ویرایش دوم

کتاب جامع مهندسی معماری دریایی

مؤلف:
مهندس محمد مونسان
(عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر)

کتاب جامع مهندسی معماری دریایی
مهندس محمد مونسان

Handbook of Naval Architecture Engineering

by: Eng. Mohammed Moonesun

«کتاب جامع مهندسی معماری دریایی» از جامع‌ترین و غنی‌ترین کتابها در زمینه مهندسی معماری دریایی است که شش درس رشته مهندسی کشتی‌سازی را بطور کامل پوشش می‌دهد: شناخت کشتی، هیدرواستاتیک، هیدرودینامیک، طراحی کشتی، طراحی با استاندارد و مهندسی اقیانوس. اغلب مطالب این کتاب برای کشتی‌های تجاری است و محتوای آن به گونه‌ای تألیف شده که جنبه کاملاً کاربردی برای طراحی کشتی‌ها داشته باشد و طراحان کشتی بتوانند از آنها استفاده کنند. از نقاط قوت و متحصربفرد این کتاب، استفاده گسترده از استانداردهای دریایی است که در بخش‌های مختلف کتاب از آنها استفاده شده است. همچنین مثال‌های متعددی در بخش‌های مختلف کتاب ارائه شده که به درک بهتر مطالب کمک میکند. نکات آزمون‌های کارشناسی ارشد نیز در داخل مطالب گنجانده شده است. برای تألیف این کتاب بیش از سه سال وقت صرف شده و بیش از ۵۰ جلد کتاب لاتین و فارسی مطالعه شده و نقاط قوت آنها با بیانی مناسب در این کتاب چکیده و ارائه شده و از تجارب تدریس چند ساله مؤلف در دانشگاه صنعتی مالک اشتر برای تفهیم بهتر مطالب نیز استفاده شده است. مطالعه این کتاب به مهندسان، طراحان و دانشجویان مهندسی دریایی و کشتی‌سازی توصیه می‌گردد.

تصویر روی جلد مربوط به کشتی ایران- اراک، اولین کشتی اقیانوس‌پیمای ساخت ایران می‌باشد که نماد غرور و افتخار صنعت ایران است. این کشتی، بزرگترین سازه متحرک ساخته شده در تاریخ ایران است.

ISBN: 976-600-5287-23-3
9786005287233

اللهم اخرجنا من ظلمات الوهم و اکرمنا بنور الفهم
اللهم افتح علینا ابواب رحمتک و انشر علینا خزائن علومک

❖ **پیامبر اکرم (ص):**

اگر علم را بر ثریا هم آویخته باشند، مردمی از سرزمین پارس بر آن دست خواهند یافت.

❖ **مقام معظم رهبری:**

- با علم و تحقیق، این اقیانوس عظیمی را که خداوند متعال در برابر انسان قرار داده است را عمق‌یابی و کاوش کنید. علم برای امروز و فردای ما حیاتی است. ما هر کار دیگری بکنیم اگر در علم تهیدست باشیم، کارهایمان عقیم و بی‌نتیجه خواهد بود.
- امروزه کشورهای ابرقدرت و زورگو با استفاده از علم و فناوری خود، بر دنیا سلطه یافته‌اند. ما برای رهایی از این سلطه، چاره‌ای جز کسب علم و دانش و رسیدن به فناوری‌های کلیدی و نو نداریم. بدون علم، کشوری وابسته، محتاج و سرافکنده خواهیم شد.

کتاب جامع مهندسی

معماری دریایی

Handbook
Of
Naval Architecture Engineering

مولف: محمد مونسان

عنوان کتاب : .....**کتاب جامع مهندسی معماری دریایی**
مؤلف : ..... **محمد مونسان**
ناشر : ..... **کانون پژوهش**
چاپ / لیتوگرافی / صحافی : .....**چاپخانه کمالی نژاد**
تیراژ :.....**۱۰۰۰جلد**
نوبت چاپ اول :..... **پاییز ۱۳۸۸**
نوبت چاپ دوم :.....**، بهار ۱۳۹۱**
قیمت : ..... **۳۵۰۰۰ تومان**
. شابک: ۳ - ۲۳ - ۵۲۸۷ - ۶۰۰ - ۹۷۸ ISBN: 978 - 600-5287-23-3

کلیه حقوق چاپ برای مؤلف محفوظ است .
نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب مجاز است.
پخش کتاب: **تهران**، ضلع جنوب شرقی میدان انقلاب، روبروی ایستگاه BRT، بازار بزرگ کتاب، کتابفروشی نوین
۰۹۳۵۴۹۸۴۷۷۳-۶۶۹۵۲۴۸۸-۶۶۴۰۴۱۳۲
اصفهان، خیابان جهاد(صارمیه) پاساژ قرض الحسنه امام حسن مجتبی(ع) واحد ۵ تلفن صبحها ۲۳۵۲۷۰۵- ۰۳۱۱
ارسال کتاب بصورت پستی : ۰۳۱۱-۴۵۱۸۵۶۴ و ۰۹۱۳۱۹۴۳۶۰۸

سازمان صنایع دریایی- گروه شناورهای زیرسطحی

چاپ اول و دوم این کتاب با حمایت گروه شناورهای زیرسطحی سازمان صنایع دریایی انجام شده است.

حقوق و مالکیت معنوی کتاب در اختیار مؤلف است.

تقدیم به:

جانبازان هشت سال دفاع مقدس؛
آنانکه رنج دیروز و امروزشان، مایه آرامش امروز ماست.

و با تشکر از:

- همکاران **سازمان صنایع دریایی- گروه شناورهای زیرسطحی** در حمایت از چاپ این کتاب بخصوص آقایان مهندس حمیدیا و مهندس حیدری
- همکاران دانشگاه صنعتی مالک اشتر- مجتمع علوم و فناوری زیردریا

و همچنین:

- همسر فداکارم که با صبر و فداکاری، نقش موثری در مدت سه ساله تکمیل این کتاب داشتند،
- پدر و مادر عزیزم در زحمات بی‌دریغشان در طول زندگی

پیشگفتار چاپ دوم:

حمد و سپاس خداوند بزرگ را که به این حقیر، سعادتی داد که بتوانم خدمتی کوچک به جامعه دریایی کشورم داشته باشم و در راه تعالی میهن اسلامی خود بکوشم.
استقبال دور از انتظاری که از چاپ اول این کتاب انجام شد مرا بر آن داشت که برای چاپ دوم (ویرایش دوم) این کتاب اقدام کنم. اظهار لطف صمیمانه دوستان، دانشجویان و اساتید دانشگاه‌های مختلف در مورد چاپ اول این کتاب باعث دلگرمی و ایجاد انگیزه مضاعف شد تا بتوانم چاپ دوم این کتاب را کامل‌تر از قبل ارائه کنم.
این کتاب برای دانشگاه‌های مالک اشتر، امیرکبیر، شریف، بوشهر، خرمشهر و چابهار ارسال شد به گونه‌ای که حدود ۷۰۰ جلد از آن ظرف کمتر از ۶ ماه به فروش رفت. این در حالی است که مخاطبان رشته مهندسی دریایی در کشور بسیار محدود هستند.

یک سال پس از چاپ کتاب سعی کردم تا جای ممکن اشکالات آن را از صاحبنظران، دانشجویان و اساتید محترم جمع‌آوری کنم و پس از رفع آنها، مباحث جدیدی را نیز بدان‌ها بیافزایم. وظیفه خود می‌دانم که صمیمانه از افرادی که در این زمینه مرا یاری دادند بخصوص اساتید و دانشجویان دانشگاه صنعتی مالک اشتر و آقایان مهندس تحویلدارزاده و مهندس نوروزی و مهندس صادقی، نهایت تشکر و امتنان خویش را ابراز دارم. دو قسمت جدید به این کتاب اضافه شدند: حرکات کشتی در امواج دریا (دریامانی) و طراحی شناورهای تندرو سرشی. برخی از ایرادات علمی و ویرایش چاپ قبل نیز اصلاح شده است. در مجموع در ویرایش دوم این کتاب، مطالب علمی آن حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. برای پرهیز از تعدد جلدهای کتاب و جمع‌بندی آن در داخل یک جلد، علی‌رغم افزایش مطالب، تعداد صفحات کتاب کاهش یافته است چراکه فونت آن ریزتر و ابعاد صفحات کتاب از وزیری به رحلی افزایش یافته است.
افراد علاقه‌مند می‌توانند جهت دریافت منابع علمی مرتبط، به سایت اینجانب (www.kashti.ir) مراجعه کنند یا توسط پست الکترونیک (m_moonesun@yahoo.com) نقطه نظرات خود را به اطلاع اینجانب برسانند. برای تهیه کتاب نیز به آدرس‌های صفحه دوم کتاب مراجعه نمایند.
امیدوارم این کتاب نیز بتواند گوشه‌ای از نیازهای جامعه دریایی کشور را پوشش دهد.

محمد مونسان
۱۳۹۱

سخن مولف:

ایران در زمان دولت هخامنشی دارای یکی از بزرگترین ناوگان‌های دریایی دنیا بود و کشتی‌هایی که در ایران ساخته می‌شد در دنیا کم‌نظیر بود. احداث اولین کانال دریایی دنیا، کانال سوئز، توسط ایرانیان و در زمان هخامنشیان انجام شد. این برتری دریایی که زمینه بسط سیطره حکومت ایران به سایر کشورهای دنیا بود پس از دولت هخامنشی رو به افول گذاشت و دیگر ایران هرگز این برتری را باز نیافت و حتی صنعت دریایی و ساخت کشتی را برای سال‌های طولانی به کلی کنار گذاشت. این در حالی است که تا امروز، صنایع دریایی و کشتی‌سازی در دنیا رشد چشمگیری یافته و همچنین بیش از ۹۰ درصد جابجایی کالا در دنیا توسط کشتی‌های تجاری انجام می‌شود.

پس از پیروزی انقلاب شکوهمند اسلامی و بخصوص در دوران جنگ تحمیلی، ایران این مهم را به درستی درک نمود که داشتن صنایع دریایی بومی و قدرتمند، لازمه حفاظت از مرزهای دریایی کشور است و در زمینه اقتصادی نیز اهمیت منحصربفردی دارد از جمله؛ ایجاد اشتغال و پویایی صنعتی در شهرهای ساحلی و رفع محرومیت از آنها، رشد صنایع جانبی و تشکیل زنجیره بزرگی از فعالیتهای صنعتی در کشور، شکل‌گیری مدیریت صنعتی کلان در کشور، ساخت عظیم‌ترین مصنوعات بشری و ایجاد خودباوری، جلوگیری از خروج ارز، کاهش وابستگی به کشورهای خارجی، گسترش ناوگان تجاری و انجام پروژه‌های عظیم دریایی صنعت نفت کشور، ایجاد گردش مالی زیاد در بخش صنعت کشور، ایجاد دانش فنی، اشتغال فارغ‌التحصیلان دانشگاه‌های کشور و خودکفایی در ساخت شناورهای نظامی و حراست از مرزهای دریایی کشور. کشورهای پیشرفته دنیا همواره در شروع تحول صنعتی خود، دو صنعت را بعنوان پشتوانه صنعتی خود برگزیده‌اند: صنعت خودروسازی و صنعت کشتی-سازی. امروزه کره جنوبی، چین و ژاپن بیشترین آمار ساخت کشتی در دنیا را دارند و به پشتوانه این دو صنعت، صنایع عظیمی را در کشور خود شکل داده‌اند از جمله: فولاد، ساخت انواع موتورها، انواع ماشین‌آلات و تجهیزات و رنگ. صنعت کشتی‌سازی تقریبا با ۱۰۰ صنعت جانبی در تماس است و به ازای اشتغال هر یک نفر در داخل کارخانه کشتی‌سازی، زمینه اشتغال حداقل ۳ نفر در خارج از کارخانه فراهم می‌شود. از دیگر مزایای صنعت کشتی‌سازی، بکارگیری وسیع کارگران معمولی است که می-تواند افراد زیادی را در مناطق محروم ساحلی مشغول بکار نماید.

در دوران دفاع مقدس، تلاش‌های محدودی در زمینه ساخت شناورهای نظامی و تجاری انجام شد تا اینکه از سال ۱۳۷۷ صنایع دریایی کشور دچار تحولات اساسی شد و سرمایه‌گزاری‌های هنگفتی در آن صورت گرفت و این نقطه شروعی برای بازیافتن قدرت تاریخی ایران در صنایع دریایی بود. در این مدت، فعالیت کارخانجات کشتی‌سازی و فراساحل کشور با رشد چشمگیری مواجه شده است.

بسیاری از این پیشرفت‌ها مرهون تلاش‌های بی‌دریغ انجمن مهندسی دریایی ایران بوده و برگزاری همایش‌های سالیانه گام دیگری در جهت پویایی و تعامل بیشتر صنایع دریایی کشور بوده است. مجموع این پیشرفت‌ها باعث شده است ایران که تا قبل از پیروزی انقلاب اسلامی جایگاهی در صنایع دریایی نداشت امروزه تبدیل به قوی‌ترین کشور غرب آسیا در صنایع دریایی شده و در دنیا نیز در زمره یکی از مطرح‌ترین کشورها قرار گرفته است. این پیشرفت‌ها به حدی بوده است که ایران توانسته است پروژه‌های زیادی را در کشورهای آمریکای جنوبی، اروپا و آسیا تصاحب کند. تقریبا از هر نوع شناوری حداقل یک فروند در ایران ساخته شده است مانند: کشتی-های کانتینربر، نفتکش، یدک‌کش، صیادی، لندینگ کرافت، بارج، داک شناور، کشتی چندمنظوره، مسافربری، هتل بارج، کاتاماران، انواع قایق‌ها، کروبوت و همچنین انواع زیردریایی، هاورکرافت، قایق پرنده، انواع سکوهای ثابت و متحرک دریایی و لوله‌گذاری در دریا. این تنوع تولیدات صنایع دریایی در یک کشور در دنیا کم‌نظیر است.

برای آشنایی بیشتر مهندسین و دانشجویان با پروژه‌های بزرگی که در کشور انجام شده است، تصاویر برخی از این پروژه‌ها در کتاب ذکر شده است.

در هر حال با تمام پیشرفتهای چشمگیری که در طی سالیان اخیر انجام شده است، هنوز فاصله زیادی تا رسیدن به جایگاه مطلوب وجود دارد. جایگاهی که در شأن کشوری با ۲۹۰۰ کیلومتر مرز آبی باشد. امروزه برخی از کشورهای اروپایی با داشتن مرزهای آبی کمتر از ایران، مساحت کشور کمتر از نیمی از مساحت ایران و جمعیتی کمتر از ایران مانند آلمان، لهستان، فرانسه و انگلستان از قدرتهای دریایی دنیا محسوب می‌شوند. ان‌شاءالله این مهم به همت و تلاش محققین و صنعتگران کشور جامه عمل خواهد پوشید.

در بخش فعالیت‌های آموزشی و تحقیقاتی نیز دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر و صنعتی مالک‌اشتر (تحت پوشش وزارت دفاع) پیشتاز بوده‌اند. دانشگاه امیرکبیر مؤسس اولین دانشکده کشتی‌سازی کشور و دانشگاه مالک اشتر مؤسس اولین پژوهشکده دریایی کشور بوده است.

وزارت دفاع ج.ا.ا با در اختیار داشتن سازمان صنایع دریایی و دانشگاه صنعتی مالک اشتر توانسته است گام‌های بلندی در ترویج و تعمیق دانش و فناوری دریایی داشته باشد که ماحصل این تلاش‌ها از قرار زیر بوده است: طراحی و ساخت انواع شناورهای سطحی، زیرسطحی و اثرسطحی، صادرات دانش فنی به کشورهای دوست و متحد، انتشار چندین جلد کتاب تخصصی دریایی، برگزاری همایش‌های تخصصی، آموزش نیروی انسانی متخصص در دانشکده دریایی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، حمایت از فعالیتها و پروژه‌های دانشجویی و تحقیقاتی مرتبط در سراسر کشور و خرید کتابها و استانداردهای دریایی از خارج کشور و توزیع رایگان آنها در کشور.

توسعه فناوری و صنعت دریایی بدون زیربناهای دانشی و تدوین و تعمیق دانش فنی و تربیت نیروی انسانی متخصص و دانش‌محور امکان‌پذیر نیست و وابستگی دائمی و متوقف شدن در حد مونتاژکاری و صرفاً اجرای نقشه‌های ساخت را به دنبال دارد. لذا کسب دانش و بومی کردن آن امری بسیار حیاتی و کلیدی است که مستلزم صرف هزینه و زمان بسیار است. اولین قدم در توسعه هر دانشی، انتشار کتابهای مرجع و کاربردی متعدد به زبان بومی می‌باشد که متأسفانه تا کنون فعالیت جدی در این زمینه در کشور انجام نشده است و طی سه دهه گذشته صرفاً چند جلد کتاب از آقایان دکتر سیف، ناخدا سلیم‌زاده و ناخدا علی‌میر، ناخدا مشتریخواه و کتابهای دانشگاه صنعتی مالک اشتر انتشار یافته است که این تعداد قابل مقایسه با رشته‌های فنی دیگر مانند هوا فضا، مکانیک، برق و مواد نیست.

اساتید بزرگوار اینجانب در دانشگاههای صنعتی امیرکبیر و شریف علی‌رغم در اختیار داشتن دانش فنی مناسب، متأسفانه هیچ گاه بطور جدی وارد عرصه انتشار کتاب نشدند و انتظار چند ساله در این زمینه بی‌نتیجه بود. سرانجام اینجانب با همین سرمایه علمی اندک خود دست به کار شدم و به یاری خداوند توانستم چندین جلد کتاب منتشر نمایم. استقبال کم‌نظیری در سطح کشور از کتاب «تحلیل پایداری شناورها» انجام شد به گونه‌ای که چاپ اول آن ظرف چند ماه به اتمام رسید و این کتاب به زبان عربی نیز در حال ترجمه است. با این استقبال گرم و غیرمنتظره این مهم را دریافتم که جامعه دریایی کشور به شدت تشنه کسب علم و دانش فنی است لذا این جسارت را به خود دادم که دست به کار بزرگتری بزنم و کتاب جامعی در زمینه مهندسی دریایی تألیف نمایم. خداوند شاهد است که در این زمینه به دنبال کسب منافع مادی نبودم و بلکه هزینه و زمان بسیاری را نیز صرف کردم و نیت من کمکی هرچند کوچک به توسعه و تعمیق دانش دریایی در ایران بوده است. لذا ضمن پوزش از اساتید خود به موجب این جسارت، امیدوارم که اینجانب را از نظرات صائب و انتقادی خود در رفع نواقص این کتاب محروم ننمایند.

«**کتاب جامع مهندسی معماری دریایی**» از جامع‌ترین و غنی‌ترین کتابها در زمینه مهندسی معماری دریایی است که شش درس رشته مهندسی کشتی‌سازی را بطور کامل پوشش می‌دهد: شناخت کشتی، هیدرواستاتیک، هیدرودینامیک، طراحی کشتی، طراحی با استاندارد و مهندسی اقیانوس. اغلب مطالب این کتاب برای کشتی‌های تجاری است و محتوای آن به گونه‌ای تألیف شده که جنبه کاملاً کاربردی برای طراحی کشتی‌ها داشته باشد و طراحان کشتی بتوانند از آنها استفاده کنند. از نقاط قوت و منحصربفرد این کتاب، استفاده گسترده از استانداردهای دریایی است که در بخش‌های مختلف کتاب از آنها استفاده شده است. همچنین مثال‌های متعددی در بخش‌های مختلف کتاب ارائه شده که به درک بهتر مطالب کمک می‌کنند. نکات آزمون‌های کارشناسی ارشد نیز در داخل مطالب گنجانده شده است. برای تألیف این کتاب بیش از سه سال وقت صرف شده و بیش از ۵۰ جلد کتاب لاتین و فارسی مطالعه شده و نقاط قوت آنها با بیانی مناسب در این کتاب چکیده و ارائه شده و از تجارب تدریس چند ساله مؤلف در دانشگاه صنعتی مالک اشتر برای تفهیم بهتر مطالب نیز استفاده شده است. منابع هر قسمت در انتهای همان قسمت ارائه شده است. منابع ارائه شده در ابتدای هر فصل به صورت پاورقی آمده است و شماره منابع هر قسمت با قسمت دیگر متفاوت است. این کتاب دارای ۶ قسمت اصلی است:

قسمت اول: آشنایی با انواع شناورها و مهندسی معماری دریایی (موضوع درس تکنولوژی کشتی).

قسمت دوم: هیدرواستاتیک و پایداری (موضوع درس آرشیتکت استاتیک)

قسمت سوم: هیدرودینامیک و پیشرانش (موضوع درس آرشیتکت دینامیک)

قسمت چهارم: حرکات کشتی در امواج دریا (دریامانی) (موضوع درس مهندسی اقیانوس)

قسمت پنجم: معماری و جانمایی کشتی (موضوع درس طراحی کشتی و درس طراحی با استانداردهای دریایی)

قسمت ششم: طراحی شناورهای تندرو سرشی (موضوع درس طراحی شناورهای تندرو)

مطالعه این کتاب به کلیه دانشجویان و مهندسان رشته مهندسی دریایی توصیه می‌شود. فایلهای pdf اغلب مراجع لاتین مورد استفاده، نزد مؤلف موجود است که افراد علاقه‌مند می‌توانند برای دریافت آنها با مؤلف تماس حاصل نمایند.

این اثر با مساعدت گروه شناورهای زیرسطحی سازمان صنایع دریایی امکان وجود یافته است و بخصوص از همکاران محترم آقایان مهندسین سالاری، حیدریه، حیدری، حمیدیا، عسگری، محمد حسین صادقی، مینوتن و دکتر جبار رشیدی تشکر و امتنان خویش را ابراز می‌دارم. همکاری ویژه و صمیمانه ریاست محترم گروه شناورهای زیرسطحی جناب آقای مهندس حمیدیا در نشر کتابهای دریایی همواره مزید امتنان بوده است.

همچنین از همکاران و دانشجویان خود در دانشگاه صنعتی مالک اشتر که در ویرایش این اثر مرا یاری دادند تشکر و قدردانی می‌کنم از جمله آقایان مهندسین؛ حسینی الست، یزدخواستی، زارع، خیری، نادری، آینه‌دار، کوهی حبیبی، منیری‌پور، عامری، قیامتی، نگهبان، هنریار، سیف‌پور، رسولی، قاری، صادقی، صادقیان، اسلام دوست، اسفنده، مقدس، سماواتیان، اردشیری، نادری، جوادی، عابدی، تحویلدارزاده، نوروزی و همچنین مساعدت آقایان دکتر عربیارمحمدی و طهماسبی.

از اساتید ارجمند خود در دانشگاههای صنعتی امیرکبیر و صنعتی شریف آقایان دکتر معتمدی، دکتر ایرانمنش، زنده یاد شهید ناخدا فاضل، دکتر سایبانی، دکتر فدوی، دکتر قاسمی، دکتر زراعتگر، دکتر رهبر، دکتر خدمتی، مهندس بابایی، دکتر صراف، دکتر کتابداری، حجه الاسلام مرادزاده، مهندس قدرت نما، دکتر سیف و دکتر صیادی نهایت تشکر و امتنان خویش را ابراز دارم.

زحمات مدیر محترم انتشارات کانون پژوهش اصفهان جناب آقای جنتیان نیز در خور تقدیر و امتنان است.

علی‌رغم تلاش بسیاری که برای جامع و کامل بودن این کتاب صورت گرفته است، این اثر نمی‌تواند خالی از اشکال باشد. لذا از نظرات اصلاحی اساتید و دانشجویان به گرمی استقبال می‌شود.

به امید اینکه این کتاب قدمی در جهت ترویج و تعمیق دانش و فناوری دریایی در ایران باشد.

محمد مونسان

عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

M_moonesun@yahoo.com

درباره مؤلف

آقای **مهندس محمد مونسان** متولد ۱۳۵۸ از شهرستان سرخه استان سمنان و فارغ التحصیل مقطع کارشناسی مهندسی کشتی‌سازی دانشگاه صنعتی امیرکبیر و فارغ‌التحصیل مقطع کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دریا از دانشگاه صنعتی شریف بوده و هم‌اکنون عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر است.

کتاب‌های دیگر ایشان عبارتند از « آشنایی با زیردریایی‌های نظامی»، «تاریخچه فناوری زیردریایی‌های آلمانی»، «تحلیل پایداری شناورها» و «اصول طراحی زیردریایی». ایشان همچنین مقالات علمی متعددی به چاپ رسانیده‌اند.

فهرست مطالب

قسمت اول: آشنایی با انواع شناورها و مهندسی معماری دریایی

بخش اول: آشنایی با لغات و اصطلاحات دریایی
بخش دوم: آشنایی با مفاهیم شناوری و تناژ
بخش سوم: آشنایی با انواع کشتی‌های تجاری و نظامی
بخش چهارم: آشنایی با سکوها و شناورهای فراساحل
بخش پنجم: خطوط بدنه کشتی‌ها و جداول سری ۶۰
بخش ششم: آشنایی عمومی با صنعت کشتی‌سازی
منابع قسمت اول

قسمت دوم هیدرواستاتیک و پایداری

بخش ۱: مفاهیم اولیه پایداری
فصل ۱: عوامل موثر در تحلیل پایداری شناور
فصل ۲: مشخصات شناورهای مدل
فصل ۳: روشهای انتگرال‌گیری عددی
فصل ۴: منحنی بونژان و مساحت مقاطع عرضی
فصل ۵: تعیین مرکز ثقل و جابجایی آن
فصل ۶: مرکز بویانسی و تغییرات آن
بخش ۲: پایداری عرضی شناور
فصل ۱: موقعیت خط آبخور در زوایای غلتش بزرگ
فصل ۲: تغییرات مرکز شناوری در زوایای غلتش و آبخورهای مختلف
فصل ۳: مفهوم نقطه متاسنتر و نحوه بدست آوردن آن
فصل ۴: تغییرات شعاع متاسنتری (**BM**) بر حسب زوایای غلتش
فصل ۵: محاسبه **KM** و **GM** براساس شعاع متاسنتری
فصل ۶: منحنی**KM** و **KB** در اشکال هندسی خاص بدنه
فصل ۷: منحنی‌های هیدرواستاتیک
فصل ۸: میزان بارگذاری به ازای یک سانتی‌متر افزایش آبخور **(TPC)**
فصل ۹: اختلاف آبخور در آب شور و شیرین **(FWA)**
فصل ۱۰: ترسیم علامت خط بار شناور
فصل۱۱: منحنی **GZ** و کاربردهای آن
فصل ۱۲: تحلیل حالات مختلف پایداری شناور
فصل۱۳: محاسبه مقدار **GZ** با روابط آتوود، پروهسکا و بارنهارت
فصل ۱۴: تغییرات منحنی **GZ**
فصل ۱۵: اصلاح سینوسی و کسینوسی منحنی **GZ**

فصل ۱۶: منحنی مقاطع پایداری
فصل ۱۷: محاسبه **GZ** در شناورهای بدنه دیواره‌ای
فصل ۱۸: محاسبه زاویه لل در شناور بدنه دیواره‌ای
فصل ۱۹: محاسبه زاویه لیست در شناور
فصل ۲۰: پایداری دینامیکی شناور
فصل ۲۱: اثرات سطح آزاد مخازن بر پایداری
فصل ۲۲: اثرات اجسام آویزان و ارتفاع جرثقیل بر پایداری شناور
فصل۳ ۲**:** اثرات شکل بدنه بر پایداری
فصل ۲۴: رابطه نسبتهای ابعادی و پایداری شناور
فصل ۲۵**:** غلتش عرضی در هنگام گردش
فصل ۲۶: پریود نوسانات حرکت رول و دریازدگی
فصل ۲۷: روش‌های کاهش غلتش شناور
فصل ۲۸: انجام آزمایش کجی
بخش ۳: پایداری طولی و مباحث مرتبط
فصل ۱: پایداری طولی شناور
فصل ۲: اثرات تغییر چگالی آب دریا بر پایداری شناور
بخش ۴: هیدرواستاتیک زیردریایی
فصل ۱: هیدرواستاتیک زیردریایی
بخش ۵: به گل نشستن و پایداری در حالت صدمه‌دیده
فصل ۱: به داک بردن و به گل نشستن شناور
فصل ۲: پایداری در حالت صدمه دیده
بخش ۶: آب‌اندازی شناور
فصل ۱: آب‌اندازی شناور
بخش ۷: ممان های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی
فصل۱: ممان‌های خمشی ناشی از توزی وزن و بویانسی
بخش ۸: آسکوآت و اثرات متقابل
فصل ۱: آسکوآت
فصل ۲: اثرات متقابل دو شناور در حال حرکت
ضمیمه
مراجع قسمت دوم

قسمت سوم: هیدرودینامیک و پیشرانش

بخش اول: مروری بر مکانیک سیالات
فصل اول: مفاهیم اولیه مکانیک سیالات
فصل دوم: لایه مرزی
فصل سوم: محاسبه ضریب مقاومت
بخش دوم: مقاومت در شناورها

فصل اول: تقسیم‌بندی اجزاء مقاومت در شناورها
فصل دوم: مقاومت اصطکاکی
فصل سوم: مقاومت فشاری
فصل چهارم: مقاومت موج در شناورها
فصل پنجم: روشهای تجربی محاسبه مقاومت و توان
فصل ششم: روش هولتروپ در محاسبه توان و مقاومت
فصل هفتم: محاسبه مقاومت به روش هولنباخ
فصل هشتم: مقایسه روش‌های متداول برای تخمین مقاومت و توان شناورهای تجاری
فصل نهم: مقاومت ضمائم و ملحقات بدنه
فصل دهم: مقاومت در آبهای کم‌عمق
فصل یازدهم: مقاومت باد
فصل دوازدهم: مقاومت حرکت کشتی در امواج دریا
فصل سیزدهم: مقاومت و توان زیردریایی
بخش سوم: بازدهی و توان
فصل اول: سیستم رانش
فصل دوم: ویک
فصل سوم: ضریب کاهش تراست
فصل چهارم: محاسبه اجزاء بازدهی سیستم رانش
فصل پنجم: نسبت توان با سرعت
بخش چهارم: بررسی روش انجام آزمایش در حوضچه کشش
فصل اول: آشنایی با آزمایشگاه دریایی
فصل دوم: تاریخچه انجام آزمایش مقاومت شناور
فصل سوم: ابعاد و اندازه‌های مدل و حوضچه آزمایش
فصل چهارم: تجهیزات مورد نیاز در حوضچه کشش
فصل پنجم: ساخت مدل و جنس آن
فصل ششم: قوانین تشابه
فصل هفتم: تعمیم نتایج آزمایش مدل به شناور اصلی
بخش پنجم: طراحی خطوط بدنه کشتی
فصل اول: مفاهیم اولیه
فصل دوم: ملاحظات تعیین شکل سینه کشتی
فصل سوم: حبابی سینه
فصل چهارم: ملاحظات تعیین شکل پاشنه کشتی
فصل پنجم: تعیین ضرایب بدنه کشتی
فصل ششم: تعیین مرکز بویانسی طولی **(LCB)**
بخش ششم: پروانه و سیستم رانش
فصل اول: تاریخچه تکامل پروانه
فصل دوم: انواع سیستم‌های رانش در شناورها

فصل سوم: انواع سیستم‌های رانش پروانه‌ای
فصل چهارم: مقایسه انواع سیستم‌های رانش
فصل پنجم: هندسه پروانه‌های دریایی
فصل ششم: تئوری‌های طراحی پروانه
فصل هفتم: طراحی با استفاده از سری‌های استاندارد
فصل هشتم: روش $B_P - \delta$ در طراحی پروانه
فصل نهم: انواع شرایط کاری در پروانه‌ها و آزمایش بولارد
فصل دهم: قوانین مؤسسات رده‌بندی دریایی در طراحی پروانه
فصل یازدهم: سایر روش‌های افزایش بازدهی پروانه
فصل دوازدهم: پدیده کاویتاسیون
بخش هفتم: طراحی سکان
فصل اول: آشنایی با سکان
فصل دوم: تعیین مساحت و ابعاد سکان
فصل سوم: طراحی مقطع فویل سکان
فصل چهارم:طراحی سکان در استاندارد **BV**
ضمیمه ۱
ضمیمه ۲
مراجع قسمت سوم

قسمت چهارم: حرکات کشتی در امواج دریا (دریامانی)

بخش اول: آشنایی با پدیده موج و امواج منظم
بخش دوم: امواج نامنظم و طیف امواج
بخش سوم: دینامیک و معادلات حرکت
فصل اول: پارامترها و دستگاههای مختصات
فصل دوم: معادلات حرکت و ساده‌سازی‌های متداول
فصل سوم: نیروها و گشتاورها و ضرایب هیدرودینامیکی
فصل چهارم: شبیه‌سازی دینامیکی، بررسی پایداری، کنترل مدار باز و مدار بسته
بخش چهارم: ارزیابی عملکرد کشتی در امواج دریا
فصل اول: فرکانس برخورد
فصل دوم: ارزیابی عملکرد کشتی در مسیر دریایی
بخش پنجم: تحلیل حرکات مستقل هیو، پیچ و رول
فصل اول: آشنایی با مبانی تحلیل
فصل دوم: حرکت هیو
فصل سوم: حرکت دورانی شتابدار
فصل چهارم: حرکت پیچ
فصل پنجم: حرکت رول

فصل ششم: مناطق سرعتی کشتی
مراجع قسمت چهارم

قسمت پنجم: معماری و جانمایی کشتی

بخش اول: فرایند طراحی کشتی
بخش دوم:تعیین ابعاد اصلی کشتی
فصل اول: ملاحظات تعیین ابعاد اصلی شناور
فصل دوم: تعیین طول کشتی
فصل سوم: تعیین عمق، آبخور و فری‌برد
فصل چهارم: تعیین عرض کشتی
فصل پنجم: تعیین مؤلفه‌های پایداری
بخش سوم:حجم‌بندی مخازن کشتی
فصل اول: آشنایی با انواع مخازن کشتی
فصل دوم: حجم‌بندی مخازن تعادل (بالاست)
فصل سوم: حجم‌بندی مخزن سوخت
فصل چهارم: حجم‌بندی مخزن آب شیرین، خن و فاضلاب
بخش چهارم:معماری و جانمایی در کشتی‌ها
فصل اول: اصول جانمایی در کشتی‌ها
فصل دوم: تعیین تعداد خدمه کشتی‌ها
فصل سوم: تعیین تعداد عرشه ها
فصل چهارم: جانمایی فضای داخلی کشتی
فصل پنجم: ملاحظات معماری روبناسازی و پل فرماندهی طبق استاندارد **ABS**
بخش پنجم:کار با استانداردهای دریایی
فصل اول: انتخاب تجهیزات در استاندارد ***BV***
فصل دوم:محاسبه حرکات و شتاب‌های کشتی طبق استاندارد **BV**
بخش ششم:تخمین وزن و مرکز ثقل کشتی
فصل اول: تقسیم‌بندی اقلام وزنی کشتی
فصل دوم: تخمین ارتفاع مرکز ثقل و درصد اقلام وزنی
فصل سوم: تخمین وزن فولاد
فصل چهارم: وزن تجهیزات و امکانات ***(E&O)***
فصل پنجم: وزن سیستم رانش
بخش هفتم:آزمایشات دریایی
مراجع قسمت پنجم

قسمت ششم: طراحی شناورهای تندرو سرشی

بخش اول: مقدمه؛ ماهیت سرش و مزایای آن
بخش دوم: آشنایی با تعاریف و هندسه شناورهای سرشی
بخش سوم: ناپایداری دینامیکی طولی تناوبی
ضمیمه: طراحی هیدرودینامیکی بدنه شناورهای سرشی - سویسکی
مراجع قسمت ششم

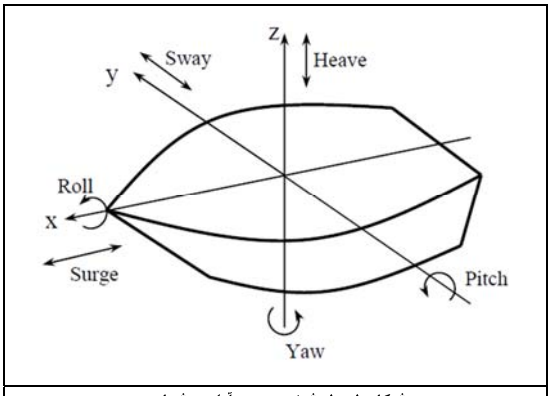
قسمت اول:

آشنایی با انواع شناورها و مهندسی معماری دریایی

- بخش اول: آشنایی با لغات و اصطلاحات دریایی
- بخش دوم: آشنایی با مفاهیم شناوری و تناژ
- بخش سوم: آشنایی با انواع کشتی‌های تجاری و نظامی
- بخش چهارم: آشنایی با سکوها و شناورهای فراساحل
- بخش پنجم: خطوط بدنه کشتی‌ها و جداول سری ۶۰
- بخش ششم: آشنایی عمومی با مهندسی دریایی

بخش اول:
آشنایی با لغات و اصطلاحات دریایی

برخی لغات و اصطلاحات در این کتاب بکار می‌رود که لازم است در مورد آنها توضیحاتی ارائه گردد[۱]: هر جسم صلب دارای ۶ درجه آزادی است که این شش درجه آزادی در کشتی به صورت زیر تعریف می‌شود (شکل۱- ۱).



شکل ۱- ۱: شش درجه آزادی شناور

حرکات دورانی:

- حول محور طولی x یا غلتش عرضی: رول [۲]
- حول محور عرضی y یا غلتش طولی: پیچ [۳]
- حول محور z یا غلتش در صفحه افقی: یاو [۴]

حرکات خطی:

- در راستای محور طولی x : سرج [۵]
- در راستای محور عرضی y : اسوی [۶]
- در راستای محور عمودی z : هیو [۷]

معمولاً حرکات (یا درجات آزادی) زیر به هم وابسته هستند و در تحلیل دینامیک حرکت کشتی نیز به صورت وابسته به هم در نظر گرفته می‌شود:

- حرکت هیو و پیچ به صورت وابسته
- حرکت یاو و اسوی به صورت وابسته
- حرت رول به صورت مستقل
- حرکت سرج به صورت مستقل

شیب[۸] **:** به شیب طولی شناور «تریم» یا «شیب» گفته می‌شود . در واقع اگر دوران طولی به صورت پیوسته و غلتشی باشد به آن پیچ و اگر به صورت استاتیکی باشد به آن «شیب» گویند.

هیل[۹] **:** به شیب عرضی شناور «هیل» گفته می‌شود و در واقع حالت استاتیکی حرکت «رول» می‌باشد.

سینه[۱۰] **و پاشنه**[۱۱] : در اصطلاح مهندسی دریایی به قسمت جلوی شناور «سینه» و به قسمت انتهایی شناور «پاشنه» گفته می‌شود.

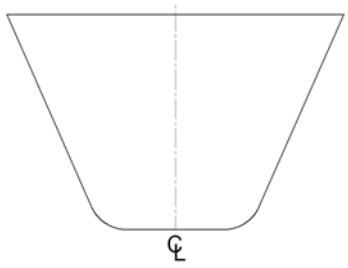
۱- منابع: [۲ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰]

2- Roll
3- Pitch
4- Yow
5- Surge
6- Sway
7- heave
8- Trim
9- heel
10- bow
11- stern

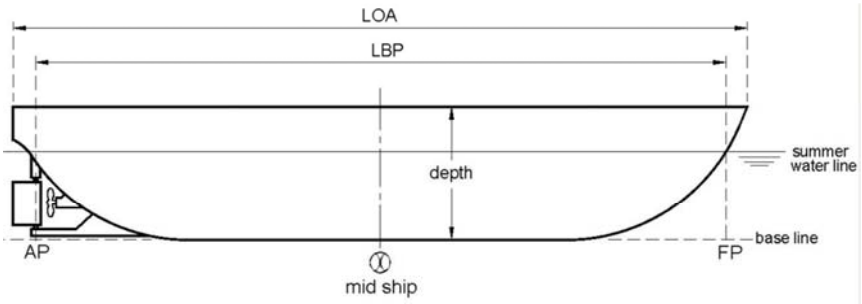
کیل[1] **:** به شاه تیر اصلی کف کشتی «کیل» گفته می‌شود که در واقع تحتانی‌ترین قسمت بدنه کشتی است.

خط مرکزی[2] **و صفحه مرکزی**[3]**:** «خط مرکزی» خطی است که صفحه آبخور شناور را به دو نیم چپ و راست تقسیم می‌کند و به صفحه‌ای که کشتی را به دو نیم چپ و راست تقسیم می‌کند، «صفحه مرکزی» گویند (شکل۱– ۲).

خط مبنا[4]**:** این خط ، خطی است که به انتهایی‌ترین قسمت کف کشتی به صورت طولی مماس می‌شود.



شکل ۱- ۲: خط مرکزی- صفحه مرکزی



شکل ۱- ۳: خط مبنا و مقطع میانی شناور

مقطع میانی[5] **:** مقطعی است که طول کشتی را دقیقاً به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند و با علامت نشان داده می‌شود (شکل ۱–۳).

آبخور[6]**:** عمقی از بدنه است که داخل آب قرار دارد (شکل ۱–۴).

فری برد[7]**:** فاصله سطح آب تا عرشه اصلی کشتی است.

عمق[8]**:** فاصله کف کشتی تا عرشه اصلی کشتی است.

ارتفاع[9]**:** فاصله آبخور تا بالاترین قسمت روبناسازی[10].

سطح خیس[11]: سطحی از بدنه کشتی که در داخل آب قرار دارد. این سطح شامل سطح بدنه در تماس با آب کشتی در طرفین چپ و راست کشتی است که به مجموع این مساحت‌ها «سطح خیس» گفته می‌شود.

طول کلی[12]: به حداکثر طول شناور که شامل جلوترین نقطه سینه تا انتهایی‌ترین نقطه پاشنه است، گفته می‌شود.

طول آبخور[13] :طول بدنه در محل خط آبخور

طول بین دو عمود[14] : طول بین عمود سینه و پاشنه است. عمود سینه[15] از محل تقاطع خط آبخور تابستان با سینه می‌باشد و عمود پاشنه[16] در محل عمود گذرنده از محور سکان است.

عرض[17] : فاصله عرضی بدنه در مقطع میانی که معمولا شامل بزرگترین عرض بدنه است.

عرض قالبی[18] : عرض بدنه بدون به حساب آوردن ضخامت ورق بدنه یا عرض داخلی بدنه

1- keel
2- Center line
3- Center plane
4- base line
5- midiship section
6- draft
7- freeboard
8- depth
9- height
10- super structure
11- wetted structure
12 - length overall
13- waterline length
14 - length between perpendicular
15 Fore perpendicular (FP)
16 - aft perpendicular (AP)
17 - beam or breadth
18 - moulded breadth

عمق قالبی[1] : عمق بدنه بدون لحاظ کردن ضخامت ورق بدنه

روبناسازی یا سوپراستراکچر[2]: سازه‌ای بر روی عرشه اصلی کشتی که معمولا محل اسکان خدمه و فضای رفاهی است.

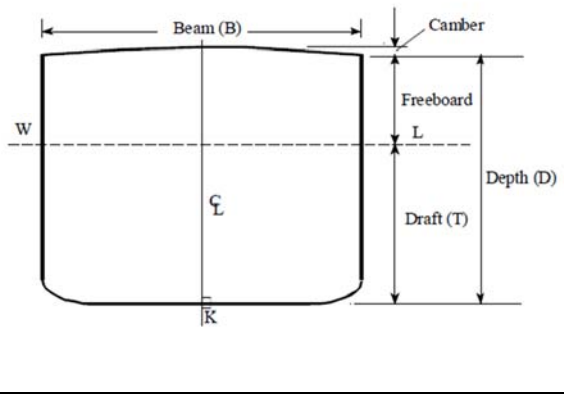
عرشه[3] : صفحه‌های افقی کشتی که بصورت طبقات متعددی می‌تواند باشد که بار یا مسافر بر روی آن حمل می شود.

سمت راست کشتی[4] : اگر از عقب به جلو کشتی نگاه کنیم به سمت راست بدنه گویند.

سمت چپ کشتی[5]: اگر از عقب به جلو کشتی نگاه کنیم به سمت چپ بدنه گویند.

سه تعریف مختلف از زوایای عرضی شناور وجود دارد: زاویه هیل[6]، لیست[7] و زاویه لل[8].

- **زاویه هیل:** هنگامیکه شناور بر اثر یک نیروی خارجی (مانند موج و باد)، دچار تغییر زاویه عرضی می‌شود، این زاویه را «زاویه هیل» گویند. این زاویه حالت ایستایی دارد و هنگامیکه حرکت نوسانی شناور بر اثر یک نیروی خارجی مد نظر باشد، به آن حرکت «رول» گویند.
- **زاویه لیست:** هنگامیکه شناور بر اثر یک نیروی داخلی (مثلاً جابجایی عرضی یک کانتینر یا بار داخل انبار) دچار تغییر زاویه عرضی می‌شود و به یک طرف متمایل می‌گردد، به آن «زاویه لیست» گویند .
- **زاویه لل:** اگر شناور دارای ارتفاع متاسنتر اولیه منفی باشد تا زاویه‌ای به نام «زاویه لل» کج خواهد شد تا جائیکه مرکز بویانسی جابجا شده و امتداد نیروهای وزن و بویانسی در یک راستا قرار گیرند و در این حالت نقطه پرومتاسنتر بر روی مرکز ثقل قرار گرفته است در حالیکه قبل از کج شدن، نقطه متاسنتر در زیر مرکز ثقل قرار گرفته بود و تعادل ناپایدار داشتیم . در واقع زاویه لل ناشی از ناپایداری شناور است که می‌تواند ناشی از قرار گرفتن بارهای سنگین در نقاط مرتفع کشتی باشد به گونه‌ای که باعث بالا آمدن مرکز ثقل تا بالای متاسنتر شده و ارتفاع متاسنتری منفی ایجاد کرده است (توجه شود که قرار گرفتن این بارها منطبق بر خط مرکزی انجام و باعث ایجاد زاویه لل شده است. (بارگذاری نامتقارن روی کشتی در واقع باعث ایجاد زاویه‌ای می‌شود که بدان «لیست» گویند)). (توضیحات مرکز بویانسی و متاسنتر و جزئیات بیشتر زاویه لل در قسمتهای بعدی کتاب ارائه شده است).



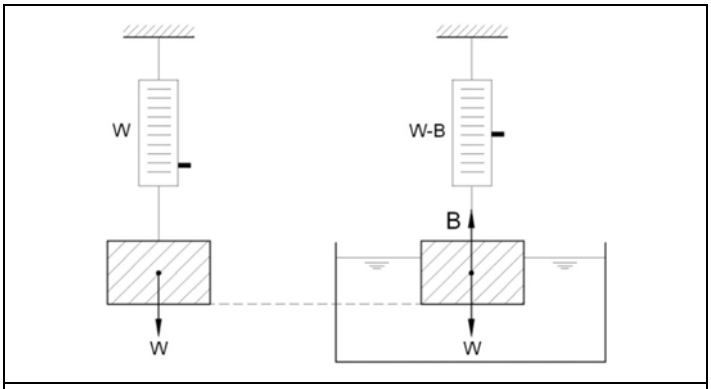
شکل ۱ - ۴: آبخور، فری‌برد و عمق بدنه شناور

امام علی (ع):
سه چیز است که مهر می آورد: دینداری، خشوع و بخشش

1 - moulded depth
2 - super structure
3 deck
4 - starboard
5 - port
6- heel
7- list
8- loll

بخش دوم:
آشنایی با مفاهیم شناوری و تناژ

❖ **قانون ارشمیدس و کاهش وزن در آب**[1] این قانون بیان می‌دارد که :«هرگاه جسمی بطور کامل یا قسمتی از آن در داخل آب قرار گیـرد، به اندازه وزن آب جابجا شده، نیروی رو به بـالا بـر جسـم وارد می‌شود». این نیروی رو به بالا که نیروی ارشـمیدس (یا در اصطلاح مهندسی دریایی ، نیروی بویانسـی) نامیـده می‌شود به منزله کاهش وزن تعبیر می‌گردد. بـا اسـتفاده از این قانون، مفهوم «وزن خشک» و «وزن تر» بـه صـورت زیر بیان می‌شود (شکل ۱-۵):



شکل۱-۵: مشاهده کاهش وزن جسم در داخل آب به کمک نیروسنج

- فرض کنیم جسمی در هـوا و خـارج از محـیط آب، دارای وزن W باشد. این وزن «وزن خشک» جسم نامیده می‌شود.
- حال اگر قسمتی از جسم داخل آب قرار گیرد، نیروی رو به بالای ارشمیدس (که با B نشان داده مـی‌شـود) بـه آن وارد می‌گردد. در این حالت نیروسنج، وزن جسم را به میـزان W' نشان می‌دهد که: $W' = W - B$ که W' همان «وزن تر» است و به صورت روبرو تعبیر می‌شود: نیروی بویانسی – وزن خشک = وزن «تر»

❖ **نحوه محاسبه نیروی ارشمیدس (بویانسی) :** همانطور که بیان شد، نیروی بویانسی برابر است با وزن آب جابجا شده توسط جسم (شکل ۱-۶).
لذا این وزن برابر است با : $W = M.g = \rho_0.V_1.g$

M: جرم آب جابجا شده ρ: چگالی آب V_1: حجم آب جابجا شده که برابر است با حجم قسمتی از جسم که وارد آب شده است.

❖ **مفهوم جابجایی و شناوری آزاد :** اگر جسمی به وزن w داشته باشیم و این جسم را بدون اینکه تکیه‌گاهی داشته باشد، در داخل آب قرار دهیم، این جسم تا حدی در آب فرو می‌رود که وزن آب جابجا شده ، دقیقاً با وزن جسم برابر شود. $W = B \rightarrow$ در حالت شناوری آزاد

وزن آب جابجا شده توسط جسم = وزن جسم

این مقدار که برای وزن جسم و وزن آب جابجا شده یکسان می‌باشد، در اصطلاح مهندسی دریایی «جابجایی» نامیده می‌شود. یعنی اگر گفته شود که «جابجایی» یک شناور ۳۵۰۰ تن است یعنی وزن شناور مجموعاً ۳۵۰۰ تن است یا به عبارت دیگر وزن مقدار آبی که کشتی جابجا می‌کند ، ۳۵۰۰ تن است. در نتیجه مفهوم جابجایی را به صورت زیر بیان می‌داریم: $W = B = displacement = \rho_0 \cdot g \cdot V_1$

وزن جسم از چگالی و حجم جسم به صورت مقابل به دست می‌آید: $W = M.g = \rho.g.V$ (V : حجم کل جسم و ρ : چگالی جسم)

لذا داریم : $\rho_0 V_1 = \rho V \;\; \rho_0.g.V_1 = \rho.g.V$

از آنجا که $V_1 < V$ لذا باید: $\rho_0 > \rho$

یعنی برای اینکه جسم بتواند بر روی آب شناور بماند باید: **چگالی جسم < چگالی آب دریا**

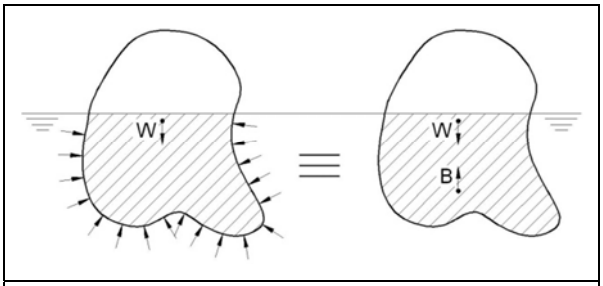
---
۱ - منابع: [۲ و ۴ و ۱۲]

مثال) استوانه‌ای از جنس فولاد به شعاع ۰/۳ متر و طول ۲ متر داریم که جرم آن ۱ تن است. با مقایسه چگالی بررسی نمائید که آیا این استوانه می‌تواند بر روی آب شناور بماند؟ (چگالی آب ۱/۰۲۳ t/m^3).

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$V = \pi.r^2.L = 3.14 \times 0.3^2 \times 2 = 0.56 \ m^3$$

$$\rho = \frac{1}{0.56} = 1.78 \ t/m^3$$



شکل۱-۶: فشار هیدرواستاتیک سیال وارد بر جسم

از آنجا که چگالی این استوانه، بیشتر از آب است ، لذا نمی‌تواند بر روی آب شناور بماند و به داخل آب فرو می‌رود. اگر شعاع استوانه به ۰/۴ متر افزایش یابد، می‌تواند بر روی آب شناور بماند، چراکه:

$$V = \pi.r^2.L = 1 \ m^3 \qquad \rho = \frac{M}{V} = \frac{1}{1} = 1 \ t/m^3$$

از آنجا که چگالی آن کوچکتر از چگالی آب دریا شده است، لذا جسم می‌تواند در آب شناور بماند.

- **وزن «تر» یک شناور که به صورت آزاد روی آب شناور است، چه مقدار است؟**

یادآوری می‌شود که: نیروی بویانسی – وزن خشک = وزن «تر»

از طرفی بیان شد که اگر جسمی بخواهد به صورت آزاد (بدون تکیه‌گاه) بر روی آب شناور بماند، باید وزن جسم با وزن آب جابجا شده یا همان نیروی بویانسی برابر باشد یعنی: برای شناوری آزاد: نیروی بویانسی = وزن خشک

لذا داریم: نیروی بویانسی ـ وزن خشک = وزن «تر» =0

لذا اگر نیروسنج به جسمی که در داخل آب شناور است، متصل گردد، نیروی صفر را نشان خواهد داد. بنابراین کشتی که بر روی آب شناور است، با هر مقدار بارگذاری و باربرداری، باز هم وزن «تر» کشتی صفر است چراکه اگر بارگذاری بیشتری روی کشتی انجام شود، کشتی بیشتر در آب فرو می‌رود و بویانسی آن متناسب با وزن، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که باز هم وزن و بویانسی با هم برابر می‌شوند لذا وزن «تر» باز هم صفر می‌شود.

مثال: شناور مدل ۲ با جابجایی ۵۵۷۰ تن دارای چه عمق آبخوری می‌باشد. اگر ۱۵۷۰ تن از داخل شناور تخلیه شود، آبخور جدید را محاسبه کنید.

حل: شناور مدل ۲ یک بارج می‌باشد که با استفاده از مشخصات آن داریم:

وزن آب جابجا شده = وزن جسم

$$5570 = L \times B \times T \times 1.025 = 80 \times 13.6 \times T \times 1.025 \quad \Rightarrow \quad T = 4.99 \ m$$

پس از برداشته شدن بار ۱۵۷۰ تنی، وزن شناور برابر ۴۰۰۰ تن می‌شود که داریم:

$$4000 = 80 \times 13.6 \times T \times 1.025 \quad \Rightarrow \quad T = 3.59 \ m$$

مثال: در مثال قبل، وزن تر و وزن خشک را در دو حالت تعیین کنید.

قبل از برداشته شدن بار، وزن خشک برابر ۵۵۷۰ تن و وزن تر برابر صفر می‌باشد. پس از برداشته شدن بار نیز وزن خشک برابر ۴۰۰۰ تن و وزن تر باز هم برابر صفر است چراکه جسم همچنان شناور است.

مثال: یک مین دریایی کروی شکل به شعاع ۰/۵ متر و به چگالی ۰/۸۵ با لنگر به کف دریا مهار شده و به طور کامل در داخل آب قرار گرفته است. وزن تر و وزن خشک این مین را بدست آورید.

$$\nabla = \frac{4}{3}.\pi.r^3 = \frac{4}{3}\pi \times (0.5)^3 = 0.523 \ m^3$$

جابجایی: $\Delta = \rho_W.\nabla = 1.025 \times 0.523 = 0.536 \ t$

جرم جسم: $M_1 = \rho.V = 0.85 \times 0.523 = 0.44 \ t$

وزن خشک $= 0.44 \ t$

نیروی بویانسی- وزن خشک = وزن تر

وزن تر $= 0.44 - 0.536 = -0.096\ t$

علامت منفی به معنای این است که برآیند نیروی وارد بر این جسم رو به بالا می‌باشد.

دو حالت کلی برای بیان وزن و اندازه حجمی شناور وجود دارد:

الف) جابجایی[۱] یا وزن کل شناور: وزن کل شناور از دو جزء اصلی تشکیل می‌شود:

۱- **وزن مرده شناور[۲]:** عبارتست از وزن بار، سوخت، آب، خدمه و مسافران و به طور کلی، کلیه اقلام غیرثابت و مصرفی شناور.

۲- **وزن سبک کشتی[۳]:** عبارتست از وزن بدنه، ماشین‌آلات موتورخانه و کلیه اقلام ثابت کشتی.

یعنی: **وزن سبک + وزن مرده = جابجایی**

ارتباط جابجایی با حجم زیر خط آب ∇ عبارتست از: $\Delta = \rho.g.\nabla$

در این رابطه، واحد جابجایی بر حسب نیوتن بدست می‌آید. در برخی منابع نیز واحد جابجایی با «تن» بیان می‌شود که از رابطه زیر استفاده شده است: $\Delta = \rho.\nabla$

برای بیان « تن » در برخی منابع سه تعریف مختلف بیان می‌گردد:

1 short ton (ST) = 907.185 kg

1 metric ton (MT) = 1000 kg *1 long ton (LT) = 1016.047 kg*

رایج‌ترین بیان از «تن» همان *MT* می‌باشد که معادل ۱۰۰۰ کیلوگرم است.

ب) حجم بسته داخل بدنه[۴]: برای بیان حجم بسته کل شناور، شامل حجم زیر عرشه اصلی و بالای عرشه از دو تعریف تناژ ناخالص[۵] و تناژ خالص[۶] استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این اصطلاح «تناژ» به معنای جرم یا وزن نیست بلکه به مفهوم حجم می‌باشد. تا سال ۱۹۸۲ مقدار تناژ به وسیله واحد ۱۰۰ فوت مکعب (۲/۸۳ متر مکعب) بیان می‌شد یعنی هر تن حجمی معادل ۲/۸۳ متر مکعب در نظر گرفته می‌شد. ولی از سال ۱۹۸۲، محاسبه مقدار تناژ (حجم بسته شناور) برای کلیه کشتی‌ها توسط قوانین کنوانسیون بین‌المللی اندازه‌گیری تناژ[۷] انجام می‌شود. دو تعریف کلی در این‌باره وجود دارد:

۱- تناژ ناخالص (GRT)[۸] :عبارتست از میزان حجم بسته کل کشتی که مبنای پرداخت هزینه به داک بردن[۹]، راهنمایی کشتی[۱۰] و بازرسی آن است. فضاهای بسته زیر، جزء تناژ ناخالص شناور محسوب نمی‌شوند و فضاهای معاف شده[۱۱] نامیده می‌شوند و مهمترین آنها عبارتند از:

۱) پل فرماندهی، اتاق نقشه، اتاق مخابرات و اتاق ابزارآلات دریانوردی ۲) فضای آشپزخانه

۳) فضای شستشو و فاضلاب ۴) محل نگهداری وسایل ایمنی و نجات ۵) کانالهای داخل بدنه

پس از محاسبه و تفریق حجم‌های فوق از حجم بسته کل شناور، از رابطه زیر برای محاسبه تناژ ناخالص استفاده می‌شود (V بر حسب متر مکعب می‌باشد):

$$GT = K_1.V$$

$$K_1 = 0.2 + 0.02\ Log(V)$$

۲- تناژ خالص (NRT)[۱۲] : عبارتست از حجم بسته داخل شناور (بالا و پایین عرشه اصلی) برای حمل بار و مسافر. تناژ خالص مبنای محاسبه هزینه‌های عوارض بندری می‌باشد. به عبارت دیگر تناژ خالص از کم کردن حجم‌های زیر از تناژ ناخالص به دست می‌آید:

۱) محل زندگی فرمانده و خدمه کشتی ۲) فضای ماشین‌آلات و موتورخانه

1- displacement
2- dead weight
3- light weight
4- enclosed space
5- gross tonnage
6- net tonnage
7- international convention on tonnage measurment
8- gross registered t7 onnage
9- docking
10- pilotage
11- excepted spaces
12- Net resgistered tonnage

۳) انبار زنجیر و لنگر و سیستم سکان ۴) مخازن تعادل کشتی

پس از محاسبه حجم بسته مربوط به حمل بار و مسافر (V_c) بر حسب متر مکعب، تناژ خالص از رابطه زیر به دست می‌آید:

۱- برای کشتی‌های مسافربری (مسافر بیش از ۱۳ نفر): $NT = K_2.V_c.(\frac{4d}{3D})^2 + K_3(N_1 + \frac{N_2}{10})$

۲- برای سایر کشتی‌ها: $NT = K_2.V_c.(\frac{4d}{3D})^2$

برای هر یک از عبارات زیر داریم:

V_c : حجم بسته مربوط به حمل بار و مسافر بر حسب متر مکعب D : عمق داخلی (عمق بدنه بدون در نظر گرفتن ضخامت ورق در وسط شناور)

d : آبخور داخلی (فاصله آبخور تابستان بدون در نظر گرفتن ضخامت ورق در وسط شناور)

$K_2 = 0.2 + 0.02\ LogV_c$ $K_3 = 1.25\ (GT + 10000) / 10000$

N_1 : تعداد مسافران در کابینهایی که بیش از هشت تخت در هر کابین نباشد. N_2 : تعداد سایر مسافران

$N_1 + N_2$: تعداد کل مسافرانی که یک کشتی می‌تواند حمل کند.

ملاحظات زیر را در فرمول‌های فوق باید در نظر داشت:

۱- عبارت $(\frac{4d}{3D})^2$ نباید بیش از یک باشد.

۲- عبارت $K_2.V_c.(\frac{4d}{3D})^2$ برای کشتی‌های مسافربری نباید بزرگتر از *0.25 GT* باشد.

۳- اگر $N_1 + N_2$ کمتر از *13* باشد، N_1 و N_2 برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند.

۴- *NT* نباید کمتر از *0.3 GT* باشد.

بدین ترتیب حجم‌های بسته داخل شناور با اصطلاح «تناژ خالص و تناژ ناخالص» بیان می‌شوند که این عبارات از جنس حجم (متر مکعب) هستند نه جرم یا وزن. بنابراین به این نکته مهم باید توجه کرد که ارتباطی بین جابجایی با تناژ خالص و ناخالص وجود ندارد.

مثال) یک کشتی حمل کالای عمومی به طول ۱۰۰متر، عرض ۹ ، آبخور ۳ و عمق ۴ متر دارای جابجایی ۱۱۰۰ تن است. کل حجم بسته شناور منهای فضاهای معاف شده ۸۰۰ مترمکعب و حجم اختصاصی حمل بار ۶۰۰ مترمکعب است. تناژ ناخالص و تناژ خالص را محاسبه کنید. حل)

$V=800\ m^3$ $V_C=600\ m^3$

$K_1 = 0.2 + 0.02\ Log(V) = 0.258$ $GT = K_1.V = 206.44\ t$

$K_2 = 0.2 + 0.02\ LogV_c = 0.255$ $NT = K_2.V_c.(\frac{4d}{3D})^2 = 0.255 \times 600 \times \left(\frac{4\times3}{3\times4}\right) = 153\ t$

بنابراین در این شناور، جابجایی ۱۱۰۰ تن، تناژ ناخالص ۲۰۶/۴۴ تن و تناژ خالص ۱۵۳ تن است (ملاحظه می‌گردد که ارتباطی بین جابجایی و *GRT*و *NRT* وجود ندارد).

❖ **نحوه تعیین خط آبخور طراحی[1] :**منظور از «خط آبخور طراحی» حداکثر میزان آبخور کشتی در چگالی t/m^3 ۱/۰۲۵ است. یکی از مراحل مهم در شروع طراحی شناور، تعیین خط آبخور آن می‌باشد. همانطور که بیان شد، مقدار جابجایی بدنه شناور در زیر خط آبخور باید برابر با وزن یا تناژ کل کشتی باشد. تناژ کل کشتی هم که از مجموع وزن سبک و وزن مرده کشتی بدست می‌آید. لذا داریم:

$W = \Delta = \rho.g.\nabla = 1.025g.\nabla$ $\nabla = \frac{W}{1.025g}$

یعنی در آبخور تعیین شده برای شناور باید حجم بدنه در زیر آب برابر ∇ باشد. در عمل، برای تعیین خط آبخور و حجم مورد نظر، سعی و خطا انجام می‌دهیم و فایل سه بعدی بدنه کامل را در ارتفاع‌های مختلف از کف برش می‌زنیم. هر موقعیتی که در آن حجم بدست آمده برابر ∇ شود، همان خط آبخور طراحی است. باید توجه داشت که همواره بخشی از بدنه در زیر خط آب است (که حجم جابجایی ایجاد می‌کند) و بخشی از بدنه در بالای خط آب است (که ذخیره شناوری ایجاد می‌کند).

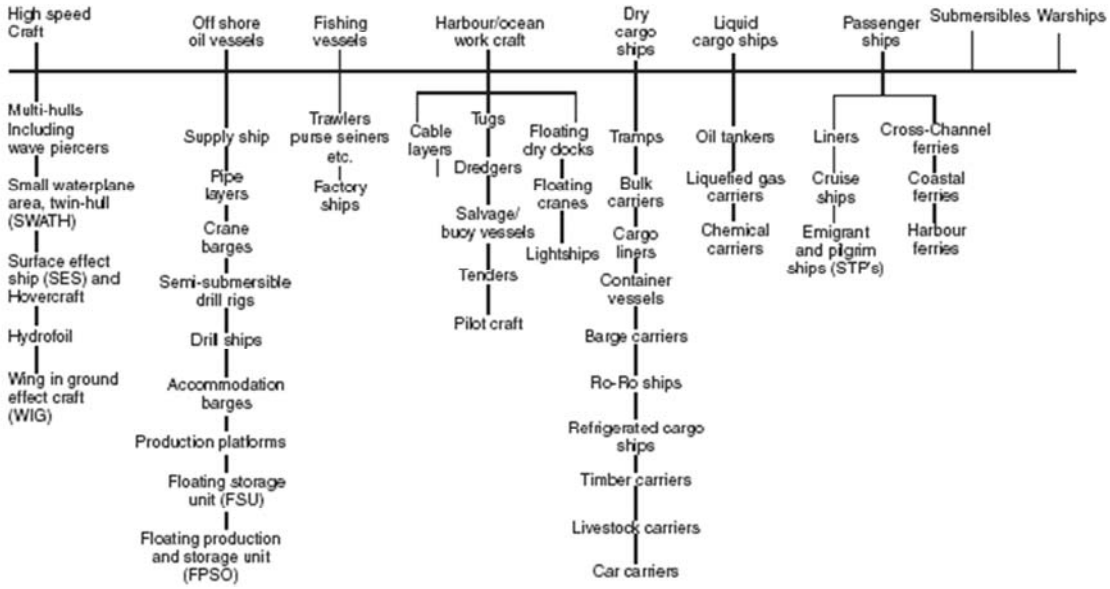
1 - design waterline

بخش سوم:

آشنایی با انواع کشتی‌های تجاری و نظامی

❖ دسته‌بندی کشتی‌های تجاری[۱]

هدف از این بخش آشنایی با انواع کشتی‌ها و وظایف آنها است. کشتی‌های تجاری را می‌توان بر حسب دیدگاه‌های مختلف، دسته‌بندی کرد. اگر نوع کاربری کشتی مدنظر باشد می‌توان مطابق شکل ۱-۷ تقسیم‌بندی زیر را انجام داد:



شکل۱-۷: تقسیم‌بندی انواع شناورها

- زیر مجموعه کشتی تندرو[۲] به صورت زیر است:
  - کشتی‌های چند بدنه[۳] : این کشتی‌ها دو، سه یا چهار بدنه هستند .
  - کشتی‌های *SWATH* [۴] : این کشتی‌ها نوعی کشتی چند بدنه هستند که سطح آبخور کوچکی دارند.
  - کشتی‌های اثر سطحی (*SES*)[۵] و هاورکرافت[۶]: این کشتی‌ها از کیفیت ایجاد شده ناشی از تزریق هوا به زیر بدنه، از سطح آب جدا شده و با سرعت بالایی حرکت می‌کنند.

---

۱ - *منابع: [۱ و ۲ و ۷ و۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱]*

2- high speed craft
3- multi - hull
4- small waterplane area twin hull
5-Surface effect ship
6- hovercraft

- کشتی هیدروفویلی[۱]: این کشتی دارای دو یا چند بال با مقطع فویل (که بدان هیدروفویل گویند) در زیر بدنه است که به کمک این بالها، شناور از سطح آب جدا شده و می‌تواند با سرعت بالایی حرکت کند.

- کشتی‌های صنعت فراساحل[۲] به صورت زیر قابل تقسیم‌بندی است:

- کشتی پشتیبانی[۳]
- کشتی لوله‌گذار در عمق آب[٤]
- بارج جرثقیل‌دار[٥]
- کشتی نیمه غوطه‌ور حفاری[٦]
- کشتی حفاری[۷]
- بارج اسکان خدمه[۸] **:** این شناور یک هتل شناور دریایی است که خدمه سکوهای فراساحل برای استراحت به آن منتقل می‌شوند.
- شناور فرآوری نفت[۹]
- شناور ذخیره نفت[۱۰] *(FSU)*
- شناور ذخیره و فرآوری نفت[۱۱] *(FPSO)*

- کشتی‌های صیادی[۱۲] را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- کشتی صیادی ترالر[۱۳]
- کشتی صیادی پرساینر[۱٤]
- کشتی فرآوری ماهی[۱٥]

- کشتی‌های خدماتی را می‌توان به صورت زیر برشمرد:
- کشتی کابل‌گذار دریایی[۱٦]
- یدک کش[۱۷]
- کشتی لایروب[۱۸]
- کشتی نجات[۱۹] : برای انجام عملیات نجات کشتی‌های صدمه‌دیده در دریا مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- کشتی خدماتی [۲۰]: این کشتی در خدمت کشتی دیگر قرار می‌گیرد تا بار و مسافران آن را جابجا کند.
- کشتی راهنما[۲۱] : برای کمک به تعیین مسیر ورودی کشتی‌های تجاری برای ورود به بندرگاه می‌باشد.
- حوضچه شناور تعمیر و ساخت کشتی[۲۲]

1- hydrofoil craft
2- offshore oil vassel
3- supply ship
4- pipe layer
5 - crane barge
6- semi submersible drill rig
7- drill rig
8- accommodation barge
9- production platform
10- Floating storage unit
11- floating production and strage unit
12- fishing vessel
13- trawler
14- purse seiner
15- factory ship
16- cable layer
17- tug
18- dredger
19- salvage
20- tender
21- pilot ship
22- floating dock

- جرثقیل شناور[۱] : این شناوری دارای یک جرثقیل بزرگ روی عرشه است که عموماً برای نصب سکوها در دریا استفاده می‌شوند.
- کشتی فانوس دریایی[۲] : این کشتی دارای برج بلندی برای فانوس دریایی می‌باشد که در گذشته برای تعیین مسیر کشتی‌های گم شده استفاده می‌شد.

- کشتی‌های حمل کالای خشک[۳] به صورت زیر تقسیم بندی می شوند:

- کشتی تجاری با مسیر و زمان کاری نامنظم[٤]
- کشتی فله‌بر[٥]
- کشتی باری با مسیر مشخص و زمان‌بندی تردد معین[٦]
- کشتی کانتینربر[۷]
- کشتی حمل بارج[۸]
- کشتی حمل اتومبیل[۹] (*Ro-Ro*)
- کشتی حمل کالای یخچالی[۱۰]
- کشتی حمل الوار چوب[۱۱]
- کشتی حمل احشام و حیوانات[۱۲]
- کشتی جابجایی اتومبیل[۱۳]

- کشتی حمل کالای مایعات[۱٤] را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- کشتی نفتکش[۱٥]
- کشتی حمل گاز مایع شده[۱٦] (*LNG*)
- کشتی حمل مواد شیمیایی[۱۷]

- کشتی‌های جابجایی مسافر[۱۸] را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد.

- کشتی مسافربری با خط سیر و زمان تردد معین[۱۹]
- کشتی لوکس مسافربری[۲۰]
- کشتی جابجایی مهاجران و زوار[۲۱]
- کشتی جابجایی مسافر در عرض رودخانه[۱]

1- floating crane
2- light ship
3- dry cargo ship
4- tramp
5- bulk carrier
6- cargo liner
7- container ship
8- barge carrier
9- roll on – roll off ship
10- refrigerated cargo ship
11-Timber carrier

۱۲ -*livestock carrier: حرکات این کشتی‌ها برای جلوگیری از بیماری حیوانات و شکستن پای آنها باید دارای حرکات نرم و پریود نوسانات زیادی باشد لذا دارای ارتفاع متاسنتری کمی هستند. ارتباط نوسانات کشتی با پریود نوسانات در قسمت پایداری بیان خواهد شد. همچنین این کشتی‌ها دارای سیلوی نگهداری علوفه و جابجایی آنها با تسمه نقاله و انتقال خودکار کود حیوانات است*

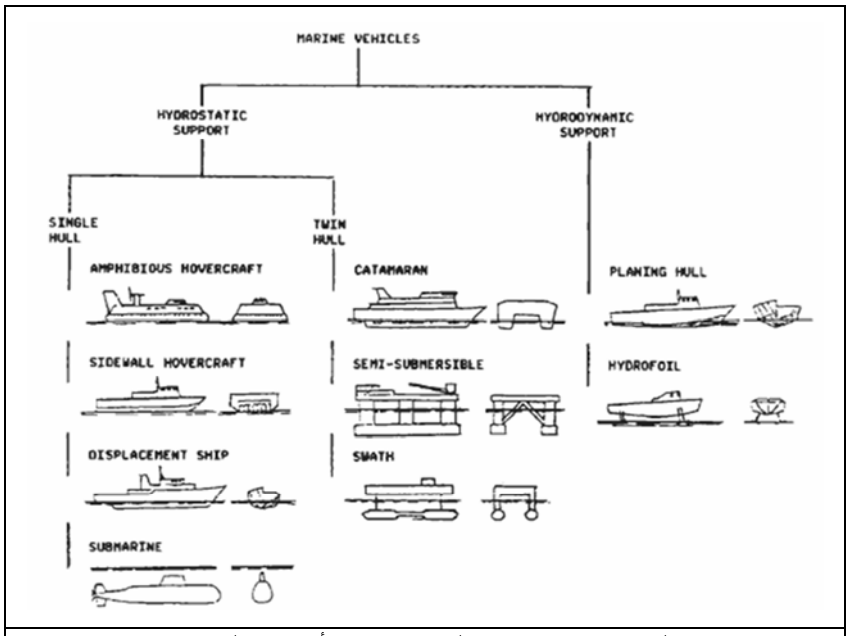
13- car carrier
14- liquid cargo ship
15- oil tanker
16- liquefied gas carrier
17- chemical carrier
18- passenger ship
19- liner
20- cruise ship
21- emigrant and pilgrim ship

- کشتی‌های مسافربری ساحلی[۲]
- کشتی‌های مسافربری بندری[۳]

از دیدگاه تأمین نیروی لازم برای غلبه بر وزن شناور می‌توان تقسیم‌بندی مطابق شکل ۱–۸ را در نظر گرفت.

دسته اول: کشتی‌هایی که نیروی وزن شناور توسط نیروی شناوری خنثی می‌شود. در این شناورها بخش قابل ملاحظه‌ای از بدنه در حین حرکت، در داخل آب است. در این دسته‌بندی شناورهای زیر را می‌توانیم نام ببریم:

- کشتی دوزیست[۴]
- کشتی هاورکرافت بدنه عمودی[۵]
- کشتی جابجایی[۶]
- زیردریایی[۷]
- کشتی دو بدنه[۸]
- شناور نیمه غوطه‌ور حفاری[۹]
- کشتی چند بدنه‌ای با سطح آبخور کوچک[۱۰]



شکل۱ -۸: تقسیم‌بندی انواع شناورها بر اساس تأمین نیروی شناوری

دسته دوم: کشتی‌هایی که نیروی وزن شناور در حالت ایستایی توسط نیروی شناوری خنثی می‌شود ولی وقتی شناور شروع به حرکت کند، سهم نیروی شناوری اندک اندک کاهش می‌یابد و با نیروی هیدرودینامیکی جایگزین می‌شود. این نیروی هیدرودینامیکی توسط بدنه یا بخشی از بدنه ایجاد می‌شود و باعث می‌شود که بدنه شناور از سطح آب بلند شود. با جدا شدن بدنه از سطح آب، شناور می‌تواند با سرعتهای خیلی بالا حرکت کند. این کشتی‌ها را به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

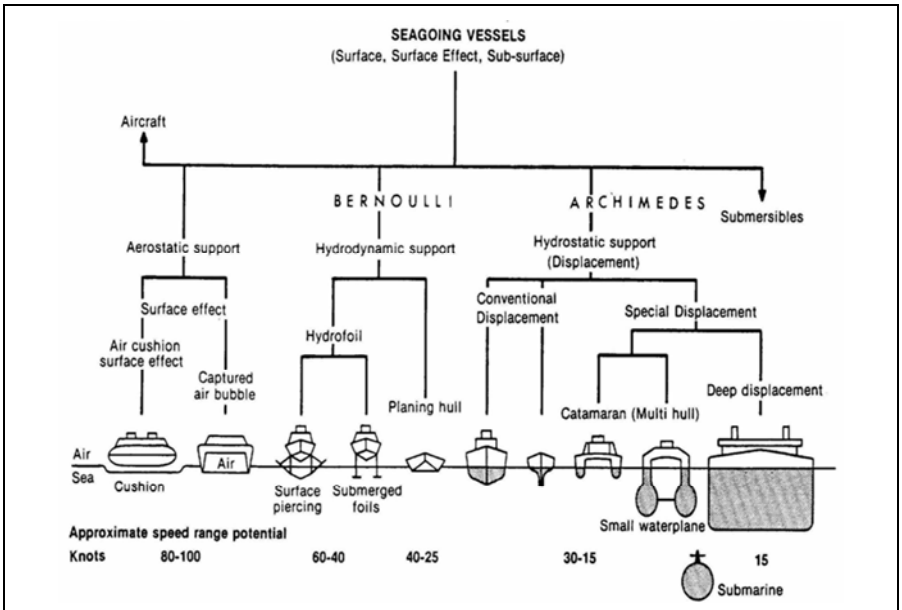
- کشتی بدنه سرشی[۱۱]: نیروی هیدرودینامیکی توسط بدنه تأمین می‌شود.
- کشتی هیدروفویلی[۱] **:** نیروی هیدرودینامیکی توسط هیدروفویل‌های متصل به زیر بدنه تأمین می شود.

1- cross chanel ferry
2- coastal ferry
3- horbour ferry
4- amphibious hovercraft
5- side wall hovercraft
6- displacement ship
7- submarine
8- catamaran
9- semi submersible
10- SWATH
11- planning hull

تقسیم‌بندی دیگری از انواع شناورها در شکل ۱–۹ ارائه شده است.

در این قسمت مهمترین و رایج‌ترین انواع کشتی‌های تجاری مورد بررسی قرار می‌گیرند. سعی می‌شود برای هر یک از انواع شناورها اطلاعات زیر ارائه گردد.

- تاریخچه ساخت
- شکل و جانمایی کلی
- انواع موجود از یک نوع شناور
- کاربردها و مشخصات کاربردی



شکل ۱-۹: تقسیم‌بندی دیگری از انواع کشتی‌ها و شناورها

❖ محدوده تعریف شناورهای تندرو و کندرو (جابجایی)

هر شناوری که مشخصات آن در فرمول زیر صدق کند شامل شناورهای تندرو می‌شود و اگر خارج از این محدوده باشد جزء شناورهای کندرو (جابجایی) محسوب می‌شود: $V/\sqrt{L} \geq 2.35(1.35)$

V= سرعت به گره دریایی

L= طول شناور به متر (برای عدد داخل پرانتز واحد طول شناور فوت است).

سرعت شناورهای تندرو از رابطه‌ی زیر نیز قابل حصول است: $V \geq 3.7\times\nabla^{0.1667}$

V= سرعت برحسب متر بر ثانیه

∇ = تناژ برحسب تن $(L\text{-}Tone)$

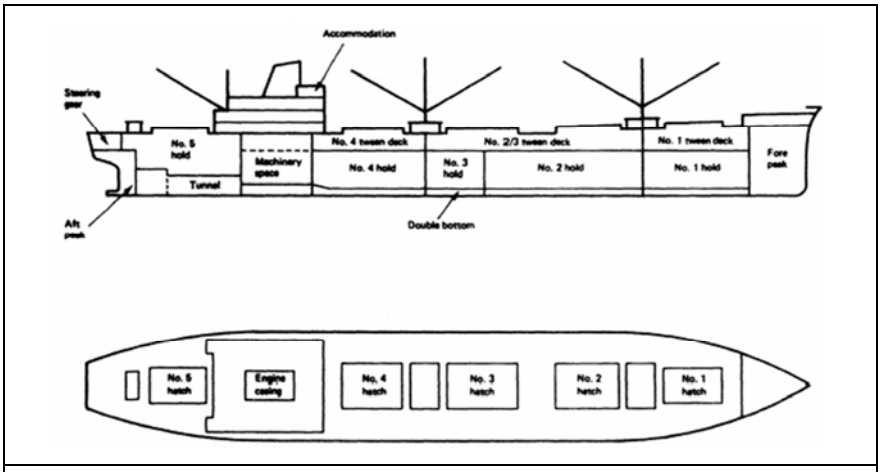
❖ کشتی باربری عمومی[2]

این نوع کشتی‌ها دارای انبارها با درب‌های ورودی بزرگ هستند به گونه‌ای که بارهای حجیم و سنگین را که قابل بسته‌بندی نیستند یا در داخل کانتینر جای نمی‌گیرند را بتوان حمل نمود. قطعات سنگین صنعتی را به وسیله مهارهایی در داخل انبار این کشتی‌ها قرار می‌دهند. نمای کلی یک کشتی حمل کالای عمومی مطابق شکل۱–۱۰ می‌باشد. انبارها در قسمت جلو قرار می‌گیرند و موتورخانه و محل اسکان خدمه در قسمت انتهایی شناور نصب می‌شوند.

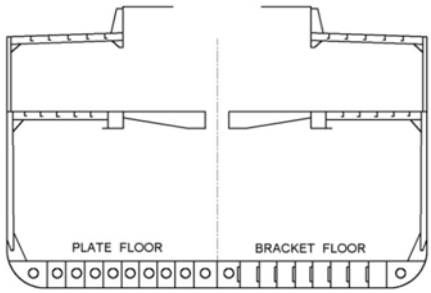
در برخی موارد هم جرثقیل‌هایی بر روی عرشه قرار می‌گیرد به گونه‌ای که شناور بتواند بدون نیاز به جرثقیل‌های ساحلی به جابجا کردن و انتقال بار بپردازد. برخی از این کشتی‌ها دارای عرشه میانی هستند (مطابق شکل ۱–۱۱) به گونه‌ای که بتوان کالاها را در چند طبقه بر روی هم قرار داد.

1- hydrofoil craft
2- general cargo ship

از آنجا که کالاهای عمومی یا متفرقه، دارای بسته‌بندی خاصی نیستند، نمی‌توان آنها را روی هم قرار داد و لذا داشتن عرشه میانی کمک مناسبی به این مورد است. در برخی از کشتی‌های باربری عمومی از درب‌های کناری بدنه برای حمل و جابجایی بار استفاده می‌شود. این کشتی‌ها دارای سرعتی بین ۱۸-۱۲ گره دریایی هستند و حداکثر ۱۲ مسافر می‌توانند حمل کنند. اگر کشتی تعداد بیشتری مسافر حمل کند، مشمول قوانین بین المللی کشتی-های مسافربری می شود که بسیار سختگیرانه‌تر و دشوارتر از قوانین کشتی‌های باربری است. شکل ۱-۱۲ یک کشتی باربری عمومی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۰: جانمایی عمومی کشتی باربری عمومی

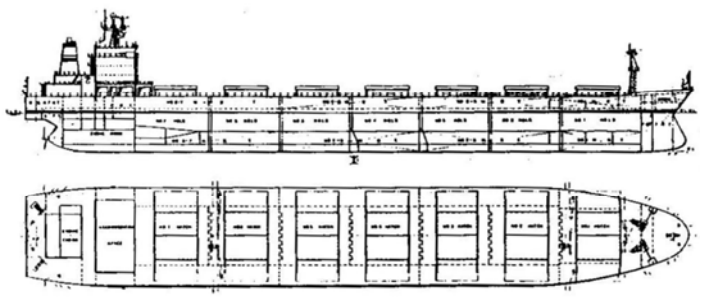


شکل ۱-۱۱: مقطع کشتی باربری عمومی با عرشه میانی

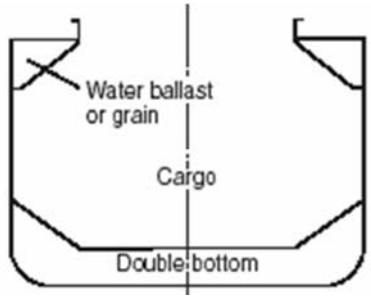
شکل ۱-۱۲: کشتی باربری عمومی

❖ کشتی فله‌بر[1]

کشتی فله‌بر برای حمل بارهای خشک به صورت فله‌ای (بدون بسته‌بندی) طراحی و ساخته می‌شوند. بارهایی که به صورت فله‌ای قابل حمل هستند، عبارتند از: غلات، ذغال سنگ، سنگ آهن، کود شیمیایی، انواع مواد معدنی، شکر و چوب که معمولاً چوب روی عرشه حمل می‌شود. نمای جانبی این کشتی‌ها مطابق شکل ۱-۱۳ می‌باشد.



شکل۱-۱۳ : جانمایی عمومی کشتی فله‌بر



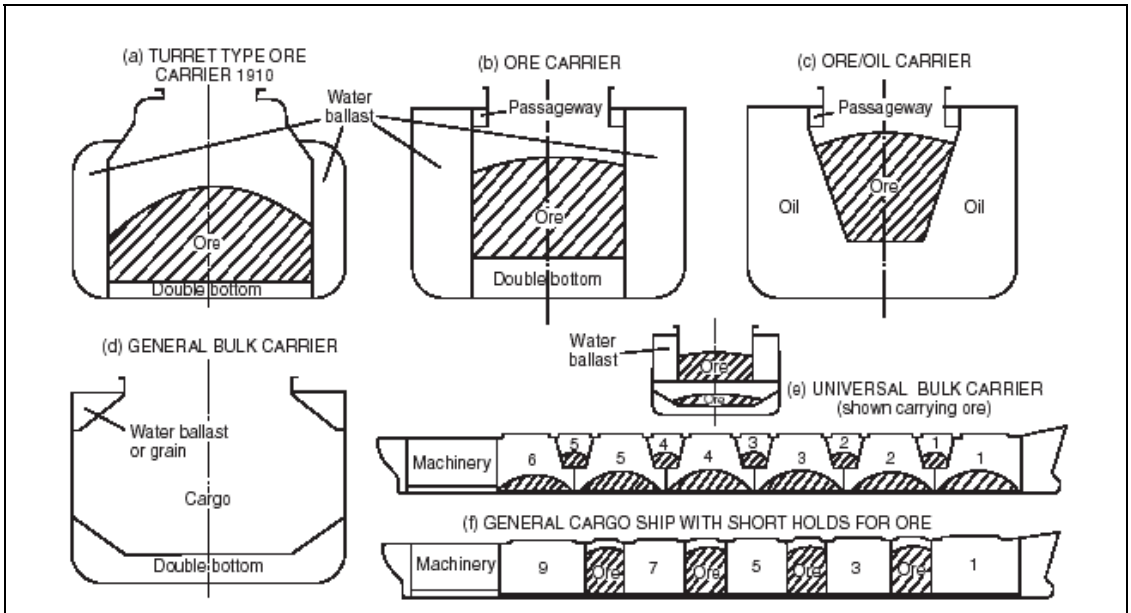
شکل ۱-۱۴: مقطع عرضی کشتی فله‌بر

تخلیه و بارگیری بارهای فله به ۳ روش اصلی انجام می‌شود: چنگک[2]، دستگاه مکنده وتسمه نقاله. از بین این روش‌ها، تخلیه با استفاده از چنگک باعث

1- bulk carrier
2- grab

صدمه به کف انبار کشتی می‌شود لذا سعی می‌شود از سایر روشها استفاده شود. لبه‌های پائینی انبارها در این کشتی‌ها اغلب به صورت مایل و شیب‌دار ساخته می‌شوند به گونه‌ای که ذرات بار فله‌ای درکناره‌ها جمع نشود و تخلیه بار به صورت کامل انجام می‌شود. شکل مقطع انبارها درکشتی های فله بر مطابق شکل ۱-۱۴ می‌باشد. مخازنی با مقطع مثلثی شکل در قسمت بالای مقطع بدنه دیده می شود که در طول انبارها وجود دارد. این مخازن را «مخازن زینی شکل»[1] می‌گویند و کاربرد آن برای افزایش ارتفاع مرکز ثقل است چرا که وقتی در داخل انبارها بارهای سنگینی مانند سنگ آهن حمل شود، مرکز ثقل به شدت پائین می‌آید. پائین آمدن مرکز ثقل باعث افزایش پایداری و کاهش پریود نوسانات غلتش عرضی می‌شود. کاهش پریود نوسانات هم به منزله کاهش راحتی و افزایش احتمال دریازدگی است. برای جلوگیری از این عارضه، مخازن زینی شکل را در شرایط حمل سنگ آهن، پر از آب می‌کنند تا ارتفاع مرکز ثقل تا حدودی افزایش یابد و دریازدگی خدمه کاهش یابد. برخی از فله‌برها می‌توانند چند نوع بار فله و حتی نفت حمل کنند که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است و کشتی می تواند در اکثر سفرها، بار حمل کند. از آنجا که چگالی بارهای فله متفاوت است لذا شکل انبارها متناسب با آنها طراحی و ساخته می‌شود. مطابق شکل ۱-۱۵، قسمت میانی انبارها با حجم کوچکتر، برای حمل بارهای با چگالی بالا (مانند سنگ آهن) در نظر گرفته شده و در انبارهای جانبی، بارهای با چگالی کمتر (مانند نفت) حمل می‌شوند.

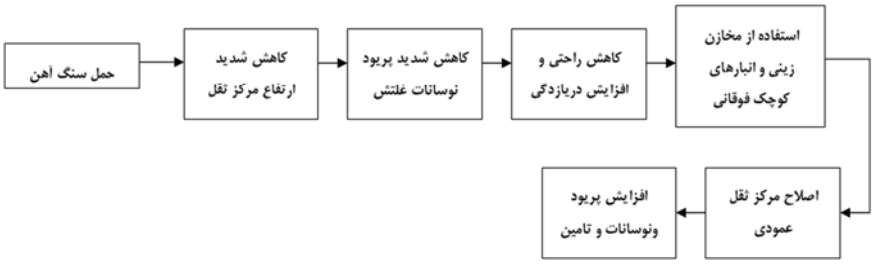
مطابق شکل ۱-۱۵، انبار برخی از فله‌برها را به صورت طولی تقسیم‌بندی می‌کنند به گونه‌ای که توزیع بار یکنواخت انجام شود و انبارها یک در میان برای بارهای سنگین و سبک در نظر گرفته می‌شوند. مطابق شکل ۱-۱۵، انبار برخی از فله‌برها را نیز به صورت عمودی به دو قسمت بزرگ و کوچک تقسیم می‌کنند به گونه‌ای که ارتفاع مرکز ثقل خیلی پائین نیاید. انبارهای کوچکی که در قسمت فوقانی قرار گرفته‌اند، نقش اصلاح محل مرکز ثقل و تامین راحتی را دارند. حداکثر تناژ این کشتی‌ها تا **۲۰۰۰۰۰***dwt* می‌باشد و سرعت آنها ۱۴-۱۲ گره است. بدنه کشتی‌های فله‌بر که امکان حمل نفت، فله و سنگ معدن داشته باشند را *OBO*[2] گویند. ملاحظه می‌شود که حجم زیادی از فضای داخل انبارهای آن خالی است. علت این مسئله چگالی زیاد سنگ معدن می‌باشد. می‌دانیم که برای شناور ماندن کشتی روی سطح آب، باید چگالی کشتی از چگالی آب دریا کمتر شود لذا با وجود چگالی بسیار زیاد سنگ (حدود ۳ تن بر متر مکعب) چاره‌ای جز خالی گذاشتن بخش‌هایی از حجم انبارها وجود ندارد.



شکل۱-۱۵: حالات مختلف چیدمانی انبارها در کشتی‌های فله‌بر چند منظوره(*OBO*)

1- saddle tank
2- Oil/Bulk/Ore

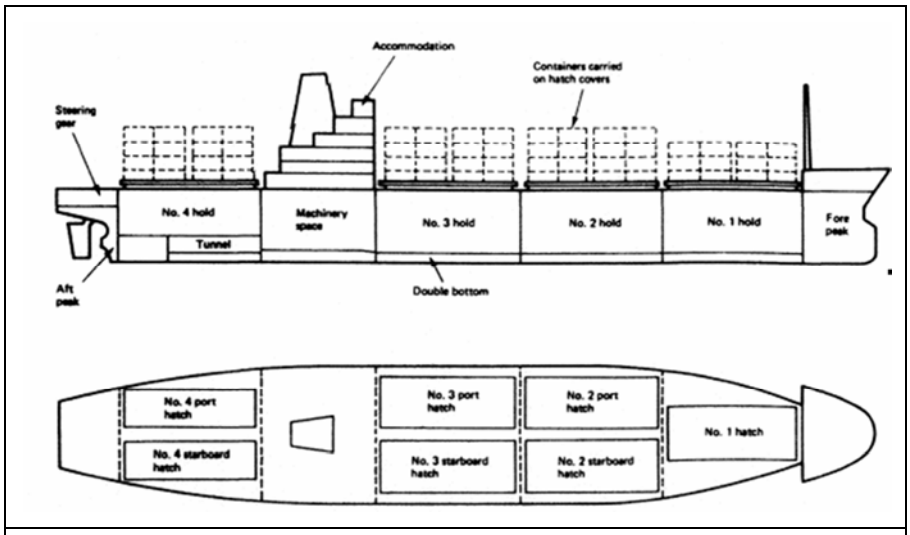
فرآیند ارتباطی زیر را می‌توان در این باره در نظر گرفت:



❖ کشتی کانتینربر[1]

معمولاً فرآیند تخلیه و بارگیری کشتی‌ها بسیار طولانی و دشوار است لذا امروزه سعی می‌شود بارها در داخل کانتینرهایی با ابعاد استاندارد جاسازی شوند و جابجایی بار بوسیله جابجایی کانتینر انجام شود و بدین ترتیب تعداد زیادی از بارهای کوچکتر را می‌توان در داخل یک واحد کانتینر جای داد که جابجایی بسیار ساده‌تر و سریع‌تر انجام خواهد شد. نمای کلی کشتی‌های کانتینربر در شکل ۱-۱۶ملاحظه می‌شود.

برای اینکه چیدمانی کانتینرها بر روی یکدیگر ساده‌تر انجام شود، کانتینرها دارای ابعاد استاندارد هستند و با واحد *TEU*[2] بیان می‌شوند مثلاً کشتی *۲۰۰۰TEU* یعنی کشتی که تعداد ۲۰۰۰ کانتینر ۲۰ فوتی می‌تواند حمل کند. کانتینرها در دو طول متفاوت وجود دارند، ۲۰ فوتی و ۴۰ فوتی . کانتینرهای ۴۵ فوتی هم وجود دارند که البته چندان رایج نیستند. ابعاد دقیق این کانتینرها در جدول ۱-۱ ارائه شده است.



شکل ۱-۱۶:جانمایی عمومی کشتی کانتینربر

حداکثر وزن مجاز هر یک از کانتینرها نیز در این جدول بیان شده است. امروزه بزرگترین کشتی کانتینربر دنیا، یک کشتی *۸۰۰۰TEU* می‌باشد و برنامه‌ریزی آینده بر روی کشتی‌های *۱۲۰۰۰TEU* می‌باشد. سرعت دریانوردی این کشتی‌ها درمسیرهای نزدیک در حدود ۱۶ گره و در مسیرهای دور حدود ۲۴ گره می‌باشد. برخی ازکانتینرها، یخچالی می‌باشند و مواد فاسد شدنی در داخل آنها قرار می‌گیرند. ابعاد این کانتینرها از کانتینرهای ۲۰ و ۴۰ فوتی تجاوز نمی‌کند. تجهیزات سرمایشی و تبرید در داخل خود کانتینرها نصب شده است. کشتی‌های کانتینربر را *Lo-Lo* [3] هم گویند چرا که بارها (کانتینرها) به صورت عمودی در داخل انبارها قرار می‌گیرند و به صورت عمودی هم تخلیه می‌شوند. از آنجا که مقطع عرضی بدنه این کشتی‌ها باز است و دارای عرشه‌های میانی نیست، لذا برای تحمل ممان‌های پیچشی وارد بر بدنه، اغلب این کشتی‌ها را دو جداره می‌سازند. از فضای بین دو بدنه نیز برای جانمایی مخازن بالاست استفاده می‌شود.

شکل ۱-۱۷ نشان‌دهنده یک فروند کشتی کانتینربر *۲۲۰۰TEU* می‌باشد که در شرکت کشتی‌سازی خلیج فارس – بندرعباس ساخته شده است.

1- container ship
2- twenty feet equivalent unit
3- lift on – lift off

شکل۱-۱۷: کشتی ۲۲۰۰ کانتینری ایران اراک – اولین کشتی اقیانوس پیما ساخت ایران-کشتی‌سازی خلیج فارس (بندرعباس)- سال ۱۳۸۸- نماد غرور و افتخار صنعت کشتی‌سازی ایران

		20′ container		40′ container		45′ high-cube container	
		imperial	metric	imperial	metric	imperial	metric
external dimensions	length	20′ 0″	6.096 m	40′ 0″	12.192 m	45′ 0″	13.716 m
	width	8′ 0″	2.438 m	8′ 0″	2.438 m	8′ 0″	2.438 m
	height	8′ 6″	2.591 m	8′ 6″	2.591 m	9′ 6″	2.896 m
interior dimensions	length	18′ 10 5⁄16″	5.758 m	39′ 5 45⁄64″	12.032 m	44′ 4″	13.556 m
	width	7′ 8 19⁄32″	2.352 m	7′ 8 19⁄32″	2.352 m	7′ 8 19⁄32″	2.352 m
	height	7′ 9 57⁄64″	2.385 m	7′ 9 57⁄64″	2.385 m	8′ 9 15⁄16″	2.698 m
door aperture	width	7′ 8 1⁄8″	2.343 m	7′ 8 1⁄8″	2.343 m	7′ 8 1⁄8″	2.343 m
	height	7′ 5 3⁄4″	2.280 m	7′ 5 3⁄4″	2.280 m	8′ 5 49⁄64″	2.585 m
volume		1,169 ft³	33.1 m³	2,385 ft³	67.5 m³	3,040 ft³	86.1 m³
maximum		66,139 lb	30,400 kg	66,139 lb	30,400 kg	66,139 lb	30,400 kg
empty weight		4,850 lb	2,200 kg	8,380 lb	3,800 kg	10,580 lb	4,800 kg
net load		61,289 lb	28,200 kg	57,759 lb	26,600 kg	55,559 lb	25,600 kg

جدول ۱-۱: جدول ابعاد استاندارد کانتینرها

❖ کشتی نفتکش[1]

نفتکش‌ها معمولاً ضریب ظرافت C_b[2] حدود ۰/۸ دارند و معمولاً دارای فری بورد کوچکی هستند. یک بویلر نیز اغلب برای استفاده های داخلی از قبیل گرمایش مخازن نفت در آنها وجود دارد (شکل ۱-۱۸). در همه مخازن، یک سیستم خروج گاز وجود دارد، این سیستم برای خارج کردن بخارات نفتی و مخلوط قابل اشتعال هوا و بخارات که در بالای مخازن بار جمع می شوند، بکار می رود. تانکرها معمولاً یک روبناسازی و ساختمان به عنوان

1- *tanker ship*
2- *block coefficient*

محل اسـکان خدمه در قسمت پاشنه دارند. در ایـن کشـتی‌ها لوله‌کشی‌های متعددی روی سطح عرشه مشاهده می‌شود که بدین‌وسیله می‌توان براحتی آنها را تشخیص داد. برای محافظت پرسنل در مقابل تأثیرات امواج ناشی از کوچک بودن فری بورد، یک راهروی مرکزی[1] در طول عرشه فوقانی و کمی بالاتر از سطح عرشه می‌سازند. امروزه در مورد ساخت نفتکش‌ها سخت‌گیری زیادی بعمل می‌آید. این امر بدلیل مشکلات زیست محیطی است که در صورت غرق شدن یک نفتکش، ممکن است روی دهد. در سال ۱۹۹۰، آمریکا برای جلوگیری از آلودگی نفتی ناشی از خسارات وارد بر تانکرها، طرحی ارائه کرد که در آن همه تانکرها با وزن مرده بالای ۵۰۰۰ تن ملزم می‌شوند که بدنه دو جداره داشته باشند و سازمان *IMO* نیز این طرح را در سال ۱۹۹۳ اجرا کرد. با این وجود هنوز هم تانکرها منجر به آلودگی نفتی می شوند و محققان درصدد هستند که طرح‌های جدیدی برای کاهش آلودگی نفتی توسط تانکرها ارائه دهند. این کشتی‌ها که معمولاً با ابعاد خیلی بزرگ ساخته می‌شوند، خاص حمل نفت هستند که بزرگترین آنها، کشتی‌های نفتکش با تناژ بیش از *DWT*۵۵۰۰۰۰ هستند. مخازن این کشتی‌ها بوسیله دیواره‌های عرضی متعدد از هم جدا شده‌اند و دارای حداکثر ۲ دیواره طولی نیز می‌توانند باشند. تقسیم‌بندی داخلی مخازن، هم از نظر مسائل پایداری و هم از نظر ایمنی و جدا بودن مخازن در شرایط صدمه دیدگی اهمیت دارد. مطابق قوانین مارپول[2] ، بدنه کلیه نفتکش‌ها باید دو جداره باشد(کف ودیواره‌ها دو جداره هستند) چرا که در صورت صدمه‌دیدن بدنه این کشتی‌ها، آلودگی‌های زیست محیطی غیر قابل جبرانی بروز می‌نماید. از فضای بین دو بدنه نیز برای مخازن بالاست استفاده می‌شود. سرعت دریانوردی کشتی‌ها به قیمت نفت بستگی دارد اما معمولاً بین ۱۶–۱۳ گره سرعت دارند.

کشتی‌های نفتکش *VLCC*[3] دارای حداکثر تناژ ۳۲۰۰۰۰ تن وکشتی های نفتکش *ULCC*[4] دارای حداکثر تناژ ۵۵۰۰۰۰ تن هستند. نمای کلی یک کشتی نفتکش در شکل ۱–۱۸ ملاحظه می‌شود. نفتکش‌ها از لحاظ ساختمانی با دیگر انواع کشتی فرق دارند و این بدلیل نوع باری است که باید حمل کنند. نفت با تغییرات دما دچار انقباض و انبساط می‌شود، بنابراین مخازن نباید بطور کامل از نفت پر شوند. در نتیجه نفت می‌تواند در مخازن، آزادانه به هر طرفی حرکت کند و این امر باعث ایجاد تنش‌های شدیدی روی بدنه می‌شود. همچنین اثرات سطح آزاد نیز باعث کاهش پایداری کشتی می‌شود. برای کاهش این اثرات منفی، تعدادی دیوار طولی[5] و صفحات طولی سوراخ دار[6] برای کاهش اثرات منفی سطح آزاد در کشتی بکار می‌رود. همچنین نفتکش‌ها توسط دیوارهای عرضی[7] به چندین قسمت تقسیم می‌شوند. روی سطح عرشه پوشیده از لوله‌کشی‌های متعددی است که برای جابجایی و انتقال نفت بکار می‌روند. برای کاهش احتمال آتش‌سوزی در تانکرها، پمپ ها را در موتورخانه نگه نمی‌دارند بلکه آنها را در یک بخش جداگانه‌ای تحت عنوان پمپ‌خانه[8] نگه می‌دارند. شکل۱–۱۹ نشان‌دهنده یک فروند نفتکش ۴۸۰۰ تنی می‌باشد که در شرکت صدرا – نکاء ساخته شده است. انواع دیگری از کشتی‌ها نیز وجود دارند که هم‌خانواده کشتی‌های نفتکش محسوب می‌شوند که عبارتند از:

شکل ۱–۱۸: نمای کلی کشتی نفتکش

شکل ۱–۱۹: کشتی نفتکش ۴۸۰۰ تنی- طراحی و ساخت شرکت صدرا

❖ کشتی حمل محصولات نفتی[9]

این کشتی‌ها محصولات فرآوری شده نفت خام مانند گازوئیل، بنزین معمولی، بنزین هواپیما را حمل می‌کنند. این کشتی‌ها نیز باید قوانین مارپول را رعایت کنند و دارای استانداردهای بالایی از نظر جلوگیری از آتش‌سوزی هستند.

1- central walk way
2- MARPOL: Maritime pollution
3- very large crude carrier
4- ultra large crude carrier
5- longitudinal bulkhead
6- wash plate
7- transverse blulkhead
8- pump room
9 - product carrier

❖ کشتی حمل مواد شیمیایی[1]

این کشتی‌ها محصولات شیمیایی مانند اسیدها، آمونیاک، الکل و روغن نباتی را حمل می‌کنند. در این کشتی‌ها، مواد بدنه انبارها باید به گونه‌ای باشند که در برابر مواد شیمیایی دچار خوردگی نگردند. قوانین مارپول در مورد این کشتی‌ها نیز لحاظ می‌گردد.

❖ کشتی حمل گاز[2]

پس از کشف منابع غنی گاز در زیر زمین، در دهه‌های اخیر سعی شده است استفاده بیشتری از گاز طبیعی و مشتقات آن بشود لذا نیاز به جابجایی مقادیر انبوهی از گاز ایجاد شد. برای حمل مقدار بیشتری گاز، نیاز است که آن را تبدیل به مایع نمایند. تبدیل گاز به مایع به ۳ روش کلی انجام می‌شود.

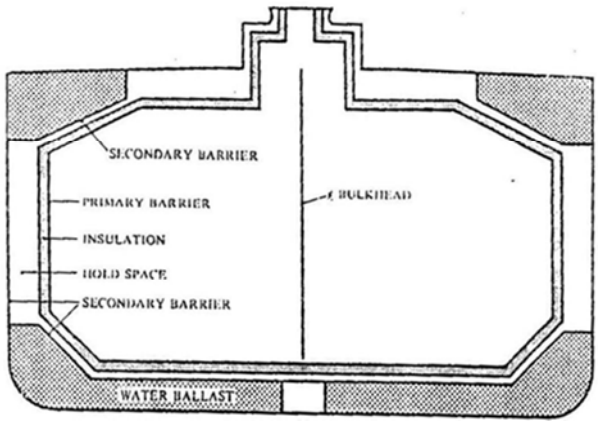
۱- کاهش دما تا زیر نقطه جوش و در فشار اتمسفر
۲- افزایش فشار و دمای معمولی
۳- حالت ترکیبی از کاهش دما و افزایش فشار

متناسب با هر یک از روش‌های فوق، مخازن مختلفی در کشتی‌های حمل گاز استفاده می‌شود (شکل ۱-۲۰) که عبارتند از:

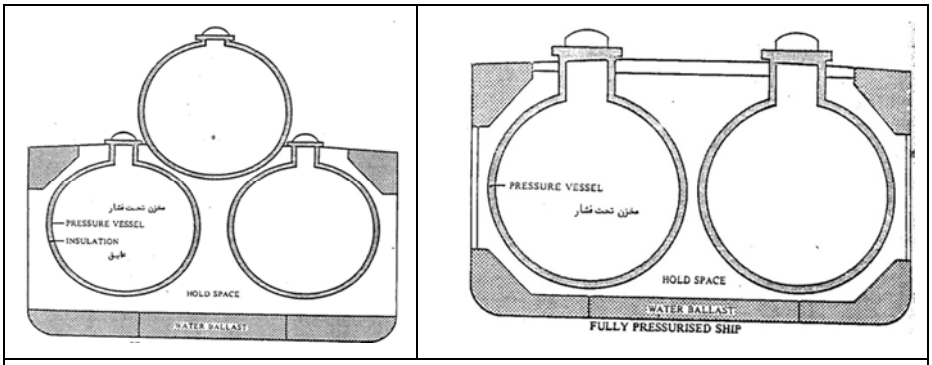
۱- کشتی‌های با مخازن ذوزنقه‌ای یا مکعبی (شکل۱-۲۱). به این نوع از مخازن، غشایی[3] هم گفته می شود.
۲- کشتی‌های با مخازن کروی (که تحمل فشارهای بالا برای مایع کردن گاز را دارند) (شکل ۱-۲۲).
۳- کشتی‌های با مخازن استوانه‌ای که آنها نیز تحمل فشارهای بالا را دارند.

شکل ۱-۲۰: انواع کشتی‌های حمل گاز: الف- مخازن استوانه‌ای ب- مخازن ذوزنقه‌ای (غشایی) ج- مخازن کروی

1- chemical carrier
2- gas carrier
3- membrance system



شکل۱-۲۱: کشتی حمل گاز با مقطع بدنه ذوزنقه‌ای



شکل۱-۲۲: آرایش‌های دیگری از کشتی‌های حمل گاز با مخازن کروی

کشتی حمل گاز از نظر نوع گاز قابل حمل به دو دسته کلی تقسیم می‌شود:

۱-کشتی LNG [1]

این کشتی مخصوص حمل مشتقات سبک‌تر طبیعی مانند متان است. گاز طبیعی به دو روش مایع می‌شود: ۱) دمای محیط و فشار ۲۰۰ آتمسفر (مخازن کروی و استوانه‌ای) ۲) دمای $-۱۶۲^{\circ}C$ و فشار یک آتمسفر(مخازن غیرکروی وغیر استوانه‌ای).

نقطه جوش این گاز نیز $-۸۲^{\circ}C$ است. کشتی های LNG تا ۱۳۰ هزار متر مکعب حجم مخزن و ۶۵ هزار DWT ظرفیت دارند و سرعت دریانوردی آنها تا ۱۹ گره است. بنابراین دمای داخلی مخازن این کشتی‌ها در روش کاهش دما تا $-۱۶۲^{\circ}C$ باید سرد شود. در این دما، مواد بدنه نباید به حالت ترد و شکننده برسند.

۲- کشتی LPG [2]

کشتی LPG مخصوص حمل مواد سنگین‌تر گاز طبیعی مانند بوتان، پروپان، اتان و پلی‌اتیلن است. حمل آنها به ۳ روش قابل انجام است.

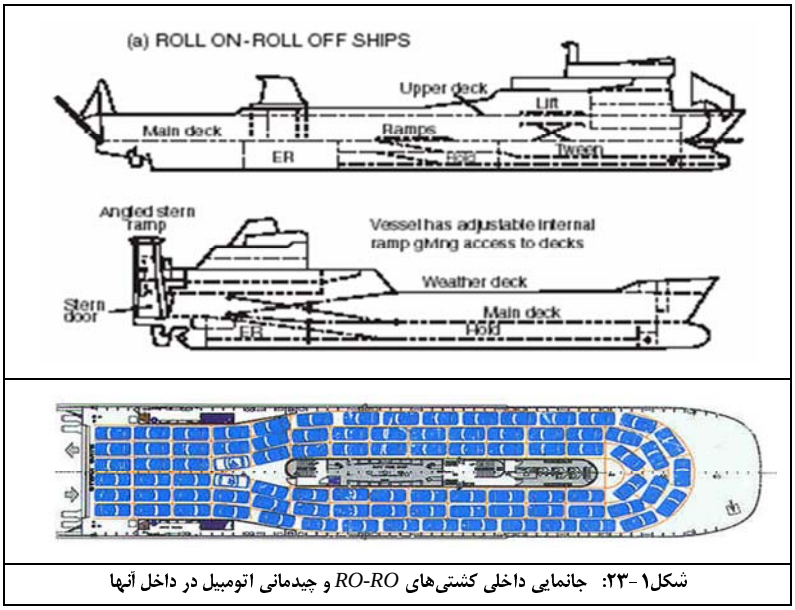
- کاملاً تحت فشار (۱۸بار) و در درجه حرارت محیط
- نیمه تحت فشار (۸ بار) و در درجه حرارت $-۱۵^{\circ}C$
- در فشار اتمسفر و در درجه حرارت $-۵۰^{\circ}C$

ابعاد کشتی‌های LPG را معمولاً کوچکتر از کشتی‌های LNG است.

از آنجا که فولاد کم‌کربن در دماهای خیلی پائین، شکننده و ترد می‌شود، باید برای حمل گاز از مخازن مخصوص استفاده کرد که بطور کامل عایق‌بندی شده باشد. فاصله عایق‌بندی مخازن از بدنه حدود ۱ متر است.

1- liquified natural
2- Liquefied petroleum gas

❖ کشتی حمل وسایل نقلیه[1] (*Ro-Ro*)



شکل۱-۲۳: جانمایی داخلی کشتی‌های *RO-RO* و چیدمانی اتومبیل در داخل آنها

این کشتی‌ها دارای یک سطح شیب‌دار[2] در سینه یا پاشنه هستند به گونه‌ای که وسایل نقلیه بتوانند به کمک سیستم رانش خودشان، از روی سطح شیب‌دار وارد کشتی شوند (شکل۱-۲۳). قبلاً از جرثقیل برای گذاشتن وسایل نقلیه در داخل انبار کشتی‌ها استفاده می‌شد که امروزه منسوخ شده است. حتی برخی از این کشتی‌های *Ro-Ro* برای حمل و جابجایی یک قطار طویل طراحی شده‌اند به گونه‌ای که قطار به همراه بار و مسافر و کلیه اجزاء، وارد کشتی می‌شود و از یک طرف دریاچه یا کانال به طرف دیگر منتقل می‌شود. برای جابجایی راحت اتومبیل و وسایل نقلیه در داخل کشتی، این کشتی‌ها دارای دیواره‌های داخلی نیستند و از نظر پایداری در شرایط صدمه‌دیده[3] ، بسیار آسیب‌پذیر هستند. برخی از کشتی‌های *Ro-Ro* علاوه بر وسایل نقلیه، می‌توانند بار و مسافر هم حمل کنند. سرعت حرکت این کشتی‌ها ۲۲ – ۱۸ گره می‌باشد. حداکثر تناژ آنها تا *GRT*۵۰۰۰ است.

❖ کشتی حمل بارج[4]

برخی از کشتی‌ها در مناطق ساحلی که اسکله وجود ندارد، برای جابجا کردن بار خود از بارج استفاده می‌کنند که این بارج‌ها بر روی خود شناور حمل می‌شوند. این نوع کشتی‌ها ممکن است ترکیبی با نوعی از کشتی تجاری دیگر باشند مثلاً یک کشتی باربری عمومی با قابلیت حمل بارج. بدین‌ترتیب بار کشتی بر روی بارج قرار می‌گیرد و بارج به ساحل منتقل می‌شود بدون اینکه نیاز باشد خود کشتی به ساحل نزدیک شود. این کشتی‌ها برای جابجا کردن بارج (بالا کشیدن و پائین بردن آن) از دو روش کلی استفاده می‌کنند:

- *LASH*[5]: که دارای جرثقیل دروازه‌ای برای بالا کشیدن بارج هستند.
- *SEABEE*: که دارای آسانسور در پاشنه است و بارج بوسیله آن بالا و پائین برده می‌شود.

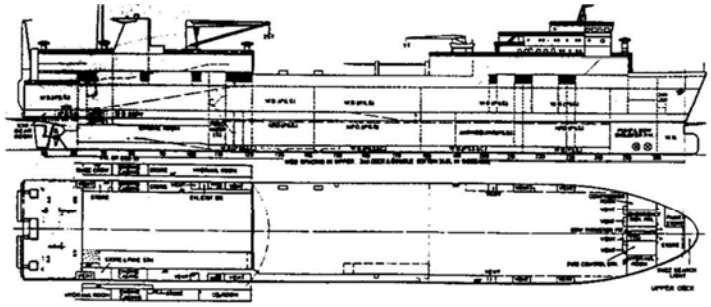
❖ کشتی های مسافربری[6]

کشتی های باربری به دلیل محدودیت‌های قانونی نمی‌توانند بیش از ۱۲ مسافر حمل کنند، در غیر این صورت مشمول قوانین سخت‌گیرانه کشتی‌های مسافربری خواهند شد. لذا سالهاست که کشتی‌های خاصی برای جابجایی مسافران در سراسر دنیا طراحی و ساخته شده‌اند. کشتی‌های مسافربری به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- **کشتی‌های مسافری – باری**[7]: این کشتی‌ها علاوه بر مسافران، بار و اثاثیه و اتومبیل آنها را نیز حمل می‌کند(شکل۱-۲۴). کشتی‌های *Ro-Ro* که قابلیت حمل مسافر هم داشته باشد نوعی کشتی مسافری-باری محسوب می‌شوند (شکل ۱-۲۵).

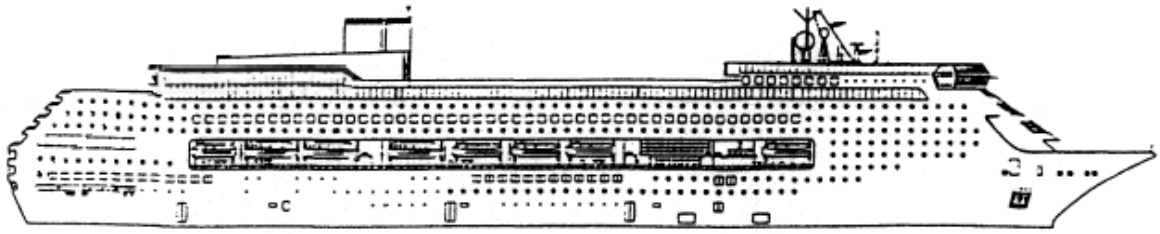
1- Roll On – Roll Off
2- ramp
3- damage stability
4- barge carrier
5- lighter aboard ship
6- Passanger ship
7- ferry

شکل ۱-۲۴: کشتی مسافری – باری (فری)



شکل۱-۲۵: کشتی‌های *Ro-Ro* با قابلیت حمل مسافر

۲- کشتی‌های تفریحی مسافربری[1]: این کشتی‌ها خاص فعالیت‌های توریستی در سراسر دنیا هستند که تعداد بسیار زیادی از مسافران را در خود جای می‌دهند (شکل۱-۲۶).



شکل ۱-۲۶: کشتی‌های تفریحی مسافربری

این کشتی‌ها دارای عرشه‌های متعدد و پیوسته در طول بدنه هستند و امکانات داخلی آنها همانند به هتل مجلل پنج ستاره است. برخی از این کشتی‌ها برای مسیرهای کوتاه و برخی برای مسیرهای بین قاره‌ای طراحی و ساخته می‌شوند. اولین کشتی مسافربری تفریحی با نام *prinzessin Victoria luise* در سال ۱۹۰۰ بین هامبورگ و آمریکا ساخته شد. هم‌اکنون بزرگترین کشتی‌های تفریحی دنیا ۴ فروند کشتی از کلاس «آزادی»[2] هستند که دارای طول ۳۳۹ متر و ارتفاع از سطح آب ۶۴ متر می‌باشند. تناژ ناخالص این کشتی GRT ۱۶۰۰۰۰ است. هم اکنون کشتی دیگری در دست ساخت است که تا سال ۲۰۱۱ آب اندازی خواهد شد و دارای طول ۳۶۰ متر، ارتفاع از سطح آب ۶۵ متر و تناژ ناخالص GRT ۲۲۰۰۰۰ است که عظیم-ترین کشتی مسافربری تفریحی دنیا خواهد شد و در هر نوبت می‌تواند ۵۴۰۰ مسافر را در خود جای دهد.

امکانات رفاهی این کشتی‌ها بسیار خاص و ویژه است بطور مثال کشتی مسافری تفریحی *Royal Caribean ship* در شرایط حمل مسافر، در هر هفته ۹ تن گوشت گوسفند، ۲۸۰۰۰ تخم مرغ و ۳۰۰۰۰ لیتر بستنی و ۱۸۰۰۰ قطعه پیتزا مصرف می‌کند. تعداد خدمه این کشتی‌ها نیز بسیار زیاد است به گونه‌ای که تعداد خدمه و مسافران در برخی از این کشتی‌ها تقریباً برابر هستند. مدیریت بر امور داخلی این کشتی‌ها از مدیریت بر یک هتل مجلل بسیار دشوارتر است. سرعت این کشتی‌ها ۲۲-۲۰ گره می‌باشد. تقاضا برای استفاده از این‌گونه کشتی‌ها به سرعت در دنیا در حال افزایش است و حتی یک فروند از کشتی‌های تفریحی هم به دبی اعزام شده است. در سال ۲۰۰۵ حدود ۱۴ میلیون مسافر از کشتی‌های تفریحی در سراسر دنیا استفاده کرده-

1- cruise ship or cruise liner
2- freedom class

اند که ۷۰ درصد آن در آمریکای شمالی، ۱۳ درصد در اروپا و بقیه در سایر نقاط دنیا بوده‌اند. این صنعت از سودآورترین صنایع گردشگری در کل دنیا محسوب می‌شود که متأسفانه جایگاه آن در ایران بسیار خالی و ضعیف است. کشتی تایتانیک یکی از معروفترین کشتی‌های مسافربری دنیا بود که به همراه مسافران غرق شد[1]. شکل ۱-۲۷ نشان‌دهنده یک فروند هتل بارج توریستی می‌باشد که در شرکت کشتی‌سازی خلیج فارس – بندرعباس ساخته شده است.

شکل۱-۲۷: هتل بارج توریستی- کشتی‌سازی خلیج فارس

❖ کشتی‌های لایروبی

انواع مختلفی از کشتی‌های لایروبی در ذیل ذکر می‌گردد:

۱) لایروب چنگکی[2] : لایروب چنگکی شناوری است با دو یا چند بازو است که با بسته شدن بازوها، مواد داخل آن محبوس شده و بالا کشیده می‌شود و پس از باز شدن بازوها، مواد آن تخلیه می‌شود. امروزه لایروب چنگکی به عنوان یکی از مقرون به‌صرفه‌ترین و سریع‌ترین دستگاههای لایروبی است (شکل ۱-۲۸). یکی از انواع لایروبهای چنگکی نصب بازوی مکانیکی روی بارج یا کشتی است که گل و لای را به همراه آب دریا بالا کشیده و پس از عمل جداسازی آب از مواد، (طی عمل بالا کشیدن از لابلای چنگالهای آن)، در بارج‌های مخصوص تخلیه نهایی صورت می‌گیرد. سادگی مکانیزم این نوع لایروبی، هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری آن را کاهش داده است و در اکثر کشورهایی که دارای قدرت صنعتی و فنی دریایی پائینی هستند این شناور لایروب بیشتر بکار گرفته می‌شود. در صنعت دریایی بیل مکانیکی نیز یکی از انواع لایروبی چنگکی شناخته می‌شود. لایروب چنگکی در مکانهای ساحلی و بندری که در معرض امواج کمتری هستند، بکار می‌رود. اگر چنگال گنجایش یک متر مکعب را داشته باشد، در زمین ماسه‌ای کار کند و عمق کار نیز بیشتر از یک متر نباشد، لایروب در حدود ساعتی چهل متر مکعب بازدهی دارد ولی اگر بستر دریا سخت و دارای قلوه سنگ باشد بازدهی به شدت کاهش می‌یابد. عمق کارکرد این لایروب گاه به ۲۰ تا ۳۰ متر نیز می‌رسد.

شکل ۱-۲۸: لایروب چنگکی

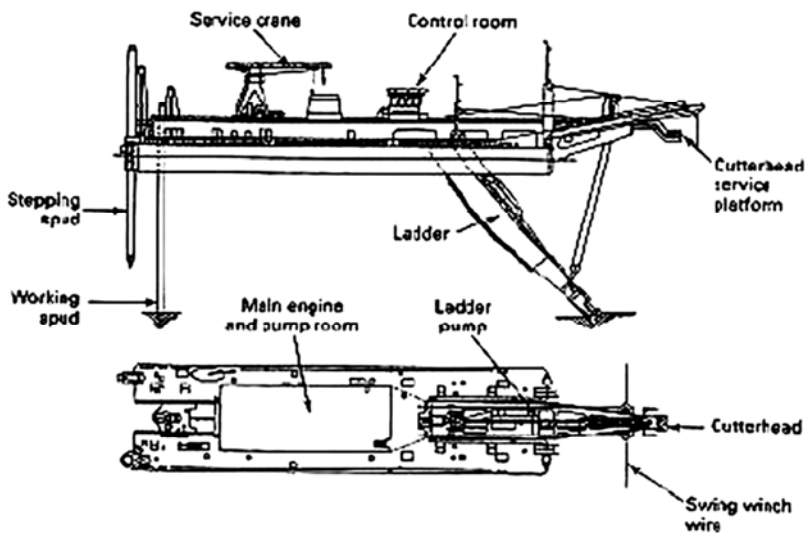
۲) لایروب سطلی[3] : این لایروب دارای سیستم رانش می‌باشد و دارای دکل بلندی است که زنجیر حاوی سطل‌های متعددی که از عقب به جلو حرکت می‌کنند روی آن قرار دارند. مکانیزم این سیستم شبیه پله‌برقی بوده و سطلها به ترتیب، عمل کندن بستر دریا و حمل گل و لای را انجام می‌دهند. تسمه حمل‌کننده سطلها از داخل شکافی در شناور پائین می‌رود و می‌توان زاویه تیر حمال را با بستر دریا تغییر داد. بدین منظور کشتی توسط چند رشته کابل یا زنجیر لنگردار در محل عملیات خود، مستقر می‌شود و سیستم مهاربندی باید ساده باشد تا در مواقع لزوم بتوان به سرعت آن را جمع‌آوری کرد. بدین ترتیب حرکت طولی و عرضی تسمه حمل‌کننده سطلها باعث لایروبی مسیر جلوی شناور می‌شود (شکل ۱-۲۹). لایروب سطلی فاقد انبار جهت ذخیره شن و ماسه می‌باشد، در نتیجه بارج‌هایی جهت تخلیه کنار شناور پهلو می‌گیرند. با نصب ضربه‌گیر در انتهای تیر حمال سطل‌ها، می‌توان عملیات لایروبی را در موج‌هایی به بلندی ۸۰ سانتیمتر نیز ادامه داد. همچنین به خاطر اجتناب از خرابی ناشی از برخورد شناور با بارج‌های تخلیه معمولاً بدنه شناور را به ضربه‌گیر مجهز می‌کنند. لایروبهای سطلی را می‌توان در هر نوع بستر دریا بکار برد با این تفاوت که در بسترهای سفت و سنگلاخی، لبه سطلها از فولاد سخت منگنزدار ساخته می‌شود. سرعت زنجیر بین ۱۲ تا ۳۲ سطل در دقیقه می‌باشد و برای کامل پر شدن سطل‌ها، بهتر است

---

۱ – کشتی مسافربری تایتانیک دارای طول ۲۶۸ متر، عرض ۲۸ متر، ارتفاع ۲۰ متر، عمق ۲۰ متر، آبخور ۱۱ متر و GRT برابر ۴۶ هزار تن با ظرفیت ۳۵۴۷ مسافر و خدمه بود این کشتی دارای ۹ عرشه، ۲ موتور ۳۰۰۰۰ اسب بخار با دور ۷۷ rpm و ۱ توربین ۱۶۰۰۰ اسب بخار با ۳ پروانه بود (پروانه میانی متصل به توربین با قطر ۵/۵ متر و پروانه‌های چپ و راست متصل به دیزل با قطر ۷/۵ متر). حداکثر سرعت آن ۲۳ گره با ۱۶ کمپارتمان آب‌بند بود. کشتی تایتانیک ۸۴۰ اتاق مسافری داشت (۴۱۶ اتاق درجه یک، ۱۶۲ اتاق درجه دو و ۲۶۲ اتاق درجه سه) و ۴۰ هزار تخم مرغ، ۴۰ تن سیب زمینی، ۱/۵ تن پیاز، ۱/۵ تن گوجه، ۸۰۰ کیلو بستنی، ۴۰۰ کیلو چای، ۱۱۰۰ کیلو قهوه، ۳۶ هزار سیب، ۳۶ هزار پرتقال، ۱۶ هزار لیمو شیرین، ۱۵۰۰ گالن شیر و مواد غذایی دیگر حمل می‌کرد. ۳ هزار فنجان چای، ۱۲ هزار بشقاب، ۷۵۰۰ پتو و ۷۵۰۰ حوله حمام و سایر امکانات از تجهیزات رفاهی کشتی تایتانیک بود.

2- grab dredger
3- ladder dredger

سرعت حرکت را متوسط نگه داشت. اگر زاویه تیر حمل‌کننده سطلها کوچکتر از ۴۵ درجه باشد چون سطلها بطور ناقص پر می‌شوند بازدهی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۲۹: لایروب سطلی

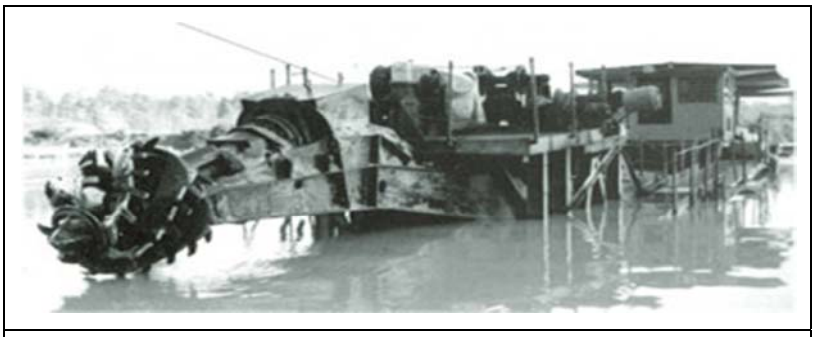
شکل ۱-۳۰: لایروب مخزنی

۳) لایروب مخزنی[1]: با طوفانهای دریایی و امواج سهمگین، لایه‌های بستر دریا جابجا شده و در مناطقی بصورت تپه‌های شن و ماسه‌ای در زیر آب در می‌آید، در نتیجه عمق آب در آن ناحیه کاهش یافته و در مسیر پر تردد کشتی‌ها علی‌الخصوص شناورهایی که دارای آبخور بیشتری هستند ایجاد مشکل می‌نماید، در نتیجه نیاز می‌باشد که با توجه به شرایط جغرافیایی و آب و هوایی منطقه، عملیات لایروبی در مسیرهای مهم به صورت هفتگی یا روزانه انجام گیرد. لایروبی بوسیله لوله مکش‌کننده قوی انجام می‌شود که گل و لای نرم را به داخل مخازن، مکش می‌کند (شکل۱-۳۰). این کشتی می‌تواند در حال حرکت، عملیات لایروبی را انجام دهد. در داخل کشتی مخزنهایی جهت تخلیه مواد وجود دارد. گل و لای، مسیر داخل لوله‌های مته مکشی را طی کرده و وارد بخش حلزونی پمپ‌خانه می‌شود و از سمت دیگر آن خارج شده و به درون مخازن داخلی شناور پمپاژ می‌شود. بالا و پائین بردن مته مکشی توسط جکهای هیدرولیکی و جرثقیل صورت می‌گیرد. مته مکشی دارای مفصل‌هایی است تا در مقابل پستی و بلندی کف دریا از خود نرمش و انعطاف‌پذیری نشان دهد. ظرفیت مخازن داخلی کشتی محدود می‌باشد در نتیجه مدت عملیات لایروبی به میزان گنجایش آنها بستگی دارد. پس از مدتی گل و لای در مخازن ته‌نشین می‌شود و آب در بالای آن جمع شده و می‌بایست آب اضافی به بیرون شناور فرستاده شود. سپس شناور به مناطق عمیق اقیانوس یا دریا رفته و تخلیه نهایی شن و ماسه با باز کردن دریچه‌های کف مخازن صورت می‌گیرد که به تدریج آبخور شناور کاهش یافته و لذا برای تأمین پایداری کشتی باید تمهیدات خاصی انجام شود، یا اینکه کشتی لایروب به سوی سواحل از پیش تعیین‌شده رفته و گل و لای را با فشار زیاد به بیرون شناور پمپاژ کند.

۴) لایروب مکشی[2]: این لایروب از اتصال چندین پانتون، مته مکشی طویل و میله‌های فرو رونده در کف دریا تشکیل شده است. در پیشانی مته، کلاهک پره‌دار یا بیلچه‌های مدور قرار داشته و این قابلیت را دارد که به آسانی در زمین‌های سخت و سنگلاخی فرو رفته و بستر دریا را آماده عملیات مکش نماید. اینگونه لایروب‌ها فاقد رانش بوده و توسط یدک‌کش به مناطق مورد نظر برده می‌شوند. جهت ثابت ماندن لایروب در جای خود و عدم انتقال توسط امواج دریا، میله‌های بلندی به نام[3] دارند که یکی از آنها در بستر دریا فرو رفته و بالاکشیدن آنها توسط جکهای هیدرولیکی صورت می‌گیرد. اگر دریا متلاطم باشد جهت مهار شناور از لنگرهای متعددی نیز استفاده می‌گردد. در قسمت جلوی پانتون اصلی، وینچ‌های نگهدارنده کابل وجود دارد که کابل‌ها با عبور از قرقره پل[4] به قسمت پیشانی و میانی مته مکشی متصل است و بالا و پائین رفتن مته توسط این کابل‌ها کنترل می‌شود. چرخش وینچ-ها و کلاهک پره‌دار مته توسط سیستم هیدرولیکی صورت می‌گیرد (شکل ۱-۳۱). همزمان با کندن بستر دریا، مکش گل و لای نیز انجام می‌شود. در قسمت داخل مته لوله‌هایی جهت انتقال مواد وجود داشته و عملیات مکش توسط پمپ قدرتمندی صورت می‌گیرد که مهم‌ترین قسمت آن بخش

1- hopper dredger
2- cutter suction dredger
3- spud
4- gantry

حلزونی می‌باشد که تحت سیستم *Suction / Discharge* معروف بوده که از یک سوی آن مکش گل و لای و از سمت دیگر، تخلیه صورت می‌گیرد. در لایروب مکشی دو نوع موتور دیزل یکی جهت تأمین قدرت پمپ‌های مکش و دیگری جهت پمپ‌های هیدرولیکی بکار گرفته می‌شود. لایروب به دو طریق، گل و لای را تخلیه می‌نماید یا اینکه از شناور به سمت ساحل، لوله‌کشی‌های طویلی نصب می‌شود و یا بارج‌هایی جهت حمل گل و لای در کنار لایروب پهلو می‌گیرند.



شکل ۱-۳۱: شناور لایروبی مکشی

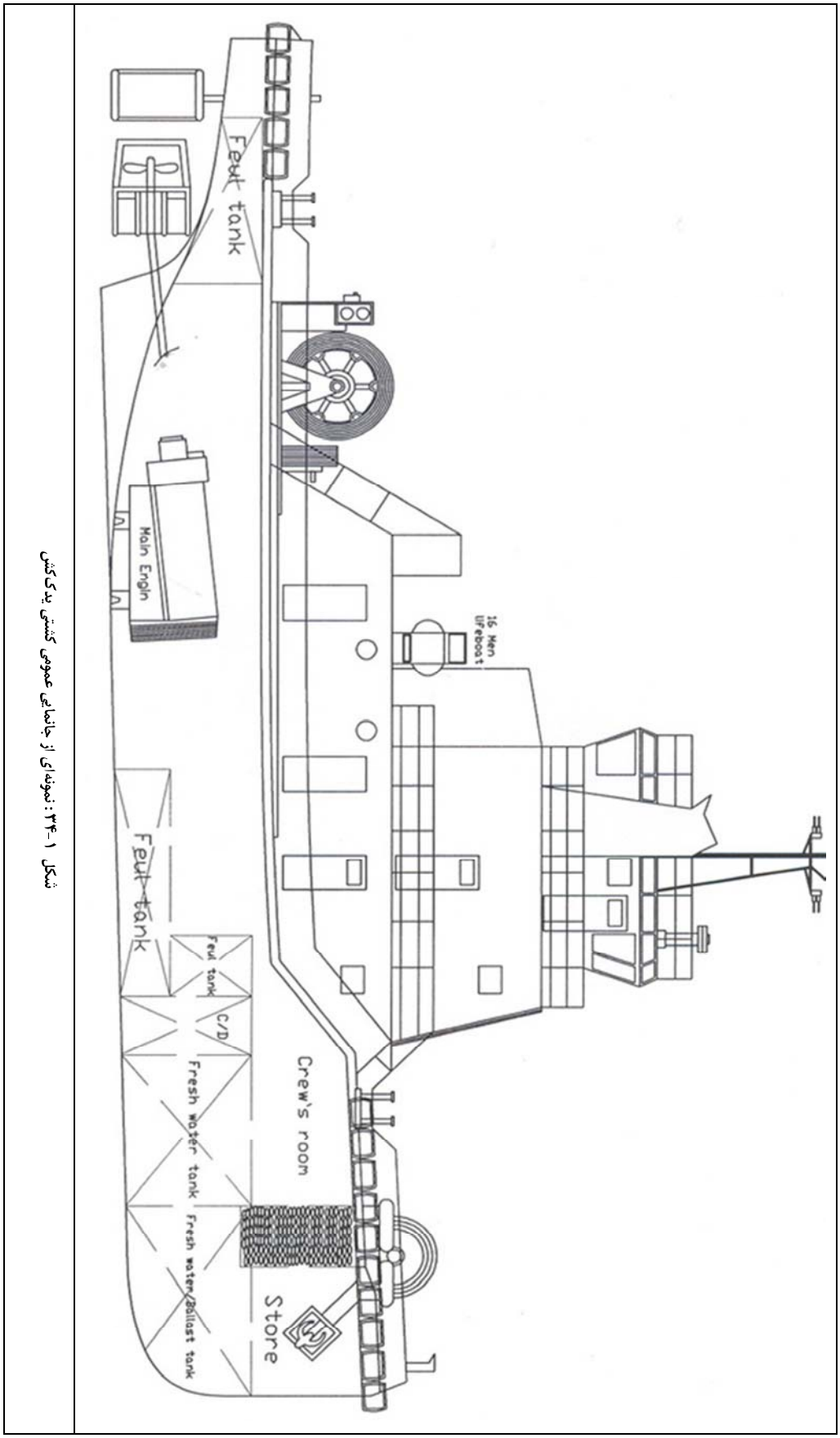
❖ یدک‌کش[1]

کشتی‌های یدک‌کش برای انجام یدک‌کشی کشتی‌های بزرگ در محدوده بندری استفاده می‌شوند. کشتی‌های بزرگ اقیانوس‌پیما قبل از نزدیک-شدن به بندر و در لنگرگاه باید سیستم رانش خود را خاموش کنند چرا که احتمال تصادم شناور با اسکله یا شناورهای دیگر بسیار است. لذا کاپیتان کشتی در لنگرگاه، اختیار کشتی را به دست کاپیتان هدایت و کشتی راهنما[2] می‌دهد و خود کشتی نیز توسط یک یا دو یا چند فروند یدک‌کش به سمت اسکله یدک می‌شود. پس از نزدیک‌شدن کشتی به اسکله، یدک‌کش‌ها با کشتی اقیانوس‌پیما پهلو به پهلو شده و آن را به اسکله می‌چسبانند (شکل ۱-۳۲). از آنجا که یدک‌کش‌ها مجبور هستند در برخی موارد کشتی‌های نفتکش غول‌پیکر که تناژ آنها صدها برابر یدک‌کش هستند را یدک نمایند لذا دارای سیستم رانش بسیار قوی و پروانه‌های خیلی بزرگ هستند و از این رو آنها را بر حسب قدرت موتور (اسب بخار) شناسایی می‌کنند. برای ایجاد قابلیت مانور خوب اکثراً دارای ۲ پروانه بوده و هر پروانه نیز دارای غلاف پروانه[3] می‌باشد چرا که سیستم غلاف پروانه برای قدرتهای بسیار بالای پروانه دارای بازدهی مطلوبی هستند. در کناره‌های بدنه، ضربه گیرهای لاستیکی[4] قرار می‌گیرند به گونه‌ای که پهلو به پهلو شدن یدک‌کش‌ها با کشتی‌های بزرگ باعث صدمه به بدنه نشود. در برخی موارد نیز از لاستیک اتومبیل در اطراف بدنه برای ضربه‌گیری استفاده می‌شود. شکل ۱-۳۴ نمونه‌ای از جانمایی یک یدک‌کش را نشان می‌دهد. اغلب یدک‌کش‌ها وظیفه هل دادن کشتی[5] را دارند تا کشیدن[6] یک شناور دیگر. یدک کش‌ها نسبت به اندازه‌شان کاملاً قوی قوی هستند. یدک کش‌های اولیه دارای موتورهای بخار بودند ولی امروزه موتورهای دیزلی استفاده می‌شود. موتورهای یدک کش بطور مثال ۳۰۰۰ – ۷۵۰ اسب بخار قدرت تولید می‌کنند اما انواع بزرگتر آن که در آب‌های عمیق استفاده می‌شوند تا ۲۵۰۰۰ اسب بخار قدرت تولید می‌نمایند و معمولاً یک نسبت توان به تناژ(*P/T*) خیلی زیادی نسبت به سایر شناورها دارند. (کشتی‌های باربری معمولی وکشتی‌های مسافربری یک نسبت (*P/T*) توان به تناژ ناخالص *kw:GRT* در حدود ۱/۲ – ۰/۳۵ دارند در حالیکه در یدک‌کش‌های بزرگ این نسبت بین ۴/۵ – ۲/۲ و برای یدک کش‌های کوچک ۹/۵ – ۴ می‌باشد). موتورها اغلب همسانند و بصورت موازی استفاده می‌شوند. امروزه انواع مختلفی از یدک‌کش‌ها در ایران طراحی و ساخته می‌شود و دانش و فناوری آن بطور کامل در کشور موجود است که نمونه‌ای از آن در شکل ۱-۳۳ نشان داده شده است.

1- tug boat
2 Pilot ship
3 - kort nozzle
4 - fender
5 - pushing
6 - towing

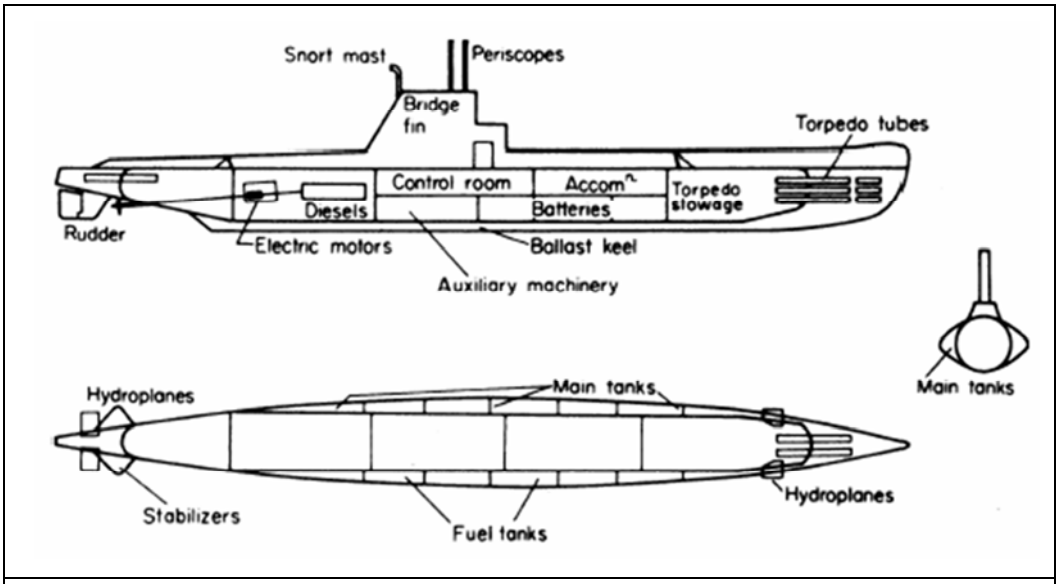
شکل ۱-۳۲: کشتی یدک‌کش

شکل ۱-۳۳: یدک کش سکوی البرز – صدرا (نکاء)



شکل ۱-۳۴: نمونه‌ای از جانمایی عمومی کشتی یدک‌کش

❖ زیردریایی[1]



شکل ۱-۳۵: نمونه‌ای از زیردریایی‌های قدیمی با شکل سینه شبیه کشتی

زیردریایی یکی از پیشرفته‌ترین تجهیزات متحرک دریایی است که از سطح آب تا اعماق دریا حرکت می‌کند و قادر به انجام عملیاتهای نظامی به صورت کاملا مخفی و ناشناس است (شکل ۱-۳۵). زیردریایی‌ها از نظر سرعت، نسبت به شناورهای سطحی دارای مزیت نیستند بلکه مزیت اصلی آنها دو عامل اصلی است:

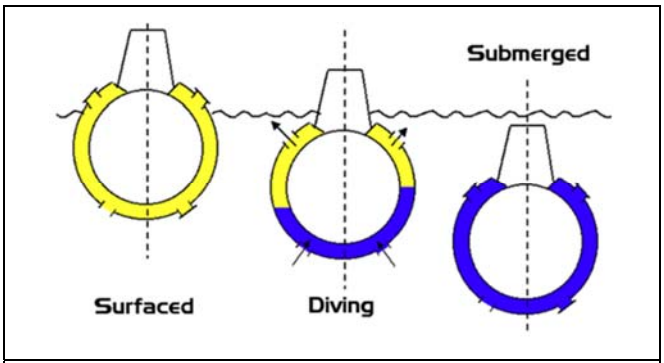
۱- حرکت در زیر آب به صورت مخفی و بدون سر و صدا

۲- غوص کردن در اعماق دریا که به عمق ۳۰۰-۵۰۰ متر می توانند برسند. در زیردریایی‌های تحقیقاتی با بدنه کروی عمق غوص به بیش از ۱۰۰۰ متر نیز می‌رسد.

بدین ترتیب زیردریای می‌تواند سرعت کم خود را که یک عیب از نظر عملیاتی محسوب می‌شود، با این دو عامل جبران کند و به صورت یک سلاح نظامی کاملا استراتژیک مطرح باشد. بنابراین می‌توان گفت یک زیردریایی پر سر و صدا یک هدف متحرک است که به دلیل نداشتن سرعت زیاد برای فرار، شانس کمی برای نجات دارد و در صورت کم سر و صدا و مخفی بودن، می‌تواند هر مانعی را منهدم کرده و از سر راه بردارد.

- **نحوه غوص و صعود زیردریایی**

غوص و صعود زیردریایی به وسیله مخازن تعادل یا بالاست انجام می‌شود. زیردریایی برای غوص کردن، مخازن تعادل خود را پر از آب کرده و به زیر آب می رود. با ورود آب به داخل مخازن، هوای داخل آن‌ها به سرعت خارج می‌شود و فواره‌ای همانند حالت غوص نهنگ اتفاق می‌افتد. برای صعود به سطح نیز عکس این عمل انجام می‌شود و زیردریایی با تخلیه کردن آب داخل مخازن تعادل، سبک شده و به سطح آب صعود می‌کند. تخلیه آب داخل مخازن به وسیله هوای فشرده انجام می‌شود (شکل ۱-۳۶).



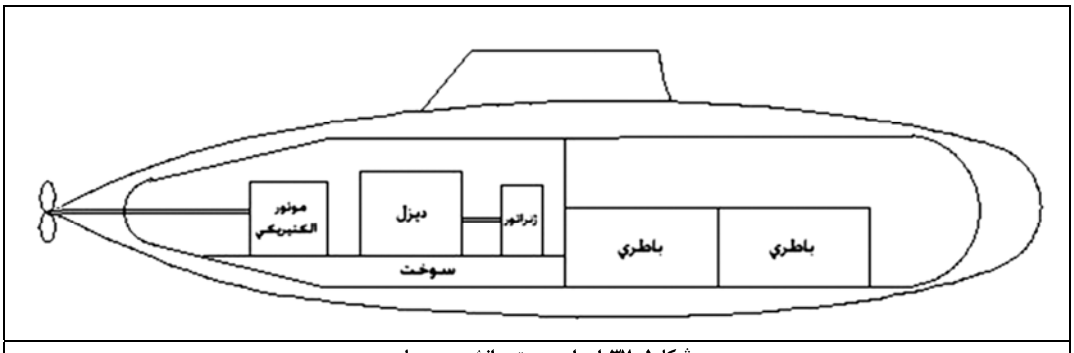
شکل ۱-۳۶: آبگیری و تخلیه مخازن شناوری(بالاست) زیردریایی

نکته مهم در اینجاست که بر خلاف تصور رایج، زیردریایی در زیر سطح آب به وسیله تغییر آب داخل مخازن، تغییر عمق نمی دهد. بلکه آب داخل مخازن در حالت تغییر عمق ثابت هستند و تغییر عمق زیردریایی معمولا به وسیله بالک ها انجام می‌شود. در واقع در زیر آب، همواره وزن و بویانسی (یا همان نیروی ارشمیدس) با هم برابر هستند و اگر وزن زیردریایی در حالت ایستایی حتی به اندازه ۱ گرم از بویانسی آن بیشتر باشد، زیردریایی آن قدر پائین می رود تا با کف دریا برخورد کند. برعکس این مسئله نیز وجود دارد یعنی اگر وزن زیردریایی در حالت ایستایی حتی ۱ گرم از بویانسی آن کمتر باشد، زیردریایی آن قدر صعود می‌کند تا به سطح آب برسد. بنابراین ملاحظه می شود که این نوع تغییرات عمق، کنترل نشده بوده و به میزان تخلیه یا آبگیری مخازن وابسته نیست.

1- submarine

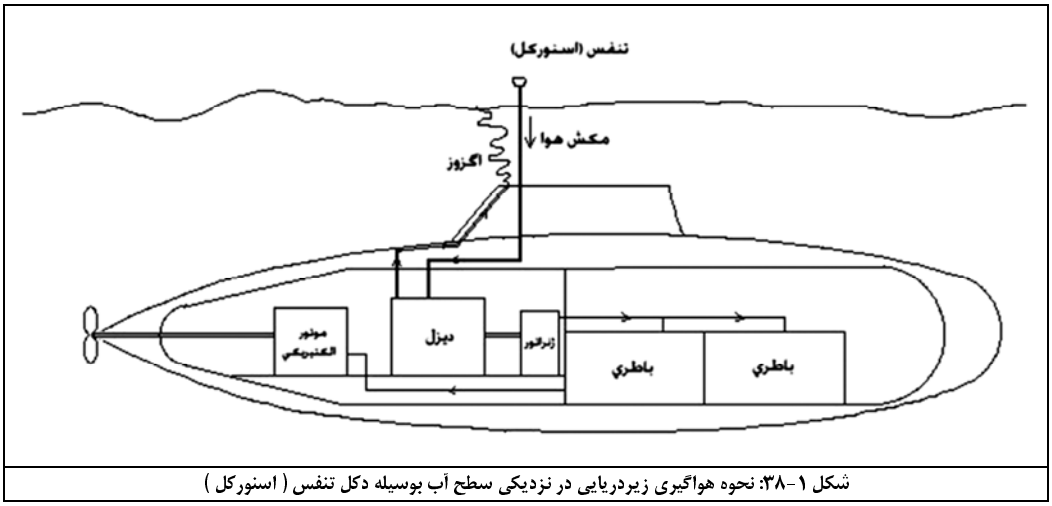
- **نحوه تأمین قدرت برای حرکت در سطح آب و زیر آب**

زیردریایی‌ها در زیر سطح آب به وسیله موتور الکتریکی و باطری حرکت می‌کنند و تا زمانی که زیردریایی در زیر سطح آب است، موتور دیزل خاموش می‌باشد چرا که اولا هوای کافی برای کارکرد دیزل وجود ندارد ثانیا تخلیه دود اگزوز در عمق آب امکان‌پذیر نیست (شکل ۱-۳۷).



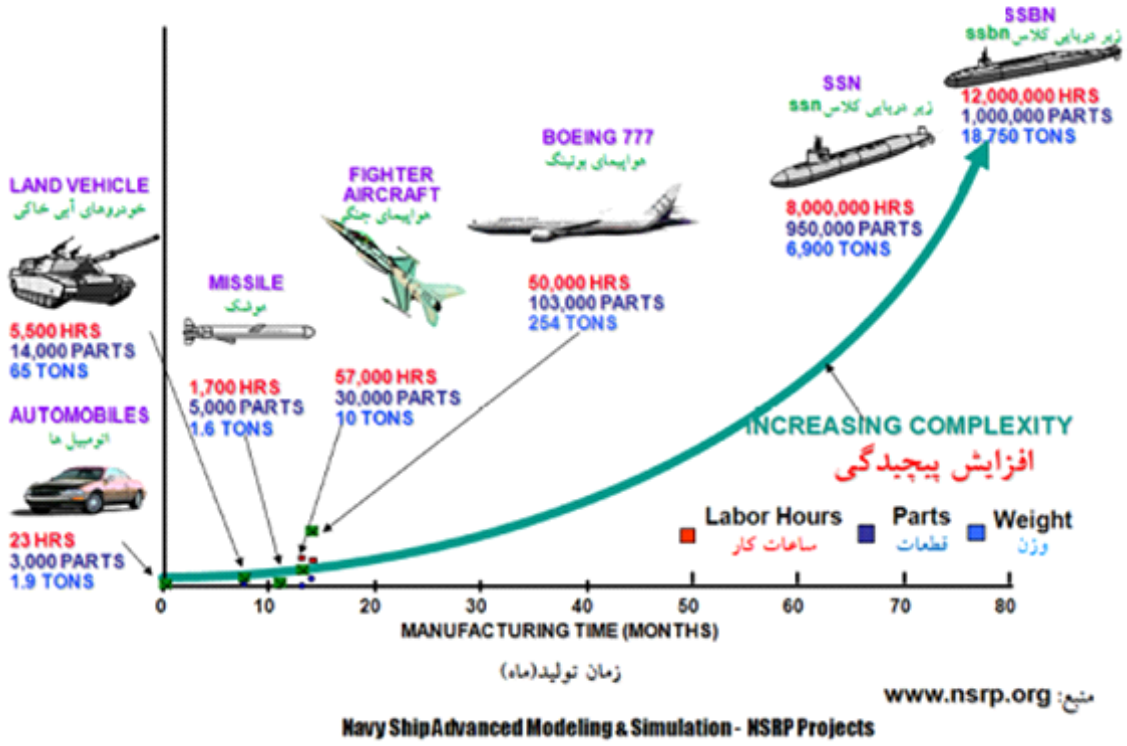
شکل۱-۳۷: اجزاء سیستم رانش زیردریایی

پس از مدتی که زیردریایی در زیر سطح آب حرکت کرد، ذخیره انرژی باطری‌ها کاهش می‌یابد. برای شارژ مجدد باطری‌ها، زیردریایی نزدیک به سطح آب می‌آید که به آن "عمق تنفس" یا "عمق اسنورکل" می‌گویند. در این شرایط ، زیردریایی دکل تنفس (یا همان دکل اسنورکل) را بالا آورده و از سطح آب خارج می‌کند. دکل تنفس کار مکش هوا برای کارکرد دیزل ها را فراهم می‌کند. بدین ترتیب زیردریایی برای شارژ باطری ها نیازی ندارد که به طور کامل به سطح آب بیاید (شکل ۱-۳۸).



شکل ۱-۳۸: نحوه هواگیری زیردریایی در نزدیکی سطح آب بوسیله دکل تنفس (اسنورکل)

دود اگزوز دیزل نیز در زیر سطح آب و در داخل آب تخلیه می‌شود. این عمل باعث می شود که دود دیزل قبل از رسیدن به سطح آب، تا حدودی در داخل آب حل شود و احتمال ردیابی زیردریایی را به دو دلیل کاهش دهد: یکی به علت کاهش دود سفید اگزوز که از فواصل دور قابل شناسایی است و دیگری کاهش دمای دود اگزوز. این دمای زیاد اگزوز به وسیله دوربین‌های مادون قرمز قابل ردیابی است. سوخت مورد نیاز دیزل معمولا توسط مخازن بزرگی در زیر عرشه موتورخانه یا بین دو بدنه سخت و نرم ذخیره شده است. کارکرد دیزل باعث دوران محور ژنراتور می شود. ژنراتور نیز جریان الکتریکی مناسب برای شارژ باطری‌ها را فراهم می‌کند و باطری‌ها پس از یک مدت معین شارژ می‌شوند. زمان شارژ باطری‌ها در عمق تنفس در حدود ۸ – ۴ ساعت می‌باشد که البته وابسته به قدرت ژنراتور و ظرفیت شارژ باطری‌ها برای هر زیردریایی، متفاوت است. بخشی از برق تولید شده توسط ژنراتور نیز به مصارف داخلی زیردریایی می‌رسد. در نوع سیستم رانش نشان داده شده در شکل ۱-۳۷ و ۱-۳۸، دیزل به شافت متصل نیست. ولی طرح دیگری از سیستم رانش وجود دارد که در آن دیزل، هم محور و متصل به شافت پروانه می‌باشد. در این آرایش، وقتی زیردریایی در عمق تنفس قرار می‌گیرد و دیزل شروع به کار می‌کند، دو عمل اصلی را انجام می‌دهد: اول به حرکت در آوردن ژنراتور و تولید برق برای شارژ باطری‌ها و مصارف داخلی و دوم چرخاندن شافت و به حرکت در آوردن پروانه. در واقع، در این آرایش، دیزل به طور مستقیم، باعث به حرکت در آمدن زیردریایی می‌شود و در واقع موتور الکتریکی خاموش است. پس از مدتی که باطری‌ها شارژ شدند، موتور دیزل خاموش و موتور الکتریکی روشن شده و زیردریایی آماده رفتن به زیر آب می شود. زیردریایی یکی از پیچیده‌ترین وسایل نقلیه ساخته بشر است که در شکل زیر گوشه‌ای از پیچیدگی‌های آن ارائه شده است. (شکل ۱-۳۹) ایران به کمک محققین خود، انواع مختلفی از زیردریایی‌های نظامی را طراحی کرده و ساخته است که از آن جمله، زیردریایی السابحات (مطابق شکل۱-۴۰) می‌باشد.



	M-1 Battle Tank تانک جنگی	Boeing 777 Airliner هواپیمای بوئینگ	VIRGINIA Class Nuclear Attack Submarine زیردریایی کلاس ویرجینیا
Weight (T) وزن	65	250	7800
Length (Ft.) طول	25	200	377
Number Systems تعداد سیستم ها	25	40	200
Crew Size تعداد پرسنل	4	10 (2 pilots)	113
Patrol Duration (Hr.)	24	8-14	2,000
Number of Parts to Assemble تعداد قطعات برای مونتاژ	14,000	100,000	1,000,000
Assembly Man-hours/Unit مونتاژ (نفر ساعت / واحد)	5,500	50,000	>10,000,000
Production Time (Mo.) زمان تولید (ماه)	7.5	14	55
Production Rate (Units/Yr.) نرخ تولید (واحد/سال)	600	72	0.5-3

شکل ۱-۳۹: مقایسه سطح فناوری زیردریایی در مقایسه با سایر محصولات نظامی

شکل ۱-۴۰: زیردریایی نظامی السابحات- طراحی و ساخت وزارت دفاع ج.ا.ایران

❖ لندینگ کرافت[1]

لندینگ کرافت نوعی شناور با آبخور کم است که خود را به نزدیکی ساحل رسانده و در واقع خود را به گل می‌زند و لفظ «لندینگ» هم به همین منظور استفاده می‌شود. در قسمت جلوی شناور یک درب لولایی بزرگ وجود دارد که با باز شدن آن، یک سطح شیب‌دار برای جابجا کردن بار و وسایل نقلیه به داخل شناور فراهم می‌شود. لندینگ کرافتها معمولاً تک‌عرشه‌ای هستند. در زیر عرشه نیز مخازن متعددی قرار می‌گیرند. لندینگ کرافتها بارهای متنوعی حمل می‌کنند از قبیل بار فله، اتومبیل، کانتینر وغیره. نمای کلی لندینگ کرافتها در شکلهای ۱-۴۱ و ۱-۴۲ ملاحظه می‌شود.

شکل ۱-۴۱: کشتی لندینگ کرافت

شکل ۱-۴۲: ساخت انواع بارج و لندینگ کرافت در کارخانجات ایران

❖ قایق نجات[2]

قایق نجات مطابق شکل ۱-۴۳ شبیه به یک ظرف دوکی شکل درب بسته است که مواد بدنه آن از جنس ضدحریق است. این قایق‌ها بر روی کشتی‌ها نصب می‌شوند و در صورت بروز حریق یا خطرات دیگر، بوسیله یک سطح شیب‌دار آب‌اندازی می‌شوند. این قایق دارای پایداری استاتیکی بسیار مناسبی است بطوریکه پس از رها شدن از روی بدنه، بدون واژگون شدن، بر روی آب شناور می‌ماند.

شکل ۱-۴۳: قایق نجات

1 - *Landing Craft*
2 - *Life Boat*

❖ قایق نجات باد شونده[1]

این قایق‌ها که امکان باد شدن دارند، در داخل محفظه‌های استوانه‌ای متعدد بر روی عرشه کشتی نگهداری می‌شوند. در شرایط اضطراری این استوانه‌ها به داخل آب انداخته می‌شوند و سپس بطور خودکار باد می‌شوند. این قایق‌ها را (*HRU*)[2] نیز می‌گویند چرا که محفظه استوانه‌ای پس از تماس با آب به صورت هیدرواستاتیکی و خودکار باز شده و قایق داخل آن باد می‌شود (شکل۱-۴۴). این قایق‌ها دارای سیستم رانش نیستند.

شکل ۱-۴۴: قایق نجات باد شونده

❖ کشتی یخ شکن[3]

این کشتی‌ها مطابق شکل ۱-۴۵، دارای بدنه‌ای هستند که می‌تواند لایه‌های نازک یخ را خرد کرده و از کنار بدنه عبور دهد. این شناورها، برای مناطق سردسیری که سطح دریا یا رودخانه در آنها اغلب یخ زده است، استفاده می‌شود. شکل سینه این کشتی‌ها با توجه به ضخامت یخ که باید شکسته شود، متفاوت است. کشتی‌های یخ شکن دارای تجهیزات گرمایشی ویژه‌ای نیز هستند.

شکل ۱-۴۵: کشتی یخ شکن

❖ کشتی آتشخوار

این کشتی برای اطفاء حریق در محیط دریا شامل آتش‌سوزی کشتی‌ها و سکوها بکار می‌رود. این شناور دارای پمپ‌های متعدد و بسیار قوی می‌باشد به گونه‌ای که می‌تواند آب دریا را مکش کرده و تا ارتفاع زیادی پرتاب کند (شکل ۱-۴۶). این کشتی جزء شناورهای خدماتی بندری می‌باشد.

شکل ۱-۴۶: کشتی آتشخوار

❖ کشتی صیادی

انواع شناورهای صیادی در زیر ارائه شده است و در ادامه به بررسی آنها خواهیم پرداخت:

۱- شناورهای *Troll*

۲- شناورهای *Gilnetter*

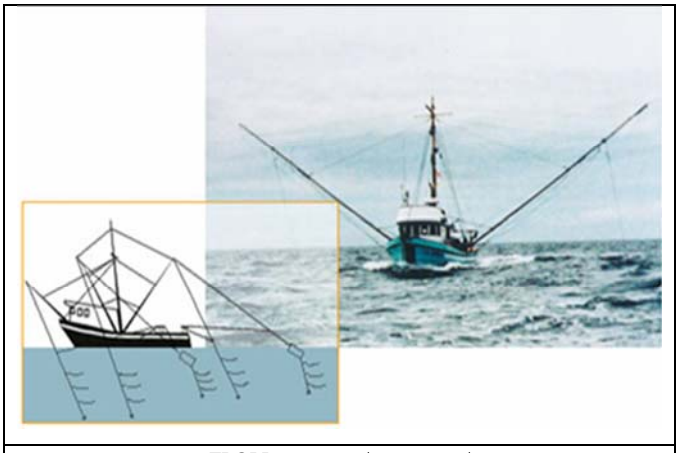
۳- شناورهای *Purse seiner*

۴- شناورهای *Trawler*

---

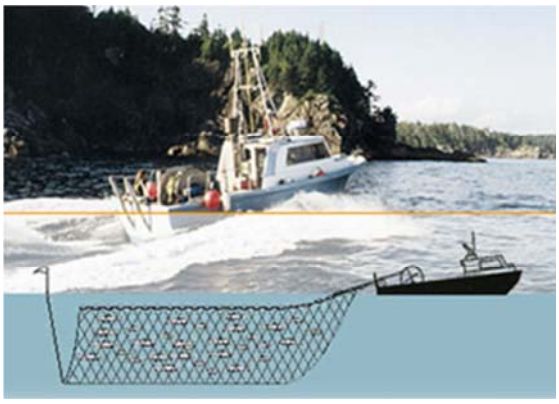
1 - Life Raft
2 - Hydrostatic Released Unit
3 - Ice Breaker

- **شناورهای** *Troll* **:** شناورهای *troll* نوعی کشتی ماهیگیری هستند که برای گرفتن ماهی‌های آزاد بزرگ سطحی استفاده می‌شود. در این شیوه از روش طعمه‌گذاری از طریق تعداد زیادی قلاب که توسط یک رشته طناب طویل بهم متصل هستند، همراه با حرکت شناور استفاده می‌شود. این شناورها به وسیله دکل بلند خود قابل تشخیص هستند (شکل ۱-۴۷).



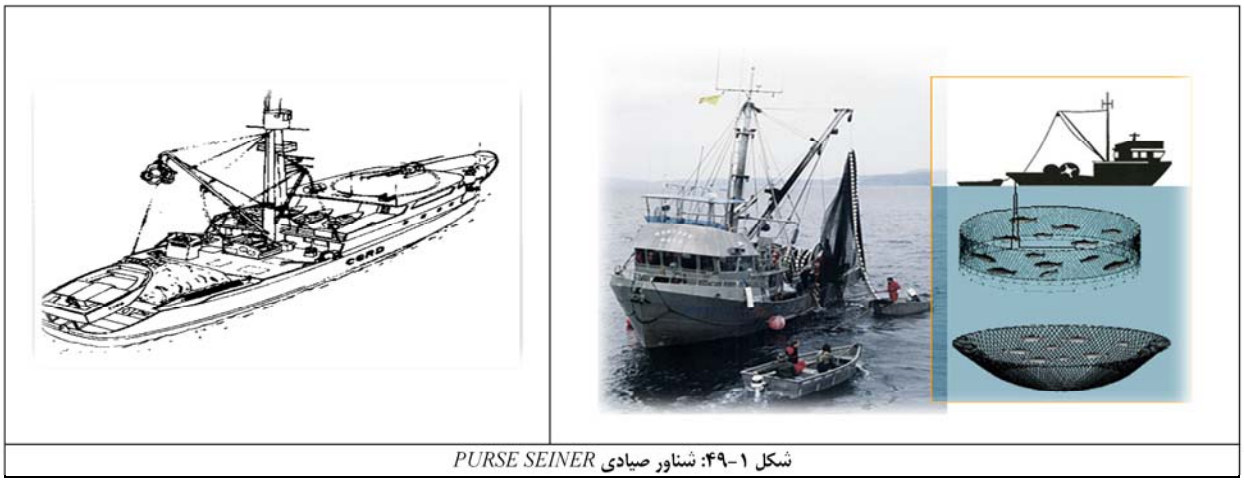
شکل ۱-۴۷ : شناور صیادی *TROLL*

- **شناورهای** *Gilnetter* **:** شناورهای gillnetter برای صید ماهی آزاد به کار گرفته می‌شوند و دارای تورهایی بزرگ هستند. طول این شناورها بین ۹ تا ۱۲ متر است و به راحتی توسط غلطک هیدرولیکی که تور دور آن پیچیده شده قابل تشخیص است (شکل ۱-۴۸). این غلطک‌ها می‌توانند در جلو یا پشت شناور نصب شود.



شکل ۱-۴۸ : شناور *GILNETTER*

- **شناورهای** *Purse seiner* **:** شناورهای *purse seiner* برای گرفتن ماهی تون،ماهی آزاد، ماهی روغنی و شاه ماهی به کار گرفته می‌شوند. شیوه صید پرساین یا صید محاصره ای برای صید انواع ماهیان صنعتی و تون در آبهای عمیق و دور از ساحل طراحی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شیوه شناور با استفاده از تجهیزات مدرن و پیشرفته الکترونیکی و ماهواره‌ای به شناسایی، تعقیب، محاصره و نهایتاً صید گله های بزرگ ماهیان تون می‌پردازد. ماهیان صید شده در شرایط خاصی در شناور نگهداری و در انتها با انتقال به سواحل به صنایع کنسروسازی تحویل می‌گردند . پرساینرهای بزرگ اغلب چند هفته در دریا حضور دارند و دارای مکانی برای نشستن و برخاستن هلیکوپتر در روی عرشه هستند. این کشتی‌ها میتوانند به وسیله بازوی متحرک بزرگ و تور انباشته در پشت شناور شناسایی شوند (شکل ۱-۴۹).



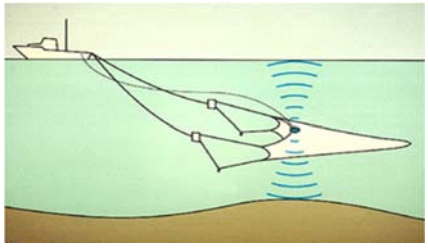
شکل ۱-۴۹: شناور صیادی *PURSE SEINER*

- **روش صید ترال و شناورهای ترالر**[1]**:** بدلیل روش خاص صید این شناورها که استفاده از تور ترال می باشد به ترالر شهرت دارند. در این روش توری که به شکل کیسه می‌باشد همراه با دو تخته ترال که از جنس فولاد یا چوب می‌باشد، به دنبال شناور کشیده می‌شود (شکل ۱-۵۰). صید ترال به سه روش انجام می‌شود: ترال کف (تور و تخته در بستر دریا می نشیند)، ترال میان آبی (تور و تخته در میان آب و در لایه عمقی مورد نظر قرار می‌گیرد) و ترال سطحی (تور و تخته در عمق چند متری از سطح آب قرار می‌گیرد). امروزه در کشورهای پیشرفته ، از ترال کف استفاده نمی‌شود که دلیل آن تخریب بستر دریا بوسیله ادوات صیادی می‌باشد و زیستگاه بسیاری از آبزیان که وابسته به بستر می‌باشند، در این روش صید از بین می‌رود.

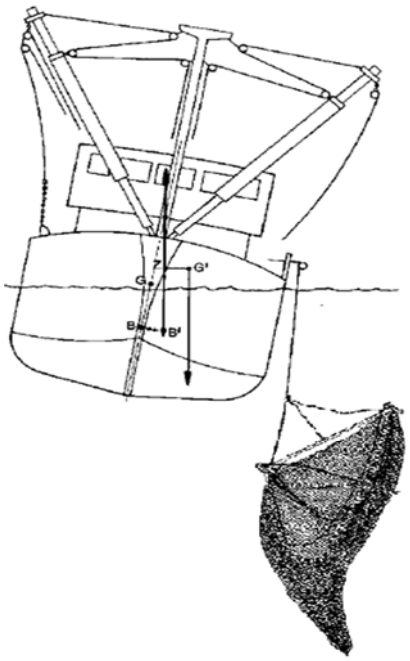
1- *trawler*

بیشترین بهره‌برداری از آبزیان در دنیا با استفاده از روش ترال میان آبی و سطحی صورت می‌گیرد. شناورهای کلاس فردوس ایران قابلیت ترال کشی در هر سه روش فوق را دارا می‌باشند. انواع کشتی‌های صیادی ترالر را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- **کشتی صیادی ترالر از پهلو:** این نوع از شناورها تا حدود سال ۱۹۵۰ در اقیانوس اطلس برای صید ماهی از پهلو استفاده میشدند.اما صید از پهلو مشکلات زیادی ایجاد می‌کرد. از جمله عدم استفاده مناسب از فضای عرشه صید و مشکلات پایداری عرضی که به هنگام بالا کشیدن دام ایجاد می‌شد. (شکل ۱-۵۱).



شکل ۱-۵۰ : روش صید ترال



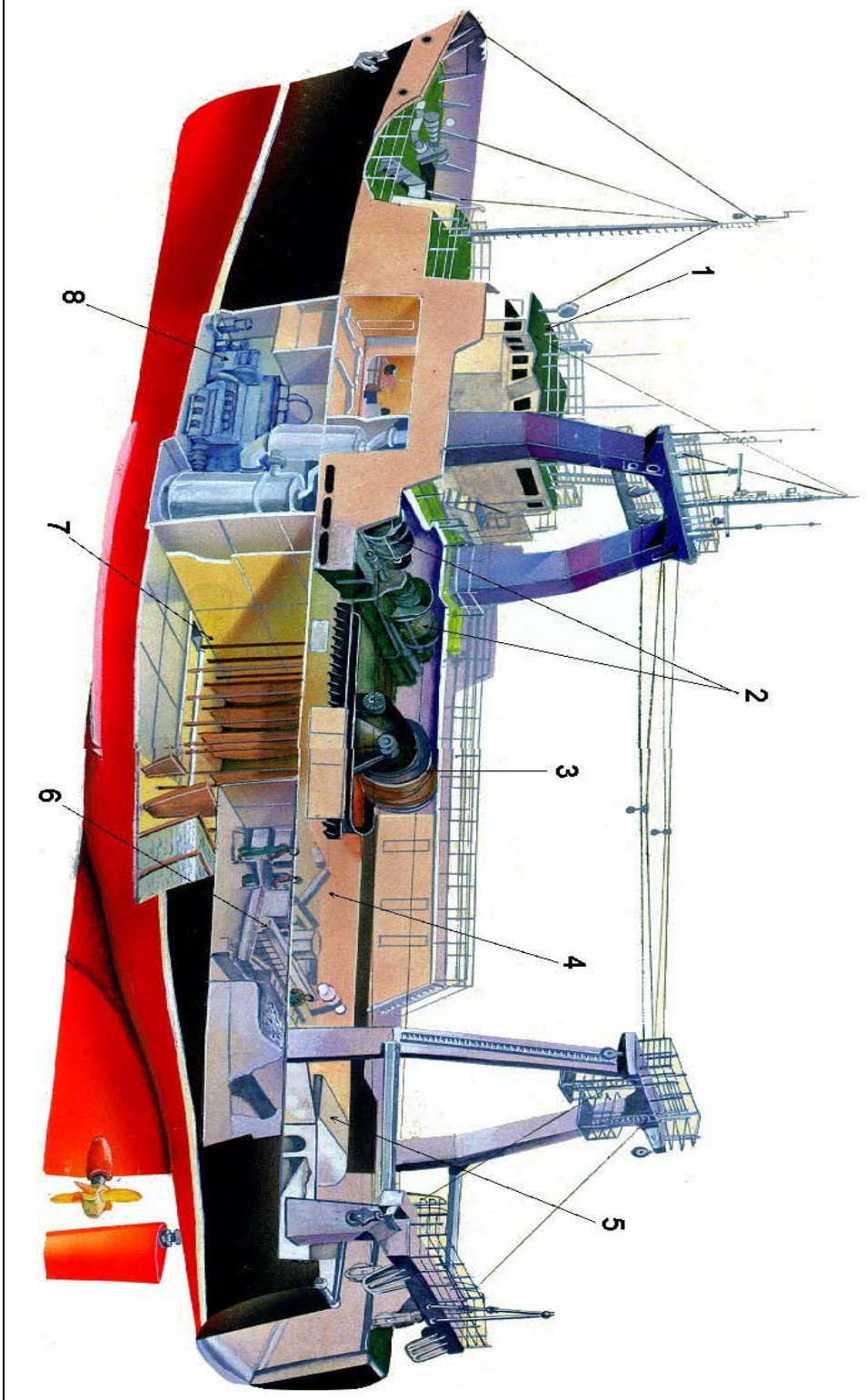
شکل ۱-۵۱: کشتی صیادی ترالر از پهلو

- **کشتی صیادی ترالر از پاشنه :** از سال ۱۹۵۰ این نوع از شناورها برای ماهی‌گیری و انجام عملیات صید از پاشنه مورد استفاده قرار گرفتند. این نوع از شناورها دارای یک شکاف شیب دار در پاشنه خود می‌باشند که تور از روی این سطح شیب دار از دریا بالا کشیده می‌شود. از نظر فنی ترالر از پاشنه بسیار آسان تر از ترالر از پهلو است. علاوه بر اینکه از فضای روی عرشه صید مطلوب‌تر می‌توان استفاده کرد، بیشتر فعالیت‌ها را می‌توان ماشینی و سریعتر انجام داد، ضمن اینکه پایداری شناور بیشتر شده و امکان انجام عملیات صید در آب و هوای نامناسب نیز امکان دارد (شکل ۱-۵۲).

- **شناورهای صیادی کارخانه‌ای:** این مدل از شناورها یک کشتی بزرگ صید ترالر از پاشنه است که دارای امکانات اضافی برای فرایند فریز کردن ماهی است و این امکان را به آن می‌دهد که برای مدت زیادی در آب بماند و تناژ آنها به بالای ۳۰۰ تن می‌رسد. در شکل ۱-۵۲ نمای کلی و قسمت های مختلف این نوع کشتی‌ها آورده شده است.

۱- پل فرماندهی کشتی
۲- ترال وینچ ها
۳- وینچ تور
۴- عرشه صید
۵- دریچه تخلیه دام در تانک ماهی
۶- سالن عمل آوری
۷- واحد های فریز کردن و نگهداری ماهی در سرما
۸- موتور خانه کشتی

در این شناورها پس از تخلیه ماهی در مخزن مخصوص، محتویات تور از تسمه نقاله‌ها به میز جداسازی رسیده و بعد از جدا شدن ماهیان درشت مورد نظر، باقی صید از طریق دریچه ای به دریا برگردانده می‌شود. بعد از جداسازی، ماهیان شسته شده و سایزبندی می‌شوند. سپس در سینی‌های مخصوص قرار گرفته و در جک استون چیده می‌شوند. این دستگاه در مدت ۳ ساعت دمای ماهیان را به ۱۵ـ درجه می‌رساند. ظرفیت هر سینی ۱۲ تا ۱۴ کیلوگرم می‌باشد. برخی از ماهیان که بزرگ بوده و در سینی جا نمی‌گیرند در تونل انجماد گذاشته می‌شوند. تونلهای انجماد حدود ۶ تن گنجایش دارند. بعد از انجماد کامل آبزیان، سینی‌ها تخلیه شده و محتوای هر دو سینی در یک کارتن قرار گرفته و بعد از نوشتن مشخصات ماهیان و اندازه آنها، برای نگهداری به انبار ذخیره ماهی منتقل می‌شوند. در انبار ذخیره ماهی که گنجایش ۱۰۰ تا ۱۲۰ تن ماهی را دارد ، آبزیان صید شده در دمای ۲۷- درجه نگهداری می‌شوند.



شکل ۱-۵۲: قسمتهای مختلف کشتی ترال از پاشنه

❖ شناورهای تفریحی بدنه شفاف

شناورهای نیمه مغروق از جمله شناورهای توریستی و تفریحی می‌باشند که بیشتر در جزایر و مناطق گرمسیری، نواحی که نوردهی و شفافیت دریا زیاد می‌باشد برای تماشای طبیعت داخل آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود شناورهای نیمه مغروق در جزایر ایران، می تواند نقش بسزایی در جذب توریست و گردشگر داشته باشد با این وجود تنها دو فروند از این شناورها با نام آکواریم دریایی درکشور وجود دارد، که توسط شرکت کشتی‌سازی بحرآمن طراحی و ساخته شده‌اند و یکی از جاذبه های گردشگری جزیره کیش می‌باشند. تقسیم‌بندی این نوع شناورها بر اساس هدف طراحی؛ که همان دیدن طبیعت زیر آب است در سه کلاس صورت می‌گیرد:

- **قایق های کف‌شیشه‌ای :** این نوع از قایق‌ها ویژه مناطق بسیار کم‌عمق طراحی و ساخته می‌شوند و حداکثر آبخور در این قایق‌ها کمتر از ۴۰ سانتی‌متر است و بیشتر در نواحی ساحلی، مرداب‌ها و رودخانه‌های آرام بکار می‌روند (شکل ۱-۵۳). همانطور که از نام این قایق‌ها مشخص است، پنجره‌ها در کف آنها قرار دارند. وجود پنجره‌ها در کف ایمنی آنها را به خطر انداخته چرا که با کوچکترین برخورد کف با موانع و صخره‌ها دچار آسیب‌دیدگی شده و خواهند شکست لذا جهت جلوگیری از خطر احتمالی و غرق شدن قایق سرتاسر پنجره‌ها را در کف قایق به اندازه ۸۰ – ۷۰ سانتی‌متر عمق می‌دهند تا در صورت آسیب دیدگی احتمالی، آب بیشتر از ارتفاع آبخور بالا نیاید و از غرق شدن قایق جلوگیری شود. از این نکته (بالا آمدن آب تا ارتفاع آبخور) در نمونه‌های بزرگتر برای از بین بردن حباب‌های ایجاد شده در زیر پنجره‌ها استفاده می‌شود که به آنها اصطلاحا حباب‌گیر می‌گویند. البته به این نکته باید اشاره کرد که پیشرفت تکنولوژی در ساخت انواع پنجره‌های شیشه‌ای و پلاستیکی در طراحی این نوع از قایق‌های تفریحی تحول زیادی ایجاد کرده است بگونه‌ای که تفاوت طراحی در مدل‌های اولیه و امروزی بسیار زیاد می‌باشد و منجر به طراحی و ساخت قایق-هایی با بدنه کاملا شفاف و پلاستیکی شده است. از دیگر روشهای مرسوم برای از بین بردن حبابهای حبس شده در زیر پنجره‌ها، استفاده از پنجره‌های **V** شکل است. زاویه مناسب در این نوع پنجره، مانع از باقی ماندن حباب‌ها در زیر آنها می‌شود. از مشکلات موجود در این قایق‌ها، چسبیدن جلبک به پنجره‌ها است که باعث کاهش میزان دید داخل آب می‌شود و باید مرتبا آنها را پاک نمود؛ این امر باعث می‌شود سطح پنجره‌ها مخدوش شود و از دید مناسبی برخوردار نباشند و نیاز به تعویض داشته باشند. لذا توصیه می‌شود در طراحی؛ قابلیت تعویض شدن، برای پنجره‌ها در نظرگرفته شود. با توجه به توضیحات داده شده، ساخت بدنه‌ای تماما شفاف از جنس پلاستیک و اکریلیک مناسب نیست چرا که تعویض تمام بدنه، کاری غیر اقتصادی است.

شکل۱-۵۳: قایق‌های کف شیشه‌ای

- **زیردریایی‌های بدنه شیشه‌ای:** عمق غوص در این نوع از زیردریایی‌های تفریحی کم می‌باشد؛ البته پیشرفت تکنولوژی بر طراحی و ساخت آنها تأثیر بسزایی گذاشته است به گونه ایی که قابلیت افزایش عمق و ابعاد پنجره‌ها در آنها افزایش یافته و بدنه‌ای تماماً شیشه‌ای بوجود آمده، تا از میدان دید بسیار عالی در داخل آب برخوردار باشند (شکل ۱-۵۴). این شناورها عموماً مجهز به سیستم روشنایی در داخل و خارج از بدنه بوده تا امکان دید در شب و نواحی تاریک آب وجود داشته باشد علاوه بر این؛ سیستم روشنایی در شب باعث جذب موجودات دریایی به سمت نور شده که بر جذابیت‌های این شناور تفریحی افزوده و باعث شده مورد استقبال زیاد گردشگران قرار بگیرد. مدت دریا نوردی آنها کوتاه است؛ از سرعت پایینی برخوردارند و بیشترین حوزه کاربری آنها در محدوده ساحل است و از تمهیدات ایمنی فوق العاده‌ای برخوردار هستند. این شناور دارای کیل رها شونده در قسمت تحتانی بوده تا درمواقع آسیب دیدگی احتمالی، با رها شدن آنها سریعاً به سطح آب آمده و امکان نجات مسافرین وجود داشته باشد.

▪ **شناورهای نیمه مغروق:** این شناور تفریحی از لحاظ تمهیدات ایمنی، امکانات رفاهی و بعضاً حتی از نظر شکل ظاهری شبیه زیر دریایی‌های تفریحی هستند و تنها تفاوت آنها با زیردریایی‌ها در این است که برخلاف یک زیردریایی که تمام بدنه آن به داخل آب نفوذ می‌کند، بخشی از بدنه آن در سطح آب باقی می‌ماند و امکان استفاده از این فضا برای مسافرین وجود دارد. در این قایق‌ها علاوه بر روشنایی معمول سالن و سایر اماکن، برای سفرهای شبانه چراغهای رنگی با رنگهای متناسب و شاد و با نورافشانی کافی جهت مشاهده هرچه بهتر دیدنی‌های زیر سطح دریا در نظر گرفته می‌شود. برای جمع شدن ماهی‌ها در اطراف قایق یک سری تفنگ شبیه تفنگ غواصی در شناور تعبیه شده که به وسیله آن غذای ماهی توسط مسافرین به بیرون پرتاب می‌شود. در حین گردش مسافرین در دریا، در محوطه سالن با استفاده از سیستم ویدئویی مدار بسته، به طور زنده تصاویری از اطراف قایق و صحنه‌های زیبای آن به همراه موسیقی های جذاب و متناسب پخش می‌گردد. مسافرین در طول گردش بر روی صندلی در داخل سالن می‌نشینند و از طریق پنجره‌هایی با ابعاد مناسب به تماشای مناظر زیر آب می‌پردازند ابعاد و فواصل و موقعیت صندلی‌ها با رعایت حداکثر شرایط آسایش ممکن در نظر گرفته می‌شود. تعدادی صندلی با میز جهت استفاده از فضای باز عرشه در آنها تعبیه شده است و برای به حداقل رساندن هرگونه آسیب‌دیدگی، از میله‌های محافظ در بین پنجره‌ها استفاده می‌شود. پنجره‌ها دو جداره هستند با توجه به این تمهیدات می‌توان قایق را از نظر ایمنی با درجه بسیار عالی در نظر گرفت. فلسفه وجود مخازن تعادل در این شناورها، در درجه اول افزایش آبخور است که باید در کل طول شناور توزیع گردد. ایران مدل‌های مختلفی از این شناورها را ساخته و در مناطق توریستی بکار گرفته است (شکل ۱-۵۵).

شکل ۱-۵۴: زیردریایی های تفریحی

شکل ۱-۵۵: شناور نیمه غوطه‌ور ساخت ایران-جزیره کیش

❖ حوضچه تعمیرات و ساخت کشتی[1]

حوضچه تعمیرات که اصطلاحاً «داک» نیز گفته می‌شود به دو نوع کلی وجود دارد:

- حوضچه تعمیرات خشک[2]
- حوضچه تعمیرات شناور[3]

حوضچه تعمیرات خشک: شامل گود برداری قسمتی از زمین است که کف و دیواره‌های آن بتون ریزی شده است و یک طرف آن به دریا ختم می‌شود. در محل ارتباط حوضچه با دریا، یک درب بزرگ وجود دارد. ابتدا درب حوضچه خشک باز می‌شود و سطح آب حوضچه با آب دریا یکسان می‌شود و شناور وارد حوضچه می‌شود. پس از نشستن و استقرار شناور روی بلوک‌های خاص داخل حوضچه، توسط پمپ‌های بزرگ و قوی، آب داخل حوضچه تخلیه می‌گردد و شناور به طور کامل روی بلوک‌ها می‌نشیند (شکل ۱-۵۶). در این شرایط، شناور در محیط خشک قرار گرفته و آماده تعمیرات می‌شود. حوضچه تعمیرات شناور: این حوضچه دارای مخازن متعددی است که به کمک آنها به صورت شناور، بالا و پائین می‌رود. با پر شدن مخازن، حوضچه سنگین‌تر شده و آبخور آن افزایش می‌یابد به حدی که شناور بتواند وارد آن شود. پس از اینکه شناور وارد شد و در محل معین بر روی بلوکها قرار گرفت، اندک اندک مخازن حوضچه بوسیله پمپ تخلیه می‌گردد تا شناور به طور کامل روی بلوکها می‌نشیند. پس می‌توان در محیط خشک به تعمیرات شناور پرداخت (شکل ۱-۵۷).

1- Dock
2 - Dry dock
3 - Floating dock

شکل ۱-۵۶: حوضچه تعمیرات خشک

شکل ۱-۵۷: حوضچه تعمیرات شناور دلفین - بندرعباس

ایران بزرگترین کشتی‌سازی غرب آسیا ...

نام شناور: حوضچه شناور تعمیر و ساخت کشتی[۱]

شرکت سازنده: گروه دریایی ساصد

طول: ۱۳۰ متر

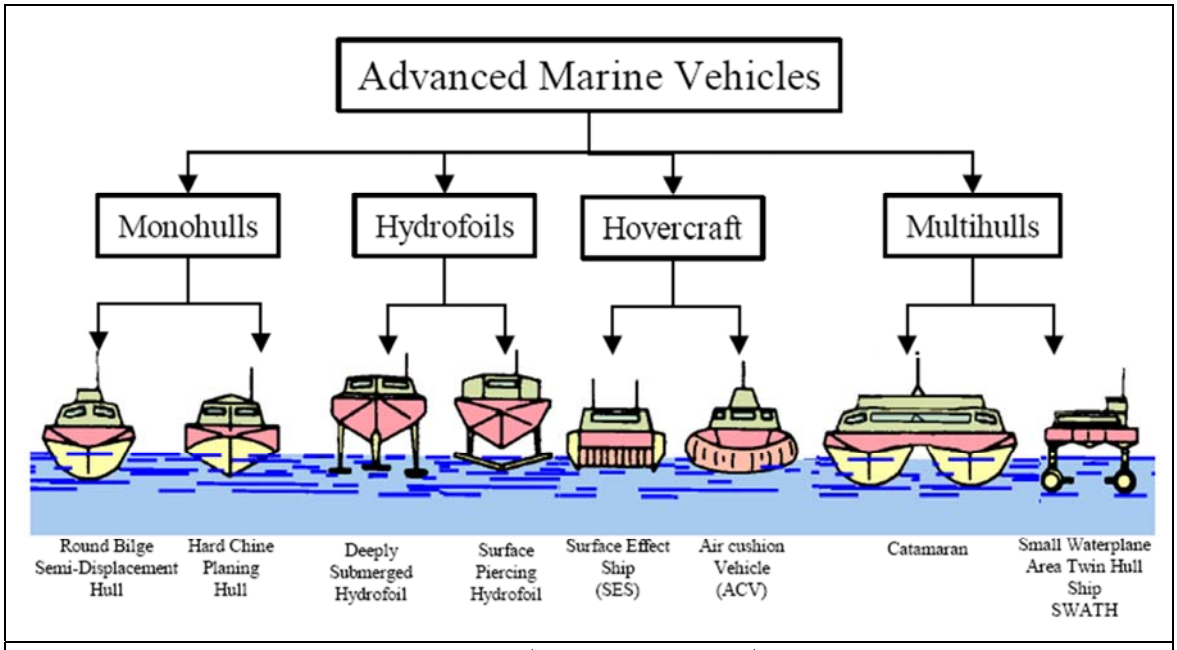
عرض: ۲۸ متر

ارتفاع: ۱۵ متر

این گروه با کسب دانش فنی ساخت این حوضچه‌ها، تاکنون چندین فروند از آنها را ساخته است. ایران جزء معدود کشورهای سازنده این حوضچه‌ها می‌باشد.

❖ کشتی‌های مدرن و خاص

افزایش پایداری و بهبود خواص حرکت کشتی در امواج[1] همیشه از اهداف طراحی کشتی‌ها بوده است. در اعداد فرود بالاتر از ۰/۴، مقاومت موج‌سازی با توان نسبتاً بالای سرعت کشتی افزایش می‌یابد. از این محدوده به بعد، توان به صورت متناسب با سرعت کشتی افزایش نمی‌یابد. همچنین با افزایش سرعت، خصوصیات دریانوردی و حرکت در امواج نیز بدتر می‌شود چراکه نیروی وارد از طرف امواج و نیروهای ضربه‌ای بحرانی افزایش می‌یابد. این مورد می‌توان‌د منجر به بزرگتر شدن ابعاد کشتی شود یعنی جابجایی کشتی افزایش یابد تا در اثر امواج، تکانهای کوچکتری را تجربه کند. رسیدن به سرعتهای بالاتر و همچنین حصول خواص دریانوردی بالاتر تنها با این شرط قابل حصول است که قسمت زیادی از حجم جابجایی کشتی یا بالای خط آب باشد یا کاملاً در عمق آب (و با فاصله زیاد از سطح آب) قرار گیرد. مقدار مقاومت موج‌سازی بسیار وابسته به سطح در تماس با سطح آزاد سیال است. اگر حجم جابجایی بالاتر یا پائین‌تر از سطح آزاد سیال باشد، مقاومت موج‌سازی بسیار کوچک خواهد بود. این مبحث، کل‌ی‌د طراحی شناورهای مدرن است. همچنین نیروهای امواج وارد بر بدنه، بر حرکات کشتی نیز مؤثر می‌باشد و هرچه این نیروها کمتر باشد، حرکات کشتی آرام‌تر می‌گردد. برخی از شناورهای مدرن دارای حجم بویانسی بالای خط آب هستند مانند هاورکرافت[2] (*ACV*)، اثر سطحی[3] (*SES*)و شناورهای سرشی[4]. این مورد با ترکیب نیروهای هیدرواستاتیکی، هیدرودینامیکی و آیرواستاتیکی حاصل خواهد شد. مواردی هم وجود دارد که حجم جابجایی در فاصله مناسبی در زیر سطح آب قرار گرفته است مانند شناورهای *SWATH* [5] بدین ترتیب مطابق شکل ۱–۵۸ می‌توان تقسیم‌بندی زیر را برای شناورهای مدرن در نظر گرفت. در ادامه، خصوصیات هر نوع از شناورها و مزیت نسبی هریک نسبت به سایرین و نسبت به شناورهای معمولی بیان خواهد شد.



شکل ۱–۵۸: تقسیم‌بندی انواع شناورهای مدرن

کشتی‌های جابجایی تک بدنه سریع

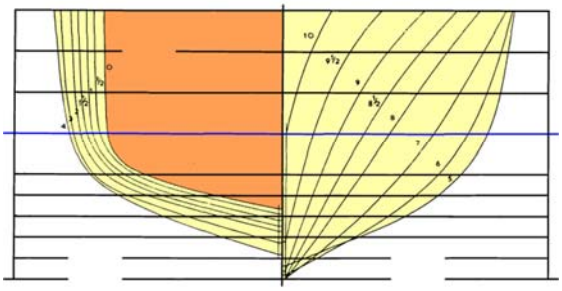
شناورهای جابجایی تندرو هرچند به عنوان شناورهای مدرن در نظر گرفته نمی‌شوند ولی بدلیل هزینه ساخت اندک و محدودیتهای وزنی کمتر مورد توجه هستند. این کشتی‌ها معمولاً عدد فرود بالاتر از ۰/۴ (بر اساس طول خط آبخور) عمل می‌کنند.

در عدد فرود $0.4 < F_n < 0.5$ نمودار مقاومت موج‌سازی تقریباً نزدیک به قله است و لذا کشتی جابجایی، مقاومت موج‌سازی قابل توجهی را تحمل می‌کند. این مسئله به این خاطر است که طول کشتی کمتر از طول موج است. قله موج در سینه کشتی و قعر موج در پاشنه کشتی است. نتیجه این وضعیت، یک تریم ناخواسته شدید به پاشنه است. برای به حداقل رسانیدن این تریم نیاز به یک پاشنه تخت عری‌ض و خطوط باتوک تخت می‌باشد. برای به حداقل رسانیدن مقاومت مورد نیاز، نسبت $L/\Delta^{1/3}$ باید بزرگتر از ۸ باشد. نمونه این نوع از شناورها، ناوچه‌ها و ناوشکن‌ها هستند. این حالت را «حالت قبل از قله موج»[6] گویند.

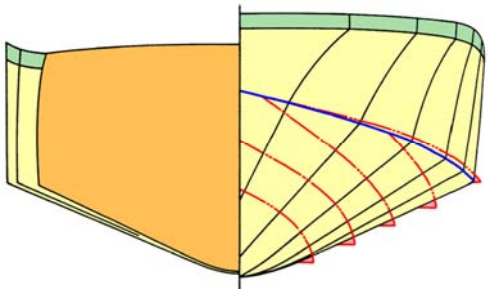
---

1 - seakeeping
2 -Air Cushion Vehicle
3 Surface Effect Ship
4 - planing craft
5 - Small Waterplane Area Twin Hull
6 - pre-primary resistance hump regime

در محدوده عدد فرود $0.5 < F_n < 0.7$، نیز یک قله موج وجود دارد که در آن حالت، طول موج بیش از دو برابر طول آبخور کشتی است. در این حالت، موج سینه باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت موج‌سازی می‌گردد. بنابراین لازم است که برای به حداقل رسانیدن توان مورد نیاز، موج سینه کاهش یابد یعنی حالت تریم پاشنه کاهش یابد. این عامل را می‌توان با خطوط سینه بسیار باریک بدست آورد. این نوع کشتی‌ها با عنوان کشتی‌های باریک[1] شناخته می‌شوند. مقدار $L/\Delta^{1/3}$ در این کشتی‌ها باید بیش از ۱۰ باشد. این کشتی‌ها دارای خصوصیات دریانوردی و حرکت در امواج بهبود یافته‌ای هستند. این حالت را «حالت پس از قله موج‌سازی[2]» گویند. در محدوده عدد فرود $0.7 < F_n < 1$ شناورهای نیمه‌جابجایی[3] یا نیمه سرشی[4] بکار می‌روند (همانند شکل۱-۵۹) که دارای بیلج نسبتاً گرد هستند. در بدنه این شناورها، اگر طراحی خوب انجام شده باشد و خطوط باتوک، تخت باشند، مقدار قابل ملاحظه‌ای نیروی لیفت (معادل ۲۰-۳۰ درصد از جابجایی) تولید می‌گردد. این عامل باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای سطح خیس می‌گردد. مقدار $L/\Delta^{1/3}$ در این شناورها بین ۶ تا ۷ (در سرعتهای بالاتر) است. در اینجا، عرض کشتی در تولید نیروی لیفت مهم‌تر است. این حالت را «حالت نیمه‌جابجایی یا نیمه-سرشی» گویند.



شکل ۱-۵۹: بدنه کف گرد نیمه جابجایی (نیمه سرشی)



شکل ۱-۶۰ بدنه سرشی تندرو دارای خطوط شکستگی (چاین)

سرعتهای بالاتر از $F_n = 0.7$، نیروی لیفت تولید شده بدنه به بیش از ۵۰ درصد جابجایی می‌رسد. این حالت از شناور را «حالت سرشی»[5] گویند (به شرطی که نیروی لیفت، بیش از ۵۰ درصد جابجایی باشد). خصوصیت این نوع از بدنه‌ها وجود خطوط شکستگی روی بدنه (چاین[6]) یا ریل‌های اسپری[7] می‌باشد (شکل ۱-۶۰). نسبت $L/\Delta^{1/3}$ برای عملیات در آبهای آرام بین ۴ تا ۵ و برای عملیات در آبهای مواج و طوفانی بین ۶ تا ۷ می‌باشد. مقطع بدنه شناور به صورت V و با خطوط محدب یا مقعر است.

در شناورهای تک بدنه، سرعت شناورهای سرشی خیلی بهتر از شناورهای جابجایی است ولی خصوصیات دریانوردی شناورهای سرشی معمولاً ضعیف‌تر است. بنابراین بطور خلاصه، برای توصیف حالات و شکل بدنه شناورهای تک بدنه تندرو می‌توان جدول۱-۲ را در نظر گرفت.

محدوده F_n	محدوده $L/\Delta^{1/3}$	شکل بدنه مناسب	توصیف حالت
$0.4 - 0.5$	> 8	پاشنه تخت عریض و خطوط باتوک تخت	حالت از قله موج‌سازی
$0.5 - 0.7$	>10	خطوط سینه باریک – بدنه باریک	حالت پس از قله موج‌سازی
$0.7 - 1$	6 - 7	کف نسبتاً گرد با خطوط باتوک تخت	حالت نیمه جابجایی یا نیمه سرشی (تولید 20 – 30 درصد لیفت)
> 0.7 (با شرط تولید بیش از 50 درصد لیفت)	4 - 5	بدنه V شکل با خطوط چاین یا ریل‌های اسپری	حالت سرشی (تولید 50 درصد لیفت)

جدول ۱-۲: توصیف حالات و شکل بدنه شناورهای تک بدنه تندرو با توجه به محدوده فرود

❖ هاورکرافت

هاورکرافت نوعی وسیله نقلیه است که هم در محیط خشکی و هم بر روی آب می‌تواند حرکت کند و در واقع دوزیست می‌باشد. هاورکرافت بر روی لایه‌ای از هوا حرکت می‌کند و ارتفاع این لایه هوا می‌تواند تا یک متر هم باشد. ایجاد این لایه هوا بوسیله یک مکنده بزرگ بر روی بدنه و یک بالشتک هوا در زیر بدنه انجام می‌شود. مکنده هوا که روی بدنه قرار گرفته هوا را مکش کرده و با فشار زیاد به زیر بدنه می‌فرستد. در زیر بدنه بالشتک هوا وجود دارد که تا حدودی هوا را حبس و دچار مکث می‌کند. البته همواره بخشی از هوا با یک دبی مشخص از زیر بالشتک خارج می‌شود که این

1 - slender ship
2 - post primary resistance hump regime
3 - semi-displacement
4 -semi-planing
5 - planning regime
6 - chine
7 - spray rail

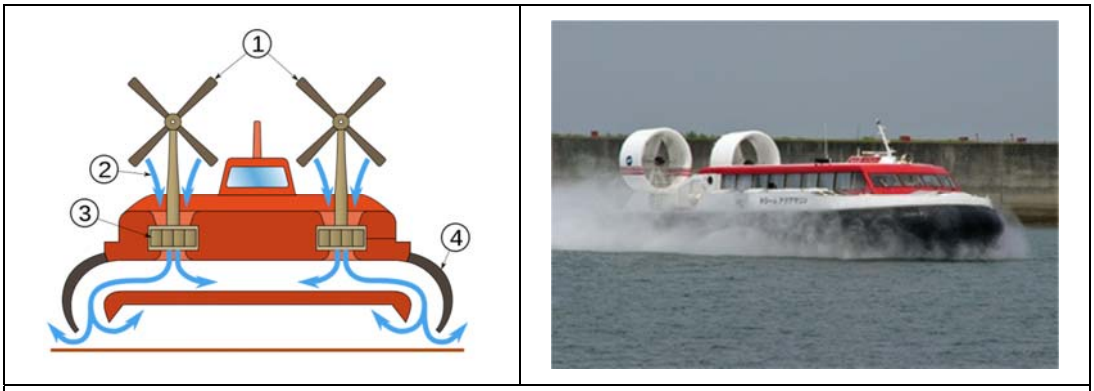
خروج هوا باعث ایجاد لایه هوا می‌شود. این لایه هوا باعث می‌شود که هاورکرافت بتواند بر روی خشکی، آب، باتلاق و شنزار و هر سطحی با سرعت بالا عبور کند. این مشخصه باعث شده که هاورکرافت دارای کاربردهای نظامی و امدادی بسیاری باشد. برای امداد رسانی به مناطق سیل‌زده یا زلزله زده استفاده از هاورکرافت بسیار رایج است.

هاورکرافتها دارای دو نوع کلی هستند: ۱- شناور دارای بالشتک هوا [1] (*ACV*) ۲- شناور اثر سطحی [2] (*SES*)

شناورهای ACV: این شناورهای بر روی لایه‌ای از هوای فشرده مستقر می‌گردند. این هوا در زیر شناور قرار می‌گیرد (شکل۱-۶۲). برای محبوس کردن هوا از پرده‌های خاصی استفاده می‌شود که در مقابل عبور هوا عایق هستند. این شناورها ممکن است با جت هوایی، واتر جت و پروانه هوایی (ملخ) به حرکت درآیند. اگر برای رانش از ملخ استفاده شود *ACV* می‌تواند یک شناور دوزیست باشد، یعنی هم در دریا و هم در خشکی حرکت نماید. شناور *ACV* در آب آرام به سرعتهای تا ۷۰ گره می‌رسد و می‌تواند وزن تا ۲۰۰ تن برای کاربردهای تجاری و نظامی داشته باشد. مهمترین عیب *ACV* افت شدید سرعت در دریاهای مواج می‌باشد. طراحی پرده عایق در برابر هوا بسیار اهمیت دارد. سایر عوامل مهم طراحی عبارتند از: حساسیت به تغییرات وزن، حفظ مسیر و پایداری سمت حرکت و رعایت برخی مبانی طراحی هواپیما.

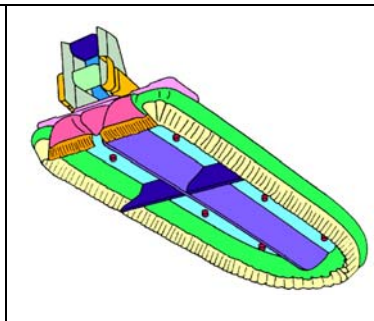
ایران اسلامی توانسته است نمونه‌های مختلفی از هاورکرافتها را تولید کند که شامل ۱، ۲ و تعداد بیشتری سرنشین هستند. شکل۱-۶۱ هاورکرافت مدرن یونس۲۲ را نشان می‌دهد که به دست متخصصان داخلی، طراحی و ساخته شده است. مطابق شماره‌های شکل ۱-۶۱ داریم:

۱- پروانه‌های ایجاد کننده پیشرانش رو به جلو و انجام مانور
۲- کانال مکش هوا
۳- مکنده هوا که باعث مکش هوا از روی بدنه به زیر بدنه می‌شود.
۴- بالشتک هوا که باعث کنترل خروج هوا از زیر بدنه می‌شود.

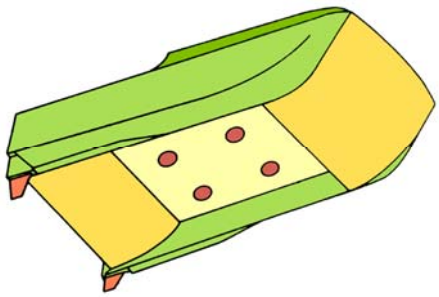


شکل۱-۶۱: هاورکرافت یونس ۲۲ – وزارت دفاع ج.ا.ایران

شناورهای اثر سطحی (SES): تفاوت شناورهای اثرسطحی با شناورهای *ACV* این است که بدنه آنها شبیه کاتاماران است و حفظ هوا در زیر بدنه توسط دو پرده عایق در قسمت سینه و پاشنه انجام می‌شود و در قسمتهای میانی، خود بدنه شناور از عبور هوا جلوگیری می‌کند (شکل ۱-۶۳). همچنین این شناورها دوزیست نیستند، چراکه از نیروی لیفت هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی بدنه نیز علاوه بر نیروی لیفت بالشتک هوا استفاده می‌شود. هنگامیکه فشار هوای داخل بالشتک ۱ اتمسفر باشد، شناور SES شبیه یک کاتاماران عمل می‌کند و کاملاً وابسته به لیفت هیدرواستاتیکی (بویانسی) می‌باشد. بدنه‌های طرفینی، فضای کافی برای نصب پروانه یا واترجت دارند.



شکل ۱-۶۲: شناور دارای بالشتک هوا *(ACV)*



شکل ۱-۶۳: شناور اثرسطحی *(SES)*

1 - air cushion vehicle
2 - surface effect ship

❖ هواپیمای دریایی[1]

هواپیمای دریایی یک هواپیما با قابلیت نشستن روی سطح آب می‌باشد. برای نشستن بر روی سطح آب دارای دو حجم بزرگ در زیر بدنه می‌باشد. این حجم‌ها ایجاد کننده نیروی بویانسی برای تحمل وزن هواپیما هستند که در این باره در بخش هیدرواستاتیک بیشتر بحث خواهد شد. حجم‌های زیر بدنه دارای شکلی شیب‌دار هستند به گونه‌ای که نقشی شبیه اسکی را ایجاد کند (شکل۱-۶۴).

❖ قایق پرنده[2] *(WIG)*

قایق پرنده نیز دارای شکلی شبیه به هواپیما می‌باشد با این تفاوت که فقط می‌تواند در فاصله کمی از سطح آب پرواز کند. این ارتفاع به حدود دو متر می‌رسد. قایق پرنده را « قایق اثر سطحی – *WIG*» نیز می‌گویند چراکه اثر مجاورت بال‌های هواپیما با سطح آب باعث افزایش لیفت بال‌ها می‌شود و در این شناور سعی می‌شود از این مزیت استفاده شود. قایق پرنده می‌تواند به سرعتهایی نزدیک به سرعت هواپیما برسد. حرکت آن در نزدیکی سطح آب نیز می‌تواند مزایای رادار گریزی را به دنبال داشته باشد.

شکل ۱-۶۵ نشان‌دهنده یک قایق پرنده می‌باشد که در وزارت دفاع ایران طراحی و ساخته شده است.

شکل ۱-۶۴: هواپیمای دریایی

شکل ۱-۶۵: قایق پرنده- ساخت وزارت دفاع ج.ا.ایران

❖ شناور هیدروفویلی[3]

در شناورهای هیدروفویلی بالک‌هایی در زیر شناور نصب گردیده که باعث تولید نیروی برآ می‌گردد که باعث جدا شدن بدنه از سطح آب می‌شود. نیروی برآ تولیدی با سرعت شناور متناسب بوده و به توان دو آن افزایش خواهد داشت. با افزایش سرعت شناور، نیروی برآ نیز افزایش خواهد یافت و این افزایش به حدی خواهد بود که بدنه شناور از سطح آب جدا شود. در این زمان با توجه به جدا شدن بدنه از سطح آب، نیروی مقاوم یکباره کاهش خواهد یافت. تغییرات نیروی تراست و نیروی مقاوم مطابق شکل ۱-۶۶ خواهد بود. در این نمودار نقطه ماکزیمم مربوط به زمان قبل از بلند شدن بدنه از سطح آب بوده که مقاومت موج سازی قابل ملاحظه‌ای بوجود خواهد آمد. پس از بلند شدن بدنه از سطح آب بایستی نیروی برآ ثابت باقی بماند. برای دستیابی به این مطلب می‌توان از دو روش استفاده کرد: کم کردن زاویه حمله و یا کاهش سطح خیس شده در فویلها. بنابر این به دو نوع سیستم فویلی نیاز داریم:

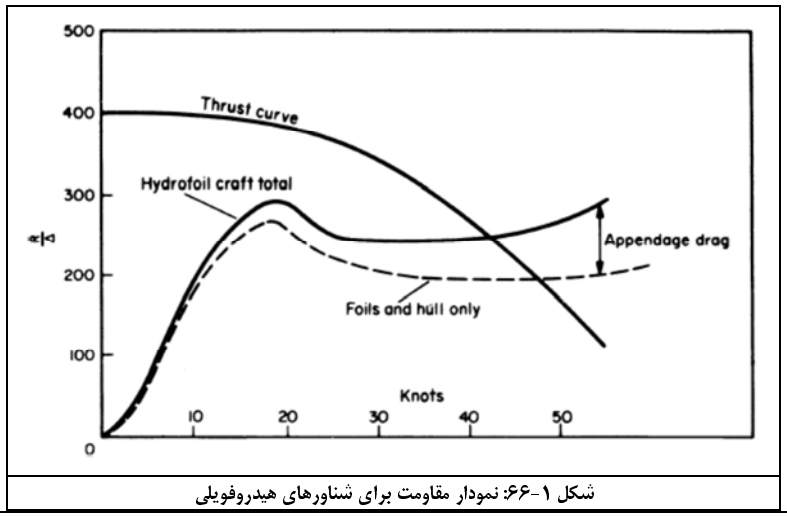
۱- فویل های V و U شکل: در این سیستم بخشی از فویل‌ها از سطح آب بیرون زده است که هر چه بدنه بالاتر آید سطح خیس شده فویل ها کاهش می‌یابد.

۲- فویل‌های مغروق کنترل پذیر: که با کنترل زاویه حمله این عمل صورت می‌گیرد.

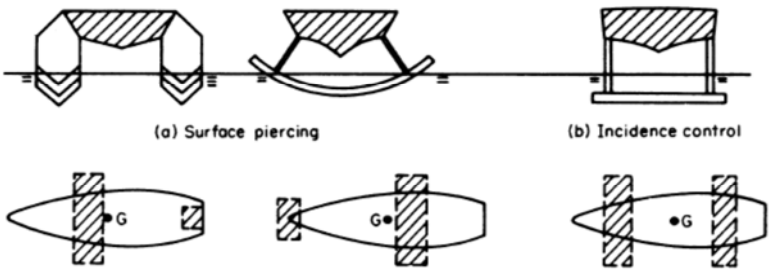
تعادل طولی شناور را نیز می توان با استفاده از بالکهای جلو و عقب با مساحت های متفاوت و تنظیم فاصله آنها تا مرکز ثقل شناور تنظیم کرد. در هر حال بایستی مجموع زاویه برآ در این بالک ها به اندازه کافی بوده و ممان ایجاد شده توسط آنها یکدیگر را خنثی نمایند (شکل ۱-۶۷).

یک جفت هیدروفویل در سه حالت کلی می‌توانند قرار گیرند (شکل ۶۸) که وابسته به موقعیت مرکز ثقل می‌باشد: ۱) بالک جلو بزرگتر از بالک عقب[4] ۲) بالک عقب بزرگتر از بالک جلو[5] ۳) بالک جلو و عقب یکسان[6]

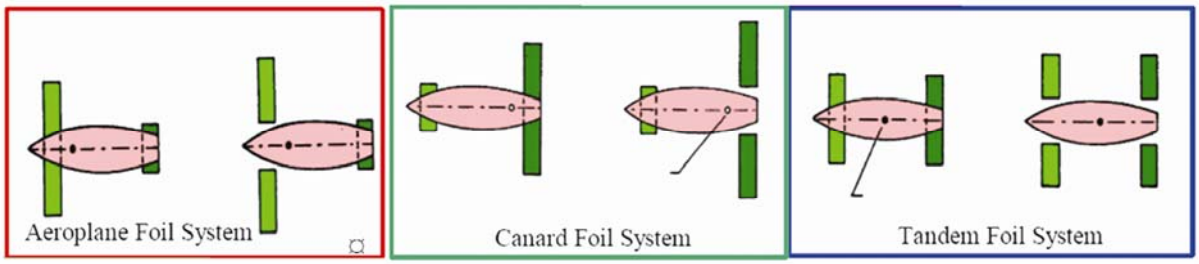
1- sea plane
2- wing in ground effect
3 - hydrofoil craft
4 - aeroplane foil system
5 - Canard foil system
6 - Tandem



شکل ۱-۶۶: نمودار مقاومت برای شناورهای هیدروفویلی



شکل ۱-۶۷: شکل و نحوه قرار گیری فویل ها



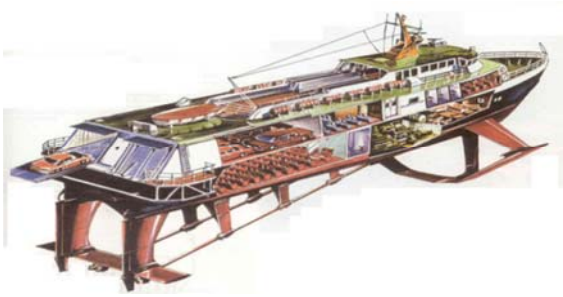
شکل ۱-۶۸: حالتهای مختلف قرارگیری هیدروفویل با توجه به موقعیت مرکز ثقل

توجه شود که ابعاد بالک بطور مستقیم وابسته به موقعیت مرکز ثقل است. ممانهای ایجاد شده توسط این بالکها باید در تعادل کلی وسیله خنثی شوند لذا اگر مرکز ثقل به جلوی شناور نزدیک باشد، ابعاد بالک جلو بزرگتر می‌شود و اگر مرکز ثقل به عقب شناور نزدیک باشد ابعاد بالک عقب بزرگتر می‌شود. این بالکها می‌توانند جمع‌شونده باشند و این مزیت را ایجاد کنند که شناور در آبهای کم‌عمق نیز بتواند حرکت کند که البته این مورد باعث افزایش هزینه و وزن کشتی می‌گردد. طراحی بالکها و نگهدارنده آنها از نظر داشتن حداقل مقاومت، استحکام سازه‌ای و کاویتاسیون بسیار حائز اهمیت است.

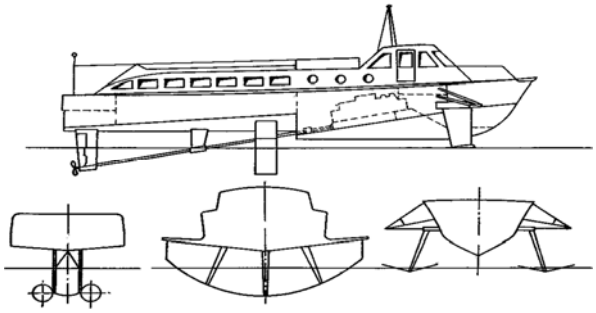
یک شناور هیدروفویلی با فویلها غوطه‌ور به وزن ۳۲۰ تن، طول ۶۵ متر و عرض ۱۲ متر می‌تواند در سرعت ۴۰–۵۰ گره حرکت نماید. شناورهای هیدروفویلی شکافنده سطح دارای خصوصیات پایداری خوبی هستند چراکه در حرکات هیو رو به پائین، نیروی لیفت بزرگتری تولید می‌شود که شناور را خیلی سریع به موقعیت اولیه بازمی‌گرداند. در اغلب آنها ابعاد فویل جلو وعقب برابر است و سرعت ۳۰–۴۰ گره را تأمین می‌کنند. کاربرد این نوع شناورهای هیدروفویلی اکثراً مسافری – باری است. هرچند که نمونه‌های نظامی هم دارند. در حالتی که شناور از سطح آب بلند نشده و بدنه در داخل آب است سطح خیس فویلها بزرگتر بوده و باعث افزایش مقاومت می‌گردد. از نظر حرکات در امواج، فویلهای کاملاً مغروق بهتر هستند چراکه نیروی لیفت در اثر امواج، تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین حرکت عمودی فویلهای شکافنده سطح ۲–۴ برابر فویلهای غوطه‌ور است.

- **تکامل و توسعه شناورهای هیدروفویل:** اولین شناورهای هیدروفویل دارای فویل‌های غوطه‌ور در سال ۱۸۹۸ میلادی در فرانسه توسط لامبرت[1] ساخته شد بصورتی که در سمت‌های جانبی آن ۴ صفحه فویل مسطح کوچک نصب گردیده بود.

1 - lambert

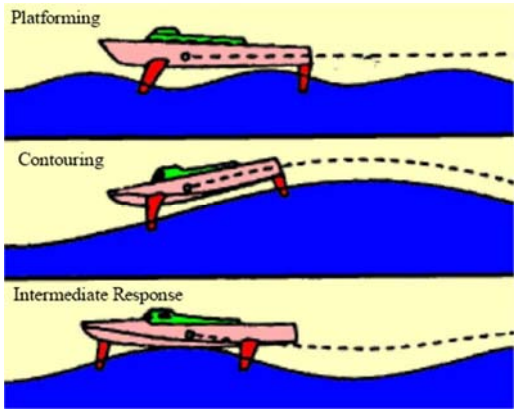


شکل ۱-۶۹: نمای کلی از شناور هیدروفویلی بزرگ مسافربری



شکل ۱-۷۰: شناور هیدروفویل نوع "Akvavion"

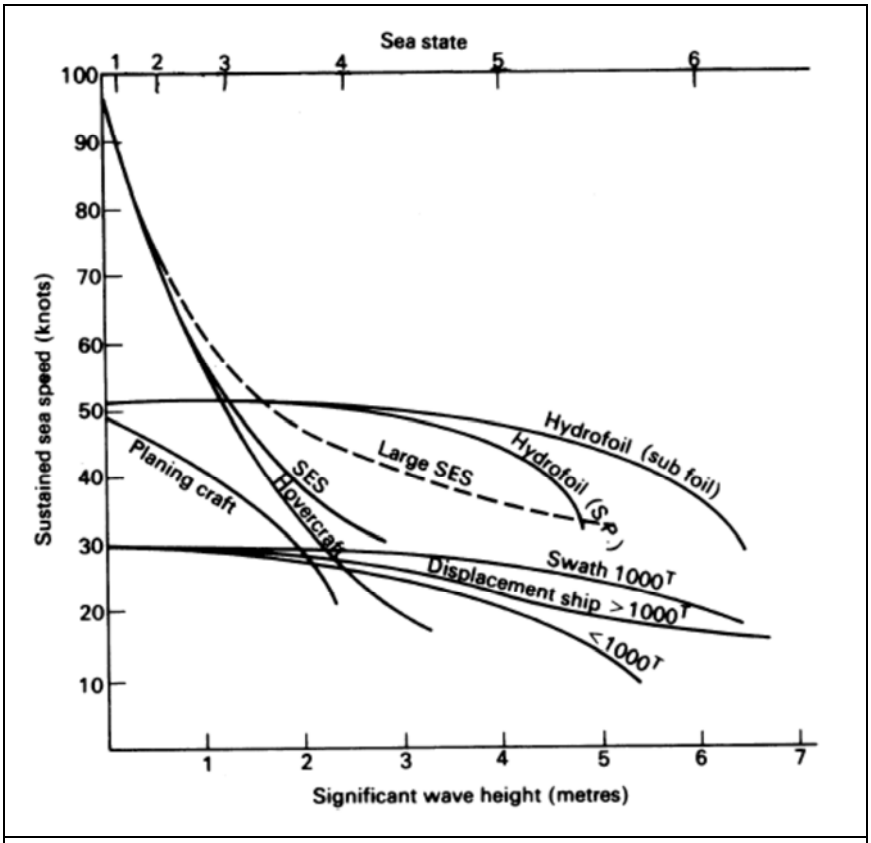
برخلاف سازندگان کشتی کانادایی و آمریکایی که نقشه "Forlanini" را پرورش و بسط دادند(شناورهای دارای فویل‌های چند طبقه‌ای)، متخصصین آلمانی در جهت بسط و تکامل اصولی که در نقشه "Krokka" مستقر بود پیش رفتند و در این مسیر موفقیت بزرگی نصیب " shertel " گردید. مشخصه شناور هیدروفویل "shertel" استفاده از فویل‌های V شکل و ذوزنقه‌ای شکلی بود که سطح آزاد آب را قطع می‌نمودند، این فویل‌ها از نوع مسطح بوده که در عمق آب غوطه‌ور می‌گردیدند. لازم است که اشاره نمود که ساخت شناورهای هیدروفویلی تا اواسط دهه ۳۰ بدون محاسبات تئوری و بر اساس آزمایش و سعی و خطا صورت می‌گرفت در سالهای دهه ۳۰ یک سری آزمایشات بر روی مدل‌های مختلف شناورهای هیدروفویل انجام شد و اصول تئوری طراحی شناور هیدروفویل پایه‌گذاری گردید. پس از جنگ جهانی دوم، توسعه و تکامل شناورهای هیدروفویلی به شکل امروزی با سرعت بیشتری به پیش رفت. در اواخر سال‌های دهه ۵۰ و سالهای نیمه اول دهه ۶۰ در کشورهای بزرگ پیشرو، ساخت سری شناورهای هیدروفویلی مسافربری دریایی انجام گردید که در حال حاضر بطور وسیعی متداول گردیده است (شکل۱-۶۹). بزرگترین و جالب‌ترین شناورهایی که ساخته شده است شناورهایی از نوع "Akvavion" می‌باشد. اولین شناورهایی که از این کلاس به آب انداخته شدند در سال ۱۹۵۷ میلادی آزمایش آنها انجام گرفت (شکل ۱-۷۰). مشخصه این شناورها استفاده از فویل‌های سرشی و انتقال توان دیزل ژنراتورها به پروانه از طریق شافت‌های مایل و اریب بود .این شناورها تا تناژ ۱۰ تن ساخته شدند. استفاده از فویل‌های سرشی باعث می‌شد در حالتی که این فویل‌ها کاملاً غوطه‌ور گردند، نیروی لیفت برروی دماغه آنها سریعاً رشد نماید به ترتیبی که از فرورفتن دماغه شناور در آب جلوگیری می‌کند. در موج‌های طولانی فویل‌های جلو که روی آب خزش می‌نمایند، موجب تریم طولی بدنه مطابق با موج می‌گردند. (زاویه حمله فویل اصلی را نیز مطابق با موج بوجود می آورند) و در امواج کوتاه (کمتر از دو برابر طول بدنه) فویل‌های جلو که در امواج فرو می‌روند تمایل دارند شیب شدیدی بر شناور اعمال کنند. شناورهای هیدروفویلی و اثر سطحی[1] بوسیله جدا کردن بدنه شناور از سطح آب ، باعث کاهش شدید نیروی مقاوم وارد بر شناور می‌شوند. اگر یک موج با فویل جلو برخورد کند، نیروی برآ آن افزایش خواهد یافت که باعث بالا آمدن قسمت جلو شناور می‌گردد. واضح است که این پدیده تا زمانی که با سطح موج برخورد دارد ادامه دارد. با پیشروی قله موج همین اتفاق برای فویل عقب می‌افتد و شناور تقریبا شکل موج را تقلید می‌کند. برای حفظ حالت مستقیم در شناور می‌بایست فویل‌ها را سریع تنظیم نمود، که در این حالت ضربات موج به کف شناور افزایش خواهد یافت. در سیستم فویلهای مغروق، فویلها بجز حرکت چرخشی ذرات موج تغییرات دیگری را حس نخواهند کرد (که در هر نیم سیکل چرخش ذرات موج برعکس خواهد شد). در این حالت شناور می‌تواند مسیر مستقیم خود را در امواج کوچک طی کند، اما در امواج بزرگتر بایستی شناور تا حدودی از حرکت امواج پیروی کند (شکل ۱-۷۱). در شناورهای کوچک می‌توان این تغییرات را بطور دستی انجام داد اما در شناورهای بزرگتر بایستی این تغییرات بصورت اتوماتیک صورت پذیرد. همچنین حالتهای مختلف حرکتی شناور هیدروفویلی در شکل ۱-۷۱ نشان داده شده است : ۱) حرکت افقی ۲) حرکت مطابق شکل موج ۳) حرکت متوسط. ولی اغلب شناورهای هیدروفویلی برای حالت متوسط طراحی می‌شوند. فویل شناورهای هیدروفویلی متغیر می‌باشد به گونه‌ای که با توجه به نیروی لیفت مورد نیاز، زاویه هیدروفویل (بالک) تغییر می‌یابد. در این قسمت لازم است به نموداری که در شکل ۱-۷۲ ارائه گردیده توجه شود.



شکل ۱-۷۱: سیستم فویل های نیمه مغروق در مواجهه با امواج

همچنانکه از نمودار مشخص می باشد شناورهای هیدروفویلی از نظر خواص دریانوردی تا شرایط دریایی[2] ۴ و ۵ دارای بهترین عملکرد در بین سایرین می‌باشند.

1 - Air cusion
2 - sea states



شکل ۱-۷۲: مقایسه خواص دریانوردی شناور هیدروفویلی با انواع شناور ها

❖ شناورهای چند بدنه‌ای[1]

شناورهای چند بدنه‌ای معمولاً به ۳ حالت کلی (مطابق شکل ۱-۷۳) وجود دارند:

۱- دو بدنه[2]

۲- سه بدنه ای[3]

۳- بیش از سه بدنه[4]

شکل ۱-۷۳: شناور دو بدنه (کاتاماران) و سه بدنه

شناورهای چند بدنه‌ای می‌توانند کاربردهای مختلفی داشته باشند از جمله: مسافربری و نظامی. این نوع شناورها دارای مزایای زیر نسبت به کشتی-های تک‌بدنه در یک تناژ یکسان هستند:

۱- تأمین عرض زیادی برای انجام جانمایی داخلی مناسب مثلاً چیدمانی تعداد زیادی صندلی‌های حمل مسافر در یک عرشه از شناور

۲- پایداری بسیار مناسب بدلیل عرض زیاد بدنه نسبت به کشتی‌های تک بدنه که باعث افزایش ارتفاع متاسنتری و افزایش پایداری می‌گردد.

۳- تاثیرپذیری کم از امواج دریا چرا که مقطع کوچکی از بدنه در معرض تهاجم امواج است و بخش اصلی بدنه خارج از آب و بالاتر از سطح آب است.

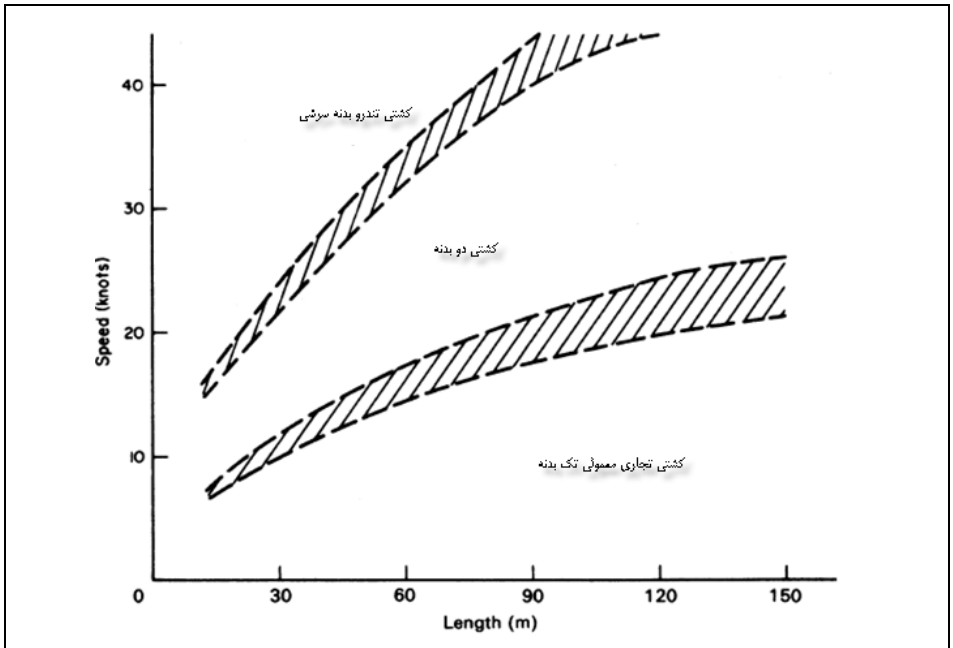
۴- مزایای هیدرودینامیکی و امکان رسیدن به سرعتهای بالاتر از کشتی‌های تک بدنه بدلیل اینکه عرشه اصلی بالاتر از سطح آب است و فقط بخش‌های باریک و کشیده‌ای از بدنه در داخل آب هستند.

---

1 - Multi – Hull ship
2 - Catamaran
3- Trimaran
4 - Multi - hull

انواع مختلفی از شناورهای چند بدنه ای در دنیا موجود می باشد از جمله :کاتاماران، شناورهای فری، شناور پشتیبانی نظامی، دکل حفاری دریایی. اولین نمونه از شناور های چند بدنه ای در سال ۱۸۷۰ساخته شد. این شناور از دو قسمت تشکیل یافته بود که توسط چوبی به هم وصل می شدند. شکل چند بدنه‌ای شناور باعث کاهش شدید حرکات رول آن می گردد، بطور مثال اگر یک کشتی معمولی ۱۵درجه رول داشته باشد، یک شناور چند بدنه‌ای با همان خصوصیات و تحت همان شرایط دارای رول ۵ درجه است یعنی رول شناور را تا یک سوم کاهش می‌دهد. شناورهای فری دارای عرشه مناسب برای مسافران، خدمه و فرود هلی‌کوپتر می‌باشند. چالش اصلی کاتاماران‌ها، خصوصیات دریانوردی و حرکت در امواج است. حرکات پیچ کاتاماران خیلی شدیدتر از کشتی‌های معمولی است. علاوه بر آن، شتابهای عمودی وارد بر عرشه بسیار زیاد است. «کاتاماران‌های شکافنده موج[1]» برای بهبود این خصوصیات معرفی شده‌اند. در شکل ۱-۷۴ مقایسه‌ای بین شناور تک‌بدنه‌ای و دوبدنه‌ای برای تعیین نسبت طول با سرعت صورت گرفته که در واقع تعیین کننده عدد فرود در این شناورها است. شناورهای دو بدنه‌ای دارای سطح خیس شده بیشتری هستند بنابراین مقاومت اصطکاکی در آنها نسبت به شناورهای تک‌بدنه‌ای بیشتر می‌باشد، اما بدلیل هیدرودینامیکی بودن و شکل خاص بدنه، در سرعتهای بالا نیروی مقاومت موج سازی کمتری تولید می‌کنند. در این گونه شناورها برای تامین پایداری معمولاً از عرض نسبتا زیادی استفاده می‌شود. در کل مانورپذیری این نمونه شناورها بسیار مناسب می‌باشد. اما مشکلی که در این شناورها وجود دارد به داک بردن شناور جهت انجام تعمیرات می‌باشد. این شناورها دارای وزن سازه‌ای نسبتا زیادی هستند، بنابراین در این شناورها معمولا آلیاژ مورد استفاده آلومینیوم می‌باشد تا بتوان این مشکل را به این صورت حل کرد. در کاتامارانهای نیمه مغروق[2] و همچنین شناورهای چند بدنه‌ای[3] که دارای سطح آبخور بسیار کوچک می‌باشد، حرکات پیچ شناور بسیار کاهش می‌یابد. در طراحی شناورهای چند بدنه ای برای تحقق این مطلب بایستی در صورت نیاز باله‌های ضد غلتش نصب گردد. در هر نمونه شناور برای کاهش اثرات موج بر روی عرشه، بایستی ارتفاع فری برد شناور زیاد باشد. در شناورهای چند بدنه سطح صفحه آبخور کم می‌باشد که این پدیده منجر به حساس شدن شناور در برابر تغییرات و توزیع بار در شناور می‌گردد. بنابراین در این شناور از سیستم جبران وزن و بالاست استفاده می‌گردد. همچنین این سیستم در زمان آبگرفتگی شناور می‌تواند باعث کاهش هیل آن گردد. در سالهای اخیر استفاده از شناورهای سه بدنه‌ای[4] که عرض بدنه وسط از طرفین خیلی بیشتر می‌باشد رونق گرفته است. از جمله مزایایی که می‌توان برای این نوع شناور برشمرد عبارتست از:

۱) کاهش نیروی مقاوم شناور (بطور مثال کاهش ۱۸ درصدی قدرت در سرعت ۲۸ گره) که منجر به کاهش مصرف سوخت می‌گردد.
۲) بهبود قابلیت های دریانوردی در مواجهه با امواج در سرعت بالای شناور
۳) افزایش سطح عرشه، پایداری بالاتر و کاهش حرکات در برابر فرود هلی‌کوپتر
۴) افزایش پایداری جهتی در شناور
۵) افزایش میزان حاشیه وزنی



شکل ۱-۷۴ : مقایسه تناسب سرعت و طول شناورهای تک بدنه ، دو بدنه و بدنه سرشی در سرعتهای مختلف

1 - wave piercing catamaran
2 - wave piercing catamaran
3 - swath
4 - teimaran

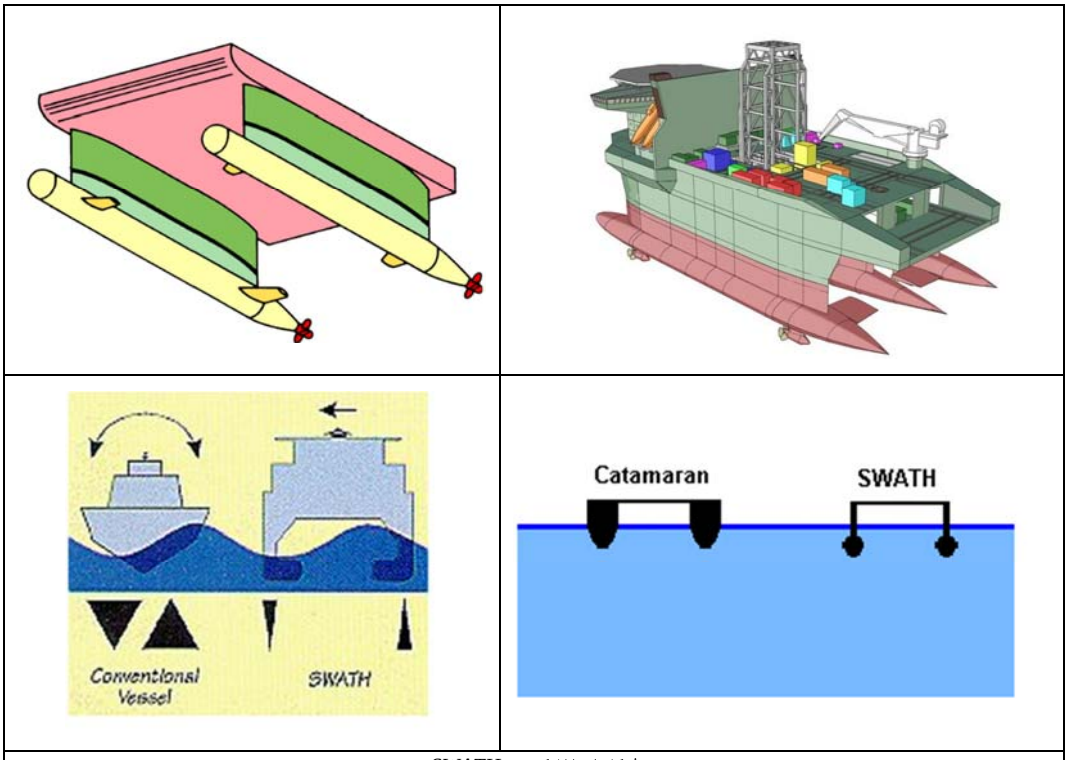
❖ کشتی *SWATH* [1]

شناور ***(SWATH)***؛ شناوری است با دو بدنه که بمنظور به‌حداقل رساندن حجم بدنه در ناحیه تماس سطحی با دریا طراحی شده است. بدلیل وجودانرژی امواج در نواحی سطوح تماس با دریا، با کاستن از حجم بدنه در این نواحی، پایداری شناور حتی در امواج مرتفع و سرعتهای بالا، بسیار بهتر شده و بدین ترتیب حجم جابجائی مورد نیاز برای شناور نگهداشتن شناور، زیر امواج قرار گرفته و به‌مقدار بسیار کمتری تحت اثر کنش امواج قرار خواهد داشت زیرا با افزایش عمق، آشفتگی امواج بصورت تابعی نمائی کاهش می‌یابد. قرار گرفتن بخش عمده حجم جابجائی شناور زیر امواج مفهومی همانند زیر دریائی دارد که تحت تاثیر اثر موج قرار ندارد. ایده استفاده از این نوع شناورها، اولین بار در سال ۱۹۳۸ توسط یکی از افراد گارد ساحلی کانادا، بنام *Fredrick G. Creed* ارائه شد. این ایده در سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ بصورت تدریجی با طراحی کاتامارانها برای مصارف نظامی و تحقیقاتی اقیانوس‌شناسی توسعه پیدا کرد. در اشکال زیر مقایسه‌ای بین شکل بدنه شناورهای *SWATH* و کاتاماران انجام شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود درشناور *SWATH* بدنه دو قلو بصورت کامل زیر آب قرار می‌گیرد. در مقایسه با شناور کاتاماران معادل، شناور *SWATH* دارای عیوب زیر است:

۱- محدودیت سرعت
۲- نیاز به توان بیشتر
۳- گرانی قیمت
۴- عمق آبخور بیشتر
۵- نیاز به سیستم کنترلی پیچیده‌تر
۶- ضرورت نگهداری بیشتر

کلید تلاطم اندک *SWATH* در کاهش سطح خیس در ناحیه کنش امواج (فضای بین تاج و حضیض موج) است. همانگونه که در شکل زیر ملاحظه می‌شود، سطح خیس در ناحیه کنشِ موج، برای یک شناور تک بدنه *V* شکل بطور قابل ملاحظه‌ای از سطح خیس در شناور *SWATH* بیشتر است. در مقابل، شناوری *SWATH* بصورت دو تا پانتون زیردریائی است که در زیرناحیه کنش موج قرار داشته و تنها بازوهای نازکی[2] که سطح بسیار کمتری را در بر دارند، در معرض موج قرار می‌گیرند. از طرفی عرض بدنه *SWATH* به صورت قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از سایر شناورها است و لذا پایداری آن بطور مضاعفی افزایش می‌یابد چراکه پایداری با توان ۳ عرض متناسب است.



شکل۱-۷۵: کشتی *SWATH*

1 - SWATH = Small Waterplane Area Twin Hull= S3 = Trisec = LWP Catamaran = Semi-submerged-Catamaran = Fast displacement Catamaran

*2 - **narrow struts***

همانگونه که در شکل ۱-۷۵ نشان داده شده است، شتاب لنگر غلتشی شناور *SWATH* (ناشی از تغیر نیروها) در اثر کنش امواج، بطور محسوسی کمتر از شناورهای معمولی بوده و در نتیجه پریود (مدت زمان) غلتش، طولانی‌تر است. بنابراین تکانهای شدیدی که منجر به ناراحتی و دریازدگی افراد می-شوند، در شناور *SWATH* بطور محسوسی کمتر از شناورهای معمولی است. طرح *SWATH80* بطور موفقیت‌آمیزی در شرایط دریایی ۶ تا ۷ در شرایط طوفانی جریان گلف استریم جنوب شرقی در فلوریدا آزمایش شد. امروزه در اطراف سکوهای حفاری نفت و گاز دریای شمال بطور آشکاری از تکنولوژی *SWATH* استفاده می‌شود.

تغییرات نسبت L/B با تناژ در شناورهای *SWATH*

این نسبت در شناورهای *SWATH* کوچکتر از شناورهای دوبدنه (کاتاماران) است.

- در شناورهای *SWATH*: $L/B = 1.75 \sim 2.9$

- در شناورهای کاتاماران (دوبدنه): $L/B = 3.3 \sim 4$

با توجه به مطالبی که در مورد مقاومت در شناورهای *SWATH* و جابجایی بودن شکل بدنه آنها بیان شد، مقاومت این شناورها در مقایسه با شناورهای تک بدنه و کاتاماران هم تناژ بیشتر است لذا سرعت آنها ۴ – ۳ گره کمتر است (برای یک توان مشخص و ثابت موتور). این تفاوت سرعت در شناورهای *SWATH* بزرگ، کاهش می‌یابد چراکه حرکات پیچ که یکی از عوامل کاهش سرعت است، کاهش می‌یابد. سریع‌ترین شناورهای *SWATH* دنیا با تناژ ۳۵۰ – ۲۰۰ تن دارای حداکثر سرعت ۲۸/۵ – ۲۷ گره هستند. اینها ۴ فروند از سریع‌ترین شناورهای *SWATH* دنیا هستند که دو فروند آنها دارای سیستم رانش دیزل و دو فروند دیگر دارای سیستم رانش توربینی هستند. اگر در شناورهای *SWATH* در آینده از توربین گاز جدید با نسبت قدرت به وزن و قدرت به ابعاد بیشتری استفاده شود، می‌توان به سرعتهای بالاتر از ۳۵ گره دست یافت که البته تاکنون فقط یک شناور فری از نوع *SWATH* با این سیستم رانش توانسته به سرعت ۳۴ گره برسد. اغلب شناورهای *SWATH* بالاتر از ۵۰۰ تن دارای سرعت کمتر از ۱۵ گره هستند.

❖ کشتی‌های نظامی[1]

کشتی‌های نظامی دارای انواع مختلفی هستند که مهمترین آنها به ترتیب ابعاد و تناژ عبارتند از:

۱- ناو هواپیمابر[2]
۲- نبرد ناو[3]
۳- رزمناو[4]
۴- ناوشکن[5]
۵- فریگیت[6]
۶- ناوچه[7]
۷- قایق‌های جنگی

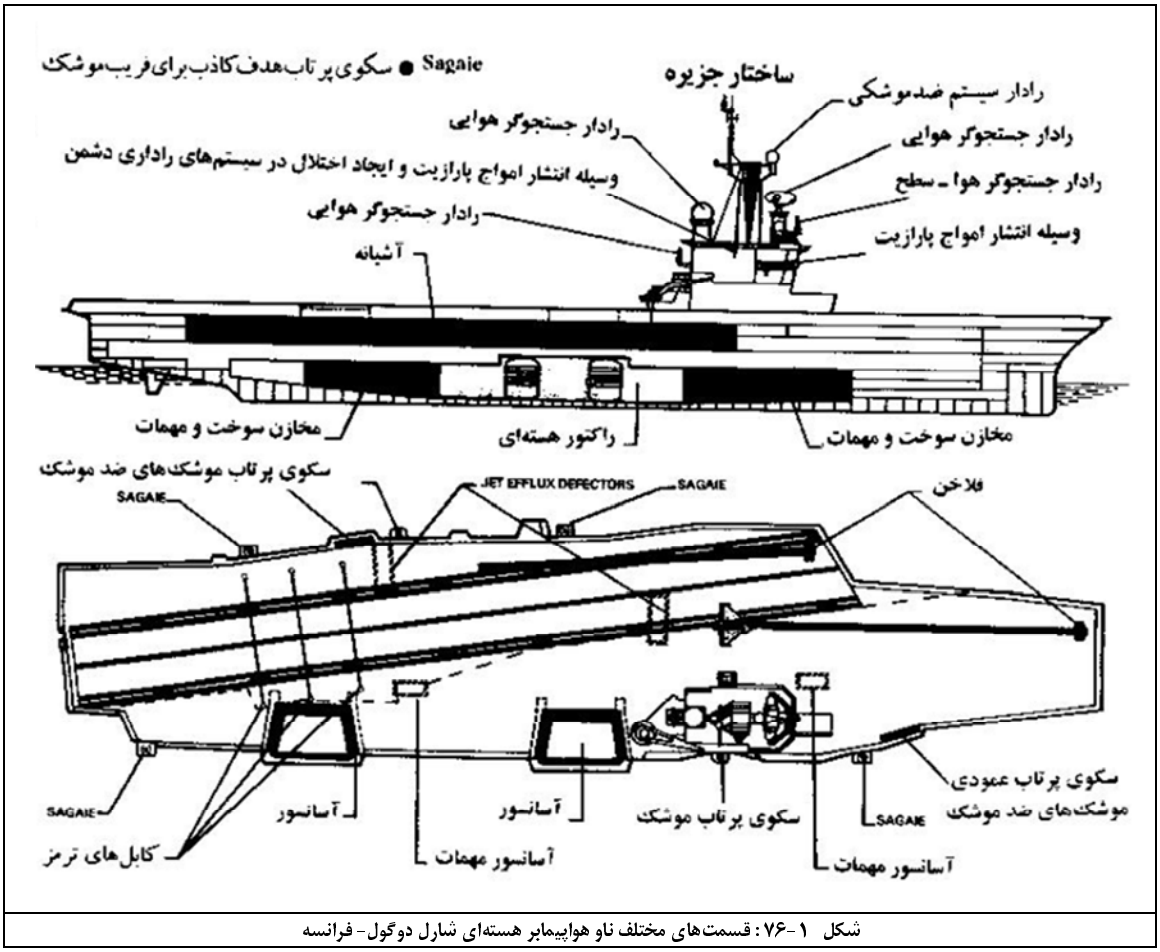
مشخصات این کشتی‌ها از قرار زیر است:

۱- ناو هواپیمابر

ناو هواپیمابر یک فرودگاه نظامی شناور است که تعداد زیادی هواپیمای جنگنده را بر روی خود جای می‌دهد. این کشتی دارای دو عرشه پرواز هستند که یکی در راستای طولی شناور است و عرشه دیگر، عرشه پرواز مایل است که با خط مرکزی ناو زاویه ۱۱ – ۷ درجه می‌سازد. از عرشه مایل برای نشستن هواپیما استفاده می‌شود چراکه در مقابل آن هواپیمایی وجود ندارد و در صورت نیاز، هواپیما می‌تواند قبل از نشستن، دوباره به پرواز درآید. عرشه اصلی اغلب برای بلند شدن و پرواز کردن هواپیما استفاده می‌شود. بدین‌ترتیب دو هواپیما می‌توانند به طور همزمان بلند شوند و بنشینند (شکل ۱-۷۶).

---

1 - Naval Ship
2 - Air craft carrier
3 - Battle Ship
4 - Cruiser
5 - Destroyer
6 - Frigate
7 - Corvette



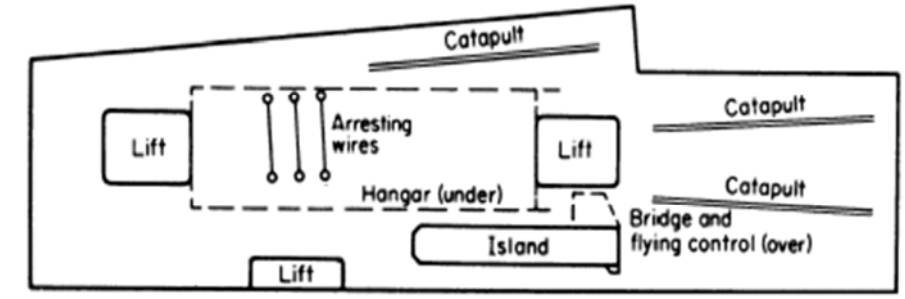
شکل ۱-۷۶ : قسمت‌های مختلف ناو هواپیمابر هسته‌ای شارل دوگول- فرانسه

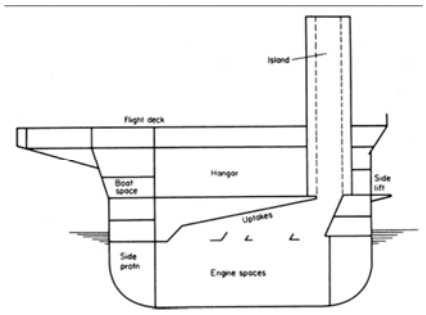
در قسمت زیر عرشه اصلی، آشیانه هواپیما قرار دارد. هواپیماها بوسیله ۲ یا ۳ دستگاه آسانسور از سطح عرشه به آشیانه منتقل می‌شوند . معمولاً دو آسانسور در کناره‌ها و یک آسانسور در قسمت میانی قرار می‌گیرد. علاوه بر این آسانسورها، آسانسورهای کوچک دیگری برای حمل سلاح و موشک به سطح عرشه وجود دارند. روی سطح عرشه چند رشته کابل ترمز وجود دارد که برای کاهش شتاب هواپیما استفاده می‌شوند. هواپیماها در هنگام فرود، یک قلاب را از قسمت انتهایی بدنه رها می‌کند. در حین نشستن، این قلاب به یکی از رشته کابل‌ها گیر می‌کند و شتاب هواپیما را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد و بدین ترتیب هواپیما می تواند در یک طول کوتاه باند، متوقف شود. اگر این رشته کابل‌ها نباشند، هواپیماهای جنگنده به طول باند چند برابری برای متوقف شدن نیاز دارند. هواپیما را نمی‌توان به یکباره متوقف کرد چرا که هم ستون مهره‌های خلبان آسیب می‌بیند و تحمل شتاب منفی بیش از حد را ندارد و هم خود هواپیما آسیب می‌بیند بنابراین کابلها با قابلیت کشش مناسب، توقف تدریجی هواپیما را فراهم می‌کنند. از طرف دیگر طول باند برای بلند شدن و پرواز هواپیما بسیار کوتاه است لذا به یک دستگاه شتاب‌دهنده قوی نیاز است به گونه‌ای که بتواند در یک طول کوتاه از باند، شتاب بسیاری به هواپیما بدهد و آن را برای بلندشدن از سطح باند به سرعت مناسب برساند. برای این منظور از یک دستگاه «فلاخن» یا «شتاب‌دهنده» استفاده می‌شود که با سیستم بخار یا هیدرولیک کار می‌کند. این دستگاه مستقیماً به تکیه‌گاه چرخ هواپیما متصل می‌شود و می‌تواند در یک فاصله ۶۰ متری، شتابی در حدود 4g به هواپیما وارد کند . این دستگاه یک محرک قوی در زیر عرشه دارد که بوسیله سیستم هیدرولیک یا بخار پرفشار حرکت پرشتابی را باعث می‌شود. این حرکت مستقیماً به هواپیما منتقل می‌شود بنابراین هواپیمای جنگنده می‌تواند در یک طول باند کوچک به پرواز درآید. هواپیماهای عمود پرواز که اخیراً بکار گرفته شده‌اند، نیاز به طول باند را به طور کلی مرتفع نموده‌اند.

مشخصات ناو هواپیمابر Nimitz در ذیل بیان می‌شود (شکل ۱-۷۷):

- جابجایی : ۱۰۰ هزار تن
- طول: ۳۳۳ متر
- سرعت: ۳۰ گره
- تعداد هواپیمای قابل حمل: ۹۰ فروند
- تعداد خدمه: شش هزار نفر!

مشخصات فوق بیان‌کننده ابعاد و عظمت ناوهای هواپیمابر هستند.



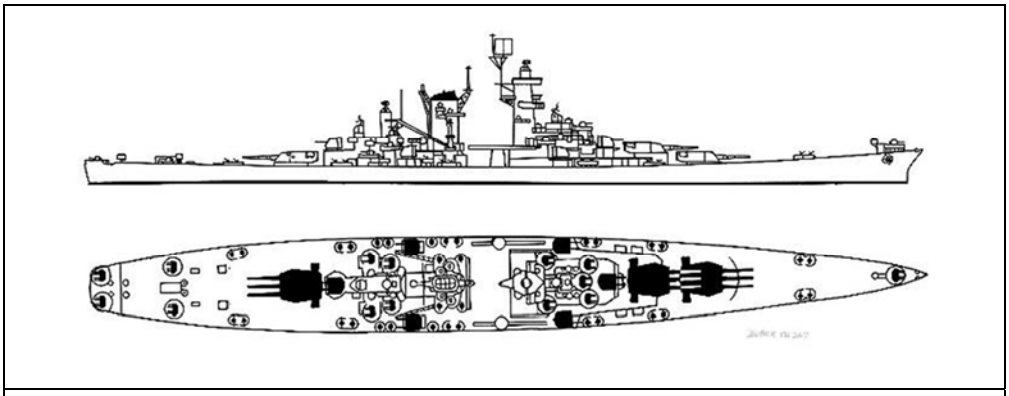


شکل ۱-۷۷: شمای کلی ناو هواپیمابر

۲- نبردناو

نبردناو، پس از ناو هواپیمابر، بزرگترین کشتی جنگی محسوب می‌شود که دارای سنگین‌ترین تسلیحات بر روی شناور می‌باشد. همچنین بدنه این شناور به سختی زره پوش شده است. نبرد ناو *Dreadnought* که در سال ۱۹۰۶ ساخته شد، اولین نبرد ناو واقعی و مدرن بود که دارای ۱۰ توپ ۳۰۰ میلیمتری بود و حداکثر سرعت آن به ۲۱ گره می‌رسید و تا قبل از ظهور ناو هواپیمابر، نبردناوها اصلی‌ترین عضو ناوگان نظامی دریایی محسوب می‌شدند که برای بمباران شدید و سنگین ساحلی و همچنین عملیات ضد هوایی استفاده می‌شدند ولی پس از جنگ جهانی دوم، نبردناوها تقریباً کنار گذاشته شدند چراکه در صورت غرق شدن یکی از آنها چند هزار تن فولاد و تسلیحات ارزشمند و چندصد نفر خدمه از بین می رفتند. ژاپن در جنگ جهانی دوم، در حمله به بندر پرل آمریکا، همه هشت فروند نبردناو آمریکایی را غرق نمود.

نبردناو عظیم بیسمارک متعلق به نیروی دریایی آلمان، در اولین عملیات نظامی دریایی خود غرق شد و این در حالی بود که تسلیحات و ابعاد آن بسیار بی‌نظیر و همانند یک جزیره بزرگ نظامی بود (شکل ۱-۷۸). از طرفی با ظهور موشک‌های دور برد و سلاح‌های قاره‌پیما، نصب انبوهی از تسلیحات بر روی یک شناور دیگر توجیه نظامی نداشت.



شکل ۱-۷۸: نبرد ناو- در این شکل‌ها فقط قسمت بالای آب نمایش داده شده است.

۳- رزمناو

کشتی نظامی که کوچکتر از نبردناو است و تناژ آن ۱۵۰۰۰-۶۰۰۰ تن است و دارای تسلیحات سنگین و زره‌پوش قدرتمند است. امروزه این شناورها نیز با انواع کشتی‌های نظامی کوچکتر جایگزین شده‌اند (شکل ۱-۷۹). مشخصات یک نمونه رزمناو از قرار زیر است:

- نام: رزمناو *Slava* – روسیه
- تناژ : ۱۲۵۰۰ تن
- امکان نشستن ۱ فروند هلی کوپتر
- تسلیحات: ۱۶ فروند موشک، ۲ توپ ۱۳۰ میلیمتری، ۱۰ اژدر ۵۳۳ میلیمتری
- سیستم رانش: دو توربین گاز ۱۲۵۰۰۰*hp*
- سرعت: ۳۴ گره
- برد: ۹۰۰۰ مایل دریایی در سرعت ۱۵ گره

۴- *ناوشکن*

ناوشکن‌ها دارای تناژ و ابعاد کوچکتری نسبت به رزمناوها هستند که دارای قابلیت تحرک و مانورپذیری بالایی بوده و دارای تسلیحات متنوعی نظیر توپ کالیبر متوسط (۱ یا ۲ قبضه)، اژدر، مین و موشک‌های هدایت‌شونده هستند (شکل ۱-۸۰). کاربرد اصلی ناوشکن‌ها، اسکورت‌کردن ناوگان نظامی بخصوص رزمناوها و نبردناوها و ناوهای هواپیمابر است. ناوشکن‌ها حلقه بیرونی اسکورت ناوگان دریایی هستند که با توجه به تسلیحات متنوع و قدرت تحرک بالا، عامل اصلی پشتیبانی و اسکورت ناوگان، بخصوص در برابر عملیات زیردریایی‌ها هستند. تجهیزات سوناری و جستجوی زیرآبی پیشرفته و تسلیحات مین و اژدر، آنها را به مانعی قدرتمند در برابر حملات زیردریایی‌ها تبدیل نموده است. موشک‌های هدایت‌شونده و رادار نیز تجهیزات ضد هوایی ناوشکن‌ها محسوب می شوند. ناوشکن‌ها دارای حدود ۳۵۰ خدمه بوده و امروزه دارای برد حرکتی بسیار زیادی هستند به گونه‌ای که ناوگان دریایی را در اقیانوسها هم بتوانند همراهی کنند. تا قبل از جنگ جهانی دوم ناوشکن‌ها دارای برد کوتاهی بودند. در گذشته با وجود نبرد ناوها و رزمناوهای متعدد، ناوشکن‌ها عضو کوچکی از کاروان دریایی محسوب می‌شدند ولی امروزه با توجه به اینکه از نبردناوها استفاده نمی‌شود و تعداد رزمناوها هم کاهش یافته، لذا ناوشکن‌ها امروزه تقریباً بزرگترین عضوکاروان دریایی پس از ناو هواپیمابر محسوب می‌شوند. بر روی برخی از ناوشکن‌ها مدرن نیز موشک‌های بالستیک نصب شده است که بخوبی توانسته است جای رزمناو را درکاروان دریایی بگیرد. مشخصات یک نمونه ناوشکن از قرار زیر است:

- نام: ناوشکن *Chungmugong* – کره جنوبی
- جابجایی: ۵۵۰۰ تن
- تسلیحات: ۱ توپ ۱۲۷ میلیمتری ، ۸ موشک هارپون ، ۶ لوله اژدر ۳۲۴ میلیمتری
- قدرت: ۵۵۰۰۰ *hp*
- سرعت: ۳۰ گره

شکل۱-۷۹ : رزمناو

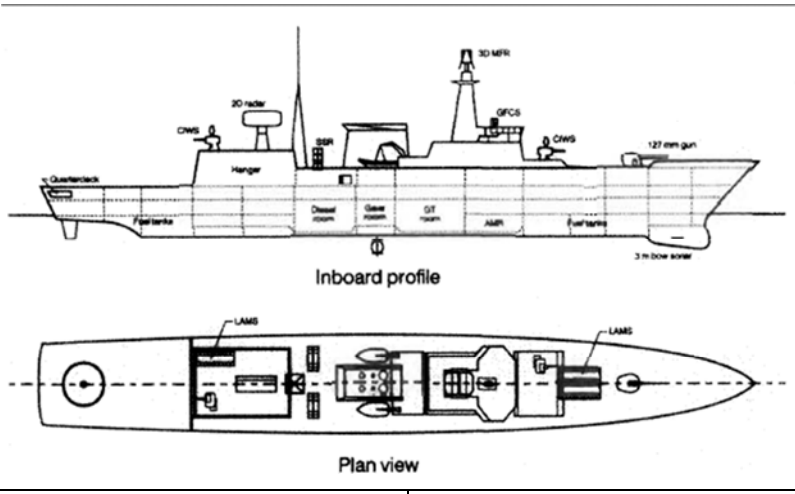
شکل ۱-۸۰: ناوشکن

۵- فریگیت

فریگیت دارای ابعاد و تناژ کوچکتری از ناوشکن و دارای تناژ ۶۰۰۰ – ۱۰۰۰ تن است. فریگیت‌ها برای اسکورت ناوشکن‌ها و کاروان دریایی در مسافتهای نزدیک (غیر اقیانوسی) بکار می‌روند و دارای تسلیحات متنوع ضد هوایی، ضد دریایی و ضد شناورهای سطحی هستند. این شناورها دارای بدنه کشیده و باریک بوده و سرعت حرکت بسیار بالایی دارند (شکل۱-۸۱) .

مشخصات یک نمونه فریگیت به صورت زیر است:

- نام: فریگیت *Georges Leygues* – فرانسه
- تناژ: ۴۵۰۰ تن
- امکان نشستن یک هلی‌کوپتر روی عرشه
- تسلیحات: ۸ فروند موشک، ۲ توپ ۱۰۰ میلیمتری، ۲ توپ ۲۰ میلیمتری، ۴ مسلسل، ۱۰ اژدر ضد زیردریایی
- قدرت: ۵۲۰۰۰ *hp*
- سرعت: ۳۰ گره
- برد: ۱۰۰۰۰ مایل دریایی در سرعت ۱۵ گره



شکل ۱-۸۱: فریگیت

۶- ناوچه

ناوچه نوعی شناور نظامی کوچکتر از فریگیت با تناژ ۲۰۰۰- ۵۰۰ تن می‌باشد که دارای سلاح سبک و قابلیت تحرک و مانور بالا می‌باشد. سلاح ناوچه‌ها اغلب شامل یک توپ کالیبر پائین و تعدادی مین دریایی برای مقابله با زیردریایی است. ناوچه‌ها برای محافظت از کاروان کشتی‌های تجاری در مقابل زیردریایی، هواپیما وکشتی‌های دشمن بکار می‌رود. برخی از ناوچه‌های مدرن امروزی به موشک و اژدر نیز مسلح شده اند (شکل ۱-۸۲).

مشخصات یک نمونه ناوچه به صورت زیر است:

- نام: ناوچه *Braunschweig* – آلمان
- تناژ : ۱۸۴۰ تن
- قدرت: ۱۲۰۰۰ hp
- سرعت: ۲۶ گره
- برد: ۴۰۰۰ مایل دریایی در سرعت ۱۵ گره
- تسلیحات: ۱ توپ ۷۶ میلیمتری، ۶ فروند موشک، امکان مین‌ریزی

شکل ۱-۸۲: ناوچه

شکل ۱-۸۳: قایق جنگی

۷- قایق جنگی

قایق‌های جنگی، سبک‌ترین عضو ناوگان نظامی دریایی و معمولاً دارای تناژ کمتر از ۳۰۰ تن هستند. سرعت حرکت آنها اغلب بیش از ۴۰ گره بوده و دارای برد حرکت کوتاه می‌باشند. بدلیل ابعاد و تناژ کوچک، امکان حضور در مناطق ساحلی را دارند و دوام حضور در دریاها و اقیانوسها را ندارند. این قایق‌ها می‌توانند دارای تسلیحات مسلسل، موشک‌های سطح به سطح و اژدر ضد کشتی باشند. در برخی از کشورها این قایق‌ها جزء ناوگان پلیس ساحلی محسوب می‌شوند (شکل ۱-۸۳).

در جدول زیر مشخصات مقایسه ای از انواع شناورهای نظامی به ترتیب بزرگی آنها ارائه شده است:

نوع شناور نظامی	وزن (تن)	طول (متر)	قدرت(۱۰۰۰ ***hp***)	سرعت(گره)	تعداد خدمه
ناو هواپیمابر	۱۵۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	۲۵۰-۳۵۰	۱۵۰-۳۰۰	۲۵-۳۵	۲۶۰۰-۶۰۰۰
نبرد ناو	۸۰۰۰-۲۰۰۰۰	۱۷۰-۲۷۰	۱۰۰-۱۸۰	۲۵-۳۵	۱۵۰۰-۲۵۰۰
رزمناو	۶۰۰۰-۱۵۰۰۰	۱۵۰-۱۸۰	۶۰-۱۲۵	۳۰-۳۵	۴۰۰-۸۰۰
ناوشکن	۳۰۰۰-۹۵۰۰	۱۲۵-۱۵۵	۵۰-۱۰۰	۳۰-۳۵	۲۰۰-۳۵۰
فریگیت	۱۰۰۰-۶۰۰۰	۸۰-۱۳۵	۱۲-۵۶	۲۵-۳۵	۹۰-۱۸۰
ناوچه	۵۰۰-۲۰۰۰	۶۰-۸۰	۱۲-۲۵	۲۵-۳۵	۴۰-۸۰
قایق‌های جنگی	کمتر از ۳۰۰	۵-۳۰	کمتر از ۸	بیش از ۴۰	کمتر از ۲۰

جدول ۱-۳: مشخصات مقایسه‌ای انواع شناورهای نظامی

❖ اندازه‌ها و تناژ رایج کشتی‌ها در دنیا[1]

تقسیم‌بندی کشتی‌ها با معیارهای مختلفی انجام می‌شود از جمله ظرفیت (تناژ) و ابعاد. از آنجا که کشتی یک وسیله نقلیه با امکان تحرک در سراسر دنیا می‌باشد که باید بتواند از برخی از کانال‌ها و تنگه‌های کم‌عرض و حتی با محدودیت طول عبور کند، لذا باید یک تقسیم‌بندی از این نظر برای کشتی‌ها در نظر گرفته شود. البته این تقسیم‌بندی و نام گذاری‌ها تعریف مشخص جهانی ندارند و در منابع مختلف، اعداد متفاوتی ذکر شده و مقادیر تناژ و طول بطور تقریبی بیان شده است.

این رده‌بندی‌ها به ترتیب عبارتند از:

- **کشتی هندی سایز کوچک**[2]: کشتی های فله بر یا تانکر با وزن مرده کمتر از *DWT* ۵۰۰۰.
- **کشتی هندی سایز**[3]: این کشتی ها دارای تناژ *DWT* ۳۵۰۰۰-۱۵۰۰۰ با آبخور تابستان حدود ۱۰ متر و اغلب دارای ۵ انبار با جرثقیل های ۳۰ تنی روی عرشه هستند. این نام‌گذاری، غالباً برای کشتی‌های فله‌بر استفاده می‌شود. امروزه حدود ۲ هزار فروند از این کشتی‌ها در دنیا وجود دارد و استفاده از آنها بسیار رایج است چرا که از تمامی آبراهه‌های دنیا می‌توانند عبور کنند.
- **کشتی هندی ماکس**[4]: کشتی‌هایی با تناژ *DWT* ۵۸۰۰۰-۳۵۰۰۰ که اغلب برای کشتی‌های فله‌بر استفاده می‌شود.
- **کشتی افراماکس**[5] : این نام‌گذاری، اغلب برای کشتی‌های نفتکش با وزن مرده *DWT*۱۲۰۰۰۰-۸۰۰۰۰ استفاده می‌شود. این کشتی‌ها برای عبور از یک کانال خاص نام‌گذاری نشده‌اند ولی منطقه تردد آنها اغلب دریای سیاه، دریای شمال، دریای کارائیب، دریای چین و دریای مدیترانه است. *AFRA* مخفف عبارت روبرو است: (*Average Freight Rate Assessment*)
- **کشتی پاناماکس**[6] : بزرگترین اندازه کشتی‌هایی که می‌توانند از کانال پاناما عبور کنند و دارای حداکثر عرض ۳۲/۲ متر هستند.
- **کشتی سوئزماکس**[7] : این نام اغلب برای کشتی‌های نفتکش استفاده می‌شود و نشان دهنده بزرگترین ابعاد کشتی هستند که از کانال سوئز می‌توانند عبور کنند. این کشتی‌ها دارای حداکثر آبخور ۱۶ متر، حداکثر عرض ۴۶ متر و وزن مرده حدود ۱۵۰۰۰۰ تن هستند. البته قرار

۱- منبع :*[۲ و ۵]*

2 - small handy size
3 - handy size
4 - hande max
5- afra max
6 - Panamax
7- suezmax

است در آینده نزدیک عمق این کانال به ۲۲ متر افزایش یابد به گونه‌ای که کشتی‌های نفتکش *ULCC* و *VLCC* هم بتوانند از آن عبور کنند. امروزه کشتی‌های نفتکش غول پیکر برای عبور از این کانال مجبور هستند بار خود را به داخل کشتی‌های کوچکتر تخلیه کنند یا توسط پمپاژ نفت و لوله‌کشی و مخازن بزرگ در کنار کانال، بار آنها سبک‌تر شود و پس از عبور از کانال، مجدداً نفت را بارگیری نمایند. این فرآیند البته هزینه‌بر و وقت‌گیر است. همچنین ارتفاع بالای آب این کشتی‌ها نباید از ۶۸ متر بیشتر باشد چرا که پل تردد عبورکننده از روی این کانال، این محدودیت را ایجاد کرده است.

- **کشتی مالاکاماکس**[1] : این نام‌گذاری اغلب برای کشتیهای نفتکش *VLCC* استفاده می‌شود که دارای حداکثر طول ۴۷۰ متر، عرض ۶۰ متر و آبخور ۲۰ متر با حداکثر وزن مرده *DWT* ۳۰۰۰۰۰ یا معادل کشتی *۱۸۰۰۰TEU* هستند. این ابعاد حداکثر ابعاد قابل عبور از تنگه مالاکا می‌باشد. محدودیت طول بخاطر وجود سدهای میانی در طول کانال است.

- **کشتی کیپ سایز**[2] : این نام‌گذاری اغلب برای کشتی‌های فله بر و نفتکش استفاده می‌شود. این کشتی‌ها دارای ابعاد بزرگتری از کشتی-های پاناماکس و سوئزماکس هستند. وزن مرده آنها بیش از ۱۵۰۰۰۰تن است که اگر نفتکش باشند در رده کشتی‌های *VLCC* و *ULCC* قرار می‌گیرند. کشتی‌های فله بر کیپ سایز دارای وزن مرده حدود ۱۷۵۰۰۰ تن هستند ولی امروزه کشتی‌های فله‌بر بزرگتری که قابلیت حمل سنگ معدن را داشته باشند با وزن مرده بیش از ۴۰۰۰۰۰ تن نیز ساخته شده‌اند. در واقع نام کیپ سایز بیان‌کننده بزرگترین ابعاد کشتی‌های ساخته شده هستند که برای آنها محدودیت ابعادی در نظر گرفته نمی‌شود.

- **کشتی** *VLCC* [3]: کشتی‌های نفتکش با وزن مرده بین ۳۲۰۰۰۰–۱۵۰۰۰۰ تن هستند.

- **کشتی** *ULCC* [4]: کشتی‌های نفتکش با تناژ وزن مرده بین ۵۵۰۰۰۰–۳۲۰۰۰۰ تن هستند که بزرگترین کشتی‌های ساخته شده در دنیا محسوب می‌شوند.

برای کشتی‌های کانتینربر نام‌گذاری زیر را با توجه به تعداد کانتینر می‌توان درنظر گرفت:

small feeder: کشتی‌های کانتینربر با عرض کمتر از ۲۳ متر برای مسیرهای کوتاه دریایی.

feeder: کشتی هایی با ظرفیت *۱۰۰۰TEU* با هدف تغذیه کشتی‌های کانتینربر خیلی بزرگ. این کشتی‌ها دارای عرض ۳۰ – ۲۳ متر هستند.

Panamax: کشتی‌هایی با ظرفیت *۵۰۰۰TEU*–۴۵۰۰، حداکثر عرض ۳۲/۳متر، حداکثر طول ۲۹۴/۱ متر و حداکثر آبخور ۱۲ متر با قابلیت عبور از کانال پاناما.

Post panamax : کشتی‌هایی با ظرفیت حدود *۱۰۰۰۰TEU* و حداکثر عرض ۳۲/۳متر.

Suezmax : کشتی هایی با ظرفیت خیلی بزرگ *ULCS* [5] با حداکثر ظرفیت *۱۲۰۰۰TEU* با عرض ۵۷–۵۰ متر و آبخور ۱۶/۴–۱۴/۴ متر که مناسب برای عبور از کانال سوئز هستند.

Post panamax یا malacamax : کشتی‌های *ULCS* با حداکثر ظرفیت *TEU* ۱۸۰۰۰، حداکثر عرض ۶۰ متر و حداکثر آبخور ۲۱ متر.

کانال	حداکثر طول (متر)	حداکثر عرض (متر)	حداکثر آبخور (متر)
کانال پاناما	۲۸۹/۵	۳۲/۳	۱۲/۰۴
کانال کایل	۳۱۵	۴۰	۹/۵
آبراهه لاورنس	۲۲۲	۲۳	۷/۶
کانال سوئز	–	–	۱۸/۲۹

جدول ۱-۴ : محدودیت ابعادی کشتی‌ها برای عبور از کانال‌ها

❖ مشخصات کانال سوئز[6] :

این کانال از سال ۱۸۵۸ شروع به ساخت شد و در سال ۱۸۶۹ اتمام یافت. طول این کانال ۱۹۲ کیلومتر است که ارتباط دریایی بین آسیا و اروپا را فراهم می‌کند، بدون اینکه نیاز به دور زدن قاره آفریقا باشد. حداکثر عمق این کانال ۲۰ متر و دارای ۴ توقفگاه میانی برای امکان عبور کشتی‌ها از مسیر کانال است. از آنجا که این کانال، دارای سدها یا دریاچه‌های میانی برای هم‌ترازکردن سطح آب نمی‌باشد، لذا کشتی‌ها دارای محدودیت طول برای عبور از این کانال نیستند.

---

1 - Malacca max
2 - cape size
3 - very large crude carrier
4 - ultra large crude carrier
5 - ultra large container ship
6 - suez chanel

❖ مشخصات بزرگترین کشتی‌های دنیا:

مشخصات بزرگترین کشتی‌های دنیا تا سال ۲۰۱۱ در جدول ۱-۵ ارائه شده است.

نوع کشتی	نام کشتی	تناژ (تن)	طول (متر)	عرض (متر)	آبخور (متر)	سرعت(گره)
سوپر تانکر	*Seawise Giant*	۵۶۴۰۰۰ *DWT*	۴۸۵	۶۹	۲۵	۱۶
سوپر تانکر	*Batillus*	۵۵۵۰۰۰ *DWT*	۴۱۴	۶۳	۲۸/۵	۱۶
کانتینربر	*MSC Danit*	۱۴۰۰۰ *TEU*	۳۶۵/۵	۵۱	۱۶	۲۵
LNG	*Mozah*	۲۶۶۰۰۰ *m3*	۳۴۵			
فله بر	*Berge Stahl*	۳۶۵۰۰۰ *DWT*	۳۴۲	۶۳	۲۳	۱۳/۵
حمل سنگ معدن و نفت	*Docecanyon*	۲۷۵۰۰۰ *DWT*	۳۴۰	–	–	–
مسافربری	*Allure of the seas*	۲۲۵۰۰۰ *GT* ، ۱۰۰۰۰۰ *t*	۳۶۲	۶۰/۵	۹	۲۳
مسافربری	*Queen Mary2*	۱۵۱۰۰۰ *GT*	۳۴۵	۴۵	۱۰	–
ناو هواپیمابر	*Nimitz*	۱۰۰۰۰۰ *t*	۳۳۳	۷۷	۱۱	۳۰
نبردناو	*Yamato*	۷۳۰۰۰	۲۶۳	۳۹	۱۰/۵	۲۷

❖ مشخصات بزرگترین و عمیق‌ترین دریاها

مشخصات بزرگترین اقیانوها و عمیق‌ترین نقطه اقیانوس‌ها در جدول ۱-۶ ارائه شده است.

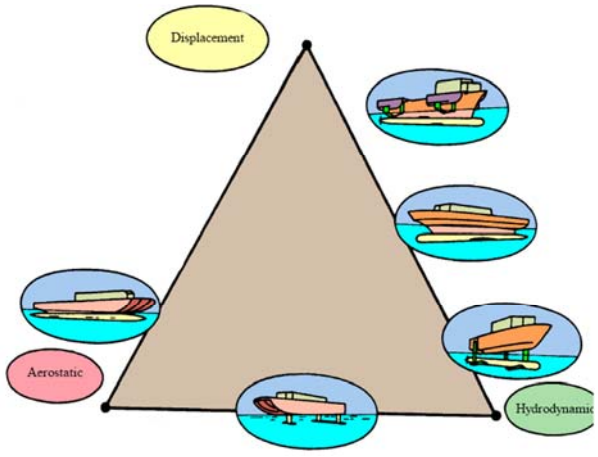
نام اقیانوس	وسعت (کیلومترمربع)	نام عمیق‌ترین نقطه اقیانوس	عمق (متر)
آرام	۱۶۶/۰۰۰/۰۰۰	گودال ماریانا	۱۰۹۲۴
اطلس	۸۲/۴۰۰/۰۰۰	گودال پورتوریکو	۸۶۴۸
هند	۷۳/۶۰۰/۰۰۰	گودال جاوه	۷۱۲۵
منجمد جنوبی	۲۰/۰۰۰/۰۰۰	گودال ساندویچ	۷۲۳۶
منجمد شمالی	۱۴/۷۵۰/۰۰۰	حوزه اوراسیا	۵۴۵۰

جدول ۱-۶: مشخصات بزرگترین و عمیق‌ترین دریاها

❖ روش‌های تامین شناوری

امروزه گرایش به سمت شناورهای ترکیبی نیز وجود دارد که مثلاً هم دارای هیدروفویل و هم دارای بالشتک هوا باشد و در موقعیتهای خاص، از مزایای متفاوتی که دارد استفاده نماید. شکل ۱-۸۴ سه ضلع مختلف از مثلثی را نشان می‌دهد که ۳ عامل اصلی تولید نیروی لیفت در شناورها را شامل می‌شود: ۱) جابجایی: همان لیفت هیدرواستاتیکی یا نیروی بویانسی میباشد. ۲) هیدرودینامیک: استفاده از نیروی لیفت هیدرودینامیکی قسمت داخل آب ۳) آیرواستاتیک: استفاده از فشار حبس شده هوای پرفشار در زیر شناور

شناورها می‌توانند دارای یک نوع یا دو نوع یا هر سه نوع از انواع نیروهای لیفت باشند. مثلاً شناورهای تجاری معمولی فقط از نیروی بویانسی استفاده می‌کنند و هاورکرافتها از نیروی بویانسی (جابجایی) و نیروی آیرواستاتیکی استفاده می‌نمایند.



شکل ۱-۸۴: سه ضلع مختلف برای ایجاد نیروی لیفت و جبران وزن شناور

❖ کاربرد تجاری شناورها و انتخاب نوع شناور

انتخاب اینکه نوع شناور چگونه باشد بسیار وابسته به نوع کاربرد آن است. دسته‌بندی کلی زیر برای حوزه‌های کاربردی شناورها با هدف تجارت و کسب درآمد در ساخت آنها مدنظر است: ۱) حمل و نقل ۲) تفریحات ۳) تولید و جابجایی نفت ۴) علمی و تحقیقاتی ۵) لوله‌گذاری و کابل‌گذاری در دریا

برای انتخاب هریک از نیازهای فوق سه معیار اصلی زیر باید اولویت‌بندی شوند: ۱) محدوده سرعت مورد نیاز ۲) قابلیت دریانوردی و حرکات در امواج ۳) میزان بار قابل حمل

مثلاً در کشتی‌های تحقیقاتی و علمی، سرعت و بار قابل حمل چندان مطرح نیست و در عوض، داشتن خصوصیات دریانوردی خوب مطرح است. در کشتی‌های جابجایی مسافر، سرعت بسیار مهم است ولی در کشتی‌های تجاری حمل بار، رسیدن به سرعتهای بالا چندان اهمیت ندارد. در کشتی‌های نظامی با توجه به نوع کاربرد آنها هریک از سه عامل فوق می‌تواند به عنوان اولویت مطرح باشد. مثلاً اگر کشتی نظامی دارای عرشه هلی‌کوپتر است باید دارای خصوصیات مناسب برای حرکت در امواج باشد تا هلی‌کوپتر بتواند روی عرشه کشتی بنشیند.

بدین ترتیب با توجه به اولویت در نظر گرفته شده نوع کشتی‌ها مشخص می‌گردند.

❖ اندازه سرعت و توان

تا کنون معیارهای مختلفی برای تعریف بازدهی حمل و نقل تعریف شده است مثلاً Gabrielli و Von Karman در سال 1950 واحد توان رانش بر وزن را پیشنهاد کردند. ولی امروزه برای تعریف بازدهی حمل و نقل از فرمول حاصلضرب وزن در سرعت تقسیم بر توان $(V \times {}^{W}/_{P})$استفاده می‌شود. شکل ۱-۸۵ مقایسه بین بازدهی انواع وسایل نقلیه (دریایی و غیر دریایی) را ارائه نموده است. بر اساس این نمودار برای انتخاب نوع شناور داریم:

- اگر سرعت مهم نباشد: نفتکش‌ها و فله‌برها
- اگر سرعت تا ۲۵ گره مدنظر باشد: نفتکش‌ها، فله‌برها، سایر کشتی‌های تجاری، کشتی‌های نظامی، اسب، دوچرخه و انسان
- اگر سرعت از ۲۵ تا ۶۰ گره مدنظر باشد: کشتی هوایی، اتومبیل، شناور هیدروفویلی، هاورکرافت و شناورهای سرشی
- اگر سرعت از ۶۰ تا ۱۵۰ گره مدنظر باشد: کشتی هوایی، اتومبیل، هاورکرافت، شناور هیدروفویلی و هلی‌کوپتر
- اگر سرعت بیش از ۱۵۰ گره مدنظر باشد: هواپیمای جت

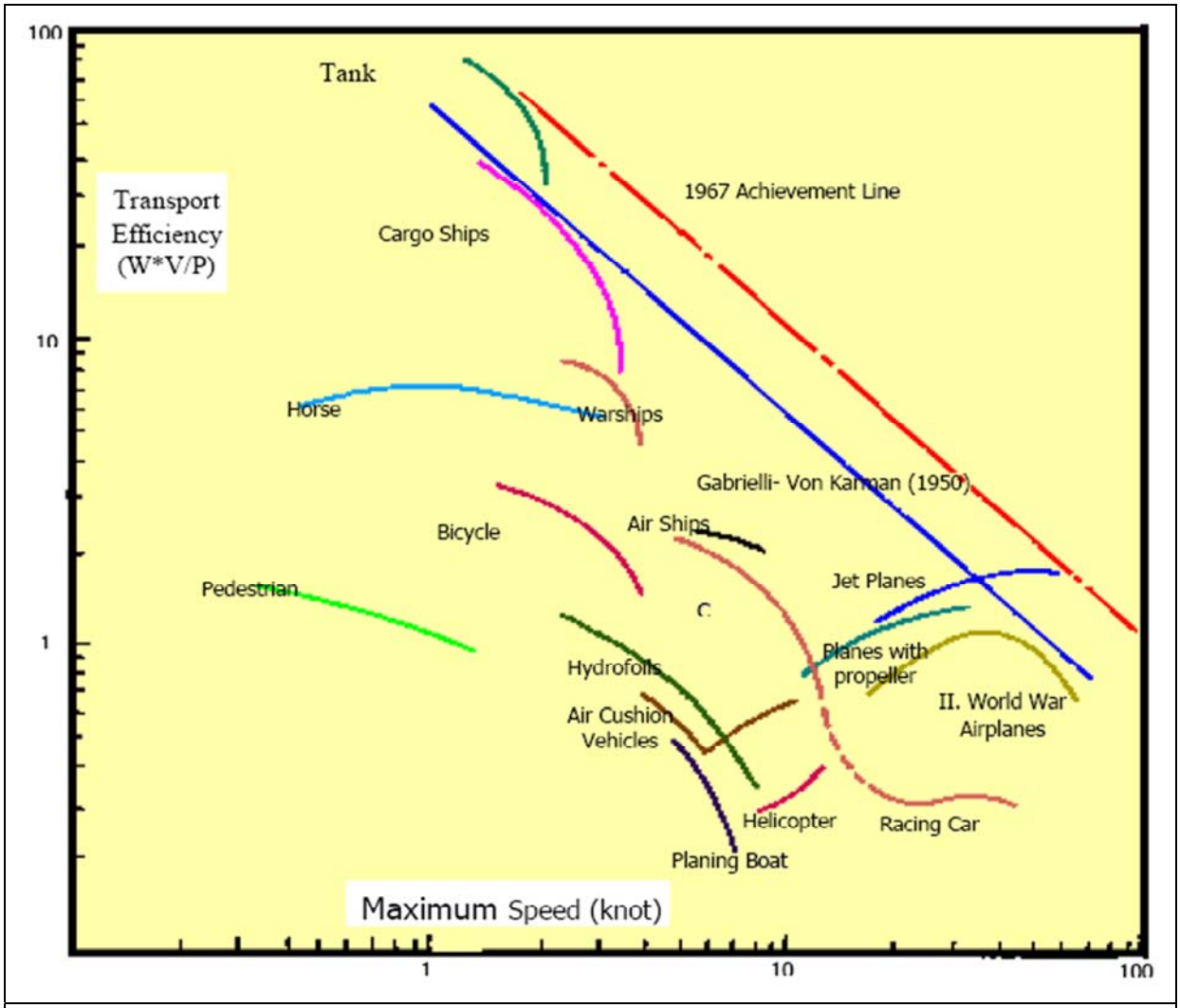
شکل ۱-۸۶ نشان‌دهنده بازدهی حمل و نقل در آب آرام برای انواع شناورها می‌باشد. اندازه کشتی نقش بسیار مؤثری در این زمینه دارد بخصوص وقتی-که مقاومت ویسکوزیته (اصطکاکی) بخش زیادی از مقاومت را تشکیل دهد.

از این شکل برای انتخاب شناور و رسیدن به حداکثر بازدهی حمل و نقل داریم:

- تا ۳۰ گره: کشتی‌های تجاری جابجایی معمولی با بالاترین بازدهی
- ۳۵ تا ۶۰ گره: شناورهای هیدروفویلی
- بیش از ۶۰ گره: شناورهای دارای بالشتک و اثرسطحی
- ۳۰ تا ۴۰ گره: شناورهای *SWATH*
- شناورهای سرشی دارای کمترین بازدهی حمل و نقل هستند.
- برای سرعت زیر ۴۵ گره: شناورهای دارای بالشتک و اثرسطحی دارای بازدهی حمل و نقل بسیار پائینی هستند.

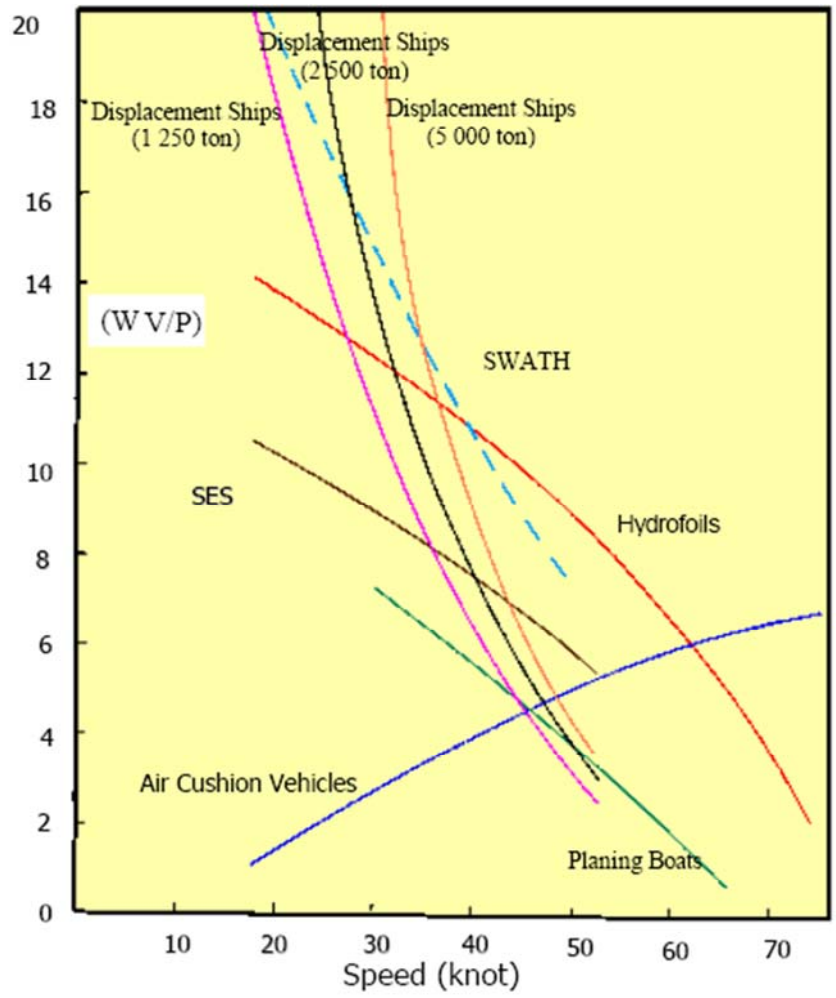
اگر شرایط دریایی بجای آب آرام، دریای مواج باشد در اینصورت کشتی‌های *SWATH* و هیدروفویلی دارای بیشترین بازدهی حمل و نقل هستند و هاورکرافتها کمترین بازدهی حمل و نقل را دارند.

در کنار بازدهی حمل و نقل (که سه معیار وزن، سرعت و توان را مدنظر قرار می‌دهد) بازدهی سیستم رانش نیز اهمیت دارد که درشکل ۱-۸۷ ارائه شده است.

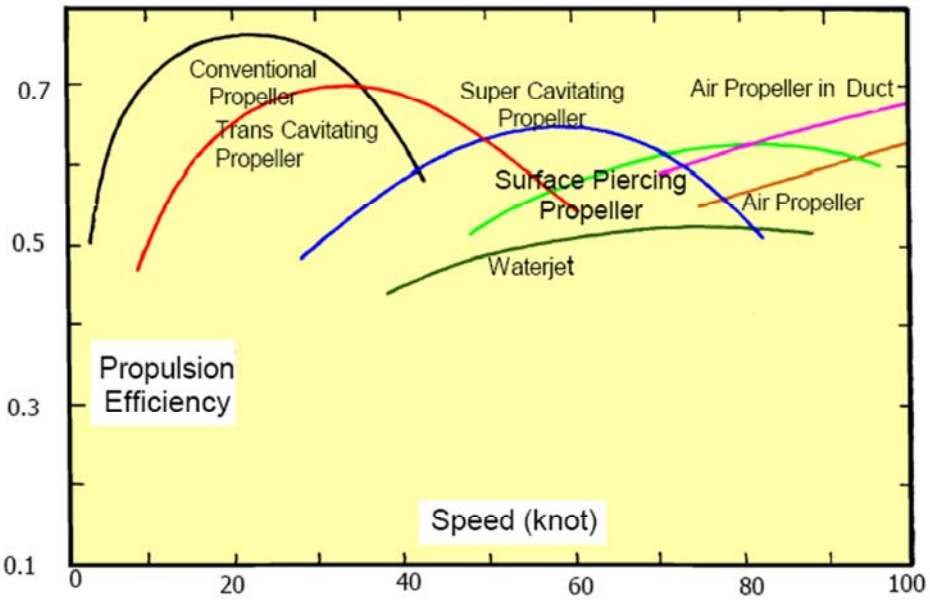


شکل ۱-۸۵: مقایسه بین بازدهی انواع وسایل نقلیه دریایی و غیر دریایی

امام علی (ع):
پنج چیز را قبل از پنج چیز غنیمت بدان:
۱-جوانی قبل از پیری
۲- سلامتی قبل از بیماری
۳- فراغت قبل از اشتغال
۴- زندگی پیش از مرگ
۵- توانگری قبل از فقر



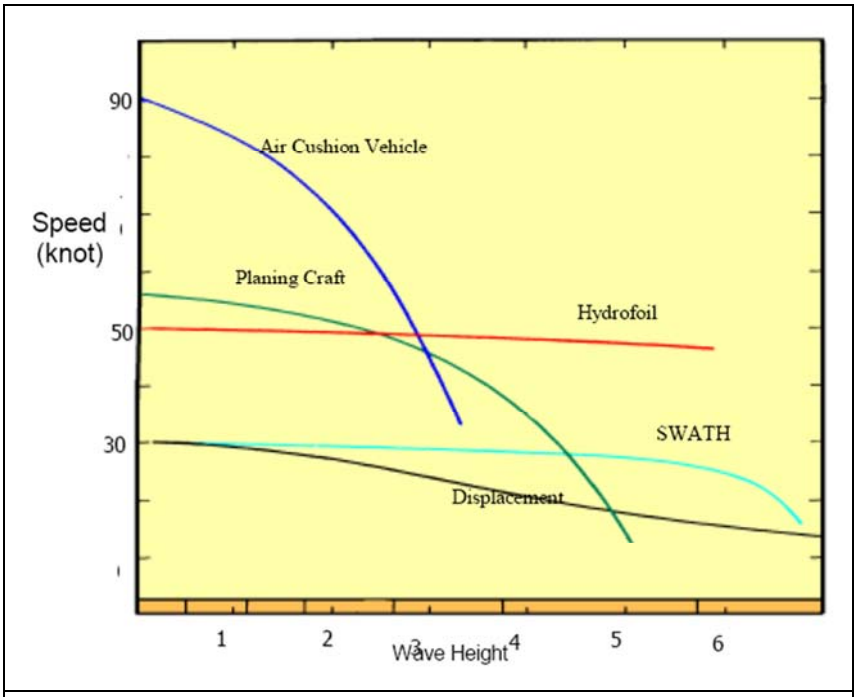
شکل ۱-۸۶: بازدهی حمل و نقل در آب آرام بر حسب سرعت برای انواع شناورها



شکل ۱-۸۷: بازدهی انواع سیستم‌های رانش

❖ خصوصیات حرکتی شناورها در امواج

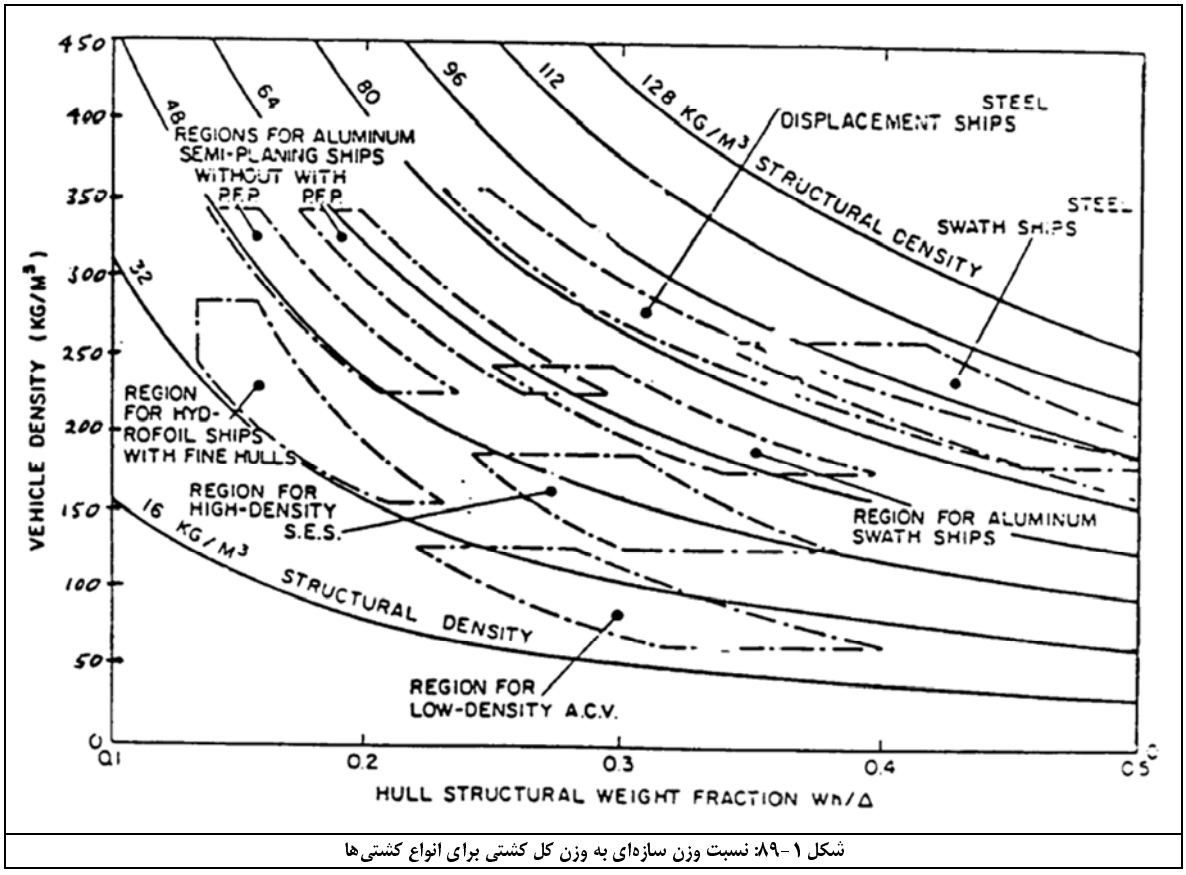
دو خصوصیت حرکتی شناورها در امواج، بسیار مهم هستند: ۱) شتاب عمودی وارد بر کشتی ۲) قابلیت حفظ سرعت و مسیر حرکت.
ملاحظه شده است که شتابهای عمودی در شناورهای هیدروفویلی بسیار وابسته به ارتفاع پایه هیدروفویل بوده و در هاورکرافتها بسیار وابسته به ارتفاع دامنه پرده نگهدارنده فشار هوا می‌باشد. برای یک هیدروفویل با فویلهای کاملاً مغروق، محدوده شتاب عمودی 0.04g – 0.03g را تجربه می‌کند و اگر هیدروفویل از نوع شکافنده آب باشد شتاب حدود 0.1g را احساس می‌کند. شناورهای اثرسطحی نیز شتاب عمودی حدود 0.07g و شناورهای دارای بالشتک شتاب در محدوده 0.5g – 0.15g را تجربه می‌کنند. شناورهای *SWATH* دارای شتاب عمودی حدود 0.15g و شناورهای تندرو سرشی حدود 0.35g شتاب عمودی دارند. مسئله کاهش سرعت در امواج نیز دلایل مختلفی دارد از جمله حرکات اسلمینگ، مقاومت افزوده، خیسی عرشه و حرکات ناخواسته کشتی. در شناورهای اثرسطحی و دارای بالشتک باید عامل فرار هوا از زیر بدنه نیز اضافه گردد.
شکل ۱–۸۸ عملکرد انواع شناورها در امواج را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که بهترین کارآیی در امواج متعلق به شناورهای هیدروفویلی، *SWATH* و سپس شناورهای جابجایی (تجاری معمولی) است. بدترین وضعیت نیز متعلق به هاورکرافتها می‌باشد. شناورهای تندرو سرشی نیز عملکرد متوسطی دارند.



شکل ۱–۸۸: عملکرد انواع شناورها در ارتفاع موج‌های مختلف

❖ وزن سازه‌ای شناورها

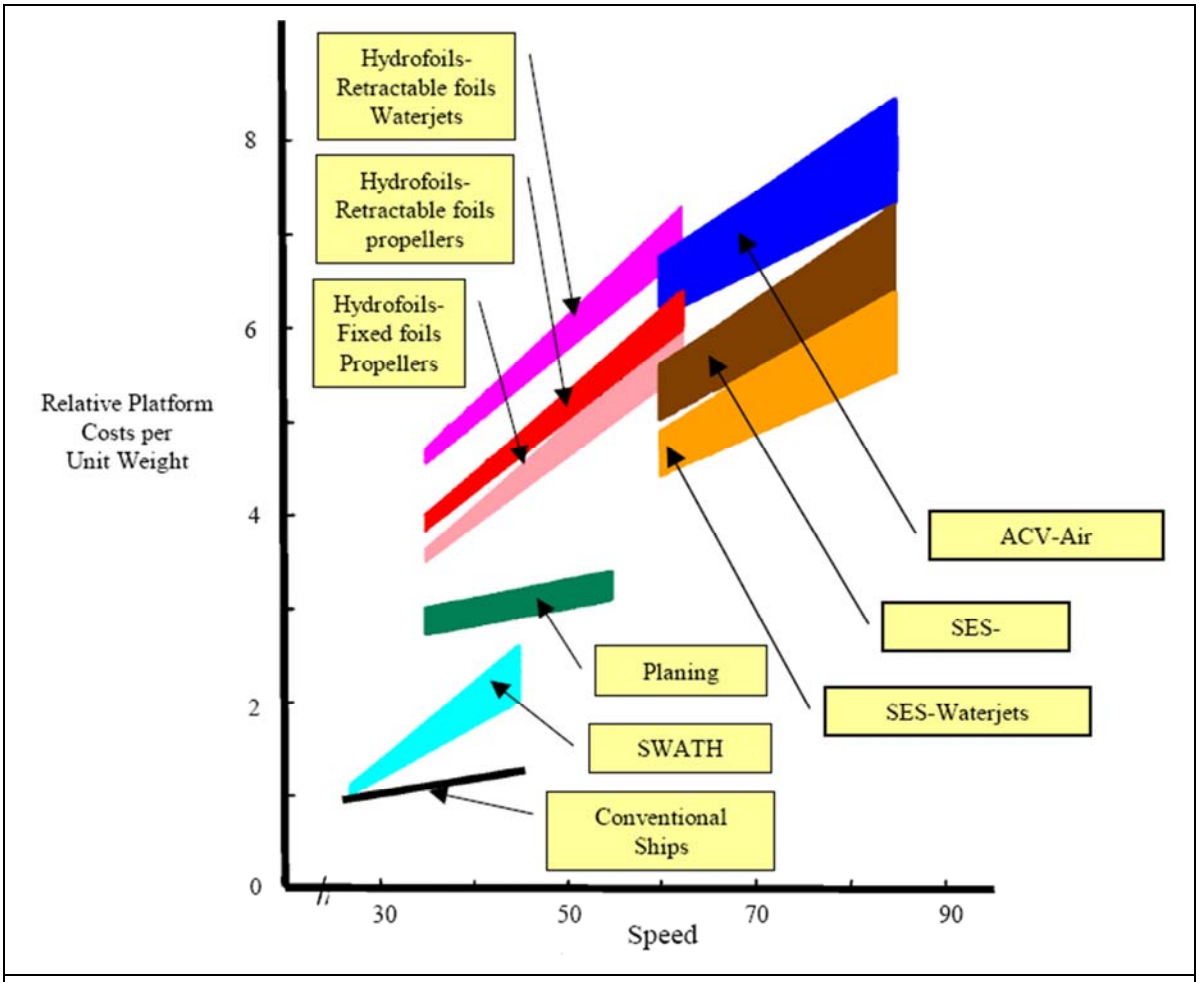
می‌دانیم که چگالی کل کشتی باید از چگالی آب دریا ($۱۰۲۵\ kg/m^3$) کمتر باشد تا کشتی بتواند روی سطح آب شناور بماند و غرق نشود. لذا هریک از اقلام و تجهیزات داخل کشتی دارای یک محدوده وزنی خاص و مجاز هستند تا چگالی کل کشتی از چگالی آب دریا بیشتر نشود. وزن سازه کشتی نیز دارای یک محدودیت خاص می‌باشد. در اغلب کشتی‌های تجاری معمولی از فولاد استفاده می‌شود ولی در شناورهای تندرو که نیاز است از سطح آب جدا شوند باید چگالی کل کشتی خیلی کمتر شود لذا برای کاهش وزن سازه‌ای از مواد سبک‌تر و البته گران‌تر استفاده می‌شود. مانند آلومینیوم. شکل ۱–۸۹ محدوده نسبت وزن سازه‌ای به وزن کل کشتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۸۹: نسبت وزن سازه‌ای به وزن کل کشتی برای انواع کشتی‌ها

❖ هزینه ساخت کشتی

شناورها بر حسب نوع آنها دارای هزینه‌های متفاوتی هستند. برای ایجاد یک مبنای مناسب برای مقایسه، از واحد هزینه بر واحد وزن کشتی استفاده می‌شود. معمولاً سرعت حرکت در هزینه کشتی بسیار مؤثر است. هرچه سرعت بالاتر رود، هزینه‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهند یافت. نمودارهای شکل ۱-۹۰ مقایسه مناسبی از مبنای هزینه انواع شناورها ارائه نموده است. محور افقی، سرعت و محور عمودی، هزینه بر واحد وزن است. یعنی برای یک شناور با سرعت ۸۰ گره کمترین هزینه، مربوط به شناور اثرسطحی با سیستم واترجت و بیشترین هزینه مربوط به شناور دارای بالشتک (ACV) با سیستم رانش هوایی است. بنابراین با توجه به سرعت مورد نیاز، ابتدا نوع کشتی انتخاب گردیده و سپس بر اساس نوع کشتی، واحد هزینه استخراج می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان گفت که بطور مثال هزینه شناور اثرسطحی واترجت ۱/۵ – ۲ برابر هزینه کشتی دارای بالشتک است.



شکل ۱-۹۰: مقایسه هزینه بر واحد وزن انواع شناورها در سرعتهای مختلف

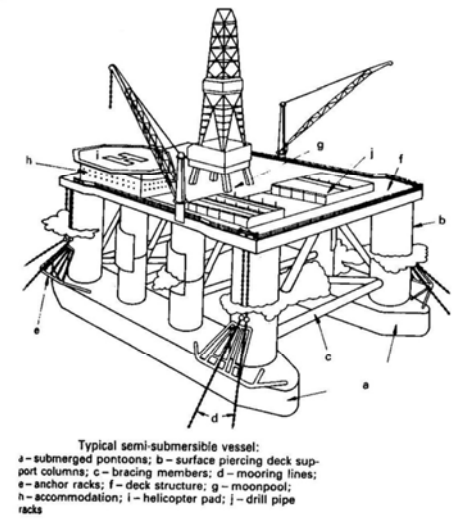
یاد بگیریم؛ محیط زیست خود را آلوده نکنیم
یاد بگیریم؛ زباله را از اتومبیل بیرون نیاندازیم
یاد بگیریم؛ وقتی برای گردش می‌رویم یک کیسه زباله همراه ببریم
و بدانیم؛ رعایت نظافت و حفظ محیط زیست نشانه شخصیت، تمدن و دین ماست.

بخش چهارم:
آشنایی با سکوها و شناورهای فراساحل

۱) سکوی خود بالابر[1]

این سکوها برای حفاری در آبهای کم عمق استفاده می‌شوند و معمولاً به شکل مثلثی و سه پایه هستند.[2] پایه‌ها مطابق شکل ۷۶ در سه گوشه مثلث قرار می‌گیرند و بوسیله ماشین‌آلات هیدرولیکی یا الکتریکی بالا و پائین می‌روند. این سکوها معمولا با بکارگیری بارج‌های بزرگ یا به صورت شناور به منطقه عملیاتی حمل می‌شوند. وقتی پایه‌های سکو بالا می‌باشند، بدنه اصلی سکو در داخل آب قرار داشته و به صورت شناور می‌باشد. وقتی پایه‌ها پائین آورده می‌شوند، پس از تماس با کف دریا، بدنه اصلی مثلثی را بالاتر از سطح آب می‌آورند و سکو بر روی سه پایه خود مستقر می‌شود و کار حفاری را شروع می‌کند. برای میدان‌های نفتی موقتی و کوچک، سکوهای خود بالابر برای استخراج نفت نیز استفاده می‌شوند. پس از اتمام کار، این سکوها به منطقه دیگری حمل می‌شوند. ایران یک نمونه از این سکوها را ساخته است (شکل ۱-۹۱).

شکل ۱-۹۱: سکوی خود بالابر خزر- صدرا



شکل ۱-۹۲: نمای کلی سکوی نیمه مغروق

۲) سکوی نیمه مغروق[3]

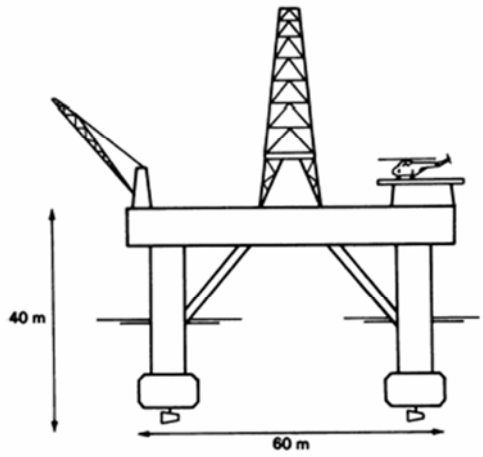
در گذشته، حفاری در آبهای تا عمق ۱۸ متر از روی شناورهای متشکل از یک یا چند پانتون (حجم‌های مکعبی شکل بزرگ) که عرشه را با ستونهایی نگه می‌داشتند انجام می‌گرفت. چنین سکوهایی تا منطقه عملیاتی به صورت شناور انتقال یافته و سپس با وارد کردن آب به داخل پانتون، سکو بر کف دریا قرار می‌گرفت و حفاری آغاز می‌شد. در طول زمان شناوری چنین سکوهایی مشاهده شد که این نوع سازه‌ها در پاسخ به تحریک امواج دریا حرکت کمی را به نمایش می‌گذارند. بعدها، این خصوصیت در طراحی سکوهای نیمه مغروق به کار گرفته شد. البته امروزه در این نوع سکوها در هنگام حفاری در آبهای عمیق، باز هم سکو به صورت شناور باقی مانده و تنها از مهارهایی جهت نگه‌داشتن سکو در موقعیت مورد نظر استفاده می‌شود.
شکل ۱-۹۲ تصویر یک سکوی نیمه مغروق امروزی است که دارای دو پانتون تأمین کننده شناوری سکو است و هشت ستون عمودی، پانتون‌ها را به عرشه متصل می‌نمایند. سکوی فوق را می‌توان بوسیله مهارهای کابلی یا زنجیری در موقعیت مورد نظر مهار نمود. عرشه سکو دارای یک سوراخ بزرگ

1- jack up

3- semi - submersible

۲- *منابع: [۳ و ۱۱]*

بنام «مون‌پول» در مرکز است که فعالیتهای لازم جهت حفاری از طریق آن انجام می‌پذیرد. اکثر نیمه‌مغروق‌ها دارای فضاهای مسکونی نیز هستند تا کارکنان سکو بتوانند برای مدت زمانی نسبتاً طولانی به روی سکو باقی بمانند. همچنین باند هلی‌کوپتر، موتورها، جرثقیلها و بسیاری دیگر از تجهیزات جزء ملزومات چنین سکوهایی است. حفاری کف دریا از طریق یک لوله عمودی به نام « رایزر » که مساحت زیر مون پول را به دهانه چاه متصل می‌کند انجام می‌گیرد. لوله حفاری که در انتهای آن مته حفاری قرار گرفته است از درون رایزر عبور می‌کند و کار حفاری را انجام می‌دهد. سیال روغنکاری آن همان گل حفاری می‌باشد که از درون رایزر عبور می‌کند و حین حفاری با فشار زیاد به پائین پمپ می‌شود و از فضای موجود بین لوله حفاری و رایزر به بالا برمی‌گردد. فشار گل حفاری برای گرداندن مخروط سر مته است و خود لوله حفاری هم با سرعتی تا ۲۵۰ دور بر دقیقه دوران می‌کند. گل حفاری چندین وظیفه دارد؛ مته را روغنکاری می‌کند، باعث گردش مخروط سر مته می‌شود، مواد را به سطح آب هدایت می‌کند و نهایتاً فشار هیدرواستاتیکی کافی برای مقاومت در برابر فشار بالای احتمالی نفت یا گاز را مهیا می‌سازد. حرکت عمودی کم ولی مهم سکو که ناشی از امواج دریا می‌باشد بوسیله یک اتصال لغزشی نصب شده در انتهای برج حفاری دفع می‌شود. یک عامل کششی[1] هم نیروی رو به بالای لازم به روی رایزر را ایجاد می‌کند تا این سازه بلند همیشه در کشش باقی بماند و از کمانش آن جلوگیری گردد. همچنین سیستم مهاربندی باید دقت لازم جهت نگهداری سکو در موقعیتی با خطای حداکثر ۷٪ عمق آب نسبت به موقعیت تعیین شده را دارا باشد تا حفاری امکان‌پذیر گردد. حداکثر عمق آب و شرایط آب و هوایی که حفاری بوسیله سکوهای نیمه مغروق امکان‌پذیر است، تابعی از سیستم مهاربندی و مقدار لوله حفاری و رایزر قابل حمل بوسیله سکو و قابلیت تحمل حرکت عمودی بوسیله تجهیزات حفاری است. برای عمق‌های بیشتر از ۴۵۰ متر، موقعیت سکو بصورت دینامیکی تثبیت و کنترل می‌شود. تثبیت دینامیکی موقعیت(DPS) [2] دارای پیشرانه‌های کوچک (تراستر) متعددی است که به سرعت تغییر جهت داده یا روشن و خاموش می‌شوند. برایند جهت نیروی ایجاد شده در این تراسترها به گونه‌ای است که خلاف جهت نیروی امواج و نیروهای خارجی باشد و سکو را در موقعیت اولیه حفظ نماید. تثبیت موقعیت دینامیکی در بسیاری از کشتی‌های حفاری بکار گرفته شده است. این سیستم‌ها دارای تجهیزاتی جهت مشخص نمودن موقعیت لحظه‌ای شناور هستند که فاصله افقی نسبت به دهانه چاه را به عنوان سیگنال خطا تعیین می‌نماید و این سیگنال خطا وارد یک مدار کنترل می‌شود و نهایتاً رانش‌دهنده‌ها پاسخ مناسب را برای کاهش سیگنال خطا انجام می‌دهند. این روند در تمام مدت حفاری ادامه می‌یابد تا شناور تا حد ممکن در بالای محور قائم گذرنده از دهانه چاه قرار گیرد. شکل ۱-۹۳ نمایش‌دهنده جانمایی پیشرانه‌ها در زیر سکو است. از نظر تئوری عمق زیاد آب محدودیتی برای کار سکوهای فوق نیست ولی در عمل طول رایزرهای قابل حمل بوسیله سکو یک محدودیت به وجود می‌آورد و همچنین احتمال کمانش و تأثیر حرکت عمودی به روی رایزر بسیار مهم خواهد بود. در هر حال بایستی اتصال رایزر به سکوهای شناور مجهز به سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی در شرایط خیلی بد دریا قطع گردد و بعد از آرام شدن مجدد دریا اتصال فوق را برقرار نمود. مشخصات سکوی ایران-البرز از قرار زیر است (شکل ۱-۹۴).



شکل ۱-۹۳: جانمایی پیشرانه‌ها در زیر سکو

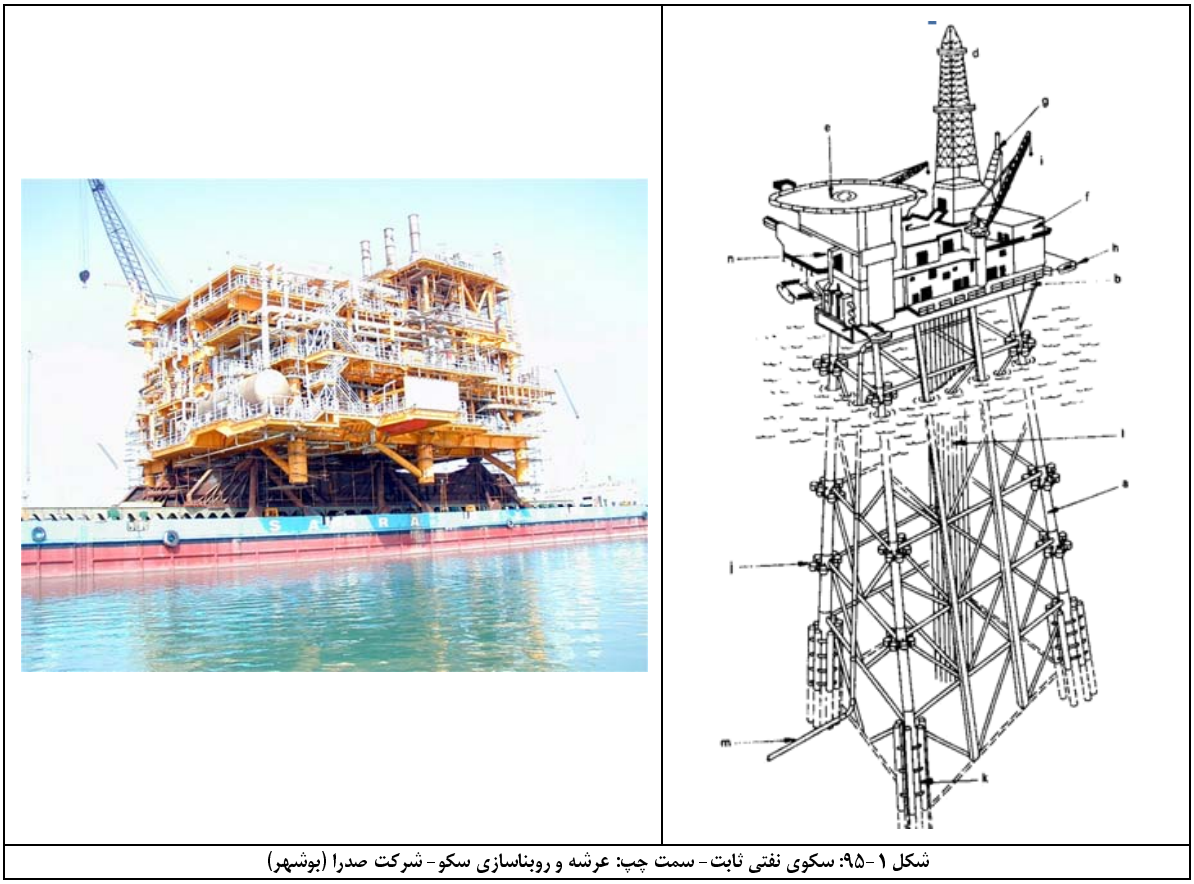
شکل ۱-۹۴: سکوی نیمه غوطه‌ور ایران-البرز (شرکت صدرا)- طول: ۹۸/۶ متر- عرض: ۷۸/۸ متر- ارتفاع: ۳۶/۵ متر- ارتفاع از سر دکل: ۶۱/۵ متر

۳) سکوی نفتی ثابت

این سکوها برای استخراج نفت در آبهای عمق کم و متوسط استفاده می‌شوند. شکل کلی این سکوها مطابق شکل ۱-۹۵ می‌باشد. بخش فوقانی این سکو را عرشه[3] می‌گویند که قسمتهای مختلفی را شامل می‌شود. از جمله تجهیزات و دکل حفاری، باند هلی‌کوپتر، جرثقیل‌ها، محل اسکان خدمه و

1- tensioner
2- Dynamic Positioning System
3- platform

تجهیزات رفاهی. پایه نگهدارنده زیر سکو را «جکت» یا «پایه سکو» گویند. این پایه بوسیله شمع‌هایی که از داخل پایه‌ها عبور داده شده، به کف دریا شمع کوبی شده و دوخته می‌شود. نفت خام و گاز به قسمت بالای سکو انتقال می‌یابد و پس از عملیات اولیه تصفیه، از طریق لوله به نفتکش‌ها یا واحدهای تصفیه و توزیع ساحلی منتقل می‌شود. طول عمر یک سکوی ثابت ۱۰ تا ۲۵ سال است. پس از اتمام نفت در میدان نفتی، برای جلوگیری از صدمه به محیط زیست، سکو از محل خود برداشته و از رده خارج می‌شود. ابتدا پایه سکو، آب‌اندازی و نصب می‌شود و سپس عرشه سکو در دریا، بر روی پایه بوسیله جرثقیل نصب می‌شود. ایران نمونه‌های متعددی از این سکوها را ساخته و نصب کرده است (شکل ۱-۹۵).



شکل ۱-۹۵: سکوی نفتی ثابت- سمت چپ: عرشه و روبناسازی سکو- شرکت صدرا (بوشهر)

۴) سکوی بتونی[1]

شکل کلی این سکوها مطابق شکل ۱-۹۶ می‌باشد که پایه سکوها از جنس بتون می‌باشد. استوانه‌های متعدد زیر سکو که بر روی کف دریا نشسته‌اند نیز بتونی بوده و مخازن ذخیره نفت هستند. این سکوها برای آبهای کم عمق استفاده می‌شوند و دارای مزایا و معایب زیر هستند.

✓ **مزایا:**

- کاربرد در شرایط بسیار بد جوی و دریاهای طوفانی
- ذخیره‌سازی نفت در داخل پایه‌های سکو
- ساخت کل سکو (پایه و عرشه) در ساحل و عدم نیاز به نصب جداگانه پایه و عرشه در دریا
- حذف فرآیند شمع‌کوبی برای ثابت کردن پایه به کف دریا (بدلیل وزن زیاد سکو که براحتی بر کف دریا مستقر می‌شود).
- خوردگی اندک سکو بدلیل جنس بتونی آن

✓ **معایب:**

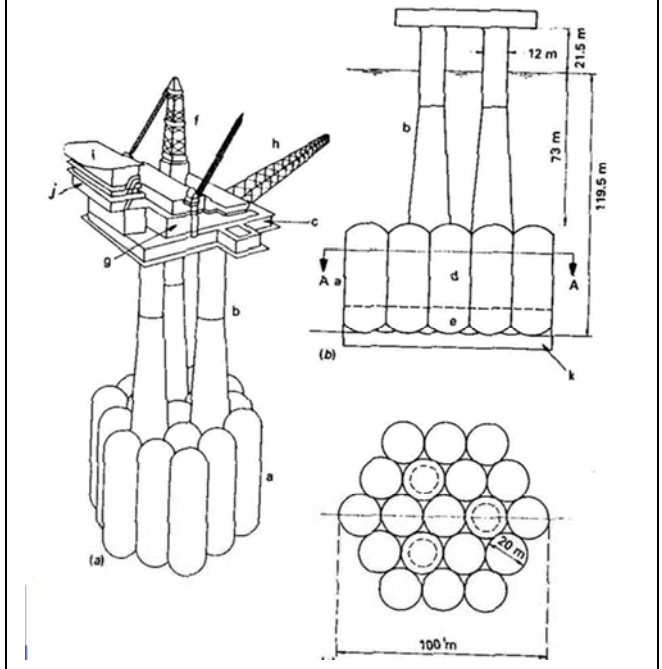
- هزینه بیشتر نسبت به سکوهای فولادی
- بکارگیری فولاد زیاد داخل بتون
- نشست و فرورفتن در کف دریا
- دشواری از بین بردن سکو پس از بهره‌برداری
- امکان نشت نفت از درزهای مخازن بتونی

1- concrete platform

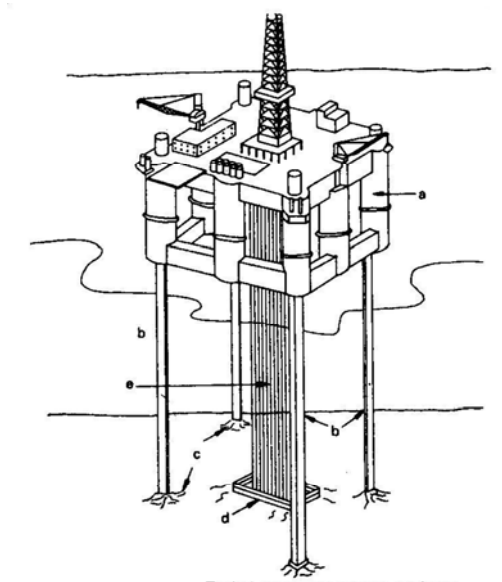
سکوهای بتونی برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ در دریای شمال ساخته و نصب شدند. ابتدا وقتی مخازن نفتی خالی هستند، سکو بر روی آب شناور می‌ماند. برای قرارگیری سکو در کف دریا، مخازن آن را پر از آب می‌کنند، سکو سنگین شده و بر کف دریا می‌نشیند.

۵) سکوی پایه کششی (TLP) [1]

این سکوها، همانند سکوهای نیمه مغروق، بر روی آب شناور هستند با این تفاوت که برای تثبیت موقعیت آن از چندین رشته کابل تحت کشش مطابق شکل ۱-۹۷ استفاده می‌شود. تحت کشش بودن شناور بخوبی باعث تثبیت موقعیت سکو می‌شود و حرکات عمودی و غلتش بخوبی مهار می‌گردد و البته باعث نیاز به ۱۵ تا ۲۵ درصد شناوری اضافی برای غلبه بر نیروی کشش می‌شود. این سکوها برای حفاری در آبهای عمیق بین ۱۲۰ تا ۱۵۰۰ متر بکار می‌روند. این نوع سکو برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ ساخته و نصب شد.



شکل ۱-۹۶: نمای کلی از سکوهای بتونی

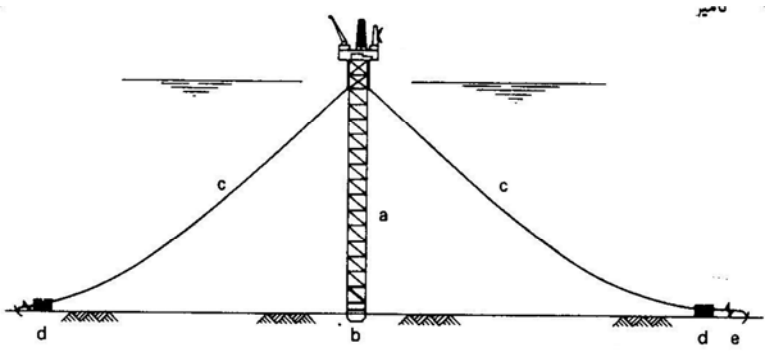


شکل ۱-۹۷: سکوی پایه کششی (TLP)

۶) سکوی برج مهار شده [2]

نوع دیگر از سکوها، برجهای مهار شده هستند که برج آن باریک و خرپا مانند است و در کف دریا داخل حوضچه‌ای کوچک قرار داده می‌شود همانند شکل ۱-۹۸. برای حفظ تعادل برج و نگه داشتن آن به حالت قائم از مهارهای متعدد کابلی یا زنجیری استفاده می‌شود که برای اطمینان در انتهای آن شمع یا وزنه‌های سنگین قرار می‌گیرند. سیستم مهاربندی به نحوی طراحی می‌شود که امکان جدا شدن برج از کف دریا در شرایط خیلی بد آب و هوایی وجود داشته باشد. این امر به کاهش نیروهای وارد بر برج کمک می‌نماید. برجهای مهار شده تقریباً تمام مزیتهای سکوهای ثابت فولادی را دارا هستند، ولی در مقایسه با یک سکوی ثابت معادل به هزینه کمتری نیاز دارند. یکی از اولین برجهای مهار شده در خلیج مکزیک نصب گردید. این برج دارای وزن فولادی معادل ۲۴۱۰۰ تن و قسمت فوقانی ۱۹۶۴۰ تن است و عمق دریا در محل فوق ۳۰۵ متر بوده است. سیستم مهار برج فوق بوسیله بیست کابل فولادی و لنگرهایی به وزن ۱۷۹ تن تأمین شده است.

1- Tension Leg Platform
2- Guyed tower

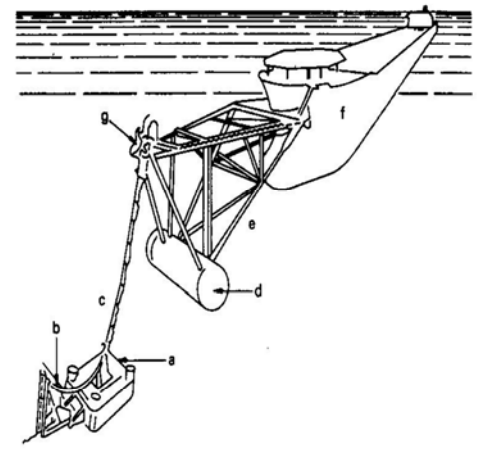


Guyed tower production platform:
a – slender tower; b – spud can foundation; c – mooring lines; d – sea bed clump weights; e – anchors

شکل ۱-۹۸ : سکوی برج مهار شده

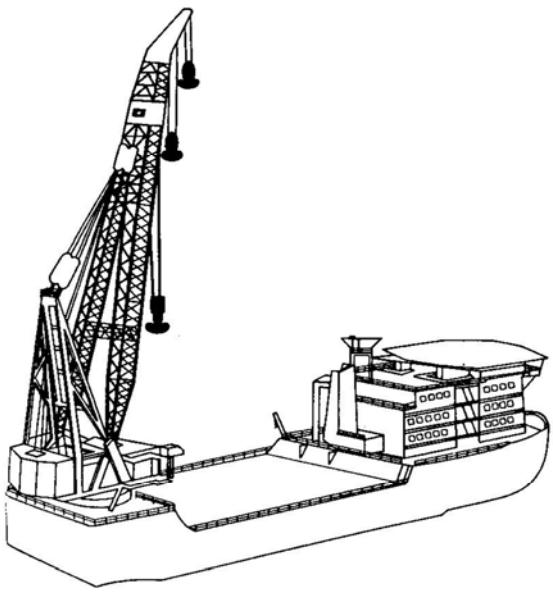
۷) سکوی شناور متصل به بویه استخراج

نوع دیگر سکو، سکوی شناور متصل به بویه (حجم استوانه‌ای تو خالی) یا مهار نقطه‌ای برای اعماق تا ۱۷۰ متر است. شناور این نوع سکوها معمولا شبیه نفتکش‌های بزرگ است و برای ذخیره‌سازی و عملیات اولیه لازم فضای کافی در آن وجود دارد. (شکل ۱–۹۹) . بعد از تصفیه اولیه، نفت به نفتکش دیگری که به نفتکش استخراج متصل می‌شود انتقال می‌یابد و به نقاط مورد نظر حمل می‌شود. راه حل دیگری نیز وجود دارد که می‌توان سکوی استخراج را حذف نمود و تأسیسات لازم را در بویه بزرگتری تعبیه کرد. در این حالت نفت مستقیما از سکو به نفتکش حمل کننده منتقل می‌شود. در طرح نمایش داده شده در شکل ۱–۹۹ اتصال لازم بین نفتکش استخراج و رایزر بوسیله یک المان قوی بنام یوک[1] تأمین می‌شود.



Single anchor leg production and storage system: a – riser base; b – jumper hose; c – tension and production risers; d – buoyancy tank; e – yoke; f – tanker with production equipment and storage; g – universal joint

شکل ۱-۹۹: سکوی شناور متصل به بویه استخراج



Ship shape crane vessel

شکل ۱-۱۰۰ : جرثقیل شناور

1- yoke

۸) جرثقیل شناور[1]

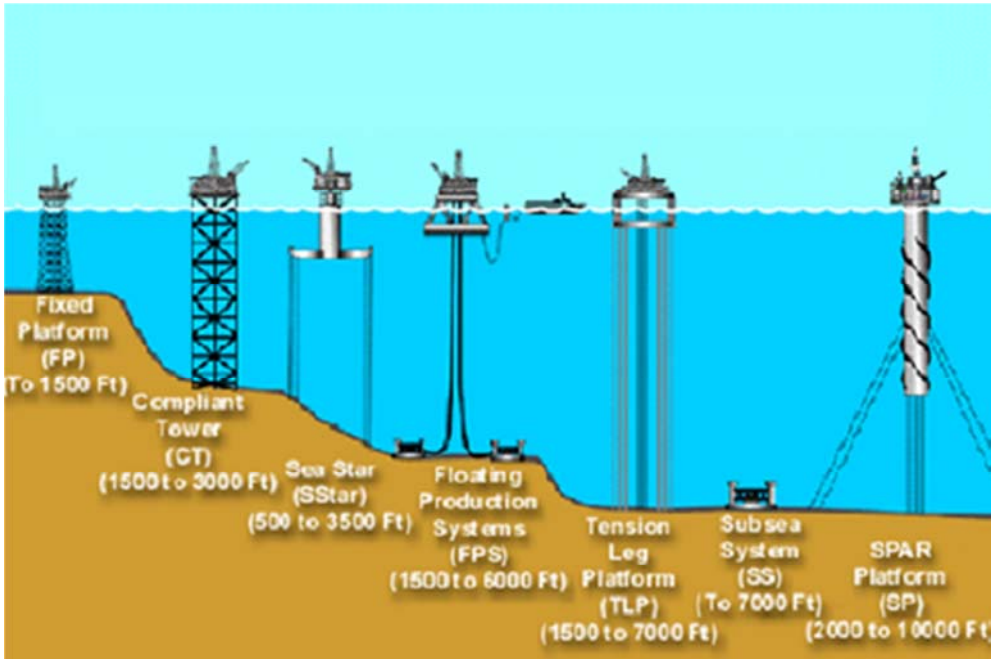
برای نصب اغلب سکوها نیاز به جرثقیل‌هایی با ظرفیت بالا می‌باشد که در داخل دریا، سکو را برداشته و در محل مورد نظر نصب کند. لذا از شناورهای جرثقیل‌دار بزرگی استفاده می‌شود که شکل کلی آن شبیه شکل ۱-۱۰۰ می‌باشد. قسمت جلوی شناور، محل روبناسازی و قسمت اسکان خدمه شناور است. قسمت انتهایی شناور نیز یک جرثقیل با تناژ بالا است. برای نصب برخی از سکوها و پایه‌ها نیاز به ۲ یا چند جرثقیل شناور می‌باشد.

۹) هتل بارج[2]

در مواقعی که یک سکو در یک منطقه مشغول حفاری و اکتشاف نفت است، تعدادی خدمه بر روی سکوی حفاری مشغول کار هستند که اگر خود سکو دارای امکانات رفاهی نباشد، از یک هتل بارج در کنار سکو استفاده می‌شود. این بارج که دارای سیستم رانش مستقل نمی‌باشد، دارای عرشه‌های متعدد و بلند و امکانات رفاهی بسیار کاملی است. این هتل بارج‌ها دارای کاربردهای تفریحی نیز می‌باشد.

۱۰) قایق‌های حمل خدمه[3]

اگر فاصله سکو از ساحل زیاد باشد، جابجایی خدمه و تعویض شیفتهای کاری بوسیله هلی‌کوپتر انجام می‌شود ولی اگر فاصله سکو تا ساحل کم باشد، جابجایی خدمه توسط قایق‌هایی انجام می‌شود که قابلیت حمل حداقل ۳۰ خدمه به همراه تجهیزات فردی، مواد خوراکی و آشامیدنی آنها را دارد. این قایقها که اغلب در صنایع فراساحل استفاده می‌شوند، تفاوت چندانی با قایق‌های مسافری معمولی ندارند. شکل ۱-۱۰۱ نشان دهنده محدوده کاربرد سکوهای مختلف با توجه به عمق آب دریا می‌باشد.



شکل ۱-۱۰۱: محدوده کاربرد سکوهای مختلف با توجه به عمق

شکسپیر: به همه عشق بورز، به تعداد کمی اعتماد کن و به هیچ کس بدی نکن

1- Crane Vessel
2- Hotel Barge
3- Crew boat

بخش پنجم:
خطوط بدنه کشتی‌ها و جداول سری ۶۰

❖ سه نمای اصلی بدنه [۱]

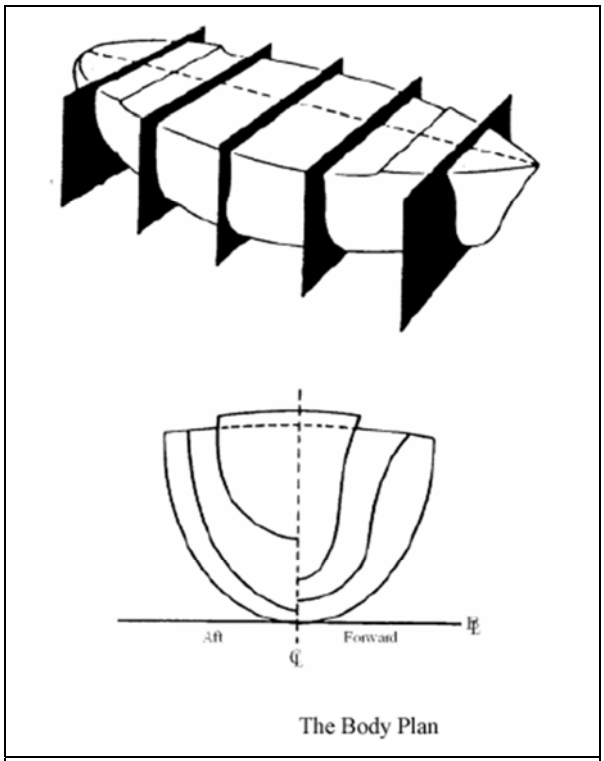
شکل بدنه کشتی معمولاً یک شکل هندسی نامعین است که به وسیله سه نمای اصلی تشریح می‌شود :

۱- نما از مقابل[۲]

۲- نما از کنار [۳]

۳- نما از بالا (نمای آبخور)[۴]

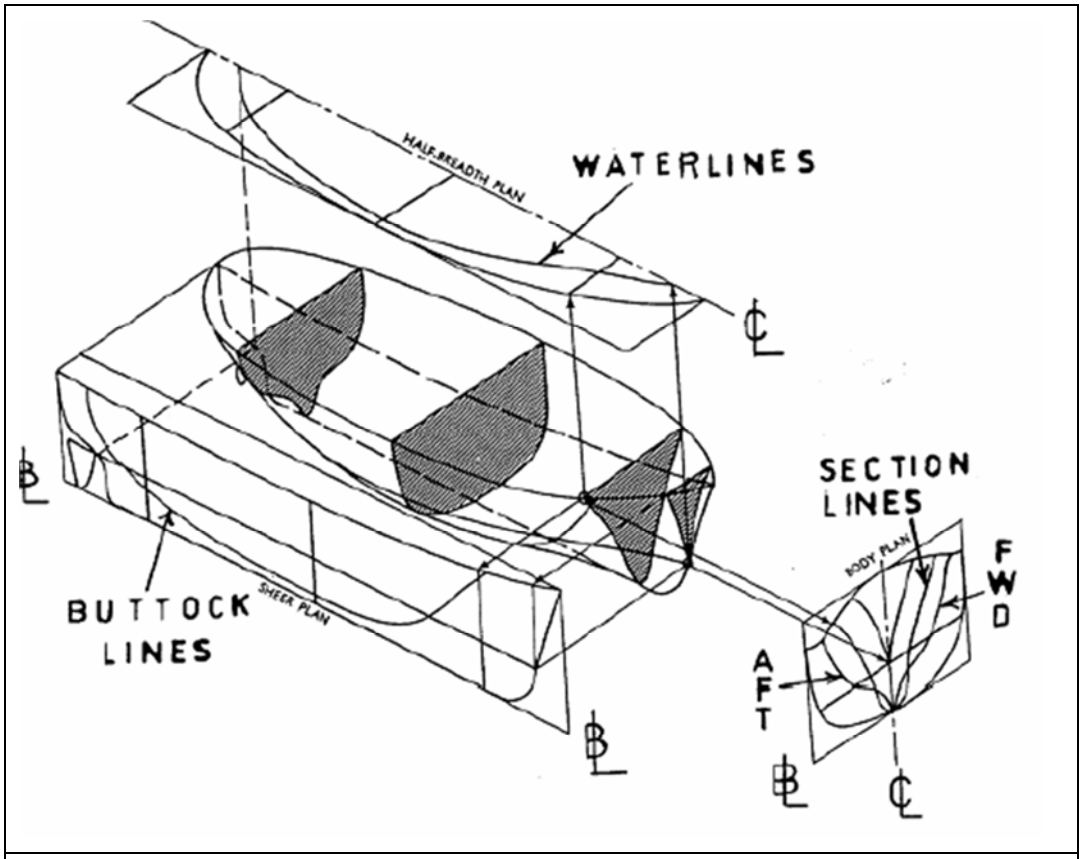
نمای مقابل شناور به وسیله صفحات برش عرضی[۵] (مطابق شکل ۱-۱۰۲) مشخص می‌شود . این مقاطع دارای فواصل مساوی در طول بدنه هستند به غیر از قسمت سینه و پاشنه که به دلیل انحنای شدید بدنه، ممکن است از فواصل کوچکتر برش عرضی استفاده شود.



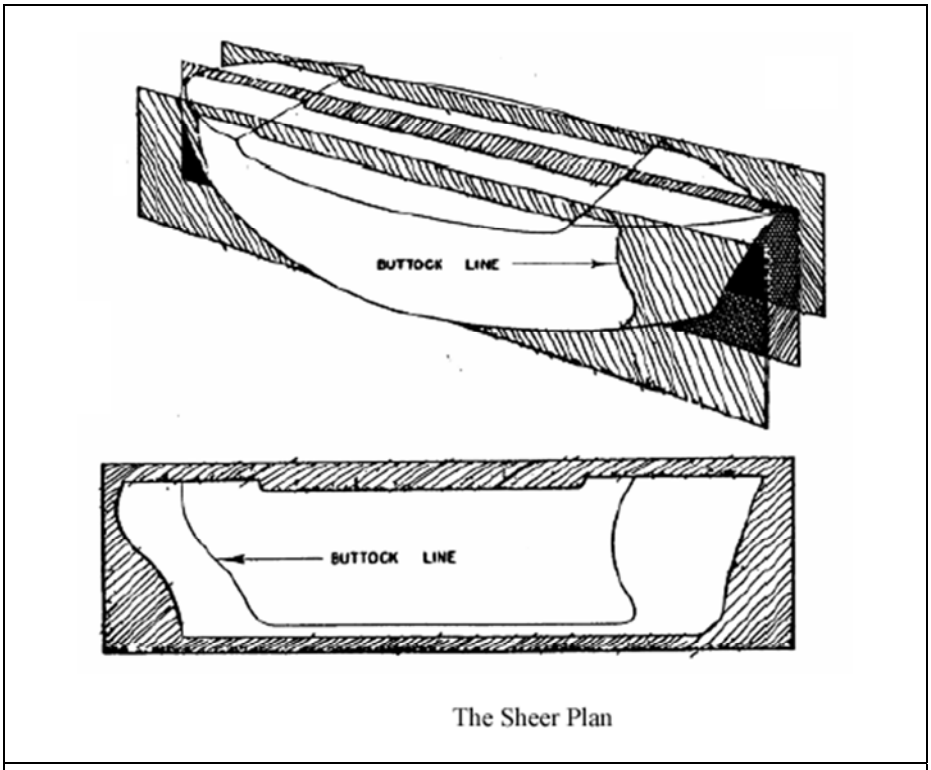
شکل ۱-۱۰۲: نمای مقابل بدنه کشتی

۱- منابع: [۱ و ۶ و ۴ و ۲]

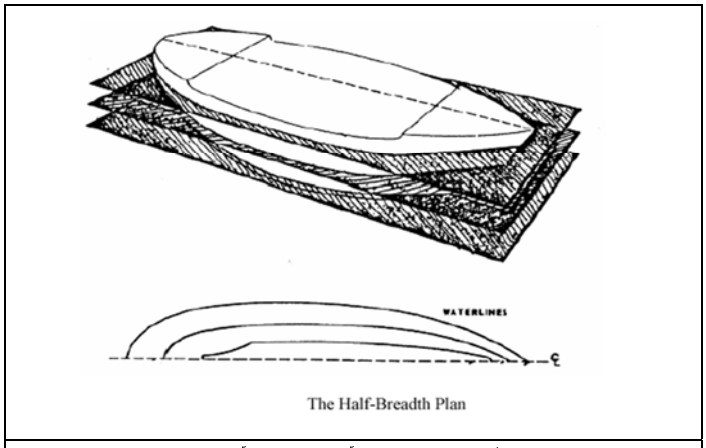
2- Body Plan
3- Sheer Plan
4- half Breadth plan - waterplan
5- Section



شکل ۱-۱۰۳: خطوط بدنه در سه نمای اصلی شناور



شکل ۱-۱۰۴: برش‌های طولی و خطوط باتوک



شکل ۱-۱۰۵: نمای آبخور و خطوط آبخور

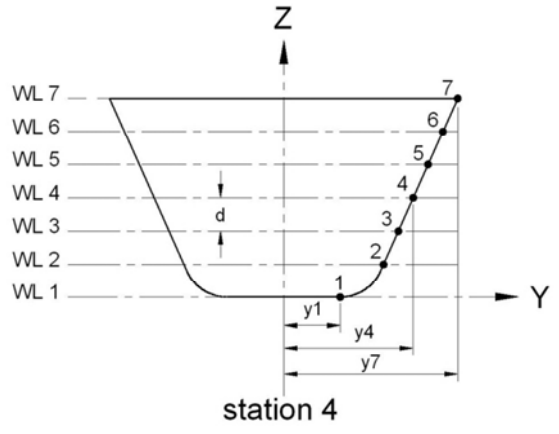
این برش‌ها تشکیل خطوط نمای مقابل[1] را می‌دهند که در شکل ۱-۱۰۲ملاحظه می‌شود. معمولاً در شناورها از حدود ۲۰ برش عرضی استفاده می‌شود که بتوان با دقت بیشتری خطوط بدنه را تعیین کرد. از آنجا که قسمت چپ و راست هندسه بدنه شناور با هم متقارن هستند، لذا در این نما فقط نیمی از بدنه نمایش داده می‌شود. مقدار نیم عرض برش‌های جلو تا وسط بدنه در قسمت راست و برش‌های وسط تا پاشنه بدنه در قسمت چپ این نما، نشان داده می‌شود که می‌توان در شکل ۱-۱۰۲ آن را مشاهده کرد. «نما از کنار» نیز توسط صفحات برش طولی ایجاد می‌گردد که به این خطوط ایجاد شده «باتوک»[2] گویند که در شکل ۱-۱۰۴ ملاحظه می‌شود . معمولاً حدود ۳-۵ برش طولی برای این نما در قسمت چپ یا راست بدنه (به دلیل تقارن بدنه) در نظر گرفته می‌شود. «نما از بالا» توسط صفحات آبخور (مطابق شکل ۱-۱۰۵) بیان می‌شود که خطوط آبخور را تشکیل می‌دهد. خطوط آبخور نیز به دلیل تقارن بدنه به صورت نیم عرض (نیمی از عرض آبخور) نمایش داده می‌شود. بنابراین می‌توان سه نمای بدنه را به صورت تصاویر خطوط بدنه بر سه صفحه روبرو، جانبی و بالا مطابق شکل ۱-۱۰۳ بیان کرد که همگی به دلیل تقارن بدنه (چپ و راست) برای نیمی از بدنه ترسیم می‌شوند.

❖ جدول آفست[3]

بیان داشتیم که شکل هندسی بدنه به وسیله خطوط بدنه در سه نما تبیین می‌گردد. هر یک از این سه نما توسط خطوطی نمایش داده می‌شوند که این خطوط نیز از نقاطی تشکیل شده‌اند. حال اگر مختصات این خطوط را در داخل جدولی داشته باشیم، می‌توانیم سه نمای بدنه را ترسیم کنیم. جدول آفست نیز جدولی است که به کمک آن می‌توانیم «نمای روبرو» و «نمای آبخور» را بطور مستقیم و «نمای جانبی» را نیز به طور غیر مستقیم ترسیم کنیم. مطابق شکل ۱-۱۰۶، سطر فوقانی نشان دهنده محل مقاطع عرضی و ستون اول نشان دهنده آبخورها می‌باشد. این شناور دارای ۷ آبخور و ۱۳ مقطع عرضی است.

Station / WaterLine	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
WL 1				y_1									
WL 2				y_2									
WL 3				y_3									
WL 4				y_4									
WL 5				y_5									
WL 6				y_6									
WL 7				y_7									

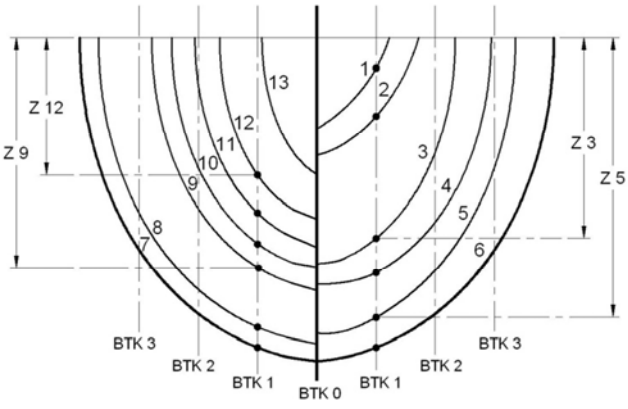
شکل ۱-۱۰۶: جدول آفست



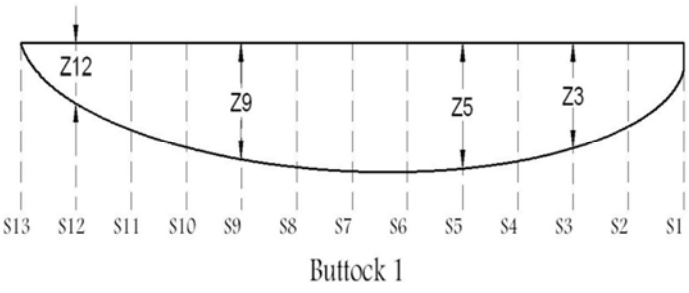
شکل ۱-۱۰۷: مختصات‌دهی مقطع عرضی و تکمیل جدول آفست

1- section line
2- Buttock Line
3- table of offset

بطور مثال اگر طول بدنه شنارو ۱۳۰ متر و عمق بدنه ۶ متر باشد، فواصل هر یک از مقاطع عرضی ۱۰ متر و فواصل هر یک از آبخورها ۱ متر می‌باشد. مطابق شکل ۱-۱۰۷ فرض کنید می‌خواهیم جدول آفست را برای مقطع ۴ تکمیل کنیم. فاصله نیم عرض آبخور *WL1* با بدنه برابر y_1، و نیم عرض آبخور *WL4* برابر y_4 است و همچنین برای کلیه آبخورها نیز به همین ترتیب فواصل نیم عرض استخراج و در جدول آفست وارد می‌شود. در واقع اگر محور طولی x، محور عرضی *y* و محور عمودی برابر z باشد، جدول آفست بیانگر مختصات *(y,z)* در هر مقطع عرضی است. y در هر نقطه از روی شکل خوانده می‌شود و z نیز برای هر آبخور، مشخص می‌باشد. مثلاً برای مختصات نقطه *4* داریم (y_4, z_4) که $Z_4 = 3 \times d = 3 \times 1 = 3m$ (فواصل آبخورها در مثال فوق ۱ متر در نظر گرفته شد) و برای نقطه *7* داریم: (y_7, z_7) که $Z_7 = 6 \times d = 6 \times 1 = 6m$ اگر این مختصات را برای کلیه مقاطع عرض وارد کنیم، جدول آفست تکمیل می‌گردد. از جدول آفست می‌توان به راحتی نمای مقابل و نمای آبخور را مستقیماً ترسیم کرد ولی نمای جانبی را نمی‌توان به طور مستقیم از جدول آفست ترسیم نمود بلکه باید نمای مقابل را ترسیم کرده و با اندازه‌گیری فواصل عمودی هر نقطه از مقاطع، بتوان خطوط «باتوک» را ترسیم کرد. اگر نمای جانبی دارای سه خط برش باشد، فاصله عمودی محل تقاطع آنها با مقاطع عرضی را اندازه‌گیری و ترسیم می‌کنیم. مثلاً اگر بخواهیم *Btk1* را ترسیم کنیم، فواصل عمودی را به صورت زیر استخراج و رسم می‌کنیم (شکل ۱-۱۰۸ و ۱-۱۰۹).



شکل ۱-۱۰۸: استخراج مختصات باتوک ۱ از نمای مقابل



شکل ۱-۱۰۹: ترسیم نمای جانبی (باتوک ۱) با توجه به شکل ۷

این مختصات‌ها در جدولی به نام جدول «خطوط نمای جانبی» به صورت زیر (شکل ۱-۱۱۰) نمایش داده می‌شوند. برای سایر برش‌های جانبی نیز به همین ترتیب (مطابق شکل ۱-۱۱۱)، جدول فوق تکمیل می‌گردد.

❖ استخراج جدول آفست برای شناور ساخته شده

در برخی موارد، در شناورهای قدیمی، دفترچه پایداری[1] شناور که جزء مدارک ضروری شناور است، مفقود گردیده و این محاسبات باید مجدداً برای شناور انجام شود. نقطه شروع برای تهیه این مدارک، تهیه جدول آفست می‌باشد که باید از روی بدنه ساخته شده استخراج گردد. اقلام مورد نیاز برای این کار عبارت است از:

- شاقول
- ریسمان طویل
- خط‌کش

1- Stability booklet

مراحل به ترتیب زیر انجام می‌شوند:

۱- اندازه‌گیری طول شناور به کمک ریسمان و ترسیم خط مستقیم کنار شناور (برابر با طول شناور و موازی با خط مرکزی)

۲- تعیین محل مقاطع عرضی در نظر گرفته شده بر روی خط ترسیم شده در کنار شناور

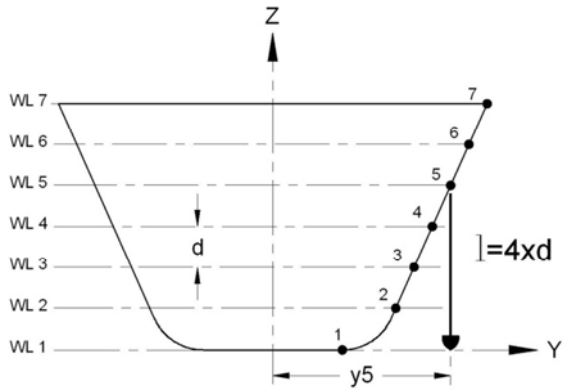
۳- اندازه‌گیری عمق بدنه با استفاده از ریسمان و در نظر گرفتن تعدادی آبخور و تعیین فواصل آبخورها

۴- در هر مقطع مشخص، چسباندن شاقول با طولی برابر ارتفاع آبخور به بدنه و تعیین نیم عرض (مطابق شکل ۱-۱۱۲)

فرض کنید محل مقاطع عرضی مشخص شده باشد و بخواهیم نیم عرض‌ها را در مقطع ۴ از بدنه استخراج کنیم. به طور مثال برای $WL5$ که ارتفاع آبخور برابر $4d$ می‌باشد (فواصل آبخورها برابر d)، طول ریسمان شاقول را به اندازه $L=4d$ جدا می‌کنیم و این طول را به بدنه می‌چسبانیم. محل تماس ریسمان با بدنه همان محل آبخور $WL5$ است. فاصله پای شاقول را از خط مرکزی اندازه گرفته و آن نیم عرض را وارد جدول آفست می‌کنیم. این نیم عرض برای آبخور $WL5$ برابر y_5 می‌باشد. برای استخراج نیم عرض در آبخور بعد، طول ریسمان شاقول را به اندازه $5d$ جدا کرده و به بدنه می‌چسبانیم و در محل تماس، نیم عرض y_6 را استخراج می‌کنیم. برای تکمیل جدول آفست، این فرآیند را برای کلیه آبخورها و در تمام مقاطع عرضی انجام می‌دهیم.

Station / Buttock	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Btk 1	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}
Btk 2													
Btk 3													

شکل ۱-۱۱۱: جدول خطوط نمای جانبی



شکل ۱-۱۱۲: اندازه‌گیری فاصله نیم‌عرض با استفاده از شاقول

محل مقاطع عرضی	فواصل عمودی از عرشه
S1	Z_1
S2	Z_2
S3	Z_3
S4	Z_4
S5	Z_5
S6	Z_6
S7	Z_7
S8	Z_8
S9	Z_9
S10	Z_{10}
S11	Z_{11}
S12	Z_{12}
S13	Z_{13}

شکل ۱-۱۱۰: جدول خطوط نمای جانبی

❖ ضرایب بدنه[1]

ضرایب بدنه شناور تعیین کننده شکل بدنه می‌باشند به گونه‌ای که با در اختیار داشتن این ضرائب، می‌توان شکل کلی بدنه را تصور کرد. همچنین با در اختیار داشتن این ضرائب می‌توان جدول آفست مناسب برای موضوع طراحی شناور را از جداول سری ۶۰ انتخاب کرد. در جداول سری ۶۰ تعداد زیادی از جداول آفست آورده شده که برای انواع کشتی‌های تجاری قابل کاربرد می‌باشد و در بالای هر جدول آفست ضرایب بدنه داده شده است که نشانگر شکل کلی بدنه شناور است. در حالت کلی، ضرایب بدنه توصیفی از شکل بدنه و نوع شناور هستند. این ضرایب عبارت است از:

۱- ضریب بلوکی[2] (شکل ۱-۱۱۳)

۲- ضریب منشوری عمودی[3]

۳- ضریب منشوری طولی[4]

۱- منابع: [۱ و ۲]

2- *block coefficient*
3- *Vertical Prismatic Coefficient*
4- *Longitudinal Prismatic Coefficient*

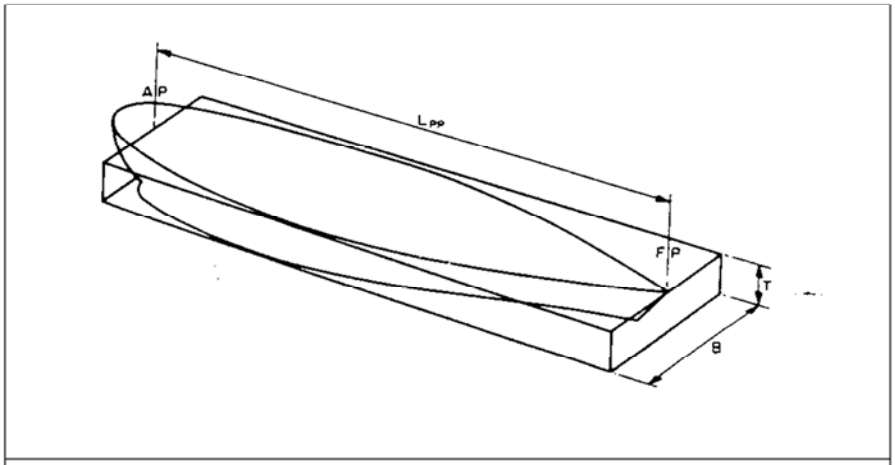
۴- ضریب صفحه آبخور[1] (شکل ۱-۱۱۴)

۵- ضریب مقطع میانی[2] (شکل ۱-۱۱۵)

کلیه این ضرایب مربوط به بخشی از بدنه هستند که در زیر آب قرار دارد و در حداکثر آبخور شناور بیان می‌شود. طول معیار در نظر گرفته شده نیز طول بین دو عمود (LBP)[3] می‌باشد که فاصله بین عمود سینه و پاشنه را شامل می‌شود:

- عمود سینه[4]: عمود وارد بر محل تقاطع سینه با خط آبخور تابستان.
- عمود پاشنه[5]: عمود وارد بر محور سکان.

فرمول هر یک از ضرائب فوق مطابق شکل زیر توضیح داده شده است:



شکل ۱-۱۱۳: ضریب بلوکی (CB) بدنه

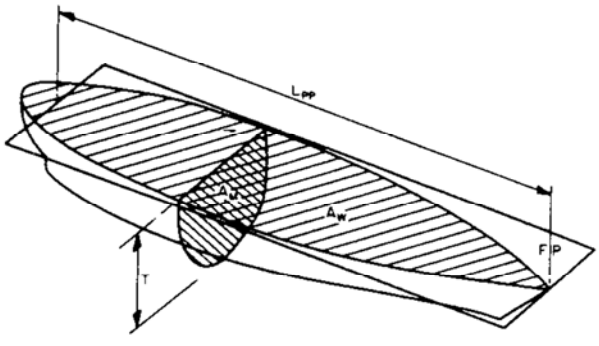
ضریب بلوکی $(C_B) = \dfrac{\nabla}{B.T.L_{BP}}$

ضریب منشوری عمودی $(C_{vp}) = \dfrac{\nabla}{A_w.T}$

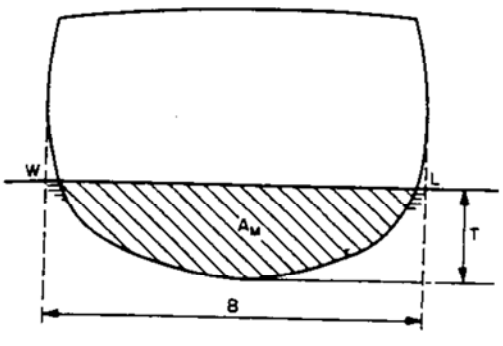
ضریب صفحه آبخور $(C_{wp}) = \dfrac{A_w}{L_{wL}.B}$

ضریب منشوری طولی $(C_p) = \dfrac{\nabla}{A_m.L_{BP}}$

ضریب مقطع میانی $(C_M) = \dfrac{A_M}{B.T}$



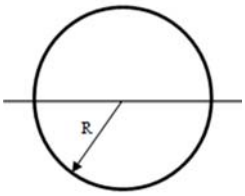
شکل ۱-۱۱۴: نمایش مقطع عرضی میانی و مساحت سطح آبخور برای محاسبه ضرایب بدنه



شکل ۱-۱۱۵: نمایش مساحت مقطع در ضریب مقطع میانی

مثال) یک استوانه مطابق شکل زیر به طول L روی سطح آب شناور بوده و خط آبخور مطابق شکل می‌باشد. ضرایب بدنه آن را محاسبه کنید.

1- Waterplan Coefficient
2- Midship Section Cofficient
3- Length Between Perpendiculars
4- Fore Perpendicular
5- Aft Perpendicular



Block coefficient: $C_B = \frac{\nabla}{L_{WL} B_{WL} T} = \frac{A_M L}{L\ B_{WL} T} = \frac{\frac{\pi R^2}{2}}{2RR} = \frac{\pi}{4}$

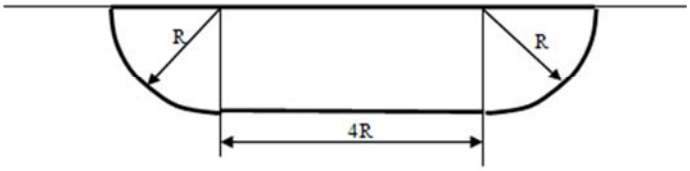
Midship section coefficient: $C_M = \frac{A_M}{B_{WL} T} = \frac{\frac{\pi R^2}{2}}{2RR} = \frac{\pi}{4}$

Prismatic coefficient: $C_P = \frac{C_B}{C_M} = \frac{\pi/4}{\pi/4} = 1$

Waterplane area coefficient: $C_{WP} = \frac{A_{WP}}{L_{WL} B_{WL}} = \frac{L \times 2R}{L \times 2R} = 1$

Vertical prismatic coefficient: $C_{VP} = \frac{C_B}{C_{WP}} = \frac{\pi/4}{1} = \frac{\pi}{4}$

مثال) مقطع عرضی ثابت یک شناور به طول L مطابق شکل زیر است. ضرایب بدنه آن را محاسبه کنید.



Block coefficient: $C_B = \frac{\nabla}{L_{WL} B_{WL} T} = \frac{A_M L}{L\ B_{WL} T} = \frac{(\frac{2\pi R^2}{4} + 4RR)L}{(4R + R + R)RL} = \frac{\pi + 8}{12} = 0.928$

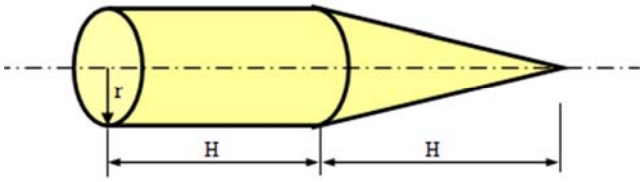
Midship section coefficient: $C_M = \frac{A_M}{B_{WL} T} = \frac{\frac{2\pi R^2}{4} + 4RR}{(4R + R + R)R} = \frac{\pi + 8}{12} = 0.928$

Prismatic coefficient: $C_P = \frac{C_B}{C_M} = 1$

Waterplane area coefficient: $C_{WP} = \frac{A_{WP}}{L_{WL} B_{WL}} = \frac{6RL}{6RL} = 1$

Vertical prismatic coefficient: $C_{VP} = \frac{C_B}{C_{WP}} = \frac{0.928}{1} = 0.928$

مثال) یک شناور مطابق شکل زیر از محل خط چین روی سطح آب شناور است. ضرایب بدنه را محاسبه نمایید.



Block coefficent: $C_B = \dfrac{\nabla}{L_{WL} B_{WL} T} = \dfrac{A_M L}{L\ B_{WL} T} = \dfrac{\frac{1}{2}\pi r^2 H + \frac{1}{6}\pi r^2 H}{2H \times 2r \times r} = \dfrac{\frac{2}{3}\pi r^2 H}{4r^2 H} = \dfrac{\pi}{6}$

Midship section coefficent: $C_M = \dfrac{A_M}{B_{WL} T} = \dfrac{\frac{1}{2}\pi r^2}{2r^2} = \dfrac{\pi}{4}$

Prismatic coefficent: $C_P = \dfrac{C_B}{C_M} = \dfrac{\frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{4}} = \dfrac{2}{3}$

Waterplane area coefficent: $C_{WP} = \dfrac{A_{WP}}{L_{WL} B_{WL}} = \dfrac{2Hr + Hr}{4Hr} = \dfrac{3}{4}$

Vertical prismatic coefficient: $C_{VP} = \dfrac{C_B}{C_{WP}} = \dfrac{\pi/6}{3/4} = \dfrac{2\pi}{9}$

Longitudianl centre of buoyancy: $LCB = \dfrac{M}{\nabla} = \dfrac{\frac{1}{2}\pi r^2 H \frac{H}{2} - \frac{1}{6}\pi r^2 H \frac{H}{3}}{\frac{2}{3}\pi r^2 H} = \dfrac{7H}{24}$

Longitudinal centre of flotation: $LCF = \dfrac{M}{A_{WP}} = \dfrac{2Hr\frac{H}{2} + Hr\frac{H}{3}}{4Hr} = \dfrac{H}{3}$

دیروز که گذشته از آن یاد مکن
فردا که نیامده فریاد مکن
حال دریاب و عمر بر باد مکن

❖ سری‌های استاندارد خطوط بدنه کشتی‌ها

چند نمونه از سری‌های استاندارد وجود دارد که در آنها چندین نوع خطوط بدنه از انواع کشتی‌های جابجایی و تندرو ارائه شده است. این اطلاعات بر اساس آزمایش مدل و برای رسیدن به حداقل مقاومت در برابر حرکت استخراج شده‌اند. معروفترین این سری‌ها، خطوط بدنه سری ۶۰ می‌باشد که اطلاعات ۶۰ نوع خطوط بدنه کشتی در آن ارائه شده است. سایر سری‌های استاندارد که برای کشتی‌های جابجایی و تندرو وجود دارد در جدول ۱–۷ ارائه شده است.

Standard series data	
Displacement data	*Planing data*
Norstrom Series (1936)	Series 50 (1949)
de Groot Series (1955)	
Marwood and Silverleaf (1960)	Series 62 (1963)
Series 63 (1963)	Series 65 (1974)
Series 64 (1965)	
SSPA Series (1968)	
NPL Series (1984)	
NSMB Series (1984)	
Robson Naval Combatants (1988)	
Southampton Catamaran Series (1996)	

جدول ۱–۷: سری‌های استاندارد خطوط بدنه کشتی

❖ محدوده ضریب بلوکی کشتی‌های مختلف برای انتخاب جدول سری ۶۰

هیچیک از جداول سری ۶۰ دارای نام کشتی یا نوع کشتی مشخصی نیستند بلکه از روی ضریب بلوکی ارائه شده در بالای جدول ۱–۸ می‌توان به نوع آن پی برد. جدول زیر بیان کننده محدوده ضریب بلوکی کشتی‌های مختلف است.

❖ جداول سری ۶۰[1]

جدول همانطور که بیان شد، بیانگر شکل هندسی بدنه می‌باشد و بدنه نیز باید بطور کامل همخوان با جریان سیال[2] باشد. از این رو استخراج جداول آفست مناسب از مدل بسیار مشکل است و لذا این جداول برای انواع شناورها به صورت جداولی به نام «جداول سری ۶۰» ارائه شده است. طول و ارتفاع بدنه به صورت واحد طول داده شده است، به صورتی که می‌توان آن را در طول و ارتفاع شناور مورد نظر ضرب کرد و به ابعاد واقعی شناور دست یافت. عرض آن برای دو واحد داده شده یعنی در واقع، نیم عرض‌های بدنه در جداول سری ۶۰ داده شده و این مقادیر باید در مقیاس نصف عرض ضرب شوند. مثلا اگر عرض یک کشتی ۱۲ متر است، باید کلیه مقادیر نیم عرض جدول آفست در ۶ ضرب شوند. انتخاب جدول مناسب از بین جداول موجود برای شناور موضوع طراحی، به کمک ضرایب بی‌بعد بدنه انجام می‌شود که مهمترین آنها دو عامل ضریب بلوکی (C_B) و مرکز بویانسی طولی *(LCB)* هستند (معرفی و توضیحات ضرایب در جدول ۱–۹ ارائه شده است). این ضرایب در بالای هر یک از جداول سری ۶۰ بطور جداگانه داده شده است و نامی از نوع شناور برای هر جدول به میان نمی‌آید. بدین ترتیب این جداول را می‌توان برای انواع کشتی‌های تجاری تک بدنه بکار برد .برای انتخاب جدول آفست باید به صورت تقریبی، محدوده ضرایب بی‌بعد شکل هندسی شناور را در اختیار داشت. مثلا ضریب بلوکی نفتکش‌ها بالاتر از ۰/۸ و ضریب بلوکی کشتی‌های صیادی در حدود ۰/۶ است. پس از ضریب بلوکی که مهمترین ضریب در انتخاب بدنه است، می‌توان از سایر ضرایب نیز استفاده کرد. این جداول برای محدوده $0.6 < C_B < 0.8$ ارائه شده که هر یک نیز خود برای ۳ حالت مختلف ارائه گردیده است. مقدار LCB یکی از مقادیر مقابل است:

$$LCB = 0 , \pm0.5 , \pm1 , \pm1.5 , \pm2$$

نوع کشتی	ضریب بلوکی(C_B)
نفتکش	۰/۸ – ۰/۹
حمل کالای عمومی	۰/۷ – ۰/۸
کانتینربر	۰/۶ – ۰/۷۵
یخچالی	۰/۵۵ – ۰/۷
ناو جنگی	۰/۵ – ۰/۵۵

جدول ۱–۸: محدوده تقریبی ضریب بلوکی انواع کشتی‌ها

توجه شود که مقادیر *LCB* از وسط بدنه و به صورت درصدی از طـول کـل داده شده‌اند که + رو به جلو و – رو به عقب کشتی می‌باشد مثلاً اگر *LCB=2* داده شده باشد یعنی مرکز بویانسی طولی، به اندازه ۲٪ طول کشتی جلوتر از وسط شناور قرار دارد.

سری ۶۰ دارای *LCB* تقریباً بهینه، که اغلب ضرایب محدوده C_B را پوشش داده است و مقادیر *L/B* از ۵/۵ تـا ۸/۵ و *B/H* از ۲/۵ تـا ۳/۵ اسـت. جـداول سری ۶۰ برای حالات ذیل ارائه شده است:

1- Tables of 60 series
2- fair

LCB	CB	LCB	CB
-1	0.65	-2	0.6
-0.5	0.65	-1.5	0.6
0	0.65	-1	0.6
-1	0.66	-2	0.61
-0.5	0.66	-1.5	0.61
0	0.66	-1	0.61
-1	0.67	-1.5	0.62
-0.5	0.67	-1	0.62
0	0.67	-0.5	0.62
-1	0.68	-1.5	0.63
-0.5	0.68	-1	0.63
0	0.68	-0.5	0.63
-0.5	0.69	-1.5	0.64
0	0.69	-1	0.64
0.5	0.69	-0.5	0.64
1.5	0.76	-0.5	0.7
2	0.76	0	0.7
1	0.77	0.5	0.7
1.5	0.77	0	0.71
2	0.77	0.5	0.71
1	0.78	1	0.71
1.5	0.78	0	0.72
2	0.78	0.5	0.72
1	0.79	1	0.72
1.5	0.79	0.5	0.73
2	0.79	1	0.73
1.5	0.8	1.5	0.73
2	0.8	0.5	0.74
2.5	0.8	1	0.74
		1.5	0.74
		0.5	0.75
		1	0.75
		1.5	0.75
		1	0.76

جدول ۱-۹: مشخصات CB و LCB هریک از ۶۰ خطوط بدنه از سری ۶۰

در ذیل چند نمونه از جدول آفست به همراه ضرایب آن داده شده است.

برای استفاده از جداول سری ۶۰ فواصل مقاطع عرضی و آبخورها بصورت زیر است:

WATERLINE POSITION

BL	1/5	1/2	1	2	3	LWL	5	6
0.0	0.05	0.125	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5

SECTIONS	POSITION(m)
0	0.0000
0 1/2	0.0250
1	0.0500
1 1/2	0.0750
2	0.1000
3	0.1500
4	0.2000
5	0.2500
6	0.3000
7	0.3500
8	0.4000
9	0.4500
10	0.5000
11	0.5500
12	0.6000
13	0.6500
14	0.7000
15	0.7500
16	0.8000
17	0.8500
18	0.9000
18 1/2	0.9250
19	0.9500
19 1/2	0.9750
20	1.0000

جدول آفست کشتی با ضریب بلوکی ۰/۶

GENERAL SPECIFICATION

LENGTH	L =	1.000 m
BEAM	B =	1.000 m
DRAFT	T =	1.000 m
BLOCK COEFFICIENT	CB =	0.600
LONGITUDINAL CENTER OF BOUYANCY	LCB =	% -2.000 L
PRISMATIC COEFFICIENT	CP =	0.614
MID SHIP SECTION COEFFICIENT	CM =	0.977
BILGE RADIUS	Rsin =	229 mm
PARALLEL MIDDLE BODY	Lpa =	0.001 m
ENTERANCE LENGTH	Le =	0.500 m
RUN LENGHT	Lr =	0.499 m

TABLE OF OFFSET

POSTA	BL	1/5	1/2	1	2	3	LWL	5	6
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0417	0.1359	0.2118
0 1/2	0.0013	0.0044	0.0085	0.0135	0.0161	0.0229	0.0993	0.2088	0.2871
1	0.0043	0.0135	0.0249	0.0372	0.0450	0.0637	0.1602	0.2691	0.3442
1 1/2	0.0096	0.0268	0.0471	0.0679	0.0833	0.1161	0.2209	0.3190	0.3869
2	0.0178	0.0441	0.0734	0.1025	0.1274	0.1739	0.2778	0.3609	0.4188
3	0.0450	0.0903	0.1335	0.1762	0.2218	0.2860	0.3704	0.4265	0.4623
4	0.0857	0.1523	0.2057	0.2565	0.3136	0.3777	0.4334	0.4679	0.4880
5	0.1298	0.2187	0.2809	0.3363	0.3927	0.4401	0.4719	0.4891	0.4983
6	0.1736	0.2820	0.3495	0.4042	0.4512	0.4775	0.4902	0.4954	0.5000
7	0.2136	0.3382	0.4065	0.4544	0.4864	0.4952	0.4994	0.4992	0.5000
8	0.2443	0.3800	0.4464	0.4835	0.4973	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
9	0.2641	0.4052	0.4682	0.4967	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.2710	0.4138	0.4750	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.2543	0.3932	0.4577	0.4887	0.4940	0.4976	0.4976	0.4987	0.4987
12	0.2229	0.3521	0.4202	0.4620	0.4786	0.4819	0.4831	0.4854	0.4869
13	0.1809	0.2960	0.3665	0.4173	0.4428	0.4494	0.4536	0.4583	0.4647
14	0.1281	0.2247	0.2970	0.3564	0.3890	0.4026	0.4072	0.4183	0.4329
15	0.0724	0.1482	0.2198	0.2848	0.3185	0.3333	0.3451	0.3634	0.3887
16	0.0350	0.0898	0.1511	0.2101	0.2420	0.2568	0.2697	0.2922	0.3279
17	0.0140	0.0497	0.0953	0.1418	0.1670	0.1748	0.1885	0.2090	0.2553
18	0.0054	0.0273	0.0565	0.0856	0.0987	0.1032	0.1106	0.1298	0.1748
18 1/2	0.0040	0.0201	0.0413	0.0617	0.0691	0.0722	0.0777	0.0952	0.1352
19	0.0033	0.0139	0.0274	0.0399	0.0429	0.0445	0.0490	0.0640	0.0965
19 1/2	0.0022	0.0075	0.0140	0.0195	0.0199	0.0203	0.0234	0.0355	0.0584
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0094	0.0204

جدول آفست کشتی با ضریب بلوکی ۰/۶۵

GENERAL SPECIFICATION

LENGTH	L =	1.000 m
BEAM	B =	1.000 m
DRAFT	T =	1.000 m
BLOCK COEFFICIENT	CB =	0.650
LONGITUDINAL CENTER OF BOUYANCY	LCB =	% -1.000 L
PRISMATIC COEFFICIENT	CP =	0.662
MID SHIP SECTION COEFFICIENT	CM =	0.982
BILGE RADIUS	Rsin =	204 mm
PARALLEL MIDDLE BODY	Lpa =	0.034 m
ENTERANCE LENGTH	Le =	0.473 m
RUN LENGHT	Lr =	0.493 m

TABLE OF OFFSET

POSTA	BL	1/5	1/2	1	2	3	LWL	5	6
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0494	0.1444	0.2184
0 1/2	0.0028	0.0065	0.0108	0.0150	0.0164	0.0276	0.1133	0.2198	0.2927
1	0.0063	0.0173	0.0300	0.0423	0.0505	0.0759	0.1787	0.2826	0.3490
1 1/2	0.0122	0.0325	0.0555	0.0778	0.0961	0.1362	0.2416	0.3340	0.3914
2	0.0220	0.0523	0.0854	0.1172	0.1471	0.1998	0.2978	0.3754	0.4234
3	0.0550	0.1053	0.1532	0.1986	0.2488	0.3130	0.3833	0.4341	0.4672
4	0.0999	0.1717	0.2307	0.2845	0.3427	0.3982	0.4417	0.4706	0.4891
5	0.1498	0.2425	0.3082	0.3629	0.4164	0.4540	0.4763	0.4898	0.4973
6	0.1988	0.3091	0.3772	0.4267	0.4663	0.4850	0.4929	0.4965	0.5000
7	0.2433	0.3664	0.4311	0.4687	0.4918	0.4968	0.4993	0.4997	0.5000
8	0.2749	0.4058	0.4658	0.4912	0.4990	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
9	0.2916	0.4251	0.4810	0.4991	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.2960	0.4298	0.4841	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.2916	0.4249	0.4806	0.4983	0.4994	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
12	0.2697	0.3998	0.4613	0.4883	0.4966	0.4985	0.4985	0.4982	0.4992
13	0.2276	0.3503	0.4207	0.4629	0.4803	0.4836	0.4873	0.4892	0.4932
14	0.1718	0.2818	0.3600	0.4171	0.4455	0.4530	0.4589	0.4680	0.4772
15	0.1137	0.2066	0.2868	0.3524	0.3862	0.4000	0.4112	0.4250	0.4436
16	0.0640	0.1363	0.2094	0.2736	0.3068	0.3230	0.3368	0.3565	0.3861
17	0.0291	0.0798	0.1376	0.1913	0.2184	0.2296	0.2443	0.2666	0.3045
18	0.0109	0.0420	0.0810	0.1167	0.1324	0.1390	0.1471	0.1695	0.2110
18 1/2	0.0067	0.0294	0.0580	0.0835	0.0930	0.0976	0.1034	0.1239	0.1631
19	0.0043	0.0192	0.0373	0.0531	0.0572	0.0596	0.0646	0.0818	0.1152
19 1/2	0.0025	0.0099	0.0183	0.0252	0.0259	0.0266	0.0304	0.0432	0.0679
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0082	0.0217

جدول آفست کشتی با ضریب بلوکی ۰/۷

GENERAL SPECIFICATION

LENGTH	L =	1.000 m
BEAM.....	B =	1.000 m
DRAFT.....	T =	1.000 m
BLOCK COEFFICIENT.....	CB =	0.700
LONGITUDINAL CENTER OF BOUYANCY.....	LCB =	% -0.500 L
PRISMATIC COEFFICIENT.....	CP =	0.710
MID SHIP SECTION COEFFICIENT.....	CM =	0.986
BILGE RADIUS	Rsin =	180 mm
PARALLEL MIDDLE BODY.....	Lpa =	0.120 m
ENTERANCE LENGTH	Le =	0.420 m
RUN LENGHT.....	Lr =	0.460 m

TABLE OF OFFSET

POSTA	BL	1/5	1/2	1	2	3	LWL	5	6
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0764	0.1791	0.2356
0 1/2	0.0036	0.0082	0.0132	0.0181	0.0218	0.0428	0.1563	0.2586	0.3134
1	0.0114	0.0262	0.0416	0.0552	0.0667	0.1073	0.2267	0.3194	0.3686
1 1/2	0.0228	0.0502	0.0781	0.1020	0.1243	0.1803	0.2860	0.3653	0.4077
2	0.0374	0.0766	0.1154	0.1492	0.1840	0.2483	0.3331	0.3998	0.4373
3	0.0770	0.1359	0.1888	0.2371	0.2923	0.3521	0.4026	0.4472	0.4765
4	0.1299	0.2093	0.2713	0.3256	0.3833	0.4256	0.4562	0.4776	0.4915
5	0.1863	0.2849	0.3506	0.4004	0.4461	0.4705	0.4838	0.4935	0.4990
6	0.2406	0.3536	0.4171	0.4552	0.4829	0.4927	0.4967	0.4989	0.5000
7	0.2846	0.4053	0.4618	0.4855	0.4977	0.4994	0.5000	0.5001	0.5000
8	0.3111	0.4355	0.4857	0.4982	0.5001	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
9	0.3194	0.4440	0.4912	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.3200	0.4445	0.4914	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.3200	0.4445	0.4914	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
12	0.3167	0.4408	0.4886	0.4985	0.4996	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
13	0.2941	0.4163	0.4701	0.4891	0.4967	0.4985	0.4977	0.4981	0.4998
14	0.2449	0.3609	0.4257	0.4618	0.4793	0.4823	0.4868	0.4898	0.4933
15	0.1818	0.2864	0.3601	0.4112	0.4386	0.4479	0.4546	0.4639	0.4728
16	0.1152	0.2021	0.2771	0.3366	0.3677	0.3816	0.3949	0.4085	0.4275
17	0.0584	0.1251	0.1923	0.2473	0.2709	0.2878	0.3021	0.3219	0.3511
18	0.0220	0.0645	0.1126	0.1532	0.1695	0.1812	0.1904	0.2134	0.2502
18 1/2	0.0125	0.0422	0.0775	0.1091	0.1237	0.1289	0.1347	0.1569	0.1945
19	0.0065	0.0255	0.0485	0.0687	0.0765	0.0789	0.0837	0.1022	0.1367
19 1/2	0.0028	0.0122	0.0234	0.0322	0.0333	0.0347	0.0386	0.0523	0.0790
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0100	0.0237

جدول آفست کشتی با ضریب بلوکی ۰/۷۵

GENERAL SPECIFICATION

LENGTH	L =	1.000 m
BEAM	B =	1.000 m
DRAFT	T =	1.000 m
BLOCK COEFFICIENT	CB =	0.750
LONGITUDINAL CENTER OF BOUYANCY	LCB =	% 0.500 L
PRISMATIC COEFFICIENT	CP =	0.758
MID SHIP SECTION COEFFICIENT	CM =	0.989
BILGE RADIUS	Rsin =	153 mm
PARALLEL MIDDLE BODY	Lpa =	0.210 m
ENTERANCE LENGTH	Le =	0.360 m
RUN LENGHT	Lr =	0.430 m

TABLE OF OFFSET

POSTA	BL	1/5	1/2	1	2	3	LWL	5	6
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0899	0.1955	0.2460
0 1/2	0.0052	0.0111	0.0168	0.0223	0.0278	0.0559	0.1798	0.2794	0.3265
1	0.0169	0.0345	0.0516	0.0664	0.0821	0.1317	0.2532	0.3397	0.3814
1 1/2	0.0329	0.0642	0.0943	0.1199	0.1484	0.2113	0.3109	0.3824	0.4188
2	0.0516	0.0947	0.1353	0.1710	0.2129	0.2795	0.3542	0.4136	0.4470
3	0.1003	0.1634	0.2168	0.2658	0.3238	0.3775	0.4199	0.4564	0.4819
4	0.1619	0.2441	0.3039	0.3546	0.4096	0.4440	0.4668	0.4839	0.4948
5	0.2262	0.3256	0.3855	0.4268	0.4642	0.4815	0.4901	0.4962	0.4998
6	0.2847	0.3933	0.4460	0.4720	0.4917	0.4970	0.4990	0.5000	0.5000
7	0.3261	0.4390	0.4833	0.4946	0.4999	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
8	0.3444	0.4580	0.4965	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
9	0.3470	0.4601	0.4974	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.3470	0.4601	0.4974	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.3470	0.4601	0.4974	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
12	0.3470	0.4601	0.4974	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
13	0.3462	0.4590	0.4962	0.4992	0.5001	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
14	0.3309	0.4431	0.4843	0.4927	0.4971	0.4991	0.4993	0.4995	0.5000
15	0.2848	0.3930	0.4443	0.4680	0.4832	0.4860	0.4902	0.4924	0.4950
16	0.2141	0.3140	0.3767	0.4161	0.4381	0.4498	0.4570	0.4637	0.4702
17	0.1328	0.2156	0.2821	0.3323	0.3590	0.3720	0.3862	0.3978	0.4123
18	0.0595	0.1180	0.1755	0.2228	0.2462	0.2580	0.2680	0.2884	0.3168
18 1/2	0.0336	0.0767	0.1225	0.1621	0.1820	0.1893	0.1968	0.2198	0.2535
19	0.0157	0.0437	0.0750	0.1027	0.1157	0.1199	0.1263	0.1450	0.1802
19 1/2	0.0049	0.0185	0.0343	0.0478	0.0527	0.0552	0.0599	0.0721	0.1025
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0110	0.0278

جدول آفست کشتی با ضریب بلوکی ۰/۸

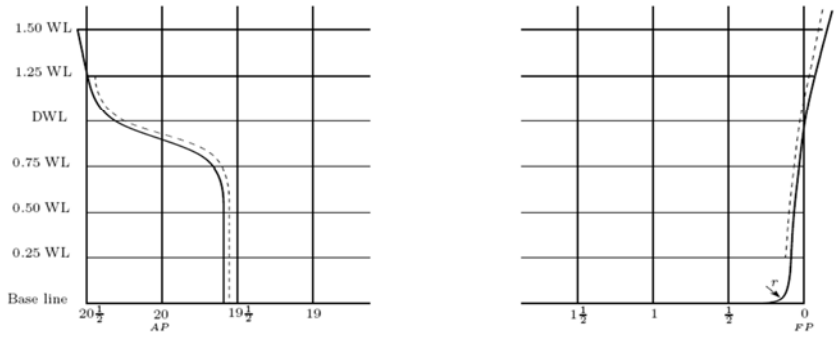
```
GENERAL SPECIFICATION
======================================================================
LENGTH ..................................... L =   1.000 m
BEAM........................................ B =  1.000 m
DRAFT....................................... T =  1.000 m
BLOCK COEFFICIENT.......................... CB = 0.800
LONGITUDINAL CENTER OF BOUYANCY......... LCB = % 2.000 L
PRISMATIC COEFFICIENT...................... CP = 0.806
MID SHIP SECTION COEFFICIENT.............. CM = 0.993
BILGE RADIUS ............................ Rsin =  118 mm
PARALLEL MIDDLE BODY...................... Lpa =   0.300 m
ENTERANCE LENGTH ......................... Le =   0.295 m
RUN LENGHT................................ Lr =   0.405 m
======================================================================
```

TABLE OF OFFSET

POSTA	BL	1/5	1/2	1	2	3	LWL	5	6
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0927	0.1986	0.2484
0 1/2	0.0067	0.0133	0.0193	0.0252	0.0316	0.0626	0.1884	0.2869	0.3324
1	0.0214	0.0404	0.0580	0.0739	0.0920	0.1450	0.2644	0.3483	0.3882
1 1/2	0.0412	0.0741	0.1040	0.1314	0.1636	0.2285	0.3226	0.3905	0.4254
2	0.0638	0.1080	0.1472	0.1846	0.2306	0.2965	0.3653	0.4210	0.4532
3	0.1241	0.1870	0.2363	0.2853	0.3440	0.3934	0.4317	0.4628	0.4856
4	0.1965	0.2760	0.3275	0.3749	0.4266	0.4563	0.4743	0.4884	0.4967
5	0.2710	0.3634	0.4099	0.4444	0.4755	0.4884	0.4943	0.4979	0.5000
6	0.3334	0.4299	0.4653	0.4830	0.4964	0.4990	0.4999	0.5000	0.5000
7	0.3708	0.4684	0.4943	0.4985	0.5002	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
8	0.3817	0.4782	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
9	0.3820	0.4784	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.3820	0.4784	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.3820	0.4784	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
12	0.3820	0.4784	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
13	0.3820	0.4784	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
14	0.3820	0.4784	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
15	0.3760	0.4719	0.4945	0.4964	0.4985	0.4997	0.5000	0.5000	0.5000
16	0.3390	0.4331	0.4637	0.4771	0.4894	0.4932	0.4957	0.4966	0.4990
17	0.2548	0.3451	0.3926	0.4267	0.4519	0.4631	0.4714	0.4776	0.4839
18	0.1479	0.2244	0.2817	0.3312	0.3662	0.3831	0.3937	0.4060	0.4257
18 1/2	0.0973	0.1624	0.2186	0.2686	0.3006	0.3142	0.3238	0.3383	0.3653
19	0.0521	0.1014	0.1494	0.1920	0.2149	0.2240	0.2323	0.2472	0.2793
19 1/2	0.0172	0.0452	0.0749	0.1001	0.1098	0.1149	0.1211	0.1380	0.1682
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0191	0.0423

❖ شکل سینه و پاشنه کشتی در بدنه‌های سری ۶۰

از خطوط بدنه ارائه شده فوق، نمی‌توان شکل سینه و پاشنه را بخوبی ترسیم نمود. شکل سینه و پاشنه کشتی در خطوط بدنه‌های سری ۶۰ را می‌توان از شکل ۱-۱۱۶ بدست آورد. توجه شود که شعاع‌های بیان شده در آبخورهای مختلف مربوط به صفحه افقی است و شکل سینه و پاشنه در صفحه عمودی (نمای طولی) را می‌توان به صورت مقیاس شده از شکل زیر بدست آورد. اضافه نمودن سینه و پاشنه به خطوط بدنه کشتی، نباید باعث بروز شکستگی در بدنه گردد.



$L \equiv LBP \quad r = 0.7969\%L$

WL	distance between stem and FP	distance between stern and AP	Bow radius	Stern radius
1	$0.495\%L$	$1.917\%L$	$0.042\%L$	$0.042\%L$
2	$0.413\%L$	$1.917\%L$	$0.042\%L$	$0.042\%L$
3	$0.245\%L$	$1.712\%L$	$0.042\%L$	$0.042\%L$
4	0	$1.688\%L$	$0.042\%L$	$0.042\%L$
5	$0.330\%L$	$2.500\%L$	$0.072\%L$	$0.042\%L$
6	$0.725\%L$	$2.875\%L$	$0.158\%L$	– – –

شکل ۱-۱۱۶: شکل سینه و پاشنه در سری ۶۰

❖ قدرت دریایی (فورس دریایی) و شرایط باد (بیوفورت)

هر کشتی برای شرایط خاص آب و هوایی طراحی می‌شود بخصوص برای تحمل ارتفاع خاصی از امواج دریا. ارتفاع امواج دسته‌بندی شده و با شماره‌های خاصی بیان می‌شوند که این شماره‌ها را قدرت دریایی (*sea state*) یا فورس دریایی *(sea force)* گویند. مثلا وقتی گفته می‌شود قدرت دریایی ۳ یعنی ارتفاع موج مشخصه ۱ متر و حداکثر ارتفاع موج ۱/۵ متر است. از آنجاکه عامل پدید آورنده امواج دریا، وزش باد می‌باشد، شرایط دریایی را می‌توان از سرعت باد نیز تشخیص داد. شرایط باد با عدد بیوفورت تعریف می‌شود. مثلا قدرت دریایی ۳ متناظر است با عدد بیوفورت ۴ و معادل است با سرعت باد حداقل ۱۰ و حداکثر ۱۶ گره. شرایط دریایی و باد در جدول ۱-۱۰ نشان داده شده‌اند. کشتی‌های کوچک و کرانه‌پیما برای قدرت دریایی کمتر از ۴ و کشتی‌های اقیانوس‌پیما (وابسته به تناژ و ابعاد) برای قدرت دریایی بالاتر از ۴ طراحی می‌شوند. طراحی باید به گونه‌ای باشد که کشتی در معرض امواج تعریف شده غرق نشده و کارایی آن مختل نگردد.

Beufort	Sea state	Description term Wind	Wave	Wind sp. [knots] min	Wind sp. [knots] max	Wave height [m] Probable	Wave height [m] Max
0	0	Calm	Calm	0	1	0	0
1	0	Light air	Ripples	1	3	0.1	0.1
2	1	Light breeze	Small wavelets	3	6	0.2	0.3
3	2	Gentle breeze	Large wavelets	6	10	0.6	1
4	3	Moderate breeze	Small waves	10	16	1	1.5
5	4	Fresh breeze	Moderate waves	16	21	2	2.5
6	5	Strong breeze	Large waves	21	27	3	4
7	6	Near gale	Large waves	27	33	4	5.5
8	7	Gale	Moderately high waves	33	40	6	7.5
9	8	Strong gale	High waves	40	47	7	10
10	9	Storm	Very high waves	47	55	9	12.5
11	9	Violent storm	Exceptionally high waves	55	63	11.5	16
12	9	Hurricane	Exceptionally high waves	63	71	14	16
13	9	Hurricane	Exceptionally high waves	71	80	>14	>16
14	9	Hurricane	Exceptionally high waves	80	89	>14	>16
15	9	Hurricane	Exceptionally high waves	89	99	>14	>16

جدول۱-۱۰: جدول قدرت دریایی (فورس) و شرایط سرعت باد (بیوفورت)

بخش ششم:
آشنایی عمومی با صنعت کشتی‌سازی

❖ تاریخچه حضور ایرانیان در خلیج فارس[۱]

ایرانیان از دوران هخامنشی در امور دریایی تلاش چشمگیری داشته و در عرصه دریا جولان می‌دادند که اوج آن را در عصر داریوش و خشایارشاه می‌توان شاهد بود. از آن پس، افول قدرت دریایی هخامنشی شروع و تا عصر پارتیان ادامه داشته است تا اینکه در زمان ساسانیان و شاپور دوم، معروف به ذوالاکتاف، تلاش قابل توجهی جهت توسعه فعالیت‌های دریایی به عمل آمد اما این تلاش‌ها پایدار و ماندگار نبود زیرا این کار توسط خلف آنها پیگیری نمی‌شد. لذا آن جنب و جوشی که لازمه یک ملت دریایی می‌باشد در ایران کمتر رخ می‌نمود. پس از چیرگی مسلمانان بر ایران، ایرانیان در یک مجموعه بزرگتری به نام امپراطوری اسلامی می‌زیستند و مستقیماً در امر دریا تلاش درخور توجهی نداشتند، اگر چه پس از تاسیس حکومت‌های منطقه‌ای و محلی در کرانه‌های دریای عمان و خلیج‌فارس، مختصر تلاش‌هایی صورت گرفت یا در عصر دیلمیان بر شتاب آن افزوده گشت، اما این تلاش‌ها چون گذشته ناپایدار بود. از این رو در زمانی که اروپا به حیات جدیدی قدم می‌نهاد و عصر اکتشافات خود را به پشتوانه توپ‌های مهیب و محیرالعقول پی می‌گرفت، ملاحظه می‌شد که دولتمردان ایران در برابر کشتی‌های توپدار پرتغالیان، به زانو درآمده و توانایی دفاع از حاکمیت خود در جزایر خلیج‌فارس را نداشتند. لذا شاه‌عباس که توان تحمل حضور پرتغالی‌ها در خلیج‌فارس را نداشت، جهت اخراج آنها از شناورهای انگلیسی مدد می‌جست. با وجود چنین احساسی نسبت به وجود نیروی دریایی، ملاحظه می‌گردد که آن همت شایسته در میان دولتمردان وجود نداشت. در انتهای حاکمیت سلسله پرامتداد صفوی که ایران شاهد یورش افاغنه بود؛ دلاور مردی از خراسان (نادر شاه) قد علم کرد که در سر سودای آزادسازی ایران را از وجود بیگانه داشت. این مرد، دلیرانه پیش تاخت و در این امر موفقیتی کامل نصیب خویش ساخت. در ادامه تعقیب متجاوزان، چشم‌های خود را به خلیج‌فارس دوخت که افاغنه و دیگر شورشیان به کمک شناورهای محلی از دست نادر گریختند. این حادثه به نادر فهماند که بدون ناوهای نیرومند محال است که از پس مراقبت از کلیه کرانه‌های ایران برآید و گذشته از این برای تامین شناور همواره به کمک بیگانگان نیاز خواهد داشت. کمپانی‌های هندشرقی دول اروپایی کمتر با نادر همکاری می‌کردند و عرب‌ها هم که چندین کشتی کوچک داشتند، معمولاً با شورشیان که بهتر از دولت ایران به آنان اجاره می‌پرداختند، بیشتر همکاری می‌نمودند، لذا نادر عزم خود را درجهت ایجاد ناوگان دریایی نیرومند جزم کرد؛ ابتدا جهت پی‌بردن به ارزش کار او، به اوضاع سیاسی و اجتماعی ایران قبل از حاکمیت نادر اشاره می‌کنیم:

▪ زمینه تلاش‌های دریایی نادر

باتوجه به دلایل فوق، نادر تصمیم گرفت تا نیروی دریایی تاسیس نماید و برای این منظور، تصمیم گرفت ابتدا نیروی دریایی کوچکی در دریای‌خزر بنا نهد. سپس دست به ایجاد نیروی دریایی مهمتری در خلیج‌فارس زد. وی که به‌خوبی دریافته بود دولت ایران به‌علت نداشتن نیروی دریایی، هرگز نخواهد توانست سیادت خود را بر خلیج‌فارس و دریای‌خزر اعمال کند؛ حضور جان‌التون در ایران را مغتنم شمرد و او را مامور تاسیس نیروی‌دریایی و ساخت کشتی در دریای‌خزر کرد و با این فرمان نخستین گام را در راه تاسیس نیروی دریایی برداشت. جان‌التون وابسته تجاری یک شرکت انگلیسی در روسیه بود که جهت توسعه صادرات خود در سال ۱۷۴۲ از طریق دریای‌خزر به ایران سفر کرده بود. لنگرود به‌عنوان مرکز فعالیت‌های التون درنظر گرفته شد و ساخت کشتی را آغاز نمود و با استفاده از الوارهای جنگ‌های شمال و تهیه بادبان از پنبه و تهیه طناب از الیاف کتان، توانست یک کشتی با ۲۳ توپ به آب اندازد.

▪ نادر و خلیج‌فارس

همانطور که ذکر شد توجه نادر به خلیج‌فارس از همان اوان حاکمیتش که با فرار محمد خان بلوچ و غلجائیان و افاغنه همراه بود،شروع شد. برای این منظور، او لطیف‌خان را به دریاسالاری ایران منصوب کرد و وی مامور خرید کشتی از کمپانی‌های موجود در خلیج‌فارس شد. کمپانی‌های هلندی و انگلیسی و نیز اعراب حاضر به فروش کشتی به لطیف‌خان نشدند. با این همه هر کدام چند کشتی به‌عنوان عاریه در اختیار وی نهادند تا به تعقیب فراریان بپردازد. لذا وی که تمام همت خود را جهت دستگیری محمدخان‌بلوچ استوار کرده بود به جزیره قس حمله برد و محمدخان ناگزیر به تسلیم شد و این عملیات نخستین خودنمایی نادر در پهنه کرانه‌های همیشه نیلگون خلیج‌فارس و دریای‌عمان بود. سایر عملیات نادر، عمدتاً به این نواحی معطوف بود زیرا شورش‌های زیادی در این منطقه صورت می‌گرفت و حاکم آنجا جهت تثبیت حاکمیت خود از نادر استمداد می‌طلبید. نادر نیز جهت توسعه

۱- *منابع: [۳ و ۷ و ۱۳]*

حاکمیت خویش به‌طور متعدد به عمان لشکرکشی می‌کرد که در جای خود به تفصیل بحث خواهد شد. در تابستان ۱۱۴۷ (۱۷۳۴ میلادی) لطیف‌خان بنا به دستور نادر مشغول تبدیل بوشهر به یک ایستگاه نیرومندی برای ناوگان دریایی ایران شد و برای آنکه این بندر را کاملاً تقویت نماید، یکی از دژهای نزدیک بندر را تعمیر کرد و اندکی بعد نام بوشهر تبدیل به بندر نادریه شد. در اوایل بهار ۱۱۴۸ (۱۷۳۵ میلادی) لطیف‌خان با ناوگانی که شامل ۳۰ کشتی بزرگ و ۵۰ کشتی متوسط و چندین زورق که عمدتا ساخت اروپا و سورات هند بود، به قصد تصرف بصره داخل شط‌العرب گردید. پادشاه بصره دو کشتی انگلیسی‌ها را به زور تصرف کرد و توانست نیروهای ایران را به یک منطقه باریک بکشاند و شکست سختی را به ایرانیان تحمیل نماید. به‌دنبال این شکست، لطیف‌خان از مقام خود عزل گردید اما طولی نکشید که به دریا سالاری ایران منصوب گردید. در سال ۱۱۵۳ نادر دستور داد که ساخت چندین کشتی در بوشهر آغاز گردد. طول این کشتی‌ها بنا بود که ۳۰۰ پا باشد و به ۵۰ توپ مسلح گردد و کارگران و ملوانان آن نیز از اروپائیان انتخاب گردند. به‌منظور تهیه تسلیحات، یک کارخانه توپ‌سازی در گمبرون (بندرعباس) ایجاد گردید تا ۳۰۰ توپ مورد احتیاج کشتی‌ها را آماده کند. در اواسط پاییز ۱۱۵۳ دو توپ مسی در این کارخانه آماده گردید ولی به‌علت عدم استفاده از نیروی ماهر و متخصص در امر کشتی‌سازی در اوایل پاییز ۱۱۵۵ دستور توقف فعالیت آن از سوی نادر صادر شد و کشتی‌های نیمه‌تمام تا چندسال در بوشهر همچنان باقی بودند. پس از این امر، نادر تصمیم به خرید کشتی از خارجیان گرفت. مطابق گزارش نماینده شرکت هندشرقی انگلیس به تاریخ فوریه۱۷۴۵، نیروی دریایی ایران در خلیج‌فارس در آن زمان شامل ۳۰ فروند ناو بزرگ از نوع بریگانتین و غراب و تعدادی ناو کوچک بود.

❖ مقایسه مزایا و معایب حمل و نقل دریایی

مزایا:

۱- امکان حمل و نقل بسیار زیاد در داخل یک وسیله- مثلاً یک فروند کشتی *TEU* ۴۰۰۰ می‌تواند به اندازه ۴۰۰۰ تریلی یا ۲۰۰ قطار یا ۸۰ هواپیمای باری، کانتینر حمل می‌کند!

۲- حرکت بدون وقفه در طول شبانه‌روز: این در حالی است که در طول شبانه‌روز وسایل حمل و نقل جاده‌ای و ریلی بدلایل متعدد، ساعاتی مجبور به توقف هستند.

۳- سازگار با محیط زیست: آلودگی یک فروند کشتی، بسیار کمتر از تعداد معادل تریلرها و قطارها می‌باشد.

۴- عدم نیاز به امکانات زیربنایی

۵- عدم نیاز به مجوز تردد عبور از سایر کشورها برای جابجایی بین‌المللی بار

۶- هزینه بسیار کم جابجایی کالا

۷- حمل و نقل ایمن و امکان تصادم و حوادث بسیار اندک

معایب:

۱- سرعت پائین حدود ۲۰ گره (حدود ۴۰ کیلومتر بر ساعت) در مقایسه با سرعت متوسط هوایی ۸۰۰ گره (حدود ۱۵۰۰ کیلومتر بر ساعت) و سرعت متوسط جاده‌ای ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و سرعت متوسط ریلی ۸۰ کیلومتر بر ساعت

۲- مقاصد بارگیری محدود

❖ مزایای صنعت کشتی‌سازی و صنایع دریایی در ایران

بیش از ۹۰ درصد جابجایی کالا در دنیا توسط کشتی‌ها انجام می‌شود و حدود ۲۰ هزار فروند کشتی اقیانوس‌پیما در دنیا وجود دارد. اگر طول عمر هر کشتی را ۲۰ سال در نظر بگیریم این بدین معنی است که برای جایگزینی و نوسازی ناوگان کشتیرانی دنیا باید در هر سال ۱۰۰۰ فروند کشتی اقیانوس‌پیما در دنیا ساخته شود. ناوگان کشتیرانی ایران شامل تجاری و نفتکش نیز دارای بیش از ۳۰۰ فروند کشتی اقیانوس‌پیما است که برای جایگزینی و نوسازی آنها باید سالیانه حداقل ۱۵ فروند کشتی اقیانوس‌پیما سفارش داده شود. این آمار نشان دهنده حجم بالای ساخت و ساز کشتی مورد نیاز است. ناوگان کشتی‌های ایران به سه قسمت عمده تقسیم می‌شود: ۱) ناوگان تجاری ۲) نفتکش ۳) ناوگان نظامی. بطور مثال ناوگان کشتیرانی تجاری ایران به نام «گروه کشتیرانی جمهوری اسلامی ایران» دارای مجموع ۱۳۶ فروند کشتی اقیانوس‌پیما با ظرفیت حمل ۵/۳ میلیون تن بار و ۱۸۷۰ نفر مسافر (طبق آمار سال ۸۸) بوده و شامل چهار شرکت اصلی است: ۱) شرکت کشتیرانی ج.ا.ا با ۹۵ فروند ۲) کشتیرانی والفجر با ۲۰ فروند ۳) کشتیرانی دریای خزر با ۱۴ فروند ۴) کشتیرانی ایران و هند با ۷ فروند.

کشورهای پیشرفته جهان برای توسعه و پیشرفت صنعتی خود، همواره صنایع مادر را شناسایی و رشد داده‌اند و در کنار آن زنجیره بزرگی از صنایع را به حرکت در آورده‌اند. از مهمترین صنایع مادر در دنیا، صنایع خودروسازی و کشتی‌سازی می‌باشد. مهمترین مزایای صنعت کشتی‌سازی در هر کشور را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱- فعال‌سازی صنایع جانبی: صنعت کشتی‌سازی با حدود ۱۰۰ صنعت جانبی در ارتباط است و این بدین معنی است که با رشد صنعت کشتی-

سازی، زنجیره بزرگی از صنایع شکل می‌گیرد و می‌تواند یک تحول بزرگ صنعتی را ایجاد کند.

۲- اشتغال‌زایی : صنعت کشتی سازی مدرن، هنوز هم یک صنعت دستی محسوب می‌شود که نقش نیروی کار در آن بسیار پر رنگ است و تجهیزات خودکار و مکانیزه هنوز نقش اصلی را ایفا نمی‌کنند. لذا ساخت یک کشتی اقیانوس‌پیما، مستلزم صرف میلیونها نفر-ساعت کار می‌باشد که این به معنای ایجاد اشتغال موثر در کشور است.

۳- ایجاد تحول درمناطق ساحلی: در تمامی کشورهای صنعتی، مناطق ساحلی جزء پرجمعیت‌ترین، اقتصادی‌ترین و پررونق‌ترین مناطق آن کشورها محسوب می‌شوند. متأسفانه در ایران، عدم وجود صنایع مادر در مناطق ساحلی، باعث شده این مناطق جزء محروم‌ترین مناطق کشور باشند و آمار فقر و بیکاری در آنها بسیار بالا است. صنعت کشتی‌سازی می‌تواند تحول بزرگی را در این مناطق باعث شود.

شهرهای ساحلی کشورهای کره، چین، ژاپن، آمریکا، فرانسه، آلمان و انگلستان جزء صنعتی‌ترین شهرهای آنها محسوب می‌شوند که جمعیت فوق-العاده زیادی را نیز در خود متمرکز کرده‌اند.

۴- ایجاد گردش اقتصادی کلان: قراردادهای ساخت کشتی، با توجه به متعدد بودن آنها و قیمت بالا با حمایت مالی دولتها و بانکها انجام می-شوند. شکل‌گیری صنعت کشتی‌سازی باعث تحرک در گردش مالی مولد در سیستم بانکی و مالی کشورها می‌شود.

۵- شکل‌گیری مدیریت صنعتی کلان: ابعاد و عظمت کشتی‌های اقیانوس‌پیما نشان‌دهنده عظمت و کارآمدی مدیریت است. ساخت چنین مجموعه عظیمی و همگرا کردن کلیه اجزاء در مسیر ساخت یک کشتی، مستلزم ایجاد یک مدیریت فنی و علمی قدرتمند و جامع است. مدیریتهای صنعتی قدرتمند و موثر در صنایع بزرگی همچون کشتی‌سازی امکان شکل‌گیری دارند.

۶- اهمیت نظامی: خودکفایی در ساخت کشتی‌های نظامی لازمه دفاع از سواحل کشور می‌باشد بخصوص در کشوری همچون ایران که حراست از ۲۹۰۰ کیلومتر مرز آبی بجز خودکفایی در ساخت ناوهای جنگی امکان‌پذیر نیست.

کشورهای صنعتی آسیایی همچون ژاپن، کره و چین در شروع تحول صنعتی و اقتصادی خود، دو صنعت مادر را به عنوان پشتوانه صنایع خود برگزیدند، صنعت خودروسازی و صنعت کشتی‌سازی. این کشورها توانستند به پشتوانه این دو صنعت عظیم، در کشور خود صنایع وسیعی را فعال کنند. هجوم این کشورها به صنعت کشتی‌سازی، باعث شد اروپا و آمریکا از گردونه رقابت در این صنعت خارج شوند و حدود ۹۰ درصد از کشتی‌های تجاری دنیا در آسیا ساخته شوند. مطابق آمار سال ۲۰۰۸ ، سهم کشورهای جهان از صنعت کشتی سازی به صورت جدول ۱-۱۱ است:

رتبه	کشور	میزان تناژ کشتی ساخته شده بر حسب GT ۱۰۰۰۰	درصد از سهم کل در جهان
۱	کره جنوبی	۱۲۴۰	۵۰/۶
۲	چین	۸۴۰	۳۴/۴
۳	اروپا	۱۴۰	۵/۷
۴	ژاپن	۹۰	۳/۷
۵	سایر	۱۴۰	۵/۶

جدول ۱-۱۱: درصد ساخت کشتی در کشورهای مختلف دنیا (سال ۲۰۰۸)

علی‌رغم تمام مزایایی که برای صنعت کشتی‌سازی بیان شد، متأسفانه ایران در تسریع به حرکت صنعتی خود نتوانسته است از صنعت کشتی‌سازی بهره کافی را ببرد. کشوری با حدود ۲۹۰۰ کیلومتر مرز آبی نقش چندانی در این صنعت ندارد در حالی که کشورهایی مانند کره، آلمان، فرانسه و لهستان با مرز آبی کمتر از ایران، مالک دانش و فناوری در صنعت کشتی‌سازی هستند. جدول ۱-۱۲ مقایسه‌ای را در مورد مساحت، جمعیت و طول سواحل کشورهای مطرح در زمینه مهندسی دریایی و کشتی‌سازی ارائه و با ایران مقایسه نموده است. نکات ذیل از این جدول قابل توجه است:

- مساحت ایران برابر ۴۰ درصد کل مساحت اتحادیه اروپا، جمعیت ایران برابر ۱۵ درصد و طول سواحل ایران برابر ۱۵ درصد کل اتحادیه اروپا می‌باشد.
- طول سواحل ایران بیش از مجموع طول سواحل ۴ کشور اروپایی (آلمان، هلند، لهستان، بلژیک) و بیش از طول سواحل کشورهای فرانسه، سوئد، فنلاند و پرتغال و کره جنوبی است.
- مساحت ایران بیش از مجموع مساحت ۴ کشور مهم اروپایی (آلمان، فرانسه، انگلستان و ایتالیا) و برابر مجموع مساحت ۷ کشور اروپایی (پرتغال، فنلاند، سوئد، بلژیک، نروژ، هلند و لهستان) است.
- جمعیت ایران بیش از جمعیت کشورهای فرانسه، انگلستان، لهستان و کره جنوبی و همچنین برابر با مجموع جمعیت ۶ کشور اروپایی (هلند، نروژ، بلژیک، سوئد، فنلاند و پرتغال) است.

کشور	مساحت (هزار کیلومترمربع)	جمعیت (میلیون نفر)	طول سواحل (کیلومتر)
فرانسه	۵۴۰	۶۲	۲۳۰۰
اسپانیا	۵۰۵	۴۵	۳۶۰۰
سوئد	۵۰۰	۹	۲۲۵۰
آلمان	۳۵۰	۸۲	۱۰۵۰
فنلاند	۳۳۰	۵	۱۲۰۰
نروژ	۳۲۵	۵	۴۰۰۰
لهستان	۳۱۰	۳۸	۵۰۰
ایتالیا	۳۰۰	۶۰	۴۲۵۰
انگلستان	۲۴۰	۶۱	۴۰۵۰
پرتغال	۹۰	۱۱	۹۵۰
هلند	۴۰	۱۶	۶۰۰
بلژیک	۳۰	۱۱	۲۰۰
ژاپن	۳۷۵	۱۲۷	۵۱۰۰
کره جنوبی	۹۹	۴۸	۱۳۰۰
ایران	**۱۶۵۰**	**۷۵**	**۲۹۰۰**
کل اتحادیه اروپا	۴۳۰۰	۵۰۲	۱۹۰۰۰

جدول ۱-۱۲: مقایسه مساحت، جمعیت و طول سواحل ایران با کشورهای معروف دریایی دنیا

با مروری بر این آمار می‌توان دریافت که ایران دارای استعدادهای بسیاری برای رشد و پیشرفت در صنایع دریایی در مقایسه با کشورهای مطرح در این زمینه است و تا رسیدن به جایگاه واقعی خود فاصله زیادی دارد. از مهمترین عوامل عدم رشد مناسب صنعت کشتی‌سازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- عدم هماهنگی سیستم بانکی کشور در حمایت به موقع و سریع از قراردادهای صنعت کشتی‌سازی.

۲- عدم وجود مدیریت باتجربه و فنی بر کارخانجات کشتی‌سازی ایران.

۳- عدم وجود تعداد کافی از نیروی متخصص و فارغ التحصیلان رشته مهندسی کشتی‌سازی به گونه‌ای که امروزه اغلب بخش‌های صنعت کشتی‌سازی در اختیار فارغ التحصیلان رشته‌های غیر مرتبط با موضوع است. البته در سال‌های اخیر تلاش‌های خوبی در زمینه آموزش نیروی انسانی و فارغ‌التحصیلان رشته مهندسی دریایی انجام شده است. هم‌اکنون در مجموع، کمتر از ۲۰۰۰ نفر فارغ‌التحصیل رشته مهندسی دریایی در کشور وجود دارند که در مقایسه با سایر رشته‌ها (مکانیک، برق و مواد) بسیار اندک و معادل یکسال فارغ‌التحصیلی آنها است. اگر پتانسیل‌های صنایع دریایی در ایران فعال شوند، پیش‌بینی می‌شود که نیاز به بیش از ۱۰ هزار فارغ‌التحصیل رشته مهندسی دریایی وجود داشته باشد.

۴- گرمسیری و دور دست بودن اغلب مناطق ساحلی کشور و فرار منابع انسانی و مالی از این مناطق.

۵- عدم تفاهم و ناسازگاری شرکتهای بزرگ کشتیرانی و کشتی‌سازی ایران؛ ایران دارای یکی از بزرگترین ناوگان‌های کشتیرانی منطقه و آسیا با بیش از ۳۰۰ فروند کشتی اقیانوس‌پیما است که اگر بخش کوچکی از کشتی‌های مورد نیاز ایران به شرکتهای کشتی‌سازی ایرانی سفارش داده می‌شد هرگز این عقب‌افتادگی در صنعت کشتی‌سازی مشاهده نمی‌شد.

امید است که انشاء ا... ایران اسلامی بتواند پس از برطرف شدن این موانع، به جایگاه اصلی خود در بازار صنعت کشتی‌سازی دنیا دست یابد. البته هم‌اکنون ایران بزرگترین کشتی‌سازی غرب آسیا محسوب می‌شود که جایگاه ایران بسیار فراتر از این حد است.

❖ کاربردهای نانو فناوری در صنایع دریایی

صنایع دریایی شامل گسترهٔ عظیمی از صنایع است که شامل مواردی مانند: شناورهای سطحی (کشتی‌ها)، زیرسطحی (زیردریایی‌ها)، سکوهای دریایی و کلیهٔ صنایع مرتبط با دریا می‌باشد. برخی از این کاربردها در ذیل مورد اشاره قرار گرفته‌اند.

- کلیه تحولاتی که در فناوری کامپیوتر، الکترونیک و مخابرات بر اساس فناوری نانو ایجاد می‌گردد، قطعا بر صنایع دریایی تاثیر گذار خواهند بود، چراکه این صنایع نیز مانند سایر صنایع، وابستگی بسیاری به این فناوری‌ها دارند.
- **الکترودهای جوشکاری دما پایین**: این الکترودها با استفاده از فناوری نانو، دارای دمای کاری بسیار پایینی نسبت به الکترودهای جوشکاری موجود هستند. مواد این الکترودها به گونه‌ای هستند که در ازای حرارت اندک، اتحاد مولکولی مستحکمی را بین مولکولهای دو قطعه فلز ایجاد می‌کنند و عملکردی شبیه چسب‌های حرارتی معمولی خواهند داشت. این الکترودها تاثیر شگرفی بر تکنولوژی جوشکاری بخصوص جوشکاری آلومینیوم خواهند داشت، چون اعوجاج بسیار ناچیزی را در فلزات ایجاد می‌کنند. کاربرد و حجم زیاد جوشکاری در صنایع دریایی می‌تواند عاملی برای تأثیر فوق‌العاده نانوفناوری در این زمینه باشد.
- **سوخت:** کشتی و کلیهٔ شناورها جهت تأمین قدرت حرکت در دریا، معمولا چندین تن سوخت حمل می‌کنند و کشتی‌های اقیانوس‌پیما مجبور هستند در طول مسیر دریانوردی، در چندین محل برای سوختگیری توقف نمایند. امروزه نانو پودرهایی ارایه شده است که مصرف سوخت را کاهش داده و از این لحاظ صرفه‌جویی‌های فراوانی را به همراه می‌آورد. همچنین نانو فناوری با ارائه سوخت‌های پر انرژی، کشتی‌ها را از توقف‌های متعدد در دریا و حمل چندین تن سوخت بی‌نیاز خواهند کرد. این سوختها به صورت بسته‌های پر انرژی مولکولی هستند که از اثرات مولکولها بر یکدیگر، انرژی زیادی را آزاد می‌کنند و یک لیتر از این سوختها، معادل ده‌ها لیتر سوخت معمولی انرژی تولید می‌کند.
- **نانوکامپوزیت‌ها:** مواد کامپوزیتی با داشتن آرایش تار و پود (ماتریسی)، استحکام زیادی دارند. نانوفناوری با اعمال آرایش تار و پودی بین مولکولها، نانوکامپوزیتهای بسیار مستحکم و سبکی ایجاد می‌کند که برتری بسیاری نسبت به فایبرگلاس‌های امروزی دارند. کامپوزیت‌ها نیز با داشتن آرایش‌های مولکولی متفاوت، کاربردهای وسیع‌تر و جدیدتری را تجربه خواهند کرد که در ساخت شناورهای فایبرگلاس نقش خواهند داشت.
- **جاذب‌های ارتعاشی:** جاذبهای ارتعاشی امروزی، معمولا موادی حجیم و سنگین هستند. قطعاً نانوفناوری با ارائهٔ جاذب‌های ارتعاشی جدید، تحول عمیقی را در این زمینه ایجاد خواهد کرد. این نانومواد، انرژی ارتعاشی را به مقدار بسیار بالایی در بین شبکهٔ مولکولی خود ذخیره می‌کنند و ساختارهای مولکولی ویژهٔ آنها، از انتقال انرژی ارتعاشی به مولکولهای جانبی تا حد زیادی خودداری می‌کنند و بدین ترتیب ارتعاش به خوبی مهار می‌شود. این مواد در کشتی‌های مسافربری، شناورهای نظامی و زیردریایی‌ها کاربردهای بسیاری دارند.
- **جاذب‌های صوتی**: این جاذبها نیز مانند جاذبهای ارتعاشی، علیرغم سبک و نازک بودن، انرژی صوت را بطور کامل میرا می‌کنند. جاذب های صوتی امروزی با وجود سنگین و حجیم بودن، نسبت به فرکانس و جهت صوت برخوردی، بازدهی متفاوتی دارند. نانوفناوری انواعی از جاذبهای صوتی را ارائه می‌کند که ساختار مولکولی آنها قابل تطابق با جهت برخورد صوت و فرکانس صوت هستند به گونه‌ای که بتواند بیشترین مقدار انرژی صوت را جذب کنند. این مواد نیز در کشتی‌های مسافربری، شناورهای نظامی و زیردریایی‌ها کاربردهای بسیاری دارند.
- **رنگهای دریایی:** خوردگی بسیار زیاد محیط دریا (آب شور)، از معضلات اساسی نگهداری سکوهای دریایی و کشتی‌ها می‌باشد. شرایط خاص محیط دریا، ایجاب می‌کند که بطور متوسط، هر سه سال یکبار، بدنهٔ سکوها و کشتی‌ها رنگ‌آمیزی شود. نانو فناوری با ارائه رنگهای جدید بسیار مقاوم در برابر خوردگی و اثرات محیط، دوامی بیش از ۲۰ سال بر بدنه شناورها خواهند داشت که با توجه به طول عمر شناورها می‌تواند به معنای مادام‌العمر بودن این رنگ‌ها باشد.
- **جاذب‌های انرژی موج دریا و نور آفتاب:** فناوری نانو، نسل جدیدی از مواد را ارائه می‌کند که همانند سلولهای فتوالکتریک انرژی موج دریا و نور آفتاب را جذب می‌کنند و به مثابه منبع تأمین انرژی خواهند بود. ویژگی منحصربه‌فرد این مواد این است که همانند پوششهای معمولی دریایی قابل اتصال به بدنه شناور هستند. استفاده از این منابع انرژی مزیت‌های زیست محیطی نیز دارد.
- **نانوفیلتراسیون:** با استفاده از این فناوری می‌توان ذرات بسیار ریز محیط را نیز جذب کرد. از کاربردهای آنها می‌تواند جذب مونوکسید و دی‌اکسید کربن باشد. پوشش داخلی زیردریایی‌ها در زیر آب که یک محیط بسته می‌باشد، محل مناسبی برای بکارگیری این فناوری می‌باشد.
- **نانومورفولوژی:** با استفاده از این نانوفناوری می‌توان مواد بسیار مقاوم در برابر آتش ساخت که در اشتعال ناپذیری تشبیه به خاک می‌شوند. استفاده از این مواد در شناورها می‌تواند در ایمنی در برابر آتش‌سوزی بسیار حایز اهمیت باشد.
- **تحول در فناوری پیل سوختی:** پیل سوختی کاربردهای وسیعی در شناورها به‌خصوص شناورهای زیرسطحی و زیردریایی‌ها دارد. امروزه روش‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی هیدروژن مورد نیاز در پیل سوختی استفاده می‌شود که برخی از آنها عبارتند از:

- ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت مایع (که دمای بسیار پایین یا فشار بسیار بالایی نیاز دارد)
- ذخیره‌سازی هیدروژن با متال هایدراید (که وزن بسیار زیادی را به شناور تحمیل می‌کند)
- ذخیره‌سازی هیدروژن به کمک کربن فعال (که استفاده از آن مشکلات زیاد و بازدهی کمی دارد.)

با گسترش کاربرد «نانولوله‌های کربنی»[1] این امکان فراهم آمده است که از این مواد برای ذخیرهٔ هیدروژن استفاده شود که دیگر نیازی به دمای پایین، فشار بسیار بالا و تحمل وزن سنگین نخواهد بود. لذا نانوفناوری تحول عظیمی را در فناوری پیل سوختی ایجاد خواهد کرد.

- **باطری‌های با ذخیره انرژی بسیار بالا** : امروزه انواع مختلفی از باطری‌های قابل شارژ وجود دارند که دارای وزن زیاد و ذخیره انرژی اندکی هستند. این باطری‌ها در شناورها بخصوص در قایق‌های تفریحی، زیردریایی‌ها و کشتی‌ها (بعنوان منبع برق اضطراری) کاربردهای حیاتی و مهمی دارند. ذخیره اندک باطری‌ها زمان ماندن زیردریایی‌های دیزل الکتریک در زیر آب را محدود می‌کند. نانوفناوری با ارائه باطریهای با ذخیره انرژی بسیار بالا، زیردریایی‌های دیزل الکتریک را قادر می‌کنند تا ده‌ها برابر زمان فعلی خود در زیر آب بمانند. همچنین فناوری نانو، وزن بسته‌های باطری را کاهش می‌دهد که بطور خاص کاربردهای ارزنده‌ای در فناوری هوافضا، هواپیماهای بدون سرنشین، اتومبیل و شناورهای تفریحی کوچک خواهند داشت.
- **گرافیت و سرامیک** : نانوفناوری با ارائه مواد بسیار مستحکم که دهها برابر مقاوم‌تر از فولاد هستند، تأثیر چشمگیری در ساخت سازه-های دریایی و صنایع دریایی خواهند داشت. از جمله این مواد، سرامیک‌ها هستندکه با استفاده از فناوری نانو، ساخته شده‌اند و در بدنه زیردریایی‌های مخصوص آبهای عمیق (حتی تا حدود ۱۱ هزار متر) بکار خواهند رفت. این مواد با داشتن استحکام فوق‌العاده، وزن سبک و دوام در شرایط دمایی بسیار متغیر، گزینه بسیار مناسبی برای سازه‌های عظیم دریایی بخصوص زیردریایی‌ها به شمار می‌روند.

کوتاه‌ترین فاصله بین یک مشکل و راه حل آن

فاصله بین زانوهایت تا زمـین است!

کسی که در برابر خداوند زانو بزند

در مقابل هر مشکلی می‌تواند بایستد .

دنیا دو روز است : یک روز با تو ، یک روز بر علیه تو !

روزی که با توست مغرور نشو ، روزی که بر علیه توست مأیوس نشو ...

1- carbon nano tube

منابع قسمت اول: آشنایی با شناورها و مهندسی معماری دریایی

1) Book: Merchant Ship Types/ R.M.Smith/ 1975
2) Book: Book: Basic Ship Theory-Vol 1/ K.J.Rawson-E.C.Tupper
3) Web site: Wikipedia Encyclopedia/ 2009
4) Book: Introduction to naval architecture/ Eric Tupper/2002
5) Book: Basic Ship Theory-Vol 2/ K.J.Rawson-E.C.Tupper
6) Document: Series 60 hull lines-Merchant ships

۷) کتاب: اصول طراحی کشتی/ مهدی سیف- محمد سعید سیف/ ۱۳۷۳
۸) کتاب: شناخت کشتی/ اسحاق علی میر/
۹) کتاب: ناو هواپیمابر/ علیرضا حکیم الهی/ ۱۳۷۳
۱۰) کتاب: اصول طراحی زیردریایی/ محمد مونسان/ ویرایش دوم/ دانشگاه صنعتی مالک اشتر/ ۱۳۸۷
۱۱) کتاب: سازه‌های دریایی/ محمد سعید سیف/ ۱۳۷۶
۱۲) کتاب: تحلیل پایداری شناورها/ محمد مونسان/ دانشگاه صنعتی مالک اشتر/ ۱۳۸۷
۱۳) مقاله: کاربردهای نانوفناوری در صنایع دریایی/محمد مونسان/مجله فناوری نانو/ ۱۳۸۶

14) Marine Engineering Reference Book/ A.F.Molland/ 2008

التماس به خدا عزت است : اگر برآورده شود رحمت است،اگر برآورده نشود حکمت است!

التماس به خلق خدا ذلت است: اگر برآورده شود منّت است، اگر برآورده نشود خفت است ...

افتادگی آموز اگر طالب علمی
هرگز نخورد آب، زمینی که بلند است

قسمت دوم

هیدرواستاتیک و پایداری

(Hydrostatics & Stability)

- بخش اول: مفاهیم اولیه پایداری
- بخش دوم: پایداری عرضی شناور
- بخش سوم: پایداری طولی شناور
- بخش چهارم: هیدرواستاتیک زیردریایی
- بخش پنجم: به گل نشستن و پایداری در حالت صدمه دیده
- بخش ششم: آب‌اندازی شناور
- بخش هفتم: ممان‌های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی
- بخش هشتم: اسکوآت و اثرات متقابل

بخش اول:
مفاهیم اولیه پایداری

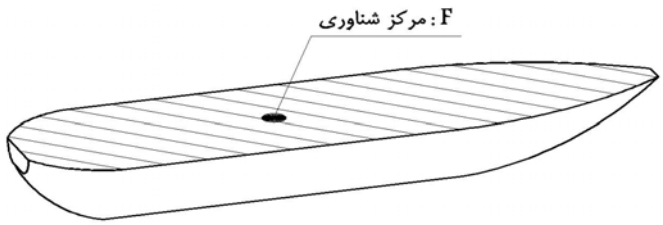
فصل ۱: عوامل مؤثر در تحلیل پایداری شناور[۱]

چند پارامتر خاص در تحلیل پایداری هر شناوری وجود دارد که در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱) مرکز ثقل (G): عبارتست از مرکز ثقل شناور به همراه بارگذاری‌های انجام شده بر روی آن. مرکز ثقل دارای سه مؤلفه طولی، عرضی و عمودی است.

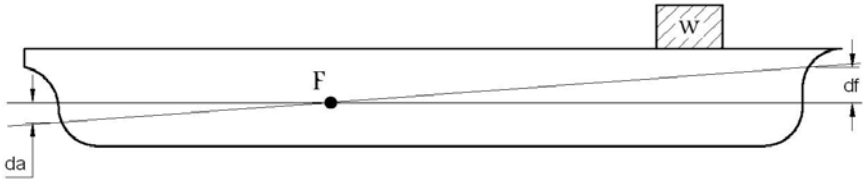
۲) مرکز بویانسی (B)[۲]: مرکز حجم داخل آب شناور است. مرکز بویانسی نیز دارای سه مؤلفه طولی، عرضی و عمودی است.

۳) مرکز شناوری (F)[۳]: عبارتست از مرکز سطح صفحه آبخور شناور. همانطور که در شکل نشان داده شده است، مرکز شناوری عبارتست از مرکز سطح صفحه‌ای که «صفحه آبخور»[۴] نامیده می‌شود.



شکل ۲-۱: مرکز شناوری یا مرکز سطح صفحه آبخور

این نقطه مرکزی است که «شیب[۵]» و «هیل» کشتی (غلتش‌های طولی و عرضی استاتیکی) حول آن انجام می‌گردد. یعنی همانطور که در شکل۲-۱ و ۲-۲ مشخص است، اگر باری بر روی عرشه در قسمت سینه قرار گیرد، کشتی حول نقطه F دوران می‌کند. نقطه F در تعیین آبخور سینه و پاشنه بسیار مؤثر است. محل مرکز شناوری معمولاً متمایل به قسمت پاشنه شناور است چرا که سطح آبخور معمولاً شبیه به شکل ۲-۱ است و این شکل اقتضا می‌کند که مرکز این سطح متمایل به قسمت عقب باشد چراکه قسمت جلویی این شکل ، باریک و کشیده و قسمت انتهایی آن عریض‌تر و پرتر است.
هیل کردن کشتی نیز حول این نقطه اتفاق می‌افتد. از آنجا که قسمت چپ و راست کشتی با هم قرینه هستند، مرکز شناوری معمولاً منطبق بر خط مرکزی شناور است و اگر باری در یک قسمت از شناور قرار گیرد، کشتی حول نقطه F دوران می‌کند (شکل ۲-۲). (نکته بسیار مهم این است که این تغییر زاویه ماهیت نوسانی ندارد و ماهیت استاتیکی دارد. اگر غلتش مداوم کشتی مد نظر باشد، دوران حول مرکز متاسنتر انجام می‌شود و نه مرکز شناوری).



شکل۲- ۲: تغییر شیب شناور حول مرکز شناوری (F) ناشی از قرارگیری یک بار در قسمت سینه

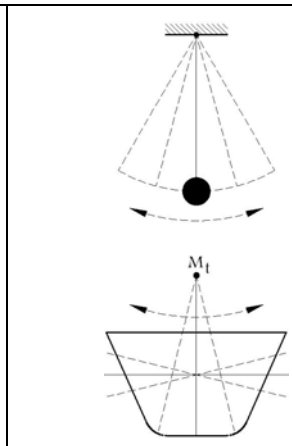
۱- منابع: [۲و ۴ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۹]

2 - Centre of buoyancy
3 - Centre of floatation
4 - Water plane

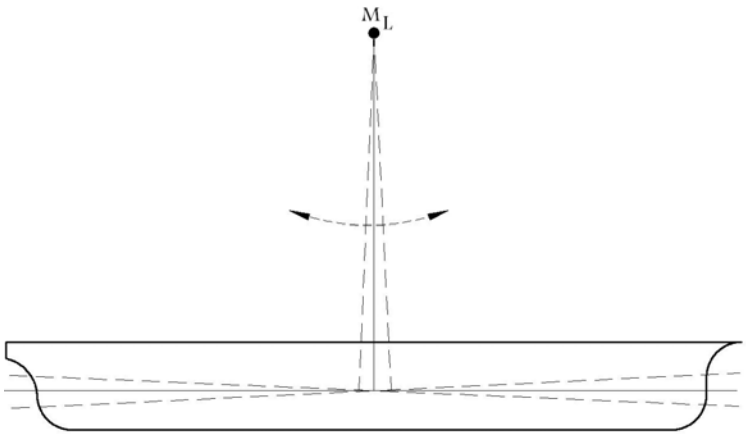
۵ - Trim: یا تریم که معادل کجی یا زاویه طولی شناور است. در این کتاب بجای لفظ «تریم» از «شیب» استفاده می‌شود.

۴) مرکز متاسنتر (M)[1]

در شناور دو نوع متاسنتر داریم: متاسنتر طولی (M_L) و متاسنتر عرضی (M_t). متاسنتر نقطه‌ای است که کشتی حول آن غلتش می‌کند. این نقطه را می‌توان مطابق شکل۲-۳ به مثابه نقطه ثابت پاندول تشبیه کرد.کشتی نیز در اثر نیروهای خارجی، حول نقطه متاسنتر همانند نقطه ثابت پاندول غلتش می‌کند. در شکل۲-۳ غلتش عرضی شناور حول نقطه متاسنتر عرضی (M_t) نشان داده شده است.



شکل۲-۳: نقطه متاسنتر به مثابه نقطه ثابت پاندول

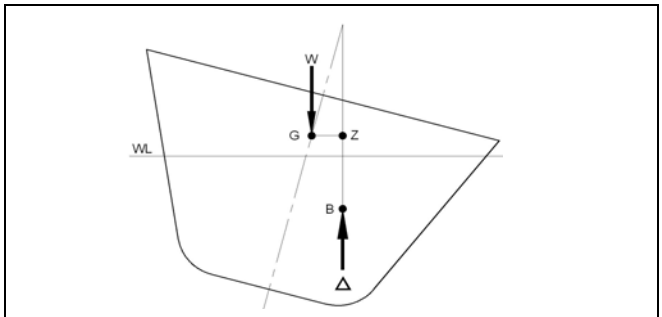


شکل ۲-۴: متاسنتر طولی که غلتش طولی حول آن انجام می‌شود

غلتش طولی کشتی نیز همانند شکل ۲-۴ حول نقطه متاسنتر طولی (M_L) انجام می‌گردد. بنابراین همواره باید در نظر داشت که کشتی به صورت تصادفی و حول نقاط نامشخص غلتش نمی‌کند بلکه حول نقطه متاسنتر (طولی و عرضی) غلتش می‌کند. مرکز متاسنتر طولی (M_L) خیلی بلندتر از متاسنتر عرضی (M_t) است که دلایل و تبعات آن در بخش‌های بعدی بحث خواهد شد.

آیا نقطه متاسنتر (طولی و عرضی) همواره نقطه ثابتی است؟

نقطه متاسنتر در زوایایی غلتش کوچک، نقطه ثابتی است ولی در زوایای بزرگ این نقطه ثابت نیست و بر روی یک منحنی مشخص تغییر موقعیت می‌دهد. زاویه غلتش کوچک برای غلتش عرضی تا ۸ درجه و برای غلتش طولی تا ۱ درجه می‌باشد. در مورد مکان هندسی تغییرات متاسنتر در قسمت‌های بعد، توضیحات بیشتری ارائه می‌شود.



شکل ۲-۵: بازوی GZ که عامل بازگشتن شناور به حالت اولیه است.

۵) بازوی بازگرداننده[2]

بازوی بازگرداننده، عامل بازگشتن شناور از حالت انحراف به حالت اولیه است. این بازو عبارتست از کمترین فاصله بین دو راستای موازی وزن (W) و (B) شناور غلتیده. مقدار GZ عامل اصلی بررسی پایداری است (شکل ۲-۵) که در یک بخش به تفصیل بررسی می‌شود.

❖ پایداری شکلی[3] و پایداری جرمی[4]

پایداری شکلی، اصطلاحی است که برای بیان پایداری شناورها در سطح آب از آن استفاده می‌شود. در سطح آب با غلتش شناور، مرکز بویانسی بدنه جابجا می‌شود که این جابجایی وابسته به شکل بدنه می‌باشد. از این رو به پایداری شناور در سطح آب، «پایداری شکلی» گفته می‌شود.

پایداری جرمی، اصطلاحی است که برای پایداری زیردریایی در زیر سطح آب استفاده می‌شود. در زیر آب با غلتش شناور، مرکز بویانسی جابجا نمی‌شود و نقطه ثابتی است چرا که کل بدنه در داخل آب غوطه‌ور است و شکل بدنه به هر نوعی که باشد، مرکز بویانسی جابجا نمی‌شود. در عوض، مرکز ثقل شناور با غلتش شناور جابجا می‌شود و مبنای بررسی پایداری، جابجا شدن مرکز ثقل است و به همین دلیل به این نوع پایداری، «پایداری جرمی» گفته می‌شود.

1 - Center of Metacentre
2 - GZ
3 - form stability
4 - Mass stability

فصل ۲ : مشخصات شناورهای مدل

برای ارائه مثال‌ها در این کتاب، دو شناور به عنوان شناورهای الگو انتخاب شده‌اند که دارای ابعاد یکسانی هستند. ابعاد یکسان بین این دو شناور برای امکان مقایسه بین مولفه‌های پایداری می‌باشد. این دو شناور عبارتند از:

الف) کشتی حمل کالای عمومی (شکل ۲-۶)

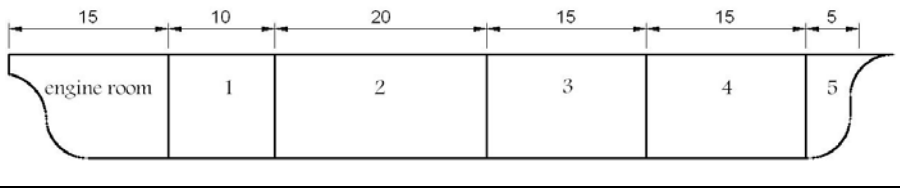
ب) بارج

مشخصات هر یک از این شناورها در زیر ارائه می‌گردد:

الف) کشتی حمل کالای عمومی[1]

مشخصات کشتی مدل ۱ به صورت جدول ۲-۱ می‌باشد:

جابجایی	**۳۵۰۰ تن**	**حداکثر آبخور : ۵ متر**
طول کلی	**۸۶/۵ متر**	**عمق بدنه : ۶ متر**
طول بین دو عمود	**۸۰ متر**	**تعداد انبارها : ۴ انبار (مطابق شکل ۲-۶)**
حداکثر عرض	**۱۳/۶ متر**	**مخزن بالاست پاشنه : ۲۱ متر مکعب با x=۵ متر از عمود پاشنه**
حداکثر عرض در آبخور تابستان	**۱۳/۴۸ متر**	**مخزن بالاست سینه : ۶۶ متر مکعب با x=۷۵ متر جلوی عمود پاشنه**
جدول ۲-۱: مشخصات کشتی مدل ۱		



شکل۲-۶: طول بین دو عمود، طول کلی و طول انبارهای شناور مدل ۱

مقدار دقیق تناژ یا جابجایی این کشتی در آبخور تابستان ۳۵۶۰/۲ تن می‌باشد که برای ساده‌ترشدن حل مسائل، ۳۵۰۰ تن فرض می‌شود ولی در نمودارهای ارائه شده (که به کمک نرم‌افزار *autoship* برای این کشتی ارائه شده)، مقدار دقیق آن ذکر شده است. فواصل بین آبخورها، مقاطع عرضی و برش‌های طولی (باتوک) و همچنین جدول آفست این کشتی به صورت زیر می‌باشد. برای حل مسائل مرتبط با این کشتی و برای جلوگیری از طولانی شدن غیر ضروری حل مسائل، جدول آفست به صورت زیر خلاصه شده است که دارای مقاطع عرضی ۰ تا ۸ با فواصل ۱۰ متر می‌باشد و بین مقاطع ۰ و ۱ و همچنین مقاطع ۷ و ۸ یک مقطع اضافی دیگر هم در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که بتوان شکل مناسبی از انحنای سینه و پاشنه در اختیار داشت. فواصل بین مقاطع در شکل ۲-۷ ملاحظه می‌شود. از این کشتی در طول کتاب با عنوان «کشتی مدل ۱» یاد می‌شود.

1 - General Cargo Ship

Station

Sta	Loc.(mm)
A41	A41000
A40	A40000
A39	A39000
A38	A38000
A37	A37000
A36	A36000
A32	A32000
A28	A28000
A24	A24000
A20	A20000
A16	A16000
A12	A12000
A8	A8000
A4	A4000
0	0
F4	F4000
F8	F8000
F12	F12000
F16	F16000
F20	F20000
F24	F24000
F28	F28000
F32	F32000
F33	F33000
F34	F34000
F35	F35000
F36	F36000
F37	F37000
F38	F38000
F39	F39000
F40	F40000
F41	F41000

Locations

Offset Half-Breadths(mm)

Sta	WL 5	WL 4	WL 3	WL 2	WL 1	WL 0
A41	377	0	0	0	0	0
A40	675	195	0	0	0	0
A39	1089	520	111	0	0	0
A38	1542	86	415	83	0	0
A37	1989	0 12	762	351	45	0
A36	2433	1660	1098	629	278	0
A32	4084	3230	2450	1814	1219	628
A28	5290	4571	3814	3063	2314	1476
A24	6004	5512	4937	4259	3481	2397
A20	6434	6133	5761	5221	4573	3439
A16	6628	6458	6223	5887	5433	4726
A12	S705	6595	6444	6206	5851	5326
A8	6724	6623	6482	6260	5925	5394
A4	6744	6650	6521	6316	6001	5462
0	6763	6678	6560	6374	6078	5531
F4	6782	6706	6600	6435	6157	5601
F8	6801	6735	6641	6498	6234	5669
F12	6821	6763	6683	6562	6313	5738
F16	6807	6730	6624	6454	6069	5292
F20	6765	6617	6430	6077	5326	4338
F24	6656	6428	6093	5387	4272	3145
F28	6478	6118	5470	4254	2932	1898
F32	6115	5556	4379	2747	1276	699
F33	6015	5358	4034	2302	884	414
F34	5839	5110	3654	1778	439	118
F35	5631	4811	3242	1139	0	0
F36	5416	4490	2809	447	0	0
F37	5180	4144	2337	0	0	0
F38	4914	3769	1803	0	0	0
F39	4609	3360	1181	0	0	0
F40	4256	2917	414	0	0	0
F41	3930	2470	0	0	0	0

Station	
Sta	Loc.(mm)
A40	A40000
A35	A35000
A30	A30000
A20	A20000
A10	A10000
0	0
F10	F10000
F20	F20000
F30	F30000
F35	F35000
F40	F40000

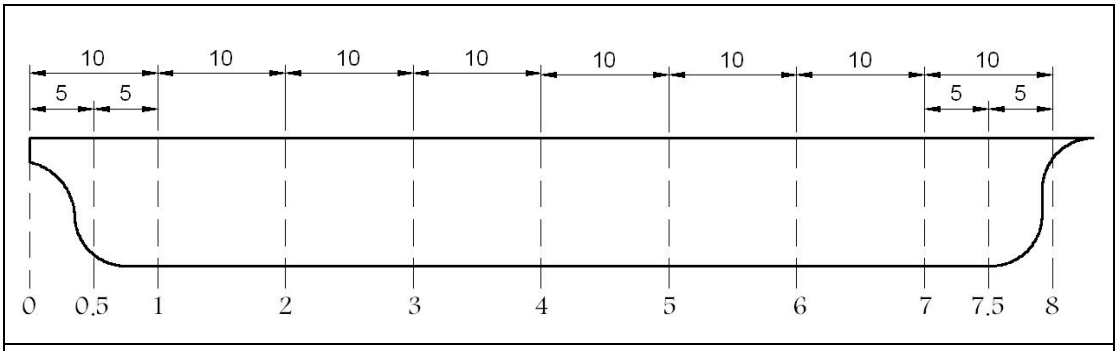
Buttock	
Butt	Loc.(mm)
Butt 1	0
Butt 2	P1700
Butt 3	P3400
Butt 4	P5100
Butt 5	P6800

Waterline	
WL	Loc.(mm)
WL 0	0
WL 1	U1000
WL 2	U2000
WL 3	U3000
WL 4	U4000
WL 5	U5000
WL 6	U6000

Offset Half-Breadths(m)								
Number	**Location**	**WL0**	**WL1**	**WL2**	**WL3**	**WL4**	**WL5**	**WL6**
0	**A40**	0	0	0	0	0	0.197	0.68
0.5	**A35**	0	0.113	0.481	0.911	1.428	2.075	2.878
1	**A30**	0	1.021	1.755	2.443	3.171	3.959	4.75
2	**A20**	0	3.438	4.569	5.219	5.76	6.131	6.634
3	**A10**	0	5.357	5.885	6.225	6.453	6.603	6.715
4	**0**	0	5.524	6.072	6.37	6.553	6.673	6.763
5	**F10**	0	5.696	6.268	6.528	6.658	6.746	6.811
6	**F20**	0	4.332	5.328	6.073	6.423	6.617	6.765
7	**F30**	0	1.333	2.179	3.559	4.982	5.879	6.324
7.5	**F35**	0	0	0	1.139	3.239	4.804	5.625
8	**F40**	0	0	0	0	0.416	2.919	4.251

Offset Heights(m)						
Number	**Location**	**Butt 1**	**Butt 2**	**Butt 3**	**Butt 4**	**Butt 5**
0	**A40**	4.708	7.471	0	0	0
0.5	**A35**	0.691	4.469	6.605	0	0
1	**A30**	0.026	1.922	4.292	6.445	0
2	**A20**	0.011	0.257	0.98	2.801	0
3	**A10**	0.009	0.079	0.316	0.764	0
4	**0**	0.007	0.042	0.209	0.628	0
5	**F10**	0.004	0.01	0.108	0.491	6.904
6	**F20**	0.003	0.03	0.466	1.764	0
7	**F30**	7.25	1.509	2.894	4.097	0
7.5	**F35**	2.115	3.237	4.09	5.261	0
8	**F40**	3.895	4.411	5.285	0	0

محل مقاطع در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: فواصل بین مقاطع کشتی مدل ۱

ب) بارج : مشخصات شناور مدل ۲ در جدول زیر ارائه شده است:

جابجایی	**۵۵۷۰ تن**
طول	**۸۰ متر**
عرض	**۱۳/۶ متر**
عمق	**۶ متر**
آبخور	**۵ متر**

از این شناور در طول کتاب با عنوان «شناور مدل ۲» یاد می‌شود.

فصل ۳: روشهای انتگرال گیری عددی[۱]

استفاده از روابط و فرمولهای انتگرال‌گیری بر یک منحنی، مستلزم موجود بودن معادله منحنی می‌باشد، یعنی داریم:

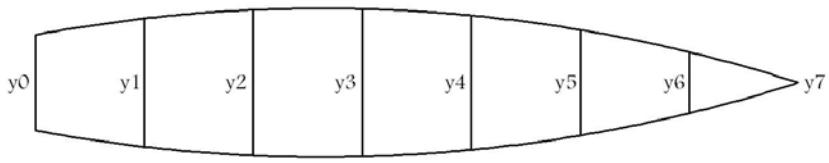
$$A = \int y dx \ , \quad y = f(x)$$

اگر رابطه $y = f(x)$ در دسترس نباشد باید به کمک روشهای عددی، رابطه $\int ydx$ محاسبه گردد. محاسبه سطح، حجم، ممان اول و ممان دوم سطح و حجم از کاربردهای انتگرال‌گیری عددی است. معمولاً در کاربردهای مهندسی دریایی نیاز به محاسبه مساحت، مرکز سطح، ممان دوم سطح، حجم و مرکز حجم می‌باشد. از طرفی به جای معادله منحنی، مختصات نقاط آنها در جدول آفست وجود دارد. لذا باید بتوان از اطلاعات عددی موجود و به کمک روشهای مختلف انتگرال‌گیری عددی، مشخصات مطلوب را محاسبه کرد. مهمترین روشهای انتگرال‌گیری عددی عبارتند از:

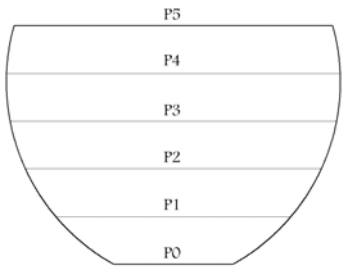
۱- روش سیمسون
۲- روش ذوزنقه
۳- روش چبیچف
۴- روش نیوتن
۵- روش گاوس

❖ کلیات روش انتگرال‌گیری عددی

فرض کنید محاسبه مساحت سطح آبخور شناور مطلوب است. عرض‌های سطح آبخور از جدول آفست به صورت زیر به دست می‌آید (مطابق شکل ۲-۸):



شکل ۲-۸: عرض‌های صفحه آبخور در یک آبخور مشخص که از جدول آفست شناور بدست می‌آید



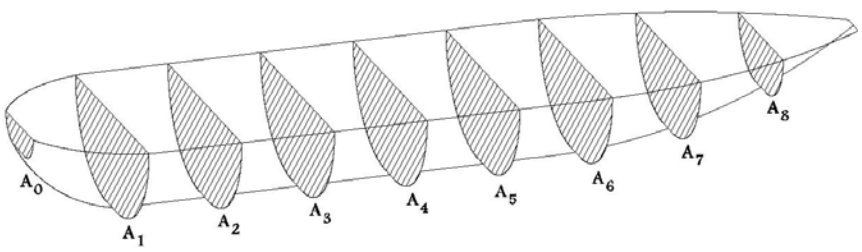
شکل ۲-۹: محاسبه مساحت عرضی با استفاده از عرض‌های بدنه در آبخورهای مختلف

مساحت این سطح به روش عددی، از رابطه کلی روبرو به دست می‌آید: $A_w = K_1(a_0y_0 + a_1y_1 + a_2y_2 + ... + a_7y_7)$

محاسبه مساحت مقطع عرضی بدنه نیز به کمک عرض‌های موجود در جدول آفست به صورت زیر می‌باشد (مطابق شکل ۲-۹):

$$A_s = K_2(b_0p_0 + b_1p_1 + ... + b_5p_5)$$

توجه شود که منظور از p نیز همان مقادیر عرض آبخور است. محاسبه حجم بدنه نیز به کمک مساحت مقاطع عرضی بدنه به صورت زیر به دست می‌آید (مطابق شکل۲-۱۰)



شکل۲-۱۰: محاسبه حجم بدنه با اعمال قوانین انتگرال‌گیری عددی بر روی مساحت مقاطع عرضی

۱ - منابع: [2] , [4] , [12] , [14]

$$V = K_3(C_0A_0 + C_1A_1 + C_2A_2 + ... + C_8A_8)$$

توجه شود که در محاسبه حجم، هر یک از مقادیر A_0 تا A_7 خود به کمک روش‌های عددی که توضیح داده شد، بدست می‌آیند. ضرایب موجود K_3, K_2, K_1 و ضرایب مختلف c,b,a در هر روش انتگرال‌گیری عددی مقادیر متفاوتی هستند که در قسمت بعد به آنها اشاره می‌گردد.

هر یک از روش‌های انتگرال‌گیری عددی در زیر بررسی می‌شوند:

۱- روش سیمسون[1]:

روش سیمسون به سه حالت کلی وجود دارد:

الف- قانون سیمسون اول (برای تعداد فواصل بین مقاطع مضربی از ۲)

ب- قانون سیمسون دوم (برای تعداد فواصل بین مقاطع مضربی از ۳)

ج- قانون (۱ – 8 5) که شکل دیگری از قانون سیمسون اول است.

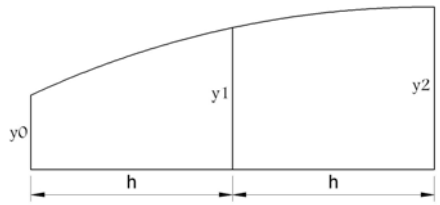
با توجه به تعداد مقاطع یا نیم عرض‌های موجود (که از جدول آفست به دست می‌آیند) می‌توان یکی از روشهای فوق را انتخاب کرد:

الف) قانون اول سیمسون

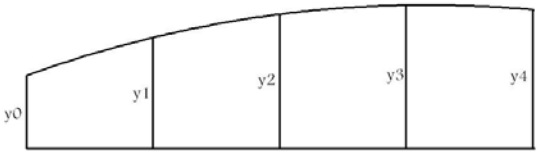
اگر تعداد فواصل بین مقاطع مضربی از ۲ باشد (مطابق شکل ۲-۱۱) می‌توان این قانون را بکار برد:

$$\text{مساحت} = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2)$$

فواصل بین مقاطع برابر h می‌باشد. به همین ترتیب برای تعداد بیشتری از مقاطع داریم (شکل ۲-۱۲):



شکل ۲-۱۱: حداقل تعداد مقاطع برای استفاده از سیمسون اول



شکل ۲-۱۲: تعداد بیشتری از مقاطع برای استفاده از سیمسون اول

$$\text{مساحت کل} = \text{مساحت ۱} + \text{مساحت ۲} = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2) + \frac{h}{3}(y_2 + 4y_3 + y_4) = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + y_4)$$

بنابراین ضریب K برای این روش برابر $\frac{h}{3}$ و ضرایب داخل پرانتز برابر است با:

1 4 1

1 4 2 4 1 یا

که اگر مقدار تعداد مقاطع به همین نسبت افزایش یابد، ضرایب نیز به همین ترتیب تغییر می‌یابند.

➢ اثبات قانون اول سیمسون

در قانون اول فرض می‌شود که منحنی گذرنده از مقاطع از درجه ۲ باشد (مطابق شکل ۲-۱۱):

$$y = ax^2 + bx + c$$

$$A = \int_0^{2h}(ax^2 + bx + c)dx = \left[\frac{ax^3}{3} + \frac{bx^2}{2} + cx + d\right]_0^{2h} = \frac{8h^3}{3}a + \frac{4h^2}{2}b + 2hc \quad (\times)$$

$$x = 0 \rightarrow y_0 = c$$

$$x = h \rightarrow y_1 = h^2a + hb + c$$

$$x = 2h \rightarrow y_2 = 4h^2 + 2hb + c$$

$$y_1 - y_0 = h^2a + hb$$

1 - Sympson Law

$$y_2 - y_0 = 4h^2 a + 2hb$$

$$(y_2 - y_0) - 2(y_1 - y_0) = 2h^2 a \rightarrow a = \frac{y_0 - 2y_1 + y_2}{2h^2}$$

$$(y_2 - y_0) - 4(y_1 - y_0) = -2hb \rightarrow b = \frac{-3y_0 + 4y_1 - y_2}{2h}$$

از رابطه بالا : $y_0 = c \rightarrow c = y_0$

با جاگذاری مقادیر a , b , c در رابطه مساحت × داریم:

$$\text{مساحت} = \frac{8h^3}{3}\frac{(y_0 - 2y_1 + y_2)}{2h^2} + \frac{4h^2}{2}\frac{(-3y_0 + 4y_1 - y_2)}{2h} + 2hy_0 = \frac{4h}{3}(y_0 - 2y_1 + y_2) + h(-3y_0 + 4y_1 - y_2) + 2hy_0$$

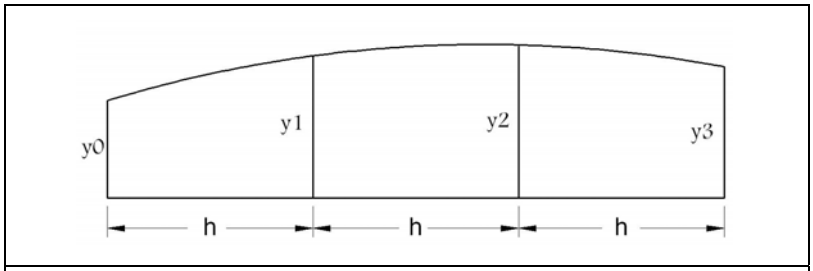
بنابراین:

$$= h\left(\frac{1}{3}y_0 + \frac{4}{3}y_1 + \frac{1}{3}y_2\right)$$

$$\text{مساحت} = \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2)$$

ب) قانون دوم سیمسون

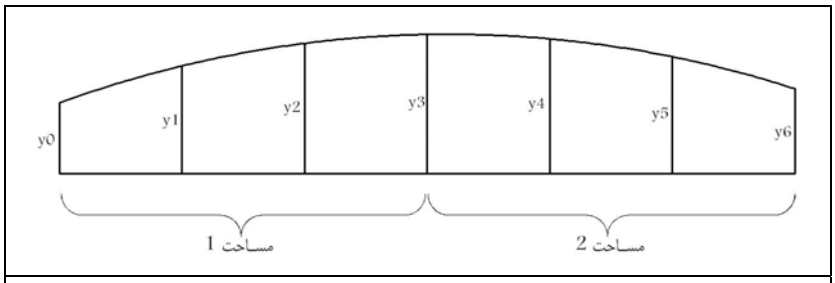
این قانون در مواقعی بکار می‌رود که فواصل بین مقاطع، مضربی از ۳ باشد (شکل ۲- ۱۳ و ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۳: حداقل تعداد عرض‌ها برای استفاده از سیمسون دوم

بدین ترتیب داریم :

$$\text{مساحت} = \frac{3h}{8}(y_0 + 3y_1 + 3y_2 + y_3)$$



شکل ۲-۱۴: نسبت افزایش مقاطع برای استفاده از سیمسون دوم

و همچنین می‌توانیم داشته باشیم:

$$\text{مساحت} = \frac{3}{8}h(y_0 + 3y_1 + 3y_2 + y_3) + \frac{3}{8}h(y_3 + 3y_4 + 3y_5 + y_6) = \frac{3}{8}h(y_0 + 3y_1 + 3y_2 + 2y_3 + 3y_4 + 3y_5 + y_6)$$

بنابراین ضریب K (ضریب پشت پرانتز) برای این روش برابر $\frac{3h}{8}$ و ضرایب داخل پرانتز برابرند با:

1 3 3 1

یا:

1 3 3 2 3 3 1

و اگر تعداد مقاطع به همین نسبت افزایش یابد، ضرایب به همین ترتیب تغییر می‌کنند.

❖ اثبات قانون دوم سیمسون

در این قانون فرض بر این است که منحنی گذرنده از مقاطع از درجه ۳ باشد (مطابق شکل ۲-۱۳):

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

$$\text{مساحت} = \int_0^{3h}(ax^3+bx^2+cx+d)dx = \left[\frac{a}{4}x^4+\frac{b}{3}x^3+\frac{c}{2}x^2+dx\right]_0^{3h} = \frac{81}{4}ah^4+9bh^3+\frac{9}{2}ch^2+3dh \qquad (\times\times)$$

$$x=0 \rightarrow \boxed{y_0 = d}$$

$$x=h \rightarrow y_1 = ah^3+bh^2+ch+d$$

$$x=2h \rightarrow y_2 = 8ah^3+4bh^2+2ch+d$$

$$x=3h \rightarrow y_3 = 27ah^3+9bh^2+3ch+d$$

$$\begin{cases} y_1-y_0 = ah^3+bh^2+ch \\ y_2-y_0 = 8ah^3+4bh^2+2ch \\ y_3-y_0 = 27ah^3+9bh^2+3ch \end{cases}$$

$$\begin{cases} (y_2-y_0)-2(y_1-y_0) = 6ah^3+2bh^2 \\ (y_3-y_0)-3(y_1-y_0) = 24ah^3+6bh^2 \end{cases}$$

$$(y_3-y_0)-3(y_1-y_0)-3[(y_2-y_0)-2(y_1-y_0)] = 6ah^3$$

$$\boxed{a = \frac{y_3-3y_2+3y_1-y_0}{6h^3}}$$

$$(y_3-y_0)-3(y_1-y_0)-4[(y_2-y_0)-2(y_1-y_0)] = -2bh^2$$

$$\boxed{b = \frac{y_3-4y_2+5y_1-2y_0}{-2h^2}}$$

با جاگذاری مقادیر d,b,a در رابطه y_1-y_0 داریم:

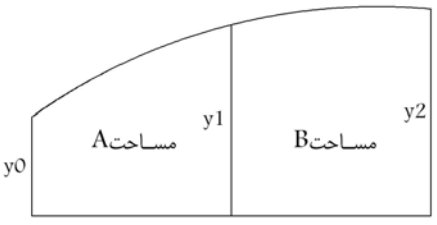
$$\boxed{c = \frac{1}{h}\left(\frac{1}{3}y_3+\frac{3}{2}y_2+3y_1-\frac{11}{6}y_0\right)}$$

با قرار دادن مقادیر d , c , b , a در رابطه ×× داریم:

$$\text{مساحت} = \frac{3}{8}h(y_3+3y_2+3y_1+y_0)$$

ج) قانون ۱- ۸ ۵

این قانون در مواقعی مطرح است که ۳ مقطع در اختیار داشته باشد ولی فقط مساحت بین دو مقطع مطلوب باشد. فرض کنید مساحت بین مقاطع y_1, y_0 (یعنی مساحت *A*) مطلوب باشد مطابق این قانون داریم (مطابق شکل ۲-۱۵) :



شکل ۲-۱۵: محاسبه مساحت A با استفاده از نیم عرض‌های y0 , y1 , y2

$$\text{مساحت A} = \frac{h}{12}(5y_0+8y_1-y_2)$$

یعنی مقادیر ۱- ۸ ۵ همان ضرایب مقاطع هستند. به همین ترتیب اگر مساحت بین مقاطع y_1, y_2 (مساحت *B*) مد نظر باشد داریم :

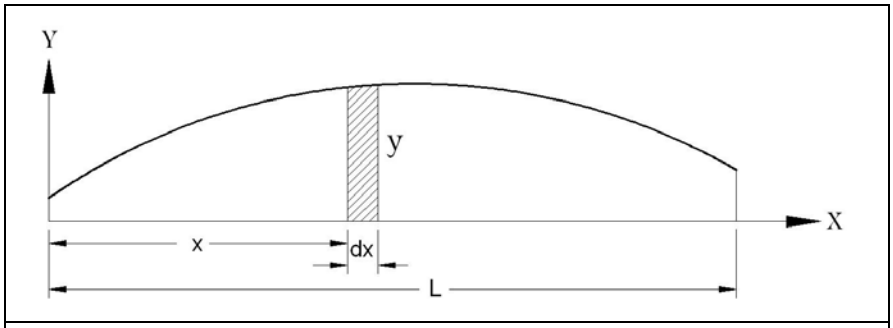
$$\text{مساحت B} = \frac{h}{12}(5y_2+8y_1-y_0)$$

این قانون شکل دیگری از قانون اول سیمسون است چرا که با جمع کردن مساحتهای *A* و *B* قانون اول بدست می‌آید:

$$\text{مساحت کل} = \text{مساحت A} + \text{مساحت B} = \frac{h}{12}(4y_0+16y_1+4y_2) = \frac{h}{3}(y_0+4y_1+y_2)$$

❖ کاربرد قوانین سیمسون در محاسبه ممان اول و دوم سطح

محاسبه ممان اول سطح در به دست آوردن مرکز سطح کاربرد دارد. به طور مثال در سطح آبخور، بدست آوردن ممـان اول سـطح و در نتیجـه مرکـز سطح (به معنای به دست آوردن مرکز شناوری) می‌باشد. ممان اول حجم هم در به دست آوردن مرکز حجم (مرکز بویانسـی) اهمیـت دارد. ممـان دوم سطح نیز در به دست آوردن شعاع متاسنتری شناور اهمیت دارد که در بخش‌های بعدی این کتاب بدان پرداخته می‌شود. محاسبه ممان اول و ممان دوم سطح وابسته به اینکه حول محور طولی یا عرضی باشد، متفاوت است. محاسبه ممان‌ها حول محور عرضی (محور Y) مطابق شکل ۲- ۱۶ عبارتست از:



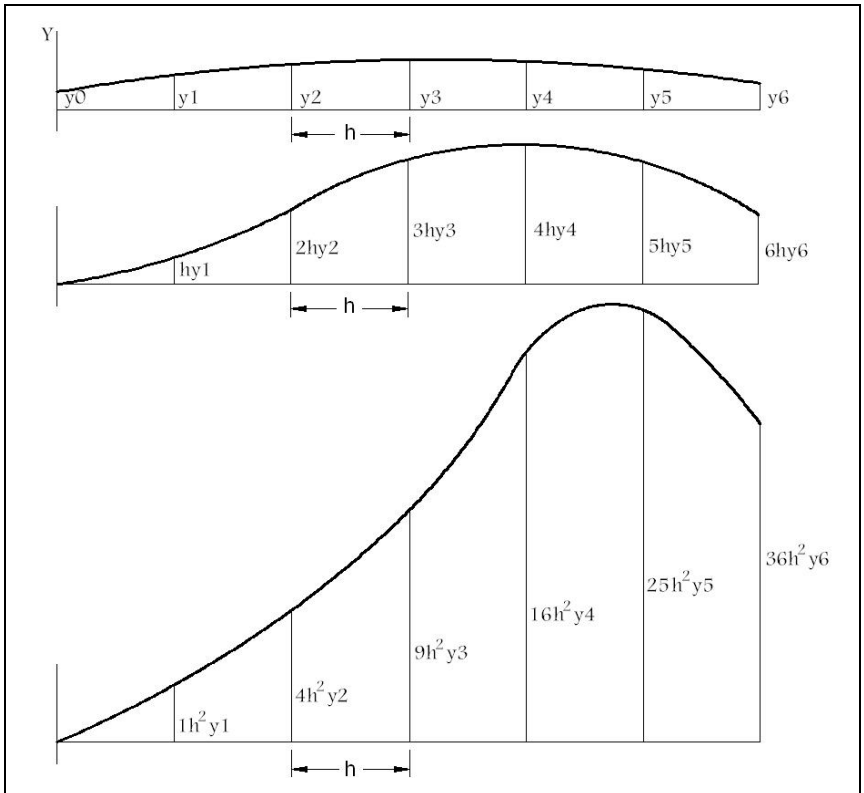
شکل ۲-۱۶: المان سطح و ممان آن

$$\text{مساحت} = \int_0^L ydx$$

$$\text{ممان اول سطح حول محور YY} = \int_0^L yxdx$$

$$\text{ممان دوم سطح حول محور YY} = \int_0^L yx^2dx$$

اگر بخواهیم انتگرال‌های فوق را به صورت عددی و مقاطع مشابه‌سازی کنیم داریم (با استفاده از شکل۲-۱۷) :



شکل ۲-۱۷: معادل‌سازی مقادیر ممان اول و دوم به صورت مقاطع عرضی

محاسبه مساحت

شماره مقطع	مقدار مقاطع (نیم‌عرض)	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F)
0	y_0	1	y_0
1	y_1	4	$4y_1$
2	y_2	2	$2y_2$
3	y_3	4	$4y_3$
4	y_4	2	$2y_4$
5	y_5	4	$4y_5$
6	y_6	1	y_6
مجموع			$\sum F$

تابع مساحت $= \sum F$

مساحت $= \frac{h}{3}\sum F$

❖ **محاسبه ممان اول سطح**

شماره مقطع	مقدار مقاطع	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F1)
0	$0y_0$	1	0
1	hy_1	4	$4hy_1$
2	$2hy_2$	2	$4hy_2$
3	$3hy_3$	4	$12hy_3$
4	$4hy_4$	2	$8hy_4$
5	$5hy_5$	4	$20hy_5$
6	$6hy_6$	1	$6hy_6$
مجموع			$\sum F1$

تابع ممان اول سطح $= \sum F1$

ممان اول سطح $= \frac{h}{3}\sum F1$

مرکز سطح $= \bar{x} = \frac{\text{ممان اول سطح}}{\text{مساحت}} = \frac{\frac{h}{3}\cdot\sum F1}{\frac{h}{3}\sum F} = \frac{\text{تابع ممان اول}}{\text{(تابع سطح)}}$

❖ **محاسبه ممان دوم سطح**

شماره مقطع	مقدار مقاطع	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F2)
۰	$0y_0$	1	**0**
1	h^2y_1	4	$4h^2y_1$
2	$4h^2y_2$	2	$8h^2y_2$
3	$9h^2y_3$	4	$36h^2y_3$
4	$16h^2y_4$	2	$32h^2y_4$
5	$25h^2y_5$	4	$100h^2y_5$
6	$36h^2y_6$	1	$36h^2y_6$
مجموع			$\sum F_2$

تابع ممان دوم سطح $= \sum F_2$

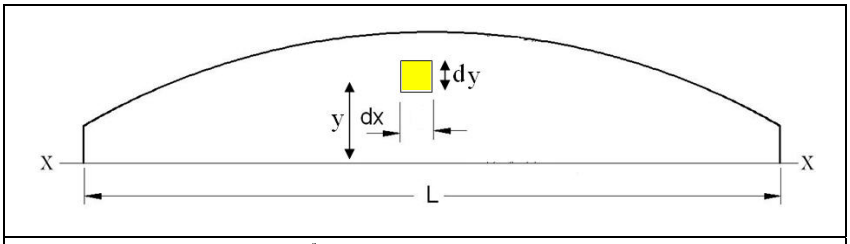
(I_{YY}) ممان دوم سطح $= \frac{h}{3}.\sum F_2$

برای محاسبات مربوط به پایداری طولی، بایستی ممان دوم سطح آبخور نسبت به محور عرضی گذرنده از مرکز سطح را داشته باشیم. بنـابراین بایـد از قضیه محورهای موازی استفاده کنیم تا ممان دوم را از حول YY به حول محور گذرنده از مرکز سطح انتقال دهیم: $I_{NA} = I_{YY} - A.x^2$

توجه شود که x (که همان فاصله طولی مرکز سطح می‌باشد) از قسمت قبل و از طریق محاسبه ممان اول به دست می‌آید.

❖ محاسبه ممانها حول محور طولی

مطابق شکل ۲-۱۸ داریم:



شکل ۲-۱۸: المان سطح و ممان آن

ممان اول سطح حول $XX = \iint y dx dy = \int \frac{y^2}{2} dx$

ممان دوم سطح حول $XX = \iint y^2 dx dy = \int_0^L \frac{y^3}{3} dx$

مشابه‌سازی انتگرال‌های فوق با انتگرال‌گیری عددی عبارتست از:

ممان اول حول محور XX

شماره مقطع	مقدار مقاطع	(مقدار مقطع)^2	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F1)
۰	y_0	y_0^2	1	y_0^2
1	y_1	y_1^2	4	$4y_1^2$
2	y_2	y_2^2	2	$2y_2^2$
3	y_3	y_3^2	4	$4y_3^2$
4	y_4	y_4^2	2	$2y_4^2$
5	y_5	y_5^2	4	$4y_5^2$
6	y_6	y_6^2	1	y_6^2
مجموع				$\sum F_1$

تابع ممان اول حول $XX = \sum F1$ ممان اول حول $XX = \frac{h}{3}(\frac{1}{2})\sum F1$

$\frac{h}{3}$ به دلیل استفاده از سیمسون اول و $\frac{1}{2}$ نیز از فرمول ممان اول حول محور XX به دست آمده است.

ممان دوم حول محور XX

شماره مقطع	مقدار مقاطع	(مقدار مقطع)^3	ضرایب سیمسون	حاصلضرب (F1)
0	y_0	y_0^3	1	y_0^3
1	y_1	y_1^3	4	$4y_1^3$
2	y_2	y_2^3	2	$2y_2^3$
3	y_3	y_3^3	4	$4y_3^3$
4	y_4	y_4^3	2	$2y_4^3$
5	y_5	y_5^3	4	$4y_5^3$
6	y_6	y_6^3	1	y_6^3
مجموع				$\sum F_2$

XX تابع ممان دوم حول $= \sum F_2$

XX ممان دوم حول $= \frac{h}{3} \times \frac{1}{3} \times \sum F_2$

که $\frac{h}{3}$ به دلیل استفاده از سیمسون اول و مقدار $\frac{1}{3}$ نیز از فرمول ممان دوم سطح حول محور XX حاصل شده است. توجه شود که اگر مقادیر y_0 تا y_6 برابر نیم عرض‌های صفحه آبخور باشند، برای کل سطح آبخور (دو طرف محور XX) داریم:

XX ممان دوم کل سطح آبخور حول محور $= 2 \times \frac{h}{3} \times \frac{1}{3} \sum F_2$

مثال: ضرایب بدنه شناور مدل ۱ را بدست آورید.

حل: ضرایب بدنه وابسته به عمق آبخور هستند که البته معمولا ضرایب برای آبخور تابستان بیان می‌گردند:

ضریب بلوکی:

از مشخصات هیدرواستاتیک می‌دانیم که تناژ در آبخور تابستان ۳۵۰۰ تن و آبخور تابستان، ۵ متر است و حداکثر عرض در آبخور تابستان برابـر ۱۳/۴۸ متر می‌باشد لذا داریم:

$$\nabla = \frac{displacement}{1.025} = 3414.6 \ m^3$$

$$C_B = \frac{\nabla}{(L \times B \times T)} = \frac{3414.6}{(80 \times 13.48 \times 5)} = 0.63$$

ضریب صفحه آبخور:

آبخور تابستان این شناور ۵ متر $(WL5)$ می‌باشد که مساحت این آبخور به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

AREA OF WATERLINE 5						
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	سیمسون	سیمسون	سیمسون	تابع سطح
0	0.197	1×0.5=0.5			0.5	0.0985
0.5	2.075	4×0.5=2			2	4.15
1	3.959	1×0.5=0.5	1		1.5	5.9385
2	6.131		4		4	24.524
3	6.603		2		2	13.206
4	6.673		4		4	26.692
5	6.746		2		2	13.492
6	6.617		4		4	26.468
7	5.879		1	1×0.5=0.5	1.5	8.8185
7.5	4.804			4×0.5=2	2	9.608
8	2.919			1×0.5=0.5	0.5	1.4595
					SUM=	134.455

A5=	895.4703

$$C_{WP} = \frac{A_W}{(L \times B)} = \frac{895.47}{(80 \times 13.48)} = 0.83$$

ضریب مقطع میانی:

مقطع میانی این شناور مقطع ۴ می‌باشد که مساحت آن تا آبخور ۵ متر به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

	نیم عرض	سیسمسون۱	سیسمسون۲	تابع سطح۱	تابع سطح۲
WL0	0	1		0	
WL1	5.524	4		22.096	
WL2	6.072	1	1	6.072	6.072
WL3	6.37		3		19.11
WL4	6.553		3		19.659
WL5	6.673		1		6.673

SUM=	28.17	51.51

a1=	18.76
a2=	38.64
A=a1+a2=	57.40

$$C_M = \frac{A_M}{B \times T} = \frac{57.4}{13.48 \times 5} = 0.85$$

ضریب منشوری عمودی:

$$C_{VP} = \frac{\nabla}{A_W \times T} = \frac{3414.6}{895.47 \times 5} = 0.76$$

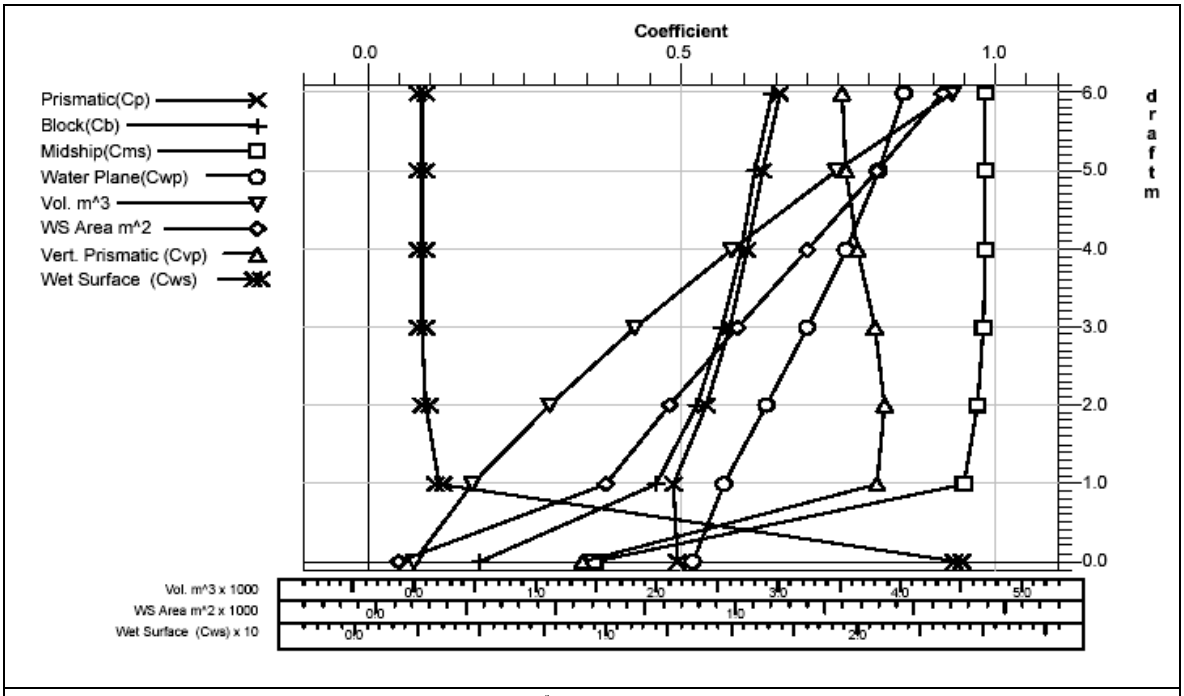
ضریب منشوری طولی:

$$C_P = \frac{\nabla}{A_M \times L} = \frac{3414.6}{57.4 \times 80} = 0.74$$

می‌دانیم که این ضرایب وابسته به عمق آبخور هستند. برای شناور مدل ۱ جداول و نمودار ضرایب بدنه بر حسب آبخور به صورت زیر می‌باشد:

مقادیر ضرایب بدنه موجود در این جداول به صورت کامپیوتری محاسبه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که بین مقادیر جدول و مقادیر محاسبه شده تفاوتهایی وجود دارد که ناشی از تعداد کم نیم‌عرض‌های در نظر گرفته شده برای حل مسئله می‌باشد. مقادیر جدول را می‌توان در نمودار ضرایب بدنه بر حسب آبخور برای شناور مدل ۱ مطابق شکل ۱-۱۹ نمایش داد.

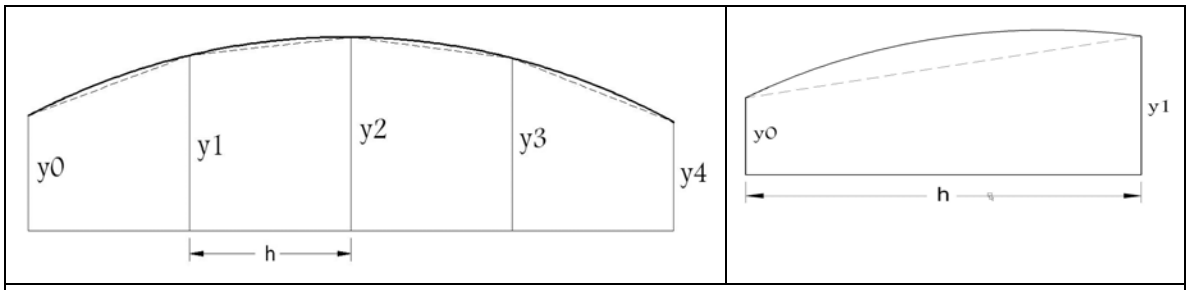
WS Area	Coefficients					Volume	Draft
m2	Cvp	Cwp	Cms	Cb	Cp	m3	m
59.80	0.341	0.518	0.360	0.177	0.492	0.42	**0.000**
638.26	0.810	0.567	0.947	0.460	0.485	481.29	**1.000**
817.71	0.824	0.635	0.971	0.523	0.538	1,107.70	**2.000**
1,002.54	0.806	0.698	0.979	0.563	0.575	1,812.71	**3.000**
1,197.35	0.779	0.761	0.981	0.593	0.604	2,600.36	**4.000**
1,393.64	0.759	0.812	0.983	0.617	0.627	3,473.36	**5.000**
1,576.16	0.756	0.853	0.984	0.644	0.655	4,416.27	**6.000**



شکل ۱-۱۹ : ضرایب بدنه بر حسب آبخور برای شناور مدل ۱

۲- روش ذوزنقه:

در روش ذوزنقه بین دو مقطع، یک خط درجه ۱ عبور داده می‌شود و با مشابه‌سازی مساحت بین دو مقطع به ذوزنقه (شکل ۲-۲۰)، مقدار مساحت و ممانهای سطح آن محاسبه می‌گردد:



شکل ۲-۲۰: محاسبه مساحت با روش ذوزنقه

$$y = ax + b$$

$$\text{مساحت برای دو نیم عرض} = \frac{h}{2}(y_0 + y_1)$$

$$\text{مساحت برای پنج نیم عرض} = \frac{h}{2}(y_0 + 2y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4)$$

❖ مقادیر مساحت و ممان دوم برای عرض کامل

اگر یک سطح، کاملا قرینه باشد و مقادیر مساحت و ممان دوم برای نیم عرض محاسبه شده باشد، برای حصول مقادیر عرض کامل، مساحت و ممان دوم باید در ۲ ضرب شوند. اگر مقدار نیم عرض برابر y و مقدار عرض کامل برابر $2y$ باشد اثبات این مسئله عبارتست از:

مقدار ممان دوم x برای نیم عرض:

$$I_{xx1} = \iint y^2 dxdy = \int_0^L \frac{y^3}{3} dx$$

مقدار ممان دوم x برای عرض کامل:

$$I_{xx2} = \frac{1}{12}\iint (2y)^2 dxdy = \frac{2}{3}\int_0^L \frac{y^3}{3} dx$$

ملاحظه می‌شود که I_{XX2} معادل ۲ برابر I_{XX1} می‌باشد. همچنین برای ممان دوم حول محور Y نیز همین رابطه برقرار است.

مثال ۱: برای شناور مدل ۱، مساحت سطوح آبخور ۱، ۲ و ۳ متر را بدست آورید. حجم زیـر آب بدنـه را نیـز در هریـک از آبخورهـا محاسبه کنید.

حل: با استفاده از مشخصات خطوط بدنه و جدول آفست مدل ۱ داریم: فواصل بین این نیم عرض‌ها: $\mathrm{h} = \frac{80}{8} = 10 \ \mathrm{m}$

فواصل بین مقاطع *0,0.5, 1* و همچنین مقاطع *7, 7.5, 8* برابر است با: $\mathrm{h}_1 = \frac{10}{2} = 5 \ \mathrm{m}$

برای راحتی حل مسئله، اثر نصف شدن فواصل این نیم عرض‌ها در ضرایب سیمسون لحاظ شده است. توجه شود کـه مقـادیر نـیم عـرض *7.5* و*8* در آبخور ۱ و ۲ صفر هستند. همچنین مسئله را به روش‌های مختلفی می‌توان حل کرد.

	WATERLINE1 AREA		
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	تابع سطح
0	0	0.5	0
0.5	0.113	2	0.226
1	1.021	1.5	1.5315
2	3.438	4	13.752
3	5.357	2	10.714
4	5.524	4	22.096
5	5.696	2	11.392
6	4.332	4	17.328
7	1.333	1	1.333
		SUM=	**78.3725**

مساحت بین مقاطع ۰ تا ۷: $a_1 = 2 \times \frac{1}{3} \times h \times sum = 2 \times \frac{1}{3} \times 10 \times 78.37 = 522.48 \ m^2$

مساحت بین مقاطع *7,7.5* با فاصله بین مقاطع ۵ متر از قانون ذوزنقه استفاده می‌شود:

مساحت بین مقاطع۷ و ۷/۵: $a_2 = 2 \times \frac{h_1}{2}(y_7 + y_{7.5}) = 5 \times (1.333 + 0) = 6.66 \ m^2$

$A_1 = a_1 + a_2 = 522.48 + 6.66 = 529.1 \ m^2$

		WL2 AREA			
شماره مقطع	نیم عرض			سیمسون	تابع سطح
0	0	1×0.5=0.5		0.5	0
0.5	0.481	4×0.5=2		2	0.96
1	1.755	1×0.5=0.5	1	1.5	2.63
2	4.569		4	4	18.28
3	5.885		2	2	11.77
4	6.072		4	4	24.28
5	6.268		2	2	12.54
6	5.328		4	4	21.31
7	2.179		1	1	2.18
7.5	0				
				SUM=	**93.95**

$a_1 = 2 \times \frac{1}{3} \times h \times sum = 2 \times \frac{1}{3} \times 10 \times 93.95 = 626.33 \ m^2$

$a_2 = 2 \times \frac{h_1}{2}(y_7 + y_{7.5}) = 10.9 \ m^2$

$A_2 = a_1 + a_2 = 637.23 \ m^2$

			WL3 AREA			
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	سیمسون	سیمسون	سیمسون نهایی	تابع سطح
0	0	1×0.5=0.5			0.5	0
0.5	0.911	4×0.5=2			2	1.822
1	2.443	1×0.5=0.5	1		1.5	3.6645
2	5.219		4		4	20.876
3	6.225		2		2	12.45
4	6.37		4		4	25.48
5	6.528		2		2	13.056
6	6.073		4		4	24.292
7	3.559		1	1×0.5=0.5	1.5	5.3385
7.5	1.139			4×0.5=2	2	2.278
8	0			1×0.5=0.5	0.5	0
					SUM=	**109.257**

$$A_3 = 2\times\frac{1}{3}\times h\times sum = 2\times\frac{1}{3}\times 10\times 109.257 = 728.38 \ \ m^2$$

مساحت این آبخور را به صورت زیر نیز می‌توان محاسبه کرد:

			WL3 AREA				
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	سیمسون	سیمسون	تابع سطح	تابع سطح	تابع سطح
0	0	1×0.5=0.5			0		
0.5	0.911	4×0.5=2			1.822		
1	2.443	1×0.5=0.5	1		1.2215	2.443	
2	5.219		3			15.657	
3	6.225		3			18.675	
4	6.37		2			12.74	
5	6.528		3			19.584	
6	6.073		3			18.219	
7	3.559		1	1×0.5=0.5		3.559	1.7795
7.5	1.139			4×0.5=2			2.278
8	0			1×0.5=0.5			0
SUM=					**3.0435**	**90.877**	**4.0575**

$$a_1 = 2\times\frac{1}{3}\times h_1\times sum_1 = 2\times\frac{1}{3}\times 5\times 3.04 = 10.03 \ \ m^2$$

$$a_2 = 2\times\frac{3}{8}\times h_1\times sum_2 = 2\times\frac{3}{8}\times 10\times 90.877 = 681.57 \ \ m^2$$

$$a_3 = 2\times\frac{1}{3}\times h_1\times sum_3 = 2\times\frac{1}{3}\times 5\times 4.057 = 13.33 \ \ m^2$$

$$A_3 = a_1 + a_2 + a_3 = 706.81 \ \ m^2$$

ملاحظه می‌شود که تفاوت مساحت A_3 در دو روش فوق، چندان زیاد نیست. پس از محاسبه مساحت هر آبخور می‌توانیم حجم زیر آبخور را بدست آوریم. همچنین با توجه به صفر بودن کلیه نیم عرض‌های آبخور *0*، مساحت این آبخور نیز صفر است.

فاصله بین آبخورها: $d = \frac{draft}{5} = \frac{5}{5} = 1 \ \ m$

صفحه آبخور	مساحت(m2)
A_0	0
A_1	525.81
A_2	633.83
A_3	706.81

حجم زیر آبخور ۱ متر برابر حجم بین A_0 و A_1 می‌باشد:

VOLUME1			
	مساحت	سیمسون	تابع حجم
A_0	0	5	0
A_1	525.81	8	4206.48
A_2	633.83	-1	-633.83
SUM=			3572.65

$$V_1 = \frac{1}{12} \times d \times sum = \frac{1}{12} \times 1 \times 3572.65 = 297.72 \ m^3$$

حجم زیر آبخورهای ۲ و ۳ متر نیز برابر است با:

VOLUME2			
	مساحت	سیمسون	تابع حجم
A_0	0	1	0
A_1	525.81	4	2103.24
A_2	633.83	1	633.83
SUM=			2737.07

$$V_2 = \frac{1}{3} \times d \times sum = \frac{1}{3} \times 1 \times 2737.07 = 912.36 \ m^3$$

VOLUME3			
	مساحت	سیمسون	تابع حجم
A_0	0	1	0
A_1	525.81	3	1577.43
A_2	633.83	3	1901.49
A_3	706.81	1	706.81
SUM=			4185.73

$$V_3 = \frac{3}{8} \times d \times sum = \frac{3}{8} \times 1 \times 4185.73 = 1569.65 \ m^3$$

مثال ۳: برای شناور مدل ۱، ممان اول و ممان دوم حول xx و yy و مرکز سطح آبخور ۶ را بدست آورید.

حل: با توجه به مقادیر نیم‌عرض در آبخور ۶ از جدول آفست داریم:

moments(lyy) of waterline6							
شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	تابع سطح	بازو	تابع ممان اول	بازو	تابع ممان دوم
0	0.68	0.5	0.34	0	0	0	0
0.5	2.878	2	5.756	0.5	2.878	0.5	1.439
1	4.75	1.5	7.125	1	7.125	1	7.125
2	6.634	4	26.536	2	53.072	2	106.144
3	6.715	2	13.43	3	40.29	3	120.87
4	6.763	4	27.052	4	108.208	4	432.832
5	6.811	2	13.622	5	68.11	5	340.55
6	6.765	4	27.06	6	162.36	6	974.16
7	6.324	1.5	9.486	7	66.402	7	464.814
7.5	5.625	2	11.25	7.5	84.375	7.5	632.8125
8	4.251	0.5	2.1255	8	17.004	8	136.032
SUM=			143.7825		609.824		3216.779

$$h=\frac{80}{8}=10\ m$$

$$\text{مساحت}=2\times\frac{1}{3}\times h\times sum_0=2\times\frac{1}{3}\times10\times143.78=958.53\ m^2$$

$$\text{مرکز سطح آبخور نسبت به عمود پاشنه}(AP)=x=h\times\frac{sum_1}{sum_0}=10\times\frac{609.82}{143.78}=42.41\ \ m$$

برای محاسبه ممان دوم عرضی(Iyy) حول محور عرضی گذرنده از عمود پاشنه داریم:

$$I_{AP}=2\times\frac{1}{3}\times h^3\times sum_2=2\times\frac{1}{3}\times(10)^3\times3216.78=2142375.4\ \ m^4$$

برای بدست آوردن ممان دوم عرضی حول محور عرضی گذرنده از مرکز سطح آبخور، با استفاده از قضیه محورهای موازی داریم:

$$I_{NA}=I_{AP}-A\cdot x^2=418355.6\ \ m^4$$

برای محاسبه ممان دوم حول محور طولی داریم:

Ixx OF WATERLINE 6				
شماره مقطع	نیم عرض	(نیم عرض)^3	سیمسون	تابع ممان دوم
0	**0.68**	0.314	0.5	0.157
0.5	**2.878**	23.838	2	47.676
1	**4.75**	107.172	1.5	160.758
2	**6.634**	291.962	4	1167.848
3	**6.715**	302.788	2	605.575
4	**6.763**	309.327	4	1237.309
5	**6.811**	315.960	2	631.921
6	**6.765**	309.602	4	1238.407
7	**6.324**	252.916	1.5	379.373
7.5	**5.625**	177.979	2	355.957
8	**4.251**	76.820	0.5	38.410

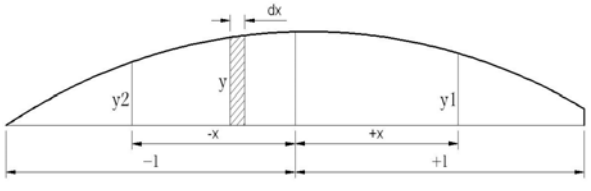
SUM=	5863.392

$$I_{xx}=2\times\frac{1}{3}\times\frac{1}{3}\times h\times sum=2\times\frac{1}{3}\times\frac{1}{3}\times10\times5863.39=13029.75\ \ m^4$$

ضریب ۲ برای دو برابر کردن نیم‌عرض، ضریب‌های ۱/۳ یکی برای سیمسون و دیگری برای ضریب ۱/۳ موجود در رابطه اصلی I_{xx} (مطابق فرمول صفحات قبل) می‌باشد. در مثال فوق ملاحظه می‌شود که مقدار I_{yy} خیلی بزرگتر از I_{xx} است. در بخش‌های بعد از این موضوع برای توجیه بیشتر بودن پایداری طولی نسبت به پایداری عرضی استفاده می‌شود. مقادیری که در این مثال‌ها بدست آمدند تا حدودی با مقادیری که در قسمت‌های بعدی کتاب با استفاده از نرم‌افزار *autoship* بدست آمده است، متفاوت است و علت آن نیز تعداد کم مقاطع در نظر گرفته شده برای حل مثال‌ها می‌باشد.

۳- روش چبیچف[1]

در حل مسائل پایداری، اغلب از روش سیمسون و پس از آن از روش چبیچف استفاده می‌شود. در این روش فرض کنید می‌خواهیم مساحت بین یک سطح محصور بین یک خط صاف و یک منحنی را محاسبه کنیم. برای محاسبه، این سطح را از نظر طولی به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم، به گونه‌ای که مطابق شکل ۲- ۲۱ فاصله خط مرکزی از ابتدا و انتهای منحنی برابر «$-l,+l$» باشد. فواصل نیم عرض‌ها نیز به هر تعدادی که باشند باید نسبت به این خط متقارن باشند. توجه شود که فواصل نیم عرض‌ها باید نسبت به خط وسط متقارن باشند نه مقدار خود نیم عرض. در شکل ۲-۲۱ فواصل نیم عرض‌ها از خط وسط برابر $-x,+x$ است.



شکل ۲-۲۱: روش محاسبه مساحت از روش چبیچف با تعداد دو نیم‌عرض

1 - Tchebycheff

حال فرض کنید در شکل فوق، معادله منحنی به صورت مقابل باشد: $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$

تعداد نیم عرض‌ها باید برابر با درجه منحنی باشد. مثلاً در شکل فوق، که معادله از درجه ۲ می‌باشد باید دو نیم عرض (y_2, y_1) داشته باشیم. به همین ترتیب اگر معادله از درجه ۵ باشد باید ۵ نیم عرض داشته باشیم (یک نیم‌عرض منطبق بر خط وسط و چهار نیم‌عرض در طرفین خط وسط).

مساحت سطح بدین ترتیب عبارتست از:

$$A = \int_{-l}^{+l} y dx = \int_{-l}^{+l} (a_0 + a_1x + a_2x^2)dx = \left[a_0x + \frac{a_1x^2}{2} + \frac{a_2x^3}{3} \right]_{-l}^{+l} = 2a_0L + \frac{2a_2L^3}{3} + \dots \quad (\text{رابطه } I)$$

حال فرض کنید می‌خواهیم مساحت را به صورت ساده‌تر شده زیر به دست آوریم: مجموع نیم عرض‌ها × ضریب ثابت =A

که در شکل فوق داریم: $A = c \times (y_1 + y_2)$

که c یک عدد ثابت است.

مقادیر y_2, y_1 را با جاگذاری $-l, l$ در معادله، به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$A = c \times (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_0 - a_1x + a_2x^2) = c \times (2a_0 + 2a_2x^2) = 2a_0c + 2a_2cx^2 \quad (\text{رابطه } II)$$

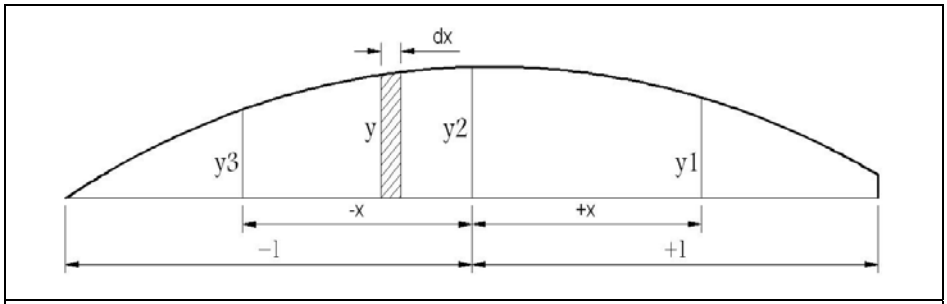
معادلهٔ (I) و (II) باید با هم برابر باشند: $2a_0c + 2a_2cx^2 = 2a_0L + \frac{2a_2L^3}{3}$

که در نتیجه داریم: $C = l = \frac{2l}{2} = \frac{\text{طول کل سطح}}{\text{تعداد نیم عرض‌ها}}$

$$Cx^2 = \frac{l^3}{3}$$

$$x^2 = \frac{l^2}{3} \qquad x = \frac{l}{\sqrt{3}} \qquad x = 0.5773\,l$$

حال اگر سه نیم عرض داشته باشیم (مطابق شکل ۲-۲۲)، نیم عرض وسط (y_2) منطبق بر خط وسط و نیم عرض‌های طرفین (y_3, y_1) به فواصل x از خط وسط هستند.



شکل ۲-۲۲: استفاده از روش چبیچف با ۳ نیم‌عرض

برای معادله منحنی داریم:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

$$A = \int_{-L}^{L} y dx = \int_{-L}^{L} (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3)dx = \left[a_0x + \frac{a_1x^2}{2} + \frac{a_2x^3}{3} + \frac{a_3x^4}{4} \right]_{-L}^{L}$$

$$= (a_0L + \frac{a_1L^2}{2} + \frac{a_2L^3}{3} + \frac{a_3L^4}{4}) - (a_0L + \frac{a_1L^2}{2} - \frac{a_2L^3}{3} + \frac{a_3L^4}{4}) = 2a_0L + \frac{2a_2L^3}{3} + \dots \quad (\text{رابطه } III)$$

از طرفی می‌خواهیم داشته باشیم: $A = C(y_1 + y_2 + y_3)$

مقدار y_1 از جاگذاری $x = l$ و مقدار y_2 از جاگذاری $x = 0$ و y_3 از جاگذاری $x = -l$ در معادله منحنی به دست می‌آید:

$$A = C(a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

$$+ a_0$$

$$+ a_0 - a_1x + a_2x^2 - a_2x^3) = C(3a_0 + 2a_2x^2) \quad (\text{رابطه } IV)$$

با برابر قرار دادن معادلات (III) و (IV) داریم: $3a_0C + 2a_2Cx^2 = 2a_0l + \frac{2a_2l^3}{3}$

در نتیجه داریم:

$$3C = 2l \qquad C = \frac{2l}{3} = \frac{\text{طول کل سطح}}{\text{تعداد نیم عرض‌ها}}$$

$$Cx^2 = \frac{l^3}{3} \qquad x^2 = \frac{l^2}{2} \qquad x = 0.7071.l$$

یعنی برای به دست آوردن مساحت سطح، با سه نیم عرض، فاصله نیم عرض‌ها از وسط خط، باید به صورت زیر باشد:

$x_1 = 0.7071\,l \rightarrow y_1$

$x_2 =$ **(منطبق بر خط وسط)** $\rightarrow y_2$

$x_3 = -0.7071\,l \rightarrow y_3$

توجه شود که در فرمولهای فوق l برابر نصف طول سطح می‌باشد.

و بدین ترتیب با به دست آوردن نیم عرض‌ها از محل قرارگیری نیم عرض‌ها و داشتن مقدار ثابت C، مساحت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A = C(y_1 + y_2 + y_3)$$

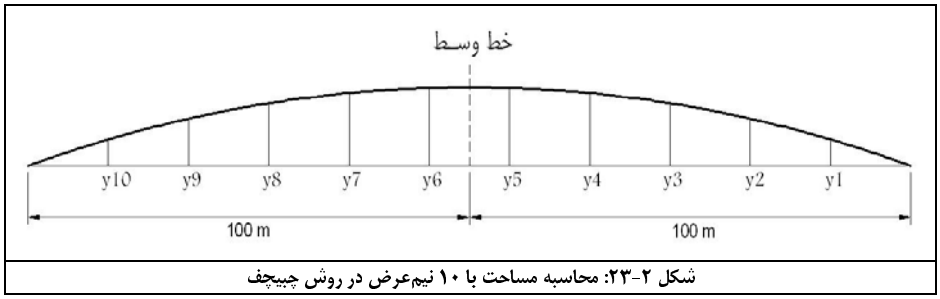
$C = \frac{\text{طول کل سطح}}{\text{تعداد نیم عرض‌ها}}$ برای هر تعداد نیم عرض

برای تعداد بیشتری از نیم عرض‌ها، فواصل آنها از خط وسط در جدول زیر نمایش داده می‌شود.

تعداد نیم عرض‌ها	**فواصل نیم عرض‌ها از خط وسط (که باید در l ضرب شود)**				
2	0.5773				
3	0	0.7071			
4	0.1875	0.7947			
5	0	0.3745	0.8325		
6	0.2666	0.4225	0.8662		
7	0	0.3239	0.5297	0.8839	
8	0.1026	0.4062	0.5938	0.8974	
9	0	0.1679	0.5228	0.6010	0.9116
10	0.0838	0.3127	0.5	0.6873	0.9162

مثال) مساحت سطح آبخوری با طول ۲۰۰ متر مطلوب است . شکل صفحه آبخور به صورت مقیاس شده در اختیار مـی‌باشـد . بـا ۱۰ نیم عرض می‌خواهیم مساحت سطح آبخور را به روش چبیچف بدست آوریم.

طبق شکل ۲-۲۳ و با استفاده از جدول قبل، فواصل نیم عرض‌ها به صورت زیر تعیین می‌شوند:



شکل ۲-۲۳: محاسبه مساحت با ۱۰ نیم‌عرض در روش چبیچف

فاصله y_1 از خط وسط $= 0.9162 \times 100 = 91.62\ m$

فاصله y_2 از خط وسط $= 0.6873 \times 100 = 68.73\ m$

این فواصل برای سایر نیم عرض‌ها نیز مطابق جدول زیر، به همین ترتیب بدست می‌آیند.

شماره نیم عرض	فاصله نیم عرض‌ها از خط مرکزی	مقدار نیم عرض (در محل تعیین شده به روش مقیاس)
1	91.62	1.2
2	68.73	5
3	50	8.4
4	31.27	10.5
5	8.38	11.7
6	-8.38	11.8
7	-31.27	11.1
8	-50	9.6
9	-68.73	7.4
10	-91.62	3.8
		مجموع =76.7

$$C = \frac{200}{10} = 20$$

$$A = C\,(y_1 + y_2 + ... + y_9 + y_{10}) = 20 \times 76.7 = 1534 \quad m^2$$

لازم به ذکر است که مقادیر ارائه شده برای مقدار هر نیم عرض، با استفاده از نقشه مقیاس شده موجود به دست آمده است.

مزایا و معایب روش چبیچف

۱) این روش با تعداد کمتری از نیم عرض‌ها (در مقایسه با روش سیمسون)، جواب دقیق‌تری به دست می‌دهد. یعنی در مثال فوق مقدار مساحت به دست آمده با ۱۰ نیم عرض، در روش سیمسون با ۲۰ نیم عرض به دست می‌آید که حاکی از دقت بالای روش چبیچف می‌باشد.

۲) این روش دارای فواصل مساوی نیم عرض‌ها نیست بلکه این فواصل مطابق جدول ارائه شده، به دست می‌آیند. این مورد باعث مشکل‌تر شدن استفاده از این روش شده است در حالی که در روش سیمسون این فواصل برابر هستند.

۴- روش نیوتن

روش نیوتن نیز از دیگر روش‌های انتگرال‌گیری عددی است که فواصل نیم عرض‌ها در آن برابر بوده و اولین و آخرین نیم عرض منطبق بر ابتدا و انتهای منحنی می‌باشند. مقدار مساحت در این روش از رابطه زیر به دست می‌آید:

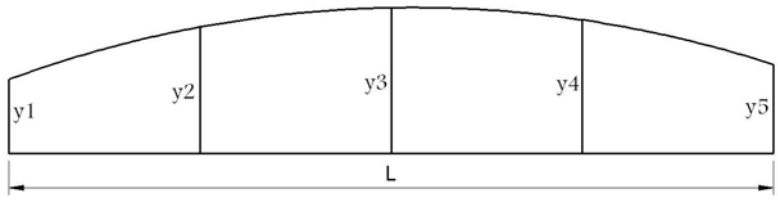
$$\text{مساحت} = L \times \sum \quad \text{(مقدار نیم عرض} \times \text{ضریب هر نیم عرض)}$$

توجه شود که در اینجا L برابر طول کل سطح است.

جدول زیر بیانگر ضرایب هر نیم عرض می‌باشد:

تعداد نیم عرض‌ها	ضریب نیم عرض‌ها				
2	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$			
3	$\frac{1}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{1}{6}$		
4	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{8}$	
5	$\frac{7}{90}$	$\frac{32}{90}$	$\frac{12}{90}$	$\frac{32}{90}$	$\frac{7}{90}$

به عنوان مثال برای یک صفحه با ۵ نیم عرض داریم (طبق شکل ۲-۲۴):



شکل ۲-۲۴: محاسبه سطح با ۵ نیم‌عرض در روش نیوتن

شماره نیم عرض	مقدار نیم عرض	ضریب	حاصلضرب
1	y_1	$\frac{7}{90}$	$\frac{7}{90}y_1$
2	y_2	$\frac{32}{90}$	$\frac{32}{90}y_2$
3	y_3	$\frac{12}{90}$	$\frac{12}{90}y_3$
4	y_4	$\frac{32}{90}$	$\frac{32}{90}y_4$
5	y_5	$\frac{7}{90}$	$\frac{7}{90}y_5$
			$\sum_1$

$$\text{مساحت} = L \times \sum_1$$

مزیت این روش در مساوی بودن فاصله نیم عرض‌ها (همانند روش سیمسون) است.

۵- روش گاوس[1]

روش گاوس نیز مانند روش چبیچف، سطح را به دو قسمت در طرفین خط وسط تقسیم می‌کند. فواصل نیم‌عرض‌ها غیر مساوی و ضرایب هر نیم عرض نیز متفاوت است. (ضریب × مقدار هر نیم عرض) مجموع × L = مساحت

که L طول کل سطح و l طول سطح در طرفین خط وسط می‌باشد.

ضرایب و فواصل نیم عرض‌ها طبق جدول زیر می‌باشد.

تعداد نیم عرض‌ها	فاصله هر نیم عرض تا خط وسط (که باید در l ضرب شود)			
2	فواصل نیم‌عرض‌ها	0.57735		
	ضرایب	0.5		
3	فواصل نیم‌عرض‌ها	0	0.7746	
	ضرایب	0.44444	0.27778	
4	فواصل نیم‌عرض‌ها	0.33998	0.86114	
	ضرایب	0.32607	0.17393	
5	فواصل نیم‌عرض‌ها	0	0.53847	0.90618
	ضرایب	0.28445	0.23931	0.11846

مروری بر روش‌های انتگرال‌گیری عددی

- روش سیمسون : فواصل مساوی نیم‌عرض‌ها و ضرایب غیر مساوی نیم‌عرض‌ها
- روش چبیچف : فواصل غیر مساوی نیم‌عرض‌ها و ضرایب مساوی نیم‌عرض‌ها
- روش نیوتن : فواصل مساوی نیم‌عرض‌ها و ضرایب غیر مساوی نیم‌عرض‌ها
- روش گاوس : فواصل و ضرایب غیر مساوی نیم‌عرض‌ها
- روش ذوزنقه : فواصل و ضرایب مساوی نیم‌عرض‌ها (به غیر از نیم‌عرض‌های اول و آخر)

مثال) برای شناور مدل ۱ مساحت سطح آبخور *WL3* را از روش چبیچف، گاوس و نیوتن نیز محاسبه کنید.

حل: **روش چبیچف:**

$$C = \frac{80}{8} = 10$$

$$l = \frac{80}{2} = 40 \text{ m}$$

با استفاده از فایل کامپیوتری و با در نظر گرفتن ۹ نیم عرض در محل معین مقاطع، داریم:

1 - Gauss

شماره	فاصله نیم عرض ها از خط وسط	مقادیر نیم عرض
1	0.9116×40	0.685
2	0.601×40	5.453
3	0.5228×40	5.964
4	0.1679×40	6.494
5	0	6.37
6	0.1679×40	3.37
7	0.5228×40	5.64
8	0.601×40	5.13
9	0.9116×40	0.31

sum=	39.416

A= 2×C×SUM=	788.32

ضریب ۲ برای دو برابر کردن نیم‌عرض و محاسبه مساحت کل سطح آبخور می‌باشد.

روش گاوس: با در نظر گرفتن نیم عرض‌ها در طرفین خط مرکزی و تعداد ۵ نیم عرض داریم:

شماره	فاصله نیم عرض ها از خط وسط	مقادیر نیم عرض	ضریب	حاصلضرب
1	0.9061×40=21.5388	0.743	0.11846	0.088016
2	0.53847×40=36.2472	5.88	0.23931	1.407143
3	0	6.37	0.28445	1.811947
4	0.53847×40=36.2472	5.01	0.23931	1.198943
5	0.9061×40=21.5388	0.54	0.11846	0.063968

SUM=	4.570017

A=2×80×SUM=	731.2027

روش نیوتن: با در نظر گرفتن ۵ نیم عرض از عمود پاشنه داریم:

شماره	فاصله از پاشنه	مقادیر نیم عرض	ضریب	حاصلضرب
1	0	0	7/90,	0
2	20	5.219	32/90,	1.855644
3	40	6.37	12/90,	0.849333
4	60	6.073	32/90,	2.159289
5	80	0	7/90,	0

SUM=	4.864267

A= 2×L×SUM=	778.282667

تفاوت موجود در پاسخ‌های فوق ناشی از دقت‌های متفاوت روش‌های انتگرال‌گیری عددی هستند. علاوه بر روشهای انتگرال‌گیری عددی از فرمولهای انتگرال‌گیری ریاضی نیز می‌توان برای حل برخی مسائل استفاده کرد که به مثال زیر می‌توان اشاره نمود.

مثال- (تست کارشناسی ارشد کشتی‌سازی سال ۸۱)

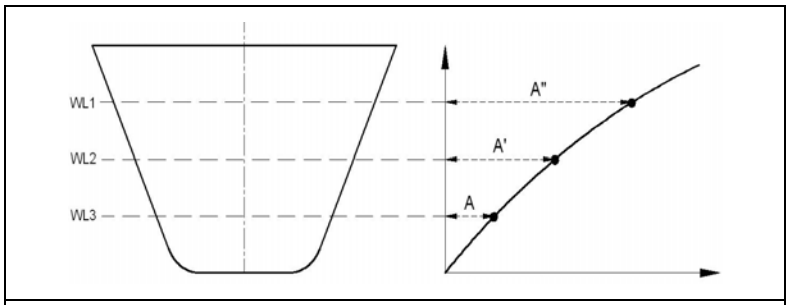
اگر مساحت صفحه آبخور SWL با محور Z (محور Z از کف شناور به طرف عرشه فرض می‌شود) رابطه غیر خطی $S_{WL}=\frac{1}{2}Z^2$ داشته باشد، مرکز بویانسی عمودی (VCB) را در آبخور d بدست آورید؟

$$Z_B=\frac{\int_0^d Z.S(z)dZ}{\int_0^d S(z)dZ}=\frac{\int_0^d Z.\frac{1}{2}Z^2dZ}{\int_0^d \frac{1}{2}Z^2dZ}=\frac{\frac{1}{4}Z^4}{\frac{1}{3}Z^3}=\frac{3}{4}Z\Big|_{Z=d}=\frac{3}{4}d$$

فصل۴ :[1] منحنی بونژان[2] و مساحت مقاطع عرضی[3]

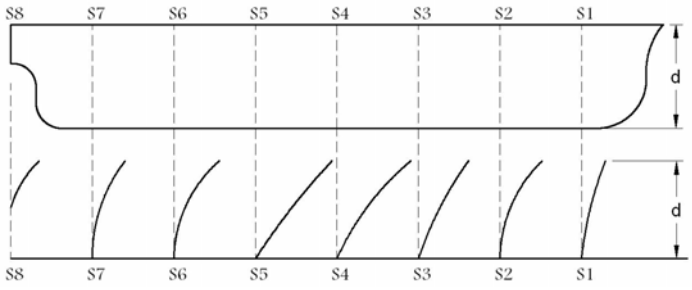
❖ منحنی بونژان

منحنی بونژان برای نشان دادن مساحت زیر آب هر مقطع[4] شناور در آبخورهای مختلف بکار می‌رود. منحنی مساحت مقاطع عرضی نیز حالت خاصی از منحنی بونژان است که مساحت زیر خط آبخور هر مقطع را فقط برای یک آبخور مشخص بیان می‌کند. بطور مثال یک مقطع عرضی از بدنه را طبق شکل ۲-۲۵ در نظر بگیرید. فرض کنید مساحت زیر خط آبخور WL3 این مقطع، برابر A و مساحت زیر خط آبخور WL2 تا کف بدنه برابر A' و مساحت زیر خط آبخور WL1 برابر A'' باشد.

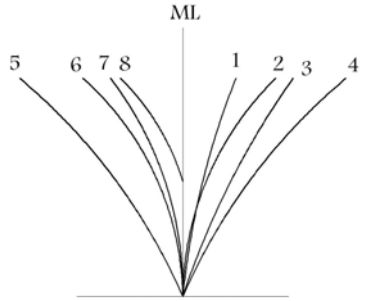


شکل ۲-۲۵: منحنی بونژان مربوط به یک مقطع عرضی

حال اگر مساحت‌های A تا A'' را به صورت فواصل افقی بر روی یک نمودار نشان دهیم، نقاطی بدست می‌آید که از به هم متصل کردن این نقاط، نمودار منحنی بونژان مربوط به این مقطع بدست می‌آید. اگر مجموعه‌ای از این منحنی‌ها برای کلیه مقاطع عرضی ترسیم شود، منحنی بونژان کل شناور به دست می‌آید. فرض کنید یک شناور دارای ۷ مقطع عرضی و حداکثر آبخور d باشد که منحنی بونژان آن مطابق شکل ۲-۲۶ می‌باشد و فواصل بین این منحنی‌ها برابر فواصل بین مقاطع عرضی است. طول کل منحنی نیز برابر طول کل شناور است. منحنی بونژان را می‌توان به صورت شکل ۲-۲۷ نیز نشان داد. به گونه‌ای که منحنی بونژان برای مقاطع سینه تا وسط در سمت راست و برای مقاطع از وسط تا پاشنه در سمت چپ نشان داده می‌شود . بنابراین ترسیم یک خط افقی برابر ارتفاع سطح آبخور مورد نظر و اندازه‌گیری فاصله افقی هر منحنی تا خط میانی (ML) نشان دهنده مساحت زیر نمودار مقاطع عرضی در آبخور مورد نظر است. مشخص است که مقادیر نشان داده شده در منحنی و مقدار مساحت مقاطع با یک مقیاس مشخص، بیان می‌شوند.



شکل ۲-۲۶: ترسیم منحنی بونژان برای کلیه مقاطع عرضی بدنه



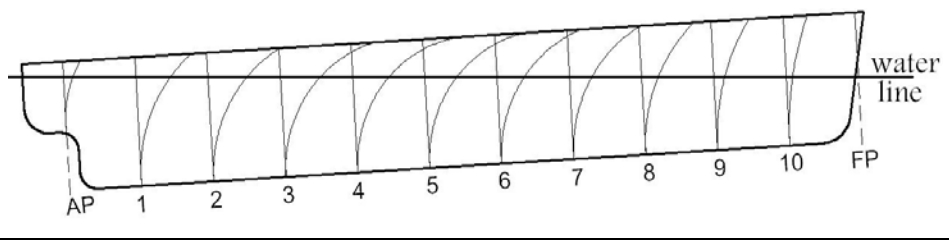
شکل ۲-۲۷:نمایش دیگری از منحنی بونژان (نما از مقابل)

کاربرد منحنی بونژان در محاسبه حجم زیر آب و مرکز حجم (مرکز بویانسی) می‌باشد بدین ترتیب با داشتن مساحت مقاطع و اعمال روشهای انتگرال‌گیری عددی (مانند قوانین سیمسون) می‌توان حجم و مرکز حجم بدنه زیر آب را به دست آورد. همچنین کاربرد مهم دیگر آن محاسبه حجم زیر خط آب در حالت تریم شناور (شکل ۲-۲۸) و همچنین در امواج هاگینگ و سگینگ (شکل ۲-۲۹) می‌باشد. اگر شناور بدون تریم و در آب ساکن باشد، حجم و مرکز حجم زیر آب بدنه را می‌توان هم از منحنی‌های هیدرواستاتیک و هم از منحنی بونژان بدست آورد ولی هنگامی که کشتی دارای تریم باشد یا در آب مواج قرار گرفته باشد، حجم و مرکز حجم و توزیع حجم (توزیع نیروی بویانسی) از طریق استفاده از منحنی بونژان امکان‌پذیر است.

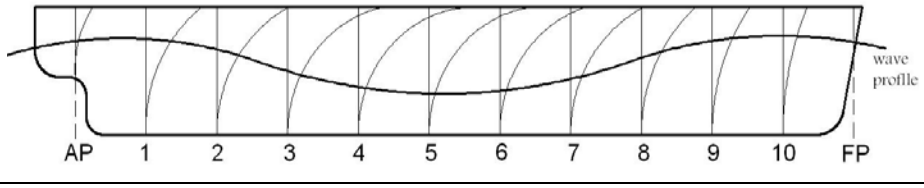
---

۱ - منابع: [1] , [4] , [10]

2 - Bonjean Curve
3 - Cross Curve of area
4 -Section



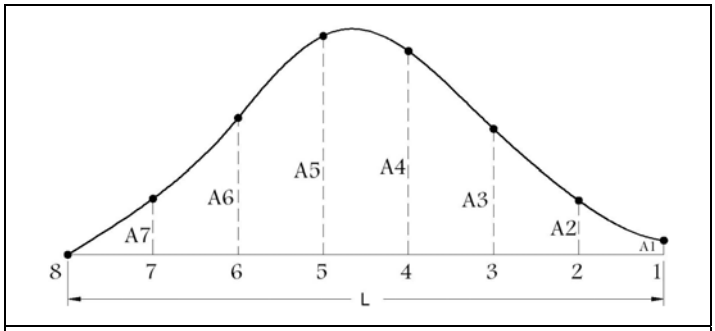
شکل ۲-۲۸:محاسبه حجم و مرکز حجم در حالت تریم با استفاده از منحنی بونژان



شکل ۲-۲۹: محاسبه حجم و مرکز حجم در آب مواج با استفاده از منحنی بونژان

❖ منحنی مساحت مقاطع عرضی[1]

منحنی مساحت مقاطع عرضی مطابق شکل ۲-۳۰ در واقع حالت خاصی از منحنی بونژان است که فقط برای یک آبخور ترسیم می‌شود. فرض کنید مساحت‌های A_1 تا A_8 مساحت‌های زیر خط آبخور *WL2* باشند که در منحنی بونژان به صورت فواصل افقی نشان داده شده‌اند. حال اگر این مقادیر را به صورت عمودی ترسیم کنیم، منحنی مقاطع عرضی شناور در آبخور *WL2* به دست می‌آید که به کمک آن می‌توان حجم و مرکز حجم را در آن آبخور تعیین کرد.



شکل ۲-۳۰: منحنی مساحت مقاطع عرضی

محور افقی این نمودار، نشان‌دهنده طول شناور و فواصل مقاطع عرضی و محور عمودی مقیاس مساحت می‌باشد که بیان کننده مساحت مقاطع عرضی هستند.

مثال ۲: منحنی بونژان مقطع ۶ را برای شناور مدل ۱ محاسبه و ترسیم نمایید.

حل: با استفاده از جدول آفست و مقادیر نیم عرض در مقطع ۶ و با توجه به اینکه فواصل بین آبخورها(d) برابر ۱ متر است، داریم:

until WL1

	نیم عرض	سیسمسون	تابع سطح
WL0	0	5	0
WL1	4.332	8	34.656
WL2	5.328	-1	-5.328
		SUM=	**29.328**

$$A_1 = 2 \times \frac{1}{12} \times d \times sum = 2 \times \frac{1}{12} \times 1 \times 29.32 = 4.89 \quad m^2$$

1 - cross section area

until WL2

	نیم عرض	سیسمسون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	4	17.328
WL2	5.328	1	5.328
		SUM=	**22.656**

$$A_2 = 2 \times \frac{1}{3} \times d \times sum = 2 \times \frac{1}{3} \times 1 \times 22.66 = 15.1 \ \ m^2$$

until WL3

	نیم عرض	سیسمسون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	3	12.996
WL2	5.328	3	15.984
WL3	6.073	1	6.073
		SUM=	**35.053**

$$A_3 = 2 \times \frac{3}{8} \times d \times sum = 26.25 \ \ m^2$$

until WL4

	نیم عرض	سیسمسون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	4	17.328
WL2	5.328	2	10.656
WL3	6.073	4	24.292
WL4	6.423	1	6.423
		SUM=	**58.699**

$$A_4 = 2 \times \frac{1}{3} \times d \times sum = 39.13 \ \ m^2$$

until WL5

	نیم عرض	سیسمسون۱	سیسمسون۲	تابع سطح۱	تابع سطح۲
WL0	0	1		0	
WL1	4.332	4		17.328	
WL2	5.328	1	1	5.328	5.328
WL3	6.073		3		18.219
WL4	6.423		3		19.269
WL5	6.617		1		6.617
			SUM=	**22.656**	**49.433**

$$a_1 = 2 \times \frac{1}{3} \times d \times sum1 = 15.1 \ \ m^2$$

$$a_2 = 2 \times \frac{3}{8} \times d \times sum1 = 37.07 \ \ m^2$$

$$A_5 = a_1 + a_2 = 52.17 \ \ m^2$$

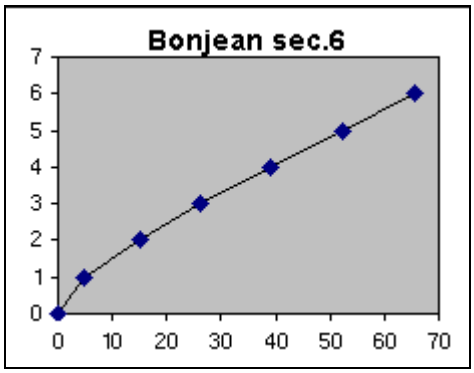
until WL6

	نیم عرض	سیسمسون	تابع سطح
WL0	0	1	0
WL1	4.332	4	17.328
WL2	5.328	2	10.656
WL3	6.073	4	24.292
WL4	6.423	2	12.846
WL5	6.617	4	26.468
WL6	6.765	1	6.765
		SUM=	**98.355**

$$A_6 = 2 \times \frac{1}{3} \times d \times sum = 65.57 \quad m^2$$

بنابراین برای ترسیم منحنی بونژان، مقادیر محور y برابر ارتفاع آبخور و مقادیر محور x برابر مساحت‌های A_0 تا A_6 میباشد که داریم:

x(m^2)	y(m)
A_0=0	0
A_1=4.89	1
A_2=15.1	2
A_3=26.25	3
A_4=39.13	4
A_5=52.17	5
A_6=65.57	6



همین فرایند را می‌توان برای کلیه مقاطع عرضی شناور اعمال کرد و منحنی بونژان را بدست آورد.

یاد بگیریم؛ محیط زیست خود را آلوده نکنیم
یاد بگیریم؛ زباله را از اتومبیل بیرون نیاندازیم
یاد بگیریم؛ وقتی برای گردش می‌رویم یک کیسه زباله همراه ببریم
و بدانیم؛ رعایت نظافت و حفظ محیط زیست نشانه شخصیت، تمدن و دین ماست.

فصل ۵: [۱] تعیین مرکز ثقل و جابجایی آن

در این قسمت دو مفهوم اصلی و کاربردی در تعیین مرکز ثقل شناور بیان می‌گردد:

- نحوه تعیین مؤلفه‌های x, y, z مرکز ثقل شناور.
- نحوه تأثیر جابجایی بار بر جابجایی مرکز ثقل شناور.

هر یک از موارد فوق به صورت زیر تشریح می‌گردد:

الف- نحوه تعیین مؤلفه‌های x , y , z مرکز ثقل شناور

همانطور که می‌دانیم یک شناور از هزاران اقلام وزنی تشکیل شده است که هر یک نسبت به محور مختصات تعریف شده دارای مختصات x_i, y_i, z_i هستند. محور مختصات معمولاً از نظر طولی منطبق بر عمود پاشنه، از نظر عمودی منطبق بر خط مبنا و از نظر عرضی منطبق بر خط مرکزی در نظر گرفته می‌شود. برآیند مؤلفه‌های هر یک از این وزن‌ها به صورت مؤلفه‌های مرکز ثقل شناور به صورت زیر تعیین می‌گردند:

$$X_G = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + ... + m_nx_n}{m_1 + m_2 + ... + m_n}$$

$$Y_G = \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + ... + m_ny_n}{m_1 + m_2 + ... + m_n}$$

$$Z_G = \frac{m_1z_1 + m_2z_2 + ... + m_nz_n}{m_1 + m_2 + ... + m_n}$$

نحوه تعیین مرکز ثقل شناور در مثال زیر تشریح می‌گردد.

مثال: مرکز ثقل شناور مدل ۱ را با توجه به توزیع وزنی در سناریوهای مختلف بارگیری شناور را بیان می‌کنیم.

یک شناور از هزاران اقلام وزنی تشکیل شده است که وزن و مرکز ثقل این اقلام باید به طور دقیق ثبت و در محاسبه مرکز ثقل کل شناور لحاظ گردد. در اینجا برای حل مسئله ، اقلام وزنی اصلی به اختصار ارائه شده‌اند:

اقلام وزنی	(t)M	(m)x	(m)y	(m)z	MX	MY	MZ
کاسه بدنه	655	38.3	0	4.1	25086.5	0	2685.5
روبناسازی	140	7	0.2	11	980	28	1540
تجهیزات داخل روبناسازی	35	5	0.1	11.3	175	3.5	395.5
بار داخل انبارها و روی عرشه	2275	45.6	0	4.7	103740	0	10693
موتور، ژنراتور، شافت پروانه	95	4	0	2.5	380	0	237.5
سایر تاسیسات موتورخانه	60	3	-0.37	2.9	180	-22.2	174
خدمه، سوخت و آب	185	4.5	-0.1	10	832.5	-18.5	1850
سربهای جلو	20	75	0	0.5	1500	0	10
سربهای عقب	5	4	-0.01	0.3	20	-0.05	1.5
سایر موارد	30	38	0.31	9	1140	9.3	270
مجموع	3500				134034	0.05	17857

$$X_G = \frac{Sum\ (Mx)}{M} = \frac{134034}{3500} = 38.30 \quad m$$

$$Y_G = \frac{Sum\ (My)}{M} = \frac{0.05}{3500} = 0.00$$

$$Z_G = \frac{Sum\ (Mz)}{M} = \frac{17857}{3500} = 5.10 \quad m$$

از آنجاکه معمولا مرکز ثقل شناور در محل مطلوب بدست نمی‌آید و قسمت پاشنه بدلیل نصب موتورخانه، سنگین‌تر از سینه شناور است لذا وزنه‌های سربی برای تنظیم مرکز ثقل بکار می‌روند و به گونه‌ای توزیع می‌شوند که شناور در حالت بدون بارگیری دارای شیب صفر باشد. در این جدول اقلام وزنی بر حسب تن و فواصل بر حسب متر هستند. x فاصله از عمود پاشنه، y فاصله از خط مرکزی و z فاصله از خط مبنا می‌باشد. همچنین وزن سبک،

۱- منبع: [4]

وزن مرده و جابجایی شناور مدل ۱ به صورت زیر می‌باشد:

وزن سبک:	۱۰۵۰ تن
وزن مرده:	۲۴۵۰ تن
جابجایی:	۳۵۰۰ =۲۴۵۰+۱۰۵۰ تن

کشتی‌های تجاری، بارگیری را در حالات مختلفی انجام می‌دهند که بر مرکز ثقل شناور موثر است. برای شناور مدل ۱ سناریوهای بارگیری زیر تعریف شده است:

سناریو	وضعیت بارگیری	مرکز ثقل عمودی	جابجایی
1	حمل کالا در داخل انبارها	4.6	3500
2	حمل کالا در داخل انبارها و روی عرشه(سناریوی اصلی)	5.1	3500
3	بدون حمل کالا و با مخازن بالاست پر	4.2	1140

ظرفیت و موقعیت مخازن بالاست که در سناریوی ۳ بکار می‌روند به صورت زیر می‌باشد:

مخزن بالاست پاشنه	۲۱ متر مکعب با X=۵ متر از عمود پاشنه
مخزن بالاست سینه	۶۶ متر مکعب با X=۷۵ متر جلوی عمود پاشنه
مجموع حجم بالاست	۸۷ تن

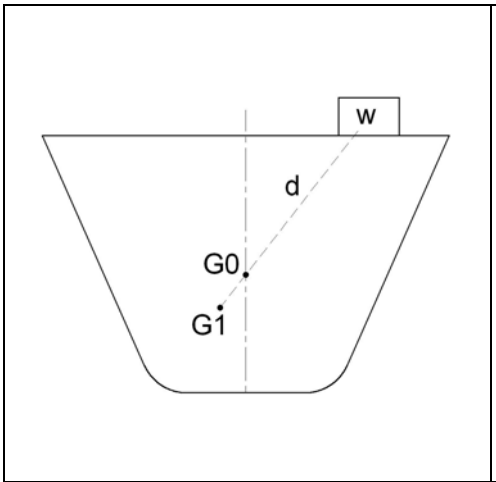
کاربرد مخزن بالاست را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- پر کردن آنها در حالت بدون بار کشتی که باعث افزایش آبخور و افزایش پایداری می‌شود.

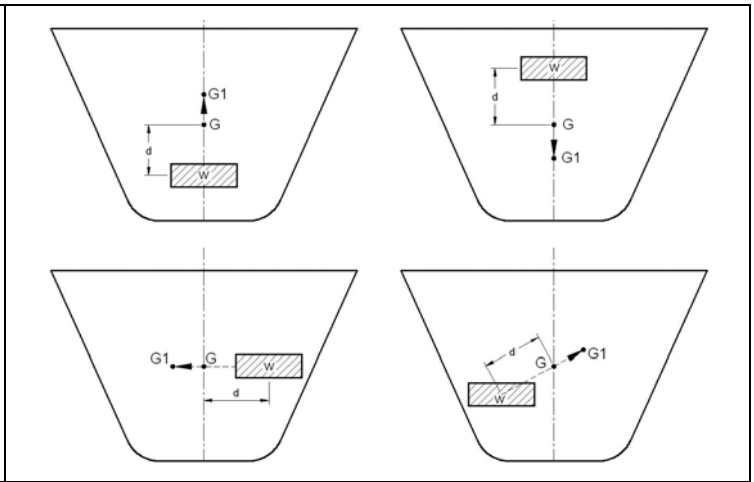
۲- تنظیم شیب (تریم) کشتی با آبگیری یا تخلیه مخازن

ب- تأثیر تغییرات بار بر جابجایی مرکز ثقل شناور

مطابق شکل ۲-۳۱ باری به وزن w به فاصله d در داخل شناور جابجا می‌شود. این جابجایی باعث جابجا شدن مرکز ثقل به اندازه GG_1 می‌شود که داریم: $GG_1 = \frac{w.d}{W}$



شکل ۲-۳۲: تأثیر برداشتن بار بر جابجایی مرکز ثقل



شکل ۲-۳۱: تأثیر جابجایی بار بر جابجایی مرکز ثقل

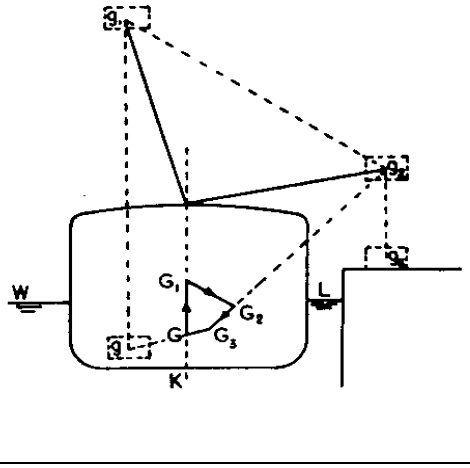
برداشتن بار از روی شناور نیز مطابق شکل ۲-۳۲ قابل توضیح است: $GG_1 = \frac{w.d}{W - w}$

بطور مثال برداشتن جسم از سمت راست شناور باعث جابجایی مرکز ثقل کل شناور به سمت چپ می‌شود. در این حالت برای یافتن امتداد جابجایی GG_1، خطی از بار به مرکز ثقل کشتی وصل می‌کنیم. نقطه G_1 نیز در امتداد این خط می‌باشد و بدین ترتیب علاوه بر محاسبه مقدار GG_1، راستای آن نیز مشخص می‌گردد. در هنگام بارگیری نیز مقدار جابجایی مرکز ثقل شناور و راستای آن بطور مشابه تعیین می‌گردد با این تفاوت که:

$$GG_1 = \frac{w.d}{W + w}$$

که در صورت بارگذاری، وزن نهایی برابر $W+w$ و در صورت باربرداری برابر $W-w$ و در صورت جابجایی بار نیز وزن نهایی برابر W می‌باشد (W وزن اولیه کل شناور است). فاصله جابجایی بار (d) می‌تواند طولی، عرضی، عمودی و یا به صورت مایل باشد که در هر صورت رابطه فوق برای GG_1 برقرار است. حال مطابق شکل ۲-۳۲، باری به وزن w در محل g را در نظر بگیرید که در قسمت کف انبار کشتی قرار دارد. مرکز ثقل کشتی نیز در G

می‌باشد. اگر این بار به صورت عمودی از g به g_1 منتقل شود، مرکز ثقل شناور از G به G_1 جابجا می‌شود. همچنین جابجایی بار از g_1 به g_2 نیز انتقال مرکز ثقل از G_1 به G_2 را در پی دارد. اگر بار در محل g_2 بر روی زمین گذاشته شود به مثابه این است که بار از محل مذکور برداشته شده است لذا مرکز ثقل شناور از G_2 به G_3 منتقل می‌شود. راستای جابجایی از G_2 به G_3 بدین ترتیب بدست می‌آید: از محل g_2 خطی به محل G_2 رسم کرده و امتداد می‌دهیم. محل G_3 در امتداد این خط می‌باشد.



شکل ۲-۳۳: جابجایی مرکز ثقل شناور در اثر جابجایی بار

مثال) در شناور مدل ۱ باری ۱۰۰ تنی در روی خط مرکزی و در کف شناور قرار دارد. این بار به روی عرشه و به فاصله ۵ متری از سمت چپ خط مرکزی منتقل می‌شود. جابجایی مرکز ثقل را محاسبه کنید.

حل: در شناور مدل ۱ در سناریوی وزنی اصلی داریم:

$W = 3500\ t$
$Z_G = 5.1\ m$
$Y_G = 0\ m$

از طرفی بار در دو راستای Z و Y جابجا شده است. لذا باعث جابجایی مرکز ثقل شناور در دو راستای Z و Y می‌شود. ارتفاع عرشه از کف انبار هم ۶ متر است. یعنی: $w = 100\ t$

$d_Z = 6\ m$
$d_y = 5\ m$

$$(GG_1)_Z = \frac{w.d_z}{W} = \frac{100\times 6}{3500} = 0.171\ m = 17.1\ cm$$

$$(GG_1)_y = \frac{w\times d_y}{W} = \frac{100\times 5}{3500} = 0.143\ m = 14.3\ cm$$

یعنی مرکز ثقل شناور در راستای عمودی ۱۷/۱ سانتی‌متر رو به بالا و ۱۴/۳ سانتی‌متر به سمت چپ جابجا می‌شود.

پروردگارا !

به من آرامشی ده تا بپذیرم آنچه را نمی‌توانم تغییر دهم

دلیری ده تا تغییر دهم آنچه را می‌توانم تغییر دهم

بینشی ده تا تفاوت این دو را بدانم

و مرا طبعی ده تا متوقع نباشم که دنیا و مردم آن مطابق میل من رفتار کنند.

«جبران خلیل جبران»

فصل ۶ : [۱] مرکز بویانسی و تغییرات آن

❖ ماهیت نیروی بویانسی[۲]

همانطور که بیان شد نیروی ارشمیدس همان نیروی بویانسی است که بر جسمی که داخل سیال شناور باشد، به صورت نیروی رو به بالا بر آن وارد می‌شود. این نیرو «نیروی شناوری» نیز نامیده می‌شود. ماهیت نیروی بویانسی از اختلاف فشار بین سطوح فوقانی و تحتانی جسم می‌باشد. جسمی مکعبی شکل را طبق شکل ۲-۳۴ و ۲-۳۵ در نظر بگیرید. اختلاف ارتفاع سطح فوقانی و تحتانی این مکعب برابر است با: $Z_1 - Z_2 = \delta Z$

اگر فشار در سطح فوقانی این مکعب برابر P_1 باشد، نیروی وارد بر این سطح برابر است با $P_1 \delta x.\delta y$. همچنین اگر فشار وارد بر سطح تحتانی برابر P_2 باشد، نیروی وارد بر این سطح با توجه به فشار ارتفاع آب δz برابر است با: $P_2 \delta x.\delta y + \rho g.\delta x.\delta y.\delta z$. برای داشتن حالت تعادل، این دو نیرو که در راستای عمودی هستند باید با هم برابر باشند:

$$P_1 \delta x.\delta y = P_2 .\delta x.\delta y + \rho g .\delta x.\delta y.\delta z$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\delta z} = \rho.g$$

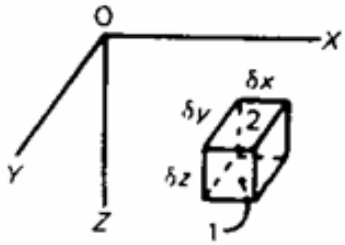
اگر داشته باشیم $Z \to 0$ و $P_1 \to P_2$ می‌توانیم بنویسیم:

$$\frac{dp}{dz} = \rho.g$$

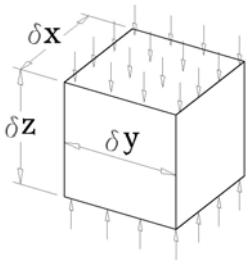
که با انتگرال‌گیری از این رابطه داریم:

$$P = \rho.g.z$$

باید توجه داشته باشیم که نیروهای هیدرواستاتیکی افقی وارد بر جسم (نیروهای وارد بر سطوح عمودی) برای هر جسمی، برابر و قرینه هم هستند و برآیند آنها برابر صفر است. لذا برای این مکعب (که المانی از هر جسم می‌تواند باشد) نیز نیروهای افقی وارد بر سطوح عمودی، با هم برابر هستند. لذا نیروی خالص وارد بر یک جسم شناور، تنها یک نیروی عمودی می‌باشد که این نیرو، (ناشی از جابجایی سیال)، یک نیروی رو به بالا می‌باشد (شکل ۲-۳۵). لذا، نیروی بویانسی وارد به جسم برابر است با: $\delta F_B = \rho.g.\delta\nabla$, $\delta F_B = \rho.g.\delta x.\delta y.\delta z$, $\delta F_B = (\frac{dp}{dz}\delta z)\delta x\delta y$



شکل ۲-۳۴: المان حجم و فشار وارد بر سطوح فوقانی و تحتانی



شکل ۲-۳۵: اختلاف فشار سطوح فوقانی و تحتانی، عامل نیروی بویانسی هستند

لذا ملاحظه می‌گردد که «ماهیت نیروی بویانسی برآیند اختلاف فشار وارد بر سطوح افقی فوقانی و تحتانی جسم می‌باشد یا برآیند اختلاف فشاری که در راستای عمودی بر جسم وارد می‌شود». در نهایت نیروی بویانسی برابر است با: $F_B = \rho.g.\nabla = \Delta$

که همان وزن آب جابجا شده توسط حجم داخل آب جسم می‌باشد که آن را با علامت Δ نشان می‌دهند و در اصطلاح مهندسی دریایی «جابجایی»[۳] نامیده می‌شود.

❖ تغییرات مرکز بویانسی

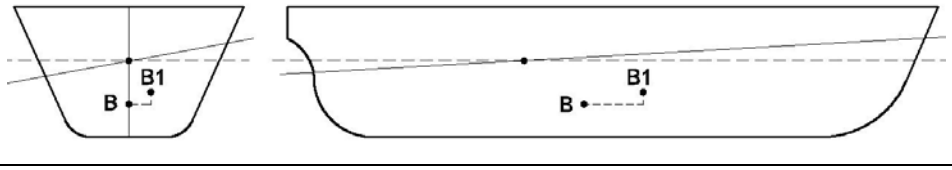
مرکز بویانسی عبارتست از مرکز حجم داخل آب شناور. اگر یک جسم به طور کامل در داخل آب باشد (مانند زیردریایی)، با غلتش طولی یا عرضی یا حرکات دیگر شناور، مرکز بویانسی تغییر نمی‌کند چرا که در هر صورت، کل جسم در داخل آب است ولی اگر جسم در سطح آب بوده و قسمتی از آن داخل آب و قسمت دیگر خارج از آب باشد، غلتش طولی یا عرضی شناور باعث تغییر محل مرکز بویانسی می‌شود که مکان هندسی این تغییرات بسیار اهمیت دارد. گوشه‌ای از شناور که به داخل آب فرو می‌رود، مرکز بویانسی نیز به همان سمت جابجا می‌شود که این تغییر، در غلتش عرضی و غلتش طولی در شکل ۲-۳۶ نشان داده شده است.

---

۱ - منبع: [3]

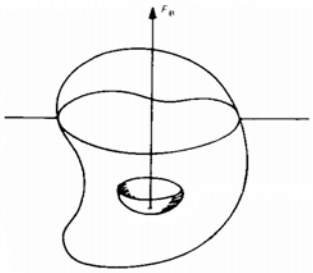
2 - Buoyancy force

3 - displacement

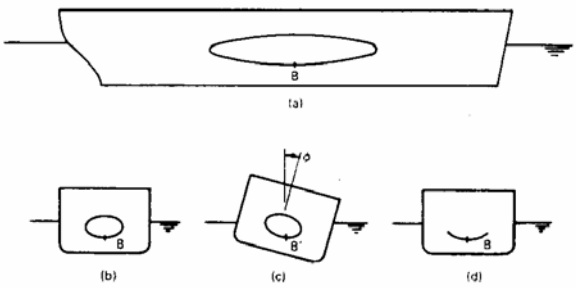


شکل ۲-۳۶: جابجایی مرکز بویانسی در غلتش طولی و عرضی

در یک تناژ ثابت، جابجایی مرکز بویانسی در غلتش توأم طولی و عرضی، روی یک مکان هندسی جابجا خواهد شد که این سطح را «مکان هندسی بویانسی» گویند (شکل ۲-۳۷).



شکل ۲-۳۷: مکان هندسی تغییرات مرکز بویانسی

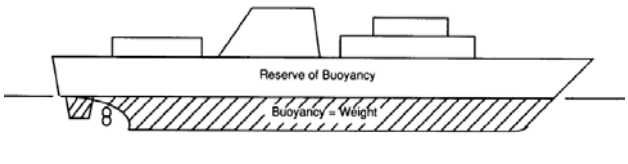


شکل ۲-۳۸: تغییرات مرکز بویانسی در غلتش‌های طولی و عرضی

لذا تغییرات مرکز بویانسی برای یک شناور با شکل مشخص و تناژ ثابت، محدود به این سطح می‌شود و نمی‌تواند خارج یا داخل این سطح باشد و مرکز بویانسی دقیقاً به روی این سطح جابجا می‌شود. «مکان هندسی بویانسی» وابسته به شکل بدنه شناور، می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد که در شکل ۲-۳۸ نمونه‌ای از آن آمده است. وقتی کشتی بدون غلتش است، مرکز بویانسی در پایین‌ترین نقطه سطح بویانسی قرار دارد (قسمت a) و هر چه شناور غلتش می‌کند، باز هم مرکز بویانسی به گونه‌ای جابجا می‌شود که در پایین‌ترین نقطه سطح بویانسی غلتیده (با فرض غلتیدن سطح بویانسی به همراه کشتی)، قرار گیرد (قسمت C). همانطور که در شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، مکان هندسی بویانسی در صورت غلتش ۳۶۰ درجه، به صورت یک منحنی بسته در می‌آید که البته در واقعیت چنین نیست و حالت (d) برای سطح بویانسی در شناور وجود دارد. اهمیت جابجایی مرکز بویانسی در محاسبات پایداری، در محاسبه «شعاع متاسنتری» (BM) می‌باشد که به کمک آن نیز «ارتفاع متاسنتری» (GM) به دست می‌آید که در قسمت‌های بعدی در این باره مطالبی خواهد آمد.

❖ ذخیره شناوری(reserve of buoyancy)

ذخیره شناوری (ذخیره بویانسی) برابر است با حجم حجم آب‌ناپذیر بالای خط آبخور. در صورت آبگرفتگی بدنه کشتی، ذخیره شناوری از غرق شدن آن جلوگیری می‌کند (شکل ۲-۳۹). لذا از نظر ایمنی و غرق‌ناپذیری کشتی از اهمیت فراوانی برخوردار است.



شکل۲-۳۹: ذخیره شناوری در کشتی‌ها

در اغلب مواقع، ذخیره شناوری به صورت درصد بیان می‌شود که عبارتست از نسبت حجم آب‌ناپذیر بالای خط آب به حجم بدنه در زیر آب به صورت درصد. بدین ترتیب اگر ذخیره شناوری یک کشتی ۳۰ درصد باشد یعنی معادل ۳۰ درصد از حجم جابجایی کشتی، حجم آب‌ناپذیر در بالای خط آبخور وجود دارد. هرچه مقدار فری‌برد کشتی بیشتر باشد در واقع ذخیره بویانسی بیشتر شده است. درصد ذخیره بویانسی در شناورهای مختلف با توجه به نوع آنها و اهمیت غرق نشدن آنها مختلف و متفاوت است و ربطی به تناژ و ابعاد کشتی ندارد. جدول۲-۳ نمونه‌هایی از درصد ذخیره شناوری در کشتی‌های مختلف را ارائه کرده است.

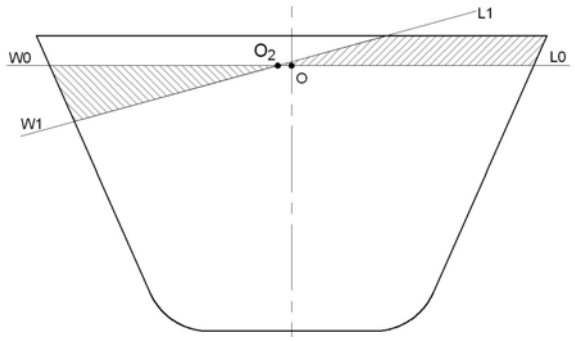
نوع کشتی	درصد ذخیره بویانسی
ناو هواپیمابر	۸۰ ٪
ناوچه	۷۰ ٪
نفتکش	۲۰ ٪
زیردریایی در زیر آب	۰ ٪
زیردریایی در سطح آب	۱۰٪

جدول ۲-۳: درصد ذخیره شناوری در کشتی‌های مختلف

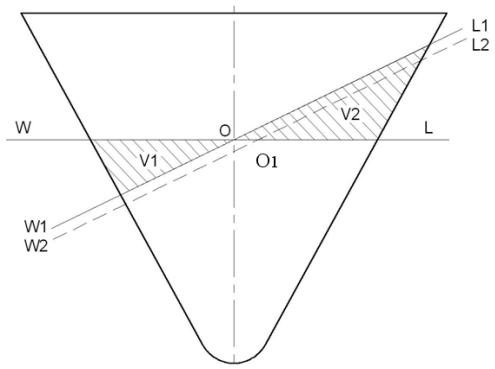
بخش دوم:
پایداری عرضی شناور

فصل ۱: [۱] موقعیت خط آبخور در زوایای غلتش بزرگ

موقعیت آبخور شناور و تقاطع آن با خط مرکزی در زوایای غلتش کوچک و بزرگ متفاوت است. در زوایای غلتش کوچک، خطوط آبخور از یک نقطه که محل تقاطع با خط مرکزی است، عبور می‌کنند ولی در زوایای غلتش بزرگ، خطوط آبخور در یک نقطه همگرا نمی‌باشند که طبق شکل ۲-۴۰ می‌توان آنرا توضیح داد. فرض کنید شناوری با مقطع شکل ۲-۴۰ به اندازه زاویه بزرگ α غلتش نموده است. در این زاویه، اگر فرض کنیم خط آبخور از نقطه O عبور کند، حجم بیرون آمده از آب برابر با V_1 و حجم وارد شده به داخل آب برابر V_2 می‌باشد. مطابق شکل واضح است که $V_2 > V_1$. از طرفی در زوایای غلتش مختلف، مقدار جابجایی کل شناور نباید تغییر کند یعنی حجم بیرون آمده و فرو رفته در آب باید با هم برابر باشند یعنی باید $V_1 = V_2$ باشد که برای این منظور باید خط آبخور W_1L_1 به خط آبخور W_2L_2 منتقل شود و از نقطه O_1 عبور کند. حال اگر عرشه به زیر آب برود (مطابق شکل ۲-۴۱) برای برابر شدن حجم زیر آب رفته و بیرون آمده از آب، خط آبخور از O به O_2 منتقل می‌گردد. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که خط آبخور در زوایای غلتش بزرگ، از نقطه O نمی‌گذرد. این جابجایی خط آبخور تبعات پایداری زیادی بر شناور دارد از جمله جابجایی مرکز شناوری، مرکز بویانسی و مرکز متاسنتری که نتیجه آن تغییر رفتار غلتش، زاویه شیب و هیل می‌باشد. همچنین محاسبه مقدار GZ به همین دلیل طبق فرمولهای ریاضی براحتی امکان‌پذیر نیست و باید به کمک نقشه‌های سه بعدی کامپیوتری و روش سعی و خطا محل خط آبخور را در هر زاویه غلتش تعیین کرد و به کمک آن مرکز بویانسی جدید و مقدار GZ را محاسبه نمود.



شکل ۲-۴۱: تأثیر خیسی عرشه در انتقال خط آبخور از O به O2



شکل ۲-۴۰: انتقال خط آبخور از O به O1 در اثر غلتش شناور

امام کاظم (ع):

دنیا همچون آب شور است. هر اندازه که تشنه از آن بیاشامد، تشنه تر گردد تا هلاک شود.

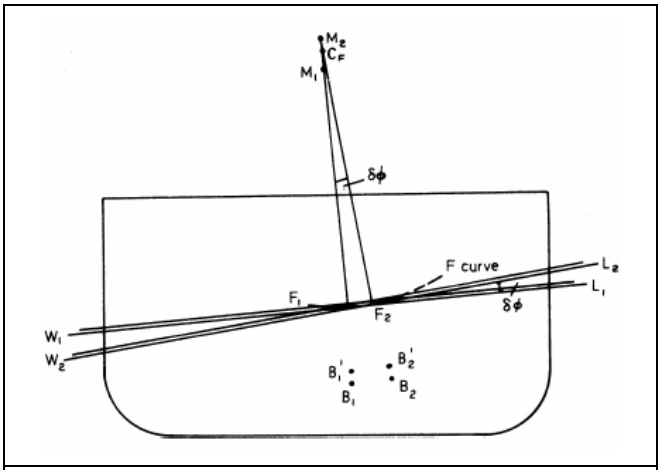
۱ - منابع: [۱ و ۲ و ۶ و ۱۹]

فصل ۲: تغییرات مرکز شناوری در زوایای غلتش و آبخورهای مختلف[1]

همانطور که بیان شد، تریم و هیل‌کردن شناور حول مرکز شناوری[2] انجام می‌شود و مرکز شناوری نیز همان مرکز سطح صفحه آبخور می‌باشد.

❖ تغییرات مرکز شناوری در زوایای غلتش مختلف

در زوایای غلتش مختلف، شکل صفحه آبخور تغییر می‌کند و در نتیجه مرکز سطح آبخور و مرکز شناوری نیز تغییر می‌یابد . این تغییرات بـر روی یـک منحنی به مرکز انحناء C_F انجام می‌شود که مطابق شکل ۲-۴۲ داریم:



شکل ۲-۴۲: CF مرکز انحنای مکان هندسی تغییرات مرکز شناوری (F).

$$\frac{\overline{B_1B_1'}}{\overline{B_1F_1}} = \frac{\delta\nabla}{\nabla + \delta\nabla} = \frac{\overline{B_2B_2'}}{\overline{B_2F_2}}$$

همچنین $\overline{B_1B_2}$ و $\overline{B_1'B_2'}$ و $\overline{F_1F_2}$ با هم موازی هستند و $\overline{B_1B_2} = \overline{B_1M_1}.\delta\varphi$. اگر $\delta\varphi$ کوچک باشد بنابراین داریم:

$$\frac{\overline{B_1F_1}}{\overline{B_1B_1'}} = \frac{\overline{B_1B_2} - \overline{F_1F_2}}{\overline{B_1B_2} - \overline{B_1'B_2'}}$$

با جاگذاری در رابطه فوق داریم:

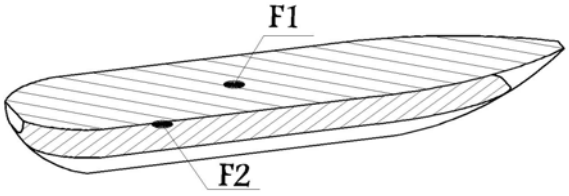
$$\frac{\nabla + \delta\nabla}{\delta\nabla} = \frac{\frac{I_1}{\nabla}\delta\varphi - \overline{C_FF_1}.\delta\varphi}{\frac{I_1}{\nabla}.\delta\varphi - \frac{I_1 + \delta I}{\nabla + \delta\nabla}.\delta\varphi}$$

در حالت حدی داریم: $C_F F_1 = \frac{dI}{d\nabla}$

این رابطه را رابطه «**لکلرت**»[3] گویند.

❖ تغییرات مرکز شناوری در آبخورهای مختلف

در آبخورهای مختلف نیز شکل صفحه آبخور تغییر می‌کند و بدین ترتیب مرکز شناوری نیز تغییر می‌نماید (شکل ۲-۴۳).



شکل ۲-۴۳: تغییرات محل مرکز شناوری در آبخورهای مختلف

۱- منبع: [2]

2 - Center of flotation
3 - Leclert

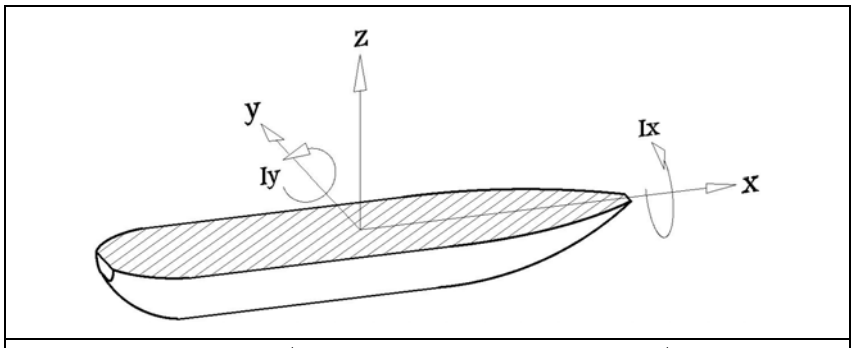
فصل ۳: [۱] مفهوم نقطه متاسنتر و نحوه بدست آوردن آن

❖ مفهوم نقطه متاسنتری[۲] و پرومتاسنتر[۳]

همانطور که در بخش پارامترهای مؤثر در تحلیل پایداری، توضیح داده شد، کشتی در غلتش عرضی حول نقطه‌ای غلتش یا دوران می‌کند که «متاسنتری عرضی» نامیده می‌شود و غلتش طولی نیز حول نقطه «متاسنتر طولی» انجام می‌شود. بنابراین غلتش شناور حول یک نقطه تصادفی نیست بلکه حول یک نقطه مشخص به نام «نقطه متاسنتر» انجام می‌شود. این نقطه یا مرکز، در زوایای غلتش کوچک (تا حداکثر ۸ درجه) نقطه ثابتی در نظر گرفته می‌شود و در زوایای غلتش بزرگ، نقطه ثابتی نیست و به روی یک منحنی مشخص حرکت می‌کند که در این حالت به آن «پرومتاسنتر» گویند. تشابه نقطه متاسنتری با نقطه آویز پاندول در بخش‌های قبل توضیح داده شد. تعیین محل این نقطه به کمک پارامتری به نام «شعاع متاسنتری» تعریف می‌شود و این شعاع همان شعاع دایره‌ای است که شناور حول نقطه متاسنتر (مرکز دایره) نوسان می‌کند. شعاع متاسنتری (BM) که فاصله مرکز بویانسی تا نقطه متاسنتر است از رابطه مقابل به دست می‌آید:

$$BM = \frac{I}{\nabla}$$

I: ممان دوم سطح آبخور (برای غلتش عرضی حول محور x، I_{XX} و برای غلتش طولی حول محور y، I_{YY} می‌باشد- شکل ۲-۴۴). ∇: حجم جابجایی (حجم زیر آب شناور). دیمانسیون I از (m^4) و دیمانسیون ∇ از (m^3) است و در نتیجه دیمانسیون شعاع متاسنتری نیز بر حسب متر (m) است.



شکل ۲-۴۴: ممان‌های طولی و عرضی برای محاسبه شعاع متاسنتری

در غلتش عرضی (حول محور x)، شعاع متاسنتری عرضی برابر است با: $BM_t = \frac{I_{XX}}{\nabla}$ و در غلتش طولی (حول محور y)، شعاع متاسنتر طولی برابر است با: $BM_L = \frac{I_{YY}}{\nabla}$ که چون I_{YY} خیلی بزرگتر از I_{XX} می‌باشد، لذا شعاع متاسنتر طولی خیلی بزرگتر از شعاع متاسنتر عرضی است مثلاً در یک شناور ۸۰ هزار تنی، شعاع متاسنتر عرضی برابر ۱/۲ متر و شعاع متاسنتر طولی برابر ۹/۸ متر می‌باشد که البته علاوه بر تناژ شناور، شکل و سطح آبخور نیز بسیار اهمیت دارد.

❖ نحوه محاسبه فرمول BM

اگر یک مثلث شناوری را در نظر بگیریم که به علت غلتش کشتی، در عرض کشتی جابجا می‌شود (شکل ۲)، خواهیم داشت: $B_0B_1 = \frac{v \times b_0b_1}{\nabla}$

اگر یک گوه کوچک به طول dl را در نظر بگیریم (شکل۲-۴۵) که حجم آن s بوده و مرکز آن از b_0 به b_1 انتقال یافته باشد، می‌توانیم بنویسیم:

$$b_0b_1 = 2 \times \frac{2}{3} \times \frac{y}{2} = \frac{2}{3}y$$

$$S = \frac{1}{2} \times \frac{y}{2} \times \frac{y}{2}\theta_C dl = \frac{y^2}{8}\theta_C dl$$

$$S \times b_0b_1 = \frac{2}{3}y \times \frac{y^2}{8}\theta_C dl = \frac{y^3 dl}{12}\theta_C$$

$$V \times g_0g_1 = \theta_C \int_0^L \frac{y^3}{12} dl$$

اما: $\int_0^L \frac{y^3}{12} dl = I$ و همچنین برای کل شناور:

۱- منابع: [2] , [3] , [4]

2 - Metacentre
3 - Pro-Metacentre

$$B_0M.\theta_C = B_0B_1$$

$$B_0M.\theta_C = \frac{I}{\nabla}\theta_C$$

$$B_0M = \frac{I}{\nabla}$$

KM و BM با استفاده از روشهای عددی که در فصل اول تشریح شدند نیز، قابل محاسبه هستند. بنابراین رابطه زیر را می‌توان برای کلیه کشتی‌ها و در همه زوایای غلتش استفاده کرد. $KM = KB + BM = KB + \frac{I}{\nabla}$

مثال) برای شناور مدل ۲ در آبخور ۳ متر، مقدار KM را محاسبه کنید.

$L = 80\ m$

$B = 13.6\ m$

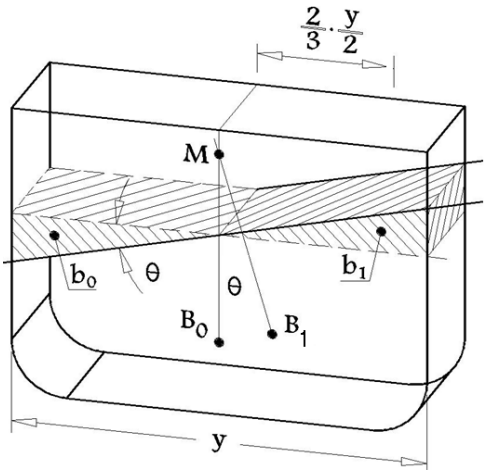
$T = 3\ m$

$\nabla = LBT = 80 \times 13.6 \times 3 = 3264\ m^3$

$KB = \frac{T}{2} = \frac{3}{2} = 1.5\ m$

$BM = \frac{I}{\nabla} = \frac{\frac{1}{12}LB^3}{LBT} = \frac{B^2}{12T} = \frac{(13.6)^2}{12 \times 3} = 5.13\ m$

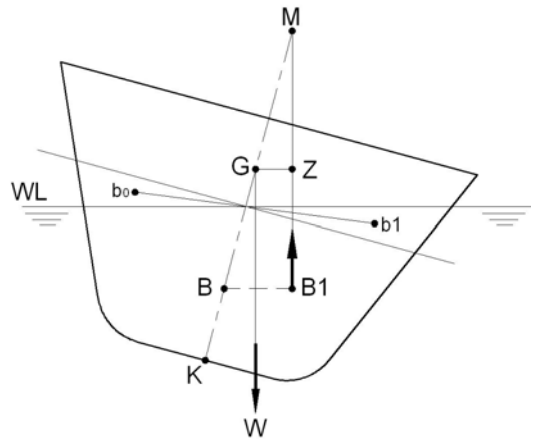
$KM = KB + BM = 1.5 + 5.13 = 6.63\ m$



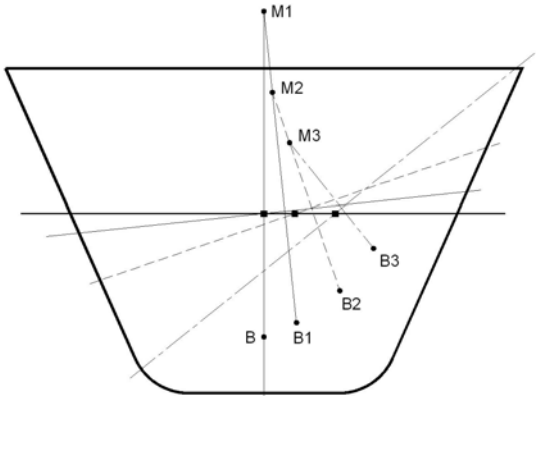
شکل۲-۴۵: جابجایی مثلث‌ها (گوه‌های) شناوری در اثر غلتش شناور

❖ تعیین نقطه متاسنتر به روش ترسیمی

در زوایایی غلتش کوچک، نقطه M را به روش ترسیمی و به صورت زیر می‌توان بدست آورد. هنگامیکه شناور غلتش می‌کند، مرکز بویانسی از B به B_1 منتقل می‌شود. راستای نیروی بویانسی همواره به صورت عمودی است که امتداد دادن راستای نیروی بویانسی، خط مرکزی شناور را قطع می‌کند (طبق شکل ۲-۴۶). محل تقاطع این دو خط همان نقطه متاسنتر (M) است. باید توجه داشت که با بزرگتر شدن زاویه غلتش، نقطه M دیگر بر خط مرکزی شناور منطبق نیست و همانطور که توضیح داده شد، بر روی یک منحنی حرکت می‌کند. در زوایای غلتش بزرگ، متاسنتر از محل تقاطع امتداد مرکز بویانسی جدید و قدیم بدست می‌آید یعنی محل پرومتاسنتر در واقع وابسته به موقعیت مرکز بویانسی(B) است و مسیر تغییرات B نیز در بخش‌های قبل توضیح داده شد. بنابراین مرکز بویانسی و متاسنتری به طور پیوسته با غلتش شناور تغییر می‌کنند (شکل ۲-۴۷).



شکل ۲-۴۶: موقعیت مرکز بویانسی و متاسنتری در زوایای غلتش کوچک

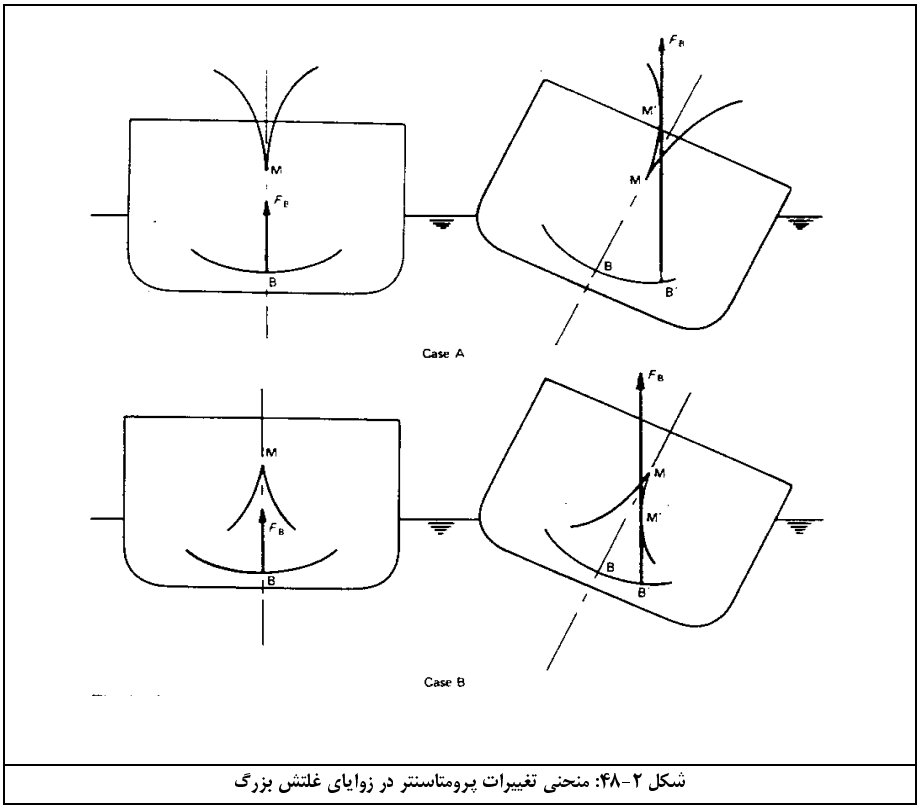


شکل ۲-۴۷: نحوه بدست‌آوردن نقطه متاسنتری در زوایای غلتش بزرگ

فصل ۴ : [۱] تغییرات شعاع متاسنتری بر حسب زوایای غلتش

همانطور که بیان شد، نقطه متاسنتری در زوایای غلتش کوچک نقطه‌ای ثابت است . از طرفی از آنجا که زوایای غلتش طولی شناور، بسیار کوچک است (برخلاف غلتش عرضی که زوایای بزرگی است)، لذا تغییرات محل متاسنتری طولی (M_L) معمولاً بررسی نمی‌شود و تغییرات محل متاسنتری عرضی (M_t) یا شعاع متاسنتری عرضی (BM_t) مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییرات BM تابعی از تغییرات مرکز بویانسی (B) و نقطه متاسنتری (M) به صورت همزمان است که از رابطه $\frac{I}{\nabla}$ در هر زاویه غلتشی قابل محاسبه است. برای تعیین منحنی مکان هندسی تغییرات B , M باید در زوایای مختلف، کشتی را دوران داد و در هر زاویه غلتش، مقدار I را برای آن سطح آبخور محاسبه کرد. برای اینکار باید نقشه‌های سه‌بعدی کامپیوتری از کشتی در اختیار باشد که بتوان کشتی را به راحتی دوران داد و مشخصات سطح آبخور را محاسبه کرد وقتی متاسنتر دیگر ثابت نباشد و بر روی یک منحنی حرکت کند، آن را «پرومتاسنتر» گویند. در شکل۲-۴۶ منحنی تغییرات B , M نشان داده شده است. مطابق شکل مشخص است که تغییر محل M وابسته به تغییر مکان B می‌باشد یعنی محل نقطه پرومتاسنتر وابسته به محل مرکز بویانسی است که در صورت غلتش شناور، این نقطه به صورت لحظه به لحظه تغییر مکان می‌دهد و این تغییر مکان روی یک مکان هندسی همانند شکل ۲-۴۸ است. در حالت A با غلتش کشتی، شعاع متاسنتری افزایش می‌یابد یعنی I در حالتی که کشتی بدون زاویه غلتش است، در حداقل مقدار خود است و با غلتش کشتی، همچنان افزایش می‌یابد. در حالت B، با غلتش شناور، شعاع متاسنتری کاهش می‌یابد یعنی در حالت بدون زاویه غلتش، I در بیشترین مقدار خود است. یعنی تغییرات I تابعی از تغییرات زاویه غلتش است. اگر r را شعاع انحناء مکان هندسی B در زاویه کوچک φ بدانیم داریم:

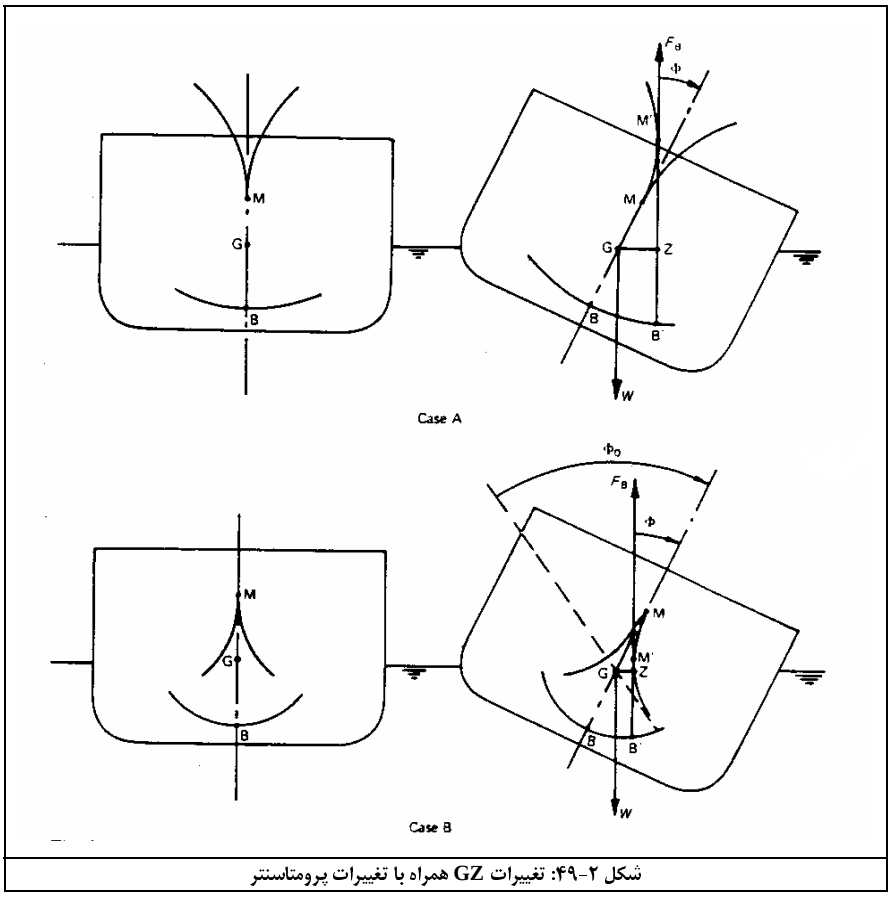
$$r = \frac{\delta(BM)}{\delta\varphi} \quad \text{یا} \quad r = \frac{d(BM)}{d\varphi} = \frac{1}{\nabla}\frac{dI}{d\varphi} \qquad \varphi \to 0$$



شکل ۲-۴۸: منحنی تغییرات پرومتاسنتر در زوایای غلتش بزرگ

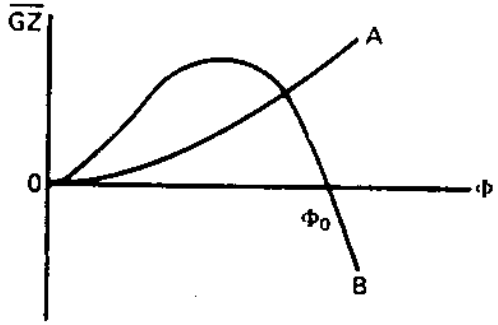
نیروهای اصلی وارد بر شناور (وزن و بویانسی) و وضعیت بازوی بازگرداننده (GZ) در زوایای غلتش مختلف که ناشی از تغییرات پرومتاسنتر است، در شکل ۲-۴۹ نشان داده شده است.

۱- منابع: [2] , [3]

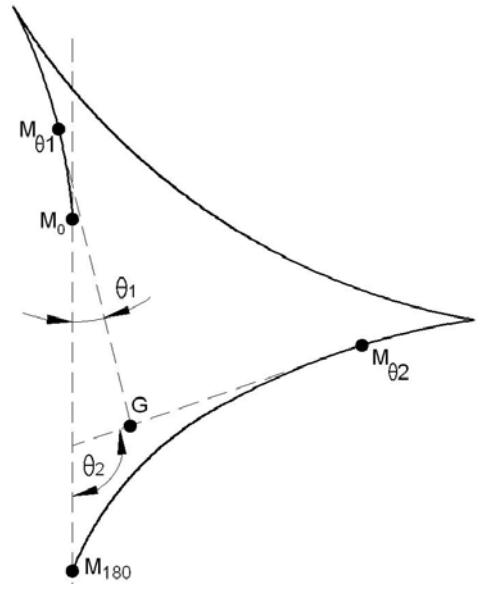


شکل ۲-۴۹: تغییرات GZ همراه با تغییرات پرومتاسنتر

بازوی بازگرداننده GZ عامل اصلی در تحلیل پایداری است و همانطور که در شکل ۲-۴۹ و ۲-۵۰ ملاحظه می‌شود تغییرات GZ در این دو حالت متفاوت می‌باشد. محدوده این تغییرات روی منحنی $GZ - \varphi$ نشان داده شده است . در حالت B زاویه φ_0 زاویه‌ای است که در آن امتداد نیروی وزن و بویانسی بر هم منطبق می‌شوند یعنی $GZ = 0$ می‌شود و این به معنای پایان محدوده پایداری و شروع حالت ناپایدار برای شناور می‌باشد. در حالت A، این زاویه خیلی دیرتر بروز می‌کند یعنی در زوایای غلتش زیاد اتفاق می‌افتد. در واقعیت، هیچ یک از حالات A و B بطور مستقل اتفاق نمی‌افتد بلکه ترکیبی از این دو حالت است. لذا تغییرات منحنی مکان هندسی M از صفر تا ۱۸۰ درجه را می‌توان به طور واقعی‌تر در شکل ۲-۵۱ ملاحظه کرد.



شکل ۲-۵۰: مقایسه منحنی GZ در حالات A و B

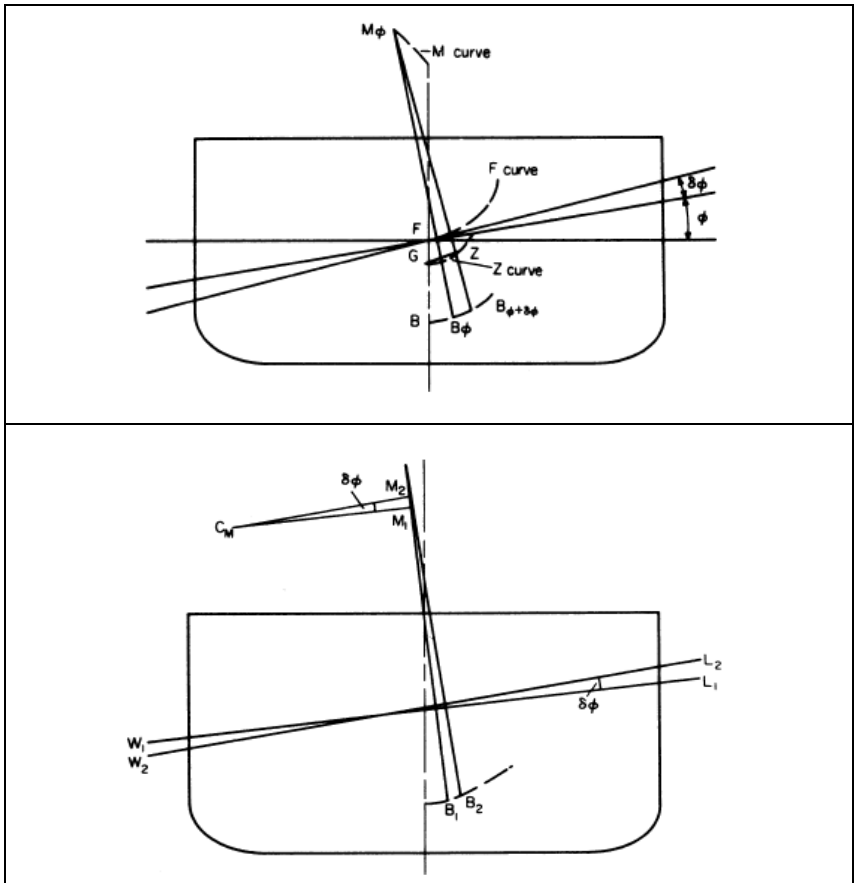


شکل ۲-۵۱: مسیر تغییرات واقعی متاسنتر

❖ تعریف مرکز انحناء منحنی متاسنتری

مطابق مطالب فوق، نقطه پرومتاسنتر در زوایای غلتش مختلف بر روی یک مکان هندسی منحنی حرکت می‌کند. برای این منحنی می‌توان یک مرکز انحناء $(C_M M)$ و شعاع انحناء تعریف کرد که مطابق شکل ۲-۵۲ داریم:

$$M_1M_2 = \delta(\overline{B_\varphi M_\varphi}) = (\overline{C_M M})\delta\varphi \qquad \overline{C_M M\varphi} = \frac{d\overline{B_\varphi M_\varphi}}{d\varphi} = \frac{1}{\nabla}\frac{dI\varphi}{d\varphi}$$



شکل ۲-۵۲: مرکز انحنای منحنی متاسنتری

امام علی (ع): خرد چون کمال پذیرد گفتار بکاهد.

فصل ۵ : [۱] محاسبه KM و GM براساس شعاع متاسنتری

همانطور که در شکل ۲-۵۳ مشخص است، ترتیب نقاط K ، B ، G و M را می‌توان به این صورت در نظر گرفت (محل نقطه B و G می‌تواند برعکس باشد).

K منطبق بر کیل شناور است که می‌توان «ارتفاع متاسنتری» (GM) را به صورت زیر به دست آورد: $\mathrm{KM} = \mathrm{KB} + \mathrm{BM} = \mathrm{KB} + \frac{\mathrm{I}}{\nabla}$

که KB همان فاصله عمودی مرکز بویانسی است. $\mathrm{GM} = \mathrm{KM} - \mathrm{KG} = (\mathrm{KB} + \frac{\mathrm{I}}{\nabla}) - \mathrm{KG}$

که KG نیز همان فاصله عمودی مرکز ثقل است. بدین ترتیب با استفاده از شعاع متاسنتری (BM)، می‌توانKM و GM را به راحتی تعیین کرد. این مقادیر برای یک بارج به صورت زیر محاسبه می‌گردد (طول L ، عرض B ، و آبخور d):

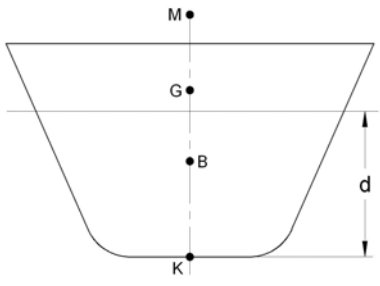
$$\nabla = L.B.d \qquad BM = \frac{I_x}{\nabla} = \frac{L.B^3}{12L.B.d} = \frac{B^2}{12d}$$

$$I_X = \frac{1}{12} L \cdot B^3$$

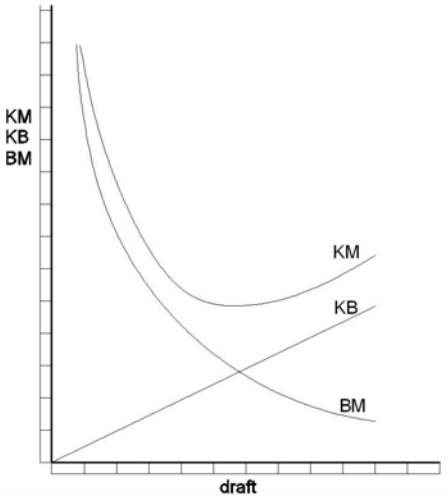
به دلیل شکل مکعبی بارج داریم: $\mathrm{KB} = \frac{\mathrm{d}}{2}$

$$\mathrm{KM} = \mathrm{KB} + \mathrm{BM} \qquad KM = \frac{d}{2} + \frac{B^2}{12d}$$

ملاحظه می‌شود که با افزایش آبخور (d)، مقدار KB افزایش و مقدار BM کاهش می‌یابد. منحنی این تغییرات برای یک بارج در شکل ۲-۵۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵۳: موقعیت تقریبی M , G , B , K



شکل ۲-۵۴: مقادیر KB ، BM و KM در آبخورهای مختلف برای یک بارج

ملاحظه می‌گردد که منحنی KM دارای یک نقطه مینیموم است . حداقل مقدار KM از رابطه مقابل به دست می‌آید: $\frac{d(KM)}{d(d)} = \frac{1}{2} - \frac{B^2}{12d^2}$

برای یافتن حداقل مقدار: $\frac{d(KM)}{d(d)} = 0$

$$\frac{1}{2} - \frac{B^2}{12d^2} = 0 \qquad \mathrm{d}^2 = \frac{\mathrm{B}^2}{6} \qquad \mathrm{d} = \frac{\mathrm{B}}{\sqrt{6}}$$

$$KM = \frac{d}{2} + \frac{(d\sqrt{6})^2}{12d} = \frac{d}{2} + \frac{6d^2}{12d} = \frac{d}{2} + \frac{d}{2} = d$$

۱- منابع: [12] , [14]

پس برای یک شناور بارج شکل، حداقل مقدار KM برابر مقدار d می‌باشد و در آبخور $d = \frac{B}{\sqrt{6}}$ اتفاق می‌افتد.

مثال) مقدار KM را برای یک شناور با مقطع V شکل محاسبه کنید.

$$I = \frac{LB^3}{12} \qquad \nabla = \frac{1}{2}LBd \qquad BM = \frac{I}{\nabla} = \frac{LB^3}{12\nabla} = \frac{LB^3}{12(\frac{1}{2}LBd)} = \frac{B^2}{6d}$$

$$KM = KB + BM \qquad KB = \frac{2}{3}d \qquad KM = \frac{2}{3}d + \frac{B^2}{6d}$$

نمودار تغییرات KB ، BM و KM همانند بارج است و حداقل مقدار KM را نیز می‌توان به روش قبل محاسبه کرد. روشهای دیگری از محاسبه KM در بخش بعد برای اشکال خاص بدنه ارائه شده است.

مثال: در شناور مدل ۲، مقادیر KB,BM و KM را در آبخور ۵ متر محاسبه کنید.همچنین مشخص کنید که حداقل مقدار KM در چه آبخوری و به چه مقدار است.

حل:

$$KB = \frac{d}{2} = \frac{5}{2} = 2.5\ m \qquad BM = \frac{B^2}{12d} = \frac{13.6^2}{12 \times 5} = 3.1\ m$$

KM= KB+BM= 5.6 m

آبخور مربوط به حداقل KM برابر است با:

$$d = \frac{B}{\sqrt{6}} = \frac{13.6}{\sqrt{6}} = 5.55\ m$$

از آنجا که حداکثر آبخور تعریف شده برای این شناور ۵ متر است لذا هیچگاه به مقدار حداقل منحنی KM نمی‌رسد. بنابراین حداقل مقدار KM برابر است با: $(KM)_{\min} = d = 5\ m$

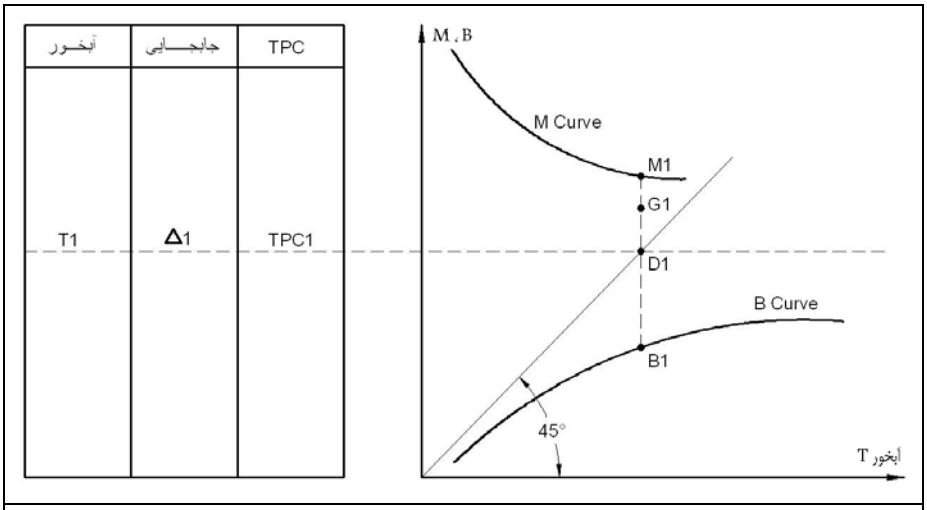
وقتی زندگی ۱۰۰ دلیل برای گریه کردن نشونت می ده ؛؛؛

تو هم ۱۰۰۰ دلیل واسه خندیدن نشونش بده !!!!!

(چارلی چاپلین)

فصل ۶ : [۱] منحنیKM و KB در اشکال هندسی خاص بدنه

مقادیر *KM* و *KB* یا به عبارتی مکان هندسی متاسنتر و مرکز بویانسی در آبخورهای مختلف تغییر می‌کنـد. در ایـن قسـمت بـه طـرز اسـتفاده از ایـن منحنی‌ها برای اشکال هندسی خاص بدنه اشاره می‌شود.



شکل ۲-۵۵: نحوه استخراج مقادیر KB و KM در آبخور معین

فرض کنید نمودار شکل ۲-۵۵ برای بدنه یک شناور ترسیم شده است (پارامتر *TPC* توضـیح داده خواهـد شـد). حـال مقـادیر *KM* و *KB* در *آبخور T1* مطلوب است. برای استخراج این مقادیر یک خط مستقیم با زاویه ۴۵ درجه ترسیم می‌کنیم که از محور مختصات عبور کند. سپس از آبخـور T1 یـک خط افقی با خط ۴۵ درجه قطع می‌دهیم (خط ۴۵ درجه خط آبخور *T1* را به محور افقی تبدیل می‌کند و در واقع این خط همـان $y=x$ اسـت). از محـل تقاطع این دو خط خطی عمود بر دو منحنی ترسیم می‌کنیم. مقادیر *KM* و *KB* را از نمودار خوانده و در جدول یادداشت می‌کنیم. محور عمـودی بدنـه می‌تواند مقدار آبخور یا نسبت ارتفاع آبخور به ارتفاع بدنه باشد. محور افقی نیز همان آبخور می‌باشد که به واسطه خط ۴۵ درجـه از حالـت عمـودی بـه محور افقی انتقال یافته است و سپس مقادیر *KB* و *KM* از محور عمودی خوانده می‌شود. مفهوم این مسئله در شکل ۲-۵۵ نشان داده شده است. هم اکنون نحوه استخراج این مقادیر برای شکل‌های بدنه استوانه‌ای، مکعبی، *V* شکل و سهمی شکل بیان می‌گردد.

❖ بدنه استوانه‌ای

الف- استوانه افقی

استوانه‌ای به شعاع *R* و طول *L* را در نظر می‌گیریم که مطابق شکل ۲-۵۶ تا آبخور *h* در داخل آب قرار گرفته است. با اسـتفاده از روابـط هندسـی در استوانه‌ها محاسبه شعاع متاسنتری (BM) در این حالت به صورت زیر می‌باشد:

$$V=[\frac{1}{2}R^2\theta-[\frac{1}{2}R\cdot Cos(\frac{\theta}{2})\cdot 2R.Sin(\frac{\theta}{2})]]\cdot L \;=\frac{1}{2}R^2(\theta-Sin\theta)\cdot L$$

ممان دوم سطح آبخور برابر است با:

$$I=\frac{1}{12}\cdot L\cdot\left[2R.Sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]^3$$

شعاع متاسنتری *BM* برابر است با $BM \;=\frac{I}{V}$ که در نتیجه خواهیم داشت:

$$BM=\frac{L\cdot\left[2R.Sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]^3}{6R^2[\theta-Sin\theta]\cdot L} \qquad BM=\frac{8R^3\left(Sin\frac{\theta}{2}\right)^3}{6R^2[\theta-Sin\theta]}$$

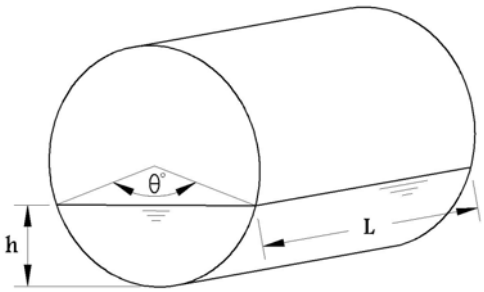
۱- منابع: [2] , [8]

$$KB = R - \frac{4}{3}R\frac{\left(Sin\frac{\theta}{2}\right)^3}{\theta - Sin\theta} \qquad KM = KB + BM$$

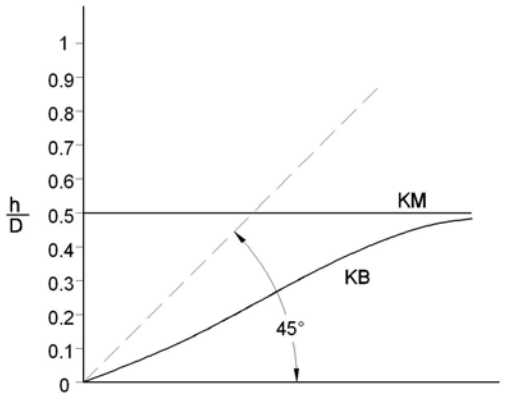
$$KM = \frac{8R^3\left(Sin\frac{\theta}{2}\right)^3}{6R^2(\theta - Sin\theta)} + R - \frac{4}{3}R\cdot\frac{\left(Sin\frac{\theta}{2}\right)^3}{\theta - Sin\theta}$$

$$\boxed{KM = R}$$

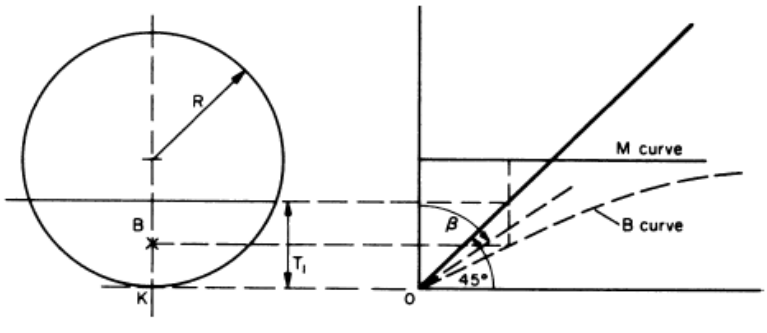
ملاحظه می‌شود که طبق محاسبات فوق، مقدار KM مستقل از مقدار آبخور و همواره برابر مقدار ثابت شعاع استوانه (R) می‌باشد. این در حالی است که در شناورها مکان هندسی تغییرات متاستنتر بر حسب آبخور، تقریبا" به شکل یک سهمی می‌باشد. در نتیجه ملاحظه می‌شود که مقدار KM در شکل‌های استوانه افقی مقدار ثابتی برابر شعاع استوانه R می‌باشد و مکان هندسی آن منطبق بر مرکز استوانه است. نمودار آن مطابق شکل ۲-۵۷ است که محور عمودی آن نسبت آبخور به قطر $\left(\frac{h}{D}\right)$ می‌باشد و $\frac{h}{D} = 0.5$ برابر شعاع استوانه است و نحوه استخراج مقادیر از شکل ۲-۵۸ بدست می‌آید.



شکل ۲-۵۶: استوانه شناور در داخل آب به شعاع R و آبخور h



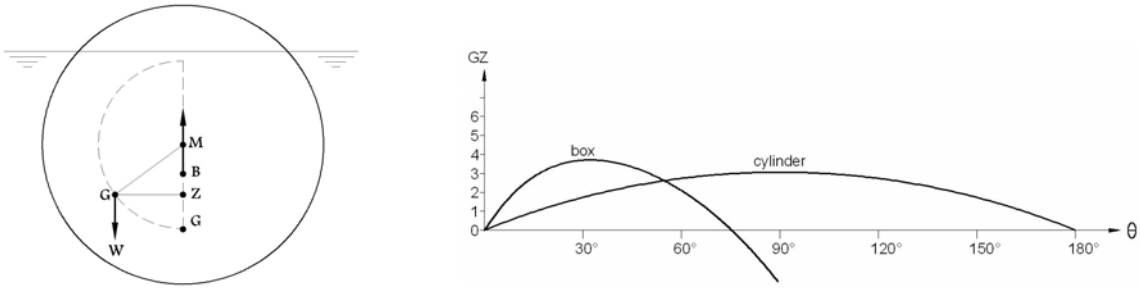
شکل ۲-۵۷: نمودار KB و KM برای شکل استوانه افقی



شکل ۲-۵۸: نحوه استخراج مقادیر KB و KM با استفاده از خط ۴۵ درجه

به دلیل همین خاصیت استوانه می‌باشد که در استوانه، مقدار GZ در ۹۰ درجه به حداکثر مقدار و در ۱۸۰ درجه برابر صفر می‌شود یعنی محدوده پایداری آن از صفر تا ۱۸۰ درجه می‌باشد که در شکل ۲-۵۹ قابل ملاحظه است و یک منحنی سینوسی کامل می‌باشد. علت این امر ثابت بودن محل B در زوایای غلتش مختلف است.

زیردریایی‌های تک بدنه را می‌توان شبیه به استوانه در نظر گرفت و روابط فوق را برای آن بکار برد . در این زیردریایی‌ها در زیر آب نیز متاستنتر بر مرکز بویانسی منطبق می‌شود و در واقع مقدار KM برابر KB و باز هم برابر شعاع استوانه است. در زیردریایی‌های دو بدنه با توجه به شکل مخازن بین دو بدنه، این روابط ممکن است مصداق کامل نداشته باشد.



شکل ۲-۵۹: تغییرات GZ در زوایای غلتش مختلف یک استوانه افقی که در زاویه ۹۰ درجه به حداکثر مقدار می‌رسد.

ب- استوانه عمودی

اگر استوانه‌ای به شعاع R و طول L به صورت عمودی تا آبخور T در داخل آب شناور باشد (شکل ۲-۶۰) داریم:

$$KB = \frac{T}{2}$$

$$BM = \frac{I}{\nabla} = \frac{\pi \frac{R^4}{4}}{\pi R^2 T} = \frac{R^2}{4T}$$

$$KM = \frac{T}{2} + \frac{R^2}{4T}$$

برای استوانه عمودی داریم $KM_l = KM_t$ چرا که:

$$I_l = I_t = \frac{\pi R^4}{4}$$

مثال) استوانه‌ای به شعاع ۲ متر و آبخور ۴ متر در داخل آب به صورت قائم شناور است (محور استوانه، عمود بر سطح آب). مقدار KM آن را محاسبه کنید.

$r = 2 \ m$

$T = 4 \ m$

$\nabla = \pi \ r^2 . T = \pi \times (2)^2 \times 4 = 50.24 \ m^3$

$KB = \frac{T}{2} = \frac{4}{2} = 2 \ m$

$BM = \frac{I}{\nabla}$

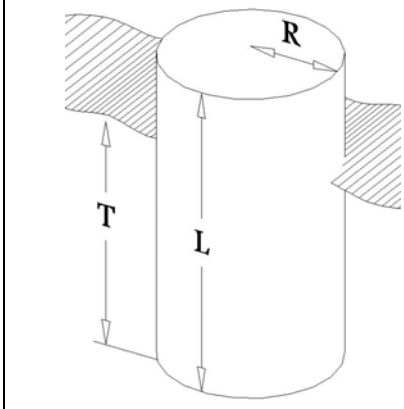
$I = \frac{\pi \ r^4}{4} = \frac{\pi (2)^4}{4} = 12.56 \ m^4$

$BM = \frac{12.56}{50.24} = 0.25 \ m$

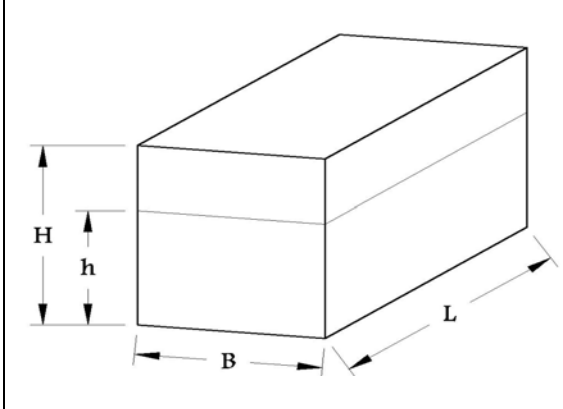
$KM = KB + BM = 2 + 0.25 = 2.25 \ m$

❖ بدنه مکعبی شکل

مطابق شکل ۲-۵۸ مکعبی به ارتفاع H و آبخور h در نظر می‌گیریم.



شکل ۲-۶۰: استوانه عمودی با آبخور T

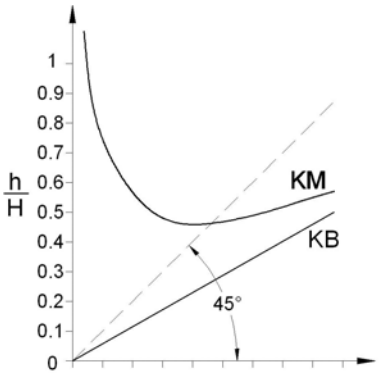


شکل ۲-۶۱: شناور مکعبی با آبخور h

$$BM = \frac{I}{V} = \frac{\frac{1}{12}LB^3}{LBh} \longrightarrow \mathrm{BM} = \frac{\mathrm{B}^2}{12\,\mathrm{h}}$$

$$\mathrm{KM} = \mathrm{KB} + \mathrm{BM} = \frac{\mathrm{h}}{2} + \frac{\mathrm{B}^2}{12\,\mathrm{h}} = \mathrm{h}\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{12}(\frac{\mathrm{B}}{\mathrm{h}})^2\right]$$

که نمودار آن مطابق شکل ۲-۶۲ می‌باشد، این شکل بدنه در بارج‌ها و دوبه‌ها رایج است.



شکل ۲-۶۲: نمودار KB و KM برای یک شناور مکعبی

❖ بدنه V شکل

در بدنه‌ای با مقطع مثلثی مطابق شکل ۲-۶۳ داریم: $\mathrm{BM} = \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{V}}$

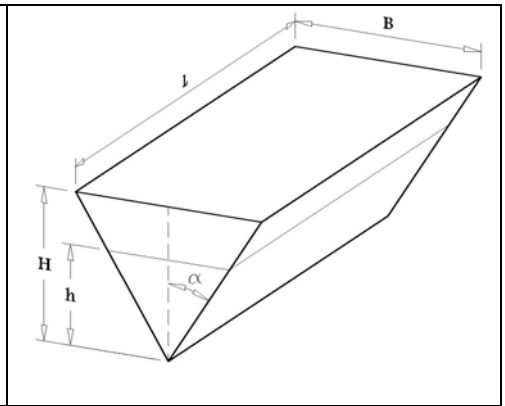
$$I = \frac{L}{12}(2 \times h \times \tan(\alpha))^3 = \frac{2L}{3}(h \times \tan\alpha)^3$$

$$V = \frac{1}{2}h \times 2 \times h \times (\tan\alpha) \times L = h^2 \tan\alpha . L$$

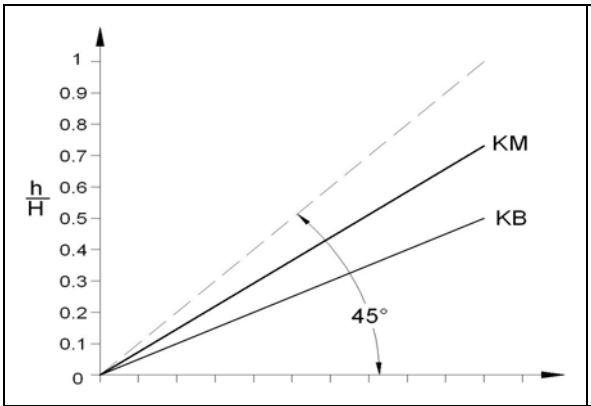
$$\mathrm{BM} = \frac{2}{3}\mathrm{h}.\tan^2\alpha \qquad \text{و} \qquad \mathrm{KB} = \frac{2}{3}\mathrm{h}$$

$$KM = KB + BM = \frac{2}{3}h + \frac{2}{3}h \times \tan^2\alpha = \frac{2}{3}h(1 + \tan^2\alpha)$$

که نمودار آن مطابق شکل ۲-۶۴ و ۲-۶۵ می‌باشد که برای استخراج مقادیر *KB* و *KM* باز هم از خط ۴۵ درجه استفاده می‌شود.

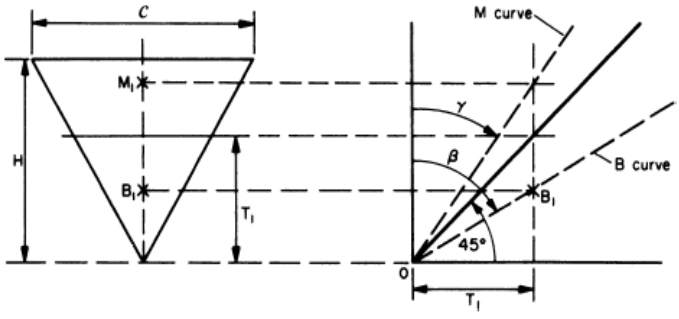


شکل ۲-۶۳: شناور با مقطع V با آبخور h



شکل ۲-۶۴: نمودار KB و KM برای شناور با مقطع V

این نوع از شکل بدنه در شناورهای تندرو نظامی رایج است.



شکل ۲-۶۵: منحنی KB و KM برای یک شناور با مقطع V شکل

❖ بدنهٔ سهمی شکل

مطابق شکل ۲-۶۶ یک بدنه سهمی شکل با معادلهٔ زیر را در نظر بگیرید.

$$x^2 = 4ay \quad \longrightarrow \quad x = \sqrt{4ay}$$

عرض آبخور $= 2x = 2\sqrt{4ah}$

$$BM = \frac{I}{V} \qquad I = \frac{L}{12}\left[2\sqrt{4ah}\right]^3 = \frac{16}{3}L(\sqrt{ah})^3$$

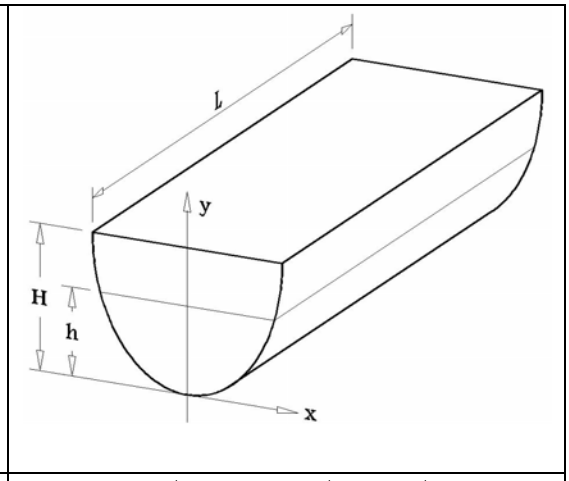
$$V = \frac{2}{3}\left[2\sqrt{4ah}.h\right]L = \frac{8}{3}Lh(\sqrt{ah}) \quad \longrightarrow \quad BM = \frac{\frac{16}{3}L.(ah).\sqrt{ah}}{\frac{8}{3}Lh(\sqrt{ah})} = 2a$$

از روابط هندسی برای سهمی داریم:

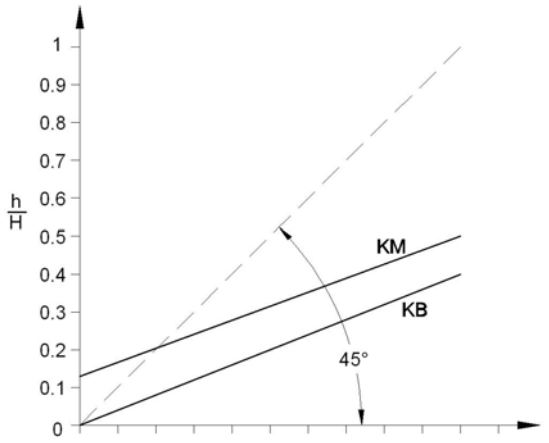
$$KB = \frac{2}{5}h$$

$$KM = KB + BM \quad \longrightarrow \quad KM = \frac{2}{5}h + 2a$$

که در شکل۲-۶۷ نمودار آن ملاحظه می‌شود.



شکل ۲-۶۶: شناور با مقطع سهمی‌شکل



شکل ۲-۶۷: نمودار KB و KM برای یک شناور با مقطع سهمی

❖ بدنه شناورهای SWATH

مزایای *شناورهای SWATH* در قسمت اول کتاب ارائه شد و مشخص گردید که این شناور کمترین اثرات را از امواج سطح آب می‌پذیرد. این شناورها علی‌رغم صفحه آبخور کوچکی که دارند از وضعیت پایداری خوبی برخوردار هستند و در امواج و حین حرکت، کمترین تلاطم و آرام‌ترین حرکات را دارند. مقدار *BM* در این شناورها مقدار قابل ملاحظه‌ای است و نکته آن در این است که ممان اینرسی کل *Ixx* حول محور طولی شناور یا همان خط مرکزی گرفته می‌شود نه حول محور صفحه آبخور. یعنی ابتدا ممان اینرسی حول محور صفحه آبخور گرفته می‌شود (که مقدار کوچکی است) و سپس این ممان به حول خط مرکزی کل شناور منتقل می‌گردد (که مقدار بزرگی بدست خواهد آمد چراکه فاصله پایه‌ها از خط مرکزی زیاد است) و بعد از این مرحله ضرب در ۲ می‌شود چراکه شناور دارای دو پایه طرفینی است. بدین ترتیب وضعیت پایداری این شناورها بسیار مناسب خواهد بود. مثال زیر به درک این مسئله کمک می‌کند.

مثال) یک شناور SWATH به طول ۲۵ متر و جابجایی ۳۰۰ تن در آب شور دریا شناور است. مقطع عرضی این شناور ثابت بوده و به صورت زیر است. مقدار KG= ۱/۸۵ متر بالاتر از خط مبنا (کف شناور) است. مطلوبست محاسبه مقدار GM؟

ابتدا آبخور شناور را تعیین می‌کنیم:

$$(\pi r^2 + h \times 0.63) \times 2 \times L \times \rho = 300 \qquad \Rightarrow \qquad h = 1.5\,m$$

$$T = 2 \times r + h = 2.5 + 1.5 = 4.0\,m$$

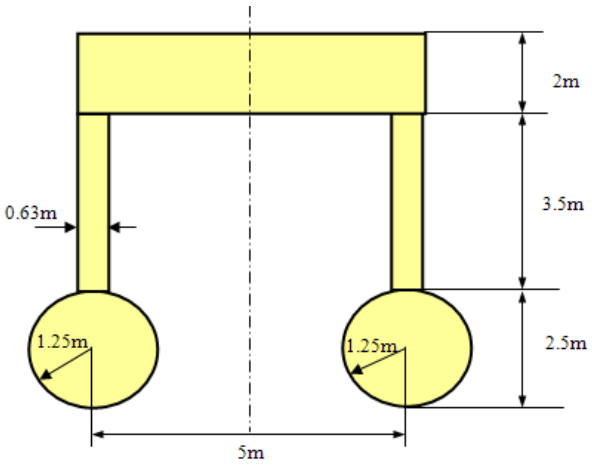
مقدار GM را محاسبه می‌کنیم:

$$KB = \frac{\nabla_1 h_1 + \nabla_2 h_2}{\nabla_1 + \nabla_2} = \frac{2 \times L \times (\pi \times 1.25^2 \times 1.25 + 1.5 \times 063 \times (2.5 + 1.5/2)}{2 \times L \times (\pi \times 1.25^2 + 1.5 \times 0.63)} = 1.573\,m$$

$$BM = \frac{I}{\nabla} = \frac{\left[\frac{2.5 \times 0.63^2}{12} + 25 \times 0.63 \times 2.5^2\right] \times 2}{300/1.025} = 0.678\,m$$

$$GM = KB + BM - KG = 1.573 - 0.676 - 1.85 = 0.4\,m$$

از آنجا که مقدار اولیه GM مثبت بدست آمده است لذا شناور دارای پایداری اولیه مثبت است.



اقیانوس باشی یا برکه‌ای کوچک!! مهم نیست ؛ زلال که باشی آسمان در تو پیداست.

فصل ۷[۱]: منحنی‌های هیدرواستاتیک

منحنی‌های هیدرواستاتیک[۲] شامل منحنی‌هایی می‌باشد که بیانگر مشخصه‌های هندسی و هیدرواستاتیک شناور می‌باشد. محور عمودی این منحنی‌ها، ارتفاع آبخور و مؤلفه افقی آن می‌تواند یکی از مقادیر مؤلفه‌های زیر باشد:

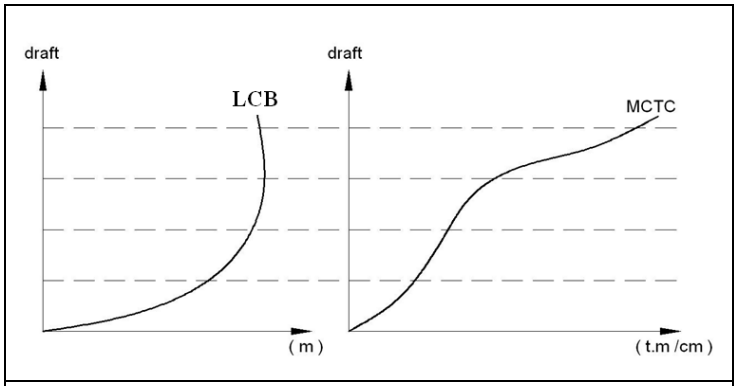
❖ **مشخصه‌های هندسی:**

- مرکز بویانسی طولی (*LCB*)[۳]
- مرکز بویانسی عمودی (*VCB*)[۴]
- مساحت صفحه آبخور (*WPA*)[۵]
- مرکز طولی سطح صفحه آبخور (*LCF*) که همان مرکز شناوری است[۶]
- جابجایی[۷]

❖ **مشخصه‌های هیدرواستاتیکی:**

- متاسنتر طولی (KM_L)
- متاسنتر عرضی (KM_T)
- وزن لازم برای ۱ سانتی‌متر فرو رفتن شناور در آب (*TPC*)[۸]
- ممان لازم برای تریم دادن شناور به اندازه ۱ سانتی‌متر (*MCTC*)[۹]

به طور مثال برای یک شناور مقادیر *LCB* و *MCTC* مطابق شکل ۲-۶۸ ترسیم می‌شود که محور عمودی آن ارتفاع آبخور و محور افقی مقادیر *LCB* و *MCTC* می‌باشد.



شکل ۲-۶۸: مقادیر LCB و MCTC در آبخورهای مختلف

این نمودارها را معمولاً در شکل‌های جداگانه‌ای نمایش نمی‌دهند بلکه کلیه منحنی‌ها را در یک شکل نشان می‌دهند که محور عمودی آن آبخور و محور افقی آن برای هر یک از مشخصه‌های فوق متفاوت است یعنی محور افقی برای هر مشخصه یک مقیاس خاص دارد. منحنی هیدرواستاتیک برای شناور مدل ۱ در مثال زیر ترسیم شده است. منحنی‌های هیدرواستاتیک جزء مدارک پایداری هر کشتی می‌باشد که باید همراه شناور وجود داشته باشد.

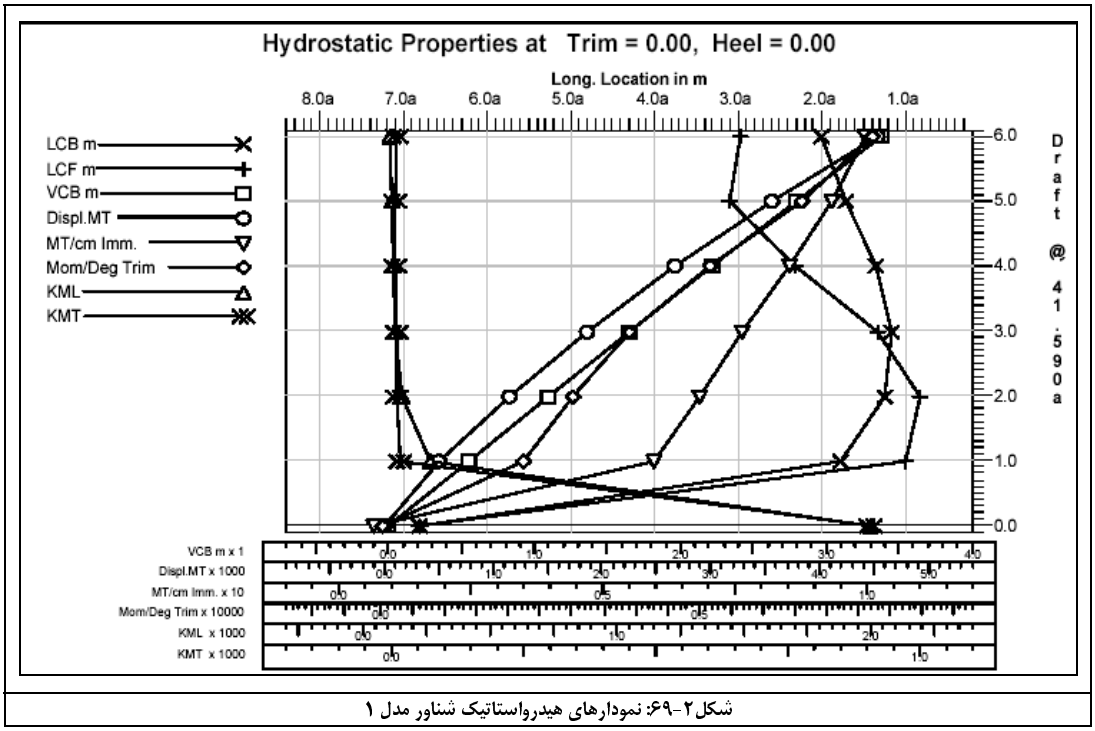
مثال: منحنی‌ها و جداول هیدرواستاتیک شناور مدل ۱ به صورت زیر می‌باشد. برخی از پارامترهای هیدرواستاتیک (*TPC,MCTC*) در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود:

۱- منابع: [2] , [4] , [7]

2 - hydrostatic curves
3 - Longitudinal Center of Buoyancy
4 - Vertical Center of Buoyancy
5 - Water Plane Area
6 - Longitudinal Center of Flotation
7 -displacement
8 - Tonne Per Centimeter
9 - Moment to `Change Trim one Centimeter

Draft (m)	Displ (MT)	LCB (m)	VCB (m)	LCF (m)	TPcm (MT/cm)	MCTC (MT-m/deg)	KML (m)	KMT (m)
0	0.44	6.813a	0.00	6.825a	0.64	15.12	0.00	0.00
1	493.33	1.786a	0.55	0.995a	5.97	2222.99	263.26	13.06
2	1135.40	1.256a	1.10	0.837a	6.83	2988.45	155.89	7.79
3	1858.04	1.173a	1.65	1.342a	7.63	3899.17	125.33	6.48
4	2665.39	1.366a	2.21	2.322a	8.51	5178.00	116.40	6.13
5	3560.21	1.728a	2.79	3.106a	9.34	6607.23	111.42	6.14
6	4526.70	2.019a	3.37	2.985a	9.95	7718.43	102.79	6.32

مقادیر LCB و LCF از وسط شناور بیان می‌شوند، علامت a به معنای عقب‌تر از وسط شناور و $draft$ و VCB از خط مبنا و چگالی آب دریا برابر $\left(t/m^3\right)$ ۱/۰۲۵ در نظر گرفته شده است. این مقادیر در نمودار زیر نمایش داده شده است:



شکل۲-۶۹: نمودارهای هیدرواستاتیک شناور مدل ۱

شکل ۲-۶۹ نشان‌دهنده نمودارهای هیدرواستاتیک شناور مدل ۱ می‌باشد که مقادیر آن در جدول قبل نشان داده شد. ملاحظه می‌شود که محور افقی این نمودار، برای هر پارامتر دارای مقیاس خاصی است.

حرفهایی هست برای نگفتن...

و ارزش عمیق هر انسان به حرفهایی است که برای نگفتن دارد.

فصل ۸:[۱] میزان بارگذاری به ازای یک سانتی‌متر افزایش آبخور (TPC)

اگر باری بر روی یک کشتی گذاشته یا برداشته شود، کشتی مقداری در آب فرو رفته یا بالاتر می‌آید. اگر بارگذاری مشخصی روی کشتی انجام شود، میزان فرو رفتن کشتی (یا افزایش آبخور) وابسته به مساحت سطح آبخور می‌باشد. اگر طبق شکل۲-۷۰ باری روی کشتی قرار گیرد که باعث ۱ سانتی‌متر افزایش آبخور کشتی شود این حجم به صورت زیر قابل محاسبه است.

جرم آب جابجا شده توسط کشتی = جرم قرار گرفته روی کشتی

$$M = v.\rho_w$$

فرض کنید شناور به ازای جرم M به اندازه یک سانتیمتر در داخل آب فرو رفته باشد:

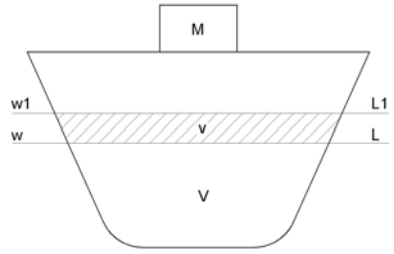
$$M = A\times\frac{1}{100}\times\rho = \frac{\rho}{100}A$$

(بر حسب تن بر سانتیمتر)

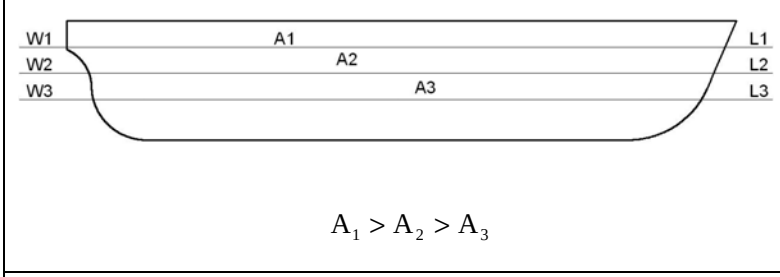
یا به عبارت دیگر:

$$TPC = \frac{\rho_w.A}{100}$$

TPC [۲] بیانگر باری بر حسب تن است که به ازای آن شناور ۱ سانتی‌متر در آب فرو می‌رود. فرض اساسی در اینجا این است که سطح آبخور (A) ثابت باشد در حالیکه با افزایش آبخور، سطح آبخور همواره تغییر می‌کند (شکل ۲-۷۱) که اگر افزایش آبخور زیاد باشد، خطای این فرض زیاد است. فرض کنید برای یک کشتی، در یک آبخور مشخص، $TPC= 5\ t/cm$ باشد یعنی اگر ۵ تن بار روی شناور قرار گیرد، شناور یک سانتی‌متر در آب فرو می‌رود و اگر ۱۵ تن بار روی عرشه بار قرار گیرد ۳ سانتی‌متر در آب فرو می‌رود (با فرض تغییرات اندک سطح صفحه آبخور).

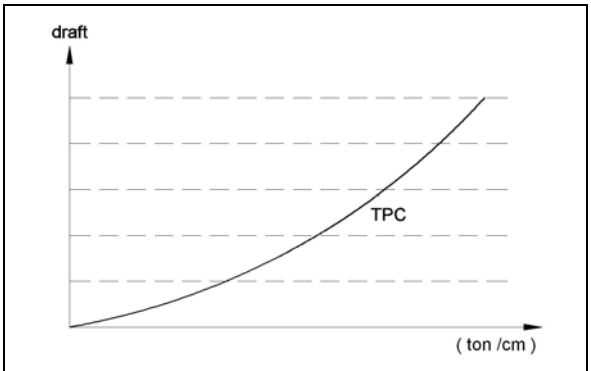


شکل ۲-۷۰: محاسبه مقدار فرورفتگی شناور در داخل آب در ازای جرم M.



شکل ۲-۷۱: تغییرات سطح صفحه آبخور در آبخورهای مختلف

جهت دقیق‌تر و ساده‌ترشدن استفاده از TPC در مسائل عملی، منحنی TPC بر حسب میزان آبخور جزء منحنی‌های هیدرواستاتیک آورده می‌شود. این منحنی باید جزء مدارک هیدرواستاتیک هر کشتی استخراج شود. مسئول بارگیری کشتی با استفاده از منحنی TPC می‌تواند تعیین کند که به ازای قرار گرفتن بار روی عرشه، شناور چه مقدار داخل آب فرو می‌رود. نمودار TPC در آبخورهای مختلف برای یک شناور در شکل ۲-۷۲ به طور مثال ارائه شده است.



شکل ۲-۷۲: تغییرات منحنی TPC بر حسب آبخور

۱- منابع: [2] , [4]

2 - Tonnes per 1 Centimeter Immersion

همچنین از مقادیر *TPC* می‌توان مقدار جابجایی را محاسبه کرد که در مثال ۳ بدان اشاره می‌شود.

مثال۱) شناور مدل ۱ در آبخور ۲ متر در آب شور شناور است. اگر یک بار ۳۰ تنی بر روی شناور قرار گیرد، چقدر داخل آب فرو می‌رود؟

حل: با استفاده از جداول مربوط به ضرایب بدنه در آبخور دو متر داریم: $A = 817.71\ m^2$: مساحت سطح آبخور در ۲ متر

$$\rho = 1.025\ \frac{t}{m^3} \quad \rightarrow \quad TPC = \frac{A.\rho}{100} = \frac{817.71 \times 1.025}{100} = 8.38\ \frac{t}{cm}$$

یعنی این شناور به ازای هر ۸/۳۸ تن، یک سانتیمتر در داخل آب فرو می‌رود پس به ازای ۳۰ تن داریم: $\frac{30}{8.38} = 3.6\ cm$ = تغییر آبخور

مثال۲) شناور مدل ۱ در آبخور ۲ متر در آب شور شناور است. اگر یک مجموعه بار ۹۰۰ تنی بر روی شناور قرار گیرد، شناور چقدر در داخل آب فرو می‌رود؟

حل: جابجایی شناور در آبخور ۲ متر: ۱۱۳۵/۴ تن

بار قرار گرفته روی شناور: ۹۰۰ تن

جابجایی نهایی: ۲۰۳۵/۴ تن

از مشخصات شناور مدل ۱، آبخور مربوط به نزدیکترین حجم جابجایی به ۲۰۳۵/۴ تن را استخراج می‌کنیم:

تناژ در آبخور ۳ متر: ۱۸۵۸ تن

که تا رسیدن به تناژ ۲۰۳۵/۴ تن، مقدار ۱۷۷/۴ تن دیگر باقی مانده است. برای محاسبه میزان فرورفتگی شناور در ازای ۱۷۷/۴ تن از روش *TPC* (در آبخور ۳ متر) استفاده می‌کنیم.

TPC در آبخور ۳ متر عبارتست از: $A = 1002.54\ m^2$:مساحت آبخور در ۳ متر

$$TPC = \frac{A.\rho}{100} = \frac{1002.54 \times 1.025}{100} = 10.27\ \frac{t}{cm}$$

میزان فرورفتگی داخل آب: $\frac{177.4}{10.27} = 17.27\ cm$

لذا در مجموع افزایش آبخور ناشی از یک بار ۹۰۰ تن برابر است با: $1 + 0.173\ m = 1.173\ m$: افزایش آبخور

باید توجه داشت که اگر در همان آبخور ۲ متر مقدار *TPC* را محاسبه می‌کردیم، باعث خطای محاسباتی می‌شد چرا که افزایش زیاد آبخور باعث تغییر صفحه آبخور می‌گردد. اگر از منحنی‌های هیدرواستاتیک استفاده شود، به صورت مستقیم می‌توان آبخور مربوط به تناژ ۲۰۳۵/۴ تن را بدست آورد.

مثال۳) جابجایی شناور مدل ۱ در آبخور ۴ متر برابر است با ۲۶۶۵ تن است. با استفاده از روش TPC، جابجایی را در آبخور ۴/۶ متر بدست آورید.

حل: با استفاده از منحنی‌های هیدرواستاتیک داریم:

آبخور	TPC	سیمسون	حاصلضرب
4	8.51	1	8.51
4.2	8 8.	3	25.74
.4	8.7		26.1
4.6	8.9	1	8.9
		: مجموع	69.25

آبخور	4	4.2	4.4	4.6
TPC	8.51	8.58	8.7	8.9

مقدار جابجایی بین آبخور ۴-۴/۶ متر: $\frac{3}{8} \times 0.2 \times 100 \times 69.25 = 519\ ton$

مقدار جابجایی تا آبخور ۴/۶ متر : $2665 + 519 = 3184\ ton$

دو خصلت است که نیک تر از آن نیست : ایمان به خدا و سودمندی برای بندگان خدا

فصل ۹: [۱] اختلاف آبخور در آب شور و شیرین (FWA)[۲]

هنگامیکه شناور از منطقه‌ای با آب شور به آب شیرین منتقل می‌شود، به دلیل کاهش چگالی آب، آبخور شناور افزوده می‌گردد. چگالی آب شور ($1.025\ t/m^3$) و چگالی آب شیرین ($1\ t/m^3$) در نظر گرفته می‌شود . اگر چگال آب شور ρ_s و چگالی آب شیرین با ρ_f نمایش داده شود، شناوری که با آبخور ds در آب شور قرار داشته و وارد آب شیرین شود، آبخور جدید به $d_s + FWA$ افزایش خواهد یافت. بنابراین:

$$\frac{d_s + FWA}{d_s} = \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad \rightarrow \quad d_s + FWA = d_s \frac{\rho_s}{\rho_f}$$

$$FWA = d_s.\frac{\rho_s}{\rho_f} - d_s \quad \rightarrow \quad FWA = d_s(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1) = d_s.(\frac{1.025}{1} - 1)$$

$FWA = 0.025 d_s$ (بر حسب متر) $= 25 d_s$ (برحسب میلیمتر)

مقدار *FWA* برای خط بار تابستان یا خطوط بار نزدیک آن اهمیت دارد. چرا که همانطور که در بخش بعد توضیح داده می‌شود، فاصله بین S و F و همچنین فاصله بین *T* و *TF* برابر *FWA* است. بنابراین *FWA* تنها هنگامی قابل استفاده است که شناور دارای آبخوری نزدیک به خط بار تابستان باشد. *FWA* را می‌توان بر حسب *TPC* نیز محاسبه کرد.

اگر d_s آبخور مربوط به خط بار تابستان در آب شور باشد داریم: $FWA = 25 d_s \frac{A \times 1.025 \times 10^{-2}}{A \times 1.025 \times 10^{-2}}$

که *A* مساحت سطح آبخور مربوط به خط بار تابستان است. از طرفی چون $TPC = A \times 1.025 \times 10^{-2}$ و $d_s \times A \times 1.025$ نیز تقریباً برابر جابجایی تابستانی شناور است، داریم:

$$FWA = \frac{25 \times \text{جابجایی}}{100 \times TPC} \quad \rightarrow \quad FWA = \frac{\text{جابجایی}}{4 \times TPC} \quad \text{(بر حسب میلیمتر)}$$

یادآوری می‌شود که رابطه *TPC* عبارتست از: $TPC = \frac{A \times \rho}{100}$

نکته دیگر این است که *TPC* بکار رفته در این مسائل برای آب شور با چگالی *1.025* می‌باشد در حالی‌که اگر کشتی در آبی با چگالی غیر از این، شناور باشد، این *TPC* کاربرد ندارد و باید اصلاح شود و *TPC* در چگالی *1.025* از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{(TPC)_D}{(TPC)_S} = \frac{\rho_D}{\rho_S}$$

بنابراین مراحل به دست آوردن *FWA* را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$FWA \rightarrow TPC \rightarrow$ مساحت سطح آبخور در آبخور تابستان $(A) \rightarrow$ آبخور تابستان (d_s)

❖ اختلاف آبخور داک (DWA)[۳]:

در اینجا منظور از آبخور داک، آبخور شناور در آبی با چگالی بین آب شور و آب شیرین است و منظور صرفاً حضور شناور در داخل داک (حوضچه تعمیرات شناور) نمی‌باشد. اگر چگالی این آب (آب داک) را با ρ_D نمایش دهیم، مقدار اختلاف آبخور داک عبارتست از:

$$\frac{DWA}{FWA} = \frac{1.025 - \rho_D}{1.025 - 1}$$

که در واقع نوعی میان‌یابی بین اختلاف آبخور شناور در آب داک و آب شور و همچنین اختلاف بین آبخور آب شور و شیرین است.

$$DWA = FWA \times \frac{1.025 - \rho_D}{1.025 - 1} = FWA \times \frac{1.025 - \rho_D}{0.025} \quad (\text{چگالی بر حسب } t/m^3 \text{ است})$$

$$DWA = FWA \times \frac{1025 - \rho_D}{25} \quad (\text{چگالی بر حسب } kg/m^3)$$

اختلاف آبخور داک مانند اختلاف آبخور بین آب شور و شیرین، تنها برای حالتی که کشتی دارای آبخوری نزدیک به خط بار تابستان باشد، اهمیت دارد. در حالتی که شناور دارای آبخوری کمتر از آبخورهای فوق باشد، می‌توان اختلاف آبخور داک را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

۱-منابع: [4] , [12] , [14]

2 - Fresh Water Allowance

3 - Dock Water Allowance

مثال) شناور مدل ۱ در منطقه‌ای با چگالی t/m3 ۱/۰۱۳ شناور است. اگر این شناور وارد آبِ شور شود، تغییر آبخور آن را محاسبه کنید.

حل: از مشخصات مدل ۱ داریم:

آبخور تابستان $d_s = 5\ m$

$A = 1393.6\ m^2$

$\Delta = 3560\ t$

$$TPC = \frac{A.\rho}{100} = \frac{1393.6 \times 1.025}{100} = 14.28\ \frac{t}{cm}$$

$$FWA = \frac{\Delta}{4 \times TPC} = \frac{3560}{4 \times 14.28} = 62\ mm$$

عدد بدست آمده بدین معناست که اگر شناور از آب شیرین وارد آب شور شود آبخور شناور ۶۲ میلیمتر کاهش می‌یابد. حال اگر این شناور از منطقه‌ای با چگالی ۱/۰۱۳ به آبِ شور وارد شود میزان کاهش آبخور عبارتست از:

$$DWA = FWA \times \frac{1.025 - \rho_D}{0.025} = 62 \times \frac{1.025 - 1.013}{0.025} = 29.76\ mm$$

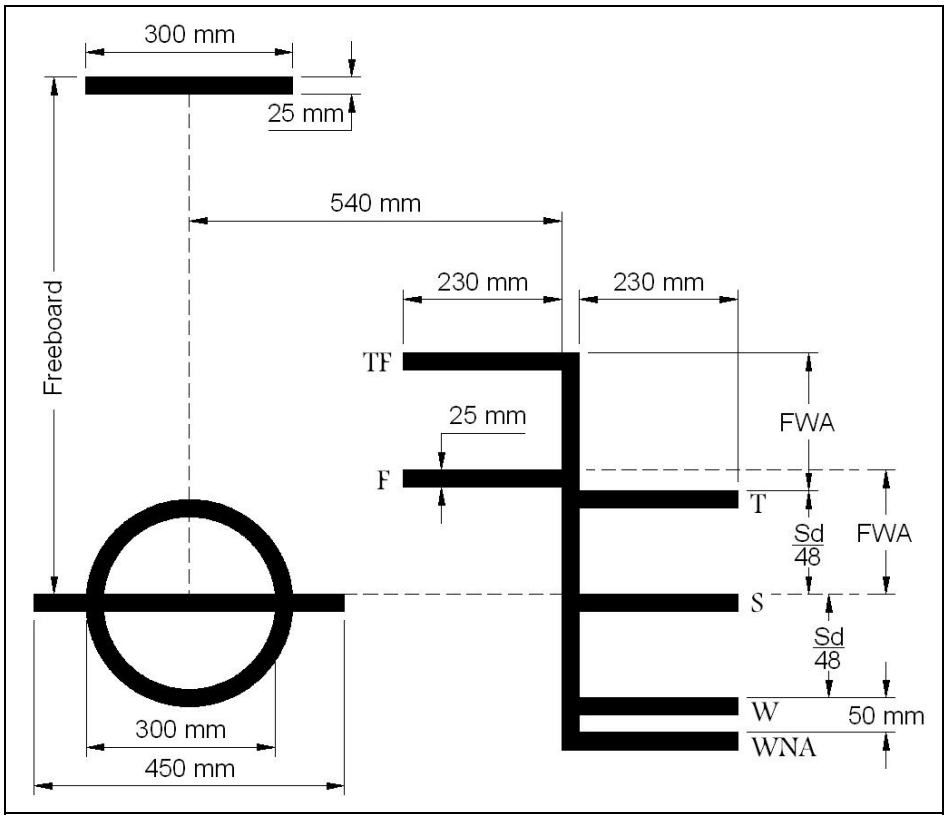
زندگی دفتری از خاطره هاست !!!

یک نفردر دل شب ... یک نفر در دل خاک ... یک نفر همدم خوشبختی هاست ... یک نفر همسفر سختی هاست ...

چشم تا باز کنیم عمرمان می گذرد ... ما همه همسفریم ...

فصل۱۰: ترسیم علامت خط بار شناور

علامت خط بار شناور بر روی بدنه هر شناوری باید ترسیم گردد به گونه‌ای که نشان دهنده حداکثر مقدار آبخور شناور در شرایط مختلف چگالی آب دریا باشد. علامت خط بار مطابق شکل۲-۷۳ می‌باشد که به آن علامت خط شاهین نیز گفته می‌شود.



شکل۲-۷۳: علامت خط بار شناور و ابعاد و اندازه‌های استاندارد آن

دایره موجود در شکل باید منطبق بر آبخور تابستان[1] باشد. این آبخور در چگالی $(\frac{t}{m^3})$۱/۰۲۵ آب دریا محاسبه می‌شود. بقیه خطـوط موجـود در شکل، نشان دهنده آبخورهای زیر هستند که با خط بار بیان می‌گردند.

خط بار گرمسیری (T)[2]: این خط بار به اندازه $\frac{1}{48}$ آبخور تابستان، در بالای خط بار تابستان رسم می‌شود.

خط بار زمستان (W)[3]: این خط به اندازه $\frac{1}{48}$ آبخور تابستان، پایین‌تر از خط بار تابستان رسم می‌شود.

خط بار زمستان در آتلانتیک شمالی (WNA)[4]: خط باری است که به اندازه ۵۰ میلیمتر پایین‌تر از خط بار زمستان قرار می‌گیرد (خـط فـوق تنهـا برای کشتی‌های کوچکتر از ۱۰۰ متر نمایش داده می‌شود).

خط بار آب شیرین (F)[5]: این خط بار نشان دهنده آبخور در آب شیرین با چگالی $(\frac{t}{m^3})$۱ می‌باشد که به اندازه FWA، بالاتر از خط بـار تابسـتان ترسیم می‌گردد.

خط بار گرمسیری در آب شیرین (TF)[6]: این خط بار به اندازه FWA بالاتر از خط بار گرمسیری (T) ترسیم می‌گردد.

1 Summer Load Line
2 -Load Line Tropical
3 - Load Line Winter
4 - Load Line Winter North Atlantic
5 - Load Line Fresh Water
6 - Load Line Fresh Water Tropical

❖ کاربرد علامت خط بار

باید توجه داشت که کاربرد علامت خط بار در حداکثر بارگیری شناور (جابجایی سنگین) می‌باشد. یعنی اگر شناور بـه انـدازه حـداکثر تنـاژ مجـاز خـود بارگیری شده باشد و در آبی با چگالی (t/m^3) ۱/۰۲۵ شناور باشد، آبخور شناور در محل مرکز دایره یا خط S قرار می‌گیرد و اگر با همین بار به منطقه دیگری با چگالی (t/m^3) ۱ برود، آبخور شناور در محل خط F قرار می‌گیرد و اگر در آب شـیرین در منطقـه گرمسـیری وارد شـود ، آبخـور بـه *TF* می‌رسد. همچنین اگر شناور در جابجایی سنگین به آبهای آتلانتیک شمالی در فصل زمستان وارد شود که چگـالی از ۱/۰۲۵ بیشـتر اسـت، آبخـور بـه *WNA* می‌رسد. دانستن مقدار آبخور در جابجایی سنگین (حداکثر تناژ شناور) در جلوگیری از تصادم شناور با کف دریا یا موانع زیرآبی بسیار اهمیت دارد و در تعیین عوارض‌بندری نیز بکار می‌رود.

مثال) علامت خط آبخور را برای شناور مدل ۱ ترسیم کنید.

مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- آبخور تابستان شناور مدل ۱ برابر ۵ متر است. $(d_S = 5\ m)$

۲- مساحت سطح آبخور در آبخور ۵ متر برابر ۱۳۹۳/۶ متر مربع است (با استفاده از نمودار مشخصات بدنه)

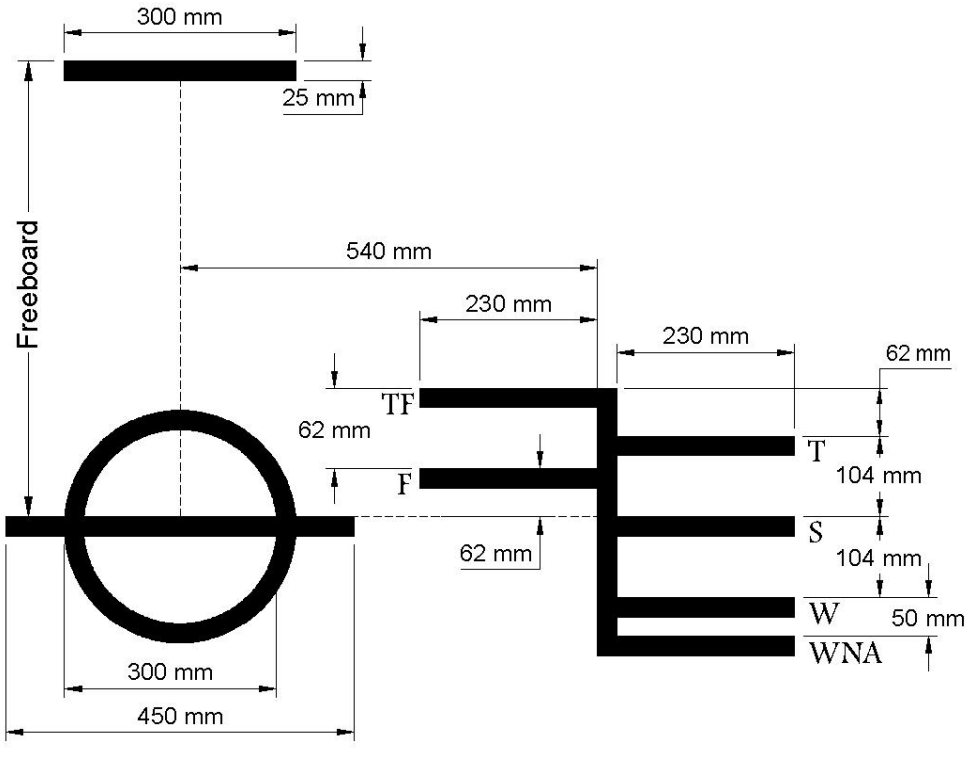
۳- محاسبه *TPC*: $TPC = \frac{A.\rho}{100} = \frac{1393.6 \times 1.025}{100} = 14.28 \frac{t}{cm}$

۴- جابجایی در آبخور ۵ متر برابر ۳۵۶۰ تن می‌باشد.

۵- محاسبه *FWA*: $FWA = \frac{disp.}{4 \times TPC} = \frac{3560}{4 \times 14.28} = 62\ mm$

۶- مقدار $\frac{d_S}{48}$ برای این شناور: $\frac{d_S}{48} = \frac{5}{48} = 0.104\ m = 104\ mm$

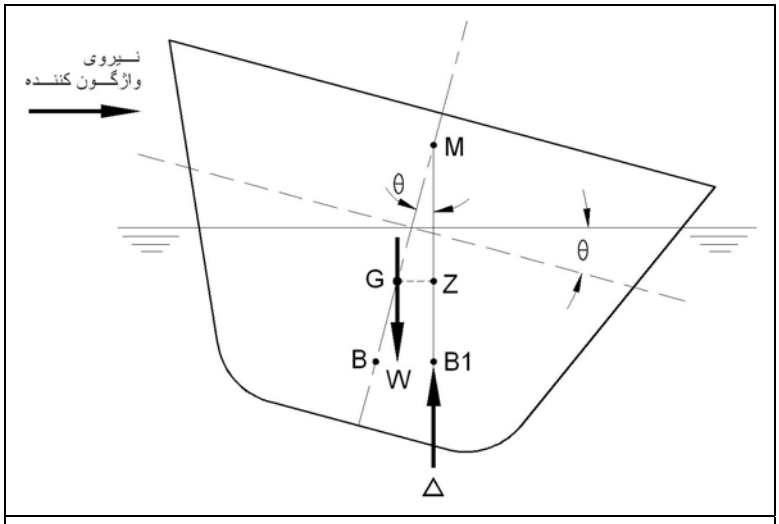
بدین ترتیب می‌توان علامت خط آبخور را برای این شناور به صورت شکل ۲-۷۴ ترسیم کرد:



شکل ۲-۷۴: علامت خط بار شناور مدل ۱

فصل ۱۱: [۱] منحنی GZ و کاربردهای آن

در مهندسی دریایی باید وضعیت پایداری شناور در زوایایی غلتش مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. پایداری شناور با عاملی به نام GZ بیان می‌شود که برای پایدار بودن شناور، مقدار GZ باید مثبت باشد و در صورت صفر یا منفی بودن GZ، شناور دارای پایداری خنثی یا ناپایدار خواهد بود. همانطور که در شکل ۲-۷۵ ملاحظه می‌شود، GZ فاصله افقی بین مرکز ثقل (G) و مرکز بویانسی و در واقع بازوی ممان بین B و G می‌باشد که به این بازو، «بازوی بازگرداننده» گویند. «ممان بازگرداننده»[۲] باعث می‌شود که طبق شکل، اگر شناور به یک سمت به اندازه زاویه θ، غلتش کند، این ممان، شناور را به حالت اولیه خود باز می‌گرداند. $RM = \overline{GZ}.\Delta$



شکل ۲-۷۵: بازوی بازگرداننده (GZ) شناور

بنابراین داریم: RM: ممان بازگرداننده شناور به حالت اولیه GZ: بازوی بازگرداننده شناور به حالت اولیه

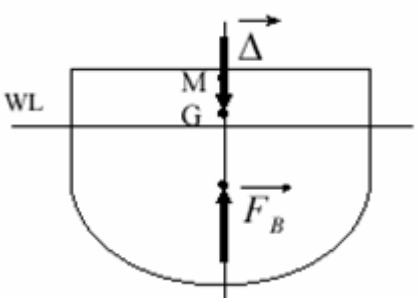
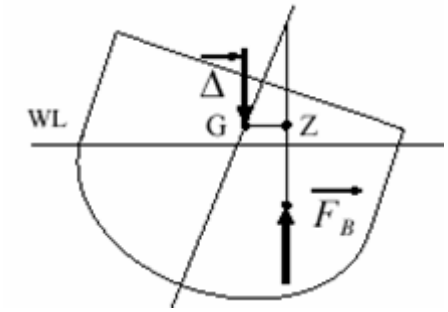
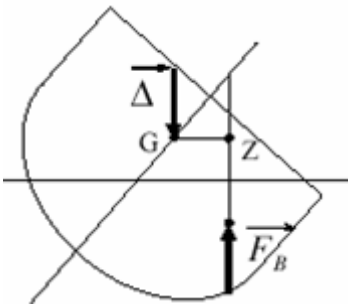
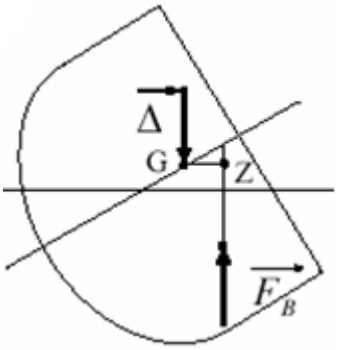
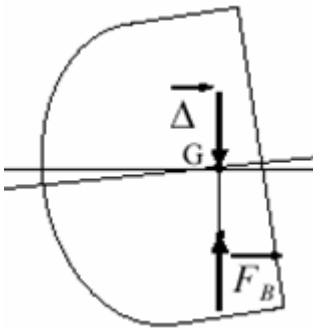
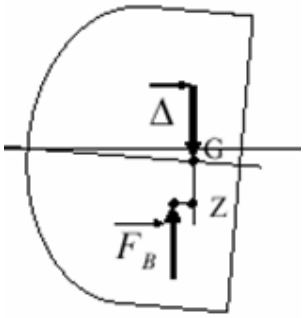
Δ : جابجایی یا همان وزن کل شناور که برابر با بویانسی (F_B) می‌باشد.

در واقع این ممان بازگرداننده، می‌تواند ممان حاصل از نیروهای خارجی (نشان داده شده در شکل) را که باعث غلتش شناور شده است، خنثی می‌کند. ممان بازگرداننده هنگامی مثبت است که GZ مثبت باشد و GZ هنگامی مثبت است که GM مثبت باشد چرا که $GZ = GM.Sin\theta$ (در زوایای غلتش کوچک). مثبت بودن GM نیز به این معناست که M (نقطه متاسنتر) بالای مرکز ثقل (G) باشد. اگر $GM = 0$ باشد در نتیجه $GZ = 0$ و به معنای پایداری خنثی و اگر $GM \langle 0$ باشد، $GZ \langle 0$ است که به معنای ناپایداری شناور است. آنچه اهمیت دارد تغییرات مقدار GZ در زوایای مختلف غلتش (θ) است که اگر این تغییرات روی یک نمودار ترسیم شوند، آن نمودار $GZ - \theta$ می‌باشد که معیار تحلیل پایداری شناور است. برای بررسی این تغییرات شکل۲-۷۶ را به عنوان نمونه مثال در نظر می‌گیریم. این شناور دارای حالت اولیه پایدار است. در حالت A ملاحظه می‌شود که زاویه غلتش برابر صفر $(\theta = 0)$ و شناور دارای حالت اولیه پایدار است چرا که M بالای G قرار دارد یعنی $GM \langle 0$ است ولی مقدار GZ برابر صفر می‌باشد چرا که داریم $GZ = GM.Sin\theta$ و چون $\theta = 0$ است لذا $GZ = 0$. در حالت B شناور به اندازه ۲۵ درجه غلتیده است و در این حالت GZ دارای مقدار مثبتی است . در حالت C شناور تا ۵۰ درجه غلتیده است و در این حالت GZ دارای بیشترین مقدار شده است و از آن پس مقدار GZ کاهش می‌یابد چرا که قسمتی از عرشه وارد آب می‌شود. در حالت D شناور تا زاویه ۷۵ درجه غلتیده که مقدار GZ همچنان کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در حالت ۵ راستای نیروی ثقل و بویانسی بر هم منطبق می‌شوند و $GZ=0$ می‌شود. در این حالت در واقع G و M بر هم منطبق شده‌اند که $GM=0$و در نتیجه $GZ=0$ شده است. در این حالت شناور دارای تعادل خنثی می‌باشد در حالیکه تا قبل از این دارای تعادل پایدار بوده است. هرچه شناور از این حد، بیشتر غلتش کند، وارد محدوده تعادل ناپایدار شده است یعنی بازوی بازگرداننده $GZ \langle 0$ شده و همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، ممان حاصل از B و G متمایل به واژگون کردن شناور است و این ممان به غلتیدن بیشتر شناور کمک می‌کند، در صورتی که در حالتهای B تا D، ممان بازگرداننده، متمایل به بازگرداندن شناور به حالت اولیه خود و متوقف کردن زاویه غلتش است. در این حالت در واقع $GM \langle 0$ و در نتیجه $GZ \langle 0$و لذا ممان بازگرداننده $RM \langle 0$ شده است. در این وضعیت، GZ را «بازوی واژگون کننده»[۳] گویند.

۱- منابع: [2] , [6] , [7]

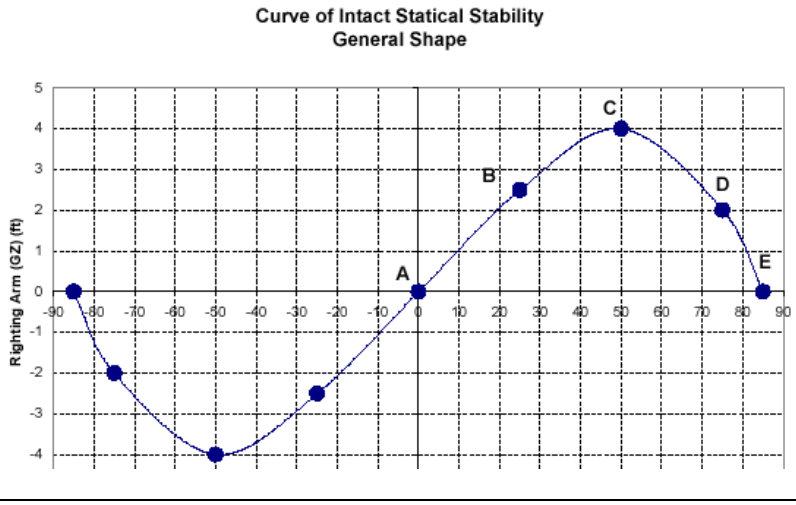
2 - righting moment

3 - Capsizing arm

	
حالت A: حالت بدون غلتش با GZ=0	**حالتB: غلتش ۲۵ درجه با GZ=17 cm**
	
حالت C: غلتش ۵۰ درجه با GZ=30 cm	**حالت D: غلتش ۷۵ درجه با GZ=8 cm**
	
حالت E: غلتش ۸۵ درجه با GZ=0	**حالت F: غلتش بیش از ۸۵ درجه با GZ منفی**
شکل ۲-۷۶: نمایش مقادیر GZ در زوایای غلتش مختلف شناور	

اگر مقادیر بدست آمده GZ در زوایای مختلف θ ترسیم شوند، منحنی $GZ-\theta$را به صورت زیر خواهیم داشت(شکل ۲-۷۷).

اگر شناور به سمت راست غلتش کند، سمت راست نمودار $GZ-\theta$ را داریم و اگر شناور به سمت چپ غلتش کند، سمت چپ نمودار $GZ-\theta$ خواهیم داشت که البته چون سمت راست و سمت چپ شناور با هم قرینه هستند، لذا منحنی $GZ-\theta$ فقط برای سمت راست نمودار ترسیم خواهد شد.



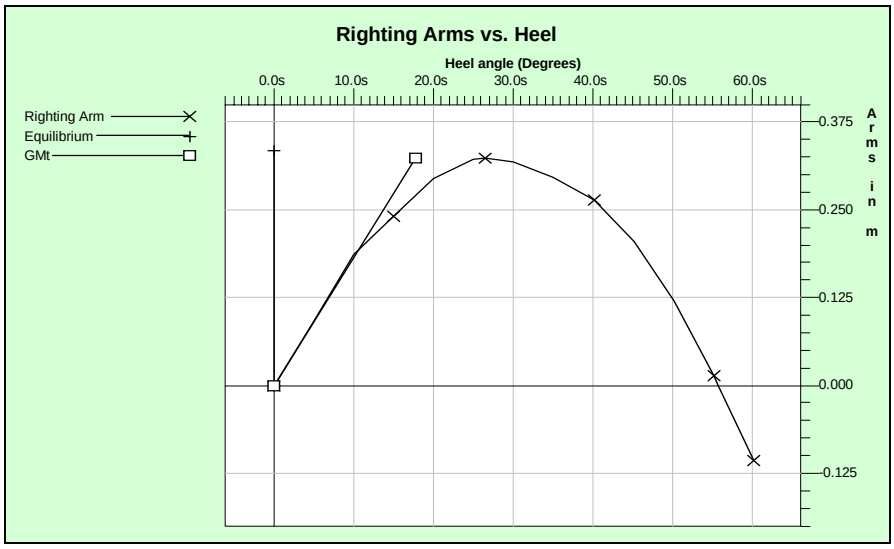
شکل ۲-۷۷: نمایش حالات A تا E در منحنی GZ

مثال: منحنی GZ شناور مدل ۱ را در سناریوی بارگیری ۱ ارائه می‌کنیم.

حل: در این مثال ابتدا جدول و سپس منحنی GZ شناور را در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG= 5.1$ متر ترسیم می‌کنیم. روش محاسبه GZ را در قسمتهای بعد بیان می‌کنیم.

Heel Angle (deg)	Trim Angle (deg)	Righting Arm (m)
0	0.00	0.000
5	0.01f	0.092
10	0.02f	0.188
15	0.06f	0.241
20	0.13f	0.295
25	0.18f	0.323
26.42	0.18f	**0.324**
30	0.17f	0.318
35	0.11f	0.298
40	0.01a	0.265
45	0.16a	0.206
50	0.32a	0.120
55	0.49a	0.014
55.58	0.51a	0.000
60	0.67a	**- 0.107**

ستون دوم بیان کننده شیب (تریم) ایجاد شده در اثر هیل کردن شناور است. در قسمتهای بعد بیان خواهیم کرد که همواره هیل کردن شناور همراه با تریم کردن شناور است(f علامت تریم به سینه و a علامت تریم به پاشنه است). ملاحظه می‌گردد که مقدار GZ در ۵۵/۵۸ درجه صفر شده و از آن پس منفی می‌شود و در زاویه ۲۶/۴۲ درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. منحنی مربوطه به صورت شکل ۲-۷۸ ترسیم می‌گردد. خط مماس شده بر نمودار در محل مرکز مختصات، برای بیان GM ترسیم شده که در قسمت بعد توضیح داده می‌شود.



شکل ۲-۷۸: منحنی GZ شناور مدل ۱

❖ تحلیل‌هایی که براساس منحنی GZ انجام می‌شوند

همانطور که بیان شد منحنی $GZ-\theta$ اساس بسیاری از تحلیل‌های پایداری شناور است و عوامل مختلفی از آن برداشت می‌شود که از جمله مهمترین موارد آن عبارتست از:

۱- محدوده پایداری[1] **:** حداکثر زاویه‌ای که شناور می‌تواند غلتش کند بدون اینکه GZ آن منفی شود، را «محدوده پایداری» گویند. در این محدوده اگر شناور بدون زاویه لیست اولیه باشد، شناور از حالت قائم با $GZ=0$ شروع به غلتش کرده و تا رسیدن مجدد به $GZ=0$ می‌تواند در حالت پایدار غلتش کند. در مثال قبل، محدوده پایداری تا ۸۵ درجه به راست و ۸۵ درجه به چپ می‌باشد. در شناور مدل ۱ نیز محدوده پایداری شناور تا زاویه ۵۵/۵۸ درجه می‌باشد.

۲- حداکثر بازوی بازگرداننده (GZ) : حداکثر بازوی بازگرداننده نیز از عوامل مهم در تحلیل پایداری و نشان دهنده حداکثر ممان واژگون‌کننده‌ای است که شناور می‌تواند بدون واژگون شدن تحمل کند. $(RM)_{max}=(GZ)_{Max}.\Delta$

در مثال قبل، حداکثر بازوی بازگرداننده در نقطه C اتفاق افتاده است. در شناور مدل ۱، حداکثر GZ برابر ۳۲/۴ سانتی‌متر است. از جمله بارگذاری‌های بحرانی دیگر نیروی مداوم باد، بارگذاری‌های نامتقارن، ضربه و آبگرفتگی جانبی می‌باشد که GZ_{max} نقش اساسی در جبران آنها دارد.

۳- زاویه متناظر با GZ_{Max} **:** زاویه‌ای که در آن حداکثر بازوی بازگرداننده را داریم نیز بسیار حائز اهمیت است چرا که از این زاویه به بعد، خیسی عرشه و کاهش بازوی بازگرداننده را داریم که برای پایداری شناور، غلتش بیشتر از این زاویه بسیار خطرناک است. زاویه خیسی عرشه[2] از زوایای مهم در پایداری است که نشان‌دهنده شروع تضعیف پایداری شناور است. زاویه متناظر با حداکثر بازوی بازگرداننده در شناور مدل ۱ برابر ۲۶/۴۲ درجه است.

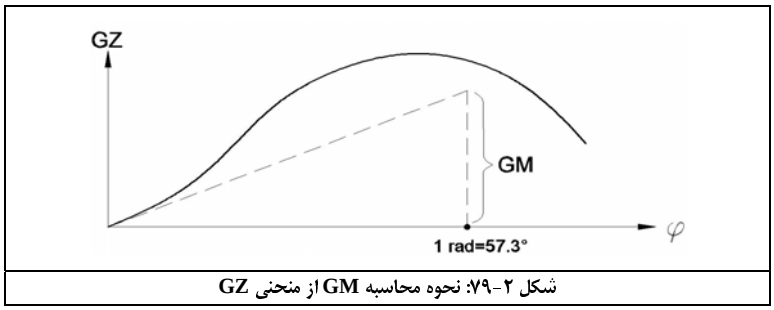
۴- پایداری دینامیکی[3] **:** پایداری دینامیکی عبارت است از کار انجام شده برای غلتیدن شناور تا یک زاویه مشخص. این‌کار از حاصلضرب سطح زیر نمودار $GZ-\theta$ در جابجایی (تناژ) بدست می‌آید که از نظر ریاضی برابر است با:

$$D.S=\Delta.\int GZ.d\theta \qquad \Delta\times(\text{مساحت زیر نمودار } GZ-\theta)$$

اگر سطح کل زیر نمودار $GZ-\theta$ را به دست آوریم، حاصلضرب این سطح در جابجایی (Δ) شناور برابر است با انرژی مقاوم در برابر انرژی واژگون‌کننده شناور.

۵- محاسبه مقدار GM : اگر خطی مماس بر نمودار $GZ-\theta$ در محل $\theta=0$ رسم کنیم (شیب نمودار در $\theta=0$)، و از زاویه یک رادیان ($\theta=1rad$) یک خط عمود رسم کنیم، ارتفاع محل تقاطع این خط مماس با خط عمود، برابر با ارتفاع متاسنتری (GM) می‌باشد که در شکل ۲-۷۹ قابل مشاهده است.

1 - Range of Stability
2 - deck wetness angle
3 - Dynamic Stability



شکل ۲-۷۹: نحوه محاسبه GM از منحنی GZ

بنابراین به روش ترسیمی و با استفاده از نمودار $GZ-\theta$ نیز می‌توان ارتفاع متاسنتری GM را بدست آورد . توجیه محاسباتی آن عبارت است از:

$$GZ = GM.Sin\theta$$

با مشتق‌گیری از این رابطه در $\theta = 0$ داریم:

$$\frac{d\,(GZ)}{d\,\theta} = \frac{d\,(GM)}{d\,\theta}.Sin\,\theta + GM\ .Cos\,\theta$$

در $\theta = \circ$ داریم $Sin\theta = \circ$ و $Cos\theta = 1$ و در نتیجه داریم:

$$\frac{d\,(GZ)}{d\,\theta}\Big|_{\varphi=0} = GM$$

بنابراین شیب نمودار $GZ-\theta$ در $\theta = 0$ برابر GM است.

محدوده تقریبی مقادیر GM برای شناورهای مختلف عبارتست از:

نوع کشتی	مقدار GM (متر)
مسافربری اقیانوس‌پیما	۲/۲-۱/۵
مسافربری آبهای ساحلی	۱/۵-۰/۵
یدک‌کش	۱
کشتی باری	۱-۰/۸
کشتی کانتینر بر	۰/۶-۰/۳

جدول ۲-۴: مقادیر تقریبی GM در انواع کشتی‌ها

❖ **تخمین مقدار *GM* کشتی‌ها از استاندارد *BV***

برای حصول یک تقریب از ارتفاع متاسنتری (GM) می توان از توصیه BV [part B/Chapter 5/Section 3] استفاده کرد:

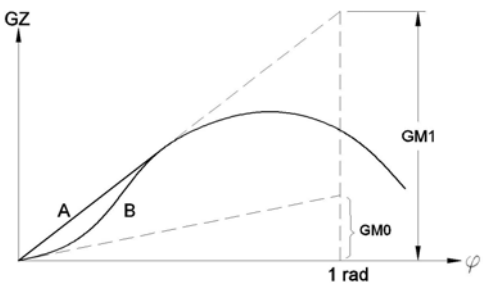
- فله برها و نفتکش ها: GM=0.12B
- کشتی های حمل سنگ معدن : GM=0.16B
- سایر کشتی ها: GM=0.07B

۶- رام یا سرکش بودن شناور : اگر شیب نمودار GZ در نقطه $\theta = 0$ (یا همان GM) بزرگ باشد، کشتی عکس‌العمل شدیدی به نیروهای خارجی خواهد داشت و پریود نوسانات غلتش عرضی کشتی کوچک خواهد بود. از این رو حرکات کشتی بسیار شدید و قوی می‌باشد که در این حالت به این کشتی «سرکش»[1] گویند. اگر این شیب کوچک باشد، در واقع کشتی عکس‌العمل ملایمی به نیروهای خارجی وارد بر شناور خواهد داشت و پریود نوسانات غلتش عرضی کشتی بزرگ خواهد بود. روابط مربوط به محاسبه پریود نوسانات طبیعی و رابطه آن با GM در بخش‌های بعدی ذکر شده است. کشتی با این حرکات آرام و نرم، را کشتی «رام»[2] گویند. بنابراین از روی نمودار GZ می‌توان رام یا سرکش بودن شناور را تشخیص داد. مطابق شکل ۲-۸۰ با توجه به شیب منحنی GZ در محل مبدأ مختصات، شناور A دارای GM بیشتر است و در نتیجه سرکش می‌باشد ولی شناور B دارای GM کمتر و در نتیجه «رام» می‌باشد.

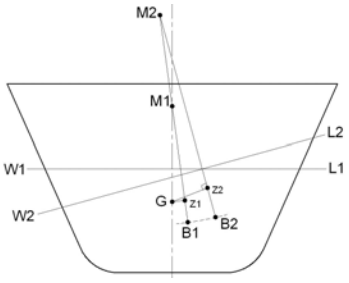
1 - Stiff Ship
2 - tender Ship

❖ مسیر تغییرات Z

Z تصویر مرکز ثقل G بر روی راستای مرکز بویانسی است که از آن بازوی بازگرداننده GZ محاسبه می‌شود. Z در زوایایی غلتش مختلف مطابق شکل۲-۸۱ تغییر می‌کند.



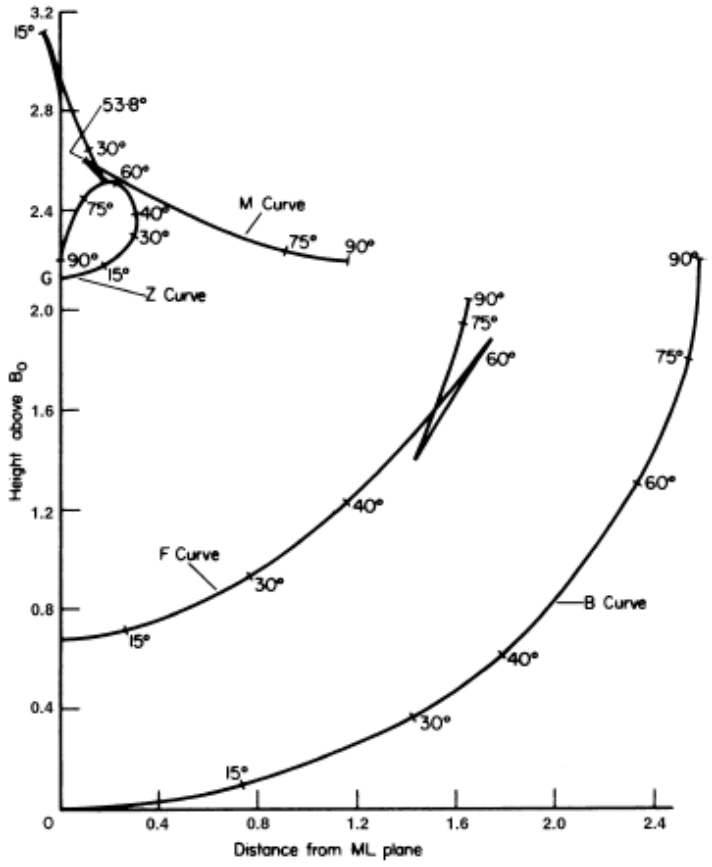
شکل ۲-۸۰: شیب نمودار GZ معرف مقدار GM و رام یا سرکش بودن شناور



شکل ۲-۸۱: موقعیت Z در زوایای غلتش مختلف

مثال : منحنی مسیر تغییرات B ، M ، F و Z برای یک شناور با مشخصات زیر در شکل ۲-۸۲ داده شده است.

Displacement(t)	678
L.B.P(m)	67.5
Beam(m)	7.58
Mean draft (m)	2.23
Block Coefficient	0.595
Prismat Coefficient	0.617
Water Plane Coefficient	0.755



شکل ۲-۸۲: مسیر تغییرات Z، M، F و B از زوایای غلتش صفر تا ۹۰ درجه

در منبع [۳] اطلاعات زیر بصورت نمونه از سه نوع شناور ارائه شده است:

نوع کشتی	KB (m)	KG (m)	KM_T (m)	KM_L (m)	GM_t (m)	GM_L (m)
فریگیت	۲/۵۶	۴/۹۴	۵/۹۲	۲۵۰	۰/۹۸	۲۴۵/۰۶
ناوشکن	۲/۹۵	۶/۹۵	۷/۸	۳۹۶	۰/۸۵	۳۸۹/۰۵
کانتینربر	۵/۶	۱۷	۱۷/۳	۲۸۰	۰/۳	۲۶۳

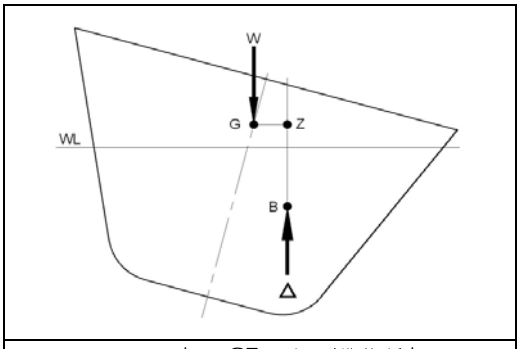
❖ محاسبه GZ به روش ترسیمی

اگر بخواهیم منحنی GZ را با استفاده از فایل سه بعدی کامپیوتری استخراج کنیم مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- مطابق مطالب بخش‌های قبل ابتدا موقعیت خط آبخور را در زاویه غلتش مورد نظر ترسیم می‌کنیم. گفتیم که در زوایای غلتش بزرگ دیگر خطوط آبخور در خط مرکزی (نقطه o) همگرا نیستند. خط آبخور به گونه‌ای جابجا می‌شود که باز هم جابجایی شناور ثابت باشد و بخش زیر آب رفته عرشه جبران گردد (شکل ۲-۸۳). بدست‌آوردن مقدار جابجا شدن خط آبخور باید به صورت سعی و خطا بدست آید و مبنای سعی و خطا در یک زاویه هیل معین، رسیدن به تناژ اولیه است.

۲- در موقعیت بدست آمده خط آبخور، محل مرکز بویانسی (B) را معین می‌کنیم.

۳- از مرکز ثقل(G) و مرکز بویانسی(B) دو خط موازی عمود بر خط آبخور جدید رسم می‌کنیم. فاصله این دو خط برابر GZ می‌باشد.



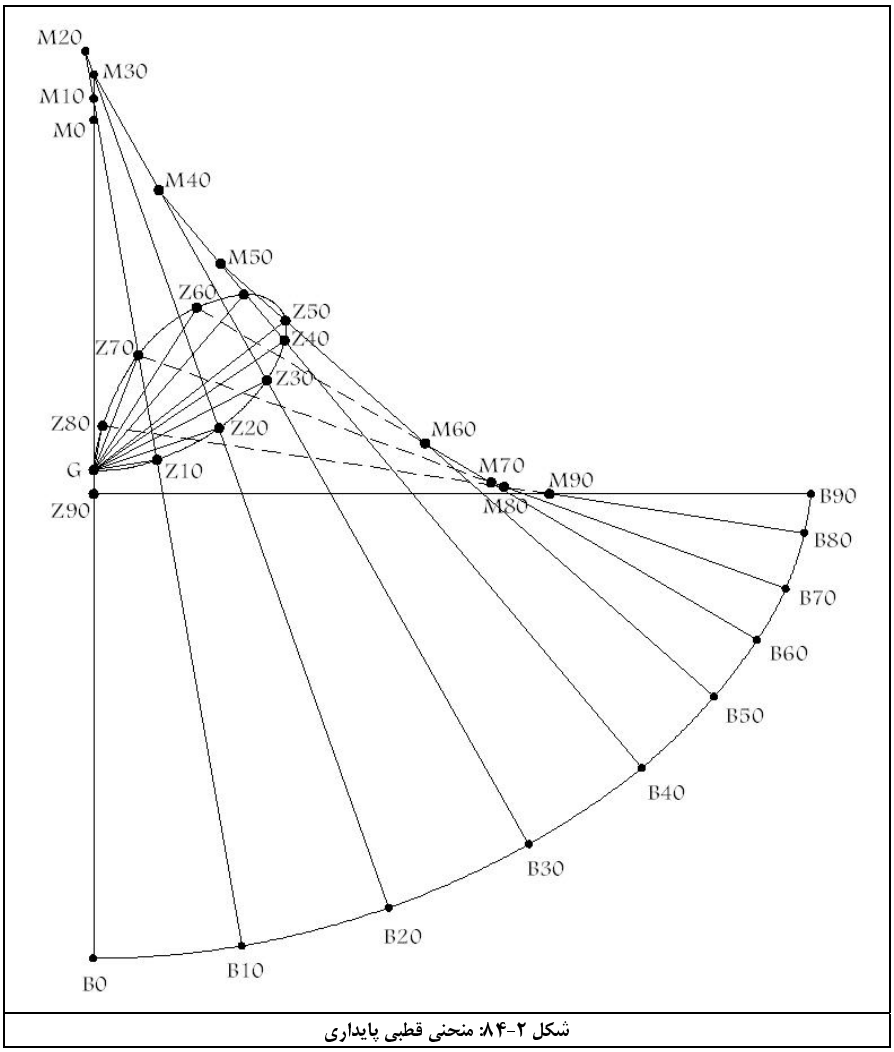
شکل ۲-۸۳: محاسبه GZ به روش ترسیمی

❖ منحنی قطبی پایداری و نمایش سه بعدی مکان هندسی Z,M,B

غلتش عرضی شناور باعث تغییر محل مرکز متاسنتر و مرکز بویانسی می‌شود. مکان هندسی این نقاط در یک صفحه قرار ندارد بلکه یک منحنی فضایی (سه بعدی) می‌باشد. این وضعیت را می‌توان در شکل ۲-۸۴ ملاحظه نمود. مکان هندسی B یک منحنی به شعاع BM می‌باشد که مرکز انحنای آن M بوده و بطور لحظه‌ای تغییر می‌کند. از آنجا که شعاع BM و مکان هندسی نقطه B در یک صفحه قرار ندارند، مکان هندسی M نیز خارج از صفحه بوده و یک منحنی فضایی است.

از آنجا که در رابطه $BM = \frac{I}{\nabla}$ هیچ یک از عوامل ممان دوم سطح و حجم بویانسی نمی‌توانند منفی باشند لذا شعاع انحنای BM هیچگاه منفی نمی‌باشد و مکان هندسی B همواره یک منحنی مقعر است. شعاع انحنای BM را شعاع متاسنتری نیز گویند یعنی شعاعی که یک طرف آن همواره منطبق بر مرکز متاسنتری است. بنابراین شعاع متاسنتری از یک سمت عمود بر منحنی مکان هندسی B و از طرف دیگر مماس بر منحنی مکان هندسی M می‌باشد. حال با در نظر داشتن مرکز ثقل G می‌توانیم بازوی بازگرداننده GZ را بصورت سه بعدی نمایش دهیم. اگر در هر زاویه غلتشی، از نقطه G خطی عمود بر راستای امتداد یافته B (در واقع امتداد BM) ترسیم کنیم و پای عمود را Z بنامیم، مقدار بازوی بازگرداننده GZ بدست می‌آید، بدین ترتیب منحنی مکان هندسی Z یک منحنی سه بعدی خواهد بود که بدان « منحنی قطبی پایداری»[1] گفته می‌شود. سرانجام به دلیل اینکه نمایش منحنی‌های سه بعدی B , M , Z بر روی یک صفحه دشوار است، لذا معمولا در کتب دریایی، این منحنی‌ها به صورت دو بعدی نمایش داده می‌شوند.

1 - Polar diagram of stability



شکل ۲-۸۴: منحنی قطبی پایداری

❖ مؤلفه‌های استاندارد منحنی GZ

منحنی *GZ*، معیار اصلی برای بررسی میزان پایداری شناور مطابق قوانین استاندارد می‌باشد. این قوانین مطابق قانون خط بار سال ۱۹۶۸ می‌باشد که از سوی *IMO* اعمال شده و توسط کلیه مؤسسات استاندارد کشتی‌سازی باید به صورت اجباری اعمال شود. هر شناوری باید در تمام حالات بارگیری بتواند قوانین استاندارد زیر را ارضا کند. در غیر اینصورت با تغییر چیدمانی و سناریوی بارگیری شناور باید با کاهش *KG* ، مؤلفه‌های استاندارد زیر را ارضا کرد:

الف- مساحت زیر منحنی *GZ*

مساحت زیر منحنی GZ نباید کمتر از مقادیر زیر باشد. توجه شود که واحد GZ بر حسب متر و زاویه بر حسب رادیان می‌باشد *(1 rad = 57.3 deg)*.

۱) ۰/۰۵۵ متر- رادیان تا زاویه ۳۰ درجه

۲) ۰/۰۹ متر- رادیان تا زاویه ۴۰ درجه یا تا زاویه‌ای که یکی از سوراخ‌های غیر آب‌بند بدنه داخل آب می‌شود (در صورتی که این زاویه کمتر از ۴۰ درجه باشد).

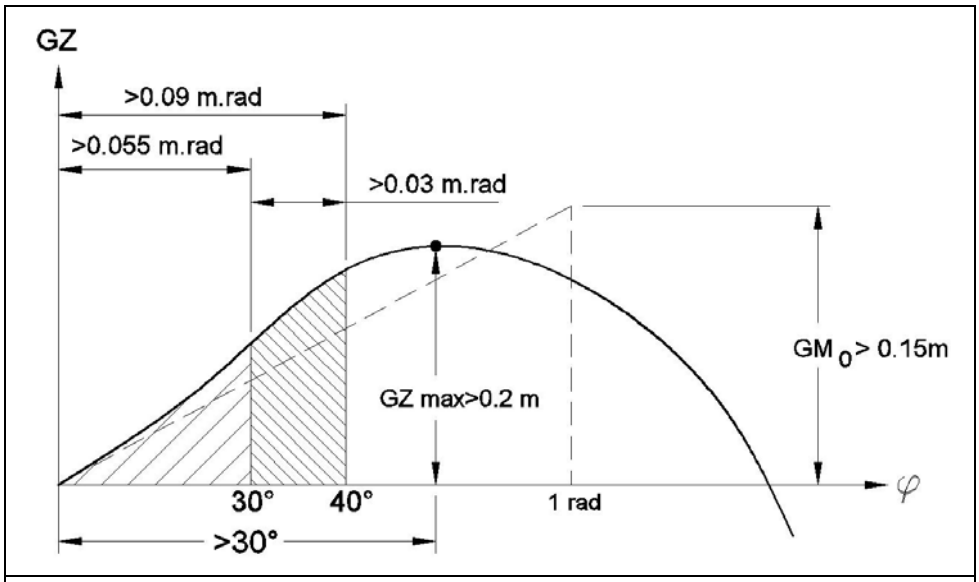
۳) ۰/۰۳ متر- رادیان بین زاویه ۳۰ تا ۴۰ درجه (یا زاویه خیسی عرشه)

ب) مقدار *GZ* نباید در زاویه ۳۰ درجه یا بزرگتر از آن، کمتر از ۰/۲ متر باشد.

ج) حداکثر مقدار *GZ* نباید در زاویه‌ای کمتر از ۳۰ درجه اتفاق بیافتد.

د) ارتفاع متاسنتری عرضی اولیه (GM_0) نباید کمتر از ۰/۱۵ متر باشد.

این مؤلفه‌های استاندارد را می‌توان در شکل ۲-۸۵ ملاحظه کرد.



شکل ۲-۸۵: مولفه‌های استاندارد منحنی GZ

برای کشتی‌هایی که الوار بر روی عرشه حمل می‌کنند، ارتفاع متاسنتری عرضی اولیه نباید کمتر از ۰/۰۵ متر باشد.

❖ استانداردهای مختلف پایداری شناورها

برای بررسی پایدار بودن شناور، استانداردهای مختلفی وجود دارد که بر حسب نوع شناور می‌توان یک یا چندین استاندارد را انتخاب کرد. برای آشنایی بیشتر و جلوگیری از برداشتهای متفاوت، اصل متن استانداردها ارائه شده‌اند.

1) IMO A167 Intact Stability criteria
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
Maximum GZ to be at an angle > 25 degrees
Initial GM to be at least 0.15 metres

2) IMO 749 Intact Stability Criteria for non - passenger
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
Initial GM to be at least 0.15 metres
GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees
Max GZ to be at an angle > 30 degrees
IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)
IMO Weather Criterion (Areas)

3) IMO A749 Intact stability Criteria Passenger
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
Initial GM to be at least 0.15 metres
GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees
Max GZ to be at an angle > 30 degrees
Angle of heel for passenger crowding < 10 degrees
Angle of heel for turning < 10 degrees
IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)
IMO Weather Criterion (Areas)

4) MARPOL 73/78 (Oil tankers)
Final waterline below down-flood point & within 20 deg. range
Final waterline below prot. openings & within 20 deg. range
Final equilibrium angle for DECK EDGE IMMERSED < 25 degrees
Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 30 degrees

Range of positive GZ to be > 20 degrees
Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
Area under GZ curve within 20 degree range > 0.0175

5) Load Line (Oil Tankers > 150m, bulk carriers > 100m)
Final waterline below down-flooding point
Final equilibrium angle for DECK EDGE IMMERSED < 15 degrees
Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 17 degrees
GM at least 0.05m in upright position after flooding

6) Passenger Ship Rules (S. I. No. 1216)
Margin line not to be immersed
GM at least 0.05m in upright position after flooding
Final equilibrium angle for unsymmetrical flooding < 7 degrees
Range of positive GZ to be > 7 degrees
Maximum GZ to be at least 0.05 metre within positive range
Final equilibrium angle for unsymmetrical flooding < 20 degrees
Range of positive GZ to be > 5 degrees
Maximum GZ to be at least 0.03 metre within positive range

7) RO-RO Ship Rules
Margin line not to be immersed
GM at least 0.05m in upright position after flooding
Final equilibrium angle for unsymmetrical flooding < 7 degrees
Range of positive GZ to be > 7 degrees
Maximum GZ to be at least 0.05 metre within positive range
Range of positive GZ to be > 5 degrees
Maximum GZ to be at least 0.03 metre within positive range

8) 1990 Passenger Ship Rules (One compartment flooding)
Range of positive GZ to be > 15 degrees
Area under GZ curve up to 22 degrees or down-flood > 0.015
Maximum GZ to be at least 0.10 metres within positive range
GM at least 0.05m in equilibrium position after flooding
Range of positive GZ to be > 7 degrees
Maximum GZ to be at least 0.05 metres within positive range

9) 1990 Passenger Ship Rules (Two or more comp. flooding)
Range of positive GZ to be > 15 degrees
Area under GZ curve up to 27 degrees or down-flood > 0.015
Maximum GZ to be at least 0.10 metres within positive range
GM at least 0.05m in equilibrium position after flooding
Range of positive GZ to be > 7 degrees
Maximum GZ to be at least 0.05 metres within positive range

10) Chemical Tankers IMO A212 for L > 150
Range of positive GZ to be > 20 degrees (Final stage)
Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
Range of positive GZ to be > 20 degrees (Final stage)
Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 17 degrees
Unprotected openings not immersed within 20 deg. range

11) NES 109 Intact stability criteria
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.080
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.048
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.133
Maximum GZ to be at least 0.30 metre
Maximum GZ to occur above 30 deg. heel
Initial GM to be at least 0.30 metres
Wind heeling: A1 >= 1.4 x A2
Wind heeling: GZc < 60% GZmax
Angle of heel due to beam winds less than 30 degrees
High speed turning : Max. heel angle 20
High speed turning : GZc/GZmax < 0.6
High speed turning : Area A > 0.4 of total area
Lifting of heavy weights : Max. heel angle 15
Lifting of heavy weights : GZc/GZmax < 0.5

Lifting of heavy weights : Area A > 0.5 of total area
Crowding of personnel : Max. heel angle 15
Crowding of personnel : GZc/GZmax < 0.6
Crowding of personnel : Area A > 0.4 of total area
Towing : Max. heel angle 15
Towing : GZc/GZmax < 0.6
Towing : Area A > 0.4 of total area
Ship must not loll - GM at 0 must be positive
Angle of vanishing stability less than 70 degrees

12) IMO A469 Intact Stability criteria for Offshore Supply Vessels
Area under GZ curve up to position of max GZ
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
Maximum GZ to be at an angle > 15 degrees
Initial GM to be at least 0.15 metres

13) SPECIAL PURPOSE SHIPS IMO A534
Final waterline below down-flooding point
Final equilibrium angle < 7 degrees
GM at least 0.05m in upright position after flooding
Range of positive GZ to be > 20 degrees
Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range

14) USSR 1987 PASSENGER SHIPS
Final equilibrium angle for DECK EDGE IMMERSED < 15 degrees
Final equilibrium angle for DECK EDGE NOT IMMERSED < 17 degrees
Range of positive GZ to be > 20 degrees
Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
GM at least 0.0m in upright position after flooding
Deck edge not immersed at equilibrium angle

15) GAS CARRIERS
Final equilibrium angle < 30 degrees
Range of positive GZ to be > 20 degrees
Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
Area under GZ curve within 20 degree range > 0.0175
Final waterline below down-flooding point

16) Grain criteria
Initial GM to be at least 0.30 metres
Angle of heel grain heeling moments <= 12 degrees
Residual dynamic stability
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
Maximum GZ to be at an angle > 25 degrees

17) Norwegian Fishing Vessel
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
Maximum GZ to be at least 0.20 metre at 30 degrees or above
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
Initial GM to be at least 0.15 metres
GZ between 40 and 65 degrees > 0.1
Range of positive GZ at least 80 degrees

18) CHEMICAL TANKERS IMO A212 L < 150
Range of positive GZ to be > 20 degrees (Final stage)
Maximum GZ to be at least 0.1 metre within the 20 degree range
Unprotected openings not immersed within 20 deg. range
Maximum Value of equilibrium angle < 25 degrees

19) NES 109 Intact with ice
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.051
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.085
Maximum GZ to be at least 0.24 metre
Maximum GZ to occur above 30 deg. heel
Initial GM to be at least 0.15 metres
Wind heeling: A1 >= 1.4 x A2
Wind heeling: GZc < 60% GZmax
Angle of heel due to beam winds <= 30 degrees
Ship must not loll - GM at 0 must be positive
Angle of vanishing stability <= 70 degrees

20) German Ministry of Transport for L <= 100
Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055
Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03
Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09
Initial GM to be at least 0.15 metres
Positive range of stability > 50 degrees
For stability range between 50 & 60 dgrs GZ increased by 10mm < 60 dgrs
Par 3.2.8 Ships with large wind lateral plan

21) Mobile Offshore Drilling Units
MODU Intact Stability Weather Criterion

23) ABS criterion for Submarine & Submersible at underwater

$$BG_{\min} = \frac{n.w.N.d}{W.\tan q}$$

Where:
n = 0.1 (**This represents 10 percent of the people aboard moving simultaneously**)
w = 79.5 kg per person (**for passenger submersibles, w may be taken as 72.5 kg per person**)
d = the interior length of the main cabin accessible to personnel, in mm.This should not include machinery compartments if they are separated from the main cabin with a bulkhead.
N = total number of people onboard the submersible.
W = the total weight (**in units consistent with w**) of the fully loaded submersible, not including soft ballast.
q = 25 degrees (**representing the maximum safe trim angle. A smaller angle may be required if battery spillage or malfunction of essential equipment would occur at 25 degrees. This assumes that each person has an individual seat that is contoured or upholstered so that a person can remain in it at this angle**).

امام علی (ع): نیکی به مردم برترین گنج است.

فصل ۱۲ [۱]: تحلیل حالات مختلف پایداری شناور

هر جسم سه حالت مختلف تعادل و پایداری دارد:

۱- پایداری مثبت (تعادل پایدار): جسم با انحراف از حالت اولیه باز هم به حالت اول خود باز می‌گردد.

۲- پایداری خنثی (تعادل خنثی): جسم با هر مقدار انحراف، در همان میزان انحراف باقی می‌ماند (نه به حالت اولیه بازمی‌گردد و نه میزان انحراف بیشتر می‌شود).

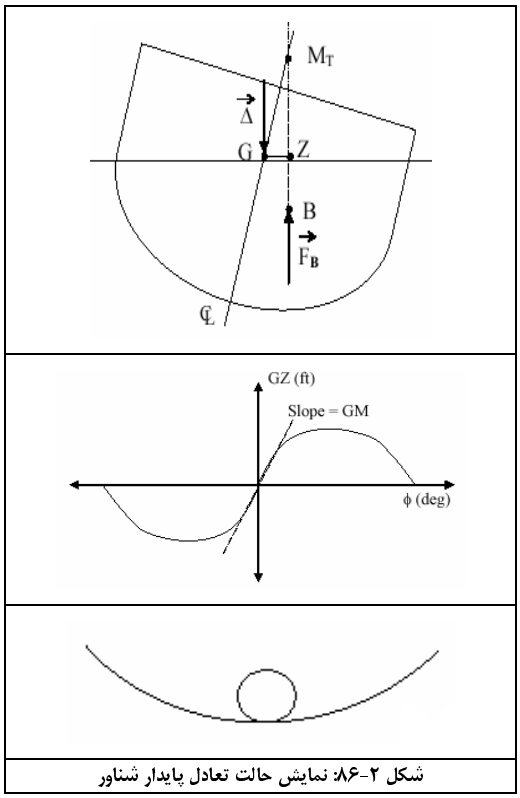
۳- پایداری منفی (تعادل ناپایدار): جسم با اندکی انحراف از حالت اولیه، پایداری خود را از دست می‌دهد و واژگون می‌گردد (میزان انحراف آن از حالت اولیه به سرعت افزایش می‌یابد).

شناور نیز در داخل آب دارای این سه حالت پایداری می‌تواند باشد. مشخصه پایداری در شناور به وسیله دو پارامتر M (نقطه متاسنتر) و G (مرکز ثقل) و موقعیت آنها نسبت به یکدیگر تعریف می‌شود.

هر یک از این حالات عبارتند از:

الف) پایداری مثبت شناور:

در هر شناوری که M بالای G باشد، این شناور دارای پایداری مثبت است یا به عبارت دیگر شناور تحت بارهای خارجی تنها در صورتی به حالت اولیه خود بازمی‌گردد که $GM > 0$ باشد. پایداری را می‌توان از روی نمودار $GZ - \theta$ نیز بررسی کرد. اگر شیب نمودار در مبدأ مختصات مثبت باشد شناور دارای حالت پایدار است یعنی در واقع $GM > 0$ است. در شکل ۲-۸۶ حالت پایداری مثبت شناور و منحنی $GZ - \theta$ آن نشان داده شده است.



شکل ۲-۸۶: نمایش حالت تعادل پایدار شناور

از قسمت سوم این شکل می‌توان درک نمود که پایداری مثبت یک شناور به مثابه یک گوی داخل گودال است که با انحراف گوی از موقعیت اولیه، باز هم به موقعیت اول خود باز می‌گردد. کشتی دارای تعادل پایدار نیز بر اثر برخورد امواج یا سایر نیروهای خارجی از موقعیت اولیه خود به اندازه زاویه φ منحرف می‌شود ولی باز هم به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد.

ب) پایداری خنثی شناور :

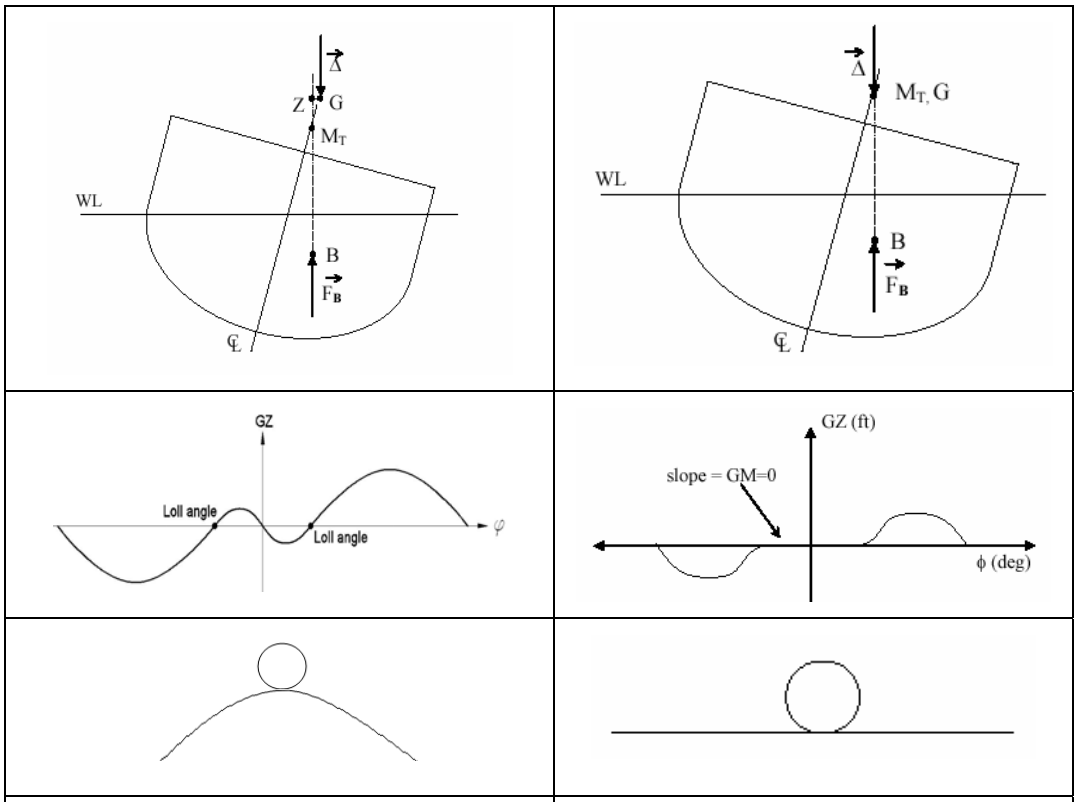
در این حالت شناور نسبت به تغییر وضعیت اولیه خود بی‌تفاوت است یعنی اگر شناور بر اثر نیروهای خارجی به اندازه زاویه کوچک θ از موقعیت اولیه خود منحرف شود، در همان زاویه θ باقی می‌ماند مگر اینکه نیروی مخالف دیگری آن را به موقعیت اولیه خود بازگرداند. این حالت موقعی پیش می‌آید که M , G بر هم منطبق باشند یعنی $GM = 0$ باشد. این حالت از پایداری را می‌توان در شکل ۲-۸۷ ملاحظه کرد. در قسمت سوم این شکل می‌توان پایداری خنثی را با مفهوم گوی بر روی یک صفحه تخت درک نمود. در نمودار $GZ - \theta$ نیز می‌توان پایداری خنثی را به این صورت ملاحظه کرد که شیب این نمودار در نقطه $\theta = 0$ برابر صفر یا به عبارت دیگر $GM = 0$ می‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد که در حالت پایداری خنثی، بازوی بازگرداننده (GZ) برای بازگرداندن شناور به حالت اولیه وجود ندارد لذا شناور در زاویه انحراف کوچک θ باقی می‌ماند.

ج) پایداری منفی شناور:

در این حالت شناور در اثر کوچکترین انحراف از موقعیت اولیه خود که ممکن است بر اثر باد ، موج یا هر نیروی خارجی دیگر باشد، دچار زوایای غلتش زیاد می‌گردد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که مرکز ثقل (G) بالای مرکز متاسنتر (M) واقع گردد یا به عبارت دیگر $GM < 0$ باشد. این حالت در نمودار $GZ - \theta$ با شیب منفی منحنی در نقطه $\theta = 0$ بیان می‌گردد که این شیب منفی در واقع نشان دهنده مقدار منفی GM می‌باشد. نکته مهم در اینجاست که منفی بودن GM صرفاً به معنای واژگون شدن شناور نیست بلکه شناور در زاویه‌ای که زاویه «لُل»[۲] نامیده می‌شود به صورت کج می‌ایستد. البته اگر زاویه لل به حدی زیاد باشد که باعث وارد شدن آب به داخل شناور شود، شناور واژگون می‌گردد. در شکل۲-۸۸ می‌توان این حالت از پایداری را مشاهده کرد.

۱- منبع: [7]

2 - Loll angle



شکل ۲-۸۷: نمایش تعادل خنثی شناور | شکل ۲-۸۸: نمایش حالت تعادل ناپایدار شناور

قسمت سوم این شکل نشان دهنده گوی بر روی یک صفحه محدب است و نشان می‌دهد که جسم با کوچکترین انحراف از حالت اولیه خود، پایداری را به کلی از دست می‌دهد و دچار انحراف زیاد از موقعیت اولیه خود می‌شود. بنابراین شرط پایداری شناور این است که:

M بالای G باشد (GM مثبت باشد)

و

ربطی به موقعیت B و G نسبت به هم ندارد.

پرسش: یک کشتی پس از آب‌اندازی در یک زاویه کجی اولیه قرار گرفته است. چگونه می‌توان تشخیص داد که این زاویه، لیست است یا لل؟

پاسخ: کشتی را با یک نیروی خارجی به سمت مخالف کج کرده و رها می‌کنیم. اگر کشتی به حالت اولیه باز گشت، این زاویه، زاویه لیست است. اگر کشتی در همان وضعیت ثانویه باقی ماند، زاویه لل است چراکه زاویه لل معمولا در یک زاویه یکسان مثبت و منفی (به سمت چپ و راست) متمایل می‌شود مثلا ۳± درجه. حال اگر زاویه کجی هم به سمت چپ و هم به سمت راست وجود داشته ولی برابر نباشند، کشتی هم دارای زاویه لیست و هم زاویه لل است مثلا اگر ۵ درجه به راست و ۳ درجه به چپ باشد یعنی کشتی دارای دارای زاویه لل ۳± به طرفین و زاویه لیست ۲ درجه به راست است.

❖ پایداری بر روی امواج:

پایداری شناور در حالت *hogging* و *sagging* با حالت آب آرام متفاوت است. شناور در حالت *hogging* دارای یک تکیه‌گاه است و پایداری آن کمتر از حالت *sagging* (که دارای دو تکیه‌گاه است) می‌باشد.

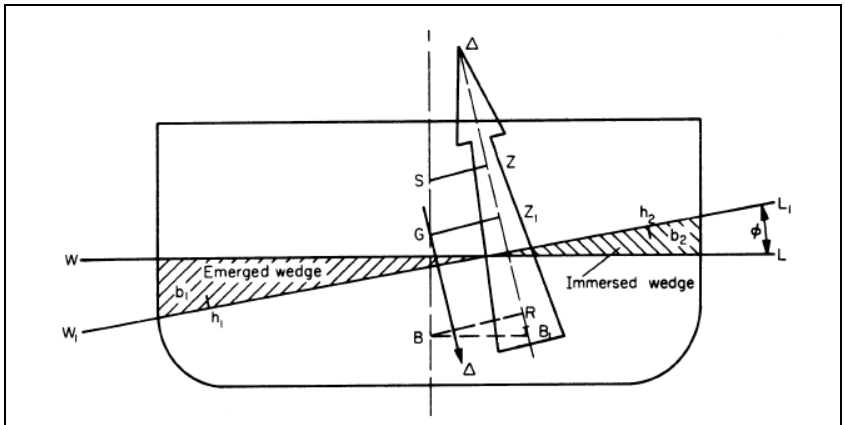
فصل ۱۳ : محاسبه مقدار GZ با روابط آتوود ، پروهسکا و بارنهارت[۱]

مقدار GZ در زوایای غلتش کوچک (کمتر از ۸ درجه) با تقریب به صورت مقابل محاسبه می‌شود: $GZ = GM.Sin\varphi$

در زوایای غلتش بزرگ، محاسبه مقدار GZ کار دشواری است که به کمک برنامه‌های کامپیوتری باید انجام شود چرا که اولاً در زوایای بزرگ غلتش، شناور علاوه بر رول، دچار تریم هم می‌شود که البته این پدیده در محاسبات GZ معمولاً لحاظ نمی‌شود چرا که تأثیر کمی بر مقدار آن دارد. ثانیاً در زوایای بزرگ غلتش، حجم‌های بیرون آمده و داخل رفته در آب با یکدیگر قرینه نیستند و در واقع نقطه متاسنتری نیز بر خط مرکزی قرار ندارد و در زوایای غلتش مختلف نیز نقطه ثابتی نیست که بتوان با تشکیل مثلث قائم‌الزاویه، رابطه قبل را بکار برد. برای محاسبه مقدار GZ در زوایای غلتش بزرگ، روشهای مختلفی ارائه شده است که مهمترین آنها روابط «آتوود» ، پروهسکا و بارنهارت می‌باشند:

❖ روش « آتوود»[۲]

نتیجه روابط زیر که «رابطه آتوود» نامیده می‌شود را می‌توان برای محاسبه GZ بکار برد. با توجه به شکل ۲-۸۹، با فرض ثابت ماندن جابجایی در آبخور WL و W_1L_1، حجم مثلث‌های شناوری فرو رفته و بیرون آمده از آب، باید برابر باشند. فرض کنید:



شکل ۲-۸۹: محاسبه GZ در روش آتوود

δ : نیروی بویانسی مربوط به مثلث‌های شناوری فرو رفته یا بیرون آمده

b_1, b_2 : مراکز حجم مثلث‌های شناوری فرو رفته یا بیرون آمده

h_1, h_2 : پای عمودهای گذرانده شده از b_1, b_2 بر روی خط آبخور W_1L_1

$R = B_1$: پای عمود گذرنده از B روی خط اثر نیروی بویانسی گذرنده از

بنابراین خواهیم داشت: $\Delta.\overline{BR} = \delta.\overline{h_1h_2}$

ممان بازگرداننده‌ای که روی کشتی اثر می‌کند طبق رابطه زیر داده می‌شود:

$$\Delta.\overline{GZ_1} = \Delta.\overline{BR} - \Delta.\overline{BG}.Sin\varphi = \Delta\left[\frac{\delta}{\Delta}\overline{h_1h_2} - \overline{BG}Sin\varphi\right]$$

این رابطه به «رابطه آتوود» مشهور است. برای محاسبه $\overline{h_1h_2}$ در مرجع [2] روش‌های مختلفی از جمله روش «بارنس»[۳] و روش ریچ[۴] پیشنهاد شده است.

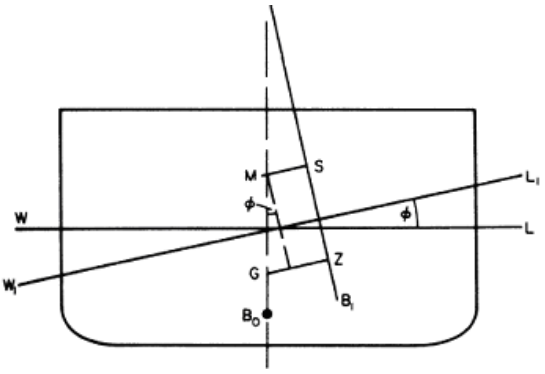
❖ روش «پروهسکا»

روش دیگری که براساس تجربه به دست آمده است و روش تقریبی مناسبی می‌باشد، روش «پروهسکا»[۵] می‌باشد که مطابق شکل ۲-۹۰ داریم:

$$\overline{GZ} = \overline{GM}.Sin\varphi + \overline{MS}$$

۱- [2] , [6]

2 - Atwood
3 - Barnes
4 - Reech
5 - Prohaska



شکل ۲-۹۰: محاسبه GZ با روش پروهسکا

مقدار $\overline{MS}$ «بازوی پایداری باقیمانده»[1] نامیده می‌شود[2] که از رابطه زیر به دست می‌آید: $C_{RS} = \frac{\overline{MS}}{BM_0}$

مقدار BM_0 همان شعاع متاسنتری اولیه (حالت قائم) می‌باشد و مقدار C_{RS} براساس تجربه از تعداد زیادی از کشتی‌ها تا زاویه ۳۰ درجه از یکی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$C_{RS} = 0.8566 - 1.2262.\frac{\overline{KB}}{T} - 0.035.\frac{B}{T}$$

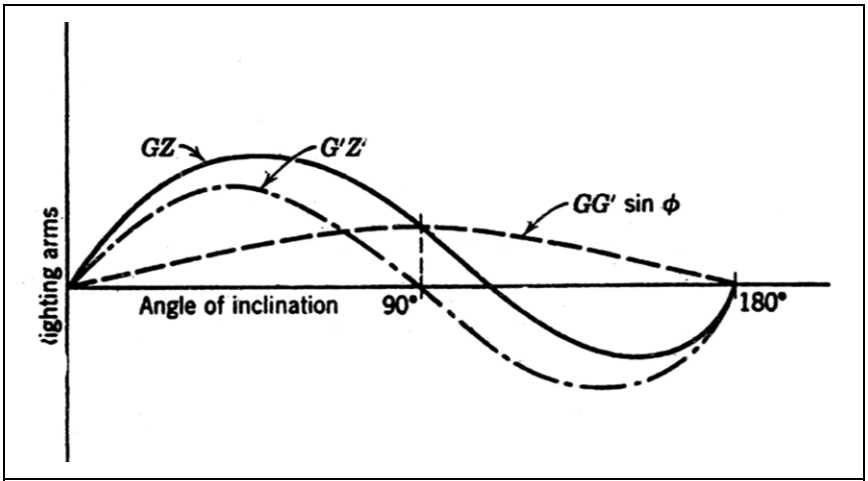
$$C_{RS} = -0.1859 - 0.0315\frac{B}{T} + 0.3526\ C_M$$

که B عرض، T آبخور و C_M ضریب مقطع میانی است.

❖ روش « بارنهارت»

روش جدید «بارنهارت» با ارائه روابط ریاضی، تخمین نسبتا" دقیقی از مقادیر بازگرداننده جهت ترسیم منحنی $GZ - \varphi$ ارائه می‌کند. این روش نتیجه تز دکترای *R.E.Barnhart* و *A.M.Thewlis* از دانشگاه «ماساچوست» می‌باشد. این روابط برای بیش از دهها شناور از انواع مختلف و ابعاد مختلف اعمال شده‌اند و نتایج با منحنی اصلی مقایسه شده‌اند که نتایج بسیار خوب و دقیقی را به دنبال داشته است.

منحنی GZ یک شناور مطابق شکل ۲-۹۱ را در نظر بگیرید که به شکل یک منحنی غیر سینوسی است. منحنی $G'Z'$ را که یک منحنی سینوسی است و از نقطه ۹۰ درجه عبور می‌کند را نیز روی نمودار در نظر می‌گیریم. اگر فاصله عمودی منحنی GZ از نقطه زاویه ۹۰ درجه برابر GG' باشد، منحنی $GG'.Sin\varphi$ را در نظر می‌گیریم که معادل جابجایی عمودی مرکز ثقل یا همان اصلاح سینوسی منحنی بازوی بازگرداننده است.



شکل ۲-۹۱: اصلاح سینوسی منحنی GZ

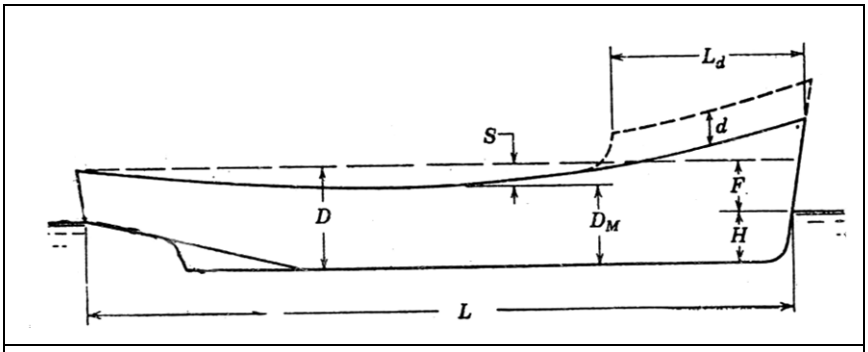
1 - residuary stability lever

۲- مفهوم دیگری از «بازوی پایداری باقیمانده» که در مهندسی دریایی بکار می‌رود در قسمت پایداری دینامیکی بیان خواهد شد.

اگر مقدار این اصلاح سینوسی از منحنی GZ کم شود، منحنی $G'Z'$ بدست می‌آید یعنی: $GZ = G'Z' + GG'.Sin\varphi$ (۱)
در روش بارنهارت، مقدار $G'Z'$ محاسبه می‌شود و در پایان مسئله با $GG'.Sin\varphi$ جمع شده و مقدار نهایی بازوی بازگرداننده یعنی GZ بدست می‌آید. مقادیر ارائه شده در این روابط بر اساس واحد انگلیسی می‌باشد بجز مقدار جابجایی که بر حسب تن می‌باشد (و نباید پوند جاگذاری شود).

- معرفی پارامترها

پارامترهای بکارگرفته شده در این روش در این قسمت بیان می‌گردد که بخشی از این پارامترها را می‌توان در شکل ۲-۹۲ ملاحظه نمود:



شکل ۲-۹۲: پارامترهای بکار رفته در فرمولها

L: طول آبخور
B: حداکثر عرض بدنه در بالا یا پائین خط آبخور
B_W: حداکثر عرض بدنه صفحه آبخور
H: آبخور متوسط در آبخور طراحی
D_M: حداقل عمق بدنه یعنی عمق از نقطه پائین خط شیب عرشه
S_F: ارتفاع انحنای شیب در سینه
S_A: ارتفاع انحنای شیب در پاشنه
Δ_0: جابجایی در آبخور طراحی
L_d: طول سوپر استراکچر که تا کناره‌های بدنه کشیده شده باشد
d: ارتفاع سوپراستراکچر که تا کناره‌های بدنه کشیده شده باشد
$C_B = \frac{\nabla_0}{L.B_W.H}$: ضریب بلوکی
C_W: ضریب صفحه آبخور در آبخور H
C_X: ضریب مقطع میانی در آبخور H
C_{PV}: ضریب منشوری عمودی در آبخور H
$A_0=C_W.L.B_W$: مساحت سطح آبخور در آبخور طراحی
$AM=CX.BW.H$: مساحت ناحیه زیر آب مقطع میانی
A_1: مساحت صفحه آبخور در آبخور D
A_2: مساحت صفحه عمودی طولی (منطبق بر خط مرکزی) تا ارتفاع D بدنه
S: مقدار میانی فاصله شیب میانی تا حداکثر شیب پاشنه (مطابق شکل)
$D=DM+S$: عمق متوسط بدنه
$F=D-H$: فری‌برد متوسط بدنه

سایر پارامترها نیز به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\Delta_T = \Delta_0 + \frac{A_0 + A_1}{2}\frac{F}{35} \quad (۲)$$

$$\delta = \frac{\Delta_T}{2} - \Delta_0 \qquad (۳)$$

$$C_W{}' = \frac{A_2}{LD} \qquad (۴)$$

$$C_W{}'' = C_W{}' - \frac{140.\delta}{BDL}\left(1 - C_{PV}{}''\right) \qquad (۵)$$

که مقدار δ برای محاسبه $C_W{}''$ همیشه مثبت است.

$$C_X{}' = \frac{A_M + B.F}{B.D} \qquad (۶)$$

$$C_{PV}{}' = \frac{35\Delta_T}{A_1 D} \qquad (۷)$$

$$C_{PV}{}'' = \frac{35\Delta_T}{A_2 .B} \qquad (۸)$$

– نحوه محاسبه بازوی بازگرداننده

همانطور که در معادله ۱ بیان شد داریم: $GZ = G'Z' + GG'.Sin\varphi$

که بیان این معادله به صورت سری فوریه از قرار زیر می‌باشد:

$$G'Z' = b_1.Sin2\varphi + b_2.Sin4\varphi + ... + b_n.Sin2n\varphi \qquad (۹)$$

بررسی‌های به عمل‌آمده برای ۱۵ شناور از انواع مختلف نشان می‌دهد که ضرایب مقادیر $\mathrm{Sin}8\varphi$ و بالاتر، مقدار بسیار کوچک و قابل صرفنظر کردن است بنابراین:

$$G'Z' = b_1.Sin2\varphi + b_2.Sin4\varphi + b_3.Sin6\varphi \qquad (۱۰)$$

ضرایب b_1 و b_2 و b_3 سری فوریه را می‌توان با کمک شکل ۵ و خواص منحنی بازوی بازگرداننده در صفر و ۹۰ درجه به صورت زیر محاسبه کرد:

در $\varphi = 0$ داریم: $\frac{d(G'Z')}{d\varphi} = G'M_0$ (۱۱)

که $G'M_0$ برابر ارتفاع متاسنتری اولیه است.

در $\varphi = 90$ نیز داریم: $\frac{d(G'Z')}{d\varphi} = G'M_{90}$ (۱۲)

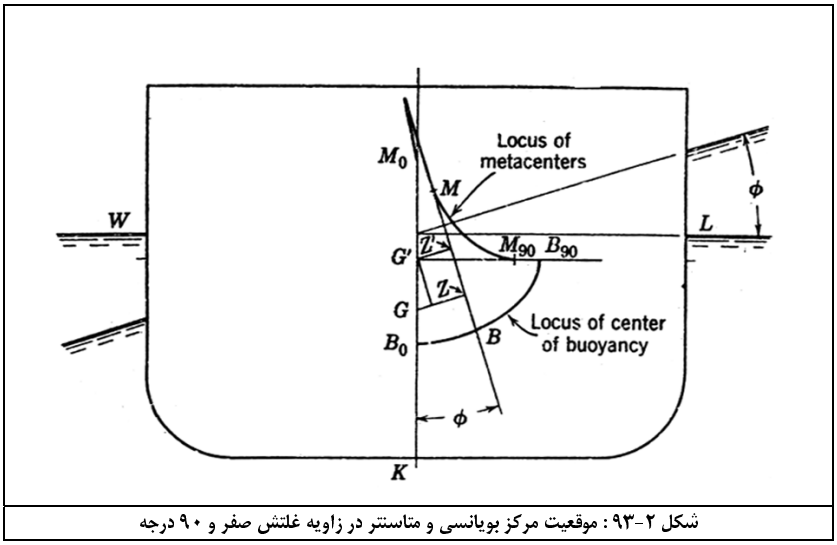
برای محاسبه b_3 نیز می‌توان از سطح زیر نمودار GZ استفاده کرد. سطح زیر نمودار GZ برابر پایداری دینامیکی شناور است که از حاصلضرب جابجایی در مقدار افزایش فاصله جدایی مرکز ثقل و بویانسی در زوایای صفر و ۹۰ درجه بدست می‌آید. در نتیجه مقادیر b_1 و b_2 و b_3 به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$b_1 = \frac{9(G'B_{90} - G'B_0)}{8} - \frac{G'M_0 - G'M_{90}}{32} \qquad (۱۳)$$

$$b_2 = \frac{G'M_0 + G'M_{90}}{8} \qquad (۱۴)$$

$$b_3 = \frac{3(G'M_0 - G'M_{90})}{32} - \frac{3(G'B_{90} - G'B_0)}{8} \qquad (۱۵)$$

که پارامترهای موجود در این معادلات را می‌توان در شکل ۲-۹۳ ملاحظه نمود.



شکل ۲-۹۳ : موقعیت مرکز بویانسی و متاسنتر در زاویه غلتش صفر و ۹۰ درجه

این پارامترها طبق معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

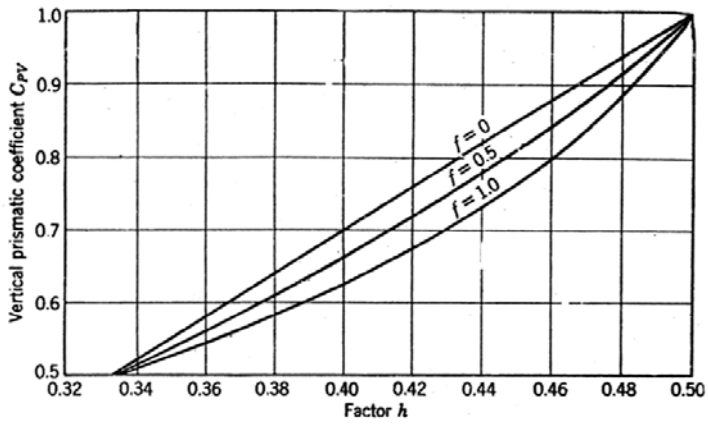
- برای محاسبه GG':

$$GG' = KG' - KG \qquad (۱۶)$$

$$KG' = \frac{D}{2}\frac{(1-h_1)\Delta_T - \delta}{\Delta_0} \qquad (۱۷)$$

$$f_1 = \frac{D\left(1-\frac{A_0}{A_1}\right)}{2F.\left(1-C_{PV}'\right)} \qquad (۱۸)$$

که مقدار h_1 از شکل ۲-۹۴ به کمک مقادیر C_{PV}' و f_1 بدست می‌آید.



شکل ۲-۹۴: نمودار استخراج ضریب h

- برای محاسبه $G'B_0$ داریم:

$$G'B_0 = KG' - KB_0 \qquad (۱۹)$$

$$KB_0 = (1-h_0)H \qquad (۲۰)$$

$$f_0 = \frac{H\left(\frac{A_1}{A_0}-1\right)}{2F(1-C_{PV})} \qquad (۲۱)$$

که h_0 باز هم از شکل ۲-۹۴ به کمک مقادیر C_{PV} و f_0 بدست می‌آید.

- برای محاسبه $G'B_{90}$ داریم:

$$G'B_{90} = \frac{\Delta_T h_2 B}{4\Delta_0} - \frac{\delta^2}{\Delta_0}\frac{17.5}{A_2 - 70\left(\frac{\delta}{B}\right)\left(1 - C_{PV}''\right)} \quad (۲۲)$$

$$f_2 = 9.1\left(C_X' - 0.89\right) \quad (۲۳)$$

δ برای محاسبه $G'B_{90}$ همیشه مثبت است. h_2 نیز از شکل ۲-۹۴ و به کمک مقادیر C_{PV}'' و f_2 بدست می‌آید. اگر C_X' کوچکتر از ۰/۸۹ باشد در نتیجه $f_2 = 0$ می‌باشد.

- برای محاسبه $G'M_0$:

$$G'M_0 = KB_0 + BM_0 - KG' \quad (۲۴)$$

$$BM_0 = \frac{C_I . L . B_W^{\,3}}{35.\Delta_0} \quad (۲۵)$$

CI از شکل ۲-۹۵ و از نمودار *Line1* به کمک *CW بدست* می‌آید.

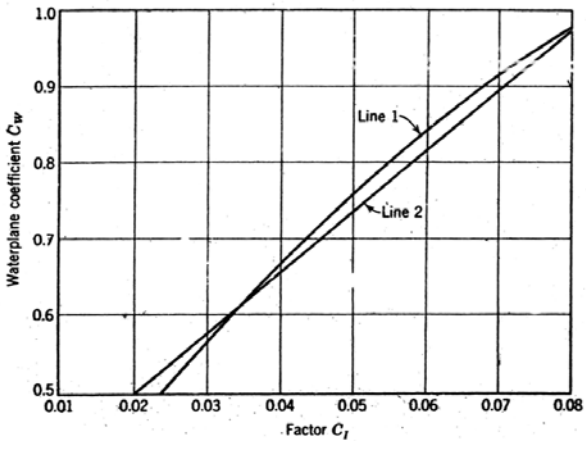
- برای محاسبه $G'M_{90}$:

$$G'M_{90} = BM_{90} - G'B_{90} \quad (۲۶)$$

که $G'B_{90}$ از معادله ۲۲ بدست می‌آید.

$$BM_{90} = \frac{C_I' L . D^3}{35.\Delta_0} + \frac{L_d . d . D^2}{140.\Delta_0} \quad (۲۷)$$

که C_I' از شکل ۲-۹۵ از نمودار Line2 به کمک C_W'' بدست می‌آید.



شکل ۲-۹۵: نمودار استخراج ضریب CI

مطابق فرمولهای ارائه شده با جاگذاری روابط ۱۹ تا ۲۷ در روابط ۱۳ تا ۱۵ ضرائب سری فوریه بدست می‌آید. با جاگذاری این ضرائب در رابطه سری فوریه مقدار $G'Z'$ بدست می‌آید. مقدار GG' نیز از روابط ۱۶ تا ۱۸ بدست می‌آید. هم‌اکنون با جاگذاری مقادیر $G'Z'$ و GG'در رابطه ۱ مقدار بازوی بازگرداننده GZ در هر زاویه غلتش بدست می‌آید. همانطور که در رابطه ۱ ملاحظه می‌شود مبنای ارائه این روش، استفاده از اصلاح سینوسی منحنی GZ و امکان تعمیم بسط سری فوریه برای آن بوده است.

بدین‌ترتیب با لحاظ کردن روابط فوق می‌توان تنها با داشتن ابعاد و ضرائب هندسی بدنه، منحنی GZ را بدست آورد و نیازی به استفاده از نقشه‌های سه بعدی کامپیوتری و صرف زمان زیاد نمی‌باشد. مقادیر بدست آمده از این روش برای تعداد زیادی از انواع کشتی‌ها بررسی شده است که نتایج بسیار دقیقی به دنبال داشته است.

فصل ۱۴: [۱]تغییرات منحنی GZ

منحنی GZ با دو پارامتر زیر تغییر می‌کند:

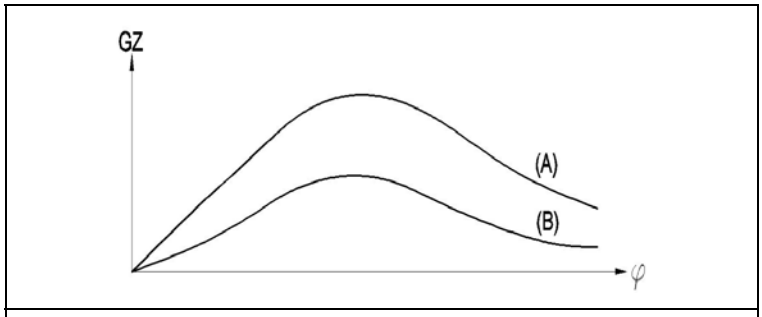
۱- تغییر مرکز ثقل شناور (KG)

۲- تغییر تناژ یا آبخور شناور

یادآوری می‌شود که GZ از مقدار GM بدست می‌آید و GM نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$KM=KB+BM$$
$$GM=KM-KG$$

لذا مقدار GM وابسته به مقادیر KM و KG می‌باشد . KM وابسته به آبخور یا تناژ و KG وابسته به مرکز ثقل شناور است. مرکز ثقل عمودی (KG) شناور در هر سناریوی بارگیری تغییر می‌کند که کاهش ارتفاع KG باعث افزایش مقادیر GZ و افزایش ارتفاع KG باعث کاهش مقادیر GZ می‌شود که در شکل۲-۹۶ به طور مثال ارائه شده است. البته توجه شود که با تغییر آبخور، مقدار KM نیز تغییر می‌کند ولی در مبحث، مقدار KM ثابت فرض شده است.

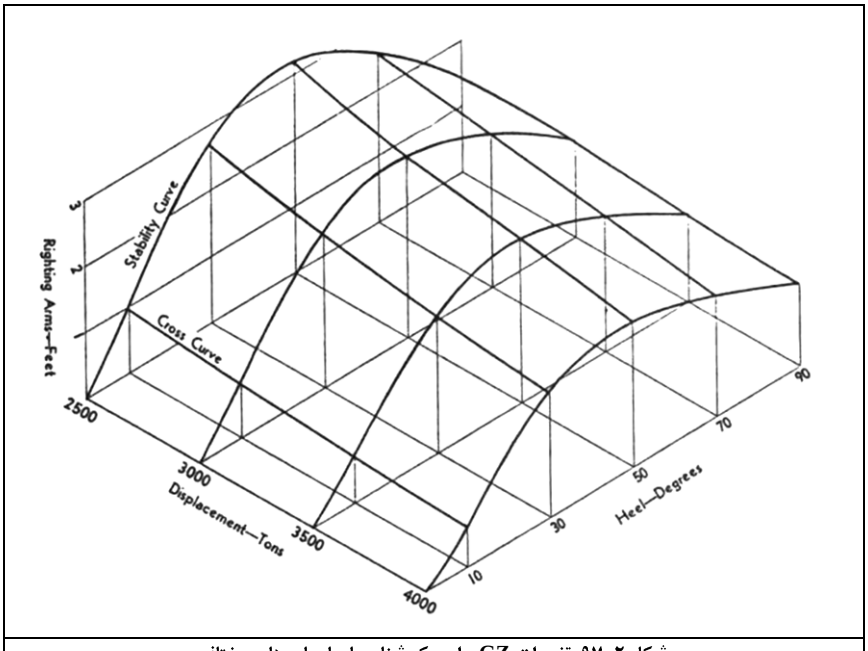


شکل۲-۹۶: منحنی GZ برای یک شناور با دو حالت بارگیری

A در حالت بارگیری : $KG = 5m$

B در حالت بارگیری : $KG = 7m$

همچنین در منحنی‌های هیدرواستاتیک، تغییرات KM با آبخور بیان شده است که این تغییرات بر مقدار GZ نیز مؤثر است. تغییرات آبخور نیز ناشی از تغییرات جابجایی می‌باشد. تغییرات GZ بر حسب تغییرات تناژ یا جابجایی برای یک شناور خاص (با KG ثابت) در شکل ۲-۹۶ ترسیم شده است.



شکل ۲-۹۷: تغییرات GZ برای یک شناور با جابجایی‌های مختلف

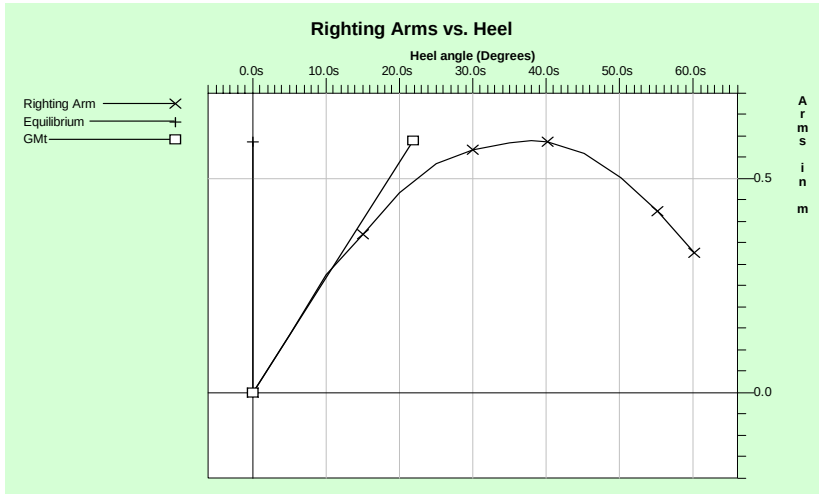
بدین ترتیب منحنی GZ هم با تغییر مرکز ثقل شناور و هم با تغییر جابجایی (آبخور) تغییر می‌کند.

۱- منبع: [5]

مثال: منحنی GZ را در جابجایی ۳۵۰۰ تن و در دو حالت مختلف مرکز ثقل برای شناور مدل ۱ ترسیم می‌کنیم.

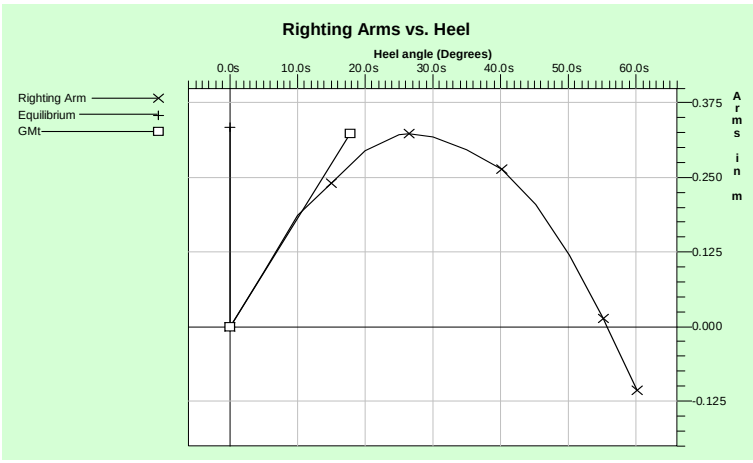
حل: در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG=5.1\ m$ منحنی GZ قبلا ترسیم شد. در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG = 4.6m$ مقادیر GZ به صورت زیر است و نمودار آن در شکل ۲-۹۸ ملاحظه می‌شود:

Heel Angle (deg)	(deg) Trim Angle	Righting Arm (m)
0	0.00	0.000
5	0.01f	0.136
10	0.02f	0.275
15	0.06f	0.371
20	0.13f	0.466
25	0.18f	0.534
30	0.17f	0.568
35	0.11f	0.584
37.95	0.04f	**0.588**
40	0.01a	0.586
45	0.16a	0.559
50	0.32a	0.503
55	0.49a	0.424
60	0.66a	0.326



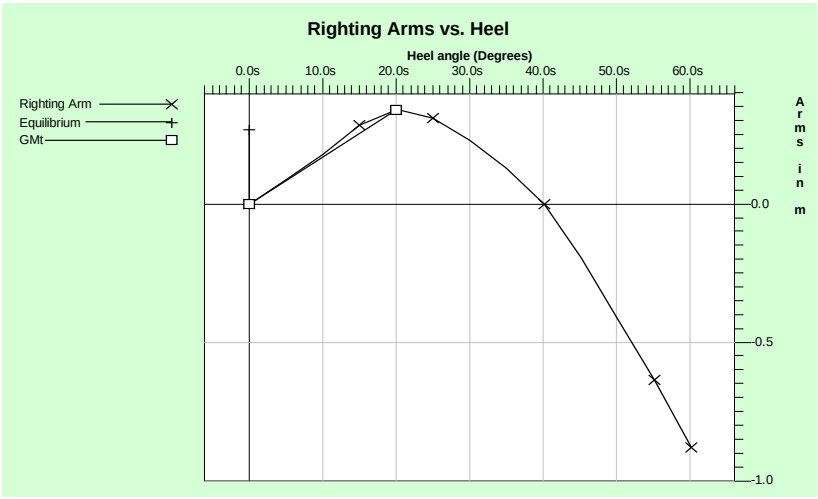
شکل ۲-۹۸: منحنی GZ کشتی مدل ۱ در شرایط: Displacement= 3500 t , KG=4.6 m

(خط مماس نشان داده شده در شکل‌ها، نشان‌دهنده مقدار GM می‌باشد که باید در زاویه ۵۷/۳ درجه نشان داده می‌شد ولی بدلیل محدودیت ابعاد تصویر تا این زاویه نمایش داده نشده است.) با یادآوری از قبل داریم که منحنی GZ در جابجایی ۳۵۰۰ تن و $KG = 5.1\ m$ مطابق شکل ۲-۹۹ می‌باشد.



شکل ۲-۹۹: منحنی GZ کشتی مدل ۱ در شرایط: Displacement= 3500 t , KG=5.1 m

برای نمایش تأثیرات تغییر جابجایی نیز منحنی GZ شناور مدل ۱ را در جابجایی ۱۱۴۰ تن و $KG=6.8\ m$ به صورت شکل ۲-۱۰۰ ملاحظه می‌کنیم.



شکل ۲-۱۰۰: منحنی GZ کشتی مدل ۱ در شرایط:
Displacement= 1140 t , KG=6.8 m

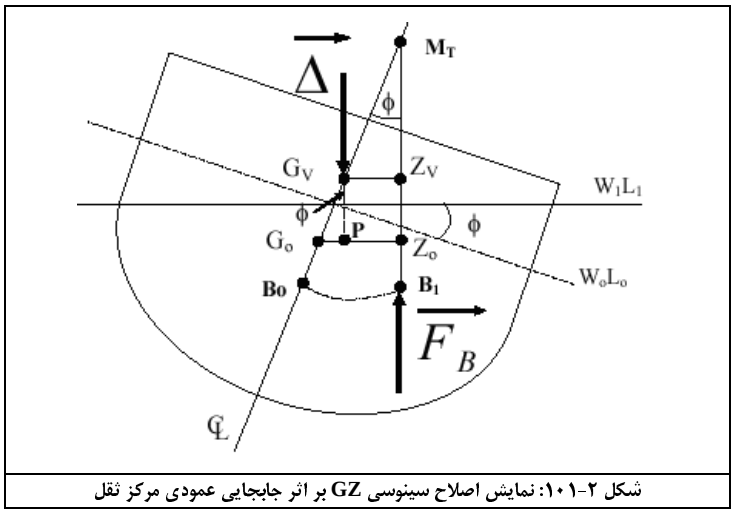
گوهر خود را مزن بر سنگ هر ناقابلی
صبر کن تا گوهر شناس قابلی پیدا شود

فصل ۱۵: [۱] اصلاح سینوسی و کسینوسی منحنی GZ

می‌دانیم که یکی از مؤلفه‌های اصلی بازوی بازگرداننده (GZ)، موقعیت مرکز ثقل (G) می‌باشد. هرگونه جابجایی عمودی یا عرضی مرکز ثقل بر مقدار GZ مؤثر است و مقدار GZ باید مطابق این تغییرات اصلاح گردد. به این تغییرات اصلاح سینوسی و کسینوسی منحنی GZ گویند.

❖ اصلاح سینوسی منحنی GZ

جابجایی عمودی بارهای داخلی کشتی باعث تغییر ارتفاع مرکز ثقل می‌گردد. مطابق شکل ۲- ۱۰۱ مقدار اولیه بازوی بازگردانـنده G_0Z_0 مـی‌باشـد. پس از جابجایی عمودی مرکز ثقل از G_0 به G_v، مقدار بازوی بازگرداننده برابر G_vZ_v می‌باشد که از مقـدار G_0Z_0 کـوچکتر اسـت چـرا کـه داریم.

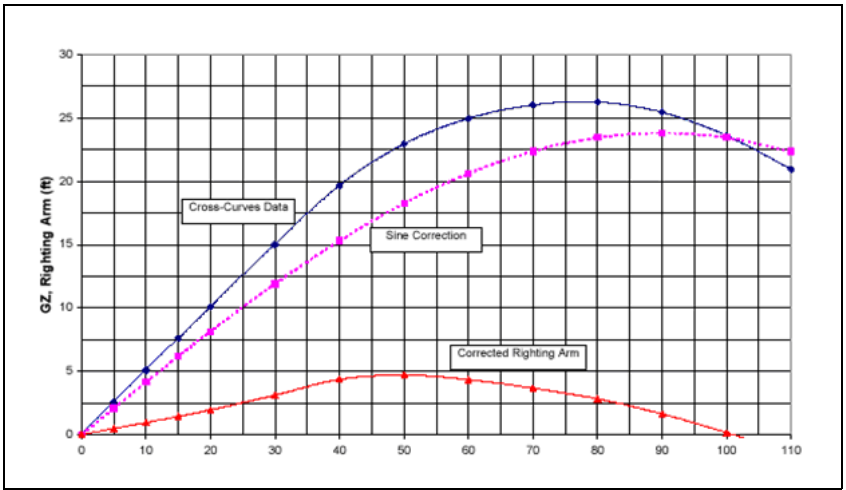


شکل ۲-۱۰۱: نمایش اصلاح سینوسی GZ بر اثر جابجایی عمودی مرکز ثقل

$$G_vZ_v = G_0Z_0 - G_0P$$
$$G_0P = G_0G_v.Sin\varphi$$

$$G_vZ_v = G_0Z_0 - G_0G_v.Sin\varphi$$

بنابراین مقدار بازوی بازگرداننده G_vZ_v به اندازه $G_0G_v.Sin\varphi$ از بازوی بازگرداننده اولیه کوچکتر می‌باشد لذا به این اصلاح بـازوی بازگردانـنده، «اصلاح سینوسی» گویند که در نمودار شکل۲-۱۰۲ قابل مشاهده است.



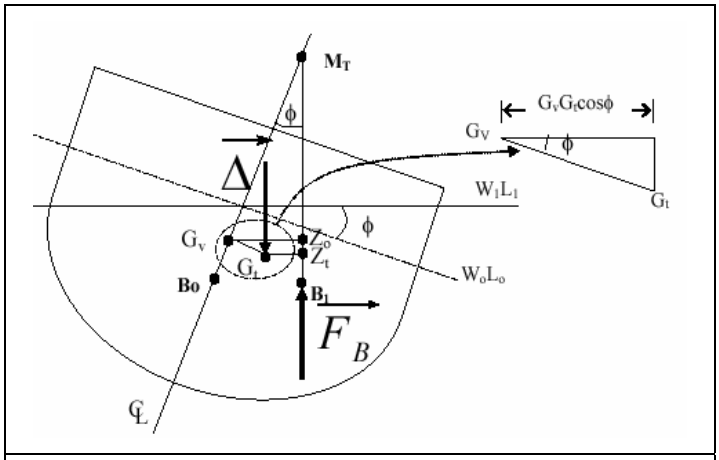
شکل ۲-۱۰۲: نمایش اثر اصلاح سینوسی بر منحنی GZ

۱- منبع: [7]

❖ اصلاح کسینوسی منحنی GZ

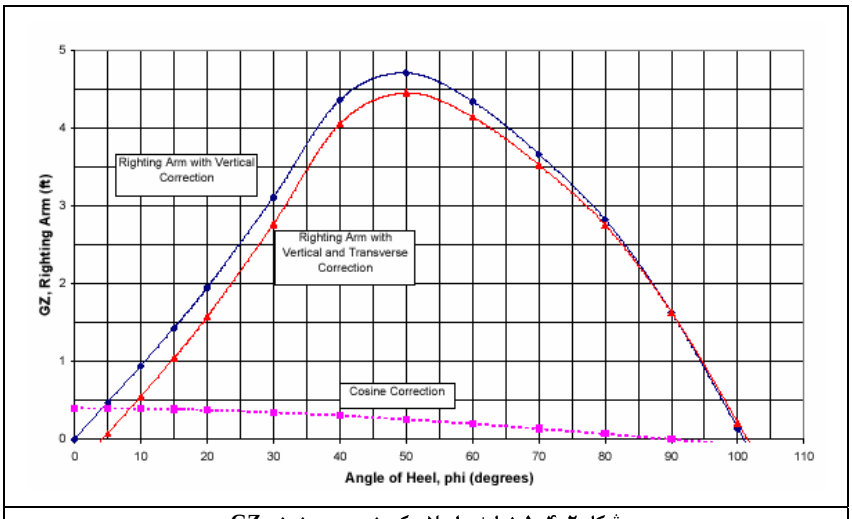
جابجایی عرضی بارهای داخلی کشتی باعث جابجایی عرضی مرکز ثقل می‌شود. مطابق شکل ۲-۱۰۳ مقدار بازوی بازگرداننده اولیه برابر G_0Z_0 می‌باشد. جابجایی عرضی بارهای داخلی، مرکز ثقل را به G_v منتقل می‌کند لذا مطابق شکل مقدار بازوی بازگرداننده ثانویه عبارتست از:

$$G_tZ_t = G_vZ_0 - G_vG_t.Cos\varphi$$



شکل ۲-۱۰۳: نمایش اصلاح کسینوسی GZ بر اثر جابجایی افقی مرکز ثقل

ملاحظه می‌گردد که بازوی بازگرداننده ثانویه به اندازه $G_vG_t.Cos\varphi$ از بازوی بازگرداننده اولیه کوچکتر می‌باشد. به این تغییر منحنی GZ «اصلاح کسینوسی» بازوی بازگرداننده گویند که در شکل ۲-۱۰۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۱۰۴: نمایش اصلاح کسینوسی بر منحنی GZ

مثال: در شناور مدل ۱ در سناریوی اصلی باری به وزن ۳۰ تن جابجا می‌شود. در دو حالت زیر مقادیر اصلاح شده منحنی GZ را بدست آورید:

الف- جابجایی وزنه به صورت عرضی از خط وسط به اندازه ۵ متر

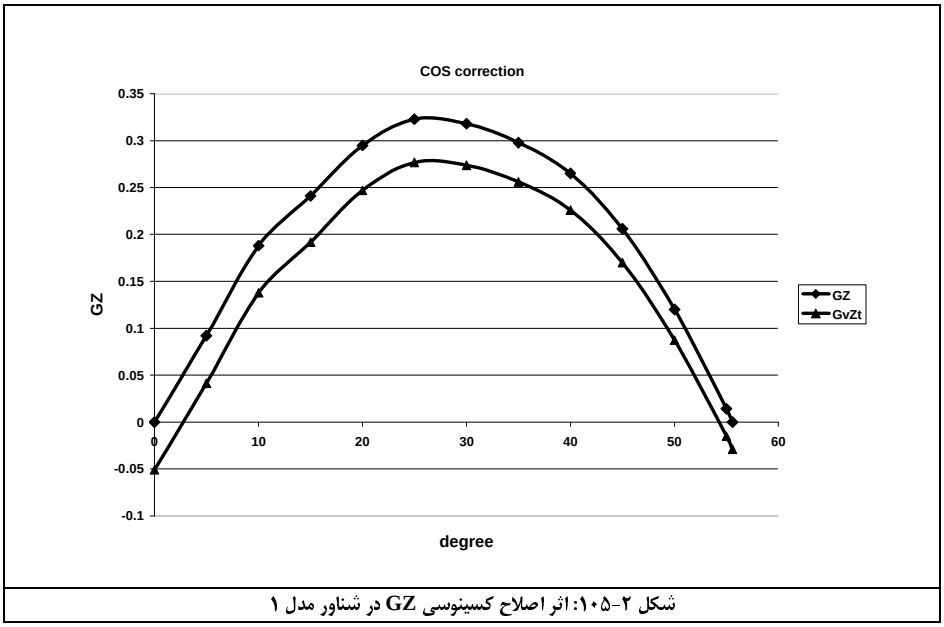
ب- جابجایی وزنه به صورت عمودی از کف انبار به روی عرشه به اندازه ۶ متر

حل: یکی از روشهای محاسبه GZ در صورت تغییر مرکز ثقل، استفاده از روش اصلاح سینوسی و اصلاح کسینوسی می‌باشد و با تغییر دادن مقادیر GZ از حالت مبنا محاسبه می‌شود. در دو حالت فوق داریم:

الف- جابجایی افقی مرکز ثقل (اصلاح کسینوسی)

$$G_0G_t = \frac{w.d}{W} = \frac{30\times5}{3500} = 0.043\ m = 4.3\ cm$$

حال با کم کردن مقدار $G_0G_t \cdot Cos\ \varphi$ در هر زاویه از مقادیر GZ در زوایای مختلف، منحنی زیر (شکل ۲-۱۰۵) بدست می‌آید:

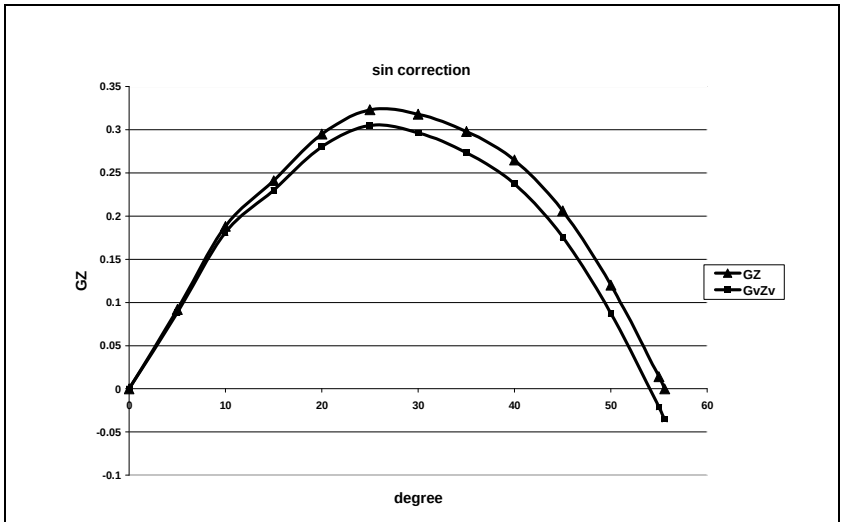


شکل ۲-۱۰۵: اثر اصلاح کسینوسی GZ در شناور مدل ۱

ب- جابجایی عمودی مرکز ثقل (اصلاح سینوسی)

$$G_0G_V = \frac{w.d}{W} = \frac{30\times 6}{3500} = 0.051\ m = 5.1\ cm$$

هم‌اکنون با کم کردن مقدار $G_0G_v \cdot Cos\ \varphi$ در هر زاویه از منحنی GZ در زوایای مختلف، منحنی زیر (شکل ۲-۱۰۶) بدست می‌آید:

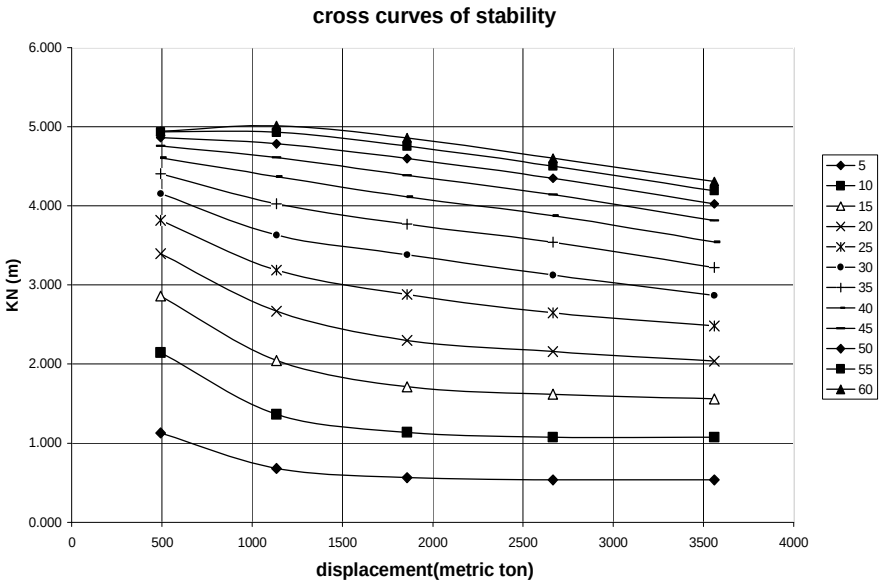


شکل ۲-۱۰۶: اثر اصلاح سینوسی GZ در شناور مدل ۲

امام علی (ع): حسادت پیکر آدمی را ذوب میکند.

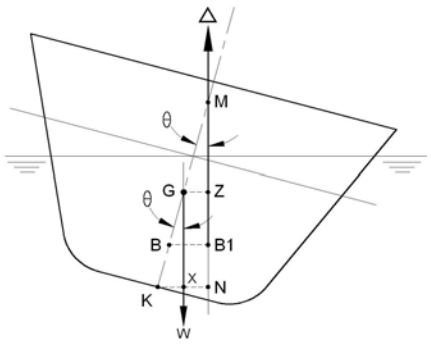
فصل ۱۶: [۱] منحنی متقاطع پایداری

کاربرد اصلی منحنی متقاطع پایداری[۲]، بدست آوردن منحنی GZ در حالات مختلف مرکز ثقل و تناژهای مختلف است. می‌دانیم کـه منحنـی GZ برای یک تناژ و مرکز ثقل خاص بدست می‌آید و در حالات مختلف بارگیری شناور، هم مرکز ثقل و هم مرکز جابجایی تغییر می‌کنـد. از طرفـی بـرای کلیه این حالات نمی‌توان منحنی GZ را ترسیم کرد لذا منحنی متقاطع پایداری کمک می‌کند که در هر حالت دلخواه بتوان مقادیر GZ را استخراج کرد. منحنی متقاطع پایداری برای شناور مدل ۱ به شکل ۲-۱۰۷ می‌باشد. جابجایی این شناور از ۵۰۰ تا ۳۵۰۰ تغییر می‌کند.



شکل۲-۱۰۷: منحنی متقاطع پایداری شناور مدل ۱

محور عمودی مقدار KN و محور افقی تناژهای مختلف یک شناور می‌باشد. مقدار KN و نحوه به دست آوردن GZ از آن به کمک شکل ۲-۱۰۸ بیـان می‌شود.



شکل ۲-۱۰۸: محاسبه GZ از KN

$$KX = KG \cdot Sin\theta \qquad GZ = KN - KX$$

$$GZ = KN - KG.Sin\theta$$

بنابراین مزایای زیر را می‌توان از منحنی متقـاطع بـرای بـه دسـت آوردن GZ برشمرد:

۱- استقلال از مرکز ثقل

۲- قابل کاربرد در تناژهای مختلف بارگیری شناور

۳- قابل کاربرد در زوایای بزرگ غلتش

مثال- منحنی متقاطع شناور مدل ۱ ارئه می‌گردد.

حل: جداول و منحنی‌های متقاطع پایـداری بـرای شـناور مـدل ۱ بـه صورت زیر می‌باشد (جدول ۲-۵ و شکل ۲-۱۰۷).

۱- منابع: [1] , [4]

2 - Cross Curve of Stability

Displ (MT)	5	10	15	20	25	30
493	1.131	2.144	2.860	3.395	3.819	4.152
1135	0.679	1.365	2.047	2.666	3.185	3.629
1858	0.566	1.137	1.712	2.297	2.881	3.383
2665	0.535	1.075	1.617	2.156	2.646	3.124
3560	0.536	1.075	1.562	2.039	2.480	2.868
Displ (MT)	35	40	45	50	55	60
493	4.408	4.604	4.755	4.863	4.935	4.941
1135	4.025	4.367	4.609	4.785	4.929	5.012
1858	3.768	4.110	4.386	4.598	4.755	4.861
2665	3.538	3.875	4.143	4.351	4.502	4.602
3560	3.220	3.544	3.812	4.027	4.191	4.309

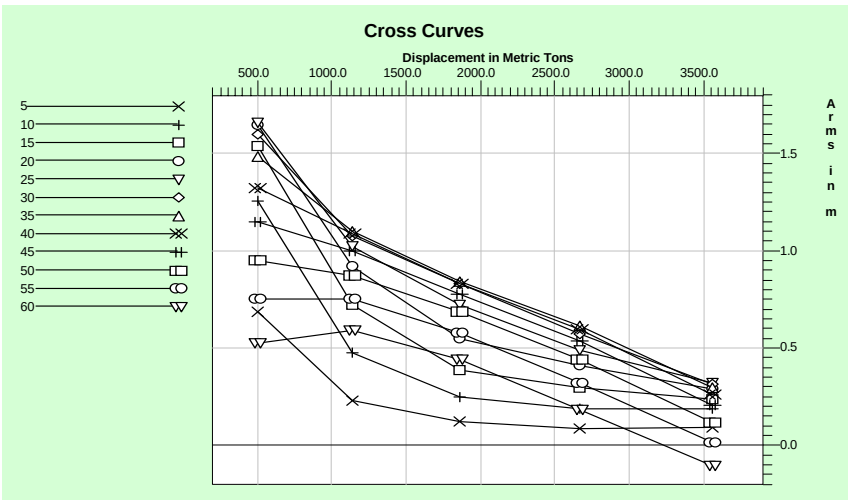
جدول۲-۵: مقادیر KN مربوط به شناور مدل ۱

اگر بخواهیم مثلا برای یک KG ثابت و برای تناژهای مختلف مقادیر GZ را محاسبه کنیم از رابطه $GZ = KN - KG \times Sin\theta$ استفاده می‌کنیم. مثلا برای شناور مدل ۱ مقادیر GZ در $KG=5.1\ m$ و در تناژهای مختلف در جدول ۲-۶ و شکل ۲-۱۰۹ ارائه شده است.

Righting Arms(GZ) for VCG = 5.10

Displ (MT)	5.000s	10.000s	15.000s	20.000s	25.000s	30.000s
493	0.687s	1.257s	1.539s	1.651s	1.662s	1.602s
1135	0.235s	0.478s	0.726s	0.922s	1.028s	1.079s
1858	0.122s	0.250s	0.391s	0.553s	0.724s	0.833s
2665	0.091s	0.188s	0.296s	0.412s	0.489s	0.574s
3560	0.092s	0.188s	0.241s	0.295s	0.323s	0.318s
Displ (MT)	35.000s	40.000s	45.000s	50.000s	55.000s	60.000s
493	1.486s	1.325s	1.149s	0.956s	0.758s	0.524s
1135	1.103s	1.088s	1.003s	0.878s	0.752s	0.595s
1858	0.846s	0.831s	0.780s	0.691s	0.578s	0.444s
2665	0.616s	0.596s	0.537s	0.444s	0.325s	0.185s
3560	0.298s	0.265s	0.206s	0.120s	0.014s	-0.107s

جدول ۲-۶: مقادیر GZ بدست آمده از مقادیر KN جدول ۱ در KG = 5.1 m



شکل ۲-۱۰۹: مقادیر GZ در تناژهای مختلف شناور مدل ۱ با KG = 5.1 m

مثال)مقادیر GZ را در آبخور ۵ متر و KG=5.1m با استفاده از منحنی متقاطع شناور مدل ۱ محاسبه کنید.

حل: سطر آخر از جدول فوق مربوط به جابجایی در آبخور ۵ متر (جابجایی تقریبی ۳۵۰۰ تـن) اسـت کـه مقـادیر *GZ* را بـرای *KG = 5.1 m* بطـور مستقیم ارائه کرده و جدول ماقبل آن نیز مقادیر *KN* را ارائه کرده بود. نحوه محاسبه *GZ* از *KN* در جـدول ۲-۷ بـرای آبخـور ۵ متـر و *KG = 5.1m* ارائه شده است:

degree	KN	sin	KG.sin	GZ=KN-KG.sin
5	0.536	0.087	0.4437	0.0923
10	1.075	0.174	0.8874	0.1876
15	1.562	0.259	1.3209	0.2411
20	2.039	0.342	1.7442	0.2948
25	2.48	0.423	3 2.15	0.3227
30	2.868	0.5	2.55	0.318
35	3.22	0.573	2.9223	0.2977
40	3.544	0.643	3.2793	0.2647
45	3.812	0.707	3.6057	0.2063
50	4.027	0.766	3.9066	0.1204
55	4.191	0.819	4.1769	0.0141
60	4.309	0.866	4.4166	-0.1076

جدول۲-۷: مقادیر KN و GZ شناور مدل ۱ در آبخور ۵ متر و KG = 5.1 m

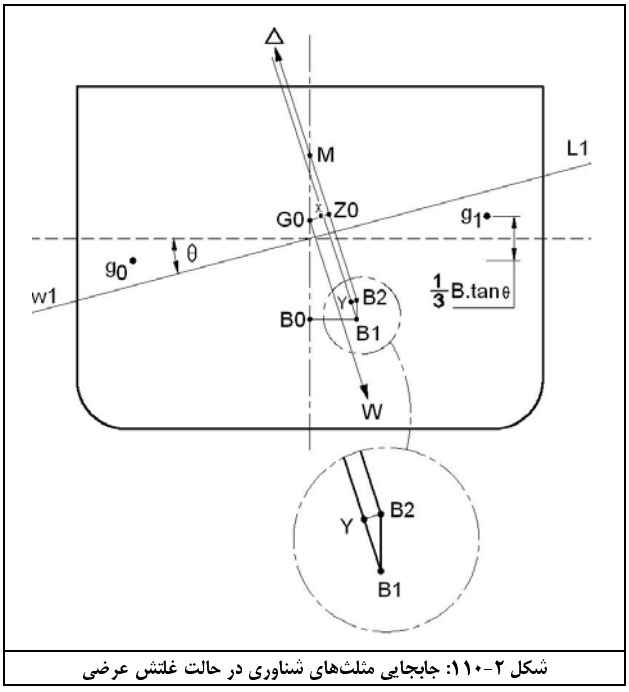
زندگی برگ بودن در مسیر باد نیست. امتحان ریشه‌ها ست !
ریشه هم هرگز اسیر باد نیست...
زندگی چون پیچکی است! انتهایش می‌رسد پیش خدا!!!

فصل ۱۷: [۱] محاسبه GZ در شناورهای بدنه دیواره‌ای

مقدار GZ را در شناورهای بدنه دیواره‌ای[۲]، در زوایای غلتش کوچک می‌توان با روابط ریاضی محاسبه کرد. شناورهای بدنه دیواره‌ای نظیر بارج‌ها هستند که دیواره‌های آن دارای شیب نمی‌باشد. همچنین می‌توان شناورهای تجاری بزرگ مانند نفتکش‌ها و کانتینربرها که قسمت اعظم بدنه آنها به شکل مکعبی است و فقط در سینه و پاشنه دارای انحناء هستند را جزء شناورهای بدنه دیواره‌ای به حساب آورد. روابط ارائه شده برای قسمت ابتدایی منحنی GZ یعنی زوایای غلتش کوچک مصداق دارد که در آن زوایا، آبخورها در محل خط مرکزی[۳] یکدیگر را قطع می‌کنند. می‌دانیم که در زوایای غلتش بزرگ مقاطع آبخورها از خط مرکزی جابجا می‌شوند و دیگر نمی‌توان از روابط ساده مثلث‌های انتقالی قائم‌الزاویه برای اثبات روابط پایداری، استفاده کرد. مطابق شکل۲-۱۰۷ شناوری به عرض B و طول L را در نظر بگیرید که تا زاویه کوچک θ غلتش نموده است. مرکز بویانسی از B_0 به B_1 در جهت افقی و از B_1 به B_2 در جهت عمودی تغییر مکان یافته است. علت این تغییر مکان افقی و عمودی، جابجایی مثلث‌های (گوه‌های) شناوری W_0W_1O و L_0L_1O به حجم v هستند که مراکز آنها هم به صورت افقی (عرضی) و هم به صورت عمودی جابجا شده‌اند و باعث جابجایی مراکز بویانسی شده‌اند.

در شکل دیده می‌شود که:

$$GZ = GX + XZ \qquad (۱)$$



شکل ۲-۱۱۰: جابجایی مثلث‌های شناوری در حالت غلتش عرضی

که GX عبارت ناشی از انتقال افقی مرکز شناوری از B_0 به B_1 و عبارت XZ ناشی از انتقال عمودی آن از B_1 به B_2 می‌باشد که داریم:

$$B_0B_1 = \frac{v \times (g_0g_1)_H}{\nabla} \qquad (۲)$$

که $(g_0g_1)_H$ مؤلفه افقی جابجایی g_0g_1 می‌باشد.

از شکل۲-۱۱۰ داریم:

$$v \times g_0g_1 = \int_0^L \frac{1}{2} \times \frac{B}{2} \times Tan\theta \times \frac{B}{2} \times dl \times \frac{2}{3} \times \frac{B}{2} \times 2 = \tan\theta \int_0^L \frac{B^3 \times dl}{12} = I \times \tan\theta \qquad (۳)$$

با جاگذاری رابطه ۳ در رابطه ۲ داریم:

$$B_0B_1 = \frac{I}{\nabla}.\tan\theta$$

از آنجا که $B_0M = \frac{I}{\nabla}$ داریم:

$$B_0B_1 = B_0M.tan\theta$$

۱- منابع: [12] , [14]

2 - Wall Sided

3 - center line

رابطه فوق نشان می‌دهد که خط عمودی گذرنده از B_1 خط مرکزی را در M قطع می‌کند و با نوشتن رابطه مثلث قائم‌الزاویه داریم:

$$GX = GM_0.\sin\theta$$

از انتقال عمودی مرکز شناوری داریم:

$$B_1B_2 = \frac{v\times(g_0g_1)_v}{\nabla} \qquad (۴)$$

$$v\times(g_0g_1)_v = \int_0^L \frac{B^2}{8}.\tan\theta\times dl\times\frac{1}{3}\times\frac{B}{2}\tan\theta\times 2 = \frac{\tan^2\theta}{2}\int_0^L \frac{B^3\times dl}{12} = \frac{\tan^2\theta}{2}\times I \qquad (۵)$$

با جاگذاری رابطه (۵) در رابطه (۴) داریم:

$$B_1B_2 = \frac{1}{2}\times\frac{I}{\nabla}\times\tan^2\theta$$

$$B_1B_2 = \frac{1}{2}.B_0M\times\tan^2\theta$$

از شکل۲-۱۰۷ می‌توان ملاحظه کرد که:

$$B_2Y = XZ = B_1B_2.\sin\theta = \frac{1}{2}B_0M.\tan^2\theta.\sin\theta$$

- با جاگذاری روابط GX و XZ در رابطه ۱ داریم:

$$GZ = GX + XZ = GM_0.\sin\theta + \frac{1}{2}B_0M.\tan^2\theta.\sin\theta$$

$$\boxed{GZ = \sin\theta\left(GM_0 + \frac{1}{2}B_0M.\tan^2\theta\right)}$$

این رابطه را می‌توان برای شناورهای بدنه دیواره‌ای تا زاویه خیسی عرشه بکار برد. اگر زاویه غلتش بسیار کوچک باشد $\tan^2\theta = 0$ فرض می‌شود و می‌توان نوشت: $GZ = GM_0.\sin\theta$

مثال: مقادیر GZ را در آبخور ۵ متر برای شناور مدل ۲ تا زاویه خیسی عرشه محاسبه کنید.

حل: مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- زاویه خیسی عرشه برای شناور مدل ۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

ارتفاع فری برد $h = 1\ m$

نیم عرض $b = 6.8\ m$

$$\tan\theta = \frac{h}{b} = \frac{1}{6.8} = 0.147 \qquad \theta = 8.4^\circ$$

۲- محاسبه BM و GM:

آبخور $d = 5\ m$

$$BM = \frac{I}{V} = \frac{\frac{1}{12}LB^3}{LBd} = \frac{B^2}{12d} = \frac{(13.6)^2}{12\times 5} = 3.1\ m$$

$$KB = \frac{d}{2} = \frac{5}{2} = 2.5\ m$$

$$KM = KB + BM = 2.5 + 3.1 = 5.6\ m$$

از قبل *دانستیم*: $KG = 4.5\ m$

$$GM = KM - KG = 5.6 - 4.5 = 1.1$$

۳- تشکیل جدول

degree	tan	$GM+\frac{1}{2}BM\times\tan^2\theta$	sinθ	GZ
0	0	1.100	0	0.000
2	0.035	1.102	0.035	0.039
4	0.67	1.796	0.069	0.124
6	0.105	1.117	0.104	0.116
8	0.14	1.130	0.139	0.157
8.4	0.147	1.133	0.146	0.165

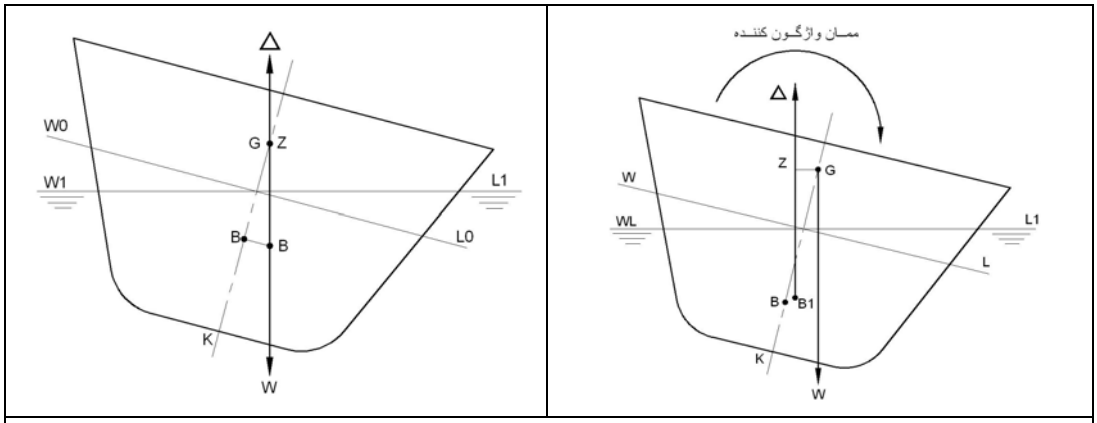
فصل ۱۸: محاسبه زاویه لل در شناور بدنه دیواره‌ای

❖ تعریف زاویه لل

اگر شناور دارای ارتفاع متاسنتری اولیه منفی باشد تا زاویه‌ای به نام «زاویه لل» کج خواهد شد تا جائیکه مرکز بویانسی جابجا شده و امتداد نیروهای وزن و بویانسی در یک راستا قرار گیرند و در این حالت نقطه پرومتاسنتر بر روی مرکز ثقل قرار گرفته است یا در امتداد آن قرار می‌گیرد. در حالیکه قبل از کج شدن، نقطه متاسنتر در زیر مرکز ثقل قرار گرفته بود و تعادل ناپایدار داشتیم. در واقع زاویه لل ناشی از ناپایداری شناور است که می‌تواند ناشی از قرار گرفتن بارهای سنگین در نقاط مرتفع کشتی باشد به گونه‌ای که باعث بالا آمدن مرکز ثقل تا بالای متاسنتر شده و ارتفاع متاسنتری اولیه منفی ایجاد کرده است (توجه شود که قرار گرفتن این بارها منطبق بر خط مرکزی انجام و باعث ایجاد زاویه لل شده است. بارگذاری نامتقارن روی کشتی در واقع باعث ایجاد زاویه‌ای می‌شود که بدان زاویه «لیست» گویند). بنابراین منفی بودن GM_0 لزوما به معنای واژگون‌شدن شناور نیست بلکه شناور تنها در صورتی واژگون می‌شود که قدرمطلق مقدار GM اولیه منفی، مقدار بزرگی باشد. اگر قدرمطلق GM_0 عدد کوچکی باشد، شناور از حالت ناپایدار اولیه در زاویه لل به حالت تعادل می‌رسد و واژگون نمی‌شود.

❖ محاسبه زاویه لل برای یک شناور بدنه دیواره‌ای[1]

با توجه به شکل ۲-۱۱۱ در حالت اولیه M_0 در زیر G_0 قرار دارد و تعادل ناپایدار داریم.



شکل ۲-۱۱۱: بررسی موقعیت G و M در حالت زاویه لل

با کوچکترین نیروی خارجی، شناور تا زاویه θ کج می‌شود تا B_0 به B_{Loll} منتقل شود و راستای نیروی وزن و بویانسی نیز در یک امتداد قرار گیرند یعنی $GZ = 0$. در شکل ملاحظه می‌شود که نقطه متاسنتر (یا پرو متاسنتر) بر مرکز ثقل G_0 منطبق شده یا در امتداد آن است. برای محاسبه این زاویه در یک شناور بدنه دیواره‌ای داریم:

$$GZ = (GM_0 + \frac{1}{2}BM\tan^2\theta)Sin\theta$$

در زاویه لل $GZ = 0$ است لذا:

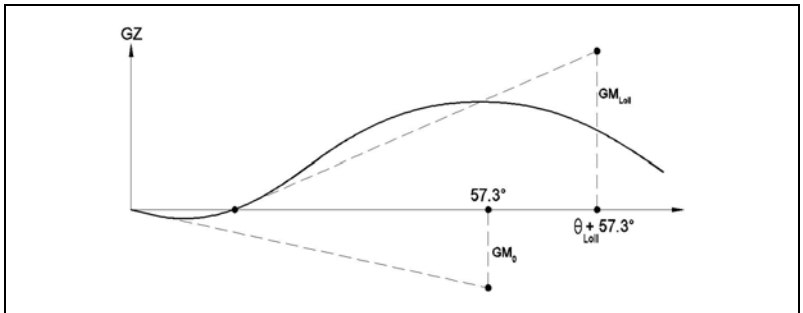
$$(GM_0 + \frac{1}{2}BM.\tan^2\theta)Sin\theta = 0$$

$Sin\theta = 0$ یعنی شناور بدون غلتش باشد. حالت دیگر صفر بودن GZ عبارتست از:

$$GM_0 + \frac{1}{2}B_0M \times Tan^2\theta = 0$$

$$tan^2\theta = \frac{-2\times GM_0}{B_0M}$$

$$tan\theta = \sqrt{\frac{-2\times GM_0}{B_0M}}$$



شکل ۲-۱۱۲: نمایش ارتفاع متاسنتری اولیه و ارتفاع متاسنتری در حالت لل با استفاده از منحنی GZ.

توجه شود که این رابطه فقط برای شناورهای بدنه دیواره‌ای بدست آمده و اگر زاویه لل بزرگتر از زاویه ورود لبه دک به آب باشد، فرمول فوق اعتبار ندارد. ملاحظه می‌شود که شناور در حالت اولیه دارای ارتفاع متاسنتر منفی

1 -wall sided

(M زیر G) است و در زاویه لل دارای ارتفاع متاسنتر مثبت (M بالای G) است. (توجه شود که حالت نشان داده شده در شکل، انطباق M و G بـه هـم است که در این علاوه بر GZ، مقدار GM صفر می‌شود ولی در حالت عمومی صفر شدن GZ می‌تواند با هم امتداد شدن G و M صـورت گیـرد یعنـی GM مثبت باشد ولی GZ صفر باشد). این مطلب را می‌توان با استفاده از نمودار $GZ-\varphi$ این شناور به صورت شکل ۲-۱۱۲ نمایش داد. همانطور که می‌دانیم مقدار GM از تقاطع شیب نمودار GZ با خط عمود از زاویه ۵۷/۳ درجه بدست می‌آید. ارتفاع متاسنتری اولیه از زاویـه ۵۷/۳ درجـه و همچنـین مقدار GM_{Loll} در زاویه ۵۷/۳+ θ_{Loll} درجه بدست می‌آید. در مبدأ مختصات که $GZ=0$ است ارتفاع متاسنتر منفی و برابر GM_0 مـی‌باشـد. در زاویه لل θ_{Loll} نیز $GZ=0$ می‌باشد ولی ارتفاع متاسنتری مثبت است. مقدار ارتفاع متاسنتر در زاویه لل به صورت زیر به دست می‌آید (برای یـک شناور بدنه دیواره‌ای):

$$GZ=(GM_0+\frac{1}{2}BM_0\times tan^2\theta).Sin\theta$$

$$\left.\frac{d(GZ)}{d\theta}\right|_{\theta=\theta_L}=Cos\theta\left(GM_0+\frac{1}{2}BM_0\cdot tan^2\theta_L\right)+BM_0\cdot Sin\theta_L\cdot tan\theta_L\cdot Sec^2\theta_L$$

$$\left.\frac{d(GZ)}{d\theta}\right|_{\theta=\theta_L}=GM_{Loll}=Cos\theta\left(GM_0+\frac{1}{2}BM_0\left(\frac{-2\cdot GM_0}{BM_0}\right)\right)+BM_0\left(\frac{-2GM_0}{BM_0}\right)Sec\theta_L$$

$$GM_{Loll}=0-2GM_0Sec\theta_L \quad\longrightarrow\quad GM_{Loll}=-2GM_0.Sec\theta_L$$

توجه شود که مقدار GM_{LOLL} باید مثبت باشد چون GM_0 منفی و $Sec\theta_L$ مثبت است و با وجود عدد منفی ۲- در نهایت، مقـدار GM_{LOll} مثبـت خواهد شد.

مثال) در شناور مدل ۲ در آبخور ۵ متر، بر اثر یک بارگیری KG=5.62 m می‌شود. وضعیت پایداری و احتمال غرق‌شدن شناور را بررسـی کنید. **حل:** از مشخصات شناور مدل ۲ در آبخور ۵ متر می‌دانیم که:

$KB = 2.5\ m$

$BM0 = 3.1\ m$

$KM0 = 5.6\ m$

$GM0 = KM - KG = 5.6-5.62 = -0.02\ m$ از آنجا که $KG=5.7\ m$ داریم:

از آنجا که ارتفاع متاسنتری اولیه شناور منفی است لذا شناور در یک زاویه لُل قرار می‌گیرد. اگر این زاویه بزرگتر از زاویه خیسی عرشـه باشـد، احتمـال غرق شدن شناور بسیار زیاد است. لذا مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- محاسبه زاویه لل ۲- محاسبه زاویه خیسی عرشه ۳- محاسبه ارتفاع متاسنتری در حالت لل

۱- محاسبه زاویه لل:

$$\tan\theta=\sqrt{\frac{-2\times GM_0}{B_0M}}=\sqrt{\frac{-2\times(-0.02)}{3.1}}=0.11$$

$\theta_{loll}=6.48^\circ$

۲- محاسبه زاویه خیسی عرشه:

$$\frac{B}{2}=\frac{13.6}{2}=6.8\ m$$

عمق بدنه D=6m

آبخور d=5m

فری برد f=6-5=1

$$\tan\theta=\frac{f}{\frac{B}{2}}=\frac{1}{6.8}=0.147 \quad\longrightarrow\quad \text{زاویه خیسی عرشه } \theta_S=8.36^\circ$$

ملاحظه می‌شود که زاویه لل خیلی بیشتر از زاویه خیسی عرشه می‌باشد و لذا اگر آب وارد یکی از منافذ روی عرشه شود، شناور به احتمـال زیـاد غـرق خواهد شد. قطعی بودن آن منوط به تقسیم‌بندی فضای داخلی بارج می‌باشد.

۳- ارتفاع متاسنتری در حالت لل: $GM_{Loll}=-2GM_0.Sec\theta=-2\times(-0.02)\times Sec(6.48)=0.04\ m$

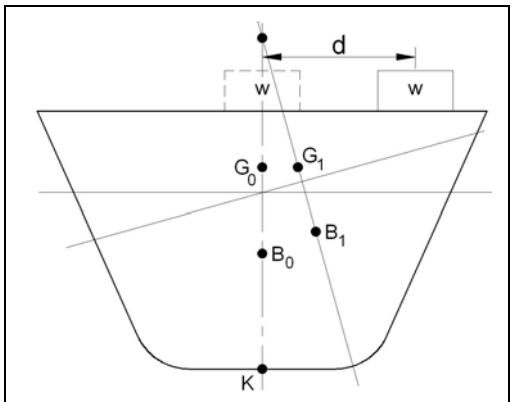
یعنی شناور پس از رسیدن به زاویه لل دارای ارتفاع متاسنتری ۴ سانتیمتر است.

مسئله: شناور مدل ۲ در زاویه لل ۲ درجه قرار گرفته است. چقدر وزنه و چگونه جابجا کنیم که این زاویه لل اصلاح شود؟ (راهنمایی: پـس از محاسـبه GM در حالت لل، مقداری وزنه را باید به صورت عمودی جابجا شود تا مقدار GM مثبت شده و زاویه لل حذف شود).

فصل ۱۹: محاسبه زاویه لیست در شناور

❖ نحوه محاسبه زاویه لیست

همانطور که بیان شد، زاویه لیست ناشی از جابجایی عرضی بارهای داخل شناور یا بارگذاری عرضی نامتقارن می‌باشد. فرض کنید جسمی به وزن w از خط مرکزی به سمت راست شناور منتقل شود. در این صورت مرکز ثقل از G به G_1 منتقل می‌شود. در این حالت دیگر مرکز ثقل و بویانسی در یک امتداد، در راستای قائم نیستند لذا شناور به اندازه زاویه θ کج می‌شود تا امتداد نیروی وزن و بویانسی، در یک راستا قرار گیرند (شکل ۲-۱۱۳). (توجه شود که در صورت غلتیدن کشتی به زاویه θ، راستای G_1 و B_1 همچنان عمود بر سطح و در راستای قائم هستند).



شکل ۲-۱۱۳: نحوه محاسبه زاویه لیست

جابجایی مرکز ثقل برابر است با: $GG_1 = \frac{w.d}{W}$

w: وزن بار W: وزن کل شناور d: فاصله جابجایی بار w θ: زاویه لیست

$$tan\theta = \frac{GG_1}{GM} \qquad tan\theta = \frac{GG_1}{GM} = \frac{w.d}{W.GM}$$

مثال) در شناور مدل ۱ باری به وزن ۵۰ تن به فاصله ۵ متر از خط مرکزی شناور قرار گرفته است.زاویه لیست ناشی از این بار را محاسبه کنید.

حل: در سناریوی وزنی اصلی مدل ۱ داریم: $GM=1\ m \qquad W=3500\ t$

و همچنین داریم: $w=50\ t \qquad d=5\ m$

$$\tan\theta = \frac{w.d}{W.GM} = \frac{50\times5}{3500\times1} = 0.071 \quad \rightarrow \quad \theta = 4^o$$

مسئله) کشتی مدل ۲ پس از آب‌اندازی در زاویه کجی عرضی ۳ درجه به چپ قرار گرفته است. مطلوبست: الف- چگونه بررسی شود که این زاویه لیست است یا لل. ب- اگر زاویه لیست باشد، چه مقدار وزنه و چگونه جابجا شود که این زاویه لیست حذف شود.

امام علی (ع):

حسد درد بی درمان است که جز به مرگ حاسد یا محسود زایل نگردد.

فصل ۲۰:[1] پایداری دینامیکی شناور

❖ مفهوم پایداری دینامیکی[2]

پایداری دینامیکی عبارتست از انرژی بازگرداننده[3] شناور که معادل با سطح زیر نمودار ممان بازگرداننده (RM)[4] می‌باشد.

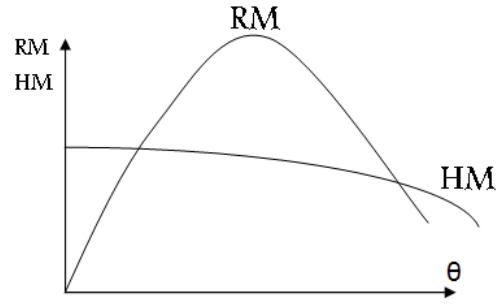
ممان بازگرداننده برابر است با: $RM = GZ.\Delta$

مطابق شکل ۲-۱۱۴، محور عمودی نمودار RM بوده و واحد آن تن در متر$(t.m)$ است. محور افقی نمودار برحسب زاویه (واحد رادیان) می‌باشد که هر ۱ رادیان معادل ۵۷/۳۲ درجه می‌باشد. مطابق شکل ۲-۱۱۴، به عنوان مثال پایداری دینامیکی شناور تا زاویه ۳۰ درجه برابر مساحت A می‌باشد.

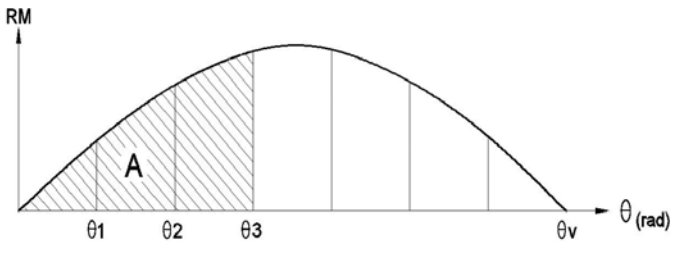
اگر از روشهای عددی بخواهیم استفاده کنیم، با اعمال یکی از روشهای عددی بر روی مقادیر RM در هر زاویه می‌توان سطح زیر نمودار را به دست آورد. از آنجا که واحد RM نیرو × جابجایی $(t.m)$ می باشد و زاویه نیز بر حسب رادیان بوده و دیمانسیون ندارد، لذا سطح زیر این نمودار از جنس انرژی (نیرو × جابجایی) می‌باشد. این انرژی عبارتست از انرژی مقاوم در برابر انرژی هیل‌دهنده (HM)[5]. به عبارت دیگر شناور می‌تواند تنها مقدار انرژی هیل دهنده‌ای را تحمل کند که بیشتر از انرژی بازگرداننده نباشد در غیر اینصورت شناور از زاویه θ_v نیز عبور کرده و واژگون می‌گردد. انرژی هیل دهنده می‌تواند انرژی باد، موج یا جریانات دریایی باشد.

❖ نمودار ممان واژگون کننده (HM)

نمودار ممان واژگون کننده معمولا به صورت یک نمودار متقاطع با نمودار RM نشان داده می‌شود و می‌تواند ناشی از نیروی باد یا موج یا هر دو باشد. اگر نیروی باد وجود داشته باشد با کج شدن کشتی، سطح جانبی کشتی کاهش یافته و مقدار HM با افزایش θ کاهش می‌یابد لذا نمودار HM بصورت نزولی (یا یک نمودار کسینوسی) بدست می‌آید (شکل ۱۱۵). نمودار مشخصات باد و امواج را می‌توان از جدولی که قبلا ارائه شده استخراج نمود. مثلا اگر کشتی برای قدرت دریایی (فورس دریایی) ۴ طراحی شده باشد، این قدرت دریایی معادل عدد بیوفورت ۵ می‌باشد که قدرت دریایی ۴ دارای حداکثر ارتفاع موج ۲/۵ متر و بیوفورت ۵ دارای حداکثر سرعت باد ۲۱ گره می‌باشد. ممان حاصل از نیروی عرضی ناشی از این باد و موج بر کشتی محاسبه و به عنوان HM درنظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۱۱۵: نمودار ممان واژگون کننده (HM) به صورت متقاطع با نمودار RM



شکل ۲-۱۱۴: پایداری دینامیکی برابر سطح زیر نمودار RM

❖ قوانین استاندارد در مورد پایداری دینامیکی

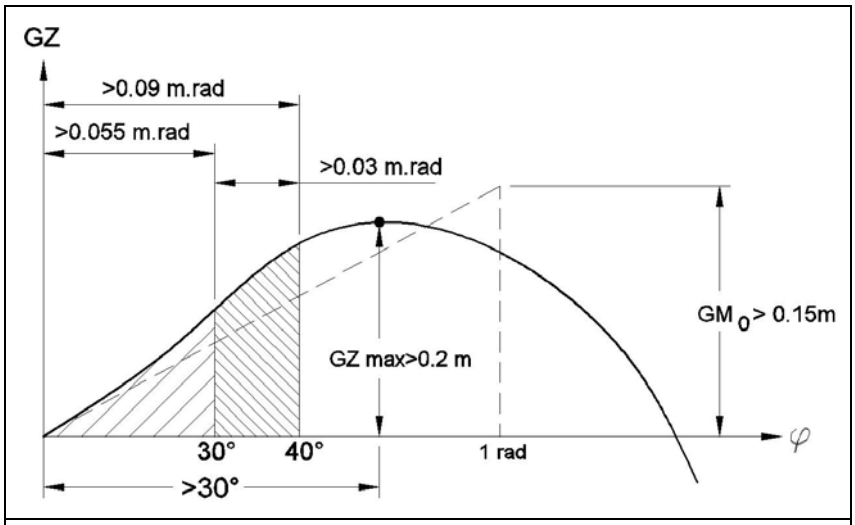
بیان داشتیم که پایداری دینامیکی، معادل سطح زیر نمودار RM است و بیانگر قدرت و توانایی شناور در برابر انرژی هیل دهنده وارد بر شناور می‌باشد. لذا پایداری دینامیکی در مبحث پایداری و جلوگیری از واژگون شدن شناور نقش محوری و اساسی دارد که توسط سازمان IMO و مؤسسات استاندارد بر آن تأکید شده است. این قوانین همانطور که قبلاً نیز بیان شده ، عبارتست از:

۱- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۳۰ درجه کمتر از ۰/۰۵۵ متر – رادیان نباشد.

۱- منابع: [9] , [12] , [14]

2 - Dynamic stability
3 - Righting Energy
4 - Righting Moment
5 - Heeling Moment

۲- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۴۰ درجه (یا زاویه‌ای که یکی از منافذ غیر آب‌بند به زیر آب می رود) کمتر از ۰/۰۹ متر – رادیان نباشد.
۳- سطح زیر نمودار GZ در زوایای بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (یا زاویه‌ای که یکی از منافذ غیر آب‌بند به زیر آب می رود) کمتر از ۰/۰۳ متر – رادیان نباشد.
می دانیم که $RM = GZ.\Delta$ لذا از حاصلضرب سطح زیر نمودار GZ در تناژ شناور، مقدار پایداری دینامیکی در هر زاویه به دست می‌آید. اگر برای یک شناور، این مؤلفه‌های استاندارد برآورده نشود می‌توان با تغییر چیدمانی و محدود کردن سناریوی بارگیری ارتفاع KG را کاهش داد و به مؤلفه‌های استاندارد رسید.



تکرار شکل: مولفه‌های استاندارد منحنی GZ

❖ تشریح پایداری دینامیکی و زوایای تعادل به کمک سیستم وزنه و فنر

مطابق شکل ۲-۱۱۶ پایداری دینامیکی را می‌توان با سیستم جرم و فنر شبیه سازی کرد. دو حالت کلی را می‌توان در این قسمت در نظر گرفت:

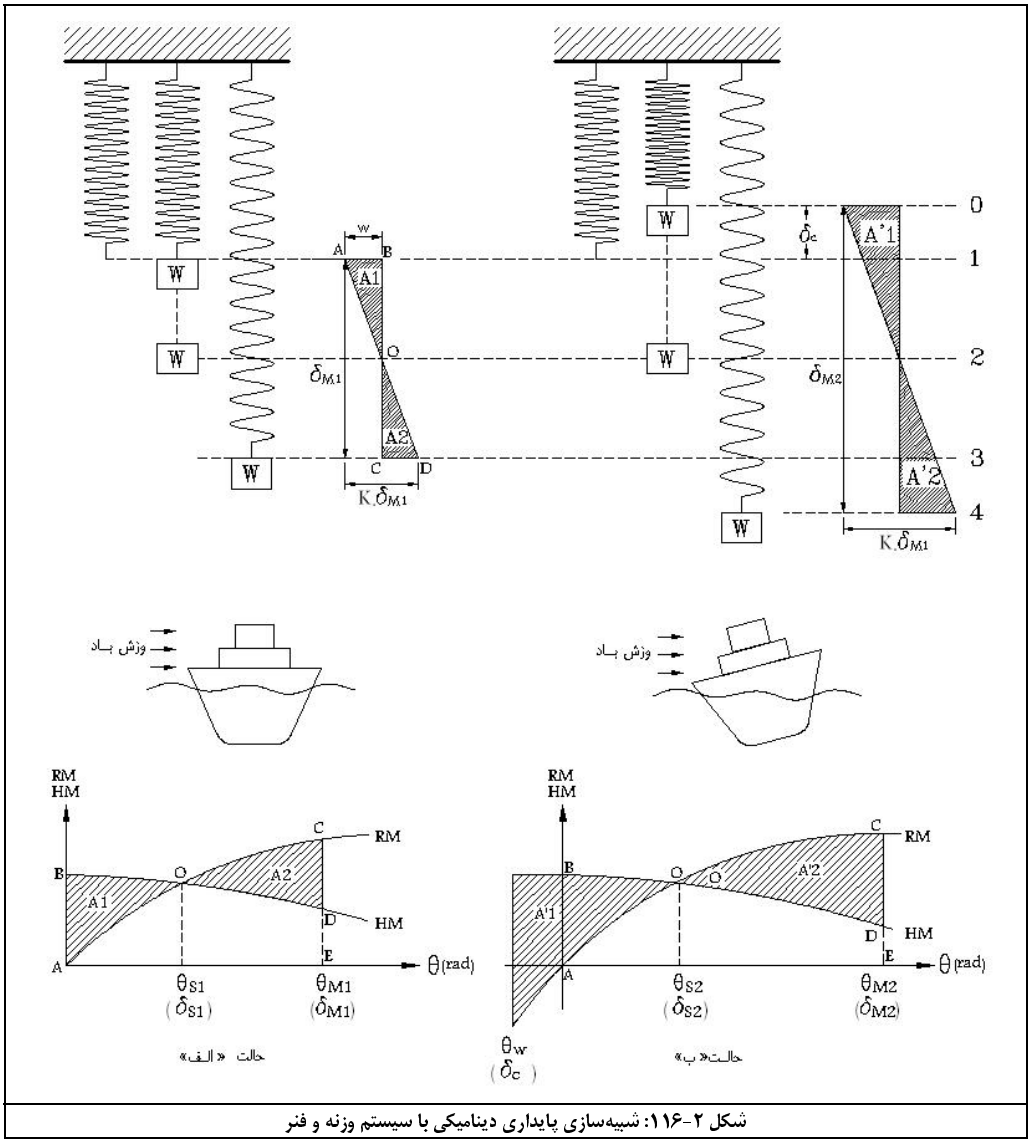
حالت اول : فنر در حالت اولیه در حالت آزاد (بدون فشردگی یا کشیدگی) می‌باشد. جرم M به آن آویخته می شود و طول فنر به اندازه δ_{M1} باز می‌شود و پس از چند بار رفت و برگشت در طول δ_{S1} به حالت استاتیکی ثابت می‌ماند. در این حالت اگر ارتفاع ۳، مبنا فرض شود، انرژی پتانسیل $mg\delta_{M1}$ در ارتفاع ۱، تبدیل به انرژی پتانسیل فنر $\frac{1}{2}K\delta_{M1}^2$ در ارتفاع ۳ می‌شود. فنر در حالت نهایی در ارتفاع ۲ به حالت ایستایی و سکون می-رسد که در این حالت طول فنر به اندازه δ_{S1} باز شده است. در این سیستم دو دسته انرژی وجود دارد: ۱- انرژی بازگرداننده که همان انرژی پتانسیل است که می‌خواهد فنر را به وضعیت تعادل ساکن برساند ۲- انرژی منحرف کننده که همان انرژی پتانسیل جرم افزوده شده می‌باشد که فنر را از حالت تعادل منحرف می‌کند. مطابق شکل، سطح $A1$ برابر انرژی منحرف‌کننده و سطح $A2$ برابر انرژی بازگرداننده فنر است.

حال شناوری را در نظر بگیرید که در حالت اولیه بدون هیل است. سطح جانبی این شناور در معرض انرژی هیل دهنده باد قرار می‌گیرد. برای این شناور، نمودارهای RM و HM ترسیم شده‌اند. سطح زیر نمودار HM برابر انرژی هیل دهنده باد و سطح زیر نمودار RM برابر انرژی بازگرداننده هیدرواستاتیکی می‌باشد. هنگامی که باد شروع به وزیدن می‌کند شناور تا زاویه θ_{M1} غلتش می‌کند و پس از چند نوسان تا زمانی که وزش باد ادامه دارد، در زاویه θ_{S1} به حالت استاتیکی باقی می‌ماند. زاویه θ_{M1} معادل تغییر طول δ_{M1} فنر و زاویه θ_{S1} معادل تغییر طول δ_{S1} فنر است.

سطح $AODE$ بین سطح زیر هر دو نمودار RM و HM مشترک است بنابراین در سمت چپ نقطه O، انرژی هیل دهنده بیش از انرژی بازگرداننده است که با مساحت هاشور خورده $A1$ نشان داده می‌شود و در سمت راست نقطه O نیز انرژی بازگرداننده بیش از انرژی هیل دهنده است که با سطح هاشور خورده $A2$ نمایش داده می‌شود. سطح $A1$ و $A2$ با هم برابر هستند یعنی در واقع شناور تا زاویه‌ای غلتش می‌کند که سطح $A2$ با سطح $A1$ برابر شود که این زاویه همان θ_{M1} می‌باشد. زاویه θ_{S1} نیز محلی است که در آن زاویه، RM و HM با هم برابر هستند یعنی در محل تلاقی دو نمودار (نقطه O). زاویه θ_{M1} از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که در واقع بیشترین زاویه غلتش شناور به هنگام اعمال انرژی هیل دهنده را نشان می دهد که در آن زاویه نباید هیچ یک از منافذ غیر آب‌بند به زیر آب بروند.

حالت دوم : فنر در حالت اولیه به اندازه طول δ_C فشرده شده است . در این حالت جرم M بدان آویخته و رها می‌شود. فنر به طول δ_{M2} تغییر طول می‌دهد و پس از چند بار رفت و برگشت، در ارتفاع ۲ و با تغییر طول δ_{S2} به حالت سکون می‌رسد. در مقایسه با حالت اول: $\delta_{S1} = \delta_{S2}$

ولی $\delta_{M2} > \delta_{M1}$ چرا که فنر دارای فشردگی اولیه بوده و انرژی اولیه آن برابر $mg(\delta_{m1}+\delta_c)+\frac{1}{2}k\delta_c^2$ می باشد. این انرژی اولیه از حالت قبل بیشتر است لذا فنر به طول بیشتری باز می‌شود.



شکل ۲-۱۱۶: شبیه‌سازی پایداری دینامیکی با سیستم وزنه و فنر

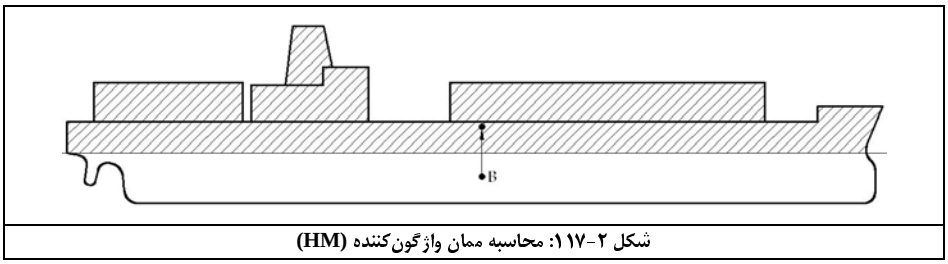
حال شناوری را با زاویه هیل اولیه (θ_w) در نظر بگیرید که سطح جانبی آن در معرض انرژی هیل دهنده باد قرار می‌گیرد. با عنایت به توضیحات حالت اول، افزونی انرژی هیل دهنده به انرژی بازگرداننده (در طرف چپ نقطه o) برابر سطح هاشور خورده A_1' است و افزونی انرژی بازگردانـنده نسـبت بـه انرژی هیل دهنده (در طرف راست نقطه o) برابر سطح هاشور خورده A_2' می‌باشد. همانند حالت اول، برای به دست آوردن θ_{M2} ، دو سطح A_1' و A_2' باید با هم برابر شوند. θ_{S2} نیز همانند θ_{S1} بدست می‌آید که زاویه مربوط به محل تقاطع دو نمودار (محل برابری *RM* , *HM*) می‌باشد. مسلماً در حالت دوم، غلتش شناور شدیدتر است. θ_{M2} معادل δ_{M2} و همچنین θ_{S2} معادل δ_{S1}, δ_{S2} در سیستم جرم و فنر می‌باشـد. سـطوح هاشـور خورده نیز در سیستم جرم و فنر و نمودارهای *RM* , *HM* با هم معادل هستند.

❖ روش حل مسائل پایداری دینامیکی

حل مسائل پایداری دینامیکی شامل مراحل زیر است:

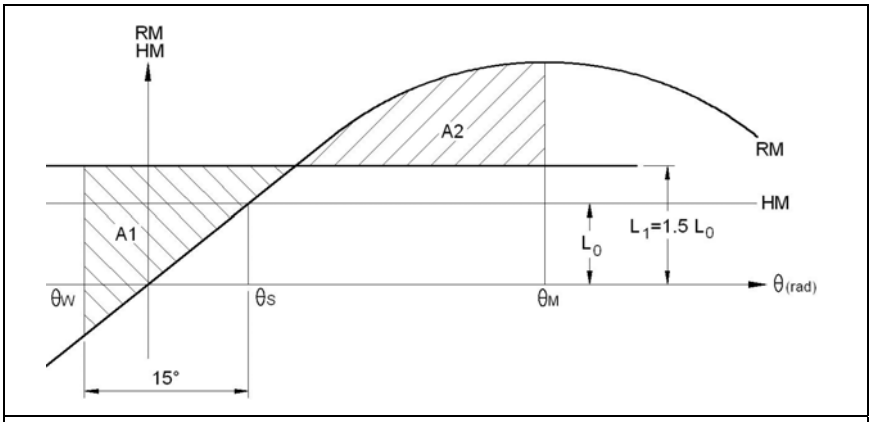
۱- استخراج مقادیر *RM* که از حاصلضرب مقادیر *GZ* در هر زاویه در مقدار تناژ به دست می‌آید.

۲- استخراج مقادیر *HM* که مثلاً اگر انرژی واژگون‌کننده باد مد نظر باشد از حاصلضرب نیروی باد در فاصله مرکز سطح وزش باد تـا مرکـز بویانسـی بدست می‌آید (شکل ۲-۱۱۷). متناظر با غلتش شناور، سطح در معرض وزش باد کاهش می‌یابد ولی در مسائل معمولاً این ممان ثابت فرض شـده و در نمودار با یک خط افقی نشان داده می‌شود. پس از محاسبه این ممان، مقدار آن در ۱/۵ ضرب می شود تا ضریب اطمینان بیشتری حاصل شود.



شکل ۲-۱۱۷: محاسبه ممان واژگون‌کننده (HM)

۳- تعیین زاویه هیل اولیه : طبق مطالبی که بیان شد، اگر شناور دارای زاویه هیل اولیه باشد، غلتش شدیدتری را دارد لذا در حل مسائل، یک زاویه هیل اولیه (θ_W) در نظر گرفته می‌شود که برابر ۱۵ درجه قبل از حالت تعادل استاتیکی (θ_S) می‌باشد (شکل ۲-۱۱۸). البته این زاویه در هر استاندارد طبق روابط خاصی به دست می‌آید. همچنین در حل مسائل، واحد پایداری دینامیکی بر حسب تن – متر $(t.m)$ می‌باشد. اگر واحد بر حسب $KN.m$ داده شده بود می‌توان با فرض $g = 10 \ \ m/s^2$ از رابطه مقابل برای تبدیل استفاده کرد: $1 \ ton-m = 10 \ \ KN-m$



شکل ۲-۱۱۸: مراحل حل مسائل پایداری دینامیکی جهت محاسبه زوایای θ_S , θ_M

۴- تعیین زاویه θ_s یعنی محل تقاطع دو نمودار RM , HM

۵- تعیین زاویه θ_W که از زاویه θ_s به اندازه ۱۵ درجه به سمت چپ به دست می آید.

۶- تعیین *مساحت* $A1$ (به روش ترسیمی یا حل عددی)

۷- تخمین زاویه θ_M به گونه ای که در آن زاویه سطح $A2$ برابر سطح $A1$ شود . باید توجه داشت که تعیین زاویه θ_M مستلزم چند مرحله سعی و خطا می‌باشد.

اگر حل مسئله طبق استاندارد BV مد نظر باشد، در ضمیمه ۱، روابط خاصی در این رابطه ارائه شده است.

❖ قدرت دریایی قابل تحمل کشتی

هر کشتی برای یک قدرت دریایی خاص طراحی می‌شود که در آن ارتفاع امواج و سرعت وزش باد، مشخص است. در این مورد دو حالت در نظر گرفته می‌شود:

الف- قدرت دریایی مجاز و ایمن: در این قدرت دریایی، کارایی دستگاهها و خدمه مختل نشده و بدنه کشتی حرکات چندان شدیدی را تحمل نمی‌کند.

ب- قدرت دریایی حداکثر: در این حالت حرکات کشتی بسیار شدید و کارایی خدمه و بعضی از دستگاهها مختل و متوقف می‌گردد و البته غرق نمی‌شود و همچنان شناور باقی می‌ماند.

برای تشخیص اینکه قدرت دریایی در نظر گرفته شده برای کشتی مجاز و ایمن است یا خیر، شکل۲-۱۱۹ را در نظر می‌گیریم. در این حالت دو شرط زیر باید بررسی شوند:

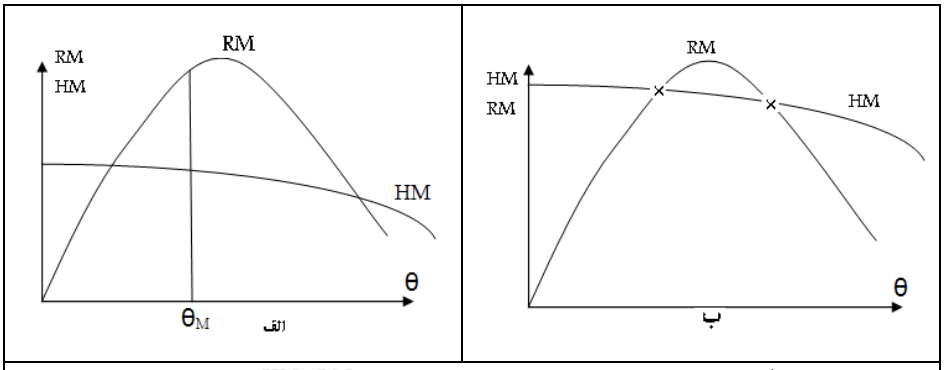
۱-مقدار θ_M نباید در بدترین شرایط فاصله زیادی از نقطه حداکثر نمودار گرفته و از آن عبور کند چراکه پس از این نقطه RM کاهش می‌یابد.

۲-مقدار θ_M نباید در هیچ شرایطی از تقاطع دوم دو نمودار عبور کند چراکه پس از تقاطع دوم $RM<HM$ شده و کشتی غرق خواهد شد.

مطابق شکل۲-۱۱۹ حالت الف یک حالت مناسب و ایمن بوده و حالت ب یک حالت نامناسب است. برای رفع حالت ب می‌توان دو اقدام زیر را انجام داد:

۱-افزایش پایداری کشتی به گونه‌ای که RM افزایش یابد. انجام این حالت به سادگی امکان‌پذیر نیست چون هر کشتی با توجه به نوع و تناژ دارای محدوده خاصی از پایداری است.

۲-کاهش قدرت دریایی قابل تحمل مثلا اگر کشتی برای قدرت دریایی ۵ درنظر گرفته شده هم اکنون برای قدرت دریایی ۴ درنظر گرفته شود.
با انجام این اقدامات می‌توان وضعیت نمودارهای HM وRM را نسبت به هم بهبود داد. البته یادآوری می‌شود که برای تعیین قطعی قدرت دریایی قابل تحمل کشتی در علم «تحلیل حرکات کشتی در دریا» یا *Seakeeping* عوامل موثر بطور کامل بررسی شده و تحلیل می‌گردد.



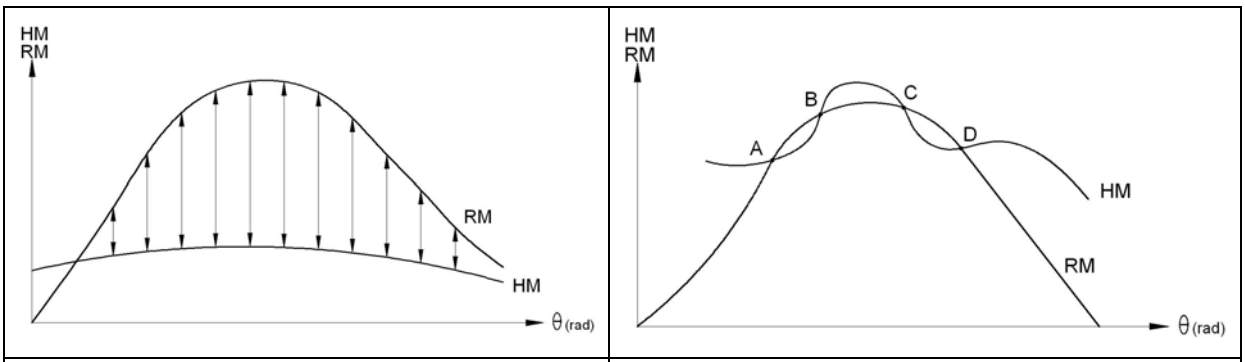
شکل ۲-۱۱۹: مقایسه حالت مناسب و نامناسب منحنی‌های RM و HM نسبت به هم

❖ بررسی حالت پایداری بر اساس منحنی HM و RM

بررسی حالت پایداری یا ناپایداری شناور بر اساس منحنی HM و RM امکان‌پذیر است. اگر شناور در وضعیتی باشد که با انحراف آن، ممان واژگون‌کننده از ممان بازگرداننده بزرگتر باشد، شناور ناپایدار و اگر ممان بازگرداننده از ممان واژگون‌کننده بیشتر باشد، شناور پایدار است. بنابراین در شکل ۲-۱۲۰ اگر ممان هیل دهنده به صورت غیرخطی باشد، در نقاط A و C دارای تعادل پایدار و در نقاط B وD دارای تعادل ناپایدار هستیم.

❖ پایداری باقیمانده[1]

به فاصله بین منحنی ممان بازگرداننده و ممان هیل دهنده، پایداری باقی‌مانده گفته می‌شود. در شکل ۲-۱۲۱ در هر زاویه می‌توان مقادیر پایداری باقیمانده را به صورت خطوط عمودی بین دو منحنی مشاهده کرد.



شکل ۲-۱۲۰: بررسی حالت پایداری با استفاده از منحنی‌های HM و RM

شکل ۲-۱۲۱: پایداری باقیمانده شناور

مثال) کشتی مدل ۱ در آبخور ۵ متر شناور است. شناور به صورت عرضی در معرض باد با سرعت ۵۰ گره قرار می‌گیرد. اگر ضریب درگ بدنه در معرض باد برابر ۱/۲ باشد، موارد زیر را محاسبه کنید:
الف- محاسبه ممان بازگرداننده و هیل دهنده
ب- کنترل مولفه‌های استاندارد پایداری دینامیکی
ج- زاویه تعادل استاتیکی
د- زاویه تعادل دینامیکی
سطح بادخور جانبی بدنه برابر ۱۷۰ مترمربع و فاصله مرکز این سطح از خط آبخور برابر ۱/۱۲ متر است.

حل:

الف- محاسبه ممان بازگرداننده و هیل دهنده

سرعت باد $V = 50\ knot = 25\ \frac{m}{s}$

1- residual stability

ضریب درگ $C = 1.2$

مساحت بادخور $A = 170\ m^2$

با استفاده از منحنی هیدرواستاتیک و داشتن فاصله KB در این آبخور، فاصله مرکز بویانسی (B) از خط آبخور را بدست می‌آوریم:

KB=2.78 m
Draft=5 m

فاصله B از خط آبخور: $5 - 2.78 = 2.22\ m$

فاصله مرکز سطح بادخور از B: $(HA) = 2.22 + 1.12 = 3.34\ m$

نیروی جانبی باد: $F = \frac{1}{2}.C.\rho.A.V^2 = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 1 \times 170 \times (25)^2 = 63750 \quad N = 6375\ kg = 6.375\ t\ f$

برای بدست آوردن ممان هیل‌دهنده داریم: (HM): ممان هیل دهنده در هر زاویه : نیروی باد × بازو × $\mathrm{Cos}\theta$

عبارت $Cos\theta$ بدین دلیل است که با غلتیدن شناور، سطح بادخور در $Cos\theta$ ضرب می‌شود لذا خواهیم داشت:

degree	cos	max HA	Force	HM	1.5*HM
-20	0.939	3.34	63.75	199.94	299.90
-15	0.966	3.34	63.75	205.69	308.53
-10	0.985	3.34	63.75	209.73	314.60
-5	0.996	3.34	63.75	212.07	318.11
0	1	3.34	63.75	212.93	319.39
5	0.996	3.34	63.75	212.07	318.11
10	0.985	3.34	63.75	209.73	314.60
15	0.966	3.34	63.75	205.69	308.53
20	0.939	3.34	63.75	199.94	299.90
25	0.906	3.34	63.75	192.91	289.37
30	0.866	3.34	63.75	184.39	276.59
35	0.819	3.34	63.75	174.39	261.58
40	0.766	3.34	63.75	163.10	244.65
45	0.707	3.34	63.75	150.54	225.81
50	0.643	3.34	63.75	136.91	205.37
55	0.573	3.34	63.75	122.01	183.01
60	0.5	3.34	63.75	106.46	159.69

ممان بازگرداننده در هر زاویه نیز از حاصلضرب مقدار GZ در جابجایی بدست می‌آید: $RM = GZ \times displacement$

لذا خواهیم داشت:

degree	GZ	disp.	RM
-20	-0.295	3500	-1032.5
-15	-0.241	3500	-843.5
-10	-0.188	3500	-658
-5	-0.092	3500	-322
0	0	3500	0
5	0.092	3500	322
10	0.188	3500	658
15	0.241	3500	843.5
20	0.295	3500	1032.5
25	0.323	3500	1130.5
30	0.318	3500	1113
35	0.298	3500	1043
40	0.265	3500	927.5
45	0.206	3500	721
50	0.12	3500	420
55	0.014	3500	49
60	-0.107	3500	-374.5

ب- کنترل مولفه‌های استاندارد پایداری دینامیکی

همانطور که بیان شد، برای بررسی مولفه‌های پایداری باید سطح زیر نمودار تا زوایای ۳۰، ۴۰ و بین ۳۰ و ۴۰ درجه محاسبه گردد و با حداقل مقادیر استاندارد مقایسه گردد.

- پایداری دینامیکی تا زاویه ۳۰ درجه

degree	RM	سیمسون	تابع سطح
0	0	1	0
5	322	3	966
10	658	3	1974
15	843.5	2	1687
20	1032.5	3	3097.5
25	1130.5	3	3391.5
30	1113	1	1113
SUM=			**12229**

$$\text{dynamic}\quad \text{stability} = \frac{3}{8}\times\frac{5}{57.3}\times \text{sum} = 400.164 \quad \text{t}\cdot\text{m}$$

- پایداری دینامیکی تا زاویه ۴۰ درجه

degree	RM	سیمسون	تابع سطح
0	0	1	0
5	322	4	1288
10	658	2	1316
15	843.5	4	3374
20	1032.5	2	2065
25	1130.5	4	4522
30	1113	2	2226
35	1043	4	4172
40	927.5	1	927.5
SUM=			**19890.5**

$$dynamic \quad stability = \frac{1}{3}\times\frac{5}{57.3}\times sum = 578.55 \quad t\cdot m$$

قوانین استاندارد پایداری دینامیکی همانطور که قبلاً نیز بیان شده، برای شناور مدل ۱ عبارتست از:

۱- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۳۰ درجه کمتر از ۰/۰۵۵ متر – رادیان نباشد(مورد تایید است).

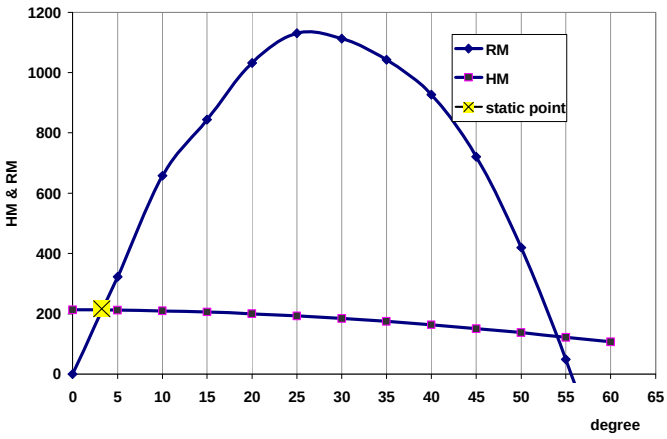
۲- سطح زیر نمودار GZ تا زاویه ۴۰ درجه (یا زاویه ای که یکی از منافذ غیر آب بند به زیر آب می‌رود) کمتر از ۰/۰۹ متر – رادیان نباشد(مورد تایید است).

۳- سطح زیر نمودار GZ در زوایای بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (یا زاویه ای که یکی از منافذ غیر آب بند به زیر آب می رود) کمتر از ۰/۰۳ متر – رادیان نباشد (مورد تایید است).

توجه شود که در حل این مسئله فرض شده است که زاویه ورود یکی از منافذ غیر آب‌بند به داخل آب، بیشتر از ۴۰ درجه باشد. همچنین زاویه خیسی عرشه به معنای زاویه ورود آب به داخل بدنه نیست چراکه از لوله‌های زانویی روی عرشه برای افزایش زاویه ورود آب به داخل بدنه استفاده می‌شود.

ج- زاویه تعادل استاتیکی

زاویه تعادل استاتیکی مطابق شکل ۲-۱۲۲ عبارتست از زاویه مربوط به محل تقاطع دو نمودار HM و RM که برای شناور مدل ۱ برابر ۳/۲۵ درجه است.



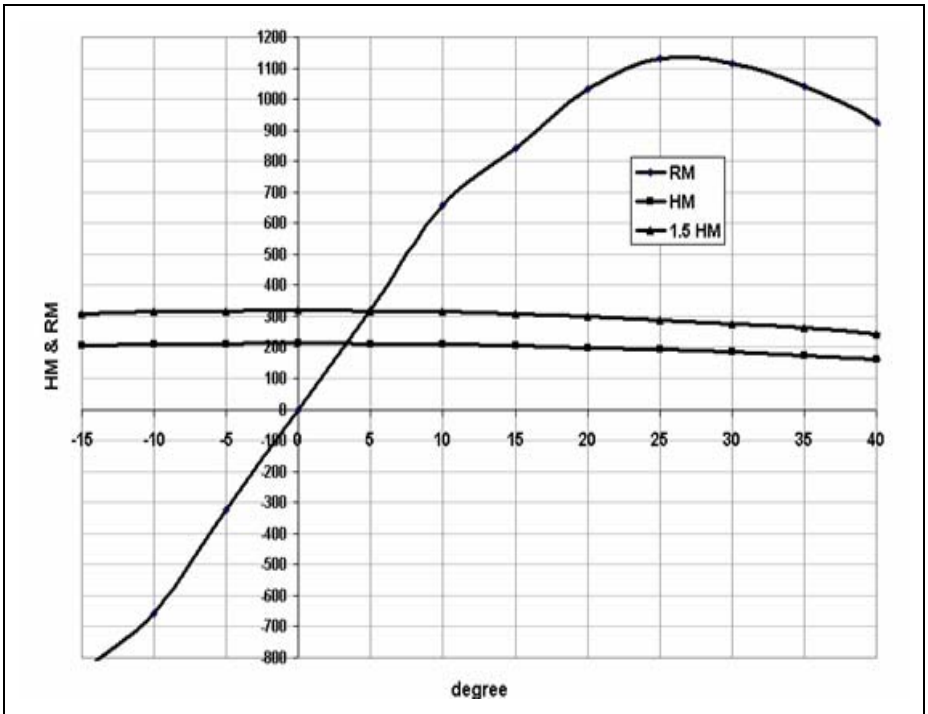
شکل ۲-۱۲۲ زاویه تعادل استاتیکی (محل تقاطع دو نمودار).

د- زاویه تعادل دینامیکی

ابتدا مقادیر و نمودار $1.5\times HM$ را بدست می‌آوریم. محل تقاطع این نمودار با نمودار RM در زاویه ۵ درجه می‌باشد. از این زاویه ۱۵ درجه به سمت چپ حرکت می‌کنیم که زاویه ۱۰- بدست می‌آید. مساحت بین دو نمودار RM و $1.5\ HM$ را از محل تقاطع دو نمودار (زاویه ۵ درجه) تا زاویه ۱۰- درجه محاسبه می‌کنیم (شکل ۲-۱۲۳):

degree	1.5×HM	RM	فاصله بین دو نمودار	سیمسون	تابع سطح
-10	314.60	-658	972.60	1	972.6
-5	318.11	-322	640.11	3	1920.33
0	319.39	0	319.4	3	958.2
5	318.11	322	0	1	0

	SUM=	**3851.13**
AREA=3/8×5/57.3×SUM=	**126.0187**	



شکل ۲-۱۲۳ نمودار ممان‌های واژگون‌کننده و بازگرداننده

حال باید همین مساحت را در طرف راست محاسبه کرد. اگر فرض اولیه ۲۰ درجه باشد داریم:

degree	1.5×HM	RM	فاصله بین دو نمودار	سیمسون	تابع سطح
5	318.11	322	0	1	0
10	314.5967	658	343.4	3	1030.21
15	308.5283	843.5	534.97	3	1604.915
20	299.9049	1032.5	732.6	1	732.5951

	SUM=	**3367.72**
AREA=3/8×5/57.3×SUM=		**110.2003**

ملاحظه می‌شود که مساحت از ۵ درجه تا زاویه ۲۰ درجه هنوز به ۱۲۶ نرسیده است. از طرفی مساحت تا ۲۵ درجه نیز به ۱۸۰/۷۷ می‌رسد (محاسبه آن ذکر نشده است) لذا با تخمین یک مساحت مستطیلی داریم:

مساحت باقی مانده $= 126 - 110.2 = 15.8$

$15.8 = 732.6 \times \theta \quad \rightarrow \quad \theta = 0.021\ rad = 1.23\ degree$

بنابراین زاویه‌ای که در آن مساحت سمت چپ و راست با هم برابر شوند عبارتست از: $20 + 1.23 = 21.23\ degree$

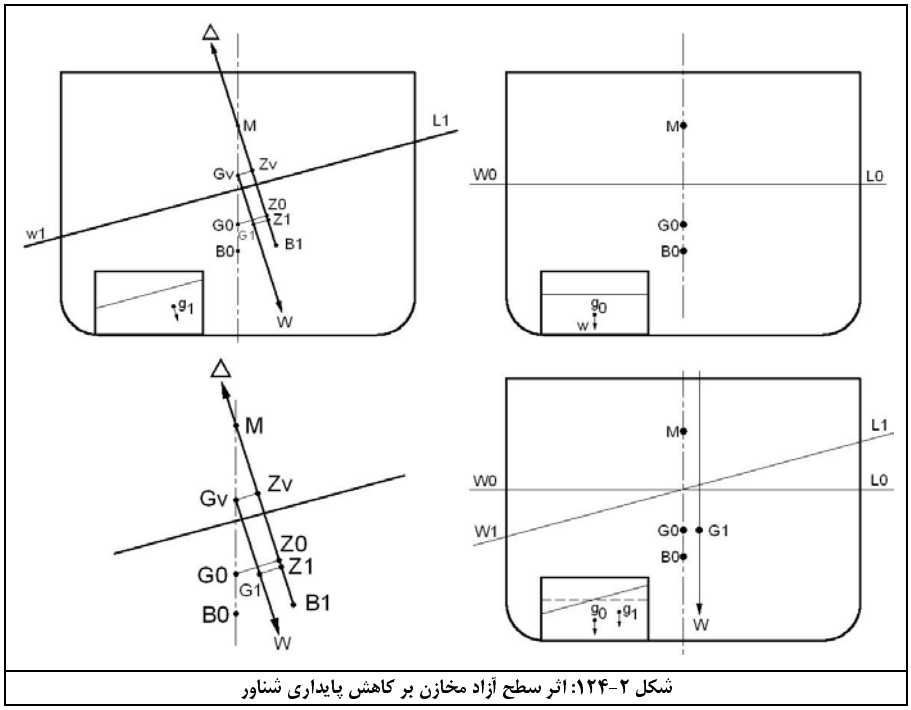
این زاویه همان زاویه تعادل دینامیکی است یعنی بیشترین زاویه غلتشی که شناور در اثر وزش باد بدان می‌رسد.

پیامبر (ص):

بین دانشمند و عابد فرق بسیار است، دانشمند صد پایه از عابد فزون تر است.

فصل ۲۱:[۱] اثرات سطح آزاد مخازن بر پایداری

سطح آزاد مخازن نیز همچون اثر اجسام آویزان باعث تضعیف پایداری می‌گردد لذا اثر سطح آزاد[۲] مخازن را باید به حداقل رسانید و تقسیم‌بندی داخلی مخازن بدین منظور انجام می‌شود. سطح آزاد مخازن باعث می‌شود که در اثر تلاطم شناور، سیال داخل مخزن از طرفی به طرف دیگر حرکت کند و باعث جابجایی عرضی و عمودی مرکز ثقل شود که آن نیز باعث اصلاح کسینوسی و سینوسی منحنی GZ می‌شود. جابجایی مرکز ثقل سیال درون مخزن و به تبع آن جابجایی مرکز ثقل شناور و اثر آن بر منحنی GZ در شکل ۲-۱۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲۴: اثر سطح آزاد مخازن بر کاهش پایداری شناور

جابجایی سیال داخل مخزن اثری بر مرکز بویانسی ندارد و مطابق شکل باعث جابجایی مرکز ثقل (G_1) می‌شود. اگر از مرکز ثقل جدید خطی عمود بر سطح آب (موازی با امتداد *BM*) ترسیم کنیم، خط مرکزی شناور را در G_v قطع می‌کند. در این حالت بازوی بازگرداننده G_vZ_v به G_0Z_0 تبدیل شده است و در واقع می‌توان فرض کرد که مرکز ثقل شناور از دیدگاه پایداری، از G_0 به G_v منتقل شده است. G_v را «مرکز ثقل مجازی» گویند و G_0G_v مقدار کاهش پایداری ناشی از اثر سطح آزاد است. یادآوری می‌شود که ضربه سیالات داخل مخازن بر دیواره‌ها مبحث متفاوتی است که بدان اسلوشینگ[۳] گویند.

❖ محاسبه میزان کاهش پایداری ناشی از اثر سطح آزاد

بیان شد که میزان کاهش پایداری برابر G_0G_v می‌باشد. برای دست یافتن به ارتباط بین G_0G_v و سطح آزاد مخازن، برای یک مخزن مکعبی شکل داریم:

$$w = v.\rho_i \qquad G_0G_1 = \frac{w.g_0g_1}{W}$$

که W وزن سیال جابجا شده داخل مخزن و V حجم این سیال جابجا شده می‌باشد که همان گوه انتقال یافته از چپ به راست در شکل فوق می‌باشد. اگر شناور به اندازه زاویه θ غلتش کرده باشد، مایع درون مخزن نیز به همین اندازه غلتش کرده است که داریم:

حجم سیال جابجا شده داخل مخزن $v = \frac{1}{2}\times\frac{b}{2}\times\frac{b}{2}\times\theta_c\times l = \frac{l\times b^2}{8}\times\theta_c$

که l طول مخزن است.

$$g_0g_1 = 2\times\frac{2}{3}\times\frac{b}{2} = \frac{2}{3}b \qquad w\cdot g_0g_1 = \frac{l\times b^2}{8}\times\theta_c\times\rho_i\times\frac{2}{3}b = \frac{l\times b^3}{12}\rho_i\theta_c$$

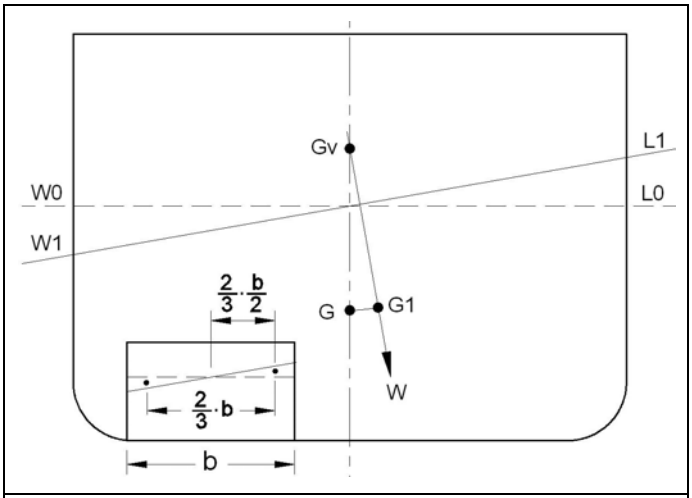
۱- منابع: [12] , [14]

2 - Free Surface Effect

3 - sloshing

عبارت $\frac{lb^3}{12}$ ممان دوم سطح یک مستطیل (i) حول محور تقارن طولی می‌باشد که در اینجا W سطح مورد نظر همان سطح آزاد سیال درون مخزن است:

$$w.g_0g_1 = i.\rho_i.\theta_c \qquad G_0G_1 = \frac{w\times g_0g_1}{W} = \frac{i.\rho_i.\theta_c}{W}$$



شکل ۲-۱۲۵ جابجایی مثلث‌های شناوری در مخازن و اثر آن بر جابجایی مرکز ثقل شناور

از طرفی مطابق شکل داریم: $G_0G_1 = G_0G_v.\theta_c$ که با جاگذاری مقدار G_0G_1 داریم :

$$\frac{i.\rho_i.\theta_c}{W} = G_0G_v.\theta_c \quad \rightarrow \quad \boxed{G_vG_0 = \frac{i.\rho_i}{W}}$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که میزان کاهش پایداری وابسته به مفهوم انتقال مرکز ثقل و آن نیز وابسته به چگالی سیال درون مخزن و ممان دوم سطح آزاد مخزن است. عبارت $i.\rho$ را ممان سطح آزاد (FSM)[1] نیز می‌گویند که بنابراین عبارات بالا تبدیل می‌شود به: $G_vG_0 = \frac{FSM}{W}$

رابطه به دست آمده نه فقط برای مخازن مکعبی بلکه برای کلیه مخازن با هر شکلی قابل کاربرد است و البته در این شرایط، رابطه ممان دوم سطح آزاد (i) برای سطوح با شکل هندسی نامعین، به روشهای عددی باید محاسبه گردد که در بخش‌های قبلی نحوه محاسبه ممان دوم سطح به روش عددی بیان شد.

❖ تقسیم‌بندی عرضی مخازن با دیواره‌های طولی

روش کاهش سطح آزاد مخزن تقسیم‌بندی عرضی مخازن (به وسیله دیواره‌های طولی) می‌باشد و باید توجه داشت که تقسیم‌بندی طولی مخازن با دیواره‌های عرضی هیچ تأثیری بر کاهش سطح آزاد مخازن ندارد که در قسمت بعد اثبات خواهد شد. در اینجا به تأثیر تقسیم‌بندی عرضی مخازن بر کاهش اثر سطح آزاد می‌پردازیم: $G_vG_0 = \frac{i.\rho_i}{W}$

اگر فرض کنیم مخزن به عرض b و طول l و بدون تقسیم‌بندی باشد داریم:

$$i = \frac{1}{12}lb^3 \qquad G_0G_v = \frac{lb^3\rho_i}{12W}$$

اگر مخزن مطابق شکل به n مخزن تقسیم شود داریم:

$$i = \frac{1}{12}l(\frac{b}{n})^3 \qquad G_vG_0 = \left[\frac{l(\frac{b}{n})^3\rho_i}{12W}\right]\times n$$

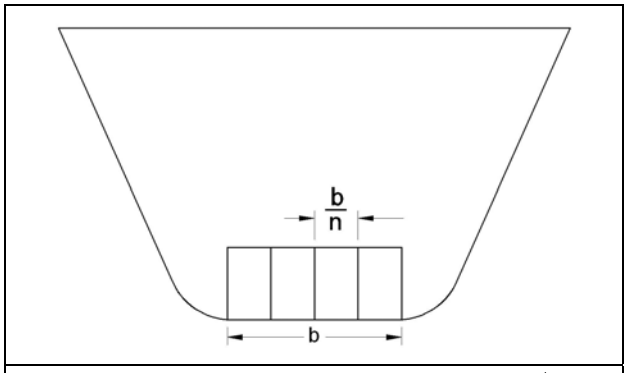
که ضریب n به دلیل این است که مخزن تبدیل به n مخزن با عرض $\frac{b}{n}$ شده است. پس از ساده‌سازی داریم:

1 - Free Surface moment

$$G_0G_v = \frac{lb^3.\rho_i}{12W} \times \frac{1}{n^2}$$

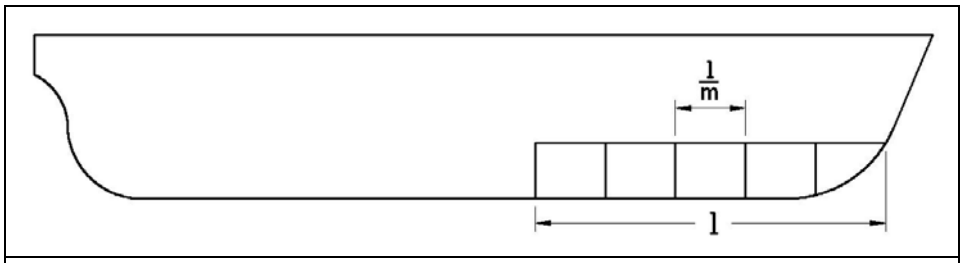
$$G_0G_v = \frac{lb^3.\rho_i}{12W} \times \frac{1}{n^2}$$

بنابراین اثر سطح آزاد با نسبت $\frac{1}{n^2}$ کاهش می‌یابد که حکایت از اثر زیاد تقسیم‌بندی عرضی مخازن بر افزایش پایداری دارد. توجه شود که تقسیم مخزن به تعداد n مخزن کوچکتر بوسیله $(n-1)$ دیواره ایجاد می‌شود (شکل ۲-۱۲۶).



شکل ۲-۱۲۶: تقسیم‌بندی عرضی مخازن بوسیله دیواره‌های طولی

❖ تقسیم‌بندی طولی مخازن با دیواره‌های عرضی



شکل۲-۱۲۷: تقسیم‌بندی طولی مخازن بوسیله دیواره‌های عرضی

مطابق شکل ۲-۱۲۷ فرض کنید مخزنی مکعبی به طول l و عرض b در شناور وجود دارد که به تعداد m مخزن تقسیم شده است و بنابراین طول هر مخزن $\frac{l}{m}$ و عرض آن b می‌باشد. ممان دوم سطح آزاد مخزن برابر است با:

$$i_m = \frac{1}{12}(\frac{l}{m})b^3$$

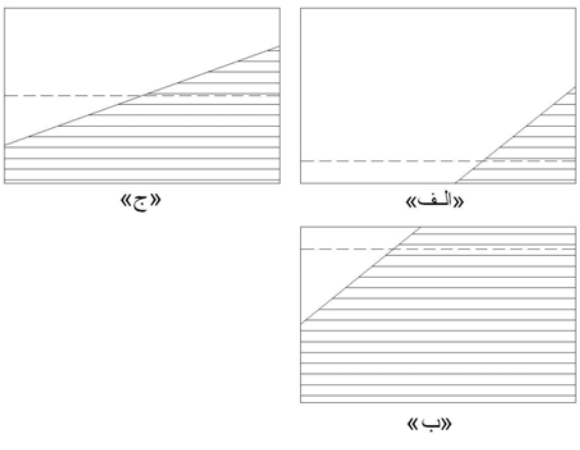
برای تعداد m مخزن داریم:

$$G_0G_v = \frac{i_m\rho}{W} \times m = \frac{\frac{l}{m}b^3\rho}{12.W} \times m = \frac{lb^3 \times \rho}{12 \times W}$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که مقدار $G_\circ G_v$ بدست آمده همان مقدار برای مخزن بدون تقسیم‌بندی می‌باشد. بنابراین تقسیم‌بندی طولی مخازن اثری بر کاهش اثر سطح آزاد مخازن ندارد و صرفا برای تقسیم‌بندی و جداسازی فضای داخلی مخازن بکار می‌رود. البته باید توجه داشت که منظور از عدم این تأثیر، بر پایداری عرضی شناور است که ممان‌گیری حول محور طولی انجام می‌شود. پایداری عرضی معمولاً حساس‌تر از پایداری طولی است لذا مبنای بحث در اثر سطح آزاد مخازن، پایداری عرضی است. اگر پایداری طولی شناور مد نظر باشد موضوع مؤثر بودن تقسیم‌بندی عرضی کاملاً برعکس می‌شود یعنی از دیدگاه پایداری طولی، دیواره‌های طولی اثری بر کاهش اثر سطح آزاد مخازن ندارند و در عوض دیواره‌های عرضی مخازن، با نسبت $\frac{1}{m^2}$ باعث کاهش اثر سطح آزاد مخازن می‌شود. در زیردریایی‌ها در زیر آب که متاسنتر طولی و عرضی بر هم منطبق است و پایداری طولی به اندازه پایداری عرضی (و بلکه بیشتر از آن) اهمیت می‌یابد، لذا هم تقسیم‌بندی طولی و هم تقسیم‌بندی عرضی مخازن اهمیت می‌یابد.

❖ عمق سیال درون مخازن

فرض کنید عرض مخزن b باشد. مطابق شکل ۲-۱۲۸ اگر عمق سیال داخل مخزن خیلی کم باشد، غلتش باعث می‌شود سیال در یک گوشه مخزن جمع شود و عرض سطح آزاد مخزن خیلی کمتر از مقدار b شود (حالت الف). اگر عمق سیال به گونه‌ای باشد که خیسی سقف مخزن اتفاق بیافتد (حالت ب)، عرض سطح آزاد مخزن باز هم خیلی کمتر از b می‌باشد. بدترین حالت در سطح آزاد مخازن، حالت (ج) می‌باشد که عرض سطح آزاد مخزن نه تنها کمتر از b نمی‌باشد بلکه بیشتر از b نیز می‌باشد که در حل مسائل مربوطه در این حالت، عرض سطح آزاد همان مقدار b فرض می‌شود.



شکل ۲-۱۲۸: اثر عمق سیال درون مخازن بر اثر سطح آزاد مخازن

❖ مخازن موجود در شناورها

مهمترین مخازن دارای سطح آزاد در شناور عبارتند از:

۱- مخزن سوخت: این مخزن شامل سوخت مصرفی موتورهای شناور می‌باشد که متناسب با کارکرد موتور، سوخت مصرف شده و سطح آزاد ایجاد می‌شود. در برخی موارد برای حذف این سطح آزاد، به جای سوخت مصرف شده، آب دریا وارد مخزن می‌شود که به دلیل اختلاف چگالی، سوخت روی آب قرار می‌گیرد.

۲- مخزن بالاست: این مخازن که در منتهی الیه سینه و پاشنه و برای تریم دادن شناور بکار می‌روند معمولاً نیمه پر هستند و سطح آزاد دارند. کاربردهای دیگر این مخازن عبارتست از: کنترل موقعیت KG، کنترل پریود حرکت رول، افزایش آبخور در حالتی که کشتی بدون بار است و باعث افزایش پایداری شناور می‌شود و آبخور مناسب برای پروانه را ایجاد می‌کند.

۳- مخزن آب شیرین: این مخزن شامل آب شیرین برای مصارف خدمه شناور می‌باشد که به تدریج با مصرف شدن آب شیرین، سطح آزاد در مخزن ایجاد می‌شود. از آنجا که چگالی آب شور دریا و آب شیرین تفاوت چندانی ندارند، لذا نمی‌توان با وارد کردن آب شور دریا به مخزن آب شیرین، اثر سطح آزاد آن را حذف کرد.

۴- مخزن خن : این مخزن شامل آب خن موتورخانه و پساب‌های داخل شناور می‌باشد.

۵- مخزن روغن : این مخزن شامل روغن مورد نیاز موتور و سیستم هیدرولیک می‌باشد.

انبارهای موجود در کشتی‌های نفتکش‌ها و حمل فرآورده‌های شیمیایی، به دلیل عرض زیاد، نباید به هیچ عنوان دارای سطح آزاد باشند یعنی باید یا کاملاً پر یا کاملاً خالی باشند. سایر مخازن فوق باید در بررسی اثر سطح آزاد مخزن لحاظ شوند.

مثال) در یک شناور، مخزن سوخت با ۶ دیواره در طول و ۳ دیواره در عرض تقسیم‌بندی شده است. اثر این تقسیم‌بندی بر سطح آزاد مخازن چگونه است؟

حل: دانستیم که تقسیم‌بندی عرضی مخزن بوسیله دیواره‌های طولی، اثر سطح آزاد مخازن را با نسبت $\frac{1}{n^2}$ کاهش می‌دهد. سه دیواره، مخزن را به چهار قسمت عرضی تقسیم‌بندی می‌کند $(n=4)$ که داریم:

$$(FSM)_2 = (FSM)_1 \times \frac{1}{n^2} = (FSM)_1 \times \left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{1}{16} FSM$$

همچنین دانستیم که تقسیم‌بندی طولی مخازن بوسیله دیواره‌های عرضی، اثری در کاهش سطح آزاد مخازن ندارد بنابراین ۶ دیواره بکار رفته در طول مخزن صرفا برای تقسیم‌بندی حجم سوخت مؤثر است و اثری بر پایداری عرضی شناور ندارد.

مثال) در شناور مدل ۱ پس از جمع‌شدن آبهای زائد موتورخانه در مخزن خن، این مخزن دارای سطح آزاد می‌باشد. طول مخزن ۳ متر و نیم‌عرض‌های سطح آزاد مخزن به صورت زیر می‌باشد:

مقطع	0	1	2	3	4
نیم عرض	1	1.4	2.3	3.9	6.4

جابجایی شناور در این حالت ۲۹۰۰ تن و ارتفاع مرکز ثقل بدون اثر سطح آزاد برابر ۴/۸ متر است. معادل افزایش ارتفاع مرکز ثقل ناشی از اثر سطح آزاد مخزن را محاسبه کنید.

حل:

$$h=\frac{3}{4}=0.75 \quad m$$

برای محاسبه اثر سطح آزاد باید ممان دوم سطح آزاد مخزن به روش عددی محاسبه گردد:

مقطع	نیم عرض	نیم عرض^۳	سیمسون	تابع ممان دوم
0	1	1	1	1
1	1.4	3	4	10.976
2	2.3	12	2	24.334
3	3.9	59	4	237.276
4	6.4	262	1	262.1
SUM=				535.73

$$i=2\times\frac{h}{3}\times\frac{1}{3}\times sum=89.29 \quad m^4$$

چگالی متوسط مایع درون مخزن خن $(\frac{t}{m^3})$ ۰/۹ می‌باشد لذا داریم:

$$G_0G_V=\frac{i\times\rho_i}{W}=\frac{89.29\times0.9}{2900}=0.0277 \quad m=27.7 \quad mm$$

مثال) در شناور مدل ۱، در سناریوی بارگیری ۱، مخازن سوخت، آب شیرین و بالاست نیمه‌پر هستند. این مخازن مکعبی و به ابعاد زیر هستند (فرض بر این است که دارای دیواره داخلی نیستند):

مخزن	حجم	L	B	H	چگالی
سوخت	180	10	8	2.25	0.85
آب شیرین چپ	27.5	5	3.2	1.7	1.01
آب شیرین راست	27.5	5	3.2	1.7	1.01
بالاست سینه	20	4	5	1	1.023
بالاست پاشنه	20	3	7	0.95	1.023

کاهش ارتفاع متاسنتری ناشی از اثر سطح آزاد مخازن را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه $i=\frac{1}{12}LB^3$ و همچنین $FSM=i\times\rho$ داریم:

مخزن	L	B^3	i	چگالی	FSM	W	G0Gv
سوخت	10	512.0	426.67	0.85	362.67	3500	0.104
آب شیرین چپ	5	32.8	13.65	1.01	13.79	3500	0.004
آب شیرین راست	5	32.8	13.65	1.01	13.79	3500	0.004
بالاست سینه	4	125.0	41.67	1.023	42.63	3500	0.012
بالاست پاشنه	3	343.0	85.75	1.023	87.72	3500	0.025
مجموع:					0.149 m = 14.9 cm		

می‌دانیم که در سناریوی ۱، $GM_0=1 \ m$ می‌باشد. کاهش ارتفاع متاسنتری ناشی از اثر سطح آزاد مخازن عبارتست از:

$$GM=GM_0-\sum G_0G_V=1-0.149=0.851 \ m$$

در واقع اثر سطح آزاد مخازن به صورت کاهش GM یا افزایش KG بروز می‌کند.

❖ محاسبه اثر سطح آزاد مخازن طبق استاندارد BV

[partB/chapter3/sec2]

۴-۱- توضیحات عمومی: برای هر یک از شرایط عملیاتی و کاری، ارتفاع متاسنتری اولیه و بازوی بازگرداننده باید با لحاظ کردن اثر سطح آزاد اصلاح شود.

۴-۲- محدوده در نظر گرفتن اثر سطح آزاد:

۴-۲-۱- اثر سطح آزاد مایعات باید برای مخازنی که کمتر از ۹۸ درصد حجم مخزن پر شده اند، محاسبه گردد.

۴-۲-۲- برای کشتیهایی که مخازن آنها بیشتر از ۶۰ درصد حداکثر عرض بدنه است، اثر سطح آزاد مخازن حتی برای پر بودن مخزن به مقدار بیشتر از ۹۸ درصد نیز باید اعمال شود.

۴-۳- دسته بندی مخازن:

مخازنی که برای آنها سطح آزاد محاسبه می‌شود به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- مخازنی که دارای سطح مایع ثابت هستند مانند مخازن اصلی حمل و آب مخازن بالاست که در این حالت مقدار واقعی سطح آزاد لحاظ می‌شود.
- مخازنی که دارای سطح مایع متغیر در داخل مخزن هستند مانند مخازن مواد مصرفی شامل سوخت، روغن و انتقال آب بین مخازن بالاست و نیمه پر بودن مخازن اصلی حمل بار. در این حالت، بدترین حالت سطح آزاد مخازن در نظر گرفته می‌شود.

۴-۴- مایعات مصرف شدنی

۴-۵- مخازن بالاست (شامل مخازن بالاست و مخازن ضد غلتش)

۴-۶- عملیات انتقال مایعات

۴-۷- اصلاح ارتفاع متاسنتری اولیه و منحنی GZ : اصلاح ارتفاع متاسنتری و بازوی بازگرداننده به کمک ممان سطح آزاد مخازن (M_{fs}) و آن نیز به کمک ممان دوم عرضی سطح آزاد سیال داخل مخزن به دست می‌آید. این ممان سطح آزاد سیال در حالت زاویه صفر درجه (بدون غلتش) محاسبه می‌گردد.

۴-۸- ممان سطح آزاد: ممان سطح آزاد مخزن برای هر زاویه غلتش از رابطه زیر و برحسب t.m به دست می‌آید: $M_{fs} = v.b.\rho.k.\sqrt{\delta}$

که داریم:

v : حجم کل مخزن (m^3) $\quad b$: حداکثر عرض مخزن (m) $\quad \rho$: چگالی سیال داخل مخزن (t/m^3)

k : ضریب بدون بعدی که از جدول زیر برحسب نسبت $\frac{b}{h}$ تعیین می‌گردد برای مقادیر میانی باید از میان‌یابی استفاده کرد.

δ : ضریب بلوکی (C_b) مخزن از رابطه مقابل: $\delta = \frac{v}{blh}$

که l حداکثر طول مخزن، h حداکثر ارتفاع مخزن می‌باشد.

$$k = \frac{\sin\theta}{12}\cdot\left(1+\frac{(\tan\theta)^2}{2}\right)\cdot\frac{b}{h}, \quad \text{where} \quad \cot\theta \geq \frac{b}{h}$$

$$k = \frac{\cos\theta}{8}\cdot\left(1+\frac{\tan\theta}{b/h}\right)-\frac{\cos\theta}{12\cdot(b/h)^2}\cdot\left(1+\frac{(\cot\theta)^2}{2}\right), \quad \text{where} \quad \cot\theta < \frac{b}{h}$$

θ b/h	5°	10°	15°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	θ b/h
20,0	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,05	0,04	0,03	0,02	20,0
10,0	0,07	0,11	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	10,0
5,00	0,04	0,07	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	5,00
3,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	3,00
2,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,09	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	2,00
1,50	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	1,50
1,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	1,00
0,75	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,09	0,16	0,18	0,21	0,16	0,75
0,50	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,09	0,16	0,18	0,21	0,23	0,50
0,30	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,11	0,19	0,27	0,34	0,30
0,20	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,13	0,27	0,45	0,20
0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,06	0,14	0,53	0,10

- مخازن کوچک

مخازن کوچک اگر به ازای مقدار Kدر زاویه ۳۰ درجه از رابطه زیر تبعیت کنند، اثر سطح آزاد آنها قابل صرفنظر است.

$$M_{fs}/\Delta_{min} < 0{,}01 \quad m$$

که :

Δ_{min}: حداقل جابجایی کشتی بر حسب تن که در d_{min} محاسبه می شود.

d_{min}: حداقل آبخور کشتی بر حسب متر با ۱۰٪ پر بودن انبارها و حداقل مقدار آب بالاست مخازن.

مثال) در یک کشتی ۵۰ تنی، یک مخزن سوخت به طول، عرض و ارتفاع ۱ متر و حجم ۰/۷۵ متر مکعب وجود دارد. این مخزن تا ۷۵ درصد پر از سوخت بوده و چگالی سوخت۰/۸ تن بر مترمکعب است.
اگر ارتفاع مرکز ثقل اولیه $KG_0=2m$ باشد مطلوبست :
الف- حداکثر اثر سطح آزاد در چه محدوده زاویه‌ای اتفاق می‌افتد.
ب- مرکز ثقل مجازی ناشی از اثر سطح آزاد را محاسبه کنید.

حل :

$$w = 50\ t$$
$$l = b = h = 1\ m \rightarrow {}^{b}/_{h} = 1$$

$$t = 0.75 \times 1 = 0.75\ m \ \rightarrow \ V = 0.75\ m^3$$

الف – از جدول داریم :

برای حداکثر مقدار k در $b/h=1$ داریم:

$$k = 0.13 \ \rightarrow \ 70^\circ \lesssim \alpha \lesssim 85^\circ$$

ب-

$$M_{fs} = vb\rho K\sqrt{\delta}$$
$$= 0.75 \times 1 \times 0.85 \times 0.13 \times \sqrt{0.75} = 0.07 \ \ t.m$$
$$\delta = \frac{v}{blh} = \frac{0.75}{1} = 0.75$$
$$G_0G_1 = \frac{M_{fs}}{W} = \frac{0.07}{50} = 0.0014 \ \ m = 1.4\ mm$$
$$KG_v = KG_o + GG_o = 2 + 0.0014 = 2.0014\ m$$

امام صادق(ع):
اهل بهشت چهار صفت دارند: خوشرویی، خوش قلبی، بخشندگی و گفتار نیکو

فصل ۲۲: [۱] اثرات اجسام آویزان و ارتفاع جرثقیل بر پایداری شناور

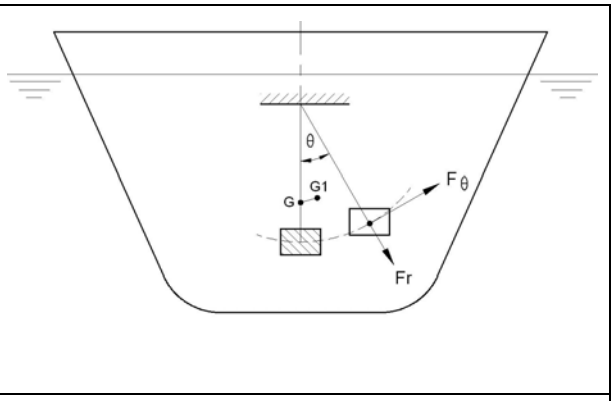
اجسام آویزان به طور کلی اثر مخربی بر پایداری شناور دارند و در شناور تا جایی که امکان دارد باید اجسام آویزان نظیر جرثقیل و لوسترهای سنگین (در کشتی‌های مسافربری) را مهار کرد، به گونه‌ای که امکان تاب خوردن آنها وجود نداشته باشد. تاب خوردن جسم آویزان، وابسته به ارتفاع نقطه آویزان باعث جابجا شدن عرضی و عمودی مرکز ثقل و اصلاح کسینوسی و سینوسی منحنی GZ می‌شود که هر دو عامل، باعث تضعیف پایداری می‌گردد. از طرفی نیروی مماسی و شعاعی ناشی از تاب خوردن شناور نیز باعث اعمال ممان رول دهنده به شناور می‌شود (شکل ۲-۱۲۹) و از آنجا که این ممان در هر سیکل برعکس می‌شود، شناور با تلاطم دائمی مواجه خواهد شد. در شکل ۲-۱۲۹ مطابق مطالب بیان شده در جابجایی مرکز ثقل داریم:

$$G_0G_1 = \frac{w.d}{W}$$

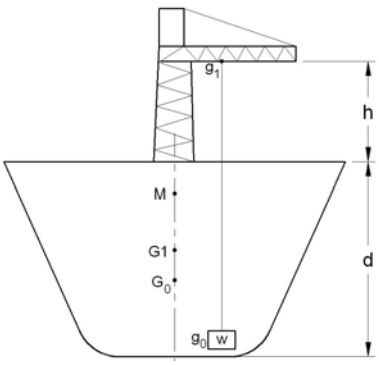
نیروی شعاعی: $F_r = m.r.\omega^2$

نیروی مماسی: $F_\theta = m.r.\dot{\omega}$

بحث اجسام آویزان در مورد جرثقیل‌های موجود در شناور[۲] از اهمیت بیشتری برخوردار است چرا که این جرثقیل‌ها، بارهای چند تنی را بلند می‌کنند که می‌توانند باعث جابجایی قابل ملاحظه مرکز ثقل شوند. از این رو حداکثر ارتفاع جرثقیلی که می‌تواند بر روی شناور نصب شود، از اهمیت حیاتی برخوردار است. اگر ارتفاع جرثقیل و حداکثر بار قابل جابجایی آن، بر اساس ملاحظات پایداری انتخاب نشده باشد، می‌تواند باعث واژگون شدن شناور شود چرا که وقتی جرثقیل باری را از روی عرشه یا انبار بلند می‌کند، وزن این بار فوراً به بالای دکل جرثقیل منتقل و به یکباره باعث افزایش ارتفاع مرکز ثقل و کاهش GM می‌گردد (شکل ۲-۱۲۵). اگر GM شناور منفی شود، شناور ناپایدار خواهد شد.



شکل ۲-۱۲۹: اثر اجسام آویزان بر شناور



شکل۲-۱۳۰: اثر ارتفاع جرثقیل بر پایداری شناور

جابجایی عمودی مرکز ثقل از رابطه مقابل قابل محاسبه است:

$$G_0G_1 = \frac{w.(h+d)}{W}$$

که h ارتفاع دکل جرثقیل و d فاصله بار تا سطح عرشه می‌باشد.

مثال: جرثقیلی به ارتفاع ۷/۵ متر بر روی عرشه شناور مدل ۱ وجود دارد. این جرثقیل می‌خواهد باری به وزن ۳۰ تن را از کف انبار بلند می‌کند. آیا بلندکردن بار، پایداری شناور را تهدید می‌کند؟

حل: به محض بلند کردن بار از کف انبار، وزن بار به سر بوم دکل منتقل می‌شود. در سناریوی اصلی، $KG=5.1\ m$ و عمق بدنه نیز ۶ متر است.

$w=10\ t \qquad W=3500\ t$

$d=6+7.5=13.5\ m$

$$G_0G_1 = \frac{w.d}{W} = \frac{10\times13.5}{3500} = 0.038\ \ m = 38\ \ mm$$

با توجه به اینکه در سناریوی ۱، مقدار $GM=0.5\ m$ است، با بلندکردن این وزنه، GM جدید برابر است با:

$GM = 0.5 - 0.038 = 0.462\ m$

لذا پایداری شناور همچنان محفوظ است.

۱- منبع: [4]

2 - derrick

فصل ۲۳:[1] اثرات شکل بدنه بر پایداری

بیان داشتیم که دو عامل اصلی بر پایداری شناور اثر دارند:

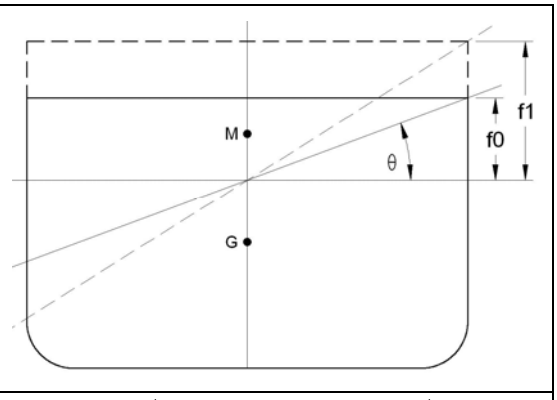
۱- وضعیت وزنی و مرکز ثقل

۲- مشخصات هندسی شناور شامل طول، عرض، ارتفاع آبخور و فری‌برد و همچنین طول روبناسازی (سوپر استراکچر) بدنه.

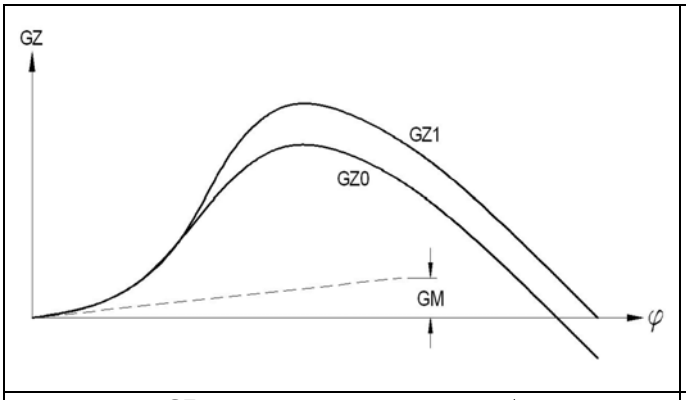
در این قسمت، اثر تغییرات هندسی بر پایداری شناور بررسی می‌گردد:

الف- تغییرات فری برد

مطابق شکل ۲-۱۳۱ افزایش فری‌برد باعث افزایش زاویه خیسی عرشه می‌گردد یعنی زاویه‌ای که عرشه شناور به زیر آب می‌رود، افزایش می‌یابد. این پدیده در منحنی GZ بر شیب اولیه نمودار (که بیانگر $GM_{\circ}$ می‌باشد) اثری ندارد ولی محدوده پایداری در این منحنی افزایش می‌یابد و زاویه‌ای که در آن حداکثر GZ به دست می‌آید نیز افزایش می‌یابد که این اثرات در شکل ۲-۱۳۲ ملاحظه می‌شود. حداکثر مقدار GZ نیز افزایش می‌یابد.



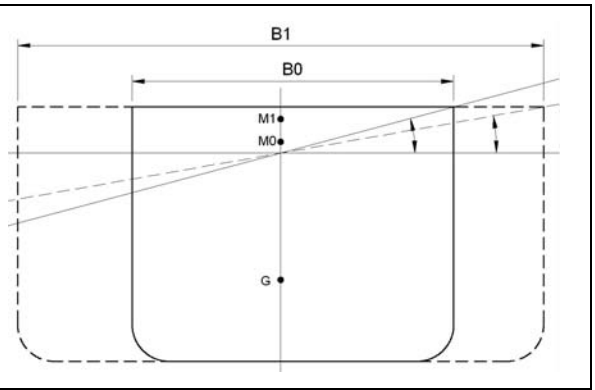
شکل ۲-۱۳۱: افزایش ارتفاع فری‌برد شناور



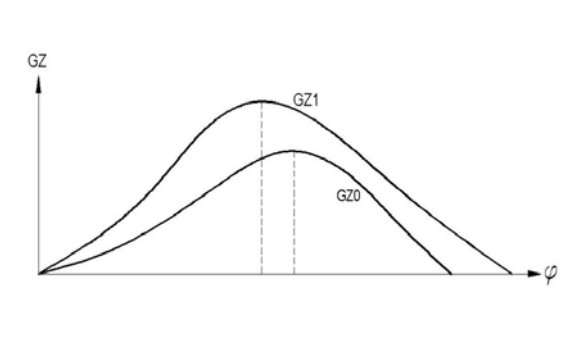
شکل ۲-۱۳۲: اثر افزایش فری‌برد بر منحنی GZ

ب- تغییر عرض

مطابق شکل ۲-۱۳۳ افزایش عرض باعث کاهش زاویه خیسی عرشه می‌گردد، یعنی عرشه اصلی شناور در زاویه کمتری به زیر آب می‌رود که این پدیده باعث می‌شود زاویه مربوط به حداکثر مقدار GZ کاهش یابد. همچنین افزایش عرض به معنای افزایش $GM_{\circ}$ می‌باشد که در منحنی GZ به معنای افزایش شیب اولیه نمودار می‌باشد و همچنین حداکثر مقدار GZ نیز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب با افزایش عرض، تغییرات فوق را در منحنی GZ مطابق شکل ۲-۱۳۴ خواهیم داشت:



شکل ۲-۱۳۴: افزایش عرض بدنه



شکل ۲-۱۳۵: اثر افزایش عرض بر منحنی GZ

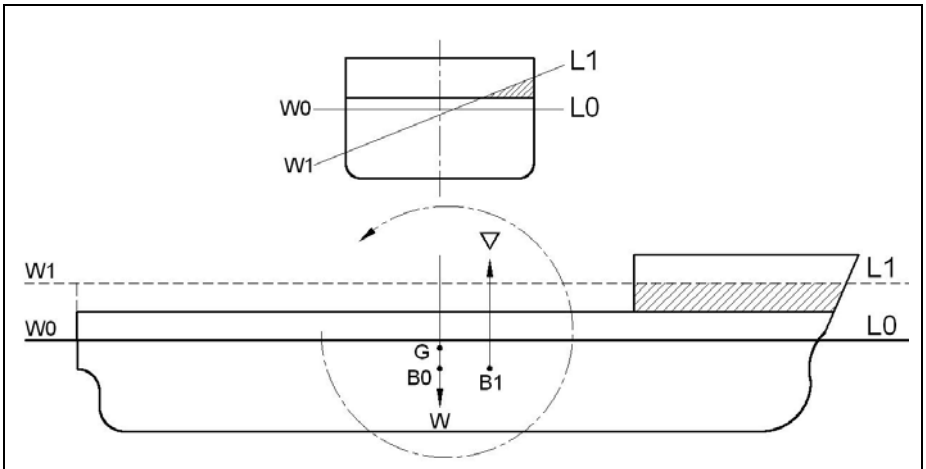
ج- تغییر طول

اثر افزایش طول بر پایداری طولی شناور شبیه اثر افزایش عرض بر پایداری عرضی شناور می‌باشد که چگونگی آن بیان شد.

۱- منابع: [4] , [14]

د- تغییر طول روبناسازی عرشه و مفهوم تریم آزاد

روبناسازی عرشه[1] اگر به صورت آب‌بند باشد، تأثیری شبیه افزایش فری برد دارد که چگونگی آن بیان شد. همچنین اگر روبناسازی به صورت غیر پیوسته روی عرشه باشد (همانند کشتی‌های خدماتی)، با فرو رفتن بخشی از عرشه اصلی در آب، به دلیل غلتش عرضی زیاد، تغییر قابل ملاحظه‌ای در شکل صفحه آبخور و مرکز شناوری (مرکز صفحه آبخور) ایجاد می‌شود. تغییر مرکز شناوری نیز باعث تریم کردن شناور می‌شود که به آن «تریم آزاد»[2] گویند. معمولاً در همه شناورها، غلتش عرضی زیاد باعث شیب ناخواسته شناور می‌شود که معمولاً از آن صرفنظر می‌شود ولی این مقدار شیب در شناورهایی که روبناسازی غیر ممتد روی عرشه دارند، بسیار بیشتر و قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. طبیعتاً شیب به سمتی است که ارتفاع فری برد و روبناسازی کمتر باشد که در شکل ۲-۱۳۵ نشان داده شده است. با غلتش عرضی زیاد شناور و تغییر آبخور از W_0L_0 به W_1L_1، مطابق شکل، مرکز بویانسی به مقدار زیادی به جلو منتقل می‌شود و شیب شدید پاشنه اتفاق می‌افتد. البته در بارج‌ها بدلیل تقارن کامل بدنه در زوایای هیل کوچک، تریم آزاد اتفاق نمی‌افتد. همچنین لازم به تذکر است که علی‌رغم اینکه هیل‌کردن شناور باعث شیب می‌شود ولی تریم‌کردن شناور باعث ایجاد زاویه هیل نمی‌گردد چراکه با تریم‌کردن شناور باز هم تقارن سمت چپ و راست به طور کامل حفظ می‌شود و شناور هیل نمی‌کند.



شکل ۲-۱۳۵: اثر روبناسازی بر تریم آزاد شناور

این اثرات را می‌توان در جدول ۲-۸ خلاصه کرد:

	افزایش فری‌برد	روبناسازی عرشه	افزایش عرض	افزایش طول
حداکثر GZ	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش
زاویه مربوط به حداکثر GZ	افزایش	افزایش	کاهش	بدون تغییر
زاویه خیسی عرشه	افزایش	افزایش زیاد	کاهش	بدون تغییر
ارتفاع متاسنتری اولیه GM_0	بدون تغییر	بدون تغییر	افزایش	بدون تغییر
محدوده پایداری	افزایش	افزایش	افزایش	بدون تغییر
پایداری دینامیکی (سطح زیر نمودار GZ)	افزایش	افزایش	بستگی دارد	افزایش

جدول ۲-۸: اثرات شکل بدنه بر خصوصیات پایداری کشتی

امام حسن عسکری(ع):
تواضع نعمتی است که کسی به آن حسادت نمی ورزد

1 - Superstructure
2 - Free Trim

فصل ۲۴:[1] رابطه نسبتهای ابعادی و پایداری شناور

در این قسمت به بررسی رابطه نسبتهای ابعادی و پایداری شناور پرداخته می‌شود. در برخی مواقع تنها یکی از ابعاد شناور تغییر می‌کند و می‌خواهیم اثر این تغییر را بر پایداری بررسی کنیم. برای اینکه این تغییر باعث انجام مجدد کل فرآیند تحلیل پایداری نگردد، با به دست آوردن این روابط می‌توان اثر تغییرات ابعادی بر پایداری را به راحتی محاسبه کرد. همچنین در این مبحث دو حالت برای تغییرات مرکز ثقل و اثرات آن بر پایداری در نظر گرفته می‌شود.

۱- اثر تغییرات کوچک ابعاد شناور بر پایداری

حجم زیر آب بدنه برابر است با: (۱)

$$\Delta = C_B.L.B.T$$

که C_B ضریب بلوکی و مقدار ثابتی است.

با مشتق گرفتن از رابطه ۱ و تقسیم طرفین بر مقدار Δ داریم: (۲)

$$\frac{d\Delta}{\Delta} = \frac{dL}{L} + \frac{dB}{B} + \frac{dT}{T}$$

از طرفی داشتیم: (۳)

$$\overline{BM} = \frac{I_t}{\nabla} = (Cons) \times \frac{B^2}{T}$$

با مشتق‌گیری از این رابطه داریم: (۴)

$$\frac{d\overline{BM}}{\overline{BM}} = 2\frac{dB}{B} - \frac{dT}{T}$$

همچنین از آنجا که در اغلب شناورها G بالاتر از B است داریم: (۵)

$$\frac{d\overline{BM}}{\overline{BM}} = \frac{d\overline{BG} + d\overline{GM}}{\overline{BM}} = \frac{d\overline{BG} + d\overline{GM}}{\overline{BG} + \overline{GM}}$$

هم اکنون با سه حالت ممکن می‌توان تغییرات ابعادی را بر پایداری در نظر گرفت.

الف) فرض کنیم فقط عرض شناور تغییر کند و بقیه ابعاد تغییری نکنند از رابطه ۲ داریم: (۶)

$$d\Delta = \Delta\frac{dB}{B}$$

رابطه ۴ با توجه به ثابت بودن آبخور تبدیل می‌شود به: (۷)

$$\frac{d\overline{BG} + d\overline{GM}}{\overline{BM}} = 2\frac{dB}{B}$$

فرض کنیم $\overline{KG}$ تغییری نمی‌کند بنابراین $d\overline{BG} = 0$ و داریم: (۸)

$$\boxed{d\overline{GM} = 2\overline{BM}.\frac{dB}{B}}$$

رابطه (۸) بیان کننده اثر تغییرات عرض بر ارتفاع متاسنتر است.

ب) فرض کنیم که جابجایی و آبخور ثابت باشد بنابراین با افزایش عرض، باید طول با همین نسبت کاهش یابد بنابراین از رابطه ۲ داریم:

$$\frac{dB}{B} = \frac{-dL}{L} \quad (۹)$$

که می‌توان رابطه فوق را در رابطه ۸ جاگذاری کرد.

ج) فرض کنیم که جابجایی و طول ثابت باشد و عرض تغییر کند. برای ثابت ماندن جابجایی، متناسب با افزایش عرض، آبخور باید کاهش یابد که از رابطه ۲ داریم: (۱۰)

$$\frac{dB}{B} = \frac{-dT}{T}$$

که می‌توان رابطه فوق را در رابطه ۸ جاگذاری کرد.

۲- اثر تغییرات مرکز ثقل و بویانسی بر پایداری

تغییر آبخور ممکن است باعث تغییر KG شود . دو حالت کلی می‌توان در نظر گرفت.

الف) KB و KG هر دو به صورت ضریب ثابتی از آبخور تغییر کنند.

$$KG = (Cons) \times T$$

$$KB = (Cons) \times T$$

$$\overline{KG} - \overline{KB} = BG = (Cons) \times T \quad (۱۱)$$

با در نظر گرفتن یکی از حالات قسمت قبل و مشتق گرفتن از رابطه ۱۱ داریم:

$$\frac{d\overline{BG}}{\overline{BG}} = \frac{dT}{T} = \frac{-dB}{B} \quad (۱۲)$$

۱- منبع: [2]

از رابطه ۴ و ۵ داریم: $$\frac{d\overline{BG}+d\overline{GM}}{\overline{BG}+\overline{GM}}=2\frac{dB}{B}-\frac{dT}{T}=\frac{3dB}{B} \quad (۱۳)$$

بنابراین: $$d\overline{BG}+d\overline{GM}=3(\overline{BG}+\overline{GM})\frac{dB}{B} \quad (۱۴)$$

با بدست آوردن مقدار $d\overline{BG}$ از رابطه ۱۲ و جاگذاری آن در رابطه ۱۴ داریم: $$-BG.\frac{dB}{B}+d\overline{GM}=3(\overline{BG}+\overline{GM})\frac{dB}{B} \quad (۱۵)$$

$$\boxed{d\overline{GM}=(4\overline{BG}+3\overline{GM})\frac{dB}{B}} \quad (۱۶)$$

ب) فرض کنید $\overline{KG}$ مقدار ثابتی است و $\overline{KB}$ به صورت ضریب ثابتی از آبخور باشد:

$$\overline{BG}=\overline{KG}-\overline{KB} \quad (۱۷)$$

$$\overline{BG}=-(\text{Const}).T \quad (۱۸)$$

$$\frac{dBG}{BG}=\frac{dT}{T} \quad (۱۹)$$

از آنجا که $BG=-KG$ داریم: $$dBG=-\overline{KG}.\frac{dT}{T}=\overline{KB}.\frac{dB}{B} \quad (۲۰)$$

همچنین از رابطه ۱۶ داشتیم: $$d\overline{BG}+d\overline{GM}=3(\overline{BG}+\overline{GM})\frac{dB}{B}$$

با جاگذاری رابطه ۲۰ داریم: $$d\overline{GM}=(3\overline{BG}+3\overline{GM}-\overline{KB})\frac{dB}{B}$$

از جاگذاری رابطه ۱۷ داریم: $$d\overline{GM}=(4\overline{BG}+3\overline{GM}-\overline{KG})\frac{dB}{B}$$

مثال) قبل از ساخت و در حین طراحی کشتی مدل ۱ اگر بخواهیم آبخور شناور را از ۵ به ۴ متر کاهش دهیم و جابجایی، طول و KG ثابت بماند، مقدار GM و عرض جدید را محاسبه کنید.

حل: از مشخصات مدل ۱ در سناریوی اصلی می‌دانیم که :

$L=80\ m$ $\quad B=13.6\ m$ $\quad KG=5.1\ m$

$T=5\ m$ $\quad KB=2.8\ m$ $\quad \Delta=3500\ t$

$BM=3.3\ m$ $\quad GM=1\ m$

$$\frac{d\Delta}{\Delta}=0=\frac{dL}{L}+\frac{dB}{B}+\frac{dT}{T}$$

$$\frac{dL}{L}=0 \qquad \frac{dB}{B}=\frac{-dT}{T}$$

تغییر آبخور مطلوب:

$$\frac{dT}{T}=\frac{4-5}{5}=\frac{-1}{5}$$

$$\frac{dB}{B}=\frac{-dT}{T}=\frac{1}{5}$$

$$dB=\frac{B}{5}=\frac{13.6}{5}=2.72\ m$$

عرض جدید : $B=13.6+2.72=16.33\ m$

$$\frac{d\overline{BM}}{\overline{BM}}=2\frac{dB}{B}-\frac{dT}{T}=2\times\frac{1}{5}+\frac{1}{5}=\frac{3}{5}$$

$$d\overline{BM}=3.3\times\frac{3}{5}=1.98\ m$$

از آنجا که KB متناسب با T است:

$$\frac{d\overline{KB}}{\overline{KB}}=\frac{dT}{T}=\frac{-1}{5}$$

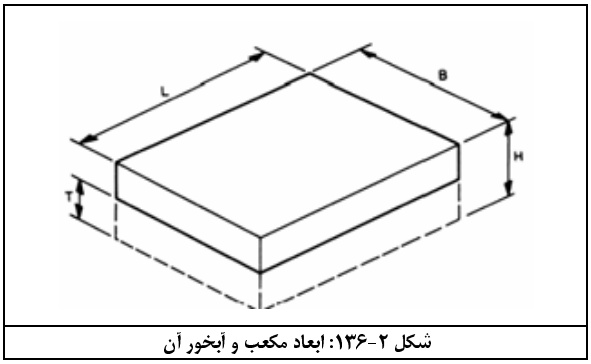
$$d\overline{KB}=\frac{-2.8}{5}=-0.56$$

قدیم $GM_0=1\ m$

جدید $\overline{GM}=GM_0+d(\overline{KB}+\overline{BM}-\overline{KG})=1+(-0.56)+1.98=2.42\ m$

❖ رابطه نسبت چگالی جسم و آب با پایداری

برای به دست آوردن این رابطه، مکعبی مانند شکل ۲-۱۳۶ در نظر بگیرید.



شکل ۲-۱۳۶: ابعاد مکعب و آبخور آن

$$\frac{\text{چگالي جسم}}{\text{چگالي آب}} = C$$

از برابری وزن و بویانسی داریم:

$$C \times LBH = LBT$$

$$C = \frac{T}{H}$$

برای یک مکعب داریم:

$$\overline{KB} = \frac{T}{2}$$

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} = \frac{1}{12}.\frac{B^3L}{BLT} = \frac{B^2}{12T}$$

با توجه به همگن بودن چگالی جسم داریم:

$$\overline{KG} = \frac{H}{2}$$

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} = \frac{T}{2} + \frac{B^2}{12T} - \frac{H}{2} = \frac{CH}{2} + \frac{B^2}{12CH} - \frac{H}{2} = \frac{H}{2}(C-1) + \frac{B^2}{12CH}$$

برای تأمین پایداری مثبت داریم $GM > 0$ یعنی باید داشته باشیم:

$$\frac{H}{2}(C-1) + \frac{B^2}{12CH} > 0$$

این رابطه را می‌توان برای شکل‌های منشوری با شکل مقاطع مختلف به دست آورد.

مثال) مکعبی با چگالی همگن به طول ۲۰ متر، عرض ۵ متر و عمق ۵ متر داریم. این مکعب در آب شیرین شناور است. محـدوده‌ای از چگالی جسم را طوری تعیین کنید که در آن محدوده جسم ناپایدار باشد.

حل: جسم در صورتی ناپایدار است که:

$$\frac{H}{2}(C-1) + \frac{B^2}{12CH} < 0$$

$$\frac{5}{2}(C-1) + \frac{25}{12C \times 5} < 0 \qquad C - 1 + \frac{1}{6C} < 0 \qquad 6C^2 - 6C + 1 < 0$$

از حل معادلهٔ درجه ۲ داریم:

$$6C^2 - 6C + 1 = 0$$

$$C = \frac{6 \pm \sqrt{36-24}}{12} = \frac{6 \pm \sqrt{12}}{12} = 0.211 \quad \text{و} \quad 0.789$$

بنابراین اگر C بین 0.211 و 0.789 باشد مقدار GM منفی و جسم ناپایدار است لذا چگالی جسم نباید در این محدوده باشد.

امام علی (ع):

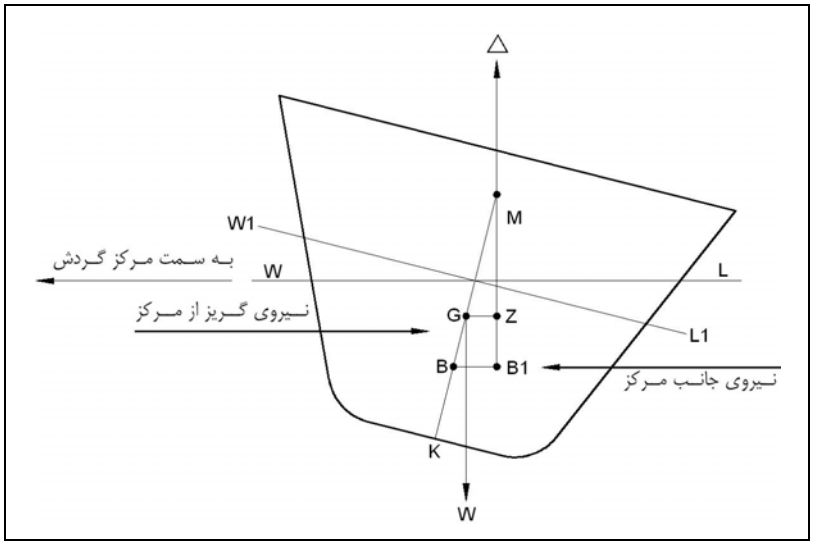
تکبر کردن با افراد متکبر، خود عین تواضع است.

فصل ۲۵:[۱] غلتش عرضی در هنگام گردش

هنگامی که یک شناور بر روی یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند، یک شتاب گریز از مرکز گردش برابر $\frac{V^2}{r}$ بر شناور وارد می‌شود. V برابر سرعت خطی شناور و r شعاع مسیر دایره‌ای می‌باشد. نیروی گریز از مرکز ناشی از این شتاب برابر $\frac{.MV^2}{r}$ می‌باشد که M جرم شناور است. این نیرو بر مرکز ثقل شناور وارد می‌شود. نیروی مقاوم در برابر این نیرو، نیروی جانب مرکز ناشی از اثرات بین آب و بدنه می‌باشد که بر مرکز سطح جانبی بدنه در زیر آب وارد می‌شود. فرض می‌شود که مرکز این سطح هم ارتفاع مرکز بویانسی باشد لذا نیروی جانب مرکز، بر مرکز بویانسی وارد می‌شود. هنگامیکه نیروی جانب مرکز و نیروی گریز از مرکز با یکدیگر برابر می‌شوند، شناور بر یک مسیر دایره‌ای به شعاع r گردش می‌کند.

$$\text{نیروی جانب از مرکز} = \text{نیروی گریز از مرکز} = \frac{M.V^2}{r}$$

این نیروها با توجه به شکل ۲-۱۳۷ باعث ایجاد یک ممان هیل دهنده می‌شود که برابر است با: $\text{ممان هیل دهنده} = \frac{M.V^2}{r}.B_1Z$



شکل ۲-۱۳۷: نیروی گریز از مرکز و جانب مرکز وارد بر یک شناور در حال گردش

این ممان باید توسط ممان بازگرداننده هیدرواستاتیکی شناور جبران شود: $\text{ممان بازگرداننده} = W.GZ = M.g.GZ$

با قرار دادن این دو ممان داریم: $M.g.GZ = \frac{M.V^2}{r}.B_1Z$

در زوایای کوچک داریم: $GZ = GM.Sin\theta$

$B_1Z = BG.Cos\theta$

که از جاگذاری آنها داریم: $M.g.GM.Sin\theta = \frac{M.V^2}{r}.BG.Cos\theta$

$$GM.Sin\theta = \frac{V^2}{g.r}.BG.Cos\theta \quad \rightarrow \quad \boxed{\tan\theta = \frac{V^2.BG}{g.r.GM}}$$

بنابراین زاویه هیل به هنگام دور زدن تابعی از سرعت حرکت، شعاع حرکت، BG و GM می‌باشد.

۱- منبع: [4]

مثال) شناور مدل ۱ در سناریوی وزنی ۱ می‌خواهد در منطقه‌ای به شعاع ۳۰۰ متر دور بزند. اگر حداکثر سرعت حرکت شناور در این حالت ۱۰ گره باشد، زاویه غلتش ناشی از دور زدن شناور چند درجه است؟

حل: با استفاده از نمودارهای پایداری در سناریوی ۱ (آبخور ۵ متر)، داریم:

$GM = 1 \ \text{m}$

$BG = KG - KB = 5.1 - 2.79 = 2.31 \ \text{m}$

$V = 10 \ \text{knot} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$r = 300 \ \text{m}$

$g = 9.81 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

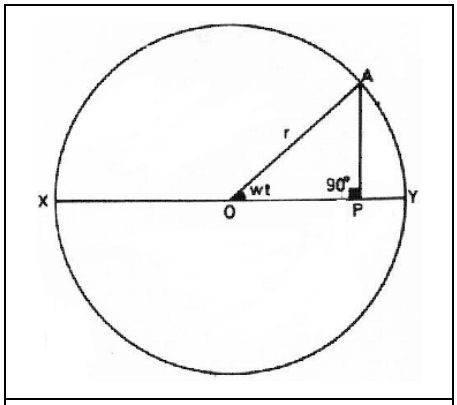
$$\tan\theta = \frac{V^2.BG}{g.r.GM} = \frac{(5)^2 \times 2.31}{9.81 \times 300 \times 1} = 0.019$$

$$\theta = 1.12^\circ$$

زندگی تفسیر سه کلمه است:
خندیدن، بخشیدن و فراموش کردن
پس بخند، ببخش و فراموش کن ...

فصل ۲۶:[1] پریود نوسانات غلتش عرضی و دریازدگی

۱- محاسبه رابطه پریود طبیعی نوسانات حرکت رول



شکل ۲-۱۳۸: حرکت هارمونیک ساده

در محاسبه پریود نوسانات غلتش عرضی (رول) کشتی، فرض بر این است که دامنه غلتش کوچک باشد و شناور دارای ارتفاع متاسنتری اولیه مثبت باشد. در این شرایط، اگر یک نیروی خارجی موقتی بر شناور وارد شود که باعث غلتش شناور گردد می‌توان این نوع نوسان حرکت را »هارمونیک ساده»[2] درنظر گرفت و از روابط ریاضی این نوع حرکت برای تحلیل حرکات رول شناور استفاده کرد. از طرفی حرکت رول در تحلیل غلتش شناور از اهمیت فوق العاده‌ای بخصوص در بحث دریازدگی برخوردار است. لذا در این قسمت ابتدا رابطه پریود نوسان یک حرکت هارمونیک ساده استخراج می‌گردد و این رابطه برای شناور تعمیم داده می‌شود.

- روابط حرکت هارمونیک ساده

فرض کنید نقطه A روی محیط دایره‌ای به شعاع r با سرعت زاویه ثابت (ω) حرکت کند. تصویر نقطه $\mathbf{A}$ روی قطر XOY نیز نقطه p باشد. ملاحظه می‌شود که با حرکت کردن نقطه A، حرکت نقطه p به سمت عقب و جلو می‌باشد (شکل ۲-۱۳۸).

در این شرایط نوع حرکت نقطه p را «هارمونیک ساده» گویند. (ω برحسب رادیان بر ثانیه).

بدین ترتیب خواهیم داشت: $2\pi = \omega.T$

پریود حرکت $T = 2\pi / \omega$

فرض می‌کنیم: $OP=x$

$$x = r.Cos(\omega.t) \qquad \frac{dx}{dt} = -r.\omega.Sin(\omega t) \qquad \frac{d^2x}{dt^2} = -r.\omega^2.Cos(\omega t)$$

داشتیم : $x = rCos(\omega t)$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

معادله حرکت هارمونیک ساده : $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$

از آنجا که $\omega = \frac{2\pi}{T}$ و از طرفی ضریب x برابر ω^2 می‌باشد لذا داریم:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\text{ضریب } x}}$$

هنگامی که یک کشتی غلتش می‌کند، می‌توان این محور را نزدیک به محور طولی گذرنده از مرکز ثقل درنظر گرفت. ممان اینرسی نیز حول این محور گرفته می‌شود: $I = M.K^2$

M : جرم شناور ($M = \frac{W}{g}$). K: شعاع ژیراسیون حول محور طولی گذرنده از مرکز ثقل g : شتاب گرانش ($I = \frac{w}{g}.k^2$).

- تعمیم رابطه هارمونیک ساده برای شناور

این رابطه هارمونیک ساده را برای شناور به صورت زیر تعمیم می‌دهیم:

اگر شناور تا زاویه θ غلتش کند، ممان بازگرداننده برابر است با: $W \times GZ$ = ممان بازگرداننده

(با فرض θ کوچک) $GZ = GM.Sin\theta$

ممان بازگرداننده = $W \times GM \times Sin\theta$

ممان بازگرداننده (M) = $W.GM.\theta$

یا می‌توان نوشت: $\mathbf{M = I.\alpha}$

همچنین از روابط دینامیک داریم:

که I همان ممان دوم جرمی و α شتاب زاویه‌ای (بر حسب رادیان بر مجذور ثانیه) است.

۱- منابع: [2] , [4] , [5]

2 - simple harmonic

شتاب زاویه‌ای حرکت برابر $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ می‌باشد که خواهیم داشت:

$$I.\frac{d^2\theta}{dt^2} = -W.GZ \qquad \frac{W}{g}.k^2.\frac{d^2\theta}{dt^2} = -W.GM.\theta$$

$$\frac{W}{g}.k^2.\frac{d^2\theta}{dt^2} + W.GM.\theta = 0 \qquad \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g.GM.\theta}{k^2} = 0$$

ملاحظه می‌گردد که معادله حرکت به دست آمده شبیه به رابطه حرکت هارمونیک ساده می‌باشد. پریود نوسانات این حرکت نیز برابر است با:

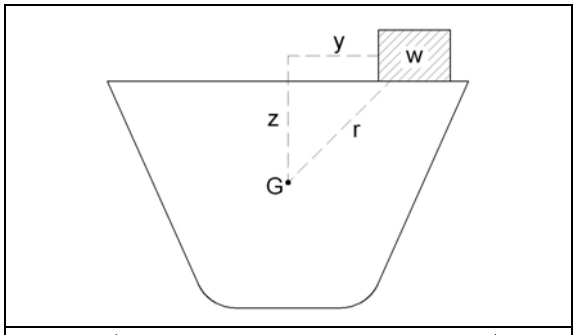
$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\text{ضریب}\theta}}$$

پریود نوسانات حرکت رول شناور:

$$T = \frac{2\pi K}{\sqrt{g.GM}}$$

❖ محاسبه شعاع ژیراسیون شناور

برای محاسبه شعاع ژیراسیون (در حرکت رول) باید ممان هریک از جرم‌های موجود در شناور را مطابق شکل ۲-۱۳۹ حول محور طولی گذرنده از مرکز ثقل، به صورت زیر محاسبه کرد که از روابط زیر استفاده می‌شود:



شکل ۲-۱۳۹: محاسبه r برای هر یک از اقلام جرمی شناور

$$r^2 = z_1^{\,2} + y^2$$

$$K^2 = \frac{m_1.r_1^2 + m_2.r_2^2 + \ldots + m_n.r_n^2}{M}$$

اگر توزیع جرمی شناور در دسترس نباشد، به عنوان یک تخمین کلی و غیردقیق می‌توان از رابطه زیر که توسط استاندارد *BV* ارائه شده استفاده کرد:

[part B/Chapter 5/Section 3] BV

شعاع ژیراسیون حرکت رول (K) بر حسب متر از روابط زیر قابل تخمین است:

- در حالت کلی : $K=0.35B$
- برای کشتی های حمل سنگ معدن : $K=0.3B$

۲- تضاد پایداری با پریود نوسانات غلتش

از فرمول استخراج شده پریود نوسانات، ملاحظه می‌گردد که T با عکس GM متناسب است و این بدین معنی است که هرچه شناور پایدارتر باشد (GM بزرگتر باشد)، پریود نوسانات کوچکتر می‌شود (حرکات شناور تندتر می‌شود) و درنتیجه راحتی و آرامش شناور کمتر می‌شود. بدین جهت اگر GM شناور بزرگتر باشد، آن شناور را «سخت»[1] گویند چراکه در اثر اعمال نیروی خارجی و تغییر حالت، به سرعت به حالت اولیه باز می‌گردد و دارای حرکت شدیدی می‌باشد. همچنین اگر GM شناور کوچک باشد آن شناور را «آرام»[2] گویند. یعنی در صورت اعمال نیروی خارجی و تغییر حالت، به آرامی حرکت کرده و با سرعت کمتری به حالت اولیه باز می‌گردد که راحتی بیشتری برای خدمه به دنبال دارد. بنابراین داریم:

◀ شناور «سخت یا سرکش»: GM بزرگ ← T کوچک ← حرکات شدید و تند ← راحتی کمتر خدمه

◀ شناور «آرام»: GM کوچک ← T بزرگتر ← حرکات آرامتر ← راحتی بیشتر خدمه

مطالب فوق با فرض ثابت بودن شعاع ژیراسیون و تغییرات GM می‌باشد. اگر تمامی پارامترها را متغیر فرض کنیم نکات زیر را بایددرنظر داشت:

۱- پریود مستقل از دامنه نوسانات است چون دامنه نوسانات بسیار کوچک فرض شده‌اند.

۲- پریود رابطه مستقیم با شعاع ژیراسیون دارد.

۳- تغییرات جرم داخل شناور با دو عامل بر پریود اثر می‌گذارد : ۱- تغییر شعاع ژیراسیون ، ۲- تغییر ارتفاع متاسنتری

مثال: شعاع ژیراسیون یک شناور ۶ متر و ارتفاع متاسنتری آن ۰/۵ متر است. پریود نوسانات آن برابر است با:

$$T = \frac{2\pi K}{\sqrt{g.GM}} \quad \rightarrow \quad T = \frac{2\pi \times 6}{\sqrt{9.81 \times 0.5}} = 17.02(\text{second})$$

1 - stiff
2 - tender

مثال۲: یک شناور دارای جابجایی ۱۰۰۰۰ تن و GM=۰/۵ متر می‌باشد. پریود حرکت رول این شناور ۲۰ ثانیه است. اگر جرمی ۵۰ تنی از ارتفاع ۱۴ متری بالای مرکز گرانش برداشته و از شناور خارج شود، پریود نوسانات جدید را به دست آورید (فرض می‌کنیم $\pi^2 = 10$).

$T = \frac{2\pi k}{\sqrt{g.GM}}$ یعنی قبل از برداشته‌شدن جرم ۵۰ تنی، شعاع ژیراسیون برابر ۷ متر و ارتفاع متاسنتری برابر ۰/۵ متر است. پس از برداشته‌شدن این جرم، هم شعاع ژیراسیون و هم ارتفاع متاسنتری به صورت زیر تغییر می‌کند:

$20 = \frac{2\pi k}{\sqrt{9.81\times 0.5}}$ $\quad 400 = \frac{4\pi^2 k^2}{9.81\times 0.5}$ $\quad k^2 = 49.05$ $\quad k = 7m$

تغییر محل مرکز ثقل ناشی از برداشتن جرم: $GG_1 = \frac{w.d}{W} = \frac{50\times 14}{9950}$ $\quad GG_1 = 0.07m$

قبلی $GM = 0.5m$ جدید $GM = 0.57m$

ممان اینرسی جرمی $I_0 = M.k^2 = 10000\times 49.05 = 490500 \quad t.m^2$

جرم برداشته شده حول مرکز ثقل $I_1 = 50\times 14^2 = 9800 \quad t.m^2$

ثانویه حول مرکز ثقل اولیه $I_2 = I_0 - I_1 = 490500 - 9800 = 480700 \quad t.m^2$

ممان ثانویه حول مرکز ثقل جدید (قضیه محورهای موازی):

$I_3 = I_2 - W\times GG_1^2 = 480700 - 9950\times 0.07^2 = 480700 - 49 = 480651 \ t.m^2$

پس از برداشته‌شدن جرم $M = 10000 - 50 = 9950\,t$

$I = Mk^2 \quad k^2 = \frac{I}{M} = \frac{480651}{9950} \quad k = 6.95m$ (شعاع ژیراسیون نهایی)

$T = \frac{2\pi k}{\sqrt{g.GM}} = \frac{2\pi\times 6.95}{\sqrt{9.81\times 0.57}} \quad T = 18.46(Second)$

درمورد این مثال بحث زیر حائز اهمیت است:

- در مثال فوق یک جرم از بالای مرکز ثقل برداشته شده که باعث افزایش *GM* و کاهش *k* می‌شود.
- اگر همین جرم از پائین مرکز ثقل برداشته شود باعث کاهش *GM* و کاهش *k* می‌شود.
- اگر همین جرم به پائین مرکز ثقل اضافه شود، باعث افزایش *GM* و افزایش *k* می‌شود.
- اگر همین جرم به بالای مرکز ثقل اضافه شود باعث کاهش *GM* و افزایش *k* می‌شود.

یا به طور کلی می توان گفت برداشتن هر جرمی باعث کاهش *k* و افزودن جرم باعث افزایش *k* می‌شود و قرار دادن جرم بالای *G* باعث کاهش *GM* و برداشتن جرم از بالای *G* باعث افزایش *GM* می‌شود.

- اگر در یک فاصله عمودی ثابت از مرکز ثقل (مثلا بر روی یک عرشه)، جرم *m* به دو قسمت *m/2* تقسیم شده و از وسط (خط مرکزی شناور) به کناره‌ها منتقل شود (جابجایی عرضی داشته باشد)، در این حالت *GM* ثابت می‌ماند و *K* افزایش می‌یابد که در مجموع پریود نوسانات افزایش می‌یابد.این نتایج در جدول زیر خلاصه شده است:

حذف یا اضافه کردن جرم نسبت به مرکز ثقل (G)	GM	K	T
از بالای G	افزایش	کاهش	کاهش
از پائین G	کاهش	کاهش	باید بررسی شود
به بالای G	کاهش	افزایش	افزایش
به پائین G	افزایش	افزایش	باید بررسی شود
جابجایی عرضی جرم موجود از خط مرکزی با فاصله عمودی ثابت از G	ثابت	افزایش	افزایش

جدول ۲-۹: اثرات جابجایی مرکز ثقل بر پریود نوسانات طبیعی

این جدول در واقع بیانگر گزینه‌های مختلف طراح جهت اعمال تغییر بر پریود نوسانات و همچنین پایداری شناور است. جرم مذکور می‌تواند هر یک از اقلام وزنی در نظر گرفته شده در شناور باشد. بدین‌ترتیب طراح با تغییر چیدمانی و جانمایی اجزاء داخل بدنه به خواسته‌های مطلوب طراحی برسد.

۳- پریود طبیعی و پریود اجباری غلتش عرضی

وقتی یک نیروی خارجی به کشتی وارد می‌شود و سپس این نیرو قطع می‌گردد، انرژی پتانسیل ذخیره شده در حالت غلتیده کشتی (باصرفنظر از اصطکاک آب) به طور کامل به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. چنانکه در حالت قائم، کل انرژی آن، انرژی جنبشی است، سپس این حرکت ادامه

می‌یابد تا انرژی جنبشی به پتانسیل در غلتش درجهت عکس، تبدیل شود و اگر اصطکاک وجود نداشته باشد، این نوسان تا زمان بی‌نهایت ادامه می‌یابد. هرچند که در واقعیت، اصطکاک بین بدنه و آب و انتشار موج آب، باعث میرایی نوسان می‌گردد تا انرژی اعمال شده، جذب گردد. این نوسان که تقریباً حول محور طولی گذرنده از مرکز ثقل در نظر گرفته می‌شود را «پریود طبیعی» گویند که رابطه آن در صفحات قبل ارائه شد. از طرفی کشتی در دریا و اقیانوس، همواره در معرض امواج دریا می‌باشد که این امواج، نامنظم بوده و به طور پیوسته بر شناور وارد می‌شوند که باعث «غلتش اجباری»[1] می‌گردد. وقتی یک پاندول با نوسان آزاد در معرض سری‌هایی از نیروی خارجی با فرکانس منظم قرار می‌گیرد، با پریود نیروهای وارد شده نوسان می‌کند و کشتی هم اگر در معرض امواج با فرکانس منظم (فرکانس تعریف شده برای طیف امواج نامنظم) قرار گیرد با همان فرکانس‌ها نوسان می‌کند. هجوم موج به دو صورت باعث غلتش اجباری شناور می‌گردد:

۱- اختلاف ارتفاع آب اطرف بدنه ناشی از ارتفاع امواج که باعث جابجایی مرکز بویانسی می‌شود و کوپل بین B و G ایجاد می‌گردد.

۲- ذرت امواج دارای حرکت چرخشی[2] هستند که یک نیروی گریز از مرکز دارند. این نیروهای گریز از مرکز (که بر مرکز ثقل وارد می‌شوند) در برخورد با شناور، نیروی بزرگی را پدید می‌آورند که با نیروی هیدرواستاتیکی آب (که بر مرکز بویانسی وارد می‌شود) یک گشتاور نیرو را تشکیل می‌دهند. مجموع این دو عامل باعث پریود اجباری غلتش عرضی می‌شود.

۴- پدیده تشدید غلتش عرضی[3]

وقتی پریود ناشی از امواج با پریود طبیعی کشتی برابر باشد، برهم نهی[4] انرژی‌های غلتاننده موجود، باعث یک رول سنگین ناخواسته می‌گردد. در این حالت، تشخیص اینکه این رول شدید ناشی ضعف پایداری است یا پدیده تشدید غلتش عرضی (رزنانس)، بسیار مشکل است لذا اغلب به اشتباه حالت تشدید رول با ضعف پایداری معادل فرض می‌شود که شاید عکس آن باشد.

نکته مهم در اینجاست که کشتی‌های با GM کوچک، خیلی کمتر در معرض پدیده تشدید رول هستند! طبق رابطه پریود نوسانات طبیعی، هرچه GM بزرگتر باشد، پریود نوسان طبیعی کوچکتر است. مثلاً برای کشتی‌های با GM بزرگ که پریود کوچک باشد (۱۲ ثانیه یا کمتر)، احتمال تشدید رزنانس در امواج بزرگ اقیانوس بیشتر است. برای مثال امواج طوفان اقیانوس اطلس دارای طول موج حدود ۲۰۰ متر و پریود ۱۰-۱۱ ثانیه می‌باشد و احتمال تشدید حرکت بسیار زیاد است. در این شرایط یک کشتی با GM کوچک، دارای پریود طبیعی بزرگتر از پریود این امواج است و کمتر با وقوع تشدید غلتش عرضی، می‌تواند اقیانوس اطلس را طی کند.

لذا اهمیت منطقه عملیاتی شناور و پریود موج‌های غالب آن دریا، برای طراحی شناور، بسیار حائز اهمیت است و باید در طراحی مؤلفه‌های پایداری لحاظ گردد.

البته در شناورهای نظامی در تعیین GM، عوامل اصلی عبارتند از: پایداری در حالت صدمه دیدگی، بادهای جانبی، دور زدن در سرعت بالا و غیره که در این صورت، مقدار GM نسبتاً بزرگ به دست می‌آید. کشتی‌های مسافربری اقیانوس پیما دارای محدوده GM کوچکتری هستند چراکه معیار اصلی، راحتی مسافرین و حرکات ملایم و اندک شناور است.

بدین ترتیب می‌توان گفت کوچک بودن GM علی رغم داشتن عیب کاهش پایداری، از دو طریق بر راحتی خدمه و مسافرین تأثیر گذار است:

۱- بزرگ بودن پریود طبیعی نوسان غلتش عرضی خود شناور

۲- کاهش احتمال بروز پدیده تشدید غلتش عرضی (رزونانس) در برابر امواج دریا

مثال) رام یا سرکش بودن شناور مدل ۱ را در سناریوی وزنی ۱ بررسی نمائید.

حل: برای بررسی رام یا سرکش بودن شناور، پریود نوسانات شناور(T) را محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه T نیز باید شعاع ژیراسیون (K) شناور را با توجه به توزیع وزنی محاسبه می‌کنیم. از آنجا که شعاع هر یک از جرم‌های موجود در شناور از محور طولی گذرنده از G محاسبه می‌گردد، لذا ابتدا باید مرکز ثقل شناور را در نظر گرفت و با استفاده از رابطه زیر جدول را کامل کرد: $r^2 = z_1^{\,2} + y^2$

1 - forced oscillation یا forced rolling

2 - orbital

3 - Synchronous Roll

4 - supper position

اقلام وزنی	وزن (t)	(m)y	z(m)	ZG	z1=abs(z-zG)	r^2	m*r^2
کاسه بدنه	655	0	4.1	5.1	1	1.00	655.0
روبناسازی	140	0.2	11	5.1	5.9	34.85	4879.0
تجهیزات داخل روبناسازی	35	0.1	11.3	5.1	6.2	38.45	1345.8
بار داخل انبارها	2275	0	4.7	5.1	0.4	0.16	364.0
موتور، ژنراتور، شافت پروانه	95	0	2.5	5.1	2.6	6.76	642.2
سایر تاسیسات موتورخانه	60	-0.37	2.9	5.1	2.2	4.98	298.6
خدمه، سوخت و آب	185	-0.1	10	5.1	4.9	24.02	4443.7
سربهای جلو	20	0	0.5	5.1	4.6	21.16	423.2
سربهای عقب	5	-0.01	0.3	5.1	4.8	23.04	115.2
سایر موارد	30	0.31	9	5.1	3.9	15.31	459.2
مجموع	**3500**						**13625.8**

$$K^2 = \frac{m_1.r_1^2 + m_2.r_2^2 + ... + m_n.r_n^2}{M} = \frac{13625\ .8}{3500} = 3.9\ \ m^2 \qquad \longrightarrow \qquad K = \sqrt{3.9} = 1.97$$

در سناریوی وزنی ۱، داریم $GM = 1\ m$ لذا:

$$T = \frac{2\pi K}{\sqrt{g.GM}} = \frac{2\pi \times 1.97}{\sqrt{9.81 \times 1}} = 3.74\ s$$

ملاحظه می‌شود که پریود نوسانات طبیعی شناور مدل ۱ در سناریوی وزنی ۱ کمتر از ۵ ثانیه بوده و شناور در این حالت وزنی دارای حرکات سخت و سرکش می‌باشد. روش رفع این حالت، تغییر جانمایی داخلی شناور یا استفاده از یکی از روش‌های کاهش غلتش است که در بخش بعد بدانها اشاره می‌شود.

۵- پریود غلتش طولی و عوامل مؤثر در آن

محدوده غلتش طولی (پیچ) از حرکت رول (که حدود ۷۰ درجه می‌باشد)، بسیار کمتر است. فرمول محاسبه پریود غلتش طولی شبیه فرمول غلتش عرضی است با این تفاوت که شعاع ژیراسیون $\mathbf{k_{yy}}$ (حول محور عرضی گذرنده از مرکز ثقل) می‌باشد و ارتفاع متاسنتر طولی (GM_L) مدنظر است.

$$T = \frac{2\pi k_{yy}}{\sqrt{g.GM_L}}$$

معمولاً پریود طبیعی غلتش طولی برابر $\frac{1}{3}$ تا $\frac{2}{3}$ پریود طبیعی حرکت رول است. از آنجا که حرکات *pitch*، *heave* و *yaw* با هم مرتبط هستند، لذا مانند *Roll* نمی‌توان آن را به طور مستقل بررسی کرد. در این بین، وابستگی حرکات پیچ و هیو بسیار بیشتر است و تحلیل کامل حرکات در بحث *seakeeping* بیان می‌گردد. با تغییر شکل بدنه می‌توان تا حد زیادی بر حرکت پیچ تأثیر گذاشت. شکل بدنه نوک تیز به راحتی باعث تشدید پیچ می‌شود و در عوض شکل سینه دارای «حبابی شکل»[1] عامل مهمی در میرایی حرکت پیچ است که تا حد زیادی وابسته به حجم، شکل و موقعیت «حبابی سینه» است. در گذشته بسیار سعی شده است که با نصب بالک‌هایی در قسمت سینه، حرکت پیچ را کاهش دهند ولی نیروهای سنگین اسلمینگ و امواج، در اغلب موارد باعث شکسته شدن این بالک‌ها شده است لذا بهترین راه حل، همان شکل سینه حبابی می‌باشد. درشناورهایی که خدمه در قسمت سینه قرار گرفته‌اند مانند زیردریایی، حرکت پیچ بسیار مضر است که البته خود شکل سینه زیردریایی، به عنوان یک «حباب سینه» بزرگ است که حرکت پیچ را میرا می‌کند. همچنین اگر شکل سینه زیردریایی به صورت شکل سینه کشتی باشد، حرکات پیچ شدیدی را باید انتظار داشت که پدیده رزنانس حرکت پیچ نیز در آن دخیل است.

1 - bulbuos bow

۶- پریود حرکت هیو[1]

وقتی به طور مجزا از هیو صحبت می‌شود، به این دلیل است که چندین جنبه قابل توجه دارد بخصوص حرکات سریع عمودی که برای کارکرد دستگاه‌ها و راحتی انسان حائز اهمیت است. اگر یک جسم به زور در داخل آب فرو برده شود و نیروی خارجی به یکباره رها شود، این شناور با پریود نوسان طبیعی بالا و پایین می‌رود که به این نوع نوسان «*dipping*» گویند و پریود طبیعی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{12.g.TPI}{\Delta}}}$$

کلیه واحدها در واحد انگلیسی است. *TPI*: *ton per inch* (که معادل *TPC* در واحد *SI* است). این پارامتر بیان کننده مقدار بار لازم (برحسب تن) برای فرو رفتن شناور در داخل آب (به اندازه ۱ اینچ یا ۱ سانتی‌متر) است. اگر حرکت *dipping* به صورت پریودی توسط نیروی خارجی مانند موج تکرار شود، این حرکت را «*heaving*» گویند که پریود آن، برآیند پریود طبیعی و پریود موج القایی است. پریود غالب، همان پریود موج است ولی اثر میرایی آن، ناشی از شکل بدنه است. مهمترین اثر این حرکت بر شتاب عمودی است.

۷- حرکت یاو[2]

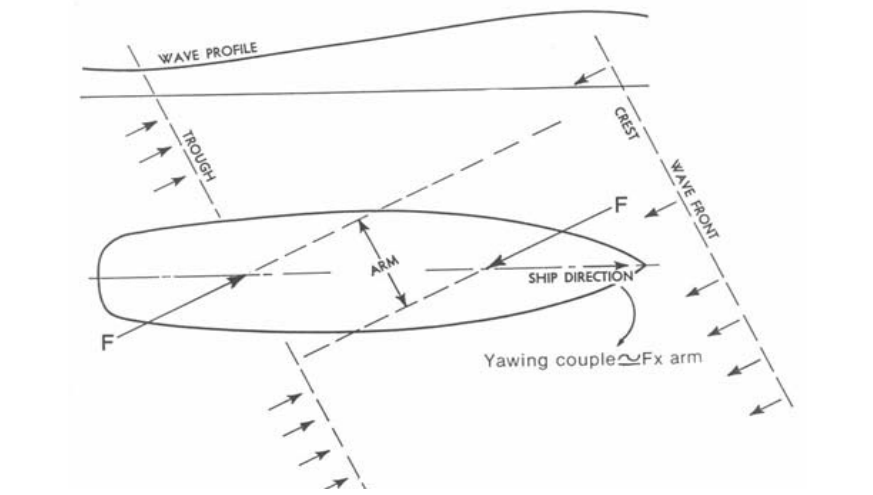
حرکت «یاو» عبارتست از چرخش شناور در صفحه افقی، حول مرکز ثقل. این حرکت، برآیند سه عامل است:

۱- عدم تعادل فشار استاتیکی روی بدنه

۲- حرکت چرخشی ذرات موج

۳- عمل ژیروسکوپی[3]

پروفیل موج در دو طرف بدنه یکسان نیست و توزیع فشار متفاوت است لذا مرکز فشار (مرکز بویانسی) ازنظر طولی و عمودی در دو طرف بدنه متفاوت است و تغییر می‌کند و باعث ایجاد ممان حرکت «یاو» می‌گردد. از آنجا که این نیروها همواره در دریا تغییر می‌کنند، مقدار و جهت نیروهای اعمالی که حرکت یاو را ایجاد می‌کنند همواره متغیر است و باعث نوسان حرکت یاو می‌شود. علاوه بر توزیع موج که یک عامل شبه استاتیکی است، حرکت چرخشی ذرات آب در موج نیز بر حرکت یاو مؤثر است. در قله و قعر موج، جهت حرکت چرخشی ذرات موج عکس یکدیگر است. طبق شکل ۲-۱۴۰، ممان یاو بر اثر امواج بر شناور وارد می‌شود که برابر است با: $M = F \times ARM$



شکل ۲-۱۴۰: اثر حرکت امواج بر حرکت یاو

در این حرکت، اعمال کنترل توسط سکان بسیار دشوار است چراکه در نیمی از طول موج، جهت نیروها برعکس نیمی دیگر است و نمی‌توان فقط با یکسو قرار دادن سکان، کنترل لازم را اعمال کرد. برای مقابله با این اثرات، اقدامات زیر را می‌توان انجام داد:

۱- سکان پشت پروانه باشد که بتواند از سرعت سیال خروجی از پروانه استفاده کند.

1 - heave
2 - yawing
3 - gyroscopic action

۲- شیب پاشنه شناور برای اینکه اثرات موج را کمتر تجربه کند.
۳- استفاده از چندین پروانه (در صورت نیاز)

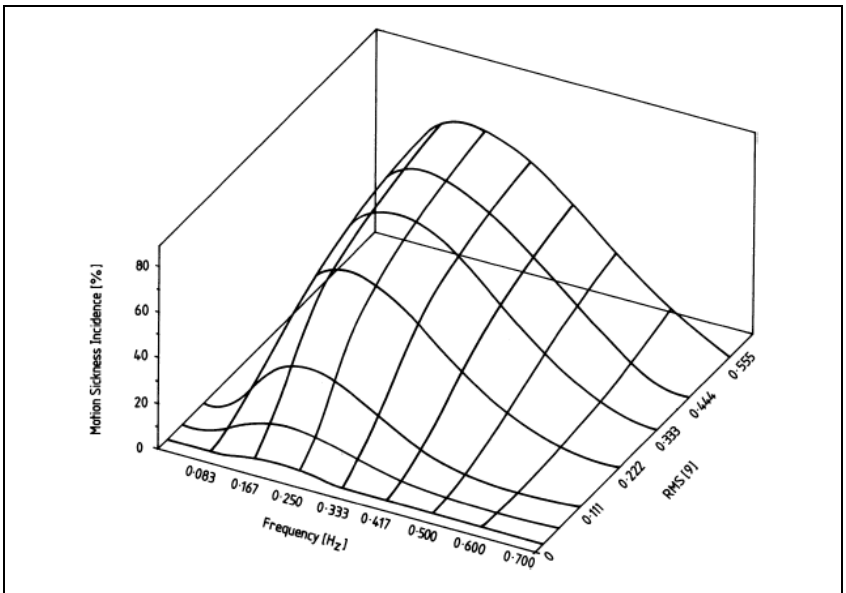
وقتی شناور به طور همزمان در حال پیچ و رول کردن است، دوران در این دو صفحه، باعث تعمیم حرکت در صفحه سوم می‌شود که حرکت یاو را باعث می‌شود. ممانی که این حرکت را ایجاد می‌کند را ممان ژیروسکوپی و عمل انتقال حرکت به صفحه سوم را «عمل ژیروسکوپی» گویند. ممان ژیروسکوپی و حرکت ناشی از آن، چندان قابل ملاحظه نیست.

۸- نسبت دریازدگی با پریود نوسانات

اغلب افراد دریانورد، در اثر حرکات شدید شناور دچار امراض و ناراحتی‌های زیر می‌گردند:

۱- کاهش قوای ذهنی و تمرکز حواس
۲- سرگیجه و تهوع (دریازدگی)
۳- عدم تسلط بر فعالیت‌های فیزیکی

این موارد برای مسافرین عادی بسیار شدیدتر است و بخصوص در شناورهای اقیانوس‌پیمای تفریحی و توریستی باید به شدت از آنها اجتناب کرد. علاوه بر ناراحتی‌های انسانی، جابجایی اجسام داخل شناور، مشکل شدن تردد، صدمه دیدن دستگاه‌ها و غیره نیز از عوامل نامناسب حرکات شدید شناور است. تاکنون بررسی‌ها نشان داده است که حرکات رول[1] و پیچ[2] و هیو بیشترین تأثیر را بر دریازدگی خدمه دارند ولی هنوز مشخص نیست که مشخصات این حرکات (فرکانس، دامنه حرکت، سرعت و شتاب)، چه سهمی در دریازدگی دارند ولی به طور قطع می‌توان گفت «فرکانس» حرکات، بیشترین تأثیر بر دریازدگی خدمه را دارد. شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای شناور نیز اثرات متفاوتی را دارند. در این بین، حرکات رول و پیچ دارای شتاب زاویه‌ای و بیشترین اثرات را دارند و البته شتاب خطی حرکت هیو نیز حائز اهمیت است. در شکل ۲-۱۴۱ فرکانس حرکات رول و اثر آن بر دریازدگی به صورت شماتیک نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد نسبت فرکانس حرکت با دریازدگی به صورت غیرخطی تغییر می‌کند و دارای یک نقطه ماکزیمم می‌باشد. در این نقطه ماکزیمم بیشترین احتمال دریازدگی اتفاق می افتد که در حدود فرکانس ۰/۲ هرتز می‌باشد که معادل پریود حرکات ۵ ثانیه می‌باشد. در این پریود، بیشترین احتمال دریازدگی خدمه (حتی دریانوردان خبره) وجود دارد چراکه در اثر تلاطم پیوسته شناور، سیستم دفاعی و گوارشی بدن مختل می‌گردد و انسان کارایی خود را از دست می‌دهد.



شکل ۲-۱۴۱: نمودار تغییرات فرکانس حرکت رول بر دریازدگی

طراحی شناور باید به گونه‌ای باشد که پریود نوسانات یا از ۵ ثانیه خیلی کمتر یا خیلی بیشتر باشد تا بتوان از نقطه اکسترمم دریازدگی دور شود. البته امکان کاهش پریود از ۵ ثانیه معمولاً وجود ندارد چراکه همانطور که گفته شد هم پریود طبیعی و هم پریود اجباری ناشی از امواج در این زمینه مؤثر

1 -Roll
2 -pitch

هستند و لذا خیلی بعید است که بتوان اغلب شرایط کاری شناور را به کمتر از ۵ ثانیه رسانید و از طرفی در این محدوده، کارکرد دستگاه‌ها نیز دچار اشکال می‌گردد. در نتیجه بهترین راه، افزایش پریود نوسانات به بیش از ۵ ثانیه است که هرچه از این مقدار بیشتر باشد، هم احتمال دریازدگی و هم خرابی دستگاه ها به حداقل می‌رسد. محدوده پریود قابل تحمل برای انسان بدون دریازدگی و اثرات جانبی:

$T < 5$ Sec. $\rightarrow$ غیر قابل تحمل برای انسان

$5 < T < 10$ Sec. $\rightarrow$ فقط برای دریانوردان قابل تحمل است (شناور سرکش)

$T > 10$ Sec. $\rightarrow$ به راحتی قابل تحمل است (شناور رام)

۹- کارکرد دستگاه‌ها در محدوده حرکات شناور

کلیه دستگاه ها و تجهیزات شناور باید بتوانند در حرکات *Roll*، *pitch*، *yaw* و *Heave* کارایی موفقی داشته باشند. برای پرهیز از طراحی غیرمهندسی[1]، حرکات شناور که مؤثر بر کارکرد تجهیزات است به دو دسته تقسیم می‌گردد:

۱- حرکاتی که در آنها دستگاه‌ها باید کارایی کامل و بدون وقفه‌ای داشته باشند و هیچ گونه افت راندمان نداشته باشند (مانند تجهیزت کنترل مسیر و حرکت شناور).

۲- حرکاتی که در آنها دستگاه‌ها مجاز هستند با افت راندمان، به کارکرد خود ادامه دهند. (مانند ماشین‌آلات فرعی نظیر سیستم تهویه)

درجدول زیر مشخصات نوسانی یک شناور نظامی تناژ متوسط که کلیه دستگاه‌ها و تجهیزات باید بتوانند بدون وقفه کار کنند ارائه شده است. مقادیر زیر برای حالت دریایی ۷[2] استخراج شده و مقادیر شتاب (از حالت محاسباتی) در ۱/۵ ضرب شده است تا ضریب اطمینان کافی حاصل شود.

	Roll	Pitch	Yaw	Heave
پریود (ثانیه)	10	5-6.5		7
دامنه (درجه)	18	8		3.5m
شتاب (درجه بر مجذور ثانیه)			1.75	

جدول ۲-۱۰: مشخصات نوسانی یک شناور متوسط

ماموریت شما در زندگی «بی مشکل زیستن» ، نیست ...

با انگیزه زیستن است ...

1 - over design
2 - Sea state 7

فصل۲۷:[1] روش‌های کاهش غلتش شناور

هر شناور متناسب با جابجایی و مقدار پایداری در محدوده خاصی از تلاطم دریا[2] می‌تواند به طور ایمن حرکت کند. اثراتی مانند نیروی امواج، جریانهای دریایی و باد باعث غلتش شناور می‌شوند که مشخصات مختلف غلتش از قبیل پریود و دامنه غلتش نباید از حد مجاز تعریف شده برای شناور تجاوز کند که دو عامل اصلی در آن در نظر گرفته می‌شود:

۱) راحتی انسان و کارکرد ایمن خدمه که در کشتی‌های مسافربری ، از اهمیت خاصی برخوردار است. عامل اصلی در این مورد، پریود نوسانات است.

۲) حداکثر زاویه غلتش قابل تحمل دستگاهها و تجهیزات که در این مورد، دامنه نوسانات از اهمیت خاصی برخوردار است.

لذا اگر شناور در محدوده کاری خود (مطابق با سناریوی کاری تعریف شده)، مجبور به عبور از مناطق دریایی بسیار متلاطم در فصل‌های خاصی باشد که میزان پایداری شناور برای غلبه بر آنها مناسب نیست باید یکی از روشهای کاهش غلتش زیر را استفاده کرد:

۱- بالچه‌های کنار بدنه[3]

۲- بال‌های ضد غلتش[4]

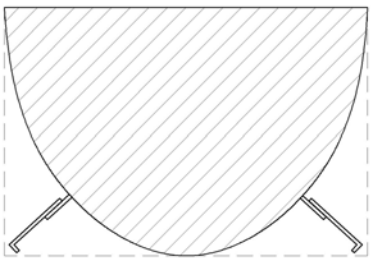
۳- مخازن ضد غلتش[5]

۴- ژیروسکوپ ضد غلتش[6]

هر یک از موارد فوق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱- بالچه‌های کنار بدنه

کشتی‌های قدیمی در زیر بدنه دارای یک کیل به صورت تیر بلندی بودند که این کیل اثر کاهش غلتش عرضی شناور را نیز انجام می‌داد. پس از ساخته شدن کشتی‌های فلزی، برای کاهش غلتش، تیغه‌هایی به کنارها در قسمت پایین بدنه جوش داده شدند که به این تیغه‌ها «بالچه‌های کنار بدنه» می‌گویند. این بالچه‌ها به صورت عمود بر پوسته در طرفین بدنه نصب می‌شوند و به گونه‌ای قرار می‌گیرند که از حداکثر عرض بدنه تجاوز ننمایند(شکل ۲-۱۴۲).



شکل ۲-۱۴۲: موقعیت نصب بالچه بر طرفین زیر بدنه

این بالچه‌ها به دو صورت کلی هستند:

۱) بالچه به صورت تیر نازک (شکل ۲-۱۳۷) که از دو قسمت مجزا تشکیل شده است. یک قسمت که به بدنه جوش شده و استحکام زیادی دارد و قسمت دوم که به قسمت اول جوش شده و در صورت برخورد با مانع، قسمت دوم صدمه دیده و به راحتی قابل جدا شدن است و به بدنه شناور صدمه‌ای وارد نمی‌شود. این نوع بالچه‌ها هزینه ساخت و نصب اندکی دارند و در شناورهای کوچک براحتی نصب می‌شوند.

۲) بالچه‌ها با مقطع V شکل که داخل آن چوب قرار می‌گیرد تا در برابر ضربه دوام بیشتری داشته باشند. این ضربه ممکن است در حال به داک بردن یا به گل نشستن اتفاق افتد.

این بالچه‌ها معمولاً از وسط تا $\frac{۲}{۳}$ طول بدنه (به سمت عقب) امتداد می‌یابند و حدود ۳۰-۲۰ درصد از غلتش بدنه را کاهش می‌دهند. وقتی شناور در حال حرکت می‌باشد، نیروی لیفت وارد شده بر روی این بالچه‌ها اثر مضاعفی بر پایدار ماندن شناور در برابر امواج و حرکات شناور دارد.

برای تعیین ارتفاع بالچه سه تخمین را می‌توان استفاده کرد: ۱- ارتفاع این بالچه‌ها در کشتی‌های اقیانوس‌پیما معمولاً بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلیمتر است. ۲- ارتفاع بالچه معمولا بزرگتر از ۲ درصد عرض یا ۳۰ درصد شعاع بیلج بدنه در نظر گرفته می‌شود. ۳- ارتفاع بالچه طبق توصیه *IACS* از رابطه مقابل بدست می‌آید: $Depth\ of\ keel = \frac{0.18}{C_B - 0.2}$ کمترین ضخامت ورق بالچه در استاندارد *LR* برابر ۱۴ میلیمتر و در استاندارد *GL* برابر ۱۵ میلیمتر ذکر شده است. عرض ورق پایه باید طبق استاندارد بیش از ۵۰ میلیمتر باشد. در مجموع، این روش، رایج‌ترین و ارزانترین روش کاهش غلتش عرضی شناور است.

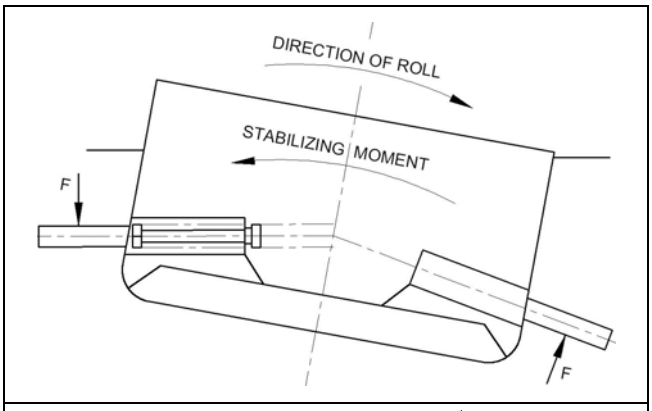
۱- منبع: [4] , [5] , [15]

2 - Sea force
3 - Bilge Keel
4 - Controllable fin – stabilizer fin
5 - Anti-Rolling tanks
6 - Gyrostabilizer

۲- بالک‌های ضد غلتش

این بالکها همانند زواید بلندی از کناره‌های زیر بدنه بیرون زده‌اند و برای کاهش بسیار مؤثر غلتش عرضی بکار می‌روند و اگر به خوبی طراحی شوند، کاهش غلتش به اندازه ۹۰ درصد را به دنبال دارند و در کشتی‌های مسافربری حرکات رول را بین ۴-۲ درجه محدود می‌کنند. این بالکها بسیار پرهزینه هستند و معمولاً در کشتی‌های مسافربری و کانتینربر استفاده می‌شوند. این بالکها از حداکثر عرض بدنه تجاوز می‌کنند لذا برای جلوگیری از تصادم این بالکها با شناورهای دیگر و پایه‌های اسکله، در مواقعی که مورد نیاز نباشند به دو نوع به داخل بدنه جمع می‌شوند:

۱) **بالک کشویی :** به صورت کشویی به داخل بدنه کشیده می‌شود (شکل ۲-۱۴۳).



شکل ۲-۱۴۳: بالک کشویی ضد غلتش

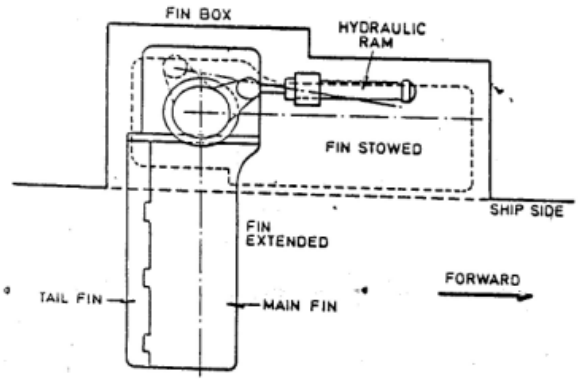
۲) **بالک لولایی :** به صورت لولایی به داخل بدنه جمع می‌شوند (شکل ۲-۱۴۴).

بالکها دارای مقطع هیدروفویل بوده و سیستم تحریک این بالکها به صورت هیدرولیک می‌باشد. هر بالک از دو قسمت تشکیل شده است (شکل ۲-۱۴۵):

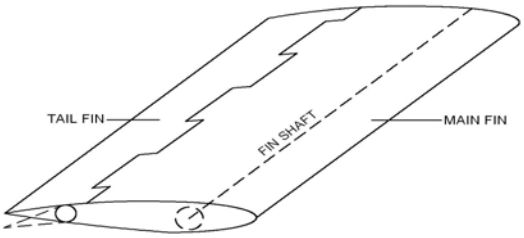
۱) قسمت اصلی بالک که تا زاویه حدود ۲۰ درجه می‌تواند دوران کند.

۲) قسمت انتهایی بالک یا بالچه[1] که به اندازه زاویه حدود ۱۰ درجه نسبت به قسمت اصلی بالک می‌تواند دوران کند.

این بالک‌ها در هنگام حرکت شناور، اثر بسیار بیشتری در کاهش غلتش دارند. مزیت عمده این روش کارآیی بسیار مؤثر در کاهش حرکت رول است و عیب عمده آن نیز اشغال فضای زیادی از داخل بدنه برای به داخل کشیدن بالک و مکانیزمهای تحریک آن می‌باشد. از طرف دیگر وزن بسیار زیادی را بر شناور تحمیل می‌کند.



شکل ۲-۱۴۴: بالک جمع‌شونده ضد غلتش



شکل ۲-۱۴۵: بالک‌های ضد غلتش دارای مقطع فویل بوده و از دو قسمت اصلی و بالچه تشکیل شده‌اند.

۳- مخازن ضد غلتش[2]

مخازن ضد غلتش از مواردی هستند که بین ۳۵ تا ۵۰ درصد غلتش‌های شناور را کاهش می‌دهند . خاصیت ضد غلتش بودن این مخازن ارتباطی با سرعت حرکت شناور ندارد. لذا در کشتی‌هایی که برای مدت طولانی در یک محل توقف دارند می‌تواند مؤثر باشد. مانند کشتی‌های مسکونی کنار سکوهای دریایی و کشتی‌های حفاری. این مخازن از سطح آزاد سیال برای کاهش غلتش استفاده می‌کنند. سطح آزاد مخازن دو اثر مهم بر شناور دارد:

1 - flap
2 - Anti-Rolling tanks

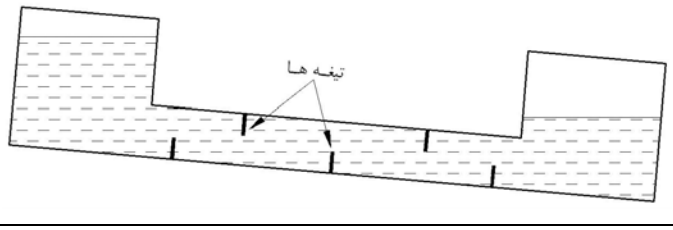
۱) اثر سطح آزاد مخازن باعث کاهش پایداری می‌شود به طوری که در شناورهایی که دارای مخازن ضد غلتش هستند باید مقدار پایداری به حدی باشد که اثر سطح آزاد مخازن باعث حد بحرانی پایداری نگردد.

۲) جابجایی سیال داخل مخازن از لختی و تأخیر فاز نسبت به جابجایی شناور برخوردار است. این تأخیر فاز به میزان آزادی سیال برای جابجا شدن بین دو ناحیه از مخزن بستگی دارد. در مؤثرترین حالت، این تأخیر فاز به اندازه نصف پریود غلتش شناور می‌باشد. بدترین حالت نیز «هم فاز» شدن با پریود غلتش شناور است که نه تنها باعث کاهش غلتش نمی‌گردد بلکه دامنه غلتش را شدیدتر می‌نماید. لذا برای ایجاد تأخیر فاز مناسب، مخازن ضد غلتش را معمولاً به شکل U می‌سازند که در قسمت بالا یا پایین بدنه قرار می‌گیرند.

سه نوع مخزن ضد غلتش برای شناورها می‌توان برشمرد:

۱) مخازن معمولی[1] :

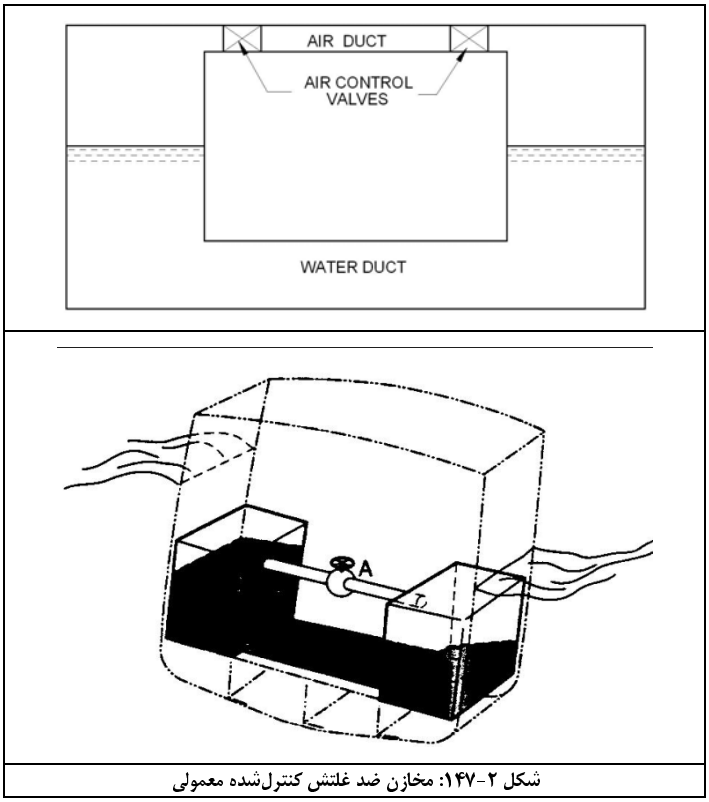
این مخازن مطابق شکل ۲-۱۴۶ دارای دو بال به شکل U می‌باشند که در طول محدودی از بدنه (بالا یا پایین بدنه) قرار می‌گیرد. در داخل کانال ارتباطی بین این مخازن نیز تیغه‌هایی قرار گرفته‌اند که بتوانند از غلتش آزاد سیال به دو بال مخزن جلوگیری و تأخیر فاز مورد نیاز را ایجاد کنند.



شکل ۲-۱۴۶: مخزن معمولی ضد غلتش

۲) مخزن کنترل شدهٔ معمولی[2]:

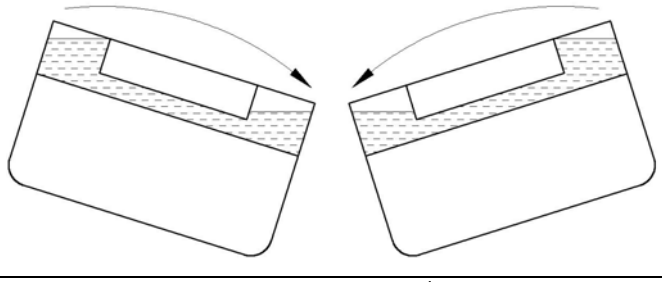
این مخازن دارای شکلی شبیه به مخازن معمولی فوق می‌باشند با این تفاوت که در قسمت فوقانی مخازن، یک کانال هوا (ونت[3] هوای مخازن) وجود دارد که این کانال هوا دارای یک یا دو شیر کنترل هوا می‌باشد (شکل ۲-۱۴۷). می‌دانیم که در یک مخزن بسته نیمه‌پر از سیال که بالای آن هوا قرار گرفته است، اگر این هوا به راحتی اجازه تخلیه یا انتقال پیدا نکند، ورود آب به داخل مخزن نیز دشوار می‌شود که تخلیه هوای داخل مخزن برای وارد شدن سیال به آن را در اصطلاح «تهویه شدن مخازن» گویند.



شکل ۲-۱۴۷: مخازن ضد غلتش کنترل‌شده معمولی

در این حالت ایجاد تأخیر فاز مناسب بر عهده شیرهای هوا می‌باشد. بهترین حالت کاهش غلتش در شکل ۲-۱۴۳ ملاحظه می‌شود که ممان ایجاد شده توسط سیال داخل مخازن با تأخیر فاز ۱۸۰ درجه باعث کاهش غلتش عرضی شناور می‌شود.

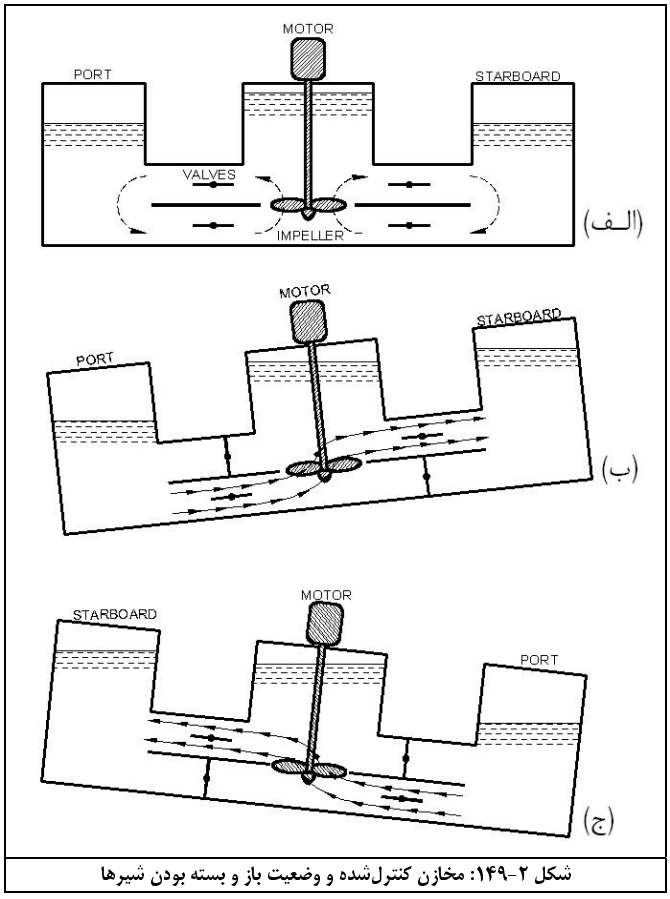
1 - Passive tanks
2 - Passive Controled tanks
3 - vent



شکل ۲-۱۴۸: تأخیر فاز ۱۸۰ درجه مخازن در کاهش غلتش

۳) مخازن کنترل شدهٔ فعال[1] :

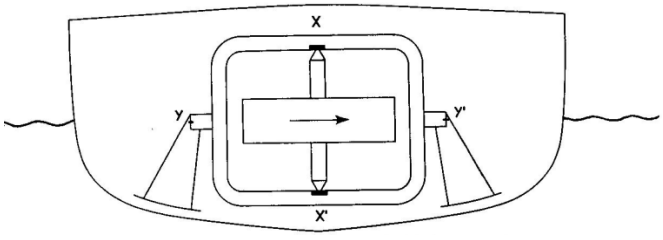
مقطع این مخازن که به شکل W یا دو حرف U در کنار هم می‌باشد، دارای یک پروانه در قسمت میانی (بال میانی) می‌باشد (شکل ۲-۱۴۹). این پروانه توسط یک موتور الکتریکی یا هیدرولیکی تحریک و کنترل می‌شود. این پروانه وظیفه ایجاد تأخیر فاز بین حرکت سیال داخل مخازن و غلتش شناور را بر عهده دارد. قسمت تحتانی مخازن توسط یک صفحه تخت به دو کانال تقسیم شده است که هر کانال نیز دارای یک شیر ارتباطی می‌باشد. حالت (الف) مربوط به حالت قائم شناور می‌باشد که پروانه همواره در حال کار کردن و کلیه شیرهای ارتباطی مخازن باز است. وقتی شناور به سمت چپ غلتش می‌کند، حالت (ب) اتفاق می‌افتد و مطابق شکل، شیرها به گونه‌ای باز می‌شوند که آب داخل مخازن از سمت چپ به راست انتقال یابند. در غلتش شناور به سمت راست نیز عکس این عمل اتفاق می‌افتد (حالت ج) به گونه‌ای که غلتش عرضی شناور مهار شود. این روش نیازمند سیستم کنترل کامپیوتری می‌باشد، به گونه‌ای که حرکت موتور پروانه و شیرها را به صورت خودکار کنترل کند. این روش دارای هزینه بالاتری نسبت به مخازن قبل می‌باشد ولی اثر بیشتری بر کاهش غلتش عرضی شناور دارد.



شکل ۲-۱۴۹: مخازن کنترل‌شده و وضعیت باز و بسته بودن شیرها

۴- ژیرسکوپ ضد غلتش:

اصول کارکرد ژیروسکوپ ضد غلتش براساس تئوری ژیروسکوپ‌های معمولی می‌باشد. مطابق شکل ۲-۱۵۰ ژیروسکوپی را در نظر بگیرید که در داخل قاب پریسکوپ حول محور xx' در حال دوران است. این ژیروسکوپ به بدنه کشتی از طریق محور yy' ثابت شده است. حال فرض کنید کشتی در معرض یک ممان خارجی قرار گرفته و حول محور طولی، غلتش عرضی (رول) انجام می‌دهد.



شکل ۲-۱۵۰: نحوه قرارگیری ژیروسکوپ ضدغلتش در داخل شناور

1 - Active Controlled tanks

با این غلتش محور ژیروسکوپ نیز تغییر زاویه می‌دهد و برآیند اثر نیروهای وارده ژیروسکوپ، به برگشت شناور به حالت اولیه خود کمک می‌کند. این نیروها براساس تئوری ژیروسکوپ قابل تحلیل می‌باشند. ژیروسکوپ‌ها دارای دو نوع فعال و غیر فعال هستند و معمولاً در شناورهای متوسط و کوچک نصب می‌شوند مانند کشتی‌های راهنما[1] و شناورهای تفریحی کرانه‌پیما. علت این امر این است که ژیروسکوپها معمولاً در اندازه‌های خیلی بزرگ ساخته نمی‌شوند که بتوانند بر روی شناورهای اقیانوس‌پیما نصب شده و بر کاهش غلتش نیز مؤثر باشند. تاکنون بزرگترین شناوری که بر روی آن ژیروسکوپ ضد غلتش نصب شده است، کشتی لوکس مسافربری ایتالیایی *conte di savoia* با تناژ بیش از ۴۰ هزار تن می‌باشد. این کشتی دارای سه ژیروسکوپ ضد غلتش با قطر قسمت دوار حدود ۴ متر است. وزن هر ژیروسکوپ ۲۳۰ تن ! و مجموع ژیروسکوپ‌ها دارای وزن ۶۹۰ تن (یعنی حدود ۱/۷ درصد جابجایی کل کشتی !) هستند. ژیروسکوپها معمولاً حدود ۶۰ درصد و در بهترین کارآیی تا ۸۰ درصد از غلتش عرضی شناور را می‌توانند کاهش دهند. اندازه و جرم ژیروسکوپ‌ها و تعداد آنها بر کاهش غلتش شناور بسیار مهم هستند و از آنجا که ژیروسکوپها معمولاً دارای جرم خیلی زیاد نیستند لذا معمولاً در شناورهای کوچک و متوسط نصب می‌شوند که کارآیی لازم را داشته باشند. در شناورهای بزرگ معمولاً از روش مخازن و بالکهای ضد غلتش استفاده می‌شود. ابعاد تقریبی ژیروسکوپ نسبت به بدنه شناور را می‌توان در شکل ۲-۱۵۰ ملاحظه کرد. مزیت عمده این روش کارآیی بسیار زیاد در کاهش غلتش عرضی و عیب آن هزینه زیاد نصب و نگهداری می‌باشد.

❖ روشهای کاهش غلتش طولی

برای کاهش غلتش طولی شناور اقدام مؤثری همانند روشهای کاهش غلتش عرضی نمی‌توان انجام داد چرا که ممان‌های طولی خیلی بزرگتر از ممان‌های عرضی هستند و براحتی نمی‌توان بر آنها غلبه کرد. دو روش اصلی در کاهش غلتش طولی مؤثر است:

۱- بالکهای سینه: در برخی مواقع که حرکات غلتش طولی شناور بسیار شدید باشد می‌توان از بالکهایی در منتهی‌الیه جلوی سینه استفاده کرد. این بالکها در کاهش غلتش طولی شناور بسیار مؤثر هستند ولی دو ایراد اصلی دارند:

اولاً: باعث ایجاد ارتعاش زیاد در بدنه می‌شوند و ثانیاً در بسیاری موارد این بالکها در اثر حرکات شدید سینه دچار شکست شده‌اند لذا باید دارای سازه بسیار محکم و سنگین باشند.

۲- حبابی سینه[2] : حبابی سینه دارای کاربردهای هیدرودینامیکی زیادی است ولی در کنترل غلتش طولی نیز بسیار مؤثر است چرا که به عنوان یک حجم بویانسی بزرگ در منتهی‌الیه جلوی سینه می‌باشد که ممان طولی زیادی برای برگرداندن شناور در حالت اولیه ایجاد می‌کند.

در حالت کلی، شناورهایی که دارای سینه باریک و تیز (همانند کشتی‌های نظامی) هستند دارای غلتش طولی (حرکات پیچ) شدیدتری نسبت به شناورهای دارای سینه توپر (همانند نفتکش‌ها) هستند.

هرکس مومنی را به خاطر گناهی سرزنش کند، نمی‌میرد تا خود آن گناه را مرتکب شود. (امام صادق (ع))

1 - pilot ship
2 - Bulbous bow

فصل ۲۸:[1] انجام آزمایش کجی

انجام آزمایش کجی[2] از مهمترین آزمایشاتی است که پس از ساخته‌شدن شناور انجام می‌شود. در این بخش مباحث زیر در مورد این آزمایش بیان می‌شوند:

- هدف از انجام آزمایش کجی
- تئوری انجام آزمایش
- محاسبه KG در آزمایش کجی
- روش خواندن زاویه غلتش
- سایر دستاوردهای آزمایش کجی
- نکات مهم در انجام آزمایش کجی

۱- هدف از انجام آزمایش کجی

هدف اصلی از انجام این آزمایش، تعیین محل دقیق مرکز گرانش (KG) می‌باشد چراکه در حین ساخت شناور معمولاً تعیین دقیق وزن‌ها و مراکز وزن، امکان پذیر نیست. در این آزمایش هم مرکز عمودی و هم مرکز طولی مرکز ثقل قابل تعیین است ولی از آنجا که پایداری عرضی شناور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا محاسبه دقیق KG (مرکز عمودی ثقل) دارای اهمیت خاصی است که در این آزمایش به دقت تعیین می‌شود. از موارد دیگری که در این آزمایش قابل تعیین است، وزن سبک[3] شناور می‌باشد. همچنین اگر کشتی دارای زاویه لیست[4] باشد، این زاویه در حین آزمایش مشخص خواهد شد. پس از تعیین KG براحتی می‌توان ارتفاع متاسنتری **(GM)** را نیز تعیین کرد و تعیین دقیق ارتفاع متاسنتری عرضی از اهمیت خاصی در تحلیل پایداری برخوردار است.

۲- تئوری انجام آزمایش:

همانطور که می‌دانیم، شناور در مقابل هر ممان هیل دهنده[5] وارده بر شناور، ممانی عکس آن را وارد می‌کند که شناور را به جای اولیه خود بازگرداند (البته در شناورهای دارای پایداری مثبت) که بدان ممان بازگرداننده[6] گویند. در این آزمایش، ممان هیل دهنده به وسیله جابجایی وزنه‌ها بر روی شناور انجام می‌گیرد (شکل ۲-۱۵۱) که این ممان برابر است با: $HM=w.x$

w: وزن وزنه‌های هیل دهنده x: جابجایی عرضی وزنه

وزن w باید در حدود ۲ درصد وزن سبک شناور باشد. لذا برای یک شناور ۱۰۰ تنی، وزن وزنه‌های جابجا شونده (w) در حدود $2000kg$ باید باشد. مقدار این وزنه‌ها باید بتواند زاویه هیل در حدود ۲-۳ درجه ایجاد کند لذا اگر وزن وزنه‌ها کمتر هم باشد، با افزایش فاصله جابجایی باید بتوان این مقدار زاویه هیل را ایجاد کرد. معمولاً در استانداردهای دریایی زاویه کمتر از ۲ درجه توصیه نمی‌شود چراکه مقدار آن بسیار کم بوده و خواندن این زاویه از شاقول (یا پاندول) مشکل است و درنتیجه خطای انجام آزمایش افزایش می‌یابد. زاویه بیشتر از ۳ درجه نیز توصیه نمی‌شود هرچند که خواندن آن راحت‌تر است ولی دو شرط اساسی آزمایش را تحت الشعاع قرار می‌دهد:

۱- ثابت بودن مرکز متاسنتر: برای انجام آزمایش زاویه هیل باید به حدی باشد که نقطه M ثابت بماند چراکه در زوایای غلتش زیاد، مرکز متاسنتر، یک مسیر منحنی را طی می‌کند و نقطه ثابتی نیست. در تحلیل پایداری نقطه متاسنتری M، تا حدود ۸ درجه ثابت تخمین زده می‌شود که برای آزمایش کجی قابل قبول نیست و برای داشتن دقت کافی، زاویه ۲ درجه توصیه شده است. به عبارت دیگر، زاویه غلتش باید به حدی باشد که بتوان مساحت سطح آبخور را ثابت درنظر گرفت.

۲- قابل صرفنظر بودن جابجایی آب داخل مخازن و اثر سطح آزاد مایعات

۳- تغییر مرکز ثقل فقط بر اثر حرکت وزنه‌ها

در غلتش شناور یا تغییر مرکز ثقل آن، فقط باید حرکت وزنه‌ها دخیل باشند و جابجایی ناخواسته جرم‌های درون شناور، آزمایش را با نتایج مردودی مواجه خواهد کرد. لذا برای حصول اطمینان، زاویه ۲ درجه می‌تواند اطمینان بخش باشد چراکه جسم‌هایی که در جای خود ثابت نشده‌اند و به راحتی از محل خود حرکت می‌کنند نیز تا زاویه ۲ درجه هیچگونه حرکتی نخواهند داشت. البته اجسام آویزان درون شناور باید در حین انجام آزمایش حذف شوند

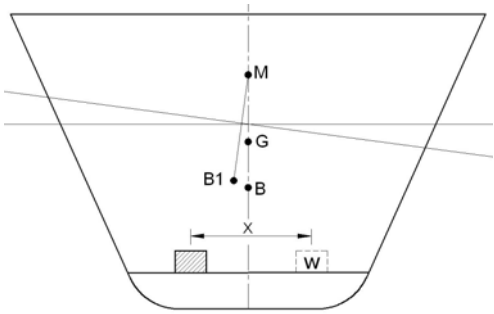
۱- منابع :[4] , [7] , [14]

2 - Inclining test
3 - light weight
4 - list angle
5 - Heeling Moment
6 - righting moment

یا اثر منفی آنها بر کاهش GM دقیقاً محاسبه گردد. همچنین اثر سطح آزاد مخازن نیز باید لحاظ گردد. ممان هیل دهنده ایجاد شده باید به وسیله ممان بازگرداننده شناور جبران شود. ممان بازگرداننده برابر است با: $RM = GM.Sin\varphi.\Delta = GZ.\Delta$

$RM=HM$ $\quad GM.Sin\varphi.\Delta = w.x \quad \Rightarrow \quad GM = \dfrac{w.x}{\Delta.Sin\varphi}$

رابطه $GM = \dfrac{w.x}{\Delta.Sin(\varphi)}$ بدین معناست که هر مقدار وزنه که به مقدار دلخواه x جابجا شود و زاویه φ را ایجاد کند باید یک GM ثابت را نتیجه دهد (برای زوایای غلتش کوچک). ولی از آنجا که همواره مقادیر تجربی با خطا مواجه هستند، این مقادیر یکسان به دست نمی‌آیند لذا از چندین حالت مختلف استفاده می‌شود و درنهایت مقدار میانگین GM به دست آمده مورد پذیرش واقع می‌شود. (نحوه خواندن φ در قسمت مربوطه آمده است).



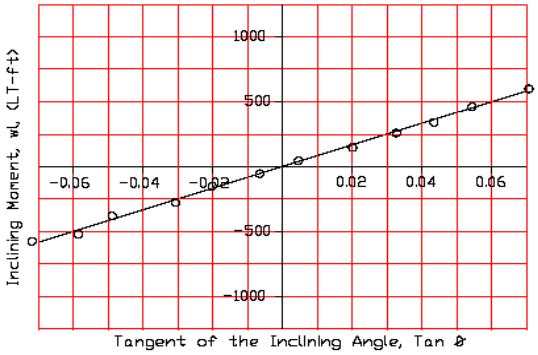
شکل ۲-۱۵۱: جابجایی وزنه‌های انجام آزمایش و غلتش شناور

۴- نحوه استخراج نتایج

برای استخراج نتایج، نموداری تشکیل داده می‌شود که محور عمودی آن ممان هیل دهنده $(w.x)$ می‌باشد و محور افقی آن $\mathrm{Sin}(\varphi)$ می‌باشد. می‌دانیم که در مجموع سه متغیر (φ, x, w) و یک مقدار ثابت (Δ) داریم. لذا GM وابسته به سه پارامتر فوق تغییر می‌کند. اگر آزمایش برای چند حالت جابجایی وزنه‌های آزمایش انجام شود، نقاط متعددی روی نمودار بدست می‌آید که می‌توان یک خط شیب‌دار بهینه از آنها عبور داد. اگر نتایج آزمایش، بدون خطا باشد، کلیه نقاط دقیقا روی یک خط شیب‌دار خواهند بود ولی بدلیل خطاهای آزمایش، معمولا این نقاط روی یک خط نیستند و باید یک خط به صورت بهینه از این نقاط عبور داد. طبق رابطه مقابل شیب این نمودار برابر با مقدار $(\Delta.GM)$ می‌باشد. $\Delta.GM = \dfrac{w.x}{Sin\varphi}$

$$\overline{G_oM_T} = \frac{w_i\, t_i}{\tan\varphi_i}\,\frac{1}{\Delta_{S\ incl}}$$

$$Average\ \overline{G_0M_T} = \frac{(slope\ of\ the\ \tan\varphi_i\ \mathrm{v}\ w_it_i\ curve)}{\Delta_{S\ incl}}$$



شکل ۲-۱۵۲: استفاده از نمودار برای استخراج نتایج آزمایش

برای یادداشت کردن نتایج در حین انجام آزمایش، باید جدولی مطابق جدول ۲-۱۱ تنظیم شود و در هر مرحله از انجام آزمایش (هر مرحله از جابجایی وزنه‌ها)، مقادیر w ، x و φ یادداشت شوند. هر یک از سطرهای این جدول به منزله نقطه‌ای از نمودار شکل ۲-۱۵۲ هستند که طبق توضیحات قبلی منجر به استخراج $\Delta.GM$ می‌شود و Δ که مشخص است لذا GM تعیین می‌شود.

w	x	$M = w.x$	جابجایی افقی سر شاقول	زاویه غلتش φ	$Sin\varphi$	$\Delta \cdot GM = \dfrac{M}{Sin\varphi}$

جدول ۲-۱۱: جدول استخراج اطلاعات وزنه‌ها و شاقول

۵- محاسبه KG به کمک GM به دست آمده

تا اینجا مقدار GM به کمک میانگین‌گیری یا استفاده از شیب خط نمودار ترسیم شده به دست می‌آید. با استفاده از شکل ۲-۱۵۳ و روابط داده شده می‌توان KG را دقیقاً تعیین کرد.

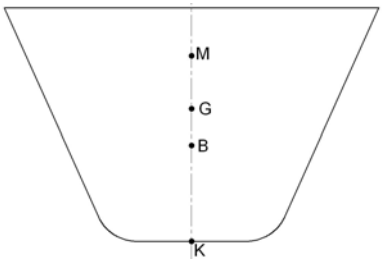
دو روش برای محاسبه KM وجود دارد:

$$KM = KG + GM \quad (۱)$$
$$KM = KB + BM \quad (۲)$$

ابتدا از روش بویانسی KM را به دست می‌آوریم:

مرکز بویانسی (از نقشه‌های کامپیوتری یا روابط سیمسون به دست می‌آید): KB

$$BM = \frac{I}{\nabla}$$ I: ممان دوم سطح آبخور ∇ : حجم جابجایی



شکل ۲-۱۵۳: مثالی از موقعیت K ، G ، B و M در یک شناور (موقعیت B و G می‌تواند برعکس باشد)

با داشتن KB و BM داریم: $KM=KB+BM$

از طرفی GM را در روابط مرحله قبل به دست آوردیم لذا KG برابر است با: $KG=KM-GM$

بدین‌ترتیب ارتفاع عمودی مرکز ثقل که نقش اصلی در بررسی پایداری شناور دارد، تعیین می‌شود. KG مهمترین دستاورد انجام آزمایش کجی است.

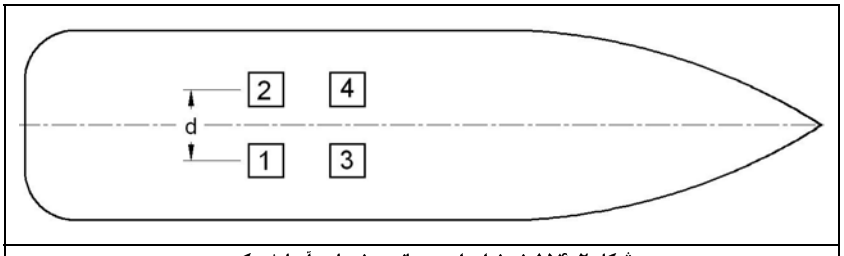
۶- نحوه جابجایی وزنه‌ها

برای جابجایی وزنه‌ها، دو حالت می‌توان در نظر گرفت:

الف- قراردادن وزنه‌ها در خط مرکزی و سپس جابجا کردن آنها به سمت چپ و راست

ب- قراردادن وزنه‌ها در طرف چپ و راست خط مرکزی و جابجا کردن آنها

برای حالت «ب» می‌توان مطابق شکل۲-۱۵۴، چهار نوبت جابجا کردن وزنه‌ها را به صورت زیر در نظر گرفت این شکل، وزنه‌های آزمایش به چهار دسته تقسیم شده‌اند. توجه شود که تعداد دسته‌های وزنه‌ها دلخواه است.



شکل ۲-۱۵۴: نمونه‌ای از چیدمانی وزنه‌ها در آزمایش کجی

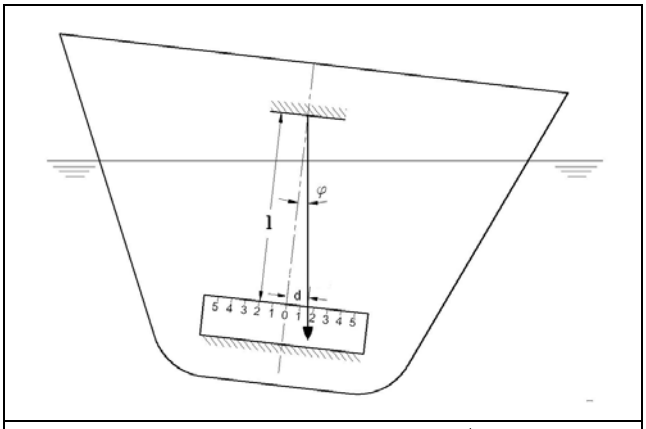
مراحل	وضعیت انتقال وزنه‌ها
۱	وزنه‌های ۱ به ۲
۲	وزنه‌های ۳ به ۴
۳	وزنه‌های ۲ به ۱
۴	وزنه‌های ۴ به ۳

جدول ۲-۱۲: وضعیت انتقال وزنه‌ها

۷- روش خواندن زاویه غلتش

مطابق شکل ۲-۱۵۵ وقتی شناور در اثر جابجایی وزنه‌ها دچار زاویه کجی عرضی می‌شود، شاقول که به سقف آویزان است و همواره در راستای قائم باقی می‌ماند ولی ظرف مدرج‌شده متناسب با کجی عرضی شناور، کج می‌شود و زاویه φ تشکیل می‌شود.

$$\varphi = \mathrm{tg}^{-1}(\mathrm{d}/\ell) \qquad \mathrm{tg}(\varphi) = \frac{\mathrm{d}}{\ell}$$



شکل ۲-۱۵۵: جابجایی ظرف حاوی سیال

برای کاهش اثرات نوسان شاقول، آن را در داخل ظرفی که حاوی یک سیال (آب یا روغن) است قرار می‌دهند. در قسمت فوقانی ظرف می‌توان با قرار دادن یک خط کش دقیق، میزان فاصله انحراف را اندازه‌گیری کرد. ریسمان شاقول نباید به مانعی گیر داشته باشد. برای ایجاد دقت بیشتر و کاهش خطا معمولاً از دو یا سه شاقول استفاده می‌کنند که در سینه، وسط و پاشنه شناور قرار می‌گیرد و در شناورهای کوچکتر در دو نقطه قرار می‌گیرند.

اطلاعات حاصل از هر شاقول در جدول ۲-۱۱ یادداشت و سپس وارد نمودار شکل ۲-۱۵۲می‌شوند. همان‌طور که گفته شد از شیب نمودار شکل ۲-۱۵۲ نیز مقدار GM و در نهایت KG محاسبه می‌شود.

۸- سایر دستاوردهای آزمایش کجی

۱) **تعیین وزن سبک شناور**[1]: از آنجا که برای انجام آزمایش کجی، آبخورهای سینه و پاشنه و وسط کشتی به دقت اندازه‌گیری می‌شوند، با داشتن آبخورها و با استفاده از منحنی‌های هیدرواستاتیک شناور، می‌توان جابجایی شناور را مشخص کرد. از آنجا که آزمایش کجی برای وزن سبک شناور انجام می‌شود، لذا وزن سبک در این آزمایش قابل تعیین است. تعیین این وزن برای مراحل بعدی آزمایش نیز مورد نیاز است.

۲) **مرکز ثقل طولی**[2]: مرکز ثقل طولی شناور را می‌توان به کمک مرکز بویانسی طولی آن به دست آورد. شناور به حالت مستقیم یا دارای شیب باشد با تعیین آبخورهای سینه و پاشنه و وسط، می‌توان به کمک منحنی‌های هیدرواستاتیک، LCB را تعیین کرد. از آنجا که برای تعادل طولی B و G همواره باید در یک امتداد باشند، لذا LCB همان LCG در شناور می‌باشد.

۳) **تعیین زاویه لیست یا لل (کجی اولیه) :** اگر شناور دارای زاویه کجی اولیه (طولی یا عرضی) باشد، نصب شاقول برای انجام آزمایش، این مقدار کجی را مشخص خواهد کرد. ضمن اینکه اگر شناور دارای زاویه کجی اولیه باشد، انجام آزمایش کجی به چپ۳ و راست۴ نتایج یکسانی به دست نخواهد آمد که نشان از وجود زاویه کجی اولیه شناور دارد.

۹- نکات مهم در آزمایش کجی

نکات بسیار مهم و حساسی در انجام آزمایش کجی وجود دارد که حاصل حوادث تلخی می‌باشد که برای کشتی‌های مختلف در حین انجام آزمایش بوجود آمده است. این نکات به صورت توصیه‌های مختلف و متفاوتی در استانداردها و مؤسسات رده‌بندی شناور آمده است که به مهمترین اصول آن در زیر اشاره می‌شود:

۱) قرار دادن وزنه‌های زیاد برروی عرشه فوقانی شناور، باعث افزایش ارتفاع مرکز ثقل می‌شود که پایداری شناور را به شدت کاهش می‌دهد یا ناپایدارمی‌کند. اثر این وزنه‌ها بر ارتفاع KG باید در نظر گرفته شود. یعنی KG بدست‌آمده از آزمایش در شرایطی است که وزنه‌های آزمایش هم روی شناور وجود دارند. لذا KG واقعی زمانی بدست می‌آید که اثر این وزنه‌ها از محاسبات حذف شوند.

1 -Light weight
2 - LCG
3 - port
4 - star board

۲) وزن وزنه‌های آزمایش باید ۲ درصد وزن کل کشتی (وزن سبک) باشد. اگر وزن این وزنه‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای باشد (برای کشتی‌های بزرگ) باید به جای وزنه از جرثقیل برای هیل دادن شناور استفاده شود.

۳) اگر شناور دارای عرشه‌های متعدد باشد، بهتر است در عرشه‌های میانی یا تحتانی، وزنه‌های آزمایش را قرار داد که به بهبود پایداری کمک می‌کند. اگر محاسبات پایداری برای قراردادن وزنه‌های آزمایش روی عرشه‌های فوقانی انجام نشده باشد، احتمال ناپایدارشدن شناور در حین انجام آزمایش وجود دارد.

۴) وجود مخازن نیمه‌پر و اجسام آویزان از عوامل منفی بر انجام آزمایش است که باید حذف شوند و در غیر این‌صورت، اثرات آنها بر کاهش GM لحاظ گردد. (این دو اثر علل اصلی واژگون شدن بسیاری از کشتی‌های سانحه دیده در حین آزمایش است).

۵) آزمایش باید در شرایط آب آرام انجام شود یعنی بدون باد، موج و جزر و مد. این شرایط در حوضچه‌های بندری و آن هم در شرایط بسیار آرام جوی امکان پذیر است. برای زیردریایی بهتر است که آزمایش کجی در زیر آب و در عمقی که اثرات موج سطح آب اثر نمی‌کند، انجام شود.

۶) GM به دست آمده برای شناور با کشتی‌های مشابه[1] مقایسه شود. اگر درصد تفاوت زیاد باشد آزمایش باید دوباره انجام شود.

۷) زاویه هیل باید به حدی باشد که بتوان سطح آبخور را ثابت فرض کرد یعنی نقطه M ثابت باشد. زاویه هیل برای این آزمایش در حدود ۲-۳ درجه مناسب است.

۸) آزمایش کجی پس از تکمیل ساخت شناور انجام می‌شود و قبل از انجام آزمایش، مدارک زیر باید موجود باشد:

۱) جداول و نمودارهای هیدرواستاتیک

۲) مارک‌های نشان دهنده عمق آبخور روی بدنه

۳) خطوط بدنه

۴) کالیبره کردن مخازن و داشتن مشخصات سطح آزاد مخازن

۵) جانمایی دقیق

۹) برای کشتی‌هایی که بسیار بزرگ هستند، به جای جابجایی وزنه از یکی از دو روش زیر استفاده می‌شود:

۱) استفاده از جرثقیل برای کج کردن شناور

۲) جابجایی آب بین مخازن (در این حالت اثرات سطح آزاد مخازن، در طرفین بدنه، به طور دقیق باید ارزیابی شود).

۱۰) دک (عرشه) قرارگیری وزنه‌ها باید استحکام سازه‌ای لازم برای تحمل وزن وزنه‌ها را داشته باشد.

۱۱) جانمایی رایج برای قرارگیری وزنه‌ها: معمولاً وزنه‌ها به ۴ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند که ۲ گروه در سمت چپ و دو گروه در سمت راست بدنه قرار می‌گیرند. بنابراین در آزمایش، کلیه وزنه‌ها در یک محل قرار نمی‌گیرند.

۱۲) نکات لازم برای اعمال ممان هیل دهنده به کمک جابجایی سیال بین مخازن

در مواردی که امکان جابجایی وزنه‌های آزمایش وجود ندارد، از جابجایی سیال از مخزنی در یک طرف بدنه به طرف دیگر استفاده می‌شود که نکات زیر را باید درنظر داشت:

۱) مرکز وزن و وزن آب داخل مخازن باید به طور دقیق مشخص باشد.

۲) اثرات سطح آزاد مخازن نیز درنظر گرفته شود که درنتیجه هندسه مخزن باید کاملاً مشخص باشد.

۳) توصیه به استفاده از مخازن مکعبی برای انجام آزمایش می‌شود.

۴) چگالی سیال داخل مخزن باید به وسیله هیدرومتر تعیین گردد.

۵) در انتقال آب از یک مخزن به مخزن دیگر، نشتی نباید وجود داشته باشد. این انتقال می‌تواند بوسیله پمپ انجام شود.

۶) مجموع مایعات درون شناور (مربوط و غیر مربوط به آزمایش) نباید از ۲۵ درصد وزن سبک آن بیشتر باشد.

۱۳) کاملاً پر یا کاملاً خالی بودن مخازنی که برای انجام آزمایش نیاز نیستند.

۱۴) شاقول‌های اندازه‌گیری معمولاً در دو یا سه محل نصب می‌شوند که شاقول‌های انتهایی باید حداقل ۱۰ درصد طول از سینه و پاشنه فاصله داشته باشند.

۱۵) باید منتظر بود تا نوسانات شاقول (که در داخل سیال میراکننده وجود دارد) از بین برود و بتوان زاویه را به طور دقیق مشخص کرد.

۱۶) طول شاقول‌ها ممکن است متفاوت باشد. شاقول کوچکتر باید حداقل دارای طول ۰/۶ ارتفاع بدنه باشد و شاقول بزرگتر حداکثر ۱/۲ برابر شاقول کوچکتر باشد.

۱۷) قبل از شروع آزمایش باید کلیه افراد در محل‌های مشخص شده خودشان باشند و حرکت نکنند. وظایف هر یک نیز در حین آزمایش به طور کامل مشخص باشد. کلیه افراد غیرضروری نسبت به انجام آزمایش، خارج از شناور باشند.

1 - sister ship

۱۸) کلیه اقدامات احتیاطی با فرض واژگون شدن شناور انجام شود (کلیه شیرهای ورودی بدنه و منافذ آب بند بسته باشند، کپسول اطفاء حریق مهیا باشد و ...)
۱۹) کلیه اجسام غیرضروری از شناور خارج شوند و اجسام ضروری نیز حتی المقدور در جای خود ثابت شوند.
۲۰) حالت اولیه کشتی بدون هیل باشد. در غیر اینصورت جابجایی اقلام وزنی داخل شناور انجام شود تا هیل اولیه صفر درجه حاصل شود.
۲۱) هیچ یک از طناب‌های مهار در حین آزمایش، تحت کشش قرار نگیرند.
۲۲) محل اولیه و ثانویه (پس از جابجایی) وزنه‌ها بالا قبلاً روی دک مشخص شده باشد.
۲۳) اندازه‌گیری چگالی آب دریا در محل آزمایش
۲۴) مشخص بودن دقیق وزن و مراکز وزن وزنه‌های وارد شده برای انجام آزمایش
۲۵) جابجایی وزنه‌ها یا انتقال سیال برای هیل دادن شناور، باید به تدریج و غیر دفعی انجام شود.
۲۶) هیچ نقطه‌ای از شناور در اثر غلتش در زوایای کوچک به نقطه‌ای در بیرون شناور برخورد یا تکیه نکند (دکل‌ها، دک و ...)
۲۷) اگر اختلاف برخی مقادیر به دست آمده برای GM با مقدار میانگین GM بیش از ۵ درصد باشد، آزمایش دوباره تکرار می‌شود. احتمالاً شناور در هنگام آزمایش دارای زاویه لیست (هیل) اولیه بوده است یا مقدار θ زاویه پاندول درست خوانده نشده است.
۲۸) اگر کشتی دارای GM منفی باشد یا قرار دادن وزنه‌ها به روی عرشه، باعث منفی شدن GM شده باشد، با کوچکترین تکان‌ها، شناور دچار تلاطم شدید می‌شود یا در یک زاویه لل قرار می‌گیرد. لذا آزمایش باید فوراً متوقف شود و در این حالت نمی‌توان GM را مشخص کرد.
۲۹) یکی از موارد اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از آزمایش کجی، مقایسه آن با مشخصات کشتی مشابه[1] آن می‌باشد. (کشتی که دارای کاربری و شکل هندسی یکسان، وزن سبک برابر و مرکز گرانش طولی برابر باشند را می‌توان کشتی‌های مشابه نامید که باید مرکز عمودی گرانش آنها نیز تقریبا با هم برابر باشد).
۳۰) گزارش آزمایش کجی شناور به همراه نتایج حاصل شده و مقایسه انجام شده با کشتی مشابه، بایددر مدارک پایداری شناور آورده شود.

در اینجا به دو آزمایش دیگر اشاره می‌شود که شبیه به آزمایش کجی هستند ولی برای اهداف متفاوتی انجام می‌شوند. این آزمایش‌ها عبارتند از:

۱) آزمایش هیل‌دادن شناور[2]: این آزمایش برای اثبات کارآیی تجهیزات در زوایای هیل مشخص انجام می‌شود. تجهیزات و دستگاههای مختلف باید بتوانند مطابق با توانایی تعریف شده برای آنها، در یک زاویه هیل مشخص برای مدت معین به کارکرد خود ادامه دهند و اختلالی در کارآیی کشتی ایجاد نکنند. برای مثال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- مختل و متوقف شدن کارآیی پمپ‌ها یا کاهش دبی مکش پمپ
- یاتاقانهای موتورهای الکتریکی در اثر اعمال بار اضافی ناشی از اعمال زوایای غلتش زیاد، ممکن است دچار اختلال در کارکرد شوند.
- قایق‌های نجات را ممکن است بخاطر هیل زیاد کشتی به یک طرف، نتوان از طرف مقابل آن آب‌اندازی کرد.

۲) آزمایش یکبر شدن کشتی[3]: این آزمایش برای ناوهای جنگی انجام می‌شود و برای بررسی تراز بودن تجهیزات جنگی نسبت به وضعیت مبنا در زوایای مختلف غلتش، انجام می‌شود مانند پرتاب‌کننده موشک‌ها، اژدرافکن‌ها و توپ‌های روی عرشه.

مثال) دستورالعمل انجام تست کجی کشتی ۵۰۰ تنی برای نمونه ارائه می‌شود.

مقادیر ارائه شده در این گزارش، مختص این آزمایش و شرایط روز آزمایش هستند و قابل تعمیم به سایر شناورها نیست (جدول ۲-۱۳).

مشخصات فنی انجام آزمایش

- نحوه کج کردن : استفاده از جابجایی جرم
- مشخصات جرم جابجا شونده:
  - کیسه های شن هر یک به وزن : ۲۰ کیلوگرم
  - اتصال هر پنج کیسه با کابل (تسمه) بصورت یک واحد ۱۰۰ کیلوگرمی
  - کل وزن : ۲/۴ تن (معادل ۲ درصد وزن سبک کشتی)
  - تعداد دسته های وزنی : ۴ دسته متقارن

1 - sister ship
2 - Heeling test
3 - Tilt test

- مشخصات عمومی:

نام کشتی	ایران - هرمز
محل انجام آزمایش	کارخانجات شهید درویشی
مسئول انجام آزمایش	مهندس حسین زارع
تاریخ	۸۷/۵/۱۵
حداکثر سرعت باد	اندک - قابل صرفنظر
حداکثر ارتفاع امواج	کمتر از ۱۰ سانتی متر
جزر ومد	مد کامل بدون جریانات آبی شدید
موسسه رده بندی ناظر	موسسه رده‌بندی ایرانیان (ICS)
تعداد افراد مستقر بر روی شناور حین آزمایش	۱۰ نفر
محل استقرار افراد	روی عرشه اصلی
مخزن سوخت	کاملا خالی
مخزن بالاست	نیمه پر
مخزن آب شیرین	کاملا خالی
سابر مخازن نیمه پر	وجود ندارد
بارهای اضافی موجود بر روی شناور (به غیر از تجهیزات آزمایش)	قابل صرفنظر
هیل اولیه شناور	صفر درجه
شیب اولیه شناور	صفر درجه
جرثقیل سقفی موتورخانه	مهار شده
اجسام آویزان	وجود ندارد
اتصال شناور به طناب مهار	بدون اتصال (اتصال شل)
چگالی آب دریا در حین آزمایش	$1.023\ (^{t}/_{m^3})$
آبخور کشتی	۳/۶متر
وزن حین انجام آزمایش	۱۲۰ تن (از جداول هیدرواستاتیک با توجه به خط آبخور)
وزن سبک	۱۵۰تن(در حالت تکمیل شده و مونتاژ کامل تجهیزات)
جابجایی	۵۰۰ تن
طول	۴۲ متر
عرض	۵ متر
تمهیدات شرایط اضطراری	انجام شده است

جدول ۲-۱۳: استخراج مقادیر در یک آزمایش کجی

- **محل قرارگیری وزنه ها: کلیه وزنه ها بر روی عرشه اصلی**

نام دسته	وزن (کیلوگرم)	فاصله طولی از پاشنه(متر)	چپ یا راست	فاصله عرضی از خط میانی
۱	۶۰۰	۱۰	راست	۲
۲	۶۰۰	۱۲	چپ	۲
۳	۶۰۰	۳۰	راست	۲
۴	۶۰۰	۳۲	چپ	۲

- **نحوه جابجایی وزنه‌ها**

- جابجایی توسط جرثقیل کنار اسکله انجام می شود.
- جابجایی بصورت واحدهای ۱۰۰ کیلویی انجام می شود.
- مراحل جابجایی وزنه‌ها :

مراحل	وضعیت انتقال وزنه‌ها
۱	وزنه‌های ۱ به ۲
۲	وزنه‌های ۳ به ۴
۳	وزنه‌های ۲ به ۱
۴	وزنه‌های ۴ به ۳

- **ظرف و شاقول**

- تعداد شاقول و ظرف : ۲ عدد
- محل قرارگیری:

	محل طولی	محل عرضی	طول طناب (متر)	مایع داخل ظرف
شاقول ۱	داخل موتورخانه	روی خط مرکزی	۱/۵	روغن
شاقول ۲	داخل انبار جلوی شناور	روی خط مرکزی	۲	روغن

- در کنار هر شاقول جدول زیر توسط مسئول مربوطه تکمیل می گردد.
- قبل از خواندن شاقول باید حرکات آن کاملا از بین رفته باشد.

$\Delta \cdot GM = \frac{M}{Sin\varphi}$	$Sin\varphi$	زاویه غلتش φ	جابجایی افقی سر شاقول	$M = w.x$	x	w

- **محل استقرار افراد**

مسئولیت	تعداد (نفر)	محل استقرار
نظارت بر دسته وزنه ۱ و ۲	۱	در محل دسته ۱ و ۲
نظارت بر دسته وزنه ۳ و ۴	۱	در محل دسته ۳ و ۴
ثبت نتایج شاقول ۱	۲	در کنار شاقول ۱
ثبت نتایج شاقول ۲	۲	در کنار شاقول ۲
ناظر آزمایش کشتی	۱	در بیرون شناور در کنار اسکله
خدمه کشتی برای مقابله با شرایط اضطراری	۴	پل فرماندهی و موتور خانه
مجموع نفرات	۱۱	۱۰ نفر در داخل شناور هستند.

- کلیه ملاحظات بیان شده در انجام آزمایش، ضمیمه این گزارش می‌گردد.
- استخراج نتایج مطابق مراحل بیان شده انجام می‌گردد.

بخش سوم:
پایداری طولی و مباحث مرتبط

فصل۱:[1] پایداری طولی شناور

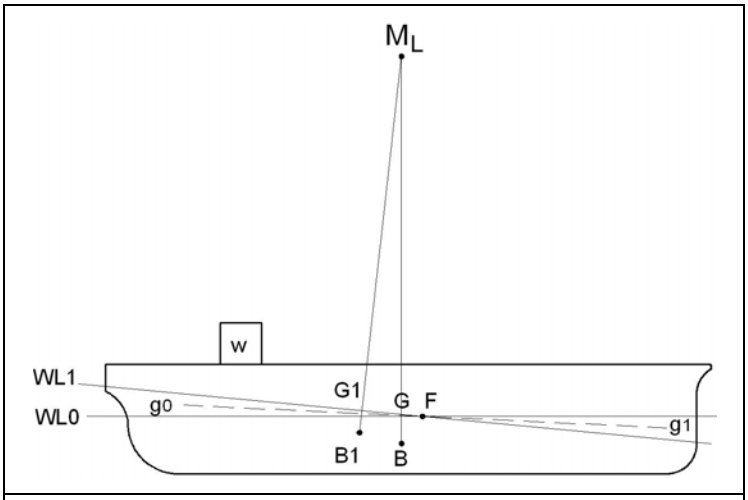
۱) تعاریف

- **شیب (تریم)**: شیب طولی شناور را گویند که به دو صورت زیر بیان می‌شود:

اختلاف آبخور سینه و پاشنه – اگر آبخور سینه بیشتر از پاشنه باشد حالت «شیب سینه» و اگر آبخور پاشنه بیشتر از سینه باشد «شیب به پاشنه» داریم.

زاویه شیب عبارتست از زاویه‌ای که بین راستای اولیه (افقی) و ثانویه شناور ایجاد می‌شود . این خطوط یکدیگر را در «مرکز شناوری» قطع می‌کنند یا به عبارت دیگر تریم‌کردن شناور حول مرکز شناوری انجام می‌شود. مقدار شیب در شکل ۲-۱۵۶ نشان داده شده است.

- **مرکز شناوری (F)[2] :** مرکز سطح صفحه آبخور را «مرکز شناوری» گویند که شیب و هیل حول این نقطه اتفاق می‌افتد (شکل ۲-۱۵۶).



شکل ۲-۱۵۶: جابجایی مرکز ثقل و بویانسی و شیب شناور

- **متاسنتر طولی(M_L):** غلتش طولی[3] شناور، حول این نقطه انجام می‌شود. این نقطه همانند متاسنتر عرضی از تقاطع امتداد مرکز بویانسی اولیه و ثانویه (پس از غلتش) به دست می‌آید، با این تفاوت که نقطه متاسنتر طولی همواره ثابت در نظر گرفته می‌شود چرا که زوایای غلتش طولی نسبت به غلتش عرضی بسیار کوچکتر هستند. لازم به ذکر است که غلتش دینامیکی حول متاسنتر (M_L) و تغییر زاویه استاتیکی حول مرکز شناوری (F) انجام می‌شود (شکل ۲-۱۵۶).
- **ارتفاع متاسنتر طولی** (GM_L)**:** ارتفاع متاسنتر طولی، همانند ارتفاع متاسنتر عرضی (GM_t) مبنای بررسی پایداری می‌باشد که ارتفاع آن می‌تواند به بیش از صد متر برسد. ارتفاع متاسنتر طولی را معمولاً برابر با شعاع متاسنتر طولی (BM_L) در نظر می‌گیرند چرا که ارتفاع نقطه متاسنتر طولی بسیار بالا می‌باشد و اختلاف (BM_L) و (GM_L) (یا مقدار BG) چندان قابل ملاحظه نیست (شکل ۲-۱۵۶).

شعاع متاسنتر طولی از رابطه مقابل به دست می‌آید: $BM_L = \frac{I_L}{\nabla}$

که I_L برابر ممان دوم طولی سطح آبخور حول محور عرضی گذرنده از مرکز شناوری و ∇ برابر حجم زیر آب بدنه می‌باشد. ممان دوم طولی برای یک سطح مستطیلی شکل به طول L و عرض B حول محور عرضی گذرنده از مرکز سطح آن به صورت زیر به دست می‌آید:

۱- منابع: [2] , [4] , [6] , [12] , [14] , [16]

2 - Center of floatation
3 - Pitching

$$I_L = \frac{1}{12}BL^3$$

ممان دوم عرضی حول مرکز سطح برابر بود با:

$$I_t = \frac{1}{12}LB^3$$

بدین ترتیب شعاع متاسنتری برای یک بارج برابر است با:

$$BM_L = \frac{I_L}{\nabla} \text{ یا } \frac{I_L}{\nabla} = \frac{BL^3}{12\nabla}$$

$$\nabla = L.B.T \qquad BM_L = \frac{BL^3}{12L.B.T} = \frac{L^2}{12T}$$

که T برابر ارتفاع آبخور است. مقدار I_L برای شناورهایی که سطح آبخور آنها دارای شکل هندسی نامعین است، با استفاده از روشهای عددی (مانند روش سیمسون) انجام می‌شود.

مثال) شعاع متاسنتری طولی (BM_L) را برای شناور مدل ۲ در آبخور ۴ متر محاسبه کنید.

حل: شناور مدل ۲ یک بارج می‌باشد لذا داریم:

$$T = 4\ m$$

$$\nabla = LBT = 80 \times 13.6 \times 4 = 4352\ m^3$$

$$I_L = \frac{1}{12}BL^3 = \frac{1}{12} \times 13.6 \times (80)^3 = 580266.66\ m^4$$

$$BM_L = \frac{I_L}{\nabla} = 133.3\ m$$

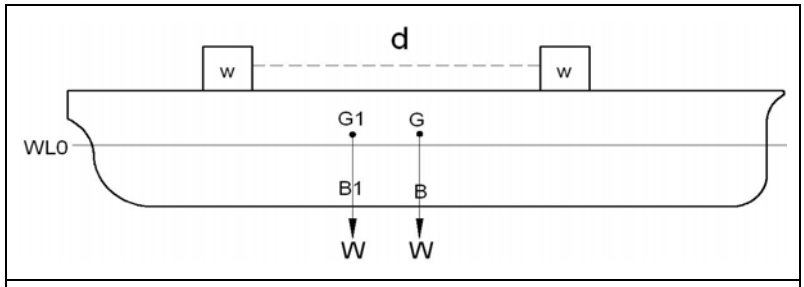
یا از رابطه زیر بطور مستقیم می‌توان شعاع متاسنتری طولی را محاسبه کرد:

$$BM_L = \frac{L^2}{12T} = \frac{(80)^2}{12 \times 4} = 133.3\ m$$

۲) علت تریم کردن شناور

علت تریم کردن (شیب گرفتن) شناور (مانند هیل) ، جابجا شدن مرکز ثقل می‌باشد. مطابق شکل ۲-۱۵۷ فرض کنید وزن w به اندازه d در طول شناور جابجا شود. این جابجایی باعث انتقال مرکز ثقل شناور از G به G_1 می‌شود:

$$W \times GG_1 = w.d \qquad GG_1 = \frac{w.d}{W}$$



شکل ۲-۱۵۷: جابجایی بار باعث جابجایی مرکز ثقل و شیب‌گرفتن شناور می‌شود.

ملاحظه می‌شود که در این حالت ممانی بین راستای G_1 و B ایجاد شده است که این ممان برابر با $W \times GG_1$ می‌باشد و باعث غلتش طولی شناور می‌شود. این غلتش تا جایی ادامه می‌یابد که مرکز ثقل و بویانسی جدید، هم امتداد (در امتداد قائم) شوند (مطابق شکل ۲-۱۵۷). لذا غلتش شناور تا جایی ادامه می‌یابد که ممان ایجاد شده صفر شود.

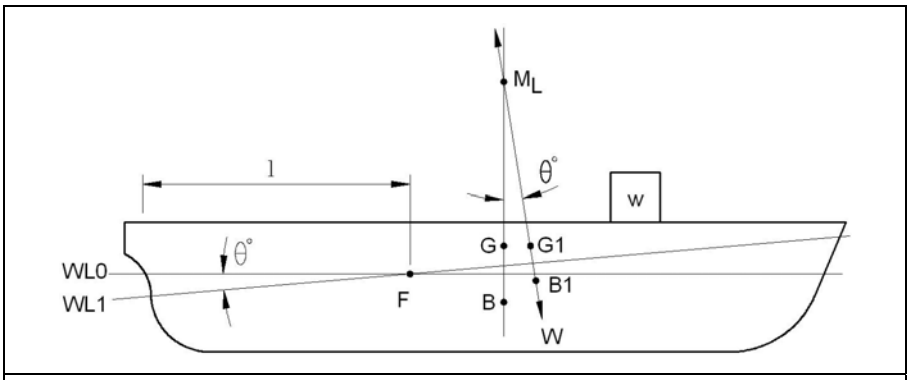
۳) ممان لازم برای تغییر شیب به اندازه یک سانتیمتر (MCTC)[1]

$MCTC$ عبارتست از مقدار گشتاور لازم برای تغییر شیب شناور به اندازه یک سانتیمتر. مثلاً اگر در یک شناور $MCTC = 5\ t.m$ باشد یعنی اگر ۵ تن بار به اندازه ۱ متر روی عرشه به صورت طولی جابجا شود، شیب شناور یک سانتی‌متر تغییر خواهد کرد. مطابق شکل ۲-۱۵۸ داریم:

$$GG_1 = \frac{w.d}{W}$$

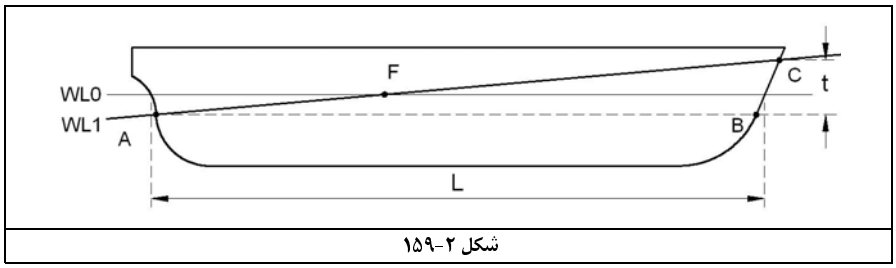
$$\tan\theta = \frac{GG_1}{GM_L} \qquad \tan\theta = \frac{w.d}{W.GM_L}$$

1 - Moment to Change Trim one Centimetre



شکل ۲-۱۵۸: زاویه شیب شناور حول مرکز شناوری

از طرف دیگر با توجه به شکل ۲-۱۵۹ اگر از نقطه A (عمود پاشنه) خطی افقی ترسیم کنیم که عمود سینه را در B قطع کند، و با در نظر گرفتن مثلث ABC داریم: $\tan\theta = \frac{t}{L}$



شکل ۲-۱۵۹

که t برابر اختلاف آبخور سینه و پاشنه یا همان شیب شناور است.

اگر t برابر یک سانتیمتر باشد (۰/۰۱ متر) داریم : $\tan\ \theta\ = \frac{1}{100\ L}$

اگر شیب (t) برابر یک سانتیمتر باشد مقدار $w.d$ برابر است با ممان لازم برای یک سانتیمتر شیب، یعنی همان $MCTC$. بنابراین از روابط فوق داریم:

$$\tan\ \theta\ = \frac{w.d}{W\ \times GM_{\ L}} \quad , \quad \tan\ \theta\ = \frac{1}{100\ L}$$

$$\frac{MCTC}{W\ .GM_{\ L}} = \frac{1}{100\ L}$$

$$\mathrm{MCTC}\ = \frac{\mathrm{W.GM_{\ L}}}{100\ \mathrm{L}}$$

$$MCTC\ = \frac{W\ \times BM_{\ L}}{100\ \times L}$$

گفتیم که می‌توان $\mathrm{GM_L}, \mathrm{BM_L}$ را برابر فرض کرد لذا می‌توان نوشت:

هم اکنون کاربرد $MCTC$ را در حل مسائل پایداری طولی می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\textbf{تغییر شیب} = \frac{\text{ممان تغییر تریم اعمال شده به شناور}}{MCTC}$$

مقدار تغییر شیب بدست آمده از این حالت، بر حسب سانتیمتر می‌باشد.

مثال) در شناور مدل ۲ در آبخور ۴ متر، باری ۷۰ تنی به اندازه ۳۵ متر به سمت سینه جابجا می‌شود. مقدار شیب شناور را به دو روش زیر محاسبه کنید (KG = 3.2 m)

الف- روش جابجایی مرکز ثقل

ب- روش MCTC

حل) الف-

$$KB = \frac{T}{2} = \frac{4}{2} = 2\ m$$

از مثال قبل: $BM_{\ L} = 133.3\ m$

$KM_L = KB + BM_L = 135.3 \ m$

$GM_L = KM_L - KG = 135.3 - 3.2 = 132.1 \ m$

$W = \rho \times L \times B \times T = 1.025 \times 4352 = 4461 \ t$

(فاصله جابجایی بار) $d = 35 \ m$

$$G_0G_1 = \frac{w.d}{W} = \frac{70\times35}{4461} = 0.55 \ m$$

$$\tan\theta = \frac{G_0G_1}{GM_L} = \frac{0.55}{132.1} = 0.0041$$

$$\theta = 0.24^{\circ}$$

شیب : $t = \tan\theta.L = 0.0041\times80 = 0.329 \ m$

یعنی اختلاف آبخور سینه و پاشنه (شیب) ناشی از جابجایی این بار برابر ۰/۳۲۹ متر می‌باشد.

ب–

$$MCTC = \frac{W\times BM_L}{100\times L} = \frac{4461\times133.3}{100\times80} = 74.33 \ \left(t.m/cm\right)$$

$$t = \frac{w.d}{MCTC} = \frac{70\times35}{74.33} = 32.9 \ cm = 0.329 \ m$$

مثال) MCTC **شناور مدل ۲ را در آبخورهای مختلف محاسبه کنید. حل)**

$$MCTC = \frac{W\times BM_L}{100\times L}$$

در اینجا در رابطه $MCTC$ نمی‌توان از GM_L استفاده کرد چراکه مرکز ثقل در هر آبخور در دسترس نیست و می‌تواند تغییر کند لذا BM_L بجای آن استفاده می‌شود. مقدار W و BM_L در هر آبخور از جدول هیدرواستاتیک بدست می‌آید یعنی: $BM_L = KM_L - KB$

طول آبخور (L) در هر آبخور نیز از روی نقشه بدست آمده است. البته در مثال‌ها می‌توان برای ساده‌تر شدن حل، طول بین دو عمود را در نظر گرفت.

آبخور (m)	وزن (W)	طول آبخور (L)	BM_L	MCTC
1	493.3	76.2	262.7	17.01
2	1135.4	77.4	154.8	22.71
3	1858	78.5	123.67	29.27
4	2665.4	79.3	114.19	38.38
5	3560.2	80	108.63	48.34

مثال) شناور مدل ۱ در آبخور ۳ متر شناور است. با استفاده از نیم‌عرضهای جدول آفست مقادیر زیر را محاسبه کنید:

الف) مقدار MCTC **ب) تغییر شیب ناشی از جابجا شدن یک بار ۴۰ تنی به اندازه ۶۰ متر به طرف جلو.**

همچنین جابجایی تا آبخور ۳ متر برابر ۱۸۵۸ تن ، $KG = 6.1 \ m$ **و** $KB = 1.6 \ m$ **می‌باشد.**

حل: مراحل زیر را برای حل مسئله طی می‌کنیم: $I_{yy} \ldots BM_L \ldots KM_L \ldots GM_L \ldots MCTC \ldots t$

با استفاده از جدول زیر I_{yy} را تعیین می‌کنیم. ابتدا I_{AP} را حول عمود پاشنه بدست می‌آوریم، سپس با استفاده از قضیه محورهای موازی I_{yy} را حول مرکز شناوری محاسبه می‌کنیم:

شماره مقطع	نیم عرض	سیمسون	تابع سطح	بازو	تابع ممان اول	بازو	تابع ممان دوم
0	0	0.5	0	0	0	0	0
0.5	0.911	2	1.822	0.5	0.911	0.5	0.4555
1	2.443	1.5	3.6645	1	3.6645	1	3.6645
2	5.219	4	20.876	2	41.752	2	83.504
3	6.225	2	12.45	3	37.35	3	112.05
4	6.37	4	25.48	4	101.92	4	407.68
5	6.528	2	13.056	5	65.28	5	326.4
6	6.073	4	24.292	6	145.752	6	874.512
7	3.559	1.5	5.3385	7	37.3695	7	261.5865
7.5	1.139	2	2.278	7.5	17.085	7.5	128.1375
8	0	0.5	0	8	0	8	0
SUM=			**109.257**		**451.084**		**2197.99**

$$h = \frac{80}{8} = 10 \ m$$

مساحت= $2 \times \frac{1}{3} \times h \times sum0 = 2 \times \frac{1}{3} \times 10 \times 109.257 = 728.38 \ m^2$

$$x = h \times \frac{sum1}{sum0} = \frac{10 \times 451.08}{109.257} = 41.28 \quad m$$

$$I_{AP} = 2 \times \frac{1}{3} \times h^3 \times sum2 = 2 \times \frac{1}{3} \times 10^3 \times 2197.99 = 1465326.66 \ m^4$$

برای بدست آوردن ممان دوم عرضی حول محور عرضی گذرنده از مرکز سطح آبخور، با استفاده از قضیه محورهای موازی داریم:

$I_{yy}=I_{NA}= I_{AP}-A.X^2 = 223769.8 \ m^4$

$$BM_L = \frac{I_{yy}}{\nabla} = \frac{223769.8}{1858} = 120.43 \ m$$

$$KM_L = KB + BM_L = 1.6 + 120.43 = 122.03 \ m$$

$$KG = 6.1 \ m$$

$$GM_L = KM_L - KG = 122.03 - 6.1 = 115.93 \ m$$

$$MCTC = \frac{W \times GM_L}{100 \times L} = \frac{1858 \ \times \ 115.93}{100 \times 80} = 26.92 \ (\frac{t.m}{cm})$$

ب)

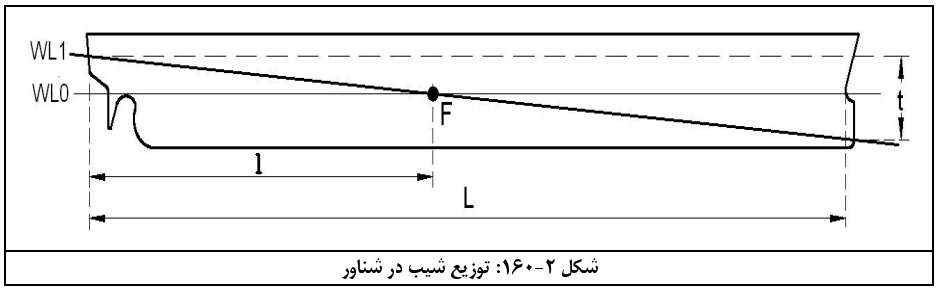
$$t = \frac{moment}{MCTC} = \frac{40 \times 60}{26.92} = 89.15 \ cm$$

۴) توزیع شیب

مطابق شکل ۲-۱۶۰ چنانچه مرکز شناوری در فاصله l متری عمود پاشنه باشد و تغییر شیب برابر t در کشتی بوجود آید، با استفاده از تشابه مثلث‌های موجود داریم:

تغییر شیب در پاشنه $= \frac{l}{L} \times t$

تغییر شیب پاشنه $-$ =تغییر شیب در سینه $\frac{(L-l)}{L} \times t = t -$



شکل ۲-۱۶۰: توزیع شیب در شناور

از طرفی می‌دانیم که قراردادن یا برداشتن جرمی به وزن w باعث تغییر آبخور شناور می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{\text{w}}{\text{TPC}}$$

بنابراین مجموع تغییر آبخور در سینه یا پاشنه را به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد. برای تغییر آبخور پاشنه داریم:

$$\pm \text{(تغییر آبخور پاشنه)} = \pm \text{(تغییر آبخور)} \pm \text{(تغییر شیب در پاشنه)}$$

$$\pm \text{(تغییر آبخور پاشنه)} = \pm \frac{\text{w}}{\text{TPC}} \pm \frac{\ell \times \text{w} \times \text{d}}{\text{L} \times \text{MCTC}}$$

همچنین برای تغییر آبخور سینه داریم:

$$\pm \text{(تغییر آبخور سینه)} = \pm \text{(تغییر آبخور)} \pm \text{(تغییر شیب در سینه)}$$

$$\pm \text{(تغییر آبخور سینه)} = \pm \frac{\text{w}}{\text{TPC}} \pm \frac{(\text{L} - \ell) \times \text{w} \times \text{d}}{\text{L} \times \text{MCTC}}$$

مثبت یا منفی بودن علامت‌های فوق بستگی به مثبت یا منفی ممان طولی و همچنین بارگذاری یا باربرداری از روی شناور دارد (معمولاً ممان به سمت سینه مثبت و ممان به سمت پاشنه منفی در نظر گرفته می‌شود).

اگر بخواهیم شرایطی را در نظر بگیریم که با تغییرات وزن بار و ممان طولی انتقال آن، آبخور سینه یا پاشنه ثابت بماند داریم (مثلاً برای پاشنه):

$$\pm \text{(تغییر آبخور)} \pm \text{(تغییر شیب پاشنه)} = ۰$$

تغییر شیب پاشنه = تغییر آبخور

$$\frac{w}{TPC} = \frac{l}{L} \times \frac{w.d}{MCTC}$$

که در این رابطه w وزن بار و d محل مناسب قرار گرفتن بار برای ثابت ماندن آبخور پاشنه است (d فاصله بار تا مرکز شناوری می‌باشد).

لازم به یادآوری است که عبارت $\frac{w}{TPC}$ تنها زمانی وجود دارد که یک جرم روی شناور قرار گرفته یا از روی آن برداشته شده باشد.

برای ثابت ماندن آبخور سینه نیز به همین ترتیب داریم:

$$\frac{w}{TPC} = \frac{(L-l)}{L} \times \frac{w \times d}{MCTC}$$

واضح است که در صورت تغییر بارگذاری روی شناور، هم آبخور سینه و هم آبخور پاشنه نمی‌توانند به طور همزمان ثابت بمانند بلکه ثابت ماندن یکی مستلزم تغییر آبخور دیگری است.

مثال) در شناور مدل ۱ در آبخور ۵ متر، باری به وزن ۱۰۰ تن در فاصله ۳۰ متر عقب‌تر از وسط شناور قرار می‌گیرد. آبخور سینه و پاشنه را پس از قرارگرفتن این بار مشخص کنید.

حل)

مراحل حل: $BM_L \rightarrow GM_L \rightarrow MCTC \rightarrow t \rightarrow t_f \ , t_a$

با استفاده از مشخصات شناور مدل ۱ در آبخور ۵ متر و در سناریوی بارگیری ۱ داریم:

$KG = 5.1 \ m$

$BM_L = 108.63 \ m$

$KB = 2.79 \ m$

$KM_L = 111.42$

$GM_L = KM_L - KG = 106.32 \ m$

$$MCTC = \frac{W \times GM_L}{100 \times L} = \frac{3500 \times 106.32}{100 \times 80} = 46.5 \ \frac{t.m}{cm}$$

از وسط شناور $LCF = 3.1 \ m$:

فاصله از مرکز شناوری: $d = 30 - 3.1 = 26.9 \ m$ (F)

$$t = \frac{w.d}{MCTC} = \frac{100 \times (26.9)}{46.5} = 57.85 \ cm$$

LCF داده شده در جداول هیدرواستاتیک نسبت به وسط شناور است. لذا فاصله F از عمود پاشنه عبارتست از:

$$l = 40 - LCF = 40 - 3.1 = 36.9 \ m$$

$$t_a = \frac{l}{L}.t = \frac{36.9}{80} \times 57.85 = 26.68 \ cm$$

$$t_f = t - t_a = 57.85 - 26.68 = 31.17 \ cm$$

مقادیر t_a , t_f ناشی از ممان اعمال شده توسط بار هستند. مقدار تغییر آبخور ناشی از قرارگرفتن بار روی شناور عبارتست از:

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{w}{TPC}$$

TPC در آبخور ۵ متر از جدول هیدرواستاتیک عبارتست از:

$$TPC = 9.34 \left(\frac{t}{cm}\right)$$

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{100}{9.34} = 10.7 \ cm$$

	آبخور سینه (cm)	آبخور پاشنه (cm)
آبخور اولیه	500	500
تغییر آبخور ناشی از ممان	- 31.17	26.68
افزایش آبخور ناشی از بارگذاری	10.7	10.7
مجموع	479.53	537.38

مثال) شناور مدل ۱ در آبخور ۴ متر قرار دارد و بارگیری زیر را انجام می‌دهد:

شماره انبار	وزن (t)
۴	۸۰
۳	۲۵
۱	-۴۰

شیب ایجاد شده ناشی از این بارگیری را بیان کنید.

حل: از مشخصات شناور داریم:

در آبخور ۴ متر از وسط شناور $LCF = 2.32\ m$ ممان به سینه مثبت و به پاشنه منفی فرض می‌شود:

شماره انبار	فاصله از عمود پاشنه	فاصله ازF	وزن(t)	ممان(t.m)
4	75	37.32	80	2985.6
3	60	22.32	25	558
1	25	-12.68	-40	507.2
مجموع:			**65**	**4050.8**

در آبخور ۴ متر از جدول هیدرواستاتیک برای *MCTC* و *TPC* داریم:

$$TPC = 8.51 \quad \frac{t}{cm}$$

$$MCTC = 38.38\ (\frac{t.m}{cm})$$

$$t = \frac{long.\ moment}{MCTC} = \frac{4050.8}{38.38} = 105.54\ cm$$

$$l = 40 - 2.32 = 37.68\ m$$

$$t_a = \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{79.3} \times 105.54 = 50.15 cm$$

$$t_f = t - t_a = 105.54 - 50.15 = 55.39 cm$$

$$\text{تغییر آبخور} = \frac{w}{TPC} = \frac{65}{8.51} = 7.64\ cm$$

	آبخور پاشنه (cm)	آبخور سینه (cm)
آبخور اولیه	400	400
میزان فرورفتگی	7.64	7.64
تغییر شیب	-50.15	55.39
مجموع	357.49	460.03

مثال) شناور مدل ۱ در جابجایی ۲۵۶۰ تن می‌خواهد ۱۰۰ تن بار را بین انبار ۱ و ۳ به گونه‌ای بارگیری کند که آبخور پاشنه ثابت بماند. توزیع بار بین این دو انبار را محاسبه کنید.

جابجایی کل پس از بارگیری = ۲۵۶۰ + ۱۰۰ = ۲۶۶۰ t

که این جابجایی معادل آبخور ۴ متر است که در آن:

$$TPC = 8.51\ \frac{t}{cm}$$

$$MCTC = 38.38\ \frac{t.m}{cm}$$

$$l = 40 - 2.32 = 37.68\ m$$

طول آبخور در آبخور ۴ متر $L = 79.3$. برای ثابت ماندن آبخور پاشنه باید داشته باشیم:

$$\frac{w}{TPC} = \frac{l}{L} \times \frac{w.d}{MCTC}$$

از رابطه فوق مقدار d را بدست می‌آوریم که نشان‌دهنده برآیند مرکز ثقل بار ۱۰۰ تنی می‌باشد که باید بین دو انبار توزیع گردد. در واقع برآیند مرکز ثقل بارهای توزیع شده بین دو انبار باید در d قرار گیرد.

$$d = \frac{w \times L \times MCTC}{w \times l \times TPC} = \frac{L}{l} \times \frac{MCTC}{TPC} = \frac{79.3}{37.68} \times \frac{38.38}{8.51} = 9.5\ m$$

یعنی مرکز ثقل بار باید ۹/۵ متر جلوتر *از* F باشد. اگر w_1 بار قرار گرفته در انبار شماره ۱ باشد، بار قرار گرفته در انبار ۳ برابر است با $100 - w_1$ و از طرفی فاصله انبار ۱ برابر ۱۲/۶۸ متر عقب‌تر از F و انبار ۳، برابر ۲۲/۳۲ متر جلوتر از F است. لذا با در نظر گرفتن فاصله این انبارها از محل برایند (فاصله ۹/۵ متری جلوتر از F) خواهیم داشت:

$$(12.68 + 9.5) \times w_1 = (22.32 - 9.5)(100 - w_1)$$

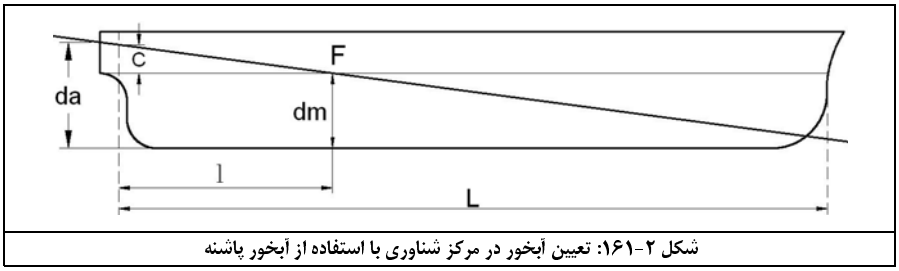
$$w_1 = 36.6\ t$$

$$w_3 = w - w_1 = 100 - 36.6 = 63.4\ t$$

یعنی ۳۶/۶ تن در انبار شماره ۱ و ۶۳/۴ تن در انبار شماره ۳ باید بارگیری شود.

۵) تعیین آبخور در مرکز شناوری

فرض کنیم که شناور دارای آبخور t باشد. طول شناور L فاصله مرکز شناوری از عمود پاشنه برابر ℓ می‌باشد. مطابق شکل ۲-۱۶۱، آبخور در مرکز شناوری برابر d_m، آبخور پاشنه برابر d_a و اختلاف d_m و d_a برابر c می‌باشد.



شکل ۲-۱۶۱: تعیین آبخور در مرکز شناوری با استفاده از آبخور پاشنه

اگر از محل عمود سینه یا پاشنه یک خط افقی ترسیم کنیم ، با تشابه مثلث‌ها داریم:

$$\frac{c}{\ell}=\frac{t}{L}$$

$$c=\frac{\ell}{L}\times t$$

همچنین داریم:

$$d_a-d_m=c \qquad d_m=d_a-c$$

بنابراین آبخور در محل مرکز شناوری (d_m) توسط آبخور پاشنه (d_a) یا آبخور سینه و مقدار شیب شناور (t) قابل محاسبه است.

$$\boxed{d_m=d_a-\frac{\ell}{L}\times t}$$

اگر در یک حالت غیرعادی، شناور دارای شیب سینه باشد رابطه فوق تبدیل به رابطه مقابل می‌شود:

$$d_m=d_a+\frac{\ell}{L}\times t$$

همچنین یادآوری می‌شود که اگر آبخور سینه d_f و آبخور پاشنه d_a باشد، مقدار شیب (t) برابر است با:

$$t=d_a-d_f$$

مثال) در شناور مدل ۱، آبخور پاشنه برابر ۳/۲ متر و آبخور سینه برابر ۲/۸ متر است. فاصله F از عمود پاشنه برابر ۳۹/۲۴ متر می‌باشد. اگر بخواهیم از مشخصات جدول هیدرواستاتیک استفاده کنیم، در چه آبخوری باید این مشخصات استخراج شود؟

حل) از آنجا که آبخور سینه و پاشنه متفاوت است لذا دو روش کلی وجود دارد:

۱- آبخور متوسط: $draft=\frac{d_a+d_f}{2}=\frac{3.2+2.8}{2}=\frac{6}{2}=3\ m$

۲- آبخور در محل مرکز شناوری: طول آبخور (L) در این حالت برابر ۷۸/۵ متر می‌باشد.

$$t=3.2-2.8=0.4\ m$$

$$d_m=d_a-\frac{l}{L}.t=3.2-\frac{39.24}{78.5}\times 0.4=3.2-0.119=3.081\ m$$

ملاحظه می‌شود که آبخور بدست آمده در هر دو روش تقریبا برابر هستند و از این آبخور می‌توان مشخصات را از جدول هیدرواستاتیک شناور استخراج کرد.

مثال) در مثال قبل اگر شناور بخواهد از آبخور پاشنه ۳/۲ متر و آبخور سینه ۲/۸ متر به آبخور پاشنه ۳/۴ متر و آبخور سینه ۲/۹ متر تغییر وضعیت دهد، چند تن بار می‌تواند بارگیری کند؟ در این حالت $l=39.24\ m$ و $L=78.5\ m$ و $TPC=7.63\ \frac{t}{cm}$ می‌باشد.

حل) به دو روش می‌توان تغییرات آبخور را محاسبه کرد و با استفاده از رابطه $\frac{w}{TPC}$ مقدار w (مقدار بار بارگیری شده) را محاسبه کرد:

الف) روش آبخور متوسط:

$$\text{آبخور متوسط اولیه}=\frac{d_f+d_a}{2}=\frac{3.2+2.8}{2}=3\ m$$

$$\text{آبخور متوسط ثانویه}=\frac{d_f+d_a}{2}=\frac{3.4+2.9}{2}=3.15\ m$$

$$\text{تغییر آبخور متوسط}=3.15-3=0.15\ m$$

$$0.15=\frac{w}{TPC}=\frac{w}{7.63}$$

$$W=1.144\ t$$

ب) روش آبخور در محل مرکز شناوری:

$$t = 3.2 - 2.8 = 0.4 \ m$$

حالت اولیه:

$$d_m = d_a - \frac{l}{L}.t$$

$$d_m = 3.2 - \frac{39.24}{78.5} \times 0.4 = 3.001 \ m$$

$$t = 3.4 - 2.9 = 0.5 \ m$$

حالت ثانویه:

$$d_m = d_a - \frac{l}{L} \times t$$

$$d_m = 3.4 - \frac{39.24}{78.5} \times 0.5 = 3.15 \ m$$

تغییر آبخور در محل مرکز شناوری $= 3.15 - 3.001 = 0.149 \ m$

$$0.149 = \frac{w}{TPC} = \frac{w}{7.63}$$

$$w = 1.136 \ t$$

ملاحظه می‌شود که مقادیر بدست آمده در دو روش، تفاوت چندانی با هم ندارند.

۶) تعیین ارتفاع متاسنتری طولی با استفاده از شیب شناور

مطابق شکل ۲-۱۶۲ فرض کنید شناور تا زاویه θ تریم کرده باشد که داریم:

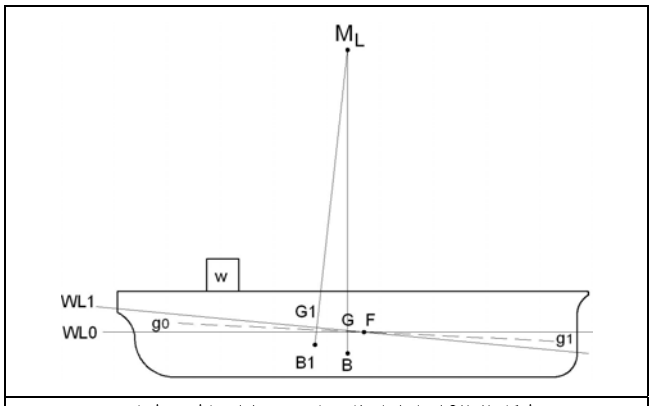
$$GG_1 = \frac{w.d}{W}$$

با استفاده از تشابه مثلث‌ها:

$$\frac{GM_L}{GG_1} = \frac{L}{t}$$

$$GM_L = \frac{L}{t} \times GG_1 = \frac{L}{t} \times \frac{w.d}{W}$$

بدین ترتیب با داشتن مقدار شیب می‌توان GM_L و در نتیجه $MCTC$ را نیز محاسبه کرد.



شکل ۲-۱۶۲: رابطه ارتفاع متاسنتری طولی با شیب شناور

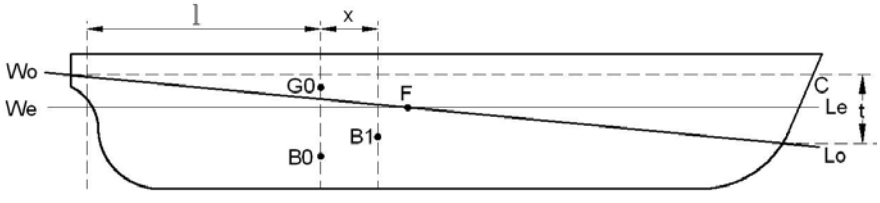
۷) تعیین موقعیت طولی مرکز ثقل با استفاده از شیب

در شکل ۲-۱۶۳ شناوری در حالت شیب دارای آبخور $w_\circ L_\circ$ و جابجایی W است. مرکز ثقل آن G و در امتداد $B_\circ$ قرار دارد. اگر شناور فوق که بر اثر ممان یک نیروی خارجی دارای شیب بوده است، به حالت افقی آورده شود و خط آبخور آن به $W_e L_e$ تغییر یابد، مرکز بویانسی نیز به B_1 انتقال خواهد یافت. اگر فاصله افقی بین $B_\circ$ و B_1 برابر x باشد، ممان تغییر شیب برابر $W.x$ بوده و شیب t را می‌توان به شکل زیر محاسبه کرد:

$$t = \frac{\text{ممان اعمال شیب}}{MCTC}$$

$$t = \frac{W.x}{MCTC}$$

$$x = \frac{t \times MCTC}{W}$$



شکل ۲-۱۶۳: رابطه مقدار شیب با مرکز ثقل و بویانسی حالت بدون شیب

یعنی در حالت بدون شیب، محل مرکز بویانسی از محل قبلی به اندازه x فاصله دارد. از آنجا که در حالت بدون شیب باز هم مرکز بویانسی و مرکز ثقل باید در امتداد قائم باشند، لذا فاصله طولی مرکز بویانسی جدید همان فاصله طولی مرکز ثقل است. بدین‌ترتیب با استفاده از مقدار شیب، مرکز ثقل و بویانسی در حالت بدون شیب بدست می‌آید.

۸) استفاده از مقدار شیب در تعیین موقعیت مرکز شناوری

روشهای مختلفی برای تعیین مرکز شناوری به کمک مقدار شیب وجود دارد. از جمله اینکه اگر در شناوری که در حالت اولیه بدون شیب است، باری به وزن $\mathbf{w}$ را در قسمت جلوی عرشه قرار دهیم، شیب به سینه داریم. حال هر چه این وزنه را به سمت عقب حرکت دهیم، شیب سینه کمتر می‌شود تا جائیکه شیب به پاشنه ایجاد می‌گردد. یعنی وزنه از مرکز شناوری به عقب‌تر حرکت کرده است. لذا در این حالت باید مجدداً وزنه را رو به جلو حرکت دهیم تا جائیکه شیب شناور صفر شود. در این شرایط، محل قرارگیری بار، همان مرکز شناوری است چرا که بارگذاری در محل مرکز شناوری باعث تغییر شیب نمی‌گردد. روش دیگر، استفاده از روابط پایداری طولی است. فرض کنید شناور دارای شیب اولیه $\mathbf{t_1}$ باشد. باری به وزن w را در فاصله $\mathbf{a}$ متری از وسط شناور (یا یک نقطه مشخص) قرار می‌دهیم که باعث شیب ثانویه $\mathbf{t_2}$ می‌شود. در این شرایط تغییر شیب برابر با $\mathbf{t_2 - t_1}$ می‌باشد.

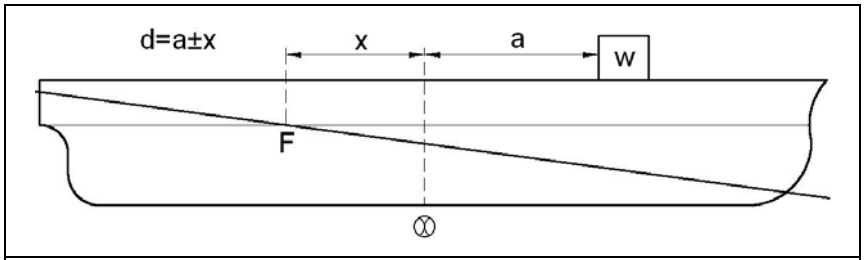
از رابطه زیر داشتیم:

$$\text{تغییر شیب} = \frac{\text{ممان اعمال شده}}{MCTC} = \frac{w.d}{MCTC}$$

که در اینجا d فاصله بار تا مرکز شناوری می‌باشد. در این معادله کلیه مقادیر به جز d معلوم هستند لذا مقدار d بدست می‌آید. از مقدار d طبق رابطه زیر و شکل ۲-۱۶۴ می‌توان فاصله مرکز شناوری را تا وسط شناور نیز به دست آورد:

$$\mathbf{d = a \pm x}$$

که x فاصله وسط شناور تا مرکز شناوری است (با فرض رایج اینکه مرکز شناوری عقب‌تر از وسط شناور است).



شکل ۲-۱۶۴: تعیین محل مرکز شناوری با استفاده از مقدار شیب

$MCTC$ نیز با استفاده از GM_L و آن هم با استفاده از مقدار شیب محاسبه می‌شود که نحوه محاسبه آن در قسمت‌های قبل بیان شد. کاربرد این روش در اطمینان از محل مرکز شناوری می‌باشد که کاربرد بسیاری در نحوه بارگیری شناور دارد. روش دیگر استفاده از دو وزنه در طرفین قسمت میانی شناور می‌باشد به گونه‌ای که شیب شناور دچار تغییر نگردد. اگر وزنه‌ها دارای وزن $\mathbf{w_2, w_1}$ و به فاصله ℓ_2, ℓ_1 از وسط شناور باشد و فرض کنیم فاصله وسط شناور تا مرکز شناوری نیز برابر x باشد داریم:

$$w_1(\ell_1 + x) - w_2(\ell_2 - x) = 0$$

$$x = \frac{w_1 l_1 - w_2 l_2}{w_1 - w_2}$$

بدین ترتیب فاصله مرکز شناوری از وسط شناور (x) به دست می‌آید.

۹) محاسبه شیب ناشی از بارهای سنگین

اگر شناوری در حالت سبک قرار گرفته باشد و بر اثر بارگیری با تغییرات خط آبخور زیاد مواجه شود، روشهای تشریح شده در قسمت‌های قبل دارای دقت کافی نیستند چرا که با تغییر خط آبخور، مشخصات صفحه آبخور عوض می‌شود و در نتیجه مرکز شناوری، BM_L و $MCTC$ تغییر می‌نماید. بنابراین برای محاسبات پایداری طولی و شیب، باید مراحل زیر رعایت شوند:

۱- تعیین موقعیت طولی مرکز ثقل در حالت اولیه

۲- تعیین موقعیت طولی مرکز ثقل در حالت ثانویه (بعد از بارگیری)

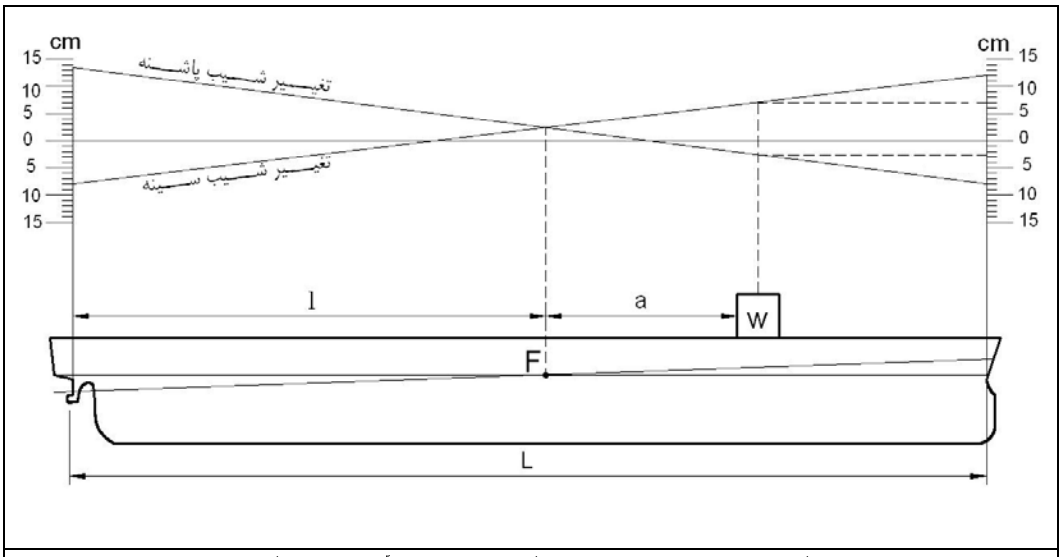
۳- تعیین موقعیت طولی مرکز بویانسی، مرکز شناوری، $MCTC$ و آبخور در محل مرکز شناوری در حالت ثانویه با استفاده از اطلاعات جداول و نمودارهای هیدرواستاتیک.

۴- تعیین ممان تغییر شیب و محاسبه تغییر شیب با استفاده از فاصله افقی بین LCG و LCB.

یعنی در واقع دو نکته تغییر آبخور (جابجایی) و مرکز ثقل در بارگزاری‌های سنگین باید مد نظر قرار گیرد.

۱۰) نمودار ضربدری شیب

این نمودار کمک می‌کند که بدون انجام محاسبات، بتوان شیب شناور را در صورت بارگیری یک جسم در محل مشخصی از بدنه، محاسبه کرد. نحوه ترسیم این نمودار به صورت زیر می‌باشد: مطابق شکل ۲-۱۶۵، شناوری به طول L با مرکز شناوری به فاصله ℓ از عمود پاشنه، باری به وزن w را در فاصله a متر نسبت به مرکز شناوری بارگیری نموده است.



شکل ۲-۱۶۵: کاربرد نمودار ضربدری شیب در تعیین تغییر آبخور سینه و پاشنه

بنابراین:

$$\text{تغییر در آبخور پاشنه} = \frac{w}{TPC} - \frac{l \times w \times d}{L \times MCTC}$$

برای واحد بار، $\frac{w}{TPC}$ ثابتی برابر با K_0 و $\frac{l \times w}{L \times MCTC}$ نیز ثابت دیگری مثل K_1 است:

$$\text{تغییر آبخور پاشنه} = K_0 + K_1.d$$

برای همین بار، تغییر آبخور در سینه عبارت است از:

$$\text{تغییر آبخور در سینه} = \frac{w}{TPC} + \frac{(L-\ell) \times w \times d}{L \times MCTC}$$

که $\frac{w}{TPC} = K_0$ و $\frac{L-\ell}{L \times MCTC} = K_2$ و بنابراین معادله خط مستقیم که نشان دهنده تغییر آبخور سینه می‌باشد عبارت است از:

$$\text{تغییر آبخور سینه} = K_0 + K_2.d$$

علامت بین دو عبارت در فرمولهای فوق، وابسته به علامت d می‌باشد. بار واحد می‌تواند مثلاً ۱۰ یا ۱۰۰ تن در نظر گرفته شود. مطابق شکل ۲-۱۶۰، این دو خط که به صورت دو خط متقاطع هستند برای یک شناور رسم شده‌اند. محورهای عمودی که در طرفین رسم شده‌اند، نشان دهنده تغییر آبخور و محور افقی برابر طول شناور است. در این شکل، بار واحدی در فاصله $\ell + d$ متری از عمود پاشنه قرار گرفته است. تغییر آبخور سینه ناشی از این بارگیری برابر ۶/۹ سانتیمتر و تغییر آبخور پاشنه برابر ۲/۵- سانتیمتر است.

مثال) اولاً نمودار ضربدری شیب را برای شناور مدل ۱ در آبخور ۵ متر بدست آورید. ثانیا: با استفاده از این نمودار مشخص کنید که اگر یک بار ۳۰ تنی در فاصله ۱۰ متری عمود پاشنه قرار گیرد، تغییر آبخور سینه و پاشنه چه مقدار است؟

حل: با استفاده از مشخصات هیدرواستاتیک در آبخور ۵ متر داریم:

$$TPC = 9.34 \ \frac{t}{cm}$$

$$MCTC = 48.34 \ (\frac{t.m}{cm})$$

$LCF = 3.1 \ m$ از وسط شناور , $l = 40 \quad 3.1 = 36.9 \ m$

الف- اگر بار در AP بارگیری شود:

$$d = 40 - 3.1 = 36.9 \ m$$

اگر بار در FP بارگیری شود:

$$d = 40 + 3.1 = 43.1 \ m$$

اگر بار واحد ۱۰ تن در نظر گرفته شود داریم:

$$w = 10 \ t$$

$$K_0 = \frac{w}{TPC} = \frac{10}{9.34} = 1.07$$

$$K_1 = \frac{l.w}{L \times MCTC} = \frac{36.9 \times 10}{80 \times 48.34} = 0.095$$

$$K_2 = \frac{(L-l)w}{L \times MCTC} = \frac{(80-36.9) \times 10}{80 \times 48.34} = 0.11$$

خط تغییرات آبخور پاشنه

خط تغییرات $= K_0 + K_1 d = 1.07 + (0.095) \times d$

این خط درجه ۱ را می‌توان با ۲ نقطه ابتدایی و انتهایی تعیین کرد:

۱- بارگیری در AP: $d = 36.9 \ m$

تغییر آبخور پاشنه $= 1.07 + (0.095) \times (36.9) = 4.57 \ cm$

۲- بارگیری در FP: $d = -43.1 \ m$

تغییر آبخور پاشنه $= 1.07 + (0.095) \times (-43.1) = -3.02 \ cm$

خط تغییرات آبخور سینه

خط تغییرات $K_0 + K_2 d = 1.07 + (0.11) \ d$

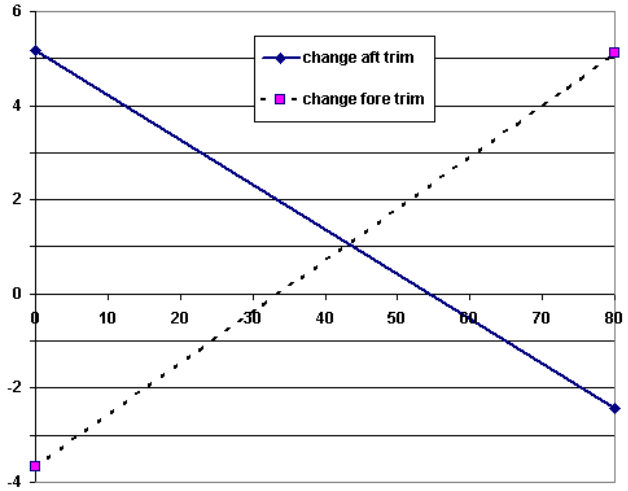
دو نقطه ابتدایی و انتهایی این خط عبارتند از:

۱- بارگیری در AP: $d = -36.9 \ m$

تغییر آبخور سینه $= 1.07 + (0.11) \times (-36.9) = -5.13 \ cm$

۲- بارگیری در FP: $d = 43.1 \ m$

تغییر آبخور سینه $= 1.07 + (0.11)(43.1) = 5.81 \ cm$



ب- حال اگر یک بار ۳۰ تنی در فاصله ۱۰ متری عمود پاشنه قرار گیرد داریم:

۱) تغییر شیب پاشنه ناشی از ۱۰ تن بارگیری: $4.2 \ cm$

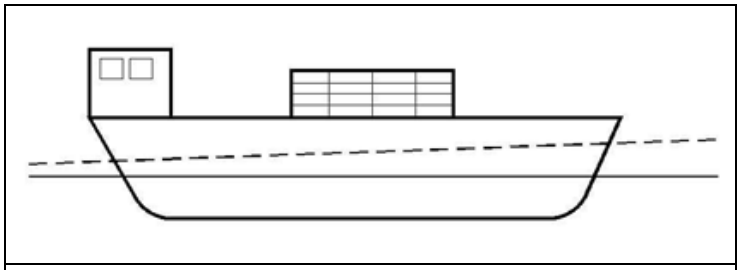
تغییر شیب پاشنه ناشی از ۳۰ تن بارگیری: $4.2 \times 3 = 12.6 \ cm$

۲) تغییر شیب سینه ناشی از ۱۰ تن بارگیری: $-2.5 \ cm$

تغییر شیب سینه ناشی از ۳۰ تن بارگیری: $-2.5 \times 3 = -7.5 \ cm$

فصل۲: اثرات تغییر چگالی آب دریا بر پایداری شناور

شناورها در مسیر تردد خود از آبهایی با چگالی‌های مختلف عبور می‌کنند. این محدوده تغییر چگالی از ۱/۰۰۵ در دهانه رودخانه ها و مناطق قطبی تا ۱/۰۲۸ t/m^3 در دریاچه های نمک و خلیج ها تغییر می‌کند. در برخی مواقع نیز فرض می شود شناور در آب شیرین با چگالی $1\ t/m^3$ شناور است. تغییر چگالی باعث دو تغییر اساسی در وضعیت شناور می شود (مطابق شکل ۲-۱۶۶):



شکل ۲-۱۶۶: تغییر چگالی باعث تغییر شیب شناور می‌شود.

۱- تغییر آبخور: این تغییر آبخور به دلیل تغییر چگالی رخ می دهد چرا که از رابطه زیر، حجم زیر آب بدنه تغییر می یابد:

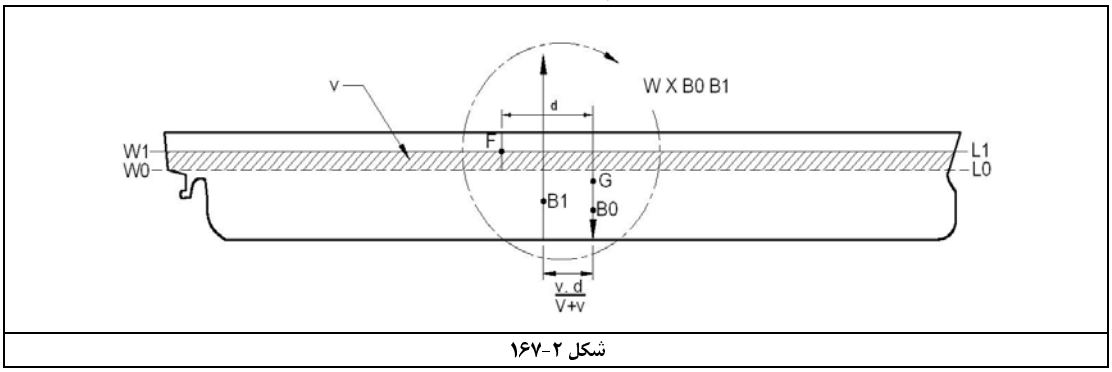
جابجایی $= \rho_1 \times V_1 = \rho_0 \times V_0$

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho_1}$$

فرض کنید $\rho_0 > \rho_1$ باشد در نتیجه $V_1 > V_0$ است یعنی: $V_1 = V_0 + v$

که v حجم فرو رفته در داخل آب در اثر تغییر چگالی است.

۲- تغییر شیب: تغییر شیب دراثر جابجا شدن مرکز بویانسی (B_0B_1) و ایجاد ممان شیب دهنده بین B و G اتفاق می افتد (مطابق شکل ۲-۱۶۷).



شکل ۲-۱۶۷

اگر حجم قسمت اضافه شده در اثر تغییر چگالی را به صورت منشوری فرض کنیم به صورتی که مرکز شناوری تغییر نکند و مرکز حجم این قسمت نیز از نظر عمودی هم امتداد مرکز بویانسی اولیه (B_0) باشد، مطابق شکل ۲-۱۶۷ داریم:

ممان تغییر شیب که بر اثر جابجایی مرکز بویانسی ایجاد می گردد، عبارت است از: ممان تغییر شیب $= W \times B_0B_1$

$$\text{تغییر تریم} = \frac{\text{ممان تغییر تریم}}{\text{MCTC}} = \frac{W \times B_0B_1}{MCTC} \qquad (۱)$$

$$B_0B_1 = \frac{v \times d}{V + v} \qquad (۲)$$

که d در این رابطه فاصله بین مرکز شناوری (F) و مرکز ثقل (G_0) می باشد. حجم v را می توان به دو صورت محاسبه کرد:

الف)

$$(V + v)\rho_1 = v\rho_0$$

$$V + v = \frac{\rho_0}{\rho_1}.V$$

$$v = V \times (\frac{\rho_0}{\rho_1} - 1) \qquad (۳)$$

ب) اگر تغییرات حجم به صورت منشوری باشد و تغییر آبخور به مقدار S را داشته باشیم:

$$\frac{d_0+s}{d_0}=\frac{\rho_0}{\rho_1} \qquad d_0+S=d_0\times\frac{\rho_0}{\rho_1}$$

$$S=d_0\times\frac{\rho_0}{\rho_1}-d_0=d_0\times(\frac{\rho_0}{\rho_1}-1)$$

v = تغییر آبخور × مساحت صفحه آبخور $=S\times A$

از طرفی داشتیم:

$$TPC=\frac{A.\rho}{100}\rightarrow A=\frac{TPC\times 100}{\rho}$$

$$v=S\times\frac{TPC\times 100}{\rho} \qquad (۴)$$

بدین ترتیب برای حل مسئله از رابطه (۳) یا (۴) مقدار v را محاسبه کرده و با استفاده از رابطه (۲) مقدار B_0B_1 را محاسبه و با جاگذاری در رابطه (۱) مقدار تغییر شیب شناور ناشی از تغییر چگالی آب دریا را محاسبه می کنیم. میزان فرورفتگی شناور در اثر تغییر چگالی نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{میزان فرورفتگی}=\frac{v\times\rho}{TPC} \qquad (۵)$$

بدین ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۵) می‌توان تغییرات آبخور سینه و پاشنه را محاسبه کرد.

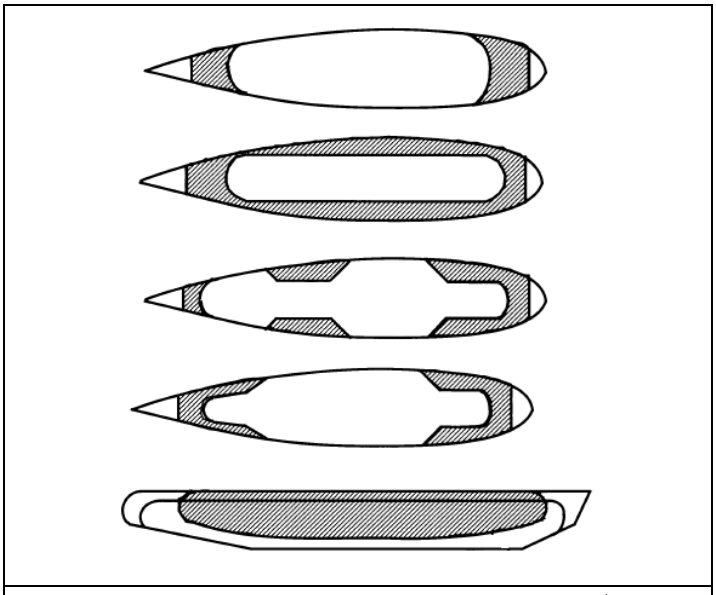
طبعی به هم رسان که بسازی به عالمی
یا همتی کز سر عالم توان گذشت

بخش چهارم:
هیدرواستاتیک زیردریایی

فصل ۱:[۱] هیدرواستاتیک زیردریایی

۱- مقدمه

در این قسمت مشخصه‌های هیدرواستاتیکی زیردریایی بررسی می‌شود. زیردریایی برخلاف کشتی‌ها، دارای یک بدنه تقریباً استوانه‌ای شکل است که حجم جابجایی ایجاد می‌کند و در صورت بسته بودن درب اصلی آن، در هیچ زاویه غلتشی، آب وارد بدنه نمی‌شود.



شکل ۲-۱۶۸: طرح‌های مختلف بدنه فشار و بدنه کاذب در زیردریایی‌ها

زیردریایی مطابق شکل ۲-۱۶۸ دارای دو بدنه می‌تواند باشد:

- **بدنه فشار:** که حجم جابجایی ایجاد می‌کند و تحمل فشار عمق آب را دارد. این بدنه از اجزاء استوانه‌ای، مخروطی و نیم‌کره تشکیل شده است ولی در این قسمت فرض می‌شود کل بدنه استوانه‌ای باشد و با این فرض، پایداری زیردریایی بررسی می‌شود که البته، چون مقطع بدنه در هر قسمت به صورت دایره‌ای است، این فرض می‌تواند دقت خوبی داشته باشد.

- **بدنه کاذب:** این بدنه، حجم جابجایی ایجاد نمی‌کند و قابلیت تحمل فشار عمق آب را ندارد و در واقع آب از منافذ این بدنه وارد می‌شود. این بدنه شکل هیدرودینامیکی مناسب برای کاهش درگ را تأمین می‌کند و بنابراین در مبحث هیدرواستاتیک چندان حائز اهمیت نیست. در فضای بین این بدنه و بدنه فشار، مخازن متعددی قرار می‌گیرند که حجم جابجایی ایجاد می‌کنند.

زیردریایی‌ها به دو حالت کلی ساخته می‌شوند:

۱) زیردریایی تک پوسته که تنها دارای بدنه فشار است و پوسته کاذب تنها در قسمت سینه و پاشنه قرار دارد. در این بخش فرض می‌شود که زیردریایی تک پوسته است.

۱- منابع: [۸ و ۹ و ۱۷]

۲) زیردریایی دو پوسته که دارای بدنه فشار و بدنه کاذب است. پایداری این زیردریایی‌ها تا حدودی با زیردریایی‌های تک پوسته متفاوت است چرا که بخش‌هایی از بیرون بدنه فشار (مخازن) نیز حجم‌های جابجایی ایجاد می‌کنند و لذا نمی‌توان بدنه را شبیه به استوانه در نظر گرفت.

در این قسمت، مطالب با فرض استوانه‌ای و تک پوسته بودن بدنه بررسی و بیان می‌شوند.

– **ذخیره بویانسی:** در این قسمت تعریف ذخیره بویانسی و محدوده آن در زیردریایی بررسی می‌شود.

– پایداری در حالت سطحی، زیرسطحی و انتقال: رفتار نقطه متاسنتری در آبخورها و زوایای غلتش مختلف در حالت سطحی بررسی شده و در حین انتقال از سطح به زیرسطح و در زیر آب نیز موقعیت متاسنتری و رفتار پایداری زیردریایی ارزیابی می‌شود.

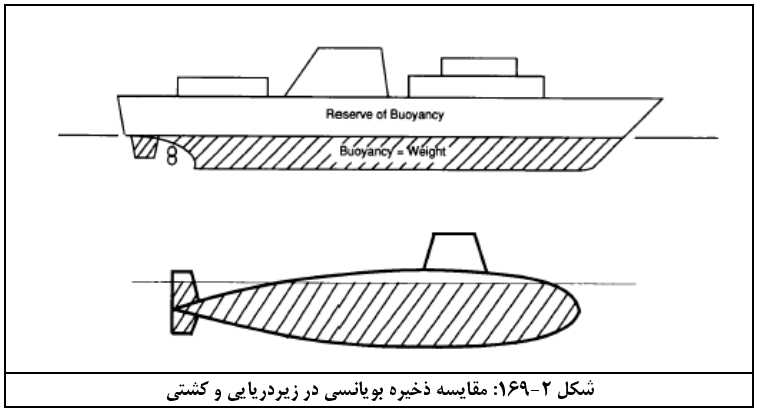
– **مروری بر مؤلفه‌های خاص پایداری:** در این قسمت، مشخصه‌های خاص پایداری زیردریایی نسبت به کشتی‌ها بیان می‌شود.

– **نسبت وزن به حجم در زیردریایی:** روش تأمین برابری وزن و بویانسی و درصدهای تقریبی وزنی – حجمی اجزاء داخلی زیردریایی تحلیل می‌شوند.

– **حجم‌بندی مخازن و چندضلعی تریم:** از مهمترین مباحث در طراحی هیدرواستاتیکی زیردریایی، حجم‌بندی مخازن متعدد زیردریایی و تعیین محل آنها می‌باشد که به کمک چندضلعی تریم بررسی می‌گردند.

۲- ذخیره بویانسی در زیردریایی

ذخیره بویانسی (ROB) [1] در شناورها عبارتست از حجم آب‌بند[2] بالای خط آب. ذخیره بویانسی در زیردریایی‌ها خیلی کمتر از کشتی‌ها می‌باشد (شکل ۲-۱۶۹).



شکل ۲-۱۶۹: مقایسه ذخیره بویانسی در زیردریایی و کشتی

وقتی زیردریایی به زیر آب می‌رود، باید حجم بالای آب را نیز به زیر آب انتقال دهد. برای این منظور، مخازن شناوری یا بالاست[3] در نظر گرفته شده‌اند که حجم این مخازن برابر حجم آب‌بند بالای آبخور یا همان ذخیره بویانسی می‌باشد و به عبارت دیگر:

ذخیره بویانسی = حجم مخازن شناوری = حجم آب‌بند بالای خط آبخور

نسبت ذخیره بویانسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{نسبت ذخیره بویانسی} = \frac{\text{حجم مخازن شناوری}}{\text{حجم جابجایی بدنه}}$$ [4]

منظور از حجم جابجایی، حجمی از بدنه است که قابلیت جابجا کردن آب را دارد که به آن «حجم بویانسی» هم می‌گویند. حجم داخل بدنه کاذب که آب وارد آن می‌شود جزء حجم جابجایی محسوب نمی‌شود. مطابق شکل ۲-۱۷۰ زیردریایی برای رفتن به زیر آب مخازن شناوری را پر از آب می‌کند یعنی مقداری از حجم بویانسی بدنه را از دست می‌دهد تا بتواند حجم آب‌بند بالای آب را به زیر آب بکشد. در این شرایط که «شرایط غوطه‌وری»[5] نامیده می‌شود، ذخیره بویانسی برابر صفر می‌باشد. ذخیره بویانسی زیردریایی‌های تک پوسته‌ای حدود ۱۰ درصد و ذخیره بویانسی زیردریایی‌های دو پوسته‌ای تا حدود ۳۰ درصد می‌باشد. هرچه ذخیره بویانسی زیردریایی بیشتر باشد، ایمنی و احتمال نجات آن در صورت آبگرفتگی یکی از بخش‌های بدنه، بیشتر است. مخازن شناوری که به منزله ذخیره بویانسی زیردریایی هستند، در بیرون بدنه فشار نصب می‌شوند چرا که نیازی به تحمل فشار عمق ندارند زیرا در زیر سطح آب پر از آب هستند. در زیردریایی‌های تک پوسته، فقط از فضای بدنه کاذب سینه و پاشنه برای نصب مخازن

---

1 –Reserve of Buoyancy

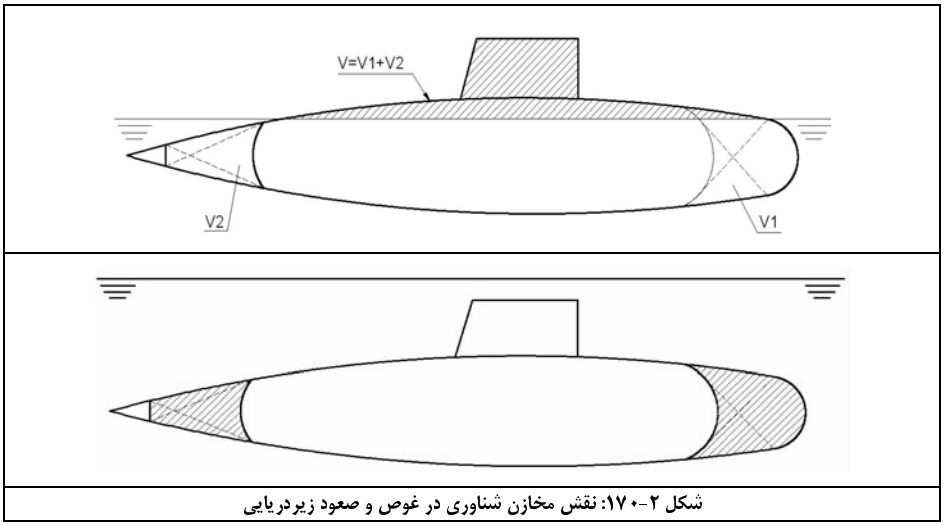
2 - Watertight

3 - Ballast

۴- منظور از حجم جابجایی، حجمی از بدنه است که قابلیت جابجا کردن آب را دارد که به آن «حجم بویانسی» هم می‌گویند. حجم داخل بدنه کاذب که آب وارد آن می‌شود جزء حجم جابجایی محسوب نمی‌شود.

5 - Submerged Condition

شناوری استفاده می‌شود و لذا ذخیره بویانسی نمی‌تواند چندان زیاد باشد ولی در زیردریایی‌های دو پوسته‌ای (که در قسمت میانی بدنه هم بدنه کاذب وجود دارد)، علاوه بر سینه و پاشنه، از فضای بین دو پوسته نیز برای نصب مخازن شناوری استفاده می‌شود و بدین ترتیب می‌توان ذخیره بویانسی زیادی را برای این زیردریایی‌ها تأمین کرد و یک مزیت عمده برای آنها محسوب می‌شود.



شکل ۲-۱۷۰: نقش مخازن شناوری در غوص و صعود زیردریایی

۳- پایداری در حالت سطحی ، زیرسطحی و انتقال

در این بخش، پایداری زیردریایی تک پوسته‌ای با فرض کاملاً استوانه‌ای بودن بدنه بررسی می‌شود. بررسی پایداری زیردریایی در سه بخش کلی انجام می‌شود:

الف- پایداری در سطح آب

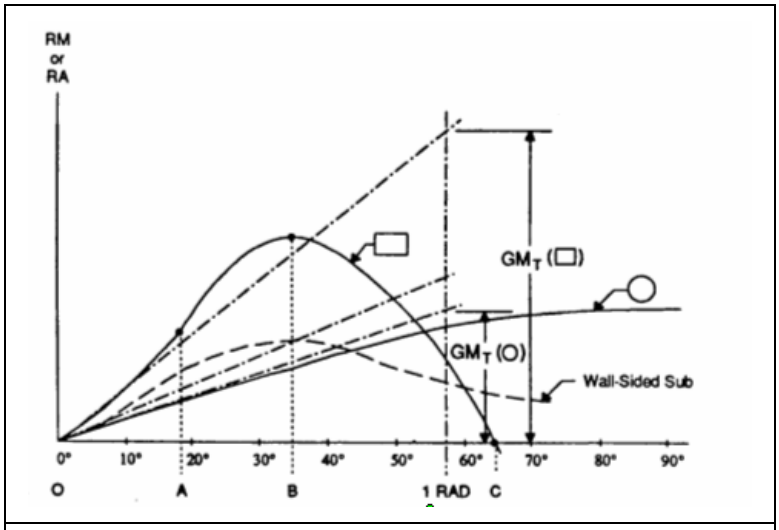
ب- پایداری در زیر آب

ج- پایداری در حین انتقال

هر یک از موارد فوق در زیر بررسی می‌شوند:

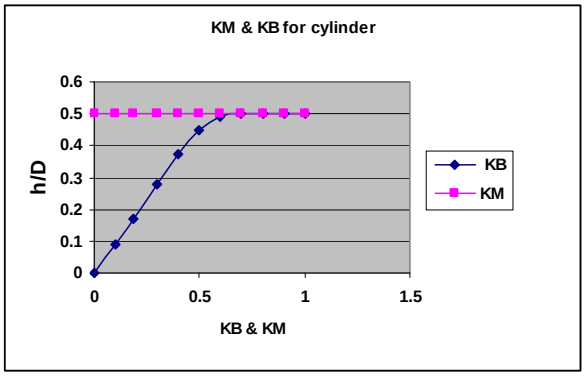
الف- پایداری در سطح آب

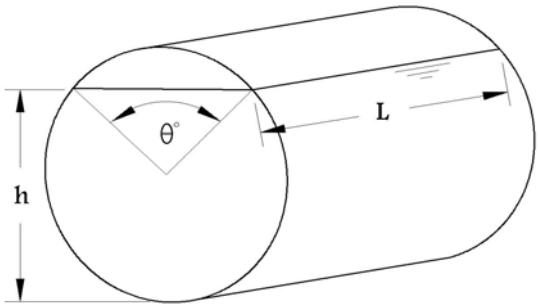
از آنجا که مساحت سطح آبخور زیردریایی نسبت به کشتی‌ها بسیار کوچکتر است، لذا در حالت کلی، پایداری سطحی زیردریایی از کشتی هم تناژ آن بسیار ضعیف‌تر است. به طور مثال ارتفاع متاسنتری یک زیردریایی ۱۰۰۰ تنی برابر ۳۲ سانتی‌متر و یک بارج ۱۰۰۰ تنی برابر ۷۴ سانتی‌متر می‌باشد. علت این تفاوت را می‌توان در شکل ۲-۱۷۱ ملاحظه نمود. در این شکل تفاوتهای منحنی GZ و ارتفاع متاسنتری GM برای دو نوع بدنه استوانه‌ای (زیردریایی) و مکعبی (بارج) مقایسه شده است که مؤلفه‌های پایداری بدنه استوانه‌ای خیلی ضعیف‌تر از بدنه مکعبی می‌باشد.



شکل ۲-۱۷۱: مقایسه مؤلفه‌های پایداری بدنه استوانه‌ای و مکعبی

تغییرات نقطه متاسنتری از عوامل کلیدی در بررسی پایداری است که در این بخش در دو حالت بررسی می‌شود:

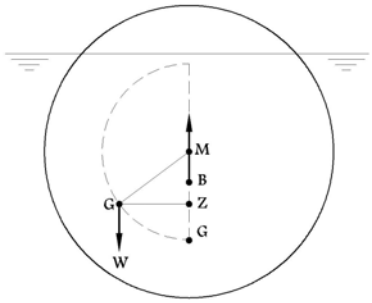




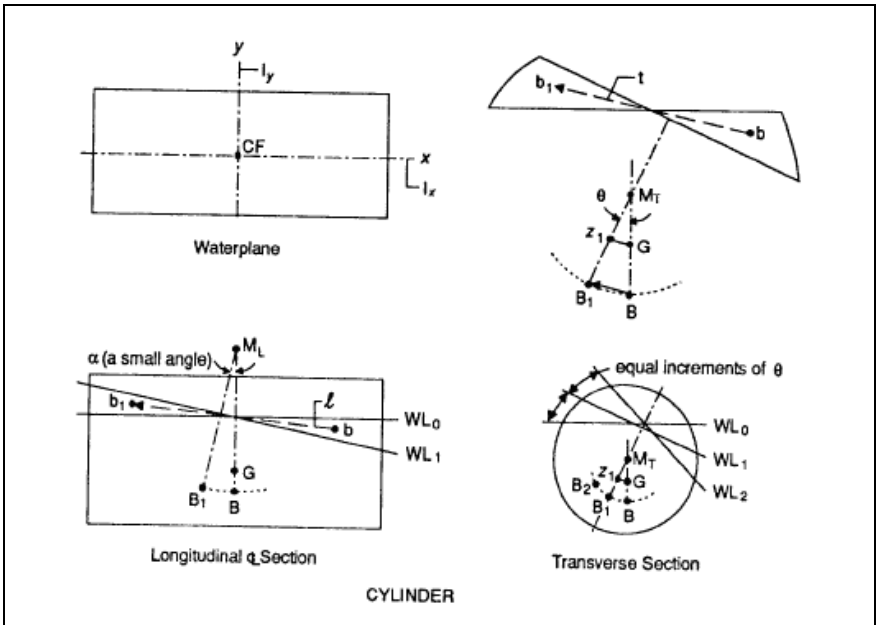
شکل ۲-۱۷۲: تغییرات KB و KM در آبخورهای مختلف

۱) تغییرات نقطه متاسنتری با تغییرات آبخور (شکل ۲-۱۷۲).

۲) تغییرات نقطه متاسنتری در زوایایی غلتش مختلف که به طور مجزا بررسی می‌شوند.



شکل ۲-۱۷۳: مقدار GZ در بدنه استوانه‌ای که در زاویه ۹۰ درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



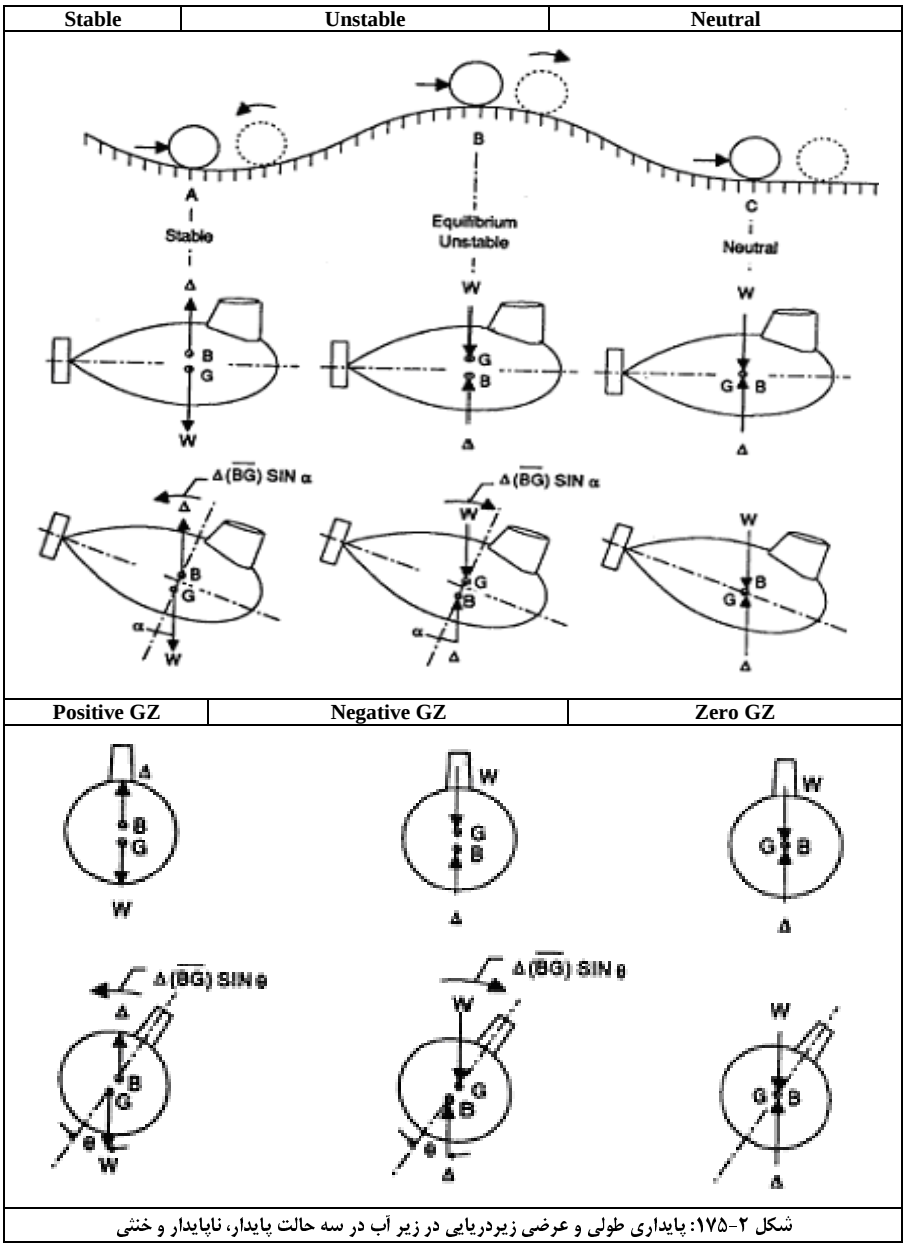
شکل ۲-۱۷۴: وضعیت حجم زیر آب بدنه استوانه‌ای در غلتش طولی و عرضی

مطابق با یک قانون هندسی در دایره، خطی که بر قطاعی از دایره عمود شود، از مرکز دایره عبور کرده و منطبق بر یکی از شعاع‌های دایره است. حال اگر مقطع یک استوانه را در نظر بگیریم، سطح آبخور ، به منزله قطاعی از دایره می‌باشد. مرکز حجم این قطاع داخل آب، در واقع مرکز بویانسی می‌باشد که در هر زاویه غلتشی، یک نقطه ثابت است، چرا که شکل قسمت زیر آب در زوایای غلتش مختلف تغییر نمی‌کند. حال، مطابق شکل ۲-۱۷۳ برای به دست آوردن مرکز متاسنتر، باید از مرکز بویانسی، عمودی بر خط آب رسم کرد که خط مرکزی را قطع کند. طبق قانون هندسی بیان شده، این

نقطه تقاطع، همان مرکز دایره (مرکز استوانه) است که همواره نقطه‌ای ثابت می‌باشد. علت ثابت بودن این نقطه در مرکز دایره را می‌توان عدم تغییر شکل قسمت زیر آب و شکل صفحه آبخور، در هر زاویه غلتشی بیان کرد. به عبارت دیگر حجمی از بدنه که از آب خارج می‌شود دقیقاً برابر و مشابه قسمتی است که وارد آب می‌شود (مطابق شکل ۲-۱۷۴). البته در سایر شناورها، این مسئله وجود ندارد و صفحه آبخور در هر زاویه غلتش تغییر می‌کند و متناسب با آن، مرکز متاسنتری نیز تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که در بدنه استوانه‌ای، مرکز متاسنتر عرضی چه با تغییر آبخور و چه با تغییر زاویه غلتش، همواره منطبق بر مرکز استوانه می‌باشد و تغییر نمی‌یابد اثبات رابطه $KM = R$ در بخش‌های قبل ارائه شد. برای متاسنتر طولی در سطح آب چنین رابطه‌ای برقرار نیست چنانچه طبق شکل ۲-۱۷۵، M_L تنها در زوایایی غلتش کوچک، ثابت است.

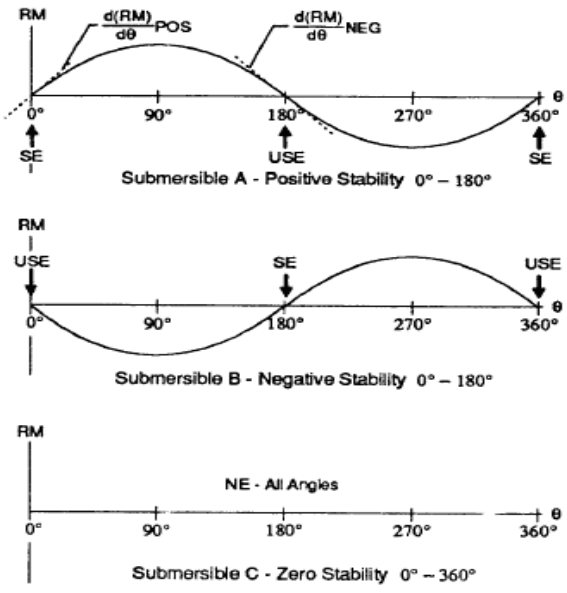
ب- پایداری در زیرآب

نقطه متاسنتری زیردریایی در زیر آب بر مرکز بویانسی منطبق می‌شود و در واقع مرکز بویانسی، وظایف نقطه متاسنتری را بر عهده دارد. علت این تطابق از تعریف نقطه متاسنتری در سطح آب برمی‌آید که از محل تقاطع امتداد مرکز بویانسی (عمود بر خط آب) با خط مرکزی به دست می‌آید و در زیر آب که خط آبخوری وجود ندارد، در واقع مرکز بویانسی همان نقطه متاسنتری خواهد بود یعنی $KB=KM$ و $BG=GM$. حال مطابق شکل ۲-۱۷۵ یک زیردریایی را در زیر آب در نظر بگیرید. در این شکل وضعیت پایداری زیرسطحی در سه حالت پایدار (حالت A)، پایداری خنثی (حالت C) و ناپایدار (حالت B) آمده که در آنها، هم وضعیت پایداری طولی و هم پایداری عرضی بررسی شده است که در هر دو حالت طولی و عرضی، حتی برای زوایایی غلتش بزرگ، بازوی بازگرداننده برابر است با: $GZ=BG.\ Sin\theta$



شکل ۲-۱۷۵: پایداری طولی و عرضی زیردریایی در زیر آب در سه حالت پایدار، ناپایدار و خنثی

در حالت پایدار (حالت A)، مرکز ثقل زیردریایی در زیر مرکز بویانسی قرار داشته و ارتفاع متاسنتری اولیه مثبت است. ($BG > 0$).
در حالت تعادل خنثی (حالت C)، مرکز ثقل و مرکز بویانسی بر هم منطبق هستند و ارتفاع متاسنتری اولیه صفر می‌باشد ($BG = 0$).
در حالت تعادل ناپایدار (حالت B)، مرکز ثقل در زیر مرکز بویانسی قرار دارد و ارتفاع متاسنتری اولیه منفی می‌باشد ($BG < 0$).
بر این اساس می‌توان ممان بازگرداننده ($W \times BG \times Sin\theta$ یا $W \times GZ$) را مطابق شکل ۲-۱۷۶ در نظر گرفت که در حالت پایدار، محدوده پایداری تا ۱۸۰ درجه می‌باشد و در شکل ۲-۱۷۷ می‌توان آن را تصور کرد.



شکل ۲-۱۷۶: وضعیت منحنی GZ در سه حالت پایدار، ناپایدار و خنثی

مقدار BG در زیردریایی حدود ۳-۴ درصد قطر بدنه فشار می‌باشد.

ج- پایداری در حالت انتقال از سطح آب به زیر آب

زیردریایی در هنگام انتقال از سطح آب به زیر آب دچار دو تغییر اصلی می‌شود:

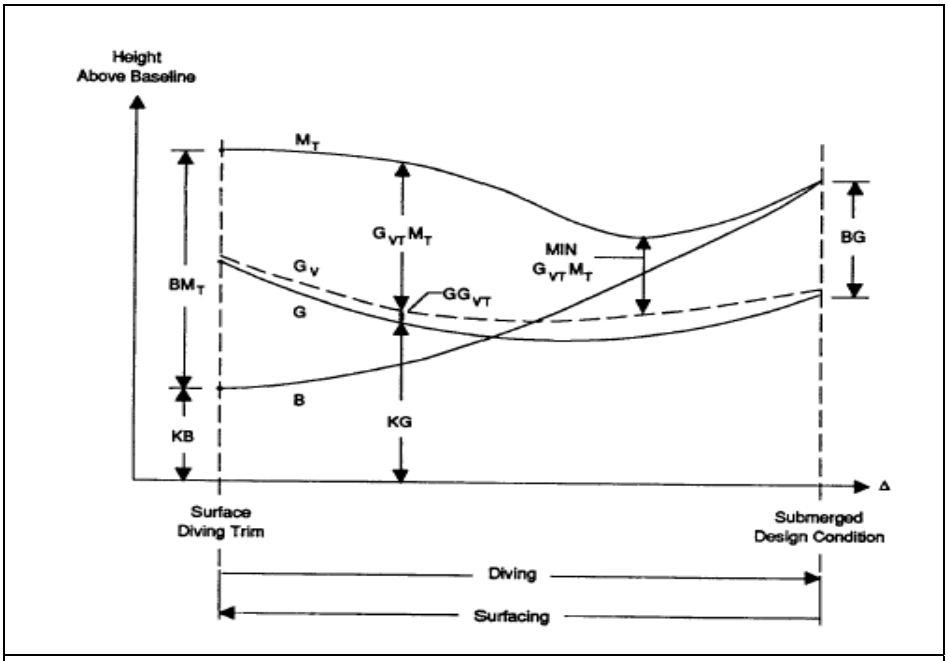
۱) تغییرات مرکز بویانسی : همانطور که بیان شد، مخازن شناوری (بالاست) زیردریایی وظیفه انتقال زیردریایی از سطح آب به زیر آب را بر عهده دارند. به هنگام غوص‌کردن، مخازن شناوری پر از آب می‌شوند و معادل آن، حجمی از بالای بدنه (بالای بدنه فشار، عرشه و برجک به همراه تجهیزات داخل آنها) به زیر آب می‌رود یعنی در واقع یک حجم بویانسی از بدنه زیر آب کم شده و به بالای بدنه افزوده شده است. این انتقال باعث بالا آمدن مرکز بویانسی می‌شود تا جائیکه مرکز بویانسی و مرکز متاسنتری بر هم منطبق می‌شوند.

۲) مرکز ثقل مجازی: می‌دانیم که مخازن شناوری دارای حجم بزرگی حدود ۱۰-۳۰ درصد حجم کل بدنه فشار هستند. در حین انتقال از سطح به زیر آب یا بالعکس، این مخازن در یک محدوده زمانی، به صورت نیمه پر می‌شوند و اثر سطح آزاد زیادی ایجاد می‌کنند.

اثر سطح آزاد منجر به تعریف مرکز ثقل مجازی (G_V) می‌شود (که در بخش اثر سطح آزاد مخازن بررسی شد). این دو اثر باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پایداری و ایجاد حالت بحرانی می‌شود. نمودار تغییرات مشخصه‌های پایداری در انتقال بین سطح و زیر آب در شکل ۲-۱۷۷ برای یک زیردریایی دو پوسته‌ای ترسیم شده است که این تغییرات بررسی می‌شوند. محور عمودی (در این شکل) ارتفاع از زیر بدنه (یا خط مبنا[1]) می‌باشد و محور افقی نیز عمق تغییرات آبخور در انتقال از سطح آب به زیر آب است. همانطور که بیان شد منحنی B یک منحنی صعودی است تا جائیکه وقتی زیردریایی کاملاً به زیر آب رفت، مرکز بویانسی و مرکز متاسنتری (M_T) بر هم منطبق می‌شوند. منحنی (M_T) نیز دارای یک مینیمم است چرا که در زیردریایی‌های دو بدنه، همانطور که بیان شد، مخازن متعددی در فاصله بین پوسته سخت و نرم قرار می‌گیرند که سطح آبخور را در حالت سطحی افزایش می‌دهند و وقتی زیردریایی به زیر آب می‌رود، این مساحت آبخور مضاعف حذف می‌شود، در نتیجه نقطه متاسنتری به یکباره پایین می‌آید. تا جائیکه بر مرکز بویانسی منطبق می‌گردد. اگر زیردریایی تک بدنه باشد، همانطور که بیان شد، مرکز متاسنتری همواره بر مرکز دایره مقطع بدنه، منطبق خواهد ماند و در این نمودار به صورت یک خط مستقیم ترسیم می‌شد.نمودار G نیز به دلیل آبگیری مخازن متغیر در زیر بدنه، در اندکی کاهش ارتفاع دارد و منحنی G_V نیز مرکز ثقل مجازی است که در اثر سطح آزاد مخازن (که اغلب آن مربوط به سطح آزاد مخازن شناوری در حین انتقال است) در

1 - Base Line

آن لحاظ شده است. فاصله بین منحنی M_t و G_V در هر لحظه، بیانگر ارتفاع متاسنتری (GM_t) می‌باشد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، ارتفاع متاسنتری در حین انتقال، در یک لحظه به کمترین مقدار خود می‌رسد که «حالت بحرانی در حین انتقال» نامیده می‌شود. این ارتفاع باید همواره مثبت باشد و در برابر نیروی امواج و جریانات دریایی مقاومت کند و منفی شدن آن به معنای زوایای غلتش بسیار بزرگ است که می‌تواند بسیار خطرآفرین باشد. در برخی مواقع ارتفاع متاسنتری طولی (GM_L) می‌تواند، حالت بحرانی‌تری از ارتفاع متاسنتری عرضی داشته باشد که این مشخصه خاص زیردریایی بوده و در کشتی‌ها هیچگاه چنین اتفاقی نمی‌افتد.



شکل ۲-۱۷۷: تغییرات مرکز ثقل، بویانسی و متاسنتری در انتقال از سطح آب به زیر آب

اگر در حین انتقال از سطح به زیر سطح حالتی اتفاق بیافتد که منحنی M_t، منحنی G_V را قطع کند، این بدین معناست که زیردریایی در یک لحظه به حالت ناپایدار رسیده است و لذا طراحی باید به گونه‌ای صورت پذیرد که این اتفاق هیچگاه رخ ندهد یا اگر به ناچار رخ دهد، زیردریایی به سرعت از این حالت ناپایدار عبور کند.

۴- نمودار غوص زیردریایی

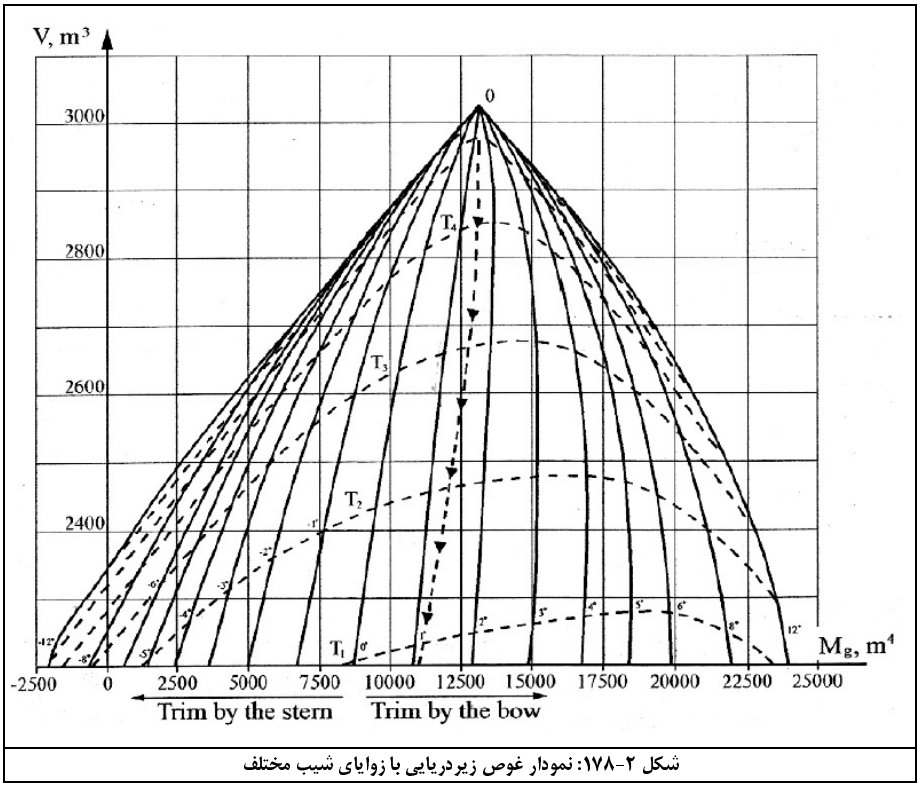
اگر زیردریایی بخواهد بصورت کاملا افقی غوص صعود کند باید مرکز حجم قسمت بیرون آب از نظر طولی هم راستای مرکز حجم مخازن بالاست در هر حالت باشد. چه هنگامی که مخازن بالاست میانی تخلیه یا آبگیری می‌شوند و چه هنگام آبگیری یا تخلیه کلیه مخازن بالاست. اگر مرکز حجم مخازن بالاست خوب طراحی نشده باشند، زیردریایی حین غوص یا صعود با شیب سینه یا پاشنه مواجه می‌شود. اگر محل مخازن بالاست خوب تعبیه شده باشند ولی تخلیه و یا آبگیری آنها بصورت متناسب و همزمان انجام نشود باز هم زیردریایی با شیب سینه یا پاشنه غوص یا صعود می‌کند. اگر این شیب از یک حد معین (حدود ۱۰ درجه) بیشتر شود، زیردریایی با خطر غرق شدن مواجه می‌گردد. نمودار شکل ۲-۱۷۸ که بصورت گنبدی شکل می‌باشد نشان دهنده نقش مخازن بالاست در غوص و صعود است. این نمودار فقط در زیردریایی‌ها وجود دارد.

محور عمودی نمودار، جابجایی یا حجم زیر آب بدنه زیردریایی بر حسب مترمکعب است و محور افقی، ممان شیب دهنده زیردریایی بر حسب m^4 می باشد ($m^3 \times m = m^4$). خطوط ممتد نمودار، نشان دهنده خطوط شیب ثابت می‌باشد که زوایای شیب روی آنها مشخص شده است. خطوط خطچین نیز نشان دهنده خطوط آبخور ثابت هستند. خط خطچین جهت‌دار نیز نشان دهنده مقدار متوسط ممان شیب‌دهنده می‌باشد. مقدار ممان نسبت به مقطع میانی زیردریایی بیان شده است که مقادیر جلوی زاویه صفر درجه(ممان حدود $8750m^4$) نشان دهنده ممان شیب به سینه و مقدار عقب آن نشان دهنده شیب به پاشنه است. ممان شیب‌دهنده به سینه یعنی فاصله مرکز حجم مخازن بالاست نسبت به مرکز حجم زیردریایی باعث ایجاد شیب به سینه شده است. این نمودار بعنوان نمونه مثال، برای یک زیردریایی ترسیم شده است(شکل ۲-۱۷۸). محور عمودی، حجم زیر آب از حالت شناوری (سطحی) تا حالت غوطه وری کامل (زیر سطحی) را نشان می‌دهد که از ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمکعب است. اختلاف این دو عدد که برابر ۵۰۰ متر مکعب می‌شود برابر حجم مخازن بالاست است. ملاحظه می‌شود که نمودارهای شیب ثابت، بصورت گنبدی شکل، در یک نقطه همگرا می‌شوند و این نقطه، حالتی است که زیردریایی کاملا غوطه ور شده است. یعنی زیردریایی وقتی از سطح آب (با شیب سینه یا پاشنه) غوص می‌کند، پس از رسیدن به زیر آب به زاویه شیب صفر درجه (افقی) می‌رسد چرا که پس از غوطه وری کامل، کلیه مخازن بالاست پر از آب شده‌اند و نقش مخازن بالاست، هر چه که بوده فعلا از بین رفته است. اگر زیردریایی مجددا به سطح آب صعود کند، همین وضعیت رخ خواهد داد.

مجددا یادآوری می‌شود که شیب به سینه یا پاشنه حین غوص و صعود می‌تواند دو علت داشته باشد:

۱- جانمایی ناهماهنگ مخازن بالاست (در برخی مواقع صعود با شیب به پاشنه مطلوبست).

۲- عدم تخلیه یا آبگیری همزمان و هماهنگ مخازن بالاست.



شکل ۲-۱۷۸: نمودار غوص زیردریایی با زوایای شیب مختلف

۵- مروری بر مؤلفه‌های خاص پایداری زیردریایی

مشخصه‌های خاص پایداری را نسبت به کشتی‌ها به صورت زیر می‌توان مرور کرد:

۱) محدوده پایداری ۱۸۰ درجه : محدوده پایداری زیردریایی در سطح آب و زیر آب برابر ۱۸۰ درجه می‌باشد در حالیکه در شناورها، محدوده پایداری کمتر از ۹۰ درجه است. حداکثر بازوی بازگرداننده زیردریایی هم به طور ثابت در زاویه ۹۰ درجه رخ می‌دهد که علت آنرا می‌توان ثابت بودن مرکز متاسنتر و رابطه $GZ = GM.Sin(\theta)$ دانست. جالب این است که وقتی زیردریایی از ۱۸۰ درجه عبور می‌کند در محدوده دوم دوباره ناپایدار شده و به حالت اولیه خود باز می‌گرد. یعنی زیردریایی به هر طریقی که کج شود باز هم به حالت اولیه خود باز می‌گردد و واژگون شدن زیردریایی عملاً امکان-پذیر نیست.[۱]

۲) ارتفاع متاسنتری اولیه: ارتفاع متاسنتری اولیه ($GM_{.}$) زیردریایی نسبت به کشتی هم تناژ آن، خیلی کوچکتر است. این مسئله را می‌توان در شیب اولیه منحنی GZ ملاحظه کرد.

۳) اهمیت بیشتر پایداری طولی نسبت به پایداری عرضی در زیر آب: در زیر آب، همانطور که بیان شد ، مرکز بویانسی هم در نقش متاسنتر عرضی و هم متاسنتر طولی است. در کشتی‌ها ارتفاع متاسنتری طولی خیلی بزرگتر از متاسنتر عرضی است که باعث شده پایداری عرضی شناور خیلی مهمتر از پایداری طولی باشد ولی در زیردریایی در زیر آب، نقطه متاسنتری و ارتفاع متاسنتری طولی و عرضی یکسان هستند ($GM_t = GM_L = BG$) در حالی که ممان‌های طولی وارد شده بر بدنه خیلی بزرگتر از ممانهای عرضی هستند لذا پایداری طولی در زیر آب از اهمیت خاصی برخوردار است.

۴) عدم وجود زاویه لل در زیر آب : زاویه لل در زیر آب وجود ندارد. در شناورها اگر GM اولیه شناور منفی باشد، شناور تا حدی غلتش می‌کند که GM صفر شود و به این زاویه غلتش «زاویه لل» گویند. در زیردریایی در زیر آب، اگر BG اولیه منفی باشد، عاملی برای صفر یا مثبت کردن آن وجود ندارد مگر اینکه زیردریایی به اندازه ۱۸۰ درجه (!) دوران کند تا BG صفر شود که این به معنای نابودی آن است.

۱- به همین دلیل میتوان زیردریایی را «گربه دریایی» نامید چراکه گربه از هر طرفی و در هر حالتی از یک بلندی پرتاب شود بر روی چهار دست و پای خود فرود می‌آید و همواره حالت تعادل اولیه را حفظ می‌کند!

۵) ثابت بودن متاسنتر عرضی و متغیر بودن متاسنتر طولی در سطح آب: همانطور که بیان شد، در یک شکل استوانه‌ای، مرکز متاسنتر عرضی همواره بر مرکز استوانه منطبق است و در هنگام غلتش عرضی، قسمت بیرون آمده از آب همواره برابر قسمت فرو رفته در آب است ولی مطابق شکل ۲-۱۷۵ در غلتش طولی حجم‌های قسمت بیرون آمده و فرو رفته با هم برابر نیستند و متاسنتر طولی نمی‌تواند ثابت باشد.

۶) شرط پایداری: در زیردریایی در زیر آب شرط پایداری وابسته به موقعیت B وG نسبت به هم است ولی در سطح آب، موقعیت G و M نسبت به هم، شرط پایداری است و البته ارتفاع متاسنتری چه در سطح آب و چه در زیر آب، برابر شعاع بدنه است.

۶- نسبت وزن به حجم در زیردریایی

اصل حاکم بر این بخش این است که وقتی زیردریایی در زیر آب است، وزن و بویانسی آن دقیقاً با هم برابر هستند. یعنی اگر مخازن شناوری (بالاست) زیردریایی از آن جدا شوند، زیردریایی به حالت غوطه‌ور با ذخیره بویانسی صفر می‌رسد. اتصال مخازن شناوری به آن، به معنای انتقال از حالت غوطه‌وری به شناوری می‌باشد. بنابراین صرفنظر از حجم بویانسی مخازن شناوری، وزن و جابجایی سایر اجزاء باید دقیقاً با هم شوند به گونه‌ای که چگالی کل زیردریایی حدوداً برابر چگالی آب دریا باشد و این چگالی نباید بیشتر از چگالی آب دریا باشد. مثلاً اگر زیردریایی در چگالی $1.02(t/m^3)$ شناور است، چگالی زیردریایی نیز باید برابر همین مقدار باشد. اگر چگالی زیردریایی برابر چگالی آب دریا باشد، زیردریایی با ذخیره بویانسی صفر به حالت غوطه‌ور می‌ماند و اگر چگالی آن بیشتر از آب دریا باشد، زیردریایی با بویانسی منفی غرق می‌شود و اگر چگالی آن کمتر از چگالی آب دریا باشد، زیردریایی با بویانسی مثبت به حالت شناور می‌ماند. بویانسی مثبت باید صرفا در حالتی که مخازن خالی هستند، وجود داشته باشد. یعنی در این حالت چگالی زیردریایی کمتر از آب دریا بوده و زیردریایی به حالت شناور باقی می‌ماند و این همان مفهوم ذخیره بویانسی می‌باشد. اگر ذخیره بویانسی ۱۰ درصد باشد، چگالی زیردریایی به همراه مخازن شناوری خالی تقریبا برابر ۰/۹ است.

نوع شناور	چگالی شناور نسبت به آب دریا
زیردریایی با مخازن شناوری پر (در زیر آب)	**۱**
زیردریایی با مخازن شناوری خالی با ذخیره بویانسی ۱۰ درصد	**۰/۹**
کشتی فریگیت	**۰/۳**
ناو هواپیمابر	**۰/۲**
کشتی فله‌بر	**۰/۸**
نفتکش	**۰/۸۵**

جدول ۲-۱۴: مقایسه چگالی شناورهای مختلف

جدول ۲-۱۴ مقایسه‌ای بین چگالی شناورهای مختلف را بیان می‌دارد. از چگالی‌های فوق می‌توان فهمید که در مقایسه زیردریایی با هر شناور تجاری یا نظامی، فضای باز داخل زیردریایی بسیار محدود و چیدمانی داخلی آن بسیار فشرده است. بطور مثال فضای آزاد داخل یک ناوچه حدود ۳/۵ برابر یک زیردریایی هم تناژ آن است. زیردریایی برای رسیدن به چگالی بالا باید دارای حجم بدنه کوچک و وزن زیاد باشد. عمده اقلام وزنی اصلی زیردریایی شامل سازه بدنه فشار، باطری‌ها و ماشین‌آلات موتورخانه می‌باشد. هر یک از این بخش‌ها حجم خاصی از بدنه را اشغال می‌کنند که درصد حجمی و وزنی هر قسمت از اجزاء زیردریایی را می‌توان طبق جداول ۲-۱۵ و ۲-۱۶ در نظر گرفت.

اجزاء دریایی	درصد وزنی	درصد حجمی
سلاح	**۹**	**۲۸**
سازه	**۴۳**	-
ماشین‌آلات و موتورها	**۳۵**	**۵۶**
قسمت استراحت خدمه	**۴**	**۱۱**
انبارها	**۱**	**۵**
سرب	**۸**	-

جدول ۲-۱۵ : درصد وزنی و حجمی اجزاء زیردریایی دیزل الکتریک

اجزا زیردریایی	درصد وزنی	درصد حجمی
سلاح	۸	۳۰
سازه	۴۵	-
ماشین‌آلات و موتورخانه	۳۵	۵۵
قسمت استراحت خدمه	۴	۱۰
انبارها	۱	۵
سرب	۷	-

جدول ۲-۱۶ : درصد وزنی و حجمی اجزاء زیردریایی اتمی غیر بالستیک

۳۵ – ۴۵ درصد از کل وزن زیردریایی به وزن سازه اختصاص دارد و حدود ۶۰ درصد از وزن سازه نیز وزن بدنه فشار می‌باشد. همچنین حدود نیمی از حجم داخل بدنه به ماشین‌آلات اصلی و فرعی (شامل موتور الکتریکی، دیزل و ژنراتور) اختصاص دارد. ۳۰ درصد از حجم داخل بدنه نیز به سلاح و سیستم سلاح تعلق دارد. حجم باقی مانده برای محل استراحت خدمه نیز برابر ۱۰ درصد است که فضای بسیار محدودی در مقایسه با کشتی‌های نظامی و تجاری می‌باشد. فضای رفاهی برای خدمه در کشتی‌های نظامی حدود ۳۰ درصد می‌باشد. نکته مهم در اینجاست که اگر پس از ساخته شدن زیردریایی، بویانسی از وزن بیشتر باشد، می‌توان با افزودن وزنه‌های سربی به برابری وزن و بویانسی دست یافت. در صورتی که اگر وزن از بویانسی بیشتر باشد ، چاره کار بسیار دشوار است از جمله:

۱) برداشتن سرب‌های موجود در داخل زیردریایی که باعث کاهش پایداری می‌شود چرا که این سرب‌ها از قسمت زیر بدنه برداشته و باعث بالا آمدن مرکز ثقل می‌شوند.

۲) نصب فوم بر روی بدنه (جهت افزایش بویانسی) که مضراتی از جمله افزایش درگ و شکل ظاهری غیر زیبا دارد. ضمن اینکه این فوم‌ها در عمق آب فشرده شده و باعث به هم خوردن تعادل وزن و بویانسی می‌شوند.

بنابراین برای جلوگیری از بروز اضافه وزن در زیردریایی، باید دسته‌بندی جامعی از اقلام وزنی زیردریایی در نظر گرفت و هر جزء وزنی را قبل از نصب شدن بر روی زیردریایی توزین و مختصات محل نصب آن را تعیین کرد به گونه‌ای که بتوان با بیشترین دقت، وزن و مرکز ثقل زیردریایی را تعیین کرد. برای ایجاد ضریب اطمینان کافی در حین انجام طراحی، دو نوع وزنه‌های سربی در زیردریایی در نظر می‌گیرند:

۱) وزنه‌های سربی ثابت: این وزنه‌ها حدود ۱–۳ درصد از وزن کل زیردریایی هستند که در قسمت‌هایی که در آینده احتمال تغییر دارند، قرار می‌گیرند مانند قسمتی که قرار است در آینده در آنجا سلاح نصب شود. بقیه سرب‌ها در داخل کیل قرار می‌گیرند و افزایش پایداری را به دنبال دارند. این وزنه‌ها حتماً باید در زیردریایی وجود داشته باشند.

۲) وزنه‌های سربی احتیاطی: این وزنه‌ها در ابتدای طراحی در حدود ۳–۴ درصد در نظر گرفته می‌شوند و خطاهای طراحی و ساخت را پوشش می‌دهند به گونه‌ای که شاید پس از آب‌اندازی، چیزی از این درصد وزنی باقی نمانده باشد به عبارت دیگر، طراح زیردریایی، این درصد وزنی را در قبال جبران خطاهای انجام شده خرج می‌کند.

برای پرهیز از خطاهای بیش از حد در مرحله طراحی، ضریب اطمینان‌های متفاوتی برای اجزاء زیردریایی در نظر می‌گیرند که برای اقلام مشابه‌سازی شده کمترین ضریب اطمینان و برای اقلام ابداعی یا اقلامی که قبلاً مشابه‌سازی نشده‌اند، بیشترین ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود.

بنابراین تخمین ابعاد و حجم بدنه را باید طوری در نظر گرفت که با وزن زیردریایی برابری کند. برای رسیدن به این مطلوب، یکی از دو روش کلی زیر می‌تواند مبنا قرار گیرد:

۱) مبنای وزنی: در این مبنا سعی بر این است که بتوان با کمترین حجم پوسته سخت، به برابری وزن و بویانسی دست یافت. در این مبنا معمولاً ملاحظاتی مانند راحتی خدمه (فضای مورد نیاز استراحت و رفاه خدمه) و تسهیلات تعمیر و نگهداری (به دلیل چیدمانی فشرده تجهیزات) چندان در اولویت قرار نمی‌گیرند. ولی این مبنا، باعث رسیدن به کمترین حالت وزنی زیردریایی و کمترین سطح خیس بدنه (کاهش درگ) می‌شود.

۲) مبنای حجمی : در این مبنا سعی بر این است که بتوان اجزاء داخل بدنه را به گونه‌ای اصولی جانمایی و چیدمانی کرد که خدمه از راحتی نسبی برخوردار بوده و دسترسی و تعمیر و نگهداری دستگاهها هم راحت‌تر باشند. این روش به کمترین حجم و سطح خیس ممکن بدنه نمی‌رسد و باید درصد وزنی سربهای موجود در بدنه را افزایش داد به گونه‌ای که بتوان به برابری وزن و بویانسی دست یافت. در عوض این مبنا باعث سهولت تعمیر و نگهداری و کاهش هزینه‌های آن می‌شود و خدمه از راحتی بیشتری برخوردارند.

۷- حجم‌بندی مخازن زیردریایی

در این قسمت حجم‌بندی کلیه مخازن زیردریایی بررسی شده است که شامل تعیین حجم و محل قرارگیری مخازن زیر می‌باشد: مخازن متغیر (جبران وزنی)- مخزن جبران اژدر- مخازن تریم- مخزن غوص سریع- مخازن بالاست (بالاست میانی و طرفینی)- مخازن آب شیرین- مخزن سوخت- مخزن فاضلاب- مخزن خن. از این مخازن برخی دارای کاربرد حفظ تعادل و غوص و صعود هستند (مانند مخازن متغیر ، بالاست، غوص سریع ، جبران اژدر و تریم) و برخی برای ذخیره مواد مصرفی (مانند سوخت و آب شیرین) و برخی دیگر دارای کاربرد بهداشتی و دفع مواد زائد (مانند فاضلاب و سیستم خن). تعیین حجم این مخازن تابعی از نیازمندیهای فنی اولیه[1] و سناریوی کاربری[2] می‌باشد. به طور مثال ذخیره آب شیرین وابسته به تعداد خدمه و مدت زمان حضور در دریا و ذخیره سوخت وابسته به حداکثر برد مورد نیاز (در سرعت کروز) می‌باشد. از این مخازن، مخازنی که مربوط به حفظ تعادل و غوص و صعود زیردریایی هستند از اهمیت حیاتی برخوردارند، چرا که زیردریایی در سطح آب باید دارای ذخیره بویانسی کافی باشد و در زیر آب نیز وزن و بویانسی دقیقاً با هم برابر باشند که حفظ تعادل در زیر سطح از دشواری و اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است . افزایش ناخواسته وزن و عدم جبران آن باعث غوص ناخواسته و خطر برخورد با کف دریا یا رسیدن به عمق انهدام سازه‌ای[3] می‌شود و کاهش ناخواسته وزن و عدم جبران آن نیز باعث صعود ناخواسته به سطح آب و خطر برخورد با شناورهای سطحی و یا شناسایی شدن را در پی دارد. از طرفی جابجایی افراد داخل زیردریایی یا جابجایی اجسام یا مصرف مواد مصرفی نباید باعث شیب غیر قابل کنترل شود و باید بتوان در هر شرایط تغییر ممان زیردریایی را از نظر طولی بالانس نمود. برای تعیین محدوده تغییرات وزنی و ممان وزنی ، چندضلعی تریم ترسیم می‌گردد که در این بخش بدان نیز پرداخته خواهد شد.

در زیر به نحوه طراحی حجم‌بندی مخازن اشاره می‌گردد:

۱) تعیین حجم مخزن جبران وزن (مخزن متغیر)

زیردریایی به هنگام غوطه‌وری در زیر آب دارای ذخیره بویانسی صفر است یا به عبارتی وزن و بویانسی زیردریایی دقیقاً با هم برابر هستند. البته در حالت واقعی، اغلب زیردریایی‌های نظامی با اندکی بویانسی مثبت به زیر آب می‌روند که با نیروی بالک‌ها بر آن غلبه می‌کنند ولی در حالت کلی باید بتوان هرگونه افزایش یا کاهش وزن را جبران نمود. البته باید توجه داشت که تغییرات بویانسی نیز باعث به هم خوردن تعادل وزن و بویانسی می‌گردد که وظیفه جبران تغییرات بویانسی نیز بر عهده مخازن متغیر می‌باشد که در اصطلاح کلی به این مخازن، «مخازن جبران وزنی» گویند. این مخزن در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد. مهمترین عوامل تغییرات وزن و بویانسی عبارتند از:

۱-۱) تغییرات چگالی آب دریا

تغییرات چگالی آب دریا باعث تغییرات بویانسی می‌شود چرا که:

$$displaceme\ nt = V \times \rho$$

که با تغییر چگالی، مقدار جابجایی، تغییر می‌کند. تغییرات چگالی هم در نقاط مختلف سطح دریا تغییر می‌کند و هم در عمق آب. در سطح آب چگالی آب دریا از ۱/۰۰۵ در دهانه رودخانه‌ها و مناطق قطبی تا ۱/۰۲۸ در دریاچه‌های نمک و مناطق گرمسیری تغییر می‌کند. چگالی آب در سطح آب همیشه کمتر از عمق آب است. در هر صورت افزایش چگالی در عمق چندان قابل ملاحظه نیست و تغییرات چگالی در نقاط مختلف در سطح آب بررسی می‌شود. فرض کنید مطابق سناریوی کاربری، محدوده تغییرات چگالی در عملیات یک زیردریایی از ۱/۰۲۲ – ۱/۰۲۵ باشد که بدین ترتیب داریم:

V= حجم بدنه

$V(\rho_2 - \rho_1)$:تغییرات نیروی بویانسی

آب اولیه که باید در مخازن جبران زیردریایی موجود باشد تا هنگامی که زیردریایی به منطقه با چگالی کمتر می‌رود، بتواند آنرا تخلیه کند، محدوده ۱/۰۲۵ – ۱/۰۲۲ می‌باشد که داریم:

$$m_1 = V \times (1.025 - 1.022)$$

البته باید توجه داشت که چگالی معیار طراحی زیردریایی معمولا $1.025\ \frac{t}{m^3}$ در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲) فشردگی بدنه در عمق

هر چه بدنه فشار به عمق بیشتری غوص می‌کند، بدنه دچار فشردگی می‌شود و بنابراین کاهش حجم بدنه به معنای کاهش نیروی بویانسی است. بنابراین باید بتوان مقداری از وزن زیردریایی را کاهش داد تا وزن و بویانسی باز هم با هم برابر شوند. این کاهش وزن به وسیله خارج کردن آب داخل مخازن متغیر که به همین منظور در نظر گرفته شده انجام می‌شود. **مقدار فشردگی بدنه در عمق معمولاً ۰/۳٪ حجم بدنه در نظر گرفته می‌شود** که برابر با وزن آب اولیه مورد نیاز موجود در مخزن متغیر برای جبران فشردگی بدنه است. نکته جالب در اینجاست که غوص زیردریایی به عمق آب

1 - Initial Technical Requirement
2 - Model of Employment
3 - crush depth

باعث دو اثر مغایر هم می‌شود: فشردگی بدنه در عمق که باعث کاهش بویانسی می‌گردد و افزایش چگالی آب دریا که باعث افزایش بویانسی می‌شود. لذا زیردریایی به هنگام غوص می‌تواند در یک عمق مشخص که برآیندی از اثرات فوق بر بدنه وارد شود، با برابری وزن و بویانسی به حالت تعادل برسد ولی در حجم‌بندی مخازن، تغییرات چگالی در عمق‌های مختلف در نظر گرفته نمی‌شود.

۱-۳) جبران وزن غذا و آب آشامیدنی

متناسب با مصرف غذا و دفع آنها توسط مخزن فاضلاب، باید آبگیری انجام شود تا وزن و بویانسی با هم برابر بمانند.

۱-۴) جبران وزن غواص‌ها

وزن هر غواص به همراه تجهیزات غواصی و کپسول هوای آن حدود ۱۰۰ کیلوگرم می‌باشد که در صورت حضور نداشتن غواص‌ها، باید آبگیری معادل وزن آنها انجام شود.

۱-۵) جبران وزن هوای فشرده کپسولها

زیردریایی دارای مخازن هوای فشرده متعددی است که مصرف آنها باعث سبکتر شدن زیردریایی می‌شود و باید آبگیری لازم برای جبران آنها انجام شود.

۱-۶) بالا آمدن دکل‌ها

زیردریایی در عمق اسنورکل و عمق پریسکوپ، دکل‌های متعددی را افراشته می‌دارد که هر یک دارای حجم قابل ملاحظه‌ای هستند. اگر این دکل‌ها به صورت نفوذی یا تلسکوپی باشند، بالا آمدن آنها به معنای افزایش حجم بویانسی زیردریایی است. از طرفی در عمق اسنورکل یا پریسکوپ زیردریایی نباید صعود ناخواسته به سطح داشته باشد لذا این مقدار افزایش بویانسی با آبگیری مخزن متغیر جبران می‌شود.

۱-۷) آبگیری مخزن خروج غواص

برای خروج غواص از مخزن در نظر گرفته شده، قبل از باز شدن درب بیرونی مخزن باید حجم داخل مخزن از آب پر شده باشد. این آب از مخزن جبران تهیه می‌شود. معمولاً در زیردریایی‌های نظامی حجم مخزن متغیر ۲/۵-۳ درصد حجم کل بدنه می‌باشد.

۲) تعیین مخزن جبران اژدر

زیردریایی نظامی دارای درصد وزنی مشخصی برای حمل سلاح می‌باشد که بدان *payload* گفته می‌شود و معادل این وزن باید حجم مناسب برای جبران وزن سلاح وجود داشته باشد. این مخزن در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد.

۳) تعیین مخازن تریم

مخازن تریم زیردریایی که حتی‌المقدور در منتهی‌الیه سینه و پاشنه (داخل بدنه) نصب می‌شوند برای تنظیم تریم زیردریایی بکار می‌روند. این مخازن به دو قسمت چپ و راست در سینه و پاشنه تقسیم شده‌اند به گونه‌ای که یکی از مخازن آب را از سینه به پاشنه و دیگری آب را از پاشنه به سینه می‌فرستد. این مخزن در واقع کمک می‌کند که مرکز ثقل و بویانسی از نظر طولی در یک امتداد قرار گیرند. ابتدا تخمین اولیه از حجم این مخازن انجام شود و سپس کارآیی حجم تخمین زده شده، در چندضلعی تریم بررسی می‌گردد. دو روش برای تخمین اولیه حجم مخازن تریم وجود دارد:

۱) ایجاد زاویه شیب ۲۰ درجه ۲)حجم کل آب داخل مخازن تریم سینه و پاشنه نیم درصد از حجم پوسته سخت

۴) تعیین حجم مخزن غوص سریع[1]

مخزن غوص سریع از مخازنی است که به غوص کردن زیردریایی از عمق پریسکوپ کمک می‌کند. دو علت اصلی را می‌توان برای کارایی این مخزن در نظر گرفت که عبارتند از:

۱- برای فرار از خطر در عمق اسنورکل یا پریسکوپ به گونه‌ای که زیردریایی در کمترین زمان ممکن غوص کند.

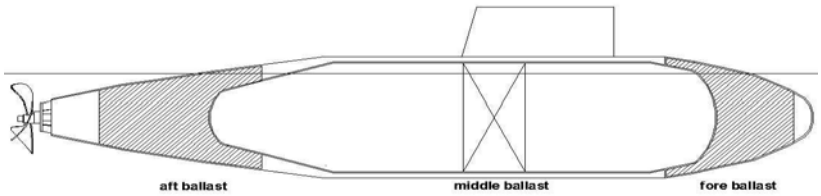
۲- هنگامیکه زیردریایی در امواج حرکت می‌کند، تلاطم امواج از آبگرفتگی کامل بخش‌های آبگیر آزاد (*FF*) جلوگیری می‌کند و لذا با حبس شدن هوا در این فضاها، زیردریایی با آبگیری مخازن بالاست، به سختی غوص می‌کند و حالت شناوری را حفظ می‌نماید. بنابراین غوص کردن در آبهای مواج بسیار مشکل است که البته جهت امواج در راحتی غوص کردن مهم است. ترتیب مشکل بودن غوص در جهت امواج عبارتست از: ۱- از روبرو ۲- از پشت ۳- به صورت عرضی

برای غلبه بر این مشکل از مخزن غوص سریع استفاده می‌شود. اگر زیردریایی با مخازن غوص سریع پر، به زیر آب برود دارای بویانسی منفی می‌باشد لذا پس از رفتن به زیر آب باید بتواند به سرعت مخازن غوص سریع را تخلیه کند. مخزن غوص سریع باید روی مرکز بویانسی یا کمی جلوتر از مرکز بویانسی باشد به گونه‌ای که زیردریایی بتواند با شیرجه سینه به زیر آب برود. این مخزن باید به صورت کپسولی باشد به گونه‌ای که امکان دمیدن آن در عمق، وجود داشته باشد و حجم آن باید به گونه‌ای باشد که کمی بیشتر از حجم دکل‌های افراشته، در حالت عمق پریسکوپی باشد. مزیت عمده این مخازن، قطر بزرگ ورودی مخزن است که تخلیه و آبگیری با دبی بسیار بالا را فراهم می‌کند. این سرعت زیاد آبگیری باعث می‌شود از اینرسی غوص نیز بتوان برای زیر آب رفتن هر چه سریعتر زیردریایی استفاده کرد. این مخرن، داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد.

1 - Negative tank (or) quick dive tank

۵) مخازن بالاست[1]

مخازن بالاست در واقع وظیفه تأمین ذخیره بویانسی زیردریایی را به عهده دارند یعنی در حالت بارگیری معمولی[2]، در سطح آب، حجم بالای خط آبخور برابر حجم مخازن بالاست می‌باشد. این مخازن در سطح آب خالی و در زیر آب پر از آب هستند. تخلیه این مخازن با هوای فشرده انجام می‌شود و این مخازن در بیرون بدنه فشار قرار گرفته و جزء مخازن نرم محسوب می‌شوند. در زیردریایی‌های دو بدنه این مخازن به حداقل سه قسمت در طول بدنه تقسیم می‌شوند (مخازن میانی، سینه و پاشنه) و بین بدنه فشار و بدنه کاذب قرار می‌گیرند (شکل ۲-۱۷۹). ولی در زیردریایی‌های تک بدنه، تنها از فضای سینه و پاشنه (داخل بدنه کاذب و بیرون بدنه فشار) می‌توان برای این منظور استفاده کرد. لذا در زیردریایی‌های تک بدنه نمی‌توان مخزنی را در قسمت میانی به عنوان «مخازن بالاست میانی» در نظر گرفت مگر اینکه این مخزن در داخل پوسته سخت (بدنه فشار) نصب شود که معمولاً محدودیت فضای داخل بدنه، اجازه این امر را نمی‌دهد. کاربرد اصلی مخازن بالاست میانی این است که زیردریایی ابتدا برای حرکت در سطح آب ، کل مخازن را نمی‌دمد بلکه ابتدا با تخلیه مخازن میانی، مقدار اندکی از بدنه را بالای خط آب قرار می دهد و در صورت بروز خطر، زیردریایی می‌تواند در مدت زمان کمتری به زیر آب غوص کند. برای مناطقی که زیردریایی از امنیت منطقه مطمئن نیست قرار گرفتن در این حالت می‌تواند برای زیردریایی بسیار مهم و ارزشمند باشد. این حالت از قرارگیری زیردریایی که نه کاملاً در سطح آب و نه کاملاً در زیر آب است را حالت آماده[3] می‌گوییم.



شکل ۲-۱۷۹: سه دسته از چیدمانی مخازن بالاست در زیردریایی دو بدنه (در این شکل مخازن بالاست میانی دمیده شده و زیردریایی در حالت آماده قرار گرفته است.)

زیردریایی پس از اطمینان از امنیت منطقه، با دمیدن سایر مخازن بالاست می‌تواند کاملاً در حالت سطحی قرار گیرد و با حداکثر ذخیره بویانسی و بیشترین فری برد به حرکت خود ادامه دهد.

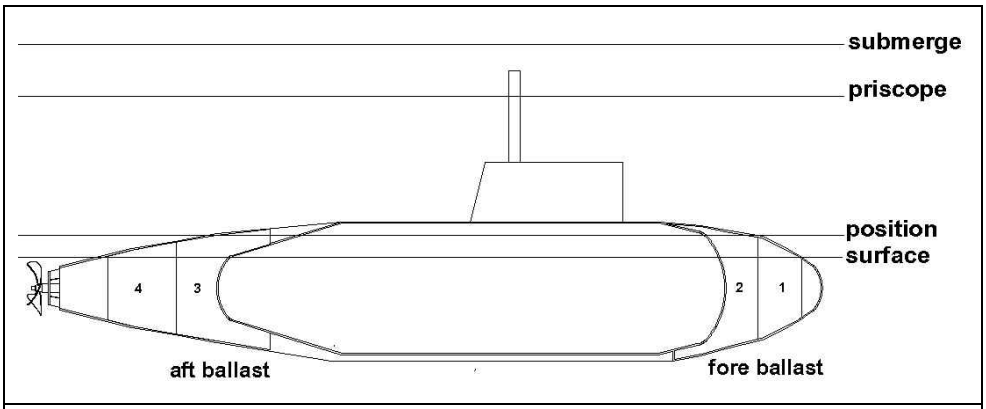
بنابراین حالات زیر را می‌توان برای وضعیت غوطه‌وری و شناوری برشمرد (مطابق شکل ۲-۱۸۰):

۱- حالت غوطه‌وری[4]

۲- حالت پریسکوپی و اسنورکلی[5]

۳- حالت آماده[6]

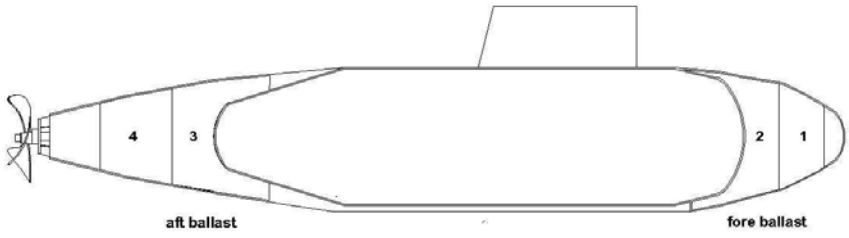
۴- حالت سطحی[7]



شکل ۲-۱۸۰: حالات مختلف عمق حرکت زیردریایی

1 - Balladt tanks
2 - Normal Load
3 - position state
4 - Submerged state
5 - priscope state
6 - position state
7 - surface state

برای زیردریایی‌های تک بدنه به جای مخازن بالاست نصب شده در وسط بدنه می‌توان از دو نیم کردن مخازن بالاست سینه و پاشنه به عنوان مخازن بالاست میانی استفاده کرد (شکل ۲-۱۸۱).



شکل ۲-۱۸۱: در زیردریایی‌های تک‌بدنه، مخازن ۲ و ۳ وظیفه مخازن بالاست میانی را انجام می‌دهند.

مطابق شکل اگر زیردریایی دارای چهار مخزن بالاست مجزا باشد مخازن بالاست ۲ و ۳ در نقش مخازن بالاست میانی می‌باشند به گونه‌ای که دمیدن این مخازن ، زیردریایی را در حالت آماده قرار می‌دهد. مخازن بالاست منتهی‌الیه سینه پاشنه (مخازن ۱ و ۴) را نیز «مخازن بالاست طرفینی» می‌نامیم. بدین ترتیب زیردریایی تک بدنه نیز می‌تواند به کمک این مخازن میانی در حالت آماده قرار گیرد . درصد حجمی مشخصی برای مخازن بالاست نمی‌توان برشمرد بلکه تعیین حجم آنها تابعی از دو پارامتر مهم می‌باشد:

الف) تأمین پایداری مناسب در حالت آماده

ب) مرکز حجم طولی قسمت بیرون آمده از آب در حالت آماده منطبق بر مرکز حجم مخازن بالاست میانی باشد به گونه‌ای که باعث شیب ناخواسته در سطح آب نگردد.

تأمین پایداری در حالت آماده از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است چرا که سطح آبخور در این حالت بسیار کوچک است و بخش اندکی از بالای بدنه در بیرون از آب قرار دارد. از طرفی بدنه در معرض باد و امواج سطح دریا قرار دارد و نیروهای وارد بر آن نسبت به حالت غوطه‌وری بسیار بزرگتر هستند.

۶) مخزن آب شیرین

تعیین حجم این مخزن وابسته به تعداد خدمه و مدت عملیات زیردریایی می‌باشد. این آب برای مصارف نوشیدنی و استحمام مصرف می‌شود. این مخزن در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد.

۷) مخزن سوخت

جهت تامین سوخت لازم برای موتورهای دیزل زیردریایی باید ذخیره سوخت کافی وجود داشته باشد. این مخازن می‌توانند هم در بیرون و هم داخل بدنه فشار نصب شوند.

۸) مخزن فاضلاب

این مخزن برای دفع فاضلاب دستشویی و حمام از زیردریایی استفاده می‌گردد. این مخزن، کپسولی شکل می‌باشد و در داخل بدنه فشار قرار می‌گیرد به گونه‌ای که در عمق آب بتواند تخلیه فاضلاب را انجام دهد.

۹) مخزن خن[1]

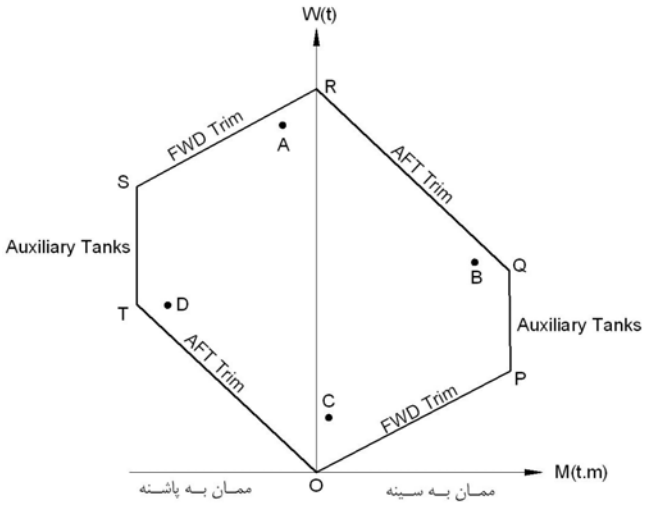
این مخزن برای تخلیه هرز آبهای موتورخانه در عمق آب بکار می‌رود و به صورت کپسولی شکل و در داخل بدنه قرار می‌گیرد.

۸- چندضلعی تریم[2]

❖ چندضلعی تریم چیست؟

چندضلعی تریم که چندضلعی تعادل[3] نیز نامیده می‌شود، وسیله‌ای برای تبیین گرافیکی تغییرات وزن و ممان وزن می‌باشد. محور افقی معرف ممان طولی و محور عمودی معرف وزن می‌باشد. این چندضلعی به کمک وزن آب داخل مخازن و ممان‌هایی که ایجاد می‌کنند ترسیم می‌گردد. مخازنی باید در اینجا لحاظ شوند که آب داخل آنها را می‌توان در مواقع نیاز، تغییر داد. شکل ۲-۱۸۲ نمونه‌ای از این چندضلعی می‌باشد. مخازن تریم جلو، تریم عقب، متغیرها و احیاناً مخزن فاضلاب جزء مخازنی هستند که در ترسیم منحنی تریم به کار می‌آیند چراکه تخلیه، آبگیری یا جابجایی آب داخل آنها می‌تواند باعث ایجاد ممان طولی در زیردریایی گردد. مخازن بالاست، از آنجا که کاملاً پر یا کاملاً خالی هستند، در اینجا به کار نمی‌آیند. در شکل فوق، مخازن تریم و مخازن فرعی دیگر که ممکن است در زیردریایی وجود داشته باشد ترسیم شده است.

1 - Bilge tank
2 - Trim polygon
3 - equilibrium polygon



شکل ۲-۱۸۲: چندضلعی تریم زیردریایی جهت بررسی وزن و ممان‌های وزنی قابل تأمین توسط مخازن

❖ تغییرات مجاز وزن و ممان براساس چندضلعی تریم

در زیردریایی معمولاً چند عامل مهم برای تغییرات وزن و بویانسی وجود دارد:

- تغییر چگالی آب دریا
- فشردگی بدنه
- سناریوهای کاربری
- دفع زباله و فاضلاب
- آبگرفتگی

همچنین مهمترین عوامل تغییر ممان طولی عبارتند از:

- تغییرات وزنی بیان شده که باتوجه به موقعیت آنها، تغییرات ممان ایجاد می‌شود.
- تجمع افراد در یک محل به دلایل: زمان استراحت و تجمع در اتاق استراحت یا آشپزخانه، بروز یک سانحه و تجمع افراد برای رفع نقص
- جابجایی بارهای داخلی (باتوجه به سناریوی کاربری)

این تغییرات وزن و ممان در هر صورت باید در داخل چندضلعی تریم باشند. در واقع اگر مختصات این تغییرات در داخل این چندضلعی باشد، اثر آنها را می‌توان به وسیله مخازن، جبران کرد و اگر این تغییرات در بیرون چندضلعی باشد، با استفاده از مخازن نمی‌توان به طور کامل این وزن‌ها وممان‌ها را خنثی کرد لذا زیردریایی دچار شیب ناخواسته و غیرقابل کنترل می‌شود. این مسئله در زیردریایی‌های میدجت بسیار حساس‌تر است و کوچکترین جابجایی‌ها (حتی جابجایی خدمه)، بر میزان شیب زیردریایی مؤثر و مشهود است. زمان و تعداد تجمع افراد نیز باید طبق منحنی تریم برای یک زیردریایی در هر سناریو به طور مجزا تعریف شده باشد. وجود وزنه‌های سربی این امکان را فراهم می‌کند که با جابجا کردن آنها، نقاط را به داخل چندضلعی منتقل کرد. مثلاً اگر در یک شرایط خاص، قسمت سینه بیش از حد سنگین شده است به طوریکه خارج از چندضلعی قرار می‌گیرد با عقب دادن وزنه‌های سربی می‌توان این نقطه را به داخل چندضلعی هدایت کرد. این وزنه‌ها در زیردریایی‌های بسیار کوچک در داخل بدنه هستند. در سایر زیردریایی‌ها نیز سرب داخل کیل‌ها را می‌توان برای این منظور استفاده کرد. این روش در صورتی موثر است که حالت ایجاد شده، استثنایی و موقتی باشد به گونه‌ای که پس از رفع شدن این شرایط خاص، بتوان سرب‌ها را به محل اول خود بازگردانید.

❖ ممان‌گیری تغییرات وزن

در ابتدا لازم به ذکر است که نیروهای اعمال شده در این چندضلعی و ممان حاصل از آنها، فقط ممان‌های هیدرواستاتیکی هستند و ممان‌های هیدرودینامیکی در اینجا درنظر گرفته نمی‌شوند. ممان‌گیری باید حول یک نقطه مبنا باشد که می‌توان حول هر نقطه‌ای انتخاب شود به شرطی که تغییرات وزن اعمال شده نیز حول ممان نقطه باشد. از آنجا که زیردریایی در زیر آب حول مرکز بویانسی و در سطح آب حول مرکز شناوری (مرکز سطح صفحه آبخور) شیب می‌کند، بهتر است یکی از این نقاط یا ترجیحاً مرکز بویانسی به عنوان نقطه مبنای ممان‌گیری انتخاب شود. چراکه چندضلعی تریم برای حالت غوطه‌وری (زیر آب) ترسیم می‌شود. لازم به یادآوری است که چندضلعی تریم فقط براساس وزن و ممان حاصل از آب داخل مخازن ترسیم می‌گردد و تغییرات وزن و ممان اشیاء و افراد داخل زیردریایی باید به صورت نقاطی داخل این چندضلعی قرار گیرند و اثر مستقیمی بر رسم چندضلعی

تریم ندارد. چندضلعی تریم را از آنچه در طراحی به دست آمده باید اندکی کوچکتر فرض کرد تا خطاهای طراحی یا اشکالات ساخت (کالیبره کردن مخازن) جبران شود.

❖ نحوه ترسیم چندضلعی تریم

برای ترسیم این چندضلعی ابتدا کلیه مخازن خالی فرض می‌شوند، سپس مخازن سینه به ترتیب پر می‌شوند تا به قسمت پاشنه برسد. (از قبیل مخازن تریم و متغیر). اگر ممان به سمت سینه (ساعتگرد) مثبت و ممان به سمت پاشنه (پادساعتگرد)، منفی فرض شود با پر شدن از سینه به پاشنه باعث می‌شود سمت راست چندضلعی تکمیل گردد. سپس بار دیگر مخازن از قسمت پاشنه به سمت سینه پر می‌شوند و سمت چپ نمودار تکمیل می‌گردد. این توضیحات، طبق شکل عبارتست از: (برای یک زیردریایی کوچک به طور مثال):

پر شدن مخازن از قسمت سینه:

- پر شدن مخزن تریم جلو، انتقال از O به P: ایجاد ممان مثبت رو به سینه و افزایش وزن
- پر شدن مخازنی که تقریباً در محل مرکز بویانسی هستند: انتقال از P به Q: صرفا باعث افزایش وزن می‌شود و ممان طولی ایجاد نمی‌کند.
- پر شدن مخزن تریم عقب: انتقال از Q به R: ایجاد ممان منفی رو به پاشنه و افزایش
- بدین ترتیب قسمت راست چندضلعی تریم تکمیل می‌شود. برای تکمیل قسمت چپ چندضلعی تریم، فرض می‌کنیم مخازن از پاشنه به سینه پر شوند:
- پر شدن مخزن تریم عقب: انتقال از O به T
- پر شدن مخازن میانی، انتقال از T به S
- پر شدن مخزن تریم سینه: انتقال از S به R

هم اکنون هر حالتی از بارگذاری که وزن و ممان وزن خاص را به دنبال دارد، باید در داخل این چندضلعی قرار گیرد به طور مثال چهار حالت حدی (نقاط A و B و C و D) برروی این نمودار توضیح داده می‌شوند:

- وضعیت A: زیردریایی در حالت سبک در آب شور
- وضعیت B: زیردریایی دارای پاشنه سبک در چگالی متوسط آب دریا
- وضعیت C: زیردریایی در حالت سنگین در آب شیرین
- وضعیت D: زیردریایی در حالت سینه سبک در چگالی متوسط آب دریا

هر حالت تغییر وزن و ممان وزنی که احتمال دارد زیردریایی با آن مواجه شود باید به صورت نقاطی در داخل چندضلعی تریم قرار گیرند در غیر اینصورت باید حجم مخازن را به گونه‌ای افزایش داد که باعث بزرگتر شدن چندضلعی تریم شود و هیچ نقطه‌ای از تغییرات و ممان وزن خارج از چندضلعی قرار نگیرد. استفاده از وزنه‌های سربی نیز راه حل دیگری است که قبلاً بیان شد.

❖ مولفه‌های استاندارد پایداری زیردریایی طبق استاندارد دفاعی ایران (IDS)

هر زیردریایی باید در تمام حالات بارگیری بتواند قوانین استاندارد زیر را ارضا کند. در غیر اینصورت با تغییر چیدمانی و سناریوی بارگیری زیردریایی باید با کاهش KG ، مؤلفه‌های استاندارد زیر را ارضا کرد:

الف- مساحت زیر منحنی GZ

- مساحت زیر منحنی GZ نباید کمتر از مقادیر زیر باشد. توجه شود که واحد GZ بر حسب متر و زاویه بر حسب درجه می‌باشد.

۱) ۱/۳۸ متر- درجه تا زاویه ۳۰ درجه

۲) ۲/۵۲ متر- درجه تا زاویه ۴۰ درجه یا تا زاویه‌ای که یکی از سوراخ‌های غیر آب‌بند بدنه داخل آب می‌شود (در صورتی که این زاویه کمتر از ۴۰ درجه باشد).

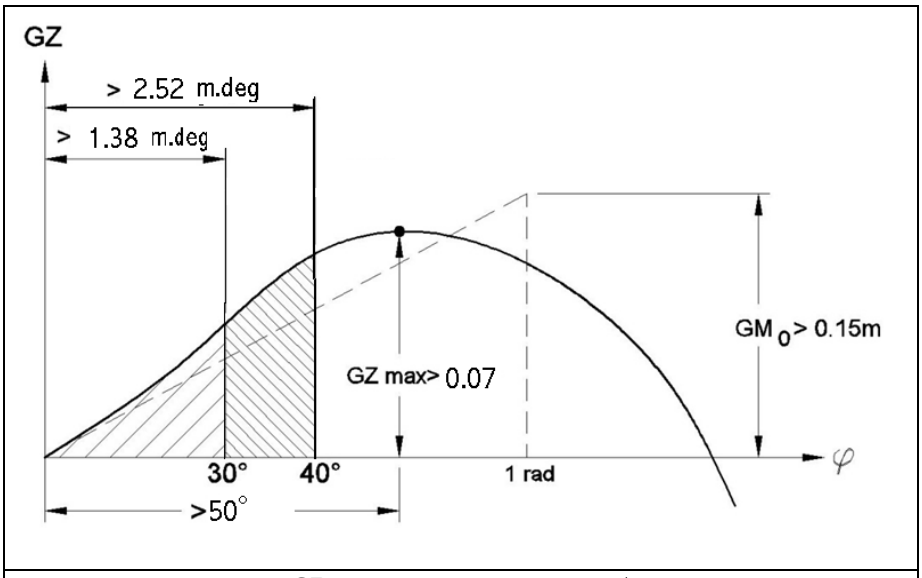
ب) مقدار GZ نباید در زاویه ۳۰ درجه یا بزرگتر از آن، کمتر از ۷ سانتیمتر باشد.

ج) حداکثر مقدار GZ نباید در زاویه‌ای کمتر از ۵۰ درجه اتفاق بیافتد.

د) ارتفاع متاسنتری عرضی اولیه (GM_0) نباید کمتر از ۰/۱۵ متر باشد. در بدترین شرایط بارهای متغیر (سلاح، سوخت و غیره) نباید این مقدار کمتر از ۰/۱۳ متر باشد.

این مؤلفه‌های استاندارد را می‌توان در شکل ۲-۱۸۳ ملاحظه کرد.

- اگر مقدار GM_o بیش از ۰/۳ متر بدست آید باید مسئله شتاب حرکات رول در حین صعود به سطح بررسی دقیق‌تری شود.



شکل ۲-۱۸۳ : مولفه‌های استاندارد منحنی GZ

– در حین انجام تعمیرات زیردریایی که اقلام سنگین و زیادی، اضافه یا کم یا جابجا می‌شوند، همواره باید حداقل شرایط زیر برآورده گردد[۱۵]:

- مقدار GM_V نباید کمتر از ۱۰ سانتیمتر شود.
- مقدار کجی در معرض وزش باد ۳۰ گره نباید بیش از ۷ درجه باشد.

معرفت، درّ گرانی است به هرکس ندهندش
پر طاووس قشنگ است به کرکس ندهندش

بخش پنجم:
به گل نشستن و پایداری
در حالت صدمه دیده

فصل۱:[۱] به داک بردن و به گل نشستن شناور

در این بخش دو مبحث که از نظر پایداری شباهت زیادی به هم دارند بررسی می‌شود: به داک بردن و به گل نشستن شناور.

❖ به داک بردن شناور

وقتی شناور وارد داک (حوضچه تعمیر) می‌شود باید بر روی بلوک‌های قرار داه شده در کف داک، بنشیند. از طرف بلوکها، نیروی رو به بالای P بر شناور وارد می‌شود که این نیرو عامل کاهش پایداری است که آن را به دو طریق می‌توان در نظر گرفت:

۱) بالا رفتن مرکز ثقل (افزایش KG)

۲) پایین آمدن مرکز متاسنتر

این موارد به صورت زیر بررسی می‌شوند:

۱) بالا رفتن مرکز ثقل را می‌توان مطابق شکل ۲-۱۸۴ توجیه کرد.

اگر وزن شناور W و نیروی P ناشی از بلوکها باشد، برآیند آنها W-P خواهد بود که داریم:

$$W.y = P.x$$

$$x = KG_1.\sin\theta$$

$$y = G_0G_1.\sin\theta$$

$$W \times G_0G_1 \times \sin\theta = P \times KG_1 \times \sin\theta$$

$$W \times G_0G_1 = P \times KG_1$$

$$W \times G_0G_1 = P \times (KG_0 + G_0G_1)$$

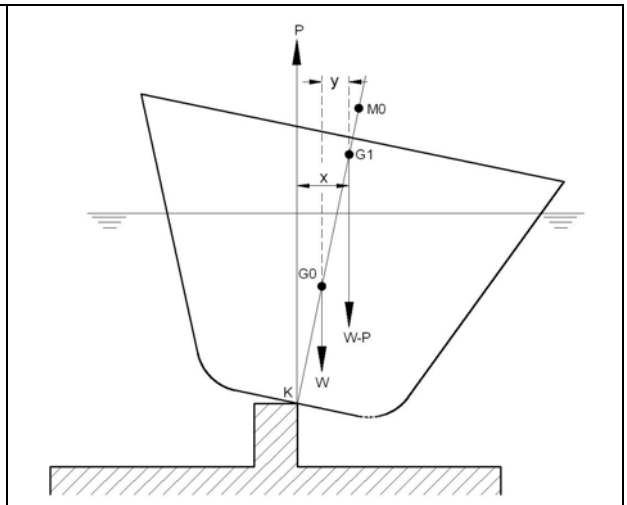
$$W \times G_0G_1 = P \times KG_0 + P \times G_0G_1$$

$$(W - P)G_0G_1 = P \times KG_0$$

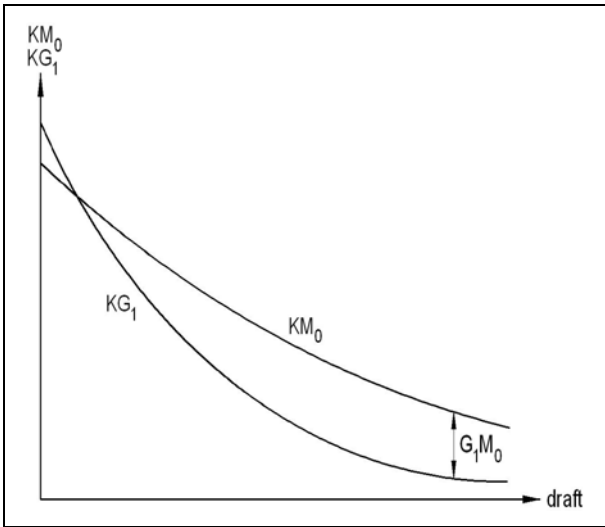
$$\boxed{G_0G_1 = \frac{P \times KG_0}{W - P}}$$

G_0G_1 نشان‌دهنده افزایش ارتفاع مرکز ثقل ناشی از نشستن شناور روی بلوکها می‌باشد که باعث تضعیف پایداری می‌گردد چرا که ارتفاع متاسنتری اولیه برابر G_0M_0 و در حالت نشستن روی بلوکها برابر G_1M_0 می‌باشد. هر چه آب داخل داک بیشتر تخلیه می‌شود و آبخور شناور کاهش می‌یابد، مقدار نیروی P بزرگتر و کاهش پایداری شدیدتر می‌شود، به گونه‌ای که نمودار شکل ۲-۱۸۵ را می‌توان برای تغییرات آبخور و مقدار ارتفاع متاسنتری در نظر گرفت.

۱- منابع:[۱۲ و ۱۴ و ۱۹]

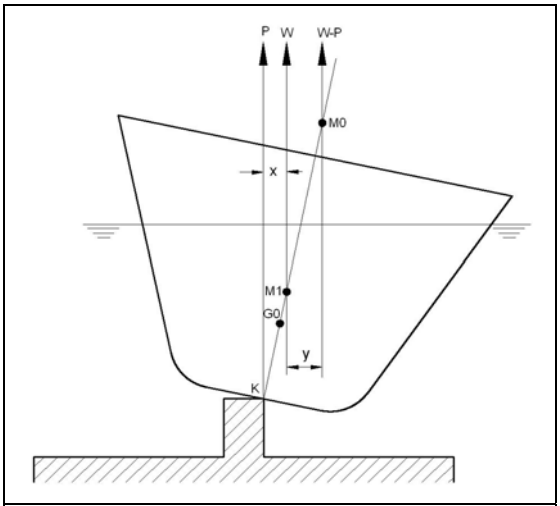


شکل ۲-۱۸۴: تأثیر نیروی بلوک‌های داک (P) بر افزایش KG



شکل ۲-۱۸۵: تغییرات پایداری با تغییر ارتفاع آب داخل داک

۲) پایین آمدن مرکز متاسنتری از نشستن شناور در داک را می‌توان مطابق شکل ۲-۱۸۶ در نظر گرفت. فرض کنید وزن شناور W باشد در نتیجه نیروی بویانسی برابر W رو به بالا باید وجود داشته باشد. حال بخشی از نیروی رو به بالا را P جبران کرده است و برای رسیدن به نیروی رو به بالای W، مقدار نیروی $W\text{-}P$ باید در محل نشان داده شده در شکل ۲-۱۸۶، بر شناور وارد شود که برآیند آنها نیروی W شود. این نیروی برآیند W، خط مرکزی شناور را در نقطه M_1 قطع می‌کند که می‌توان تصور کرد که نقطه متاسنتر از M_0 به M_1 منتقل شده باشد (با فرض زوایای غلتش کوچک). یعنی ارتفاع متاسنتر اولیه که G_0M_0 بوده است به G_0M_1 تغییر یافته است.



شکل ۲-۱۸۶: تأثیر نیروی بلوک‌های داک (P) بر کاهش ارتفاع متاسنتر

محاسبه مقدار کاهش ارتفاع متاسنتر (M_0M_1) با توجه به شکل ۲-۱۸۶ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$(W - P).y = P.x$$

$$x = KM_1.\text{Sin}\theta$$

$$y = M_0M_1.\text{Sin}\theta$$

$$(W - P) \times M_0M_1 \times \text{Sin}\theta = P \times KM_1 \times \text{Sin}\theta$$

$$W \times M_0M_1 - P \times M_0M_1 = P \times KM_1$$

$$W \times M_0M_1 = P \times KM_1 + P \times M_0M_1$$

$$\boxed{M_0M_1 = \frac{P \times KM_0}{W}}$$

مثال) کشتی مدل ۱ در سناریوی وزنی اصلی باید به حوض خشک انتقال یابد. مقادیر GM را در حین کاهش آب داخل حوضچه از ۲ تا ۵ متر بدست آورید. آبخوری را که شناور در آن ناپایدار می‌شود تعیین کنید.

حل)

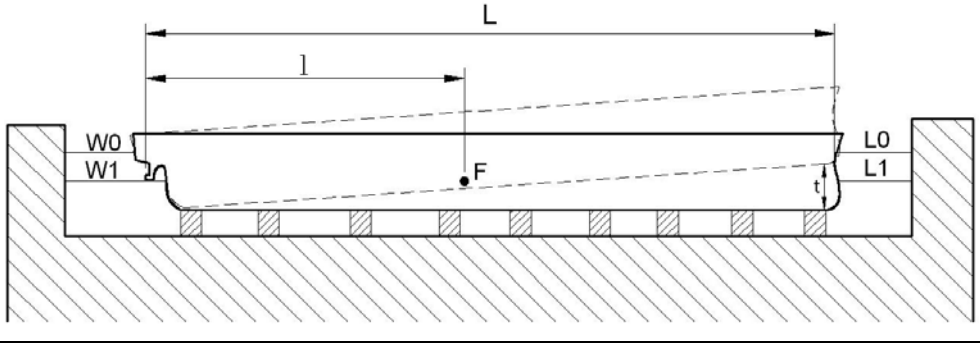
$$G_0G_1 = \frac{P \times KG}{W - P}$$

آبخور	جابجایی اولیه	W-P (t)	P (t)	KG_0	G_0G_1	KG_1	KM_0	G_1M_0
5	3560	3560	0	5.1	0.00	5.10	6.14	1.04
4	3560	2665.4	894.6	5.1	1.71	6.81	6.13	-0.68
3	3560	1858	1702	5.1	4.67	9.77	6.5	-3.27
2	3560	1135.4	2424.6	5.1	10.89	15.99	7.78	-8.21

عبارت *W-P* ذکر شده در جدول، در واقع بیانگر مقدار جابجایی در هر آبخور می‌باشد که به کمک آن و جابجایی اولیه شناور، مقدار *P* محاسبه می‌شود. شناور در آبخوری بین ۵ و ۴ متر ناپایدار می‌شود. این آبخور برابر ۴/۲ متر می‌باشد. بدین ترتیب وقتی آبخور در داخل داک به ۴/۲ متر می‌رسد، باید تکیه‌گاه‌های لازم برای جلوگیری از یکبر شدن شناور در نظر گرفته شود.

❖ لحظه بحرانی در ورود شناور به داک با شیب سینه یا پاشنه

با پایین‌آمدن سطح آب، *P* بطور یکنواخت شروع به افزایش می‌کند و پایداری شناور پیوسته کاهش می‌یابد. حالت بحرانی هنگامی است که کشتی با شیب زیاد وارد داک شده و با بلوکهای سینه و پاشنه تماس پیدا می‌کند و آبخور شناور در داخل داک به حدی کم شده است که سینه شناور در حال نشستن روی بلوک‌ها می‌باشد (شکل ۲-۱۸۷). این حالت به لحظه بحرانی معروف است.



شکل ۲-۱۸۷: نمایش لحظه بحرانی در حالتی که شناور با شیب وارد داک می‌شود.

اگر شناور با شیب t وارد حوضچه شود، نیروی بحرانی P به صورت زیر بدست می‌آید:

$$t = \frac{P \times l}{MCTC} \qquad P = \frac{t \times MCTC}{l}$$

بدین ترتیب نیروی *P* که در محاسبه میزان کاهش پایداری(M_0M_1 یا G_0G_1)لحاظ می‌گردد، از مقدار شیب شناور به هنگام ورود به داک به دست می‌آید. ابتدا سینه یا پاشنه روی یکی از بلوکها می‌نشیند که بحرانی‌ترین موقعیت را به دلیل داشتن بیشترین فاصله از مرکز شناوری دارد. بدین ترتیب در بحث به داک بردن، ارتباط نزدیک و وابسته‌ای بین پایداری عرضی و طولی برقرار می‌شود. همچنین از مقدار حداکثر مجاز *P* (که ارتفاع متاسنتر را صفر کند) می‌توان حداکثر مقدار زاویه شیب مجاز در ورود به داک را محاسبه کرد. در برخی موارد که سینه یا پاشنه شناور دچار آبگرفتگی شده باشد، شیب زیاد سینه یا پاشنه اجتناب‌ناپذیر است و باید از حجم‌های بویانسی جداگانه‌ای برای کاهش شیب استفاده کرد.

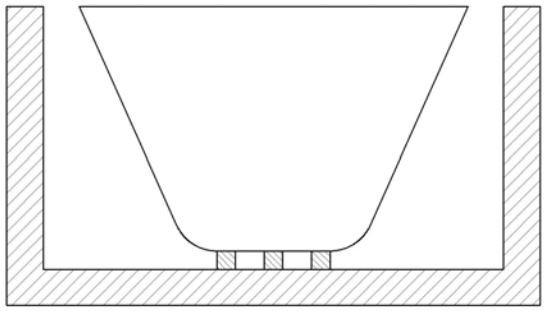
معمولاً برای کاهش احتمال واژگونی شناور در هنگام به داک بردن، اقدامات زیر انجام می‌شود:

۱- ورود شناور بدون زاویه شیب به داخل داک

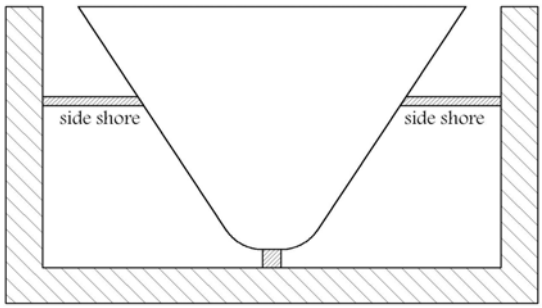
۲- استفاده از بلوکهای عرضی چند ردیفه به گونه‌ای که شناور فقط بر روی یک بلوک میانی تکیه نکند (مطابق شکل ۲-۱۸۸) در این هنگام نیروی P به طور متقارن بر بدنه وارد می‌شود.

۳- استفاده از تکیه‌گاههای عرضی[1] بین شناور و داک که از واژگونی شناور جلوگیری می‌کند (شکل ۲-۱۸۹).

1 - side shore



شکل ۲-۱۸۸: افزایش تعداد بلوک‌ها در عرض بدنه، عاملی برای کاهش حالت بحرانی



شکل ۲-۱۸۹: استفاده از تکیه‌گاه‌های جانبی برای جلوگیری از واژگونی شناور

مثال) شناور مدل ۱ می‌خواهد با آبخور سینه ۳/۶ متر و آبخور پاشنه ۴/۴ متر با $KG = 5.6\ m$ وارد حوضچه خشک شود. مطلوبست:
الف) GM در لحظه بحرانی ب) ممان بازگرداننده در زاویه غلتش ۵ درجه ج) آبخور سینه و پاشنه در لحظه بحرانی

حل) آبخور متوسط در این حالت برابر ۴ متر می‌باشد. از مشخصات هیدرواستاتیکی در آبخور ۴ متر داریم:

$d_a = 4.4\ m$

$d_f = 3.6\ m$

$t = 4.4 - 3.6 = 0.8\ m$

$KG_0 = 5.6\ m$

$KM_0 = 6.13\ m$

$MCTC = 38.38\ \frac{t.m}{cm}$

$TPC = 8.51\ \frac{t}{cm}$

از وسط شناور $LCF = 2.32\ m$

از عمود پاشنه F فاصله $l = 40 - 2.32 = 37.68\ m$

$\Delta = 2665.4\ t$

الف)

$$P = \frac{t \times MCTC}{l} = \frac{0.8 \times 38.38}{37.68} = 0.81\ t$$

$$G_0G_1 = \frac{P \times KG_0}{W - P} = \frac{0.81 \times 5.6}{2665.4 - 0.81} = 0.0017\ \ m = 1.7\ mm$$

$$M_0M_1 = \frac{P \times KM_0}{W} = \frac{0.81 \times 6.13}{2665.4} = 0.0018 = 1.8\ mm$$

ب) ممان بازگرداننده به دو روش قابل محاسبه است:

روش اول:

$$G_1M_0 = KM_0 - KG_0 - G_0G_1 = 6.13 - 5.6 - 0.0017 = 0.5283\ \text{m}$$

ممان بازگرداننده $= (W - P) \times G_1M_0 \times Sin\theta = (2665.4 - 0.81) \times 0.5283 \times Sin5^\circ = 123.1\ t.m$

$$G_0M_1 = KM_0 - KG_0 - M_0M_1 = 6.13 - 5.6 - 0.0018 = 0.5282\ \text{m}$$

ممان بازگرداننده $= W \times G_0M_1 \times Sin5^\circ = 2665.4 \times 0.5282 \times Sin5^\circ = 122.7\ t.m$

ملاحظه می‌شود که جواب در هر دو روش تقریبا برابر هستند.

ج)

کاهش آبخور ناشی از نیروی **P** $= \frac{P}{TPC} = \frac{0.81}{8.51} = 0.095\ cm$

تغییر شیب پاشنه $= \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{80} \times 0.8 = 0.377\ m = 37.7\ cm$

تغییر شیب سینه $= t - t_a = 0.8 - 0.377 = 0.423\ m = 42.3\ \ cm$

	آبخور پاشنه (cm)	آبخور سینه (cm)
آبخور اولیه	440	360
بالا آمدگی ناشی ازp	-0.095	-0.095
تغییر شیب	-37.7	42.3
مجموع	402.2	402.2

مثال) شناور مدل ۱ در شرایط مثال قبل وارد حوضچه خشک می‌شود. عمق اولیه آب در حوضچه برابر ۵ متر می‌باشد. مطلوبست:
الف) تعیین GM شناور را بعد از پائین آمدن سطح آب به اندازه ۱ متر.
ب) تعیین آبخورها پس از کاهش عمق آب فوق

عمق آب	5 m
آبخور پاشنه	4.4 m
فاصله پاشنه از کف حوضچه	0.6 m
کاهش عمق آب	1 m
تغییر آبخور پس از نشستن پاشنه	0.4 m

حل: با توجه به شرایط مثال قبل داریم:

تغییر شیب پاشنه + بالا آمدگی ناشی از P = تغییر آبخور پاشنه

$$-0.4 = \frac{-P}{TPC} - \frac{l \times P \times l}{L \times MCTC}$$

الف) با فرض اینکه شناور از عمود پاشنه روی بلوکهای حوضچه می‌نشیند داریم: $d = l$. لذا داریم:

$$-0.4 = \frac{-P}{8.51} - \frac{(37.68)^2 \times P}{79.3 \times 38.38}$$

$$15126\,P = 10360$$

$$P = 0.68\ t$$

$$G_0G_1 = \frac{P \times KG_0}{W - P} = \frac{0.68 \times 5.6}{26654 - 0.68} = 0.0014\,m = 1.4\ mm$$

$$G_0M_0 = KM_0 - KG_0 = 6.13 - 5.6 = 0.53\ m$$

$$G_1M_0 = G_0M_0 - G_0G_1 = 0.53 - 0.0014 = 0.5286\,m$$

ب)

P بالا آمدگی ناشی از $= \frac{P}{TPC} = \frac{0.68}{8.51} = 0.08\ \ cm$

تغییر شیب: $t = \frac{P \times l}{MCTC} = \frac{0.68 \times 37.68}{38.38} = 0.667\ \ cm$

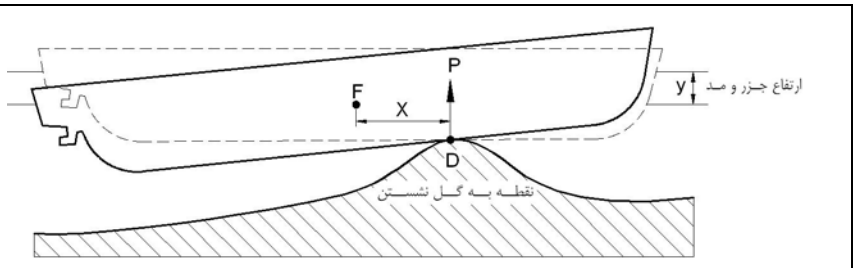
$$t_a = \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{79.3} \times 0.667 = 0.317\,cm$$

$$t_f = t - t_a = 0.667 - 0.317 = 0.35\,cm$$

	آبخور پاشنه(cm)	آبخور سینه(cm)
آبخور اولیه	440	360
بالا آمدگی ناشی ازp	-0.08	-0.08
تغییر شیب	-0.317	0.35
مجموع	439.6	360.27

❖ به گل نشستن شناور

در مبحث به گل نشستن نیز همانند به داک بردن، نیروی P باعث کاهش پایداری می‌شود که این نیروی P نیروی ناشی از کف دریا بر زیر شناور می‌باشد و وابسته به میزان جزر و مد آب دریا است (شکل ۲-۱۹۰).



شکل ۲-۱۹۰: کاهش پایداری ناشی از به گل‌نشستن از یک نقطه

این کاهش پایداری را می‌توان همانند به داک بردن شناور با بالا رفتن G یا پایین آمدن M بررسی کرد. در حالت به گل نشستن، تغییر آبخور در محل تماس با بستر دریا معلوم است

که البته وابسته به میزان جزر و مد محل به گل نشستن شناور می‌باشد. مطابق شکل ۲-۱۸۴، شناوری به طول L در نقطه D به فاصله x از مرکز شناوری، با بستر دریا برخورد کرده است. بر اثر جزر و مد، سطح آب به اندازه y تغییر نموده و آبخور شناور تغییر یافته است. تغییر آبخور در محل تماس شناور با بستر دریا، برابر با همان مقدار افت جزر و مد یعنی y است. بنابراین: تغییر $y = \frac{P}{TPC} + \frac{x}{L} \times \frac{P \times x}{MCTC}$

آبخور در محل C

که از این رابطه مقدار P مجهول و قابل محاسبه است (با فرض مشخص بودن میزان جزر و مد (y)). بعد از مشخص شدن P، می‌توان آبخورهای جدید را محاسبه کرد. می‌دانیم که مقادیر $MCTC$ و TPC در آبخورهای مختلف تغییر می‌کنند ولی در حل مسائل، برای ساده‌تر شدن حل، این مقادیر را ثابت فرض می‌کنند و در واقع فرض می‌شود تغییرات آبخور، اندک باشد. اگر تغییرات آبخور زیاد باشد باید از مقادیر مختلف $MCTC$ و TPC در آبخور در هنگام جزر و هنگام مد استفاده کرد.

مثال) شناور مدل ۱ به آبخور سینه ۳/۶ متر و آبخور پاشنه ۴/۴ متر با $KG = 5.6 \quad m$ در نقطه‌ای به فاصله ۶۰ متر از عمود پاشنه به گل می‌نشیند. اگر جزر آب در آن منطقه برابر ۵۰ سانتی‌متر باشد مطلوبست:

الف- بررسی پایداری شناور پس از جزر آب **ب- آبخورهای سینه و پاشنه پس از جزر آب**

حل: در آبخور متوسط ۴ متر، اطلاعات هیدرواستاتیکی در مثال قبل ارائه شده است.

از وسط شناور $LCF = 2.32 \quad m$

از عمود پاشنه $LCF = 40 - 2.32 = 37.68 \quad m$

$$x = 60 - 37.68 = 22.32 \quad m \qquad , \qquad y = \frac{P}{TPC} + \frac{x}{L} \times \frac{P.x}{MCTC}$$

$$50 = \frac{P}{8.51} + \frac{22.32}{80} \times \frac{P \times 22.32}{38.38} \qquad \Rightarrow \qquad 50 = \frac{P}{8.51} + 0.1P \qquad \Rightarrow$$

$$50 = 0.11P + 0.16P = 0.27P \qquad \Rightarrow \qquad P = 185.2 \quad t$$

الف- تعیین مقدار GM:

$$G_0G_1 = \frac{P \times KG_0}{W - P} = \frac{185.2 \times 5.6}{35000 - 185.2} = 0.03 \quad m \qquad , \qquad KM_0 = 6.13 \quad m$$

$$G_1M_0 = 6.13 - 0.03 = 6.1 \quad m$$

از آنجا که GM هنوز مثبت است لذا شناور پایدار می‌ماند.

ب- تعیین مقدار آبخورهای سینه و پاشنه

کاهش آبخور ناشی از نیروی P $= \frac{P}{TPC} = \frac{185.2}{8.51} = 21.76 \quad cm$

تغییر شیب $t = \frac{P \times x}{MCTC} = \frac{185.2 \times 22.32}{38.38} = 107.7 \quad cm$

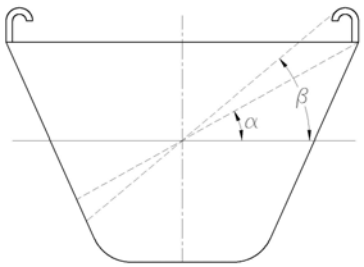
تغییر شیب پاشنه $= \frac{l}{L} \times t = \frac{37.68}{80} \times 107.7 = 50.72 \quad cm$

تغییر شیب سینه $= t - t_a = 107.7 - 50.72 = 56.98 \quad cm$

	آبخور پاشنه	آبخور سینه
آبخور اولیه	440	360
کاهش آبخور ناشی از P	-21.76	-21.76
تغییر شیب	50.72	-56.98
مجموع	468.96	281.26

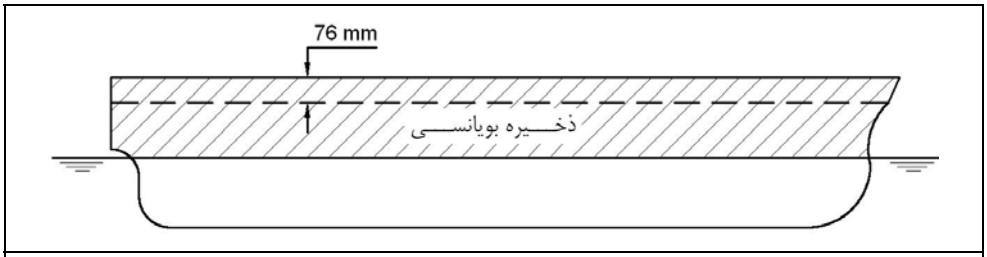
فصل۲:[1] پایداری در حالت صدمه دیده[2]

آبگرفتگی[3] باعث ورود آب به داخل بدنه شناور می‌شود که دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد، از جمله شکاف بدنه ناشی از تصادم یا انفجار، شکستگی شیرها و اتصالات مرتبط با آب دریا و ورود آب از روی عرشه شناور. برای جلوگیری از آبگرفتگی، حداکثر قابلیت اطمینان در طراحی بدنه، اتصالات و شیرها رعایت می‌گردد و برای ممانعت از ورود آب به داخل بدنه در زوایای غلتش بزرگ، منافذ روی بدنه را با یک لوله خرطومی مطابق شکل ۲-۱۹۱ بر روی عرشه اصلی قرار می‌دهند تا زاویه ورود آب به داخل شناور افزایش یابد. این منافذ باید با هوای بیرون مرتبط باشند که اغلب شامل تهویه انبارها و فضاهای داخل بدنه است.



شکل ۲-۱۹۱: لوله‌های خرطومی روی عرشه برای افزایش زاویه آبگرفتگی منافذ

ولی با تمام تمهیدات انجام شده باز هم احتمال ورود آب به داخل بدنه وجود دارد به خصوص در شرایط بروز تصادم و شکافتگی بدنه. در این شرایط تمهیداتی باید انجام شود که با آبگرفتگی بدنه اولاً از توسعه آن جلوگیری شود ثانیاً تا زمانی که شناور دارای ذخیره بویانسی می‌باشد، خط ایمن[4] شناور به زیر آب نرود. خط ایمن به فاصله ۷۶ میلیمتر پایین‌تر از عرشه اصلی (عرشه آب ناپذیر) است (شکل ۲-۱۹۲).



شکل ۲-۱۹۲: نمایش ذخیره بویانسی و خط ایمن در شناورها

برای افزایش دوام شناور در برابر آبگرفتگی، مقداری ذخیره بویانسی[5] برای شناور در نظر می‌گیرند که در شرایط حداکثر بارگیری مجاز، باز هم مقداری حجم آب ناپذیر بالای خط آب وجود دارد که به آن «ذخیره بویانسی» گویند. بنابراین خط ایمن در ۳ حالت ممکن است به زیر آب برود.

۱- مقداری آب وارد شناور شود که مقدار ذخیره بویانسی کاهش یافته و نزدیک به صفر برسد که در این شرایط بخش عمده بدنه به زیر آب می‌رود یا بدنه به طور کامل به زیر آب رفته و در کف دریا جای می‌گیرد . در برخی موارد برای جلوگیری از غرق شدن کامل شناور، حجم‌های بویانسی استوانه‌ای یا مکعبی شکل (مطابق شکل ۲-۱۹۳) به بدنه شناور صدمه دیده متصل می‌کنند که به آنها «بویانسی نجات»[6] می‌گویند.

۲- آبگرفتگی در گوشه چپ یا راست بدنه به گونه‌ای که ذخیره بویانسی هنوز از بین نرفته ولی خط ایمن به دلیل زاویه هیل شدید به زیر آب می‌رود (شکل ۲-۱۹۴).

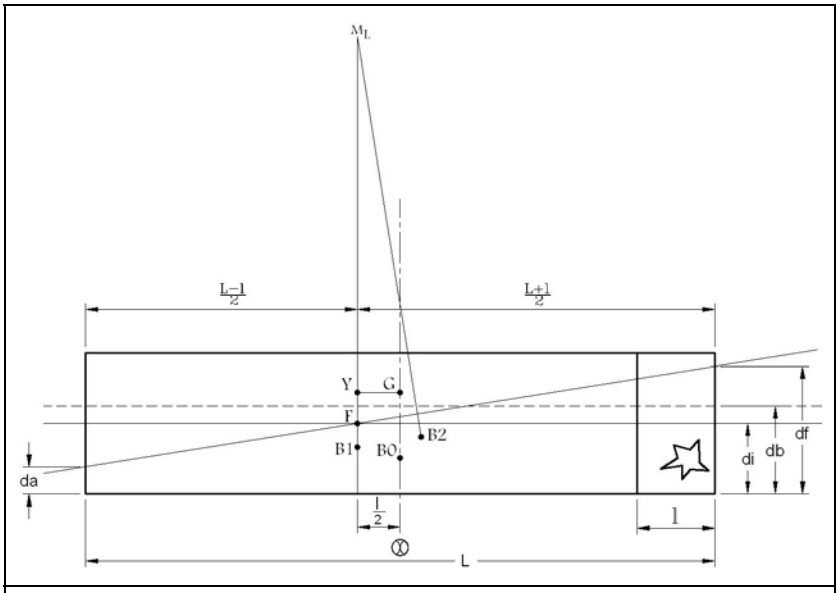
شکل ۲-۱۹۳: اتصال حجم‌های بویانسی به بدنه برای جلوگیری از غرق‌شدن شناور

شکل ۲-۱۹۴: آبگرفتگی در گوشه چپ یا راست بدنه

۱- منابع: [10] , [12] , [14]

2 - damaged stability
3 - Bilging
4 - Margine Line
5 - Reserve of buoyancy
6 - Camel

۳- آبگرفتگی در سینه یا پاشنه شناور به گونه‌ای که علی‌رغم وجود ذخیره بویانسی، خط ایمن به دلیل شیب شدید به زیر آب می‌رود (شکل ۲-۱۹۳ و ۲-۱۹۴).

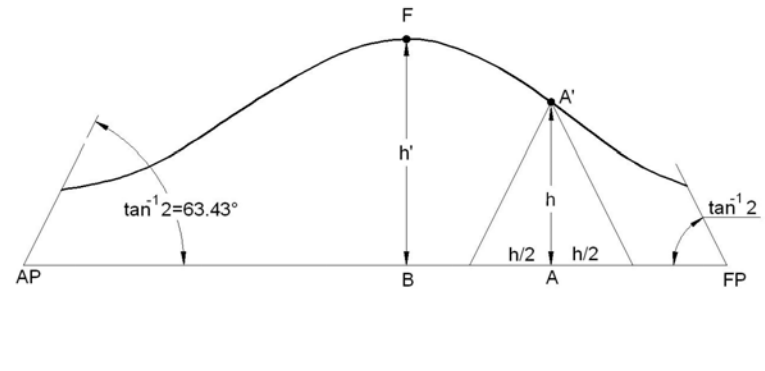


شکل ۲-۱۹۵: آبگرفتگی سینه یا پاشنه شناور

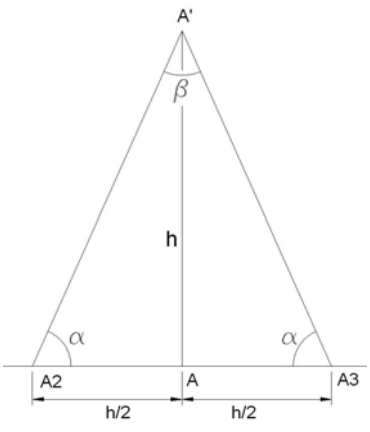
بنابراین شناور باید طوری طراحی شود که حداقل بر اثر آبگرفتگی یک کمپارتمان در هر نقطه‌ای از شناور اولاً ذخیره بویانسی آن صفر نشود ثانیاً زاویه هیل به قدری نباشد که خط ایمن به زیر آب برود و ثالثاً مقدار شیب باعث زیر آب رفتن خط ایمن نگردد. حداقل تعداد کمپارتمان قابل آبگرفتگی در کشتی‌های نظامی، مسافربری و تجاری با یکدیگر متفاوت است.

❖ منحنی طول آبگرفتگی[1] چیست؟

منحنی طول آبگرفتگی مطابق شکل ۲-۱۹۶ می‌باشد که طول آن برابر طول بین دو عمود (عمود سینه FP و عمود پاشنه AP) می‌باشد . در واقع محور طولی آن همان خط مبنای طولی[2] شناور است. مؤلفه عمودی هر نقطه از این منحنی که به فواصل مشخص از خط مبنای طولی ترسیم می‌شود، بیانگر «طولی از شناور است که به مرکزیت آن نقطه می‌تواند آبگرفته شود، بدون اینکه خط ایمن به زیر آب برود.». بطور مثال فرض کنید نقطه A به طول l از عمود سینه قرار گرفته است. فاصله نقطه A از منحنی طول آبگرفتگی برابر h می‌باشد. فاصله h به این معنی است که طولی از بدنه به مرکزیت نقطه A که می‌تواند آبگرفته شود برابر h می‌باشد. از آنجا که A مرکز این طول است یعنی طول مجاز آبگرفتگی برابر $\frac{h}{2}$ در طرفین این نقطه می‌باشد. بدین ترتیب مطابق شکل ۲-۱۹۷ نقاط A_2, A_3 به دست می‌آیند. بین این نقاط، مثلث $A_1' A_2 A_3$ تشکیل می‌شود که هم طول قاعده آن و هم ارتفاع آن برابر h است.



شکل ۲-۱۹۶: مفهوم طول مجاز آبگرفتگی



شکل ۲-۱۹۷: نحوه محاسبه زوایای α و β

1 -floodable length curve
2 - Base Line

بدین ترتیب زاویه α را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{h/2} = 2$$

در نتیجه α برابر است با:

$$\alpha = \tan^{-1}(2)$$

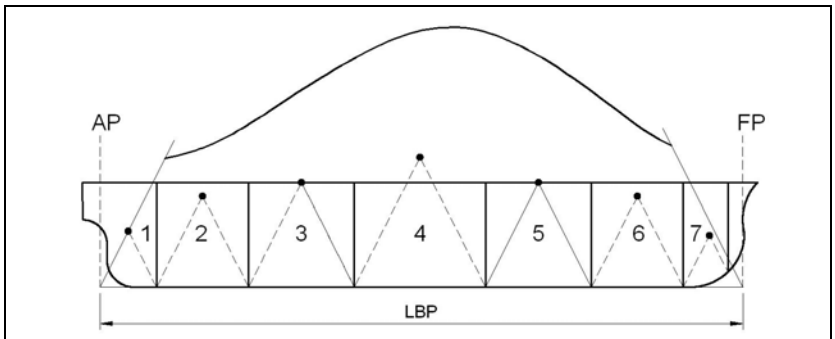
از شکل ۲-۱۹۷ می‌توان تشخیص داد که زاویه β برابر است با:

$$\beta = 180 - 2\alpha \qquad \frac{\beta}{2} = 90 - \alpha$$

در قسمت تعیین محل دیواره‌های عرضی ملاحظه خواهد شد که زاویه $\tan^{-1} 2$ دارای کاربرد زیادی است. ابتدا و انتهای منحنی طول آبگرفتگی که با خط $\tan^{-1} 2$ جدا شده است، نیز بر همین مبنا ترسیم شده است. مطابق شکل ۲-۱۹۶ ملاحظه می‌شود که این منحنی دارای یک نقطه ماکزیمم می‌باشد. چرا نقطه ماکزیمم در قسمت میانی منحنی (یا طول شناور) می‌باشد ؟ علت آن است که هر چه کمپارتمان به سینه یا پاشنه نزدیکتر باشد، در ازای آبگرفتگی، شیب بیشتری ایجاد می‌کند چرا که فاصلهٔ آن از مرکز شناوری (F) بیشتر شده است. لذا طول مجاز آبگرفتگی در منتهی الیه سینه و پاشنه، کمترین مقدار و در قسمت میانی، بیشترین مقدار است. مطابق شکل ۲-۱۹۶، طول مجاز آبگرفتگی در قسمت میانی (نقطه B) برابر h' و در نقطه A برابر h است که $h' > h$ می‌باشد.

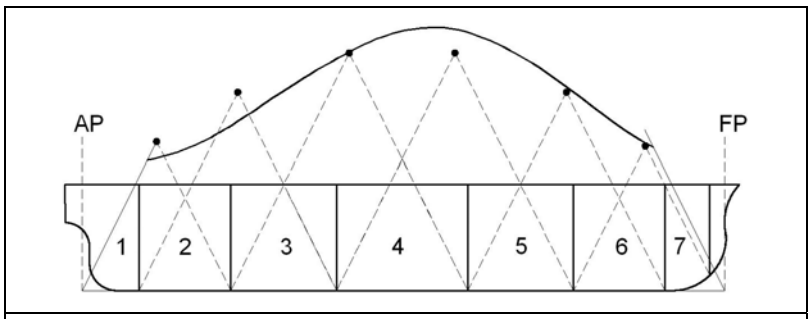
❖ منحنی طول آبگرفتگی و کاربردهای آن

در مبحث آبگرفتگی آنچه معیار پایداری در حالت صدمه دیدگی است، منحنی طول آبگرفتگی است که خروجی و نتیجه مباحث آبگرفتگی است. در این قسمت ابتدا منحنی آبگرفتگی و چگونگی استفاده از آن را توضیح می‌دهیم و سپس به کمک روابط ریاضی موجود چگونگی ترسیم این منحنی را بررسی می‌کنیم. در واقع به کمک منحنی طول آبگرفتگی می‌توان محل دیواره‌های عرضی (بالکهدها) را تعیین کرد. فرض کنید منحنی طول آبگرفتگی برای یک شناور خاص مطابق شکل ۲-۱۹۸ ترسیم شده است و محل دیواره‌های عرضی و کمپارتمان‌بندی‌ها هم انجام گرفته است.



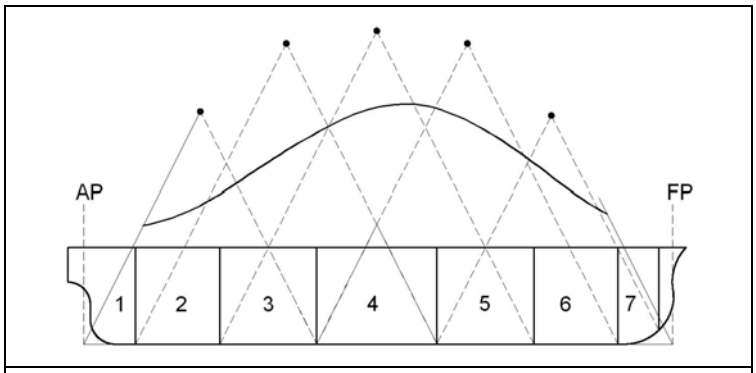
شکل ۲-۱۹۸: حالت آبگرفتگی یک کمپارتمان

برای اینکه تشخیص دهیم با آبگرفتگی یک کمپارتمان، آیا خط ایمن زیر آب می‌رود یا خیر، از کنار هر دیواره یک خط با زاویه $\tan^{-1} 2$ رسم می‌کنیم. رأس مثلث محل تقاطع این خطوط، باید پایین‌تر از منحنی طول آبگرفتگی باشد . حال فرض کنیم دو کمپارتمان مجاور آبگرفته شده باشند. برای بررسی اینکه آیا باز هم خط ایمن به زیر آب می‌رود یا نه، از کنار هر دو کمپارتمان مجاور، یک خط با زاویه $\tan^{-1} 2$ رسم می‌کنیم که باز هم محل تقاطع این خطوط، باید زیر منحنی طول آبگرفتگی باشد (با فرض اینکه کشتی برای آبگرفتگی مجاز دو کمپارتمان طراحی شده باشد).



شکل ۲-۱۹۹: بررسی آبگرفتگی دو کمپارتمان

حال می‌خواهیم بررسی کنیم که آیا با آبگرفتگی سه کمپارتمان مجاور هم خط ایمن به زیر آب می‌رود یا خیر. مجدداً خطوط $\tan^{-1} 2$ را هم بین هر سه کمپارتمان ترسیم می‌کنیم. که محل تقاطع خطوط $\tan^{-1} 2$ با یکدیگر باید زیر منحنی طول آبگرفتگی باشد.

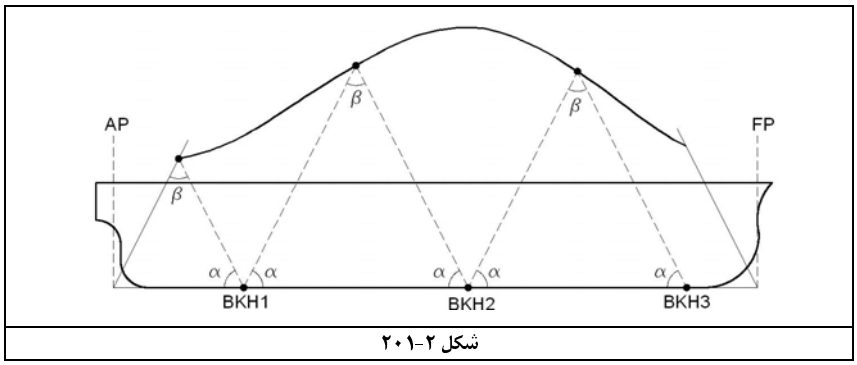


شکل ۲-۲۰۰: آبگرفتگی سه کمپارتمان مجاور

ملاحظه می‌شود که محل تقاطع تعدادی از خطوط با زاویه $2^{-1}\tan$ که بین هر سه کمپارتمان ترسیم شده است، بالاتر از منحنی طول آبگرفتگی افتاده است که به معنی زیر آب رفتن خط ایمن در کمپارتمان‌ها مربوطه می‌باشد. کمپارتمان‌هایی که محل تقاطع خطوط $2^{-1}\tan$ آنها بر روی منحنی یا زیر منحنی طول آبگرفتگی افتاده است، بدین معناست که آبگرفتگی آن کمپارتمانهای مجاور، باعث به زیر آب رفتن خط ایمن نمی‌گردد. لازم به ذکر است که حداقل تعداد مجاز آبگرفتگی کمپارتمان‌ها در کشتی‌های تجاری یک کمپارتمان و در کشتی‌های نظامی دو کمپارتمان است.

❖ تعیین محل دیواره‌های عرضی

تعیین محل دیواره‌های عرضی به کمک منحنی طول آبگرفتگی انجام می‌شود و وابسته به این است که آبگرفتگی چند کمپارتمان مجاور مطلوب می‌باشد. این مورد وابسته به نوع شناور و نظر کارفرما می‌باشد. حال فرض کنید مطابق شکل ۲-۲۰۱ منحنی طول آبگرفتگی یک شناور با فرض اینکه آبگرفتگی فقط یک کمپارتمان مجاز باشد، ترسیم شده است (چگونگی ترسیم این منحنی در قسمت‌های بعدی تشریح می‌شود).



شکل ۲-۲۰۱

برای تعیین محل دیواره‌ها از عمود پاشنه شروع می‌کنیم. از محل تقاطع خط $2^{-1}\tan$ عمود پاشنه با منحنی طول آبگرفتگی (نقطهٔ *A*)، زاویه β را جدا می‌کنیم که نقطه *BKH1* به دست می‌آید که می‌تواند محل اولین بالکهد باشد. حال از همین نقطه زاویه $\alpha = \tan^{-1} 2$ را جدا می‌کنیم تا منحنی طول آبگرفتگی را در نقطه *B* قطع کند. از نقطه *B* باز هم زاویه β را جدا می‌کنیم تا 2 *BKH* به دست آید که محل دومین بالکهد بدست آید. ملاحظه می‌شود که در این نمونه، تنها با ۲ دیواره می‌توان حجم داخل شناور را طوری تقسیم‌بندی کرد که با آبگرفتگی یک کمپارتمان، خط ایمن هم مرز خط آب قرار گیرد که البته ضریب اطمینان کافی ندارد لذا فاصله دیواره‌ها را معمولاً کمتر از حالت مرزی می‌گیرند. به گونه‌ای که محل تقاطع خطوط با شیب α دقیقاً روی منحنی طول آبگرفتگی قرار نگیرند بلکه زیر این منحنی قرار گیرند که در شکل‌های ۲-۲۰۰ و ۲-۲۰۱ می‌توان ملاحظه کرد. البته باید توجه داشت که تعیین محل دیواره‌ها تنها وابسته به منحنی طول آبگرفتگی نیست بلکه یکی دیگر از عوامل مهم، نوع باری است که شناور در انبارها می‌خواهد حمل کند. فرض کنید در کشتی‌های کانتینربر، طول انبارها باید ضریبی از طول کانتینر باشد، که در غیر اینصورت اتلاف فضای داخلی کمپارتمان را در پی خواهد داشت. در تعیین اولین و آخرین دیواره (دیواره انتهای موتورخانه و دیواره تصادم) نیز قوانین و محدودیتهای خاصی وجود دارد که در قسمت قوانین مؤسسه *LR* بدانها اشاره شده است.

❖ ضریب نفوذ[1] و ضریب بارگیری[2]

منحنی‌های طول آبگرفتگی که به صورت یکپارچه ترسیم شده‌اند، با این فرض بوده‌اند که ضریب نفوذ کل قسمت‌های داخلی بدنه یکسان هستند در حالی که در واقعیت چنین نیست. ضریب نفوذ از مقدار آبی که در صورت آبگرفتگی یک کمپارتمان امکان ورود به داخل بدنه را دارد، بدست می‌آید که رابطه آن عبارتست از:

1 - Permeability factor
2 - stowage factor

ضریب نفوذ: $PF = \frac{\text{حجم قابل آب وارد شدن به داخل انبار}}{\text{حجم کل انبار}}$

بنابراین برای هر انبار و کمپارتمان شناور، یک ضریب نفوذ خاص تعریف می‌شود که باید برای هر کمپارتمان مشخص باشد ولی به طور تقریبی می‌توان مقادیر زیر را در نظر گرفت. عامل دیگری که برای تبیین میزان نفوذ آب می‌توان در نظر گرفت، ضریب بارگیری، است. اگر ρ (تن بر متر مکعب) چگالی بار باشد، حجم اشغال شده توسط یک تن بار برابر $\frac{1}{\rho}$ می‌باشد. معمولاً بارها را کاملاً به هم چسبیده نمی‌توان بارگیری نمود و فضاهای خالی در بین بارها وجود دارد. اگر حجم اشغال شده توسط یک تن بعد از بارگیری را «ضریب بارگیری» (*SF*) بنامیم، حجم موجود برای آب ورودی به داخل بدنه عبارتست از:

$$\text{حجم ورود آب} = (SF - \frac{1}{\rho}) \quad (\text{بر حسب } \frac{m^3}{t})$$

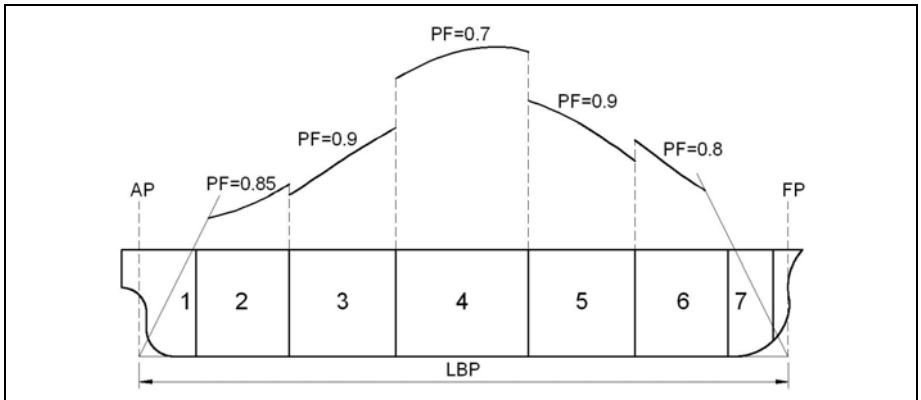
که بدین ترتیب ضریب نفوذ (PF) برابر است با:

$$PF = \frac{SF - \frac{1}{\rho}}{SF}$$

کمپارتمان	ضریب نفوذ (PF) (درصد)
فضای موتورخانه	۸۰–۸۵
فضای رفاهی خدمه و کابین‌ها	۹۵
انبارهای مواد غذایی	۶۵
انبار حمل فله	۶۰–۶۵
انبار حمل اتومبیل (کشتی‌های RO -RO)	۸۵
انبار حمل کالای عمومی	۷۰
کمپارتمان‌های کشتی‌های نظامی	۹۷
انبار حمل ذغال سنگ	۳۵
انبار حمل الوار چوب	۲۰

جدول ۲-۱۷: مقادیر ضریب نفوذ برای انواع کشتی‌ها

حال در نمونه‌های بیان شده فرض کنید ضریب نفوذ هر یک کمپارتمان‌ها متفاوت باشد. بدین ترتیب منحنی طول آبگرفتگی به صورت پیوسته نیست بلکه به صورت بریده بریده می‌باشد چرا که مقدار آب قابل وارد شدن به بدنه وابسته به ضریب نفوذ هر کمپارتمان، متفاوت است که در شکل ۲-۲۰۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲-۲۰۲

❖ برخی قوانین مؤسسه رده‌بندی LR در مورد فاصله بین دیواره‌ها

حداقل تعداد دیواره‌ها در کشتی‌های حمل کالا مشخص شده است : یک دیواره تصادم[1] در قسمت سینه، یک دیواره در منتهی‌الیه پاشنه[2] و دو دیواره در طرفین موتورخانه. بنابراین در کشتی‌هایی که موتورخانه در قسمت میانی بدنه است، حداقل تعداد دیواره‌ها برابر ۴ است. برای کشتی‌هایی که موتورخانه در قسمت عقب بدنه است، حداقل تعداد دیواره‌ها برابر ۳ است چرا که دیواره منتهی الیه پاشنه و دیواره پشت موتورخانه با هم یکی می‌شوند (جدول ۲–۱۸). از این دیواره‌ها، دیواره تصادم مهمترین دیواره است چرا که ۵۰ درصد تصادف کشتی‌ها از قسمت سینه اتفاق می‌افتد. این دیواره نه باید

1 - Collision Bulkhead
2 - aft peak Bulkhead

خیلی نزدیک به جلوی سینه باشد (به گونه‌ای که در برابر ضربه به راحتی از بین نرود) و نه خیلی دور از سینه باشد (به گونه‌ای که آبگرفتگی قسمت سینه باعث شیب شدید نگردد). این دیواره باید بین ۵-۷/۵ درصد طول بدنه عقب‌تر از عمود سینه باشد. دیواره منتهی‌الیه پاشنه نیز باید در جلوی روکش شافت[1] قرار گیرد به گونه‌ای که نفوذ آب از آن، باعث آبگرفتگی کمپارتمان نگردد. همچنین این دیواره نباید از منتهی الیه پاشنه چندان دور باشد به گونه‌ای که آبگرفتگی باعث شیب شدید پاشنه نگردد. دیواره‌های موتورخانه نیز ماشین‌آلات پیشران را احاطه کرده‌اند به گونه‌ای که آبگرفتگی کمپارتمان‌های مجاور باعث صدمه دیدن موتور، ژنراتور، بویلر و سایر ماشین‌آلات نگردد . از طرفی این دیواره در صورت بروز آتش‌سوزی موتورخانه، از سرایت آتش به کمپارتمان‌های مجاور جلوگیری می‌کند[2]. برای کشتی‌های حمل کالا با طول بیش از ۹۰ متر، مطابق جدول زیر تعداد دیواره‌ها توصیه می‌گردد (با فرض فواصل برابر). اغلب دیواره‌ها تا عرشه فوقانی اصلی امتداد یافته‌اند (به خصوص دیواره تصادم) ولی حداقل ارتفاع این دیواره‌ها باید بالاتر از علامت خط آبخور باشد.

طول کشتی (متر)	تعداد دیواره‌ها	
	موتورخانه در پاشنه	موتورخانه در وسط بدنه
۹۰-۱۰۵	۵	۵
۱۰۵-۱۱۵	۵	۶
۱۱۵-۱۲۵	۶	۶
۱۲۵-۱۴۵	۶	۷
۱۴۵-۱۶۵	۷	۸
۱۶۵-۱۹۰	۸	۹
بیش از ۱۹۰ متر	نیازمند تحلیل	نیازمند تحلیل

جدول ۲-۱۸: تعداد دیواره‌ها طبق اشتاندارد LR

❖ بررسی مقدار فرو رفتن بدنه در صورت آبگرفتگی

در قسمت‌های قبل بیان داشتیم که خط ایمن در سه حالت ممکن است به زیر آب برود:

۱- از دست رفتن کامل ذخیره بویانسی ۲- آبگرفتگی در گوشه چپ یا راست بدنه

۳- آبگرفتگی در ابتدا یا انتهای شناور

در حالت ۲ و ۳ ذخیره بویانسی هنوز وجود دارد ولی شیب زیاد یا هیل زیاد باعث زیر آب رفتن خط ایمن می‌شود . در این قسمت روش محاسبه میزان فرو رفتن بدنه در آب بررسی می‌شود.

۱- آبگرفتگی در قسمت میانی بدنه:

اگر قسمت میانی بدنه یا به عبارتی قسمت منطبق بر مرکز بویانسی بدنه دچار آبگرفتگی شود بدنه بدون شیب و بدون هیل و به صورت یکنواخت در آب فرو می‌رود. برای بررسی میزان فرو رفتن داخل آب دو روش کلی وجود دارد:

روش اول) بار افزوده[3]: در این روش فرض می‌شود که آب وارد شده به بدنه به منزله وزن اضافه شده می‌باشد و فرض می‌شود که بویانسی بدنه ثابت باشد. این روش چندین نقص دارد که عبارتند از : مشکل بودن تخمین مقدار آب نفوذ کرده به انبار، نیاز به در نظر گرفتن تغییرات KG و نیاز به در نظر گرفتن تأثیر سطح آزاد آب درون انبار.

روش دوم) بویانسی از دست رفته[4]: در این روش فرض می‌شود که قسمت دچار آبگرفتگی، از مقدار بویانسی بدنه کسر گردیده است. یعنی در واقع وزن کشتی ثابت است و مقدار بویانسی کمپارتمان آبگرفته، از دست رفته است. مسلماً در این حالت، مرکز ثقل ثابت است و مرکز بویانسی تغییر می‌کند. البته باید در نظر داشت که مقدار جابجایی، قبل و بعد از آبگرفتگی ثابت می‌ماند چرا که به ازای بویانسی از دست رفته کمپارتمان آبگرفته، بدنه در آب فرو می‌رود و این بویانسی جبران می‌گردد که داریم:

حجم سالم زیر آب بعد از آبگرفتگی = حجم سالم زیر آب قبل از آبگرفتگی

در شکل ۲-۲۰۳ یک بارج به طول L، عرض B و آبخور d_i نمایش داده شده است. انبار متقارنی در وسط کشتی قرار گرفته که طول آن ℓ ، عرض آن b و ارتفاع آن برابر ارتفاع شناور می‌باشد و دچار آبگرفتگی می‌شود. اگر آبخور بعد از آبگرفتگی را d_b بنامیم با توجه به رابطه بالا داریم:

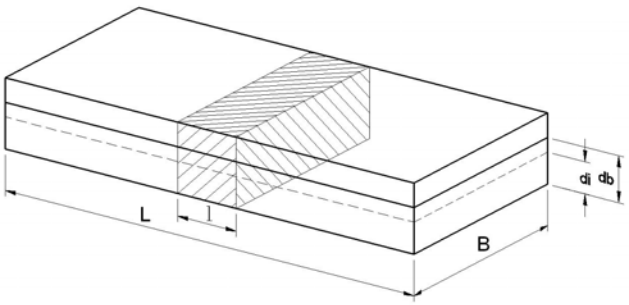
$$LBd_i = LBd_b - \ell b d_b$$

1 - stern tube

۱- این دیواره را دیواره ضد آتش (fire Bulkhead) نیز می‌گویند که طبق قوانین SOLAS به دیواره‌ای گفته می‌شود که در برابر دمای ۱۵۰۰ درجه فارنهایت به مدت یک ساعت مقاومت می‌کند.

3 - Added Weight

4 - Lost Buoyancy



شکل ۲-۲۰۳: موقعیت آبخور شناور در قبل و بعد از آبگرفتگی کمپارتمان میانی

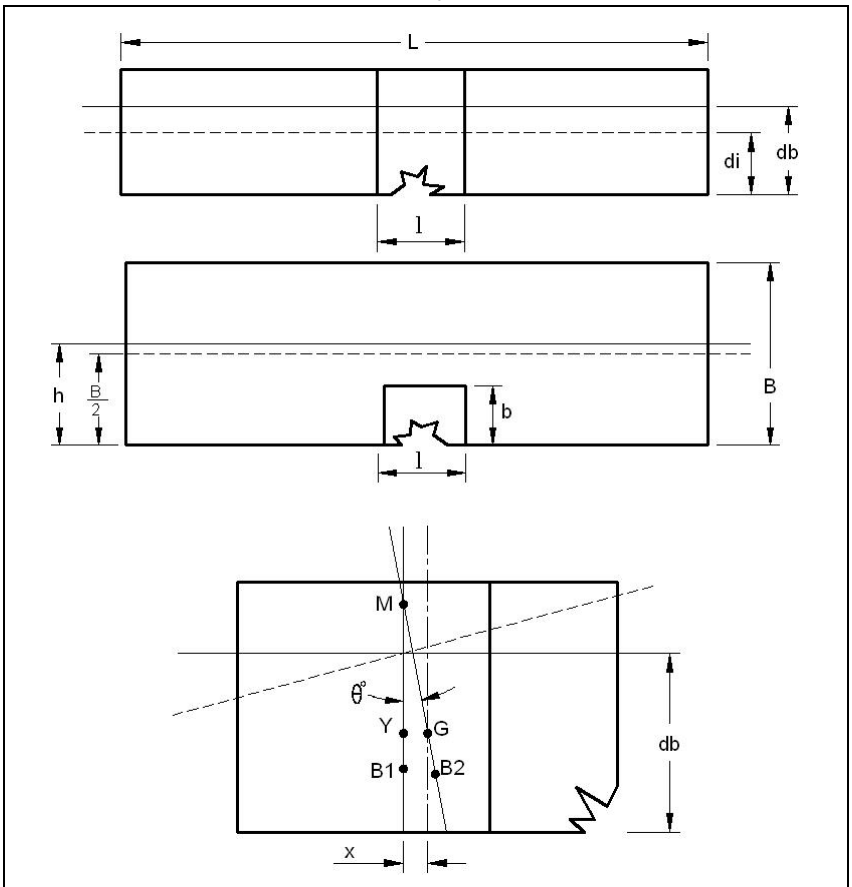
پایداری شناور به دو علت تغییر می‌کند: ۱- جابجایی مرکز بویانسی ۲- تغییر شکل صفحه آبخور و در نتیجه تغییر ممان دوم صفحه آبخور

۲- آبگرفتگی یک انبار کناری در قسمت میانی بدنه

در شکل ۲-۲۰۴ یک بارج به طول L، عرض B با آبخور d_i نمایش داده شده است. یک انبار خالی کناری به طول l و عرض b که دارای ارتفاعی برابر ارتفاع شناور است، آبگرفته می‌شود و شناور از آبخور W_0L_0 به آبخور W_1L_1 می‌رسد. آبخور ثانویه d_b می‌باشد. در این حالت مرکز بویانسی به صورت عرضی جابجا می‌شود و به $B1$ منتقل می‌شود. اگر فاصله بین G و $B1$ برابر x باشد، ممان هیل دهنده زیر اعمال می‌شود:

$HM = W.x$ ممان هیل دهنده

اگر متاسنتر در حالت آبگرفته برابر M_b باشد (و درست در بالای $B1$ قرار گیرد) و زاویه غلتش شناور، کوچک باشد، شناور تا زاویه θ غلتش می‌کند تا $B1$ به $B2$ منتقل گردد (هم امتداد مرکز ثقل G). مطابق شکل داریم: $\tan\theta = \frac{GY}{YM_b}$



شکل ۲-۲۰۴: اثر آبگرفتگی قسمت چپ یا راست بدنه بر پایداری

برای محاسبه GY فرض می‌کنیم خط قائم گذرنده از $B1$ از مرکز سطح آبخور نیز بگذرد. در شکل ۲-۲۰۴ اگر مرکز شناوری به فاصله h از کنار بدنه باشد داریم:

$$h = \frac{\text{ممان سطح حول خط کنار شناور}}{\text{مساحت}} = \frac{L\times B\times\frac{B}{2} - l.b.\frac{b}{2}}{LB - lb}$$

و چون G بر روی خط مرکزی قرار دارد، فاصله آن از کنار بدنه برابر $\frac{B}{2}$ است که برای GY داریم:

$$GY = h - \frac{B}{2}$$

در صورتی که انبار دارای ارتفاعی برابر ارتفاع شناور باشد:

$$KB = \frac{d_b}{2}$$

$$B_1M_b = \frac{I_b}{\nabla}$$

البته I_b باید نسبت به خط گذرنده از مرکز سطح آبخور جدید (مرکز شناوری جدید) محاسبه شود.

$$I_{side} = \frac{LB^3}{3} - \frac{lb^3}{3}$$

$$I_b = I_{side} - Ah^2 = I_{side} - (LB - lb)h^2$$

$$B_1M_b = \frac{I_b}{\nabla}$$

و همچنین:

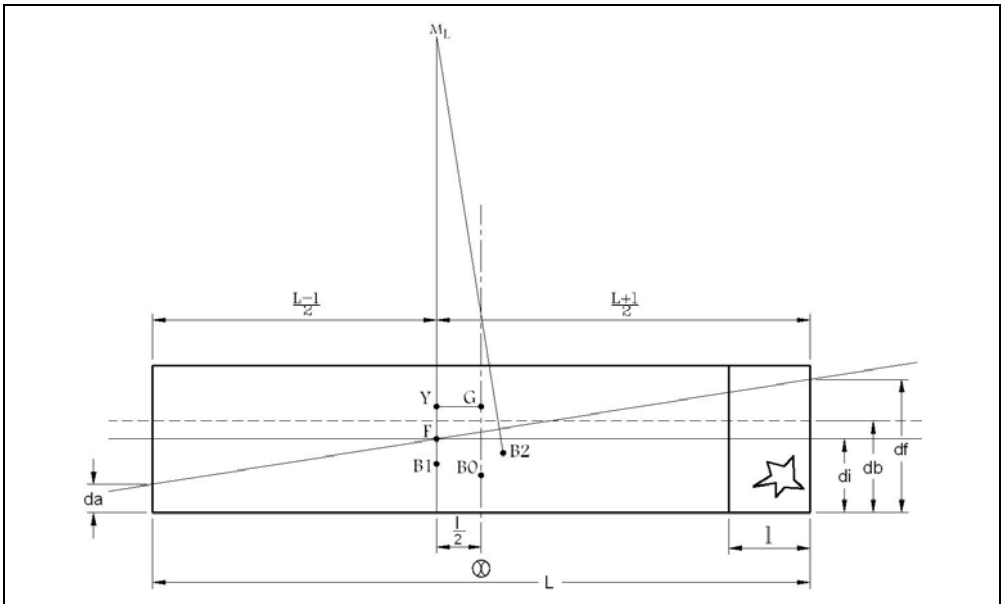
$$KM_b = KB_1 + B_1M_b \qquad YM_b = KM_b - KG \qquad \tan\theta = \frac{GY}{YM_b}$$

که مقادیر GY و YM_b طبق روابط بیان شده، محاسبه می‌شوند. لازم به یادآوری است که برای این نتیجه سه فرض در نظر گرفته شده است که ممکن است نتایج را با خطای زیادی مواجه کند ولی برای رسیدن به یک تقریب، کفایت می‌کند. این فرضیات عبارتند از:

۱- هم امتداد بودن $B1$ و M_b **۲**- کوچک بودن زاویه غلتش **۳**- خط قائم گذرنده از $B1$ از مرکز سطح آبخور (مرکز شناوری) جدید عبور کند.

۳- آبگرفتگی یک انبار در سینه یا پاشنه

در شکل ۲-۲۰۵، شناوری به طول L، عرض B و آبخور اولیه d_i می‌باشد. یک انبار به طول l واقع در انتهای کشتی صدمه می‌بیند و خط آبخور به W_1L_1 و مرکز بویانسی به $B1$ انتقال می‌یابد.



شکل ۲-۲۰۵:اثر آبگرفتگی یک قسمت از سینه یا پاشنه بر پایداری شناور

اگر ارتفاع انبار آبگرفته برابر ارتفاع شناور باشد داریم:

$$\text{فاصله مرکز بویانسی نسبت به } AP = \frac{L-\ell}{2}$$

فاصله مرکز ثقل برابر $\frac{L}{2}$ از عمود پاشنه است. بنابراین فاصله افقی بین $B1$ و G عبارتست از:

$$\frac{L}{2} - \frac{L-\ell}{2} = \frac{\ell}{2} = GY$$

اگر جابجایی شناور برابر W باشد، ممان شیب دهنده برابر $W\times GY$ بوده و داریم:

$$\text{تغییر شیب (t)} = \frac{\text{ممان تغییر تریم}}{MCTC} = \frac{W\times GY}{MCTC}$$

در اینجا $MCTC$ مربوط به حالت آبگرفته است.

❖ نحوه ترسیم منحنی طول آبگرفتگی

هم‌اکنون با دانستن نحوه کاربرد منحنی طول آبگرفتگی و نحوه محاسبه شیب شناور در شرایط آبگرفتگی طولی، می‌توان براحتی منحنی طول آبگرفتگی را ترسیم کرد. برای ترسیم این منحنی به صورت تصادفی، نقاطی از طول شناور در نظر می‌شود بطوری که به مرکزیت آن، بدنه دچار آبگرفتگی شده و این آبگرفتگی باعث شود که خط ایمن در محل عمود سینه یا پاشنه با خط آبخور مماس شود. مثلاً اگر محل آبگرفتگی جلوتر از مرکز شناور ی باشد، مقدار آبگرفتگی باید طوری باشد که خط آب در محل عمود سینه با خط ایمنی مماس شود. مطابق شکل ۲-۱۹۰ اگر طول این آبگرفتگی برابر h بدست آید و مرکز آن نقطه A باشد، خطی عمودی به همان ارتفاع h و از محل نقطه A ترسیم می‌کنیم و نقطه A' بدست می‌آید. این نقطه یک نقطه از منحنی طول آبگرفتگی است. اگر این کار برای چندین محل از طول شناور انجام شود، منحنی طول آبگرفتگی کامل می‌شود. همچنین این منحنی در محل عمود سینه و پاشنه با خطی با شیب $tan^{-1}2$ قطع می‌شود. توجه شود که طول h را باید بر اساس سعی و خطا و استفاده از روابط شیب طولی شناور بدست آورد. یعنی ابتدا یک طول فرضی h از یک محل مشخص در شناور را در نظر می‌گیریم که آبگرفته شده و این آبگرفتگی، جرم m از آب دریا را وارد بدنه نموده است. سپس محاسبه می‌کنیم که آیا شیب ناشی از این مقدار آبگرفتگی، باعث مماس شدن خط آبخور با عمود سینه یا پاشنه شده است یا خیر. اگر نه، طول فرضی h را تغییر می‌دهیم تا این امر حاصل شود و مراحل بیان شده فوق برای تعیین نقطه به نقطه منحنی آبگرفتگی انجام گردد.

۲۰ سال اول زندگی که دوران یادگیری است
۲۰ سال سوم که دوران کهولت و ضعف و بی‌باری است
پس در ۲۰ سال دوم زندگی باید به اندازه ۶۰ سال کار کنی !

بخش ششم :
آب‌اندازی شناور

فصل ۱:[۱] آب‌اندازی شناور[۲]

۱- مقدمه

کار ساخت یا تعمیر شناور باید در خشکی انجام شود که دو روش کلی دارد:

۱- ساخت یا تعمیر و آب‌اندازی در داک خشک یا داک شناور که وضعیت پایداری در این حالت در بخش‌های قبل بررسی شد.

۲- ساخت یا تعمیر در داخل کارخانه و انتقال بر روی سرسره آب‌اندازی[۳] که این عمل را «آب‌اندازی» گویند که به ۳ طریق انجام می‌شود: ۱) آب‌اندازی از پاشنه ۲) آب اندازی از سینه ۳) آب‌اندازی از پهلو .

آب‌اندازی به صورت طولی (با سینه یا پاشنه) مستلزم داشتن فاصله عرضی مناسب از ساحل تا طرف مقابل می‌باشد و ضمناً باید عمق کافی برای جلوگیری از برخورد کشتی با کف دریا وجود داشته باشد. این نوع آب‌اندازی در کارخانجات کنار رودخانه‌ها که دارای عرض کم و عمق کم هستند، امکان‌پذیر نیست. آب‌اندازی طولی، اغلب با پاشنه انجام می‌شود چرا که پاشنه دارای حجم بویانسی بیشتر (پرتر) می‌باشد و شناور زودتر به حالت شناوری می‌رسد. آب‌اندازی از پهلو در رودخانه‌های کم عرض انجام می‌شود که البته این نوع آب‌اندازی، دارای حالت بحرانی پایداری می‌باشد و در صورت بروز خطا در محاسبات، امکان واژگونی شناور وجود دارد. کشتی‌های کوچک یا کشتی‌هایی که دارای پایداری مناسبی باشند را می‌توان از پهلو آب‌اندازی کرد. سه روش رایج برای آب‌اندازی از پهلو مطابق شکل ۲-۲۰۶ عبارتند از:

۱- کشتی از پهلو به طرف پایین سرسره آب‌اندازی هدایت می‌شود و به پهلو وارد آب می‌شود (حالت a).

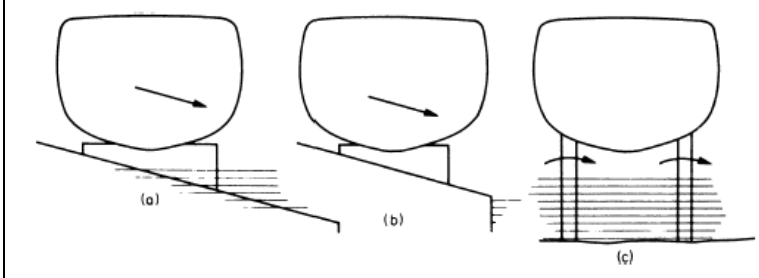
۲- کشتی یک بر شده و تا انتهای سرسره بر روی ریل هدایت می‌شود. در این حالت کشتی مسافت زیادی را روی ریل حرکت می‌کند و خود سرسره نیز در حین آب‌اندازی تغییر زاویه می‌دهد (حالت b).

۳- کشتی بر روی پایه‌هایی ساخته می‌شود و نحوه طراحی این پایه‌ها به گونه‌ای است که با اعمال فشار از پهلو متلاشی شده و کشتی در داخل آب قرار می‌گیرد. تمهیدات لازم برای پرهیز از برخورد بدنه شناور با پایه‌ها هنگام آب‌اندازی در نظر گرفته می‌شود (حالت c).

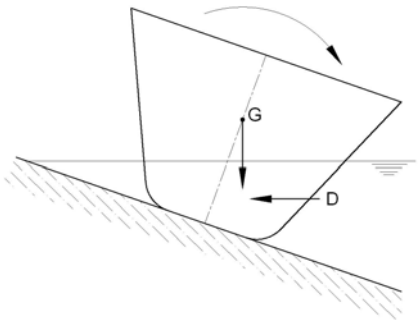
در تمامی این روش‌ها شناور با غلتش عرضی زیاد که ممکن است بیش از ۳۰ درجه باشد، به داخل آب می‌افتد. امواج به وجود آمده از غلتش عرضی، ممکن است باعث ایجاد خسارت در ساحل مقابل سرسره شود. شیب سرسره آب‌اندازی معمولاً به نسبت ۱ به ۸ (حدود ۷ درجه) می‌باشد به گونه‌ای که شناور با سرعت مناسب آب‌اندازی شود. در روش آب‌اندازی از پهلو، کل طول بدنه به یکباره وارد آب می‌شود. برخلاف روش آب‌اندازی طولی که طول شناور مرحله به مرحله وارد آب می‌شود. در آب‌اندازی از پهلو، ممان واژگون‌کننده شامل شیب عرضی بدنه و سرسره (جابجایی مرکز ثقل) و نیروی مقاوم آب (D) و نیروی ناشی از شتاب زاویه‌ای بدنه می‌باشد که باید توسط ممان بازگرداننده جبران شود. لذا اولویت اول، در آب‌اندازی شناور به صورت طولی می‌باشد که امکان واژگونی شناور خیلی کمتر است. بیشترین خطرات در این حالت، امکان برخورد با کف دریا، امکان برخورد با طرف مقابل رودخانه، وارد شدن نیروی موضعی زیاد بر سینه (در آب‌اندازی از پاشنه) یا بر پاشنه (در آب‌اندازی از سینه) می‌باشد. لذا برای پرهیز از این خطرات، باید نیروهای هیدرواستاتیکی حین آب‌اندازی به دقت بررسی شوند. این نیرو وابسته به ارتفاع جزر و مد آب نیز می‌باشد لذا پس از بررسی‌های لازم معین می‌شود که شناور در چه ارتفاعی از جزر و مد می‌تواند آب‌اندازی شود. در این بخش ضمن تشریح نقاط مختلف سرسره آب‌اندازی نیروها و گشتاورهای هیدرواستاتیکی، حین انتقال بررسی می‌شوند.

۱- منابع: [۲ و ۱۹]

2 - Launching
3 - Slipway



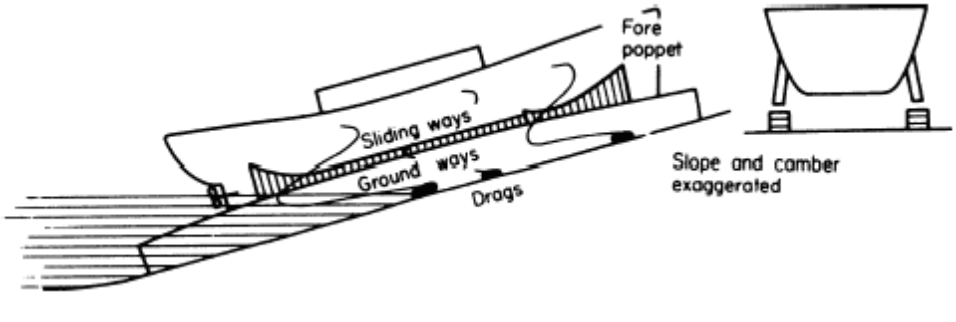
شکل ۲-۲۰۶: روش‌های آب‌اندازی شناور از پهلو



شکل ۲-۲۰۷: ممان‌های واژگون‌کننده وارد بر شناور به هنگام آب‌اندازی از پهلو

۲- ساختمان سرسره آب‌اندازی[1] و روش آب‌اندازی

سرسره آب‌اندازی مطابق شکل ۲-۲۰۸ دارای دو بخش ثابت (پی) و متحرک (گهواره) می‌باشد. ارتباط بین این بخش ثابت و متحرک به وسیله یک ریل با لایه‌ای از روغن برقرار می‌شود. بخش ثابت (پی) متصل به زمین بوده و بخش متحرک (گهواره) روی بخش ثابت می‌لغزد.



شکل ۲-۲۰۸: شناور بر روی سرسره آب اندازی

شناور روی گهواره قرار می‌گیرد. مطابق شکل، شناور به همراه گهواره وارد آب می‌شود و در حین انتقال، حول «لبه پی»[2] (شکل ۲-۲۰۹) گشتاور ایجاد می‌کند که در این شرایط گشتاور نیروی وزن بیشتر از گشتاور نیروی بویانسی می‌باشد. با پیشروی گهواره در داخل آب، نیروی بویانسی افزایش یافته و گشتاور بویانسی از گشتاور وزن حول لبه پی بیشتر می‌شود. در این حالت، شناور بر روی «پایه سینه»[3] (شکل ۲-۲۱۱) تکیه و حول این نقطه دوران می‌کند. در این حالت نیروی موضعی بسیار شدیدی بر این نقطه (پایه سینه) وارد می‌شود و شناور هنوز به طور کامل شناور نشده است. با افزایش پیشروی گهواره به داخل آب نیروی بویانسی همواره افزایش می‌یابد تا جایی که نیروی وزن و بویانسی با هم برابر شوند. در این حالت، در صورتی که شناور با شتاب وارد آب گردد ممکن است پاشنه به طور کامل زیر آب برود لذا تمهیدات لازم باید انجام شود. گهواره در حین آب‌اندازی، از وارد شدن نیروهای موضعی بر بدنه جلوگیری می‌کند. در لحظه شناور شدن و جدایی شناور از گهواره، سازه گهواره باید استحکام کافی در برابر نیروها و گشتاورهای وارده را داشته باشد. منحنی تغییرات وزن و بویانسی و گشتاور آنها حول لبه پی و «پایه سینه» در شکل ۲-۲۱۱ ترسیم شده است. این مقادیر در نمودار شکل ۲-۲۱۱ ملاحظه می‌شوند که در آن محور افقی، طول سرسره آب‌اندازی و محور عمودی نیرو (وزن یا بویانسی) و ممان نیرو است. در مورد این منحنی نکات زیر قابل تأمل می‌باشد:

۱) در نقطه‌ای که گشتاوری ناشی از نیروی بویانسی حول پایه سینه برابر با گشتاور ناشی از وزن، حول این نقطه می‌گردد، پاشنه شناور بلند می‌شود.

۲) اختلاف مقدار بین منحنی‌های نیروی وزن و بویانسی در موقعیت بالا رفتن پاشنه، بیشترین نیرویی می‌باشد که بر روی پایه سینه اعمال می‌گردد.

۳) منحنی گشتاور ناشی از نیروی بویانسی حول لبه پی می‌بایست کاملاً در بالای منحنی گشتاور ناشی از نیروی وزن قرار گیرد چرا که در غیر اینصورت کشتی دچار شیرجه پاشنه[4] شده و امکان برخورد با کف دریا را دارد. بنابراین این دو منحنی هیچگاه نباید یکدیگر را قطع کنند بلکه باید حداقل فاصله معینی بین آنها وجود داشته باشد. برای پرهیز از این اتفاق دو اقدام کلی انجام می‌شود:

---

1 - Launching Slipway
2 - AEW : After End of Way

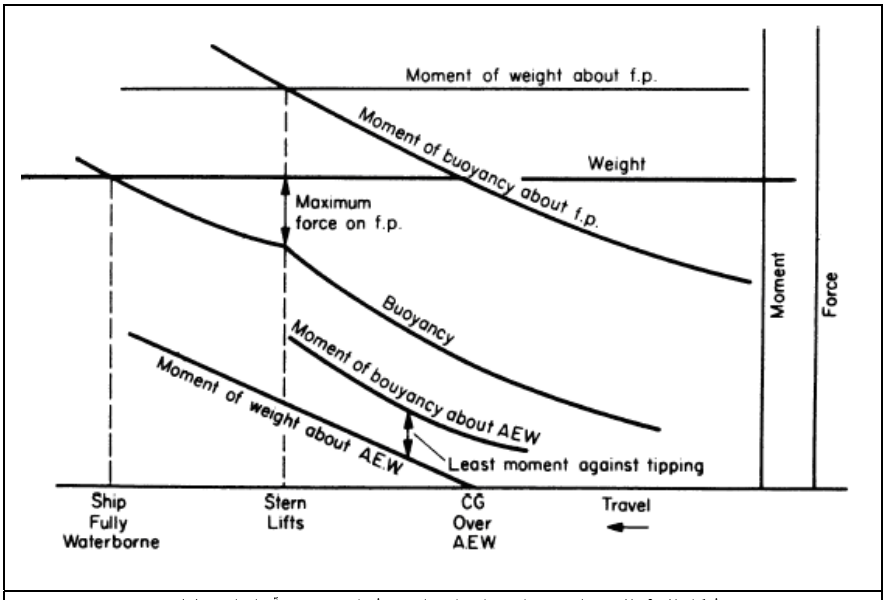
۳- پایه سینه : اولین پایه زیر بدنه که محل تماس بدنه شناور با گهواره می‌باشد. (fore poppet)

4 - Tipping

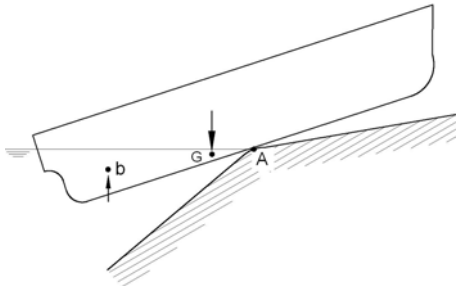
– افزایش طول سرسره آب‌اندازی، به گونه‌ای که قبل از اینکه مرکز ثقل از لبه پی عبور کند، گشتاور مرکز بویانسی قسمت داخل آب حول لبه پی، از گشتاور وزن بیشتر شود و حالت شیرجه پاشنه اتفاق نیافتد.

– پر کردن مخازن بالاست سینه به گونه‌ای که مرکز ثقل به جلوتر منتقل شده و فرصت کافی برای افزایش بویانسی قسمت داخل آب برای ایجاد گشتاور لازم، فراهم شود.

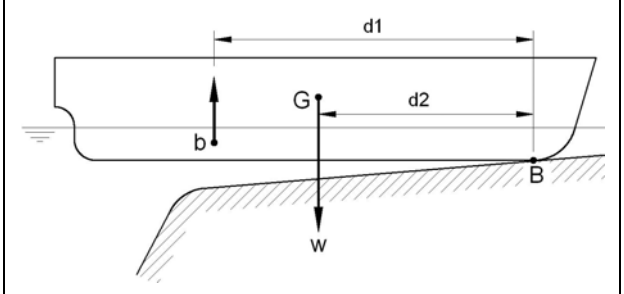
بدین ترتیب به هنگام آب‌اندازی طولی، شناور قبل از رسیدن به حالت شیرجه پاشنه (شکل ۲–۲۱۰) (و تکیه بر لبه پی) باید بتواند بر روی پایه سینه تکیه کند (شکل ۲–۲۱۱) و سپس شناور شود.



شکل ۲–۲۰۹: نمودار نیروها و ممان‌های وارد بر شناور در حین آب‌اندازی طولی



شکل ۲–۲۱۰: نمایش حالت شیرجه پاشنه (نقطه A: لبه پی)



شکل ۲–۲۱۱: جداشدن شناور از سرسره حول پایه سینه (B: پایه سینه)

۴) اگر در حین انتقال کشتی به پایین سرسره، برابری نیروی وزن و بویانسی قبل از رسیدن سینه به لبه پی صورت گیرد، پایه سینه (تکیه‌گاه سینه روی قسمت متحرک سرسره) به داخل آب نمی‌افتد در غیر این صورت این پایه به داخل آب می‌افتد و لذا باید عمق آب کافی باشد تا قسمت سینه با پایه برخورد نکند. در محاسبه امکان برخورد سینه، مواردی نظیر ممنتوم حرکت سینه، اختلاف وزن و بویانسی در لحظه افتادن سینه و اثرات میرایی آب باید لحاظ گردند. این ویژگی‌ها در دو مورد اصلی کاربرد دارند:

۱– حداقل طول و شیب سرسره مورد نیاز برای آب اندازی شناورها

۲– ارتفاع جزر و مد مناسب در حین آب اندازی

در هر مرحله از حرکت شناور به پائین سرسره، می‌توان با داشتن زاویه شیب سرسره و با استفاده از منحنی بونژان، مقدار نیروی بویانسی و مرکز آن را تعیین کرد. بدین ترتیب در هر لحظه می‌توان مقدار نیرو و گشتاور بویانسی را با وزن و گشتاور آن مقایسه کرد و تشخیص داد که در چه لحظه‌ای، پاشنه از روی پایه بلند می‌شود، شناور در چه لحظه‌ای بطور کامل شناور می‌شود، آیا شیرجه پاشنه اتفاق می‌افتد و آیا پایه سینه به داخل آب می‌افتد یا خیر.

بخش هفتم:
ممان های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی

فصل ۱[1]: ممان های خمشی ناشی از توزیع وزن و بویانسی

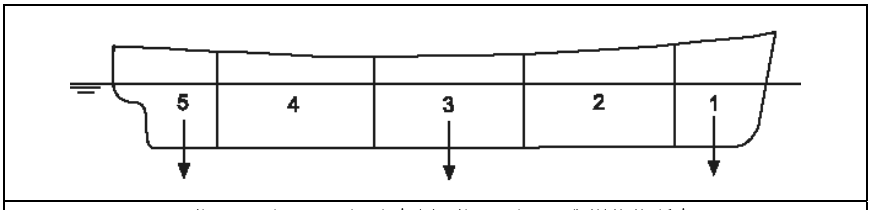
ممان های خمشی وارد بر بدنه شناور در دو حالت قابل بررسی است:

الف- ممان های خمشی در آب آرام

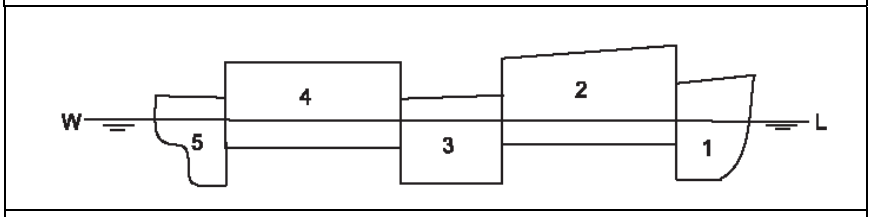
ب- ممان های خمشی در اثر امواج

در حالات فوق، کشتی همانند یک تیر، تحت خمش قرار می‌گیرد و به صورت زیر بررسی می‌شوند:

الف- ممان خمشی در آب آرام: می‌دانیم که برای شناور ماندن کشتی، وزن و بویانسی شناور باید دقیقاً با هم برابر باشند یعنی برآیند اقلام وزنی با برآیند اجزاء بویانسی ناشی از بدنه با هم برابر شوند. حال اگر توزیع نیروی وزن و بویانسی در هر قسمت از طول شناور دقیقاً با هم قرینه باشند، هیچگونه ممان خمشی بر شناور وارد نمی‌گردد ولی در واقعیت هیچ‌گاه این اتفاق نمی‌افتد. علی‌رغم برابری برآیند نیروی وزن و بویانسی، توزیع آنها در طول یکسان



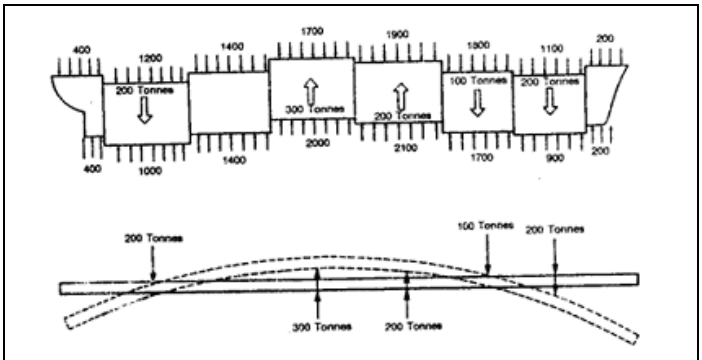
شکل ۲-۲۱۲: قسمت‌های مختلف طول شناور با وزن و بویانسی مختلف



شکل ۲-۲۱۳: نمایش افزونی وزن و بویانسی در قسمت‌های مختلف

نیست و این تفاوت توزیع نیرو باعث اعمال خمش بر بدنه شناور می‌شود. مطابق شکل ۲-۲۱۲ شناوری را در نظر بگیرید که دارای ۵ قسمت مجزا باشد. قسمتهای ۱ ، ۳ و ۵ به دلیل استقرار تجهیزات لنگر و سکان (قسمت ۱)، موتورخانه (قسمت ۳ - با فرض موتورخانه در قسمت میانی بدنه) و تجهیزات شافت و پروانه (قسمت ۵)، دچار افزونی وزن بر بویانسی هستند. قسمت های ۲ و ۴ سبک هستند و در آنها وزن از بویانسی کمتر است. حالت اغراق آمیز نسبت وزن و بویانسی این قسمت‌ها را می‌توان در شکل ۲-۲۱۳ ملاحظه نمود.

اگر آبخور شناور *WL* باشد، قسمتهای ۱ ، ۳ و ۵ که دچار افزونی وزن هستند مایل به فرو رفتن بیشتر در آب هستند که بویانسی را افزایش دهند تا برابر وزن آن قسمت گردد. قسمتهای ۲ و ۴ که سبک هستند مایل به بیرون‌آمدن از آب هستند تا اضافه بویانسی را کاهش دهند و برابری وزن و بویانسی در آن قسمت هم برقرار گردد ولی در واقع امکان بروز هیچ یک از آنها وجود ندارد چراکه کشتی یک جسم صلب است و آبخور *WL* نیز ثابت است (برای یک حالت وزنی معین). این تمایلات متفاوت قسمتهای مختلف شناور باعث اعمال ممان خمشی می‌گردد، لذا هنر طراح کشتی در این است که توزیع وزنی را در طول شناور به گونه ای انجام دهند که باعث اعمال کمترین ممان خمشی بر بدنه گردد. شکل ۲-۲۱۴ توزیع وزن و بویانسی واقعی را در یک کشتی حمل کالای عمومی ۹۷۰۰ تنی

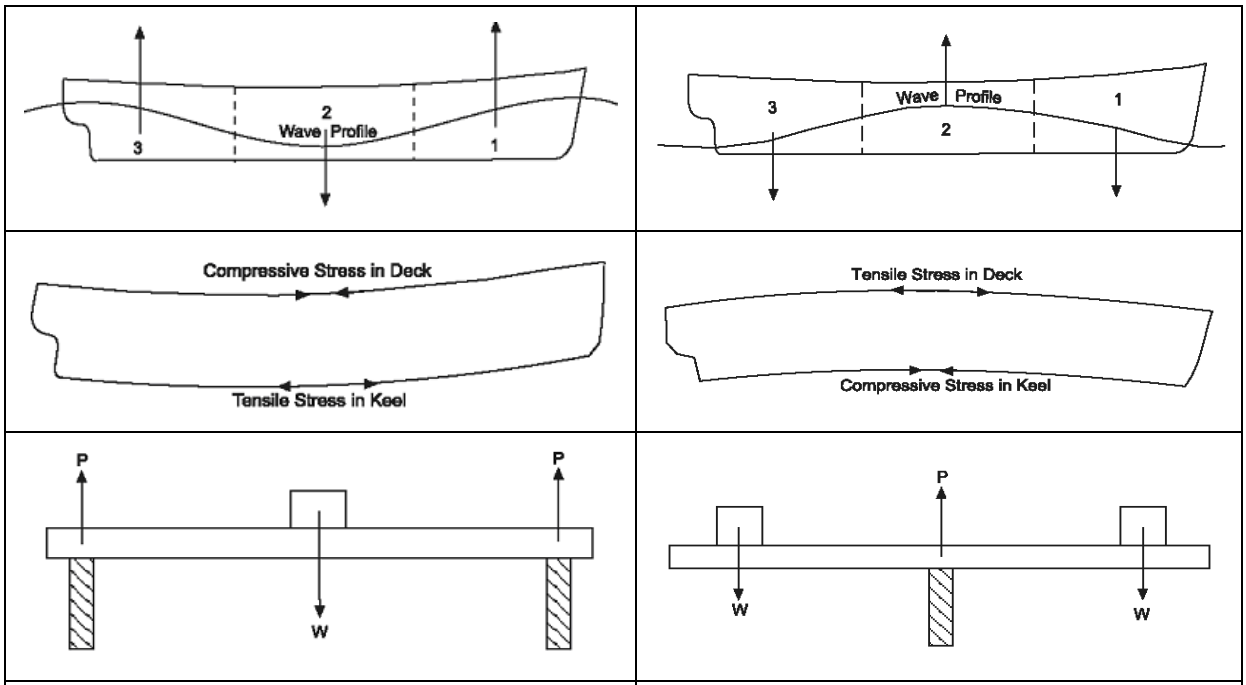


شکل ۲-۲۱۴: شبیه‌سازی نیروهای وزن و بویانسی با نیروهای وارد بر یک تیر و اعمال خمش

۱- منابع: [۲ و ۴ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۹]

نشان می‌دهد. در قسمتهای میانی به دلیل توپر بودن بدنه، نیروی بویانس بیشتر از وزن است و در قسمت سینه و پاشنه، به دلیل باریک شدن بدنه، نیروی وزن بیشتر از بویانسی شده است. در برخی از قسمتهای بدنه نیز حتی‌المقدور سعی شده که وزن و بویانسی با هم برابر و برآیند آن صفر شود و باعث اعمال ممان خمشی بر شناور نگردند. ملاحظه می‌شود که مجموع اجزاء وزنی برابر ۹۷۰۰ تن و مجموع اجزاء بویانسی بدنه نیز برابر ۹۷۰۰ تن شده است ولی بطور یکسان در طول توزیع نشده‌اند. بنابراین ممان خمشی در آب آرام وابسته به توزیع وزن و بار برروی شناور و همچنین هندسه بدنه است.

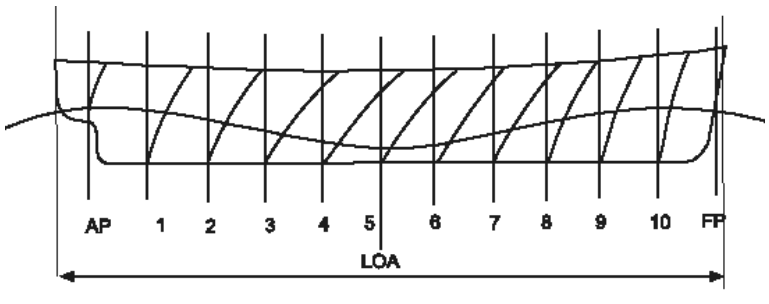
ب- ممان خمشی در اثر امواج: دانستیم که عدم تقارن نیروی وزن و بویانسی باعث اعمال ممان خمشی می‌گردد. از طرفی امواج بخصوص امواج تولیدشده توسط خود بدنه از جمله عوامل تغییر در توزیع نیروی بویانسی هستند و بدترین حالت، زمانی است که طول موج برابر با طول شناور باشد. شکل ۲-۲۱۵ را در نظر بگیرید که طول موج برابر طول شناور و قله موج در وسط شناور قرار گرفته است. در این حالت قسمت میانی با افزونی نیروی بویانسی و قسمت سینه و پاشنه با افزونی وزن مواجه شده است که باعث کشش در قسمت فوقانی (دک) و حالت فشاری در کف می‌شود. شناور به مثابه یک تیر دارای تکیه‌گاه میانی شبیه‌سازی می‌شود که دو وزنه در طرفین تیر قرار گرفته‌اند. این حالت را در مهندسی دریایی «*hogging*» گویند که بحرانی‌ترین و بدترین حالت ممکن در اعمال ممان خمشی بر شناور است. عکس این حالت که در شکل ۲-۲۱۶ ملاحظه می‌شود را «*sagging*» گویند که قعر موج در قسمت وسط شناور است. کف تحت کشش و عرشه تحت فشار قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۲۱۵: اعمال نیروی خمشی هاگینگ بر بدنه شناور

شکل ۲-۲۱۶: اعمال نیروی خمشی سگینگ بر بدنه شناور

محاسبه توزیع نیروی بویانسی در حالت موجدار بودن آب دریا به وسیله منحنی بونژان مطابق شکل ۲-۲۱۷ انجام می‌شود که نحوه استفاده از منحنی بونژان در قسمت‌های قبل توضیح داده شد. ابتدا به وسیله منحنی بونژان، مساحت زیر خط آب هر مقطع به دست می‌آید و از این مساحت‌ها نیز حجم و مرکز حجم زیر آب بدنه محاسبه شود.



شکل ۲-۲۱۷: استفاده از منحنی بونژان در تعیین حجم و مرکز حجم بدنه در امواج

بخش هشتم :
آسکوآت و اثرات متقابل

فصل ۱[1]: آسکوآت

اسکوآت عبارتست از تغییر شیب ناشی از سرعت حرکت شناور در مناطق کم‌عمق نظیر کانالها و رودخانه‌ها.
در اینجا آبهای کم‌عمق اصطلاحاً به آبهایی گفته می‌شود که عمق آب کمتر از ۱/۵ برابر آبخور شناور باشد.
توصیف اولیه و کلی پدیده اسکوآت به وسیله قانون برنولی امکان‌پذیر است:

قانون برنولی : $mgh+\frac{mp}{\rho}+\frac{1}{2}mv^2 =$ ثابت

اگر فرض کنیم که ارتفاع سیال ثابت است داریم: $\frac{mp}{\rho}+\frac{1}{2}mv^2 =$ ثابت

بنابراین اگر سرعت سیال افزایش یابد، فشار سیال کاهش می‌یابد به گونه‌ای که رابطه بالا همواره برابر مقدار ثابتی باشد. حرکت شناور در داخل آب را می‌توان بطور نسبی به صورت حرکت سیال و شناور ثابت، فرض کرد. از طرفی بیان داشتیم که نیروی بویانسی ناشی از فشار سیال جابجا شده توسط بدنه است لذا اگر فشار سیال کاهش یابد، آبخور شناور افزایش می‌یابد تا مقدار بویانسی لازم، مجدداً تأمین گردد. همانطور که در بخش‌های قبل گفتیم، فرو رفتن شناور در داخل آب باعث تغییر شیب شناور می‌شود. لذا در نهایت می‌توان گفت: «حرکت شناور در آبهای کم‌عمق، باعث تغییرات زیاد فشار شده و آن نیز باعث تغییر شیب شناور می‌شود». در سال های ۱۹۶۰–۱۹۹۰ ابعاد کشتی‌ها رشد چشمگیری یافت و نفتکش‌های غول پیکر ۳۵۰/۰۰۰ تنی با طول و آبخور بسیار بزرگ به وجود آمدند. از طرفی سرعت کشتی‌ها نیز افزایش یافت و این سه عامل باعث بحرانی شدن اسکوآت برای این کشتی‌ها، بخصوص در مناطق کم عمق شد چراکه حتی نیم درجه شیب ناشی از اسکوآت می‌توانست تغییر آبخور پاشنه به اندازه بیش از ۱ متر را به دنبال داشته باشد و خطر برخورد پاشنه یا پروانه با کف بسیار جدی بود. همین‌طور کشتی‌های دیگر که ابعاد بزرگی داشتند و از سرعت بالایی برخوردار بودند مانند کانتینربرها با سرعت بالای ۲۵ گره) در معرض خطر بودند[2]. بطور مثال کشتی نفتکش ۲۶۰/۰۰۰ تنی *Diamond Grace* در سال ۱۹۹۷ در یکی از مناطق کم عمق اطراف توکیو بر اثر پدیده اسکوآت با کف دریا برخورد کرد و بدنه و سیستم رانش آن با خسارت هنگفتی مواجه شد. حوادث مشابه باعث تحقیقات گسترده در زمینه پدیده اسکوآت شد که نتایج زیر را در برداشت:

حداکثر اسکوآت : $\delta=\frac{C_B\times S^{0.81}\times V_K^{2.08}}{20}$ (۱)

این رابطه برای آبهای آزاد (بدون محدودیت عرض) عبارتست از:

$$\delta=\frac{C_B\times V_K^2}{100} \quad (۲)$$

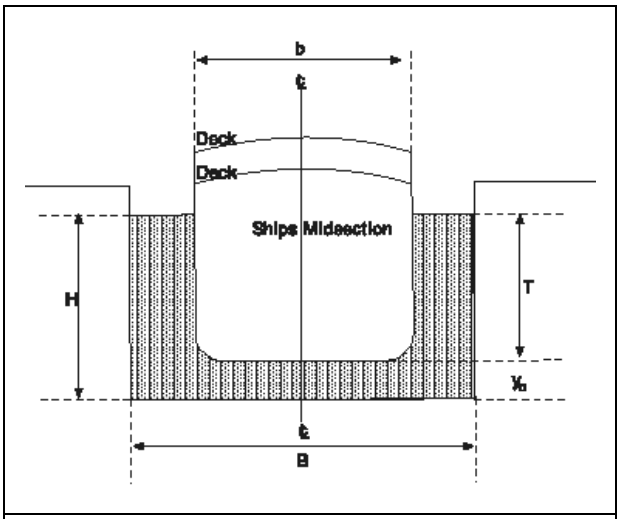
که در آن $\frac{H}{T}$ (عمق به آبخور) در محدوده ۱/۱–۱/۴ باشد.

در کانالها برای مقادیر S در محدوده ۰/۱–۰/۲۶۵ می‌توان رابطه زیر را بکار برد:

$$\delta=\frac{C_B\times V_K^2}{50} \quad (۳)$$

۱- منابع: [۲ و ۴ و ۱۹]

۱- بزرگترین نفتکش دنیا Jahre Viking با وزن مرده حدود ۵۶۵۰۰۰ تن می باشد و بزرگترین کشتی کانتینربر دنیا NYK Antares با وزن مرده ۷۲۰۰۰ تن و با سرعت ۲۳ گره می باشد.



شکل ۲-۲۱۸: نمایش پارامترهای نشان داده شده در فرمول‌ها

ضریب محدودیت محیط (S) از رابطه زیر به دست می آید:

$$S = \frac{\text{مساحت مقطع عرضی کشتی}}{\text{مساحت مقطع کانال}} = \frac{b \times T}{B \times H} \qquad (۴)$$

که این پارامترها در شکل ۲-۲۱۸ قابل ملاحظه هستند.

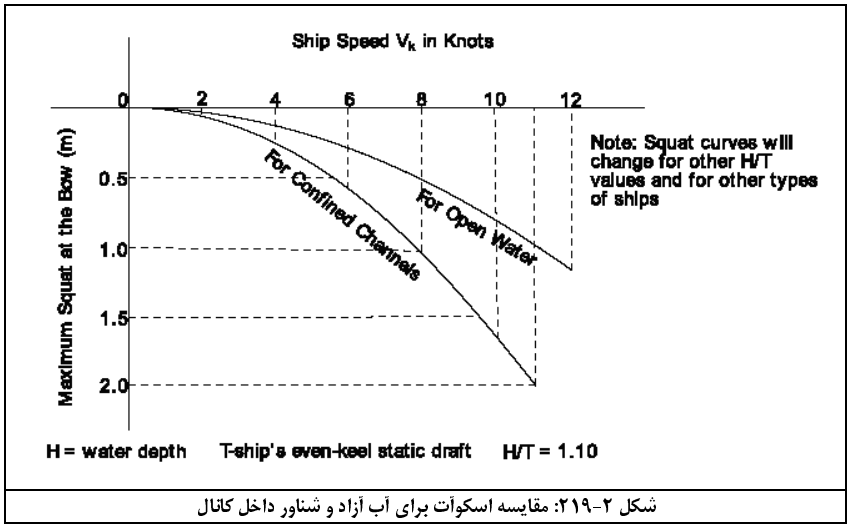
که در روابط بالا داریم:

b : عرض شناور B : عرض کانال H : عمق آب T : آبخور کشتی در حالت بدون شیب

C_B : ضریب بلوکی V_K : سرعت نسبی کشتی و آب (مثلاً رودخانه‌ها) S : ضریب محدودیت محیط

اگر بخواهیم رابطه (۴) را برای یک آب آزاد[1] محاسبه کنیم، عرض معادل B از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \left\{7.7 + 20(1 + C_B)^2\right\} \qquad (۵)$$

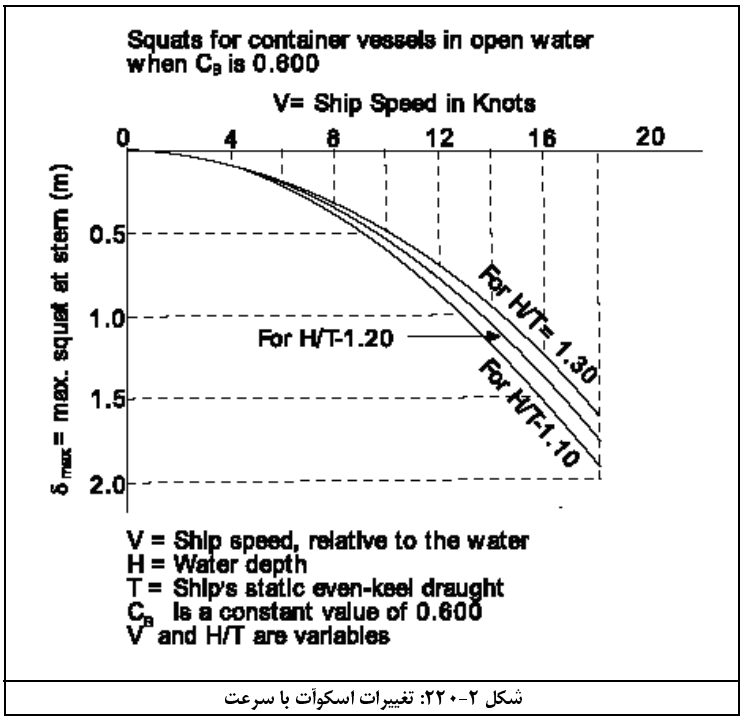


شکل ۲-۲۱۹: مقایسه اسکوآت برای آب آزاد و شناور داخل کانال

همچنین باید بدانیم که در کشتی‌های توپر مانند نفتکش‌های غول پیکر (با $C_B > 0.7$)، اغلب اسکوآت به سینه اتفاق می‌افتد و در کشتی های با C_B کوچک ($C_B < 0.7$) مانند کشتی‌های نظامی، مسافربری و کانتینربر، اغلب اسکوآت در پاشنه بروز می‌کند.

از رابطه (۱) ملاحظه می‌شود که حداکثر اسکوآت وابسته به ضریب بلوکی (C_B)، ضریب محدودیت محیطی (S) و سرعت نسبی سیال و کشتی (V_K) می‌باشد. با ثابت فرض کردن برخی پارامترها و متغیر در نظر گرفتن پارامتر دیگر می‌توان نمودارهای حداکثر اسکوآت را ترسیم کرد. شکل ۲-۲۱۹ تغییرات اسکوآت برحسب سرعت را برای دو حالت آب آزاد و آب داخل کانال نشان داده است که طبق این شکل، اسکوآت در داخل کانال بسیار بیشتر از آب آزاد است. در این شکل $\frac{H}{T} = 1.1$ در نظر گرفته شده است. شکل ۲-۲۲۰ نیز تغییرات اسکوآت با سرعت را در نسبتهای $\frac{H}{T}$ مختلف ارائه کرده است.

1 - Open Water



شکل ۲-۲۲۰: تغییرات اسکوآت با سرعت

شکل ۲-۲۲۱ تغییرات اسکوآت با سرعت را در مقادیر مختلف C_B ارائه کرده است. جدول زیر این شکل محدوده C_B را برای انواع کشتی‌ها بیان داشته است.

در نهایت می‌توان گفت تنها راه چاره کاپیتان شناور برای جلوگیری از به گل زدن شناور در اثر اسکوآت، کاهش سرعت به هنگام ورود به آبهای کم‌عمق است. ورود به آبهای کم‌عمق را می‌توان با نشانه‌های زیر تشخیص داد:

۱- افزایش ارتفاع امواج تشکیل شده از حرکت بدنه بخصوص در قسمت سینه

۲- کاهش فرمان‌پذیری سکان

۳- کاهش خودبخود دور موتور که در آبهای آزاد حدود ۱۵ درصد و در کانالها حدود ۲۰ درصد است.

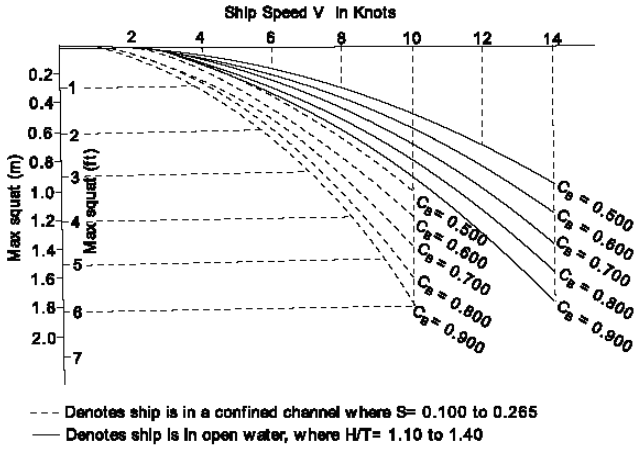
۴- کاهش سرعت حرکت شناور که در آبهای آزاد حدود ۳۰ درصد و در کانالها حدود ۶۰ درصد است.

۵- کاهش حرکات رول ، پیچ و هیو

۶- گل آلود شدن اطراف بدنه (برای مناطق شنی)

۷- افزایش قطر گردش شناور در صفحه افقی به حدود ۲ برابر

۸- افزایش زمان و فاصله توقف



Ship type	*Typical C_B, fully loaded*	*Ship type*	*Typical C_B, fully loaded*
ULCC	0.850	General cargo	0.700
Supertanker	0.825	Passenger liner	0.625
Oil tanker	0.800	Container ship	0.575
Bulk carrier	0.750	Coastal tug	0.500

شکل ۲-۲۲۱: تغییرات اسکوآت بر حسب CB

فصل ۲: اثرات متقابل دو شناور در حال حرکت[۲]

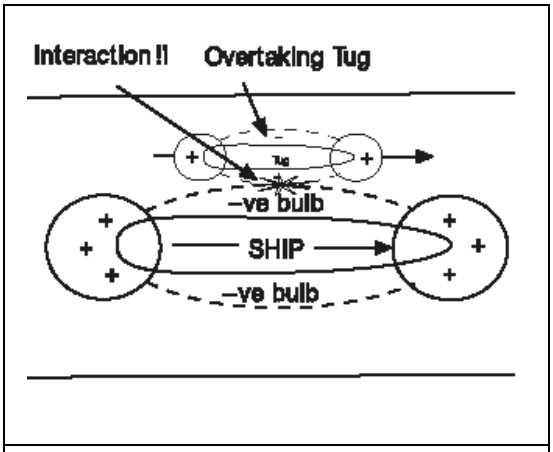
اثر متقابل شامل تغییر شیب یا هیل دو شناور گذرنده از کنار هم می‌باشد که این اثر در رودخانه‌ها و کانالها بسیار محسوس است. تبعات زیر را می‌توان برای اثر متقابل برشمرد:

۱- هنگامی که عرض میانی دو شناور در امتداد هم قرار می‌گیرند و شناورها در داخل کانال و رودخانه‌ها هستند، اثر متقابل باعث دو برابر شدن اسکوآت می‌شود.

۲- اثر متقابل فرمان‌پذیری سکان را دشوار و غیر قابل پیش‌بینی می‌کند.

۳- کشتی کوچکتر ممکن است به دلیل اثر متقابل، از مسیر خارج و به کناره‌های رودخانه برخورد کند.

۴- خطر واژگونی کشتی کوچکتر در شرایط خاص وجود دارد.



شکل ۲-۲۲۲: اثر متقابل بین دو کشتی متحرک

به صورت کلی، سه حالت را می‌توان برای اثر متقابل برشمرد:

۱- اثر متقابل بین دو کشتی متحرک مجاور هم

۲- اثر متقابل بین کشتی و دیواره‌های کناری رودخانه یا کانال

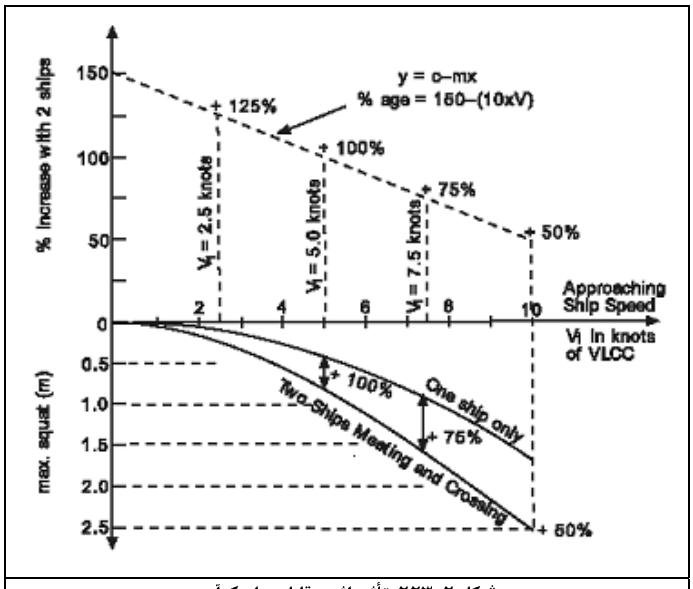
۳-اثر متقابل بین کشتی وکف رودخانه یا کانال (اسکوآت)

علت بروز اثر متقابل، تغییرات فشار در اطراف بدنه می‌باشد که مطابق شکل ۲-۲۲۲ می‌توان آن را نشان داد:

در این شکل، کشتی با سرعت V رو به جلو در حال حرکت می‌باشد که در قسمت سینه و پاشنه نواحی پرفشار و در قسمت میانی شناور ناحیه کم فشار به وجود می‌آید و ناحیه کم فشار باعث مکش از ناحیه اطراف می گردد. اگر ناحیه تغییرات فشار نشان داده شده بین دو کشتی با هم متداخل شود، «اثر متقابل» بروز می‌کند. نتیجه اثر متقابل، تغییر شیب و هیل است که در قسمت الف و ب توضیح بیشتری در مورد آنها ارائه می‌گردد. البته این اثر بر گردش در صفحه افقی[۳] نیز مؤثر است که در قسمت (ج) بررسی می‌شود.

الف- تأثیر اثر متقابل بر اسکوآت

می‌دانیم که از عوامل مؤثر بر اسکوآت، ضریب محدودیت محیط (S) می‌باشد. وقتی دو شناور در کنار هم و در داخل کانال قرار می‌گیرند در واقع ضریب S افزایش یافته و به تبع آن، اسکوآت افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بطور مثال دو شناور یکی با $C_B = 0.85$ و دیگری $C_B = 0.52$ را در نظر بگیرید که در داخل کانال به یکدیگر نزدیک می‌شوند. مقایسه تفاوت مقادیر اسکوآت برای کشتی بزرگتر، در شکل ۲-۲۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۲۳: تأثیر اثر متقابل بر اسکوآت

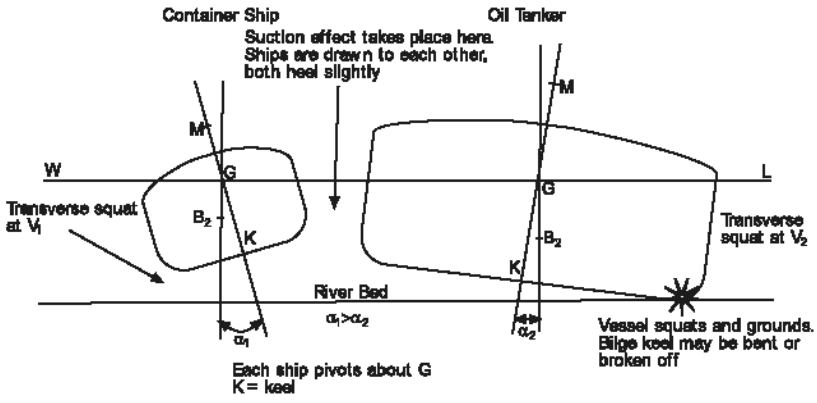
۱- [2] , [4]

2 - Intraction
3 - yaw

خط چین‌های قسمت بالایی نمودار، درصد افزایش اسکوآت را نشان می‌دهد که تا بیش از ۱۲۵ درصد نیز رسیده است. نکته قابل توجه در اینجاست که کشتی بزرگتر از آنجا که $C_B > 0.7$ دارد، اسکوآت به سینه دارد و کشتی کوچکتر که $C_B < 0.7$ دارد، اسکوآت به پاشنه دارد.

ب- تأثیر اثر متقابل بر غلتش عرضی

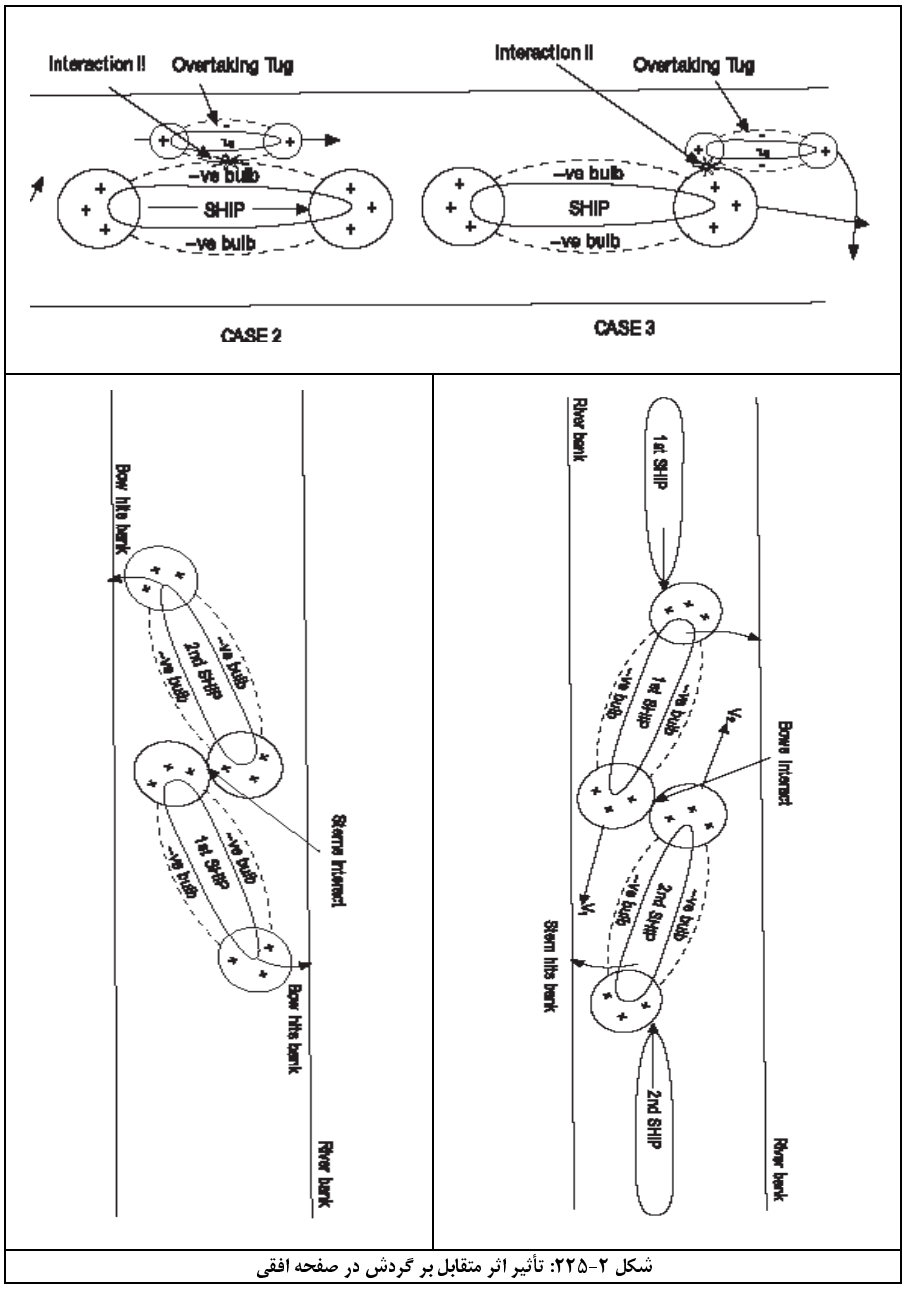
هنگامی که دو شناور از کنار هم عبور می‌کنند، (بخصوص اگر ابعاد آنها برابر نباشد)، وقتی عرض میانی دو شناور هم امتداد شود، در بین دو کشتی، تداخل نواحی کم فشاری به وجود می‌آید که مکش زیادی در ناحیه بین دو کشتی ایجاد می‌کند (مطابق شکل ۲-۲۲۴). این ناحیه کم فشار باعث هدایت جریان سیال از طرف مقابل به این ناحیه می‌شود که غلتش شناورها را مطابق شکل ۲-۲۲۴ در پی دارد. غلتش کشتی کوچکتر، بیشتر از کشتی بزرگتر است ولی از آنجا که عرض کشتی بزرگتر خیلی بیشتر است، اگر عمق زیر شناور کافی نباشد، احتمال برخورد شناور بزرگتر با کف وجود دارد. در این حالت غلتش شناور حول G در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۲۲۴: تأثیر اثر متقابل بر غلتش عرضی

ج- تأثیر اثر متقابل بر گردش در صفحه افقی

تداخل نواحی کم فشار و پرفشار دو شناور می‌تواند عکس‌العملهای متفاوتی از دو شناور را در صفحه افقی در پی داشته باشد. این حالات را می‌توان در شکل ۲-۲۲۵ ملاحظه کرد. در این شکل، حالات مختلف تداخل نواحی پرفشار و کم‌فشار در قسمت سینه و پاشنه و میانی شناور نشان داده شده است. تغییر مسیر شناور نیز بر روی شکل نشان داده شده است. در حالت تداخل نواحی کم فشار قسمت میانی، شناورها ضمن کشیده شدن به سمت یکدیگر، باز هم به حرکت مستقیم ادامه می‌دهند ولی در بقیه حالات، تغییر مسیر شناور کوچکتر بسیار محسوس است.



شکل ۲-۲۲۵: تأثیر اثر متقابل بر گردش در صفحه افقی

امام حسن عسکری(ع):
تواضع نعمتی است که کسی به آن حسادت نمی ورزد

ضمیمه ۱ :

ملاحظات طراحی پایداری در استاندارد کشتی سازی BV

BV : Part B / Chapter 3/

مهمترین موارد این استاندارد در زمینه پایداری شناور، در زیر به اختصار مورد اشاره قرار می‌گیرند (شکل‌ها و نمودارها از متن اصلی انتهای این بخش ملاحظه شوند):

بخش ۱:

۱- توضیحات عمومی

تمام کشتی‌های با طول بزرگتر یا مساوی ۲۴ متر می‌توانند از این استاندارد استفاده کنند، البته به شرطی که پایداری در حالت سالم[1] آنها به حد کافی باشد. برای کشتی‌های با طول کمتر از ۲۴ متر نیز می‌توان از این استاندارد استفاده کرد با این تفاوت که بخش‌هایی از آن برای این کشتی ها، حذف می شود.

۲- فرآیند ارزیابی

۲-۱- مدارکی که باید تسلیم شوند:

کلیه مدارکی که در قسمت sec 3 , ch 1، [1,1,2] گفته شده باید ارائه شود.

مدارک پایداری که در قسمت sec 3 , ch 1، [1,2,1] بیان شد شامل موارد زیر باید ارائه شود:

– ارائه گزارش آزمایش کجی به صورتی که در بخش [2,2] بیان می‌شود یا ارائه اطلاعات پایداری و نتایج آزمایش کجی مربوط به کشتی مشابه[2] به همراه وزن سبک[3] آن (اگر وزن سبک، به روشی غیر از آزمایش کجی به دست آمده، باید گزارش و نوع روش اندازه گیری ضمیمه گردد).

– دفترچه تریم و پایداری به گونه ای که بیان خواهد شد.

– محاسبات تقسیم بندی داخلی و طول مجاز آبگرفتگی به گونه‌ای که در قسمت pr E ، CH 11، sec 3 ، [1,3] بیان شده است.

– روش بارگیری غلات و فله به روش توضیح داده شده در sec 3 , ch 4 , pr E ، [2,2,2].

– محاسبه پایداری در حالت صدمه‌دیده مطابق قسمت sec 3 , ch 3.

– مدارک کامپیوتری بارگیری مطابق sec 3 ,sec 2 , ch 3.

مؤسسه رده‌بندی این حق را دارد که کلیه مدارک نحوه بارگیری براساس تخمین وزن سبک شناور را درخواست کند.

مدارک نهایی: مدارک نهایی پس از انجام آزمایش کجی یا کنترل وزن سبک[4] تسلیم می‌شود. این نتایج [که پس از ساخت و آب اندازی ارائه می‌شود]. حداکثر می‌تواند به اندازه مقادیر زیر با مدارک اولیه ارائه شده تفاوت داشته باشد.

– تفاوت وزن سبک شناور به اندازه ۲ درصد.

– تفاوت مرکز ثقل طولی به اندازه ۱ درصد طول بین دو عمود.

همچنین مرکز ثقل عمودی ارائه شده نباید به هیچ عنوان بالاتر از مرکز ثقل عمودی ارائه شده در فازهای قبل باشد.

۲-۲- آزمایش کجی / کنترل وزن سبک

تعاریف:

– وزن سبک: شامل وزن شناور تکمیل شده بدون وجود مواد مصرفی، بار داخل انبارها و خدمه. البته مایعات داخل ماشین آلات مانند روغن هیدرولیک که برای کارکرد دستگاهها ضروری هستند جزء وزن سبک در نظر گرفته می‌شوند.

– آزمایش کجی: آزمایش کجی شامل جابجاکردن وزنه‌هایی با جرم مشخص، به صورت عرضی و اندازه‌گیری زاویه هیل ناشی از جابجایی‌ها می‌باشد که با بکاربردن روابط خاص، ارتفاع مرکز ثقل (*KG* یا *VCG*) تعیین می‌گردد.

– کنترل وزن سبک: به هنگام انجام آزمایش کجی (حالت بدون هیل شناور)، آبخور شناور از روی علامت خط آبخور خوانده می‌شود و با استفاده از منحنی‌های هیدرواستاتیک، می‌توان وزن سبک شناور را به دست آورد. البته باید وزن و مرکز ثقل طولی، عرضی و عمودی کلیه اقلام غیر ضروری موجود در شناور به هنگام انجام آزمایش کجی حذف و اقلامی که احیاناً بعداً باید نصب شوند نیز در محاسبات وزن سبک لحاظ شوند تا وزن سبک در حالت واقعی شناور به دست آید.

مؤسسه رده بندی در موارد زیر اجازه می‌دهد که به جای آزمایش کجی تنها کنترل وزن سبک انجام شود:

---

1 - intact stability
2 - sister ship
3 - light weight
4 - light weight check

– اگر نتایج آزمایش کجی و اطلاعات پایداری کشتی مشابه در دسترس باشد و وزن سبک شناور نیز بیش از ۱٪ با کشتی مشابه تفاوت نداشته باشد، دیگر نیازی به انجام آزمایش کجی نیست و مرکز ثقل عمودی کشتی مشابه را می‌توان برای شناور موضوع پروژه در نظر گرفت.

– نوع خاصی از کشتی‌ها مانند کاتاماران ها به شرطی که:

- جزئیات اقلام وزنی و موقعیت مرکز ثقل آنها معلوم باشد.
- کنترل وزن سبک انجام شده باشد و عدد حاصل شده بین وزن تخمین زده شده و وزن تعیین شده باشد.
- در تمام شرایط بارگیری، طبق دفترچه تریم و پایداری شناور، پایداری مناسبی وجود داشته باشد.

بخش ۲ :

۱- توضیحات عمومی :

شامل توضیحاتی از نیازمندی‌های تأیید پایداری، وزنه‌های سربی ثابت داخل شناور، شناورهای ابداعی، شرایط کاری و غیره.

۲- معیارهای طراحی:

۲-۱- معیارهای پایداری در حالت سالم:

۲-۱-۱- موارد توضیح داده شده در زیر حداقل‌های مورد نیاز برای تأمین پایداری هستند نه حداکثر مقادیر. البته باید توجه داشت که بیش از حد بزرگ شدن ارتفاع متاسنتری[1] نیز نامناسب است چرا که باعث شتاب بالای حرکات شناور شده و کارکرد خدمه، دستگاهها و حتی ایمنی حمل بار را به خطر می‌اندازد. معیارهای پایداری در زیر بیان می‌شوند.

۲-۱-۲- مساحت زیر نمودار GZ :

– مساحت زیر نمودار GZ تا زاویه ۳۰ درجه کمتر از ۰/۰۵۵ متر – رادیان نباشد.

– مساحت زیر نمودار GZ تا زاویه ۴۰ درجه (یا زاویه‌ای کمتر از ۴۰ درجه (θ_f) که اولین عرشه غیر آب‌بند به زیر آب می‌رود) کمتر از ۰/۰۹ متر – رادیان نباشد.

– مساحت زیر نمودار GZ در زاویه بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (یا θ_f درجه) نباید کمتر از ۰/۰۳ متر – رادیان باشد.

۲-۱-۳- حداقل بازوی بازگرداننده (GZ)

حداقل مقدار GZ در زاویه ۳۰ درجه یا بیشتر، باید برابر ۰/۲ متر باشد.

۲-۱-۴- زاویه‌ای که حداکثر بازوی بازگرداننده در آن به دست می آید:

– حداکثر مقدار GZ باید ترجیحاً در زاویه‌ای بیش از ۳۰ درجه و حداقل در ۲۵ درجه به دست آید.

– اگر منحنی GZ دارای دو نقطه حداکثر است، اولین نقطه حداکثری نباید کمتر از ۲۵ درجه رخ دهد.

– در برخی موارد خاص، مؤسسه رده‌بندی می‌تواند اجازه دهد که حداکثر زاویه‌ای که در آن بازوی بازگرداننده به حداکثر مقدار خود می‌رسد (θ_{max}) کمتر از ۲۵ درجه هم باشد (و در هیچ شرایطی کمتر از ۱۵ درجه نمی‌تواند باشد) به شرطی که مساحت کل زیر منحنی GZ کمتر از مقدار A نباشد. مقدار A از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A = 0,055 + 0,001\ (30° - \theta_{max})$$

۲-۱-۵- ارتفاع متاسنتری اولیه

ارتفاع متاسنتری اولیه (GM_0) شناور نباید کمتر از ۰/۱۵ متر باشد.

۲-۱-۶- مواردی که پایداری را تحت تأثیر قرار می‌دهند:

برخی موارد که در اینجا ذکر می‌شوند، پایداری را تحت تأثیر قرار می‌دهند و لذا باید در نظر گرفته شوند از جمله، باد عرضی با سطح بادخور زیاد، یخ زدگی عرشه فوقانی، آب جمع شده روی عرشه و برخورد امواج از پشت به شناور.

۲-۱-۷- مواردی که پایداری را کاهش می‌دهند:

باید ضریب اطمینان کافی برای مواردی که باعث کاهش پایداری می‌شوند را مد نظر گرفت مانند افزایش وزن در اثر جذب آب یا یخ‌زدگی بعضی بخش‌ها یا کاهش وزن در اثر مصرف موادی مانند سوخت و انبارها.

۳- معیار وزش باد شدید و غلتش (معیار آب و هوا):

۳-۱- توضیحات کلی

۳-۱-۱- مطالب این قسمت برای کشتی‌های با طول بیش از ۲۴ متر بکار می رود و مکمل بحث قبلی پایداری است.

۳-۲- معیار آب و هوا

1 - GM

۳-۲-۱- فرضیات:

بررسی مقاومت شناور در برابر اثرات باد عرضی و غلتش برای شرایط استاندارد بارگیری، براساس شکل۲-۲۱۹ به صورت زیر است:

کشتی در معرض فشار باد یکنواخت به صورت عمود بر صفحه مرکزی شناور قرار می‌گیرد که بازوی نیروی باد L_{w1} می باشد.

θ_0 زاویه تعادل استاتیکی و θ_1 زاویه‌ای است که شناور بر اثر نیروی موج رو به باد متمایل شده است.

سپس کشتی در معرض فشار تندباد با بازوی هیل دهنده L_{w2} قرار می‌گیرد.

اثر سطح آزاد مخازن نیز باید لحاظ گردد.

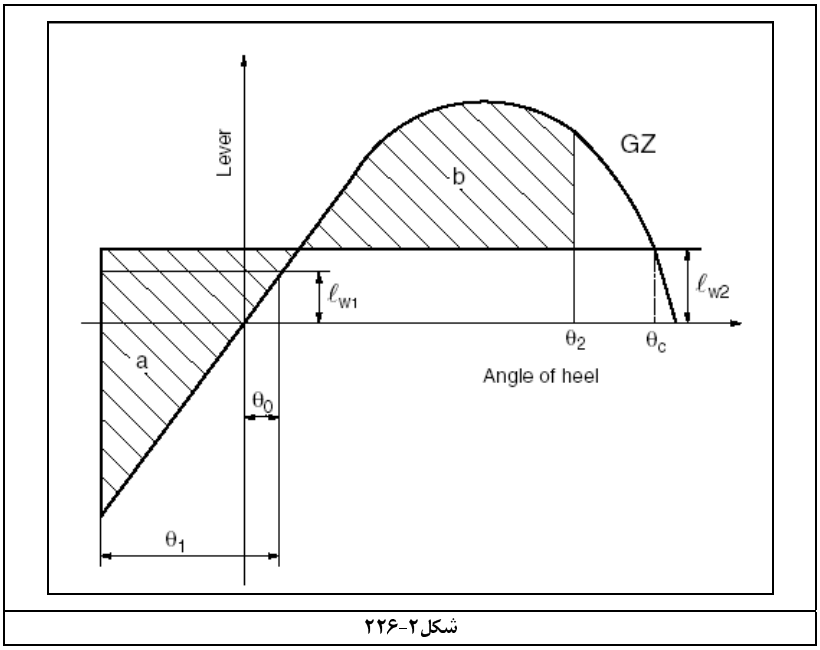
۳-۲-۲- معیار پایداری دینامیکی

براساس فرضیات بیان شده، معیار به صورت زیر می‌باشد:

مساحت b باید برابر یا بزرگتر از مساحت a باشد که:

- a: مساحت بین منحنی GZ و بازوی هیل‌دهنده L_{w2} از محل برخورد دو نمودار تا زاویه θ_R (مطابق شکل ۲-۲۲۶).
- b: مساحت بین منحنی GZ و بازوی هیل‌دهنده L_{w2} از محل برخورد دو نمودار تا زاویه θ_2 (مطابق شکل ۲-۲۲۶).

θ_0 زاویه تعادل استاتیکی شناور در معرض وزش باد یکنواخت باید حداکثر ۱۶ درجه یا ۸۰ درصد زاویه خیسی عرشه باشد.



شکل۲-۲۲۶

۳-۲-۳- بازوهای هیل دهنده:

بازوهای هیل‌دهنده باد L_{w1} و L_{w2} بر حسب متر، مقادیر ثابتی در همه زوایای غلتش هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{w1} = \frac{PAZ}{1000g\Delta} \qquad L_{w2} = 1.5L_{w1}$$

که داریم: P: برای ناوبری در مناطق نامحدود اقیانوسی برابر است با $۵۰۴ \frac{N}{m^2}$ و برای ناوبری در مناطق محدود (غیر اقیانوسی) کمتر از این حد می‌باشد. A: سطح جانبی در معرض وزش باد بر حسب m^2 که از سطح جانبی بدنه کشتی، روبناسازی و سطح جانبی بارهای روی عرشه به دست می‌آید. Z : فاصله عمودی بر حسب متر از مرکز سطح A تا مرکز سطح جانبی زیر خط آبخور (که به صورت تقریبی نصف عمق آبخور در نظر گرفته می‌شود).

Δ : جابجایی بر حسب تن.

$g : 9.81\left(m/s^2\right)$

۳-۲-۴- زوایای هیل: برای محاسبه معیار بیان شده، زوایای تعریف شده در شکل ۲-۲۲۶ به صورت زیر به دست می‌آید:

θ_0 : زاویه هیل برحسب درجه که از وزش باد یکنواخت ایجاد شده است.

θ_1 : زاویه رول برحسب درجه که ناشی از نیروی موج به سمت باد می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_1 = 109KX_1X_2\sqrt{rs}$$

زاویه θ_1 برای کشتی هایی که دارای باله ضد غلتش هستند، در حالت بدون باله در نظر گرفته می‌شود.

θ_2 : زاویه به زیر آب رفتن عرشه (θ_f) برحسب درجه یا ۵۰ درجه یا θ_c.

θ_f : زاویه هیل برحسب درجه که در آن زاویه یکی از سوراخهای بدنه، روبناسازی یا اتاقک روی عرشه که آب‌بند نیست به زیر آب می‌رود.

θ_c : زاویه در محل تقاطع منحنی GZ با بازوی هیل‌دهنده L_{w2}.

θ_R : این زاویه برابر است با: $\theta_R = \theta_0 - \theta_1$.

X_1 : ضریبی که از جدول ۱ به دست می‌آید.

X_2 : ضریبی که از جدول ۲ به دست می‌آید.

K : ضریبی که از ملاحظات زیر به دست می‌آید:

- برای کشتی‌هایی با کف گرد بدون تیغه های ثابت کاهش غلتش یا تیغه کیل ، K=۱ است .
- برای کشتی‌هایی با کف با زاویه تند K=0.7 است.
- برای کشتی‌هایی که دارای تیغه های ثابت کاهش غلتش یا تیغه کیل نیستند، K از جدول ۳ به دست می‌آید.

r : برابر است با : $r = 0.73 \pm 0.6(OG/T_1)$ که برای این رابطه داریم:

- OG : فاصله برحسب متر بین مرکز ثقل و خط آبخور (اگر مرکز ثقل بالای خط آب باشد مثبت و اگر پائین خط آب باشد، منفی است).
- T_1 : عمق آبخور متوسط بدون در نظر گرفتن ضخامت بدنه برحسب متر.

S : تعریف شده در جدول ۴ که T_R این جدول از رابطه زیر وارد می‌شود:

$$T_R = \frac{2CB}{\sqrt{GM}}$$

که در این رابطه C برابر است با:

$$C = 0.373 + 0.023\frac{B}{T_1} - 0.043\frac{L_w}{100}$$

در این رابطه نیز پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

L_w : طول خط آبخور بر حسب متر.

T_1 : عمق آبخور متوسط بدون در نظر گرفتن ضخامت بدنه برحسب متر.

A_K : مساحت کل تیغه‌های ثابت ضد غلتش یا مساحت جانبی کل هر یک از ملحقات بدنه به گونه‌ای که در برابر حرکت رول، جرم افزوده ایجاد می‌کند. (بر حسب متر مربع)

GM : ارتفاع متاسنتری برحسب متر که اثر سطح آزاد مخازن در آن لحاظ شده است.

Table 1 : Values of coefficient X_1

B/d	X_1
≤ 2,4	1,00
2,5	0,98
2,6	0,96
2,7	0,95
2,8	0,93
2,9	0,91
3,0	0,90
3,1	0,88
3,2	0,86
3,4	0,82
≥ 3,5	0,80

Table 2 : Values of coefficient X_2

C_B	X_2
≤ 0,45	0,75
0,50	0,82
0,55	0,89
0,60	0,95
0,65	0,97
≥ 0,70	1,00

Table 3 : Values of coefficient k

$\frac{A_K \times 100}{L \times B}$	k
0,0	1,00
1,0	0,98
1,5	0,95
2,0	0,88
2,5	0,79
3,0	0,74
3,5	0,72
≥ 4,0	0,70

Table 4 : Values of factor s

T_R	s
≤ 6	0,100
7	0,098
8	0,093
12	0,065
14	0,053
16	0,044
18	0,038
≥ 20	0,035

فاصله تابش خود را با دیگران تنظیم کن ...

خداوند خورشید را در جایی نهاد که گرم کند ولی نسوزاند...

CHAPTER 3
STABILITY

Section 1 General

1	General	43
	1.1 Application	
2	Examination procedure	43
	2.1 Documents to be submitted	
	2.2 Inclining test/lightweight check	

Section 2 Intact Stability

1	General	45
	1.1 Information for the Master	
	1.2 Permanent ballast	
2	Design criteria	45
	2.1 General intact stability criteria	
3	Severe wind and rolling criterion (weather criterion)	46
	3.1 Scope	
	3.2 Weather criterion	
4	Effects of free surfaces of liquids in tanks	48
	4.1 General	
	4.2 Consideration of free surface effects	
	4.3 Categories of tanks	
	4.4 Consumable liquids	
	4.5 Water ballast tanks	
	4.6 Liquid transfer operations	
	4.7 GM0 and GZ curve corrections	
	4.8 Free surface moment	
	4.9 Small tanks	
	4.10 Remainder of liquid	
5	Cargo ships carrying timber deck cargoes	49
	5.1 Application	
	5.2 Definitions	
	5.3 Stability criteria	
	5.4 Stability booklet	
	5.5 Calculation of the stability curve	
	5.6 Loading conditions to be considered	
	5.7 Assumptions for calculating loading conditions	
	5.8 Stowage of timber deck cargoes	
6	Icing	50
	6.1 Application	
	6.2 Ships carrying timber deck cargoes	
	6.3 Calculation assumptions	
	6.4 Guidance relating to ice accretion	

Section 3 Damage Stability

1 Application 52
1.1 Ships for which damage stability is required
2 General 52
2.1 Approaches to be followed for damage stability investigation
3 Documents to be submitted 52
3.1 Damage stability calculations
3.2 Permeabilities
3.3 Progressive flooding
4 Damage control documentation 54
4.1 General

Appendix 1 Inclining Test and Lightweight Check

1 Inclining test and lightweight check 55
1.1 General

Appendix 2 Trim and Stability Booklet

1 Trim and stability booklet 58
1.1 Information to be included in the trim and stability booklet
1.2 Loading conditions
1.3 Stability curve calculation

Appendix 3 Probabilistic Damage Stability Method for Cargo Ships

1 Probabilistic damage stability method for cargo ships 63
1.1 Application
1.2 Definitions
1.3 Required subdivision index R
1.4 Attained subdivision index A
1.5 Calculation of factor pi
1.6 Calculation of factor si
1.7 Permeability
1.8 Stability information
2 Interpretations 69
2.1 Interpretations on transverse subdivision
2.2 Interpretations on combined transverse, horizontal, and longitudinal subdivision
2.3 Interpretations on recesses
2.4 Interpretation on the contribution to the attained index A applying various forms of watertight subdivision.

منابع قسمت دوم: هیدرواستاتیک و پایداری

1) Principles of Naval Architecture/ Vol.1/E.N.Lewis/1988

2) Basic Ship Theory / Vol.1/K.J.Rawson-E.C.Tupper/2001

3) Mechanics of Marine Vehicles/ B.R.Clayton-E.D.Bishop/1982

4) Ship Stability for Masters and Mates/ D.R.Derrett/2001

5) Modern Ship Design/ T.C.Gillmer/1975

6) Naval Architecture for non-Naval Architecture/ H.Benford/1991

7) Principles of Ship Performance/ Rob Vroman/2003

8) Submarine Design Notes/ H.A.Jackson/1980

9) Submersible Vehicle System Design /A Group of Authorities/1990

10) Introduction to Naval Architecture/ Eric Tupper/2002

11) Practical Ship Design/vol 1/ G.M.Watson/2002

12) Merchant Ship Stability/ A.R.Lester/1992

13)Creative Naval Architure/ G.N.Hatch/1971

۱۴- تعادل و پایداری شناورها- دکتر محمد سعید سیف-دکتر مهدی سیف-۱۳۷۴ – انتشارات دانشگاه هرمزگان

۱۵- شناخت کشتی – اسحاق علی میر

۱۶- پایداری و ایستایی کشتی- دکتر احمد باشی – ۱۳۷۴-انتشارات دانشگاه علوم دریایی نوشهر

۱۷- اصول طراحی زیردریایی – محمد مونسان – ۱۳۸۳- انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۱۸- مجموعه آزمونهای کارشناسی ارشد معماری کشتی – مصطفی قاسمی – مجید کریمی راد – ۱۳۸۵

۱۹- تحلیل پایداری شناورها – محمد مونسان – ۱۳۸۷ – انتشارات دانشگاه مالک اشتر

قسمت سوم

هیدرودینامیک و پیشرانش

(Hydrodynamics & Propulsion)

- بخش اول: مروری بر مکانیک سیالات
- بخش دوم: مقاومت در شناورها
- بخش سوم: بازدهی و توان
- بخش چهارم: بررسی روش انجام آزمایش در حوضچه کشش
- بخش پنجم: طراحی خطوط بدنه کشتی
- بخش ششم: پروانه و سیستم رانش
- بخش هفتم: طراحی سکان

بخش اول:
مروری بر مکانیک سیالات

فصل اول: مفاهیم اولیه مکانیک سیالات[۱]

علم مکانیک سیالات به بررسی رفتار سیال در شرایط مختلف می‌پردازد. در این علم، معادلات و ملاحظات حاکم بر رفتار سیال ارائه می‌شود. در این قسمت، فقط بخش‌هایی از مهمترین مباحث علم مکانیک سیالات که دارای کاربردهای مهمی در علم هیدرودینامیک است، بیان می‌شود. مباحث تکمیلی در این زمینه در کتابهای «مکانیک سیالات» موجود است و در اینجا بیان نمی‌گردد. «علم هیدرودینامیک»[۲] به بررسی رفتار سیال آب می‌پردازد که در واقع زیرمجموعه‌ای از مکانیک سیالات محسوب می‌شود. در مهندسی معماری کشتی منظور از «هیدرودینامیک»، بررسی نیروهای سیال آب وارد بر بدنه کشتی می‌باشد که مهمترین خروجی آن محاسبه نیروی مقاومت[۳] سیال در برابر حرکت شناور می‌باشد. پس از محاسبه مقاومت، می‌توان مواردی مانند توان مورد نیاز موتور شناور، مشخصات پروانه، طراحی و بهینه‌سازی شکل بدنه شناور را مشخص نمود. به بدنه شناوری که از نظر مقاومت، در حداقل مقدار ممکن باشد، «بدنه هیدرودینامیکی» گفته می‌شود که معادل «خط جریانی بودن»[۴] در علم مکانیک سیالات است. در ادامه مبحث، فقط به برخی مباحث مورد نیاز از مکانیک سیالات پرداخته می‌شود.

عدد رینولدز (Re):

عدد رینولدز عبارتست از نسبت نیروی نیروی اینرسی به اصطکاکی.

$$C_1 = \frac{dynamic\ \ force}{friction\ \ force} = \frac{\frac{1}{2}\rho V^2 A}{\mu.\left(\frac{V}{L}\right).A} = \frac{\mathrm{VL}}{\frac{\mu}{\rho}} \qquad \Rightarrow \qquad R_e = \frac{VL}{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{VL}{\nu}$$

کاربرد عدد رینولدز در محاسبه مقاومت اصطکاکی و مقاومت فشاری است. μ را ضریب لزجت دینامیکی با واحد $(kg/m.s)$ و υ را ضریب لزجت سینماتیکی با واحد (m^2/s) گویند. برای آب شیرین داریم:

$$\mu \approx 10^{-3}\left(\frac{kg}{m.s}\right)$$

$$\nu \approx \frac{\mu}{\rho} = \frac{10^{-3}}{1000} = 10^{-6}\left(\frac{m^2}{s}\right)$$

عدد فرود (Fr):

عدد فرود عبارتست از نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای گرانشی. کاربرد این عدد در محاسبه مقاومت موجسازی است.

$$C_2 = \frac{dynamic\ \ force}{gravity\ \ force} = \frac{\frac{1}{2}\rho V^2 A}{\rho g L A} \qquad C_3 = \frac{V^2}{gL} \qquad \Rightarrow \qquad F_n = \frac{V}{\sqrt{g.l}}$$

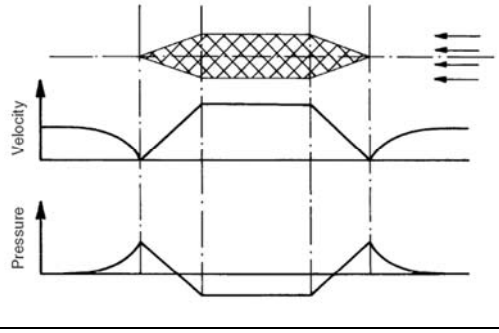
رابطه برنولی: رابطه برنولی بیان‌کننده رابطه بین تغییرات فشار، سرعت و عمق سیال (هد) است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh = const. \qquad\qquad P + \frac{\rho.V^2}{2} + \rho gh = const.$$

این رابطه بیان می‌کند که در هر نقطه‌ای از اطراف شناور در یک ارتفاع معین، که سرعت افزایش یابد، فشار کاهش می‌یابد و همچنین برعکس. شکل ۳-۱ نشان‌دهنده تغییرات سرعت و فشار در اطراف بدنه یک شناور است. ملاحظه می‌شود که این تغییرات معکوس یکدیگرند و با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد.

۱- منابع :[۱ و ۲ و ۲۱ و ۲۲ و ۱۵]

2 - hydrodynamics
3 - resistance
4 - streamline



شکل ۳-۱ : تغییرات سرعت و فشار اطراف یک شناور در سیال ایده آل

❖ فرمول عمومی محاسبه مقاومت

فرمول عمومی محاسبه مقاومت حرکت یک جسم در یک سیال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F = \frac{1}{2}\rho A V^2 . C_D$$

که در این فرمول ρ چگالی سیال، A مساحت سطح خیس یا سطح در معرض جریان سیال، V سرعت حرکت جسم در داخل سیال و C_D ضریب مقاومت می‌باشد. تمامی مؤلفه‌های مختلف مقاومت با همین فرمول بیان می‌شوند و تفاوت آنها در ضریب مقاومت (C_D) می‌باشد. مثلا ضریب مقاومت اصطکاکی با C_f و ضریب مقاومت موج با C_w نشان داده می‌شود که مقادیر آنها با هم متفاوت است و به ترتیب از آنها مقاومت اصطکاکی R_f و مقاومت موج R_w محاسبه می‌شود:

$$R_f = \frac{1}{2}\rho A V^2 . C_f$$

برای درک این رابطه، دیمانسیون آن بررسی می‌شود. ضریب $\frac{1}{2}$ و C_D که دارای واحد نیستند. برای سایر اجزاء داریم: $\left(\rho A V^2\right)$:

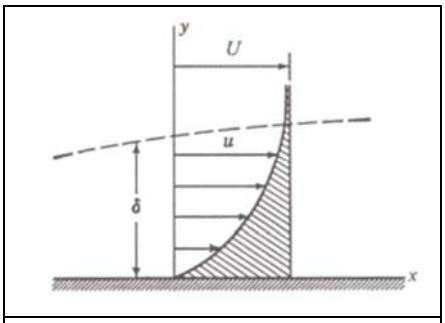
$$\frac{kg}{m^3} \times m^2 \times \left(\frac{m}{s}\right)^2 = \frac{kg.m^4}{m^3.s^2} = kg.{m}/{s^2}$$

که این واحد نیز واحد نیرو $(F = m.a)$ می‌باشد.

یاد بگیریم؛ محیط زیست خود را آلوده نکنیم
یاد بگیریم؛ زباله را از اتومبیل بیرون نیاندازیم
یاد بگیریم؛ وقتی برای گردش می‌رویم یک کیسه زباله همراه ببریم
و بدانیم؛ رعایت نظافت و حفظ محیط زیست نشانه شخصیت، تمدن و دین ماست.

فصل دوم: لایه مرزی

اگر یک جسم در داخل یک سیال غیرایده‌آل حرکت کند؛ در نزدیکی مرز جسم در حال حرکت، یک لایه‌ای از سیال با سرعت متفاوت شکل می‌گیرد که بدان لایه مرزی گویند. (شکل ۳-۲) در منبع [۲۲] لایه مرزی به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل ۳-۲: لایه مرزی اطراف یک جسم

لایه‌ای نزدیک به جسم که بدلیل گرادیان زیاد سرعت نمی‌توان از اصطکاک آن صرفنظر کرد. بنابراین تغییرات سرعت باعث لایه‌لایه‌شدن سیال و ایجاد تنش‌های برشی می‌گردد. مجموع این تنش‌ها همان نیروی اصطکاکی می‌باشد. برای این منظور از تنش‌ها در واحد سطح انتگرال‌گیری می‌شود:

$$\tau = \mu.\frac{du}{dy} \qquad F = \int \tau.dA$$

امکان حل این انتگرال بطور کاربردی و عملی وجود ندارد و برای محاسبه مقاومت اصطکاکی از روشهای دیگری استفاده می‌شود. در سیال ایده‌آل، مقدار تنش برشی صفر و در نتیجه اصطکاک حرکت یک جسم در سیال ایده‌آل صفر است. مشخصه سیال ایده‌آل عبارتست از:

- تراکم‌ناپذیر $(\rho = Const)$
- بدون ویسکوزیته $(\nu = 0)$
- بدون کشش سطحی $(\sigma = 0)$

اگر کشتی در داخل سیال ایده‌آل حرکت کند، بدلیل نبودن لزجت، مقاومت اصطکاکی و ویسکوز فشاری صفر است ولی مقاومت موج وجود دارد لذا در این حالت مقاومت تابعی از شکل بدنه است. اگر یک زیردریایی در عمق زیاد در یک سیال ایده‌آل حرکت کند مقاومت کل آن صفر است چراکه در عمق آب، فقط مقاومت اصطکاکی و ویسکوز فشاری وجود دارد که آنها نیز در سیال ایده‌آل صفر هستند.

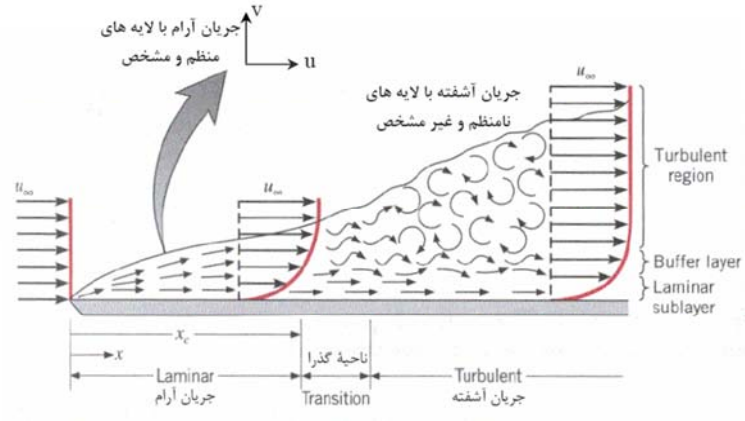
جدول ۳-۱ بیان‌کننده خواص فیزیکی آب شیرین است:

دما، °C	چگالی ρ kg/m³	ویسکوزیته μ $(N.s/m^2)\times10^{-3}$	ویسکوزیته سینماتیکی ν $m^2/s\times10^{-6}$	مدول حجمی κ $Pa\times10^{7}$	کشش سطحی σ $N/m\times10^{-2}$	فشار بخار Pa
۰	۹۹۹٫۹	۱٫۷۹۲	۱٫۷۹۲	۲۰۴	۷٫۶۲	۵۸۸
۵	۱۰۰۰٫۰	۱٫۵۱۹	۱٫۵۱۹	۲۰۶	۷٫۵۴	۸۸۲
۱۰	۹۹۹٫۷	۱٫۳۰۸	۱٫۳۰۸	۲۱۱	۷٫۴۸	۱۱۷۶
۱۵	۹۹۹٫۱	۱٫۱۴۰	۱٫۱۴۱	۲۱۴	۷٫۴۱	۱۶۶۶
۲۰	۹۹۸٫۲	۱٫۰۰۵	۱٫۰۰۷	۲۲۰	۷٫۳۶	۲۴۴۷
۳۰	۹۹۵٫۷	۰٫۸۰۱	۰٫۸۰۴	۲۲۳	۷٫۱۸	۴۲۹۷
۴۰	۹۹۲٫۲	۰٫۶۵۶	۰٫۶۶۱	۲۲۷	۷٫۰۱	۷۴۰۰
۵۰	۹۸۸٫۱	۰٫۵۴۹	۰٫۵۵۶	۲۳۰	۶٫۸۲	۱۲۲۲۰
۶۰	۹۸۳٫۲	۰٫۴۶۹	۰٫۴۷۷	۲۲۸	۶٫۶۸	۱۹۶۰۰
۷۰	۹۷۷٫۸	۰٫۴۰۶	۰٫۴۱۵	۲۲۵	۶٫۵۰	۳۰۷۰۰
۸۰	۹۷۱٫۸	۰٫۳۵۷	۰٫۳۶۷	۲۲۱	۶٫۳۰	۴۶۴۰۰
۹۰	۹۶۵٫۳	۰٫۳۱۷	۰٫۳۲۸	۲۱۶	۶٫۱۲	۶۸۲۰۰
۱۰۰	۹۵۸٫۴	۰٫۲۸۴	۰٫۲۹۶	۲۰۷	۵٫۹۴	۹۷۵۰۰

جدول ۳-۱: خواص فیزیکی آب شیرین در واحد SI

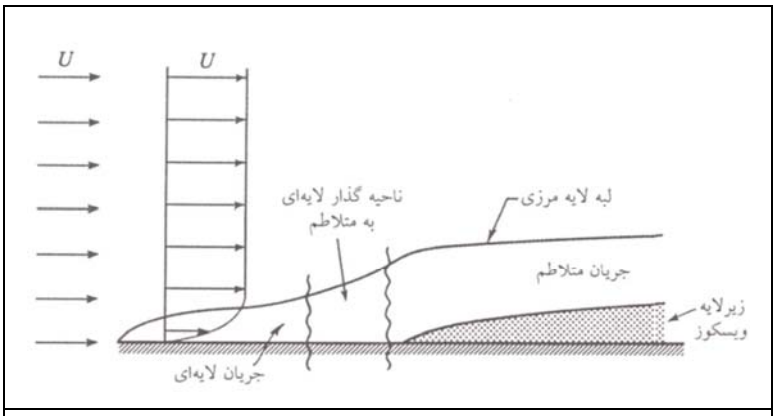
❖ قسمت‌های مختلف لایه مرزی

لایه مرزی که روی سطح در معرض جریان سیال شکل می‌گیرد، با حرکت سیال، ضخیم‌تر می‌گردد. لایه مرزی در ابتدا به صورت آرام و لایه‌ای است و حرکت ذرات سیال در لایه‌های صاف و منظم، مطابق شکل ۳-۳ انجام می‌شود. با پیشروی جریان روی سطح و افزایش ضخامت لایه مرزی، ذرات، اندک اندک ناپایدار شده و به جای حرکت در لایه‌های مشخص، مسیرهای تصادفی و نامنظم را در پیش می‌گیرند. بدین ترتیب، لایه مرزی پس از عبور از ناحیه گذرا یا انتقال، تبدیل به جریان کاملا آشفته می‌شود.



شکل ۳-۳ : حرکت لایه‌های سیال در حالت آرام، گذار و آشفته

در این حالت، مطابق شکل ۳-۳، ضخامت لایه مرزی، افزایش چشمگیری می‌یابد. همچنین در زیر قسمت جریان آشفته، یک زیر لایه آرام همچنان وجود دارد که دارای ضخـامت بسـیار اندکی است (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴: زیرلایه آرام در جریان آشفته

عوامل مهم در تبدیل لایه مرزی آرام به آشفته عبارتند از:

- عدد رینولدز (رینولدز بحرانی عددی است که در آن، جریان آرام به آشفته تبدیل می‌شود).
- تلاطم اولیه جریان آزاد
- زبری سطح صفحه
- انتقال گرما به صفحه یا از صفحه

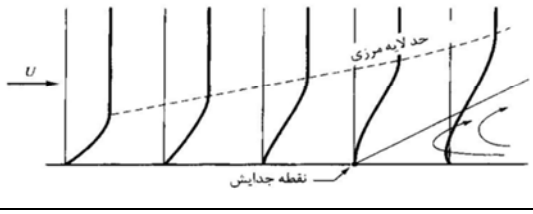
$$R_{e_{\text{بحرانی}}} = \left(\frac{U.X}{\nu}\right) = 3.2\times10^{5} \text{ تا } 10^{6}$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، علاوه بر عدد رینولدز، عوامل دیگری نیز در تبدیل جریان آرام به آشفته دخیل هستند. لذا یک عدد ثابت و معین نمی‌توان برای رینولدز بحرانی در نظر گرفت و بجای آن محدوده‌ای برای عدد رینولدز بحرانی در نظر می‌گیرند:

اگر تلاطم جریان آزاد خیلی کم باشد، سطح خیلی صاف باشد و غیره، عدد رینولدز بحرانی می‌تواند برابر یک میلیون باشد. در حل مسائل مهندسی دریایی، رینولدز بحرانی معمولا ۵۰۰۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود مگر اینکه شرایط معلوم محلی ایجاب کند که از عدد رینولدز بحرانی دیگری استفاده شود.

❖ جدایش جریان و جریان بازگشتی

گفتیم که در لایه مرزی، تغییرات سرعت وجود دارد به طوری که سرعت سیال در نزدیکی سطح جسم تقریبا برابر صفر و در خارج از لایه مرزی، برابر با سرعت جریان آزاد سیال است. حال اگر تغییرات سرعت در نزدیکی سطح جسم برعکس جریان عبورکننده از روی سطح شود، یعنی گرادیان سرعت برعکس شود (مطابق شکل ۳-۵)؛ بازگشت جریان در نزدیکی مرز جسم اتفاق می‌افتد و این به معنای «جریان بازگشتی» است.

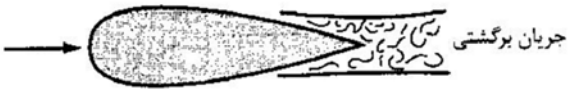


شکل ۳-۵: جدایش جریان و جریان بازگشتی در نزدیکی مرز جسم

این وضعیت به معنای جدا شدن سیال از سطح جسم یا به معنای عدم تبعیت سیال از شکل جسم و تغییر مسیر آن می‌باشد که بدان «جدایش جریان» می‌گویند. در واقع می‌توان مراحل زیر را برای این پدیده در نظر گرفت:

- گرادیان معکوس و نیروی برشی = کاهش اندازه حرکت در لایه مرزی = برگشت جریان در مجاورت سطح = پدیده جدایش جریان

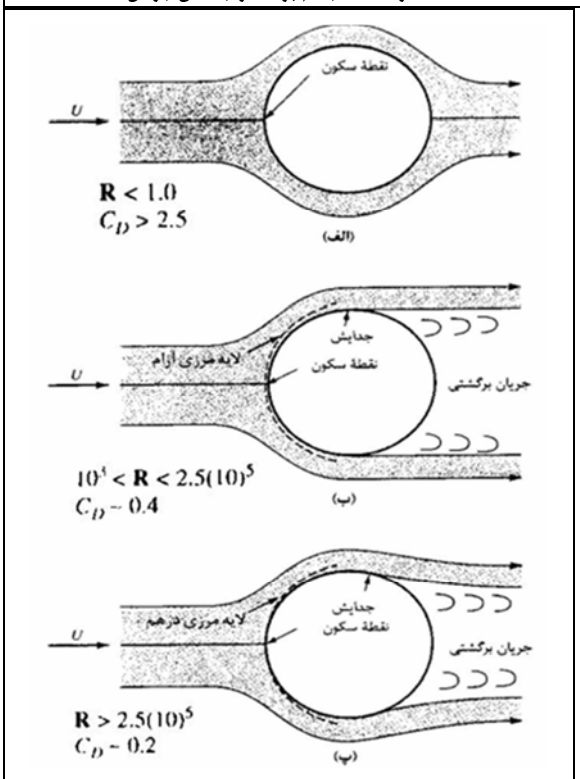
امکان جدایش هم در لایه مرزی آرام و هم در لایه مرزی آشفته وجود دارد که البته بسیار وابسته به هندسه جسم و مقدار انحنای جسم است (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶: تأثیر هندسه جسم بر تأخیر جدایش جریان

اثر جدایش جریان را می‌توان در نزدیکی جداره‌ها ملاحظه کرد که برگشت جریان اتفاق افتاده است. علاوه بر شکل بدنه، عدد رینولدز نیز بر جدایش تأثیر زیادی دارد. در شکل ۳-۷ می‌توان اثر رینولدز و جریان بازگشتی را بر ضریب مقاومت نیز ملاحظه کرد. از این شکل ملاحظه می‌شود که در جریان آشفته، جدایش جریان دیرتر اتفاق می‌افتد چراکه بدلیل بیشتر بودن اندازه حرکت

ذرات سیال، به گرادیان فشار معکوس بیشتری برای جداکردن جریان نیاز است. در این حالت ناحیه جدایش جریان کم‌عرض‌تر است. دیرتر جداشدن جریان به معنای کاهش ضریب مقاومت است (حالت سوم شکل). این در حالی است که در شکل ۳-۷، حالت دوم، جریان لایه مرزی به صورت آرام است لذا جدایش جریان زودتر اتفاق می‌افتد و ضریب مقاومت بیشتر می‌شود. در این حالت، عرض ناحیه جدایش جریان بیشتر است. اگر عدد رینولدز کوچکتر از ۱ باشد (حالت اول)، به آن جریان خزشی[1] گویند و خطوط جریان سیال بسیار همخوان و هماهنگ با شکل جسم است.



شکل ۳-۷: اثر رینولدز بر جدایش جریان

پیامبر (ص):

مسلمانی را از عمل حرامی بازداشتن، پاداش هفتاد حج مقبول دارد.

1 - Creeping flow

فصل سوم: محاسبه ضریب مقاومت

مطابق مطالب بیان‌شده تا اینجا می‌دانیم که برای محاسبه نیروی مقاوم (نیروی مقاوم در برابر حرکت جسم در داخل سیال) نیاز به محاسبه ضریب مقاومت می‌باشد. از طرفی گفتیم که امکان انتگرال‌گیری از تنش‌های برشی لایه مرزی برای محاسبه نیروی مقاوم در عمل وجود ندارد، لذا در علم سیالات و هیدرودینامیک اغلب از روش انجام آزمایشات عملی استفاده می‌شود. در این قسمت، روابط مختلفی که برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی روی صفحه تخت وجود دارد، ارائه می‌گردد،

برای جریان آرام داریم:

$$C_D = \frac{1.328}{\sqrt{R_e}}$$

برای جریان گذرا و آشفته فرمول‌های مختلفی بیان شده که در زیر به آن اشاره می‌شود:

فرمول بلازیوس: $5\times10^5 \langle R_e \langle 10^7$

$$C_D = \frac{0.072}{\sqrt[5]{R_e}}$$

فرمول پرانتل: $5\times10^5 \langle R_e \langle 10^7$

$$C_D = \frac{0.074}{\sqrt[5]{R_e}} - \frac{1700}{R_e}$$

رابطه دیگری نیز در این محدوده وجود دارد: $10^6 \langle R_e \langle 10^9$

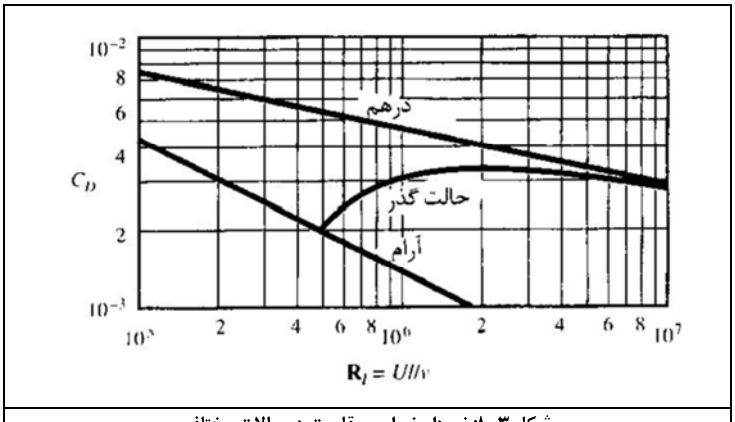
$$C_D = \frac{0.455}{(\log(R_e))^{2.58}}$$

فرمول دیگری نیز برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی وجود دارد که در طراحی مهندسی دریایی از این رابطه استفاده می‌شود و به رابطه *ITTC-1957* معروف است:

(رابطه *ITTC-57*):

$$C_f = \frac{0.075}{[\log R_e - 2]^2}$$

این رابطه توسط آزمایش مدل کشتی در حوضچه کشش بدست آمده که درباره آن بیشتر صحبت خواهد شد. در مجموع نمودار شکل ۳-۸ را نیز می‌توان در نظر گرفت که محور افقی آن عدد رینولدز و محور عمودی ضریب مقاومت برای صفحات تخت است.



شکل ۳-۸: نمودار ضرایب مقاومت در حالات مختلف

مثال) یک صفحه مسطح صاف با عرض ۳ متر و طول۳۰ متر در آب با درجه حرارت 20^oC با سرعت $6m/s$ کشیده می‌شود. نیروی کششی وارد بر یکی از وجوه صفحه و مقدار آن در ۳ متر اولیه از طول صفحه را تعیین کنید.

حل: برای کل صفحه:

$$R = \frac{Vl}{\nu} = \frac{\left(6\,m/s\right)(30m)}{1.007\times10^{-6}\ m^2/s} = 1.787\times10^8$$

$$C_D = \frac{0.455}{[\log(1.787\times10^8)]^{2.58}} = 0.00196$$

کشش وارد بر یک صفحه برابر است با:

$$\text{نیروی کشش} = C_D bl\rho\frac{U^2}{2} = 0.00196(3m)(30m)\left(998.2\,kg/m^3\right)\frac{\left(6\,m/s\right)^2}{2} = 3169\ N$$

که در آن b عرض صفحه است. اگر عدد رینولدز بحرانی 5×10^5 باشد، l_{o} *طول* در حالت گذرا برابر است با:

$$\frac{\left(6\,m/s\right)\left(l_O\ m\right)}{1.007\times10^{-6}\ m^2/s}=5\times10^5 \qquad l_O=0.084\ m$$

برای $3m$ اولیه از طول صفحه $R_l=1.787\times10^7$ بنابراین خواهیم داشت:

$$\text{نیروی کشش}=C_D bl\rho\frac{U^2}{2}=\frac{0.455}{\left[\log\left(1.787\times10^8\right)\right]^{2.58}}(3\ m)\left(998.2\ kg/m^3\right)\frac{\left(6\,m/s\right)^2}{2}=443\ N$$

❖ محاسبه ضخامت لایه مرزی

برای محاسبه ضخامت لایه مرزی در جریان آرام و آشفته از روابط زیر می‌توان استفاده کرد:

لایه مرزی آرام:

$$\frac{\delta}{x}=4.65\sqrt{\frac{\nu}{U_x}}=\frac{4.65}{\sqrt{R_x}}$$

لایه مرزی متلاطم:

$$\delta=0.37\left(\frac{\nu}{U}\right)^{1/5}x^{4/5}=\frac{0.37x}{\left(U_x/\nu\right)^{1/5}}=\frac{0.37\,x}{R_x^{1/5}}$$

❖ لایه مرزی در صفحات زبر

همانطور که بیان شد، زبری سطح از عوامل مؤثر در تبدیل جریان آرام به آشفته است. اثر زبری سطح در صفحات با نسبت $\frac{L}{e}$ بیان می‌شود که L طول صفحه و e میانگین ارتفاع برجستگی زبری‌های سطح می‌باشد. مناطق مختلف از نظر زبری عبارتند از:

- **منطقه صاف:** پوشش کامل برجستگی‌های سطح توسط زیرلایه آرام (عدم وابستگی ضریب اصطکاک جداری به زبری نسبی)
- **منطقه گذار:** بخشی از برجستگی‌ها خارج از زیرلایه آرام قرار می‌گیرد.
- **منطقه زبر:** بخش عمده برجستگی‌ها در معرض جریان آزاد است و خارج از زیرلایه آرام قرار می‌گیرد. در این شرایط، ضریب اصطکاک به عدد رینولدز صفحه بستگی ندارد.

در جریان مغشوش، ضریب اصطکاک تابع زبری سطح و عدد رینولدز است که با افزایش زبری نسبی در جریان مغشوش، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. در جریان لایه‌ای، زبری اثری بر مقاومت ندارد.

با استفاده از نمودار شکل۳-۹ می‌توان در مناطق زبری مختلف، مقدار ضریب اصطکاک را محاسبه کرد. در این شکل، محور عمودی مقادیر C_f، محور افقی مقدار عدد رینولدز و مقادیر روی نمودار نسبت زبری ($\frac{L}{e}$) هستند. مشاهده می‌شود در منطقه زبر، نمودار افقی شده و به عدد رینولدز بستگی ندارد (با تغییر رینولدز تغییر نمی‌کند).

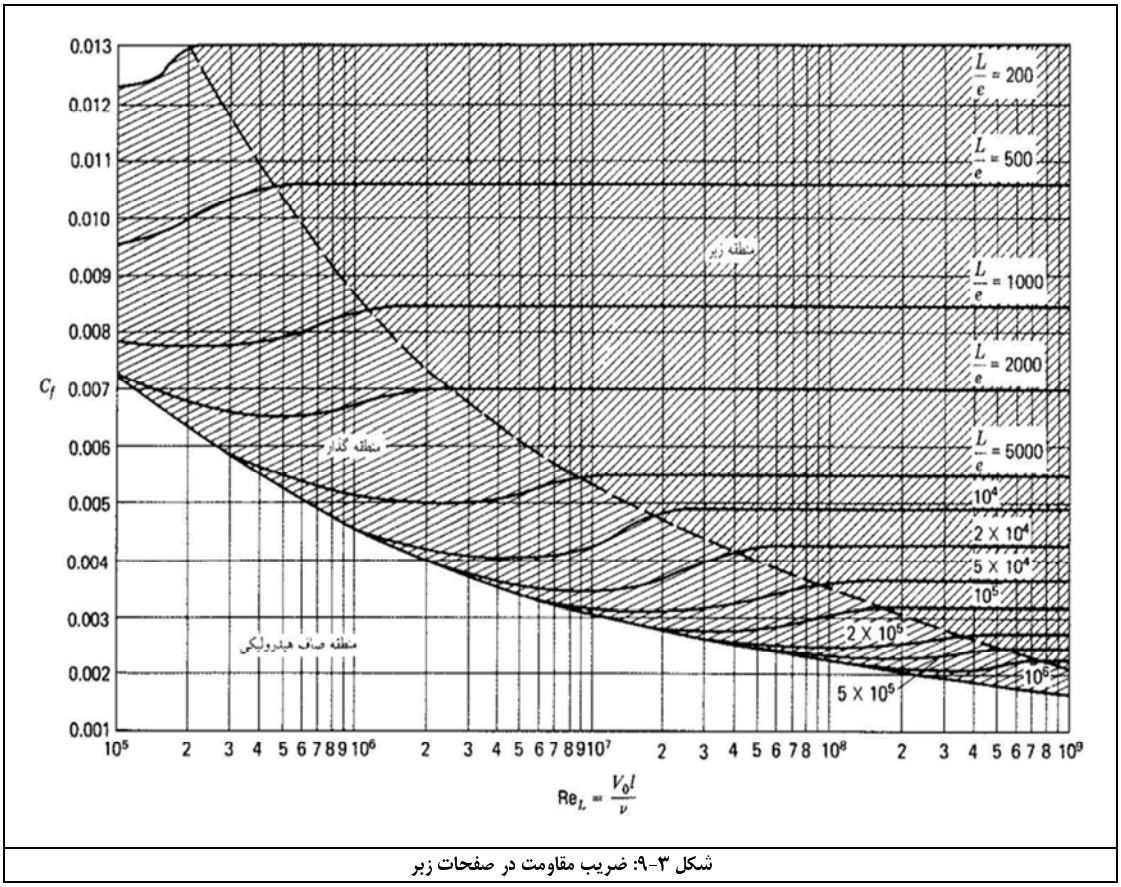
هر چه ارتفاع زبری‌ها (e) بیشتر باشد، نسبت $\frac{L}{e}$ کوچکتر شده و منطقه گذار زودتر اتفاق می‌افتد. همچنین می‌توان گفت هرچه ضخامت زیرلایه نسبت به زبری‌ها بیشتر شود، اثر زبری کمتر می‌شود یعنی رشد یکسان ضخامت زیرلایه به همراه افزایش زبری می‌تواند همچنان به معنی ماندن در منطقه صاف هیدرولیکی باشد. برای منطقه صاف هیدرولیکی داریم:

$$\frac{V.e}{\nu}\le5 \qquad e_{\text{مجاز}}\le L\left[\frac{100}{R_e}\right]$$

برای منطقه زبر، ضریب مقاومت از رابطه شلیختینگ بدست می‌آید:

منطقه زبر: $$C_f=\left(1.89+1.62\log\frac{l}{e}\right)^{-2.5}$$

برای بدنه کشتی‌ها، اگر بدنه نو باشد زبری را می‌توان ۲۰۰ – ۵۰ میکرون در نظر گرفت و اگر بدنه بیش از یکسال کار کرده باشد زبری را می‌توان ۱۵۰۰ – ۵۰۰ میکرون در نظر گرفت (هر میکرون 10^{-6} متر است.). بطور متوسط در کشتی‌ها حدود ۲۰ درصد مقاومت اصطکاکی را زبری سطح موجب می‌شود.



شکل ۳-۹: ضریب مقاومت در صفحات زبر

مثال) یک کشتی نفتکش *ULCC* با سرعت ۲۰ گره در حال حرکت است. مقاومت اصطکاکی کف کشتی را با طول ۳۰۰ متر و عرض ۶۰ متر و $\frac{L}{e} = 5000$ بدست آورید.

حل:

L=300m B=60m

$\frac{L}{e} = 5000$ $\rho = 1.025 \quad ton/m^3$

$V = 20 \quad knot \times 0.5144 = 10.288 \quad m/s$

$$R_e = \frac{vl}{\upsilon} = \frac{10.288 \times 300}{10^{-6}} = 3.09 \times 10^9$$

حال با مراجعه به شکل۳-۹ داریم:

$C_f = 0.006$

$$R_f = \frac{1}{2} C_f \rho A V^2$$

$A = 300 \times 60 = 18000 \ m^2$

$R_f = 0.5 \times 0.006 \times 1.025 \times 18000 \times 10.288^2$

$R_f = 5858.41 \ KN$

❖ ضریب مقاومت اشکال هندسی خاص

همانطور که بیان شد، محاسبه ضریب مقاومت از طریق محاسبه امکان‌پذیر نیست یا بسیار دشوار است لذا اغلب از روش انجام آزمایش عملی، ضریب مقاومت اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری برای اشکال هندسی معین انجام شده و نتایج آن در منابع مختلف ارائه شده است. این مقادیر برای یک شکل مشخص، در منابع مختلف، تا حدودی با هم متفاوت هستند چراکه خطاها و شرایط آزمایش، باعث تفاوت در نتایج می‌گردد. در کتاب مکانیک سیالات شیمز ضرایب مقاومت به صورت زیر ارائه شده است (شکل ۳-۱۰). در کتاب سیالات استریتر نیز ضرایب مقاومت به صورت زیر ارائه شده‌اند (شکل ۳-۱۱و ۳-۱۲).

ضرایب کشش برای اجسام دوبعدی در $Re \simeq 10^5$

شکل	C_D
صفحه ←	۲ر۰
نیم‌استوانه ←	۱ر۲
نیم‌استوانه ←	۱ر۷
نیم لوله ←	۱ر۲
نیم لوله ←	۲ر۳
میلهٔ چهارگوش ←	۲ر۱
میلهٔ چهارگوش ←	۱ر۶
مثلث متساوی الاضلاع ←	۱ر۶
مثلث متساوی الاضلاع ←	۲ر۰

شکل	C_D	
	جریان لایه‌ای	جریان متلاطم
بیضیها:		
۲:۱	۰ر۶	۰ر۲۰
۴:۱	۰ر۳۵	۰ر۱۰
۸:۱	۰ر۲۸	۰ر۱۰
استوانه ←	۱ر۲	۰ر۳۰
صفحهٔ مستطیلی ← : $\frac{b}{h}$ = ۱		۱ر۱۸
۵		۱ر۲
۱۰		۱ر۳
۲۰		۱ر۵

ضرایب کشش برای اجسام سه‌بعدی

شکل	C_D
صفحه گرد ←	۱ر۱۷
مخروط ۶۰° ←	۰ر۴۹
مکعب ←	۱ر۰۵
مکعب ←	۰ر۸۰
فنجانی ←	۰ر۳۸
توخالی ←	۱ر۴۲
نیمکرهٔ صلب ←	۰ر۳۸
نیمکرهٔ صلب ←	۱ر۱۷

شکل	C_D	
	جریان لایه‌ای	جریان متلاطم
کره: ←	۰ر۴۷	۰ر۲۷
جسم بیضوی حاصل از دوران :		
۲:۱ ←	۰ر۲۷	۰ر۰۶
۴:۱ ←	۰ر۲۰	۰ر۰۶
۸:۱ ←	۰ر۲۵	۰ر۱۳

شکل ۳-۱۰ : ضرایب مقاومت در کتاب شیمز

مقدار تقریبی C_D برای اجسام سه‌بعدی در $R > 10^4$

شکل جسم*	C_D
مکعب	۱/۱
مخروط ۶۰°	۰/۵
نیمکرهٔ باز	۱/۴ ۰/۴
صفحهٔ مکعب مستطیلی	۱/۱۸(۱)† ۱/۲(۵) ۱/۳(۱۰) ۱/۵(۲۰) ۲/۰(∞)
جریان در امتداد محور استوانه	۱/۱۵(۰/۵)‡ ۰/۹۰(۱) ۰/۸۵(۲) ۰/۸۷(۴) ۰/۹۹(۸)

شکل ۳-۱۱ : ضرایب مقاومت اجسام سه بعدی در کتاب سیالات استریتر

نمونهٔ ضرایب نیروی کشش برای سیلندرهای مختلف در جریان دو بعدی

شکل جسم*		C_D	عدد رینولدز
سیلندر مدّور	1	1.2	10^4 to 1.5×10^5
سیلندر بیضوی	2:1	0.6	4×10^4
		0.46	10^5
	4:1	0.32	2.5×10^4 to 10^5
	8:1	0.29	2.5×10^4
		0.20	2×10^5
سیلندر چهارگوش		2.0	3.5×10^4
		1.6	10^4 to 10^5

سیلندر مثلثی	→ 120°	2.0	10^4
	→ 120°	1.72	10^4
	→ 90°	2.15	10^4
	→ 90°	1.60	10^4
	→ 60°	2.20	10^4
	→ 60°	1.39	10^4
	→ 30°	1.8	10^5
	→ 30°	1.0	10^5
نیم لوله	→	2.3	4×10^4
	→	1.12	4×10^4

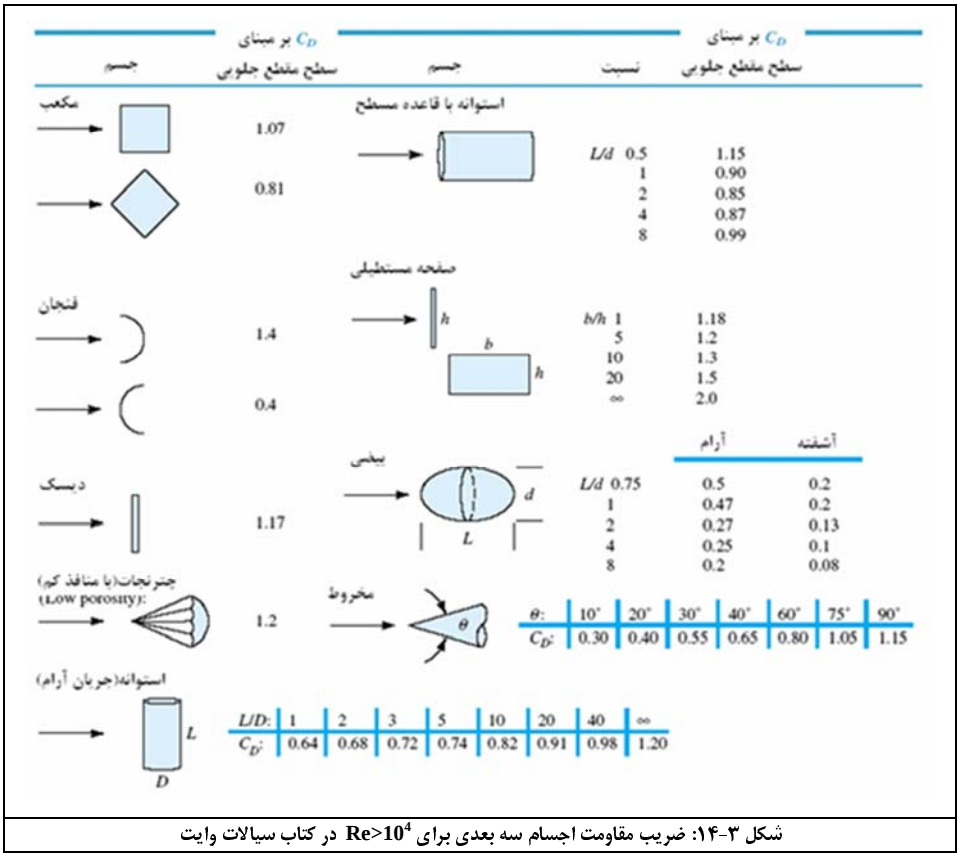
شکل ۳-۱۲: ضرایب مقاومت اجسام دوبعدی در کتاب استریتر

در کتاب سیالات وایت نیز برای اجسام مختلف، ضرایب مقاومت به صورت زیر ارائه شده است (شکل۳-۱۳و۳-۱۴).

شکل	C_D بر مبنای سطح مقطع جلویی	شکل	C_D بر مبنای سطح مقطع جلویی
استوانه مربعی →	2.1	نیم استوانه →	1.2
→	1.6	→	1.7
نیم لوله →	1.2	مثلث متساوی الاضلاع →	1.6
→	2.3	→	2.0
صفحه →	2.0		

شکل	آرام	آشفته
استوانه بیضوی 1:1 →	1.2	0.3
2:1 →	0.6	0.2
4:1 →	0.35	0.15

شکل ۳-۱۳ : ضریب مقاومت اجسام دوبعدی برای $Re>10^4$ در کتاب سیالات وایت



شکل ۳-۱۴: ضریب مقاومت اجسام سه بعدی برای $Re>10^4$ در کتاب سیالات وایت

❖ چرا در علم سیالات و هیدرودینامیک اغلب از روش آزمایش مدل استفاده می‌شود؟

پیگیری مباحث معادلات حاکم بر سیال منجر به معادلات ناویر – استوکس می‌شود که به حالت کلی زیر نوشته می‌شود:

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+B_i+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\zeta\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)$$

برای جریان تراکم‌ناپذیر $\vec{\nabla}.\vec{V}=0$ می‌شود (مانند سیال آب)، لذا معادله ناویر – استوکس به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\rho\frac{D\vec{V}}{Dt}=-\nabla p+\mathbf{B}+\mu\nabla^2\mathbf{V}$$

به عنوان مثال مؤلفه x معادله ناویر – استوکس به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+F_x+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$

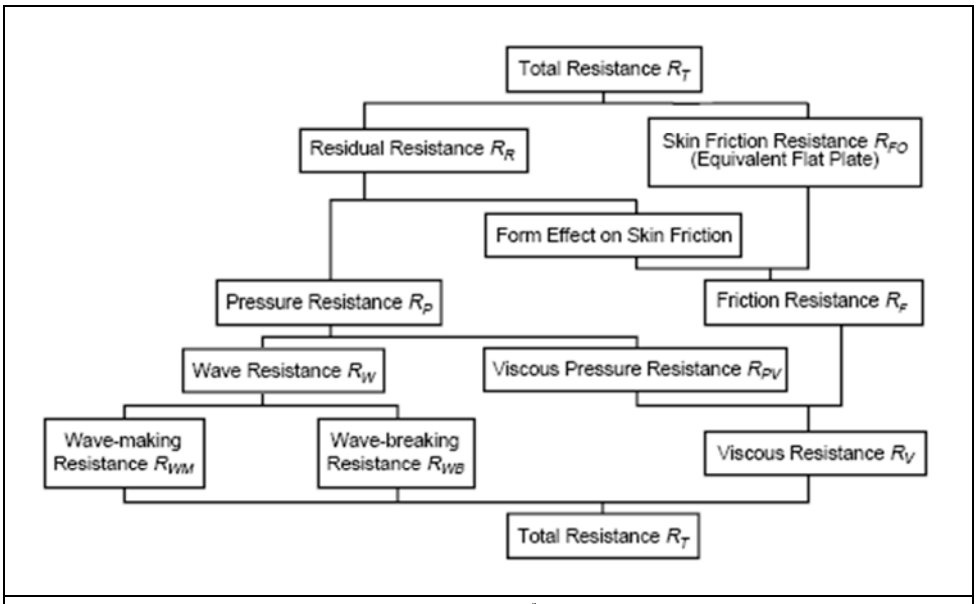
حل معادله ناویر – استوکس به واسطه حضور عبارات غیرخطی نظیر $u\frac{\partial u}{\partial x}$ ، به صورت صریح و تحلیلی وجود ندارد و حل دقیق آن یکی از مشکل‌ترین مسائل مهندسی است. به اعتقاد ریاضی‌دانان، جواب یکتا برای این معادله وجود ندارد. اگر برای حل آن ساده‌سازی‌هایی صورت گیرد، منجر به افزایش خطا می‌گردد. لذا مواجه شدن با این بن‌بست، باعث شد علم مکانیک سیالات و هیدرودینامیک تکیه اصلی خود را بر انجام آزمایش در تونل باد یا حوضچه کشش قرار دهند هر چند که روشهای عددی و *CFD* بطور مناسبی توسعه‌یافته‌اند و می‌توان از نتایج آن در مراحل اولیه طراحی استفاده کرد.

افتادگی آموز اگر طالب علمی
هرگز نخورد آب، زمینی که بلند است

بخش دوم:
مقاومت در شناورها

فصل اول: تقسیم‌بندی اجزاء مقاومت در شناورها[۱]

در حرکت شناور، اجزاء مختلفی از مقاومت حضور دارند که می‌توان تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای آنها مانند نمودار آبشاری مطابق شکل ۳-۱۵ را در نظر گرفت.



شکل ۳-۱۵ : نمودار آبشاری تقسیم‌بندی اجزاء مقاومت

با توجه به این نمودار می‌توان تعاریف زیر را بیان کرد:

- **مقاومت اصطکاک پوسته‌ای[۲] (R_{fo}):** مقاومت ناشی از انتگرال تنش‌های برشی وارد بر کل سطح خیس شده کشتی در حال حرکت است، با این فرض که این سطح دارای انحناء نیست و یک صفحه مسطح است.
- **مقاومت باقی‌مانده[۳] (R_R):** مقاومت باقی‌مانده عبارتست از مقاومت کل حرکت شناور به جز مقاومت اصطکاک پوسته‌ای. به عبارتی:

مقاومت باقیمانده = مقاومت اصطکاک پوسته‌ای − مقاومت کل

- **مقاومت اصطکاکی[۴] (R_f):**

مقاومت اصطکاکی عبارتست از حاصل جمع مقاومت اصطکاک پوسته‌ای + اثر شکل بدنه بر مقاومت اصطکاکی.

- **مقاومت فشاری[۵] (R_P):** مقاومت فشاری زیرمجموعه مقاومت باقیمانده است که دارای دو مؤلفه مقاومت موج و مقاومت فشاری ویسکوز است. ماهیت این نوع مقاومت، تغییرات فشار سیال است.
- **مقاومت فشاری ویسکوز[۶] (R_{vp}):** بدلیل ویسکوزیته سیال، اگر در پشت جسم، افت فشار و پدیده جدایش اتفاق افتد مقاومتی بوجود خواهد آمد به نام مقاومت فشاری ویسکوز که تابعی از عدد رینولدز و شکل جسم است.

۱-منابع { ۵ و ۲۳ و ۳۰}

2 - Skin friction Resistance
3 - Residual Resistance
4 - friction resistance
5 - pressure Resistance
6 - viscouse pressure Resistance

- **مقاومت موج[1] (R_w):** مقاومت موج زیرمجموعه مقاومت فشاری است که خود دارای دو زیرمجموعه است: مقاومت موج‌سازی و مقاومت شکست موج. این امواج، امواج دریا نیست بلکه امواج تولید شده توسط خود بدنه شناور است. مقاومت موج‌سازی ناشی از تولید موج و مقاومت شکست موج، ناشی از شکست امواج حاصل از بدنه است. این مقاومت تابعی از عدد فرود و شکل جسم است.
- **مقاومت ویسکوز[2] (R_v):** مقاومت ناشی از ویسکوزیته سیال که حاصل جمع مقاومت اصطکاکی و مقاومت ویسکوز فشاری است. در واقع این مقاومت در برگیرنده کلیه مقاومتهای ناشی از ویسکوزیته سیال است.

در رایج‌ترین تقسیم‌بندی، مؤلفه‌های مقاومت را به صورت زیر می‌توان در نظر گرفت:

$$R_T = R_f + R_w + R_{VP}$$

$$R_T = \left(C_f + C_w + C_{vp}\right).\frac{1}{2}\rho A V^2$$

علاوه بر موارد فوق مؤلفه‌های دیگری از مقاومت نیز وجود دارند که باید بررسی شوند.

- **مقاومت باد[3]:** همواره بخشی از بدنه که بالاتر از سطح آب است، در معرض جریان باد قرار دارد و باعث مقاومت باد می‌شود. از آنجا که سطح در معرض باد، سطح قابل ملاحظه‌ای است لذا این مقاومت باید در نظر گرفته شود.
- **مقاومت ضمائم[4]:** علاوه بر بدنه اصلی شناور، قسمتهای دیگر متصل به بدنه وجود دارند مانند بالچه ضد غلتش (بیلج کیل[5])، نگهدارنده شافت، سکان و تجهیزات هدایت و ضمائم پروانه. این قسمتها، مقاومت دیگری به نام مقاومت ضمائم را باعث می‌شوند.
- **مقاومت القایی[6]:** اگر بدنه و اجزای متصل به آن را در نظر بگیریم، در محل اتصال دو جزء به یکدیگر، مقاومت دیگری به نام مقاومت القایی وجود دارد که مجزا از مقاومت خود اجزاء است.
- **مقاومت حرکت در امواج اقیانوسی:** وقتی کشتی در دریا حرکت می‌کند، دائما در معرض امواج اقیانوسی قرار دارد که این خود باعث افزایش مقاومت می‌شود. این مولفه مقاومت با مقاومت موج (موجی که توسط بدنه شناور ایجاد می‌شود) متفاوت است.
- **مقاومت حرکت در آبهای کم‌عمق:** اگر شناور در آبهای کم‌عمق یا کانالها حرکت کند، کلیه مؤلفه‌های مقاومت افزایش می‌یابند.
- **مقاومت اسپری[7]:** با وارد شدن ضربات بدنه بر سطح آب مانند ضربات اسلمینگ[8] یا حرکت یک شناور تندرو، آب دریا به صورت اسپری پخش می‌شود که باعث مقاومت دیگری به نام مقاومت اسپری می‌شود.

تقسیم‌بندی‌های مختلف دیگر از نیروی مقاوم با توجه به ماهیت نیرو می‌توان در نظر گرفت:

- **از نظر جهت نیرو:** ۱- مماسی یا برشی (نیروی اصطکاکی) ۲- عمود بر سطح(فشاری)
- **از نظر طبیعت نیروها:** ۱- اصطکاکی ۲- شکلی ۳- موج‌سازی
- **از نظر منبع نیروها:** ۱- گرانشی (موج‌سازی) ۲- ویسکوز (اصطکاکی)
- **از نظر فرود:** ۱- اصطکاکی ۲- باقیمانده

سهم هر یک از مؤلفه‌های مقاومت به صورت درصد در شناورهای عادی و تندرو را می‌توان به صورت جدول ۳-۲ در نظر گرفت [۳۰]:

	اجزاء مقاومت	کشتی های با CB>0.7	
		بدون جدایی جریان	با جدایی جریان
۱	مقاومت اصطکاکی	۷۰	۵۵
۲	مقاومت باقی مانده	۳۰	۴۵
۳	مقاومت موج	۵	۵
۴	مقاومت ویسکوزیته فشاری	۲۵	۴۰
۵	مقاومت ویسکوزیته	۹۵	۹۵

۱+۲=٪۱۰۰

۳+۴=۲

۱+۴=۵

جدول ۳-۲: درصد اجزاء مقاومت در کشتی‌ها

1 - Wave resistance
2 - Viscous Resistance
3 - wind Resistance
4 - appendage Resistance
5 - Bilge keel
6 - Induced Resistance
7 - Spray Resistance
8 -Slamming: ضربات قسمت سینه کشتی بر روی سطح آب

فصل دوم: مقاومت اصطکاکی[۱]

همانطور که قبلا هم بیان شد مقاومت اصطکاکی ناشی از تنش برشی بین لایه‌های سیال موجود در لایه مرزی است. از انتگرال‌گیری این تنش‌ها روی سطح، نیروی اصطکاک بدست می‌آید:

$$F = \int \tau . dA \qquad \tau = \mu . \frac{du}{dy}$$

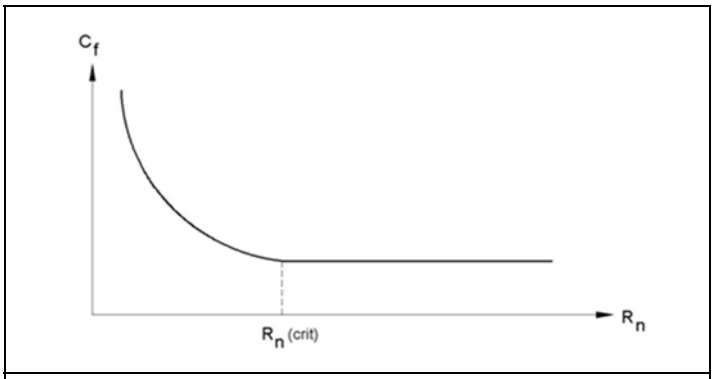
رابطه *ITTC-57*[۲]

گفته شد که در عمل محاسبه این انتگرال، امکان‌پذیر نیست لذا از روشهای تجربی برای اندازه‌گیری مقاومت استفاده می‌شود. معروف‌ترین روش در کاربردهای دریایی برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت، روش *ITTC-57* است:

$$C_f = \frac{0.075}{[\log R_e - 2]^2}$$

$$R_e = \frac{V.L}{\nu}$$

که V سرعت بر حسب m/s ، L طول بر حسب m و υ ضریب لزجت سینماتیکی بر حسب m^2/s می‌باشد. مطابق این رابطه نمودار تغییرات ضریب مقاومت اصطکاکی بر حسب عدد رینولدز به صورت نمودار زیر است(شکل ۳-۱۶).



شکل ۳-۱۶ : نمودار تغییرات ضریب مقاومت اصطکاکی بر حسب رینولدز

که ضریب مقاومت اصطکاکی پس از عبور از عدد رینولدز بحرانی، مقدار ثابتی شده و نمودار آن به یک خط صاف تبدیل می‌گردد. پس از محاسبه ضریب مقاومت، از فرمول عمومی محاسبه مقاومت استفاده می‌کنیم:

$$R_f = \frac{1}{2}\rho A V^2 . C_f$$

رابطه پیشنهادی *ITTC-2008*

کمیته مقاومت *ITTC* در سال ۲۰۰۸ رابطه جدیدی را برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت پیشنهاد داده است که دقیق‌تر از رابطه *ITTC-57* می‌باشد. شکل کلی این رابطه بصورت زیر است:

$$C_F = A/(\log Rn - D)^{B\log Rn + C}$$

ضرایب ثابت A,B,C,D از روش حداقل مربعات در آزمایش مدل بدست می‌آیند. این رابطه از قرار زیر است:

$$C_F = \frac{0.0066577}{(\log Rn - 4.3762)^{0.042612\cdot \log Rn + 0.56725}}$$

رابطه *ITTC-2008* را رابطه سلطنتی[۳] نیز گویند. این فرمول در محدوده رینولدز زیر معتبر است:

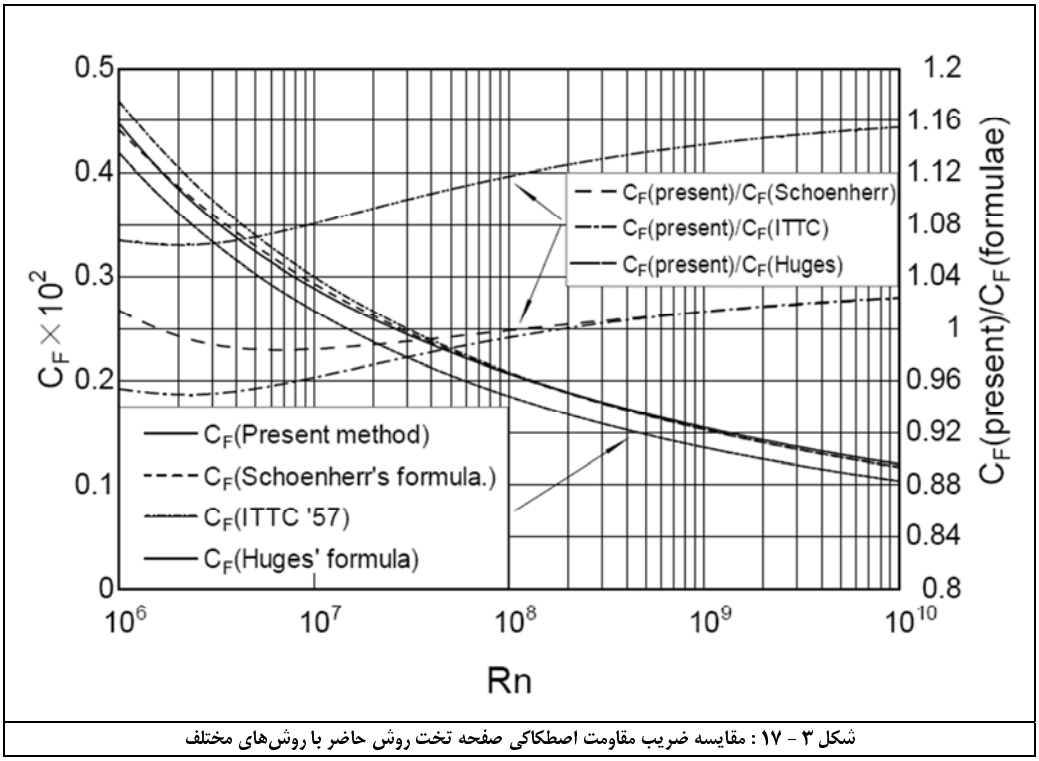
$$1.0\times10^6 \le Rn \le 7.0\times10^9$$

۱-منابع [۳ و ۵ و ۲۴]

۲-کنفرانس بین المللی حوضچه کشش (International Towing Tank Conference) ITTC که بر اساس انجام آزمایشات مدل در حوضچه کشش هر چند سال روابطی را برای محاسبه مقاومت و سایر زمینه‌های علمی هیدرودینامیک ارائه می‌کند که مقبولیت جهانی دارند. از آنجاکه این روابط بر اساس روش تجربی هستند هرچند سال یکبار مورد بازبینی قرار گرفته و تکمیل می‌شوند.

3 - empirical formula

نمودار شکل۳-۱۷ مقایسه‌ای بین نتایج روش حاضر برای ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت با روش‌های شونهر، *ITTC-57* و هافز ارائه کرده است (سایر روش‌ها در قسمت‌های بعدی توضیح داده می‌شوند):



شکل ۳ - ۱۷ : مقایسه ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت روش حاضر با روش‌های مختلف

مثال) یک کشتی کانتینربر به طول ۱۲۰ متر با سرعت ۲۰ گره حرکت می‌کند. اگر سطح خیس‌شده بدنه این کشتی ۳۲۰۰ مترمربع باشد، نیروی مقاومت اصطکاکی آن را محاسبه کنید.

حل: با روش *ITTC-57* داریم:

$$L = 120 \quad m$$

$$V = 20 \quad knot \approx 10 \quad {}^{m}/_{s}$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log R_e - 2)^2}$$

$$R_e = \frac{V.L}{\nu} = \frac{10 \times 120}{1.01 \times 10^{-6}} = 1.2 \times 10^9$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log(1.2 \times 10^9) - 2)^2} = \frac{0.075}{50.11} = 1.5 \times 10^{-3}$$

اگر داشته باشیم:

$$\rho = 1.025 \frac{t}{m^3}$$

$$R_f = \frac{1}{2} \rho A V^2 . C_f = 0.5 \times 1.025 \times 3200 \times 10^2 \times 1.5 \times 10^{-3}$$

$$R_f = 246 \quad KN$$

با روش *ITTC-2008* مقدار ضریب مقاومت اصطکاکی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$C_F = \frac{0.0066577}{(\log \quad Rn - 4.3762)^{0.042612 \,.\log\, Rn + 0.56725}} = 1.52 \times 10^{-3}$$

توجه: اگر چگالی بر حسب (t/m^3) وارد شود، نیروی مقاوم بر حسب کیلو نیوتن (KN) و اگر چگالی بر حسب kg/m^3 وارد شود، نیروی مقاوم بر حسب نیوتن (N) بدست می‌آید.

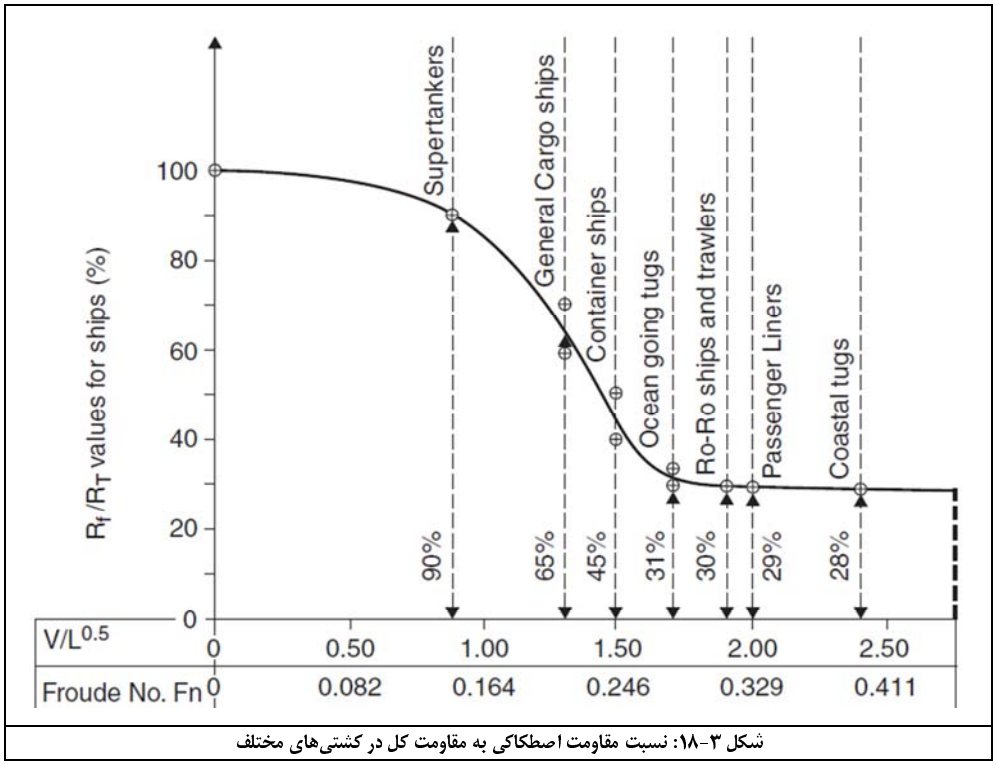
❖ نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل

اگر کشتی در آب ساکن و شرایط آرام جوی حرکت کند، نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل را می‌توان به صورت زیر تخمین زد (جدول ۳-۳):

نوع کشتی	Fn	R_F/R_T
کشتی یدک‌کش	0.4	R_F/R_T=30%
کشتی مسافربری	0.33	R_F/R_T=30%
کشتی RO-RO	0.3	R_F/R_T= 30%
کشتی کانتینربر	0.25	R_F/R_T=40-50 %
کشتی حمل کالای عمومی	0.2	R_F/R_T= 60-70 %
نفتکش‌های VLCC و ULCC	0.12	R_F/R_T= 90 %

جدول ۳-۳: نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل در انواع کشتی‌ها

شکل ۳-۱۸ نیز بیان کننده نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل شناور در کشتی‌های مختلف بر حسب عدد فرود است. هرچه سرعت شناور بالاتر و عدد فرود بیشتر باشد، سهم مقاومت اصطکاکی کاهش و سهم مقاومت موج‌سازی افزایش می‌یابد.

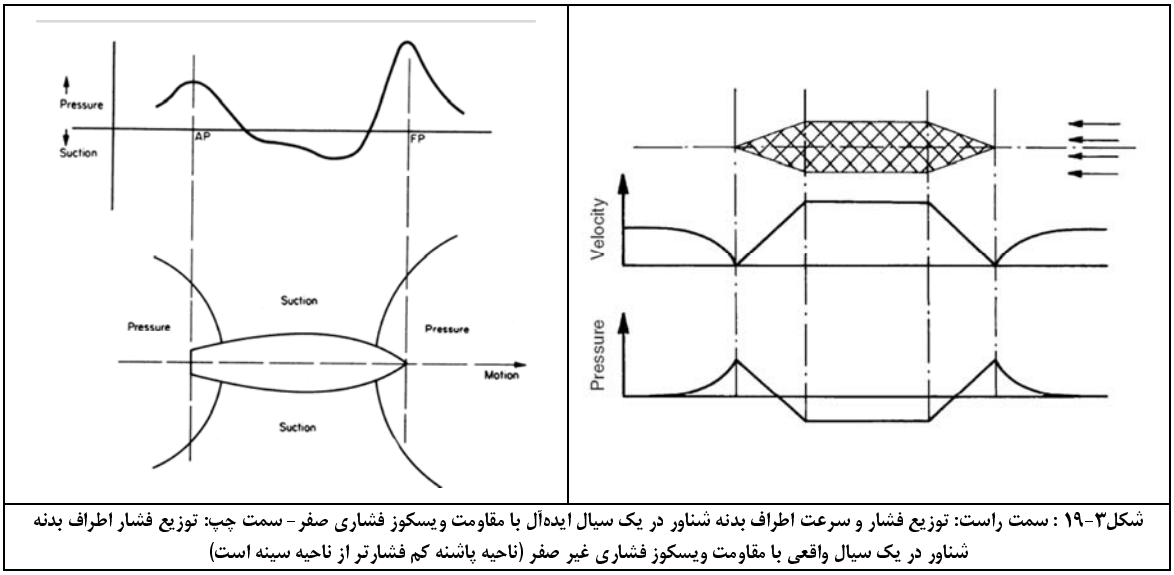


شکل ۳-۱۸: نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل در کشتی‌های مختلف

زندگی قصه مرد یخ فروشی است که از او پرسیدند : فروختی ؟
گفت : نخریدند ، تمام شد...

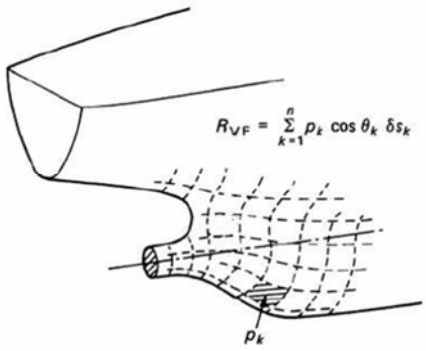
فصل سوم: مقاومت فشاری

همانطور که قبلا بیان شد مقاومت فشاری خود از دو جزء مقاومت موج و مقاومت ویسکوز فشاری تشکیل شده است. مشخصات مقاومت موج در مباحث بعدی به طور کامل بررسی می‌شود. مقاومت ویسکوز فشاری مؤلفه‌ای از مقاومت است که وابسته به ویسکوزیته سیال و شکل بدنه است. از قبل توزیع سرعت و فشار اطراف بدنه شناور را در یک سیال ایده‌آل مطابق شکل ۳-۱۹ بررسی کردیم.

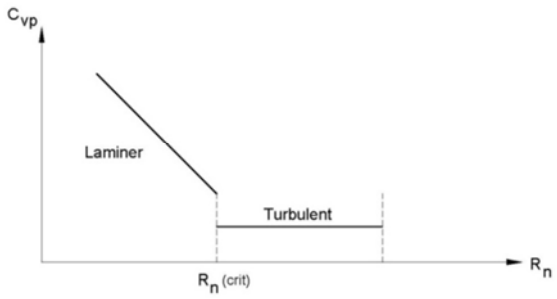


شکل۳-۱۹ : سمت راست: توزیع فشار و سرعت اطراف بدنه شناور در یک سیال ایده‌آل با مقاومت ویسکوز فشاری صفر- سمت چپ: توزیع فشار اطراف بدنه شناور در یک سیال واقعی با مقاومت ویسکوز فشاری غیر صفر (ناحیه پاشنه کم فشارتر از ناحیه سینه است)

مطابق این شکل، مشخص می‌گردد که سرعت سیال اطراف بدنه، در همه نقاط یکسان نیست. در برخی نقاط سرعت سیال از سرعت حرکت شناور کمتر و در برخی نقاط بیشتر است. طبق قانون برنولی نیز می‌دانیم که تغییرات سرعت و فشار عکس یکدیگرند. لذا فشار سیال اطراف بدنه در همه جا یکسان نیست. در شکل فوق (سمت راست) مقاومت ویسکوز فشاری در یک سیال ایده‌آل (بدون ویسکوزیته) برابر صفر است ولی در سیال واقعی مسئله متفاوت است. در سیال واقعی بدلیل وجود ویسکوزیته، جریان در جلوی بدنه آرام و در انتهای بدنه کاملا آشفته و در قسمت پاشنه دچار جدایش جریان و فشار معکوس است. لذا بدین ترتیب فشار قسمت پاشنه(P_A) از فشار قسمت سینه (P_F) کمتر است و این به معنی وجود مکش (نقطه کم فشار) در پاشنه است (شکل سمت چپ). این پدیده باعث وجود وقاومت ویسکوز فشاری در جریان واقعی است. از طرف دیگر شکل بدنه نیز بسیار موثر است. از آنجا که شکل قسمت سینه و پاشنه شناورها با یکدیگر متفاوت است و از طرفی، شکل بدنه بر توزیع فشار بسیار مؤثر است، لذا فشار سیال در جلو و عقب بدنه شناور با هم متقارن نیست. این عدم تقارن به معنی اعمال یک نیروی مقاوم بر بدنه است. بنابراین مطابق شکل ۳-۲۰، مقاومت ویسکوز فشاری را می‌توان به صورت حاصل‌جمع مؤلفه‌های فشار وارد بر المان‌های سطح بدنه شناور در نظر گرفت. روابط مربوط به محاسبه مقاومت ویسکوز فشاری در مراحل بعدی بیان می‌گردد. نمودار تغییرات ضریب مقاومت ویسکوز فشاری بر حسب عدد رینولدز را می‌توان مطابق شکل ۳-۲۱ در نظر گرفت. ملاحظه می‌شود که پس از عبور از عدد رینولدز بحرانی، ضریب مقاومت ویسکوز فشاری به یکباره کاهش می‌یابد. این کاهش ضریب مقاومت بدلیل اغتشاش جریان در لایه مرزی اطراف بدنه می‌باشد.



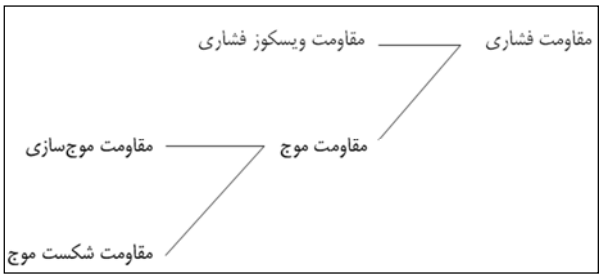
شکل ۳-۲۰ : مقاومت فشاری به صورت حاصل جمع مؤلفه‌های فشار وارد بر سطح بدنه



شکل ۳-۲۱ : تغییرات ضریب مقاومت ویسکوز فشاری بر حسب رینولدز

فصل چهارم: مقاومت موج در شناورها [۱]

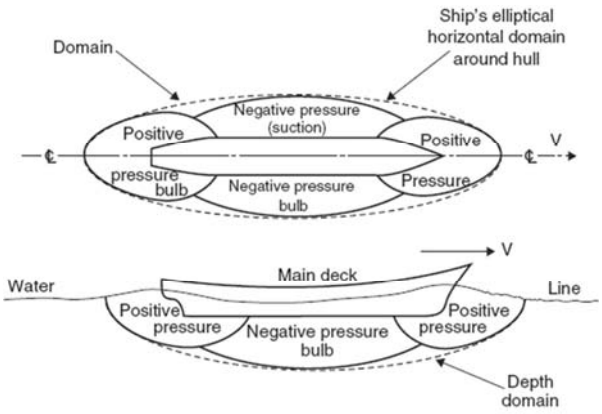
از قبل دانستیم موج در شناورها زیرمجموعه‌ای از مقاومت فشاری است. مقاومت موج نیز خود به دو دسته تقسیم می‌شود؛ مقاومت موج‌سازی و مقاومت شکست موج.



توجه شود که این موج با موج دریا متفاوت است و موج ناشی از حرکت بدنه در داخل سیال است.

❖ علت پیدایش موج اطراف بدنه

از تقسیم‌بندی فوق نیز می‌توان متوجه شد که علت اصلی پیدایش موج، تغییرات فشار است. اگر سطح آزاد سیال که مرز مشترک میان سیال و هوا است، دچار تغییرات فشار شود، موج تولید می‌شود. اگر منطقه‌ای از بالای سطح آزاد سیال کم‌فشار باشد، سطح آب دچار برآمدگی می‌شود و به ناچار بدلیل پیوستگی سیال، مناطق اطراف آن دچار فرورفتگی می‌شوند که بدین‌ترتیب قله و قعر موج شکل می‌گیرند. اگر منطقه‌ای از بالای سطح آزاد سیال هم پرفشار باشد، عکس این حالت اتفاق می‌افتد (شکل ۳-۲۲). همچنین باید توجه شود که کم‌فشار بودن سطح آزاد سیال می‌تواند معادل با پرفشار بودن سطح زیر سطح آزاد سیال باشد که باعث برآمدگی سطح آب می‌شود. حال اگر یک جسم در داخل سیال قرار گیرد و با سرعت مشخصی حرکت کند، تغییرات فشار باعث تولید موج می‌شود.



شکل۳-۲۲: مناطق پرفشار و کم‌فشار اطراف شناور

❖ امواج کشش سطحی و امواج ثقلی

• موج کشش سطحی [۲]

امواج کشش سطحی، امواجی هستند که دارای دوره تناوبی کمتر از ۰/۷ ثانیه و طول موج کمتر از ۱/۷ سانتیمتر و حداکثر ارتفاع ۱ تا ۲ میلیمتر است. چون در این موج، کشش سطحی سیال، عامل حرکت موج است، لذا به آن موج کشش سطحی گویند.

• موج ثقلی [۳]

این امواج، امواجی هستند که ناشی از نیروی گرانش و دارای دوره تناوب، بیش از امواج کشش سطحی هستند. از این‌رو این امواج را «امواج ثقلی» گویند. دوره تناوب این امواج بیش از ۱۵ ثانیه و ارتفاع این امواج تا ۳۴ متر نیز می‌رسد. امواج ایجاد شده در اثر حرکت بدنه شناور، از نوع امواج ثقلی هستند.

۱- منابع: [۲ و ۳ و ۴ و ۶ و ۱۹]

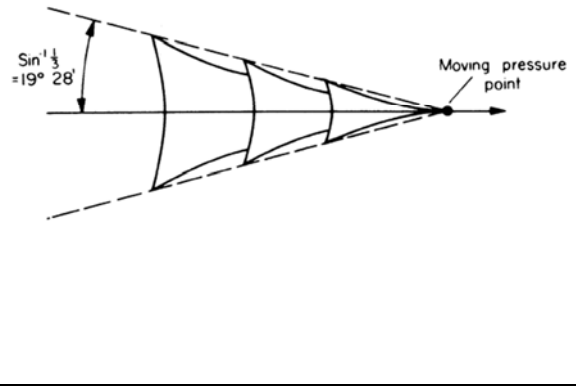
2 - Capilary wave
3 - gravity wave

❖ الگوی موج کلوین

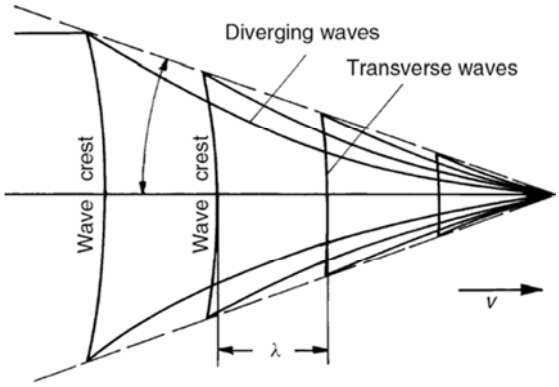
اگر یک نقطه فشار (مانند یک میله) در داخل آب حرکت داده شود، الگوی موج کلوین بیان می‌کند که دو سیستم موج توسط این نقطه فشار تولید می‌شود (شکل ۳-۲۳).

۱- **موج عرضی**[1]: که مطابق شکل، قله و قعر این موج عمود بر راستای حرکت جسم است. اگر میرایی این امواج در نظر گرفته نشود، می‌توان تقریبا آن را موج منظم در نظر گرفت. این موج، بیشترین اهمیت را در مقاومت موج‌سازی دارد.

۲- **موج واگرا**[2]: این امواج به صورت امواج واگرا از مسیر حرکت جسم فاصله می‌گیرند (شکل ۳-۲۳).

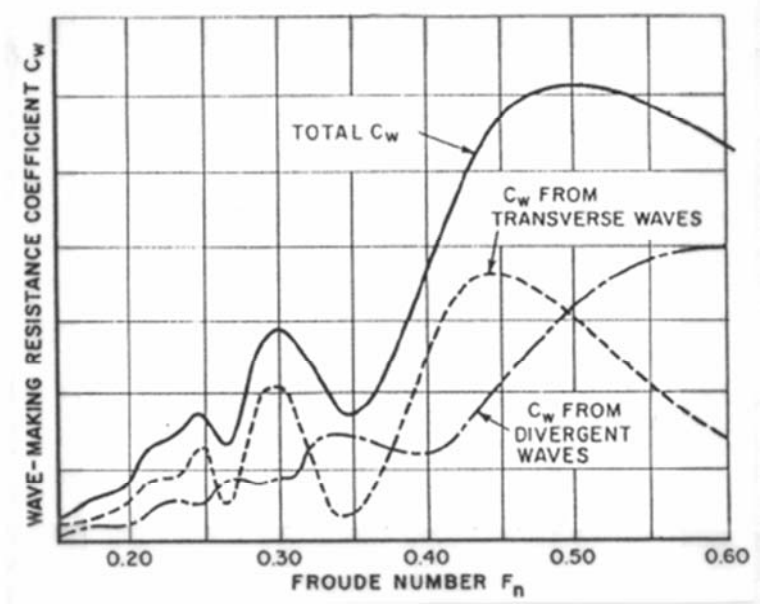


شکل ۳-۲۳ : الگوی موج کلوین (موج عرضی و موج واگرا)



شکل ۳-۲۴ : موج عرضی و موج واگرا در الگوی موج کلوین

اگر جسم در آب عمیق حرکت کند، زاویه موج واگرا از مسیر حرکت (نیم‌زاویه موج) برابر '۱۹°۲۸ می‌باشد. این زاویه بستگی به شکل جسم و سرعت حرکت آن ندارد (با فرض آب عمیق بودن) و یک زاویه ثابت می‌باشد. اگر آب کم‌عمق باشد، این زاویه با سرعت حرکت جسم تغییر می‌کند که در این باره در قسمتهای بعد بحث خواهد شد. مقاومت موج ناشی از برآیند این دو موج است که در شکل ۳-۲۵ مشاهده می‌شود. در این نمودار محور عمودی، ضریب مقاومت موج‌سازی و محور افقی عدد فرود است.



شکل۳-۲۵ : تغییرات ضریب مقاومت موج‌سازی بر حسب عدد فرود و سهم موج عرضی و موج واگرا در ضریب مقاومت کل

1 - transverse wave
2 - divergent wave system

❖ چرا زاویه ۱۹°,۲۸′ ؟[۱]

از معادلات انرژی موج برای سرعت انتشار موج یا سرعت گروهی موج در آب عمیق داریم:

$$V_g = \frac{1}{2}\frac{w}{k} = \frac{1}{2}\frac{g}{w}$$

که w سرعت زاویه‌ای و k عدد موج است. از طرفی نیز داریم:

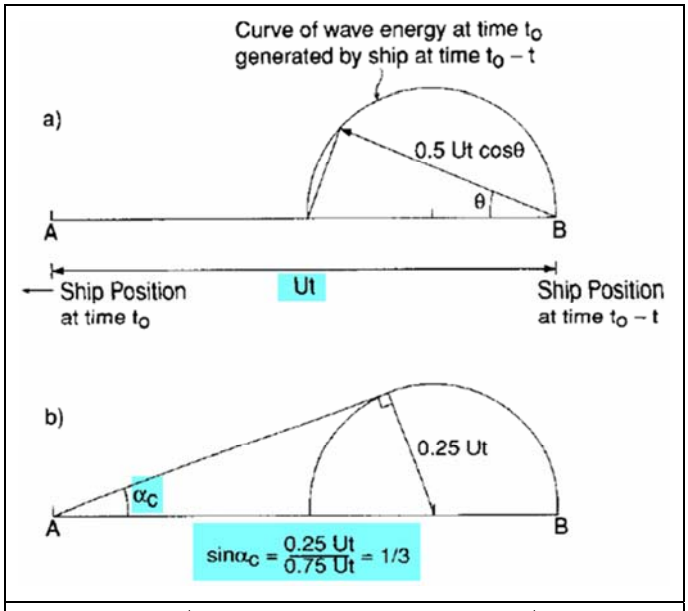
$$w = \frac{g}{u.Cos\theta}$$

با ادغام این دو معادله داریم:

$$V_g = \frac{1}{2}u.Cos\theta$$

مطابق شکل ۳-۲۳ حالت الف، منحنی انرژی موج در زمانt_o که توسط کشتی در زمان t_o-t تولید شده را نشان داده است. مکان هندسی این منحنی از نقطه B توسط $V_g.t$ برابر $0.5u.t.Cos\theta$ یا همان مقدار بیان می‌شود. مکان جبهه موج در زمان t_o در نقطه A و در زمان t_o-t در نقطه B است. فاصله زمانی بین این دو نقطه نیز برابر t می‌شود و فاصله بین دو نقطه A و B نیز برابر $u.t$ می‌باشد. بنابراین دایره مذکور از نقطه B تا وسط فاصله بین نقطه A و B وجود دارد. اگر از نقطه A مماسی بر این دایره در نظر گرفته شود، مطابق شکل ۳-۲۶ حالت ب، زاویه α_c برابر است با:

$$Sin\alpha_C = \frac{R}{3R} = \frac{0.25u.t}{0.75u.t} = \frac{1}{3} \qquad \Rightarrow \qquad \alpha_C = Sin^{-1}\left(\frac{1}{3}\right) = 19^{\circ},28'$$



شکل ۳-۲۶ : زاویه موج واگرا در تولید موج بدنه شناور

بنابراین زاویه موج تولید شده توسط بدنه شناور در آب عمیق برابر مقدار ثابت ۱۹°,۲۸′ می‌باشد.

❖ الگوی موج در آب کم‌عمق

الگوی موج کلوین که پیش از این بیان شد مربوط به آب عمیق است. هر چه عمق آب کمتر شود، زاویه موج واگرا بیشتر می‌شود به‌طوریکه در آب کامـلا کم‌عمق، این زاویه به ۹۰ درجه نزدیک می‌شود. در حرکت از آب عمیق به کم‌عمق، علاوه بر زاویه موج واگرا، مقدار طول موج کاهـش می‌یابد (با توجه به رابطه $\lambda=2\pi V^2/g$ با توجه به کاهش سرعت حرکت از آب عمیق به کم عمق، طول موج کاهش می‌یابد). اگر h عمق آب و λ طول موج باشد، تعریف آب عمیق و کم‌عمق به صورت زیر بیان می‌شود:

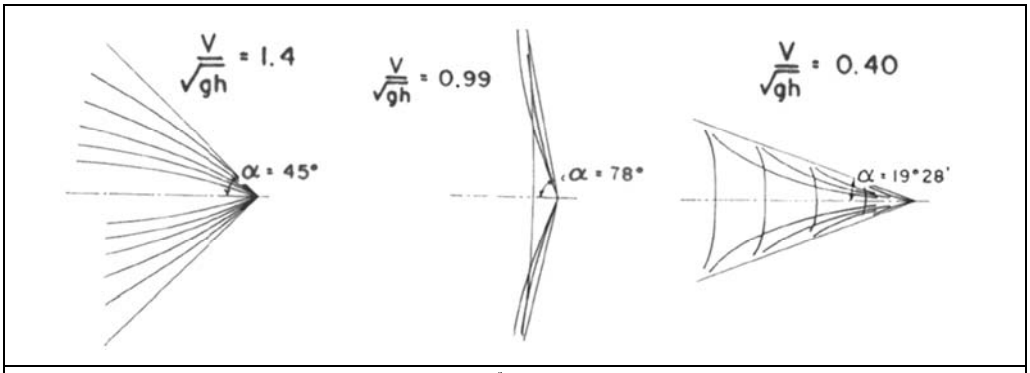
آب عمیق: $\frac{h}{\lambda} \rangle \frac{1}{2}$

آب کم‌عمق: $\frac{h}{\lambda} \langle \frac{1}{20}$

یعنی کم‌عمق و عمیق بودن آب، وابسته به مشخصات موج تولید شده متفاوت است و تعریف عمق، متناسب با طول موج تولید شده می‌باشد. بر این اساس تغییرات زیر را می‌توان در آب کم‌عمق در نظر گرفت (شکل ۳-۲۷). در حرکت موج از آب عمیق به کم عمق، دامنه موج افزایش، طول موج کاهش و سرعت موج کاهش می‌یابد.

در آب کم عمق، سرعت بحرانی تعریف می‌شود که برابر است با: $V = \sqrt{gh}$.

۱- منبع: [۱۹]



شکل ۳-۲۷ : تغییرات زاویه موج واگرا در آب کم عمق بر حسب تغییرات سرعت

اگر $V\langle\sqrt{gh}$ باشد، الگوی موج، هم دارای موج عرضی و هم دارای موج واگرا است (شبیه آب عمیق). حال برای همین حالت می‌توان دو زیرمجموعه در نظر گرفت:

- $V\langle 0.4\sqrt{gh}$: وجود امواج عرضی و واگرا با زاویه ۱۹°,۲۸′
- $0.4\sqrt{gh}\langle V\langle\sqrt{gh}$: وجود امواج عرضی و واگرا ولی با این تفاوت که با افزایش V (سرعت حرکت جسم)، زاویه واگرایی موج واگرا بیشتر می‌شود.

همچنین برای سرعتهای بیش از سرعت بحرانی داریم:

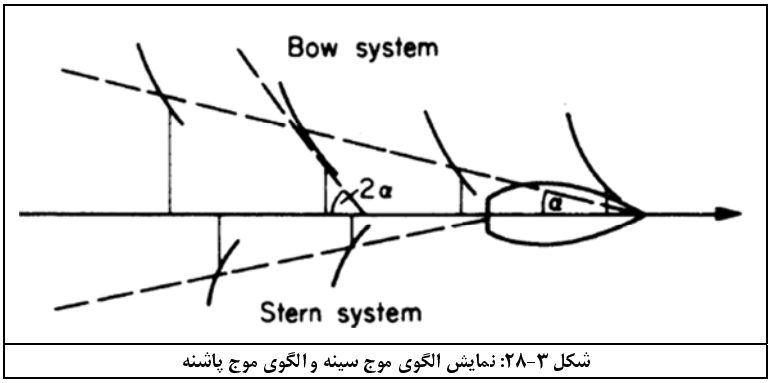
- $V=\sqrt{gh}$: موج عرضی و واگرا وجود دارد ولی موج عرضی بسیار ضعیف است و زاویه موج واگرا نیز به ۹۰ درجه می‌رسد.
- $V\rangle\sqrt{gh}$: با افزایش سرعت به بیش از سرعت بحرانی، موج عرضی حذف می‌شود و صرفا سیستم موج واگرا وجود دارد. زاویه موج واگرا مجددا از ۹۰ درجه کمتر می‌شود. این زاویه با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Sin\alpha=\frac{\sqrt{gh}}{V}$$

همچنین شکل الگوی موج (مطابق شکل) دیگر مقعر نیست بلکه به صورت محدب در می‌آید.

❖ سیستم موج اطراف شناور

دانستیم که اگر یک جسم (نقطه فشار) در داخل یک سیال حرکت کند، الگوی موج کلوین تولید می‌شود. حال اگر یک شناور نیز در آب عمیق حرکت کند، الگوی موج جدیدی تولید می‌کند. یکی الگوی موج سینه که همانند موج کلوین دارای موج عرضی و واگرا با زاویه α=۱۹°,۲۸′ بوده و دیگری الگوی موج پاشنه که دارای موج عرضی و موج واگرا با زاویه 2α منتشر می‌گردد. (شکل ۳-۲۸)

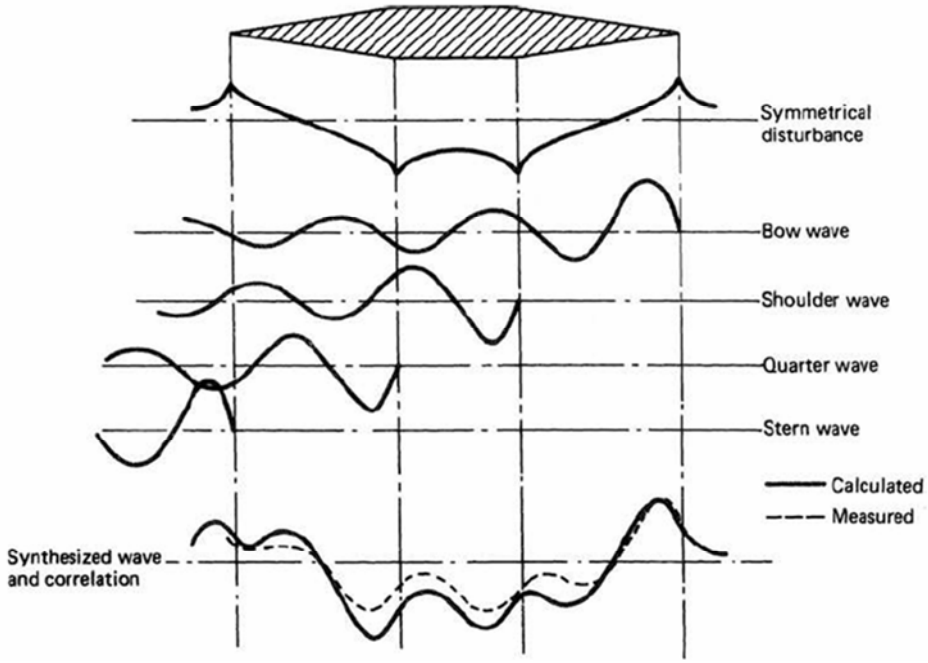


شکل ۳-۲۸: نمایش الگوی موج سینه و الگوی موج پاشنه

از آنجا که سینه شناور، منطقه پرفشار محسوب می‌گردد، لذا موج سینه با قله شروع می‌شود و منطقه سینه شناور را «نقطه فشار»[1] گویند. معمولا موج پاشنه ضعیف‌تر از موج سینه است لذا موج پاشنه را نمی‌توان براحتی ملاحظه کرد، چراکه با موج سینه تلفیق می‌گردد. از همین رو سهم موج سینه در مقاومت موج‌سازی بیشتر از سهم موج پاشنه است. بنابراین به اختصار داریم:

- **الگوی موج سینه:** دارای موج عرضی و موج واگرا با زاویه α – شروع موج با قله موج – قوی‌تر از موج پاشنه
- **الگوی موج پاشنه:** دارای موج عرضی و موج واگرا با زاویه 2α – شروع موج با قعر موج – ضعیف‌تر از موج سینه

1 - pressure point



شکل ۳-۲۹ : امواج تولید شده در قسمت‌های مختلف شناور با بدنه میانی موازی

اگر شکل بدنه شناورهای تجاری را شبیه شکل ۳-۲۹ در نظر بگیریم و بررسی دقیق‌تری از الگوی امواج تولید شده توسط بدنه داشته باشیم، امواج ایجاد شده را می‌توان در چهار دسته‌بندی زیر در نظر گرفت:

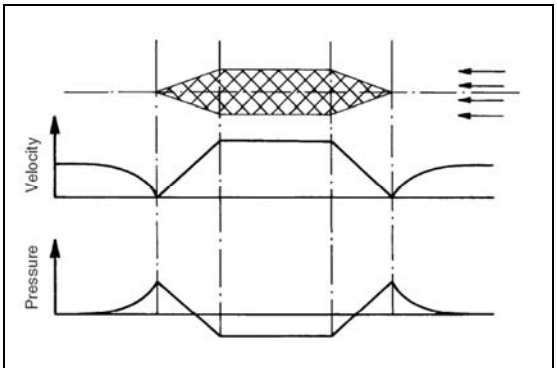
۱- موج سینه[1]: موج ایجاد شده در ناحیه سینه شناور که با قله موج شروع می‌شود چراکه در نقطه پر فشار است.

۲- موج شانه سینه[2]: موج ایجاد شده در ناحیه شانه سینه که با قعر موج شروع می‌شود، چراکه در منطقه کم‌فشار است.

۳- موج شانه پاشنه[3]: موج ایجاد شده در ناحیه شانه پاشنه که با قعر موج شروع می‌شود چراکه در منطقه کم‌فشار است.

۴- موج پاشنه[4]: موج ایجاد شده در ناحیه پاشنه که با قله موج شروع می‌شود چراکه در منطقه پرفشار قرار دارد.

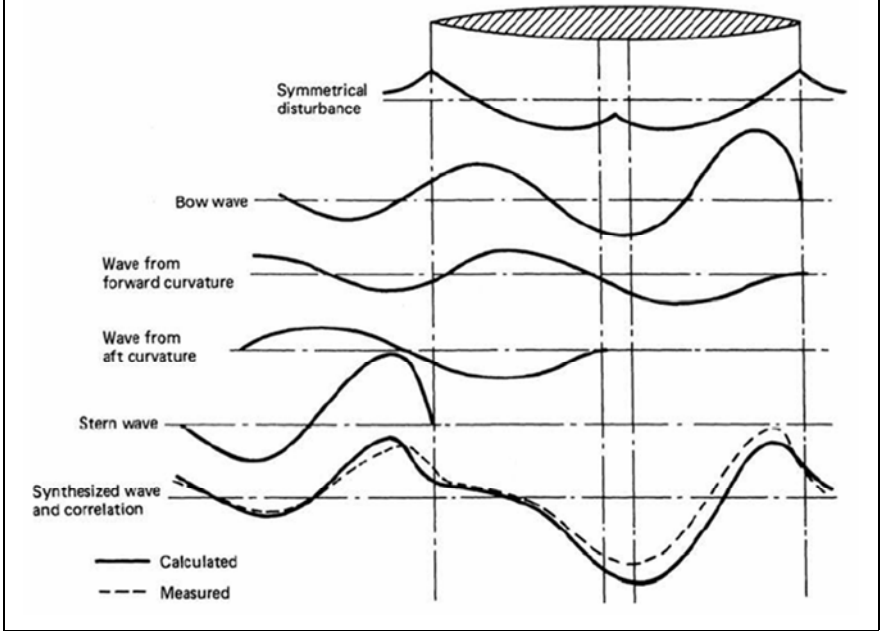
برای درک بهتر مناطق کم‌فشار و پرفشار مجددا می‌توان به شکل ذیل مراجعه کرد.



تکرار شکل: توزیع سرعت و فشار اطراف بدنه شناور در سیال ایده آل

از این شکل ملاحظه می‌شود که شانه سینه و شانه پاشنه در ناحیه کم‌فشار و قسمت سینه و پاشنه شناور در منطقه پرفشار قرار گرفته‌اند. اگر موج سینه و شانه سینه را موج منطقه سینه در نظر بگیریم، می‌بینیم که برآیند موج این منطقه همانطور که در قسمت برآیند امواج نشان داده شده (شکل ۳-۲۹)، با قله موج شروع می‌شود چراکه موج سینه (که با قله شروع می‌شود) از موج شانه سینه (که با قعر شروع می‌شود) قوی‌تر است. همچنین اگر موج پاشنه و شانه پاشنه را موج منطقه پاشنه در نظر بگیریم، می‌بینیم که برآیند موج این منطقه همانطور که در قسمت برآیند امواج آمده، با قعر موج نشان داده شده است. چراکه موج شانه پاشنه (که با قعر شروع می‌شود) از موج پاشنه (که با قله شروع می‌شود)، قوی‌تر است. به همین دلیل است که در مبحث قبلی، در حالت کلی، بیان کردیم که موج سینه با قله و موج پاشنه با قعر شروع می‌شود. اگر شکل بدنه شناور شبیه شکل ۳-۳۰ باشد، سیستم امواج تولید شده با قبل اندکی متفاوت است. توزیع فشار در نمودار اول و برآیند تداخل امواج نیز در نمودار انتهایی ارائه شده است. در این نمودارها و نمودارهای شکل قبل ملاحظه می‌شود که دامنه امواج تولید شده در نقاط مختلف شناور با هم متفاوت است ولی طول موج این امواج تقریبا یکسان است چراکه برای طول موج تولید شده داریم: $\lambda = \frac{2\pi V^2}{g}$ که V برای نقاط مختلف اطراف شناور تقریبا برابر است. موج سینه و پاشنه هر دو با سرعت برابر با سرعت حرکت کشتی (V) حرکت می‌کنند.

1 - bow wave
2 - shoulder wave
3 - Quarter wave
4 - stern wave



شکل ۳-۳۰: امواج تولید شده در قسمت‌های مختلف شناور با بدنه میانی محدب

❖ تداخل امواج سینه و پاشنه

اگر ارتفاع موج سینه h_f و ارتفاع موج پاشنه h_a باشد و این دو موج با اختلاف فاز ε با یکدیگر تداخل کنند، ارتفاع موج برآیند از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$h^2 = h_f^2 + h_a^2 + 2h_f h_a Cos\varepsilon = M + NCos\varepsilon$$

ε: اختلاف فاز موج سینه با موج پاشنه در زمان رسیدن موج سینه به محل موج پاشنه

اگر موج سینه و پاشنه با هم همفاز باشند، یعنی موج سینه به صورت همفاز به محل موج پاشنه برسد، ($\varepsilon = \circ$) داریم:

هم فاز: $\varepsilon = \circ \rightarrow h^2 = M + N$

اگر موج سینه و پاشنه با هم در فاز مخالف باشند، یعنی موج سینه به صورت فاز مخالف به محل موج پاشنه برسد،($\varepsilon = \pi$) داریم:

فاز مخالف : $\varepsilon = \pi \rightarrow h^2 = M - N$

هم‌فاز بودن تداخل امواج یعنی موج سینه با قعر موج به محل موج پاشنه (که آن نیز با قعر شروع می‌شود)، می‌رسد. در این حالت، ارتفاع موج برآیند بیشتر است. غیر همفاز بودن تداخل امواج یعنی موج سینه با قله موج به محل موج پاشنه می‌رسد که در این حالت، ارتفاع موج برآیند کمتر می‌شود.

همچنین می‌دانیم که مقاومت موج‌سازی متناسب است با توان دوم ارتفاع موج: $R_W \propto h^2$

اثر تداخل مطلوب و نامطلوب امواج سینه و پاشنه را می‌توان به صورت زیر نیز توضیح داد. برای یک پریود کامل موج داریم:

$$\lambda = \frac{2\pi V^2}{g}$$

$$\frac{V^2}{\lambda} = \frac{g}{2\pi}$$

اگر یک پریود موج کامل، با طول موج مشخص λ ، طول شناور (L) را طی کند آنگاه می‌توانیم بجای λ مقدار L را قرار دهیم:

$$\frac{V^2}{L} = \frac{g}{2\pi}$$

اگر بجای یک پریود کامل موج، ضریبی از یک نیم‌موج داشته باشیم، یعنی بجای 2π عدد $N\pi$ را جایگذاری کنیم داریم:

$$\frac{V^2}{L} = \frac{g}{N\pi}$$

در مرجع [۲] مقدار L را برابر فاصله بین مرکز فشار سینه و پاشنه یعنی برابر ۹۰ درصد طول بین عمود سینه و پاشنه در نظر گرفته است.

مرجع [۵] مقدار L را برابر طول صفحه آبخور در نظر گرفته است: $L = 0.9L_{BP}$

$L = L_W$

اگر قرارداد مرجع [۱] را در نظر بگیریم داریم:

$$\frac{V^2}{0.9L_{BP}} = \frac{g}{N\pi}$$

از طرفی می‌توانیم N را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$N = \frac{L}{\lambda/2}$$

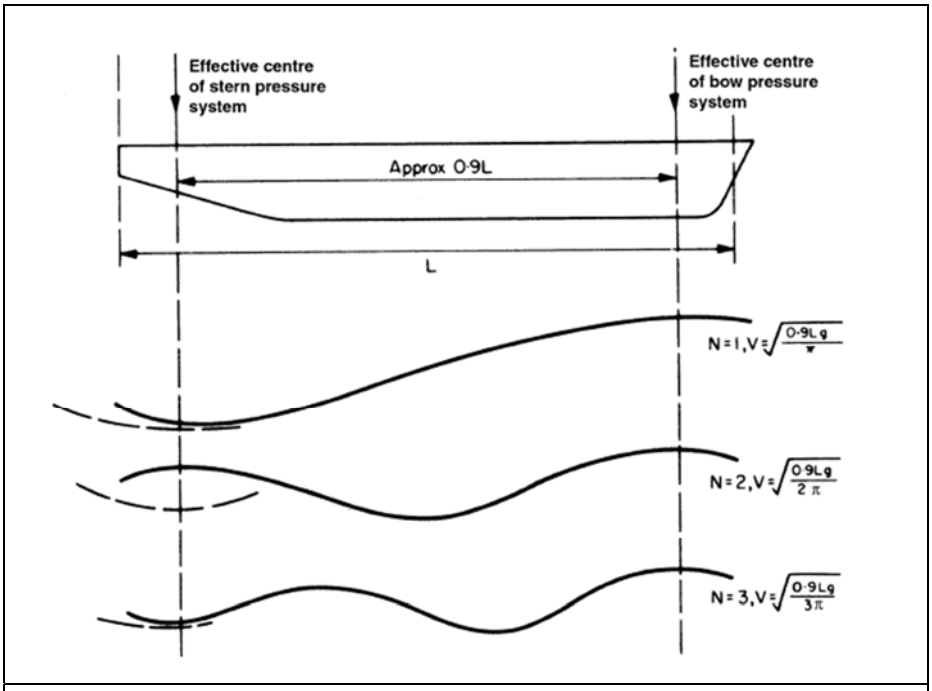
یا می‌توانیم بگوییم:

$$N = \frac{0.9L.g}{V^2.\pi}$$

از روابط قبل داریم:

$$V^2 = \frac{0.9L_{BP}.g}{N\pi}$$

$$V = \sqrt{\frac{0.9L_{BP}.g}{N\pi}}$$



شکل ۳-۳۱ : حالات مختلف تداخل موج سینه و پاشنه با توجه به سرعت حرکت شناور

حال با توجه به شکل ۳-۳۱ و اینکه موج سینه همواره با قله و موج پاشنه همواره با قعر شروع می‌شود داریم:

***N*=۱** : موج سینه که همواره با قله شروع می‌شود با قعر موج به محل موج پاشنه (که با قعر شروع شده)، می‌رسد. این تداخل یک تداخل نامطلوب است چراکه در محل پاشنه، دو قعر موج با هم تلاقی می‌کنند و یک منطقه کم‌فشار بزرگ (قعر بزرگ موج) تشکیل می‌شود که باعث افزایش مقاومت می‌شود. در این حالت داریم:

$$V = \sqrt{\frac{0.9L_{BP}.g}{\pi}}$$

در این حالت، موج با طی‌شدن نصف طول موج، طول بدنه شناور را می‌پیماید.

***N*=۲** : موج سینه با همان قله موج به محل موج پاشنه می‌رسد. این تداخل یک تداخل مطلوب است چراکه در محل پاشنه، قله و قعر یکدیگر را خنثی یا تضعیف می‌نمایند و منطقه کم‌فشار بزرگ ایجاد نمی‌گردد و لذا مقاومت موج‌سازی افزایش چندانی نمی‌یابد. در این حالت: $V = \sqrt{\frac{0.9L_{BP}.g}{2\pi}}$ است و موج با یک طول موج کامل، طول بدنه شناور را طی می‌کند.

***N*=۳:** این حالت همانند حالت N=۱ می‌باشد، با این تفاوت که موج سینه با طی‌کردن ۱/۵ برابر موج کامل، طول بدنه شناور را طی می‌کند و لذا قعر دو موج در پاشنه با یکدیگر تداخل می‌کنند. لذا این تداخل نیز یک تداخل نامطلوب است.

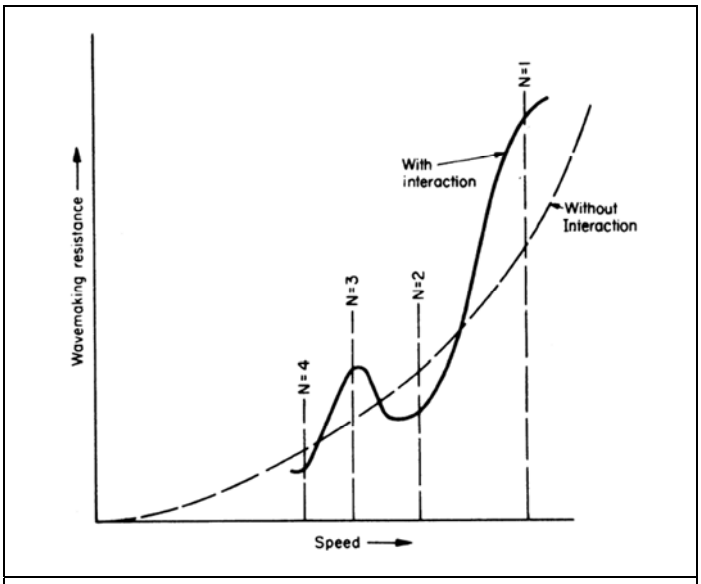
بر این اساس می‌توانیم بگوییم:

فرد : N ⟵ تداخل نامطلوب امواج سینه و پاشنه

زوج: N ⟵ تداخل مطلوب امواج سینه و پاشنه

یادآوری می‌کنیم که $N = \frac{0.9L_{BP}.g}{V^2.\pi}$ است و بنابراین می‌توانیم بگوییم که در تداخل مطلوب یا نامطلوب امواج سینه و پاشنه که بر مقاومت موج-سازی مؤثر است، دو عامل اصلی طول شناور (L_{BP}) و سرعت حرکت شناور (V) دخیل هستند. یعنی برای رسیدن به حالت مطلوب و حداقل مقاومت، باید کسر حاصل طوری بدست آید که مقدار N عددی زوج بدست آید. این مفهوم در تعریف طول مناسب شناور (در فرآیند طراحی) و سرعت بهینه

اقتصادی (در حین کاربری شناور) بسیار مؤثر است. برای بررسی اثر این تداخل بر مقاومت موج‌سازی، شکل ۳-۳۲ را در نظر می‌گیریم. در این شکل، محور عمودی، مقاومت موج‌سازی و محور افقی، سرعت حرکت شناور است. اگر تداخل امواج سینه و



شکل ۳-۳۲ : تغییرات مقاومت موج‌سازی بر حسب سرعت

پاشنه را در نظر نگیریم، نمودار خط‌چین بدست می‌آید که یک سهمی بدون تغییرات انحنای محلی است و با افزایش سرعت، مقاومت حرکت افزایش می‌یابد. حال اگر تداخل امواج در نظر گرفته شود، نمودار اصلی مقاومت موج‌سازی بر حسب سرعت بدست می‌آید که خود این نمودار دارای قله و قعر[1] می‌باشد. قله‌های نمودار، نشان از تداخل نامطلوب امواج سینه و پاشنه دارد که متناظر با اعداد N فرد می‌باشد: $N=1, 3, 5, \ldots$ که $N=1$ را قله اصلی[2] و $N=3$ را قله منشوری[3] می‌نامند چراکه ضریب منشوری بدنه در مقدار آن بسیار مؤثر است.

قعرهای نمودار نیز نشان از تداخل مطلوب امواج سینه و پاشنه دارد که متناظر با اعداد N زوج $(N=2, 4, \ldots)$ می‌باشد. پس در نمودار مقاومت موج‌سازی، با افزایش سرعت، لزوما مقاومت موج‌سازی افزایش نمی‌یابد بلکه ممکن است سرعت متناظر با N فرد و در قله نمودار باشد (مثلاً $N=3$) و با افزایش سرعت، N تبدیل به عدد زوج شود و نمودار مقاومت موج‌سازی در قعر نمودار $(N=2)$ قرار گیرد یعنی بدین ترتیب با افزایش سرعت، مقدار مقاومت موج‌سازی کاهش یافته است. این یک مفهوم جدید و استثنایی در بحث مقاومت است.

❖ تأثیر عدد فرود بر مقاومت موج‌سازی

گفتیم که عدد فرود از نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای گرانشی بدست می‌آید و برابر است با: $F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$. از طرفی هم می‌دانیم که امواج تولید شده توسط بدنه شناور، موج ثقلی است و مستقیما مرتبط با نیروهای ثقلی می‌باشد از این رو، مبحث مقاومت موج‌سازی مستقیما مرتبط با عدد فرود است. اگر بخواهیم بحثی را که تا کنون بیان کرده‌ایم به عدد فرود مرتبط کنیم، از رابطه زیر داریم:

$$V = \sqrt{\frac{0.9 L_{BP}.g}{N.\pi}}$$

$$\frac{V}{\sqrt{L.g}} = \sqrt{\frac{0.9}{N.\pi}} = F_n$$

اگر بخواهیم اعداد فرود مناسب و نامناسب را با توجه به مطالب قبل داشته باشیم داریم (جدول ۳-۴):

N	Fn	وضعیت
1	$\sqrt{\frac{0.9}{\pi}} = 0.54$	نامطلوب
2	$\sqrt{\frac{0.9}{2\pi}} = 0.38$	مطلوب
3	$\sqrt{\frac{0.9}{3\pi}} = 0.31$	نامطلوب
4	$\sqrt{\frac{0.9}{4\pi}} = 0.27$	مطلوب
5	$\sqrt{\frac{0.9}{5\pi}} = 0.24$	نامطلوب
6	$\sqrt{\frac{0.9}{6\pi}} = 0.22$	مطلوب

جدول ۳-۴ : نسبت عدد فرود با وضعیت تداخل امواج

1 -hump & hollow
2 - Main hump
3 - prismatic hump

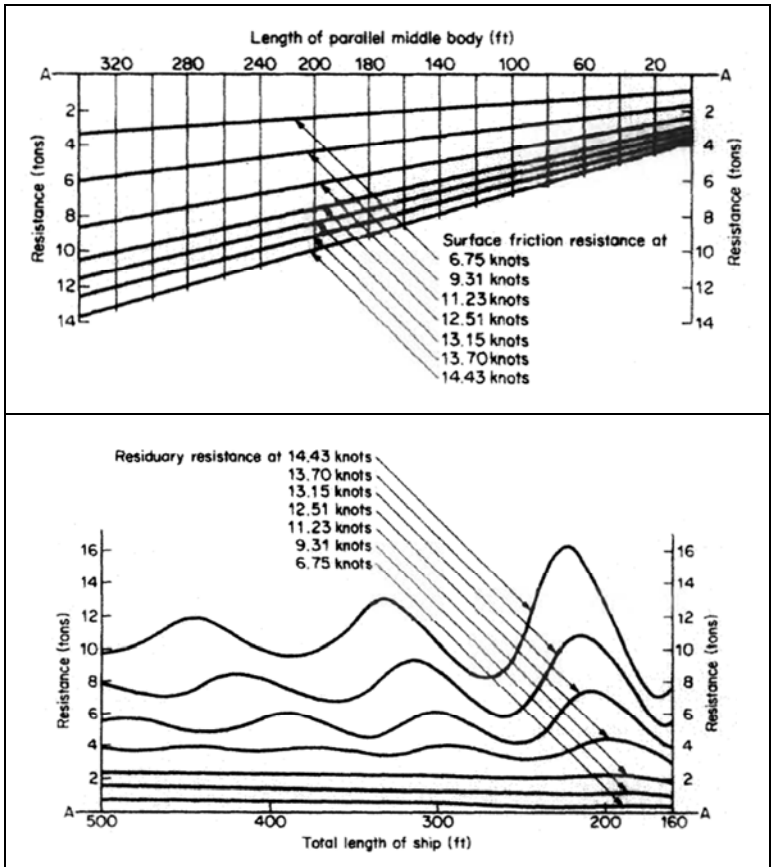
یعنی اعداد فرود ۰/۵۴ ، ۰/۳۱ و ۰/۲۴ نامطلوب و اعداد فرود ۰/۳۸ ، ۰/۲۷ و ۰/۲۲ مطلوب هستند. همانطور که در شکل۳-۳۲ملاحظه می‌شود، برای اعداد فرود کمتر از ۰/۲۵ تقریبا قله و قعر نمودار بسیار ناچیز می‌شود و می‌توان نمودار را در این محدوده به صورت صرفا صعودی و سهمی‌شکل در نظر گرفت. محدوده فرود کشتی‌های تجاری اقیانوس‌پیما در محدوده ۰/۳۵ — ۰/۲ است و در شناورهای تندرو معمولا عدد فرود بیش از ۰/۳ است. بطور مثال برای یک کشتی نفتکش به طول ۲۰۰ متر و سرعت ۲۰ گره داریم:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{10}{\sqrt{9.81\times 200}} = 0.22$$

و برای یک شناور تندرو نظامی به طول ۸۰ متر و سرعت ۳۰ گره داریم:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{15}{\sqrt{9.81\times 80}} = 0.53$$

از طرف دیگر نیز می‌دانیم که عدد فرود وابسته به شکل بدنه نیست و فقط وابسته به طول بدنه و سرعت حرکت است. پس تأثیر شکل بدنه بر مقاومت موج‌سازی کجاست؟ به این سؤال در قسمتهای بعدی پاسخ داده می‌شود. بدین ترتیب تغییرات سرعت و طول کشتی تاثیرات مضاعف و غیرخطی بر تغییرات مقاومت موج‌سازی دارد در حالی که این تغییرات در مقاومت اصطکاکی به صورت خطی است. نمودار شکل ۳-۳۳ اثرات تغییرات مقاومت اصطکاکی و مقاومت باقی‌مانده (شامل مقاومت موج‌سازی) نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۳: تغییرات مقاومت اصطکاکی و باقی‌مانده با تغییرات طول و سرعت

مثال) یک کشتی فله‌بر به طول ۱۰۰ متر و حداکثر سرعت ۲۰ گره در مراحل طراحی می‌باشد. مطلوبست: الف) پیشنهاد طول مناسب برای صرفه‌جویی در مصرف سوخت شناور (در جابجایی ثابت) ب) تعیین سرعت اقتصادی شناور در شرایط فعلی.

حل) برای شرایط فعلی داریم:

$$L = 100\ m$$

$$V = 20\ knot \approx 10\ m/s \qquad g \approx 10\ m/s2$$

الف)

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{10}{\sqrt{10\times 100}} = 0.32$$

با توجه به مطالب قبل ملاحظه می‌شود که عدد فرود بدست‌آمده نزدیک به مقدار 0.31 و متناظر با $N = 3$ است که بدلیل فرد بودن N در این حالت تداخل امواج نامناسب است و باعث افزایش مقاومت و توان مورد نیاز می‌شود که این نیز معادل افزایش مصرف سوخت است. برای کاهش مصرف سوخت موتور باید تداخل امواج مناسب باشد که دو پیشنهاد بهینه می‌توان مطرح کرد:

$$N=2 \rightarrow F_n=0.38=\frac{V}{\sqrt{gL}}=\frac{10}{\sqrt{10\times L}} \quad (۱$$

$$L=69.2 \quad m$$

برای ثابت ماندن جابجایی می‌توان با افزایش آبخور یا عرض، مقدار کاهش طول را جبران کرد.

$$N=4 \rightarrow F_n=0.27=\frac{V}{\sqrt{gL}}=\frac{10}{\sqrt{10\times L}} \quad (۲$$

$$L=137.17\,m$$

برای ثابت ماندن جابجایی می‌توان آبخور یا عرض را کاهش داد. این گزینه نیز از آنجا که معادل است با افزایش زیاد طول و ازدیاد طول نیز باعث افزایش شدید وزن سازه‌ای شناور می‌شود لذا مطلوب نیست.

برای این مورد راه حل دیگری نیز می‌توان پیشنهاد کرد که البته از حالت بهینه فاصله دارد. از جدول صفحات قبل می‌دانیم که عدد فرود ۰/۳۸ مطلوب و فرود ۰/۳۱ نامطلوب است. لذا حد وسط بین این دو را در نظر می‌گیریم:

$$F_n=0.35$$

$$0.35=\frac{V}{\sqrt{gL}}=\frac{10}{\sqrt{10\times L}}$$

$$L=81.6 \quad m$$

لذا طول ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده برای طراحی نامناسب است و باید تغییر یابد.

ب) (اگر شرایط فعلی شناور را داشته باشیم) سرعت اقتصادی یا کروز[1]، سرعتی کمتر از حداکثر سرعت است که برای تعیین سرعت اقتصادی باید مقاومت شناور حداقل باشد.

نام سرعت اقتصادی بدین دلیل انتخاب شده که در این سرعت، شناور دارای بهینه‌ترین مقاومت و بهینه‌ترین مصرف سوخت است. لذا برای سرعتهای پائین‌تر از حداکثر سرعت فرض می‌کنیم:

$$F_n=0.22 \rightarrow N=6(\text{زوج}) \rightarrow \text{مطلوب} \qquad \text{حالت}$$

$$F_n=0.22=\frac{V}{\sqrt{gL}} \rightarrow V=0.22\sqrt{10\times 100}$$

$$V=6.95 \quad {}^{m}\!/_{s} \approx 14 \quad knot$$

یعنی سرعت اقتصادی این شناور باید ۱۴ گره باشد. حداکثر سرعت آن نیز ۲۰ گره است.

❖ دو مشخصه مهم موج در مقاومت موج‌سازی

موج تشکیل شده توسط بدنه کشتی دارای دو مشخصه مهم است که بر مقاومت موج‌سازی تاثیر زیادی دارد:

۱- طول موج: همانطور که بیان شد طول موج سینه و پاشنه و نحوه تداخل این امواج، نقش مهمی در مقاومت موج‌سازی دارد.

۲- ارتفاع موج: تا حد ممکن باید بتوان ارتفاع موج سینه و پاشنه را کاهش داد و برای این منظور معمولا از حبابی سینه (بالبوس) استفاده می‌شود. کاهش ارتفاع موج به دو صورت بر مقاومت موج موثر است: ۱) کاهش ارتفاع موج که با توان ۲ باعث کاهش مقاومت موج‌سازی می‌گردد. ۲) جلوگیری از شکست موج که باعث حذف مولفه مقاومت شکست موج می‌گردد.

❖ اثر شکل بدنه بر مقاومت موج

از مطالب قبل دانستیم که شکل بدنه (مانند شکل سینه و پاشنه) اثری بر عدد فرود و مقدار N ندارد. پس اثر شکل بدنه بر مقاومت موج‌سازی در کجاست؟ مطالبی که در گذشته بیان شد برای بررسی اثر تداخل امواج سینه و پاشنه بود، حال آنکه تاکنون بحثی از ارتفاع موج سینه و پاشنه نشده است. اثر اصلی شکل بدنه بر ارتفاع امواج تولید شده است و از طرفی نیز دانستیم که $R_W \propto h^2$. همچنین شکل بدنه بر شکست موج و مقاومت شکست موج[2] بسیار مؤثر است، چراکه موج در شرایطی دچار شکست می‌شود که ارتفاع موج از محدوده بحرانی بیشتر شود که در این باره بحث خواهد شد.

۱) اثر حبابی سینه[3] بر مقاومت موج:

تأثیر اصلی حبابی سینه در کاهش مقاومت، بوسیله کاهش ارتفاع موج تولید شده در قسمت سینه می‌باشد. آزمایشات متعدد در حوضچه کشش نشان داده است که حبابی سینه با توجه به شکل و موقعیت قرارگیری آن و همچنین محدوده عدد فرود در حرکت کشتی می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش مقاومت موج و در نتیجه کاهش مقاومت کل داشته باشد (شکل ۳-۳۴). از قبل می‌دانیم که مقاومت موج دارای دو مؤلفه مقاومت موج‌سازی و مقاومت شکست موج است. اثر کاهش ارتفاع موج را به دو صورت می‌توان بیان کرد:

1 - cruise speed
2 - Wave breaking Resistance
3- Bulbous bow

۱- کاهش ارتفاع موج به طور مستقیم باعث کاهش مقاومت موج‌سازی می‌گردد چراکه داریم: $R_W \propto h^2$.

۲- کاهش ارتفاع موج باعث جلوگیری از رسیدن موج به حد بحرانی و جلوگیری از شکست موج می‌شود. جلوگیری یا کاهش شکست موج نیز به معنای کاهش مقاومت شکست موج می‌گردد چراکه شکست موج و مومنتوم حاصل از آن در کنار بدنه باعث افزایش مقاومت می‌شود.

نسبت بحرانی $\frac{h}{\lambda}$ (نسبت ارتفاع موج به طول موج) که باعث شکست موج می‌شود در آب عمیق و کم‌عمق به صورت زیر بیان می‌شود:

آب عمیق: $\frac{h}{\lambda}=\frac{1}{2}$

آب کم‌عمق: $\frac{h}{\lambda}=\frac{1}{10}$

یعنی آنچه باعث شکست موج می‌شود، نسبت ارتفاع موج به طول موج است و اگر ارتفاع موج از این حد بیشتر شود، موج دچار شکست می‌گردد. با کاهش ارتفاع موج، نسبت $\frac{h}{\lambda}$ کمتر شده و شکست موج اتفاق نمی‌افتد.

شکل۳-۳۴: شکل از حبابی سینه

اثبات ریاضی برای تبیین چگونگی اثر حبابی سینه بر کاهش ارتفاع موج وجود ندارد. جلوگیری از شکست موج در کشتی‌های نظامی دارای اهمیت زیادی است چراکه سر و صدای ناشی از شکست موج باعث کاهش کارآیی سونار (وسیله ردیابی صوتی در قسمت زیر آب) می‌گردد. در کشتی‌های تندرو مانند ناوشکن‌ها و کشتی‌های مسافربری، حبابی سینه باعث بهبود تولید موج می‌گردد ولی همین حبابی سینه در نفتکش‌های بزرگ باعث افزایش ارتفاع موج می‌گردد علی‌رغم اینکه مقاومت موج در مجموع کاهش می‌یابد. این تناقض با آزمایشات تجربی دقیق در مورد دبی موج و اثر مومنتوم در ناحیه ویک قسمت سینه بررسی شد و شکست موج را نتیجه این تناقض دانست. بدین ترتیب که در نفتکش‌ها با وجود حبابی سینه افزایش ارتفاع موج، همراه با افزایش طول موج می‌باشد یعنی بدین ترتیب موج به حد بحرانی $\frac{h}{\lambda}$ نمی‌رسد و دچار شکست نمی‌گردد. عدم شکست موج یا کاهش آن نیز در مجموع به معنای کاهش مقاومت موج است. در سایر انواع کشتی‌ها همانطور که قبلا بیان شد، حبابی سینه مستقیماً باعث کاهش ارتفاع موج می‌گردد.

۲) اثر زاویه ورودی صفحه آبخور بر مقاومت موج

اگر در نما از بالای صفحه آبخور، زاویه ورودی (جلویی) صفحه آبخور i_R باشد، در سرعتهای پائین، مقاومت موج‌سازی بسیار کوچک و وابسته به شکل صفحه آبخور در قسمت سینه (i_R) است.

$(R_W \propto i_R)$

۳) اثر جابجایی (تناژ) بر مقاومت موج

در سرعتها و اعداد فرود خیلی بالا، مقاومت موج با مجذور جابجایی متناسب است. این موضوع، بیان‌کننده این واقعیت است که در سرعتهای خیلی بالا، شکل بدنه تقریبا مهم نیست و عامل اصلی جابجایی در واحد طول $\left(\frac{\Delta}{L}\right)$ می‌باشد یا به عبارتی می‌توان گفت:

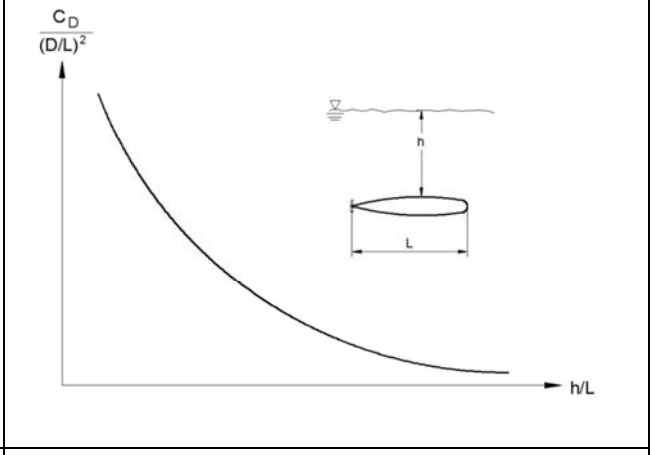
$R_W \propto \Delta^2$

۴) اثر نسبت B/L بر مقاومت موج: مقاومت موج، نسبت مستقیم با نسبت B/L دارد لذا افزایش عرض باعث افزایش مقاومت می‌گردد.

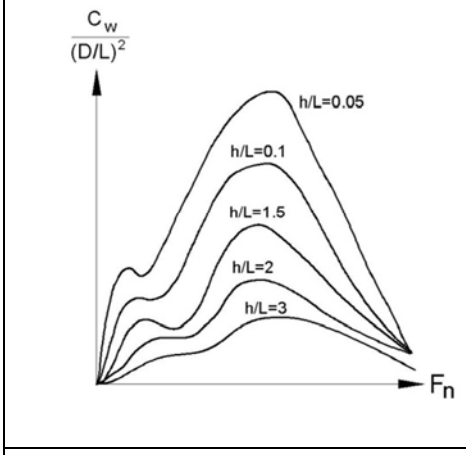
❖ مقاومت موج‌سازی زیردریایی[۱]

تولید موج در سطح مشترک دو سیال با چگالی متفاوت انجام می‌شود. اگر یک کشتی روی سطح آب حرکت کند در واقع در سطح مشترک سیال آب و هوا حرکت کرده و تولید موج می‌کند. حال اگر یک زیردریایی ابتدا روی سطح آب حرکت کند و اندک اندک از سطح آب فاصله بگیرد و به عمق آب برود، اثر مقاومت موج‌سازی اندک اندک کاهش یافته تا جائیکه این مؤلفه مقاومت کاملا حذف می‌شود. نمودار شکل ۳-۳۵ بیان‌کننده کاهش ضریب مقاومت کل با افزایش عمق زیردریایی است. در این نمودار C_D ضریب مقاومت کل، h عمق غوطه‌وری زیردریایی، L طول و D حداکثر قطر زیردریایی است. همچنین نمودار شکل ۳-۳۶ بیان‌کننده تغییرات ضریب مقاومت موج‌سازی بر حسب تغییرات عمق است. محور افقی نمودار نیز عدد فرود می‌باشد.

۱ [۲ و ۱۴ و ۲۰]



شکل ۳-۳۵ : تغییرات ضریب مقاومت کل زیردریایی با افزایش عمق



شکل ۳-۳۶: تغییرات ضریب مقاومت موج‌سازی زیردریایی با تغییر عدد فرود و عمق غوطه‌وری

اعداد نوشته شده بر روی نمودار، نسبت $\frac{h}{L}$ هستند. بنابراین مقاومت موج‌سازی زیردریایی با افزایش عمق، کاهش می‌یابد تا جائیکه کاملا حذف می‌شود. این عمق در منبع [۲] برابر نصف طول زیردریایی $\left(h=\frac{L}{2}\right)$ و در منبع [۱۴] سه برابر قطر بدنه زیردریایی $(h=3D)$ و در منبع [۲۰] معادل ۵ برابر قطر بدنه $(h=5D)$ در نظر گرفته شده است. مشخص است که مقاومت شکست موج در زیر سطح آب وجود ندارد و فقط مقاومت موج‌سازی وجود دارد. مقاومت موج‌سازی برای یک زیردریایی که نزدیک سطح آب قرار گرفته به صورت امواج کوچک در سطح آب مشخص می‌شود.

❖ مقاومت موج‌سازی در عمق آب[۲،۱]:

گفتیم که موج در سطح مشترک دو سیال با چگالی متفاوت بوجود می‌آید. در دریا نیز لایه‌های مختلفی در عمق آب با چگالی متفاوت ممکن است وجود داشته باشد که بستگی به آن منطقه دریایی دارد. لایه‌هایی با چگالی کمتر در سطوح بالاتر و چگالی بیشتر در لایه‌های پائین‌تر هستند. هر چه این اختلاف چگالی بیشتر باشد، موج‌سازی تولید شده بیشتر خواهد بود. امواج زیرآبی دارای ارتفاع عمودی و دامنه‌ای بسیار بزرگتر از امواج سطحی هستند، به گونه‌ای که از سطح آب نیز ممکن است قابل رؤیت باشند. مقاومت اضافه‌شده از این امواج می‌تواند ۲–۳ برابر مقاومت موج‌سازی در آب همگن (چگالی یکنواخت) باشد. [۴]. این موج می‌تواند توسط یک کشتی کندرو مانند یدک‌کش که روی لایه آب شیرین حرکت می‌کند بوجود آید، یعنی شناور حتما نباید سطح مشترک آب شور و شیرین را قطع کند. این مقاومت توسط حرکت یک زیردریایی در زیر آب نیز می‌تواند ایجاد شود. همچنین موج‌سازی در لایه‌های زیرآبی صرفا نباید همراه با موج‌سازی در سطح آب باشد. نکته مهم دیگر در اینجاست که این امواج دارای سرعت حرکت بسیار کمی هستند و اگر سرعت کشتی بیش از ۵ گره باشد، احتمال کمی دارد که این امواج بتوانند کشتی را همراهی کنند.[۳]

سرعت حرکت امواج زیرآبی در مقایسه با امواج سطحی با نسبت زیر کاهش می‌یابد.

$$S=\frac{\text{چگالی آب شیرین}}{\text{چگالی آب شور}} \qquad \frac{V_{submerged}}{V_{surface}}=\sqrt{\frac{1-S}{1+S}}$$

برای مثال در آب شور و شیرین داریم:

$$S=0.9662$$

$$\text{نسبت سرعتها}=0.131$$

بنابراین چون سرعت امواج زیرآبی بسیار کمتر از امواج سطح آب است لذا اغلب از شناور عقب می‌مانند و اثر آنها بر شناورهای کندرو است.

❖ تخمین ارتفاع و محل موج سینه و پاشنه[۴]

برای تخمین ارتفاع و محل وقوع موج سینه و پاشنه، آزمایشات متعددی بر روی مدل در حوضچه کشش و بر روی شناور واقعی در دریا انجام شده است. نتیجه این آزمایشات به صورت یکسری نمودارها و روابط تجربی ارائه شده که در منبع [۷] به طور کامل بدان پرداخته شده است.

---

1 - Subsurface Wave

۲ - منبع: [۴]

3 There is little chance that the ship will be caught by dead water.

۴- منبع: [۷]

- **تخمین ارتفاع موج سینه**

برای تخمین ارتفاع موج سینه از فرمول «کنت»[1] استفاده می‌شود: $h = K.\frac{B.V^2}{L_E}$

که B عرض، L_E طول مؤثر شناور (بر حسب فوت) و V سرعت حرکت شناور (بر حسب گره) می‌باشد. برای کشتی‌های تجاری معمولی و بدون حبابی سینه از $K=0.083$ استفاده می‌شود. عوامل دیگری که می‌توانند در ارتفاع موج، مؤثر باشند و در این رابطه در نظر گرفته نشده‌اند عبارتند از:

- زاویه ورودی صفحه آبخور
- توپر یا تو خالی بودن شکل صفحه آبخور در محل ورودی سینه
- انحناء به سمت بیرون بدنه[2]
- شیب قسمت سینه شناور[3]

مطالعات دقیق‌تر بعدی نشان داد که K می‌تواند در محدوده مقابل باشد: K=0.015-0.13

برای اینکه بتوان فرمول قبل را در هر واحدی (انگلیسی یا SI) استفاده کرد، «کنت» رابطه زیر را ارائه نمود:

$$h = k_w(\frac{B_x}{L_E}).\frac{1}{w}.(\frac{\rho}{2})V^2 = k_w(\frac{B_x}{L_E})\frac{V^2}{2g}$$

در این فرمول محدوده $K_W = 0.3\text{-}3$ است که مقادیر K_W در نمودار زیر ارائه شده است.

این فرمول برای شناورهای کندرو (جابجایی) صادق است. نمودار شکل ۳-۳۷ بر حسب مقادیر T_q و F_n برای محاسبه K_W ارائه شده است.

$$T_q = \frac{V}{\sqrt{L}} \qquad F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

مثال) یک کشتی باربری به عرض ۷۳ فوت و طول ۲۶۲/۶۵ فوت با سرعت ۲۰/۵ گره حرکت می‌کند. مطلوبست ارتفاع موج سینه؟

$$h = 1.385\times\frac{73\times(420.25)}{(262.65)(64.35)} = 2.514 \quad ft$$

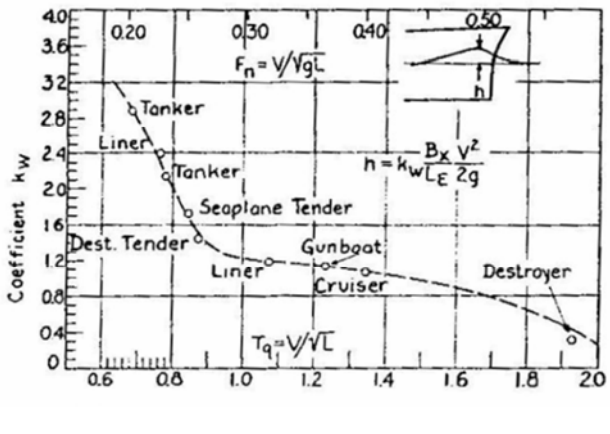
- **تخمین محل موج سینه**

رابطه «ایگرت»[4] برای محاسبه محل موج سینه به صورت زیر ارائه شده است: $x = 0.372\frac{V^2}{g}$

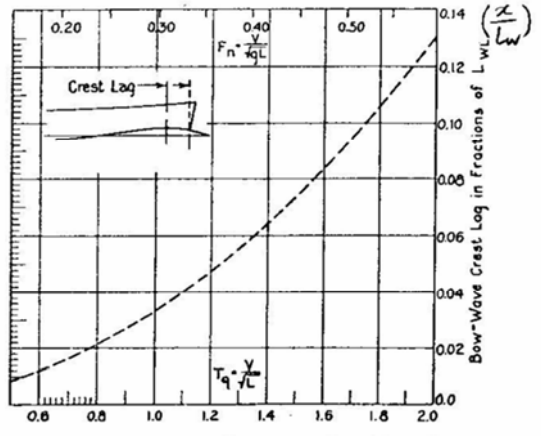
که x فاصله از عمود سینه و واحدهای g و V و x می‌تواند دلخواه باشد.

اگر V بر حسب گره و x بر حسب فوت باشد، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد: $x = 0.033V^2$

همچنین برای محاسبه x می‌توان از نمودار شکل ۳-۳۸ استفاده کرد که در آن $\left(\frac{x}{L_{WL}}\right)$ بر حسب T_q و F_n داده شده است. L_{WL} طول صفحه آبخور می‌باشد.



شکل ۳-۳۷: استخراج ضریب KW برای محاسبه ارتفاع موج سینه

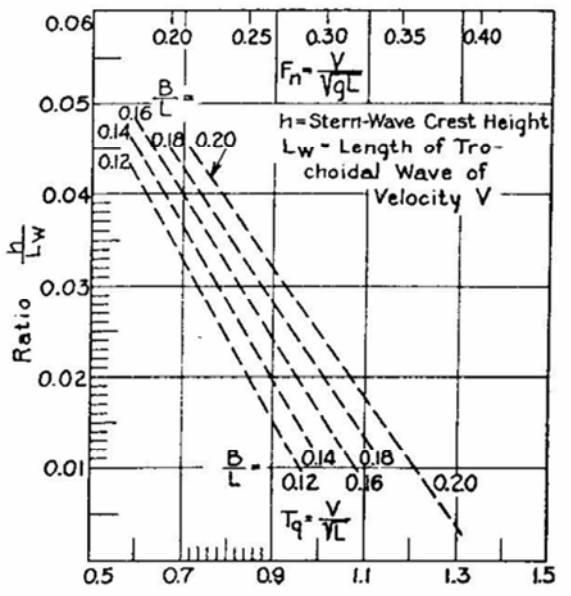


شکل ۳-۳۸: تخمین محل وقوع موج سینه

1 - kent
2 - flare
3 - rake
4 - Eggert

- **تخمین ارتفاع موج پاشنه**

برای تخمین ارتفاع موج پاشنه (h) نیز نمودار زیر توسط «هاروالد»[1] ارائه شد. ارتفاع موج پاشنه به صورت نسبت $\left(\frac{h}{L_w}\right)$ ارائه شده که بر حسب T_q و F_n از نمودار شکل ۳-۳۹ قابل استخراج است.



شکل ۳-۳۹: تخمین ارتفاع موج پاشنه

نسبت طول بدنه به طول موج ترکوئیدی	مقدار T_q
$L = 4L_w$	0.63
$L = 3L_w$	0.72
$L = 2L_w$	0.88
$L = L_w$	1.15
$L = 3.5L_w$	0.67
$L = 2.5L_w$	0.8
$L = 1.5L_w$	0.99
$L = 0.5L_w$	1.5 –1.7

جدول ۳-۵: محاسبه LW بر حسب Tq و طول بدنه

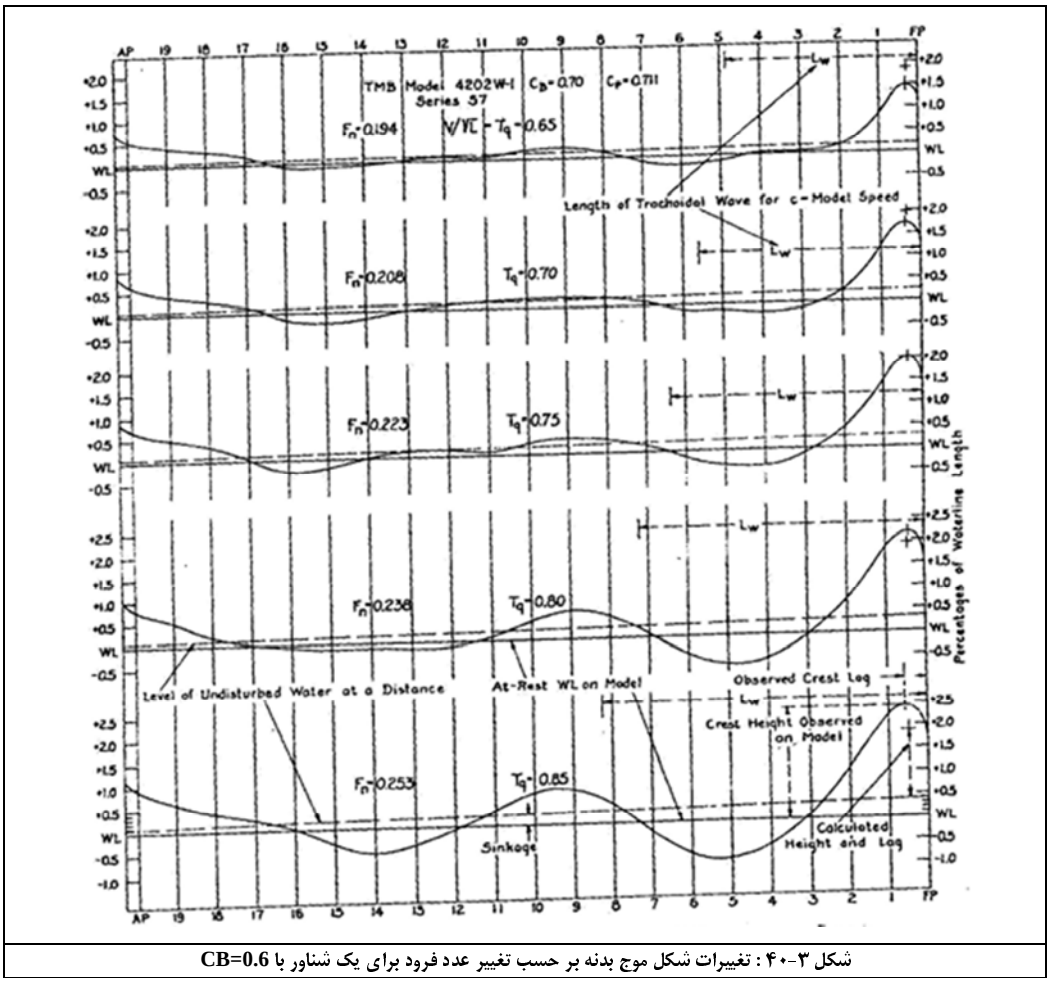
برای محاسبه L_W می‌توان از جدول ۳-۵ استفاده کرد. در این نمودار L_W طول موج ترکوئیدی در سرعتهای مختلف است که از جدول ۳-۶ بدست می‌آید.

velocity(knot)	length(feet)	period(second)	velocity(knot)	length(feet)	period(second)
1	0.5571	0.3208	**25**	348.2	8.245
2	2.228	0.6596	**26**	376.6	8.575
3	5.014	0.9894	**27**	406.1	8.905
4	8.914	1.319	**28**	436.8	9.234
5	13.93	1.649	**29**	468.5	9.564
6	20.06	1.979	**30**	501.4	9.894
7	27.3	2.309	**31**	535.4	10.22
8	35.65	2.639	**32**	570.5	10.55
9	45.13	2.968	**33**	606.7	10.88
10	55.71	3.298	**34**	644	11.21
11	67.41	3.628	**35**	682.4	11.54
12	80.22	3.958	**36**	722	11.87
13	94.15	4.287	**37**	762.7	12.2
14	109.2	4.617	**38**	804.5	12.53
15	125.3	4.947	**39**	847.3	12.86
16	142.6	5.277	**40**	891.4	13.19
17	161	5.607	**41**	936.5	13.52
18	180.5	5.936	**42**	982.7	13.85
19	201.1	6.266	**43**	1030	14.18
20	222.8	6.596	**44**	1079	14.51
21	245.7	6.926	**45**	1128	14.84
22	269.6	7.256	**46**	1179	15.17
23	294.7	7.585	**47**	1231	15.5
24	320.9	7.915	**48**	1284	15.83

جدول ۳-۶: استخراج طول موج ترکوئیدی (LW) برای تخمین ارتفاع موج پاشنه

1 - Harvard

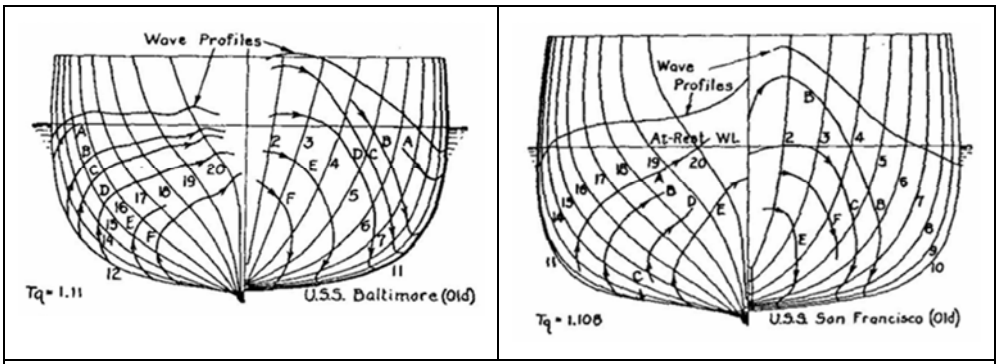
جدول ۳-۵ برای شناورهای تجاری با بدنه معمولی ارائه شده و به کمک T_q، رابطه‌ای بین طول موج عرضی[1] و طول شناور بیان می‌کند. همانطور که قبلا هم بیان شد، نقطه حداکثری نمودار مقاومت موج، زمانی اتفاق می‌افتد که طول کشتی برابر نصف طول موج عرضی بدنه باشد. (در این قسمت فرض شده است که شکل موج عرضی بجای موج سینوسی، شبیه شکل موج ترکوئیدی است). نمونه‌ای از این تغییرات بر روی یک شناور از سری ۵۷ با $C_B=0.6$ در شکل ۳-۴۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۰ : تغییرات شکل موج بدنه بر حسب تغییر عدد فرود برای یک شناور با CB=0.6

❖ شکل امواج حاصل از بدنه در آزمایشات تیلور

یک سری آزمایشات جامع توسط دیوید تیلور[2] در حوضچه کشش برای نشان دادن شکل خطوط امواج در کناره‌های بدنه کشتی‌ها در طی ۱۰ سال (۱۹۱۰-۱۹۰۰) انجام شد. نمونه‌ای از این نتایج در شکل ۳-۴۱ ملاحظه می‌شود.



شکل ۳-۴۱ : شکل امواج حاصل از بدنه در آزمایشات تیلور (مثال برای یک کشتی مسافربری در Tq مختلف)

1 - transverse wave length
2 - D.W.Taylor

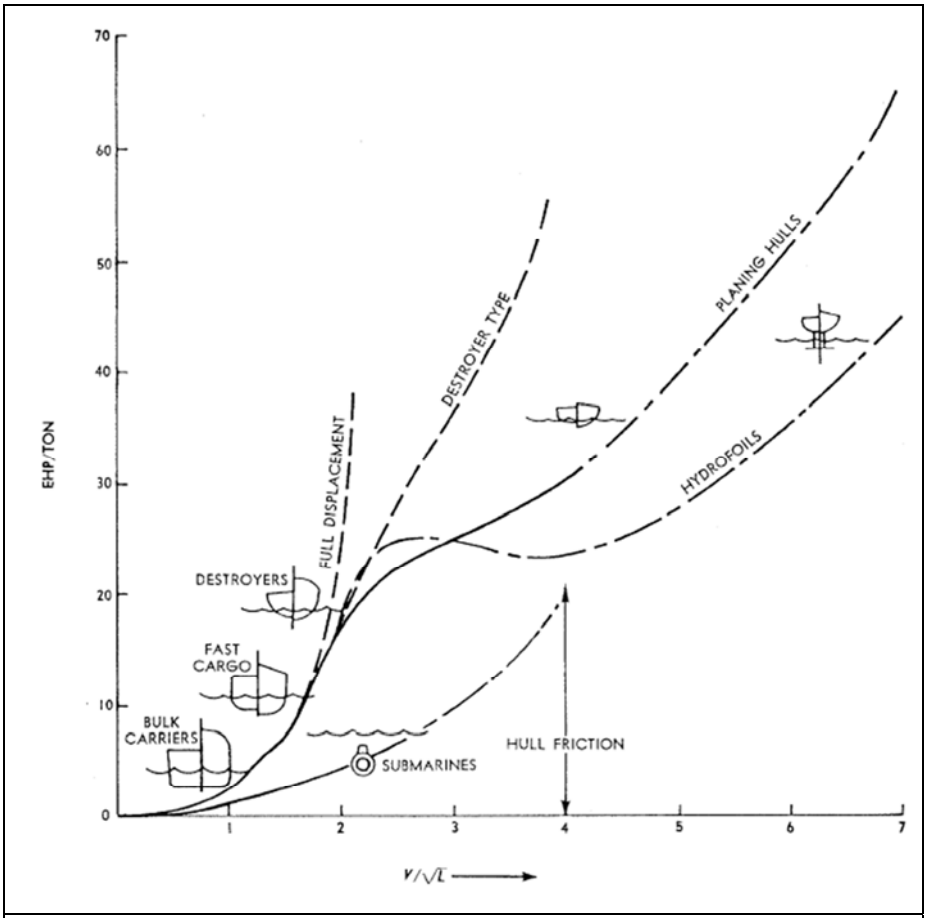
اعداد ۱ تا ۲۰ نشان داده شده روی خطوط همان مقاطع عرضی بدنه کشتی[1] و حروف A تا E نیز نمایش دهنده شکل امواج در آبخورهای مختلف هستند. هر نمودار برای یک T_q یا F_n خاص ارائه شده است. با توجه به مقاطع عرضی بدنه می‌توان شکل موج اطراف بدنه را ترسیم کرد.

❖ محاسبه مقاومت موج‌سازی به روش تحلیلی[2]

گفتیم که در علم هیدرودینامیک و بخصوص در بحث مقاومت موج، تکیه اصلی بر انجام آزمایشات در حوضچه کشش است. در کنار این فعالیتها، روشهایی نیز برای تخمین مقاومت موج ارائه شده است از جمله رابطه زیر:

$$R_W = \frac{1}{2}\pi\rho V^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left|A(\theta)^2\right| Cos^3\theta \; d\theta$$

که البته در آن فرض بر این است که موج میرا نمی‌گردد. در این رابطه $A(\theta)$ دامنه موج می‌باشد که با توان ۲ در انتگرال مؤثر است. عامل $Cos^3\theta$ نشان‌دهنده اهمیت امواج عرضی در بحث مقاومت موج‌سازی است. بنابراین مطابق این فرمول داریم: $R_W \propto V^2A^2$. از طرفی از خصوصیات امواج ثقلی داریم $A \sim V$ (حداقل با توان ۱ متناسب است با V) یعنی در مجموع می‌توان گفت: $R_W \propto V^4$ (یا توان‌های بالاتری از V). یعنی مقاومت موج-سازی می‌تواند با توان ۴ سرعت حرکت شناور متناسب باشد. از طرفی می‌دانیم که مقاومت اصطکاکی و ویسکوز فشاری با توان ۲ سرعت متناسب است لذا از اینجا براحتی می‌توان درک نمود که چرا در سرعتهای بالا (اعداد فرود بالا)، مقاومت موج‌سازی بر سایر مؤلفه‌های مقاومت برتری دارد. نمودارهای شکل ۳-۴۲ تصویر مناسبی در این زمینه ارائه می‌کنند.



شکل ۳-۴۲ : تغییرات توان بر حسب تغییر سرعت در انواع مختلفی از شناورها

محور افقی این نمودار $\frac{V}{\sqrt{L}}$ و محور عمودی آن $\frac{EHP}{Ton}$ (قدرت اسب بخار مؤثر به تناژ شناور) است. در واقع محور عمودی بیان‌کننده توان مورد نیاز حرکت است که آن نیز از مقاومت حرکت بدست می‌آید. این نمودار نشان می‌دهد که در محدوده سرعتهای پائین، نمودار شناورهای مختلف تقریبا بر هم منطبق است به غیر از نمودار زیردریایی که بدلیل نداشتن مقاومت موج‌سازی در زیر آب، از سایر نمودارها پائین‌تر است. در این نمودارها ملاحظه می‌شود

1 - section

۲ - منبع[۴]

که پس از رسیدن به یک سرعت معین، نمودار به صورت مجانبی درمی‌آید یا در واقع تا همان حد سرعت باقی می‌ماند و به سرعتهای بالاتر نمی‌رسد. اولین نموداری که به حالت مجانبی (عمودی) می‌رسد، نمودار کشتی‌های کندرو (تجاری)[1] مانند نفتکش‌ها و کانتینربرها می باشد. بدنه این شناورها، سرشی[2] نمی‌باشد و در سرعتهای بالا مقاومت موج‌سازی به صورت تصاعدی (با توان چهار – $R_W \propto V^4$) زیاد می‌شود و شناور تجاری، پس از رسیدن به یک سرعت مشخص تقریبا به سرعت حد می‌رسد. به همین دلیل است که معمولا کشتی‌های تجاری معمولی دارای حداکثر سرعت ۲۵ گره هستند و هرگز مثلا یک کشتی فله‌بر با سرعت ۵۰ گره نمی‌توان یافت. بنابراین رمز رسیدن به سرعتهای بالاتر، رها شدن از مقاومت موج یا کاهش آن است. در شناورهای نظامی (نمودار دومی که به حالت حدی یا مجانبی می‌رسد) با تغییرات شکل بدنه تا حدودی اثر مقاومت موج را کاهش داده‌اند ولی باز هم به سرعت حد می‌رسند. سومین نموداری که به حالت مجانبی می‌رسد، نمودار شناورهای بدنه سرشی[3] می‌باشد. بدنه این شناورها برای کاهش مقاومت از سطح آب بلند می‌شود و وقتی شناور به سرعتهای بالا می‌رسد، بخش زیادی از جلوی شناور به صورت شیب‌دار از سطح آب بلند می‌شود و بنابراین، کلیه مؤلفه‌های مقاومت از جمله مقاومت موج‌سازی کاهش می‌یابد چراکه سطح تماس بدنه با آب، کمتر و سطح خیس نیز کمتر می‌شود. این نوع شناورها فقط در ابعاد کوچک قابل اجرا هستند و شناورهای تجاری بزرگ را نمی‌توان بدین‌صورت ساخت. چهارمین نموداری که توانایی رسیدن به سرعتهای خیلی بالا را دارد، شناورهای هیدروفویلی هستند که در زیر بدنه دارای بالهای (هیدروفویل‌های) بزرگی هستند که نیروی لیفت حاصل از آنها، شناور را از سطح آب بلند می‌کند و بخش عمده تماس شناور با سطح آب قطع می‌شود. بدین ترتیب کلیه مؤلفه‌های مقاومت کاهش چشمگیری می‌یابند و این شناور می‌تواند به سرعتهایی بالاتر از کلیه انواع شناورها برسد. این نمودار یک نقطه حداکثری را نیز طی می‌کند و از آن پس مقاومت کاهش می‌یابد که این نقطه، همان لحظه جدا شدن سطح بدنه از سطح آب است. از آنجا که بدنه در این حالت به صورت افقی از سطح آب جدا می‌شود (بر خلاف شناورهای بدنه سرشی که با شیب زیاد از سطح آب جدا می‌شد)، شناورهای هیدروفویلی کاربردهای تجاری و مسافربری بسیاری دارند. نتایج این نمودارها را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

نوع شناور	$\left(\frac{V}{\sqrt{L}}\right)_{max}$	$\left(\frac{EHP}{ton}\right)_{max}$
تجاری معمولی	**۲**	**۱۵**
شناورهای نظامی	**۴**	**۶۰**
شناورهای بدنه سرشی	**۷**	**۷۰**
شناورهای هیدروفویلی	**بیش از ۷**	**بیش از ۷۰**

مثال) در نظر است شناوری ۱۵۰۰ تنی با طول ۶۰ متر طراحی شود. در هر یک از حالات زیر نوع مناسب شناور را پیشنهاد کنید و توان مؤثر مورد نیاز آن را تخمین بزنید.

الف- دارای حداکثر سرعت ۵۰ گره

ب- دارای حداکثر سرعت ۲۰ گره

حل: الف-

$$V = 50 \quad knot \approx 25 \quad m/s$$

$$\frac{V}{\sqrt{L}} = \frac{25}{\sqrt{60}} = 3.23$$

با توجه به نسبت $\frac{V}{\sqrt{L}}$ در نمودار شکل قبل، نوع شناور باید بدنه سرشی یا هیدروفویلی باشد. از آنجا که طول این شناور زیاد است، توصیه می‌شود نوع شناور هیدروفویلی باشد.

با توجه به همین نسبت $\frac{V}{\sqrt{L}}$ داریم:

$$\frac{EHP}{ton} = 25$$

$$EHP = 25 \times 1500 = 37500\,hp = 28000\,KW = 28\,MW$$

توان مؤثر مورد نیاز شناور ۲۸ مگاوات و نوع شناور، هیدروفویلی است.

ب)

1 - displacement ship
2 - planning
3 - planning Hull

$V = 20\ knot = 10\ {}^{m}\!/_{s}$

$\frac{V}{\sqrt{L}} = \frac{10}{\sqrt{60}} = 1.3$

با توجه به نسبت $\frac{V}{\sqrt{L}}$ و از نمودار، نوع شناور می‌تواند تجاری معمولی باشد.

در همین نسبت $\frac{V}{\sqrt{L}}$ داریم:

$\frac{EHP}{ton} = 5$

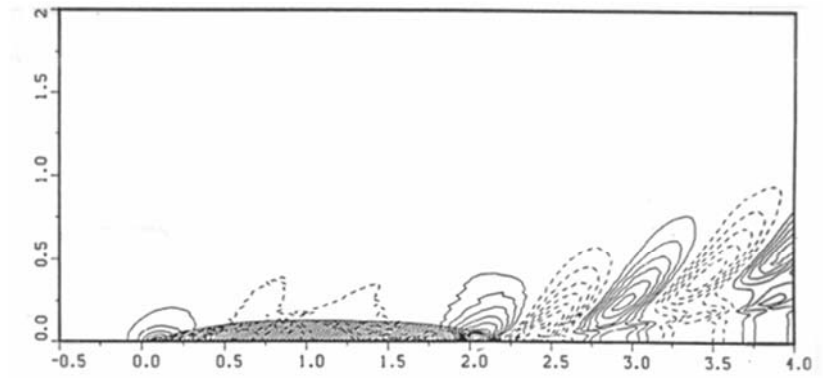
$\frac{EHP}{1500} = 5$

$EHP = 7500\ hp = 5625\ KW = 5.6\ MW$

توان مؤثر مورد نیاز حدود ۶ مگاوات و نوع شناور، تجاری معمولی است.

❖ روش چشمه و چاه

برای انجام محاسبات مقاومت موج‌سازی از روش چشمه و چاه نیز استفاده شده است با این تفاوت که بدنه شبیه‌سازی شده در این روش با بدنه کشتی واقعی متفاوت است که البته با اصلاحاتی قابل رفع است. نتایج این روش برای یک کشتی با $F_n=0.28$ در شکل ۳-۴۳ ارائه شده است.



شکل ۳-۴۳ : مدلسازی بدنه برای محاسبه مقاومت موج‌سازی به روش چشمه و چاه برای یک شناور با Fn=0.28

❖ مروری بر مقاومت در حالات مختلف در شناورها

تا اینجا بیان داشتیم که مقاومت در سیال ایده‌آل و واقعی باهم متفاوت است. از طرف دیگر مقاومت در سطح آب و عمق آب نیز باهم متفاوت است. فرض اولیه در تمامی مباحث فوق این بوده است که شناور با سرعت ثابت (شتاب صفر) حرکت می‌کند. حال اگر حرکت شناور شتابدار باشد مولفه مقاومت اینرسی نیز به مولفه‌های قبلی اضافه می‌گردد. جدول زیر حاصل جمع‌بندی مباحث فوق می‌باشد.

	نوع سیال	مقاومت اصطکاکی	مقاومت ویسکوز فشاری	مقاومت موج
کشتی	ایده آل	صفر	صفر	غیرصفر
	واقعی	غیرصفر	غیرصفر	غیرصفر
زیردریایی در عمق آب	ایده‌آل	صفر	صفر	صفر
	واقعی	غیرصفر	غیرصفر	صفر
اگر حرکت شتابدار باشد، در سیال ایده‌آل و غیر ایده‌آل و چه در سطح و زیر سطح آب مقاومت اینرسی وجود دارد.				

جدول ۳-۷: وجود مقاومت در حالتهای مختلف

فصل پنجم: روشهای تجربی محاسبه مقاومت و توان[۱]

با توجه به اینکه اغلب فرمولهای ارائه شده در مبحث هیدرودینامیک به روش تجربی ارائه می‌شوند لذا روابط متعددی در این زمینه ارائه شده که هریک بر اساس دقت انجام آزمایشات، دارای دقتهای متفاوتی هستند. برخی از این فرمولها مربوط به نوع خاصی از شناور هستند. مانند:

- 'Ayre' for cargo ships, Remmers and Kempf (1949)
- 'Taggart' for tugboats
- 'Series-60' for cargo ships, Todd *et al*. (1957)
- 'BSRA' for cargo ships, Moor *et al*. (1961)
- 'Danckwardt' for cargo ships and trawlers, Danckwardt (1969)
- 'Helm' for small ships, Helm (1964)
- 'Lap–Keller' for cargo ships and ferries, Lap (1954), Keller (1973)

در این روش‌ها حبابی سینه وجود ندارد. همچنین روش‌های دیگری نیز وجود دارد که بطور عمومی برای شناورهای تجاری قابل استفاده هستند مانند:

- 'Taylor–Gertler' (for slender ships), Gertler (1954)
- 'Guldhammer–Harvald', Guldhammer and Harvald (1974)
- 'Holtrop–Mennen', Holtrop and Mennen (1978, 1982), Holtrop (1977, 1978, 1984)
- 'SSPA', Williams (1969)
- 'Hollenbach', Hollenbach (1997, 1998)

در این روش‌ها $\frac{2}{3}$ طول حبابی سینه به طول بدنه افزوده می‌شود. در اینجا به برخی از روابط موجود اشاره می‌شود.

❖ محاسبه مساحت سطح خیس

مساحت سطح خیس بدنه انواع شناورهای تجاری و خدماتی به تفکیک در زیر ارائه شده است.

برای کشتی‌های تجاری و باری – مسافری $(Lap.1954)$:

$$S = \nabla^{1/3}.\left(3.4\times\nabla^{1/3} + 0.5\times L_{WL}\right)$$

برای کشتی‌های تجاری و باری – مسافری $(Danckward - 1969)$:

$$S = \frac{\nabla}{B}\times\frac{1.7}{C_B - 0.2\times(C_B - 0.65)} + \frac{B}{T}$$

برای کشتی‌های صیادی $(Danckward - 1969)$:

$$S = \frac{\nabla}{B}\times\frac{1.7}{C_B} + \frac{B}{T}\times\left(0.92 + \frac{0.092}{C_B}\right)$$

برای کشتی‌های نظامی و مدرن $(Schneekluth - 1988)$:

$$S = L\times(1.8\times T + C_B\times B)$$

❖ ارتباط نسبت $\frac{L}{B}$ و $\frac{L}{T}$ با مساحت سطح خیس

برای یک تناژ و جابجایی ثابت از شناور، اگر مساحت مقطع عرضی بدنه کاهش و طول افزایش یابد، سطح خیس بدنه افزایش می‌یابد و همچنین بالعکس. یعنی افزایش طول در یک جابجایی ثابت معادل است با افزایش سطح خیس. این موضوع با یک نمونه مثال در مورد یک مکعب (بارج) مشخص می‌شود. فرض کنید ابعاد داده شده مربوط به قسمت زیر آب است.

- بارج با حجم جابجایی ۲۴۰ متر مکعب با ابعاد زیر:

حالت اول: طول ۳۰ متر، عرض ۴ متر و آبخور ۲ متر

حالت دوم: طول ۱۰ متر، عرض ۸ متر و آبخور ۳ متر

حالت اول:

حجم زیر آب: $V = 30\times4\times2 = 240 \quad m^3$

مساحت سطح خیس: $A = (4+4+2+2)\times30 = 360 \quad m^2$

حالت دوم:

حجم زیر آب: $V = 10\times8\times3 = 240 \quad m^3$

مساحت سطح خیس: $A = (8+8+3+3)\times10 = 320 \quad m^2$

ملاحظه می‌شود که در یک جابجایی ثابت (۲۴۰ تن)، با کاهش طول، مساحت سطح خیس کاهش چشمگیری می‌یابد. در واقع این موضوع بیان‌کننده این مطلب مهم است که نسبتهای ابعادی در مساحت سطح خیس بسیار مهم هستند، هر چند که تناژ ثابت باشد. همچنین افزایش طول در یک تناژ ثابت، باعث افزایش وزن سازه‌ای نیز می‌گردد چراکه، افزایش مساحت سطوح جانبی به معنای افزایش وزن ورق بدنه و تقویتهای آن نیز می‌باشد.

---

۱ -منابع[۵و۶]

پس با کاهش نسبت $\frac{L}{B}$ یا $\frac{L}{T}$ ، هم سطح خیس و هم وزن سازه‌ای کمتر می‌شود.

❖ محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی

همانطور که قبلاً هم بیان شد، فرمول تجربی *ITTC-57* برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت استفاده می‌شود:

$$C_f = \frac{0.075}{(\log R_e - 2)^2}$$

از فرمول فوق و عدد R_e می‌توان گفت که C_f وابسته به سرعت و طول کشتی و همچنین دما و ویسکوزیته سیال است. در سرعتهای پائین، مقاومت اصطکاکی سهم غالب را در بین مؤلفه‌های مقاومت دارد.

❖ محاسبه ضریب و مقاومت فشاری ویسکوز

این مؤلفه مقاومت، بیان‌کننده اثر شکل بدنه بر مقاومت و توان است. فرمول زیر برای محاسبه ضریب مقاومت فشاری ارائه شده است (فرمول تیلور):

$$C_{PV} \times 10^3 = (26 \times C_\nabla + 0.16) + \frac{B}{T} - \frac{13 - 10^3 \times C_\nabla}{6} \times (C_P + 58 \times C_\nabla - 0.408)(0.535 - 35 \times C_\nabla)$$

که در آن $C_\nabla = \frac{\nabla}{L^3}$ می‌باشد. این رابطه برای محدوده زیر معتبر است:

$$\frac{B}{T} = 2.25 - 4.5$$
$$C_P = 0.48 - 0.8$$
$$C_\nabla = 0.001 - 0.007$$

اگر بخواهیم مقاومت فشاری ویسکوز را مستقیماً محاسبه کنیم، می‌توانیم با یک ضریب K، از مقاومت اصطکاکی مقدار مقاومت فشاری ویسکوز را بدست آوریم. $R_{VP} = K.R_F$

فرمولهای زیر برای تخمین K وجود دارد:

$k = 18.7 \cdot (C_B \cdot B/L)^2$	Granville (1956)
$k = 14 \cdot (\nabla/L^3) \cdot (B/T)$	Russian, in Alte and Baur (1986)
$k = -0.095 + 25.6 \cdot C_B/[(L/B)^2 \cdot \sqrt{B/T}]$	Watanabe

در این روابط، اثر جدایش جریان بر مقاومت فشاری ویسکوز در نظر گرفته نمی‌شود.

نتایج *CFD* برای محاسبه مقاومت فشاری ویسکوز مناسب است. روابط محاسبه مقاومت موج نیز در قسمت‌های بعد ارائه می‌گردد.

پس از بدست آوردن مساحت سطح خیس و ضرایب مقاومت، با استفاده از رابطه زیر می‌توان مقاومت کل را بدست آورد:

$$R_T = R_f + R_w + R_{VP} = \frac{1}{2}\rho A V^2 (C_f + C_w + C_{VP}) = \frac{1}{2}\rho A V^2 . C_T$$
$$C_T = C_f + C_w + C_{VP}$$

مقادیر مقاومت که از این فرمولها بدست می‌آید مقداری کمتر از مقاومت بدنه شناورهای مدرن امروزی است که مهمترین دلایل آن را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱- وجود حبابی پاشنه
۲- فرورفتگی موضعی بدنه در بالای پروانه
۳- ضمائم بزرگ اطراف پروانه و سکان
۴- وجود پاشنه تخت مغروق
۵- مقطع V شکل جلوی کشتی‌های کانتینربر برای افزایش ذخیره کانتینر

نکته مهم در این قسمت این است که برخی تجهیزات یا اجزاء متصل به بدنه دارای اثر منفی روی مقاومت هستند ولی اثر مثبتی روی بازدهی سیستم رانش دارند. مثلاً غلاف اطراف پروانه[1] باعث افزایش مقاومت می‌شود ولی از آنجا که بازدهی سیستم رانش و پروانه را افزایش می‌دهد، در مجموع عامل مثبتی محسوب شده و بر روی برخی از شناورها نصب می‌گردد. علاوه بر روابط بیان‌شده، دو روش تجربی محاسبه مقاومت و توان به صورت مجزا و کامل بیان می‌گردد: روش هولتروپ[2] و روش هولنباخ[3].

1 - kort Nozzle
2 - Holtrop
3 - Hollenbach

فصل ششم: روش هولتروپ در محاسبه توان و مقاومت[۱]

۱- مقدمه

این روش براساس تحلیل میان‌یابی آزمایشات مدل شناور و آزمایشات میدانی کشتی‌های واقعی در حوضچه کشش هلند[۲] بدست آمده است. نتایج این تلاش‌ها فرمول هایی با محدود کاربری وسیع‌تر بود. البته باز هم ممکن است اشتباهاتی در کار باشد. کارآیی این روش محدود می‌شود به شکل‌هایی از بدنه کشتی که ابعاد اصلی و ضرایب بدنه آنها در این روش استفاده شده است. حیطه کارآیی این روش بر روی بهبود پیش‌بینی توان کشتی‌های با ضریب بلوکی بالا و نسبت L/B کم و همچنین کشتی‌های نظامی باریک و کشیده با ضمائم پیچیده و پاشنه تخت مغروق متمرکز است. بخشی از این مطالعات در قالب برنامه تحقیقاتی شرکت *NSMB* انجام شده است. تطبیق و صحت سنجی نتایج این روش برای کشتی‌های نظامی بوسیله یک مطالعه تحقیقاتی نیروی دریایی سلطنتی هلند انجام شده است. (منابع مورد اشاره در این مقاله مربوط به منابع خود مقاله است).

۲- پیش بینی مقاومت:

مقاومت کل کشتی با اجزاء زیر بیان می‌شود:

$$R_{total} = R_F(1+k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

که داریم:

R_F : مقاومت اصطکاکی که از فرمول مقاومت اصطکاکی *ITTC-1957* بدست می آید.

$1+k_1$: ضریب شکل است که مقاومت ویسکوز فشاری را با استفاده از مقاومت اصطکاکی بیان می‌کند.

R_{APP} : مقاومت ضمائم و ملحقات بدنه است.

R_W : مقاومت موج شامل مقاومت موج سازی و مقاومت شکست موج است.

R_B : مقاومت فشاری افزوده ناشی از مجاورت حبابی سینه با سطح آب است.

R_{TR} : مقاومت فشاری افزوده ناشی از پاشنه تخت مغروق است.

R_A : مقاومت اصلاحی تعمیم نتایج مدل به کشتی است.

برای فاکتور شکل بدنه از فرمول زیر می توان استفاده کرد:

$$1+k_1 = C_{13}\left[0.93 + C_{12}(B/L_R)^{0.92497}(0.95-C_P)^{-0.521448}(1-C_P+0.0225\ Lcb)^{0.6906}\right]$$

در این فرمول C_P ضریب منشوری بر مبنای طول خط آبخور L است و Lcb موقعیت طولی مرکز بویانسی به صورت درصدی از طول L و نسبت به وسط بدنه *(0.5L)* روبه جلو می باشد. در فرمول بالا L_R پارامتر بیان کننده طول خروجی شناور *[*طولی از شناور بعد از بدنه موازی میانی که پاشنه شناور را شامل می‌شود*]* می‌باشد که از فرمول زیر بدست می آید: $L_R/L = 1-C_P+0.06C_P.Lcb/(4C_P-1)$

برای ضریب C_{12} داریم:

$$C_{12} = (T/L)^{0.2228446} \qquad T/L > 0.05$$

$$C_{12} = 48.2(T/L-0.02)^{2.078} + 0.479948 \qquad 0.02 < T/L < 0.05$$

$$C_{12} = 0.479948 \qquad T/L < 0.02$$

در این فرمول T متوسط آبخور قالبی[۳] است. ضریب C_{13} شکل پاشنه بدنه را وارد فرمول می‌کند که وابسته به ضریب C_{stern} مطابق زیر است:

$$C_{13} = 1 + 0.003C_{stern}$$

برای C_{stern} از مقادیر تجربی زیر می‌توان استفاده کرد:

شکل پاشنه شناور	C_{stern}
V-shape section	-۱۰
Normal section shape	-۱۰
u-section shape with Hogner stern	+۱۰

مساحت سطح خیس بدنه را می توان بطور تقریبی از رابطه زیر محاسبه کرد:

۱- منبع: [۱۰]

2 - Netherlands ship Model Basin

3 – *moulded draft*

$$S = L(2T+B)\sqrt{C_M}(0.453+0.4425C_B-0.2862\ C_M-0.003467B/T+0.3696\ C_{WP})+2.38A_{BT}/C_B$$

در این فرمول C_M ضریب مقطع میانی، C_B ضریب بلوکی براساس طول آبخور L، C_{WP} ضریب سطح صفحه آبخور و A_{BT} مساحت مقطع عرضی حبابی سینه در خط آبخور آرام می‌باشد.

مقاومت ضمائم و ملحقات بدنه را می توان از فرمول مقابل بدست آورد:

$$R_{APP} = 0.5\rho V^2 S_{APP}(1+k_2)_{eq}.C_F$$

که ρ چگالی آب دریا، V سرعت کشتی، S_{APP} مساحت سطح خیس شده ملحقات بدنه، $1+K_2$ فاکتور مقاومت ضمائم بدنه و C_F ضریب مقاومت اصطکاکی کشتی مطابق فرمول *ITTC-57* بدست می‌آید. در جدول زیر مقادیر $1+K_2$ برای جریان یکنواخت و برای ضمائم مختلف ارائه شده است. این مقادیر با استفاده از آزمایش مدل در حالت بدنه لخت و بدنه با ضمائم و ملحقات بدست آمده است. در چندین مورد از این آزمایشات، آشفته ساز جریان در قسمت لبه جلویی بدنه نصب شد به گونه‌ای که جریان روی ضمائم آشفته شود.

ملحقات بدنه	مقادیر $1+k_2$ ملحقات
Rudder behind skeg	*1.5-2*
Rudder behind stern	*1.3-1.5*
Twin screw balance rudder	*2.8*
Shaft brackets	*3*
Skeg	*1.5-2*
Strut bossing	*3*
Hull bossing	*2*
Shafts	*2-4*
Stabilizer fin	*2.8*
dome	*2.7*
bilge keel	*1.4*

مقدار $1+K_2$ در حالت ترکیبی از ملحقات بدنه به صورت زیر بدست می‌آید:

$$(1+k_2)_{eq.} = \frac{\sum(1+K_2).S_{APP}}{\sum S_{APP}}$$

مقاومت ملحقات بدنه بر اثر وجود تونل تراستر سینه می‌تواند افزایش یابد که از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$\rho V^2 \pi\ d^2 C_{BTO}$$

که d قطر تونل است.

ضریب C_{BTO} در محدوده *0.003* تا *0.012* می‌باشد. اگر تونل بر روی قسمت استوانه‌ای حبابی سینه نصب شده باشد باید کمترین مقدار C_{BTO} را در نظر گرفت.

مقاومت موج *[* شامل موج‌سازی و شکست موج*]* از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_W = C_1C_2C_5\nabla\rho g\ exp\{m_1.F_n^d + m_2Cos(\lambda F_n^{-2})\}$$

که داریم:

$$C_1 = 2223105\ C_7^{3.78613}(T/B)^{1.07961}(90-i_E)^{-1.37565}$$

$$C_7 = 0.229577(B/L)^{0.33333} \qquad B/L < 0.11$$

$$C_7 = B/L \qquad 0.11 < B/L < 0.25$$

$$C_7 = 0.5 - 0.0625\ L/B \qquad B/L > 0.25$$

$$C_2 = \exp(-1.89\sqrt{C_3})$$

$$C_5 = 1-0.8A_T/(B.T.C_M)$$

که در این عبارت C_2 پارامتر لحاظ کننده کاهش مقاومت ناشی از اثر حبابی سینه است. بطور مشابه، C_5 بیان کننده اثر پاشنه تخت بر مقاومت موج است. A_T مساحت مقطع عرضی زیر آب پاشنه تخت در آب ساکن و سرعت صفر است که مساحت گوه[1] در محل خط شکستگی پاشنه نیز باید به آن اضافه شود. *[*گوه: بخشی از قسمت تحتانی پاشنه تخت به شکل گوه است که برای کاهش مقاومت استفاده می شود.*]* در این فرمول برای مقاومت موج، عدد فرود F_n بر اساس طول خط آبخور L محاسبه می‌شود. سایر پارامترها را می‌توان از فرمول‌های زیر بدست آورد:

$$\lambda = 1.446C_P - 0.03L/B \qquad L/B > 12$$

$$\lambda = 1.446C_P - 0.36 \qquad L/B < 12$$

$$m_1 = 0.0140407L/T - 1.75254\nabla^{1/3}/L - 4.79323B/L - C_{16}$$

1 - wedge

$C_{16} = 8.07981 C_P - 13.8673 C_P^2 + 6.984388 C_P^3$ $\quad C_P < 0.8$

$C_{16} = 1.73014 - 0.7067 C_P$ $\quad C_P > 0.8$

$m_2 = C_{15} C_P^2 \exp(-0.1 F_n^{-2})$

$C_{15} = -1.69385$ $\quad L^3/\nabla < 512$

$C_{15} = 0.0$ $\quad L^3/\nabla > 1727$

$C_{15} = -1.69385 + (L/\nabla^{1/3} - 8.0)/2.36$ $\quad 512 < L^3/\nabla < 1727$

$d = -0.9$

i_E (*half angle of entrance*)

نیم زاویه ورودی برحسب درجه بیان می شود. [زاویه ورودی معادل زاویه صفحه آبخور سینه در محل صفحه مرکزی است، البته بدون لحاظ کردن شکل موضعی نوک سینه شناور]. اگر i_E معلوم نباشد از فرمول زیر می‌توان استفاده کرد:

$$i_E = 1 + 89 \exp\{-(L/B)^{0.80856}(1-C_{wp})^{0.30484}(1-C_P-0.0225\,lcb)^{0.6367}(L_R/B)^{0.34574}(100\nabla/L^3)^{0.16302}\}$$

این فرمول بوسیله میان یابی از تحلیل بیش از ۲۰۰ شکل بدنه برای i_E بین ۱ تا ۹۰ درجه بدست آمده است. معادله بیان شده برای i_E در منبع [۱] در برخی موارد (بدنه‌های غیرمعمول) منجر به مقدار منفی i_E می‌شد که هم اکنون اصلاح شده است. ضریبی که تعیین کننده اثر حبابی سینه روی مقاومت موج سازی است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_3 = 0.56\, A_{BT}^{1.5} / \{BT(0.31\sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)\}$$

که h_B موقعیت مرکز مساحت عرضی حبابی سینه A_{BT} بالاتر از صفحه کیل و T_F آبخور سینه شناور است. مقاومت افزوده ناشی از حضور حبابی سینه در نزدیکی سطح آب از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_B = 0.11 \exp(-3P_B^{-2}) F_{ni}^3\, A_{BT}^{1.5}\, \rho g / (1 + F_{ni}^2)$$

که ضریب P_B پارامتری برای میزان بیرون زدگی حبابی از سطح آب و F_{ni} عدد فرود بر اساس قسمت داخل آب است:

$$P_B = 0.56\sqrt{A_{BT}} / (T_F - 1.5 h_B)$$

$$F_{ni} = V / \sqrt{g(T_F - h_B - 0.25\sqrt{A_{BT}}) + 0.15V^2}$$

به همین صورت، مقاومت فشاری افزوده ناشی از پاشنه تخت مغروق را از رابطه زیر می‌توان بدست آورد:

$$R_{TR} = 0.5 \rho V^2 A_T . C_6$$

ضریب C_6 وابسته به عدد فرود و بر اساس قسمت زیر آب پاشنه تخت از رابطه زیر بدست می‌آید.

$C_6 = 0.2(1 - 0.2 F_{nT})$ $\quad F_{nT} < 5$

$C_6 = 0$ $\quad F_{nT} \geq 5$

F_{nT} به صورت روبرو تعریف می‌شود: $\quad F_{nT} = V / \sqrt{2gA_T / (B + BC_{wp})}$

که C_{wp} ضریب مساحت سطح آبخور می‌باشد. مقاومت ناشی از تعمیم نتایج بین مدل و کشتی واقعی نیز برابر است با:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_A$$

که در آن اثر زبری سطح بدنه و مقاومت باد نیز لحاظ شده است. از تحلیل نتایج آزمایشات سرعت که برای شرایط آزمایش واقعی اصلاح شده است، فرمول زیر برای C_A بیان می شود:

$$C_A = 0.006(L+100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003\sqrt{L/7.5} C_B^4 . C_2 . (0.04 - C_4)$$

که داریم:

$C_4 = T_F / L$ $\quad T_F / L \leq 0.04$

$C_4 = 0.04$ $\quad T_F / L > 0.04$

ضمناً مقدار C_A ممکن است باز هم افزایش یابد مثلاً در اثر زبری بیش از حد استاندارد بدنه. برای این منظور *ITTC-78* را می‌توان برای محاسبه افزایش C_A ناشی از زبری بدنه بالاتر از حد استاندارد بطور (متوسط $K_S = 150\mu\ m$) به این صورت استفاده کرد:

افزایش مقدار $C_A = (0.105 K_S^{1/3} - 0.005579) / L^{1/3}$

در این فرمول L و K_S برحسب متر هستند.

۳- پیش بینی فاکتورهای پیشرانش:

فرمولهای تخمین ضریب ویک، ضریب کاهش تراست و راندمان چرخشی نسبی که به صورت آماری در منبع [۱] بیان شده بود را می توان از چند جنبه بهینه کرد. برای کشتی های تک پروانه با پاشنه معمولی فرمول زیر را برای ضریب ویک می توان در نظر گرفت:

$$w = C_9.C_v.\frac{L}{T_A}(0.0661875 + 1.21756\ C_{11}.\frac{C_v}{(1-C_{P1})}) +$$
$$+0.24558\sqrt{\frac{B}{L(1-C_{P1})}} - \frac{0.09726}{0.95-C_P} + \frac{0.11434}{0.95-C_B} + 0.75C_{Stern}C_v + 0.002C_{Stern}$$

ضریب C_9 وابسته به ضریب C_8 بوده و از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$C_8 = BS/(LDT_A) \qquad B/T_A < 5$$
$$C_8 = S(7B/T_A - 25)/(LD(B/T_A - 3)) \qquad B/T_A > 5$$
$$C_9 = C_8 \qquad C_8 < 28$$
$$C_9 = 32 - 16/(C_8 - 24) \qquad C_8 > 28$$
$$C_{11} = T_A/D \qquad T_A/D < 2$$
$$C_{11} = 0.0833333(T_A/D)^3 + 1.33333 \qquad T_A/D > 2$$

در فرمول محاسبه ویک، C_V ضریب مقاومت ویسکوز فشاری از رابطه زیر است:

$$C_V = (1+k)C_F + C_A$$

همچنین داریم:

$$C_{P1} = 1.45\ C_P - 0.315 - 0.0225\ lcb$$

به همین ترتیب برای ضریب کاهش تراست در کشتی‌های تک پروانه با پاشنه معمولی داریم:

$$t = 0.001979L/(B - BC_{P1}) + 1.0585C_{10} - 0.00524 - 0.1418D^2/(BT) + 0.0015C_{stern}$$

ضریب C_{10} به صورت زیر بیان می شود:

$$C_{10} = B/L \qquad L/B > 5.2$$
$$C_{10} = 0.25 - 0.003328402/(B/L - 0.134615385) \qquad L/B < 5.2$$

راندمان چرخشی نسبی را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908\ A_E/A_{\_} + 0.07424(C_p - 0.0225\ lcb)$$

از آنجا که فرمول بالا برای کشتی های با پاشنه معمولی می‌باشد، فرمول‌های دیگری برای شناورهای تک پروانه با پاشنه باز ارائه شده که برخی مواقع برای کشتی های باریک و کشتی های بادبانی استفاده می شود:

$$w = 0.3C_B + 10C_V C_B - 0.1$$
$$t = 0.1$$
$$\eta_R = 0.98$$

این فرمول‌ها براساس تعداد بسیار کمی از مدل‌ها بدست آمده‌اند. تأثیر توپر بودن بدنه و ضریب مقاومت ویسکوز برای کشتی های دو پروانه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$w = 0.3095\ C_B + 10C_V C_B - 0.23D/\sqrt{BT}$$
$$t = 0.325\ C_B - 0.1885D/\sqrt{BT}$$
$$\eta_R = 0.9737 + 0.111(C_P - 0.0225\ lcb) - 0.06325\ P/D$$

مثال) یک کشتی نفتکش با جابجایی ۲۴۴۸۶ تن دارای طول ۱۵۰ متر، عرض ۲۳ متر و آبخور ۸/۸ متر است. ضرایب بدنه شناور در آبخور طراحی با عنایت به خروجی نرم‌افزار عبارت است از: $C_{WP} = 0.89$, $C_B = 0.8$, $C_M = 0.95$, $C_P = 0.8$. مقدار Lcb، از وسط کشتی (رو به جلو) و بر حسب درصد بیان می‌شود و برابر است با: Lcb = 0.72 %. سرعت ۱۲/۹ گره می‌باشد.

اما ملحقاتی که برای این شناور مد نظر گرفته شده است برابر است با:

Rudder behind Skeg , Rudder behind stern , Shaft bracket , Skeg , Strut bossing Hull bossing , Shaft , bilge keel

حل) بر اساس روش هولتروپ، مقاومت کل کشتی عبارت است از:

$R_{total} = R_F\ (1+K1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$

که به محاسبه تک تک پارامترها می‌پردازیم:

$\Delta = 24486$ t

$\nabla = \Delta / 1.025 = 23889\ m^3$

۱) R_F: فرمول محاسبه R_F به روش *ITTC 57* برابر است با: $R_F = 1/2\rho.C_F.V_S^2.S_{wet}$

با توجه به مقدار A_{BT} (که مساحت مقطع عرضی حبابی سینه است و $= 15\ m^2$) و فرمول S_{wet} داریم:

$$S_{wet} = L(2T+B)\sqrt{CM}\left(0.453+0.4425C_B-0.2862C_M-0.003467\frac{B}{T}+0.3696C_{WP}\right)$$
$$+2.38\frac{A_{BT}}{C_B} = 5119.69\ m^2$$

مقدار CA و Re را به دست می‌آوریم:

$$C_A = (2-6)\times10^{-4} = 4\times10^{-4}$$
$$R_e = \frac{V.L}{\upsilon} = \frac{(6.63\times150)}{(10^{-6})} = 99.45\times10^7$$
$$\Rightarrow C_F = C_{Fo} + C_A = 1.93\times10^{-3}$$

مقدار C_{Fo} برابر است با:

$$C_{Fo} = \frac{0.075}{[\log R_e - 2]^2} = 1.53\times10^{-3}$$
$$\Rightarrow C_F = C_{Fo} + C_A = 1.93\times10^{-3}$$

و نهایتاً با جایگذاری تمامی معلومات به دست آمده در فرمول نهایی داریم:

$R_F = 222.59\ KN$

۲) $(1+K_1)$:

این پارامتر ضریب شکل است که مقاومت ویسکوز فشاری را با استفاده از مقاومت اصطکاکی بیان می‌کند، طبق فرمول داریم:

$$1+K_1 = C_{13}\left[0.93+C_{12}\left(\frac{B}{LR}\right)^{0.92497}(95-C_P)^{-0.521448}(1-C_P+0.225Lcb)^{0.6906}\right]$$

✓ اما محاسبه پارامترهای این فرمول:

I) L_R:

$$L_R = L\left[(1-C_P)+\frac{(0.6C_P.Lcb)}{4C_P-1}\right] = 32.36\ m$$

II) C_{12}: چون $\frac{T}{L} = \frac{8.8}{150} = 0.058$ است، طبق فرمول داریم:

$$C_{12} = \left(\frac{T}{L}\right)^{0.2228446} = 0.53$$

III) C_B: با توجه به پاشنه U شکل شناور $C_{stern} = +10$ می‌باشد؛ لذا داریم:

$$C_{13} = 1+0.003\,C_{stern} = 1.03$$

با توجه به مقادیر به دست آمده و فرمول $(1+K_1)$ که پیش از این آمد داریم: $(1+K_1) = 1.64$

۳) محاسبه R_{APP}:

طبق فرمول: $R_{APP} = 0.5.\rho.V^2.(1+K_2)_{eq}.C_F$

S_{APP}: مجموع سطح کلیه ملحقات شناور است که در جدول زیر ارائه شده است (از اطلاعات این شناور):

Name	S	1+K2
1. b.k	1.4	0.5
2. shft	3	0.8
3. H.b	2	0.7
4. S.b	3	0.6
5. Skeg	1.5	0.4
6. Sh.b	3	0.3
7. R.b.s	2	1.4
8. R.bs	1.5	1.3

$$\sum S_{APPi} = S_{APP}(total) = 6m^2$$

$$(1+K_2)_{eq} = \sum (1+K_2).S_{APP} \Big/ S_{APP-total} = 2.1$$

در نتیجه R_{APP} برابر است با: $R_{APP}=5.47\ KN$

۴) مقاومت موج R_W:

با توجه به فرمول داریم: $$R_W = C_1C_2C_5\nabla\rho g \exp\left\{m_1.F_n^{\ d} + m_2 Cos\left(\lambda F_n^{\ -2}\right)\right\}$$

و حال محاسبه تک تک پارامترهای مرتبط:

a) C_1: برای محاسبه C_1 نخست لازم است i_E را با توجه به فرمول زیر محاسبه کنیم:

$$i_E = 1 + 89\exp\left\{-\left(L/B\right)^{0.80856}\left(1-C_{WP}\right)^{0.30484}\left(1-C_P-0.0225Lcb\right)^{0.6367}\left(L_R/B\right)^{0.34574}\left(100\frac{\nabla}{L^3}\right)^{0.16302}\right\}$$

$$i_E = 39.5$$

با جایگذاری در فرمول مقدار C_1 هم به دست می‌آید: $$C_1 = 2223105C_7^{\ 3.78613}\left(T/B\right)^{1.07961}\left(90-i_E\right)^{-1.37565}$$

برای تعیین C_7 چون مقدار $B/L = 0.15$ است مقدار $C_7 = B/L = 0.15$ خواهد بود و نهایتاً مقدار C_1 برابر است با: $C_1=2.7$

b) C_2: برای محاسبه C_2 نیاز به محاسبه C_3 داریم: $$C_3 = 0.56A_{BT}^{\ 1.5} \Big/ \left\{BT\left(0.31\sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B\right)\right\}$$

معرفی پارامترها:

A_{BT}: مساحت مقطع عرضی حبابی سینه است: $15\ m^2$

T_F: آبخور سینه = ۸/۸ متر.

h_B: فاصله مرکز سطح حبابی سینه از کیل = ۳ متر

$C_3 = 0.023$

با توجه به فرمول: $$C_2 = \exp\left(-1.89\sqrt{C_3}\right) = 0.75$$

c) C_5 : طبق فرمول برابر است با: $$C_5 = 1 - 0.84A_T \Big/ \left(B.T.C_M\right)$$

تنها نامعلوم این بخش A_T است. A_T مساحت سطح مقطع پاشنه است که آن را به طور تقریبی $16\ m^2$ در نظر می‌گیریم.

$$C_5 = 0.93$$

d) m_1: طبق فرمول برابر است با: $$m_1 = 0.0140407L/T - 1.75254\nabla^{1/3}/L - 4.79323B/L - C_{16}$$

مقدار C_{16}: $$C_{16} = 8.07981C_P - 13.8673C_P^{\ 2} + 6.984388C_P^{\ 3} = 1.16478$$

و نهایتاً مقدار m_1 برابر است با: $$m_1 = -1.9899$$

e) m_2: طبق فرمول: $$m_2 = C_{15}C_P^{\ 2}\exp\left(-0.1F_n^{\ -2}\right)$$

محاسبه تک تک پارامترها:

$$I)F_n = V/\sqrt{L.g} = 0.17$$

$$II)C_{15} \rightarrow \left(L^3/\nabla \text{ مقدار} \quad \text{با توجه به} \quad\right) \rightarrow -1.69385$$

$$\rightarrow m_2 = -0.034$$

f) λ: با توجه به مقدار L/B = 6.5 داریم: $$\lambda = 1.446C_P - 0.03L/B = 0.96$$

نهایتاً با توجه به اینکه مقدار d = -0.9 می‌باشد، مقدار R_W برابر است با:

$$R_W = C_1C_2C_5\nabla\rho g \exp\left\{m_1.F_n^{\ d} + m_2 Cos\left(\lambda F_n^{\ -2}\right)\right\}$$

$$R_W = 30\ KN$$

۵) محاسبه (R_B):

این پارامتر مقاومت افزوده ناشی از حضور حبابی سینه در نزدیکی سطح آب است که برابر است با:

$$R_B = 0.11\exp\left(-3P_B^{\ -2}\right)\ F_{ni}^3 A_{BT}^{\ 1.5}.\rho g \Big/ \left(1+F_{ni}^{\ 2}\right)$$

محاسبه پارامترهای دخیل در R_B:

I) P_B:

$$P_B = \frac{0.56\sqrt{A_{BT}}}{(T_F - 1.5h_B)} = 0.5$$

II) F_{ni}:

$$F_{ni} = \frac{V}{\sqrt{g(T_F - h_B - 0.25\sqrt{A_{BT}} + 0.15V^2)}} = 0.9$$

در نتیجه مقدار R_B برابر است با:

R_B=0.0358 KN

۶) محاسبه (R_{TR}): طبق فرمول داریم:

$$R_{TR} = 0.5\rho V^2 . A_T . C_6$$

I) C_6:

$$C_6 = 0.2(1-0.2F_{NT})$$

II) F_{NT}: چون:

$$F_{NT} = \frac{V}{\sqrt{2gA_T/(B + B.C_{WP})}} = 2.47$$

5) F_{NT} است می‌توان نوشت:

$$C_6 = 0.2(1-0.2F_{NT}) = 0.10$$

نهایتاً:

R_{TR} = 36.04 KN

حال می‌توان مقاومت کل را بدست آورد:

$R_{total} = (1+k_1) R_F + R_W + R_{TR} + R_B + R_{APP} = 1.64\ (222.59) + 30 + 36.04 + 0.0358 + 5.47 = 435.57$ KN

این مقدار در مقایسه با خروجی نرم‌افزارMaxsurf (Hull Speed) تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد:

474.29 KN = خروجی نرم‌افزار

مثال) خصوصیات مقاومت و بازدهی یک کشتی تک پروانه با حداکثر سرعت ۲۵ گره مطلوب است که در آن مؤلفه‌های مختلف مقاومت و ضرایب پیشرانش محاسبه شوند. خصوصیات اصلی این شناور در جدول زیر لیست شده اند:

طول آبخور	L	205m
طول بین دو عمود	L_{PP}	200m
عرض قالبی	B	32m
آبخور قالبی در محل عمود سینه	T_F	10m
آبخور قالبی در محل عمود پاشنه	T_A	10m
حجم جابجایی قالبی	∇	$37500m^3$
مرکز بویانسی طولی	lcb	۲/۰۲ درصد عقب از وسط بدنه
مساحت مقطع عرضی حبابی سینه	A_{BT}	$20m^2$
مرکز حبابی بالاتر از خط کیل	h_B	4m
ضریب مقطع میانی	C_M	0.98
ضریب صفحه آبخور	C_{wp}	0.75
مساحت پاشنه تخت	A_T	$16m^2$
مساحت سطح خیس ضمائم بدنه	S_{APP}	$50m^2$
پارامتر شکل پاشنه	C_{stern}	10
قطر پروانه	D	8m
تعداد پره های پروانه	Z	4
فاصله پروانه از کیل	-	0.2m
سرعت کشتی	V	25knot

نتایج محاسبه به روش فرمول‌های آماری به صورت جدول زیر حاصل شده است:

$F_n = 0.2868$	$F_{nT} = 5.433$
$C_P = 0.5833$	$R_{TR} = 0\ kN$
$L_R = 81.385m$	$C_4 = 0.04$
$lcd = -0.7\%(relative\ ½\ L)$	$C_A = 0.000352$
$C_{12} = 0.5102$	$R_A = 221.98\ kN$
$C_{13} = 1.03$	$R_{total} = 1793.26\,kN$
$1+k_1 = 1.156$	$P_E = 23063\ \ kw$
$S = 7381.45\ m^2$	$C_V = 0.001963$
$C_F = 0.00139$	$C_9 = 14.5$
$R_F = 869.63\ \ kN$	$C_{11} = 1.25$
$1+k_2 = 1.5$	$C_{P1} = 0.5477$
$R_{APP} = 8.83\ \ kN$	$w = 0.2584$
$C_7 = 0.1561$	$C_{10} = 0.15610$
$i_E = 12.08\ \deg ree$	$t = 0.1747$
$C_1 = 1.398$	$T = 2172.75kN$
$C_3 = 0.02119$	$A_E / A_\circ = 0.7393$
$C_2 = 0.7595$	$\eta_R = 0.9931$
$C_5 = 0.9592$	$C_{0.75} = 3.065\ m$
$m_1 = -2.1274$	
$C_{15} = 1.69385$	$t / C_{0.75} = 0.03524$
$m_2 = -0.17087$	$\Delta C_D = 0.000956$
$\lambda = 0.6513$	
$R_w = 557.11kN$	
$P_B = 0.6261$	
$F_{ni} = 1.5084$	
$R_B = 0.049\,kN$	

امام علی (ع): غیبت کردن آخرین تلاش آدم ناتوان است.

فصل هفتم: محاسبه مقاومت به روش هولنباخ[۱،۲]:

روش هولنباخ از آزمایش ۴۳۳ مدل کشتی در حوضچه کشش برای بدنه‌های مدرن امروزی بدست آمده است. این روش بهترین روش برای بدنه-های امروزی است. در استفاده از روابطی که در این روش ارائه می‌شود، ابتدا L_{os} به صورت زیر تعریف می‌شود:

۱) برای آبخور طراحی: طول بین قسمت انتهایی آبخور پاشنه و جلوترین قسمت آبخور سینه در زیر آب.

۲) برای آبخور در شرایط بالاست: طول بین دو قسمت انتهایی آبخور بالاست، بدون به حساب آوردن سکان. (شرایط بالاست: شرایط بدون بار کشتی که فقط مخازن بالاست (تعادل) پر از آب هستند).

❖ محاسبه سطح خیس

سطح خیس بدنه کشتی از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$S_{\text{total}} = k \cdot L \cdot (B + 2 \cdot T)$$

$$k = a_0 + a_1 \cdot L_{os}/L_{wl} + a_2 \cdot L_{wl}/L + a_3 \cdot C_B + a_4 \cdot B/T + a_6 \cdot L/T + a_7 \cdot (T_A - T_F)/L + a_8 \cdot D_P/T + k_{\text{Rudd}} \cdot N_{\text{Rudd}} + k_{\text{Brac}} \cdot N_{\text{Brac}} + k_{\text{Boss}} \cdot N_{\text{Boss}}$$

ضرایب موجود در این فرمول از جدول ۳-۸ استخراج می‌شود.

	Single-screw		*Twin-screw*	
	design draft	*ballast draft*	*bulbous bow*	*no bulbous bow*
a_0	−0.6837	−0.8037	−0.4319	−0.0887
a_1	0.2771	0.2726	0.1685	0.0000
a_2	0.6542	0.7133	0.5637	0.5192
a_3	0.6422	0.6699	0.5891	0.5839
a_4	0.0075	0.0243	0.0033	−0.0130
a_5	0.0275	0.0265	0.0134	0.0050
a_6	−0.0045	−0.0061	−0.0006	−0.0007
a_7	−0.4798	0.2349	−2.7932	−0.9486
a_8	0.0376	0.0131	0.0072	0.0506
k_{Rudd}			0.0131	0.0076
k_{Brac}			−0.0030	−0.0036
k_{Boss}			0.0061	0.0049

D_P propeller diameter
T_A draft at aft perpendicular
T_F draft at forward perpendicular
N_{Rudd} number of rudders
N_{Brac} number of brackets
N_{Boss} number of bossings

جدول ۳-۸: استخراج ضرایب در مورد روش هولنباخ برای محاسبه سطح خیس شناور

عدد فرود موجود در روابط بعدی بر اساس طول L_{fn} می‌باشد که آن نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_{fn} = L_{os} \qquad L_{os}/L < 1$$

$$L_{fn} = L + 2/3 \cdot (L_{os} - L) \qquad 1 \le L_{os}/L < 1.1$$

$$L_{fn} = 1.0667 \cdot L \qquad 1.1 \le L_{os}/L$$

❖ محاسبه مقاومت باقیمانده

مقاومت اصطکاکی که از فرمول ITTC-57 بدست می‌آید. با محاسبه مقاومت باقیمانده از روش هولنباخ می‌توان مقاومت کل شناور را محاسبه کرد، مطابق رابطه زیر:

$$R_R = C_R \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot \left(\frac{B \cdot T}{10}\right)$$

1 - Holenbach

۲ [۵]

$$C_R = C_{R,\text{Standard}} \cdot C_{R,\text{Fnkrit}} \cdot k_L \cdot (T/B)^{b1} \cdot (B/L)^{b2} \cdot (L_{os}/L_{wl})^{b3} \cdot (L_{wl}/L)^{b4} \cdot (1 + (T_A - T_F)/L)^{b5} \cdot (D_P/T_A)^{b6} \cdot (1 + N_{\text{Rudd}})^{b7} \cdot (1 + N_{\text{Brac}})^{b8} \cdot (1 + N_{\text{Boss}})^{b9} \cdot (1 + N_{\text{Thruster}})^{b10}$$

که $N_{thruster}$ تعداد تراسترهای جانبی است.

$$C_{R,\text{Standard}} = c_{11} + c_{12}F_n + c_{13}F_n^2 + C_B \cdot (c_{21} + c_{22}F_n + c_{23}F_n^2) + C_B^2 \cdot (c_{31} + c_{32}F_n + c_{33}F_n^2)$$

$$C_{R,\text{Fnkrit}} = \max(1.0, (F_n/F_{n,\text{krit}})^{f_1})$$

$$F_{n,\text{krit}} = d_1 + d_2C_B + d_3C_B^2$$

$$k_L = e_1L^{e_2}$$

ضرایب موجود در این رابطه از جدول ۳-۹ بدست می‌آید:

	Single-screw		*Twin-screw*
	design draft	*ballast draft*	
$b1$	−0.3382	−0.7139	−0.2748
$b2$	0.8086	0.2558	0.5747
$b3$	−6.0258	−1.1606	−6.7610
$b4$	−3.5632	0.4534	−4.3834
$b5$	9.4405	11.222	8.8158
$b6$	0.0146	0.4524	−0.1418
$b7$	0	0	−0.1258
$b8$	0	0	0.0481
$b9$	0	0	0.1699
$b10$	0	0	0.0728
c_{11}	−0.57420	−1.50162	−5.34750
c_{12}	13.3893	12.9678	55.6532
c_{13}	90.5960	−36.7985	−114.905
c_{21}	4.6614	5.55536	19.2714
c_{22}	−39.721	−45.8815	−192.388
c_{23}	−351.483	121.820	388.333
c_{31}	−1.14215	−4.33571	−14.3571
c_{32}	−12.3296	36.0782	142.738
c_{33}	459.254	−85.3741	−254.762
d_1	0.854	0.032	0.897
d_2	−1.228	0.803	−1.457
d_3	0.497	−0.739	0.767
e_1	2.1701	1.9994	1.8319
e_2	−0.1602	−0.1446	−0.1237
f_1	$F_n/F_{n,\text{krit}}$	$10 \cdot C_B \cdot (F_n/F_{n,\text{krit}} - 1)$	$F_n/F_{n,\text{krit}}$

جدول ۳-۹: ضرایب مورد نیاز برای محاسبه مقاومت باقی‌مانده در روش هولنباخ

محدوده اعتبار روش هولنباخ مطابق جدول ۳-۱۰ می‌باشد:

	Single-screw		*Twin-screw*
	design draft	*ballast draft*	
$F_{n,\min}, C_B \le 0.6$	0.17	$0.15 + 0.1 \cdot (0.5 - C_B)$	0.16
$F_{n,\min}, C_B > 0.6$	$0.17 + 0.2 \cdot (0.6 - C_B)$	$0.15 + 0.1 \cdot (0.5 - C_B)$	$0.16 + 0.24 \cdot (0.6 - C_B)$
$F_{n,\max}$	$0.642 - 0.635 \cdot C_B + 0.15 \cdot C_B^2$	$0.32 + 0.2 \cdot (0.5 - C_B)$	$0.50 + 0.66 \cdot (0.5 - C_B)$

جدول ۳-۱۰: محدوده اعتبار روش هولنباخ

محدوده پارامترهای هندسی در روش هولنباخ از جدول۳-۱۱ بدست می‌آید:

	Single-screw		
	design draft	*ballast draft*	*Twin-screw*
$L/\nabla^{1/3}$	4.490–6.008	5.450–7.047	4.405–7.265
C_B	0.601–0.830	0.559–0.790	0.512–0.775
L/B	4.710–7.106	4.949–6.623	3.960–7.130
B/T	1.989–4.002	2.967–6.120	2.308–6.110
L_{os}/L_{wl}	1.000–1.050	1.000–1.050	1.000–1.050
L_{wl}/L	1.000–1.055	0.945–1.000	1.000–1.070
D_P/T_A	0.430–0.840	0.655–1.050	0.495–0.860

جدول ۳-۱۱: محدوده اعتبار پارامترهای هندسی در روش هولنباخ

برای بدنه‌هایی که خوب طراحی شده باشند، استفاده از فرمول زیر مناسب‌تر است:

$$C_R = C_{R,\text{Standard}} \cdot (T/B)^{a1} \cdot (B/L)^{a2} \cdot (L_{os}/L_{wl})^{a3} \cdot (L_{wl}/L)^{a4}$$

ضرایب این فرمول از جدول ۳-۱۲ بدست می‌آید:

	*a*1	*a*2	*a*3	*a*4
Single-screw ship	−0.3382	0.8086	−6.0258	−3.5632
Twin-screw ship	−0.2748	0.5747	−6.7610	−4.3834

جدول ۳-۱۲ : ضرایب محاسبه مقاومت باقی‌مانده

محدوده حداقل و حداکثر مقدار عدد فرود برای معتبر بودن رابطه فوق را می‌توان از جدول ۳-۱۳ ملاحظه کرد:

	Single-screw	*Twin-screw*
$F_{n,\min},\ C_B \le 0.6$	0.17	0.15
$F_{n,\min},\ C_B > 0.6$	$0.17 + 0.2 \cdot (0.6 - C_B)$	0.14
$F_{n,\max}$	$0.614 - 0.717 \cdot C_B + 0.261 \cdot C_B^2$	$0.952 - 1.406 \cdot C_B + 0.643 \cdot C_B^2$

جدول ۳- ۱۳ : محدوده اعتبار عدد فرود برای کاربرد رابطه قبل

همیشه فکر می کنیم چون گرفتاریم به خدا نمی رسیم، ولی نمی دونیم چون به خدا نمی‌رسیم پس گرفتاریم !!

فصل هشتم:

مقایسه روش های متداول برای تخمین مقاومت و توان شناورهای تجاری [۱]

روش های مختلفی برای محاسبه مقاومت وجود دارد که رایج‌ترین آنها عبارتند از:

MICHLET، HOLENBACH ، HOLTROP، VAN OORT و SERIES 60.

برخی از این روش‌ها در صفحات قبل بررسی شد و برخی از آنها نیز در نرم‌افزارهای دریایی قابل حصول هستند. در اینجا سعی می‌شود نتایج این روش‌ها برای یک کشتی مشخص، ارائه و مقایسه انجام شود. هدف، بدست آوردن نیروی مقاومت کل شناور در بیشترین سرعت رو به جلو و در نهایت تخمین نیروی پیشران آن است. شناور در نظر گرفته شده یک فروند کشتی کانتینربر با توان پیشران مشخص می‌باشند. در نهایت با مقایسه توان بدست آمده توسط روش های فوق الذکر و توان پیشران خود شناور روشی که نزدیک ترین جواب را به مقدار واقعی دارد مشخص می‌شود. در ادامه به بررسی روشهای مورد نظر و محدوده اعتبار آنها می پردازیم:

۱) روش HOLTROP **:** این روش برای تخمین و پیشگویی مقاومت تانکرها, کشتی‌های حمل کالای عمومی, شناورهای ماهیگیری، کشتی‌های کانتینربر، ناوچه های جنگی و یدک‌کشها ارائه شده است.

۲) روش VAN OORTMERSEN: این روش برای تخمین مقاومت کشتی‌های کوچک از قبیل صیادی و یدک‌کشها مفید است.

۳) روش 60 SERIES **:** این روش برای تخمین مقاومت کشتی های حمل بار تک پروانه‌ای مفید است.

۴) روش HOLENBACH **:** این روش حاصل بیش از ۴۳۳ تست مدل از بدنه های مدرن در حوضچه کشش و روشی مناسب برای بدنه‌های مدرن امروزی است.

۵) روش MICHLET **:** این روش برای شناورهای با ضریب ظرافت بسیار بالا و نزدیک به ۱ و بدنه‌های منشوری شکل که قسمت زیادی از طول بدنه دارای مقطع یکسانی است نظیر زیردریایی ها و نفتکش‌ها مناسب است.

محدوده کاربرد روش‌ها:

Algorithm	Low speed limt	High speed limit
Holtrop	0	Fn_L= 0.80
Van oort	0	Fn_L= 0.50
Series 60	Fn_v=0.282	Fn_v=0.677

holenbach	design draft	ballast draft
$F_{n,min}$, $C_B \leq 0.6$	0.17	$0.15+0.1\times(0.5-C_B)$
$F_{n,min}$, $C_B > 0.6$	$0.17+.2\times(0.6-C_B)$	$0.15+0.1\times(0.5-C_B)$
$F_{n.max}$	$0.642-0.635\times C_B+0.15\times C_B^2$	$0.32+0.2\times(0.5-C_B)$

Holtrop	van oort	holenbach	draft design	ballast deign
$0.55 < C_p < 0.85$	$8 < L < 80$	$L/\nabla^{1/3}$	4.490-6.008	5.450-7.047
$3.9 < L/B < 15$	$3 < L/B < 6.2$	C_B	0.601-0.830	0.559-0.790
$2.1 < B/T < 4.0$	$0.5 < C_p < 0.73$	L/B	4.710-7.106	4.949-6.623
Series 60	$-7 < 100LCG/L < 2.8$	B/T	1.989-4.002	2.967-6.120
$0.6 < C_b < 0.8$	$5 < V < 3000$	L_{OS}/L_{WL}	1.000-1.050	1.000-1.050
$5.5 < L/B < 8.5$	$1.9 < B/T < 4.0$	L_{WL}/L	1.000-1.055	0.945-1.000
$2.5 < B/T < 3.5$	$0.70 < C_m < 0.97$	D_P/T_A	0.430-0.840	0.655-1.050
$-2.48\ \% < LCB < 3.51\ \%$	$10 < ic < 46$			

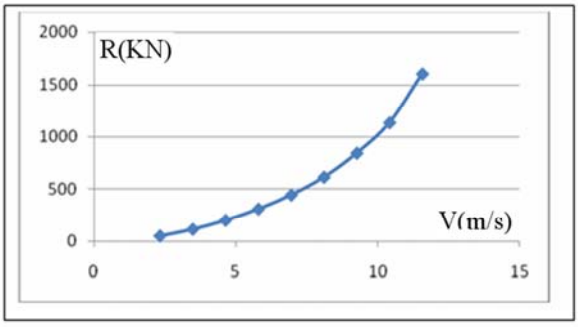
۱ - منبع :[۳۴]

مشخصات کشتی کانتینربر در نظر گرفته شده به صورت زیر است:

217 m	LOA	طول کلی شناور
208.325 m	LWL	طول خط آبخور
200.24 m	LBP	طول بین دو عمود
32.2 m	B	عرض
19.4 m	Depth	عمق
12.5 m	T_F	آبخور در محل عمود سینه
12.5 m	T_A	آبخور در محل عمود پاشنه
42800 m3		حجم جابجایی
-5.02%	LCB	مرکز بویانسی طولی
16 m2	A_{BT}	مساحت مقطع عرضی حبابی سینه
4.648 m	H_B	مرکز حبابی بالاتر از خط کیل
0.463	C_B	ضریب بلوکی
0.615	C_P	ضریب منشوری
0.963	C_M	ضریب مقطع میانی
0.857	C_{WP}	ضریب صفحه آبخور
16 m2	A_T	مساحت پاشنه تخت
50.571 m2	S_{APP}	مساحت سطح خیس ضمایم بدنه
10	Cstern	پارامتر شکل پاشنه
8 m	D	قطر پروانه
4	Z	تعداد پره های پروانه
22.5 knot	V	سرعت کشتی
28800 KW	P_B	توان خروجی موتور

الف) روش HOLTROP **:**

نمودار مقاومت کل شناور که توسط این روش در سرعتهای مختلف محاسبه شده است به قرار زیر است:



V(m/s)	R(KN)
1.15749	14.925
2.31498	55.081
3.47247	118.499
4.62996	204.29
5.78745	312.469
6.94494	446.329
8.10243	617.054
9.25992	845.871
10.41741	1137.085
11.5749	1604.091

در این روش بیشترین میزان مقاومت که در بیشترین سرعت شناور یعنی ۲۲/۵ گره معادل *11.5749 m/s* محاسبه شده است برابر ۱۶۰۴/۱ کیلونیوتن است . طبق رابطه $P_E = R \times V$ که R مقاومت کل شناوربرحسب *KN* و V سرعت بر حسب *m/s* است (از اثر ویک صرفنظر شده است). توان پیشران مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت سیال بر حسب *KW* بدست می‌آید :

$$P = R \times V = 1604.091\ kn \times 11.5749\ m/s = 18567.1929\ kw$$

این عدد، توان موثر یا P_E است که با توجه به تلفاتی که در مسیر انتقال قدرت وجود دارد توان مورد نیاز موتور یا P_B از این عدد بیشتر است. راندمان انتقال نیروی بدست آمده برای شناور فوق برابر۶۴ درصد است که با توجه به رابطه :$P_B = P_E/\eta$

توان خروجی موتور بدست می‌آید :

$$KW=29\ MW \quad P_B = P_E/\eta = 18567.1929\ KW / 0.64 = 29011.99$$

با توجه به اینکه توان خروجی موتور در شناور مورد بررسی برابر 28800 kw است می‌توان خطای این روش را محاسبه کرد :

درصد خطا: $= (29002.99 - 28800) / 28800) \times 100 = 0.705$

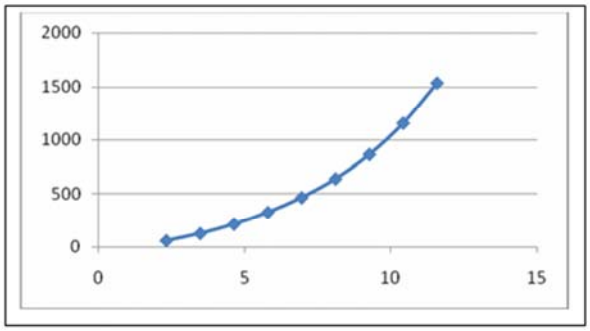
در نتیجه خطای این روش برابر % 0.7 است.

ب) روش HOLENBACH :

نمودار مقاومت کل شناور که توسط این روش در سرعتهای مختلف محاسبه شده است به قرار جدول زیر است. در این روش بیشترین میزان مقاومت که در بیشترین سرعت شناور یعنی ۲۲/۵ گره معادل *11.5749 m/s* محاسبه شده است برابر *1533.56* کیلو نیوتن است. توان موثر مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت سیال بر حسب *KW* بدست می آید:

$P = R \times V = 1533.56 \times 11.5749\ m/s = 17750.8\ kw$

این عدد توان موثر یا P_E است که با توجه به تلفاتی که در مسیر انتقال نیرو وجود دارد توان مورد نیاز موتور یا *PB* از این عدد بیشتر است.



V(m/s)	R(KN)
1.15749	17.818
2.31498	63.517
3.47247	131.148
4.62996	218.951
5.78745	328.971
6.94494	466.641
8.10243	641.378
9.25992	865.946
10.41741	1156.673
11.5749	1533.56

راندمان انتقال نیروی بدست آمده برای شناور فوق برابر۶۴ درصد است که با توجه به رابطه: $P_B = P_E/\eta$

توان خروجی موتور بدست می‌آید: $P_B = P_E/\eta = 17750\ KW / 0.64 = 27736.764\ KW$

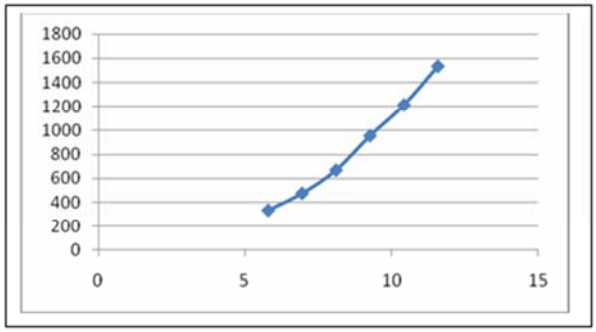
با توجه به اینکه توان خروجی موتور در شناور مورد بررسی برابر 28800 kw است می‌توان خطای این روش را محاسبه کرد:

درصد خطا = $(27727.764 - 28800) / 28800 \times 100 = -3.723$

در نتیجه خطای این روش برابر 3.7 % است.

ج) روش SERIES 60 :

نمودار مقاومت کل شناور که توسط این روش در سرعت های مختلف محاسبه شده است به قرار زیر است:



V(m/s)	R(KN)
1.15749	-----
2.31498	------
3.47247	------
4.62996	------
5.78745	333.5
6.94494	475.45
8.10243	669.59
9.25992	956.19
10.41741	1214.11
11.5749	1535.27

در این روش بیشترین میزان مقاومت که در بیشترین سرعت شناور یعنی ۲۲/۵ گره معادل *11.5749 m/s* محاسبه شده است برابر ۱۵۳۵/۲۷ کیلونیوتن است. توان موثر مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت سیال بر حسب *KW* بدست می‌آید:

$P = R \times V = 1535.27 \times 11.5749\ m/s = 17770.597\ kw$

توان خروجی موتور بدست می‌آید: $P_S = P_E/\eta = 17770.597\ KW / 0.64 = 27761.006\ KW$

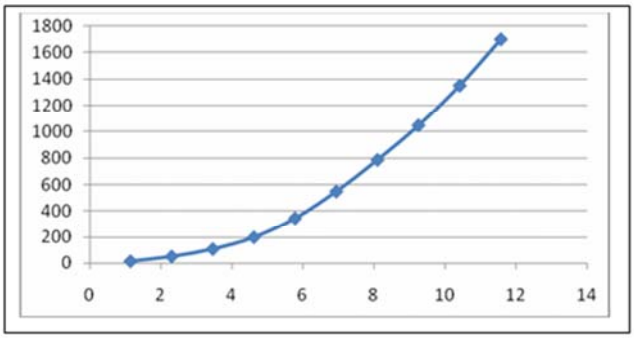
با توجه به اینکه توان خروجی موتور در شناور مورد بررسی برابر *28800 kw* است می‌توان خطای این روش را محاسبه کرد:

درصد خطا = $(27761.006 - 28800) / 28800 \times 100 = -3.608$

در نتیجه خطای این روش برابر 3.608 % است.

د) روش VAN OORT :

نمودار مقاومت کل شناور که توسط این روش در سرعت‌های مختلف محاسبه شده است به قرار زیر است:



V(m/s)	R(KN)
1.15749	13.27
2.31498	49.18
3.47247	106.46
4.62996	196.01
5.78745	343.17
6.94494	546.16
8.10243	748.25
9.25992	1045.32
10.41741	1348.94
11.5749	1697.86

توان موثر مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت سیال بر حسب *KW* بدست می‌آید:

$$P = R \times V = 1697.86 \times 11.5749\ m/s = 19652.560\ kw$$

توان خروجی موتور بدست می‌آید:

$$P_B = P_E/\eta = 19652.560\ KW / 0.64 = 30698.395\ KW$$

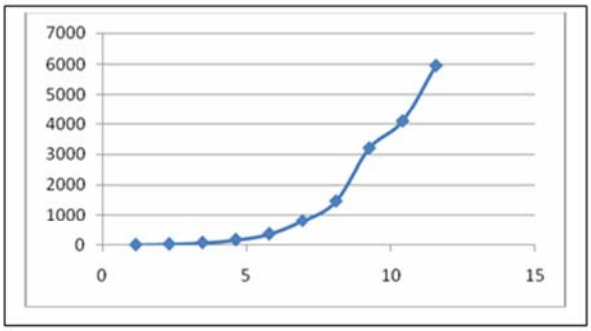
با توجه به اینکه توان خروجی موتور در شناور مورد بررسی برابر *28800* kw است می‌توان خطای این روش را محاسبه کرد:

درصد خطا = $(30698.395 - 28800) / 28800 \times 100 = 6.592$

در نتیجه خطای این روش برابر % 6.592 است.

و) روش MICHLET :

نمودار مقاومت کل شناور که توسط این روش در سرعت های مختلف محاسبه شده است به قرار زیر است:



V(m/s)	R(KN)
1.15749	4.175
2.31498	27.361
3.47247	73.7744
4.62996	167.865
5.78745	359.205
6.94494	799.155
8.10243	1459.822
9.25992	3205.482
10.41741	4105.082
11.5749	5954.571

در این روش بیشترین میزان مقاومت که در بیشترین سرعت شناور یعنی ۲۲/۵ گره معادل *11.5749 m/s* محاسبه شده است برابر 5954.571 کیلونیوتن است. توان موثر مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت سیال بر حسب *KW* بدست می‌آید:

$$P = R \times V = 5954.571 \times 11.5749\ m/s = 68923.56\ kw$$

توان خروجی موتور بدست می‌آید:

$$P_B = P_E/\eta = 68923.56\ KW / 0.64 = 107662.446\ KW$$

با توجه به اینکه توان خروجی موتور در شناور مورد بررسی برابر *28800 kw* است می‌توان خطای این روش را محاسبه کرد:

درصد خطا = $(107662.446 - 28800) / 28800 \times 100 = 273.83$

در نتیجه خطای این روش برابر % *273.8* است که تفاوت زیادی در آن مشاهده می‌گردد.

نتایج بدست آمده برای شناور فوق به قرار زیر است:

Method	R	V	P_E	η	P_S	خطا ٪
HOLTROP	1604.091	11.5749	18567.193	64.02%	29002.99	0.705
HOLENBACH	1533.56	11.5749	17750.804	64.02%	27727.764	3.723
SERIES 60	1535.27	11.5749	17770.597	64.02%	27761.006	3.608
VAN OORT	1697.86	11.5749	19652.56	64.02%	30698.395	6.592
MICHLET	5954.571	11.5749	68923.56	64.02%	107662.45	273.83

با توجه به خروجی روشها و خطای محاسباتی آنها مناسب‌ترین روش کم خطاترین روش است که با توجه به داده‌های جدول بالا روش *HOLTROP* است . در این میان از روشهای موجود برای محاسبه مقاومت و توان در شناورها، پرکاربردترین و معمول ترین روشها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند . همانطور که از داده های جدول بالا مشخص است چهار روش اول دارای نتایج تقریبا مشابه و خطاهای معقولی هستند که این امر امکان استفاده کاربر از هرکدام را فراهم می‌کند. روش *Michlet* برای برخی از شناورها دارای جواب‌های بسیار دقیق و برای برخی از شناورها دارای خطاهای بسیار بالایی است که وابسته به میزان منشوری بودن بدنه است.

فصل نهم: مقاومت ضمائم و ملحقات بدنه[1]

مقاومت ضمائم متصل به بدنه با توجه به شکل، ابعاد و موقعیت قرارگیری آنها متفاوت است ولی برای حصول تقریب مناسب از مقاومت این اجزاء می‌توان موارد زیر را در نظر گرفت:

۱- بالچه‌های ضدغلتش[2]: این عضو حدود ۲-۱ درصد مقاومت کل بدنه را به خود اختصاص می‌دهد، البته این بالچه‌ها که به صورت طولی در کنار بدنه قرار گرفته‌اند، در دریای متلاطم باعث کاهش مقاومت می‌شوند چراکه از حرکات ناخواسته شناور جلوگیری می‌کنند.

۲- طول شافت بیرون بدنه: معمولاً در کشتی‌های دوپروانه یا سه‌پروانه‌ای، طول قابل ملاحظه‌ای از شافت در بیرون از بدنه قرار می‌گیرد چراکه شافتها از کناره بدنه که دارای انحنا است، خارج می‌شدند. در کشتی‌های دوپروانه، این مقاومت به حدود ۲۰ درصد می‌رسد.

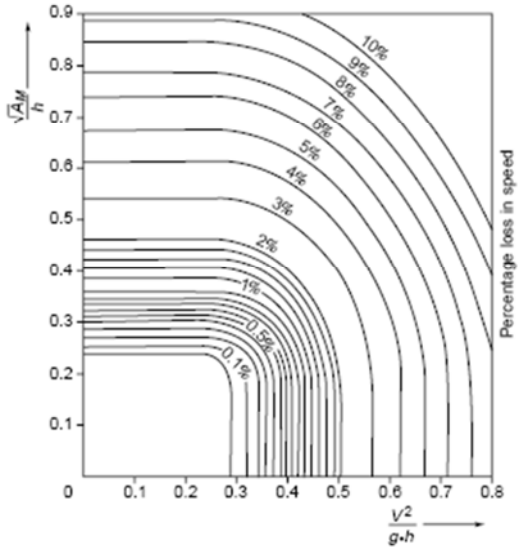
۳- براکت‌های شافت و پاشنه: براکت‌های نگهدارنده شافت پروانه و سکان می‌توانند ۵-۱۲ درصد از مقاومت کل را به خود اختصاص دهند. این نگهدارنده‌ها برای جلوگیری از ارتعاشات و افزایش استحکام ضروری هستند.

۴- تراستر پاشنه باعث ۶-۱ درصد افزایش مقاومت می‌شود.

۵- تراستر سینه اگر خوب طراحی شده باشد باعث افزایش مقاومت نمی‌شود.

فصل دهم: مقاومت در آبهای کم‌عمق

قبلاً بیان داشتیم که ورود شناور به آبهای کم‌عمق و کم‌عرض مانند کانال‌ها، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها باعث افزایش کلیه مؤلفه‌های مقاومت می‌گردد که مهمترین علل آن را می‌توان افزایش سرعت سیال در اطراف بدنه، تغییر شکل سطح آزاد سیال و افزایش ارتفاع موج حاصل از حرکت بدنه و شکست موج دانست. افزایش مقاومت را می‌توان معادل با کاهش سرعت حرکت کشتی در نظر گرفت. در نمودار شکل ۳-۴۴ کاهش سرعت بدلیل ورود شناور از آب عمیق به آب کم‌عمق ارائه شده که به صورت درصدی از سرعت اولیه بیان شده است. در این نمودار V سرعت اولیه شناور (قبل از ورود به آب کم-عمق)، h عمق آب در منطقه کم‌عمق و A_M مساحت مقطع میانی کشتی است. واحدها می‌تواند انگلیسی یا SI باشند.



شکل ۳-۴۴ : کاهش سرعت ناشی از ورود به آبهای کم عمق

۱ -[۲و۵]

2 - Bilge keel

فصل یازدهم: مقاومت باد [۱]

مباحثی که تا اینجا بیان شد مربوط به مقاومت قسمت زیر آب بدنه شناور می‌باشد حال آنکه بخش بزرگی از بدنه شناور و روبناسازی روی عرشه در معرض باد می‌باشد. مقاومت قسمت بالای آب بدنه کشتی در شرایط آرام جوی، ۳–۵ درصد مقاومت قسمت زیر آب است. در کشتی‌های کانتینربر که سطح بزرگی از روی عرشه نیز در معرض باد می‌باشد، مقاومت باد عدد قابل ملاحظه‌ای است. مقاومت باد در شناورها از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{AA} = C_{AA}\frac{\rho_{air}}{2}.(V+V_{wind})^2.AF$$

که برای کشتی‌های تجاری $C_{AA} = 0.8-1$ و $\rho_{air} = 1.25\frac{kg}{m^3}$ و V_{wind} سرعت مطلق وزش باد، A_F سطح مقطع عرضی (نما از مقابل) کشتی در قسمت بالای آب می‌باشد. رابطه دقیق‌تری نیز برای محاسبه مقاومت باد به صورت زیر وجود دارد:

$$R_{AA} = \frac{\rho_{air}}{2}u^2 A_L.CD_l\frac{Cos\varepsilon}{1-\frac{\delta}{2}\left(1-\frac{CD_l}{CD_t}\right)Sin^2 2\varepsilon}$$

که در آن u سرعت باد، A_L مساحت جانبی بالای خط آب، ε زاویه وزش باد نسبت به کشتی (ε=0 برای باد از مقابل و $\varepsilon = ۱۸۰^\circ$ برای باد از پشت شناور) و δ پارامتر نیروی عرضی است که از جدول ۳–۱۱بدست می‌آید. این جدول مقادیر مختلف CD_t، CD_{LAF} و δ را برای انواع مختلفی از شناورها داده است. مقدار CD_L طبق فرمول مقابل از CD_{LAF} بدست می‌آید:

$$C_{D_{LAF}} = C_{D_L}.\frac{A_L}{A_F}$$

CD_t و CD_L به ترتیب ضریب مقاومت باد عرضی و باد از مقابل می‌باشد. معمولاً حداکثر مقاومت باد در محدوده $۰^\circ < \varepsilon < ۲۰^\circ$ بدست می‌آید.

ارتفاع مبنا برای سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری است. سرعت باد را می‌توان از عدد بیوفورت[۲] (BN) بدست آورد. در مهندسی دریایی، مشخصات باد هر منطقه توسط عدد بیوفورت بیان می‌شود. جدول ۳–۱۵ بیان‌کننده سرعت باد در هر عدد بیوفورت می‌باشد. اعداد بیوفورت از صفر تا ۱۲ هستند. مثلاً اگر کشتی از یک منطقه عبور کند که عدد بیوفورت آن ۵ است یعنی سرعت باد در آن منطقه ۱۰/۷ – ۸ متر بر ثانیه است. همچنین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری را بر حسب متر بر ثانیه می‌توان از عدد بیوفورت طبق رابطه زیر بدست آورد:

$$U_{10} = 0.836\times BN^{1.5}$$

	CD_t	$CD_{t\,AF}$	δ
Car carrier	0.95	0.55	0.80
Cargo ship, container on deck, bridge aft	0.85	0.65/0.55	0.40
Containership, loaded	0.90	0.55	0.40
Destroyer	0.85	0.60	0.65
Diving support vessel	0.90	0.60	0.55
Drilling vessel	1.00	0.70–1.00	0.10
Ferry	0.90	0.45	0.80
Fishing vessel	0.95	0.70	0.40
LNG tanker	0.70	0.60	0.50
Offshore supply vessel	0.90	0.55	0.55
Passenger liner	0.90	0.40	0.80
Research vessel	0.85	0.55	0.60
Speed boat	0.90	0.55	0.60
Tanker, loaded	0.70	0.90	0.40
Tanker, in ballast	0.70	0.75	0.40
Tender	0.85	0.55	0.65

جدول ۳-۱۴ : استخراج ضرایب مورد نیاز برای محاسبه مقاومت باد (Blendermann – ۱۹۹۶)

Bft	*Wind description*	*Wind speed* [m/s]
0	No wind	0.0–0.2
1	Gentle current of air	0.3–1.5
2	Gentle breeze	1.6–3.3
3	Light breeze	3.4–5.4
4	Moderate breeze	5.5–7.9
5	Fresh breeze	8.0–10.7
6	Strong wind	10.8–13.8
7	Stiff wind	13.9–17.1
8	Violent wind	17.2–20.7
9	Storm	20.8–24.4
10	Violent storm	24.5–28.3
11	Hurricane-like storm	28.5–32.7
12	Hurricane	>32.7

جدول ۳-۱۵ : سرعت باد در اعداد بیوفورت مختلف دریایی

۱ [۲ و ۵و۷]

2 - Beaufort Number

فصل دوازدهم: مقاومت حرکت کشتی در امواج دریا[۱]

علاوه بر مؤلفه‌های مختلف مقاومتی که تا کنون بیان شد، مقاومت حرکت کشتی در امواج دریا نیز مؤلفه دیگری از مقاومت است. یادآوری می‌شود که مقاومت موج که قبل از این بحث شد مربوط به موج تولید شده توسط حرکت بدنه بود و ارتباطی به موج دریا نداشت. مقاومت ناشی از موج دریا در اینجا بحث می‌شود. قدرت امواج مناطق مختلف دریایی بر حسب شماره «قدرت دریا» یا «فورس دریا»[۲] بیان می‌گردد. هر شماره دریا بیان‌کننده مشخصات ارتفاع و طول موج است. شماره «قدرت دریا» از صفر تا ۹ می‌باشد. از طرفی می‌دانیم که عامل اصلی تولید امواج دریا، وزش باد است. بنابراین باید ارتباط مشخصی بین «قدرت دریا» و «عدد بیوفورت» برقرار باشد. این ارتباط در جدول۳- ۱۶ برای دریای شمال ارائه شده است.

Sea scale	*Bft*	*Sea description*	*Approximate average* *Wave height* [m]	*Wavelength* [m]
0	0	Smooth sea	—	—
1	1	Calm, rippling sea	0–0.5	0–10
2	2–3	Gentle sea	0.5–0.75	10–12.5
3	4	Light sea	0.75–1.25	12.5–22.5
4	5	Moderate sea	1.25–2.0	22.5–37.5
5	6	Rough sea	2.0–3.5	37.5–60.0
6	7	Very rough sea	3.5–6.0	60.0–105.0
7	8–9	High sea	>6.0	>105.0
8	10	Very high sea	up to 20	up to 600
9	11–12	Extremely heavy sea	up to 20	up to 600

جدول۳- ۱۶ : ارتباط بین عدد بیوفورت و قدرت دریا برای دریای شمال

فرمول زیر توسط *Townsin* و *Kwon* در سال ۱۹۸۳ برای تخمین کاهش سرعت ناشی از وزش باد و امواج دریا ارائه شده است:

$$\Delta V = C_{\mu}.C_{ship}.V$$

که ضرایب C_{μ} و C_{ship} وابسته به عدد بیوفورت (BN) هستند. مقادیر C_{μ} از روابط زیر بدست می‌آیند که μ زاویه وزش باد به بدنه است.

$C_{\mu} = 1.0$ $\quad \mu = 0^{\circ} - 30^{\circ}$

$C_{\mu} = 1.7 - 0.03 \times (BN-4)^2$ $\quad \mu = 30^{\circ} - 60^{\circ}$

$C_{\mu} = 0.9 - 0.06 \times (BN-6)^2$ $\quad \mu = 60^{\circ} - 150^{\circ}$

$C_{\mu} = 0.4 - 0.03 \times (BN-8)^2$ $\quad \mu = 150^{\circ} - 180^{\circ}$

C_{ship} نیز عامل نوع کشتی را لحاظ می‌کند:

$C_{ship} = 0.5BN + BN^{6.5} / \left(2.7 \times \nabla^{2/3}\right)$ $\quad$ tanker s, *laden*

$C_{ship} = 0.7BN + BN^{6.5} / \left(2.7 \times \nabla^{2/3}\right)$ $\quad$ tanker s, *ballast*

$C_{ship} = 0.7BN + BN^{6.5} / \left(2.2 \times \nabla^{2/3}\right)$ $\quad$ *containership*,

∇ حجم جابجایی بدنه شناور بر حسب متر مکعب است.

در حالت کلی می‌توان گفت امواج دریا به دلایل زیر باعث افزایش مقاومت می‌شوند:

۱- حرکات هیو و پیچ اضافی ناشی از امواج دریا.

۲- امواج از پهلو و از پشت که باعث حرکات شدید رول و یاو می‌شوند.

۳- زاویه گرفتن سکان برای حفظ مسیر.

---

۱ [۵]

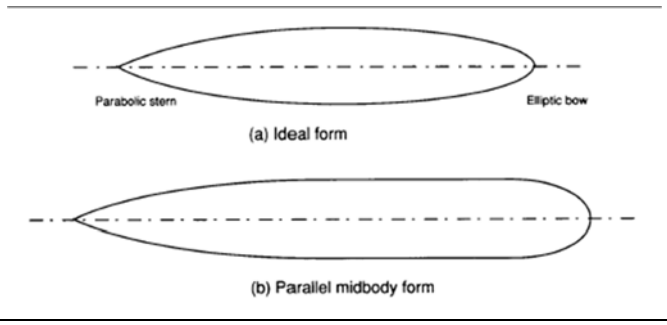
2 - Sea force

فصل سیزدهم: مقاومت و توان زیردریایی[1]

روابط ارائه شده تاکنون، برای کشتی‌ها معتبر است و برای شکل بدنه زیردریایی کاربرد ندارند. در این قسمت، ملاحظات هیدرودینامیکی طراحی بدنه زیردریایی به همراه روش محاسبه مقاومت و توان زیردریایی بیان می‌گردد.

❖ شکل ایده‌آل بدنه برای حرکت در زیر آب

ایده‌آل‌ترین شکل برای حرکت در زیر آب، شکلی شبیه شکل ۳–۴۵ الف می‌باشد که به آن حالت «دوکی شکل» گویند. این شکل دارای مقاومت ویسکوز فشاری برابر ۱۰ درصد مقاومت کل است که نشان از مناسب بودن این شکل برای زیر آب دارد.



شکل ۳–۴۵ : شکلهای مناسب برای بدنه زیردریایی

در واقع این شکل برای حرکت در محیط یک نوع سیال (آب یا هوا) که مرز مشترک دو سیال و سطح آزاد نداشته باشد، مناسب است، بنابراین برای هواپیما نیز این شکل بدنه مناسب است. از آنجا که ساخت این بدنه و ایجاد انحنای آن کاری دشوار است، از شکلی مناسب‌تر مطابق شکل ۳–۴۵ ب استفاده می‌شود که به آن «بدنه میانی استوانه‌ای» می‌گویند. امروزه اغلب زیردریایی‌ها و هواپیماها را به این شکل می‌سازند. اگر یک شناور بخواهد در مرز مشترک دو سیال مانند هوا و آب حرکت کند، شکل بدنه شبیه کشتی‌ها با سینه تیز، مناسب و ایده‌آل خواهد بود. در این‌باره در قسمتهای بعد بیشتر صحبت خواهد شد. یک توصیه مناسب برای شکل بدنه هیدرودینامیک زیردریایی می‌تواند شکل ۳–۴۶ باشد که دو بدنه دوکی شکل و بدنه میانی موازی را برای بدنه زیردریایی معرفی می‌کند. معادله بدنه در این حالتها در ذیل ارائه شده است.

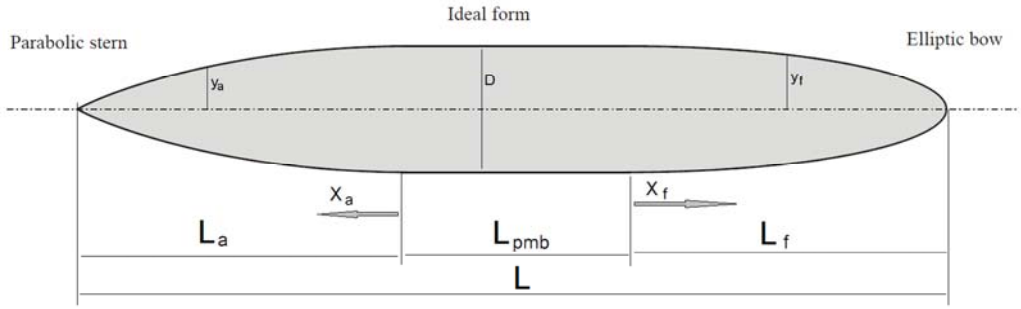
❖ تغییرات مقاومت فشاری و اصطکاکی با نسبت L/D

اگر یک بدنه دوکی شکل برای یک زیردریایی در عمق آب در نظر بگیریم، بدلیل دور بودن از سطح آزاد، مقاومت موج‌سازی وجود ندارد و فقط مقاومت اصطکاکی و ویسکوز فشاری وجود دارد. مقاومت ویسکوز فشاری نیز همان مقاومت شکلی[2] است. تغییرات مقاومت اصطکاکی و شکلی نسبت به تغییرات طول به قطر $\left(\frac{L}{D}\right)$ را می‌توان در شکل ۳–۴۷ مشاهده کرد. با زیاد شدن نسبت L/D مقاومت اصطکاکی افزایش و مقاومت شکلی کاهش می‌یابد. بنابراین اثر L/D بر این دو مؤلفه از مقاومت، متناقض است. بنابراین باید یک نقطه بهینه‌ای در این بین وجود داشته باشد به گونه‌ای که مجموع دو مقاومت اصطکاکی و شکلی، باعث کمترین مقاومت کل شود. نمودار مقاومت کل همان نمودار سهمی شکل موجود در شکل ۳–۴۳ است. پائین‌ترین نقطه این سهمی، نقطه ایده‌آل نسبت L/D است که برای بدنه دوکی شکل، این نسبت برابر ۶ و برای بدنه میانی استوانه‌ای برابر ۱۰ است.

- $L/D = ۶$ بهینه: بدنه دوکی شکل
- $L/D = ۱۰$ بهینه: بدنه میانی استوانه‌ای

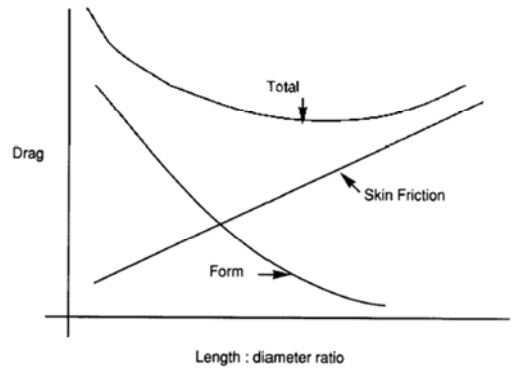
1 - منابع: [۲۵ و ۱۳ و ۱۴]

2 - form resistance



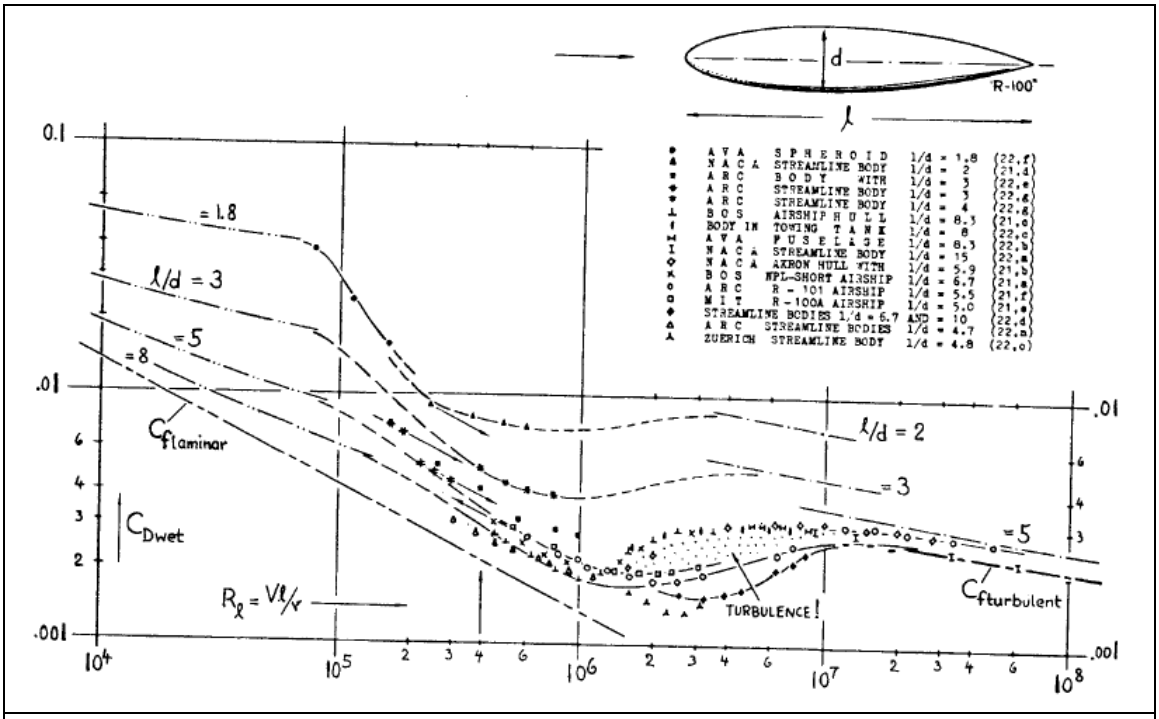
Parameter	Range
D	22-34 feet
L/D	7-10
B/D	1-1.2
L_f	2.4*D
L_a	3.6*D
η_f	2-3.5
η_a	2.5-4
L_{td}/D	6
L_{td}	L_a+L_f
L_{pmb}	$L- L_{td}=L- L_a-L_f$
y_f	$\frac{D}{2}[1-(X_f/l_f)^{\eta_f}]^{1/\eta_f}$
y_a	$\frac{D}{2}[1-(X_a/l_a)^{\eta_a}]$
A(x)	$\frac{B}{D}*\pi*(z(x))^2$
p(x)	$2*\pi*\sqrt{0.5*(z(x))^2*(1+(B/D)^2)}$
V_{env}	$\int_0^L A(x).dx$
S	$\int_0^L p(x).dx$

شکل ۳-۴۶: شکل ایده‌آل و شکل بدنه میانی موازی زیردریایی و معادلات مربوطه در دو حالت



شکل ۳-۴۷: تغییرات مقاومت زیردریایی با نسبت L/D

تغییرات ضریب مقاومت باقی‌مانده با نسبت L/D در شکل ۳-۴۸ نشان داده شده است. با ارائه مثال ساده زیر برای دو استوانه نشان می‌دهیم که چگونه در یک جابجایی ثابت، با افزایش نسبتL/D ، مقاومت اصطکاکی افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۴۸: تغییرات مقاومت باقی‌مانده با نسبت L/D

مثال) دو استوانه با حجم یکسان ۸۳ متر مکعب داریم. یکی دارای طول ۱۱ متر و قطر ۳/۱ متر و دیگری دارای طول ۸/۲ متر و قطر ۳/۶ متر است. محیط این دو استوانه که به منزله سطح خیس است را با مقایسه کنید.

- **استوانه اول:**

$L = 11\,m \qquad L/D = 3.5$

$D = 3.1\,m$

حجم $V = \pi D^2 . L/4 = 83\,m^3$

سطح جانبی $P = 2\pi RL = 107\,m^2$

- **استوانه دوم:**

$L = 8.2\,m \qquad L/D = 2.3$

$D = 3.6\,m$

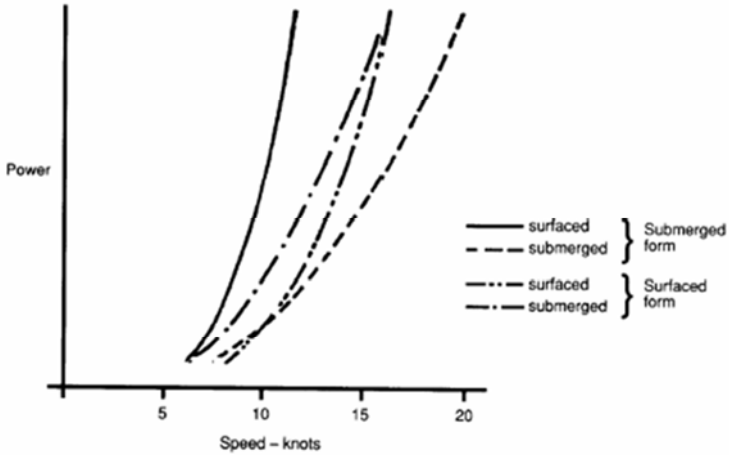
حجم $V = 83\,m^3$

سطح جانبی $P = 2\pi RL = 92\,m^2$

این مثال ساده بیان‌کننده این نکته مهم است که با افزایش نسبتL/D ، سطح خیس یا همان محیط استوانه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت اصطکاکی نیز افزایش می‌یابد.

❖ تأثیر شکل بدنه بر مقاومت بدنه

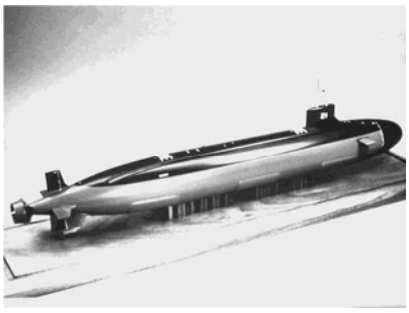
همانطور که گفتیم شکل مناسب برای حرکت در سطح آب با شکل مناسب برای زیر آب کاملاً متفاوت است. شکل بدنه ایده‌آل برای زیر سطح آب (یا حرکت در یک سیال بدون سطح آزاد)، بدنه «دوکی شکل» است. شکل ایده‌آل برای سطح آب نیز شبیه بدنه کشتی‌ها می‌باشد. ملاحظه می‌شود که این شکل‌ها کاملاً با هم متفاوت هستند. از طرف دیگر هم‌اکنون می‌توان درک نمود که چرا شکل حبابی سینه کشتی‌ها، که اغلب در زیر سطح آب قرار دارد، به صورت استوانه‌ای است نه تیز. نمودار شکل ۳-۴۹ بیان‌کننده نمودار توان – سرعت برای اشکال ایده‌آل بدنه در سطح آب و زیر آب است. در این شکل ملاحظه می‌شود که شکل بدنه زیردریایی در زیر آب دارای کمترین شیب (بهترین حالت) و در سطح آب دارای بیشترین شیب (بدترین حالت) است. شکل بدنه کشتی در سطح آب نیز دارای شیب کمتری نسبت به حالت زیر آب است (با فرض اینکه شکل بدنه کشتی بتواند در زیر آب حرکت کند همانند شکل بدنه زیردریایی‌های قدیمی).



شکل ۳-۴۹: مقایسه توان مورد نیاز در سطح آب و زیر آب برای بدنه‌های مختلف

❖ شکل کلی زیردریایی و سهم اجزاء آن در مقاومت و توان

معمولا بدنه زیردریایی‌ها شبیه شکل ۳-۵۰ می‌باشد که همانند یک استوانه طویل است با برجک برآمده بر روی بدنه، بالکهای جلو و عقب، کیل در زیر بدنه، عرشه فوقانی روی بدنه و پروانه در انتها. برای بیان نقش هریک از اجزاء بدنه زیردریایی می‌توان از جدول۳-۱۷ به عنوان یک تقریب استفاده کرد. عبارت A شامل نسبت توان صرف شده در عضو مورد نظر نسبت به توان کل است و عبارت B بیان‌کننده نسبت سطح خیس آن عضو به سطح خیس کل زیردریایی است. نسبت A/B نیز بیان‌کننده نسبت توان صرف شده به مساحت سطح خیس هر عضو از بدنه است که هر چه این نسبت بزرگتر باشد، حالت نامطلوب‌تری وجود دارد.



شکل۳-۵۰ : شکل کلی بدنه زیردریایی

Component	$\frac{\Delta P_E}{\text{Total } P_E}(\%) = A$	$\frac{\Delta \text{ Area}}{\text{Total Area}}(\%) = B$	Resistfulness $\frac{A}{B}$
Hull	68.50	84.33	0.81
Bridge fin	7.87	8.05	0.98
Stern planes	7.71	3.28	2.35
Bow planes	3.54	0.58	6.14
Upper rudder	5.34	1.64	3.26
Lower rudder	1.81	1.11	1.63
Sonar fairing	2.88	0.16	18.03
Ballast keel	6.05	6.10	0.99
Total	103.70		

جدول ۳-۱۷ : توان مورد نیاز و سطح خیس هریک از اجزاء بدنه زیردریایی

همانطور که از جدول فوق پیداست، مقاومت کلی زیردریایی مجموع مقاومت بدنه لخت و مقاومت ملحقات[1] و ضمائم بدنه[2] است.

$$R_T = R_{BH} + R_{APP}$$

❖ تخمین مقاومت ملحقات بدنه

در مجموع ۳۰ – ۲۰ درصد از مقاومت کل زیردریایی را می‌توان مرتبط به مقاومت ملحقات و ضمائم زیردریایی دانست که شامل سوراخ‌های آبگیر آزاد[3] روی بدنه زیردریایی نیز می‌باشد. سوراخ‌های روی بدنه زیردریایی، از آنجا که در سراسر طول بدنه وجود دارند، می‌توانند باعث افزایش زیاد مقاومت شوند (سوراخ‌های روی بدنه بیرونی زیردریایی برای خروج سریع آب از داخل برجک در حین صعود می‌باشد). همچنین جریان چرخشی و نوسانی آب در داخل این سوراخ‌ها می‌تواند باعث تولید صدا و ارتعاش زیادی شود. لذا یک روکش هیدرودینامیکی در برخی مواقع، بر روی این سوراخ‌ها در نظر می‌گیرند. همچنین زواید کوچک روی بدنه نیز می‌توانند بر مقاومت بسیار مؤثر باشند که نمونه‌ای از آن در شکل ۳-۵۱ نشان داده شده است. کشتی‌ها معمولاً با مشکلات کمتری از این نظر مواجه هستند چرا که بدنه کشتی معمولاً صاف و بدون زواید است ولی از آنجا که کل بدنه زیردریایی و قسمتهای فوقانی

1 - bare hull
2 - appendage
3 -free flooding holes

آن نیز زیر آب می‌رود، لذا باید در طراحی هیدرودینامیکی آن دقت بسیاری کرد.

شکل ۳-۵۱ : نقش زواید کوچک بدنه بر افزایش مقاومت

شکل ۳-۵۲ : موقعیت پروانه و بالکهای زیردریایی

ضریب مقاومت اجزاء مختلف ضمائم بدنه را بر حسب سطح عمود بر جریان می‌توان از جدول زیر بدست آورد:

ملحقات	ضریب مقاومت CT
گنبدی های کوچک (مانند گنبدی سونار)	*0.015*
آنتن	*1.2*
استوانه	*1.2*
حفره‌های روی بدنه (بر اساس تصویر مساحت از جلوی بدنه)	*0.5*
بالکها	*0.011*

جدول ۳-۱۸: ضریب مقاومت کل ملحقات بدنه

و از رابطه مقابل برای محاسبه مقاومت ملحقات استفاده می‌شود: $R_{APP} = 0.5C_T.\rho.A.V^2$

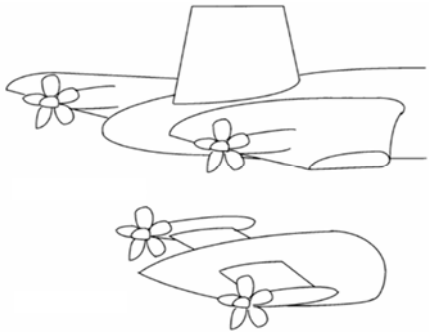
❖ پروانه زیردریایی

زیردریایی‌های نظامی معمولاً دارای یک پروانه هستند که در انتهایی‌ترین قسمت بدنه قرار گرفته‌اند. حضور بالکها و سکانها در مجاورت پروانه، باعث اثر ویک زیاد روی پروانه می‌شود (شکل ۳-۵۲).

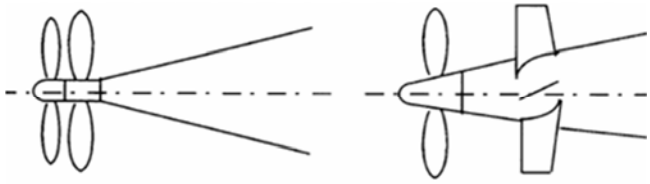
قطر پروانه ۷۰ – ۴۰ درصد قطر بدنه زیردریایی است: $D_{prop} = (0.4-0.7)D_{hull}$

تعداد پره‌های پروانه زیردریایی‌ها معمولاً فرد است (۳ ، ۵ و ۷ پره) که علت آن همان حضور بالکها و سکان‌های صلیبی شکل در جلوی پروانه است. مثلاً اگر تعداد پره‌های پروانه ۴ عدد باشد، در هر سیکل چرخش پروانه، لحظه‌ای اتفاق می‌افتد که هر چهار پره در مقابل چهار سطوح کنترلی (بالکها و سکانها) قرار می‌گیرند و بدلیل تغییرات یکباره و شدید سرعت سیال ورودی به پروانه، در هر سیکل چرخش، یک شوک به پروانه وارد می‌شود که از بازدهی پروانه می‌کاهد. لذا معمولاً پره‌های پروانه را زوج انتخاب نمی کنند. نوع پره‌های پروانه زیردریایی نظامی معمولاً از نوع شلاقی[1] می‌باشد چرا که باعث کاهش کاویتاسیون، سر و صدا و ارتعاش پروانه می‌شوند. در مورد پروانه‌های شلاقی در قسمت‌های بعدی بیشتر صحبت خواهد شد. زیردریایی‌ها معمولا تک پروانه هستند. ولی در برخی از زیردریایی‌ها مطابق شکل ۳-۵۳، ممکن است از ۲ پروانه استفاده شود که البته امروزه چندان رایج نیست. برای افزایش بازدهی پروانه نیز از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که شامل پراونه‌های عکس چرخنده[2] پروانه هرز چرخنده[3] و تیغه‌های ثابت جلوی پروانه[4] می‌باشد(شکل ۳-۵۴). پروانه‌های عکس چرخنده **(*CRP*)** برای افزایش تراست و کاهش ممان رول دهنده پروانه بکار می‌رود. تیغه-های ثابت جلوی پروانه نیز نقش پیش چرخش سیال، قبل از ورود به پروانه را دارند که باعث افزایش بازدهی می‌شود. در این باره، در بخش دیگری به طور کامل بحث می‌شود.

1 - high skew
2 - Contra Rotating
3 - Grim Wheel
4 - forward stator



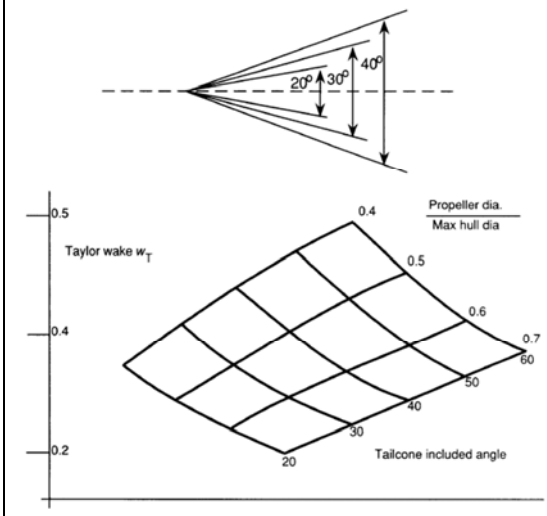
شکل ۳-۵۳: سیستم دو پروانه‌ای در زیردریایی



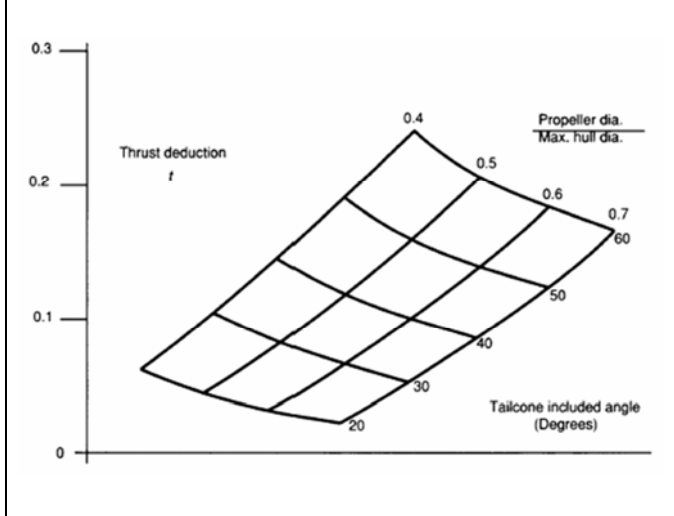
شکل ۳-۵۴: روشهای افزایش بازدهی پروانه زیردریایی

❖ اثر پاشنه زیردریایی بر ضریب ویک و ضریب کاهش تراست

می‌دانیم که پاشنه زیردریایی از یک مخروط تشکیل شده است. زاویه مخروطی پاشنه به همراه نسبت قطر پروانه به قطر بدنه، بر ضریب ویک و ضریب کاهش تراست، بسیار مؤثر هستند. اثر این دو عامل بر ضریب ویک را می‌توان در شکل ۳-۵۵ مشاهده کرد. هر چه زاویه مخروطی پاشنه کمتر می‌شود، ضریب ویک کمتر می‌شود چراکه کم‌شدن زاویه مخروطی به معنای کشیده‌ترشدن آن و در نتیجه دورتر شدن پروانه از بدنه است. لذا ضریب ویک، کاهش می‌یابد. همچنین هر چه نسبت قطر پروانه به قطر بدنه بیشتر شود، ضریب ویک کمتر می‌شود چراکه نوک پره‌های پروانه می‌توانند از محدوده ویک دورتر شوند. اثر زاویه مخروطی پاشنه و نسبت قطر پروانه به قطر بدنه بر ضریب کاهش تراست نیز در شکل ۳-۵۶ نشان داده شده است که شبیه تغییرات ویک است.



شکل ۳-۵۵: اثر زاویه مخروطی پاشنه و قطر پروانه در ضریب ویک



شکل ۳-۵۶: اثر زاویه مخروطی پاشنه و قطر پروانه بر ضریب کاهش تراست

در مرجع{۱۴} روابط زیر برای ضریب ویک و ضریب کاهش تراست در زیردریایی‌های با بدنه متقارن محوری ذکر شده است:

$$1-t = 0.632 + 2.44\frac{D_{prop}}{\sqrt{S_{wet}}} \qquad 1-w = 0.371 + 3.04\frac{D_{prop}}{\sqrt{S_{wet}}}$$

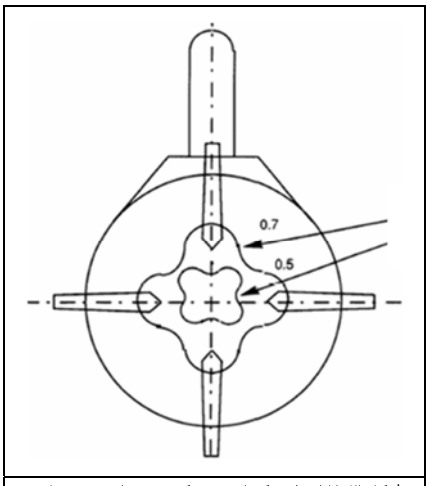
روابط فوق، تخمین مناسبی را برای مراحل اولیه طراحی ارائه می‌کند. همچنین اثر زاویه مخروطی پاشنه در زیردریایی‌های تک‌پروانه و دو پروانه را می‌توان در جدول ۳-۱۹ ملاحظه کرد.

		w_T	t	η_H	η_o	η_R	PC
Single Screw	20° L	0.26	0.04	1.30	0.65	1.02	0.86
	40° L	0.36	0.11	1.41	0.65	1.02	0.93
	60° L	0.46	0.18	1.52	0.65	1.02	1.00
Twin-Screw	—	0.20	0.15	1.06	0.65	0.99	0.68

جدول۳- ۱۹ : اجزاء بازدهی در زیردریایی‌های تک پروانه و دو پروانه

وجود بالکهای عقب و سکان‌های فوقانی و تحتانی که یک حالت صلیبی شکل در پاشنه زیردریایی ایجاد می‌کند، باعث غیریکنواخت شدن توزیع ویک بر روی پروانه زیردریایی می‌شود. (شکل ۳-۵۷).

این غیریکنواختی ویک اثر نامطلوبی بر بازدهی پروانه دارد.



شکل ۳-۵۷ : غیریکنواختی ویک در پروانه زیردریایی بدلیل حضور بالک‌ها و سکان

❖ تخمین مقاومت زیردریایی

برای محاسبه مقاومت زیردریایی روش‌های مختلفی ارائه شده است که در اینجا به چند روش اشاره می‌شود، روش اول برای حالت سطح آب و زیر آب و بقیه روشها فقط برای محاسبه مقاومت بدنه لخت در زیر آب است که در این روش‌ها باید مقاومت ملحقات را به مقاومت بدنه لخت اضافه کرد تا مقاومت کل بدست آید. در این روابط، D قطر بدنه زیردریایی و L طول زیردریایی است.

۱) روش اول: استفاده از روش منبع [۲۵]

پس از تعیین اندازه‌های زیردریایی و مشخص شدن ضمائم متصل به بدنه، ارزیابی دقیق‌تری از نسبت $\left(\frac{\text{مقاومت}}{\text{سرعت}}\right)$ در هنگامی‌که زیردریایی کاملاً غوطه‌ور است، طبق روش زیر انجام می‌گردد:

ضریب مقاومت کل ممکن است به شکل روبرو بیان شود:

$$C_T = C_{FS} + C_R + C_A$$

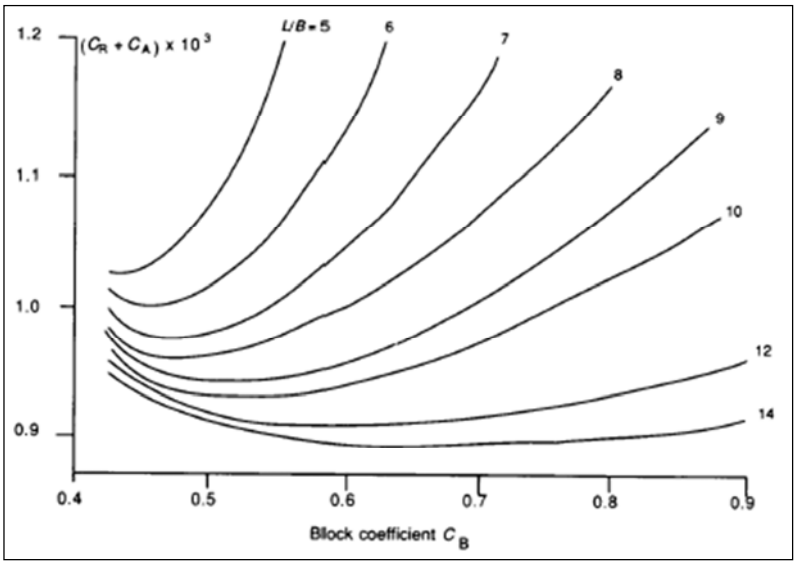
$$\text{ضریب } C = \frac{\text{مقاومت}}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

ضریب مقاومت اصطکاکی : C_{FS}

ضریب مقاومت باقیمانده (ویسکوزفشاری) : C_R

ضریب مجاز برای مدل کردن در مقیاس کامل : C_A

مقدار C_R از آزمایشات مقاومت مدل بدست می‌آید و فرض شده است که مستقل از عدد رینولدز باشد و مقدار آن برای مدل و نمونه واقعی یکسان است یعنی $C_{RM} = C_{RS}$. خطاهای همراه این فرض در ضریب C_A در نظر گرفته می‌شود. ضریب C_A از انجام اولین آزمایشات زیردریایی جدید بدست می‌آید، هر چند که در مرحله طراحی و ساخت مدل، مقدار مناسبی برای C_A براساس زیردریایی‌های قبلی در نظر گرفته می‌شود. به عنوان نمونه مقدار مجاز ضریب C_A ممکن است بین « $۰/۶ \times ۱۰^{-۳} - ۰/۴ \times ۱۰^{-۳}$ » باشد. تغییرات قابل ملاحظه‌ای نیز در ضریب مقاومت باقیمانده وجود دارد که از آزمایشات مدل و ضریب مجاز مدل (C_A) از آزمایشات بدست می آید. خوشبختانه این را قبلاً هم توضیح داده‌ایم که با افزایش نسبت L/D ، C_R کوچکتر خواهد شد (یعنی مقاومت شکلی کمتر)، ولی این باعث مساحت سطح خیس بزرگتر برای یک حجم جابجایی مشخص، می‌شود. ضریب مجاز مدل (C_A)، تأثیرات صافی بدنه، دریچه‌های بدنه، خطاهای ساخت و خطاهای ذاتی موجود در فرآیند مقیاس کردن را در بر می‌گیرد. در نتیجه، شکل‌های با مساحت سطوح خیس بزرگ برای یک حجم جابجایی مشخص دارای ضریب مجاز (C_A) بزرگتر خواهند بود. با جمع C_R با C_A این اثرات متمایل به خنثی شدن خواهند بود.



شکل ۳-۵۸: تناسب ضریب مقاومت باقی‌مانده و ضمائم با ضریب بلوکی

در شکل ۳-۵۸ مشاهده می‌شود که محدوده کوچکی از مقادیر $(C_R + C_A)$ در محدوده $۱۰ \times (۱/۲-۰/۹)^{-۳}$ در ازای محدوده بزرگی از ضریب ظرافت[1] و ضریب لاغری (L/B) آورده شده است. شکل ۳-۵۸ را می‌توان برای ارزیابی طراحی نهایی مورد استفاده قرار داد.

ضریب مقاومت اصطکاکی (C_{FS}) برای زیردریایی از فرمول تجربی $(1957\ ITTC)$ محاسبه می‌گردد:

$$C_{FS} = \frac{0.075}{(Log_{10}\ Rn - 2)^2}$$

بدنه و روکش آن و هر یک از ملحقات بدنه دارای یک عدد رینولدز خاص هستند که براساس طول کل، روکش و طول کورد متوسط هر یک از ملحقات می‌باشد و هر یک از اینها ضرایب خاص خود را خواهند داشت و متناسب با مساحت هر یک به مساحت سطح خیس کل (که به عنوان سطح مرجع (S_{REF}) شناخته می‌شود) به یکدیگر افزوده خواهند شد یعنی:

$$C_{FS} = C_{Fhull} \times \left(\frac{\text{مساحت محل اتصال ملحقات به بدنه} \_ \text{سطح خیس بدنه}}{S_{Ref}} \right) + C_{Fbridge} \times \frac{\text{سطح خیس پل}}{S_{Ref}} +$$

$$2 \times C_{Fbowplane} \times \frac{\text{سطح خیس روی یک بالک}}{S_{Ref}} + \cdots$$

که $(SRef)$ مساحت سطح خیس بدنه بدون ملحقات[2] و روکش آن بعلاوه سطح خیس همه ملحقات، منهای مساحت محل اتصال ملحقات به بدنه می‌باشد. ضریب مقاومت کل شناور که مشخص شد، قدرت مؤثر (P_E) در سرعت V در حالت غوطه‌وری از فرمول زیر بدست می‌آید:

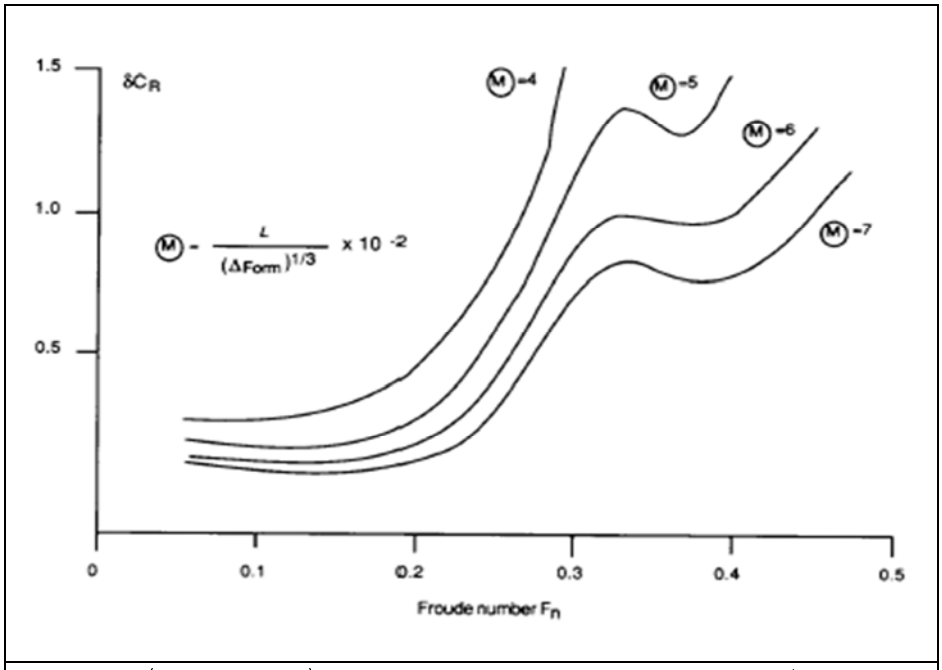
$$P_E = 1/2\ \rho\ V^3\ S_{Ref}\ C_{Ts}$$

یک ضریب مجاز باید برای خزه‌گرفتگی و ناصاف شدن بدنه در آبهای مختلف با ضریبی برابر $\left(\frac{1}{8}\right)$ درصد C_{Fs} برای هر روز تا ۱۸۰ روز پس از خارج شدن از داک، در نظر گرفته شود. با دانستن بازدهی پیشرانش (PC)[3] مشخص خواهد شد که قدرت شفت (P_s) در چه محدوده سرعت کار خواهد کرد. اما قبل از بحث در این مرحله، روی اینکه مقاومت بدنه زیردریایی چگونه تحت تأثیر تغییرات عمق به هنگام عملیات قرار می‌گیرد، صحبت می‌کنیم.

مقاومت در سطح آب و نزدیک سطح آب

به محض نزدیک شدن زیردریایی به سطح آب، مقاومت آن بدلیل پراکندگی انرژی ناشی از ایجاد موج، افزایش می‌یابد. ایجاد موج، توزیع فشار را روی بدنه زیردریایی تغییر می‌دهد درنتیجه درگ بدنه افزایش می‌یابد و این خود را به صورت افزایش ضریب مقاومت باقیمانده $(\delta\ C_R)$ نشان می‌دهد. این افزایش، به هنگام شروع بیرون آمدن بدنه از سطح آب، بیشترین مقدار است و این زمانی است که آبخور (H) برابر عمق بدنه می‌باشد $(D$ برابر قطر بدنه بعلاوه ارتفاع روکش بدنه می‌باشد). یعنی $(H = D)$. افزایش ضریب مقاومت باقیمانده ممکن است مرتبط با عدد فرود (F_n) و یک عامل بدون بُعد $\left(\frac{L}{\nabla_{Form}^{1/3}}\right)$ باشد. نمونه‌ای از این اطلاعات در شکل ۳-۵۹ نشان داده شده است.

1- Block coefficient
2 - bare hull
3- Propulsive Coefficient



شکل ۳-۵۹: تخمین نیروی مقاوم بر زیردریایی در حرکت اسنورکلی(حرکت در عمق تنفس)

ممکن است با ثابت فرض کردن C_F , C_A , C_R , δC_R ، تخمین مقاومت بدنه زیردریایی ناقص باشد. هر چه زیردریایی به عمق بیشتری می‌رود، δC_R کمتر خواهد شد تا اینکه اثر سطح آزاد قابل چشم پوشی شود. هر چند فقط اطلاعات اندکی در خصوص تغییرات مقاومت موج سازی با عمق و سرعت، موجود می‌باشد اما فرمول زیر ممکن است یک مقدار تقریبی برای افزایش ضریب مقاومت باقیمانده بدهد:

$$\delta C_R'' = \delta C_R \times e^{\left[0.37g\times\frac{(D-H)}{V^2}\right]}$$

برای $H \rangle D$:

مقاومت ناشی از پریسکوپ و دیگر دکل‌ها باید به صورت مجزا بررسی شود. نزدیک بودن تعدادی از این دکل‌ها به یکدیگر، تخمین مقاومت آنها را بسیار مشکل می‌کند. ضریب مقاومت ۰/۳ توصیه می‌شود که بر مبنای سطح جلویی هر یک از دکل‌ها می‌باشد.

تخمین پیشرانش

الف) تخمین اولیه ضریب پیشرانش (در حالت غوطه‌وری)

تأثیر متقابل پروانه و بدنه بر یکدیگر مستلزم این است که طراحی قسمت پاشنه زیردریایی و طراحی پروانه به صورت همزمان انجام شود. بررسی اثرات چاقی قسمت پاشنه و قطر پروانه، نشان داده است که چگونه اجزاء بازدهی بدنه و ضریب پیشرانش تغییر می‌کنند. افزایش چاقی پاشنه باعث افزایش مقاومت و اثر ویک می‌شود. این افزایش ویک می‌تواند برای افزایش بازدهی بدنه استفاده شود.

شکل پاشنه چاق قطعاً دارای مضراتی از نظر کارآیی سکان و سطوح کنترلی عقب دارد، بخصوص اگر دارای قیود و تکیه‌گاه پهن باشند. افزایش قطر پروانه باعث بهبود بازدهی پیشرانش می‌گردد. هر چه نسبت قطر پروانه به قطر بدنه افزایش یابد، میانگین اثر ویک روی پروانه کاهش می‌یابد، بخصوص اگر نوک پره‌ها در بیرون از محدوده ویک کار کند که مستلزم داشتن قطر بزرگ پروانه می‌باشد. ضریب پیشرانش غوطه‌وری برای زیردریایی تک پروانه بین ۰/۷ تا ۰/۸ تغییر می‌کند که وابسته به اندازه نسبی پروانه، شکل پاشنه، تعداد دوران پروانه در دقیقه، عملکرد ماشین‌آلات و طراحی پروانه می‌باشد. در طراحی‌های اخیر، مقدار ۰/۷۵ برای زیردریایی‌های تک پروانه و مقدار ۰/۶۵ برای زیردریایی‌های دارای چندین پروانه، نمی‌تواند چندان برای تخمین قدرت شفت (P_S) نامطلوب باشد.

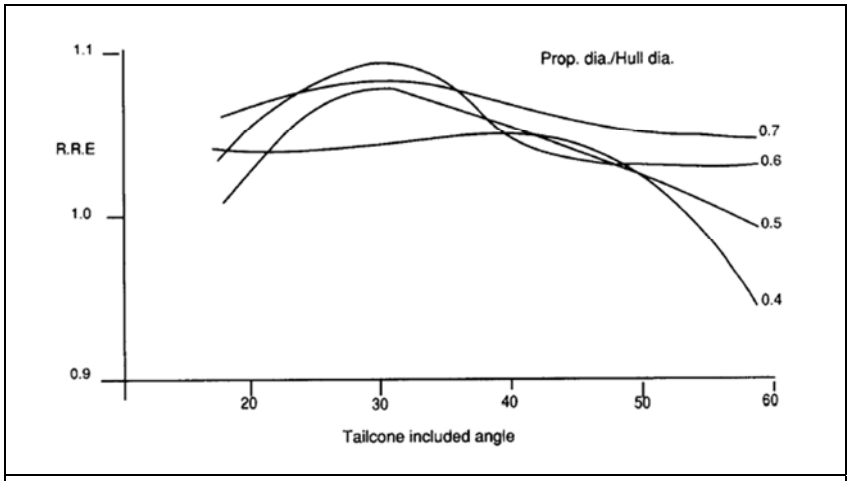
ب) جزئیات بیشتر در تخمین پیشرانش (در حالت غوطه‌وری)

۱- بازدهی پروانه

خصوصیات آب آزاد برای طراحی پروانه ممکن است از مرجع (*AEW 20 inch methodical series*) مشخص شود. پروانه‌هایی که هم اکنون استفاده می‌شود، به مقدار قابل ملاحظه‌ای از نظر تعداد و شکل پره‌ها با پروانه‌های ارائه شده در این سری‌های اطلاعات، متفاوت است و پیشرفت‌هایی برای بهبود وضعیت صدای پروانه به هنگام تولید نیروی پیشرانش انجام شده است. هر چند در ناحیه بدون کاویتاسیون، خصوصیات پیشرانش پروانه‌های مدرن ممکن است شبیه سری‌های اطلاعات (*Series Data*) داده شده فرض شوند. بار وارده بر پره‌های پروانه باید به $\left(KN/m^2\right)$ ۷۰ محدود گردد.

۲- اجزاء بازدهی بدنه :

بازدهی بدنه اصولاً وابسته به شکل قسمت پاشنه و اندازه قطر پروانه نسبت به بدنه است. نمونه‌ای از ویک تیلور (ω_T)، ضریب کاهش تراست (t) و بازدهی دورانی نسبی (η_R) در شکل‌های بالا و ۳-۶۰ آورده شده است.



شکل ۳-۶۰: تغییرات راندمان پروانه

مقادیر ω_T ارائه شده در شکل ۳-۵۵ نمونه‌ای از مقادیر مدل هستند. در مقیاس کامل، مقادیر ویک بعضاً کمتر از مقادیر مدل می‌باشد که نتیجهٔ بخشی از مشکلات موجود برای مقیاس کردن می‌باشد (چرا که لایه‌های مرزی مقیاس نمی‌شوند). کاهش مقادیر ویک مدل به مقدار ۱۲٪ می‌تواند منطقی باشد.

۳- ضریب پیشرانش

ضرایب ایده‌آل آزمایشات که معمولاً مقدار ۹۸٪ برای آن در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه ضریب پیشرانش ممکن است از فرمول زیر ارزیابی گردد:

$$PC = \frac{P_E}{P_S} = \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_O \cdot \eta_S$$

ج) تخمین پیشرانش در سطح آب یا نزدیک سطح آب

اطلاعات کمی در مورد خصوصیات پروانه و اجزاء بازدهی بدنه زیردریایی در عمق تنفس (پریسکوپ) یا در سطح آب، وجود دارد. کاملاً معقولانه است که ضریب پیرانش (P_C) در این حالت از آنچه برای حالت غوطه‌وری تخمین زده شد، کمتر باشد. کاهش به میزان ۷٪ و ۱۴٪ (به ترتیب برای عمق پریسکوپ و سطح آب) نمی‌تواند برای زیردریایی‌های تک پروانه، چندان غیر واقع بینانه باشد.

۲) روش دوم: استفاده از روش منبع [۶]

شرط استفاده از این روش به صورت زیر است:

۱- نسبت طول به قطر بدنه در محدوده زیر باشد:

$$5 \langle \frac{L}{D} \langle 7$$

۲- عمق حرکت زیردریایی بیش از ۵ برابر قطر بدنه باشد:

$$h \geq 5D$$

اگر شروط فوق برقرار بود طی مراحل زیر مقاومت بدنه لخت زیردریایی محاسبه می‌گردد:

۱ - محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی از رابطه *ITTC-57*:

$$C_{Fo} = \frac{0.075}{(\log R_e - 2)^2}$$

۲ - ضریب مقاومت افزوده ناشی از زبری سطح معادل ۵ درصد ضریب مقاومت اصطکاکی:

$$\delta C_F = 0.05\, C_f$$

$$C_F = C_{F\circ} + \delta C_F$$

۳ - محاسبه ضریب شکل *(K)* از رابطه زیر:

$$K = \left(\frac{D}{L}\right) + 1.5\left(\frac{D}{L}\right)^3$$

L: طول زیردریایی و *D*: قطر بدنه زیردریایی

۴ - ضریب مقاومت فشاری (شکلی) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_{VP} = C_{Form} = K.C_{F\circ}$$

۵ - محاسبه ضریب مقاومت کل:

$$C_T = C_F + C_{VP}$$

۶ – محاسبه مقاومت کل بدنه لخت زیردریایی از رابطه زیر: $R_T = \frac{1}{2} C_T \,.\, \rho \,.\, A \,.\, V^2$

که A مساحت سطح خیس است. برای محاسبه مقاومت کلی زیردریایی باید مقاومت ملحقات نیز به مقدار فوق اضافه گردد.

۳) روش سوم: استفاده از اولین روش منبع [۱۱]:

در این روش، مقاومت کلی زیردریایی بر اساس ضریبی از مقاومت اصطکاکی ارائه شده است. با استفاده از مراحل زیر می‌توان به محاسبه پرداخت:

۱ – محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی از *ITTC-57* $C_{Fo} = \frac{0.075}{(\log R_e - 2)^2}$

۲ – محاسبه ضریب مقاومت کل: $C_T = C_F \left(1 + 1.5 \left(\frac{D}{L}\right)^{1.5} + 7 \left(\frac{D}{L}\right)^3\right)$

۳ – محاسبه مقاومت کل بدنه لخت زیردریایی: $R_T = \frac{1}{2} C_T \,.\, \rho \,.\, A \,.\, V^2$

در این رابطه A مساحت سطح خیس است. مقاومت ملحقات باید به مقدار فوق اضافه گردد.

۴) روش چهارم: استفاده از دومین روش منبع [۱۱]:

این روش همانند روش قبل است با این تفاوت که ضریب مقاومت کل بدنه لخت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_T = C_F \left(3 \left(\frac{D}{L}\right) + 4.5 \left(\frac{D}{L}\right)^{0.5} + 21 \left(\frac{D}{L}\right)^2\right)$$

و سپس استفاده از رابطه زیر که در آن S، مساحت مقطع عرضی زیردریایی است: $R_T = \frac{1}{2} C_T \,.\, \rho \,.\, S \,.\, V^2$

۵) روش پنجم: رابطه گیلمر و جانسون

بر طبق رابطه ارائه شده توسط گیلمر و جانسون در سال ۱۹۸۲ مقدار ضریب شکل بدنه لخت زیر دریایی به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$C_T = C_F \left(1 + 0.5 \frac{D}{L} + 3 \left(\frac{D}{L}\right)^{7 - n_f - \frac{n_a}{2}}\right)$$

برای شکل بدنه بر اساس NACA0014 مقادیر N_f=2.25 و n_a=2.75 مناسب می‌باشد.

۶) روش ششم: رابطه دانشگاه MIT

به کمک رابطه ارائه شده توسط دانشگاه MIT مقدار نیروی مقاوم بدنه لخت از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$C_T = C_F \left(1 + 1.5 \frac{D}{L} + 7 \left(\frac{D}{L}\right)^3 + 0.002 \left(C_p - 0.6\right)\right)$$

که $C_p = \frac{V_{env}}{\pi D^2 L / 4}$ ضریب منشوری شکل بدنه شناور می‌باشد و از تحلیل‌های هیدرواستاتیکی بدنه قابل محاسبه می‌باشد که تقریبا برابر ۰/۶۴۴۳ می‌باشد.

مثال) مطلوبست محاسبه مقاومت کل زیرسطحی یک زیردریایی با مشخصات زیر:
طول: ۵۰ متر، قطر۷/۴ متر، آبخور ۴/۵ متر ،تناژ سطحی ۸۰۷ تن، سرعت زیرسطحی ۹ گره، مساحت سطح خیس ۷۳۲ متر مربع.
مقاومت ملحقات و ضمائم بدنه را ٪ ۳۰ مقاومت بدنه لخت در نظر بگیرید.

حل) محاسبه مقاومت به روش اول :

$$R_T = R_{BH} + R_{APP}$$

محاسبه عدد رینولدز $R_n = \frac{VL}{\upsilon} = \frac{(9 \times 0.544) \times 50}{10^{-6}} = 2.313 \times 10^8$

محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی از *ITTC1957*

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2} = 0.0019$$

اکنون C_R+C_A را از شکل (۳–۵۸) تخمین می‌زنیم که برای استفاده از این شکل نیاز به محاسبه C_B داریم:

$$\Delta_{\text{سطحی}}=807\ (ton)$$
$$\Longrightarrow \nabla=\frac{\Delta}{\rho}=\frac{807}{1.025}=787.3\ (m^3)$$
$$C_B=\frac{\nabla}{L.B.T}=\frac{787.3}{50\times 7.14\times 4.5}=0.5$$
$$\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{B}}=\frac{50}{7.14}=7$$

حال با $\frac{L}{B}=7$ و $C_B=0.5$ به سراغ شکل (۳–۵۸) می‌رویم:

$$(C_R+C_A)\times 10^3=0.98 \qquad \Longrightarrow \qquad C_R+C_A=0.98\times 10^{-3}$$

طبق این روش $\frac{1}{8}$ درصد C_{FS} را برای هر روز به مدت ۱۸۰ روز پس از خارج شدن از داک را به میزان C_F اضافه نمود یعنی

$$C_F=C_{FS}+\left(180\times\frac{\frac{1}{8}}{100}C_{FS}\right)$$

ضریب مقاومت کل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_{TBH}=C_F+C_R+C_A$$
$$C_{TBH}=0.0019+0.225+0.0019+0.98\times 10^{-3}=0.0033$$
$$R_{TBH}=0.5\rho S_{wet}.V^2.C_T=26.53(KN)$$

برای محاسبه مقاومت کل باید ۰/۳ مقدار فوق را به آن اضافه نمود.

$$R_T=R_{BH}+R_{APP}=26.53+(0.3\times 26.53)=34.49\ KN$$

روش دوم:

شرط استفاده از این روش این است که $5<\frac{L}{D}<7$ که مشخصات ابعاد این زیردریایی با این شرط سازگار است.

$$\frac{L}{D}=\frac{50}{7.14}=7$$

C_{F0} را در روش قبلی محاسبه نمودیم: $C_{F0}=0.0019$

محاسبه ضریب مقاومت افزوده: $C_F=0.05\mathrm{C_{F0}}=9.5\times 10^{-5}\delta$

$$C_F=C_{F0}+\delta C_F=0.001995$$

محاسبه ضریب شکل : $K=(\frac{D}{L})+1.5(\frac{D}{L})^3$

ضریب مقاومت فشاری: $C_{VB}=C_{Form}=K.C_{F0}=2.796\times 10^{-4}$

ضریب مقاومت کل بدنه لخت: $C_{TBH}=C_F+C_{VP}=0.0022$

محاسبه مقاومت کل بدنه لخت: $R_{TBH}=0.5C_{TBH}.\rho.S_{wet}V^2=18.29\ \ KN$

محاسبه مقاومت کل زیردریا $R_T=R_{BH}+R_{APP}=18.29 + (0.3\times 18.29)=23.78\ \ KN$

روش سوم:

ضریب مقاومت کل $C_T=C_{F0}(1+1.5(D/L)^{1.5}+V(D/L)^3)=0.002$

مقاومت کل بدنه لخت $R_{TBH}=0.5\rho.C_T.S_{wet}.V^2=16.4\ \ KN$

مقاومت کل زیردریایی $R_T=R_{TBH}+R_{APP}=16.4+(0.3\times 16.4)=21.32\ \ KN$

روش چهارم:

ضریب مقاومت کل $C_T=C_F(3(L/D)+4.5(D/L)0.5+21(D/L)2)=0.0428$

در این روش سطح مقطع عرضی ملاک محاسبه بدنه لخت می باشد

$$S_{\text{عرضی}}=\pi\, d2/4=40.04\ \ m^2$$
$$R_{TBH}=0.5\rho S_{\text{عرضی}}.CT.V2=18.84\ \ KN$$
$$R_{\text{کل}}=1.3\times R_{BH}=24.49\ \ KN$$

❖ تخمین مساحت سطوح کنترلی زیردریایی

زیردریایی دارای سه جفت سطوح کنترلی می‌باشد:

۱- سکان: برای مانور در صفحه افقی

۲- بالک پاشنه: برای مانور در صفحه عمودی (تنظیم شیب و عمق)

۳- بالک سینه: برای مانور در صفحه عمودی (تنظیم شیب و عمق)

برای تخمین مساحت سطوح کنترلی از رابطه مقابل استفاده می‌شود که A مساحت یک جفت از سطوح کنترلی است: $A = \frac{L.D}{m}$

برای هریک از سطوح کنترلی، مقدار m به صورت زیر می‌باشد:

سطوح کنترلی	مقدار m
سکان	۳۰/۳
بالک پاشنه	۲۵/۶
بالک سینه	۵۴/۹

جدول ۳-۲۰: ضریب m در هریک از سطوح کنترلی

فاصله تابش خودت را با دیگران تنظیم کن ...

خداوند خورشید را در جایی نهاد که گرم کند؛ ولی نســـــــوزاند ...

بخش سوم :
بازدهی و توان

فصل اول: سیستم رانش[1]

سیستم رانش کشتی از هر نوعی که باشد همانند سایر سیستم‌های رانش دارای بازدهی مشخصی است. به همین دلیل تمام توانی که توسط موتور تولید می‌شود، صرف پیشرانش نمی‌گردد و بخشی از آن سهم تلفات و بازدهی می‌باشد. بازدهی‌های سیستم رانش شناور به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- **بازدهی‌های مکانیکی**: این بازدهی شامل سیستم‌های داخل بدنه و موتورخانه که در مسیر شافت پروانه است، می‌باشد مانند: گیربکس (η_G)، یاتاقان‌های متعدد نگهدارنده شافت (η_B) و آب‌بندی شافت (η_{se}).
- **بازدهی هیدرودینامیکی**: این بازدهی شامل اجزاء بیرون بدنه و مرتبط با آب دریا می‌باشد مانند بازدهی بدنه(η_H)، بازدهی پروانه در آب آزاد (η_o) و بازدهی چرخشی نسبی (η_{RR}).

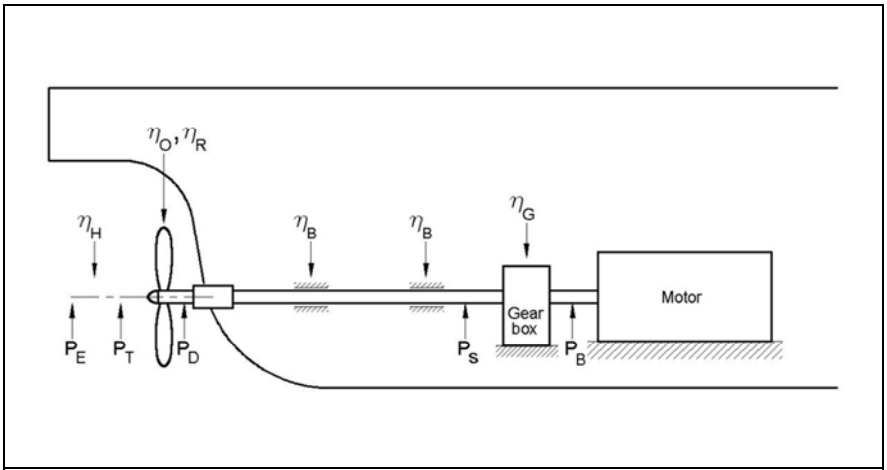
می‌دانیم که بازدهی به طور مستقیم در توان ضرب می‌شود و باعث کاهش آن می‌گردد مثلاً اگر توان موتور شناوری ۱۰۰ کیلووات و بازدهی کل سیستم رانش آن ۸۰ درصد باشد، توان باقی‌مانده برای پیشرانش عبارتست از:

$$P_2 = \eta . P_1 = 0.8 \times 100 = 80 \quad KW$$

معمولاً بازدهی سیستم رانش شناورها با توجه به پارامترهای متعدد زیر بین ۸۵ – ۶۵ درصد است:

۱- تک پروانه یا چند پروانه بودن
۲- وجود یا عدم وجود گیربکس – نسبت تبدیل گیربکس
۳- طول شافت و یاتاقان‌های میانی نگهدارنده شافت
۴- نوع آب‌بند شافت در محل عبور از بدنه
۵- امکان وجود تسمه پولی در مسیر شافت

اگر سیستم رانش شناور، پروانه‌ای نباشد مثلاً واترجت یا الکترومغناطیس باشد، اجزاء بازدهی دیگری در آن دخیل هستند که در اینجا بحث نمی‌شود.



شکل ۳-۶۱: اجزاء بازدهی و توان سیستم رانش

اگر اجزاء سیستم رانش شناور را مطابق شکل ۳-۶۱ در نظر بگیریم، داریم:

توان خالص خروجی از موتور : P_B

1- منابع : [۵ و ۶ و ۴]

توان شافت بعد از عبور از گیربکس: $p_s = \eta_G \cdot p_B$

توان تحویل شده[1] به پشت پروانه: $p_D = \eta_G . \eta_B . \eta_{se} . p_B = \eta_s . p_B$

در این رابطه حاصلضرب کلیه اجزاء بازدهی مکانیکی (η_s)عبارتست از: $\eta_s = \eta_G . \eta_B . \eta_{se}$

توان تراست[2] که عبارتست از توان تولید شده پس از پروانه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$p_T = \eta_o . \eta_R . \eta_s . p_B = \eta_o . \eta_R . \eta_G . \eta_B . \eta_{se} . p_B = \eta_o . \eta_R . p_D$$

همچنین برای p_T داریم: $p_T = T.V_s$ که T نیروی تراست پروانه و V_s سرعت کشتی است.

$$p_E = \eta_H . p_T = \eta_H . \eta_o \eta_R . \eta_G . \eta_B . \eta_{se} . p_B = \eta_p . p_B$$

این توان، توان مؤثر[3] یا توان خالص است که باعث پیشرانش شناور می‌شود به عبارتی توان خالصی است که بر مقاومت غلبه می‌کند و p_E از فرمول زیر نیز بدست می‌آید: $p_E = R.V_A$

(V_A سرعت پیشروی است که در مبحث پروانه توضیح داده می‌شود و $V_A=V_S(1-w)$ و w نیز ضریب ویک است). حاصلضرب بازدهی‌های زیر را بازدهی هیدرودینامیکی (η_{Hyd}) یا بازدهی تحویل‌شده (η_D) گویند:

$$\eta_D = \eta_{Hyd} = \eta_H . \eta_o . \eta_R \qquad \eta_D = \frac{RV_A}{p_D} = \frac{P_E}{P_D}$$

و بازدهی شافت عبارتست از: $\eta_s = \eta_G . \eta_B . \eta_{se}$

بازدهی کل سیستم رانش (η_p) به صورت زیر تعریف می‌شود: $\eta_p = \eta_{Hyd} . \eta_s$

بنابراین خواهیم داشت: $p_B \rangle p_D \rangle p_T \rangle p_E$

❖ توان موتور (P_B)

توان خروجی از موتور را «توان ترمز»[4] گویند و به این صورت تعریف می‌شود که:

«توان مورد نیاز برای متوقف کردن چرخش موتور در محل شافت خروجی موتور[5] بوسیله وسایل هیدرولیک یا پنوماتیک یا الکتریکی». به همین دلیل توان خروجی موتور را «توان ترمز» (P_B) می‌نامند که البته مطلب بالا صرفاً یک تعریف است. در عمل P_B را می‌توان از گشتاور و دور موتور به صورت زیر بدست آورد:

$$P_B = Q.w = Q.\frac{2\pi n}{60}$$

که Q گشتاور موتور بر حسب $(N.m)$ و n چرخش پروانه بر حسب دور بر دقیقه (rpm) است. w نیز سرعت زاویه چرخش موتور است:

$$w = \frac{2\pi n}{60} .$$

اگر بخواهیم n را بر حسب دور بر ثانیه بیان کنیم داریم: $P_B = 2\pi n.Q$

در روابط بالا توان (P_B) بر حسب وات (w) بدست می‌آید. اگر گشتاور بر حسب $(KN.m)$ وارد شود توان هم بر حسب کیلووات (KW) بدست می‌آید.

1- delivered power

2- thrust power

3- Effective power

4- Brake power

5- crank-shaft

مثال) شناوری دارای موتور با گشتاور ۲ KN.m و دور 600rpm است و با سرعت پیشروی ۹/۹ m/s و سرعت کشتی ۱۰m/s حرکت می-کند. بازدهی اجزاء سیستم رانش آن به صورت زیر است:
بازدهی گیربکس ۰/۹۸، دو یاتاقان نگهدارنده هر یک ۰/۹۹، آب‌بند ۰/۹۲، بازدهی آزاد پروانه ۰/۸، بازدهی چرخشی نسبی ۰/۹۸ و بازدهی بدنه ۰/۹۹ می‌باشد.
مطلوبست:
الف) توان خروجی موتور(P_B) **ب) مقدار P_E , P_T , P_D , P_S**
ج) η_D , η_{Hyd} , η_S و بازدهی کل سیستم رانش (η_P) **د) مقاومت و تراست قابل حصول**

حل):

الف)

$$Q = 2 \quad KN.m$$
$$n = 600\ rpm = 10\ rps$$
$$p_B = 2\pi Q.n = 2\pi \times 2 \times 10 = 125.6\ KW$$

ب)

$$p_s = \eta_G . p_B = 0.98 \times 125.6 = 123.1\ KW$$
$$p_D = \eta_G.\eta_B.\eta_{se}.p_B = \eta_B.\eta_{se}.p_s = (0.99 \times 0.99) \times 0.92 \times 123.1 = 110.98\ KW$$
$$p_T = \eta_G . \eta_B . \eta_{se}.\eta_o.\eta_R.p_B = \eta_o.\eta_R.P_D = 87\ KW$$
$$p_E = \eta_H.\eta_o\eta_R.\eta_G.\eta_B.\eta_{se}.p_B = \eta_H.P_T = 0.99 \times 87 = 86.1\ KW$$

ج)

$$\eta_s = \eta_G.\eta_B.\eta_{se} = 0.98 \times (0.99 \times 0.99) \times 0.92 = 0.88 = 88\,\%$$
$$\eta_D = \eta_{Hyd} = \eta_H.\eta_o.\eta_R = 0.99 \times 0.8 \times 0.98 = 0.78 = 78\,\%$$
$$\eta_p = \eta_G.\eta_B.\eta_{se}.\eta_o.\eta_R.\eta_H = \eta_s.\eta_D = 0.68 = 68\,\%$$

د)

$$V_A = 9.9 \quad m/s \qquad V_S = 10 \quad m/s$$
$$P_E = R.V_A \rightarrow R = \frac{P_E}{V_A} = \frac{86.1}{9.9} = 8.69\ KN$$
$$P_T = T.V_S \rightarrow T = \frac{P_T}{V_S} = \frac{87}{10} = 8.7\ KN$$

در مورد تفاوت سرعت کشتی و سرعت پیشروی بعداً بحث می‌شود.

فیثاغورث:
عصبانی شدن، انتقام دیگران را از خود گرفتن است.

فصل دوم: ویک[1]

ماهیت «ویک» همان تغییرات سرعت سیال می‌باشد که می‌تواند عوامل مختلفی داشته باشد. در واقع اگر کشتی با سرعت V_s حرکت کند، سرعت سیالی که وارد پروانه می‌شود برابر V_s نخواهد بود بلکه از آن کمتر است که در مورد علل آن بحث خواهد شد. مقدار «ویک» را با یکی از روابط زیر بیان می‌دارند:

۱- نسبت سرعت

می‌دانیم که یک میدان سرعت سیال از سه مؤلفه سرعت محوری (V_a)، سرعت مماسی (V_t) و سرعت شعاعی (V_r) تشکیل شده است. اگر سرعت شناور V_s باشد داریم: $\frac{V_a}{V_s}, \frac{V_t}{V_s}, \frac{V_r}{V_s}$

که از این بین مؤلفه سرعت محوری که در راستای طولی است، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

۲- ویک تیلور

این ویک بر اساس سرعت محوری سیال رسیده به پروانه (V_a) از این رابطه بدست می‌آید: $w_t = \frac{V_s - V_a}{V_s} = 1 - \frac{V_a}{V_s}$

برای مؤلفه سرعت شعاعی و مماسی که کمتر رایج است داریم:

$$w_{tt} = 1 - \frac{V_t}{V_s}$$

$$w_{tr} = 1 - \frac{V_r}{V_s}$$

۳- ویک فرود

این ویک با رابطه مقابل بیان می‌شود: $w_f = \frac{V_s - V_a}{V_a} = \left(\frac{V_s}{V_a}\right) - 1$

یادآوری می‌شود که ویک فرود و تیلور را می‌توان با رابطه زیر به یکدیگر تبدیل کرد:

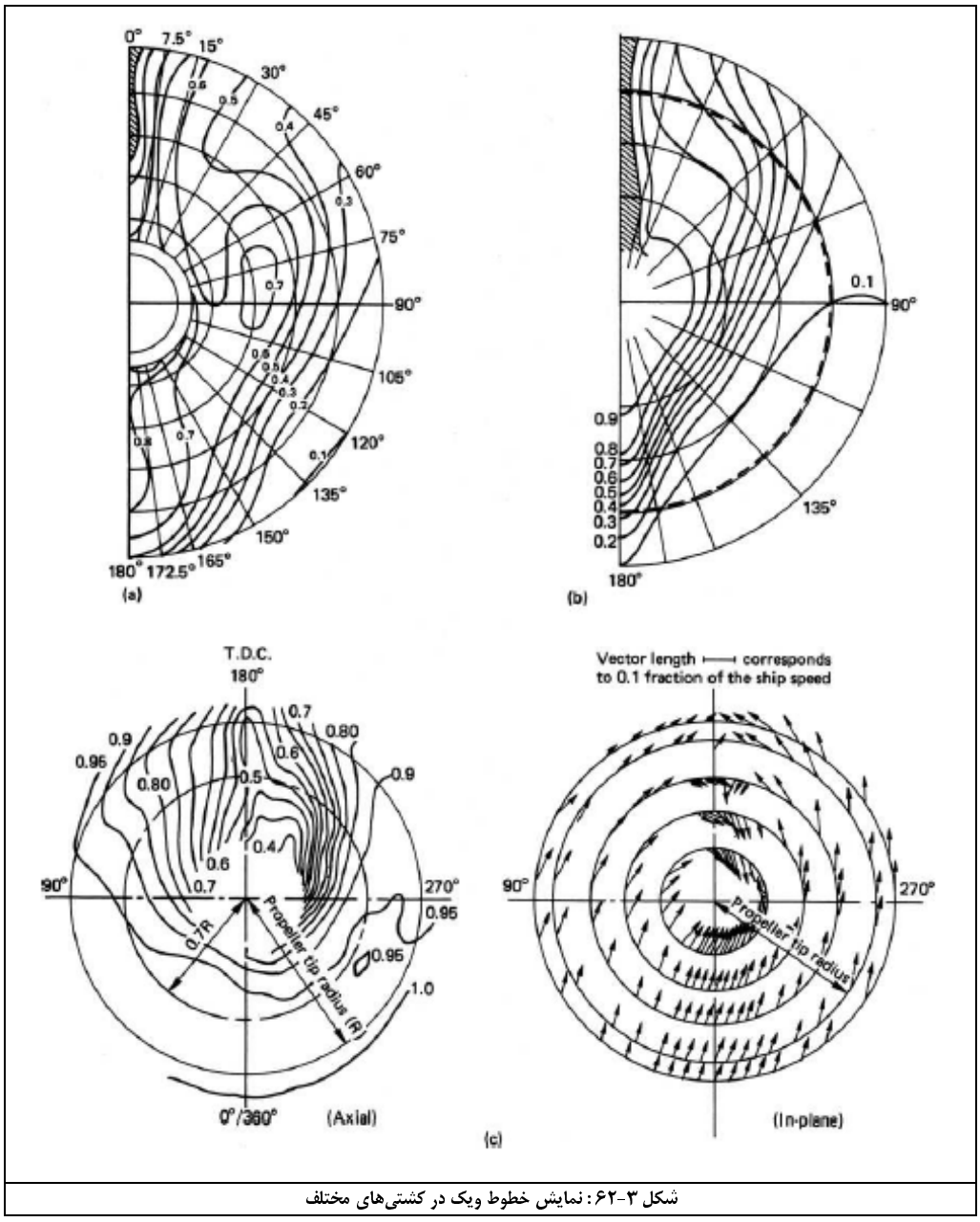
$$w_f = \frac{w_t}{1 - w_t}$$

$$w_t = \frac{w_f}{1 + w_f}$$

❖ خطوط ویک

گفتیم که ویک عبارتست از تغییرات سرعت سیال که این تغییرات در محل صفحه پروانه بسیار اهمیت دارد. تغییرات سرعت سیال ورودی به پروانه در ایجاد نیروی تراست آن بسیار مؤثر است لذا هر چه مقدار ویک کمتر باشد، مناسب‌تر است. شکل ۳-۶۲ نمونه‌هایی از خطوط ویک را برای چند نوع شناور نشان داده است. شکل a خطوط ویک یک شناور با مقطع U شکل و شکل b متعلق به شناوری با مقطع V شکل است. شکل c مربوط به یک شناور است که دارای تکیه‌گاه شافت در پشت پروانه است. اثرات حضور این تکیه‌گاه بر روی خطوط ویک مشهود است. حالت d نیز تغییرات سرعت در شعاع‌های مشخص، نمایش داده شده است. حالت d نشان می‌دهد که هم مقدار و هم جهت سرعت سیال در یک شعاع مشخص، دچار تغییر می‌گردد. در حالات a و b و c خطوطی نمایش داده شده که در این خطوط، مقدار ویک، عددی ثابت است. هر چه به محور پروانه نزدیکتر می‌شویم، مقدار ویک بیشتر می‌شود یعنی تغییرات سرعت بیشتر است و هر چه از محور پروانه دورتر شویم، مقدار ویک کمتر شده و تغییرات سرعت کمتر می‌شود. در واقع هر چه از محور دورتر می‌شویم، سرعت سیال ورودی به پروانه (V_a) به سرعت حرکت شناور (V_s) نزدیکتر می‌شود. مثلاً اگر یک خط ویک با ۰/۶ نشان داده شده باشد، یعنی سرعت سیال ورودی به پروانه ۴۰ درصد سرعت حرکت شناور است و اگر با ۰/۳ نشان داده شده باشد، سرعت سیال ورودی به صفحه پروانه ۷۰ درصد سرعت حرکت شناور است. به مجموعه‌ای از این خطوط، «میدان ویک» گویند.

1 - wake



شکل ۳-۶۲: نمایش خطوط ویک در کشتی‌های مختلف

❖ سرعت میانگین یا کسر ویک

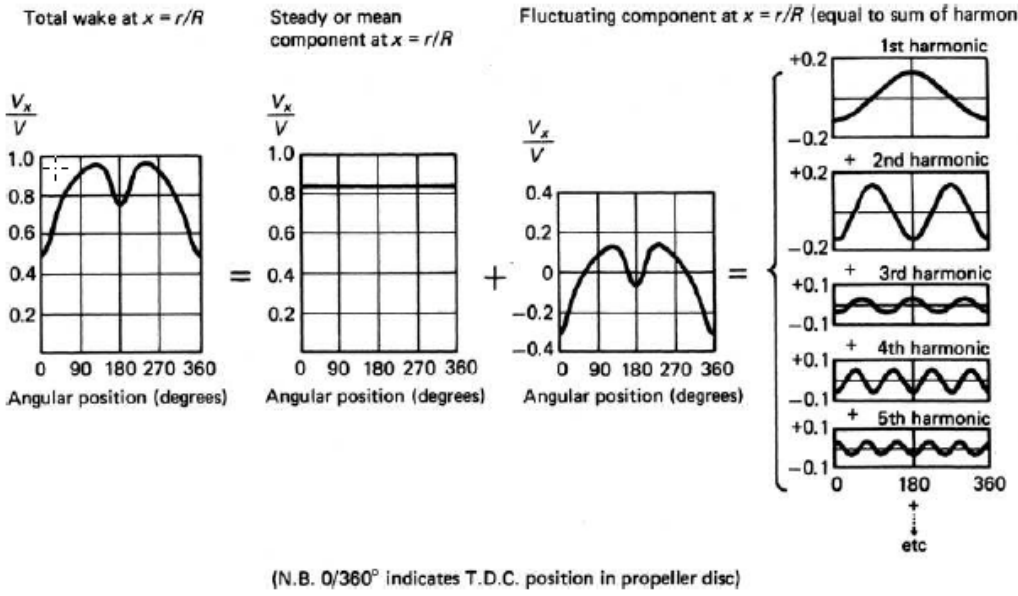
سرعت محوری متوسط در صفحه پروانه را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\overline{W_T} = \frac{\int_{r_h}^{R} r \int_0^{2\pi} w_T \,]d\Phi dr}{\pi\left(R^2 - r_h^2\right)}$$

$$\left(\frac{\overline{\upsilon_a}}{V_s}\right) = \frac{\int_{r_h}^{R} r \int_0^{2\pi} \left(\frac{\upsilon_a}{V_s}\right) d\Phi dr}{\pi\left(R^2 - r_h^2\right)}$$

❖ تحلیل فوریه از میدان ویک

می‌دانیم که مقدار ویک در یک شعاع مشخص، در زوایای مختلف (از صفر تا ۳۶۰ درجه) فرق می‌کند. این تغییرات را می‌توان بوسیله سری‌هایی از فوریه بیان کرد (شکل ۳-۶۳).



شکل ۳-۶۳ : بررسی میدان ویک با استفاده از سری فوریه

❖ علل ایجاد ویک و تعریف ویک نامی

میدان ویک نامی، میدانی است که بدون حضور و تأثیر پروانه در جریان پشت بدنه تعریف می‌شود. میدان ویک نامی ناشی از سه علت اصلی می‌تواند باشد: ویک پتانسیل، ویک اصطکاکی و ویک موج.

$$\{w_n\} = \{w_p\} + \{w_v\} + \{w_w\} + \{\Delta w\}$$

که $\{\Delta w\}$ لحاظ‌کننده اثرات متقابل این اجزاء بر یکدیگر است. این علل را می‌توان به صورت زیر توضیح داد:

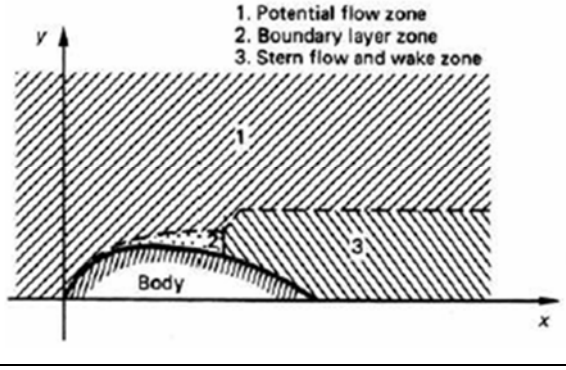
۱- ویک پتانسیل[1]

اگر شناور در یک سیال ایده‌آل و بدون ویسکوزیته حرکت کند، سیال اطراف آن دچار تغییر سرعت می‌شود. در ویک پتانسیل فرق نمی‌کند که کشتی رو به عقب حرکت کند یا رو به جلو. در واقع شکل بدنه اثری بر این ویک ندارد. برای محاسبه این میدان ویک، می‌توان یک مدل شناور را ساخت و آن را به سمت عقب حرکت داد، در اینصورت اثر ویسکوزیته در پروانه کمترین مقدار خواهد بود. به طور کلی، ویک پتانسیل نسبت به کل میدان ویک، مقدار ناچیزی است.

۲- ویک اصطکاکی[2]

ویک اصطکاکی، لحاظ‌کننده اثر ویسکوزیته بر کاهش سرعت سیال اطراف بدنه است که البته وابسته به وضعیت لایه مرزی است. مطابق شکل ۳-۶۴ می‌توان سه ناحیه برای حرکت بدنه در سیال ویسکوز در نظر گرفت:

1 - potential wake
2 - frictional wake



شکل ۳-۶۴ : سه ناحیه مختلف در محدوده ویک

۱- ناحیه دور از لایه مرزی که به «منطقه پتانسیل» معروف است (و در قسمت قبل بیان شد).

۲- ناحیه منطقه لایه مرزی

۳- ناحیه پائین دست پس از لایه مرزی که به ناحیه ویک پاشنه معروف است.

در واقع ناحیه ۲ و ۳ مربوط به اثرات لزجت بر تغییرات سرعت سیال است.

۳- ویک موج[1]

ویک موج بیان‌کننده اثرات امواج تولید شده توسط بدنه بر تغییرات سرعت سیال اطراف بدنه است. بدین ترتیب ویک موج وابسته به عدد فرود و موج‌سازی بدنه است. می‌دانیم که در یک موج کامل، در هر نیم سیکل، جهت حرکت ذرات موج برعکس می‌شود و این بر سرعت جریان سیال ورودی به پروانه بسیار مؤثر است.

❖ میدان ویک مؤثر

در میدان ویک‌نامی، فرض بر غیرچرخشی بودن جریان است اما پروانه در جایی کار می‌کند که این فرض نادرست است. در عمل باید تأثیر متقابل پروانه و بدنه را نیز در نظر گرفت.

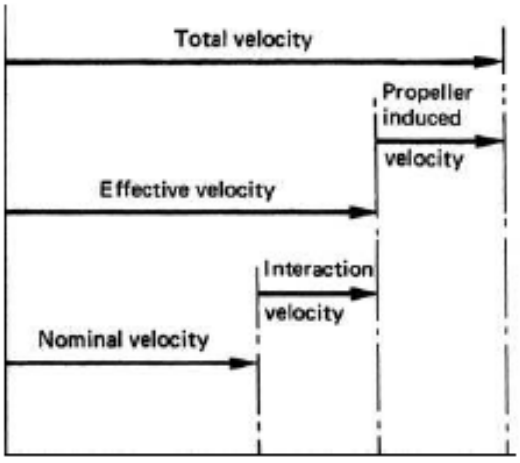
اثر متقابل سرعت + سرعت نامی = سرعت مؤثر

سرعت ناشی از حضور پروانه − سرعت کل = سرعت مؤثر

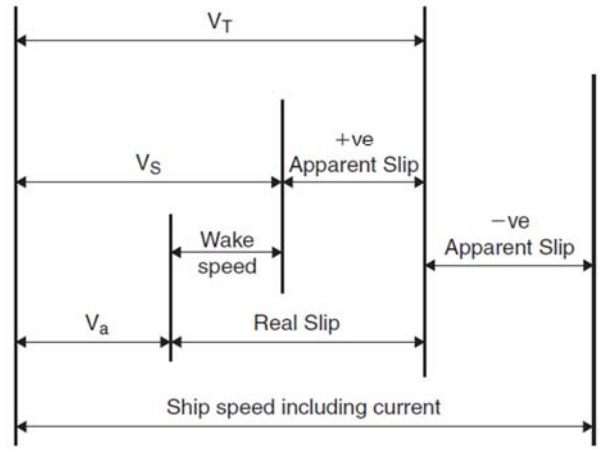
این مورد را می‌توان مطابق شکل ۳-۶۵ ملاحظه کرد.

❖ تعاریف مختلف سرعت

مطابق شکل ۳-۶۶ سرعت‌های مختلفی از نظر هیدرودینامیکی تعریف می‌شود که عبارتند از:



شکل ۳-۶۵ : تقسیم‌بندی‌های ویک



شکل ۳-۶۶: تعاریف مختلف سرعت

1 - wave wake

الف) سرعت تئوری (V_T)

ایده‌آل‌ترین و بیشترین سرعتی که کشتی می‌تواند به آن برسد بدون لحاظ شدن سر خوردن پروانه در داخل سیال. در این حالت پروانه در داخل یک سیال با سرعت اولیه مشخص کار می‌کند. این سرعت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_T = propeller\quad pitch(p) \times propeller\quad revolutions(N) \times \frac{60}{1852}$$

$$V_T = P \times N \times \frac{60}{1852} = \frac{P \times N}{30.867}\, kt$$

عدد ۱۸۵۲ برای تبدیل سرعت گره به m/hr است (1 knot= 1852 m/hr). اگر سرعت بر حسب m/s مد نظر باشد عدد ۱۸۵۲ از مخرج حذف می‌شود.

ب) سرعت حرکت کشتی (V_S)

در این حالت مقدار سر خوردن پروانه لحاظ می‌شود و پروانه در داخل یک سیال ساکن کار می‌کند. این در حالی است که پروانه همواره در معرض حرکت اولیه سیال است. لذا سرعت V_S از V_T اغلب کمتر است. در مشخصات فنی کشتی معمولا V_S به عنوان مشخصه سرعت کشتی بیان می‌گردد.

ج) سرعت پیشروی کشتی (V_A)

در این حالت، اثرات نامطلوب تغییرات سرعت (ویک) روی کارکرد پروانه لحاظ می‌شود لذا سرعت V_A از V_S کمتر خواهد شد. با توجه به تعاریف مختلف سرعت می‌توان تعاریف زیر را برای سر خوردن (*slip*) شناور در نظر گرفت:

سر خوردن تئوری: $\text{Apparent Slip} = (V_T - V_S) \quad kt$

نسبت سر خوردن: $\text{Apparent Slip ratio} = \frac{V_T - V_S}{V_T}$

سر خوردن واقعی: $\text{Real Slip} = (V_T - V_a) \quad kt$

نسبت سر خوردن واقعی: $\text{Real Slip ratio} = \frac{V_T - V_a}{V_T}$

سرعت ویک: برابر است با اختلاف سرعت حرکت کشتی با سرعت پیشروی

$$\text{Wake speed} = (V_S - V_a) \quad kt$$

نسبت سرعت ویک نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{Wake speed fraction} = W_t = \frac{V_S - V_a}{V_S}$$

مثال) پروانه یک کشتی در دور ۱۲۰ rpm با گام ۴/۵ متر کار می‌کند. سرعت حرکت کشتی ۱۵/۵ گره و ضریب بلوکی کشتی ۰/۷۲۶ است. سرعتهای مختلف شناور و مقادیر مختلف سر خوردن آن را محاسبه کنید؟

$$V_T = \frac{P \times N}{30.866} = \frac{4.5 \times 120}{30.867} = 17.49 \quad kt$$

$$\text{Apparent Slip} = V_T - V_S = 17.49 - 15.50 = 1.99 \quad kt$$

$$\text{Apparent Slip ratio} = \frac{V_T - V_S}{V_T}$$

$$W_t = (C_B/2) - 0.05 = (0.726/2) - 0.05 = 0.313$$

$$W_t = \text{Wake speed fraction} = w_t = \frac{V_S - V_a}{V_S} = 0.313$$

$$0.313 = \frac{15.50 - V_a}{15.50} \qquad V_a = 10.65\, kt$$

$$\text{Real Slip} = V_T - V_a = 17.49 - 10.65 = 6.84 \quad kt$$

$$\text{Real Slip ratio} = \frac{V_T - V_a}{V_T} = \frac{17.49 - 10.65}{17.49} = +0.3911 = +39.11\%$$

$$\text{Wake speed} = V_S - V_a = 15.50 - 10.65 = 4.85 \quad kt$$

❖ روش‌های مختلف محاسبه ویک

۱) تخمین ویک: یک شیوه مناسب برای تعیین میدان ویک (که البته برای محاسبه ضریب کاهش تراست هم استفاده می‌شود)، استفاده از رابطه زیر است:

$$\left.\begin{aligned} \bar{w}_a &= w_1 + w_2 + w_3 \\ t &= t_1 + t_2 + t_3 \end{aligned}\right\}$$

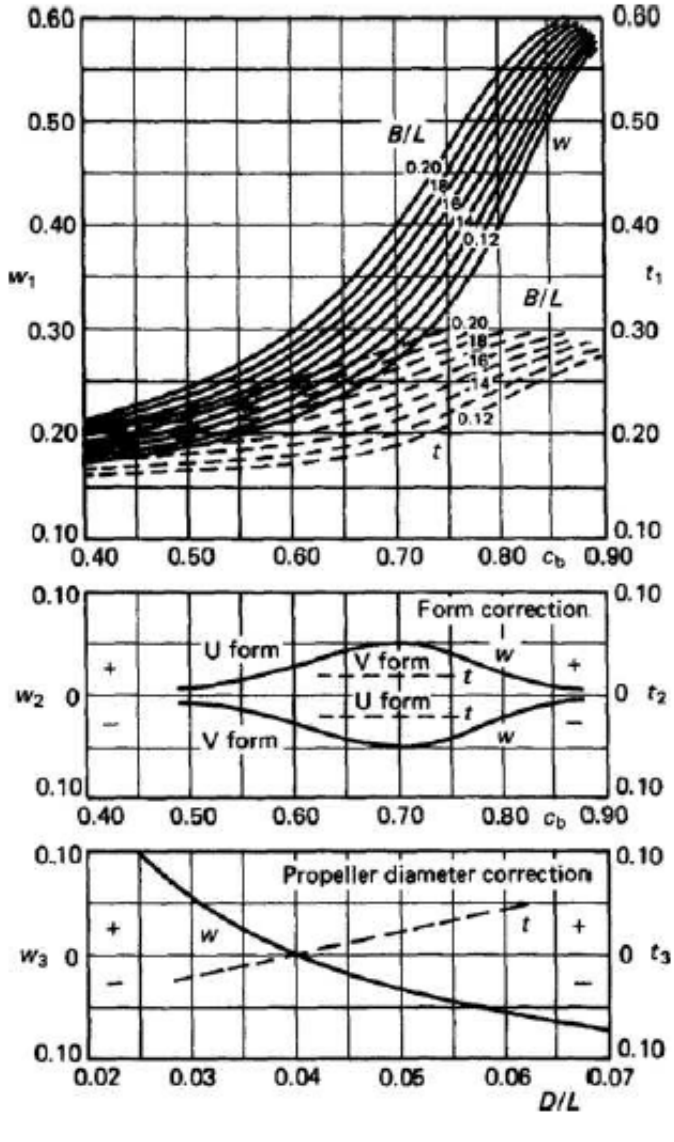
که:

w_1 , t_1 : تابعی از نسبت $\frac{B}{L}$

w_2 , t_2 : تابعی از ضریب بلوکی بدنه (C_B) است (U شکل یا V شکل)

w_3 , t_3 : اثر اصلاحی قطر پروانه

این مقادیر از نمودارهای شکل ۳-۶۷ بدست می‌آیند.



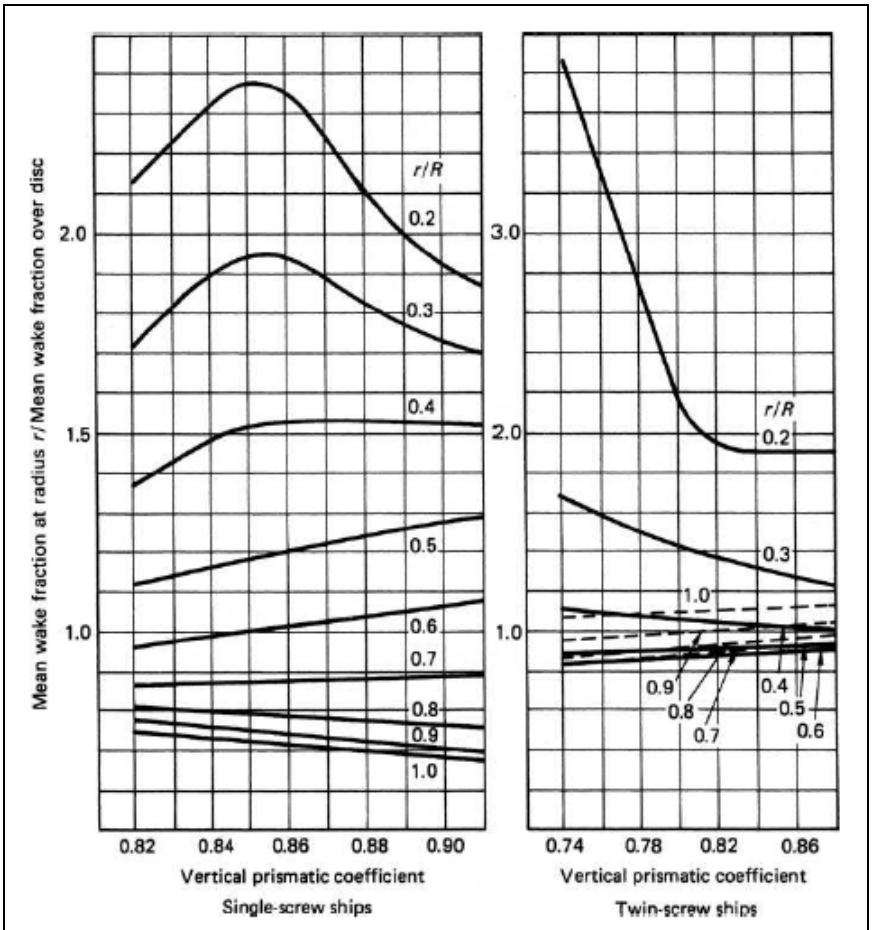
شکل ۳-۶۷: نمودارهای محاسبه ویک

۲) روش هولتروپ: این روش در قسمت دیگری به طور کامل توضیح داده شده است.

۳) نمودارهای ون‌لم[1] :

1 - Van lam

این نمودارها ارائه‌کننده مقادیر متوسط ویک در شعاع‌های مختلف است که برای کشتی‌های تک پروانه و دو پروانه و بر حسب ضریب منشوری عمودی ارائه شده است (شکل ۳-۶۸).

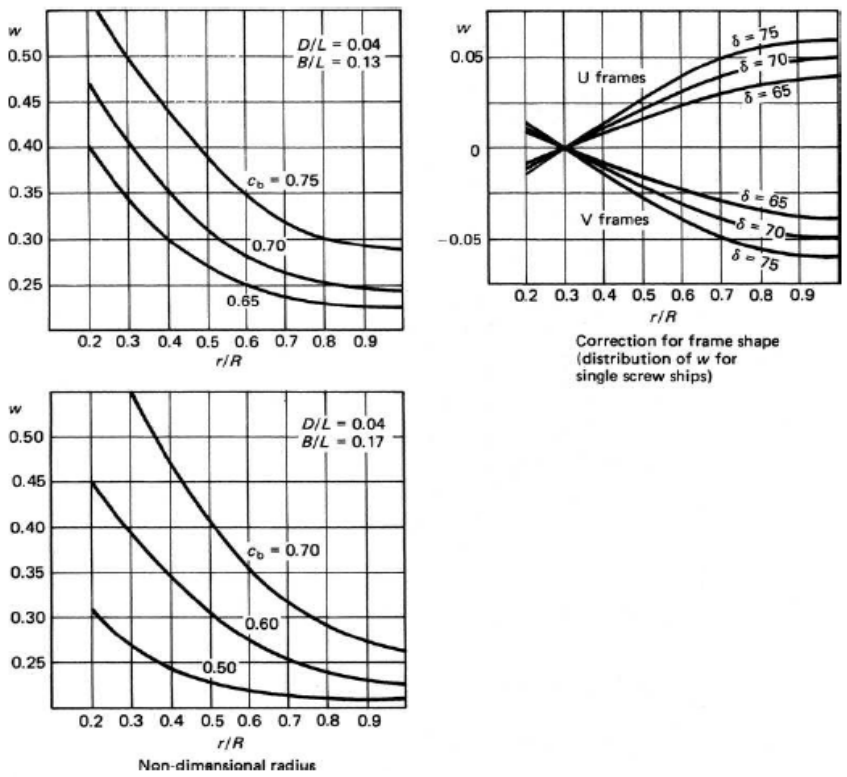


شکل ۳-۶۸: نمودارهای ون‌لم در محاسبه ویک

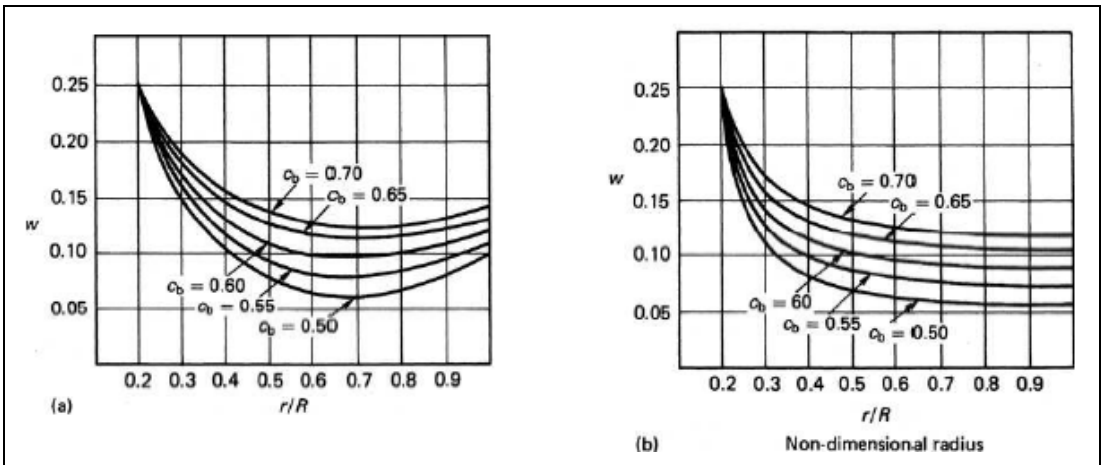
۴) روش هاروارد[1] :

این روش با استفاده از ضریب بلوکی و نسبت‌های مختلف r/R مقدار ضریب ویک را برای کشتی‌های تک پروانه و دو پروانه ارائه می‌کند. هاروارد توجه زیادی به تعمیم نتایج بین مدل و کشتی واقعی کرد. شکل ۳-۶۹ مربوط به کشتی‌های تک‌پروانه با $\frac{D}{L}=0.04$ است. شکل ۳-۷۰ نیز مربوط به کشتی‌های دوپروانه است.

1 - Harvard



شکل ۳-۶۹: تغییرات ضریب ویک برای شناوری تک پروانه با D/L=0.04



شکل ۳-۷۰: تغییرات ضریب ویک برای(a) یک مدل باD/L=0.03
(b)برای شناورهای دو پروانه با D/L=0.03

❖ سایر روابط تجربی محاسبه ویک

روابط زیر برای کشتی‌های تک‌پروانه دارای حبابی پاشنه ارائه شده است:

$$w = 0.5 \cdot C_P \cdot \frac{1.6}{1 + D_P/T} \cdot \frac{16}{10 + L/B}$$

$$w = 0.75 \cdot C_B - 0.24, \text{ Krüger (1976)}$$
$$w = 0.7 \cdot C_P - 0.18, \text{ Heckscher for cargo ships}$$
$$w = 0.77 \cdot C_P - 0.28, \text{ Heckscher for trawlers}$$
$$w = 0.25 + 2.5(C_B - 0.6)^2, \text{ Troost for cargo ships}$$
$$w = 0.5 \cdot C_B, \text{ Troost for coastal feeders}$$
$$w = C_B/3 + 0.01, \text{ Caldwell for tugs with } 0.47 \le C_B \le 0.56$$
$$w = 0.165 \cdot C_B \cdot (\nabla^{1/3}/D_P) - 0.1 \cdot (F_n - 0.2), \text{ Papmehl}$$
$$w = \frac{3}{1-(C_P/C_{WP})^2} \cdot \frac{B}{L} \cdot \frac{E}{T} \cdot \left(1 - \frac{1.5 \cdot D + (\varepsilon + r)}{B}\right), \text{ Telfer for cargo ships}$$

ε زاویه اسکیو بر حسب رادیان، r زاویه ویک بر حسب رادیان، E فاصله شافت تا کیل است.

روابط زیر نیز برای کشتی‌های دوپروانه ارائه شده است:

$$w = 0.81 C_B - 0.34 \qquad (Kruger - 1976 - C \arg o \; ship)$$
$$w = 0.7 C_B - 0.3 \qquad (Heckscher - C \arg o \; ship)$$
$$w = C_B / 3 - 0.03 \qquad (Caldwell - for \; tugs \; with \; 0.47 < C_B < 0.56)$$

روش هولتروپ نیز به صورت زیر است:

کشتی‌های تک‌پروانه: $w = 0.3 C_B + 10 C_V C_B - 0.1$

کشتی‌های دوپروانه: $w = 0.3095 \; C_B + 10 C_V C_B - \frac{0.23 D}{\sqrt{BT}}$

پارامترهای موجود در این روش به طور کامل در قسمت دیگری ارائه شده است. مقادیر تقریبی ویک برای کشتی‌های مختلف در جدول ۳-۲۱ ارائه شده است:

Ship type	*Typical C_B, when fully loaded*	*Approximate W_t*
Supertankers	0.825	0.363
Oil Tankers	0.800	0.350
Large Bulk Carriers	0.825	0.363
Small Bulk Carriers	0.775	0.338
General Cargo ships	0.700	0.300
Passenger Liners	0.625	0.263
Container ships	0.575	0.238

جدول ۳-۲۱: مقادیر تقریبی ویک در کشتی‌های مختلف

❖ سرعت پیشروی[1] (V_A)

با لحاظ کردن اثرات ویک بدنه روی سرعت سیال اطراف بدنه یا به عبارتی روی سرعت حرکت کشتی (V_S)، سرعت پیشروی (V_A) بدست می‌آید:

$$V_A = V_S (1 - w)$$

کاربرد سرعت پیشروی در محاسبه توان مؤثر (P_E) است:

$$P_E = R.V_A$$

1 - Advance Speed

فصل سوم: ضریب کاهش تراست[1] (t)

ضریب کاهش تراست *(t)* بیان‌کننده افزایش مقاومت ناشی از حضور خود پروانه به دو صورت اصلی است:

۱) افزایش سرعت در قسمت عقب بدلیل مکش پروانه و افزایش مقاومت موضعی آن قسمت

۲) کاهش فشار در پاشنه و افزایش مقاومت فشاری

ضریب کاهش تراست از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$t = \frac{T - R}{T}$$

$$T = \frac{R}{1 - t}$$

بدین ترتیب برای غلبه بر مقاومت بدنه (R)، باید نیروی تراست بیشتری تولید کرد $\left(T = \frac{R}{1-t}\right)$.

این در حالی بود که در گذشته فرض کردیم اگر یک کشتی با سرعت ثابت V حرکت کند، مقاومت و تراست با هم برابر هستند *(R=T)*، در حالی که با توجه به مفهوم ضریب کاهش تراست، این تساوی درست و برقرار نیست.

❖ محاسبه ضریب کاهش تراست

روابط زیر برای کشتی‌های تک‌پروانه به صورت زیر ارائه می‌شود:

$t = 0.5 \cdot C_P - 0.12$, Heckscher for cargo ships

$t = 0.77 \cdot C_P - 0.30$, Heckscher for trawlers

$t = 0.5 \cdot C_B - 0.15$, Danckwardt for cargo ships

$t = w \cdot (1.57 - 2.3 \cdot C_B/C_{WP} + 1.5 \cdot C_B)$, SSPA for cargo ships

$t = 0.001979 \cdot L/(B(1 - C_P)) + 1.0585 \cdot B/L - 0.00524 - 0.1418D^2/(BT)$, Holtrop and Mennen (1978)

برای کشتی‌های دو پروانه نیز روابط زیر ارائه می‌شود:

$t = 0.5 \cdot C_P - 0.18$, Heckscher for cargo ships

$t = 0.52 \cdot C_B - 0.18$, Danckwardt for cargo ships

$t = w \cdot (1.67 - 2.3 \cdot C_B/C_{WP} + 1.5 \cdot C_B)$, SSPA for cargo ships

$t = 0.325 \cdot C_B - 0.1885 \cdot D_P/\sqrt{B \cdot T}$, Holtrop and Mennen (1978)

همچنین *Alet* و *Baur* نیز در سال ۱۹۸۶ رابطه زیر را بین t و w ارائه کردند:

$$(1 - t) = (1 - w)^{0.4-0.8}$$

محدوده توان ۰/۴ – ۰/۸ بیان‌گر تقریب محاسبه است. میزان خطا در محاسبه t ممکن است زیاد باشد در حالی که ویک به طور دقیق‌تری محاسبه می‌شود. لذا بهتر است ابتدا ویک را محاسبه کرد و سپس از رابطه بالا برای محاسبه محدوده t استفاده کرد.

1 - thrust Reduction factor

فصل چهارم: محاسبه اجزاء بازدهی سیستم رانش [۱]

گفتیم که دو تقسیم‌بندی کلی برای بازدهی سیستم رانش می‌توان در نظر گرفت:

الف) بازدهی مکانیکی: شامل بازدهی گیربکس، یاتاقان و آب‌بند

ب) بازدهی هیدرودینامیکی: شامل بازدهی پروانه در آب آزاد، بازدهی چرخشی نسبی پروانه و بازدهی بدنه است که برای هر یک از این موارد داریم:

۱) بازدهی پروانه در آب آزاد [۲]

وقتی پروانه در پشت بدنه قرار ندارد و اثرات بدنه بر پروانه تأثیرگذار نیست، در این حالت به بازدهی پروانه، بازدهی در آب آزاد گویند (η_o). این بازدهی مربوط به خصوصیات پروانه است که در بخش پروانه بدان اشاره خواهد شد و معمولاً این بازدهی کوچکتر از ۸۵٪ است.

۲) بازدهی چرخشی نسبی پروانه [۳] (η_R)

این بازدهی عبارتست از تفاوت کارکرد پروانه در پشت بدنه کشتی به کارکرد پروانه در آب آزاد (از آزمایش مدل) که می‌تواند شامل اثر سکان نیز باشد. بازدهی چرخشی نسبی ممکن است بزرگتر از ۱ باشد: $\eta_R = 1 \pm 0.05$.

Alte و *Baur* در سال ۱۹۸۶، مقدار η_R را برای شناورهای تک‌پروانه برابر ۱ و برای کشتی‌های دو پروانه برابر ۰/۹۸ اعلام کردند.

در روش هولتروپ [۴] داریم:

برای شناورهای تک‌پروانه:

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908 \cdot A_E/A_0 + 0.07424 \cdot (C_P - 0.0225 \cdot \text{lcb})$$

برای شناورهای دوپروانه:

$$\eta_R = 0.9737 + 0.111 \cdot (C_P - 0.0225 \cdot \text{lcb}) - 0.06325 \cdot P/D_P$$

در این روابط، *Lcb*، موقعیت طولی مرکز بویانسی نسبت به وسط طول آبخور $\left(\frac{L_{WL}}{2}\right)$ و بر حسب درصدی از طول آبخور بیان می‌شود (بنابراین *Lcb* باید به صورت صدم و کوچکتر از ۱ نوشته شود) و $\frac{A_E}{A_o}$ نسبت سطح گسترش یافته پروانه و $\frac{P}{D}$ نسبت گام به قطر پروانه است که در مورد آنها در بخش پروانه بحث خواهد شد.

Helm در سال ۱۹۸۰ رابطه زیر را برای کشتی‌های کوچک بیان کرد:

$$\eta_R = 0.826 + 0.01\frac{L}{\nabla^{1/3}} + 0.02\frac{B}{T} + 0.1 \cdot C_M$$

Jensen در سال ۱۹۹۴ مقدار η_R برای کشتی‌های تک‌پروانه را به صورت زیر بیان کرد: $\eta_R = 1.02 - 1.06$

درباره علت اینکه راندمان چرخشی نسبی می‌تواند بزرگتر از ۱ باشد بعداً بحث خواهد شد.

۳) بازدهی بدنه [۵] (η_H)

بازدهی بدنه بیان‌کننده اثرات بدنه بر پروانه است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_H = \frac{(p_E)\ \text{مؤثر} \quad \text{توان}}{(p_T)\ \text{تراست} \quad \text{توان}} = \frac{R.V_A}{T.V_S} = \frac{T(1-t)V_A}{T.V_A(1-w)} = \frac{1-t}{1-w}$$

در این رابطه V_S سرعت کشتی، V_A سرعت پیشروی، t ضریب کاهش تراست و w ضریب ویک می‌باشد. در برخی موارد بجای بازدهی بدنه به آن «ضریب بدنه» هم می‌گویند چرا که $0.95 < \eta_H < 1.4$ می‌باشد و t و w بیشتر از همه وابسته به شکل بدنه هستند. لذا بازدهی بدنه می‌تواند بزرگتر از ۱ هم باشد. در مورد محاسبه t و w در بخش‌های بعدی بحث می‌شود.

Helm در سال ۱۹۸۰ رابطه زیر را برای کشتی‌های کوچک با زاویه کیل مایل، بیان کرد:

$$\eta_H = 0.895 - \frac{0.0065 \cdot L}{\nabla^{1/3}} - 0.005 \cdot \frac{B}{T} - 0.033 \cdot C_P + 0.2 \cdot C_M + 0.01 \cdot \text{lcb}$$

---

۱ [۴ و ۵ و ۶]

2 - open water efficiency

3 - Relative Rotative Efficiency

4 - Holtrop

5 - Hull Efficiency

Lcb مرکز طولی بویانسی نسبت به وسط طول خط آبخور بر حسب درصد است. محدوده اعتبار این رابطه به صورت زیر است:

$$3.5 \le \frac{L}{\nabla^{\frac{1}{3}}} \le 5.5$$

$$0.53 \le C_P \le 0.71 \qquad 2.25 \le \frac{B}{T} \le 4.5$$

$$0.6 \le C_M \le 0.89 \qquad D_P = 0.75T$$

که T آبخور، D_P قطر پروانه و زاویه شیب کیل به اندازه ۴۰ درصد آبخور است.

مثال) برای شناوری که با سرعت (Knots) 21 از یک پروانه‌ای که در جریان غیریکنواخت ویک با ضریب 0.1 کار می‌کند در صورتی کـه مقاومـت مـؤثر شناور در این سرعت (KN) 400 و نیروی تراست مورد نیاز (KN) 450 باشد، مقدار راندمان بدنه η_H را محاسبه کنید.

$$T = 450kN \qquad R = 400kN \qquad w = 0.1$$

$$\eta_H = \frac{R \times V_a}{T \times V_s} = \frac{1-t}{1-w} \qquad t = \frac{T-R}{T} = \frac{450-400}{450} = \frac{1}{9}$$

$$\eta_H = \frac{1-1/9}{1-0.1} \cong 0.9$$

۴) بازدهی تحویل‌شده (η_D):

قبلاً بازدهی تحویل‌شده به صورت زیر تعریف شد:

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_o \cdot \eta_R$$

مقدار این بازدهی در محدوده زیر است:

کشتی‌های تجاری $\eta_D = 0.6 \sim 0.7$

یدک‌کش‌ها $\eta_D = 0.4 \sim 0.6$

Danckward در سال ۱۹۶۵ رابطه زیر را ارائه کرد:

$$\eta_D = 0.836 - 0.000165 \cdot n \cdot \nabla^{1/6}$$

که در این رابطه n، دور پروانه بر حسب *rpm*، ∇ حجم جابجایی بدنه بر حسب m^3 است. خطای این رابطه $\pm 10\ \%$ است و البته برای نیمی از کشتی‌ها دارای خطای٪ ۲/۵ $\pm$ است.

Keller نیز رابطه زیر را ارائه کرد:

$$\eta_D = 0.885 - 0.00012 \cdot n \cdot \sqrt{L_{pp}}$$

HSVA رابطه زیر را برای کشتی‌های دو پروانه در سال ۱۹۵۷ ارائه کرد:

$$\eta_D = 0.69 - 12000 \cdot \left(0.041 - \frac{V_s}{n \cdot D_P}\right)^3 \pm 0.02$$

در این رابطه V_S، سرعت کشتی بر حسب گره، D_P قطر پروانه برحسب متر و $0.016 \le \frac{V_S}{n.D_P} \le 0.04$ است.

امام صادق (ع):

بهترین دوست تو آنکس است که عیب تو را نزد تو هدیه دهد.

فصل پنجم: نسبت توان با سرعت

می‌دانیم که مقاومت از رابطه زیر بدست می‌آید: $R = \frac{1}{2} C \rho A V^2$

یعنی $R \propto V^2$. از طرفی برای محاسبه توان مؤثر داریم: $P = R.V$

با جاگذاری تناسب قبل بجای R داریم: $P \propto V^2 . V \propto V^3$

این تناسب مفهوم بسیار مهمی در مبحث توان مورد نیاز برای رسیدن به یک سرعت مشخص و نقش سرعت در توان دارد که درمثال زیر روشن می‌شود.

مثال) شناوری با توان مؤثر ۱۰۰ کیلو وات با سرعت ۶ گره حرکت می‌کند. اگر این شناور بخواهد به سرعت ۱۲ گره برسد، چه توانی را باید صرف کند.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 \qquad \frac{P_2}{100} = \left(\frac{12}{6}\right)^3 = (2)^3 \qquad P_2 = 8 \times 100 = 800\,KW$$

یعنی به ازای ۲ برابر شدن سرعت، باید توان مورد نیاز ۸ برابر شود. همچنین اگر سرعت بخواهد ۳ برابر شود، توان باید ۲۷ برابر شود!! در این مثال نقش منحصربفرد سرعت (با توان۳) بر توان شناور واضح و مشخص است. مهندسان و طراحان باید به این نکته توجه کافی داشته باشند.

از جدول۳-۲۲ می‌توان برای تخمین سریع و درک بهتر موضوع استفاده کرد:

چند برابر شدن سرعت	چند برابر شدن توان
۱/۱	۱/۳
۱/۲	۱/۷
۱/۳	۲/۲
۱/۴	۲/۷۵
۱/۵	۳/۴
۲	۸
۳	۲۷

جدول ۳-۲۲: تناسب سرعت و توان

مثال) شناوری با قدرت موثر 950hp دارای سرعت ۵۰ گره است. اگر قدرت موثر به 1200hp افزایش یابد مقدار مقاومت قبلی و جدید و سرعت جدید شناور را محاسبه کنید. (فرض کنید راندمان‌های پروانه و سیستم رانش ثابت باقی بمانند).

راه حل اول:

$$P_1 = 950\,hp \qquad V = 50\,konts \qquad P_2 = 1200\,hp$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 \qquad \frac{1200}{950} = \left(\frac{V_2}{50}\right)^3 \qquad V_2 \cong 54\,knots$$

راه حل دوم:

$$P_1 = R_1 V_1 \qquad 950 = R_1 \times 50 \qquad R_1 = 19$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{0.5\rho A V_2^{\,2}.C_D}{0.5\rho A V_1^{\,2}.C_D} = \frac{V_2^2}{V_1^1} \Rightarrow R_2 = R_1\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2$$

$$P_2 = R_2 V_2 \qquad 1200 = R_1\left(\frac{V_2}{50}\right)^2 V_2 \quad \Rightarrow \quad V_2 \cong 54\ knots$$

حال اگر سهم مقاومت موج‌سازی در مقاومت کل زیاد باشد، مبحث فوق تا حدودی متفاوت خواهد شد. در قسمت مقاومت موج‌سازی رابطه زیر برای مقاومت موج‌سازی ارائه شد:

$$R_w = \frac{1}{2}\pi\rho V^2 \int_{\frac{-\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |A(\theta)|^2 Cos^{\,3}\theta d\theta$$

در این رابطه $A(\theta)$ دامنه موج می‌باشد که با توان ۲ در انتگرال مؤثر است. بنابراین مطابق این فرمول داریم: $R_W \propto V^2 A^2$. از طرفی از خصوصیات امواج ثقلی داریم $A \sim V$ (A حداقل با توان ۱ با V متناسب است) یعنی در مجموع می‌توان گفت: $R_W \propto V^4$ (یا توان‌های بالاتری از V). *یعنی مقاومت موج‌سازی می‌تواند با توان ۴ سرعت حرکت شناور متناسب باشد.* از طرفی می‌دانیم که مقاومت اصطکاکی و ویسکوز فشاری با توان ۲ سرعت متناسب است لذا از اینجا براحتی می‌توان درک نمود که چرا در سرعتهای بالا (اعداد فرود بالا)، مقاومت موج‌سازی بر سایر مؤلفه‌های مقاومت برتری دارد یعنی

اگر سرعت ۲ برابر شود، مقاومت موج‌سازی ۱۶ برابر می‌شود. جدول ۳-۲۳ نشان‌دهنده نحوه افزایش توان (با فرض سهم ۵۰ درصدی مقاومت موج-سازی) است:

چند برابر شدن سرعت	چند برابر شدن مقاومت اصطکاکی و فشاری	چند برابر شدن مقاومت موج‌سازی	چند برابر شدن مقاومت کل	چند برابر شدن توان مورد نیاز موتور
۱/۲	۱/۴۴	۲/۱	۱/۸	۲/۲
۱/۵	۲/۲۵	۵/۱	۳/۷	۵/۵
۲	۴	۱۶	۱۰	۲۰

جدول ۳-۲۳: نحوه تناسب افزایش سرعت با توان

بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که اگر سرعت مورد نیاز ۲ برابر شود، توان مورد نیاز موتور ۲۰ برابر می‌شود!.

❖ رابطه آدمیرالتی برای تخمین مستقیم توان

رابطه آدمیرالتی امکان تخمین توان را بطور مستقیم فراهم می‌کند. رابطه آدمیرالتی به صورت زیر است: $p_B = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}}.V^3}{C}$

که Δ جابجایی شناور بر حسب تن، V سرعت شناور بر حسب گره و C ضریب آدمیرالتی می‌باشد که طبق جدول زیر بدست می‌آید:

general cargo ships	400–600
bulker and tanker	600–750
reefer	550–700
feedership	350–500
warship	150

واحد C نیز $\left(\frac{t^{\frac{2}{3}}.kn^3}{KW}\right)$ می‌باشد. فرض بر این است که ضریب آدمیرالتی برای کشتی‌های مشابه با عدد فرود $\nabla, \frac{\nabla}{L}, C_P, C_B, F_n$ یکسان، عددی ثابت است. رابطه اصلاح‌شده دیگری معروف به آدمیرالتی اصلاح‌شده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_D = \frac{\Delta^{0.567} \cdot V^{3.6}}{C \cdot \eta_D}$$

امام هادی (ع):

تمام خبائث در اتاقی است که کلید آن دروغ است.

بخش چهارم :

بررسی روش انجام آزمایش در حوضچه کشش

فصل اول[1]: آشنایی با آزمایشگاه دریایی

برای انجام فعالیت‌های طراحی مهندسی ۳ روش کلی وجود دارد:

۱- **مدلسازی ریاضی:** که در آن از فرمولهای ریاضی تحلیلی یا تجربی استخراج شده استفاده می‌شود. این روش برای مراحل اولیه طراحی مناسب است چراکه صرفا یک تخمین اولیه ارائه می‌دهد که شاید چندان دقیق هم نباشد.

۲- **مدلسازی عددی:** که مبنای آن روشهای تحلیل عددی است که امروزه به کمک برنامه‌های کامپیوتری انجام می‌شود.

۳- **مدلسازی فیزیکی :** که بر اساس ساخت یک مدل مقیاس شده می‌باشد و نتایج بدست آمده از مدل بر اساس روابط خاصی به مدل واقعی تعمیم داده می‌شود. این روش در مراحل نهایی طراحی استفاده می‌شود چون بسیار پرهزینه و دقیق است.

در فعالیت‌های هیدرودینامیکی و محاسبه مقاومت و توان شناور، فرمولهای ریاضی مستقلی وجود ندارد. مثلاً در علم هیدرواستاتیک بسیاری از فرمولها بر اساس خواص ذاتی رفتار شناور و سیال بدست می‌آید. ولی در علم هیدرودینامیک معدود فرمول‌های موجود نیز بر اساس تست مدل یا روابط آماری استخراج شده‌اند. مدلسازی عددی و استفاده از برنامه‌های کامپیوتری که بر اساس مدلسازی عددی تهیه شده‌اند نیز می‌تواند خطاهای غیرقابل پیش‌بینی و بزرگی داشته باشند مگر اینکه اطلاعات واقعی موجود باشد و با مقایسه با آنها مقدارخطا مشخص شود.

لذا بنظر می‌رسد در علم هیدرودینامیک، مطمئن‌ترین روش استفاده از مدلسازی فیزیکی و آزمایش آن می‌باشد که تنها خطای موجود در آن، خطای اندازه‌گیری و روش آزمایش است. بسیاری از فرمولهای موجود در محاسبه مقاومت شناورها نیز بر اساس مدلسازی فیزیکی و آزمایش مدل بدست آمده‌اند. برای آزمایش مدلهای فیزیکی ساخته شده (در مقیاس‌های متفاوت) روشهای زیر وجود دارد:

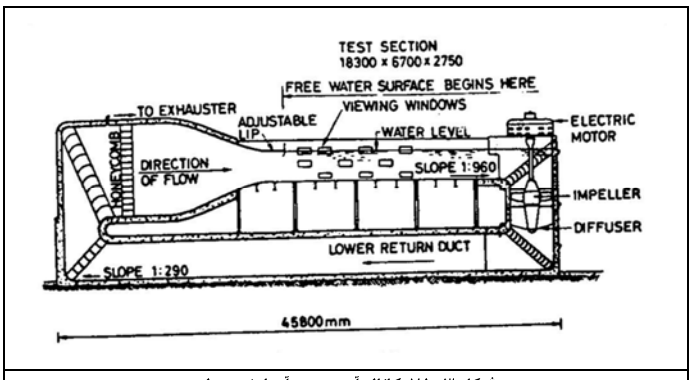
۱- حوضچه کشش[2]

۲- کانال آب[3]

۳- تونل کاویتاسیون[4]

۴- تونل باد[5]

مشخصات حوضچه کشش در این بخش به تفصیل بررسی می‌شود. برای بررسی دقیق روش آزمایش مدل می‌توان به کتاب ارزشمند «مقاومت شناورها» ترجمه دکتر سیف مراجعه کرد. معروفترین آزمایشگاه‌های دریایی دنیا در ضمیمه ۱ ارائه شده است.



شکل ۳-۷۱: کانال آب جهت آزمایش مدل

❖ کانال آب

در حوضچه کشش، آب ثابت و مدل در داخل حوضچه حرکت می‌کند. حال اگر مدل ثابت و آب جریان داشته باشد، این فرایند داخل کانال آب انجام می شود. نمونه ای از کانال آب در شکل ۳-۷۱ نشان داده شده است. مدل در قسمت فوقانی که دارای سطح آزاد سیال است قرار می-

---

1- منابع:[و ۲۷ و ۴ و ۲۳]

2- Towing tank

3- Water channel

4- Cavitation Tunnel

5- Wind tunnel

گیرد. مقطع کانال به اندازه‌ای است که می توان مدل‌هایی با طول ۶ متر را آزمایش نمود. یکی از مزایای مهم این تونل‌ها این است که مشاهده به صورت پیوسته انجام می‌شود و نیازی به صرف وقت زیاد برای برگشتن به ابتدای حوضچه و انتظار برای آرام شدن آب برای آزمایش مجدد، وجود ندارد. البته باید توجه نمود که ایجاد یک جریان یکنواخت برای انجام آزمایش های مقاومت یکی از مشکلات عمده در کانال آب است.

❖ تونل کاویتاسیون

این تونل شبیه کانال آب است و اغلب برای بررسی پروانه‌های دریایی از آنها استفاده می‌شود. این تونل قادر به ایجاد تغییرات فشار در محیط اطراف پروانه است به طوری که می‌توان بروز کاویتاسیون را به خوبی در پروانه مشاهده کرد. در پروانه‌ها در دمای ثابت محیط، کاهش فشار باعث ایجاد فاز بخار سیال شده و کاویتاسیون بوجود می‌آید. این یک تونل مدار بسته است که به صورت عمودی قرار گرفته است و بدنه آن از ورق‌ها و پروفیل‌های فولادی تشکیل شده است. نمای کلی تونل کاویتاسیون در شکل ۳-۷۲ نشان داده شده است. در واقع تغییرات فشار در پروانه واقعی بوسیله تغییرات سرعت سیال ایجاد می‌شود. البته در تونل کاویتاسیون از پمپ خلاء نیز برای کاهش فشار و برابری عدد کاویتاسیون مدل و پروانه واقعی استفاده می‌شود (در مورد عدد کاویتاسیون بعداً بحث خواهد شد). این تغییرات سرعت توسط یک ***Impeller*** در قسمت تحتانی تونل ایجاد می‌گردد. این پروانه می‌تواند سرعت صفر تا m/s ۱۵را در محل پروانه مدل ایجادکند. این سرعت باید برابر با سرعت حرکت معادل شناور باشد. پس از پروانه ***Impeller*** یک قسمت ***diffuser*** با مقطع دایره‌ای قرار گرفته است. کمی جلوتر و قبل از اولین خمیدگی تونل، مقطع دایره‌ای به مقطع مستطیل شکل تبدیل می‌شود. جهت جریال سیال در محل خمیدگی توسط پره‌هایی با کمترین اتلاف ممکن، تغییر می‌کند. آب پس از گذشتن از خمیدگی اول وارد ستون عمودی می شود و حبابهای هوا از سیال خارج می شوند. دقیقاً بعد از دومین خمیدگی، سیستم فشار و ایجاد خلاء قرار دارد. در همین محل خط تغذیه آب نیز قرار دارد. صفحه لانه زنبوری که از ورق فولادی نازک و سوراخ های مربعی تشکیل شده، موازی بودن جریان سیال را در جلوی پروانه‌ای که باید آزمایش شود تأمین می‌کند. بعد از صفحه لانه زنبوری یک تغییردهنده سطح مقطع با نسبت حدود ۱۰ به ۱ واقع شده ضمن اینکه جریان همچنان باید یکنواخت باشد. پس از این مرحله سیال وارد منطقه تست مدل می شود. این محل دارای پنجره‌های شیشه‌ای متعددی است به گونه‌ای که بتوان رفتار پروانه و سیال را مشاهده کرد. قطر پروانه مورد آزمایش می‌تواند ۲۰۰ الی ۲۵۰ میلی‌متر باشد. قانون تشابه حاکم بر تونل کاویتاسیون، تشابه فرود است و نیازی به برقراری تشابه رینولدز نیست چراکه سرعت چرخش پروانه باید بیش از حد بالا باشد که امکان‌پذیر نیست لذا فقط اگر رینولدز مدل پروانه بیش از رینولدز بحرانی باشد (جریان مغشوش) کفایت می‌کند. کاربرد اصلی تونل کاویتاسیون، تعیین عدد کاویتاسیون پروانه در آب آزاد است و علاوه بر آن می‌توان ضرایب تراست و گشتاور پروانه را نیز تعیین کرد. در این مورد، بیشتر بحث خواهد شد. پروانه داخل محل تست[1] به وسیله یک شافت، متصل به یک موتور می باشد (سرعت آب در محل اندازه‌گیری می‌تواند صفر تا (m/s) ۱۵ باشد.). بنابراین تجهیزات اندازه گیری مربوط به پروانه مدل و موتور آن در محل دومین خمیدگی قرار می‌گیرد. دور موتور پروانه می‌تواند یک تا ۶۰ دور در ثانیه باشد که توسط یک سرعت سنج اندازه گیری می‌شود. همچنین تراست و گشتاور پروانه با وسایل مخصوصی اندازه گرفته می‌شود. دما نیز باید کاملاً معلوم باشد که قبل از ورود سیال به مقطع تست توسط یک دماسنج اندازه گیری می‌گردد. یک دستگاه هوادهی و تخلیه هوا به منظور کنترل هوای داخل آب تونل نیز وجود دارد. پس از گذشتن سیال از مقطع مدل، وارد خمیدگی سوم و سپس خمیدگی چهارم می‌شود. کلیه خمیدگی‌های دارای پره‌هایی هستند که تغییر جهت سیال را براحتی فراهم می‌کنند. بدین ترتیب اجزا زیر را می توان در تونل کاویتاسیون نام برد:

۱- قسمت تحتانی، موتور و پروانه سرعت دهنده سیال[2] برای ایجاد سرعت ۱ تا (m/s) ۱۵ برابر با سرعت شناور.

۲- کاهنده سرعت سیال[3] با مقطع دایره‌ای

۳- مقطع مستطیلی کانال

۴- اولین خمیدگی به همراه پره های جهت دهنده سیال در داخل آن

۵- ستون عمودی که حبابهای هوا در آنجا از سیال جدا می شوند.

۶- خمیدگی دوم به همراه پره های داخل آن

۷- موتور و شافت پروانه مدل با یک تا ۶۰ دور در ثانیه

۸- اندازه‌گیر گشتاور و تراست ایجاد شده ناشی از حرکت پروانه (هدف اصلی آزمایش)

۹- پمپ خلاء[4] برای تزریق و مکیدن حبابهای هوا جهت تنظیم کردن میزان حباب هوای موجود در سیال.

۱۰- صفحه لانه زنبوری برای یکنواخت کردن جریان سیال ورودی به مقطع تست پروانه

۱۱- یک نازل با نسبت ۱۰ به ۱

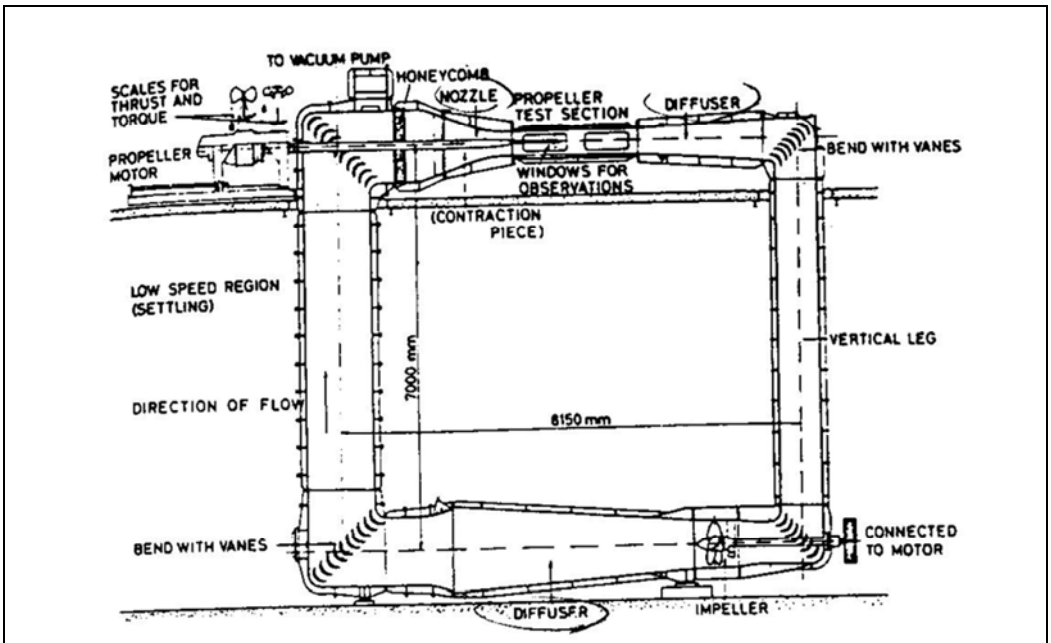
1- Test section

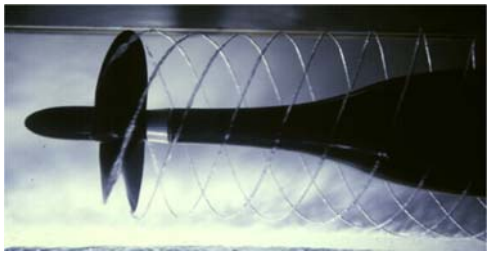
2- Impeller

3- diffuser

4- Vacume Pump

۱۲- مقطع تست مدل به همراه پنجره های آن و پروانه مدل که در داخل آن قرار گرفته است. (قطر پروانه ۲۵- ۲۰سانتیمتر)
۱۳- کاهنده سرعت[1]
۱۴- خمیدگی سوم و پره‌های داخل آن
۱۵- ستون عمودی
۱۶- خمیدگی چهارم و تکرار سیکل





شکل ۳-۷۲: تونل کاویتاسیون جهت آزمایش پروانه

❖ تونل باد[2]

تونل باد از سرعت دادن جریان هوا و ثابت بودن مدل برای اندازه‌گیری نیروی مقاوم استفاده می‌کند و برای آزمایش مدل زیردریایی‌ها (که دارای سطح آزاد سیال نیستند) نیز بسیار استفاده می‌شود. تونل باد در ۲ نوع کلی وجود دارد:

۱) تونل باز: دارای یک مدار بسته نیست و می‌تواند سرعتی در حدود (m/s) ۱۵ را تأمین کند.

۲) تونل بسته: دارای یک مدار بسته با اغتشاش کم است. در این تونل (مطابق شکل) جهت حرکت سیال پادساعتگرد می‌باشد.

مخروط قسمت پائین تونل دارای نسبت ۱۵ به ۱ است و قبل از آن نیز تعدادی (پنج یا بیشتر) صفحه به منظور کاهش اغتشاش قرار دارد. این صفحات گردابهای بزرگ را به گردابهای کوچک تبدیل می‌کنند که این گردابها نیز در مقطع بعدی از بین می‌روند. بنابراین جریان در مقطع آزمایش یکنواخت و با اغتشاش کم است. سرعت هوا در تونل بسته به m/s ۱۰۰ می‌رسد.

ابزارهایی در مقطع تست وجود دارد که می‌تواند مؤلفه‌هایی مانند لیفت، درگ و ممان روی مدل را اندازه بگیرد. ضرایب مورد نظر را می‌توان به صورت توابعی از سرعت و زاویه حمله بدست آورد.

1 -*Diffuser*
2-Wind tunnel

فصل دوم: تاریخچه انجام آزمایش مقاومت شناور

لئوناردو داوینچی آزمایش‌هایی بر روی ۳ مدل کشتی با سینه و پاشنه‌های متفاوت انجام داد. بنابراین می توان آزمایش او را آغاز آزمایش مدل دانست یعنی روش استفاده از مدل‌های کوچک و نتیجه‌گیری آن برای کشتی‌های بزرگ. در نهایت او اظهار داشت: «هر چقدر کشتی در قسمت نزدیک به سینه دارای سطح مقطع پهن‌تری باشد، آن کشتی سریع‌تر حرکت خواهد کرد». البته امروزه می‌دانیم که این برداشت درست نیست و فقط تا حدودی برای غوطه‌ورشونده‌ها (مانند زیردریایی‌ها) صحت دارد. پس از داوینچی آزمایشهای دیگری نیز انجام گرفت اما اغلب نتایج خوبی به همراه نداشت. ویلیام‌فرود اولین فردی بود که بدرستی می‌دانست چگونه از مدلها در طراحی هیدرودینامیکی کشتی استفاده کند. روشهای مورد استفاده در آزمایش مدل‌های فیزیکی به مرور پیشرفت کرده و بسیار پیشرفته و پیچیده شده‌اند. مراجعه به کتابچه‌های کنفرانس بین‌المللی *ITTC*[1] مسیر این پیشرفت را نشان می‌دهد. دیوید تیلور(۱۹۴۰-۱۸۶۴) نیز از دیگر محققین هیدرودینامیک بود که گام‌های بلندی دراین زمینه برداشت. *Emanuel Sweden Borg* برنامه دقیقی برای استفاده از مدلها ارائه کرد (۱۷۲۱) و بعد از تشریح تجهیزات که شامل روش وزنه برای تامین نیرو بود (که هنوزهم در برخی آزمایشگاههای کوچک استفاده می شود)، نتوانست روشی برای مقایسه سرعتها ارائه کند. ریاضیدان معروف *Bouguer* نیز آزمایشهایی بر روی مدل کشتی انجام داد. در سال ۱۷۶۱ در لندن آزمایشهایی در *Peerless Pool* بوسیله کشش وزنه انجام شد که نقاشی های آن امروزه موجود است. *Benjamin Franklin* که یک مهندس برق بود، در فرانسه آزمایش‌هایی را برای درک حرکت شناور در آبهای کم عمق و داخل کانالها انجام داد. *Chapman* نیز از دیگر محققین اروپایی در این زمینه بود که نتایج تحقیقات او هنوز پس از ۷۰ سال قابل استفاده است.

فصل سوم: ابعاد و اندازه‌های مدل و حوضچه آزمایش

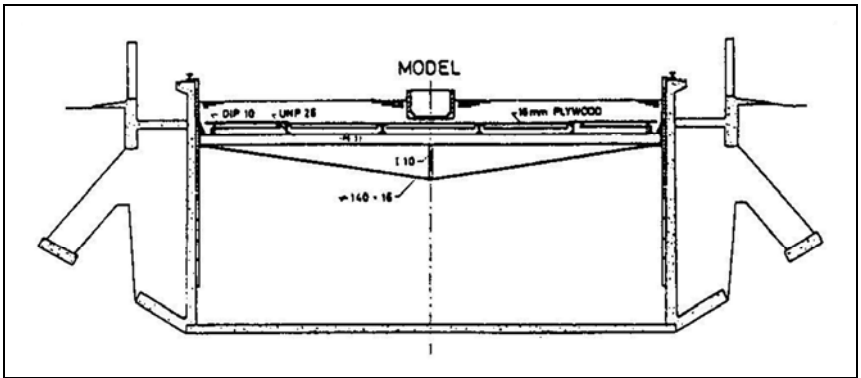
❖ حداقل عمق مورد نیاز حوضچه کشش

عمق حوضچه باید برای آبهای عمیق به حدی باشد که اثرات کف حوضچه بر مدل اثری نداشته باشد و برای آزمایش در آبهای کم‌عمق نیز باید قابل تنظیم باشد به گونه‌ای که اثرات اسکوآت قابل تأثیر باشد. اگر یک مدل از زیردریایی بخواهد در حوضچه، آزمایش زیرآبی را انجام دهد، حداقل فاصله مدل زیردریایی از سطح آب باید برابر نصف طول زیردریایی باشد: $h = \frac{L}{2}$

در مورد عمقی که می‌توان از اثر سطح آزاد سیال صرفنظر کرد به طور کامل در قسمت مقاومت موج‌سازی بحث شده است.

❖ نسبت مساحت مقطع مدل به مساحت مقطع حوضچه

قابل ذکر است که نسبت مساحت مقطع مدل به مساحت مقطع حوضچه بسیار اهمیت دارد. کم بودن عرض حوضچه نسبت به عرض مدل باعث بروز اثر دیواره‌ها[2] و کم بودن نسبت عمق مدل به عمق حوضچه باعث تجربه اثرات کف و اثرات آب کم‌عمق می‌شود. البته برخی از حوضچه‌های کشش دارای کف قابل تنظیم هستند به گونه‌ای که بتوان مقاومت حرکت در آب کم‌عمق را نیز محاسبه کرد (مطابق شکل ۳-۷۳).



شکل ۳-۷۳: حوضچه های کشش دارای کف قابل تنظیم

1 - International Towing Tank confference
2 - *side wall effect (blockage effect)*

قبلاً تصور می‌شد که برای جلوگیری از تأثیر مرزها (اثرات کف و دیواره‌ها) نسبت سطح مقطع عرضی زیر آب مدل به سطح مقطع عرضی کانال به اندازه ۱٪ کافی است اما تحقیقات *Lucy Ashton* نشان داد که این مقدار باید به ۰/۴٪ یا ۰/۰۰۴ کاهش یابد:

$$\frac{A_{model}}{A_{tank}} \le 0.004$$

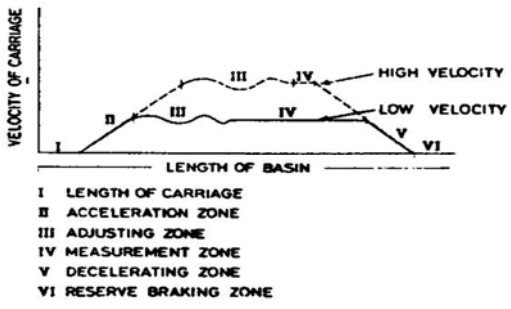
اگر مساحت مطلوب رعایت نشود، عبور آب از جلو به عقب مدل با ایجاد اختلاف فشار و تغییرات سرعت سیال همراه خواهد بود که با حرکت در آب آزاد و عمیق متفاوت است. لذا نتایج را با خطا مواجه خواهد کرد. بیش از حد کوچک بودن مدل نیز باعث وجود جریان آرام بر روی بدنه و نیاز به مغشوش کردن جریان اطراف بدنه می‌شود. چراکه جریان روی سطح شناورهای واقعی مغشوش است. مغشوش کردن جریان اطراف بدنه توسط تجهیزات خاصی انجام می‌شود که در قسمت‌های بعدی ارائه می شود. پیشنهاد دیگری نیز بین ابعاد مدل و حوضچه به صورت زیر ارائه شده است:

$$\begin{cases} \frac{B_M}{B_T} < \frac{1}{10} \\ \frac{T_M}{h_T} < \frac{1}{10} \end{cases}$$

در صورتی که این شرایط برقرار باشد می‌توان از اثر مرزها (دیواره‌ها و کف) و انجام تصحیحات روی نتایج آزمایش، صرفنظر کرد.

❖ تعیین طول حوضچه کشش

طول حوضچه کشش باید به حدی باشد که ارابه، زمان کافی برای شتاب گرفتن و رسیدن به سرعت مشخص، طی‌کردن چند ثانیه در سرعت ثابت و سپس کاهش سرعت را داشته باشد. ارابه معمولاً با شتاب $0.05g$ شتاب می‌گیرد تا به سرعت مطلوب برسد. برای کاهش سرعت نیز شتاب $0.07g$ اعمال می‌شود که برای این منظور از ترمزهای هیدرولیک یا مکانیکی استفاده می‌شود. حدود مورد نیاز طول حوضچه کشش را می‌توان در شکل ۳-۷۴ ملاحظه کرد.



شکل ۳-۷۴: قسمت‌های مختلف سرعت‌گیری مدل در حوضچه کشش

سرعت ارابه معمولاً تا $15\ ^m/_s$ می‌باشد ولی در برخی از حوضچه‌های بزرگ این سرعت تا بیش از $50\ ^m/_s$ می‌رسد. بنابراین ۳ پارامتر اصلی در تعیین طول حوضچه کشش را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱. شتاب ارابه برای رسیدن به سرعت مطلوب و همچنین کاهش سرعت
۲. حداکثر سرعت قابل تأمین توسط ارابه
۳. طول مدل

به طور مثال طول حوضچه کشش *N.P.L* در انگلیس به صورت زیر تعیین شد:

۱- مسافت مورد نیاز برای شتابگیری تا سرعت $50\ ^{ft}/_{sec}$	*590ft*
۲- حرکت پیوسته به مدت ۷ ثانیه:	*350ft*
۳- مسافت لازم برای توقف:	*200ft*
۴- مسافت اضافی در انتهای حوضچه برای جلوگیری از برخورد:	*200ft*
مجموع	*1340ft*

مشخص است که اگر شتاب حرکت ارابه بیشتر بود، به طول کمتری از حوضچه نیاز می‌شد. سیستم رانش معمولاً روی ارابه نصب نمی‌شود بلکه در انتهای حوضچه قرار می‌گیرد و بوسیله چند کابل به ارابه متصل می‌گردد. این موجب سبک‌تر شدن ارابه و شتابگیری آسان‌تر آن خواهد شد به گونه‌ای که شتاب تا $4g$ نیز قابل تأمین است. اگر سیستم رانش الکتریکی بر ارابه سوار شود، جریان برق بوسیله کابل‌هایی که در بالای

ارابه در طول مسیر کشیده شده تأمین می‌گردد. به منظور قابلیت کنترل بیشتر، از جریان مستقیم *(DC)* استفاده می‌شود. از طرف دیگر خود ارابه و تجهیزات روی آن نیز ایجاد درگ (مقاومت آیرودینامیک) می‌کنند که باید در محاسبات وارد شوند.

❖ انحنای طولی ریل ارابه

در محدوده ای که ارابه به سرعت ثابت می‌رسد، هیچ عاملی نباید باعث تغییر ناخواسته سرعت شود از جمله شتاب ثقل. برای اینکه شتاب ثقل نه باعث افزایش و نه باعث کاهش سرعت شود، باید انحنای ریل ارابه، مطابق با انحنای کره زمین باشد. مقدار حداکثر ارتفاع منحنی *(h)* برای حوضچه‌های متوسط در حدود ۱ میلی‌متر و برای بزرگترین حوضچه‌ها در حدود ۳۵ میلی‌متر است. ارتفاع h از رابطه مقابل بدست می‌آید:

$$h = \frac{L^2}{8R}$$

L: طول حوضچه کشش و R: شعاع کره زمین

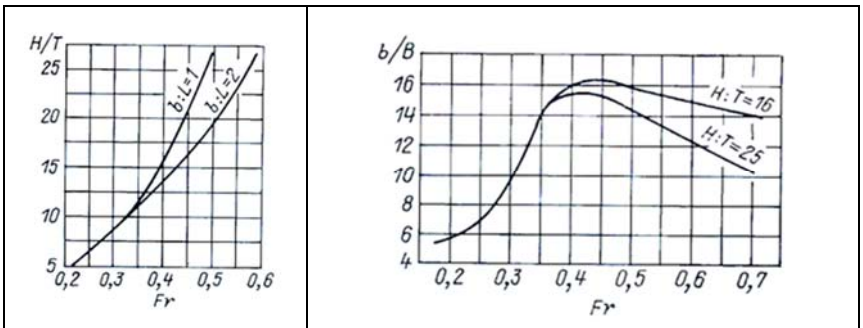
❖ طول مدل

در مورد طول خود مدل نیز امروزه در حوضچه‌های عادی مدل‌هایی با طول۱ تا ۶ متر مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما مدل‌های بزرگ حدود ۱۰ متر نیز در حوضچه‌های بزرگی مثل حوضچه تیلور قابل استفاده هستند. مدتها بود که مدل‌های کوچک ۱ تا ۲ متری بدلیل وجود جریان آرام در اطراف بدنه (علی رغم جریان آشفته در کشتی واقعی) مورد استفاده نبودند تا اینکه دکتر *K.S.M.Davidson* روشهای بخصوصی را برای حذف بخش جریان آرام در اینگونه مدلها معرفی کرد که استفاده از مدلهایی با طول تا یک متر را میسر نمود. از طرفی باید توجه داشت که بزرگتر شدن طول به معنای بزرگتر شدن ابعاد مدل و افزایش اثرات دیواره ها و کف می باشد.

❖ پیشنهاد *ITTC* در مورد نسبت ابعاد حوضچه و مدل

پیشنهاد *ITTC* در مورد نسبت ابعاد حوضچه و مدل در شکل ۳-۷۵ آمده است.

H: عمق حوضچه کشش، T: ارتفاع آبخور شناور، L: طول مدل، b: عرض حوضچه، B: عرض شناور



شکل ۳-۷۵: پیشنهاد ITTC در مورد نسبت ابعاد حوضچه و مدل

❖ مشخصات حوضچه های کشش موجود در ایران

مشخصات حوضچه‌های کشش موجود در ایران در جدول ۳-۲۴ ارائه شده است.

محل	طول(متر)	عرض(متر)	عمق(متر)	حداکثرسرعت ارابه *(m/s)*
حوضچه کشش دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز - (در حال ساخت)	۱۴۰	۷	۳	بیش از ۱۰
حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان	۱۰۷	۳	۲/۲	۳
حوضچه کشش دانشگاه صنعتی شریف	۲۵	۲/۵	۲/۵	۶
حوضچه کشش دانشگاه امام خمینی	۱۶	۲/۵	۲	۳

جدول ۳-۲۴: مشخصات حوضچه‌های کشش موجود در ایران

حوضچه کشش دانشگاه صنعتی مالک اشتر بزرگترین حوضچه کشش خاور میانه است. برای آشنایی با حوضچه‌های کشش جهان می‌توان به ضمیمه ۲ مراجعه کرد.

فصل چهارم: تجهیزات مورد نیاز در حوضچه کشش

هنگام انجام آزمایش مدل، ابزارهای مخصوص بسیاری مورد نیاز است. بعضی از این ابزارها در ذیل توضیح داده می‌شود:

۱) انتقال حرکت ارابه به مدل:

نیروی لازم برای حرکت مدل کشتی در یک سرعت معین، توسط سیستمی مانند ترازو، از ارابه کشش به مدل منتقل می‌گردد.

۲) اندازه گیر تریم

کشش مدل با اندازه‌گیر تریم، یکی در پاشنه و دیگری در سینه مدل، همراه است. اتصال بین این وسیله و مدل به گونه ای است که به مدل اجازه حرکات غلتش طولی، عرضی و هیو را می‌دهد.

۳) ثبت کننده سرعت

سرعت مدل همان سرعت حرکت ارابه است و تجهیزات بسیار زیادی برای اندازه‌گیری آن وجود دارد.

۴) ثبت کننده دور پروانه

هنگام انجام آزمایش خویش رانش[1]، تعداد دور پروانه توسط یک دورسنج از داخل بدنه مدل کنترل می شود. لازم به ذکر است که در این نوع آزمایش، چرخش پروانه توسط یک الکتروموتور در داخل بدنه انجام می‌شود.

۵) نیروسنج پروانه

این نیروسنج برای اندازه‌گیری نیروی تراست و گشتاور بکار می‌رود.

۶) دیگر وسایل اندازه گیری

علاوه بر وسایلی که توضیح داده شد، آزمایشگاههای تحقیقاتی باید مجهز به تجهیزات دیگری هم باشند:

۱- اندازه‌گیر آبخور.

۲- هیدرومتر، ویسکومتر و آنالیز کننده شیمیایی

۳- ثبت کننده موج

۴- وسیله سنجش زبری و ناصافی سطح بدنه

۵- لوله پیتوت‌های[2] مختلف، مانومتر و سرعت سنج لیزری

۶- تجهیزات استرین گیج

۷- تجهیزات الکترونیکی مانند ثبات، کامپیوتر، ماشین رسّام

۸- تجهیزات عکسبرداری.

۷) حوضچه‌های دارای سیستم موج‌ساز[3]

برای تحقیق و پیش‌بینی رفتار کشتی در دریای ناآرام توسط آزمایش مدل، وجود دستگاه موج‌ساز به منظور تولید امواج مورد نیاز لازم است. موج‌سازها را می‌توان به ترتیب زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱- موج‌سازهای مکانیکی

۲- موج‌سازهای پنوماتیکی

این موج سازها می‌توانند امواج منظم و نامنظم تولید کنند.

به منظور استفاده مؤثر از آزمایش موج، لازم است که از برگشت امواج از انتهای حوض جلوگیری شود. اگر این کار انجام نگیرد، امواج برگشتی می‌توانند در طول حوضچه، امواج ناخواسته ایجاد نمایند که در نتیجه مدت زمان لازم بین هر دو آزمایش جهت آرام کردن آب، بسیار طولانی خواهد بود. برگشت امواج از انتهای حوضچه به شکل های مختلفی کاهش داده می‌شود مانند:

- استفاده از سطوح شیب دار
- ایجاد شکاف های متعدد
- استفاده از تور فلزی
- قرار دادن قطعات بتنی متعدد
- ایجاد شبکه ای از میله های فلزی

هنگامی که مدل درون حوضچه کشیده می‌شود، یک سیستم امواج عرضی و مورب تشکیل می‌گردد که آن نیز باید قبل از انجام آزمایش بعدی، از بین برود.

---

1 - *self-propulsion*
2 - *pitot tube*
3 - *wave maker*

❖ تجهیزات و روشهای مغشوش کردن جریان اطراف مدل

آزمایش مدل در عدد رینولدز نسبتاً پائین انجام می‌شود این در حالی است که محدوده عدد رینولدز در شناورها 10^{8}–10^{10} می‌باشد. از طرفی می‌دانیم که جریان در رینولدزهای بالاتر از 5×10^{5} مغشوش می‌باشد. لذا باید بتوانیم برای شبیه‌سازی واقعی جریان روی مدل، جریان را مغشوش نمائیم. لذا در بررسی نتایج تست مدل، فرض بر این است که مدل در جریان کاملاً مغشوش قرار دارد و بنابراین باید از مغشوش بودن جریان مطمئن شد. روشهای ایجاد اغتشاش در مدل را به سه صورت می‌توان تقسیم نمود:

۱- ایجاد اغتشاش بسیار زیاد در آبی که مدل در آن حرکت می‌کند

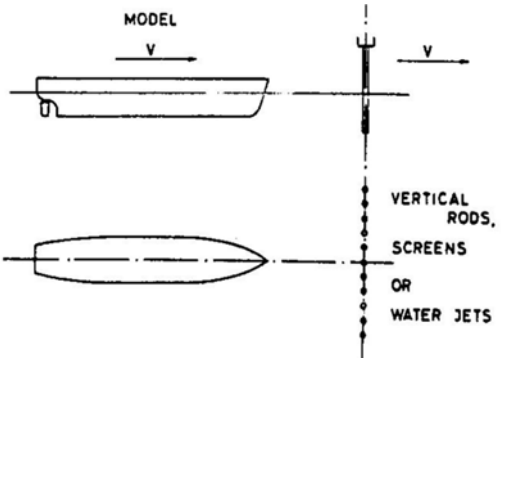
۲- ایجاد اغتشاش در لایه مرزی مدل

۳- سایر روشها

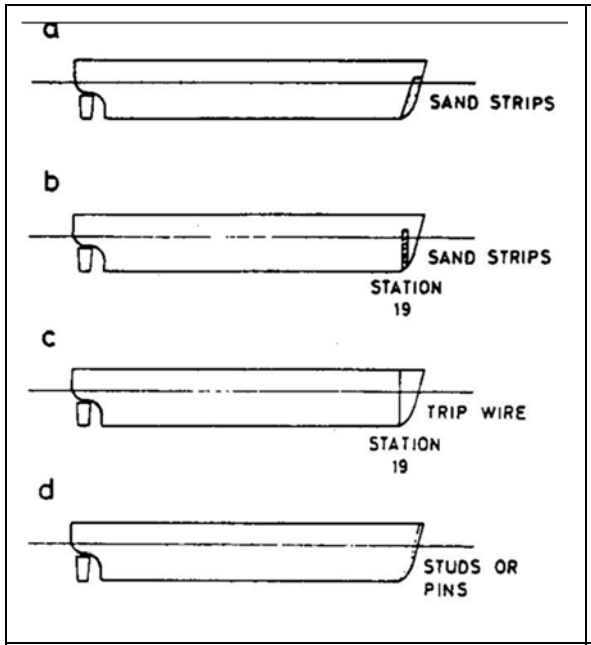
در ذیل این ۳ روش توضیح داده می‌شوند:

روش اول) در این روش سعی می‌شود آب حوضچه متلاطم و آشفته گردد (مطابق شکل ۳-۷۶). در این روش از تجهیزاتی مانند میله‌های عمودی یا صفحات مشبک یا جت آب استفاده می‌شود. این وسایل با فاصله مشخصی در جلوی مدل حرکت می‌کنند. بخاطر جدایش جریان از روی میله‌ها و سیم‌ها، گرداب و اغتشاش بوجود می‌آید. مدل در این محیط در حال حرکت است و بنابراین جریان غیر آرام و مغشوش روی بدنه مدل تأمین می‌شود.

روش دوم) برای آشفته کردن جریان روی مدل، معمولاً از روش دوم استفاده می‌شود که بجای آشفته کردن کل آب درون حوضچه، فقط جریان روی بدنه بوسیله زوائدی که در قسمت سینه چسبانیده می‌شود، انجام می‌گیرد (مطابق شکل ۳-۷۷).



شکل ۳-۷۶: روش ایجاد اغتشاش آب درون حوضچه



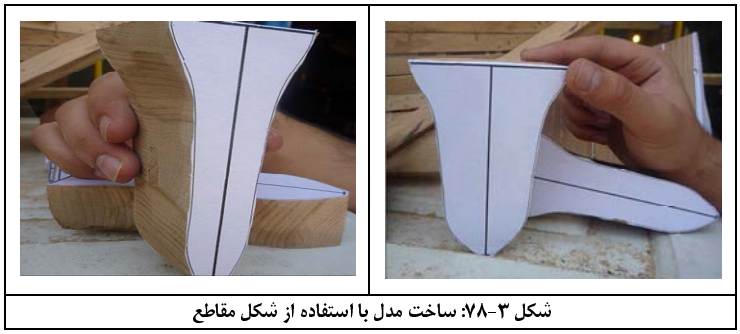
شکل ۳-۷۷: ایجاد اغتشاش در جریان روی مدل

برای مدل های کوچک، نوارهای ماسه‌ای (نوع a) بکار می‌رود. در این حالت نوارهایی از ماسه زبر به سینه مدل چسبانده می‌شود. آزمایشات نشان داده است که گرادیان منفی بزرگ فشار می‌تواند اغتشاش ایجاد شده را از بین ببرد و دوباره جریان به حالت آرام تبدیل گردد. برای حل این مشکل می‌توان از روش b که یک نوار ماسه‌ای چسبانده شده، استفاده کرد. نوارهای ماسه‌ای فوق باعث افزایش مقاومت نیز می‌شوند. البته قسمت قبل از نوار که دارای لایه مرزی آرام است، مقاومت کمی دارد که می‌تواند تأثیر افزایش مقاومت ناشی از وجود نوار ماسه‌ای را حذف کند. بجای نوارهای ماسه‌ای، از سیم‌های نازک نیز می‌توان استفاده کرد (حالت c) که در این سیم‌ها در سینه بدنه کشتی، خوابانده می‌شود (حدوداً ۵ درصد طول عقب‌تر از نوک سینه). روش دیگر، استفاده از پین‌هایی در قسمت سینه می‌باشد (حالت d). در این حالت پین‌هایی به قطر حدوداً ۳ میلی‌متر عمود بر سطح بدنه در قسمت سینه نصب می‌شوند. نحوه نصب پین‌ها و فواصل آنها و جزئیات دیگری حائز اهمیت هستند و معمولاً هر آزمایشگاهی، در این‌باره دارای استانداردهایی می‌باشد.

روش سوم) سایر روشهای ایجاد اغتشاش در اینجا بیان می‌شود که البته چندان رایج نیستند. یکی از این روشها بدین صورت است که قسمت سینه مدل از داخل تحت ارتعاش قرار می‌گیرد تا لایه مرزی آرام تبدیل به لایه مرزی مغشوش شود. روش دیگر، استفاده از پالس‌های الکتریکی است که بین دماغه و قطعات فلزی که در فاصله کمی از آن قرار گرفته است ایجاد می‌شود. در این روش، معمولاً ولتاژهای بالا لازم است که خطرات خاصی به دنبال دارد و لذا کمتر استفاده می‌شود.

فصل پنجم: ساخت مدل و جنس آن

جنس مدل می‌تواند از چوب، موم، فایبرگلاس، پلاستیک یا فلز می‌باشد. موم مناسب‌تر از همه است زیرا هم کار با آن ساده تر است و هم پس از انجام آزمایش می‌توان آنرا مجدداً برای مدل دیگری استفاده نمود. اما از طرف دیگر حمل و نقل مدل چوبی از مکانی به مکان دیگر به منظور انجام برخی کنترل‌ها روی سطح و شکل مدل، براحتی امکان پذیر است در حالی که حمل و نقل مدل‌های مومی بسیار دشوار است. مدلهایی که در آزمایش‌های متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً دارای بدنه‌های کاملی نیستند، بلکه قسمت بیرون آب آنها تنها به اندازه‌ای است که از ورود آب به داخل مدل جلوگیری می‌کند. این روش هم اقتصادی‌تر است و هم کنترل مدل آسانتر خواهد بود. البته واضح است که مدلهایی که در آزمایشهای موج بکار می روند باید دارای بدنه کامل (زیر آب و بالای آب) باشند. روش ارائه شده توسط ویلیام فرود برای تهیه مدلها از موم، امروزه نیز تقریباً به همان صورت استفاده می‌شود. در برخی موارد نیز از مدل چوبی استفاده می‌شود: شکل ۳-۷۸ نشان‌دهنده نحوه ساخت مدل چوبی با استفاده از شابلون (صفحه کاغذی مقطع بدنه) می‌باشد. مطابق شکل، مقاطع بدنه بر روی مقطع مستطیل چوبی چسبانده شده و تراش داده می‌شود. پس قطعات مختلف چوبی به هم متصل شده و مجدداً سوهان‌کاری می‌شوند تا شکل بدنه کشتی بدست آید. موم دارای ترکیبات *parafin wax* و مقداری *beeswax* و مواد دیگر به منظور افزایش صلبیت و سختی موم و کاهش حفره‌های آن می‌باشد. موم سطحی صاف و یکنواخت ایجاد می‌کند که در هنگام استفاده از چوب به آسانی ایجاد نمی شود. این نکته با توجه به این موضوع اهمیت پیدا می‌کند که بدانیم قسمت عمده مقاومت مدل، شامل مقاومت اصطکاکی می‌شود که صیقلی بودن بدنه به آن بستگی دارد. در ابتدا مدل مومی در یک قالب گلی ریخته می‌شود. این مدل در ابتدا حدود ۳ سانتی‌متر بزرگتر از اندازه‌های مورد نظر است و با تراشیدن موم، اندازه مدل به اندازه های مطلوب می‌رسد. مدل به صورت برعکس روی میز قرار می‌گیرد و تراشیدن آن اغلب توسط دستگاه‌های اتوماتیک انجام می‌شود. مدلها با خطای ۴ میلیمتر در طول و ۱ میلیمتر در دیگر ابعاد ساخته می‌شوند امّا باید توجه داشت که یک تغییر دمای ۶ درجه‌ای می‌تواند طول یک مدل ۶ متری را ۴ میلیمتر افزایش دهد. مدل مومی ساخته شده قبل از استفاده، به مدت ۳۶ ساعت درون آب قرار می‌گیرد و خیس می‌شود. سپس بوسیله یک برس کاملاً پاک شده و آماده آزمایش می‌شود. مواد استفاده شده در مدل‌های مومی پس از اتمام آزمایشها، قابل بازیافت هستند. تهیه مدل بدنه زیردریایی بدلیل اینکه دارای انحنای زیاد و پیچیده است، توسط دستگاه‌های اتوماتیک انجام می‌شود.



شکل ۳-۷۸: ساخت مدل با استفاده از شکل مقاطع

امام علی (ع):

از پرگویی بپرهیز که باعث لغزش فراوان و آرزدگی بسیار گردد.

فصل ششم: قوانین تشابه

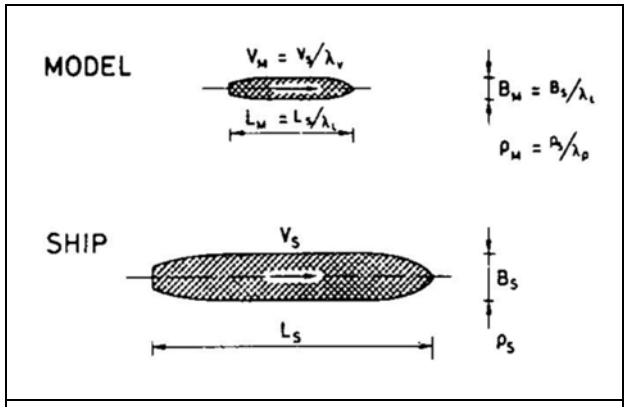
پس از بدست آوردن نتایج آزمایش بر روی مدل‌های فیزیکی، این نتایج باید از مقیاس مدل به مقیاس کشتی واقعی تبدیل شوند. بدین منظور باید بعضی از قوانین تشابه را یادآوری نمود. برای اینکه نیروهای وارد بر مدل و کشتی واقعی یکسان باشند، شرایط زیر باید برقرار شوند:

۱) تشابه هندسی
۲) تشابه سینماتیکی
۳) تشابه دینامیکی

در مورد هر یک از این تشابه‌ها مطالب زیر را بررسی می‌کنیم.

۱) تشابه هندسی

کلیه ابعاد شناور اصلی و مدل باید با یک نسبت ثابت مقیاس شوند. از طرفی باید سعی شود که حتی زبری سطح مدل و شناور اصلی هم یکسان باشد ولی از آنجا که اغلب چنین امکانی وجود ندارد، سطح مدل را به صورت صیقلی می‌سازند و سپس اصلاحاتی روی نتایج آزمایش انجام می‌شود. (شکل ۳-۷۹). حتی اگر زبری‌ها هم یکسان باشد، بخاطر خواص آب، جریان در امتداد سطوح، مشابه نخواهد بود. به عبارت دیگر، پدیده لایه مرزی در کشتی را نمی‌توان عیناً در مقیاس مدل بوجود آورد. لذا انجام تصحیحات روی نتایج گریزناپذیر است.



شکل ۳-۷۹: مقیاس ابعاد مدل و کشتی

برای ایجاد تشابه هندسی در پروانه‌ها نیز مشکلات زیادی وجود دارد چرا که لبه‌های پره‌ها به قدری باریک و نازک می‌شود که ایجاد مقطع فویل پره غیرممکن می‌شود لذا معمولاً پره‌های پروانه مدل، ضخیم‌تر از لبه‌های پره‌های پروانه واقعی می‌باشد. تشابه هندسی در حوضچه کشش و محیط دریا نیز بطور کامل برقرار نمی‌باشد چراکه محدودیت عرض و محدودیت عمق در حوضچه کشش قابل مقایسه با عرض و عمق نامحدود دریاها نیست و لذا تشابه هندسی در این باره بطور کامل بوجود نمی‌آید و اعمال تصحیحات روی نتایج نیزکار ساده‌ای نیست.

۲) تشابه سینماتیکی

تشابه سینماتیکی شامل تشابه حرکت و سرعت مدل و شناور واقعی می‌باشد. تشابه سرعتها در سطح آزاد سیال از طریق برابری عدد فرود مدل و کشتی واقعی انجام می‌شود.

$$(F_n)_m = (F_n)_S$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{g.L_m}} = \frac{V_S}{\sqrt{g.L_S}} \quad \rightarrow \quad \frac{V_m}{V_S} = \sqrt{\frac{L_m}{L_S}}$$

در مورد پروانه‌ها، نسبت سرعت پیشروی به سرعت چرخشی هر المان پره در مدل و کشتی باید یکسان باشد یعنی:

$$\frac{\text{سرعت پیشروی}}{\text{سرعت چرخشی}} = \frac{V_m}{n_m.(2\pi R_m)} = \frac{V_S}{n_s.(2\pi R_s)} \qquad (۱)$$

$$\frac{V_m}{n_m D_m} = \frac{V_s}{n_s.D_s} \qquad (۲)$$

$$J_m = J_s \qquad (۳)$$

یعنی برای برقراری تشابه سینماتیکی در پروانه مدل و واقعی باید ضریب پیشروی آنها یکسان باشد. (ملاحظه می‌شود که ضریب پیشروی (J) از نسبت سرعت پیشروی به سرعت چرخشی بدست می‌آید.)

۳) تشابه دینامیکی

هدف اصلی از انجام آزمایش مدل، بدست آوردن نیروها و مقیاس کردن آنها برای رسیدن به نیروها در شناور واقعی است. در اینجا برای سیالی که مدل درون آن قرار می‌گیرد، چهار حالت کلی در نظر گرفته می‌شود که در هر کدام، یک شرط تشابه و یک ضریب k در نظر گرفته می‌شود که $F_s = K.F$ به چهار حالت عبارتست از:

۱- سیال غیر قابل تراکم بدون اصطکاک و بدون سطح آزاد
۲- سیال غیر قابل تراکم بدون اصطکاک با سطح آزاد
۳- سیال غیر قابل تراکم و بدون سطح آزاد
۴- سیال غیر قابل تراکم با سطح آزاد

فرض می‌شود که تشابه هندسی و سینماتیکی بین مدل و کشتی برقرار باشد. همچنین داریم:

مقیاس ابعاد $\lambda_L = \frac{L_s}{L_m}$

مقیاس چگالی $\lambda_\rho = \frac{\rho_s}{\rho_m}$

مقیاس سرعت پیشروی $\lambda_V = \frac{V_s}{V_m}$

از اینها روابط زیر نتیجه می شود: مقیاس سطح : $\lambda_s = \lambda_L^2$

مقیاس حجم $\lambda_\nabla = \lambda_L^3$

مقیاس جرم $\lambda_m = \lambda_\rho . \lambda_L^3$

مقیاس زمان $\lambda_t = \frac{\lambda_L}{\lambda_V}$

مقیاس شتاب $\lambda_a = \frac{\lambda_V^2}{\lambda_L}$

پس از این تعاریف برای چهار حالت بیان شده داریم:

۱) سیال غیر قابل تراکم بدون اصطکاک و بدون سطح آزاد

بدلیل نداشتن سطح آزاد، فقط نیروهای اینرسی دخالت دارند:

$$F_S = C\left(\frac{1}{2}\rho_s V_S^2\right)S_S \qquad (۴)$$

$$F_m = C\left(\frac{1}{2}\rho_m V_m^2\right)S_m \qquad (۵)$$

C یک ضریب مستقل از مقیاس است.

$$\lambda_{Fi} = \frac{F_S}{F_m} = \frac{\rho_s . V_V^2 . S_s}{\rho_m . V_m^2 . S_m} = \lambda_\rho . \lambda_L^2 . \lambda_V^2 \qquad (۶)$$

و در نتیجه برای مقیاس نیروها داریم:

$$F_S = \lambda_{Fi} . F_m \qquad (۷)$$

$$F_S = \lambda_\rho . \lambda_L^2 . \lambda_V^2 . F_m$$

۲) سیال غیر قابل تراکم بدون اصطکاک با سطح آزاد

در این حالت، نیروی ثقلی بدلیل اینکه در تشکیل موج دخالت دارد، در روابط بین نیروها نقش دارد. مقیاس برای این نیرو عبارتست از نسبت بین نیروهای ثقلی وارد بر جرم و ذرات متناظر m_m و m_S

$$\lambda_{Fg} = \frac{F_{gs}}{F_{gm}} = \frac{m_s . g_s}{m_m . g_m} = \lambda_\rho . \lambda_L^3 . \lambda_g \qquad (۸)$$

λ_g مقیاس شتاب ناشی از ثقل است.

چنانچه تشابه دینامیکی مورد نظر باشد، نسبت هر نیروی اینرسی و هر نیروی ثقلی برای مدل و شناور واقعی باید دارای مقادیری یکسان باشند. بنابراین:

(۹)

$$\frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی ثقلی}} = \frac{F_{im}}{F_{gm}} = \frac{F_{is}}{F_{gs}}$$

$$\lambda_{Fi} = \lambda_{Fg} \quad , \quad \frac{F_{is}}{F_{im}} = \frac{F_{gs}}{F_{gm}} \qquad (۱۰)$$

با استفاده از روابط (۸) و (۶) داریم:

$$\lambda_\rho.\lambda_L^2.\lambda_V^2 = \lambda_\rho.\lambda_L^3.\lambda_g \qquad (۱۱)$$

$$\lambda_V^2 = \lambda_g.\lambda_L \qquad (۱۲)$$

رابطه (۱۲) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V_S^2}{V_m^2} = \frac{g_s}{g_m}.\frac{L_S}{L_m} \qquad (۱۳)$$

$$\frac{V_S^2}{g_s.L_s} = \frac{V_m^2}{g_m.L_m} \qquad (۱۴)$$

با جذر گرفتن از رابطه (۱۴) داریم:

$$\frac{V_S}{\sqrt{g_s.L_s}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m.L_m}} = F_n \qquad (۱۵)$$

یا به عبارت دیگر:

$$(F_n)_S = (F_n)_m \qquad (۱۶)$$

شرط تشابه نیروها

لذا مبنای تعریف عدد فرود به این صورت بدست می آید. با برقرای تشابه هندسی و سینماتیکی و مساوی بودن عدد فرود، می‌توان هر نیروی اندازه‌گیری شده روی مدل را به نیروی متناظر آن بر روی کشش واقعی تبدیل کرد. این کار با استفاده از ضریب زیر انجام می‌شود:

$$\lambda_{Fi} = \lambda_{Fg} = \lambda_\rho.\lambda_g.\lambda_L^3 \qquad F_S = \lambda_{Fi}.F_m = \lambda_{Fg}.F_m \qquad (۱۷)$$

بر اساس قانون تشابه و بر اساس مشاهدات امواج ناشی از مدل ها با شکل بدنه یکسان اما در اندازه های متفاوت، فرود در سال ۱۸۶۸، «قانون تشابه» را بدین‌صورت بیان نمود:

«چنانچه نسبت سرعتهای مدل و کشتی متناسب با ریشه دوم ابعاد خطی آنها باشد، نسبت مقاومت باقیمانده آنها، متناسب است با نسبت توان سوم ابعاد خطی آنها» $\frac{F_s}{F_m} \alpha \left(\frac{L_s}{L_m}\right)^3$

یا به عبارت دیگر نسبت مقاومت باقی مانده کشتی به مدل را با استفاده از قانون تشابه فرود به صورت زیر بدست می‌آوریم:

$$R_R = C_R.(0.5\rho A V^2)$$

از طرفی از تشابه فرود داریم: $C_{RM}=C_{RS}$ لذا:

$$\frac{R_{RS}}{R_{Rm}} = \frac{A_S}{A_m} \times (\frac{V_S}{V_m})^2$$

از تشابه اعداد فرود داریم:

$$\frac{V_m}{\sqrt{g.L_m}} = \frac{V_S}{\sqrt{g.L_s}} \rightarrow (\frac{V_S}{V_m})^2 = \lambda$$

$$\frac{R_{RS}}{R_{Rm}} = \frac{A_S}{A_m} \times (\frac{V_S}{V_m})^2 = \lambda^2.\lambda = \lambda^3$$

مثال) اگر مدل یک کشتی در مقیاس یک دهم ساخته شده باشد و مقاومت باقی‌مانده مدل ۲ نیوتن باشد، مقاومت باقی مانده کشتی چند کیلو نیوتن است؟

$\lambda=10$ $R_{RS}=\lambda^3.R_{Rm}=1000\times2=2000\ N=2\ KN$

۳) سیـال غیر قابل تراکـم و بدون سطح آزاد (دارای ویسـکوزیته و اصـطکاک می‌باشد)

یک نیروی ویسکوز را می‌توان به صورت زیر بیان نمود: $F_v = \mu.\frac{dV}{dy}.S$

μ: ضریب ویسکوزیته دینامیکی

ν ضریب ویسکوزیته سینماتیکی $\left(\nu = \frac{\mu}{\rho}\right)$

نسبت بین یک نیروی ویسکوز در مدل و نیروی متناظر آن در کشتی واقعی عبارتست از:

$$\lambda_{FV} = \frac{F_{Vs}}{F_{Vm}} = \frac{\mu_s.(dV_s/dy_s).S_s}{\mu_m.(dV_m/dy_m).S_m} = \lambda_\mu.\frac{\lambda_V}{\lambda_L}.\lambda_L^2 \qquad (۱۸)$$

مقیاس مربوط به نیروهای ویسکوز باید مساوی با مقیاس نیروهای اینرسی باشد. از رابطه (۱۸) و (۷) داریم:

$$\lambda_\mu.\frac{\lambda_V}{\lambda_L}.\lambda_L^2=\lambda_\rho.\lambda_L^2.\lambda_V^2 \qquad (۱۹)$$

$$\lambda_\mu=\lambda_\rho.\lambda_V.\lambda_L \qquad (۲۰)$$

$$\frac{\mu_S}{\mu_m}=\frac{\rho_s}{\rho_m}.\frac{V_S}{V_m}.\frac{L_s}{L_m} \qquad (۲۱)$$

با در نظر داشتن $\nu=\frac{\mu}{\rho}$ نتیجه خواهد شد:

$$\frac{V_mL_m}{\nu_m}=\frac{V_S.L_S}{\nu_s}=R_n$$

$$(R_n)_m=(R_n)_s \qquad (۲۲)$$

و ضریب تبدیل نیروها عبارتست از:

$$F_s=\lambda.F_m$$

$$\lambda=\lambda_\rho.\lambda_L^2.\lambda_V^2=\lambda_\mu.\lambda_V.\lambda_L \qquad (۲۳)$$

معمولا برقراری تشابه رینولدز در آزمایشگاه غیرممکن یا بسیار دشوار است. از آنجا که تأثیر رینولدز در مغشوش کردن جریان است لذا از روشهای مختلف اغتشاش جریان استفاده می‌شود و نیازی به برقراری تشابه رینولدز نیست.

مثال) یک کشتی به طول ۱۰۰ متر با سرعت ۱۰ متر برثانیه مد نظر است. اگر بخواهیم یک مدل ۱ متری از آن را ساخته و تشابه رینولدز را برقرار کنیم، این مدل باید با چه سرعتی کشیده شود؟

$$(R_n)_m=(R_n)_s\rightarrow\frac{Vm}{Vs}=\frac{Ls}{Lm}\rightarrow Vm=10\times100=1000\ \ m/s \quad !!!$$

پس در عمل، انجام چنین تشابهی با افزایش سرعت، غیر ممکن است.

۴) سیال غیر قابل تراکم با سطح آزاد (دارای ویسکوزیته و اصطکاک)

هنگامی‌که‌کشتی در سطح آب دریا حرکت می‌کند، هر سه تشابه بین نیروها (ثقلی، ویسکوزیته و اینرسی) وجود دارند. بنابراین تشابه دینامیکی عبارتست از:

$$\lambda_{Fi}=\lambda_{Fg}=\lambda_{FV}$$

$$\lambda_\rho.\lambda_L^2.\lambda_V^2=\lambda_\rho.\lambda_L^3.\lambda_g=\lambda_\mu.\lambda_V.\lambda_L$$

از قانون تشابه فرود و رینولدز داریم:

$$\lambda_L.\lambda_g=\lambda_V^2 \qquad \lambda_\mu=\lambda_\rho.\lambda_V.\lambda_L$$

با ترکیب دو معادله فوق داریم:

$$\lambda_L^3.\lambda_g=\frac{\lambda_V^6}{\lambda_g^2}=\lambda_\nu^2$$

λ_g تقریباً برابر ۱ است بنابراین می‌توان چنین نوشت:

$$\lambda_L^3=\lambda_V^6=\lambda_\nu^2$$

چون‌کشتی و مدل هر دو در آب حرکت می‌کنند می‌توان فرض‌کرد:

$$\lambda_\nu=1$$

و لذا :

$$\lambda_L=\lambda_V=1$$

این شرایط تنها در صورتی امکان‌پذیر است که کشتی در مقیاس یک به یک ساخته شود و با سرعت نمونه واقعی کشیده شود. **لذا این مورد عملاً امکان پذیر نیست**. لذا از روش فرود و $C_{RS}=C_{RM}$ و فرمول *ITTC57* استفاده می‌شود.

مثال) اگر ضریب مقاومت کل کشتی و مدل با هم برابر باشند ($C_{Tm}=C_{Ts}$) و نسبت مقیاس کشتی و مدل λ باشد، با فرض این که خواص سیال در حوضچه آزمایش و دریا یکسان باشد؛ نسبت مقاومت کل کشتی به مدل را بدست آورید.

$$R_T=C_T\left(\frac{1}{2}\rho AV^2\right) \qquad \frac{R_{Ts}}{R_{Tm}}=\frac{C_{Ts}}{C_{Tm}}\times\frac{A_s}{A_m}\times\left(\frac{V_s}{V_m}\right)^2 \qquad \frac{R_{Ts}}{R_{Tm}}=\lambda^3$$

توجه: طبق تشابه عدد فرود داریم: $\left(\frac{V_s}{V_m}\right)^2=\lambda$

فصل هفتم: تعمیم نتایج آزمایش مدل به شناور اصلی

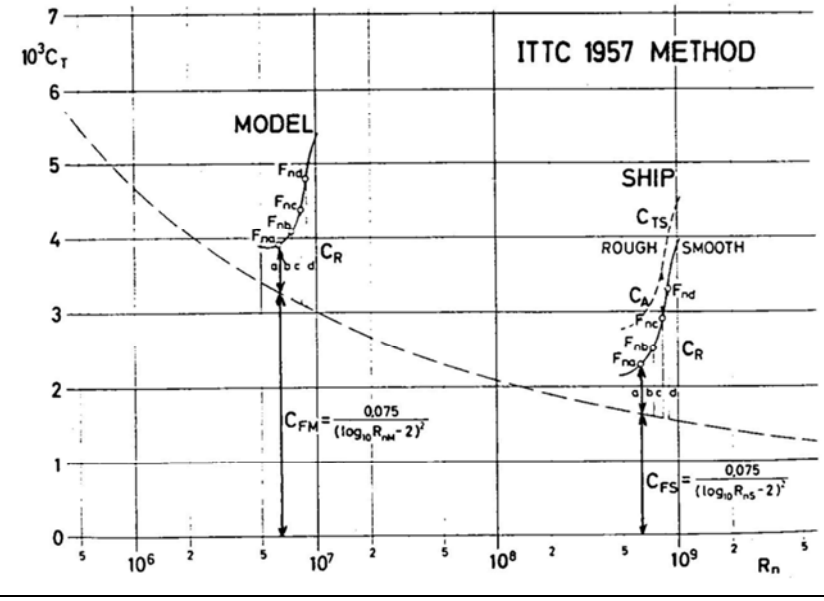
یک مدل شناور چندین مرتبه با سرعتهای مختلف در داخل حوضچه کشیده می‌شود و نمودارهای سرعت مقاومت آن ترسیم می‌گردد. اکنون منحنی مقاومت مدل باید به منحنی مقاومت شناور اصلی تبدیل شود. همانگونه که می‌دانیم، غیر ممکن است که یک مدل به سبب دخالت نیروهای اینرسی، جاذبه و اصطکاک از لحاظ دینامیکی کاملاً شبیه نمونه واقعی باشد. تنها شرایط سینماتیکی و هندسی نمونه واقعی را می‌توان توسط مدل ارضاء نمود. بنابراین فرض‌های مختلفی را باید در نظر گرفت تا بتوان منحنی‌های مدل را به کشتی واقعی تبدیل کرد. این فرضیات در هر روش متفاوت است. در ذیل به چند روش از این روش‌ها اشاره می شود:

۱) روش *ITTC – 57*[1]:

موضوع اصلی تمامی کنفرانس‌های *ITTC*، چگونگی انتقال نتایج بدست آمده از آزمایش روی مدل به شناور واقعی است. یافتن پاسخ کاملاً صحیح امری بسیار مشکل است. روشی که توسط *ITTC* در سال ۱۹۵۷ ارائه شد"*ITTC 57*" نامیده می‌شود. در این روش خط ارتباطی بین مدل و شناور واقعی با رابطه مقابل بیان شد:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2}$$

که C_F ضریب مقاومت اصطکاکی بدنه می‌باشد. شکل ۳–۸۰ روش *ITTC57* رانشان می‌دهد. مراحل استخراج نتایج به صورت زیر است:



شکل ۳–۸۰: روش ITTC-57

۱– ضریب مقاومت نهایی برای مدل براساس آزمایش کشش از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$C_{TM} = \frac{R_{Tm}}{1/2\rho.V^2{}_m .s_m}$$

۲–در این روش فرض می‌شود محاسبه ضریب مقاومت باقیمانده مدل و کشتی درهمان عدد فرود و رینولدز برابر هستند:

$$C_{RS} = C_{Rm}$$

۳– محاسبه ضریب مقاومت باقی‌مانده از رابطه زیر:

$$C_{RS} = C_{Tm} - C_{Fm}$$

۴– ضریب مقاومت نهایی برای یک کشتی با سطح صاف عبارتست از:

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{Rm}$$

که C_{FS} از *رابطه* ***ITTC57*** بدست می‌آید و C_R کشتی نیز همان C_R مدل است.

برای کشتی‌های با سطح بدنه ناصاف نیز خواهیم داشت:

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{Rm} + C_A$$

که C_A معرف ضریب ناصافی بدنه است. بعضی آزمایشگاههای دریایی، برای کلیه انواع شناورها، یک ضریب C_A ثابت استفاده می‌کنند برای مثال: $C_A = 0.0004$ و برخی نیز C_A را مرتبط با تناژ کشتی در نظر می‌گیرند (جدول ۳–۲۵):

1 - *International Towing Tank Confference*

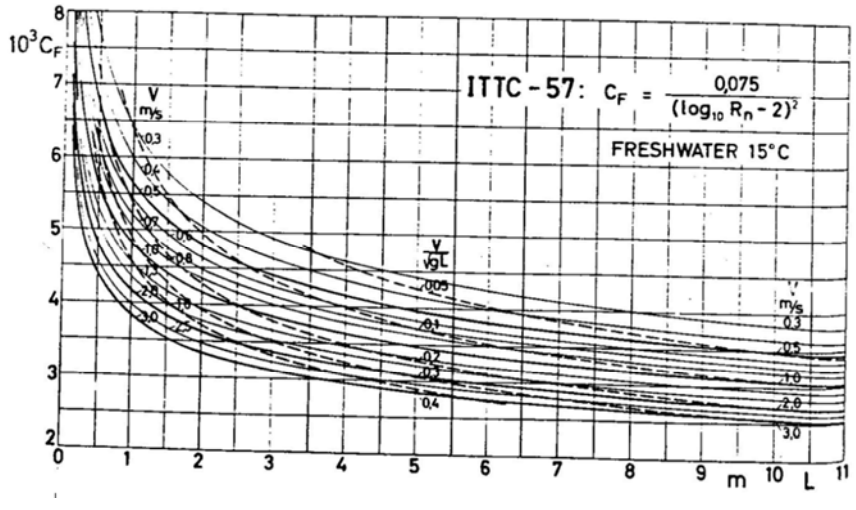
جابجایی (تن)	ضریب C_A
1000	0.0006
10000	0.0004
100000	0
1000000	-0.0006

جدول ۳-۲۵: ضریب ناصافی برای تناژهای مختلف

۵- مقاومت نهایی شناور اصلی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{TS} = C_{TS}(\frac{1}{2}\rho_s V_s^2 . A_s)$$

نمونه‌ای از فرمول *ITTC 57* برای C_F بر حسب L و V در شکل ۳-۸۱ ترسیم شده است.



شکل ۳-۸۱: روش ITTC-57 برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی

توجه شود که این نمودارها برای شرایط زیر ترسیم شده اند:

$$T = 15^o C \quad , \quad \rho = 1\ t/m^3 \qquad \nu = 1.139\times10^{-6} m/s$$

لازم به ذکر است که چنانچه بخواهیم از نمودارهای فوق در شرایط دیگری از دما و چگالی استفاده کنیم، قبل از ورود به نمودار و خواندن C_F از فرمول زیر استفاده می‌کنیم و با مقدار L_1 وارد نمودار شده و C_F را می‌خوانیم:

$$L_1 = \frac{1.139}{10^6 \nu} \times L$$

مشخص است که همواره ضریب مقاومت کل مدل از کشتی واقعی بزرگتر است ($C_{TM} > C_{TS}$) چراکه $C_T = C_f + C_R$ که C_R مدل و کشتی که برابر است ولی $C_{fm} > C_{fs}$ چراکه $R_{es} > R_{em}$ و طبق رابطه *ITTC57* عدد رینولدز در مخرج کسر قرار دارد ($C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2}$).

به همین ترتیب می‌توان گفت با افزایش سرعت کشتی، ضریب مقاومت اصطکاکی کاهش و مقاومت اصطکاکی افزایش می‌یابد. اگر ضریب مقاومت کل را مانند رابطه زیر در نظر بگیریم:

$$R_T = (1+K)C_f + C_W$$

برای ضریب K رابطه زیر توسط *ITTC* پیشنهاد شده است:

$$K = 0.17 + \frac{20.C_B}{(L/B)^2 \sqrt{B/T}}$$

همچنین *ITTC* محدوده زیر را برای ضریب مقاومت افزوده ناشی از زبری سطح برای کشتی‌ها پیشنهاد کرده که باید در تعمیم نتایج لحاظ شود:

$$\delta C_f = (4-6)\times10^{-4}$$

۲) روش فرود[1]

در سال ۱۸۶۸ ویلیام فرود برای اولین بار مقاومت کشتی یا هر شناوری که در سطح آب حرکت کند را به دو دسته کلی تقسیم کرد:

۱- مقاومت اصطکاکی که ناشی از اثر لزجت و نیروهای اینرسی خواهد بود.

۲- سایر مقاومتها که ناشی از اثر نیروهای جاذبه و اینرسی خواهد بود. این بخش از مقاومت، امروزه «مقاومت باقیمانده» نامیده می‌شود که شامل مقاومت موج‌سازی و مقاومت ویسکوز فشاری است.

$$R_T = R_F + R_R$$

همانطور که قبلاً بیان کردیم قانون تشابه فرود به صورت زیر بدست آمد:

$$V_m = \frac{V_s}{\sqrt{\lambda}}$$

هم اکنون برای محاسبه مقاومت کل شناور اصلی مراحل زیر را داریم:

۱- محاسبه مقاومت کل مدل (R_{Tm}) به روش انجام آزمایش.

۲- محاسبه مقاومت اصطکاکی (R_F)

فرود معتقد بود که بین مقاومت اصطکاکی و سرعت رابطه زیر برقرار است:

$$R_F = f.s.V^n$$

که این رابطه توسط پسر فرود به صورت زیر بازبینی شد:

$$R_F = f.s.V^{1.825}$$

در برخی مراجع رابطه‌ای برای محاسبه f ارائه شده است ولی امروزه سعی می‌شود برای محاسبه مقاومت اصطکاکی از همان روش *ITTC57* استفاده شود که دقیق‌تر است.

۳- محاسبه مقاومت باقیمانده مدل(R_{Rm}) که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{Rm} = R_{Tm} - R_{Fm}$$

۴- تبدیل مقاومت باقیمانده مدل به مقاومت باقی‌مانده شناور اصلی که از رابطه تبدیلی زیر بر اساس تشابه فرود استفاده می‌شود:

$$R_{RS} = K.R_{RM}$$

$$K = \lambda_{Fi} = \lambda_{fg} = \lambda_\rho.\lambda_L^3.\lambda g$$

یعنی اگر $\lambda_g = 1$ باشد داریم:

$$R_{RS} = \lambda_\rho.\lambda_L^3.R_{RM}$$

۵- محاسبه مقاومت اصطکاکی شناور اصلی (R_{FS})

به یکی از روشهای بیان شده.

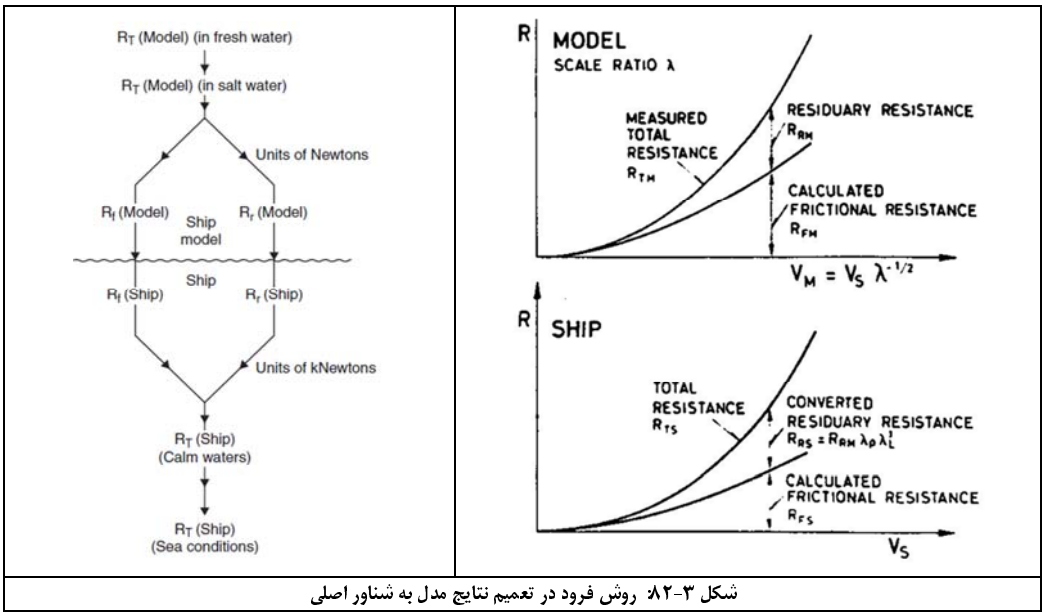
۶- محاسبه مقاومت کل شناور اصلی به روش زیر:

$$R_{TS} = R_{FS} + R_{RS}$$

$$R_{TS} = R_{FS} + \lambda_\rho.\lambda_L^3.R_{RM}$$

$$R_{TS} = R_{FS} + \lambda_\rho.\lambda_L^3.(R_{TM} - R_{FM})$$

برای اغلب کشتی های تجاری و زیردریایی‌ها، مقدار R_{FS} بسیار بزرگتر از مقدار R_{RS} می‌باشد. روش تبدیل فرود در شکل ۳-۸۲ ارائه شده است:



شکل ۳-۸۲: روش فرود در تعمیم نتایج مدل به شناور اصلی

1 - *Froud method*

جهت استفاده از روش فرود از فرضیات زیر استفاده می‌کنیم:

۱) ذرات سیال به علت تشکیل موج، در اطراف بدنه در مسیرهای نسبتاً پیچیده ای حرکت نمی‌کند.

۲) سرعت سیال در تمام طول بدنه یکسان فرض می‌شود (این در حالی است که در برخی قسمت‌ها سرعت سیال از سرعت شناور بیشتر و برخی قست‌ها کمتر است.)

۳) جدایی جریان اتفاق نمی‌افتد.

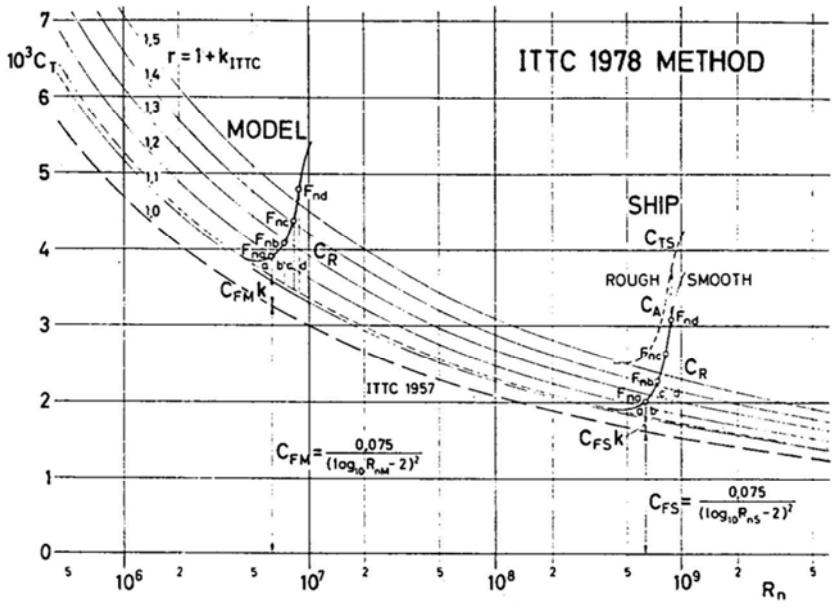
۴) لایه مرزی در همه نقاط بدنه دارای ضخامت یکسانی است.

۳)روش *ITTC78*

در سال ۱۹۷۸ کنفرانس *ITTC* روشی را جهت محاسبه مقاومت کل کشتی‌های تک پروانه پیشنهاد کرد که به موجب آن، ضریب مقاومت کل برای یک کشتی بدون بیلج براساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_{TS} = (1+k)C_{FS} + C_R + C_A + C_{AA}$$

که در رابطه فوق k معرف فاکتور فرم است که با انجام آزمایش مقاومت محاسبه می‌شود. نمودارهای این روش در شکل ۳-۸۳ ملاحظه می‌شود.



شکل ۳-۸۳: روش ITTC-78

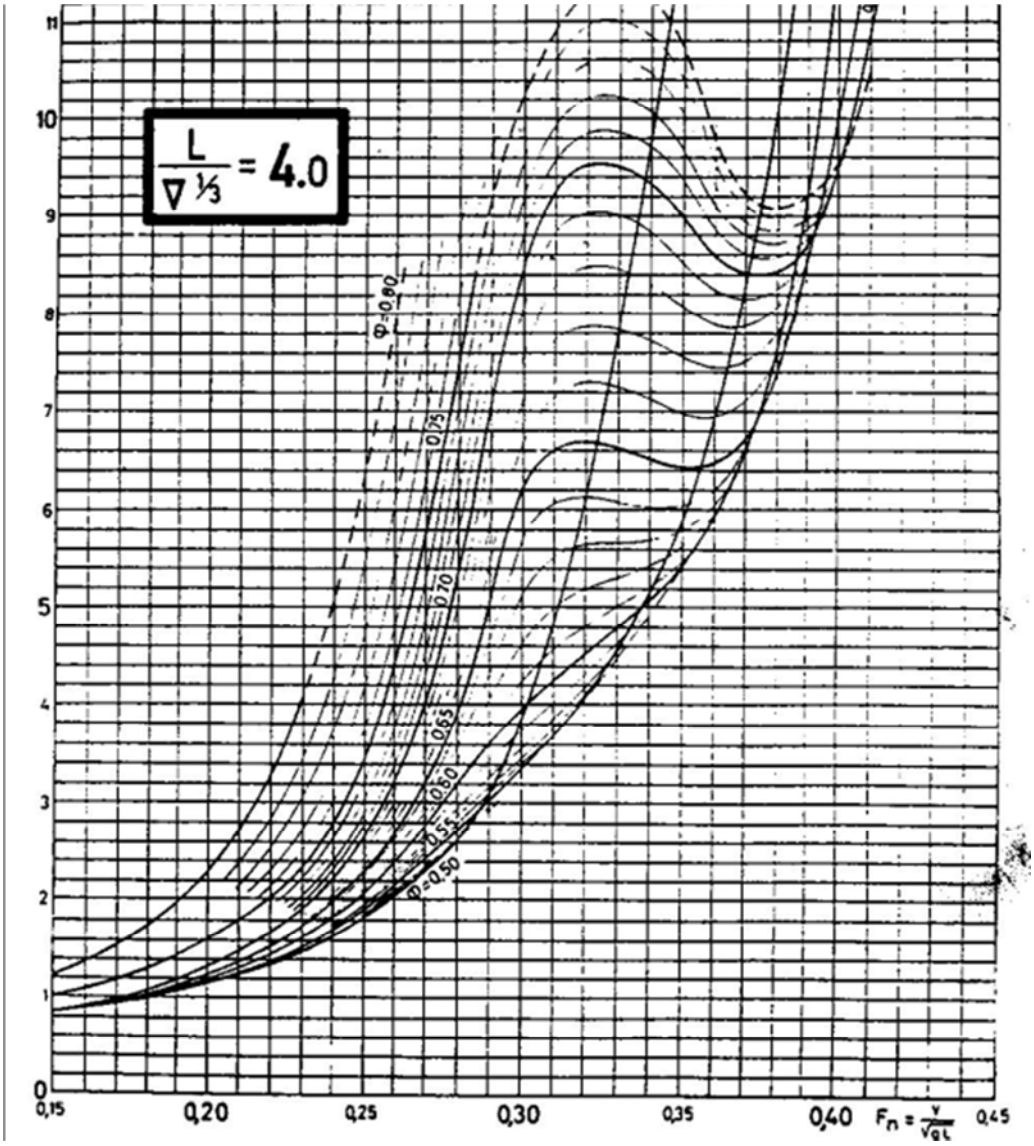
محتوای این روش شبیه روش پروهاسکا و هافز می‌باشد (به مرجع ۲۳ مراجعه شود).

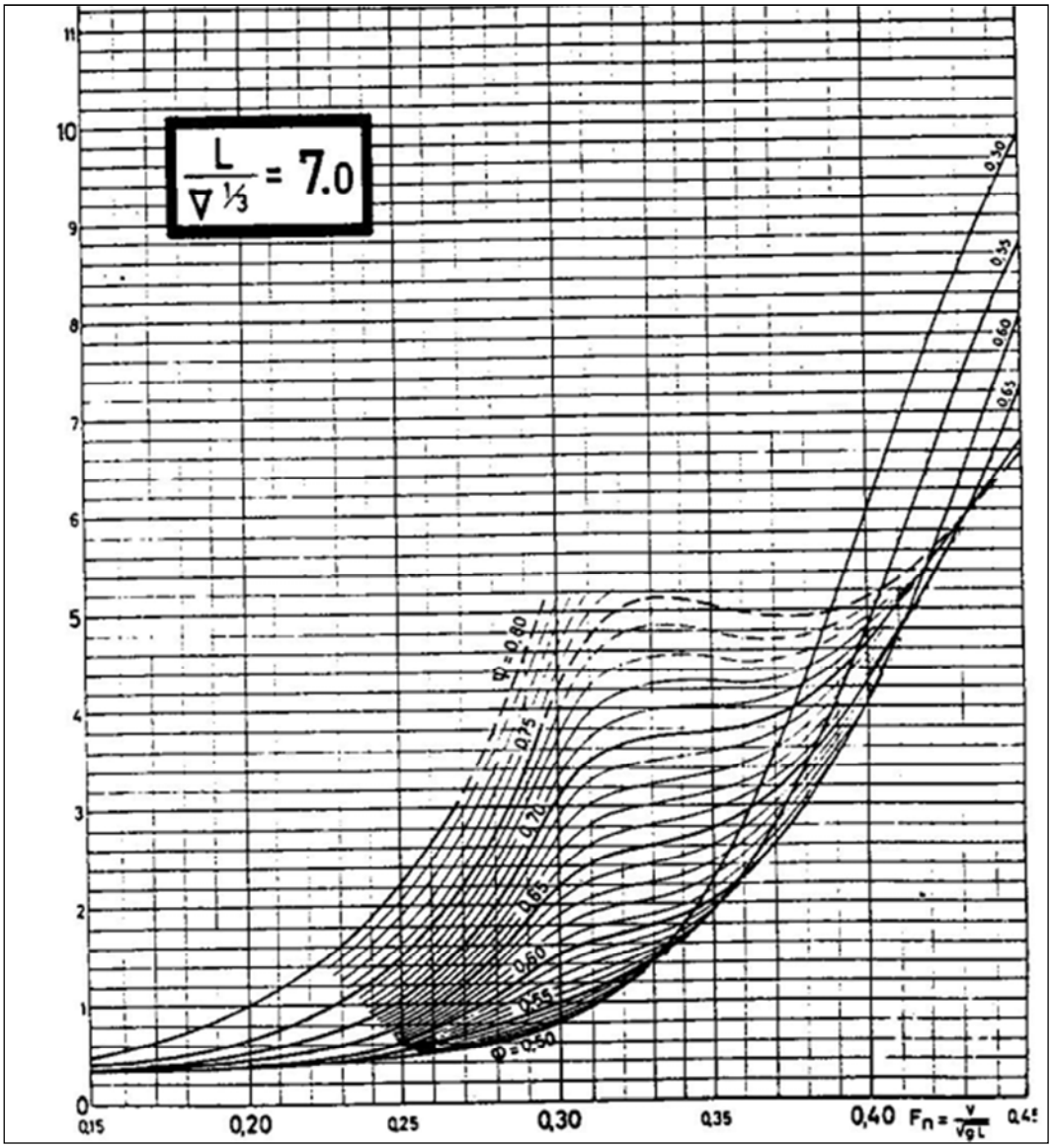
۴) نمودارهای گولدهامر و هاروالد[1]

گولدهامر و هارولد در سالهای ۱۹۶۵ و ۱۹۷۴ نتایج منتشر شده آزمایشهای کشش را بکار گرفته و از آن نمودارهایی برای C_R استخراج کرد که در شکل‌های زیر ملاحظه می‌شود (شکل ۳-۸۴).

1 - *Guldhammer & Harvald Diagrams*

شکل۳-۸۴: برخی از نمودارهای گولدهامر و هاروالد





این منحنی‌ها برای شرایط استاندارد مقابل رسم شده‌اند: $T = 15^{\circ}C \quad , \quad \rho = 1.025 \ {}^{kg}/_{m^3} \quad \nu = 1.188\times10^{-6} \ {}^{m^2}/_{s}$

این منحنی‌ها برای چندین مدل با ضریب منشوری‌های متفاوت (φ) و برای نسبت $\frac{B}{T} = 2.5$ استخراج شده است.

چنانچه بخواهیم تحت شرایط دیگری از حرارت و چگالی این منحنی‌ها را بدست آوریم، بجای L باید از مقدار L_1 در نمودار استفاده کنیم و مقدار C_F را بخوانیم: $L_1 = \frac{1.188}{10^6 \times \nu}$

روش بدست آوردن C_R شبیه همان روش $ITTC$ می باشد.

از آنجا که نمودارها برای نسبت عرض $\frac{B}{T} = 2.5$ بدست آمده‌اند، لذا اگر بخواهیم آن را برای شناورهایی با $\frac{B}{T}$ بزرگتر یا کوچکتر استفاده کنیم، تصحیح زیر را روی C_R بدست آمده از نمودار اعمال می‌کنیم.

$$10^3 C_R = 10^3 C_{R(\frac{B}{T}=2.5)} + 0.16(\frac{B}{T} - 2.5)$$

بدین ترتیب C_R را می‌توان برای شناورهای با $\frac{B}{T}$های مختلف بکار برد. خط ارتباطی مدل و کشتی واقعی می‌تواند چنین نمودارهایی باشد. (در این نمودارها، φ ضریب منشوری افقی است).

❖ سری مدل‌های استاندارد

برای کشتی‌های تجاری چندین سری مدل ساخته شده و پس از انجام آزمایشات حوضچه کشش، نتایج آن ارائه شده است مانند:

- ✓ **سری تیلور:** شامل ۱۵۷ نوع مدل آزمایش شده برای ضریب منشوری بین ۰/۸۶ – ۰/۴۸ و نسبت طول به جابجایی ۱۰-۵/۲ و نسبت عرض به آبخور ۳/۷۵ و ۳ و ۲/۲۵ و در تمام آنها LCB ثابت است.
- ✓ **سری کنت:** شامل ۲۰ مدل کشتی و هرکدام برای ۳ آبخور مختلف
- ✓ **سری ۶۰:** شامل ۶۰ مدل کشتی با L/B از ۵/۵ تا ۸/۵ و B/H از ۲/۵ تا ۳/۵. مشخصات مدلهای سری ۶۰ در قسمت اول این کتاب آمده است.

پارامترهای اصلی در سری‌های استاندارد عبارتند از:

- ضریب بلوکی (C_B)
- LCB: که بهینه بودن مرکز شناوری طولی بر مقاومت بسیار مؤثر است.
- سرعت حرکت (محدوده Fn , Rn)
- نسبت های ابعادی $\frac{L}{\nabla^{1/3}}$, $\frac{B}{T}$
- شکل سینه و پاشنه
- C_M (ضریب مقطع میانی)

مثال) در نظر است یک لندینگ کرافت به طول ۵۰ متر، عرض ۷ متر، عمق ۵ متر با سرعت ۱۰ گره در حوضچه کشش دانشگاه صنعتی مالک اشتر آزمایش شود. مساحت سطح خیس کشتی ۸۰۰ متر مربع است. مطلوبست: الف) مقیاس مدل و سرعت مدل برای انجام آزمایش (با در نظر گرفتن ابعاد حوضچه کشش دانشگاه صنعتی مالک اشتر) ب) اگر نیروی مقاومت مدل ۱/۳ نیوتن باشد، نیروی مقاومت کشتی واقعی را بدست آورید.

حل) از آنجا که طول مدل اغلب در حدود ۱ متر است، ابتدا مقیاس $\frac{1}{40}$ در نظر گرفته می‌شود و سپس با استفاده از نسبت مساحت مقطع عرضی مدل به مقطع عرضی حوضچه و سرعت قابل کشش در حوضچه، تأئید یا تغییر می‌یابد:

۱) مقیاس ابعاد مدل:

$$\lambda = \frac{1}{40}$$

$$L_S = 50\ m \qquad B_S = 7\ m \qquad D_S = 5\ m$$

$$L_m = \frac{50}{40} = 1.25\ m \qquad B_m = 0.175\ m \qquad D_m = 0.125\ m$$

$$V_S = 5.1\ m/s$$

۲) نسبت مساحتهای مدل به حوضچه:

$$A_m = B_m.D_m = 0.175 \times 0.125 = 0.02\ m^2$$

$$A_t = B_t.D_t = 7 \times 3 = 21\ m^2$$

$$\frac{A_m}{A_t} = \frac{0.02}{21} = 0.001$$

از آنجا که نسبت مساحتها کوچکتر از ۰/۰۰۴ است، پس مقیاس $\frac{1}{40}$ در نظر گرفته شده، از این نظر مناسب است.

۳) مقیاس سرعت: با توجه به مقیاس انجام شده روی ابعاد مدل و استفاده از تشابه فرود داریم:

$$(F_n)_S = (F_n)_m$$

$$\frac{V_S}{\sqrt{g.L_S}} = \frac{V_m}{\sqrt{g.L_m}} \qquad V_m = V_S\sqrt{\frac{L_m}{L_S}} = V_S\sqrt{\frac{1}{\lambda}}$$

$$V_m = 5.1\sqrt{\frac{1}{40}} = 0.8\ m/s$$

یعنی مدل باید با سرعت ۰/۸ m/s در حوضچه کشش، حرکت کند. از آنجا که این سرعت از حداکثر سرعت ارابه کمتر است، لذا از این نظر سرعت مدل مورد تأئید است

۴) بررسی مدت زمان حرکت در سرعت ثابت:

گفتیم که مدت زمان حرکت در سرعت ثابت باید حداقل ۷ ثانیه باشد. این زمان از آنجا اهمیت دارد که نیروی نشان داده شده در سرعت ثابت، معیار ادامه مراحل و تعمیم نتایج است. لذا طول حوضچه و سرعت کشش باید به گونه‌ای باشد که این حداقل زمان بدست آید. لذا با فرض شتاب‌گیری

مثبت $0.05g$ در حین حرکت و شتاب منفی $0.07g$ حین توقف بررسی می‌کنیم:

- طول طی شده تا رسیدن به سرعت ثابت $\left(0.8\ m/s\right)$: $a_1 = 0.05\ g \approx 0.5\ m/s^2$

$$V = a_1.t_1 \qquad t_1 = \frac{V}{a_1} = \frac{0.8}{0.5} = 1.6\ Sec$$

$$x_1 = \frac{1}{2}a_1 t_1^2 = \frac{1}{2}(0.5)(1.6)^2 = 0.64\ m$$

- طول طی‌شده برای متوقف شدن از سرعت ثابت $\left(0.8\ m/s\right)$ به حالت سکون:

$$t_2 = \frac{V}{a_2} = \frac{0.8}{0.7} = 1.14\ Sec$$

$$x_2 = \frac{1}{2}a_2 t_2^2 = \frac{1}{2}(0.7)(1.14)^2 = 0.45\ m$$

- کل طول طی‌شده برای شتاب‌گیری و توقف: $x_3 = x_1 + x_2 = 1.1\ m$
- اگر طول مؤثر حوضچه ۱۲۰ متر باشد، طول طی‌شده در سرعت ثابت عبارتست از:

$$x_4 = l - x_3 = 120 - 1 = 119\ m$$

$$t = \frac{x}{V} = \frac{119}{0.8} = 150\ Sec$$

از آنجا که زمان حرکت در سرعت ثابت از ۷ ثانیه بیشتر است، لذا سرعت بدست آمده از این نظر نیز مطلوب است. بدین‌ترتیب ارابه می‌تواند حتی طول کمتری از طول حوضچه را طی کند به گونه‌ای که زمان سرعت ثابت ۷ ثانیه تأمین شود.

۵) تعمیم نیروی مدل به شناور اصلی

با بررسی مراحل مختلف تا اینجا مشخص شد که مقیاس $\frac{1}{40}$ در نظر گرفته شده و سرعت مدل برابر $0.8\ m/s$ مناسب است. حال اگر نیروسنج ارابه، نیروی ۱/۳ نیوتن را نشان داده باشد، با روش زیر نتایج را تعمیم می‌دهیم. از روش *ITTC-57* استفاده می‌کنیم: $R_{tm} = 1.5\ N$

با استفاده از مساحت سطح خیس کشتی واقعی و مقیاس مساحت داریم:

$$A_m = \frac{A_S}{\lambda^2} = \frac{800}{(40)^2} = 0.5\ m^2$$

$$C_{tm} = \frac{R}{\frac{1}{2}\rho A V^2} = \frac{1.5}{0.5\times 1000\times 0.5\times (0.8)^2} = \frac{1.5}{160} = 0.008$$

$$R_{nm} = \frac{V_m.L_m}{\nu} = \frac{0.8\times 1.25}{1.007\times 10^{-6}} = 0.99\times 10^6$$

از آنجا که عدد رینولدز مدل حدود یک میلیون است، پس شرط مغشوش‌بودن جریان روی مدل (همانند کشتی واقعی) برقرار است.

$$C_{fm} = \frac{0.075}{(\log R_{nm} - 2)^2} = \frac{0.075}{16} = 0.005$$

$$C_{Rm} = C_{tm} - C_{fm} = 0.008 - 0.005 = 0.003$$

$$C_{Rm} = C_{RS} = 0.003$$

$$C_{fS} = \frac{0.075}{(\log R_{es} - 2)^2}$$

$$R_{nS} = \frac{V_S.L_S}{\nu} = \frac{5.1\times 50}{1.01\times 10^{-6}} = 252.4\times 10^6$$

$$C_{fS} = \frac{0.075}{(\log R_{es} - 2)^2} = \frac{0.075}{41} = 0.0018 \approx 0.002$$

$$C_{ts} = C_{fS} + C_{Rm} = 0.002 + 0.003 = 0.005$$

$$R_{TS} = \frac{1}{2}C_{tS}.\rho.A_S.V_S^2 \qquad A = 800\,m^2 \qquad V_S = 5.1\,m/s \qquad \rho = 1.025\,\frac{t}{m^3}$$

$$R_{TS} = 0.5\times 0.005\times 1.025\times 800\times (5.1)^2 = 53.3\ KN$$

بنابراین نیروی مقاومت حرکت کشتی در آب آرام ۵۳/۳ *KN* است. توجه شود که سایر اجزاء مقاومت مانند مقاومت باد و ضمائم بدنه باید به این مقاومت افزوده شوند تا مقاومت کل کشتی بدست آید.

❖ تعمیم نتایج آزمایش مدل در زیر آب

زیردریایی یا یک غوطه‌ور شونده در سطح آب، از آنجاکه اثرات موج را بر روی سطح آب ندارد لذا نمی‌توان از تشابه فرود استفاده کرد. گفتیم که برای شبیه‌سازی لایه مرزی و اغتشاش جریان، برقراری تشابه رینولدز نیز در عمل غیرممکن است. لذا برای آشفته کردن جریان اطراف مدل (همانند زیردریایی واقعی) بجای استفاده از تشابه رینولدز از روش‌های زبر کردن بدنه، بستن سیم به جلوی بدنه و غیره استفاده می‌شود. پس از اطمینان از آشفتگی جریان اطراف بدنه مدل و آگاهی از عدم وجود مقاومت موج سازی در زیر آب می‌توانیم به تعمیم نتایج بپردازیم. همچنین از مباحث مقاومت می‌دانیم که ضریب مقاومت ویسکوز فشاری پس از رینولدز بحرانی، تقریبا ثابت مانده و نمودار آن یک خط افقی می‌شود. لذا بدون نیاز به سرعت خاص، زیردریایی مدل را در یک سرعت دلخواه می‌کشیم و مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

۱- محاسبه Cfm از رابطه $ITTC\text{-}57$

۲-محاسبه مقاومت کل مدل (Rtm) و محاسبه Ctm با توجه به سرعت آزمایش مدل (اثر سرعت دلخواه مدل در اینجا لحاظ شده و از اینجا به بعد، مسئله مستقل از سرعت آزمایش مدل حل می‌شود).

۳-محاسبه Cvp از رابطه: $Cvp=Ctm-Cfm$

۴-برابر قراردادن $Cvpm$ و $Cvps$ $(Cvpm=Cvps)$

۵-محاسبه Cfs از رابطه $ITTC\text{-}57$

۶-محاسبه ضریب مقاومت کل زیردریایی $(Cts=Cfs+Cvps)$

۷-محاسبه مقاومت کل زیردریایی

وقتی تنهاییم دنبال یه دوست می‌گردیم ؛
وقتی پیدا کردیم دنبال عیب‌هاش می‌گردیم؛
وقتی از دستش دادیم دنبال خاطراتش می‌گردیم؛
و باز هم تنها می‌شویم !!

بخش پنجم :

طراحی خطوط بدنه کشتی

فصل اول: مفاهیم اولیه

طراحی خطوط بدنه کشتی با معیارهای اصلی زیر انجام می‌شود:

۱) جای‌دادن بار و تجهیزات کشتی در داخل آن

۲) شکل هیدرودینامیکی مناسب به گونه‌ای که برای حرکت، نیاز به کمترین توان ممکن داشته باشد.

۳) تأمین پایداری مناسب برای کشتی که بسیار وابسته به عرض بدنه است.

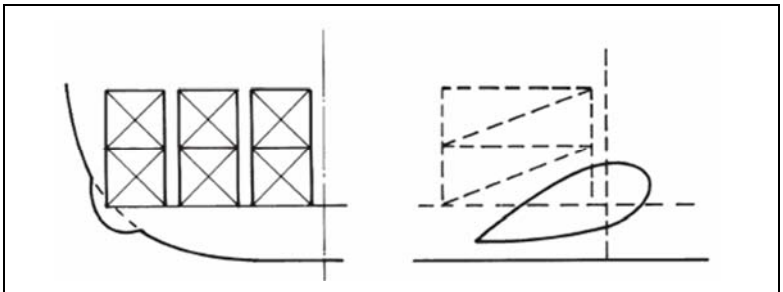
۴) زیبایی شکل ظاهری و عدم وجود فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های ناموزون

۵) تأمین مانورپذیری مناسب: هر چه بدنه چاق و توپر باشد و نسبت L/B کم باشد، مانورپذیری افزایش می‌یابد.

۶) تأمین حفظ مسیر و پایداری دینامیکی مناسب: هر چه بدنه، کشیده و باریک باشد و نسبت L/B زیاد باشد، قابلیت حفظ مسیر افزایش می‌یابد. مانورپذیری و پایداری دینامیکی (قابلیت حفظ مسیر) دو پارامتر مغایر هم هستند.

۷) میرایی مناسب حرکت رول و پیچ و اسلمینگ: شکل مقطع عرضی بدنه بر میرایی حرکت رول مؤثر است. شکل و حجم سینه و پاشنه و موقعیت LCB نیز بر حرکت پیچ و اسلمینگ بسیار مؤثر هستند.

حمل کالاهایی که دارای ابعاد ثابت و مشخصی هستند، بیشترین محدودیت را برای طراحی بدنه تحمیل می‌کنند مانند حمل کانتینرها و اتومبیل. از طرفی کالاهایی که به شکل حجم انبار در می‌آیند مانند فله (گندم و جو) و مایعات (نفت و مواد شیمیایی) کمترین محدودیت را بر طراحی شکل بدنه تحمیل می‌کنند و آزادی بیشتری در این زمینه وجود دارد. در کشتی‌هایی مانند کشتی‌های کانتینربر در واقع ابتدا تعداد کانتینرها چیدمانی می‌شوند و سپس یک روکش بر روی آنها کشیده می‌شود. نسبت‌های ابعادی و ضرایب بدنه نباید از حدود استاندارد و رایج تجاوز کند. در برخی مواقع ممکن است گوشه‌ای از یک کانتینر که در نزدیکی قسمت سینه قرار گرفته، از بدنه بیرون بزند (مطابق شکل ۳-۸۵).



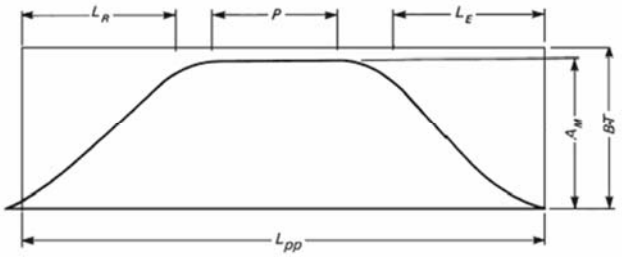
شکل ۳-۸۵: بیرون زدگی موضعی کانتینر که باعث تغییر شکل موضعی بدنه می‌شود.

در این شرایط، بزرگ کردن کل بدنه مقرون به صرفه نیست لذا یک برآمدگی موضعی مطابق شکل در نظر گرفته می‌شود. این برآمدگی موضعی اگر در سینه باشد، اثر کمی بر افزایش مقاومت دارد و اگر در قسمت پاشنه باشد، اثر زیادی بر جدایی جریان و افزایش مقاومت دارد و لذا توصیه نمی‌شود. برای طراحی خطوط بدنه کشتی ابتدا باید ضرایب بدنه تعیین شوند و سپس با استفاده از این ضرایب می‌توان طراحی خطوط بدنه را انجام داد. در نرم‌افزارهای دریایی مانند *Tribon* و *Maxsurf* می‌توان خطوط بدنه یک شناور را با دادن ابعاد اصلی و ضرایب بدنه مقیاس نمود و به یک شکل بدنه

سه بعدی مناسب دست یافت. یکی از ابزارهای مناسب برای تعیین ضرایب بدنه، شکل سینه و شکل پاشنه، استفاده از منحنی مقاطع عرضی[1] می‌باشد. این منحنی در بخش هیدرواستاتیک و پایداری به طور کامل توضیح داده شد. حال در اینجا به کاربردهای آن اشاره می‌کنیم و سپس به تعیین و تخمین ضرایب هندسی بدنه می‌پردازیم.

❖ کاربردهای منحنی مقاطع عرضی

شکل کلی این منحنی که برای هر شناوری به صورت جداگانه استخراج می‌شود، مطابق شکل ۳-۸۶ می‌باشد.



شکل ۳-۸۶ : نمایش عوامل مؤثر در منحنی مقاطع عرضی

طول این منحنی برابر طول بین دو عمود شناور است و فاصله هر نقطه از منحنی تا خط افقی برابر مساحت مقطع عرضی شناور در همان مقطع است. در واقع همانطور که قبلاً هم بیان شده است، این منحنی بیانگر مساحت مقطع عرضی در هر مقطعی از طول شناور است. پارامترهای زیر را می‌توان از این منحنی استخراج کرد:

۱) مساحت زیر این نمودار برابر حجم بدنه شناور است. چراکه طول هر خط از این نمودار معرف مساحت مقطع عرضی بدنه است که حاصل جمع آنها (محاسبه مساحت زیر نمودار) برابر با حجم بدنه خواهد شد.

۲) مرکز سطح زیر نمودار منحنی مقاطع عرضی بیانگر مرکز حجم بدنه است به گونه‌ای که موقعیت طولی و عمودی مرکز حجم یا همان مرکز بویانسی را می‌توان از این منحنی استخراج نمود. موقعیت طولی مرکز بویانسی[2] LCB مهمترین خروجی آن در این قسمت است که از فاصله مرکز سطح نمودار از سینه یا پاشنه بدست می‌آید.

۳) طول ورودی (L_E): طول ورودی[3] برابر طولی از قسمت ابتدایی منحنی است که مساحت عرضی بدنه آنقدر زیاد می‌شود که به حداکثر مقدار خود برسد. این طول را از روی هندسه بدنه یا از روی شکل صفحه آبخور نیز می‌توان تشخیص داد. این طول دارای کاربردهای زیادی است که در قسمتهای بعدی بدان اشاره می‌شود.

۴) طول بدنه میانی موازی[4] (p): این طول، طولی از قسمت میانی بدنه است که بدون تغییر شکل امتداد یافته است. در واقع در این قسمت از بدنه، مساحت و شکل مقطع عرضی به حداکثر مقدار خود رسیده و بدون تغییر شکل امتداد یافته است. این طول از روی هندسه بدنه قابل تشخیص است. طول قسمت زیادی از بدنه نفتکش‌ها یا کشتی‌های تجاری بزرگ به صورت بدنه موازی است.

۵) طول خروجی[5] (L_R): طول خروجی برابر طولی از قسمت انتهایی منحنی است که مساحت مقطع عرضی بدنه کاهش می‌یابد تا به حداقل مقدار خود در محل عمود پاشنه برسد. این طول نیز از روی هندسه بدنه یا شکل صفحه آبخور قابل تشخیص است. این طول دارای کاربردهای زیادی است که بدان اشاره خواهد شد.

۶) زاویه ورودی[6] (i_E): زاویه مماس وارد بر منحنی مقاطع عرضی در محل عمود سینه را «زاویه ورودی» گویند (مطابق شکل ۳-۸۷)

شکل۳-۸۷: زاویه ورودی و زاویه خروجی در منحنی مقاطع عرضی

1 – Cross Section Area
2 - longitudinal centre of Buoyancy
3 - Entrance length
4 - parallel middle body
5 - Run length
6 - Entrance angle

۷) زاویه خروجی[1] (i_R): زاویه مماس بر منحنی مقاطع عرضی در محل عمود پاشنه را «زاویه خروجی» گویند (مطابق شکل ۳-۸۷).

۸) ضریب بلوکی (C_B): ضریب بلوکی از منحنی مقاطع عرضی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_B = \frac{\text{نمودار زیر مساحت}}{L.B.T} = \frac{\text{بدنه آب زیر حجم}}{L.B.T}$$

۹) ضریب مقطع میانی (C_M): این ضریب به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_M = \frac{\text{محور تا موازي ميانی فاصله بدنه ميانی عرضی مقطع مساحت}}{B.T} = \frac{\text{ميانی عرضی مقطع مساحت}}{B.T}$$

برای طراحی خطوط بدنه پس از توضیحات منحنی مقاطع عرضی، مطالب زیر بیان می‌شوند:

- تعیین موقعیت مرکز بویانسی طولی (LCB)
- تعیین ضرایب بدنه
- تعیین شکل سینه
- تعیین شکل پاشنه

1 - Run angle

فصل دوم: ملاحظات تعیین شکل سینه کشتی

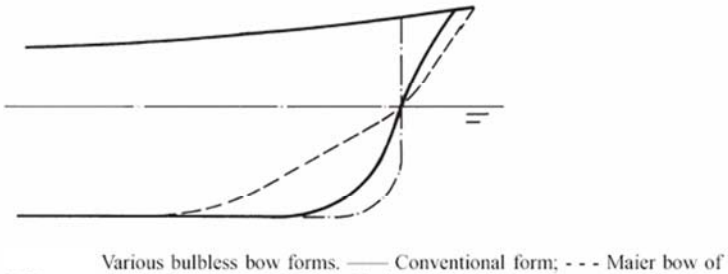
سه حالت کلی برای شکل سینه کشتی می‌توان در نظر گرفت (شکل ۳-۸۸):

۱) سینه معمولی ۲) سینه مایر[1] ۳) سینه عمودی[2]

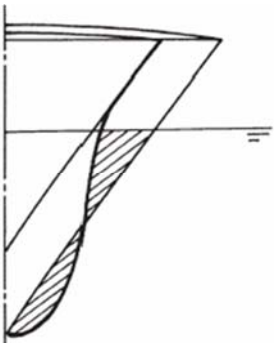
از سال ۱۹۳۰ – ۱۸۴۰ شکل سینه عمودی تقریباً رایج بوده است. از سال ۱۹۳۰ به بعد، شیب سینه در قسمت بالا و پائین خط آب رایج شد. مزایای شیب سینه را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) شکافتن راحت‌تر آب که سبب کاهش مقاومت حرکت شناور می‌شود.
۲) افزایش ذخیره بویانسی در قسمت سینه
۳) ایمنی و حفاظت بیشتر در برابر تصادم
۴) زیبایی بیشتر بدنه

البته سینه‌های بدون شیب، هنوز در کشتی‌های ساحلی که محدودیت طول دارند، رایج است.



شکل ۳-۸۸ : حالات مختلف شکل سینه کشتی‌ها



شکل ۳-۸۹: شکل‌های مختلف مقاطع سینه کشتی

❖ شکل مقاطع مختلف سینه کشتی

دو حالت کلی شکل مقاطع سینه شناور، مقاطع U و V شکل هستند که در ادامه مبحث با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شرایط مقایسه این دو نوع شکل مقطع سینه، مطابق شکل ۳-۸۹ به صورت زیر است:

۱) مساحت زیر آب یکسان (مطابق شکل، مساحتهای اضافه و کم شده هاشور خورده با هم برابر هستند).
۲) ارتفاع بدنه و آبخور هر دو برابر است.
۳) زاویه عرضی بدنه در بالای خط آب[3] در هر دو یکسان است.

با در نظر گرفتن این شرایط، هم‌اکنون مقایسه بین مقاطع عرضی سینه U و V شکل انجام می‌شود:

• مزایا و معایب مقطع V شکل:

در زیر به مزایا و معایب مقطع V شکل اشاره می‌شود که به تبع آن معایب و مزایای مقطع U شکل هم معلوم می‌گردد (با توجه به شکل ۳-۸۹):

۱) حجم فوقانی بزرگتر که منجر به ذخیره بویانسی بیشتری می‌شود.
۲) عرض بدنه بزرگتر که منجر به پایداری بیشتر می‌شود:

عرض بیشتر ← BM بیشتر ← KM بیشتر ← پایداری بهتر

عرض بیشتر ← حجم فوقانی بزرگتر ← KB بیشتر ← KM بیشتر ← پایداری بهتر

1 - Maier bow
2 - Vertical stern
3 - Flare

۳) سطح خیس کمتر: برای مشخص شدن موضوع، یک مقطع مثلثی و یک مقطع مربعی را با مساحتهای مقطع و حجم یکسان در واحد طول در نظر می‌گیریم:

مربع به ضلع a :
$$A_m = a^2$$
$$V = (a^2).1 = a^2$$
$$\text{محیط} \quad = P = 3a$$

مثلث به قاعده $2a$ و ارتفاع a :
$$A_m = \frac{1}{2}a \,.\, 2a = a^2$$
$$V = a^2 \,.\, 1 = a^2$$
$$P = (a\sqrt{2}) \times 2 = 2\sqrt{2}a = 2.8\,a$$

ملاحظه می‌شود که حجم هر دو در واحد طول یکسان است ولی مساحت سطح خیس مقطع مثلثی از مستطیلی کمتر است (فرض شده است که فقط ضلع فوقانی آنها خیس نشود).

۴) وزن فولاد کمتر: به تبع، با کم شدن مساحت سطوح جانبی (همانند سطح خیس شده)، وزن ورق فولادی نیز کمتر خواهد شد.

۵) هزینه ساخت کمتر: بدلیل مسطح بودن سطوح جانبی مقاطع V شکل، هزینه شکل‌دهی ورق و ساخت آن کمتر است.

۶) قابلیت دریانوردی بهتر از دو طریق زیر:

- ذخیره بویانسی بیشتر (بدلیل عرض بدنه)
- کاهش اثرات اسلمینگ بدلیل حجیم بودن قسمت فوقانی. در واقع این حجم بویانسی باعث می‌شود، بخشی از بدنه که در اثر اسلمینگ در داخل آب فرو می‌رود، سریع‌تر از آب خارج گردد و دامنه حرکات کاهش یابد.

۷) مساحت عرشه بیشتر: بدلیل زیادتر بودن عرض مقطع V شکل، مساحت عرشه بیشتری برای جادادن بار و کانتینر فراهم می‌شود بخصوص برای جانمایی انبارها در قسمت جلوی بدنه (که عرض بدنه کاهش می‌یابد) مناسب می‌باشد.

۸) فرورفتگی بیشتر در داخل آب در شرایط سبک (بالاست)؛

وقتی کشتی در شرایط بدون بار و سبک (شرایط بالاست) می‌باشد، باید برای افزایش آبخور، مخازن تعادل (بالاست) را پر از آب نماید. مقطع V شکل بدلیل کم‌عرض بودن قسمتهای تحتانی، در شرایط سبک، دارای آبخور بیشتری است. به همین دلیل کشتی‌های با مقطع V شکل نیاز به مخازن تعادل کوچکتری برای افزایش آبخور دارند.

۹) توصیه محدوده مناسب برای مقطع V و U شکل:

- محدوده مناسب مقطع V شکل: در دو حالت می‌توان این مقطع را توصیه کرد،

I. $F_n \langle 0.18$ یا $F_n \rangle 0.25$

II. برای $\frac{B}{T} \rangle 3.5$

- محدوده مناسب مقطع U شکل: $0.18 \langle F_n \langle 0.25$

❖ آزمایشات گوتنبرگ بر مقاطع قسمت سینه کشتی

گوتنبرگ آزمایشاتی را بر روی مقاطع U و V شکل و مقاطع مابین U و V شکل برای قسمت سینه انجام داد تا محدوده عدد فرود مناسب را برای مقاطع سینه مشخص نماید. این آزمایشات با شرایط زیر در ساخت مدل انجام شد:

- بدنه بدون حبابی سینه
- منحنی مساحت مقاطع عرضی یکسان
- نسبتهای اصلی یکسان

$C_B = 0.675$
$C_M = 0.984$
$B/T = 2.4$
$L/B = 7.24$

نتایج آزمایشات وی به صورت نمودار شکل ۳-۹۰ ارائه شد. این نمودار تغییرات مقاومت بر حسب عدد فرود را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در محدوده عدد فرود ۰/۲۵ – ۰/۱۸ شکل سینه U شکل مناسب‌تر است و در محدوده فرود خارج از این حدود، شکل سینه V شکل مناسب‌تر است. بیشترین تغییرات مقاومت در حدود ۶ درصد قابل انتظار است. گوتنبرگ توصیه کرد که در محدوده فرود ۰/۲۵ – ۰/۱۸ از مقطع سینه تقریباً U شکل نیز

می‌توان استفاده کرد ولی در عدد فرود مابین آنها $(F_n = 0.23)$، مقطع سینه کاملاً U شکل مناسب است.

❖ انحنای مقطع عرضی بدنه در بالای خط آب[1]

انحنای عرضی بالای خط آب دارای مزایای زیر می‌باشد:

۱) تأمین عرض بیشتر و در نتیجه مساحت عرشه بیشتر
۲) شکافتن بهتر آبهای مواج
۳) افزایش ذخیره بویانسی و حجم بالای خط آب
۴) کاهش دامنه حرکات پیچ و رول
۵) افزایش ارتفاع منحنی GZ

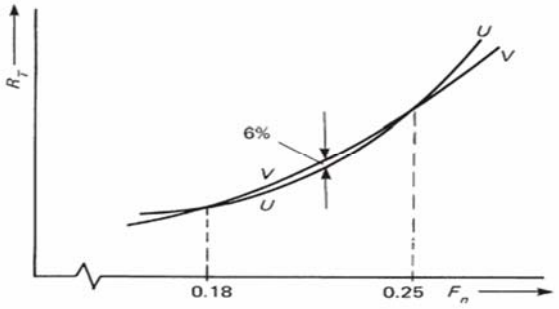
این انحنای عرضی دارای معایب زیر نیز می‌باشد:

۱) تولید اسپری آب (مقاومت اسپری)
۲) مساحت دشوارتر و مواد فولادی بیشتر
۳) تولید شتاب بزرگ در حرکات پیچ و اسلمینگ (علی‌رغم کاهش دامنه حرکات پیچ و اسلمینگ)

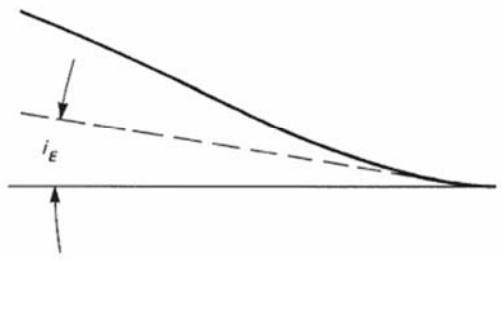
در کشتی‌های تجاری، روبناسازی کوچک جلوی عرشه، می‌تواند تا ۴۰ درجه شیب داشته باشد.

❖ پیشنهاد زاویه ورودی

گفتیم که زاویه ورودی (i_E) از منحنی مساحت مقاطع عرضی بدست می‌آید (مطابق شکل ۳-۹۱) لذا برای بدست‌آوردن این زاویه باید منحنی مقاطع عرضی ترسیم شود. پوپانکن[2] در سال ۱۹۳۹ نیم‌زاویه صفحه آبخور را به صورت جدول ۳-۲۶ پیشنهاد کرد که البته مقادیر زاویه در این جدول باید در عبارت $\frac{7}{(L/B)}$ ضرب شوند.



شکل ۳-۹۰ : توصیه مقطع U و V شکل با توجه به محدوده فرود و حداقل مقاومت



شکل ۳-۹۱ : تعریف زاویه ورودی

این جدول نیم‌زاویه ورودی صفحه آبخور را بر حسب C_P (ضریب منشوری) بیان می‌داد.

C_P	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
i_E	8°	9°	9–10°	10–14°	21–23°	33°	37°

جدول ۳-۲۶ : تخمین مقدار مناسب برای زاویه ورودی

در کشتی‌ها، اغلب سعی می‌شود قسمت نوک سینه، به صورت تیز باشد. کوچکترین شعاع انحنا در محل نوک سینه برابر ۴ − ۳برابر ضخامت ورق در نظر گرفته می‌شود. در کشتی‌های یخشکن، یک تیر با مقطع گرد در نوک سینه در نظر گرفته می‌شود که البته شعاع آن تا حد ممکن باید کوچک باشد. شعاع استاندارد جلوی سینه در محل خط آبخور برای کشتی‌های با $C_B \langle 0.72$ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R_{Deck} = 0.8 \times B/2$$

در قسمت زیر خط آبخور، این شعاع می‌تواند افزایش یابد. سینه‌های سهمی شکل دارای شعاع انحنای بزرگی هستند که در قسمت بعد بدان اشاره می‌شود.

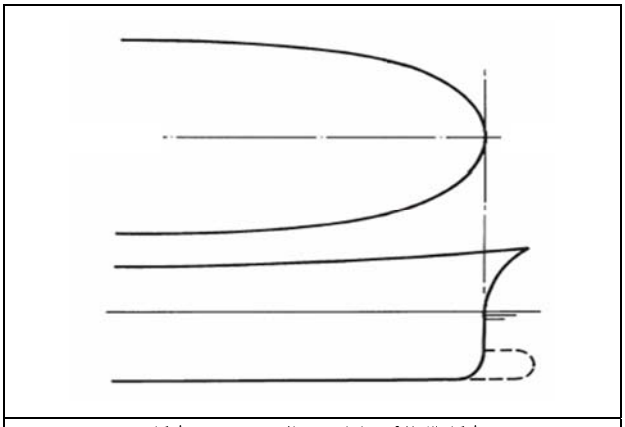
1 - flare
2 - Pophanken

❖ سینه سهمی شکل[1]

اگر نما از بالا (نمای آبخور) شناور به صورت سهمی شکل باشد، بدان «سینه سهمی شکل» گویند (شکل ۳-۹۲). سینه سهمی شکل برای کشتی-هایی با L/B کوچک و با شرایط زیر در نظر گرفته می‌شود:

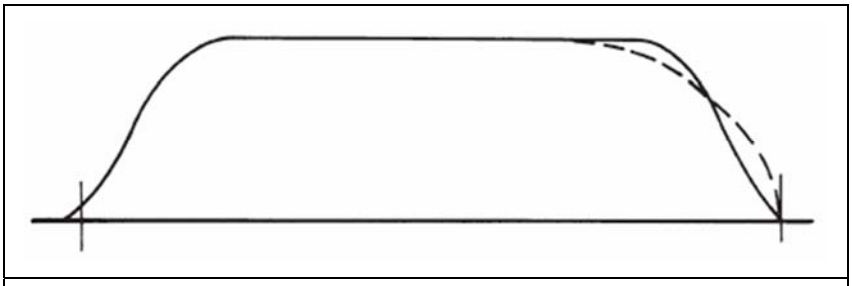
$F_n = 0.11 - 0.18$

$C_B \rangle 0.8$



شکل ۳-۹۲ : نماهای مختلف سینه سهمی‌شکل

نمونه مثال آن، تانکرهای بزرگ نفتی هستند. همچنین سینه سهمی شکل در کشتی‌های با C_B کوچک ولی B/T بزرگ استفاده می‌شوند. سینه سهمی شکل برای قسمتی که در زیر آب است، برای کاهش مقاومت حرکت بسیار مناسب است. می‌توان یک حبابی در قسمت سینه به سینه سهمی شکل مطابق شکل ۳-۹۲ افزود به صورتی که بطور مضاعف باعث کاهش مقاومت شود. اگر شکل سینه به صورت سهمی باشد، منحنی مقاطع عرضی به صورت شکل ۳-۹۳ در می‌آید (نمودار خطچین). تفسیر منحنی مقاطع عرضی و اثر تغییرات بر آن در قسمتهای قبل بیان شد.



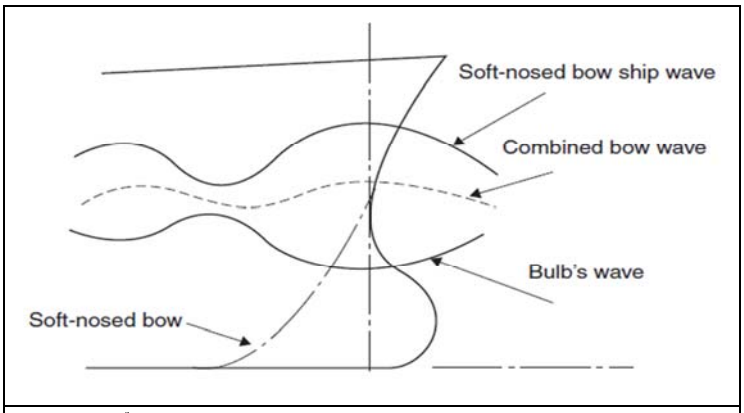
شکل ۳-۹۳: مقایسه منحنی مقاطع عرضی بین سینه معمولی و سینه سهمی‌شکل

1 - parabolic bow

فصل سوم: حبابی سینه[1]

آزمایشات جامعی از سال ۱۹۰۰ در حوضچه کشش برای دستیابی به ایده‌آل‌ترین شکل سینه برای رسیدن به حداقل مقاومت بدست آید. یک اتفاق در جنگ جهانی اول باعث کشف اثر حبابی سینه شد. در جنگ جهانی اول از قایق‌های اژدرافکن استفاده‌های زیادی می‌شد که در زیر بدنه آنها یک یا دو اژدر بسته می‌شد. قسمت جلوی اژدر در جلوی سینه شناور قرار می‌گرفت. گزارش خدمه این قایق‌ها حاکی از اثر مثبت نصب این اژدرها روی حرکت قایق بود. بر این اساس، آزمایشات جداگانه‌ای در این زمینه شروع شد و بدین ترتیب اثرات مثبت حبابی سینه کشف شد. حبابی سینه برای اولین بار در سال ۱۹۲۹ بر روی یک کشتی تجاری و از سال ۱۹۵۰ نیز روی اغلب کشتی‌های تجاری نصب گردید. حبابی سینه از طریق کاهش مقاومت موج‌سازی باعث کاهش مقاومت و افزایش سرعت می‌شود. در واقع حبابی سینه مطابق شکل ۳-۹۴ باعث کاهش ارتفاع موج سینه می‌شود. یعنی اگر سینه معمولی باشد، موج سینه با قله موج شروع می‌شود و از طرفی موج ناشی از حبابی سینه با قعر موج شروع می‌شود. برآیند این دو موج، شروع موج با قله ولی با ارتفاع کمتر خواهد شد. حبابی سینه در کشتی‌هایی با محدوده فرود زیر باعث کاهش مقاومت می‌شود: $0.17 \le F_n \le 0.7$

همچنین حبابی سینه برای کشتی‌های با انرژی جنبشی بالا $(0.5\ mV^2)$ نصب می‌شود یعنی نفتکش های بزرگ (جرم زیاد) یا کشتی‌های کانتینربر (سرعت زیاد). نکته قابل توجه اینجاست که اگر حبابی سینه در کشتی‌های کوچک (کمتر از ۴۰۰۰ تن وزن مرده) با سرعت کم (کمتر از ۱۲ گره) نصب شود، باعث بروز گردابه‌های اطراف حبابی سینه شده و افزایش مقاومت را باعث می‌شود.



شکل ۳-۹۴: تداخل موج سینه و موج حبابی سینه و کاهش ارتفاع موج برآیند

❖ عوامل تعیین‌کننده حبابی سینه

شکل و موقعیت قرارگیری حبابی سینه توسط عوامل زیر تعیین می‌شوند:

۱) شکل مقطع حبابی سینه
۲) نمای جانبی حبابی سینه
۳) طول حبابی سینه که جلوتر از عمود سینه قرار گرفته است.[2]
۴) موقعیت قرارگیری محور حبابی سینه
۵) نسبت مساحت مقطع عرضی حبابی به مساحت مقطع میانی کشتی
۶) نحوه اتصال حبابی با بدنه کشتی

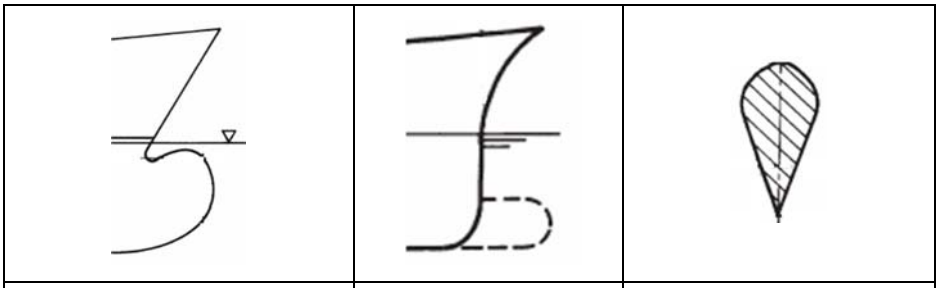
هر یک از این پارامترها در قسمتهای بعدی تشریح می‌گردد.

❖ شکلهای مختلف مقاطع حبابی سینه

مقاطع حبابی سینه دارای سه شکل کلی به صورت زیر می‌تواند باشد (شکل ۳-۹۵):

۱) مقطع گوه‌ای: قسمت پائین این مقطع به صورت تیز و قسمت فوقانی آن دارای انحنا است (شکل الف).
۲) مقطع دایره‌ای (استوانه‌ای): در این حالت مقطع حبابی سینه به صورت دایره‌ای و شکل کلی حبابی نیز به صورت استوانه‌ای است. (شکل ب)
۳) مقطع‌دایره‌ای (غیراستوانه‌ای): دراین حالت، حبابی دارای مقطع دایره‌ای است ولی شکل کلی حبابی به صورت استوانه‌ای نمی‌باشد. (شکل‌ج)

1 - Bulbous Bow
2 - projected length



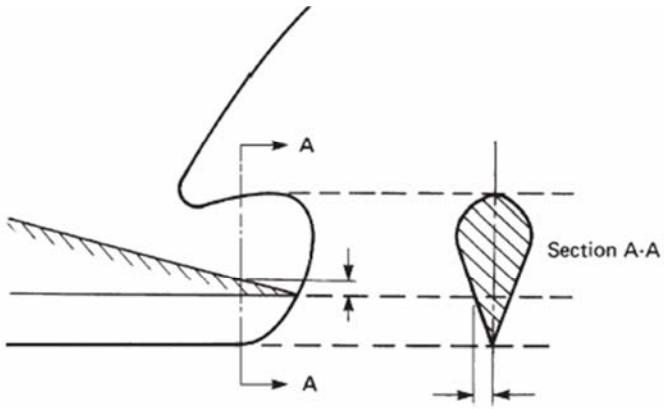
الف- مقطع گوه‌ای حبابی سینه	ب- حبابی استوانه‌ای	ج-حبابی غیر استوانه‌ای

شکل ۳-۹۵ : حالات مختلف مقاطع حبابی سینه

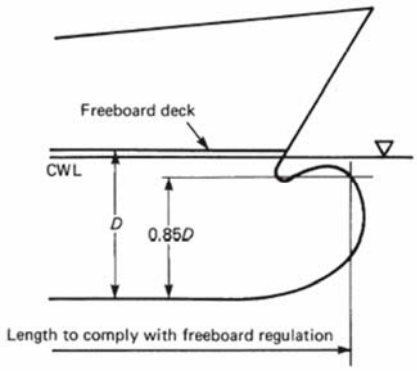
حبابی با مقطع گوه‌ای از آنجا که دارای سطوح پائینی نوک‌تیز است، باعث شتاب حرکت اسلمینگ می‌گردد چراکه نیروی بویانسی به تدریج زیاد می‌شود و باعث کاهش حرکت اسلمینگ می‌گردد. مقاومت اسپری شدن آب نیز در این حالت از حبابی کاهش می‌یابد. حبابی گوه‌ای معمولاً برای کشتی‌هایی که دارای مقطع V شکل هستند استفاده می‌شود (شکل ۳-۹۶). مقطع دایره‌ای برای حبابی دارای هزینه ساخت کمتر و ساخت راحت‌تر است. حبابی با مقطع دایره‌ای و شکل کلی استوانه‌ای، اغلب برای کشتی‌هایی با مقطع بدنه U شکل استفاده می‌شود.

❖ ارتفاع حبابی سینه

در حالت کلی حبابی سینه باید کاملاً در زیر آب قرار گیرد و سطح آب را قطع نکند و از طرف دیگر فاصله بیش از حدی از سطح آب نداشته باشد به گونه‌ای که بتواند باعث کاهش ارتفاع موج سینه شود. در شرایطی که کشتی بدون بار است (شرایط بالاست)، حبابی سینه از سطح آب بیرون می‌زند و در این صورت، حبابی سینه مقاومت زیادی ایجاد می‌کند. طبق قوانین فری‌برد، ارتفاع حبابی برابر ۸۵ درصد عمق (از کیل تا عرشه فری‌برد) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳-۹۶).



شکل ۳-۹۶ : کاربرد حبابی گوه‌ای در کشتی‌های با مقطع V شکل



شکل ۳-۹۶ : فواصل حبابی سینه برای تعیین ارتفاع آن

❖ محور حبابی سینه

محور گذرنده از سطح مقطع‌های حبابی سینه می‌تواند دو حالت کلی داشته باشد:

۱) محور افقی: در حبابی‌های استوانه‌ای که در نفتکش‌ها با مقطع U شکل بکار می‌رود.

۲) محور متمایل به بالا: در حبابی‌های با مقطع گوه‌ای یا دایره‌ای استفاده می‌شود. اگر کشتی اغلب یا نیمی از عمر کاری خود را در شرایط سبک به سر می‌برد که ارتفاع آبخور کم است و حبابی از سطح آب بیرون می‌زند، در این شرایط از حبابی‌های با محور متمایل به بالا استفاده می‌شود (شکل ۳-۹۷).

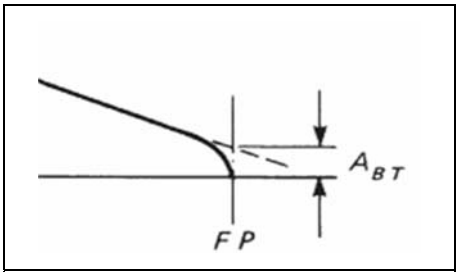
شکل ۳-۹۷ : حبابی با محور متمایل به بالا

❖ طول حبابی جلوتر از عمود سینه[1]

طول حبابی سینه ممکن است تا جلوتر از عمود سینه (FP) نیز ادامه یابد ولی جلوتر از نوک سینه شناور بدلیل خطر تصادم امتداد نمی‌یابد. طول حبابی جلوتر از عمود سینه حدود ۲۰ درصد عرض بدنه $(20\%B)$ در نظر گرفته می‌شود. امروزه در اغلب کشتی‌ها، طول حبابی جلوتر از عمود سینه حذف شده است و حبابی، حداکثر تا عمود سینه امتداد می‌یابد. این طول وابسته به دو پارامتر اصلی است: ۱- شکل حبابی ۲- عدد فرود. قانون و رابطه مدونی در این زمینه ارائه نشده و به کمک آزمایش مدل بررسی می‌شود. حبابی‌های با طول جلوی عمود سینه در بهترین بازدهی باعث ۶ درصد کاهش مقاومت می‌شوند و حبابی‌های مدرن اخیر با فرود بالاتر از ۰/۲۳ حدود ۲۰ درصد کاهش مقاومت را باعث می‌شوند.

❖ نسبت مساحت حبابی سینه

نسبت مساحت حبابی سینه عبارتست از نسبت مساحت مقطع عرضی حبابی سینه در محل عمود سینه به مساحت مقطع عرضی میانی کشتی $\left(\lambda = \frac{A_{BT}}{A_M}\right)$. اگر حبابی سینه، عمود سینه را قطع نکند، مساحت مذکور از امتداد خط حبابی سینه (مطابق شکل ۳-۹۸) بدست می‌آید.



شکل ۳-۹۸ : تعریف مساحت مقطع عرضی حبابی سینه

با افزایش نسبت حبابی سینه، مقاومت حبابی کاهش می‌یابد ولی افزایش بیش از حد مساحت حبابی بدلایل زیر مفید نیست:

۱) افزایش مقاومت در شرایط سبک کشتی که بخشی از حبابی از آب بیرون می‌زند.
۲) افزایش شتاب حرکت اسلمینگ (علی‌رغم کاهش دامنه حرکت اسلمینگ)
۳) افزایش احتمال تصادم لنگر سینه با حبابی هنگام لنگراندازی و لنگرکشی

❖ نحوه اتصال حبابی با بدنه کشتی

انتقال و اتصال حبابی به بدنه، معمولاً به صورت کاملاً مناسب و خط جریانی[2] امکان‌پذیر نیست ولی تا جای ممکن باید بتوان از فرورفتگی بیش از حد در محل اتصال جلوگیری کرد (شکل ۳-۹۹).

❖ سایر کاربردهای حبابی سینه

حبابی سینه علاوه بر کاربردهای هیدرودینامیکی دارای کاربردهای زیر نیز می‌باشد:

۱) نصب تراستر سینه[3] : از آنجا که حبابی سینه کاملاً در قسمت جلوی بدنه قرار می‌گیرد، لذا محل مناسبی برای نصب تراستر سینه می‌باشد (شکل ۳-۱۰۰)، چراکه فاصله تا مرکز ثقل یا نقطه گردش کشتی را افزایش می‌دهد و کشتی راحت‌تر دور می‌زند.
۲) جانمایی مخازن: در قسمت سینه، مخازن مختلفی می‌توانند قرار گیرند از جمله مخازن بالاست (تعادل) که برای سنگین‌کردن شناور یا تنظیم شیب آن استفاده می‌شوند و لذا تا جای ممکن باید در منتهی‌الیه سینه یا پاشنه نصب شوند. حبابی سینه محل مناسبی برای جانمایی مخازن تعادل در منتهی‌الیه سینه شناور است.
۳) نصب سونار در داخل حبابی سینه در کشتی‌های نظامی، صیادی و تحقیقاتی: سر و صدای سیال بر روی حبابی سینه کم می‌باشد لذا محل مناسبی برای نصب سونار است.
۴) شکستن یخ در مناطق یخبندان و قطبی.

1 - projection length
2 - fair
3 - Bow thruster

شکل ۳-۹۹ : اتصال حبابی سینه به بدنه

شکل ۳-۱۰۰ : نصب تراستر بر روی حبابی سینه

❖ خاصیت یخ‌شکنی حبابی سینه

حبابی سینه می‌تواند تا حدودی وظیفه سینه‌های یخ‌شکن را ایفا کند. حبابی به زیر لایه یخ نفوذ کرده و با بلندکردن آن باعث شکستن لایه یخ می‌شود. قطعات شکسته‌شده یخ به صورت افقی از کناره‌های بدنه حرکت می‌کنند و باعث جلوگیری از افزایش بیش از حد مقاومت ناشی از قطعات یخ می‌شود. حداکثر ضخامت یخ قابل شکسته‌شدن توسط حبابی سینه نسبت به سینه‌های مخصوص یخ‌شکن، کمتر است.

❖ خصوصیات حرکت در امواج با حبابی سینه

از خصوصیات حرکت در امواج به اهم موارد اشاره می‌شود:

۱) میرایی حرکت پیچ: حبابی سینه از آنجا که یک حجم بویانسی بزرگ در جلوی بدنه محسوب می‌شود لذا به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند باعث کاهش دامنه حرکت پیچ شود. بهترین میرایی حرکت پیچ در شرایط برابری طول موج و طول کشتی بدست خواهد آمد. برای طول موج‌های کوچکتر، این میرایی کمتر است. اگر طول موج، بیش از ۱/۵ — ۱/۳ برابر طول کشتی باشد، حبابی باعث افزایش دامنه حرکت پیچ می‌شود لذا اثر منفی بر حرکات کشتی دارد.

۲) قابلیت حرکت در امواج شدید دریا: امواج دریا بدلیل اینکه بطور پیوسته باعث تغییر مسیر کشتی می‌شوند لذا حرکت شناور را کندتر و با تلاطم بیشتر همراه می‌کنند. حبابی سینه از آنجا که باعث بهبود حفظ مسیر و افزایش پایداری دینامیکی می‌شود، اثر مثبتی برای حرکت در امواج دارد. همچنین حبابی سینه باعث کاهش دامنه حرکات ناشی از اسلمینگ می‌شود، بخصوص اگر قسمت تحتانی حبابی، تیز باشد، شتاب اسلمینگ نیز کاهش می‌یابد.

❖ تأثیر حبابی بر مقاومت و توان

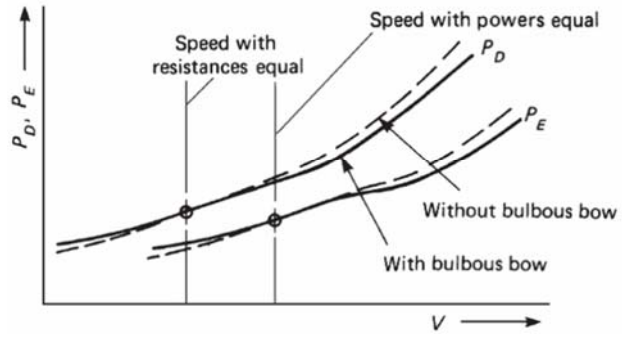
حبابی سینه باعث کاهش مقاومت و در نتیجه کاهش توان مورد نیاز حرکت می‌شود. اثر حبابی بر کاهش مقاومت را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱) **مقاومت اصطکاکی:** حبابی سینه باعث افزایش مقاومت اصطکاکی می‌شود چراکه سطح خیس افزایش می‌یابد.

۲) **مقاومت ویسکوز فشاری:** باعث کاهش این مقاومت می‌گردد چراکه باعث کاهش جریان چرخشی در قسمت سینه می‌شود.

۱) **مقاومت موج:** حبابی سینه در مجموع، باعث کاهش مقاومت موج سازی و شکست موج و در نتیجه کاهش مقاومت موج می‌گردد که در این زمینه در فصول قبل (بخش مقاومت موج) بحث شده است. در مجموع، اثر کاهش مقاومت موج به حدی است که باعث کاهش مقاومت کل حرکت شناور می‌شود.

تأثیر کاهش مقاومت و توان را ناشی از حضور حبابی سینه می‌توان در شکل ۳-۱۰۱ ملاحظه کرد. حبابی سینه در کشتی در حداکثر آبخور می‌تواند باعث ۰/۵ — ۰/۲۵ گره افزایش سرعت شود. در آبخور سبک (بالاست)، حبابی سینه می‌تواند باعث ۰/۷۵ — ۰/۵ گره افزایش سرعت شود [۲۰].



شکل ۳-۱۰۱ : اثر حبابی سینه بر کاهش مقاومت و توان

فصل چهارم: ملاحظات تعیین شکل پاشنه کشتی[۱]

انتخاب شکل پاشنه کشتی با معیارهای زیر باید انجام گردد:

۱) پاشنه حداقل مقاومت را ایجاد نماید.

۲) ایجاد بازدهی بالای سیستم رانش از طریق یکنواخت کردن جریان سیال به سمت پروانه و ایجاد حداکثر بازدهی بدنه

۳) ایجاد حداقل ارتعاش در سازه بدنه کشتی

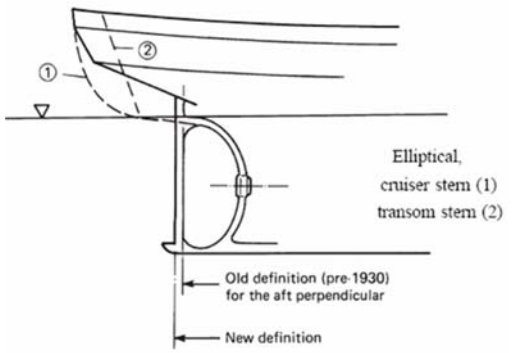
تعیین شکل پاشنه در بالا و پائین خط آبخور دارای معیارهای متفاوتی است. مقطع عرضی پاشنه نیز دارای اهمیت زیادی است. پاشنه، محل قرارگیری پروانه و تجهیزات سکان است که محل قرارگیری آنها دارای فواصل معین و استانداردی است. شکل صفحه آبخور در قسمت پاشنه از عوامل مهمی است که به همراه موارد فوق در این مبحث ارائه می‌شود.

❖ شکلهای مختلف بالای خط آب

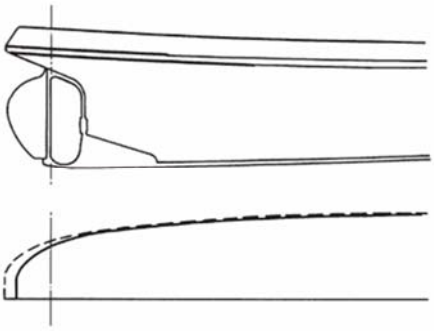
شکلهای مختلف پاشنه در بالای خط آب مطابق شکل۳-۹۶ دارای سه حالت کلی است:

۱) پاشنه تجاری[۲]

این شکل پاشنه را پاشنه بیضوی[۳] نیز می‌گویند چراکه نما از بالای پاشنه به صورت بیضی‌شکل است. این پاشنه، قدیمی‌ترین نوع پاشنه است و همانطور که در شکل ۳-۱۰۲ مشخص است، طول بین دو عمود با طول آبخور برابر است. این پاشنه دارای یک خط شکستگی[۴] و یک انحنا به سمت بیرون است. نمونه اصلاح‌شده این نوع پاشنه را می‌توان در یدک‌کش‌ها ملاحظه کرد که مطابق شکل ۳-۱۰۳، در محل عرشه فوقانی دارای شکستگی و سپس انحنا به داخل بدنه است.



شکل ۳-۱۰۲: شکل‌های مختلف پاشنه در بالای خط آب



شکل ۳-۱۰۳ : خط شکستگی و انحناء به بیرون در بدنه یدک‌کش‌ها

۲) پاشنه قاشقی[۵]

این نوع پاشنه را قاشقی یا پاشنه کروز[۶] گویند که نما از کنار آن مطابق شکل ۳-۱۰۲ می‌باشد. نمونه ساخته‌شده‌ای از آن را می‌توان در شکل ۳-۱۰۴ ملاحظه کرد. نما از کنار و نما از بالای این پاشنه هر دو به صورت بیضی شکل می‌باشد و از نیمه دوم قرن نوزده در کشتی‌های نظامی رایج شد و سپس برای کشتی‌های تجاری نیز بکار رفت. علت بکارگیری آن در کشتی‌های نظامی این بود که پاشنه شناور مطابق شکل ۳-۱۰۲، پائین‌تر می‌آمد و سکان و تجهیزات هدایت در زیر عرشه فوقانی که به شدت زره‌پوش شده بود، قرار می‌گرفت. بدین ترتیب احتمال صدمه‌دیدن سیستم سکان به حداقل می رسید. این نوع پاشنه دارای خط شکستگی نیست و مقاومت آن کمتر از پاشنه‌های تجاری است. طول خط آبخور بزرگتر از طول بین دو عمود است چراکه مطابق شکل ۳-۱۰۲، پاشنه، سطح آب را قطع می‌کند و این مسئله بخصوص در کشتی‌های تک‌پروانه باعث کاهش مقاومت می‌گردد.

۳) پاشنه تخت[۷]:

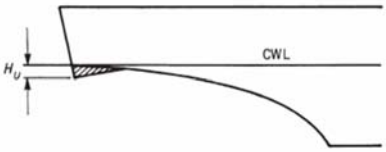
نمای طولی از کنار پاشنه از این نوع را می‌توان در شکل ۳-۱۰۵ ملاحظه کرد و اغلب برای کشتی‌های تندرو استفاده می‌شود. پاشنه تخت حالت

۱-منبع:[۵]

2 - merchant stern
3 - elliptical stern
4 - knuckle
5 - spoon stern
6 - Cruise stern
7 - transom stern

قیچی‌شده‌ای از پاشنه قاشقی است و معمولاً از محل خط آبخور شروع می‌شود. ساخت آن ساده و کم‌هزینه است. وجود قسمت گوه‌ای[1] در زیر پاشنه تخت باعث کاهش مقاومت و کاهش ارتفاع موج ایجاد شده در پاشنه می‌شود (شکل ۳-۱۰۵).

شکل ۳-۱۰۴ : پاشنه قاشقی کشتی



شکل ۳-۱۰۵ : قسمت گوه‌ای در پاشنه تخت

شکل ۳-۱۰۶: پاشنه تخت کشتی

این قسمت گوه‌ای به صورت یک قطعه مجزا می‌تواند به بدنه متصل گردد. شکل ۳-۱۰۵ نشان‌دهنده نمونه‌ای از این نوع پاشنه است. محدوده مناسب و ملاحظات عدد فرود برای پاشنه تخت را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$F_n \langle 0.3$: پاشنه در بالای خط آبخور قرار دارد و فقط در حین حرکت، بخشی از پاشنه در داخل آب قرار می‌گیرد.

$F_n \approx 0.3$: بخش کوچکی از پاشنه در آب قرار دارد.

$F_n \approx 0.5$: بخش بیشتری از پاشنه در داخل آب قرار دارد و یک گوه کوچک نیز به آن متصل می‌شود. مقدار زیر آب‌بودن پاشنه برابر است با:

$$t = 10 - 15\% T$$

$F_n \rangle 0.5$: بخش زیادی از پاشنه به‌صورت مغروق (زیر آب) است[2] ودارای یک گوه بزرگ به عرض بدنه است. مقدار زیرآب‌بودن پاشنه برابر است با:

$$t = 15 - 20\% T$$

ملاحظات دیگری در مورد پاشنه تخت مغروق را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) لبه‌های پاشنه باید تیز باشد.

۲) عرض صفحه آبخور در محل پاشنه برای بهبود پایداری نباید کم باشد.

۳) پاشنه وبویژه‌سطوح تحتانی آن بربازدهی پیشرانش بسیار مؤثر است واغتشاش در ناحیه بین پروانه وپوسته بدنه در بالای پروانه کمتر می‌شود.

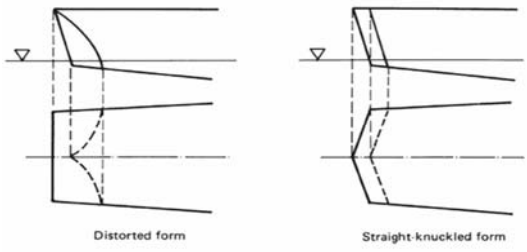
۴) اسلمینگ[3] کمتر اتفاق می‌افتد چراکه بخشی از پاشنه از ابتدا در داخل آب قرار دارد.

۵) در سرعتهای پائین، پیچش شدید جریان در پشت پاشنه تخت، باعث خیس شدن پاشنه و حتی سطح عرشه در قسمت پاشنه می‌گردد لذا در سرعتهای پائین، مقاومت پاشنه تخت خیلی بیشتر از پاشنه قاشقی است.

۶) در پاشنه تخت مرکز حرکت غلتش طولی[4] حدود $\frac{1}{4}$ طول از پاشنه است ولی در پاشنه‌های معمولی حدود $\frac{1}{3}$ طول از پاشنه است. لذا در دریای طوفانی در پاشنه تخت، سینه شناور بیشتر از پاشنه خیس می‌شود.

۷) در حرکت رو به عقب و در دریای طوفانی، عرشه پاشنه شناور به مقدار زیادی خیس می‌شود و حرکت شناور را مختل می‌کند. راه حل پرهیز از این مشکل، استفاده از شکلهای پاشنه به صورت شکل ۳-۱۰۷ است.

در مجموع مقاومت این نوع پاشنه نسبت به پاشنه‌های دیگر اندکی بیشتر است مثلاً در عدد فرود ۰/۵، مقاومت حدود ۱۰ درصد از پاشنه قاشقی بیشتر است. مزیت اصلی این نوع پاشنه، فراهم کردن فضای مناسب برای حمل کانتینر در قسمت پاشنه است (شکل ۳-۱۰۸).



شکل ۳-۱۰۷ : شکل‌های مختلف پاشنه تخت برای جلوگیری از خیسی عرشه

شکل ۳-۱۰۷ : حمل کانتینر بر روی پاشنه تخت

1 - stern wedge
2 - deeply submerged
3 - slamming
4 - pitch

❖ انتخاب شکل پاشنه در زیر آب

انتخاب شکل پاشنه در زیر آب با در نظرگرفتن معیارهای زیر باید انجام گردد:

۱) به حداقل رسانیدن جدایش جریان در قسمت پاشنه

۲) به حداقل رسانیدن اثر مکش پروانه

۳) ایجاد فواصل مناسب بین پروانه، سکان و بدنه

هریک از موارد فوق به صورت زیر بررسی می‌شوند.

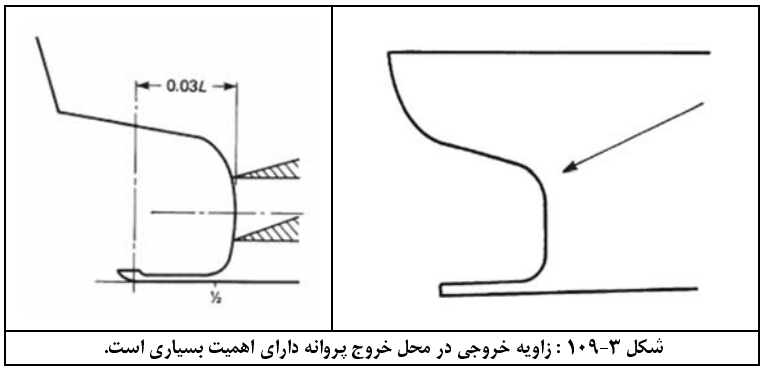
❖ جدایش جریان در پاشنه

جدایش جریان در پاشنه تابعی از شکل پاشنه و موقعیت پروانه است. اثر مکش پروانه بر این مورد اثر مثبتی دارد و از جدایش جریان جلوگیری می‌کند. البته در کشتی‌های دو پروانه، اثر مکش پروانه به جدایش جریان کمک می‌کند. شعاع انحنای بدنه و زاویه صفحه آبخور پاشنه بر جدایش جریان بسیار مؤثر است. لذا برای پرهیز از جدایش، زاویه انتهای صفحه آبخور در پاشنه باید از مقادیر بحرانی زیر کمتر باشد:

$i_R = ۲۰^\circ$: مطابق نظر *Baker*، برای زوایای بیش از این، جدایش اجتناب‌ناپذیر است.

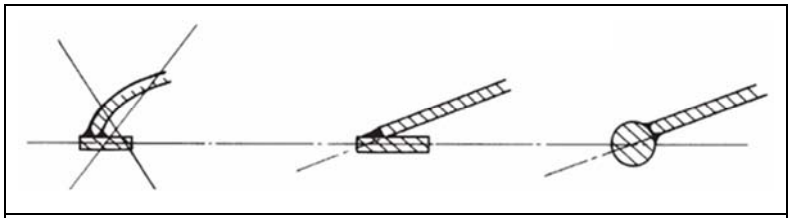
$i_R = ۱۵^\circ$: مطابق نظر *Kempf*، شروع جدایش جریان از این زاویه خواهد بود.

رسیدن به این زوایا در کشتی‌های توپر تقریباً غیرممکن و جدایش جریان، اجتناب‌ناپذیر است. بحرانی‌ترین منطقه از نظر i_R، محل خروج پروانه (مطابق شکل ۳-۱۰۹) می‌باشد که از اهمیت بیشتری برخوردار است.



شکل ۳-۱۰۹ : زاویه خروجی در محل خروج پروانه دارای اهمیت بسیاری است.

در مناطقی که جریان سیال از خطوط باتوک (خطوط برش‌های طولی بدنه) تبعیت می‌کند، زاویه i_R، بی اثر است. اتصال پوسته بدنه در محل خروجی شافت باید یک زاویه تند باشد (مطابق شکل ۳-۱۱۰).



شکل ۳-۱۱۰ : اتصال پوسته در محل خروجی شافت باید زاویه تند باشد.

تند بودن این زوایا دو مزیت اصلی زیر را به دنبال دارد:

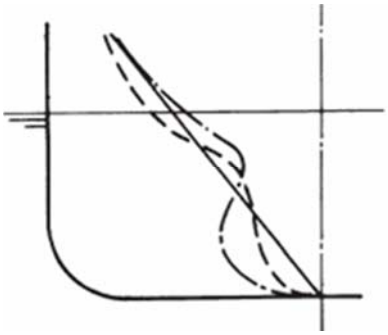
۱) کاهش توان مورد نیاز از طریق کاهش مقاومت و کمتر شدن ضریب کاهش تراست (ضریب کاهش تراست در قسمت‌های بعد توضیح داده شده است) .

۲) عملکرد آرام و کاهش سروصدای پروانه

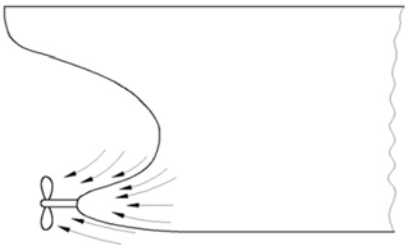
❖ شکلهای مختلف مقاطع عرضی پاشنه

مطابق شکل ۳-۱۱۱ سه حالت کلی از مقطع عرضی پاشنه می‌توان در نظر گرفت که عبارتست از مقاطع U و V شکل و مقطع دارای حبابی پاشنه[1]. منظور از حبابی پاشنه همان برآمدگی پاشنه در محل خروج شافت است که بدان «برآمدگی شافت»[2] هم می‌گویند (شکل ۳-۱۱۲) که استفاده از آن، از سال ۱۹۵۸ شروع شد.

1 - bulbous stern
2 - shaft bossing



شکل ۳-۱۱۱ : حالات عرضی مقطع پاشنه

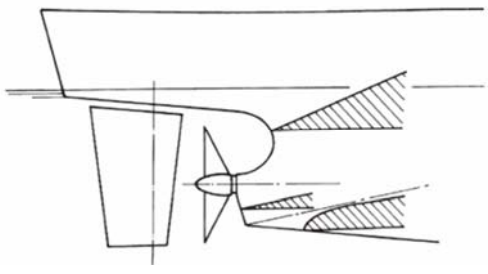


شکل ۳-۱۱۲: حبابی پاشنه در محل خروجی شافت پروانه

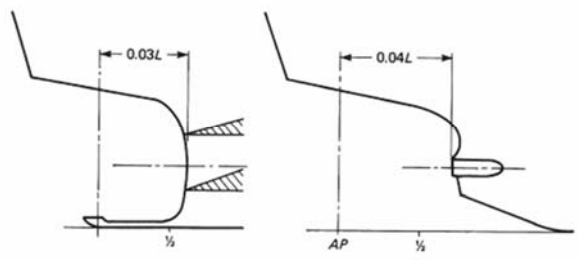
حبابی پاشنه وظیفه همگرا کردن جریان سیال را به طرف پروانه بر عهده دارد و باعث افزایش بازدهی پروانه می‌گردد. شکل پاشنه، بخصوص در شناورهای تک‌پروانه دارای اهمیت فوق العاده‌ای است. پاشنه V شکل در بین این پاشنه‌ها دارای کمترین مقاومت است و ارتباطی به عدد فرود هم ندارد. مقطع U شکل دارای مقاومت بیشتری از مقطع V شکل است. مقطع پاشنه دارای حبابی نیز دارای بالاترین مقاومت بین شکلهای مقاطع پاشنه است. یک مقطع دارای حبابی اگر بسیار خوب طراحی شده باشد به اندازه مقطع U شکل دارای مقاومت است. پس مزیت اصلی حبابی پاشنه چیست؟ همانطور که گفته شد وظیفه اصلی حبابی پاشنه، همگرا کردن جریان به سوی پروانه است که باعث افزایش بازدهی پروانه می‌گردد هر چند باعث افزایش مقاومت گردد. یعنی علی‌رغم افزایش مقاومت (که باعث افزایش توان مؤثر مورد نیاز می‌شود)، توان کل مورد نیاز شناور بدلیل افزایش بازدهی پروانه، کاهش می‌یابد و بدین ترتیب علت این تناقض مشخص می‌گردد. در نتیجه توان مورد نیاز در پاشنه دارای حبابی چند درصد کمتر از توان مقطع U شکل پاشنه است. مقطع V شکل دارای غیریکنواخت‌ترین توزیع ویک(تغییرات سرعت اطراف پروانه) و مقطع دارای حبابی، دارای بهترین توزیع ویک است. هر چه توزیع ویک، یکنواخت‌تر باشد، بازدهی پروانه بالاتر خواهد رفت و ارتعاشات پروانه کمتر خواهد شد. کشتی‌های تک‌پروانه به همین دلیل اغلب از مقاطع U شکل یا دارای حبابی استفاده می‌کنند. مقاطع پاشنه V شکل دارای کمترین هزینه ساخت و حبابی پاشنه دارای بیشترین هزینه ساخت است. شکل ساده‌تری از حبابی پاشنه به صورت شکل ۳-۱۱۳ می‌باشد که در آن مقاطع آبخور منتهی به حبابی پاشنه به صورت نوک‌تیز است و زاویه i_R در آن کاهش یافته است. مطابق شکل، حبابی پاشنه به صورت رو به پائین ساخته شده به گونه‌ای که جریان را به سوی پروانه هدایت کند. کشتی‌های دو پروانه اغلب از مقاطع V شکل استفاده می‌کنند چراکه شکل پاشنه در آنها اثر کمی بر بازدهی پروانه دارد. مقطع V شکل باعث مکش بهتر سیال به سمت دو پروانه می‌شود (پروانه‌ها در طرفین مقطع V شکل نصب می‌شوند).

❖ فواصل اطراف پروانه

محدوده اطراف پروانه دارای فواصل معینی است که کاهش یا افزایش حساب‌نشده آن باعث ایجاد معایبی می‌گردد که از آن بحث خواهد شد. حداقل فاصله مورد نیاز بین پشت پروانه تا عمود پاشنه در شکل ۳-۱۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱۳ : شکل ساده‌تری از حبابی پاشنه



شکل ۳-۱۱۴ : حداقل فاصله بین پشت پروانه تا عمود پاشنه

می‌دانیم که عمود پاشنه همان راستای محور سکان است که در واقع پروانه در ناحیه محدود به پاشنه شناور و سکان قرار می‌گیرد. فواصل اطراف پروانه بر پارامترهای زیر مؤثر است:

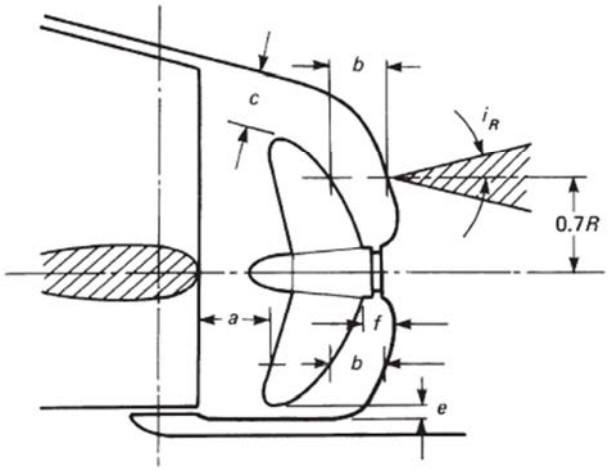
۱) بازدهی پروانه و در نتیجه توان مورد نیاز

۲) اثرات ارتعاشی پروانه بر بدنه قسمت پاشنه که ممکن است باعث شکست حاصل از خستگی شود. هر چه فواصل بیشتر باشد، ارتعاشات کمتر می‌شود. ارتعاشات را با پروانه‌های *hi-skew* نیز کاهش می‌دهند.

۳) قطر پروانه و سرعت بهینه پروانه

۴) تأثیر بر گشتاور مورد نیاز برای گردش پروانه

استاندارد دریایی DNV حداقل فواصل مورد نیاز اطراف پروانه را مطابق شکل ۳-۱۱۵ تعیین کرده است که این فواصل به غیر از موارد خاص باید رعایت شوند.



شکل ۳-۱۱۵ : فواصل اطراف پروانه در استاندارد DNV

حداقل مقادیر عبارات نشان داده شده روی شکل عبارتند از:

$a \rangle 0.1D$

$b \rangle (0.35 - 0.02Z)D$

(برای پروانه‌های چهارپره‌ای) $b \rangle 0.27\ D$

$c \rangle (0.24 - 0.01Z)D$

$e \rangle 0.035\,D$

که در این روابط، D قطر پروانه و Z تعداد پره‌های پروانه است. در شناورهای تجاری معمولی که دارای نگهدارنده پائینی سکان[1] نمی‌باشد، فاصله نوک پره از خط مبنا[2] ۲۰ – ۱۰ سانتیمتر است.

برای رسیدن به یک تخمین واقع‌بینانه‌تر می‌توان نکات زیر را در نظر داشت:

- فواصل اطراف پروانه نمی‌تواند مستقیماً تابعی از قطر باشد.
- فواصل وابسته به توان، توزیع ویک و جریان روی پروانه است.
- در شناورهای تک‌پروانه فاصله پروانه تا بدنه باید تقریباً از رابطه روبرو تبعیت کند: $c \approx 0.1\ {}^{mm}/_{KW}$
- فاصله افقی پروانه (در شعاع $0.7R$) تا بدنه: $b \approx 0.23\ {}^{mm}/_{KW}$

برای کشتی‌های دو پروانه‌ای در استانداردهای DNV و BV و GL توصیه‌های زیر ارائه شده است:

(مطابق پیشنهاد DNV) $C \rangle (0.3 - 0.01Z).D$

(مطابق پیشنهاد GL و BV) $a \rangle 2\left({}^{A_E}/_{A_0}\right).{}^{D}/_{Z}$

که در اینجا ${}^{A_E}/_{A_0}$ نسبت سطح گسترش‌یافته است.

در شرایط زیر باید فواصل بیان‌شده را بیشتر در نظر گرفت:

- زیاد بودن نسبت C_B به سرعت (تناسب C_B با عدد فرود بیان خواهد شد).
- زیاد بودن زاویه خروجی سطح آبخور (i_R).
- ضخامت زیاد تجهیزات سکان در قسمت پاشنه

همچنین فاصله قسمت فوقانی لبه پره از سطح آب باید حداقل $0.2D$ باشد.

❖ معایب فواصل بیش از حد اطراف پروانه

اگر فواصل اطراف پروانه بیش از حدود بیان‌شده باشد، معایب زیر را می‌توان برای آن برشمرد:

۱) فواصل عمودی c و e: باعث کاهش قطر پروانه و کاهش بازدهی آن می‌شود.

۲) فواصل افقی a و b و f : باعث افزایش طول آبخور می‌شود.

1 - ruder heel
2 - Base line

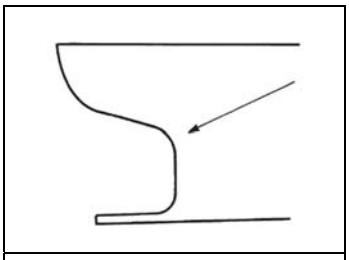
۳) افزایش فاصله سکان از پروانه که باعث دو اثر مغایر هم می‌شود:
- کاهش اثر سرعت خروجی پروانه بر روی سکان (کاهش کارآیی سکان)
- کاهش آشفتگی جریان پائین دست پروانه بر روی سکان (افزایش کارآیی سکان)

از طرف دیگر می‌دانیم که فواصل زیاد بین پروانه و بدنه باعث کاهش ارتعاشات می‌گردد. اگر فواصل عمودی کم باشد به طوری که پروانه پائین‌تر و با فاصله بیشتری از سطح آب قرار گیرد، باعث افزایش بازدهی پروانه می‌شود. لذا با درنظر گرفتن بازدهی پیشرانش، موارد زیر قابل توجه هستند:
- c و e: باید کوچک باشد تا بتوان به حداکثر قطر پروانه رسید.
- a باید کوچک باشد برای بازیابی انرژی خروجی پروانه بر روی سکان
- f و b باید بزرگ باشد تا بتوان به بازدهی مناسب بدنه رسید.

برای رسیدن به ارتعاشات بهینه در قسمت پاشنه باید فواصل a و c و e به دقت تعیین و اندازه‌گیری شوند. فواصل b و f هر چه بیشتر باشند باعث کاهش ارتعاشات می‌شوند.

پاشنه‌های فاقد تکیه‌گاه پائینی سکان یا پاشنه باز[1] که امروزه در کشتی‌ها، رایج شده، دارای مزایای بسیاری از جمله موارد زیر است:

۱) مقاومت کمتر بخاطر نداشتن تکیه‌گاه پائینی
۲) افزایش بازدهی پروانه بخاطر پائین‌تر آوردن پروانه
۳) سطح کمتر برای کاهش انتقال ضربات ارتعاشی به بدنه
۴) هزینه ساخت کمتر



شکل ۳-۱۱۶: سطوح اطراف پروانه باید دارای انحنا باشد.

فضای باز قرارگیری پروانه باید دارای گوشه‌های گرد شده و سطوح دارای انحنا باشد (تخت نباشد) (مطابق شکل ۳-۱۱۶). فاصله بین پره‌ها و لبه‌ها نباید یکباره تغییر کند. شعاع انحنای بدنه در ناحیه قرارگیری پروانه باید بیش از شعاع پروانه باشد.

برای کاهش ارتعاشات قسمت پاشنه، معمولاً استحکام قسمت پاشنه به صورت زیر افزایش می‌یابد:
- ضخامت ورق در این منطقه حدود ۱/۵ برابر مناطق دیگر پاشنه است.
- دارای فریم‌ها و تقویت‌های موضعی زیاد در این ناحیه است.

❖ فاصله پروانه تا بدنه در استاندارد GL

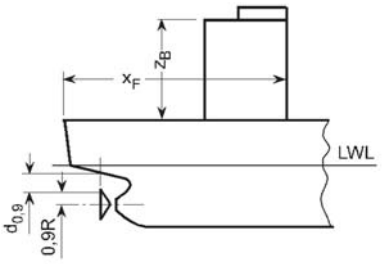
استاندارد GL[2] برای فاصله پروانه تا بدنه طبق شکل ۳-۱۱۶ رابطه زیر را ارائه کرده است:

$$d_{0,9} \geq 0,004 \cdot n \cdot d_p^3 \sqrt{\frac{v_0\,(1-\sin(0,75\gamma))\left(0,5+\frac{Z_B}{x_F}\right)}{D}} \quad [m]$$

که در این رابطه:

R : شعاع پروانه ، V_0: سرعت کشتی بر حسب گره، n: دور پروانه بر حسب دور بر دقیقه (rpm) ، D: حداکثر تناژ کشتی بر حسب تن

d_P: قطر پروانه بر حسب متر، γ: زاویه شلاقی[3] پروانه مطابق شکل ۳-۱۱۸ ، Z_B: ارتفاع عرشه اصلی تا عرشه فرماندهی (مطابق شکل ۳-۱۱۷) بر حسب متر، X_F: فاصله دیواره جلویی روبناسازی تا قسمت پاشنه بر حسب متر (مطابق شکل۳-۱۱۷)



شکل ۳-۱۱۷: فواصل عمودی اطراف پروانه در استاندارد GL

شکل ۳-۱۱۸: تعریف زاویه شلاقی پروانه (GL)

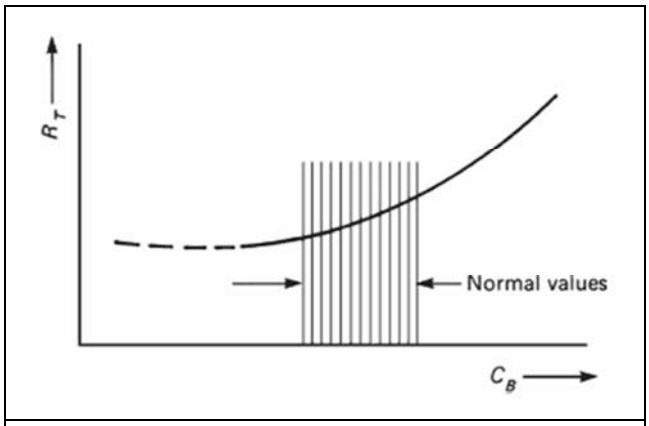
1 - open stern frame
2 - Part I / chapter 1 / sec13
3 - skew

فصل پنجم: تعیین ضرایب بدنه کشتی[۱]

هندسه بدنه کشتی یک هندسه نامنظم و پیچیده است که به کمک ضرایب هندسی بدنه می‌توان تا حدودی آن را توصیف کرد. بطور مثال توصیف هندسه یک کره توسط شعاع آن انجام می‌شود. توصیف هندسه بدنه کشتی نیز بوسیله ابعاد اصلی و ضرایب بدنه آن انجام می‌شود. با استفاده از همین پارامترها، در نرم‌افزارهای دریایی، می‌توان هندسه بدنه کشتی را نیز ایجاد نمود.

❖ ضریب بلوکی[۲] (C_B):

روابط و معرفی ضریب بلوکی در بخش هیدرواستاتیک بیان شد و در اینجا به اهمیت و ارتباط آن با روابط هیدرودینامیک پرداخته می‌شود. C_B به مقدار زیادی بر مقاومت حرکت شناور مؤثر است و یک محدوده بهینه برای آن وجود دارد. شکل ۳-۱۱۹ بیان‌کننده تغییرات مقاومت بر حسب ضریب بلوکی است که یک محدوده مناسب برای آن تعیین شده است. البته این محدوده توصیه شده برای رسیدن به حداقل مقاومت است ولی معمولاً مقادیر C_B واقعی کشتی‌ها، بزرگتر از این مقادیر است.



شکل ۳-۱۱۹ : محدوده مناسب CB بر حسب مقاومت

عبارت $(1+K)$ عبارتی بود که در مقاومت اصطکاکی ضرب می‌شد و مقاومت ویسکوز (اصطکاکی و ویسکوز فشاری) را نتیجه می‌داد. مقدار $1+K$ با افزایش C_B افزایش می‌یابد (مقدار $1+K$ *نشان‌دهنده* نسبت سهم مقاومت اصطکاکی و مقاومت ویسکوز است):

$1+K=1.13 \qquad C_B \langle 0.7$

$1+K=1.25 \qquad C_B = 0.83$

در بین این مقادیر از میان‌یابی استفاده می‌کنیم. از طرف دیگر هرچه C_B کمتر باشد یعنی بدنه کشیده و باریک باشد، حرکت راحت‌تری در بین امواج دریا خواهد داشت و با مقاومت کمتری مواجه خواهد شد. بنابراین طول و سرعت شناور که تشکیل‌دهنده عدد فرود هستند بر مقاومت بسیار مؤثرند. بین C_B و عدد فرود، رابطه کلی زیر برقرار است:

$$C_B = K_1 - K_2 . F_n$$

ضرایب K_1 و K_2 از رابطه ایری[۳] به صورت زیر ارائه شده است:

$$C_B = C - 1.68\, F_n$$

برای کشتی‌های تک پروانه: $C = 1.08$

برای کشتی‌های دو پروانه: $C = 1.09$

ضریبی که معمولاً رایج است : $C = 1.06$

شنیکلات[۴] روابط زیر را برای محاسبه C_B ارائه کرد:

$$C_B = \frac{0.14}{F_n} . \frac{L/B + 20}{26}$$

$$C_B = \frac{0.23}{F_n^{2/3}} . \frac{L/B + 20}{26}$$

روابط شنیکلات در محدوده زیر معتبر هستند:

$0.48 \le C_B \le 0.85 \qquad 0.14 \le F_n \le 0.32$

اگر محدوده فرود $F_n \langle 0.3$ باشد، در رابطه بالا از $F_n = 0.3$ استفاده می‌شود. این رابطه نسبت مستقیم L/B با C_B را نشان می‌دهد. جدول۳- ۲۷

۱-منابع:[۱ و ۵و۲۰]

2 - Block coefficient

3 – Ayre

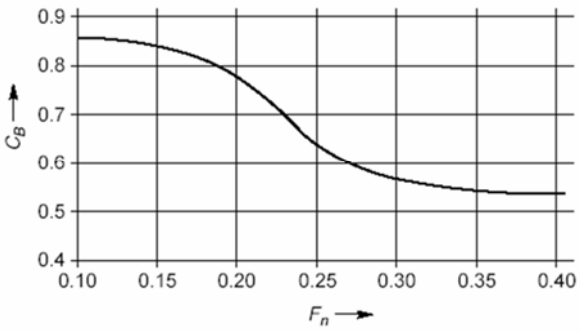
4 - schneekluth

رابطه C_B و عدد فرود را بطور مثال برای $L/B = 6$ ارائه نموده است. این جدول نشان می‌دهد که هرچه عدد فرود بالاتر باشد، بدنـه بایـد دارای C_B کوچکتری باشد یعنی کشیده و باریک‌تر باشد.

Formula	Froude number F_n 0.14	0.17	0.20	0.25	0.30	0.32
$C_B = 1.08 - 1.68F_n$	0.85	0.79	0.74	0.66	0.58	0.54
$C_B = 1.06 - 1.68F_n$	0.83	0.77	0.72	0.64	0.56	0.52
$C_B = 0.23F_n^{-2/3}$	0.85	0.75	0.68	0.58	0.51	0.51
$C_B = 0.14/F_n$	0.85	0.82	0.72	0.56	0.48	0.48

جدول۳- ۲۷ : رابطه C_B و عدد فرود برای یک کشتی با $L/B = 6$

جنسن[1] در سال ۱۹۹۴ بر اساس اطلاعات آماری کشتی‌های ژاپنی در محدوده فرود زیر، نمودار شکل ۳-۱۲۰ را ارائه کرد که در آن C_B بر حسب عدد فرود ارائه شده است.



شکل ۳-۱۲۰ : رابطه C_B با عدد فرود (رابطه جنسن)

$0.15 < F_n < 0.32$

$C_B = -4.22 + 27.8\sqrt{F_n} - 39.1\,F_n + 46.6\,F_n^3$

روش دیگری در منبع[۲۰] برای محاسبه ضریب بلوکی بر حسب نوع شناور ارائه شده است. مطابق شکل ۳-۱۲۱ محور افقی نسبت $\frac{V}{\sqrt{L}}$ می‌باشد کـه V برحسب گره و طول بر حسب متر است.

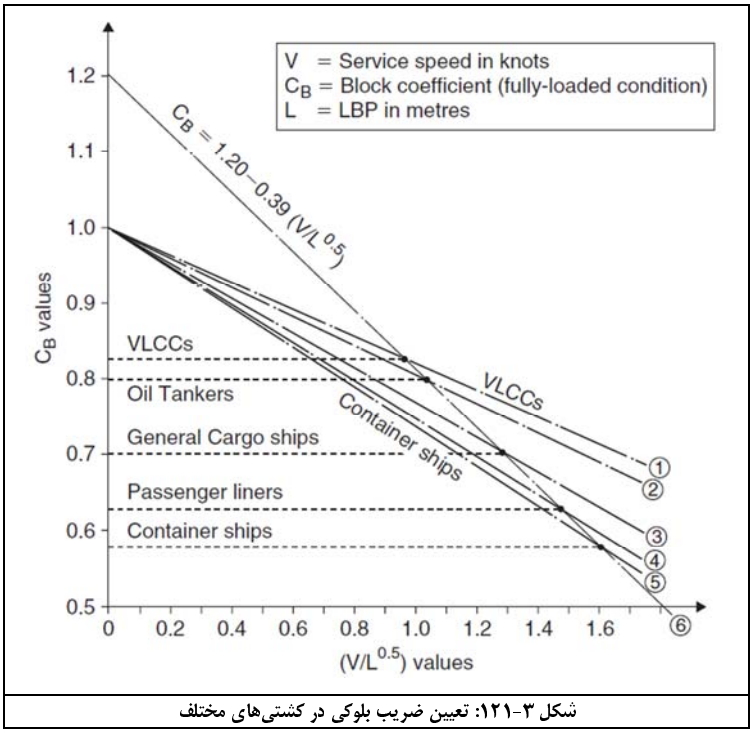
$C_B = 1 - 0.182\ (V/L^{0.5})$ For VLCCs, 50 000 to 200 000 tonnes dwt
$C_B = 1 - 0.195\ (V/L^{0.5})$ For Oil Tankers, 25 000 to 50 000 tonnes dwt
$C_B = 1 - 0.234\ (V/L^{0.5})$ For General Cargo ships
$C_B = 1 - 0.254\ (V/L^{0.5})$ For Passenger liners
$C_B = 1 - 0.265\ (V/L^{0.5})$ For Container ship
$C_B = 1.20 - 0.39\ (V/L^{0.5})$ Global formula for all ships

محدوده تقریبی ضریب بلوکی کشتی‌های مختلف مطابق جدول ۳-۲۸ است:

نوع کشتی	CB
نفتکش	۰/۸ – ۰/۹
تجاری معمولی	۰/۷ -۰/۸
کانتینربر	۰/۶ – ۰/۷۵
یخچالی	۰/۵۵ – ۰/۷
ناو جنگی	۰/۵ – ۰/۵۵

1 - Jensen

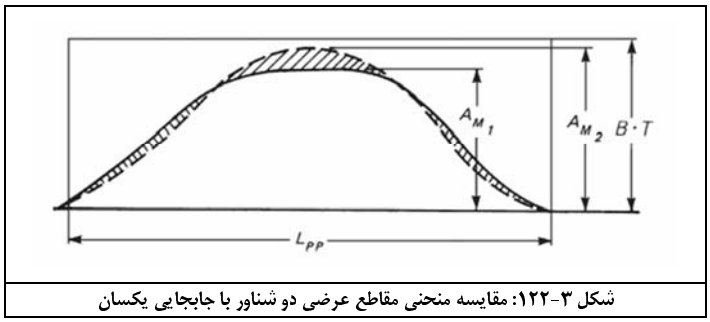
جدول ۳-۲۸: محدوده تقریبی بلوکی کشتی‌ها



شکل ۳-۱۲۱: تعیین ضریب بلوکی در کشتی‌های مختلف

❖ ضریب مقطع میانی[1] (C_M) :

تعیین ضریب مقطع میانی از اهمیت زیادی برخوردار است و بر سایر ضرایب مانند ضریب منشوری (C_P) و ضریب صفحه آبخور(C_{WP}) نیز بسیار مؤثر است. برای بدست آوردن C_M می‌توان از منحنی مساحت مقاطع عرضی نیز استفاده کرد. شکل ۳-۱۲۲ مقایسه دو نمونه شناور با جابجایی یکسان و مساحت مقاطع عرضی متفاوت ارائه نموده است.



شکل ۳-۱۲۲: مقایسه منحنی مقاطع عرضی دو شناور با جابجایی یکسان

از این نمودار می‌توان دریافت که پارامترهای متعددی از جمله طول ورودی، طول خروجی، زاویه ورودی و زاویه خروجی دچار تغییر شده‌اند (برای توضیحات بیشتر به بحث منحنی مقاطع عرضی- قسمت دوم کتاب-مراجعه شود). برای نسبت‌های L/B بزرگ از مقاطع عرضی U و V شکل و برای نسبت‌های L/B کوچک، از مقطع عرضی V شکل استفاده می‌شود. اثرات تعیین C_M را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) اثرات افزایش C_M ضمن ثابت ماندن C_B:
- افزایش طول خروجی (L_R): کاهش مقاومت ویسکوز
- افزایش طول ورودی (L_E): کاهش مقاومت موج‌سازی
- افزایش طول صفحه آبخور: نابرابری بیشتر سرعت در طول بدنه و افزایش مقاومت
- افزایش مساحت سطح خیس: افزایش مقاومت
- در مجموع، اثرات C_M بر مقاومت، اندک است.
- با افزایش C_M مقدار C_P کاهش می‌یابد.

۲) C_M بیشتر = انحنای بیلج کمتر = انحنای بدنه کمتر (در ناحیه موازی میانی) = انحنای فریم داخلی کمتر

1 - Midship section coefficient

۳) امکان جادادن تعداد بیشتری کانتینر در مقطع میانی بدنه

۴) کاهش C_M = حرکات رول شدیدتر (دامنه حرکت رول بیشتر) که برای کاهش آن می‌توان از بالچه‌های کنار بدنه[1] استفاده کرد. منبع [۵] توصیه‌های زیر را برای استفاده از بالچه‌های کنار بدنه ارائه کرده است (شکل ۳-۱۲۳)

- ارتفاع بالچه باید بیش از ۲ درصد عرض بدنه یا ۳۰ درصد شعاع بیلج باشد.
- طول بالچه حدود $1/4$ طول بین دو عمود است.
- باید ۱ درصد عرض حاشیه اطمینان بین نوک بالچه تا حداکثر عرض بدنه باشد.

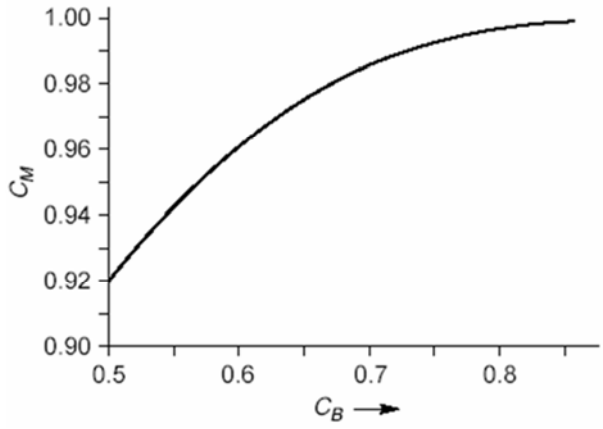
برای کشتی‌هایی که دارای خیز کف نباشند، مطابق جدول۳-۲۹ روابط محاسبه C_M ارائه شده‌اند:

for ships with rise of floor	$C_B = 0.75$	$C_M = 0.987$
	0.70	0.984
	0.65	0.980
	0.60	0.976
	0.55	0.960
for ships without rise of floor		$C_M = 0.9 + 0.1 \cdot C_B$
		$C_M = 1/(1 + (1 - C_B)^{3.5})$
		$C_M = 1.006 - 0.0056 \cdot C_B^{-3.56}$

جدول ۳-۲۹ : روابط محاسبه CM برای کشتی‌های بدون شیب کف.

مقدار C_M در سری تیلور برابر مقدار استاندارد ۰/۹۲۵ می‌باشد. برای کشتی‌های با L/B کوچک، مقدار بسیار بزرگی است و نتایج خوبی نمی‌دهد. در سری ۶۰ مقادیر مختلفی از C_B و C_M وجود دارد. جنسن در سال ۱۹۹۴، نمودار شکل ۳-۱۲۴ را برای کشتی‌های مدرن و برای رابطه بین C_B و C_M ارائه کرد. همانطور که ملاحظه می‌شود معمولا مقدار C_M در محدوده ۱- ۰/۹۲ است.

شکل ۳-۱۲۳ : بالچه‌های کنار بدنه برای کاهش حرکات رول



شکل ۳-۱۲۴ : رابطه بین CB وCM در کشتی‌های مدرن (نمودار جنسن)

❖ توصیه شعاع بیلج

شعاع بیلج از موارد مهم در تعیین مساحت مقطع عرضی میانی و مؤثر بر مقدار C_M است. برای کشتی‌های بدون شیب کف، شعاع بیلج به صورت زیر ارائه شده است:

$$R = \frac{B \cdot C_K}{\left(\frac{L}{B} + 4\right) \cdot C_B^2} \qquad C_K = 0.4 - 0.7$$

برای اغلب موارد $C_K = 0.5 - 0.6$.

در کشتی‌های دارای شیب کف[2] در رابطه بالا بجای C_B از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$C'_B = C_B \cdot \frac{T}{T - a/2}$$

که a مقدار شیب کف می‌باشد.

1 - Bilge keel
2 - rise of floor

در کشتی‌های با مقطع ذوزنقه‌ای، B در نصف ارتفاع آبخور اندازه‌گیری می‌شود. در کشتی‌های تندرو $(F_n \rangle 0.4)$، شعاع بیلج حداقل برابر ارتفاع آبخور می‌باشد. شعاع بیلج و ضریب C_M بسیار به هم وابسته هستند و رابطه زیر را می‌توان بین آنها در نظر گرفت:

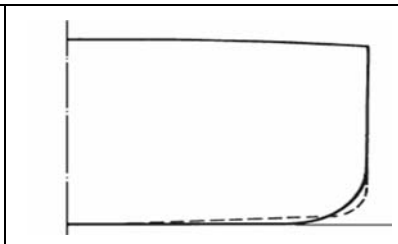
$$R = \sqrt{2.33(1-C_M).B.T}$$

$$C_M = 1 - \frac{R^2}{2.33 \times B \times T}$$

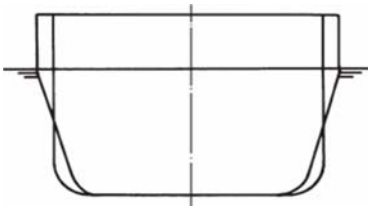
اغلب کشتی‌های جدید امروزی بدون شیب کف هستند بجز کشتی‌هایی با $C_M \rangle 0.9$ که معمولاً شیب کف در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳-۱۲۵). نداشتن شیب کف و تخت بودن آن مزایای زیر را به دنبال دارد:

۱) قرارگیری آسان‌تر بر روی داک و بلوک‌های داک
۲) اجرای ساده‌تر ساخت کف
۳) ارزان‌تر بودن هزینه ساخت

عامل دیگری که در طراحی مقطع عرضی بدنه اهمیت دارد، شیب دیواره‌های مقطع عرضی بدنه است. کشتی‌های امروزی اغلب دارای مقطع ذوزنقه‌ای با دیواره‌های مایل جانبی هستند (شکل ۳-۱۲۶). حتی در کشتی‌های کانتینربر هم به گونه‌ای این شیب در نظر گرفته می‌شود که فضای غیرقابل استفاده کمتری ایجاد کند.



شکل ۳-۱۲۵: مقایسه کف شناور در دو حالت



شکل ۳-۱۲۶: مقطع ذوزنقه‌ای کشتی‌های تجاری

دو مقطع ذوزنقه‌ای و مستطیلی را می‌توان به صورت زیر با هم مقایسه کرد:

۱) در حالت برابر بودن مساحت مقطع میانی
- آسیب‌پذیری بیشتر مقطع ذوزنقه‌ای از ضربه‌گیرهای کنار اسکله در دریای طوفانی
- عرض بیشتر مقطع ذوزنقه‌ای و پایداری بیشتر آن
- برابر بودن ضریب منشوری (C_P) در دو مقطع
- کوچکتر بودن C_B مقطع ذوزنقه‌ای
- سطح خیس کوچکتر مقطع ذوزنقه‌ای
- خواص پایداری در حالت صدمه‌دیده بهتر مقطع ذوزنقه‌ای چراکه هر چه بیشتر در آب فرو رود، عرض بدنه و پایداری بهبود می‌یابد. برعکس این حالت در شرایط بدون بار بودن کشتی است که عرض، کاهش زیادی می‌یابد و باعث کاهش پایداری می‌شود.

۲) در حالت برابر بودن ابعاد اصلی مقطع میانی
- کوچکتر بودن مساحت مقطع میانی ذوزنقه‌ای
- دارای C_B برابر دو مقطع
- کوچکتر بودن ضریب منشوری (C_P) در مقطع ذوزنقه‌ای
- بیشتر بودن مقاومت مقطع ذوزنقه‌ای
- عرض کف کوچکتر و کم شدن حجم مخازن بالاست در کف دوجداره

❖ ضریب مساحت صفحه آبخور[1] (C_{WP}) :

ضریب صفحه آبخور یا ضریب مساحت صفحه آبخور (C_{WP}) از عوامل مؤثر بر طراحی خطوط بدنه کشتی است که بر دو عامل زیر بسیار مؤثر است:

- مقاومت بدنه: طول صفحه آبخور بسیار بر آن مؤثر است.
- پایداری: عرض صفحه آبخور تأثیر مهمی بر آن دارد.

نیازهای این دو عامل تا حدودی با یکدیگر متفاوت است چراکه کاهش مقاومت مستلزم کم‌عرض و کشیده بودن صفحه آبخور و افزایش پایداری

1 - Water plane area coefficient

مستلزم عریض بودن صفحه آبخور است. ضریب صفحه آبخور بسیار وابسته به ضریب بلوکی و ضریب مقطع میانی است.
روابط زیر برای محاسبه C_{WP} در کشتی‌های پاشنه تخت ارائه شده و برای پاشنه‌های قاشقی کاربرد ندارد.

برای مقاطع U شکل: $C_{WP} = 0.95C_P + 0.17\sqrt[3]{1-C_P}$

برای مقاطع میانی: $C_{WP} = (1+2C_B)/3$

برای مقاطع V شکل: $C_{WP} = \sqrt{C_B} - 0.025$

$C_{WP} = C_P^{2/3}$

$C_{WP} = \left(1+2C_B/\sqrt{C_M}\right)/3$

برای نفتکش‌ها و فله‌برها: $C_{WP} = C_B/(0.471+0.551.C_B)$

نمونه‌ای از نتایج این روابط برای C_B و C_M مختلف در جدول۳- ۳۰ ارائه شده است:

		C_{WP}				
C_B	C_M	$(1+2C_B)/3$	$0.95C_P + 0.17\sqrt[3]{1-C_P}$	$C_P^{2/3}$	$\sqrt{C_B} - 0.025$	$(1+2C_B/\sqrt{C_M})/3$
0.50	0.78	0.666	0.722	0.745	0.682	0.710
0.50	0.94	0.666	0.637	0.658	0.682	0.677
0.60	0.98	0.733	0.706	0.722	0.749	0.740
0.70	0.99	0.800	0.785	0.793	0.812	0.802
0.80	0.99	0.866	0.866	0.868	0.869	0.870

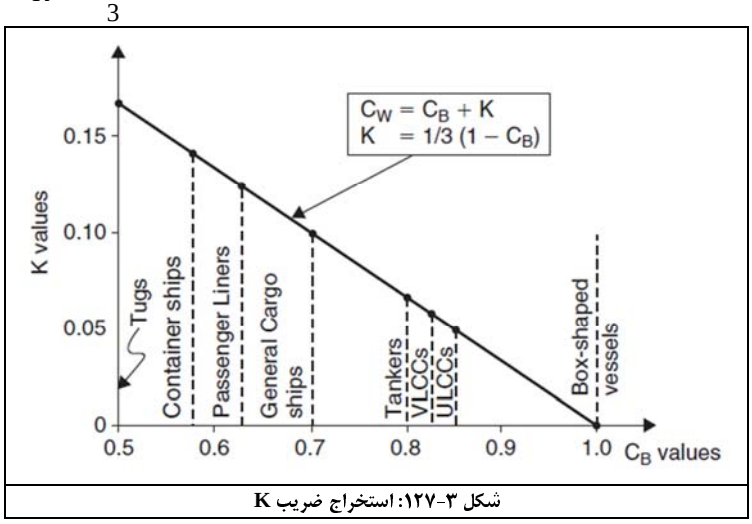
جدول۳- ۳۰ : رابطه بین CB، CM و CWP در روابط مختلف

اگر طول قسمتی از بدنه کم یا زیاد شود، اثر آن بر ضریب صفحه آبخور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{WP,p} = \frac{L_v \cdot C_{WP,v} + \Delta L}{L_v + \Delta L}$$

که L_v طول بین دو عمود طرح اولیه و ΔL طول قسمت میانی موازی که افزوده شده است. اندیس P مربوط به کشتی تغییریافته و v مربوط به کشتی اولیه است. برای تخمین C_W از رابطه و شکل ۳-۱۲۷ نیز می‌توان استفاده کرد:

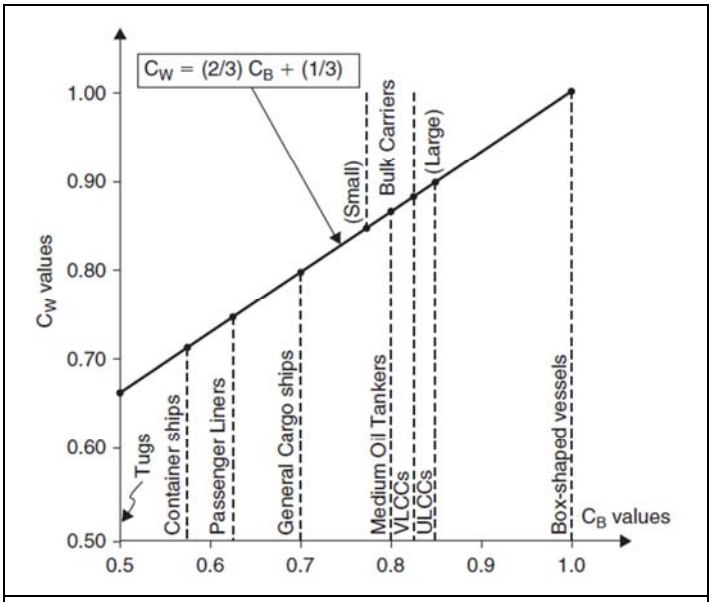
$$C_W = C_B + K \qquad K = \frac{1-C_B}{3}$$



شکل ۳-۱۲۷: استخراج ضریب K

همچنین رابطه دیگری با دقت مناسب برای تخمین C_W وجود دارد (شکل ۳-۱۲۸):

$$C_W = (\frac{2}{3}C_B) + \frac{1}{3}$$

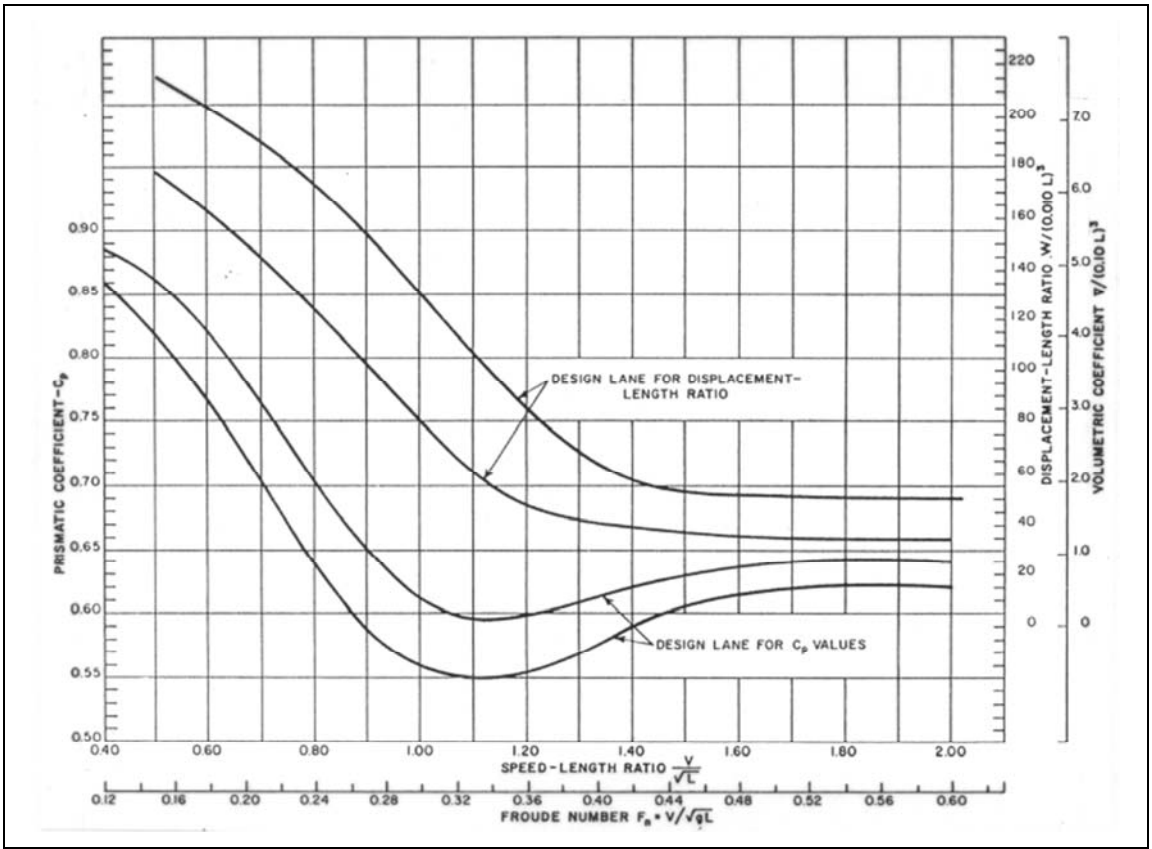


شکل ۳-۱۲۸: محاسبه ضریب صفحه آبخور

❖ تعیین ضریب منشوری[1] (C_P)

ضریب منشوری را می‌توان مطابق نمودار شکل ۳-۱۲۹ محاسبه کرد. محور افقی این نمودار، عدد فرود (F_n) و نسبت سرعت به طول $\frac{V}{\sqrt{L}}$ است.

محور عمودی شامل پارامترهای مختلفی است: ضریب منشوری (C_P)، ضریب حجمی $\left(\frac{\nabla}{(0.1L)^3}\right)$ و نسبت جابجایی به طول $\left(\frac{\Delta}{(0.01L)^3}\right)$.



شکل ۳-۱۲۹: نمودار محاسبه ضریب منشوری

1 - Prismatic coefficient

فصل ششم: تعیین مرکز بویانسی طولی (LCB)

موقعیت طولی مرکز بویانسی[1] LCB بر طراحی خطوط بدنه بسیار مؤثر است و از طرفی بر مقاومت حرکت کشتی نیز تأثیر زیادی دارد. می‌دانیم که وقتی یک کشتی آب‌اندازی می‌شود، برای اینکه به صورت افقی و بدون شیب در داخل آب قرار گیرد باید داشته باشیم:

(LCB) موقعیت طولی مرکز بویانسی = موقعیت طولی مرکز ثقل[2] (LCG)

لذا مرکز بویانسی در هر صفحه‌ای که باشد، مرکز ثقل نیز باید در همان صفحه قرار گیرد. از طرفی مرکز ثقل نیز به کمک چیدمانی بارها و تجهیزات داخل شناور تعیین می‌شود لذا اگر مرکز بویانسی به طور منطقی تعیین نشده باشد، تنظیم مرکز ثقل بسیار دشوار یا غیرممکن است. معمولاً در حالات مختلف بارگیری شناور و آبخورهای مختلف، مرکز بویانسی و مرکز ثقل طولی در یک صفحه در نمی‌آیند که از روشهای زیر برای تنظیم آن استفاده می‌شود:

- تغییر چیدمانی بارهای داخل انبارها
- آبگیری یا تخلیه مخازن تعادل (بالاست) کشتی

اگر مرکز ثقل، جلوی مرکز بویانسی باشد، شیب به سینه بوجود می‌آید که باعث کاهش عمق غوطه‌وری پروانه و کاهش بازدهی پروانه می‌شود. اگر مرکز ثقل عقب‌تر از مرکز بویانسی باشد، شیب به پاشنه بوجود می‌آید که باعث افزایش عمق غوطه‌وری پروانه و افزایش بازدهی پروانه می‌شود. البته همانطور که در قسمت حجم‌بندی مخازن کشتی بیان می‌شود، تنظیم شیب طولی کشتی اغلب توسط مخازن بالاست انجام می‌شود. مرکز بویانسی طولی وابسته به هندسه و ضرایب بدنه است بخصوص به ضریب بلوکی بدنه. جنسن در سال ۱۹۹۴ نمودار شکل ۳-۱۳۰ را برای تعیین LCB بر حسب C_B ارائه کرد. در این نمودار LCB نسبت به وسط بدنه بیان شده است.

منفی بودن آن یعنی عقب‌تر بودن از وسط بدنه و مثبت بودن آن یعنی جلوتر بودن از وسط بدنه. از طرفی، LCB بر خصوصیات هیدرودینامیکی و مقاومت شناور نیز بسیار مؤثر است. رابطه زیر برای مرکز بویانسی طولی بر حسب عدد فرود به صورت زیر بیان شده است:

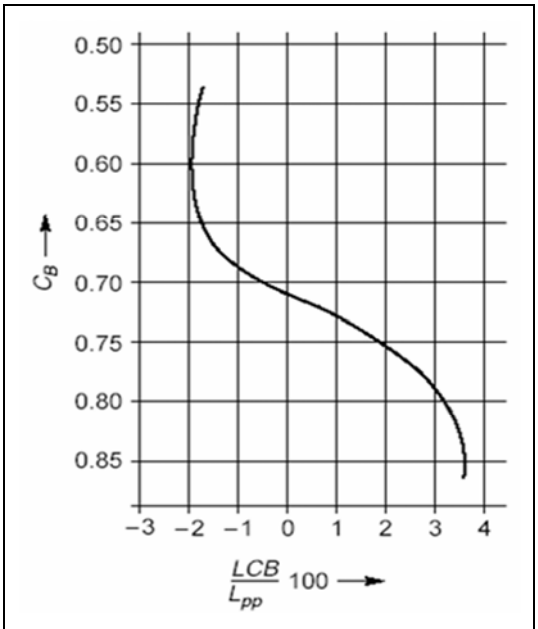
$$\mathrm{lcb}/L = (8.80 - 38.9 \cdot F_n)/100$$

برای نفتکش‌ها و کشتی‌های فله‌بر داریم:

$$\mathrm{lcb}/L = -0.135 + 0.194 \cdot C_P$$

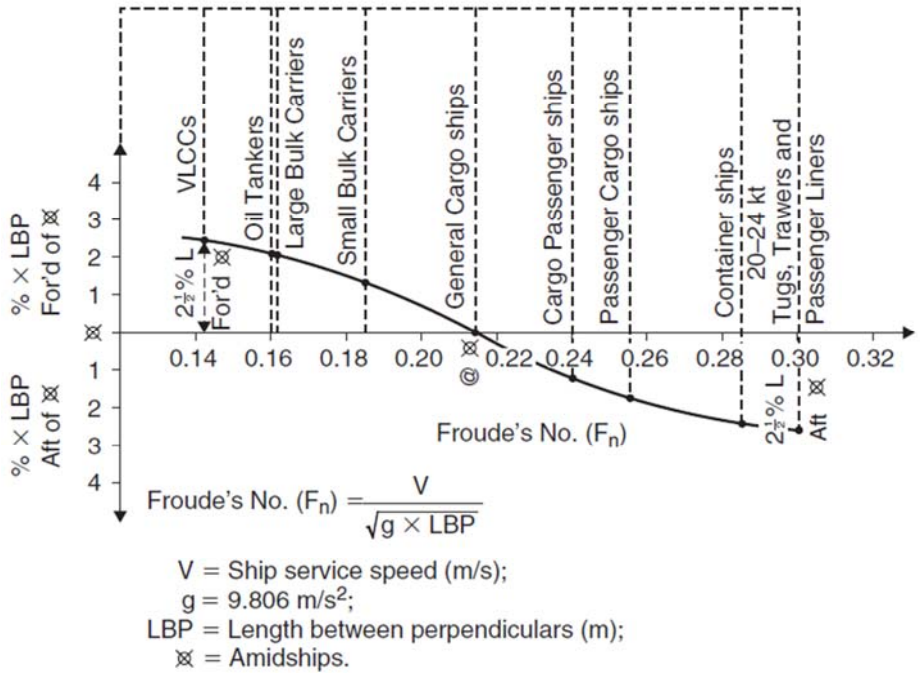
تعیین محل مناسب LCB وابسته به شکل بدنه است که آن نیز وابسته به سرعت حرکت است. LCB معمولا از وسط بدنه و به صورت درصدی از طول بین دو عمود بیان می‌شود. مثلا در کشتی‌های $VLCC$ با ضریب بلوکی حدود ۰/۸۵ ، مرکز بویانسی طولی به اندازه ۲/۵ درصد طول بین دو عمود جلوتر از وسط بدنه است. در کشتی‌های مسافربری تندرو با ضریب بلوکی حدود ۰/۶ ، مرکز LCB به اندازه ۲/۵ درصد طول بین دو عمود عقب‌تر از وسط بدنه است.

نمودار شکل ۳-۱۳۱ را می‌توان برای تعیین LCB در نظر گرفت. هرچه سرعت کشتی بالاتر باشد، C_B کمتر شده و LCB عقب‌تر خواهد رفت چراکه جلوی بدنه باریک‌تر خواهد شد.



شکل ۳-۱۳۰ : رابطه LCB با CB

1 - Longitudinal Centre of Buoyancy
2 - Longitudinal Centre of Gravity



شکل ۳-۱۳۱: موقعیت طولی مرکز بویانسی در کشتی‌های مختلف

همیشه دور بودن به معنای فراموش کردن نیست

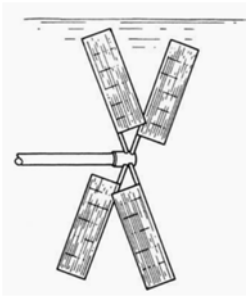
گاهی فرصتی است برای دلتنگ شدن ...

بخش ششم :

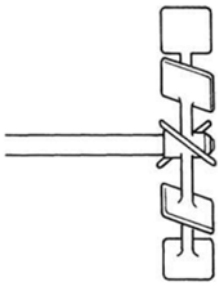
پروانه و سیستم رانش

فصل اول: تاریخچه تکامل پروانه[1]

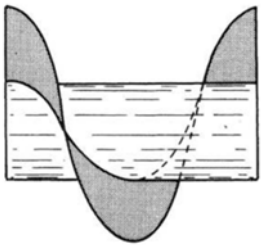
ارشمیدس و لئوناردو داوینچی اولین کسانی بودند که مفهوم عملکرد پروانه را ارائه کردند. ارشمیدس توانست توجیه علمی نسبتاً مناسبی از نحوه ایجاد نیروی رانش در شناورها توسط پروانه ارائه کند و پروانه‌ای را ارائه کرد که دارای شکل یک مارپیچ ممتد بود. لئوناردوداوینچی، ۱۷۰۰ سال بعد از ارشمیدس نقاشی‌هایی از خود به جای گذاشت که در آن پروانه‌ای با شکل پره‌هایی شبیه بادبزن ارائه شده بود. رابرت هوک نیز در سال ۱۶۸۳ یک سیستم رانش شبیه آسیاب آبی افقی ارائه کرده بود که محور آن به صورت افقی بود و پره‌های آن به صورت عمودی در داخل آب چرخش می‌کردند (شکل ۳-۱۳۲). این پروانه دارای چهار باله چوبی بود که باله‌ها می‌توانستند حول محور خود ۱۸۰ درجه دوران کنند. شکل پره‌ها مستطیلی و بدون انحنا بود. امروزه ۲/۵ قرن پس از طرح هوک از این نوع پروانه‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۳۲: پروانه پیشنهادی هوک- ۱۶۸۳



شکل ۳-۱۳۳: پروانه برنولی- ۱۷۵۲

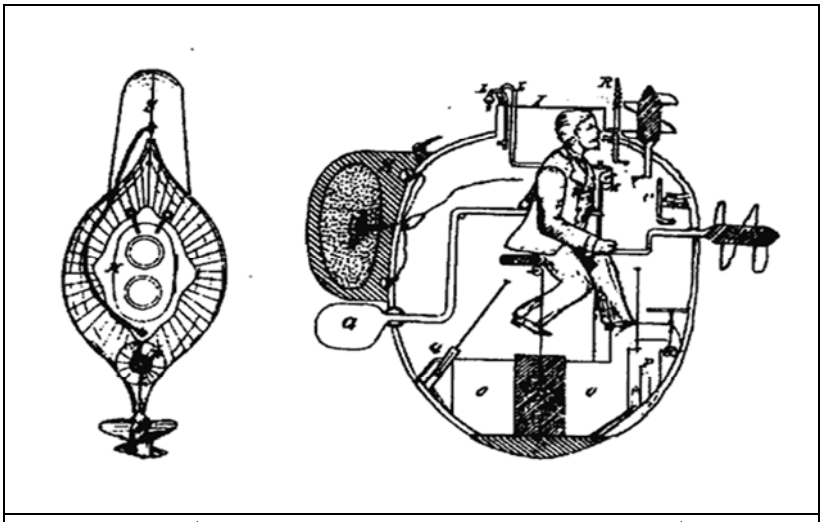


شکل ۳-۱۳۴: پروانه پاکتون- ۱۷۵۲

وزارت علوم فرانسه در سال ۱۷۵۲، یک سری جوایز برای تحقیق و ارائه طرح‌های جدید برای پیشرانش شناورها ارائه کرد که توانست تحول و پیشرفت خوبی در طراحی پروانه ایجاد کند. ریاضیدانان و دانشمندان زیادی از سراسر اروپا جذب این مسابقات شدند از جمله برنولی و اولر. برنولی طرحی مطابق شکل ۳-۱۳۳ ارائه کرد که شامل چند تیغه مایل بر روی چند میله بود. چهار میله که هریک دارای دو تیغه مایل بودند. برنولی معتقد بود یک شناور خاص با قدرت موتور ۲۰ تا ۲۵ اسب بخار، می‌تواند با این پروانه به سرعت ۲/۵ گره برسد. این پروانه نتوانست نظر ارتش و وزارت علوم فرانسه را جلب کند. در همین زمان فردی به نام پاکتون[2] طرحی مطابق شکل ۳-۱۳۴ ارائه کرد که ایده آن از پروانه ارشمیدس گرفته شده بود. این پروانه شبیه یک نوار ممتد بود که در اطراف یک استوانه به صورت مارپیچ درآمده بود. امروزه می‌دانیم که مسیر طی شده توسط پره پروانه شبیه این شکل است. در سال ۱۷۷۶، دیوید بوشنل آمریکایی توانست اولین زیردریایی با سیستم رانش پروانه‌ای را مطابق شکل ۳-۱۳۵ بسازد. این زیردریایی که تورتل (لاک پشت) نام داشت، دارای ۲ پروانه بود. یکی برای حرکت عمودی و دیگری برای حرکت افقی. عامل تحرک این پروانه‌ها بوسیله رکاب زدن خدمه تأمین می‌شد. این زیردریایی از نوع پروانه ارشمیدس استفاده کرده بود.

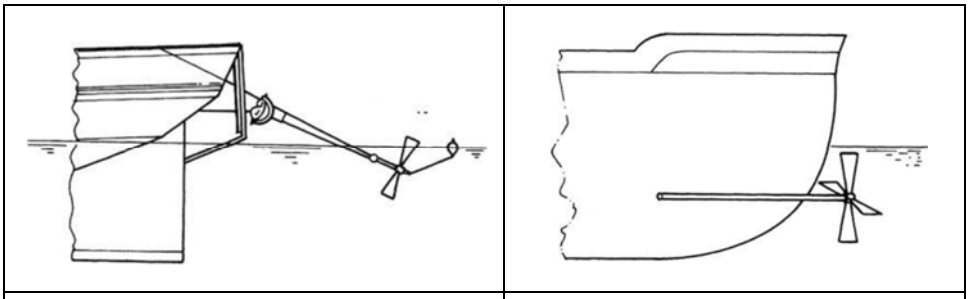
۱- منبع: [۳]

2 - Poucton



شکل ۳-۱۳۵: زیردریایی تورتل- سیستم دو پروانه‌ای- پروانه نوع ارشمیدس

در سال ۱۷۸۵ باز هم به دعوت وزارت علوم فرانسه، طرحی از پروانه مطابق شکل ۳-۱۳۶ توسط براما[1] ارائه شد. شکل پره‌ها به صورت مثلثی بود که از طرف رأس، به محور شافت متصل شده و چهار پره‌ای بود. این پروانه بر روی یک شناور با سیستم رانش بخار نصب شد ولی باز هم رضایت‌مندی خوبی ایجاد نکرد. ارتش فرانسه به دنبال پروانه‌ای بود که بتواند ناوهای نظامی فرانسه را با سرعت بالایی حرکت دهد و عامل برتری در جنگها باشد. در سال ۱۸۰۲، فردی به نام شورتر[2] ایده دیگری را ارائه کرد که در شکل ۳-۱۳۷ نشان داده شده است. شکل کلی این پروانه شبیه پروانه براما بود با این تفاوت که به صورت مایل و توسط یک بویه شناور روی سطح آب قرار می‌گرفت و در واقع در سطح آزاد سیال دوران می‌کرد. شافت این پروانه در بالای خط آب قرار داشت و لذا با مشکلات آب‌بندی مواجه نبود. توان محرک این پروانه توسط ۸ نفر خدمه به صورت دستی تأمین می‌شد. این پروانه توانست یک شناور را در تنگه جبل الطارق با سرعت ۱/۵ گره به حرکت درآورد. او فهمید که باید از سیستم رانش بخار برای به حرکت درآوردن شافت پروانه استفاده کند تا بتواند به سرعتهای بالاتری برسد. این پروانه در مراحل بعدی با موتور بخار وات به حرکت درآمد و توانست همان شناور را به سرعت ۴ گره برساند.



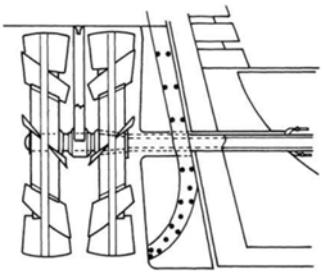
شکل ۳-۱۳۶: پروانه براما- ۱۷۸۵

شکل ۳-۱۳۷: پروانه شورتر- ۱۸۰۲

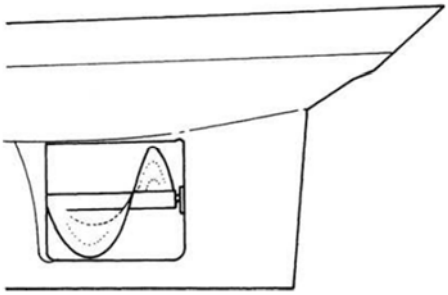
جان اریکسون[3] یک افسر سابق ارتش سوئد در سال ۱۸۳۶ یک سیستم پروانه دوقلو مطابق شکل ۳-۱۳۸ ارائه کرد. این پروانه شبیه پروانه برنولی و دارای ۸ پره بود. این دو پروانه در جهت عکس یکدیگر چرخش می‌کردند و می‌توانستند با سرعتهای متفاوت نیز گردش کنند. این پروانه ابتدا روی یک شناور یک متری امتحان شد و پس از کسب نتایج آن، یک پروانه بزرگتر با قطر ۱/۷ متر از این نمونه، روی یک قایق ۱۵ متری نصب شد و در رودخانه تایمز آزمایش شد. این آزمایش که در حضور فرماندهان ارتش انگلیس انجام شد، توانست قایق را به سرعت ۱۰ گره برساند که یک رکورد مناسب بود. این پروانه‌ها در پشت سکان نصب شدند که بر فرمان‌پذیری سکان نیز اثر بسیار مناسبی داشت. پروانه اریکسون توانست موفقیت نسبی را کسب کند. روند تکامل پروانه در اروپا با فراز و نشیب بسیاری مواجه بود چرا که شرایط سیاسی در آن خیلی مهم بود. هرگاه در اروپا جنگ در می‌گرفت، ارتش هر کشور برای غلبه بر نیروهای دشمن، سرمایه‌گذاری خوبی روی تکامل پروانه انجام می‌داد و پس از پایان یا رفع شدن جنگ، این حمایتها متوقف می‌شد. اسمیت که یک مهندس کشاورزی بود، در سال ۱۸۳۷، از پروانه مارپیچی ارشمیدس استفاده کرد و آزمایشاتی را در یک استخر بزرگ انجام داد (شکل ۳-۱۳۹). در یکی از این آزمایشات، به طور کاملاً اتفاقی، قسمتی از پروانه چوبی دچار شکست شد و به یکباره سرعت شناور افزایش یافت. این اتفاق خوش‌یمن، تحول بزرگی در طراحی پروانه‌های جدید بود. همگان دانستند که پروانه باید یک مسیر مارپیچی (هلیکال) را طی کند ولی

1 - Bramah
2 - Edward Shorter
3 - John Ericsson

شکل پره‌ها نباید پیوسته و همانند یک نوار مارپیچ باشد.

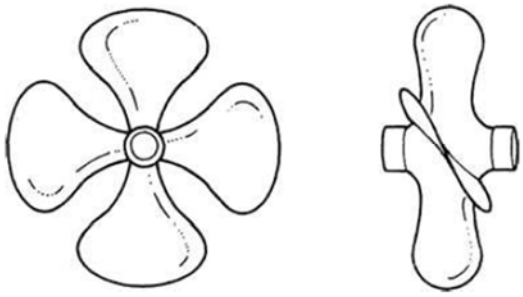


شکل ۳-۱۳۸: پروانه اریکسون- ۱۸۳۶

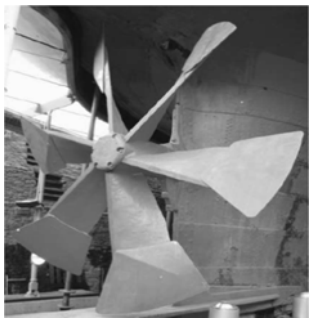


شکل ۳-۱۳۹: پروانه اسمیت- ۱۸۳۷

ارتش انگلیس از این پروانه حمایت کرد به گونه‌ای که پروانه‌ای با قطر ۱/۸ متر روی یک کشتی ۲۳۷ تنی به طول ۴۰ متر نصب شد و توانست آن را به سرعت بیش از ۹ گره برساند. پس از این موفقیت، مجوز استفاده از پروانه بر روی ناوهای انگلیسی صادر شد که در نوع خود موفقیت بزرگی بود. در سال ۱۸۴۲ فردی به نام ناپالن[1] طرح جدیدی ارائه کرد که در شکل ۳-۱۴۰ ملاحظه می‌شود. این پروانه بسیار شبیه به پروانه‌های امروزی است. دارای چهار پره با انحنای خاص و شکل کلی هر پره نیز گلابی شکل بود. این پروانه روی یک کشتی ۳۷۶ تنی نصب شد و نتایج قابل قبولی داشت. پروانه ناپالن باعث توجه به عوامل مؤثر در کارآیی پروانه شد، از جمله: تعداد پره، سطح هر پره، قطر و گام پروانه. آزمایشات روی این عوامل باعث توسعه سریع‌تر در تکامل پروانه شد. یک نمونه سه پره‌ای از جنس چدن از این پروانه ساخته و روی یک کشتی ۳۷۶ تنی نصب شد. این پروانه که با سرعت ۱۲۶ دور در دقیقه حرکت می‌کرد، توانست این کشتی را به سرعت ۱۲ – ۱۰ گره برساند.



شکل ۳-۱۴۰: پروانه ناپالن- ۱۸۴۲



شکل ۳-۱۴۱: پروانه بارنل- ۱۸۴۲

در همان زمان، فردی به نام بارنل[2] از مفاهیم پروانه ناپالن استفاده کرد و مطابق شکل ۳-۱۴۱ طرح دیگری از پروانه، ارائه کرد. این پروانه ۶ پره با قطر ۵/۳ متر بود که به روش ریخته‌گری و از جنس آهن ساخته شده بود. نمونه دیگری با ۹ پره و قطر ۵/۱ متر ساخته و آزمایش شد. این نوع پروانه توانست یک کشتی ۸۰۰ تنی با موتور بخار ۲۰۰ اسب بخار را به سرعت ۸/۷۵ گره برساند. تا این مرحله و تا سال ۱۸۵۰، طراحی و تکامل پروانه به مرحله قابل قبولی رسیده بود و شکل کلی پروانه تثبیت شده و مورد قبول واقع شده بود، به گونه‌ای که با افزایش دور پروانه، امکان رسیدن به سرعتهای بالاتر وجود داشت. موتور بخار از تأمین این خواسته عاجز بود تا اینکه با ظهور موتورهای دورن‌سوز و رسیدن به دورهای بسیار بالا، این مشکل نیز رفع شد و پروانه‌ها توانستند کشتی‌ها را تا سرعت بیش از ۲۰ گره نیز برسانند. این پیشرفتها در صنعت هوانوردی نیز استفاده شد به گونه‌ای که تا سال ۱۸۵۰ در طراحی ملخ هواپیما از نتایج طراحی پروانه‌های دریایی استفاده می‌شد. از آن پس با رونق صنعت هوانوردی، طراحی ملخ توانست تأثیر مثبتی بر طراحی و توسعه پروانه‌های دریایی داشته باشد.

1 - Napoleon
2 - Burnel

فصل دوم: انواع سیستم‌های رانش در شناورها [۱]

تاکنون برای شناورها، سیستم‌های رانش متعددی پیش‌بینی شده است که هر یک در دوران خاصی بکار گرفته شده و پس از مدتی کنار گذاشته شدند. رایج‌ترین نوع سیستم رانش همان پروانه می‌باشد که امروزه نیز به صورت تکامل‌یافته‌ای استفاده می‌شود. ظهور و افول انواع سیستم‌های رانش بر اساس معیارهای اصلی زیر انجام شده است:

۱) بازدهی بیشتر: به گونه‌ای که بتوان با صرف کمترین انرژی ممکن، به بیشترین نیروی پیشران دست یافت. صرفه‌جویی در مصرف سوخت و انرژی از اولویت بالایی برخوردار است.

۲) سادگی ساخت و تعمیر و نگهداری: سیستم رانش باید دارای دشواری ساخت چندان زیادی نباشد و مهمتر از آن، تعمیر و نگهداری ساده‌ای داشته باشد به گونه‌ای که تعمیرات آن در کارگاه‌های مربوطه قابل انجام باشد و نیازی به فناوری سطح بالا نداشته باشد. سیستم رانش الکترومغناطیس مثال نقض این مورد است. هرچه انجام تعمیرات، دشوارتر باشد یعنی هزینه‌بر و غیر اقتصادی‌تر است.

۳) امکان جانمایی ساده در داخل شناور: سیستم رانش باید بتواند براحتی در داخل بدنه شناور قرار گیرد بدون اینکه شکل هیدرودینامیکی نامناسبی ایجاد کند. در واقع باید وزن و حجم قابل قبولی را اشغال کند. مثال نقض این مورد سیستم رانش توربین بخار می‌باشد.

۴) ایجاد حداقل ارتعاشات و سروصدا: از آنجا که سیستم رانش کشتی‌ها دارای ابعاد بزرگی است، لذا می‌تواند باعث ایجاد سروصدا و ارتعاشات زیادی بر بدنه کشتی شود که هم راحتی خدمه را مختل می‌کند و هم مشکلات سازه‌ای را به دنبال دارد. لذا رسیدن به یک سیستم رانش با حداقل ارتعاشات و سروصدا مطلوبست.

❖ سیستم رانش بادبانی

شکل ۳-۱۴۲ : سیستم بادبانی در کشتی‌های مدرن

این سیستم رانش، اولین نوع سیستم رانشی بوده که بشر از آن استفاده کرده است و البته امروزه هم کاربردهای وسیعی دارد. شناورهای مجهز به این سیستم، دارای بادبان‌های بلندی هستند که با توجه به تغییر زاویه بادبان‌ها، کشتی می‌تواند حتی در خلاف جهت باد نیز حرکت کند. امروزه علت اصلی استفاده از بادبان، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و انرژی است چراکه در هنگام وزش باد، از انرژی باد استفاده می‌شود و در مواقعی که باد نباشد، بادبان‌ها برای پرهیز از ایجاد مقاومت جمع می‌شوند. بنابراین امروزه بادبان‌ها یک سیستم رانش کمکی محسوب می‌شوند. (شکل ۳-۱۴۲). بطور مثال کشتی ۱۶۰۰ تنی ژاپنی که در سال ۱۹۲۵ ساخته شده، با مساحت بادبان ۱۹۴ مترمربع و در سرعت باد ۱۰ گره، توانست به سرعت ۵ گره برسد. بطور متوسط این بادبان‌ها باعث ۱۲ درصد صرفه‌جویی اقتصادی در مصرف سوخت این شناور شده‌اند. قایق‌های بادبانی تفریحی و ورزشی نیز امروزه بسیار رایج هستند.

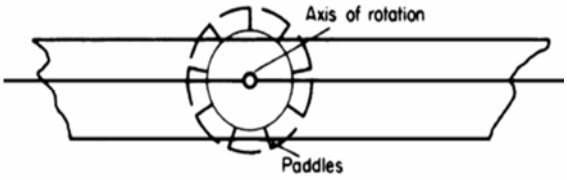
❖ سیستم رانش چرخ پدالی[۲]:

پس از کشف سیستم تولید قدرت بخار، اولین سیستم‌های رانشی که روی شناورها نصب شد، توربین بخار بود که با سیستم چرخ پدالی باعث حرکت شناورها می‌شد. نمونه‌ای از این شناور را می‌توان در شکل ۳-۱۴۳ ملاحظه کرد که توربین بزرگی در سمت چپ شناور قرار گرفته است. نمای کلی داخل آن شبیه شکل ۳-۱۴۴ می‌باشد که پدالهایی متصل به یک چرخ دوار بزرگ قرار گرفته‌اند و با چرخش آن، پدالها سطح آب را قطع کرده و باعث پیشرانش می‌شوند. حرکت چرخ می‌تواند توسط منابع تولید قدرت بخار، الکتریکی یا موتورهای احتراقی انجام شود.

۱- منابع:[۳ و۲]

2 - paddle wheel

شکل ۳-۱۴۳ : جانمایی سیستم رانش چرخ پدالی در کشتی

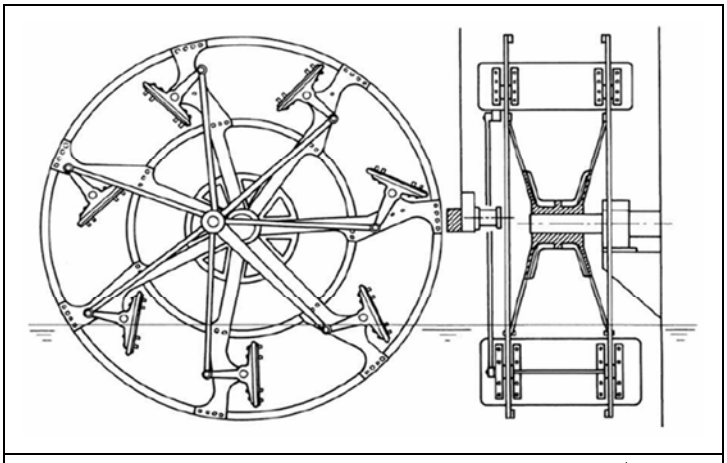


شکل ۳-۱۴۴ : نمای کلی سیستم چرخ پدالی

نسل اولیه پدالها، به صورت ثابت بر روی چرخ متصل می‌شدند و امکان تغییر زاویه نداشتند ولی در سیستم‌های چرخ پدالی جدیدتر، پدال‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری در سیکل چرخش، تغییر زاویه می‌دادند (شکل ۳-۱۴۵).

این مورد باعث افزایش بازدهی این سیستم می‌شد. امروزه از این نوع سیستم رانش بدلالیل زیر، کمتر استفاده می‌شود: ۱- بازدهی کم ۲- به هم‌زدن شکل هیدرودینامیکی بدنه بدلیل اینکه توربین و روکش آن از یک طرف بدنه بیرون می‌زدند. ۳- تحمیل وزن زیاد بر شناور: این سیستم رانش در گذشته، اغلب روی کشتی‌های مسافربری نصب می‌شد و در شرایطی که از سیستم رانش کمکی دیگری استفاده می‌شد، این سیستم به داخل بدنه جمع می‌شد. از مزایای این سیستم می‌توان موارد زیر را نام برد:

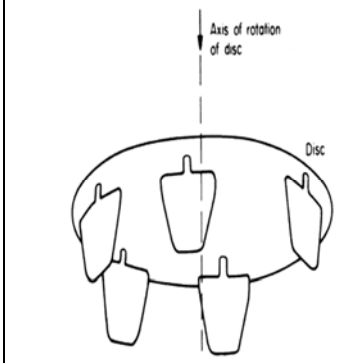
۱) کارکرد در جریان یکنواخت و همگن در فاصله‌ای مناسب از بدنه شناور
۲) عدم وجود کاویتاسیون و حداقل ارتعاشات
۳) امکان چرخش به صورت برعکس و حرکت رو به عقب شناور



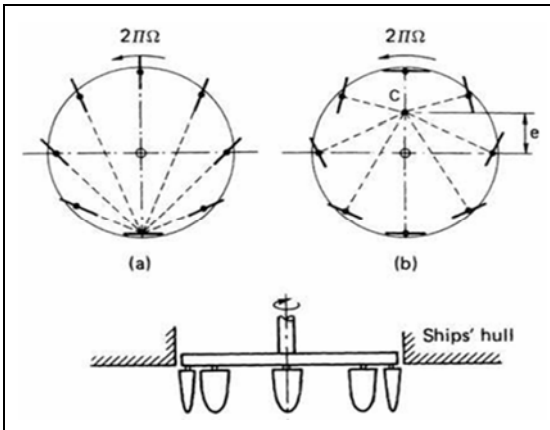
شکل ۳-۱۴۵: تغییر زاویه پدال‌ها در هر دور چرخش در سیستم چرخ پدالی

❖ پروانه‌های محور عمودی[1]

این سیستم رانش از سال ۱۹۲۰ در یدک‌کش‌ها و فری‌ها نصب شد و شامل مجموعه‌ای از پره‌های عمودی روی یک صفحه دوار افقی بود (شکل ۳-۱۴۶).



شکل ۳-۱۴۶ : پروانه‌های محور عمودی



شکل ۳-۱۴۷ : تغییر زاویه پره‌ها در هر دور چرخش در پروانه محور عمودی a- روش کریستسن – بوئینگ b- وویس - اشنایدر

تعداد پره‌ها ۱۰ – ۶ پره می‌تواند باشد و این پره‌های عمودی می‌توانند حول محور خود دوران کنند. تغییر زاویه این پره‌ها به گونه‌ای است که در هر لحظه از چرخش، بیشترین تراست (پیشرانه) را به جلو اعمال کند (شکل ۳-۱۴۷).

1 - Cycloidal propeller

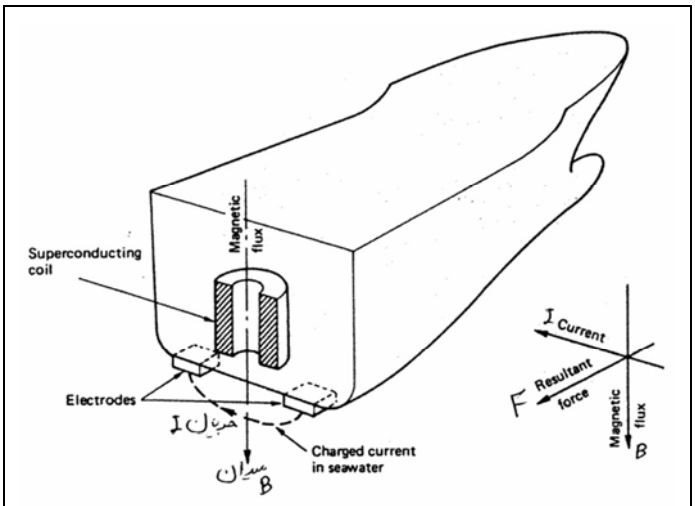
مطابق شکل ملاحظه می‌شود که تراست ایجاد شده در هر پره در راستای حرکت شناور است. چرخش صفحه دوار حول محور میانی آن انجام می‌شود ولی تغییر زاویه پره‌ها حول یک محور دیگر انجام می‌شود که دو حالت ممکن آن در شکل ۳-۱۴۷ نشان داده شده است:

۱) کریستین – بوئینگ ۲) وویس – اشنایدر

تغییر زاویه پره نسبت به محیط دایره در هر دور گردش، ۱۸۰ درجه می‌باشد و برآیند کلیه نیروها در جهت حرکت است و در این بین ممکن است یک پره، در بخشی از گردش خود، تراست ایجاد نکند. سرعت سیال روی پره عبارتست از جمع سرعت پیشروی و سرعت دورانی.

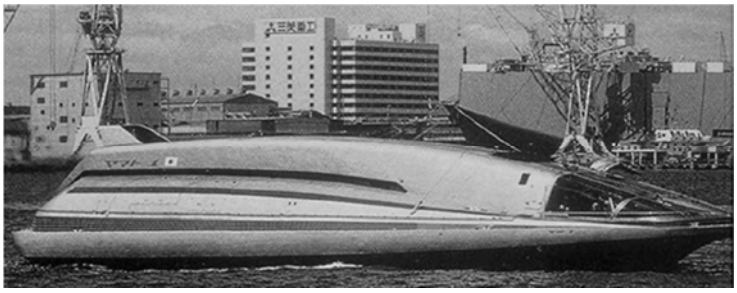
❖ سیستم رانش الکترومغناطیس[1]

قانون فیزیکی معروف به «دست راست» بیان می‌کند که: اگر انگشت اشاره در جهت جریان و کف دست در راستای میدان مغناطیسی باشد، انگشت شست، نشان‌دهنده راستای نیروی وارد شده می‌باشد که عمود بر دو راستای قبلی است. از همین مفهوم برای انجام پیشرانش در کشتی‌ها استفاده شد که شمای کلی سیستم آن را می‌توان در شکل ۳-۱۴۸ ملاحظه کرد.



شکل ۳-۱۴۸ : شمای کلی سیستم رانش الکترومغناطیس

کشتی ژاپنی یاماتو در سال ۱۹۹۲، اولین کشتی بود که به این سیستم رانش مجهز شد (شکل ۳-۱۴۹).



شکل ۳-۱۴۹ : کشتی یاماتو (۱۹۹۲) – اولین کشتی با سیستم رانش الکترومغناطیس

سیستم رانش الکترومغناطیس بدون ارتعاش و سروصدا و بدون کاویتاسیون می‌باشد. این سیستم نیاز به یک میدان مغناطیسی شدید و سیم‌پیچ ابر رسانا دارد که مقاومت صفر را تأمین نماید لذا از هلیوم مایع در دمای ۴/۲ کلوین استفاده می‌شود. برای محافظت از این کاهش دما از عایق‌بندی شدیدی استفاده می‌شود. مجموعه این عوامل باعث می‌شود سیستم رانش الکترومغناطیس یک سیستم با فناوری بالا و پرهزینه محسوب شود لذا امروزه کمتر از آن استفاده می‌شود.

❖ سیستم رانش واترجت[2]

سیستم رانش واترجت در گذشته در قایق‌های تفریحی استفاده می‌شد ولی امروزه در کشتی‌های تندرو نیز استفاده می‌شود. سیستم رانش واترجت از

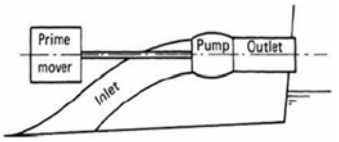
1 - electro – magnetic propulsion
2 - waterjet

سه قسمت اصلی زیر مطابق شکل ۳–۱۵۰ تشکیل شده است.

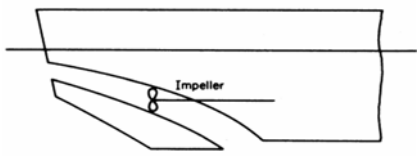
۱) مدخل ورودی آب: این محل به صورت حفره‌ای در زیر بدنه می‌باشد که وظیفه مکش آب از زیر بدنه را بر عهده دارد. قطر این ورودی بزرگتر از قطر خروجی (نازل) است.

۲) پمپ و محرک آن: در داخل مدخل عبور آب، یک پمپ یا سیستم توربینی شکل قرار دارد که بوسیله یک محرک[1] به حرکت در می‌آید. سیستم توربینی می‌تواند یک روتور و استاتور ۷ – ۳ پره‌ای باشد.

۳) خروجی (نازل): خروجی آب از سیستم واترجت که دارای قطر کمتری از ورودی آن است را «نازل» نیز می‌گویند. محل خروجی آب، در نزدیکی سطح آب است که البته محل ایده‌آل آن، بیرون از سطح آب می‌باشد که در واقعیت ممکن است امکان‌پذیر نباشد. تفاوت قطر ورودی و خروجی آب مطابق شکل ۳–۱۵۱ باعث افزایش دبی آب واردشده به پمپ می‌شود. همچنین اختلاف ارتفاع ورودی آب (در زیر شناور) و خروجی آب (در سطح یا نزدیکی سطح آب) باعث ایجاد اختلاف فشار مناسب جهت افزایش سرعت خروجی آب می‌شود (با کاهش عمق، فشار هیدرواستاتیک آب نیز کاهش می‌یابد). در واقع اساس ایجاد پیشرانش (تراست)، اختلاف مومنتوم یا همان ایجاد اختلاف سرعت است.

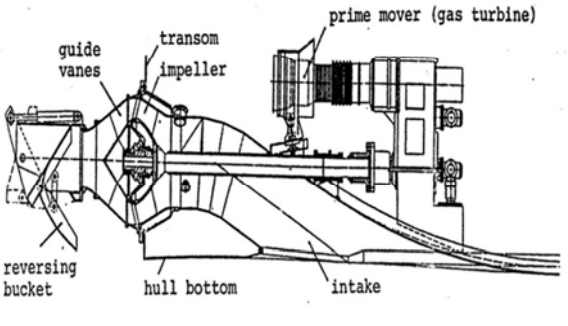


شکل ۳–۱۵۰ : اجزاء اصلی سیستم رانش واترجت



شکل ۳–۱۵۱: تفاوت قطر ورودی و خروجی سیستم واترجت که باعث افزایش مومنتوم می‌گردد.

نمای دقیق‌تری از سیستم رانش واترجت را می‌توان در شکل ۳–۱۵۲ ملاحظه کرد.



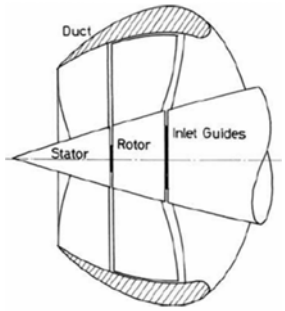
شکل ۳–۱۵۲ : اجزاء دقیق‌تری از سیستم واترجت

در محل خروجی آب از نازل، یک دهانه با قابلیت تغییر زاویه[2] می‌باشد که می‌تواند باعث حدود ۳۰± درجه تغییر زاویه سیال خروجی از نازل شود که در واقع وظیفه سکان و مانورپذیری را انجام می‌دهد. همچنین این دهانه می‌تواند در وضعیتی قرار گیرد که باعث ۱۸۰ درجه تغییر مسیر و برگشت سیال شود به گونه‌ای که شناور بتواند رو به عقب حرکت کند. در واقع در سیستم واترجت، امکان عکس کردن دور پمپ وجود ندارد و از همین سیستم دهانه معکوس‌کننده برای حرکت رو به عقب استفاده می‌شود. در شکل ۳–۱۵۲، عامل محرک یک توربین گاز می‌باشد. آرایش تیغه‌های روتور و استارتور می‌تواند مطابق شکل ۳–۱۵۳ باشد که چسبیده به محل خروجی آب است. مزایای اصلی سیستم رانش واترجت از قرار زیر است:

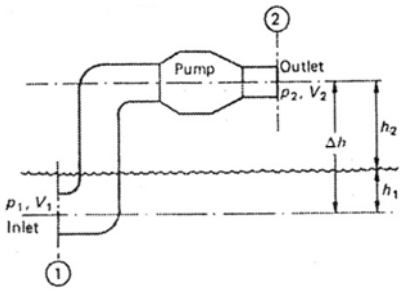
۱) عدم وجود ممان واژگون‌کننده: پروانه‌ها ممان رول‌دهنده یا واژگون‌کننده شدیدی را اعمال می‌کنند ولی سیستم رانش واترجت این ممان را اعمال نمی‌کنند.

۲) ایجاد پیشرانش بسیار زیاد و امکان رسیدن به سرعتهای خیلی بالا به کمک این سیستم رانش.

1 - prime mover
2 - reversing bucket



شکل ۳-۱۵۳: تیغه‌های روتور و استاتور



شکل ۳-۱۵۴: حالت ایده‌آل سیستم واترجت

حالت ایده‌آلی از سیستم واترجت را مطابق شکل ۳-۱۵۴ در نظر می‌گیریم که ورودی کاملاً در زیر آب و خروجی کاملاً در بالای سطح آب است. فشار و سرعت در محل ورودی P_1 و V_1 است و در محل خروجی سیال برابر P_2 و V_2.

دبی ورودی و خروجی سیال برابر است با: $\dot{m} = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2$

مومنتوم: $\dot{m}.V$

اختلاف مومنتوم ایجاد شده ناشی از اختلاف سرعت در محل ورودی و خروجی عبارتست از: $\dot{m}(V_2 - V_1) = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1) = T$

این اختلاف مومنتـوم همان نیـروی پیشرانه (تراست) است که باعث حرکت رو به جلوی شناور می‌شود.

دیمانسیون رابطه فوق به صورت زیر منجر به دیمانسیون نیرو می‌شود. $\frac{kg}{m^3} \times m^2 \times \frac{m}{s} \times \frac{m}{s} = kg.\frac{m}{s^2} = N$

که نیوتن هم واحد نیرو است. از همین مفهوم اختلاف مومنتوم نیز برای توجیه نیروی تراست ایجاد شده در پروانه استفاده می‌شود.

رابطه بین سرعت و فشار در مقطع ۱ و ۲ مطابق شکل ۳-۱۵۴ به صورت زیر است:

$$P_1 = P_2 + \rho g.\Delta h$$

و از رابطه برنولی داریم: $\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + H_P = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h + h_{loss}$

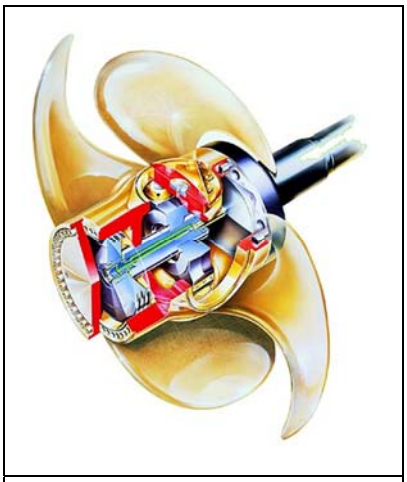
که h_{loss} تلفات جریان سیال ورودی و تلفات پمپ است.

زندگی تفسیر سه کلمه است:
خندیدن، بخشیدن و فراموش کردن
پس بخند، ببخش و فراموش کن ...

فصل سوم: انواع سیستم‌های رانش پروانه‌ای

❖ پروانه گام متغیر[1](CPP):

پـروانه‌های گام متغیر دارای امکان تغییر زاویه گام پروانه هسـتند به گـونه‌ای که پروانه بتواند حول محور خود چرخش نماید. بدین ترتیب پروانه در شرایط کاری مختلف می‌تواند زاویه گام پره‌ها را به گونه‌ای تغییر دهد که در بهینه‌ترین شرایط از نظر بازدهی قرار داشته باشد که نتیجه آن صرفه‌جویی در مصرف سوخت است. نمای داخلی پروانه‌های گام متغیر را می‌توان در شکل ۳-۱۵۵ ملاحظه کرد.



شکل ۳-۱۵۵ : نمای داخلی پروانه گام متغیر

این شکل، یک پروانه با سیستم تغییر زاویه هیدرولیک را نشان می‌دهد که پره پروانه با یک سیستم سیلندر پیستونی حول محور خود چرخش می‌کند. در واقع تغییر زاویه گام پره‌ها به دو حالت کلی زیر انجام می‌شود (مطابق شکل ۳-۱۵۶):

۱) **تحریک مکانیکی:** در این سیستم تغییر زاویه گام پروانه به صورت مکانیکی و بوسیله یک میله عبوری از داخل شافت پروانه (مطابق شکل ۳-۱۵۶) انجام می‌شود. در واقع در این روش، حرکت خطی میله، تبدیل به حرکت چرخشی پره‌های پروانه و تغییر زاویه آنها می‌شود. ایجاد حرکت خطی (طولی) میله می‌تواند توسط یک سیستم هیدرولیک، پنوماتیک یا دستی انجام شود. این سیستم برای شناورهایی با طول شافت کوچک قابل انجام است.

۲) **تحریک هیدرولیکی:** در این سیستم، تحریک پره‌های پروانه به صورت هیدرولیک انجام می‌شود به گونه‌ای که در داخل توپی پروانه، یک سیلندر و پیستون هیدرولیک کوچک قرار دارد که حرکت پیستون باعث دوران پره‌ها می‌شود. تحریک هیدرولیک توسط یک خط رفت و برگشتی روغن هیدرولیک در داخل شافت پروانه انجام می‌شود. تأمین فشار روغن هیدرولیک توسط سیستم هیدرولیک در داخل موتورخانه انجام می‌شود. نکته مهم در اینجاست که در هر دو سیستم تحریک مکانیکی و هیدرولیکی، تغییر زاویه گام کلیه پره‌های پروانه باید به صورت کاملاً یکسان و برابر انجام شود در غیر اینصورت پروانه دچار عدم توازن شده و لنگ می‌زند. لذا دقت بالای عملکرد مکانیزم‌های تغییر همزمان و برابر کلیه پره‌ها، بسیار حائز اهمیت است. وجود مکانیزم‌های تغییر زاویه در داخل توپی پروانه باعث می‌شود قطر توپی آن بزرگتر از قطر توپی پروانه‌های گام ثابت باشد:

گام ثابت: $D_{hub} = 0.16\,D - 0.25\,D$

گام متغیر: $D_{hub} = 0.24\,D - 0.32\,D$

مزایای پروانه‌های *CPP* را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) بازدهی بالاتر پروانه به گونه‌ای که پروانه بتواند در شرایط کاری مختلف تغییر گام دهد و در شرایط بهینه و بالاترین بازدهی هیدرودینامیکی کار کند. این مهم باعث کاهش مصرف سوخت موتور کشتی می‌شود.

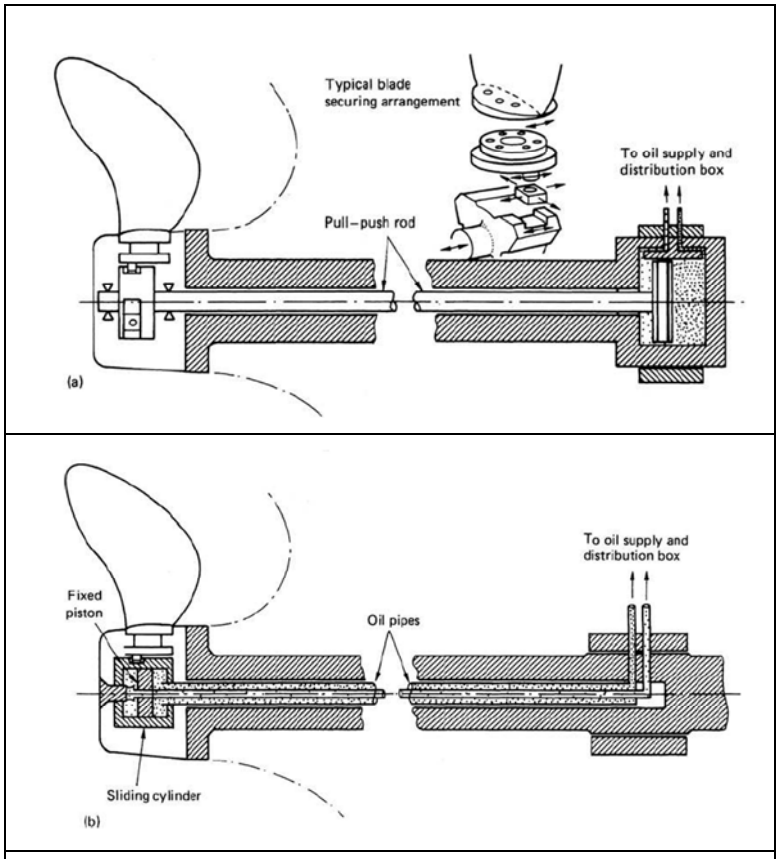
۲) امکان عکس کردن جهت حرکت شناور با تغییر زاویه گام پره‌ها به اندازه ۹۰ درجه. در این شرایط، جهت چرخش موتور، شافت و پروانه بدون اینکه به عکس شود، شناور می‌تواند رو به عقب حرکت کند.

۳) امکان بکارگیری یک موتور با دور ثابت؛ چراکه حتی اگر دوران (*rpm*) شافت ثابت باشد، پروانه می‌تواند با تغییر زاویه گام پره‌ها باعث تغییر سرعت شناور شود. در واقع، شناور برای افزایش یا کاهش سرعت نیازی به تغییر سرعت دوران شافت ندارد.

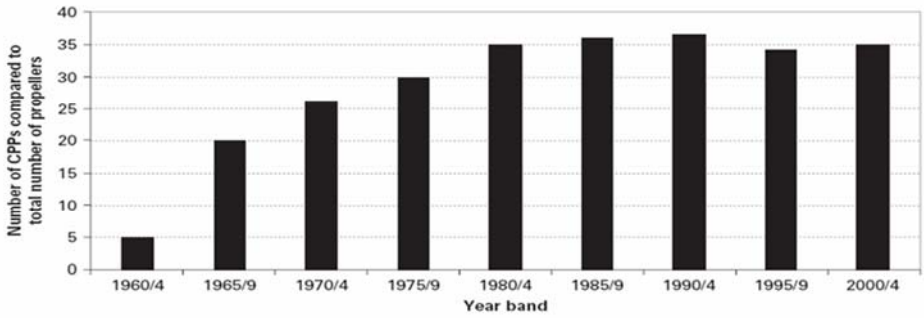
۴) امکان کارکرد درجا با صفر کردن زاویه گام پره‌ها: در واقع اگر موتور کشتی بخواهد قبل از حرکت، مدتی کار کند بدون اینکه پیشروی داشته باشد، زاویه گام پره‌ها صفر می‌شود و شناور درجا کار می‌کند. در واقع در اینجا تغییر گام، بجای استفاده از کلاچ انجام وظیفه می‌کند. (کلاچ جداکردن چرخش محور موتور از محور پروانه را بر عهده دارد).

مزایای پروانه‌های *CPP* باعث شده است، استفاده از آنها در دنیا بسیار رایج شود. نمودار شکل ۳-۱۵۷ نشان‌دهنده درصد استفاده از پروانه‌ها *CPP* در مقایسه با کل تعداد پروانه‌های استفاده شده به تفکیک سالهای مختلف می‌باشد.

1 - Controlable pitch propeller



شکل ۳-۱۵۶ : دو حالت کلی تغییر زاویه گام پره پروانه



شکل ۳-۱۵۷ : درصد پروانه‌های گام متغیر نسبت به کل پروانه‌های استفاده شده در سالهای مختلف

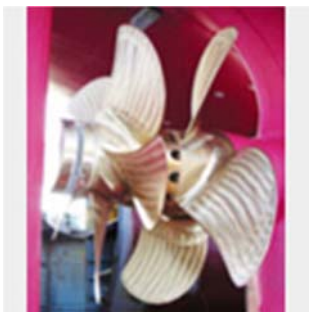
جدول۳- ۳۱، سهم شناورهای مختلف را در استفاده از پروانه‌های گام متغیر نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که کشتی‌های مسافربری، یدک‌کش، صیادی و فراساحل دارای بیشترین آمار استفاده از پروانه‌های گام متغیر هستند چراکه شرایط کاری بسیار متفاوتی دارند که همین موضوع توجیه اقتصادی مناسبی برای پروانه‌های *CPP* است.

Ship type	*1960–1964*	*1965–1969*	*1970–1974*	*1975–1979*	*1980–1984*	*1985–1989*	*1990–1994*	*1995–1999*	*2000–2004*
Tankers	1	7	15	14	23	13	21	17	10
Bulk carriers	1	9	10	5	5	12	0	1	1
Container ships	0	13	24	3	1	13	18	10	9
General cargo	2	12	20	29	42	43	45	55	80
Passenger ships and ferries	24	64	82	100	94	100	88	78	63
Tugs and offshore vessels	29	50	44	76	85	100	77	73	78
Fishing vessels	48	54	87	90	93	92	100	90	89

جدول۳- ۳۱: سهم شناورهای مختلف در استفاده از پروانه‌های گام متغیر

❖ پروانه‌های عکس چرخنده[1] (CRP):

پروانه‌های عکس چرخنده مطابق شکل ۳-۱۵۸ شامل دو پروانه پشت سر هم می‌باشد که جهت چرخش آنها برعکس یکدیگر است. هر دوی این پروانه‌ها نیروی تراست رو به جلو ایجاد می‌کنند، چراکه زاویه گام پره‌های آنها ۹۰ درجه با یکدیگر متفاوت است. لذا چرخش معکوس پره‌ها به معنای خنثی‌کردن تراست یکدیگر نیست. این ایده اولین بار در ملخ هواپیماها استفاده شد و در سال ۱۸۳۶ برای اولین بار روی کشتی‌ها نصب شد. قطر پروانه دوم معمولاً کوچکتر از قطر پروانه اول است. دور پروانه‌ها نیز ممکن است متفاوت باشد ولی در اغلب موارد دور آنها با یکدیگر یکسان است. چرخش این پروانه‌ها توسط دو شافت تو در تو انجام می‌شود که پروانه اول روی شافت بیرونی و پروانه دومی روی شافت داخلی قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۵۸: پروانه‌های عکس چرخنده

مزایای این نوع پروانه‌ها را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) خنثی‌کردن گشتاور یکدیگر به گونه‌ای که یکی ممان به صورت ساعتگرد و دیگری پادساعتگرد ایجاد می‌کند و این ممان‌ها یکدیگر را خنثی می‌کنند. خنثی‌کردن این گشتاورها بخصوص در اژدرها بسیار اهمیت دارد چراکه ابعاد پروانه اژدر نسبتاً بزرگ است. گشتاور پروانه تکی می‌تواند باعث چرخش اژدر حول محور طولی شود. لذا برای جلوگیری از آن، اغلب اژدرها دارای پروانه‌های عکس چرخنده هستند. (اژدر نوعی موشک زیرآبی است که دارای پروانه برای حرکت رو به جلو است).

۲) کاهش بار روی سطح پروانه‌ها (بدلیل دو پروانه بودن) و در نتیجه کاهش کاویتاسیون

۳) استفاده بهتر از انرژی خروجی از پروانه اول به گونه‌ای که پروانه دوم می‌تواند از انرژی چرخشی سیال خروجی از پروانه اول نیز جهت افزایش تراست استفاده کند.

در مجموع، پروانه‌های *CRP* باعث ۱۰ – ۸ درصد افزایش بازدهی می‌شوند.

معایب پروانه‌های عکس چرخنده را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) دارای سیستم شافت تو در تو و پیچیده به گونه‌ای که بکارگیری آنها در کشتی‌های بزرگ با طول شافت زیاد، امکان‌پذیر نیست.

۲) نیاز به یک چرخ‌دنده برای برعکس کردن دور موتور در یکی از پروانه‌ها که این چرخ‌دنده در داخل موتورخانه قرار می‌گیرد.

۳) مشکل نصب یاتاقان بر روی شافت داخلی که منتهی به پروانه دوم می‌شود.

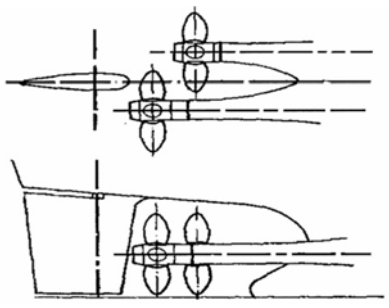
۴) احتمال بروز کاویتاسیون در پروانه دوم

❖ پروانه‌های متداخل[2]

شکل کلی پروانه‌های متداخل شبیه شکل ۳-۱۵۹ می‌باشد به گونه‌ای دو پروانه درکنار یکدیگر قرار گرفته‌اند که پره‌های آنها با یکدیگر متداخل است. این پروانه‌ها از نظر طولی با یکدیگر فاصله دارند و در واقع، یکی جلوتر و دیگری عقب‌تر قرار گرفته است. فاصله بین دو شافت این پروانه‌ها در محدوده زیر است:

$$d = 0.5\,D - 0.8\,D$$

جهت چرخش آنها عکس یکدیگر و به سمت بیرون است و معمولاً در بدنه‌هایی با مقطع V شکل نصب می‌شوند. مزایای اصلی این پروانه‌ها عبارتند از:



شکل ۳-۱۵۹ : پروانه‌های متداخل (نما از بالا و نما از کنار)

۱) استفاده از پروانه‌های با قطر بزرگتر (بدلیل متداخل بودن) که افزایش تراست را امکان‌پذیر می‌کند.

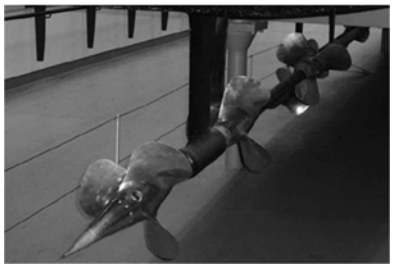
۲) استفاده پروانه دوم از سرعت سیال خروجی از پروانه اول و در نتیجه افزایش بازدهی سیستم (استفاده از انرژی میدان ویک).

1 - Contra Rotating Propeller
2 - over lapping propeller

❖ پروانه گام آزاد[1]

پره‌های این نوع پروانه می‌توانند به اندازه ۳۶۰ درجه حول محور عمود بر توپی پروانه دوران کنند که در واقع همان زاویه گام پره‌ها تغییر می‌کند. زاویه گام پره‌ها نیز توسط نیروهای هیدرودینامیکی و نیروهای گریز از مرکز به صورت خود به خود تنظیم می‌شود به گونه‌ای که باعث افزایش بازدهی و تراست پروانه گردد. اغلب کاربرد این پروانه‌ها در قایق‌های تفریحی کوچک می‌باشد.

❖ پروانه‌های هم‌محور[2]

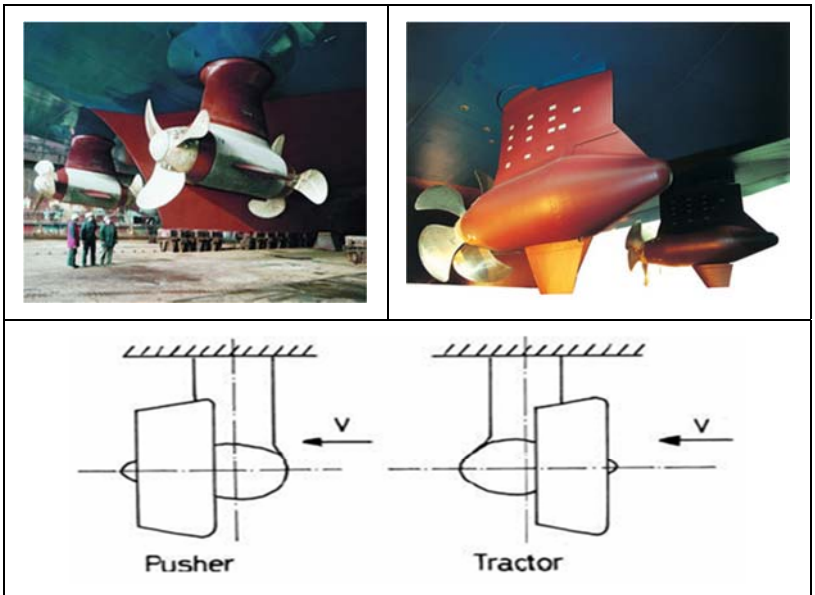


شکل ۳-۱۶۰: پروانه‌های هم محور

شکل ۳-۱۵۴ نشان‌دهنده مدلی از پروانه‌های هم‌محور می‌باشد که سه پروانه بر روی یک شافت قرار گرفته‌اند. در این حالت نیروی تراست فوق‌العاده‌ای توسط پروانه‌ها برای رسیدن به سرعتهای بالا ایجاد می‌شود. از طرفی پروانه‌ها از سرعت سیال خروجی از پروانه‌های قبلی خود استفاده می‌کنند که باعث افزایش بازدهی می‌گردد. اشکال اصلی این پروانه‌ها، ایجاد ممان رول-دهنده بسیار زیاد است که غلبه بر آن نیازمند پایداری بسیار زیاد شناور است. از طرفی طول شافت بیرون بدنه بسیار زیاد است که خود باعث افزایش مقاومت می‌شود(شکل ۳-۱۶۰).

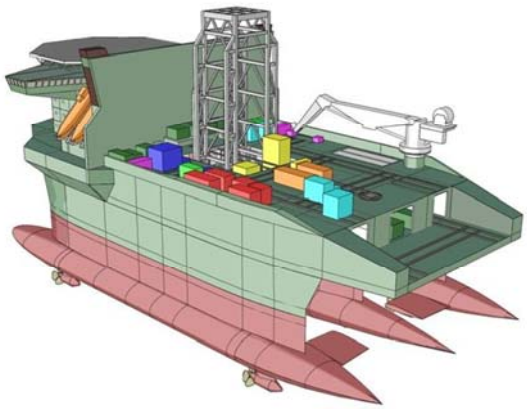
❖ سیستم رانش آزیموت[3]

شکل کلی سیستم رانش آزیموت در شکل ۳-۱۶۱ نشان داده شده است. این سیستم شامل چند پروانه کوچک در زیر بدنه می‌باشد که سیستم تحریک و عامل چرخش پروانه در پشت آن قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۳-۱۶۱ ملاحظه می‌شود، این قسمت به صورت یک جسم دوکی شکل متصل به پروانه است و می‌تواند الکتریکی یا هیدرولیکی باشد. در شناورها ۶ – ۴ یا بیشتر از این پروانه‌های کوچک در زیر بدنه قرار می‌گیرند. این پروانه‌ها حول محور خود گردش می‌کنند و در واقع می‌توانند کار سکان را نیز انجام دهند به همین دلیل سیستم آزیموت را «سکان فعال[4]» نیز می‌گویند. جهت قرارگیری پروانه‌ها مطابق شکل ۳-۱۶۱ دارای اهمیت است که باعث به دنبال کشیدن یا هل دادن شناور می‌شود. سیستم آزیموت معمولاً در شناورهای *SWATH* مطابق شکل ۳-۱۶۲ استفاده می‌شود و علت آن این است که در این شناورها، بخش عمده بدنه بیرون از سطح آب است و نمی-توان سیستم موتور، شافت و پروانه معمولی را به گونه‌ای قرار داد که پروانه در داخل آب قرار گیرد. بنابراین بجای یک پروانه بزرگ، چند پروانه کوچکتر با سیستم تحریک متصل به آن که «تراستر» نیز نامیده می‌شوند، در زیر بدنه قرار می‌گیرند. این شناورها هنگام به داک رفتن دچار مشکلات خاصی هستند.



شکل ۳-۱۶۱: سیستم رانش آزیموت

1 - self pitching propeller
2 - tandem propellers
3 - Azimuth propulsion
4 - active rudder



شکل ۳-۱۶۲ : کاربرد سیستم رانش آزیموت در شناورهای SWATH

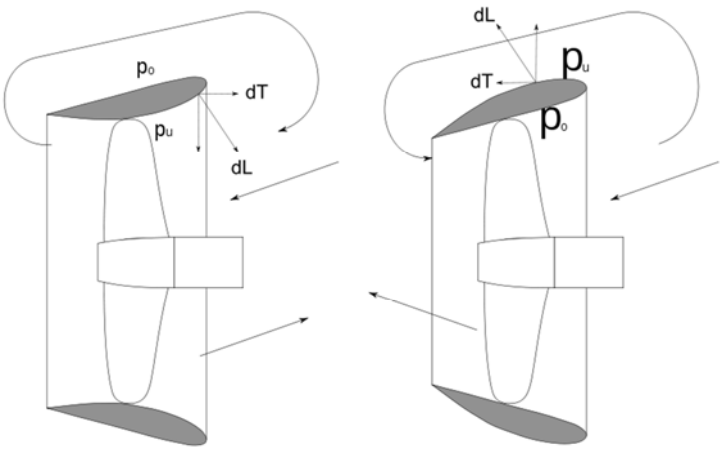
❖ پروانه‌های دارای غلاف[1]

یک غلاف استوانه‌ای یا مخروطی شکل حول برخی پروانه‌ها قرار می‌گیرد (شکل ۳-۱۶۳). این غلاف فاصله بسیار کمی تا نوک پره‌ها دارد. سطح مقطع ورودی غلاف همواره بزرگتر از سطح مقطع خروجی است و مقطع غلاف نیز به صورت فویل می‌باشد. غلاف پروانه برای افزایش بازدهی پروانه و افزایش پایداری مسیر استفاده می‌شود بخصوص برای پروانه‌هایی با شرایط کاری سنگین مانند یدک‌کش‌ها و کشتی‌های صیادی. این خواص در حرکت رو به عقب برعکس می‌شود. تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه توسط *luigi stipa* در سال ۱۹۳۱ و *ludwig kort* در سال ۱۹۳۴ انجام شد. غلاف اطراف پروانه دارای دو حالت کلی با کاربردهای متفاوت است:

شکل ۳-۱۶۳ : غلاف پروانه (کورت نازل)

الف- غلاف افزاینده[2]:

شکل کلی این غلاف مطابق شکل ۳-۱۶۴ (سمت چپ) می‌باشد. در این حالت سرعت سیال ورودی به پروانه و بازدهی پروانه افزایش می‌یابد. این نوع غلاف برای پروانه‌های با شرایط کاری سنگین استفاده می‌شود. از آنجا که تحقیقات در زمینه این نوع غلاف توسط *L.Kort* انجام شده، به افتخار او به این نوع غلافها «کورت نازل»[3] گفته می‌شود.



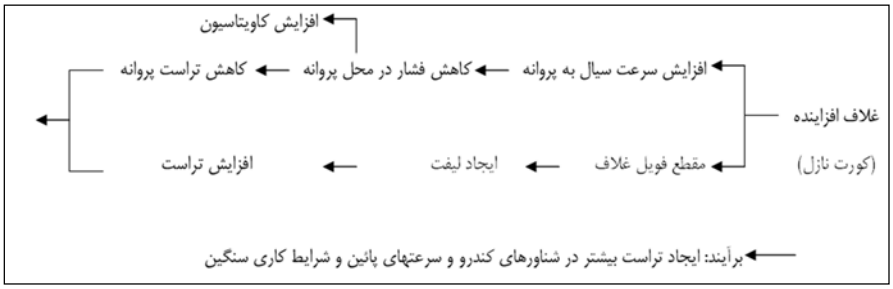
شکل ۳-۱۶۴: الف) غلاف کاهنده ب) غلاف افزاینده

dL: مولفه نیروی لیفت Pu: فشار منفی

dT : مولفه نیروی تراست Po: فشار مثبت

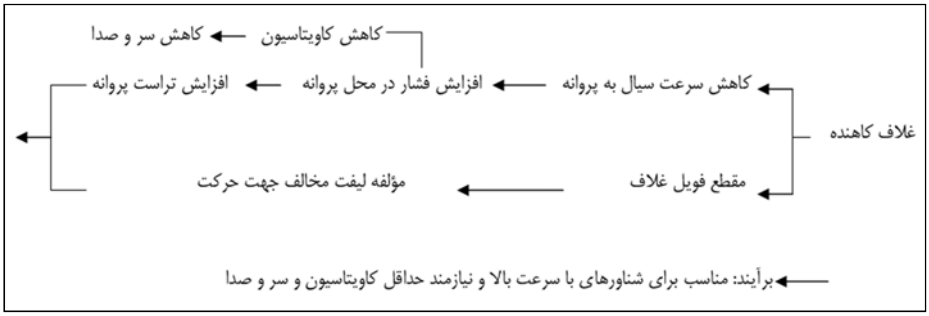
1 - ducted propeller
2 - accelerating duct
3 - Kort Nozzle

غلاف افزاینده، باعث افزایش سرعت ورودی به پروانه و کاهش فشار می‌شود. کاهش فشار باعث کاهش تراست و گشتاور پروانه می‌شود. از طرف دیگر، جریان سیال حول غلاف، مطابق شکل باعث ایجاد نیروی لیفت می‌شود که یک مؤلفه افقی رو به جلو (نیروی تراست) ایجاد می‌کند، یعنی این تراست توسط خود غلاف ایجاد می‌شود. معمولاً تراست ایجاد شده توسط غلاف افزاینده (کورت نازل) بزرگتر از مقدار کاهش تراست پروانه (ناشی از حضور غلاف) است. فاصله اندک بین غلاف و لبه پره‌های پروانه، باعث افزایش بازدهی پروانه می‌شود. این مزیت تا یک سرعت معین برقرار است. با افزایش سرعت از این حد معین، مقاومت ناشی از حضور غلاف به حدی افزایش می‌یابد که از تراست ایجاد شده توسط غلاف هم بیشتر می‌شود لذا غلاف افزاینده فقط برای سرعتهای پائین و شرایط کاری سنگین استفاده می‌شود مانند یدک‌کش‌ها و کشتی‌های صیادی که علی‌رغم سرعت اندک، دارای شرایط کاری سنگین هستند. در شرایط بولارد (کارکرد پروانه و درجا زدن شناور بدون حرکت رو به جلو- مانند لحظات اولیه یدک‌کشی یک نفتکش بزرگ)، تراست ناشی از غلاف می‌تواند تا ۳۰ درصد افزایش یابد.

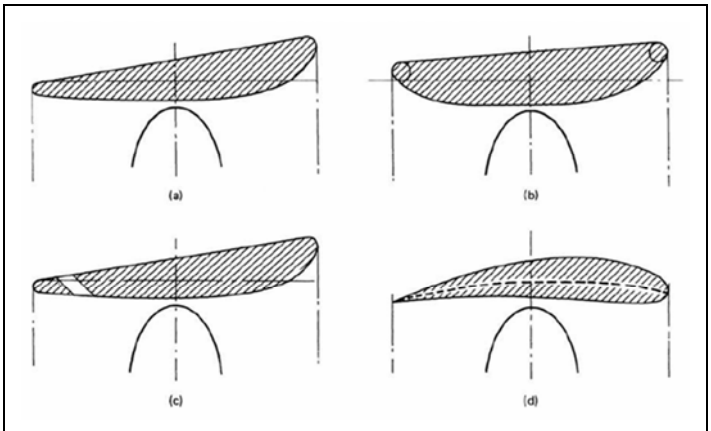


ب- غلاف کاهنده:

شکل کلی این غلاف مطابق شکل ۳-۱۶۴ (سمت راست) می‌باشد. در این حالت سرعت سیال ورودی به پروانه کاهش و فشار در محل پروانه افزایش می‌یابد. بدین ترتیب با افزایش فشار، کاویتاسیون کاهش می‌یابد. با کاهش کاویتاسیون، سر و صدای ناشی از آن، کاهش می‌یابد. غلاف کاهنده برای مخفی ماندن کشتی‌های تندرو نظامی خیلی اهمیت دارد. از طرفی مطابق شکل، مقطع غلاف به گونه‌ای است که نیروی لیفت رو به بیرون ایجاد می‌شود و مؤلفه افقی آن که همان نیروی تراست است، مخالف جهت حرکت شناور اعمال می‌شود که عاملی نامطلوب است.



از آنجا که غلاف پروانه اغلب در کشتی‌های تجاری معمولی استفاده می‌شود که دارای سرعت پائینی هستند و سر و صدای کاویتاسیون اهمیت ندارد، لذا استفاده از غلاف افزاینده (کورت نازل) رایج‌تر است. در قسمتهای بعدی به مباحث بیشتری از غلاف‌های افزاینده با نام «غلاف» می‌پردازیم. غلاف پروانه از سال ۱۹۲۴ بر روی پروانه شناورها نصب شد که باعث افزایش بازدهی و تراست پروانه‌ها گردید. مقاطع مختلف دیگری از غلاف پروانه وجود دارند که در شکل ۳-۱۶۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶۵ : مقاطع مختلف غلاف پروانه

طول کورد غلاف می‌تواند در محدوده مقابل باشد: $0.4\,D \langle C \langle 0.9\,D$

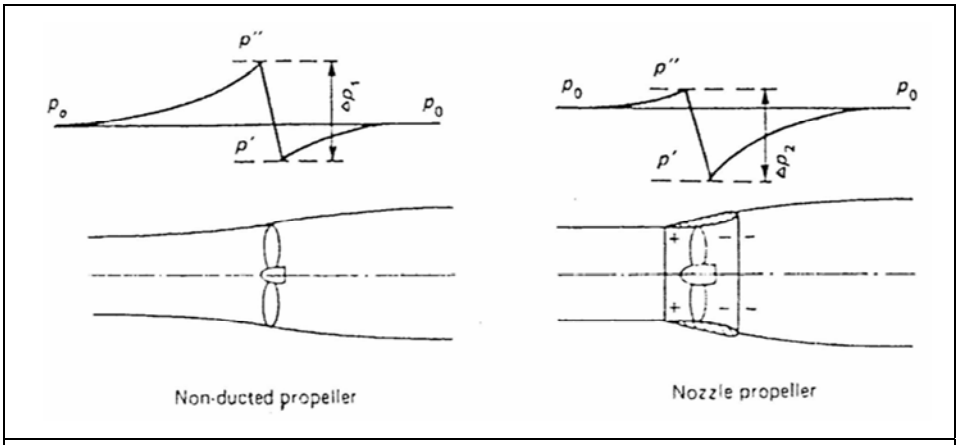
هرچه شرایط کاری پروانه سنگین‌تر باشد، طول کورد غلاف بزرگتر می‌شود. در نفتکش‌ها طول کورد غلاف کم است چراکه شرایط کاری آن سبک است. مفهوم سبک یا سنگین بودن شرایط کاری پروانه در قسمت مربوطه توضیح داده شده است. لبه پره‌های پروانه بسیار نزدیک به سطح غلاف پروانه است.

مزایای غلاف پروانه را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) ایجاد اختلاف سرعت بیشتر، مومنتوم بیشتر و در نتیجه تراست بیشتر
۲) استفاده از تراست ایجاد شده توسط فویل مقطع غلاف پروانه
۳) بازدهی بالاتر از پروانه‌های معمولی که در یدک‌کش‌ها و شرایط کاری سنگین پروانه، این افزایش بازدهی می‌تواند به ۲۰ درصد برسد.
۴) جهت‌پذیر بودن غلاف پروانه که می‌تواند جایگزین سکان شناورها گردد.
۵) بهبود پایداری در حفظ مسیر ناشی از اثر سکان
۶) محافظت پروانه از برخورد پره‌ها با موانع و کف دریا

معایب غلاف پروانه را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) افزایش کاویتاسیون: بدلیل اینکه اختلاف فشار دو طرف پروانه افزایش می‌یابد. نزدیکی لبه پره‌ها به غلاف پروانه بر افزایش تراست و افزایش کاویتاسیون بسیار تأثیرگذار است. اثر غلاف بر تغییرات فشار سیال را می‌توان در شکل ۳-۱۶۶ ملاحظه کرد.
۲) مکش سنگ و ماسه در آب‌های کم‌عمق
۳) کاهش مانور در حرکت رو به عقب



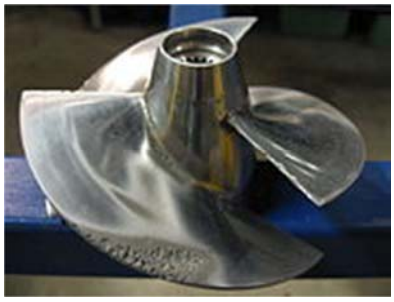
شکل ۳-۱۶۶: اثر غلاف پروانه در تغییرات فشار سیال

❖ پروانه‌های گام ثابت[1] (*FPP*)

در این پروانه‌ها زاویه گام پره‌ها ثابت است و تغییر نمی‌کند. تعداد پره‌های پروانه ۷ — ۲ پره می‌تواند باشد که وابسته به فرکانس ارتعاشی بدنه، سازه و ماشین‌آلات و همچنین تعداد سیلندر موتور می‌باشد. اگر تعداد سیلندرهای موتور زوج باشد، تعداد پره‌های پروانه باید فرد باشد و اگر تعداد سیلندرها فرد باشد، تعداد پره‌های پروانه باید زوج باشد. علت این مسئله، ملاحظات ارتعاشی و جلوگیری از رزنانس است. پروانه‌های دوپره‌ای در شناورهای تفریحی و قایق‌های موتوری کوچک و پروانه‌های سه‌پره‌ای در موتورهای سرعت بالا و سرعت متوسط مانند کشتی‌های ماهیگیری، یدک‌کش و قایق موتوری کاربرد دارد. پروانه‌های چهار پره‌ای و بالاتر در کشتی‌های تجاری و نفتکش‌ها کاربرد دارند (شکل ۳-۱۶۷). جنس پروانه‌های کوچک از انواع پلیمرها، پلاستیک و آلومینیوم و جنس پروانه‌های بزرگ از آلیاژهای آهنی است به گونه‌ای که در برابر خوردگی محیطی و خوردگی ناشی از کاویتاسیون مقاوم باشد. پروانه کشتی می‌تواند راستگرد یا چپ‌گرد باشد. اگر پروانه راستگرد باشد، انتهای شناور به سمت راست و مسیر شناور به سمت چپ چرخش می‌کند و همچنین اگر پروانه چپ‌گرد باشد، انتهای شناور به سمت چپ و مسیر شناور به سمت راست چرخش می‌کند.

1 - fixed pitch propeller

شکل ۳-۱۶۷ : پروانه گام ثابت

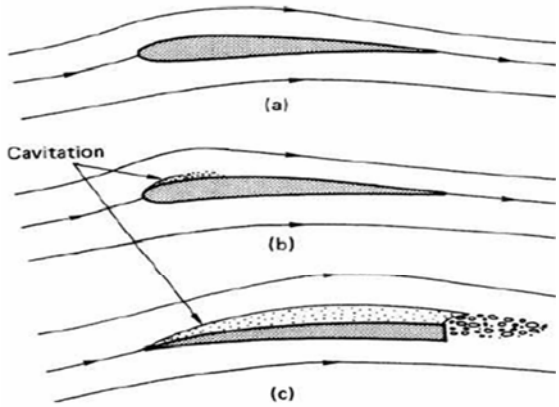


شکل ۳-۱۶۸ : پروانه سوپرکاویتاسیون

❖ پروانه‌های سوپرکاویتاسیون[1]

پروانه‌های سوپرکاویتاسیون نوعی پروانه با مقاطع پره سوزنی شکل هستند (شکل ۳-۱۶۸) و در این پروانه‌ها از مقطع فویل استفاده نمی‌شود. پروانه‌های سوپرکاویتاسیون اغلب دارای دور بسیار بالا (بیش از ۱۰۰۰ *rpm*) هستند و سرعت شناورهای آنها به بالاتر از ۲۵ گره می‌رسد. بروز کاویتاسیون در این پروانه‌ها اجتناب‌ناپذیر است به گونه‌ای که بدلیل دور بالای پروانه، کل سطح پره از کاویتاسیون پوشیده می‌شود و به همین دلیل بجای مقاطع فویل شکل، از مقاطع سوزنی شکل استفاده می‌شود (شکل ۳-۱۶۹).

جدول۳-۳۲ نشان‌دهنده محدوده کاربرد پروانه‌های معمولی و پروانه‌های سوپرکاویتاسیون است.



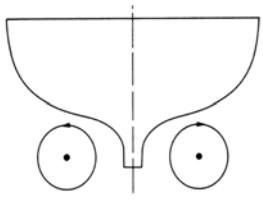
شکل ۳-۱۶۹: شکل مقاطع پروانه‌های معمولی و سوپر کاویتاسیون

	فویل معمولی	فویل سوپرکاویتاسیون
نوع شناور	تناژ بیش از ۱۰۰۰ تن	تناژ کمتر از ۱۰۰ تن
سرعت دوران پروانه	کمتر از ۱۰۰۰ rpm	بین ۱۰۰۰-۵۰۰۰ rpm
از نظر کاویتاسیون	در برخی موارد	کاملا سوپر کاویتاسیون- ترکیدن حباب در فاصله زیاد از شناور بدلیل سرعت بالای شناور

جدول ۳-۳۲: محدوده کاربرد پروانه‌های معمولی و پروانه‌های سوپر کاویتاسیون

❖ سیستم دو پروانه‌ای[2]

برخی از شناورها که نیازمند رسیدن به سرعتهای بالا هستند یا برای حرکت به تراست بسیار زیادی نیاز دارند، بجای استفاده از یک پروانه، از دو یا سه پروانه استفاده می‌کنند. شکل ۳-۱۷۰ نشان‌دهنده یک شناور دو پروانه‌ای می‌باشد که این پروانه‌ها در جهت عکس یکدیگر دوران می‌کنند.



شکل ۳-۱۷۰: سیستم دو پروانه‌ای در شناورها

1 - supercavitation propeller
2 - twin screw system

جهت دوران آنها نیز به داخل نمی‌باشد بلکه به سمت بیرون است که دو مزیت عمده زیر را به دنبال دارد:

۱) کاهش اثرات متقابل دو پروانه[1]

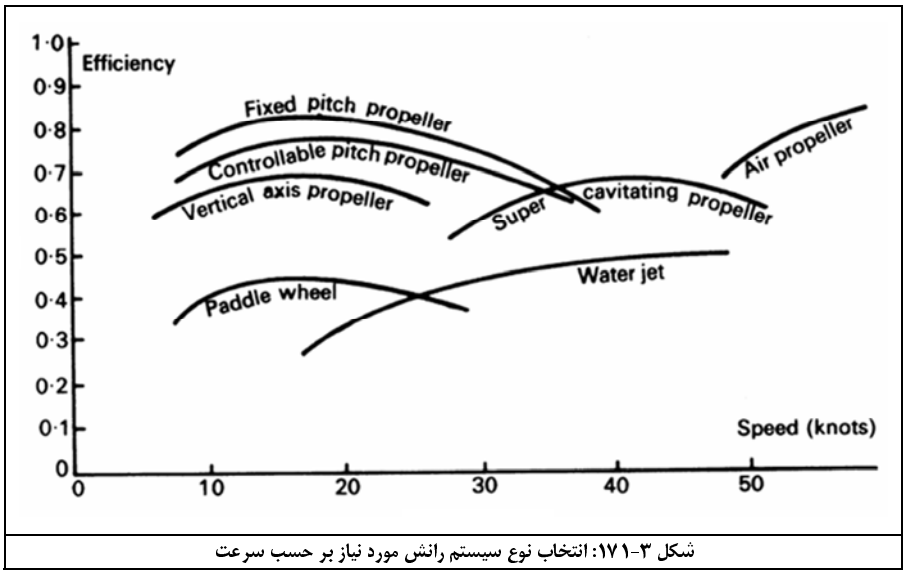
۲) ایجاد یک نیروی رو به پائین در پاشنه و افزایش شیب به پاشنه و عمق غوطه‌وری (با افزایش عمق پروانه، کاویتاسیون کاهش و بازدهی افزایش می‌یابد.)

همچنین از سیستم دو پروانه‌ای برای انجام مانور و جایگزین سکان نیز می‌توان استفاده کرد به گونه‌ای که با خاموش کردن یک پروانه و روشن کردن دیگری، می‌توان به صورت درجا دور زد. جهت چرخش معکوس پروانه‌ها بدلیل متفاوت بودن زاویه گام آنها، باعث ایجاد تراست رو به جلو می‌شود (زاویه گام پروانه‌ها با یکدیگر ۹۰ درجه فرق می‌کنند لذا جهت معکوس چرخش آنها باز هم باعث ایجاد تراست رو به جلو می‌شود).

1 - Interaction

فصل چهارم: مقایسه انواع سیستم‌های رانش

همانطور که در این قسمت بیان شد، انواع مختلفی از سیستم‌های رانش وجود دارد که همگی در شناورها نصب شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سؤال مهم در اینجاست که معیار انتخاب نوع سیستم رانش چگونه است؟ شکل ۳-۱۷۱ نموداری را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان این انتخاب را انجام داد.



شکل ۳-۱۷۱: انتخاب نوع سیستم رانش مورد نیاز بر حسب سرعت

محور افقی، سرعت حرکت شناور و محور عمودی، بازدهی سیستم رانش است. نتایج نمودار فوق را می‌توان در جدول ۳-۳۳ مشاهده کرد. به کمک این داده‌ها می‌توان سیستم رانش بهینه را با توجه به سرعت مورد نیاز و بازدهی مطلوب، انتخاب کرد.

نوع سیستم رانش	محدوده سرعت شناور (گره)	محدوده بازدهی سیستم رانش (٪)
پروانه سوپرکاویتاسیون	۲۷–۵۵	۵۵–۷۰
واترجت	۱۷–۵۰	۳۰–۵۵
پروانه گام ثابت	۸–۴۰	۶۰–۸۵
پروانه گام متغیر	۸–۳۸	۶۵–۸۰
پروانه محور عمودی	۵–۲۷	۶۰–۷۰
رانش چرخ پدالی	۶–۳۰	۳۵–۴۵

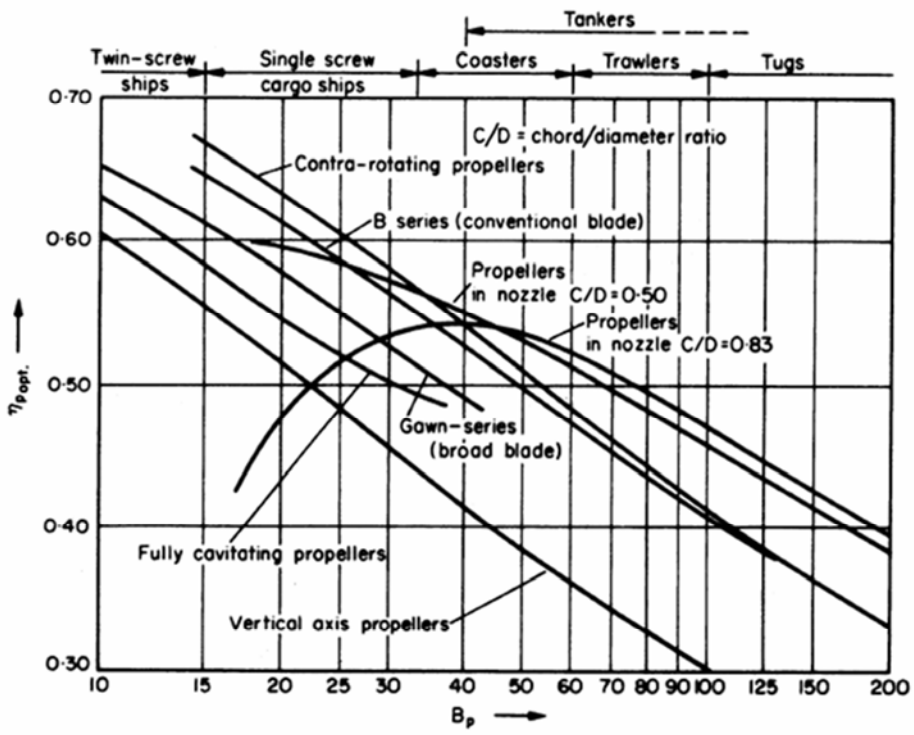
جدول ۳-۳۳: محدوده سرعت و بازدهی هریک از انواع سیستم رانش

از بین انواع سیستم‌های رانش، سیستم‌های رانش پروانه‌ای بسیار رایج‌تر است. از طرفی دانستیم که سیستم‌های پروانه‌ای، انواع مختلفی دارند. سؤال مهم اینجاست که از کدامیک می‌توان استفاده کرد و معیار انتخاب چیست؟ نمودارهای شکل ۳-۱۷۲ روش انتخاب را نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی مقدار B_p و محور عمودی، بازدهی سیستم رانش است که برای B_P داریم: $B_P = \frac{n \cdot P_D^{\frac{1}{2}}}{V^{2.5}}$

که n دور پروانه بر حسب rpm ، P_D توان تحویل‌شده، V سرعت بر حسب گره است. در مورد عبارت B_P در بخش‌های بعدی بحث بیشتری خواهد شد. محور افقی بالای جدول نیز انواع شناورها را نشان داده است: کشتی‌های دو پروانه – کشتی‌های تک پروانه – کشتی‌های ساحلی – نفتکش‌ها و یدک‌کش‌ها.

نمودارهای مختلف این شکل عبارتند از: پروانه‌های عکس چرخنده (CRP)، پروانه‌های سری B و گاون، پروانه‌های دارای غلاف با $\frac{C}{D}=0.5$ و 0.83 (که نسبت $\frac{C}{D}$ برابر نسبت طول کورد غلاف به قطر پروانه است)، پروانه‌های سوپرکاویتاسیون و پروانه‌های محور عمودی یا سیکلوئیدی.

انتخاب در این نمودارها باید به گونه‌ای باشد که با توجه به مقدار B_P بتوان به بیشترین بازدهی ممکن دست یافت.



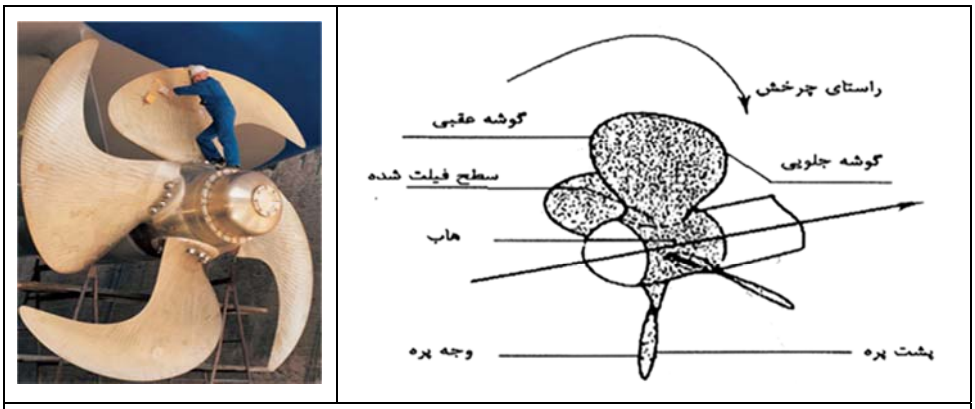
شکل ۳-۱۷۲: انتخاب انواع سیستم رانش پروانه‌ای

زندگی دو نیمه است!!

نیمه اول در انتظار نیمه دوم نیمه دوم در حسرت نیمه اول!

فصل پنجم: هندسه پروانه‌های دریایی

اجزاء و قسمت‌های کلی پروانه را می‌توان مطابق شکل ۳-۱۷۳ نشان داد:



شکل ۳-۱۷۳: قسمت‌های مختلف پروانه

۱) تعداد پره‌ها[1] هر پروانه می‌تواند ۲-۷ پره باشد.

۲) وجه پروانه[2]: اگر از عقب کشتی رو به پروانه نگاه کنیم، قسمت دیده شده از پره را «وجه» گویند که یک منطقه پرفشار محسوب می‌شود.

۳) پشت پروانه[3]: قسمت پشت پره‌های پروانه را در دید از عقب کشتی، «پشت پروانه» گویند که یک منطقه کم‌فشار محسوب می‌شود.

۴) لبه جلویی[4]: لبه‌ای از پره پروانه که ابتدا وارد آب می‌شود را لبه جلویی گویند.

۵) لبه عقبی[5]: لبه‌ای از پره که آخر از سایر قسمتهای پره وارد آب می‌شود را «لبه عقبی» گویند.

۶) توپی پروانه[6]: قسمت مرکزی پروانه است که پره‌های پروانه بر روی آن متصل می‌شوند.

۷) ریشه[7]: پائین‌ترین قسمت پره پروانه که متصل به توپی پروانه است که به *شعاع* r_h از محور پروانه است (r_h شعاع توپی پروانه است).

۸) لبه فوقانی[8]: بالاترین قسمت پره پروانه را «لبه فوقانی» گویند که به شعاع R از محور پروانه قرار دارد.

❖ زوایای تعریف شده در پروانه

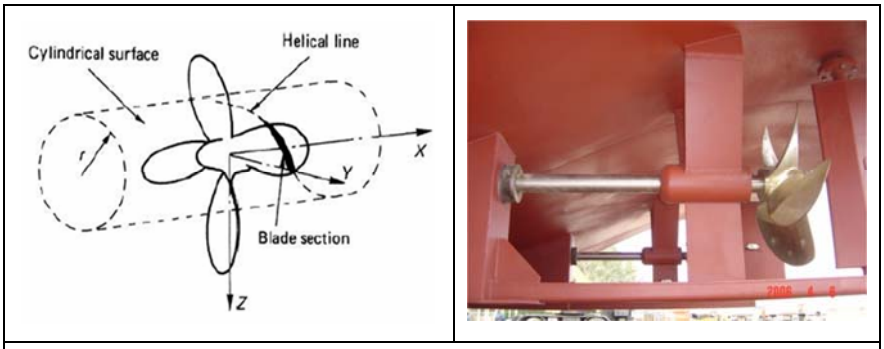
در تبیین هندسه پروانه زوایای مختلفی تعریف می‌شوند که عبارتند از:

- زاویه گام[9]
- زاویه کجی[10]
- زاویه شلاقی[11]

۱) زاویه گام و مقدار گام پروانه

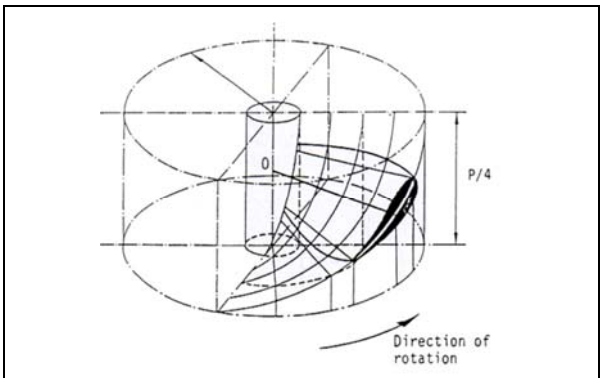
مطابق شکل ۳-۱۷۴ ملاحظه می‌شود که پره‌های پروانه به صورت زاویه‌دار به توپی پروانه متصل می‌شوند.

1 -Blade
2 - face
3 - Back
4 - Leading edge
5 - trailing edge
6 - Hub - Boss
7 - root
8 - tip
9 - pitch angle
10 - rake angle
11 - skew angle



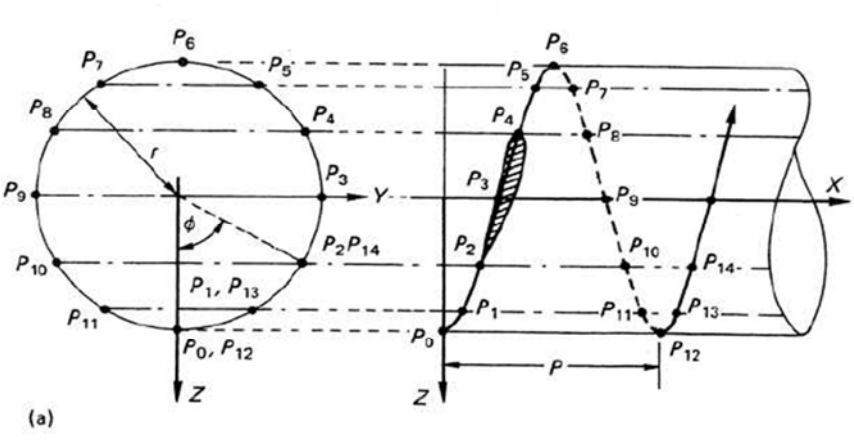
شکل ۳-۱۷۴ : زاویه گام پروانه

این زاویه باعث پیشروی پروانه در هر دور گردش آن می‌شود. اگر پروانه در هر دور گردش، یک فاصله افقی معین را طی کند، این فاصله افقی را مقدار گام پروانه[1] گویند که با P نشان داده می‌شود. بدین ترتیب مطابق شکل ۳-۱۷۵ مشخص است که اگر پروانه به اندازه $\frac{1}{4}$ دور گردش کند، به اندازه $P/4$ پیشروی می‌نماید.



شکل ۳-۱۷۵ : میزان پیشروی پروانه در $\frac{1}{4}$ دور گردش پروانه

همچنین زاویه‌دار بودن پره‌ها به این معنی است که هر مقطع از پره پروانه، یک مسیر منحنی هلیکال را طی می‌کند. این مسیر هلیکال روی شکل ۳-۱۷۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۷۶ : مسیر هلیکال روی پره در گردش پروانه

اگر مقطعی از پره پروانه یک دور کامل بچرخد یعنی از P_0 شروع کند و به P_{12} برسد یک گام (P) را طی کرده است. مسیر طی شده یک خط هلیکال است. مقطع از مقابل آن نیز نشان داده شده است. حال اگر این مسیر منحنی هلیکال را به صورت یک خط صاف قرار دهیم که نقاط P_0 تا P_{12} نیز روی

1 - pitch

آن قرار گرفته باشند، به شکل ۳-۱۷۷ می‌رسیم که شبیه یک مثلث است.
قاعده آن گام طی شده در یک دور گردش پروانه و ارتفاع آن محیط دایره طی شده $(2\pi r)$ در یک دور گردش کامل پروانه است. در این مثلث، زاویه (θ) همان «زاویه گام» پروانه است که در واقع باعث گام برداشتن پروانه و حرکت رو به جلوی آن می‌شود:

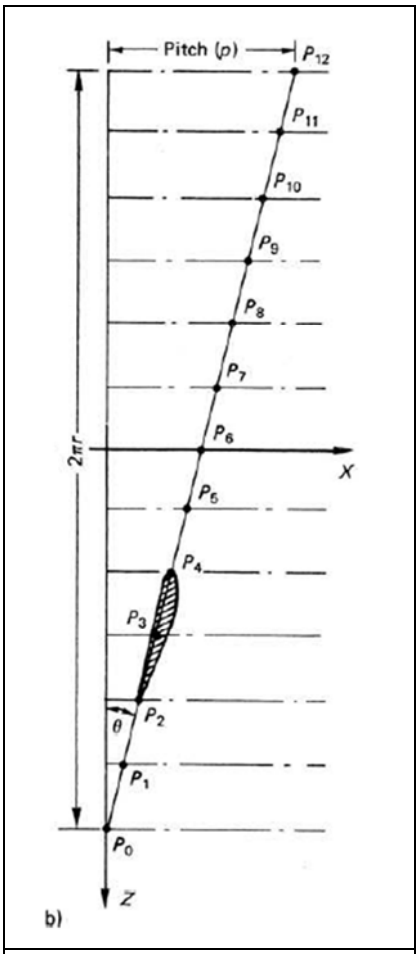
$$\tan\theta = \frac{P}{2\pi r}$$

زاویه φ نیز زاویه نقاط مختلف روی محیط پروانه است. بنابراین مختصات نقاط را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

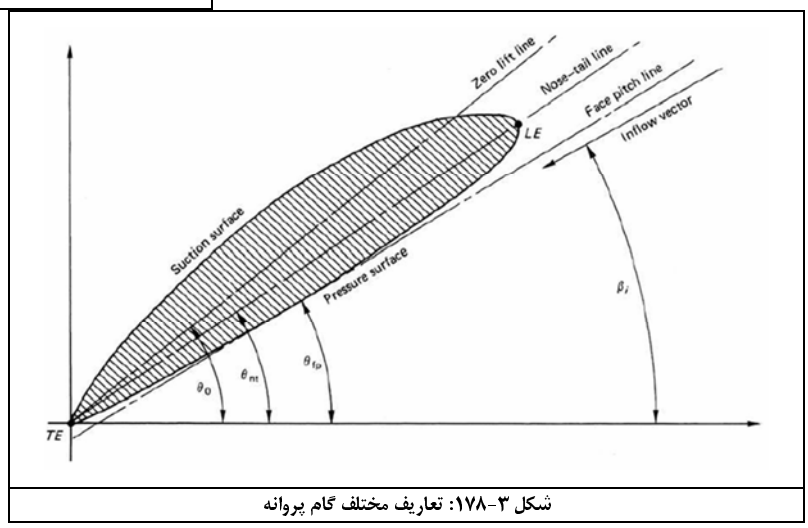
$$x = r\,\varphi\tan\theta$$
$$y = r\,Sin\,\varphi$$
$$z = r\,Cos\,\varphi$$

توجه شود که مقطع فویل پره پروانه که در شکل ۳-۱۷۷ نشان داده شده است، مقطعی در شعاع r از پروانه است (حداکثر شعاع پروانه R است). معمولاً گام پروانه را در $0.7R$ در نظر می‌گیرند.گام پروانه دارای تعاریف مختلفی است که در شکل ۳-۱۷۸ نشان داده شده است:

۱) **گام لبه تا لبه**[1]: این گام پروانه مطابق شکل، از زاویه راستای افق با خط متصل بین لبه حمله و لبه انتهایی بدست می‌آید.
۲) **گام هیدرودینامیکی**[2]: این گام پروانه مطابق شکل، از زاویه بین راستای افق و راستای برخورد سیال به پروانه بدست می‌آید. در واقع این زاویه گام و مقدار گام ارتباط مستقیمی با هندسه پروانه ندارد.
۳) **گام وجه**[3]: مطابق شکل، این گام از زاویه بین خط مماس بر وجه فویل با راستای افقی بدست می‌آید.
۴) **گام مؤثر یا گام بدون لیفت**[4]: کلیه مقاطع فویل دارای راستایی هستند که اگر سیال در آن راستا با فویل مواجه شود، هیچ نیروی لیفتی ایجاد نمی‌گردد. گام مؤثر از زاویه بین این راستا با خط افق بدست می‌آید.



شکل ۳-۱۷۷ : منحنی هلیکال باز شده به صورت یک خط صاف



شکل ۳-۱۷۸: تعاریف مختلف گام پروانه

نکته مهم در اینجاست که زاویه گام هر مقطع از پره ممکن است با زاویه گام مقاطع دیگر متفاوت باشد. به عبارت دیگر، هر پره در راستای شعاع، دارای گام‌های متفاوتی است. معمولاً بیشترین زاویه گام در محدوده $0.6\,R - 0.7\,R$ وجود دارد. از طرفی زاویه گام در محل ریشه (نزدیکی توپی پروانه) از

1 - nose – tail pitch
2 - Hydrodynamic pitch
3 - face pitch
4 - effective pitch – zero lift pitch

زاویه گام در محل لبه فوقانی پره بیشتر است. از آنجا که در نوک پره بیشترین پدیده سرخوردن سیال اتفاق می‌افتد و اختلاف فشار چندانی برای ایجاد تراست بوجود نمی‌آید لذا زاویه گام در نوک پره کاهش می‌یابد که در واقع بار وارده بر نوک پره را کاهش می‌دهد. مسائل سازه‌ای نیز بر کاهش بار در نوک پره (کاهش زاویه گام) مؤثر است.

❖چگونه با استفاده از زاویه گام می‌توان جهت چرخش پروانه را تعیین کرد؟

زاویه گام پروانه همواره به گونه‌ای قرار می‌گیرد که چرخش پروانه، سیال را رو به جلو بپیماید. برای تصور فیزیکی آن می‌توان حرکت یک پیچ در داخل یک مهره را در نظر گرفت. به طور مثال در پروانه شکل ۳-۱۷۴، جهت چرخش پروانه برای حرکت رو به جلو به صورت پادساعتگرد است. اگر این پروانه به صورت ساعتگرد بچرخد رو به عقب حرکت می‌کند. مطابق این شکل، شناور دارای ۲ پروانه است. پروانه دوم که برعکس پروانه اول چرخش می‌کند، زاویه گام آن ۹۰ درجه با پروانه قابل ملاحظه در شکل متفاوت است. یعنی پروانه دوم برای حرکت رو به جلو به صورت ساعتگرد چرخش می‌کند.

۲) زاویه کجی (ریک)

در برخی از پروانه‌ها، پره‌ها به صورت عمود بر توپی پروانه قرار نمی‌گیرد بلکه به صورت زاویه‌دار قرار می‌گیرند (مطابق شکل ۳-۱۷۹).

اگر از کنار به پروانه نگاه کنیم این زاویه قابل رؤیت است. اگر این زاویه به سمت بیرون (دور از پاشنه) باشد بدان کجی مثبت و اگر این زاویه به درون (به سمت بدنه پاشنه) باشد، ریک منفی است. کاربرد آنها به صورت زیر بیان می‌شود:

- زاویه ریک مثبت:

۱) برای تأمین سطح بیشتر و قطر بیشتری از پروانه = افزایش تراست و کاهش کاویتاسیون

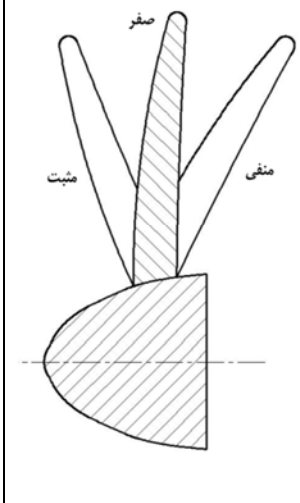
۲) برای ایجاد فواصل بیشتر بین نوک پره‌ها و بدنه

- زاویه ریک منفی: جهت تأمین استحکام سازه‌ای پره و پروانه

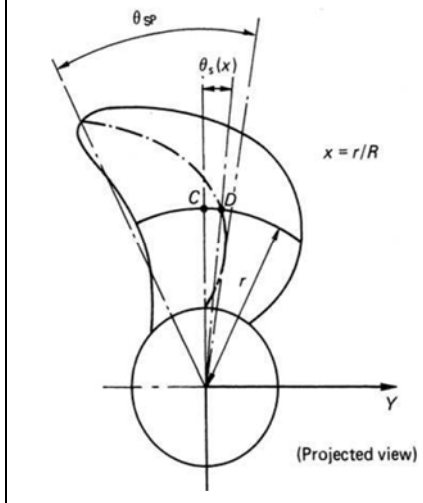
زاویه ریک پره‌ها ۱۵ – ۰ درجه می‌تواند باشد.

۳) زاویه شلاقی

اگر از مرکز توپی پروانه مماس بر خط میانی پره پروانه رسم کنیم و خط دیگری از مرکز توپی به نوک پره متصل کنیم، زاویه بین این دو خط برابر زاویه شلاقی است (شکل ۳-۱۸۰ و ۳-۱۸۱). مطابق استاندارد *ABS* به پروانه‌هایی شلاقی (یا شمشیری)[1] گویند که زاویه شلاقی آن بیش از ۲۵ درجه باشد و حداکثر زاویه شلاقی تا ۵۰ درجه می‌تواند باشد.



شکل ۳-۱۷۹ : زاویه کجی پره‌های پروانه



شکل ۳-۱۸۰ : زاویه شلاقی پره پروانه

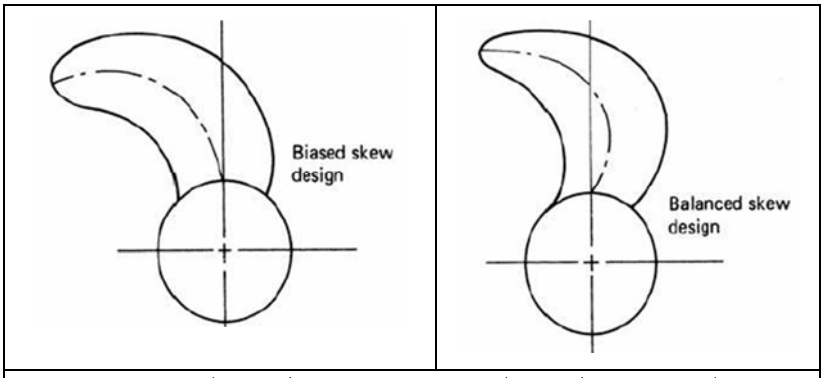
شکل ۳-۱۸۱

در واقع زاویه شلاقی باعث ایجاد انحنایی مطابق شکل به پروانه می‌شود که پروانه‌های معمولی فاقد آن هستند. پروانه‌های شلاقی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱) پروانه متوازن: این پروانه مطابق شکل ۳-۱۸۲ حالت «الف» می‌باشد و سطح پره در دو طرف خط عمود بر محل ریشه وجود دارد.

۲) پروانه نامتوازن: این پروانه مطابق حالت «ب» می‌باشد و اغلب سطح پره در یک طرف خط عمود بر محل ریشه وجود دارد.

1 -high skew propeller



شکل ۳-۱۸۲ : الف) پروانه با شلاقی متوازن ب) پروانه با شلاقی نامتوازن

شلاقی بودن پره پروانه دارای مزایای زیر می‌تواند باشد:

۱) ورود تدریجی بار بر روی پره و ایجاد یکنواختی در نیروی تراست و جلوگیری از وارد آمدن بار ناگهانی بر روی پره که منجر به کاهش کاویتاسیون خواهد شد.

۲) کم سروصدا بودن بدلیل کاهش کاویتاسیون چراکه سروصدای اصلی پروانه ناشی از پدیده کاویتاسیون است که هرچه کاویتاسیون کمتر باشد، سر و صدا کمتر است. پروانه‌های شلاقی اغلب به همین دلیل در شناورهای نظامی و زیردریایی‌ها استفاده می‌شود.

اعمال زاویه شلاقی باعث کاهش بازدهی پروانه می‌شود ولی بدلیل کاهش کاویتاسیون، از آن در پروانه‌های نظامی و تجاری استفاده‌های زیادی می‌شود. همچنین افزایش زاویه شلاقی و افزایش تعداد پره‌ها باعث کاهش ارتعاشات پروانه می‌گردد.

■ **چگونه با استفاده از شکل ظاهری و شلاقی پروانه می‌توان جهت چرخش آن را تعیین کرد؟**

پروانه همواره در جهتی چرخش می‌کند که لبه جلویی شلاقی پره زودتر آب را بشکافد مثلاً در شکل ۳-۱۸۱، جهت چرخش پروانه پادساعتگرد است و در شکل ۳-۱۸۲ جهت چرخش، ساعتگرد است. بدین ترتیب در نما از مقابل پروانه و بدون دیدن زاویه گام پروانه هم می‌توان جهت چرخش آن را تعیین کرد.

❖ هندسه مقاطع پره پروانه

شکل مقطع پره به صورت فویل می‌تواند باشد. هندسه فویل و عوامل مؤثر در آن را می‌توان در شکل ۳-۱۸۳ ملاحظه کرد. عوامل نشان‌داده شده روی شکل، بخوبی تبیین‌کننده هندسه مقطع فویل پره هستند.

اگر مقطع فویل با کدهای[1] *NACA نام‌گذاری* شده باشد، می‌توان با استفاده از کد بیان‌شده، هندسه فویل را مشخص کرد. مثلاً برای فویل *NACA:2412* داریم:

- عدد اول (۲): نسبت فاصله حداکثر انحنای میانی[2] تا خط وتر به طول وتر[3] برابر ۲۰ درصد است.
- عدد دوم (۴): محل حداکثر انحنای خط میانی فویل به اندازه ۴۰ درصد طول وتر از لبه (نوک) فویل است.
- دو عدد آخر (۱۲): نسبت حداکثر ضخامت فویل به طول وتر برابر ۱۲ درصد است.

شکل مقطع پره از ریشه تا نوک پره همواره لزوماً یکسان و به صورت فویل نیست بلکه در اغلب موارد در شعاع کمتر از *0.5R* مقطع پره شبیه مقاطع فویل *NACA* است و در شعاع‌های بیشتر از *0.5R*، مقطع پره به صورت اوجیوال[4] است. شکل مقاطع مختلف پره در شکل ۳-۱۸۴ نشان داده شده است:

$r \langle 0.5\,R$: *NACA*

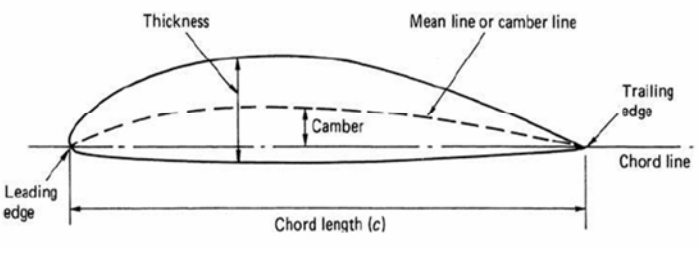
$r \rangle 0.5R$: *ogival*

در مورد تغییرات مشخصات فویل مقاطع در راستای شعاع پره می‌توان نکات زیر را ذکر کرد:

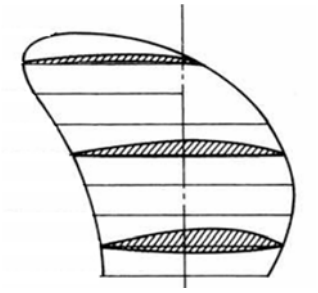
۱) همانطور که در شکل ۳-۱۸۴ ملاحظه می‌شود، بیشترین طول وتر فویل در محدوده شعاع $0.6\,R - 0.7\,R$ به حداکثر مقدار می‌رسد و البته معمولاً در شعاع *0.66R* دارای بیشترین طول وتر از مقطع فویل پره است.

۲) ضخامت فویل پره، مطابق شکل در نزدیکی توپی پروانه بیشترین مقدار است و با افزایش شعاع، این ضخامت کاهش می‌یابد. مسائل سازه‌ای در این مورد بسیار مؤثر است.

1 - National Aerospace Committee of America
2 - Camber
3 - Chord
4 - ogival



شکل ۳-۱۸۳: شکل هندسه فویل



شکل ۳-۱۸۴ : مقاطع مختلف پره در شعاع‌های مختلف

❖ تعاریف سطوح پروانه

برای پروانه پنج تعریف مختلف از سطوح وجود دارد:

۱) سطح دایره پروانه[1] (A_o)

۲) سطح تصویر شده[2] (A_P)

۳) سطح توسعه یافته[3] (A_D)

۴) سطح گسترش یافته[4] (A_E)

۵) سطح جاروب شده[5] (A_S)

که در پروانه‌ها ترتیب بزرگی سطوح به صورت مقابل است: $A_o \rangle A_E \rangle A_D \rangle A_P$

البته در برخی پروانه‌ها $A_E \rangle A_o$ می‌باشد.

قبل از توضیح سطوح مختلف فوق، دو خاصیت هندسی از پره‌های پروانه مجدداً یادآوری می‌شود:

۱) زاویه گام پره‌های پروانه در شعاع‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است یعنی پره در راستای عمود بر توپی پروانه دارای انحنا و پیچش است.

۲) مقطع پره پروانه که به شکل فویل است، دارای انحنا و قوس می‌باشد. انحناء فویل را می‌توان از قوس خط میانی[6] آن ملاحظه کرد (شکل ۳-۱۸۴).

با در نظر داشتن دو نکته فوق می‌توانیم سطوح پروانه را تعریف کنیم (شکل ۳-۱۸۵):

۱) سطح دایره پروانه (A_o): این مساحت برابر است با مساحت دایره احاطه کننده پروانه به قطر D. مساحت این دایره عبارتست از:

$$A_o = \frac{\pi D^2}{4}$$

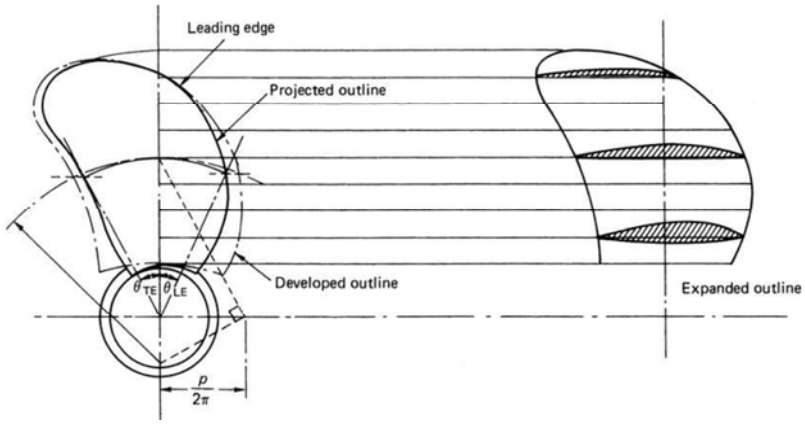
۲) سطح تصویر شده (A_P): اگر از مقابل به سطح پره نگاه شود، سطحی از پره‌ها که دیده می‌شود را سطح تصویرشده گویند. این مساحت از مساحت واقعی پره‌ها کمتر است چراکه پره‌ها دارای زاویه گام هستند. برای محاسبه این سطح داریم:

$$A_{\mathrm{p}} = Z \int_{r_{\mathrm{h}}}^{R} (\theta_{\mathrm{TE}} - \theta_{\mathrm{LE}}) r \, \mathrm{d}r$$

۳) سطح توسعه یافته (A_D): اگر از مقابل به سطح پره نگاه شود، با این فرض که زاویه گام مقاطع مختلف پره‌ها صفر شده است، این مساحت را سطح توسعه یافته گویند که از سطح تصویر شده بزرگتر است. در واقع صفرشدن زاویه گام باعث می‌شود سطح بزرگتری از پره دیده شود. برای محاسبه این سطح در پروانه‌های بدون شلاقی داریم (رابطه *Burrill*):

$$A_{\mathrm{D}} \simeq \frac{A_{\mathrm{p}}}{(1.067 - 0.229P/D)}$$

1 - disk area
2 - projected area
3 - developed area
4 - expended area
5 - swept area
6 - Camber



شکل ۳-۱۸۵ : تعاریف مختلف سطوح در پروانه

۴) سطح گسترش یافته (A_E): اگر فرض کنیم که هم زاویه گام پره‌ها صفر شود و هم انحنای فویل پره‌ها صاف شود، سطحی که ملاحظه می‌شود را سطح گسترش یافته گویند. در واقع خط میانی فویل که دارای انحنا است به صورت یک خط صاف در نظر گرفته می‌شود. این سطح را می‌توان سطح پهن‌شده پره‌های پروانه روی یک سطح صاف در نظر گرفت (شکل ۳-۱۸۶).

بدین ترتیب سطح گسترش یافته را می‌توان از اعمال قوانین سیمسون روی طول هر مقطع از پره بدست آورد. قوانین سیمسون همان روش‌های انتگرال‌گیری عددی هستند که در واقع بیان‌کننده رابطه زیر می‌باشند که محدوده انتگرال‌گیری از شعاع توپی تا حداکثر شعاع پروانه است.

$$A_E = Z \int_{r_n}^{R} c\,dr$$

معمولاً مقادیر A_D و A_E خیلی به هم نزدیک هستند و لذا معمولاً به صورت زیر در نظر می‌گیرند:

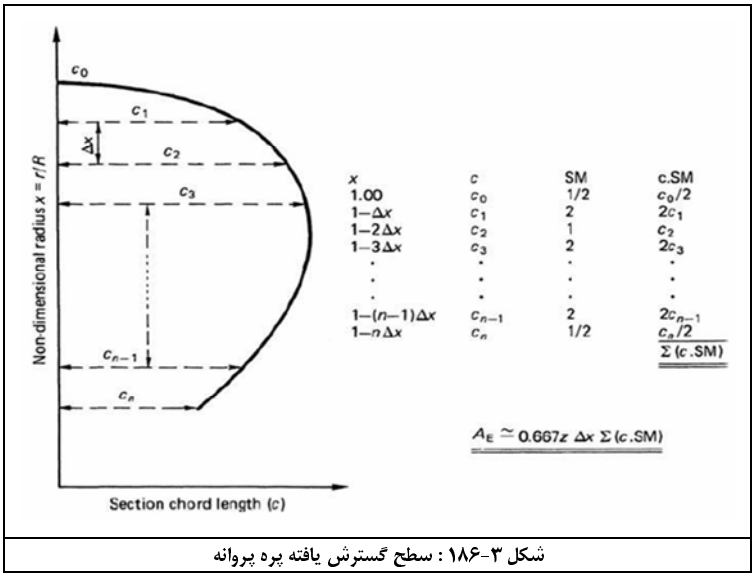
$$A_E \approx A_D$$

برای مثال سطوح مختلف یک پروانه به صورت زیر استخراج شده است (جدول۳- ۳۴):

	Projected area	*Developed area*	*Expanded area*
Area ratio (A/A_o)	0.480	0.574	0.582

جدول۳- ۳۴ : سطوح مختلف یک پروانه خاص به طور مثال

۵) سطح جاروب شده: این سطح همان سطح جاروب شده (طی شده) توسط لبه‌های جلویی و عقبی پروانه است و برای بیان حد فواصل لبه‌های پروانه با بدنه در حین چرخش بکار می‌رود. این سطح از مشخصات فنی طراحی پروانه نیست.



شکل ۳-۱۸۶ : سطح گسترش یافته پره پروانه

فصل ششم: تئوری‌های طراحی پروانه[۱]

روشهای مختلفی برای توجیه تراست ایجاد شده در پروانه وجود دارد که عبارتند از:

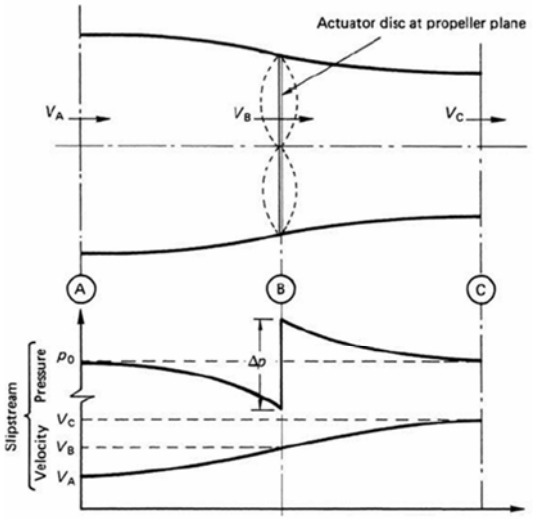
۱) تئوری اختلاف مومنتوم: اختلاف مومنتوم ایجاد شده ناشی از چرخش پروانه و سرعت گرفتن سیال را عامل تراست می‌داند.

۲) تئوری المان پره: نیروی لیفت ایجاد شده بر روی مقاطع فویل پره‌ها را عامل تراست می‌داند.

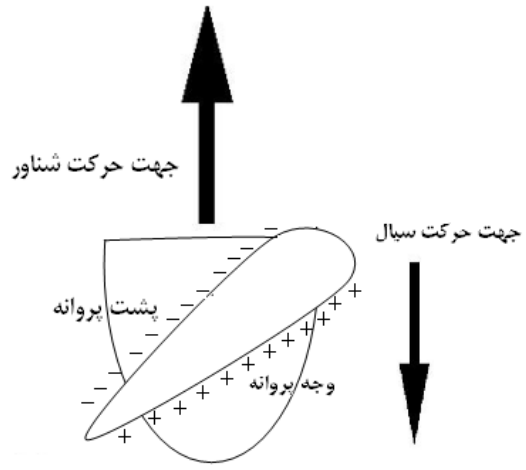
❖ روش تئوری اختلاف مومنتوم

مطابق شکل ۳-۱۸۷، اگر سیال با سرعت V_A وارد پروانه شود، در محل پروانه به سرعت V_B و در حین خروج از پروانه به سرعت V_C می‌رسد. نمودار تغییرات فشار و سرعت در زیر آن نمایش داده شده است. در این شکل، سیال از چپ به راست شتاب می‌یابد و شناور به سمت چپ حرکت می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود، نمودار سرعت سیال همواره صعودی و افزایشی است. چراکه سرعت سیال از قبل پروانه تا پس از خروج از پروانه همواره افزایشی است. طبیعتاً طبق قانون برنولی، باید نمودار تغییرات فشار همواره کاهشی باشد ولی در نمودار تغییرات فشار در واقع یک پله‌ای مشاهده می‌شود. علت آن چیست؟

مطابق شکل ۳-۱۸۷ در انتقال از نقطه A به B همواره سرعت افزایش و فشار کاهش می‌یابد. در محل صفحه پروانه، فشار به یکباره افزایش می‌یابد چراکه همانطور که قبلاً هم بیان شد، پشت پروانه منطقه به شدت کم‌فشار و جلوی پروانه منطقه کاملاً پرفشار است و علت آن نیز شکل فویل مقاطع پره است که در شکل ۳-۱۸۸ ملاحظه می‌شود.



شکل ۳-۱۸۷: تغییرات فشار و سرعت در اثر چرخش پروانه



شکل ۳-۱۸۸: منطقه کم فشار و پر فشار دو طرف فویل پره

بنابراین سیال در حین عبور از بین پره‌های پروانه، اختلاف فشار شدیدی را تجربه می‌کند و در محل وجه پروانه به فشار بالایی می‌رسد و از آن پس باز هم سیر نزولی فشار (بدلیل افزایش سرعت)، ادامه می‌یابد. بدین ترتیب اختلاف مومنتوم از قبل تا بعد از پروانه به صورت زیر است که برابر با تراست ایجاد شده در پروانه است: $T = \dot{m}(V_C - V_A) = \rho V_A A_o (V_C - V_A)$

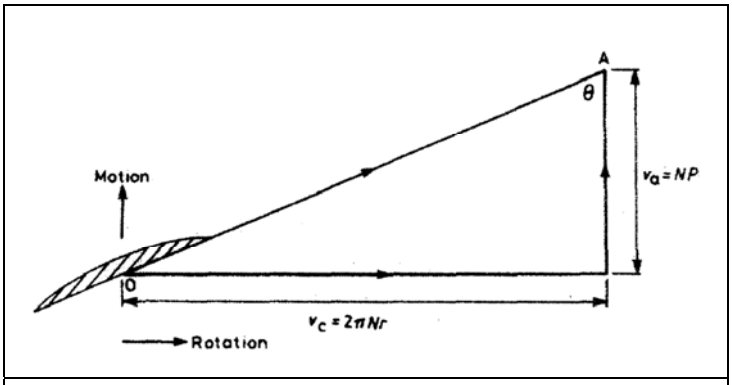
که $\dot{m}$ دبی سیال عبوری از پروانه می‌باشد که اگر در محل صفحه پروانه نوشته شود داریم: $\dot{m} = \rho V_A A_o$

که A_o مساحت دایره پروانه است.

❖ روش تئوری المان پره

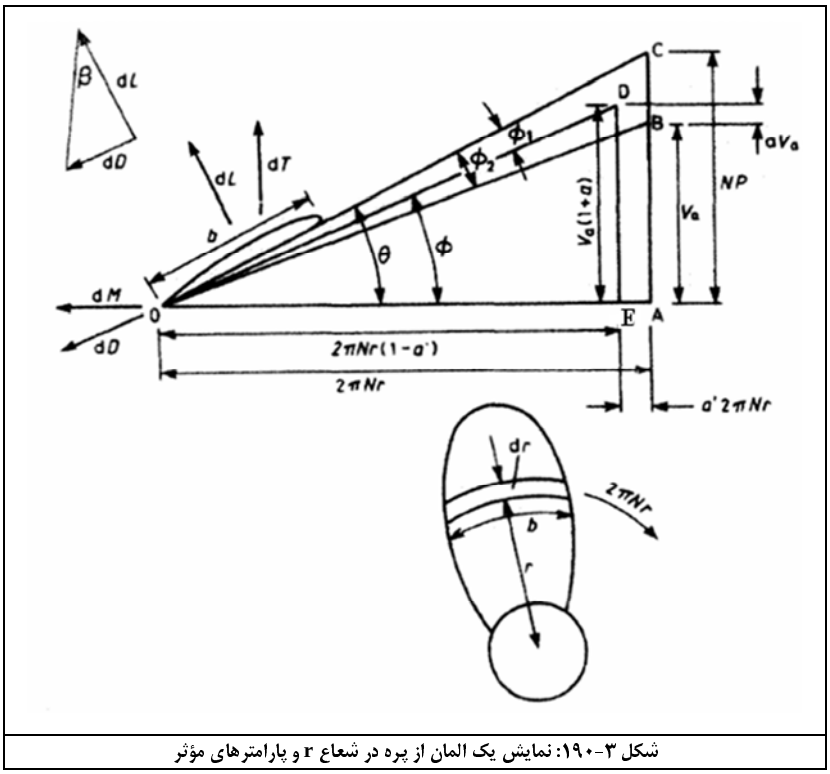
قبلاً در توضیح زاویه گام در شکل۳-۱۷۶ نشان دادیم که اگر پروانه یک دور چرخش کند، به اندازه یک گام پیشروی خواهد کرد. حال اگر پروانه N دور چرخش کند، شکل ۳-۱۸۹ را خواهیم داشت. $2\pi r$ محیط یک دور چرخش و $2\pi Nr$ محیط n دور چرخش است و NP نیز گام‌های طی‌شده در N دور چرخش است.

۱- منابع: [۱ و ۳]



شکل ۳-۱۸۹ : گام طی شدن در n دور چرخش پروانه

حال اگر مطابق شکل ۳-۱۹۰ یک المان از پره در شعاع r از پره را در نظر بگیریم و مقطع آن را نمایش دهیم خواهیم داشت:



شکل ۳-۱۹۰: نمایش یک المان از پره در شعاع r و پارامترهای مؤثر

AC: پیشروی گام پروانه در حالت ایده‌آل برابر *NP*.

AB: سرعت پیشروی پروانه[1] برابر V_a.

ED: سرعت پروانه برابر $V_a(1+a)$

OA: محیط طی شده در N دور چرخش برابر $2\pi Nr$

- محیط طی شده با لحاظ کردن پدیده سرخوردن پره: $2\pi r(1-a')$
- مقدار سرخوردن پروانه برابر است با $NP - V_a$ و نسبت سرخوردن برابر است با:

$$slip = S = \frac{(NP - V_a)}{NP} = 1 - \frac{J.D}{P} \qquad \text{و} \qquad J = \frac{P}{D}(1-S)$$

سطح المان پره در نظر گرفته شده برابر است با: $dA = bdr$

- زوایای θ و φ مطابق شکل نشان داده شده است.

1 - advanced speed

- سرعت وارد شده بر فویل پره (V_1):

$$V_1^2 = V_a^2(1+a)^2 + 4\pi^2 r^2(1-a')^2$$

مؤلفه نیروی لیفت (dL) و مؤلفه نیروی مقاومت (dD) و تصویر این مؤلفه‌ها در راستای طولی شناور مؤلفه نیروی تراست (dT) است. مؤلفه نیروی عرضی مورد نیاز برای چرخاندن المان پره برابر dM می‌باشد که منجر به ایجاد گشتاور dQ می‌شود. با استفاده از تعاریف انجام شده و شکل ۳-۱۹۰ برای مؤلفه نیروی لیفت و مقاوم داریم:

$$dL = \tfrac{1}{2}\rho V_1^2 C_L\, dA = \tfrac{1}{2}\rho C_L[V_a^2(1+a)^2 + 4\pi^2 r^2(1-a')^2]\,b\,dr$$

$$dD = \tfrac{1}{2}\rho V_1^2 C_D\, dA = \tfrac{1}{2}\rho C_D[V_a^2(1+a)^2 + 4\pi^2 r^2(1-a')^2]\,b\,dr$$

حال اگر بخواهیم مؤلفه نیروی تراست را بدست آوریم باید مؤلفه لیفت و درگ را در راستای حرکت شناور (راستای طولی) تصویر کنیم که خواهیم داشت:

$$dT = dL\cos\varphi - dD\sin\varphi = dL\left(\cos\varphi - \frac{dD}{dL}\sin\varphi\right)$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho V_1^2 C_L(\cos\varphi - \tan\beta\sin\varphi)\,b\,dr$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho V_1^2 C_L \frac{\cos(\varphi+\beta)}{\cos\beta}\,b\,dr$$

$$\tan\beta = dD/dL = C_D/C_L,$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho V_1^2 C_L \frac{\cos(\varphi+\beta)}{\cos\beta}\,b\,dr$$

$$\text{Since } V_1 = V_a(1+a)/\sin\varphi,$$

$$dT = \tfrac{1}{2}\rho C_L \frac{V_a^2(1+a)^2\cos(\varphi+\beta)}{\sin^2\varphi\cos\beta}\,b\,dr$$

مقدار بدست آمده، مؤلفه المان نیروی تراست هر مقطع از مقاطع پره است که با انتگرال‌گیری از آن در راستای شعاعی می‌توان به مقدار تراست رسید: $T = \int_{r_h}^{R} dT$

این مقدار T باید در تعداد پره‌های پروانه ضرب شود.

تا اینجا مهمترین عامل در طراحی پروانه که نیروی تراست پروانه است، استخراج شده ولی عامل بسیار مهم دیگر، محاسبه گشتاور لازم برای چرخاندن پروانه است. این گشتاور باید به گونه‌ای باشد که توسط گشتاور موتور قابل تأمین باشد یا در واقع گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن پروانه از گشتاور موتور کوچکتر یا برابر باشد. اگر المان نیروی عرضی وارد بر المان پره را dM بنامیم، گشتاور المان پره برابر است با: $dQ = r.dM$. برای محاسبه dM باید مؤلفه افقی نیروی لیفت و درگ را مطابق شکل ۳-۱۹۰ محاسبه کنیم:

$$dM = dL\sin\varphi + dD\cos\varphi = dL\left(\sin\varphi + \frac{dD}{dL}\cos\varphi\right)$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho V_1^2 C_L \frac{\sin(\varphi+\beta)}{\cos\varphi}\,b\,dr$$

$$dQ = r\,dM$$

حال با جاگذاری مقدار V_1 در رابطه فوق داریم:

$$dQ = r\,dM = \tfrac{1}{2}\rho C_L \frac{V_a^2(1+a)^2\sin(\varphi+\beta)}{\sin^2\varphi\cos\beta}\,b\,r\,dr$$

با انتگرال‌گیری از المان گشتاور به مقدار گشتاور پره می‌رسیم: $Q = \int_{r_h}^{R} dQ$

که این گشتاور اگر در تعداد پره‌ها ضرب شود، گشتاور کل پروانه بدست می‌آید. روابطی که تا اینجا ارائه شد، معمولاً در طراحی پروانه‌ها استفاده نمی‌شود و از روابط سری‌های استاندارد پروانه مانند سری *B-Wageningen* استفاده می‌شود. روابط فوق برای کدنویسی و روشهای حل عددی مناسب هستند.

❖ استخراج روابط طراحی پروانه

• محاسبه تراست

با توجه به دیمانسیون و واحد نیرو $\left(\frac{kg}{m.s^2}\right)$، تراست پروانه را می‌توان وابسته به عوامل زیر در نظر گرفت:

$$T = \dot{m}.V = \rho.A.V.V = \rho.A.V^2 = \frac{\rho.\pi.D^2}{4}.V^2 = \rho.V^2.D^2.K$$

$$T = \rho V_a^2 D^2 \left[f_1\left(\frac{ND}{V_a}\right), f_2\left(\frac{\nu}{V_a D}\right), f_3\left(\frac{gD}{V_a^2}\right) \right]$$

که در آن D قطر پروانه، n دور پروانه، V_a سرعت پیشروی است و عوامل ویسکوزیته و چگالی سیال نیز در رابطه ملاحظه می‌شود. در پروانه‌ها، ضریب پیشروی[1] به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \frac{V_a}{n.D} \qquad V_A = J.n.D$$

با در نظرگرفتن این رابطه، خواهیم داشت:

$$T = \rho N^2 D^4 J^2 [f_T(J)]$$

$$T = \rho N^2 D^4 \mathbf{F}_T(J)$$

$$K_T = T/\rho N^2 D^4 = \mathbf{F}_T(J)$$

که در نهایت رابطه پرکاربرد مقابل بدست می‌آید: $T = K_t . \rho . n^2 . D^4$

که عوامل D , n , ρ برای هر پروانه معلوم است و مقدار ضریب تراست (K_t) نیز از آزمایشات و نتایج سری‌های استاندارد که به صورت نمودارهایی ارائه شده، استخراج می‌شود. در مورد استخراج K_t در قسمت بعد بحث می‌شود.

• محاسبه گشتاور

برای محاسبه گشتاور با توجه به دیمانسیون و واحد آن $\left(kg . m^2/s^2\right)$ داریم:

$$Q = \rho V_a^2 D^3 [f_Q(J)]$$

که رابطه معروف روبرو بدست می‌آید: $Q = K_q . \rho . n^2 . D^5$

از این رابطه، K_q ضریب گشتاور است که از سری‌های استاندارد بدست می‌آید. گشتاور پروانه یک عامل نامطلوب است و سعی در کاهش آن می‌باشد.

• بازدهی آب آزاد پروانه

علاوه بر نیروی تراست و گشتاور، عامل دیگری که بسیار اهمیت دارد، بازدهی آب آزاد[2] (η_0) می‌باشد که برابر است با:

$$\eta_0 = \frac{\text{توان ایجاد شده توسط تراست}}{\text{توان کل}}$$

$$\eta_0 = \frac{T.V_a}{2\pi nQ} = \frac{K_t.\rho.n^2.D^4}{K_q.\rho.n^2.D^5}.\frac{V_a}{2\pi n} = \frac{K_t}{K_q}.\frac{V_a}{n.D}.\frac{1}{2\pi}$$

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi}.\frac{K_t}{K_q}$$

که این رابطه پرکاربرد، بیان‌کننده بازدهی پروانه در آب آزاد یعنی بدون حضور بدنه شناور است. در این روابط مشخص است که با افزایش تراست، بازدهی افزایش و با افزایش گشتاور، بازدهی کاهش می‌یابد. یادآوری می‌شود که توان کل برابر توان خروجی از موتور در نظر گرفته می‌شود که معادل کار انجام شده برای غلبه بر گشتاور در واحد زمان است: $P_B = \omega . Q_m = 2\pi n Q_m$

که Q_m گشتاور قابل تأمین موتور است.

سه رابطه بیان‌شده در این قسمت برای T ، Q و η_o بسیار کاربردی هستند که نکات زیر از آنها قابل استخراج است:

۱) نیروی تراست متناسب با توان ۴ قطر و گشتاور متناسب با توان ۵ قطر پروانه است که حاکی از تأثیر بسیار زیاد قطر بر تراست و گشتاور است.

1 - advanced coefficient
2 - open water efficiency

$T \propto D^4$

$Q \propto D^5$

۲) نیروی تراست و گشتاور هر دو متناسب با توان ۲ دور پروانه هستند:

$T \propto n^2$

$Q \propto n^2$

۳) در طراحی باید بتوان تا جای ممکن، گشتاور را کاهش و تراست را افزایش داد. در واقع گشتاور، یک عامل نامطلوب است چراکه هرچه گشتاور پروانه بیشتر شود، به موتور بزرگتر با گشتاور بیشتری برای چرخاندن آن نیاز است.

مثال) یک کشتی با سرعت ۲۰ گره با نیروی مقاومت ۹۰KN مد نظر است. این کشتی دارای موتور دور پائین ۳۰۰rpm با توان ۱۱۰۰KW است. ضریب کاهش تراست آن ۰/۱ و ضریب ویک آن ۰/۱۲ است. مطلوبست:

۱- حداکثر گشتاور قابل تأمین

۲- نیروی تراست مورد نیاز

۳- اگر یک پروانه با تراست ۸۰KN و گشتاور ۲۵KN.m در نظر گرفته باشیم، قطر و دور پروانه باید چند برابر شود که به مقادیر مطلوب برسیم (با فرض ثابت بودن Kt و Kq با تغییر قطر و دور).

۴- اثر تغییر فوق بر بازدهی پروانه

۵- سرعت پیشروی و مقایسه ضریب پیشروی

حل):

۱)

$V = 20\ Knot \approx 10\ ^m/_s$

$n = 300\ rpm = 5\ rps$

$P_B = 2\pi n Q_m$

که P_B توان موتور (KW) و Q_m حداکثر گشتاور قابل تأمین توسط موتور $(KN.m)$ و n دور موتور (rps) می‌باشد.

$$Q_m = \frac{P_B}{2\pi n} = \frac{1100}{2\pi \times 5} = 35\ KN.m$$

در واقع گشتاور پروانه باید از گشتاور موتور کمتر باشد.

۲) نیروی تراست مورد نیاز که باید توسط پروانه تأمین شود به صورت زیر بدست می‌آید:

$R = 90\ KN \qquad t = 0.1$

$$T = \frac{R}{1-t} = \frac{90}{1-0.1} = 100\ KN$$

۳) این قسمت با فرض ثابت بودن ضرایب K_t و K_q با تغییر n و D حل می‌شود. ملاحظه می‌شود که تراست بدست آمده از تراست مطلوب کمتر است که به دو طریق زیر می‌توان آن را افزایش داد:

$T = K_t.\rho.n^2.D^4$

$Q = K_q.\rho.n^2.D^5$

الف) n ثابت باشد و D افزایش یابد:

اگر $\frac{D_2}{D_1} = C_1$ باشد: $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 = C_1^4$

یعنی قطر پروانه باید ۱/۰۶ برابر شود: $\frac{100}{80} = C_1^4 \ \rightarrow \ C_1 = 1.06$

اثر این تغییر بر روی گشتاور نیز باید بررسی شود:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5$$

$Q_2 = (1.06)^5 \times 25 = 33.45\ KN.m$

از آنجا که مقدار بدست آمده از حداکثر گشتاور قابل تأمین موتور کمتر است $(35KN.m)$ لذا تغییر اعمال شده روی قطر مورد قبول است.

ب) D ثابت باشد و n افزایش یابد:

اگر $\frac{n_2}{n_1} = C_1$ باشد: $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = C_2^2$

$\frac{100}{80} = C_2^2 \ \rightarrow \ C_2 = 1.12$

یعنی برای رسیدن به تراست مطلوب باید دور پروانه ۱/۱۲ برابر شود یعنی:

$$n_2 = 1.12 \times n_1 = 1.12 \times 300 = 336\ rpm = 5.6\ rps$$

هم‌اکنون برای تأیید این تغییر باید اثر آن روی گشتاور نیز کنترل شود:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = C_2^2$$

$$Q_2 = (1.12)^2 . Q_1 = 31.36\ KN.m$$

از آنجا که این مقدار از حداکثر گشتاور قابل تأمین موتور کمتر است لذا تغییر اعمال شده روی دور پروانه، قابل قبول است.

۴) باز هم با فرض *ثابت‌ماندن* K_t و K_q داریم:

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_t}{K_q} = \frac{V_a}{2\pi nD} \cdot \frac{K_t}{K_q}$$

$$\frac{\eta_{o2}}{\eta_{o1}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

برای دو حالت بیان‌شده داریم:

الف)

$$\frac{\eta_{o2}}{\eta_{o1}} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\eta_{o2} = \frac{1}{1.06}\eta_{o1} = 0.94\eta_{o1}$$

ب)

$$\eta_{o2} = \frac{n_1}{n_2} . \eta_{o1} = \frac{1}{1.12}\eta_{o1} = 0.89\eta_{o1}$$

ملاحظه می‌شود که حالت (ب) به مقدار بیشتری باعث کاهش بازدهی می‌شود لذا از نظر تامین بازدهی مناسب، افزایش قطر پروانه مطلوب‌تر است.

۵)

$$V_S = 5\,{}^{m}\!/_{s} \qquad w = 0.12$$

$$V_a = V_S(1-w) = 5(1-0.12) = 4.4\,{}^{m}\!/_{s}$$

$$J = \frac{V_a}{n.D} \qquad \frac{J_2}{J_1} = \left(\frac{n_1.D_1}{n_2.D_2}\right) = \frac{n_1}{n_2} . \frac{D_1}{D_2}$$

در دو حالت بیان‌شده داریم:

الف)

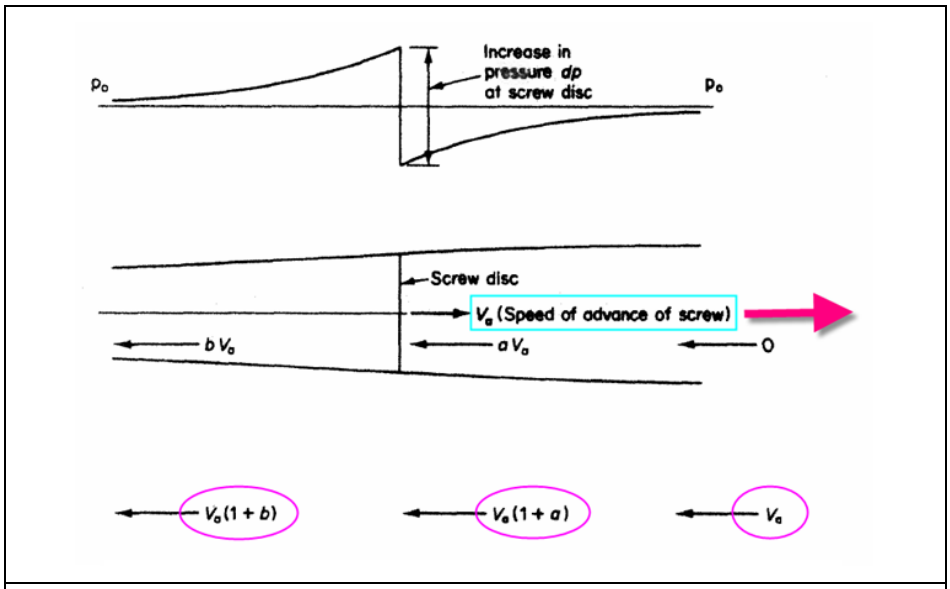
$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{1}{1.06} = 0.94$$

ب)

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{1.12} = 0.89$$

❖ تغییر سرعت سیال در محل صفحه پروانه

مطابق شکل ۳-۱۹۱ اگر سرعت ورودی پروانه V_a، سرعت در صفحه پروانه $V_a(1+a)$ و سرعت خروجی پروانه $V_a(1+b)$ باشد، نیروی تراست را می‌توان به دو روش محاسبه کرد:



شکل ۳-۱۹۱: تغییرات سرعت سیال در قبل و بعد از پروانه

روش اول) اختلاف مومنتوم:

$$T = \dot{m}.\Delta V = \rho A_o V_a (1+a)[(1+b)V_a - V_a] = \rho A_o V_a^2 b(1+a) \qquad (I)$$

روش دوم) تراست برابر است با اختلاف فشار دو طرف پره‌های پروانه:

$$T = A_o(P'' - P')$$

با استفاده از قانون برنولی داریم:

$$P_o + \rho\frac{V_a^2}{2} = P' + \rho\frac{V_a^2}{2}(1+a)^2$$

$$P_o + \rho\frac{V_a^2}{2}(1+b)^2 = P'' + \rho\frac{V_a^2}{2}(1+a)^2$$

از دو رابطه فوق داریم:

$$P'' - P' = \rho\frac{V_a^2}{2}(1+b)^2 - \rho\frac{V_a^2}{2}$$

$$T = \rho/2\, A_o V_a^2(2b+b^2) \qquad (II)$$

با برابر قرار دادن رابطه I و II داریم:

$$\rho/2\, A_o V_a^2(2b+b^2) = \rho A_o V_a^2(1+a)b$$

$$1+b/2 = 1+a \quad \rightarrow \quad a = b/2$$

این نتیجه بدین معنی است که نیمی از افزایش سرعت سیال، در محل صفحه پروانه اتفاق می‌افتد.

❖ محاسبه بازدهی پروانه

با استفاده از روابط فوق، بازدهی پروانه را نیز می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\eta = \frac{\text{تراست توسط انجام شده کار}}{\text{انرژي کل}} = \frac{P_T}{P_K}$$

همچنین برای یک پروانه ایده‌آل:

$$P_T = T.V = \rho A_o V_a^2 .2a(1+a).V_a$$

$$P_K = \frac{1}{2}\dot{m}\left[V_2^2 - V_1^2\right] = \frac{1}{2}\dot{m}\left[V_a^2(1+b)^2 - V_a^2\right] = \frac{1}{2}\dot{m}\left[V_a^2(1+2a)^2 - V_a^2\right] = \frac{1}{2}\dot{m}V_a^2\left[(1+2a)^2 - 1\right]$$

$$= \frac{1}{2}\dot{m}V_a^2(4a^2+4a) = \frac{1}{2}\rho A_o V_a(1+a)V_a^2(4a^2+4a)$$

$$\eta = \frac{2\rho a(1+a)A_o V_a^3}{\frac{1}{2}\rho A_o V_a^3(1+a)(4a^2+4a)} = \frac{a(1+a)}{(1+a)(a^2+a)} = \frac{1}{1+a}$$

بازدهی پروانه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{2}{1+\sqrt{C_T+1}} \qquad C_T = \frac{T}{0.5\rho.A.V^2}$$

فصل هفتم: طراحی با استفاده از سری‌های استاندارد

❖ هدف و کاربرد سری‌های استاندارد پروانه

کاربرد اصلی سری‌های استاندارد پروانه برای استخراج ضرایب تراست و گشتاور و بازدهی پروانه است. این سری‌ها بجای استفاده از روابط محاسباتی از روش آزمایش مدل استفاده می‌کنند بدین ترتیب که مدل‌های کوچکی از پروانه مثلاً به قطر ۲۵ سانتیمتر ساخته شده و در تونل کاویتاسیون آزمایش می‌شوند. شکل هندسی پروانه‌ها در هریک از سری‌های استاندارد با هم متفاوت است. منظور از «استاندارد» در این سری‌ها، مؤسسات رده‌بندی نمی‌باشد بلکه منظور از آن، سری‌های شناخته شده‌ای از اطلاعات طراحی پروانه می‌باشد. طراحی به کمک این سری‌ها دارای بیشترین دقت و ساده‌ترین روش است.

❖ سری‌های استاندارد پروانه

جدول۳– ۳۵ نشان‌دهنده سری‌های پروانه گام ثابت و بدون غلاف است که اطلاعات پروانه‌های آزمایش‌شده در هر سری را به اختصار نشان داده است.

سری	تعداد پروانه ها در سری	Z	A_E/A_0	P/D	D(mm)	r_h/R	وجود کاویتاسسیون
B	120	2-7	0.3-1.05	0.6-1.4	250	0.169	خیر
AU	34	4-7	0.5-1.2	0.5-1.2	250	0.18	خیر
گاون	37	3	0.2-1.1	0.4-2	508	0.2	خیر
KCA	30	3	0.5-1.25	0.6-2	406	0.2	بلی
Ma	32	3-5	0.75-1.2	1-1.45	250	0.19	بلی
نیوتن رادر	12	3	0.5-1	1.05-2.08	254	0.167	بلی
KCD	24	3-6	0.44-0.8	1.06-1.6	406	0.2	بلی
Meridian	20	3	0.45-1.05	0.4-1.2	305	0.185	بلی

جدول ۳-۳۵: سری‌های استاندارد پروانه

در این جدول Z تعداد پره‌های مختلف آزمایش شده است مثلاً در سری‌های B پروانه‌های ۷ – ۲ پره آزمایش شده‌اند. A_E/A_o نسبت سطح گسترش یافته و P/D نسبت گام پروانه‌ها می‌باشد. مقدار D در این جدول قطر مدل آزمایش شده در تونل کاویتاسیون است مثلاً در سری B، Au ، Ma قطر پروانه‌های مدل ۲۵ سانتیمتر است. توجه شود که این قطر به معنای قطر پروانه واقعی نمی‌باشد و پروانه واقعی، هر قطری می‌تواند داشته باشد و نتایج بدست آمده از این سری‌ها قابل تعمیم است. r_h/R نسبت شعاع توپی پروانه به شعاع پروانه است که همین نسبت شعاع در پروانه واقعی هم وجود دارد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، سری B یا B- *Wageningen* دارای جامع‌ترین حالتها می‌باشد و در آن ۱۲۰ مدل پروانه مختلف آزمایش شده است. در مثال زیر نحوه ارتباط و تعمیم مدل به پروانه واقعی بررسی شده است.

مثال) هر گاه پروانه کشتی دارای دور rpm 98 باشد مدل پروانه با نسبت $\frac{D_S}{D_m}=9$ (D_S قطر پروانه کشتی و D_m قطر مدل پروانه) در عمل در چه دوری چرخانده می‌شود؟

حل) دو شرط برابری اعداد فرود و ضریب پیشروی پروانه مدل و پروانه واقعی را داریم. از برابری عدد فرود نسبت سرعتهای مدل و پروانه واقعی را می‌یابیم:

$$J_m = J_s \qquad Fr_m = Fr_s$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{D_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{D_s}} \qquad \frac{V_m}{1} = \frac{V_s}{\sqrt{9}} \quad \Rightarrow \quad V_s = 3V_m$$

$$\frac{V_m}{n_m D_m} = \frac{V_s}{n_s D_s} \qquad \frac{V_m}{n_m D_m} = \frac{3V_m}{98\times 9\times D_m} \qquad n_m = 294 \quad rpm$$

❖ طراحی به کمک سری پروانه‌های B – *Wageningen*

پروانه‌های سری B در آزمایشگاه دریایی لهستان تهیه شده که حاصل انجام آزمایشات بر روی ۱۲۰ مدل مختلف پروانه با تعداد پره‌ها، سطح گسترش یافته و نسبت گام‌های متفاوت می‌باشد. این آزمایشات توسط آقای *Wageningen* انجام شده است. شرایط انجام آزمایش در عدد رینولدز ۲×۱۰^۶ بوده است که اگر شرایط واقعی پروانه مورد نظر، دارای عدد رینولدز دیگری است، نتایج باید با روابط ارائه شده، اصلاح شوند. تعداد پره‌ها و

نسبت سطح گسترش یافته این ۱۲۰ مدل از قرار زیر است:

- تعداد پره‌ها ۷ – ۲ پره و هر پروانه برای $A_E/A_o = 0.3-1.05$ می‌باشد.

که البته بسیاری از اطلاعات ارائه شده از روش درون‌یابی و برون‌یابی بدست آمده و حالات آزمایش شده محدودتر از آنچه ارائه شده، می‌باشد. در استاندارد GL[1] ، شکل مقاطع پره‌های پروانه در سری B به صورت شکل ۳-۱۹۲ ارائه شده است.

روابط استفاده شده در این سری به صورت زیر است:

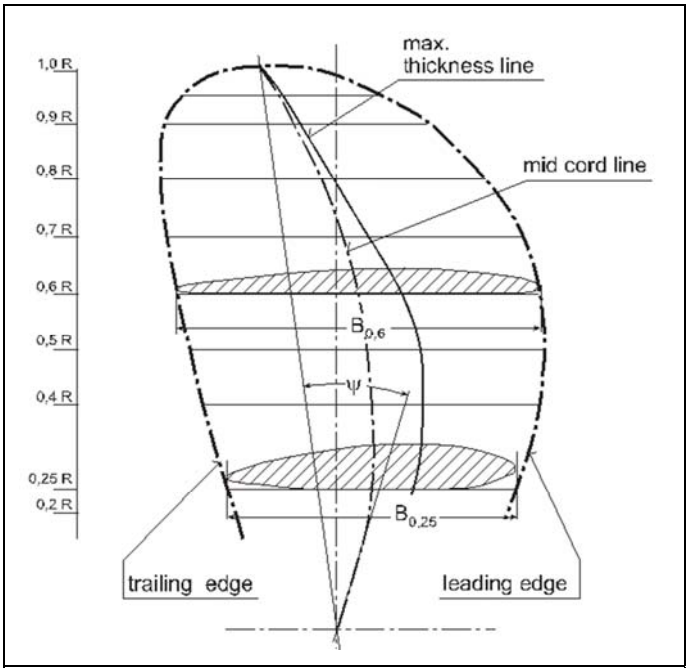
$$T = K_t.\rho.n^2.D^4$$
$$Q = K_q.\rho.n^2.D^5$$
$$\eta_o = \frac{J}{2\pi}.\frac{K_t}{K_q}$$
$$J = \frac{V_A}{n.D} = \frac{V_S(1-w)}{n.D}$$

که کلیه پارامترهای آن قبلاً معرفی شده‌اند. ضرایب تراست و گشتاور به صورت تابعی از عوامل زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$K_t = f_1\left(J, P/D, A_E/A_o, Z, R_e, \frac{t}{c}\right)$$
$$K_q = f_2\left(J, P/D, A_E/A_o, Z, R_e, \frac{t}{c}\right)$$

که عدد رینولدز با توجه به طول کورد در شعاع ۰/۷۵R اندازه‌گیری شده است. نسبت ضخامت پره به طول کورد $\left(\frac{t}{c}\right)$ نیز در شعاع ۰/۷۵R ارائه شده است (چراکه طول کورد و ضخامت پره در شعاع‌های مختلف با هم متفاوت است).

فرمول K_t به صورت مقابل است: $K_T = \sum C^T_{S,t,u,v}.(J)^S.(P/D)^t.(A_E/A_0)^u.(z^v)$



شکل ۳-۱۹۲ : شکل مقطع پره‌های پروانه در استاندارد GL

1 – part 1 / chapter 2

که ضرایب موجود در این فرمول از جدول۳-۳۶ بدست می‌آیند:

K_T	$C^T_{s,t,u,v}$	s (J)	t (P/D)	u (A_E/A_O)	v (Z)
	+0.00880496	0	0	0	0
	-0.204554	1	0	0	0
	+0.166351	0	1	0	0
	+0.158114	0	2	0	0
	-0.147581	2	0	1	0
	-0.481497	1	1	1	0
	+0.415437	0	2	1	0
	+0.0144043	0	0	0	1
	-0.0530054	2	0	0	1
	+0.0143481	0	1	0	1
	+0.0606826	1	1	0	1
	-0.0125894	0	0	1	1
	+0.0109689	1	0	1	1
	-0.133698	0	3	0	0
	+0.00638407	0	6	0	0
	-0.00132718	2	6	0	0
	+0.168496	3	0	1	0
	-0.0507214	0	0	2	0
	+0.0854559	2	0	2	0
	-0.0504475	3	0	2	0
	+0.010465	1	6	2	0
	-0.00648272	2	6	2	0
	-0.00841728	0	3	0	1
	+0.0168424	1	3	0	1
	-0.00102296	3	3	0	1
	-0.0317791	0	3	1	1
	+0.018604	1	0	2	1
	-0.00410798	0	2	2	1

جدول ۳-۳۶: ضرایب موجود در رابطه Kt

و پس از آن در رابطه $T = K_t . \rho . n^2 . D^4$ جاگذاری می‌گردد. رابطه محاسبه K_q نیز به صورت زیر است:

$$K_Q = \sum C^Q_{S,t,u,v} . (J)^S . (P/D)^t . (A_E / A_0)^u . (z^v)$$

که ضرایب موجود در این فرمول از جدول۳-۳۶ بدست می‌آید:

$C^Q_{s,t,u,v}$	s (J)	t (P/D)	u (A_E/A_O)	v (Z)
+0.00379368	0	0	0	0
+0.00886523	2	0	0	0
-0.032241	1	1	0	0
+0.00344778	0	2	0	0
-0.0408811	0	1	1	0
-0.108009	1	1	1	0
-0.0885381	2	1	1	0
+0.188561	0	2	1	0
-0.00370871	1	0	0	1
+0.00513696	0	1	0	1
+0.0209449	1	1	0	1
+0.00474319	2	1	0	1
-0.00723408	2	0	1	1
+0.00438388	1	1	1	1
-0.0269403	0	2	1	1
+0.0558082	3	0	1	0
+0.0161886	0	3	1	0
+0.00318086	1	3	1	0
+0.015896	0	0	2	0
+0.0471729	1	0	2	0
+0.0196283	3	0	2	0
-0.0502782	0	1	2	0
-0.030055	3	1	2	0
+0.0417122	2	2	2	0
-0.0397722	0	3	2	0
-0.00350024	0	6	2	0
-0.0106854	3	0	0	1
+0.00110903	3	3	0	1

جدول۳-۳۷:ضرایب موجود در رابطه Kq

اگر عدد رینولدز پروانه واقعی بزرگتر از ۲×۱۰^{۶} باشد، آنگاه ضرایب K_t و K_q باید اصلاح شوند:

$$\begin{aligned}\Delta K_T = {} & 0.000353485 \\ & -0.00333758(A_E/A_O)J^2 \\ & -0.00478125(A_E/A_O)(P/D)J \\ & +0.000257792(\log R_n-0.301)^2(A_E/A_O)J^2 \\ & +0.0000643192(\log R_n-0.301)(P/D)^6J^2 \\ & -0.0000110636(\log R_n-0.301)^2(P/D)^6J^2 \\ & -0.0000276305(\log R_n-0.301)^2z(A_E/A_O)J^2 \\ & +0.0000954(\log R_n-0.301)z(A_E/A_O)(P/D)J \\ & +0.0000032049(\log R_n-0.301)z^2(A_E/A_O)(P/D)^3J\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta K_Q = {} & -0.000591412 \\ & +0.00696898(P/D) \\ & -0.0000666654z(P/D)^6 \\ & +0.0160818(A_E/A_O)^2 \\ & -0.000938091(\log R_n-0.301)(P/D) \\ & -0.00059593(\log R_n-0.301)(P/D)^2 \\ & +0.0000782099(\log R_n-0.301)^2(P/D)^2 \\ & +0.0000052199(\log R_n-0.301)z(A_E/A_O)J^2 \\ & -0.00000088528(\log R_n-0.301)^2z(A_E/A_O)(P/D)J \\ & +0.0000230171(\log R_n-0.301)z(P/D)^6 \\ & -0.00000184341(\log R_n-0.301)^2z(P/D)^6 \\ & -0.00400252(\log R_n-0.301)(A_E/A_O)^2 \\ & +0.000220915(\log R_n-0.301)^2(A_E/A_O)^2\end{aligned}$$

و سری B در محدوده زیر قابل استفاده است:

$2 \le Z \le 7$

$0.3 \le {}^{A_E}\!/_{A_o} \le 1.05$

$0.5 \le {}^{P}\!/_{D} \le 1.4$

برای اطلاعات پروانه خارج از این محدوده، اطلاعات سری B جوابگو نیست. تعداد پره‌های پروانه شناورهای مختلف مطابق جدول۳-۳۸ توصیه می‌شود.

نوع کشتی	تعداد پره
زیردریایی	۷ و ۵ و ۳
کشتی‌های رزمی	۴ و ۳
کشتی‌های تجاری	۵ و ۴

جدول۳-۳۸:توصیه تعداد پره‌های پروانه برای شناورهای مختلف

❖ آشنایی با نمودارهای سری B

نمودارهای موجود در شکل‌های زیر برای K_t و K_q و η_0هستند که به صورت نموداری ارائه شده‌اند و با استفاده از این نمودارها می‌توان به طراحی پرداخت (شکل ۳-۱۹۳).

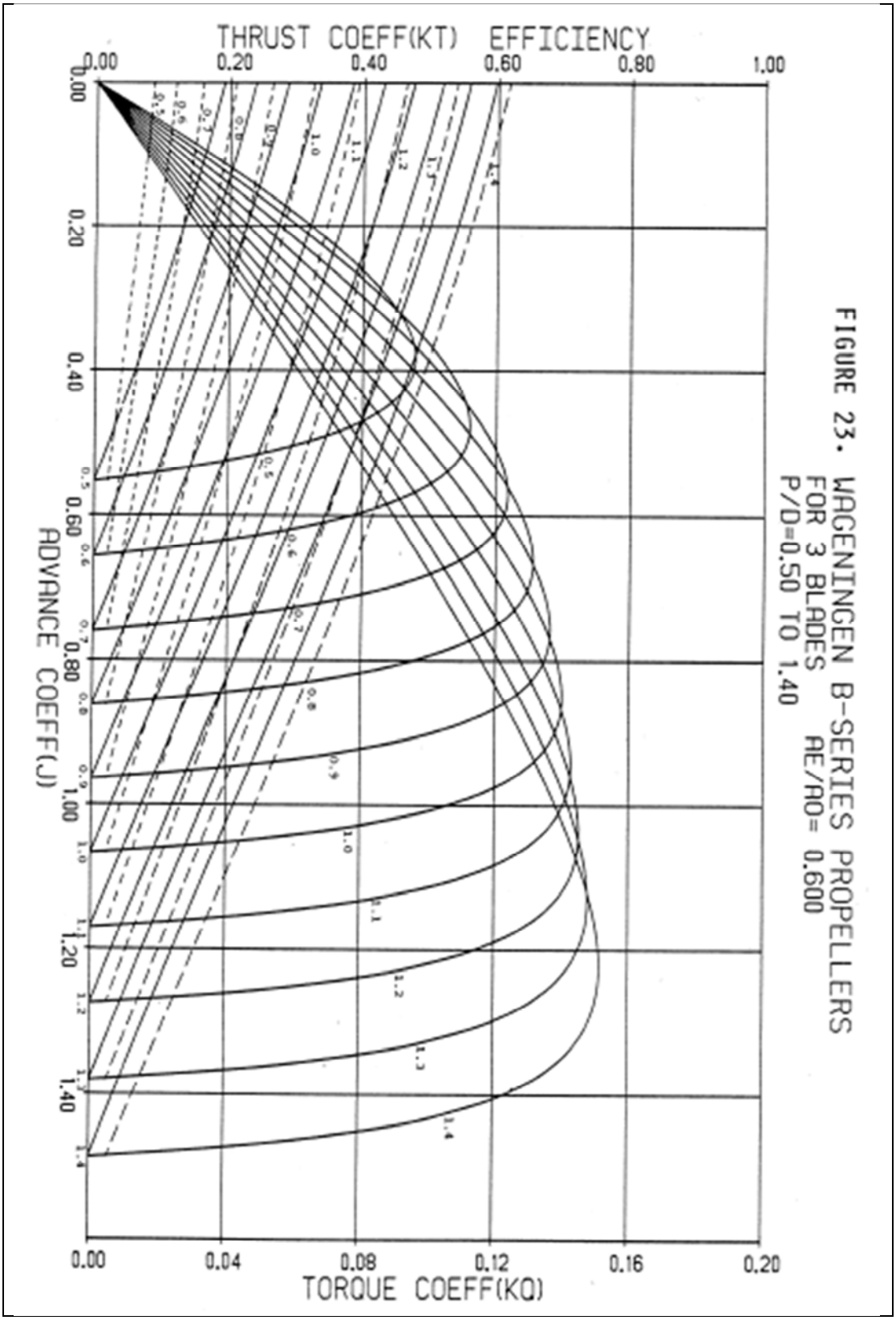
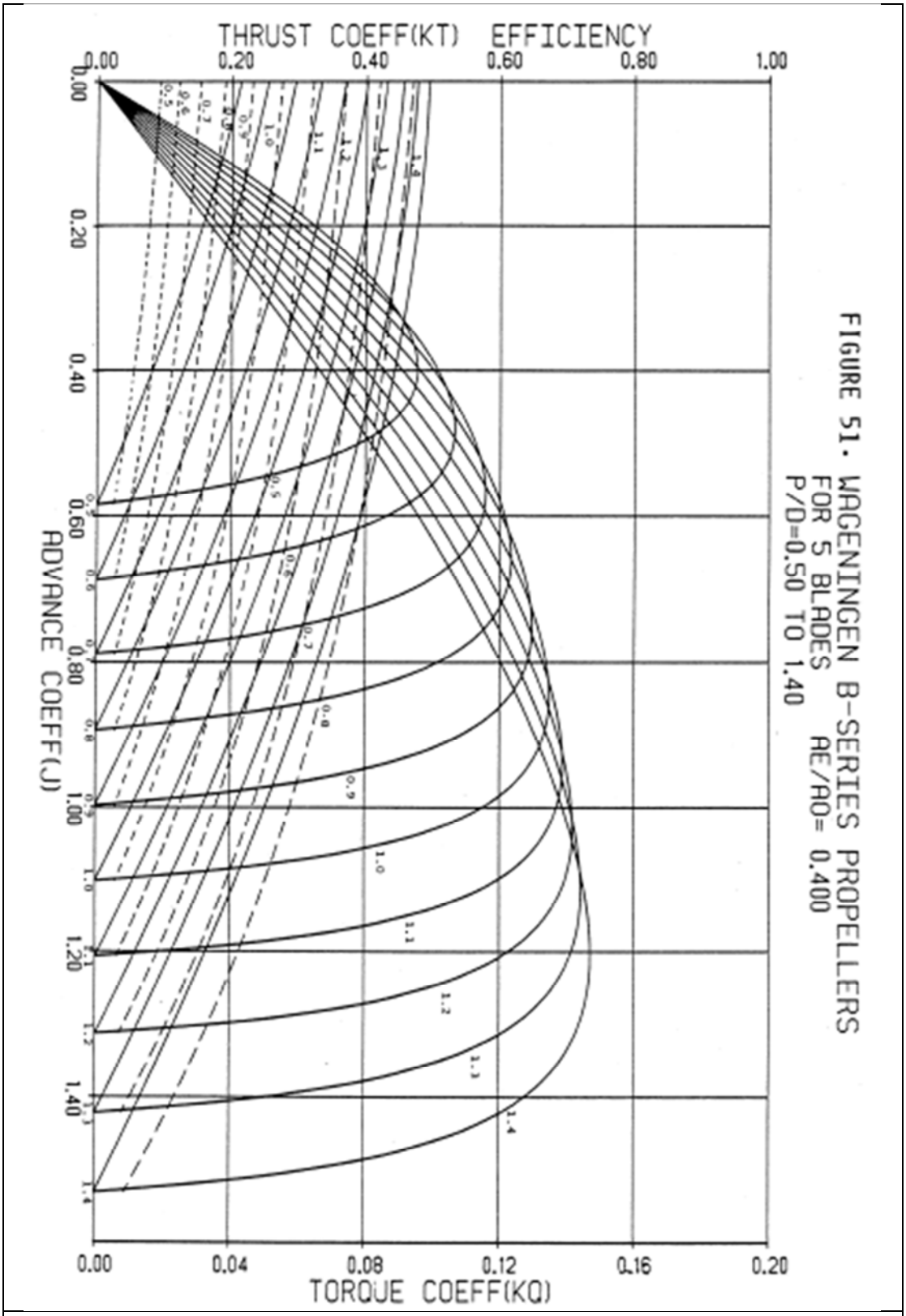
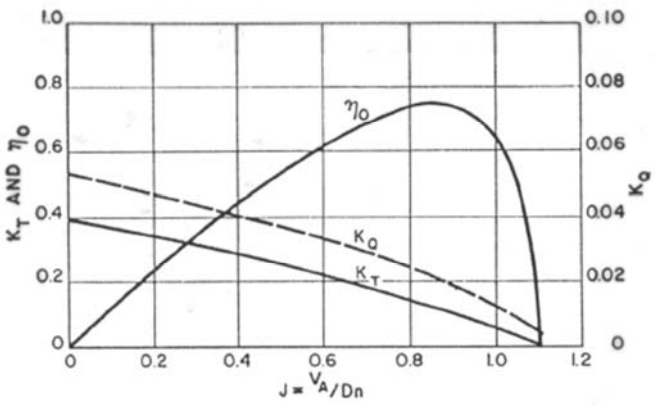


FIGURE 23. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
FOR 3 BLADES AE/AO= 0.600
P/D=0.50 TO 1.40



شکل۳- ۱۹۳: نمونه‌ای از مجموعه نمودارهای پروانه‌های سری B-Wageningen

سری B شامل ۹۶ مجموعه نمودار می‌باشد که هر نمودار فقط مختص به یک تعداد پره (Z) و یک نسبت سطح گسترش یافته A_E/A_o است. هر نمودار با یک کد شناخته می‌شود که بیان‌کننده تعداد Z و A_E/A_o است. مثلاً نمودار $B4-55$ یعنی نمودارهای مربوط به پروانه ۴ پره با نسبت سطح گسترش‌یافته ۵۵ درصد. در داخل هریک از این نمودارها، ضرایب K_t و K_q و بازدهی در آب آزاد η_0 برای P/Dهای مختلف $(0.5 \le P/D \le 1.4)$ رسم شده است، یعنی برای هر P/D، سه نمودار $(\eta_o \ , \ K_q \ , \ K_t)$ موجود است. شکل ۳-۱۹۴ نشان‌دهنده این سه نمودار برای یک P/D خاص است و البته کل این نمودارها در P/D های مختلف برای یک Z و A_E/A_o خاص است و هریک در قالب یک مجموعه نمودار مجزا ارائه می‌شوند.



شکل ۳-۱۹۴ جفت نمودار برای یک P/D خاص (در یک Z و A_E/A_o معین)

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، محور افقی، ضریب پیشروی (J)، محور عمودی سمت چپ مقدار K_t و η_0 و محور عمودی سمت راست مقدار K_q را نشان می‌دهد. در روی نمودار نیز، نمودار خط ممتد K_t، خط‌چین K_q و منحنی دارای نقطه حداکثری η_0 است. برای استخراج مقادیر در یک مقدار Jمشخص $\left(J = \frac{V_A}{n.D}\right)$، خطی را عمود می‌کنیم و مقادیر ضرایب K_t و K_q را می‌خواهیم و سپس با قرار دادن آنها در روابط مربوطه، مقادیر T و Q بدست می‌آیند. نمودارهای سری B در حالات مختلف مطابق جدول ۳-۳۹ وجود دارند:

تعداد پره (Z)	نسبت سطح گسترش یافته (AE/A0)
2	0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 , 0.7, 0.75 , 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05
3	0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 , 0.7, 0.75 , 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05
4	0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 , 0.7, 0.75 , 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05
5	0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 , 0.7, 0.75 , 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05
6	0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 , 0.7, 0.75 , 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05
7	0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 , 0.7, 0.75 , 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05

جدول ۳-۳۹: حالات مختلف پروانه‌ها در سری B

❖ روش عملی طراحی به روش سری B

اساس روش طراحی پروانه به روش سری B بر سعی و خطا استوار است بدین ترتیب که ابتدا برخی از پارامترهای پروانه را فرض می‌کنیم و سپس وارد سیکل طراحی می‌شویم و آنقدر سعی و خطا را ادامه می‌دهیم تا چهار مؤلفه اصلی طراحی به ترتیب اولویت ارضاء شوند:

۱) تأمین تراست مورد نیاز

۲) رسیدن به گشتاور مطلوب (که باید از گشتاور موتور کمتر باشد).

۳) رسیدن به بازدهی مناسب به گونه‌ای که خط عمودی ترسیم شده در یک J مشخص نزدیک به قله نمودار بازدهی (در هر P/D) باشد.

۴) بررسی عدم وقوع کاویتاسیون که نسبت A_E/A_o در آن بسیار اهمیت دارد.

بر اساس چهار معیار بیان‌شده می‌توانیم مراحل زیر را برای فرآیند طراحی پروانه در نظر بگیریم:

۱) تعیین تقریبی قطر پروانه (D) : قطر پروانه را می‌توان با توجه به ابعاد پاشنه شناور موضوع طراحی و فواصل استانداردی که باید پروانه از بدنه داشته باشد، تعیین نمود. ابعاد قسمت پاشنه شناور وابسته به موضوع طراحی و ورودی مسئله است. ابعاد استاندارد فواصل پروانه با بدنه در قسمت مربوطه ارائه شده است. این قطر، حداکثر قطر قابل حصول پروانه است که البته ممکن است در مراحل بعدی کاهش یابد چراکه قطر بزرگ مستلزم ایجاد گشتاور زیاد برای چرخش است. از مطالب قبل می‌دانیم که $T \propto D^4$ و $Q \propto D^5$.

۲) تعیین حدودی دور پروانه n : تعیین دور پروانه وابسته به مشخصات دور موتور و احیاناً گیربکس (چرخ‌دنده) است. یعنی در واقع سه پارامتر دور پروانه، موتور و چرخ‌دنده به هم وابسته هستند. ایده‌آل‌ترین حالت، عدم نیاز به چرخ‌دنده و برابر بودن دور موتور و پروانه است چراکه چرخ‌دنده باعث افزایش وزن، کاهش بازدهی و ایجاد سروصدا می‌شود. پروانه کشتی‌های تجاری معمولاً دارای دور کمتر از $۵۰۰rpm$ هستند و سری B نیز برای پروانه کشتی‌ها و شناورهای معمولی قابل کاربرد است. این دور پروانه مستلزم استفاده از موتورهای دور پائین می‌باشد که ملاحظات زیر را داریم:

- موتور دور پائین ← ایجاد گشتاور زیاد← ابعاد بزرگ و وزن زیاد ← محدودیت فضای موتورخانه ← عدم نیاز به گیربکس
- موتور دور بالا ← ایجاد گشتاور کم ← ابعاد کوچک و وزن کم ← جانمایی راحت‌تر ← استفاده از گیربکس برای کاهش دور و افزایش گشتاور

منظور از موتور دور پائین، دور کمتر از rpm ۵۰۰ و موتور دور بالا، دور بیشتر از rpm ۱۰۰۰ است.

هرچه دور بالاتر باشد، گشتاور پائین‌تر است و علت آن، تبعیت از رابطه مقابل است: $P = Q.\omega = 2\pi nQ$

که Q گشتاور موتور بر حسب $(N.m)$ و n بر حسب دور بر ثانیه (rps) است. اگر دو موتور با توان یکسان را در نظر بگیریم داریم:

$$P_1 = P_2$$

$$n_1 Q_1 = n_2 Q_2 \qquad \rightarrow \qquad \frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

یعنی در توان ثابت، به همان نسبتی که دور افزایش یابد، گشتاور کاهش می‌یابد و بالعکس. در واقع گیربکس نیز از همین قاعده پیروی می‌کند. مثلاً گیربکس کاهنده ۲ به ۱ (که دور را نصف می‌کند)، گشتاور قابل تأمین را دو برابر می‌کند. افزایش گشتاور برای چرخاندن پروانه، اهمیت بسیاری دارد.

بنابراین با توجه به ملاحظات فوق و فضای موجود موتورخانه برای موتور و گیربکس، یک دور اولیه تعیین می‌کنیم. این دور به صورت فرض اولیه است و در مراحل بعدی ممکن است تغییر کند.

۳) تعیین ضریب پیشروی (J):

$$J = \frac{V_A}{n.D} = \frac{V_S(1-w)}{n.D}$$

V_S که از ورودی‌های مسئله و معلوم است. مقدار n و D نیز در مراحل قبل تعیین شد. هم‌اکنون ضریب پیشروی را محاسبه می‌کنیم که البته با تغییر n و D آن هم تغییر می‌کند. حال با J تعیین‌شده می‌توانیم وارد نمودار شویم.

۴) انتخاب نمودار: دانستیم که سری B دارای ۹۶ مجموعه نمودار مختلف است که برای شروع طراحی یکی از آنها را باید انتخاب کنیم. گفتیم که هر نمودار مربوط به یک Z و A_E/A_o خاص است پس باید یک حدس اولیه برای Z و A_E/A_o بزنیم. تعداد پره‌ها را می‌توان با توجه به توصیه جدول ۳-۳۸ تعیین کرد. از نظر بازدهی پروانه، هرچه تعداد پره‌ها کمتر باشد بازدهی بیشتر است لذا اولویت به انتخاب کمترین تعداد پره است که البته ممکن است در مراحل بعدی تغییر کند. A_E/A_o هرچه بیشتر باشد کاویتاسیون کمتر می‌شود ولی باعث کاهش بازدهی پروانه می‌گردد. بنابراین باید حد میانه‌ای از A_E/A_o را در نظر گرفت و به عنوان فرض اولیه وارد سیکل طراحی شد. اگر A_E/A_o خیلی کم در نظر گرفته شده باشد، پروانه با مشکل کاویتاسیون مواجه می‌شود و لذا باید آن را افزایش داد.

تا اینجا با تعیین اولیه Z و A_E/A_o توانستیم نمودار مربوطه را تعیین کنیم. ضریب پیشروی (J) هم که از مرحله قبل تعیین شد. هم‌اکنون باید نسبت گام (P/D) تعیین شود تا بتوان مقادیر را از روی نمودار استخراج کرد.

۵) تعیین نسبت گام (P/D) : می‌دانیم که نسبت گام هرچه بیشتر باشد، پیشروی پروانه و سرعت شناور بیشتر خواهد شد ولی از طرفی باعث افزایش کاویتاسیون می‌شود. همچنین افزایش نسبت گام باعث افزایش بازدهی نیز می‌گردد. بنابراین حد میانه‌ای از (P/D) به صورت حدسی به عنوان مقدار اولیه در نظر گرفته می‌شود که البته در مراحل بعد ممکن است تغییر یابد.

هم‌اکنون با توجه به مقادیر اولیه که تاکنون در نظر گرفته‌ایم به صورت حدس اولیه می‌توانیم وارد یکی از نمودارهای سری B شویم و مقادیر مورد

نیاز $(\eta_o \ , K_q \ , K_t)$ را استخراج کنیم.

۶) **تعیین مقدار تراست:** با توجه به نمودار انتخاب شده (بر اساس Z و A_E/A_o) و مقدار P/D و J تعیین‌شده، مقدار K_t را از نمودار می‌خوانیم و در رابطه زیر جاگذاری می‌کنیم: $T = K_t . \rho . n^2 . D^4$

مقادیر n و D و ρ هم که از قبل معلوم است بنابراین مقدار تراست را بدست می‌آوریم. این تراست را با تراست مطلوب مقایسه می‌کنیم اگر برابر بودند (یا تراست بدست آمده اندکی از تراست مطلوب بزرگتر بود – حدود ۱۰ درصد)، مورد قبول است. اگر تراست کوچکتر بود اقدامات زیر را با توجه به نمودار K_t و رابطه فوق می‌توانیم انجام دهیم:

الف) کاهش ضریب پیشروی (J) برای افزایش K_t که به یکی از دو روش زیر قابل انجام است: $J = \frac{V_A}{n.D}$

۱) افزایش قطر (D) که علاوه بر کاهش J و افزایش K_t می‌تواند با توان ۴ باعث افزایش تراست شود. بدین ترتیب هم افزایش K_t و هم افزایش D در رابطه تراست رخ داده است.

۲) افزایش دور (n) که علاوه بر کاهش J و افزایش K_t می‌تواند با توان ۲ باعث افزایش تراست شود. بنابراین افزایش دو عامل K_t و n در رابطه تراست رخ می‌دهد.

ب) افزایش نسبت گام (P/D) : که در واقع با افزایش آن، نمودار K_t یک پله بالاتر می‌رود. افزایش P/D لزوماً به معنی کاهش قطر (D) نیست چراکه ممکن است P زیاد شده باشد.

۷) **تعیین مقدار گشتاور:** با همین روشی که مقدار K_t خوانده شد و از آخرین اطلاعات سعی و خطای مرحله قبل، مقدار K_q را از نمودار مربوطه می‌خوانیم و در رابطه زیر جاگذاری می‌کنیم: $Q = K_q . \rho . n^2 . D^5$ که همه پارامترهای آن معین است. مقدار گشتاوری که از این رابطه بدست می‌آید باید از گشتاور موتور کمتر باشد در غیر اینصورت یکی از اقدامات زیر را باید انجام داد:

الف) افزایش J برای کاهش K_q که از دو طریق زیر انجام می‌شود:

۱) کاهش D که هم باعث افزایش J (کاهش K_t و K_q) می‌شود و هم با توان ۵ باعث کاهش مستقیم گشتاور می‌شود.

۲) کاهش n که علاوه بر افزایش J (کاهش $K_q \ , K_t$) باعث کاهش مستقیم گشتاور با توان ۲ می‌شود.

ب) کاهش نسبت P/D به گونه‌ای که طبق نمودار مقدار K_q کاهش یابد.

توجه شود که تغییر این عوامل باعث کاهش تراست می‌شود یعنی پس از تأمین گشتاور، مجدداً مقادیر تراست باید کنترل شود به طوری که در پایان این مرحله، تراست برابر یا اندکی بزرگتر از تراست مطلوب و گشتاور پروانه، کوچکتر یا برابر گشتاور موتور شده باشد.

۸) **بررسی مقدار بازدهی:** پس از تأمین تراست و گشتاور، مقدار بازدهی پروانه در آب آزاد (η_o) بررسی می‌شود به گونه‌ای که در P/D تعیین شده در انتهای مراحل قبل، مقدار بازدهی در قله نمودار باشد. برای بازدهی نمی‌توان عدد خاصی را معیار گرفت چراکه حداکثر مقدار بازدهی وابسته به مقدار P/D است. با افزایش P/D قله‌های نمودار افزایش می‌یابد.

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} . \frac{K_t}{K_q}$$

در صورت تغییر نسبت گام، مقادیر تراست و گشتاور نیز باید مجدداً کنترل شوند.

۹) **کنترل کاویتاسیون:** پس از طی‌کردن مراحل قبل که مقادیر مناسب تراست، گشتاور و بازدهی تأمین شد، باید معیار کاویتاسیون کنترل شود. روشهای کنترل کاویتاسیون در بخش مربوطه بیان خواهد شد ولی می‌توان از معیار کاویتاسیون B – Wageningen نیز استفاده کرد:

$$A_E / A_0 \geq \frac{0.692T}{D^2 (P_0 - P_v)^{0.75} V_A^{0.5} \ (1.067 - 0.229 P/D)}$$

آخرین مقادیر خروجی تا سعی و خطای مرحله قبل باید در این رابطه جاگذاری شوند.

در صورت عدم برقراری این رابطه باید مقدار A_E/A_o افزایش یابد تا کاویتاسیون در پروانه رخ ندهد. همانطور که می‌دانیم تغییر A_E/A_o به معنای تغییر کل نمودار و مراجعه به نمودار دیگری است. بدین ترتیب در صورت بروز این تغییر، کل محاسبات تراست، گشتاور و بازدهی باید مجدداً انجام شود. با مروری بر مطالب فوق مشخص می‌گردد که طراحی پروانه یک فرآیند بسیار طولانی و با سعی و خطای بسیار است که اغلب پارامترهای آن در شروع کار، فرض می‌شوند و در فرآیند بیان‌شده، تک تک پارامترها اصلاح می‌شوند. انجام این کار به طور دستی کاری مشکل و وقت‌گیر است لذا مؤلف این کتاب به همراه دو نفر از دانشجویان دانشگاه صنعتی مالک اشتر اقدام به تهیه «نرم‌افزار طراحی پروانه به روش سری B» نموده‌اند که در ضمیمه ۲،

توضیحات مختصری از آن ارائه می‌شود[1].

مثال) نمونه‌ای از فرایند طراحی پروانه را برای یک کشتی با مشخصات زیر انجام می‌دهیم تا ماهیت روش سعی و خطا در طراحی پروانه مشخص گردد. کشتی نفتکش ۱۷۰۰۰ تنی دارای موتوری با قدرت ۴۴۰۰KW و دور ۵۲۰rpm می‌باشد. این دور توسط یک گیربکس ۳ به ۱ تحویل پروانه می‌شود. پروانه شناور دارای ۴ پره می‌باشد و از آلیاژ آلومی‌نیوم – نیکل – برنز تهیه شده است. پروانه این شناور دارای قطری برابر با ۴/۳ متر می‌باشد. شناور دارای سرعتی برابر با (۶/۶۳m/s) ۱۳knot خواهد بود (بدیهی است که از تعداد پره و قطر ذکر شده در کشتی مشابه به عنوان راهنما استفاده می‌کنیم، نه معیار!)

حل)

۱) نخست با داشتن P_B (توان موتور) و دور موتور، گشتاور آن را محاسبه می‌کنیم.

طبق فرمول داریم:

$P_B = 4400\ KW$
$n = 520\ rpm = 8.67\ rps$
$\omega = 2\pi n \qquad P_B = Q.\omega$
$Q = P_B/\omega = 80.8\ KN.m$

یعنی حداکثر گشتاوری که موتور می‌تواند تامین کند برابر ۸۰/۸ کیلو نیوتن– متر است.

۲) بررسی تأثیر گیربکس روی Q و n:

Q پارامتر گشتاور و n دور حاصل از موتور است. لذا با استفاده از گیربکس (که به منظور افزایش گشتاور و کاهش دور) Q و n تحویلی به پروانه تغییر می‌یابد پس داریم:

$$P_1=P_2$$
$$Q_1.n_1=Q_2.n_2$$
$$\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{n_1}{n_2}$$

چون در موتورخانه شناور از یک گیربکس کاهنده استفاده شده است، گشتاور تحویلی به پروانه ۳ برابر و دور تحویل شده یک سوم می‌شود. یعنی در واقع:

$Q = 80.8 \times 3 = 242.4\ KN.m$
$n = 8.67\ rps/3 = 2.89\ rps$

۳) محاسبه ویک w:

w فاکتور ویک نامیده می‌شود که بسته به نوع شناور و فرمول مورد استفاده متفاوت خواهد بود. با توجه به نفتکش بودن شناور و با استفاده از فرمول مربوطه (که بدان اشاره شده است) داریم:

$w = 0.7\ C_P - 0.18 \longrightarrow (C_P = 0.8) \rightarrow w = 0.38$

۴) محاسبه t :

t، فاکتور کاهش تراست است که مشابه **w** از فرمول مربوطه برای شناورهای تجاری به روش زیر استخراج می‌شود:

$t = 0.5\ C_P - 0.12 = 0.28$

۵) مقاومت R :

R، همان مقاومت کل شناور است که قبلا به روش هولتروپ محاسبه شده و برابر است با:

$R_{total} = 435.57\ KN$

۶) مقدار تراست مورد نیاز T:

با لحاظ کردن ضریب کاهش تراست روی مقدار مقاومت می‌توان نیروی تراست مورد نیاز را محاسبه کرد:

$T = R / (1-t) \rightarrow T = 435.57 / (1-0.28)$
$\rightarrow T = 604.95\ KN$

۷) سرعت پیشروی VA:

VA ، همان سرعت پیشروی[2] شناور است که با توجه به سرعت کشتی و فاکتور ویک به دست می‌آید:

$V_A = V_S\ (1-w)$
$V_S = 13 \times 0.51 = 6.63\ m/s$
$V_A = 6.63\ (1-0.38) = 4.11\ m/s$

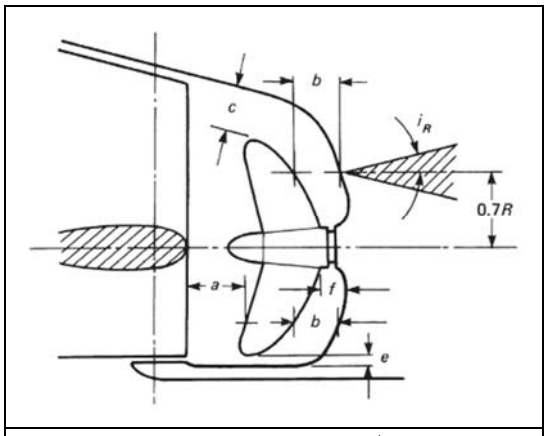
---

1 این نرم‌افزار بطور رایگان در اختیار جامعه دریایی کشور قرار گرفته است.

2 –Advanced Speed

۸) ملاحظات ابعادی پروانه:

با توجه به فضای استاندارد مابین انتهای پاشنه و محور سکان؛ و با توجه به توصیه استاندارد *DNV* که در زیر آمده است داریم:



تکرار شکل: فواصل استاندارد اطراف پروانه

I) a: $a \rangle 0.1\ D \rightarrow a \rangle 0.43$

حداقل مقدار a (فاصله افقی تا *rudder*) باید 0.44 باشد.

II) b: $b \rangle 0.27\ D \rightarrow b \rangle 1.16$

حداقل مقدار b (فاصله افقی تا پشت پروانه) باید 1.17 باشد.

III) c: $c \rangle 0.20\ D \rightarrow D \rangle 0.86$

حداقل مقدار c (فاصله عمودی تا بدنه) باید 0.87 باشد.

IV) e: $e \rangle 0.035\ D \rightarrow e \rangle 0.15$

حداقل مقدار e (فاصله عمودی تا نکیه‌گاه پایینی سکان) باید 0.16 باشد.

- **توضیح چگونگی مراحل طراحی:**

نخست بر حسب توصیه‌های انجام شده، تعداد پره‌ها را انتخاب می‌کنیم و سپس A_E / Ao را از کمترین مقدار انتخاب و شروع می‌کنیم. یک P/D را حدس می‌زنیم و در محدوده نمودار به دست آمده برای n و D مبنا، مقدار J را به دست می‌آوریم. از روی J و با استفاده از نمودار، Kt و Kq را به دست می‌آوریم. در صورت ارضا شدن T و Q به دست آمده در قسمتهای قبلی، پروانه طراحی مرحله اول خود را پشت سر گذاشته است و تنها باید پروانه را از لحاظ راندمان و کاویتاسیون کنترل کرد. توجه شود که با تغییر دور، مقدار T وQ مورد نیاز (معیار) نیز تغییر می‌کند ولی در طول حل مسئله برای انجام حل دستی، این مقادیر را ثابت در نظر می‌گیریم (که البته در حالت واقعی نباید اینطور باشد).

لازم به ذکر است که در تغییر D باید به محدودیتهای قطر پروانه توجه داشت.

- **فرایند طراحی پروانه**

J = ضریب پیشروی پروانه است که برابر است با: $J = V_A/n.D$

K_q = ضریب گشتاور است که برابر است با: $K_q = Q/1.025.n^2.D^5$

K_t = ضریب تراست است که برابر است با: $K_t = T/1.025.n^2.D^4$

برای این مسئله می‌توان چندین جواب که همگی هم درست باشند بدست آورد. در این مثال سعی شده است که فرایند حل به روش سعی و خطا تشریح گردد و جوابها تا حد ممکن بهینه باشند. البته بدلیل مشکلات حل دستی و فرایند تکرار، جوابها ممکن است بهترین جواب ممکن برای حل مسئله نباشند. استفاده از برنامه‌نویسی و کدهای کامپیوتری روش مناسبی برای حل اینطور مسائل است.

❖ طراحی پروانه اول:

برای یک پروانه ۴ پره‌ای و $A_E/A_o = 0.4$؛ نمودار $B - Vageningen$ را انتخاب می‌کنیم. در مرحله اول برای $P/D = 0.6$ داریم:

✓ **حدس اول:**

$n = 2.89\ rps$

$D = 4.3\ m$ داریم: $J = 0.33 \rightarrow$ نمودار: $K_t = 0.147$, $K_q = 0.016$

$\rightarrow T = 430.23\ KN$, $Q = 201.36\ KN.m$ (×)

که این مقادیر فاصله بسیار زیادی با مقادیر مدنظر دارد. لذا باید با تغییر در مقدار D و n می‌بایست به حد مطلوب برسیم.

✓ **حدس دوم:**

در این مرحله D را از ۴/۳ به ۴/۵ متر افزایش می‌دهیم:

n = 2.89 rps

D = 4 m داریم:*J = 0.316* ⟶ نمودار: $K_t = 0.152$, $Kq = 0.017$

→ T = 533.6 KN , Q = 268.55 KN.m (×)

✓ **حدس سوم:**

D را ۴/۴ متر در نظر می‌گیریم:

n = 2.89 rps

D = 4.4 m داریم: *J = 0.323* ⟶ نمودار: $K_t = 0.149$, $K_q = 0.016$

→ T = 478.1 KN , Q = 225.89 KN.m (×)

✓ **حدس چهارم:**

چون هنوز با مقادیر مطلوب فاصله داریم؛ همچنان *D* را کاهش می‌دهیم:

n = 3 rps

D =4.4 m *داریم:J = 0.311 → نمودار: $K_t = 0.153$, $K_q = 0.017$*

→ T = 529 KN , Q = 258.6 KN.m (×)

✓ **حدس پنجم:**

دور را به ۱/۵ می‌رسانیم:

n = 3 rps

D = 4.3 m داریم: *J = 0.318* ⟶ نمودار: $K_t = 0.151$, $K_q = 0.017$

→ T = 476.2 KN , Q = 230.55 KN.m

✓ **حدس ششم:**

n = 3.5 rps

D = 4.3 m داریم: *J = 0.273* ⟶ نمودار: $Kt = 0.166$, $Kq = 0.018$

→ T = 712.59 KN , Q= 332.25 KN.m (×)

✓ **حدس هفتم:**

n = 3.5 rps

D = 4.1 m داریم: *J = 0.286* ⟶ نمودار: $K_t = 0.162$, $K_q = 0.017$

→ T = 574.8 KN , Q = 247.3 KN.m (×)

✓ **حدس هشتم:**

n = 3.45 rps

D = 4.12 m داریم: *J = 0.289* ⟶ نمودار: $Kt = 0.161$, $Kq = 0.017$

→ T = 610 KN , Q= 217.4 KN.m (√)

و این حدس قابل قبول است چراکه تقریبا تراست بدست آمده برابر با تراست مورد نیاز است و گشتاور بدست آمده از گشتاور قابل تحمل موتور کمتر است. البته در این مسئله می‌توانستیم مقدار *P/D* را نیز تغییر دهیم به گونه‌ای که خط عمودی *J* نزدیک به قله نمودار بازدهی (در آن *P/D* مورد نظر) باشد.

حال باید این مقادیر را از نظر بازدهی و کاویتاسیون بررسی کنیم:

۱) بازدهی:

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi}.\frac{K_t}{K_q} = 43.5\ \%$$

۲) کاویتاسیون: طبق معیار wageningen داریم:

$$A_E / A_0 \geq \frac{0.692T}{D^2(P_0 - P_v)^{0.75}V^{0.5}_A(1.067 - 0.229P/D)}$$

→ $A_E/Ao = 0.4$

ملاحظه می‌شود که این پروانه معیار کاویتاسیون را هم ارضا می‌کند و راندمان آن در محدوده نسبتاً مناسبی قرار دارد. می‌دانیم هنگامیکه A_E/A_o را افزایش می‌دهیم، کاویتاسیون کمتر می‌شود. چون در کمترین حالت A_E/A_o مشکلی از لحاظ کاویتاسیون نداریم، پس نیازی به افزایش A_E/A_o نیست. (افزایش A_E/A_o؛ باعث کاهش کاویتاسیون و از طرفی باعث کاهش راندمان می‌شود!)

❖ طراحی پروانه دوم:

این بار پروانه را به صورت ۵ پره برای حالتهای فرض اولیه زیر طراحی می‌کنیم:

$A_E/Ao = 0.9 \quad , \quad P/D = 0.8$

✓ حدس اول:

باز هم حدس را از حالتهای معیار شروع می‌کنیم:

$n = 2.89\ rps$

$D = 3.4\ m$ داریم: $J = 0.418 \longrightarrow$ نمودار: $K_t = 0.214 \quad , \quad Kq = 0.03$

$\rightarrow T = 244.82\ KN \quad , Q = 116.69\ KN.m \quad (\times)$

✓ حدس دوم:

$n = 2.89\ rps$

$D = 4.5\ m$ داریم: $J = 0.316 \longrightarrow$ نمودار: $K_t = 0.32 \quad , \quad K_q = 0.044$

$\rightarrow T = 2001.69\ KN \quad , Q = 825.7\ KN.m \quad (\times)$

✓ حدس سوم:

$n = 2.89\ rps$

$D = 4.15\ m$ داریم: $J = 0.342 \longrightarrow$ نمودار: $K_t = 0.248 \quad , \quad K_q = 0.033$

$\rightarrow T = 629.74\ KN \quad , Q = 347.75\ KN.m \quad (\times)$

✓ حدس چهارم:

$n = 2.82\ rps$

$D = 4.15\ m$ داریم: $J = 0.351 \longrightarrow$ نمودار: $K_t = 0.231 \quad , \quad K_q = 0.032$

$\rightarrow T = 607.1\ KN \quad , Q = 238.2\ KN.m \quad (\times)$

و این حدس قابل قبول است چراکه تقریبا تراست بدست آمده برابر با تراست مورد نیاز است و گشتاور بدست آمده از گشتاور قابل تحمل موتور کمتر است. اما برای کنترل بازدهی و کاویتاسیون. طبق فرمولها داریم:

۱) راندمان: طبق فرمولها داریم $\longleftarrow \quad \eta_o = \frac{J}{2\pi}.\frac{K_t}{K_q} = 40.3\ \%$

۲) کاویتاسیون: طبق فرمولها داریم $\longleftarrow \quad A_E/A_o = 0.9$ که هر دو را ارضا می‌کند.

❖ طراحی پروانه سوم:

این بار پروانه را به صورت ۳ پره‌ای *برای* $A_E/A_o=0.9$ با همین فرایند طراحی نمایید. یک حدس اولیه از مقادیر P/D وn وD را در نظر گرفته و شروع به سعی و خطا نمایید.

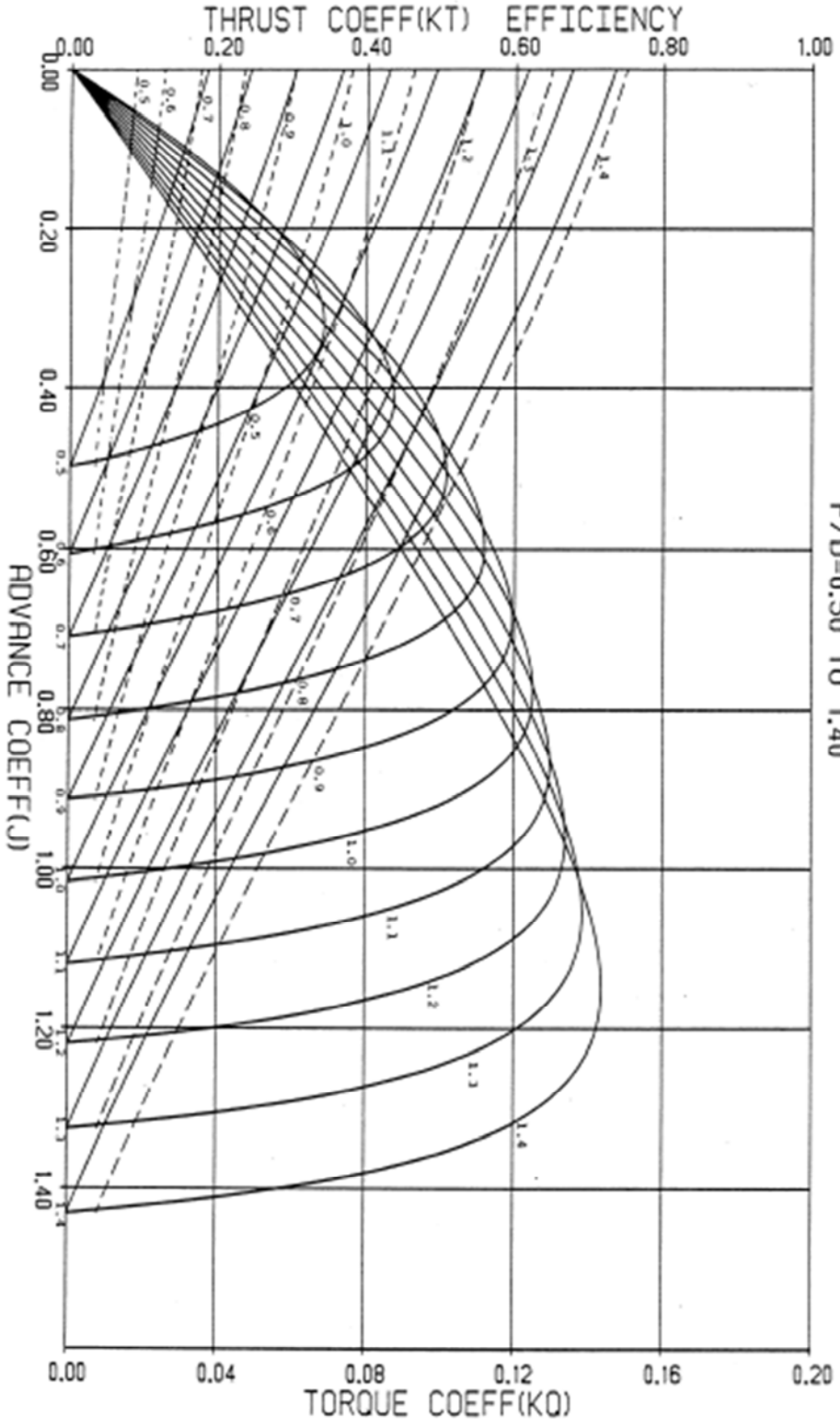


FIGURE 29. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
FOR 3 BLADES AE/AO= 0.900
P/D=0.50 TO 1.40

فصل هشتم: روش $B_P - \delta$ در طراحی پروانه

روش دیگری که در طراحی پروانه‌های گام ثابت وجود دارد، روش سری $B_p - \delta$ می‌باشد که البته کاربرد آن به اندازه روش سری B رایج نیست. این روش در آحاد انگلیسی بیان می‌شود. نمونه‌ای از شکل نمودارهای سری $B_P - \delta$ را می‌توان در شکل ۳-۱۹۵ ملاحظه کرد. این نمودارها، همانند سری B برای یک تعداد پره و نسبت سطح گسترش‌یافته خاص ارائه می‌شود. مثلاً نمودارهای شکل ۳-۱۹۵ برای *B4 - 70* یعنی ۴ پره با $A_E/A_o = 70$ بیان شده‌اند. بدلیل شلوغی و تراکم نمودارها در این شکل، نحوه استفاده از آن در نمودارهای شکل ۳-۱۹۶ توضیح داده می‌شود. در استفاده از این نمودارها داریم:

$$B_P = \frac{P_D^{0.5}.n}{V_a^{2.5}}$$

$$\delta = \frac{D.n}{V_a}$$

P_D: توان تحویل شده بر حسب اسب بخار(h_P)

n: بر حسب دور بر ثانیه(rps)

V_a: سرعت پیشروی بر حسب گره (kn)

D: قطر پروانه بر حسب فوت (ft)

در این نمودارها مطابق شکل ۳-۱۹۶ الف محور افقی مقدار B_P، محور عمودی نسبت P/D است و نمودارهای داخل شکل، مقادیر نسبت گام بهینه برای حداکثر راندمان، مقدار راندمان موجود (η) و خطوط ثابت δ می‌باشد. نمودار خطچین نشان داده شده در شکل ۳-۱۹۵ و ۱۹۶ معیار اصلی طراحی است. پارامترهای پروانه طی مراحل زیر مشخص می‌شوند:

۱) مقدار V_a بر اساس سرعت مورد نیاز کشتی (V_S) بدست می‌آید. $V_a = V_S(1-w)$

۲) P_D به طور تقریبی با توجه به مشخص بودن مقاومت (R) و توان مؤثر (P_E) بدست می‌آید (به بخش بازدهی سیستم رانش مراجعه شود).

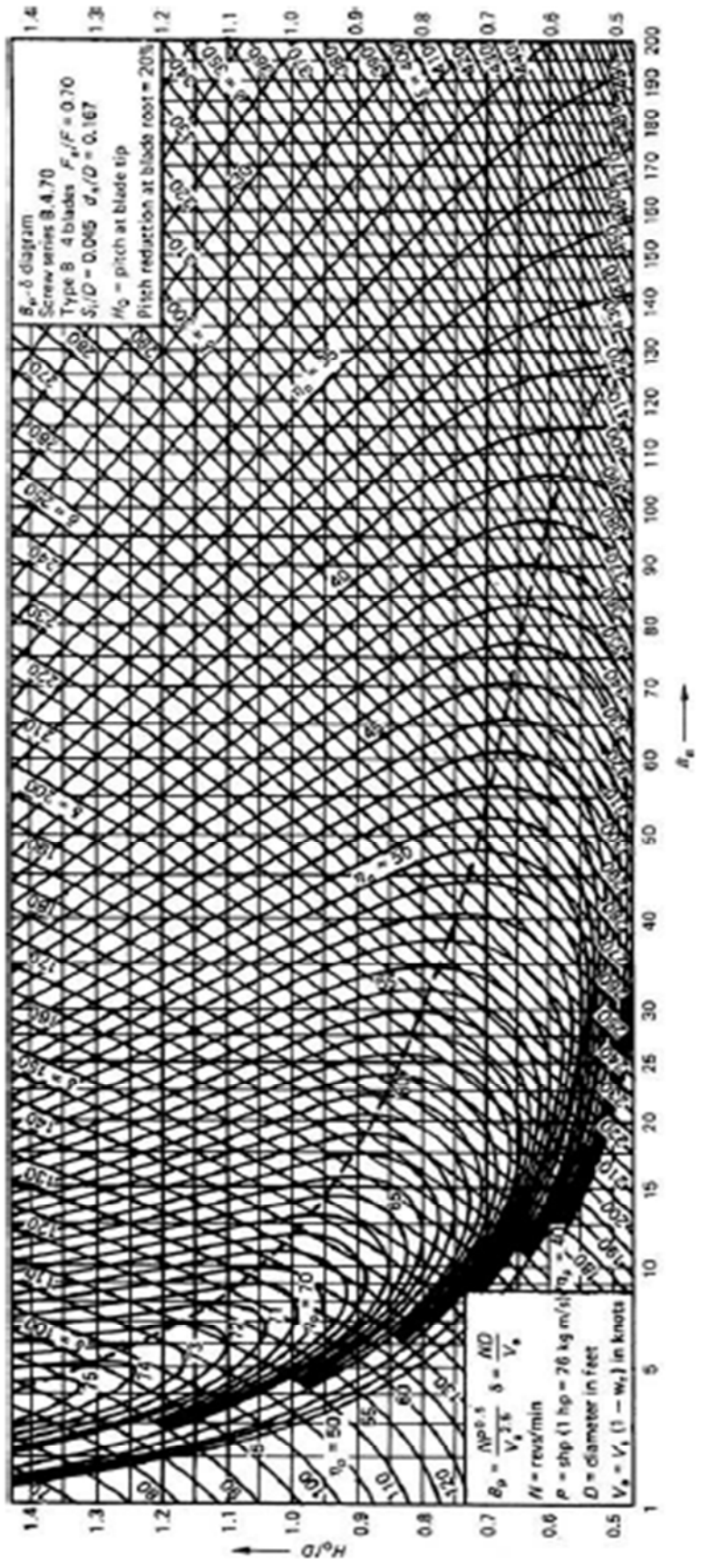
۳) با مشخص بودن V_a و P_D مقدار B_P را محاسبه می‌کنیم. یک مقدار تقریبی n نیز حدس می زنیم که این حدس در مراحل بعدی اصلاح می‌شود.

۴) محاسبه قطر بهینه: مطابق شکل ۳-۱۹۶ ب با یک B_P مشخص وارد نمودار می‌شویم تا نمودار حداکثر بازدهی (نمودار خطچین) را در یک نقطه قطع می‌کند. این نقطه همان نقطه طراحی است. هم‌اکنون نمودار δ که از این نقطه عبور می‌کند را به عنوان δ بهینه (δ_{opt}) در نظر می‌گیریم و از آن مقدار قطر بهینه را بدست می‌آوریم:

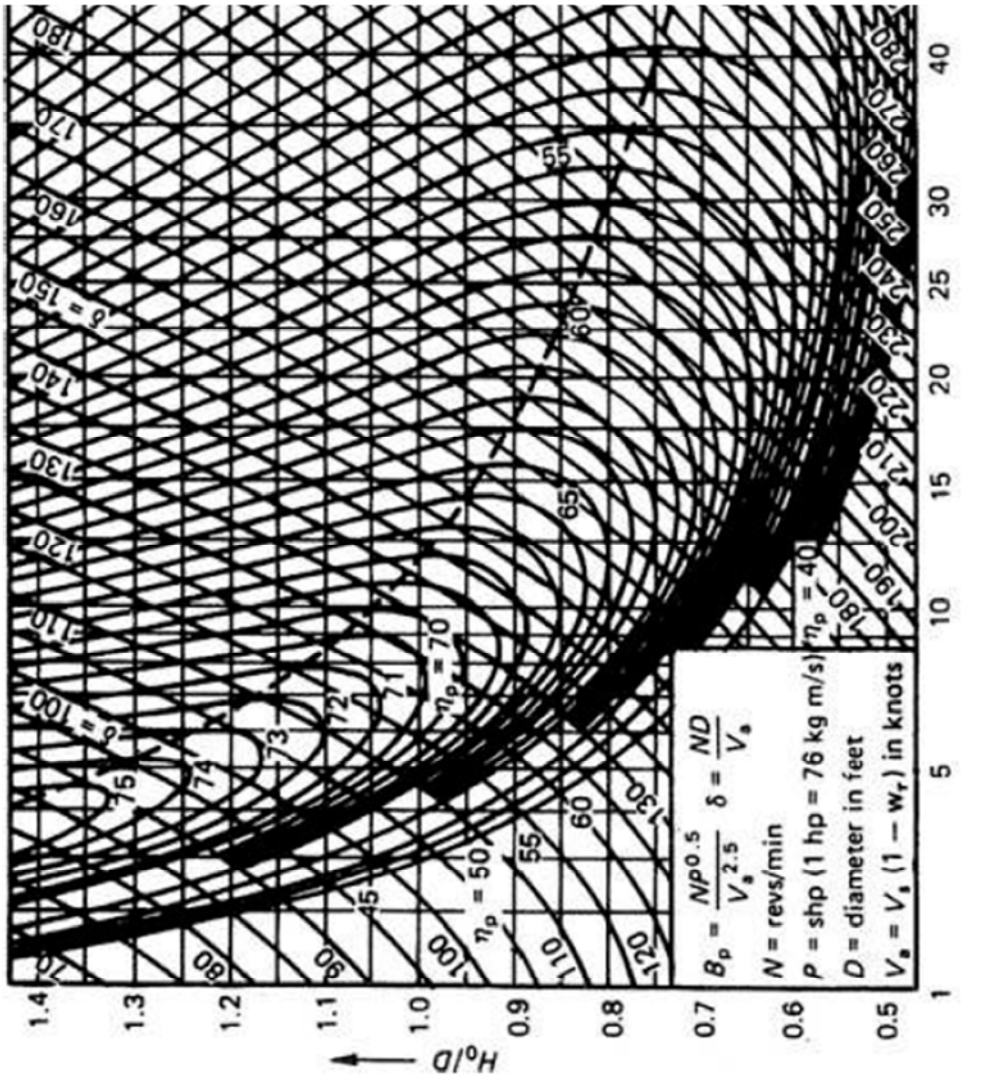
$$D_{opt} = \frac{\delta_{opt}.V_a}{n}$$

همچنین از این نمودار، مقدار بازدهی در آب آزاد (η_o) نیز بدست می‌آید. می‌دانیم که دور و قطری که تا اینجا بدست آمده با شرط کاویتاسیون قابل پذیرش هستند. لذا این مقادیر باید برای سطح گسترش‌یافته‌های مختلف بررسی شوند. می‌دانیم که هر چه نسبت A_E/A_o بیشتر شود، قطر بهینه آن کاهش می‌یابد. این مسئله به صورت نمودار کوچکی در کنار شکل الف نشان داده شده است. مقدار δ_{opt} بهینه را می‌توان از رابطه زیر نیز محاسبه کرد:

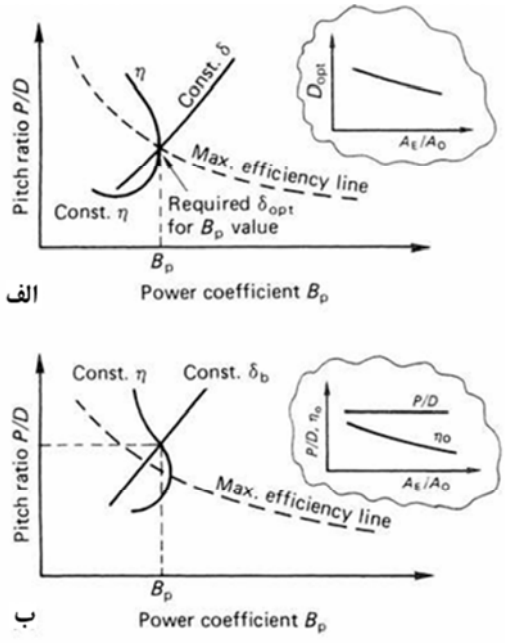
$$\delta_{\text{opt}} = 100\left[\frac{B_{\text{P}}^3}{(155.3 + 75.11B_{\text{P}}^{0.5} + 36.76B_{\text{P}})}\right]^{0.2} \times \left[0.9365 + \frac{1.49}{Z} - \left(\frac{2.101}{Z} - 0.1478\right)^2 \times \frac{A_{\text{E}}}{A_{\text{O}}}\right]$$



شکل ۳-۱۹۵: نمودار روش $B_P - \delta$ در طراحی پروانه



بخشی از شکل ۳-۱۹۵: قسمت بزرگ شده ابتدای نمودار فوق



شکل ۳-۱۹۶: روش استفاده از نمودارهای $B_P - \delta$

حال با مشخص بودن B_P مطابق شکل ۳-۱۹۶ ب، از تقاطع B_P با نمودار δ_b ، نقطه‌ای بدست می‌آید که این نقطه نشان‌دهنده نسبت گام بهینه $\left(P/D\right)$ است. لازم به تذکر است که این مقادیر، مقادیر نهایی نیستند بلکه با سعی و خطاهای متوالی و ارضاء شدن کلیه شرایط، نهایی می‌شوند. استفاده از این روش دشوارتر و غیر رایج‌تر از روش سری B است و نمودار های کامل این سری در ایران در دسترس نیست. رابطه تراست (T) با سایر عوامل نیز به این صورت است:

$$T = \frac{P_D . \eta_o}{V_a}$$

مثال) یک کشتی دارای توان تحویل شده ۴۷۵۰ kw و دور ۱۰۰ rpm و سرعت پیشروی ۱۱/۵ گره است. مطلوبست مقادیر: B_P، δ، بازدهی پروانه، گام و نسبت گام پروانه و قطر پروانه.

حل) P_D= 4750000 w n=100 rpm V_A=11.5 knot

مراحل حل مسئله:

۱) ابتدا مقدار B_P را محاسبه می‌کنیم.

۲) نمودار مربوط به B_P را دنبال می‌کنیم تا محل تقاطع آن با نمودار نسبت گام بهینه در حداکثر بازدهی بدست آید. این نقطه تقاطع، محل بهینه طراحی پروانه است.

۳) در محل این تقاطع موارد زیر را معلوم می‌کنیم: بازدهی پروانه، δ و P/D

۴) استفاده از δ برای محاسبه قطر پروانه

۵) استفاده از نسبت P/D برای محاسبه گام پروانه

با استفاده از اطلاعات مسئله داریم:

$$B_P = \frac{0.0367 \ .n.P_D^{0.5}}{V_A^{2.5}} = \frac{0.0367 \ .100 \ .(4750000 \ )^{0.5}}{(11.5)^{2.5}} = 17.83$$

با استفاده از میان‌یابی خط B_P=17.83 را دنبال می‌کنیم تا نمودار گام بهینه برای حداکثر بازدهی را قطع کند. با در نظر گرفتن محل این برخورد داریم:

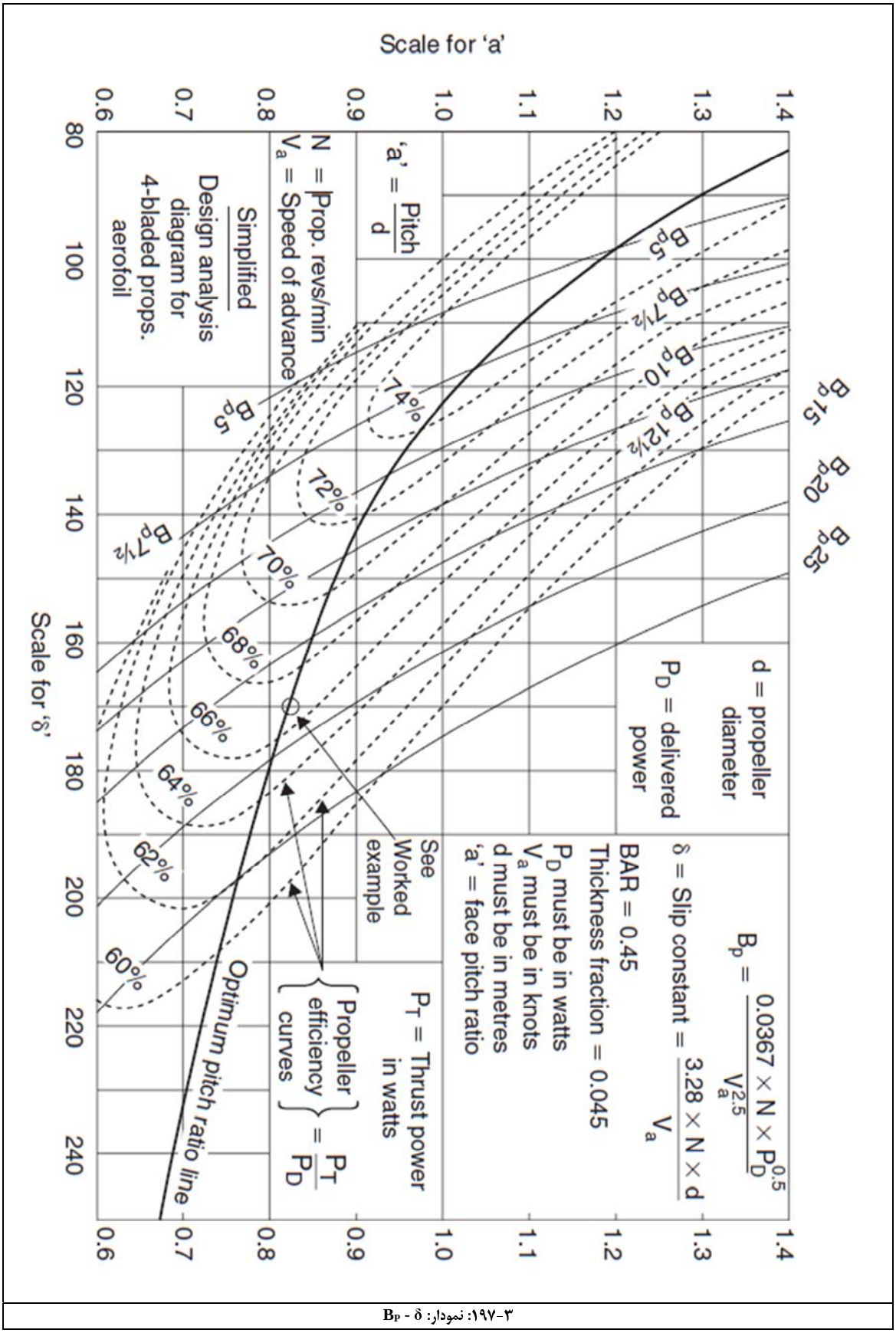
η=66.7% δ=170 P/D=a= 0.825

$$\delta = \frac{3.28 \times n.D}{V_A} \qquad D = \frac{\delta . V_A}{3.28 \times n}$$

$$D = \frac{170 \times 11.5}{3.28 \times 100} = 5.96$$

P/D= 0.825

P=0.825× D=0.825×5.96=4.92 m



۳-۱۹۷: نمودار: B_P - δ

فصل نهم: انواع شرایط کاری در پروانه‌ها و آزمایش بولارد

برای سیستم رانش شناورها سه حالت کلی تعریف می‌شود:

۱) شرایط کاری سبک یا حرکت آزاد[1]

۲) شرایط کاری متوسط یا یدک‌کشی[2]

۳) شرایط کاری سنگین یا سخت[3]

هر یک از این سه شرایط کاری را می‌توان مطابق شکل ۳-۱۹۸ به صورت زیر توضیح داد:

۱) شرایط کاری سبک: این شرایط مطابق حالت ۱ همانند حرکت آزاد شناور در شرایطی می‌باشد که به جایی متصل نیست. یعنی اگر شناور در حداکثر سرعت هم حرکت کند باز هم از نظر شرایط کاری سیستم رانش، در شرایط سبک می‌باشد. در این شرایط با فرض صرفنظر کردن از ضریب کاهش تراست داریم: $T = R$ (که T تراست و R مقاومت است) و سرعت ورودی به پروانه تقریبا با سرعت حرکت شناور برابر است.

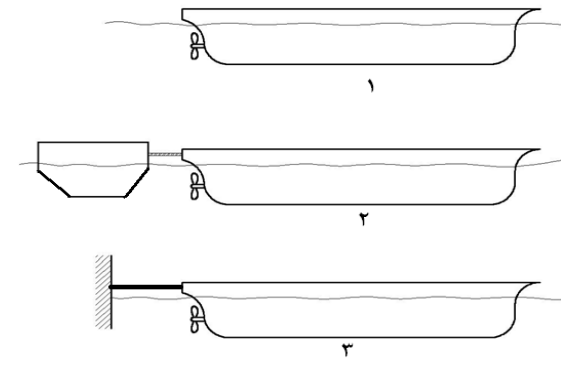
۲) شرایط کاری متوسط: اگر مطابق حالت ۲ ، شناوری در حال یدک کشیدن یک شناور دیگر یا یک بارج باشد، شرایط کاری متوسط برای سیستم رانش تعریف می‌شود. این شرایط در یدک‌کش‌ها بسیار رایج است. برای این شرایط داریم:

$$T = R + R_{tow}$$

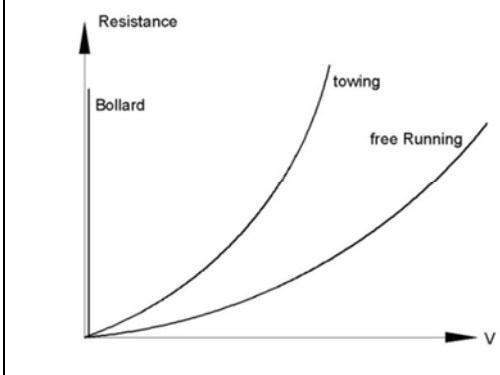
(که T تراست است که باید توسط سیستم رانش فراهم شود، R مقاومت شناور و R_{tow} مقاومت تحمیل شده برای یدک کشیدن یک شناور دیگر است و سرعت حرکت و سرعت سیال ورودی به پروانه خیلی کمتر از شرایط کاری سبک است.)

۳) شرایط کاری سنگین یا سخت: مطابق حالت سوم شکل ۳-۱۹۸، اگر شناور به یک مانع بسته شده باشد $(V = 0)$ و سیستم رانش در حال کارکردن باشد، این شرایط را برای سیستم رانش، شرایط کاری سنگین می‌نامیم. این شرایط شبیه به لحظات اولیه یدک‌کشی است. مثلاً فرض کنید یک یدک‌کش می‌خواهد یک نفتکش غول‌پیکر را یدک کند. در لحظات اولیه یدک‌کشی، سیستم رانش یدک‌کش به شدت در حال کارکردن است ولی شناور حرکت رو به جلو ندارد. این شرایط را از آن جهت سخت یا سنگین گویند که سرعت سیال ورودی به پروانه صفر است (چون شناور بدون حرکت است). صفر بودن سرعت ورودی باعث تحمیل شرایط سخت بر پروانه می‌شود. در قسمت تئوری پروانه ملاحظه می‌شود که سرعت ورودی اولیه (که همان سرعت پیشروی (V_A) است)، در ایجاد تراست نقش مؤثری دارد. در شرایط کاری سنگین، سیستم رانش باید بتواند با سرعت حرکت صفر، تراست مورد نیاز را ایجاد کند.

نمودار تراست مورد نیاز بر حسب سرعت را می‌توان در شکل ۳-۱۹۹ ملاحظه کرد. اگر شرایط کاری سبک باشد، بار روی پروانه، معمولی است و اگر شرایط کاری، سنگین باشد بار روی پروانه بسیار زیاد است و موتور در شرایط دشوار[4] کار می‌کند. حال اگر شناوری مانند یدک‌کش یا کشتی‌های صیادی، در طول عمر کاری خود با هر سه شرایط کاری مواجه باشد باید از پروانه‌های گام متغیر (CPP) استفاده کند به گونه‌ای که در هر شرایط کاری، با تغییر زاویه گام پره‌های پروانه، ایده‌آل‌ترین شرایط را از نظر بازدهی فراهم کند. این در حالی است که پروانه‌های گام ثابت فقط دارای یک وضعیت بهینه‌کاری هستند.



شکل ۳-۱۹۸: نمایش انواع شرایط کاری پروانه



شکل ۳-۱۹۹: نمودار مقاومت بر حسب سرعت در شرایط کاری مختلف

1 - Free Running Condition
2 - Towing Condition
3 - Bollard or Sever Condition
4 - over load

❖ آزمایش شرایط کشش سنگین[1]

برای ارزیابی تراست و کارآیی سیستم رانش در شرایط کاری سنگین، آزمایش بولارد یا آزمایش شرایط کشش سنگین انجام می‌شود. این آزمایش دارای قوانین خاصی است که در ذیل به گوشه‌هایی از آن اشاره می‌شود. شناور بوسیله یک طناب مستحکم به اسکله بسته می‌شود و سیستم رانش در حداکثر توان خود کار می‌کند. در این بین، نیروی کشش ایجاد شده در طناب که همان نیروی تراست پروانه یا سیستم رانش است اندازه‌گیری می‌شود. خروجی-های اصلی آزمایش شرایط کشش سنگین عبارتست از:

۱) حداکثر نیروی تراست قابل تأمین در حداکثر توان موتور در مدت زمان یک دقیقه کارکرد پیوسته سیستم رانش که در واقع از میانگین نیروی کشش طناب در مدت یک دقیقه بدست می‌آید.

۲) نیروی کشش یکنواخت که از متوسط نیروی کشش طناب در مدت ۵ دقیقه بدست می‌آید.

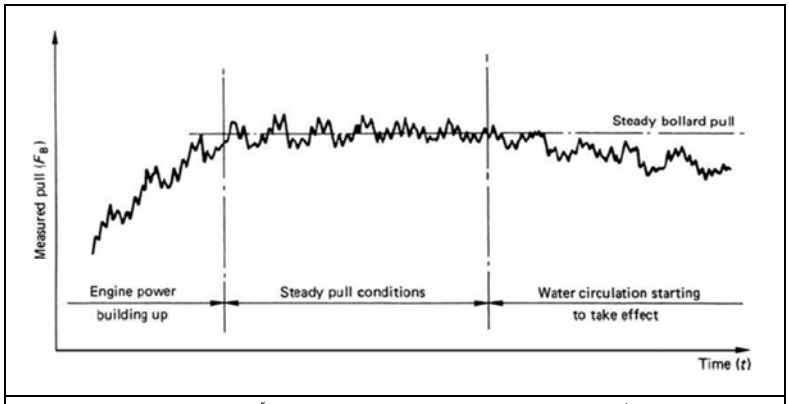
۳) حداکثر نیروی تراست قابل تأمین در شرایط کاری سنگین در دریا که به صورت درصدی از نیروی کشش طناب می‌باشد. این درصد اغلب به اندازه ۷۸ درصد نیروی کشش طناب در نظر گرفته می‌شود.

در واقع مراحل انجام کشش و شرایط کاری سنگین نسبت به زمان مطابق شکل ۳-۲۰۰ به صورت زیر است:

مرحله اول: افزایش سریع نیروی کشش طناب با افزایش دور موتور

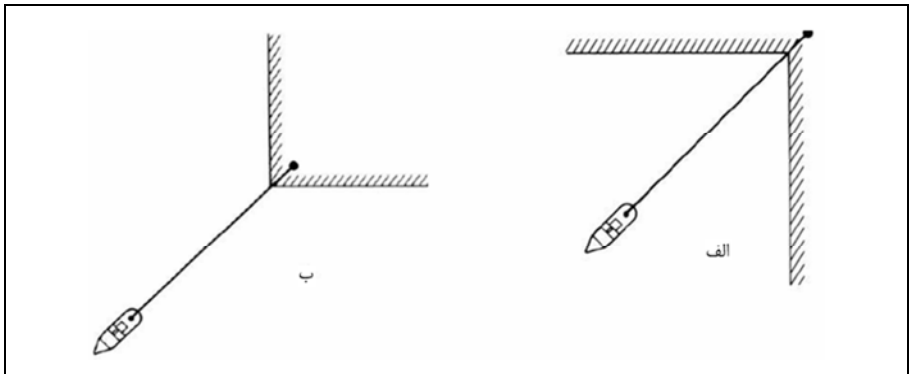
مرحله دوم: تثبیت نیروی کشش در یک بازه زمانی که مقدار نیروی کشش تقریباً یک عدد ثابت را نشان می‌دهد.

مرحله سوم: شروع چرخش سیال حول پروانه و کاهش نیروی کشش علی‌رغم تداوم کارکرد سیستم رانش در حداکثر توان.



شکل ۳-۲۰۰ : مراحل اندازه‌گیری نیروی کشش در آزمایش بولارد

آزمایش شرایط کشش سنگین باید در محل مناسبی انجام شود که مطابق شکل ۳-۲۰۱ می‌توان آن را ملاحظه کرد. حالت (الف) شرایط مناسبی نمی-باشد چراکه شناور در محل کنج قرار گرفته و محیط اطراف آن بسته است لذا پدیده چرخش سیال حول پروانه به صورت شدیدتری اتفاق می‌افتد و نیروی کشش طناب کاهش بیشتری می‌یابد.حالت (ب) شرایط مناسبی است به گونه‌ای که محیط اطراف بدنه باز است و چرخش سیال حول پروانه کمتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۳-۲۰۱: حالت الف- محل نامناسب انجام آزمایش و حالت ب- محل مناسب انجام آزمایش

از طرف دیگر فاصله کافی در جلوی شناور باید وجود داشته باشد به طوریکه در صورت پاره شدن طناب، شناور با مانعی برخورد نکند.

برای انجام آزمایش، فواصل معینی از اطراف بدنه وجود دارد که باید رعایت شوند. این فواصل عبارتند از:

1 - Bollard test

۱) حداقل فاصله پاشنه شناور تا قسمت ساحلی که نباید کمتر از ۲ برابر طول شناور باشد. هرچه این فاصله بیشتر باشد بهتر است و مقادیر کشش طناب و نیروی تراست نزدیک‌تر است چراکه پدیده چرخش سیال اطراف پروانه کاهش می‌یابد یا حذف می‌شود (شکل ۳-۲۰۲).

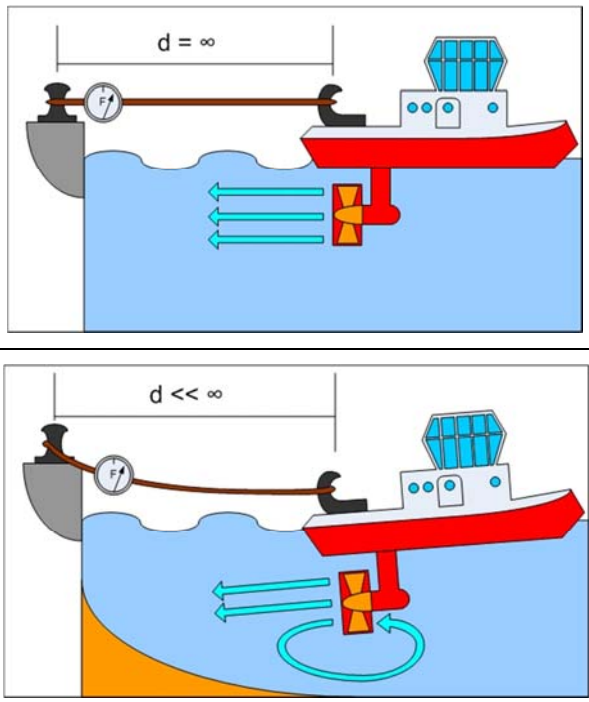
۲) حداقل فاصله آزاد کناره‌های شناور تا ساحل باید به اندازه طول شناور باشد.

۳) حداقل عمق زیر کیل نباید کمتر از ۲ برابر آبخور در محل پاشنه باشد و البته این عمق نباید کمتر از ۱۰ متر هم باشد.

۴) اثرات جذر و مد و جریانات زیرآبی در ایده‌آل‌ترین حالت، در حین انجام آزمایش باید صفر باشد بنابراین محل داک از این نظر مناسب به نظر می‌رسد. اگر این اثرات، غیر قابل اجتناب باشد، جذر و مد باید در حین انجام آزمایش در حالت مد باشد و سرعت جریانات زیرآبی نیز بیش از ۰/۵ m/s نباشد.

۵) سرعت باد نباید بیشتر از بیوفورت ۳ یا ۴ باشد و دریا یا رودخانه باید آرام و بدون موج باشد.

مقدار تقریبی نیروی کشش در آزمایش کشش سنگین برای یدک‌کش‌های ساحلی و کوچک ۳۰-۱۵ تن و برای یدک‌کش‌های بزرگ اقیانوس‌پیما ۱۱۵-۳۰ تن است.



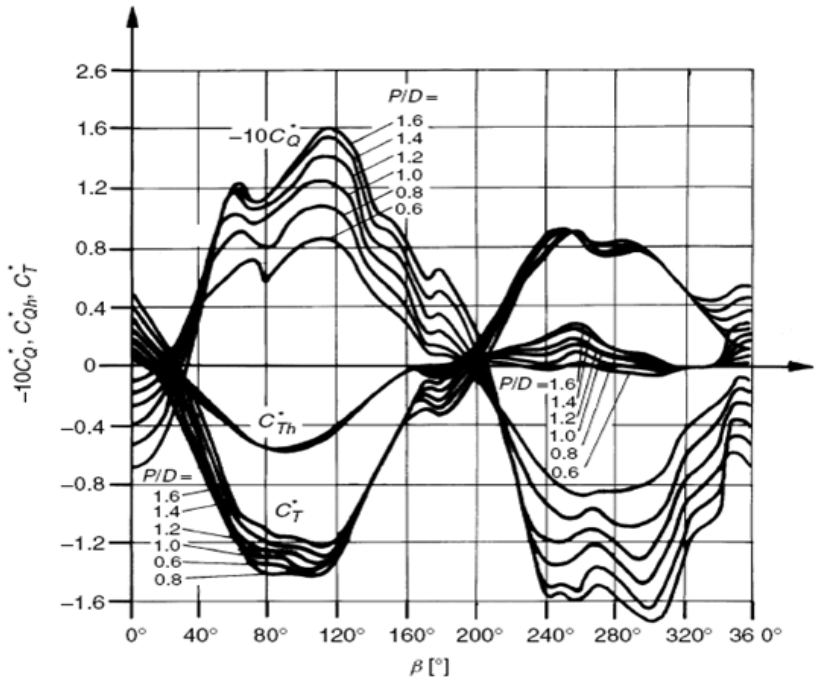
شکل ۳-۲۰۲: الف- شرایط مناسب آزمایش ب- شرایط نامناسب آزمایش به همراه پدیده چرخش سیال حول پروانه

❖ ضرایب پروانه در شرایط کاری کشش سنگین (بولارد)[1]

قبلاً شرایط کاری کشش سنگین برای پروانه را بیان کردیم که در سنگین‌ترین حالت به «بولارد»[2] معروف است. پروانه در حال حرکت است ولی شناور پیشروی ندارد. در واقع در این حالت ضریب پیشروی J $\left(J=\frac{V_A}{n.D}\right)$، صفر بدست می‌آید. این حالت در کشتی‌های یدک‌کش و صیادی که شرایط کاری متفاوتی دارند، بسیار رایج است. لذا در این شرایط برای محاسبه تراست و گشتاور از نمودار شکل ۳-۲۰۳ استفاده می‌شود.

۱- منبع: [۳]

2 - Bollard



شکل ۳-۲۰۳ : ضرایب پروانه در شرایط کاری سنگین

در این نمودار β به صورت زیر تعریف می‌شود: $\tan\beta = \frac{V_A}{0.7\pi nD}$

زاویه β را می‌توان به صورت زیر تفسیر کرد (جدول۳- ۴۰):

$0 \le \beta \le 90$	**کشتی رو به جلو حرکت می‌کند. پروانه تراست رو به جلو تولید می‌کند. (شرایط عادی حرکت به جلو)**
$90 \le \beta \le 180$	**کشتی رو به جلو حرکت می‌کند. پروانه تراست رو به عقب تولید می‌کند. (شرایط ترمز در حرکت رو به جلو)**
$180 \le \beta \le 270$	**کشتی رو به عقب حرکت می‌کند. پروانه تراست رو به عقب تولید می‌کند. (شرایط عادی حرکت به عقب)**
$270 \le \beta \le 360$	**کشتی رو به عقب حرکت می‌کند. پروانه تراست رو به جلو تولید می‌کند. (شرایط ترمز در حرکت رو به عقب)**

جدول ۳-۴۰: تفسیر زوایای مختلف β در شرایط کاری مختلف پروانه

$\beta = 360$, $\beta = 0$: نشان‌دهنده شرایط کشش سنگین در حرکت رو به جلو است و کشتی بدون حرکت است و پروانه تراست رو به جلو ایجاد می‌کند.

$\beta = 180$: نشان‌دهنده شرایط کشش سنگین در حرکت رو به عقب است. (کشتی بدون حرکت است و پروانه تراست رو به عقب ایجاد می‌کند).

این حالات را می‌توان در شکل ۳-۲۰۴ نشان داد.

هم‌اکنون با شناسایی ماهیت β می‌توانیم ضرایب تراست و گشتاور پروانه را در شرایط کاری مختلف از روابط زیر بدست آوریم:

$$C_{Th}^* = \frac{T}{\rho V_R^2 \pi D^2/8}$$

$$C_Q^* = \frac{Q}{\rho V_R^2 \pi D^3/8}$$

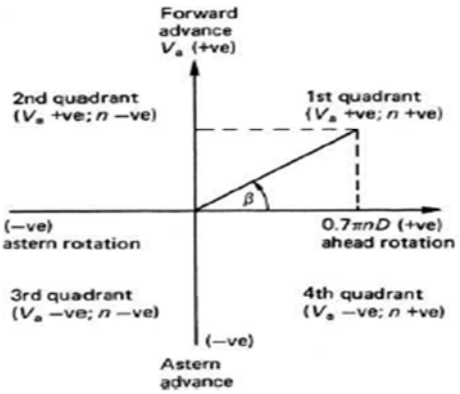
که در آن V_R سرعت دورانی در شعاع $0.7R$ می‌باشد. معادلات بالا را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$C_T^* = \frac{T}{(\pi/8)\rho[V_a^2 + (0.7\pi nD)^2]D^2}$$

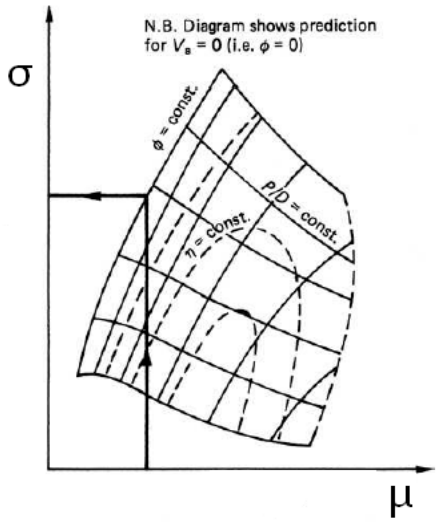
$$C_Q^* = \frac{Q}{(\pi/8)\rho[V_a^2 + (0.7\pi nD)^2]D^3}$$

❖ روش $\mu - \sigma$ برای شرایط کاری کشش سنگین

می‌دانیم که در شرایط کاری کشش سنگین (بولارد) مثلاً در یدک‌کش‌ها از نمودارهای معمولی پروانه نمی‌توان استفاده کرد. مثلاً اگر بخواهیم از نمودارهای $B_P - \delta$ استفاده کنیم، در شرایط بولارد که V صفر یا بسیار کوچک است، B_P به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و نمی‌توان از نمودار استفاده کرد. $\left(B_P = P_D^{0.5}.n/V_a^{2.5}\right)$. در این شرایط از نمودارهای $\mu - \sigma$ استفاده می‌شود (شکل ۳-۲۰۵).



شکل ۳-۲۰۴ : نمایش نموداری شرایط کاری مختلف پروانه



شکل۳-۲۰۵ :نمودار روش $\mu - \sigma$ برای شرایط کاری سنگین پروانه

در این روش داریم:

$$\mu = n\sqrt{\frac{\rho D^3}{Q}} \qquad \varphi = \mathrm{V_a}\sqrt{\frac{\rho D^3}{\mathrm{Q}}} \qquad \sigma = \frac{\mathrm{TD}}{2\pi \mathrm{Q}}$$

که در آن:

D : قطر پروانه بر حسب متر(m).

Q : گشتاور تحویل شده بر حسب$(kgf.m)$.

T : تراست پروانه بر حسب (kgf).

n : دور پروانه بر حسب دور بر ثانیه (rps).

V_a : سرعت پیشروی بر حسب (m/s).

با توجه به روابط فوق در $V_a = 0$، مقدار $\varphi = 0$ را داریم و می‌توان پروانه را طراحی کرد. اگر بخواهیم از سیستم آحاد انگلیسی استفاده کنیم، روابط مطابق جدول ۳-۴۱ است.

سری‌های کامل نمودارهای این روش در ایران در دسترس نیست.

$$K_Q = 9.5013 \times 10^6 \left(\frac{P_D}{N^3 D^5}\right) \text{ (salt water)}$$

$$B_P = 23.77\sqrt{\frac{\rho K_Q}{J^5}}$$

$$J = \frac{101.33 V_a}{ND} = \frac{101.33}{\delta}$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{K_Q}} = 3.2442 \times 10^{-4}\sqrt{\frac{N^3 D^5}{P_D}} \text{ (salt water)}$$

$$\phi = \frac{J}{\sqrt{K_Q}} = J\mu$$

$$\sigma = \frac{\eta_o}{J} = \frac{\eta_o \mu}{\phi} = \frac{K_T}{2\pi K_Q}$$

where:
P_D is the delivered horsepower in Imperial units
Q is the delivered torque at propeller in (lbf ft)
T is the propeller thrust (lbf)
N is the propeller rotational speed in (rpm)
n is the propeller rotational speed in (rev/s)
D is the propeller diameter in (ft)
V_a is the propeller speed of advance in (knots)
v_a is the propeller speed of advance in (ft/s)
ρ is the mass density of water (1.99 slug/ft^3 sea water; 1.94 slug/ft^3 for fresh water).

جدول ۳-۴۱: آحاد انگلیسی در روش $\mu - \sigma$

فصل دهم: قوانین مؤسسات رده‌بندی دریایی در طراحی پروانه

❖ ملاحظات طراحی غلاف پروانه در استاندارد ABS

استاندارد ABS از دیدگاه سازه‌ای، طراحی غلاف پروانه را بیان داشته است. روابط ارائه شده برای غلاف‌های پروانه با حداکثر قطر کمتر از ۵ متر می‌باشد. برای غلاف‌های با قطر بزرگتر، روابط دیگری حاکم است.

• فشار طراحی غلاف پروانه

فشار طراحی غلاف پروانه که برای طراحی سازه‌ای آن در نظر گرفته می‌شود عبارتست از:

$$p_d = c \cdot p_{d0} \quad [kN/m^2] \qquad p_{d0} = \varepsilon \frac{N}{A_p} \quad [kN/m^2]$$

N : حداکثر قدرت شافت بر حسب KW و A_P : مساحت صفحه پروانه بر حسب مترمربع که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A_p = \pi D^2 / 4$$

D : قطر پروانه بر حسب متر و ε : ضریبی که از رابطه زیر بدست می‌آید:

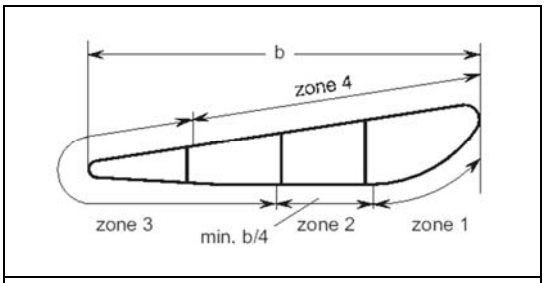
$$\varepsilon = 0{,}21 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{N}{A_p}$$

و حداقل مقدار آن باید ۰/۱ باشد.

C: مطابق شکل ۳-۲۰۶ برابر ۱ در ناحیه ۲

C : برابر ۰/۵ در ناحیه ۱ و ۳

C : برابر ۰/۳۵ در ناحیه ۴



شکل ۳-۲۰۶: تعریف ناحیه‌های مختلف روی غلاف پروانه

• محاسبه ضخامت ورق غلاف پروانه

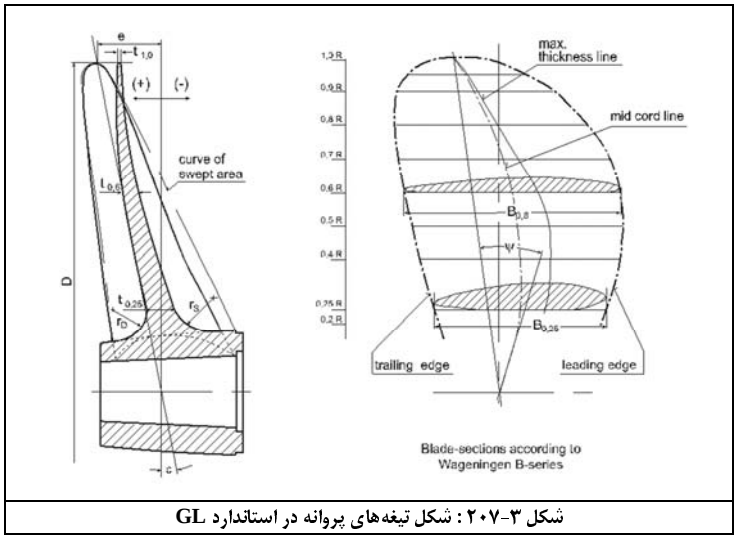
ضخامت ورق غلاف با توجه به نواحی تعریف شده در شکل ۳-۲۰۶ متفاوت است و با توجه به فشار طراحی بدست‌آمده برای هر قسمت از غلاف، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$t = 5 \cdot a \sqrt{p_d} + 1{,}0 \quad [mm]$$

که حداقل مقدار آن باید ۷/۵ میلیمتر باشد. a : فاصله تقویت‌های داخلی غلاف بر حسب متر

❖ محاسبه ضخامت پره پروانه از استاندارد GL

استاندارد در قسمت [$I - part\ 1/chapter\ 2/sec\ 6\ (propeller)$] از دیدگاه سازه‌ای به طراحی پروانه پرداخته و روابطی برای محاسبه ضخامت پره پروانه ارائه کرده است.



شکل ۳-۲۰۷ : شکل تیغه‌های پروانه در استاندارد GL

مطابق شکل ۳-۲۰۷ و با استفاده از روابط زیر، ضخامت پره در شعاع $0.25R$ ($t_{0.25}$) و در شعاع $0.6R$ ($t_{0.6}$) محاسبه می‌شود و ضخامت پره بر حسب میلیمتر نباید از این مقدار کمتر باشد:

$$t = K_o \cdot k \cdot K_1 \cdot C_G \cdot C_{Dyn}$$

$$K_o = 1 + \frac{e \cdot \cos\alpha}{H} + \frac{n_2}{15000}$$

که پارامترهای آن عبارتند از:

e : مقدار زاویه ریک پره مطابق شکل ۳-۲۰۷ و از رابطه: $e \approx R.\tan\varepsilon$

α : زاویه گام در شعاع‌های $0.25R$، $0.35R$ و $0.6R$ بر حسب درجه که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\alpha_{0,25} = \arctan\frac{1.27 \cdot H}{D}$$

$$\alpha_{0,35} = \arctan\frac{0.91 \cdot H}{D}$$

$$\alpha_{0,6} = \arctan\frac{0.53 \cdot H}{D}$$

H : گام قسمت پرفشار پره در شعاع $0.25R$، $0.35R$ و $0.6R$ بر حسب میلیمتر و D : قطر پروانه بر حسب میلیمتر

n_2 : سرعت پروانه (rpm) و k : ضریب شکل پره‌های پروانه که از جدول ۳-۴۲ بدست می‌آید:

Profile shape	Values of k		
	0,25 R	0,35 R	0,6 R
Segmental profiles with circular arced back	73	62	44
Segmental profiles with parabolic back	77	66	47
Blade profiles as for Wageningen B Series propellers	80	66	44

جدول ۳-۴۲: استخراج ضریب K

K_1 : از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K_1 = \sqrt{\frac{P_w \cdot 10^5 \cdot \left(2 \cdot \frac{D}{H_m} \cdot \cos\alpha + \sin\alpha\right)}{n_2 \cdot B \cdot z \cdot C_w \cdot \cos^2\varepsilon}}$$

P_W : توان اسمی موتور اصلی (kw)

H_m : مقدار متوسط گام پروانه در وجه فشاری پره (که در شعاع‌های مختلف متفاوت است) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$H_m = \frac{\Sigma(R \cdot B \cdot H)}{\Sigma(R \cdot B)}$$

B : عرض پهن‌شده مقطع پره در شعاع $0.25R$ ، $0.35R$ و $0.6R$ بر حسب میلیمتر.

z : تعداد پره‌های پروانه

C_W : ضریب مربوط به جنس مواد مطابق جدول ۳-۴۳:

Material	Description [1]	C_w
Cu 1	Cast manganese brass	440
Cu 2	Cast manganese nickel brass	440
Cu 3	Cast nickel aluminium bronze	590
Cu 4	Cast manganese aluminium bronze	630
Fe 1	Unalloyed cast steel	440
Fe 2	Low-alloy cast steel	440
Fe 3	Martensitic cast chrome steel 13/1-6	600
Fe 4	Martensitic cast chrome steel 17/4	600
Fe 5	Ferritic-austenitic cast steel 24/8	600
Fe 6	Austenitic cast steel 18/8-11	500

[1] For the chemical composition of the alloys, see the GL Rules II – Materials and Welding.

جدول ۳-۴۳: ضریب C_W مربوط به جنس

ε : با توجه به شکل بدست می‌آید (بر حسب درجه).

C_G : از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_G = \text{size factor [–]}$$

$$1{,}1 \geq \sqrt{f_1 + \frac{D}{1000}} \geq 0{,}85$$

f_1 : برای پروانه‌های معمولی ۷/۲ و برای پروانه‌های گام متغیر ۶/۲

C_{dyn}: ضریب دینامیکی پروانه از رابطه زیر:

$$C_{Dyn} = \sqrt{\frac{(\sigma_{max}/\sigma_m - 1) + f_3}{0{,}5 + f_3}} \geq 1{,}0$$

برای $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} \rangle 1.5$ و برای خارج از این محدوده برابر ۱ است.

اگر مقدار دقیق $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_m}$ موجود نباشد می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = f_2 \cdot E_T + 1$$

$$E_T = 4{,}3 \cdot 10^{-9} \frac{V_s \cdot n_2 \cdot (1 - w) \cdot D^3}{T}$$

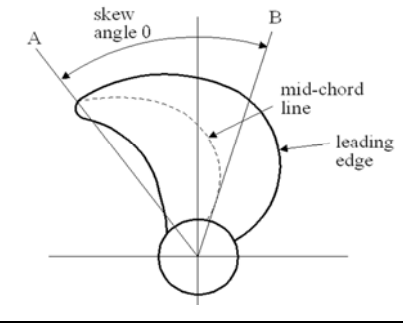
f_2 : برابر ۰/۶ – ۰/۴ برای کشتی‌های تک‌پروانه. مقدار ۰/۴ برای کشتی‌هایی که فاصله لبه بالایی پره پروانه از بدنه زیاد است و فاقد تکیه‌گاه پائینی سکان است و مقدار ۰/۶ برای فواصل کم لبه بالایی پره با بدنه و دارای تکیه‌گاه پائینی سکان و برابر ۰/۲ برای کشتی‌های دو پروانه.

f_3 : برابر ۰/۲ برای مواد مناسب از نظر شرایط ذکر شده در استاندارد.

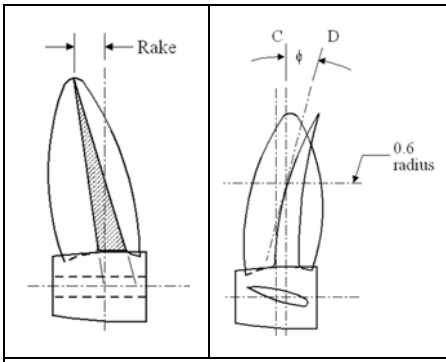
V_S : سرعت کشتی بر حسب گره و w: ضریب ویک و T: نیروی تراست پروانه بر حسب نیوتن.

❖ تعریف زوایای پروانه در استاندارد ABS[1]

مطابق شکل ۳-۲۰۸ و ۲۰۹ داریم:



شکل ۳-۲۰۸ : تعریف زاویه شلاقی پروانه در ABS



شکل ۳-۲۰۹ : تعریف زاویه کجی پروانه در ABS

- **تعریف زاویه شلاقی:**

1.3.2 Highly Skewed Propeller

A *Highly Skewed Propeller* is one whose skew angle is more than 25°.

پروانه‌های high - skew به پروانه‌هایی گفته می‌شود که زاویه شلاقی پره بیش از ۲۵ درجه باشد و می‌تواند تا ۵۰ درجه هم باشد.

- **تعریف زاویه کجی پره[2]**

1.3.3 Propeller Rake

1.3.3(a) Rake. *Rake* is the distance at the blade tip between the generating line and the line perpendicular to the propeller axis that meets the generating line at the propeller axis. See 4-3-3/Figure 2.

1.3.3(b) Rake angle (ϕ). *Rake Angle* of a propeller is the angle measured from the plane perpendicular to shaft centerline to the tangent to the generating line at a specified radius (0.6×radius for the purpose of this section). See 4-3-3/Figure 2.

- **تخمین تراست پروانه:**

استاندارد ABS جدول زیر را برای تخمین تراست قابل تولید پروانه ارائه کرده است:

SI units (N)	*MKS units (kgf)*	*US units (lbf)*
$1762\frac{H}{v}$ or $57.4\times10^6\cdot\frac{H}{PR}$	$132\frac{H}{v}$ or $4.3\times10^6\cdot\frac{H}{PR}$	$295\frac{H}{v}$ or $0.38\times10^6\cdot\frac{H}{PR}$

جدول ۳-۴۴: تخمین تراست

T : تراست پروانه بر حسب $[N\ ,\ Kgf\ ,\ lbf]$

R : دور پروانه(rpm)

P : مقدار گام متوسط پروانه بر حسب $[mm\ ,\ mm\ ,\ in]$

H : توان شافت بر حسب $[KW\ ,\ ps\ ,\ hp]$

v : سرعت شناور بر حسب گره

همچنین استاندارد *ABS* روابطی را برای محاسبه ضخامت پره پروانه‌های گام ثابت و متغیر ارائه کرده است که می‌توان به آدرس داده شده در این استاندارد مراجعه کرد.

1 -ABS: part 4/chapter 3/section 3:propellers

2 – rake

❖ بررسی احتمال کاویتاسیون در استاندارد GL

استاندارد *GL* در قسمتی که آدرس‌دهی شد، روابط و نموداری ارائه کرده است که به کمک آن می‌توان احتمال کاویتاسیون در پروانه را بررسی کرد. عبارت *SIGMAn* به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SIGMA_n = \frac{p_S - p_V}{0{,}5 \cdot \rho \cdot (\pi \cdot D \cdot n_2/60)^2}$$

و ضریب بار تراست نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

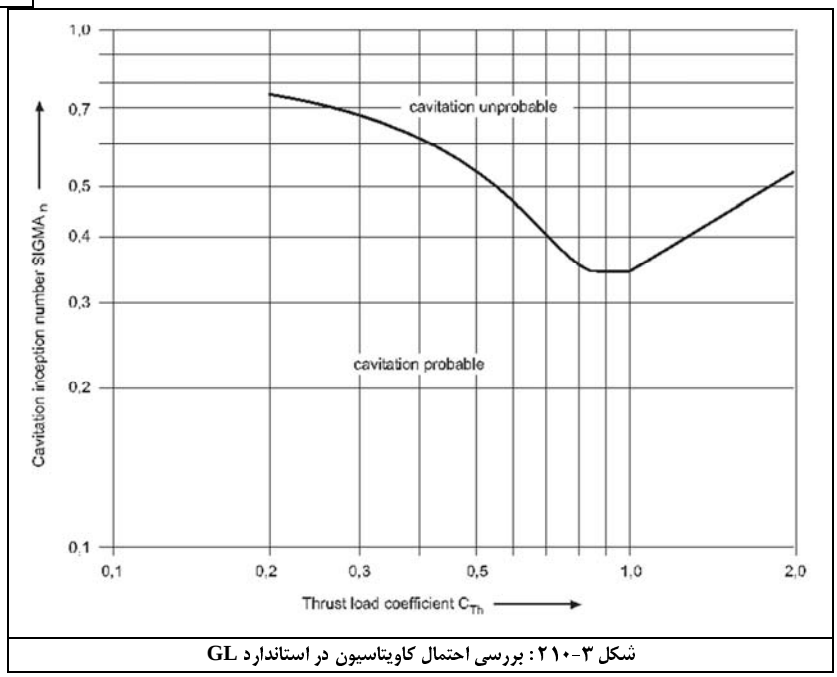
$$C_{Th} = \frac{T}{0{,}5 \cdot \rho \cdot v_A^2 \cdot A_D}$$

بدین ترتیب با توجه به نمودار شکل ۳-۲۱۰ می‌توان احتمال کاویتاسیون در پروانه را بررسی کرد. در محدوده زیر نمودار احتمال وقوع کاویتاسیون وجود دارد و در محدوده بالای نمودار، احتمال کاویتاسیون وجود ندارد. رابطه بین ضریب تراست و ضریب بار تراست را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$C_{Th} = \frac{T}{0.5\rho A.V^2}$$

$$K_t = \frac{T}{\rho.n^2.D^4} \qquad A = \pi D^2/4 \qquad J = \frac{V}{nD}$$

$$\Rightarrow C_{Th} = \frac{8}{\pi}.\frac{K_t}{J^2}$$



شکل ۳-۲۱۰: بررسی احتمال کاویتاسیون در استاندارد GL

امام علی (ع):

پرخوری و همیشه سیر بودن، امراض گوناگون ایجاد می کند.

فصل یازدهم: سایر روش‌های افزایش بازدهی پروانه[1]

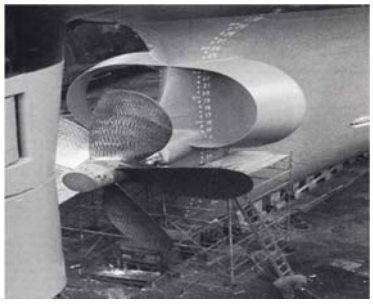
۱) حلقه یکسان‌سازی ویک

حلقه یکسان‌سازی ویک در پشت پروانه در بالای شفت نصب می‌شود (شکل ۳-۲۱۱). قطر این حلقه در حدود نصف قطر پروانه است. حلقه می‌تواند در پشت پاشنه به صورت یک حلقه گرد یا دو نیم حلقه در دو طرف پاشنه نصب شود. مزایای حلقه یکسان‌سازی ویک عبارتست از:

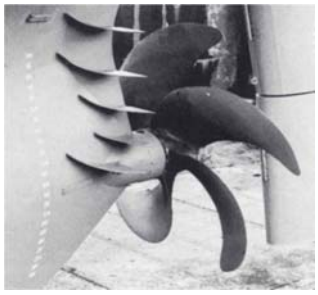
۱- بوسیله ایجاد میدان جریانهای یکنواخت برای پروانه بازدهی را بهبود می‌بخشد.
۲- جدایی جریان را تا حدی کاهش می‌دهد.
۳- مقطع حلقه که به صورت فویل است ایجاد نیروی لیفت و تراست (مولفه افقی لیفت) می‌کند.
۴- کاهش نیروهای غیریکنواخت پروانه و کاویتاسیون ناشی از جریانهای غیر پایدار ورودی به پروانه

۲) تیغه‌های گروتوس[2]

این تیغه‌ها به صورت صفحات دارای انحنا در پشت پروانه نصب می‌شوند (شکل ۳-۲۱۲). وجود این تیغه‌ها باعث بهتر هدایت شدن سیال به سمت پروانه می‌شود.



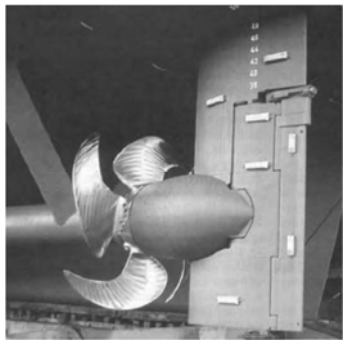
شکل ۳-۲۱۱: حلقه یکسان‌سازی ویک

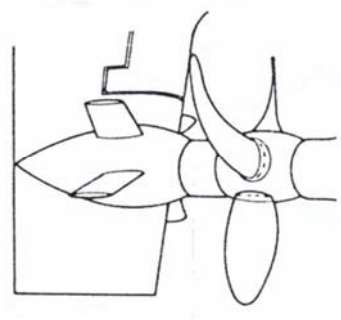


شکل۳-۲۱۲: تیغه‌های گروتوس

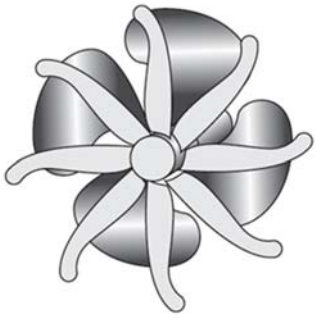
۳) حبابی و بالک‌های پشت پروانه

مطابق شکل ۳-۲۱۳ این روش شامل یک حبابی می‌باشد که معمولا ۴ بالک به صورت + یا × بر روی آن قرار می‌گیرد. قطر حبابی تقریبا ۳۰ تا ۴۰ درصد قطر پروانه می‌باشد که از جدایش جریان در پشت پروانه جلوگیری می‌کند و کاویتاسیون را نیز کاهش می‌دهد. همچنین از مولفه افقی نیروی لیفت بالک‌ها برای ایجاد تراست بیشتر رو به جلو استفاده می‌شود. بدین ترتیب از سرعت سیال خروجی از پروانه می‌توان استفاده بهتری کرد. این بالکها می‌توانند ۶-۵ درصد، مصرف سوخت و ۲۵ درصد از سطح ارتعاشات پروانه را کاهش دهند.





شکل ۳- ۲۱۳: حبابی و بالک‌های پشت پروانه



شکل ۳-۲۱۴ : پروانه گریم ویل

۴) پروانه گریم ویل

در سال ۱۹۸۰ طرحی از سوی پروفسور گریم[3] ارائه شد که در آن یک پروانه بزرگتر، شبیه ملخ هواپیما با قطر حدود ۲۰ درصد بزرگتر از پروانه اصلی، در جلوی پروانه اصلی نصب می‌شد. در واقع پروانه دوم از انرژی میدان ویک پروانه اول استفاده می‌کرد و در واقع باعث افزایش بازدهی می‌شد. این پروانه را «گریم ویل»[4] گویند (شکل ۳-۲۱۴).

۱- منابع: [۲۳ و ۳]
2 Grothuse spoiler
3 - O.Grim
4 - Grim wheel propeller

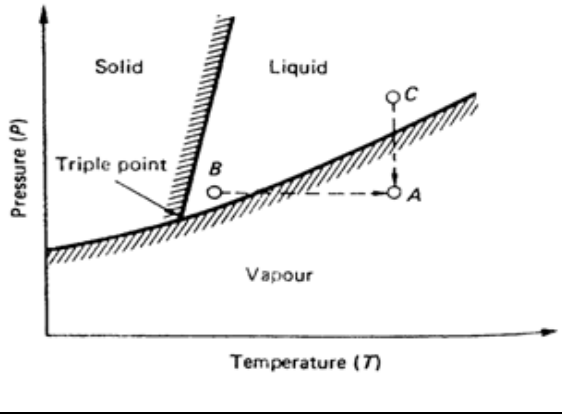
فصل دوازدهم: پدیده کاویتاسیون[1]

کاویتاسیون در واقع نوعی تبخیر شدن سیال است با این تفاوت که در آن بجای افزایش دما از کاهش فشار استفاده می‌شود. در واقع یک سیال به دو روش تبدیل به گاز (بخار) می‌شود:

۱- افزایش دما که همان تبخیر شدن است. در این حالت، فشار ثابت (فشار اتمسفر) است.

۲- کاهش فشار در دمای ثابت که بدان کاویتاسیون گویند.

برای بیان علمی‌تر این موضوع می‌توانیم از نمودار شکل ۳-۲۱۵ که فازهای مختلف آب را نشان می‌دهد استفاده کنیم.



شکل ۳-۲۱۵ : نمایش فازهای مختلف آب

با افزایش دما در فشار ثابت، حالت سیال از B به A تبدیل می‌شود یعنی از حالت سیال به بخار که همان تبخیر است. اگر دما ثابت باشد و فشار کاهش یابد، باز هم سیال می‌تواند از فاز سیال (C) به بخار (A) تبدیل شود که همان کاویتاسیون است. بروز پدیده کاویتاسیون در پروانه کشتی‌ها رایج است چراکه در قسمت کم‌فشار پره پروانه، حباب ایجاد می‌گردد که باعث کاهش بازدهی می‌شود. اگر حباب‌ها به مرحله ترکیدن یا متلاشی شدن برسد، اثرات نامطلوبی از نظر ایجاد ارتعاش و خوردگی مکانیکی سطح پره و سروصدای پروانه دارد.

❖ تشکیل حباب

ابعاد حباب تشکیل شده از رابطه مقابل بدست می‌آید: $P_V - P_1 = \frac{2S}{R}$

که P_V فشار بخار سیال، P_1 فشار سیال و S تنش سطحی سیال و R شعاع حباب ایجاد شده است. ملاحظه می‌شود که هر چه اختلاف فشار بیشتر باشد، شعاع حباب کوچکتر می‌شود.

❖ متلاشی شدن حباب

حباب در محل کم‌فشار ایجاد می‌شود و به مرور که به ناحیه پرفشار حرکت می‌کند، شعاع آن آنقدر کاهش پیدا می‌کند که فشار داخلی حباب به حد بحرانی رسیده و متلاشی می‌شود. ترکیدن حباب یک ضربه فشاری را ایجاد می‌کند که میزان بزرگی آن به شعاع حباب بستگی دارد. این وضعیت را می‌توان در شکل ۳-۲۱۶ ملاحظه کرد. شوک ناشی از ترکیدن حباب می‌تواند با سرعت m/s ۱۰۰۰ منتشر شود که اگر این شوک در نزدیکی پره پروانه باشد، می‌تواند به شدت باعث خوردگی سطح پره شود. در کشتی‌های تندرو که دارای پروانه‌های سوپرکاویتاسیون هستند، بدلیل سرعت بسیار بالای شناور، حباب در فاصله دور از پروانه می‌ترکد و لذا اثر کمی بر خوردگی پروانه دارد. برای بررسی تغییرات شعاع حباب تا لحظه ترکیدن آن می‌توان از روابط زیر استفاده کرد. فرض می‌کنیم شعاع حباب در زمان $t = o$ برابر R_o باشد. با گذشت زمان، تغییرات شعاع حباب از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2R}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{1}{QR}(P_v - P_O)$$

با انتگرال‌گیری از معادله بالا و فرض اینکه P_o و P_V ثابت هستند داریم:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{2}{3}\frac{(P_0 - P_v)}{Q}\left(\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 - 1\right)$$

1 - cavitation

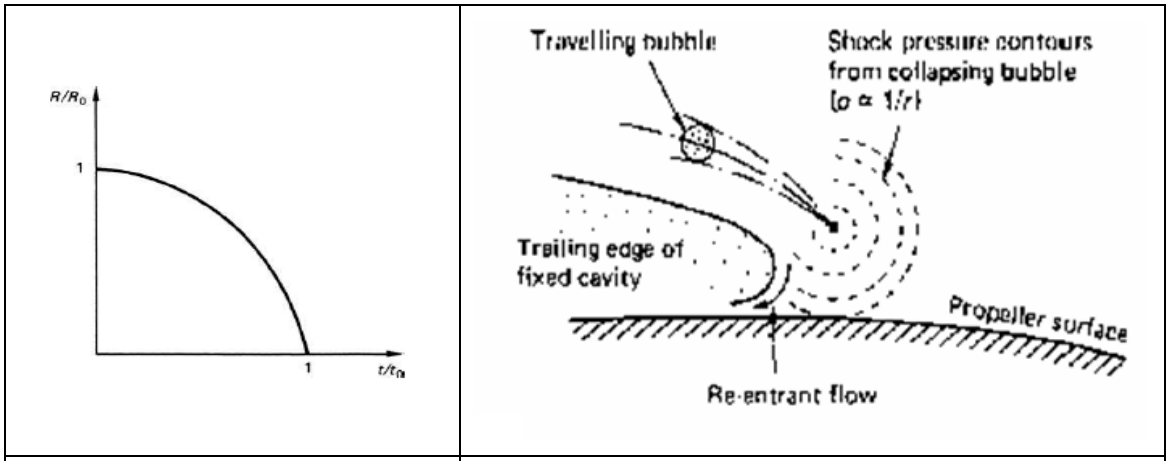
با انتگرال‌گیری عددی از رابطه بالا، زمان متلاشی‌شدن حباب از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$t_0 = 0.91468 R_0 \left(\frac{Q}{P_0 - P_v} \right)^{1/2}$$

رابطه بین شعاع حباب و زمان به صورت بی‌بعد از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{t}{t_0} = 1.34 \int_{R/R_0}^{1} \frac{dx}{\left(1/x^2 - 1 \right)^{1/2}}$$

بنابراین مطابق شکل ۳-۲۱۰، شعاع حباب آنقدر کوچک می‌شود تا می‌ترکد.

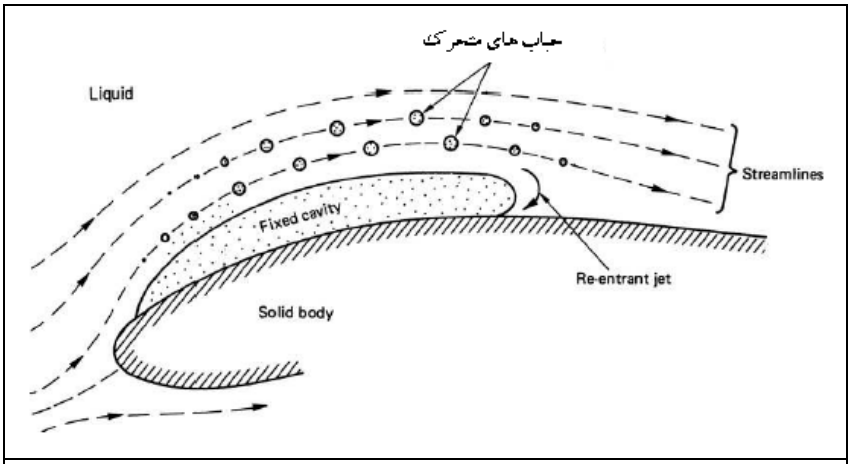


شکل ۳-۲۱۶ : پدیده ترکیدن حباب پس از رسیدن به شعاع بحرانی حباب

شکل ۳-۲۱۷ : تغییرات شعاع حباب نسبت به زمان

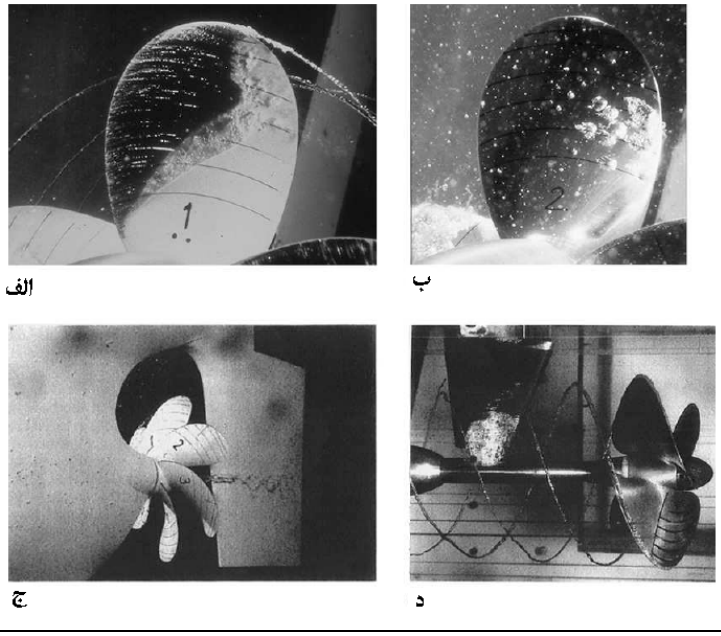
❖ انواع کاویتاسیون

در یک دسته‌بندی می‌توان کاویتاسیون را به دو دسته تقسیم کرد (مطابق شکل ۳-۲۱۸).



شکل ۳-۲۱۸ : شمای کاویتاسیون ثابت و متحرک

۱- **کاویتاسیون ثابت:** در این کاویتاسیون، فاز بخار به صورت لایه‌ای چسبیده به سطح باقی می‌ماند و ظاهری شیشه‌ای و یکنواخت دارد (شکل ۳-۲۱۹-الف).



شکل ۳-۲۱۹: نمایش انواع کاویتاسیون

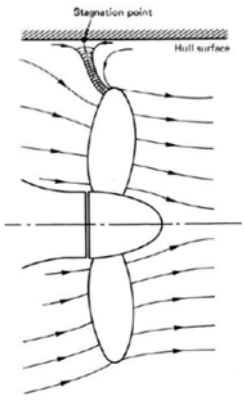
۱- **کاویتاسیون متحرک:** در این کاویتاسیون، ذرات حباب یا گاز در اطراف جسم به صورت غوطه‌ور حرکت می‌کنند که به صورت ردیف‌هایی از حباب هستند (شکل ۳-۲۱۹-ب).

در یک دسته‌بندی دیگر، کاویتاسیون را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- **کاویتاسیون ناشی از توپی پروانه:** این نوع کاویتاسیون اغلب در توپی پروانه شبیه به رشته‌هایی از طناب بوجود می‌آید. این کاویتاسیون می‌تواند اثرات مخربی روی سکان داشته باشد (شکل ۳-۲۱۹-ج).

۲- **کاویتاسیون ناشی از ورتکس نوک پره**[1] **:** در این نوع کاویتاسیون، حباب‌ها به صورت رشته‌هایی متصل به نوک پره هستند (شکل ۳-۲۱۹-د) هر چه ورتکس قوی‌تر باشد یا پره بار بیشتری را تحمل کند یا عدد کاویتاسیون کاهش یابد، ورتکس به سمت نوک پره‌ها حرکت می‌کند.

۳- **کاویتاسیون رگه‌ای**[2] **(*PHV*) :** این کاویتاسیون مطابق شکل ۳-۲۲۰، به صورت رگه‌ای بین نوک پره و بدنه شناور ایجاد می‌شود و یک شکل قوسی و کمانی دارد. آزمایشات انجام شده نشان داده است که این نوع کاویتاسیون، اغلب در کشتی‌هایی دیده می‌شود که فاصله کمی بین نوک پره و بدنه وجود دارد. همچنین ضریب پیشروی پروانه (J) نیز در آن مؤثر می‌باشد که هر چه J کمتر باشد، این کاویتاسیون بیشتر و شدیدتر اتفاق می‌افتد $(J=V_A/(n.D))$.



شکل ۳-۲۲۰: کاویتاسیون رگه‌ای بین پره پروانه و بدنه شناور

❖ عدد کاویتاسیون

عدد کاویتاسیون معیاری برای سنجش میزان کاویتاسیون است. هر چه این عدد کمتر باشد، احتمال و شدت کاویتاسیون بیشتر است. عدد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{عدد } \textit{کاویتاسیون} = \frac{\text{هد } \textit{استاتیکی}}{\text{هد } \textit{دینامیکی}}$$

که هد استاتیکی می‌تواند میزان غوطه‌وری مرکز شافت (فاصله از سطح آب) یا موقعیت لحظه‌ای پره‌های پروانه از سطح آب باشد. هد دینامیکی نیز وابسته به سرعت (محوری و دورانی) پروانه است لذا داریم:

1 - tip vortex
2 - Propulsor Hull Vortex

$$\sigma_V = \frac{P_o - P_V}{\frac{1}{2}\rho V_R^2}$$

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (0.7\pi n D)^2}$$

$$V_A = V_S(1-w)$$

که عبارت $0.7\pi nD$، سرعت دورانی در شعاع $0.7R$ است. در برخی موارد، سرعت دورانی را در نظر نمی‌گیرند و بجای V_R مقدار V_A را جاگذاری می‌کنند.

که h ارتفاع مرکز شافت از سطح آب است.

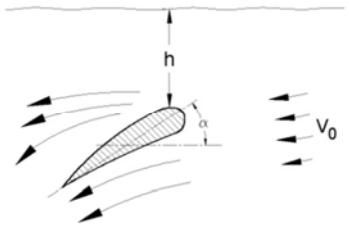
$$P_o = \rho g h + P_{atm}$$

$$P_{atm} = 10^5\left(\frac{N}{m^2}\right) = 10^5\ Pa$$

P_V نیز فشار بخار اشباع است که از جدول۳- ۴۵ بدست می‌آید.

دما	0	10	15	20	25	30
Pv(KN/m2)	0.608	1.226	1.707	2.354	3.169	4.248
Pv(Pa)	608	1226	1707	2354	3169	4248

جدول۳-۴۵: فشار بخار اشباع آب در دماهای مختلف



شکل ۳-۲۲۱ : اعمال قانون برنولی روی یک پره پروانه

رابطه دیگری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \frac{P_o - P}{\frac{1}{2}\rho V_R^2}$$

که همانند رابطه قبل است با این تفاوت که بجای P_V مقدار P را قرار می‌دهیم. P مقدار فشار روی سطح پره است. اگر $\sigma \le \sigma_V$ باشد، کاویتاسیون نداریم و اگر $\sigma \rangle \sigma_V$ باشد، کاویتاسیون خواهیم داشت.

شرط کاویتاسیون را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد. مطابق شکل ۳-۲۲۱ فرض کنید مقطعی از پره پروانه (در شعاع $0.7R$) در فاصله h از سطح آب قرار دارد. طبق قانون برنولی داریم:

$$P_o + \frac{1}{2}\rho V_S^2 = P + \frac{1}{2}\rho V_A^2$$

$$P = P_o + \frac{1}{2}\rho\left(V_S^2 - V_A^2\right)$$

اگر داشته باشیم: $P \le P_V$ آنگاه کاویتاسیون داریم. از رابطه فوق می‌توان نقش عدد کاویتاسیون را نیز به این صورت ملاحظه کرد:

$$\frac{P_o - P_V}{\frac{1}{2}\rho V_A^2} \le \left(\frac{V_A}{V_S}\right)^2 - 1$$

در این صورت کاویتاسیون در پروانه اتفاق می‌افتد. همچنین برای بررسی کاویتاسیون می‌توانیم از جدول زیر استفاده کنیم:

عدد کاویتاسیون	شرایط کاویتاسیون
$\sigma_V \rangle 2$	کاویتاسیون وجود ندارد.
$1 \langle \sigma_V \langle 2$	احتمال شروع کاویتاسیون وجود دارد.
$0.25 \langle \sigma_V \langle 1$	کاویتاسیون در بخشی از پره وجود دارد.
$\sigma_V \langle 0.25$	حالت سوپرکاویتاسیون وجود دارد.

جدول ۳-۴۶: شرایط مربوط به عدد کاویتاسیون

ملاحظه می‌شود که هر چه عدد کاویتاسیون کمتر شود، کاویتاسیون شدیدتر می‌شود. بنابراین با توجه به رابطه σ_V می‌توان برای افزایش عدد کاویتاسیون و جلوگیری از کاویتاسیون اقدامات زیر را انجام داد:

۱- افزایش عمق غوطه‌وری پروانه که باعث افزایش h و P_o می‌شود و صورت کسر افزایش می‌یابد. این کار با افزایش شیب کشتی به پاشنه

انجام می‌شود. در برخی شناورهای تندرو، شافت به صورت زاویه‌دار نصب می‌شود تا عمق غوطه‌وری پروانه افزایش و کاویتاسیون کاهش یابد. همچنین در این شرایط، قطر پروانه بزرگتری نیز می‌توان در نظر گرفت که آن نیز باعث کاهش کاویتاسیون می‌گردد.

۲- کاهش سرعت دورانی پروانه که باعث کوچک شدن مخرج کسر و در نتیجه بزرگتر شدن عدد کاویتاسیون می‌شود.

انجام این دو عمل در هر شرایطی ممکن است امکان‌پذیر نباشد لذا اقدامات زیر در مراحل طراحی پروانه برای کاهش کاویتاسیون می‌توان در نظر گرفت:

۱- افزایش نسبت سطح گسترش‌یافته $\left(A_E/A_o\right)$

۲- افزایش تعداد پره‌های پروانه

۳- افزایش زاویه شلاقی

۴- کاهش نسبت گام $\left(P/D\right)$

۵- افزایش زاویه کجی[1]

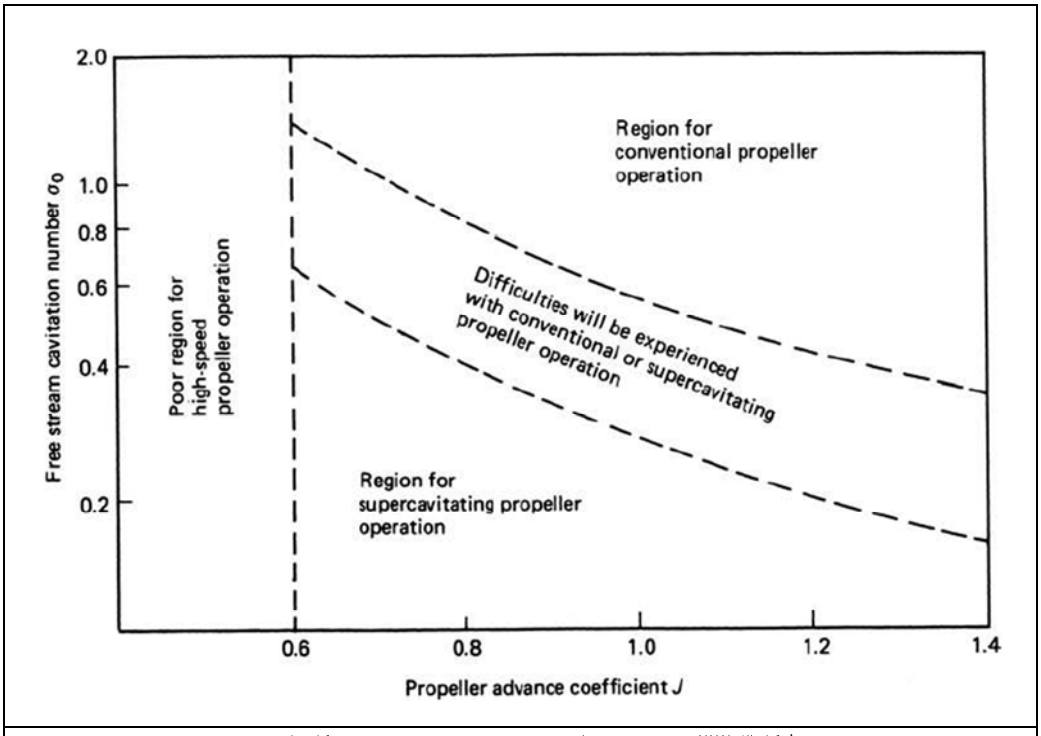
۶- کاهش زبری سطح پروانه

۷- افزایش عمق غوطه‌وری پروانه (به همین دلیل کاویتاسیون در پره وقتی به نزدیکی سطح آب می‌رسد بیشتر است).

۸- کاهش سرعت دورانی پروانه

۹- افزایش قطر پروانه

شکل ۳-۲۲۲ نشان‌دهنده جدولی برای تعیین نوع پروانه است. این نمودار بر اساس ضریب پیشروی و عدد کاویتاسیون نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۲۲ : تعیین نوع پروانه بر حسب ضریب پیشروی و عدد کاویتاسیون

1 - rake

❖ سایر روشهای بررسی کاویتاسیون

روشهای دیگری نیز برای بررسی وقوع کاویتاسیون وجود دارد که به استحضار می‌رسد:

۱) روش وگنینگن[1]: در این روش به تأثیر نسبت سطح گسترش‌یافته تأکید شده است. برای جلوگیری از کاویتاسیون باید A_E/A_o از یک حد مشخص، مطابق رابطه زیر، بزرگتر باشد.

$$A_E / A_0 \geq \frac{0.692T}{D^2(P_0 - P_v)^{0.75}V^{0.5}{}_A(1.067 - 0.229P/D)}$$

۲) روش کلر[2]: این روش نیز بر نسبت سطح گسترش‌یافته برای جلوگیری از کاویتاسیون تأکید می‌کند که مقدار K عددی بین صفر تا ۰/۲ است که برای انواع شناورها تغییر می‌کند.

$$A_E / A_0 \geq \frac{(1.3+0.3Z)T}{D^2(P_0 - P_v)} + k$$

۳) روش بوریل[3]: برای پروانه‌های گام ثابت می‌توان از این روش استفاده کرد. برای این روش از عدد کاویتاسیون متوسط در $0.7R$ و ضریب تراست τ_C مطابق شکل ۳-۲۲۳ می‌توان استفاده کرد.

$$\tau_c = \frac{T}{q_{0.7R}^2 A_p}$$

$$q_{0.7R} = \tfrac{1}{2}\rho V_R^2$$

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (0.7\pi nD)^2}$$

بوریل، برای سطح تصویر شده رابطه زیر را بیان کرده است:

$$A_P = \frac{T}{\frac{1}{2}\tau_c \varrho [V_A^2 \ (0.7\pi nD)^2]}$$

برای محاسبه سطح گسترش‌یافته نیز رابطه زیر را می‌توان بیان کرد:

$$A_E = \frac{A_P}{(1.067 \ \ 0.229P/D)}$$

بوریل رابطه دیگری برای نسبت سطح گسترش‌یافته به صورت زیر ارائه کرده است:

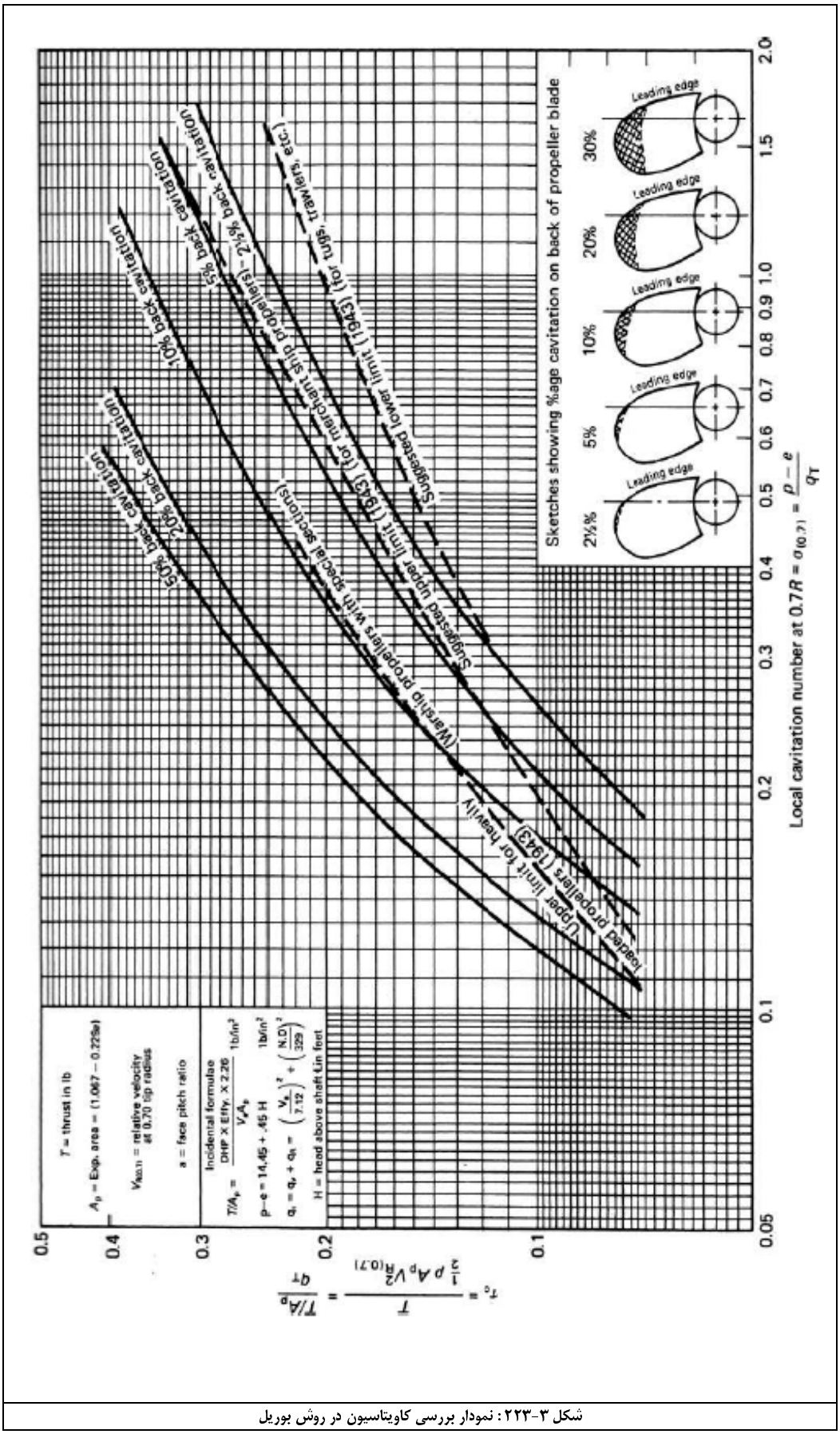
$$\frac{A_E}{A_O} = \frac{(1.3 \ \ 0.3Z)T}{(p_0 \ \ p_v)D^2} \ \ K$$

که P_V فشار بخار، T مقدار تراست، Z تعداد پره، D قطر پروانه و K برای کشتی‌های تک پروانه و دو پروانه تندرو برابر $K = 0$ و برای کشتی‌های دو پروانه کندرو برابر $K = 0.1$ است.

1 - wageningen

2 - keller

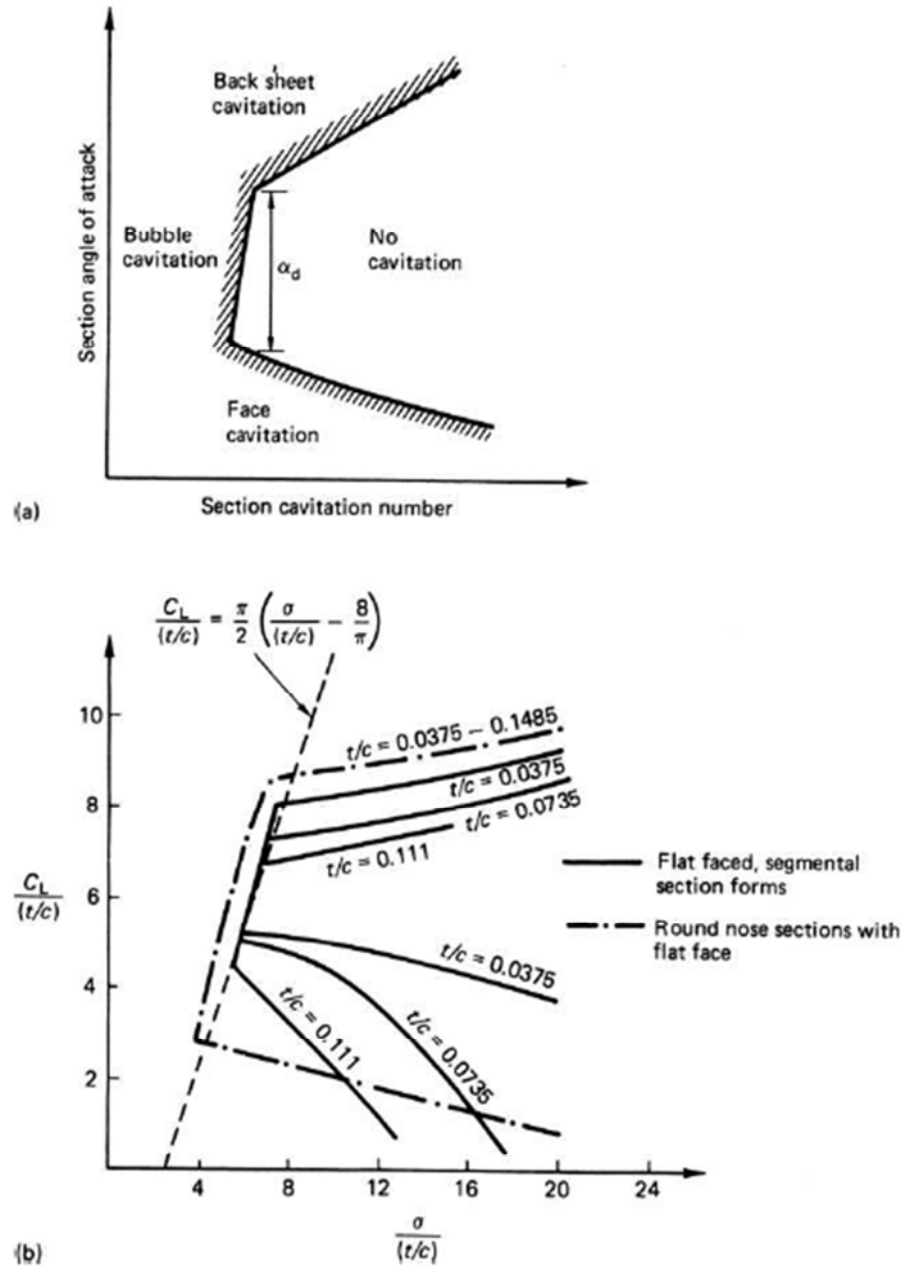
3 - Burill



شکل ۳-۲۲۳ : نمودار بررسی کاویتاسیون در روش بوریل

۴) ارتباط عدد کاویتاسیون با زاویه گام پروانه

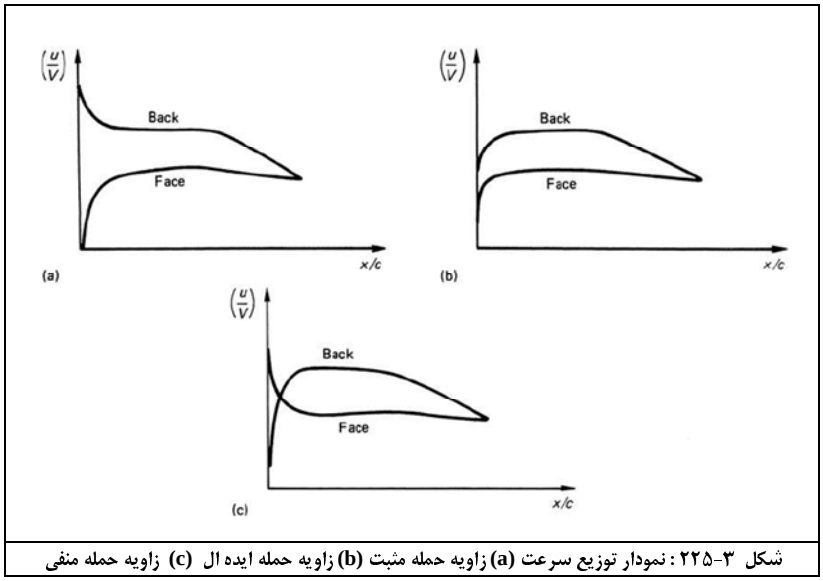
مطابق شکل ۳-۲۲۴ ارتباط بین عدد کاویتاسیون و زاویه گام پره‌های پروانه (معادل با زاویه حمله یک فویل) نشان داده شده است. حالت (الف) نمودار عمومی آن را نشان می‌دهد که برای شکل‌های مختلف مقاطع پره متفاوت است. در حالت (ب) این نمودار برای چند نوع فویل مقطع پروانه ترسیم شده است.



شکل ۳-۲۲۴: ارتباط عدد کاویتاسیون با زاویه گام پره‌های پروانه

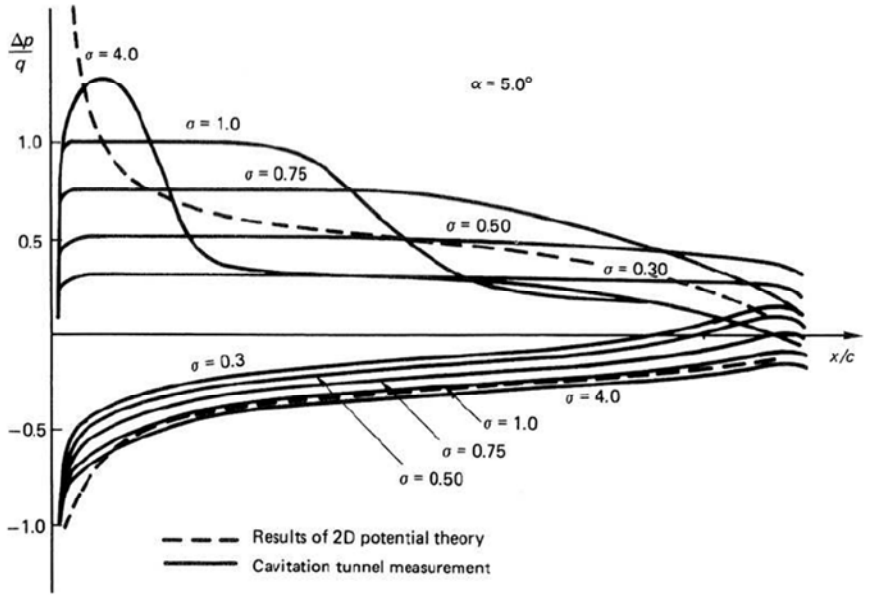
❖ تأثیر کاویتاسیون بر نیروی لیفت فویل

کاویتاسیون توزیع فشار و سرعت روی فویل را تغییر می‌دهد و از این‌رو باعث تغییر نیروی لیفت فویل می‌شود. در حالت عادی توزیع سرعت روی یک فویل با توجه به زاویه حمله آن مطابق شکل ۳-۲۲۵ می‌باشد.

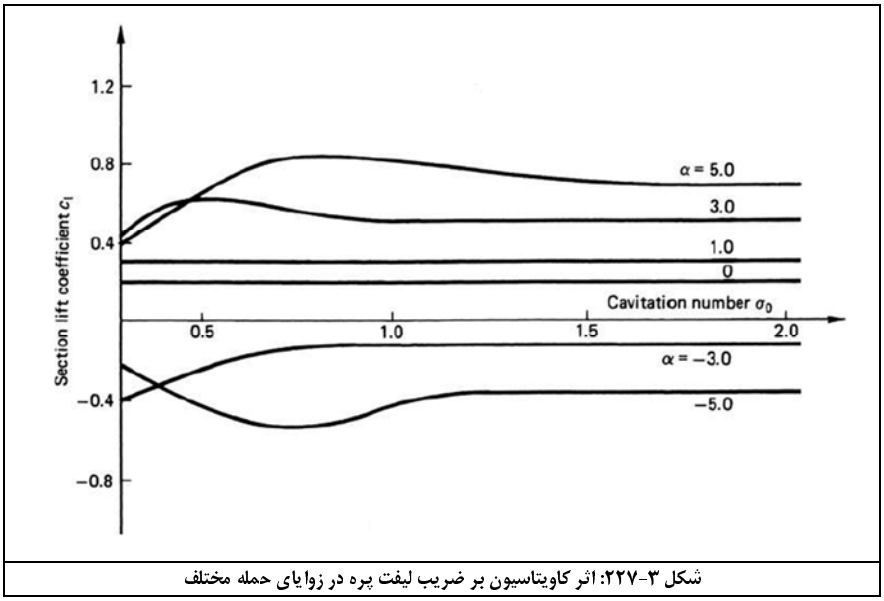


شکل ۳-۲۲۵ : نمودار توزیع سرعت (a) زاویه حمله مثبت (b) زاویه حمله ایده ال (c) زاویه حمله منفی

هنگامی‌که کاویتاسیون روی سطح پره اتفاق می‌افتد، توزیع سرعت و فشار به هم می‌خورد. شکل ۳-۲۲۶ نمونه‌ای از نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در آن یک فویل با ضخامت و نسبت کمبر به طول کورد *0.0294* و *0.022* در زاویه حمله ۵ درجه قرار گرفته است و عدد رینولدز در این آزمایشات 3×10^6 تا 4×10^6 است. اعداد کاویتاسیون روی نمودارها نیز بین ۰/۳ تا ۴ است. شکل ۳-۲۲۷ نیز اثر کاویتاسیون بر ضریب لیفت را در زوایای حمله مختلف ارائه کرده است.



شکل ۳-۲۲۶: اثر کاویتاسیون بر ضریب لیفت پره در یک زاویه حمله معین (۵ درجه)



شکل ۳-۲۲۷: اثر کاویتاسیون بر ضریب لیفت پره در زوایای حمله مختلف

❖ آزمایش کاویتاسیون پروانه و مدلسازی پروانه در تونل کاویتاسیون

می‌دانیم که آزمایش پروانه در تونل کاویتاسیون انجام می‌شود. برای این بررسی باید شروط زیر برقرار باشد:

۱- تشابه هندسی مدل و پروانه اصلی

۲- تشابه سینماتیکی پروانه مدل و اصلی که از طریق برابری ضریب پیشروی آنها حاصل می‌شود:

$$J_S = J_m \qquad \left(\frac{V_A}{n.D}\right)_S = \left(\frac{V_A}{n.D}\right)_m$$

۳- تشابه دینامیکی: عدد رینولدز پروانه مدل و اصلی باید در حین آزمایش با هم برابر باشند. اگر در تونل کاویتاسیون، سرعت جریان به حد کافی بالا باشد، می‌توان به اعداد رینولدز بالا رسید. بنابراین سرعت گردش آب داخل تونل کاویتاسیون تابعی از برابری عدد رینولدز است که شرط اغتشاش جریان در مدل و نمونه واقعی را فراهم می‌کند:

$$(R_n)_S = (R_n)_m$$

$$\left(\frac{V.D}{\nu}\right)_S = \left(\frac{V.D}{\nu}\right)_m \rightarrow \qquad \frac{D_S}{D_m} = \lambda = \frac{V_m}{V_S} \quad \rightarrow \qquad V_m = \lambda.V_S$$

ملاحظه می‌شود که بدلیل سرعت بسیار زیاد، تامین این شرط امکان‌پذیر نمی‌باشد و برای اغتشاش جریان از روش‌های دیگری استفاده می‌شود.

۴- تشابه کاویتاسیون: عدد کاویتاسیون پروانه مدل و اصلی باید با هم برابر باشد. به همین دلیل فشار داخل تونل کاویتاسیون به اندازه‌ای انتخاب می‌شود که عدد کاویتاسیون هر دو برابر باشند. در برخی مواقع نیز از پمپ خلاء استفاده می‌شود.

$$(\sigma_V)_S = (\sigma_V)_m$$

۵- تشابه حباب‌ها: شکل و نوع حبابهای تشکیل‌شده در هر دو باید یکسان باشد لذا باید رابطه زیر برقرار باشد:

که در آن T_e تنش سطحی است.

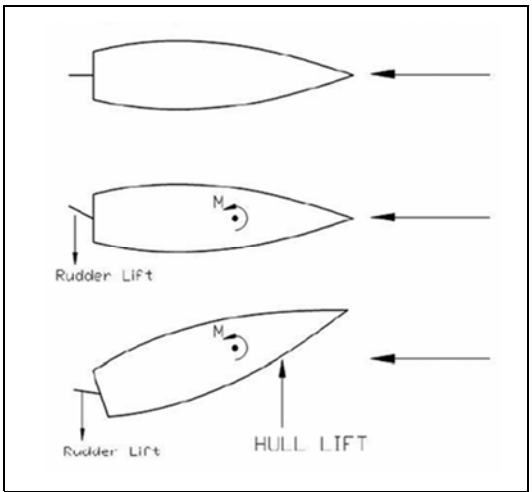
$$\left(\frac{\rho \cdot V^2 \cdot l}{T_e}\right)_m = \left(\frac{\rho \cdot V^2 \cdot l}{T_e}\right)_s$$

هرگاه دیدی در اوج هستی به حباب فکر کن !!!!!

بخش هفتم :
طراحی سکان

فصل اول: آشنایی با سکان

سکان وسیله‌ای برای تغییر مسیر و مانور کشتی در سطح آب است که اولین بار توسط ایرانیان ابداع شد. تا قبل از ابداع سکان برای تغییر مسیر کشتی از پارو زدن در یک سمت کشتی استفاده می‌شد تا اینکه سکان توسط ایرانیان در عصر هخامنشی ابداع شد. آنها برای اولین بار از یک صفحه تخت بزرگ در انتهای شناور برای تغییر مسیر استفاده کردند. تغییر زاویه آن با نیروی دست انجام می‌شد. مطابق شکل ۳-۲۲۸ سکان نیروی عرضی لازم برای چرخیدن کشتی حول نقطه چرخش[1] را فراهم می‌کند. بدین ترتیب وقتی سکان به سمت چپ می‌چرخد، کشتی هم به سمت چپ گردش می‌کند و همچنین بالعکس. معیار کارآیی سکان معمولاً با قطر دایره چرخش بررسی می‌شود. اگر کشتی با حداکثر سرعت، زاویه سکان را به حداکثر مقدار در یک طرف قرار دهد، کشتی یک مسیر دایره‌ای را طی می‌کند که قطر این دایره حدود چهار برابر طول کشتی است ($D = 4L$). مساحت و مشخصات سکان باید به حدی باشد که قطر دایره چرخش از این حد بزرگتر نشود. محل نقطه چرخش نیز حدود یک سوم تا یک چهارم طول عقب‌تر از قسمت سینه کشتی است. حداکثر زاویه چرخش سکان به هر طرف نیز معمولاً کمتر از ۲۵ درجه است. در استانداردهای دریایی *ABS* , *DNV* , *BV* مطالب جامعی در مورد طراحی سکان ارائه شده است.



شکل ۳-۲۲۸ : نحوه تأثیر سکان بر چرخش کشتی

❖ انواع سکان

سکان‌ها دارای انواع مختلفی هستند که مهمترین آنها مطابق شکل ۳-۲۲۹ عبارتند از:

۱ - سکان ساده [2]: دراین نوع سکان،کل سطح سکان چرخیده و در ایجاد نیروی کنترلی مشارکت می‌کند و رایج ترین نوع سکان می‌باشد که دارای نگهدارنده پائینی[3] می‌باشد. نگهدارنده پائینی سکان باید عرض قابل توجهی داشته باشد تا بتواند نیروهای افقی را تحمل کند. از آنجا که مرکز اثر نیروهای فویل سکان تقریبا همان محل قرارگیری محور سکان[4] می‌باشد به این نوع سکان، سکان بالانس شده[5] نیز می‌گویند. جدایش جریان در نگهدارنده پائینی سکان، مقاومت را افزایش می‌دهد و غیریکنواختی میدان ویک و ارتعاشات القایی پروانه را افزایش می‌دهد. بنابراین کشتی‌های تک پروانه‌ای پیشرفته معمولاً به انواع دیگر سکان مجهز می‌شوند. اما این نوع سکان به دلیل کم هزینه بودن، هنوز هم برای شناورهای کوچک و برخی کشتی‌های ماهیگیری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- سکان آویخته[6] : این نوع سکان همان سکان ساده بالانس شده است با این تفاوت که دارای نگهدارنده پائینی نمی‌باشد و عمدتاً درشناورهای فری[7] و کشتی‌های *Ro-Ro* بکار می‌رود.

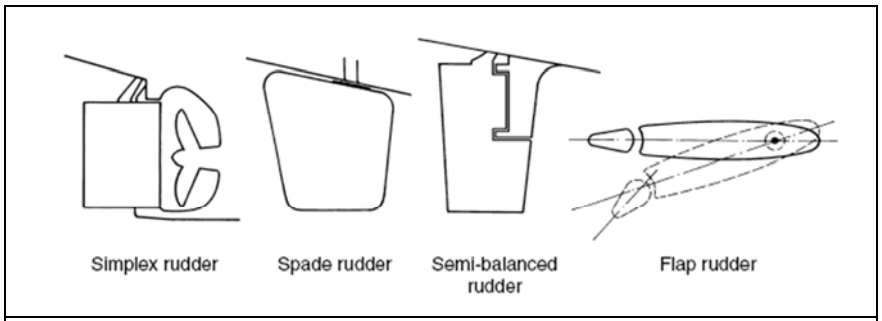
۳- سکان آویخته نیمه بالانس[8] : به سکانی گفته می‌شود که دارای یک تکیه‌گاه شیپوری است. به همین دلیل برخی اوقات به آن سکان شیپوری[9]

1 - turning point
2 Simplex Rudder
3 Rudder Heel
4 Rudder Stock
5 Simple Balanced Rudder
6 Spade Rudder
7 Ferry
8 Semi-Balanced Rudder
9 Horn Rudder

نیز گفته می‌شود. برای دایره‌های چرخش یکنواخت، سکان آویخته نیمه بالانس تنها نصف نیروی عرضی را نسبت به یک سکان آویخته با مساحت یکسان تولید می‌کند. دلایل کاهش نیروی عرضی یا لیفت این نوع سکان عبارتند از:

- وقتی سکان به شدت زاویه می‌گیرد، فضای خالی افقی قابل توجهی بین سکان و نگهدارنده شیپوری بوجود می‌آید. برای حل این مشکل بعضاً صفحات افقی به نگهدارنده شیپوری در امتداد فضای خالی متصل می‌گردند (عملکرد قیچی‌وار سکان[1]).
- زاویه حمله نامطلوب برای نگهدارنده شیپوری: نسبت نیروی درگ به لیفت سکان درحدود دو مرتبه درمقایسه با سکان‌های آویخته بیشتر است.

۴- سکان فلپ[2]: این نوع سکان دارای یک لبه متحرک است که با سیستم هیدرولیکی یا مکانیکی تحریک می‌گردد؛ لذا یک زاویه فلپ متغیر به صورت تابعی از زاویه سکان ایجاد می‌کند. این سیستم مانند یک بال هواپیما دارای لبه متحرک کار می‌کند و در شناورهایی مثل کانتینربرها، کشتی‌های باربری، فله‌برها، نفت‌کش‌ها، شناورهای تفریحی و نظامی به کار می‌رود. مقطع این سکان‌ها اغلب به صورت یک هیدروفویل استاندارد از سری *NACA* یا پروفیل‌های تیغه‌ای می‌باشد. در این نوع سکان‌ها حداکثر زاویه گردش در سرعت عملیاتی شناور در هر طرف ۲۵ درجه است. سکان‌های فلپ همچنین حداکثر نیروی لیفتی درحدود ۷۰-۶۰ درصد بیشتردر قیاس با یک سکان معمولی با مساحت و شکل یکسان تولید می‌کند.



شکل ۳-۲۲۹ : انواع سکان‌های رایج در کشتی‌ها

❖ مراحل طراحی سکان

در مطالب بعدی، روابط و ملاحظات مورد نیاز طراحی سکان ارائه می‌گردند. برای هدفمند شدن مطالعه این مطالب، فرآیند کلی طراحی سکان ذکر می‌گردد:

۱- مشخص بودن مشخصات فنی عمومی کشتی مانند نوع، طول، تناژ، آبخور و غیره

۲- تعیین محل سکان در قسمت پاشنه

۳- تعیین مساحت و ابعاد سکان: برای مساحت سکان روابطی ارائه می‌گردد که البته با توجه به ابعاد قسمت پاشنه کشتی باید تعیین گردد. هرچه فضای قسمت پاشنه بازتر باشد، مساحت بزرگتری از سکان می‌توان در نظر گرفت. در این قسمت برای تأمین مساحت، ابعاد سکان نیز مشخص می‌گردد.

۴- تعیین تعداد سکان: اگر مساحت مورد نیاز سکان که از روابط خاصی بدست می‌آید را بدلیل محدودیت‌های پاشنه نتوان در یک سکان در نظر گرفت، تعداد بیشتری سکان در نظر گرفته می‌شود که آن مساحت را تأمین کند. تعداد سکان کشتی می‌تواند ۲ یا ۳ سکان هم باشد کشتی‌های دو پروانه، اغلب دارای دو سکان هستند.

۵- تعیین نوع سکان: مثلاً سکان ساده یا آویخته که انواع آن در مطالب قبل بیان شد.

۶- تعیین شکل مقطع سکان: مقطع سکان می‌تواند به صورت فویل یا یک صفحه تخت ساده باشد. در کشتی‌های تجاری معمولاً مقطع سکان به صورت فویل است. نوع فویل حتماً باید متقارن باشد چراکه نیروی عرضی مورد نیاز به چپ یا راست کشتی برابر است.

۷- تعیین نیروی عرضی سکان: نیروی عرضی که سکان می‌تواند تأمین کند، عامل اصلی کارآیی سکان است. پس از تعیین مساحت و مقطع فویل سکان می‌توان نیروی عرضی آن را تعیین کرد.

1 Rudder Scissors
2 Flap Rudder

فصل دوم: تعیین مساحت و ابعاد سکان

❖ تعیین مساحت سکان

روابطی که در ذیل ارائه می‌گردد حداقل مساحت مورد نیاز سکان را تعیین می‌کند. این مساحت می‌تواند با یک یا چند سکان فراهم شود.

۱- پیشنهاد استاندارد دریایی *DNV*:

$$A \geq \frac{T \times LBP}{100}\left[1+25\left(\frac{B}{LBP}\right)^2\right]$$

۲- رابطه تجربی محدوده مساحت:

$$\frac{0.023}{\left(\frac{L_w}{C_B \times B}-6.2\right)^{\frac{1}{3}}} < \frac{A}{L_w \times T} < \frac{0.030}{\left(\frac{L_w}{C_B \times B}-7.2\right)^{\frac{1}{3}}}$$

۳- رابطه باراس[1] : مطابق توضیحات ذیل.

❖ طراحی سکان با رابطه باراس

مساحت سکان از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A_R = K.LBP.d \quad (m^2)$$

که d آبخور تابستان و *LBP* طول بین دو عمود بر حسب متر است و ضریب *K* از جدول۳-۴۷ بدست می‌آید:

Type of ship	*Typical value for K (%)*
Container ships and Passenger Liners	1.2–1.7
General Cargo ships	1.5
Oil Tankers and Bulk Carriers	1.7
Lake steamers	2.00
Cross Channel ferries (RO-RO ships)	2–3
Coastal vessels	2.0–3.3
Tugs, Pilot vessels	2.5–4.0

جدول ۳-۴۷: ضریب K در روش باراس

مثال) در نظر است یک کشتی فله‌بر با یک سکان ساده بالانس شده مجهز شود. شرایط ابعادی پاشنه به گونه‌ای است که ارتفاع سکان می‌تواند ۱/۷۵ برابر طول سکان باشد. در این کشتی طول بین دو عمود ۱۸۲ متر و آبخور تابستان ۱۰/۷۵ متر است. مساحت و ابعاد سکان را طراحی کنید.

حل: مطابق شکل ۳-۲۳۰ داریم:

$LBP = 182\,m$

$d = 10.75\,m$

$A_R = K.LBP.d$

$A_R = K \times LBP \times SLWL = 1.7\% \times 182 \times 10.75 = 33.26\,m^2$

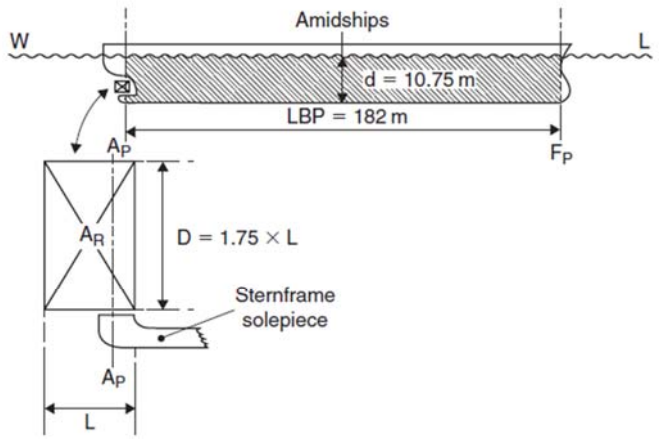
$A_R = 33.26 = L \times D = 1.75 \times L^2$ So $33.26 = 1.75 \times L^2$

$L = 4.36\,m, \quad D = 1.75 \times L = 1.75 \times 4.36 = 7.63\,m$

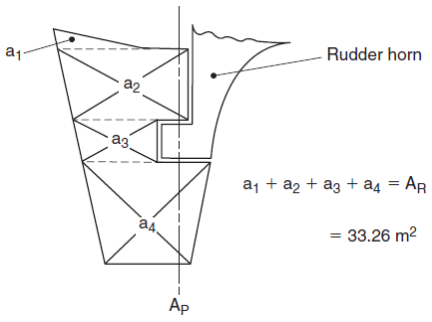
Rudder area = $33.26\,m^2$, Rudder length = $4.36\,m$,
Rudder depth = $7.63\,m$.

که *L* طول سکان و *D* ارتفاع سکان است. مطابق شکل ملاحظه می‌شود که اگر فضای کافی وجود داشته باشد می‌توان یک سکان مستطیلی با مقطع فویل در نظر گرفت. اگر بخواهیم از نوع دیگری از سکان استفاده کنیم، باید کل مساحت مورد نظر به مساحتهای کوچکتر تقسیم شود (شکل ۳-۲۳۱).

1 - Barras



شکل ۳-۲۳۰ : ابعاد سکان در مثال فوق



شکل ۳-۲۳۱ : امکان تقسیم‌بندی مساحت سکان

❖ فاصله سکان با پروانه

مساحتهای ارائه شده در روابط فوق، حداقل مقادیر مساحت سکان هستند که باید در پاشنه کشتی جانمایی شوند. برای تأمین مساحت باید فاصله سکان تا پروانه (a) نیز رعایت شود که می‌توان یکی از دو معیار زیر را در نظر گرفت:

۱- پیشنهاد استاندارد دریایی *DNV*: $a > 0.1D$

که D قطر پروانه و a فاصله بین سکان و پروانه است.

۲- رابطه تجربی رایج: $a > 0.5D$

پیشنهاد استانداردهای دریایی *BV*، *DNV* و *GL* برای کشتی‌های دو پروانه: $a \rangle 2\left(A_E/A_o\right).D/Z$

که Z تعداد پره پروانه و A_E/A_o نسبت سطح گسترش‌یافته پروانه و D قطر پروانه است. با در نظر داشتن این فواصل، می‌توان مساحت قابل جانمایی در پاشنه کشتی را معین کرد.

❖ عوامل مهم در تعیین ابعاد هندسی سکان

مقطع اغلب سکان‌ها به صورت فویل است بنابراین:

۱- ارتفاع سکان همان طول اسپن[1] فویل است. اگر سکان ذوزنقه‌ای باشد، ارتفاع متوسط برابر است با (شکل ۳-۲۳۲):

$$\bar{b} = \frac{b_1 + b_2}{2}$$

۲- طول سکان همان طول کورد[2] فویل است. اگر سکان ذوزنقه‌ای باشد، طول متوسط سکان برابر است با:

$$\bar{c} = \frac{c_1 + c_2}{2}$$

۳- ضریب منظری[3] (AR): این ضریب برابر است با نسبت طول اسپن به طول کورد که در طراحی مقاطع فویل بسیار حائز اهمیت است:

$$\lambda = \frac{span}{corth} = \frac{\bar{b}}{\bar{c}}$$

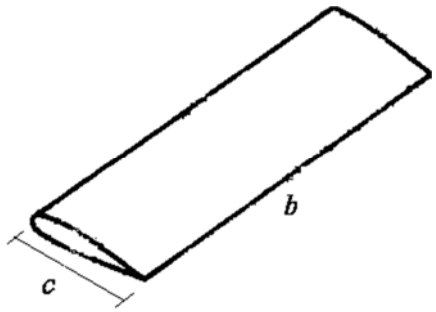
ضریب منظری یکی از مؤثرترین عوامل طراحی مقاطع فویل است. شکل ۳-۲۳۳ نشان‌دهنده تغییرات ضریب لیفت در ضریب منظری‌های مختلف است. مشخص است که هر چه λ بیشتر باشد، ضریب لیفت (C_L) بیشتر خواهد شد ولی زودتر به زاویه استال (زاویه افت کارآیی سکان یا واماندگی سکان، که بعداً توضیح داده خواهد شد)، می‌رسد. تعبیر ساده‌تر آن بدین صورت است که برای یک مساحت معین سکان، هر چه ارتفاع به طول سکان بیشتر شود، ضریب منظری بیشتر می‌شود و لذا ضریب لیفت افزایش و زاویه واماندگی سکان (استال) کاهش می‌یابد (شکل ۳-۲۳۳). افزایش ضریب لیفت یک

1 - span

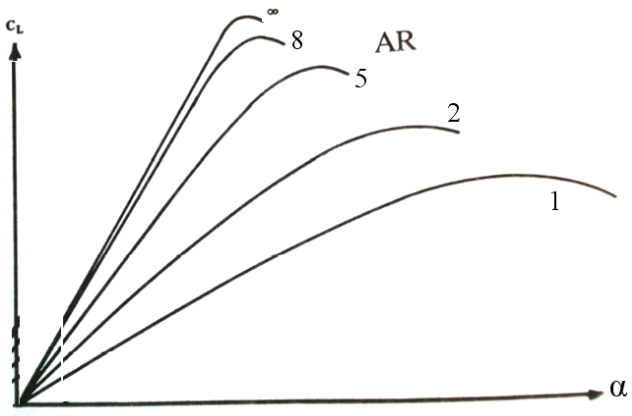
2 - Corth length

3 - Aspect Ratio

عامل مثبت و کاهش زاویه واماندگی یک عامل منفی است.



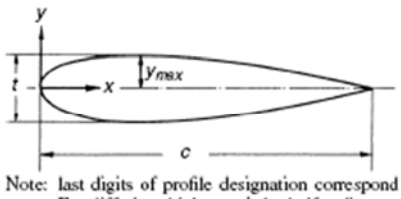
شکل ۳-۲۳۲ : طول اسپن و کورد فویل سکان



شکل ۳-۲۳۳ : تأثیر ضریب منظری بر نمودار ضریب لیفت

فصل سوم: طراحی مقطع فویل سکان

می‌دانیم که هرگاه یک فویل با یک زاویه معین در معرض حرکت یک سیال قرار گیرد، دو نیروی لیفت و درگ ایجاد می‌گردند. اگر فویل به صورت افقی باشد (مانند بال هواپیما)، نیروی لیفت، رو به بالا خواهد بود و اگر فویل به صورت عمودی باشد، (مانند سکان)، نیروی لیفت به طرف چپ یا راست خواهد بود. نیروی لیفت همان نیروی عرضی و عامل کارآیی سکان است که باعث می‌شود کشتی حول نقطه چرخش، گردش کند. مقطع فویل سکان حتماً باید متقارن باشد و فویل‌های نامتقارن در سکان کارآیی ندارند چراکه نیروی عرضی یکسانی به طرف چپ یا راست نیاز است. برای سکان، فویل-های متقارن مختلفی می‌توان در نظر گرفت که در شکل ۳-۲۳۴ ارائه شده و مختصات این فویل‌ها نیز در جدول ۳-۴۸ آمده است.



c (m) = chord length of foil
x/c (–) = dimensionless abscissa
y/c (–) = dimensionless half ordinate

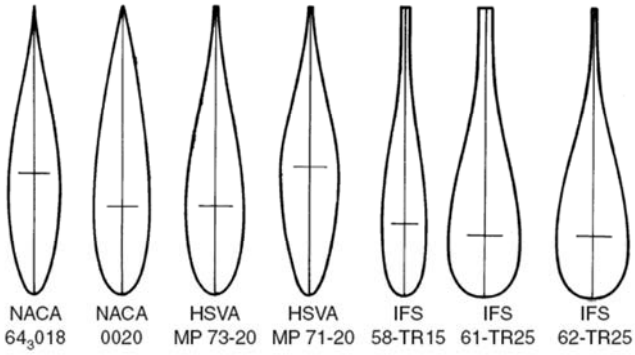
Note: last digits of profile designation correspond to the thickness form e.g. 25 for $t/c = 0.25$. For differing thickness t' the half ordinates y' to be obtained by multiplication

$$\frac{y'}{c} = \frac{t'}{t} \cdot \frac{y}{c}$$

x/c	*IFS62-TR 25* y/c	*IFS61-TR 25* y/c	*IFS58-TR 15* y/c	*HSVA-MP71-20* y/c	*HSVA-MP73-20* y/c	*NACA 00-20* y/c	*NACA* 64_3*-018* y/c
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.04420*	0.04420*	0.02208*
0.0125	0.0553	0.0553	0.0306	0.0230	0.03156	0.03156	0.02177
0.0250	0.0732	0.0732	0.0409	0.0306	0.04356	0.04356	0.03005
0.0500	0.0946	0.0946	0.0530	0.0419	0.05924	0.05924	0.04186
0.1000	0.1142	0.1142	0.0655	0.0583	0.07804	0.07804	0.05803
0.1500	0.1226	0.1226	0.0715	0.0706	0.08910	0.08910	0.06942
0.2000	**0.1250**	**0.1250**	0.0743	0.0801	0.09562	0.09562	0.07782
0.2500	0.1234	0.1226	**0.0750**	0.0881	0.09902	0.09902	0.08391
0.3000	0.1175	0.1176	0.0740	0.0939	**0.10000**	**0.10000**	0.08789
0.4000	0.0993	0.1002	0.0669	0.0996	0.09600	0.09672	**0.08952**
0.4500	–	–	–	**0.1000**	–	–	0.08630
0.5000	0.0742	0.0766	0.0536	0.0965	0.08300	0.08824	0.08114
0.6000	0.0480	0.0533	0.0377	0.0766	0.06340	0.07606	0.06658
0.7000	0.0263	0.0357	0.0239	0.0546	0.04500	0.06106	0.04842
0.8000	0.0123	0.0271	0.0168	0.0335	0.02740	0.04372	0.02888
0.9000	0.0080	0.0250	0.0150	0.0140	0.01200	0.02414	0.01101
1.0000	0.0075	0.0250	0.0150	0.0054	0.00540	0.00210	0.00000

* radius

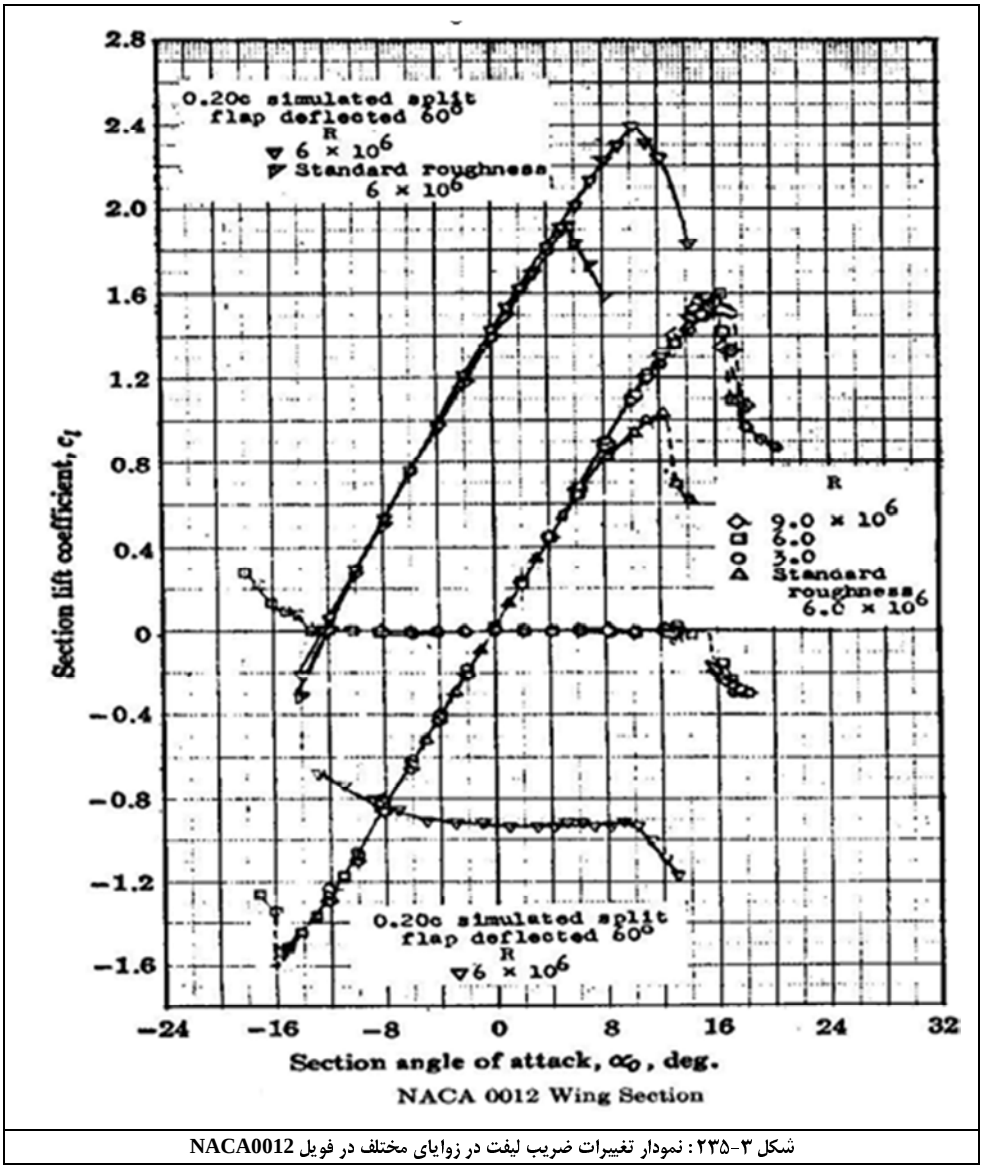
جدول ۳-۴۸ : مختصات فویل سکان ارائه شده در شکل ذیل



شکل ۳-۲۳۴ : شکل‌های مختلف مقاطع فویل سکان

رایج‌ترین مقطع فویل سکان، مقاطع متقارن *NACA* می‌باشد که عموماً از *NACA0012* ، *NACA0015* و *NACA0020* استفاده می‌شود. نمودارهای

ضرایب لیفت و درگ مقاطع *NACA* در کتاب «نظریه مقاطع بال»[1] تألیف *Abbott* ارائه شده که نمونه‌ای از آن در شکل ۳-۲۳۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۳۵ : نمودار تغییرات ضریب لیفت در زوایای مختلف در فویل NACA0012

نمودارهای داخل شکل بر حسب عدد رینولدز هستند. عدد رینولدز فویل از رابطه روبرو بدست می‌آید: $R_n = \frac{V.C}{\nu}$

که V سرعت سیال برخوردی به سکان (سرعت خروجی پروانه یا تقریباً سرعت حرکت کشتی) و C طول کورد سکان است و $\nu \approx 1.1\times10^{-6}\ m/s$ در آب ۱۰ درجه می‌باشد.

نکته مهم اینجاست که حداکثر زاویه سکان باید از زاویه واماندگی (استال) آن کمتر باشد یا خیلی از آن بزرگتر نباشد. مثلاً اگر زاویه واماندگی یک فویل معین، ۲۰ درجه باشد، حداکثر زاویه سکان ۲۵ – ۱۵ درجه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین شکل مقطع فویل در حداکثر زاویه سکان بسیار تعیین‌کننده است.

پس با معلوم بودن ضریب لیفت (C_L) و مساحت سکان (A) می‌توانیم طبق رابطه زیر، نیروی لیفت یا نیروی عرضی سکان را محاسبه کنیم:

$$F = \frac{1}{2}.C_L \rho A V^2$$

V سرعت خروجی سیال از پروانه است که به سکان می‌رسد. این سرعت بزرگتر از سرعت حرکت شناور است.

1 - Wing section theory

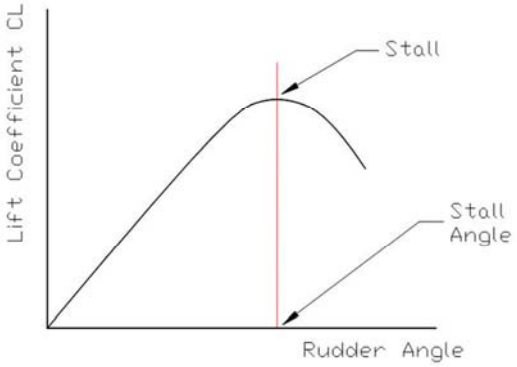
❖ پدیده‌های مختلف در سکان

در مقطع فویل پدیده‌های مختلفی وجود دارد از جمله:

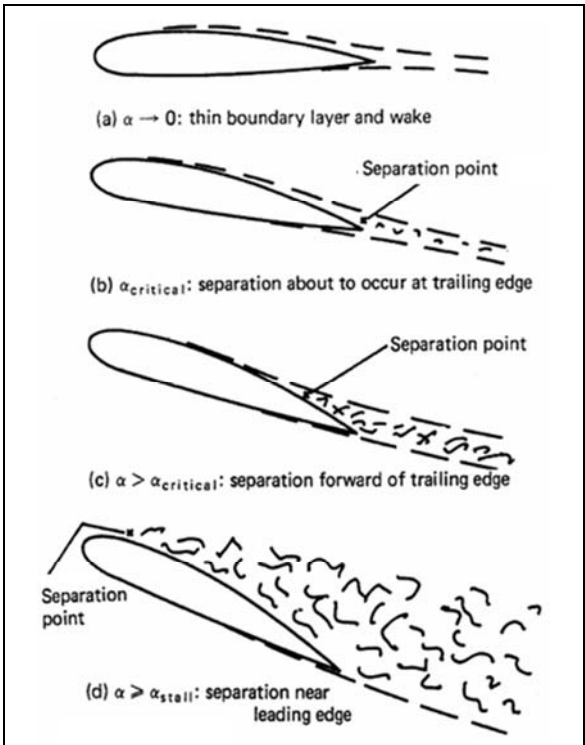
۱- **پدیده کاویتاسیون:** ناشی از اختلاف فشار شدید دو طرف فویل سکان است.

۲- **پدیده مکش هوا:** در اثر مجاورت سکان با سطح آزاد آب و اختلاف فشار قسمت کم فشار فویل با سطح آزاد، جریان هوا به داخل آب کشیده می‌شود که البته اغلب به هنگام دور زدن اتفاق می‌افتد. این پدیده، نیروی عرضی سکان را کاهش می‌دهد.

۳- **پدیده واماندگی (استال) سکان:** از نمودارهای ضریب لیفت بر حسب زاویه دانستیم که با افزایش زاویه سکان (فویل) نسبت به سیال، ضریب لیفت افزایش می‌یابد (شکل ۳-۲۳۶) تا اینکه به نقطه حداکثر می‌رسد. پس از این نقطه، نمودار سیر نزولی را طی می‌کند و ضریب لیفت کاهش می‌یابد. این نقطه همان رسیدن به زاویه استال (واماندگی) است. وضعیتی که در این زاویه رخ می‌دهد در شکل ۳-۲۳۷ نشان داده شده است. در آخرین وضعیت، فویل به زاویه واماندگی رسیده و در نتیجه جدایش و چرخش جریان سیال در پشت فویل اتفاق افتاده که در اثر آن اختلاف فشار به شدت کاهش یافته است. کم شدن اختلاف فشار به معنای کم شدن نیروی لیفت و ضریب لیفت است. لذا همواره سعی می‌شود در همه فویل‌ها از جمله فویل سکان، زاویه فویل به زاویه واماندگی نرسد. دانستیم که هرچه ضریب منظری کمتر باشد، زاویه واماندگی دیرتر اتفاق می‌افتد که یک مزیت محسوب می‌شود ولی در عوض حداکثر مقدار C_L کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۲۳۶ : نمایش زاویه واماندگی (استال) در نقطه حداکثری ضریب لیفت



شکل ۳-۲۳۷ : وضعیت جدایش جریان در زاویه واماندگی

۴- **زاویه خنثی سکان**[1] :زاویه خنثی سکان، زاویه‌ای است که در آن هیچ نیروی عرضی تولید نمی‌گردد. با توجه به اینکه فویل سکان، یک فویل متقارن است، اگر سیال با زاویه صفر درجه به آن برخورد کند، هیچ نیروی لیفتی تولید نمی‌گردد. اگر کشتی در مسیر مستقیم حرکت کند، سیال با زاویه صفر به سکان برخورد نمی‌کند بلکه زاویه برخوردی آن برابر با زاویه سیال خروجی از پروانه است. اگر پروانه راستگرد باشد، زاویه خنثی سکان ۲ – ۱ درجه به سمت راست خواهد بود و اگر چپ‌گرد باشد ۲ – ۱ درجه به سمت چپ. در واقع سیال خروجی از پروانه زاویه ۲ – ۱ درجه با راستای طولی کشتی دارد. اگر کشتی بخواهد در مسیر مستقیم حرکت کند باید سکان در زاویه خنثی قرار گیرد. در واقع اگر پروانه راستگرد باشد، انتهای شناور به سمت راست و مسیر شناور به سمت چپ چرخش می‌کند و همچنین اگر پروانه چپ‌گرد باشد، انتهای شناور به سمت چپ و مسیر شناور به سمت راست چرخش می‌کند.

1 – Natural position

فصل چهارم:طراحی سکان در استاندارد BV

مطالب کاملی از طراحی سکان در استانداردهای دریایی موجود است از جمله استاندارد *BV*:

[*Part B / chapter 10 / section 1*]

در اینجا به طور مختصر به آن اشاره می‌شود ولی مطالب موجود در متن استاندارد کامل‌تر هستند و حتی نحوه محاسبه قطر پیچ‌های سکان و تعداد پیچ‌ها نیز ارائه شده است.

علائم:

V_{AV}: حداکثر سرعت پیشروی رو به جلو بر حسب گره در آبخور تابستان. اگر سرعت کشتی کمتر از ۱۰ گره باشد، مقدار V_{AV} نباید کمتر از مقدار فرمول زیر در نظر گرفته شود.

$$V_{MIN} = \frac{V_{AV} + 20}{3}$$

V_{AD}: حداکثر سرعت رو به عقب بر حسب گره نباید کمتر از $0.5V_{AV}$ در نظر گرفته شود.

A: کل مساحت سکان بر حسب متر مربع

K_1: ضریب ماده تعریف شده در [1.4.3]

K: ضریب ماده تعریف شده در [1.4.5]

C_R: نیروی سکان بر حسب نیوتن

M_{TR}: گشتاور سکان بر حسب نیوتن – متر

M_B: ممان خمشی سکان بر حسب نیوتن – متر

۱- موارد بیان شده در این استاندارد برای سکان‌های معمولی با حداکثر زاویه سکان ۳۵ درجه به طرفین در حداکثر سرعت می‌باشد. زاویه بیش از ۳۵ درجه فقط برای مانورهای خاص یا سرعتهای خیلی پائین قابل قبول هستند.

۲-محاسبه ضریب K_1:

$$k_1 = \left(\frac{235}{R_{eH}}\right)^n$$

R_{eH}: تنش تسلیم بر حسب N/mm^2 برای فولاد استفاده شده است که نباید کمتر از $450N/mm^2$ یا $0.7R_m$ باشد.

R_m: حداقل استحکام کششی بر حسب N/mm^2 برای فولاد استفاده شده

n: ضریبی که طبق قانون زیر بدست می‌آید:

$R_{eH} > 235\ N/mm^2$ $\quad n = 0.75$

$R_{eH} \leq 235\ N/mm^2$ $\quad n = 1$

۳- نیروی عرضی سکان

نیروی عرضی ایجاد شده توسط سکان از رابطه مقابل بدست می‌آید:

$$C_R = 132\ n_R A\ V^2\ r_1\ r_2\ r_3$$

n_R: ضریب ناوبری از جدول۳-۴۹

Navigation notation	Navigation coefficient n_R
Unrestricted navigation	1,00
Summer zone	0,95
Tropical zone	0,85
Coastal area	0,85
Sheltered area	0,75

جدول ۳-۴۹: استخراج ضریب ناوبری

V: سرعت حرکت رو به جلو یا عقب (V_{AV} یا V_{AD})

r_1: ضریب شکل سکان از رابطه: $r_1 = \frac{\lambda + 2}{3}$

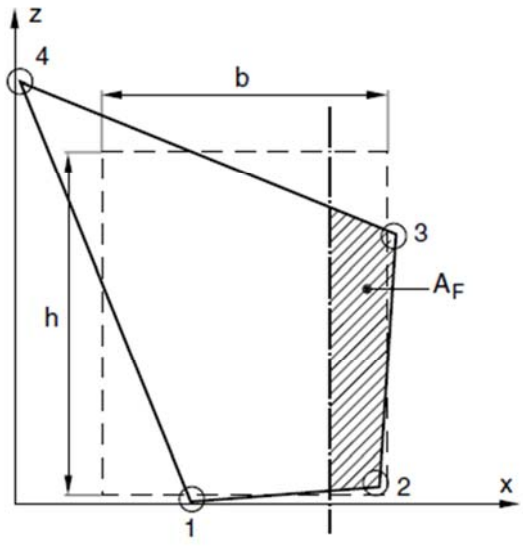
λ: یک ضریب از رابطه زیر که البته نباید بزرگتر از ۲ باشد. $\lambda = \frac{h^2}{A_T}$

h: ارتفاع متوسط بر حسب متر که از رابطه زیر با توجه به شکل بدست می‌آید (مطابق شکل ۳-۲۳۸):

$$h = \frac{Z_3 + Z_4 - Z_2}{2}$$

A_T: مساحت بر حسب متر مربع که از مجموع مساحت سکان (A) بعلاوه مساحت تکیه‌گاه‌های سکان بدست می‌آید.

r_2: ضریبی که از شکل ۳-۲۳۹ زیر با توجه به نوع فویل سکان بدست می‌آید.



شکل ۳-۲۳۸: نمایش Z3 , Z2 , Z1 در سکان

Rudder profile type	r_2 for ahead condition	r_2 for astern condition
NACA 00 - Goettingen	1,10	0,80
Hollow	1,35	0,90
Flat side	1,10	0,90
High lift	1,70	1,30
Fish tail	1,40	0,80
Single plate	1,00	1,00

شکل ۳-۲۳۹: ضریب r2 در مقاطع مختلف فویل سکان

r_3: ضریبی که از قانون زیر بدست می‌آید:

- $r_3 = 0.8$: سکان خارج از جریان سیال خروجی از پروانه
- $r_3 = 1.15$: سکان در پشت پروانه دارای غلاف ثابت
- $r_3 = 1$: برای سایر موارد

ضمائم قسمت هیدرودینامیک

ضمیمه ۱: معروف ترین و مجهزترین آزمایشگاه های دریایی دنیا

❖ **اولین حوضچه های کشش دنیا**

حوضچه های کشش به شکل امروزی که در دنیا وجود دارد، اولین بار در سال ۱۸۷۲ توسط ویلیام فرود در انگلیس بنا شد که «حوضچه کشش ویلیام فرود» نیز نام گرفت (مطابق شکل ۱). این حوضچه دارای طول ۸۵ متر، عرض ۱۱ متر و عمق ۳ متر بود. دومین حوضچه کشش دنیا به نام دنی[1] که یک حوضچه خصوصی بود در سال ۱۸۸۳ در اسکاتلند افتتاح شد. ابعاد آن ۹۳ متر، عرض ۶/۸ متر و عمق ۲/۷۵ متر بود (شکل ۲).

❖ **آزمایشگاه دریایی دیوید تیلور**[2]

این آزمایشگاه بزرگترین و مجهزترین آزمایشگاه دریایی دنیا محسوب می‌شود (شکل ۳و۴). طول کلی این آزمایشگاه ۱۱۰۰ متر است که دارای ۳ حوضچه کشش[3] مستقل از هم می باشد:

۱) حوضچه آب کم عمق[4]: با کف قابل تنظیم برای مدلسازی حرکت در کانال‌ها، رودخانه‌ها و آبراهه‌های باریک.

۲) حوضچه آب عمیق[5]: دارای قابلیت موج‌سازی و شبیه‌سازی حرکات شناور در امواج منظم و نامنظم.

۳) حوضچه شناورهای تندرو[6]: دارای قابلیت موج سازی امواج منظم و نامنظم با طیف‌های موج مختلف برای بررسی رفتار شناورهای تندرو در امواج دریا.

همچنین برای کشیدن مدل شناورهای هیدروفویل، بدنه پروازی و سایر شناورهای تندرو و چند بدنه است (شکل ۵).

این ۳ حوضچه کشش دارای کاربردهای وسیعی از جمله در موارد زیر هستند:

۱) محاسبه مقاومت حرکت [7]

۲) حرکت خویش رانش [8]

۳) پایداری استاتیکی در آب آرام

۴) بررسی خصوصیات پروانه در آب آزاد

۵) مانورهای خویش رانش مدل [9]

۶) اندازه‌گیری نیروهای غیر پیوسته وارد بر پره‌های پروانه

۷) اندازه‌گیری ویک

۸) کالیبراسیون سرعت تحت شرایط دینامیکی شبیه‌سازی شده

۹) آزمایشات حرکات عمودی و افقی

۱۰) نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر اجسام غوطه‌ور، زیردریایی‌ها و هیدروفویل‌ها

۱۱) آزمایشات شناورهای یدک‌شونده

۱۲) آزمایشات قطع موج طولی [10]

مشخصات کامل‌تری از ابعاد حوضچه‌های کششی موجود در آزمایشگاه تیلور در شکل ۶ ارائه شده است:

حوضچه چهارم ۴۳ متری بوده و دارای کاربری آموزشی می‌باشد.

همچنین سرعت حرکت ارابه[11] نیز در هر حوضچه متفاوت است. حوضچه شناورهای تندرو نیز به تنهایی دارای ۳ ارابه می باشد که سرعت های ۳۲، ۵۰ و بیشتر از ۵۰ گره را تأمین می‌کنند. سرعت حرکت ارابه در حوضچه کم عمق ۱۴ گره و در حوضچه عمیق ۲۰ گره است.

مشخصات سرعت ارابه ها در جدول ارائه شده است:

1 - *Deny tank*
2 - *David Taylor Model Basin*
3 - towing tank
4 - *Shallow water Basin*
5 - *Deep Water Basin*
6 -*High Speed Basin*
7 - Resistance
8 - *Self Propultion*
9 - *Self-Propelled model steering maneuvers*
10 - *Longitudinal wave cut experiments*
11 - *Carriage*

❖ **آزمایشگاه دریایی**[1] NMRI

این آزمایشگاه، بزرگترین آزمایشگاه دریایی اروپا و دومین آزمایشگاه بزرگ دریایی در دنیا می باشد. این آزمایشگاه دارای تجهیزات زیر است:

۱- حوضچه آزمایش ۴۰۰ متری: این حوضچه بزرگترین حوضچه کشش اروپا با طول ۴۰۰ متر، عرض ۱۸ متر و عمق ۸ متر است. این حوضچه برای آزمایش مدل نفتکش های بسیار غول پیکر تا کشتی های تندرو بکار می رود (شکل ۸).

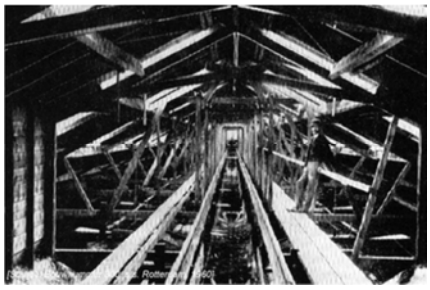
۲- حوضچه کشش متوسط: این حوضچه کشش دارای طول ۱۵۰ متر، عرض ۷/۵ متر و عمق ۳/۵ متر است. حداکثر سرعت ارابه ۵ متر بر ثانیه است. عمق آب می‌تواند از ۳/۵ متر تا ۰/۲ متر تغییر کند به گونه‌ای که بتوان شرایط آب کم عمق را بخوبی شبیه‌سازی کرد. این حوضچه دارای موج ساز و دمنده‌های هوا می‌باشد که شرایط باد و موج را به‌طور همزمان ایجاد می‌کند (شکل ۹).

۳- حوضچه مهندسی اقیانوس[2]: این حوضچه برای آزمایشات سازه‌های فراساحل بکار می رود (شکل ۱۰). دارای طول ۴۰ متر، عرض ۲۷ متر و عمق ۲ متر است. این حوضچه می‌تواند شرایط موج و جریانات زیرآبی را بخوبی شبیه‌سازی کند.

۴- ترکیب تونل باد و حوضچه آب: این تونل باد دارای طول ۱۵ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۲ متر است که می‌تواند حداکثر سرعت باد ۳۰ متر بر ثانیه را ایجاد کند (شکل ۱۱). حوضچه داخل این تونل نیز به گونه‌ای است که مدل بتواند در آبخور معین در داخل آن شناور بماند.

۵- حوضچه یخی[3]: این حوضچه دارای طول ۳۵ متر، عرض ۶ متر و عمق ۱/۸ متر می‌باشد که برای آزمایش مدل شناورهای یخ شکن و کشتی‌هایی که مجبور به حرکت در آبهای با سطح یخ‌زده هستند، بکار می‌رود (شکل ۱۲).

۶- حوضچه آب عمیق – شبیه سازی دریای عمیق[4]: این حوضچه که به صورت دایره‌ای می‌باشد برای شبیه‌سازی عمق دریاها استفاده می‌شود که برای تکنولوژی‌های استخراج منابع زیردریا و بکارگیری تجهیزات مهندسی در عمق دریا کاربرد دارد (شکل ۱۳). این حوضچه دارای عمق ۳۰ متر و قطر مؤثر ۶ متر می‌باشد. در کنار آن یک مخزن فشار با قطر ۱/۱ متر و تحمل فشار ۶۰*Mpa* نیز وجود دارد.



شکل۱ : اولین حوضچه کشش دنیا- حوضچه کشش ویلیام فرود

شکل۲: دومین حوضچه کشش دنیا به نام Deny tank

شکل ۳: نمای بیرونی آزمایشگاه تیلور (با طول بیش از ۱۰۰۰ متر)

شکل ۴: نمای داخلی حوضچه کشش عمیق آزمایشگاه تیلور

شکل ۵: حوضچه شناورهای تندرو آزمایشگاه تیلور

TOWING CARRIAGE SPEEDS

	Maximum
Carriage No. 1 *(Shallow Water Basin)*	14 knots
Carriage No. 2 *(Deep Wafer Basin)*	20 knots
Carriage No. 3 *(High Speed Basin)*	32 knots
Carriage No. 5 *(High Speed Basin)*	50 knots
Carriage No. 6 *(High Speed Basin)*	> 50 knots
Carriage *(140 foot Basin)*	6 knots

شکل ۷: سرعت ارابه‌های حوضچه‌های مختلف آزمایشگاه تیلور

1- *National Maritime Research Institute*

2 - *Ocean engineering Basin*

3 - *Ice Model Basin*

4 - *Deep – Sea Basin*

BASIN CHARACTERISTICS

	Length (ft)	Width (ft)	Depth (ft)	Volume (gal)	Wavemaking Capability Length (ft)	Wavemaking Capability Height (in)
Shallow Water Basin	303	51	0-10		–	–
Deep Water Basin	2,636	1-17.5	22	15,820,000		
High Speed Basin	2,968	21	10-16*			
140 foot Basin	140	10	5	52,000		

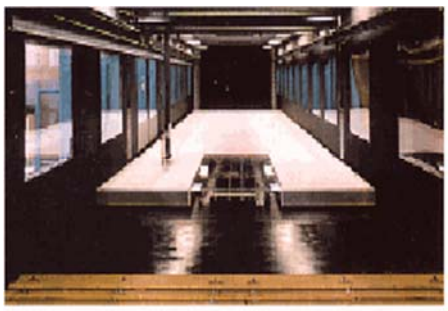
* 10 feet for one-third of Basin length, 16 feet remaining length

شکل ۶: مشخصات ابعادی حوضچه‌های کشش آزمایشگاه تیلور

شکل ۸: حوضچه کشش آزمایشگاه NMRI

شکل ۹: حوضچه کشش متوسط NMRI

شکل ۱۰: حوضچه مهندسی اقیانوس NMRI



شکل ۱۱: ترکیبی از تونل باد و حوضچه آب NMRI

شکل ۱۲: حوضچه یخی NMRI

شکل ۱۳: حوضچه آب عمیق NMRI

❖ مشخصات سایر آزمایشگاه‌های دریایی دنیا

محل قرارگیری		ابعاد				تاریخ ساخت
		طول(m)	عرض(m)	عمق(m)	سرعت(m/s)	
آلمان	برلین	۲۰۸	۸/۲	۴/۲	۷/۲	۱۹۰۲
	هامبورگ	۳۲۰	۵	۲/۵	۲۰	۱۹۱۵
آمریکا	میشیگان	۹۱/۴	۶/۷	۳		۱۹۰۶
	واشنگتن	۱۴۳	۱۳/۶	۴/۵	۹	۱۸۹۸
اتریش	وین	۱۸۰	۱۰	۵/۲۵	۸/۵	۱۹۱۵
روسیه	مسکو	۲۰۰	۱۲	۶/۵	۱۵	
	لنینگراد		۶/۷	۳/۳	۴	
ایتالیا	رم	۲۷۵	۱۲/۵	۶/۳	۱۲	
ژاپن	ناکازاکی	۱۳۷	۶/۱	۱/۴		۱۹۰۶

ضمیمه ۲: نرم‌افزار طراحی پروانه به روش سری B-Wageningen

شکل ۱: صفحه اصلی نرم افزار خلیج فارس

این نرم افزار شامل ماژول‌های متعددی می‌باشد که در صفحه اول ملاحظه می‌گردد (مطابق شکل ۲):

۱-ترسیم نمودارهای ضرایب پروانه

۲- طراحی پروانه

۳- بهینه‌سازی بر اساس محدودیت قطر پروانه

۴- بهینه‌سازی بر اساس محدودیت دور پروانه

۵- راهنما

۶- درباره ما

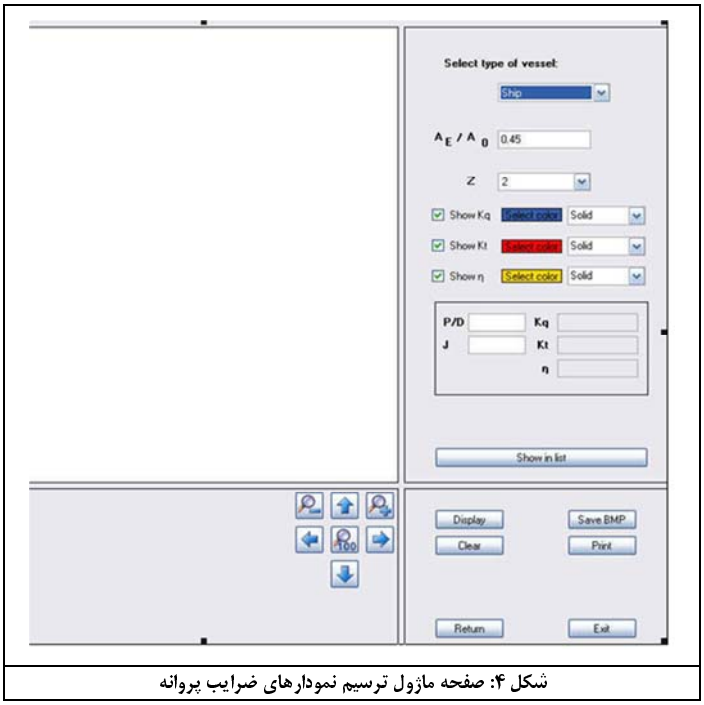
شکل ۲: ماژول‌های نرم افزار

توضیحات سه قسمت اول نرم افزار در مراحل بعدی تشریح می‌گردد. در قسمت « راهنما» توضیحات نرم افزار به صورت یک فایل PDF موجود است.

در قسمت « درباره ما» نیز مشخصات افراد تهیه کننده این نرم افزار به صورت شکل ۳ ارائه شده است:

شکل ۳: مشخصات تیم تهیه کننده نرم افزار

پس وارد شدن به این ماژول، صفحه‌ای مطابق شکل ۴ ظاهر می‌گردد.

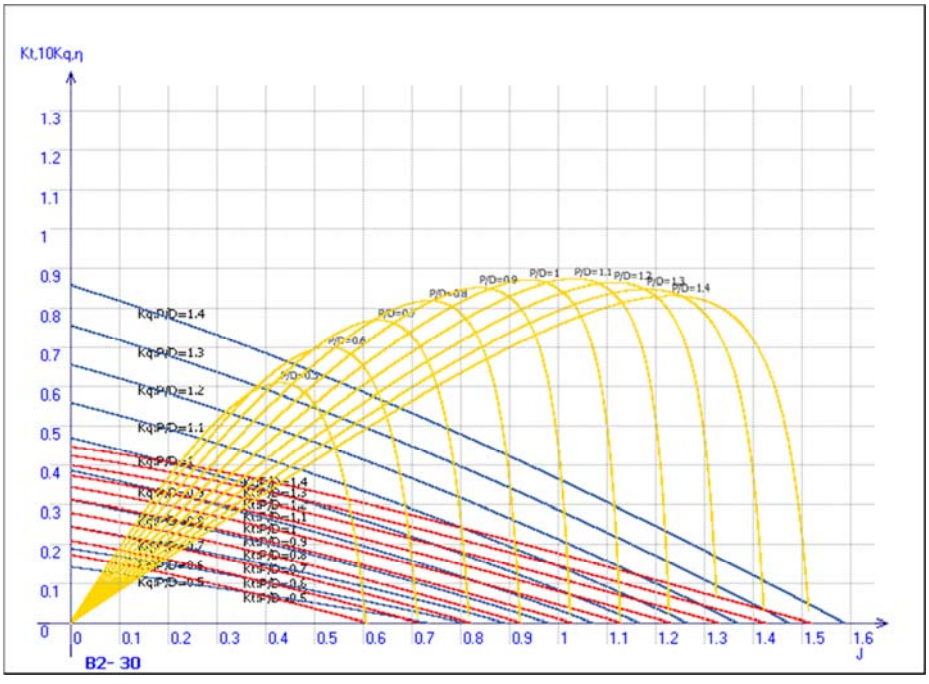


شکل ۴: صفحه ماژول ترسیم نمودارهای ضرایب پروانه

در این قسمت، نمودارهای هیدرودینامیکی پروانه شامل اجزاء زیر ترسیم می‌گردد:

- **ضریب تراست**
- **ضریب گشتاور**
- **راندمان پروانه در آب آزاد**

این ضرایب مبنای اصلی طراحی پروانه در روش سری B هستند که به صورت نمودارهایی ترسیم می‌شوند. دقت این نمودارها تا سه رقم اعشار است چراکه هرگونه خطا در این مرحله، بهینه‌سازی را با خطای بسیار مواجه می‌کند. دقت این نمودارها با نمودارهای موجود است مستندات سری B مقایسه شده که سه نمونه از آنها در ذیل ارائه شده است(شکل‌های ۵).



شکل ۵: نمونه‌ای از نمودارهای استخراج شده

منابع قسمت سوم:

1) Book: Introduction to naval architecture/ Eric Tupper/2002
2) Book: Basic Ship Theory-Vol2/ K.J.Rawson-E.C.Tupper
3) Book: Marine Propellers and Propulsion /J.S.Carlton
4) Document: Ship Resistance and Propulsion
5) Book: Ship Design for Efficiency and Economy
6) Book: Practical Ship Hydrodynamics / V.Bertram/ 2000
7) Book: Hydrodynamics in Ship Design-Vol2 / H.E.Saunders/ 1979
8) Book: Introduction in Ship Hydrodynamics/ J.M.Juree-J.Pinkster
9) Document: ITTC (International Towing Tank Confference)
10) Paper: An Approximate Power Prediction Method/ J.Holtrop and G.G.J.Mennen
11) Paper: Underwater Vehicle Design with Regard to Power Plant Selection/
12) Document: Curves for Wageningen B-Series Propellers/ M.M.Bernitsas-D.Ray-P.Kinley
13) Book: Concepts in Submarine Design/ Louis Rydill/ 1992
14) Book: Submarine Design Notes/
15) Book: Fluid Mechanics/ F.M.White
16) Document: ABS Standard/ Propellers/ Part 4/ Chapter 3/
17) Document: GL Standard/ Propellers/ Part 1/ Chapter2
18) Document: BV Standard/ Rudders/ Part 1/ Chapter2
19) Book: Hydrodynamics of High Speed Vehicles/ O.D.Faltinsen
20) Book: Ship Design and Performance/ C.B.Barras/2004

۲۱) کتاب: مکانیک سیالات / استریتر/ ملک زاده-کاشانی حصار
۲۲) کتاب: مکانیک سیالات/ هرمن شیمز/ بهرام پوستی
۲۳) کتاب: مقاومت شناورها/ محمد سعید سیف-مهدی سیف/ ۱۳۷۴
۲۴) کتاب: مقدمه‌ای بر مفاهیم جریان‌های آشفته و مدلسازی آنها/ مهدی صنیعی نژاد/ ۱۳۸۳
۲۵) کتاب: اصول طراحی زیردریایی/ محمد مونسان/ ۱۳۸۳
۲۶) کتاب: تحلیل پایداری شناورها/ محمد مونسان-فرهاد صفری/ ۱۳۸۷
۲۷) پایان نامه: معرفی انواع آزمایشهای مدل معمول در صنعت کشتی‌سازی/ پرهام صدوقی-ژوبین زرگرباشی/۱۳۷۸
۲۸) پایان نامه: طراحی سکان با مقطع فویل برای شناورهای تندرو/ محسن رهبری/ ۱۳۸۷
۲۹) جزوه درسی: آقای دکتر قاسمی/ دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳۰) جزوه درسی: آقای دکتر زراعتگر/ دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳۱) کتاب: دینامیک کشتی/ محمد سعید سیف/ ۱۳۷۳
۳۲) پایان نامه: طراحی پروانه کشتی‌ها/ مهدی نگهبان/ دانشگاه صنعتی مالک اشتر/ ۱۳۸۷
۳۳) پایان نامه: طراحی پروانه کشتی‌های تجاری و نظامی/ علی امیری/ دانشگاه صنعتی مالک اشتر/ ۱۳۸۴
۳۴) مقاله: مقایسه چند روش متداول برای تخمین مقاومت و توان شناورهای تجاری/ محمد مونسان-احسان کوهی حبیبی/ ۱۳۸۸
۳۵) کتاب: مجموعه آزمون‌های کارشناسی ارشد معماری کشتی/ مصطفی قاسمی-مجید کریمی راد/ ۱۳۸۵

قسمت چهارم

حرکات کشتی در امواج دریا (دریامانی)

SEAKEEPING

- بخش اول: آشنایی با پدیده موج و امواج منظم
- بخش دوم: امواج نامنظم و طیف امواج
- بخش سوم: دینامیک و معادلات حرکت
- بخش چهارم: ارزیابی عملکرد کشتی در امواج دریا
- بخش پنجم: محاسبات پاسخ شناور در امواج دریا

بخش اول :

آشنایی با پدیده موج و امواج منظم

هدف از قسمت چهارم این کتاب، آشنایی مختصر با خصوصیات امواج دریا و روابط حاکم بر آنها و همچنین مروری بر روش تحلیل حرکات کشتی در دریا می‌باشد. خصوصیات حرکات کشتی در امواج دریا و قابلیت ماندگاری کشتی در دریا « دریامانی» نامیده می‌شود. مبحث دریامانی، از مباحث علمی بسیار مفصل و پیچیده می‌باشد که ارائه کلیه مطالب و جزئیات آن در این مجال نمی‌گنجد. این قسمت از کتاب، صرفا یک آشنایی کلی با مبحث دریامانی فراهم می‌کند و برای مباحث تکمیلی باید از مراجع مربوطه استفاده شود.

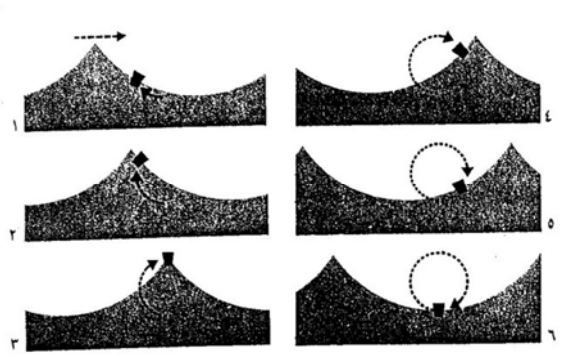
❖ تاریخچه شناخت موج [۳]

«ارسطو» (حدود ۳۰۰ سال پیش از میلاد) پی برد که بادی که روی سطح دریا حرکت می‌کند، عامل اصلی تولید موج است ولی راهی برای آزمایش و اثبات آن نداشت. «پلینی» (حدود ۵۰ سال پیش از میلاد) مشاهده کرد که اگر روی سطح آب مقداری روغن ریخته شود، تولید امواج آرامتر می‌شوند. او دریافته بود که علاوه بر باد، خصوصیات سیال نیز در شکل‌گیری موج مهم است. از نیمه دوم قرن هجدهم تقریباً تمام جهان پذیرفت که عامل اصلی تولید امواج، باد است. در سال ۱۷۷۴ «بنجامین فرانکلین» اعلام کرد هوای در حال حرکت (باد) که در حال عبور از روی سطح صاف آب است، ممکن است همانند سطح زمین، باعث سایش و چین‌خوردگی سطح آب شود و اگر وزش باد ادامه یابد، این چین خوردگی‌ها بزرگتر و بیشتر می‌شوند. فرانکلین همچنین آزمایش «پلینی» را دوباره تکرار کرد و با ریختن روغن روی سطح آب، مشاهده کرد که تشکیل موج بسیار کمتر می‌شود. او این نظریه را ارائه کرد که لایه روغن باعث سرخوردن باد از روی سطح آب می‌شود و چین‌خوردگی سطح آب را کاهش می‌دهد. در نظریه او در واقع روغن باعث کاهش اصطکاک بین سطح آب و باد می‌شود. در آن زمان «تئوری جفری» ارائه شد که بیان می‌داشت : «جریان باد، قسمتی از موج را که در جلوی موج است فشار داده و پشت آن را تا حدودی مانند جریان‌های ورقه‌ای نازک بالا می‌برد ولی در فراز، آن را رها کرده و به پایین می‌آید». تئوری جفری در هر حال کاملاً گویا نیست. از آن پس اینگونه رایج شد که آب، جریان باد بالای خود را آهسته می‌کند و چرخشی در آن به وجود می‌آورد که این جریان‌های چرخشی هوا، کوشش در حفر کردن سطح آب دارد. با حفر شدن یک قسمت از سطح آب، قسمتهای کناری آن برجسته‌تر می‌شوند و شکل موج پدید می‌آید. او سپس توجیه علمی این پدیده را با اختلاف فشار ایجاد شده ناشی از تغییرات سرعت باد روی سطح آب بیان کرد. بدین ترتیب که ابتدا باد با سرعت ثابت به یک منطقه دریایی می‌رسد. سرعت قسمتی از باد که نزدیک سطح آب است، به دلیل تماس با سطح آب و لزجت آب، کاهش می‌یابد و این اختلاف سرعت، در یک منطقه باعث افزایش فشار شده و طبیعتاً این افزایش فشار در یک منطقه باعث کاهش فشار در منطقه مجاور می‌شود. بدین ترتیب رشد و توسعه موج (در صورت ممتد بودن وزش باد) ادامه می‌یابد. همچنین او بیان داشت که حداقل سرعت باد که قادر به ایجاد موج باشد $۱/۱ m/s$ است. جفری در نظریه خود، تنها فشار عمودی باد را در نظر گرفت و فشار مماسی باد به حساب نیاورده بود. در هر حال «استانتون» در سال ۱۹۳۲ توانست با مشاهدات تونل باد، نظریات علمی‌تری از تولید و توزیع موج ارائه کند. تا آن زمان، اغلب نظریه‌های ارائه شده، ناشی از ذهن خلاق نظریه پردازان بود و به تدریج با ظهور تجهیزات آزمایشگاهی، نظریات علمی‌تری از روی «اورسل»، «سورداپ»، «مونک»، «برتیشنایدر»، «پیرسون»، «نیومن»، «فیلیپس»، «مسکوویچ»، «دربیر»، «کارت رایت» و «هسلمن» ارائه شد که تصحیح نظریات گذشتگان بود. در هر حال هنوز هم رفتار موج و اثرات متقابل آن به طور کامل شناخته شده نیست و توابع ریاضی ارائه شده برای مشخصه‌های موج، کاملاً گویا نیستند و فقط برای حدس نسبتاً درستی از رفتار موج به کار می‌روند. طیف‌های امواج ارائه شده تلاشی در این راه هستند که با هزینه و تلاش فراوان در پنج دهه اخیر ارائه شده‌اند. در تمام این سالها، نظرات تجربی دریانوردان خبره کمک شایانی به دانشمندان در ارائه نظریه‌های علمی بوده است. برخی از این نظریات تجربی دریانوردان عبارتند از:

- نسیم با قدرت ۰/۵گره باعث دندانه دندانه شدن سطح دریا می‌شود.
- باد با قدرت ۴ گره، موج‌های واقعی تولید می‌کند.
- ارتفاع موج (فوت) بیش از نیمی از سرعت باد (به گره) نمی‌تواند باشد.

ـ اگر باد به صورت ممتد در یک دوره زمانی طولانی بوزد امواج با سرعت حدود $\frac{۳}{۴}$سرعت باد حرکت خواهند کرد.

یکی دیگر از مشاهدات تجربی دریانوردان، عدم حرکت رو به جلوی اجسام شناور آزاد روی آب می‌باشد. آنها مشاهده کرده بودند که وقتی جسمی روی آب شناور است، با رسیدن موج به آن جسم، ابتدا کمی رو به جلو حرکت می‌کند و پس از گذشتن موج از جسم، آن جسم مجدداً به عقب باز می‌گردد و تقریباً در همان نقطه اولیه خود قرار می‌گیرد. یعنی برآیند حرکت عمودی و افقی جسم، بازگشت به محل اولیه خود می‌باشد. این وضعیت را می‌توان به وسیله حرکت یک چوب پنبه بر روی موج طبق شکل زیر نشان داد. (شکل ۴-۱)



شکل۴-۱: نمایش حرکت ذرات آب با یک چوب پنبه که یک حرکت تقریبا درجا را نشان می‌دهد.

❖ منابع ایجاد امواج [۵]

منابع ایجاد امواج دریا عبارتند از:

۱ـ تأثیر متقابل بین باد و سطح دریا: این عامل، مهمترین عامل ایجاد امواج دریا می‌باشد.

۲ـ جزر و مد: ناشی از اثرات ماه روی زمین است.

۳ـ زمین لرزه در کف دریا: وقوع زمین لرزه در کف دریا، باعث انتقال مقادیر عظیمی از انرژی به آب دریا می‌شود که نتیجه آن وقوع پدیده «سونامی»[1] می‌باشد.

۴ـ نوسانات و حرکات شناورها و کشتی‌ها در دریا: این دسته از امواج بسیار محدود، کم انرژی و موقتی هستند.

۵ـ جریانات اقیانوسی: اثر متقابل جریانات اقیانوسی بر یکدیگر باعث ایجاد سیستم‌های امواج بسیار عظیم می‌شود. جریانات اقیانوسی که در برخی موارد بسیار شدید هستند، ناشی از علل مختلف و متعددی می‌باشند.

مهمترین منبع ایجاد موج، وزش باد می‌باشد که چهار پارامتر اصلی زیر در آن دخیل هستند :

۱) ***شدت وزش باد:*** محتوای انرژی باد تابعی است از شدت یا سرعت وزش باد. هر چه سرعت وزش باد بیشتر باشد، حاوی انرژی بیشتری است که می‌تواند این انرژی را به آب دریا منتقل کرده و باعث به وجود آمدن امواج بزرگ شود.

۲) ***مدت وزش باد:*** مدت زمانی که باد انرژی خود را به آب دریا منتقل می‌کند بر محتوای انتقال انرژی باد به امواج و در نتیجه ارتفاع امواج تأثیر خواهد داشت. در واقع با وزش طولانی مدت باد، دریا در همان سرعت باد به صورت کاملاً توسعه یافته در می‌آید.

۳) ***طول بادگیر***[2]**:** طول بادگیر، پهنه یا وسعت منطقه‌ای از دریا است که تحت تأثیر باد قرار دارد. بیشتر بودن طول بادگیر باعث می‌شود تا انتقال انرژی میان باد و دریا بیشتر صورت گیرد. بنابراین دریاهای دارای وسعت زیاد، مواج‌تر از دریاهای با وسعت کم هستند. عرض منطقه مذکور نیز حداقل $\frac{۱}{۴}$ طول بادگیر است که البته در اغلب موارد عرض منطقه بادگیر مورد بحث قرار نمی‌گیرد.

۴) ***عمق آب:*** عمق آب تأثیر قابل توجهی بر ارتفاع امواج دارد. ارتفاع امواج با حرکت از آب عمیق به آب کم عمق نزدیک ساحل افزایش می‌یابد.

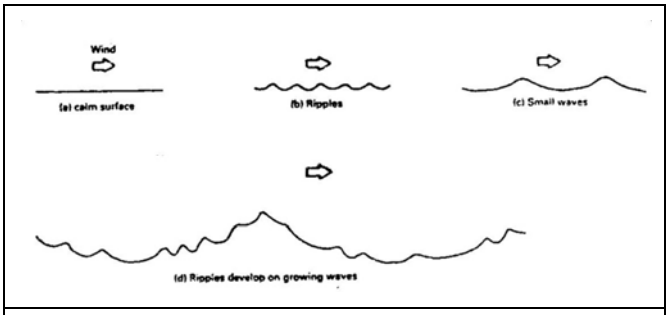
❖ مراحل شکل‌گیری امواج توسط باد[۵]

سلسله مراحل شکل‌گیری امواج توسط انرژی باد را می‌توان به صورت زیر بیان نمود (شکل ۴-۲):

۱ـ مرحله آغاز: در ابتدا، حرکت باد بر فراز سطح دریا سبب تشکیل خیز آبهای کوچک[3] با فرکانس بالا و طول موج ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر می‌شود.

---

1 - Tsunami
2 - fetch length
3 - ripple



شکل ۴-۲: مراحل تبدیل امواج کوچک به امواج نامنظم اقیانوسی

۲ـ مرحله رشد امواج[1]: در این حالت با ادامه یافتن وزش باد، انرژی بیشتری به موج منتقل می‌شود که از انرژی مستهلک شونده ناشی از ویسکوزیته آب بیشتر است و به همین دلیل، محتوای انرژی امواج افزایش یافته و امواج رشد می‌کنند و ارتفاع آنها بیشتر می‌شود. در این حالت فرکانس موج کاهش یافته و طول موج افزایش می‌یابد.

۳ـ مرحله کاملاً توسعه یافته[2]: در این حالت رشد امواج و افزایش ارتفاع امواج متوقف می‌شود یعنی انرژی باد با اتلاف انرژی امواج برابر است.

۴ـ امواج دوراً[3]: سرانجام سیستم امواج، پس از قطع شدن وزش باد، باز هم مسیر خود را ادامه می‌دهند و به صورت امواج دوراً، وارد مناطق دیگر می‌شوند.

❖ *ماهیت تشکیل موج[۲]* [ ]

برای بیان ماهیت و چگونگی ایجاد موج توسط باد، نظریه‌های متعددی ارائه شده است که در بخش تاریخچه از آن یاد شد. این پدیده را می‌توان به صورتهای زیر بیان داشت :

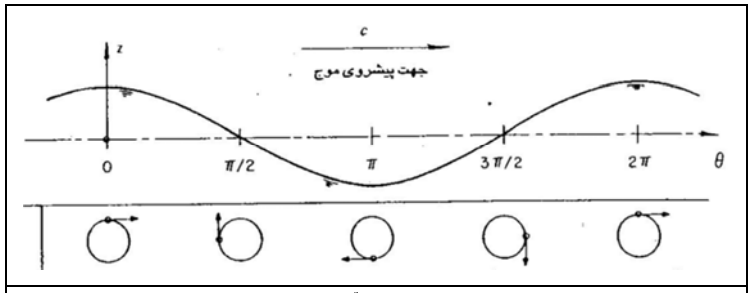
- **انتقال انرژی:** باد گذرنده از روی سطح آب مایل است که انرژی خود را به آب منتقل کند و ذرات آب را با سرعت خود، به حرکت درآورد. با عبور باد از روی موج، بخشی از انرژی به آن منتقل شده و ذرات آب، حرکت در مسیر انتقال انرژی را شروع می‌کنند. این انرژی بوسیله حرکات چرخشی ذرات آب منتقل می‌شود. ماهیت حرکات چرخشی باعث بوجود آمدن قله و قعر در سطح آب می‌شود. برجستگی روی موج یا قله موج را جبهه موج، نیز گویند که البته باید توجه داشت که این مدارها نه خطوط جریان بلکه صرفاً مسیرهای حرکت چرخشی ذرات آب هستند.
- **اختلاف فشار:** عبور باد از روی سطح آب باعث تغییرات سرعت و در نتیجه تغییرات فشار هوا روی سطح تراز آب می‌شود. کاهش فشار نیز باعث برجسته شدن سطح آب می‌شود. برجسته شدن یک منطقه از یک سیال، باعث حفر شدن قسمتهای کناری آن می‌شود. با ادامه یافتن عبور باد از سطح دریا، این فرآیند همچنان ادامه می‌یابد تا جائیکه امواج در سرتاسر طول دریا پخش می‌شوند.

❖ حرکت چرخشی ذرات آب *[۲]*

بیان داشتیم که انتقال انرژی باد به آب دریا، باعث به وجود آمدن حرکات چرخشی ذرات آب می‌شود. همین حرکات چرخشی عامل انتقال انرژی امواج دریا می‌باشد. مسیر این حرکات چرخشی وابسته به عمق نسبی $(\frac{d}{\lambda})$ می‌باشد. در آبهای عمیق، مسیر چرخشی ذرات به صورت دایره‌ای و در آبهای کم عمق، این مسیر به صورت یک بیضی افقی می‌باشد. در واقع هر چه از آب عمیق به آب کم عمق نزدیکتر می‌شویم، این مسیر حرکت بیشتر شبیه بیضی افقی کشیده می‌شود. بدین ترتیب سرعت ذرات در زیر قله موج، در جهت انتشار موج می‌باشد و در زیر قعر موج در خلاف جهت انتشار است. لذا در هر نیم سیکل، جهت ذرات آب برعکس می‌شود. همچنین مقدار سرعت در زیر قله موج، حداکثر مقدار می‌باشد که عموماً سرعت آن خیلی کمتر از سرعت فـاز مـوج است. این برعکس شدن جهت حرکت ذرات در مهندسی دریایی و کشتیرانی نیز بسیار مؤثـر است. مثلاً این عکس شدن جـهت سـرعت ذرات، در فـرمان‌پذیـری سـکان و نیروهای وارد برسکان بسیار مؤثر است چرا که در هر نیم سیکل، جهت حرکت سیال و نیـروهای وارده بر عکس می‌شود (شکل ۴-۳).

---

1 - Growing of wave
2 - Fully developed
3 - Swell

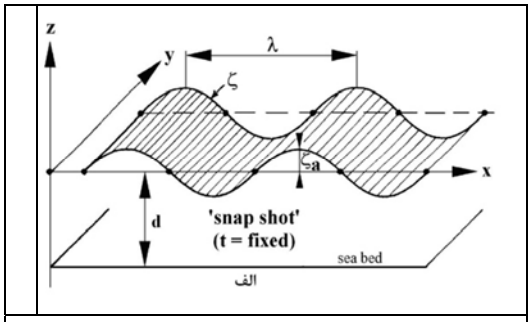


شکل ۴-۳: حرکت ذرات آب و جهت پیشروی موج

❖ برخی تعاریف موج[۲]

- **مشخصه‌های تعریف کننده موج**

بیان داشتیم که برای تبیین شکل موج از تئوری‌های مختلفی استفاده می‌شود. در اغلب این تئوری‌ها، سه پارامتر مستقل از هم وجود دارد که به کمک آنها می‌توان موج را تعریف کرد (۴-۴): عمق آب (d)، ارتفاع موج (H)، و پریود (T) یا طول موج (λ)



شکل ۴-۴: مشخصه‌های تعریف کننده موج

ـ **شرایط کاملاً توسعه یافته**[۱]**:** اگر طول بادگیر و زمان وزش به ازای سرعت معین باد به اندازه کافی طولانی باشد، آنگاه بلندترین امواج ممکن در یک ناحیه مشخص به وجود می‌آیند. این شرایط را شرایط کاملاً توسعه یافته گویند.

ـ **ناحیه میرایی**[۲]**:** به ناحیه پایین دست باد گویند که در آن توده امواج تولید شده پس از ترک طول بادگیر منتشر می‌شوند. واژه ناحیه پراکندگی[۳] نیز برای این منظور به کار می‌رود. امواج در ناحیه پراکندگی به صورت طولی و عرضی پراکنده می‌شوند. کاهش ارتفاع موج در این ناحیه نه به علت اثرات لزجت یا آشفتگی، بلکه به علت گسترده شدن انرژی موج در سطح دریا می‌باشد. لذا به نظر می‌آید که استفاده از واژه پراکندگی از میرایی مناسب‌تر است.

ـ **شکست موج**[۴]**:** اگر فرض کنیم انرژی موج ثابت بماند، با پیشروی موج به سمت ساحل، طول موج کاهش می‌یابد و در نتیجه برای ثابت ماندن انرژی، ارتفاع موج افزایش می‌یابد این امر موجب افزایش تیزی موج (نسبت ارتفاع موج به طول موج) می‌شود. افزایش تیزی پس از رسیدن به مقدار بحرانی منجر به شکست موج می‌شود. این مقدار بحرانی تیزی موج در آب عمیق برابر $\frac{۱}{۷}$ و در آب کم عمق برابر $\frac{۱}{۱۰}$ است. در واقع در نواحی کم عمق، اثرات اصطکاک کف افزایش یافته و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد. پدیده شکست موج از پدیده‌های انتقال جرم در امواج است. تا قبل از شکست موج، انتقال جرم (دبی جرمی) موج تقریباً صفر است. در یک تخمین دیگر می‌توان گفت که هنگامی موج به ارتفاعی تقریباً برابر با عمق آب می‌رسد، دیگر پایدار نبوده و می‌شکند.

ـ **تقلیل موج**[۵]**:** این پدیده همان کاهش برخی پارامترهای موج مانند ارتفاع موج، حرکت مداری ذرات آب، نوسان فشار و غیره است.تقلیل موج صرفاً به معنای استهلاک موج[۶] و از بین رفتن انرژی موج نمی‌باشد و ممکن است به لحاظ طبیعت فیزیکی پدیده حاصل شود. برای مثال تقلیل حرکت مداری ذرات آب با عمق آب.

ـ **تفرق موج**[۷] **:** این پدیده پس از برخورد رشته موج با یک مانع به وجود می‌آید.

---

1 - fully developed
2 - Decay area
3 - Dispersal area
4 - Wave Breaking
5 - Wave attenuation
6 - Wave dissipation
7 - Wave diffraction

ـ **سرعت بحرانی باد:** اگر سرعت باد در مجاورت سطح دریا از یک مقدار بحرانی که برابر $1 m/s$ است، تجاوز کند، امواج محلی پدید می‌آورد.

ـ **خیز آبهای کوچک[1]:** مرحله اولیه تشکیل موج می‌باشد که این امواج با طول‌های ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ تا ۲ سانتی‌متر هستند.

ـ **انکسار موج[2]:** جهت حرکت جبهه موج در لحظه برخورد مورب آن در آب کم عمق با بستر دریا تغییر می‌کند. این عمل را انکسار موج گویند.

ـ **انعکاس موج[3]:** اگر یک مانع تمام توان موج را از بین نبرد، آنگاه موج منعکس می‌شود که بدان «پدیده انعکاس موج» گویند.

ـ **عبور موج[4]:** اگر موج با یک سازه متخلخل برخورد کند و از آن عبور کند، این پدیده را «عبور موج» گویند.

ـ **فرو آب موج[5]:**قبل از شکست موج، کمی فرورفتگی در سطح متوسط آب به وجود می‌آید که به آن پدیده «فرو آب» گویند.

ـ **پدیده بالا روی موج[6]:** در ناحیه شکست موج، سطح تراز آب بالا می‌آید که بدان پدیده بالا روی موج می‌گویند.

ـ **امواج پریود کوتاه :** امواج آب با پریود کمتر از ۳۰ ثانیه را امواج پریود کوتاه گویند. این امواج به دو دسته امواج محلی و امواج دوراً تقسیم می-شوند.

– **پدیده کاهش عمق[7]:** اثرگذاری بستر دریا بر روی حرکت موج با ورود موج به آب کم عمق‌تر یعنی جایی که عمق آب کمتر از نصف طول موج است، آغاز می‌شود. هر چه عمق آب از این نقطه به بعد کمتر شود، آنگاه سرعت موج کمتر، ارتفاع آن بلندتر و نیم رخ موج تیزتر می‌شود. این پدیده را پدیده کاهش عمق گویند. استهلاک انرژی در این ناحیه در اثر اصطکاک بستر دریا غالب می‌شود. شایان ذکر است که به طورکلی استهلاک حاصل از لزجت سیال در اعماق مختلف قابل توجه نبوده و بسیار کمتر از استهلاک در لایه مرزی بستر دریا[8] است.در آبهای کم عمق امواج با سرعت کمتری نسبت به آبهای عمیق منتشر می‌شوند.

❖ نحوه تأثیر گذاری عمق بر موج دریا[۲،۱]

با ورود موج به آبهای کم عمق (یعنی جایی که عمق آب کمتر از نصف طول موج باشد) اثرات بستر دریا بر موج شروع می شود. هر چه عمق آب کمتر می شود ۱) سرعت موج کمتر ۲) ارتفاع آن کوتاهتر و ۳) نیم رخ تیزتر می شود. این پدیده را پدیده «کاهش ژرفا»[9] گویند. استهلاک انرژی و کاهش ارتفاع موج ناشی از اثرات اصطکاک کف دریا و قابل ملاحظه شدن رشد ضخامت لایه مرزی است. یادآوری می شود که استهلاک حاصل از لزجت سیال در اعماق مختلف، قابل توجه نبوده و بسیار کمتر از استهلاک در لایه مرزی بستر دریا می باشد. در واقع اثرات کاهش عمق را به صورت زیر می‌توان لیست کرد:

۱) کاهش سرعت موج ناشی از کاهش طول موج

۲) کاهش انرژی موج ناشی از کاهش ارتفاع موج (انرژی موج وابسته به ارتفاع موج می باشد)

۳) افزایش نسبت $\frac{H}{\lambda}$ و افزایش تیزی موج که در نهایت پس از رسیدن به مقادیر بحرانی باعث شکست موج می شود (این مقدار بحرانی در آب عمیق $\frac{1}{7}$ و در آب کم عمق $\frac{1}{10}$ می باشد).

همچنین دو تعبیر کلی برای پدیده شکست موج[10] بیان شده است:

۱) رسیدن نسبت $\frac{H}{\lambda}$ به حد بحرانی

۲) ارتفاع موج تقریباً برابر با عمق آب شود.

در این شرایط، موج دیگر پایدار نبوده و می‌شکند.

❖ تقسیم بندی امواج[۲]

در این قسمت چند نوع تقسیم‌بندی امواج ارائه می‌شود :

الف ـ تقسیم‌بندی بر اساس انتقال جرم یا دبی[11]

۱) **امواج نوسانی[1]**

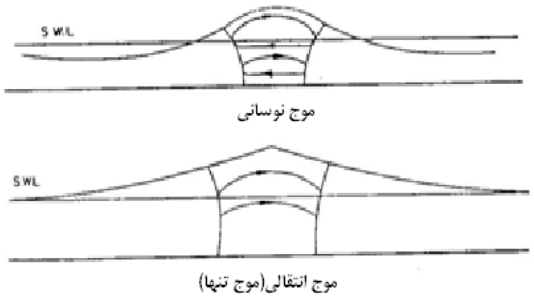
---

1 - Ripple
2 - Wave refraction
3 - Wave reflection
4 - Wave transmission
5 - Wave set – down
6 - Wave run – up
7 - shoaling
8 - Bed Boundary Layer
9 - shoaling
10 - Wave Breaking
11 - flux

انتقال جرم یا دبی در یک موج نوسانی برابر صفر است. حرکت موج را می‌توان در این حالت به نوسان عرضی یک طناب تشبیه کرد. خود موج نوسانی به دو صورت پیشرونده و ایستا می‌باشد. موج ایستا را می‌توان به صورت حاصل جمع دو موج با دامنه و دوره تناوب یکسان ولی با حرکت در جهت مخالف یکدیگر در نظر گرفت. موج ایستایی ناشی از باد را «موج کوبه»[2] می‌نامند.این موج در آب کم عمق به نوسانات آزاد[3] معروف است. اگر دو موجی که مخالف جهت هم حرکت می‌کنند دارای دوره تناوب و دامنه‌های یکسانی نباشند، «موج نیمه ایستا» یا «موج کوبه ناقص»[4] را به وجود می‌آورند. «موج پیشرونده» نیز با سرعت C حرکت می‌کند بدون اینکه انتقال جرم انجام شده باشد.

۲) امواج انتقالی[5]

موج انتقالی همراه با انتقال جرم می‌باشد. برخی مثالهای این پدیده عبارتست از : مدهای سریع یا پرش‌های هیدرولیکی متحرک، امواج تولید شده در اثر شکست یک سد، امواج رودخانه‌ای و سیلابی و موج تنها[6]. وضعیت نوسانی ذرات در موج نوسانی و انتقالی در شکل ۴-۵ بررسی شده است.



شکل ۴-۵: مقایسه حرکت ذرات در موج نوسانی و موج انتقالی تنها

ب- تقسیم بندی بر اساس شکل موج

۱ـ موج سینوسی[7]**:** موجی با مقطع به شکل تابع سینوسی یا کسینوسی است. این موج از نظر تئوری در آب عمیق با موج خیلی کوتاه[8] وجود دارد.

۲ـ موج دامنه محدود[9]**:** امواج تیزی هستند که دیگر فرض سینوسی بودن آن معتبر نیست.

۳ـ موج چرخک نما[10]**:** موجی به شکل ترکوئیدی یا چرخک‌نما می‌باشد که در واقع بر اثر چرخش نقطه‌ای بر روی محیط دایره‌ای ایجاد می‌شود. منحنی ایجاد شده ناشی از حرکت این نقطه را «چرخدیس»[11] گویند.

البته این شکل موج به دلیل ناپایداری، عملاً امکان‌پذیر نیست. از نظر تئوری در آبهای عمیق وجود دارد و اگر تیزی موج کم شود به موج سینوسی شبیه است.

۴ـ موج نویدال[12]**:** این نوع موج از نظر تئوری برای آبهای کم عمق در نظر گرفته می‌شود که به وسیله سری‌های ریاضی، شامل کسینوس بیضوی ژاکوبی[13] تعریف می‌شود. به دلیل پیچیده بودن روابط ریاضی این تئوری، نمی‌توان به راحتی از آنها استفاده کرد.

۵ ـ موج هذلولی[14]**:** حالت خاصی از موج نویدال است. تئوری این موج فقط در آبهای کم عمق کاربرد دارد.

۶ ـ موج تنها[15]**:** این حالت، شکل فرضی موج قبل از شکستن آن است.

ج ـ تقسیم بندی موج کشش سطحی[16] و موج ثقلی یا گرانشی[17]

ـ امواج کشش سطحی، امواجی هستند که دارای دوره تناوب کوتاهی هستند. این دوره تناوب کمتر از ۰/۷ ثانیه و طول آن کمتر از ۱/۷ سانتی‌متر و ارتفاع آنها حداکثر ۱ تا ۲ میلیمتر است. چون در این موج، کشش سطحی سیال، عامل حرکت موج است، لذا آن را موج کشش سطحی گویند.

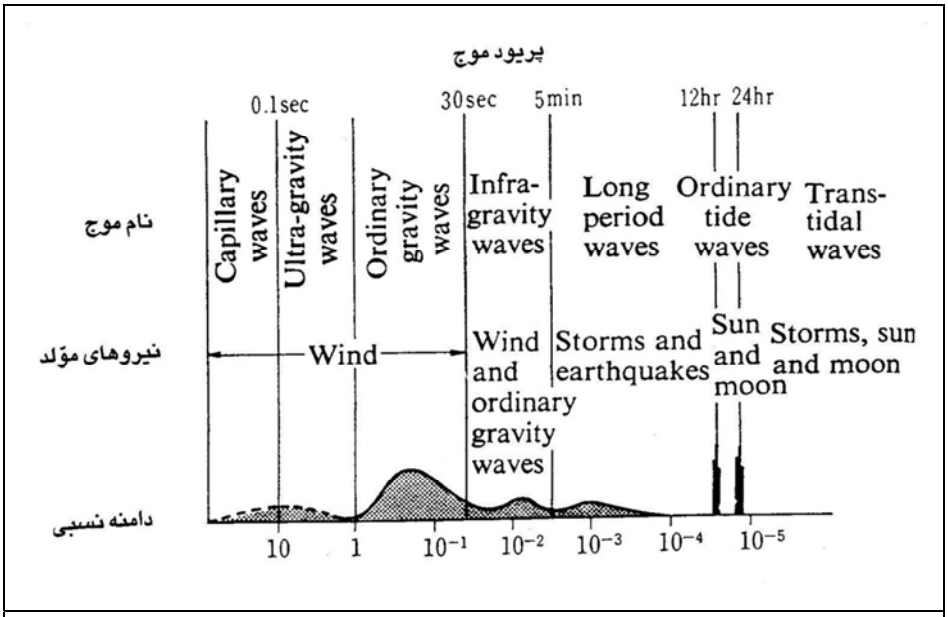
ـ امواج ثقلی، امواجی هستند که ناشی از نیروی گرانش و دارای دوره تناوب بیش از امواج کشش سطحی هستند. از این رو این امواج را «امواج ثقلی» گویند. دوره تناوب این امواج کمتر از ۱۰-۱۵ ثانیه است و ارتفاع این امواج تا ۳۴ متر نیز می‌رسد.

---

1 - oscillatory wave
2 - Clapotis
3 - seiche
4 - partial clapotis
5 - translatory wave
6 - Solitary wave
7 - sinusoidal wave
8 - small amplitude wave
9 - Finite amplitude wave
10 - Trochoidal wave
11 - Cycloidal curve
12 - Cnoidal wave
13 - Jacobis elliptic cosine
14 - Hyperbolic wave
15 - Solitary wave
16 - Capilary wave
17 - Gravity wave

د ـ تقسیم بندی بر اساس دوره تناوب

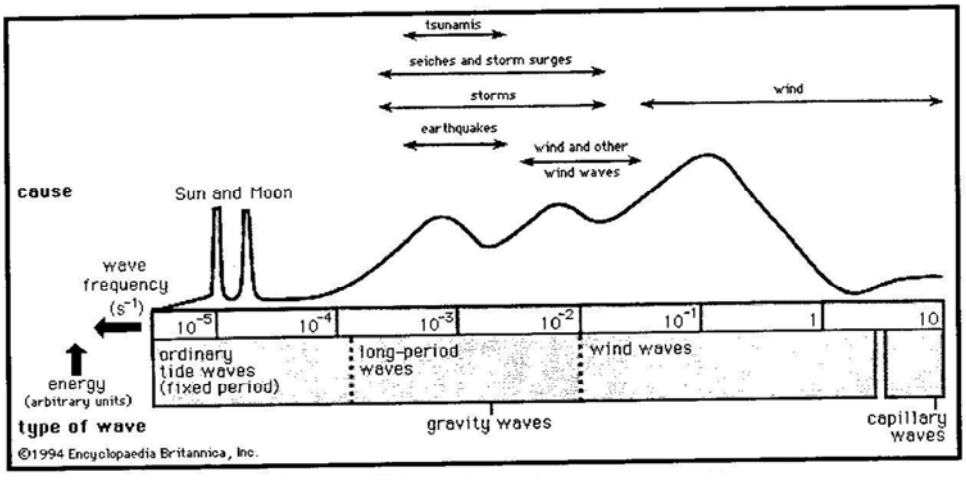
در شکل ۴-۶ تقسیم بندی کلی از امواج بر حسب فرکانس ارائه شده است. این جدول در سال ۱۹۵۱ میلادی توسط ***Munk*** ارائه شده که تقسیم-بندی بر حسب دوره تناوب (یا فرکانس) امواج می‌باشد. موج‌های دارای کوتاه‌ترین دوره تناوب، امواج کشش سطحی هستند که دوره تناوب کمتر از ۰/۷ ثانیه دارند.



شکل ۴-۶ : تقسیم‌بندی امواج بر اساس پریود

امواج با دوره تناوب بیشتر، امواج ناشی از باد هستند که پریود آنها کمتر از ۱۰ تا ۱۵ ثانیه است. امواج دوراً[1] که امواج گریخته از ناحیه بادگیر هستند نیز جزء این محدوده می‌باشند. امواج بلند[2] دارای بزرگترین دوره تناوب‌ها هستند که شامل نوسانات سطحی در حوضچه بنادر[3]، امواج سونامی[4]، برکشند طوفان[5] و جزرومد نجومی[6] هستند.

دوره تناوب این امواج از چند دقیقه تا یک ساعت است (امواج سونامی) (شکل ۴-۶ و ۴-۷).



شکل ۴-۷ : منابع مختلف ایجاد موج با فرکانس‌های مختلف

1 - swell
2 - long wave
3 - seiches
4 - Tsunami
5 - storm surg
6 - Astronomical tide

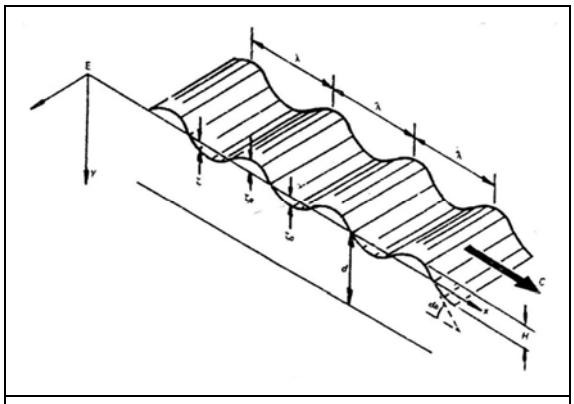
❖ **امواج پریود کوتاه**

این امواج دارای پریودی کمتر از ۳۰ ثانیه هستند که به دو دسته کلی تقسیم می شوند.

۱- امواج محلی: امواج محلی هنگامی بوجود می‌آیند که سرعت باد در مجاورت سطح دریا از یک مقدار بحرانی (معادل ۱ متر بر ثانیه) تجاوز کند.

۲- امواج دوراً: امواج گریخته از محل بادگیری که منظم تر و با دوره تناوب بلندتری نسبت به امواج محلی هستند.

❖ **تعاریف موج منظم[*۷،۲،۱*]**



شکل ۴-۸: پارامترهای موج منظم

مطابق شکل ۴-۸ داریم:

ζ :مقدار فرورفتگی یا برآمدگی سطح آب نسبت به حالت آب ساکن (تراز آب)

ζ_0 :دامنه موج یا فاصله بین سطح تراز آب با قله یا قعر موج (در برخی منابع با a نمایش داده می‌شود.)[1]

H: ارتفاع موج که معادل ۲ برابر دامنه موج ($H=2a$) است.

λ : طول موج یا فاصله افقی بین دو قله یا قعر موج (در برخی منابع با L نمایش داده می‌شود.)

C: سرعت فاز موج که از سرعت زاویه یک تک موج به دست می‌آید.[2] $C=\frac{\lambda}{T}=\frac{\omega}{K}$

U_G: سرعت گروهی موج که بر مبنای سرعت انتقال انرژی گروهی امواج تعریف می‌شود.[3]

T: دوره تناوب موج (زمان بین به وجود آمدن دو قعر یا قلعه متوالی)

d: عمق سطح تراز آب از کف دریا

$\propto$: زاویه شیب موج[4] که در هر نقطه از موج، مقدار متفاوتی است.

$\propto_0$: حداکثر زاویه شیب موج

$\frac{H}{\lambda}$: تیزی موج[5] که این تعریف مبنای بررسی شکست موج است. عدد بی بعد تیزی موج اگر در آب عمیق به $\frac{1}{7}$ و در آب کم عمق به $\frac{1}{10}$ برسد، موج دچار شکست می‌شود.

$\frac{H}{d}$: ارتفاع نسبی موج است. اهمیت این عدد بی بعد در انتخاب نظریه موج است. هر چقدر ارتفاع نسبی موج بیشتر باشد، خصوصیات غیر خطی موج نمود بیشتری پیدا می‌کند. اگر ارتفاع نسبی موج به سمت صفر میل کند، نظریه موج خطی یا موج سینوسی یا موج ایری[6] که برای امواج دامنه کوتاه معتبر است، قابل استفاده می‌شود.

$\frac{d}{\lambda}$: عمق نسبی نامیده می‌شود که این عدد بی بعد برای تعریف عمیق یا کم عمق بودن دریا در منطقه وجود موج به کار می‌رود.

- کم عمق: $\frac{d}{\lambda}<\frac{1}{20}$

---

1 - Amplitude
2 - Phase Velocity
3 - Group Velocity
4 - Wave Slope
5 - Wave steepness
6 - Airy Wave

- آب عمیق: $\frac{d}{\lambda} > \frac{1}{2}$

ملاحظه می‌شود که عمیق یا کم بودن دریا در مبحث امواج، با توجه به خصوصیات موج تعریف می‌شود و مستقل از موج نمی‌باشد.

آب کم عمق جایی است که سرعت فاز موج فقط به عمق آب بستگی دارد و برابر است با : $C = \sqrt{g.d}$

آب عمیق آبی است که سرعت فاز موج، مستقل از عمق آب و تنها وابسته به دوره تناوب موج است : $C = \sqrt{\frac{g.\lambda}{2\pi}}$

U_r: این عدد بی بعد عدد اورسل[1] نامیده می‌شود که برابر است با : $U_r = \frac{(H/\lambda)}{(d/\lambda)^3} = \frac{H\lambda^2}{d^3}$

این عدد بی بعد که کلیه پارامترهای تعیین کننده موج را در بر دارد، برای انتخاب نظریه موج مناسب به کار می‌رود.

اگر این پارامتر کوچک باشد، نظریه موج دامنه کوتاه صادق است. در نظریه موج دامنه کوتاه $U_r < 20$ می‌باشد.

ω : سرعت زاویه موج: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

k: عدد موج: $K = \frac{2\pi}{\lambda}$

عدد موج برای بیان تعداد موج‌ها در هر سیکل (دور) بیان می‌شود.

جدول ۴-۱ نشان‌دهنده روابط حاکم بر امواج منظم در آب عمیق و کم عمق است.

Quantity	In terms of	Any depth	Deep water (d > 0.5λ)	Shallow water (d < 0.03λ)
ω	T	$\frac{2\pi}{T}$	$\frac{2\pi}{T}$	$\frac{2\pi}{T}$
	k	$\sqrt{[gk]tanh(kd)}$	$\sqrt{[gk]}$	$k\sqrt{(gd)}$
	λ	$\sqrt{\left[\frac{2\pi g}{\lambda}tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)\right]}$	$\sqrt{\left(\frac{2\pi g}{\lambda}\right)}$	$\frac{2\pi\sqrt{(gd)}}{\lambda}$
	c	-	$\frac{g}{c}$	-
T	ω	$\frac{2\pi}{\omega}$	$\frac{2\pi}{\omega}$	$\frac{2\pi}{\omega}$
	k	$\frac{2\pi}{\sqrt{[gk\ tanh(kd)]}}$	$\frac{2\pi}{\sqrt{(gk)}}$	$\frac{2\pi}{k\sqrt{(gd)}}$
	λ	$\frac{2\pi\lambda}{\sqrt{\left[g\ tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)\right]}}$	$\sqrt{\left(\frac{2\pi\lambda}{g}\right)}$	$\frac{\lambda}{\sqrt{(gd)}}$
	c	-	$\frac{2c}{\pi g}$	-
c	ω	-	$\frac{g}{\omega}$	-
	T	-	$\frac{gT}{2\pi}$	-
	k	$\sqrt{\left(\frac{g}{k}\tanh(kd)\right)}$	$\sqrt{\left(\frac{g}{k}\right)}$	-

1 - ursell

	λ	$\sqrt{\left[\frac{g\lambda}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)\right]}$	$\sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi}\right)}$	-
	d	-	-	$\sqrt{(gd)}$
$_0\alpha$	ω	-	$\frac{\omega^2\zeta_0}{g}$	$\frac{\omega\zeta_0}{\sqrt{(gd)}}$
	T	-	$\frac{4\pi^2\zeta_0}{gT^2}$	$\frac{2\pi\zeta_0}{T\sqrt{(gd)}}$
	k	$k\zeta_0$	$k\zeta_0$	$k\zeta_0$
	λ	$\frac{2\pi\zeta_0}{\lambda}$	$\frac{2\pi\zeta_0}{\lambda}$	$\frac{2\pi\zeta_0}{\lambda}$
	c	-	$\frac{g\zeta_0}{c^2}$	-
y_0	d	-	-	$\frac{\zeta_0(d-y)}{d}$
u_G	ω	-	$\frac{g}{2\omega}$	-
	T	-	$\frac{gT}{4\pi}$	-
	k	$\sqrt{\left(\frac{g}{4k}\tanh(kd)\right)\left(1+\frac{2kd}{sinh(2kd)}\right)}$	$\sqrt{\frac{g}{4k}}$	-
	λ	$\sqrt{\left[\frac{\lambda g}{8\pi}\tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)\right]\left[1+\frac{4\pi d}{\lambda\sinh\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)}\right]}$	$\sqrt{\frac{g\lambda}{8\pi}}$	-
	c	-	$\frac{c}{2}$	c
	d	-	-	$\sqrt{\left(\frac{gd}{4}\right)}$

جدول ۴-۱: روابط حاکم بر امواج منظم در آب عمیق و کم عمق

در این روابط داریم: $\lambda = \frac{g}{2\pi}T^2\tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right)$

که در آب عمیق که h به سمت بی‌نهایت می‌رود داریم: $\lambda = \frac{g}{2\pi}T^2$

از این رابطه مشخص می‌شود که هر پریودی متناظر با یک طول موج است. لذا برای امواج دریا می‌توانیم داشته باشیم:

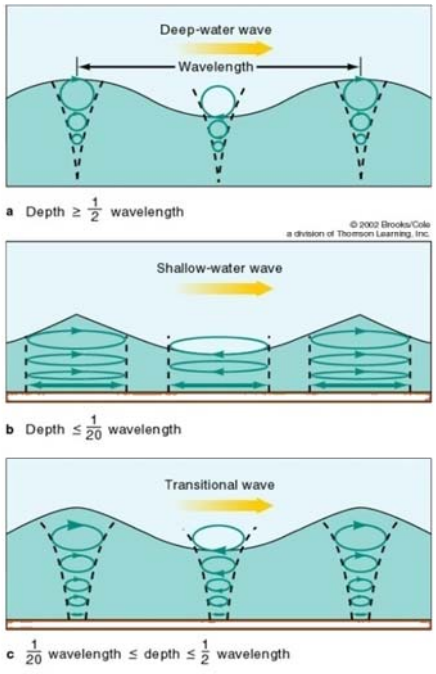
$5 < T < 15\ (sec) \longrightarrow 40 < \lambda < 350\ m$

پریود طبیعی (T_n) شناور نباید به گونه‌ای باشد که باعث تشدید در حرکات مختلف کشتی شود. کشتی در حرکات هیو، پیچ و رول دارای پریود طبیعی است. در سازه‌های دریایی طول عمر ۲۰ ساله در نظر گرفته می‌شود و مرتبه خستگی حدود 10^8 می‌باشد. اگر پریود امواج را در یک منطقه حدود ۶/۱ ثانیه در نظر بگیریم داریم:

$$fatigue = \frac{(year)\times(day)\times(hour)\times(\sec)}{T} = \frac{20\times365\times24\times3600}{6.1} \approx 10^8$$

❖ مسیر حرکت ذرات موج [۷،۱]

مسیر حرکت ذرات آب در آبهای عمیق به صورت دایره‌ای و در آبهای کم‌عمق بیضوی است (مطابق شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹: مسیر حرکت ذرات آب در آبهای عمیق و کم‌عمق

❖ انرژی امواج منظم [۶،۴،۱]

انرژی یک موج شامل دو مولفه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی است. مطابق شکل یک المان از موج به طول δx را در نظر بگیرید (شکل ۱۰-۴).

$(\zeta = \zeta_\circ Sin(kx - \omega t))$

❖ محاسبه انرژی پتانسیل

مقدار جرم آب در طول δx برابر است با: $\rho.\zeta.\delta x$ – (عرض موج در جهت z برابر واحد فرض می شود). مرکز این جرم برابر $\zeta/2$ است.

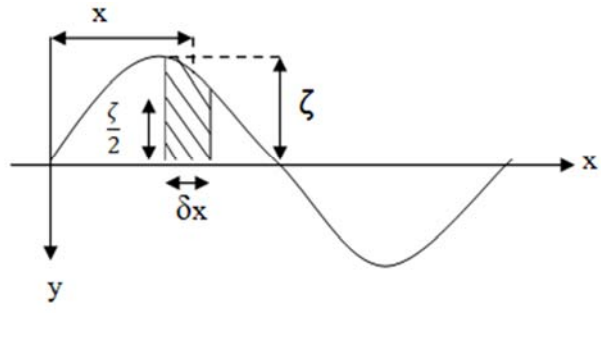
مقدار انرژی پتانسیل این جرم عبارتست از: $\frac{1}{2}\rho g\zeta^2.\delta x$

با میل کردن δx به سمت صفر و انتگرال‌گیری از رابطه فوق داریم:

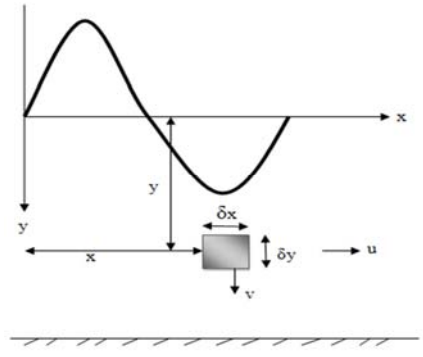
$$E_p = \int^{\lambda} \frac{1}{2}\rho g\zeta^2 dx = \frac{\rho g\zeta_\circ^2}{2}\int^{\lambda} Sin^2(kx-\omega t)dx = \frac{\rho g\zeta_\circ^2\lambda}{4} = \frac{\rho g\zeta_\circ^2\lambda}{2}$$

❖ محاسبه انرژی جنبشی

یک المان کوچک را مطابق شکل (۴-۱۱) در نظر می‌گیریم.



شکل ۴-۱۰ : المانی از موج منظم



شکل ۴-۱۱: انتخاب المان موج برای محاسبه انرژی جنبشی

جرم المان فوق برابر $\rho.\delta_x.\delta y$ می‌باشد و سرعت آن برابر است با: $q^2 = u^2 + v^2$

لذا انرژی جنبشی این المان برابر است با: $\frac{1}{2}\rho q^2 \delta_x.\delta_y$

با نزدیک شدن δx و δy به صفر و انتگرال گیری در طول موج از رابطه فوق داریم: $E_K = \frac{1}{2}\rho \int_0^{\lambda} (\int_0^{\eta} q^2 dy)dx$

برای محاسبه q از مقادیر u و v داریم:

$$q^2 = \frac{g.\zeta_\circ^2 k^2}{\omega^2.Cosh(kd)}.\{Cosh^2(k(d-y)).Sin^2(kx-\omega t) + Sinh^2[k(d-y)]Cos^2(kx-\omega t)\}$$

با ساده سازی عبارت فوق و جایگزین نمودن آن در رابطه انرژی جنبشی خواهیم داشت: $E_k = \frac{g.\zeta_\circ^2 \lambda}{4}$

ملاحظه می شود که $E_p = E_k$.

انرژی کل برابر است با: $E = E_p + E_k = \rho\frac{g.\zeta_\circ^2.\lambda}{2}$

نتیجه فوق بسیار حائز اهمیت است که:

«انرژی موج با توان دوم دامنه موج مرتبط است و از فرکانس موج مستقل می باشد».

انرژی بر واحد سطح (انرژی متوسط) برابر است با: $E = \frac{\rho g \zeta_\circ^2}{2}$

❖ سرعت گروهی (سرعت انتقال انرژی)[1]

انتقال انرژی در مسیر پیشروی موج می‌باشد. دبی انتقال انرژی با در نظر گرفتن یک مقطع عمود بر جهت پیشروی امواج و مقدار انرژی عبوری از آن در واحد زمان تعریف می شود. از آنجا که المان کوچک است، فشار و سرعت در کل آن برابر است با مقدار آن در مراکز المان، بر این اساس نیروی وارد شده از طرف سیال عبارتست از $p.dy$ بر واحد عرض. کار انجام شده برابر است با $up.dy$ بر واحد عرض. اکنون اگر δy به سمت صفر میل کند و با انتگرال گیری از مقدار فوق، کل کار انجام شده در مقطع یا دبی انتقال انرژی بدست می‌آید. پس دبی فوق عبارتست از: $\dot{E} = \int_0^{d} u.p.dy$

از قبل می دانیم که: $u = u_o Sin(kx-\omega t)$

$$p = +\rho g \zeta_\circ \frac{Cosh[k(d-y)]}{Cosh(kd)}.Sin(kx-\omega t)$$

$$\dot{E} = \frac{\rho g^2 \zeta_\circ^2.k.Sin^2(kx-\omega t)}{\omega.Cosh^2(kd)}.\int_0^{d} Cosh^2[k(d-y)]dy - \frac{\rho g^2 \zeta_\circ^2.k.Sin(kx-\omega d)}{\omega.Cosh(kd)}\int_0^{d} ydy$$

با در نظر داشتن $\omega = \frac{g}{c}$ در آبهای عمیق:

$$\dot{E} = \frac{\rho g \zeta_\circ^2.c}{2}\left(1+\frac{2kd}{Sinh(2kd)}\right).Sin^2(kx-\omega t) - \frac{\rho g \zeta_\circ^2 kd^2}{2\omega\cosh(kd)}.Sin(kx-\omega t)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود دبی انتقال انرژی دارای نوسان است و بهتر است مقدار متوسط آن بررسی شود. در طول یک فاصله زمانی طولانی مقدار متوسط $Sin^2(kx-\omega t)$ برابر $\frac{1}{2}$ خواهد بود و مقدار متوسط $Sin(kx-\omega t)$ هم دارای مقدار متوسط صفر است. بنابراین انرژی متوسط برابر است با: $\dot{E} = \frac{\rho g \zeta_\circ^2.C}{4}\left(1+\frac{2kd}{Sinh(2kd)}\right)$

همچنین بیان داشتیم که انرژی متوسط یک موج برابر است با: $\dot{E} = \frac{\rho g \zeta_\circ^2}{2}$

بنابراین سرعت انتقال انرژی یا سرعت گروهی به صورت مقابل بدست می آید: $u_G = \frac{\dot{E}}{E} = \frac{C}{2}\left(1+\frac{2kd}{Sinh(2kd)}\right)$

به عبارت دیگر: $\frac{U_G}{C} = \frac{1}{2}\left(1+\frac{2kd}{Sinh(2kd)}\right)$

---

1 - Group Velocity

در آبهای عمیق: $\frac{2kd}{Sinh(2kd)}=0$ بنابراین: $U_G=\frac{C}{2}$

در آبهای کم عمق: $\frac{2kd}{Sinh(2kd)}=1$ بنابراین : $U_G=C$

تفسیر این روابط در آبهای عمیق و کم عمق بدین صورت است که: در آب کم عمق، موج همراه با پیشروی، با همان سرعت انرژی را نیز با خود انتقال می دهد ($U=U_G$). در آبهای عمیق، سرعت انتقال انرژی برابر با نصف سرعت پیشروی موج است $(U_G=\frac{U}{2})$. یعنی انرژی موج همراه با پیشروی موج انتقال نمی‌یابد بلکه تنها نیمی از انرژی موج انتقال می‌یابد و نصف دیگر انرژی موج، به موج عقبی اضافی می‌شود. اگر گروهی از امواج به صورت متوالی در حال حرکت باشند، بدین ترتیب انرژی موج در واحد سطح همواره ثابت باقی می‌ماند چرا که در اثر از دست دادن نیمی از انرژی (در اثری پیشروی در آب عمیق)، این کاهش انرژی با انرژی باقی مانده از موج جلویی جبران می‌شود.

❖ شکست امواج در آب کم‌عمق [۵،۲،۱]

امواجی که از آب عمیق به سوی آب کم‌عمق پیشروی می‌کنند، دچار کاهش طول و افزایش ارتفاع می‌شوند. این اثر باعث کاهش سرعت پیشروی موج و افزایش تیزی موج می‌شود. موج پس از رسیدن به یک عمق مشخص، سرانجام می‌شکند. عمل شکست منجر به استهلاک انرژی موج در قالب اغتشاش و کار انجام شده در اثر اصطکاک بستر دریا می‌گردد. چند علت یا چند نوع تحلیل برای شکست موج می‌توان برشمرد:

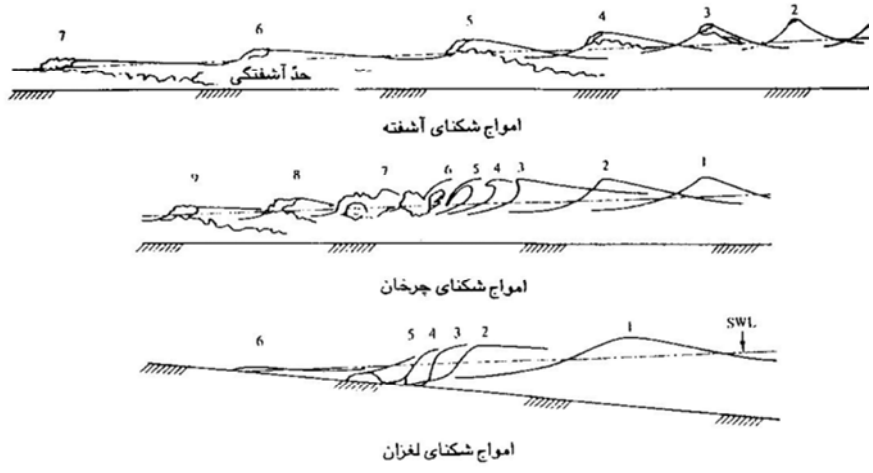
۱ـ سرعت ذره‌ای در قله موج بیش از سرعت پیشروی موج باشد.

۲ـ فشار در سطح آزاد که از معادله برنولی تعیین می‌شود، با فشار جو ناموافق باشد.

۳ـ شتاب ذره قله موج، ذرات را از سطح آب جدا کند.

۴ـ سطح آزاد سیال قائم شود.

مطابق شکل ۴-۱۲، شکست امواج به سه حالت امواج شکنای آشفته، چرخان و لغزان تقسیم می‌شوند. شکست موج در سواحلی با شیب خیلی ملایم از نوع آشفته است. با تندتر شدن شیب کف دریا، موج شکنای چرخان ظاهر می‌شوند. اگر شیب ساحل خیلی زیاد و تند باشد، امواج شکنای لغزان بوجود می‌آیند.



شکل ۴-۱۲: شکست امواج به سه حالت امواج شکنای آشفته، چرخان و لغزان

بخش دوم:
امواج نامنظم و طیف امواج

❖ امواج اقیانوسی (امواج نامنظم) [۱،۵،۶،۷]

مهم‌ترین دسته از امواج دریا، امواجی هستند که در اثر وزش باد بر سطح دریا به وجود می‌آیند. وزش باد ابتدا باعث به وجود آمدن موجک[1] می‌شود. چنانچه وزش باد ادامه داشته باشد و وسعت طول بادگیر[2] به حد کافی باشد، موج‌های بزرگ دریا به وجود می‌آیند که البته دیگر منظم نیستند. در اقیانوس، همواره امواج بلندتر که دارای سرعت بیشتری هستند، به امواج کوچکتر می‌رسند و امواج نامنظم شکل می‌گیرند. امواج به دو طریق انرژی منتقل شده از باد را مستهلک می‌کنند:

۱ـ شکست امواج (در امواج با شیب تند[3])

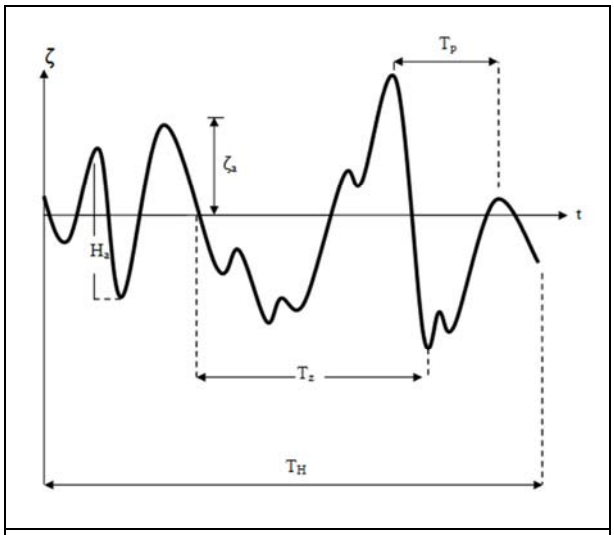
۲ـ ویسکوزیته آب (در امواج بلند به وسیله اصطکاک ناشی از ویسکوزیته آب در مدت طولانی حرکت موج)

اگراین انتقال انرژی باد و استهلاک انرژی با هم برابر شوند، موج به حالت تعادل رسیده و امواج کاملا توسعه یافته[4] شکل می‌گیرند. این امواج بسیار نادر هستند چرا که جهت و سرعت وزش باد ثابت باقی نمی‌ماند و پیوسته تغییر می‌کند.

امواج دیگر که موثر بر امواج اقیانوسی هستند، امواج دوراً[5] هستند که دارای دوره تناوب بزرگ و نسبتا منظم هستند. مجموع این عوامل باعث تغییرات در امواج منظم و بروز امواج نامنظم اقیانوسی می‌شوند.

❖ پارامترهای امواج نامنظم

مطابق شکل ۴-۱۳ داریم:



شکل ۴-۱۳: پارامترهای امواج نامنظم

ζa : دامنه موج (فاصله بین سطح تراز آب تا قله یا قعر موج)

Ha : ارتفاع موج (فاصله بین قله و قعر متوالی)

T_z : پریود موج بین نقاطع تقاطع صفر متوالی

T_p : پریود موج بین دو قله متوالی

---

1 - Ripple
2 - fetch length
3 - steep wave
4 - fully developed
5 - swell

T_H: کل زمان اندازه‌گیری

از آنجا که این پارامترها دائما در حال تغییر هستند از مقادیر متوسط زیر استفاده می‌شود:

$$\overline{H}_{\frac{1}{100}}, \overline{H}_{\frac{1}{10}}, \overline{H}_{\frac{1}{3}}, \overline{\zeta}_{\frac{1}{3}}, \overline{T}_Z, \overline{T}_P, \overline{H}_a, \overline{\zeta}_a$$

$\overline{H}_{\frac{1}{3}}$: برابر است با متوسط ارتفاع یک سوم بلندترین امواج که بدان ارتفاع مشخصه موج[1] نیز گویند.

$\overline{H}_{\frac{1}{10}}$: برابر است با متوسط ارتفاع ۱۰ درصد بلندترین امواج

$\overline{H}_{\frac{1}{100}}$: برابر است با متوسط ارتفاع ۱ درصد بلندترین امواج

طبق تعاریف فوق مشخص است که داریم: $\overline{H}_{\frac{1}{100}} \rangle \overline{H}_{\frac{1}{10}} \rangle \overline{H}_{\frac{1}{3}}$

برای منطقه خلیج فارس داریم[۱۰]: $\overline{H}_{\frac{1}{3}} = 6m \qquad \overline{T} = 7\sec$

مثال) مشخصات ارتفاع موج از رکوردگیری‌های موج به دست آمده‌اند. ارتفاع متوسط، ارتفاع مشخصه، میانگین $\frac{1}{10}$ و $\frac{1}{100}$ مرتفع‌ترین امواج را به دست آورید.

۱ ارتفاع امواج (متر)	۲ تعداد امواج	۳=۱×۲	۴ = ۱ ×۲ برای $\frac{1}{3}$ بلندترین امواج	۵ = ۱×۲ $\frac{1}{10}$ بلندترین امواج	۶ = ۱×۲ $\frac{1}{100}$ بلندترین امواج
۱	۴	۴	–	–	–
۲	۴۰	۸۰	–	–	–
۳	۳۱	۹۳	(۳ × ۷) = ۲۱	–	–
۴	۲۵	۱۰۰	(۴ × ۲۵) =۱۰۰	(۴ × ۸) = ۳۲	-
۵	۲	۱۰	(۵× ۲) = ۱۰	(۵× ۲) = ۱۰	۵ × ۱ = ۵
مجموع	۱۰۲	۲۸۷	۱۳۱	۴۲	۵

لازم به ذکر است که تعداد امواج تقریبا برابر ۱۰۰ است. $H_{\frac{1}{3}}$ از ۳۳ درصد (۳۴ عدد موج انتهای جدول) و $\frac{۱}{۱۰}$ از تعداد ۱۰ درصد امواج (۱۰موج انتهای جدول) و$\frac{۱}{۱۰۰}$ از تعداد ۱ موج انتهای جدول به دست می‌آید.

$$\overline{H} = \frac{287}{102} = 2.8\ m \qquad \overline{H}_{\frac{1}{10}} = \frac{42}{10} = 4.2\ m$$

$$\overline{H}_{\frac{1}{3}} = \frac{131}{34} = 3.85\ m \qquad \overline{H}_{\frac{1}{100}} = \frac{5}{1} = 5\ m$$

در این امواج همانطور که ملاحظه می‌شود: $\overline{H}_{\frac{1}{100}} \rangle \overline{H}_{\frac{1}{10}} \rangle \overline{H}_{\frac{1}{3}}$

متوسط تغییرات سطح: $\overline{\zeta} = \sum_{n=1}^{N} \frac{\zeta_n}{N}$

واریانس تغییرات سطح نسبت به مقدار متوسط: $m_\circ = \frac{\sum_{n=1}^{N} (\zeta n - \overline{\zeta})^2}{N}$

انحراف معیار RMS[2]: $\sigma_\circ = \sqrt{m_\circ}$

1 - significant wave height
2 - Root Mean Square

❖ **کاربرد سری فوریه در مبحث امواج**

هر موج نامنظم را می‌توان به تعداد زیادی موج منظم تقسیم نمود که از برهم نهی آنها یک موج نامنظم شکل گرفته است (شکل۴-۱۴). برای برهم نهی از قوانین سری فوریه استفاده می‌شود.

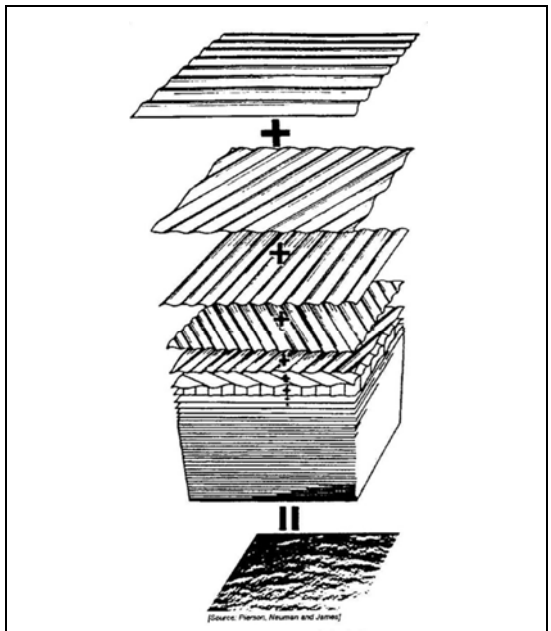
$$\zeta(t) = \bar{\zeta} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n.\cos(\omega_n t) + B_n.\sin(\omega_n t) \qquad \omega_n = \frac{2\pi n}{T} \qquad n = 1,2,3,.....$$

$$B_n = \frac{2}{T_H}\int_0^{T_H} \zeta(t).\sin(\omega_n.t)\ dt \quad A_n = \frac{2}{T_H}\int_0^{T_H} \zeta(t).\cos(\omega_n.t)\ dt$$

رابطه اول را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$\zeta(t) = \bar{\zeta} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \qquad \zeta_{no} = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \qquad \tan\varepsilon_n = -\frac{B_n}{A_n}$$

فواصل بین فرکانس‌ها به صورت روبرو انتخاب می‌شود: $\delta\omega = \frac{2\pi}{T_H}$



شکل ۴-۱۴ : موج نامنظم حاصل از برهم نهی امواج منظم

❖ **طیف امواج[1] *[۱] و [۶] و [۷]***

طیف امواج این امکان را فراهم می‌کند که به کمک امواج منظم تشکیل‌دهنده یک موج نامنظم، بتوان خصوصیات آن موج $\left(\lambda, \overline{H}_{ave}, \overline{H}_{\frac{1}{100}}, \overline{H}_{\frac{1}{10}}, \overline{H}_{\frac{1}{3}}, \overline{T}_P, \overline{T}_Z\right)$ و همچنین انرژی موج را بدست آورید. همان‌طور که می‌دانیم یک موج نامنظم مطابق شکل۱ از تعداد زیادی امواج منظم با جهات انتشار مختلف به دست می‌آید. می‌دانیم که: $E = \frac{1}{2}\rho g \zeta_a^2$

برای n موج منظم تشکیل دهنده یک موج نامنظم داریم: $E_T = \frac{1}{2}\rho g(\zeta_{a1}^2 + \zeta_{a2}^2 ... \zeta_{an}^2)$

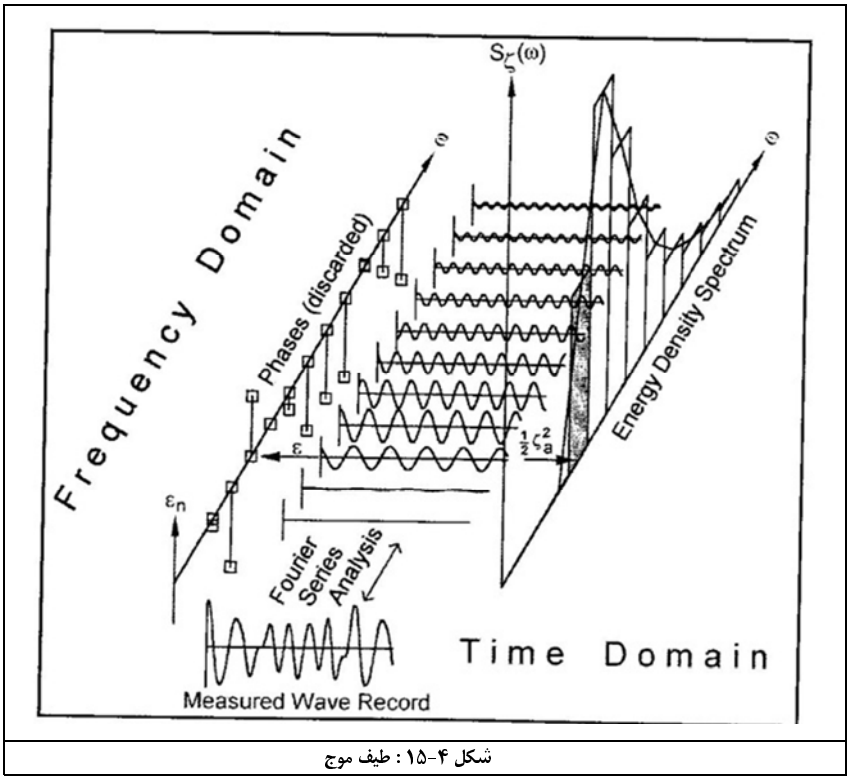
حال اگر پارامتری به نام Sw را به گونه‌ای تعریف کنیم که برای یک موج منظم با فراکانس ω_n و محدوده δ_ω داشته باشیم:

$$E_n = \frac{1}{2}\rho g \zeta_n^2 = \rho g.S_w.\delta\omega$$

آنگاه‌مقادیر $S\omega$ و ωn برای هر موج منظم تشکیل دهنده یک موج نامنظم، یک طیف موج را به وجود می‌آورد که در شکل ۴-۱۵ قابل مشاهده است.

---

1 - Wave Spectrum



شکل ۴-۱۵ : طیف موج

نمودار تشکیل شده بر حسب $S\omega$ و ω همان طیف موج می‌باشد. با استفاده از ممان‌های طیفی که در زیر تعریف می‌شود، پارامترهای موج حاصل می‌شوند.

❖ **ممان‌های طیفی موج**

$$m_n = \int^{\infty} \omega^n . S_{(\omega)} d\omega$$

$$m_o = \int^{\infty} S_{(\omega)} d\omega$$

$$m_2 = \int^{\infty} \omega^2 . S_{(\omega)} d\omega$$

$$m_4 = \int^{\infty} \omega^4 . S_{(\omega)} d\omega$$

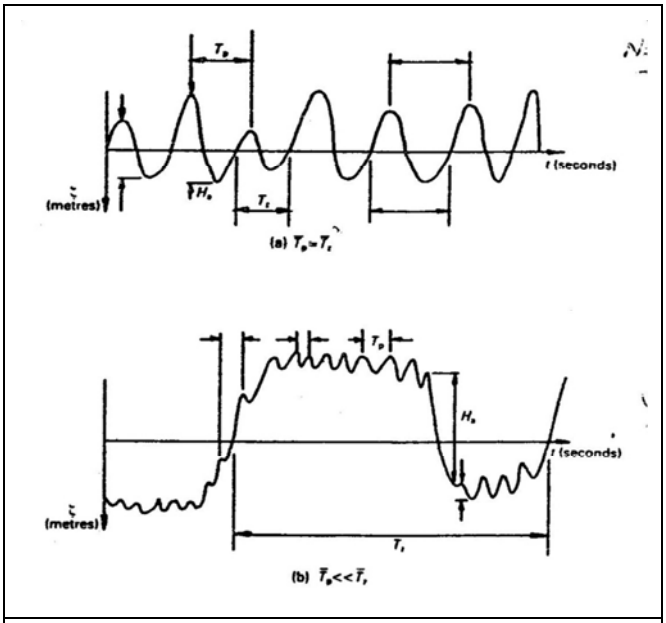
پارامترهای موج به دست آمده از ممان‌های طیفی عبارتند از: $E = \rho g m_\circ$

$$\overline{\omega} = \frac{m_1}{m_\circ} \qquad \overline{T}_z = 2\pi\sqrt{\frac{m_\circ}{m_2}} \qquad \overline{T}_p = 2\pi\sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \qquad \overline{T} = \frac{2\pi m_\circ}{m_1}$$ (دوره متناوب متوسط)

$$\varepsilon = \sqrt{1-\frac{\overline{T}_P^2}{\overline{T}_Z^2}} = \sqrt{1-\frac{m_2^2}{m_\circ . m_4}}$$: ضریب عرض باند

$\varepsilon = \circ$: امواج باند باریک (مطابق شکل ۴-۱۶ بالا)

$\varepsilon = 1$: امواج باند عریض(مطابق شکل ۴-۱۶ پائین) $\overline{H}_{\frac{1}{3}} = 4\sqrt{1-\frac{\varepsilon^2}{2}}.\sqrt{m_\circ}$



شکل ۴-۱۶ : مقایسه امواج باند عریض و کم‌عرض

رابطه $\overline{H}_{\frac{1}{3}}$ برای امواج باند عریض و باند باریک عبارتست از:

$$\begin{cases} \overline{H}_{\frac{1}{3}} = 2.83\sqrt{m_\circ} \\ \overline{H}_{\frac{1}{3}} = 4\sqrt{m_\circ} \end{cases}$$

(برای باند عریض $\varepsilon = 1$)

(برای باند باریک $\varepsilon = \circ$)

$$\overline{H}_{\frac{1}{10}} = 5.09\sqrt{m_\circ}$$

$$\overline{H}_{\frac{1}{100}} = 6.67\sqrt{m_\circ}$$

$$\bar{\lambda} = 2\pi g.\sqrt{\frac{m_\circ}{m_4}}$$

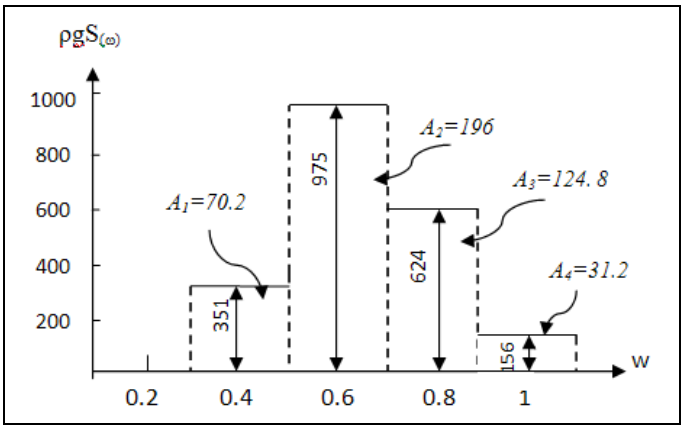
مثال) یک موج نامنظم از چهار موج منظم با مشخصات زیر تشکیل شده است. توزیع انرژی (طیف موج) این موج نامنظم را به دست آورید:

	1	2	3	4
$\lambda(ft)$	1265	562	316	202
$H(ft)$	3	5	4	2

برای امواج منظم $\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}}$, $\omega_1 = 0.4$ $\omega_2 = 0.6$ $\omega_3 = 0.8$ $\omega_4 = 0.1$

$$E_T = \frac{1}{2}\rho g(\zeta_{a1}^2 + \zeta_{a2}^2 + \zeta_{a3}^2 + \zeta_{a4}^2) = \frac{1}{2}(62.4)\left[(1.5)^2 + (2.5)^2 + 2^2 + 1^2\right] = 70.2 + 195 + 124.8 + 31.2 = 421.2 \ \frac{\ell b}{ft}$$

نمایش مقادیر انرژی برای هر موج منظم داریم:



که هر مقدار ρgSw متناظر با یک w خاص از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_T = \frac{1}{2}\rho g\zeta_n^2 = \rho g S_w.\delta\omega \qquad \rho g S_w = \frac{E}{\delta\omega}$$

$$(\rho g S_w)_1 = \frac{70.2}{0.2} = 351 \qquad (\rho g S_w)_2 = \frac{195}{0.2} = 975$$

حال اگر این نمودار بر ρg تقسیم شود، نمودار طیف انرژی بدست می‌آید که نموداری شبیه شکل ۴-۱۷ خواهد بود:

سطح زیر نمودار طیف $= m_\circ$ $\qquad E_T = \rho g m_\circ$

$$\omega_a = \omega_n - \frac{\delta\omega}{2}$$

$$\omega_b = \omega_n + \frac{\delta\omega}{2}$$

برای مولفه nام موج: $E_n = \frac{1}{2}\rho g\zeta_n^2 = \rho g\left[S_{(\omega)}.\delta\omega\right]$

$$\zeta_n = \sqrt{2.\delta\omega.S_{(\omega)}} \qquad \frac{\zeta_n^2}{2\delta\omega} = S_{(\omega)}$$

بدین ترتیب واحد $S(\omega)$ برابر است با: $(\frac{m^2.\sec}{rad})$

بدین ترتیب واحد انرژی می‌شود:

$$E_n = \rho g S.\delta\omega \rightarrow (\frac{t}{m^3})(\frac{m}{s^2})(\frac{m^2.s}{rad})(\frac{rad}{s})$$

انرژی در واحد سطح $= \frac{t}{m^3}.\frac{m^3}{s^2} = \frac{t}{s^2} = t.\underbrace{\frac{m}{s^2}}_{m.a=F}.\frac{1}{m^2}$

$$S_{\ell 1} = \frac{\zeta_{a1}^2}{2\delta\omega} = \frac{(1.5)^2}{2\times 0.2} = 5.625 \quad \frac{ft^2.s}{rad} \rightarrow \quad Area: 5.625\times 0.2 = 1.125$$

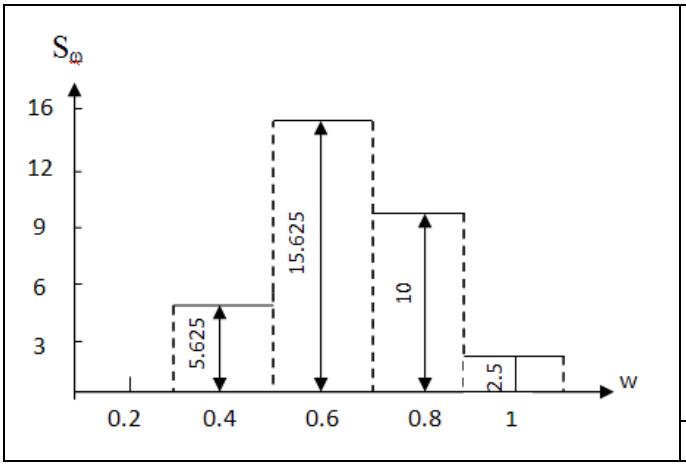
$$S_{\zeta 2} = \frac{\zeta_{a2}^2}{2.\delta\omega} = \frac{(2.5)^2}{2\times 0.2} = 15.625 \quad \frac{ft^2.s}{rad} \rightarrow \quad Area: 15.625\times 0.2 = 3.13$$

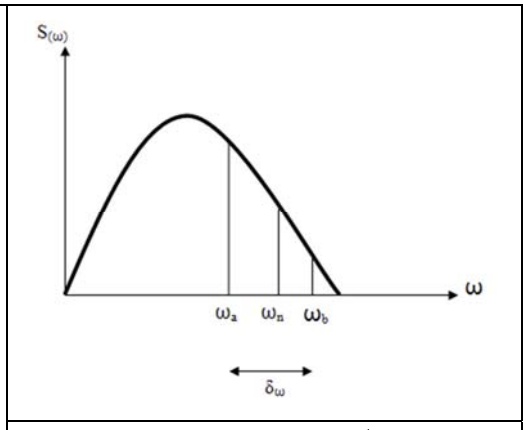
$$S_{\ell 3} = \frac{\zeta_{a3}^2}{2.\delta\omega} = \frac{(2)^2}{2\times 0.2} = 10 \quad \frac{ft^2.s}{rad} \rightarrow \quad Area: 10\times 0.2 = 2$$

$$S_{\ell 4} = \frac{\zeta_{a4}^2}{2.\delta\omega} = \frac{(1)^2}{2\times 0.2} = 2.5 \quad \frac{ft^2.s}{rad} \rightarrow \quad Area: 2.5\times 0.2 = 0.5$$

$Total\ \ Area : 6.755 = m_\circ$

$$E_T = \rho g m_\circ = 62.4 \times 6.755 = 421.5 \quad \frac{lb}{ft}$$





شکل ۴-۱۷ : طیف انرژی موج

برای محاسبه $m_4, m_2, m_\circ$ داریم: (از روابط سیمسون- فرض با سیمسون اول)

1	2	3	4		2× ω^2 =5	6=5×3	7	8	9=8×3
ω	$S(\omega)$	ضریب سیمسون	تابع $m_\circ$	ω^2	$\omega^2 \times S_{(\omega)}$	ضریب سیمون× 5 تابع m2=	ω^4	$S_{(\omega)}.\omega^4$	سیمون × 8
Sum			Sum 0			Sum 2			Sum 4

$$m_\circ = \frac{1}{3} \times \Delta\omega \times Sum_\circ \qquad \overline{H}_{\frac{1}{3}} = 4\sqrt{m_\circ} \qquad E = \rho g m_\circ$$

$$m_2 = \frac{1}{3} \times \Delta\omega \times Sum_2 \qquad \overline{H} = 2.506\sqrt{m_\circ} \qquad \varepsilon^2 = \frac{m_\circ m_4 - m_2^2}{m_\circ m_4}$$

$$m_4 = \frac{1}{3} \times \Delta\omega \times Sum_4 \qquad \overline{H}_{\frac{1}{10}} = 5.09\sqrt{m_\circ} \qquad \overline{H}_{\frac{1}{3}} = 4\sqrt{1 - \frac{1}{2}\varepsilon^2} = 4\sqrt{m_\circ}$$

$$\overline{H}_{\frac{1}{100}} = 6.671\sqrt{m_\circ}$$

$$\overline{T}_Z = 2\pi\sqrt{\frac{m_\circ}{m_2}} \qquad \overline{T}_P = 2\pi\sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \qquad \overline{\lambda} = 2\pi g\sqrt{\frac{m_\circ}{m_4}}$$

❖ **طیف‌های استاندارد امواج** *[۱،۵،۶،۷]*

برای استخراج پارامترهای امواج در مناطق مختلف دریایی چندین طیف موج استاندارد پیشنهاد شده است. این طیف‌ها عبارتند از:

۱ـ طیف برتیشنایدر[1]

این طیف موج استاندارد برای دریاهای آزاد[2] به کار می‌رود که از سوی *ITTC* نیز توصیه شده است. دو دسته رابطه کلی برای طیف برتیشنایدر داریم:

الف) (طیف برتیشنایدر)

$$S_{(\omega)} = \frac{A}{\omega^5}.e^{(\frac{-B}{\omega^4})} \qquad A = 8.1\times10^{-3}\times g^2$$

$$\begin{cases} B = \dfrac{3.11\times10^4}{H_{\frac{1}{3}}^2} & [S_\omega \text{ برحسب } \dfrac{Cm^2}{(\frac{rad}{s})},\ H_{\frac{1}{3}} \text{ بر حسب سانتی‌متر}] \\ B = \dfrac{-33.56}{H_{\frac{1}{3}}^2} & [S_\omega \text{ برحسب } \dfrac{ft^2}{(\frac{rad}{sec})},\ H_{\frac{1}{3}} \text{ بر حسب فوت}] \end{cases}$$

ب) اگر پریود و ارتفاع مشخصه، هر دو در دسترس باشد:

$$S_{(\omega)} = \frac{A}{\omega^5}.e^{(\frac{-B}{\omega^4})}$$

(طیف بریتشنایدر)

$$\begin{cases} A = \dfrac{172.75(H_{\frac{1}{3}})^2}{\overline{T}^4} = 123.8\dfrac{\overline{H}_{\frac{1}{3}}}{\overline{T}_Z^4} \\ B = \dfrac{691}{\overline{T}^4} = \dfrac{495}{\overline{T}_Z^4} \end{cases}$$

رابطه تقریبی بین سرعت باد و ارتفاع مشخصه در دریای آزاد، هنگامی که فقط سرعت باد معلوم است:

سرعت باد برحسب گره	$\overline{H}_{\frac{1}{3}}\ (ft)$
۲۰	۱۰
۳۰	۱۷/۲
۴۰	۲۶/۵
۵۰	۳۶/۶
۶۰	۴۸

روابط اختصاصی زیر را می‌توان برای طیف بریتشنایدر استفاده کرد:

$$m_0 = \int_0^\infty \frac{A}{\omega^5}.\exp(\frac{-B}{\omega^4})d\omega = \frac{A}{4B} = 0.0625\ H_{\frac{1}{3}}^2$$

$$m_2 = \int_0^\infty \frac{A}{\omega^3}.\exp(\frac{-B}{\omega^4})d\omega = \frac{A}{4}.\sqrt{\frac{\pi}{B}} = 2.916\ H_{\frac{1}{3}}^2 \Big/ \overline{T}^2$$

$$m_4 = \int_0^\infty \frac{A}{\omega}.\exp(\frac{-B}{\omega^4})d\omega = \frac{A}{4} = \omega$$

1 - Bertshneider
2 - Open sea

از این روابط و روابط قبلی بیان شده می‌توان نوشت:

$$\overline{H}_{\frac{1}{3}} = 4\sqrt{m_0}$$

ارتفاع مشخصه با رابطه فوق به سطح زیر نمودار مرتبط می‌شود و همچنین داریم:
(mean Zero- crossing wave period)

$$\overline{T}_Z = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = \frac{2\pi}{4\sqrt{\pi B}} = 0.92\overline{T}$$

ضریب عرض باند (ε) برای طیف بریتشنایدر عبارتست از:

$$\varepsilon = \sqrt{1-\frac{m_2^2}{m_0 m_4}} = \sqrt{1-\frac{\overline{T}_p^{\,2}}{\overline{T}_z^{\,2}}} = 1$$

بنابراین این طیف از نوع «باند عریض»[1] می‌باشد. با استفاده از این روابط برای ثابت‌های A و B طیف می‌توان نوشت:

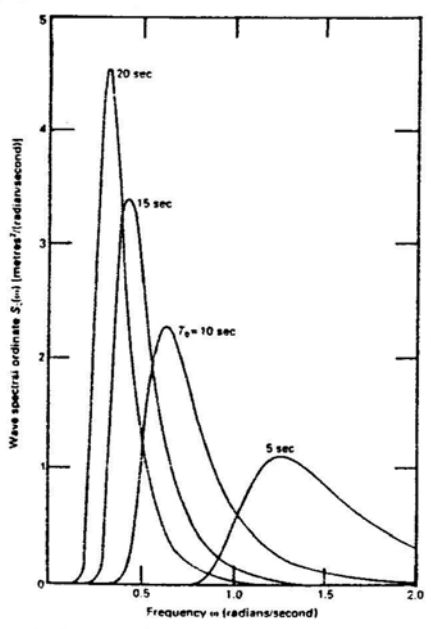
$$A = 172.75\ \frac{\overline{H}_{\frac{1}{3}}^{\,2}}{\overline{T}^{\,4}} = 123.8\frac{\overline{H}_{\frac{1}{3}}^{\,2}}{\overline{T}_z^{\,4}} \qquad B = \frac{691}{\overline{T}^{\,4}} = \frac{495}{\overline{T}_z^{\,4}}$$

فرکانس مربوط به نقطه حداکثر طیف (ω_0) که دوره تناوب مودال[2] نیز گفته می‌شود با مشتق‌گیری از طیف برتیشنایدر $S_{B(\omega)}$ برحسب ω و برابر صفر قرار دادن آن، به صورت زیر به دست می‌آید:

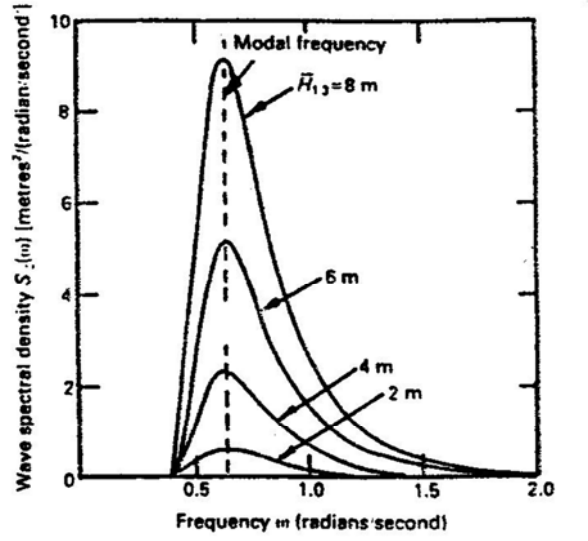
$$\omega_0 = \sqrt[4]{\frac{4B}{5}} = \frac{4.849}{\overline{T}} \qquad T_\circ = \frac{2\pi}{\omega_\circ} = 1.296\,\overline{T} = 1.41\overline{T}_Z$$

❖ تغییرات طیف بریتشنایدر در $\overline{H}_{\frac{1}{3}}$ و پریودهای مختلف

شکل ۴-۱۸ مربوط به طیف بریتشنایدر در ارتفاع مشخصه ثابت ۴ متر و $T_\circ$های مختلف است. طبق روابط قبل دانستیم که $\overline{H}_{\frac{1}{3}}$ مرتبط با $m_\circ$ است و $m_\circ$ نیز مساحت زیر نمودار طیف می‌باشد. لذا اگر $\overline{H}_{\frac{1}{3}}$ را ثابت فرض کنیم، سطح زیر نمودار کلیه نمودارها ثابت و برابر است و نقاط حداکثر نمودارها که معادل $\omega_\circ$ می‌باشد، با تغییر $T_\circ$ تغییر می‌کند.



شکل ۴-۱۸: طیف بریتشنایدر در ارتفاع مشخصه ثابت و پریودهای مختلف



شکل ۴-۱۹: طیف بریتشنایدر در پریود ثابت

1 - *Wide Band*
2 - *Modal period*

در شکل ۴-۱۹ نیز طیف بریتشنایدر برای دوره تناوب مودال ثابت ۱۰ ثانیه و ارتفاع مشخصه‌های متفاوت ترسیم شده است. چون $T_{\circ}$ ثابت است لذا $\omega_{\circ}$ که همان نقطه حداکثر نمودار است، برای همه نمودارها یکسان است. در عوض سطح زیر نمودارها، به دلیل تغییر $\overline{H}_{\frac{1}{3}}$ دچار تغییر می‌شود.

یادآوری می‌شود که طبق رابطه اصلی طیف، هر طیفی با مشخص بودن $\overline{H}_{\frac{1}{3}}$ و یک پریود ($\overline{T}$ یا $\overline{T}_Z$) ترسیم می‌شود.

مثال) الف) با استفاده از فرمول‌های *ITTC*، طیف موج برای سرعت باد ۳۱ گره رسم شود.
ب) ارتفاع مشخصه موج را از این طیف به دست آورید؟

حل: سرعت باد ۳۱ گره تقریبا معادل ارتفاع موج مشخصه ۱۸/۵ فوت است (مطابق جدول قبل)

$$S_{(\omega)} = \frac{A}{\omega^5}.e^{(-\frac{B}{\omega^4})}$$

$$A = 8.1\times10^{-3}\times g^2 = 8.385 \quad \frac{ft^3}{(\frac{rad}{\sec})} \qquad B = \frac{-33.56}{(H_{\frac{1}{3}})^2} = 0.09806$$

هم‌اکنون با تشکیل جدول صفحه بعد، از روابط سیمسون برای انتگرال‌گیری استفاده می‌شود.

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*
ω	$\frac{B}{\omega^4}$	ω	$S_{(\omega)}$	ضرایب سیمسون	تابع $m_{\circ}$ *(4×5)*	ω^2	$\omega^2\times S_{(\omega)}$ (4×7)	تابع m_2 *(5×8)*	ω^4	$\omega^4 .S$ *(4×10)*	تابع m_4 *(11×5)*
0.2 *0.3* *0.4* *2*											
					Sum_o= 646.92			*Sum_2= 327.14*			*Sum_4= 285.48*

پس از محاسبه مقادیر *Sum0*، *Sum2* و *Sum4* داریم: (با فرض سیسمون اول)

$$m_0 = \frac{1}{3}\times\Delta\omega\times Sum_0 = \frac{1}{3}\times0.1\times646.92 = 21.364 ft^2 \qquad m_2 = \frac{1}{3}\times\Delta\omega\times Sum_2 = 10.91\frac{ft^2}{\sec^2}$$

$$m_4 = \frac{1}{3}\times\Delta\omega\times Sum_4 = 9.52\frac{ft^2}{\sec^4} \qquad \bar{H}_{\frac{1}{3}} = 4\sqrt{m_0} = 18.5\ ft$$

$$\bar{H}_{aver} = 2.506\sqrt{m_0} = 11.67\ ft \qquad \bar{H}_{\frac{1}{10}} = 5.09\sqrt{m_0} = 23.65\ ft$$

$$\bar{H}_{\frac{1}{100}} = 6.67\sqrt{m_0} = 31\ ft \qquad \bar{T}_z = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = 8.83\ Sec$$

$$\bar{T}_P = 2\pi\sqrt{\frac{m_2}{m_4}} = 7.2\ Sec \qquad \lambda = 2\pi g\sqrt{\frac{m_0}{m_4}} = 304.5\ ft$$

انرژی بر واحد سطح $E = \rho g m_0 = 1342\frac{\ell b}{ft}$

$$\varepsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4} = 0.42 \qquad \rightarrow \qquad \varepsilon = 0.648$$

۲- طیف جونس واپ[1]

این طیف برای دریاهای محدود[2] و مناطق ساحلی استفاده می‌شود.

$S_{B(\omega)}$: همان طیف بریتشنایدر می‌باشد (که اصلاح شده است).

$$S_{(\omega)} = 0.658 \times C \times S_{B(\omega)}$$

$$C = 3.3 \times \exp\left[\frac{-1}{2\gamma^2}.(\frac{\omega T_0}{2\pi} - 1)^2\right]$$

$$\begin{cases} \omega < \dfrac{2\pi}{T_0} \rightarrow \gamma = 0.07 \\ \omega > \dfrac{2\pi}{T_0} \rightarrow \gamma = 0.09 \end{cases}$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 1.41 \times \overline{T}_z = 1.296\overline{T}$$

طیف *JONSWAP*، تغییر شکل یافته همان طیف بریتشنایدر می‌باشد. شکل ۴-۲۰ مقایسه‌ای بین دو طیف فوق برای ارتفاع مشخصه ۴ متر و دوره تناوب مودال ۱۰ ثانیه نمایش می‌دهد. در این شکل سطح زیر نمودار هر دو برابر است، چرا که ارتفاع مشخصه هر دو یکسان است.

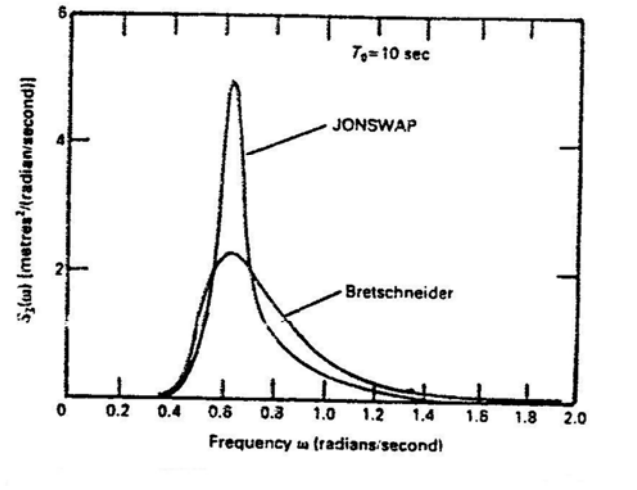
۳- طیف پیرسون ـ مسکویچ[3] *[۵،۲،۷]*

این طیف برای موج دریاهای کاملا توسعه یافته[4] به کار می‌رود که در آن باد طی مدت زمانی طولانی و در طول بادگیر مناسب وزش می‌کند. شکل طیف اخیر بر اساس داده‌های موج ناشی از باد به دست آمده است. امواج ناشی از باد هم از طریق اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری موج فشاری[5] متصل شده به بدنه کشتی جمع‌آوری شده‌اند.

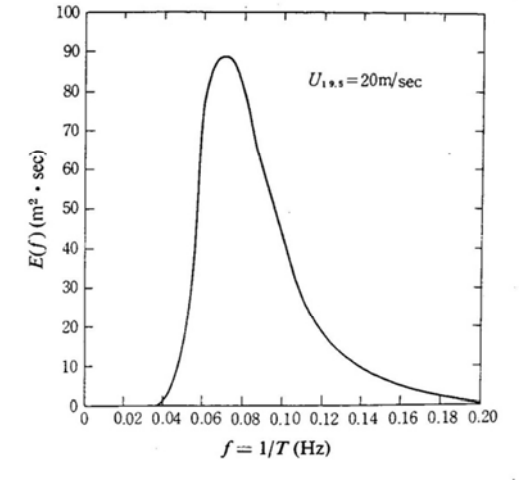
$$S = \frac{8.1\times10^{-3} g^2}{(2\pi)^4 f^5}.\exp\left[-0.74(\frac{g}{2\pi.u_{19.5}.f})^4\right] \quad (m^2.\text{sec})$$

$$f = \frac{1}{T}(HZ)$$

$U_{19.5}$: سرعت باد برحسب $(\frac{m}{s})$ در ارتفاع ۱۹/۵ متری بالای سطح تراز آب دریا. شکل طیف پیرسون ـ مسکویچ در شکل۴-۲۱ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۴-۲۰ : مقایسه طیف جانسواپ و بریتشنایدر



شکل ۴-۲۱ : طیف پیرسون ـ مسکویچ

1 - Jons Wap - Joint North Sea Wave Project
2 - Limited Sea
3 - Pierson-Moskowits
4 - fully developed
5 - Pressure- type wave gage

۴- طیف *Mitsuyasu*

این طیف در سال ۱۹۷۰ توسط *Mitsayasu* پیشنهاد گردید:

$$S = 8.58\times10^{-4}(\frac{g.F}{u_*^2})^{-0.312}\times\frac{g^2}{f^5}\times\exp[-1.25(\frac{g.F}{u_*^2})^{-1.32}\times(\frac{u.f^{-4}}{g}] \quad (m^2.\sec)$$

g: شتاب ثقل

F: طول بادگیر

u_*: سرعت اصطکاکی باد در سطح دریا [1]

$$f = \frac{1}{T}$$

Mitsuyasu معادله فوق را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$S = 1.15\times10^{-4}(\frac{g.F}{u_{10}^2})^{-0.312}\times\frac{g^2}{f^5}\times\exp\left[-99.6\times(\frac{g.F}{u_{10}^2})^{-1.32}\times(\frac{u_{10}.f}{g})^{-4}\right]$$

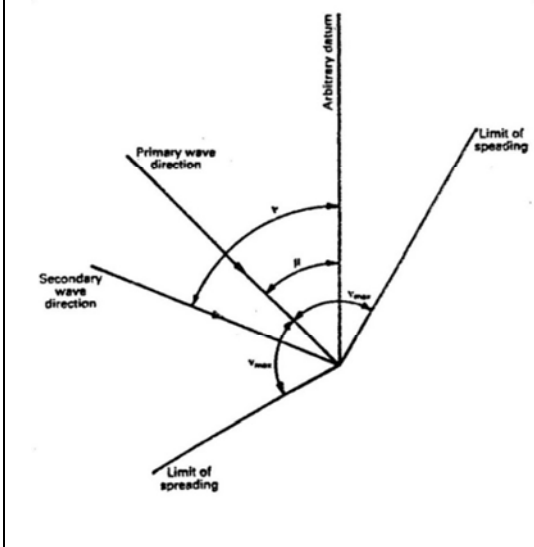
معمولاً طیف امواج هرمنطقه دریایی را معادل یکی از طیف‌های بیان شده در نظر گرفته و با توجه به اطلاعات آماری استخراج شده از آن منطقه، مسائل موج حل می‌گردد.

❖ توزیع جهتی امواج [۲] [۵،۱]

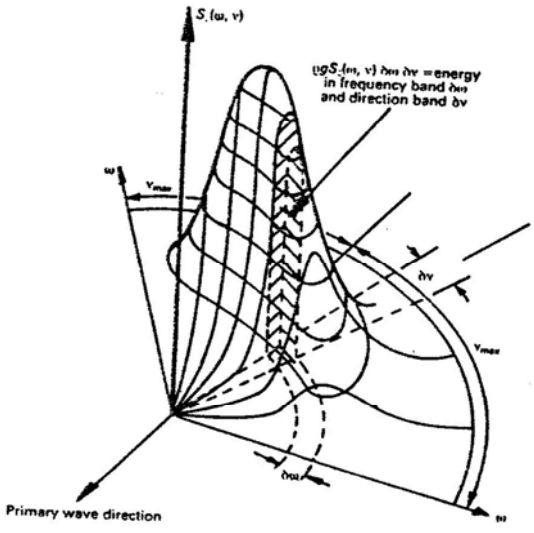
اگر موج دریا کاملا در یک جهت منتشر شود و در همان جهت در زمان‌های مختلف به راه خود ادامه دهد، به آن امواج با قله طولانی [3] گویند. در هر حال به دلیل تغییرات جهت وزش باد، تاثیر ساحل، شکل کف دریا، امواج با قله‌های طولانی به ندرت اتفاق می‌افتند و یک موج به ندرت می‌تواند یک مسیر انتشار ثابت برای مدت طولانی داشته باشد. به چنین امواجی با قله کوتاه [4] گویند. در برخی از تحلیل‌های مهندسی مانند بررسی حرکات رول شناور، توزیع جهتی امواج حائز اهمیت است.

حال مطابق شکل ۴-۲۲، فرض کنید μ جهت اولیه انتشار موج بوده است و ν جهت ثانویه انتشار موج. محدوده تغییرات زاویه انتشار، نسبت به مسیر اولیه نیز برابر $\pm\nu_{\max}$ می‌باشد یعنی: $\nu_{\min} \langle\ \nu-\mu\ \langle \nu_{\max}$

بدین ترتیب طیف انرژی جهت‌دار امواج [5] $S_\zeta(\omega,\nu)$ به نحوی تعریف می‌شود که $\rho g S_\zeta(\omega,\nu).\delta\omega.\delta\nu$ معادل انرژی امواج با فرکانس متعلق به محدوده $\delta\omega$ و درون زاویه $\delta\nu$ باشد. (شکل ۴-۲۳)



شکل ۴-۲۲: توزیع جهتی امواج



شکل ۴-۲۳: توزیع جهتی امواج

1 - wind friction velocity at the sea surface
2 - Wave Directional Spreading
3 - Long Crested Wave
4 - Short Crested Wave
5 - Directional Wave Spectrum

یعنی انرژی موج در این محدوده فرکانسی و محدوده زاویه‌ای پخش شده است. مطابق روابط قبل که داشتیم: $S_\zeta(\omega)=\frac{\zeta_n^2}{2\delta\omega}$ هم‌اکنون برای توزیع جهتی امواج داریم:

$$S_\zeta(\omega)=\frac{\zeta_n^2}{2\delta\omega.\delta\nu}$$

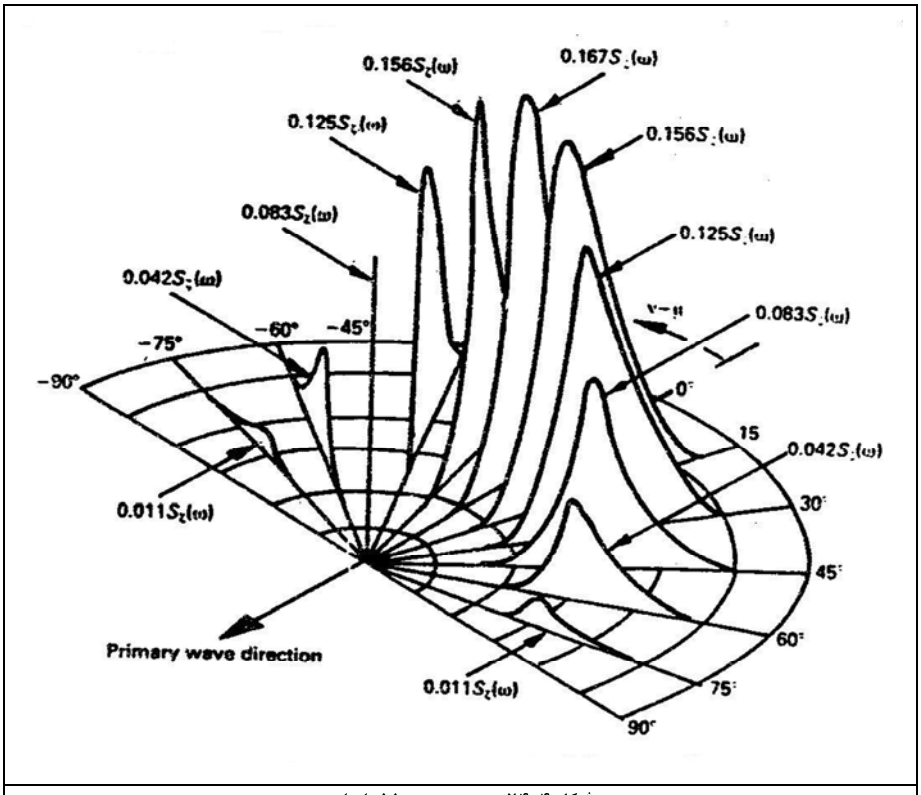
$$S_\zeta(\omega,\nu)=D.\cos^m(\frac{\pi}{2\nu_{\max}}(\nu-\mu))S_\zeta(\omega)$$

که رابطه فوق در مبحث طراحی کشتی‌ها معمولا به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$S_\zeta(\omega,\nu)=\frac{2}{\pi}\cos^2(\nu-\mu).S_\zeta(\omega)$$

یعنی در این رابطه $m=2$ و $\nu_{\max}=90^\circ$ در نظر گرفته شده است.

$m=0$ بیانگر توزیع انرژی به طور یکنواخت در تمامی جهات است که با افزایش m، انرژی بیشتر در جهت انتشار اصلی متمرکز می‌گردد. بنابراین بزرگ در نظر گرفتن m، یعنی خصوصیت امواج با قله‌های طولانی. البته با کوچک انتخاب کردن $\nu_{\max}$ نیز می‌توان به چنین نتایجی رسید که همانطور که بیان شد $m=2$ در بحث تحلیل حرکات کشتی لحاظ می‌شود. اگر بازه بین زوایای مختلف جهت انتشار امواج، مساوی و برابر $\delta\nu$ در نظر گرفته شود، توزیع انرژی طیف را در هر زاویه می‌توان به صورت شکل ۴-۲۴ در نظر گرفت. از آنجا که در رابطه قبل، ضریب پشت $S\zeta(\omega)$، یک مقدار اسکالر می‌باشد، لذا شکل منحنی $S(\omega)$ برای تمام زوایا یکسان است و فقط منحنی در یک مقیاس، ضرب شده است.



شکل ۴-۲۴: توزیع جهتی طیف امواج

- نتیجه این مبحث، منحنی‌های طیف جهتی امواج در شکل می‌باشد. هرچه طیف از مسیر اصلی و اولیه انتشار موج فاصله می‌گیرد، دارای مقادیر کوچکتر می‌شود. یعنی در این شکل، انرژی موج اولیه در زاویه بین ۹۰+ و ۹۰- توزیع شده است و انرژی موج، برابر جمع انرژی کلیه این طیف‌ها می‌باشد. هرچه زاویه‌پخش شدن موج کوچکتر باشد، مقادیر منحنی $S_{(\omega)}$ به مقدار اصلی خود نزدیک‌تر است.

❖ اطلاعات آماری امواج

قبلا بیان داشتیم که طیف امواج با دو مشخصه ارتفاع مشخصه امواج و دوره تناوب متوسط تعریف می‌شوند. به کمک طیف امواج نیز می‌توان سایر خصوصیات امواج را به دست آورد. بنابراین سعی شده با آمارگیری از خصوصیات امواج در مناطق مختلف دریایی (به خصوص ارتفاع مشخصه و پریود) بتوان مشخصه امواج دریا را پیش‌بینی کرد. دوره زمانی استخراج اطلاعات باید حداقل ۱۰۰ برابر پریود بلندترین موج اندازه‌گیری شده در آن منطقه باشد تا اطلاعات از اعتبار برخوردار باشند.

❖ کدهای قدرت دریا (قدرت دریا)[1]

دریانوردان وضعیت دریا را با سرعت باد در منطقه مورد نظر بیان می‌دارند. لذا برخی طبقه‌بندی‌ها برحسب سرعت باد بیان شده است. در یک طبقه‌بندی دیگر، فقط ارتفاع مشخصه امواج بیان شده و از دوره تناوب امواج صرف‌نظر شده است. این طبقه‌بندی در جدول ۴-۲ بیان شده است.

Sea state code	Significant wave height (metres)		Description
	Range	Mean	
0	0	0	Calm (glassy)
1	0–0.1	0.05	Calm (rippled)
2	0.1–0.5	0.3	Smooth (wavelets)
3	0.5–1.25	0.875	Slight
4	1.25–2.5	1.875	Moderate
5	2.5–4.0	3.25	Rough
6	4.0–6.0	5.0	Very rough
7	6.0–9.0	7.5	High
8	9.0–14.0	11.5	Very high
9	Over 14.0	Over 14.0	Phenomenal

جدول ۴-۲: طبقه‌بندی قدرت دریایی (فورس دریایی)

❖ حالات مختلف بیوفورت[2] *[۷۵]*

در سال ۱۸۰۵ *Francis Beaufort* یک مقیاس بصری برای اندازه‌گیری بادهای دریایی ابداع نمود. مقیاس وی، بادها را با مشاهده اثرات آنها بر روی کشتی‌های در حال حرکت و امواج، اندازه‌گیری می‌کند. مقیاس بیوفورت برای ایستگاه‌های هواشناسی خشکی هم استفاده می‌شود. تعریفی از مقیاس باد بیوفورت در شکل۴-۲۵ ارائه شده است.

1 - Sea state
2 - Beaufort force

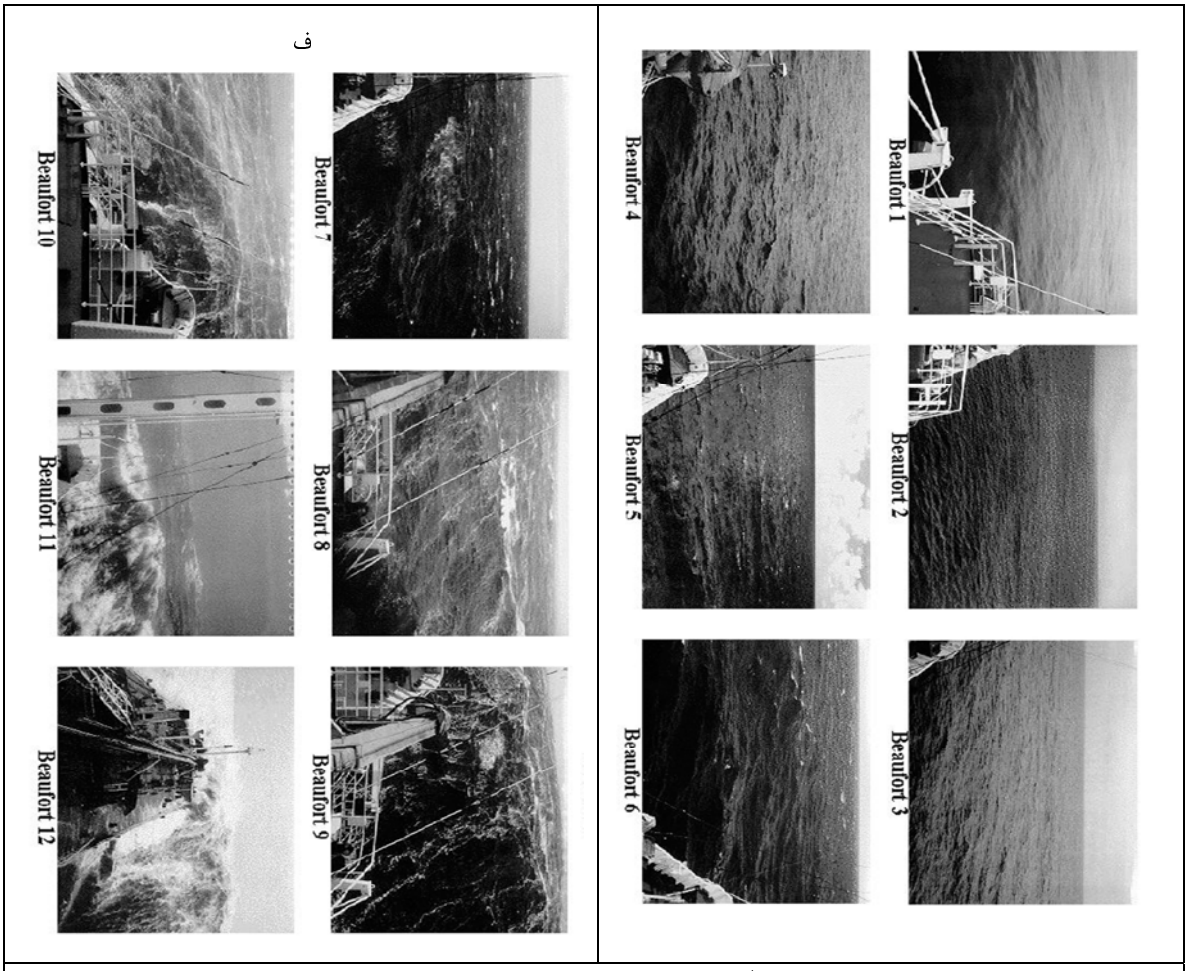
BEAUFORT WIND FORCE SCALE

Beaufort Number	WIND SPEEDS Knots	miles per hr. (U.S. Statute)	meters per sec.	km per hr.	Wind Press. N/m^2	Beaufort description for square rigged ships 1806	Racing Sailor's description (C.A. Marchay, 1964)	U.S. Weather Service description	Dutch KNMI description	Beaufort Number
0	0 1	0 1	0 0.5	0 2				Calm	Windstil	0
1	1 3	1 3	0.5 1.5	2 6	0.14 1.4	Just Steerage Way	Boredom	Light air	zwakke	1
2	4 6	4 7	2.1 3.1	7 11	2.4 5.7	1-3 knots close hauled	Mild pleasure	Light breeze		2
3	7 10	8 12	3.6 5.1	13 19	7.7 16	4-5 knots close hauled	Pleasure	Gentle breeze	matige	3
4	11 16	13 18	5.7 8	20 30	19 41	6-7 knots close hauled	Great Pleasure	Moderate breeze		4
5	17 21	19 24	9 11	32 39	46 67	Hull Syned Full Sail	Delight	Fresh breeze	vrij krach-tige	5
6	22 27	25 31	11 14	41 50	77 115		Delight tinged with anxiety	Strong breeze	krachtige	6
7	28 33	32 38	14 17	52 61	125 172		Anxiety tinged with fear	Moderate Gale	harde	7
8	34 40	39 46	18 21	63 74	182 250		Fear tinged with terror	Gale	stormach-tige	8
9	41 47	47 54	21 24	76 87	270 350		Great terror	Strong Gale	storm	9
10	48 55	55 63	25 28	89 102	360 480		Panic	Whole Gale	zware storm	10
11	56 63	64 75	29 33	104 120	500 630		I want my mummy!!	Storm	zeer zware storm	11
12	above 63	above 75	above 33	above 120	above 630	bare poles	Yes, Mr. Jones	Hurricane	orkaan	12

شکل ۳ـ۱۸ـ مقیاس نیروی باد بیوفورت

شکل ۴-۲۵: مقیاس نیروی باد بیوفورت

تصاویر شکل ۴-۲۶، یک درک کلی از شرایط دریایی مربوط به مقیاس بیوفورت به خواننده می‌دهد. اعلام وضعیت طوفانی، معمولا برای بادهای شدیدتر از بیوفورت فورس ۶ صادر می‌شود.



شکل ۴-۲۶: نمایش وضعیتهای قدرت دریایی

جدول ۴-۳ نمایشی از استخراج پارامترهای طیف موج را در بیوفورت‌های مختلف در دو منطقه مختلف ارائه کرده است.

تخمین پارامترهای طیف موج								
مقیاس بیوفورت	سرعت باد در ارتفاع ۱۹/۵ متری بالای سطح دریا (گره)	مناطق باز اقیانوسی (برتشنایدر)			مناطق دریای شمال (جانسواپ)			
		$H_{1/3}$ (m)	T_1 (sec)	T_2 (sec)	$H_{1/3}$ (m)	T_1 (sec)	T_2 (sec)	γ (-)
۱	۲/۰	۱/۱۰	۵/۸۰	۵/۳۵	۰/۵۰	۳/۵۰	۳/۲۵	۳/۳
۲	۵/۰	۱/۲۰	۵/۹۰	۵/۴۵	۰/۶۵	۳/۸۰	۳/۵۵	۳/۳
۳	۸/۵	۱/۴۰	۶/۰۰	۵/۵۵	۰/۸۰	۴/۲۰	۳/۹۰	۳/۳
۴	۱۳/۵	۱/۷۰	۶/۱۰	۵/۶۰	۱/۱۰	۴/۶۰	۴/۳۰	۳/۳
۵	۱۹/۰	۲/۱۵	۶/۵۰	۶/۰۰	۱/۶۵	۵/۱۰	۴/۷۵	۳/۳
۶	۲۴/۵	۲/۹۰	۷/۲۰	۶/۶۵	۲/۵۰	۵/۷۰	۵/۳۰	۳/۳
۷	۳۰/۵	۳/۷۵	۷/۸۰	۷/۲۰	۳/۶۰	۶/۷۰	۶/۲۵	۳/۳
۸	۳۷/۰	۴/۹۰	۸/۴۰	۷/۷۵	۴/۸۵	۷/۹۰	۷/۳۵	۳/۳
۹	۴۴/۰	۶/۱۰	۹/۰۰	۸/۳۰	۶/۱۰	۸/۸۰	۸/۲۰	۳/۳
۱۰	۵۱/۵	۷/۴۵	۹/۶۰	۸/۸۰	۷/۴۵	۹/۵۰	۸/۸۵	۳/۳
۱۱	۵۹/۵	۸/۷۰	۱۰/۱۰	۹/۳۰	۸/۷۰	۱۰/۰۰	۹/۳۰	۳/۳
۱۲	>۶۴/۰	۱۰/۲۵	۱۰/۵۰	۹/۶۵	۱۰/۲۵	۱۰/۵۰	۹/۸۰	۳/۳

جدول ۴-۳: استخراج پارامترهای طیف موج در بیوفورتهای مختلف

❖ **توابع احتمال وقوع امواج** [۷۶۵]

در مبحث امواج، احتمال وقوع یک موج بسیار اهمیت دارد مثلا امواجی که ارتفاع آن‌ها از مقدار مشخص a_1 بزرگتر است یا امواجی که پریود آنها بزرگتر از T_1 ثانیه باشد. بررسی این احتمال توسط تابع چگالی احتمال $f(x)$ بررسی می‌شود. برای $f(x)$ روابط مختلفی ارائه شده که در قسمت‌های بعدی بیان می‌شود. احتمال وقوع نیز با استفاده از تابع $f(x)$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P\{x\rangle a\}=\int_a^{\infty} f(x)\,dx$$

مثال) با توجه به موجود بودن اطلاعات جدول زیر، احتمال بروز امواج با ارتفاع بیش از ۳/۲۵ متر، مقادیر ارتفاع متوسط امواج و ارتفاع موثر امواج $(H_{\frac{1}{3}})$ را محاسبه کنید.

متوسط ارتفاع موج (متر)	تعداد امواج (*n*)	تابع چگالی احتمال *f(x)*
0.5	*15*	*0.1*
1	*30*	*0.2*
1.5	*55*	*0.367*
2	*21*	*0.14*
2.5	*14*	*0.093*
3	*9*	*0.06*
3.5	*5*	*0.033*
4	*1*	*0.007*
مجموع	***150***	***1***

حل : ۱) احتمال بروز امواج با ارتفاع بیش از ۳/۲۵ متر:

$$P\{\overline{H}\rangle 3.25\}=\int_{3.25}^{\infty} f(x)dx$$

$$P\{\overline{H}\rangle 3.25\}=0.033+0.007=0.04$$

یعنی احتمال وقوع چنین امواجی ۴ درصد می‌باشد.

۲) ارتفاع متوسط امواج:

$$\overline{H}=\frac{0.5\times 15+1\times 30+1.5\times 55+2\times 21+2.5\times 14+3\times 9+3.5\times 5+4\times 1}{150}=1.64m$$

۳) ارتفاع مشخصه موج $(H_{\frac{1}{3}})$

یک سوم بلندترین امواج یعنی تعداد ۵۰ موج از بلندترین امواج (از مجموع ۱۵۰ موج):

$$H_{\frac{1}{3}}=\frac{2\times 21+2.5\times 14+3\times 9+3.5\times 5+4\times 1}{50}=2.51m$$

روش دیگر با استفاده از $f(x)$:

$$H_{\frac{1}{3}}=\frac{2\times 0.14+2.5\times 0.093+3\times 0.06+3.5\times 0.033+4\times 0.07}{\frac{1}{3}}=2.51m$$

یادآوری: جذر متوسط مربعات (*RMS*)

اگر N برابر تعداد کل نمونه‌برداری‌های انجام شده باشد، انحراف معیار استاندارد نوسانات سطح آب (σ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$RMS=\sigma=\sqrt{\frac{1}{N-1}.\sum_{n=1}^{N}\zeta_n^2}$$

مقدار *RMS* یا همان σ (انحراف معیار) با روابط زیر با دامنه موثر و ارتفاع موثر موج مرتبط می‌شود:

$$\begin{cases} \zeta_{\frac{1}{3}} = 2\sigma & \text{(دامنه موثر امواج)} \\ H_{\frac{1}{3}} = 4\sigma & \text{(ارتفاع موثر امواج)} \end{cases}$$

(بدین ترتیب واحد *RMS* نیز واحد طول (m) می‌باشد.)

❖ **تابع چگالی احتمال *f(x)* ـ توزیع گاوسی**

توزیع گاوسی رابطه‌ای برای $f(x)$ ارائه می‌دهد که بدان توزیع نرمال گویند و با این فرض بنا نهاده شده که متوسط مقادیر ζ برابر صفر می‌باشد.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}.\exp\left\{-(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}})^2\right\}$$

در این رابطه x متغیر مورد مطالعه (ارتفاع موج، پریود موج و ...) و σ انحراف معیار آن می‌باشد. با استفاده از این توزیع به طور مثال، احتمال اینکه سطح آب ζ از مقداری مثل a فراتر رود، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P\{\zeta \rangle a\} = \int_a^\infty f(x)\,dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}.\int_a^\infty \exp\left\{-(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}})^2\right\}dx$$

تعدادی از مقادیر مهم a و احتمال متناظر با آن $P\{\zeta \rangle a\}$ در جدول زیر آمده است:

a	$P\{\zeta \rangle a\}$
σ	*0.32*
2σ	*0.046*
3σ	*0.003*

در این تابع داریم: $f(0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} = 0.399$

❖ **تابع چگالی احتمال *f(x)* ـ توزیع رایلی**

تابع توزیع رایلی که برای امواج در محدوده فرکانس محدود و غیروسیع می‌باشد (باند نازک *Narrow band*) به صورت زیر ارائه گردیده است:

$$f(x) = \frac{x}{B^2}.\exp\left\{-(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}})^2\right\}$$

که x متغیر مورد مطالعه و σ انحراف معیار آن می‌باشد. بدین ترتیب احتمال اینکه دامنه موج ζa از مقدار مورد نظر a تجاوز کند، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P\{\zeta_a \rangle a\} = \int_a^\infty f(x)\,dx = \frac{1}{\sigma^2}\int_a^\infty x.\exp\left\{-(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}})^2\right\}dx = \exp(\frac{-a^2}{2\sigma^2})$$

این احتمال برای ارتفاع امواج به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P\{H_\omega \rangle H\} = \exp\left\{-2(\frac{H}{H_{\frac{1}{3}}})^2\right\}$$

این در حالی است که باید یک میدان موج با ارتفاع موثر $H_{\frac{1}{3}} = 4\sigma$ داشته باشیم.

❖ **بررسی حداکثر ارتفاع موج با استفاده از تابع احتمال**

یک راه حل ساده برای به دست آوردن حداکثر ارتفاع موج قابل وقوع این است که احتمال وقوع آن موج را برابر صفر یا نزدیک به صفر قرار دهیم. اگر در رابطه قبل، احتمال را برابر صفر قراردهیم، $H = \infty$ به دست می‌آید که غیرقابل قبول است. از راه حل مهندسی که اغلب استفاده می‌شود، احتمال وقوع آن را $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ در نظر بگیریم:

$$\exp\left\{-2(\frac{H_{\max}}{H_{\frac{1}{3}}})^2\right\} = \frac{1}{1000}$$

$$H_{\max} = 1.86\,H_{\frac{1}{3}}$$

بخش سوم:
دینامیک و معادلات حرکت[۱۱]

فصل اول: پارامترها و دستگاه‌های مختصات

۱-مقدمه[۱]

عملکرد هیدرودینامیکی مطلوب یک وسیله دریایی در مسائل هدایت، ناوبری و کنترل اهمیت بسیار زیادی دارد. یک ابزار مفید و مناسب برای بررسی نحوه عملکرد هیدرودینامیکی وسیله، شبیه‌سازی دینامیکی معادلات حرکت وسیله می‌باشد. برای حل معادلات حرکت باید نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله معلوم باشند. یکی از روش‌ها در تعیین نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله، استفاده از ضرایب هیدرودینامیکی است. این ضرایب در واقع نحوه تغییرات نیروها و گشتاورها را مشخص می‌کنند. بنابراین برای انجام شبیه‌سازی، ابتدا باید ضرایب هیدرودینامیکی وسیله معلوم باشند[۱]. محاسبه ضرایب هیدرودینامیک و معادلات حرکت یک زیردریایی دشوارترین و پیچیده‌ترین نوع حل مسئله است چراکه امکان حرکت در صفحات عمودی و افقی را دارد در حالیکه حرکت کشتی به سطح افقی آب دریا محدود می‌شود لذا در این مبحث به ضرایب هیدرودینامیک و معادلات حرکت زیردریایی پرداخته می‌شود که جامع‌تر است. شبیه‌سازی معادلات حرکت یک وسیله زیرسطحی به حل همزمان شش معادله دیفرانسیل غیرخطی کوپل شده احتیاج دارد، که سه معادله، بیانگر حرکت انتقالی و سه معادله دیگر بیانگر حرکت چرخشی وسیله هستند. برای نوشتن این معادلات باید پارامترها و مختصات‌هایی تعریف شوند. پس از آن، معادلات حرکت در یک دستگاه مختصات نوشته می‌شوند. برای تعیین نیروها و گشتاورهای وارد به وسیله باید ضرایب هیدرودینامیکی تعیین شوند و پس از آن با حل عددی معادلات حرکت، مانورپذیری و پایداری دینامیکی و عملکرد وسیله معلوم می‌شود. در صورت مطلوب نبودن نتایج (عدم پایداری یا مطلوب نبودن نحوه مانور)، طرح دوباره باید به شکلی تغییر کند تا در نهایت به پایداری و مانوردهی مناسب برسیم. بالاخره با معلوم بودن دینامیک سیستم – یعنی نحوه تغییرات نیروها و گشتاورهای بدنه و سطوح کنترل با تغییر زوایای حمله و دریفت و جاگذاری در معادلات حرکت– طراحی کنترل‌کننده صورت می‌گیرد. در این بخش، سعی بر این است که روند ذکر شده در بالا به طور مختصر بررسی و روش‌های مختلف معرفی شوند. به‌همین منظور در فصل اول به معرفی مختصات‌ها و پارامترها، در فصل دوم به معرفی معادلات حرکت و ساده‌سازی‌های متداول، در فصل سوم به بررسی انواع نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله و تعریف ضرایب هیدرودینامیکی و روش‌های تعیین آنها و بالاخره در فصل چهارم به شبیه‌سازی معادلات حرکت، بررسی انواع پایداری و کنترل وسیله خواهیم پرداخت. مجددا یادآوری می‌شود که این مباحث بسیار مختصر و فشرده ارائه شده‌اند و برای مطالعات تکمیلی باید به مراجع اصلی در این زمینه مراجعه نمود.

---

[۱] - *روش دیگری که برای شبیه‌سازی حرکت انجام می‌شود، کوپل کردن یک کد دینامیک سیالات محاسباتی(CFD) و معادلات حرکت شش درجه آزادی است. در این روش دیگر نیازی به تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نیست. زیرا در این روش ابتدا کد CFD بطور مثال در یک زاویه حمله اجرا می‌شود نیروها و گشتاورها از طریق پس پردازش اطلاعات به‌دست می‌آیند. با به‌دست آوردن نیروها و گشتاورها، معادلات شش درجه آزادی حل شده و موقعیت جدید وسیله تعیین می‌شود. وسیله در موقعیت جدید با تکنیک‌های شبکه جابجاشونده، دوباره شبکه‌بندی می‌شود و کد CFD مجدداً اجرا می‌شود تا نیروها و گشتاورها در موقعیت جدید محاسبه شوند. دوباره معادلات شش درجه آزادی با نیروها و گشتاورهای جدید حل می‌شوند تا موقعیت جدید وسیله تعیین شود. این فرایند به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا در بازه زمانی مورد نظر پایداری و نحوه عملکرد مانوری وسیله مشخص شود. از مزایای این روش این است که دیگر به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی احتیاجی نیست و نیروها و گشتاورها بطور مستقیم از حل عددی میدان جریان به‌دست می‌آیند و تقریب‌های ناشی از تخمین ضرایب دیگر وجود ندارد از معایب این روش اولاً پیچیدگی کد محاسباتی CFD است که به‌صورت هوشمند بتواند در موقعیت‌های جدید شبکه‌بندی درست و مناسبی را برای حل مساله ایجاد کند ثانیاً زمان همگرا شدن کد محاسباتی CFD نسبتا زیاد است و به‌همین علت این روند نمی‌تواند برای طراحی کنترل‌کننده که نیاز به تحلیل‌های سریع دارد، استفاده شود امّا برای شبیه‌سازی پرتابه‌ها مناسب‌تر است. همچنین در این کد باید مدل‌های دقیقی برای آشفتگی استفاده شود تا بتواند نیرو و گشتاورها را با دقت خوبی محاسبه کند.*

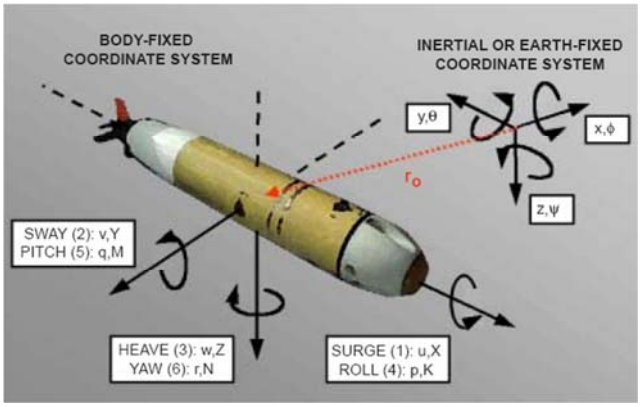
۲- معرفی پارامترها و مختصات‌ها

هدف از مدل‌سازی حرکتی یک وسیله، تعیین وضعیت و موقعیت آن در هر لحظه می‌باشد. برای این منظور سه مختصه مکانی و سه مختصه زاویه‌ای مورد نیاز هستند (۶ درجه آزادی). مدل‌سازی حرکتی شناورهای زیرسطحی شامل مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی است. مدل‌سازی استاتیکی، حرکت با سرعت ثابت (شامل سرعت صفر) و مدل‌سازی دینامیکی، حرکت با سرعت متغیر (حرکت شتابدار) را مدل می‌کند. در مطالعه حرکت شناورهای زیرسطحی دو سیستم مختصات تعریف می‌شود، دستگاه مختصات متحرک XYZ متصل به بدنه، که مبدأ آن معمولاً در مرکز جرم یا مرکز شناوری وسیله قرار دارد. محور X محور طولی، Y محور عرضی و Z محور عمودی (به سمت پایین) وسیله است. وقتی مرکز جرم در صفحه اصلی تقارن باشد مبدأ مختصات معمولاً روی آن قرار داده می‌شود. حرکت این دستگاه مختصات نسبت به دستگاه مختصات متصل به زمین، $X_OY_OZ_O$، اندازه‌گیری می‌شود. که در تحلیل حرکتی وسایل دریایی از حرکت دستگاه مختصات متصل به زمین، صرفنظر می‌شود. این فرض به دلیل سرعت پایین وسایل دریایی فرض معقولی است. به‌همین علت موقعیت‌های مکانی و زاویه‌ای وسیله نسبت به دستگاه مختصات متصل به زمین و سرعت‌های خطی و زاویه‌ای نسبت به دستگاه مختصات متصل به بدنه بیان می‌شوند. جدول (۴-۴)،کمیت‌های مختلف را در دستگاه‌های مختصات متصل به جسم و متصل به زمین را نشان می‌دهد.

	نیروها وگشتاورها	سرعت‌های خطی و زاویه ای	موقعیت و زوایا
حرکت‌در جهت x ***(surge)***	X	u	x
حرکت در جهت y ***(sway)***	Y	v	y
حرکت درجهت z ***(heave)***	Z	w	z
گردش حول محور x ***(Roll)***	K	p	ϕ
گردش حول محور y ***(Pitch)***	M	q	θ
گردش حول محور z ***(Yaw)***	N	r	ψ

جدول(۴-۴): کمیت‌های مورد استفاده در مسائل دریایی

شکل۴-۲۷ مختصات‌ها و پارامترهای مختلف را در دستگاه مختصات متصل به جسم و دستگاه مختصات متصل به زمین، نشان می‌دهد. در شکل ملاحظه می‌شود که موقعیت‌های مکانی و زاویه‌ای در دستگاه متصل به زمین و سرعت‌های خطی و زاویه‌ای در دستگاه متصل به بدنه بیان می‌شوند.



شکل۴-۲۷: دستگاه‌های مختصات و پارامترها در دستگاه مربوطه

بردارهای زیر، حرکت وسیله را توصیف می‌کنند[۱].

$$\eta=\begin{bmatrix}\eta_1 & ,\eta_2\end{bmatrix} \quad : \quad \eta_1=[x,y,x]^T \quad ; \quad \eta_2=[\phi,\theta,\psi]^T$$

$$v=\begin{bmatrix}v_1 & ,v_2\end{bmatrix} \quad : \quad v_1=[u,v,w]^T \quad ; \quad v_2=[p,q,r]^T$$

$$\tau=\begin{bmatrix}\tau_1 & ,\tau_2\end{bmatrix} \quad : \quad \tau_1=[X,Y,Z]^T \quad ; \quad \tau_2=[K,M,N]^T$$

بردارهای η، موقعیت‌های مکانی و زاویه‌ای هستند که در دستگاه مختصات متصل به زمین محاسبه و بیان می‌شوند. بردارهای ν، سرعت‌های خطی و زاویه‌ای و بردارهای τ، نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله هستند، که در دستگاه مختصات متصل به بدنه محاسبه و بیان می‌شوند. (زیرنویس ۱ مربوط به موقعیت‌ها و سرعت‌های خطی و نیروها و زیرنویس ۲ مربوط به موقعیت‌ها و سرعت‌های زاویه‌ای و گشتاورهاست.).

بردار η_2 بیانگر زوایای (ϕ,θ,ψ) است،که به زوایای اویلر معروف هستند. برای تعیین وضعیت قرار گرفتن یک وسیله نسبت به مرجع مختصات متصل به زمین – که برای کنترلِ جهت‌گیری و مسیرِ وسیله نسبت به یک جسم دیگر لازم است – از این زوایا استفاده می‌کنیم. نرخ تغییرات این زوایا نیز در تعیین سرعت‌های مرکز جرم مهم است. همانطور که از شکل ۴-۲۷ پیداست زاویه گردش ψ، (زاویه مثبت ψ به سمت راست وسیله فرض می‌شود) گردش حول محور Z در مختصات مرجع زمینی است. زاویه θ، (زاویه θ مثبت به سمت بالا فرض می‌شود) گردش حول محور Y جدید – بعد از گردش دستگاه مختصات متصل به بدنه حول محور Z به اندازه زاویه ψ – است. زاویه ϕ، گردش حول محور X دوباره جدید شده – بعد از گردش دستگاه مختصات متصل به بدنه حول محور Y به اندازه زاویه θ – است.

بنابراین برای تعیین مسیر حرکت وسیله در دستگاه مختصات زمینی از روی سرعت‌های خطی و زاویه‌ای، باید تبدیل مختصات صورت بگیرد. این کار به وسیله ماتریس‌های تبدیل انجام می‌گیرد.

ماتریس $J_1(\eta_2)$ ماتریس تبدیلی است که تابع زوایای اویلر (ϕ,θ,ψ) است که سرعت‌های خطی را به نرخ تغییر موقعیت‌های مکانی تبدیل می‌کند[۱].

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1$$

$$J_1(\eta_2)=\begin{bmatrix} C\psi.C\theta & -S\psi.C\phi+C\psi.S\theta.S\phi & S\psi.S\phi+C\psi.C\phi.S\theta \\ S\psi.C\theta & C\psi.C\phi+S\phi.S\theta.S\psi & -C\psi.S\phi+S\theta.S\psi.C\phi \\ -S\theta & C\theta.S\phi & C\theta.C\phi \end{bmatrix}$$

که در آن C مخفّف"Cos" و S مخفّف"Sin" است. ماتریس $J_2(\eta_2)$ نیز ماتریس تبدیلی تابع زوایای اویلر (ϕ,θ,ψ) است که سرعت‌های زاویه‌ای را به نرخ تغییر موقعیت‌های زاویه‌ای تبدیل می‌کند.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)\nu_2$$

$$J_2(\eta_2)=\begin{bmatrix} 1 & S\phi.t\theta & C\phi.t\theta \\ 0 & C\phi & -S\phi \\ 0 & S\phi/C\theta & C\phi/C\theta \end{bmatrix}$$

که در آن t مخفّف"tan" است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix}\dot{\eta}_1\\ \dot{\eta}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & J_2(\eta_2)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\nu_1\\ \nu_2\end{bmatrix}$$

به عبارتی می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} C\Psi.C\theta & -S\Psi.C\phi+C\Psi.S\theta.S\phi & S\Psi.S\phi+C\Psi.C\phi.S\theta \\ S\Psi.C\theta & C\Psi.C\phi+S\phi.S\theta.S\Psi & -C\Psi.S\phi+S\theta.S\Psi.C\phi \\ -S\theta & C\theta.S\phi & C\theta.C\phi \end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{z}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & S\phi.t\theta & C\phi.t\theta \\ 0 & C\phi & -S\phi \\ 0 & S\phi/C\theta & C\phi/C\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix}P\\ q\\ r\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}$$

فصل دوم: معادلات حرکت و ساده سازی‌های متداول

۲-۱- معادلات اصلی حرکت

برای بدست آوردن معادلات حرکت از قوانین اصلی مکانیک، استفاده می‌کنیم. این قوانین تغییرات اندازه حرکت خطی و زاویه ای را برابر با نیرو و گشتاور قرار می‌دهند. در اینجا ما فرض می‌کنیم که اولاً بدنه صلب است و ثانیاً مرجع متصل به زمین ثابت است. در نتیجه معادلات حرکت به صورت زیر به‌دست می‌آیند.

$$m\left[\dot{u}-vr+wq-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})\right]=X$$
$$m\left[\dot{v}-wp+ur-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})\right]=Y$$
$$m\left[\dot{w}-uq+vp-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})\right]=Z$$
$$I_x\dot{p}+(I_z-I_y)qr-(\dot{r}+pq)I_{xz}+(r^2-q^2)I_{yz}+(pr-\dot{q})I_{xy}$$
$$+m\left[y_G(\dot{w}-uq+vp)-z_G(\dot{v}-wp+ur)\right]=K$$
$$I_y\dot{q}+(I_x-I_z)rp-(\dot{p}+qr)I_{xy}+(p^2-r^2)I_{zx}+(qp-\dot{r})I_{yz}$$
$$+m\left[z_G(\dot{u}-vr+wq)-x_G(\dot{w}-uq+vp)\right]=M$$
$$I_z\dot{r}+(I_y-I_x)pq-(\dot{q}+rp)I_{yz}+(q^2-p^2)I_{xy}+(rq-\dot{p})I_{zx}$$
$$+m\left[x_G(\dot{v}-wp+ur)-y_G(\dot{u}-vr+wq)\right]=N$$

که در آن $r_G=[x_G,y_G,z_G]^T$ فاصله مرکز جرم وسیله تا مبدأ مختصات روی بدنه، m جرم وسیله و تانسور I، معرف گشتاور اینرسی وسیله حول محورهای مختصات، هستند.

$$I_O=\begin{bmatrix} I_x & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_y & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_z \end{bmatrix}$$

شکل کلی معادلات که در بالا ارائه شد، می‌تواند با در نظر گرفتن مبدأ مختصات متصل به بدنه به صورت‌های زیر، ساده شود:

اگر مبدأ روی مرکز جرم قرار گیرد خواهیم داشت. $r_G=[0,0,0]^T$

همچنین اگر راستای محورهای مختصات با محورهای اصلی اینرسی، یکی باشند، تانسور اینرسی قطری خواهد شد، لذا خواهیم داشت:

$$I_C=diag\left[I_{xc},\ I_{yc},\ I_{zc}\right]$$

البته اگر محورهای بدنه منطبق بر محورهای اصلی اینرسی نباشد می‌توان با چرخاندن محورها، به این حالت رسید، اما عیب این روش این است که دیگر محورهای دستگاه مختصات بدنه، موازی محورهای طولی، عرضی و عمودی وسیله نیستند. اگر مبدأ طوری انتخاب شود که تانسور اینرسی قطری شود در حالی که $r_G\neq\vec{0}$، در این حالت محورها موازی محورهای بدنه باقی می‌مانند. بنابراین معادلات حرکت به شکل زیر در می‌آیند.

$$m\left[\dot{u}-vr+wq-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})\right]=X$$
$$m\left[\dot{v}-wp+ur-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(qp+\dot{r})\right]=Y$$
$$m\left[\dot{w}-uq+vp-z_G(p^2+q^2)+x_G(rp-\dot{q})+y_G(rq+\dot{p})\right]=Z$$
$$I_x\dot{p}+(I_z-I_y)qr+m\left[y_G(\dot{w}-uq+vp)-z_G(\dot{v}-wp+ur)\right]=K$$
$$I_y\dot{q}+(I_x-I_z)rp+m\left[z_G(\dot{u}-vr+wq)-x_G(\dot{w}-uq+vp)\right]=M$$
$$I_z\dot{r}+(I_y-I_x)pq+m\left[x_G(\dot{v}-wp+ur)-y_G(\dot{u}-vr+wq)\right]=N$$

معادلات حرکت را می‌توان در شکل فشرده زیر نوشت. که در آن M_{RB} ماتریس متقارن اینرسی بدنه صلب[1] و $C_{RB}(v)$ بیانگر ماتریس شتاب‌های مایل به مرکز و کوریولیس هستند.

1- Rigid Body

$$M_{RB}\dot{v}+C_{RB}(v)v=\tau_{RB}$$

معادلات شش درجه آزادی ذکر شده در بالا، غیرخطی و کوپل‌شده هستند، در نتیجه حل آن‌ها مشکل خواهد بود. به‌همین دلیل در بررسی رفتار دینامیکی و مانورپذیری زیردریایی‌ها معمولاً هر شش معادله بطور همزمان در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه حرکت به صفحات افقی و عمودی تقسیم‌بندی شده و با خطی سازی معادلات به شکل‌های ساده تری از آن‌ها دست می‌یابیم که حل آن‌ها و در نتیجه مدل سازی دینامیکی را ساده می‌کند. به این معادلات، معادلات صفحه‌ای گفته می‌شود. در این حالت تغییر زوایای اویلر همان سرعت‌های زاویه‌ای در مختصات متصل به بدنه هستند.

$$p=\dot{\phi} \quad ; \quad q=\dot{\theta} \quad ; \quad r=\dot{\psi}$$

۲-۲- معادلات حرکت در صفحه افقی OXY: (Surge – Sway – Yaw)

در این وضعیت، بردار سرعت به صورت زیر خواهد بود و حرکت تنها در صفحه افقی OXY مجاز است.

$$\vec{V}=[u,v,0,0,0,r]$$

معادلات حرکت در حالتی که تانسور اینرسی قطری باشد، به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$m\left[\dot{u}-vr-x_G r^2-y_G\dot{r}\right]=X$$
$$m\left[\dot{v}+ur+x_G\dot{r}-y_G r^2\right]=Y$$
$$I_z\dot{r}+m\left[x_G(\dot{v}+ur)-y_G(\dot{u}-vr)\right]=N$$

علائم استفاده شده برای نشان دادن نیروها و گشتاورها مانند علائم ذکر شده در معادلات شش درجه آزادی هستند، اما باید توجه داشت که این نیروها و گشتاورها با نیروها و گشتاورهای کلی در حالت شش درجه آزادی فرق دارند.

۲-۳- معادلات حرکت در صفحه OYZ: (Sway – Heave – Roll)

در این حالت بردار سرعت به صورت زیر خواهد بود و حرکت تنها در صفحه عمودی OYZ مجاز است.

$$\vec{V}=[0,v,w,p,0,0]$$

معادلات به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$m\left[\dot{v}-wp-y_G p^2-z_G\dot{p}\right]=Y$$
$$m\left[\dot{w}+vp+y_G\dot{p}-z_G p^2\right]=Z$$
$$I_x\dot{p}+m\left[y_G(\dot{w}+vp)-z_G(\dot{v}-wp)\right]=K$$

۲-۴- معادلات حرکت در صفحه عمودی OXZ : (Surge – Heave – Pitch)

در این حالت بردار سرعت بصورت زیر خواهد بود و حرکت تنها در صفحه عمودی OXZ مجازاست.

$$\vec{V}=[u,0,w,0,q,0]$$

معادلات به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$m\left[\dot{u}+wq-x_G q^2+z_G\dot{q}\right]=X$$
$$m\left[\dot{w}-uq-x_G\dot{q}-z_G q^2)\right]=Z$$
$$I_y\dot{q}-m\left[x_G(\dot{w}-uq)-z_G(\dot{u}+wq)\right]=M$$

ذکر این مسأله ضروری به نظر می‌رسد که این معادلات معمولاً با فرض‌هایی، حول نقاط کاری خطی‌سازی می‌شوند. بطورمثال، در حرکت به سمت جلو، سرعت حالت دائم U_0 در جهت محور x ، در مقایسه با سایر مؤلفه‌های سرعت خیلی بزرگ است، بنابراین می‌توان در معادلات از حاصلضرب بقیه سرعت‌ها صرفنظر کرد.

فصل سوم: نیروها و گشتاورها و ضرایب هیدرودینامیکی

تقسیم‌بندی نیروها و گشتاورهایی که در طرف راست معادلات شش درجه آزادی(معادلات حرکت) قرار دارند به صورت‌های مختلفی انجام می‌شود. یک تقسیم‌بندی متداول، تقسیم به نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی است. نیروها و گشتاورهای هیدرواستاتیکی، ناشی از اختلاف نیروی وزن و نیروی شناوری و فاصله محوری و عرضی نقاط مرکز شناوری و مرکز جرم است. نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی ناشی از حرکت سیال حول بدنه، سطوح کنترل و پروانه و همچنین اثرات جرم افزوده هستند. در حقیقت نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی به نحوی از حرکت سیال حول وسیله و توزیع خطوط جریان در اطراف آن، ناشی می‌شوند. نیروها وگشتاورهای جرم افزوده[۱]، نیز هنگام شتاب گرفتن وسیله ظاهر می‌شوند. معمولاً نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله در قالب ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. این ضرایب نحوهٔ تغییرات نیروها و گشتاورها را نسبت به سرعت‌ها، شتاب‌ها و زوایای سطوح کنترل نشان می‌دهند. روش‌های مختلفی برای بیان روابط مربوط به نیروها و گشتاورها وجود دارد. به عنوان نمونه، در مورد سطوح کنترل، از آنجایی‌که هندسه آن‌ها از فویل‌های استاندارد است، نمودار ضرایب لیفت و درگ آنها در زوایای حمله مختلف، مشخص است و بر اساس آن می‌توان نیروها و گشتاورهای مربوط به آنها را محاسبه کرد و با در نظر گرفتن یک ضریب تداخل با نیرو و گشتاورهای سایر اجزاء ترکیب کرد. همچنین در مورد پروانه که ضرایب مخصوص به خود را دارد، نیرو و گشتاور آن جداگانه محاسبه می‌شود و با بقیه اجزاء، با در نظر گرفتن یک ضریب تداخل ترکیب می‌شود. اگر در طراحی پروانه از سری‌های استاندارد مانند سری B استفاده شده باشد ضرایب تراست و گشتاور از نمودارهای مربوطه قابل حصول است. بقیه نیروهای هیدرودینامیکی(شامل نیروهای ناشی از جریان حول بدنه و نیروهای جرم افزوده) را می‌توان از روش‌های مختلفی شامل روش‌های نیمه‌تجربی- نیمه‌تحلیلی، آزمایش مدل و روش‌های مبتنی بر حل عددی میدان جریان(CFD)، تعیین کرد. (البته در برخی مواقع، بدنه و سطوح کنترل با هم در نظر گرفته می‌شوند).

در این بخش سعی بر این است که برای مسائل ذکر شده در بالا توضیحات مختصری ارائه گردد، دقت و محدوده عملکرد آن‌ها نیز تا حد امکان مورد بحث قرارگیرد.

۳-۱- نیروها و گشتاورهای هیدرواستاتیکی

این نیروها و گشتاورها ناشی از اختلاف بین وزن و نیروی شناوری و فاصله بین محل اعمال آن‌ها، یعنی مرکز جرم و مرکز شناوری است. مولفه‌های این نیروها و گشتاورها به شرح زیر هستند.

$$
\begin{aligned}
X_{Static} &= (W-B)\sin\theta \\
Y_{Static} &= -(W-B)\cos\theta.\sin\phi \\
Z_{Static} &= -(W-B)\cos\theta.\cos\phi \\
K_{Static} &= -(y_G W - y_B B)\cos\theta.\cos\phi + (z_G W - z_B B)\cos\theta.\sin\phi \\
M_{Static} &= (z_G W - z_B B)\sin\theta \qquad + (x_G W - x_B B)\cos\theta.\cos\phi \\
N_{Static} &= -(x_G W - x_B B)\cos\theta.\sin\phi \; - (y_G W - y_B B)\sin\theta
\end{aligned}
$$

ازآنجایی که در صفحات OXY, OYZ, OZX به ترتیب، داریم:

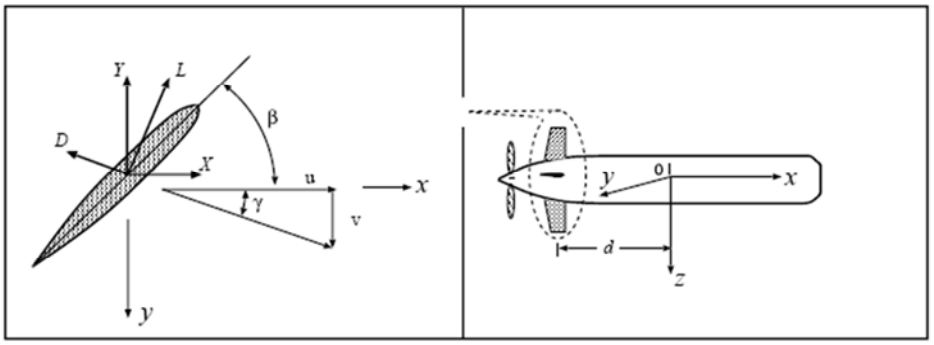
$$(\theta=\phi=0) \text{ و } (\psi=\theta=0) \text{ و } (\phi=\psi=0)$$

این عبارات در معادلات صفحه‌ای ساده می‌شوند.

۳-۲- نیروها و گشتاورهای سطوح کنترل

مقاطع سطوح کنترل معمولاً از مقاطع استاندارد هستند که ضرایب لیفت C_L و درگ C_D، آن‌ها در زوایای حمله مختلف، مشخص است. این اطلاعات به همراه شرایط جریان حول زیردریایی برای تخمین زدن نیروهای هیدرودینامیکی که بر سطوح کنترل وارد می‌شوند مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان نمونه، اگر مقطع سکان یک AUV به صورت شکل۴-۲۸ باشد، که در آن u وv سرعت های طولی و عرضی هستند و زاویه بین سکان و محور x برابر β است. زاویه حمله مؤثر جریان حول سکان، α، برابر است با: $\alpha=\beta+\gamma$ که در آن $\gamma=\tan^{-1}(v/u)$.

۱- *Adedd mass*



شکل۴-۲۸: سطوح کنترل برای حرکت در صفحه افقی

پس نیروهای لیفت و درگ را می‌توان درقالب ضرایب C_L و C_D به صورت زیر نوشت.

$$L = C_L \frac{\rho}{2}(u^2+v^2)A \qquad , \qquad D = C_D \frac{\rho}{2}(u^2+v^2)A$$

که در آن A سطح مقطع سکان و ρ چگالی آب است.

تجزیه نیروها در جهت‌های x,y با فرض اینکه مختصات مرکز فشار سکان در جهت محور x نسبت به دستگاه مختصات متصل به بدنه نقطه *xd* باشد، به صورت زیر خواهد بود:

$$X_{rudder} = +L\sin\gamma - D\cos\gamma$$
$$Y_{rudder} = -L\cos\gamma - D\sin\gamma$$
$$N_{rudder} = (-L\cos\gamma - D\sin\gamma)x_d$$

ساده‌سازی‌هایی نیز ممکن است صورت بگیرد. مثلاً وقتی که γ کوچک باشد، یعنی سرعت عرضی وسیله کم باشد، داریم:

$$X_{rudder} \approx -D \qquad , \qquad Y_{rudder} \approx -L \qquad , \qquad N_{rudder} \approx -L \times x_d$$

همانطور که می‌دانیم ضریب CL تا قبل از واماندگی جریان حول سطوح کنترل، یک تابع خطی از زاویه حمله است. یعنی: $C_L = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}\alpha$

پس می‌توان گفت: $L = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}\frac{\rho}{2}(u^2+v^2)A\alpha$

اگر فرض کنیم سرعت پیشروی در جهت x، یعنی U_0 در مقایسه با بقیه سرعت‌ها خیلی بزرگتر است،داریم: $L \approx \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}\frac{\rho}{2}U_0^2 A\alpha$

عبارت $\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}\frac{\rho}{2}U_0^2 A$ به عنوان ضریب نیروی سکان یعنی، $Y_{\delta r}$تعریف می‌شود که در این رابطه، عبارت $\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$ یک مشخصه مقطع فویل سکان است. به روش مشابه برای دیگر سطوح کنترلی نیز می‌توان ضرایب نیرو و گشتاور را تعریف کرد که جزء مشخصه های هندسی و دینامیکی آنها محسوب می‌شوند.

۳-۳- نیروها و گشتاورهای پروانه

پروانه معمولاً یک نیروی محوری، X_{prop} و یک گشتاور، K_{prop} حول محور x در دستگاه مختصات بدنه ایجاد می‌کند. نیرو و گشتاور پروانه‌ها از نمودارهای مربوطه، بر اساس ضریب پیشروی $J = \frac{U}{n.D}$ (U سرعت پیشروی بر حسب (m/s)، n دور پروانه بر حسب (rps) و D قطر پروانه بر حسب (m)) محاسبه می‌شوند.

$$X_{prop} = K_T(j)\rho n^2 D^4 \quad \leftrightarrow \quad \frac{T}{\rho n^2 D^4} = K_T(j)$$
$$X_{prop} = K_Q(j)\rho n^2 D^5 \quad \leftrightarrow \quad \frac{T}{\rho n^2 D^5} = K_Q(j)$$

Q,T به ترتیب تراست و گشتاور پروانه هستند.

۳-۴- نیروها و گشتاورهای بدنه، جرم افزوده و نیروهای میراکننده سیال

۳-۴-۱- تعریف ضرایب هیدرودینامیکی

نیروها و گشتاورهای حول بدنه در زوایای مختلف جریان، ناشی از توزیع فشار و اصطکاک روی بدنه می‌باشند. نیروهای میراکننده، معادل اتلافات انرژی هیدرودینامیکی سیال، شامل موج‌سازی در حرکت‌های سطحی یا نزدیک به سطح و آشفتگی جریان در لایه مرزی حول بدنه و تولید گردابه‌های انتهایی وسیله هستند. نیروها و گشتاورهای جرم افزوده همانطور که قبلاً گفته شد، هنگام شتاب گرفتن وسیله ظاهر می‌شوند. در حقیقت هنگامی‌که یک جسم درون یک سیال، شتاب می‌گیرد، سیال اطراف جسم، متلاطم شده و آن نیز شتاب می‌گیرد. حرکت دادن سیال اطراف جسم، نیازمند نیرویی بیشتر و اضافه‌تر از آنچه برای شتاب دادن خود جسم می‌باشد، مورد نیاز است. جرم افزوده یک ضریب تناسب مربوط به نیروی اضافی مورد نیاز برای شتاب دادن به جسم است. ذکر این نکته مهم است که هیچ جرم مشخص و متمایزی از آب وجود ندارد که با وسیله در حال حرکت باشد. جرم افزوده تنها یک جرم فرضی است و به بیان دیگر، یک روش مناسب برای توصیف نیروی اضافی مورد نیاز برای هل دادن شتابدار یک جسم درون یک سیال است. جرم افزوده برای محاسبه دقیق حرکت شتابدار وسیله، بسیار با اهمیت است. انرژی جنبشی مورد نیاز برای حرکت دادن سیال، از طریق نیروهای فشاری تأمین می‌شود و از آنجایی‌که فشار سیال به صورت عمود بر بدنه جسم وارد می‌شود، هندسه جسم، پارامتر اصلی تأثیرگذار در تعیین جرم افزوده است. برای تعیین نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریان حول بدنه و نیروهای جرم افزوده، روش‌های متعددی وجود دارد. اما همانطور که قبلاً بیان شد، متداول‌ترین روش برای بیان این نیروها و گشتاورها بیان آنها در قالب ضرایب هیدرودینامیکی است. به‌همین دلیل پیش از اینکه به روشهای مختلف تخمین این ضرایب اشاره کنیم به تعریف مفهوم آنها می‌پردازیم. مشتقات یا ضرایب هیدرودینامیکی برای تقریب زدن نیروها و گشتاورهای وارد شده به وسیله استفاده می‌شوند. در این روش فرض بر این است که حرکت‌های بدنه، انحراف‌های کوچکی از خط مستقیم حرکت هستند. بر اساس این فرض نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه ناشی از یک اغتشاش کوچک، می‌توانند بصورت تناسب مستقیم با یک تغییر کوچک در سرعت مربوطه، تقریب زده شوند. عباراتی که در معادلات حرکت، نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله را نشان می‌دهند، اغلب به وسیله سری تیلور حول یک نقطه مرجع مناسب (آنچه متداول است نقطه کاری یا نقطه تعادل است) بسط داده می‌شوند. در حالت کلی، حرکت زیردریایی از دو قسمت ترکیب شده است. یک حرکت حالت دائم یا متوسط و یک حرکت غیردائم که شامل اغتشاشات کوچک حول حرکت دائم است. در این‌حالت سرعت‌ها به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$U=U_0+u\ ,\ V=V_0+v\ ,\ W=W_0+w\ ,\ P=P_0+p\ ,\ Q=Q_0+q\ ,\ R=R_0+r$$

زیرنویس «0» حالت حرکت دائم و عبارت بعدی حرکت نوسانی را نشان می‌دهد.

برای هواپیما و کشتی‌ها نقطه مرجع، معمولاً حالت تعادل حرکت به سمت جلو با سرعت ثابت U_0 است. این روش برای زیردریایی‌ها نیز استفاده می‌شود. با این فرض سرعت‌ها به‌صورت زیر درخواهند آمد. در این حالت سرعت‌های غیردائم در مقایسه با U_0 کوچک هستند:

$$(u,v,w,p,q,r \ll U_0).$$

$$U=U_0+u\ ,\ V=v\ ,\ W=w\ ,\ P=p\ ,\ Q=q\ ,\ R=r$$

ضرایب هیدرودینامیکی با بسط دادن نیروها و گشتاورها حول این نقطه مرجع (حرکت حالت دائم) بدست می‌آیند. اگر فرض کنیم نیروی محوری X تابعی از سرعت‌ها و مشتقات آن و زوایای سطوح کنترل باشد، از بسط تیلور خواهیم داشت:

$$X = X(u,v,w,p,q,r,\dot{u},\dot{v},\dot{w},\dot{p},\dot{q},\dot{r},\delta r,\delta s,etc)$$

$$\Rightarrow \quad X = X(U_0,0,0,0,0,0,0,...,etc)+uX_u+vX_v+wX_w+pX_p$$

$$+qX_q+rX_r+\dot{u}X_{\dot{u}}+\dot{v}X_{\dot{v}}+\dot{w}X_{\dot{w}}+\dot{p}X_{\dot{p}}+etc$$

مشتقات در معادله بالا، همان ضرایب هیدرودینامیکی هستند. این ضرایب در واقع تغییر در نیروها و گشتاورها به ازاء واحد اندازه تغییرات هستند. به عنوان مثال، X_u که به‌صورت $X_u=(\frac{\partial X}{\partial u})_0$ تعریف می‌شود، نرخ تغییر نیروی X به ازاء واحد سرعت u است، در حالی‌که زیردریایی با سرعت حالت دائم U_0 به سمت جلو پیش می‌رود. از آنجایی‌که این ضرایب نحوه تغییر نیروها و گشتاورهای اعمالی به وسیله را نشان می‌دهند، روی پایداری و حرکت زیردریایی تأثیر می‌گذارند، به‌همین خاطر به عنوان مشتقات پایداری نیز از آنها نام برده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان ضرایب هیدرودینامیکی را به دو نوع استاتیک[1] و دینامیک[2] تقسیم‌بندی کرد. ضرایب استاتیک همانطور که از نام آنها پیداست مربوط به نحوه تغییرات نیرو و گشتاورها نسبت به متغیرهای حالت، یعنی سرعت‌های خطی و زاویه‌ای و سطوح کنترل هستند، به عنوان مثال ضریب $X_u=(\frac{\partial X}{\partial u})$ به‌ه این معنی است که اگر سرعت u به اندازه یک واحد مثلا از نُه به ده تغییر کند نیروی X چقدر تغییر خواهد کرد. این ضریب نمی‌تواند فیزیک تغییر از نُه تا ده را به ما نشان دهد. دقت کنید یک بار

1 static یا steady
2 unsteady

گفته شد از نُه به ده و بار دیگر گفته شد از نُه تا ده. برای بیان فیزیک تغییرات بین نُه تا ده باید از ضرایب دینامیکی استفاده شود به عنوان مثال ضریب $X_{\dot{u}} = (\frac{\partial X}{\partial \dot{u}})$ در واقع ضرایب دینامیکی شرایط غیردائم[1] را مدل می‌کنند.

اثرات نیروها و گشتاورها می‌توانند به صورت تداخلی و در جهت‌های افقی و عمودی با هم کوپل شوند. اثرات محیط اطراف نیز نسبتاً زیاد و مهم است. پس به علت طبیعت پیچیده مسائل هیدرودینامیک در زیرسطح آب، مدل‌های هیدرودینامیکی از بیش از یکصد ضریب مربوطه استفاده می‌کنند که این ضرایب می‌توانند از روش‌های مختلف محاسبه شوند. البته اغلب این ضرایب در رفتار زیر دریایی‌های بزرگ، اثرات کمی دارند و قابل چشم‌پوشی هستند. بعلاوه به علت فرضیات ساده کننده‌ای که در مودهای مختلف حرکت در نظر گرفته می‌شود و یا به‌علت تقارن‌های موجود در بدنه (اغلب بدنه‌ها حداقل حول صفحه xz تقارن دارند) تعدادی از این ضرایب کاسته می‌شوند. به عنوان مثال برای حرکت در صفحه افقی با فرض دریایی آرام، بدون جریان، موج یا اثرات باد، می‌توان فرض کرد که نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی به موقعیت وسیله بستگی ندارند. یعنی ضرایب $X_X, X_y, X_\phi, Y_X, Y_y, Y_\phi, N_X, N_y, N_\phi$ صفر هستند یا به علت تقارن حول صفحه xz ضرایب $X_v, X_{\dot{v}}, X_r, X_{\dot{r}}, Y_u, Y_{\dot{u}}, N_u, N_{\dot{u}}$ صفر هستند. اما با همه این اوصاف برای وسایل با سرعت‌های بالا(مثل اژدر) باید بسیار دقیق و محتاطانه بررسی و برخورد شود، زیرا در سرعت‌های بالا اثرات ضرایب تداخلی و دینامیکی بسیار با اهمیت است.

۳-۴-۲- روش های محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی

روش‌های محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به سه دسته تقسیم می‌شوند.

- روش‌های نیمه‌تجربی- نیمه‌تحلیلی
- روش‌های مبتنی بر آزمایش مدل
- روش‌های مبتنی بر حل عددی یا محاسباتی میدان جریان سیال (CFD)

۳-۴-۲-۱- روش‌های نیمه‌تجربی- نیمه‌تحلیلی

این روش‌ها، روش‌هایی هستند که از روابط ارزیابی شده به‌وسیله آزمایش، برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی هندسه‌های مشخص و تعیین برخی از ضرایب خاص در محدوده‌های معین، استفاده می‌کنند. معمولاً روابط پایه توسط افراد خبره، با برخی فرضیات ساده‌کننده و یا با توجه به مجموعه‌ای از اطلاعات گردآوری شده از آزمایش‌های میدانی و مدل، به‌وسیله روش‌های آماری، استخراج می‌شوند. روابط پایه عمدتاً بر پایه روابط استخراج شده از روش تئوری نواری هستند. این روابط هر کدام ممکن است در محدوده‌ای خاص معتبر باشند. همچنین بوسیله آن‌ها می‌توان تعداد مشخصی از ضرایب هیدرودینامیکی را تعیین کرد. محدوده اعتبار این روابط و اینکه کدام یک از ضرایب را دقیق‌تر (یعنی با خطای کمتر) تقریب می‌زنند، معمولاً به وسیله آزمایش‌های خاصی معین می‌شوند. این روابط عمدتاً ضرایب استاتیکی (مشتقات نیروها و گشتاورها نسبت به سرعت ها) را در محدوده اعتبارشان، برای هندسه‌های مشخص، با دقت خوبی تخمین می‌زنند. در تخمین ضرایب دینامیکی (مشتقات نیروها و گشتاورها نسبت به شتاب‌ها) باید در هر مساله خاص با احتیاط و دقت عمل کرد.

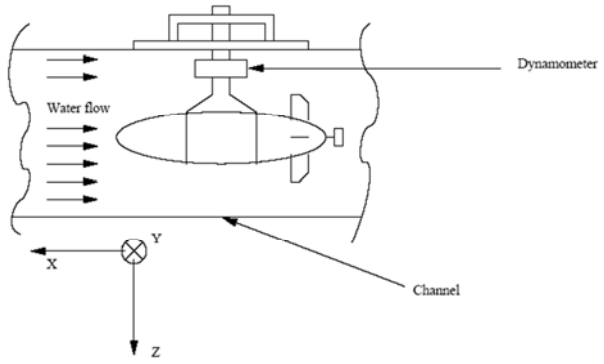
نرم‌افزار MD[2] که معروف‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزار در این گونه روش‌هاست در واقع مجموعه‌ای از روابط نیمه‌تجربی- نیمه‌تحلیلی است که ضرایب آیرودینامیکی را محاسبه می‌کند و برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، اصلاحاتی در آن ایجاد می‌شود. در این نرم‌افزار، روابطی بر پایه روش تئوری نواری و روابطی هم بر اساس مجموعه اطلاعات گردآوری شده نیروی هوایی ایالات متحده وجود دارد.

۳-۴-۲-۲- روش های مبتنی بر آزمایش

در روش‌های مبتنی بر آزمایش، ضرایب لیفت و درگ و گشتاور بدنه و سطوح کنترل، بر حسب زوایای مختلف حمله، دریفت و زوایای سطوح کنترل، از آزمایش مدل در کانال آب یا حوضچه کشش بدست می‌آید. سپس در بازه عملکردی وسیله یک رابطه تقریبی برای این ضرایب تخمین زده می‌شود. استخراج ضرایب دینامیکی (مشتقات نسبت به شتاب‌ها و سرعت‌های زاویه‌ای) به‌وسیله آزمایش‌های دینامیکی صورت می‌گیرد، یعنی حالتی که مدل با یک حرکت نوسانی با فرکانس بالا و دامنه کم به ارتعاش در می‌آید. این‌گونه آزمایش‌ها جزء کارهای پیچیده و پرهزینه هستند زیرا روند انجام آزمایش، برداشت اطلاعات و پردازش آنها پیچیده و هزینه‌بر است. برخی از این آزمایش‌ها مستقیماً برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، نظیر $N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}, N_v, N_r, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Y_v, Y_r$ انجام می‌گیرند. در ادامه مطلب به برخی از این آزمایش‌ها اشاره می‌شود.

۱) آزمایش یک AUV در کانال آب برای محاسبه ضرایب لیفت، درگ و گشتاور بدنه و سطوح کنترل به صورت زیر انجام شده‌است.

1 unsteady
2- Missle DATCOM

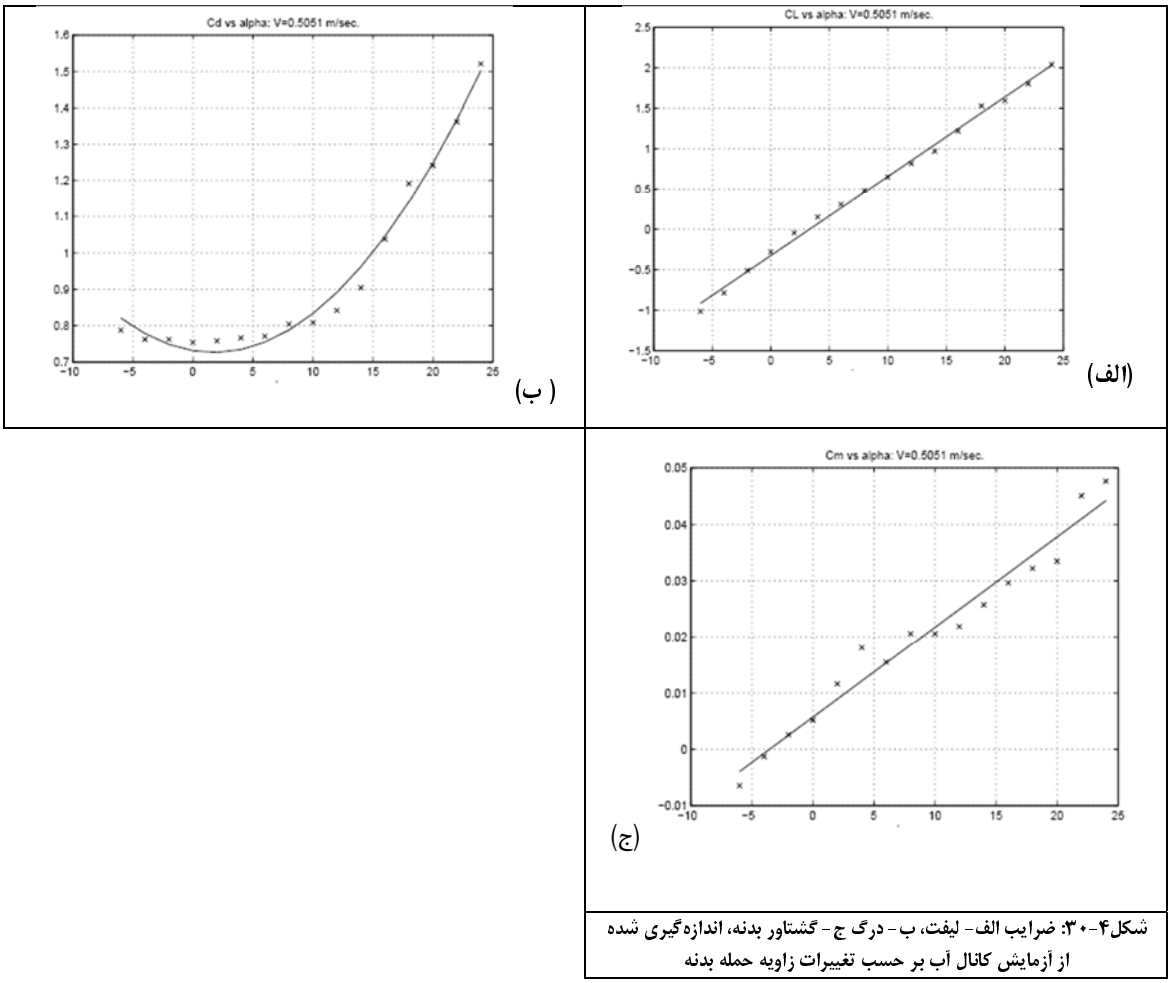


شکل۴-۲۹: تنظیمات انجام شده برای آزمایش کانال آب

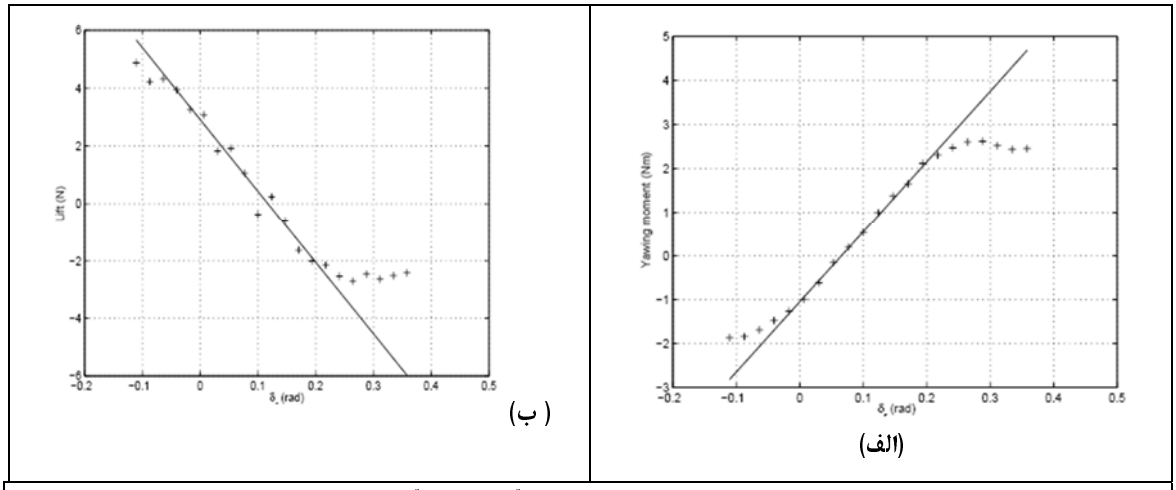
با تغییر دادن زوایای بدنه یا سطوح کنترل (اِلویتور)، نیروهای لیفت، درگ و گشتاورها از طریق ابزار اندازه‌گیری ثبت می‌شوند، سپس با استفاده از روابط زیر به‌صورت بی‌بعد نوشته می‌شوند. نتایج خروجی آزمایش در شکل‌های زیر آورده شده است.

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho A_f V^2}\ ,\quad C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho A_f V^2}\ ,\quad C_m = \frac{M_y}{\frac{1}{2}\rho A_f V^2 L}$$

$$C_{L,\delta e} = \frac{F_{z,e}}{\frac{1}{2}\rho A_f V^2}\ ,\quad C_{m,\delta e} = \frac{M_{y,e}}{\frac{1}{2}\rho A_f V^2 L}$$



شکل۴-۳۰: ضرایب الف- لیفت، ب- درگ ج- گشتاور بدنه، اندازه‌گیری شده از آزمایش کانال آب بر حسب تغییرات زاویه حمله بدنه



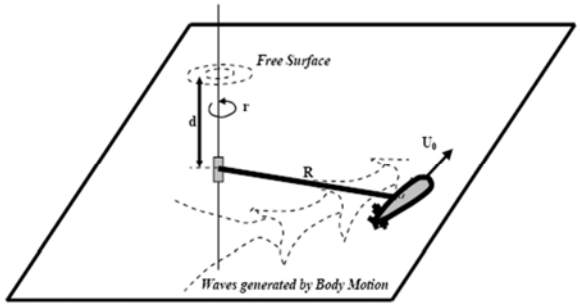
(الف) (ب)

شکل۴-۳۱: ضرایب الف- گشتاور و ب- لیفت الویتور، اندازه‌گیری شده از آزمایش کانال آب بر حسب تغییرات زاویه حمله الویتور

۲) آزمایش‌هایی که برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی نظیر $N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}, N_v, N_r, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Y_v, Y_r$ انجام می‌گیرند. آزمایش‌های ارائه شده در اینجا جامع نیستند، زیرا تنها ضرایب مورد نیاز برای مطالعه پایداری یک شناور زیرسطحی را در حرکت افقی (در عمق ثابت) ارائه می‌دهند. برای حرکات دیگر نیاز به طراحی آزمایش‌های جدید خواهد بود.

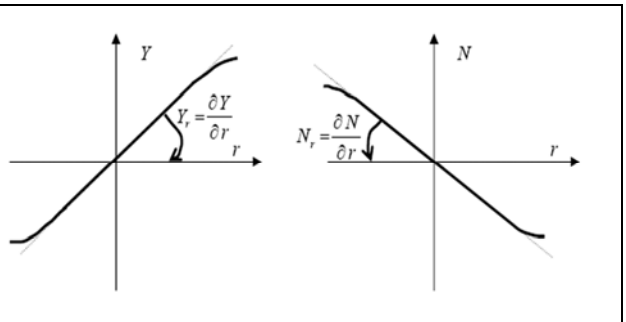
۲-۱) آزمایش بازوی چرخان

برای اندازه‌گیری مشتقات چرخشی Y_r, N_r این آزمایش انجام می‌شود. مدل به بازویی متصل شده است که می‌تواند حول یک محور ثابت در مرکز حوضچه، بچرخد.



شکل۴-۳۲: تنظیمات انجام شده برای آزمایش بازوی چرخان

موقعیت و سرعت زاویه‌ای بازو می‌تواند تغییر کند. اگر محور طولی مدل عمود بر بازو باشد، سرعت عرضی مدل،v، صفر خواهد بود، در نتیجه خواهیم داشت: $r = U_0/R$، که در آن R طول بازو، r سرعت زاویه‌ای و U0 سرعت خطی مدل است. با تغییر R و ثابت نگه داشتن U0، سرعت زاویه‌ای r، تغییر خواهد کرد. با اندازه‌گیری نیروی Y و گشتاور N در مقادیر مختلف r، می‌توان منحنی تغییرات نیرو و گشتاور را نسبت به سرعت زاویه‌ای رسم کرد. شیب نمودارها در مبدأ، ضرایب Y_r و N_r هستند. برای اینکه منحنی‌ها از دقت خوبی برخوردار باشند، این آزمایش باید حداقل سه یا چهار مرتبه انجام شود.



شکل۴-۳۳: نمونه نتایج آزمایش بازوی چرخان

۲-۲) آزمایش کشش

در این آزمایش که از لحاظ هزینه مقرون به صرفه‌تر از آزمایش قبلی است. مدل با یک زاویه دریفت β، همانطوری که در شکل۴-۳۴ نشان داده شده‌است، حرکت می‌کند و ضرایب Y_v, N_v محاسبه می‌شوند.

در این آزمایش داریم: $u = U_0 Cos\beta \quad , \quad v = U_0 \sin\beta$

برای زوایای کوچک β خواهیم داشت: $u \approx U_0 \quad , \quad v \approx U_0 \times \beta$

با توجه به تعریف ضرایب هیدرودینامیکی داریم:

$$Y_v = \frac{\partial Y}{\partial v} = \frac{\partial Y}{\partial (U_0 \beta)} = \frac{1}{U_0}\frac{\partial Y}{\partial \beta}$$

$$N_v = \frac{\partial N}{\partial v} = \frac{\partial N}{\partial (U_0 \beta)} = \frac{1}{U_0}\frac{\partial N}{\partial \beta}$$

با انجام این آزمایش در زوایای مختلف β و رسم منحنی N و Y بر حسب زاویه β می‌توان شیب منحنی‌ها را در مبدأ ضرب در معکوس سرعت U_0، به عنوان ضرایب هیدرودینامیکی Y_v, N_v در سرعت ثابت U_0 در نظر گرفت. این آزمایش نیز مانند آزمایش قبل باید حداقل سه یا چهار مرتبه انجام گیرد.

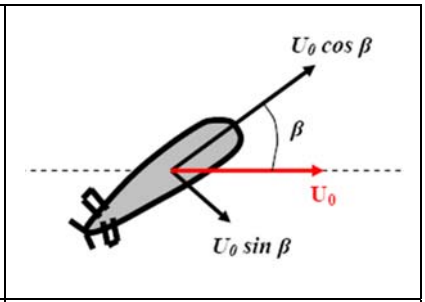
۲-۳) آزمایش حرکت نوسانی در صفحه عرضی[1]

همانطور که از شکل ۴-۳۵ پیداست در این آزمایش، مدل یک حرکت نوسانی در صفحه عرضی با سرعت رو به جلوی ثابت U0، خواهد داشت. اگر نوسان در صفحه عرضی (اغتشاش وارد شده) به شکل سینوسی باشد در مورد سرعت و شتاب داریم:

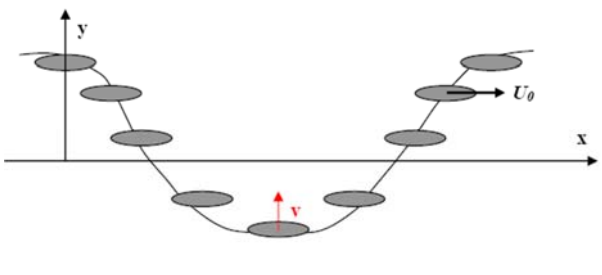
$$y = -a_0 \sin(\omega t)$$

$$v = \dot{y} = -a_0 \omega \cos(\omega t)$$

$$\dot{v} = \ddot{y} = a_0 \omega^2 \sin(\omega t)$$



شکل۴-۳۴: آزمایش کشش با زاویه دریفت



شکل۴-۳۵: آزمایش حرکت نوسانی در صفحه عرضی

دامنه این نوسان باید کوچک باشد زیرا نشان‌دهنده اغتشاش وارد شده به جسم است. سرعت (v) یک تابع کسینوسی است لذا با جابجایی(y)، $\pi/2$ اختلاف فاز دارد و شتاب یک تابع سینوسی است که با جابجایی در یک فاز هستند. بنابراین نیرو و گشتاورهایی که با $\pi/2$ اختلاف فاز نسبت به جابجایی اندازه‌گیری می‌شوند، برای محاسبه ضرایب Y_v و N_v و نیروها و گشتاورهایی که در فاز جابجایی اندازه‌گیری می‌شوند، برای محاسبه ضرایب $Y_{\dot{v}}$ و $N_{\dot{v}}$ استفاده می‌شوند. اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها در فاز جابجایی و با $\pi/2$ اختلاف فاز نسبت به جابجایی با وجود اغتشاش‌هایی که در هنگام اندازه‌گیری کمیت‌ها در آزمایش وجود دارد، کاری پیچیده است که به پس‌پردازش اطلاعات و حذف نویزهای اندازه‌گیری نیاز دارد.

معادله حرکت عرضی، Sway، از مجموعه معادلات حرکت خطی‌سازی شده در صفحه افقی xy (حرکت در عمق ثابت، خطی‌سازی حول سرعت پیشروی ثابت با مؤلفه‌های سرعت اغتشاشی کوچک) به صورت زیر می‌باشد:

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (\frac{Y_{\delta r}}{U} - Y_v)v + (mU - Y_r)r = F$$

در این رابطه $Y_{\delta r}$ ضریب نیروی سکان است در حالی‌که زاویه آن نسبت به بدنه صفر باشد و F نیروی اندازه‌گیری شده از آزمایش می‌باشد. در این آزمایش r و $\dot{r}$ برابر با صفر هستند لذا معادله فوق به صورت زیر، ساده می‌شود:

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (\frac{Y_{\delta r}}{U} - Y_v)v = F$$

1- Planer Sway Oscillating Motion(PSOM)

با جدا کردن دو حالت $v=0$ و $\dot{v}=0$ به‌خاطر اختلاف فازی که دارند، روابط زیر برای ضرایب هیدرودینامیکی ذکر شده بدست می‌آید.

- وقتی $v=0$ یعنی $\dot{v}=a_0\omega^2$ باشد نیروی اندازه‌گیری شده متناسب با $(m-Y_{\dot{v}})\dot{v}$ است. لذا داریم:

$$Y_{\dot{v}} = m - \frac{Y_{in}}{a_0\omega^2} \quad (F = Y_{in})$$

- وقتی $\dot{v}=0$ یعنی $v=-a_0\omega$ باشد نیروی اندازه‌گیری شده متناسب با $(\frac{Y_{\delta r}}{U}-Y_v)v$ است. لذا داریم:

$$Y_v = \frac{Y_{\delta r}}{U} + \frac{Y_{out}}{a_0\omega} \quad (F = Y_{out})$$

همچنین معادله گشتاور یاو با قرار دادن r و $\dot{r}$ برابر با صفر، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (\frac{N_{\delta r}}{U} - N_v)v = N$$

در این رابطه $N_{\delta r}$ ضریب گشتاور سکان است در حالی‌که زاویه آن نسبت به بدنه صفر باشد و N گشتاور اندازه‌گیری شده از آزمایش می‌باشد. در این صورت، با جدا کردن دو حالت $v=0$ و $\dot{v}=0$، روابط زیر برای ضرایب هیدرودینامیکی بدست می‌آید.

$$N_{\dot{v}} = mx_G - \frac{N_{in}}{a_0\omega^2} \quad (N = N_{in})$$
$$N_v = \frac{N_{\delta r}}{U} + \frac{N_{out}}{a_0\omega} \quad (N = N_{out})$$

در این روابط زیرنویس " in "و" out " به ترتیب، مربوط به اندازه نیروها و گشتاورهای اندازه‌گیری شده در فاز جابجایی و یا با $\pi/2$ اختلاف فاز با جابجایی است. این آزمایش قادر است چهار ضریب را با یک بار انجام آن محاسبه کند.

روابط ارائه شده در اینجا فقط برای محاسبات آزمایش ذکر شده در حوضچه کشش، معتبر هستند زیرا در آزمایش باید تمام مؤلفه‌های هندسی و اینرسی نیروها و گشتاورها در نظر گرفته شوند. اما در شبیه‌سازی عددی تنها نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از گرادیان فشار و سرعت اطراف جسم، حضور دارند لذا در این حالت برای استخراج مشتقات هیدرودینامیکی تنها بایستی نیروهای محاسبه شده از حل عددی به صورت زیر، تجزیه شوند.

$$Y = vY_v + \dot{v}Y_{\dot{v}} + rY_r + \dot{r}Y_{\dot{r}}$$
$$N = vN_v + \dot{v}N_{\dot{v}} + rN_r + \dot{r}N_{\dot{r}}$$

با قرار دادن r و $\dot{r}$ برابر با صفر، این روابط به صورت زیر نوشته می‌شود:

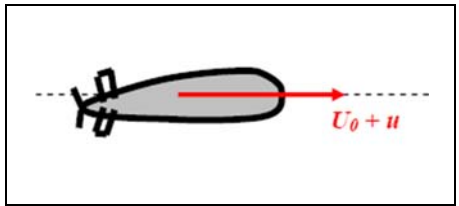
$$Y = vY_v + \dot{v}Y_{\dot{v}}$$
$$N = vN_v + \dot{v}N_{\dot{v}}$$

در این صورت، با جدا کردن دو حالت $v=0$ و $\dot{v}=0$، روابط زیر برای ضرایب هیدرودینامیکی بدست می‌آید:

$$Y_{\dot{v}} = \frac{Y_{in}}{a_0\omega^2} \quad ; \quad Y_v = -\frac{Y_{out}}{a_0\omega}$$
$$N_{\dot{v}} = \frac{N_{in}}{a_0\omega^2} \quad ; \quad N_v = -\frac{N_{out}}{a_0\omega}$$

۲-۴) آزمایش حرکت نوسانی در جهت محور طولی x [1]

برای تعیین ضریب $X_{\dot{u}}$، مدل را با سرعت "$u+U_0$" به سمت جلو حرکت می‌دهیم که در آن $u=-a_0\omega\cos(\omega t)$.



شکل۴-۳۶ آزمایش حرکت نوسانی در صفحه افقی

در این آزمایش، تمرکز بر روی حرکت سرج است. معادله حرکت سرج، از مجموعه معادلات حرکت خطی‌سازی شده در صفحه افقی xy، به صورت زیر نوشته می‌شود:

1- *Perturbed Surge Motion*

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - X_u(u + U) = F$$

مثل حالات قبل با توجه به معادلات حرکت در جهت محور طولی و در نظر گرفتن دو وضعیت $u = 0$ و $\dot{u} = 0$ خواهیم داشت:

- وقتی $u = -a_0\omega$ یعنی $\dot{u} = 0$ باشد نیروی اندازه‌گیری شده متناسب با $-X_u(u + U)$ است. لذا داریم:

$$X_u = -\frac{X_{in}}{U - a_0\omega^2}$$

از آنجایی‌که مقدار $a_0\omega^2$ ناچیز است، این نیرو بیشتر، ناشی از نیروی درگ است.

- وقتی $\dot{u} = a_0\omega^2$ یعنی $u = 0$ باشد داریم:

$$X_{\dot{u}} = m - \frac{X_{out} + UX_u}{a_0\omega^2}$$

در این حالت مانند حالات قبل، زیرنویس‌های " in "و" out " به ترتیب مربوط به اندازه نیروی X در فاز سرعت و خارج از فاز آن است. با این آزمایش دو ضریب هیدرودینامیکی با یک بار انجام آزمایش به‌دست می‌آیند.

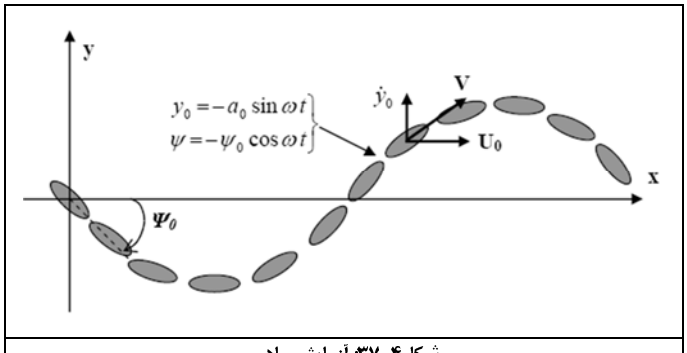
در شبیه‌سازی عددی، نیروی هیدرودینامیکی در جهت x به صورت زیر تجزیه می‌شود.

$$X = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u(u + U) = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u u + X_u U \approx X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u U$$

در حالت $\dot{u} = 0$، نیروی اندازه‌گیری شده، نیروی درگ است ($X_u(u + U) = X_u u + X_u U$)، امّا زمانی که $u = 0$ باشد، نیروی درگ به همراه سهم نیروی $X_{\dot{u}}\dot{u}$ اندازه‌گیری می‌شود ($X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u U$). بنابراین در ابتدا باید نیروی درگ حالت دائم ($X_u U$) را استخراج کنیم، – مقدار نیرویی که نیروی در جهت x حول آن نوسان می‌کند–. در نتیجه مقدار ضریب X_u محاسبه می‌شود ($X_u = \frac{X_{Ave}}{U}$). سپس برای محاسبه مقدار ضریب $X_{\dot{u}}$، نیرو در حالت $u = 0$ خوانده شده و مقدار مربوط به حالت دائم($X_u U$) از آن کاسته می‌شود ($X_{\dot{u}} = \frac{X_{out} - X_u U}{a_0\omega^2}$).

۲-۵) آزمایش ماهی[1]

این آزمایش شبیه آزمایش حرکت نوسانی در صفحه عرضی است ولی علاوه بر نوسان در جهت عرضی، زاویه Ψ نیز با همان فرکانس نوسان دارد. با این آزمایش محاسبه ضرایب $N_{\dot{r}}, N_{\dot{r}}, Y_{\dot{r}}, Y_{\dot{r}}$ امکان‌پذیر است. این آزمایش مربوط به سرعت زاویه‌ای و شتاب است. برای محاسبه ضرایب N_r , Y_r باید مقادیر v , $\dot{v}$, r برابر با صفر قرار داده شوند و برای محاسبه ضرایب $N_{\dot{r}}, Y_{\dot{r}}$ باید مقادیر v , $\dot{v}$, $\dot{r}$ برابر صفر باشند. شکل۴-۳۷ به صورت شماتیک، نحوه انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. سرعت رو به جلوی وسیله، ثابت و برابر U0 می‌باشد. مؤلفه عرضی سرعت در مختصات xy معادل $\dot{y}$ است. سرعت برآیند V در امتداد محور جسم قرار می‌گیرد لذا با توجه به ثابت بودن مقدار U0 مقدار سرعت عرضی آن، v در مختصات متصل به بدنه در طول انجام آزمایش، صفر می‌باشد. بنابراین $v, \dot{v}$ هر دو صفر هستند. مشابه آنچه در مورد حرکت نوسانی عرضی، انجام گرفت در اینجا نیز برای حرکت نوسانی یاو با در نظر گرفتن دو وضعیت $r = 0$ و $\dot{r} = 0$ چهار ضریب $N_r, N_{\dot{r}}, Y_r, Y_{\dot{r}}$ استخراج می‌شوند.



شکل۴-۳۷: آزمایش ماهی

معادلات حرکت عرضی و گشتاور یاو با فرض $v = \dot{v} = 0$ به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$(mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (mU - Y_r)r = F$$
$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + (mx_G U - N_r)r = N$$

1- *Fish Experiment*

در این رابطه F و N نیرو و گشتاور اندازه‌گیری شده هستند. با جدا کردن دو حالت $r = 0$ و $\dot{r} = 0$، چهار ضریب، به صورت زیر استخراج می‌شوند.

$$Y_{\dot{r}} = mx_G - \frac{Y_{in}}{\psi_0 \omega^2} \quad ; \quad Y_r = mU - \frac{Y_{out}}{\psi_0 \omega}$$
$$N_{\dot{r}} = I_z - \frac{N_{in}}{\psi_0 \omega^2} \quad ; \quad N_r = mx_G U - \frac{N_{out}}{\psi_0 \omega}$$

در صورت شبیه‌سازی عددی، روابط فوق به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$Y_{\dot{r}} = \frac{Y_{in}}{\psi_0 \omega^2} \quad ; \quad Y_r = \frac{Y_{out}}{\psi_0 \omega}$$
$$N_{\dot{r}} = \frac{N_{in}}{\psi_0 \omega^2} \quad ; \quad N_r = \frac{N_{out}}{\psi_0 \omega}$$

تا اینجا روش‌های متفاوتی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی در صفحه افقی، بیان شده‌اند. در جدول ۴-۵ مزایا و معایب هر کدام از این روش‌ها آورده شده است.

Name of Experiment	Hydrodynamic coeff. determined	Number of program runs
Rotating Arm	N_r, Y_r	At least 3 or 4 times
Drift Angle towing	N_v, Y_v	At least 3 or 4 times
PSOM experiment	$N_v, N_{\dot{v}}, Y_v, Y_{\dot{v}}$	once
Oscillatory surge	$X_u, X_{\dot{u}}$	once
Fish experiment	$N_r, N_{\dot{r}}, Y_r, Y_{\dot{r}}$	once

جدول ۴-۵: مزایا و معایب روش‌های مختلف آزمایش ضرایب هیدرودینامیکی

همانطور که مشخص است سه نوع آزمایش آخر، نسبت به دو مورد اول، ارجحیت دارند زیرا ضرایب جامع‌تری از آن‌ها محاسبه می‌شود، به علاوه زمان کمتری صرف می‌کنند و روش‌های کارآمدتری محسوب می‌شوند. به این دسته از روش‌ها، تکنیک‌های نوسانی گفته می‌شود.

۳-۴-۲-۳- روش‌های مبتنی بر حل عددی میدان جریان (دینامیک سیالات محاسباتی CFD)

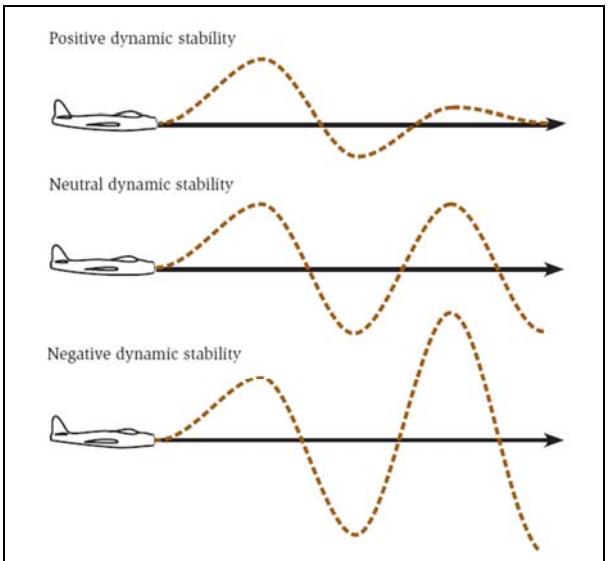
استفاده از روش‌های نیمه تجربی- نیمه‌تحلیلی، تنها زمانی رضایت‌بخش است که به هندسه‌های متقارن محوری اعمال شوند، اما زمانی که به بدنه‌هایی با هندسه‌های پیچیده‌تر غیر از حالت متقارن محوری اعمال شوند تخمین ضعیفی خواهند داد. به علاوه همانطور که قبلاً اشاره شد بازه عملکرد برخی از روابط محدود است و در همه موارد صدق نمی‌کند. از طرفی همانطور که از مطالب بیان شده در مورد روش‌های مبتنی بر آزمایش پیداست، این روش‌ها از لحاظ قیمت و زمان صرف شده بسیار سنگین هستند، زیرا از طرفی هزینه تجهیزات و همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها بالاست و از طرف دیگر کالیبره کردن تجهیزات آزمایش و برداشت اطلاعات و در نهایت پس پردازش اطلاعات بسیار پیچیده و پرهزینه می‌باشند. بنابراین این روش تنها زمانی توجیه پذیر خواهد بود. به‌همین خاطر یک نیاز جدی و آشکار به یک روش قابل توسعه به هندسه‌های پیچیده‌تر و غیرعمومی که بازه عملکردی آن هم محدود نباشد، از طرفی از لحاظ قیمت و بازه عملکردی نیز مناسب باشند، برای مراحل اولیه طراحی وجود دارد.

یک روش جایگزین، ترکیب تکنیک های تجربی به همراه قابلیت های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان سیال به‌منظور مدل‌سازی مجازی شرایط موجود در آزمایش‌های آزمایشگاهی، در فضای نرم‌افزاری می‌باشد. به علت تکامل نرم‌افزارهای تجاری و علمی CFD و همچنین افزایش توان محاسباتی کامپیوترها در سال های اخیر، امکان استفاده از این نرم‌افزارها در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی هندسه‌های مختلف به‌وجود آمده است. در عمل برای اعتبارسنجی نتایج این نرم‌افزارها، از نتایج در دسترس آزمایش مدل‌های گوناگون استفاده می‌شود و بعد از عملیات اعتبارسنجی در صورت تطابق نتایج شبیه سازی عددی با نتایج آزمایش، از این نرم‌افزارها برای انجام مطالعات پارامتریک بر روی هندسه های مختلف شناورهای زیرسطحی استفاده می‌شود.

در بخش قبل به برخی روابط موجود برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی در صفحه افقی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی اشاره گردید.

فصل چهارم: شبیه‌سازی دینامیکی، بررسی پایداری، کنترل مدار باز و مدار بسته

پس از استخراج معادلات حرکت مربوط به حرکت و مانور خاصی از وسیله که قرار است شبیه‌سازی شود و همچنین، تعیین ضرایب هیدرودینامیکی مربوطه، معادلات حرکت به صورت عددی، حل می‌شوند تا در زمان‌های مختلف، سرعت‌های خطی و زاویه‌ای وسیله تعیین شوند. با استفاده از سرعت‌های خطی و زاویه‌ای که در دستگاه مختصات متصل به بدنه بیان شده‌اند با یک تبدیل مختصات، نرخ تغییر موقعیت‌های مکانی و زاویه‌ای وسیله در دستگاه مختصات متصل به زمین تعیین می‌شوند و با یک انتگرال‌گیری ساده، موقعیت و حالت زاویه‌ای وسیله محاسبه می‌شود. هدف از شبیه‌سازی حرکت، بررسی پایداری و قابلیت مانوردهی وسیله است. پایداری در حقیقت توانایی برگشتن وسیله به یک حالت تعادل بعد از یک اغتشاش اولیه است، بدون اینکه عمل اصلاحی مثل استفاده از قدرت سیستم رانش یا سطوح کنترلی، روی آن انجام شود و قابلیت مانوردهی، قابلیت وسیله برای طی یک مسیر از پیش طراحی شده و یا انجام مانورهای خاص و استاندارد است. انواع مختلفی از پایداری مد نظر است. برای درک مفاهیم مختلف پایداری باید انواع پایداری‌ها را تقسیم‌بندی کنیم. پایداری هیدرواستاتیک در حالتی بررسی می‌شود که وسیله ساکن است. بررسی این پایداری شامل تعیین محل نقاط مرکز بویانسی، مرکز جرم و مرکز متاسنتر است. اگر فرض کنیم وسیله در یک وضعیت دائم[1] در حال حرکت است، اگر به‌طور ناگهانی یک اغتشاش به آن وارد شود، توانایی وسیله را برای برگشتن به حالت تعادل، پایداری استاتیکی می‌گویند. به عبارت دیگر، پایداری استاتیکی مربوط می‌شود به تمایل اولیه یک جسم برای برگشتن به حالت حرکتی اصلی (قبلی) خود هنگامی که یک اغتشاش خارجی به آن اعمال می‌شود. هنگامی که وسیله در حال حرکت غیردائم[2] یا حرکت شتاب‌دار است، مثلاً حالتی که با یک نرخ زاویه‌ای متغیر (شتاب‌دار) حول محور Z حرکت یاو دارد، اگر متغیرهای حالت آن به‌طور ناگهانی و زیاد، افزایش نیابند و در یک محدوده قابل قبول و منطقی باقی بمانند، وسیله از لحاظ دینامیکی پایدار است. به عبارت دیگر، پایداری دینامیکی در مورد چگونگی تغییر حرکت ایجاد شده توسط اغتشاش وارده شده به وسیله، در طی زمان، بحث می‌کند. به‌عنوان نمونه در مثال ذکر شده، اگر وسیله در هنگام حرکت یاو ناگهان به دور خودش بچرخد یعنی زاویه رول ناگهان بطور غیرمنطقی زیاد شود یا اینکه زاویه پیچ[3] خیلی زیاد شود، می‌گوییم وسیله از لحاظ دینامیکی ناپایدار است. همانطور که بیان شد، پایداری دینامیکی مربوط می‌شود به اثرات دراز مدت اغتشاش وارد شده به وسیله و این مسأله ایجاب می‌کند تا علاوه بر بررسی تمایل اولیه جسم بعد اعمال اغتشاش در حالت تعادل (بررسی پایداری استاتیکی) به مطالعه رفتار وابسته به زمان یک سیستم دینامیکی بپردازیم. اندرسون[4] ماهیت پایداری دینامیکی را به صورت زیر بیان می‌کند:



شکل ۴-۳۸: سه نوع از پایداری دینامیکی در صفحه طولی (*Logitudinal*)

" یک جسم به صورت دینامیکی پایدار است اگر در خارج از وضعیت خودش (تریم)، پس از طی یک دوره زمانی، سرانجام به حالت تعادل خود برگردد و در این وضعیت باقی بماند. "

بررسی پایداری دینامیکی یک وسیله بسیار ضروری است زیرا مربوط به چگونگی پاسخ (رفتار) آن وسیله به اعمال یک اغتشاش خارجی است که در ابتدای اعمال آن کوچک می‌باشد. اگر این اغتشاش، کوچک بماند یا بعد از اعمال شدن، ناپدید شود، در این حالت، وسیله بطور ذاتی، پایدار است. اما اگر این اغتشاش، افزایش یابد، در این حالت، وسیله بطور ذاتی ناپایدار است.

سه نوع از پایداری دینامیکی در صفحه طولی[5] در شکل نشان داده شده است. تصویر بالایی در این شکل، پایداری دینامیکی مثبت را نشان می‌دهد. وقتی وسیله به سمت بالا پیچ می‌کند[6] یک نیروی بازگرداننده[7] وجود دارد (پایداری استاتیکی) و مسیر حرکتی بین ارتفاع اصلی و با دامنه نوسان کاهنده با زمان، نوسان می‌کند. این حالت، مثل حرکت یک اتومبیل با کمک فنرهای[8] خوب است. تصویر وسط، حالت پایداری دینامیکی خنثی را نشان می‌دهد. وسیله از لحاظ استاتیکی پایدار است زیرا یک نیروی بازگرداننده وجود دارد. امّا دامنه نوسانات با زمان، کاهش نمی‌یابد. این حالت مثل حرکت اتومبیل بدون کمک فنری است که به یک دست‌انداز در جاده برخورد می‌کند. تصویر پایین، حالت مربوط به پایداری دینامیکی منفی را نشان می‌دهد. در اینجا نیز وسیله از لحاظ استاتیکی پایدار است امّا دامنه نوسانات با زمان، افزایش می‌یابد. این حالت نیز مثل حرکت اتومبیل بدون کمک فنری است که در یک جاده پردست‌انداز در حال حرکت باشد. اگر

1 Steady
2 Unsteady
3 Pitch
4 Anderson, J. D., Jr., Introduction to Flight(3rd Edition), 1989
5 Logitudinal
6 Pitch up
7 Restoring force
8 Shock absorbers

اغتشاش اولیه اعمال شده به جسم، در حالیکه در حال افزایش است، آنقدر آهسته افزایش یابد که کاربر[1] زمان کافی داشته باشد تا اقدام متقابل را قبل از افزایش خطرناک دامنه اغتشاش اعمال شده، انجام دهد، این نوع ناپایداری ذاتی می‌تواند قابل مدارا باشد. خصوصاً در وسایلی که باید به فرامین کنترلی حساس باشند یک درجه معینی از ناپایداری می‌تواند وجود داشته باشد. امّا در وسایلی که برای حرکت در مسیرهای طولانی و با مانور پایین طراحی می‌شوند، این نوع از ناپایداری ذاتی نمی‌تواند قابل تحمل باشد زیرا باعث فشار زیاد بر کاربر می‌شود. پایداری دینامیکی کاملاً به پایداری استاتیکی وابسته است. یک وسیله می‌تواند به‌صورت استاتیکی پایدار باشد بدون اینکه به‌صورت دینامیکی پایدار باشد، امّا نمی‌تواند به‌صورت دینامیکی پایدار باشد بدون اینکه به‌صورت استاتیکی پایدار باشد. البته همانطور که قبلاً بیان شد ممکن است نرخ ناپایداری دینامیکی به‌گونه‌ای باشد که فرصت انجام اقدام متقابل را به کاربر یا سیستم کنترل بدهد. از آنجایی‌که پایداری دینامیکی مربوط می‌شود به قابلیت وسیله در ایجاد امکان خروج آسان از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر (مانورپذیری مطلوب)، لذا می‌توان نتیجه گرفت افزایش پایداری استاتیکی باعث کاهش پایداری دینامیکی خواهد شد یا به‌عبارت بهتر، بین این دو نوع از پایداری بایستی یک مصالحه منطقی با توجه به نوع وسیله و مأموریت آن صورت پذیرد. با این اوصاف می‌توان حالات زیر را برای یک وسیله برشمرد:

۱) حالتی که وسیله از لحاظ استاتیکی و دینامیکی، ناپایدار است. در این وضعیت به علت ناپایداری استاتیکی در صورت بروز اغتشاش، وسیله تمایل دارد که از حالت تعادل دور شود، ناپایداری دینامیکی نیز این حالت را تشدید می‌کند.

۲) حالتی که وسیله از لحاظ استاتیکی پایدار، ولی از لحاظ دینامیکی ناپایدار است. در صورت بروز اغتشاش، پایداری استاتیکی تمایل دارد وسیله را به حالت تعادل برگرداند، امّا ناپایداری دینامیکی باعث می‌شود وسیله بعد از برگشتن به حالت تعادل، از آن عبور کند. در واقع ناپایداری دینامیکی، منجر به یک حرکت نوسانی که دامنه آن در حال افزایش است، خواهد شد. (البته با این فرض که طبیعت ناپایداری دینامیکی نوسانی باشد.) این حالت در برخی شرایط خاص که ناپایداری دینامیکی، پریود(دوره تناوب) طولانی داشته باشد، می‌تواند قابل‌قبول باشد، امّا در حالت کلی این وضعیت نامطلوب است.

۳) حالتی که وسیله از لحاظ استاتیکی و دینامیکی پایدار است. در صورت بروز اغتشاش، در این وضعیت، بیشترین پایداری وجود دارد.

نوع دیگر تقسیم‌بندی، تقسیم به دو دسته پایداری مدار باز (کنترل ثابت) و پایداری مدار بسته (کنترل آزاد) است.

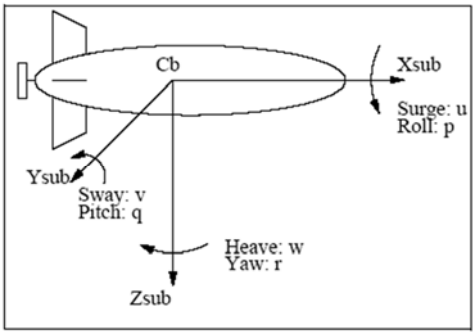
پایداری مدار باز (کنترل ثابت) به بررسی پایداری وسیله زمانی که سطوح کنترل و نیروی پیشران ثابت هستند، می‌پردازد. آنالیز پایداری مدار باز وسایل دریایی روی مساله یافتن معیاری بر اساس مشتقات هیدرودینامیکی تمرکز دارد.

پایداری مدار بسته (کنترل آزاد) بررسی پایدرای در حالتی است که هم سطوح کنترل و هم سیستم پیشران مجاز به تغییر هستند. در این حالت دینامیک سیستم کنترل نیز باید در آنالیز پایداری در نظر گرفته شود. این مساله در مبحث طراحی کنترل خودکار مطرح است.

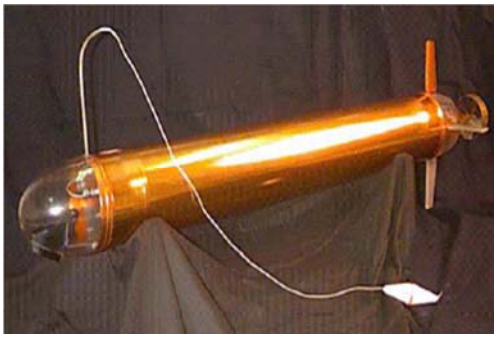
پایداری استاتیکی و دینامیکی، به سرعت وسیله و ضرایب یا مشتقات هیدرودینامیکی، جرم وسیله و نحوه توزیع آن وابسته‌اند. ضرایب هیدرودینامیکی تابع شکل و هندسه بدنه و سطوح کنترل هستند و همانطور که در فصل قبل اشاره شده، ارائه روابط یا روش‌هایی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یا مشتقات پایداری به نحوی که ارتباط بین هندسه وسیله (بدنه و سطوح کنترل) و ضرایب را بیان کنند، اهمیت فوق العاده‌ای دارد. روشهای تئوری برای تعیین پایداری یا عدم پایداری سیستم‌ها وجود دارد. در سیستم‌های خطی‌سازی شده روش‌های شناخته شده‌ای مثل روش راث یا هورویتز وجود دارد. در سیستم‌های غیرخطی از روش لیاپانوف استفاده می‌شود. این روش‌ها در حقیقت فقط بیان می‌کنند که آیا سیستم پایدار است یا پایدار نیست، امّا نحوه عملکرد و رفتار سیستم را نشان نمی‌دهند، بهمین خاطر برای بررسی رفتار دینامیکی وسیله به شبیه‌سازی معادلات حرکت، احتیاج است. در واقع همین جاست که بحث بهینه‌سازی هیدرودینامیکی وسیله مطرح می‌شود، زیرا هر چه وسیله پایداری بیشتری داشته باشد، برای انجام یک مانور خاص به ورودی‌های بیشتری از سطوح کنترل، سیستم رانش یا در مجموع، سیستم کنترلی نیاز دارد یعنی قابلیت مانوردهی آن کاهش می‌یابد. به‌علاو ه با توجه به محدودیت‌های عملکردی سیستم‌های کنترلی و اینکه سطوح کنترلی تا حد زاویه واماندگی می‌توانند عمل کنند، باید یک مصالحه یا تعادل، بین پایداری وسیله و قابلیت مانوردهی آن ایجاد شود. به‌خاطر همین مساله است که شبیه‌سازی حرکت و بهینه‌سازی وسیله معنا پیدا می‌کند. یعنی با شبیه‌سازی حرکت، اگر پایداری و مانوردهی مشاهده شده از وسیله مطلوب نبود، باید دوباره تغییراتی در هندسه وسیله و سطوح کنترل ایجادکرد که در نتیجه آن ضرایب هیدرودینامیکی تغییر می‌کند، سپس با شبیه‌سازی دوباره معادلات حرکت، رفتار وسیله مجدداً ارزیابی می‌شود. این سیکل آنقدر ادامه می‌یابد تا اینکه به هندسه، پایداری و مانور مطلوب و بهینه برسیم. پس از پایان مرحله بهینه‌سازی وسیله، با دانستن دینامیک سیستم می‌توان ضرایب کنترلی لازم را برای طراحی کنترل‌کننده استخراج نمود. در نهایت، همه این بحث‌ها به طراحی کنترل‌کننده خودکار ختم می شود. در واقع ما برای یک وسیله با عملکرد بهینه که دینامیک آن برای ما شناخته شده است، یک مدار کنترلی با پسخوراند (Feedback) باید طراحی کنیم تا وسیله بتواند یک مسیر از پیش تعیین شده را طی کند و هر وقت به مانعی رسید آن را دور بزند و دوباره به مسیرش ادامه بدهد. مانورهای استانداردی نیز برای ارزیابی عملکرد یک وسیله وجود دارد که به برخی از آنها اشاره می‌شود: ۱) مانور مارپیچ ۲) مانور زیگ زاگ ۳)مانور دایره

در ادامه مطلب به عنوان مثال، یک نمونه از نتایج شبیه‌سازی یک شناور AUV را نشان می‌دهیم که مشخصات هندسی آن در جدول(۴-۶) آمده است.

1 *Operator*



شکل۴-۳۹: سیستم مختصات متصل به بدنه،



هندسه *AUV* شبیه‌سازی شده

Parameter	Symbol	Value	Units
Mass	m	18.826	kg
Mass moment	Ixx	0.0727	kg.m^2
Mass moment	Iyy=Izz	1.77	kg.m^2
Length	L	1.391	m
Hull Radius	R	0.076	m
Fin distance from C_b	x_{fin}	0.537	m
Location of Centre of Mass	$[X_g, Y_g, Z_g]$	[-0.012, 0, 0.0048]	m

جدول(۴-۶): مشخصات هندسی *AUV* شبیه‌سازی شده

بعد از تخمین ضرایب از روش‌های مناسب و متداول با جایگذاری آن‌ها در روابط مربوط به نیروها و گشتاورها، روابط زیر به‌دست می‌آیند.

$$\sum X_{ext} = X_{HS} + X_{u|u}u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{v|v|}v|v| + X_{vr}vr + X_{w|w|}w|w| + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{rr}rr + X_{prop}$$

$$\sum Y_{ext} = Y_{HS} + Y_{uu\delta_r}u^2(\delta_{r_{top}} + \delta_{r_{bottom}}) + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{v|v|}v|v| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{\dot{r}}\dot{r}$$

$$\sum Z_{ext} = Z_{HS} + Z_{uu\delta_s}u^2(\delta_{s_{right}} + \delta_{s_{left}}) + Z_{uw}uw + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{w|w|}w|w| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{rp}rp$$

$$\sum K_{ext} = K_{HS} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{uu\delta_r}(-\delta_{r_{top}} + \delta_{r_{bottom}}) + K_{uu\delta_s}(-\delta_{s_{right}} + \delta_{s_{left}}) + K_{prop}$$

$$\sum M_{ext} = M_{HS} + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s + M_{uw}uw + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{rp}rp$$

$$\sum N_{ext} = N_{HS} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r + N_{ur}ur + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{\dot{r}}\dot{r}$$

در روابط بالا ضرایب سرعت‌ها و شتاب‌ها همان ضرایب یا مشتقات هیدرودینامیکی هستند. جزئیات به دست آوردن این ضرایب در مرجع (۷) آورده شده‌است. ضرایب استفاده شده در این شبیه‌سازی در جدول(۴-۷) آمده‌اند. بعد از تعیین نیروها و گشتاورها با حل معادلات حرکت، نتایج نشان داده شده در اشکال بعدی، در مورد عملکرد این وسیله به‌دست آمده‌اند.

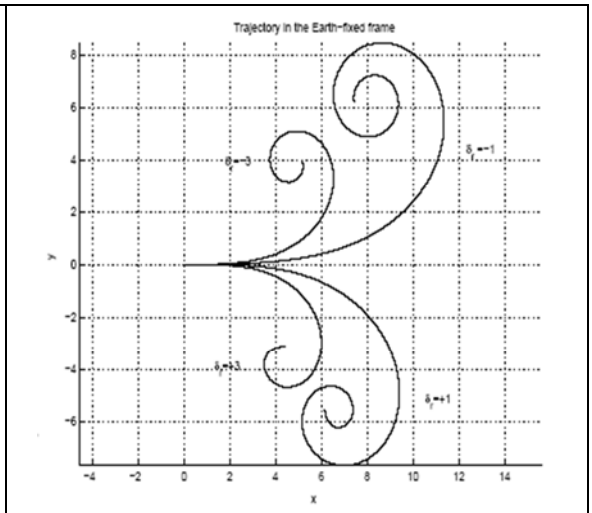
Non-linear Maneuvering Coefficients for Forces and Moments

Parameter	Value	Units	Description
X_{uu}	-3.11e+0	kg/m	Drag
$X_{\dot{u}}$	+4.21e-1	kg	Added Mass
X_{uw}	+3.01e+1	kg/m	Drag
X_{uv}	+3.01e-2	kg/m	Drag
X_{vv}	-5.19e+1	kg/m	Drag
X_{vr}	+2.72e+1	kg/rad	Added Mass Cross Term
X_{ww}	-5.19e+1	kg/m	Drag
X_{wq}	-2.72e+1	kg/rad	Added Mass Cross Term
X_{rr}	+1.83e+0	kg/rad	Added Mass Cross Term
X_{prop}	+7.38e+0 (variable)	N	Propeller Thrust
$Y_{uu\delta r}$	+1.19e+1	kg/(m.rad)	Fin Lift Force
Y_{uv}	-5.85e+1	kg/rad	Added Mass Cross-term, Fin Lift and Drag
Y_{ur}	+5.66e+0	kg/rad	Added Mass Cross-term and Fin Lift
Y_{vv}	+3.01e+0	kg/m	Drag
$Y_{\dot{v}}$	-2.72e+1	kg	Added Mass
Y_{wp}	+2.72e+1	kg/rad	Added Mass Cross Term
Y_{pq}	-1.83e+0	kg/rad	Added Mass Cross Term
$Y_{\dot{r}}$	-1.83e+0	kg	Added Mass
$Z_{uu\delta s}$	-1.19e+1	kg/(m.rad)	Fin Lift Force
Z_{uw}	-5.85e+1	kg/rad	Added Mass Cross-term, Fin Lift and Drag
Z_{uq}	-5.66e+0	kg/rad	Added Mass Cross-term and Fin Lift
Z_{vp}	-2.72e+1	kg/rad	Added Mass Cross Term
Z_{ww}	+3.01e+1	kg/m	Drag
$Z_{\dot{w}}$	-2.72e+1	kg	Added Mass
$Z_{\dot{q}}$	+1.83e+0	kg	Added Mass
Z_{rp}	-1.83e+0	kg/rad	Added Mass Cross Term

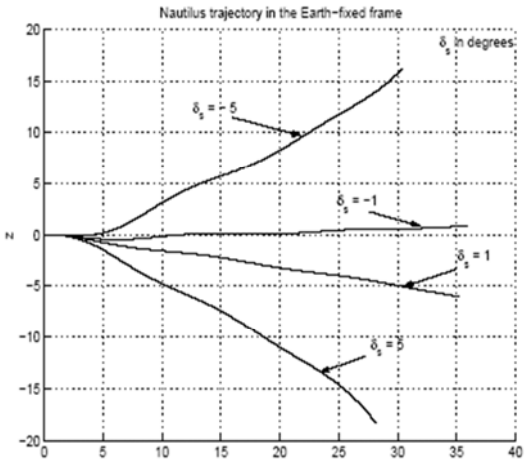
Non-linear Maneuvering Coefficients for Moments.

Parameter	Value	Units	Description
$K_{\dot{p}}$	-4.10e-2	kg.m^2 /rad^2	Added Mass
K_{prop}	-5.40e-1 (variable)	N.m	Propeller Torque
$K_{uu\delta r}$	+4.48e+0	kg/rad	Fin Rolling Moment
$K_{uu\delta s}$	+4.48e+0	kg/rad	Fin Rolling Moment
$M_{uu\delta s}$	-6.08e+0	kg/rad	Fin Lift Moment
M_{uw}	+2.40e+1	kg	Body and Fin and Munk Moment
M_{uq}	-4.93e+0	kg.m/rad	Added Mass Cross term and Fin Lift
M_{vp}	+1.83e+0	kg.m/rad	Added Mass Cross
$M_{\dot{w}}$	+1.83e+0	kg.m^2 /rad^2	Added Mass
$M_{\dot{q}}$	-4.34e+0	kg.m^2 /rad^2	Added Mass
M_{rp}	+4.30e+0	kg.m^2 /rad^2	Added Mass Cross Term
$N_{uu\delta r}$	-6.08e+0	kg/rad	Fin Lift Moment
N_{uv}	-2.40e+1	kg	Body and Fin and Munk Moment
N_{ur}	-4.93e+0	kg.m/rad	Added Mass Cross term and Fin Lift
$N_{\dot{v}}$	-1.83e+0	kg.m^2 /rad^2	Added Mass
N_{wp}	+1.83e+0	kg.m /rad	Added Mass Cross Term
N_{pq}	-4.30e+0	kg.m^2 /rad^2	Added Mass Cross Term
$N_{\dot{r}}$	-4.34e+0	kg.m^2 /rad^2	Added Mass

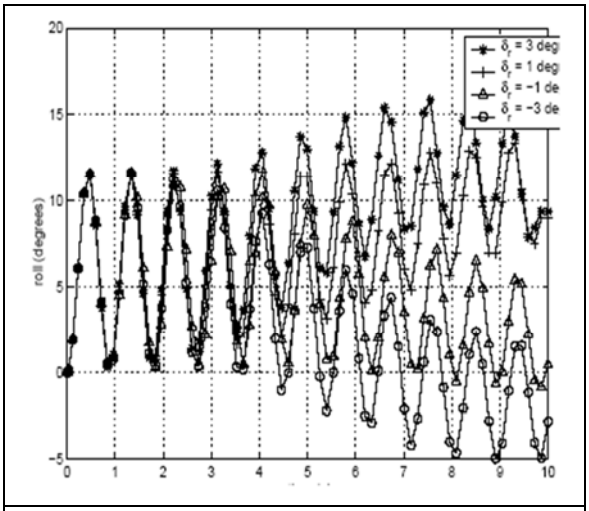
جدول(۴-۷): ضرایب به‌کاررفته در شبیه‌سازی *AUV*



شکل(۴-۴۰): مسیر شبیه‌سازی شده AUV در زوایای مختلف : بالک افقی (الویتور)



سکان

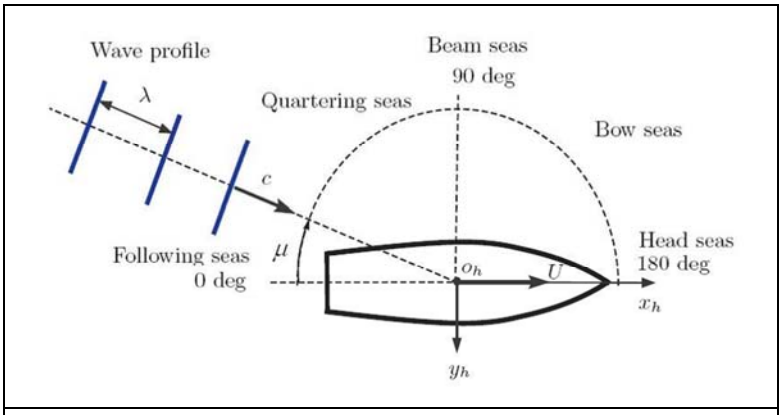


شکل(۴-۴۱): شبیه‌سازی زاویه رول AUV در زوایای مختلف سکان

بخش چهارم:
ارزیابی عملکرد کشتی در امواج دریا

فصل اول: فرکانس برخورد

در بخش‌های قبل، مبحث امواج منظم نسبت به یک دستگاه مختصات ساکن مورد تشریح قرار گرفت. هنگامی که شناور دارای سرعتی نباشد فرکانسی که در آن، امواج موجب تحریک شناور می‌شوند با فرکانس امواج منطبق بوده و بنابراین توصیفات قبلی معتبر خواهند بود. اما هنگامی که شناور حرکت می‌کند فرکانسی که شناور تجربه می‌کند با فرکانس موج تفاوت دارد. این فرکانس، اصطلاحاً به «فرکانس برخورد[1]» معروف بوده و با پارامتر ω_e نشان داده می‌شود. اگر کشتی با سرعت متوسط U به سمت جلو حرکت نماید، دریا را می‌توان براحتی نسبت به دستگاه مختصات (O_h, x_h, y_h) توصیف نمود که این دستگاه مختصات همانطور که در شکل ۲ـ۴۲ نشان داده شده است، با سرعت متوسط شناور حرکت می‌نماید. این شکل همچنین قرارداد اتخاذ شده برای زاویه برخورد (μ یا β) و نامگذاری‌های متداول برای شرایط مختلف دریانوردی را نشان می‌دهد:



شکل ۴-۴۲: تعریف زاویه برخورد و نامگذاری‌های متداول برای شرایط دریانوردی

- حرکت در جهت انتشار امواج، امواج از پشت[2] ($\mu = 0 \; or \; 360 \deg$)
- امواج از طرف قسمت عقبی کناره شناور[3] ($0 < \mu < 90 \deg \quad or \quad 270 < \mu < 360 \deg$)
- حرکت در جهت عمود بر جهت انتشار امواج، امواج از کنار[4] (*μ=90 deg-port or 270 deg-star.*)
- امواج از طرف سینه[5] ($90 < \mu < 180 \deg \quad or \quad 180 < \mu < 270 \deg$)
- حرکت در خلاف جهت امواج، امواج از روبرو[6] ($\mu = 180 \deg$)

از شکل ۲ـ۴۲ می‌توان نتیجه گرفت که امواج با سرعت نسبی $C_P - U\cos\mu$ از کشتی عبور می‌کنند. بنابراین فرکانس برخورد را می‌توان با عبارت زیر بیان نمود:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e} = \frac{2\pi}{L_w} \cdot (C_P - U\cos\mu)$$

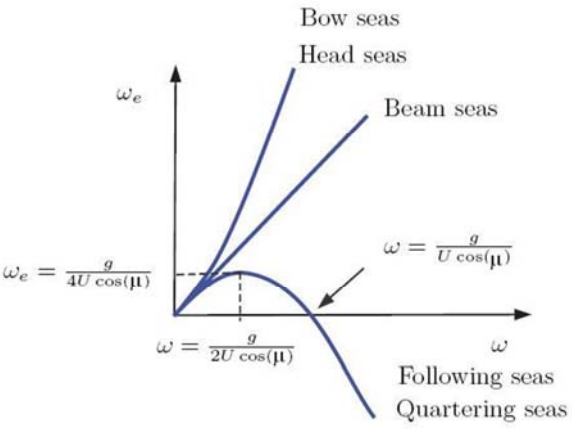
که با جایگذاری رابطه $k = 2\pi/L_w = \omega^2/g$ و $C_P = g/\omega$ رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} \cdot U \cdot \cos\mu$$

---

1 Encounter frequency
2 Following seas
3 Quartering seas
4 Beam seas
5 Bow seas
6 Head seas

عبارت فوق بیانگر تبدیل در فرکانسی است که یک موج منظم توسط یک ناظر ثابت یا یک ناظر در حال حرکت با سرعت پیشروی شناور مشاهده می‌گردد. شکل ۴-۴۳ تبدیل میان ω و ω_e را بصورت نمودار نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان مشاهده نمود که هنگامی که شناور در حال دریانوردی در حالت *Bow seas* یا *Head seas* است، فرکانس‌های امواج به فرکانس‌های بالاتری تبدیل می‌گردند. اما در حالت امواج از کنار هیچ تغییری در فرکانس رخ نمی‌دهد و هر دو فرکانس ω و ω_e یکسان هستند. در حالات موج از عقب و موج از کنار با توجه به اینکه فرکانس‌های مختلف امواج می‌توانند به فرکانس برخورد یکسانی نگاشته شوند، وضعیت پیچیده‌تری پیش می‌آید. همچنین از رابطه سرعت پیشروی امواج $C_P = \sqrt{gL_w/2\pi}$ می‌توان نتیجه گرفت که در آب عمق، امواج بلند سریع‌تر از امواج کوتاه حرکت می‌کنند. بنابراین در این حالت، امواج بلند از شناور سبقت می‌گیرند و در حالیکه امواج کوتاه از شناور عقب می‌افتند. در واقع برای $0 < \omega < \frac{g}{U\cos\mu}$، امواج از شناور جلو می‌افتند. فرکانس موج $\omega = \frac{g}{U\cos\mu}$ که فرکانس برخورد در آن برابر صفر است، متناظر وضعیتی است که مؤلفه سرعت شناور در جهت انتشار موج با سرعت موج برابر است. در این حالت خصوصیات موجی که ناظر متصل به شناور مشاهده می‌کند، ثابت باقی مانده و همراه با کشتی حرکت می‌کند. سرانجام فرکانس برخورد برای امواج دارای فرکانس بالا منفی می‌باشد بدین معنی که شناور از امواج پیشی می‌گیرد. حرکت کشتی در امواج نتیجه تحریک امواج در اثر اختلاف توزیع فشار بر روی سطح بدنه آن است. از مفاهیم این بخش انتظار می‌رود که تحریک امواج و نیز پاسخ شناور، تنها به خصوصیات امواج (دامنه و فرکانس) بستگی نخواهد داشت بلکه به شرایط دریانوردی[1] شامل زاویه برخورد و سرعت نیز وابسته هستند.



شکل ۴-۴۳: تبدیل فرکانس موج به فرکانس برخورد تحت شرایط مختلف دریانوردی و در سرعت پیشروی ثابت *U*

مثال) اگر در آب عمیق امواجی با پریود ۶ ثانیه از روبرو به کشتی با سرعت ۲۰ گره برخورد کند فرکانس برخورد را محاسبه کنید.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 1.05\,rad/s \qquad \lambda = \frac{g}{2\pi}T^2 = 56.23m$$

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{56.23}{1.05} = 53.5\,m/s \qquad K = \frac{2\pi}{\lambda} = 0.11$$

$$\mu = 180\deg \qquad u = 20knot = 20\times 0.5144\,m/s = 10.29\,m/s$$

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g}.u.Cos\mu \qquad \omega_e = 1.05 - \frac{(1.05)^2}{9.81}\times 10.29\times Cos(180) = 2.2\,rad/s$$

$$T_e = \frac{2\pi}{\omega_e} = 2.85\sec$$

1 *Sailing conditions*

فصل دوم: ارزیابی عملکرد کشتی در مسیر دریایی

۱ـ مقدمه

دریامانی[1] علم بررسی حرکات کشتی در دریا و تعیین محدوده عملکرد شناور در دریا برای انجام موفق و ایمن مأموریت است. در حدود سال ۱۹۵۰ ، نیاز صنعت و تجارت دریایی به پیش‌بینی رفتار شناورها و سازه‌های دریایی در دریا به میزان قابل توجهی افزایش یافت. این نیاز زمینه شکل‌گیری گونه جدیدی از تحقیقات در زمینه علوم دریایی با عنوان Seakeeping Performance Analysis یا تحلیل حرکات شناورها در امواج را ایجاد نمود.

۱ـ۱ـ اهمیت بررسی دریامانی در طراحی شناورها و مراحل آن

جهت درک اهمیت دریامانی در طراحی شناورها لازم به ذکر است که رفتار شناورها در مسیر دریایی بر موارد زیر تأثیرگذار است:

ایمنی مسافرین، خدمه، بار و شناور

راحتی و آسایش مسافرین و خدمه

بارهای دینامیکی بر سازه‌های شناور، محموله‌ها و متعلقات مربوط به آنها

سرعت شناور و میزان مصرف سوخت سیستم رانش

برای انجام طراحی دریامانی یک شناور در مراحل اولیه طراحی همانند مراحل دیگر مثل محاسبات هیدروستاتیک، به هندسه دقیق بدنه نیازی نخواهد بود. زیرا در این مرحله از طراحی دریامانی می‌توان از فرم لوئیس مقاطع که تنها به عرض، عمق و مساحت مقطع نیاز دارند، استفاده نمود. علاوه براین طراح می‌تواند طرحش را طوری پیش ببرد تا از ایجاد برخی مشکلات جدی برای شناور در شرایط خیلی بحرانی دریا جلوگیری نماید. در طراحی دریامانی شناور، اصولاً سه دیدگاه اساسی ذیل مورد توجه قرار می‌گیرد:

- قابلیت سکونت[2]
- قابلیت عملکرد[3]
- قابلیت دوام یا بقاء[4]

قابلیت سکونت به آماده‌سازی خدمه با شرایط محیط برای کارآیی مؤثر و بدون کاهش عملکرد گفته می‌شود. قابلیت عملکرد بخش‌هایی از قابلیت سکونت را نیز در بر می‌گیرد اما مفهوم آن فراتر می‌رود؛ به توانایی عملکرد کشتی برای انجام مأموریت مشخص در محیط دریا با تمامی تجهیزات مکانیکی توسط خدمه گفته می‌شود که می‌تواند شامل مواردی مانند دقت اسلحه، نشستن و برخاستن هلیکوپتر، حفظ شرایط کاری تجهیزات، اطمینان از ایمنی تجهیزات عرشه، حفظ مسیر در امواج جانبی و مواردی نظیر این باشد.

قابلیت دوام دارای مفهومی بسیار فراتر از قابلیت عملکرد است. این دیدگاه مرتبط با شرایطی است که در آن دوام و نجات شناور به مخاطره می‌افتد و یا به اتفاقاتی گفته می‌شود که برای کشتی در شرایط دریای طوفانی اتفاق می‌افتد که در این شرایط کشتی با هر یک از زیر سیستمهای اصلی در معرض خطر آسیب دیدگی یا خرابی قرار می‌گیرند. شرایط طوفانی سخت در طول دوران کاری کشتی یک یا دو بار اتفاق می‌افتند. قابلیت سکونت بعنوان فاکتوری در ملاحظات اولیه مورد توجه قرار نمی‌گیرد و قابلیت عملکرد تنها آنجایی که مربوط به امور ضروری زیرسیستم‌هاست، مهم به نظر می‌رسد. هرچند این سه دیدگاه از نظر ذاتی به کلی از یکدیگر متفاوت هستند اما همه آنها از موارد زیر تأثیر می‌پذیرند:

- حرکات متوسط یا مشخصه در هر ۶ درجه آزادی
- شتاب‌های مشخصه در هر ۶ درجه آزادی
- شتاب‌ها و حرکات حداکثر
- افزایش در قدرت مورد نیاز
- پدیده خیسی عرشه و اسپری آب
- توانایی حفظ مسیر به همراه تمایل به خروج از مسیر
- اسلمینگ و بارهای اسلمینگ
- ممان‌های خمشی شاه تیر
- ارتعاشات ناشی از امواج
- بارهای دریایی محلی
- انحناء بدنه
- چرخش پروانه و بارگذاری موجود بر روی شفت (محور) پروانه

---

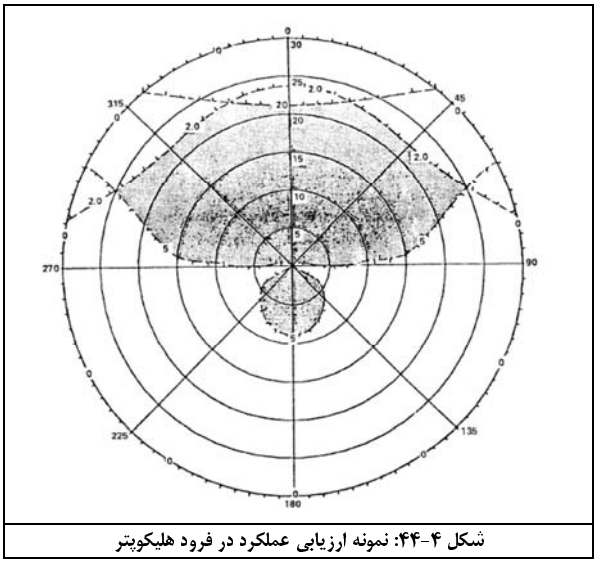
1 - seakeeping
2 - Habitibility
3 - Operability
4 - Survivability

هر یک از موارد فوق تأثیرات مربوط به خود را شامل می‌شود. به عنوان مثال می‌توان از معیار ارزیابی کیفیت دریامانی استاندارد NATO برای ناوهای فریگیت در ارتباط با عملکرد هلیکوپتر در شرایط کاری پیوسته (جدول ۴-۸) نام برد.

Criterion Response	Location	Criteria levels for		
		Launch	Recovery	Support
Pitch	About the center of gravity	3.0 deg		
Roll		5.0 deg	3.5 deg	
Deck Wetness	At F.P.	30 occurrence per hour		
Bottom Slamming	15% LBP from F.P.	20 occurrence per hour		
Vertical Acceleration	Bridge	0.4 g		
Lateral Acceleration		0.2 g		
Vertical Velocity	Helicopter touchdown point	none	2.0 m/s	None

جدول ۴-۸: نمونه‌ای از معیار ارزیابی کیفیت دریامانی ناوهای فریگیت (استاندارد *NATO*)

نتایج معمولاً بصورت زیر استخراج می‌شوند: فرض نمایید که کشتی در محیط دریا با ارتفاع مشخصه امواج و دوره تناوب مودال مشخص در حال انجام مأموریت باشد، بنابراین طیف امواج دریا مشخص است. برای تمام جهات حرکت کشتی و برای سرعت‌های تا ۳۰ گره، یک دیاگرام قطبی مشابه آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، تهیه می‌شود. در این دیاگرام قسمت‌های هاشورخورده نشان دهنده محدوده‌هایی هستند که از یک یا چندین معیار ارزیابی تجاوز شده و کارایی کشتی مختل شده است. فرض نمایید مساحت دیسک A_0 و زیر مجموعه‌ای از A_0 که در آن محدوده کشتی می‌تواند شرایط کاری هلیکوپتر را هدایت نماید A باشد. ضریب عملکرد را که نشان دهنده توانایی کشتی در انجام مأموریتی خاص در شرایط دریایی مشخص است، می‌توان بصورت $100(A/A_0)$ تعریف نمود. در مورد شکل ۴-۴۴ مقدار این ضریب برابر با ۴۴٪ است. اگر این محاسبات برای کشتی‌های مختلف یا گزینه‌های مختلف طراحی تکرار شود، فرم بدنه بهینه را می‌توان با توجه به معیارهای دریامانی بدست آورد.



شکل ۴-۴۴: نمونه ارزیابی عملکرد در فرود هلیکوپتر

در فرایند طراحی دریامانی سه فاز حساس و مهم وجود دارد که عبارتند از:

۱ـ تعریف محیطی که انتظار می‌رود کشتی در آن عمل نماید.

۲ـ ایجاد نیازهای کمّی و کیفی برای کارآیی دریامانی بر پایه مأموریت کشتی.

۳ـ ارزیابی طرح بر این اساس که آیا نیازها ارضا می‌شود یا خیر و اصلاح طرح در صورت نیاز.

انتظار می‌رود که اکثر کشتی‌ها در بخش مشخصی از اقیانوس مأموریت خود را بخوبی انجام دهند. اطلاعات آماری دریاها نیز در سرتاسر جهان براحتی در دسترس می‌باشد، بنابراین فاز اول طراحی دریامانی با در دسترس بودن اطلاعات آماری دریاها براحتی انجام می‌شود. اما تبدیل قالب مأموریت شناور در فاز دوم توسط طراح به مقادیر کمّی و کیفی مانند آنچه که در جدول ۴-۸ آورده شده است، یکی از مسائل مشکلی است که طراحان کشتی با آن مواجه هستند. در این مرحله از طراحی نه تنها تجربه محدود می‌شود، بلکه مردم و سیستم‌های جنگ‌افزاری نیز در طول زمان تغییر می‌کنند، بطوریکه ایجاد یک معیار ارزیابی قابل پذیرش جهان شمول را نیز غیرممکن می‌سازد. خوشبختانه در فاز سوم، ارزیابی قیاسی نیاز به دقت بالایی ندارد. ارزیابی طرح تنها می‌تواند با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و مشخصات سخت و وخیم کاری کشتی و مأموریت آن انجام شود. به عنوان مثال فرض کنید که

نیروی دریایی نیاز به یک ناو هواپیمابر کوچک دارد که قصد دارد در آب‌های مابین شمال بریتانیا و ایسلند مأموریت انجام دهد. فرض کنید که شکل و اندازه بدنه انتخاب شده است و طراح تنها نگران یک مشکل نهایی است و آن طراحی شکل عرشه پرواز ناو هواپیمابر می‌باشد. به خاطر کوچکی اندازه ناو هواپیمابر، فضای موجود بر روی دک پرواز از اهمیت بیشتری برخوردار است. از طرفی افراد متصدی نیز بر این باورند که اگر عرشه پرواز پهنای خود در قسمت میانی کشتی تا ناحیه سینه کشتی حفظ نماید، شناور دارای کارایی بهتری خواهد بود که این موضوع باعث ایجاد پهن‌شدگی[1] خیلی زیادی در قسمت سینه کشتی می‌شود و این در حالیست که بررسی‌ها حاکی از آن است که اسلمینگ ناشی از پهن‌شدگی ناحیه سینه کشتی بر قابلیت عملکرد و قابلیت دوام شناور تأثیرگذار است. برای کاهش خطر آسیب‌دیدگی در هنگام وقوع پدیده اسلمینگ، طراح می‌تواند برای کاهش پهن شدگی در ناحیه سینه کشتی عرشه پرواز را باریک نماید. باریک‌سازی روشی جهت حل مشکل پدیده اسلمینگ است، اما این امر مورد پذیرش متصدیان کشتی نیست. عملکرد عرشه تنها دلیل حفظ پهن‌شدگی سینه کشتی نیست بلکه وجود میزان کافی پهن‌شدگی می‌تواند هنگام حرکت سینه کشتی به سمت پایین بر روی امواج، در کاهش وقوع پدیده خیسی عرشه و افزایش فری‌برد مؤثر، مفید واقع شود. در این مورد شکل نهایی عرشه پرواز را باید از طریق انجام آزمایش‌های مناسب و تعیین فاکتورهایی که در محیط دریا به عنوان فاکتور محدود کننده عمل می‌کنند، تعیین نمود. طبیعی است که یک فرم بدنه بهینه از نظر کیفیت دریامانی ممکن است از نظر طراحی کلی بهینه دور باشد. بعنوان مثال مقاومت در آب ساکن ممکن است بیش از حد زیاد شود. با این وجود دریامانی فاکتوری بسیار مهم در اصول طراحی کلی کشتی است زیرا بسیاری از کشتی‌ها به علت نقص در کیفیت دریامانی نتوانسته‌اند مأموریت خود را بطور مؤثر انجام دهند.

۲ـ ارزیابی عملکرد

روش اصولی در ارزیابی عملکرد دریامانی به چهار فاکتور وابستگی دارد که این فاکتورها باید مورد تعریف و دسته‌بندی قرار گیرند:

آ) مأموریت: مأموریت‌هایی که به کشتی محول می‌شود هر کدام دربردارنده شرایط بارگیری مختص به خود هستند. کلیه مأموریت‌های حقیقی تمامی کشتی‌های موجود در دنیا را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

- حمل و نقل بندر به بندر کالا یا انسان توسط شناورهایی که تحت یک برنامه زمان‌بندی منظم فعالیت می‌کنند (Liners) یا شناورهایی که تحت شرایط کاری پیوسته به کار گرفته می‌شوند (همانند کشتی‌های فلّه‌بر و ترمپ‌ها)
- مأموریت‌های نظامی که تماماً در دریا انجام می‌شوند، مانند مراقبت از دریا، عملیات پدافندی یا تهاجمی در برابر نیروهای دریایی یا بر علیه اهدافی در ساحل.
- مأموریت‌های تجاری در دریا مانند ماهیگیری، حفّاری نفت یا استخراج از اقیانوس.

ب) محیط: تلاطم سطح دریا و سرعت وزش باد به عنوان تابعی از دو عامل موقعیت و زمان تعریف می‌گردد. به منظور دستیابی به اهداف این بخش، روش رایج سازمان دریانوردی در دسته‌بندی تلاطم سطح دریا بوسیله Starta به عنوان شماره‌های Sea state بکار برده می‌شود. روش Starta که در این بخش بکار برده می‌شود توسط ارتفاعات مشخصه امواج (و پریودهای مودال امواج) مشخص می‌شود. حال آنکه ارتفاع مشخصه موج ($H_{1/3}$) و پریود مودال موج (T_m) دو پارامتر رایجی هستند که عموماً جهت توصیف Sea state مورد استفاده قرار می‌گیرند که $H_{1/3}$ پارامتر اصلی بوده و در حالیکه پارامتر T_m به لحاظ اهمیت در درجه دوم قرار دارد به دلیل آنکه به ازای هر مقدار ممکن برای T_m همواره یک محدوده از مقادیر مثبت $H_{1/3}$ وجود دارد که سرعت کشتی را در منحنی عملیاتی کشتی تابع خود قرار می‌دهد. عکس این قضیه همیشه درست نیست.

ج) پاسخ‌های کشتی: پاسخ‌های معینی از کشتی به عنوان تابعی از میزان تلاطم سطح دریا، سرعت کشتی و زاویه برخورد موج با کشتی و حداکثر سرعت قابل دستیابی در هر دو وضعیت دریای آرام و طوفانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پاسخ‌های کشتی شامل تمامی پاسخ‌های مطلق و نسبی کشتی می‌باشد.

د) معیارهای عملکرد دریامانی: این معیارها عنصری کلیدی در توسعه یک روش اصولی جهت ارزیابی کارآیی عملیاتی یک کشتی در مسیر دریایی هستند و با مقادیر حدی از پیش تعیین شده می‌توان تعیین نمود که آیا یک مأموریت می‌تواند انجام پذیرد یا خیر. همچنین لغت کشتی جهت اشاره به کل سیستم کشتی بکار برده می‌شود، بطوریکه در تمام موارد حداقل شامل چهار رکن اساسی زیر می‌باشد:

- بدنه یا پلت‌فرم: نوع، هندسه و سازه آن
- سیستم‌هایی که جهت راه‌اندازی بدنه مورد نیاز هستند که در اصطلاح به آنها عبارت «سیستم‌های پلت‌فرم» اطلاق می‌گردد که عبارت است از سیستم پیشران، سیستم هدایت، سیستم‌های کنترل حرکت و غیره.
- سیستم‌هایی که جهت اجرای مأموریت یا مأموریت‌های محوله به کشتی مورد نیاز هستند که در اصطلاح به آنها عبارت «سیستم‌های مأموریتی[2]» اطلاق می‌گردد.
- افرادی (از نظر تعداد، نوع و سطح مهارت) که جهت راه اندازی کل سیستم کشتی مورد نیاز هستند.

---

1 - Flare
2 - Mission Systems

دو معیار کمّی عملکرد دریامانی کشتی که در اصطلاح شاخص‌های عملکرد دریامانی نامیده می‌شوند، در طی سالیان متمادی بصورت ذهنی تحت تعریف قرار گرفته‌اند. یکی از این کمیت‌ها[1] *SPI-1* نامیده می‌شود که به عنوان کارآیی مأموریت[2] تعریف می‌گردد و عبارت است از نسبت زمانی که یک کشتی در شرایط بارگیری معین می‌تواند یک مأموریت نظامی یا تجاری مشخص (یا ترکیبی از مأموریت‌های مختلف) را طبق یک برنامه از پیش تعیین شده از سرعت‌ها و جهات حرکت کشتی در یک ناحیه مشخص از اقیانوس و در فصل معینی از سال انجام دهد.

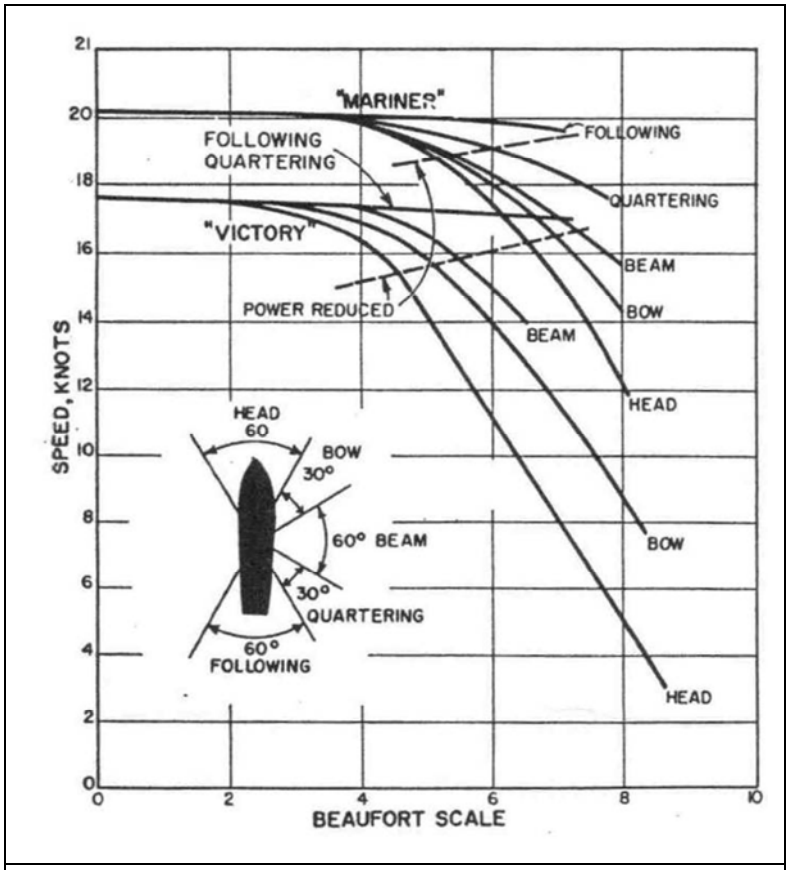
کمیت دوم نیز *SPI-2* نامیده می‌شود که شاخص زمانی ترانزیت محسوب شده و تنها برای تعداد انبوهی از کشتی‌ها در سرتاسر جهان مناسب است که منحصراً به حمل و نقل بندر به بندر اختصاص دارند. این شاخص همچنین در مورد کشتی‌های ماهیگیری در حال عزیمت به منطقه ماهیگیری یا در حال بازگشت از این مناطق مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین ممکن است از این شاخص برای آن دسته از شناورهایی نظامی استفاده گردد که در حال عزیمت به مقصد مشخصی بوده و دستیابی به کمترین زمان تلف شده در عبور و مرور نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. کمیت *SPI-2* به عنوان شاخص زمانی عبور و مرور[3] تعریف می‌شود که عبارت است از نسبت مدت زمان ایده‌آلی که یک کشتی برای ترانزیت درآب آرام بین دو یا چند بندر مشخص نیاز دارد تقسیم بر مدت زمان واقعی مورد نیاز همان کشتی جهت مسافرت بین همان دو بندر در شرایط دریایی مختص به فصل یا یا فصول مشخص. در مورد حداقل فاصله مسیر معین همچنین شاخص *SPI-2* عبارت است از نسبت سرعت متوسط کشتی در مسیر مورد نظر و در دریای مشخص شده به سرعت همان کشتی در آب آرام در شرایط بارگذاری یکسان و به همراه میزان خزه یکسان در کف. این شاخص در این حالت «نسبت سرعت مورد انتظار[4]» نامیده می‌شود.

باید درصد تعداد دفعاتی (یعنی احتمالی) را که مقادیر واقعی پاسخ‌های مختلف کشتی هرگز از مقادیر از پیش تعیین شده معیارهای ارزیابی عملکرد تجاوز نمی‌کنند، محاسبه شود. به علت محدودیت موجود در ترکیب سرعت‌های ثابت از پیش تعیین شده، *SPI-1* در محاسبه ارزش عملیاتی کشتی‌های در حال فعالیت در کارهای تجاری متداول حمل بار یا مسافر از بندر به بندر مناسب نیست. برای این منظور، *SPI-2* مناسب است که نسبت زمان عبور و مرور ایده‌آل در آب آرام به زمان عبور و مرور واقعی می‌باشد. *SPI-2* یکی از فاکتورهای کلیدی مورد نیاز جهت محاسبه زمان سفر دریایی در یک مسیر مشخص و در یک فصل مشخص جهت نیل به درجه معینی از اطمینان می‌باشد. این فاکتور یکی از ضروری‌ترین عوامل در ارزیابی ارزش عملیاتی حمل و نقل کشتی‌هایی است که در سرویس‌های منظم یا زمان‌بندی شده در حال فعالیت هستند. سایر فاکتورهای کلیدی الزامی در محاسبه زمان سفر دریایی جهت حصول درجه‌ای از اطمینان در *SPI-2* به حساب آورده نشده است، بدلیل آنکه این فاکتورها بطور مستقیم به عملکرد کشتی در دریای متلاطم وابسته نیستند. این فاکتورهای کلیدی به عواملی همچون جریانات اقیانوسی، مقاومت باد، رسوبات بدنه، شرایط میدان دید، اتلاف توان خروجی، هزینه سوخت، شرایط بندری و غیره وابسته هستند. باید به این نکته توجه نمود که همانطوری که *SPI-1* جهت مأموریت حمل و نقل قابل استفاده نیست، *SPI-2* نیز برای مأموریت‌هایی از کشتی که در آنها از *SPI-1* استفاده می‌شود، مناسب نمی‌باشد. هر دو شاخص *SPI-1* و *SPI-2* ممکن است برای فریگیت‌ها و ناوشکن‌ها در مأموریت محافظت مفید واقع شوند.

۳ـ کاهش ارادی و غیر ارادی سرعت

کاهش ارادی سرعت یعنی اینکه فرمانده کشتی برای پرهیز از صدمه‌دیدن بدنه کشتی، تجهیزات و خدمه، مقدار سرعت را کاهش داده یا جهت حرکت کشتی را نسبت به امواج تغییر می‌دهد. هر دوی این عوامل می‌توانند باعث طولانی‌تر شدن مسیر دریانوردی و کاهش سرعت شوند. در این حالت توان و دور موتور کاهش می‌یابد. کاهش غیر ارادی سرعت نیز بر اثر قدرت امواج به کشتی تحمیل می‌شود بدون اینکه فرمانده اقدام به کاهش توان و دور موتور نماید. هر دو عامل کاهش ارادی و غیر ارادی سرعت در مجموع باعث کاهش سرعت کشتی در مسیر دریانوردی می‌شود.

1 - SPI: Seakeeping Performance Index
2 - Mission Effectiveness
3 - Transit Time Index
4 - Expected Speed Fraction



شکل ۴-۴۵: سرعت قابل دستیابی در دریا در شرایط مختلف دریایی برای دو کلاس از شناورهای باری

مقادیر هر دو شاخص *SPI-1* و *SPI-2* اشاره به محدودیت‌های تحمیل شده از جانب مسیر دریایی بر روی سرعت کشتی و جهت برخورد امواج به کشتی دارند. در این بخش تأکید اصلی بر روی محدودیت‌های موجود بر سرعت کشتی در امواج از روبرو وجود دارد که یکی از جهات بحرانی برخورد امواج به کشتی برای اکثر کشتی‌ها می‌باشد. سوپرتانکرهای عظیم‌الجثه و پرقدرت معمولاً به اندازه کافی توسط دریای متلاطم کاهش سرعت داده می‌شوند بگونه‌ای که بطور خودکار از بروز عوارض ناشی از تأثیر حرکات شدید بر شناور جلوگیری بعمل می‌آید. اما برای شناورهای دارای سرعت میانه تا تندرو یک کاهش ارادی سرعت نیز وجود دارد که به حرکات این شناورها مربوط می‌شود (پدیده اسلمینگ و خیسی عرشه از عوامل غیر ارادی و اجباری کاهش سرعت هستند). شکل ۴-۴۵ اطلاعات کمّی کاهش سرعت را نشان می‌دهد که متعلق به دو کلاس از کشتی‌های جنرال کارگو در پنج جهت مختلف نسبت به امواج بوده و در یک سفر دریایی واقعی ثبت شده‌اند. دو منحنی که با عنوان «افت توان[1]» ارائه شده‌اند، نقاط انتقال بین کاهش غیرارادی و ارادی سرعت را بطور تقریبی برای این دو نوع کشتی باربری نشان می‌دهد. قبلا بیان شد که *SPI-1* شاخص کارایی عملیاتی و *SPI-2* شاخص سرعت قابل دستیابی است. به علت اینکه *SPI-2* به حداکثر سرعت قابل حصول کشتی در تمامی شرایط دریایی از شرایط آرام تا طوفانی مربوط می‌شود، مسلم است که مقادیر هر دو پارامتر کاهش ارادی و غیرارادی سرعت می‌تواند در محاسبه *SPI-2* حائز اهمیت باشند. از سوی دیگر بدلیل اینکه *SPI-1* تنها با مقادیر معین یا از پیش تعیین شده سرعت (که تقریباً همیشه در زیر حداکثر سرعت در آب آرام قرار دارند) در ارتباط است، بسیار محتمل است که تنها کاهش‌های ارادی سرعت و محدودیت‌های جهت حرکت در محاسبه *SPI-1* حائز اهمیت باشند. البته اگر مقادیر معین شده سرعت به سرعت حداکثر کشتی در آب آرام خیلی نزدیک باشند، سپس همانطور که شکل ۴-۴۵ نشان می‌دهد، عامل کاهش غیرارادی سرعت در تنزّل محدوده sea state هایی که کشتی قادر به انجام مأموریت خود در آن محدوده می‌باشد، از توانایی اندکی برخوردار خواهد بود. بنابراین در بیشتر موارد عملی، مقادیر سرعتی که جهت محاسبه مقادیر *SPI-1* مورد استفاده قرار می‌گیرند، کمتر از سرعتی هستند که کاهش‌های غیرارادی سرعت از نقش قابل توجهی برخوردار بوده و در عوض کاهش‌های ارادی سرعت دارای اهمیت بیشتری هستند.

1 - Power reduced

٤ـ معیارهای ارزیابی عملکرد دریامانی و پاسخ‌های کشتی در مسیر دریایی

در عرف رایج، اصطلاحات «شاخص» و «معیار» معانی مشابهی دارند. امّا در ادبیات مربوط به دریامانی بتدریج وجه تمایز آشکاری میان آنها شکل گرفته است. عبارت «شاخص عملکرد دریامانی»[1] یا شاخص کارآیی محیطی در اینجا به عنوان یک مقیاس آماری کلی از تنزل کارآیی کل سیستم کشتی در مسیر دریایی در طی بازه‌ای از زمان بکار برده می‌شود. در مقابل آن عبارت «معیار عملکرد دریامانی»[2] به جنبه مشخصی از پاسخ کشتی به یک مسیر دریایی (دامنه حرکات، رویداد منحصر بفرد یا فرکانس وقوع رویدادها) اشاره دارد که اگر هریک از آنها از شدت کافی برخوردار باشند، می‌توانند سطح کارآیی تعدادی از اجزاء کل سیستم یک کشتی را به سطح غیرقابل‌قبولی تنزل دهند.

دوازده نمونه از معیارهای رایج عملکرد در مسیر دریایی در جدول ۴–۹ ارائه شده است. دوازده معیار ارزیابی عملکرد دریامانی در جدول به چهار دسته از پاسخ‌ها به شرح زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

- دامنه حرکات، نظیر مقادیر مطلق جابجایی‌ها و زاویای حرکات roll، pitch و yaw شناور
- مقادیر مطلق سرعت‌ها و شتاب‌های قائم، عرضی و طولی در نقاط تعیین شده بر روی کشتی نسبت به دستگاه مختصات متصل به زمین
- مقادیر نسبی جابجایی‌ها و سرعت‌های قائم در نقاط تعیین شده بر روی کشتی با توجه به موقعیت سطح آب نسبت به این نقاط
- حرکات نسبی بین پلات‌فرم و هواپیما

تمام دوازده معیار موجود در جدول ۴–۹ می‌توانند در مورد کلیه شناورهای تجاری و نظامی مورد استفاده قرار گیرند. البته معیارهای شماره ۳، ۹ و ۱۲ اصولاً به کشتی‌های نظامی مربوط می‌شوند.

ارزیابی بلند مدت[3] عملکرد دریامانی یک طرح جدید که جهت انجام مأموریت محوله در یک محیط مشخص پیشنهاد شده است، مستلزم مقایسه پاسخ‌های محاسبه شده با مقادیر تعیین شده برای معیارهای مربوطه در تعداد زیادی از وضعیت‌های کوتاه مدت می‌باشد. مقادیر واقعی پاسخ‌ها، شدت حرکات و فرکانس وقوع رویدادهایی را اندازه‌گیری می‌کنند که شناور حین حرکت در دریا تجربه می‌کند. مقادیر واقعی تمامی پاسخ‌ها بجز آنهایی که مشتمل بر حرکات اجسام مستقل از سازه کشتی هستند (مانند معیار شماره ۱۲ از جدول ۴–۹)، همگی وابسته به حرکات کشتی در مسیر دریایی هستند. بنابراین مقادیر پاسخ‌های متناظر با معیارهای ۱ الی ۷، بطور مستقیم از طیف پاسخ مرتبط با دسته‌های (آ) و (ب) قابل محاسبه هستند. دریازدگی متناظر معیار شماره ۶، وابسته به مقادیر شتاب قائم و فرکانس مربوط به این شتاب‌ها فرض می‌شود. تحت معیار شماره ۷، محاسبه مقادیر واقعی حداکثر شتاب قائم ناشی از اسلمینگ دارای دشواری‌هایی می‌باشد، زیرا این مقادیر نتیجه یک رویداد گذرا و تصادفی هستند. مقادیر واقعی پاسخ‌های متناظر با معیارهای شماره ۸ الی ۱۱ (دسته ج) را می‌توان با تعیین طیف‌های پاسخ در سرعت‌ها و جهات مختلف و در طیف معرف دریا محاسبه نمود. در نهایت مقادیر واقعی پاسخ متناظر معیار شماره ۱۲ برای عرشه پروازی و هواپیما با استفاده از طیف سرعت‌های قائم دسته (ب) قابل محاسبه هستند. ارزیابی کوتاه مدت عملکرد کشتی را می‌توان با انجام محاسبات سیستماتیک بر روی پاسخ‌های مختلف در سرعت‌ها و جهات متفاوت و در شرایط دریایی مشخص که با استفاده از طیف جهتی دریا تعریف شده‌اند، بدست آورد. سپس نتایج این محاسبات را می‌توان بر اساس سرعت ترسیم نمود. برای هر دستهٔ مشخصی از معیارهای ارزیابی عملکرد و برای هر ترکیبی از sea state و جهت پیشروی، در نقاطی که معیارها برقرار هستند، می‌توان سرعت‌ها را تعیین نمود.

---

1 - Seakeeping Performance Index
2 Seakeeping Performance Criterion
3 Long-Term

معیار ارزیابی عملکرد در مسیر دریایی	عوامل تحت تأثیر	انواع افت‌های عملکرد
(a) Absolute Motion Amplitudes		
Roll angle Pitch angle	People, Mission and Platform Systems	صدمه به پرسنل، کاهش کارآیی در انجام وظایف و افت سیستم‌های مأموریتی و سیستم‌های بدنه
Vertical displacement of points on flight deck	People Mission Systems	صدمه به پرسنل جابجایی هواپیما ناتوانی در پرواز یا فرود ایمن هواپیما
(b) Absolute Velocities and Accelerations		
Vertical acceleration Lateral acceleration	People and Mission Systems	خستگی پرسنل، کاهش کارآیی در انجام وظایف و افت سیستم‌های مأموریتی
Motion sickness incidence (MSI)	People	کاهش کارآیی در انجام وظایف
Slam acceleration (vibratory, vertical)	People, Mission and Platform Systems	خستگی و صدمه به پرسنل، کاهش کارآیی در انجام وظایف و افت سیستم‌های مأموریتی و سیستم‌های بدنه. ممانعت از عملکرد سونار
(c) Motions Relative to Sea		
Frequency of slamming. (Simultaneus bow reimmersion & exceedance of a threshold vertical velocity)	Mission Systems Platform Systems	تنش‌های ضربه‌ای وارد بر بدنه و آسیب به سنسورهای موجود در دکل‌ها آسیب‌دیدگی ناشی از اسلمینگ به قسمت تحتانی جلوی سازه بدنه
Frequency of emergence of a sonar dome	Mission Systems	افت راندمان سونار
Frequency of deck wetness (submergence if the main deck forward)	People Mission Systems	صدمه یا غرق شدن پرسنل آسیب به تجهیزات نصب شده بر روی عرشه
Probability of propeller emergence	Platform Systems	آسیب به سیستم پیشران اصلی
(d) Motions relative to aircraft		
Vertical velocity of aircraft relative to the flight deck	Mission Systems	آسیب به وسایل فرود هواپیما و یا ایجاد خسارت در هواپیما

جدول ۴-۹ـ معیارهای دوازده‌گانه ارزیابی عملکرد دریامانی

۵ـ تعیین مقادیر حدی معیار ارزیابی عملکرد در مسیر دریایی

مقادیر حدی تعیین شده برای معیارهای ارزیابی عملکرد در مسیر دریایی سعی بر ایجاد مرزی میان عملکرد قابل قبول و غیر قابل قبول دارند که «حد قابلیت عملکرد[1]» نامیده می‌شوند. بطور ایده‌آل، این مسأله بسیار مفید خواهد بود که اگر ارتباط قابل قبولی میان حرکات و تنزل کارآیی با یک ناپیوستگی ناگهانی وجود داشته باشد. در حقیقت چنین ناپیوستگی‌های غیرمنتظره‌ای وجود ندارد. بنابراین ایجاد رابطه‌ای میان حرکات و تنزل عملکرد در غالب عبارات احتمالاتی برای معیارهای مختلف باید امکان‌پذیر باشد. چنین رویه‌ای تنها از طریق جمع‌آوری و تحلیل آماری مقادیر زیادی از اطلاعات کاری می‌تواند بطور کامل به واقعیت بپیوندد. این مسئله مستلزم آن است که تعریف دقیق‌تری از محدوده‌های مربوط به سطوح مختلف عملکرد صورت پذیرد. در حقیقت مقادیر تعیین شده، اطلاعاتی هستند که با استفاده از آنها در مورد عملکرد کشتی قضاوت صورت می‌گیرد و حاصل تجربیات و دانش کسانی است که نیازمندی‌های عملیاتی کشتی‌ها را فرمول‌بندی می‌کنند. دانش پزشکی با کارآیی افراد سر و کار دارد، مهندسان معماری دریایی و دیگر مهندسان مربوط با طراحی و عملکرد کشتی و زیرسیستم‌های آن در ارتباط هستند، گروه‌های مختلفی از مهندسان با سیستم‌های مأموریتی در ارتباط

1 Limit of Operability

بوده و مهمتر از همه افسران و افرادی هستند که سیستم‌ها را راه‌اندازی می‌کنند. هر یک از مقادیر تعیین شده توسط این افراد به عنوان محدوده عملیاتی متوسط و قابل قبولی که اختلال عمده‌ای در کارآیی شناور ایجاد نشده و یا عملکرد آن دچار تنزل قابل توجهی نشود (مگر آنکه تصریح شده باشد)، در غالب یکی از سه دسته‌بندی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند:

۱) خدمه

- راحتی
- دریازدگی
- خستگی خدمه
- مسئولیت تخصصی
- ایمنی

۲) محموله کشتی

- فرود هواپیما و هلی‌کوپتر
- جابجایی بار

۳) کشتی

- آسیب‌دیدگی بدنه
- آسیب‌دیدگی تجهیزات روی عرشه
- آسیب‌دیدگی سیستم‌ها
- کارآیی سیستم‌ها
- سیستم پیشران

مقادیر تعیین شده برای معیارهای ارزیابی دریامانی موجود در دسته‌های (۱) و (۲) باید کاملاً مستقل از شرایط دریا، باد و شرایط جوی، موقعیت بر روی کشتی و یا وجود یا عدم وجود سیستم‌های کنترل فعال حرکات باشند. این معیارها تابع نوع مأموریت کشتی و تجربه خدمه بوده و ممکن است به اندازه و نوع کشتی یا مدت زمان انجام مأموریت وابسته باشند. به همین ترتیب، مقادیر تعیین شده برای معیارهای ارزیابی دریامانی که برای دسته (۳) توسعه یافته‌اند نیز کاملاً مستقل از شرایط دریا، باد و شرایط جوی بوده و تابع نوع وظایف کشتی هستند اما برخلاف مقادیر تعیین شده قبلی، به موقعیت بر روی کشتی وابستگی دارند. مقادیر تعیین شده برای معیارهای دوازده‌گانه ارزیابی عملکرد در مسیر دریایی (جدول ۴–۹) برای پنج کشتی نظامی مختلف و چهار کشتی تجاری که از منابع متعدد استخراج شده‌اند، برای کشتی‌هایی با وظایف متعدد در جدول ۴–۱۰ ارائه گشته است. ترکیب پنج کشتی نظامی تشکیل یافته است از کشتی‌های تک بدنه، *SWATH*، پروازی، هیدروفویل و شناورهای اثر سطحی. اگرچه در منابع مورد استفاده، چگونگی استخراج این مقادیر مشخص نشده است اما شاید بتوان اینطور فرض نمود که مقادیر تعیین شده در جدول ۴–۱۰ به استثنای مقادیر مربوط به معیار شماره ۶ از متوسط محدوده‌های عملیاتی ثبت شده بدون افت قابل توجه عملکرد بدست آمده‌اند. مقادیر تعیین شده برای معیارهای جدول ۴–۱۰ طبق اصول معرفی شده در ابتدای این بخش، می‌توانند در مورد هر موقعیتی بر روی کشتی مورد استفاده قرار گیرند. اگرچه بخاطر اینکه تعداد زیادی از مقادیر واقعی پاسخ‌های مرتبط با معیارها به موقعیت مکان‌های مشخصی وابستگی دارند، استفاده از روش بررسی عملکرد دریامانی نیازمند آن است تا اطلاعات مربوط به موقعیت‌ها نیز مد نظر قرار گیرند. موقعیت‌هایی که پاسخ‌ها باید با مقادیر تعیین شده برای معیارهای ۳ الی ۱۲ از جدول ۴–۱۰ مورد مقایسه قرار گیرند، با توجه به محورهای مختلف طولی، عرضی و قائم عبارتند از:

معیار شماره۳: محل فرود هلی‌کوپتر

Criterion No.	Column No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Ship Type	Naval mono-hull		3350 t. SWATH	Planning craft	Hydro-foil	2000-3000 t SES	Naval mono-hull		Naval mono-hull		Commercial Monohulls			
												Bulk Carrier	General Cargo L.	Trawler	Cross-Chan.
	Function	Point-to-point transit						Helicopter operation		At sea replen.	Sonar search	Transit			
	Source	Olson (1977)	Comstock et al. (1980)	Olson (1977)	Allen et al. (1978)	Stark (1977)	Mandel (1979)	Olson (1977)	Comstock et al. (1980)	Olson (1977)	Olson (1977)	Aertssen (1968, 1972)			
1	Rms Roll Angle (deg)	9.6	4.0	9.6	—	1.25	1.5	3.2	2.5	—	9.6	—	—	—	—
2	Rms Pitch Angle (deg)	—	1.5	—	—	1.5	1.5	—	1.5	2.4	—	—	—	—	—
3	Rms Vert. Disp. (m)	—	—	—	—	—	—	1.26	—	—	—	—	—	—	—
4	Rms Vert. Accel. (g)	—	0.2	—	—	0.11	0.1	—	0.2	—	—	0.5	0.9	1.4	1.0
5	Rms Lat. Accel. (g)	—	0.1	—	—	0.06	0.1	—	0.1	—	—	—	—	—	—
6	Mot. Sickness Incidence	20% in 2 hrs.	—	20% in 2 hrs.	—	10% in 4 hrs.	10% in 2 hrs.	—	—	—	20% in 2 hrs.	—	—	—	—
7	Slam Accel. (g)	0.2	—	—	4*	0.5*	0.6*	0.2	—	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9	0.4
8	Slam Freq.	$^{3}/_{100}$	$^{20}/_{hr.}$	#	—	—	—	$^{3}/_{100}$	$^{20}/_{hr.}$	$^{3}/_{100}$	$^{3}/_{100}$	$^{3}/_{100}$	$^{4}/_{100}$	$^{6}/_{100}$	$^{5}/_{100}$
9	Sonar Dome Emerg. Freq.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$^{120}/_{hr.}$	—	—	—	—
10	Deckwetness Freq.	$^{30}/_{hr.}$	$^{30}/_{hr.}$	—	—	—	—	$^{30}/_{hr.}$	$^{30}/_{hr.}$	$^{30}/_{hr.}$	$^{30}/_{hr.}$	$^{5}/_{100}$	$^{5}/_{100}$	—	—
11	Prop. Emerg. Freq.	—	—	#	—	—	—	—	—	—	—	$^{25}/_{100}$	$^{25}/_{100}$	—	—
12	Rms Rel. Ver. Vel. (m/s)	—	—	—	—	—	—	1.83	1.0	—	—	—	—	—	—

نکات: تمامی مقادیر پاسخ‌ها (زوایا، جابجایی‌ها، شتاب‌ها) جذر متوسط مربعات مقادیر قله تا میانگین هستند مگر آنکه تصریح گردد.

× مقدار حداکثر قله تا میانگین

بخش ۷ را ملاحظه فرمایید.

جدول ۴-۱۰: مقادیر تعیین شده برای معیارهای ارزیابی عملکرد جدول ۴-۹

معیارهای ۴، ۵ و ۶: تمام مکان‌های موجود در کشتی که خدمه در این محل‌ها غذا می‌خورند، استراحت می‌کنند و فعالیت می‌نمایند (در مورد کشتی‌های مسافربری، مکان‌های تفریحی نیز باید به این موارد اضافه گردد). معیارهای ۷ و ۸: برای شناورهای پروازی، هیدروفویل، *SES* و *ACV* باید محل‌هایی که در مورد معیارهای ۴، ۵ و ۶ بیان شد و برای شناورهای تک بدنه و *SWATH* مکان‌هایی که متعلق به قسمت‌های پُر بدنه و بویژه امتداد سطح کف هستند، مورد بررسی قرار گیرد. موقعیت مفروض برای مقادیر ارائه شده در جدول ۴–۱۰ برای این دو معیار، در فاصله‌ای برابر با ۱۵ درصد از طول کشتی واقع در عقب سینه کشتی قرار دارد که مقداری است که برای کشتی باربری ۵۲۸ فوتی *Mariner* در سال ۱۹۷۳ بوسیله *Ochi* و *Motter* مورد استفاده قرار گرفت.

معیار شماره ۹: موقعیت سونار

معیار شماره ۱۰: هر مکانی واقع بر روی عرشه شناور یا بالای آن که خدمه، محموله، سازه کشتی یا سیستم‌های آن ممکن است در اثر شدت اصابت آب دریا مجروح شوند یا صدمه ببینند.

معیار شماره ۱۱: موقعیت پروانه

معیار شماره ۳ و ۱۲: مکانی که در آن هلی‌کوپتر پرواز می‌کند یا فرود می‌آید.

هر یک از مقادیر تعیین شده در جدول ۴–۱۰ در بخش ۷ به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

٦ـ معیارهای حاکم

از دوازده معیار بیان شده برای هر کشتی و در وضعیت‌های خاص، یک معیار به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته می‌شود. این معیارها به عنوان معیارهای حاکم[1] نامیده می‌شوند. معیارهای حاکم با توجه به تغییرات سرعت و جهت برخورد امواج به کشتی تغییر خواهند نمود و همچنین با تغییر و تبدیل شدّت sea state تغییر می‌یابند. همچنین معیارهای حاکم برای یک مأموریت، سرعت و جهت مشخص ممکن است برای کشتی‌های مختلف اما از یک نوع متفاوت باشند و حتی ممکن است برای کشتی‌های یکسان با شرایط بارگیری مختلف نیز متفاوت باشند. مثلا در شرایط بارگیری سبک (آبخور کم و فری‌برد زیاد) در مورد یک شناور تک بدنه که وظیفه ترانزیت کالا را بر عهده دارد، معیار حاکم برای بخش اعظم بازه سرعت عبارت است از معیار شماره ۸ یعنی فرکانس اسلمینگ و فقط در کمتر از ۲۸ درصد از بازه سرعت، معیار شماره ۱۰ یعنی خیسی عرشه به عنوان معیار حاکم محسوب می‌شود. در حالیکه در شرایط بارگیری سنگین (آبخور زیاد و فری‌برد کم)، معیار اسلمینگ تنها در بیش از ۲۰ درصد از بازه سرعت حاکم بوده و در مقابل معیار خیسی عرشه بر بیشتر محدوده سرعت حاکم می‌باشد.

۷ـ تشریح معیارهای دوازده گانه

تمامی مقادیر تعیین شده جنبه موقت داشته و با افزایش اطلاعات در این زمینه باید مورد تجدید نظر قرار گیرند.

معیار شماره ۱؛ جذر متوسط مربعات زاویه غلتش عرضی

دریازدگی ارتباط تاریخی طولانی مدتی با حرکت غلتش عرضی کشتی‌ها در دریا دارد. اگر چه تحقیقات *O'Hanlon* و *Mc-Cauley* در سال ۱۹۷۳ آشکار ساخت که شتاب‌های قائم مرتبط با زاویه غلتش عرضی، زاویه غلتش طولی و حرکت قائم (نه زاویه غلتش عرضی تنها) هنگامی که در محدوده یک باند فرکانسی با پهنای بسیار کم (که تمامی آنها زیر یک هرتز قرار دارند) رخ دهند، سبب بروز دریازدگی در خدمه می‌شوند. در مورد نتایج این تحقیقات در معیار شمارهٔ ۶ بررسی بیشتری صورت می‌گیرد. هیچ یک از مقادیر تعیین شده برای زاویهٔ غلتش عرضی در جدول ۴–۱۰ بر اساس دریازدگی تعیین نگشته‌اند بلکه اساس هر مقدار از معیار زاویهٔ غلتش عرضی در جدول ۴–۱۰بشرح زیر می‌باشد:

ستون‌های (۱)، (۳) و (۱۰)؛ مقدار زاویه رول ۹/۶ درجه: *Olson* در سال ۱۹۷۷ نتوانست واقعاً علت بیان این مقدار نسبتاً بزرگ را با دلیل و مدرک به اثبات رساند، هرچند که وی آنرا به کارآیی خدمه مرتبط می‌دانست. در این زمینه توجه به اظهارات *Mendel* در سال ۱۹۷۹ درباره خلاصه کار *Olson* بسیار جالب خواهد بود که علی‌رغم بزرگی اندازه آن، این مقدار تعیین شده موجب می‌شود که زاویه غلتش عرضی به عنوان معیار حاکم برای شناورهای تک بدنه مختص ترانزیت در بین ۷۵ مورد از ۸۰ سفر دریایی در زاویه برخورد ۷۵ درجه (۲۸۵ درجه) در نظر گرفته شود. همچنین زاویه غلتش عرضی مرسوم‌ترین معیار حاکم در تمام زوایای برخورد بین ۵۰ درجه (۳۱۰ درجه) و ۸۲ درجه (۲۷۸ درجه) محسوب می‌شود. (کار *Olson* چهار نوع کشتی جنگی تک بدنه متفاوت را در پنج سرعت مختلف و در دریاهایی با چهار پریود مودال متفاوت تحت پوشش قرار می‌دهد). در مقابل برای شناورهای *SWATH*، زاویه غلتش عرضی با وجود برخورداری از این مقدار هرگز به عنوان یک معیار حاکم محسوب نمی‌گردد.

ستون (۲)؛ ۴ درجه: اساس تعیین این مقدار برای زاویه غلتش عرضی، ملاحظات مربوط به خدمه بوده و به محدودیت‌های مرتبط با کشتی یا تجهیزات مأموریتی و یا خود کشتی مربوط نمی‌شود. برخی مدارک دال بر این مسأله است که این مقدار محدود به عملیات ترانزیت می‌باشد.

ستون (۵)؛ ۱/۲۵ درجه: *Stark* در سال ۱۹۷۷ این مقدار را به عنوان یک راهبرد تقریبی برای تأمین نیازمندی‌های متعاقب سیستم‌های جنگی، در جهت حفظ کارآیی خدمه در دریای ناآرام و محدودسازی میزان بارهای سازه‌ای وارد بر تجهیزات نصب شده در قسمت‌های انتهایی کشتی پیشنهاد نمود.

---

1 Governing Criteria

ستون (۶)؛ ۱/۵درجه: مشخصه این مقدار برای *rms* زاویه غلتش عرضی (و غلتش طولی) آن است که در *sea state*هایی که معیار شماره ۴ (*rms* شتاب قائم) با مقدار ۰/۱*g* (ارائه شده در ستون ۶ جدول ۴–۱۰) معیار حاکم باشد، پاسخ غلتش عرضی شناور هرگز از این مقدار فراتر نمی‌رود. به جرأت می‌توان گفت که مقادیر واقعی *rms* زاویه غلتش عرضی و غلتش طولی شناور تا زمانی که پاسخ مربوط به معیار شماره ۴ از مقدار تعیین شده برای آن تجاوز ننماید، بدون کاهش کارآیی خدمه در انجام وظایف یا افزایش دریازدگی می‌توانند از ۱/۵ درجه نیز بیشتر باشند. این مطلب بر پایه یافته‌های *O'Hanlon* و *McCauley* در سال ۱۹۷۳ قرار دارد که در مقدمه این بخش بدان اشاره شد. بدلیل وجود برخی عدم قطعیت‌ها، در جدول ۴–۱۰ اطلاعاتی در رابطه با هاورکرافت‌ها (*ACV*) آورده نشده است. با این وجود آقایان *Wachnic* و *Pierce* در سال ۱۹۶۷ با انجام یک سری اندازه‌گیری‌های واقعی بر روی یکی از هاورکرافت‌های مسافربری کلاس *SRN4* متعلق به انگلیس در دریایی با ارتفاع مشخصه امواج ۲/۷ متر، مقدار ۳/۴ درجه را برای معیار rms زاویه غلتش عرضی بدست آورده‌اند که این ارتفاع مشخصه با استفاده از بویه‌هایی که در نقاط مشخصی از مسیر نصب شده بودند، ثبت شده است. ارتفاع مشخصه امواج که بیانگر میزان شدت تلاطم دریا می‌باشد، برای این دریا به میزانی است که اپراتورهای شناور به دلیل عدم توانایی مسافرین در تحمل حرکات شناور در چنین شرایطی، زمان سرویس‌دهی آنرا به تعویق خواهند انداخت. البته خود این شناورها توانایی تحمل شرایط دریایی سخت‌تر را هم دارا هستند. از آنجا که این نوع شناورها صرفاً در سرویس‌های تجاری سودآور تجاری مشغول سرویس‌دهی هستند، تصمیم‌گیری در زمینه تعویق زمان سرویس برای آنها بسادگی صورت نمی‌پذیرد. از این گذشته، این امر که این نوع شناورها برای مدت یک دهه کامل مشغول سرویس‌دهی بوده‌اند، باعث می‌شود تا چنین تصمیماتی بر اساس آگاهی شرکت مورد نظر از میزان توانایی مسافران در مواجهه با حرکات شدید انجام پذیرند. بنابراین با توجه به تجربیاتی که در مورد شناورهای اثر سطحی (*SES*) وجود دارد، همانطور که در مبحث مربوط به مقادیر ستون (۶) درج شده است، به نظر می‌رسد که به جای *rms* زاویه غلتش عرضی پاراگراف قبل، معیار حاکم صحیح برای هاورکرافت‌ها همان *rms* شتاب قائم با مقداری برابر با ۰/۱g از ستون (۶) باشد.

ستون‌های (۷) و (۸)؛ ۳/۲ درجه و ۲/۵ درجه: این مقادیر توسط *Olson* در سال ۱۹۷۷ و *Comstock* و *Keane* در سال ۱۹۸۰ برای شناورهای تک‌بدنه (و همچنین *SWATH*) برای عملیات فرود یا پرواز هلیکوپترها بدست آمده‌اند که کار هر دو گروه بر پایه مطالعات *Baitis* در سال ۱۹۷۵ قرار دارد. آنها قصد داشتند تا محدوده‌های ایمن را برای خدمه تعریف نمایند که برای حمل هلیکوپتر بعد از فرود یا قبل از پرواز، بر روی عرشه فعالیت می‌نمایند. ارائه خلاصه گزارش *Olson* (۱۹۷۷) توسط *Mendel* در سال ۱۹۷۹ حاکی از آن است که تعیین این مقادیر برای زاویه غلتش عرضی باعث می‌شود تا این معیار در مورد هر چهار فروند ناوشکن تک‌بدنه مورد بررسی توسط *Olson* در حین انجام عملیات فرود یا پرواز هلیکوپتر و در تمامی زوایای برخورد بین ۴۰ درجه (۳۲۰ درجه) و ۱۰۰ درجه (۲۶۰ درجه) به عنوان معیار حاکم برتر لحاظ شود. در مورد شناورهای *SWATH*، تعیین مقدار ۳/۲ درجه برای زاویه غلتش عرضی باعث می‌شد تا این معیار در یک مورد از میان ۳۲ مورد، در زوایای برخورد مابین ۴۰ درجه (۳۲۰ درجه) و ۷۰ درجه (۲۹۰ درجه) به عنوان معیار محسوب گردد. این موضوع در مورد شناورهای *SWATH* در حین عملیات در هشت سرعت مختلف و در دریاهایی با چهار پریود مودال متفاوت صادق است.

معیار شماره ۲؛ جذر متوسط مربعات زاویه غلتش طولی

اساس هر یک از مقادیر تعیین شده برای زاویه غلتش طولی در جدول ۴–۱۰، همان اصولی است که در مورد زاویه غلتش عرضی بیان شد. در رابطه با مقدار ستون (۹)، *Olson* در سال ۱۹۷۷ بیان نموده است که «هنگامی که ما هیچ مقدار مشخصی را برای معیار غلتش طولی بر اساس کارآیی عوامل انسانی نیافتیم، مقدار ۲/۴ درجه به عنوان محدوده کاری زیرسیستم‌های کشتی ذکر گردید.

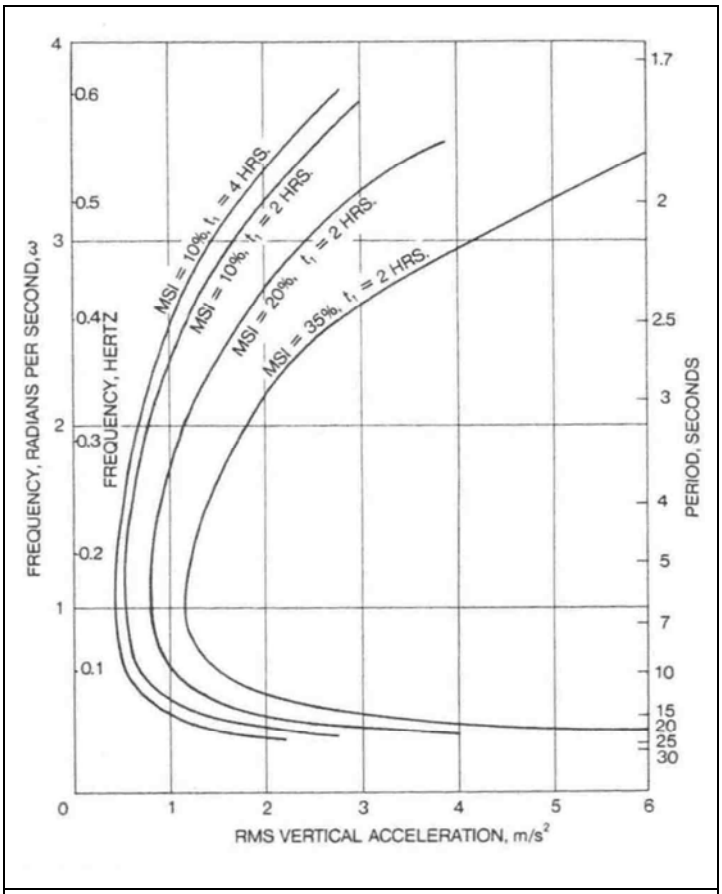
معیار شماره ۳؛ جذر متوسط مربعات جابجایی قائم

ملاحظات موجود در پس معیار شماره ۳ عبارت است از توانایی خدمه عرشه پروازی در حمل ایمن هلیکوپترها قبل از پرواز و پس از فرود. تنها مقدار درج شده در جدول ۴–۱۰ برای معیار *rms* جابجایی قائم با مقداری برابر با ۱/۲۶ متر، بر اساس مطالعات *Baitis* در سال ۱۹۷۵ و *Olson* در سال ۱۹۷۷ بدست آمده است. نتایج مطالعات *Olson* حاکی از آن است که این مقدار موجب می‌شود تا معیار شماره ۳. به عنوان معیار حاکم اصلی برای انجام عملیات فرود و پرواز هلیکوپتر در تمامی زوایای برخورد بین ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه و زوایای مابین صفر (۳۶۰ درجه) و ۷۵ درجه (۲۸۵ درجه) در مورد شناورهای *SWATH* محسوب گردد.

معیار شماره ۴ و ۵؛ جذر متوسط مربعات شتاب‌های قائم و جانبی

ارتباط نزدیک میان معیار شماره ۴ و ۵ با خستگی و کاهش کارآیی خدمه برای مدت چندین دهه است که تشخیص داده شده است. مقادیر تعیین شده برای این دو معیار در فرکانس‌های بالاتر از یک هرتز و برحسب مدت زمان‌های معین توسط سازمان استانداردهای بین المللی (*ISO, 1978*) انتشار یافته و برای سالیان متمادی به عنوان استانداردهای نظامی (*MIL-STD-1472*) مورد استفاده قرار گرفته است. در مورد فرکانس‌های کمتر از ۱ هرتز که در استانداردهای *ISO* گنجانده نشده است، *Stark* در سال ۱۹۷۷ با استفاده از شاخص دریازدگی که در بخش بعد شرح داده شده است، مقدار حدی وابسته به فرکانس را برای شتاب قائم اقتباس نمود. این مقادیر در ستون ۵ جدول ۴–۱۰ گنجانده شده‌اند. مقادیر واقعاً یکسانی برای معیار شتاب قائم از آزمایشات شبیه‌سازی شناورهای اثرسطحی و از آزمایشات انجام شده بر روی هاورکرافت‌های کلاس *SNR4* بدست آمده است که در ستون ۶ جدول ۴–۱۰ گنجانده شده‌اند. *Aertssen* در سال ۱۹۶۸ مقادیر حدی بسیار بزرگتری را برای شناورهای تجاری ارائه نمود (ستون‌های ۱۴–۱۱). مقداری که *Stark* در سال ۱۹۷۷ برای *rms* شتاب جانبی (معیار ۵) در ستون ۵ ارائه نمود برابر ۰/۰۶g می‌باشد. او اظهار نمود که این مقدار را از طریق

برون‌یابی مقادیر *MIL-STD* (برای دورهٔ زمانی محدود ۴ ساعته) که در فرکانس‌های مابین ۱ و ۲ هرتز تا فرکانس‌های کمتر از فرکانس غلتش عرضی همزمان برای شناور هیدروفویل (تقریباً ۰/۲۵ هرتز) ثابت می‌باشد، بدست آورده است. مقدار تعیین شده برای این معیار در مورد شناورهای اثرسطحی در ستون (۶) همانند مقادیری که برای شناورهای تک‌بدنه در ستون‌های (۲) و (۸) آورده شده است، به ویژگی‌های چرخش شناور مربوط می‌شود نه به حرکات آن در امواج.



شکل ۴-۴۶: مقادیر شتاب عمودی و فرکانس متناظر با چهار مقدار معین از شاخص دریازدگی (*MSI*) و زمان وقوع حرکات

معیار شماره ۶؛ شاخص دریازدگی

در اوایل دهه ۱۹۷۰، *O'Hanlon* و همکارانش (سال ۱۹۷۳) یک سری آزمایشاتی را با همکاری گروهی از مردان جوان نامأنوس با حرکات ترتیب دادند که در طی این آزمایشات آنها را در معرض یک سری از حرکات سینوسی قائم با فرکانس‌های منفرد (نه حرکت غلتش عرضی) قرار دادند. نتایج این آزمایشات در غالب عباراتی از شاخص دریازدگی[1] (*MSI*) بیان شد. شاخص دریازدگی عبارت است از درصد افرادی که در صورت مواجهه با حرکاتی با ویژگی‌های مشخص در طی یک بازه زمانی معین t_1، از لحاظ جسمی دچار بیماری می‌شوند. نتایج آزمایشات *O'Hanlon* و همکارانش برحسب مقادیر *rms* شتاب قائم و فرکانس با چهار ترکیب مختلف از مقادیر *MSI* و t_1 در شکل ۴-۴۶ رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که در مقداری از *rms* شتاب قائم معادل ۱ m/s^2 (۰/۱g) ۲۰ درصد از این مردان در ظرف مدت ۲ ساعت در فرکانس‌های ۰/۱ و ۰/۲۹ هرتز (پریودهای ۳/۴ و ۱۰ ثانیه) دچار حالت تهوع می‌شوند. در فرکانس‌ها و پریودهای میانی مابین این دو مجموعه از مقادیر، مقدار *MSI* بیشتر از ۲۰ درصد است. در مقداری از *rms* شتاب قائم معادل ۲، ۳۵ m/s^2 درصد از چنین افرادی در ظرف مدت ۲ ساعت و در فرکانس‌هایی از ۰/۰۹ تا ۰/۳۴ هرتز (پریودهای ۲/۹ و ۱۱/۴ ثانیه) دچار دریازدگی شدند. این محدوده از پریودها شدیداً منطبق بر پریودهای واقعی غلتش عرضی اکثر شناورهای تک‌بدنه بوقوع می‌پیوندد که در ازاء وقوع غلتش عرضی همزمان در چنین کشتی‌هایی، بطور معمول بیشتر در محدوده پریودهای مابین ۶ تا ۲۵ ثانیه اتفاق می‌افتد. تلاش‌های *O'Hanlon* و همکارانش وجود این انطباق میان پریودها را فاش ساخت و در نتیجه چگونگی ارتباط تاریخی میان زاویه غلتش عرضی شناور و بیماری دریازدگی را روشن نمود. همچنین همزمان با این مسأله آشکار گشت که لزوماً حرکات غلتش عرضی به تنهایی موجب دریازدگی نمی‌شوند بلکه این شتاب‌های قائم مرتبط با حرکات غلتش عرضی، غلتش طولی و حرکت قائم هستند که می‌توانند عامل اساسی بروز دریازدگی باشند.

1 - Motion Sickness Incidence

شکل ۴-۴۶ همچنین کاهش خیلی سریع شاخص دریازدگی را با افزایش پریودها بعد از پریود همزمان غلتش عرضی متداول کشتی‌ها نشان می‌دهد. با افزایش پریود در بعد از حدود ۷ ثانیه (فرکانس کمتر از ۰/۱۴ هرتز)، *MSI* در تمام مقادیر *rms* شتاب قائم پس از حدود m/s^2 ۱ سریعاً شروع به کاهش می‌کند.

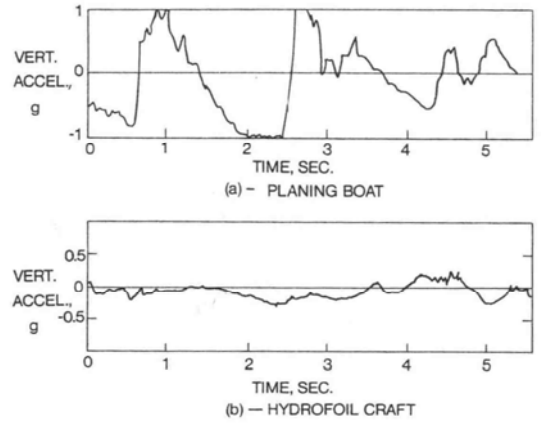
این خاصیت شاخص دریازدگی در سال‌های ابتدایی قرن بیستم در مهندسین معمار کشتی شگفتی زیادی را بوجود آورد. بطوریکه در زمان اوج رونق خطوط کشتیرانی مسافربری آتلانتیک، پریود غلتش عرضی این کشتی‌ها با کاهش ارتفاع متاسنتری افزایش داده شد.

معیار شماره ۷؛ شتاب اسلمینگ

وقوع متوالی و شدید پدیده اسلمینگ به عنوان یک محدودیت بر روی سرعت کشتی در دریای متلاطم به خوبی ارزیابی شده است. میزان شدت این پدیده را می‌توان یا با استفاده از شتاب قائم موضعی بزرگی تشخیص داد که در لحظه برخورد کف کشتی به سطح دریا ایجاد می‌شود و یا بوسیله پاسخ ارتعاشی ناشی از آن که در سراسر کشتی تجربه می‌شود و مشتمل بر شتاب‌ها و تنش‌های خمشی بدنه می‌باشد. بزرگی شتاب موضعی اسلمینگ در لحظه برخورد اغلب به عنوان یک معیار ارزیابی عملکرد دریامانی، بخصوص در مورد شناورهای کوچک بکار برده می‌شود. مقادیر خیلی بزرگ نقاط حداکثر شتاب‌های اسلمینگی که توسط شناورهای پروازی تجربه می‌شود، می‌تواند یک سری آسیب‌های جدی را متوجه خدمه نماید و حتی منجر به مرگ آنها شود (*Payne, 1978*). از طرف دیگر شتاب‌های اسلمینگ کوچک‌تری که توسط شناورهای بزرگ تجربه می‌شود، آسیبی را متوجه خدمه نمی‌سازد اما ممکن است باعث ایجاد آسیب‌های سازه‌ای موضعی و تنش‌های ضربه‌ای شدیدی در بدنه شناور شوند. در مورد شناورهای پروازی، پدیده اسلمینگ حتی در دریاهایی با شرایط متوسط نیز شتاب‌های رو به افزایش خیلی بزرگی را در بازه‌های زمانی متوالی ایجاد می‌کند. نمونه کوچکی از تاریخچه زمانی شتاب قائم یک شناور پروازی در *Sea State* شماره ۶ و امواج از روبرو، در شکل ۶a نشان داده شده است. شتاب‌های رو به افزایش بزرگ و متوالی در شناورهای پروازی به سه ویژگی این شناورها قابل استناد است:

- فرم بدنه دارای زاویه انحنای کف[1] نسبتاً کم: که منجر به ایجاد ناحیه نسبتاً بزرگی برای اعمال ضربه اسلمینگ نسبت به شناورهای تک‌بدنه می‌گردد.
- حجم جابجایی کم: که شناور را نسبت به بارهای ضربه‌ای واکنش‌پذیرتر می‌سازد.
- سرعت بالا: که سبب افزایش فرکانس برخورد امواج و شدت اسلمینگ در امواج از روبرو می‌شود.

به دلیل آنکه نقاط حداکثر رو به افزایش شتاب اسلمینگ در شناورهای پروازی دارای مقادیر زیاد و دفعات تکرار بسیار زیادی هستند (بزرگ‌تر از ۱g در شکل ۶)، معیار شماره ۷ توسط ملاحظات خستگی و عدم کارآیی انسان تحمیل می‌گردد نه به واسطه ترس از آسیب‌دیدگی بدنه همانند برخی شناورهای تک‌بدنه بزرگ. از سوی دیگر بدین علت که شتاب‌های اسلمینگ در مورد شناورهای پروازی آنقدر به دفعات و شدت زیاد رخ می‌دهند که ظاهراً سایر رویدادهای دریامانی بر عملکرد آنها محدودیتی ایجاد نمی‌نمایند. برای نمونه در شناورهای پروازی تندرو، دریازدگی ابداً به نظر نمی‌رسد که به عنوان یک مسأله مهم برای خدمه مطرح باشد. شاید علت آنرا بتوان بدین ترتیب بیان نمود که حرکات فرکانس پایینی که سبب بروز دریازدگی می‌شوند، بندرت توسط خدمه شناورهای پروازی که در معرض شتاب‌های اسلمینگی با فرکانس بالاتر و شدت بیشتر قرار دارند، ادراک می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که خدمه سوار بر شناورهای پروازی در مقایسه با خدمه سوار بر انواع دیگر شناورها، در شرایط بسیار دشوارتر، از تحمل بیشتری برخوردار باشند.



شکل ۴-۴۷: نمونه‌ای از تاریخچه زمانی شتاب قائم یک شناور پروازی و یک شناور هیدروفویل در امواج از روبرو در معرض وضعیت دریایی مشخص

1 Deadrise Angle

همانطور که در جدول ۴-۱۰ نشان داده شده است، *Allen* و *Jones* در سال ۱۹۷۸ برای شناور پروازی ۱۰۰ تنی، مقدار حداکثر 4g را برای مقادیر حداکثر شتاب اسلمینگ (برای زمان‌های خیلی کوتاه در حدود ۲۰ دقیقه یا کمتر) پیشنهاد نمودند. برای شناورهای هیدروفویل (با اندازه نامعلوم) در شرایط *foilborne*، مقدار حداکثر شتاب قائم اسلمینگ برابر ۰/۵g در جدول ۳ توسط *Stark* در سال ۱۹۷۷ تعیین شده است که برای پریودهای زمانی طولانی‌تر، بسیار کمتر از مقدار حداکثر ۴g پیشنهادی توسط *Allen* و *Jones* برای شناورهای پروازی ۱۰۰ تنی می‌باشد. مقدار کوچک پیشنهادی *Stark* انعکاسی از اعتقاد راسخ وی بر این مطلب است که شتاب قائم اسلمینگ بیانگر شدیدترین محدودیت بر عملکرد شناورهای هیدروفویل در مسیر دریایی می‌باشد. مقدار کوچک تعیین شده توسط او سعی در اثبات این مسئله دارد که خستگی افراد نقشی در ارزیابی کیفی هیدروفویل سوار بر امواج دریاهای متلاطم ایفا نمی‌نماید. توجه نمایید که با توجه به تاریخچه زمانی حرکات هیدروفویل در شکل ۴-۴۷ بطور کلی هیچگونه نقاط حداکثر مشخصی در شتاب اسلمینگ در در شرایط بسیار سخت یعنی *Sea State* شماره ۸ در امواج از روبرو وجود ندارد. نگرانی *Stark* در مورد شتاب اسلمینگ به این مطلب مربوط می‌شود که با نزدیک شدن فویل‌های شناور هیدروفویل به سطح آب در دریای متلاطم، ممکن است موجب خروج آنها از آب شده و نیروی لیفت هیدروفویل‌ها ممکن است برای چند لحظه به صفر برسد. از این شرایط تحت عنوان *foil broaching* نام برده می‌شود. برای بروچ‌های شدید، شتاب‌های رو به پایین بزرگ در شناور پدید می‌آید و متعاقب یک بروچ، خود بدنه نیز در برابر قله امواج دچار کوبش یا اسلم می‌شود. شتاب رو به افزایش مرتبط با این کوبش بزرگتر از شتاب‌های رو به کاهش مربوط به بروچ خواهد بود. بنابراین مقادیر حداکثر شتاب اسلمینگ به یک محدودیت تحمیل شده بر عملکرد شناور هیدروفویل در شرایط دریای کاملاً متلاطم تبدیل می‌شوند. هاورکرافت‌ها و شناورهای اثرسطحی نیز پدیده اسلمینگ را تجربه می‌کنند. در دریاهای طوفانی، مقدار زاویه غلتش طولی این نوع شناورها ممکن بقدری بزرگ شود که باعث بروز نشت هوای بالشتک از زیر قسمت آب‌بند سینه[1] شود. در صورت وقوع این اتفاق، نتیجه این خواهد بود که شتاب رو به پایین سینه شناور موجب ایجاد شتاب‌های اسلمینگ بزرگی می‌شود. تعیین مقدار ۰/۶g برای معیار حداکثر شتاب اسلمینگ برای شناورهای اثرسطحی با تناژ ۳.۰۰۰-۲.۰۰۰ تن در جدول ۴-۱۰ مطابقت دارد با مقادیر (۰/۵۵g تا ۰/۷۰g) مربوط به شناورهای ۳.۰۰۰-۲.۰۰۰ تنی که توسط *Allen* و *Jones* در سال ۱۹۷۸ ارائه گشته است. *Mendel* در سال ۱۹۷۹ مقادیر مشابهی را برای یک هاورکرافت ارائه نمود. همانند شناورهای هیدروفویل، تأثیر شتاب‌های اسلمینگ بر خستگی خدمه و کارآیی خدمه موجب بروز نگرانی‌های بسیار جدی در رابطه با شناورهای اثرسطحی می‌باشد و نصب سیستم‌های فعال کاهش حرکات بر روی آنها بسیار ضروری به نظر می‌رسد. *Allen* و *Jones* در سال ۱۹۷۸ اظهار داشتند که مقادیر حداکثر تعیین شده برای شتاب اسلمینگ باید تابعی از اندازه بدنه باشند تا انعکاس دهنده ضربات بسیار متفاوت ناشی از اسلمینگ بر روی شناورهای بزرگ نظیر تک‌بدنه‌ها در مقایسه با شناورهای کوچک نظیر شناورهای پروازی باشند. بنابراین آنها مقدار حداکثر قله تا حد متوسط 0/5g را برای شناورهای تک‌بدنه ۴.۰۰۰ تنی پیشنهاد نمودند. در این حالت اسلمینگ فشارهای ضربه‌ای بزرگی را بر روی سطح محدودی از کف شناور اعمال می‌کند که امکان دارد سبب بروز آسیب‌های موضعی در بدنه شناور شود یا ممکن است تنش‌های ضربه‌ای[2] بزرگی را بر بدنه شناور اعمال نماید. اما پدیده اسلمینگ در شناورهای تک‌بدنه مقادیر شتاب حداکثر نسبتاً کوچکتری را نسبت به شناورهای پروازی تولید می‌کند، زیرا بطور معمول اندازه (حجم جابجایی) بزرگتر در شناورهای تک‌بدنه و شکل بدنه آنها به میزان زیادی سطح برخورد اسلمینگ به بدنه را کاهش می دهد. با وجود تأکید بر مقادیر حداکثر شتاب در پاراگراف قبل، مقادیری که در جدول ۴-۱۰ برای شتاب اسلمینگ در مورد شناورهای تک‌بدنه تعیین شده است، همان مقادیر *rms* دامنهٔ شتاب‌ها می‌باشد نه مقادیر حداکثر. تعیین مقدار ۰/۲g برای جذر متوسط مربعات شتاب اسلمینگ در مورد شناورهای تک‌بدنه در ستون‌های (۱)، (۷) و (۱۲)-(۹) از جدول ۴-۱۰ با انجام تحلیل‌های طیفی بر روی رکوردهای شتاب قائم محاسبه گشته است که این رکوردها در خلال انجام آزمایشات دریایی خاص بر روی یک شناور کانتینربر بزرگ بدست آمده و توسط *Aertssen* و *van Sluijs* در سال ۱۹۷۲ گزارش شده‌اند. در طی انجام آزمایشات، حرکات شناور به قدری شدید بوده که کاپیتان از ترس آسیب رسیدن به بدنه در اثر اسلمینگ، سرعت کشتی را کاهش داده است. مقدار واقعی ۰/۲g برای *rms* شتاب قائم از اطلاعات ثبت شده در چنین شرایطی از دریا بدست آمده و به عنوان مقدار معیار شماره ۷ برای شناورهای تک‌بدنه اتخاذ شده است. اگرچه این معیار باید تنها به عنوان یک مقدار دست بالا برای شناورهای بزرگ در نظر گرفته شود اما فرکانس اسلمینگ (معیار شماره ۸) یا مقدار تنش‌های ناشی از اسلمینگ در قسمت میانهٔ کشتی ممکن است در مورد چنین شناورهایی از قابلیت اتکاء بیشتری برخوردار باشد (*Aertssen, 1968*).

معیار شماره ۸: فرکانس اسلمینگ

در حالیکه مقدار حداکثر شتاب اسلمینگ یک معیار مناسب جهت برآورد کیفی بخشی از شناورها نظیر شناورهای اثرسطحی، هیدروفویل و پروازی محسوب می‌گردد ولی برای ارزیابی اهمیت اسلمینگ بر روی شناورهای تک‌بدنه بزرگ و *SWATH* این معیار کفایت نمی‌کند. به عقیده *Aertssen* و *Van* Sluijs (۱۹۷۲) و سایر محققین، فرکانس وقوع ضربات شدید اسلمینگ است که علاوه بر شتاب‌های زیاد اسلمینگ و حرکات ضربه‌ای ارتعاشی موجب می‌شود کاپیتان کشتی از سرعت کشتی خود بکاهد و یا جهت آنرا تغییر دهد. *Tick* در سال ۱۹۵۸ و سایرین فرض نمودند که یک ضربه اسلمینگ شدید در شناورهای تک‌بدنه زمانی بوقوع می‌پیوندد که دو رویداد بطور همزمان رخ دهند که این دو رویداد عبارتند از:

- بازگشت مجدد سینه شناور به داخل آب بعد از جدا شدن آن از سطح آب.
- سرعت نسبی قائم بین قسمت هموار کف کشتی و سطح آب از یک مقدار بحرانی معین تجاوز نماید.

---

1 Bow seal
2 Whipping Stress

طبق نظر *Ochi* و *Motter* در سال ۱۹۷۳، مقدار این سرعت قائم بحرانی برای یک شناور ۱۵۸ متری در نقطه‌ای واقع بر فاصله‌ای برابر با ۱۵ درصد طول شناور از سینه آن برابر *۳/۶۶ m/sec* می‌باشد. *Aertssen* در سال ۱۹۶۸ اظهار داشت که کاپیتان یک کشتی تجاری در صورت تکرار پدیده اسلمینگ به تعداد ۳ تا ۶ بار در هر ۱۰۰ موج برخوردی به کشتی (بسته به نوع کشتی همانطور که در جدول ۴–۱۰ آورده شده است)، نسبت به کاهش سرعت کشتی یا تغییر مسیر حرکت آن اقدام خواهد نمود. فرکانس ۳ بار در ۱۰۰ سیکل معادل است با وقوع یک ضربه اسلمینگ در هر ۲ تا ۵ دقیقه یا فرکانس اسلمینگ برابر با ۳۰ـ۱۲ بار در هر ساعت که وابسته به اندازه کشتی می‌باشد. از آنجا که پریود طبیعی غلتش طولی تمایل به افزایش با طول کشتی دارد (*Mendel, 1960*) تعداد سیکل‌های غلتش طولی در واحد زمان تمایل به کاهش با افزایش طول دارد. بازه ۳۰ـ۱۲ بار در هر ساعت مقدار متوسط ارائه شده در ستون‌های (۲) و (۸) را تعیین می‌کند که توسط *Comstock* و همکاران در سال ۱۹۸۰ ارائه گشته است. شکل ۴–۴۷ بین هر دو ضربه اسلمینگ وارد بر شناورهای پروازی یک وقفه زمانی ۱/۷ ثانیه‌ای را نشان می‌دهد که متناظر است با فرکانس ۳۵ ضربه در هر دقیقه. این مقدار باید با مقدار تعیین شده برای فرکانس اسلمینگ (معیار شماره ۸) یعنی وقوع ۱۲ تا ۳۰ ضربه در هر ساعت برای شناورهای تک‌بدنه که در پاراگراف قبل شرح داده شد، قیاس شود. در مورد شناورهای *SWATH* معیار شماره ۸ بیانگر فرکانس اسلمینگ نیست بلکه به فرکانس برخورد موج و قسمت زیر عرشه سازه عرضی شناور *SWATH* مربوط می‌شود. بدیهی است که قسمت هموار زیر عرشه این سازه و آب محصور شده به وسیله ستون‌های کناری باعث می‌شوند که برخورد موج به یک رویداد مهم دریامانی برای شناورهای *SWATH* تبدیل گردد. بر پایه نظریه *Lamb* در سال ۱۹۷۵ مقدار تعیین شده برای فرکانس برخورد امواج برای شناورهای *SWATH* زمانی بوقوع می‌پیوندد که میانگین ۰/۱[1] بزرگترین مقادیر جابجایی نسبی قائم بین زیر عرشه شناور *SWATH* و سطح دریای متلاطم زیر آن، از مقدار فاصله باز سطح هموار آب تا زیر عرشه تجاوز کند. نتایج *Olson* در سال ۱۹۷۷ که در جدول ۴–۱۰ برای شناور *SWATH* ارائه شده است، نشان می‌دهد که تعیین این مقدار باعث می‌شود که معیار شماره ۸ به عنوان معیار حاکم در انجام وظایف شناور *SWATH* جدول ۴–۱۰ در تمام زوایای برخورد مابین ۱۳۰ و ۲۳۰ درجه در بیش از ۲۰ مورد از بین ۳۲ مورد محسوب گردد. بنابراین برخورد موج یک معیار ارزیابی عملکرد خیلی مهم در مسیر دریایی برای شناورهای *SWATH* می‌باشد.

معیار شماره ۹؛ فرکانس پدیدار شدن سونار

در حالیکه صدای موج سونار[1] پالسی کوتاه است، یک پریود شنوایی بلند که وقفه صدای موج[2] نامیده می‌شود جهت اینکه قادر به شناسایی صدای بازگشتی از هدف باشد، مورد نیاز است. مدت زمان وقفه صدای موج تابع مستقیمی از برد سونار و سرعت صوت در داخل آب است. در صورتی که یک جستجوی فعال تا بردی بالغ بر ۱۰ مایل ترتیب داده شود، *Olson* در سال ۱۹۷۷ وقفه‌ای در حدود ۳۰ ثانیه را برای آن پیشنهاد می‌کند. با توجه به دریافت صدای برگشتی از هدفی واقع در هر نقطه‌ای در فاصله ۰ الی ۱۰ مایلی، کلاهک سونار باید در مدت کل وقفه صدای موج مغروق باقی بماند. برای بردهای بلندتر سونار، کلاهک سونار برای وقفه‌های بسیار طولانی‌تر باید کاملاً مغروق باقی بماند. مقدار تعیین شده برای معیار شماره ۹ در جدول ۴–۱۰ عبارت است از ۱۲۰ بار پدیدار شدن سونار در هر ساعت که با وقفه ۳۰ ثانیه‌ای صدای موج سونار بدست آمده توسط *Olson* در سال ۱۹۷۷ تقریباً برابر است. البته مقدار تعیین شده ۱۲۰ بار در هر ساعت برای معیار پدیدار شدن سونار این تضمین را نمی‌دهد که تمامی وقفه‌های صدای موج طولانی‌تر از ۳۰ ثانیه باشند. اگرچه محاسبات در حوزه زمانی بنظر می‌رسد که جواب‌های صریح‌تری را فراهم کند اما در عمل باید به تعداد دفعات زیادی تکرار شوند تا نتیجه آماری قابل قبلی را فراهم سازند.

معیار شماره ۱۰؛ فرکانس خیسی عرشه

Olson در سال ۱۹۷۷ اظهار نمود که «پیشنهاد می‌گردد که کشتی‌ها به ندرت قادر به پذیرش وقوع خیسی عرشه در قسمت سینه بیش از ۱ بار در هر ۲ تا ۵ دقیقه هستند بخصوص اینکه دهانه توپ، لانچرهای موشک و یا تجهیزات اصلی عرشه در قسمت جلوی شناور واقع شده باشند». وقوع ۳۰ بار خیسی عرشه در هر ساعت توسط *Olson* به عنوان مقدار تعیین شده برای شناورهای تک‌بدنه مورد انتخاب قرار گرفت. *Bales* نیز در سال ۱۹۷۸ مقداری مشابه را پیشنهاد نمود اما *Andrew* و *Lloyd* در سال ۱۹۸۱ وقوع ۹۰ خیسی در ساعت را به عنوان مقدار تعیین شده برای فریگیت‌ها بیان نمودند و *Aertssen* در بحثی در مورد مقاله *Andrew* و *Lloyd* وقوع ۳۶ خیسی در ساعت یا ۵ بار در هر ۱۰۰ سیکل را به عنوان مقدار تعیین شده برای کشتی‌های کانتینربر پیشنهاد نمود (*Aertssen, 1968*) . نتایج *Olson* حاکی از آن است که برای ۴ فروند ناوشکن مشابهی که بر روی آنها تحلیل انجام داده است، مقادیر تعیین شده توسط او باعث می‌شوند که پدیده خیسی عرشه تنها در ۶ مورد از بین ۸۰ مورد ممکن در زوایای برخورد مابین ۱۶۰ و ۲۰۰ درجه به معیار حاکم تبدیل گردد. بر اساس جدول ۳، پدیده خیسی عرشه ظاهراً تنها برای شناورهای تک‌بدنه یک معیار مهم ارزیابی عملکرد در مسیر دریایی محسوب می‌شود.

معیار شماره ۱۱؛ پدیدار شدن پروانه[3]

پدیدار شدن پروانه در دریاهای متلاطم که منجر به افزایش سرعت گردش پروانه[4] می‌شود، یک رویداد متداول در مورد کشتی‌های تجاری تک‌پروانه بویژه آنهایی که مجهز به موتور دیزل هستند و همچنین در مورد شناورهای *SWATH* محسوب می‌گردد. *Aertssen* در سال ۱۹۶۶ با

---

1 Ping of a sonar
2 Ping Interval
3 -Propeller Emergence
4 -Propeller Racing

مشاهده اینکه چه موقع سر مهندس کشتی دستور کاهش دور پروانه را به دلیل افزایش سرعت گردش شفت صادر می‌کند، برای یک کشتی باربری تک پروانه مجهز به موتور دیزل، مقدار ۲۵ را به عنوان مقدار حدی معیار پدیدار شدن پروانه در هر ۱۰۰ نوسان کشتی ثبت نمود. بر پایه نظر *Olson* در سال ۱۹۷۷، این معیار در مورد شناورهای *SWATH* بصورت احتمال اینکه جابجایی قائم پروانه نسبت به سطح آزاد آب موجب خروج بیشتر از ۲۵ درصد از سطح دیسک پروانه از آب نشود. به عقیده *Lamb* در سال ۱۹۷۵، این مقدار در مورد شناور ۳.۳۵۰ تنی *SWATH* جدول ۴-۱۰، متناظر با مقدار مشخصه جابجایی قائم پروانه نسبت به سطح آب می‌باشد که نباید از مقدار ۳/۹۰ متر تجاوز کند. نتایج *Olson* نشان می‌دهد که با تعیین این مقدار برای پدیده پدیدار شدن پروانه، این پدیده به یک معیار حاکم مهم برای شناورهای *SWATH* مختص ترانزیت که در جدول ۴-۱۰ آورده شده است، در تمام زوایای برخورد تبدیل می‌شود. در زوایای برخورد مابین صفر (۳۶۰ درجه) و ۱۱۰ درجه (۲۵۰ درجه) این معیار در بیش از یک چهارم موارد از ۳۲ مورد شناور *SWATH* به عنوان معیار حاکم محسوب می‌شود.

معیار شماره ۱۲؛ جذر متوسط مربعات سرعت نسبی قائم[1]

مقدار تعیین شده برای معیار شماره ۱۲ سعی در ایجاد محدودیت در مقدار حداکثر نیروهای ضربه‌ای وارد بر چرخ هلیکوپتر در خلال عملیات فرود دارد. بر اساس مطالعات *Olson* در سال ۱۹۷۷، حداکثر مقدار مجاز سرعت نسبی مؤثر بین هلیکوپتر *SH2F* و عرشه پرواز تقریباً برابر با *m/sec* ۳/۶۵ می‌باشد. این مقدار معادل است با مقدار *rms* برابر با *m/sec* ۱/۸۳ که در ستون ۷ از جدول ۳ برای شناورهای تک‌بدنه ارائه شده است. از آنجا که هلیکوپتر *SH2F* از سرعت فرود برابر با *m/sec* ۱/۵۲ برخوردار است، این مقدار حاکی از وجود مقدار حدی برابر m/sec ۲/۱۳ برای سرعت قائم مؤثر کشتی نسبت به زمین می‌باشد. اگرچه نتایج *Olson* نشان می‌دهد که با توجه به مقدار تعیین شده *m/sec* ۱/۸۳ برای *rms* سرعت نسبی قائم، معیار شماره ۱۲ هرگز یک معیار حاکم برای شناورهای تک‌بدنه مورد بررسی توسط وی نمی‌باشد و در مورد شناورهای *SWATH* به عنوان معیار حاکم اصلی در زوایای برخورد بین ۸۵ درجه (۲۷۵ درجه) و ۱۲۰ درجه (۲۴۰ درجه) محسوب می‌گردد. با این وجود تحقیقات اخیر *NAVSEA* نشان داده است که با تعیین یک مقدار مشخصه کمتر به اندازه *m/sec* ۰/۶۷ (عرشه پروازی نسبت به زمین)، معیار شماره ۱۲ به معیار حاکم برای ناوشکن انجام دهنده عملیات فرود هلیکوپتر در تمام زوایای برخورد مابین ۷۰ درجه و ۲۹۰ درجه تبدیل می‌گردد. این مطلب متعاقباً در شکل ۱۰*b* نشان داده می‌شود. *Comstock* و همکاران در سال ۱۹۸۰ مقدار حدی *m/sec* ۱ را برای شناورهای تک‌بدنه ارائه نمود که در ستون (۸) قابل مشاهده می‌باشد.

۸ـ مراحل تعیین شاخص SPI-1 عملکرد دریامانی

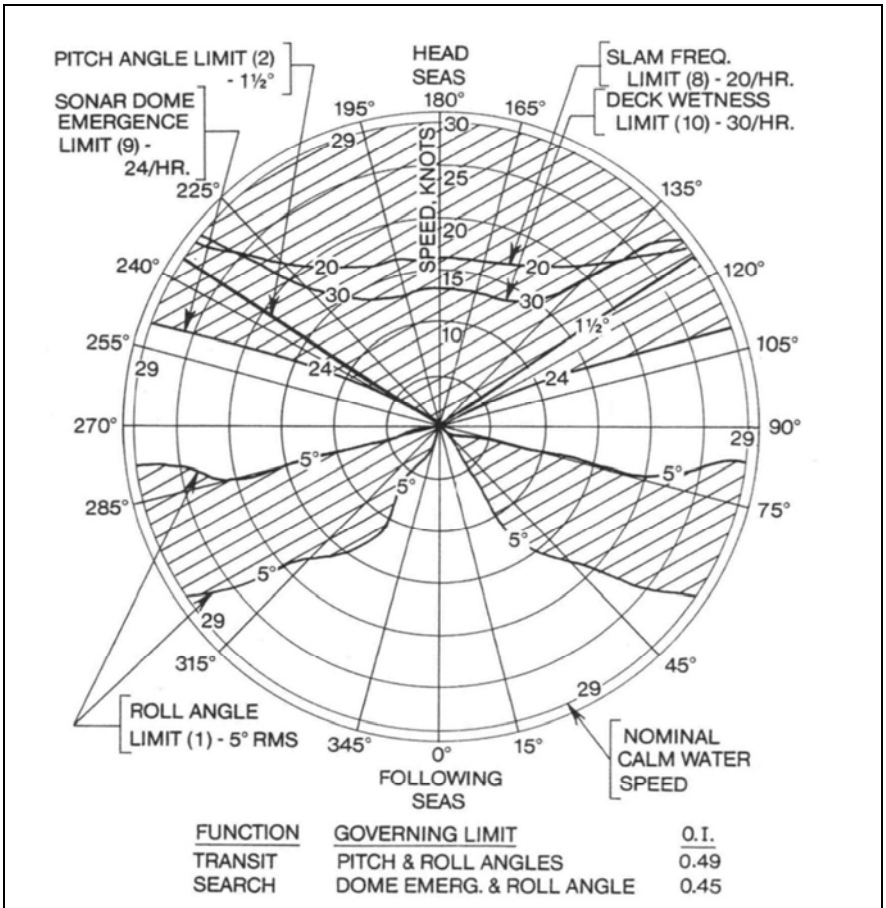
تا این قسمت از بخش ۸ راجع به مفهوم مقدماتی معیار ارزیابی عملکرد دریامانی، ماهیت این معیارها در انجام مأموریت‌های متفاوت کشتی‌ها، اطلاعات موجود در زمینه محدوده یا مقادیر تعیین شده برای این معیارها بحث شد. این مراحل ما را قادر می‌سازند تا بتوانیم عملکرد شناور را تحت شرایط فرضی که بارگذاری شناور، *Seastate*، سرعت کشتی و جهت آن ثابت باقی بمانند، پیش‌بینی کرده و پس از آن عملکرد کوتاه مدت شناور را ارزیابی نماییم. هم اکنون ما جهت پرداختن به مسأله ارزیابی بلند مدت عملکرد دریامانی با توجه به مأموریت‌ها، بارگذاری‌ها، شرایط دریا، جهات برخورد امواج و سرعت‌ها از آمادگی لازم برخوردار بوده یا بطور خلاطه قادر به تعیین مقادیر شاخص عملکرد شناور خواهیم بود. این کار را می‌توان با روش‌های مختلفی به انجام رساند که در این بخش شرح داده خواهد شد.

آ) دیاگرم قطبی سرعت[2]

اولین قدم اتخاذ روشی جهت نمایش تعداد زیادی از نتایج ارزیابی‌های کوتاه مدت عملکرد با یک روش مناسب می‌باشد. این کار را می‌توان با استفاده از «دیاگرام قطبی سرعت» به انجام رساند که در سال ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار می‌گرفت. این روش ابزاری ایده‌آل جهت نمایش مرزهای موجود میان سرعت‌ها و جهات برخورد امواج مربوط به حرکات قابل قبول و حرکات غیر قابل قبول در یک *Seastate* مشخص می‌باشد. در اینجا اصطلاح «قابل قبول» بدین معنا بکار می‌رود که اگر پاسخ‌ها از مقادیر تعیین شده فراتر روند در انجام عملیات مورد نظر اختلال ایجاد می‌شود. این دیاگرام به صورت یک دایره نمایش داده می‌شود که زوایای روی محیط آن که از صفر تا ۳۶۰ درجه است، زاویه برخورد موج و کشتی را نسبت به هم نشان می‌دهد (زاویه برخورد). دایره‌های با شعاع‌های کوچکتر داخل دایره اصلی، دایره‌های سرعت ثابت هستند که از صفر تا حداکثر سرعت شناور با بازه‌های مشخص ترسیم می‌شوند. هر نمودار نیز برای یک *sea state* خاص و برای یک شناور خاص ترسیم می‌شود. هم‌اکنون معیارهای حاکم (با توجه به نوع شناور) بر روی نمودار ترسیم می‌شوند. هر شناور معمولاً ۳ -۲ معیار حاکم دارد. محدوده‌هایی که از مقادیر حاکم تجاوز نمایند به صورت هاشورزده ترسیم می‌شوند و محدوده نامناسب عملیاتی برای شناور هستند. یعنی در این محدوده یک شناور خاص با توجه به سرعت، جهت برخورد امواج، فورس دریایی و معیارهای حاکم تعریف شده، نمی‌تواند عملیات موفقی داشته باشد. شکل ۴-۴۸ نمونه‌ای از دیاگرام قطبی سرعت را برای یک ناوشکن بزرگ در عملیات حمل و نقل و جستجوی سونار در دریای متلاطمی با *Seastate* شماره ۶ نشان می‌دهد. محدودیت‌های وارد بر سرعت کشتی و زاویه برخورد توسط مقادیر تعیین شده در سال ۱۹۸۰ برای معیارهای شماره ۲، ۸ و ۱۰ از جدول ۳ ستون ۲ اعمال می‌شوند که در شکل ۴-۴۸ نیز نشان داده شده‌اند. به همین ترتیب محدودیت‌های وارد بر سرعت کشتی و زاویه برخورد بواسطه مقدار rms زاویه غلتش عرضی برابر ۵ درجه در معیار شماره ۱ (به جای مقدار ۴ درجه پیشنهادی *Comstock*) و مقدار ۲۴ بار پدیدار شدن سونار در ساعت در معیار شماره ۹ (به جای ۱۲۰ بار در ساعت پیشنهادی *Olson*) اعمال می‌شوند. از شکل ۴-۴۸ مشخص است که برای عملیات جستجوی سونار، دو معیار اخیر (یعنی معیار شماره ۱ و ۹) به همراه مقادیر تعیین

1 -Rms Relative vertical velocity
2 -Speed polar plot

شده برای آنها به عنوان معیارهای حاکم برای این ناوشکن محسوب می‌شوند. برای عملیات حمل و نقل، شکل ۴-۴۸ نشان می‌دهد که حد زاویه غلتش عرضی برابر ۵ درجه و حد زاویه غلتش طولی برابر ۱/۵ درجه باعث می‌شوند تا معیارهای شماره ۱ و ۲ به معیار حاکم تبدیل گردند.



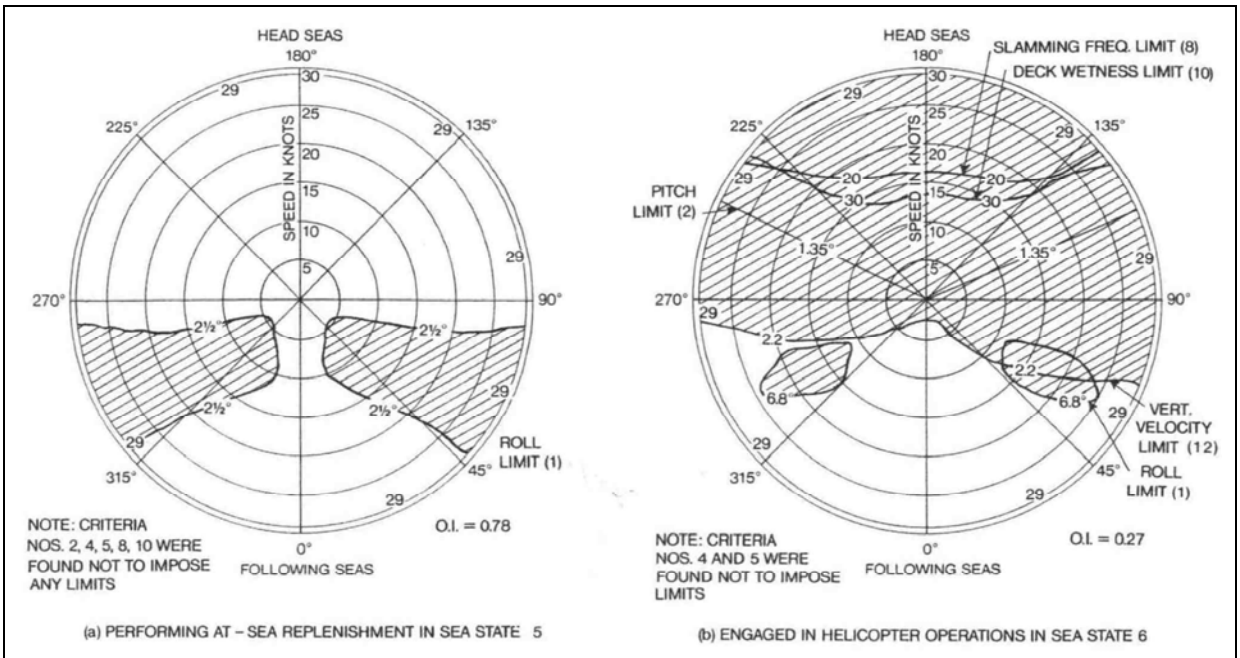
شکل ۴-۴۸: دیاگرام قطبی سرعت، این دیاگرام بیانگر مقادیر محدوده‌های عملیاتی دریامانی (*SOE*) و شاخص قابلیت عملکرد (*O.I.*) برای یک شناور ناوشکن در وضعیت دریایی شماره ۶ می‌باشد.

ب) رویه‌های عملیاتی دریامانی [1]

مرز رژیم‌های قابل کارکرد سرعت‌ها و جهات برخورد امواج که در شکل ۴-۴۸ بصورت بدون هاشور (برای عملیات جستجوی سونار) نشان داده شده است، تحت عنوان رویه عملیاتی دریامانی (*SOE*) نامیده می‌شود. بطور کلی در مکالمات، از ناحیه هاشور نخورده در داخل نمودار *SOE* تحت عنوان بهترین محدوده عملکرد دریامانی نام برده می‌شود. از این شکل می‌توان نتایج کمّی بیشتری نیز استخراج نمود، به عنوان مثال در این نمودار، قابلیت کارکرد در زوایای برخورد مشخصی نظیر صفر، ۹۰ و ۲۷۰ درجه مستقل از سرعت است. از سوی دیگر در یک سرعت ثابت برخی از جهات دارای قابلیت کارکرد مناسب هستند و برخی دیگر خیر. علاوه بر این می‌توان نسبتی بدست آورد که در آن کشتی قادر به انجام عملیات محوله در یک سرعت و *Sea state* مشخص می‌باشد. بدین ترتیب که با فرض احتمال یکسان برای تمام جهات می‌توان از طریق نسبت کل زوایای محصور شده توسط کمان‌های هاشور نخورده حول هر یک از دوایر سرعت ثابت تا ۳۶۰ درجه مقدار این نسبت را بدست آورد. مثلاً در سرعت ۱۰ گره عملیات محوله جستجوی سونار در *Sea state* شماره ۶ در حدود ۳۹ درصد از کل زوایای برخورد ممکن بواسطه ملاحظات دریامانی دچار محدودیت نخواهد شد و کارآیی مناسبی خواهد داشت. همین طور در سرعت ۱۵ گره این مقدار به ۴۲ درصد افزایش یافته و در تمام سرعت‌های مابین ۲۰ تا ۲۹ گره به حدود ۴۵ درصد نیز می‌رسد. این مقادیر متناظر با پارامتری هستند که *Comstock* و همکارانش در سال ۱۹۸۰ آن را تحت عنوان شاخص قابلیت عملکرد[2] (*OI*) نام نهادند. مقدار شاخص *OI* در *Sea state* شماره ۶ بطور تقریب برابر است با نسبت مساحت قسمت هاشور نخورده شکل ۴-۴۸ به مساحت کل دیاگرام قطبی. نسبت این دو مساحت برای عملیات جستجوی سونار در شکل برابر ۰/۴۵ است یعنی مقدار شاخص قابلیت عملکرد برابر ۴۵ درصد بیان می‌شود. اهمیت مقادیر *OI* از نقطه نظر عملیاتی بدین دلیل است که این مقادیر متناظر هستند با نسبت تعداد دفعاتی (یا احتمال) که انتظار می‌رود یک کشتی بتواند عملیات محوله را در *sea state* مشخص به انجام رساند. بدین معنا که با فرض اینکه تمامی سرعت‌های کشتی و تمامی زوایای برخورد از

1 -Seakeeping operating envelope
2 -Operability Index

احتمال یکسانی برخوردار باشند، انتظار می‌رود که ناوشکن شکل ۴-۴۸ بتواند عملیات جستجوی سونار را حداکثر در ۴۵ درصد از کل دفعاتی که در *sea state* شماره ۶ فعالیت می‌کند، به انجام رساند. این محدودیت منحصراً بواسطه ملاحظات دریامانی اعمال می‌گردد. فاکتورهای مهم دیگری همچون شرایط میدان دید، خرابی تجهیزات و غیره که باید در ارزیابی عملیاتی کلی کشتی مدنظر قرار گیرند، این نسبت دفعات را حتی بیش از این مقدار نیز محدود خواهند نمود. نمودارهای مشابه شکل ۴-۴۸ را می‌توان برای وضعیت‌های دریایی غیر از شماره ۶ نیز تهیه نموده و بدین ترتیب تصاویر فشرده‌ای از شرایط مربوط به عملکرد قابل قبول و غیر قابل قبول در کوتاه مدّت ـیا قابلیت عملکردـ برای یک یا چند عملیات کشتی تهیه نمود. سپس تعدادی منحنی *OI* را می‌توان برحسب شماره *sea state* ترسیم نمود که هر کدام برای یک سرعت متفاوت مناسب بوده مشروط به آنکه احتمال استفاده از تمامی زوایای برخورد برابر باشد. در شکل ۴-۴۹ رویه‌های عملیاتی دریامانی برای دو نوع عملیات متفاوت علاوه بر دو نوع عملیات شکل ۴-۴۸ آورده شده است. شکل ۴-۴۹ به عملیات سوخت‌رسانی در دریا در وضعیت دریایی شماره ۵ مربوط بوده و شکل ۴-۴۹ به عملیات فرود و پرواز هلیکوپتر در وضعیت دریایی شماره ۶ مربوط می‌شود. در ترسیم هر دو شکل از مقادیر مربوط به معیارهای شماره ۸ و ۱۰ جدول ۴-۱۰، ستون دوم استفاده شده است. علاوه‌براین در شکل ۴-۴۹ مقادیر موجود در جدول ۴-۱۱ برای معیارهای شماره ۱، ۲ و ۱۲ مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴-۴۹: رویه‌های عملیاتی دریامانی (*SOE*) برای عملیات‌های دیگر ناوشکن شکل ۴-۴۸

Criterion	Prescribed (a)	rms (b)	Limiting Values,
1. Roll Angle (deg.)	2.5	6.8	
2. Pitch Angle (deg.)	1.0	1.35	
12. Vertical Velocity (m/sec.)	--	0.67	

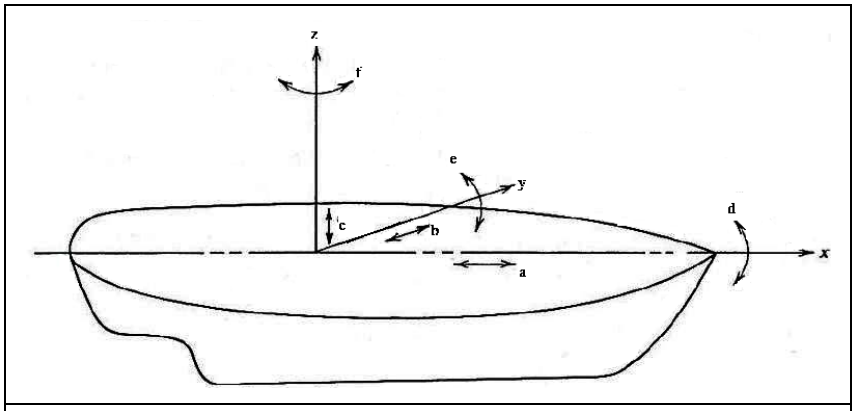
جدول ۴-۱۱: معیارهای شماره ۱، ۲ و ۱۲

توجه: تنها معیار شماره ۱ در شکل ۴-۴۹ نمایان است، به دلیل آنکه معیارهای دیگر در وضعیت دریایی شماره ۵ هیچ محدودیتی بر شناور تحمیل نمی‌نمایند.

بخش پنجم :
تحلیل حرکات مستقل هیو، پیچ و رول

فصل ۱: آشنایی با مبانی تحلیل

مطالب این قسمت برگرفته از منبع [۱۲] بوده و درک مناسبی از نحوه تحلیل حرکات کشتی ارائه می‌کند. برخی پارامترها و قراردادها مانند نامگذاری حرکات در اینجا با مطالب قبلی متفاوت است که باید بدانها توجه شود. واحدها در این مطلب نیز با توجه به منبع آن، واحد انگلیسی است نه *SI*. می‌دانیم که این حرکات مستقل نیستند بلکه به حرکات دیگری هم وابسته هستند بخصوص حرکات هیو و پیچ ولی در اینجا برای ساده‌سازی معادلات و ایجاد درک ساده‌تر از تحلیل حرکات کشتی به صورت غیر وابسته و مستقل در نظر گرفته شده و ارائه می‌گردند. کشتی در سطح آب معمولاً دارای حرکات نوسانی است که به مرور میرا می‌گردند. در این مبحث برخی از حالات به صورت مداوم و غیرمیرایی و برخی حالات به صورت میرا شونده در نظر گرفته می‌شوند. کشتی دارای شش درجه آزادی است که سه درجه آن خطی و سه درجه آن دورانی است و در شکل ۴-۵۰ نشان داده شده است. طبق این شکل، a معرف حرکت سرج،b حرکت اسوی، c حرکت هیو،d حرکت رول، e حرکت پیچ و f حرکت یاو می‌باشد. تنها سه حرکت هیو و رول و پیچ واقعاً نوسانی هستند چراکه تحت تأثیر نیروهای بازگرداننده هیدرواستاتیکی قرار دارند. حرکات سرج، اسوی و یاو پس از خارج شدن از حالت تعادل به حالت اولیه بازنمی‌گردند مگر اینکه نیرو یا ممان خارجی دیگری آن را به حالت اولیه بازگرداند بنابراین این سه حرکت، نوسانی کامل نیستند. کشتی در حین حرکت در دریا در اغلب مواقع، هر شش حرکت را همزمان تجربه می‌کند. در حالت کلی چنین در نظر گرفته می‌شود که حرکات پیچ و هیو به هم وابسته، حرکات یاو و اسوی به هم وابسته و حرکات سرج و رول مستقل هستند ولی همانطور که بیان شد این حرکات در اینجا مستقل در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۴-۵۰: نمایش شش درجه آزادی کشتی

الهی!!!

توفیقم ده که بیش از طلب همدردی ، همدردی کنم ...
بیش از آنکه مرا بفهمند ، دیگران را درک کنم ...
بیش از آنکه دوستم بدارند ، دوست بدارم ...

زیرا در عطا کردن است که می‌ستانیم، و در بخشیدن است که بخشیده می‌شویم، و در مردن است که حیات ابدی می‌یابیم .

فصل ۲: حرکت هیو

اگر یک نیروی خارجی به صورت عمود بر صفحه آبخور بر شناور وارد شود و آن را در داخل آب فرو برد، بدلیل افزونی نیروی بویانسی بر وزن، کشتی رو به بالا حرکت می‌کند. در حین حرکت رو به بالا از حالت تعادل اولیه عبور می‌کند چراکه کشتی دارای ممنتوم زیادی حین حرکت رو به بالا است. این حالت باعث می‌شود که این دفعه، بویانسی از وزن کمتر شود لذا حرکت رو به بالا متوقف شده و کشتی دوباره رو به پائین حرکت می‌کند. اگر نیروی خارجی به صورت هارمونیک ساده ادامه یابد، آن را حرکت هیو گویند. اگر عامل میراکننده وجود نداشته باشد آن را «حرکت نوسانی آزاد[1]» گویند و اگر حرکت میرایی[2] داشته باشد آن را «حرکت نوسانی میرا شونده[3]» گویند. برای این حرکت، دامنه هیو و پریود هیو تعریف می‌شود. از آنجا که حرکت هیو آزاد، یک حرکت هارمونیک ساده است، پریود نوسان مستقل از دامنه حرکت است که به عنوان پریود طبیعی و فرکانس طبیعی شناخته می‌شود. اگر حرکت دارای میرایی باشد، پریود حرکت آن کوتاهتر از پریود حرکت طبیعی است. اگر یک نیروی خارجی با پریود مشخص باعث نوسان جسم شود آن را «حرکت نوسانی اجباری[4]» گویند که در آن دامنه و پریود حرکت، وابسته به دامنه و پریود نیروی خارجی است. در این حالت چهار عامل مهم وجود دارند:

۱- نیروی اینرسی: هنگامی وجود دارد که حرکت کشتی نوسانی باشد و برابر است با: $F_a = -a\ddot{z}$
که a جرم مجازی[5] (جرم کشتی بعلاوه جرم افزوده) و $\ddot{z} = {d^2z}/{dt^2}$ شتاب عمودی است.

۲- نیروی میراکننده یا نیروی میرایی: که معمولاً در مقابل حرکت مقاومت می‌کند. $F_b = b\dot{z}$ ، که b ثابت میرایی و $\dot{z} = {dz}/{dt}$ سرعت است.

۳- نیروی بازگرداننده[6]: این نیرو متمایل است که کشتی را به حالت تعادل بازگرداند و برابر است با: $F_c = cz$ ، که c ضریب بازگرداننده یا ضریب فنری است و z جابجایی عمودی مرکز ثقل است.

۴- نیروی تحریک که بر جرم جسم وارد می‌شود و برابر است با: $F = F_0 \cos \omega_e t$ ، که F_o دامنه نیروی تحریک و ω_e فرکانس برخورد و t زمان است.

برای تعادل نیرویی، حاصل جمع نیروها باید صفر باشد. $F_0 \cos \omega_e t - a\ddot{z} - b\dot{z} - cz = 0$ و $a\ddot{z} + b\dot{z} + F_0 \cos \omega_e t$

اگر $F_o = 0$ و $b = 0$ باشد «حرکت آزاد غیر میرا شونده[7]» است. اگر $F_o = 0$ باشد «حرکت نوسانی آزاد میرا شونده[8]» است.

اگر هیچ نیرویی صفر نباشد «حرکت اجباری میرا شونده[9]» است.

- **حرکت هیو آزاد غیر میرا شونده($F_o = 0$ و $b = 0$)**

از شرایط تعادل داریم: $a\ddot{z} + cz = 0$. پاسخ این معادله دیفرانسیل به صورت زیر است:

$z = A \sin(\omega_z t - \beta)$ یا $z = A \sin \omega_z t + B \cos \omega_z t$

که A و B ثابتهایی هستند که از شرایط اولیه بدست می‌آیند و ω_z فرکانس طبیعی حرکت هیو است که برابر است با: $\omega_z = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{c}{a}}$.

---

1 - free oscillation
2 - damping
3 - damped oscillation
4 - forced oscillation
5 - virtual mass
6 - restoring force
7 - free undamped heaving motion
8 - free damped oscillation
9 - forced damped heaving motion

که T_z پریود حرکت هیو و β زاویه فاز است. یادآوری می‌شود که پریود حرکت هیو (T_z) ثابت در نظر گرفته می‌شود و وابسته به دامنه حرکت نمی‌باشد. این فرض برای حرکات کوچک و متوسط، صحیح است. پریود طبیعی یک عامل مهم است که تعیین‌کننده حرکت هیو در حین دریانوردی است.

- **حرکت هیو آزاد میرا شونده ($F_o = 0$)**

از شرایط تعادل داریم: $a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0$

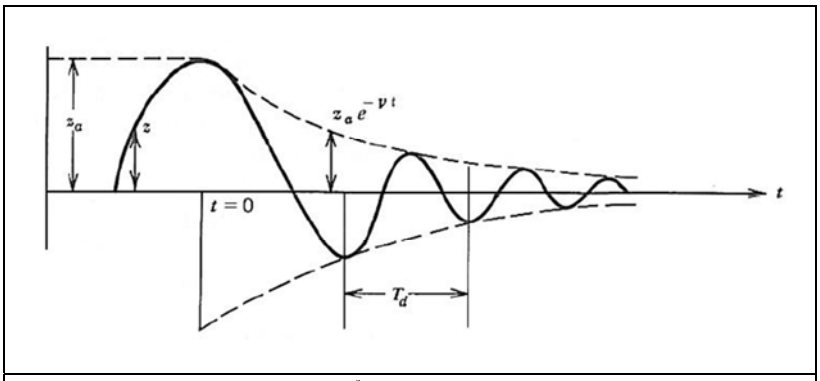
پاسخ این معادله (در شرایط $b < \sqrt{2ac}$) عبارتست از: $z = e^{-\nu t}(C_1 \cos\omega_d t + C_2 \sin\omega_d t)$ و $z = e^{-\nu t} A \sin(\omega_d t - \delta)$

که $\nu = b/2a$ ثابت تأخیر[1] و ω_d فرکانس حرکت نوسانی میراشونده است که برابر است با: $\omega_d = \sqrt{\omega_z^2 - \nu^2}$.

ω_z فرکانس طبیعی حرکت نوسانی غیر میرا شونده بوده و C_1 , C_2 یا A , δ از شرایط اولیه تعیین می‌شوند . پریود میرا شونده[2] برابر است با:

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d}$$

که بزرگتر از مقدار T_z است که $\omega_d < \omega_z$. حرکت نوسانی آزاد میرا شونده در شکل ۴-۵۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۱ : حرکت نوسانی آزاد میرا شونده

یادآوری می‌شود که اگر میرایی خیلی بزرگ باشد (یعنی $\nu > \omega_z$)، حرکت دیگر نوسانی نیست و با عنوان «حرکت غیرنوسانی» شناخته می‌شود. این مورد در حرکات کشتی مد نظر نیست چراکه در حرکات کشتی، ν معمولاً نسبت به ω_z خیلی کوچک است. همانطور که در بالا یادآوری شد، ثابتهای C_1 , C_2 می‌توانند معرف شرایط اولیه باشند. برای مثال در $t = 0$:

$$\frac{dz}{dt} = 0 \quad \rightarrow \quad z = z_a$$

اگر $t = 0$ در معادله قرار گیرد: $z = e^{-\nu t}(z_a \cos\omega_d t + C_2 \sin\omega_d t)$, $z_a = C_1$

همچنین: $\frac{dz}{dt} = \nu e^{-\nu t}(C_1 \cos\omega_d t + C_2 \sin\omega_d t) + \omega_d e^{-\nu t}(C_1 \sin\omega_d t + C_2 \sin\omega_d t)$

می‌دانیم که در $t = 0$ داریم $dz/dt = 0$ یا $-\nu C_1 + \omega_d C_2 = 0$ و بدست می‌آوریم که: $C_2 = \frac{\nu C_1}{\omega_d} = \frac{\nu z_a}{\omega_d}$

از آنجا که $C_1 = z_a$ و بنابراین: $z = e^{-\nu t}(z_a \cos\omega_d t + \frac{\nu z_a}{\omega_d}\sin\omega_d t)$ و $z = z_a e^{-\nu t}(\cos\omega_d t + \frac{\nu}{\omega_d}\sin\omega_d t)$

---

1 - decay constact
2 - damped period

- **حرکت هیو اجباری**

شرایط تعادل در این مورد عبارتست از: $a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_0 \cos \omega_e t$

و حل آن برابر است با:

$$z = e^{-\nu t}(C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t) + z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon_2) = A\, e^{-\nu t} \sin(\omega_d t - \beta)\, z_a \cos \omega_e t - \varepsilon_2)$$

که z_a دامنه حرکت اجباری و ε_2 زاویه فاز حرکت اجباری نسبت به نیروی تحریک است. مطابق معادله، این حرکت عبارتست از حاصلجمع دو حرکت نوسانی: اول عبارتی است که حرکت نوسانی آزاد میرا شونده را نشان می‌دهد و عبارت دوم یک حرکت نوسانی با همان فرکانس به عنوان نیروی تحریک حرکت هیو است. تا هنگامیکه هر دو حرکت نوسانی مؤثر و برقرار باشد، نتیجه آن «حرکت گذرا[1]» نامیده می‌شود. هرچند که عبارت نوسانی اول فوراً دچار تأخیر فاز (جلوتر یا عقب‌تر) می‌شود که وابسته به مقدار ν است. برای شرایط یکنواخت، دامنه حرکت اجباری z_a به صورت مقابل داده می‌شود: $z_a = z_{st} \cdot \mu_z$

که z_{st} برابر است با دامنه هیو استاتیک[2] و برابر است با: $z_{st} = \frac{F_o}{c}$

μ_z ضریب بزرگنمایی[3] بوده و برابر است با: $\mu_z = \frac{z_a}{z_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4\kappa^2\Lambda^2}}$

Λ ضریب فرکانسی[4] بوده و برابر است با نسبت فرکانس طبیعی برخورد به فرکانس یعنی: $\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_z}$

κ ضریب میرایی بی‌بعد[5] است: $\kappa = \frac{\nu}{\omega_z}$ $\qquad \nu = \frac{b}{2a}$ $\qquad \omega_z = \sqrt{\frac{c}{a}}$

ε_2 زاویه فاز بین نیروی تحریک و حرکت است و برابر است با: $\varepsilon_2 = tan^{-1} \frac{2\kappa\Lambda}{1-\Lambda^2}$

اگر فرض شود که یک موج با طول و دامنه مشخص در طول شناور به آرامی حرکت کند چنانکه کشتی در شرایطی باشد که به صورت استاتیکی خود را روی موج، متعادل کند، کشتی هماهنگ با فرکانس برخورد و به آرامی بالا و پائین می‌رود چنانکه تعادل بین وزن و بویانسی حفظ شود و دامنه استاتیک z_{st} منتج خواهد شد. اگر اکنون در نظر بگیریم موج با سرعت واقعی خود حرکت می‌کند، دامنه دینامیکی[6] به نام z_a بدست خواهد آمد. نسبت دامنه در حالت دینامیکی به حالت استاتیکی «ضریب بزرگنمایی[7]» نامیده می‌شود. با رسم نمودار $\mu = z_a/z_{st}$ بر حسب Λ، شکلی برای پاسخ دینامیکی همانند شکل ۴-۵۲ بدست می‌آید. حداکثر مقدار پاسخ هنگامی بدست می‌آید که مخرج کسر در رابطه حداقل مقدار باشد. این حالت موقعی اتفاق می‌افتد که مشتق مقدار زیر رادیکال در مخرج کسر بر حسب Λ معادله فوق، برابر صفر قرار گیرد. بنابراین هنگامیکه $\Lambda = \sqrt{1-2\kappa^2}$ آن‌گاه داریم: $\mu = \mu_{max}$. برای حرکت هیو کاملاً غیر میرا شونده (یعنی مقدار ν خیلی کوچک است)، مقدار Λ_z در μ_{max} تقریباً برابر ۱ است. این شرایط در صورتی اتفاق می‌افتد که فرکانس برخورد نیروی تحریک برابر فرکانس طبیعی حرکت هیو کشتی باشد و به عنوان یک حالت بحرانی در نظر گرفته می‌شود. همچنین از شکل ۴-۵۲ ملاحظه می‌شود که با افزایش مقادیر میرایی، محل حداکثر مقدار پاسخ به سمت چپ متمایل می‌شود که در آن μ_{max} در مقادیر کوچکتر از ۱ برای Λ بدست می‌آید. در هر حال پیشنهاد می‌شود که تا جای ممکن از ضرایب فرکانسی نزدیک به ۱ پرهیز شود. به عبارت دیگر، برای ارتفاع موج مشخص، در سرعتهایی که دور از حالت همزمانی[8] باشد، حرکات آرام‌تری انتظار می‌رود. این حالت موقعی اتفاق می‌افتد که سرعت بالا و طول موج مؤثر کوچک باشد (یعنی $\Lambda < 1$). هرچند که حرکات کشتی در امواج (دریامانی) به مقدار زیادی وابسته به نوسانات اجباری است ولی نوسانات آزاد نیز به دو دلیل زیر دارای اهمیت هستند:

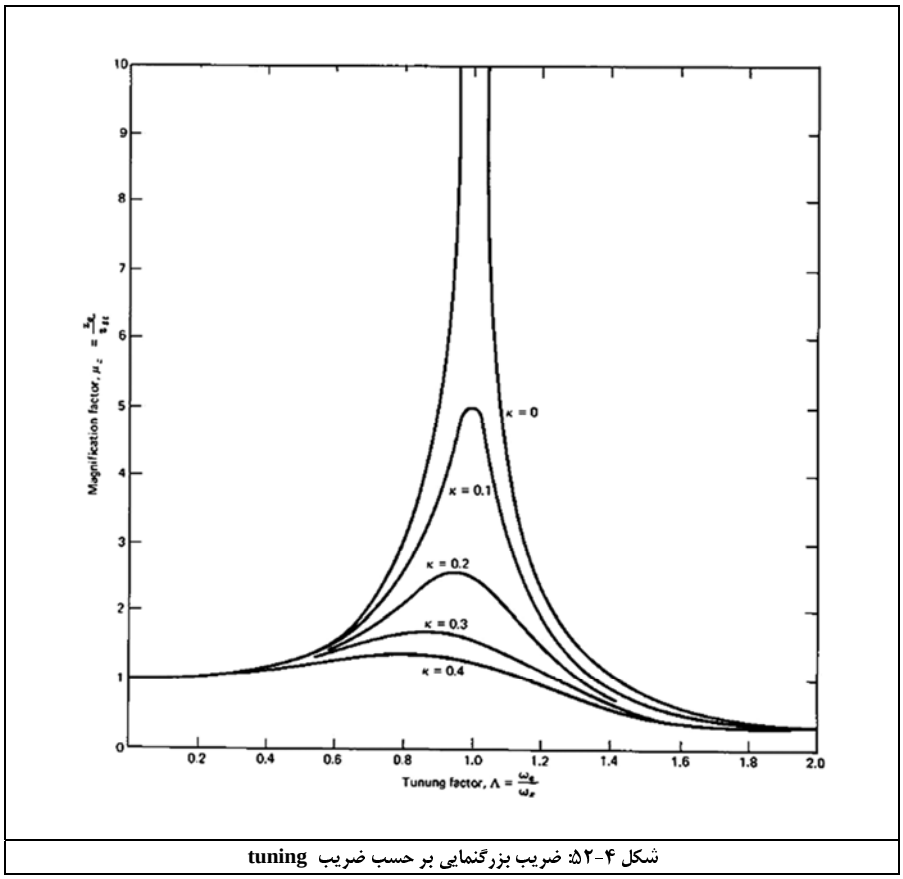
---

1 - transient motion
2 - static heaving amplitude
3 - magnification factor
4 - tuning factor
5 - nondimensional damping factor
6 -dynamic amplitude
7 - magnification factor
8 - synchronism

۱- فرکانس طبیعی کشتی که از نوسان آزاد ارزیابی می‌شود، مشخص‌کننده مقدار ضریب فرکانسی ($\Lambda = \omega_e / \omega_z$) است و یافتن منطقه پاسخ، مهم است (یعنی $\Lambda = 1$ برای حالتی که حرکات، بزرگترین مقادیر را دارد).

۲- حتی در دریاهایی با موج منظم[1] حرکت گذرا[2] که ممکن است باعث دامنه بزرگ حرکات شود وابسته به نوسان آزاد است (هرچند میرا شونده باشد). در دریاهایی با امواج نامنظم، حرکات گذرا ممکن است به صورت اتفاقی بروز نماید.

لذا تلاش‌ها برای کاهش نوسانات آزاد تا حد ممکن متمرکز می‌باشد بویژه با ایجاد میرایی زیاد مانند استفاده از میرا کننده‌های حرکت مانند استبلایزر. از آنجا که نیروهای اینرسی، میرایی، بازگرداننده و تحریک معلوم هستند، توصیف حرکت براحتی امکان‌پذیر است. به عبارت دیگر، قبل از اینکه ما بتوانیم حرکت هیو را معین کنیم، باید بتوانیم ضرایب نیرویی مختلف را مشخص کنیم یعنی مقادیر F_o , c , b , a از معادله حرکت هیو از رابطه.



شکل ۴-۵۲: ضریب بزرگنمایی بر حسب ضریب tuning

- **نیروی اینرسی:** وقتی یک جسم در داخل یک سیال به صورت شتابدار حرکت می‌کند، نیرویی را تجربه می‌کند که از حاصلضرب جرم در شتاب بزرگتر است. برای توجیه این نیروی اضافی فرض می‌شود که یک جرم خالص به نام «جرم افزوده[3]» در شتاب حرکت ضرب شده باشد تا حالت دیمانسیون معادله نیز درست شود. این مفهوم برای بحث بر روی نیروی اینرسی کشتی لازم است. بنابراین نیروی اینرسی عبارتست از:

$$a\frac{d^2z}{dt^2} = body\ accelerating\ force + liquid\ accelerating = M\frac{d^2z}{dt^2} + \delta I$$

که در آن M جرم کشتی و δI نیروی شتاب‌دهنده به سیال است (که وابسته به مفهوم جرم افزوده می‌باشد). بنابراین داریم:

$$Inertial\ force = a\frac{d^2z}{dt^2} = M\frac{d^2z}{dt^2} + \delta I = M\frac{d^2z}{dt^2} + a_z\frac{d^2z}{dt^2} = (M + a_z)\frac{d^2z}{dt^2}$$

1 - regular seas
2 - transient motion
3 - added mass

باید یادآوری کنیم که مفهوم جرم افزوده در علم مکانیک سیالات تنها برای توجیه معادلات و جورآمدن دیمانسیون (واحدها) ارائه می‌گردد و هیچ تجسم فیزیکی از آن وجود ندارد یعنی این مفهوم رایج که جرم افزوده همان جرم سیال جابجاشونده به همراه جسم در حرکت شتابدار است، مفهوم درستی نیست. ضریب اینرسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \frac{\begin{array}{c}Added\ mass\ of\ the\ section\ of\ unit\ length, beam\\ B_n, and\ section\ draft\ T_n\ to\ bottom\ of\ section\end{array}}{\begin{array}{c}Half\ of\ the\ added\ mass\ for\ a\ circular\ section\\ sement\ of\ unit\ length\ and\ diameter\ B_n\end{array}}$$

هم‌اکنون نیمی از جرم افزوده برای یک مقطع دایره‌ای با طول واحد و قطر B_n به صورت مقابل تعریف می‌شود: $\frac{1}{2}\rho\pi r^2 = \frac{\rho\pi B_n^2}{8}$

که $B_n = 2r$. برای شکلهای غیر از مقطع دایره‌ای، جرم افزوده یک مقطع کشتی (a_n) از رابطه روبرو بدست می‌آید: $a_n = C\frac{\rho\pi B_n^2}{8}$

ضریب C برای مقاطع فرم‌های لوئیس[1] از شکل ۴-۵۳ بدست می‌آید که این نمودارها به عنوان تابعی از نسبت عرض به آبخور و ضریب مساحت مقطع عرضی (که به صورت تقسیم مساحت مقطع عرضی بر (عرض × آبخور) تعریف می‌شود) ارائه شده‌اند. در اینجا فرض شده است که جرم افزوده مقاطع در امتداد طول همانند عرض تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند.

جرم افزوده کل کشتی را می‌توان به این صورت محاسبه کرد: $a_z = \int_{-L/2}^{L/2} a_n dx$

با استفاده از مقادیر a_n و ذکر اینکه $B_n = 2y(x)$ که $y(x)$ نیم‌عرض صفحه آبخور است داریم: $a_z = \rho\frac{\pi}{2}\int_{-L/2}^{L/2} Cy^2(x)dx$

مثال) یک شناور مدل با اطلاعات زیر موجود است. مطلوبست جرم افزوده حرکت هیو:

طول ۱۹/۲ فوت، حداکثر عرض ۲/۵۹۲ فوت، آبخور ۱/۱۴۴ فوت، طول موج = طول کشتی برابر با ۱۹/۲ فوت، موقعیت طول مرکز ثقل ۰/۴۸ فوت جلوتر از وسط شناور، موقعیت طولی مرکز بویانسی ۰/۴۸ فوت جلوتر از وسط شناور، سرعت مدل ۴/۷۸۸ فوت بر ثانیه و جابجایی ۲۸۳۷/۷۶ پوند و زاویه راستای حرکت کشتی نسبت به موج برابر ۱۸۰ درجه (موج از روبرو) می‌باشد.

اطلاعات صفحه آبخور آن نیز به صورت زیر است:

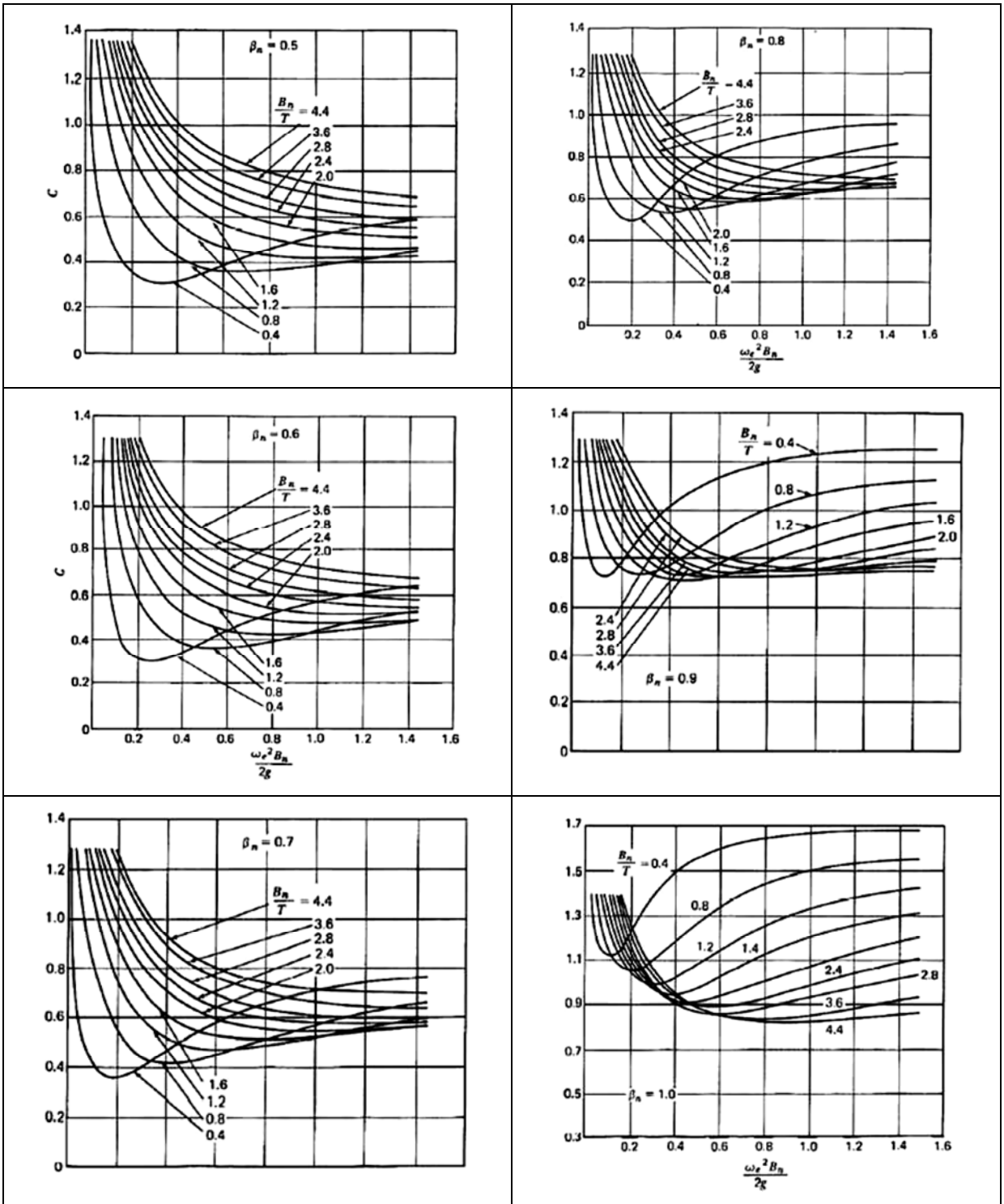
Station No.	B_n [ft]	T_n [ft]	S_n, = Sectional Area [ft²]
0	0	1.144	0
5	2.592	1.144	2.944
10	2.592	1.144	2.944
15	2.592	1.144	2.752
20	0	1.144	0

حل: فرکانس موج برابر است با: $\omega_w = \sqrt{\frac{2\pi g}{L_w}} = \left(\frac{2\times3.1416\times32.2}{19.20}\right)^{1/2} = 3.245\ {}^{rad}/_{sec}$

و فرکانس برخورد برابر است با: $\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g}\,u\cos\mu = 4.811\ {}^{rad}/_{sec}$

که u سرعت حرکت مدل بر حسب فوت بر ثانیه است. اطلاعات مورد نیاز در جدول۴-۱۲محاسبه شده است.

1 - Lewise form



شکل ۴-۵۳: ضرایب جرم افزوده اجسام شناور دوبعدی در حرکت هیو

Station Number	B_n [ft]	T_n [ft]	S_n [ft]	$\frac{\omega_e^2}{2g} \times B_n$	B_n/T_n	$B_n \times T_n$	β_n	C	B_n^2	$\frac{\rho\pi}{8} \times B_n^2$	a_n	Simpson's Multiplier	Product
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
0	0.000	1.144	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	1	0.000
5	2.592	1.144	2.944	0.932	2.266	2.965	0.993	0.98	6.718	5.113	5.011	4	20.044
10	2.592	1.144	2.944	0.932	2.266	2.965	0.993	0.98	6.718	5.113	5.011	2	10.022
15	2.592	1.144	2.752	0.932	2.266	2.965	0.928	0.84	6.718	5.113	4.295	4	17.180
20	0.000	1.144	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	1	0.000
												SUM	47.246

Column Number	Description	Column Number	Description
①	Station Number	⑨	Added Mass Coefficient, C, obtained from Fig. 4.4 using the values from ⑤, ⑥, and ⑧
②	Beam at Station, B_n[ft]	⑩ = ②²	Beam Squared, B_n^2
③	Draft at Station, T_n[ft]	⑪	$(\rho\pi/8) \times B_n^2$
④	Sectional Area at Station, S_n[ft²]	⑫ = ⑨ × ⑪	Sectional Added Mass Coefficient, $a_n = C \times (\rho\pi/8) \times B_n^2$
⑤	$(\omega_e^2/2g) \times B_n$	⑬	Simpson's Multiplier
⑥ = ② ÷ ③	Beam Draft Ratio, B_n/T_n	⑭ = ⑫ × ⑬	Product = ⑫ × ⑬
⑦ = ③ × ⑥	$B_n \times T_n$		
⑧ = ④ ÷ ⑦	Sectional Area Coefficient, $\beta_n = S_n/(B_n \times T_n)$		

جدول ۴-۱۲

جرم افزوده برابر است با:

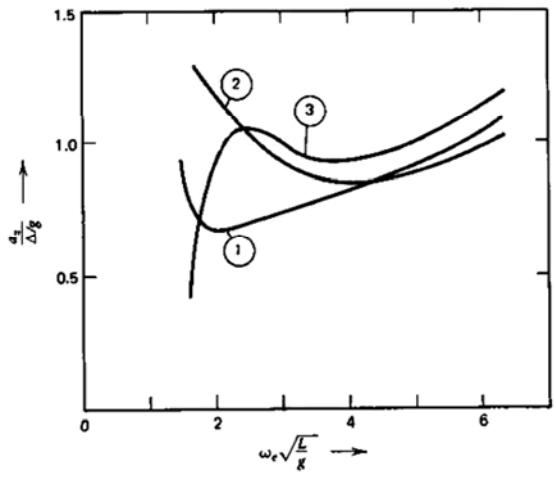
$$Added\ mass\ for\ heaving = \int a_n d\xi = \frac{1}{3} \times station\ spacing(s) \times SUM$$

$$= \frac{1}{3} \times 4.8 \times 47.246 = 75.6\ lb - sec^2/ft$$

جرم مدل کشتی برابر است با:

$$Model\ mass\ = \frac{\Delta}{g} = \frac{2837.76}{32.2} = 88.13\ lb - sec^2/ft$$

بنابراین جرم افزوده برابر ۸۶ درصد جرم کشتی است. آزمایشات مدل برای تعیین جرم افزوده حین حرکت هیو انجام شده است و از شکل ۴-۵۴ می‌توان ملاحظه کرد که جرم افزوده حرکت هیو کشتی واقعی نیز به همان بزرگی جرم کل کشتی است. بنابراین در محاسبات حرکت هیو، جرم افزوده می‌تواند با دقت مناسبی محاسبه شود.



	L/B	B/T	C_B	C_{WP}	C_M
①	7.5	2.5	0.6	0.706	0.977
②	7.0	2.5	0.7	0.785	0.986
③	6.5	2.5	0.8	0.871	0.994

L	Length of ship
B	Beam
T	Draft
C_B	Block coefficient
C_{WP}	Waterplane coefficient
C_M	Midship section coefficient

شکل پائین۴-۵۴: جرم افزوده بی‌بعد حرکت هیو

در حالت کلی می‌توان گفت که ضریب جرم افزوده حرکت هیو با افزایش ضریب بلوکی (C_B) و نسبت عرض به طول افزایش می‌یابد.

- **نیروی میرایی**

نیروی میرایی یا میرا کننده معمولاً مخالف جهت حرکت است و باعث کاهش دامنه حرکت می‌شود. برای تعیین اثر میرایی باید در معادله، نیروی میرایی وجود داشته باشد که به صورت ساده شده عبارتست از: $F_b = -b\frac{dz}{dt}$

که b ضریب نیروی میرایی حرکت هیو است. ضریب میرایی به طور معمول وابسته به عوامل زیر است:

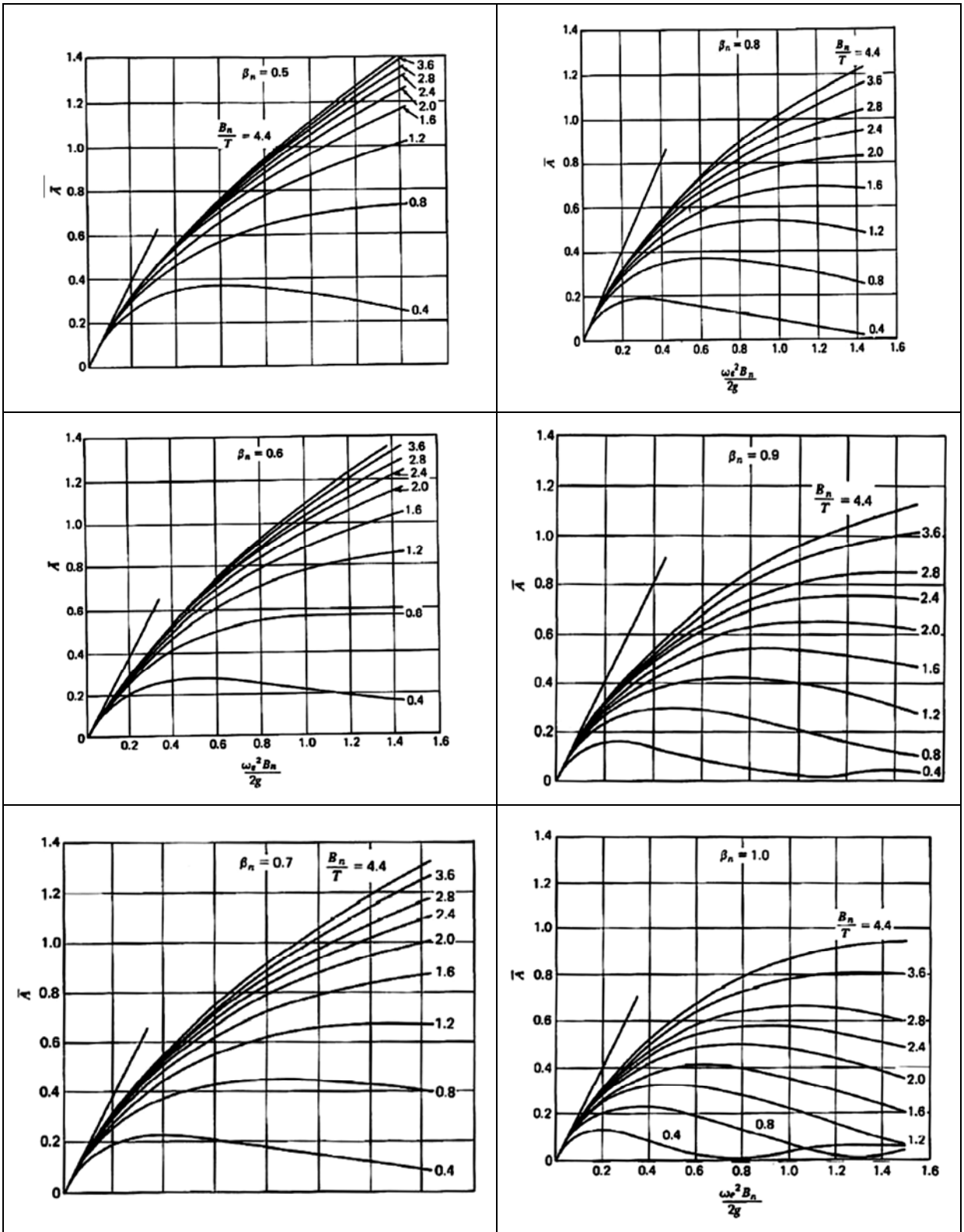
۱) نوع حرکت نوسانی ۲) فرکانس برخورد ۳) شکل بدنه کشتی

با شکل ساده در نظر گرفته شده، b بطور خطی متناسب با سرعت نوسان dz/dt است. این نیرو مقدار قابل ملاحظه‌ای است و باید معلوم گردد چراکه میرایی ناشی از اصطکاک و جریان گردابه‌ای در مقایسه با اثر میرایی مقاومت موج‌سازی، ناچیز است (یعنی اثر میراکنندگی موج‌سازی بسیار قابل ملاحظه است). ضریب میرایی حرکت هیو نیز مانند جرم افزوده از روش تئوری نواری محاسبه می‌شود. از آنجا که عامل اصلی ضریب میرایی، موج تولید شده در حرکت هیو است، لذا ضریب میرایی در واحد طول مستقیماً متناسب با دامنه موج است. ضریب میرایی حرکت هیو از رابطه زیر محاسبه می‌شود: $b_n = \frac{\rho g^2 \bar{A}^2}{\omega_e^3}$

که در آن ω_e فرکانس امواج منتشر شده (در اینجا فرکانس برخورد) است و همچنین $\bar{A}$ نیز نسبت دامنه امواج منتشر شده به دامنه حرکت هیو است.

$$\bar{A} = \frac{Amplitude\ of\ the\ radiated\ waves}{Amplitude\ of\ the\ heaving\ motion} = \frac{\bar{\zeta}}{z_a}$$

نسبت میرایی $\bar{A}$ را می‌توان از شکل ۴-۵۵ بدست آورد بنابراین ضریب میرایی کل را می‌توان از انتگرال‌گیری روی b_n در کل طول کشتی محاسبه کرد. لذا داریم: $b = \int_{-L/2}^{L/2} b_n dx$



شکل ۴-۵۵: نسبت دامنه $\bar{A}$ اجسام شناور دوبعدی در حرکت هیو – در اینجا β_n ضریب مساحت مقاطع، B_n عرض هر مقطع و T آبخور است.

مثال) ضریب میرایی b را برای کشتی مثال قبل محاسبه کنید؟

حل: اطلاعات محاسبه شده در جدول زیر آمده است.

Station Number ①	$\frac{\omega_e^2}{2g} \times B_n$ ②	B_n/T_n ③	β_n ④	$\bar{A}$ ⑤	$(\bar{A})^2$ ⑥	b_n ⑦	Simpson's Multiplier ⑧	Product ⑨
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000
5	0.932	2.266	0.993	0.570	0.325	5.866	4	23.464
10	0.932	2.266	0.993	0.570	0.325	5.866	2	11.732
15	0.932	2.266	0.928	0.660	0.436	7.869	4	31.476
20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000
							SUM	66.670

Column Number	Description
①	Station Number
②	$(\omega_e^2/2g) \times B_n$
③	Beam Draft Ratio, B_n/T_n
④	Sectional Area Coefficient, β_n
⑤	Amplitude Ratio for Two-Dimensional Body in Heaving Motion, $\bar{A}$, found by entering Fig. 4.6 with the values from columns ②, ③, and ④
⑥	$(\bar{A})^2$
⑦	Sectional Damping Coefficient, $b_n = \rho g^2 \bar{A}^2/\omega_e^3$
⑧	Simpson's Multiplier
⑨	Product = ⑦ × ⑧

ضریب میرایی حرکت هیو عبارتست از: $b = \int b_n dx = \frac{1}{3} \times s \times SUM = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 66.67 \quad \rightarrow \quad b = 106.67\ lb - sec^2/ft$

باید یادآوری شود که ارزیابی مقدار نیروی میرایی در حرکاتی نزدیک به همزمانی[1] بسیار حائز اهمیت است در حالیکه در فرکانس‌های دور از فرکانس همزمانی دارای اهمیت کمتری است. البته مقدار میرایی اثر بیشتری روی مقدار فاز حرکت در فرکانس‌های مختلف دارد.

در تئوری نواری[2]، از اثر متقابل بین مقاطع مجاور هم صرفنظر می‌شود ولی باز هم نتایج این محاسبات با نتایج آزمایش تجربی بسیار نزدیک است. سه روش مختلف برای بدست آوردن میرایی در آزمایش مدل وجود دارد:

۱) نوسان آزاد در آب آرام ۲) نوسان اجباری در آب آرام ۳) نوسان اجباری در امواج منظم

روش اول چندان دقیق نیست چراکه مقدار زیادی میرایی در حرکت هیو وجود دارد و یک منحنی تحریک نمی‌تواند به دقت تعیین شود. در روش دوم تمام عواملی که نیروی میرایی را تعیین می‌کنند می‌توانند به دقت محاسبه شوند. این مورد بویژه در نیروهای تحریک تولید شده توسط نوسانگر اهمیت دارد. در این بین، روش سوم وضعیت واقع‌بینانه‌تری دارد و تعیین دقیق نیروی تحریک بسیار دشوار است و بنابراین نتایج این روش برای مطالعات کیفی قابل استفاده و مناسب است. نتایج بدست آمده برای ضریب میرایی در هریک از این سه روش می‌تواند متفاوت باشد چراکه شرایط فیزیکی در هریک از این فرآیندها متفاوت است. تعیین ضریب میرایی به روش ۲ در منبع [۱۲] بحث شده است ولی در اینجا فقط نتایج آن در شکل ۴-۵۶ ارائه می‌شود. این شکل مربوط به ضریب نیروی میرایی بدست آمده از آزمایش روش نوسان اجباری در آب آرام است.

نتایج بدست آمده از هر دو روش تئوری و تجربی موارد زیر را نشان می‌دهد:

۱) ضریب نیروی میرایی متناسب است با توان ۲ مساحت صفحه آبخور.

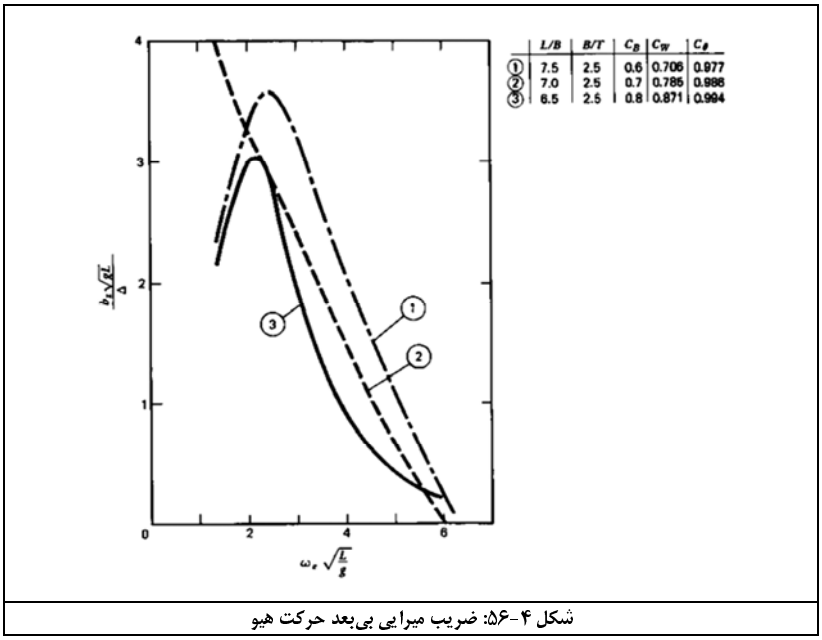
۲) کشتی‌های با بدنه V شکل میرایی بیشتری را نسبت به بدنه‌های U شکل تجربه می‌کنند (در مساحت صفحه آبخور یکسان).

۳) ضریب میرایی بی‌بعد مطابق شکل ۴-۵۶ ابتدا به یک مقدار حداکثری می‌رسد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد. در حالت تشدید (رزونانس) که میرایی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند، این کاهش میرایی اثر چندان مهمی را نشان نمی‌دهد.

۴) هر چه سرعت پیشروی بیشتر باشد، میرایی ناشی از موج، کاهش می‌یابد.

در حالت کلی، ضریب میرایی با افزایش B/L افزایش می‌یابد ولی با افزایش C_B کاهش می‌یابد (بدنه‌های V شکل از بدنه‌های U شکل میرایی بیشتری دارند).

1 - synchronism
2 - strip theory



شکل ۴-۵۶: ضریب میرایی بی‌بعد حرکت هیو

- **نیروی بازگرداننده**

نیروی بازگرداننده معادل است با بویانسی اضافه شده ناشی از افزایش آبخور شناور. در اینجا فرض بر این است که با تغییر آبخور، صفحه آبخور تغییر نمی‌کند یعنی بدنه در محل آبخور به صورت بدنه دیواره‌ای[1] است. لذا نیروی بازگرداننده برابر می‌شود با مقدار آب جابجاشده که آن نیز برابر است با حاصلضرب وزن مخصوص در حجم بویانسی اضافه شده. بنابراین داریم: $cz = \rho g A_{wp} z$

که حاصلضرب A_{wp} (مساحت صفحه آبخور) و z (مقدار فرورفتگی در داخل آب یا مقدار افزایش ابخور) برابر است با حجم بویانسی اضافه شده.

بنابراین ضریب نیروی بازگرداننده برابر است با: $c, the\ restoring\ force\ coefficient = \rho g A_{wp} = \rho g L B C_{wp}$

که C_{wp} ضریب صفحه آبخور است. لذا نیروی بازگرداننده را می‌توان مستقیماً از جدول آفست به صورت زیر بدست آورد:

$$c = \rho g \int_{-L/2}^{+L/2} 2y(x)\, dx$$

که $y(x)$ مقدار نیم‌عرض صفحه آبخور در مقطع x از طول بدنه است. اگر حرکت هیو نیز مانند حرکات سرج، اسوی و یاو دارای نیروی بازگرداننده نباشد، حرکت به صورت غیر نوسانی خواهد بود و لذا هرگز پدیده تشدید (رزنانس) رخ نخواهد داد. البته حرکت هیو نوسانی است چراکه همواره نیروی تحریک، مخالف جهت حرکت وجود دارد.

مثال) ضریب نیروی بازگرداننده برای مدل شناور مثال قبل را محاسبه کنید.

حل) ضریب نیروی بازگرداننده در حرکت هیو برابر است با: $c = \frac{1}{3} \times s \times SUM = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 1617.8 = 2588\ lb/ft$

که S فاصله بین مقاطع عرضی است. یادآوری می‌شود که برای آب شیرین $\rho = 1.9384\ lb\text{-}sec^2/ft$ است.

مثال) یک کشتی با مشخصات زیر را در نظر بگیرید: طول ۴۲۰ فوت، عرض ۵۶ فوت، آبخور ۲۰ فوت، $C_B = C_{wp}$ و جرم افزوده برابر ۹۰ درصد جرم کشتی است. فرض کنید که نیروی میرایی وجود ندارد. مطلوبست مقادیر زیر:

۱) محاسبه پریود حرکت هیو در آب آرام

۲) توصیف حرکت نوسانی هیو در آب آرام در شرایطی که در زمان $t = 0$ مقدار جابجایی و سرعت حرکت هیو به ترتیب صفر و ۵/۵۲ فوت بر ثانیه باشد.

۳) محاسبه حداکثر نیروی وارد شده از طرف یک بار ۴ تنی بر روی عرشه کشتی.

۴) با ترسیم نمودار نشان دهید که جابجایی، سرعت و شتاب با زمان چگونه تغییر می‌کند.

---

1 - wall sided

حل: ۱) پریود طبیعی حرکت هیو (T_z) از رابطه روبرو محاسبه می‌شود: $T_z = 2\pi\sqrt{\frac{a}{c}}$

که a جرم مجازی و c ضریب نیروی بازگرداننده است. لذا داریم: $a = M + a_z = M + 0.9M = 1.9\ \frac{\Delta}{g}$, $c = \rho g A_{wp}$

با جاگذاری در رابطه فوق داریم: $T_z = 2\pi\sqrt{\frac{1.9\Delta}{g.\rho g A_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{1.9LBTC_B.\rho g}{g\rho g LBC_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{1.9T}{g}} = 6.81\ sec$

این مقدار در شکل ۴-۵۷ ملاحظه می‌شود.

۲) حل عمومی حرکت هیو غیر میرا شونده در آب آرام عبارتست از: $z = A\ sin\ \omega_z t + B\ cos\ \omega_z t$

از طرفی داریم: ۱) در $t = ۰$ داریم $z = ۰$, $B = ۰$ ۲) مجدداً در $t = ۰$ داریم $dz/dt = 5.52\ ft/sec$ یا با مشتق‌گیری از رابطه قبل داریم:

$$\frac{dz}{dt} = \{A\omega_z\ cos\ \omega_z t - B\omega_z\ sin\ \omega_z t\}\big|_{t=۰} = A\omega_z$$

با جاگذاری رابطه dz/dt در $t = ۰$ داریم: $5.52 = A\omega_z \quad \rightarrow \quad A = \frac{5.52}{\omega_z}$

از آنجا که داریم: $\omega_z = \frac{2\pi}{T_z} = \frac{2\pi}{6.81} = 0.92 \quad \rightarrow \quad A = 6$

بنابراین توصیف معادله حرکت هیو در آب آرام عبارتست از: $z = 6\ sin\ 0.92t$

که در شکل ۴-۵۷ نشان داده شده است.

۳) نیروی وارد شده از طرف بار ۴ تنی بر روی عرشه برابر است با حاصل‌جمع نیروی گرانش و نیروی اینرسی. این نیروی اینرسی اضافی ناشی از شتاب حرکت هیو می‌باشد. نیروی گرانش که ثابت است لذا حداکثر نیروی وارد بر عرشه از طرف بار هنگامی اتفاق می‌افتد که نیروی اینرسی حداکثر مقدار باشد و آن نیز هنگامی رخ می‌دهد که d^2z/dt^2 حداکثر مقدار را داشته باشد. با مشتق‌گیری دوباره از رابطه z داریم:

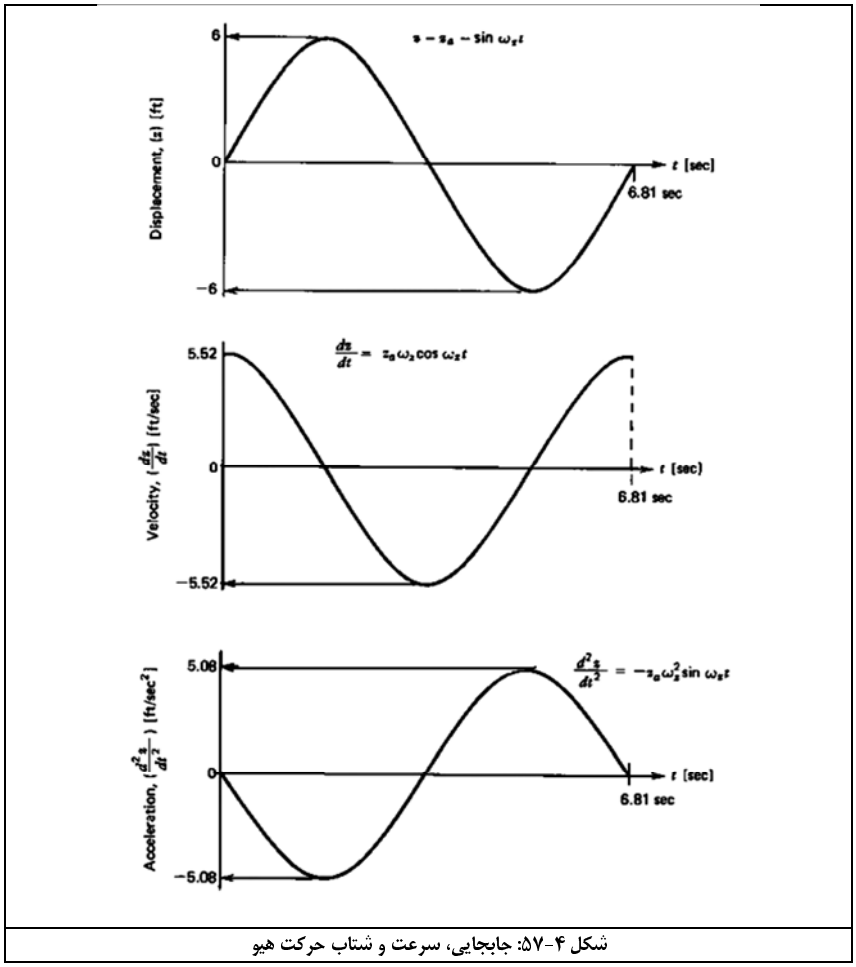
$$\frac{d^2z}{dt^2} = -A\omega_z^2\ sin\ \omega_z t - B\ \omega_z^2\ cos\ \omega_z t = -A\ \omega_z^2\ sin\ \omega_z t$$

از آنجا که در حالت خاص $B = ۰$ است، شتاب حرکت هیو در شکل ۴-۵۷ نشان داده شده است، از این معادله می‌بینیم که d^2z/dt^2 هنگامی حداکثر است که:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -A\omega_z^2 = 6(0.92)^2 = 5.08\ ft/sec^2 \quad \text{یا:}\ -sin\ \omega_z t = 1$$

از آنجا که شتاب g برابر ۳۲/۲ ft/sec^2 است، این شتاب با شتاب حاصل از اینرسی حرکت هیو جمع می‌شود. حاصلضرب این شتابها در جرم بار برابر می‌شود با مقدار نیروی وارد بر عرشه.

۴) شکل ۴-۵۷ تغییرات جابجایی، سرعت و شتاب با زمان را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵۷: جابجایی، سرعت و شتاب حرکت هیو

مثال)

الف) نشان دهید که اگر کلیه ابعاد یک کشتی به نسبت λ مقیاس شوند، پریود طبیعی حرکت هیو کشتی معادل $\sqrt{\lambda}$ برابر مدل است.
ب) اگر طول مدل ۱۶/۸ فوت (طول کشتی ۴۲۰ فوت) با پریود طبیعی هیو ۱/۳۶۲ ثانیه باشد، مطلوبست پریود طبیعی هیو کشتی.

حل) الف) پریود طبیعی هیو کشتی برابر است با:

$$T_z = 2\pi\sqrt{\frac{C\Delta}{g\rho g A_{wp}}}$$

که C برابر است با نسبت جرم مجازی به جرم کشتی. بنابراین داریم:

$$T_z = 2\pi\sqrt{\frac{CLBTC_B\rho g}{g\rho g LBC_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{CTC_B}{gC_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{C(\lambda T_m)C_B}{gC_{wp}}}$$

که T_m آبخور مدل است. سرانجام داریم:

$$T_z = \sqrt{\lambda}2\pi\sqrt{\frac{C(T_m)C_B}{gC_{wp}}} = \sqrt{\lambda}T_z(model)$$

چراکه C , C_B , g , C_{wp} مدل و کشتی با هم برابر است.

ب) نسبت مقیاس λ برابر است با:

$$\lambda = \frac{420}{16.8} = 25$$

$$T_z(ship) = \sqrt{\lambda}T_z(model) = \sqrt{25} \times 1.362 = 6.81\ sec$$

- **نیروی تحریک**

برای تعیین نیروی تحریک حرکات کشتی، موج دریا باید مورد مطالعه قرار گیرد چراکه تنها منبع مهم تحریک کشتی در دریا، نیروی امواج می‌باشد. این امواج، امواج دریا هستند (نه موج تولید شده توسط بدنه). در نظر می‌گیریم که $\zeta = \zeta_a \cos\omega_e t$ باشد. نیروی تحریک بدنه در حرکت هیو از انتگرال-گیری بویانسی افزوده ناشی از امواج در طول کشتی بدست می‌آید. بنابراین نیروی تحریک روی یک مقطع از کشتی با طول واحد توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\rho g 2y\zeta dx$$

که ζ مختصات شکل موج مؤثر است که موج مؤثر به شکل یک موج زیرآبی[1] در نظر گرفته می‌شود: $\zeta = \zeta_a e^{-k'T_m}\cos(k'x - \omega_e t)$

که k' عدد موج مؤثر و برابر $2\pi/L'_\omega$ می‌باشد. در $k\cos\mu$ داریم k عدد موج معمولی و برابر $2\pi/L_\omega$ و μ راستای جهت کشتی نسبت به امواج است و T_m عمق متوسط موج مؤثر از سطح آزاد آب است. تأکید می‌شود که برای جهتهای مختلف زاویه μ، نیروی تحریک حرک هیو با استفاده از طول موج مؤثر بدست می‌آید که $L'_\omega = L_\omega / \cos\mu$ و در اینجا نباید مستقیماً از L_ω استفاده کرد. برای امواج از پهلو $(\mu = 90^\circ \text{ or } 270^\circ)$ مقدار L'_ω به سمت بی-نهایت میل می‌کند و دامنه نیروی تحریک F_o حداکثر مقدار می‌شود و به صورت زیر بدست می‌آید: $F_o = 2\rho g \zeta_a B L C_{wp} = 2\rho g \zeta_a A_{wp}$

هرچند که محاسبه نیروی تحریک حرکت هیو در حالتی فرض می‌شود که کشتی ساکن باقی می‌ماند تا وقتی که به صورت عمودی حرکت کند و موج به صورت تدریجی طول کشتی را طی می‌کند. بنابراین نیروی تحریک عبارتست از: $F = F_o \cos\omega_e t$

و F_o دامنه نیروی تحریک کل است که از انتگرال‌گیری نیروی بویانسی بر روی کلیه مقاطع بدست می‌آید. اگر فرض کنیم که کشتی در محل آبخور، بدنه دیواره‌ای است و هنگامیکه موج به کشتی می‌رسد و زمانی که قله موج منطبق بر وسط کشتی است، زمان t را داریم. در این شرایط موقعیت موج در موقعیت x از مقطع وسط کشتی بدست می‌آید. هم‌اکنون نیروی تحریک حرکت هیو در شرایطی محاسبه می‌گردد که فرض کنیم کشتی قبل از شروع به حرکت عمودی، ساکن باقی می‌ماند و موج به آرامی از کشتی عبور می‌کند. نیروی تحریک هیو عبارتست از افزونی نیروی بویانسی در هر مقطع که می‌تواند به صورت مقابل بیان شود: $F = \int_{-L/2}^{L/2} \rho g 2y(x)\zeta dx$

با جاگذاری رابطه شکل موج و عبارت کسینوسی و با فرض اینکه کشتی نسبت به وسط بدنه متقارن است، نیروی تحریک هیو به صورت زیر است:

$$F = \int_{-L/2}^{L/2} (\rho g 2y\zeta_a e^{-k'T_m}\cos k'x)\,dx$$

اگر فرض شود که شکل موج سطح آب، شکل موج مؤثر باشد (این فرض منجر می‌شود به اینکه نیروی تحریک بزرگتری بدست آید و طراحی از حاشیه ایمنی بالاتری برخوردار باشد)، عبارت نیروی تحریک به صورت زیر بدست می‌آید:

$$F = \left(\rho g 2\zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y\cos k'x\,dx\right)\cos\omega_e t = F_o\cos\omega_e t$$

یادآوری می‌شود که F در شرایطی مثبت است که در جهت مثبت وارد شود یعنی رو به پائین. با مقایسه روابط درمی‌یابیم که زاویه فاز بین پروفیل موج و نیروی هیو ناشی از امواج برابر است با: $\varepsilon_1 = 0^\circ$

دامنه نیروی تحریک را می‌توان به صورت بی‌بعد مقابل نوشت: $f_0 = \frac{F_o}{\rho g \zeta_a LB} = \frac{2}{LB}\left(\int_{-L/2}^{L/2} y(x)\cos(kx\cos\mu)\,dx\right)$

مجدداً یادآوری می‌شود که در امواج از پهلو $(\mu = 90^\circ \text{ or } 270^\circ)$ نیروی تحریک هیو به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

مثال) دامنه نیروی تحریک هیو را برای کشتی مدل مثال اول محاسبه کنید. از آن مثال داشتیم:

$(\mu = 120^\circ, LCC = at\otimes, L = L_w = 19.2\ ft, B = 2.592\ ft, \zeta = 0.2\ ft, \rho = 1.93\ lb - sec^2/ft^4)$

مطلوبست مقادیر f_0 و F_o.

حل) از اطلاعات فوق برای عدد موج داریم: $k = \frac{2\pi}{L_w} = \frac{6.28}{19.20} = 0.327\ ft^{-1}$

---

1 - subsurface wave

دامنه نیرو به صورت بی‌بعد عبارتست از:

$$f_0 = \frac{2}{LB}\left(\int_{-L/2}^{L/2} y(x)\ cos\ (kx\ cos\ \mu)\ dx\right)$$

مقادیر عددی f_0 و F_o با استفاده از جدول زیر مشخص می‌گردند. بنابراین داریم:

$$f_0 = \frac{2}{LB} \times integral = \frac{2}{LB} \times 15.87 = 0.638$$

$$F_\circ = \rho g \zeta_a BL \quad , \quad f_0 = 396.2\ lb$$

Station No. ①	$y = \frac{B_n}{2}$ ②	Cos μ ③	x ④	$k' = kx \cos \mu$ ⑤	Cos (kx cos μ) ⑥	y cos ($k'x$ cos μ) ⑦	Simpson's Multiplier ⑧	Product ⑨
0	0	− 0.5	9.6	− 1.570	0.000	0.000	1	0.000
5	1.296	− 0.5	4.8	− 0.785	0.707	0.916	4	3.664
10	1.296	− 0.5	0	0.000	1.000	1.296	2	2.592
15	1.296	− 0.5	− 4.8	0.785	0.707	0.916	4	3.664
20	0	− 0.5	− 9.6	1.570	0.000	0.000	1	0.000
							SUM	9.920

Column Number	*Description*	*Column Number*	*Description*
①	Station Number	⑥	Cos (kx cos μ)
②	Offset (half-breadth of waterplane), $y = B_n/2$	⑦	y Cos ($k'x$ cos μ)
③	Cos μ	⑧	Simpson's Multiplier
④	Distance from LCG, x	⑨	Product = ⑦ × ⑧
⑤	kx cos μ = effective wave number k'		

یادآوری می‌شود که در اینجا تعداد مقاطع به تعداد ۵ مقطع در نظر گرفته شد و هرچه تعداد مقاطع بیشتر باشد، نتایج بهتری برای F_o بدست می‌آید.

مقدار ضریب نیروی تحریک هیو f_o به صورت تابعی از نسبت طول موج برخورد[1] به طول کشتی در مقادیر مختلفی از ضریب صفحه آبخور در شکل ۴-۵۸ ارائه شده است. نتایج کلی زیر را در مورد نیروی هیو می‌توان نتیجه گرفت:

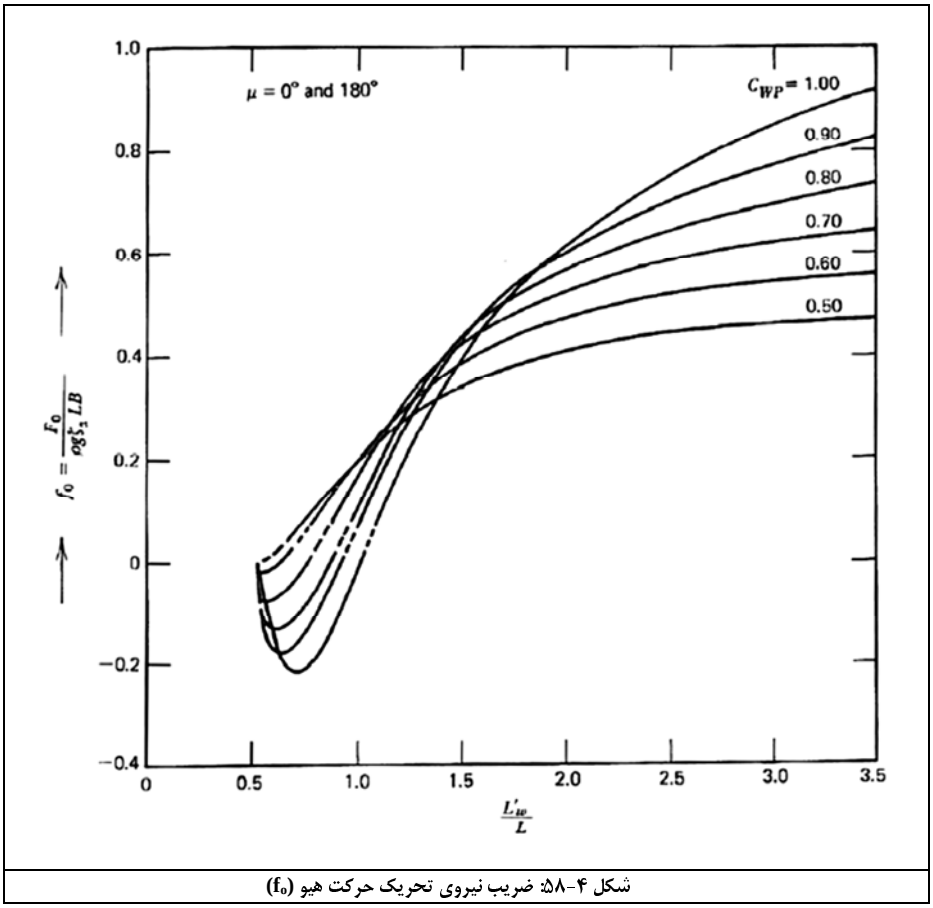
۱) اگر طول موج مؤثر[2] کمتر از نصف طول کشتی باشد، نیروی هیو کوچک است.

۲) هنگامیکه نسبت طول موج‌ها برابر با ضریب صفحه آبخور باشد، نیروی هیو به نظر می‌رسد که صفر باشد.

۳) اگر طول موج مؤثر برابر طول کشتی باشد، نیروی هیو کوچک یا متوسط است.

۴) اگر طول موج مؤثر به بی‌نهایت نزدیک شود، نیروی هیو بی‌بعد به مقدار ضریب صفحه آبخور نزدیک می‌شود.

1 -encountering wavelength
2 - effective wavelength



شکل ۴-۵۸: ضریب نیروی تحریک حرکت هیو (f_0)

اگر همانطور که قبلاً ذکر کردیم، موج به آرامی طول کشتی را طی کند جابجایی عمودی هر مقطع کشتی با عنوان «هیو استاتیک» نامیده می‌شود و عبارتست از:

$$\frac{F}{c} = z_{st} \cos \omega_e t$$

دامنه هیو استاتیک برابر است با:

$$z_{st} = \frac{F_o}{c}$$

که F نیروی تحریک هیو بوده و عبارتست از:

$$F = F_o \cos \omega_e t = 2\rho g \zeta_a e^{-kT_m} \int_{-L/2}^{L/2} y \cos(kx - \omega_e t) dx$$

مثال) یک کشتی با مشخصات زیر موجود است:

(L = 450 ft , B = 70 ft , C_{wp} = 0.8 , Δ = 12500 ton , ω_e = 1.18 rad/sec , ρ = 1.99 lb – sec^2 / ft^4)

دامنه موج ζ_a = 10 ft است و همچنین داریم: الف) جرم افزوده هیو ۸۰ درصد جرم واقعی کشتی است.

ب) ضریب میرایی به صورت بی‌بعد روبرو عبارتست از : $b\sqrt{gl}/\Delta = 1.7$ ج) دامنه نیروی تحریک حرکت هیو به صورت بی‌بعد برابر است با: $f_o = F_o / \rho g \zeta_a LB = 0.17$

مطلوبست دامنه حرکت هیو کشتی

حل)

۱) برای نیروی اینرسی داریم:

$$Interial\ force = \frac{\Delta' d^2 z}{g\ dt^2}$$

که جرم مجازی عبارتست از:

$$a = \frac{\Delta}{g} = 1.80 \ \frac{\Delta}{g} = 1.80 \times \frac{12500}{32.2} \times 2240 = 1565222\ lb - sec^2/ft$$

۲) برای ضریب میرایی داریم:

$$\frac{b\sqrt{gl}}{\Delta} = 1.70$$

$$\rightarrow \quad b = \frac{1.70\Delta}{\sqrt{gl}} = \frac{1.70 \times 12500}{\sqrt{32.2 \times 450}} = 176.53 \ {}^{ton-sec}/_{ft} = 3955427 \ lb - sec/ft (by\ multiplying\ by\ 2240)$$

۳) برای ضریب بازگرداننده داریم: $c = 1.99 \times 32.2 \times (450 \times 70 \times 0.80) = 1614766 \ lb/ft$

۴) برای نیروی تحریک بی‌بعد داریم: $f_o = \frac{F_o}{\rho g \zeta a L B} = 0.17$

$$F_o = 0.17 \times 1.99 \times 32.2 \times 10 \times 450 \times 70 = 3431377 \ lb \qquad \Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_z} = \frac{1.180}{1.016} = 1.61$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{c}{a}} = \sqrt{\frac{1614766}{1565222}} = 1.016 \ rad/sec$$

$$k = \frac{\nu}{\omega_z} = \frac{0.126}{1.016} = 0.124 \qquad 2\nu = \frac{b}{a}$$

بدین ترتیب دامنه حرکت هیو عبارتست از:

بدین ترتیب دامنه حرکت هیو عبارتست از:

$$z_a = z_{st} \cdot \mu_z = \frac{F_o}{c} \times \frac{1}{\sqrt{\left(1-\Lambda^2\right)^2 + 4\kappa^2\Lambda^2}} = \frac{3431377}{1614766} \times \frac{1}{\sqrt{[1-(1.161)^2]^2 + (0.124)^2 \times (1.161)^2}} = 4.70 \ ft$$

مثال) از اطلاعات مثال قبل مطلوبست محاسبه موارد زیر:

۱) زاویه فاز بین حرکت موج و حرکت هیو

۲) حداکثر شتاب حرکت هیو در امواج منظم

۳) جابجایی کشتی نسبت به موج

۴) مقدار حداکثر برآیند حرکت نسبی (جابجایی) کشتی نسبت به سطح موج

حل)

۱) زاویه فاز بین حرکت موج و حرکت هیو به صورت روبرو بیان می‌شود: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$. که ε_1 زاویه فاز بین حرکت موج و نیروی تحریک ناشی از موج است و ε_2 زاویه فاز بین نیروی تحریک و حرکت هیو است. از رابطه مربوطه داریم $\varepsilon_1 = 0^\circ$ و همچنین:

$$\varepsilon_2 = tan^{-1}\left(\frac{2\kappa\Lambda}{1-\Lambda^2}\right) = tan^{-1}\left(\frac{2 \times 0.124 \times 1.161}{1-(1.161)^2}\right) = -39.6^\circ$$

یادآوری می‌شود که بررسی زاویه فاز موج از اهمیت بالایی در حرکت کشتی برخوردار است چراکه همانطور که بعداً نشان داده خواهد شد، هم خیسی عرشه[1] و هم مقاومت افزوده کشتی در امواج وابسته است به موقعیت نسبی کشتی به امواج. همچنین باید یادآوری شود که اگر فرکانس برخورد خیلی خیلی نزدیک به فرکانس طبیعی حرکت هیو باشد، پیش‌بینی زاویه فاز دارای عدم قطعیت بسیار زیادی خواهد شد چراکه در این موقعیت تشدید (رزنانس)، مقدار میرایی حرکت هیو را به مقدار قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، اگر مقدار میرایی بسیار کوچک باشد زاویه فاز صفر درجه در زیر تشدید و زاویه ۱۸۰ درجه در بالای تشدید خواهد بود. در ناحیه نزدیک به ناحیه تشدید دامنه حرکت نسبت به میرایی بسیار حساس خواهد شد بنابراین پیش-بینی حرکت نزدیک به ناحیه تشدید چندان رضایت‌بخش نخواهد بود.

۲) معادله حرکت هیو یک کشتی در امواج منظم عبارتست از:

$$z = z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon) \qquad \frac{dz}{dt} = -z_a \omega_e \sin(\omega_e t - \varepsilon) \qquad \frac{d^2z}{dt^2} = -z_a \omega_e^2 \cos(\omega_e t - \varepsilon)$$

مقدار d^2z/dt^2 هنگامی حداکثر است که $\cos(\omega_e t - \varepsilon) = -1$ باشد بنابراین: $\frac{d^2z}{dt^2} = -z_a\omega_e^2 = 4.70 \times (1.18)^2 = 6.54 \ {}^{ft}/_{sec^2}$

۳) فرض کنید معادله حرکت موج نسبت به یک نقطه ثابت در سطح آب آرام به صورت روبرو بیان شود: $\zeta = \zeta_a \cos \omega_e t$

حرکت هیو همان نقطه برای شرایط یکنواخت عبارتست از: $z = z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon)$

که ε زاویه فاز بین حرکت موج و حرکت کشتی است. بنابراین حرکت نسبی (یا مقدار جابجایی) این نقطه را می‌توان به این صورت بیان کرد:

$$s = \zeta - z = \zeta_a \cos \omega_e t - z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon) = \zeta_a \left[\cos \omega_e t - \frac{z_a}{\zeta_a} \cos(\omega_e t - \varepsilon)\right]$$

۴) حداکثر حرکت نسبی کشتی هنگامی بدست می‌آید که:

---

1 - deck wetness

$$\frac{ds}{d(\omega_e t)} = 0 \qquad \rightarrow \qquad \omega_e \zeta_a \left[-sin(\omega_e t) + \frac{z_a}{\zeta_a} sin(\omega_e t - \varepsilon) \right] = 0$$

از آنجا که $\zeta_a \neq 0$ است عبارت داخل براکت صفر است لذا داریم:

$$-sin(\omega_e t) + \frac{z_a}{\zeta_a} sin(\omega_e t - \varepsilon) = 0 \qquad \rightarrow \qquad -sin(\omega_e t) + \frac{z_a}{\zeta_a} [sin(\omega_e t)\, cos\, \varepsilon - cos(\omega_e t)\, sin\, \varepsilon] = 0$$

هم‌اکنون با جاگذاری مقادیر z_a و ζ_a و ε داریم:

$$-sin(\omega_e t) + \frac{4.7}{10} [sin(\omega_e t)\, cos(-39.6^\circ) - cos(\omega_e t)\, sin(-39.6^\circ)] = 0 \qquad \rightarrow$$

$$-0.638 sin(\omega_e t) + 0.299\, cos(\omega_e t) = 0$$

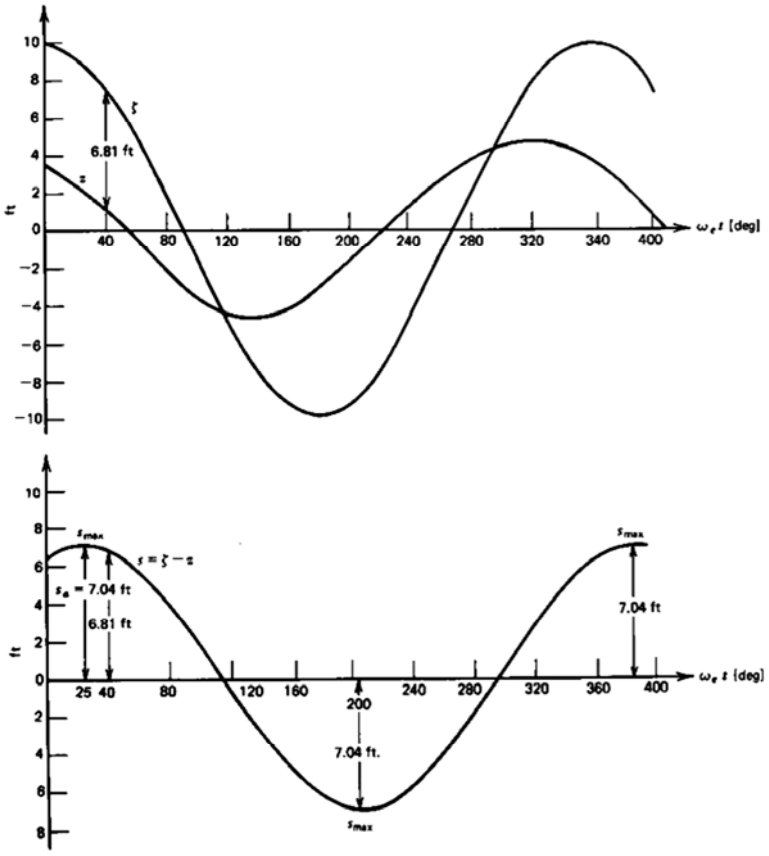
$$1 = \frac{0.638\, sin(\omega_e t)}{0.299\, cos(\omega_e t)} \qquad \rightarrow \qquad tan\, \omega_e t = 0.469 \qquad \rightarrow \qquad \omega_e t = 25.11^\circ (or\ 205.11^\circ)$$

و s هنگامی حداکثر است که $\omega_e t = 25.11^\circ$.

حداکثر حرکت برآیند نسبی با جاگذاری مقادیر $\omega_e t$ در معادله به این صورت بدست می‌آید:

$$s = 10 \left[cos\, 25.11^\circ - \frac{4.7}{10} cos(25.11^\circ + 39.60^\circ) \right] = 7.04\ ft$$

یادآوری می‌شود که با ترسیم منحنی‌های ζ , z , s ملاحظه می‌شود که $\omega_e t = 25^\circ \text{ and } 205^\circ$، حداکثر حرکت نسبی ۷/۰۴ فوت بدست می‌آید. همچنین یادآوری می‌شود که مطابق شکل ۴–۵۹ زاویه فاز حرکت نسبت به موج مثبت است چراکه: $z = z_a\, cos(\omega_e t - (39.6)^\circ)$



شکل ۴- ۵۹ : حرکت نسبت به سطح آزاد

- **ارتباط بین مدل و کشتی**

اگر یک کشتی بزرگ به طول L و جرم M و یک کشتی کوچکتر (یا مدل) که از نظر هندسی کاملاً شبیه مدل بزرگتر است به طول l و جرم m باشد داریم:

$$\lambda = \frac{Length\ of\ ship}{Length\ of\ model} = scale\ factor \quad , \quad M = \lambda^3 m \quad , \quad L = \lambda l$$

از طرفی برای رابطه پریود نوسانات داریم (اندیس ۱ برای کشتی بزرگتر و اندیس ۲ کشتی کوچکتر):

$$T_2 = \frac{2\pi k_2}{\sqrt{g\overline{GM}_2}} \quad , \quad T_1 = \frac{2\pi k_1}{\sqrt{g\overline{GM}_1}}$$

$$T_1 = \frac{2\pi\lambda k_2}{\sqrt{g\overline{GM}_2}} = \frac{\lambda 2\pi k_2}{\lambda^{1/2}\sqrt{g\overline{GM}_2}} = \lambda^{1/2} T_2 \quad , \quad \lambda = \frac{Dimension_1}{Dimension_2}$$

فصل ۳: حرکت دورانی شتابدار[1]

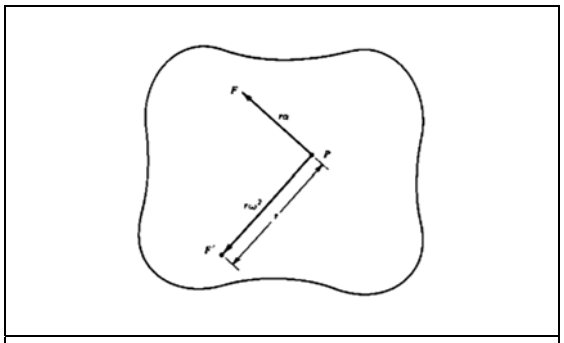
اگر یک جسم کاملاً صلب یک حرکت دورانی شتابدار داشته باشد، شتاب هر نقطه از جسم به فاصله r از محور دوران دارای ۲ مؤلفه است:

۱) اولین مؤلفه برابر $r\alpha$ می‌باشد که همراستا با جهت سرعت است. ۲) دومین مؤلفه برابر $r\omega^2$ می‌باشد که به سمت محور دوران است.

لذا شتاب زاویه‌ای برابر است با: $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\Phi}{dt^2}$

مطابق شکل ۴-۶۰، نیروهای وارد شده می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$F = mass \times acceleration = mr\alpha \quad , \quad F' = mass \times acceleration = mr\omega^2$$



شکل ۴-۶۰ : دو مؤلفه شتاب وارد بر یک ذره در حرکت دورانی شتابدار

اگر جسم از قطعات متفاوت و مجزا تشکیل شده باشد، برای جمع‌بندی اثرات آنها باید ممان‌های هر یک از قطعات با یکدیگر جمع شوند. این ممان‌ها حول محور دوران گرفته می‌شود و بنابراین مجموع ممان‌های F و F' حول محور دوران عبارتست از: $Fr = mr\alpha r = mr^2\alpha$

ممان کل نیروها (حاصل از اجزاء مختلف) حول محور دوران عبارتست از : $\sum F_i r_i = \sum (m_i r_i^2)\alpha = \sum (m_i r_i^2)\frac{d^2\Phi}{dt^2} = I\frac{d^2\Phi}{dt^2}$

که I ممان اینرسی جسم حول محور دوران بوده و برابر است با $\sum(\mathrm{m_i r_i^2})$ که این مقدار وابسته به توزیع جرم بر روی جسم و همچنین وابسته به محور دوران است. باید توجه داشت که هر چند جرم کل جسم $M = \sum m_i$ است و یک مرکز ثقل برآیند دارد ولی مقدار ممان آن با ممان اینرسی کل جسم متفاوت است. از طرف دیگر مقادیر حول ممان اینرسی حول محورهای مختلف، اعداد متفاوتی را منتج می‌گردد. مثلاً اگر کشتی حرکت رول داشته باشد ممان اینرسی آن حول محور x و اگر حرکت پیچ داشته باشد حول محور y و اگر حرکت یاو داشته باشد حول محور z در نظر گرفته می‌شود که البته همه این مقادیر با یکدیگر متفاوت هستند. بنابراین بطور کلی می‌توان نوشت: $I = Mk^2$

که k شعاع ژیراسیون کشتی حول یک محور خاص نامیده می‌شود که این محور می‌تواند x، y یا z باشد. برای یک کشتی به جابجایی Δ داریم:

$$I = \frac{\Delta}{g}k^2$$

در واقع شعاع ژیراسیون کشتی به جرم کل M که از بسیاری از جرمهای کوچکتر m تشکیل شده است، به این صورت بدست می‌آید: $k^2 = \frac{\sum(w_i r_i^2)}{\Delta}$

در این رابطه w_i وزن هریک از المان‌های وزنی و r فاصله آن جرم از محور دوران و Δ وزن کل کشتی است.

- **شعاع ژیراسیون برای حرکات دورانی مختلف**

۱) شعاع ژیراسیون حرکت رول

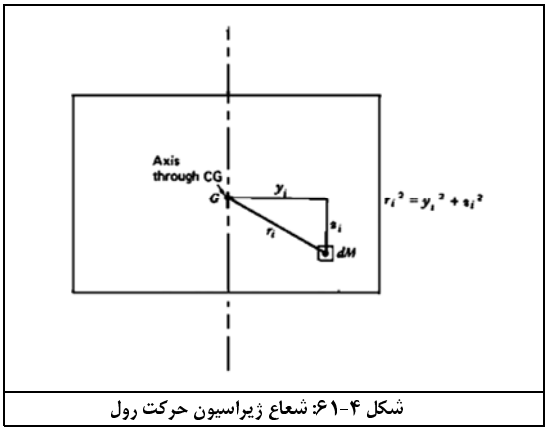
مطابق شکل۴-۶۱ شعاع ژیراسیون حرکت رول برابر است با:

$$I_{xx} = Mk_{xx}^2 = \int dMr_i^2 = \int dM(y_i^2 + z_i^2) \quad , \quad r_i^2 = y_i^2 + z_i^2 \quad \rightarrow \quad I_{xx} = \frac{1}{g}\sum[w_i(y_i^2 + z_i^2)] + \sum I_i$$

که y_i و z_i فاصله المان جرم از مرکز ثقل کل کشتی (CG) می‌باشد و I_i ممان اینرسی المان جرم حول محور خودش می‌باشد.

---

1 - accelerated rotational motion



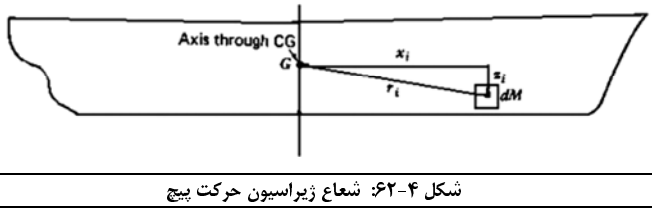
شکل ۴-۶۱: شعاع ژیراسیون حرکت رول

یا به عبارت دیگر می‌توان نوشت: $k_{xx} = \sqrt{\frac{\sum w_i(y_i^2+z_i^2)}{\Delta}}$ $\quad I_{xx} = \frac{\Delta}{g}k_{xx}^2 = \frac{1}{g}\sum[w_i(y_i^2 + z_i^2)]$

۲) شعاع ژیراسیون حرکت پیچ

مطابق شکل ۴-۶۲ شعاع ژیراسیون حرکت پیچ برابر است با:

$$I_{yy} = Mk_{yy}^2 = \int dMr_i^2 = \int dM(x_i^2 + z_i^2) \quad , \quad r_i^2 = x_i^2 + z_i^2 \quad \rightarrow \quad I_{yy} = \frac{\Delta}{g}k_{yy}^2$$
$$= \frac{1}{g}\sum[w_i(x_i^2 + z_i^2)] + \sum I_i$$

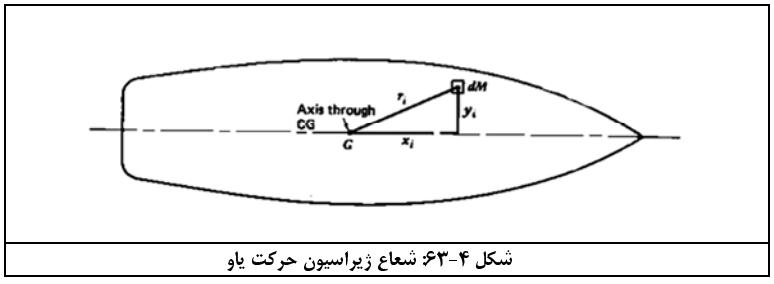


شکل ۴-۶۲: شعاع ژیراسیون حرکت پیچ

اگر کشتی به اقلام وزنی کوچکتر تقسیم شده باشد داریم:

$$I_{yy} = \frac{\Delta}{g}k_{yy}^2 = \frac{1}{g}\sum[w_i(x_i^2 + z_i^2)] \quad , \quad k_{yy} = \sqrt{\frac{\sum w_i(x_i^2 + z_i^2)}{\Delta}}$$

۳) شعاع ژیراسیون حرکت یاو



شکل ۴-۶۳: شعاع ژیراسیون حرکت یاو

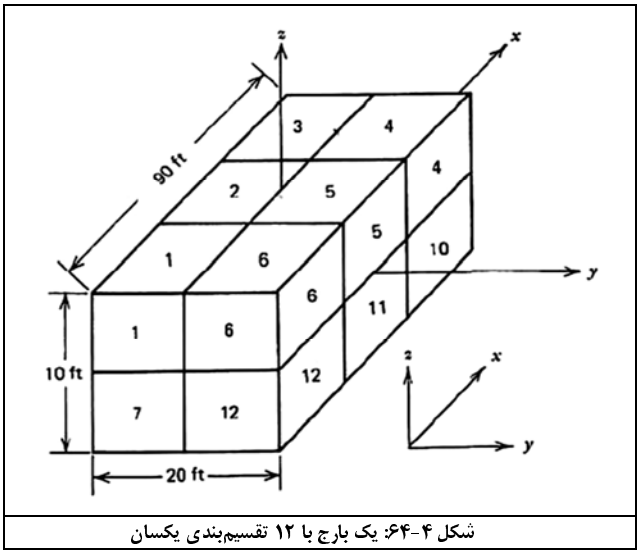
مطابق شکل ۴-۶۳ شعاع ژیراسیون حرکت یاو عبارتست از:

$$I_{zz} = Mk_{zz}^2 = \int dMr_i^2 = \int dM(x_i^2 + y_i^2) \quad , \quad r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 \quad \rightarrow \quad I_{zz} = \frac{\Delta}{g}k_{zz}^2 = \frac{1}{g}\sum[w_i(x_i^2 + y_i^2)] + \sum I_i$$

اگر جرم کشتی به اجزاء بسیار کوچکتری تقسیم شود داریم:

$$I_{zz} = \frac{\Delta}{g}k_{zz}^2 = \frac{1}{g}\sum[w_i(x_i^2 + y_i^2)] \quad , \quad k_{zz} = \sqrt{\frac{\sum w_i(x_i^2 + y_i^2)}{\Delta}}$$

مثال) یک بارج که به صورت همگن بارگیری شده است دارای جابجایی ۶۰۰ تن بوده و مطابق شکل ۴-۶۴ به ۱۲ قسمت ۵۰ تنی تقسیم شده است. اگر جرم هر قسمت در مرکز آن متمرکز شده باشد مطلوبست شعاع ژیراسیون در حرکات رول، پیچ و یاو. از ممان اینرسی هر قسمت حول محور خود صرفنظر می‌کنیم.



شکل ۴-۶۴: یک بارج با ۱۲ تقسیم‌بندی یکسان

حل) وزن و موقعیت هریک از اقلام وزنی در جدول زیر ارائه شده است و با توجه به روابطی که قبلاً ارائه شده بود داریم:

$$k_{xx}^2 = \frac{18750}{600} = 31.25\,, \quad i.e\,, \quad k_{xx} = 5.59\ ft$$

$$k_{yy}^2 = \frac{363750}{600} = 606.25\,, \quad i.e\,, \quad k_{yy} = 24.62\ ft$$

$$k_{zz}^2 = \frac{375000}{600} = 625.00\,, \quad i.e\,, \quad k_{zz} = 25.00\ ft$$

	w_i [tons]	x_i [ft]	y_i [ft]	z_i [ft]	x_i^2 [ft²]	y_i^2 [ft²]	z_i^2 [ft²]
1	50	− 30	− 5	2.5	900	25	6.25
2	50	0	− 5	2.5	0	25	6.25
3	50	+ 30	− 5	2.5	900	25	6.25
4	50	+ 30	+ 5	2.5	900	25	6.25
5	50	0	+ 5	2.5	0	25	6.25
6	50	− 30	+ 5	2.5	900	25	6.25
7	50	− 30	− 5	− 2.5	900	25	6.25
8	50	0	− 5	− 2.5	0	25	6.25
9	50	+ 30	− 5	− 2.5	900	25	6.25
10	50	+ 30	+ 5	− 2.5	900	25	6.25
11	50	0	+ 5	− 2.5	0	25	6.25
12	50	− 30	+ 5	− 2.5	900	25	6.25

$y_i^2 + z_i^2$ [ft²]	$x_i^2 + z_i^2$ [ft²]	$x_i^2 + y_i^2$ [ft²]	$w_i(y_i^2 + z_i^2)$ [ton-ft²]	$w_i(x_i^2 + z_i^2)$ [ton-ft²]	$w_i(x_i^2 y_i^2)$ [ton-ft²]	l_i
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
31.25	6.25	25	1,562.5	312.5	1,250	0
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
31.25	6.25	25	1,562.5	312.5	1,250	0
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
31.25	6.25	25	1,562.5	312.5	1,250	0
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
31.25	6.25	25	1,562.5	312.5	1,250	0
31.25	906.25	925	1,562.5	45,312.5	46,250	0
		SUMS	18,750	363,750	375,000	0

توجه شود که چون توزیع جرم داخل بارج به صورت همگن است، آن را می‌توان به صورت مکعب‌های مجزا از هم در نظر گرفت و با این فرض می‌توان در نظر گرفت، مقدار k_{xx} برابر $0.2887\ B$ و هر دو مقدار k_{yy} و k_{zz} برابر $0.2887\ L$ در نظر گرفته شود. در ادامه این مقدار برای k_{yy} محاسبه می‌گردد. برای یک جسم همگن داریم:

$$I = \int m_n \zeta^2 d\zeta \qquad \text{و} \qquad k_{yy}^2 = \frac{I}{M} = \int \frac{m_n \zeta^2 d\zeta}{M}$$

برای تعیین شعاع ژیراسیون حرکت پیچ، مقادیر جدول زیر ارائه شده است.

$$I_{yy} = \frac{1}{3} \times 45 \times \frac{81000}{32.2 \times 3} = 12577.64\ ton - sec^2/ft$$

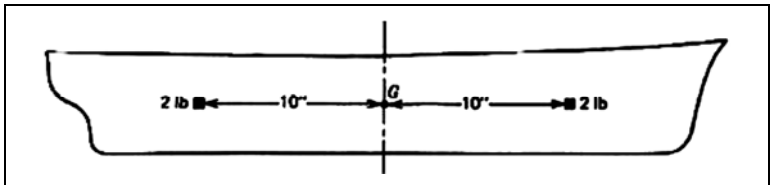
$$k_{yy} = \sqrt{\frac{I_{yy}}{M}} = \sqrt{\frac{1277.6}{600/32.2}} = 25.9807\ ft\ (i.e, 0.2887\ L)$$

$$M = \frac{600}{32.2} ton - sec^2/ft$$

Station No.	m_n [ton-sec²/ft²]	ζ Distance from Pitching Axis	$m_n\zeta^2$	Simpson's Multiplier	Product
0	$\frac{600}{32.2 \times 90}$	45	$\frac{40,500}{32.2 \times 3}$	1	$\frac{40,500}{32.2 \times 3}$
1	$\frac{600}{32.2 \times 90}$	0	0	4	0
2	$\frac{600}{32.2 \times 90}$	45	$\frac{40,500}{32.2 \times 3}$	1	$\frac{40,500}{32.2 \times 3}$
				SUM	$\frac{81,000}{32.2 \times 3}$

Therefore $I_{yy} = \frac{1}{3} \times 45 \times \frac{81,000}{32.2 \times 3}$
$= 12,577.64$ ton-sec²-ft

مثال) یک مدل کشتی به وزن ۷/۵ پوند باید افزایش وزن دهد تا به وزن ۱۱/۵ پوند که مرتبط با وزن کشتی اصلی است برسد. بعد از سنگین کردن مدل مطابق شکل ۴-۶۵، مشخص شد که شعاع ژیراسیون حرکت پیچ برابر ۱۲ اینچ است در حالیکه برای نمونه اصلی برابر $0.25L$ است. اگر طول مدل ۵ فوت باشد و توزیع جرم جدید به گونه‌ای انجام شده باشد که مرکز ثقل CG همان CG اصلی باشد، وزنه‌ها در چه فاصله‌ای از CG باید قرار گیرند؟



شکل ۴-۶۵: تعیین شعاع ژیراسیون

حل) ممان اینرسی مطلوب باید به این صورت باشد: $\frac{11.5}{g} \times (0.25\ L)^2 = \frac{11.5}{g} \times (0.25 \times 60 in.)^2$

ممان اینرسی مدل متعادل شده عبارتست از: $\frac{11.5}{g} \times (12)^2 = \frac{1655\ lb-in.^2}{g\ ft/sec^2}$

کاهش ممان اینرسی اتفاق افتاده برابر است با: $\frac{2590}{g} - \frac{1655}{g} = \frac{935\ lb-in.^2}{g[ft/sec^2]}$

سهم ۲ وزنه ۲ پوندی اضافه شده از ممان اینرسی کل عبارتست از: $\frac{2}{g} \times 10^2 + \frac{2}{g} \times 10^2 = \frac{400\ lb-in.^2}{g[ft/sec^2]}$

در حالیکه این وزنه‌ها باید مقدار ۹۳۵ واحد ممان اینرسی دیگر نیز ایجاد کنند که داریم:

$$\frac{400}{g} + \frac{935}{g} = \frac{1355\ lb - in.^2}{g[ft/sec^2]} \quad , \quad m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 = \frac{1355\ lb - in.^2}{g[ft/sec^2]}$$

$$m_1 = m_2 = \frac{2\ lb}{g[ft/sec^2]} \quad , \quad r_1 = r_2 = r\ in.$$

$$r^2\frac{(2+2)}{g} = \frac{1355\ lb - in.^2}{g[ft/sec^2]} \quad , \quad r = 18.3\ in.$$

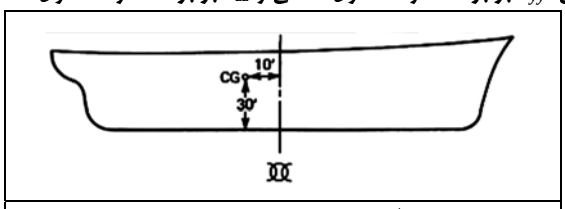
این مقدار بدین معناست که وزنه‌ها باید به فاصله ۱۸/۳ اینچ از مرکز ثقل قرار گیرند.

مثال) یک کشتی با مشخصات زیر در نظر است. یک وزنه ۲۰۰ تنی در فاصله ۱۰۰ فوت جلوتر از وسط شناور و ۵۰ فوت بالاتر از کیل و ۵ متر در سمت راست شناور به محل دیگری واقع در ۵۰ فوت جلوتر از وسط شناور، ۲۰ فوت بالاتر از کیل و ۱۰ متری سمت راست قرار می-گیرد. مطلوبست مقادیر جدید CG , k_{xx} , k_{yy} , k_{zz}؟

(L= 599 ft , B = 70 ft , δ = 13000 ton)

***CG* کل کشتی: مطابق شکل ۴-۶۴ ، ۱۰ فوت عقب‌تر از وسط کشتی و ۳۰ فوت بالاتر از کیل و روی خط مرکزی کشتی.**

***k_{xx}* برابر ۴۰ درصد عرض کشتی، *k_{yy}* برابر ۲۵ درصد طول کشتی و *k_{zz}* برابر ۲۵ درصد طول کشتی است.**



شکل ۴-۶۶: توصیف کشتی مثال حاضر

حل) جابجایی وزنه را می‌توان در ۲ مرحله برای تعیین شعاع ژیراسیون در نظر گرفت: الف) حذف وزنه ب) اضافه کردن وزنه به محل مورد نظر

الف) حذف وزنه: در نظر می‌گیریم که وزنه ۲۰۰ تنی از محل اولیه حذف شده باشد لذا با توجه به شکل ۴-۶۷ می‌توان گفت:

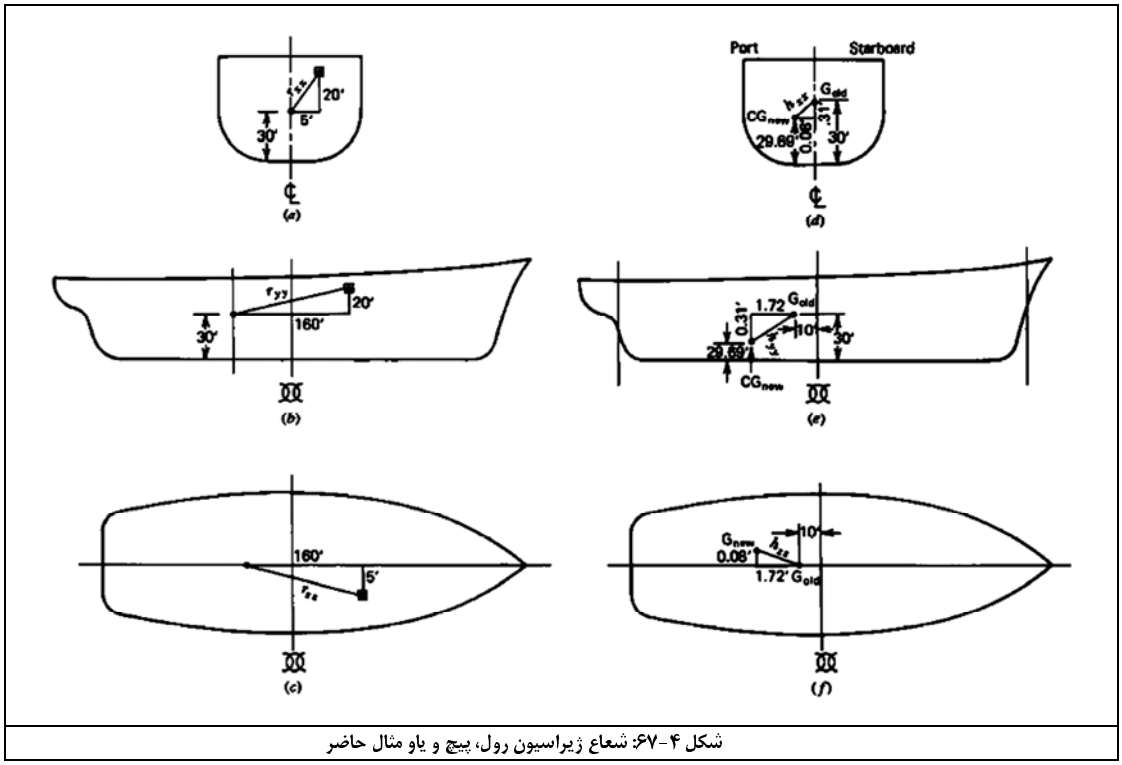
$$\left(I_{xx_{new}}\right)_{new\ (CG)} = (I_{xx})_{orginal} - mr_{xx}^2 = Mk_{xx}^2 - mr_{xx}^2 = \frac{13000}{32.2}\times(0.4\times 70)^2 - \frac{200}{32.2}\times[(20)^2+5^2]$$
$$= 313882\ ton - sec^2 - ft$$

از حالت b این شکل داریم:

$$\left(I_{yy_{new}}\right)_{old\ CG} = \left(I_{yy}\right)_{orginal} - mr_{yy}^2 = \frac{13000}{32.2}\times(125)^2 - \frac{200}{32.2}\times[(110)^2+(20)^2] = 6230590\ ton - sec^2 - ft$$

و از حالت c این شکل داریم:

$$\left(I_{zz_{new}}\right)_{old\ CG} = (I_{zz})_{orginal} - mr_{zz}^2 = \frac{13000}{32.2}\times(125)^2 - \frac{200}{32.2}\times[(110)^2+5^2] = 6232919\ ton - sec^2 - ft$$



شکل ۴-۶۷: شعاع ژیراسیون رول، پیچ و یاو مثال حاضر

بدلیل برداشته‌شدن وزنه باید مرکز ثقل جدید محاسبه گردد. با ممان‌گیری حول عمود سینه داریم:

$$New(CG)_x = \frac{13000 \times 260 - 200 \times 150}{13000 - 200} = 261.72\ from\ the\ forward\ perpendicular$$

بنابراین جابجایی طولی مرکز ثقل برابر ۱/۷۲ فوت است. با ممان‌گیری حول خط مرکزی داریم:

$$New(CG)_y = \frac{13000 \times 0 - 200 \times (+5)}{13000 - 200} = -0.08\ ft\ (port)$$

لذا جابجایی عرضی مرکز ثقل برابر ۰/۰۸ فوت است. با ممان‌گیری حول خط مبنا داریم:

$$New(CG)_z = \frac{13000 \times 30 - 200 \times 50}{13000 - 200} = 29.69\ ft\ above\ baseline$$

بنابراین جابجایی عمودی مرکز ثقل برابر ۰/۳۱ = ۲۹/۶۹ − ۳۰ فوت است و لذا داریم: $\left(I_{xx_{new}}\right)_{new\ CG} = \left(I_{xx_{new}}\right)_{new\ (CG)} - (M-m)h_{xx}^2$

که h_{xx} فاصله محور طولی گذرنده از مرکز ثقل جدید تا محور طولی گذرنده از مرکز ثقل قدیم است (حالت d شکل)

$$h_{xx}^2 = \left(shift\ of\ G_y\right)^2 + (shift\ of\ G_z)^2$$

$$\left(I_{xx_{new}}\right)_{new\ CG} = 313882 - \frac{(13000-200)}{32.2} \times [(0.32)^2 + (0.08)^2] = 313841\ ton - sec^2 - ft$$

$$\left(I_{yy_{new}}\right)_{new\ CG} = \left(I_{yy_{new}}\right)_{new\ CG} - (M-m)h_{yy}^2$$

که h_{yy} فاصله بین محورهای عرضی گذرنده از مرکز ثقل جدید و قدیم است (حالت e):

$$h_{yy}^2 = (shift\ of\ G_z)^2 + (shift\ of\ G_x)^2$$

$$\left(I_{yy_{new}}\right)_{new\ CG} = 6230590 - \frac{(1300-200)}{32.2} \times [(1.72)^2 + (0.31)^2] = 6229376\ ton - sec^2 - ft$$

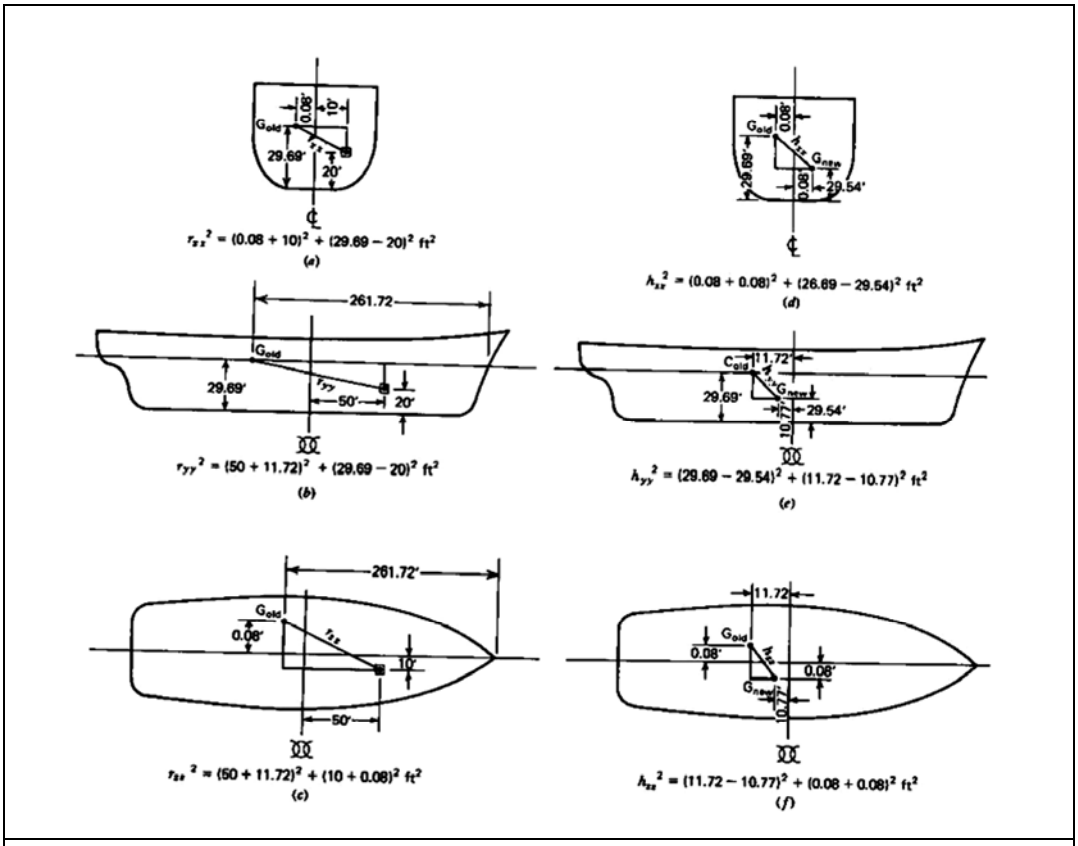
$$\left(I_{zz_{new}}\right)_{new\ CG} = \left(I_{zz_{new}}\right)_{old\ CG} - (M-m)h_{zz}^2$$

از حالت f نیز برای h_{zz} و ممان حاصل از آن داریم: $h_{zz}^2 = (shift\ of\ G_x)^2 + \left(shift\ of\ G_y\right)^2$

$$\left(I_{zz_{new}}\right)_{new\ CG} = 6232919 - \frac{(1300-200)}{32.2} \times [(1.72)^2 + (0.08)^2] = 6231740\ ton - sec^2 - ft$$

ب) افزودن وزنه: در نظر می‌گیریم که یک وزنه ۲۰۰ تنی در موقعیت جدید اضافه شده باشد. بنابراین از شکل ۴-۶۸ داریم:

$$\left(I_{xx_{new}}\right)_{old\ CG} = (I_{xx})_{orginal} + mr_{xx}^2 = 313841 + \frac{200}{32.2} \times [(10.08)^2 + (9.69)^2] = 315055\ ton - sec^2 - ft$$



شکل ۴-۶۸: جابجایی مرکز ثقل در هریک از جهات

با توجه به حالت b از این شکل داریم:

$$\left(I_{yy_{new}}\right)_{old\ CG} = \left(I_{yy}\right)_{orginal} + mr_{yy}^2 = 6229376 + \frac{200}{32.2} \times [(61.72)^2 + (9.69)^2] = 6253620\ ton - sec^2 - ft$$

از حالت c این شکل داریم:

$$\left(I_{zz_{new}}\right)_{new\ CG} = (I_{zz})_{orginal} + mr_{zz}^2 = 6231740 + \frac{200}{32.2} \times [(61.72)^2 + (10.08)^2] = 6256032\ ton - sec^2 - ft$$

با توجه به اضافه شدن وزنه، مرکز ثقل کشتی تغییر می‌کند. با ممان‌گیری حول عمود سینه داریم:

$$New(CG)_x = \frac{12800 \times 261.72 - 200 \times 200}{12800 - 200} = 260.77\ ft\ from\ the\ forward\ perpendicular$$

که نشان‌دهنده جابجایی طولی مرکز ثقل به اندازه ۰/۹۵ = ۱۰/۷۷ − ۱۱/۷۲ فوت است. با ممان‌گیری حول خط مرکزی داریم:

$$New(CG)_y = \frac{12800 \times (-0.08) + 200 \times 10}{12800 + 200} = +0.08\ ft(i.e., starboard)$$

جابجایی عرضی مرکز ثقل برابر است با: فوت ۰/۱۶ = ۰/۰۸ + ۰/۰۸ . با ممان‌گیری حول خط مبنا داریم:

$$New(CG)_z = \frac{12800 \times 29.69 + 200 \times 20}{12800 + 200} = 29.54\ ft\ above\ \ the\ baseline$$

جابجایی عمودی مرکز ثقل برابر است با: فوت ۰/۱۵ = ۲۹/۵۴ − ۲۹/۶۹ . با توجه به حالت d از شکل برای محاسبه ممان اینرسی داریم:

$$\left(I_{xx_{new}}\right)_{new\,CG} = \left(I_{xx_{new}}\right)_{old\,CG} - (M+m)h_{xx}^2$$

$$h_{xx}^2 = \left(shift\ of\ G_y\right)^2 + (shift\ of\ G_z)^2$$

$$\left(I_{xx_{new}}\right)_{new\,CG} = 315055 - \frac{(112800+200)}{32.2} \times [(0.16)^2 + (0.15)^2] = 315036\ ton - sec^2 - ft$$

از حالت e شکل نیز داریم:

$$\left(I_{yy_{new}}\right)_{new\,CG} = \left(I_{yy_{new}}\right)_{new\,CG} - (M+m)h_{yy}^2$$

$$h_{yy}^2 = (shift\ of\ G_z)^2 + (shift\ of\ G_x)^2$$

$$\left(I_{yy_{new}}\right)_{new\,CG} = 6253620 - \frac{(12800+200)}{32.2} \times [(0.15)^2 + (0.95)^2] = 6253247\ ton - sec^2 - ft$$

از حالت f شکل داریم:

$$\left(I_{zz_{new}}\right)_{new\,CG} = \left(I_{zz_{new}}\right)_{old\,CG} - (M+m)h_{zz}^2$$

$$h_{zz}^2 = (shift\ of\ G_x)^2 + \left(shift\ of\ G_y\right)^2$$

$$\left(I_{zz_{new}}\right)_{new\,CG} = 6256032 - \frac{(12800+200)}{32.2} \times [(0.95)^2 + (0.16)^2] = 6255657\ ton - sec^2 - ft$$

با توجه به استخراج ممان اینرسی جدید حول محورهای مختلف در نهایت خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta}{g}k_{xx}^2 = I_{xx}$$

$$k_{xx} = \sqrt{\frac{I_{xx}g}{\Delta}} = \sqrt{\frac{315036 \times 32.2}{13000}} = 27.93\ ft$$

$$k_{yy} = \sqrt{\frac{I_{yy}g}{\Delta}} = \sqrt{\frac{6253247 \times 32.2}{13000}} = 124.45\ ft$$

$$k_{zz} = \sqrt{\frac{I_{zz}g}{\Delta}} = \sqrt{\frac{6255567 \times 32.2}{13000}} = 124.48\ ft$$

Also, as calculated earlier,
(G_x) New = 10.77 ft aft of ⊗
(G_y) New = 0.08 ft on starboard
(G_z) New =29.54 ft above baseline

فصل ۴: حرکت پیچ

همانطور که بیان شد اگر یک نیروی تحریک خارجی کشتی را از حالت تعادل خارج کند و سپس آن را رها کند یا با یک سرعت اولیه از حالت تعادل خارج شود، کشتی حول محور x یا y می‌تواند حرکت هارمونیک ساده داشته باشد. نوسان حول محور y همان حرکت پیچ است. از طرف دیگر بیان شد که در حرکت دورانی مانند پیچ بجای نیروها باید بر ممان‌های وارد بر کشتی تأکید شود. همانند حالت حرکت هیو در اینجا نیز چهار عامل ممان در حرکت پیچ و رول وجود دارند:

۱) ممان اینرسی ۲) ممان میرایی ۳) ممان بازگرداننده ۴) ممان تحریک

معادله حرکت پیچ را می‌توان به صورت مقابل نوشت: $a\frac{d^2\theta}{dt^2} + b\frac{d\theta}{dt} + c\theta = M_o \cos\omega_e t$

الف) ممان اینرسی = $a\frac{d^2\theta}{dt^2}$ که در آن a ممان اینرسی جرم مجازی و $\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{dt}^2}$ شتاب زاویه‌ای حرکت پیچ است.

ب) ممان میرایی = $b\frac{d\theta}{dt}$ که در آن b ضریب ممان میرایی و $\frac{d\theta}{dt}$ سرعت زاویه‌ای است. باز هم همانند حرکت هیو، این ضریب بطور خطی متناسب با سرعت زاویه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

ج) ممان بازگرداننده $\mathrm{c}\theta$ که در آن c ضریب ممان بازگرداننده و θ جابجایی زاویه‌ای حرکت پیچ است. باز هم همانند حرکت هیو، این ضریب بطور خطی متناسب با زاویه در نظر گرفته می‌شود. البته این برای زوایای کوچک پیچ صحیح است.

د) ممان تحریک = $M_o \cos\omega_e t$ در نظر گرفته می‌شود که توسط فرکانس برخورد ω_e ایجاد می‌گردد.

اگر ما بتوانیم مقادیر مختلف M_o , c , b, a را معلوم کنیم، می‌توانیم حرکت پیچ شناور را توصیف کنیم. باید تأکید شود که این ضرایب در حرکات هیو و پیچ و رول با یکدیگر متفاوت هستند لذا باید هریک بطور مجزا محاسبه گردند.

- **تعیین ضرایب حرکت پیچ**

ممان اینرسی جرم مجازی حرکت پیچ (a) برابر است با ممان اینرسی حرکت پیچ بعلاوه ممان اینرسی جرم افزوده حرکت پیچ چنانکه:

$$a = I_{yy} + \delta I_{yy} = \frac{\Delta}{g}k_{yy}^2 + \delta I_{yy}$$

که $\delta\mathrm{I}_{\mathrm{yy}}$ ممان اینرسی جرم افزوده حرکت پیچ و k_{yy} شعاع ژیراسیون حرکت پیچ است. ممان اینرسی جرم مجازی حرکت پیچ (a) را می‌توان بصورت زیر نیز نوشت: $a = (virtual\,mass) \times (radius\,of\,gyration)^2 = (M + \delta M) \times k_{yy}^2 = \frac{\Delta'}{g}k_{yy}^2$

که $\frac{\Delta'}{\mathrm{g}}$ جرم مجازی است. ممان اینرسی جرمی حرکت پیچ I_{yy} را می‌توان با یک تخمین مناسب از ممان اینرسی مساحت زیر منحنی مساحت مقاطع عرضی بدست آورد که داریم: $I_{yy} \approx \rho\int_{-L/2}^{L/2} A(x)x^2dx$

که $A(x)$ مساحت مقطع عرضی در محل x می‌باشد. البته در اینجا فرض اساسی بر این بوده است که توزیع جرم کشتی با توزیع بویانسی آن یکسان است و همچنین فرض شده است که مرکز ثقل کشتی در مقطع میانی کشتی قرار دارد. از طرفی برای کشتی‌های تجاری معمولی می‌توان شعاع ژیراسیون حرکت پیچ را با یک تخمین مناسب از رابطه روبرو بدست آورد: $k_{yy} = 0.24L \quad to \quad 0.2L$

که L طول کشتی است. ممان اینرسی جرم افزوده حرکت پیچ را می‌توان به روش تجربی یا از روش تئوری نواری بدست آورد که در آن مقاطع کشتی با یکدیگر متفاوت باشند (به شکل واقعی کشتی نزدیکتر باشد). ممان اینرسی جرم افزوده از محاسبه جرم افزوده بدست می‌آید همانطور که ممان اینرسی کشتی از جرم کشتی بدست می‌آید. بنابراین داریم: $\delta I_{yy} = \int_{-L/2}^{L/2} a_n x^2 dx$ ، که a_n ممان اینرسی هریک از مقاطع کشتی است که قبلاً نحوه محاسبه آن ذکر شد و x فاصله هر مقطع از مرکز ثقل طولی (LCG) است. معادله را می‌توان به این صورت نوشت: $\delta I_{yy} = \rho\frac{\pi}{2}\int_{-L/2}^{L/2} Cx^2y^2dx$ ، که C ضریب جرم افزوده که از شکل ۴-۵۳ بدست می‌آید.

مثال) ممان اینرسی جرم افزوده کشتی مدل مثال اول را مشخص کنید.

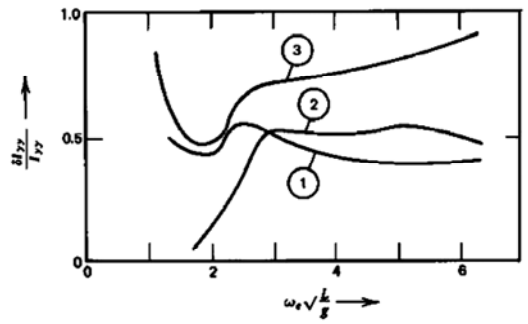
حل) از جدول زیر، ممان اینرسی جرم افزوده حرکت پیچ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$A = \int a_n\xi^2 d\xi = \frac{1}{3} \times s \times SUM = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 855.3 = 1368.5\ lb - ft - sec^2$$

Station No. ①	a_n [from Example 4.1] ②	ξ [ft] ③	ξ^2 [ft²] ④	$a_n\xi^2$ [slugs-ft²] ⑤	Simpson's Multiplier ⑥	Product ⑦
0	0.000	9.12	83.174	0.000	1	0.00
5	5.0011	4.32	18.662	93.515	4	374.06
10	5.0011	− 0.48	0.230	1.152	2	2.30
15	4.295	− 5.28	27.878	119.736	4	478.94
20	0.000	− 10.08	101.606	0.000	1	0.00
					SUM	855.30

Column Number	Description	Column Number	Description
①	Station Number	⑤	$a_n\xi^2$ = ② × ④ = Added Mass Moment of Inertia of Each Section
②	Added Mass for Each Section, a_n, obtained from ⑫ of Table 4.1.	⑥	Simpson's Multiplier
③	Lever Arm, ξ, distance of each section from LCG	⑦	Product = ⑤ × ⑥
④	Lever Arm Squared, ξ^2 = ③ × ③		

که S فاصله مقاطع عرضی است. شکل ۴-۶۹ ممان اینرسی افزوده حرکت پیچ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که (همانند جرم افزوده)، اینرسی افزوده حرکت پیچ تقریباً هم‌اندازه اینرسی واقعی کشتی است پس باید در محاسبات حرکت پیچ محاسبه شده و در نظر گرفته شود.



	L/B	B/T	C_B	C_{WP}	C_M
①	7.5	2.5	0.6	0.708	0.977
②	7.0	2.5	0.7	0.785	0.986
③	6.5	2.5	0.8	0.871	0.994

شکل ۴-۶۹: ممان اینرسی جرم افزوده بی‌بعد حرکت پیچ

- **ضریب میرایی حرکت پیچ**

ضریب میرایی حرکت پیچ نیز می‌تواند از روش تئوری نواری محاسبه شود که برای هر مقطع، محاسبه شده و سپس انتگرال‌گیری می‌شود. برای کل طول کشتی ضریب میرایی به صورت مقابل است: $b_{pitching} = \int_{-L/2}^{L/2} b_{n\ heaving} \times \xi^2 d\xi$

که b_n ضریب نیروی میرایی برای هر مقطع از طول و ξ فاصله هریک از مقاطع از مرکز ثقل طولی است.

مثال) مطلوبست محاسبه ضریب میرایی حرکت پیچ کشتی مدل مثال اول که اطلاعات مورد نیاز آن در جدول زیر وارد شده است.

Station No. ①	b_n (from Example 4.2) [lb-sec²] ②	ξ [ft] ③	ξ^2 [ft²] ④	$b_n\xi^2$ [lb-sec] ⑤	Simpson's Multiplier ⑥	Product ⑦
0	0.000	9.12	83.174	0.00	1	0.00
5	5.866	4.32	18.662	109.47	4	437.88
10	5.866	− 0.48	0.230	1.35	2	2.70
15	7.869	− 5.28	27.878	218.89	4	875.59
20	0.000	− 10.08	101.606	0.00	1	0.00
					SUM	1316.17

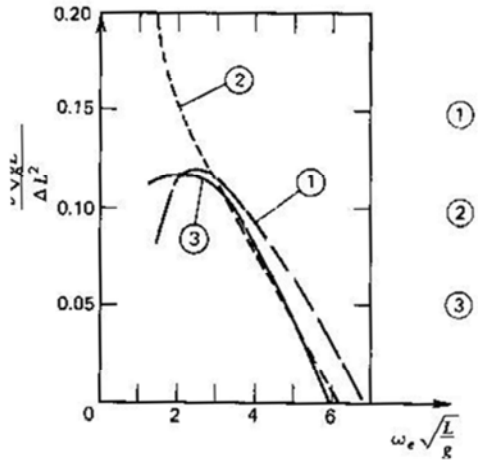
Column Number	Description	Column Number	Description
①	Station Number	④	Lever Arm Squared, ξ^2
②	Sectional Damping Coefficient. $b_n = \rho g^2 \bar{A}^2/\omega_e^3$ [$\bar{A}$ from Fig. 4.6]	⑤	$b_n\xi^2$ = ④ × ②
③	ξ = Lever Arm (i.e., distance of individual section from the LCG position)	⑥	Simpson's Multiplier
		⑦	Product = ⑤ × ⑥

حل) از جدول ۷-۴ ضریب میرایی حرکت پیچ عبارتست از:

$$b = \int b_n\xi^2 d\xi = \frac{1}{3} \times s \times SUM = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 1316.17 = 2105.9\ ft - lb - sec^2$$

که میرایی حرکت پیچ با عوامل زیر افزایش می‌یابد: ۱) افزایش عرض بدنه ۲) کاهش آبخور ۳) کاهش ضریب منشوری عمودی (یعنی افزایش حالت V شکل بودن).

به عبارت دیگر، کاهش سریع میرایی با افزایش فرکانس نوسان اتفاق می‌افتد. چنین فرکانس‌های بالایی هر چند که اصولاً بیرون از ناحیه تشدید اتفاق می‌افتد که در آن میرایی چندان اهمیتی ندارد. شکل ۴-۷۰ نشان‌دهنده ضریب میرایی بی‌بعد حرکت پیچ است که از طریق تجربی بدست آمده است.



	L/B	B/T	C_B	C_{WP}	C_M
①	7.5	2.5	0.6	0.706	0.977
②	7.0	2.5	0.7	0.785	0.986
③	6.5	2.5	0.8	0.871	0.994

شکل ۴-۷۰: ضریب میرایی بی‌بعد

- **ضریب ممان بازگرداننده**

ممان بازگرداننده حرکت پیچ را می‌توان به صورت روبرو بیان کرد: $c\theta = \rho g\theta = \int_{-L/2}^{L/2} x^2 y(x)dx = \rho g\theta I_Y$

که C ضریب ممان بازگرداننده و I_y ممان اینرسی سطح صفحه آبخور است. از آنجا که $BM_L = I_y / \nabla$ لذا داریم:

$$c\theta = \rho g\theta\nabla\overline{BM}_L \qquad c\theta = \rho g\nabla\overline{GM}_L$$

برای زوایای غلتش کوچک داریم: $c = \rho g\nabla\overline{GM}_L = \Delta\overline{GM}_L$

یادآوری می‌شود که ضریب ممان بازگرداننده را می‌توان بطور خطی متناسب با زاویه پیچ θ در نظر گرفت.

مثال) مطلوبست تعیین ممان بازگرداننده شناور مدل مثال اول؟

حل) اطلاعات مورد نیاز در جدول زیر داده شده است. ضریب ممان بازگرداننده عبارتست از:

$$c = \frac{1}{3}\times s \times SUM = \frac{1}{3}\times 4.8 \times 30191.4 = 48306.2\ ft - lb$$

Station No.	B_n [ft]	$C_n = \rho g B_n$ [lb/ft²]	ξ^2 [ft²]	$C_n\xi^2$ [lb]	Simpson's Multiplier	Product
0	0	0	83.174	0	1	0
5	2.592	161.78	18.662	3019.14	4	12,076.6
10	2.592	161.78	0.230	37.21	2	74.4
15	2.592	161.78	27.878	4510.10	4	18,040.4
20	0	0	101.606	0	1	0
					SUM	30,191.4

- **حرکت پیچ در آب آرام**

معادلات حرکت پیچ در آب آرام عبارتست از:

$$a\frac{d^2\theta}{dt^2}+b\frac{d\theta}{dt}+c\theta=0 \qquad or \qquad I'_{yy}\frac{d^2\theta}{dt^2}+b\frac{d\theta}{dt}+\Delta\overline{GM}_L.\theta=0 \qquad or \qquad \frac{d^2\theta}{dt^2}+\frac{b}{I'_{yy}}\frac{d\theta}{dt}+\frac{\Delta\overline{GM}_L}{I'_y}\theta=0$$

$$\ddot{\theta}+2\nu\dot{\theta}+\omega_\theta^2\theta=0 \quad , \quad 2\nu=\frac{b}{a}=\frac{b}{I'_{yy}} \quad , \omega_\theta^2=\frac{c}{a}=\frac{\Delta\overline{GM}_L}{I'_{yy}}$$

که در آن ω_θ فرکانس طبیعی حرکت پیچ است. توصیف پریود طبیعی حرکت پیچ به صورت مقابل است: $T_\theta=\frac{2\pi}{\omega_\theta}=2\pi\sqrt{\frac{I'_{yy}}{\Delta\overline{GM}_L}}$

حل معادله به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\theta=e^{-\nu t}(C_1\cos\omega_d t+C_2\sin\omega_d t) \qquad or \qquad \theta=e^{-\nu t}(A\sin(\omega_d t-\delta))$$

که در آن ω_d فرکانس میرایی بوده و برابر است با: $\sqrt{\omega_\theta^2-\nu^2}$. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، اگر $\nu\geq\omega_\theta$ باشد، حرکت نوسانی نخواهد بود و غیر نوسانی نامیده می‌شود. البته این مورد در مبحث شناورها و کشتی‌ها چندان کاربرد ندارد. پریود حرکت پیچ میراشونده را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$T_d=\frac{2\pi}{\omega_d}=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_\theta^2-\nu^2}}=T_\theta\frac{1}{\sqrt{1-\left(\nu/\omega_\theta\right)^2}} \qquad since \quad \omega_d=\sqrt{\omega_\theta^2-\nu^2}$$

که $T_\theta=\frac{2\pi}{\omega_\theta}$ همان پریود طبیعی حرکت پیچ است. از رابطه فوق ملاحظه می‌شود که پریود با افزایش میرایی افزایش می‌یابد هرچند که در حرکت کشتی‌ها، این ضریب میرایی بسیار کوچک است و بنابراین افزایش پریود قابل صرفنظر است.

مثال) یک کشتی با اطلاعات زیر مدنظر است. اگر ممان اینرسی جرم افزوده حدود ۹۰ درصد ممان اینرسی جرم کشتی باشد، پریود طبیعی حرکت پیچ را محاسبه کنید.

(L =500 ft , k_{yy} = 0.25 L , GM_L = 500 ft , Δ = 15000 t)

حل) پریود طبیعی حرکت نوسانی عبارتست از $\omega_\theta=\sqrt{\frac{c}{a}}$:

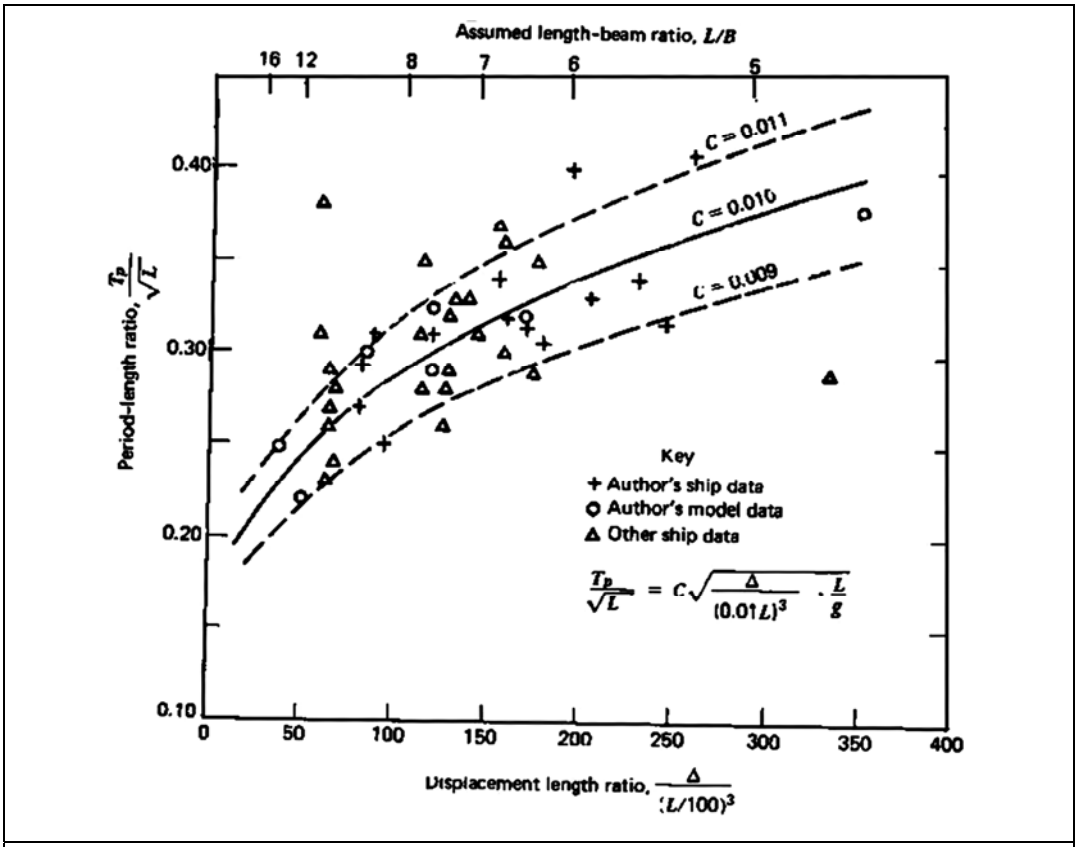
که در آن $a=I'_{yy}$, $c=\Delta.\overline{GM}_L$ و لذا داریم: $I'_{yy}=1.90I_{yy}=1.90\times\frac{\Delta}{g}k_{yy}^2$

$$\omega_\theta=\sqrt{\frac{\Delta\overline{GM}_L g}{1.9\Delta k_{yy}^2}}=\sqrt{\frac{500\times2.2}{1.90\times(125)^2}} \qquad \rightarrow \qquad T_\theta=\frac{2\pi}{\omega_\theta}=\frac{2\pi}{0.736}=852\ sec$$

- **پریودهای حرکت پیچ**

پریود طبیعی حرکت پیچ تقریباً کوچک و اصولاً نزدیک به پریود حرکت هیو و تقریباً نصف پریود حرکت رول است. البته پریود حرکت پیچ مهم‌تر از سایر عوامل است چراکه اثرات خیسی عرشه، اسلمینگ و شتابهای عمودی را به دنبال دارد. پریود پیچ را می‌توان با افزایش شعاع ژیراسیون k_{yy} افزایش داد که این کار نیز با جابجا کردن جرم‌ها به دو انتهای سینه و پاشنه قابل انجام است. در کشتی‌های تجاری تقریباً داریم: k_{yy} = 0.24 L ~ 0.26 L.

از طرف دیگر افزایش پایداری طولی باعث کاهش پریود نوسانات پیچ می‌شود. پر بودن شکل سینه و پاشنه، انحنا به سمت بیرون سینه و تخت بودن پاشنه اثرات میرایی قابل ملاحظه‌ای بر روی حرکات پیچ دارد. برای پرهیز از پدیده تشدید، پریود حرکت پیچ تا حد ممکن کوچک نگه داشته می‌شود چنانکه T_o / T_e خیلی کوچک باقی بماند و این عامل باعث می‌شود که کشتی با امواج دریا نوسان کند و حرکات پیچ آن با امواج هماهنگ شوند و لذا اثرات دینامیکی تا جای ممکن کاهش یابند. پریود حرکت پیچ مطابق شکل ۴-۷۱، هم برای کشتی‌های تجاری و هم نظامی به صورت تابعی از نسبت جابجایی به طول است. از منحنی عبوری از نقاط این شکل می‌توان رابطه زیر را ارائه کرد: $\frac{T_P}{\sqrt{L}}=C\sqrt{\frac{\Delta}{(0.01L)^3}.\frac{L}{g}}$



شکل ۴-۷۱: پریود پیچ به صورت تابعی از نسبت جابجایی به طول

که در آن C یک ثابت بوده و از ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۱ تغییر می‌کند. مقدار پریود حرکت پیچ برای چند نوع کشتی در جدول ۴-۱۳ ارائه شده است.

Type of ship	Δ [tons]	L [ft]	T_θ [from Fig. 4.23]
Icebreaker	5,301	279	5.3–6.5
Command	2,800	300	4.5–5.5
Submarine	6,900	410.5	5.2–6.4
Aircraft carrier	75,700	1040	7.4–9.0
Cruiser (heavy)	17,500	664	5.9–7.2
Cruiser (light)	14,600	600	5.8–7.1
Frigate	5,800	512.5	4.5–5.6
Destroyer	5,155	493	4.4–5.5
Destroyer escort	3,425	414.5	4.4–5.2
Battleship	59,000	860.0	7.6–9.0
Inshore fire support	1,500	245	4.0–5.0
Amphibious command	19,290	620	6.2–7.7
Amphibious assault	39,300	820	6.8–8.5
Amphibious cargo	20,700	575.5	6.2–7.8
Amphibious transport	15,200	465.0	6.2–7.7
Amphibious dock	16,900	570.0	5.9–7.1
Landing ship dock	11,270	510	5.4–6.7
Landing ship tank	8,392	522.3	5.2–6.1
Landing craft (utility)	360	115	3.3–4.1
Landing craft (mechanized)	113	75.6	2.9–3.4
Petrol gunboat	245	164.5	2.9–3.4
River petrol boat	8	32	1.2 2.2
Minesweeper	9,040	440	5.6–6.9
Ammunition ship	20,500	565	6.4–7.8
Store ship	15,500	459.2	6.2–7.7
Oiler	40,000	640	7.3–8.8
Destroyer tender	20,500	643	5.8–7.3
Hospital ship	15,400	496	6.0–7.5
Submarine tender	22,250	643.7	6.3–7.6

جدول ۴-۱۳

مثال) از اطلاعات مثال قبل مطلوبست محاسبه حرکت پیچ در زمان‌های صفر، ۱، ۲ و ۳ ثانیه در صورتیکه ضریب ممان میرایی حرکت پیچ برابر ۲۵۰۰۰۰۰ *ft.ton.sec* باشد و شرایط اولیه از قرار ($t = o$, $\theta = 5^\circ$, $\frac{d\theta}{dt} = o$) باشد:

حل) معادله حرکت میرایی پیچ در آب آرام به صورت زیر است: $\theta = 5^\circ \; and \; \frac{d\theta}{dt} = 0 \;\; at \;\; t = 0 \; sec$

$$\omega_\theta = \frac{2\pi}{T_\theta} = \frac{2\pi}{8.53} = 0.737 \; sec^{-1}$$

$$2\nu = \frac{b}{I'_{yy}} = \frac{2500000}{1.9 \times (15000/32.2) \times (125)^2} = 0.181 \; sec^{-1}$$

$$\omega_d = \sqrt{(0.737)^2 - (0.091)^2} = 0.731 \; sec^{-1} \qquad \rightarrow \qquad T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = 8.60 \; sec$$

از طرفی در $t = o$، داریم $\theta = 5^\circ$ چنانکه: $\theta = 5 = A \sin(-\delta) = -A \sin\delta$

با مشتق‌گیری از این رابطه داریم: $\frac{d\theta}{dt} = (e^{-\nu t} A \, \omega_d \cos(\omega_d t - \delta) \; A \sin(\omega_d t - \delta) - \nu e^{-\nu t})$

و در $t = o$ داریم $d\theta / dt = o$ چنانکه: $0 = A \, \omega_d \cos(-\delta) - \nu A \sin(-\delta)$

$$\tan\delta = -\frac{\omega d}{\nu} = -\frac{0.731}{0.090} = -8.12 \quad \rightarrow \quad \delta = -84.8^\circ \; or \; -1.48 \; rad \quad \rightarrow \quad A = -\frac{5}{\sin\delta} = 5.021$$

در نهایت معادله حرکت پیچ را می‌توان به صورت روبرو نوشت: $\theta[rad] = e^{0.091t} \times 5.021 \sin(0.731t + 1.48)$

با جاگذاری مقادیر مختلف t در این معادله، جدول زیر بدست می‌آید:

Period [sec]	t [sec]	θ [rad]	θ [deg]
0	0	0.0873	5
1	8.6	0.0402	2.30
2	17.2	0.0183	1.05
3	25.8	0.0082	0.48

- **ممان تحریک حرکت پیچ**

ممان تحریک حرکت پیچ نیز بر اثر ممان غیرمتعادل ناشی از امواج حول محور عرضی کشتی بوجود می‌آید همانند حرکت هیو، آن را می‌توان بوسیله توزیع فشار هیدرواستاتیک بدست آورد چنانکه داریم: $M_\theta = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} 2y\zeta x dx$

هم‌اکنون با جاگذاری معادله سطح آزاد به صورت $\zeta = \zeta_a \cos(kx \, coc\mu - \omega_e t)$ و فرض اینکه کشتی حول مقطع وسط آن متقارن است داریم:

$$M_\theta = \left[2\rho g \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y(x) \times \sin(kx \cos\mu) \, dx\right] \sin\omega_e t$$

هم‌اکنون فرض می‌کنیم که:

$$M_\theta = M_o \; \sin\omega_e t \qquad , \qquad M_\theta = M_o \; \cos(\omega_e t - \varepsilon_1)$$

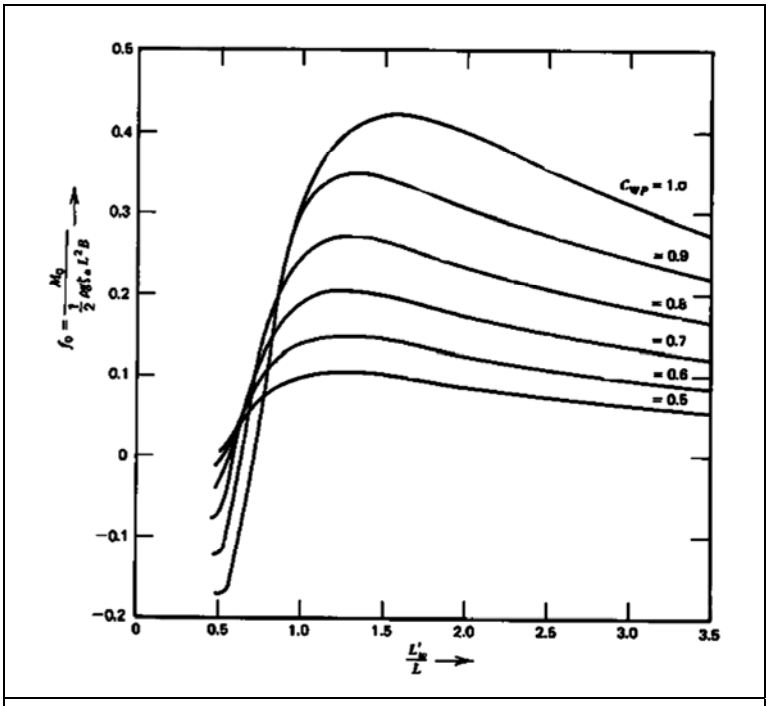
که M_o دامنه ممان تحریک و ε_1 زاویه فاز ممان تحریک نسبت به امواج است. چنانکه داریم:

$$M_o = \left[2\rho g \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y(x) \times \sin(kx \cos\mu) \, dx\right]$$

و $\varepsilon_1 = +90^\circ$، دامنه بی‌بعد ممان تحریک حرکت پیچ عبارتست از:

$$f_o = \frac{M_o}{\frac{1}{2}\rho g \zeta_a B L^2} = \frac{4}{BL^2} \int_{-L/2}^{L/2} y(x) \times \sin(kx \cos\mu) \, dx$$

توجه شود که در امواج عرضی ($\mu = 90^\circ$, 270°)، ممان تحریک حرکت پیچ (M_θ) صفر می‌شود. شکل ۴-۷۲ نشان می‌دهد که دامنه ممان تحریک پیچ (f_o) چگونه با نسبت طول موج مؤثر به طول کشتی و همچنین ضریب صفحه آبخور تغییر می‌کند.



شکل ۴-۷۲: ضریب ممان تحریک پیچ

مثال) با استفاده از اطلاعات مثال قبل، ممان تحریک حرکت پیچ را بدست آورید. اطلاعات مورد نیاز در جدول زیر ارائه شده است.

Station No. ①	$y = B_n$ [ft] ②	ξ [ft] ③	$y\xi$ [ft²] ④	$k\xi\cos\mu$ [−] ⑤	$\sin(k\xi\cos\mu)$ [−] ⑥	$y\xi\sin(k\xi\cos\mu)$ [ft²] ⑦	Simpson's Multiplier ⑧	Product [ft²] ⑨
0	0	9.6	0	−1.570	−1.000	0.000	1	0.00
5	1.296	4.8	6.22	−0.785	−0.707	−4.400	4	−17.59
10	1.296	0	0	0	0	0.000	2	− 0.00
15	1.296	−4.8	−6.22	0.785	0.707	−4.400	4	−17.59
20	0	−9.6	0	1.570	1.000	0	1	0.00
							SUM	−35.18

Column Number	Description	Column Number	Description
①	Station Number		$\cos\mu = \cos 120^\circ = -0.5$
②	Half-Breadths of Waterplane	⑥	sin ⑤
③	Distance from LCG, ξ	⑦	$y\xi\sin(k\xi\cos\mu) = \xi y \sin k$
④	$y\xi$	⑧	Simpson's Multiplier
⑤	$k\xi\cos\mu$, where k = wave number $= 2\pi/L_w = 2\pi/19.2 = 0.327$	⑨	Product = ⑦ × ⑧

حل) مقدار انتگرال عبارتست از: $\left(\frac{1}{3}\right)(4.8)(-35.18) = -56.288\ ft^2$

بنابراین دامنه بی‌بعد ممان تحریک برابر است با: $f_o = \frac{4}{BL^2}(integral) = \frac{4}{2.592\times(19.2)^2}\left(-56.288\right) = -0.2356$

و دامنه ممان عبارتست از: $M_o = \frac{1}{2}\rho g \zeta_a B L^2 f_o = \left(\frac{1}{2}\right)(1.9384)(32.2)(0.2)(2.592)\times[(19.2)^2](-0.2356) = -1405.12\ ft-lb$

با استفاده از محاسبات می‌توان نتایج زیر را ارائه نمود:

الف) هنگامیکه طول موج مؤثر کمتر از نصف طول کشتی است، ممان پیچ کوچ است.

ب) هنگامیکه طول موج مؤثر برابر طول کشتی است، ممان پیچ بزرگ است. این ممان به حداکثر مقدار خود می‌رسد که وابسته به شکل بدنه است (بخصوص ضریب صفحه آبخور) برای $1 < L'_w/L < 1.5$.

ج) برای طول موج مؤثر بی‌نهایت، ممان پیچ نزدیک به صفر می‌شود چراکه برای یک ارتفاع موج ثابت و طول بی‌نهایت، شیب موج تقریباً ناپدید می‌شود.

- **حرکت پیچ در امواج**

معادله حرکت پیچ در امواج به صورت زیر است:

$$I'_{yy}\frac{d^2\theta}{dt^2}+b\frac{d\theta}{dt}+c\theta=M_o\ \sin\omega_e t \qquad or \qquad or \quad I'_{yy}\ \frac{d^2\theta}{dt^2}+\frac{b}{I'_{yy}}\frac{d\theta}{dt}+\frac{\Delta\overline{GM}_L}{I'_{yy}}\theta=\frac{M_o}{I'_{yy}}\ \sin\omega_e t$$

این معادله شبیه معادله حرکت هیو است و منتج به نتیجه مشابه زیر می‌شود: $\theta_a=\theta_{st}\,.\,\mu_\theta$

که θ_{st} زاویه پیچ استاتیک ناشی از اعمال حداکثر ممان پیچ است چنانکه:

$$\theta_{st}=\frac{M_o}{c}=\frac{M_o}{\Delta\overline{GM}_L} \qquad , \qquad \mu_\theta=\frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2+4\kappa^2\Lambda^2}}$$

و این عبارت، ضریب بزرگنمایی پیچ[1] می‌باشد چنانکه: $\Lambda=\frac{\omega_e}{\omega_\theta}$ و $\kappa=\frac{\nu}{\omega_\theta}$,

حل معادله بصورت زیر می‌باشد:

$$\theta=\ \theta_a\ sin(\omega_e t-\varepsilon_2) \qquad since \quad C=\theta_a$$

$$\theta=\frac{\theta_{st}}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2+4\kappa^2\Lambda^2}}\,sin(\omega_e t-\varepsilon_2)$$

می‌بینیم که ε_2 زاویه فاز بین ممان تحریک و حرکت پیچ است و $tan\,\varepsilon_2=\frac{2\kappa\Lambda}{1-\Lambda^2}$

همان نوع از منحنی پاسخ مانند هیو بدست می‌آید و حداکثر دامنه پیچ وقتی بدست می‌آید که: $\Lambda=1-2\kappa^2$

مجدداً داریم که برای سیستم‌های با ضریب میرایی کوچک، پدیده تشدید می‌تواند در $\Lambda\approx 1$ اتفاق افتد. از طرفی می‌توان ملاحظه کرد که برای مقادیر معمولی κ برای شکل بدنه کشتی‌ها، پدیده تشدید می‌تواند در $\Lambda=0.85\sim 0.9$ اتفاق بیافتد. زاویه فاز کل بین موج و حرکت پیچ عبارتست از:

$$\varepsilon=\varepsilon_1+\ \varepsilon_2=90^\circ+\varepsilon_2$$

که در آن $-180\le\varepsilon_2\le o$ می‌باشد.

مثال) یک کشتی با اطلاعات زیر موجود است:

(L = 450 ft , B = 70 ft , GM_L = 450 ft , C_{wp} = 0.8 , k_{yy} = 110 ft , $\mu = 180^\circ$ (ahead sea) , ζ_a = 10 ft , ρ = 1.99 lb-sec^2 / ft^4 , ω_e = 1.18 rad /sec)

فرض کنید که ممان اینرسی جرم افزوده ۵۴ درصد ممان اینرسی جرم کشتی و ضریب میرایی بی‌بعد حرکت پیچ $\left(b\sqrt{g\overline{l}}/\Delta L^2\right)$ برابر ۰/۱۵۴ باشد. از شکل داریم دامنه بی‌بعد ممان پیچ برابر است با: $f_o=\frac{M_o}{\frac{1}{2}\rho g\zeta_a BL^2}=0.25$

مطلوبست هر دو پارامتر دامنه ممان پیچ و تفاوت فاز بین موج و حرکت پیچ؟ شکلی را ترسیم کنید که نشان دهنده حرکت موج، ممان تحریک پیچ و حرکت پیچ شناور به صورت تابعی از $\omega_e t$ باشد.

حل) ممان اینرسی حرکت پیچ برابر است با: $I'_{yy}=I_{yy}+\delta I_{yy}=I_{yy}+0.54I_{yy}=1.54I_{yy}$

یا $I'_{yy}=1.54\frac{\Delta}{g}k_{yy}^2=1.54\times\frac{12500}{32.2}\times(110)^2=7233000\,ton-sec^2-ft$

از آنجا که $b\sqrt{g\overline{l}}/\Delta L^2=0.154$، ضریب میرایی پیچ *(b)* برابر می‌شود با:

$$b=\frac{0.154\Delta L^2}{\sqrt{gL}}=\frac{0.154(12500)(450)^2}{\sqrt{32.2\times 450}}=3240000\,ft-ton-sec$$

1 - pitch magnification factor

دامنه حرکت پیچ M_o برابر است با:

$$M_o = \frac{1}{2}\rho g \zeta_a B L^2 f_o = 0.25\left(\frac{1}{2}\right)(1.99)(32.2)(10)(450)^2 \times 70 = 506250\ ft-tons\ \ (after\ dividing\ by\ 2240)$$

$$\theta_{st} = \frac{M_o}{c} = \frac{M_o}{\Delta \overline{GM}_L} = \frac{506250}{12500 \times 450} = 0.09\ rad \qquad 2\nu = \frac{b}{I'_{yy}} = \frac{3240000}{7233000} = 0.448$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{c}{a}} = \sqrt{\frac{12500\times450}{7233000}} = 0882\ rad/sec \qquad \kappa = \frac{\nu}{\omega_\theta} = \frac{0.224}{0.882} = 0.254$$

$$\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\theta} = \frac{1.18}{0.882} = 1.338 \qquad \frac{\theta_a}{\theta_{st}} = \mu_\theta = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4\kappa^2\Lambda^2}} = \sqrt{0.624 + 4 \times (0.254)^2 \times (1.338)^2} = 0.960$$

$$\theta_a = \mu_\theta \,.\, \theta_{st} = 0.960 \times 0.09 = 0.086\ rad\ (or\ 4.93^\circ)$$

زاویه فاز بین حرکت موج و حرکت پیچ برابر است با: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ ، که ε_1 زاویه فاز بین حرکت موج و ممان تحریک پیچ و ε_2 زاویه فاز بین ممان تحریک پیچ و حرکت پیچ است. داریم: $\varepsilon_1 = 90^\circ$:

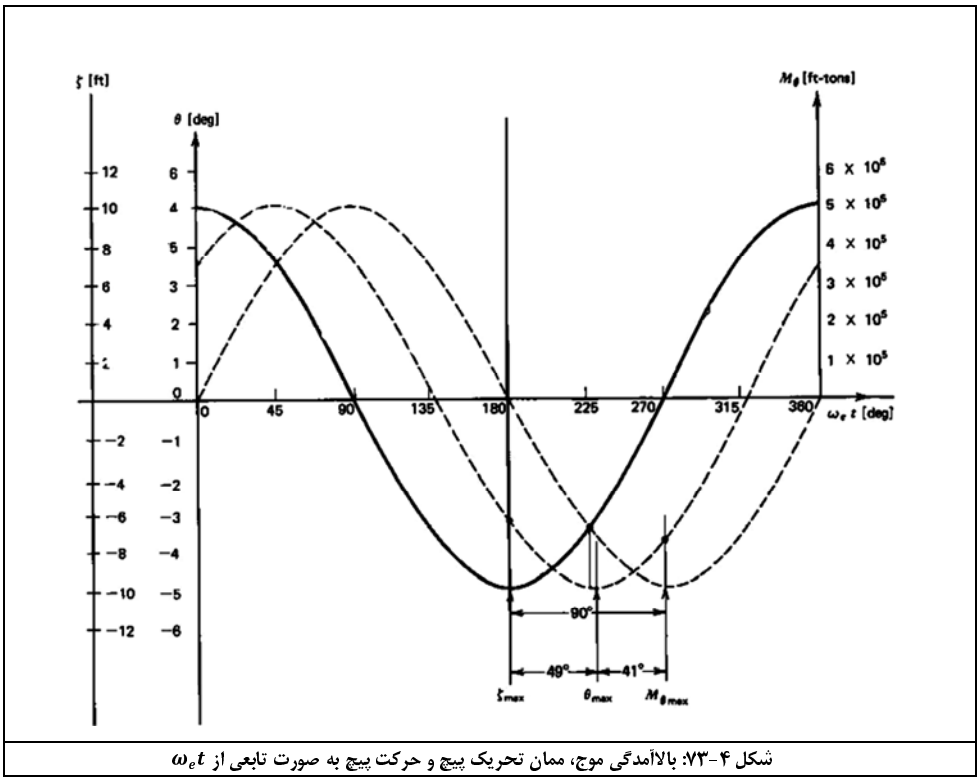
$$\varepsilon_2 = tan^{-1}\frac{2\kappa\Lambda}{1-\Lambda^2} = tan^{-1}\left[\frac{2\times0.254\times1.338}{1-(1.338)^2}\right] = -41^\circ \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 90^\circ - 41^\circ = 49^\circ$$

معادله موج عبارتست از $\zeta = \zeta_a\ cos(\omega_e t)$ و معادله ممان تحریک پیچ برابر است با:

$$M_\theta = M_o\ sin\,\omega_e t \quad , \quad M_\theta = M_o\ cos(\omega_e t - 90^\circ)$$

معادله حرکت پیچ به صورت زیر بیان می‌شود: $\theta = \theta_a\ sin(\omega_e t + 41^\circ)$, $\theta = \theta_a\ sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$

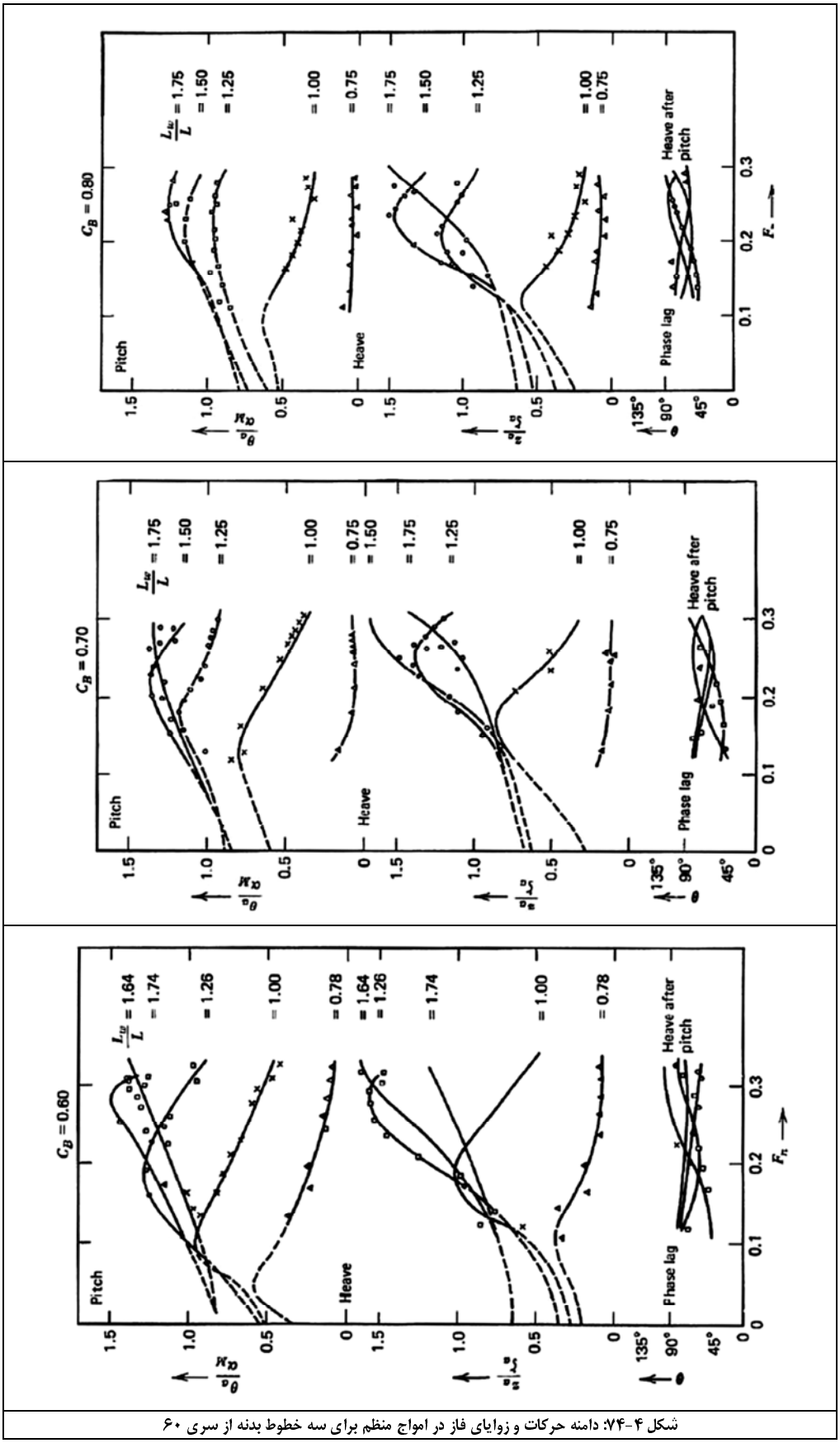
رابطه فاز بین حرکت موج و ممان تحریک پیچ برابر ۹۰ درجه است که حداکثر ممان تحریک بعد از حداکثر نقطه حرکت موج به اندازه ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. به همین ترتیب، ارتباط فاز بین ممان تحریک و حرکت پیچ برابر ۴۱ درجه است چنانکه حداکثر نقطه حرکت موج در ۴۱ درجه زودتر از نقطه حداکثر ممان پیچ اتفاق می‌افتد. بنابراین حداکثر حرکت پیچ انتظار می‌رود که در زاویه ۴۱ – ۹۰ درجه یا همانطور که در شکل ۴–۷۳ نشان داده شده در ۴۹ درجه بعد از حرکت موج اتفاق افتد.



شکل ۴-۷۳: بالاآمدگی موج، ممان تحریک پیچ و حرکت پیچ به صورت تابعی از $\omega_e t$

نتایج آزمایشات روی سه مدل کشتی از سری ۶۰ برای حرکات هیو و پیچ در حرکت در موج منظم از روبرو برای سرعتهای مختلف به صورت بی‌بعد در شکل ۴-۷۴ نشان داده شده است. این شکل همچنین نشان‌دهنده رابطه فاز بین حرکات پیچ و هیو است که حرکت هیو از حرکت پیچ تبعیت می‌کند. آنچه باید متذکر شود، تفاوتهای قابل ملاحظه بین دامنه حرکات در این سه نوع بدنه است. در بیشترین موارد برای $C_B = 0.8$، دامنه حرکت پیچ کوچکترین مقادیر را دارد. همچنین دامنه حرکت هیو برای این بدنه، کوچکترین مقدار است. کاهش حرکات هیو و پیچ کاملاً مشهود است بخصوص برای حالتی که طول موج، برابر یا کوچکتر از $1.25\,L$ باشد. پدیده قابل توجه دیگر، تغییرات کوچک در تفاوت فاز است. جدول زیر ارائه کننده خلاصه‌ای از مقادیر تقریبی فرکانس طبیعی است که برای مدل سری ۶۰ بدست آمده است.

F_n	$C_B = 0.60$		$C_B = 0.70$		$C_B = 0.80$	
	ω_z [sec^{-1}]	ω_θ [sec^{-1}]	ω_z [sec^{-1}]	ω_θ [sec^{-1}]	ω_z [sec^{-1}]	ω_θ [sec^{-1}]
0.15	7.2	7.0	6.5	6.9	6.2	6.7
0.20	7.0	7.1	6.5	6.7	6.2	6.5
0.25	7.0	7.2	6.7	6.9	6.2	6.6
0.30	7.1	7.2	6.8	6.8	6.2	6.9



شکل ۴-۷۴: دامنه حرکات و زوایای فاز در امواج منظم برای سه خطوط بدنه از سری ۶۰

فصل ۵: حرکت رول

معادله حرکت رول همانند حرکت پیچ است و به صورت مقابل بیان می‌شود: $a\frac{d^2\Phi}{dt^2} + b\frac{d\Phi}{dt} + c\Phi = M_o \cos\omega_e t$

که $a\frac{d^2\Phi}{dt^2}$ ممان اینرسی و a ممان اینرسی جرم مجازی حرکت رول و $\frac{d^2\Phi}{dt^2}$ شتاب زاویه‌ای حرکت رول و $b\frac{d\Phi}{dt}$ ممان میرایی و b ضریب ممان میرایی و $\frac{d\Phi}{dt}$ سرعت زاویه‌ای است. در حالت ساده شده، ممان میرایی به طور خطی متناسب با $\frac{d\Phi}{dt}$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین $c\Phi$ ممان بازگرداننده و c ضریب ممان بازگرداننده و Φ جابجایی زاویه‌ای حرکت رول است. باز هم همانند حرکت پیچ، ممان تحریک $M_o \cos\omega_e t$ به صورت فرکانس برخورد موج تعریف می‌شود. بنابراین اگر ضرایب مختلف معادله فوق مشخص شوند، معادله حرکت رول توصیف می‌گردد. البته باید توجه شود که ضرایب معادله رول با ضرایب معادله پیچ متفاوت هستند.

- **تعیین ضرایب حرکت رول**

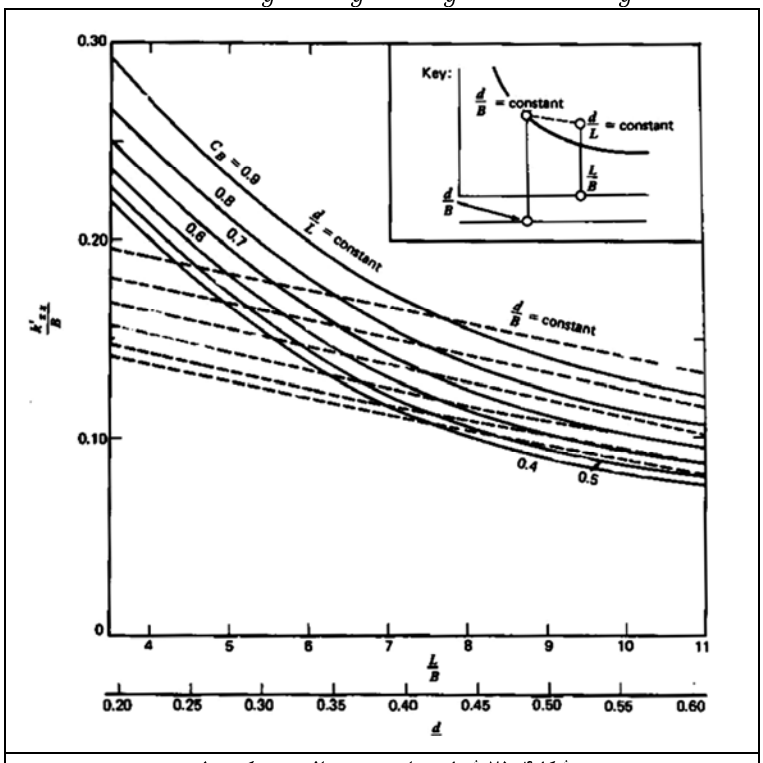
ممان اینرسی جرم مجازی حرکت رول برابر است با ممان اینرسی جرم واقعی کشتی بعلاوه ممان اینرسی جرم افزوده، بنابراین داریم:

$a = I_{xx} + \delta I_{xx} = \frac{\Delta}{g}k_{xx}^2 + \delta I_{xx}$ که k_{xx} شعاع ژیراسیون حرکت رول و δI_{xx} ممان اینرسی جرم افزوده حرکت رول است. مقدار ضریب a را می‌توان بصورت تجربی یا به صورت تحلیلی بدست آورد. نتایج بدست آمده از هر دو روش تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد که ممان جرم افزوده حرکت رول حدود ۲۰ درصد ممان اینرسی جرم واقعی حرکت رول است. ضریب a را می‌توان به این صورت بیان نمود:

$$a = I_{xx} + \delta I_{xx} = \frac{\Delta}{g}k_{xx}^2 + \frac{\delta\Delta}{g}k_{xx}^2 = \left(\frac{\Delta + \delta\Delta}{g}\right)k_{xx}^2 = \frac{\Delta'}{g}k_{xx}^2$$

که Δ' جابجایی مجازی کشتی در حرکت رول است: $\Delta' = \Delta + \delta\Delta$ که برابر است با حاصل‌جمع وزن مجازی و وزن واقعی کشتی. یادآوری می‌شود که اگر مقدار جرم افزوده حرکت رول در دسترس نباشد می‌توان آن را برابر ۲۰ درصد وزن واقعی کشتی در نظر گرفت. شکل ۴-۷۵ نشان‌دهنده نتایج تجربی شعاع ژیراسیون افزوده[1] است که به صورت زیر بکار برده می‌شود:

$$a = I_{xx} + \delta I_{xx} = \frac{\Delta}{g}k_{xx}^2 + \frac{\delta\Delta}{g}k_{xx}^2 = \frac{\Delta}{g}(k_{xx}^2 + k'^2_{xx}) = \frac{\Delta}{g}k''^2_{xx}$$



شکل۴-۷۵: شعاع ژیراسیون جرم افزوده حرکت رول

مقدار k_{xx} شعاع ژیراسیون کشتی حول محور x کشتی است و k'_{xx} شعاع ژیراسیون جرم افزوده حول محور x (طبق شکل ۴-۲۷) و k''_{xx} اغلب به صورت متناسب با عرض کشتی بیان می‌شود و در محدوده $0.33\,B \le k''_{xx} \le 0.45\,B$ است. از نتایج فعالیتهای تجربی انواع مختلفی از مدل کشتی‌ها، دو فرمول زیر برای تخمین شعاع ژیراسیون حرکت رول ارائه شده است:

1 - *added radius of gyration*

۱) **برای کشتی‌های تجاری معمولی:** $\left(\frac{k''_{xx}}{B}\right)^2 = f\left[C_B C_u + 1.10C_u(1-C_u)\left(\frac{H_e}{T}-1.20\right)+\frac{H_e^2}{B^2}\right]$

که در آن:

k''^2_{xx} : شعاع ژیراسیون مجازی حول محور x گذرنده از مرکز ثقل کشتی است.

C_B: ضریب بلوکی و C_u ضریب مساحت عرشه فوقانی است که به صورت مساحت عرشه تقسیم بر (طول × عرض) بیان می‌شود.

H_e: عمق مؤثر روبناسازی کشتی بوده و برابر است با: $D+\left(A/L_{pp}\right)$

D: عمق قالبی عرشه اصلی و A مساحت تصویر شده جانبی روبناسازی و عرشه‌های بالای عرشه اصلی است.

L_{pp}: طول بین دو عمود، T برابر آبخور قالبی و B عرض کشتی است.

f: به صورت زیر تعریف می‌شود: برای کشتی‌های مسافری، باری و باری – مسافری برابر ۰/۱۲۵ است. برای نفتکش‌ها برابر ۰/۱۳۳ و برای کشتی‌های صیادی صید وال برابر ۰/۱۷۷ و سایر کشتی‌های صیادی برابر ۰/۲ است.

۲) **برای کشتی‌های نظامی:** $\left(\frac{k''_{xx}}{B}\right)^2 = f\left[C_B C_u + 1.10C_e(1-C_B)\left(\frac{H_n}{d}-1.20\right)+\frac{H_n^2}{B_u^2}\right]$

که در آن B عرض قالبی کشتی، d آبخور متوسط و B_u حداکثر عرض زیر آب بدنه و C_e ضریب مساحت عرشه در معرض وزش باد[1] است.

$H_n = D + A_n/L_{pp}$ است که D عمق از بالای کیل تا عرشه فوقانی و A_n مساحت تصویر شده جانبی نیم‌عرشه سینه[2]، زیر پل فرماندهی و زیر توپخانه است.

f برای نبردناوها[3] برابر ۰/۱۷۷ و برای ناوشکن‌ها، ناوچه‌ها و قایق‌های اژدرافکن برابر ۰/۱۷۲ است. باید خاطر نشان شود که تخمین بسیار دقیق ممان اینرسی افزوده حرکت رول چندان مهم نیست چراکه ممان اینرسی جرم افزوده حرکت رول بسیار کوچکتر از ممان اینرسی جرم واقعی کشتی است.

- **ضریب ممان میرایی**

نیروی میراکننده وارد بر کشتی در حرکت رول را می‌توان بصورت زیر نام برد:

۱) تولید موج در حرکت رول ۲) نیروی اصطکاکی آب روی سطح بدنه کشتی ۳) نیروی بیلج کیل و سایر ضمائم بدنه

۴) مقاومت بین کشتی و هوا ۵) اتلاف انرژی ناشی از تولید گرما در حین انجام حرکت رول ۶) کشش سطحی

مقادیر عوامل ۱ و ۲ و ۳ از عوامل فوق بسیار مهم هستند در حالیکه عوامل ۴ و ۵ و ۶ اثرات ناچیزی دارند. همانند حرکات هیو و پیچ، ضریب میرایی حرکت رول نیز بسیار مهم است بخصوص که ضریب میرایی حرکت رول نسبتاً کوچک است و ضریب بزرگنمایی باید به مقادیر بین ۵ و ۱۰ برسد. ضریب میرایی (b) ناشی از تولید موج در حرکت رول را می‌توان از روش تئوری نواری نیز بدست آورد. ضریب میرایی در واحد طول را می‌توان به این صورت بیان کرد:

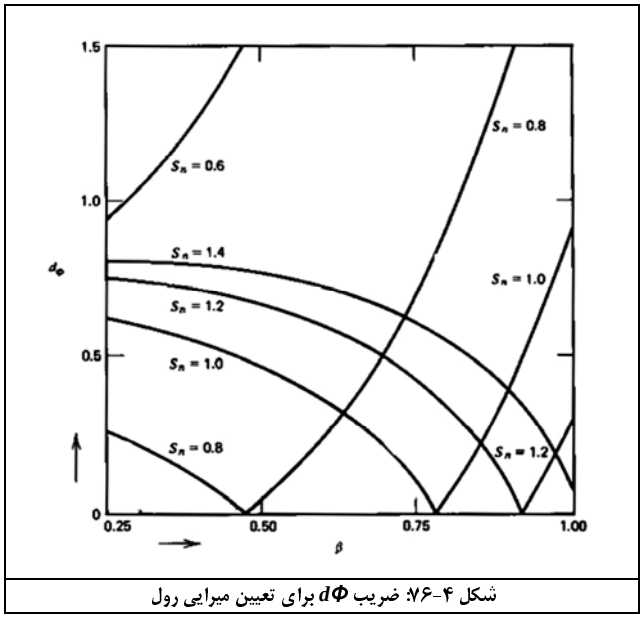
$$b_n = \frac{\rho g^2}{\omega_e^3}\left(\frac{B_n}{2}\right)^2 \bar{A}_\Phi^2$$

که در آن $\bar{A}_\Phi$ به صورت مقابل تعریف می‌شود: $\bar{A}_\Phi = \frac{\zeta_a}{\Phi_a\left(B_n/2\right)} = d_\Phi\left(\frac{\omega_e^2 B_n}{2g}\right)^2$

با استفاده از تئوری نواری، ضریب ممان میرایی کل به صورت روبرو بیان می‌شود: $b = \int b_n d\xi$

شکل ۴-۷۶ نشان‌دهنده نمودار $d\Phi$ برای مقاطع مختلف فرم لوئیس بر حسب ضریب مقطع ویژه β و S_n است که: $S_n = \frac{B_n}{2T_n}$

1 - exposed deck area coefficient
2 - forcastle
3 - battle ship



شکل ۴-۷۶: ضریب $d\Phi$ برای تعیین میرایی رول

مقادیر شکل فوق برای $\frac{\omega_e^2 B_n}{2g}$ کمتر از ۰/۳ صادق است.

مثال) با استفاده از مقادیر مثال اول، مطلوبست محاسبه ضریب میرایی حرکت رول. مقادیر مربوطه در جدول زیر ارائه شده است.

Station No. ①	B_n [ft] ②	B_n^2 [ft²] ③	$\frac{B_n^2}{4}$ [ft²] ④	S_n ② / 2.288 ⑤	β_n [−] ⑥	d_ϕ (from Fig.4.28) ⑦	$\bar{A}_\phi$ ⑧	$\bar{A}_\phi^2$ ⑨	b_n ⑩	Simpson's Multiplier ⑪	Product ⑫
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	2.592	6.718	1.680	1.133	0.993	0.50	2.9157	8.5025	258	4	1032
10	2.592	6.718	1.680	1.133	0.993	0.50	2.9159	8.5025	258	2	516
15	2.592	6.718	1.680	1.133	0.993	0.50	2.9159	8.5025	258	2	1032
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
										SUM	2580

حل) $b = \int b_n d\xi$ و $b_n = \frac{\rho g^2}{\omega_e^3}\left(\frac{B_n}{2}\right)^2 \bar{A}_\Phi^2$ و $b = \frac{1}{3} \times 5 \times SUM = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 2580 = 4128 ft - lb - sec$

یادآوری می‌شود که برای ستون ۱۰ داریم: $\bar{A}_\Phi = d_\Phi \left(\frac{\omega_e^2 B_n}{2g}\right)^2 = \left[\frac{(4.811)^2 B_n}{64.4}\right]^2 = 0.1292\, B_n^2 d_\Phi$

$$b_n = \frac{\rho g^2}{\omega_e^3}\frac{B_n^2}{4}\bar{A}_\Phi^2 = \frac{1.94(32.2)^2}{(4.811)^3 \times 4} B_n^2 \bar{A}_\Phi^2 = 4.526 B_n^2 \bar{A}_\Phi^2 = 4.526 \quad \big((3) \times (9)\big)$$

از آنجا که اثرات اصطکاکی نقش مهمی در میرایی حرکت رول دارد، میرایی صرفاً ناشی از موج‌سازی نمی‌تواند چندان دقیق باشد. همچنین ضمائم بدنه مانند بیلج کیل نیز با تولید جریانهای گردابه‌ای می‌تواند نقش مؤثری در میرایی حرکت رول ایفا کند. از طرف دیگر، سرعت حرکت شناور نیز بسیار اهمیت دارد. ضرایب میرایی رول کشتی در حال حرکت می‌تواند تا ۳ برابر آن ضریب برای یک کشتی ساکن باشد. یعنی سرعت کشتی اثر مثبت بر میرایی حرکت رول دارد. در آخر نیز متذکر می‌شود که اگر زوایای حرکت رول، بزرگ باشد، قانون ارتباط خطی برای ممان میرایی رول $(b \cdot d\Phi/dt)$ دیگر اعتبار ندارد.

- **ضریب ممان بازگرداننده**

ممان بازگرداننده کشتی در حرکت رول، یک ممان بازگرداننده عرضی در هر زاویه است و به صورت مقابل بیان می‌شود: $c\Phi = \Delta\overline{GZ}$.

برای زوایای کوچک (Φ بر حسب رادیان) داریم: $c\Phi \cong \Delta\overline{GM}_T \sin\Phi \cong \Delta\overline{GM}_T = \rho g \Delta\overline{GM}_T \Phi$ و $c = \rho g \Delta\overline{GM}_T$.

البته این رابطه فقط برای زوایای رول کوچک صادق است (یعنی برای زوایای رول تا ۱۰ درجه به شرطی که منحنی ممان بازگرداننده بطور خطی تا زاویه ۱۰ درجه تغییر کند).

- **حرکت رول در آب آرام**

معادله حرکت رول در آب آرام عبارتست از: $a\frac{d^2\Phi}{dt^2}+b\frac{d\Phi}{dt}+c\Phi=0$.

با جاگذاری ضرایب $a\ ,b\ ,c$ داریم: $I'_{xx}\frac{d^2\Phi}{dt^2}+b\frac{d\Phi}{dt}+\Delta\overline{GM}_T\Phi=0$ و $\frac{d^2\Phi}{dt^2}+2\nu\frac{d\Phi}{dt}+\omega_\Phi^2\Phi=0$ و $2\nu=\frac{b}{a}=\frac{b}{I'_{xx}}$

$$T_\Phi=\frac{2\pi}{\omega_\Phi}=2\pi\sqrt{\frac{I'_{xx}}{\Delta GM_T}}. \quad \text{و} \quad \omega_\Phi^2=\frac{c}{a}=\frac{\Delta\overline{GM}_T}{I'_{xx}}$$

با حل آخرین معادله دیفرانسیل، داریم: $\Phi=e^{-\nu t}(C_1\cos\omega_d t+C_2\sin\omega_d t)$

یا می‌توان این حل را به این صورت نیز نوشت: $\Phi=e^{-\nu t}A\sin(\omega_d t-\delta)$ و $\omega_d=\sqrt{\omega_\Phi^2-\nu^2}$

هم‌اکنون می‌توانیم اثرات میرایی حرکت رول بر روی پریود حرکت را مشاهده کنیم. پریود حرکت رول میراشونده عبارتست از:

$$T_d=\frac{2\pi}{\omega_d}=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_\Phi^2-\nu^2}}=T_\Phi\frac{1}{\sqrt{1-\left(\nu/\omega_\Phi\right)^2}}$$

که T_Φ پریود حرکت بدون میرایی است. از این رابطه مشخص می‌شود که با افزایش میرایی، پریود حرکت افزایش می‌یابد ولی این افزایش قابل صرفنظر است چراکه میرایی حرکت رول بسیار کوچک است.

مثال) یک کشتی به طول ۴۵۰ فوت دارای تناژ ۱۲۵۰۰ تن و شعاع ژیراسیون حول محور طولی برابر ۳۰/۸ فوت است. ارتفاع متاسنتری عرضی ۵/۷۹ فوت است. مطلوبست پریود طبیعی و پریود میراشونده حرکت رول در صورتی که ممان میرایی حرکت رول برابر ۳۲۰۰۰ *ft-ton-sec* و مقدار جرم افزوده برابر ۲۰ درصد جرم واقعی کشتی در نظر گرفته شود.

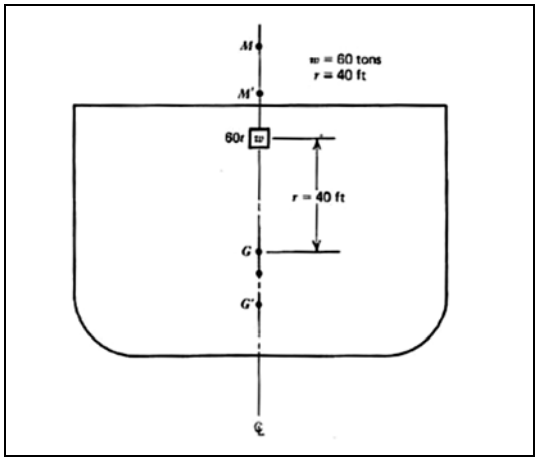
حل) پریود طبیعی حرکت رول طبق فرآیند زیر محاسبه می‌گردد:

$$\omega_d=\sqrt{\frac{\Delta\overline{GM}_T}{I'_{xx}}} \qquad I'_{xx}=\frac{\Delta'}{g}k_{xx}^2=\frac{1.2\Delta}{g}k_{xx}^2 \qquad \rightarrow \qquad \omega_\Phi=\sqrt{\frac{\Delta\overline{GM}_T g}{1.2\Delta k_{xx}^2}}=0.405\ sec^{-1}$$

$$T_\Phi=\frac{2\pi}{\omega_\Phi}=\frac{2\pi}{0.405}=15.51\ sec \qquad \rightarrow \qquad \nu=\frac{b}{2I'_{xx}}=0.0362\ sec^{-1}$$

پریود میراشونده حرکت رول نیز برابر است با: $T_d=15.51\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{0.0362}{0.405}\right)^2}}=15.52\ sec$

مثال) اطلاعات یک کشتی مطابق شکل ۴-۷۷ داده شده است، مطلوبست محاسبه T_Φ وقتی که یک بار ۶۰ تنی از فاصله ۴۰ فوتی بالای مرکز ثقل حذف شود. فرض می‌شود که GM_T بدون تغییر باقی بماند و ممان اینرسی جرم افزوده حرکت رول به مقدار ۲۰ درصد ممان اینرسی جرم کشتی باشد.



شکل ۴-۷۷: تغییر شعاع ژیراسیون ناشی از حذف وزنه

حل) از آنجا که میرایی در این حرکت وجود ندارد داریم: $I'_{xx}\frac{d^2\Phi}{dt^2}+\Delta\overline{GM}_T\Phi=0$ یا $\frac{d^2\Phi}{dt^2}+\frac{\Delta\overline{GM}_T}{I'_{xx}}\Phi=0$

پریود طبیعی بصورت مقابل بدست می‌آید: $T_\Phi = \frac{2\pi}{\omega_\Phi} = 2\pi\sqrt{\frac{I'_{xx}}{\Delta\overline{GM}_T}}$ و $\omega_\Phi^2 = \frac{\Delta\overline{GM}_T}{I'_{xx}}$.

که با توجه به مقادیر Δ و GM_T داریم: $I'_{xx} = 810000$ ولی I_{xx} $I'_{xx} = 1.2$ چراکه ممان اینرسی جرم افزوده برابر ۲۰ درصد ممان اینرسی جرم کشتی است. بنابراین داریم: $I_{xx} = 675000\ ton\text{-}sec^2 - ft$.

مقدار جدید I_{xx} حول مرکز ثقل اولیه کشتی عبارتست از:

$$I_{xx} = I_{xx} - mr_{xx}^2 = 675000 - \frac{60}{32.2} \times (40)^2 = 675000 - 2981 = 672019\ ton\,mass - sec^2 - ft$$

$$m = \frac{w}{g} = \frac{60}{32.2} \quad , \quad r_{xx} = r = 40\,ft \quad , \quad \overline{CG} = \frac{w \times r}{\Delta - w} = \frac{60 \times 40}{19940} = 0.12\,ft$$

و مقدار جدید I_{xx} حول مرکز ثقل جدید عبارتست از: $(I_{xx})_{\text{new}} = 672019 - \frac{19940}{32.2} \times (0.12)^2 = 672010\,ton - ft - sec^2$

همچنین داریم: $New\ I'_{xx} = 1.20 \times (newI_{xx}) = 806412\,ton\,mass - sec^2 - ft$

و پریود جدید برابر است با: $T_\Phi = 2\pi\sqrt{\frac{I'_{xx_{new}}}{\Delta_{new}\overline{GM}_T}} = 2\pi\sqrt{\frac{806412}{19940\times4}} = 19.98\,sec$

مقادیر تقریبی پریود حرکت رول برای انواع کشتی‌ها در جدول ۴-۱۴ ارائه شده است.

Type of ships	T_ϕ [sec]
Passenger	20 –25
Cargo-Passenger	10.5–14.5
Cargo	9 –13
Tanker	9 –10
Fishing boat	5.5– 7.0
Whale boat	9 –11.5
Battleship	14.5–17.0
Cruiser	12.0–13.0
Destroyer	9 – 9.5
Torpedo boat	7 – 7.5

جدول ۴-۱۴

مثال) یک کشتی دارای جابجایی ۱۰۰۰۰ تن با پریود ۱۰ ثانیه حرکت رول را انجام می‌دهد و دارای ارتفاع متاسنتری عرضی ۴ فوت است. کشتی مشابه آن دارای تناژ ۱۲۰۰۰ تن و ارتفاع متاسنتری عرضی ۴/۲۵ فوت است توزیع وزن در هر دو شناور یکسان است و جرم افزوده رول برابر ۱۶ درصد جرم کشتی است. مطلوبست: الف) محاسبه پریود حرکت رول کشتی مشابه بدون جرم افزوده ب) محاسبه پریود کشتی مشابه با احتساب جرم افزوده

حل) الف) $\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{12000\ tons}{10000\ tons} = \lambda^3 = \frac{6}{5} \rightarrow \lambda = 1.062$ $\quad T_1 = \lambda^{1/2}T$

یا: $\lambda^{1/2} = 1.031$ $\quad T_1 = 1.031 \times 10 = 10.31\,sec$

ب) $T_1 = \lambda^{1/2}T$ $\quad \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{1.16\times12000}{1.16\times10000} = \frac{6}{5} = \lambda^3 \rightarrow \lambda = 1.062$ $\quad \lambda^{1/2} = 1.031$ $\quad T_1 = 10.31\,sec$

ملاحظه می‌شود که لحاظ شدن یا لحاظ نشدن جرم افزوده، تناسب پریود نوسانات بین کشتی اصلی و کشتی مشابه را دچار تغییر نمی‌کند.

مثال) یک کشتی دارای شعاع ژیراسیون (حول محور دوران رول) برابر ۳۰/۸ فوت و ارتفاع متاسنتری عرضی ۴/۸۴ فوت و جابجایی ۱۵۰۰۰ تن است. اگر ضریب ممان میرایی در حالتی که در آب آرام نوسان می‌کند برابر ۳۲۰۰۰ *ft-ton-sec* باشد، مطلوبست محاسبه دامنه حرکت رول پس از سه نوسان کامل در صورتیکه انحراف اولیه برابر ۷ درجه باشد (یعنی در $t = o$ داریم $\Phi = 7^\circ$ و $d\Phi/dt = o$). ممان اینرسی جرم افزوده برابر ۲۰ درصد ممان اینرسی جرم واقعی کشتی است.

حل) $\Delta = \Delta + \delta\Delta = 1.2\Delta$ $\quad \frac{d^2\Phi}{dt^2} + \frac{bg}{\Delta' k_{xx}^2}\frac{d\Phi}{dt} + \frac{\Delta\overline{GM}_T}{\Delta' k_{xx}^2}\Phi = 0$

$$\Phi = e^{-\nu t}(C\cos\omega_d t + D\sin\omega_d t)$$

$$2\nu = \frac{b}{I'_{xx}} = \frac{32000\times 32.2}{1.2[15000\times(30.8)^2]} = 0.0603 sec^{-1} \quad \text{یا} \quad \nu = 0.0301 sec^{-1}$$

$$\omega_\Phi = \frac{\Delta\overline{gGM}_T}{\Delta' k_{xx}^2} = \frac{32.2\times 4.84}{1.20\times 949} = 0.137\, {}^{rad}/_{sec^2}$$

فرکانس حرکت رول میراشونده عبارتست از: $\omega_d = \sqrt{\omega_\Phi^2 - \nu^2} = \sqrt{0.137 - 0.0009} = 0.369$ $\quad t = 0, \Phi = 7^\circ, \rightarrow 7 = C$

همچنین در $t = 0$ داریم $d\Phi/dt = 0$ بنابراین:

$$0 = e^{-\nu t}(\omega_d C\sin\omega_d t + D\,\omega_d\cos\omega_d t) - \nu e^{-\nu t}(C\cos\omega_d t + D\sin\omega_d t) \quad \text{یا} \quad 0 = D\omega_d - C_\nu$$

$$D = \frac{C_\nu}{\omega_d} = \frac{7\times 0.0301}{0.369} = 0.571$$

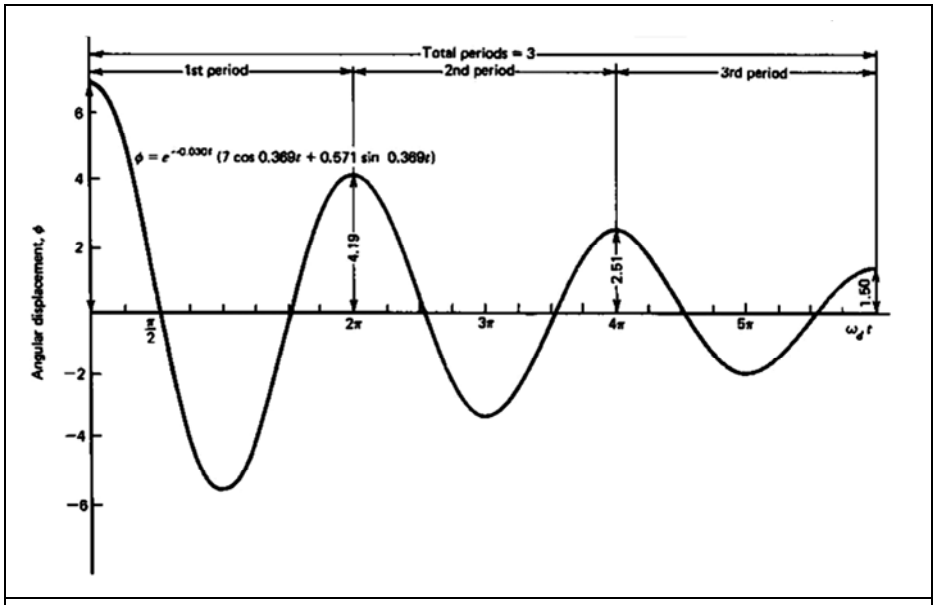
بنابراین حل این معادله برابر است با: $\Phi = e^{-0.0301t}(7\cos 0.369t + 0.571\sin 0.369t)$

از طرفی داریم: $T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{6.28}{0.369} = 17.00\, sec$

پس از ۳ پریود یعنی پس از (یا ۱۷ × ۳ ثانیه $\omega_d t = 0.369\times 3\times 17\, rad$) داریم:

$$\Phi = e^{-0.0301\times(17\times 3)}[7\cos(0.369\times 17\times 3) + 0.571\sin(0.369\times 17\times 3)] \quad \Phi = e^{-1.54}(7+0) = 1.50^\circ$$

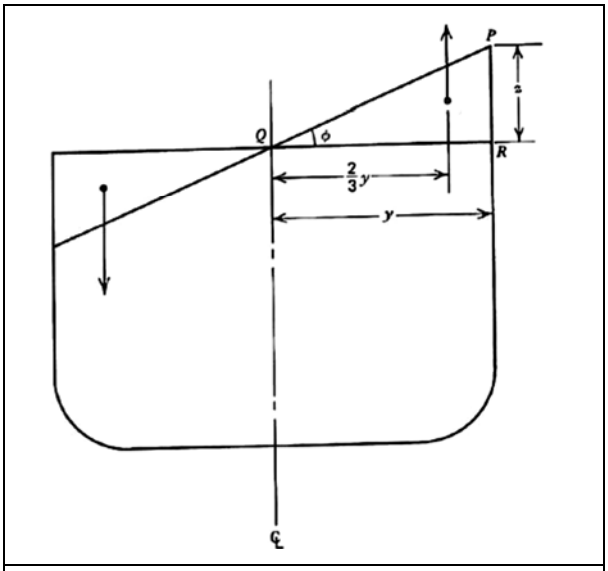
شکل ۴–۷۸ نشان‌دهنده دامنه نوسان حرکت رول با زمان t است.



شکل ۴–۷۸: اثر میرایی حرکت رول در آب آرام

- **ممان تحریک حرکت رول**

علت بروز ممان تحریک حرکت رول، تغییر نیروی بویانسی بدنه در امواج می‌باشد. این ممان با انتگرال‌گیری گوه بویانسی وارد شده به داخل آب (مطابق شکل ۴–۷۹) در طول بدنه بدست می‌آید.



شکل ۴-۷۹: ممان تحریک ناشی از تغییر نیروی بویانسی

شیب سطح آزاد برابر است با: $z = y \times slope$ → $slope = tan\Phi = \frac{z}{y}$

بنابراین مساحت PQR برابر است با $\left(\frac{1}{2}\ y\ \times y\ \times slope\right)$. ممان بویانسی این گوه برابر است با: $\rho g\ \times\ (Volume) \times \frac{2}{3}\ y$.

برای هر دو گوه (مطابق شکل) داریم:

$$\Delta M_\Phi = 2\rho g\ \times\ (Volume) \times \frac{2}{3}\ y = 2\rho g\ \times \left(\frac{1}{2} y^2 \tan\Phi\, dx\right) \times \frac{2}{3}\ y = \frac{2}{3}\rho g y^3 \frac{\partial \zeta}{\partial y} dx$$

$$= \left[\frac{2}{3}\rho g y^3 k\zeta_a \sin\mu \cos(kx\cos\mu) dx\right] \sin\omega_e t$$

از طرف دیگر داریم:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = wave\ slope\ =\ \alpha_M \cos(kx\cos\mu) = k\zeta_a \sin\mu \cos(kx\cos\mu) \qquad \zeta = \zeta_a \cos(kx\cos\mu - \omega_w t)$$

بنابراین این ممان برابر است با: $M_\Phi\ = \left[\frac{2}{3}\rho g k\zeta_a \sin\mu \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx\cos\mu) y^3 dx\right] \sin\omega_e t$

اگر فرض کنیم که: $M_\Phi = M_0 \cos(\omega_e t + \varepsilon_1)$ ، دامنه برابر است با: $M_o\ = \frac{2}{3}\rho g k\zeta_a \sin\mu \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx\cos\mu) y^3 dx$.

و زاویه فاز بین ممان تحریک و بالا آمدن موج برابر است با: $\varepsilon_1 = \frac{\pi}{2}$. از آنجا که $\sin\theta = \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$ ، لذا دامنه بی‌بعد ممان تحریک برابر است با: $f_o = \frac{M_o}{\rho g k\zeta_a LB^2 T} = \frac{2}{3}\frac{\sin\mu}{LB^2 T} \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx\cos\mu) y^3 dx$.

برای امواج از پهلو (امواج عرضی که $\mu = 90°$) دامنه ممان رول‌دهنده برابر است با: $M_o = \rho g \nabla k\zeta_a \overline{GM}_T$.

از آنجا که $\frac{2}{3}\int y^3 dx$ برابر ممان اینرسی عرضی صفحه آبخور است لذا:

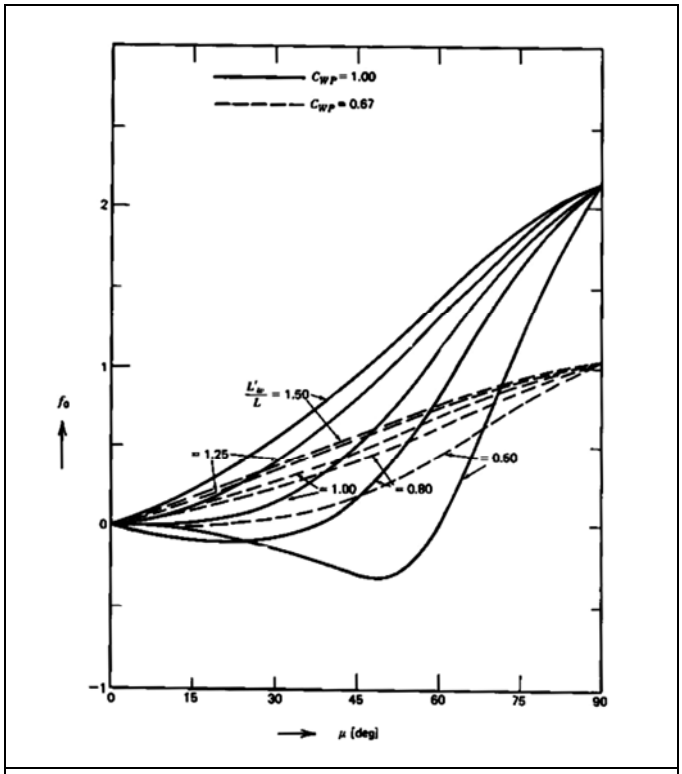
$$M_\Phi = \Delta\alpha_M \overline{GM}_T \sin\omega_e t = c\ \alpha_M \sin\omega_e t \qquad \text{یا} \qquad M_o = \rho g \nabla \alpha_M k GM_T$$

که C ضریب ممان بازگرداننده بوده و برابر است با $\Delta.\overline{GM}_T$.

برای مشابه‌سازی، ممان رول‌دهنده M_Φ برای هر جهت موج به غیر از موج عرضی برابر است با:

$$M_\Phi = \Delta\alpha'_M \sin\omega_e t \quad , \quad \alpha_M = \alpha'_M \sin\mu$$

ضریب ممان رول‌دهنده f_o در شکل ۴-۸۰ بر حسب زاویه راستای موج برای چندین ضریب صفحه آبخور و نسبت L'_w / L ترسیم شده است.



شکل ۴-۸۰: ضریب ممان تحریک رول

مثال) مطلوبست محاسبه ممان تحریک رول کشتی مثال اول. فرض کنید که موقعیت طول مرکز بویانسی در مقطع وسط کشتی است و همچنین:

$\mu = 120^{\circ}$.

حل) از مثال اول جدول زیر را فراهم می‌کنیم.

Station	x	y	y^3	$kx\cos\mu$	$\text{Cos}(kx\cos\mu)$	$y^3\cos(kx\cos\mu)$	Simpson's Multiplier	Product
0	9.6	0	0	− 1.570	0	0	1	0
5	4.8	1.296	2.177	− 0.785	0.707	1.539	4	6.156
10	0	1.296	2.177	0	1.000	2.177	2	4.354
15	− 4.8	1.296	2.177	0.785	0.707	1.539	4	6.156
20	− 9.6	0	0	1.570	0	0	1	0
							SUM	16.666

از انتگرال‌گیری داریم: $\frac{1}{3} \times s \times SUM = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 16.666 = 26.666$.

دامنه ممان تحریک بی‌بعد حرکت رول برابر است با: $f_o = \frac{2}{3}\frac{\sin\mu}{LB^2T} \times integral = \frac{2}{3} \times \frac{0.866}{19.2 \times (2.592)^2 \times 1.144} \times 26.666 = 0.1043$

و دامنه ممان تحریک حرکت رول برابر است با:

$$M_o = \rho g k \zeta_a L B^2 T \,.\, f_o = 1.93 \times 32.2 \times 0.327 \times 0.2 \times 19.2 \times (2.592)^2 = 62.6\ ft - lb$$

- **حرکت رول در امواج منظم دریا**

معادله حرکت رول در امواج منظم عبارتست از:

$$I'_{xx}\frac{d^2\Phi}{dt^2}+b\frac{d\Phi}{dt}+\Delta\overline{GM}\Phi=\Delta\overline{GM}\alpha'_M.\sin\omega_e t \qquad \text{یا} \qquad \frac{d^2\Phi}{dt^2}+\frac{bg}{\Delta' k_{xx}^2}\frac{d\Phi}{dt}+\frac{\Delta\overline{GM}_T}{\Delta' k_{xx}^2}\Phi=\frac{\Delta\overline{GM}_T}{\Delta' k_{xx}^2}\alpha'_M.\sin\omega_e t$$

برای امواج عرضی، ω_e می‌تواند با ω_w جایگزین شود که فرکانس واقعی موج است. از آنجا که $\omega_w = \omega_e$ لذا $\mu = 90^\circ$. وقتی کشتی با شدت شروع به حرکت رول می‌کند، راه حل آن تغییر مسیر حرکت و یا سرعت حرکت است که باعث تغییر فرکانس برخورد می‌شود و همزمانی (که البته همیشه باعث چنین حرکات رول سنگینی می‌شود) را از بین می‌برد. حل عمومی این نوع معادله دیفرانسیل عبارتست از:

$$\Phi = e^{-\nu t}(C\cos\omega_d t + D\sin\omega_d t)+\left(\frac{\alpha'_M\omega_\Phi^2}{\sqrt{\left(\omega_\Phi^2-\omega_e^2\right)^2+4\nu^2\omega_e^2}}\right)\times\sin\left[\omega_e t-\tan^{-1}\left(\frac{2\nu\omega_e}{\omega_\Phi^2-\omega_e^2}\right)\right] \qquad \text{یا}$$

$$\Phi = e^{-\nu t}(C\cos\omega_d t + D\sin\omega_d t)+\Phi_a\sin(\omega_e t-\varepsilon_2) \qquad \omega_d=\sqrt{\omega_\Phi^2-\nu^2}$$

$$\Phi_a=\frac{\alpha'_M\omega_\Phi^2}{\sqrt{(\omega_\Phi^2-\omega_e^2)^2+4\nu^2\omega_e^2}} \quad , \quad \varepsilon_2=\tan^{-1}\left(\frac{2\nu\omega_e}{\omega_\Phi^2-\omega_e^2}\right)$$

از روابط موجود می‌توان مشاهده کرد که حرکت موج در امواج منظم ترکیبی از دو نوع نوسان است: نوسان طبیعی و نوسان اجباری. نوسان طبیعی دارای فرکانس حرکت رول کشتی در آب آرام (ω_d) است و بدلیل وجود عامل $e^{-\nu t}$، نوسان به تدریج با زمان محو می‌شود. نوسان اجباری با فرکانس برخورد بیان شده و ناشی از نیروی تحریک است. دامنه Φ_a و زاویه فاز ε_2 نوسان اجباری با زمان تغییر نمی‌کند و به شرایط اولیه حرکت، بستگی ندارد. بنابراین برای شرایط یکنواخت داریم: $\Phi = \Phi_a \sin(\omega_e t-\varepsilon_2)$.

هم‌اکنون با مقایسه معادله با ممان تحریک حرکت رول، می‌بینیم که یک اختلاف فاز بین حرکت و ممان تحریک وجود دارد. یادآوری می‌شود که وقتی $\nu = 0$ (حرکت بدون میرایی) باشد حرکت به صورت بدون تأخیر نسبت به ممان تحریک انجام می‌شود. همانند حرکات هیو و پیچ، Λ و κ برای حرکت رول نیز به صورت زیر معرفی می‌شوند: $\Lambda=\frac{\omega_e}{\omega_\Phi}$.

ضریب میرایی بی‌بعد عبارتست از: $\kappa=\frac{\nu}{\omega_\Phi}$.

یادآوری می‌شود که برای شکل بدنه‌های معمولی مقدار κ بین ۰/۰۳۵ و ۰/۱ است. دامنه حرکت رول عبارتست از:

$$\Phi_a=\frac{\alpha'_M}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2+4\kappa^2\Lambda^2}}$$

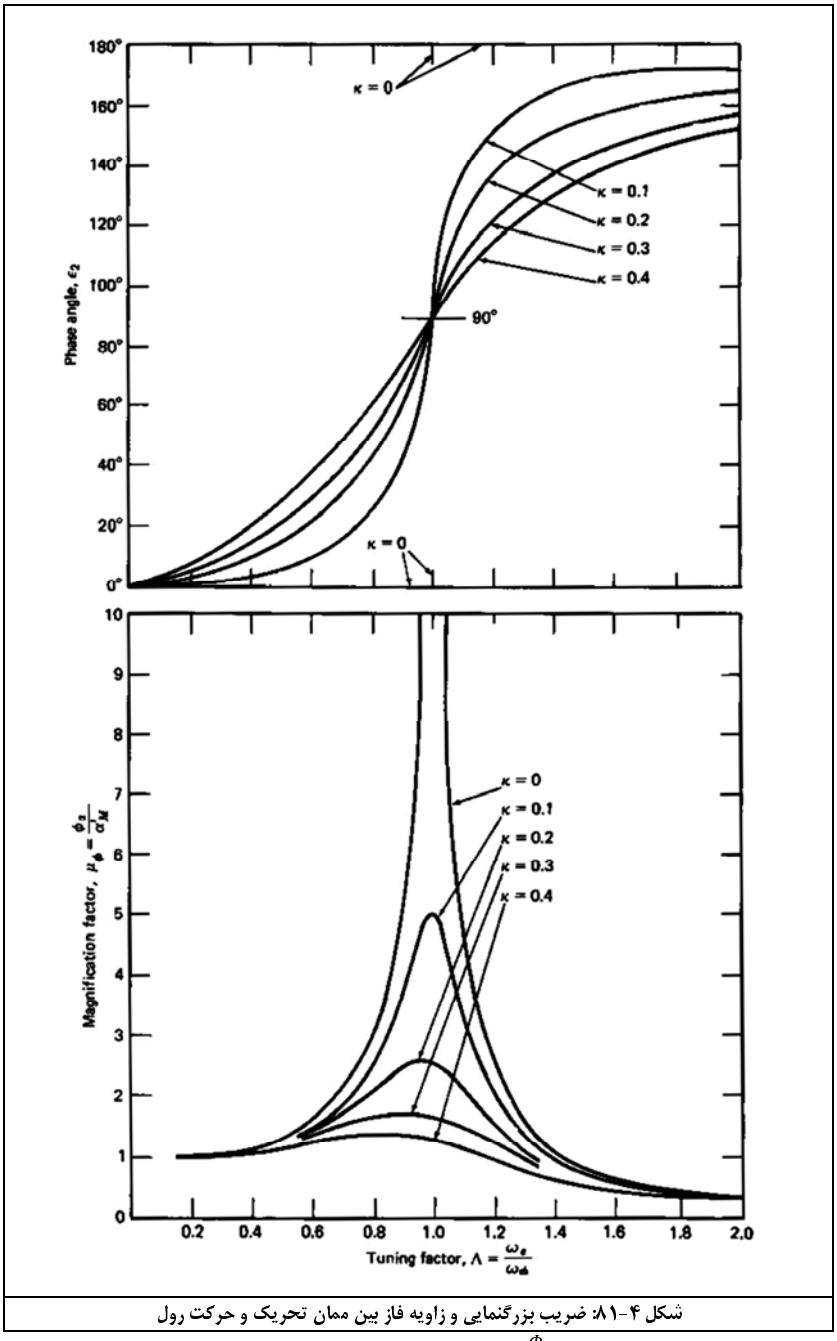
زاویه فاز از رابطه ۳۰-۴ بدست می‌آید: $\tan\varepsilon_2=\frac{2\kappa\Lambda}{1-\Lambda^2}$.

ضریب بزرگنمایی μ_Φ برابر است با: $\Phi_{st}=\frac{F_0}{c}=\alpha'_M$ $\qquad \mu_\Phi=\frac{\Phi_a}{\Phi_{st}}=\frac{\Phi_a}{\alpha'_M}=\frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2+4\kappa^2\Lambda^2}}$

μ_Φ ضریب بزرگنمایی بوده و دارای حداکثر مقادیر بین ۵ و ۱۰ است. اگر میرایی وجود نداشته باشد مقادیر ν و κ هر دو برابر صفر هستند و داریم:

$\mu_\Phi=\frac{\Phi_a}{\Phi_{st}}=\frac{1}{1-\Lambda^2}$.

ضریب بزرگنمایی μ_Φ که در شکل ۴-۸۱ به عنوان تابعی از $\Lambda=\omega_e/\omega_\Phi$ ترسیم شده است، خصوصیات زیر را نشان می‌دهد:



شکل ۴-۸۱: ضریب بزرگنمایی و زاویه فاز بین ممان تحریک و حرکت رول

الف) در $\Lambda = 0$ برای تمام مقادیر κ داریم: $\mu_\Phi = \frac{\Phi_a}{\Phi_{st}} = 1$.

ب) در $\Lambda = \infty$ (یعنی برای پریود برخوردهای بسیار کوچک) برای ضریب بزرگنمایی داریم: $\mu_\Phi = \frac{\Phi_a}{\Phi_{st}} = 0$

ج) در $\Lambda = 1$ (یعنی برای حالت تشدید) داریم: $\mu_\Phi = \frac{\Phi_a}{\Phi_{st}} = \frac{1}{2\kappa}$.

د) برای تعیین محل حداکثر مقدار ضریب بزرگنمایی داریم: $x = \Lambda^2$, $y = \left(\frac{\Phi_a}{\Phi_{st}}\right)^2$

بنابراین داریم: $y = \frac{1}{(1-x)^2 + 4\kappa^2 x}$

برای حداکثر مقدار y، مشتق اول y برابر صفر قرار می‌گیرد:

$\Lambda = \sqrt{1-2\kappa^2}$ یا $x = 1 - 2\kappa^2$, $-2(1-x) + 4\kappa^2 = 0$ $\frac{dy}{dx} = -\frac{-2(1-x)+4\kappa^2}{[(1-x)^2 + 4\kappa^2 x]} = 0$

بنابراین حداکثر مقدار ضریب بزرگنمایی منطبق بر موقعیت تشدید (یعنی $\omega_e / \omega_\Phi = 1$) نمی‌باشد بلکه در سمت چپ آن اتفاق می‌افتد که وابسته به بزرگی ضریب میرایی بی‌بعد (κ) می‌باشد. هم‌اکنون با داشتن موقعیت حداکثر مقدار ضریب بزرگنمایی، می‌توانیم مقدار بزرگی آن را بدست آوریم. بنابراین:

$$(\mu_\Phi)_{max} = \left(\frac{\Phi_a}{\alpha'_M}\right)_{max} = \frac{1}{\sqrt{[1-(1-2\kappa^2)]^2+4\kappa^2(1-2\kappa^2)}} = \frac{1}{2\sqrt{1-\kappa^2}}$$

معادلات نشان می‌دهند که مقدار بزرگ میرایی، نه تنها باعث کاهش دامنه نقطه حداکثری نوسان اجباری می‌شود بلکه همچنین باعث می‌شود که آن نقطه در مقادیر کوچکتری از Λ اتفاق افتد. وقتی $k > \frac{1}{\sqrt{2}}$ یا 0.707 می‌باشد، هیچ نقطه حداکثری در شکل ۳۶-۴ وجود ندارد. یادآوری می‌شود که ضریب میرایی (k) برای حرکت رول، معمولاً در مقایسه با عدد یک، کوچک است. یکی بخاطر این می‌تواند باشد که موقعیت و بزرگی حداکثر مقدار ضریب بزرگنمایی منطبق بر موقعیت ناحیه تشدید (رزنانس) است.

مثال) یک کشتی با اطلاعات زیر موجود است. مطلوبست زاویه بین راستای کشتی و موج هنگامی که بزرگترین رول اتفاق می‌افتد.

$$T_\Phi = 15\ sec\ ,\ V = 35\ knot\ ,\ L_w = 900\ ft$$

حل) حداکثر مقدار حرکت رول هنگامی اتفاق می‌افتد که همزمانی اتفاق افتاده باشد یعنی: $\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\Phi} \approx 1.0$ و آن نیز زمانی اتفاق می‌افتد که:

$$\omega_e = \omega_\Phi \quad , \quad \omega_e = \omega_w\left(1 - \frac{\omega_w}{g} V\cos\mu\right)$$

که μ زاویه بین راستای کشتی و موج است. بنابراین داریم:

$$\omega_\Phi = \frac{2\pi}{T_\Phi} = \frac{2\pi}{15} = 0.419\ rad \qquad \omega_\Phi = \omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} V\cos\mu \qquad \rightarrow \qquad \cos\mu = \frac{(\omega_w - \omega_\Phi)g}{\omega_w^2 V}$$

برای امواج آبهای عمیق داریم: $\omega_w = \sqrt{\frac{2\pi g}{L_w}} = \sqrt{\frac{2\pi\times 32.2}{900}}$ و از آنجا که $V = 35 \times 1.689\ ft/sec$ داریم:

$$\cos\mu = \frac{(0.474 - 0.419)\times 32.2}{(0.474)^2 \times 35 \times 1.689} = 0.133 \qquad \text{یا} \qquad \mu = 82.5^\circ \text{ یا } -82.5^\circ$$

حرکات رول می‌تواند در صورتی که زاویه راستای کشتی و موج بین صفر تا ۴۵ درجه و بین ۱۳۵ تا ۱۸۰ درجه باشد، به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. بنابراین همانطور که قبلاً ذکر شد، اگر کشتی دچار حرکات رول سنگین شود، عکس‌العمل مناسب به آن، تغییر مسیر (راستای حرکت) و یا تغییر سرعت است که به موجب آن فرکانس برخورد و همزمانی تغییر می‌کند که بطور معمول، علت اصلی حرکات رول سنگین در دریا رفع می‌گردد.

معادلات ارائه شده در این بخش، می‌تواند برای محاسبه دامنه و زاویه فاز حرکت رول کشتی‌ها در زوایای برخورد مختلف بکار برده شود و داریم که دامنه حرکات از محدوده خطی تجاوز نمی‌کند یعنی $\frac{\Phi_a}{\alpha'_M}$، همان مقدار برای تمامی مقادیر ζ_a باقی می‌ماند یعنی همان مقدار زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\alpha'_M = \left(\frac{2\pi\zeta_a}{L_w}\right)$$

زاویه فاز ε_2 وابسته به ضریب میرایی است همانطور که وابسته به نسبت فرکانس (یا ضریب فرکانسی) (Λ) است و در شکل ۳۶-۴ نیز نشان داده شده است. جالب است که یادآوری شود که برای $\Lambda = 1$، زاویه فاز برابر ۹۰ درجه است بدون اینکه ضریب میرایی مهم باشد و برای مقادیر کوچک $\mathbf{K}$، این مقدار در حدود و مجاورت $\Lambda = 1$ به سرعت تغییر می‌کند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که برای مقادیر کوچک Λ، مقدار Φ تقریباً همفاز با ممان تحریک است ولی همزمان با افزایش فرکانس نوسان اجباری، زاویه فاز ε_2 نیز افزایش می‌یابد. برای فرکانسهای بسیار بالا (یعنی Λ به سمت بی‌نهایت)، مقدار ε_2 به ۱۸۰ درجه نزدیک می‌شود بدون اینکه وابسته به مقدار میرایی باشد.

مثال) یک کشتی با سرعت ۲۰ گره و زاویه راستای حرکت با موج ۱۵۰ درجه در حال حرکت است. مطلوبست: الف) ترسیم مقدار ضرایب حرکت رول بر حسب ضرایب فرکانسی برای فرکانس‌های موج ω_w بین صفر تا ۲ در بازه‌های ۰/۱ . ابعاد مربوطه کشتی عبارتند از:

$$\Delta = 12500\ ton\ ,\ GM = 5.79\ ft\ ,\ k_{xx} = 30.8\ ft\ ,\ L = 450\ ft\ .$$

داریم که جرم افزوده برابر ۲۰ درصد جرم کشتی و ممان میراکننده برابر $3200\ ft-ton$ است.

ب) حداکثر دامنه حرکت رول کشتی در شرایطی که ارتفاع موج ۶۰ فوت باشد.

حل) الف) برای فرکانس طبیعی رول داریم: $\omega_\Phi = \sqrt{\frac{\Delta\overline{GM}_T}{I'_{xx}}} = \sqrt{\frac{\Delta\overline{GM}_T g}{1.2\Delta k_{xx}^2}} = \sqrt{\frac{5.79\times 32.2}{1.2\times(30.8)^2}}$

ضرایب میرایی نیز عبارتند از:

$$\nu = \frac{b}{2a} = \frac{b}{2I'_{xx}} = \frac{32000}{2\left(\Delta'/g\right)k_{xx}^2} = \frac{32000}{2\left[\frac{(1.2\times 12500)}{32.2}\right]} = 0.0362\ sec^{-1} \quad , \quad \kappa = \frac{\nu}{\omega_\Phi} = \frac{0.0362}{0.405} = 0.089$$

ضریب بزرگنمایی برابر است با: $\mu_\Phi = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2+4\kappa^2\Lambda^2}} = \frac{\Phi_a}{\Phi_{st}}$

و ضریب فرکانسی برابر است با: $\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\Phi} = \frac{\omega_e}{0.405}$

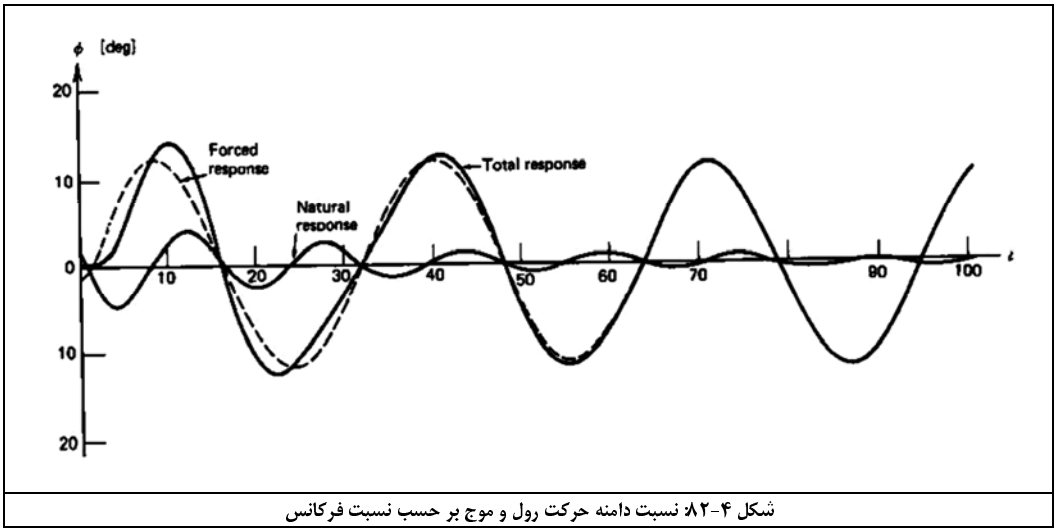
فرکانس برخورد برابر است با: $\omega_e = \omega_w\left(1 - \frac{\omega_w}{g}V\cos\mu\right)$

برای $V = 20\ knot = 20 \times 1.689 = 33.78\ ft/sec$ و $\mu = 150^\circ$، مقادیر عددی مربوطه در جدول ۴–۱۵ ارائه شده است.

ω_w [rad/sec] ①	$\eta = \frac{\omega_w V}{g}\cos\mu$ ②	$\omega_e = \omega_w(1-\eta)$ [rad/sec] ③	$\Lambda_\Phi = \frac{\omega_e}{\omega_\Phi}$ ④	$\mu_\Phi = \frac{\Phi_a}{\Phi_{st}}$ ⑤
040	0	0	0	1.0
010	− 0.091	0.109	0.269	1.078
0.20	− 0.182	0.236	0.583	1.497
0.30	− 0.272	0.382	0.942	4.923
0.40	− 0.363	0.545	1.346	1.179
0.50	− 0.454	0.727	1.795	0.445
0.60	− 0.545	0.927	2.288	0.235
0.70	− 0.635	1.145	2.827	0.143
0.80	− 0.726	1.381	3.410	0.094
0.90	− 0.817	1.635	4.038	0.065
1.00	− 0.908	1.908	4.711	0.047
1.10	− 0.999	2.198	5.428	0.035
1.20	− 1.089	2.507	6.191	0.027
1.30	− 1.180	2.834	6.998	0.021
1.40	− 1.271	3.179	7.850	0.016
1.50	− 1.362	3.543	8.747	0.013
1.60	− 1.453	3.924	9.689	0.011
1.70	− 1.634	4.324	10.676	0.009
1.80	− 1.725	5.177	11.707	0.007
1.90	− 1.725	5.177	12.783	0.006
2.00	− 1.816	5.681	13.904	0.005

جدول ۴–۱۵

ضریب بزرگنمایی نیز در شکل ۴–۸۲ نشان داده شده است.



شکل ۴–۸۲: نسبت دامنه حرکت رول و موج بر حسب نسبت فرکانس

ب) دامنه حرکت رول با عبارت زیر بیان می‌شود: $\Phi_a = \mu_\Phi \Phi_{st}$

$$\Phi_{st} = \frac{M_o}{c} = \frac{\Delta\overline{GM}_T\alpha'_M}{\Delta\overline{GM}_T} = \alpha'_M = \alpha_M \sin\mu$$

از آنجا که $\sin \mu = \sin(150) = 0.5$ بنابراین Φ_a هنگامی حداکثر مقدار را دارد که ضریب بزرگنمایی μ_Φ حداکثر مقدار را داشته باشد. بنابراین μ_Φ در نقطه روبرو حداکثر مقدار است:

$$\Lambda = \sqrt{1 - 2\Lambda^2} = \sqrt{1 - 2 \times (0.089)^2}$$

وقتی که مقدار Λ برابر ۰/۹۹۲ باشد، مقدار μ_Φ برابر ۵/۶۴ است. بنابراین داریم:

$$(\Phi_a)_{max} = 5.64\Phi_{st} = 5.64 \times 0.5\alpha_M = 2.82\alpha_M$$

که حداکثر شیب موج α_M باید برای $\Lambda = 0.992$ تعیین گردد. با ترسیم ω_w بر حسب Λ داریم $\omega_w = 0.312$ برای $\Lambda = 0.992$. همچنین برای طول موج و پس از آن داریم:

$$L_w = \frac{2\pi g}{\omega_w^2} = \frac{2\pi \times 32.2}{(0.312)^2} = 2078\ ft \qquad , \qquad \alpha_M = \frac{2\pi\zeta_a}{L_w} = \frac{2\pi \times 30}{2078} = 0.091\ rad$$

و در نهایت داریم: $(\Phi_a)_{max} = 2.82 \times \alpha_M = 2.82 \times 0.091 = 0.257\ rad\ (14.73^\circ)$

مثال) معادله حرکت رول یک کشتی به صورت زیر بیان شده است: $\frac{d^2\Phi}{dt^2} + 0.0724\frac{d\Phi}{dt} + 0.164\Phi = \alpha'_M\omega_\Phi^2 \sin\omega_e t$

اگر شیب موج α'_M را بتوانیم ثابت و برابر $\pi/20$ رادیان برای فرکانس برخورد $0.2\ rad/sec$ در نظر بگیریم، نشان دهید که نوسان طبیعی با گذشت زمان به تدریج محو خواهد شد در حالیکه دامنه نوسان اجباری، بدون تأثیرپذیری، ثابت می‌ماند. شرایط اولیه بصورت زیر مشخص شده است. در $t = 0$ داریم: $\Phi = 0$, $\frac{d\Phi}{dt} = 0$

حل) حل عمومی این معادله همانطور که قبلاً بیان شد، بصورت زیر است: $\Phi = e^{-\nu t}(C_1 \cos\omega_d t + C_2 \sin\omega_d t) + \Phi_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_\Phi^2 - \nu^2} \qquad , \qquad \Phi_a = \mu_\Phi \alpha'_M$$

$$\mu_\Phi = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4\kappa^2\Lambda^2}} \qquad , \qquad \varepsilon_2 = tan^{-1}\left(\frac{2\kappa\Lambda}{1-\Lambda^2}\right)$$

برای شرایط اولیه داریم:

الف) وقتی $t = 0$، $\Phi = 0$ است یعنی وقتی در لحظه اول موج به کشتی برخورد می‌کند، کشتی در حالت قائم است بنابراین:

$$\Phi = 0 = C_1 - \Phi_a \sin\varepsilon_2 \qquad \text{یا} \qquad C_1 = \Phi_a \sin\varepsilon_2$$

ب) در $t = 0$ داریم $\frac{d\Phi}{dt} = 0$. با مشتق‌گیری از رابطه داریم:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\nu e^{-\nu t}(C_1 \cos\omega_d t + C_2 \sin\omega_d t) + e^{-\nu t}(-\omega_d C_1 \sin\omega_d t + \omega_d C_2 \cos\omega_d t) + \Phi_a\, \omega_e cos(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

$$0 = -\nu(C_1) + (\omega_d C_2) + \Phi_a\, \omega_e cos(-\varepsilon_2) \qquad \text{یا} \qquad C_2 = \frac{\nu C_1 - \Phi_a\, \omega_e \cos\varepsilon_2}{\omega_d}$$

با بکارگیری مقدار C_1 بدست آمده از قبل داریم: $C_2 = \frac{\Phi_a(\nu sin\,\varepsilon_2 - \omega_e cos\,\varepsilon_2)}{\omega_d}$

$$\nu = \frac{0.0724}{2} = 0.0362\ sec^{-1} \qquad , \qquad \omega_\Phi = \sqrt{0.164} = 0.405\ rad/sec$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_\Phi^2 - \nu^2} = \sqrt{(0.405)^2 - (0.0362)^2} = 0.403\frac{rad}{sec}$$

$$\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\Phi} = \frac{0.20}{0.405} = 0.494$$

از آنجا که $\omega_e = 0.2$ داریم $\mu_\Phi = 1.314$. لذا داریم: $\kappa = \frac{\nu}{\omega_\Phi} = \frac{0.20}{0.405} = 0.089$

$$\Phi_a = \mu_\Phi \Phi_{st} = \mu_\Phi \alpha'_M = 1.314 \times \frac{\pi}{20} = 0.206\ rad\ (11.83^\circ)$$

$$\Phi_{st} = \frac{M_o}{c} = \alpha'_M \qquad \rightarrow \qquad \varepsilon_2 = tan^{-1}\left(\frac{2\kappa\Lambda}{1-\Lambda^2}\right) = tan^{-1}(0.11675) = 0.116\ rad\ (6.659^\circ)$$

و بنابراین $C_1 = 0.024$ و داریم:

$$C_2 = \frac{\Phi_a(\nu sin\,\varepsilon_2 - \omega_e cos\,\varepsilon_2)}{\omega_d} = \frac{0.206(0.0362 \times 0.116 - 0.20 \times 0.993)}{0.403} = -0.099$$

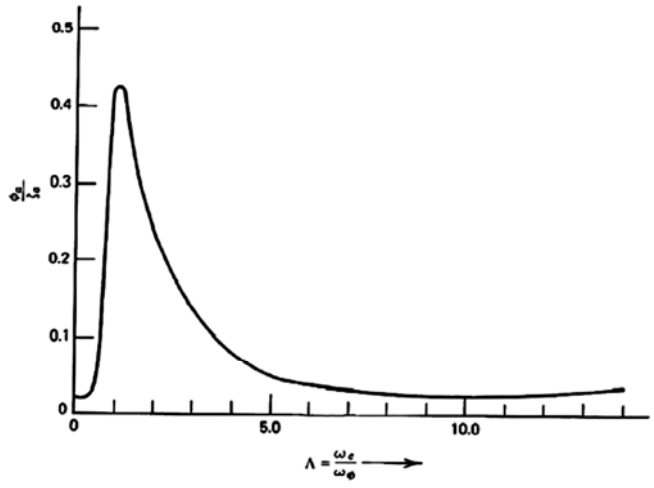
هم‌اکنون با استفاده از مقادیر ν , C_1 , C_2 , ω_d , Φ_a , ε_2 معادله رول عبارتست از:

$$\Phi = e^{-0.0362t}(0.024\,cos\,0.403t - 0.099\,sin\,0.403t) + 0.206\,sin(0.200t - 0.116)$$

جدول زیر برای زمانهای ۰ تا ۱۰۰ ثانیه آماده شده است.

t [sec]	$e^{-0.0362t}$	[rd]	Damped Rolling $e^{-0.0362t}(\ )$ [deg]	Forced Rolling 0.206 sin [deg]	ϕ [deg]
①	②	③	④ = ② × ③	⑤	⑥ = ④ + ⑤
0	1.000	0.024	1.37	− 1.37	0
10	0.696	0.062	2.46	11.23	13.69
20	0.485	− 0.102	− 2.83	− 7.98	− 10.81
30	0.338	0.067	1.29	− 4.59	− 3.30
40	0.235	0.018	0.24	− 11.80	− 12.04
50	0.164	− 0.083	− 0.84	− 5.23	− 6.07
60	0.114	0.095	0.61	− 7.44	− 6.83
70	0.079	− 0.030	− 0.14	11.43	11.29
80	0.055	− 0.056	− 0.18	− 2.07	− 2.25
90	0.038	0.101	0.23	− 9.71	− 9.48
100	0.027	− 0.072	− 0.11	10.15	10.04

شکل ۴-۸۳ ترسیم معادلات فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸۳: پاسخ طبیعی، اجباری و کل برای حرکت رول بر حسب زمان

- **نسبت دامنه پاسخ به دامنه موج $\frac{\Phi_a}{\zeta_a}$**

در شکل ۴-۸۱ ضریب μ بر حسب Λ ترسیم شده است. برای یک Λ مشخص، مقدار μ_Φ ثابت است. بنابراین Φ_a بطور خطی متناسب با α'_M است. دامنه رول Φ_a همچنین می‌تواند با عبارت زیر تعیین شود: $\frac{\Phi_a}{\zeta_a} = \frac{\Phi_a}{\alpha'_M}\,\alpha'_M\,\frac{1}{\zeta_a} = \mu_\Phi \frac{2\pi\zeta_a}{L_w} sin\,\mu\,\frac{1}{\zeta_a}$

که $\alpha'_M = \alpha_M\,sin\,\mu$ و از آنجا $\frac{\Phi_a}{\alpha'_M} = \mu_\Phi$ بنابراین داریم:

$$\frac{\Phi_a}{\zeta_a} = \mu_\Phi \frac{2\pi}{L_w} sin\,\mu = \mu_\Phi \frac{\omega_w^2}{g} sin\,\mu \qquad , \qquad \frac{\omega_w^2}{g} = \frac{2\pi}{L_w} \quad \rightarrow \quad \frac{\Phi_a}{\zeta_a} = \mu_\Phi \frac{\omega_w^2}{g} 57.3\ sin\,\mu$$

اگر Φ_a بر حسب درجه باشد، معادله فوق نشان می‌دهد که برای یک فرکانس موج ثابت، مقدار Φ_a بطور خطی متناسب با دامنه موج ζ_a است چراکه μ_Φ و g در معادله فوق تغییر نکرده و ثابت هستند. این رابطه خطی بین Φ_a , ζ_a به غیر از برای امواج با دامنه کوتاه اعتبار ندارد.

فصل ۶: مناطق سرعتی کشتی

تا اینجا مشاهده کردیم که دامنه حرکات هیو، پیچ و رول کشتی در حال حرکت در دریا وابسته به Λ است. از آنجا که فرکانس برخورد به هر دو عامل سرعت کشتی و راستای حرکت کشتی و موج بستگی دارد، یک کشتی ممکن است مقادیر مختلفی از Λ داشته باشد که وابسته به سرعت و راستای حرکت کشتی است که تأثیر زیادی بر خصوصیات حرکتی کشتی دارد. رابطه بین سرعت، راستای حرکت و ضریب فرکانسی حرکت هیو را می‌توان بصورت زیر بدست آورد:

$$\omega_e = \frac{2\pi(V_w - V\cos\mu)}{L_w} \qquad \text{یا} \qquad \omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} V\cos\mu$$

$$\rightarrow \; V\cos\mu = \frac{(\omega_w - \omega_e)g}{\omega_w^2} \qquad , \qquad \frac{V}{g^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}}\cos\mu = \frac{1}{\omega_w}\frac{g^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}} - \frac{\omega_e}{\omega_z}\frac{\omega_z}{\omega_w}\frac{g^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{یا} \qquad F_n\cos\mu = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}}\left(\frac{L_w}{L}\right)^{1/2} - \frac{\Lambda_z}{2\pi}\frac{\omega_z}{g^{\frac{1}{2}}}\frac{L_w}{L^{1/2}}\frac{L^{1/2}}{L^{1/2}} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}}\left(\frac{L_w}{L}\right)^{1/2} - \frac{\Lambda_z}{2\pi}\left[\omega_z\left(\frac{L}{g}\right)^{1/2}\right]\frac{L_w}{L}$$

عبارت داخل براکت سمت راست معادله عبارتست از $\omega_z\left(\frac{L}{g}\right)^{1/2}$ که «فرکانس بی‌بعد[1]» نامیده می‌شود. به همین صورت برای حرکات پیچ و رول، چنین عبارتی بدست می‌آید. برای حرکت پیچ داریم: $F_n\cos\mu = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}}\left(\frac{L_w}{L}\right)^{1/2} - \frac{\Lambda_\theta}{2\pi}\left[\omega_\theta\left(\frac{L}{g}\right)^{1/2}\right]\frac{L_w}{L}$ و برای حرکت رول داریم:

$$F_n\cos\mu = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}}\left(\frac{L_w}{L}\right)^{1/2} - \frac{\Lambda_\Phi}{2\pi}\left[\omega_\Phi\left(\frac{L}{g}\right)^{1/2}\right]\frac{L_w}{L}.$$

با توجه به مطالب فوق، سه شرایط متفاوت دریایی را می‌توان در نظر گرفت. این شرایط عبارتند از:

۱) امواج دریا از روبرو[2] ($90^\circ < \mu < 270^\circ$): در این شرایط، $V_w - V\cos\mu$ بزرگتر و مثبت است. در این شرایط قدر مطلق مقدار عبارت دوم در سمت راست معادله باید بزرگتر از عبارت اول باشد.

۲) امواج دریا از پهلو[3]، در این شرایط $V_w - V\cos\mu$مثبت است. برای رسیدن به این شرایط باید قدر مطلق مقدار عبارت دوم سمت راست معادله کوچکتر از عبارت اول باشد.

۳) امواج دریا از پشت سر[4] ($0^\circ < \mu < 90^\circ$, $270^\circ < \mu < 360^\circ$): در این شرایط $V_w - V\cos\mu$ منفی است. در شرایط امواج از پشت سر، هم فرکانس برخورد ω_e و هم ضریب فرکانسی(Λ) نسبت به دو حالت قبل شرایط مثبتی دارند. در این شرایط، عبارت دوم سمت راست معادله مثبت می‌شود و سرعت کشتی نسبتاً زیاد است. توجه شود که وقتی $\omega_e = 0$ است موقعیت نسبی کشتی و موج ثابت باقی می‌ماند چراکه موج و کشتی هر دو با یک سرعت حرکت می‌کنند (یعنی $\Lambda = 0$).

از شکل ۴-۸۴ می‌توان ملاحظه کرد که حرکت کشتی در امواج به مقدار زیادی از عوامل زیر متأثر است:

الف) مقدار نیروی تحریک **ب)** ناحیه تشدید **ج)** مقدار میرایی

از آنجا که نیروی تحریک، اثرات قابل ملاحظه‌ای دارد لذا این موضوع اهمیت دارد که مناطق مختلف عملیات کشتی در امواج مورد بررسی قرار گیرد:

۱) منطقه زیر بحرانی[5] ۲) منطقه بحرانی[6] ۳) منطقه فوق بحرانی[7]

جدول ۴-۱۶ این سه منطقه مختلف را نشان می‌دهد.

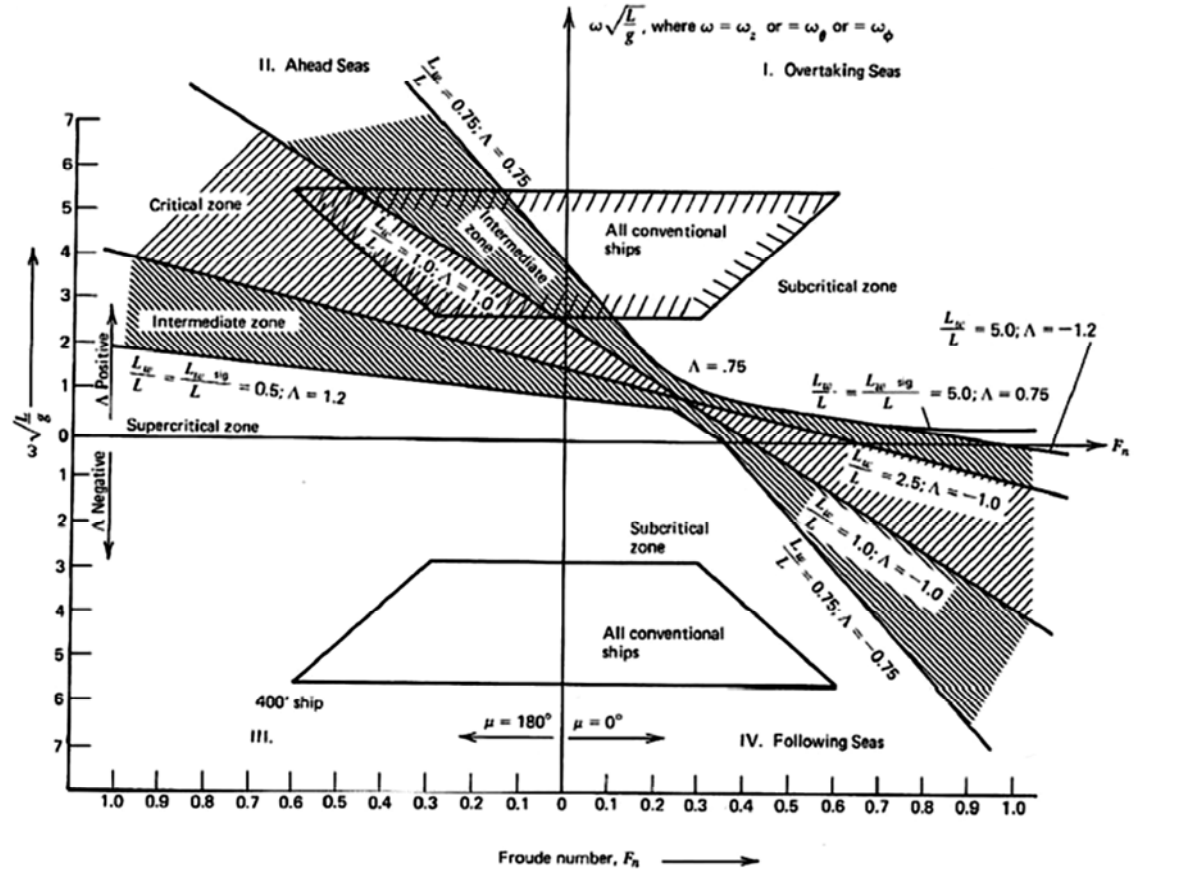
---

1 - nondimensional frequency
2 - ahead seas
3 - overtaking
4 - following seas
5 - subcritical zone
6 - critical zone
7 - supercritical zone

Zone of Operation	Tuning Factor, Λ
Subcritical	< 0.75
Critical	1.00
Supercritical	> 1.20

جدول ۴-۱۶

از جدول فوق ملاحظه می‌شود که یک تداخل بین مناطق زیر بحرانی و بحرانی وجود دارد همانطور که بین مناطق بحرانی و فوق بحرانی وجود دارد به گونه‌ای که حرکات می‌توانند سخت‌تر از شرایط خالص زیر بحرانی یا فوق بحرانی باشند. در هر حال حرکات متوسط هم در منطقه زیر بحرانی و هم فوق بحرانی انتظار می‌رود. در شرایط موج از روبرو، در کشتی‌های تجاری معمولی تا طول ۱۰۰۰ فوت وقتی که دارای سرعتهای بالایی باشند وارد منطقه بحرانی حرکات هیو و پیچ می‌شوند. کشتی‌هایی که دارای مقادیر بزرگتر فرکانس طبیعی هیو و پیچ هستند قبل از رسیدن به ناحیه بحرانی، می‌توانند سریع‌تر از کشتی‌هایی که دارای فرکانس طبیعی پائین‌تری هستند، حرکت کنند. کشتی‌های معمولی معمولاً در ناحیه زیر بحرانی در امواج از پشت هستند و بنابراین دارای حرکات آرام‌تری در این دریاها هستند. در امواج از پشت، کشتی در صورتی وارد ناحیه بحرانی می‌شود که دارای حداکثر سرعت غیرمتعارفی باشد. همچنین ورود کشتی‌های معمولی به منطقه فوق بحرانی در امواج از روبرو بسیار دشوار است. به عبارت دیگر، در چنین سرعتهای بالایی از کشتی، در منطقه فوق بحرانی و در امواج از پشت، حالت تشدید احتمال زیادی دارد و حرکات سنگینی انتظار می‌رود. علاوه بر آن، اگر نیاز باشد که کشتی سرعت خود را کاهش دهد، وارد ناحیه بحرانی می‌شود که ممکن است شدیدترین حرکات ممکن را تجربه کند. شکل ۴-۸۴ نشان می‌دهد که اگر پارامتر فرکانس بی‌بعد پیچ (یا هیو) $\left(\omega_0\sqrt{\frac{L_0}{g}}\right)$ به مقدار ۰/۷۵ کاهش یابد، یک کشتی ۴۰۰ فوتی معمولاً در ناحیه فوق بحرانی عملیات می‌کند، درحالیکه در امواج از روبرو، سرعت هر مقدار که می‌خواهد باشد و در امواج از پهلو، سرعت تا ۱۲ گره $(F_n = 0.175)$ باشد. این کشتی در امواج از پهلو وارد ناحیه بحرانی نمی‌شود مگر اینکه سرعت به ۱۸/۵ گره برسد $(F_n = 0.275)$ و در سرعتهای ۲۲ $(F_n = 0.325)$ ناحیه بحرانی را ترک می‌کند. با افزایش سرعت، ممکن است کشتی نتواند به ناحیه زیر بحرانی بازگردد. برای سرعتهای بین ۲۲ و ۳۵ گره $(F_n = 0.325 \text{ to } 0.515)$، کشتی در مناطق میانی خواهد بود، ابتدا در امواج از پهلو و سپس در امواج از پشت. حتی در سرعتهای بالاتر (بیش از ۳۵ گره)، کشتی می‌تواند در امواج از پشت وارد ناحیه بحرانی شود و همچنان در تمامی سرعتهای ممکن، داخل همین ناحیه بماند. هر چند که اگر فرکانس بی‌بعد پیچ و هیو بتواند به ۶ افزایش یابد (که برای کشتی‌های معمولی خیلی بزرگ است)، یک کشتی ۴۰۰ فوتی می‌تواند در تمامی سرعتها در امواج از پهلو در ناحیه زیر بحرانی بماند و همچنین برای سرعتهای تا ۱۲ گره $(F_n = 0.18)$ در امواج از روبرو و همچنین در موج از روبرو تا زمانی که سرعت کشتی به ۳۷ گره $(F_n = 0.55)$ نرسد، کشتی وارد ناحیه بحرانی نخواهد شد. البته هیچ‌یک از پارامترهای فرکانس بحث شده در بالا (۰/۷۵ یا ۶) برای کشتی‌های معمولی امکان‌پذیر نیست مگر اینکه به مقدار زیادی اصلاحات روی آن انجام شده باشد. پارامتر فرکانس‌های بالا در حالت کلی مربوط به کشتی‌های طویل، لاغر و پرسرعت مانند ناوشکن‌ها می‌باشد و پارامتر فرکانس‌های پائین مربوط به یدک‌کش‌ها، کشتی‌های ماهیگیری و سایر کشتی‌های کوتاه و کم سرعت می‌باشد.



شکل ۴-۸۴: مناطق سرعت زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی برای یک کشتی ۴۰۰ فوتی

مثال) یک کشتی با اطلاعات زیر موجود است:

(L = 400 ft , $\omega_\theta = 0.7$, $L_w / L = 2.5$) مطلوبست سرعت کشتی در امواج از روبرو در مناطق زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی.

حل) داریم: $$F_n \cos\mu = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}}\sqrt{\left(\frac{L_w}{L}\right)} - \frac{\Lambda_\theta}{2\pi}\left[\omega_\theta \left(\frac{L}{g}\right)^{1/2}\right]\frac{L_w}{L}$$

که برای امواج از روبرو و از پشت، *1-* یا *1+* = $\cos\mu$ است. بنابراین داریم:

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{6.28}}\sqrt{2.5} - \frac{\Lambda_\theta}{6.28}\left[0.7\left(\frac{400}{32.2}\right)^{1/2}\right]2.5 = \frac{V}{\sqrt{gL}} = 0.63094 - \Lambda_\theta(0.98216) = \frac{V}{113.49}$$

منطقه زیر بحرانی: $\Lambda < 0.75$, $F_n < 0.106$, $V < 11.99\ ^{ft}/_{sec}\ (7.1\ knot)$

منطقه بحرانی: $\Lambda = 1.0$, $F_n = 0.351$, $V = 36.86\ ^{ft}/_{sec}\ (23.6\ knot)$

منطقه فوق بحرانی: $\Lambda > 1.2$, $F_n > 0.548$, $V > 62.15\ ^{ft}/_{sec}\ (36.7\ knot)$

مراجع قسمت چهارم :

[۱]: دینامیک کشتی ـ محمدسعید سیف ـ ۱۳۷۶
[۲]: نظریه‌های موج ـ وحید چگینی ـ ۱۳۷۷
[۳]: شناخت امواج ـ ناخدا سلیم‌زاده ـ ۱۳۶۵
[۴]: مهندسی دریا
[۵]: مدلسازی امواج اقیانوس ـ داوود تحویلدارزاده ـ ۱۳۸۵
[۶]: جزوه درسی «تئوری امواج» ـ دانشگاه خلیج فارس ـ مهندس کهنسال
[۷]: تحلیل حرکات کشتی در امواج – داوود تحویلدارزاده – ۱۳۸۵
[8]:Introduction in ship hydromechanics/ J.M.J.Journee & Jackob Pinkster
[9]:Basic ship theory/ K.J.Rawson & E.C.Tupper
[۱۰]:جزوه درسی: دینامیک شناورهای تندرو– دکتر محمدسعید سیف– دانشگاه صنعتی شریف
[۱۱]:ضرایب هیدرودینامیک– حسین نوروزی– دانشگاه صنعتی مالک اشتر–۱۳۹۰
[12]- Dynamics of Marine Vehicles,R.Bhattacharyya, 1972
[13]- Guidance and Control of Ocean Vehicle, T .I .Fossen: JOHN WILEY & SONS 1994.
[14]- Maneuvering And Control of Marine Vehicles, M .S .Triantafyllou: Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts USA 2002
[15]- Submarine Dynamic Modeling, Dr Peter Ridley & Julien Fontan and Dr Peter Corke,
[16]- An Evaluation of the FIDAP Computational Fluid Dynamics Code for the Calculation of Hydrodynamic Forces on Underwater Platforms, D.A. Jones and D.B. Clarke: DSTO-TR-1494, 2003
[17]- An Introduction to Submarine Longitudinal Static And Dynamic Stability Concepts, j .j Barlow, Naval Submarine, 1983

قسمت پنجم:

معماری و جانمایی کشتی

(Architecture & General Arrangement)

- بخش اول: فرآیند طراحی کشتی
- بخش دوم: تعیین ابعاد اصلی کشتی
- بخش سوم: حجم‌بندی مخازن کشتی
- بخش چهارم: معماری و جانمایی در کشتی‌ها
- بخش پنجم: کار با استانداردهای دریایی
- بخش ششم: تخمین وزن و مرکز ثقل کشتی
- بخش هفتم: آزمایشات دریایی

بخش اول:
فرایند طراحی کشتی

طراحی کشتی نه تنها در یک مرحله، بلکه در چندین مرحله انجام می‌شود و در هر مرحله، کشتی به حالت بهینه نزدیک‌تر می‌شود. فرایند بهینه‌سازی طراحی را می‌توان در شکل ۵-۱ نمایش داد که به آن «حلزون طراحی» گویند. این شکل حلزونی دارای چندین حلقه می‌باشد که با طی شدن هر حلقه در واقع یک «سعی و خطا» برای کلیه اجزاء طراحی انجام شده است. این اجزاء به صورت خطوط شعاعی ترسیم شده‌اند و هر خط نشان‌دهنده یک جزء طراحی می‌باشد که شامل موارد زیر است:

۱- **تعیین ابعاد و انتخاب شکل بدنه:** در این قسمت، حجم و ابعاد بدنه تعیین می‌شوند به‌گونه‌ای که بتوان کلیه فضاهای مورد نیاز برای حمل بار، مسافر، خدمه و تجهیزات را تأمین کرد. حجم بویانسی و مرکز بویانسی (مرکز حجم) در این قسمت تعیین می‌گردد.

۲- **چیدمانی داخلی و جانمایی عمومی:** در این قسمت چیدمانی تجهیزات داخلی و فضاهای اختصاص یافته برای شناور، در داخل بدنه توزیع می‌شوند. تعیین مرکز ثقل کشتی خیلی وابسته به این مرحله است.

۳- هیدرودینامیک و کنترل سرعت: بر اساس انجام محاسبات هیدرودینامیک و محاسبه درگ، قدرت مورد نیاز و سرعت حرکت تعیین می‌گردد. سرعت حرکت شناور معمولا معیار اصلی چانه‌زنی بین کارفرما و پیمانکار است.

۴- **انتخاب تجهیزات:** انتخاب تجهیزات، شامل انتخاب نوع، ابعاد و وزن تجهیزات می‌باشد که در تعیین مرکز ثقل کل کشتی و حجم مورد نیاز بدنه برای نصب تجهیزات اهمیت دارد. معمولا در مراحل اولیه طراحی فقط تخمینی از وزن و ابعاد تجهیزات ارائه می‌شود. انتخاب تجهیزات جهت خرید فقط در مرحله طراحی مهندسی و طراحی جزئیات انجام می‌شود.

۵- **طراحی سازه‌ای:** در قسمت طراحی سازه‌ای، مشخصات هندسی و وزنی سازه قسمتهای مختلف بدنه انجام می‌شود. در آخرین مرحله طراحی سازه، بدنه کشتی چنان بهینه شده است که دارای کمترین وزن سازه‌ای ممکن باشد.

۶- **تخمین وزن و مرکز ثقل:** پس از انتخاب تجهیزات و طراحی سازه‌ای بدنه می‌توان تخمین نسبتا دقیقی از وزن شناور و مرکز ثقل آن بدست آورد.

۷- **کنترل پایداری در حالت سالم و صدمه‌دیده:** برای کنترل پایداری شناور دو مشخصه اصلی مورد نیاز است: یکی مشخصات هندسی بدنه و دیگری مرکز ثقل شناور که تا این مرحله هر دو مشخصه فوق تعیین شده‌اند. بررسی پایداری در دو حالت کلی سالم و صدمه‌دیده (آبگرفتگی بدنه) انجام می‌شود.

۸- **کنترل و مانور پذیری:** بررسی پایداری مسیر و کنترل‌پذیری شناور در این قسمت انجام می‌شود.

۹- **کنترل هزینه:** طراحی، وابستگی زیادی به توانایی مالی کارفرما دارد. در بسیاری موارد برای کاهش هزینه‌ها، ساده‌سازی طراحی تنها راه چاره است.

مطابق شکل ۴-۱ جایگاه پایداری در فرایند طراحی نشان می‌دهد که بررسی پایداری تنها زمانی امکان‌پذیر است که تغییرات شکل و حجم بدنه و همچنین مرکز ثقل تعیین شده باشد. تعداد حلقه‌های طراحی که در حلزون طراحی وجود دارد به تجربه و دانش طراحی پیمانکار بستگی دارد. معمولا به دو حلقه اول «طراحی مفهومی»، دو حلقه دوم «طراحی مقدماتی»، سه حلقه بعدی «طراحی مهندسی» و سه حلقه آخر نیز «طراحی جزئیات» گفته می‌شود. لازم به ذکر است که قبل از ورود به «حلزون طراحی» سه مرحله باید انجام شود که عبارتند از:

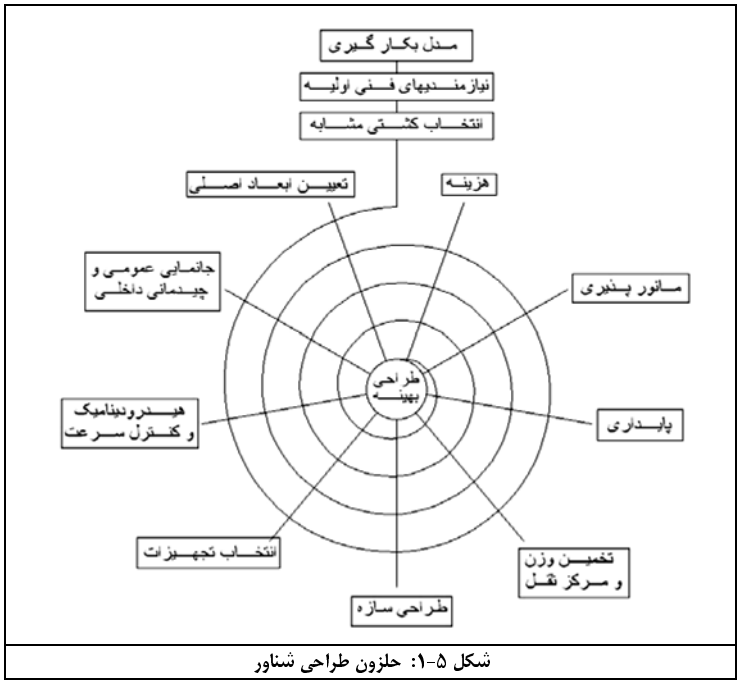
۱- **تعیین مدل بکارگیری**[1] : در این مرحله نوع شناور و الگوی استفاده از شناور شامل مسیر حرکت، مدت زمان حضور پیوسته در دریا، مشخصات جوی ناحیه تردد، مشخصات مناطق لنگر اندازی و پهلوگیری و ... تعریف می‌شود که از اهمیت خاصی در طراحی برخوردار است مثلا اگر شناوری قرار است در ناحیه قطبی پوشیده از یخ حرکت کند الزامات خاصی را نیاز دارد.

۲- **تعیین نیازمندیهای فنی اولیه**[2] : در این مرحله ابتدا نیازهای کارفرما دریافت شده و پس از مذاکرات فنی بسیار بین کارفرما و پیمانکار، نیازمندی‌های معقول مورد توافق طرفین تعیین می‌گردد که سند «نیازمندیهای فنی اولیه» نامیده می‌شود و شامل موارد زیر می‌باشد: سرعت

1 - Model of Employment
2 - Initial Technical Requirement

حرکت شناور، تناژ بار قابل حمل، برد حرکت بدون سوخت‌گیری مجدد و ....

۳- **انتخاب کشتی مشابه**[1] : قبل از شروع طراحی، باید بتوان مشابه‌ترین کشتی به کشتی مورد توافق در «نیازمندیهای فنی اولیه» را از بین کشتی‌های ساخته شده انتخاب کرد. هرچه شباهت کشتی مشابه بیشتر باشد، فرایند طراحی در حلقه‌های کمتر و در مدت زمان کوتاه‌تری به پایان می‌رسد. چهار مشخصه اصلی در انتخاب کشتی مشابه عبارتند از: ۱) نوع کشتی ۲)جابجایی (تناژ) ۳) ابعاد (بخصوص طول کشتی) ۴) سرعت حرکت



شکل ۵-۱: حلزون طراحی شناور

الهی!!!

توفیقم ده که بیش از طلب همدردی ، همدردی کنم ...
بیش از آنکه مرا بفهمند ، دیگران را درک کنم ...
بیش از آنکه دوستم بدارند ، دوست بدارم ...

زیرا در عطا کردن است که می‌ستانیم، و در بخشیدن است که بخشیده می‌شویم، و در مردن است که حیات ابدی می‌یابیم .

1 - Sister Ship

بخش دوم:

تعیین ابعاد اصلی کشتی

فصل اول: ملاحظات تعیین ابعاد اصلی شناور[1]

ابعاد اصلی شناور موارد زیر است:

۱) طول: طول بین دو عمود (L_{BP})، طول کلی (L_{OA}) و طول خط آبخور(L_W).

۲) عرض: حداکثر عرض و عرض قالبی

۳) ارتفاع آبخور و فری‌برد

برای تعیین ابعاد اصلی شناور در مراحل اولیه طراحی طبق مراحل زیر عمل می‌شود:

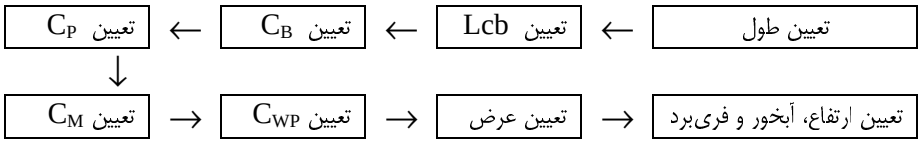
۱) تعیین طول (L): مهمترین قسمت تعیین ابعاد می‌باشد که به کمک آن می‌توان سایر ابعاد کشتی و ضرایب بدنه را بدست آورد. همچنین پس از تعیین طول می‌توان عدد فرود را نیز محاسبه کرد.

۲) تعیین موقعیت طولی مرکز بویانسی (Lcb): با تعیین طول و عدد فرود می‌توان Lcb را تعیین کرد.

۳) تعیین ضرایب بدنه: طبق روابطی که ارائه شده است از عوامل مهم در تعیین ضرایب بدنه، طول و عدد فرود می‌باشد. ضرایب بدنه عباتند از: ضریب بلوکی (C_B)، ضریب منشوری (C_P)، ضریب مقطع میانی (C_M)، ضریب صفحه آبخور (C_{WP}).

۴) تعیین عرض B: عرض بدنه بر پایداری شناور که عامل بسیار مهمی است، تأثیر ویژه‌ای دارد لذا در این مرحله عرض بدنه تعیین می‌گردد.

۵) تعیین عمق (D)، آبخور (d) و فری‌برد (F): که در جابجایی (تناژ) و ذخیره بویانسی شناور مؤثر هستند. بنابراین مراحل زیر را می‌توان در نظر گرفت:



روابط تجربی و محاسباتی تعیین هریک از عوامل فوق در قسمت‌های بعد ارائه می‌شود و وابستگی عوامل و مراحل تعیین آنها در روابط ارائه شده، قابل ملاحظه است.

محدوده کلی زیر را می‌توان برای نسبتهای ابعادی کشتی‌ها در نظر گرفت:

(طبق پیشنهاد استاندارد GL) $\frac{L}{D}=10-16$

که البته برای اغلب کشتی‌ها $\frac{L}{D}=$ ۱۰ − ۱۲ می‌باشد.

$\frac{L}{B}=5.5-8$

در کشتی‌های نظامی $\frac{L}{B}=9$ است.

$\frac{B}{D}=2-3$

در منبع ۲۲ نسبتهای ابعادی کشتی‌های مختلف به صورت زیر داده شده است:

کشتی مسافربری	L/B=6-8
کشتی باری معمولی	L/B=5-7

1 - منابع: [۲ و ۱]

یدک‌کش	L/B=3-5
انواع کشتی	B/T=2.3-4.5

در واقع تعیین ابعاد کشتی پس از چندین مرتبه سعی و خطا و در فرآیند طراحی قطعی می‌شود چراکه ابعاد اصلی شناور دارای اثر متقابل با عواملی از جمله عوامل زیر است:

۱) حجم بدنه، بار قابل حمل و ذخیره بویانسی شناور: حجم بدنه و بار قابل حمل به معنای درآمدزایی کشتی و بسیار حائز اهمیت است.

۲) هیدرودینامیک، توان و سرعت شناور: مقاومت حرکت شناور هرچه کمتر باشد، توان مورد نیاز کمتر شده و مصرف سوخت کاهش می‌یابد.

۳) پایداری استاتیکی، دینامیکی و مانورپذیری شناور: پایداری استاتیکی بسیار وابسته به عرض بدنه است. همچنین ذخیره بویانسی و ارتفاع فری‌برد هم بر پایداری استاتیکی تأثیر بسیاری دارد. پایداری دینامیکی و مانورپذیری نیز دو عامل مغایر هم هستند بدین ترتیب که هرچه پایداری دینامیکی بیشتر باشد، مانورپذیری کمتر است. پایداری دینامیکی همان قابلیت حفظ مسیر است. ارتباط این پارامترها با نسبت $\frac{L}{D}$ بدین ترتیب بیان می‌شود:

- افزایش $\frac{L}{D}$: یعنی بدنه، کشیده و باریک شده لذا پایداری دینامیکی (قابلیت حفظ مسیر)، افزایش یافته و مانورپذیری کاهش می‌یابد مانند کشتی‌های تجاری بزرگ.
- کاهش $\frac{L}{D}$: یعنی بدنه، توپر و کوتاه شده لذا پایداری دینامیکی کاهش و مانورپذیری افزایش می‌یابد مانند یدک‌کش‌ها.

۴) مشخصات سازه و وزن سازه‌ای کشتی:

در جابجایی ثابت هرچه نسبت $\frac{L}{D}$ افزایش یابد وزن سازه‌ای کشتی افزایش می‌یابد که برای آن می‌توان دو دلیل اصلی ذکر کرد:

۱) افزایش سطح ورق: این مورد را با یک مثال برای سطح دو بارج با تناژ یکسان می‌توان تعیین کرد: سطح بیان‌شده = سطح جداره‌ها، کف و عرشه.

- بارج به ابعاد ۵× ۵ × ۱۰:

حجم $V = 5\times5\times10 = 250m^3$

سطح جانبی $S = [(5+5)\times2]\times10 = 200m^2$

$\frac{L}{D} = 2$

- بارج با ابعاد ۲× ۵ × ۲۵:

$V = 25\times5\times2 = 250m^3$

سطح جانبی $S = [(5+2)\times2]\times25 = 350m^2$

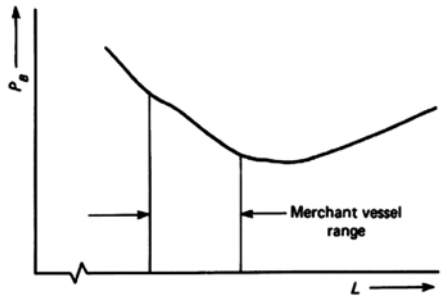
$\frac{L}{D} = \frac{25}{2} = 12.5$

ملاحظه می‌شود که با افزایش $\frac{L}{D}$ ، در جابجایی یکسان، مساحت سطح که همان مساحت ورق بدنه می‌باشد افزایش بسیاری یافته است.

۲) افزایش ممان‌های خمشی وارد بر بدنه: با افزایش طول کشتی در جابجایی ثابت، ممان‌های خمشی شدیدتری بر بدنه وارد می‌شود که در نتیجه باید استحکام ورق و تقویتهای متصل به آن را افزایش داد. این عامل نیز به معنای افزایش وزن سازه کشتی است.

فصل دوم: تعیین طول کشتی

طول شناور همانطور که در قسمت قبل بیان شد بر مهمترین عوامل طراحی و کارآیی کشتی بسیار مؤثر است. از جمله هیدرودینامیک، پایداری استاتیکی و دینامیکی. عامل مهم بر بحث هیدرودینامیک عدد فرود می‌باشد که پس از تعیین طول، قابل محاسبه است $\left(F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}\right)$. سرعت از ورودی‌های طراحی است که طبق نظر کارفرما (مالک کشتی) تعیین می‌شود. در واقع تعیین طول می‌تواند نقطه شروع طراحی کشتی باشد. مطابق نظر جنسن باید از فرود در محدوده زیر پرهیز کرد: $0.25 \langle F_n \langle 0.27$ و $0.37 \rangle F_n \rangle 0.5$. مباحث تکمیلی این بحث مربوط به مقاومت موج‌سازی می‌شود که در قسمت مربوطه ارائه شده است.



شکل ۵-۲: محدوده مناسب طول کشتی‌ها برای حصول حداقل توان و مقاومت

برای تعیین طول شناور، مهمترین عوامل زیر را می‌توان در نظر گرفت:

۱- محدودیت آبراهه‌های جهان: برخی کانال‌ها و رودخانه‌ها دارای محدودیت ابعادی برای کشتی‌های عبوری هستند مانند کانال سوئز و پاناما که در قسمت مربوط بدان اشاره شده است. (کانال سوئز: بین کشور مغرب و اسپانیا – اتصال‌دهنده دریای مدیترانه و اقیانوس اطلس. کانال پاناما: بین آمریکای شمالی و جنوبی در کشور پاناما – متصل‌کننده اقیانوس آرام و اطلس).

۲- ملاحظات هیدرودینامیکی بخصوص مقاومت موج‌سازی: در مورد اثر طول بر مقاومت موج‌سازی و مقاومت کل شناور، در قسمت مربوطه در بخش هیدرودینامیک بطور مفصل بحث شد. نمودار شکل ۵-۲ بیان‌کننده یک محدوده مناسب طول برای کشتی است. طول بیشتر از این محدوده باعث افزایش فوق‌العاده وزن سازه‌ای و کاهش مانورپذیری می‌شود لذا علی‌رغم کاهش مقاومت و توان، توصیه نمی‌شود.

۳- سایر ملاحظاتی که پیش از این در مورد تعیین طول بحث شد.

برای تعیین طول کشتی‌ها روابطی به صورت تجربی استخراج شده که قابل استفاده و کاربردی هستند. این روابط بر دو مبنای کلی بنا شده‌اند:

۱) فرمول‌هایی بر مبنای حداقل هزینه و بازدهی اقتصادی

۲) فرمول‌هایی بر اساس مطالعات آماری کشتی‌های ساخته شده

این روابط در ذیل بیان می‌شوند و طول بکار رفته در آنها طول بین دو عمود است. در صورت وجود حبابی سینه باید ۷۵ درصد طول حبابی در جلوی سینه را به آن اضافه کرد.

۱- رابطه شنیکلات[1] : این رابطه بر اساس کمترین هزینه ساخت و بازدهی اقتصادی بیان شده است:

$$L_{PP} = \Delta^{0.3}.\Delta^{0.3} \times 3.2 \times .\frac{C_B + 0.5}{(0.145/F_n) + 0.5}$$

که در آن: L_{PP} : طول بین دو عمود بر حسب متر، Δ : جابجایی بر حسب تن، V : سرعت بر حسب گره

کاربرد این رابطه در محدوده زیر است:

$$\Delta \geq 1000t$$

$$0.16 \leq F_n \leq 0.32$$

با توجه اینکه در این رابطه عدد فرود (F_n) وجود دارد، این بدین‌معناست که مسائل هیدرودینامیک و حداقل مقاومت در آن لحاظ شده است. طول بدست آمده از این فرمول حدود ۱۰ درصد بزرگتر از طول بهینه اقتصادی واقعی است و این طول از طول کشتی‌های ساخته شده در سالهای اخیر هم بزرگتر است.

۲- رابطه ایری[2] : این فرمول بر اساس اطلاعات آماری بدست آمده است: $\frac{L}{\nabla^{1/3}} = 3.33 + 1.67\frac{V}{\sqrt{L}}$

۳- رابطه پوزنین[3] : این رابطه بر اساس انجام آزمایشات در حوضچه کشش برای رسیدن به حداقل مقاومت بدست آمده است:

1 - schneekluth
2 - Ayre
3- posdunine

$$L = C\left(\frac{V}{V+2}\right)^2 \nabla^{1/3}$$

L بر حسب متر، V بر حسب گره و ∇ بر حسب متر مکعب است. برای کشتی‌هایی با محدوده $V = 15.5 - 18.5$ داریم:

$$C = 7.25$$

۴- رابطه ولکر[1] :

$$\frac{L}{\nabla^{1/3}} = 3.5 + 4.5\frac{V}{\sqrt{g\nabla^{1/3}}}$$

۵- در این رابطه V بر حسب m/s است. این رابطه برای کشتی‌های حمل بار خشک و کشتی‌های کانتینربر صادق است. برای کشتی‌های یخچالی مقدار $L/\nabla^{1/3}$ کمتر از ۰/۵ است و برای کشتی‌های ساحلی و صیادی کمتر از ۱/۵ است. جدول ۵-۱ مقایسه‌ای بین مقادیر مختلف طولی در روابط موجود ارائه کرده است.

∇ [t]	V [kn]	Ayre	Posdunine	Schneekluth $C_B = 0.145/F_n$	Schneekluth $C_B = 1.06 - 1.68F_n$
1 000	10	55	50	51	53
1 000	13	61	54	55	59
10 000	16	124	123	117	123
10 000	21	136	130	127	136
100 000	17	239	269	236	250

جدول ۵-۱: مقایسه‌ای بین مقادیر مختلف طولی در روابط موجود

منبع [۴] روش زیر را برای تخمین طول کشتی ارائه کرده است که بر حسب متر بدست می‌آید:

$$L = \left(\frac{dwt \times (L/B)^2 \times (B/H)}{\rho \times C_B \times C_D}\right)^{1/3} \quad m$$

در این رابطه L طول بین دو عمود، B عرض، ρ چگالی آب دریا، C_B ضریب بلوکی و C_D ضریب بار مرده است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_D = \frac{deadweight}{displacement} = \frac{dwt}{W}$$

محدوده تقریبی ضریب بار مرده در جدول ۵-۲ ارائه شده است:

جدول ۵-۳ و نمودار شکل ۵-۳ برای تخمین طول بین دو عمود بر اساس اطلاعات آماری کشتی‌های تجاری ارائه شده است:

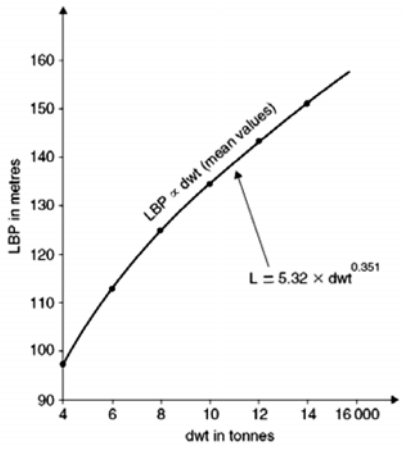
$$LBP = 5.32 \times dwt^{0.351}$$

Ship type	C_D	Ship type	C_D
Oil Tanker	0.800–0.860	Container ship	0.600
Ore Carrier	0.820	Passenger Liners	0.35–0.40
General Cargo ship	0.700	RO-RO vessel	0.300
LNG or LPG ships	0.620	Cross-channel	0.200

جدول ۵-۲: مقدار تقریبی وزن بار مرده در انواع کشتی‌ها

Approx LBP (m)	Deadweight (tonnes)
97.6	4000
112.8	6000
125.0	8000
134.2	10 000
143.5	12 000
151.0	14 000

جدول ۵-۳: مقدار تقریبی طول بر حسب وزن مرده



شکل ۵-۳: مقدار تقریبی طول بر حسب وزن مرده

1 - Volker

فصل سوم: تعیین عمق، آبخور و فری‌برد[۱]

مبحث اصلی در این قسمت عمق بدنه است. قسمت زیر آب عمق بدنه را آبخور و قسمت بالای آب بدنه را فری‌برد گویند. (عمق بدنه – آبخور = فری-برد).

❖ ملاحظات تعیین آبخور

برای تعیین عمق باید بتوان یک تخمین از آبخور شناور ارائه کرد و البته محدودیت‌هایی برای شناورهایی مانند سوپرتانکرها، فله‌برها و کشتی‌های ساحلی وجود دارد. سوپرتانکرها و فله‌برها از آنجا که باری با چگالی بالا (نسبت به چگالی آب)، حمل می‌کنند لذا دارای آبخور زیادی هستند. البته افزایش آبخور مزایایی را نیز در پی دارد مانند استفاده از پروانه‌هایی با قطر بزرگتر که منجر به افزایش بازدهی پروانه می‌شود. نقش اصلی آبخور، تأمین حجم جابجایی لازم و در واقع تأمین نیروی بویانسی است. این نیروی بویانسی باید بر وزن غلبه کند. اگر تا این مرحله، طول، ضرایب بدنه و عرض تعیین شده باشد طبق رابطه زیر می‌توان آبخور را بدست آورد:

$$W = \Delta = \rho.V = \rho.C_B.L.B.T$$

$$T = \frac{W}{\rho.C_B.L.B}$$

در مراحل بعدی طراحی می‌توان از منحنی‌های هیدرواستاتیک هم برای تعیین دقیق آبخور استفاده کرد. مثلاً اگر جرم کلی یک کشتی ۱۰۰۰ تن شده است، از جداول هیدرواستاتیک، آبخوری را تعیین می‌کنیم که در آن جابجایی شناور برابر ۱۰۰۰ تن شود. این آبخور، آبخور شرایط سنگین[۲] می-باشد. آبخور در حالات مختلف بارگیری نیز از جداول و نمودارهای هیدرواستاتیک قابل حصول است.

❖ ملاحظات تعیین عمق بدنه[۳]

عمق بدنه دارای اثرات متفاوتی بر طراحی کشتی است از جمله:

۱) تأمین فضای داخل انبارها برای جاسازی کالاها

۲) اثرات استحکامی و سازه‌ای

افزایش عمق به معنای افزایش مدول مقطع عرضی بدنه است: $M = \frac{I}{C}$

هرچه مدول مقطع[۴] بیشتر باشد استحکام بدنه کشتی در برابر بارهای خمشی و خیز بدنه بیشتر خواهد بود. عمق، اثر قابل ملاحظه‌ای بر مدول مقطع دارد:

$$M = \frac{I}{C} = \frac{\frac{1}{12}B.(D)^3}{C}$$

که B عرض، D عمق بدنه و I ممان دوم حول محور عرضی مقطع بدنه و C فاصله محور تا مرکز سطح مقطع است. ملاحظه می‌شود که عمق با توان ۳ بر مدول مقطع کشتی مؤثر است. حال اگر عمق کاهش یابد، ضخامت ورق یا ابعاد تقویت‌های عرشه و کف باید به حدی تقویت شود که مدول مقطع مورد نیاز تأمین شود و این به معنای افزایش تصاعدی وزن سازه بدنه است. لذا عمق بدنه از نظر هزینه فولاد مصرفی، ارزان‌ترین بعد کشتی محسوب می‌شود چراکه سایر ابعاد مانند طول، همانطور که قبلاً بیان کردیم، بطور فوق‌العاده‌ای باعث افزایش وزن سازه‌ای می‌گردد.

۳) ارتفاع مرکز ثقل و پایداری: قانون کلی مبحث پایداری بیان می‌کند که هرچه ارتفاع مرکز ثقل افزایش یابد، پایداری شناور تضعیف می‌شود. عمق بدنه از عواملی است که مستقیماً باعث افزایش ارتفاع مرکز ثقل (KG) می‌شود. افزایش KG نیز به منزله کاهش ارتفاع متاسنتری (GM) است.

۴) تأمین آبخور و فری‌برد: عمق بدنه علاوه بر آبخور، باید بتواند فری‌برد مورد نیاز را نیز تأمین کند. برای تعیین فری‌برد قوانین خاصی وجود دارد که در قسمت بعد بیان می‌شود. از مجموع آبخور و فری‌برد، مقدار عمق بدنه بدست می‌آید. طبق توصیه مؤسسه استاندارد GL، نسبت $\frac{L}{D} = 10-16$ است.

❖ ملاحظات تعیین فری‌برد کشتی‌ها

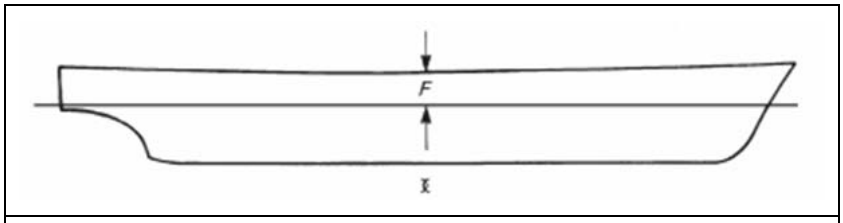
اثرات فری‌برد بر خصوصیات کشتی را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱) تأمین ذخیره بویانسی: ذخیره بویانسی در واقع حجم آب‌ناپذیر بالای خط آب تا عرشه فری‌برد می‌باشد که در صورت صدمه دیدن بدنه شناور، عامل غرق‌ناپذیری آن است. حداقل مقدار ذخیره بویانسی تابع قوانین فری‌برد و خط بار است و حداکثر مقدار آن وابسته به نظر

۱- منابع: [۴ و ۲]

2 - full load
3 - depth
4 - section modulus

کارفرما و مالک کشتی است (شکل۵-۴) (عرشه فری‌برد: بالاترین عرشه ممتد شناور را عرشه فری‌برد گویند که همان عرشه اصلی شناور است).



شکل۵-۴: تامین ذخیره بویانسی با توجه به مقدار فری برد

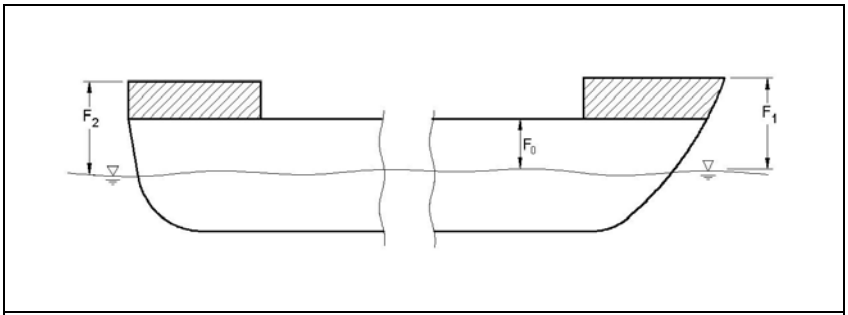
۲) اثرات بر منحنی GZ و پایداری: اثرات فری‌برد بر منحنی GZ در بخش پایداری به طور کامل بحث شده است. افزایش فری‌برد باعث افزایش زاویه خیسی عرشه، افزایش حداکثر مقدار GZ و افزایش محدوده پایداری می‌شود.

۳) تأمین خشکی سطح عرشه که مزایای زیر را به دنبال دارد:

- کاهش خطر راه رفتن روی عرشه
- ایمنی در برابر ورود آب به سوراخ‌ها و منافذ عرشه
- کاهش اثرات موج بر روبناسازی
- جلوگیری از خسارت بر بارها و کالاهای روی عرشه

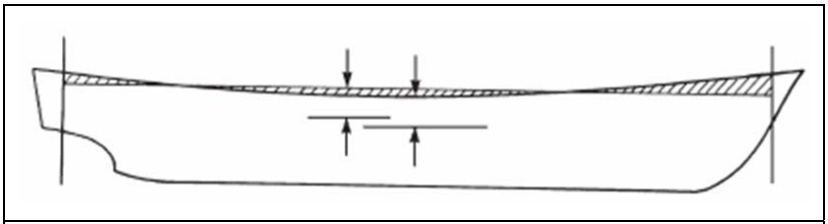
کشتی‌های مسافربری که دارای ایمنی بسیار بالا هستند، دارای ذخیره بویانسی و ارتفاع فری‌برد بیشتری نسبت به سایر کشتی‌ها هستند. کشتی-های بادبانی نیز دارای فری‌برد زیادی هستند چراکه وزش باد بر روی بادبان‌ها، ممان عرضی زیادی بر شناور وارد می‌کند و زوایای غلتش را بسیار افزایش می‌دهد. یدک‌کش‌ها از پهلو به پهلو شدن با کشتی‌های بزرگ، در برخی مواقع دچار غلتش‌های شدیدی می‌شوند که برای جلوگیری از آبگرفتگی عرشه، ارتفاع فری‌برد آنها از سایر کشتی‌ها بیشتر در نظر گرفته می‌شود. ملاحظه می‌شود که ارتفاع فری‌برد برای کشتی‌های خاص، متفاوت است و قوانین جداگانه‌ای را طلب می‌کند. تأمین ارتفاع فری‌برد در سینه و پاشنه از اهمیت خاصی برخوردار است چراکه در اثر حرکات غلتش طولی، احتمال زیر آب رفتن سینه و پاشنه بسیار زیاد است. برای این منظور دو اقدام اصلی می‌توان انجام داد:

۱) ساخت نیم‌عرشه سینه[۱] و نیم‌عرشه پاشنه [۲]که در واقع فری‌برد سینه و پاشنه را به صورت محلی افزایش می‌دهد. (شکل ۵-۵)



شکل۵-۵: افزایش محلی فری برد سینه و پاشنه

۲) شیب طولی عرشه : شیب طولی عرشه مطابق شکل ۵-۶ باعث افزایش فری‌برد در سینه و پاشنه می‌گردد ولی باعث کاهش فری‌برد در وسط شناور نیز می‌شود. البته همانطور که بیان شد، فری‌برد قسمت میانی از اهمیت کمتری نسبت به فری‌برد سینه و پاشنه برخوردار است.



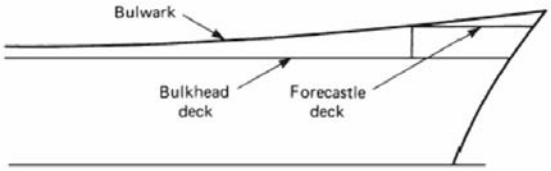
شکل۵-۶: افزایش فری برد سینه و پاشنه بدلیل شیب طولی عرشه

مزایا و معایب داشتن شیب طولی عرشه را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

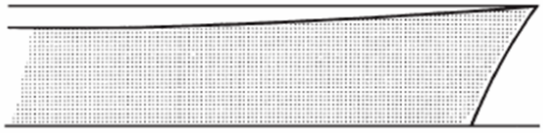
۱ - forcastle
۲ - poop

۱- تأمین ارتفاع فری‌برد لازم در سینه و پاشنه شناور
۲- حمل بیشتر کالا در زیر عرشه (کالای فله و نفت)
۳- تأمین زیبایی شکل ظاهری
۴- ساخت دشوارتر سطح عرشه بدلیل انحنای آن و هزینه بیشتر ساخت
۵- دشواری قرارگیری کانتینر روی سطح عرشه

اگر کشتی دارای انحنای طولی عرشه نباشد برای تأمین شکل ظاهری و زیبایی آن از ۲ روش زیر استفاده می‌شود:



شکل ۵-۷: نرده‌های اطراف عرشه برای نمایش شیب طولی



شکل ۵-۸: رنگ‌آمیزی طولی عرشه برای نمایش شیب طولی

۱) استفاده از نرده‌های اطراف عرشه[۱] برای نمایش شیب طولی (شکل ۵-۷)
۲) رنگ‌آمیزی عرشه یا انحنادار ساختن ضربه‌گیرهای اطراف بدنه (شکل ۵-۸)

❖ فرآیند محاسبه فری‌برد

مطابق قوانین خط بار ۱۹۹۶- مقدار اولیه F_o (فری‌برد) بر حسب میلیمتر در جداول زیر ارائه شده است. مقدار F_o وابسته به طول شناور تغییر می‌کند. این مقدار F_o وابسته به شرایطی که بیان خواهد شد، اصلاح می‌شود. جدول ۵-۴ نشان‌دهنده مقدار فری‌برد برای کشتی‌های حمل مایعات و جدول ۵-۵ مقدار فری‌برد برای سایر کشتی‌ها است. مقدار طول از ۲۴ تا ۳۵۰ متر می‌باشد. مقادیر میانی آنها توسط میان‌یابی بدست می‌آید. برای کشتی‌های با طول بیش از ۳۵۰ متر، مقدار فری‌برد توسط مؤسسات رده‌بندی تعیین می‌گردد.

L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)
24	200	80	841	136	1736	192	2530	248	3000	304	3278
26	217	82	869	138	1770	194	2552	250	3012	306	3285
28	233	84	897	140	1803	196	2572	252	3024	308	3292
30	250	86	926	142	1837	198	2592	254	3036	310	3298
32	267	88	955	144	1870	200	2612	256	3048	312	3305
34	283	90	984	146	1903	202	2632	258	3060	314	3312
36	300	92	1014	148	1935	204	2650	260	3072	316	3318
38	316	94	1044	150	1968	206	2669	262	3084	318	3325
40	334	96	1074	152	2000	208	2687	264	3095	320	3331
42	354	98	1105	154	2032	210	2705	266	3106	322	3337
44	374	100	1135	156	2064	212	2723	268	3117	324	3342
46	396	102	1166	158	2096	214	2741	270	3128	326	3347
48	420	104	1196	160	2126	216	2758	272	3138	328	3353
50	443	106	1228	162	2155	218	2775	274	3148	330	3358
52	467	108	1260	164	2184	220	2792	276	3158	332	3363
54	490	110	1293	166	2212	222	2809	278	3167	334	3368
56	516	112	1326	168	2240	224	2825	280	3176	336	3373
58	544	114	1359	170	2268	226	2841	282	3185	338	3378
60	573	116	1392	172	2294	228	2857	284	3194	340	3382
62	600	118	1426	174	2320	230	2872	286	3202	342	3387
64	626	120	1459	176	2345	232	2888	288	3211	344	3392
66	653	122	1494	178	2369	234	2903	290	3220	346	3396
68	680	124	1528	180	2393	236	2918	292	3228	348	3401
70	706	126	1563	182	2416	238	2932	294	3237	350	3406
72	733	128	1598	184	2440	240	2946	296	3246		
74	760	130	1632	186	2463	242	2959	298	3254		
76	786	132	1667	188	2486	244	2973	300	3262		
78	814	134	1702	190	2508	246	2986	302	3270		

جدول۵-۴: تخمین اولیه فری برد برای کشتی‌های حمل مایعات با توجه به طول

طول بیان شده، طول بین دو عمود می‌باشد که مقادیر فری‌برد جدول نیز بر حسب میلیمتر ارائه شده است.

۱ - bulwark

L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)	L (m)	F (mm)
24	200	80	887	136	2021	192	3134	248	3992	304	4676
26	217	82	923	138	2065	194	3167	250	4018	306	4695
28	233	84	960	140	2109	196	3202	252	4045	308	4714
30	250	86	996	142	2151	198	3235	254	4072	310	4736
32	267	88	1034	144	2190	200	3264	256	4098	312	4757
34	283	90	1075	146	2229	202	3296	258	4125	314	4779
36	300	92	1116	148	2271	204	3330	260	4152	316	4801
38	316	94	1154	150	2315	206	3363	262	4177	318	4823
40	334	96	1190	152	2354	208	3397	264	4201	320	4844
42	354	98	1229	154	2396	210	3430	266	4227	322	4866
44	374	100	1271	156	2440	212	3460	268	4252	324	4890
46	396	102	1315	158	2480	214	3490	270	3128	326	4909
48	420	104	1359	160	2520	216	3520	272	4302	328	4931
50	443	106	1401	162	2560	218	3554	274	4327	330	4955
52	467	108	1440	164	2600	220	3586	276	4350	332	4975
54	490	110	1479	166	2640	222	3615	278	4373	334	4995
56	516	112	1521	168	2680	224	3645	280	4397	336	5015
58	544	114	1565	170	2716	226	3675	282	4420	338	5035
60	573	116	1609	172	2754	228	3705	284	4443	340	5055
62	601	118	1651	174	2795	230	3735	286	4467	342	5075
64	629	120	1690	176	2835	232	3765	288	4490	344	5097
66	659	122	1729	178	2875	234	3795	290	4513	346	5119
68	689	124	1771	180	2919	236	3821	292	4537	348	5140
70	721	126	1815	182	2952	238	3849	294	4560	350	5160
72	754	128	1859	184	2988	240	3880	296	4583		
74	784	130	1901	186	3025	242	3906	298	4607		
76	816	132	1940	188	3062	244	3934	300	4630		
78	850	134	1979	190	3098	246	3965	302	4654		

جدول ۵-۵: تخمین اولیه فری برد برای کشتی‌های تجاری با توجه به طول

در واقع در قوانین خط بار دو نوع کشتی در نظر گرفته می‌شود: مدل A: کشتی‌ها حمل مایعات و مدل B: سایر کشتی‌ها
انجام اصلاحات بر روی مقدار F_o در دسته‌بندی‌های زیر قابل انجام است:

۱) برای $24m\langle L\langle 100m$ داریم: $\Delta F[mm]=7.5(100-L)(0.35-\min(E,0.35L)/L)$

E برابر طول مؤثر روبناسازی است.

۲) برای $C_{B,0.85D}\rangle 0.68$ داریم: $F_{new}=F_{old}.(C_{B,0.85D}+0.68)/1.36$

۳) اصلاح مربوط به عمق بدنه:

$\Delta F\,[mm]=(D-L/15)R$

$-L\langle 120\,m: R=\dfrac{L}{0.48}$

$-L\rangle 120\,m: R=250$

$-D_{s\tan dard}=\dfrac{L}{15}$

ضخامت سازه عرشه فری‌برد + عمق معمول = D

برای مقادیر $D\langle\dfrac{L}{15}$ نیازی به این اصلاح نیست بجز وقتی که روبناسازی آب‌بند ۶۰ درصد طول قسمت میانی را در بر گرفته باشد. اگر ارتفاع روبناسازی از ارتفاع استاندارد کمتر باشد، مقدار اصلاحی بالا (ΔF) باید در نسبت زیر ضرب شود:

$$C=\frac{\text{ارتفاع واقعي}}{\text{ارتفاع استاندارد}}$$

مقادیر ارتفاع استاندارد روبناسازی[۱] از جدول ۵-۶ بدست می‌آید و برای سایر مقادیر طول باید از میان‌یابی استفاده کرد.

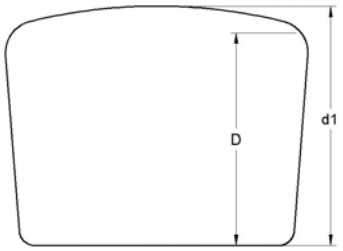
L [m]	Raised quarterdeck	All other superstructures
≤30	0.90	1.80
75	1.20	1.80
≥125	1.80	2.30

جدول ۵-۶: استخراج مقادیر استاندارد ارتفاع روبناسازی

۱ - superstructure

۴) اصلاح بدلیل شکل عرشه: این مورد برای کشتی‌هایی که محل دیواره و عرشه گرد شده باشد بکار می‌روند. تفاضل زیر باید به فری‌برد اضافه شود (شکل۵-۹):

$$S = d_1 - D$$



شکل ۵-۹: اصلاح ناشی از انحنای عرشه

۵) اصلاح بدلیل روبناسازی:

$$\Delta F\ [\text{mm}] = -\begin{cases} 350 + 8.3415(L-24) & 24\,\text{m} \le L < 85\,\text{m} \\ 860 + 5.6756(L-85) & 85\,\text{m} \le L < 122\,\text{m} \\ 1070 & 122\,\text{m} \le L \end{cases}$$

این اصلاح ΔF در ضریبی که وابسته به E (طول مؤثر روبناسازی) است باید ضـرب شود. این ضریب برای کشتی‌های مدل A و B متفاوت و طبق جدول ۵-۷ است.

	$E/L =$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Type A		0	0.07	0.14	0.21	0.31	0.41	0.52	0.63	0.753	0.877	1
Type B with forecastle	I without detached bridge	0	0.05	0.10	0.15	0.235	0.32	0.46	0.63	0.753	0.877	1
	II with detached bridge	0	0.063	0.127	0.19	0.275	0.36	0.46	0.63	0.753	0.877	1

جدول ۵-۷: استخراج ضریب اصلاحی با توجه به طول موثر روبناسازی

برای کشتی‌های مدل B داریم:

$E_{bridge} \langle 0.2\,L$: میان‌یابی خطی از سطر I و II جدول

$E_{forcastle} \langle 0.4\,L$: از سطر II استفاده می‌شود.

$E_{forcastle} \langle 0.07\,L$: این ضریب از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن f طول مؤثر عرشه سینه[۱] است.

$$C = \frac{0.05(0.07\,L - f)}{0.07\,L}$$

۱) اصلاح بدلیل شیب طولی عرشه: استاندارد شیب طولی عرشه از جدول زیر بدست می‌آید:

Aft Perp. (A.P.)	$y_1 = 25\ \frac{L}{3} + 10$
1/6 L from A.P.	$y_2 = 11.1\ \frac{L}{3} + 10$
1/3 L from A.P.	$y_3 = 2.8\ \frac{L}{3} + 10$
Amidships	$y_4 = 0$
Amidships	$y_4 = 0$
1/3 L from F.P.	$y_5 = 5.6\ \frac{L}{3} + 10$
1/6 L from F.P.	$y_6 = 22.2\ \frac{L}{3} + 10$
Forward Perp. (F.P.)	$y_7 = 50\ \frac{L}{3} + 10$

جدول ۵-۸: استخراج مقادیر y

مساحت زیر سطح ناشی از شیب استاندارد سینه و پاشنه عبارتست از:

$$A_A = \frac{3}{48} L(y_1 + 3y_2 + 3y_3 + y_4)$$

$$A_F = \frac{3}{48} L(y_4 + 3y_5 + 3y_6 + y_7)$$

M ارتفاع متوسط شیب طولی است که داریم:

$$M_{standard} = \frac{A_A + A_F}{L}$$

همین رابطه را شیب طولی واقعی کشتی می‌نویسیم و M واقعی را محاسبه می‌کنیم و در رابطه زیر جاگذاری می‌کنیم:

$$\Delta F = (M_{standard} - M).(0.75 - S/(2L))$$

۲) حداقل ارتفاع فری‌برد عمود سینه: فری‌برد در محل عمود سینه باید حداقل برابر مقدار زیر باشد:

۱ - forcastle

$$F_{FP,\min}[mm] = 76.16L(1-0.002L)/\left(\max(0.68, C_{B,0.85D})+0.68\right) \quad for\ L\langle 250m$$
$$F_{FP,\min}[mm] = 9520/\left(\max(0.68, C_{B,0.85D})+0.68\right) \quad for\ L\geq 250m$$

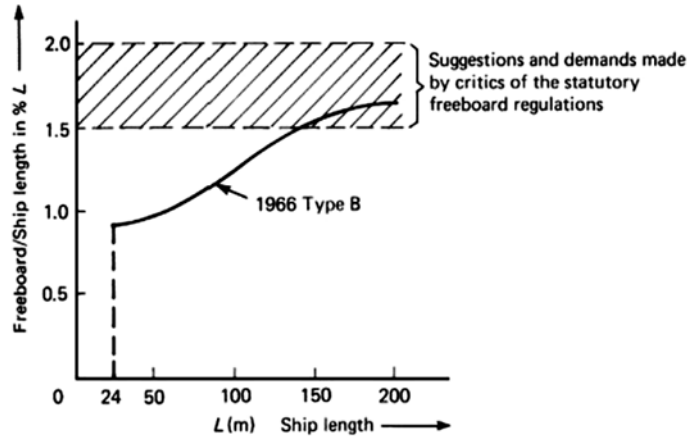
۳) حداقل مقدار فری‌برد برای عرشه‌هایی با هچ آب‌بند ۵۰ mm و عرشه‌هایی با هچ غیر آب‌بند برابر ۱۵۰ mm باشد.

نتیجه این مبحث محاسبه فری‌برد کشتی در آبخور تابستان (آبخور طراحی) می‌باشد که وقتی با مقدار آبخور جمع شود، عمق بدنه بدست می‌آید.

- **انتقادی بر قوانین خط بار ۱۹۶۶**[1] (ICLL66)

۱) انتقاد اول: وابستگی فری‌برد به ابعاد کشتی

وابستگی فری‌برد به ابعاد کشتی نمی‌تواند چندان صحیح باشد. اگر فری‌برد را عاملی در برابر آبگرفتگی بدانیم، کشتی‌های کوچکتر که دچار حرکات شدیدتری می‌شوند، به فری‌برد مناسب‌تری نیاز دارند. مطابق شکل۵-۱۰، محدوده فری‌برد طبق قانون خط بار از ۱/۵ – ۱ درصد طول کشتی است در صورتی که بهتر است برای تمام کشتی‌ها ۲ – ۱ درصد طول باشد.



شکل ۵-۱۰: پیشنهاد محدوده مناسب فری برد

دفاع از قانون خط بار شاید توجیه‌های زیر باشد که چندان پذیرفته نیست:

- کشتی‌های کوچک در آبهای ساحلی تردد دارند و شانس بیشتری برای فرار از آب و هوای بد دارند.
- سرعت کشتی‌های کوچک در امواج، کمتر از کشتی‌های بزرگ است لذا ارتفاع موج کوچکتری ایجاد می‌کند.

۲) انتقاد دوم: دخیل بودن عوامل متعدد که تأثیر هریک بر ایمنی شناور مشخص نیست:

نوع – اندازه – جانمایی روبناسازی عرشه و طول آن

برای تخمین فری برد از نسبت آبخور به عمق نیز مطابق جدول زیر می‌توان استفاده کرد [۴]:

کشتی نفتکش	**T/D=0.8**
کشتی حمل کالای عمومی	**T/D=0.75**
کشتی LNG و LPG	**T/D=0.5**

مثال) یک کشتی نفتکش دارای عمق بدنه ۲۰ متر است. آبخور و فری برد آن را تخمین بزنید.

T/D= 0.8 T/20= 0.8 T= 16 m f=20-16=4 m

1 - International Load Line Convention of 1966

فصل چهارم: تعیین عرض کشتی[۱]

عرض عامل اصلی و مهمی در پایداری کشتی است که در بخش‌های مربوطه از آن بحث شده است. بطور مثال برای یک بارج داریم:

$$BM_t = \frac{I_{XX}}{\nabla} = \frac{1/12 LB^3}{LBT} = \frac{1}{12}\frac{B^2}{T}$$

ملاحظه می‌شود که در پایداری عرضی شناور، عرض با توان ۲ حضور دارد. به همین دلیل عرض شناور معمولاً همراه با پایداری توصیف می‌گردد. البته عرض با عوامل دیگری هم مرتبط است. بطور مثال افزایش عرض ضمن ثابت بودن مساحت مقطع میانی (A_M) اثرات زیر را به دنبال دارد:

۱- افزایش مقاومت حرکت و توان مورد نیاز

۲- افزایش عرض در جابجایی ثابت منجر به کاهش آبخور می‌شود که در نتیجه قطر و بازدهی پروانه نیز باید کاهش یابد.

۳- افزایش پایداری:افزایش عرض از دو طریق می‌تواند باعث افزایش پایداری شود:

* افزایش BM و در نتیجه افزایش KM
* کاهش KG

نتیجه این دو مبحث باعث افزایش مضاعف GM می‌شود.

۴- فراهم کردن آبخور کمتر در شرایطی که محدودیت آبخور وجود دارد.

۵- احتمال کاهش محدوده پایداری (در مورد علت آن مراجعه شود به بخش پایداری). از نظر پایداری نسبت $\frac{B}{T}$ خیلی مهمتر از نسبت $\frac{L}{B}$ است.

در کشتی‌های نظامی $\frac{L}{B}$ تقریباً برابر ۹ است.

در تثبیت عرض و پایداری باید حالات مختلف زیر را مدنظر داشت:

۱- رفتار مناسب شناور در امواج[۲]: باید کلیه مؤلفه‌های حرکت و راحتی در امواج ارضاء شود از جمله دامنه و شتاب حرکت رول دارای اهمیت خاصی است.

۲- شرایط مختلف بارگذاری روی شناور:

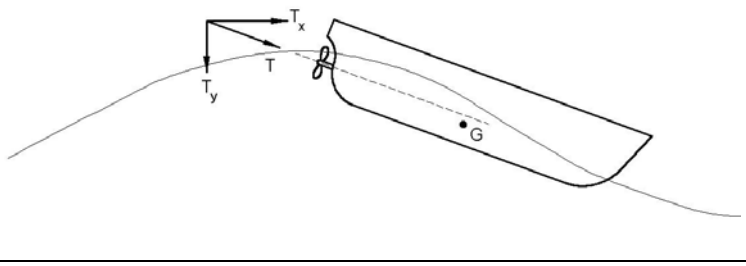
- کشتی در حالت صدمه‌دیده
- تجمع افراد در یک طرف کشتی
- کشش طناب یدک‌کش از یک طرف
- یخزدگی سطح عرشه
- برداشتن بار سنگین توسط جرثقیل روی عرشه
- جابجاشدن بار غلات و مایعات

۳- در نظر داشتن شرایط هاگینگ و سگینگ: شناور باید در شرایط هاگینگ و سگینگ بخصوصی حالت هاگینگ پایداری لازم را داشته باشد چراکه در این حالت کشتی فقط یک تکیه‌گاه دارد و مساحت سطح آبخور و ممان دوم سطح آبخور، کاهش شدیدی می‌یابد و احتمال واژگونی شناور وجود دارد.

۴- تحمل در برابر امواج دریا: امواج دریا بخصوص در شرایطی که سرعت موج و کشتی برابر باشد می‌تواند بسیار خطرناک بوده و باعث واژگونی شناور باشد. خطر واژگونی شناور در امواج از پشت بسیار زیاد است چراکه در این حالت شناور اندکی رول کرده و به یکباره واژگون می‌شود. برای امواج از کنار، شناور به سختی رول کرده و به آرامی واژگون می‌شود. لذا بر خلاف آنچه ممکن است در ظاهر به نظر برسد، امواج در راستای طولی بخصوص از عقب شناور، بسیار خطرناکتر از امواج عرضی هستند. در این شرایط مؤلفه افقی نیروی تراست، خود به واژگون شدن و افزایش تریم و رول شناور کمک می‌کند. (شکل ۵-۱۱).

۱- منابع: [۴ و ۲]

۲ - seakeeping



شکل ۵-۱۱ : خطر واژگونی کشتی در امواج از پشت با طول موج برابر با طول کشتی بخصوص در حالت پایین‌تر بودن مرکز ثقل از راستای نیروی تراست

هر چه فاصله مرکز ثقل پائین‌تر از راستای اعمال تراست باشد، ممان واژگون‌کننده بیشتری وارد می‌شود. بنابراین می‌توان گفت اگر پایداری کشتی ضعیف باشد:

- در امواج از پشت با سرعتی برابر سرعت شناور: شناور اندکی رول کرده و به یکباره واژگون می‌گردد.
- در امواج از پهلو شناور به سختی رول کرده و به آرامی واژگون می‌شود.

منبع [۴] رابطه زیر را برای تخمین عرض انواع کشتی‌ها ارائه کرده است:

$B = (L/10) + (5 \text{ to } 7.5)$ m	General Cargo ships
$B = (L/10) + (7.5 \text{ to } 10)$ m	Container vessels
$B = (L/5) - 12.5$ m	Supertankers (C.B. Barrass)
$L/B = 6.00–6.25$	Supertankers (1975–1990)
$L/B = 5.00–5.75$	Supertankers (1990–2004)

تا توانی به جهان خدمت محتاجان کن

به دمــی یا درمــی یا قلــمی یا قــدمی

فصل پنجم: تعیین مؤلفه‌های پایداری [۱]

یکی از عوامل مهم پایداری مقدار GM می‌باشد که دارای یک محدوده مشخصی است. زیاد و کم بودن آن، تبعات زیر را به دنبال دارد:

- کم بودن GM: کاهش پایداری که منجر به دامنه نوسانات بزرگ غلتش عرضی می‌شود.
- زیاد بودن GM: افزایش بیش از حد پایداری که باعث کاهش پریود نوسانات غلتش عرضی و احساس ناراحتی و دریازدگی خدمه می‌شود.

$\left(T = \frac{2\pi.K}{\sqrt{g.GM}}\right)$ برای توضیحات تکمیلی به بخش پایداری مراجعه شود.

همچنین اهمیت دیگر مقدار GM تعیین مقدار KG است:

$$KM = KB + BM$$

$$GM = KM - KG$$

در واقع اگر نیاز به افزایش یا کاهش GM باشد، باید KG را کاهش یا افزایش داد. تغییر KG نیز یعنی تغییر چیدمانی تجهیزات و بارهای داخلی شناور برای رسیدن به مرکز ثقل مطلوب.

از همین‌رو برای شناورها با توجه به نوع آنها، محدوده خاصی از GM در نظر گرفته می‌شود که در جدول ۵-۹ ملاحظه می‌شود:

نوع کشتی	GM (m)
مسافربری اقیانوس پیما	۱/۵-۲/۲
مسافربری کرانه پیما	۰/۵-۱/۵
حمل سنگ معدن	۲-۳
حمل اتومبیل (RO-RO)	۱/۵
یدک کش	۱
نفتکش VLCC	۰/۳-۱
حمل کالای عمومی	۰/۳-۰/۵
کانتینربر	۰/۳-۰/۶

جدول ۵-۹: محدوده ارتفاع متاسنتری کشتی‌ها

در کشتی‌های تانکری (حمل نفت و موادشیمیایی)، مقدار حاشیه اطمینان برابر ۰/۲ – ۰/۱ متر بیشتر از مقدار معمول در نظر می‌گیرند. در کشتی‌های فله‌بر و حمل ذغال‌سنگ، تخلیه و بارگیری معادل است با تغییرات شدید محل مرکز ثقل لذا در این شرایط باید حاشیه اطمینان کافی برای GM وجود داشته باشد که با افزایش KG، مقدار GM منفی نشود. روشی که معمولاً استفاده می‌شود پرکردن مخازن بالاست در کف شناور است که باعث کاهش KG و افزایش GM گردد. حالت بهینه و اقتصادی طراحی به گونه‌ای باید باشد که نیاز چندانی به مخازن بالاست نباشد چراکه این مخازن جای زیادی اشغال می‌کنند.

❖ راههای تأثیر بر پایداری

به غیر از تغییر عرض، راههای دیگری برای تأثیر بر پایداری وجود دارد:

أ. پایداری در حالت سالم[۲]

ب. پایداری در حالت صدمه‌دیده[۳]

برای هریک از موارد فوق داریم:

أ. پایداری در حالت سالم:

۱) افزایش ضریب مساحت صفحه آبخور $\left(C_{WP}\right)$:

افزایش C_{WP} به دو دلیل باعث افزایش پایداری می‌شود:

- ممان اینرسی $\left(I_{XX}\right)$ صفحه آبخور افزایش می‌یابد.
- مرکز بویانسی به سمت بالا حرکت می‌کند که در نتیجه KB و KM افزایش می‌یابد.

۱- منابع: [۱۱ و۲]

2 - intact stability

3 - damaged stability

البته افزایش C_{WP} باعث افزایش مقاومت به مقداری بیش از افزایش B می‌شود. لذا در مراحل اولیه طراحی کوچکترین C_{WP} به نحوی در نظر گرفته می‌شود که مؤلفه‌های پایداری تضمین گردد. کوچک بودن C_{WP} باعث بهبود در طراحی خطوط بدنه کشتی می‌شود.

۲) پائین آوردن مرکز ثقل: که به روش‌های زیر امکان‌پذیر است:
- نصب اجزاء سنگین در پائین بدنه
- استفاده از مواد سبک در روبناسازی
- استفاده از وزنه‌های سربی ثابت در پائین بدنه
- استفاده از مخازن بالاست در پائین بدنه

۳) افزایش ذخیره بویانسی

ب. پایداری در حالت صدمه‌دیده: استفاده از تمامی موارد قسمت قبل برای این قسمت نیز قابل کاربرد است. علاوه بر آن موارد زیر قابل استفاده است:
- استفاده از دیواره‌های طولی و عرضی
- افزایش ارتفاع عرشه آب‌بند به گونه‌ای که تا زاویه ۷ – ۱۵ درجه هم به زیر آب نرود.
- استفاده از لوله‌های خرطومی بر روی منافذ تهویه روی عرشه که زاویه آب‌گرفتگی سوراخ‌ها و منافذ را افزایش می‌دهد.

❖ روابط تجربی ارتفاع مرکز بویانسی (KB)

Normand	$\overline{KB} = T\left(\frac{5}{6} - \frac{1}{3}C_B/C_{WP}\right)$
Normand	$\overline{KB} = T(0.9 - 0.36.C_M)$
Schneekluth	$\overline{KB} = T(0.9 - 0.3.C_M - 0.1.C_B)$
Wobig	$\overline{KB} = T(0.78 - 0.285C_B/C_{WP})$

دقت این روابط بیش از یک درصد آبخور است.(1%T).

❖ روابط تجربی ارتفاع (BM)

می‌دانیم که BM از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$BM_t = \frac{I_{XX}}{\nabla}$$

ممان دوم سطح آبخور مستطیل شکل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_{XX} = \frac{1}{12}LB^3$$

برای مساحت‌های غیر مستطیلی، یک ضریب کاهنده به صورت تابعی از C_{WP} در نظر گرفته می‌شود:

$$\overline{BM} = \frac{I_T}{\nabla} = \frac{f(C_{WP})L.B^3}{12\,L\,.B\,.T\,.C_B} = \frac{f(C_{WP})}{12}.\frac{B^2}{T\,.C_B}$$

مقدار تقریبی $f(C_{WP})$ از روابط زیر محاسبه می‌شود:

Murray (trapezoidal waterplanes)	$f(C_{WP}) = 1.5.C_{WP} - 0.5$
Normand	$f(C_{WP}) = 0.096 + 0.89.C_{WP}^2$
Bauer	$f(C_{WP}) = 0.0372(2.C_{WP} + 1)^3$
N.N	$f(C_{WP}) = 1.04.C_{WP}^2$
Dudszus and Danckwardt	$f(C_{WP}) = 0.13.C_{WP} + 0.87.C_{WP}^2 \pm 0.005$

هم‌اکنون با محاسبه KB و BM از روابط تجربی مقدار $KM = KB + BM$ را بدست می‌آوریم. مقدار KM را می‌توان بطور مستقیم از رابطه زیر نیز محاسبه کرد:

$$\overline{\mathrm{KM}} = B\left[13.61 - 45.4\frac{C_B}{C_{WP}} + 52.17\left(\frac{C_B}{C_{WP}}\right)^2 - 19.88\left(\frac{C_B}{C_{WP}}\right)^3\right]$$

این فرمول برای محدوده $0.73 < \frac{C_B}{C_{WP}} < 0.95$ قابل کاربرد است.

همچنین برای مقدار KM رابطه زیر را داریم:

$$\overline{KM} = B\left[\frac{0.08}{\sqrt{C_M}}.\frac{B}{T}.C + \frac{0.9-0.3.C_M-0.1.C_B}{B/T}\right]$$

برای محاسبه C در این رابطه داریم:

- اگر C_{WP} معلوم نباشد: C = 1
- اگر C_{WP} معلوم باشد:

$$C = \left(C_{WP.A}/C_{WP.N}\right)^2 \qquad C_{WP.N} = \left(1+2C_B/\sqrt{C_M}\right)/3$$

برای کشتی‌های با مقطع V شکل: $C = 1.1-1.2$

برای یک بارج محدوده دقت رابطه فوق از قرار زیر است:

$$for\ B/T = 2\ an\ error\ \Delta\overline{KM} = -1.6\%$$
$$for\ B/T = 10\ an\ error\ \Delta\overline{KM} = +4.16\%$$

این روابط برای حالت حداکثر بارگیری[۱] هستند.

از ترکیب رابطه Schneekluth و Murray داریم:

$$\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM} = \underbrace{T\cdot(0.9-0.3\cdot C_M-0.1\cdot C_B)}_{\text{Schneekluth}} + \underbrace{\frac{(3C_{WP}-1)B^2}{24\cdot C_B\cdot T}}_{\text{Murray}}$$

با جاگذاری رابطه $C_{WP} = \frac{1}{3}\left(1+2C_B/\sqrt{C_M}\right)$ در فرمول Murray داریم:

$$\overline{BM} = 0.08348(B/T)/\sqrt{C_M}$$

افـــکار خـوب + رفتـــار خـوب = یک روز خـــوب

۱ - full load

بخش سوم:
حجم‌بندی مخازن کشتی

فصل اول: آشنایی با انواع مخازن کشتی[۱]

در کشتی‌ها مخازن مختلفی وجود دارد که مهمترین آنها عبارتست از:

۱) مخازن تعادل (بالاست)[۲]
۲) مخازن سوخت
۳) مخازن آب شیرین
۴) مخزن روغن
۵) مخزن خن
۶) مخزن فاضلاب
۷) مخازن زینی شکل[۳]

توجه شود که در حجم‌بندی مخازن دو عامل اصلی مدنظر است:

۱- تعیین حجم مورد نیاز مخزن
۲- تعیین محل قرارگیری مخزن که در برخی موارد مانند مخازن تعادل، محل قرارگیری، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد.

به این دو عامل، حجم‌بندی مخازن کشتی گویند.

برای حجم‌بندی مخازن، تعریف دقیق سناریوی کاربری کشتی بسیار اهمیت دارد شامل:

۱- مدت زمان حضور پیوسته در دریا
۲- تعداد خدمه: در تعیین حجم مخازن آب شیرین
۳- ایستگاههای میانی مسیر تردد برای پشتیبانی سوخت و آذوقه و تخلیه خن و فاضلاب

با اطلاعات فوق می‌توان حجم مخازن مختلف موجود در کشتی را تعیین کرد.

❖ ملاحظات عمومی جانمایی مخازن

در تعیین محل مخازن یک سری ملاحظات عمومی وجود دارد که در ذیل بیان می‌گردد:

۱- استفاده از فضاهای مرده و غیرقابل استفاده: آنچه در مخازن بیش از هر چیز اهمیت دارد، تأمین حجم مورد نیاز می‌باشد و شکل مخزن مهم نیست لذا در جانمایی مخازن سعی می‌شود از محل‌های مرده و غیرقابل استفاده برای تخصیص مخازن استفاده شود بدلیل عدم نیاز به دسترسی آسان و فقط نیاز به یک دریچه آدم‌رو[۴].
۲- قرارگیری مخازن در قسمت تحتانی بدنه برای کاهش ارتفاع مرکز ثقل (بجز مخازن زینی شکل که در بالای بدنه قرار می‌گیرند و وظیفه آنها افزایش ارتفاع مرکز ثقل است).
۳- نصب دیواره‌های طولی و عرضی در داخل مخازن: برای کاهش اثر سطح آزاد مخازن و جلوگیری از تاب خوردن سیال در داخل مخازن از دیواره‌های متعدد طولی و عرضی استفاده می‌شود.
۴- جانمایی متقارن مخازن: اغلب مخازن به صورت متقارن جانمایی می‌شوند به گونه‌ای که تعادل عرضی شناور پس از تخلیه یا آبگیری آنها رعایت شود.
۵- تأمین سیستم خن در صورت سرریزکردن مخازن و مخزن دیگری برای جمع‌آوری آنها.
۶- دوری مخازن حاوی مایعات اشتعال‌پذیر (سوخت و روغن) از فضاهای داغ موتورخانه.

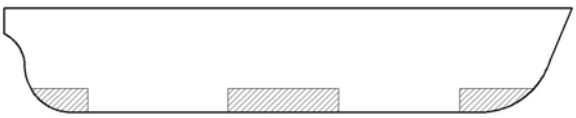
استفاده از مخزن واسطه[۵] بین مخازن سوخت و آب شیرین (در صورت مجاورت آنها با یکدیگر). مخازن واسطه یک فضای خالی است و سیالی داخل آن قرار نمی‌گیرد و صرفاً برای ایجاد حایل استفاده می‌شود.

۱- منابع: [۱ و ۴ و ۱۲]

2 - ballast
3 - saddle tank
4- manhole
5- cofferdam

فصل دوم: حجم‌بندی مخازن تعادل (بالاست)

مخازن تعادل معمولاً به دو قسمت تقسیم می‌شوند که یکی در سینه و دیگری در پاشنه قرار می‌گیرد. البته برخی از کشتی‌ها هم با توجه به نوع کاربری، ممکن است فقط دارای مخازن تعادل سینه و پاشنه باشند. کشتی‌هایی که دارای طول زیادی هستند، اگر مخازن تعادل فقط در سینه و پاشنه قرار گیرند، ممان شدیدی بر سازه بدنه اعمال می‌شود که برای جلوگیری یا کاهش آن از مخازن تعادل میانی استفاده می‌شود و سه دسته مخازن تعادل در آنها وجود دارد (شکل ۵-۱۳).



شکل۵-۱۳ : توزیع مخازن تعادل کشتی

مخازن تعادل معمولاً در قسمتهای پائین بدنه قرار می‌گیرند به گونه‌ای که با پرکردن آنها از آب دریا، مرکز ثقل پائین بیاید و پایداری کشتی بهبود یابد. مخازن تعادل دو وظیفه اصلی زیر را بر عهده دارند که با استفاده از آنها می‌توان حجم‌بندی مخازن تعادل را انجام داد:

أ. تأمین زاویه شیب مناسب

ب. افزایش آبخور کشتی در حالت بارگیری سبک کشتی

نحوه انجام محاسبات به صورت زیر بیان می‌گردد:

أ. تأمین زاویه شیب

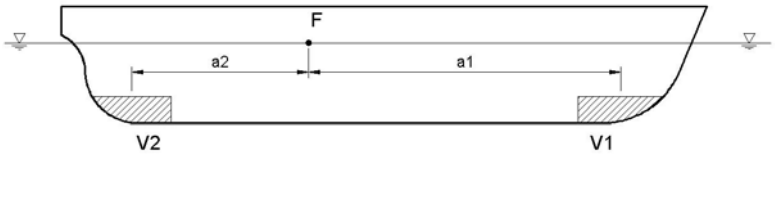
حجم مخازن تعادل و فاصله آنها از مرکز شناوری (F) باید به گونه‌ای باشد که ممان لازم برای تأمین شیب به اندازه ۳ – ۱ درجه در شرایط بارگیری کامل[1] را تأمین کند. مطابق شکل۵-۱۴ داریم:

مخزن تعادل سینه $m_1 = V_1 . \rho$

مخزن تعادل پاشنه $m_2 = V_2 . \rho$

ممان طولی به سینه ناشی از مخزن تعادل سینه: $M_1 = m_1 . a_1 = V_1 . \rho . a_1$

ممان طولی به پاشنه ناشی از مخزن تعادل پاشنه: $M_2 = m_2 . a_2 = V_2 . \rho . a_2$



شکل ۴-۱۴ : توزیع حجم مخازن سینه و پاشنه کشتی

a_1 و a_2 فاصله مرکز حجم مخازن تعادل سینه و پاشنه از مرکز شناوری (F) هستند. مرکز شناوری همان مرکز سطح صفحه آبخور است که تریم (شیب) شناور حول آن انجام می‌شود. توجه شود که مرکز شناوری در آبخورهای مختلف، متفاوت است و در اینجا مرکز شناوری در آبخور طراحی (حداکثر آبخور) مدنظر است. اگر جابجایی شناور در آبخور طراحی برابر W و ارتفاع متاسنتری طولی GM_L باشد، ممان لازم برای تأمین شیب به اندازه زاویه θ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$M = W . GM_L . \tan\theta$$

اگر بخواهیم به کمک روابط فوق، مثلاً حجم مخزن تعادل سینه را تعیین کنیم (V_1 مجهول است و بقیه پارامترها معلوم هستند). در صورتی که زاویه شیب مطلوب به سینه در آبخور طراحی (بارگیری کامل) برابر θ_1 باشد:

$$W . GM_L . \tan\theta_1 = V_1 . \rho . a_1 \qquad V_1 = \frac{W . GM_L . \tan\theta_1}{\rho . a_1}$$

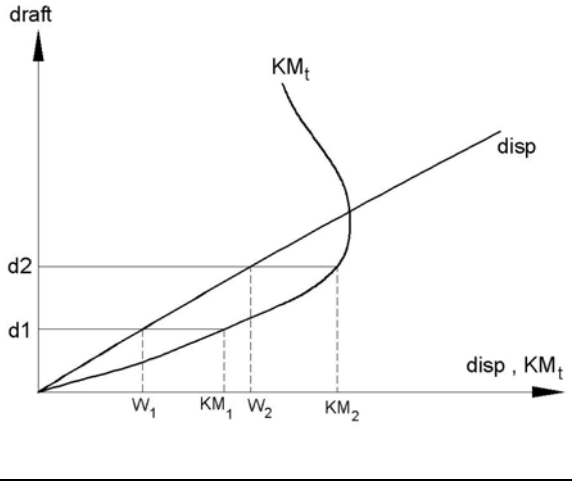
برای تعیین حجم مخزن تعادل پاشنه اگر زاویه شیب مطلوب به پاشنه θ_2 باشد، داریم:

$$V_2 = \frac{W . GM_L . \tan\theta_2}{\rho . a_2}$$

1 - full load

ب. افزایش آبخور کشتی در حالت جابجایی سبک

وقتی کشتی کلیه بارهای خود را تخلیه می‌کند و در شرایط باری سبک قرار می‌گیرد، قسمت عمده‌ای از بدنه کشتی از آب خارج می‌شود و ممکن است کشتی به حالت ناپایداری اولیه برسد. وقتی کشتی در این حالت باشد در زاویه کجی عرضی اولیه[1] قرار می‌گیرد (برای اطلاعات بیشتر به بخش هیدرواستاتیک مراجعه شود). کشتی برای پرهیز از حالات ناپایداری اولیه در شرایط سبک، باید مخازن تعادلی داشته باشد با پرکردن آنها، آبخور افزایش یافته و ارتفاع متاسنتری مثبت شود. برای حل مسئله در این حالت باید از منحنی‌های هیدرواستاتیک استفاده کرد که منحنی جابجایی و KM_t در این باره به‌کار می‌آیند (شکل ۵-۱۵). اگر در شرایط سبک، وزن کشتی که برابر وزن سبک[2] است برابر W_1 و مرکز ثقل آن KG_1 باشد مطابق شکل ۵-۱۵ از نمودار disp مقدار آبخور در این حالت را معلوم می‌کنیم (d_1). حال در همین آبخور، مقدار KM_{t1} را می‌خوانیم و طبق رابطه زیر مقدار ارتفاع متاسنتری اولیه را محاسبه می‌کنیم:



شکل ۵-۱۵: کاربرد منحنی‌های هیدرواستاتیک در حجم‌بندی مخازن تعادل

$$GM_{t1} = KM_{t1} - KG_1$$

این مقدار نباید منفی باشد. اگر منفی باشد، مقدار آبخور را آنقدر افزایش می‌دهیم که مقدار GM مثبت شود و کلیه مؤلفه‌های پایداری پذیرفته شود (در مورد مؤلفه‌های پایداری مانند مساحت زیر منحنی GZ قبلاً صحبت شده است). اگر این آبخور مطلوب d_2 باشد و جابجایی متناظر با آن W_2 باشد، یعنی حجم مخازن بالاست باید به حدی باشد که آبخور کشتی را از d_1 به d_2 افزایش دهد.

$$W_2 - W_1 = \rho g V$$

$$V = \frac{W_2 - W_1}{\rho g}$$

حجم مورد نیاز مخزن تعادل برای افزایش آبخور: وضعیت کشتی در این حالت را شرایط تعادل یا شرایط بالاست[3] گویند که اصطلاحی رایج در مهندسی دریایی است. در این حالت، آبخور را آبخور بحرانی گویند که اغلب در کشتی‌هایی مانند نفتکش و فله‌بر اتفاق می‌افتد.

هم‌اکنون پس از تعیین حجم مورد نیاز مخازن تعادل در حالت «آ» و «ب»، بیشترین حجم بین V و V' را در نظر می‌گیریم.

از حالت « آ»: حجم مورد نیاز: $V' = V_1 + V_2$

از حالت «ب»: حجم مورد نیاز: V

توزیع محل مخازن در حالت «آ» و «ب»:

حالت «آ»: محل مخازن باید طوری تنظیم شود که با در نظر گرفتن فاصله آنها از مرکز شناوری، ممان لازم به سینه و پاشنه تأمین شود.

حالت «ب»: محل مخازن باید طوری باشد که کشتی به طور افقی در آب فرو رود یعنی مرکز ثقل مخازن منطبق بر مرکز ثقل کشتی باشد.

این دو حالت تناقض با یکدیگر ندارند و می‌توان شرایطی را در نظر گرفت که هر دو شرایط ارضاء گردند.

❖ فواید افزایش آبخور و شیب کشتی

افزایش آبخور و شیب کشتی دارای فوائد زیر می‌باشد:

۱- افزایش آبخور برای پرهیز از آبخور بحرانی و ناپایدارشدن شناور

۲- افزایش عمق غوطه‌وری پروانه که باعث کاهش کاویتاسیون در پروانه می‌گردد.

۳- جبران تغییرات وزنی در حین سفر مانند مصرف سوخت، مواد غذایی و آب شیرین که بخصوص در کشتی‌های کوچک حائز اهمیت است.

۴- کاهش ضربات اسلمینگ با افزایش آبخور سینه شناور

---

1 - loll
2 - light weight
3 - Ballast Condition

مثال) یک کشتی نفتکش ۱۷ هزار تنی به طول ۱۵۰ متر در دست طراحی است و اطلاعات کامل هیدرواستاتیک آن در اختیار است. اگر جابجایی سبک آن ۵۰۰ تن باشد، حجم‌بندی مخازن تعادل (بالاست) آن را تعیین کنید. KG آن در شرایط سبک ۲/۶ متر و در حداکثر آبخور ۳/۵ متر است.

حل) الف) فرض می‌کنیم تأمین زاویه شیب ۱ درجه به پاشنه و ۰/۵ درجه به سینه در شرایط آبخور سنگین مدنظر باشد. جابجایی کل برابر است با:

وزن مرده + وزن سبک = جابجایی

جابجایی= 5000 + 17000 = 22000 t

مطابق جدول هیدرواستاتیک (که در اینجا ارائه نشده است)، آبخور مربوط به این تناژ برابر ۴/۵ متر است. در این آبخور داریم:

$KM_L = 125m$

$KG = 3.5m$

$GM_L = KM_L - KG = 121.5m$

$LCF = 1.3m$

فاصله مرکز شناوری از وسط کشتی داده شده است یعنی مرکز شناوری ۱/۳ متر جلوتر از وسط شناور است. با توجه به نقشه‌های موجود از شناور و فضای قابل برای مخازن تعادل سینه و پاشنه داریم:

- فاصله مرکز حجم مخزن تعادل سینه از مرکز شناوری: $a_1 = 70m$
- فاصله مرکز حجم مخزن تعادل پاشنه از مرکز شناوری: $a_2 = 73.5m$

برای تأمین زاویه شیب ۱ درجه به پاشنه داریم:

$$V_2 = \frac{W.GM_L.\tan\theta_2}{\rho.a_2} \qquad V_2 = \frac{22000\times121.5\times\tan 1}{1.025\times73.5} = 619.3m^3$$

به همین ترتیب برای تأمین زاویه ۰/۵ درجه به سینه داریم:

$$V_1 = \frac{W.GM_L.\tan\theta_1}{\rho.a_1} = \frac{22000\times121.5\times\tan(0.5)}{1.025\times70} = 325.1m^3$$

در مجموع حجم مخازن برای تأمین شیب برابر است با: $V' = V_1 + V_2 = 619.3 + 325.1 = 944.4m^3$

آبگیری مخزن تعادل پاشنه به حداکثر مقدار زیر می‌تواند باعث افزایش عمق پروانه شود: $h = a_2.\tan\theta_2 = 73.5\times\tan(1) = 1.3m$

ب) حجم مخازن تعادل برای افزایش آبخور:

برای شرایط سبک که جابجایی ۵۰۰۰ تن است، از نمودارهای هیدرواستاتیک، آبخور ۱ متر بدست می‌آید. برای آبخور ۱ متر از نمودارهای هیدرواستاتیک داریم:

KM_t = 2.5 m

مقدار KG در شرایط سبک عبارتست از: GM_t = KG = 2.6 m

KM_t –KG = 2.5 – 2.6 = -0.1 m

بنابراین کشتی در آبخور و شرایط سبک در حالت ناپایداری اولیه است و در زاویه لل زیر قرار می‌گیرد:

(با فرض بدنه دیواره‌ای بودن نفتکش): $\tan\theta = \sqrt{\frac{-2\times GM}{BM_o}}$

(از جداول هیدرواستیک مقدار BM = 2 m است):

$$\tan\theta = \sqrt{\frac{-2\times(-0.1)}{2}} \quad \rightarrow \quad \theta = 0.32^\circ$$

این زاویه ناپایداری اولیه یا همان زاویه لل است. برای رفع این نقص، مقدار GM اولیه باید مثبت باشد و حداقل مقدار آن ۱۵ سانتیمتر باشد یعنی KM شناور باید به مقدار زیر برسد:

KM = KG + 0.15 = 2.6 + 0.15 = 2.75 m

با توجه به نمودارهای هیدرواستاتیک، این مقدار در آبخور ۱/۲ متر که معادل ۶۱۰۰ تن است بدست می‌آید. برای تأمین کلیه شرایط پایداری باید علاوه بر مثبت شدن GM_t، سایر موارد پایداری (شامل مساحت زیر نمودار) ارضاء گردد. با توجه به اطلاعات موجود از شناور، این شرایط در آبخور ۶۵۰۰ تن تأمین می‌شود (برای چگونگی بررسی به بخش هیدرواستاتیک و پایداری مراجعه شود).

$\delta W = 6500 - 5000 = 1500\ t$

یعنی حجم مخازن تعادل باید به گونه‌ای باشد که ۱۵۰۰ تن افزایش تناژ را تأمین کند. در این صورت با توجه به اینکه آب دریا وارد مخزن می‌شود داریم:

$$V = \frac{\delta W}{\rho} = \frac{1500}{1.025} = 1465\,m^3$$

رسیدن به این شرایط را شرایط بالاست گویند.

- **مقایسه و جمع‌بندی نتایج مثال:**

از حالت الف) $V' = 944.4\,m^3$ $V_2 = 619.3\,m^3$ $V_1 = 325.1m^3$

و محل مخازن سینه و پاشنه هم معلوم شده است.

از حالت ب) $V = 1465\,m^3$ مورد نیاز

بدین ترتیب برای ارضاءشدن هر دو شرط فوق داریم:

- حجم مخزن تعادل سینه: ۳۲۵/۱ مترمکعب
- حجم مخزن تعادل پاشنه: ۶۱۹/۳ مترمکعب
- حجم مخزن تعادل میانی: $V_3 = V - (V_1 + V_2) = 521m^3$

مرکز حجم مخزن میانی باید طوری در نظر گرفته شود که مرکز ثقل کلیه مخازن روی مرکز شناوری (F) در آبخور سبک قرار گیرد تا با پرکردن آنها کشتی به طور افقی داخل آب فرو رود.

فصل سوم: حجم‌بندی مخزن سوخت

حجم‌بندی مخزن سوخت وابسته به دو عامل اصلی است:

۱- مصرف سوخت موتور

۲- مدت زمان کارکرد پیوسته موتور قبل از سوختگیری مجدد که وابسته به سناریوی کاربری کشتی است که در ابتدای فرآیند طراحی تعریف می‌شود.

در کشتی‌ها معمولاً دو نوع مخزن سوخت وجود دارد:

أ. مخزن سوخت اصلی: این مخزن، کل حجم سوخت مورد نیاز در مدت‌زمان مورد نظر به همراه ۲۵ درصد سوخت ذخیره را در خود جای می‌دهد.

ب. مخزن سوخت روزانه: این مخزن باید بتواند مصرف مورد نیاز برای کارکرد پیوسته موتور در ۱ یا ۲ روز را فراهم کند. در واقع موتور سوخت مورد نیاز را مستقیماً از مخزن سوخت اصلی دریافت نمی‌کند، بلکه سوخت از مخزن سوخت روزانه و پس از گذشتن از فیلترهای مربوطه وارد موتور می‌شود. معمولاً ۳ – ۲ درصد حجم بالای مخازن برای تجمع بخارات گازی خالی در نظر گرفته می‌شود. در گذشته از مخازن تعادل و سوخت در مواقع نیاز بجای یکدیگر استفاده می‌شد ولی امروزه بدلیل زیست محیطی و حفاظت کاتدی مخازن این کار انجام نمی‌شود.

- تعیین محل مخازن سوخت:

- مخزن سوخت روزانه معمولاً در ارتفاعی بالاتر از موتور دیزل قرار می‌گیرد به گونه‌ای که سوخت مورد نیاز به طور ثقلی وارد موتور شود و نیازی به پمپ مجزا نباشد.
- مخزن سوخت اصلی در مجاورت یا داخل موتورخانه در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که سوخت مسیر کوتاهی را برای رسیدن به موتور دیزل طی کند. از نظر ایمنی نیز کاهش طول لوله‌کشی سوخت بسیار حائز اهمیت است.

- تعیین حجم سوخت مورد نیاز: مصرف سوخت که باید در طول سفر پیوسته کشتی فراهم شود مربوط به موارد زیر است:

۱- موتور دیزل اصلی که شافت آن متصل به شافت پروانه است و باعث دوران پروانه می‌شود.

۲- دیزل ژنراتور: برای تأمین برق داخل کشتی از یک یا دو دستگاه دیزل – ژنراتور استفاده می‌شود. در واقع یک دستگاه دیزل به یک دستگاه ژنراتور متصل شده است که دوران دیزل باعث دوران ژنراتور می‌شود و دوران ژنراتور نیز باعث تولید برق می‌شود.

حتی کشتی‌های اتمی نیز دارای دیزل – ژنراتورهای اضطراری و کمپرسورهای بزرگ هستند که مصرف سوخت مورد نیاز آنها باید تأمین شود. برای تخمین حجم سوخت مورد نیاز باید مصرف سوخت تک‌تک دیزل‌های مورد استفاده در کشتی تعیین شده و با هم جمع شوند تا مصرف سوخت کل

بدست آید.

مصرف سوخت یک موتور دیزل از رابطه زیر بدست می‌آید: $\left[\frac{lit}{KW.hr}\times KW\times hr\right]=[lit]$ $V=SFC\times P_B\times t$

- SFC [1]: مصرف‌ویژه سوخت موتور بر حسب $\frac{lit}{KW.hr}$ یا $\frac{gr}{KW.hr}$ می‌باشد.

- P_B: توان موتور بر حسب کیلووات و t: مدت‌زمان کارکرد موتور قبل از سوختگیری مجدد بر حسب ساعت (این مورد بر اساس سناریوی کاربری تعیین می‌شود).

مثال) نفتکش مثال قبل دارای موتوری به توان ۶۰۰۰hp می‌باشد. مصرف ویژه سوخت آن نیز $180\ {}^{gr}/_{KW.hr}$ می‌باشد. اگر سناریوی کاربری این کشتی ۱۰ روز کارکرد بدون سوختگیری مجدد باشد، حجم کل سوخت و حجم مخزن روزانه سوخت را محاسبه کنید.

حل:

$P_B=6000\,hp=4500\,KW$

$SFC=180\ {}^{gr}/_{KW.hr}$

$t=10\,day=10\times 24=240\,hr$

از آنجا که SFC بر حسب $gr/KW.hr$ داده شده لذا از رابطه جرم سوخت را بدست می‌آوریم:

$$M=SFC\times P_B\times t=180\times 4500\times 240=194.4\times 10^6\ gr$$

اگر چگالی سوخت را $0.85\ {}^{kg}/_{lit}$ بگیریم داریم:

$$\rho=0.85\ {}^{kg}/_{lit}=850\ {}^{gr}/_{lit}$$

$$\rho=\frac{M}{V}\ \rightarrow\ V=\frac{M}{\rho}=\frac{194.4\times 10^6}{850}=228700\,lit$$

کل حجم سوخت مورد نیاز: $V=22.87\,m^3$

حجم سوخت روزانه با قرارداد t برای ۱ روز (۲۴ ساعت) بدست می‌آید: $V=2.3\,m^3$

التماس به خدا عزت است

اگر برآورده شود رحمت است،اگر برآورده نشود حکمت است!

التماس به خلق خدا ذلت است

اگر برآورده شود منّت است، اگر برآورده نشود خفت است ...

1 - specific fuel consumption

فصل چهارم: حجم‌بندی مخزن آب شیرین، خن و فاضلاب

❖ حجم‌بندی مخزن آب شیرین

آب شیرین مصرفی خدمه با در نظر داشتن سه عامل اصلی زیر تعیین می‌شود:

۱- تعداد خدمه و مسافرین (n)

۲- آب مصرفی خدمه و مسافرین در طول هر روز (A) (مصرف خدمه و مسافرین با یکدیگر متفاوت است).

۳- مدت‌زمان حضور پیوسته کشتی در دریا بدون بارگیری مجدد آب شیرین (t)

حداقل حجم مخزن آب شیرین از رابطه مقابل بدست می‌آید: $V = n . A . t$ (A بر حسب لیتر در روز و t بر حسب روز است).

حداقل آب مصرفی خدمه کشتی‌های تجاری در طول هر شبانه‌روز به طور متوسط برابر ۲۵ لیتر و آب مصرفی مسافرین کشتی‌های لوکس مسافربری در طول هر شبانه‌روز ۵۰ لیتر در نظر گرفته می‌شود. اگر در کشتی دستگاه آب شیرین‌کن در نظر گرفته شده باشد، حجم مخزن آب شیرین کاهش می‌یابد.

مثال) کشتی مثال قبل دارای ۲۰ نفر خدمه می‌باشد. حجم مخزن آب شیرین آن را تعیین کنید.

(با فرض نداشتن دستگاه آب شیرین‌کن).

$V = n . A . t$

$n = 20 \qquad A = 25\ lit \qquad t = 24\ day$

$V = 20 \times 25 \times 24 = 12000\,lit = 12\,m^3$

ملاحظات جانمایی مخزن آب شیرین:

۱- مخازن آب شیرین باید بسیار نزدیک به فضای رفاهی و آشپزخانه باشد.

۲- آب شیرین دارای کاربردهای خنک‌کاری و سیستم تهویه نیز می‌باشد که مصارف آن باید جداگانه و در موتورخانه در نظر گرفته شود. ترکیب مواد آب شیرین خوراکی و خنک‌کاری با هم متفاوت است.

۳- مخزن آب شیرین نباید با مخازن سوخت، بالاست و فاضلاب هم‌مرز باشد و در صورت اجبار باید از مخازن واسطه[1] استفاده کرد.

۴-پوشش داخلی مخازن آب شیرین آشامیدنی و خوراکی از نوع خاصی است به گونه‌ای که طعم و بوی آب شیرین تغییر نکند.

❖ حجم‌بندی مخزن خن[2]

مخزن خن برای جمع‌آوری هرزآبهای کشتی استفاده می‌شود که می‌تواند شامل هرزآبهای موتورخانه نیز باشد. در گذشته، حجم مخزن خن به گونه‌ای تعیین می‌شد که هر ۵ – ۳ روز یکبار به دریا تخلیه شود ولی امروزه محدودیتهای زیست محیطی باعث شده است که کشتی نتواند مخزن خن را در دریا تخلیه کند و لذا این زمان به کل زمان حضور پیوسته در دریا افزایش یافته است.

❖ حجم‌بندی مخزن فاضلاب

مخزن فاضلاب معمولاً برای جمع‌آوری فاضلاب انسانی استفاده می‌شود که وابسته به تعداد خدمه و مدت‌زمان حضور پیوسته در دریا است. مخزن فاضلاب معمولاً در زیر فضای بهداشتی قرار می‌گیرد و این مخزن نباید مجاور انبار مواد غذایی باشد.

انسان موفق کسی است: که در تاریکی به دنبال فانوس بگردد

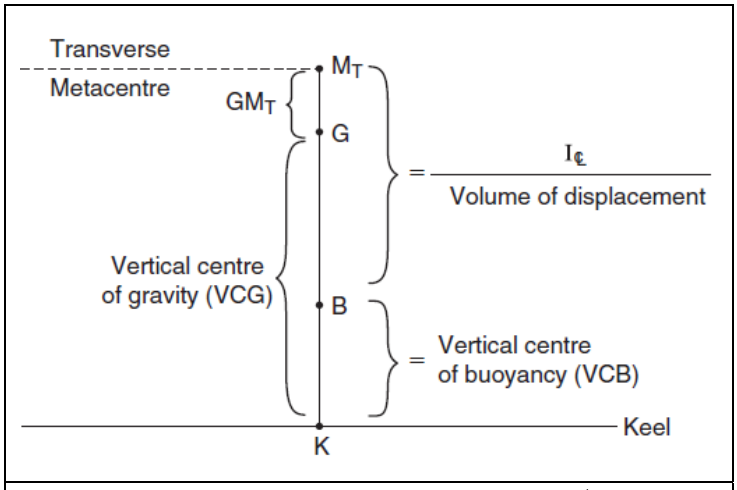
نه کسی که به انتظار آمدن صبح بنشیند ...

1 - Cofferdam
2 - bilge tank

بخش چهارم:
معماری و جانمایی در کشتی‌ها

فصل اول: اصول جانمایی در کشتی‌ها

جانمایی در کشتی‌ها شامل تقسیم‌بندی فضاهای داخلی کشتی و چیدمانی تجهیزات در قسمت‌های مختلف آن می‌باشد. اصول جانمایی برای قسمت‌های مختلف کشتی متفاوت است مانند: روبناسازی، موتورخانه و فضای انبارها. بیشترین ملاحظات جانمایی در فضای روبناسازی که محل استراحت و معیشت خدمه است، کاربرد دارد که خود دارای بخش‌های مختلفی مانند اتاق استراحت، فضای بهداشتی، آشپزخانه، راهروها و راه پله‌ها و غیره است. قبل از شروع جانمایی باید سناریوی کاربری کشتی تعریف شده باشد چرا که بر جانمایی بسیار موثر است. مهمترین عوامل سناریوی کاربری در این قسمت عبارتست از: نوع بار قابل حمل، تعداد خدمه، بنادر مبدا و مقصد (مسافت و زمان دریانوردی)، تعداد دفعات توقف در مسیر و امکان دریافت آذوقه و پشتیبانی در طول مسیر. پس از تعیین ابعاد اصلی کشتی، جانمایی مهمترین مرحله است که در واقع می‌تواند نقطه شروع طراحی باشد لذا هر چه جانمایی استادانه‌تر طراحی شده باشد، کل طراحی، سریعتر و با کمترین مشکل انجام خواهد شد.



شکل ۵-۱۶: نقش کاهش ارتفاع مرکز ثقل بر افزایش پایداری

اصول کلی در تعیین شکل بدنه و انجام جانمایی در داخل بدنه عبارتست از:

۱- عدم تجاوز حجم بدنه از حداکثر تناژ (حجم بدنه بطور مستقیم باعث ایجاد جابجایی (تناژ) می‌گردد.)

۲- امکان رسیدن به سرعت مطلوب: این عامل به شدت وابسته به دو عامل شکل کلی بدنه (ضریب مقاومت) و سطح خیس بدنه می‌باشد لذا طراحی جانمایی باید طوری انجام شود که منجر به یک شکل غیر هیدرودینامیک نگردد.

۳- پایداری مناسب: این مسئله نیز وابسته به دو عامل اصلی است: یکی شکل بدنه و دیگری کاهش ارتفاع مرکز ثقل. جانمایی داخلی کشتی باید بگونه‌ای انجام شود که اقلام سنگین در پائین بدنه و اقلام سبکتر در قسمت‌های بالای بدنه قرار گیرند. بدین ترتیب محل مرکز ثقل، پایین‌تر آمده و کشتی از وضعیت پایداری بهتری برخوردار خواهد بود (شکل ۵-۱۶).

۴- تامین قابلیت مانور خوب و پایداری دینامیکی مناسب: می‌دانیم که قابلیت مانور و پایداری دینامیکی دو عامل متضاد هم هستند. منظور از پایداری دینامیکی در اینجا همان قابلیت حفظ مسیر است. هر چه مانورپذیری بیشتر باشد، حفظ مسیر مشکل‌تر است. از طرفی هرچه بدنه کشیده و باریک‌تر باشد (مانند کشتی‌های نظامی) از قابلیت حفظ مسیر و پایداری دینامیکی بهتری برخوردار بوده و هر چه بدنه کوتاه تر و توپرتر باشد (مانند یدک‌کش‌ها)، قابلیت مانور بهتری دارد. تعیین ابعاد کلی و شکل بدنه باید بگونه‌ای باشد که نسبت L/B و L/D بتواند با توجه به ماموریت شناور، قابلیت مانور یا پایداری دینامیکی را تامین نماید.

۵- تامین امکانات رفاهی مناسب با توجه به نوع کشتی و ماموریت آن: جانمایی داخل کشتی باید بگونه‌ای باشد که راحتی کافی برای خدمه یا مسافران فراهم کند. تعیین سطح راحتی در داخل کشتی وابسته به دو عامل اصلی است:

- **نوع کشتی**: اگر کشتی مثلا مسافربری لوکس و تجملی باشد مشخص است که باید امکانات رفاهی آن در حد عالی باشد. کشتی های تجاری معمولی از امکانات رفاهی کمتری برخوردار هستند.
- **طول مدت ماموریت**: اگر کشتی بخواهد در مسیرهای کوتاه تردد کند که مثلا طول مدت دریانوردی حداکثر ۲ روز است، امکانات رفاهی ضعیف‌تری فراهم می‌شود ولی اگر کشتی بخواهد در مسیر طولانی تردد کند که مثلا طول مدت دریانوردی ۳۰ روز است، باید تجهیزات رفاهی کامل‌تر و مجهزتری در نظر گرفته شود به گونه‌ای که خدمه احساس راحتی کافی در طول سفر داشته باشند و سفر طولانی برای آنها قابل تحمل باشد.

۶- **زیبایی شکل ظاهری:** تأمین شکل ظاهری مناسب و زیبا بخصوص در کشتی‌های مسافربری بسیار حائز اهمیت است. در کشتی‌های مسافربری یکی از مهمترین عوامل کسب درآمد، زیبایی شکل ظاهری است. از همین رو معمولا در این کشتی‌ها مساحت سطح عرشه‌ها را از پایین به بالا کاهش می‌دهند تا شکل عرشه‌ها مایل باشد و همچنین شکل دودکش‌های بزرگ آنها را نیز به صورت مایل می‌سازند تا هم از نظر آیرودینامیکی و هم از نظر زیبایی مناسب باشد. استفاده از رنگ‌های متنوع و شاد نیز اهمیت خاصی دارد.

۷- **کنترل وزن کل کشتی:** در انجام جانمایی باید به مسئله وزنی توجه بسیاری داشت چرا که وزن و بویانسی (جابجایی) کشتی باید با هم برابر شوند در غیر اینصورت کشتی با اضافه وزن مواجه خواهد شد که حل این مشکل کار ساده‌ای نیست. طراح جانمایی می‌تواند از فنونی استفاده کند که حداقل وزن را در جانمایی تحمیل کند مثلا مشترک کردن فضاهای بهداشتی، تعداد دیواره‌های کاذب داخلی، تنوع امکانات رفاهی و غیره.

فصل دوم: تعیین تعداد خدمه کشتی‌ها

تعیین تعداد خدمه کشتی‌ها از عوامل مهم در طراحی کشتی می‌باشد از جمله:

۱- تعریف شیفت‌های کاری و وظایف خدمه
۲- تعیین تعداد اتاق‌ها، تخت‌ها و کلیه تجهیزات رفاهی
۳- حجم‌بندی مخازن آب شیرین و فاضلاب
۴- بررسی پایداری ناشی از جابجاشدن طولی، عرضی و عمودی خدمه

در تعیین تعداد خدمه کشتی‌ها عوامل بسیار متعددی دخیل هستند از جمله:

۱- نوع کشتی (تجاری یا مسافری)
۲- تناژ کشتی
۳- طول کشتی
۴- سطح اتوماسیون و خودکاربودن تجهیزات کشتی
۵- طول مدت‌زمان کاری کشتی (که شیفت‌های کاری را افزایش می‌دهد).

لذا براحتی نمی‌توان توصیه و رابطه‌ای برای تعداد خدمه کشتی‌ها ارائه کرد لذا تعداد خدمه چند نوع کشتی واقعی ساخته شده در جداول زیر بر حسب نوع کشتی ارائه می‌شود و توصیه مربوطه در انتهای آن بیان می‌گردد.

أ. تعداد خدمه کشتی‌های مسافربری

ردیف	نام کشتی	(GRT)تناژ ناخالص	تعداد خدمه	تعداد مسافر
۱	*Hawaii*	۹۲۰۰۰	۱۱۰۰	۲۲۲۴
۲	*SS Norway*	۷۶۰۰۰	۸۷۵	۲۵۶۴
۳	*Vision Star*	۱۹۰۰۰	۴۷۰	۸۰۰
۴	*Aquarius*	۵۱۰۰۰	۷۰۰	۱۵۲۹
۵	*America*	۸۱۰۰۰	۹۰۰	۲۱۴۶
۶	*Pacific*	۲۰۰۰۰	۳۵۰	۶۴۰
۷	*Norwegian Sun*	۷۸۰۰۰	۹۶۸	۲۰۰۲
۸	*Leo Class*	۷۷۰۰۰	۹۶۵	۱۹۹۶
۹	*Norwegian Majesty*	۴۰۰۰۰	۶۲۰	۱۴۶۰
۱۰	*Carnival Liberty*	۱۱۰۰۰۰	۱۱۵۰	۲۹۷۴
۱۱	*Carnival Legend*	۸۸۵۰۰	۹۳۰	۲۱۲۴
۱۲	*GTS Millennium*	۹۱۰۰۰	۹۰۰	۱۹۵۰
۱۳	*Celebrity Solstice*	۱۲۲۰۰۰	۲۸۵۰	۱۵۰۰
۱۴	*Emerald Princess*	۱۱۳۰۰۰	۱۲۰۰	۳۱۱۴
۱۵	*Adventure of the Seas*	۱۳۷۰۰۰	۱۱۸۰	۳۱۱۴
۱۶	*Freedom of the Seas*	۱۵۴۰۰۰	۱۳۶۰	۴۳۷۰
۱۷	*MSC Fantasia*	۱۳۳۵۰۰	۱۳۱۳	۳۹۵۹
۱۸	*MSC Melody*	۳۵۰۰۰	۱۰۶۲	۱۵۳۵
۱۹	*MV Boudicca*	۲۸۰۰۰	۳۲۰	۹۰۰
۲۰	*MS Bleu de France*	۳۷۰۰۰	۴۰۶	۷۵۲

جدول ۵-۱۰: تعداد خدمه و مسافر و چند کشتی مسافربری

توصیه: تعداد خدمه کشتی‌های مسافری برابر $\frac{1}{2}$ تا $\frac{1}{3}$ تعداد مسافرین است. هرچه نوع کشتی لوکس و تجملی‌تر باشد تعداد خدمه بیشتر است (جدول ۵-۱۰).

ب. کشتی‌های فله‌بر و کانتینربر

ردیف	نام کشتی	وزن مرده(DWT)	تعداد خدمه
۱	*Edith Maersk*	۱۵۶۰۰۰	۱۳
۲	*Motor Vessel Baffin Strai*	۸۳۰۰۰	۱۳
۳	*MSC Daniela*	۱۵۲۰۰۰	۳۰
۴	*Danit*	۱۶۵۰۰۰	۲۵
۵	*Yasa Neslihan*	۸۳۰۰۰	۲۰
۶	*MSC Madeleine*	۱۰۷۰۰۰	۲۵
۷	*MV Cristina A*	۲۲۰۰۰	۱۶
۸	*MSC Danit*	۱۶۵۰۰۰	۲۵

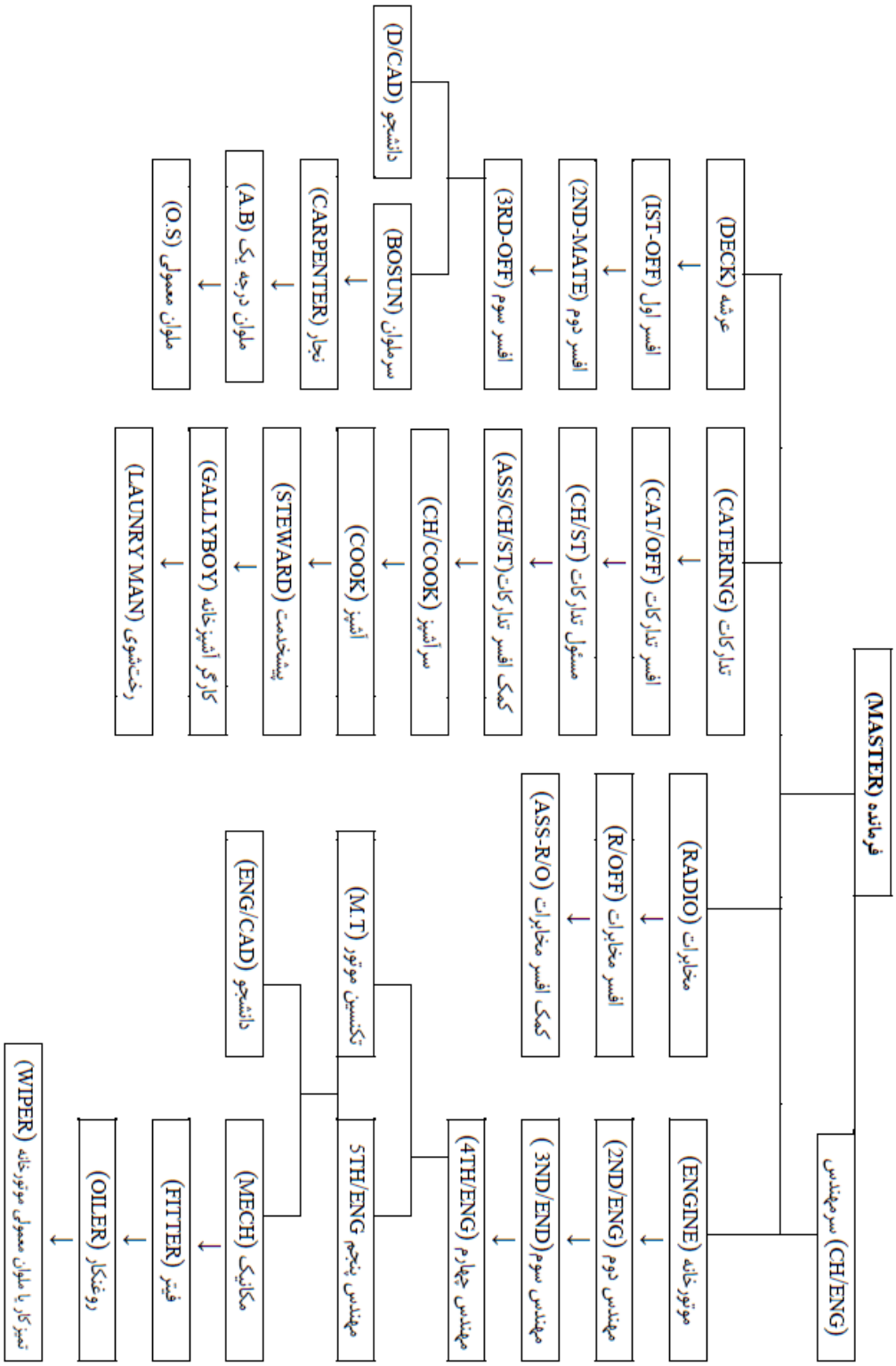
جدول ۵-۱۱: نمونه‌هایی از تعداد خدمه کشتی‌های فله‌بر و کانتینربر

ت. کشتی‌های نفتکش و حمل مواد شیمیایی

ردیف	نام کشتی	وزن مرده(DWT)	تعداد خدمه
۱	*Thomas W. Lawson*	۱۴۰۰۰	۱۸
۲	*Empire MacKay*	۸۹۰۰	۱۱
۳	*MT Stolt Valor*	۲۵۰۰۰	۲۲
۴	*Karagöl*	۲۱۱۰۰۰	۳۵

جدول ۵-۱۲: نمونه‌هایی از تعداد خدمه کشتی‌های نفتکش و حمل مواد شیمیایی

❖ تقسیم وظایف داخل کشتی‌های تجاری



فصل سوم: تعیین تعداد عرشه ها

در یک تخمین اولیه باید بتوان تعداد عرشه‌های کشتی را معلوم نمود که شامل عرشه‌های داخل روبناسازی و عرشه‌های داخل انبار می‌باشد. تعیین تعداد عرشه‌ها در کشتی‌های مسافربری بزرگ از اهمیت خاصی برخوردار است. برای تعیین تعداد عرشه‌ها دو عامل اصلی مورد نیاز است:

۱- کل حجم در اختیار: که از طریق محدودیت جابجایی کنترل می‌شود.

۲- سطح بنای مورد نیاز : در ساختمانهای معمولی قبل از انجام جانمایی و معماری داخلی، ابتدا سطح بنا را مشخص می‌نمایند و بر اساس مساحت موجود، جانمایی را انجام می‌دهند. در کشتی‌ها نیز به همین صورت است. ابتدا با مشخص‌شدن سناریوی کاربری و نوع کشتی، مساحتی از قسمت‌های متعدد بدست می‌آید که نشان‌دهنده سطح کل مورد نیاز است. حال اگر این سطح بنا را بر متوسط سطح هر عرشه (سطح بنا) تقسیم کنیم تعداد عرشه‌ها بدست می‌آید:

$$\text{تعداد عرشه ها} = \frac{\text{کل مساحت مورد نیاز}}{\text{متوسط مساحت هر عرشه (سطح بنا)}}$$

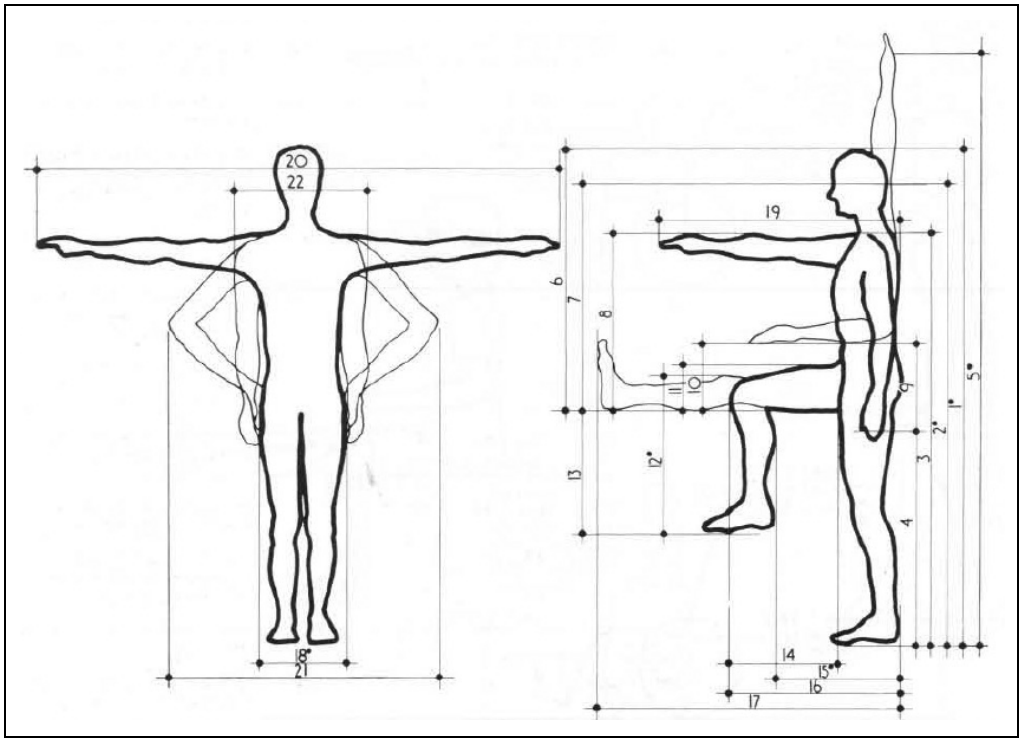
فصل چهارم: جانمایی فضای داخلی کشتی

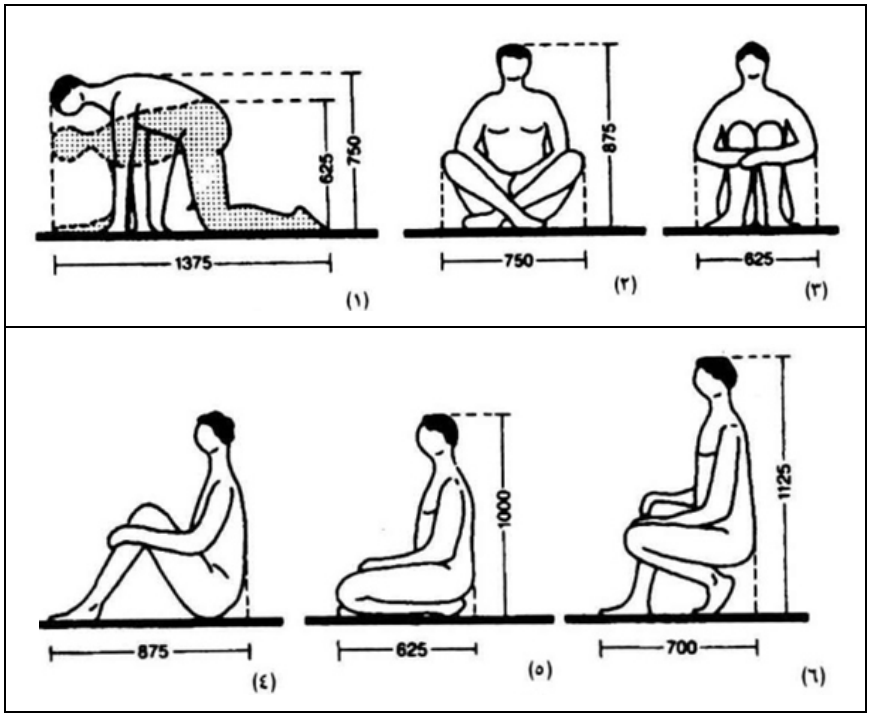
❖ ابعاد بدن انسان جهت معماری فضاهای مسکونی و کاری

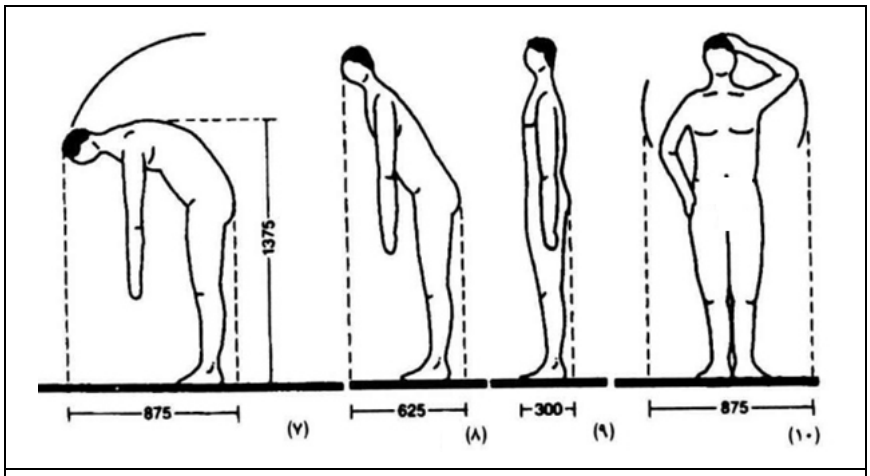
آشنایی با ابعاد تقریبی بدن انسان که اصطلاحا ارگونومی نامیده می‌شود در طراحی فضاهای مسکونی بسیار موثر است. البته ابعاد بدن انسان بین زن و مرد و نژادهای مختلف، فرق می‌کند. جدول ۵-۱۳ داده‌های ابعاد بدن انسان در زیر مربوط به جمعیت نمونه از مردم آمریکا است. در شکل ۵-۱۷، ابعاد تقریبی برای انجام جانمایی ارائه می‌گردد (ابعاد برحسب میلیمتر).

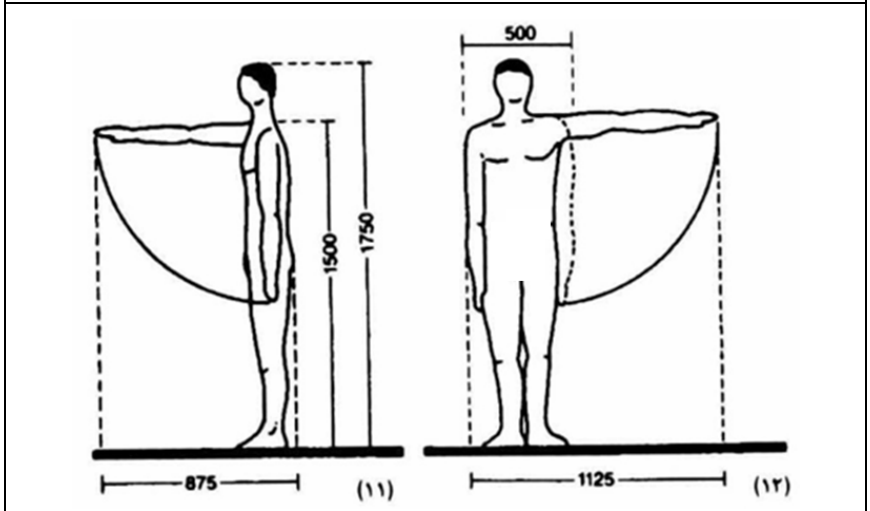
	قسمت بدن	ابعاد (mm)
1	قد	۱۷۳۷
2	ارتفاع چشم(ایستاده)	۱۶۳۳
3	ارتفاع شانه(ایستاده)	۱۴۲۸
4	ارتفاع دست(ایستاده)	۷۷۰
5	دسترسی به بالا	۲۱۱۸
6	ارتفاع بالای سطح نشیمن	۹۰۰
7	ارتفاع چشم بالای سطح نشیمن	۷۸۵
8	ارتفاع شانه بالای سطح نشیمن	۵۸۷
9	طول ساعد	۳۲۸
10	ارتفاع آرنج از سطح نشیمن	۲۲۴
11	قطر ران	۱۴۹
12	ارتفاع زانو از کف پا	۵۵۲
13	ارتفاع زیر زانو از کف پا	۴۳۵
14	فاصله جلو شکم تا انتهای زانو	۳۸۶
15	فاصله پشت کپل تا پشت ساق پا	۴۷۸
16	فاصله پشت کپل تا انتهای زانو	۶۱۴
17	طول پا	۱۰۹۰
18	پهنای نشیمن	۳۶۶
19	دسترسی به جلو	۸۴۸
20	دسترسی جانبی	۱۷۶۸
21	پهنای حالت دست به کمر	۹۵۵
22	پهنای شانه	۴۶۲

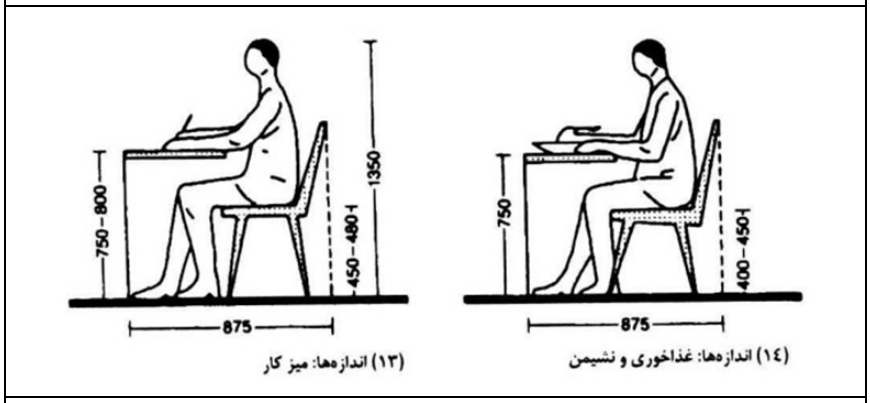
جدول ۵-۱۳: ابعاد بدن انسان جهت انجام معماری فضاهای معمولی و کاری

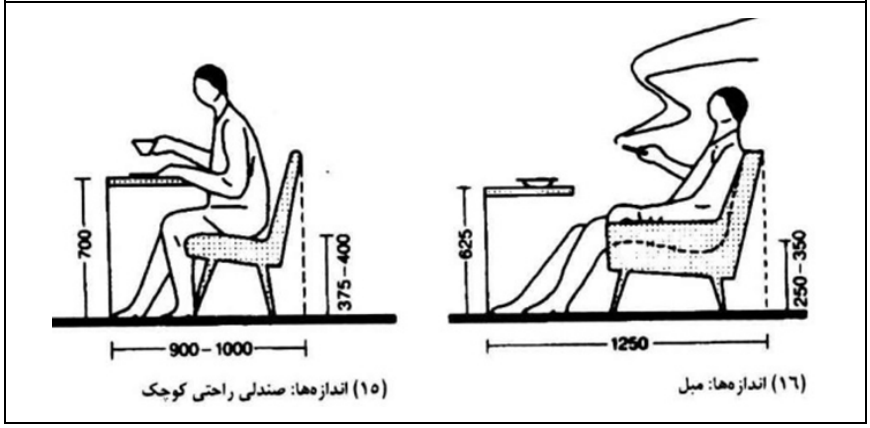

20
22
19
6
7
8
11
10
9
5"
1"
2"
3
4
13
12"
18"
21
14
15"
16
17

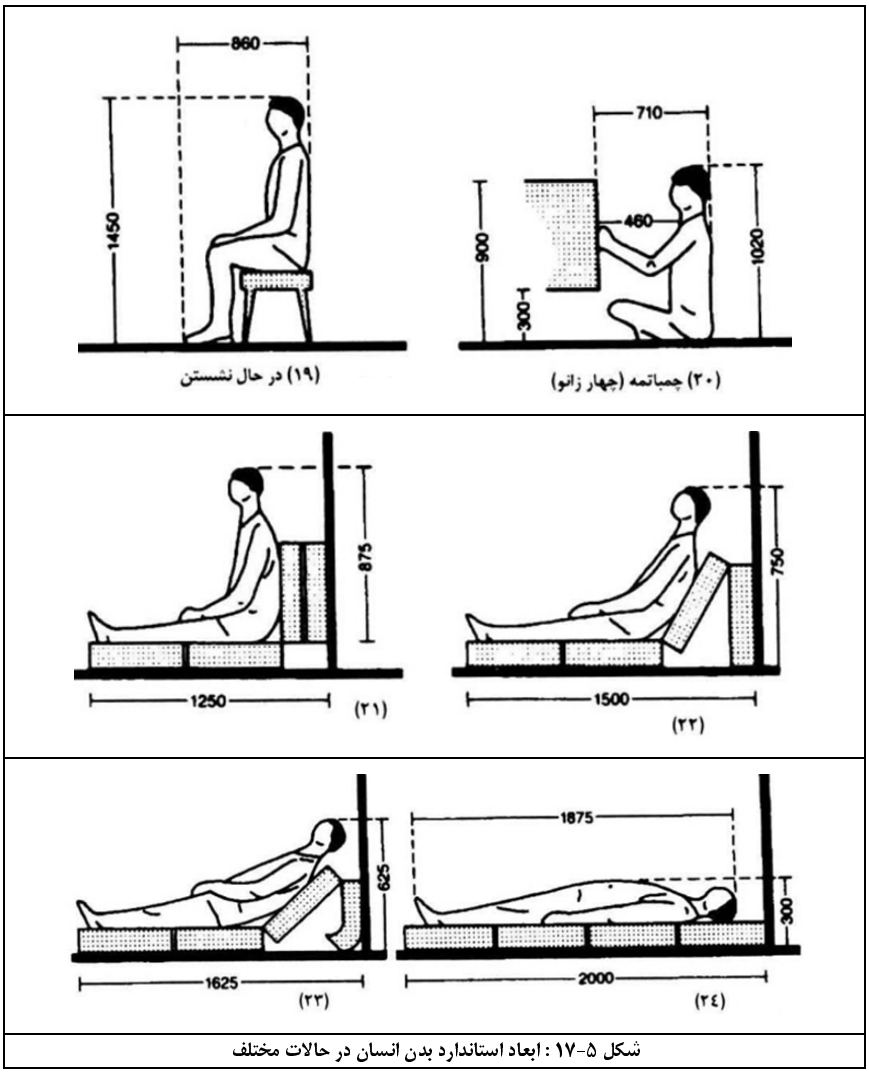

625
750
1375
(۱)
875
750
(۲)
625
(۳)
875
(٤)
1000
625
(٥)
1125
700
(٦)


1375
875
(۷)
625
(۸)
300
(۹)
875
(۱۰)


500
1500
1750
875
(۱۱)
1125
(۱۲)


750-800
450-480
1350
875
(۱۳) اندازه‌ها: میز کار
750
400-450
875
(۱٤) اندازه‌ها: غذاخوری و نشیمن


700
375-400
900-1000
(۱۵) اندازه‌ها: صندلی راحتی کوچک
625
250-350
1250
(۱٦) اندازه‌ها: مبل



شکل ۵-۱۷ : ابعاد استاندارد بدن انسان در حالات مختلف

❖ جانمایی اتاق‌های کشتی

تعداد اتاق های کشتی باید بگونه‌ای باشد که کلیه خدمه و مسافران را در خود جای دهد. تک نفره یا چند نفره بودن اتاق‌ها وابسته به سطح راحتی در نظر گرفته شده برای افراد می‌باشد. مثلا در کشتی‌های تجاری فرمانده و افسران دارای اتاق‌های تک نفره و ملوانان دارای اتاق‌های عمومی هستند. امروزه داخل هر اتاق معمولا تجهیزات زیر قرار دارد: تخت‌های خواب، میز مطالعه، کمد لوازم شخصی، دستشویی و حمام. در جانمایی اتاق‌ها باید نکات کلی زیر را در نظر داشت:

۱- راحتی و زیبایی اتاق‌ها

۲- نگهداری و نظافت اتاق‌ها بگونه‌ای که دسترسی به قسمت‌های مختلف اتاق ساده باشد. توجه به این نکته ضروری است که در داخل کشتی و در داخل اتاق‌ها، تک تک تجهیزات در محل خود ثابت شده‌اند. مثلا مبلمان یا میزها در جای خود پیچ شده‌اند و برداشتن و جابجا کردن آنها کار ساده-ای نیست. لذا با توجه به این نکته، باید نظافت قسمت‌های مختلف اتاق براحتی میسر باشد.

۳- دسترسی راحت به محل اتاق بگونه‌ای که تردد خدمه یا مسافران به اتاق های خود براحتی انجام شود.

۴- هزینه ساخت مناسب.

شکل ایده‌آل اتاق بصورت نسبت ابعاد کاغذ A4 است یعنی اگر نسبت طول به عرض اتاق زیاد باشد، نمی‌توان جانمایی مناسبی را در داخل آن انجام داد. محل اتاق‌ها معمولا در کنار بدنه جانمایی می‌شود بگونه‌ای که امکان تعبیه پنجره وجود داشته باشد. با توجه به مرطوب بودن محیط دریا و داخل کشتی، داشتن پنجره و نورگیر از امور ضروری در جانمایی اتاق است. از اتاق‌هایی که در مجاورت بدنه و دارای پنجره نیست معمولا برای انبار استفاده می‌شود. تخت‌ها معمولا دارای عرض ۶۰ سانتی‌متر و طول ۲ متر هستند. در جانمایی محل تخت‌ها، توجه به نکات زیر مهم است(هر چند که ممکن است در برخی مواقع، امکان تامین آن وجود نداشته باشد):

۱- جانمایی تخت‌ها در راستای طولی بدنه: از آنجا که همواره حرکات رول، شدیدتر از حرکات پیچ است لذا اگر تخت‌ها بصورت طولی جانمایی

شوند، حرکات رول باعث گهواره‌ای و آرامش‌بخشی برای فردی که در روی تخت خواب در حال استراحت است، می‌گردد. این در حالی است که اگر تخت‌ها در راستای عرضی نصب شوند، حرکات رول باعث ناراحتی شدید فرد در حال استراحت می‌شود. این مسئله بخصوص در کشتی‌های اقیانوس‌پیما که قسمت زیادی از طول مسیر خود را با حرکات رول شدید طی می‌کنند ضروری است. در کشتی‌های کوچک که این معضل کمتر است، در برخی مواقع تخت‌ها را بصورت L شکل جانمایی میکنند که یکی در راستای طولی و دیگری در راستای عرضی است.

۲- فاصله تخت‌ها از بدنه کشتی و دیواره راهرو: معمولا سعی می‌شود که تخت‌ها چسبیده به دیواره راهرو نباشد چرا که تردد افراد و سر و صدای آنها مزاحم استراحت خدمه و مسافران خواهد شد. مجاورت تخت با بدنه کشتی نیز با توجه به خطر تصادم بدنه، خطرناک است.

۳- عدم مجاورت تخت با پنجره : معمولا تخت ها را کنار پنجره قرار نمی‌دهند چرا که محدودیت‌های زیر را دارد:

- روشنایی زیاد در زمان استراحت فرد در روز
- نشت آب از پنجره
- خطر شکستن شیشه و صدمه‌دیدن فرد
- احساس سرمای بیشتر توسط فرد

در جانمایی میز مطالعه و صندلی نیز دو نکته وجود دارد:

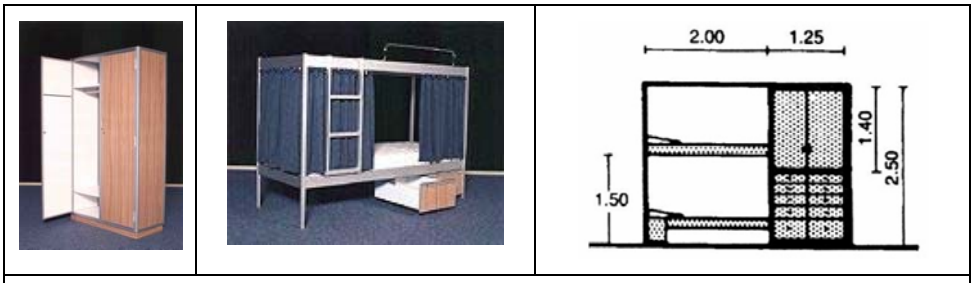
۱- میز در کنار دیوار یا وسط اتاق قرار می‌گیرد.

۲- موقعیت نشستن فرد پشت به پنجره نباشد تا روشنایی لازم حین مطالعه فراهم شود.

محفظه لوازم شخصی نیز مطابق شکل۵-۱۸ به دوصورت قابل جانمایی است:

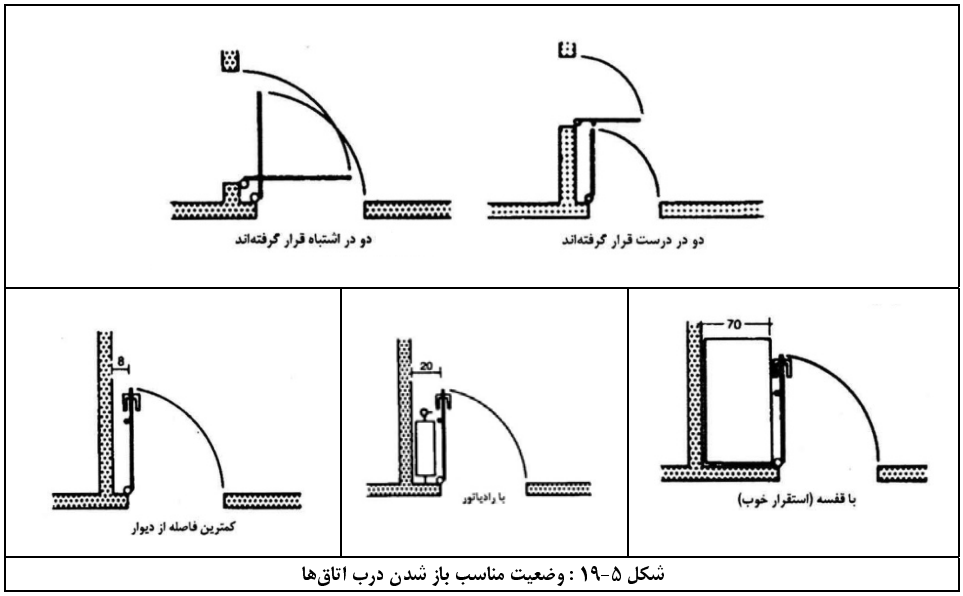
۱- کمد عمودی مستقل که فضای مناسب‌تری را برای رخت آویز فراهم کند.

۲- کشوهای بزرگ زیر تخت که در صورت کم‌بودن مساحت اتاق، از این روش استفاده می‌شود.



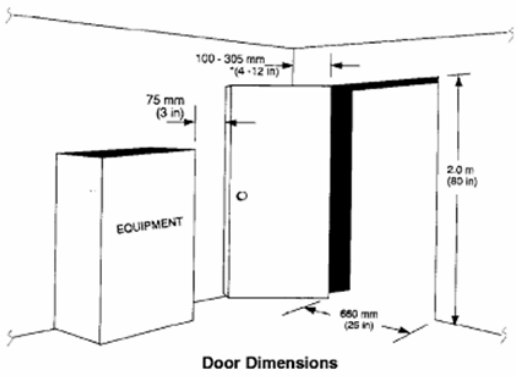
شکل ۵-۱۸: جانمایی کمد و محفظه لوازم شخصی

درب اتاق‌های کشتی معمولا به طرف داخل اتاق باز می‌شوند و نباید به داخل راهرو باز شوند. اگر اتاق‌ها به صورت L جانمایی شده باشند باز شدن دربها نباید باعث تداخل آنها شوند (شکل۵-۱۹). در حالت عادی دربها باید بتوانند ۹۰ درجه باز شوند. اگر درب ۹۰ درجه باز شود باید حداقل ۸ سانتیمتر فاصله بین درب و دیوار رعایت شود. همچنین اگر کمد یا شوفاژ در پشت درب قرار گرفته باشد باید عرض آنها برای باز شدن کامل درب، مناسب باشد.



شکل ۵-۱۹ : وضعیت مناسب باز شدن درب اتاق‌ها

اگر درب بیش از ۹۰ درجه باز شود، ابعاد تقریبی درب مطابق استاندارد ASTM در شکل ۵-۲۰ ارائه شده است.



شکل ۵-۲۰: ابعاد استاندارد درب در استاندارد ASTM

❖ جانمایی فضای بهداشتی کشتی

فضای بهداشتی (دستشویی، توالت و حمام) از امکانات ضروری محیط کاری انسان است که در کشتی‌های تجاری قدیمی بصورت سرویس بهداشتی عمومی در نظر گرفته می‌شد و فقط برای کشتی‌های لوکس مسافربری بصورت اختصاصی برای هر اتاق وجود داشت. ولی امروزه در اغلب کشتی‌های تجاری و مسافربری سعی می‌شود برای هر اتاق یک سرویس بهداشتی مجزا در نظر گرفته شود. در جانمایی فضای بهداشتی، نکات زیر مهم است:

۱- مجاور بودن فضای بهداشتی اتاق‌های هم جوار: بدین ترتیب در لوله‌کشی سیستم فاضلاب صرفه‌جویی می‌شود چرا که به ازای هر دو سرویس فقط یک مجموعه انتقال فاضلاب استفاده می‌شود.

۲- جانمایی در کنار دیوار مجاور راهرو: سروصدای راهرو برای فضای بهداشتی ایجاد راحتی نمی‌کند.

۳- عدم عبور لوله کشی‌های داخل فاضلاب از روی انبار مواد غذایی و یخچالها و تابلوهای برق: چرا که در صورت بروز نشتی باعث بروز خسارت بسیار می‌گردد.

۴- انتقال لوله‌های فاضلاب بصورت عرضی به بیرون از بدنه کشتی و عدم انتقال بصورت طولی: لوله فاضلاب نباید بصورت طولی امتداد یافته باشد چرا که در صورت شیب داشتن کشتی، کار پمپ فاضلاب برای انتقال بسیار دشوار خواهد بود.

❖ سه حالت کلی برای جانمایی اتاق‌ها نسبت به راهروها

همانطور که بیان شد اتاق‌ها معمولا در کنار بدنه و دارای پنجره جانمایی می‌شوند و اتاق‌ها بصورت ردیفی در کنار هم قرار می‌گیرند. وضعیت اتاق‌ها نسبت به راهروها را می‌توان در سه حالت کلی زیر در نظر گرفت(شکل ۵-۲۱):

۱- مطابق حالت الف: راهروها کنار کابین موازی خط مرکزی کشتی است و اتاق ها عمود بر راهروها هستند. در این حالت طول کابین‌ها با هم برابر و عرض آنها متفاوت است در نتیجه مساحت اتاق‌ها با توجه به انحنای بدنه با هم متفاوت خواهد بود.

۲- مطابق حالت ب: را هروها با خط مرکزی موازی است و اتاق ها دارای طول متفاوتی هستند ولی مساحت آنها با هم برابر است.

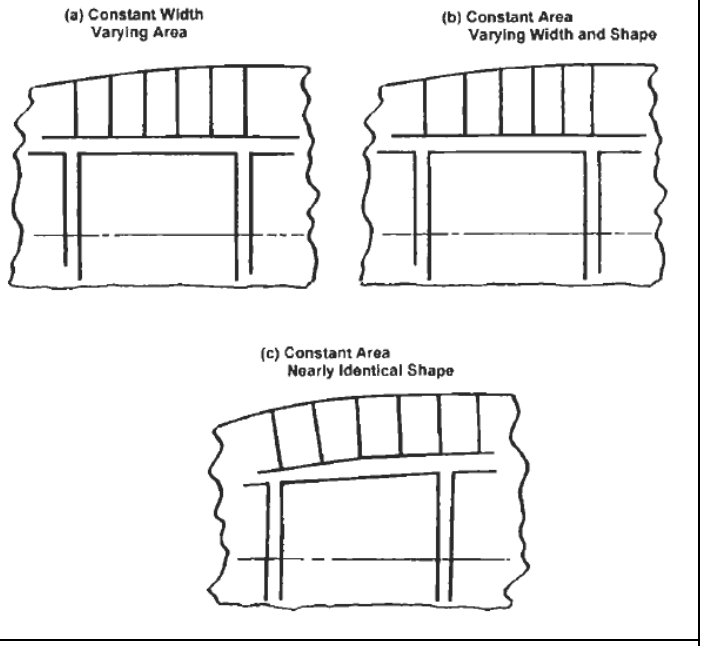
۳- مطابق حالت ج: راهرو موازی خط مرکزی نیست و شکل اتاق‌ها و جانمایی آنها با هم متفاوت است ولی مساحت همه اتاق‌ها یکسان است.

❖ جانمایی راهروهای کشتی

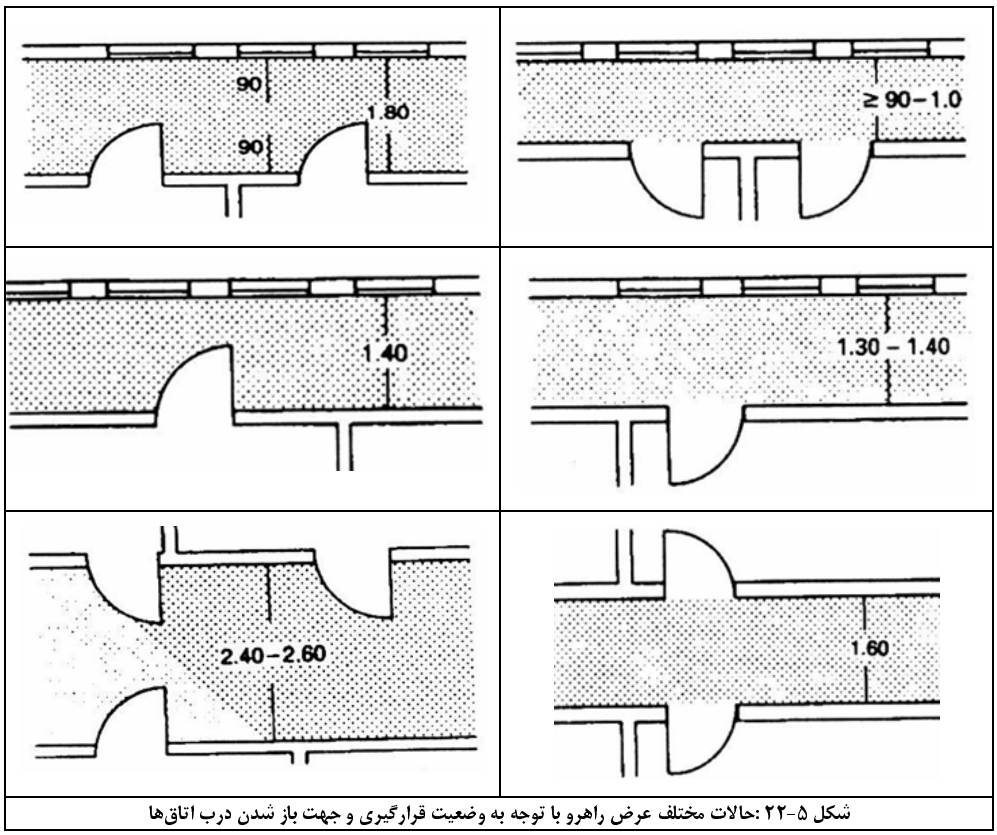
وجود راهروها برای دسترسی به نقاط مختلف کشتی ضروری است و جزء فضاهای مرده و غیرمطلوب محسوب می‌شود که کاهش آن به حداقل مقدار ممکن مطلوب است. عرض راهروها متناسب با ترافیک و حجم تردد راهرو متفاوت است. مثلا راهرو منتهی به ناهارخوری که در ساعات مختلفی از روز، افراد زیادی به آنجا مراجعه می‌کنند، دارای عرضی متفاوت از راهرو مجاور اتاق‌ها می‌باشد. راهرو مجاور اتاق‌ها(که اغلب راهروهای کشتی از این نوع است)، دارای عرض حدود ۱ متر می‌باشد چرا که در معرض حرکات رول، شخص امکان تکیه از یک دیوار به دیوار مقابل را داشته باشد بدون اینکه در این بین روی زمین بیافتد. لذا افزایش و کاهش عرض راهرو همواره با محدودیت مواجه است. داخل راهروها نیز همواره یک میله طولی بعنوان تکیه-گاه در طول راهرو وجود دارد که افراد بتوانند درحین تلاطم و حرکات شدید کشتی، باز هم تردد نمایند. عوامل مهم در تعیین عرض راهرو که در شکل ۵-۲۲ نشان داده شده‌اند عبارتند از:

- ترافیک عبور و مرور افراد (مهمترین عامل)

- درب اتاق‌ها در یک طرف قرار دارند یا هر دو طرف راهرو
- درب اتاق‌ها به داخل باز می‌شوند یا به بیرون



شکل ۵-۲۱: جانمایی اتاق‌ها نسبت به راهروها



شکل ۵-۲۲ :حالات مختلف عرض راهرو با توجه به وضعیت قرارگیری و جهت باز شدن درب اتاق‌ها

این میله در ارتفاع حدود ۹۰ سانتیمتری به دیوار متصل شده است. مسیر راهرو باید بگونه‌ای تعیین شود که منجر به حداقل طول راهرو شود چرا که راهرو از فضاهای نامطلوب است. طول مسیر راهرو نیز نباید کاملا مستقیم باشد و مطابق شکل۵-۲۳ باید دارای شکستگی باشد، چراکه در صورت

سرخوردن و حرکت ناخواسته یک شی در اثر حرکات شدید کشتی، مسیر طولانی را طی نکند و در یک محل متوقف شود.

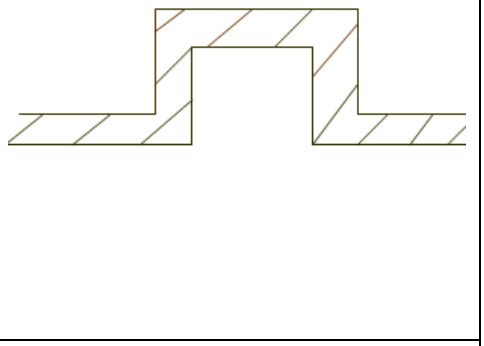
اگر کشتی دارای آسانسور باشد، از این فضای شکستگی راهرو برای نصب آسانسور استفاده می‌شود تا استفاده مطلوب از فضای داخل کشتی شده باشد.

❖ ارتباط بین طبقات و سطوح مختلف

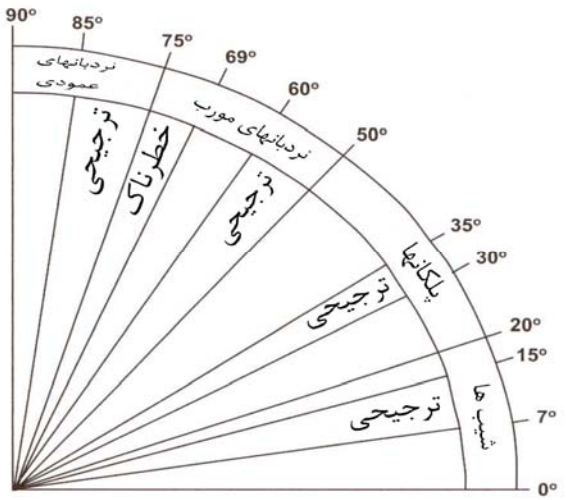
اگر بین دو سطح یا دو طبقه اختلاف ارتفاع وجود داشته باشد از انواع وسایل ارتباطی با توجه به زاویه آن استفاده می‌شود که عبارتند از:

- سطح شیب دار مسطح (بدون پله)[1] : برای زاویه ۰- ۲۰ درجه
- راه پله[2]: برای زاویه ۲۰- ۵۰ درجه
- نردبان مایل[3]: برای زاویه ۵۰- ۷۵ درجه
- نردبان عمودی[4]: برای زاویه ۷۵- ۹۰ درجه

برای انتخاب اینکه از کدامیک از روش‌های فوق می‌توان استفاده کرد نمودار شکل ۵-۲۴ ارائه شده است:



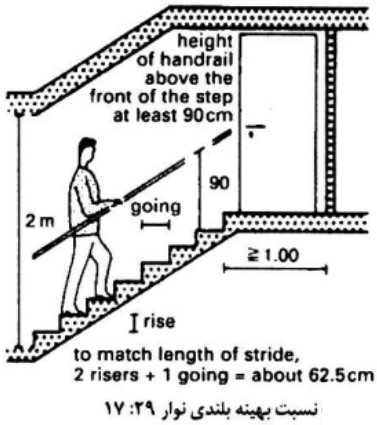
شکل ۵-۲۳: فضای شکستگی راهرو



شکل ۵-۲۴ : انتخاب نوع ارتباط بین طبقات و سطح با توجه به زاویه

❖ جانمایی راه پله‌های کشتی

راه پله‌ها دارای کاربری اصلی برای ارتباط بین عرشه‌ها هستند که البته در برخی مواقع یک عضو سازه‌ای نیز محسوب می‌شوند و همانند یک ستون در زیر عرشه می‌توانند عمل کنند و باعث تقویت محل برش عرشه برای نصب راه‌پله باشند. راه‌پله‌ها اغلب به صورت طولی نصب می‌شوند تا در مواجهه با حرکات رول (که شدیدتر از حرکات پیچ است) افراد بتوانند براحتی از راه‌پله‌ها استفاده کنند. قوانین تعیین عرض راه‌پله‌ها نیز همانند راهروها می باشد و میله دستگیره نیز مطابق شکل ۵-۲۵ در ارتفاع ۹۰ سانتیمتری وجود دارد.اگر تعداد پله‌ها کمتر از ۵ باشد نیازی به میله دستگیرهوجود ندارد. وجود پاگرد در راه پله‌ها نیز واجب و ضروری است و معمولا در ازای



نسبت بهینه بلندی نوار ۲۹: ۱۷

شکل ۵-۲۵: راه پله کشتی

1 - Ramp
2 - stair
3 - inclined ladder
4 - vertical ladder

حداکثر هر ۱۸ پله یک پاگرد قرار می‌گیرد. زاویه شیب ۳۰ درجه راه پله ایده‌آل‌ترین زاویه از نظر مصرف انرژی انسان است که اغلب در کشتی‌های تجاری امکان‌پذیر نیست ولی در کشتی‌های مسافربری اعمال می‌گردد. حداقل ارتفاع کف راه پله تا سقف شیب‌دار فوقانی باید ۲ متر باشد و اغلب در کشتی‌ها ۲/۱ متر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵-۲۶، شش حالت کلی از راه‌پله‌ها در کشتی می‌باشد. در این شکل elevation برش طولی کشتی و section ، برش عرضی کشتی است. این حالات عبارتند از:

حالت ۱: راه‌پله‌ها بصورت طولی و موازی هم هستند.

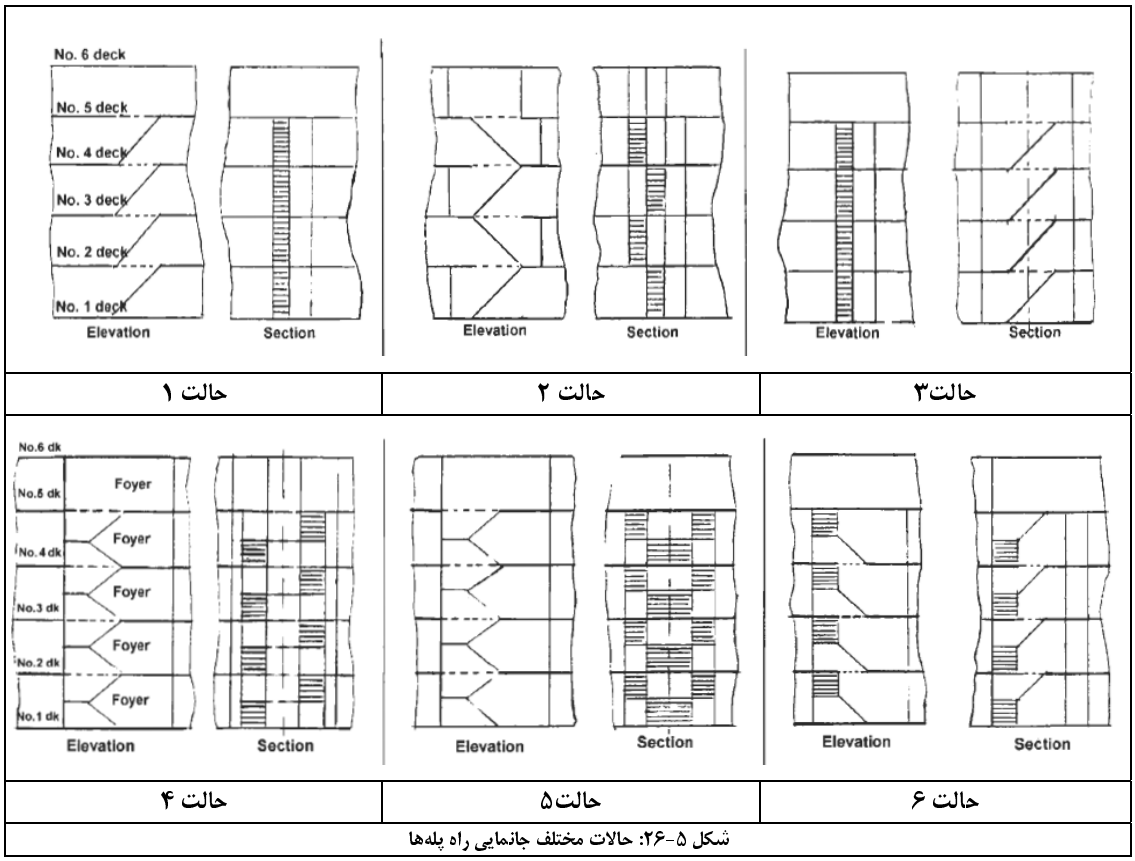
حالت۲: راه‌پله‌ها بصورت طولی و متقاطع هستند.

حالت۳: راه‌پله‌ها بصورت عرضی و موازی هم هستند.

حالت ۴: راه‌پله‌های بین دو عرشه به دو نیم تقسیم شده و یک پاگرد قرار گرفته‌است. راه‌پله‌ها بصورت طولی قرار گرفته‌اند.

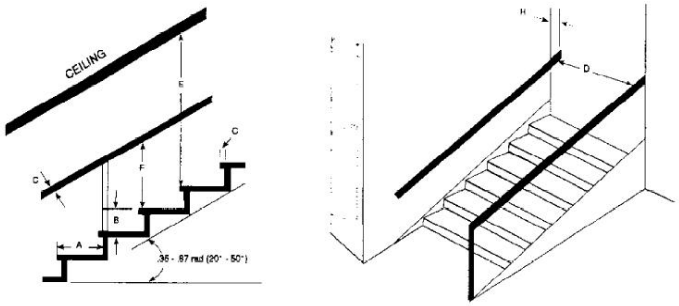
حالت ۵: راه‌پله‌ها دو نیم شده و بصورت طولی و با عرض زیاد قرار گرفته‌اند این جانمایی برای کشتی‌های مسافربری بزرگ مناسب است.

حالت۶: راه‌پله‌ها بصورت متناوب طولی و عرضی جانمایی شده‌اند و پاگرد در هر تغییر مسیر وجود دارد.



شکل ۵-۲۶: حالات مختلف جانمایی راه پله‌ها

بطور کلی سه بخش اصلی راه پله عبارتست از: ۱- پله ۲- پاگرد ۳- نرده‌ها. در استاندارد ASTM محدوده ابعاد راه پله‌ها مطابق شکل ۵-۲۷ ارائه شده است.

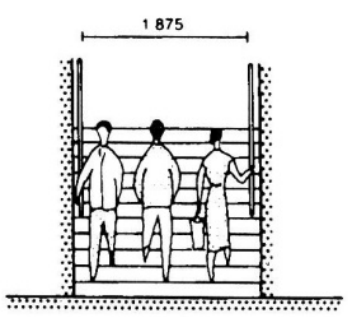


DIMENSION	MINIMUM mm (in)	MAXIMUM mm (in)	RECOMMENDED mm (in)
A. Tread depth (including nosing)	240 (9 1/2)	300 (12)	280-300 (11-12)
B. Riser Height	125 (5)	200 (8)	165-180 (6 1/2-7)
C Depth of nosing (where applicable)	19 (3/4)	38 (1 1/2)	25 (1)
D Width (handrail to handrail):			
One-way stairs	760 (30)	—	910 (36)
Two-way stairs	1220 (48)	—	1300 (51)
E Overhead Clearance	1981 (78)	—	2032 (80)
F Height of handrail (from leading edge of tread)	760 (30)	910 (36)	840 (33)
G Handrail diameter	32 (1 1/4)	75 (3)	38-51 (1 1/2-2)
H Rail clearance from wall	45 (1 3/4)	—	75 (3)

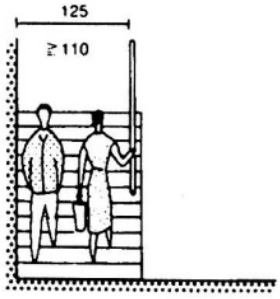
Stair Dimensions

شکل ۵-۲۷ : ابعاد استاندارد راه پله‌ها

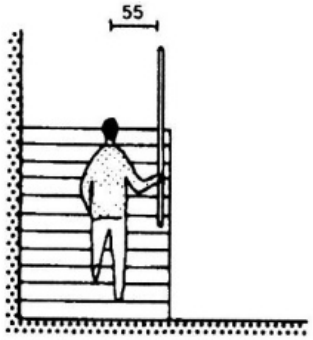
میزان پهنای پله با توجه به ترافیک آن تعیین می‌شود که در کشتی‌های مسافربری اهمیت خاصی دارد که در شکل ۵-۲۸ تعیین می‌شود.



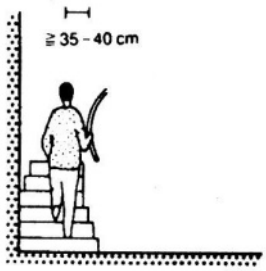
پهنای پله که امکان عبور سه نفر را فراهم می‌آورد



پهنای پله کـه امکـان عبـور دو فـرد را فراهم می‌آورد



اگر پله‌ها مستقیم و پـــهن هســتند، فاصلـهٔ میان خط پیاده تا نرده باید ۵۵ سانتی‌متر باشد

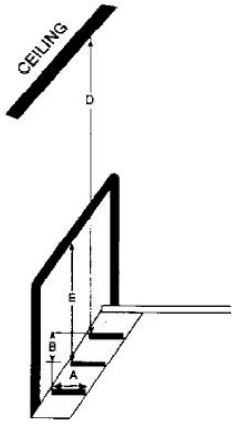


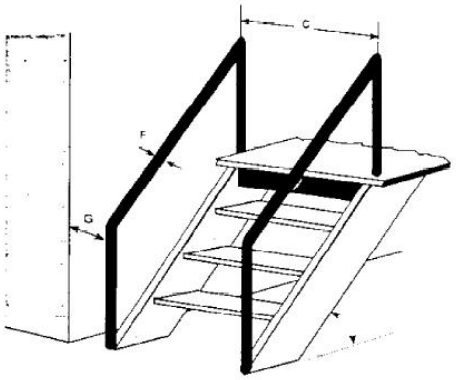
اگر پله‌ها باریک بوده یـا مسـیری منحنـی دارند، بخش بیرونی کف پله تا شخص بالارونده باید ۳۵ تا ۴۰ سانتی‌متر باشد

شکل ۵-۲۸ : ابعاد استاندارد راه پله‌ها با توجه به ترافیک عبور و مرور

❖ جانمایی نردبان

نردبان مایل و عمدی در کشتی‌ها کاربرد زیادی دارند. در طراحی نردبان مایل می‌توان از ابعاد شکل ۵-۲۹ استفاده کرد.





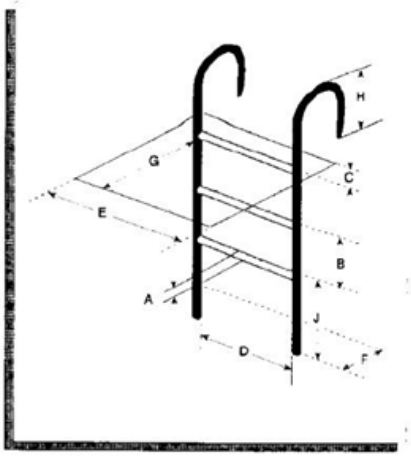
	MINIMUM mm (in)	MAXIMUM mm (in)	RECOMMENDED mm (in)
A Tread depth range:			
For .87-1.05 rad (50-60°) rise	150 (6)	250 (10)	215 (8 1/2)
For 1.20-1.31 rad (69°-75°)rise (open ladders only)	75 (3)	140 (5 1/2)	100 (4)
B Riser Height	180 (7)	300 (12)	230 (9)
C Width (handrail to handrail)	530 (21)	610 (24)	560 (22)
D Overhead clearance*	1930 (76)	—	2032 (78)
E Height of handrail (from leading edge of tread)	860 (34)	940 (37)	890 (35)
F Handrail diameter	32 (1 1/4)	75 (3)	38-51 (1 1/2-2)
G Rail clearance from wall	50 (2)	—	75 (3)

*Whenever the distance D is less than 1.880 m (74 in), the overhead obstruction should be painted with yellow and black stripes.

Incline-Ladder Dimensions

شکل ۵-۲۹ : ابعاد استاندارد نردبان مایل

همچنین برای نردبان عمودی از ابعاد شکل ۵-۳۰ استفاده می‌شود:



DIMENSION	MINIMUM mm (in)	MAXIMUM mm (in)	RECOMMENDED mm (in)
A Rung thickness			
Wood	32 (1 1/8)	38 (1 1/2)	35 (1 3/8)
Protected metal	19 (3/4)	38 (1 1/2)	35 (1 3/8)
Corrosive metal	25 (1)	38 (1 1/2)	35 (1 3/8)
B Rung spacing	230 (9)	380 (15)	300 (12)
C Height, rung to landing	150 (6)	380 (15)	380 (15)
D Width between stringers	300 (12)	–	460-530 (18 - 21)
E Climbing clearance width	610 (24)	–	760 (30)
Clearance depth:			
F In back of ladder	150 (6)	–	200 (8)
G On climbing side (range)	910 (36) for 1.30 rad (75°) to 760 (30) for 1.57 rad (90°)		
H Height of stringer above landing	910 (36)	1067 (42)	1067 (42)
J Height from lower elevation to bottom rung		380 (15)	

Vertical-Ladder Dimensions

شکل ۵-۳۰ : ابعاد استاندارد نردبان عمودی

❖ جانمایی آشپزخانه کشتی

آشپزخانه پس از تعیین موقعیت موتورخانه دارای بیشترین اهمیت در جانمایی است چرا که:

۱- رفت و آمد زیاد به آشپزخانه و لزوم منتهی شدن راهروها و راه پله ها به محل آشپزخانه

۲- نزدیکی به انبار مواد غذایی خشک و یخچالها و همچنین فروشگاه مواد غذایی (بوفه)

۳- مجاورت با محل سالن غذاخوری جهت سرو راحتتر غذا و انتقال آن به سالن غذاخوری

بنابراین ملاحظه می‌شود که آشپزخانه، برخلاف آنچه ممکن است که به ذهن برسد دارای نقش کلیدی و مهم در جانمایی داخلی محل استراحت و روبناسازی است. مطابق شکل۵-۳۱ میتوان نکات زیر را در جانمایی داخل آشپزخانه کشتی برشمرد:

۱- فر خوراک‌پزی بصورت عرضی قرار می‌گیرد و دو طرف آن دیواره کوتاهی نصب می‌شود بگونه‌ای که بتوان دیگ غذا را بوسیله آن مهار کرد و در حرکات رول، باعث واژگونی آن نگردد.

۲- نصب فر خوراک‌پزی در وسط آشپزخانه و ثابت شده در جای خود: این عامل باعث می‌شود کلیه آشپزها از مجموعه پخت و پز مشترک وسط آشپزخانه استفاده کنند و مراحل کاری پخت و پز توسط سرآشپز کنترل گردد.

۳- کابینت‌ها و یخچال‌ها در اطراف دیواره آشپزخانه نصب می‌شوند و مواد غذایی خشک و یخچالی در داخل آنها قرار می‌گیرند. این مجموعه‌ها در اطراف فر خوراک‌پزی میانی قرار گرفته‌اند و دسترسی مواد غذایی را راحت‌تر می‌کنند و جابجایی خدمه آشپزخانه را به حداقل می رساند.

۴- وجود فاصله کافی بین فر خوراک‌پزی میانی با کابینت‌ها و یخچال‌ها برای باز شدن درب آنها

در جانمایی قفسه‌های مواد غذایی خشک می‌توان ملاحظات زیر را در نظر گرفت:

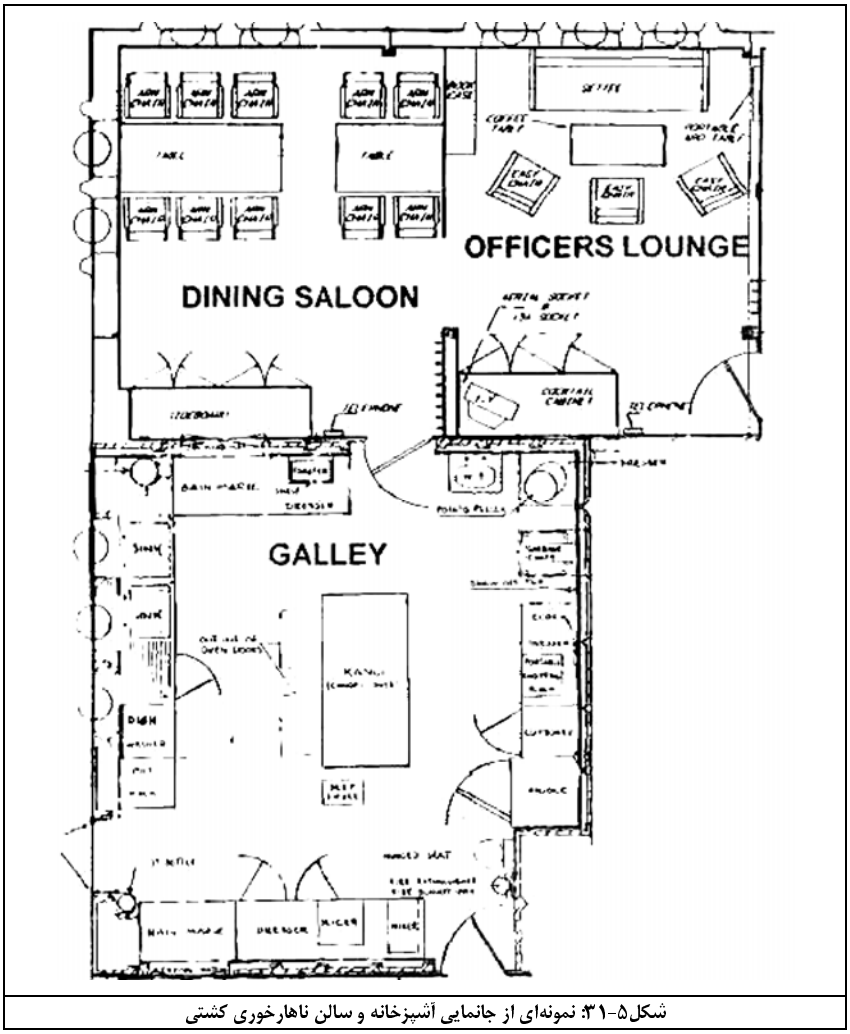
۱- قفسه‌ها دارای عرض ۶۰ سانتی‌متر هستند.

۲- راهرو بین قفسه‌ها دارای عرض ۶۰ سانتی‌متر هستند.

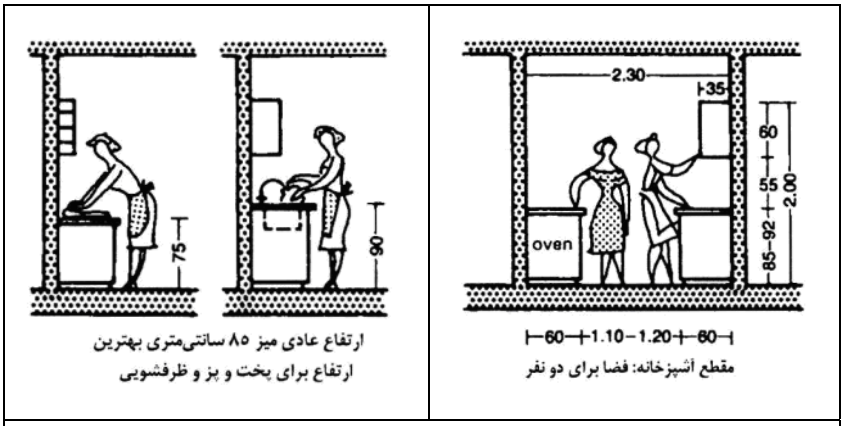
۳- قفسه‌ها بصورت پشت به پشت جانمایی می‌شوند.

۴- لوله فاضلاب از داخل انبار مواد غذایی عبور نکند.

مقطع آشپزخانه در کشتی‌های کوچک و متوسط و ارتفاع مناسب میزهای داخل آشپزخانه در شکل ۵-۳۲ نشان داده شده است.

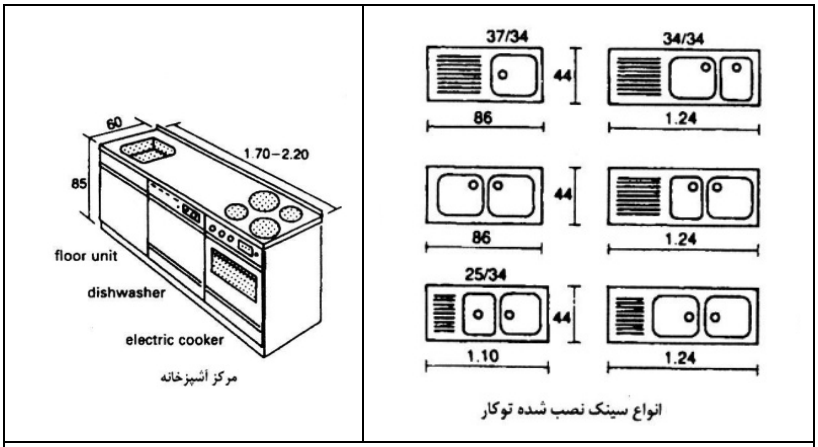


شکل۵-۳۱: نمونه‌ای از جانمایی آشپزخانه و سالن ناهارخوری کشتی



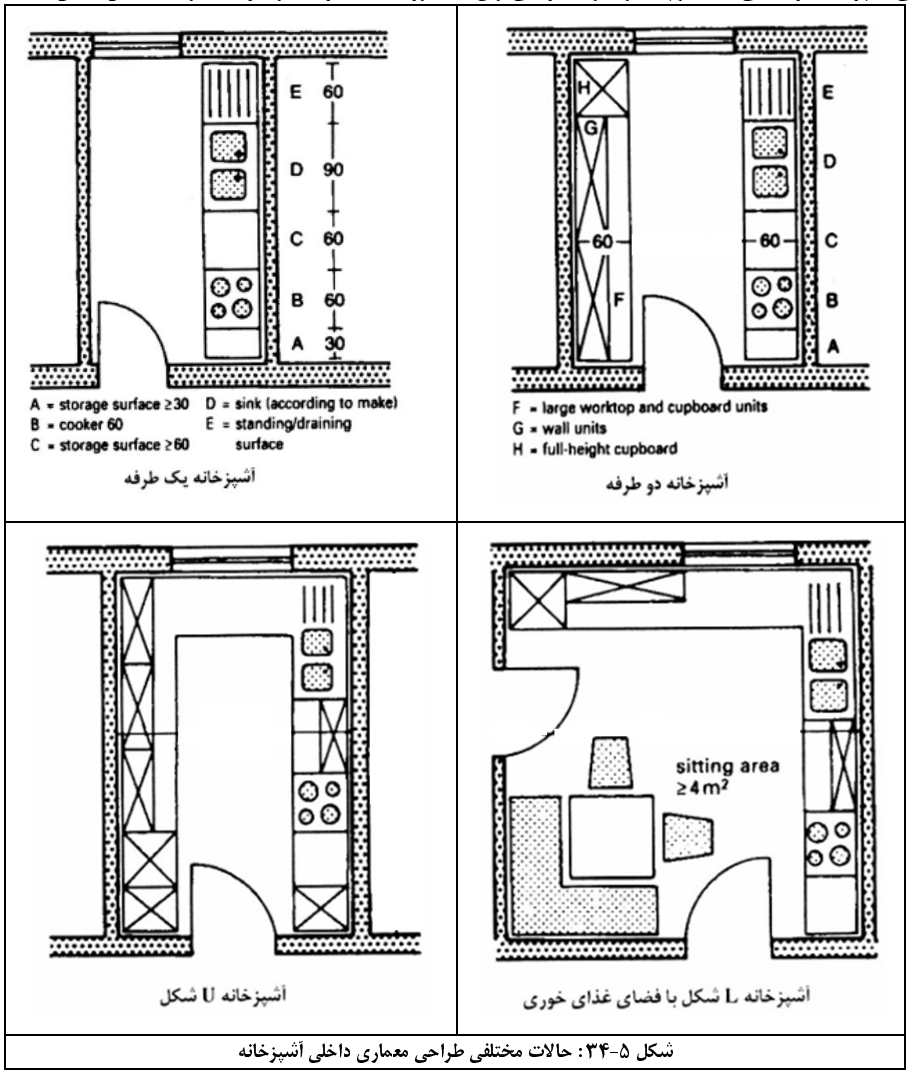
شکل ۵-۳۲ : ارتفاع مناسب میزهای آشپزخانه

برای شست‌وشوی ظروف آشپزخانه، سینک‌های متعدد ظرفشویی مطابق شکل ۵-۳۳ نیاز است. همچنین شعله‌های متعدد گاز برای پخت و پز نیاز می‌باشد که می‌توان ابعاد میز آشپزخانه را به صورت چند واحد مجزا مطابق شکل زیر در نظر گرفت.



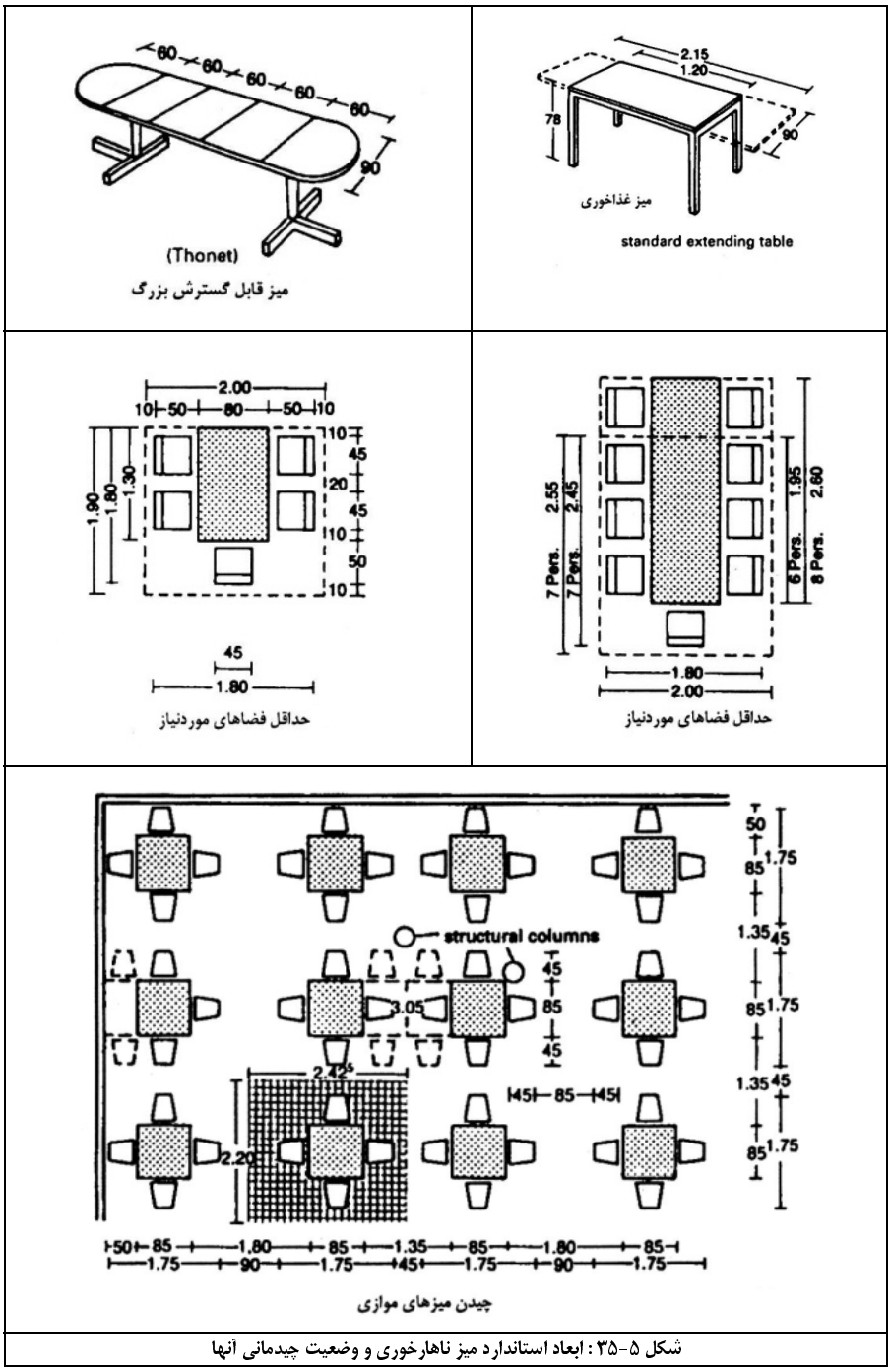
شکل ۵-۳۳ : ابعاد سینک ظرفشویی و میز آشپزخانه

چیدمانی کلی داخلی آشپزخانه در کشتی‌های کوچک و متوسط را می‌توان به صورت یک طرفه، دو طرفه، L و U مطابق شکل ۵-۳۴ درنظر گرفت.



شکل ۵-۳۴ : حالات مختلفی طراحی معماری داخلی آشپزخانه

در قسمت ناهارخوری باید میزهای متعددی را جانمایی کرد. ابعاد میز و نحوه جانمایی میزها در شکل ۵-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۵ : ابعاد استاندارد میز ناهارخوری و وضعیت چیدمانی آنها

❖ دریچه‌ها و سوراخ‌ها

برای بازبینی و امکان تردد افراد در بخش‌های مختلف کشتی شامل مخازن، سازه کف دو جداره، دیواره‌ها و بخش‌های کوچک و کنج و دشوار برای بازبینی، دریچه‌های متعددی به صورت عمودی یا افقی قرار می‌گیرند. این دریچه‌ها عبارتند از:

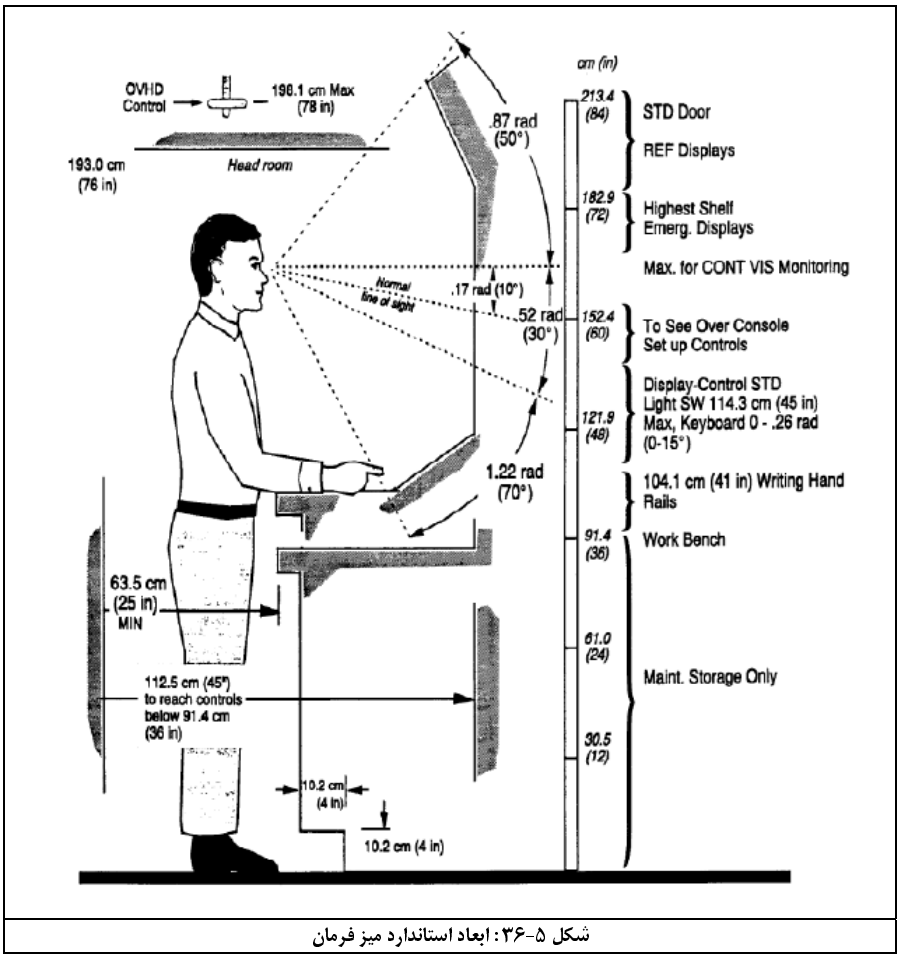
۱- دریچه آدم‌رو[1]: از این دریچه‌ها انسان می‌تواند به صورت عمودی یا خوابیده عبور کند. اگر این دریچه‌ها افقی باشند ابعاد آنها نباید کمتر از ۴۰۰×۴۰۰ میلیمتر باشند. اگر بر روی تیرهای کف دو جداره (به صورت عمودی) قرار گرفته باشد باید دارای حداقل ابعاد ۶۰۰×۸۰۰ میلیمتر و حداکثر ارتفاع ۶۰۰ میلیمتر از کف باشد. در برخی از موارد سوراخ روی تیرها برای سبک‌تر شدن سازه بکار می‌رود که ابعاد آنها باید کوچکتر از ۵۰ درصد ارتفاع تیر باشد در غیر اینصورت از تقویت‌کننده‌های مناسب استفاده می‌شود.

۲- دریچه دست‌رو[2]: ابعاد این دریچه باید به حدی باشد که دست انسان امکان عبور از آن را داشته باشد.

1 - man hole
2 - hand hole

❖ میز فرمان موتورخانه و اتاق فرمان

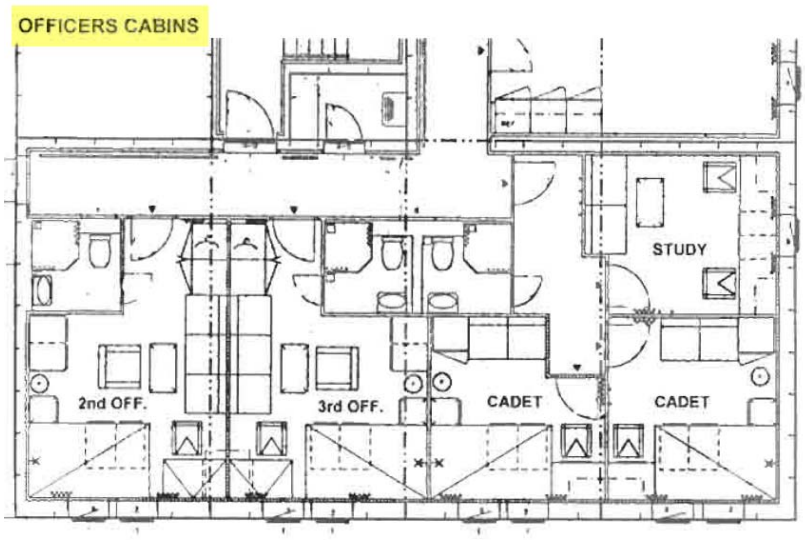
در داخل موتورخانه و اتاق فرمان کشتی‌های بزرگ، میزهای فرمان بلندی وجود دارد که انواع نشانگرها، مونیتورها و دسته‌های کنترلی بر روی آنها تعبیه شده است. فرد مسئول که در مقابل میز فرمان می‌ایستد باید دید و تسلط کافی بر روی تجهیزات روی میز داشته باشد. ابعاد استاندارد میز فرمان در شکل ۵-۳۶ نشان داده شده است. اگر میز برای استفاده خانم‌ها باشد باید ارتفاع میز ۱۲/۷ سانتیمتر (معادل ۵ اینچ) کاهش یابد.



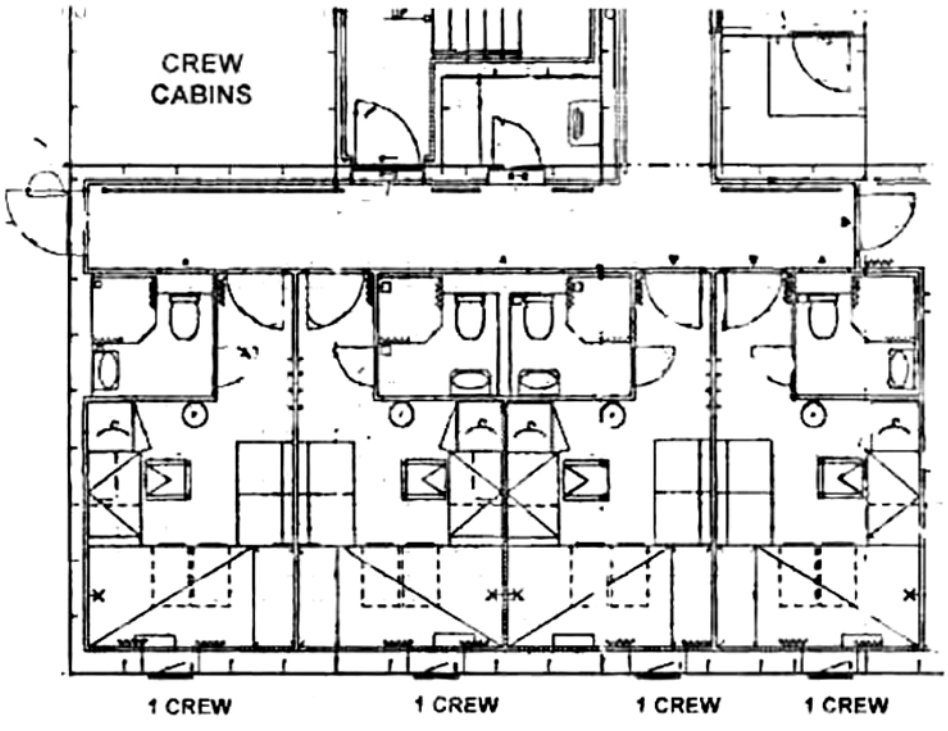
شکل ۵-۳۶: ابعاد استاندارد میز فرمان

❖ نمونه‌ای از جانمایی داخل اتاق‌ها در یک کشتی

شکل۴-۳۷ نشان دهنده جانمایی داخلی اتاق افسران است. این اتاق‌ها تک‌نفره هستند و هر اتاق یک سرویس بهداشتی مجزا دارد. اتاق افسران دارای صندلی‌های بزرگتر و یک میز قهوه و صندلی راحتی بیشتر است.



شکل ۵-۳۷: نمونه‌ای از جانمایی داخلی اتاق افسران

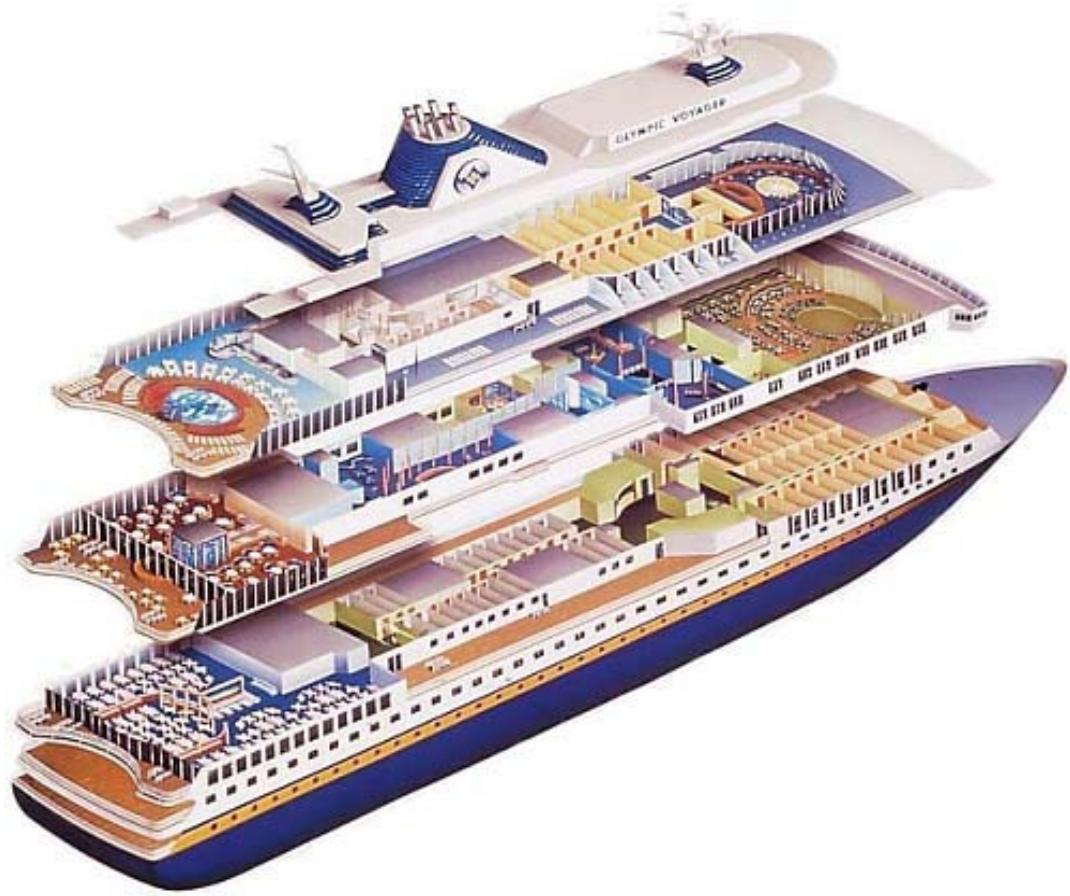


شکل ۵-۳۸: نمونه‌ای از جانمایی داخلی اتاق خدمه

مساحت اتاق افسران در این کشتی نمونه ۱۳/۴ متر مربع است. مساحت توالت و دستشویی هر اتاق ۲/۶ متر مربع است. شکل۵-۳۸ نیز نشان دهنده جانمایی داخلی اتاق‌های خدمه است. این اتاق‌ها در این نمونه، تک نفره هستند(اغلب دو نفره). مساحت آنها ۹/۶ متر مربع است.

❖ جانمایی داخلی کشتی‌های لوکس مسافربری

کشتی‌های مسافربری دارای عرشه‌های متعدد و دشوارترین نوع جانمایی هستند و ملاحظات بسیار زیادی در آنها دخیل است که قابل مقایسه با جانمایی کشتی‌های تجاری نیست(شکل ۵-۳۹). علت اصلی این تفاوت تعداد زیاد مسافران و خدمه است. یک کشتی مسافربری بزرگ که دارای ۳۰۰۰ نفر مسافر است، حدود ۱۰۰۰ خدمه حمل می‌کند و در مجموع ۴۰۰۰ نفر را در داخل خود جای می‌دهد. جانمایی مناسب باعث کنترل تردد و آسایش آنها می‌شود.



شکل ۵-۳۹: جانمایی پیچیده داخلی کشتی‌های مسافربری

از جمله مهمترین موارد در جانمایی داخلی شناورهای مسافربری می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱- عدم بروز ترافیک و تجمع زیاد در ساعات مشخص مانند مراجعه به سالن غذاخوری، آمفی تئاتر و استخر

۲-عدم تجمع هم‌زمان مسافران در یک نقطه که باعث تهدید پایداری کشتی می‌شود.

۳- خدمات‌رسانی مناسب، به موقع و بدون تاخیر به مسافران با توجه به هزینه بسیار بالایی که از آنها اخذ می‌شود. در تصاویر شکل ۵-۴۰ نمونه هایی از جانمایی داخلی کشتی‌های بزرگ مسافربری ارائه شده که شبیه هتل‌های چند ستاره مجلل می‌باشد.

نمای بیرونی کشتی مسافربری

راه پله تالار مرکزی کشتی

آمفی تئاتر کشتی

اتاق عبادت کشتی

اتاق مسافران کشتی

اتاق مسافران کشتی

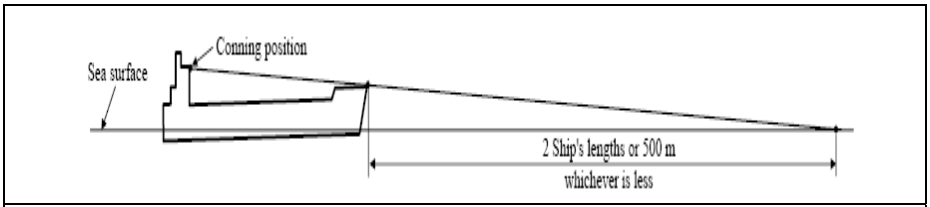
شکل۵-۴۰: نمایی از جانمایی داخلی کشتی‌های مسافربری

فصل پنجم: ملاحظات معماری روبناسازی و پل فرماندهی طبق استاندارد ABS

استاندارد ABS قوانین زیر را برای معماری پل فرماندهی بیان نموده است:

۱) تعیین ارتفاع روبناسازی

ارتفاع روبناسازی باید به حدی باشد که از پل فرماندهی (بالاترین طبقه روبناسازی)، فقط فاصله‌ای از جلوی سینه کشتی به اندازه دو برابر طول کشتی یا طول ۵۰۰ متر (هر کدام که کمتر باشد)، خارج از دید باشد (شکل ۵-۴۱). این فاصله در واقع فاصله کور جلوی کشتی است که برای فرمانده قابل رویت نیست. این شرط باید در تمامی حالات آبخور، شیب و وضعیت قرارگیری بار روی عرشه، برقرار باشد. به کمک این معیار استاندارد ABS، می‌توان ارتفاع روبناسازی کشتی را تعیین نمود.



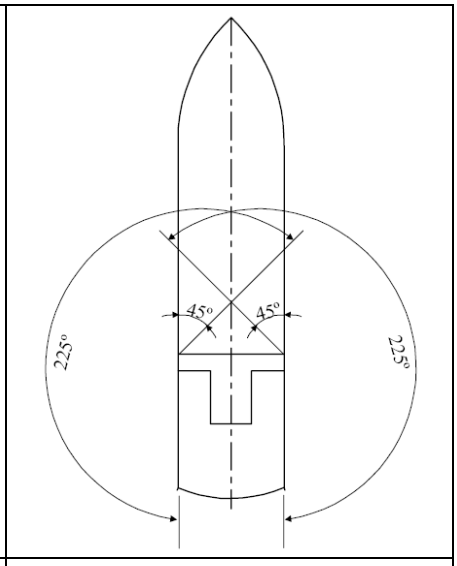
شکل ۵-۴۱: حداکثر فاصله کور مجاز جلوی کشتی برای تعیین ارتفاع روبناسازی

۲) زاویه دید پل فرماندهی

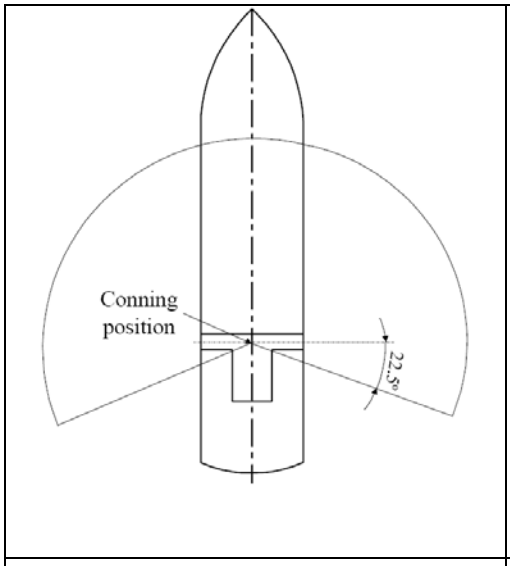
مطابق شکل ۵-۴۳، معماری پل فرماندهی باید بگونه‌ای باشد که موقعیت دید از داخل پل فرماندهی حداقل ۲۲۵ درجه باشد که ۱۸۰ درجه آن دید از جلو و مقدار ۲۲/۵ آن دید به عقب طرفین است.

۳) بال پل فرماندهی

روبناسازی در طرفین خود دارای دو بال است که تا حداکثر عرض بدنه امتداد یافته است. معماری این پل باید بگونه‌ای باشد که وقتی فرد در نوک پل می ایستد براحتی زاویه ۲۲۵ را رویت کند که ۱۸۰ درجه آن مقابل و ۴۵ درجه آن عقب محل استقرار فرد است(شکل ۵-۴۲). همچنین فرد باید بتواند از روی بالها، دیواره جانبی بدنه کشتی را براحتی رویت کند. این توصیه ABS در معماری بالها موثر است.



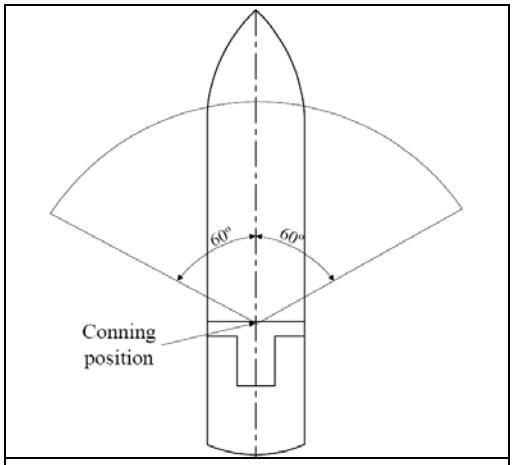
شکل ۵-۴۲: زاویه دید بال پل فرماندهی



شکل ۵-۴۳: زاویه دید پل فرماندهی

۴) زاویه دید از محل فرمان سکان

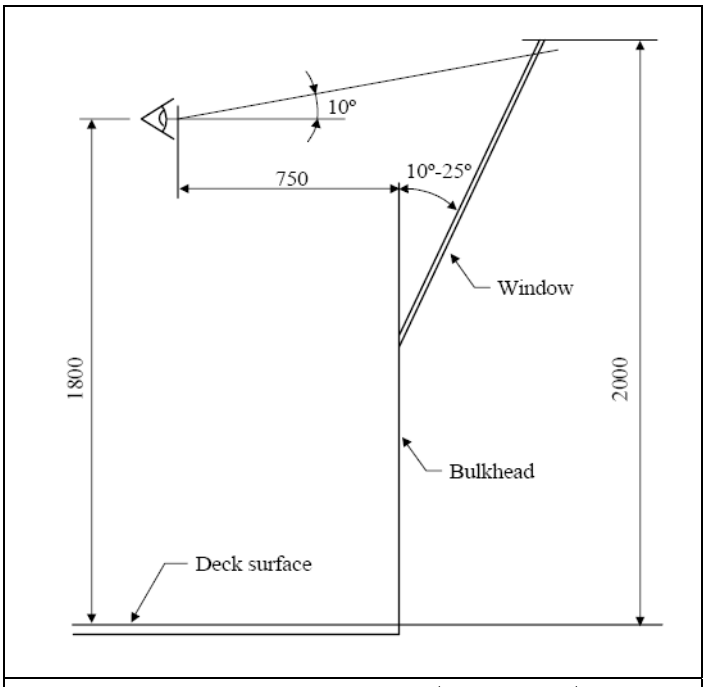
وقتی فرد در داخل پل فرماندهی در پشت فرمان سکان قرار می گیرد باید بتواند زاویه ۶۰ درجه را در طرفین خط مرکزی کشتی مشاهده کند(شکل ۵-۴۴).



شکل ۵-۴۴: زاویه دید پل فرماندهی از محل استقرار ناخدا

۵) پنجره های دید پل فرماندهی

استاندارد ABS مطابق شکل ۵-۴۵ زوایای نصب پنجره و موقعیت قرارگیری فرد و زوایای دید آن نسبت به پنجره را مشخص می‌کند . زوایای انحنای پنجره به بیرون، ۲۵-۱۰ درجه است. حداکثر ارتفاع پنجره ۲ متر از کف است. اگر چشم فرد در ارتفاع ۱/۸ متری و به فاصله افقی ۷۵ سانتی‌متری از پنجره باشد، باید زاویه دید ۱۰ درجه تا بالای پنجره داشته باشد. ضخامت فریم‌های بین پنجره‌ها باید حداقل مقدار ممکن باشد که از نظر سازه‌ای مناسب است. فریم بین پنجره‌ها نباید مستقیما جلوی دید جایگاه افراد مستقر باشد.



شکل ۵-۴۵: زاویه شیب پنجره پل فرماندهی و فواصل استاندارد

بخش پنجم:
کار با استانداردهای دریایی

فصل اول[۱]: انتخاب تجهیزات در استاندارد *BV*

[part B/chapter10/sec4]

انتخاب تجهیزات شامل انتخاب: لنگر، مهار و یدک‌کشی می‌باشد که به کمک استاندارد براحتی قابل انجام است.

۱- معرفی پارامترها

- *EN*: عدد تجهیزات که رابطه آن بیان خواهد شد.
- σ_{ALL}: تنش مجاز بر حسب N/mm^2 که برای کنترل تسلیم مواد استفاده می‌شود:

- $\sigma_{ALL}=0.67R_{Eh}$
- $\sigma_{ALL}=0.4R_m$

- R_{eH}: حداقل تنش تسلیم مواد بر حسب N/mm^2 تعریف شده در [ch4,sec[1,2]]
- R_m: استحکام کششی بر حسب N/mm^2 تعریف شده در [ch4,sec[1,2]]

انتخاب تجهیزات برای حالتی که کشتی در کنار اسکله یا داخل محیط محافظت شده از امواج دریاست ارائه می‌گردد. بنابراین این انتخاب تجهیزات برای لنگراندازی در دریاهای مواج یا متوقف کردن یک کشتی در حال حرکت نمی‌باشد.

۲- عدد تجهیزات[۲]

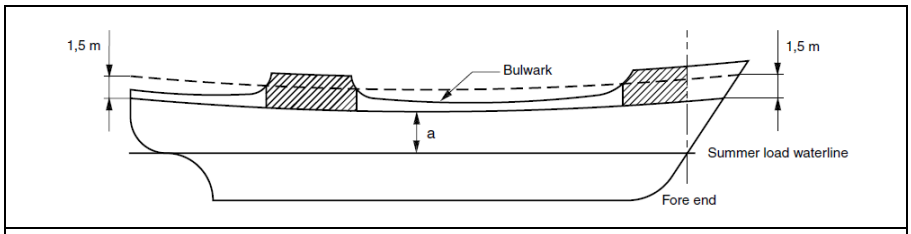
عامل کلیدی در انتخاب تجهیزات (لنگر، مهار و یدک‌کشی) عدد تجهیزاتEN می‌باشد که به کمک این عدد و جداول مربوطه می توان تجهیزات را انتخاب نمود. عدد تجهیزات برای کشتی‌هایی که دیواره جلویی عرشه آنها عمودی است (شکل ۵-۴۶) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$EN=\Delta^{2/3}+2Hb+0.1A$$

Δ : جابجایی قالبی کشتی بر حسب تن در آبخور تابستان و h: ارتفاع موثر بر حسب متر از آبخور تابستان تا بالاترین نقطه روبناسازی عرشه با استفاده از رابطه زیر:

$$H=a+\sum h_n$$

که در محاسبه h از مقدار شیب طولی عرشه و تریم صرفنظر می‌شود . a: مقدار فری‌برد در قسمت میانی کشتی در خط آبخور تابستان تا عرشه اصلی بر حسب متر. h_n: ارتفاع هر طبقه بر حسب متر در محل خط مرکزی برای طبقاتی که دارای عرض بزرگتر از B/4 هستند. اگر عرض یک طبقه کمتر از B/4 و طبقه فوقانی آن بزرگتر از B/4 باشد از طبقه پایین صرفنظر شده اما طبقه فوقانی به حساب می‌آید.



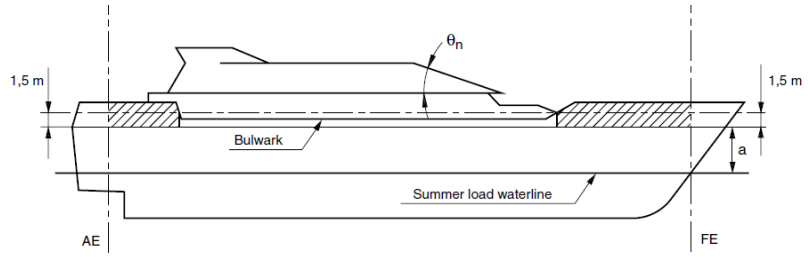
شکل ۵-۴۶: دیوار جلویی عمودی روبناسازی

A: مساحت سطح جانبی بدنه در قسمت‌های بالای خط آبخور شامل روبناسازی‌های دارای عرض بیشتر از B/4 بر حسب متر مربع. این مساحت برای طول تجهیزاتL_E محاسبه می شود. L_E : طول تجهیزات[۳] بر حسب متر که بزرگتر از ۹۶ درصد و کوچکتر از ۹۷ درصد طول آبخور تابستان است.

۱-منابع: [۲۱ و ۵]

2 - Equipment Number
3 - Equipment length

صفحات عمودی و نرده‌های اطراف عرشه (مطابق شکل ۵-۴۶) که دارای ارتفاعی برابر یا بزرگتر از ۱/۵ متر هستند بعنوان روبناسازی محسوب شده و باید در محاسبه A و h وارد شوند.لبه‌های عرشه و کانتینرهای روی عرشه از این قاعده مستثنی هستند. عدد تجهیزات(EN) برای کشتی هایی که دارای دیواره های جلویی مایل هستند (شکل ۵-۴۷) از رابطه زیر بدست می‌آید:$EN=\Delta^{2/3}+2(a\,B+\sum b_n h_n \sin\theta_N)+0.1A$



شکل ۵-۴۷: دیوار جلویی مایل روبناسازی

که عبارات موجود مانند رابطه قبل هستند و θ_N: زاویه نشان داده در شکل ۵-۴۷ که برابر زاویه کجی دیواره جلویی روبناسازی است.

b_n: بزرگترین عرض هر طبقه از روبناسازی یا نیم عرشه روی عرشه اصلی که دارای عرض بزرگتر از B/4 است. نرده‌ها و صفحات با ارتفاع بزرگتر از ۱/۵ باید در محاسبه h و A محسوب شوند. قسمت‌های هاشورخورده شکل ۵-۴۷ نیز باید به حساب آیند.

۳- انتخاب لنگر

پس از محاسبه عدد تجهیزات EN، می توان با استفاده از جدول۵-۱۰ به انتخاب لنگر و طناب یا زنجیر لنگر اقدام نمود.

Equipment numeral	Stockless anchor			Stud link cable					
	Bower anchor	Stream anchor		Bower anchors				Stream wire or chain for stream anchor	
	Number	Mass per anchor in kg		Total length in m	d1 in mm	d2 in mm	d3 in mm	Length in mm	Br. Load In KN
up to 50	2	120	40	165	12.5	12.5	12.5	80	65
50-70	2	180	60	220	14	12.5	12.5	80	65
70-90	2	240	80	220	16	14	14	85	75
90-110	2	300	100	247.5	17.5	16	16	85	80
110-130	2	360	120	247.5	19	17.5	17.5	90	90
150-175	2	420	140	275	20.5	17.5	17.5	90	100
175-205	2	480	165	302.5	22	19	19	90	110
205-240	3	570	190	302.5	24	20.5	20.5	90	120
240-280	3	660		330	26	22	20.5		
280-320	3	780		357.5	30	24	22		
320-360	3	900		357.5	32	26	24		
360-400	3	1020		385	34	28	24		
400-450	3	1140		385	36	30	26		
450-500	3	1290		412.5	38	32	28		
500-550	3	1440		412.5	40	34	30		
550-600	3	1590		440	42	34	30		
600-660	3	1740		440	44	36	32		
660-720	3	1920		440	46	38	34		
720-780	3	2100		467.5	48	40	36		
780-840	3	2280		467.5	50	42	36		
840-910	3	2460		467.5	52	44	38		
910-980	3	2640		495	54	46	40		
980-1060	3	2850		495	56	48	42		
1060-1140	3	3060		495	58	50	44		
1140-1220	3	3300		522.5	60	52	46		
1220-1300	3	3540		522.5	62	54	46		
1300-1390	3	3780		522.5	64	56	48		
1390-1480	3	4050		550	66	58	50		
1480-1570	3	4320		550	68	60	50		
1570-1670	3	4590		550	70	62	52		
1670-1790	3	4890		577.5	73	64	54		
1790-1930	3	5250		577.5	76	66	56		
1930-2080	3	5610		577.5	78	68	58		
2080-2230	3	6000		605	81	70	60		
2230-2380	3	6450		605	84	73	62		
2380-2530	3	6900		605	87	76	64		
2530-2700	3	7350		632.5	90	78	66		
2700-2870	3	7800		632.5	92	81	68		

2870-3040	3	8300		632.5	95	84	70		
3040-3210	3	8700		660	97	84	73		
3210-3400	3	9300		660	100	87	76		
3400-3600	3	9900		660	102	90	78		
3600-3800	3	10500		687.5	105	92	78		
3800-4000	3	11100		687.5	107	95	81		
4000-4200	3	11700		687.5	111	97	84		
4200-4600	3	12300		715	114	100	87		
4600-4800	3	12900		715	117	102	87		
4800-5000	3	13500		715	120	105	90		
5000-5200	3	14100		742.5	122	107	92		
5200-5500	3	14700		742.5	124	111	95		
5500-5800	3	15400		742.5	127	111	97		
5800-6100	3	16100		742.5	130	114	97		
6100-6500	3	18800		742.5	132	117	100		
6500-6900	3	19000		742.5		120	102		
6900-7400	3	19500		770		124	107		
7400-7900	3	20500		770		127	111		
7900-8400	3	21500		770		132	114		
8400-8900	3	23000		770		137	117		
8900-9400	3	24500		770		142	122		
9400-10000	3	26000		770		147	127		
10000-10700	3	27500		770		152	132		
10700-11500	3	29000		770			132		
11500-12400	3	31000		770			137		

جدول ۵-۱۰: انتخاب لنگر با توجه به عدد تجهیزات (EN)

در ستون اول از سمت چپ این جدول محدوده عدد تجهیزات نوشته شده است که با توجه به EN بدست آمده یکی از این سطرها انتخاب می‌شوند. ستون دوم شامل تعداد لنگر (N) و ستون سوم شامل وزن هر لنگر بر حسب کیلوگرم است. ستون چهارم شامل طول طناب یا زنجیر هر لنگر بر حسب متر است. ستون آخر نیز بار شکست طناب یا زنجیر لنگر است که به کمک آن می‌توان طناب لنگر را انتخاب نمود.

۴- انتخاب یدک‌کشی و مهار

با توجه به عدد تجهیزات محاسبه شده (EN) و استفاده از جدول ۵-۱۱ می‌توان به مشخصات یدک‌کشی کشتی توسط یک یدک‌کش و همچنین مهاربندی دست یافت.

Equipment numeral	Recommended ropes				
	Towline		Mooring line		
	Length in m	Break Load In KN	Number	Length in m	Break Load In KN
up to 50	180	100	3	80	35
50-70	180	100	3	80	35
70-90	180	100	3	100	40
90-110	180	100	3	110	40
110-130	180	100	3	110	45
150-175	180	100	3	120	50
175-205	180	100	3	120	55
205-240	180	110	3	120	60
240-280	180	130	4	120	65
280-320	180	150	4	140	70
320-360	180	175	4	140	75
360-400	180	200	4	140	80
400-450	180	225	4	140	85
450-500	180	250	4	140	95
500-550	180	275	4	160	100
550-600	180	305	4	160	110
600-660	180	340	4	160	120
660-720	190	370	4	160	130
720-780	190	405	4	170	145
780-840	190	440	4	170	160
840-910	190	480	4	170	170
910-980	190	520	4	170	185
980-1060	190	560	4	180	200
1060-1140	190	600	4	180	215
1140-1220	190	645	4	180	230

1220-1300	200	690	4	180	250
1300-1390	200	740	4	180	270
1390-1480	200	785	4	180	285
1480-1570	200	835	4	190	305
1570-1670	200	890	5	190	325
1670-1790	200	940	5	190	325
1790-1930	200	1025	5	190	335
1930-2080	220	1110	5	190	350
2080-2230	220	1170	5	200	375
2230-2380	220	1260	5	200	400
2380-2530	220	1355	5	200	425
2530-2700	220	1455	5	200	450
2700-2870	220	1470	6	200	480
2870-3040	240	1470	6	200	480
3040-3210	240	1470	6	200	190
3210-3400	240	1470	6	200	500
3400-3600	260	1470	6	200	520
3600-3800	260	1470	6	200	555
3800-4000	260	1470	6	200	590
4000-4200	280	1470	6	200	620
4200-4600	280	1470	7	200	650
4600-4800	280	1470	7	200	650
4800-5000	300	1470	7	200	660
5000-5200	300	1470	7	200	670
5200-5500	300	1470	7	200	680
5500-5800	300	1470	8	200	685
5800-6100	300	1470	8	200	685
6100-6500	300	1470	8	200	695
6500-6900	300	1470	9	200	705
6900-7400	300	1470	9	200	705
7400-7900	300	1470	9	200	715
7900-8400	300	1470	10	200	725
8400-8900	300	1470	11	200	725
8900-9400	300	1470	11	200	725
9400-10000	300	1470	12	200	735
10000-10700	300	1470	13	200	735
10700-11500	300	1470	14	200	735
11500-12400	300	1470	15	200	735

جدول ۵-۱۱: انتخاب یدک‌کشی و مهار با توجه به عدد تجهیزات (EN)

خطوط یدک کشی و مهار می‌تواند رشته‌های سیمی، فیبر طبیعی یا مصنوعی یا ترکیبی از فیبر وسیم باشد. بار شکست بیان شده در جدول ۴-۱۱ مربوط به سیم های فولادی یا طناب های طبیعی است. با پی بردن به بار شکست از جدول ۵-۱۱ ، می‌توان نوع طناب یا سیم را انتخاب کرد چرا که در کاتالوگ شرکت‌های مختلف، عامل خرید، همان بار شکست می‌باشد که باید از قبل معلوم شده باشد. در جدول ۵-۱۱ ، ستون اول(از سمت چپ) محدوده عدد تجهیزات (EN) می‌باشد که با توجه به EN بدست آمده از قبل، یکی از سطرها انتخاب می‌شود. ستون دوم و سوم مربوط به یدک‌کشی شناور است. ستون دوم حداقل طول خط یدک‌کشی که باید بهمراه شناور باشد را بر معلوم می‌کند و ستون سوم، بار شکست خط یدک‌کشی می‌باشد که عامل انتخاب نوع و قطر خط یدک‌کشی (سیمی یا طناب) است. ستون ۵ و ۶ و ۷ نیز مربوط به مهاربندی شناور است. ستون ۵ تعداد طناب مهاربندی که در نقاط مختلف طول کشتی باید نصب شوند را معلوم می‌کند و ستون ۶ و ۷ نیز طول خط مهار و بار شکست آن را تعیین می‌کند. برای مطالب بیشتر و دقیق‌تر از انتخاب تجهیزات می‌توان به متن اصلی استاندارد مراجعه کرد.

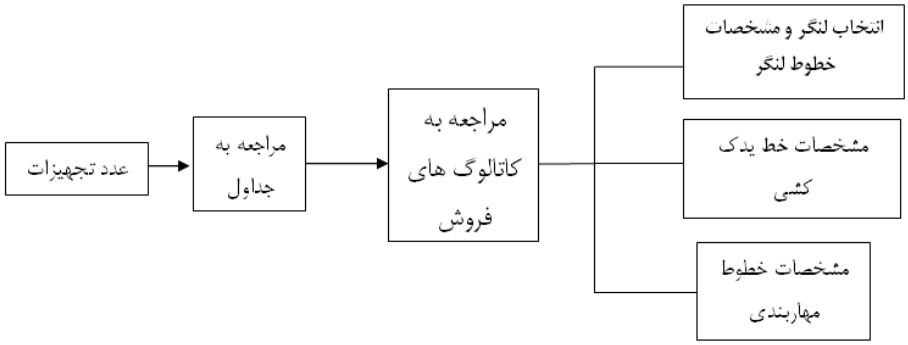
❖ نمونه‌ای از مشخصات فروش کابل یا طناب با توجه به بار شکست

با توجه به مشخصات استخراج شده از جداول انتخاب تجهیزات می‌توان از کاتالوگ‌های فروش شرکتهای تجاری، مشخصات تجهیزات را استخراج کرد. حداقل بار شکست طبق استاندارد مشخص می‌گردد و سپس با استفاده از جداولی مانند جدول ۵-۱۲ (که متعلق به یک کشتی تجاری است)، کابل یا طناب مورد نظر را انتخاب کرد. در این جدول MBF[1] می‌باشد.

1 - Minimum break force

Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area	MBF	Stiffness	Torque 25% MBF	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m	mm²	kN	MN	Nm	Nm
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

جدول ۵-۱۲: نمونه‌ای از کاتالوگ فروش کابل یا طناب و مقدار بار شکست آن



مثال) انتخاب تجهیزات برای یک شناور نمونه

در این بخش مقایسه‌ای از عدد تجهیزات استانداردهای متفاوت صورت می‌گیرد. برای این مقایسه از یک کشتی نمونه استفاده می‌شود که مشخصات آن در زیر ارائه شده است.

measurement	Value	Units
Displacement, Δ	200000	Tone
Volume	195240	m^3
Length, L	328	m
Draft to Baseline, T	12.43	m
Beam wl, B	58	m
Depth, D	15.95	m
Freeboard	3.52	m
Density	1.025	$tone/m^3$

کشتی مورد نظر یک نفتکش *VLCC*[1] می‌باشد. نوع و ابعاد این شناور بگونه‌ای می‌باشد که می‌توان از بعضی موارد جزئی صرف نظر کرد. ارتفاع حفاظ-های عرشه از آن جمله است که حذف آن خدشه‌ای در دقت محاسبات وارد نمی‌آورد و نتایج بدست آمده قابل قبول می‌باشند. نمونه‌ای از محاسبات انجام شده در زیر ارائه شده است: روسازه این شناور دارای چهار طبقه می‌باشد که ارتفاع هر کدام نیز چهار متر می‌باشد اما پهنای متفاوتی دارند.

$h=a+\sum h_n$
$\sum h_n=h_A+h_B+h_C+h_D+h_E$
$\sum h_n=4+4+4+4+4=20$
$Freeboard=a=3.52$
$H=3.52+20=23.52\ m$
$A=A_1+A_2$
$A_1=L\times a=328\times 3.52=1154.56\ m^2$

1 -Very large crude carrier (VLCC)

$A_2=S_A+S_B+S_C+S_D+S_E$
$S_A=25\times4=100\ m$
$S_B=25\times4=100$ m
$S_C=15.6\times4=62.4$ m
$S_D=15.6\times4=62.4$ m
$S_E=17.6\times4=70.4$
$A_2=100+100+62.5+62.5+70.4=395.2$ m^2
$A=1154.56+395.2=1549.76$ m^2
$EN=200000^{2/3}+2\times23.52\times58+0.1\times1549.76$
EN=6303.24

بعد از محاسبه عدد تجهیزات بر اساس روابط مختلف استانداردهای ذکر شده در قبل می‌توان تجهیزات مورد نظر را استخراج کرد. تجهیزات کشتی مورد نظر مطابق جدول۵-۱۳ استخراج می‌شود.

$6100 < EN < 6500$

	Equipment number	Stockless bower anchor		Stud link chain cables for bower anchor				Recommended ropes				
					Diameter			Towline		Mooring LINE		
		Number	Mass per anchor in kg	Total length in m	d1 in mm	d2 in mm	d3 in mm	Length in m	Breaking strength in KN	Number	Length of each in m	Breaking strength in kn
BV	6303.34	3	18800	742.5	-	120	107	-	-	9	220	716
LR	6303.24	2	18800	742.5	-	120	107	-	-	6	180	736.0
DNV	6303.24	2	18800	742.5	137	120	107	300	1471	9	200	716
GL	6303.24	3	18800	742.5	-	120	107	300	1470	9	200	715
ABS	6303.24	3	18800	742.5	-	120	107	300	1471	9	200	716.0
ICS	6303.24	2	18800	742.5	-	120	107	-	-	9	200	716

جدول۵-۱۳: انتخاب تجهیزات برای کشتی نمونه

فصل دوم:
محاسبه حرکات و شتاب‌های کشتی طبق استاندارد BV

Part B /chapter 5/ section 3

۱- تعاریف و عبارات

a_{su}: شتاب حرکت سرج بر حسب m/s^2 -- a_{sw}: شتاب حرکت اسوی بر حسب m/s^2 - a_H: شتاب حرکت هیو بر حسب m/s^2 – α_R: شتاب حرکت رول بر حسب rad/s^2 – α_P: شتاب حرکت پیچ بر حسب rad/s^2 – α_Y: شتاب حرکت یاو بر حسب rad/s^2 – T_{sw}: پریود حرکت اسوی بر حسب ثانیه(s) – T_R: پریود حرکت رول بر حسب ثانیه(s) – T_P: پریود حرکت پیچ بر حسب ثانیه(s) – A_R: دامنه حرکات رول بر حسب رادیان(rad) – A_P: دامنه حرکات پیچ بر حسب رادیان(rad) – a_B: پارامتر حرکت و شتاب

$$a_B = n\left(0.76F + 1.875\frac{h_W}{L}\right)$$

h_w: پارامتر موج بر حسب متر

$$h_W = 11.44 - \left|\frac{L-250}{110}\right|^3 \quad for\ L\langle 350\,m$$

$$h_W = \frac{200}{\sqrt{L}} \quad for\ L \geq 350\,m$$

n و n_1: ضرایب ناوبری از جدول ۵-۱۴:

Navigation notation	Navigation coefficient n	Navigation coefficient n_1
Unrestricted navigation	1,00	1,00
Summer zone	0,90	0,95
Tropical zone	0,80	0,90
Coastal area	0,80	0,90
Sheltered area	0,65	0,80

جدول ۵-۱۴: ضرایب n و n1

F: عدد فرود طبق رابطه زیر: $F = 0.164\frac{V}{\sqrt{L}}$

V: حداکثر سرعت پیشروی بر حسب گره و T_1: آبخور تابستانی بر حسب متر. در این بخش فرض شده که حرکات کشتی پریودیک و تکرار شونده باشد. احتمال وقوع حرکات و شتابهای بیان شده می‌تواند 10^{-5} باشد و به ندرت اتفاق بیافتد یعنی مقادیر بدست آمده از حرکات و شتاب‌های معمولی کشتی بیشتر است .

۲- حرکات و شتابهای مطلق کشتی

۱) حرکت سرج[1]: شتاب حرکت سرج برابر با مقدار ثابت $0.5\ m/s^2$ در نظر گرفته می‌شود.

۲) حرکت اسوی[2]: پریود و شتاب حرکت اسوی از جدول زیر بدست می‌آید.

Period T_{sw}, in s	Acceleration a_{sw}, in m/s^2
$\frac{0.8\sqrt{L}}{1.22F+1}$	$0{,}775\ a_B\ g$

۳) حرکت هیو[3]: شتاب حرکت هیو بر حسب m/s^2 که از رابطه مقابل بدست می‌آید: $a_H = a_B . g$

1 - Surge
2 - Sway
3 - Heave

۴) حرکت رول[1]: دامنه، پریود و شتاب حرکت رول طبق جدول زیر بدست می آید:

Amplitude A_R, in rad	Period T_R, in s	Acceleration α_R, in rad/s²
$a_B\sqrt{E}$	$2{,}2\frac{\delta}{\sqrt{GM}}$	$A_R\left(\frac{2\pi}{T_R}\right)^2$

مقدار E موجود در جدول فوق از رابطه زیر بدست می‌آید: $E = 1.39\frac{GM}{\delta^2}B$

مقدار E نباید کمتر از ۱ باشد (یعنی اگر E کمتر از ۱ بدست آمد در محاسبات برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.). GM : ارتفاع متاسنتری بر حسب متر می‌باشد. اگر مقدار GM معلوم نباشد از تقریب های زیر استفاده می‌کنیم:

- در حالت کلی: GM=0.07B
- فله برها و نفتکش ها GM=0.12B
- کشتی حمل سنگ معدن GM=0.16B

δ : شعاع ژیراسیون حرکت رول بر حسب متر برای شرایط بارگذاری مدنظر که از رابطه زیر قابل تخمین است:

- در حالت کلی δ=0.35B
- کشتی های حمل سنگ δ=0.3B

۵) حرکت پیچ[2]: دامنه، پریود و شتاب حرکت پیچ از جدول زیر بدست می‌آید:

Amplitude A_P, in rad	Period T_P, in s	Acceleration α_P, in rad/s²
$0{,}328a_B\left(1{,}32-\frac{h_W}{L}\right)\left(\frac{0{,}6}{C_B}\right)^{0{,}75}$	$0{,}575\sqrt{L}$	$A_P\left(\frac{2\pi}{T_P}\right)^2$

حرکت یاو[3] : شتاب حرکت یاو برحسب rad/s^2 از رابطه زیر بدست می‌آید: $\alpha_Y = 1.581\frac{a_B g}{L}$

۳- حرکات و شتابهای نسبی کشتی

۱) تعاریف

- حرکات نسبی: در حرکات نسبی، نوسانات عمودی کشتی نسبت به خط آبخور اولیه (T_1) در یک طرف کشتی مدنظر است.
- شتابهای نسبی: شتاب‌های در جهت X ، Y و Z همان نتایج مولفه‌های شتاب‌های مطلق در جهات بیان شده هستند.

۲) شرایط کشتی: حرکات و شتابهای کشتی در دو حالت کلی زیر بیان می‌شود:

- کشتی در حالت عمودی[4]: در این حالت کشتی در معرض امواجی قرار می‌گیرد که باعث ایجاد حرکات در صفحه X-Z یعنی سرج، هیو و پیچ می‌شوند.
- کشتی در حالت مایل[5]: در این حالت کشتی در معرض امواجی قرار می گیرد که باعث حرکات در صفحات X-Y و Y-Zمی شوند، یعنی حرکات اسوی، یاو و رول

۳) حرکات نسبی کشتی

1 - Roll
2 Pitch
3 yaw
4 upright ship condition
5 inclined ship condition

حرکات نسبی کشتی در حالت عمودی بر حسب متر درهر مقطع عرضی از بدنه، طبق جدول ۵-۱۵ بدست می‌آید:

Location	Reference value of the relative motion h_1 in the upright ship condition, in m
$x = 0$	$0,7\left(\frac{4,35}{\sqrt{C_B}} - 3,25\right)h_{1,M}$ if $C_B < 0,875$ $h_{1,M}$ if $C_B \geq 0,875$
$0 < x < 0,3L$	$h_{1,AE} - \frac{h_{1,AE} - h_{1,M}}{0,3}\frac{x}{L}$
$0,3L \leq x \leq 0,7L$	$0,42\ n\ C\ (C_B + 0,7)$ without being taken greater than $D - 0,9\ T$
$0,7L < x < L$	$h_{1,M} + \frac{h_{1,FE} - h_{1,M}}{0,3}\left(\frac{x}{L} - 0,7\right)$
$x = L$	$\left(\frac{4,35}{\sqrt{C_B}} - 3,25\right)h_{1,M}$
Note 1: C : Wave parameter defined in Ch 5, Sec 2 $h_{1,AE}$: Reference value h_1 calculated for $x = 0$ $h_{1,M}$: Reference value h_1 calculated for $x = 0,5L$ $h_{1,FE}$: Reference value h_1 calculated for $x = L$	

جدول ۵-۱۵: حرکات نسبی کشتی در حالت عمودی

حرکات نسبی در حالت مایل بر حسب متر در هر مقطع عرضی بدنه از رابطه زیر بدست می‌آید: $h_2 = 0.5h_1 + A_R\frac{B_W}{2}$

که در این رابطه:

h_1: مقادیر پایه حرکت نسبی در حالت قائم بر حسب متر که از رابطه قبل بدست می‌آید.

B_W: عرض قالبی[1] بر حسب متر که در محل آبخور تابستان (T_1) در مقطع عرضی مدنظر بدست آید.

۴) شتابهای نسبی کشتی: شتابهای طولی ، عرضی و عمودی در هر نقطه‌ای از کشتی در حالت قائم و مایل طبق جدول ۵-۱۶ بدست می‌آید.

Direction	Upright ship condition	Inclined ship condition
X - Longitudinal a_{X1} and a_{X2} in m/s²	$a_{X1} = \sqrt{a_{SU}^2 + [A_P g + \alpha_P(z - T_1)]^2}$	$a_{x2} = 0$
Y - Transverse a_{Y1} and a_{Y2} in m/s²	$a_{Y1} = 0$	$a_{Y2} = \sqrt{a_{SW}^2 + [A_R g + \alpha_R(z - T_1)]^2 + \alpha_P^2 K_X L^2}$
Z - Vertical a_{Z1} and a_{Z2} in m/s²	$a_{Z1} = \sqrt{a_{H}^2 + \alpha_P^2 K_X L^2}$	$a_{z2} = \alpha_R\ y$
Note 1: $K_X = 1,2\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 1,1\frac{x}{L} + 0,2$ without being taken less than 0,018		

جدول۵-۱۶: شتابهای نسبی کشتی در حالت قائم و مایل

مثال) یک کشتی اقیانوس پیما با تناژ ۳۲۰۰ تن به طول ۱۰۰ متر، عرض ۸ متر و آبخور ۵ متر با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه در آب شیرین در حال حرکت است. مطلوبست مشخصات حرکت رول؟

حل: از جدول ۵-۱۴ (برای کشتی اقیانوس پیما) $n_1 = 1 \quad , \quad n = 1$

1 - Moulded Breath

$$h_w = 11.44 - \left|\frac{L-250}{110}\right|^3 = 11.44 - \left(\frac{150}{110}\right)^3 = 8.9 \quad m$$

$$a_B = n\left(0.76F + 1.875\frac{h_w}{L}\right)$$

$$a_B = 1 \times \left(0.76 \times 0.5 + 1.875 \times \frac{8.9}{100}\right) = 0.38 + 0.167 = 0.55$$

$$V = 15 \ {}^{m}/_{s} = 30 \ knot \xrightarrow{\text{عدد فرود}} F = 0.164\frac{V}{\sqrt{L}} = 0.164 \times \frac{30}{\sqrt{100}} = 0.5$$

$$A_R = a_B\sqrt{E} = 0.55 \times \sqrt{1} = 0.55 \text{ rad}$$

$$GM = 0.07\,B = 0.07 \times 8 = 0.56\,m$$

شعاع ژیراسیون $\delta = 0.35B = 0.35 \times 8 = 2.8 \ m^4$

$$E = 1.39\frac{GM}{\delta^2}B = 1.39 \times \frac{0.56}{(2.8)^2} \times 8 = 0.79 \xrightarrow{\text{not to less then 1}} E = 1$$

$$T_R = 2.2\frac{\delta}{\sqrt{GM}} = 2.2\frac{2.8}{\sqrt{0.56}} = 8.21 \text{ sec}$$

$$\alpha_R = A_R\left(\frac{2\pi}{T_R}\right)^2 = 0.55\left(\frac{2\pi}{8.21}\right)^2 = 0.32 \quad \frac{\text{rad}}{s^2}$$

بخشش را از آفتاب یاد بگیر

زیرا که در تمامی شرایط بر همه یکسان می تابد!

و نیز از باران که برای همه یکسان می بارد ...

بخش ششم:

تخمین وزن و مرکز ثقل کشتی

فصل اول: تقسیم‌بندی اقلام وزنی کشتی

می‌دانیم که وزن کل کشتی برابر با جابجایی (نیروی بویانسی) آن است که:

وزن سبک+وزن مرده(بار)= جابجایی

وزن بار قابل حمل با توجه به نیاز کارفرما تعیین می‌شود. آنچه که در طی فرآیند طراحی کشتی باید بتوان تعیین نمود، مقدار وزن سبک کشتی است. وزن سبک از اقلام وزنی متعدد و کثیری تشکیل شده که باید سهم هر یک را معلوم کرد، در غیر اینصورت کشتی دچار اضافه وزن می‌گردد. سهمیه بندی وزن هر یک از اقلام را می‌توان به کمک روابط زیر معلوم کرد. جابجایی را بصورت زیر می توانیم بنویسیم:

$$\Delta = \Delta_L + W_{dw} = \left(W_{StR} + W_{StAD} + W_O + W_M + W_R\right) + W_{dw}$$

که داریم : Δ_L: وزن سبک (بدون بار) کشتی

W_{dw}: وزن بار کل قابل حمل توسط کشتی که شامل موارد زیر است:

- بار محموله‌های تجاری (که قسمت عمده وزن کشتی را تشکیل می‌دهد)
- آب مخازن تعادل(بالاست)
- مواد غذایی و آب شیرین مصرفی خدمه
- سوخت و روغن
- آب سیستم خنک‌کاری و تهویه
- خدمه و لوازم شخصی آنها

W_{StR}: وزن بدنه فولادی

W_{StAD}: وزن روبناسازی فولادی و نیم عرشه‌های روی عرشه اصلی

W_0: وزن تجهیزات دریایی و امکانات رفاهی[1]

W_M: وزن موتور (سیستم رانش)

W_R: حاشیه اطمینان وزنی (برای جلوگیری از مواجه شدن با اضافه وزن)

در این مبحث مقایر وزن بر حسب تن بیان شده نه بر حسب نیوتن، لذا اقلامی که با وزن بیان می‌گردند در واقع بیان کننده جرم هستند.

❖ ضریب وزن بار مرده

ضریب زیر بعنوان ضریب بار مرده تعریف می‌شود که عبارتست از وزن بار مرده به جابجایی کشتی:

$$C = W_{dw} / \Delta$$

که C به نوع کشتی، عدد فرود و ابعاد کشتی وابسته است. از این ضریب برای تخمین جابجایی کشتی با توجه به مقدار بار مرده استفاده می‌شود. از این روش برای کشتی هایی که اندازه آنها وابسته است به مساحت عرشه، حجم انبار کالا یا قدرت موتور نمی‌توان استفاده کرد مانند کشتی‌های فری، مسافربری و یخ شکن.

برای کشتی های تجاری معمولی: $C \approx 0.66$

برای کشتی های تانکری: $C \approx 0.78 + 0.05.\max(1.5, W_{dw}/100000)$

1 - *equipment of outfit*

مثال) جابجایی یک کشتی نفتکش ۳۰۰هزار تنی را تخمین بزنید.

حل: منظور از ۳۰۰ هزار تن در کشتی‌های نفتکش و حمل مایعات، مقدار بار مرده است لذا:

$$C = 0.78 + 0.05 \times \max\left(1.5, {300000}/{100000}\right) = 0.78 + 0.15 = 0.93$$

$$\Delta = \frac{W_{dw}}{C} = \frac{300000}{0.93} = 322580\ t$$

ضریب بار مرده انواع کشتی‌های تجاری را مطابق جدول ۵-۱۷ نیز می‌توان در نظر گرفت:

		dw/Δ [%]
cargo ship	5000–15 000 tdw	60–80
coastal cargo ship	499–999 GT	70–75
bulker	20 000–50 000 tdw	74–80
bulker	50 000–150 000 tdw	80–87
tanker	25 000–120 000 tdw	65–83
	≥200 000 tdw	83–88
containership	10 000–15 000 tdw	60–76
	20 000–50 000 tdw	60–70
ro-ro ship	≤16 000 tdw	50–60
reefer	300 000–600 000 cu ft	45–55
ferry		16–33
trawler	44–82 m	30–58
tug	500–3000 kW	20–40

جدول ۵-۱۷: درصد اقلام وزنی کشتی‌ها

فصل دوم: تخمین ارتفاع مرکز ثقل و درصد اقلام وزنی

❖ تخمین ارتفاع مرکز ثقل بصورت تابعی از عمق بدنه

دانستن اینکه ارتفاع مرکز ثقل (KG)کشتی در چه محدوده‌ای باید بدست آید، کمک شایانی به محاسبات و چیدمانی اجزاء داخلی کشتی است. برای حصول این تخمین از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\overline{KG} = C_{KG} D_A = C_{KG} . \left(D + \frac{\nabla_A + \nabla_{DH}}{L_{pp} . B} \right)$$

در این رابطه : ∇_A : حجم داخل روبناسازی عرشه و ∇_{DH} : حجم داخل نیم عرشه هایی روی عرشه اصلی[1]. D_A: عمق اصلاح شده است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_A = D + \frac{\text{sup}\, erstructure\ volume}{deck\ area}$$

بدین ترتیب با دانستن ضریب C_{KG} می‌توان تقریبی از ارتفاع مرکز ثقل (KG)را بدست آورد.

C_{KG} با توجه به مقادیر زیر تخمین زده می شود:

1 -*deckhouse*

passenger ships	0.67 – 0.72
large cargo ships	0.58 – 0.64
small cargo ships	0.60 – 0.80
bulk carrier	0.55 – 0.58
tankers	0.52 – 0.54
trawlers	0.66 – 0.75
tugs	0.65 – 0.75

❖ تخمین درصد وزن اقلام وزنی و ارتفاع آنها

در این قسمت سعی بر این است که سهمیه بندی وزنی هر یک از اقلام داخل کشتی تعیین شود بگونه‌ای که کشتی دچار اضافه وزن نشود. جدول ۵-۱۷ درصد هر یک از اقلام وزنی را بصورت درصدی از جابجایی برای کشتی‌های مختلف بیان داشته است.

		dw/Δ [%]	W_{St}/Δ_L [%]	W_o/Δ_L [%]	W_M/Δ_L [%]
cargo ship	5000–15 000 tdw	60–80	55–64	19–33	11–22
coastal cargo ship	499–999 GT	70–75	57–62	30–33	9–12
bulker	20 000–50 000 tdw	74–80	68–79	10–17	12–16
bulker	50 000–150 000 tdw	80–87	78–85	6–13	8–14
tanker	25 000–120 000 tdw	65–83	73–83	5–12	11–16
	≥200 000 tdw	83–88	75–83	9–13	9–16
containership	10 000–15 000 tdw	60–76	58–71	15–20	9–22
	20 000–50 000 tdw	60–70	62–72	14–20	15–18
ro-ro ship	≤16 000 tdw	50–60	65–78	12–19	10–20
reefer	300 000–600 000 cu ft	45–55	51–62	21–28	15–26
ferry		16–33	56–66	23–28	11–18
trawler	44–82 m	30–58	42–46	36–40	15–20
tug	500–3000 kW	20–40	42–56	17–21	38–43

جدول ۵-۱۷: درصد اقلام وزنی کشتی‌ها

با استفاده از این جدول، درصد بار مرده، وزن سازه فولادی بدنه، وزن تجهیزات و وزن موتور بدست می‌آید. جدول ۵-۱۸ نیز تقریبی از ارتفاع مرکز ثقل (KG) هر یک از این اقلام را بصورت درصدی از فاصله کیل تا عرشه فوقانی بیان داشته است. این مقادیر برای کشتی‌های مختلف بصورت جداگانه بیان شده است. با استفاده از این دو جدول می‌توان تخمین اولیه‌ای از سهمیه‌بندی وزنی و ارتفاع مرکز ثقل هر یک را بدست آورد. در قسمت-های بعدی روابط دقیق‌تری برای تخمین اقلام وزنی ارائه می‌شود.

		for W_{St}	*for* W_o	*for* W_M	*light ship*
cargo ship	≥5000 tdw	60–68	110–120	45–60	70–80
coastal cargo ship	≥499 GT	65–75	120–140	60–70	75–87
bulker	≥20 000 tdw	50–55	94–105	50–60	55–68
tanker	≥25 000 tdw	60–65	80–120	45–55	60–65
containership	≥10 000 tdw	55–63	86–105	29–53	60–70
ro-ro ship	≥80 m	57–62	80–107	33–38	60–65
reefer	≥300 000 cu ft	58–65	85–92	45–55	62–74
ferry		65–75	80–100	45–50	68–72
trawler	≥44 m	60–65	80–100	45–55	65–75
tug	≥500 kW	70–80	100–140	60–70	70–90

جدول ۵-۱۸: تقریب ارتفاع مرکز ثقل اقلام وزنی

فصل سوم: تخمین وزن فولاد

همانطور که در جداول قبل ملاحظه شد، فولاد بخش عمده‌ای از وزن سبک کشتی را به خود اختصاص می‌دهد. لذا بررسی آن باید بسیار دقیقتر از سایر اقلام وزنی باشد در حالیکه برای تجهیزات و لوازم داخلی کشتی، یک تخمین هم کفایت می‌کند. وزن فولاد شامل موارد زیر می‌باشد:

- ورق‌های شکل‌دهی برای تشکیل بدنه
- فریم‌ها و تقویت‌های متصل به ورق بدنه
- قطعات ریخته‌گری شده قسمت پاشنه و نگهدارنده شفت پروانه[1]
- مواد جوشکاری استفاده شده در قسمت‌های مختلف جوشکاری بدنه

موارد زیر نیز در برخی مواقع بعنوان وزن فولاد و برخی مواقع بعنوان وزن تجهیزات آورده می‌شوند:

- درپوش‌های روی دریچه اصلی[2]
- دکل‌ها
- پوسته و سازه سکان
- نگهدارنده‌های کانتینرها

برای تخمین وزن فولاد کشتی دو روش اصلی وجود دارد:

۱- آمار کشتی‌های ساخته شده مشابه: که از طریق برون‌یابی یا درون‌یابی حاصل می‌شود.

۲- از سازه طراحی شده برای همان کشتی: که با استفاده از فایل سه بعدی تهیه شده، بطور دقیق می‌توان وزن فولاد بدنه را تخمین زد.

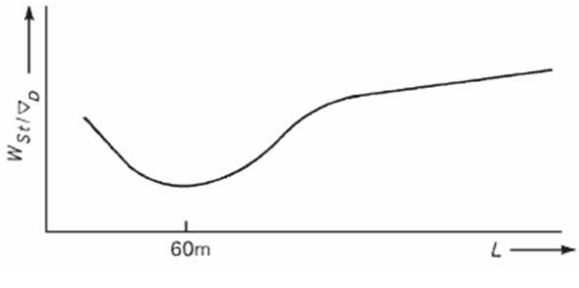
روابطی که در قسمت های بعدی ارائه می‌شود برای کشتی‌های تجاری معمولی هستند. اصلی‌ترین داده‌ها برای تخمین وزن فولاد عبارتند از ابعاد بدنه، تعداد عرشه‌ها، تک‌بدنه یا دو بدنه بودن و روش ساخت بدنه.

❖ پیشنهاد اشتروباخ[3]

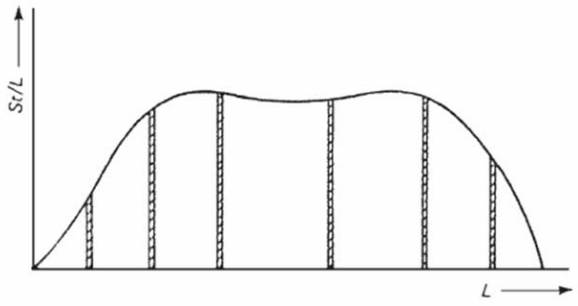
اشتروباخ در سال ۱۹۲۸ مراحل زیر را برای تخمین وزن فولاد کشتی پیشنهاد کرد:

۱) محاسبه وزن فولاد در واحد طول برای هر شناور (شکل۵-۴۸) (چرا که همانطور که قبلا بیان شد طول شناور تاثیر زیادی بر وزن سازه‌ای آن دارد). طبق پیشنهاد او، تغییرات وزن کشتی با افزایش طول دارای یک نقطه حداقلی است. این نقطه حداقلی تقریبا ۶۰ متر است. پس از ۶۰ متر، وزن بصورت تصاعدی زیاد می‌شود (با فرض ثابت بودن جابجایی).

۲) استخراج وزن در واحد طول و ترسیم نمودار آن (شکل ۵-۴۹)



شکل ۵-۴۸: تغییرات نسبت وزن فولاد به تغییرات طول



شکل ۵-۴۹: توزیع وزن در واحد طول

این شکل برای یک کشتی با شیب طولی عرشه ترسیم شده است.

۳) محاسبه مساحت زیر نمودار و استخراج وزن فولاد

۴) افزودن سایر اقلام وزنی که قبلا افزوده نشده است.

این روش برای چندین نوع کشتی استخراج می‌شود و سپس با تشکیل بانک اطلاعاتی می‌توان برای سایر کشتی‌ها نیز استفاده کرد.

1 - *Shaft Bracket*
2 - *hatch cover*
3 - *strohbusch*

❖ تأثیر ابعاد بر وزن فولاد

بدیهی است که ابعاد بدنه بطور مستقیم بر وزن فولاد بدنه تاثیر گذار است. رابطه زیر را می توان در نظر گرفت: $W_{St} = L^a \cdot B^b \cdot D^c \cdot C_B^d \cdot e$

البته نمی‌توان عدد مناسبی برای توان‌های a و b و c و d و ضریب e براحتی پیشنهاد کرد، چرا که عوامل بسیار متعددی در آن دخیل هستند، مثلا نوع و روش ساخت از اهمیت زیادی برخوردار است که در مثال‌های زیر به برخی از آنها اشاره می‌شود.

مثال ۱ : – وزن فولاد یک نفتکش با دیواره های کنگره‌ای[1]: ۴۱۵۰ تن

– وزن فولاد یک کشتی نفتکش با دیواره های مسطح و تقویتهای جوش شده : ۴۴۲۰ تن

مثال ۲ : – یک کشتی فله بر برای حمل بار با چگالی $1.1\ t/m^3$: ۳۸۸۰ تن

– یک کشتی فله بر برای حمل بار با چگالی $1.1\ t/m^3$: ۴۰۲۰ تن

مثال ۳ :– یک کشتی *RO-RO* با فولاد نرم و بار محوری ۵۵ تن بدون تکیه گاه: ۵۷۰۰ تن

– یک کشتی *RO-RO* با فولاد نرم و بار محوری ۵۵ تن با دو تکیه گاه زیر عرشه: ۴۹۷۰ تن

– یک کشتی *RO-RO* با فولاد استحکام بالا (*HT*) و بار محوری ۱۷ تن بدون تکیه‌گاه: ۴۱۰۰ تن

❖ سایر روش های محاسبه وزن فولاد

برای کشتی‌های کانتینربر به روش میلر[2] که در سال ۱۹۶۸ ارائه شد داریم:

$$W_{St} = 0.000435(L\,.\,B\,.\,D)^{0.9}\,.\,(0.675 + C_B/2)\,.\,\left[0.00585((L/D)-8.3)^{1.8} + 0.939\right]$$

برای کشتی‌های حمل بار خشک به روش کرلن[3] که در سال ۱۹۸۵ارائه شد داریم:

$$W_{St} = 0.0832\,.\,X\,.\,e^{-5.73X\,.10^{-7}} \qquad X = \frac{1}{12} L_{PP}^2\,.\,B\,.\,\sqrt[3]{C_B}$$

و برای همین کشتی ها بروش واتسون و گیلفیلان[4] که در سال ۱۹۷۷ ارائه شد داریم:

$$W_{St} = C_B^{2/3}\,.\,\frac{1}{6} L\,.\,B\,.\,D^{0.72}\,.\,\left[0.002(L/D)^2 + 1\right]$$

برای نفتکش‌ها رابطه‌ای از استاندارد *DNV* در سال ۱۹۷۲ به صورت زیر ارائه شده است:

$$W_{St} = \Delta\left[\alpha_L + \alpha_T (1.009 - 0.004\,.\,(L/B))\,.\,0.06\,.\,(28.7 - (L/D))\right]$$

$$\alpha_L = \left[(0.054 + 0.004\,L/B)\,.\,0.97\right]/\left[0.189\,.\,(100\,L/D)0.78\right]$$

$$\alpha_T = 0.029 + 0.00235\,.\,\Delta/100000 \qquad \Delta \langle\ 600000t$$

$$\alpha_T = 0.0252\,.\,(\Delta/100000)^{0.3} \qquad \Delta \rangle\ 600000t$$

که این رابطه در محدوده زیر معتبر است:

$$L/D = 10-14\,,\quad L/B = 5-7\,,\quad L = 150-480m$$

که البته در رابطه *DNV*، وزن روبناسازی عرشه و نیم‌عرشه‌ها در نظر گرفته نشده است.

برای سوپر تانکرها هم در سال ۱۹۶۷ رابطه زیر توسط ساتو[5] ارائه شد:

$$W_{St} = (C_B/0.8)^{1/3}\,.\,\left[5.11\,.\,L^{3.3}\,.\,B/D + 2.56\,.\,L^2(B+D)^2\right]$$

برای کشتی های فله بر در سال ۱۹۶۴رابطه مورای[6] ارائه شد:

$$W_{St} = 0.026\,.\,L^{1.65}(B + D + T/2)\,.\,(0.5\,.\,C_B + 0.4)/0.8$$

همچنین *DNV* رابطه زیر را در سال ۱۹۷۲ برای فله برها ارائه کرد :

$$W_{St} = 4.274\,.\,W^{0.62}\,.\,L\,.\,(1.215 - 0.035\,.\,L/B)\,.\,(0.73 + 0.025\,L/B)\,.$$
$$(1 + (L-200)/1800)\,.\,(2.42 - 0.07\,L/D)\,.\,(1.146 - 0.0163\,L/D)$$

---

1 - *corrugated bulkhead*
2 -*Miller*
3 - *Kerlen*
4 - *Watson&Gilfillan*
5 - *Sato*
6 *Murray*

که در این رابطه W اساس مقطع[1]، مقطع میانی کشتی است. همان محدودیت‌های رابطه *قبل DNV* در مورد نفتکش‌ها در اینجا نیز صادق است. بجز اینکه باید طول کشتی کوچکتر از ۳۸۰ متر باشد.

برای کشتی‌های تجاری معمولی رابطه دیگری توسط جنسن و هاروالد[2] در سال ۱۹۹۲ ارائه شد. این رابطه بر اساس کشتی‌های ساخته شده در کارخانجات دانمارک بین سالهای ۱۹۹۰–۱۹۶۰ استخراج شده که دارای خطای کمتر از ۱۰ درصد است:

$$W_{St} = (L \,.\, B \,.\, D_A).\, C_S$$

$$C_S = C_{SO} + 0.064\; e^{-(0.5u+0.1u^{2.45})} \qquad u = \log_{10}(\Delta/100\,t)$$

$C_{SO}\,[t/m^3]$ *depends on ship type* :

sup *port vessels*	0.0974	*bulk carriers*	0.0700
tugs	0.0892	tan ker *s*	0.0752
c arg *o ships* (1 *deck*)	0.0700	*VLCC*	0.0645
c arg *o ships* (2 *decks*)	0.0760	*product carriers*	0.0664
c arg *o ships* (3 *decks*)	0.0820	*reefers*	0.0609
train ferries	0.0650	*passenger ships*	0.0580
rescue vessel	0.0232		

وزن زیرسازی و فوندانسیون زیر موتور طبق پیشنهاد شنیکلات[3] بصورت 3-6 kg/kw تخمین زده می‌شود یا از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$W_{StF} = \frac{27 P_B}{(n+250).\,(15+P_B/1000)}$$

که w_{stf} وزن فولاد زیرسازی موتور بر حسب تن، n دور موتور بر حسب rpm و P_B توان موتور بر حسب کیلو وات است. همچنین شنیکلات جدول ۵–۱۹ را برای تخمین وزن لبه‌های نگهدارنده کانتینرها در کشتی‌های کانتینربر ارائه کرد:

Container			
Type	*Length* (ft)	*Fixed*	*Detachable*
Normal	20	0.70 t/TEU	1.0 t/TEU
Normal	40	0.45 t/TEU	0.7 t/TEU
Refrigerated	20	0.75 t/TEU	—
Refrigerated	40	0.48 t/TEU	—
Refrigeration	20	0.75 t/TEU	
Pipes	40	0.65 t/TEU	

جدول ۵-۱۹: تخمین وزن لبه‌های نگهدارنده کانتینرها

این جدول وزن لبه‌های نگهدارنده را برای هر کانتینر ۲۰یا ۴۰ فوتی و بر حسب نوع آن (معمولی یا یخچالی)ارائه می‌کند. وزن مهاربندی کانتینرها نیز بصورت زیر ارائه شده است:

کانتینر ۲۰ فوتی : $0.024 \quad t/TEU$

کانتینر ۴۰ فوتی: $0.031 \quad t/TEU$

❖ موقعیت مرکز ثقل عمودی بدنه فولادی

مرکز ثقل عمودی بدنه فولادی بدون روبناسازی و نیم عرشه‌ها روی بدنه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\overline{KG}_{StR} = 58.3 - 0.157.(0.824 - C_{BD})\left(\frac{L}{D}\right)^2.D_S.0.01 \approx 0.057\,D_S$$

D_S عمق اصلاح شده با لحاظ کردن اثر حجم زیر شیب طولی عرشه و برآمدگی دریچه‌های ورود کالا می‌باشد. C_{BD} نیز ضریب بلوکی برحسب عمق بدنه است.

- در صورت داشتن حبابی سینه : $D_S=D-0.004D=0.966D$
- برای مقادیر L/B به غیر از $L/B=6.5$: $D_S=D+0.008D=1.008D$

1 *section modulus*
2 *Jensen&Harvald*
3 - *Schneeklutch*

تخمین دیگری که برای مرکز ثقل عمودی بدنه فولادی در نظر گرفته شده، برابر ۵ درصد پایین‌تر از مرکز حجم بدنه فولادی است (مرکز حجم از منحنی‌های هیدرواستاتیک). مرکز ثقل طولی بدنه نیز برابر با مرکز حجم طولی بدنه فولادی می‌باشد.

❖ تخمین وزن سازه ای رو بناسازی و نیم عرشه ها

روش *Muler-koster* در سال ۱۹۷۳ برای این منظور ارائه شدند که تا حدودی سبکتر از مقدار واقعی هستند لذا بهتر است ۲۵-۱۰درصد به آنها افزوده شود. در این روش داریم:

الف) نیم‌عرشه سینه[1] : با توجه به حجم زیر این نیم‌عرشه داریم:

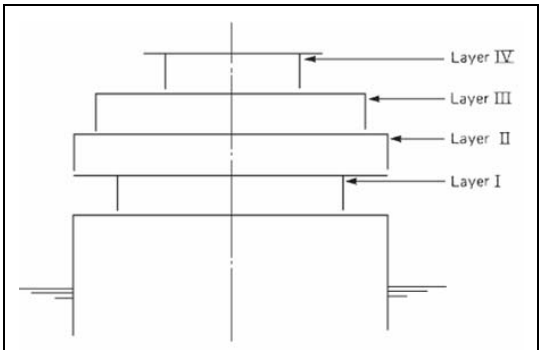
- برای $L \geq 140\ m$: $C_{forcastle}=0.1\ \ t/m^3$
- برای $L \approx 120\ m$: $C_{forcastle}=0.13\ \ t/m^3$

این مقادیر را می‌توان صرفا برای نیم‌عرشه سینه با ارتفاع ۲/۵-۳/۲۵ متر و طول بیش از ۲۰ درصد طول بین دو عمود اعمال کرد. اگر طول نیم-عرشه سینه حدود یک سوم طول بین دو عمود باشد، ۱۰ درصد کاهش وزن خواهد داشت. اگر ارتفاع آن نیز از دو حد گفته شده بلندتر باشد، ۱۰-۵ درصد کاهش وزن خواهد داشت.

ب)نیم‌عرشه پاشنه[2] در برگیرنده روی موتورخانه $C_{POOP}=0.075 \quad t/m^3$

یک نیم‌عرشه پاشنه طویل که علاوه بر موتورخانه، روی یک انبار را هم پوشانده باشد: $C_{POOP}=0.09 \quad t/m^3$

ج)روبناسازی (ناحیه مسکونی روی عرشه) : روبناسازی دارای عرشه‌های متعددی است که وزن هر عرشه (طبقه) از پایین به بالا کاهش می‌یابد، لذا وزن سازه‌ای همه طبقات یکسان نیست. عرشه‌ها طبق شکل۵-۵۰ شماره‌گذاری می‌شوند.



شکل ۵-۵۰: شماره‌گذاری عرشه‌ها

وزن هر طبقه از رابطه زیر بدست می آید: $G_{DH} = C_{DH} \cdot F_u \cdot h \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$

که ضریب C_{DH} از جدول۵-۲۰ بدست می‌آید:

	Layer				
F_o/F_u	*I*	*II*	*III*	*IV*	*Wheelhouse*
1.0	0.057	0.056	0.052	0.053	0.040
1.25	0.064	0.063	0.059	0.060	0.045
1.5	0.071	0.070	0.065	0.066	0.050
1.75	0.078	0.077	0.072	0.073	0.055
2.0	0.086	0.084	0.078	0.080	0.060
2.25	0.093	0.091	0.085	0.086	0.065
2.5	0.100	0.098	0.091	0.093	0.070

جدول۵-۲۰: استخراج ضریب CDH

این جدول برای طبقات مختلف و بر حسب $\frac{F_o}{F_u}$ بیان شده است. F_0 مساحت سطح فوقانی هر طبقه (شامل راهروهای بیرونی) و F_u مساحت سطح کف هر طبقه است . برای مقـادیر مختلف $\frac{F_o}{F_u}$ می توان از میانیابی استفاده کرد.

1 - *forcastle*
2 - *poop*

H ارتفاع هر طبقه است که معمولاً برابر با ۲/۶ متر در نظر گرفته می شود. اگر ارتفاع هر طبقـه غیـر از ایـن مقـدار باشـد، ضـریب اصـلاحی K_1 بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$K_1 = 1 + 0.02(h - 2.6)$$

ضریب K_2 نیز عبارتست از: $K_2 = 1 + 0.05(4.5 - f_i)$

که f_i برابر است با نسبت طول دیواره های داخلی به طول مقطع روبناسازی.

ضریب K_3 نیز عبارتست از:

$$K_3 = 1 + (L_{PP} - 150) \times {0.15}/{130} \qquad 100 \langle L_{PP} \langle 230\ m$$

ارتفاع مرکز ثقل هر طبقه نیز از رابطه زیر بدست می‌آید :

- بدون دیواره های داخلی: $0.76h - 0.82h$
- دارای دیواره های داخلی: $0.7h$

با استفاده از مواد سازه‌ای سبک می‌توان وزن روبناسازی را نسبت به مواد فولادی ۵۰-۴۵ درصد کاهش داد. البته هزینه ساخت آن ۷-۵ برابر می-شود. روبناسازی‌های آلومینیومی دارای وزن کم و هزینه زیادی هستند. اتصال روبناسازی آلومینیومی به بدنه فولادی بوسیله میخ پرچ با روکش پلاستیکی انجام می‌شود. نقطه ضعف مواد آلومینیومی حساسیت به حریق است، لذا در این روبناسازی‌ها بایستی از سیستم اطفاء حریق بسیار قوی و هوشمند استفاده شود.

فصل چهارم: وزن تجهیزات و امکانات[1] (E&O)

تجهیزات و امکانات داخلی کشتی‌ها عامل افزایش راحتی خدمه می‌باشد. علی‌رغم کاهش تعداد خدمه، وزن تجهیزات و امکانات داخلی کشتی بدلایل زیر نسبت به قبل افزایش یافته است:

۱) افزایش مساحت زیربنا و فضا برای هر نفر در داخل کشتی
۲) دیواره های کاذب فعلی سنگین تر از دیواره‌های چوبی
۳) تجهیزات فاضلاب و خن بیشتر با توجه به امکانات بهداشتی انفرادی برای هر اتاق
۴) سیستم‌های تهویه مطبوع سنگین‌تر و قوی‌تر از سیستم‌های قبلی
۵) استفاده از عایق‌بندی حرارتی و صوتی قوی‌تر نسبت به قبل

وزن تجهیزات و امکانات کشتی با توجه به نوع کشتی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

رابطه عمومی عبارتست از : $W_o = K.\nabla$

- کشتی‌های مسافربری دارای کابین: $K=0.036 - 0.039 \quad t/m^3$
- کشتی‌های مسافربری با قابلیت حمل اتومبیل: $K=0.04 - 0.05 \quad t/m^3$

برای کشتی‌های تجاری از رابطه کلی زیر استفاده می‌شود: $W_0=K.L.B$

که ضریب K بصورت زیر بدست می‌آید:

Cargo ships	K=0.40-0.45 t/m^2
Containerships	K=0.34-0.38 t/m^2
Bulk carriers without cranes:	
With length of around 140 m	K=0.22-0.25 t/m^2
With length of around 250 m	K=0.17-0.18 t/m^2
Crude oil tankers:	
With length of around 150 m	K≈0.28 t/m^2
With length of over 300 m	K≈0.17 t/m^2

1 - *Equipment&outfit*

در سال ۱۹۶۵، *Henschke* رابطه زیر را برای کشتی‌های تجاری حمل کالای خشک و شناورهای ساحلی دارای موتور ارائه کرد:

$$W_0 = \frac{0.07 \,.\, (2.4 - \nabla_{LR}/W_{dw})^3 + 0.15}{-1 + \log \nabla_{LR}} \,.\, \nabla_{LR}$$

$$\nabla_{LR} = hold\ volume\ [M^3]$$

$$\nabla_{LR}/W_{dw} = stowage\ coeffcient\ [M^3/t]$$

محدوده اعتبار این رابطه عبارتست از:

$$1.2 \langle \nabla_{LR} \diagup W_{dw} \langle 2.4$$

در کشتی‌های تجاری حمل کالای خشک، وزن تجهیزات معمولا ۲-۱/۵ برابر وزن سیستم رانش است. برای کشتی‌های یخچالی با طول ۱۶۵-۹۰ متر، وزن تجهیزات از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W_O = 0.055L^2 + 1.63\nabla_i^{2/3}$$

که L طول بین دو عمود است و ∇_i حجم ناخالص انبارهای عایق‌بندی شده است. برای تخمین دقیق‌تری از وزن تجهیزات کشتی می‌توان تقسیم-بندی زیر را بر روی آنها اعمال کرد:

گروه ۱ : درب روی هچ ها به همراه مکانیزم آنها: جدول ۵-۲۱ برای تخمین وزن درب تک کشش[1] روی هچ‌ها بر حسب طول درب ارائه شده است:

	Weight in kg/m hatchway length				
Hatchway breadth [m]	6	8	10	12	14
Load 1.75 t/m²	826	1230	1720	2360	3150
1 container layer	826	1230	1720	2360	3150
2 container layers	945	1440	2010	2700	3550

جدول ۵-۲۱: وزن درب روی هچ ها به همراه مکانیزم آنها

رابطه زیر توسط Malzahn برای وزن درب هچ تک کشش با حمل بار $1.75\ t/m^2$ ارائه شده است:

$$\frac{W_L}{L} = 0.0533.d^{1.53}$$

که W_L وزن درب هچ بر حسب تن، L طول درب و d عرض درب بر حسب متر است. وزن درب عرشه میانی[2] طبق جدول ۵-۲۲ بدست می‌آید. عرض درب در این‌حالت ۰/۲ متر بیشتر از عرض دریچه است.

گروه ۲: تجهیزات بارگیری: شامل جرثقیل های روی عرشه، وینچ‌ها، تجهیزات جابجایی بار، جرثقیل‌های سقفی زیر عرشه و واحدهای مهار کانتینر است. وینچ‌های جابجای کالا دارای وزن ۱-۰/۶ تن به ازای هر تن جابجایی بار است. وزن جرثقیل روی عرشه از جدول ۵-۲۳ بدست می‌آید:

	Weight in kg/m hatchway length				
Cover breadth [m]	6	8	10	12	14
Normal load	845	1290	1800	2440	3200
Fork-lift operation	900	1350	1870	2540	3360
2 container layers	930	1390	1940	2600	3460

جدول ۵-۲۲: وزن درب عرشه میانی

Max.	*Weight (t) at max. working radius*			
load (t)	15 m	20 m	25 m	30 m
10	18	22	26	
15	24	28	34	
20		32	38	45
25		38	44	54
30		42	48	57
35		46	52	63

جدول ۵-۲۳: وزن جرثقیل روی عرشه

ارتفاع مرکز ثقل جرثقیل با بازوی افقی ۳۵-۲۰ درصد ارتفاع جرثقیل است.

گروه ۳: تجهیزات محل استراحت خدمه: تجهیزات این قسمت شامل موارد زیر است:

- کابین‌ها و دیوارهای حایل (اگر جزء وزن فولاد نیامده باشد)
- کف‌پوش ها و پوشش‌های دیوارها

1 - *single pull*
2 - *tween deck*

- لوله‌های تاسیسات و فاضلاب
- درب‌ها، پنجره‌ها و نورگیرها
- تجهیزات گرمایشی، تهویه داخلی، تهویه مطبوع به همراه لوله‌کشی و کابل‌کشی‌ها
- تجهیزات آشپزخانه و بهداشتی
- مبلمان و تجهیزات رفاهی

وزن این تجهیزات بصورت وزن در واحد سطح یا وزن در واحد حجم قابل بیان هستند:

- برای کشتی‌های تجاری کوچک تا متوسط : $60-70\ {kg}/{m^3}$, $160-170\ {kg}/{m^2}$
- برای کشتی‌های تجاری و نفتکش‌های بزرگ : $80-90\ {kg}/{m^2}$, $180-200\ {kg}/{m^2}$

گروه ۴: سایر اقلام وزنی تجهیزات

شامل موارد زیر می‌باشد:

- لنگر ها، زنجیرها و طناب‌ها
- تجهیزات لنگراندازی، وینچ‌های مهار روی شناور و لوله‌های عبور طناب
- تجهیزات هدایت و سکان، بخش‌های فرمان در پل فرماندهی
- سیستم یخچال و فریزری
- تجهیزات محافظت در برابر خوردگی، پوشش‌های عرشه
- قایق‌های نجات و قایق‌های بادشونده بهمراه تجهیزات جانبی آنها
- ریل‌ها، پلکان‌های ثابت و متحرک، درب‌ها، پوشش روی درب آدم رو
- تجهیزات اطفاء حریق و سیستم‌های جاذب دی اکسیدکربن
- لوله‌ها، شیشه‌ها و تجهیزات عمق‌سنجی مخازن
- سیستم تهویه داخلی انبارها
- سیستم دریانوردی، الکترونیک و هشداردهنده‌ها

وزن این تجهیزات اغلب وابسته به اندازه کشتی است و وابستگی کمی به نوع کشتی دارد. وزن این گروه از تجهیزات از یکی از دو رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$W_{IV} = (L.B.D)^{2/3}.C \qquad 0.18t/m^2 \langle C \langle 0.26t/m^2$$

$$W_{IV} = W_{St}^{2/3}.C \qquad 1t^{1/3} \langle C \langle 1.2\,t^{1/3}$$

مرکز ثقل تجهیزات کل کشتی از روابط زیر قابل تخمین است:

- کشتی‌های تجاری حمل کالای خشک: $\overline{KG}_{EO} = D_A - 1.05D_A$
- نفتکش‌ها: $\overline{KG}_{EO} = 1.02D_A - 1.08D_A$

D_A برابر است با عمق بدنه بعلاوه عمق معادل ناشی از روبناسازی. عمق معادل روبناسازی نیز از تقسیم حجم روبناسازی بر مساحت عرشه بدست می‌آید.

تکرار این جمله برای افراد زیادی موفقیت آورده است :
من کاری دارم عالی ، به شیوه‌ای عالی
با خدمتی عالی ،برای پاداشی عالی !

فصل پنجم: وزن سیستم رانش

وزن سیستم رانش شامل موارد زیر است:

۱) موتورها (با یا بدون گیربکس) یا توربین‌ها به همراه بویلرها
۲) سیستم اگزوز و دودکش
۳) سیستم شافت، پروانه، یاتاقان‌ها، آب‌بندها و تونل شافت
۴) ژنراتورها، کابل‌ها و تابلوهای برق
۵) پمپ‌ها،کمپرسورها و جداکننده‌ها
۶) لوله‌کشی‌های داخل موتورخانه، پمپ‌ها و لوله کشی‌های سیستم بالاست و سوخت
۷) تجهیزات تبخیر ساز و تقطیر
۸) سیستم زباله
۹) پمپ‌های بارگیری مایعات و فله و تجهیزات منجمد سازی بار
۱۰) عایق بندی ارتعاشی، حرارتی و صوتی موتورخانه

در انتخاب یک سیستم رانش مناسب، باید معیارهای زیر را در نظر داشت:

۱) هزینه اولیه
۲) قابلیت اطمینان و ایمنی
۳) وزن موتور و اجزاء سیستم پیشرانش
۴) مصرف سوخت (SFC)
۵) نوع سوخت مصرفی
۶) هزینه تعمیر و نگهداری
۷) قابلیت ارائه سرویس
۸) مانورپذیری
۹) نویز وارتعاش
۱۰) قابلیت کنترل

❖ وزن خشک موتور (بدون آب خنک کاری و روغن)

موتورهای دور پائین ($۱۴۰-۱۱۰ rpm$) $0.016-0.045 \quad t/kw$

موتورهای دور متوسط ($۵۰۰-۴۰۰ rpm$) $0.012-0.02 \quad t/kw$

موتورهای دور متوسط V شکل ($۵۰۰-۴۰۰ rpm$) $0.008-0.015 \quad t/kw$

❖ وزن گیربکس

عوامل زیر در تعیین وزن گیربکس موثرند:

- توان
- تراست
- سرعت ورودی و خروجی (نسبت تبدیل)
- نوع ریخته گری یا جوشکاری

برای گیربکس جوشکاری شده با دور $۱۰۰ rpm$: $W_G = 0.003-0.005 \quad t/kw$

اگر n سرعت دورانی پروانه باشد برای گیربکس جوشکاری شده داریم: $W_G = 0.34-0.4\frac{P_B}{n} \quad \left(\frac{t.rpm}{kw}\right)$

برای گیربکس ریخته گری‌شده، وزن تقریبا ۳ برابر مقدار فوق است.

❖ وزن سیستم شافت بدون یاتاقان

با در نظر گرفتن روابط محاسبه قطر شافت می‌توان حجم و وزن شافت را بدست آورد. با در نظر گرفتن جنس شفت با استحکام کششی N/mm^2 ۷۰۰ قطر شفت برابر است با:

$$d = 11.5\left(\frac{P_D}{n}\right)^{1/3}$$

که d بر حسب سانتی متر P_D بر حسب kw و n بر حسب rpm است. وزن شافت در واحد طول نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$0.081\left(\frac{P_D}{n}\right)^{2/3} \qquad \left(t/m\right)$$

❖ وزن پروانه

معمولا هر کشتی به همراه خود یک پروانه یدکی نیز حمل می‌کند که وزن آن نیز باید در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن پروانـه از جـنس برنـز داریم: $W_{prop} = D^3.K \quad \left(t/m^3\right)$

که ضریب k بصورت یکی از روابط زیر بدست می‌آید:

$$K \approx 0.18\, A_E / A_O - (Z-2)/100$$
$$K \approx (d_S/D).(1.85\, A_E / A_O - (Z-2)/100)$$

Z تعداد پره، A_E سطح گسترش یافته، A_0 سطح صفحه پروانه و ds قطر شافت پروانه و D قطر پروانه است.

❖ وزن ژنراتور

این وزن وابسته به برق مورد نیاز می‌باشد و بهترین راه، استفاده از کاتالوگ شرکت ها می‌باشد. بعنوان یک تخمین داریم:

$$W_{gen} = 0.001P(15 + 0.014P)$$

که P توان ژنراتور بر حسب kw است.

❖ سایر اجزاء سیستم رانش

شامل موارد زیر است: پمپ‌ها، لوله‌ها، جاذب‌های صوتی، کابل‌ها، توزیع کننده‌ها، قطعات تعویضی، راه پله‌ها، مخازن سرویس روزانه، تهویه مطبوع موتورخانه، کمپرسورها، سیستم خنک‌کاری آب، تجهیزات کنترل، اتاق کنترل، تجهیزات عایق حرارتی موتورخانه، آب و سوخت داخل لوله ها، موتورهای فرعی و بویلرها. جرم این گروه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$M = 0.04P - 0.07P \quad \left(t/kw\right)$$

که P توان ژنراتور بر حسب kw است. حد پایین این مقادیر برای کشتی‌های با قدرت $۱۰MW$ بدست می‌آید.

❖ راههای کاهش وزن سیستم رانش و موتورخانه

- استفاده از سوپر شارژر قوی
- کاهش مصارف الکتریکی و کاهش وزن تجهیزات الکتریکی
- کاهش اتوماسیون
- کاهش عایق‌بندی موتورخانه
- عدم استفاده از روغن سنگین[1]: استفاده از این روغن در شرایطی ارزشمند است که قدرت خروجی بیش از $۱MW$ و زمان کارکرد بیش از ۳۰۰۰ ساعت در سال باشد.

❖ مرکز ثقل عمودی سیستم رانش

مرکز ثقل عمودی سیستم رانش معمولا ۴۵-۳۵ درصد ارتفاع، بالاتر از شافت می‌باشد.

❖ ضریب اطمینان وزنی

برای اینکه کشتی پس از آب اندازی در آبخور طراحی قرار گیرد و با اضافه وزن مواجه نشود باید حاشیه و ضریب اطمینان وزنی، حتمـا در نظـر گرفتـه شود . مهمترین علل بروز خطا در سهمیه بندی وزنی عوامل زیر هستند:

۱- خطاها درحین طراحی و محاسبات
۲- خطاهای ساخت اجزاء سپرده شده به پیمانکاران
۳- خطاهای پوشش‌های بدنه (رنگ، سیمان و...)

با توجه به این موارد ضریب اطمینان بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- ضریب اطمینان وزنی = ۳ درصد وزن سبک برای کشتی‌های جدید
- برای کشتی‌های مشابه سازی شده مقدار حاشیه اطمینان کمتر است.
- محل عمودی وزن‌های اطمینان برابر $1.2KG$ بالاتر از کیل در نظر گرفته می‌شود که از نظر پایداری، اطمینان بیشتری حاصل شود(محل عمودی مرکز ثقل اثر قابل ملاحظه‌ای بر پایداری دارد).
- محل طولی وزن‌های اطمینان بر روی مرکز ثقل در نظر گرفته می‌شود.

رعایت حاشیه وزنی و تامین پایداری در کشتی‌های مسافربری از حساسیت بیشتری برخوردار است.

1 - *heavy oil*

بخش هفتم:

آزمایشات دریایی

❖ آشنایی با آزمایشات دریایی[۱]

کشتی‌ها پس از آب‌اندازی باید مجموعه‌ای از آزمایشات دریایی[۲] را بگذرانند به‌گونه‌ای که مورد تایید موسسه رده‌بندی و کارفرما قرار بگیرند. منظور از این آزمایشات، سنجش صحت طراحی و بررسی خصوصیات فنی کشتی است. سازمان بین‌اللملی دریانوردی(*IMO*[۳]) از سال ۱۹۹۳مجموعه‌ای از قوانین برای آزمایشات دریایی تدوین کرده که تا کنون چندین مرتبه مورد بازبینی قرار گرفته است. قوانین *IMO* کامل‌ترین مجموعه برای بررسی آزمایشات دریایی است که در اینجا مروری بر این آزمایشات می‌شود. استاندارد *ABS* نیز دارای توصیه‌هایی در این زمینه است. آشنایی با این آزمایشات از ضرورت‌های فنی رشته مهندسی دریایی و کشتی‌سازی است. مهمترین این آزمایشات که در حیطه مهندسی دریایی می‌باشند در ذیل ذکر می‌گردند:

۱- **آزمایش کجی**[۴]: منظور از انجام این آزمایش، تعیین موقعیت مرکز ثقل عمودی کشتی است. شرح کامل این آزمایش در قسمت هیدرواستاتیک و پایداری بیان شد.

۲- **آزمایش کشش سنگین**[۵]: منظور از این آزمایش، سنجش توانایی ایجاد تراست پروانه بخصوص در شرایط کاری سنگین است. این آزمایش برای یدک‌کش‌ها و کشتی‌های ماهیگیری که با شرایط کشش سنگین مواجه هستند، از اهمیت خاصی برخوردار است. شرح این آزمایش در قسمت هیدرودینامیک ارائه شد.

۳- **آزمایش سرعت مطابق استاندارد ABS، IMO و روش باراس**

تأمین سرعت حرکت کشتی، مهمترین عامل چانه‌زنی بین کارفرما و پیمانکار است که در صورت عدم تامین سرعت، برای آن جریمه‌های سنگینی تعیین شده و مالک می‌تواند کشتی را نپذیرد. تامین سرعت مطلوب به معنای کارایی شکل بدنه، سیستم رانش، موتور و پروانه است. اگر امکان‌پذیر باشد، مسیر حرکت کشتی با جهت وزش باد تطبیق داده می‌شود. از آنجا که در آزمایشات دریایی، آبخور کشتی کمتر از حداکثر آبخور است لذا سرعت آزمایش شده حدود ۱-۰/۷۵ گره بیشتر از حداکثر سرعت توافق شده باید بدست آید که البته وابسته به تفاوت آبخور است. ملاحظات زیر را باید برای انجام آزمایش در نظر داشت:

۱- آزمایشات باید فوراً پس از خروج کشتی از داک انجام شوند چراکه بدنه تمیز بوده و هنوز جلبک نگرفته است. اگر مدت طولانی پس از آب-اندازی آزمایش انجام شود، حداکثر سرعت بدست نخواهد آمد.

۲- عمق آب در محل آزمایش باید عمیق باشد در غیر اینصورت حداکثر سرعت بدست نمی‌آید. عرض محل آزمایش نیز نباید از یک حد معین کمتر نباشد. حداقل عمق و عرض دریا در حین انجام آزمایش برای کشتی‌های مختلف اگر از اعداد جدول۵-۲۴ بیشتر باشد، آب عمیق و غیر محدود محسوب می‌شود. در این جدول، T مقدار آبخور و B مقدار عرض بدنه کشتی است.

Ship type	*Approximate* C_B	*Width of influence,* F_B	*Depth of influence,* F_D
ULCCs	0.850	8.08 × B	5.48 × T
VLCCs	0.825	8.29 × B	5.70 × T
Oil Tankers	0.800	8.51 × B	5.93 × T
Bulk Carriers (small)	0.775	8.74 × B	6.18 × T
General Cargo ships	0.700	9.53 × B	7.06 × T
Passenger Liners	0.625	10.50 × B	8.18 × T
Container ships	0.575	11.27 × B	9.12 × T
Tugs	0.500	12.69 × B	10.93 × T

جدول ۵-۲۴ : حداقل عمق و عرض دریا با توجه به نوع و آبخور کشتی

۱- منابع: [۴ و ۷ و ۱۰]

2 -Sea Trials
3 - International Maritime Organisation
4 - *Inclining test*
5 - Bollard pull

از رابطه زیر نیز برای محاسبه حداقل عمق دریا برای آزمایشات در آب عمیق می‌توان استفاده کرد:

$$d = \frac{4.44}{C_B^{1.3}} \times T$$

که اگر آبخور (T) بر حسب متر باشد، عمق دریا (d) نیز بر حسب متر بدست می‌آید.

۳- پروانه باید کاملاً در آب غوطه‌ور باشد در غیر اینصورت بیرون زدن لبه پره‌ها از سطح آب و پدیده سرخوردن پروانه باعث کاهش سرعت می‌گردد. از آنجا که آزمایش سرعت در آبخور سبک یا آبخور کمتر از حداکثر آبخور انجام می‌شود لذا باید به این مهم توجه داشت.

۴- فاصله از ساحل باید حتی‌المقدور ثابت باشد تا اثرات عمق و جزر و مد یکسان باشد سرعت ثابت طی شده در طول ۱ مایل اندازه‌گیری می‌شود. در ابتدا و انتهای دو طرف فاصله ۱ مایلی، دو نفر حضور دارند که زمان را ثبت می‌کنند. از زمان و فاصله طی شده سرعت بدست می‌آید.

۵- قبل از رسیدن به محل فاصله ۱ مایلی، باید فاصله کافی برای سرعت گرفتن کشتی وجود داشته باشد به گونه‌ای که وقتی کشتی به ابتدای فاصله ۱ مایلی می‌رسد، باید به حداکثر سرعت خود رسیده باشد و فاصله ۱ مایلی را در حداکثر سرعت طی کند و با همین سرعت از نقطه انتهایی ۱ مایلی عبور کند. لذا در انتهای مسیر نیز باید فاصله کافی برای توقف کشتی وجود داشته باشد. فاصله سرعت گرفتن و متوقف شدن وابسته به نوع کشتی است ولی برای هریک حدود ۲ مایل فاصله نیاز است.

۶- آزمایش سرعت ۸ – ۴ مرتبه تکرار می‌شود تا خطاهای اندازه‌گیری به حداقل برسد.

۷- باید حداقل ۳ نفر به صورت مستقل در هر آزمایش، سرعت را ثبت کنند تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود.

۸- ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری سرعت وجود دارد. وجود دو ایستگاه ثبت کنار ساحل یکی از روشهای موجود است که برای کشتی‌های کوچک با آبخور کم کاربرد دارد. کشتی‌های بزرگ را باید در دریا و دور از ساحل آزمایش کرد لذا ایستگاه ساحلی کاربرد ندارد و از روشهای دیگر ثبت سرعت باید استفاده کرد مانند روشهای لیزری، صوتی و رادیویی. سیستم اندازه‌گیری سرعت رادیویی بدلیل عدم تأثیرپذیری از شرایط جوی بسیار مناسب است.

۹- مسیر کشتی در حین آزمایش باید مستقیم باشد لذا زاویه سکان برای اصلاح مسیر ممکن است به اندازه ۵ درجه به طرفین تغییر کند.

۱۰- آبخور کشتی در حین آزمایش باید حتی‌المقدور نزدیک به آبخور معادل مدل آزمایش شده در حوضچه کشش باشد تا بتوان ارتباطی بین آزمایش مدل و آزمایش کشتی واقعی برقرار کرد و میزان خطا را تخمین زد و آن را به حداکثر آبخور کشتی تعمیم داد.

عوامل زیر در آزمایش سرعت، اندازه‌گیری و ثبت خواهند شد:

۱- حداکثر سرعت حرکت کشتی

۲- دور (rpm) پروانه و موتور در سرعتهای مختلف

۳- سرعت و جهت وزش باد

۴- شرایط دریایی: ارتفاع موج دریا، عمق دریا و چگالی آب دریا، وضعیت جزر و مد، سرعت جریانات زیرآبی

۵- آبخور کشتی در سینه، وسط و پاشنه

۶- فاصله کشتی از ساحل

۷- اندازه‌گیری تراست پروانه

❖ روشهای حذف اثرات جزر و مد و جریانات دریایی از نتایج آزمایش سرعت

سرعت اندازه‌گیری شده همواره متأثر از میزان جزر و مد و جریانات دریایی زیرآبی است لذا به همین دلیل است که اغلب، سرعت‌های بدست آمده در تکرار آزمایش یکسان نخواهند بود. مثلاً اگر آزمایش ۶ مرتبه تکرار شود، ۶ عدد مختلف بدست خواهد آمد. در اینجا به روش کلی برای حذف این اثرات و رسیدن به سرعت واقعی کشتی اشاره خواهد شد. در این روش باید بازه زمانی بین اندازه‌گیری‌های سرعت یکسان باشد مثلاً اگر بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای باشد و ۴ سرعت مختلف (V_1 , V_2 , V_3 , V_4) اندازه‌گیری شده باشند برای سرعت واقعی کشتی داریم:

$$True\ ship\ speed = \frac{V_1 + 3V_2 + 3V_3 + V_4}{8}$$

عدد ۸ حاصل جمع اعداد ۱ ، ۳، ۳ و ۱ است و ضرایب استفاده شده همان ضرایب سیمسون هستند. اگر ۶ سرعت اندازه‌گیری شده باشند:

$$True\ ship\ speed = \frac{V_1 + 5V_2 + 10V_3 + 10V_4 + 5V_5 + V_6}{32}$$

عدد ۳۲ حاصل جمع اعداد ۱، ۵، ۱۰، ۱۰، ۵ و ۱ است که آن نیز از روش‌های سیمسون است.

مثال) یک کشتی تازه ساخته شده عازم آزمایشات دریایی سرعت شده و ۶ مرتبه این آزمایش را در فواصل ۳۰ دقیقه‌ای انجام داده است. آزمایشات از ساعت ۱۲ ظهر شروع شده‌اند. مطابق اطلاعات استخراج شده از جدول زیر، مقدار سرعت متوسط و سرعت

واقعی را بدست آورید.

Time of day in middle of run	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30
Direction of each run	North	South	North	South	North	South
Measured ship speed, V (kt)	16.08	15.61	16.71	15.06	17.11	14.67
Tidal speed and direction	0.08 N	0.39 N	0.71 N	0.94 N	1.11 N	1.38 N

حل)

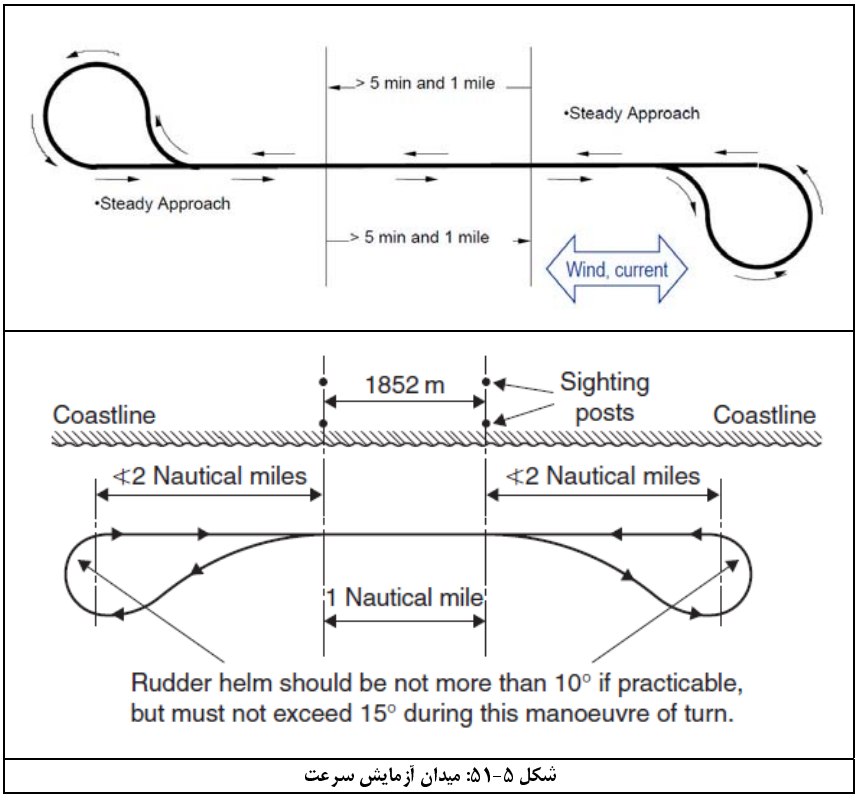
$$mean\ speed = \frac{16.08+15.61+16.71+15.06+17.11+14.67}{6} = 15.865\ knot$$

در این حالت برای محاسبه سرعت متوسط، یک میانگین‌گیری ساده انجام شده است و روابط خطی فرض شده‌اند ولی در واقع اثر جزر و مد به صورت سهمی است. روش سیمسون این رابطه سهمی را اعمال می‌کند و در واقع اثرات جزر و مد را خود بخود با رابطه سهمی شکل حذف می‌کند. لذا برای سرعت واقعی داریم:

$$True\ speed = \frac{(1\times16.08)+(5\times15.61)+(10\times16.71)+(10\times15.06)+(5\times17.11)+(1\times14.67)}{32}$$

$$= 16.00\ knot$$

اگر بازه‌های زمانی یکسان نباشد باید از روش‌های دیگری غیر از سیمسون استفاده کرد. مطابق شکل ۵-۵۱ کشتی باید حداقل مسیر به طول ۱ مایل را طی کند و حداقل ۵ دقیقه در حداکثر سرعت یا سرعت مطلوب بطور پیوسته حرکت کند.



شکل ۵-۵۱: میدان آزمایش سرعت

برای انجام آزمایش سرعت باید شرایط زیر فراهم باشد که در دو حالت کلی بیان می‌شود:

الف- شرایط فوق العاده و پذیرش عالی

۱) شرایط دریایی[1] اغلب کمتر از ۳ و در برخی مواقع کمتر از ۵ باشد. اگر طول کشتی بزرگتر از ۱۰۰ متر باشد، شرایط دریایی می‌تواند حداکثر ۶

1 Sea state

باشد.

۲) برای شرایط سرعت باد، برای کشتی‌های با طول کمتر از ۱۰۰ متر، باید عدد بیوفورت[1] (عدد شرایط سرعت باد) کمتر از ۵ و برای کشتی-های با طول بزرگتر از ۱۰۰ متر، کمتر از بیوفورت ۶ (سرعت باد ۲۰ گره) باشد. استاندارد *ABS* جدول۵-۲۵ را برای تشخیص قدرت دریایی و شرایط باد (بیوفورت) ذکر کرده است.

Beufort	Sea state	Description term Wind	Wave	Wind sp. [knots] min	Wind sp. [knots] max	Wave height [m] Probable	Wave height [m] Max
0	0	Calm	Calm	0	1	0	0
1	0	Light air	Ripples	1	3	0.1	0.1
2	1	Light breeze	Small wavelets	3	6	0.2	0.3
3	2	Gentle breeze	Large wavelets	6	10	0.6	1
4	3	Moderate breeze	Small waves	10	16	1	1.5
5	4	Fresh breeze	Moderate waves	16	21	2	2.5
6	5	Strong breeze	Large waves	21	27	3	4
7	6	Near gale	Large waves	27	33	4	5.5
8	7	Gale	Moderately high waves	33	40	6	7.5
9	8	Strong gale	High waves	40	47	7	10
10	9	Storm	Very high waves	47	55	9	12.5
11	9	Violent storm	Exceptionally high waves	55	63	11.5	16
12	9	Hurricane	Exceptionally high waves	63	71	14	16
13	9	Hurricane	Exceptionally high waves	71	80	>14	>16
14	9	Hurricane	Exceptionally high waves	80	89	>14	>16
15	9	Hurricane	Exceptionally high waves	89	99	>14	>16

جدول ۵-۲۵: جدول قدرت دریایی (فورس) و شرایط سرعت باد (بیوفورت)

۳) شرایط عمق آب: عمق آب حداقل ۳ برابر آبخور باشد یا از رابطه یا جدول ارائه شده برای آب عمیق بیشتر باشد.

۴) شرایط سرعت جریانات زیرآبی: سرعت جریانات زیرآبی کمتر از ۲ گره باشد.

ب- شرایط معمولی و پذیرش عادی

۱- شرایط دریایی: بدون موج یا حداکثر ارتفاع موج ۱۰ سانتی‌متر

۱- شرایط سرعت باد: بدون باد یا حداکثر بیوفورت ۲ (سرعت باد کمتر از ۶ متر بر ثانیه)

۲- شرایط عمق: کاملا عمیق (حداقل عمق ۴ برابر آبخور)

۱- شرایط سرعت جریانات زیرآبی: بدون جریانات زیرآبی

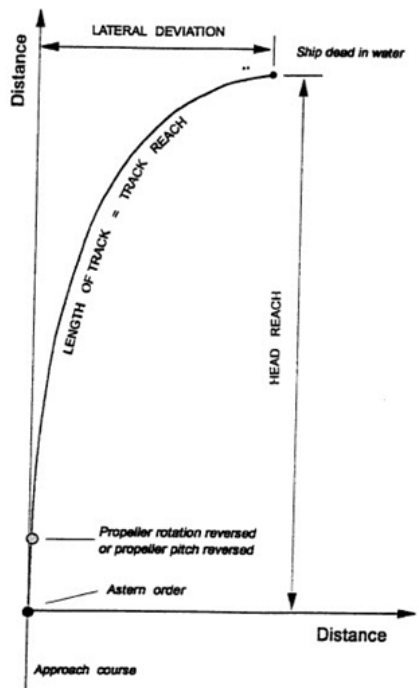
در صورت عدم تطابق شرایط آزمایش با این شرایط، باید اصلاحاتی انجام گیرد که در *IMO-15016* نحوه اعمال آن بیان شده است.

۴- آزمایش توقف

این آزمایش مطابق شکل۵-۵۲ برای استخراج دو عامل اصلی بیان می-گردد:

۱- فاصله طی شده تا توقف کامل از زمان صدور فرمان توقف موتور یا فرمان کارکرد برعکس موتور (شرایط کاملا رو به عقب)

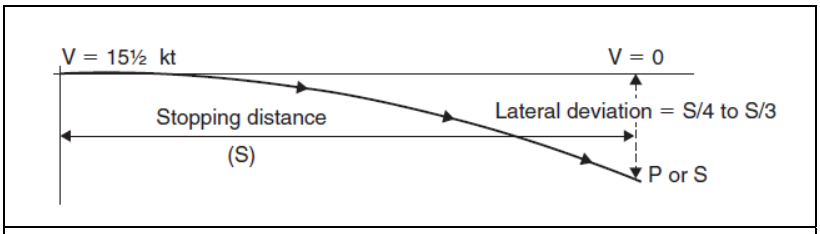
۲- فاصله عرضی طی شده تا توقف کامل : در این شرایط باید کشتی قبل از زمان توقف به حداکثر سرعت به صورت پایدار رسیده باشد. سکان نیز بدون زاویه است. در برخی از آزمایشات نیز برای توقف سریع کشتی، سکان را به یک طرف می‌دهند تا نیروی مقاومت بیشتری برای توقف ایجاد کند یا گام پروانه را یکباره برعکس می‌کنند. در این شرایط، کشتی فاصله عرضی زیادی را



شکل ۵-۵۲: مسیر طی شده توسط کشتی در آزمایش توقف

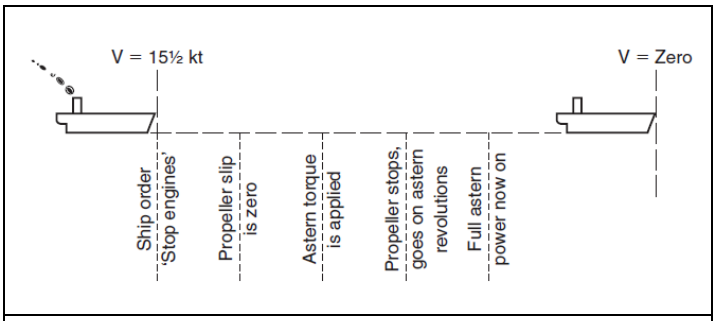
1 Beufort *number*

طی می‌کند تا متوقف شود که این فاصله $\frac{1}{3}$ – $\frac{1}{4}$ فاصله توقف کشتی است اما فاصله طولی توقف[1] کمتر خواهد شد (شکل۵–۵۳).



شکل ۵–۵۳ :فاصله عرضی طی شده در حین توقف در یک کشتی نفتکش

مراحل انجام آزمایش توقف را می‌توان مطابق مراحل زیر در نظر گرفت (شکل ۵–۵۴).



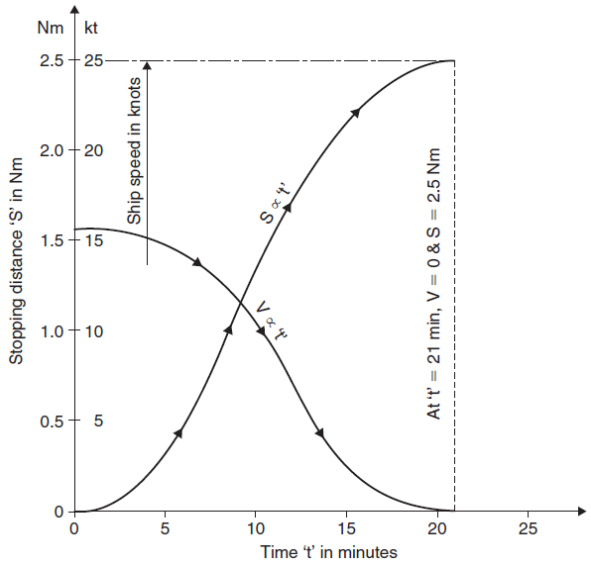
شکل ۵–۵۴: مراحل توقف کشتی در آزمایش توقف

۱– ابتدا زاویه سکان صفر و همواره در این زاویه حفظ می‌شود.
۲– کشتی به حداکثر سرعت خود می‌رسد.
۳– صدور فرمان توقف کارکرد موتور
۴– توقف چرخش پروانه و صفر شدن تراست رو به جلو
۵– اعمال گشتاور معکوس روی پروانه و ایجاد نیروی رو به عقب
۶– توقف کامل کشتی

باید توجه داشت که در سیستم رانش توربین، حداکثر توان رو به عقب می‌تواند تا ۴۰ درصد حداکثر توان رو به جلو باشد. همچنین در سیستم رانش دیزل، حداکثر توان رو به عقب می‌تواند تا ۸۰ درصد توان رو به جلو باشد. بنابراین فاصله توقف یک کشتی با سیستم رانش دیزل، کمتر از فاصله توقف با سیستم رانش توربین است. فاصله توقف با دیزل مطابق نتایج تجربی حدود ۷۰ درصد فاصله توقف با توربین است. زمان توقف نیز بسیار حائز اهمیت است. زمان و فاصله توقف جهت جلوگیری از تصادم کشتی‌ها بسیار اهمیت دارد.

1 - Crash *distance*

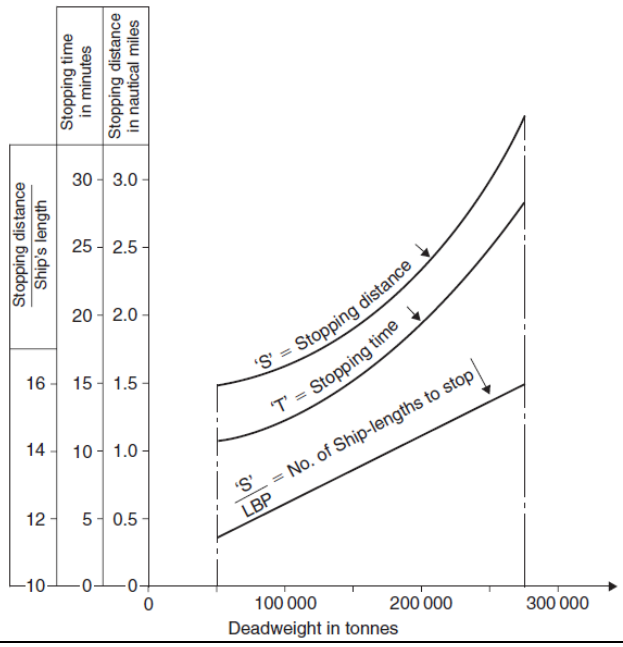
مثال) زمان و فاصله توقف در نفتکش‌ها با سرعت حدود ۱۶ – ۱۵/۵ گره و ضریب بلوکی ۰/۸۲۵ – ۰/۸ با زاویه صفر سکان و سیستم رانش توربین در شکل ۵-۵۵ و ۵۶ و جدول۵-۲۶ارائه شده است.



شکل ۵-۵۵: نمودارهای فاصله توقف کشتی نفتکش ۲۱۵۰۰۰ تنی

Oil Tanker dwt (tonnes)	*Stopping distance (S) in nautical miles*	*S/LBP or lengths to stop each tanker*	*Time to stop each tanker (min)*
50 000	1.49	11.5	11.0
100 000	1.60	12.5	12.0
150 000	1.89	13.5	15.0
200 000	2.36	14.5	19.5
250 000	3.00	15.5	25.0

جدول ۵-۲۶ : فاصله و زمان توقف نفتکش‌ها با تناژهای مختلف



شکل ۵-۵۶: نمودارهای توقف کشتی‌های نفتکش با سیستم رانش توربین بخار در تناژهای مختلف

ملاحظه می‌شود برای یک کشتی با سرعت ۱۵/۵ گره، فاصله توقف ۲/۵ مایل (حدود ۵ کیلومتر) و زمان توقف حدود ۲۰ دقیقه است که در مقایسه با اتومبیل‌ها و قطارها، فاصله و زمان بسیار زیادی است که لزوم احتیاط در کشتی‌ها را آشکار می‌کند. از نمودار شکل ۵-۵۶ ملاحظه می‌شود که نسبت طول توقف به طول کشتی بر حسب تناژ متفاوت است و از ۱۱ تا ۱۶ تغییر می‌کند و زمان توقف نیز ۱۰ تا ۳۰ دقیقه و فاصله توقف نیز ۱/۵ تا ۳/۵ مایل دریایی متغیر است.

❖ محاسبه مشخصات توقف کشتی در روش باراس[1] [۴]

این روابط در سال ۱۹۹۵ توسط باراس ارائه شد. فاصله توقف کشتی بر حسب مایل دریایی عبارتست از: $S = 0.38\left(\frac{dwt^2 - dwt}{100\,000}\right) + 1.6$

فاصله توقف بر حسب چند برابر طول کشتی: $S_L = \frac{S}{LBP} = 2\left(\frac{dwt}{100000}\right) + 10.5$

زمان توقف بر حسب دقیقه نیز از رابطه زیر بدست می‌آید: $T = 2.67\left(\frac{dwt}{100000}\right)^2 - 0.67\left(\frac{dwt}{100000}\right) + 10$

اگر آب کم عمق باشد، زمان و فاصله توقف می‌تواند تا ۲/۵ برابر افزایش یابد که نشان‌دهنده وضعیت بحرانی‌تر در آبهای کم‌عمق است.

❖توانایی توقف کشتی‌های بزرگ مطابق قوانین IMO

فاصله افقی طی شده تا توقف کامل، از اهمیت خاصی برخوردار است بخصوص برای کشتی‌های بزرگ مانند نفتکش‌ها که در شرایط بروز سانحه و تصادم می‌تواند بسیار مهم و حیاتی باشد. برای محاسبه فاصله توقف در یک مسیر مستقیم (مسیر در راستای طول کشتی)، عوامل متعددی دخیل هستند از جمله نوع کشتی (شکل بدنه کشتی)، میزان کارکرد موتور در حرکت رو به عقب (توان رو به عقب) و زمان رسیدن به حداکثر تراست رو به عقب. با این ملاحظات، سازمان *IMO* رابطه زیر را ارائه کرده است:

$$S = A \log_e(1+B) + C$$

S: فاصله طی شده تا توقف کامل در راستای طول کشتی که ضریبی از طول کشتی است و A: ضریب وابسته به نوع کشتی (جدول ۴-۲۷) است.

Ship type	Coefficient A
Cargo ship	5-8
Passenger/car ferry	8-9
Gas carrier	10-11
Products tanker	12-13
VLCC	14-16

جدول ۵-۲۷: ضریب وابسته به نوع کشتی

B: ضریب وابسته به میزان توان رو به عقب (جدول ۵-۲۸)

Type of machinery	Percentage power astern	Coefficient B	Log (1+B)
Diesel	85%	0.6-1.0	0.5-0.7
Steam turbine	40%	1.0-1.5	0.7-0.9

جدول ۵-۲۸: ضریب وابسته به میزان توان رو به عقب

C: ضریب وابسته به زمان رسیدن به حداکثر سرعت رو به عقب (جدول ۵-۲۹) که البته اگر سرعت کشتی بیش از ۱۵ گره باشد یا دستیابی به رانش رو به عقب بیشتر از ۶۰ ثانیه طول بکشد، ضریب C افزایش خواهد یافت.

Ship length (metres)	Time to achieve astern thrust (s)	Ship speed (knots)	Coefficient C
100	60	15	2.3
200	60	15	1.1
300	60	15	0.8

جدول ۵-۲۹: ضریب وابسته به زمان رسیدن به حداکثر سرعت رو به عقب

مثال) یک کشتی VLCC با طول ۳۰۰ متر و سرعت ۱۵ گره و رانش توربین بخار و با فرض زمان یک دقیقه‌ای برای تراست کامل رو به عقب در مانور توقف خواهیم داشت:

1 - Barras

A=16 , B=1.5 , C=0.8

$$S = 16\log_e(1+1.5) + 0.8 = 15.5\, ship\, lengths$$

یعنی توانایی توقف این کشتی ۱۵/۵ برابر طول کشتی باید باشد. در آزمایش توقف، طول توقف باید حدودا با این عدد برابر باشد.

۵- آزمایش حرکات کشتی در امواج[1]

این آزمایش برای بررسی رفتار شناور در معرض امواج انجام می‌شود که عوامل متعددی از آن استخراج می‌گردد. این آزمایشات تنها برای شناورهای تندرو انجام می‌شود. *IMO* دستورالعمل‌های جامعی در این زمینه ارائه کرده است که می‌توان به آنها مراجعه کرد(*IMO-185E*). در هنگام آزمایش، شتاب‌ها بوسیله شتاب‌سنج‌های دقیق و زاویه‌ها و تغییر جهات با استفاده از ژیروسکوپ و جهت‌یاب ثبت می‌گردند.

۶- آزمایش صدای پروانه[2] **و خوردگی فیزیکی**[3] **پروانه:** این آزمایش برای کشتی‌های نظامی از اهمیت خاصی برخوردار است.

۷- آزمایشات مانورپذیری: قوانین *IMO* در مورد آزمایشات مانور، جامع و مدون است. آزمایشات مانور شامل بخش‌های زیر است:

الف) آزمایش دایره چرخش[4]

ب) آزمایش حرکت زیگزاگ[5]

ج) آزمایش مانور مارپیچ[6]

د) آزمایش زیگزاگ بسیار کوچک[7]

ن) آزمایش یدک کشی

و) آزمایش حفظ مسیر و پایداری دینامیکی

سه آزمایش آخر برای شناورهای خاص انجام می‌شود ولی دو مورد اول برای تمامی شناورها و کشتی‌های تجاری انجام می‌شوند. موارد زیر باید کنترل شود:

- زاویه سکان
- دور پروانه
- تعیین موقعیت کشتی
- جهت حرکت رفت و برگشت
- زاویه خنثی سکان: زاویه خنثی سکان لزوماً صفر درجه نیست. در یک کشتی تک‌پروانه‌ای راستگرد این زاویه سکان در ۱ درجه به راست تنظیم می‌شود.
- کشتی در آبخور سنگین یا بیشترین آبخور قابل تامین یا آبخوری معادل آبخور آزمایش مدل قرار دارد و بدون شیب اولیه است (۵٪ اختلاف آبخور مجاز).

شرایط محیطی انجام آزمایش نیز باید کاملا تحت کنترل باشد از جمله:

- سرعت و جهت وزش باد (عدد بیوفورت) با استفاده از بادسنج: نباید بیش از بیوفورت ۵ باشد.
- ارتفاع امواج یا شرایط دریا (فورس دریایی) با استفاده از بویه‌های موج نگار: نباید بیش از فورس ۴ باشد.
- عمق آب در محل انجام آزمایش با تجهیزات عمق‌سنجی صوتی باید بیش از سه برابر آبخور باشد.
- سرعت جریانات زیرآبی که باید یکنواخت باشد.

در ذیل به مشخصات آزمایش چرخش و زیگزاگ و مانور مارپیچ اشاره می‌شود:

الف)آزمایش دایره چرخش

در این آزمایش کشتی در حداکثر سرعت قرار دارد و زاویه سکان روی زاویه ۳۵ درجه یا حداکثر زاویه سکان، به چپ یا به راست تنظیم می‌شود. اطلاعات اساسی این آزمایش سه عامل اصلی زیر هستند (مطابق شکل ۵-۵۷):

۱- قطر کلی[8] دایره چرخش (*TDC*)

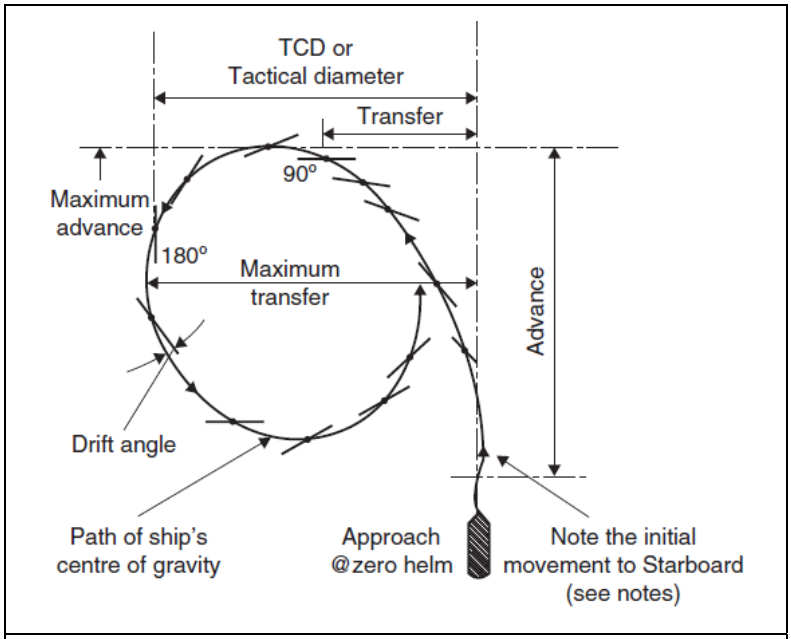
۲- فاصله پیشروی[9] تا انجام چرخش کامل

۳- فاصله انتقال[10] تا انجام چرخش کامل

قطر کلی دایره چرخش حدود ۴-۳ برابر طول بین دو عمود شناور باید بدست آید در غیر اینصورت مساحت و کارایی سکان در حد مطلوب نیست و باید اصلاح شود: $TDC = (3-4).LBP$

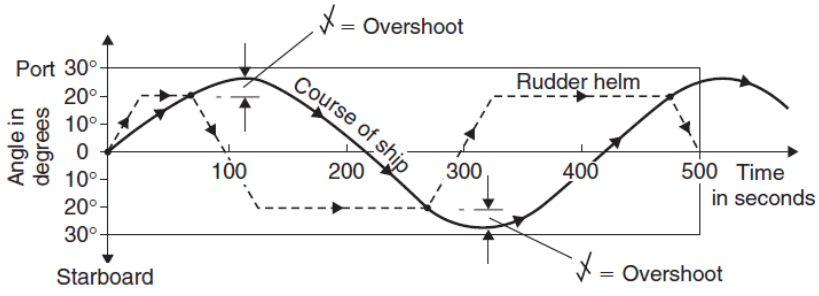
1 - *Seakeeping* test
2 - *Noise*
3 - *Erosion*
4 - Turning *circles*
5 - Zig-*zag* test
6 -*Spiral* test
7 - Very *small* zig-zag test
8 - Tactical diameter circle (TDC)
9 - Advance distance
10 - Transfer distance

اگر کشتی به سمت چپ گردش کند، به سمت راست غلتش (هیل) می‌کند و همچنین بالعکس و علت آن نیروهای گریز از مرکز است. چپ‌گرد یا راست‌گرد بودن پروانه نیز روی قطر دایره چرخش موثر است. پروانه اغلب کشتی‌ها در دید از عقب کشتی، راستگرد است. همچنین در آبهای کم‌عمق، قطر دایره چرخش می‌تواند تا ۲ برابر افزایش یابد.



شکل ۵-۵۷: آزمایش دایره چرخش

ب) آزمایش حرکت زیگزاگ: این آزمایش برای بررسی کارآیی سکان و مانورپذیری شناور انجام می‌شود. در این حالت، شناور به یک سرعت ثابت می‌رسد و زاویه سکان صفر درجه (یا زاویه خنثی سکان) است. سپس سکان بتدریج به طرف چپ یا راست تا یک زاویه مشخص جابجا می‌شود و این عمل تکرار می‌گردد به گونه‌ای که حداقل ۲ مسیر زیگزاگ طی شود (شکل ۵-۵۸). تغییر زاویه سکان می‌تواند ابتدا از چپ یا راست شروع شود.



شکل ۵-۵۸: آزمایش حرکت زیگزاگ و نمایش عوامل موثر

تغییر زاویه سکان در دو حالت کلی انجام می‌شود:

- آزمایش $10^\circ/10^\circ$
- آزمایش $20^\circ/20^\circ$

نمونه‌ای از نحوه انجام این آزمایش در شکل ۵-۵۸ برای حالت $20^\circ/20^\circ$ ارائه شده است. محور عمودی این نمودار، زاویه سکان و زاویه راستای کشتی از حالت اولیه است و محور افقی، زمان می‌باشد. نمودار ذوزنقه‌ای، تغییر زاویه سکان را نشان می‌دهدکه بصورت ±۲۰ درجه تغییر کرده است. نمودار سینوسی نیز نمودار تغییر زاویه راستای کشتی است. وقتی زاویه سکان به ۲۰ درجه رسید، تا مدتی در آن زاویه حفظ می‌شود تا زاویه راستای کشتی نیز به ۲۰ درجه برسد. پس از آن زاویه سکان به ۲۰- درجه تغییر می‌یابد و باز هم در آن زاویه تا زمانی حفظ می‌شود که زاویه راستای کشتی هم۲۰- درجه شود. ملاحظه می‌شود که با تغییر مسیر سکان، کشتی فوراً تغییر مسیر نمی‌دهد بلکه مقداری بیرون‌زدگی[1] هم دارد. این بیرون‌زدگی بین

1 - overshoot

۱۰–۸ درجه است که در شکل ۵–۵۸ ملاحظه می‌شود. هرچه مقدار بیرون‌زدگی کمتر باشد، کشتی پایدارتر است. این فرآیند، حداقل برای دو سیکل زیگزاگ انجام می‌شود یا حداقل بایستی دو دقیقه به طول بیانجامد.

اطلاعات خروجی این آزمایش عبارتست از:

- زمان تغییر زاویه سکان
- زمان رسیدن راستای کشتی به اندازه زاویه سکان
- مقدار بیرون‌زدگی (تفاضل تغییر زاویه سکان با تغییر راستای کشتی)
- زمان طی شدن یک زیگزاگ کامل

استاندارد *ABS* برای آزمایش زیگزاگ موارد زیر را بیان داشته است:

- وقتی کشتی در حداکثر سرعت در حال حرکت است، تغییر زاویه سکان از ۳۵ درجه در یک سمت به ۳۰ درجه در سمت دیگر، نباید بیش از ۲۸ ثانیه به طول بیانجامد.
- وقتی کشتی در حداکثر سرعت یا سرعت ۷ گره (هر کدام که بیشتر است)، در حال حرکت است، تغییر زاویه سکان از ۱۵ درجه در یک سمت به ۱۵ درجه در سمت دیگر، نباید بیش از ۶۰ ثانیه طول بکشد.

فرم آزمایشات مانور *IMO* در انتهای این بخش ارائه شده است.

ج) آزمایش مانور مارپیچ

هدف از انجام این آزمایش بررسی میزان پایداری دینامیکی یا پایداری جهتی کشتی[1] است. در این آزمایش، کشتی در حداکثر سرعت یا یک سرعت معین حرکت می‌کند و سکان ابتدا در زاویه ۱۵ درجه به راست است و این زاویه تا جایی حفظ می‌شود که نرخ چرخش کشتی یکنواخت شود. سپس زاویه سکان تا ۱۰ درجه در همان سمت، کاهش می‌یابد و مجدداً این زاویه حفظ می‌شود تا جایی که نرخ چرخش یکنواخت شود. سپس سکان به زاویه ۱۵ و ۱۰ درجه به چپ می‌چرخد و این فرآیند تکرار می‌شود. در طول آزمایشات، سرعت کشتی ثابت می‌ماند. با استخراج میزان تغییر زاویه سکان در هر ثانیه، نموداری شبیه شکل ۵–۵۹ ترسیم می‌گردد. فاصله *O-T* مربوط به چرخش سکان به سمت راست و *O-U* مربوط به سمت چپ است. فاصله بین T و U نشان‌دهنده عدم تعادل هیدرودینامیکی است. اگر فاصله *U-T* صفر باشد، کشتی دارای پایداری جهتی مناسبی است.

۸- سایر آزمایشات

آزمایشاتی که تا کنون بیان شده است، مهمترین آزمایشات دریایی است که در کنار مجموعه وسیعی از آزمایشات برقی، مکانیکی و تأسیساتی انجام می‌شود. مجموعه دیگری از آزمایشات مرتبط با تجهیزات دریایی به صورت زیر انجام می‌گردد:

۱- آزمایشات وینچ لنگر، زنجیر و لنگر

۲- آزمایشات حرکت رو به عقب کشتی: در این آزمایش کشتی در سرعتهای مختلف رو به عقب حرکت می‌کند و سکان در زاویه ۱۵ درجه به چپ و راست تغییر زاویه می‌دهد. مشخصات تغییر مسیر و زمان و سرعت رو به عقب با توجه به دور موتور اندازه‌گیری می‌شود.

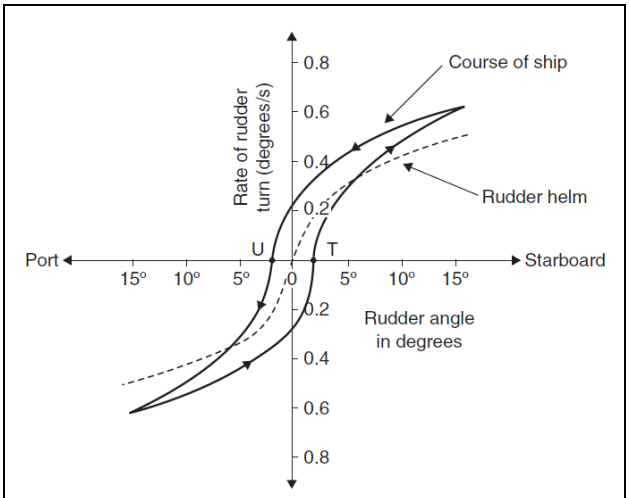
۳- آزمایشات فرمان‌پذیری سکان: در این آزمایش سکان باید بتواند در حداکثر سرعت حرکت کشتی، از زاویه ۳۵ درجه به سمت چپ، ظرف ۲۸ ثانیه به زاویه ۳۰ درجه به سمت راست برسد (تغییر زاویه ۶۵ درجه ظرف ۲۸ ثانیه).

۴- آزمایشات تراسترهای عرضی

۵- آزمایشات بالک‌های متعادل‌کننده (استابلایزر)

۶- آزمایشات ناوبری و مخابراتی کشتی

۷- آزمایشات مخازن: در این آزمایشات، نفوذناپذیری مخازن و عدم نشت آب از یک طرف دیواره (بالکهد) به طرف دیگر آن کنترل می‌شود. نفوذناپذیری توسط پاشش آب توسط شلنگ‌های پرفشار آتش‌نشانی به محل درزها انجام می‌شود.



شکل ۵–۵۹ : نمودار استخراج شده در مانور مارپیچ

1 - directional stability

۸- آزمایشات ماشین‌آلات اصلی و فرعی

۹- آزمایشات قایق نجات و رهاسازی قایق نجات: در این آزمایش ابتدا صحت قایق نجات بررسی می‌شود و سپس یکبار از روی عرشه یا روبناسازی پرتاب می‌شود تا صحت عملکرد آن بررسی شود.

۱۰- آزمایشات تجهیزات رفاهی روبناسازی: کلیه تجهیزات رفاهی داخل روبناسازی (داخل اتاق‌ها، راهروها، اماکن تجمع عمومی، ناهارخوری، آشپزخانه و غیره) مطابق قوانین *IMO* بررسی می‌شوند.

۱۱- آزمایشات مصرف سوخت در دریا: برای این آزمایش، کشتی ۲۴ – ۶ ساعت به طور پیوسته در دریا حرکت می‌کند و میزان سوخت مصرف شده اندازه‌گیری می‌شود.

حکمت وزیدن باد،
رقصاندن شاخه‌ها نیست،
امتحان ریشه‌هاست...

FORM FOR REPORTING MANOEUVRING DATA TO IMO

Administration: _____ **Reference No.*** ☐

SHIP DATA: (FULL LOAD CONDITION)

Ship type*	☐			L/V	☐ sec
L/B	☐	B/T	☐	C_B	☐
Rudder type*	☐				
Total rudder area/LT	☐			Number of rudders	☐
Propeller type*	☐			Trim	☐
No. of propellers	☐				
Engine type*	☐			Ballast condition	☐

TRIALS DATA: (ENVIRONMENTAL CONDITION)

Water depth/trial draught	☐
Wind: Beaufort number	☐
Wave: Sea state	☐

MANOEUVRING DATA:

Loading condition: Tested at Full load ☐ Tested at partial load and corrected ☐

	TEST RESULTS PORT	TEST RESULTS STBD		IMO CRITERIA
Turning circle:				
Advance	☐	☐	Ship lengths	4.5
Tactical diameter	☐	☐	Ship lengths	5
Zig-Zag:				
10 deg/10 deg	**PORT**	**STBD**		
1st overshoot angle	☐	☐	deg	☐
2nd overshoot angle	☐	☐	deg	☐
20 deg/20 deg	**PORT**	**STBD**		
1st overshoot angle	☐	☐	deg	25
Initial turning:				
	PORT	**STBD**		
Distance to turn 10 deg with 10 deg rudder	☐	☐	Ship lengths	2.5
Stopping distance:				
Track reach	☐	☐	Ship lengths	15 to 20

منابع قسمت پنجم: معماری و جانمایی کشتی

1) Book: Practical Ship design / G.M.Watson/ 2002
2) Book: Ship Design for Efficiency and Economy/ H.Schneekluth & V.Bertram/ 1998
3) Book: Ship Design and Construction
4) Book: Ship Design & Performance/ C.B.Barrass/ 2004
5) Document: BV Standard/
6) Document: GL Standard/
7) Document: ABS Standard
8) Document: LR Standard/
9) Document: DNV Standard/
10) Document: IMO Rules/
11) Book: Mechanics of Marine Vehicles/ B.R.Clayton-E.D.Bishop/1982
12) Book: Basic Ship Theory/ K.J.Rawson-E.C.Tupper/2001
13) Book: Modern Ship Design / T.C.Gillmer/1975
14) Book: Principles of Naval Architecture / E.N.Lewis/1988

۱۵) کتاب: هندبوک معماری/
۱۶) کتاب: معماری نویفرت/
۱۷) کتاب: اصول طراحی کشتی/ مهدی سیف-محمد سعید سیف/ ۱۳۷۳
۱۸) پایان نامه: جانمایی و معماری داخلی کشتی‌های تجاری/منیری‌پور، عامری/ راهنما: مونسان/ دانشگاه صنعتی مالک اشتر/ ۱۳۸۸
۱۹) کتاب: تحلیل پایداری شناورها/ محمد مونسان-فرهاد صفری/ ۱۳۸۷
۲۰) کتاب: اصول طراحی زیردریایی/ محمد مونسان/ ۱۳۸۳
۲۱) پایان‌نامه: انتخاب تجهیزات کشتی مطابق استانداردهای دریایی/ محمد خیری/ راهنما: مونسان/ دانشگاه صنعتی مالک اشتر/ ۱۳۸۸
۲۲) شناخت کشتی / محمدرضا نگهداری / ۱۳۸۸

قسمت ششم:

طراحی شناورهای تندرو سرشی

Design of
High speed Planing Vessel

- بخش اول:مقدمه: ماهیت سرش و مزایای آن
- بخش دوم: آشنایی با تعاریف و هندسه شناورهای سرشی
- بخش سوم: پدیده ناپایداری دینامیکی طولی تناوبی
- ضمیمه: طراحی هیدرودینامیکی بدنه شناورهای سرشی

بخش اول:
مقدمه: ماهیت سرش و مزایای آن

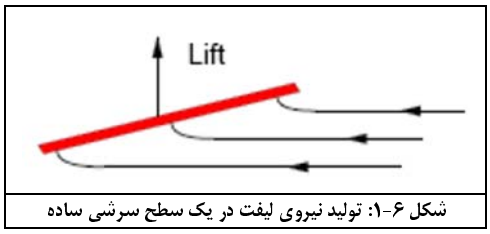
هدف این قسمت ارائه یک بینش اجمالی و مختصر در مورد طراحی شناورهای تندرو سرشی می‌باشد و برای مطالعات تکمیلی باید به منابع اصلی رجوع شود. رسیدن به سرعتهای بالا در دریا همواره از آرزوهای انسان بوده و تلاش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده که حاصل آن شناورهای تندرو امروزی مانند هیدروفویل کرافتها، هاورکرافت‌ها و شناورهای سرشی بوده است. شناورهای سرشی اصولاً به شناورهایی گفته می‌شود که بدنه آنها بر اثر سرش و سرخوردن روی سطح آب، نیروی لیفت مناسبی تولید می‌کند. این نیرو به گونه‌ای است که بخشی از بدنه شناور بر اثر آن از سطح آب جدا شده و سطح خیس و طول آبخور شناور به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این مسئله باعث می‌شود که سهم مقاومت ویسکوز به شدت کاهش یابد. از طرفی می‌دانیم که در سطح آب در سرعتهای بالا، مقاومت موج (شامل مقاومت موج‌سازی و مقاومت شکست موج) سهم قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. برای کاهش این مقاومت نیز شکل بدنه شناورهای سرشی به گونه‌ای طراحی می‌شود که دارای حداقل مقاومت موج‌سازی باشد. شناورهای سرشی جزء شناورهای تندرو و مدرن محسوب می‌شوند که دسته‌بندی انواع و مقایسه مزایا و معایب آنها در قسمت اول این کتاب ارائه شد. در قسمت سوم و در مباحث هیدرودینامیکی توضیح داده شد که چرا شناورهای جابجایی نمی‌توانند به سرعتهای بالا برسند و علت آن غیرسرشی بودن آنها بیان شد. شناورهای جابجایی دارای سطح خیس زیادی با آب (حتی در سرعتهای بالا) هستند و از آنجا که مقاومت ویسکوز آنها با توان ۲ سرعت و مقاومت موج‌سازی آنها با توان بالاتر از ۴ سرعت افزایش می‌یابد، لذا سرعت آنها پس از یک حد معین، تقریباً ثابت می‌ماند و نمودار تغییرات توان با سرعت، تبدیل به یک خط مجانی عمودی می‌شد. برای رهایی از این مشکل باید بدنه شناور بتواند سطح در تماس با آب دریا را کاهش دهد که البته شناورهای جابجایی بدلیل شکل بدنه آنها، از چنین مزیتی برخوردار نیستند. لذا اصولاً در شناورهای جابجایی رسیدن به سرعتهای بالا مطرح نیست و معمولاً حمل بار زیاد مطرح است. از طرف دیگر برای درک بهتر کارآیی و مفاهیم هیدرودینامیکی شناورهای سرشی باید مروری بر مباحث نقش عدد فرود در مقاومت موج‌سازی شود. نمودار تغییرات مقاومت موج‌سازی با عدد فرود دارای قله و قعرهای موضعی می‌باشد که در قسمت سوم به طور کامل به آنها پرداخته شد. جدول ۶-۱ زیر جهت یادآوری آن مبحث و مرور اعداد فرود مطلوب و نامطلوب مجدداً در اینجا ارائه می‌گردد (توجه شود که طول در اینجا بر اساس ۰/۹ طول بین دو عمود ارائه شده نه طول آبخور) ولی در اینجا بر حسب طول آبخور در عدد فرود بحث می‌شود که تا حدودی مقادیر متفاوتی از عدد فرود را باعث می‌شود). یک قابلیت ویژه شناورهای تندرو سرشی، تغییر در محدوده عدد فرود است چراکه وقتی شناور به حالت سرش می‌رسد طول خط آبخور کاهش زیادی یافته و عدد فرود ($F_n = V/\sqrt{g.L}$) افزایش می‌یابد. بدین ترتیب شناور سرشی می‌تواند از اعداد فرود بحرانی عبور نماید. وقتی یک سطح شیب‌دار مطابق شکل ۶-۱ روی سطح سیال حرکت می‌کند، نیرویی بر این سطح وارد می‌شود که دارای یک مؤلفه عمودی (لیفت) و یک مؤلفه افقی (مقاومت) است. چگونگی تولید نیروی لیفت و محاسبه آن در قسمتهای بعدی توضیح داده می‌شود. در مباحث تئوری و حتی آزمایشات مدل اولیه از شناورهای سرشی، از سطوح منشوری ساده استفاده می‌شود که تقریباً دارای مقطع V شکل هستند. روابط مبنای طراحی برای سطوح منشوری سرشی استخراج می‌گردند. بر همین اساس روابط مربوط به طراحی هیدرودینامیکی شناورهای سرشی که توسط سویسکی در ضمیمه این قسمت ارائه شده، مربوط به یک سطح منشوری سرشی می‌باشد. همین روابط، مبنای طراحی شناورهای سرشی واقعی هستند. شناورهای سرشی در سرعتهای پائین نیروی لیفت اندک و ناچیزی دارند و نیروی وزن توسط نیروی بویانسی (لیفت هیدرواستاتیکی) جبران می‌گردد. وقتی شناور سرعت می‌گیرد، سهم نیروی لیفت افزایش می‌یابد و از سهم

وضعیت	Fn	N
نامطلوب	$\sqrt{\frac{0.9}{\pi}} = 0.54$	1
مطلوب	$\sqrt{\frac{0.9}{2\pi}} = 0.38$	2
نامطلوب	$\sqrt{\frac{0.9}{3\pi}} = 0.31$	3
مطلوب	$\sqrt{\frac{0.9}{4\pi}} = 0.27$	4
نامطلوب	$\sqrt{\frac{0.9}{5\pi}} = 0.24$	5
مطلوب	$\sqrt{\frac{0.9}{6\pi}} = 0.22$	6

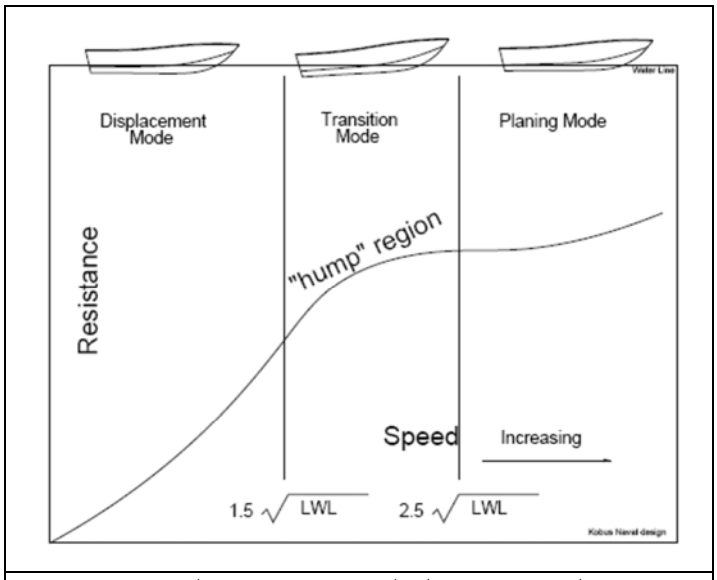
جدول ۶-۱ : یادآوری اعداد فرود مطلوب و نامطلوب

نیروی بویانسی کاسته می‌شود (توجه شود که به نیروی بویانسی، نیروی لیفت هیدرواستاتیکی نیز می‌گویند). همواره مجموع این دو نیرو برابر نیروی وزن شناور است.

به همین دلیل است که بدنه شناورهای تندرو اغلب از جنس سبک مانند آلومینیوم یا فایبرگلاس ساخته می‌شود تا به نیروی لیفت کمتری برای بلند شدن بدنه از سطح آب نیاز باشد. یک شناور سرشی از ابتدا تا رسیدن به حالت سرشی، سه مرحله را طی می‌کند: ۱)حالت جابجایی ۲) حالت انتقال ۳) حالت سرشی. مطابق شکل ۶-۲، شناور ابتدا در حالت جابجایی است یعنی نیروی وزن به طور کامل توسط نیروی بویانسی خنثی می‌شود. در سرعتی حدوداً برابر $V = 1.5\sqrt{LWL}$ (که LWL برابر طول خط آبخور است) سرش شناور شروع می‌شود و یک حالت انتقال را طی می‌کند تا اینکه در سرعت حدود $V = 2.5\sqrt{LWL}$ شناور به حالت کاملاً سرشی می‌رسد و قسمت زیادی از بدنه از سطح آب جدا می‌شود. توجه شود که سرعتهای داده شده که بر اساس طول خط آبخور می‌باشد، مرتبط با عدد فرود تعریف شده‌اند. در حالت انتقال ممکن است شناور دچار تریم‌های ناخواسته‌ای شود که علت آن این است که محاسبات تعادل برای شناورهای سرشی معمولاً برای حالت سرشی کامل برقرار می‌شود نه در حالت انتقال چراکه حالت انتقال یک حالت موقتی و گذرا است. محدودیت سرعت در شناورهای جابجایی و شناورهای سرشی بسیار با هم متفاوت است و حتی معیارهای رسیدن به حداکثر سرعت نیز برای آنها متفاوت است. در کشتی‌های جابجایی (بجز نفتکش‌ها) معمولا حداکثر سرعت قابل حصول برابر $Vmax = 2.43\sqrt{LWL}$ بیان می‌شود (LWL طول خط آبخور بر حسب متر است). در سرعتهای بالاتر از این حد بدلیل افزایش بیش از حد ارتفاع امواج تولید شده توسط بدنه، کشتی در میان امواج محو می‌شود. در شناورهای سرشی، معیار حداکثر سرعت قابل حصول بر اساس واحد وزن بر توان پروانه تعریف می‌شود. برای رسیدن به حداکثر سرعت ۲۵ گره، نسبت مجاز وزن به توان پروانه (بر حسب اسب بخار) باید کمتر از ۱۸ kg/hp باشد و برای رسیدن به حداکثر سرعت ۵۰ گره این نسبت مجاز باید به ۴/۵ kg/hp کاهش یابد (این مسئله بیان کننده این مفهوم است که چرا شناورهای تجاری معمولی نمی‌توانند به سرعتهای بالا برسند). هر شناوری که مشخصات آن در فرمول زیر صدق کند شامل شناورهای تندرو می‌شود و اگر خارج از این محدوده باشد جزء شناورهای کندرو (جابجایی) محسوب می‌شود:



شکل ۶-۱: تولید نیروی لیفت در یک سطح سرشی ساده



شکل ۶-۲:مراحل سرشی شناور از حالت سکون تا سرشی کامل

$$V/\sqrt{L} \geq 2.35(1.35)$$

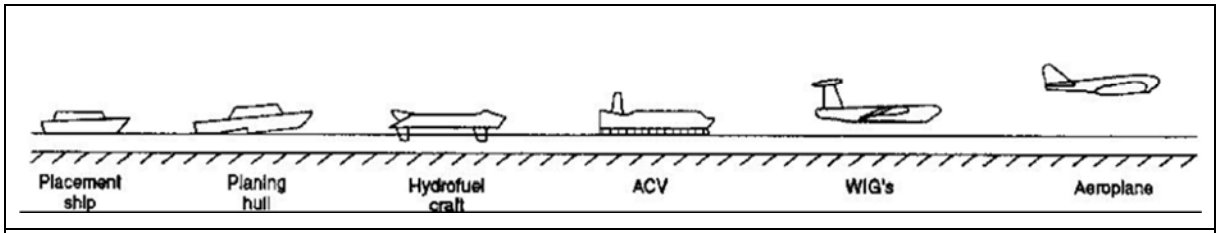
V= سرعت به گره دریایی و L= طول شناور به متر (برای عدد داخل پرانتز واحد طول شناور فوت است).

سرعت شناورهای تندرو از رابطه‌ی زیر نیز قابل حصول است:

$$V \geq 3.7\times \nabla^{0.1667}$$

V= سرعت برحسب متر بر ثانیه و ∇= تناژ برحسب تن

هرچه سرعت مورد انتظار شناورها بیشتر شود نوع شناور نیز تغییر می‌کند. مطابق شکل ۶-۳ کم سرعت‌ترین شناورها همان کشتی‌های جابجایی (تجاری معمولی) بوده و پر سرعت‌ترین آنها شناور *WIG* می‌باشد.



شکل۶-۳: محدوده سرعت مورد انتظار از انواع شناورها

بخش دوم:

آشنایی با تعاریف و هندسه شناورهای سرشی

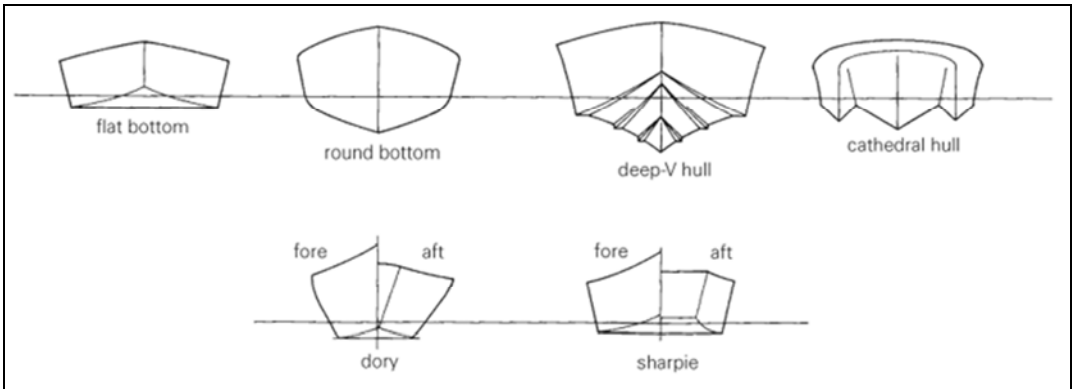
۱) شکل کلی بدنه شناورهای تندرو

شکل بدنه شناورهای تندرو دارای خصوصیات خاصی است که بخشی از آن در قسمت اول این کتاب ارائه شد. خلاصه آن مباحث در جدول ۶-۲ یادآوری می‌شود.

محدوده F_n	محدوده $L/\Delta^{1/3}$	شکل بدنه مناسب	توصیف حالت
0.4 – 0.5	> 8	پاشنه تخت عریض و خطوط باتوک تخت	حالت از قله موج‌سازی
0.5 – 0.7	>10	خطوط سینه باریک – بدنه باریک	حالت پس از قله موج‌سازی
0.7 – 1	6 - 7	کف نسبتاً گرد با خطوط باتوک تخت	حالت نیمه جابجایی یا نیمه سرشی (تولید ۳۰ – ۲۰ درصد لیفت)
> 0.7 (با شرط تولید بیش از ۵۰ درصد لیفت)	4 - 5	بدنه V شکل با خطوط چاین یا ریل‌های اسپری	حالت سرشی (تولید ۵۰ درصد لیفت)

جدول ۶-۲: ارتباط شکل بدنه شناور با عدد فرود

ملاحظه می‌شود که عدد فرود و نسبت بی‌بعد طول به حجم در تعریف شکل کلی بدنه شناورهای تندرو بسیار حائز اهمیت است. برای آشنایی بیشتر با شکل بدنه شناورهای تندرو بر روی خصوصیات و مزایا و معایب شکل بدنه این شناورها مطابق شکل ۶-۴ بحث می‌شود. قسمت کف شناورهای تندرو می‌تواند سه حالت کلی داشته باشد: ۱) کف تخت ۲) کف V شکل ۳) کف گرد. هریک از اینها باعث خصوصیات ویژه‌ای برای شناور می‌شوند.



شکل ۶-۴: انواع بدنه شناورهای تندرو

قایق‌های کف تخت، ساده‌ترین و ارزان‌ترین نوع شناورهای تندرو هستند ولی در امواج، دچار ضربات سنگین کف[1] می‌شوند و مشکلات دریازدگی و ناراحتی خدمه و مسافرین را باعث می‌شود. همچنین تنش‌های سازه‌ای بزرگی بر این شناورها وارد می‌شود. این بدنه‌ها دارای دیواره‌های جانبی رو به بیرون[2] هستند تا هم آب را اسپری کنند و هم ذخیره بویانسی مناسبی را هنگام غلتش عرضی تأمین نمایند. نوعی از بدنه‌های کف تخت دارای شکل نوک تیز هستند که به آنها dory گفته می‌شود (مطابق شکل ۶-۴). این شناورها دارای عرض باریک و نوک تیز هستند و برای کشتی‌های بادبانی

1 - pounding
2 - flare

استفاده می‌شوند. این شناورها دارای فضای داخلی و سطح عرشه نسبتاً کمی هستند ولی ظاهر مناسب و زیبایی دارند. قسمت سینه این شناورها، برای کاهش ضربات کف دارای آبخور نسبتاً زیادی است یعنی سینه این شناورها متمایل به بالا نیست و لذا یک شناور نیمه سرشی محسوب می‌شوند. نوع دیگری از شناورهای کف تخت به نام sharpie می‌باشد که دارای عرض بیشتر و زاویه دیواره کمتری هستند. این شناورها دارای عرض بزرگ و مساحت زیاد عرشه هستند. یک مشکل این شناورها، واژگون شدن عرضی و حرکات هیل شدید است که با انحنای دیواره‌های جانبی به بیرون تا حدی مرتفع می‌گردد. امروزه بدنه برخی از قایق‌های مسابقه‌ای و ماهیگیری نیز اینگونه طراحی می‌شوند.

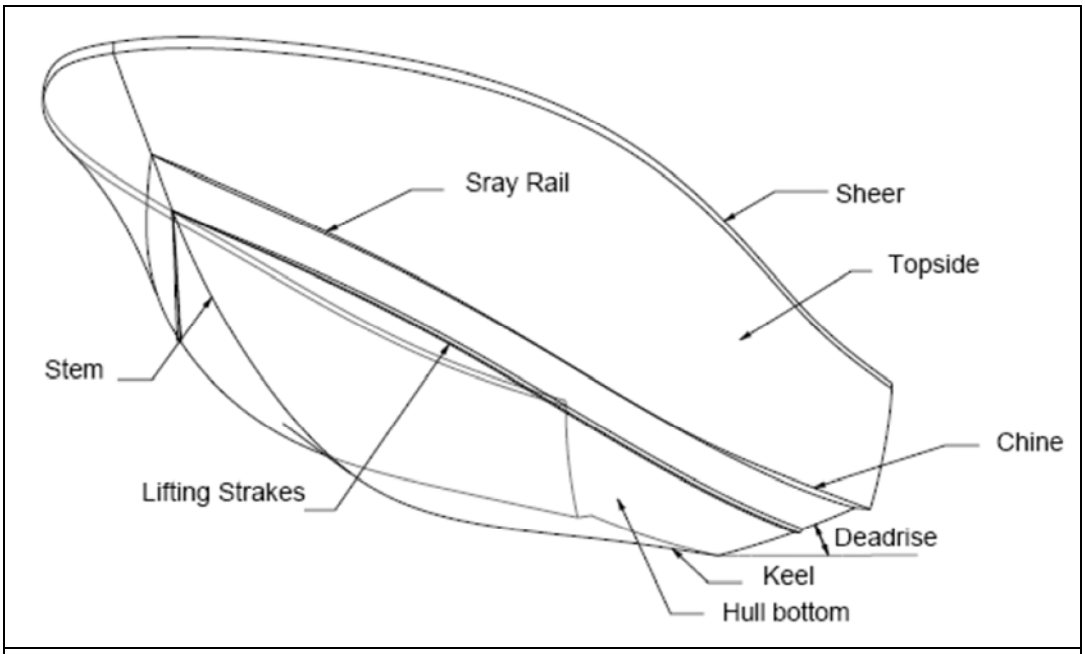
شناورهای V شکل دارای زاویه خیز کف (ددرایز)[1] زیادی هستند (خیز کف یا ددرایز در قسمتهای بعدی توضیح داده می‌شود). این شناورها بدلیل داشتن خیز کف مناسب کمتر ضربات کف می‌شوند. این نوع بدنه‌ها برای حیطه وسیعی از شناورها مناسب هستند، از قایق‌های بادبانی چوبی کوچک تا کشتی‌های آلومینیومی یا فولادی بزرگ. اغلب شناورهای سرشی دارای بدنه V شکل هستند. زاویه خیز کف آنها در سینه (برای کم کردن ضربات کف سینه) حدود ۲۶ درجه و در پاشنه (برای تأمین سرش) حدود ۱۸ – ۱۰ درجه است. این بدنه‌ها که زاویه خیز کف آنها در طول بدنه متغیر است را «بدنه-های با خیز کف متغیر»[2] گویند (در سری ۶۲ زاویه خیز تا ۴۰ درجه نیز آمده است). تمامی بدنه‌های V شکل سرشی دارای خیز کف شدیدی در سینه هستند. شناورهای V شکل در قسمت پاشنه دارای کف تخت نیستند لذا به توان بیشتری برای سرش نیاز دارند (کف تخت پاشنه به سرش زودتر کمک می‌کند ولی باعث ضربات سنگین بر امواج سطح آب نیز می‌شود لذا در این نوع از بدنه‌ها استفاده نشده است. در شناورهای تندرو با افزایش زاویه کف، مقدار لیفت شناور کاهش می‌یابد ولی از طرف دیگر شناورهای با کف تخت باعث پاشش شدید آب به طرفین و ایجاد مقاومت زیاد می‌شوند). این شناورها در مقایسه با شناورهای قبلی که بیان شد در آب آرام دارای سرعت کمتری هستند ولی این بدنه‌ها می‌توانند در آبهای مواج حالت سرش خود را حفظ کنند چراکه شناورهایی که قسمتی از کف آنها تخت نباشد در دریای مواج مجبور به کاهش سرعت نیستند لذا می‌توانند حالت سرش را حفظ کنند. شناورهای بدنه V شکل دارای پایداری دینامیکی مناسب و حفظ مسیر بهتری در حین سرش هستند ولی از طرف دیگر مشکلاتی در حین دور زدن دارند به گونه‌ای که یک طرف شناور حین دور زدن، روی سطح آب قرار می‌گیرد. به این حالت دور زدن «حرکت روی خط شکستگی»[3] گویند (منظور از خط شکستگی همان چاین است که در مطالب بعدی توضیح داده می‌شود). نوارهای طولی[4] می‌توانند علاج این مشکل باشند. همچنین آبخور شناورهای V شکل در یک تناژ مشخص، بیشتر از قایق‌های کف تخت می‌باشد که این عامل نیز می‌تواند خصوصیات دریانوردی و حرکات امواج بهتری را باعث شود (در شناورهای با زاویه خیز صفر درجه در سرعتهای بالا امکان حرکت ناخواسته پاشنه به طرفین وجود دارد).

قایق‌های کف گرد[5]، حجم داخلی بزرگتر و سطح خیس کمتری را فراهم می‌کنند و در سرعتهای پائین، حداقل مقاومت اصطکاکی را باعث می‌شوند. لذا این نوع بدنه نیز در انواع مختلفی از شناورها استفاده می‌شود: از لنچ‌های کوچک تا کشتی‌های تفریحی اقیانوس‌پیما و برای هر دو نوع از شناورهای بادبانی و دارای سیستم رانش. همچنین این نوع بدنه دارای کمترین کوبش کف در بین سه نوع بدنه است و لذا برای اهداف مسافربری بسیار راحت و مناسب است. البته ساخت بدنه‌های کف گرد بسیار دشوار و پرهزینه است. شناورهای کف گرد دارای سرعتی در حدود کشتی‌های جابجایی هستند. چراکه تعبیه کف تخت (که در بسیاری از شناورهای تندرو استفاده می‌شود) در این نوع از بدنه‌ها غیر ممکن است. البته بدنه برخی از شناورهای نیمه سرشی و برخی از کاتاماران‌ها نیز دارای کف گرد هستند. هرچه انحنای کف و بیلج تندتر باشد و دارای زوایای تیزتری باشد به سرعتهای بالاتری می-تواند برسد.

1 - deadrise
2 - Variable deadrise hull or warped hull
3 - chine walking
4 - longitudinal strake
5 - Round Bottom

۲) توصیف هندسه بدنه شناورهای سرشی

بدنه شناورهای سرشی دارای شکل و هندسه خاصی است که شباهتی با شناورهای جابجایی معمولی ندارد. شکل ۶-۵ اجزاء مختلف بدنه شناورهای سرشی را نشان می‌دهد که مشخصات هریک از آنها توضیح داده می‌شود.



شکل۶-۵: نمایش اجزاء بدنه شناورهای تندرو سرشی

اجزاء کلی نشان داده شده روی شکلها عبارتند از:

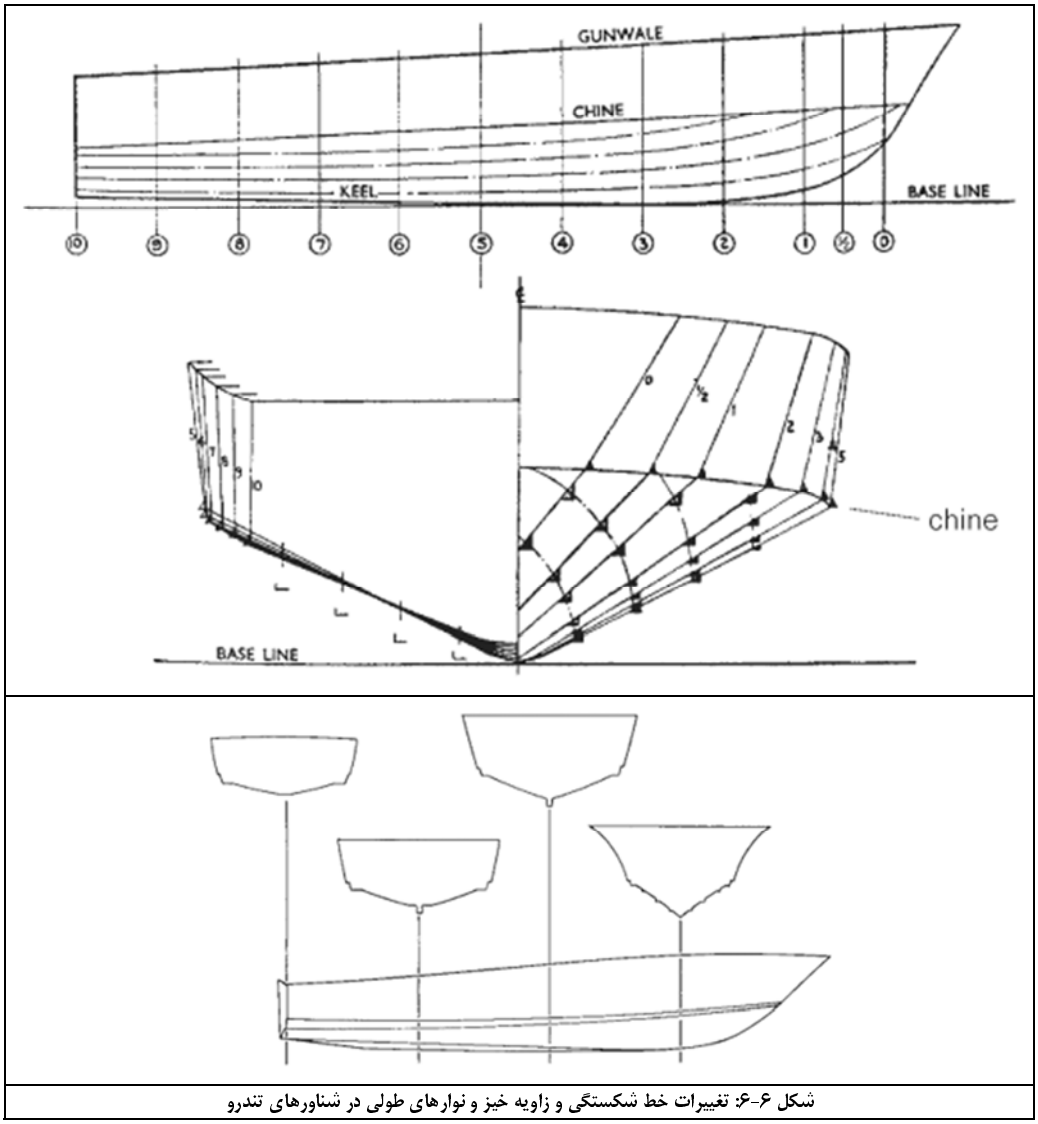
۱- خیز کف[۱]
۲- خطوط شکستگی[۲]
۳- نوارهای لیفت یا ریل‌های اسپری[۳] یا نوارهای طولی[۴]
۴- بیلج[۵]
۵- کیل[۶]

قبل از بیان خصوصیات هریک از این اجزاء تصریح می‌شود که در مورد ویژگی‌های طراحی هریک از آنها، تا به امروز قانون و توافق اثبات شده و قطعی وجود ندارد و بیشتر وابسته به اطلاعات تجربی طراحان و سازندگان شناورهای سرشی است. طرح‌های بسیار متنوعی از هریک از این اجزاء از طرف طراحان ارائه شده و هریک ادعا می‌کنند که طرح آنها دارای بیشترین بازدهی است.

1 - deadrise
2 - chine
3 - lifting sreake or spray rail
4 - longitudinal strake
5 - bilge
6 - keel

۱-۲) خیز کف

خیز کف همان شیب عرضی کف است که بر حسب زاویه بیان می‌شود و زاویه بین دیواره کف و سطح افق می‌باشد که از صفر درجه (در قایق‌های کف تخت) تا ۲۶ درجه (در شناورهای کاملاً V شکل) می‌تواند باشد. انتخاب زاویه خیز بسیار وابسته به نوع کاربرد شناور است. یک شناور کف تخت (زاویه خیز صفر درجه) در آبهای آرام، خیلی زود به حالت سرشی می‌رسد و دارای پایداری خوبی است ولی در دریاهای مواج به شدت دچار ضربات کوبش کف می‌گردد. شناورهای دارای زاویه خیز کف زیاد، حرکات آرام‌تری دارند و در امواج نیز حالت سرشی را حفظ می‌کنند ولی دیرتر از شناورهای کف پاشنه تخت به حالت سرش می‌رسند. برای اغلب کاربردهای رایج، زاویه خیز کف حدود ۱۵ درجه است. زاویه خیز می‌تواند در طول شناور تغییر کند. معمولاً زاویه خیز سینه بیشتر است تا بتواند امواج را براحتی بشکافد ولی در قسمت پاشنه تمایل به زاویه خیز کمتر و تأمین حالت پاشنه نزدیک به تخت است تا بتواند راحت‌تر و زودتر سرش کند. تغییرات زاویه خیز معمولاً از سینه تا وسط بسیار شدید و از وسط تا پاشنه تقریباً یکنواخت است (مطابق شکل ۶-۶). سایر مزایای خیز کف عبارتند از: تأمین حرکات آرامتر در امواج و کاهش مقاومت سطح خیس به هنگام بلند شدن بدنه شناور از سطح آب، حفظ مسیر و مانور مناسب‌تر.



شکل ۶-۶: تغییرات خط شکستگی و زاویه خیز و نوارهای طولی در شناورهای تندرو

هرچه منطقه کاربری شناور مواج‌تر و دورتر از ساحل باشد زاویه خیز افزایش می‌یابد مثلاً خیز قسمت میانی به سمت پاشنه در شناورهای سرشی داخل حوضچه‌های کوچک و دریاچه‌ها ۱۲-۱۰ درجه، برای ناحیه آبهای ساحلی دریا ۲۰-۱۵ درجه و برای دریاهای آزاد ۲۵-۲۰ درجه می‌باشد. حتی برای قایق‌های بسیار تندرو در دریاهای آزاد و مواج، خیز کف پاشنه می‌تواند ۳۰-۲۶ درجه هم باشد که البته این مورد معمولاً برای کاهش ضربات در

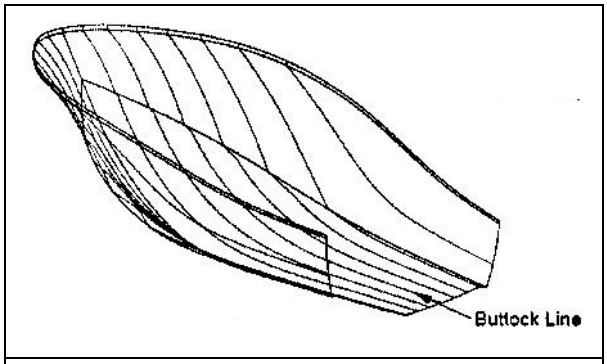
سرعتهای بالاتر از ۵۰ گره می‌باشد که سطح بدنه به مقدار زیادی از سطح آب کنده شده و سپس با شیب پاشنه به داخل آب می‌افتد. وقتی شناور با پاشنه به داخل آب می‌افتد نباید ضربات سنگینی بدان وارد شود لذا در اینجا زاویه خیز را بسیار زیادتر از حد معمول در نظر می‌گیرند.

۲-۲) خط شکستگی

خط شکستگی به محل برخورد کف با دیواره‌های شناور تندرو گفته می‌شود که تشکیل یک زاویه تند می‌دهد. از شکل ۶-۶ مشخص است که خط شکستگی یک تغییر انحنای شدید را روی بدنه باعث می‌شود. این انحنا که معمولاً به سمت بیرون است در همه قسمتهای بدنه یکسان نیست بلکه در قسمت سینه انحنا به بیرون[1] بیشتر و در قسمت پاشنه کمتر است. انحنای رو به بیرون زیاد دیواره‌های سینه از محل خط شکستگی (مطابق شکل ۶-۶) برای کاهش اثرات کوبش کف و اسلمینگ و کمک به اسپری شدن آب به سمت بیرون است. بدنه بجای یک «شکستگی تند»[2] می‌تواند چندین «شکستگی ملایم»[3] داشته باشد که به عنوان «شناورهای دارای چند شکستگی»[4] معروف هستند. این شکل از بدنه‌ها، ظاهر چندان زیبایی ندارند و ساخت آنها نیز بسیار دشوار است ولی به مقدار زیادی پایداری دینامیکی را افزایش داده و باعث حرکات آرام‌تری در سرعتهای بالا در دریاهای طوفانی و مواج می‌شود. خط چاین معمولاً از خط باتوک[5] تبعیت می‌کند (شکل ۶-۷).

۲-۳) نوارهای لیفت یا ریل‌های اسپری

نوارهای لیفت یا ریل‌های اسپری که بدانها «نوارهای طولی» نیز می‌گویند، دارای مقطع مثلثی بوده و کف آنها موازی سطح آب است. نوارهای طولی در شکل ۶-۷ در مقطع بدنه یک شناور V شکل نشان داده شده‌اند. توافق معینی بر روی تعداد و موقعیت نوارهای طولی وجود ندارد ولی هرچه تعداد آنها بیشتر باشد بهتر است چراکه ۳ مزیت اصلی را ایجاد می‌کنند: ۱) ایجاد نیروی لیفت بیشتر ۲) کاهش سطح خیس شده جانبی بدنه شناور که منجر به کاهش مقاومت اصطکاکی می‌گردد. ۳) تأمین پایداری دینامیکی بیشتر و حفظ مسیر بهتر. عرض هر نوار حدود ۳-۲ درصد عرض بدنه است و معمولاً بیش از ۴ نوار طولی در هر طرف شناور استفاده نمی‌شود و رایج نمی‌باشد. نوارهای طولی معمولاً از پاشنه تا وسط از خطوط باتوک تبعیت می‌کنند. در قسمت جلوتر از وسط شناور، نوارهای طولی می‌توانند از خطوط باتوک تبعیت کنند یا نکنند. اگر نوارهای طولی جلوی بدنه از خطوط باتوک تبعیت کنند معمولاً به خط شکستگی برخورد نمی‌کنند. یعنی نوارهای طولی می‌توانند با خط شکستگی موازی باشند (مانند شکل ۶-۵) یا با آن برخورد کنند (شکل ۶-۶). طول این نوارها و محل شروع آنها به گونه‌ای است که لبه جلویی نوارها منطبق بر خط ریشه اسپری در حین حرکت باشد یعنی اگر خط ریشه تقریبا ۸ شکل باشد قرارگیری لبه نوارها نیز از این شکل تبعیت می‌کند.



شکل ۶-۷: خطوط باتوک و موقعیت خط شکستگی و نوارهای طولی نسبت به آن

۲-۴) بیلج

بیلج دو معنی کلی می‌تواند داشته باشد:

۱- لبه تیز بین کف و دیواره: در این حالت، بیلج در واقع همان محل خط شکستگی است. اگر زاویه بیلج کم باشد به آن «بیلج نرم»[6] و اگر زاویه زیاد باشد بدان «بیلج سخت»[7] گویند (شکل ۶-۸ بالا). بیلج نرم باعث ایجاد عرض اندک صفحه آبخور و بیلج سخت باعث افزایش عرض صفحه آبخور می‌شود که بطور مستقیم در بحث پایداری استاتیکی دخیل می‌باشد.

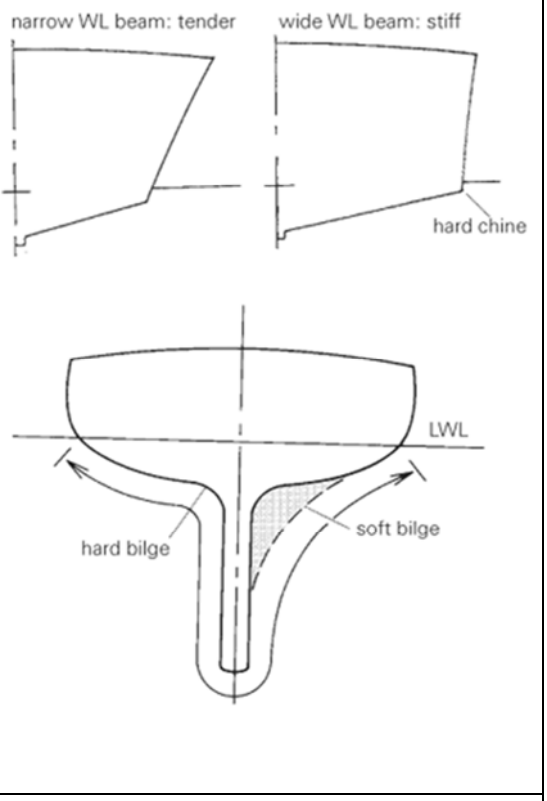
۲- تیر عمودی زیر شناور: در برخی از شناورهای تفریحی که دارای کف گرد بوده و در معرض زوایای رول شدیدی هستند (مانند کشتی‌های بادبانی)، بدلیل پایداری اولیه ضعیف از این نوع بیلج‌های عمودی استفاده می‌شود تا وضعیت پایداری بهبود یابد. این بیلج‌ها به سه طریق باعث افزایش پایداری و افزایش راحتی شناور می‌گردند: ۱) پائین آوردن مرکز ثقل و افزایش مقدار GM ۲) افزایش پریود نوسانات و

1 - flare
2 - hard chine
3 - soft chine
4 - multi-chine
5 - Buttock line
6 - soft bilge
7 - hard bilge

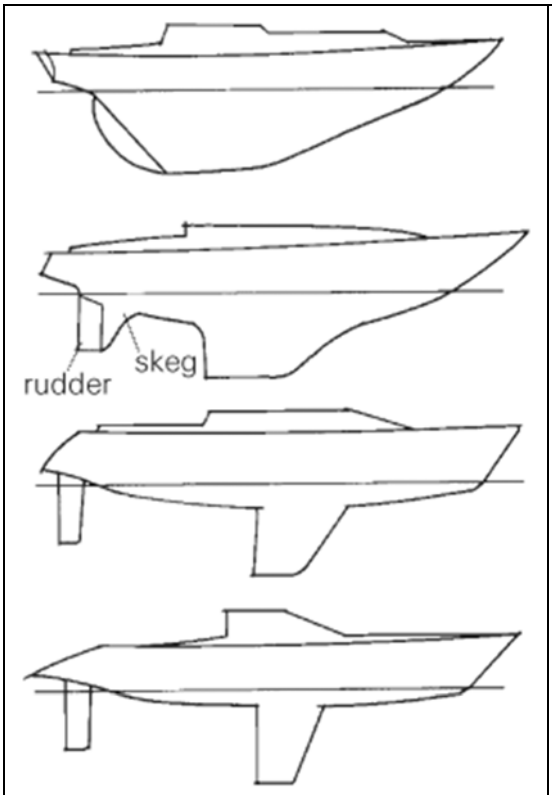
کاهش دامنه غلتش عرضی که باعث افزایش راحتی می‌گردد ۳) تأمین پایداری دینامیکی بیشتر و حفظ مسیر بهتر. در این حالتها بیلج نرم و بیلج سخت مطابق شکل ۶-۸- پایین تعریف می‌شود. مشخص است که وجود این زائده باعث افزایش مقاومت و کاهش سرعت می-گردد. همچنین محدودیت دریانوردی در آبهای کم‌عمق را باعث می‌شود.

۵-۲)کیل

کیل در انواع شناورها دارای شکلهای مختلفی می‌باشد. برخی از انواع کیل‌ها که بیرون از بدنه قرار می‌گیرند در شکل ۶-۹ ارائه شده است. ملاحظات و مزایا و معایب این کیل‌ها همانند بیلج عمودی است.



شکل ۶-۸: حالات و تعاریف مختلف بیلج

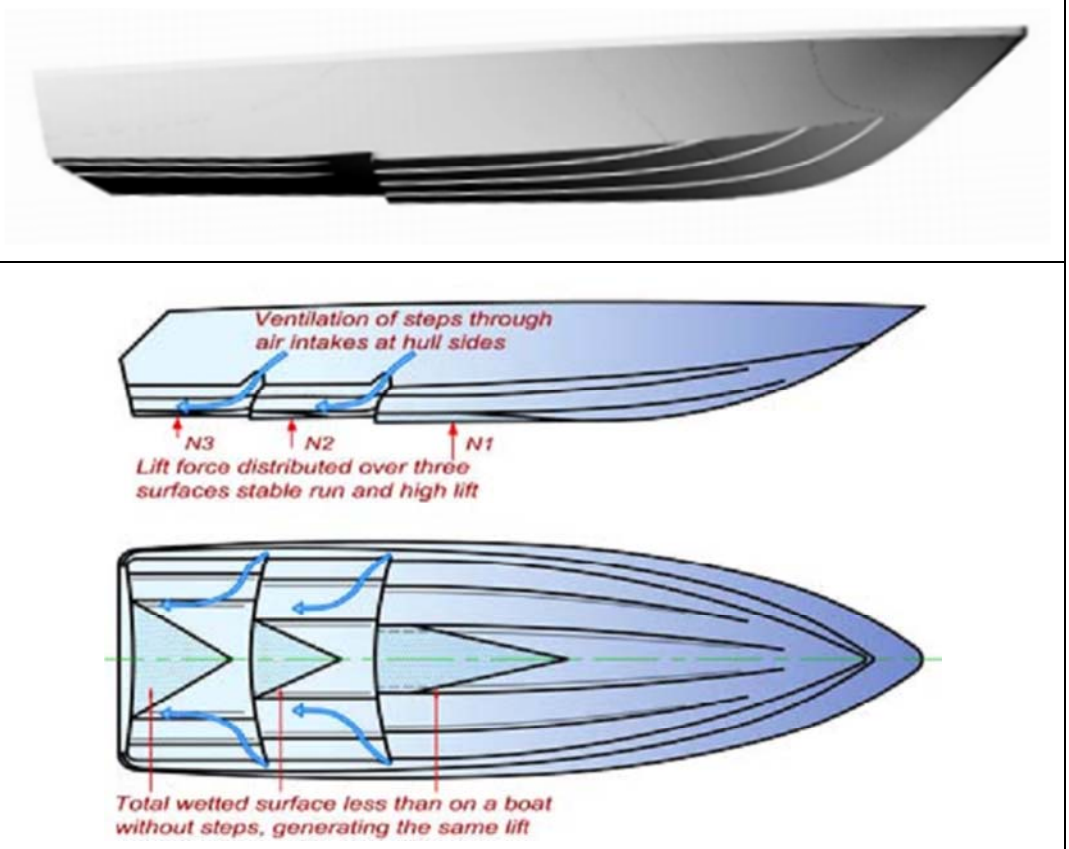


شکل ۶-۹: کیل‌های مختلف بیرون بدنه در شناورهای تندرو سبک

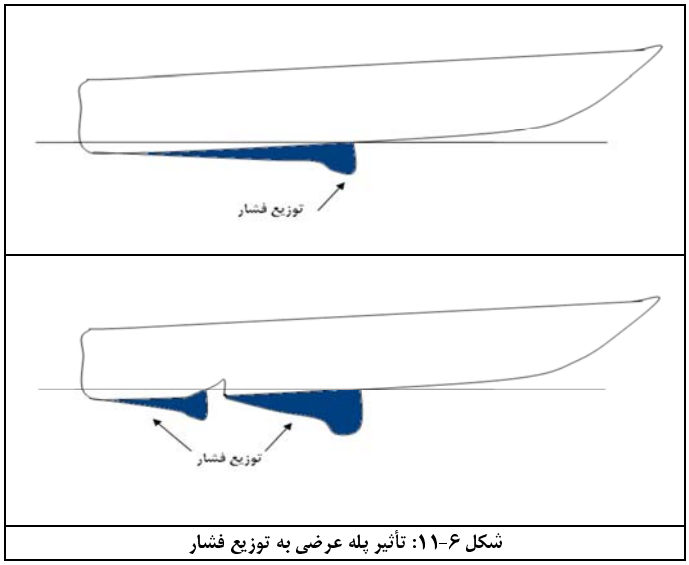
۶-۲) پله عرضی (استپ)

پله عرضی همانند یک شکستگی کف شناور است که بدان پله عرضی[1] گویند (شکل ۶-۱۰). اغلب نیروی لیفت در شناورهای تندرو در قسمت جلوی سطح خیس تولید می‌شود و تقریبا $\frac{۲}{۳}$ انتهای سطح خیس، لیفت کمی تولید می‌کند. برای افزایش مقدار لیفت، می‌توان با ایجاد یک یا چند پله عرضی، دست طراحان را برای جابجایی موقعیت طولی مرکز ثقل باز می‌گذارد(شکل ۶-۱۱). معمولاً موقعیت طولی مرکز ثقل در شناورهای تندرو حدود ۳۰ درصد طول از پاشنه است که در شناورهای دارای پله عرضی می‌تواند افزایش یابد. ارتفاع پله ۵ — ۳ درصد عرض بدنه می‌باشد.

1 - step



شکل ۶-۱۰: پله عرضی در شناورهای سرشی



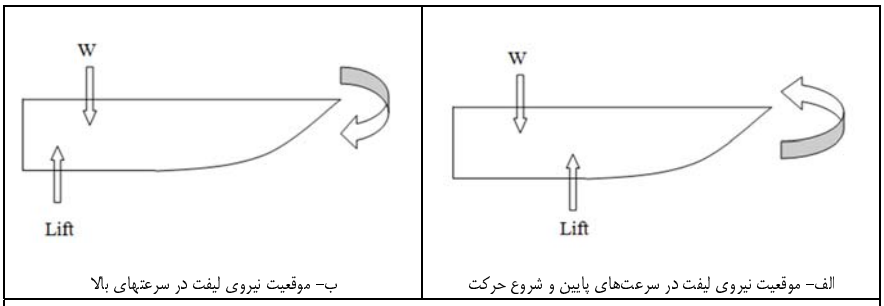
شکل ۶-۱۱: تأثیر پله عرضی به توزیع فشار

دنیا دو روز است : یک روز با تو ، یک روز بر علیه تو !
روزی که با توست مغرور نشو ، روزی که بر علیه توست مأیوس نشو ...

بخش سوم:

ناپایداری دینامیکی طولی تناوبی

پدیده پورپویزینگ[1] یا ناپایداری دینامیکی طولی تناوبی (که اصطلاحاً در این مبحث ناپایداری طولی نامیده می‌شود) یکی از پدیده‌های نامطلوب در آب آرام در شناورهای تندرو سرشی است. در این پدیده، سینه شناور بطور متناوب بالا و پائین رفته و روی سطح آب کوبیده می‌شود. بروز این حالت، نشان از ناپایداری طولی دارد و کارآیی شناور و خدمه را مختل می‌کند. در واقع در این پدیده حرکات وابسته هیو و پیچ بطور تناوبی و پیوسته تکرار می‌شوند. علت این حرکات بروز گشتاور بین مراکز اثر نیروی وزن و نیروی لیفت (مطابق شکل ۶-۱۲) می‌باشد که شناور قادر به ایجاد تعادل نیرویی نیست و این حرکت بطور تناوبی ادامه می‌یابد. نیروی لیفت همان مرکز اثر برآیند نیروی لیفت دینامیکی و نیروی لیفت هیدرواستاتیکی (بویانسی) است. میزان فاصله بین نیروی وزن و نیروی لیفت، شدت ناپایداری را تعیین می‌کند.



الف- موقعیت نیروی لیفت در سرعت‌های پایین و شروع حرکت

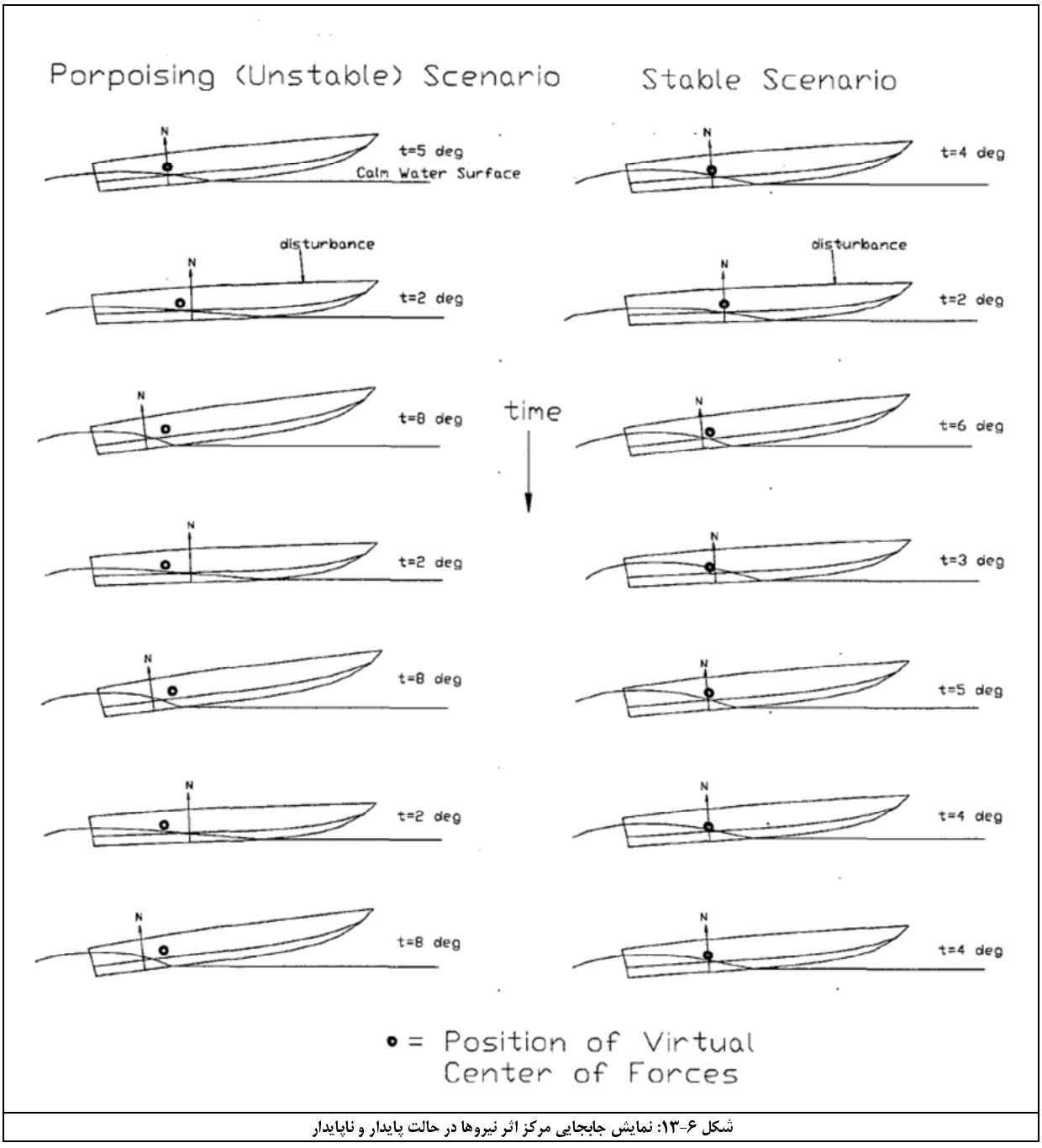
ب- موقعیت نیروی لیفت در سرعتهای بالا

شکل ۶-۱۲: جابجایی مرکز فشار و ایجاد گشتاور ناپایداری طولی

وقتی شناور در حداکثر سرعت قرار می‌گیرد، بخش عمده نیروی لیفت همان لیفت دینامیکی ناشی از حرکت شناور است. لذا در این حالت مرکز اثر نیروی لیفت را می‌توان مرکز فشار[2] در نظر گرفت. هنگامیکه شناور سرعت می‌گیرد،اگر مرکز اثر این دو نیرو بر هم منطبق باشد در واقع هیچ‌گونه ممان پیچ بر شناور وارد نمی‌شود. ولی اگر بین مرکز اثر این دو نیرو فاصله ایجاد شود، گشتاور طولی بر شناور تحمیل می‌گردد. در شکل ۶-۱۲ در حالت الف، مرکز اثر نیروی لیفت جلوتر از مرکز ثقل است و لذا سر شناور سرشی رو به بالا متمایل می‌گردد. این حالت مربوط به ابتدای حرکت است و البته برای شروع سرش و بلند شدن بدنه از سطح آب لازم است. همزمان با تریم کردن شناور و جدا شدن بخشی از بدنه از سطح آب، مرکز اثر نیروی لیفت (مرکز فشار) به سرعت به سمت عقب منتقل می‌شود و حالتی همانند شکل ۶-۱۲ حالت ب اتفاق می‌افتد. ملاحظه می‌شود که در این حالت یک گشتاور، مخالف حالت قبل بر شناور وارد می‌شود و سر شناور سرشی رو به پائین متمایل می‌گردد. با متمایل شدن سر رو به پائین، مجدداً حالت الف تکرا می‌شود. با ادامه حرکت شناور، این حالت تناوبی ادامه می‌یابد و سر شناور به طور مرتب و متناوب بالا و پائین رفته و با سطح آب برخورد می‌کند. بنابراین علت اصلی آن را می‌توان جابجا شدن مرکز اثر نیروی لیفت یا مرکز فشار دانست. حالت مطلوب این است که در حالت سرش، مرکز اثر این دو نیرو در یک امتداد قرار گیرند. به جهت بررسی علت شروع ناپایداری باید تغییرات مرکز فشار در کف شناور را به عنوان تابعی از تغییرات زاویه تریم شناور داشته باشیم. شناورهایی که زاویه تریم دینامیکی آنها کم می باشد، سیستم پایدارتری دارند زیرا در این شناورها با تغییر تریم شناور تغییرات کمی در سطح خیس صورت می‌گیرد که در نتیجه مرکز فشار نیز جابجایی کمی خواهد داشت. ولی در مورد شناورهایی که زاویه تریم دینامیکی آنها زیاد می باشد این مساله بالعکس می باشد. وقتی یک نیروی خارجی به صورت لحظه ای بر شناور اعمال گردد، موقعیت فرضی مرکز نیروها کمی جابجا می‌شود. موقعیت فرضی مرکز نیروها یک نقطه ذهنی (موهومی) است که حول آن ممان تریم دهنده ناشی از نیرو های تراست (تراست و نیروی قائم آن)، نیرو های ضمائم (لیفت و درگ) و نیرو های اصطکاکی بدنه با هم جمع شده و جایگزین کل این نیروها می شود. به جهت ساده سازی مساله فرض می شود که مرکز فرضی نیروها موقعیت ثابتی داشته باشد. با اعمال آشفتگی در جلوی شناور به نظر می رسد که موقعیت مرکز فشار جلوتر از مرکز فرضی نیروها

1 - porpoising
2 - Centre of pressure

قرار گرفته و باعث تغییرات زیاد در ممان تریم دهنده در جهت بازگشت به حالت اولیه می‌شود. اما در مورد یک شناور پایدار اعمال نیروی خارجی باعث جابجایی مرکز فشار در حدی می شود که به یک حالت تعادل جدید دست یابد و عامل خارجی فقط موجب ایجاد نوسانات محدودی در شناور شده و شناور خیلی سریع به حالت تعادل اولیه اش باز میگردد (شکل ۶-۱۳)[۸] .



شکل ۶-۱۳: نمایش جابجایی مرکز اثر نیروها در حالت پایدار و ناپایدار

Celano با تحلیلی که بر روی تست های انجام شده توسط Day & Haag انجام داد رابطه زیر را برای تریم بحرانی آغاز پورپویزینگ ارائه داده است:

$$\tau_{crit} = 0.1197 \times \beta^{0.7651} \times \exp\left(15.7132 \times \sqrt{\frac{C_L}{2}} \times \beta^{-0.2629}\right) \text{degrees}$$

رابطه بین C_Δ، C_L و C_V به صورت زیر می باشد: $\sqrt{\frac{C_L}{2}} = \frac{\sqrt{C_\Delta}}{C_V}$

که متغیرهای استفاده شده در روابط فوق به شرح ذیل می باشند:

$$C_L = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho V^2 b^2} = \text{lift coefficient for a deadrise planing surface}$$

$$C_\Delta = \frac{\Delta}{\rho g b^3} = \text{load coefficient}$$

$$C_V = \frac{V}{\sqrt{gb}} = \text{speed coefficient}$$

$b = \text{beam overall}$

$\beta = \text{deadrise angle}$

$\Delta = \text{displacement}$

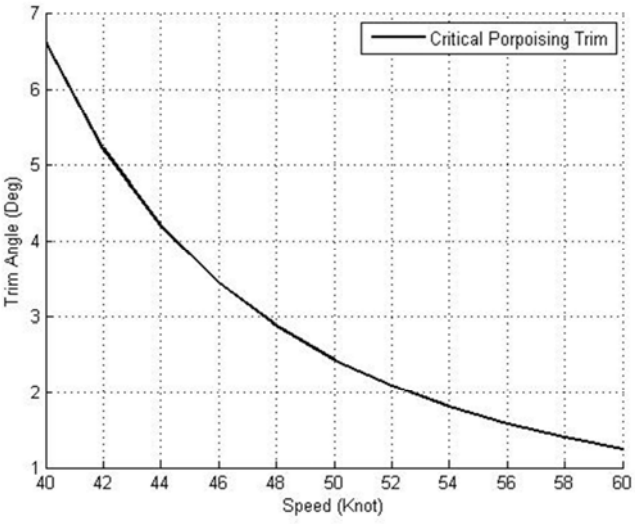
$\rho = \text{water density}$

$V = \text{speed of craft}$

$g = \text{acceleration of gravity}$

محدوده استفاده از رابطه فوق به صورت زیر می باشد: $0.392 \le C_\Delta \le 0.525 \quad , \quad 2 \le C_V \le 4.7 \quad , \quad 15^\circ \le \beta \le 20^\circ$

یک نمونه از منحنی بدست آمده از رابطه فوق برای یک شناور فرضی در شکل ۶-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۴: تغییرات سرعت بحرانی با زاویه تریم

برای حل مشکل ناپایداری طولی اقدامات زیر انجام می‌شود که نقش هریک بطور مختصر تبیین می‌گردد:

۱) کاهش زاویه تریم: در حالت کلی، به هر روشی که بتوان زاویه تریم شناور حین سرش را کاهش داد، اثر مثبتی بر ناپایداری طولی دارد. هرچه زاویه تریم برای انجام سرش بیشتر شود، جابجایی مرکز فشار نیز بیشتر شده و احتمال ناپایداری افزایش می‌یابد. برخی راه حل‌هایی که در ادامه ذکر می‌شود برای کاهش زاویه تریم است.

۲) جابجایی مرکز ثقل: برای ایجاد پایداری و تعادل طولی باید مرکز ثقل و مرکز فشار در یک راستا قرار گیرند. در برخی موارد که نمی‌توان مرکز فشار را جابجا نمود (چراکه وابسته به شکل و حالت بدنه است) می‌توان با جابجا کردن مرکز ثقل، ناپایداری را رفع نمود. در برخی شناورهای سرشی کوچک، جابجا شدن اتوماتیک یک دسته وزنه به سمت جلو می‌تواند بر جابجایی مرکز ثقل کل شناور مؤثر باشد.

۳) استفاده از صفحه تریم‌دهنده[1]: صفحه تریم‌دهنده معمولاً به صورت جفتی در قسمت انتهای شناور قرار می‌گیرد. این صفحات در حالت خنثی نیروی لیفت تولید نمی‌کنند ولی با زاویه گرفتن آنها، نیروی لیفتی ایجاد می‌شود که انتهای شناور را بلند می‌کند و باعث کاهش زاویه تریم

1 - trim tab

می‌شود. کاهش زاویه تریم نیز بطور مستقیم بر کاهش ناپایداری مؤثر است. مزیت عمده این سیستم، ساده و سبک بودن آن است و در همه سرعتها کارآمد است. تحریک این صفحات توسط جک هیدرولیک انجام می‌شود و در شناورهای سرشی بزرگ نیز کاربرد دارد.

۴) کاهش سرعت: وقتی حالت ناپایداری طولی اتفاق می‌افتد یعنی مرکز اثر نیروی لیفت خیلی به سمت عقب منتقل شده است. برای جبران این حالت یا باید زاویه تریم را کاهش داد یا سرعت حرکت را. کاهش سرعت حرکت در شناورهای سرشی بطور همزمان باعث کاهش زاویه تریم و جابجایی مرکز فشار به سمت جلو می‌شود و حالت ناپایداری مرتفع می‌گردد. البته کاهش سرعت، یکی از پدیده‌های نامطلوب است و حالت ایده‌آل در رفع ناپایداری این است که باعث کاهش سرعت نگردد.

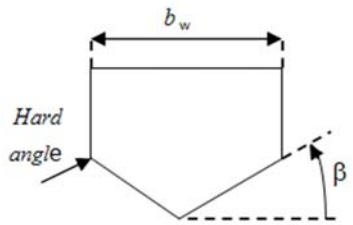
۵) افزایش زاویه خیز کف: همانطور که در قسمت ضمیمه و در محاسبات و نمودارهای طراحی نشان داده شده است، افزایش زاویه خیز کف بطور مستقیم بر کاهش ناپایداری طولی اثر دارد.

۶) کاهش ضریب منظری کل بدنه: ضریب منظری[1](AR) در شناورهای سرشی به صورت زیر تعریف می‌شود (شکل ۶-۱۵):

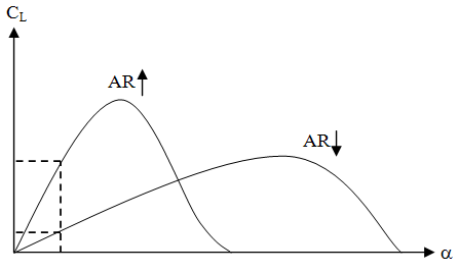
$$AR = \frac{\bar{b}_w^2}{S}$$

اگر S مساحت تصویر شده از بالا[2] باشد که با در نظر گرفتن عرض متوسط و طول متوسط (با توجه به تغییرات عرض در طول شناور و همچنین طول خیس متغیر در حین حرکت) می‌توان رابطه زیر را در نظر گرفت: $AR = \frac{\bar{b}_w}{L_w}$

ضریب لیفت بدنه وابسته به ضریب منظری(AR) است. مطابق شکل۶-۱۶ هرچه ضریب منظری بیشتر شود، شیب ضریب لیفت بیشتر می‌شود و هرچه این ضریب کمتر شود، شیب ضریب لیفت کاهش می‌یابد. مطابق مطالب بخش ضمیمه، سویسکی نشان داد که هرچه ضریب لیفت کمتر باشد، ناپایداری طولی کاهش می‌یابد. لذا کاهش AR اثر مستقیم بر کاهش ناپایداری طولی دارد. کاهش ضریب منظری نیز به معنی کشیده‌تر و باریک‌تر شدن صفحه آبخور و در نتیجه، تغییر شکل کلی بدنه است. این مسئله نیز می‌تواند باعث جابجایی مرکز فشار به سمت عقب شود و کاهش ناپایداری را به دنبال داشته باشد. از آنجا که عوامل بسیار متنوع دیگری در تعیین شکل بدنه دخیل هستند از جمله مباحث هیدرواستاتیک، مقاومت و جانمایی داخلی، شاید تأمین این مسئله براحتی امکان‌پذیر نباشد ولی یکی از مسائل مهمی است که در طراحی شکل بدنه شناورهای سرشی باید در نظر گرفته شود. در ضمیمه این قسمت (شکل ۱۶ ضمیمه)، نحوه محاسبات و پیش‌بینی ناپایداری طولی تشریح شده است.



شکل ۶-۱۵: نمایش عرض حداکثر در شناور دارای خیز کف



شکل۶-۱۶: اثرات ضریب منظری (AR) بر ضریب لیفت و زاویه حمله

❖ **محدوده LCG**: محدوده رایج LCG در شناورهای تندرو برابر ۰/۴ − ۰/۳۵ طول بدنه از پاشنه می‌باشد. $LCG = (0.35\sim0.4)L$

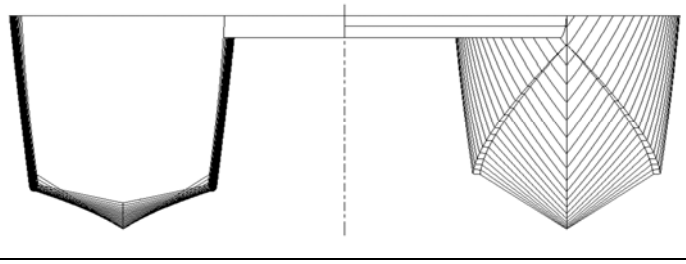
یک تخمین وسیع‌تر از موقعیت LCG برابر است با: $LCG = (0.33\sim0.48)L$

عامل اصلی در تعیین LCG پرهیز از وقوع ناپایداری طولی است و شکل بدنه در تعیین دقیق LCG بسیار موثر است. ملاحظات بیشتر در شکل ۱۸ ضمیمه آمده است.

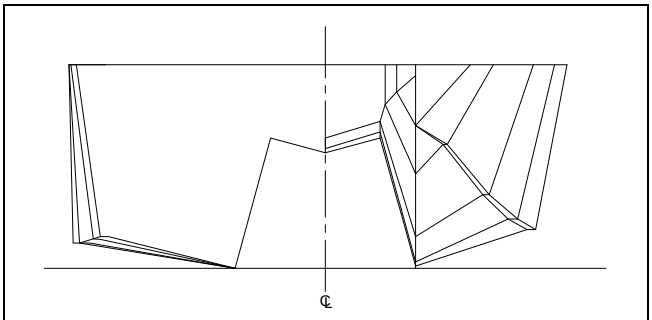
❖ شناور دوبدنه [۹]

جهت تخمین رفتار کاتاماران سرشی می‌توان از دو شناور تک بدنه استفاده نمود. اصول اولیه از روابط سویتسکی استفاده شده است. در حالت کلی می‌توان نیم‌بدنه‌های کاتاماران را به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول کاتامارنهایی که در نیم‌بدنه آن زاویه کف بیرونی و داخلی برابر باشد (شکل ۶-۱۷). در گروه دوم زاویه کف داخلی متفاوت یا ۹۰ درجه است (شکل ۶-۱۸).

1 - Aspect ratio
2 - plan area

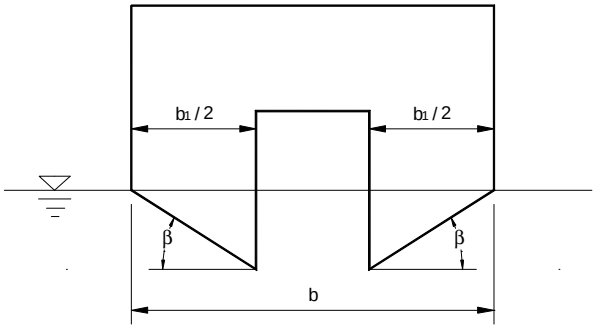


شکل ۶-۱۷: کاتامارانِ با زاویه کف بیرونی و درونی یکسان (گروه اول)



شکل۶-۱۸: کاتامارانِ با زاویه کف بیرونی و درونی متفاوت (گروه دوم)

برای هر یک از بدنه‌های فوق روش خاصی طراحی شده است. برای حالت اول با استفاده از نصف وزن شناور، که مستقلاً محاسبه و نتایج دو برابر خواهد شد. برای حالت دوم کاتامارانها با استفاده از عرض مفید نیم بدنه‌ها و هم چنین اعمال تاثیر سطح خیس شده دیواره‌های داخلی شناور که تاثیر چندانی در مقدار لیفت ندارد، استفاده می‌شود. در مدل اولی از کاتامارانها (شکل) از روابط حاکم برای حالت تک بدنه استفاده می‌شود. در ادامه روش تخمین رفتار کاتامارانهای مدل دوم شرح داده شده است. با توجه به شکل زیر، ضریب $r=\frac{b_1}{b}$ و فاکتور تداخل A که بین ۱/۴۱-۱ تعریف می‌شود. با استفاده از روابط سویتسکی و ضرایب اصلاحی، معادلات حاکم بر کاتامارانها بصورت زیر اصلاح می‌گردد (شکل ۶-۱۹). لازم بذکر است که مابقی روابط بدون تغییر باقی می‌ماند.



شکل ۶-۱۹: نمای مقطع عرضی کاتاماران

$$C_{L_0}=\tau^{1.1}r^{3/2}\left[0.012\frac{\lambda^{1/2}}{A}+\left(0.0055\frac{\lambda^{5/2}A}{C_v^2 r}\right)\right]$$

$$C_P=0.75-\frac{1}{2.39+5.21\left(\frac{C_v^2 r}{A^2\lambda^2}\right)}$$

ضمیمه:

طراحی هیدرودینامیکی بدنه شناورهای سرشی[1]

Daniel Savistky – 1964

چکیده:

در این مطلب، خصوصیات هیدرودینامیکی سطوح سرشی منشوری مورد بحث قرار گرفته و معادلات مربوط به محاسبه موارد ذیل ارائه شده است: نیروی لیفت، درگ، مساحت سطح خیس، مرکز فشار و محدودیت‌های پایداری و ناپایداری طولی سطوح سرشی به عنوان تابعی از سرعت، زاویه تریم، زاویه خیز کف (ددرایز) و میزان بارگذاری. حاصل این فرمولها، پیش‌بینی توان موتور نیاز موتورها، تریم ایجاد شده در حین حرکت، آبخور و ناپایداری طولی بدنه‌های سرشی منشوری می‌باشد.
تحقیقات در زمینه هیدرودینامیک سطوح سرشی از سال ۱۹۱۰ شروع شد و بر روی موضوعات هواپیماهای آب‌نشین و قایق‌های تندرو متمرکز بود. البته امروزه تمرکز بر روی قایق‌های بدنه سرشی و شناورهای هیدروفویلی است. نتیجه این تلاشها گردآوری مجموعه بزرگی از اطلاعات آزمایشات هیدرودینامیکی بود که بر روی سطوح سرشی منشوری با خیز کف ثابت و در حالتهای تریم ثابت، طول خیس ثابت و سرعت ثابت انجام شده بود.
برای کاربردی کردن این اطلاعات نیاز بود که روابطی بین بسیاری از پارامترهای بدنه‌های سرشی با نیروهای لیفت و درگ، ممان پیچ‌دهنده و سطح خیس برقرار شود. این نوع فعالیتها از سال ۱۹۴۷ شروع شد که حاصل آن ۱۶ گزارش فنی در زمینه‌های مختلف ذیل بود: نیروهای لیفت و درگ، سطح خیس، توزیع فشار، شکل میدان ویک، شکل‌گیری اسپری آب، پایداری دینامیکی سطوح سرشی منشوری. سویسکی از سال ۱۹۴۹ شروع به انتشار تحقیقات خود در این زمینه‌ها کرد.

- علائم اختصاری و پارامترها:

علائم اختصاری و پارامترهای بکار رفته در این قسمت از قرار زیر است:

C_f: ضریب مقاومت اصطکاکی برابر با رابطه: $C_f = \frac{D_f.Cos\beta}{0.5\rho V_1^2 \lambda b^2}$

C_{L_0}: ضریب لیفت با زاویه خیز کف صفر برابر با: $C_{L_0} = \frac{\Delta}{0.5\rho V^2 b^2}$

C_{L_β}: ضریب لیفت با سطح دارای خیز کف از رابطه: $C_{L_\beta} = \frac{\Delta}{0.5\rho V^2 b^2}$

C_{Ld}: مؤلفه دینامیکی ضریب لیفت

C_{Lb}: مؤلفه بویانسی ضریب لیفت

C_p: فاصله مرکز فشار (نیروی هیدرودینامیکی) در راستای کیل و جلوتر از پاشنه تخت برابر با: $C_p = \frac{L_p}{\lambda b}$

C_V: ضریب سرعت برابر با: $C_V = \frac{V}{\sqrt{gb}}$

R_e: عدد رینولدز برابر با: $R_e = \frac{V_1 \lambda b}{\nu}$

λ: نسبت طول خیس متوسط به عرض از رابطه: $\lambda = \frac{L_K + L_e}{2b}$

λ_1: نسبت طول خیس متوسط به عرض بر اساس سطح زیر ناحیه غیر آشفته

b: عرض سطح سرشی بر حسب فوت (ft).

D_f: مؤلفه اصطکاکی نیروی درگ در امتداد سطح کف شناور بر حسب پوند (lb) برابر با:

$D_f = D\,Cos\tau - \Delta\,Sin\,\tau$

g: شتاب گرانش برابر با $32.2\ ft/sec^2$ L_c: طول چاین خیس شده بر حسب فوت L_k: طول کیل خیس شده بر حسب فوت

L_p: فاصله از پاشنه تخت تا نقطه تقاطع بردار نیروی هیدرودینامیکی با کیل (اندازه‌گیری شده در راستای کیل) بر حسب فوت.

V: سرعت افقی سطح سرشی بر حسب ft/s

V_1: سرعت متوسط کف سطح سرشی به صورت تابعی از τ و λ و بر حسب ft/s

β: زاویه خیز کف سطح سرشی بر حسب درجه Δ: مقدار جابجایی بر حسب پوند (lb)

ν: ویسکوزیته سینماتیکی سیال بر حسب ft^2/sec ρ: چگالی آب w/g

L_b: مؤلفه لیفت هیدرودینامیکی (lb) D: کل مؤلفه افقی نیروی درگ (lb) D_p: مؤلفه مقاومت ناشی از نیروی فشاری (lb)

d: عمق عمودی لبه انتهایی قایق (در محل کیل) تا سطح افقی آب (ft)

N: مؤلفه نیروی مقاومت عمود بر کف (lb) a: فاصله بین D_f و CG (اندازه‌گیری شده به صورت عمود بر D_f) (ft)

1 - planing hull

f: فاصله بین T و CG (اندازه‌گیری شده به صورت عمود بر T) (ft) T: نیروی تراست پروانه (lb)

ϵ: زاویه بین راستای تراست نسبت به خط کیل بر حسب درجه.

c: فاصله بین N , CG (اندازه‌گیری شده به صورت عمود بر N) (ft)

L_1: تفاوت بین کیل خیس شده با طول چاین (ft) $(L_1 = L_k - L_c)$

L_2: تفاوت بین طول کیل و چاین که توسط سطح آب خیس شده است (ft)

L_m: طول خیس متوسط (ft) $Lm = (L_k + L_c)/2$

ω: وزن ویژه آب (lb/ft^3) γ: زاویه بین خط ریشه اسپری[1] و صفحه موازی کیل (درجه) τ: زاویه تریم سطح سرشی (درجه)

LCG: فاصله مرکز ثقل از پاشنه تخت (اندازه‌گیری شده در راستای کیل) (ft)

φ: زاویه بین کیل و لبه اسپری اندازه‌گیری شده در صفحه کف (درجه) A_s: مساحت سطح خیس شده کل توسط اسپری (ft^2)

VCG: فاصله مرکز ثقل بالای خط کیل اندازه‌گیری شده به صورت عمود به کیل (ft)

- **هیدرودینامیک سطوح سرشی منشوری**

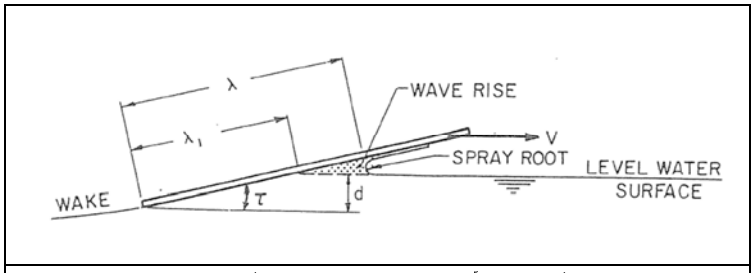
قبل از انجام طراحی هندسه قایق‌های بدنه سرشی، نیاز است که شناختی از خصوصیات هیدرودینامیکی اولیه سطوح سرشی ساده بدست آید. در این قسمت، توضیحاتی در مورد مساحت سطح خیس، نیروهای لیفت و درگ، مرکز فشار و محدودیتهای پایداری سطوح منشوری دارای چاین تند بر حسب زاویه تریم، زاویه خیز کف و سرعت پیشروی ارائه می‌گردد. فرض می‌شود که سطح سرشی منشوری دارای خیز کف ثابت، عرض ثابت و زاویه تریم ثابت برای کل مساحت سطح خیس سرشی باشد. تغییرات این وضعیتها در قسمت فرآیند طراحی بحث خواهد شد. در اینجا فقط شکلهای بدنه سرشی چاین تند در نظر گرفته می‌شود. ضرایب سرشی[2] و علائم استفاده شده در تحلیل‌های بعدی بر اساس قانون فرود ارائه شده و در قسمت قبل آمده است. باید یادآوری شود که عرض، اولین بعدی است که نسبت به طول قایق بی‌بعد می‌شود و معمولاً با ملاحظات معماری دریایی مشخص می‌گردد. علت آن این است که در بدنه‌های سرشی، طول خیس قایق با تریم، بارگذاری روی شناور و سرعت تغییر می‌کند در حالیکه عرض خیس شناور اصولاً ثابت است. علاوه بر آن، این امکان وجود دارد که اگر طول کلی قایق سرشی تغییر کند تغییری را روی خصوصیات هیدرودینامیکی در سرعتهای بالا ایجاد نشود.

- **شکل سطح خیس سطوح سرشی**

تحلیل‌های متفاوتی در مورد شکل سطح خیس سطوح کف تخت و سطوح دارای خیز کف وجود دارد. برخی از این موارد در قسمتهای بعدی ارائه می‌گردد.

- **بالاآمدگی موج[3] در سطوح سرشی تخت[4]**

در مورد سطوح سرشی بدون زاویه خیز کف (سطوح سرشی کف تخت)، آب در قسمت جلوی سطح، بالا می‌آید که باعث می‌شود طول خیس در حال حرکت l بزرگتر از طول تعریف شده در حالت بدون حرکت باشد (شکل۱).

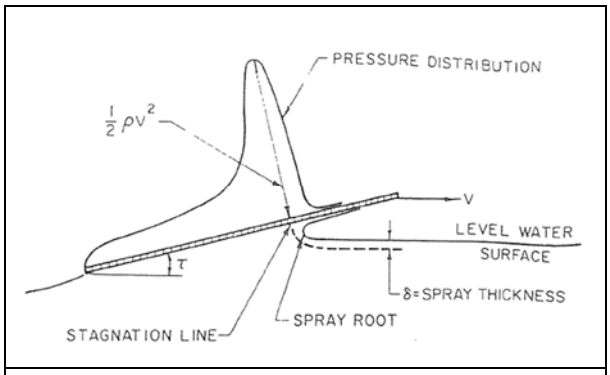


شکل ۱: بالا آمدگی موج روی یک سطح سرشی تخت

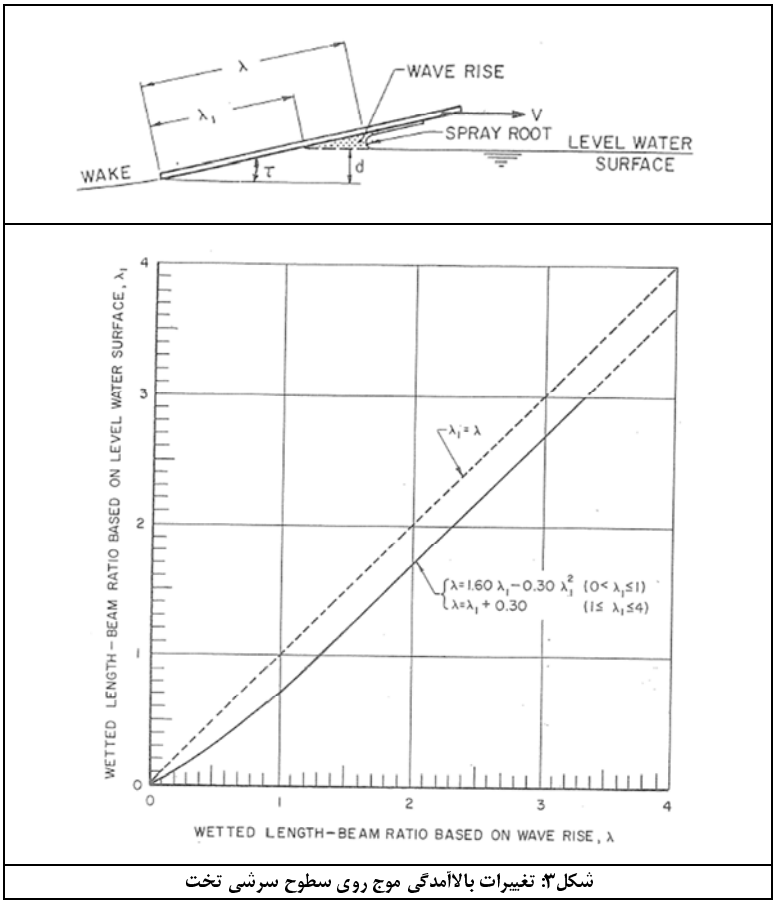
Wagner مطالعات عددی را روی جریان لبه جلویی[5] سطح سرشی با طول نامحدود انجام داد و دریافت که سطح آب بالا آمده، با یک لایه نازک آب که در جلوی سطح و در امتداد طول وجود دارد ترکیب می‌شود. این لایه نازک، منبع اسپری آب در سطوح سرشی است و این ناحیه به عنوان «ریشه اسپری[6]» شناخته می‌شود. شکل ۲ ریشه اسپری و توزیع فشار ناشی از آن را نشان می‌دهد.

1 - spray root line
2- planning coefficient
3 -Wave rise
4 - Flat planning surface
5 - leading edge
6 - spray root

عبارت سطح خیس[1] در اینجا به سطح خیس شده توسط فشار آب وارد شده، منهای سطح خیس ناشی لایه نازک اسپری گفته می‌شود. ولی معمولاً عبارت سطح خیس به عنوان «مساحت فشار[2]» در نظر گرفته می‌شود که از نظر هندسی، شامل تمامی مساحت کف خیس شده از ناحیه ریشه اسپری تا عقب می‌باشد (محل تقاطع خط عمود بر کف سرشی با خط مماس بر منحنی ریشه اسپری). این خط در عکسبرداری-های زیرآبی قابل مشاهده است. طبق شکل ۲، فشار سکون[3] در فاصله کوتاهی عقب‌تر از خط ریشه اسپری مشاهده می‌شود. در زوایای بسیار کوچک تریم، خط سکون[4] و خط ریشه اسپری[5] تقریباً بر هم منطبق می-شوند. هرچه زاویه تریم افزایش می‌یابد، خط سکون به عقب‌تر از خط ریشه اسپری منتقل می‌شوند. اطلاعات طول خیس یک صفحه تخت از تمامی منابع اطلاعاتی موجود در شکل ۳ به صورت λ بر حسب λ_1 ترسیم شده است. در اینجا λ بیانگر نسبت طول خیس متوسط در حال حرکت به عرض $\left(l/b\right)$ و λ_1 بیانگر نسبت طول به عرض در آب آرام است که از رابطه $\lambda_{1=} d/_b Sin\tau$ بدست می‌آید که d عمق لبه انتهایی تا سطح افقی آب سرشی در حال حرکت (مطابق شکل ۳) می‌باشد.



شکل۲: توزیع فشار موردی روی یک سطح سرشی تخت



شکل۳: تغییرات بالاآمدگی موج روی سطوح سرشی تخت

از شکل ۳ ملاحظه می‌شود که در محدوده پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش، بالاآمدگی موج روی یک کف سطح سرشی، تنها تابعی از طول خیس در حال حرکت است. معادله منحنی‌های ارائه شده برای نمودار فوق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

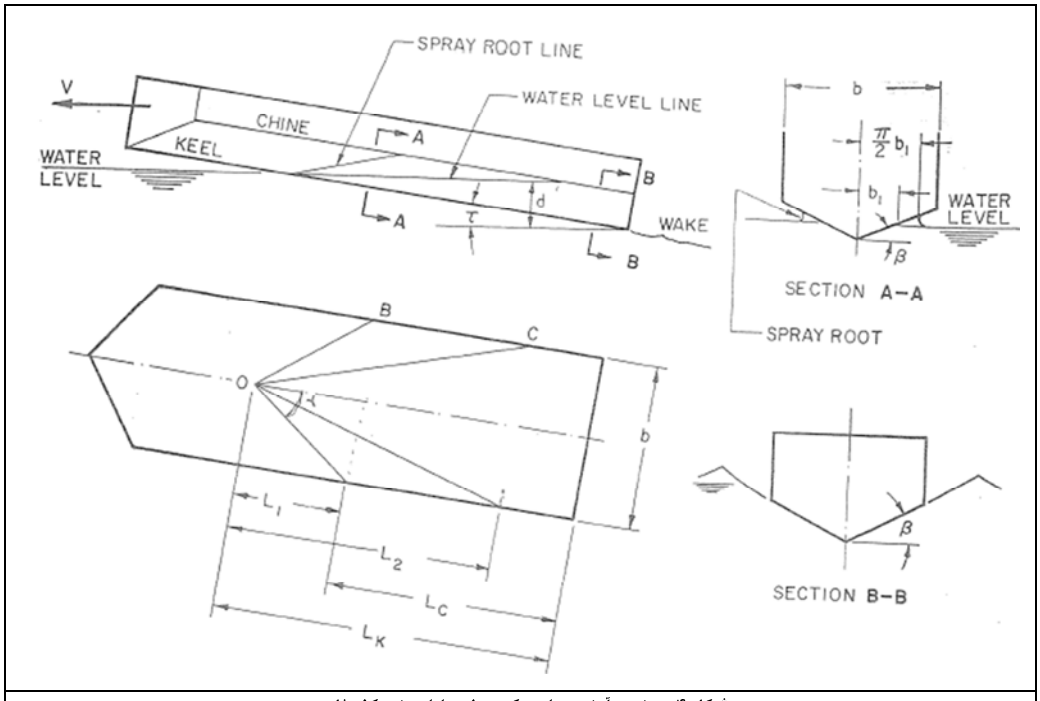
1 - wetted area
2 - pressure area
3 - stagnation pressure
4 - stagnation line
5 - spray root line

$$\lambda = 1.60\,\lambda_1 - 0.30\,\lambda_1^2 \qquad (0 \le \lambda_1 \le 1)$$
$$\lambda = \lambda_1 + 0.30 \qquad (1 \le \lambda_1 \le 4) \qquad (1)$$

برای مقادیر متوسط، λ_1 معمولاً بزرگتر از ۱ بوده و بنابراین معادله ساده روبرو معمولاً بکار می‌رود، که $\lambda = \lambda_1 + 0.3$. همچنین نتایج تحقیقات بیشتر نشان داده است که این رابطه برای محدوده زوایای تریم ۲ تا ۲۴ درجه و $\lambda \le 4$, $C_v < 25$ $0.6 \le$ قابل استفاده است.

- **ناحیه فشار خیس[1] سطوح سرشی دارای خیز کف**

در بدنه‌های سرشی V شکل، تقاطع کف شناور با سطح آب آرام به صورت یک خط مایل (OC) بین خط کیل و خط چاین می‌باشد (شکل۴).



شکل ۴: برخورد آبخور برای یک سطح دارای خیز کف ثابت

تا زوایای تریم حدود ۱۵ درجه، بالا آمدن آب جلوی کیل چندان قابل ملاحظه نیست ولی برای زوایای بیش از ۱۵ درجه، مقدار کمی بالاآمدگی آب در جلوی کیل بوجود می‌آید. از محل تقاطع آب آرام با کف شناور (نقطه O) مقداری بالاآمدگی آب در امتداد خط ریشه اسپری (OB) وجود دارد که جلوتر از خط آب آرام قرار گرفته است. خط ریشه اسپری تا حدودی محدب است ولی از آنجا که انحنای آن بسیار کوچک است، قابل صرفنظر می‌باشد. بنابراین طول خیس متوسط یک سطح دارای خیز کف به صورت میانگین طول اندازه‌گیری شده کیل و چاین (از قسمت پاشنه تخت تا محل تقاطع خط ریشه اسپری) در نظر گرفته می‌شود. تفاوت بین طول کیل خیس شده با طول چاین خیس شده در آب آرام (L_2) تابعی از زاویه تریم و خیز کف است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

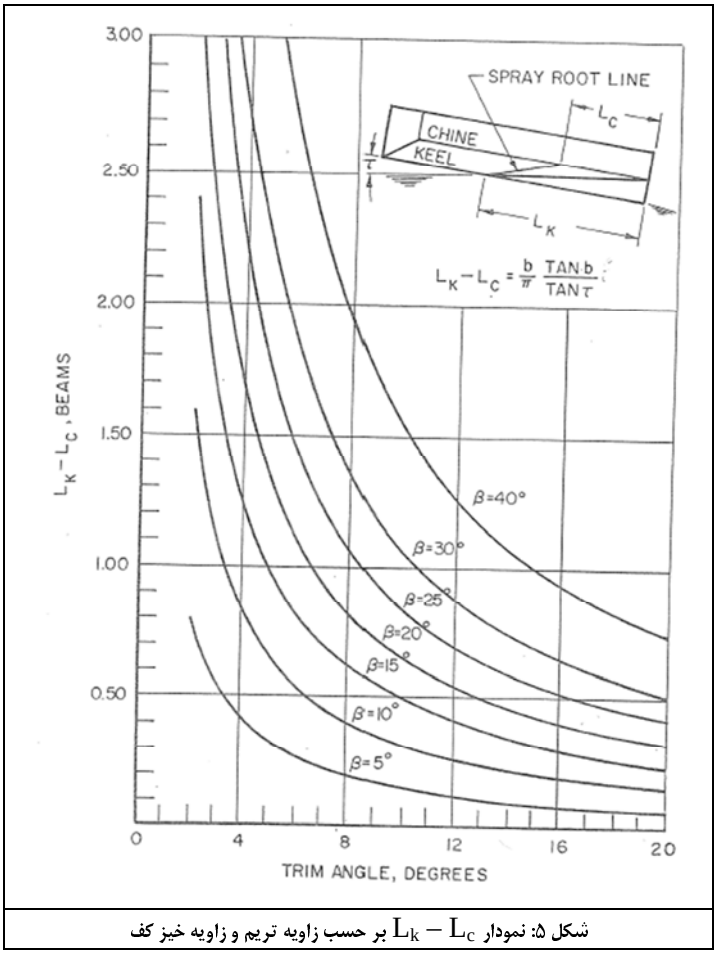
$$L_2 = \frac{b}{2}\frac{\tan\beta}{\tan\tau} \qquad (2)$$

در مورد میزان بالاآمدگی موج[2] درناحیه ریشه اسپری مطالعات زیر انجام شده است. Wagner میزان بالاآمدگی موج برای یک گوه دوبعدی که در یک سیال به صورت عمودی حرکت داده می‌شد را محاسبه کرد و دریافت که عرض خیس واقعی گوه معادل $\frac{\pi}{2}$ برابر عرض گوه در آب آرام در محل تقاطع با کف گوه می‌باشد. حرکت یک سطح سرشی دارای خیز کف، می‌تواند به صورت یک مسئله دو بعدی مطرح شود (با در نظر گرفتن اینکه جریان آب بین دو صفحه عمودی، عمود بر صفحه تقارن سطح سرشی باشد). برای یک ناظری که در بین دو صفحه قرار گرفته است، گذرگاه سطح سرشی V شکل منشوری معرف همان گوه عمودی فرو رفته در آب است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که ضریب بالاآمدگی موج$\frac{\pi}{2}$ که توسط wagner محاسبه شده بود، قابل استفاده است و تفاوت بین طول کیل خیس شده واقعی و طول چاین خیس شده یک سطح سرشی منشوری از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_k - L_c = \frac{b}{\pi}\frac{\tan\beta}{\tan\tau} \qquad (3)$$

ملاحظه می‌شود که این طول معادل $\frac{2}{\pi}$ برابر طول مربوطه است که با تقاطع خط آرام با بدنه سرشی V شکل تعریف شده است. نمودارهای مربوط به این رابطه در شکل ۵ نشان داده شده است.

1 - wetted pressure area
2 -wave rise



شکل ۵: نمودار $L_k - L_c$ بر حسب زاویه تریم و زاویه خیز کف

از آنجا که طول کیل خیس شده می‌تواند بر حسب آبخور انتهایی کیل به صورت زیر محاسبه شود:

$$L_k = \frac{d}{\sin\tau} \qquad (4)$$

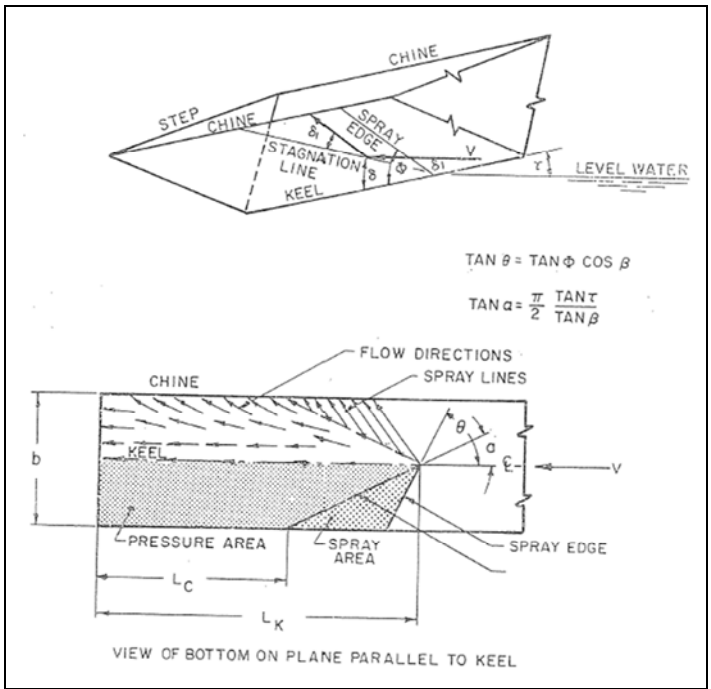
لذا نسبت طول خیس متوسط به عرض (λ) که تعریف کننده سطح فشار است به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\lambda = \frac{\left[\frac{d}{\sin\tau} - \frac{b}{2\pi}\frac{\tan\beta}{\tan\tau}\right]}{b} = \frac{L_k + L_c}{2b} \qquad (5)$$

مدارک تجربی نشان می‌دهد که رابطه ۳ برای تمامی حالات ترکیبی از زوایای خیز کف و تریم قابل استفاده است به شرطی که ضریب سرعت بیش از $C_v = 2$ باشد. این مسئله نشان‌دهنده پیشرفتی است که تخمین و پیش‌بینی ریشه اسپری و میزان بالاآمدگی آب توسط wagner ارائه شده است. برای سطوح دارای خیز کف ۱۰ درجه یا کمتر، رابطه ۳ می‌تواند همچنان قابل کاربرد در $C_v = 1$ باشد. برای سطوح دارای خیز کف ۲۰ درجه در $C_v = 1$ و $\tau \leq 4^\circ$ مقادیر تجربی $L_k - L_c$ بزرگتر از مقادیر پیش‌بینی شده در رابطه ۳ هستند که نشان‌دهنده شکست قسمتی از شکل ریشه اسپری است. مدارک تجربی برای سطوح دارای خیز کف ۳۰ درجه همین اثرات را نشان می‌دهد بجز اینکه در $C_v = 1$، شکل ریشه اسپری وقتی که $\tau \leq 6^\circ$ باشد، می‌شکند. این مسئله نشان می‌دهد که برای $C_v = 1$ ، شکل ریشه اسپری شروع به شکست می‌کند درحالیکه برای یک خیز کف مشخص، زاویه تریم کاهش می‌یابد به یک مقداری همانند مقدار تئوری $L_k - L_c$ که تقریباً برابر 1.66b می‌باشد. مقدار$(L_k\text{-}L_c)/b$ می‌تواند واقعاً برابر با مقدار زاویه γ بین خط ریشه ریشه اسپری و خط کیل (اندازه‌گیری شده در یک صفحه در امتداد کیل) باشد. بنابراین می‌توان این قانون را عمومیت داد که شکل ریشه اسپری در $C_v = 1$ شروع به شکست خواهد کرد (در شرایطی که مقدار تئوری γ حدوداً کمتر از ۱۷ درجه برای یک ترکیب مشخص از زاویه تریم و خیز کف باشد). براحتی نشان داده می‌شود که $\gamma = \tan^{-1}(\tan\tau / 2\tan\beta)$.

- **مساحت سطح خیس اسپری سطوح سرشی دارای خیز کف**

مساحت سطح خیس کل سطوح سرشی در واقع به دو ناحیه کلی تقسیم می‌شود. یکی در عقب خط ریشه اسپری که معمولاً با عنوان سطح فشار[1] شناخته می‌شود و دیگری جلوی خط ریشه اسپری که با عنوان سطح اسپری[2] شناخته می‌شود. سطح فشار که در این بخش تعریف شده است، ناحیه‌ای است که بار وارد به کف سرشی شناور را تحمل می‌کند. سطح اسپری جلویی در درگ کل شناور مشارکت می‌کند ولی برای تحمل هیچ گونه باری در نظر گرفته نمی‌شود. جهت جریان در هر دو سطح خیس توسط عکسبرداری زیرآبی مشخص می‌شود. یک طرح بزرگ شده‌ای از جریان روی یک سطح دارای خیز کف در شکل۶ ارائه شده است.



شکل ۶: جهت جریان در امتداد جسم منشوری سرشی و حیطه ناحیه اسپری

مشخص شده است که جریان در سطح فشار طبیعتاً به سمت عقب است که با برخی جریانات عرضی در راستای چاین ترکیب می‌گردد. جریان در امتداد خط ریشه اسپری اصولاً در امتداد خط سکون[3] است. یعنی هر خط حرکتی در ناحیه اسپری نزدیک است به بازگشت[4] حول خط سکون در راستای سرعت برخوردی. از آنجا که فشار در ناحیه اسپری تقریباً فشار ۱ آتمسفر است لذا طبق قانون برنولی، سرعت اسپری می‌تواند برابر با سرعت سرشی[5] در نظر گرفته شود. معادلاتی وجود دارند که جهت اسپری را بر حسب زاویه تریم و زاویه خیز کف بیان می‌کنند. ناحیه اسپری واقعی از خط ریشه اسپری به سمت جلو تا لبه اسپری امتداد می‌یابد. زاویه φ بین کیل و لبه اسپری اندازه‌گیری شده در صفحه کف به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\tan\varphi = \frac{A + k_1}{1 - Ak_1} \qquad (6)$$

$$A = \frac{\left\{\sin^2\tau\,(1-2K) + K^2\tan^2\tau\left[\left({}^{1}/_{\sin^2\beta}\right) - \sin^2\tau\right]\right\}^{1/2}}{\cos\tau + K\,\tan\tau\sin\tau}$$

$$k_1 = \frac{K\tan\tau}{\sin\beta}$$

$$K \approx \frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{3\,\tan^2\beta\cos\beta}{1.7\,\pi^2} - \frac{\tan\beta\sin^2\beta}{3.3\,\pi}\right)$$

ناحیه اسپری کل در هر دو طرف، تصویر شده روی صفحه در امتداد خط کیل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A_s = \frac{b^2}{2}\left(\frac{\tan\beta}{\pi\,\tan\tau} - \frac{1}{4\,\tan\Phi\cos\beta}\right) \qquad (7)$$

در به تصویر کشیدن طول چاین خیس شده در حین حرکت سرشی، تشخیص تفاوت نقطه برخورد ریشه اسپری با چاین و نقطه برخورد لبه اسپری[6] با چاین بسیار مهم است. شکل ۷ تفاوت بین این دو نقطه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که لبه اسپری معمولاً جلوتر از محل برخورد ریشه اسپری با کف است.

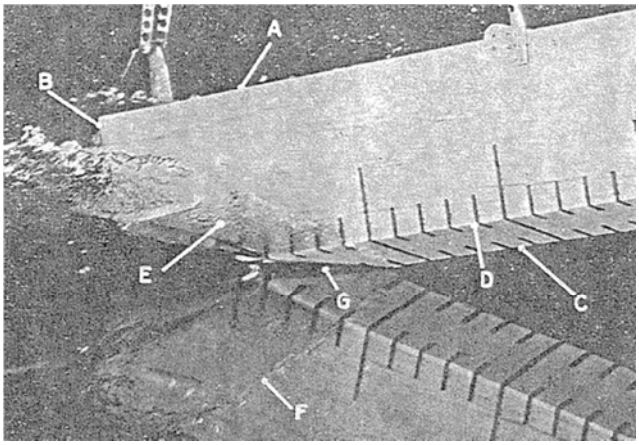
1 -pressure area
2 - spray area
3 -stagnation line
4 - reflection
5 - planning speed
6 - spray edge

- **نیروی لیفت سطوح سرشی**

این مبحث ابتدا برای معادلات لیفت سطوح سرشی تخت بیان می‌شود و سپس نشان می‌دهد که چگونه این نتایج برای شناورهای دارای خیز کف اصلاح می‌گردد.

- **نیروی لیفت سطوح سرشی تخت**

نیروی لیفت بر روی سطوح سرشی (در آبخور و زاویه تریم ثابت) می‌تواند به دو پدیده کلی تقسیم شود: یکی عکس‌العمل دینامیکی سیال در مقابل سطح در حال حرکت و دیگری نیروی بویانسی که در لیفت مشارکت می‌کند و همراه با فشار استاتیکی در یک آبخور و تریم مشخص است. در واقع بویانسی در مقابل گرانش مطرح می‌شود. در ضریب سرعتهای خیلی پائین، لیفت ناشی از بویانسی غالب است. با افزایش سرعت، اثرات لیفت دینامیکی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت روی یک سطح سرشی منشوری، بارهای دینامیکی وارد بر شناور افزایش می‌یابد. در ضریب سرعتهای خیلی بالا نیروی لیفت دینامیکی بر لیفت بویانسی ناشی از فشار استاتیکی غلبه می‌کند، چنانکه نیروی بویانسی بسیار ناچیز می‌شود. نیروی لیفت بدنه‌های سرشی بر اساس ترکیب نیروهای استاتیکی و دینامیکی بیان می‌شود. مجدداً تأکید می‌شود که جهت جریان سیال روی ناحیه فشار یک سطح سرشی، ترکیبی از جریان طولی و کمی جریان عرضی در هر دو طرف خط چاین است. از تئوری آیرودینامیکی می‌دانیم که سطوح ایجادکننده لیفت با نسبت منظری[1] بالا (مقدار λ کوچک) دارای جریان طولی[2] غالب است و نیروی لیفت بطور مستقیم متناسب با τ است. برای سطوح دارای اسپن[3] بسیار کوچک و طول نامحدود یعنی $\lambda = \infty$، جریان در جهت عرضی است و نیروی لیفت متناسب با τ^2 است. بنابراین برای سطوح سرشی معمولی با ضریب منظری کم، ضریب نیروی لیفت را می‌توان به شکل زیر بیان داشت:



شکل ۷: خصوصیات سطح سرشی V شکل: A-مدل گوه سرشی B-پاشنه تخت C-کیل D-چاین E-اسپری ویسکر F- لبه بازگشت اسپری G-ناحیه ریشه اسپری

$$C_L = A.\tau + B.\tau^2 \qquad (8)$$

برای مقادیر کاربردی λ در سطوح سرشی، عبارت دوم نیازمند کمی اصلاح است و می‌توان دریافت که معادله ۸ می‌تواند تقریباً با توان ۱/۱ عبارت τ اصلاح شود. بنابراین:

$$\frac{C_L}{\tau^{1.1}} = f(\lambda, C_v) \qquad (9)$$

Sottorf با بررسی اطلاعات بدنه‌های سرشی سرعت بالا که در آنها عامل هیدرواستاتیکی قابل صرفنظر است، نشان داد که برای یک زاویه تریم مشخص، مؤلفه دینامیکی ضریب لیفت با $\sqrt{\lambda}$ تغییر می‌کند. بنابراین این مؤلفه را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$C_{L_d} = c\lambda^{0.5}\tau^{1.1} \qquad (10)$$

که ضریب C یک ثابت است و باید مشخص شود. مؤلفه هیدرواستاتیک لیفت برای یک صفحه تخت به عرض b، نسبت طول خیس متوسط به عرض λ و زاویه تریم τ می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$L_b = \frac{1}{2}\rho g b^3(\lambda - 0.30)^2 \tan\tau \qquad (11)$$

با تقسیم هر دو طرف معادله فوق بر عبارت $\frac{1}{2}\rho V^2 b^2$ و با فرض اینکه $(\lambda - 0.3)^2$ می‌تواند با $D\lambda^n$ جایگزین شود که D و n ثابتهایی هستند که باید تعریف شوند، در نتیجه:

$$C_{L_b} = \frac{D\lambda^n}{C_v^2}\tan\tau \qquad (12)$$

اگر تفاوت بین $\tan\tau$ و $\tau^{1.1}$ قابل صرفنظر باشد، می‌توان C_{Lb} را به صورت زیر نوشت:

$$C_{L_b} = \frac{D\lambda^n}{C_v^2}\tau^{1.1} \qquad (13)$$

با ترکیب معادله (۱۰) و (۱۳) ضریب نیروی لیفت یک سطح سرشی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_L = \tau^{1.1}\left(c\lambda^{1/2} + \frac{D\lambda^n}{C_v^2}\right) \qquad (14)$$

---

1 - aspect ratio
2 - chordwise
3 - span

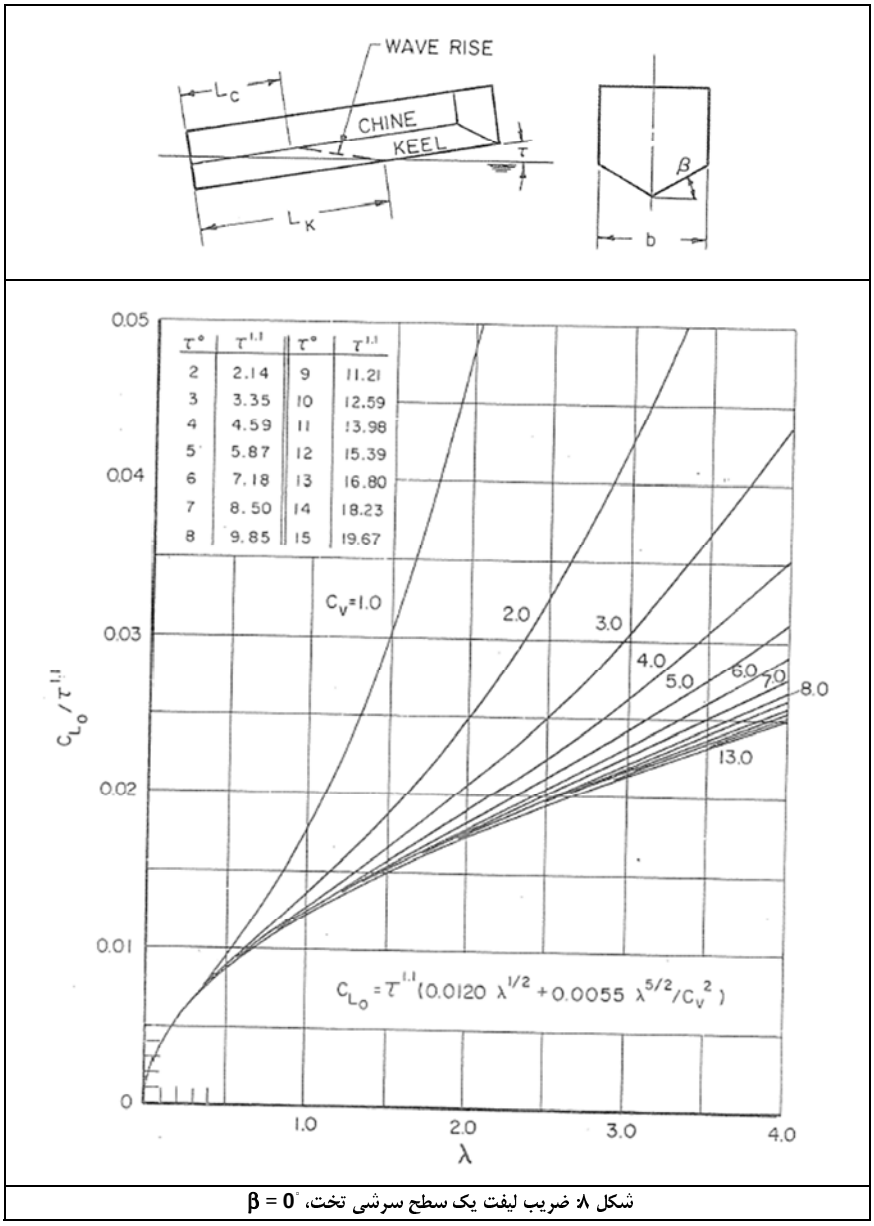
روشهای مختلفی برای محاسبه ضریب نیروی لیفت وجود دارند ولی مزیت رابطه ۱۴ این است که مستقیماً اثرات پارامترهای مختلف را بر نیروی لیفت نشان می‌دهد و همچنین برای طراحی بدنه‌های سرشی، بسیار قابل کاربرد است. ثابتهای n , D , C بر اساس داده برداری‌های بسیار زیاد بدست می‌آیند. برای معادله نیروی لیفت در یک سطح با زاویه خیز کف صفر، می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$C_L = \tau^{1.1}\left(0.0120\lambda^{1/2} + \frac{0.0055\lambda^{\frac{5}{2}}}{C_v^2}\right) \qquad (15)$$

که τ بر حسب درجه است. این فرمول برای محدوده زیر قابل کاربرد است:

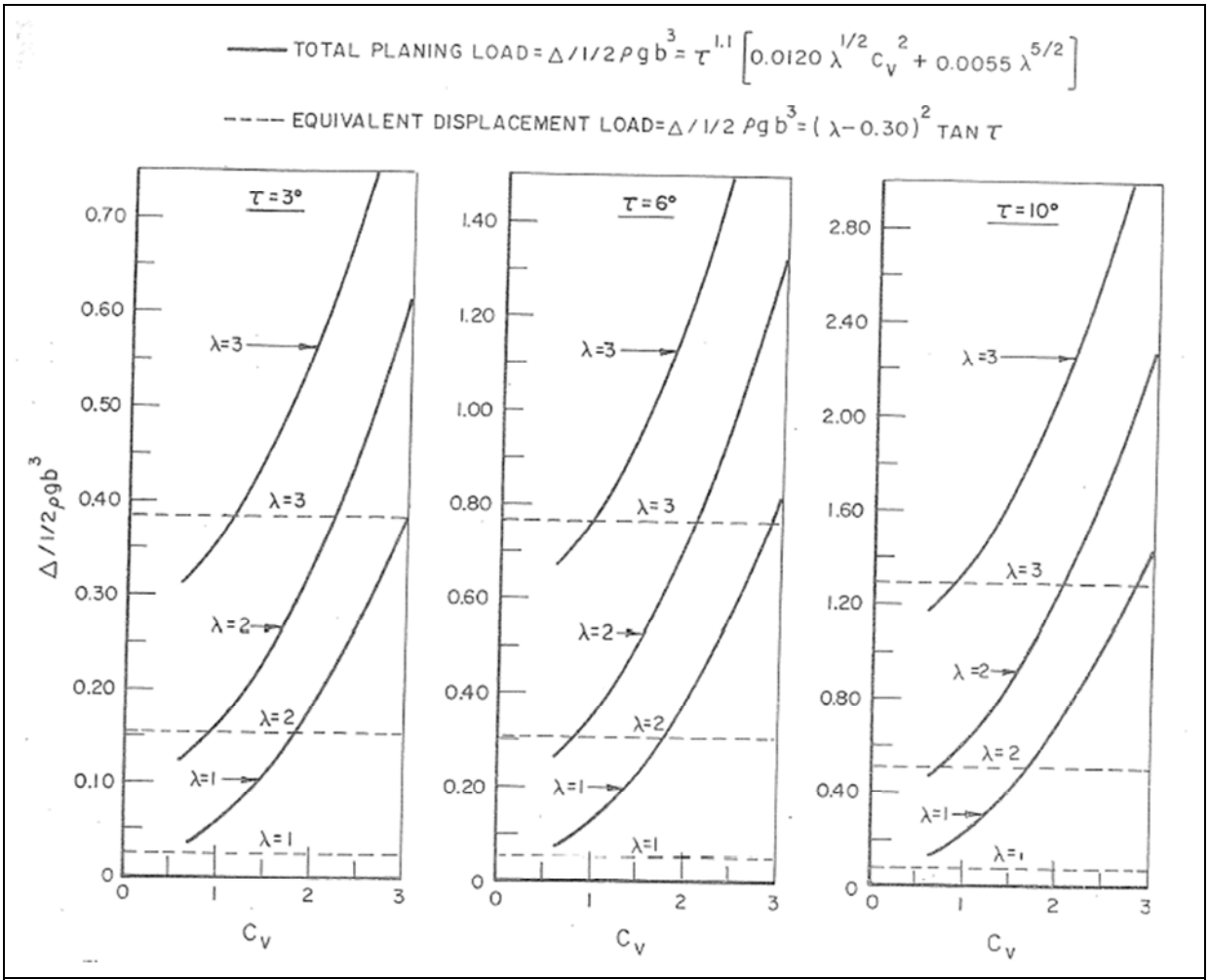
$0.6 \le C_v \le 13 \quad , \quad 2^\circ \le \tau \le 15^\circ \quad , \quad \lambda \le 4$.

برای استفاده راحت‌تر، فرمول ۱۵ به صورت نمودار شکل ۸ به صورت $C_L/\tau^{1.1}$ بر حسب λ برای محدوده وسیعی از مقادیر C_v ترسیم شده است. مثلاً یک λ ثابت در این نمودار، مشخص می‌شود که سهم نیروی بویانسی در لیفت، تا ضریب سرعت حدود ۱۰ مقدار قابل ملاحظه‌ای است.



شکل ۸: ضریب لیفت یک سطح سرشی تخت، $\beta = 0^\circ$

در $C_v > 10$ نیروی لیفت دینامیکی غالب می‌شود و پس از آن ضریب لیفت مستقل از سرعت می‌شود. در واقع برای $C_v > 10$ ضریب لیفت یک صفحه تخت می‌توان به صورت ساده زیر نوشته شود: $C_L = 0.012\lambda^{\frac{1}{2}}\tau^{1.1}$. برای توضیح میزان کاهش لیفت در سرعتهای خیلی پائین $(C_V \le 1)$، شکل ۹، مقایسه بین لیفت برآیند و مؤلفه خالص لیفت استاتیکی (بویانسی) را برای یک آبخور و تریم مشخص یک سطح سرشی نشان می‌دهد.



شکل ۹: بار سرشی بر حسب بار جابجایی محاسبه شده برای یک سطح سرشی تخت در ضرایب سرعت مختلف

یک شکل خاصی از ضریب بار[1] بر حسب ضریب سرعت برای ۳ طول خیس در ۳ زاویه تریم ترسیم شده است. منحنی‌های خط ممتد، بارهای سرشی هستند که طبق رابطه ۱۵ تخمین زده شد و ملاحظه می‌شود که با C_V تغییر می‌کند. منحنی‌های نقطه‌چین مؤلفه بارهای بویانسی هستند که توسط رابطه ۱۱ بیان شد. این بار مستقل از C_V می‌باشد. در مقایسه بین بار سرشی و بار بویانسی محاسبه شده، محدود به مقادیر $C_V \geq 0.6$ می‌باشد چراکه این همان محدوده کارآیی رابطه ۱۵ است. از آنجا که مقدار C_V به صفر نزدیک می‌شود، طبیعتاً انتظار می‌رود که بار محاسبه شده باید به مقدار بار بویانسی نزدیک شود. جالب است یادآوری شود که در شکل ۹ که $0.6 \leq C_V \leq 1$ است، حرکت سطح سرشی باعث کاهش نیروی لیفت در مقادیر کمتر از این محدوده می‌شود که می‌توان یک اساس جابجایی خالص را انتظار داشت. این اثر تا حدودی شبیه اثر فرورفتگی[2] است که توسط شناورهای جابجایی در سرعتهای پائین تجربه می‌شود. در $C_V \approx 1$، بار سرشی کل تقریباً برابر است با بار بویانسی. در $C_V > 1$، عکس‌العمل دینامیکی مثبت سیال بر روی کف سرشی سریعاً با افزایش سرعت، افزایش می‌یابد.

- **نیروی لیفت سطوح سرشی دارای خیز کف**

برای یک تریم و یک نسبت طول خیس متوسط به عرض، اثر افزایش زاویه خیز کف باعث کاهش نیروی لیفت سرشی می‌گردد. این کاهش لیفت بر اثر کاهش فشار سکون[3] در لبه جلویی سطح خیس ایجاد می‌گردد. زاویه بین خط سکون[4] و کیل توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$\gamma = \tan^{-1}(\tan\tau / 2\tan\beta)$

1 - load coefficient
2 - sinkage
3 - stagnation pressure
4 - stagnation line

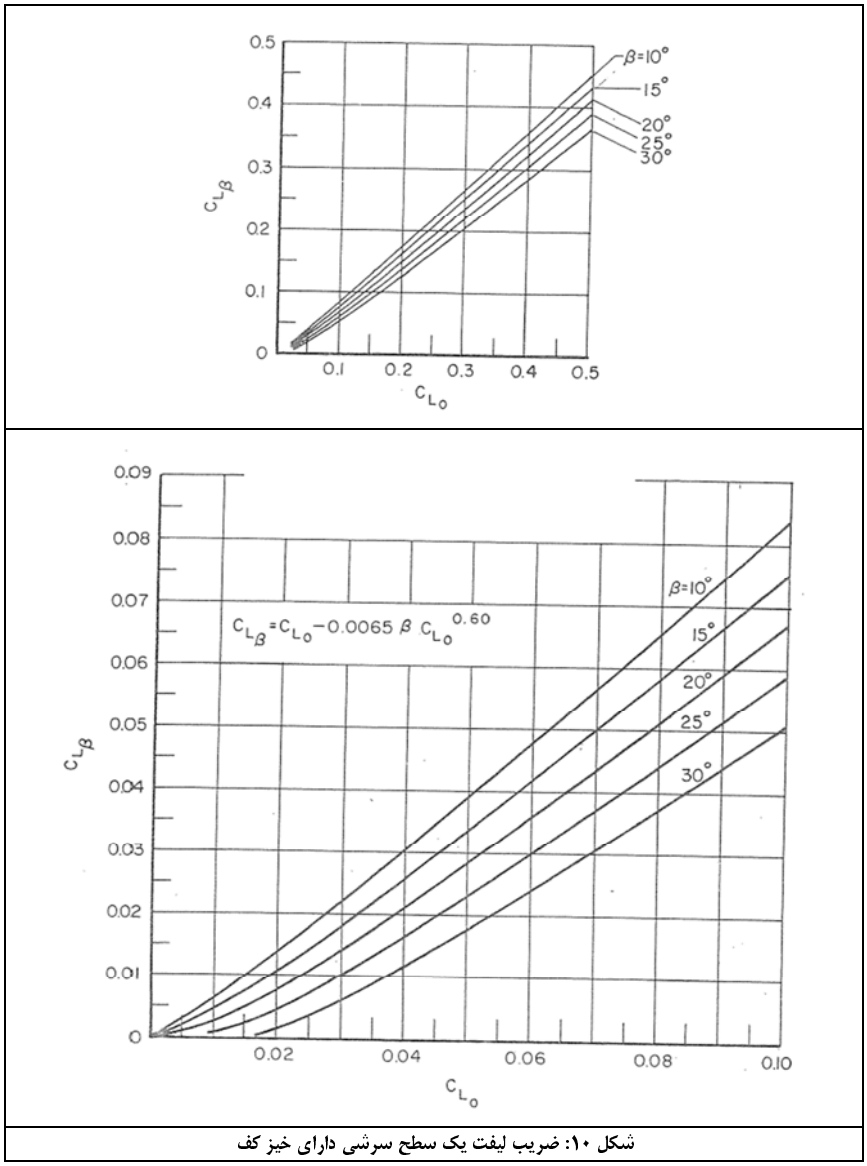
وقتی $\beta = 0^\circ$ باشد خط سکون عمود بر کیل و عمود بر سرعت جریان آزاد[1] است چنانکه فشار سکون کامل $\frac{1}{2}\rho V^2$ بدست می‌آید. با افزایش مقادیر β، زاویه γ کاهش می‌یابد چنانکه فشار سکون کامل دیگر وجود ندارد. بنابراین نیروی لیفت سرشی کاهش می‌یابد. وجود خیز کف باعث می‌شود که خط سکون به قسمت عقب‌تر منتقل شده و باعث کاهش لیفت شود.

برای رسیدن به یک معادله برای لیفت سرشی یک سطح دارای خیز کف، ضریب لیفت یک سطح V شکل با یک صفحه تخت با مقادیر C_v , λ , τ مقایسه شد. از روابط ۷ و ۹ فهمیدیم که نیروی لیفت یک سطح دارای خیز کف می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$C_{L_\beta} = C_{L_o} - 0.0065\beta C_{L_o}^{0.60} \qquad (16)$$

که در آن: $C_{L\beta}$: ضریب لیفت برای یک سطح دارای خیز کف است. β: زاویه خیز کف بر حسب درجه. C_{Lo}: ضریب لیفت یک صفحه تخت که در همان مقادیر C_v , λ , τ صفحه دارای خیز کف عمل می‌کند.

برای راحتی بیشتر در استفاده از این معادله، نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰: ضریب لیفت یک سطح سرشی دارای خیز کف

- **درگ سطوح سرشی**

درگ هیدرودینامیکی کل وارد بر سطوح سرشی، ترکیبی از فشار عمود خیز کف شناور و درگ ویسکوزیته مماس بر کف شناور، هم در ناحیه فشار و هم در ناحیه اسپری است. اگر سطوح جانبی بدنه نیز خیس شوند، یک درگ ویسکوزیته دیگر باید به مقاومت هیدرودینامیکی وارد بر کف سطح سرشی

1 - *free stream velocity*

اضافه شود. در تحلیل حاضر، خیسی سطوح جانبی وجود ندارد. برای یک سیال بدون اصطکاک، نیروی مماسی صفر است. بنابراین برای یک زاویه تریم τ، بار Δ و نیروی N عمود بر کف، مؤلفه مقاومت D_p ناشی از نیروی فشاری در شکل ۱۱ نشان داده شده است که داریم:

$$D_p = \Delta \tan\tau \qquad (17)$$

هنگامیکه درگ ویسکوزیته D_f مماس بر کف وارد می‌شود نیز اضافه می‌گردد و درگ کل D بدست می‌آید که در شکل ۱۲ نشان داده شده است که داریم:

$$D = \Delta \tan\tau + \frac{D_f}{\cos\tau} \qquad (18)$$

مؤلفه اصطکاکی D_f در اینجا به اینصورت محاسبه می‌گردد:

$$D_f = \frac{C_f \rho V_1^2 (\lambda b^2)}{2\ (\cos\beta)^4} \qquad (19)$$

C_f: ضریب اصطکاک توربولانس شونهر و V_1: سرعت کف متوسط

سرعت کف متوسط (V_1) کمتر از سرعت سرشی رو به جلو (V) می‌باشد و از آنجا منتج می‌شود که فشار کف سرشی بزرگتر از فشار جریان آزاد است.

روابط کاربردی و مفیدی در محدوده $(1 < C_V < 13)$ ارائه شده که بر اساس فرضیات زیر می‌باشد: اولاً زاویه خیز کف بدنه صفر است ثانیاً مؤلفه دینامیکی نیروی لیفت سرشی از عبارت اول فرمول ۱۵ بدست می‌آید. لذا داریم:

$$C_{L_d} = 0.0120\lambda^{0.5}\tau^{1.1} \qquad (20)$$

بار دینامیکی وارد بر کف عبارتست از:

$$\Delta_d = \frac{1}{2}\rho V^2 b^2 (0.0120\lambda^{0.5}\tau^{1.1}) \qquad (21)$$

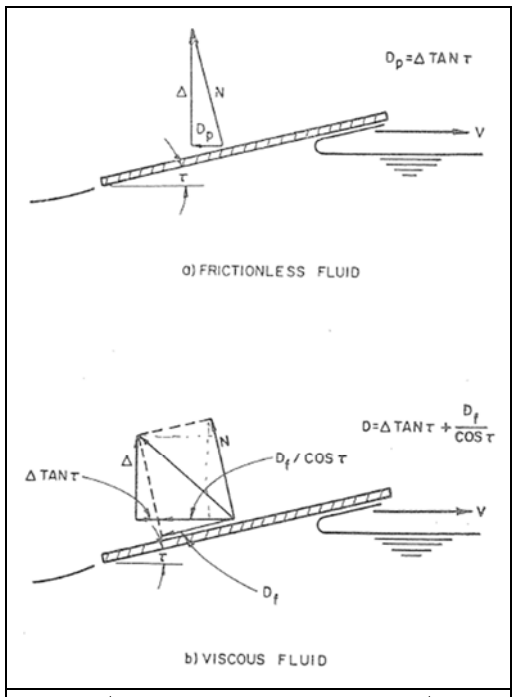
فشار دینامیکی متوسط عبارتست از:

$$p_d = \frac{\Delta}{\lambda b^2 \cos\tau} = \frac{0.0120\tau^{1.1}V^2\rho}{2\lambda^{0.5}\cos\tau} \qquad (22)$$

با بکار بردن قانون برنولی بین شرایط جریان آزاد و شرایط فشار و سرعت متوسط روی کف سطح سرشی، داریم:

$$V_1 = V\left(1 - \frac{2p_d}{\rho V^2}\right)^{1/2} \qquad (23)$$

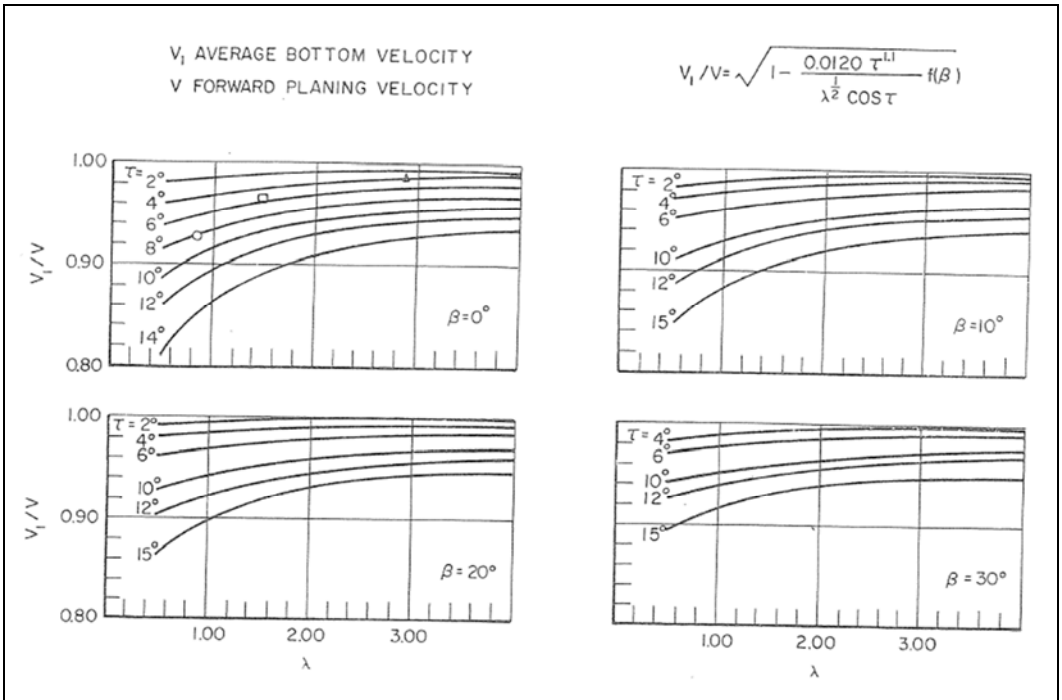
$$V_1 = V\left(1 - \frac{0.0120\tau^{1.1}}{\lambda^{1/2}\cos\tau}\right)^{1/2} \text{ for } \beta = 0^\circ \qquad (24)$$



شکل ۱۱: مؤلفه‌های درگ روی یک سطح سرشی

با جاگذاری رابطه ۲۲ در رابطه ۲۳ داریم:

سرعت متوسط کف برای یک زاویه خیز کف مشخص با استفاده از نسبت V_1 / V بدست می‌آید و طبق شکل ۱۳ که برای چهار زاویه خیز کف متفاوت ترسیم شده بدست می‌آید.



شکل ۱۲: مقدار سرعت متوسط کف برای یک سطح سرشی

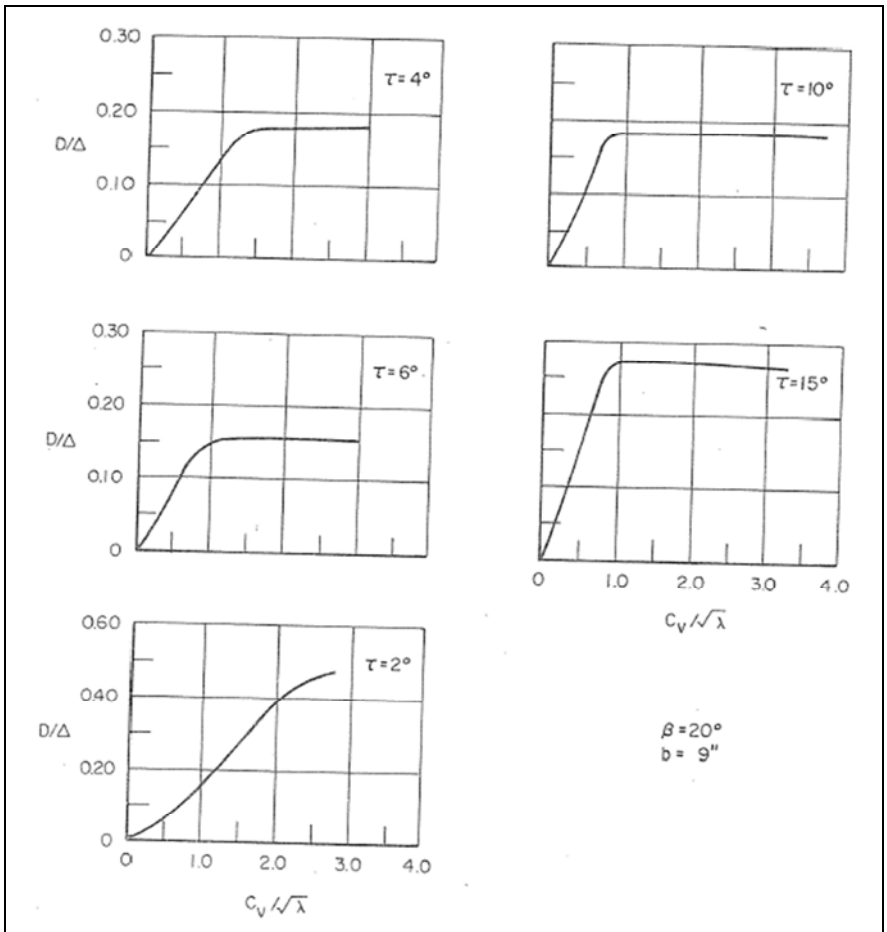
یادآوری می‌شود که مساحت سطح خیس استفاده شده در رابطه ۱۹، مساحت فشار کف λb^2 می‌باشد. تحقیقات بیشتر نشان داد که مقاومت اصطکاکی در ناحیه اسپری، می‌تواند منجر به شکل ساده‌تری شود: یک مؤلفه اضافی $\Delta\lambda b^2$ باید به مساحت فشار λb^2 اضافه شود. این نتایج برای زوایای تریم بزرگتر از ۴ درجه به عنوان مبنا قرار گرفت. تحقیقات بعدی نشان داد که در زوایای تریم کمتر از ۴ درجه (که برای قایق‌های تندرو رایج است)، ضخامت اسپری به صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از آنچه فرض شده بود می‌باشد. در واقع نشان داده شد که صفحه اسپری خیلی نازک‌تر از ضخامت لایه مرزی در شناورهای جابجایی در همان رینولدز است. سرانجام مقرر شد برای زوایای تریم کمتر از ۴ درجه، مساحت استفاده شده برای محاسبه درگ ویسکوزیته می‌تواند λb^2 باشد ولی برای زوایای بزرگتر از ۴ درجه باید از همان مساحت گفته شده در بالا استفاده شود. بطور خلاصه، درگ هیدرودینامیکی یک سطح سرشی از معادله زیر بدست می‌آید:

$$D = \Delta \tan\tau + \frac{\rho V_1^2 C_f \lambda b^2}{2\cos\beta\cos\tau} \qquad (25)$$

که مقدار V_1 در شکل ۱۳ ترسیم شده است و C_f ضریب اصطکاک توربولانس شونهر است. عدد رینولدز به صورت $R_n = V_1\lambda b/\nu$ تعریف می‌شود که ν ویسکوزیته سینماتیکی است.

- **نسبت نیروی درگ به لیفت در سطوح سرشی**

قبل از محاسبه نسبت درگ به لیفت سطوح سرشی، بهتر است که تغییرات نسبت درگ به لیفت به عنوان تابعی از سرعت، طول خیس و زاویه تریم ارزیابی شود. برای این منظور، داده‌های تجربی برای یک سطح سرشی به عرض ۹ اینچ و زاویه خیز کف ۲۰ درجه برای زوایای تریم مختلف در شکل ۱۴ ترسیم شده است.



شکل ۱۳: تغییرات درگ به لیفت با ضریب سرعت

محور افقی در این نمودارها مقدار $C_V/\sqrt{\lambda}$ است که همانند رابطه عدد فرود $V/\sqrt{gl}$ می‌باشد. باید تأکید شود که نسبتهای درگ به لیفت شکل ۱۴ فقط برای یک مدل تست شده به عرض ۹ اینچ قابل کاربرد است و مستقیماً نمی‌تواند برای قایق‌های اندازه واقعی بکار رود. این نمودارها به صورت موردی برای بیان تغییرات نسبت درگ به لیفت سطوح سرشی ارائه شده است.

از شکل ۱۳ که نسبت D/Δ بر حسب $C_V/\sqrt{\lambda}$ رسم شده ملاحظه می‌شود که تا رسیدن به نسبت $C_V/\sqrt{\lambda} \approx 1$ یک افزایش خیلی سریع در مقدار D/Δ در تمامی زوایای تریم رخ داده است. در زاویه تریم بزرگتر از ۲ درجه و در $C_V/\sqrt{\lambda} > 1$، مقادیر D/Δ برای هر ترکیبی از سرعت و طول خیس ثابت است. برای زاویه تریم ۲ درجه منحنی D/Δ در مقادیر $C_V/\sqrt{\lambda} > 2$ تقریباً ثابت می‌شود. تغییرات D/Δ می‌تواند همراه با تغییرات جریان سیال حول سطح سرشی باشد. همچنین مشخص شده است که در $C_V \geq 2$ یک جدایش جریان مشخص و واضح در چاین‌ها و پاشنه تخت وجود داشته است.
علاوه بر آن در $C_V \leq 1$ میزان جدایش جریان در پاشنه تخت، در یک زاویه تریم مشخص، تابعی از طول خیس است که هرچه طول خیس کمتر باشد جدایش جریان بزرگتری وجود دارد. با افزایش میزان جدایش جریان در پاشنه تخت، نیروی درگ افزایش یافته و بنابراین نسبت D/Δ افزایش می‌یابد، تا اینکه جدایش جریان کامل در امتداد خطوط چاین و پاشنه اتفاق بیافتد.
اگر حالت سرشی و بلند شدن شناور برای حالتی تعریف شود که شکست سیال از خطوط چاین و پاشنه اتفاق می‌افتد، با استفاده از شکل ۱۳ می‌توان گفت که حالت سرشی وقتی اتفاق می‌افتد که برای $C_V/\sqrt{\lambda} = 1$ در $\tau \geq 4^\circ$ و برای $C_V/\sqrt{\lambda} = 2$ در $\tau = 2^\circ$ باشد.

در واقع حالت سرشی وقتی اتفاق می‌افتد که نسبت درگ به لیفت در یک زاویه تریم مشخص، اصولاً ثابت باشد. تعاریف دیگری نیز برای حالت سرشی وجود دارد مثلاً Locke بیان می‌دارد که حالت سرشی وقتی اتفاق می‌افتد که در یک λ و τ مشخص، نیروی تحمل شده توسط سطوح سرشی با توان ۲ سرعت تغییر کند. این مسئله بیان می‌دارد که مؤلفه بویانسی نیروی لیفت قابل صرفنظر است.
در هر دو تعریف، تنها قسمت کف سطح سرشی خیس شده است. استفاده از $C_V/\sqrt{\lambda} = 1$ حالتی را تعریف می‌کند که این پدیده اتفاق می‌افتد. البته نحوه تعریف حالت سرشی چندان مهم نیست. از شکل ۱۳ مشخص می‌شود که وقتی قایق شروع به سرش می‌کند، بیشترین مقدار مقاومت را در یک زاویه تریم ثابت دارد. وقتی که نسبت $C_V/\sqrt{\lambda}$ به مقدار کمتر از ۱ کاهش می‌یابد، مقاومت به شدت کاهش پیدا می‌کند.

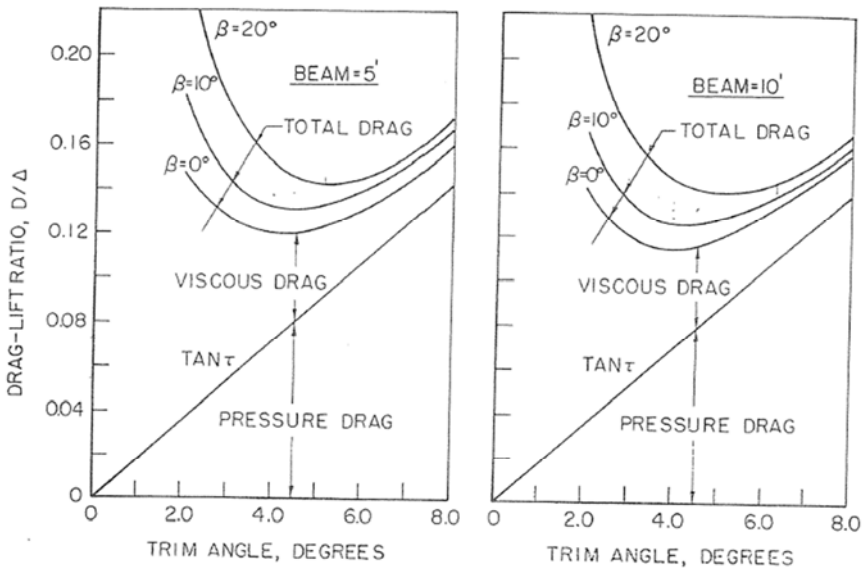
با استفاده از رابطه ۲۵، نسبت نیروی درگ به لیفت یک سطح سرشی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\frac{D}{\Delta} = \tan\tau + \frac{\rho V_1^2 C_f \lambda b^2}{2\,\Delta \cos\beta\, \cos\tau} \qquad (26)$$

با ضرب و تقسیم کردن V^2 در عبارت دوم طرف راست معادله فوق و جاگذاری C_L بجای $2\Delta/\rho V^2 b^2$ نتیجه می‌شود که:

$$\frac{D}{\Delta} = \tan\tau + \frac{\left(\frac{V_1}{V}\right)^2 C_f \lambda}{C_L\ \cos\tau \cos\beta} \qquad (27)$$

می‌دانیم که اگر $\beta = 0^\circ$ باشد $C_L = C_{Lo}$ و اگر $\beta \neq 0^\circ$ باشد $C_L = C_{L\beta}$. مقدار V_1/V از شکل ۱۲ استخراج می‌شود. ضریب اصطکاک C_f تابعی از عدد رینولدز است که با افزایش ابعاد شناور، افزایش می‌یابد. همانطور که توسط شونهر نشان داده شده، ضریب اصطکاکی توربولانس با افزایش رینولدز کاهش می‌یابد و نسبت D/Δ به آرامی با افزایش ابعاد شناور، کاهش می‌یابد (برای یک ترکیب مشخص از λ وτ و β و C_v). معادله ۲۷ برای محاسبه نسبت D/Δ برای زوایای خیز کف صفر و ۱۰ و ۲۰ درجه و در زوایای تریم ۲ و ۴ و ۶ و ۸ درجه استفاده شده است. نسبت طول خیس به عرض λ از ۱ تا ۴ تغییر کرده و ضریب سرعت تا $C_v = 10$ در حالات ترکیبی مختلف استفاده شده است. این محاسبات برای عرض b به مقدار ۵ و ۱۰ فوت انجام شد. همانطور که انتظار می‌رفت برای $\tau = 4^\circ$، نسبت D/Δ اساساً هنگامیکه $C_V/\sqrt{\lambda} > 1$ بود، ثابت بدست آمد. برای $\tau = 2^\circ$ هنگامیکه $C_V/\sqrt{\lambda} > 2$ بود، نسبت D/Δ اصولاً ثابت بود. نتایج این محاسبات در شکل ۱۴ ارائه شده است، چنانکه اثر زاویه تریم، خیز کف و اندازه شناور روی نسبت درگ به لیفت مشخص شود. هر نقطه محاسبه شده بطور متوسط ارائه کننده پنج ترکیب مختلف از $C_V/\sqrt{\lambda}$ می‌باشد.



شکل ۱۴: تغییرات نسبت درگ به لیفت برای سطوح سرشی منشوری

بطور متوسط تقریباً ۵ درصد پراکندگی در مقادیر محاسبه شده برای هر ترکیبی از زاویه تریم و زاویه خیز کف وجود دارد. برای مقادیر دقیق‌تر D/Δ توصیه می‌شود که ارزیابی دقیق‌تر معادله ۲۷ برای موارد خاص انجام شود. از شکل ۱۴ مشخص می‌شود که برای هر زاویه خیز کف مشخص، یک زاویه تریم بهینه با کمترین نسبت D/Δ وجود دارد. یک کاهش کوچک در زاویه تریم کمتر از مقدار تریم بهینه، باعث افزایش زیاد مقاومت می‌شود. افزایش کوچک زاویه تریم به بیشتر از مقدار تریم بهینه، منجر به افزایش اندک مقاومت می‌گردد.

افزایش زاویه خیز کف باعث افزایش مقاومت در یک زاویه تریم مشخص می‌گردد. در زاویه خیز کف صفر درجه، کمترین مقاومتی که می‌توان انتظار داشت تقریباً ۱۲ درصد نیروی لیفت است که در زاویه تریم حدود ۴/۵ درجه بدست می‌آید. همچنین یادآوری می‌شود که زاویه تریم بهینه، با افزایش زاویه خیز کف به آرامی افزایش می‌یابد.

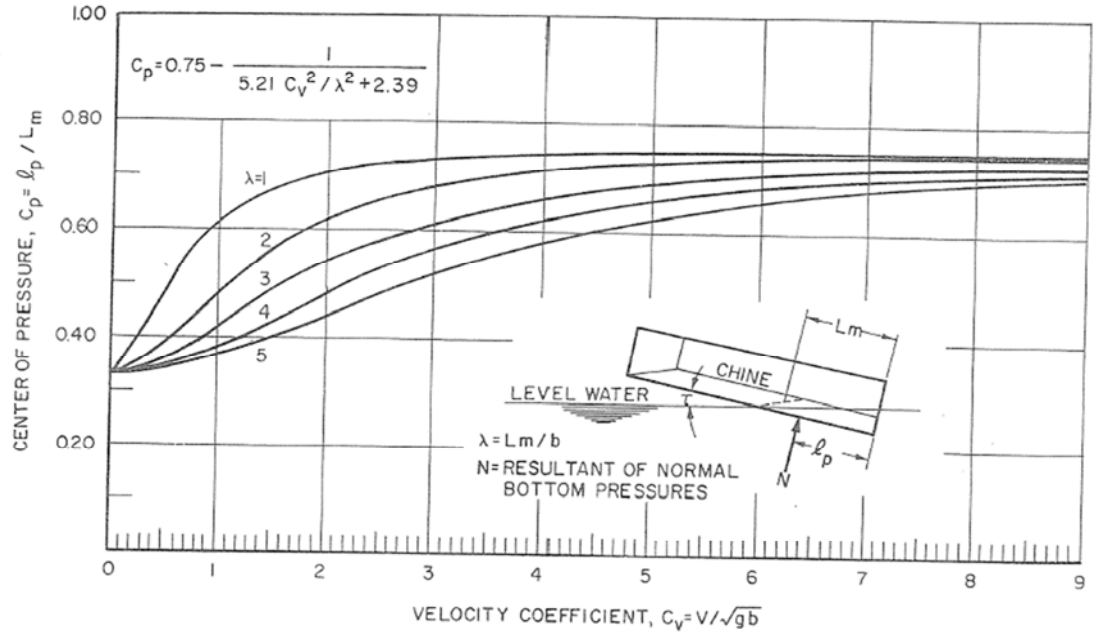
اثر افزایش اندازه عرض شناور از ۵ به ۱۰ فوت، کاهش نسبت D/Δ به مقدار حدود ۴ درصد می‌باشد. همچنین در شکل ۱۴، خط $tan\tau$ ترسیم شده است که مؤلفه فشاری درگ کل است. تفاوت بین $tan\tau$ و منحنی D/Δ بیانگر مؤلفه درگ ناشی از ویسکوزیته است. ملاحظه می‌شود که در زوایای تریم کوچک، درگ اصطکاکی سهم غالب از درگ کل است در حالیکه در زوایای تریم بزرگ، درگ فشاری سهم غالب از درگ کل است. در $\tau=4^\circ$ برای $\beta=0^\circ$ از درگ کل تقریباً نیمی از آن درگ فشاری و نیمی از آن درگ اصطکاکی است. همچنین از شکل ۱۳ مشخص شد که در محدوده زیر مقادیر D/Δ مستقل از ترکیبهای مختلف C_V و λ است: در $C_V/\sqrt{\lambda}\geq 2$ و $\tau=2^\circ$ و در $C_V/\sqrt{\lambda}\geq 1$ و $\tau\geq 4^\circ$.

- **مرکز فشار سطوح سرشی**

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مرکز فشار برآیند سطوح سرشی را می‌توان با دقت خوبی با مجزا کردن سهم نیروی بویانسی و نیروی دینامیکی از لیفت کل محاسبه کرد. مرکز فشار مؤلفه دینامیکی حدوداً ۷۵ درصد طول خیس متوسط، جلوتر از قسمت پاشنه تخت در نظر گرفته می‌شود در حالیکه مرکز فشار نیروی بویانسی حدوداً ۳۳ درصد جلوتر از قسمت پاشنه تخت در نظر گرفته می‌شود. هر چند این اعداد تقریبی هستند ولی قابل کاربرد می‌باشند. برای محاسبه فاصله مرکز فشار کل از قسمت پاشنه، باید ممان حاصل از مجموع این دو مؤلفه را با هم جمع و بر نیروی کل تقسیم کرد. با استفاده از مقادیر مؤلفه‌های بویانسی و دینامیکی که در رابطه ۱۵ داده شده است، محل مرکز فشار، C_p، از قسمت پاشنه برابر با عبارت زیر است:

$$C_p = \frac{l_p}{\lambda b} = 0.75 - \frac{1}{5.21\,\frac{C_V^2}{\lambda^2} + 2.39} \qquad (28)$$

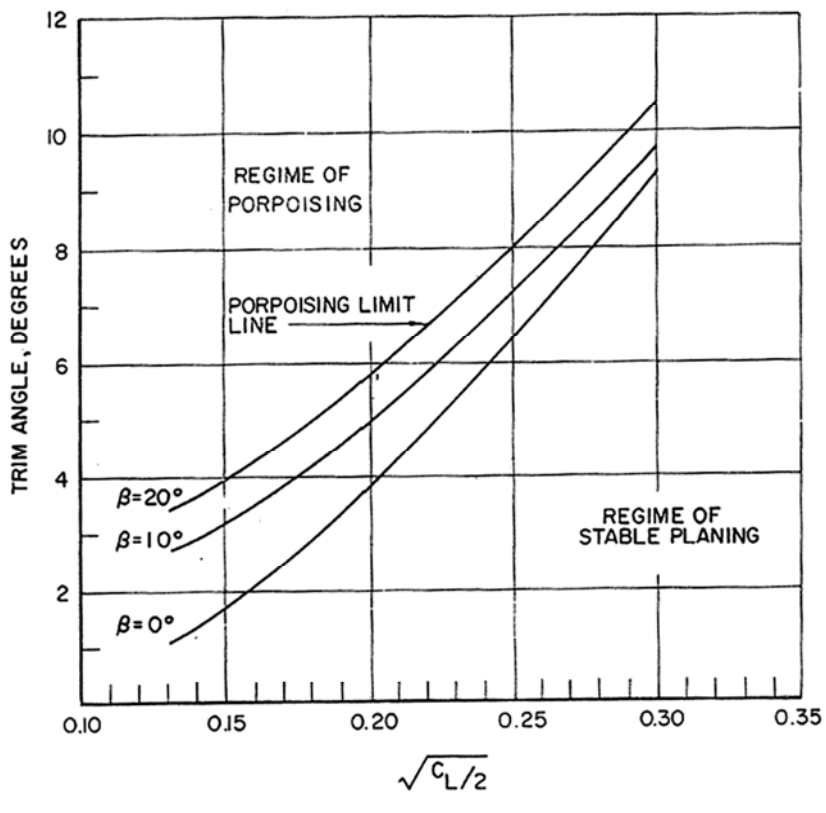
که C_p نسبت فاصله طولی مرکز فشار از قسمت پاشنه بر طول خیس متوسط است. تفاوت بین نتایج رابطه ۲۸ با نتایج تست عملی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. تطابق خوبی بین نتایج عملی و این فرمول وجود دارد. ملاحظه می‌شود که C_p اصولاً مستقل از زاویه تریم و / یا زاویه خیز کف است. شکل ۱۵ یک ترسیم کاربردی از معادله ۲۸ می‌باشد به گونه‌ای که با دانستن طول خیس و ضریب سرعت، مقدار C_p براحتی از روی نمودار مشخص می‌گردد.



شکل ۱۵: مرکز فشار سطوح سرشی

- **محدودیتهای ناپایداری دینامیکی طولی**

ناپایداری دینامیکی طولی یا همان پورپویزینگ به این صورت تعریف می‌شود: ترکیب نوسانی در حرکات پیچ و هیو یک قایق با دامنه ثابت یا افزایش یابنده، در حین حرکت سرشی در آب آرام. این پدیده برای شناورهای تندرو سرشی نامطلوب است و می‌تواند منجر به صدمات سازه‌ای و ایجاد سانحه شود. همچنین این پدیده می‌تواند منجر به زیر آب رفتن سینه قایق یا پدیده «*tripping*» در قسمت سینه شود. این وضعیت در زوایای تریم کوچک، در سیکل رو به پائین ناپایداری طولی بوجود می‌آید که منجر به فرورفتن سینه به داخل آب می‌شود. این ناپایداری طولی منجر به به تصادفات و سوانح جدی قایق‌ها شده و برخی مواقع به عنوان یک پدیده مرموز ناشناخته مطرح شده است. با افزایش یکنواخت سرعت شناور مدرن سرشی، ناپایداری طولی به یک مشکل اصلی در طراحی قایق‌های سرشی تبدیل شده است. طراحان هواپیماهای آب‌نشین نیز در سال ۱۹۳۰ با ناپایداری طولی مواجه بودند. تحقیقات گسترده‌ای برای این مشکل هواپیماهای آب‌نشین انجام شد و سپس مشخص گردید که این نتایج قابل تعمیم به قایق‌های تندرو نیز می‌باشد. تحقیقاتی در سال ۱۹۵۲ توسط *Day* و *Hagg* بر روی سطوح سرشی منشوری دارای خیز کف انجام شد تا محدودیتهای ناپایداری طولی بدنه‌های سرشی را نشان دهد. هدف این تحقیق فراهم کردن اطلاعات کاربردی برای طراحان قایق‌های تندرو در پیش‌بینی ناپایداری طولی بود که وابسته به زاویه تریم، سرعت، وزن و خیز کف می‌باشد. نتایج تحقیقات این دو نفر بطور گرافیکی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که در یک زاویه خیز کف مشخص، رابطه خاصی بین زاویه تریم و ضریب لیفت وجود دارد که محدوده ناپایداری طولی را مشخص می‌کند. این رابطه در شکل ۱۶ برای زوایای خیز کف صفر و ۱۰ و ۲۰ درجه برای سطوح سرشی منشوری دارای خیز کف نشان داده شده است. اگر ترکیب C_L و τ زیر منحنی باشد نشان دهنده عملیات پایدار قایق است و اگر بالای نمودار باشد، نشانه وجود ناپایداری طولی است (یک روش دیگر برای پیش‌بینی ناپایداری طولی، بررسی نتایج تریم بر حسب سرعت است. اگر در سرعتهای پایین، تغییر ناگهانی شیب داشته باشیم امکان ایجاد پدیده ناپایداری طولی افزایش می‌یابد).



شکل ۱۶: محدوده ناپایداری طولی (پورپویزینگ) بدنه‌های سرشی منشوری

همچنین از این شکل ملاحظه می‌شود که با کاهش ضریب لیفت، محدوده مجاز زاویه تریم (که در آن ناپایداری طولی اتفاق نیافتد) نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، اثر افزایش زاویه خیز کف، افزایش زاویه مجاز تریم قبل از بروز ناپایداری طولی است. در هر حال، یک قانون کلی می‌توان گفت که: «اگر یک قایق در یک سرعت و نیروی لیفت مشخص در حال ناپایداری طولی است، می‌توان با کاهش زاویه تریم از ناپایداری طولی جلوگیری کرد». کاهش زاویه تریم را می‌توان به روشهای مختلفی انجام داد. یکی از روشها، تغییر محل مرکز ثقل طولی به سمت جلو می‌باشد. اگر قایق ساخته شده و نمی‌توان مرکز ثقل را تغییر داد، می‌توان با استفاده از گوه‌های عرضی در قسمت پاشنه یا با استفاده از سطوح تریم دهنده[1] در پاشنه این کار را انجام داد. این روشها با هزینه کم و افزایش اندک درگ، می‌توانند باعث کاهش تریم در حین حرکت[2] شوند.

البته باید بتوان یک زاویه تریم را در نظر گرفت که هم ناپایداری طولی اتفاق نیافتد و هم مقاومت حداقل مقدار باشد. از شکل ۱۴ می‌توان دریافت که زاویه تریم تقریباً ۴ تا ۵ درجه منجر به حداقل مقدار نسبت درگ به لیفت می‌شود. از طرفی شکل ۱۶ نشان می‌دهد که برای پرهیز از ناپایداری طولی در قایق‌های بسیار تندرو، بهتر است که زاویه تریم تا جای ممکن کم و حدود ۱ تا ۲ درجه باشد. بنابراین باید چنین نتیجه گرفت که چون ناپایداری طولی مستقیماً مربوط به قابلیت کارآیی و کارآمدی قایق می‌گردد لذا نسبت به مقاومت، دارای ارجحیت است.

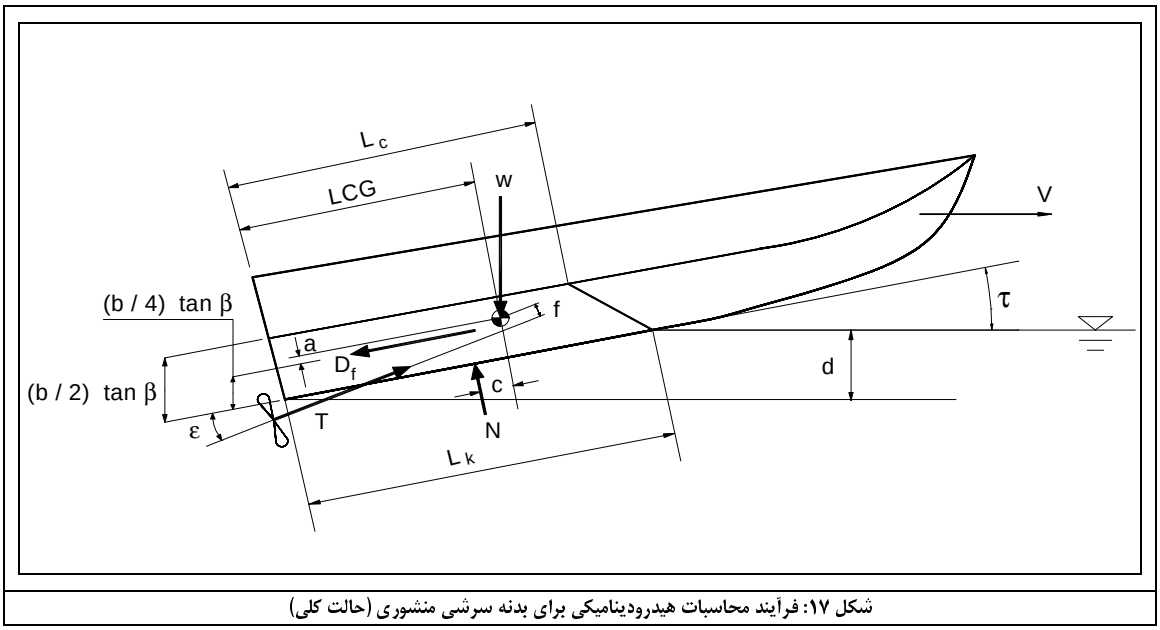
البته راه حل دیگر آن می‌تواند افزایش زاویه خیز کف باشد چراکه با افزایش زاویه خیز کف، زاویه تریم مجاز برای پرهیز از ناپایداری طولی افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش زاویه خیز کف می‌تواند منجر به این شود که شناور در یک زاویه تریم مناسب حرکت کند که هم ناپایداری طولی اتفاق نیافتد و هم مقاومت به حداقل برسد.

باید یادآوری شود که محدوده ناپایداری طولی وابسته به ممان اینرسی حرکت پیچ قایق نیست. آزمایشات نشان داده است که افزایش یا کاهش قابل ملاحظه ممان اینرسی حرکت پیچ اثر ناچیز و اندکی بر روی ناپایداری طولی داشته است. آنچه ملاحظه شد تغییر فرکانس نوسان حرکت بوده است. مقادیر بزرگ ممان اینرسی باعث کاهش فرکانس و مقادیر کوچک ممان اینرسی باعث افزایش فرکانس شده است.

1 - trim tab
2 - running trim

- **روش ارزیابی بازدهی شکلهای سرشی منشوری**

برای یک طراح شناور تندرو این موضوع اهمیت دارد که بتواند توان مورد نیاز سیستم رانش و ناپایداری طولی بدنه‌های سرشی منشوری را محاسبه و پیش‌بینی کند. در این بخش، روش محاسبه تریم در حین حرکت، طول خیس، مقاومت، توان مورد نیاز و پایداری یک بدنه سرشی در محدوده وسیعی از سرعتها و موقعیت دلخواه شافت پروانه و تغییر زاویه شافت پروانه نسبت به مرکز ثقل بدنه ارائه می‌گردد. راستای اثر نیروی تراست و نیروی مقاومت و اثرات آن بر نیروی لیفت و ممان پیچ باید در نظر گرفته شود. در ادامه، فرمولهایی برای محاسبه موارد فوق معرفی می‌گردد که بر اساس آزمایش بدست آمده‌اند. این روش محاسبه شامل تعیین تریم حین حرکت و مقاومت است که شرایط تعادل را برای بدنه در یک سرعت حرکت معین، نیروی لیفت و موقعیت مرکز ثقل فراهم می‌کند. شکل ۱۷ نیروها و ممان‌های وارد بر یک بدنه سرشی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: فرآیند محاسبات هیدرودینامیکی برای بدنه سرشی منشوری (حالت کلی)

عبارات و علائم استفاده شده عبارتند از:

T: نیروی تراست(lb) Δ_Δ : وزن شناور(lb) CG: مرکز ثقل τ: زاویه تریم کیل(deg)

β: زاویه خیز کف(deg) b: عرض(ft) L_k: طول کیل خیس (ft) d: آبخور کیل در محل پاشنه(ft)

ϵ: زاویه بین راستای نیروی تراست با کیل(deg) N: برآیند نیروهای فشاری عمود بر کف(lb)

L_c: طول چاین خیس (از پاشنه تخت تا محل برخورد ریشه اسپری با خط چاین)(ft) V: سرعت سرشی(ft/sec)

D_f: مؤلفه ویسکوزیته درگ (که فرض می‌شود در راستای خط کیل و در فاصله بین خط کیل و خط چاین وارد می‌شود)(lb)

LCG: موقعیت طولی مرکز ثقل که از محل پاشنه تخت رو به جلو اندازه‌گیری می‌شود.(ft)

a: فاصله بین D_f و CG (اندازه‌گیری شده به صورت عمود بر D_f)(ft)

f: فاصله بین T و CG (اندازه‌گیری شده به صورت عمود بر خط شافت)

c: فاصله بین N و CG (اندازه‌گیری شده به صورت عمود بر N)

برای تعادل در نیروهای عمودی داریم: $\Delta_0 = \mathrm{N}\cos\tau + \mathrm{T}\sin(\tau+\epsilon) - \mathrm{D_f}\sin\tau$ (29)

برای تعادل در نیروهای افقی داریم: $\mathrm{T}\cos(\tau+\epsilon) = \mathrm{D_f}\cos\tau + \mathrm{N}\sin\tau$ (30)

برای تعادل در ممان‌های پیچ‌دهنده داریم: $NC + \mathrm{D_f\,a} - \mathrm{Tf} = 0$ (31)

برای طراحی یک قایق، مقادیر Δ_Δ ، a ، b ، ϵ ، LCG ، f و β مشخص هستند. موارد مجهول باید با حل همزمان سه معادله تعادل به همراه استفاده از فرمولهای لیفت، درگ و مرکز فشار بدست آیند.

برای ساده‌سازی فرآیند محاسبات، معادلات تعادل به صورت زیر بدست می‌آیند. می‌توان نشان داد که:

$\mathrm{T}\cos\epsilon = \Delta\sin\tau + \mathrm{D_f}$ (32)

با جاگذاری رابطه ۳۲ در رابطه ۲۹ و با فرض اینکه $Cos\epsilon \approx 1$ منجر می‌شود به اینکه:

$\Delta = \mathrm{N}\cos\tau + \Delta\sin\tau\sin(\tau+\epsilon)$ (33)

چنانکه داریم: $\mathrm{N} = \frac{\Delta[1-\sin\tau\sin(\tau+\epsilon)]}{\cos\tau}$ (34)

با جاگذاری رابطه ۳۲ و ۳۴ در داخل رابطه ۳۱ داریم: $\Delta\left\{\frac{[1-\sin\tau\,\sin(\tau+\epsilon)]c}{\cos\tau}-\mathrm{f}\,\sin\tau\right\}+\mathrm{D_f}(\mathrm{a}-\mathrm{f})=0$ (35)

وقتی مقادیر τ و C و D_f معادله ۳۵ را ارضا کنند، ارزیابی تعادل بدنه سرشی، مقاومت، توان و پایداری براحتی انجام می‌شود.

✓ **شرایطی که محور تراست موازی کیل باشد:**

در طراحی بسیاری از قایق‌ها، محور شافت تقریباً موازی با خط کیل است. اگر فرض شود که $\epsilon = 0^\circ$ معادله ۳۵ به صورت زیر ساده می‌شود:

$\Delta(\mathrm{c}.\cos\tau-\mathrm{b}.\sin\tau)+\mathrm{D_f}(\mathrm{a}-\mathrm{f})=0$ (36)

✓ **شرایطی که محور تراست و نیروی ویسکوز بر هم منطبق شده و از مرکز گرانش بگذرند:**

این شرایط، ساده‌ترین ارزیابی را باعث می‌شود چراکه برای رسیدن به تعادل در پیچ، نیروی فشار هیدرودینامیکی باید از مرکز ثقل بگذرد. لذا فرض شده است که فواصل a , f, c برابر صفر هستند و $\epsilon = 0^\circ$. ممان معادله ۳۱ بدین ترتیب ساده‌سازی می‌شود چراکه c ، f و a برابر صفر هستند. همچنین از آن مشخص می‌شود که $\lambda C_p.b = LCG$ بنابراین با ترکیب معادله ۲۹ و ۳۰ داریم:

$$N = \Delta\cos\tau$$
$$\lambda C_p b = LCG$$

این دو معادله شرایطی را ارضاء می‌کنند که در آن: $a = f = c = \epsilon = 0^\circ$. طراحی بسیاری از قایق‌های تندرو در این محدوده و شرایط قابل انجام است و روابط فوق کاربردی هستند.

✓ **شرایط عمومی:**

فرض می‌شود که هندسه بدنه و شرایط بارگذای معلوم بوده و زاویه تریم، طول خیس، توان مورد نیاز و اندازه‌گیری ناپایداری طولی باید در یک محدوده سرعت محاسبه و معلوم گردد.

برای حل مسئله، اطلاعات داده شده و اطلاعات مورد نیاز از قرار زیر است:

✓ **اطلاعات داده شده**
- ابعاد و خطوط قایق $(\beta\,,\,b)$
- وزن قایق (Δ)
- موقعیت خط شافت پروانه $(f\,,\,\epsilon)$
- موقعیت مرکز ثقل $(a\,,\,c\,,\,LCG)$
- سرعت قایق (V)

✓ **اطلاعات مورد نیاز**
- زاویه تریم حین حرکت (τ)
- طول خیس $(L_k\,,\,L_c)$
- مقاومت کل (D)
- آبخور کیل (d)
- توان
- محدوده ناپایداری طولی

فرآیند حل یک مسئله در جدول۱ ارائه شده است. این فرآیند در هر سرعت، باید برای زوایای تریم مختلف و برای هر زاویه تریم، مقادیر مورد نیاز جهت جاگذاری در معادله ۳۵ محاسبه گردند.

GIVEN:

Δ = 60,000 LB
LCG = 29.0 FT
VCG = 2.0 FT
b = 14 FT (AVERAGE)
β = 10° (AVERAGE)
V = 40 KNOTS (67.5 FT/SEC)
a = 1.39 FT
f = 0.50 FT
ε = 4°

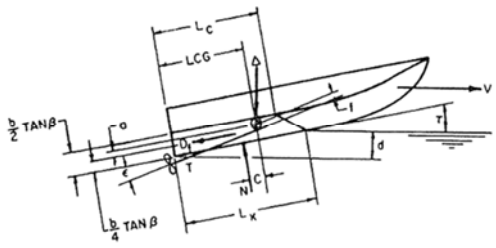
REQUIRED:
POWER REQUIREMENT
PORPOISING LIMIT

POWER REQUIREMENT
V = 40 KNOTS

PLANING COEFFICIENTS:

$C_V = V/\sqrt{gb} = 40 \times 1.69/\sqrt{32.2 \times 14} = 3.18$

$C_{L_\beta} = \Delta / \frac{1}{2}\rho V^2 b^2 = 60{,}000/0.97 \times 67.5^2 \times 14^2 = 0.069$



EQUILIBRIUM TRIM (τ_e)

Trim at which (30) = 0
Assume line AR interpolation between $\tau = 2°$ and $\tau = 3°$

$$\tau_e = 2° + \frac{149{,}960}{149{,}960 + 336{,}600} \sim 2.3°$$

Horizontal Drag Force

$$D = 9424 - (9434 - 8304)\frac{3}{10}$$
$$D = 9095 \text{ lb}$$

Effective Horsepower

$$EHP = \frac{D \times V}{550} = \frac{9095 \times 67.5}{550} = 1115 \text{ hp}$$

Equilibrium Mean Wetted Length-Beam Ratio

$$\lambda_e = 3.85 - (3.85 - 2.60)\frac{3}{10} = 3.29$$

Wetted Keel Length

$$L_k = \lambda_e b + \frac{b \tan\beta}{2\pi \tan\tau}$$

$$L_k = 46 + \frac{14}{2\pi}\frac{\tan 10°}{\tan 2.3°} = 55.9 \text{ ft}$$

Wetted Chine Length

$$L_c = \lambda_e b - \frac{b}{2\pi}\frac{\tan\beta}{\tan\tau} = 36.1 \text{ ft}$$

Draft of Keel at Transom

$$d = L_k \sin\tau_e = 55.9 \times \tan 2.3°$$
$$d = 2.24 \text{ ft}$$

Porpoising Stability

$$\left(C_{L_\beta}/2\right)^{1/2} = \left(\frac{0.069}{2}\right)^{1/2} =$$
$$0.0345^{1/2} = 0.186$$

From Fig. 16, porpoising will occur if $\tau_e 4.5°$; hence, present planing boat is *stable*.

Row	Quantity	Source	$\tau = 2°$	$\tau = 3°$	$\tau = 4°$
1	$\tau^{1.1}$	~~Figure 8~~	2.14	3.35	4.59
2	C_{L_0}	Figure 10	.085	.085	.085
3	$C_{L_0}/\tau^{1.1}$	(2)/(1)	.0397	.0254	.0185
4	λ	Figure 8	3.85	2.60	1.86
5	V_m	Figure 12	67.0	66.6	66.2
6	R_e	$V_m \lambda b/\nu$	3.61×10^8	2.42×10^8	1.73×10^8
7	C_f	Schoenherr	.00174	.00184	.00192
8	ΔC_f	ATTC Standard Roughness	.0004	.0004	.0004
9	$C_f + \Delta C_f$	(7) + (8)	.00214	.00224	.00232
10	D_f	$\frac{\rho V_m^3 \lambda b^2 (C_f + \Delta C_f)}{2\cos\beta}$	7.340	5.160	3.760
11	$\tan\tau$		.0349	.0524	.0698
12	$\sin\tau$		.0349	.0524	.0698
13	$\cos\tau$		.9994	.9986	.9976
14	$\Delta \tan\tau$		2094	3144	4188
15	$D_f/\cos\tau$	(10)/cosτ	7340	5160	3760
16	D	(14) + (15)	9434	8304	7948
17	C_p	Figure 15	.59	.65	.70
18	$C_p \lambda b$		31.6	23.5	18.2
19	c	LCG - (18)	-2.6	5.5	10.8
20	$(b/4)\tan\beta$		.616	.616	.616
21	e	VCG - (20)	1.39	1.39	1.39
22	$\sin(\tau + \epsilon)$		.1045	.1219	.1392
23	$1 - \sin\tau \sin(\tau + \epsilon)$	1 - (12)(22)	.9964	.9964	.9903
24	$(23)\left(\frac{c}{\cos\tau}\right)$		-2.59	5.46	10.70
25	$f \sin\tau$		.0174	.0262	.0349
26	(24) - (25)		-2.6	5.53	10.73
27	Δ (26)		-156,500	332,000	645,000
28	(e - f)	(21) - f	.89	.89	.89
29	$D_f(e - f)$	(10)(28)	6540	4600	3350
30	(27) + (29)	Eq 35	-149,960	336,600	648,350

جدول ۱: فرآیند محاسبات هیدرودینامیکی یک سطح سرشی منشوری

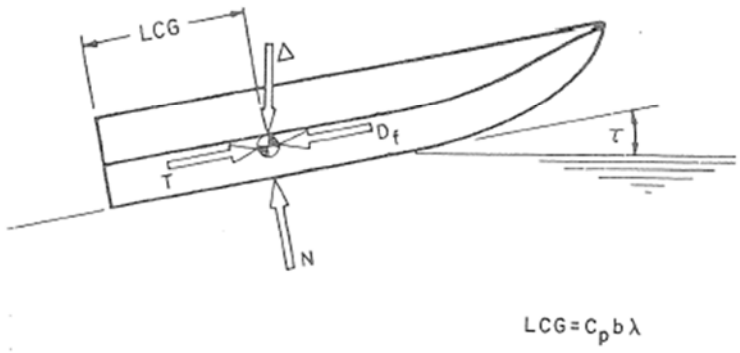
یادآوری می‌شود که معادله ۳۵ حاوی تمامی شرایط برای نیروها و گشتاورهای تعادل است. مقدار زاویه تریم که معادله ۳۵ را برابر صفر می‌کند، حل مسئله است. ستون ۱ جدول ۱ مقادیری است که باید معلوم شوند و ستون ۲ منابع مورد نیاز برای ارزیابی مجهولات مسئله است. ستون ۳ و ۴ و ۵ مقادیر محاسبه شده برای ۳ زاویه تریم هستند. خط آخر این جدول شامل مقادیر معادله ۳۵ است که برای هر زاویه تریم ارائه شده است. با میان‌یابی بین مقادیر مثبت و منفی، یک زاویه تریم بدست می‌آید که منجر به صفر شدن معادله ۳۵ می‌گردد. سپس زاویه تریم بدست آمده برای محاسبه مقادیر سطح خیس، مقاومت و توان استفاده می‌شود. همچنین جدول ۱ شامل فرآیند تخمین ناپایداری طولی قایق سرشی است. نسبت $(C_L/2)^{1/2}$ محاسبه شده و بوسیله آن از منحنی ناپایداری طولی، مقدار زاویه خیز کف مطلوب از شکل ۱۶ تعیین می‌گردد. اگر زاویه تریم بدست آمده از این منحنی‌ها بزرگتر از زاویه تریم تعادل محاسبه شده در قبل باشد، قایق سرشی پایدار است. فرآیند ذکر شده برای تمامی سرعتهای مورد نظر (در محدوده $C_V \geq 1$) انجام شده و منحنی مقاومت بر حسب سرعت ترسیم می‌گردد.

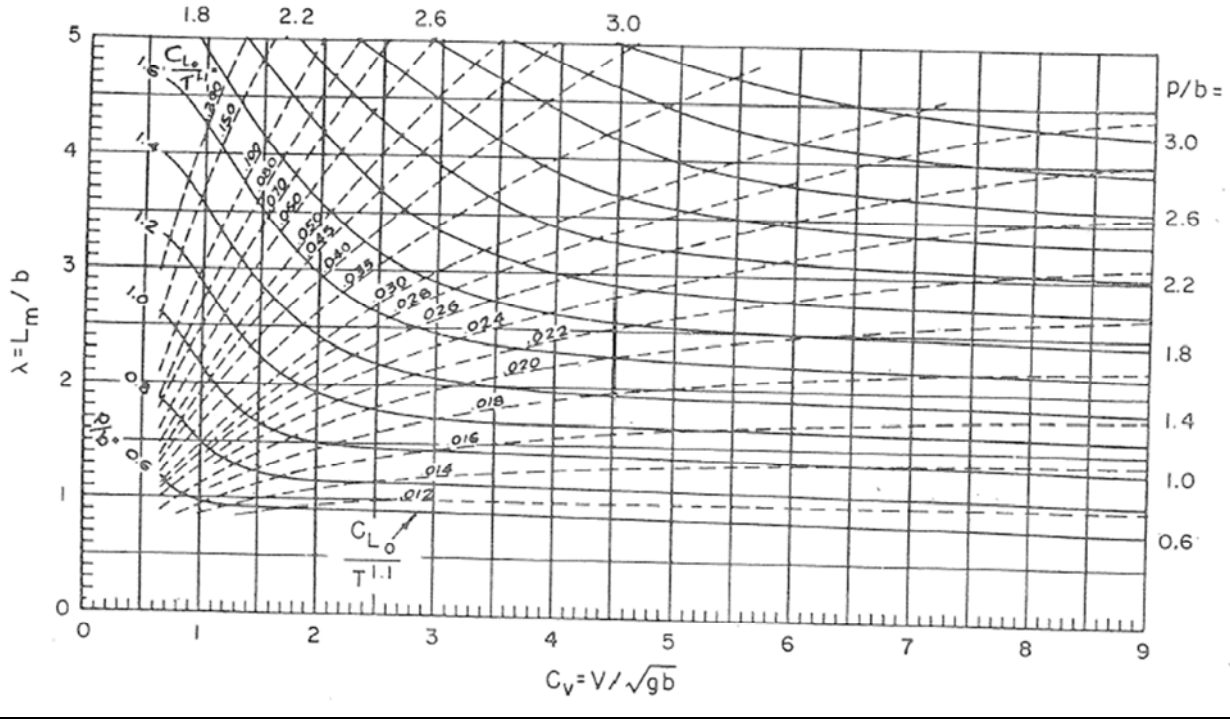
- ✓ **شرایطی که محور نیروی تراست موازی کیل باشد:**

شرایطی که برای این مورد قبلاً ذکر شد، در اینجا نیز استفاده می‌شود با این تفاوت که $\epsilon = 0°$ است.

✓ **شرایطی که محور تراست و نیروی ویسکوز بر هم منطبق می‌شوند و از مرکز ثقل می‌گذرند:**

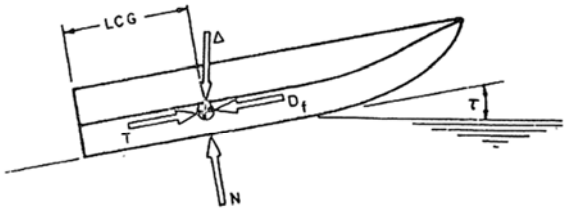
برای این شرایط سرشی ساده، معادلات ساده شده در قالب نمودارهای شکل ۱۸ توسط Koelbel ارائه شد. از این نمودارها، تریم در حالت تعادل و مساحت سطح خیس مستقیماً بدست می‌آیند بدون اینکه نیاز به میان‌یابی بین مقادیر فرض شده تریم باشد (همانطور که برای حالت کلی انجام می‌شد).





شکل ۱۸: حالت تعادل برای وقتی که تمامی نیروها بر CG وارد می‌شوند

جدول ۲ ارائه دهنده فرآیند حل یک مسئله با استفاده از شکل ۱۸ می‌باشد. ناپایداری طولی به همان روش قبل محاسبه و تخمین زده می‌شود.



GIVEN:

Δ = 60,000 LB
LCG = 29.0 FT
VCG = 2.0 FT
b = 14 FT (AVERAGE)
β = 10° (AVERAGE)
V = 40 KNOTS
a = c = f = ϵ = 0

REQUIRED:

POWER REQUIREMENT
PORPOISING STABILITY

POWER REQUIREMENT

V = 40 KNOTS (67.5 FT/SEC)

PLANING COEFFICIENTS:

$C_V = V/\sqrt{gb} = 40 \times 1.69/\sqrt{32.2 \times 14} = 3.18$

$C_{L_\beta} = \Delta / \frac{1}{2}\rho V^2 b^2 = 60{,}000 / 0.97 \times 67.5^2 \times 14^2 = 0.069$

Row	Quantity	Source	Value
1	C_{L_0}	Figure 10	.085
2	ℓ_p/b	LCG/b	2.07
3	λ	Figure 18	3.45
4	$C_{L_0}/\tau^{1.1}$	Figure 18	.035
5	$\tau^{1.1}$	(1)/(4)	2.42
6	τ		2.23°
7	tanτ		.039
8	Δ tanτ		2,340
9	λb^2	$(3)b^2$	675
10	V_m	Figure 12	66.9
11	R_e	$V_m \lambda b/\nu$	3.22×10^8
12	C_f	Schoenherr	.00177
13	ΔC_f	ATTC Standard Roughness	.0004
14	$C_f + \Delta C_f$	(12) + (13)	.00217
15	D_f	$\frac{\rho V_m^2 \lambda b^2 (C_f + \Delta C_f)}{2 \cos\beta}$	6670
16	$D_f/\cos\tau$		6670
17	D	(8) + (17)	9010
18	EHP	D x V/550	1100
19	$\sqrt{C_{L_\beta}}/\tau$		.186
20	τ porpoising	Figure 16	$\leq 4.5°$ Boat Is Stable

جدول ۲: فرآیند محاسبات هیدرودینامیکی یک بدنه سرشی منشوری (حالتی که نیروها از CG می‌گذرند.)

- **استفاده از سطوح سرشی منشوری ساده برای بدنه‌های سرشی واقعی**

معادلات ارائه شده برای سطوح سرشی منشوری ساده می‌باشد که در آنها زاویه خیز کف، عرض و زاویه تریم در کل طول خیس ثابت هستند و تغییر نمی‌کنند. ولی در شناورها و قایق‌های تندرو و سرشی واقعی، برخی از این پارامترها با طول خیس تغییر می‌کنند. به عنوان یک راهنمایی در طراحی می‌توان از مقادیر فوق به عنوان مقادیر متوسط بدست آمده از بدنه‌های واقعی استفاده کرد.

منابع قسمت ششم:

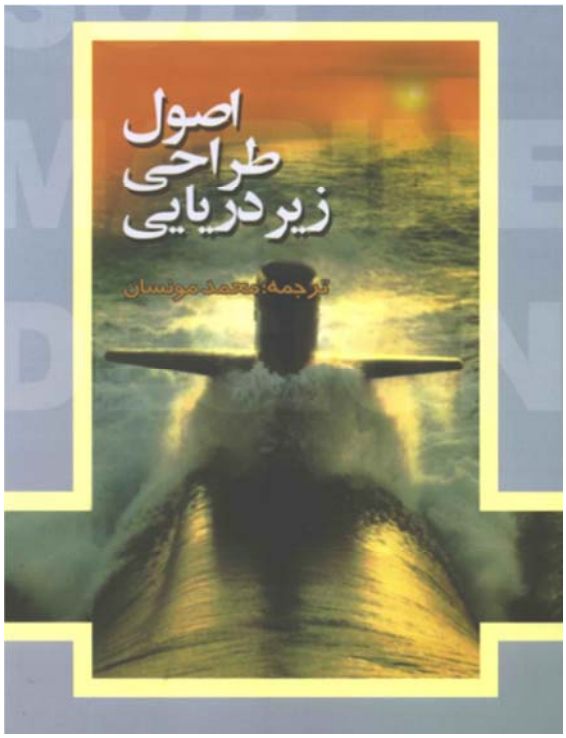
1- paper: Hydrodynamic design of planning hulls / D.Savistky / 1964
2- book: Hydrodynamics of high speed marine vehicles/ O.M.Faltinsen/ 2005
3- Book: Mechanics of marine vehicles / B.R.Clayton- R.E.D.Bishop / 1982
4- Book: Design technique for advanced marine vehicles / M.Insel / 2000
5- Book: Marine engineering data handbook / A.F.Molland / 2008
6- Document: Planning hulls / K.Potgieter / 2006
7- Document: Hull shape of marine crafts / www.answer.com

۸- سند علمی: بررسی پدیده پورپویزینگ در شناورهای پلنینگ / محمد حسین صادقی / ۱۳۸۸

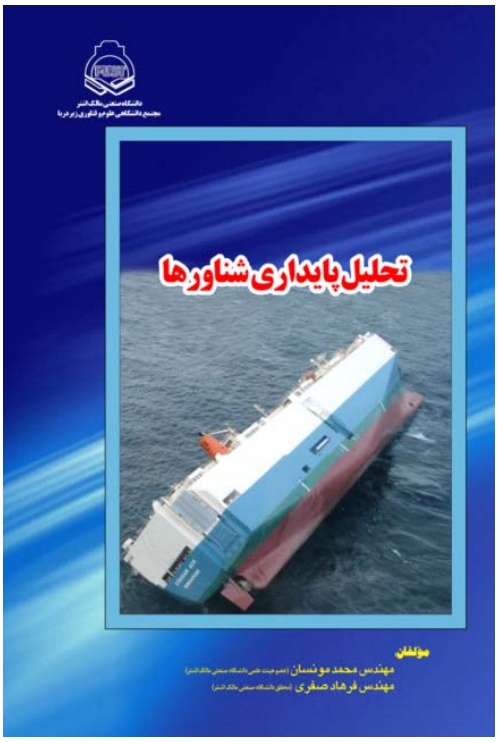
۹- سند علمی: تحلیل شناورهای تندرو با بدنه‌های پیشرفته / محمد حسین صادقی / ۱۳۸۹

یاد بگیریم؛ محیط زیست خود را آلوده نکنیم
یاد بگیریم؛ زباله را از اتومبیل بیرون نیاندازیم
یاد بگیریم؛ وقتی برای گردش می‌رویم یک کیسه زباله همراه ببریم
و بدانیم؛ رعایت نظافت و حفظ محیط زیست نشانه شخصیت، تمدن و دین ماست.

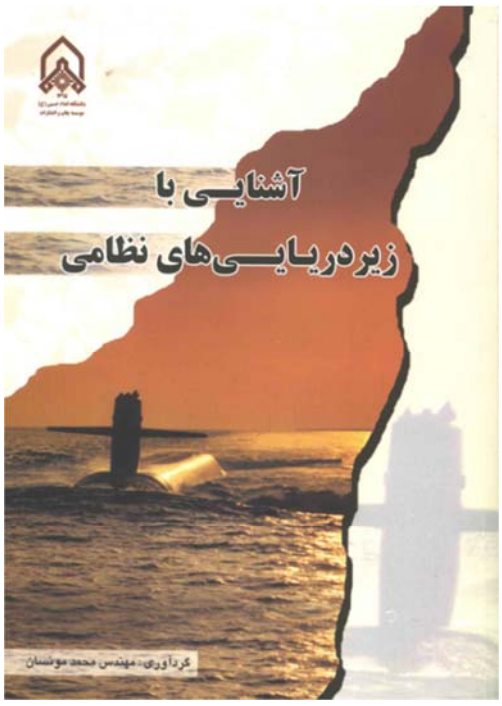
سایر آثار مؤلف:



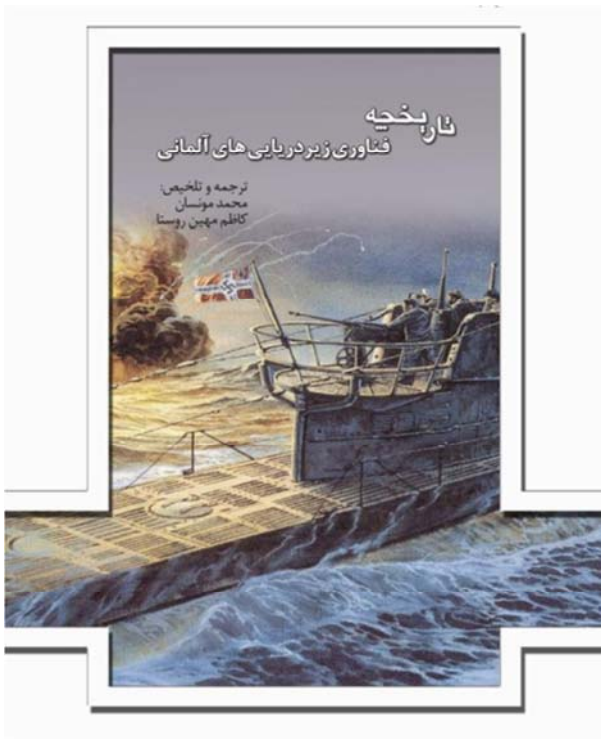
اصول طراحی زیردریایی-محمد مونسان - ۱۳۸۳



تحلیل پایداری شناورها- محمد مونسان. فرهاد صفری-۱۳۸۷



آشنایی با زیردریایی‌های نظامی-محمد مونسان-۱۳۸۳



تاریخچه فناوری زیردریایی‌های آلمانی-محمد مونسان. کاظم مهین روستا- ۱۳۸۵

کتاب جامع مهندسی معماری دریایی (ویرایش اول)- محمد مونسان- ۱۳۸۸ ـ انتشارات کانون پژوهش