دریامانی (Seakeeping)

شامل دروس مهندسی اقیانوس و دینامیک متحرک های دریایی

استخراج شده از فیلم های آموزشی آقای دکتر محمد مونسان

پیاده سازی و نگارش : مهندس حسن کریمی باصری - دانشجوی ارشد رشته مهندسی دریا دانشگاه صنعتی مالک اشتر (سال 1398)

بخش دوم : دینامیک متحرک های دریایی

بخش دوم

دینامیک متحرک های دریایی

جلسه بیست و دوم

دینامیک متحرک های دریایی

«حرکات مستقل هیدروکشتی در موج منظم»

منابع درس دینامیک متحرک های دریایی: ✓ کتاب جامع مهندسی معماری دریایی / مهندس محمد مونسان

✓ دینامیک متحرک های دریایی / محمد سعید یوسف

✓ Dynamics of Marine vehicles /

✓ امواج دریا / محمد سعید یوسف

✓ principles of Naval Architecture / Edward V. Lewis

«حرکات مستقل هیدروکشتی در موج منظم»

منابع:

✓ Dynamics of Marine vehicles / chapter 4

✓ کتاب جامع مهندسی معماری دریایی / قسمت چهارم / بخش پنجم

حرکت هیو: اگر شیء خارجی به صورت هارمونیک ساده وارد شود آن را حرکت هیو گویند

- اگر عامل میراکننده وجود نداشته باشد آن را حرکت نوسانی آزاد گویند و اگر حرکت میرایی داشته باشد آن را حرکت نوسانی میرا شونده گویند.

free oscillation

damped oscillation

- 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 یک نیروی خارجی با پریود مشخص باعث نوسان جسم شود آن را حرکت نوسانی اجباری گویند که در آن دامنه و پریود حرکت، وابسته به دامنه و پریود نیروی خارجی است.

چهار عامل مهم در تفسیر حرکت هیز:

1- نیروی اینرسی: هنگامی وجود دارد که حرکت کشش نوسانی باشد و برابر است با: $F_a = -a\ddot{z}$

که a جرم مجازی (جرم کشش بعلاوه جرم افزوده) و $\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2}$ شتاب عمودی است.

2- نیروی میراکننده یا نیروی میرایی: که معمولاً در مقابل حرکت مقاومت می‌کند. $F_b = b\dot{z}$، که b ثابت میرایی و $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$ سرعت است.

3- نیروی بازگرداننده: این نیرو متمایل است که کشش را به حالت تعادل بازگرداند و برابر است با $F_c = cz$، که c ضریب بازگرداننده یا ضریب فنریت است و z جابجایی عمودی مرکز ثقل است.

4- نیروی تحریک که بر جرم جسم وارد می‌شود و برابر است با: $F = F_0 \cos\omega_e t$، که F_0 دامنه نیروی تحریک و ω_e فرکانس برخورد و t زمان است.

$$\boxed{a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_0 \cos\omega_e t}$$

$\frac{lb \cdot s^2}{ft}$ $\quad$ $\frac{lb \cdot s}{ft}$ $\quad$ $\frac{lb}{ft}$ $\quad$ lb

حرکت هیو آزاد غیر میرا شونده ($b=0$ و $F_0=0$)

$$a\ddot{z}+cz=0$$

جواب معادله دیفرانسیل فوق $\Longrightarrow$ $z=A\sin\omega_z t+B\cos\omega_z t \Rightarrow z=A\sin(\omega_z t-\beta)$

- که A و B ثابت هایی هستند که از شرایط اولیه بدست می آیند β زاویه فاز است.

ω_z : فرکانس طبیعی حرکت هیو است که برابر است با:

$$\omega_z=\frac{2\pi}{T}=\sqrt{\frac{c}{a}}$$

حرکت هیو آزاد میرا شونده ($F_0=0$)

$$a\ddot{z}+b\dot{z}+cz=0$$

پاسخ این معادله در شرایط $b<\sqrt{2ac}$ عبارت است از:

$$z=e^{-\nu t}(C_1\cos\omega_d t+C_2\sin\omega_d t)=e^{-\nu t}A\sin(\omega_d t-\delta)$$

که $\nu=\frac{b}{2a}$ ثابت تأخیر و ω_d فرکانس حرکت نوسانی میرا شونده است که برابر است با:

$$\omega_d=\sqrt{\omega_z^2-\nu^2}$$

پریود میرا شونده برابر است با:

$$T_d=\frac{2\pi}{\omega_d}$$

که بزرگتر از مقدار T_z است که $\omega_d<\omega_z$.

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 کنترل مدنظر نیست چرا که در حرکات کنترل، ν معمولاً نسبت به ω_z خیلی کوچک است.

همانطور که گفته شد ثابت‌های c_1 و c_2 از شرط اولیه بدست می‌آید در اینجا شرط اولیه می‌تواند $z|_{t=0} = z_a$ و $\left.\frac{dz}{dt}\right|_{t=0} = 0$ باشد. ما که با جابجایی در راستای اصلی خواهیم داشت:

$$z = e^{-\nu t}(c_1 \cos\omega_d t + c_2 \sin\omega_d t)$$

$$z|_{t=0} = z_a \rightarrow z = \underbrace{e^{-\nu \times 0}}_{1}\left(c_1 \underbrace{\cos(0)}_{1} + c_2 \underbrace{\sin(0)}_{0}\right) = z_a$$

$$\Rightarrow \boxed{c_1 = z_a}$$

$$\left.\frac{dz}{dt}\right|_{t=0} = 0 \rightarrow \frac{dz}{dt} = \nu e^{-\nu t}(c_1 \cos\omega_d t + c_2 \sin\omega_d t) + \omega_d e^{-\nu t}(c_1 \sin\omega_d t + c_2 \cos\omega_d t)$$

$$\Rightarrow -\nu c_1 + \omega_d c_2 = 0 \Rightarrow c_2 = \frac{\nu c_1}{\omega_d} \Rightarrow \boxed{c_2 = \frac{\nu z_a}{\omega_d}}$$

در نتیجه شکل معادله به صورت زیر خواهد شد:

$$\boxed{z = \underbrace{z_a e^{-\nu t}}_{\text{عامل میرانندگی}}\left(\cos\omega_d t + \frac{\nu}{\omega_d}\sin\omega_d t\right)} \rightarrow \text{معادله کلی حرکت هیپ}$$

حرکت هیبرید اجباری:

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_0 \cos \omega_e t$$

مجموع جرم حقیقی و جرم افزوده

پاسخ معادله فوق به صورت زیر است:

$$z = e^{-Dt}\left(c_1 \cos \omega_d t + c_2 \sin \omega_d t\right) + \underbrace{z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon_2)}_{\text{ناشی از وجود نیروی تحریک}}$$

که می‌توان آن را به صورت زیر نیز نوشت:

$$z = A e^{-Dt} \sin(\omega_d t - \beta) + z_a \cos(\omega_d t - \varepsilon_2)$$

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 اندازه نیروی تحریک حرکت هیبرید است: تا هنگامی که هر دو حرکت نوسانی مؤثر و برقرار باشند نتیجه آن «حرکت گذرا» نامیده می‌شود.

- برای شرایط یکنواخت، دامنه حرکت اجباری z_a به صورت مقابل داده می‌شود: $z_a = z_{st} \cdot \mu_z$

نکته: اگر همانطور که قبلاً ذکر کردیم موج به کرامی جلال کشتی را طی کند جابجایی عمودی هر مقطع کشتی با عنوان «هیبرد استاتیک» نامیده می‌شود و عبارتست از:

$$\frac{F}{c} = z_{st} \cos(\omega_e t)$$

دامنه هیو استاتیک برابر است با:

$$z_{st} = \frac{F_0}{c}$$

که F نیروی تحریک هیو بوده و عبارتست از:

$$F = F_0 \cos\omega_e t = 2\rho g \zeta_a e^{-kT_m} \int_{-L/2}^{L/2} y \cos(kx - \omega_e t)$$

حال دوباره معادله حرکت هیو اجباری را می‌نویسیم:

$$z = A e^{-\nu t} \sin(\omega_d t - \beta) + z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

$$z_a = z_{st} \cdot \mu_z \quad ;$$

دامنه هیو استاتیک: $z_a = \frac{F_0}{c}$

"static heaving amplitude"

ضریب بزرگنمایی: $\mu_z = \frac{z_a}{z_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4K^2\Lambda^2}}$

"magnification factor"

کاهنده — کاهنده

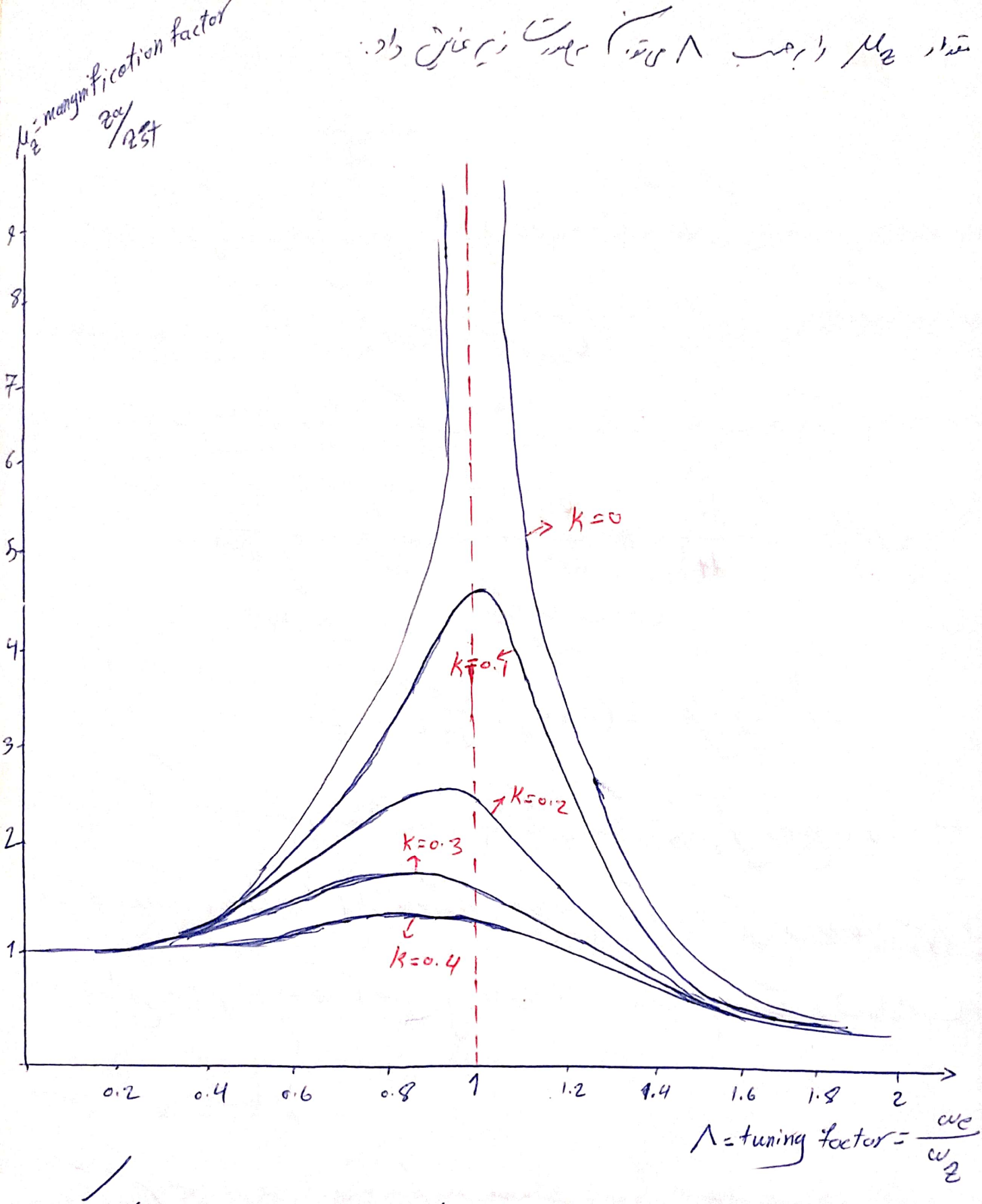
$$\Lambda = \text{tuning factor} = \frac{\text{Frequency of encounter}}{\text{Natural frequency}} = \frac{\omega_e}{\omega_z}$$

$$K = \text{nondimensional damping factor} = \frac{\nu}{\omega_z}$$

ضریب دمپینگ بی بعد

$$\nu = \frac{b}{2a} \quad , \quad \omega_z = \sqrt{\frac{c}{a}} \quad , \quad \varepsilon_2 = \tan^{-1}\frac{2K\Lambda}{1-\Lambda^2}$$

مقدار μ_z را برحسب Λ می‌توان به صورت زیر نمایش داد:



- در $\omega_e = \omega_z$ بیشترین دامنه حرکات را داریم و هر چه که k افزایش می‌یابد دامنه حرکات کمتر می‌شود تا جایی که ارتعاش پیدا می‌کند که دیگر حرکت نوسانی نیست.

جلسه بیست و دوم

«حرکات مستقل هیدرکش در موج منظم»

بخش دوم

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 در شتاب حرکت ضرب شده باشد تا حالت دینامیکی معادله نیز درست شود.

$$\text{نیروی اینرسی} = a\frac{d^2z}{dt^2} = M\frac{d^2z}{dt^2} + \underbrace{\delta I}_{\text{نیروی شتاب دهنده}} = M\frac{d^2z}{dt^2} + \underbrace{a_z}_{\text{جرم افزوده}}\frac{d^2z}{dt^2}$$

$$\Rightarrow \text{نیروی اینرسی} = (M + a_z)\frac{d^2z}{dt^2}$$

- باید یادآوری کنیم که مفهوم جرم افزوده در علم مکانیک سیالات تنها برای توجیه معادلات وجود آمده دینامیکی که (واحدها) ارائه می‌گردد و هیچ تجسم فیزیکی از آن وجود ندارد یعنی این مفهوم رایج که جرم افزوده همان جرم سیال جابجا شونده به همراه جسم در حرکت شتابدار است، مفهوم درستی نیست!

- هم اکنون نیمی از جرم افزوده برای یک مقطع دایره‌ای با طول واحد و قطر B_n به صورت مقابل تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{2}\rho\pi r^2 = \frac{\rho\pi B_n^2}{8} \qquad r = \frac{B_n}{2}$$

جرم افزوده نیم استوانه

برای شکل های غیر از مقطع دایره ای، حجم افزوده یک مقطع کشتی (a_n) از رابطه زیر بدست می آید:

$$a_n = C \frac{\rho \pi B_n^2}{8}$$

ضریب C برای مقاطع نرم کاوشی (اگر تعداد عملاً نگاشت همین برابر 2 باشد، نرم کاوشی از آن استفاده می شود) از نمودارهای بدست می آید.

$$C = \frac{\text{Added mass of the section of unite length, beam } (B_n)\text{, and section draft } (T_n) \text{ to bottom of section}}{\text{Half of the added mass for a circular section sement of unit length and diameter}}$$

$$\text{حجم افزوده کل کشتی} = \int_{-L/2}^{L/2} a_n \, dx$$

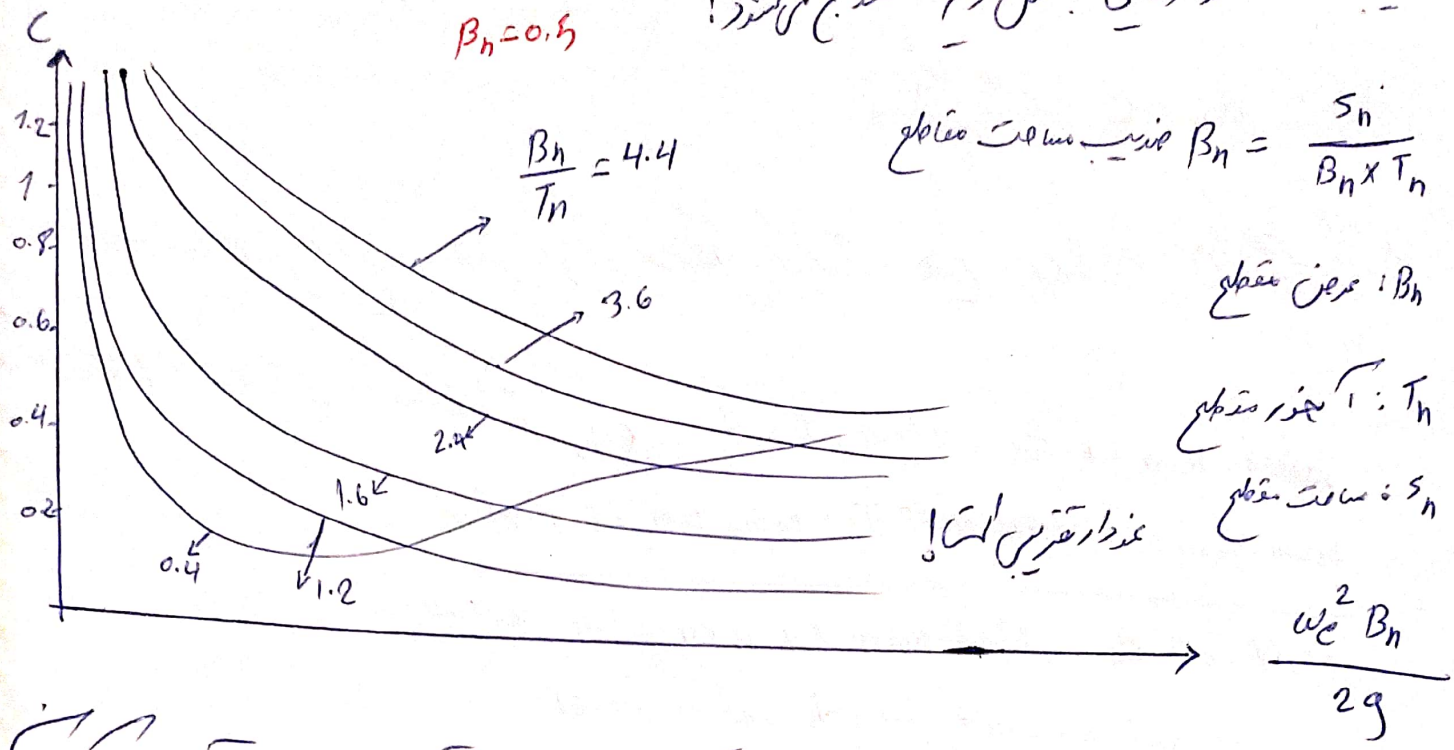
- نکته: در این رابطه فرض شده است که حجم افزوده مقاطع در امتداد طول همانند عرض تغییر قابل ملاحظه ای ندارد.

- با استفاده از مقادیر a_n و ذکر کنیم $B_n = 2y(x)$ که $y(x)$ نیم عرض صفحه آبخور است داریم:

$$a_z = \rho \frac{\pi}{2} \int_{-L/2}^{L/2} C y^2(x) \cdot dx$$

- چون عملاً مقدار $y(x)$ موجود نمی باشد نمی توانیم انتگرال بالا را حل کنیم بنابراین از قوانین اسیمپسون استفاده می کنیم.

- ضریب C از نمودارهایی به شکل زیر استخراج می‌شود:



ضریب مساحت مقاطع $\beta_n = \frac{S_n}{B_n \times T_n}$

B_n: عرض مقطع

T_n: آبخور مقطع

S_n: مساحت مقطع

مهم: هر نمودار یک β_n خاص دارد در واقع نمودارهای مختلف با β_nهای مختلف برای بدست آوردن C ارائه شده است. (در نمودارهای بعدی از درون‌یابی استفاده کردم)

مثال: برای یک مدل شناور اطلاعات زیر داده شده است. جرم افقی را برای حرکت هیو بدست آورید؟

$L = 19.2\ ft$, $B = 2.592\ ft$, $T = 1.144\ ft$, $L_w = L = 19.2\ ft$

$LCG = +0.48\ ft$ (forward of ⊗)

$LCB = +0.48\ ft$ (forward of ⊗)

Model speed $= u = 4.788\ ft/sec$, $\Delta = 2837.76\ lb$

جهت برخورد امواج $\mu = 180^\circ$ (i.e. head sea)

همچنین اطلاعات مربوط به مقاطع در صفحه بعد آورده شده است!

شماره مقطع station No.	عرض مقطع B_n (ft)	آبخور مقطع T_n (ft)	مساحت مقطع sectional Area (ft^2)
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

Ans:

فرکانس موج $\omega_w = \sqrt{\frac{2\pi g}{L_w}} = \left(\frac{2\times 3.14 \times 32.2}{19.20}\right)^{1/2} = 3.245 \ rad/sec$

فرکانس برخورد $\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} u \cos\mu = 3.245 - \frac{(3.245)^2}{32.2} \times 4.788 \cos 180^\circ = 4.811 \ rad/sec$

شماره مقطع	B_n	T_n	S_n	$\frac{\omega_e^2 \times B_n}{2g}$	B_n/T_n	$B_n \times T_n$	β_n	C	B_n^2	$\frac{917}{8} \times B_n^2$	a_n
0	0.0	1.144	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	2.592	//	2.944	0.932	2.266	2.965	0.993	0.98	6.718	5.113	5.011
10	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//
15	//	//	2.752	//	//	//	//	0.84	//	//	4.295
20	//	//	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0

ضرایب سیمپسون	تابع جرم اضافه
1	0.0
4	20.04
2	10.02
4	17.18
1	0.0
	sum = 47.246

ادامه جدول ⟹

بنابراین جرم اضافه بدست خواهد آمد:

$$\text{جرم اضافه حرکت هیو} = \int a_n \, dx = \frac{1}{3} \times \text{فاصله مقاطع} \times 5cm$$

$$\text{فاصله مقاطع} = \frac{18.2}{4} = 4.8$$

$$\Rightarrow \text{جرم اضافه حرکت هیو} = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 47.246 = 75.6 \ \frac{lb.sec^2}{ft}$$

همچنین جرم خود مدل برحسب $\frac{lb.sec^2}{ft}$ به صورت زیر بدست می‌آید

$$\text{جرم مدل} = \frac{\Delta}{g} = \frac{2837.76}{32.2} = 88.13 \ \frac{lb.sec^2}{ft}$$

بنابراین جرم اضافه $\frac{75.6}{88.13} \times 100 = 86\ \%$ جرم مدل است.

مقایسه جرم افزوده برای شناورهای مختلف

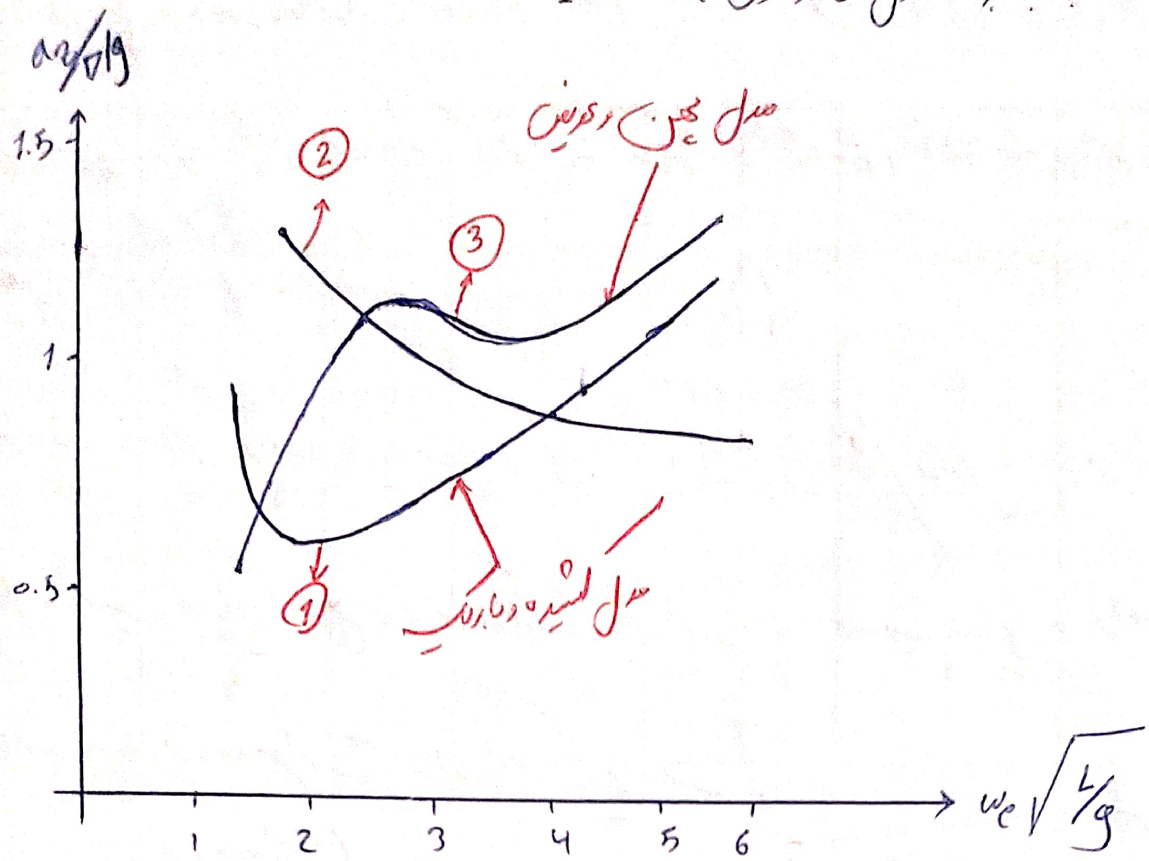
برای سه مدل شناور اطلاعات زیر داده شده است

	L/B	B/T	C_B	C_{WP}	C_M
1	7.5	2.5	0.6	0.706	0.977
2	7	2.5	0.7	0.785	0.986
3	6.5	2.5	0.8	0.871	0.994

C_M: ضریب مقطع میانی C_{WP}: ضریب صفحه آبخور C_B: ضریب بلوکی

23-5

منحنی جرم افزوده ی بعد برای سه مدل شناور فوق به صورت زیر است:



- با توجه به نمودار می توان گفت هرچه شناور پهن تر و عریض تر باشد جرم افزوده بیشتر است.

نیروی میرایی

نیروی میرایی یا میراکننده معمولاً مخالف جهت حرکت است و باعث کاهش دامنه حرکت می شود. برای تعیین اثر میرایی باید در معادله، نیروی میرایی وجود داشته باشد که به صورت ساده شده عبارت است از:

$$F_b = -b\frac{dz}{dt}$$

که b ضریب میرایی نیروی هیدرو است

- ضریب میرایی به عوامل وابسته به عوامل زیر است:

- نوع حرکت نوسانی
- مکانیزم برخورد
- شکل بدنه کشتی

b به طور خطی متناسب با سرعت نوسان $\frac{dz}{dt}$ است. این نیرو مقدار قابل ملاحظه ای است و باید معلوم گردد

چرا که میرایی ناشی از اصطکاک و جریان گردابی در مقایسه با اثر میرایی مقاومت موج سازی ناچیز است

(یعنی اثر میراکنندگی موج سازی بسیار قابل ملاحظه است)

- ضریب میرایی حرکت هیو نیز مانند جرم افزوده از روش تئوری نوار محاسبه می شود. 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. و از رابطه زیر بدست می آید:

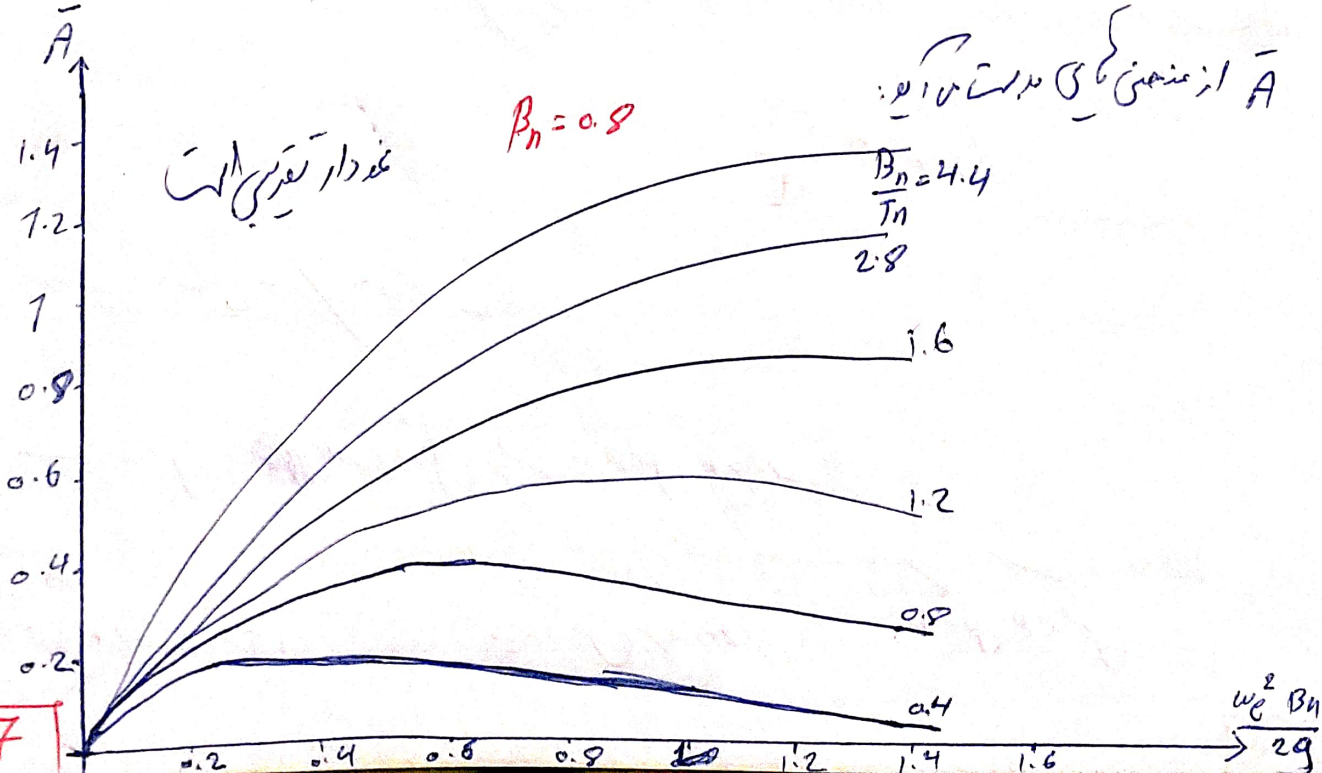
$$\boxed{b_n = \frac{\rho g^2 \bar{A}^2}{\omega_e^3}} \quad , \quad \bar{A} = \frac{\bar{\zeta}}{Z_a}$$

دامنه موج تولید (یا منتشر شده) Amplitude of the radiated waves

دامنه حرکت هیو (heave motion)

میرایی کل (از تئوری نوار) $b = \int_{-L/2}^{L/2} b_n \, dx$

$\bar{A}$ از منحنی های زیر بدست می آید:



مثال: ضریب میرایی (b) را برای شناور مثال قبل محاسبه کنید؟

شماره مقطع	$\frac{\omega_e^2}{2g} \times B_n$	B_n / T_n	β_n	$\bar{A}$	$\bar{A}^2$	b_n	ضرایب سیمپسون	تابع ضریب میرایی
0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0.932	2.266	0.993	0.57	0.325	5.86	4	23.46
10	0.932	//	//	//	0.325	5.86	2	11.732
15	//	//	//	0.66	0.436	7.86	4	31.476
20	0	0	0	0	0	0	1	0
								sum = 66.67

ضریب میرایی برابر است با $b = \int b_n \, dx = \frac{1}{3} \times$ فاصله بین مقاطع $\times$ sum $= \frac{1}{3} \times 4.8 \times 66.67 = 106.67$ $\frac{lb.sec}{ft}$

✓ در تئوری نوار، از اثر متقابل بین مقاطع 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:

1. نوسان آزاد در آب آرام
2. نوسان اجباری در آب آرام
3. نوسان اجباری در امواج منظم

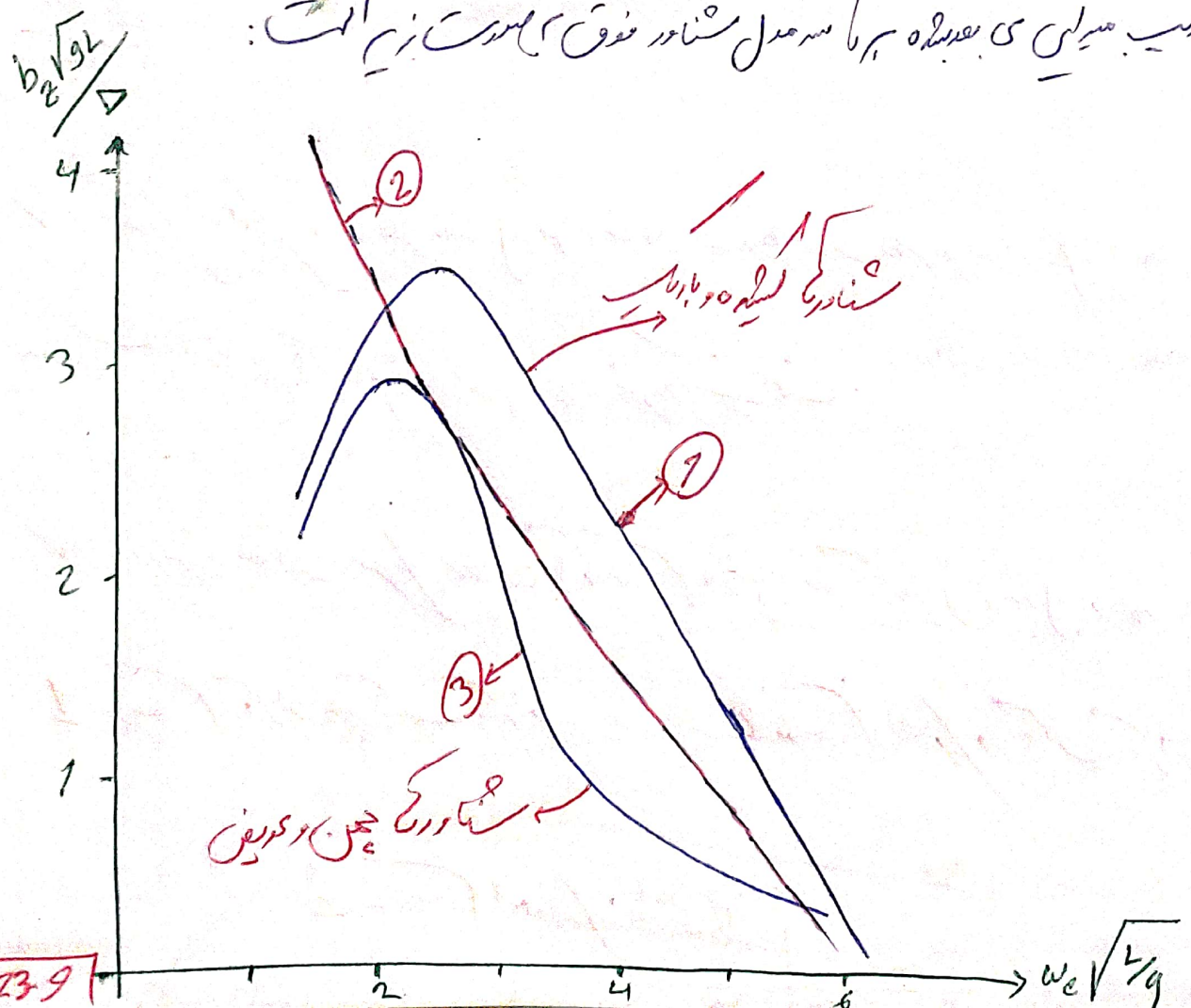
نکته مربوط به جرم افزوده: برای استفاده از جرم افزوده نیم استوانه و برای تطابق دادن مقطع شناور با نیم استوانه فرض می‌شود شناور با اکسترود (Extrude) شدن مقطع مورد بررسی ایجاد شده است.

نتایج ضریب میدانی برای شناورهای مختلف

ضرایب بی‌بعد برای سه مدل شناور به صورت زیر آورده شده است:

	L/B	B/T	C_B	C_W	C_M
1	7.5	2.5	0.6	0.706	0.977
2	7	2.5	0.7	0.785	0.986
3	6.5	2.5	0.8	0.871	0.994

منحنی ضریب میدانی بی‌بعد شده برای سه مدل شناور فوق به صورت زیر است:



نتایج بدست آمده از هر دو روش تئوری و تجربی موارد زیر را نشان می‌دهد.

✓ ضریب نیروی میرایی متناسب است با توان ۲ مساحت صفحه آبخور

✓ کشتی‌هایی با بدنه V شکل میرایی بیشتری نسبت به بدنه‌های U شکل تجربه می‌کنند (در A_{wp} یکسان)

✓ ضریب میرایی بی‌بعد مطابق شکل ابتدا به یک مقدار حداکثر می‌رسد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد

در حالت تشدید که میرایی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند این کاهش میرایی اثر چندانی مهمی را نشان نمی‌دهد.

✓ 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)

نیروی بازگرداننده

تا بدین جا ضرایب a و b را بدست آوردیم حال به دنبال محاسبه c هستیم

نیروی بازگرداننده معادل است با جریانی اضافه‌شده ناشی از افزایش آبخور شناور.

در این جا فرض بر این است که با تغییر آبخور، صفحه آبخور تغییر نمی‌کند یعنی بدنه در محل آبخور به صورت بدنه دیواره‌ای است. (wall-sided)

ضریب صفحه آبخور

$$\boxed{\text{ضریب نیروی بازگرداننده}\ C = \rho g A_{wp} = \rho g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp}}$$

نیم عرض $= B_n$

ضریب نیروی بازگرداننده $\Rightarrow$

$$\boxed{C = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} 2y(x)\,dx}$$

مثال: ضریب نیروی بازگرداننده را برای مدل شناور مثال قبل را محاسبه کنید؟

شماره مقطع	B_n	$C_n = \rho g B_n$	ضرایب سیمپسون	تابع ضریب بازگرداننده
0	0	0	1	0
5	2.592	161.78	4	647.12
10	2.592	161.78	2	323.56
15	2.592	161.78	4	647.12
20	0	0	1	0

sum = 1617.8

$$\Rightarrow C = \frac{1}{3} \times \text{فاصله بین مقاطع} \times \text{sum} = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 1617.8 = 2588\ \text{lb/ft}$$

مثال: اطلاعات زیر برای یک کشتی داده شده است

$L = 420$ ft , $B = 56$ ft , $T = 20$ ft , $C_B = C_{wp}$

a = added mass = 90 % of ship mass

مطلوب است مقادیر زیر:

a) محاسبه پریود حرکت هیو در آب آرام

b) توصیف حرکت نوسانی هیو در آب آرام در شرایطی که در زمان $t=0$ مقدار جابجایی و سرعت حرکت هیو به ترتیب صفر و 5.52 فوت بر ثانیه باشد

c) محاسبه حداکثر نیروی وارد شده از طرف یک بار 4 تنی بر روی عرشه کشتی

d) با ترسیم نمودار نشان دهید که جابجایی، سرعت و شتاب با زمان چگونه تغییر می‌کند

Ans:

a)

پریود طبیعی حرکت هیو $T_z = 2\pi\sqrt{\frac{a}{C}}$ → جرم مجازی

$C = \rho g A_{wp}$, $a = M + a_z = M + 0.9M = 1.9\frac{\Delta}{g}$

$$\Rightarrow T_z = 2\pi\sqrt{\frac{1.9\Delta}{g\cdot\rho g A_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{1.9 LBT C_B\cdot\rho g}{g\rho g LB C_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{1.9T}{g}} = 6.81 \text{ sec}$$

b)

شرکل معادله حرکت هیو $z = A\sin\omega_z t + B\cos\omega_z t$

شرایط مرزی $t=0 \rightarrow z=0 \Rightarrow B=0$

صورت مسأله $t=0 \rightarrow \frac{dz}{dt} = 5.52 \text{ ft/sec} \rightarrow A\omega_z = 5.52$

$$\Rightarrow A = \frac{5.52}{\omega_z}$$

$$\omega_z = \frac{2\pi}{T_z} = \frac{2\pi}{6.81} = 0.92 \Rightarrow A = 6$$

$$\Rightarrow \boxed{z = 6 \sin 0.92 t}$$

c)

نیروی وارد شده از طرف بار بالتی بر روی عدسه = نیروی گرانش + نیروی اینرسی

- این نیروی اینرسی اضافی ناشی از شتاب حرکت هواپیما. نیروی گرانش که ثابت است لذا حداکثر نیروی وارد بر عدسه از طرف بار هنگامی اتفاق می‌افتد که نیروی اینرسی حداکثر مقدار باشد و آن نیز هنگامی رخ می‌دهد که $\frac{d^2z}{dt^2}$ حداکثر مقدار را داشته باشد یا دوبار مشتق گیری از رابطه z داریم:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -A\omega_z^2 \sin\omega_z t - B\omega_z^2 \cos\omega_z t = -A\omega_z^2 \sin\omega_z t$$

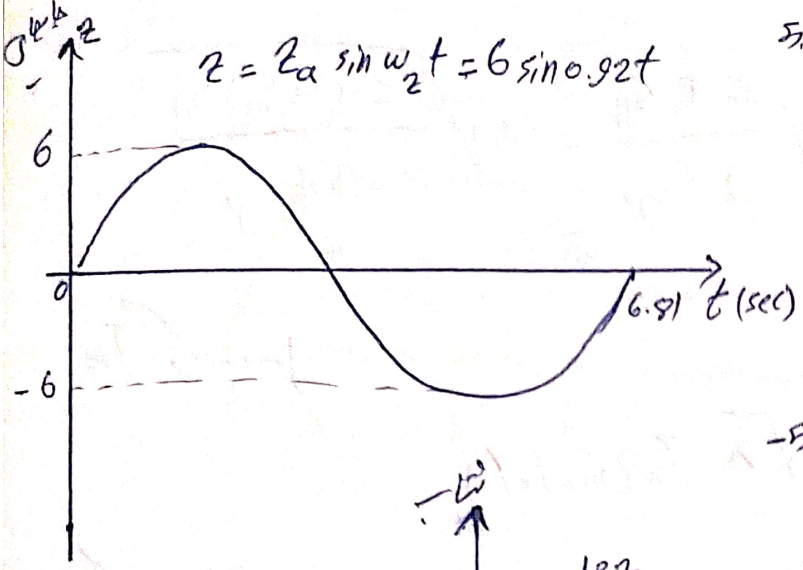
$$\Rightarrow \left.\frac{d^2z}{dt^2}\right|_{max} = -A\omega_z^2 = 6(0.92)^2 = 5.08 \ \frac{ft}{sec^2}$$

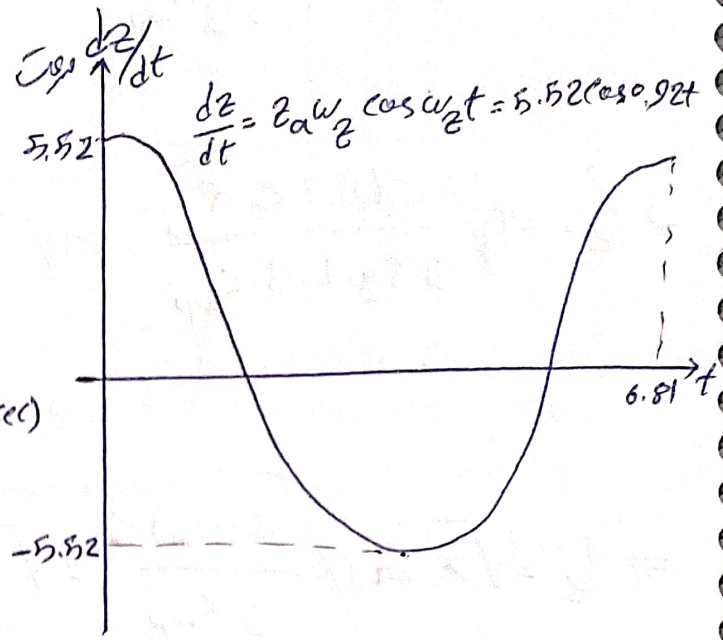
23-13

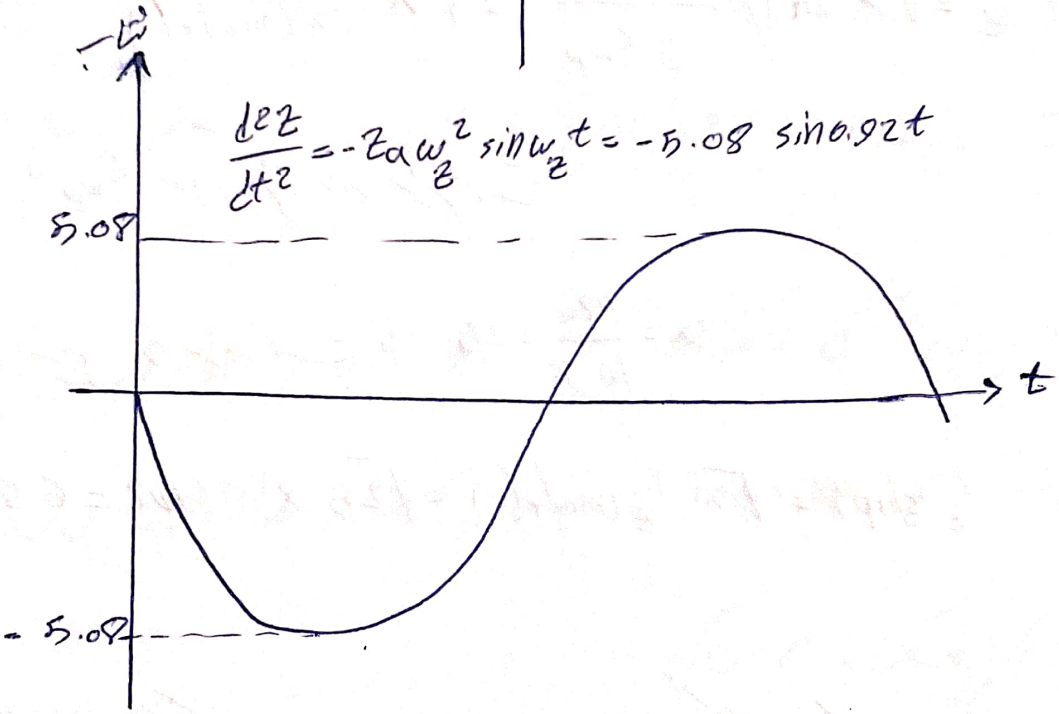
$$\frac{m}{g} \times \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{4}{32.2} \times 5.08 = 0.63 \text{ ton}$$

$\Rightarrow$ کل نیروی وارده $= 4 + 0.63 = 4.63$ ton

d)







مثال: الف) نشان دهید که اگر طیف افزایش یک کشتی برحسب λ مقیاس شوند، پریود طبیعی

همگی هیو کشتی معادل $\sqrt{\lambda}$ برابر مدل است

ب) اگر طول مدل 16.8 فوت و طول کشتی 420 فوت باشد، پریود طبیعی هیو 1.362 ثانیه باشد،

مطالب است پریود طبیعی کشتی.

Ans:

الف)

$$T_z = 2\pi\sqrt{\frac{C\Delta}{g\rho g A_{wp}}}$$

C: نسبت جرم مجازی به جرم کشتی

$$\Rightarrow T_z = 2\pi\sqrt{\frac{C.L.B.T.C_B.\rho.g}{g.\rho.g.L.B.C_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{C.T.C_B}{g.C_{wp}}} = 2\pi\sqrt{\frac{C.(\lambda T_m).C_B}{g.C_{wp}}}$$

T_m: مخفف مدل

$$\Rightarrow T_z = \sqrt{\lambda}\, 2\pi\sqrt{\frac{C(T_m)C_B}{g.C_{wp}}} = \sqrt{\lambda}\; T_z(model)$$

چرا که C و C_B و g و C_{wp} مدل و کشتی باهم برابر است

ب) نسبت مقیاس λ برابر است با $\lambda = \frac{420}{16.8} = 25$

$$\Rightarrow T_z(ship) = \sqrt{\lambda}\; T_z(model) = \sqrt{25} \times 1.362 = 6.81 \text{ sec}$$

نیروی تحریک

برای تعیین نیروهای تحریک حرکات کشتی، موج دریا باید مورد مطالعه قرار گیرد چرا که تنها منبع مهم تحریک کشتی در دریا، نیروهای امواج می باشد. این امواج، امواج دریا هستند (نه موج تولید شده توسط بدنه). در نظر می گیریم که رویه موج به فرم $\zeta = \zeta_a \cos\omega_e t$ باشد.

نیروی تحریک بدنه در حرکت هیو از انتگرال گیری جوابهای افزوده شده ناشی از امواج در طول کشتی بدست می آید بنابراین نیروی تحریک روی یک مقطع از کشتی با طول واحد توسط رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\rho g z \zeta \, dx$$

که ζ مختصات شکل موج موثر است که موج موثر به شکل یک موج زیر آبی در نظر گرفته می شود:

$$\boxed{\zeta = \zeta_a e^{-k' T_m} \cos(k' x - \omega_e t)}$$

طول موج موثر $L'_w = L_w / \cos\mu$ عدد موج موثر $k' = \frac{2\pi}{L'_w}$

T_m : عمق متوسط موج موثر از سطح آزاد آب μ : راستای جهت انتشار بستاب امواج

- عامل نمایی $e^{-k' T_m}$ بیانگر کاهش اثرات موج با افزایش عمق است

- برای امواج از چهار جهت ($\mu = 90^\circ$ or 270°) مقدار L'_w به سمت بی نهایت میل می کند و دامنه نیروی تحریک F_0 حداکثر مقدار می شود و به صورت زیر بدست می آید

$$F_0 = \rho g \zeta_a B L C_{wp} = 2\rho g \zeta_a A_{wp}$$

هر چند که محاسبه نیروی تحریک حرکت هیو در حالتی فرض می شود که کشتی ساکن باقی می ماند تا وقتی که به صورت عمودی حرکت کند و موج به صورت تدریجی طول کشتی را طی می کند بنابراین نیروی

تحریک عبارتست از:

$$F = F_0 \cos(\omega_e t)$$

- اگر فرض کنیم که کشتی در محل آبخور، بدنه دیواره‌ای است و هنگامی که 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.

هم اکنون 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 افزودن نیروی بویایی در هر مقطع که می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$F = \int_{-L/2}^{L/2} \rho g\, 2y(x)\, \zeta\, dx$$

$$\Rightarrow F = \int_{-L/2}^{L/2} \left(\rho g\, 2y\, \zeta_a e^{-k' T_m} \cos k'x\right) dx$$

اگر فرض شود که شکل موج سطح آب، شکل موج مورب باشد (این فرض منجر می‌شود به اینکه نیروی تحریک بزرگتری بدست آید و طراحی از جانب ایمنی بالاتری برخوردار باشد) عبارت نیروی تحریک به صورت روبرو بدست می‌آید:

$$\boxed{F = \left(\rho g\, 2\zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y \cos k'x\, dx\right) \cos \omega_e t = F_0 \cos \omega_e t}$$

باید آورد می‌شود ε_1 در شرایطی مثبت است که در جهت مثبت وارد شود یعنی رو به پایین.

با مقایسه روابط درمی‌یابیم که زاویه فاز بین پروفیل موج و نیروی هیدرودینامیکی از امواج برابر است با

$$\boxed{\varepsilon_1 = 0^\circ}$$

دامنه نیروی تحریک را می‌توان به صورت بی‌بعد مقابل نوشت:

$$f_0 = \frac{F_0}{\rho g \zeta_a L B} = \frac{2}{LB}\left(\int_{-L/2}^{L/2} y(x)\cos(kx\cos\mu)\,dx\right)$$

مثال: دامنه نیروی تحریک وارد بر یک مدل کشتی با مشخصات زیر را بدست آورید؟

$\mu = 120^\circ$, $LCG = at\ \otimes$, $L = L_w = 19.2\ ft$, $B = 2.592\ ft$, $\zeta_a = 0.2\ ft$

$\rho = 1.93\ \frac{lb.sec^2}{ft^4}$ $\qquad f_0 = ?$, $F_0 = ?$

Ans: $k = \frac{2\pi}{L_w} = \frac{6.28}{19.2} = 0.327\ ft^{-1}$

$$f_0 = \frac{2}{LB}\int_{-L/2}^{L/2} y(x)\cos(kx\cos\mu)\,dx$$

برای بدست آوردن قسمت انتگرالی لازم است که از روش‌های عددی استفاده کنیم برای این کار جدولی مطابق با جدول صفحه بعد تدوین می‌کنیم. توجه شود که مقدار نیم‌عرض (y) برابر است با نصف عرض (B_n).

شماره مقطع	$y = \frac{B_n}{2}$	$\cos\mu$	x	$k' = kx\cos\mu$	$\cos(kx\cos\mu)$	$y\cos(k'x\cos\mu)$	ضرایب سیمپسون	تابع f_0
0	0	-0.5	9.6	-1.570	0	0	1	0
5	1.296	〃	4.8	-0.785	0.707	0.916	4	3.664
10	〃	〃	0	0	1	1.296	2	2.592
15	〃	〃	-4.8	0.785	0.707	0.916	4	3.664
20	0	〃	-9.6	1.570	0	0	1	0

sum = 9.92

$$\text{انتگرال} = \frac{1}{3} \times \text{فاصله بین مقاطع} \times \text{sum} = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 9.92 = 15.87$$

$$\Rightarrow f_0 = \frac{2}{LB} \times \text{انتگرال} = \frac{2}{LB} \times 15.87 = 0.638$$

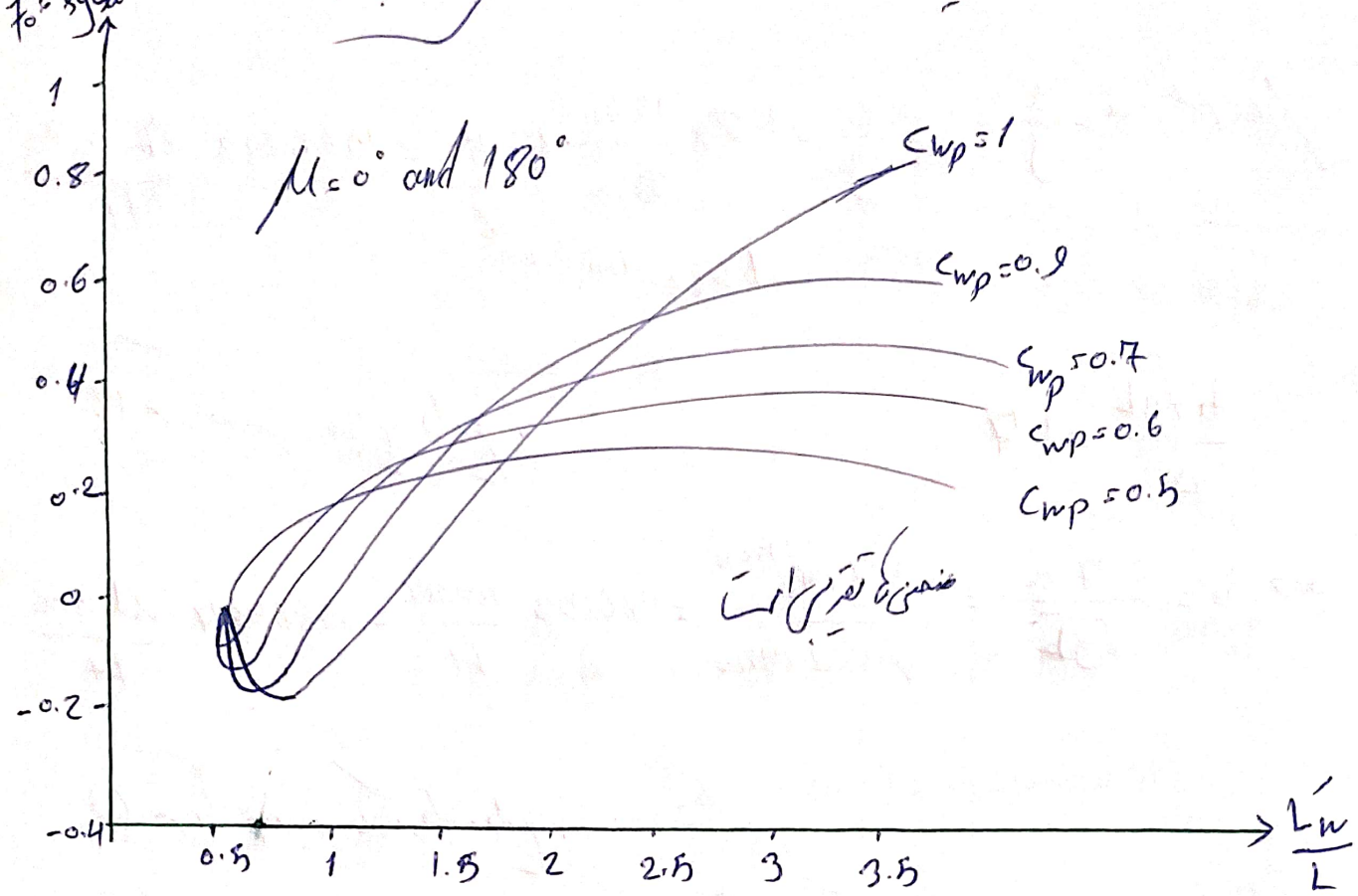
$$\Rightarrow F_0 = \rho g \zeta_a LB f_0 = 396.2 \ lb$$

نتایج کلی زیر را در مورد نیروی هیو می‌توان نتیجه گرفت:

- اگر طول موج مؤثر کمتر از نصف طول کشتی باشد، نیروی هیو کوچک است.
- هنگامی که نسبت طول موج به برابر با ضریب صفحه آبخور باشد، نیروی هیو به نظر می‌رسد که صفر باشد.
- اگر طول موج مؤثر برابر طول کشتی باشد نیروی هیو کوچک یا متوسط است.

✓ اگر طول موج مؤثر برای نهایت نزدیک میشود نیروی هیدرودینامیکی بعد به مقدار ضریب ضخامت بستگی نزدیک میشود

توجه: نکات فوق از نمودار زیر بدست آمده است که مربوط به نیروی هیدرودینامیکی بعد است:



مثال: دامنه حرکت هیو را برای کشتی زیر بدست آورید!

$L = 450\ ft$, $B = 70\ ft$, $C_{wp} = 0.8$, $\Delta = 12500\ tons$, $\omega_e = 1.18\ rad/sec$

$\rho = 1.99\ \frac{lb\ sec^2}{ft^2}$, wave amplitude $\zeta_a = 10\ ft$

همچنین داریم: الف) جرم افزوده حرکت هیو 80 درصد جرم واقعی کشتی است.

ب) ضریب میرایی به صورت بی بعد عبارتست از $b\sqrt{gL/\Delta} = 1.7$

ج) دامنه تحریک حرکت هیو به صورت بی بعد برابر است با:

$$f_0 = \frac{F_0}{\rho g \zeta_a LB} = 0.17$$

حل)

1) برای نیروی اینرسی داریم:

$$\text{Interial force} = \frac{\Delta'}{g}\frac{d^2z}{dt^2}$$

حجم مجاز $a = \frac{\Delta}{g} = 1.8\frac{\Delta}{g} = 1.8 \times \frac{12500}{32.2} \times 2240 = 1565222 \ \frac{lb.sec^2}{ft}$

تبدیل ton به پوند lb

2) برای ضریب میرایی داریم:

$$\frac{b\sqrt{gL}}{\Delta} = 1.7$$

$$\Rightarrow b = \frac{1.7\Delta}{\sqrt{gL}} = \frac{1.7 \times 12500}{\sqrt{32.2 \times 450}} = 176.53 \ \frac{ton.sec}{ft} = 3955427 \ \frac{lb.sec}{ft}$$

3) برای ضریب بازگرداننده داریم:

$$C = \rho g A_{wp} = \rho g (L.B.C_{wp}) = 1.99 \times 32.2 \times (450 \times 70 \times 0.8) = 1614766 \ \frac{lb}{ft}$$

4) برای نیروی تحریک موج داریم:

$$f_0 = \frac{F_0}{\rho g \zeta_a L B} = 0.17$$

$$\rightarrow F_0 = 0.17 \times 1.99 \times 32.2 \times 10 \times 450 \times 70 = 3431377 \ lb$$

$$A = \frac{\omega_e}{\omega_z} = \frac{1.18}{1.016} = 1.61$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{C}{a}} = \sqrt{\frac{1614766}{1565222}} = 1.016 \ rad/sec$$

بین ترتیب دامنه حرکت هیو عبارت است از:

$$k = \frac{D}{\alpha_z} = \frac{0.126}{1.016} = 0.124$$

که D از رابطه $2D = \frac{b}{a}$ بدست می‌آید ←

$$z_a = z_{st} \cdot \mu_z = \frac{F_0}{c} \times \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4k^2\Lambda^2}} = \frac{3431377}{1614766} \times \frac{1}{\sqrt{[1-(1.161)^2]^2 + (0.124)^2}} \times (1.161)^2$$

$$\Rightarrow z_a = 4.7 \text{ ft}$$

مثال: از اطلاعات مثال قبل مطلوب است محاسبه موارد زیر:

1) زاویه فاز بین حرکت موج و حرکت هیو

2) حداکثر شتاب حرکت هیو در امواج منظم

3) جابجایی کشتی نسبت به موج

4) مقدار حداکثر برآمدگی حرکت نسبی (جابجایی) کشتی نسبت به سطح موج

حل /

1) 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 که از رابطه مربوطه داریم $\varepsilon_1 = 0$ و همچنین:

$$\varepsilon_2 = \tan^{-1}\left(\frac{2k\Lambda}{1-\Lambda^2}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2 \times 0.124 \times 1.161}{1-(1.161)^2}\right) = -39.6^\circ$$

یادآوری می‌شود که بررسی زاویه فاز موج از اهمیت بالایی در حرکت کشتی بر خوردار است چرا که همانطور که بعداً نشان داده خواهد شد هم خنثی می‌شود 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 یا پیش بینی زاویه فاز دارای عدم قطعیت بسیار زیادی خواهد شد چرا که در این موقعیت تشدید (رزونانس) مقدار میرایی حرکت هیو را به مقدار قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد.

2) معادله حرکت هیو کشتی در موج مفرد : $z = z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon)$

$$\rightarrow \frac{dz}{dt} = -z_a \omega_e \sin(\omega_e t - \varepsilon) \rightarrow \frac{d^2 z}{dt^2} = -z_a \omega_e^2 \cos(\omega_e t - \varepsilon)$$

بنابراین شتاب هنگامی حداکثر است که $\cos(\omega_e t - \varepsilon) = -1$ باشد:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = z_a \omega_e^2 = 4.7 \times (1.18)^2 = 6.54 \ ft/sec^2$$

3) فرض کنید معادله حرکت موج نسبت به یک نقطه ثابت در سطح آب آرام به صورت زیر بیان شود:

$$\zeta = \zeta_a \cos \omega_e t$$

حرکت هیو همان نقطه برای شرایط یکنواخت عبارت است 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:

$$S = \zeta - z = \zeta_a \cos(\omega_e t) - z_a \cos(\omega_e t) = \zeta_a \left[\cos \omega_e t - \frac{z_a}{\zeta_a} \cos(\omega_e t - \varepsilon)\right]$$

4) حداکثر حرکت نسبی کشتی هنگامی بدست می‌آید که:

$$\frac{ds}{d(\omega_e t)} = 0 \longrightarrow \omega_e \zeta_a \left[-\sin(\omega_e t) + \frac{z_a}{\zeta_a} \sin(\omega_e t - \varepsilon)\right] = 0$$

از آنجا که $\zeta_a \neq 0$ صفر است بنابراین عبارت داخل براکت صفر است لذا داریم:

$$-\sin(\omega_e t) + \frac{z_a}{\zeta_a} \sin(\omega_e t - \varepsilon) = 0$$

$$\longrightarrow -\sin(\omega_e t) + \frac{z_a}{\zeta_a} \left[\sin(\omega_e t) \cos \varepsilon - \cos(\omega_e t) \sin \varepsilon\right] = 0$$

همانند با جایگذاری مقادیر z_a و ζ_a و ε داریم

$$-\sin(\omega_e t) + \frac{4.7}{10} \left[\sin(\omega_e t) \cos(-39.6^\circ) - \cos(\omega_e t) \sin(-39.6)\right] = 0$$

$$\rightarrow -0.638 \sin(\omega_e t) + 0.299 \cos(\omega_e t) = 0$$

$$\rightarrow 1 = \frac{0.638 \sin(\omega_e t)}{0.299 \cos(\omega_e t)} \rightarrow \tan \omega_e t = 0.469 \rightarrow \omega_e t = 25.11^\circ$$

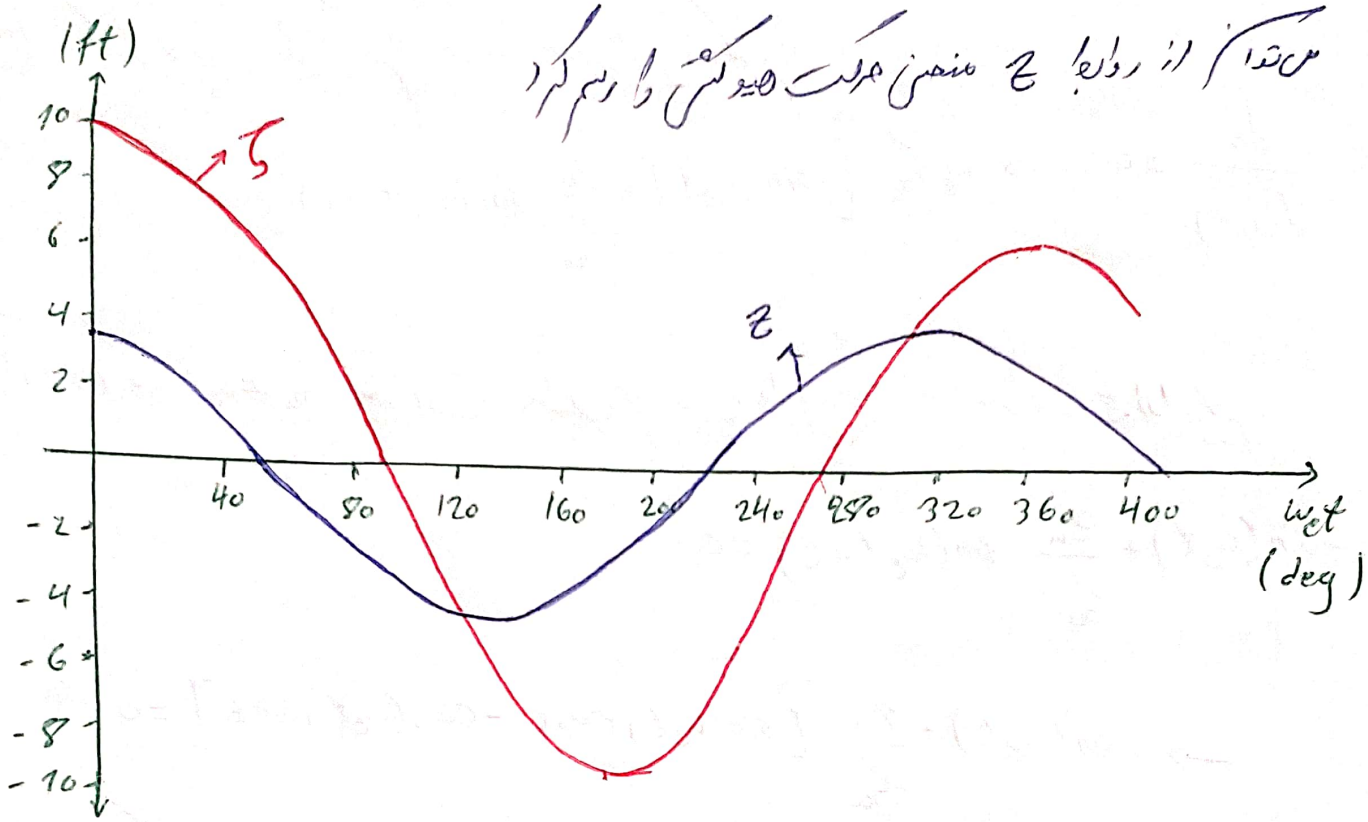
و S هنگامی حداکثر است که $\omega_e t$ برابر 25.11° باشد که با جایگذاری مقدار $\omega_e t$ در معادله خواهیم داشت:

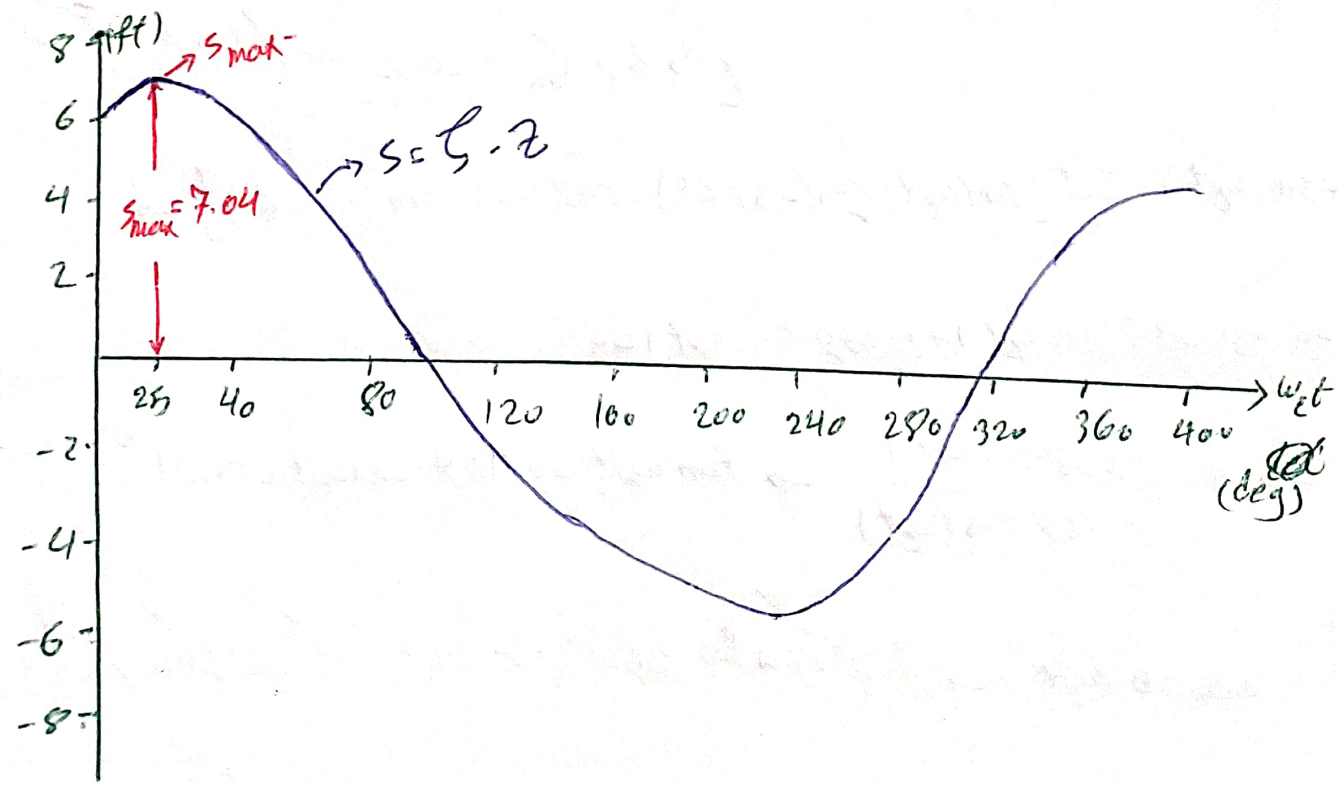
$$S = 10\left[\cos 25.11 - \frac{4.7}{10}\cos(25.11 + 36.6^\circ)\right] = 7.04\ ft$$

همچنین $z = z_a \cos(\omega_e t - (39.6^\circ))$

* در مورد S در ادامه توضیح داده خواهد شد

می‌توان از روابط z منحنی حرکت هیدروکش را رسم کرد





نکته: توجه شود که نیروی تحریک به طور مستقیم با دامنه موج (ζ_a) ارتباط است یعنی در شرایط یکسان با دو برابر شدن ζ_a مقدار F_0 هم دو برابر می‌شود:

ζ_a (2 برابر) $\rightarrow$ F_0 (2 برابر) $\rightarrow$ دامنه پاسخ z_0 (2 برابر) $\rightarrow$ دامنه شتاب $\ddot{z}$ (2 برابر)

- برای هر سه حرکت مد نظر در دریاهای (Roll، pitch، heave) همین قاعده برقرار است که این از روابط زیر بدست می‌آید

$$F_0 = \int_{-L/2}^{L/2} \rho g \cdot 2g(x) \cdot a \cos(kx - \cos\beta) \, dx$$

$$\frac{z_0}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(c-(M+a)\omega^2)^2 + b^2\omega^2}}$$

$$z = z_a \cdot \cos(\omega_e t + \varepsilon)$$

$$\ddot{z} = -z_a \omega_e^2 \cos(\omega_e t - \varepsilon)$$

پس n برابر شدن دامنه موج = n برابر شدن دامنه‌ها تحریک، پاسخ و شتاب

جلسه هفدهم بیست و چهارم

«حرکت مستقل پیچ کش در موج منظم»

همانند حرکت هیو در اینجا نیز چهار عامل مهم که ما بررسی کردیم در حرکت پیچ و رول وجود دارد:

- مهم اینرسی
- مهم بازگرداننده
- مهم میرایی
- مهم تحریک

شکل کلی معادله حرکت پیچ:

$$\boxed{a\frac{d^2\theta}{dt^2}+b\frac{d\theta}{dt}+c\theta=M_0\cos\omega_e t}$$

مهم اینرسی — مهم میرایی — مهم بازگرداننده — مهم تحریک

a: مهم اینرسی جرم مجازی

c: ضریب مهم بازگرداننده

b: ضریب مهم میرایی

θ: جابجایی زاویه‌ای حرکت پیچ

- اگر ما بتوانیم مقادیر مختلف a و b و c و M_0 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 هر حرکت به طور مجزا محاسبه گردند.

مهم اینرسی حرکت پیچ

مهم اینرسی جرم واقعی کشتی حول محور y

$$a = I_{yy} + \delta I_{yy} = \frac{\Delta}{g}k_{yy}^2 + \delta I_{yy}$$

مهم اینرسی افزوده حول محور y

ممان اینرسی : $a = \text{حجم مجاز} \times (\text{شعاع ژیراسیون})^2 = (M+\delta M) \times k_{yy}^2$

$$\Rightarrow a = \frac{\Delta'}{g} k_{yy}^2$$

ممان اینرسی جرم افزوده از محاسبه جرم افزوده بدست می‌آید همان طور که ممان اینرسی

کشتی از جرم کشتی بدست می‌آید بنابراین :

$$\boxed{\delta I_{yy} = \int_{-L/2}^{L/2} a_n x^2 . dx}$$

a_n : ممان اینرسی هر یک از مقاطع کشتی

x : فاصله هر مقطع از مرکز ثقل طولی (LCG)

- معادله فوق را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت :

$$\boxed{\delta I_{yy} = \rho \frac{\pi}{2} \int_{-L/2}^{L/2} c x^2 y^2 dx}$$

q_n و c همان هایی هستند که در حرکت هیو محاسبه گردید

مثال : در مثال جلسه قبل (صفحه 23-3 جزوه) : ممان اینرسی جرم افزوده را مشخص کنید.

پاسخ : جدولی مطابق با جدول صفحه بعد تدوین می‌کنیم و ممان اینرسی جرم افزوده را محاسبه می‌کنیم :

شماره مقطع	a_n (از مثال جلسه قبل)	x (ft)	x^2 (ft^2)	$a_n \cdot x^2$	ضرایب سیمپسون	تابع مساحت انیمی انحنا دار
0	0	9.12	83.17	0	1	0
5	5.0011	4.32	18.66	93.51	4	374.06
10	5.0011	-0.48	0.23	1.152	2	2.30
15	4.295	-5.28	27.88	119.736	4	478.94
20	0	-10.08	101.6	0	1	0

sum= 855.3

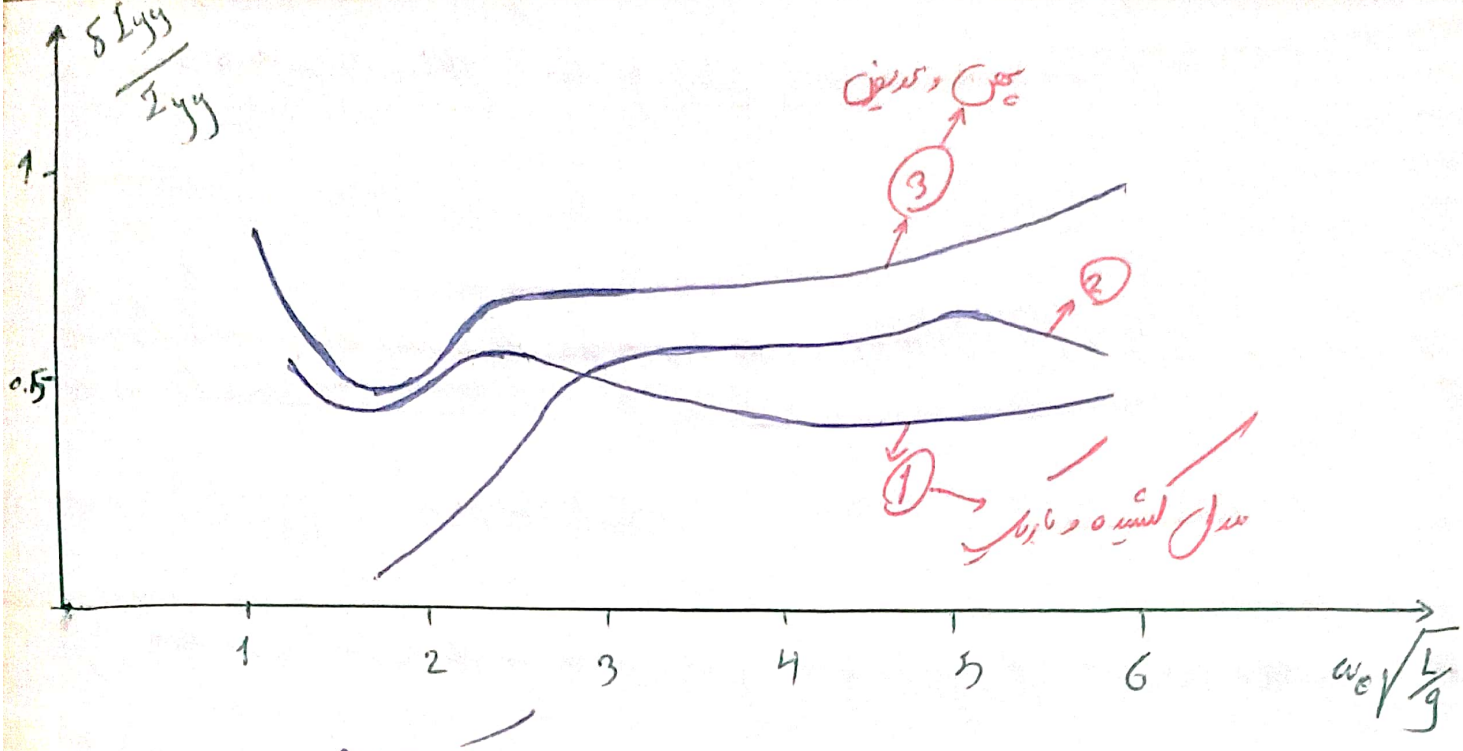
مقادیر x از مرکز ثقل کشتی محاسبه می‌شود

$$\delta I_{yy} = \int_{-L/2}^{L/2} a_n x^2 dx = \frac{1}{3} \times \text{فاصله مقاطع عرضی} \times sum = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 855.3$$

$$\Rightarrow \delta I_{yy} = 1368.5 \quad lb\text{-}ft\text{-}sec^2$$

نکته: همانند قبل برای سه مدل شناور با مشخصات زیر نمودار ۳ فرم را که در صفحه بعد ترسیم شده است بدست آورید:

	L/B	B/T	C_B	C_{WP}	C_M
1	7.5	2.5	0.6	0.706	0.977
2	7	2.5	0.7	0.785	0.986
3	6.5	2.5	0.8	0.871	0.994



برای کشتی کشیده و باریک (مدل 1) ممان اینرسی افزوده تقریباً نصف ممان اینرسی واقعی کشتی است. و برای کشتی پهن و عریض این مقدار تقریباً برابر 0.5-1 است. بنابراین مقدار ممان افزوده حرکت پیچ قابل ملاحظه است و در محاسبات باید در نظر گرفته شود.

ممان میرایی حرکت پیچ

ضریب میرایی حرکت پیچ نیز می‌تواند از روش تئوری نواری محاسبه شود که برای هر مقطع محاسبه شده و سپس انتگرال گیری می‌شود.

$$b_{pitching} = \int_{-L/2}^{L/2} b_{n\,heaving} \times x^2 \, dx$$

x : فاصله هر یک از مقاطع از مرکز ثقل طولی شناور

b_n : ضریب میرایی بحرانی هر مقطع

یادآوری کوچک: استفاده از تئوری نوارها و روابط فوق و نمودارهای استخراج شده با فرض تابع پتانسیل انجام شده است.

مثال: مطلوب است محاسبه ضریب میرایی حرکت پیچ کش مدل مثال محاسبه قبل (صفحه 23-3 جزوه) که اطلاعات مورد نیاز آن در جدول زیر وارد شده است.

شماره مقطع	b_n (بدست آمده از مثال حرکت پیچ)	x (ft)	x^2 (ft²)	$b_n \cdot x^2$	ضرایب سیمپسون	تابع ضریب میرایی
0	0	9.12	83.17	0	1	0
5	5.866	4.32	18.66	109.47	4	437.88
10	5.866	-0.48	0.23	1.35	2	2.7
15	7.869	-5.28	27.88	218.89	4	875.59
20	0	-10.08	101.6	0	1	0
						sum = 1316.17

$$b_n = \int_{-L/2}^{L/2} b_n \cdot x^2 \cdot dx = \frac{1}{3} \times \text{فاصله مقاطع عرضی} \times \text{sum} = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 1316.17$$

$$\Rightarrow b_n = 2105.9 \quad ft_lb_sec$$

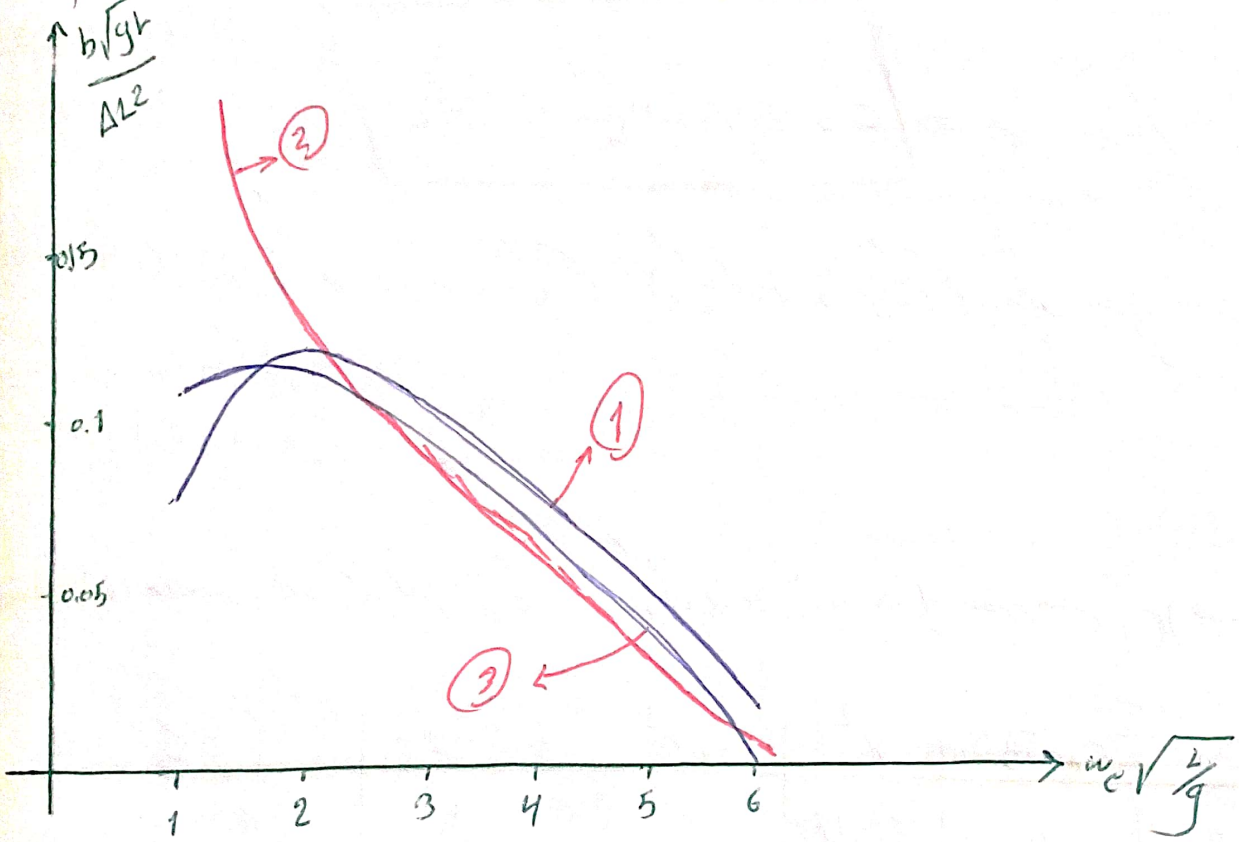
- میرایی حرکت پیچی با عوامل زیر افزایش می‌یابد:

✓ افزایش عرض بدنه

✓ کاهش آبخور

✓ کاهش ضریب منحصر به فرد عمودی (این افزایش حالت ۱ شکل بود)

نکته: حال برای سه مدل که در صفحه 24-3 جزوه آورده شد ضریب میرایی محاسبه شده را رسم می‌کنیم:



ممان بازگرداننده حرکت پیچی

ممان بازگرداننده حرکت پیچی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$C\theta = \rho g \theta \int_{-L/2}^{L/2} x^2 y(x)\, dx = \rho g \theta I_y$$

C: ضریب ممان بازگرداننده

I_y: ممان اینرسی سطح صفحه در آبخور

از آنجا که $BM_L = \frac{I_y}{\nabla}$ لذا داریم:

$$C\theta = \rho g \theta \nabla \overline{BM_L}$$

بدلیل آنکه فاصله نقطه متاسنتر طولی از کشتی بسیار زیاد (برابر کشتی 100 متر حدود 100 متر است) می‌توان $\overline{BM_L}$ را برابر $\overline{GM_L}$ گرفت:

$$\Rightarrow C\theta = \rho g \theta \nabla \overline{GM_L}$$

برای زوایای غلتش کوچک $\Rightarrow$ $\boxed{C = \rho g \nabla \overline{GM_L} = \Delta \overline{GM_L}}$

یادآوری می‌شود که ضریب ممان بازگرداننده را می‌توان بطور خطی متناسب با زاویه پیچ (θ) در نظر گرفت.

مثال: مطلوب است تعیین ممان بازگرداننده شناور مدل مثال جلسه قبل (صفحه 3-23 جزوه)

شماره مقطع	B_n	$C_n = \rho g B_n$	x^2	$C_n x^2$	ضرایب سیمپسون	ضریب تابع ممان بازگرداننده
0	0	0	83.174	0	1	0
5	2.592	161.78	18.662	3019.14	4	12076.6
10	2.592	161.78	0.23	37.21	2	74.4
15	2.592	161.78	27.88	4510.1	4	18040.4
20	0	0	101.6	0	1	0
						sum = 30181.4

بنابراین مقدار ضریب میرایی را باز گردانده به صورت زیر بدست می‌آید:

$$c = \frac{1}{3} \times \text{فاصله بین مفاصل} \times sum = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 30191.4 = 48306.2 \ ft\text{-}lb$$

حرکت پیچی در آب آرام

معادلات حرکت پیچی در آب آرام (بدون نیرو/تحریک) عبارتست از:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = 0 \rightarrow I'_{yy}\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + \Delta\overline{GM_L}\,\theta = 0$$

$$\rightarrow \ddot{\theta} + \underbrace{\frac{b}{I'_{yy}}}_{2\nu}\dot{\theta} + \underbrace{\frac{\Delta\overline{GM_L}}{I'_{yy}}}_{\omega_\theta^2}\theta = 0 \rightarrow \boxed{\ddot{\theta} + 2\nu\dot{\theta} + \omega_\theta^2\theta = 0} \quad (I)$$

$$\Rightarrow \boxed{2\nu = \frac{b}{a} = \frac{b}{I'_{yy}}} \ , \ \boxed{\omega_\theta^2 = \frac{c}{a} = \frac{\Delta\overline{GM_L}}{I'_{yy}}}$$

ω_θ : فرکانس طبیعی حرکت پیچی

$$\Rightarrow T_\theta = \frac{2\pi}{\omega_\theta} = 2\pi\sqrt{\frac{I'_{yy}}{\Delta\overline{GM_L}}}$$

حل معادله (I) به صورت زیر می‌باشد

$$\theta = e^{-\nu t}(c_1\cos\omega_d t + c_2\sin\omega_d t)$$

محاسبه اختلاف فاز

$$\Rightarrow \theta = e^{-\nu t}A\sin(\omega_d t - \delta)$$

که ω_d فرکانس میرایی بوده و برابر است با $\omega_d = \sqrt{\omega_\theta^2 - \nu^2}$

- در رابطه ω_d اگر $\omega_\theta \geq \nu$ باشد حرکت نوسانی نخواهد بود و غیر نوسانی نامیده می‌شود.

البته این مورد در مبحث شناوری و کشتی‌ها چندان کاربرد ندارد.

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_\theta^2 - \nu^2}} = T_\theta \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\nu}{\omega_\theta}\right)^2}}$$

پریود طبیعی حرکت

پیچ

نکته: از رابطه فوق ملاحظه می‌شود که پریود با افزایش میرایی، افزایش می‌یابد.

همچنین که در حرکت کشتی‌ها، این ضریب میرایی بسیار کوچک است و بنابراین افزایش پریود قابل صرف نظر است.

مثال: برای کشتی با اطلاعات زیر، پریود طبیعی حرکت پیچ را حساب کنید

$L = 500\ ft$, $k_{yy} = 0.25L$, $GM_L = 500\ ft$, $\Delta = 15000\ tons$

همچنین ممان اینرسی افزوده حدود 90 % ممان اینرسی جسم واقعی کشتی است

Ans:

$$I'_{yy} = 1.9\, I_{yy} = 1.9 \times \frac{\Delta}{g} k_{yy}^2 = a$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{c}{a}} = \sqrt{\frac{\Delta \overline{GM}_L \cdot g}{1.9 \Delta k_{yy}^2}} = \sqrt{\frac{500 \times 32.2}{1.9 \times (125)^2}} = 0.736$$

$$T_\theta = \frac{2\pi}{\omega_\theta} = \frac{2\pi}{0.736} = 8.52\ sec$$

نکته: 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 چرا که اثرات نیروی موج، اسلمینگ و شتاب‌های عمودی را به دنبال دارد.

$k_{yy} = 0.24L \sim 0.26L$ در کشتی‌های تجاری

نکته: طبق رابطه‌ی $T_\theta = 2\pi\sqrt{\frac{I_{yy}}{\Delta \overline{GM}_L}}$ با افزایش پایداری طولی ($\overline{GM}_L$ افزایش) ، پریود نوسانات پیچ کاهش می‌یابد.

نکته: پر بودن شکل بدنه و یا نیز و تحت بودن بدنه نیز و تحت بودن باشند اثرات میرایی قابل ملاحظه‌ای بر روی حرکات پیچ دارد.

نکته: برای پرهیز از پدیده تشدید، پریود حرکت پیچ تا حد ممکن کوچک نگه داشته می‌شود و به عبارتی دیگر نسبت $\frac{T_\theta}{T_e}$ کوچک نگه داشته می‌شود.

نکته: پریود حرکت پیچ به صورت تابعی از جابجایی و طول برآشتاری تجاری و نظامی قابل بیان است:

$$\frac{T_\theta}{\sqrt{L}} = c\sqrt{\frac{\Delta}{(0.01L)^3}\cdot\frac{L}{g}}$$

→ از داده‌های تجربی بدست آمده است.

ex: for submarine with $\Delta = 6900$ tons and $L = 410.5$ ft $\Rightarrow T_\theta = 5.2 - 6.4$

for Frigate with $\Delta = 5800$ tons and $L = 512.5$ ft $\Rightarrow T_\theta = 4.5 - 5.6$

for oiler with $\Delta = 40000$ tons and $L = 640$ ft $\Rightarrow T_\theta = 7.3 - 8.8$

مثال: از اطلاعات مثال قبل مطلوب است محاسبه حرکت پیچ در زمان‌های صفر، 1، 2، 3 ثانیه

در صورتیکه ضریب میرایی حرکت پیچ برابر 2500,000 ft.lon.sec باشد و

شرایط اولیه از قرار ($t=0$ ، $\theta=5^\circ$ ، $\frac{d\theta}{dt}=0$) باشد

Ans:

معادله حرکت پیچ در آب آرام $\theta = e^{-\nu t} A \sin(\omega_d t - \delta)$

$$\omega_\theta = \frac{2\pi}{T_\theta} = \frac{2\pi}{8.53} = 0.737 \ sec^{-1}$$

$$2\nu = \frac{b}{I'_{yy}} = \frac{2500,000}{1.9 \times (15000/32.2) \times (125)^2} = 0.181 \ sec^{-1}$$

$$\omega_d = \sqrt{(0.737)^2 - (0.091)^2} = 0.731 \ sec^{-1}$$

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = 8.6 \ sec$$

شرط مرز $t=0 \rightarrow \theta = 5^\circ \xrightarrow[\text{در معادله حرکت}]{\text{جایگزاری}} \theta = 5 = A\sin(-\delta) = -A\sin\delta$

$$\frac{d\theta}{dt} = e^{-\nu t} A\omega_d \cos(\omega_d t - \delta) - \nu e^{-\nu t} A \sin(\omega_d t - \delta)$$

شرط مرز $t=0 \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = 0 \Rightarrow 0 = A\omega_d \cos(-\delta) - \nu A \sin(-\delta)$

$$\Rightarrow \delta = -\frac{\omega_d}{\nu} = -\frac{0.731}{0.091} = -8.12 \Rightarrow \delta = -84.8 \text{ or } -1.48 \ rad$$

$$A = -\frac{5}{\sin\delta} = 5.021$$

معادله حرکت پیچ $\Longrightarrow$ $\boxed{\theta[rad] = e^{0.091t} \times 5.021 \sin(0.731t + 1.48)}$

24-11

جلسه بیست و پنجم

«حرکت مستقل پیچ کشتی در موج منظم»

«قسمت دوم»

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 به وسیله توزیع فشار هیدرواستاتیک بدست آورد چنانکه داریم:

$$M_\theta = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} 2y\, \zeta\, x\, dx$$

هم اکنون با جایگذاری معادله رویه موج به صورت $\zeta = \zeta_a \cos(kx\cos\mu - \omega_e t)$ و با فرض متقارن بودن کشتی حول مقطع وسط آن داریم:

$$M_\theta = \underbrace{\left[2\rho g\, \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y(x)\, x \sin(kx\cos\mu)\, dx\right]}_{M_0} \sin\omega_e t$$

$$\Rightarrow M_\theta = M_0 \sin\omega_e t \Rightarrow M_\theta = M_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_1)$$

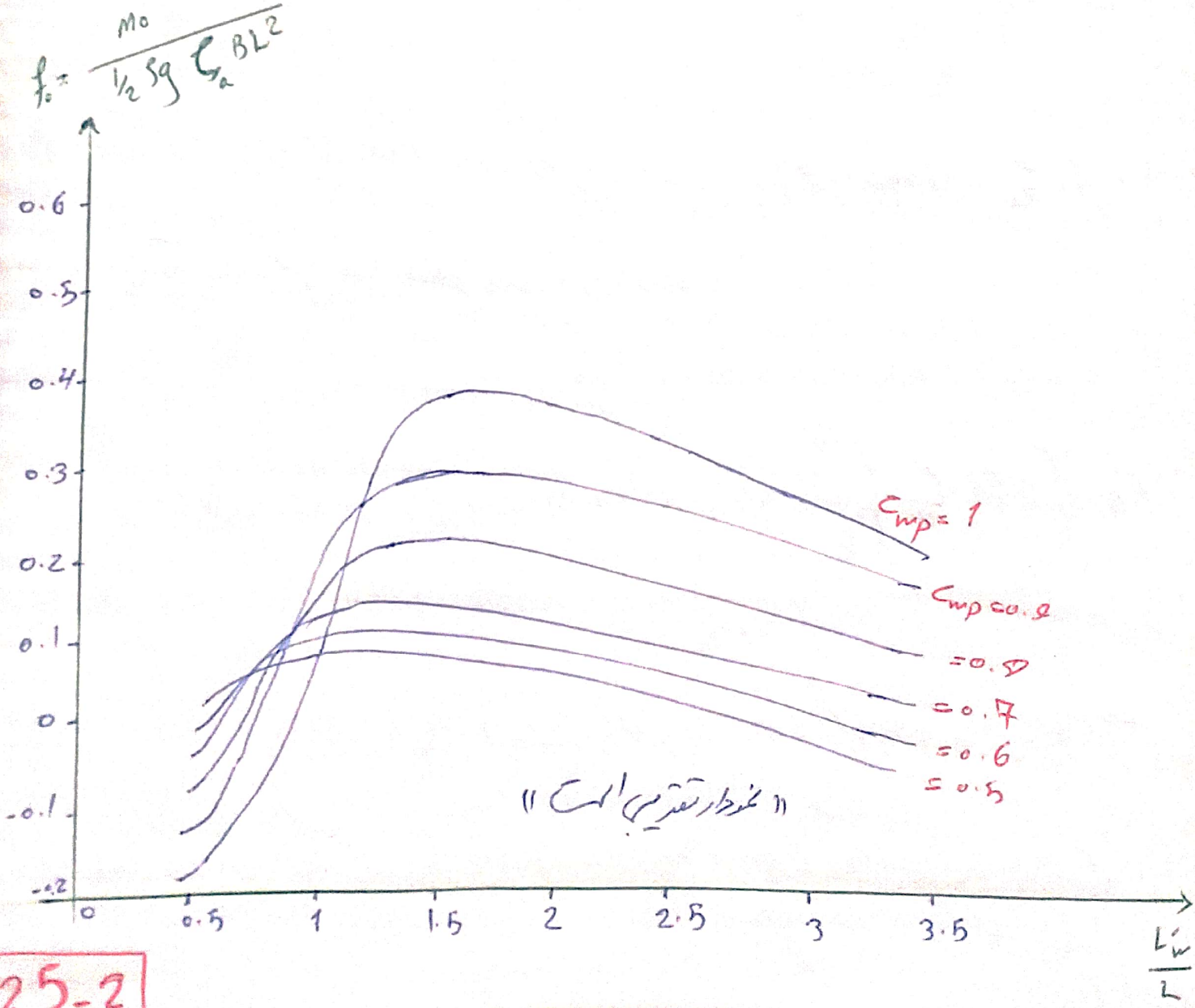
M_0: دامنه ممان تحریک $\qquad$ $\varepsilon_1 = 90^\circ$: زاویه فاز ممان تحریک نسبت به امواج

اما پارامتری بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود که دامنه‌ی بعدی ممان تحریک حرکت پیچی نامیده می‌شود و عبارت است از:

$$\boxed{f_0 = \frac{M_0}{\frac{1}{2}\rho g \zeta_a B L^2} = \frac{4}{BL^2}\int_{-L/2}^{L/2} y(x)\, x \sin(kx\cos\mu)\, dx}$$

- با توجه به رابطه‌ی فوق در امواج عرضی ($\mu = 90^\circ, 270^\circ$) ممان تحریک حرکت پیچی (M_θ) صفر می‌شود.

نمودار f_0 برحسب $\frac{L_w}{L}$ برای ضرایب صفحه‌ی آبگذر مختلف به صورت زیر است:



مثال: برای مثال صفحه 23-3 جدول عمق تحت یک حرکت پیچ را بدست آورید (اطلاعات مورد نیاز در جدول آورده شده است.)

از اطلاعات مسئله داریم

فاصله مقطع	$y(x)=\frac{B_n}{2}$ (ft)	x (ft)	$y(x)\cdot x$	$kx\cos\mu$	$\sin(kx\cos\mu)$	$y(x)\,x\,\sin(kx\cos\mu)$	ضرایب سیمپسون	تابع
0	0	9.6	0	-1.57	-1	0	1	0
5	1.296	4.8	6.22	-0.785	-0.707	-4.4	4	-17.59
10	1.296	0	0	0	0	0	2	0
15	1.296	-4.8	-6.22	0.785	0.707	-4.4	4	-17.59
20	0	-9.6	0	1.57	1	0	1	0
								sum = -35.18

رابطه f_0: $f_0 = \dfrac{M_0}{\frac{1}{2}\rho g \zeta_a B L^2} = \dfrac{4}{BL^2}\displaystyle\int_{-L/2}^{L/2} y(x)\cdot x\cdot \sin(kx\cos\mu)\,dx$

مقدار انتگرال $= \frac{1}{3}\times 4.8\times(-35.18) = -56.288\ ft^3$

$\Rightarrow f_0 = \dfrac{4}{BL^2}\times(\text{انتگرال}) = \dfrac{4}{2.592\times(19.2)^2}(-56.288) = -0.2356$

$\Rightarrow M_0 = \frac{1}{2}\rho g \zeta_a B L^2 f_0 = \frac{1}{2}\times(1.9384)\times 32.2\times 0.2\times 2.592\times(19.2^2)\times(-0.2356)$

$\Rightarrow M_0 = -1405.12\ ft\text{-}lb$

- با استفاده از منحنی می توان نتایج زیر را ارائه نمود:

✓ هنگامی که طول موج مؤثر کمتر از نصف طول کشتی است، تمام پیچ کوچک است.
(یا طول موج تقدیر شده)

✓ هنگامی که طول موج تقدیر شده برابر طول کشتی است تمام پیچ بزرگ است

به حداکثر مقدار خود می رسد که وابسته به شکل بدنه است (بخصوص ضریب صفحه، بجفور) برای $1 < \frac{L_{wl}}{\lambda} < 1.5$

✓ برای طول موج مؤثر (تقدیر شده) بی نهایت تمام پیچ نزدیک به صفر است همچنانکه

برای یک ارتفاع موج ثابت و طول بی نهایت، شیب موج تقریباً ناپدید می شود.

حرکت پیچ در امواج

معادله حرکت پیچ در امواج به صورت روبرو است:

$$I'_{yy}\frac{d^2\theta}{dt^2}+b\frac{d\theta}{dt}+c\theta=M_0\sin\omega_e t$$

$$\Rightarrow \ddot{\theta}+\frac{b}{I'_{yy}}\dot{\theta}+\frac{\Delta\overline{GM_L}}{I'_{yy}}\theta=\frac{M_0}{I'_{yy}}\sin\omega_e t$$

- این معادله شبیه معادله حرکت هیو است و منتج به نتیجه مشابه زیر می شود:

دامنه حرکت پیچ $\theta_a=\theta_{st}\cdot\mu_\theta$

$\theta_{st}=\frac{M_0}{C}=\frac{M_0}{\Delta\overline{GM_L}}$ (شرایطی که فقط یک فنر دادیم و نیروی تحریک در وسط قرار دهیم و جرم را در نظر نمی گیریم)

$$\mu_\theta=\frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+4k^2\lambda^2}}$$

که به θ مثل ضریب بزرگنمایی حرکت می‌باشد و داریم:

$$\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\theta} \qquad K = \frac{\nu}{\omega_\theta}$$

کایا

K (کایا): ضریب میرایی بی بعد

حل معادله حرکت پیچ در حالت کلی و در صورت وجود نیروی موج به صورت زیر است:

$$\theta = Be^{-\nu t}\sin(\omega_d t + \gamma) + c\sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

زمانی که نوسان ادامه پیدا کند تا به حالت یکنواخت (steady-state) برسد در این صورت فقط عامل تحریک می‌ماند و معادله به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\theta = c\sin(\omega_e t - \varepsilon_2) \qquad c = \theta_a \Rightarrow \theta = \theta_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

از قبل داشتیم $\theta_a = \theta_{st} \cdot \mu_\theta \Rightarrow \theta = \dfrac{\theta_{st}}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4K^2\Lambda^2}}\sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$

ε_2: زاویه فاز بین نیروی تحریک و حرکت پیچ است و داریم: $\boxed{\tan(\varepsilon_2) = \dfrac{2K\Lambda}{1-\Lambda^2}}$

بنابراین حداکثر دامنه حرکت پیچ زمانی اتفاق می‌افتد که $\Lambda = 1 - 2K^2$

برای سیستم‌هایی با ضریب میرایی کوچک، پدیده تشدید می‌تواند در $\Lambda = 1$ اتفاق افتد.

از طرفی می‌توان ملاحظه کرد که برای مقادیر معمولی K برای شکل بدنه کشتی‌ها پدیده تشدید می‌تواند در $\Lambda = 0.85$ تا 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 $-180 \le \varepsilon_2 \le 0$ می‌باشد.

مثال: برای کشتی با مشخصات زیر

$L = 450\ ft \quad B = 70\ ft \quad \overline{GM_L} = 450\ ft$

$C_{wp} = 0.8 \quad k_{yy} = 110\ ft \quad \mu = 180^\circ$ (head seas) , $\zeta_a = 10\ ft$

$\rho = 1.99\ lb\text{-}sec^2/ft$, $\omega_e = 1.18\ \frac{rad}{sec} \quad \Delta = 12500\ tons$

مطلوب است هر دو پارامتر دامنه ماکزیمم پیچ و تفاوت فاز بین موج و حرکت پیچ؟ شکل را ترسیم کنید که نشان دهنده حرکت موج، ماکزیمم تحریک پیچ و حرکت پیچ شناخته می‌شود تابعی از $\omega_e t$ باشد

همچنین فرض کنید که ماکزیمم اینرسی جرم افزوده 54 درصد ماکزیمم اینرسی جرم کشتی و ضریب میرایی بی بعد حرکت پیچ ($\frac{b\sqrt{gL}}{\Delta L^2}$) برابر 0.154 باشد و نیز از شکل داریم دامنه‌ی بی بعد ماکزیمم پیچ برابر است با:

$$f_0 = \frac{M_0}{\frac{1}{2}\rho g \zeta_a B L^2} = 0.25$$

Ans:

$$I'_{yy} = I_{yy} + \delta I_{yy} = I_{yy} + 0.54 I_{yy} = 1.54\, I_{yy}$$

$$\Rightarrow I'_{yy} = 1.54 \frac{\Delta}{g} k_{yy}^2 = 1.54 \times \frac{12500}{32.2} \times (110)^2 = 7233000\ ton\text{-}sec^2\text{-}ft$$

$$\frac{b\sqrt{gL}}{\Delta L^2} = 0.154 \Longrightarrow b = \frac{0.154 \Delta L^2}{\sqrt{gL}} = \frac{0.154 \times 12500 \times 450^2}{\sqrt{32.2 \times 450}} = 3240000\ ft\text{-}ton\text{-}sec$$

$$M_0 = f_0 \times \frac{1}{2} \times \rho g \zeta_a L^2 B = 0.25 \times \frac{1}{2} \times 1.99 \times 32.2 \times 10 \times 450^2 \times 70$$

$$\Rightarrow M_0 = 506250\ ft\text{-}tons$$

← بعد از تبدیل با ضریب تبدیل 2240

$$\theta_{st} = \frac{M_0}{c} = \frac{M_0}{\Delta \overline{GM}_L} = \frac{506250}{12500 \times 450} = 0.09 \text{ rad}$$

$$2\nu = \frac{b}{I'_{yy}} = \frac{3240000}{7233000} = 0.448$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{c}{a}} = \sqrt{\frac{12500 \times 450}{7233000}} = 0.882 \text{ rad/sec}$$

$$K = \frac{\nu}{\omega_\theta} = \frac{0.224}{0.882} = 0.254$$

$$\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\theta} = \frac{1.18}{0.882} = 1.338$$

$$\frac{\theta_a}{\theta_{st}} = \mu_\theta = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4K^2\Lambda^2}} = \sqrt{0.624 + 4 \times (0.254)^2 \times (1.338)^2}$$

$$= 0.96$$

$$\Rightarrow \theta_a = \mu_\theta \cdot \theta_{st} = 0.96 \times 0.09 = 0.086 \text{ rad (or } 4.93^\circ)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \qquad \varepsilon_1 = 90^\circ$$

$$\varepsilon_2 = \tan^{-1}\left(\frac{2K\Lambda}{1-\Lambda^2}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2 \times 0.254 \times 1.338}{1-(1.338^2)}\right) = -41^\circ$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 90^\circ - 41^\circ = 49^\circ$$

رسم نمودار :

$$\zeta = \zeta_a \cos(\omega_e t)$$

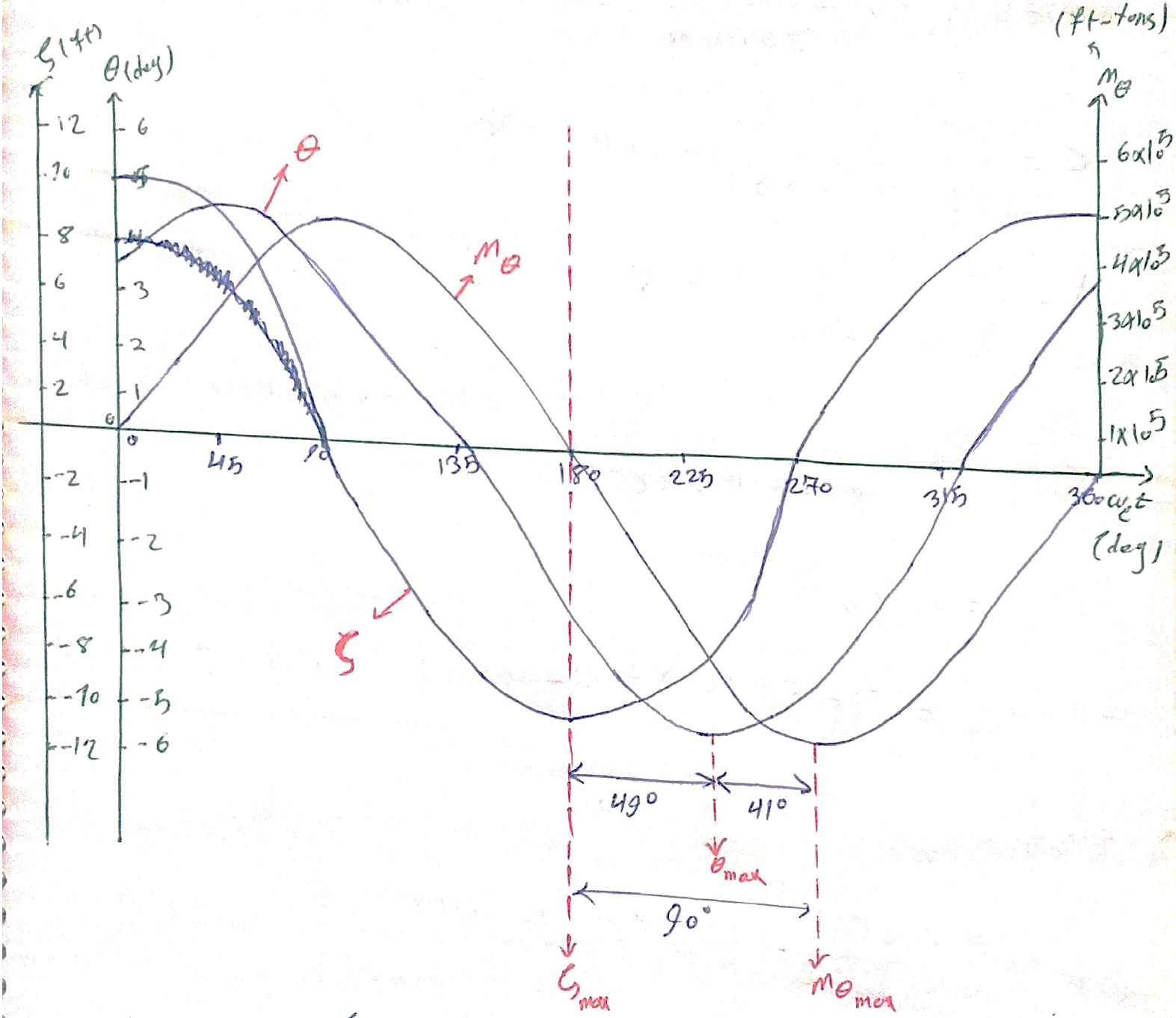
$$M_\theta = M_0 \sin \omega_e t = M_0 \cos(\omega_e t - 90^\circ)$$

$\varepsilon_1 = 90^\circ$

$$\theta = \theta_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2) = \theta_a \sin(\omega_e t + 41^\circ) = \theta_a \cos(\omega_e t - 49^\circ)$$

$\varepsilon_2 = -41^\circ$

$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$



- پاسخ کشتی (θ) زودتر به حالت ماکزیمم می‌رسد نسبت به محرک تحریک (M_θ). در واقع پاسخ کشتی نسبت به محرک تحریک تقدم فاز دارد.

حرکت هیپ از حرکت پیچ تبعیت می‌کند

هرچه C_B افزایش بیابد دامنه حرکت هیپ و پیچ کاهش می‌یابد

لزوماً نمی‌توان گفت که هرگاه طول کشتی با طول موج برابر باشد بیشترین دامنه حرکت هیپ و پیچ اتفاق می‌افتد بلکه وابسته به عدد فرود نیز می‌باشد

جلسه بیست و ششم

«حرکات مستقل رول کشتی در موج منظم»

حرکت رول در مبحث دریاهای بسیار پرکاربرد و مهم است در این حرکت برخلاف دو حرکت دیگر (هیو و پیچ) عامل لزجت نیز دارای اهمیت است.

- معادله حرکت رول همانند حرکت پیچ است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$a\frac{d^2\phi}{dt}+b\frac{d\phi}{dt}+c\phi=M_0\cos\omega_e t$$

در زوایای غلتش کوچک، ممان میرایی به طور خطی متناسب با $\frac{d\phi}{dt}$ در نظر گرفته می‌شود.

- با مشتق گیری ضرایب a و b و c و M_0 در معادله فوق معادله حرکت رول توصیف می‌گردد. البته باید توجه داشت که ضرایب معادله رول با ضرایب معادله پیچ متفاوت هستند.

ممان اینرسی حرکت رول

ممان اینرسی جرم مجازی حرکت رول برابر است با ممان اینرسی جرم واقعی کشتی به علاوه ممان اینرسی جرم افزوده، بنابراین داریم:

$$a=I_{xx}+\delta I_{xx}=\frac{\Delta}{g}k_{xx}^2+\delta I_{xx}$$

این معادله را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$a = I'_{xx} = I_{xx} + \delta I_{xx} = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 + \frac{\delta\Delta}{g} k_{xx}^2 = \left(\frac{\Delta + \delta\Delta}{g}\right) k_{xx}^2 = \frac{\Delta'}{g} k_{xx}$$

- که Δ' جایگزین محاسبه کشش در حرکت رول است که برابر است با حاصل جمع وزن افزوده و وزن واقعی کشتی.

نکته: مقدار ضریب a را می‌توان به صورت تجربی یا به صورت تحلیلی بدست آورد و نتایج بدست آمده از هر دو روش تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد که همان جرم افزوده حرکت رول حدود 20 درصد همان اینرسی جرم واقعی حرکت رول است.

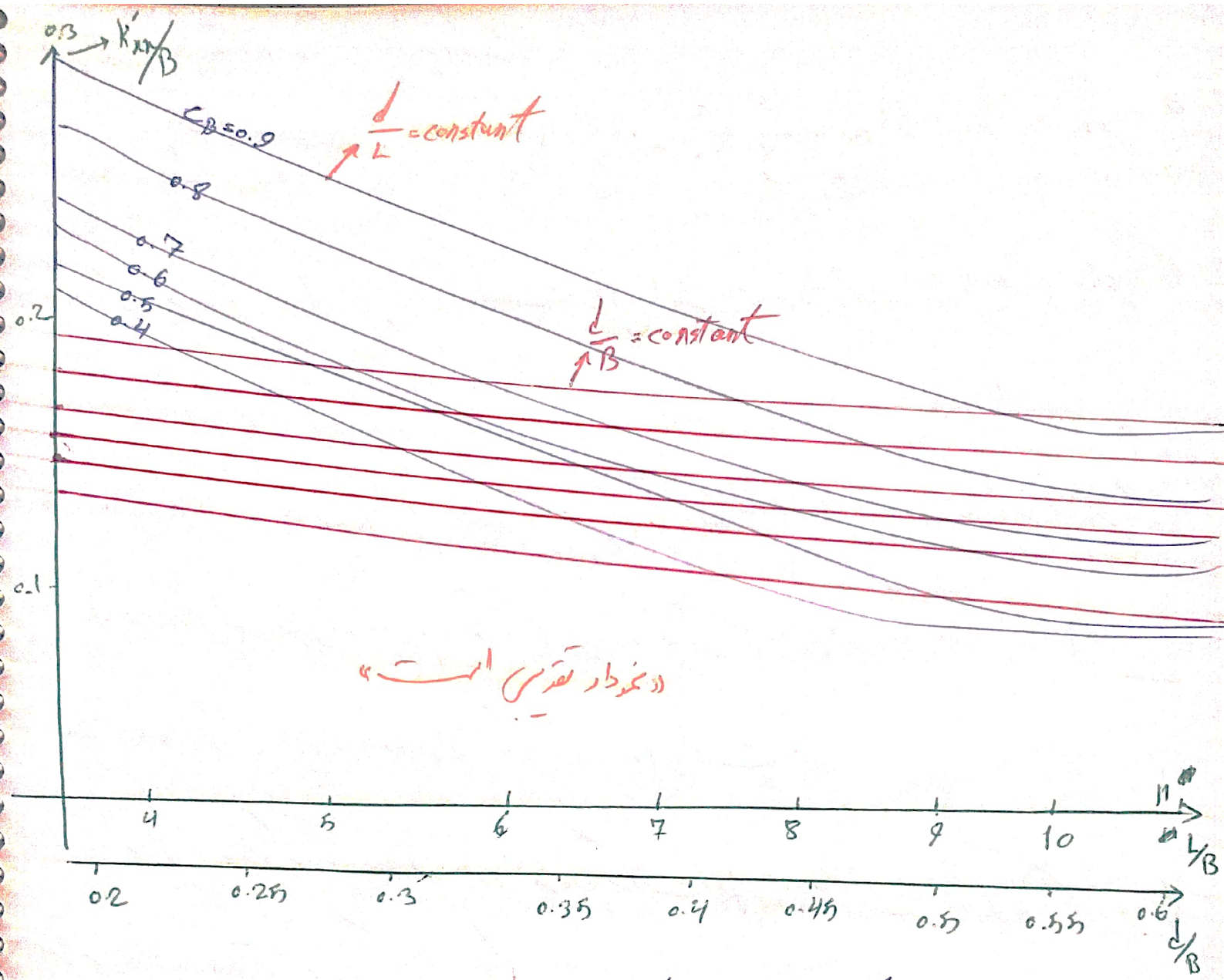
- باید آوری می‌شود که اگر مقدار جرم افزوده حرکت رول در دسترس نباشد می‌توان آن را برابر 20 درصد وزن واقعی کشتی در نظر گرفت.

همچنین معادله فوق را می‌توان برحسب شعاع ژیراسیون جرم افزوده به صورت زیر نوشت:

$$a = I_{xx} + \delta I_{xx} = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 + \frac{\Delta}{g} k'^2_{xx} = \frac{\Delta}{g}\left(k_{xx}^2 + k'^2_{xx}\right) = \frac{\Delta}{g} k''^2_{xx}$$

که k_{xx} شعاع ژیراسیون حول محور x کشتی است و k'_{xx} شعاع ژیراسیون جرم افزوده حول محور x و k''_{xx} اغلب به صورت متناسب با عرض کشتی بیان می‌شود و در محدوده

$0.33B \leq k''_{xx} \leq 0.45B$ است.



K_{xx} (شعاع ژیراسیون حرکت رول) کمی بیشتر از $\frac{1}{4}$ عرض است و این بدلیل آن است که توزیع جرم در عمق کمی بیشتر است و قسمت کم کناره کمی سنگین‌تر می‌شود.

برای تخمین شعاع ژیراسیون حرکت رول فرمول‌های دیگری نیز ارائه شده است که در صفحه 21-3 جزوه آورده شده است.

مقاومت میدانی حرکت رول

- عواملی که در میدان حرکت رول مؤثر هستند عبارتند از:

1) تولید موج در حرکت رول

2) نیروی اصطکاکی آب روی سطح بدنه کشتی

3) نیروی پیچک کیل و سایر ضمائم بدنه

4) مقاومت پسای کشتی و هوا

5) اتلاف انرژی ناشی از تولید گرما در حین انجام حرکت رول

6) کشش سطحی

- عوامل 1 و 2 و 3 از عوامل فوق بسیار مهم هستند در حالی که عوامل 4 و 5 و 6 اثرات ناچیز دارند.

- عامل اصلی در تولید مقاومت میدانی حرکت رول تولید موج است اما نمی‌توان از تأثیر نیروی اصطکاکی و پیچک کیل و دیگر ضمائم چشم پوشی کرد. بنابراین ابتدا با روابط تحلیلی مقاومت حاصل از تولید موج را بدست می‌آوریم سپس با استفاده از فاکتورهای تجربی آن را تعمیم می‌دهیم به حالتی که پیچک کیل و ضمائم و نیروی اصطکاکی نیز در نظر گرفته شده باشد.

نکته: همانند حرکت هیو و پیچ، ضریب میرایی حرکت رول نیز بسیار مهم است بخصوص که ضریب میرایی حرکت رول نسبت به حرکت هیو و پیچ کوچکتر است.

ضریب میرایی (b) ناشی از تولید موج در حرکت رول را می‌توان از روش تشدید نوسان بدست آورد.

(یعنی قبل از انتگرال گرفتن)

ضریب میرایی در واحد طول را می‌توان به این صورت بیان کرد:

$$b_n = \frac{\rho g^2}{\omega_e^3}\left(\frac{B_n}{2}\right)^2 \bar{A}_\phi^{-2}$$

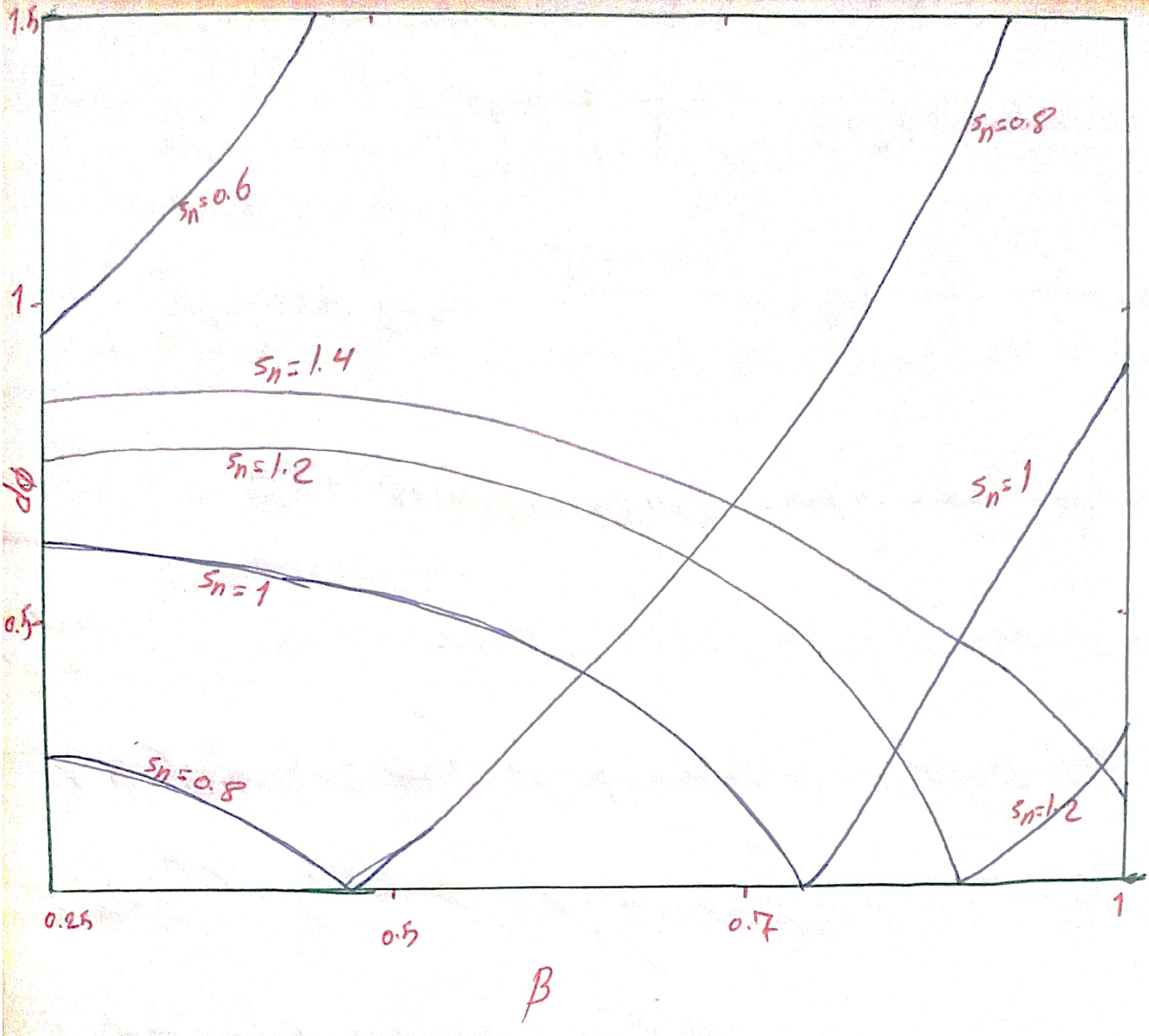
$$\bar{A}_\phi = \frac{\zeta_a}{\phi_a\left(B_n/2\right)} = d\phi\left(\frac{\omega_e^2 B_n}{2g}\right)^2$$

توجه: مقدار $d\phi$ از نمودارها سرعت بدست می‌آید

پس از بدست آوردن b_n برای هر مقطع، طبق تشدید نوسان از آن در طول کشتی انتگرال گرفته می‌شود

$$b = \int b_n \cdot dx$$

- مقادیر $d\phi$ از منحنی‌ها مطابق با آنچه در صفحه بعد آمده است، بدست می‌آید. توجه شود که مقادیر این منحنی برای $\frac{\omega_e^2 B_n}{2g}$ کمتر از 0.3 صادق است.



مثال: با استفاده از مقادیر مثال صفحه 23-3 جزوه، مطلوب است محاسبه ضرایب میرایی حرکت دورانی. (مقادیر مربوطه در جدول ارائه شده است)

$S_n = \frac{B_n}{2T_n} = 2.288$

از نمودار

زمان (ثانیه)	B_n (ft)	B_n^2	$\frac{B_n^2}{4}$	S_n	β_n	d_ϕ	$\bar{A}_\phi$	$\bar{A}_\phi^2$	b_n	ضرایب سیمپسون	تابع همگرا
0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	0
5	2.592	6.718	1.68	1.133	0.993	0.5	2.9157	8.5	258	4	1032
10	2.592	6.718	1.68	1.133	0.993	0.5	2.9157	8.5	258	2	516
15	2.592	6.718	1.68	1.133	0.993	0.5	2.9157	8.5	258	4	1032
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
											sum=2580

26-6

نحوه محاسبه B_n در جدول ، $\bar{A}_\phi = d_\phi \left(\frac{\omega_e^2 B_n}{2g}\right)^2 = \left[\frac{(4.811)^2 B_n}{64.4}\right]^2 = 0.1292 B_n^2 d_\phi$

$$\Rightarrow b_n = \frac{\rho g^2}{\omega_e^3} \frac{B_n^2}{4} (\bar{A}_\phi)^2 = \frac{1.94 (32.2)^2}{(4.811)^3 \times 4} B_n^2 \bar{A}_\phi^2 = 4.526 B_n^2 \bar{A}_\phi^2$$

$$\Rightarrow b = \frac{1}{3} \times \text{فاصله مقاطع} \times \text{sum} = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 2580 = 4128 \ ft.lb.sec$$

چند نکته :

از آنجا که اثرات اصطکاک نقش مهمی در حرکت رول دارد ، میرایی ناشی از موج ساز صدفاً می تواند چندان دقیق باشد. همچنین ضمائم بدنه مانند بیلج کیل نیز با تولید جدایش گردابه می تواند نقش مؤثری در میرایی حرکت رول ایفا کند.

از طرف دیگر سرعت حرکت شناور نیز بسیار اهمیت دارد. ضریب میرایی رول نشی در حال حرکت می تواند تا 3 برابر آن ضریب برای یک کشتی ساکن باشد. یعنی سرعت اثر مطلوب بر میرایی دارد.

همانطور که قبلاً نیز گفته شد اگر زوایای حرکت رول بزرگ باشد ، تقاون ارتباط خطی بر دامنه میرایی دیگر ارتباط ندارد. یعنی $b\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$ نامعتبر است.

✓ میدان حرکت رول را می‌توان خیلی دقیق محاسبه کرد بنابراین برای تخمین رفتار حرکت رول آزمایش یک تجربی دقیقی انجام می‌شود یا از روش‌های CFD استفاده می‌شود.

✓ روش‌های CFD از روش‌های تحلیل دقیق‌تر است هم می‌توان بیلج کیل و دیگر ضمائم را مدل‌سازی و مش‌بندی کرد.

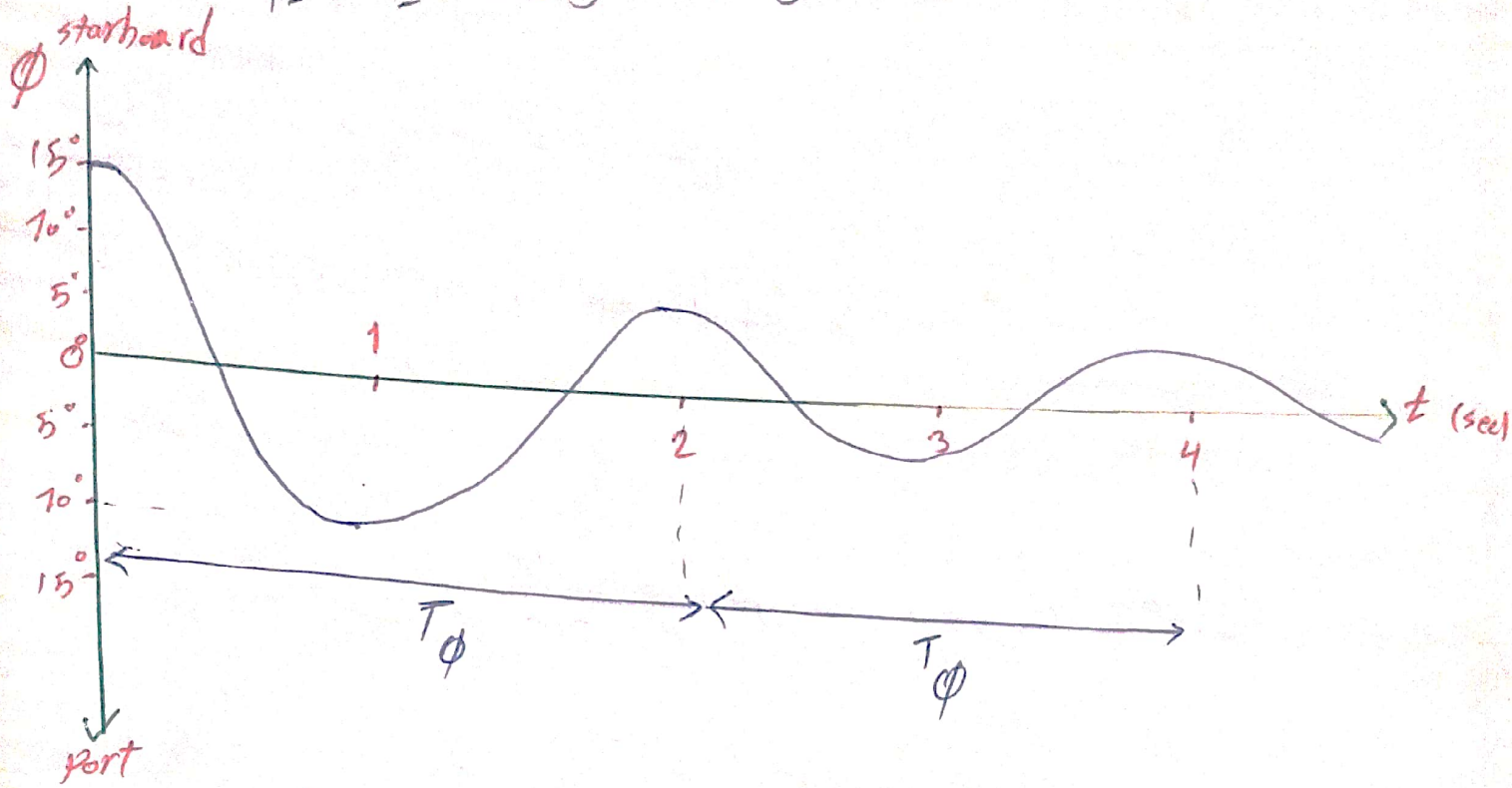
✓ هرچه دامنه حرکت رول بزرگتر باشد اثرات میدان خود را بیشتر نشان می‌دهد یعنی هرچه دامنه حرکت رول بزرگتر باشد همان میدانش نیز بیشتر است.

بدست آوردن همان میدان حرکت رول با استفاده از تست رولدیکی (روش تجربی)

در تست رولدیکی کشتی واقعی یا کشتی مدل را به یک سمت کشیده و رها می‌کنیم و دامنه حرکت و پریود حرکت را محاسبه می‌کنیم.

توجه شود که در تست رولدیکی، اگر از مدل شناور استفاده شود به دلیل اینکه ابعاد مدل کوچک است فرصت لازم برای تشکیل لایه مرزی وجود ندارد (به عنوان مثال در حرکت رول سیال روی مدل تقریباً 7 الی 8 سانتی‌متر نسبت به ابعاد مدل، بیشتر نمی‌تواند حرکت کند که در این فاصله لایه مرزی نمی‌تواند رشد کند و به مقدار واقعی خود برسد) بنابراین هرچه مدل بزرگتر باشد لایه مرزی بهتر ایجاد می‌شود و نتایج بهتر و دقیق‌تر خواهد بود.

با بست نوسانات شناور رسم شده منحنی حرکت رول به صورت زیر ترسیم می‌شود



- پریود طبیعی (T_ϕ) را ثابت در نظر می‌گیریم اما در واقعیت اینگونه نیست و با گذشت زمان و کاهش دامنه حرکت رول مقدار T_ϕ نیز کاهش می‌یابد.

- با استفاده از تست رولینگ می‌توان GM و KG (مبحث هیدرواستاتیک) و ضریب میرایی (مبحث دینامیک) را تعیین کرد.

- با توجه به منحنی می‌توان کاهش دامنه را در هر پریود محاسبه کرد. که از این کاهش دامنه مقدار ضریب کلی میرایی (b) بدست می‌آید که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

فرض کنید بر روی یک شناور مقادیر دامنه حرکت رول به صورت زیر کاهش می‌یابد:

15°, 11°, 8.5°, 6.5°, 5°, 4.1°, 3.3°, 2.6°

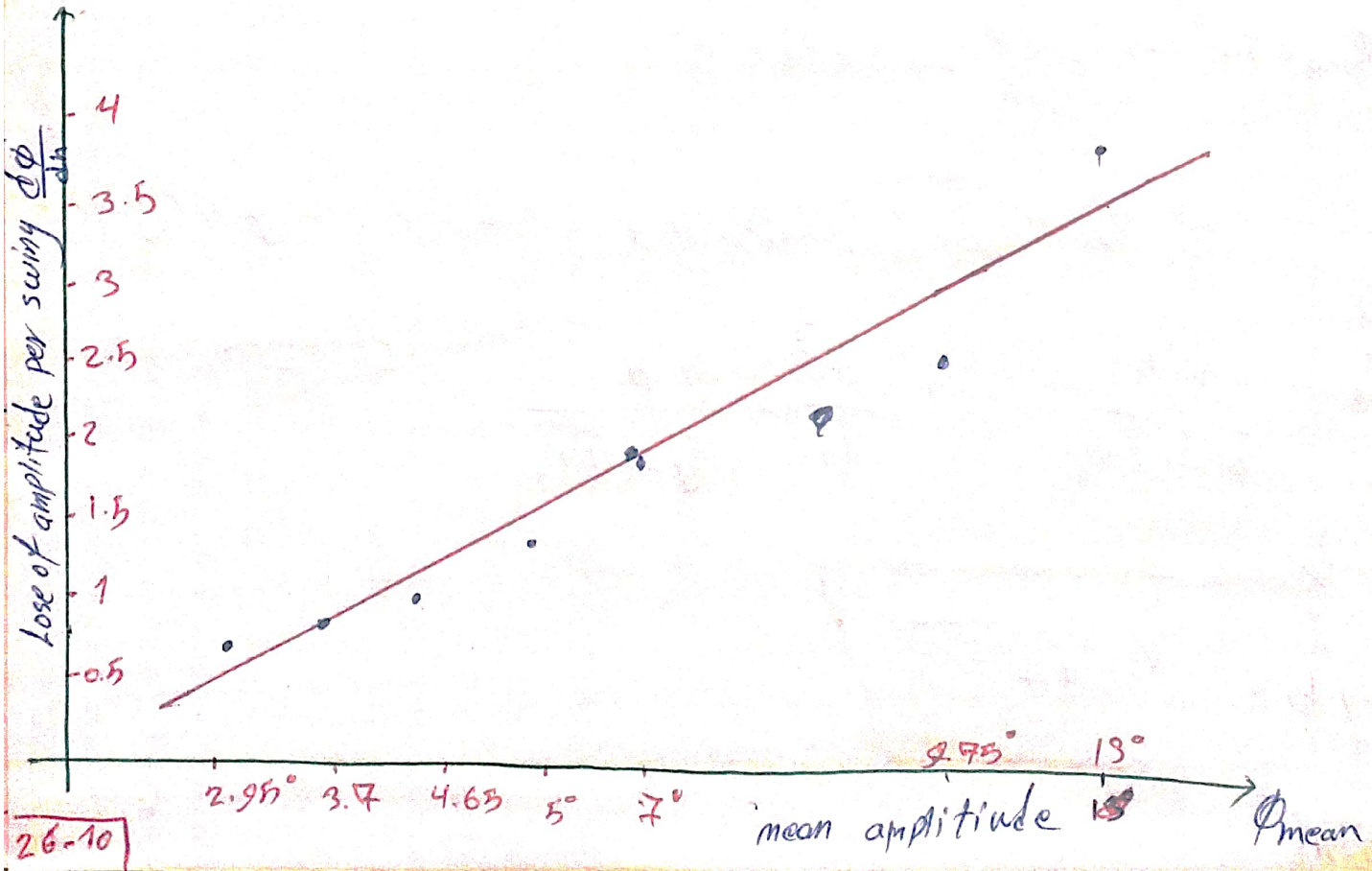
* مقادیر مطابق با منحنی بالا است

26-9

جدول زیر را تشکیل می‌دهیم

ϕ (deg)	ϕ_{mean} (متوسط زاویه حرکت رول دو نوسان)	$\delta\phi$ (اختلاف زاویه حرکت رول دو نوسان)
15	13	4
11	9.75	2.5
8.5	7	2
6.5	5.75	1.5
5	4.55	0.9
4.1	3.7	0.8
3.2	2.95	0.7
2.6		

حال نقاط را بر روی منحنی زیر نمایش می‌دهیم و یک خط از آنها می‌گذرانیم



26-10

$\frac{d\phi}{dn}$

$\Delta\phi = K_1 \phi_m$ برای هدف نوسانی ← چون تغییر خطی است

زاویه می‌تواند هم برحسب درجه و هم برحسب رادیان باشد

چون نوسان است پس از مدتی به صفر می‌رسد پس این خط حتماً از مبدأ مختصات می‌گذرد بنابراین با داشتن یک نقطه دیگر می‌توان مقدار K_1 را محاسبه کرد.

به عنوان مثال $\phi_m = 7^\circ$ و $\Delta\phi = 2.1 \rightarrow 2.1 = K_1 \times 7^\circ \Rightarrow K_1 = 0.3$

$$\rightarrow \boxed{-\frac{d\phi}{dn} = 0.3\,\phi_m}$$

با توجه به رابطه فوق برای دیگر زاویه‌ها می‌توان مقدار $\frac{d\phi}{dn}$ را محاسبه کرد.

$\phi_{max} = 10^\circ \rightarrow -\frac{d\phi}{dn} = 0.3 \times 10 = 3^\circ$

فرمولی تجربی برای محاسبه مقدار K_1 ارائه شده است به عنوان مثال:

$$K_1 = \frac{\pi^2 b}{T_\phi \Delta \overline{GM}_T} \rightarrow -\frac{d\phi}{dn} = \frac{\pi^2 b}{T_\phi \Delta \overline{GM}_T}$$

ضریب میرایی

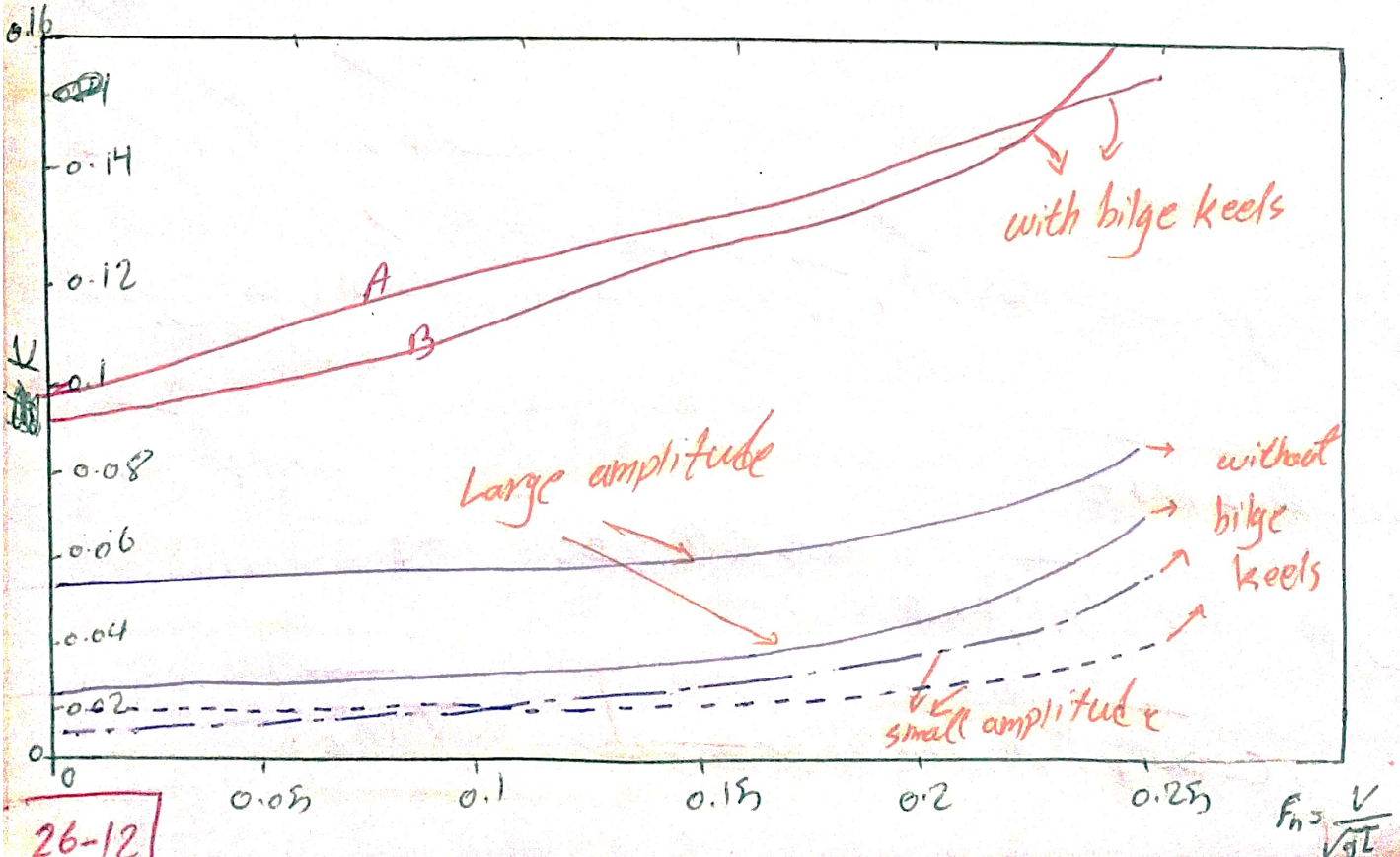
$$\Downarrow$$

$$\boxed{b = \frac{K_1 T_\phi \Delta \overline{GM}_T}{\pi^2}}$$

- از رابطه فوق می‌توان ضریب میرایی را با استفاده از آزمایش رولینگ و پس از محاسبه مقدار ω_n بدست آورد همچنین می‌توان این مقدار را با مقدار ضریب میرایی که از روش تحلیلی بدست آورده شده است مقایسه کرد و میزان خطاها را بررسی کرد.

- رابطه فوق که برای تعیین ضریب میرایی حرکت رول است، برای تعیین ضریب میرایی حرکات هیو و پیچ مناسب نیست چرا که مقادیر ضریب میرایی خیلی بزرگتر خواهند بود و نتایج تجربی بدست آمده دقیق نیستند.

حال به بررسی اثرات بیلج کیل، سرعت و دامنه حرکت روی میرایی حرکت رول می‌پردازیم. در منحنی زیر این تأثیرات برای دو مدل A و B نشان داده شده است.



26-12

همچنین مقدار K (کایا) است بیانگر ضریبی از میرایی است:

بدون بعد

$$K = \frac{\nu}{\omega_\phi} \quad \text{و} \quad \nu = \frac{b}{2I'_{xx}} \quad \text{و} \quad \omega_\phi = \sqrt{\frac{c}{a}} = \sqrt{\frac{\Delta \cdot \overline{GM}}{I'_{xx}}}$$

در منحنی صفحه قبل مقادیر K برای حالت با و بدون بیلج کیل ارائه شده است و در حالت بدون بیلج کیل برای دو حالت حرکت رول با دامنه بزرگ و دامنه کوچک آورده شده است.

- ملاحظه می‌شود در حالتی که بیلج کیل وجود دارد مقادیر میرایی نسبت به حالتی که بیلج کیل وجود ندارد بسیار بیشتر است. (برای مدل A، 5 برابر است)

همچنین در منحنی مشخص است که حرکات با دامنه بلندتر با میرایی حرکت رول افزایش می‌یابد.

مماس بازگرداننده حرکت رول

از درس هیدرواستاتیک به خاطر می‌آورید که مماس بازگرداننده حرکت رول به صورت زیر بیان می‌شود.

$$C\phi = \Delta \overline{GZ}$$

$$\overline{GZ} = \overline{GM_T} \sin\phi \quad \Longrightarrow \quad C\phi = \Delta \overline{GM_T} \sin\phi$$

همچنین داشتیم

برای زوایای کوچک غلتش $C = \Delta \overline{GM_t}$ $\longrightarrow$ $\boxed{C = \rho g \nabla \overline{GM_t}}$

جلسه بیست و هفتم

«حرکات مستقل رول کشتی در موج منظم»

بخش دوم

حرکت رول در آب آرام

معادله حرکت رول در آب آرام : $a\dfrac{d^2\phi}{dt^2}+b\dfrac{d\phi}{dt}+c\phi=0$

با جایگذاری ضرایب a و b و c که از جلسه قبل بدست آوردیم خواهیم داشت:

$$I'_{xx}\frac{d^2\phi}{dt^2}+b\frac{d\phi}{dt}+\Delta\overline{GM}_T\phi=0$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\phi}{dt^2}+2\nu\frac{d\phi}{dt}+\omega_\phi^2\phi=0 \quad , \quad \boxed{2\nu=\frac{b}{a}=\frac{b}{I'_{xx}}}$$

$$\boxed{\omega_\phi^2=\frac{c}{a}=\frac{\Delta\overline{GM}_T}{I'_{xx}}} \quad , \quad \boxed{T_\phi=\frac{2\pi}{\omega_\phi}=2\pi\sqrt{\frac{I'_{xx}}{\Delta\overline{GM}_T}}}$$

پریود نوسانات طبیعی حرکت رول

با حل معادله دیفرانسیل فوق خواهیم داشت:

$$\phi=e^{-\nu t}(c_1\cos\omega_d t+c_2\sin\omega_d t)$$

که می‌توان آن را به این صورت نیز نوشت: $\phi=e^{-\nu t}A\sin(\omega_d t-\delta)$

$$\omega_d=\sqrt{\omega_\phi^2-\nu^2}$$

هم اکنون می‌توانیم اثرات میرایی حرکت رول بر روی پریود حرکت را مشاهده کنیم

پریود حرکت رول میرا شونده $T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_\phi^2 - \nu^2}} = T_\phi \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\nu}{\omega_\phi}\right)^2}}$

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 چرا که میرایی حرکت رول بسیار کوچک است.

مثال: یک کشتی به طول 480 فوت دارای تناژ 12500 تن و شعاع ژیراسیون حول محور طولی 30.8 فوت است ارتفاع متاسنتر عرضی 5.79 فوت است. مطلوب است پریود طبیعی و پریود میرا شونده حرکت رول در صورتی که همان میرایی حرکت رول برابر 32000 ft-ton-sec و مقدار جرم افزوده برابر 20 درصد جرم واقعی کشتی در نظر گرفته می‌شود.

Ans: $\omega_\phi = \sqrt{\frac{\Delta \overline{GM}_T}{I'_{xx}}}$

$I'_{xx} = \frac{\Delta'}{g} k_{xx}^2 = \frac{1.2\Delta}{g} k_{xx}^2$

$\Rightarrow \omega_\phi = \sqrt{\frac{\Delta \overline{GM}_t \cdot g}{1.2\Delta k_{xx}^2}} = 0.405 \ sec^{-1}$

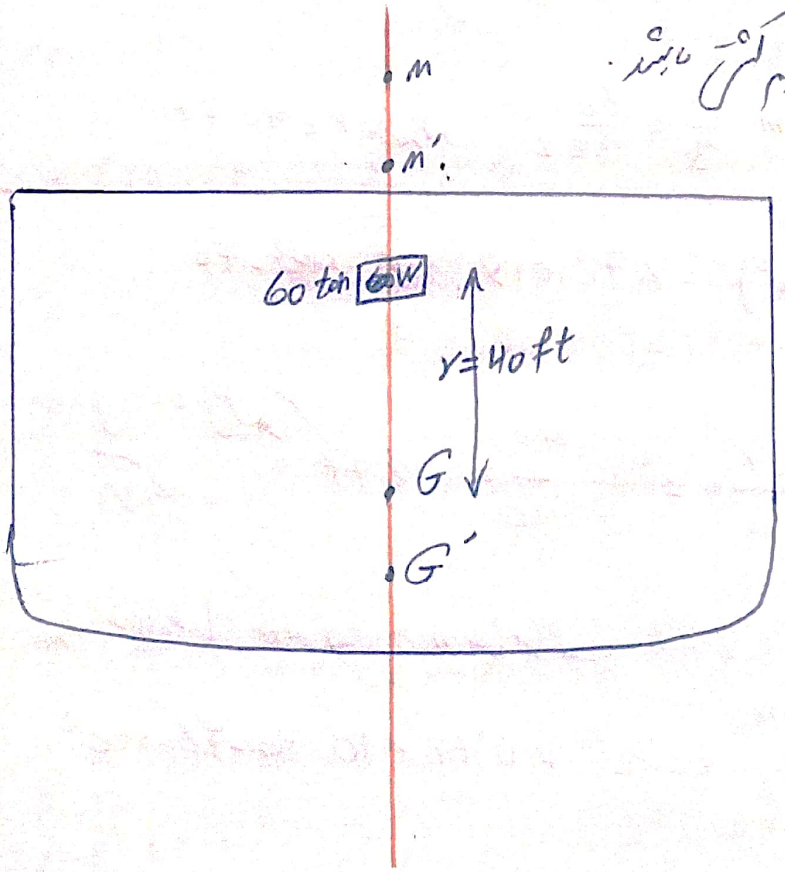
$$T_\phi = \frac{2\pi}{\omega_\phi} = \frac{2\pi}{0.405} = 15.51 \text{ sec}$$

$$\nu = \frac{b}{2I'_{xx}} = 0.0362 \text{ sec}^{-1}$$

$$T_d = T_\phi \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\nu}{\omega_\phi}\right)^2}} = 15.51 \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{0.0362}{0.405}\right)^2}} = 15.52 \text{ sec}$$

مشاهده می‌شود که T_ϕ و T_d خیلی به همدیگر نزدیک هستند.

مثال: اطلاعات یک کشتی مطابق شکل زیر داده شده است، مطلوبست محاسبه T_ϕ وقتی که یک بار 60 تنی از فاصله 40 فوتی بالای عرشه حذف شود. فرض می‌شود که $\overline{GM}_T$ بدون تغییر باقی بماند و ممان اینرسی حجم افزوده حرکت رول مقدار 20 درصد ممان اینرسی حجم کشتی باشد.



$W = 60$ tons

$r = 40$ ft

$\Delta = 20000$ tons

$\overline{GM}_t = 4$ ft

$T_\phi = 20$ sec

Ans:

میرایی وجود ندارد و معادله حرکت به صورت زیر می‌شود

$$I'_{xx}\frac{d^2\phi}{dt^2}+\Delta\overline{GM_t}\,\phi=0$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\phi}{dt^2}+\frac{\Delta\overline{GM_t}}{I'_{xx}}\phi=0$$

$$\omega_\phi^2=\frac{\Delta\overline{GM_t}}{I'_{xx}}\quad,\quad T_\phi=\frac{2\pi}{\omega_\phi}=2\pi\sqrt{\frac{I'_{xx}}{\Delta\overline{GM_t}}}$$

$$20=2\pi\sqrt{\frac{I'_{xx}}{20{,}000\times4}}\Rightarrow 400=4\pi^2\frac{I'_{xx}}{20{,}000\times4}\rightarrow I'_{xx}=\frac{8\times10^6}{\pi^2}=810{,}000$$

ton-sec²-ft

$$I'_{xx}=1.2\,I_{xx}\rightarrow I_{xx}=675{,}000\ \text{tons-sec}^2\text{-ft}$$

حال I_{xx} جدید را حول مرکز ثقل اولیه شناور بدست می‌آوریم:

$$I_{xx}=I_{xx}-m r_{xx}^2\qquad m=\frac{W}{g}=\frac{60}{32.2}\quad,\ r_{xx}=r=40\ ft$$

$$\Rightarrow I_{xx}=675{,}000-\frac{60}{32.2}\times(40^2)=672{,}019\ \text{ton-sec}^2\text{-ft}$$

جابجایی مرکز ثقل ؛ $\overline{GG'}=\frac{W\times r}{\Delta\cdot W}=\frac{60\times40}{19{,}940}=0.12\ ft$ مرکز ثقل 0.12 پایین‌تر می‌آید

I_{xx} جدید حول مرکز ثقل جدید برابر است با

$$I_{xx}=672{,}019-\frac{19{,}940}{32.2}\times0.12^2=672{,}010\ \text{ton-ft-sec}^2$$

27.4

$I'_{xx\,\text{جدید}} = 1.2\, I_{xx\,\text{جدید}} = 806{,}412 \text{ ton-sec}^2\text{-ft}$

$$\Rightarrow T_\phi = 2\pi\sqrt{\frac{I'_{xx\,new}}{\Delta_{new} \times \overline{GM}_t}} = 2\pi\sqrt{\frac{806{,}412}{19{,}940 \times 4}} = 19.98 \text{ sec}$$

بنابراین با برداشته شدن جرم 60 تنی، پریود نوسانات (T_ϕ) از 20 ثانیه به 19.98 ثانیه تغییر می‌کند.

- پریود نوسانات طبیعی حرکت رول برای چند شناور به همراه غذا در زیر آورده شده است:

	T_ϕ (sec)	T_θ (sec) پریود حرکت پیچ
Passenger :	20-25	—
Cargo :	9-13	—
Battleship :	14.5-17	7.6-9
cruiser :	12-13	5.8-7.1
Destroyer :	9-9.5	4.4-5.5

مثال: یک کشتی دارای جابجایی 10,000 تن با پریود 10 ثانیه حرکت رول را انجام می‌دهد و دارای ارتفاع متاسنتر عرضی 4 فوت است. کشتی مشابه آن دارای تناژ 12,000 تن و ارتفاع متاسنتر عرضی 4.25 فوت است. توزیع وزن در هر دو شناور یکسان است و جرم افزوده رول برابر 15 درصد جرم

کشتی است مطلوب است:

الف) محاسبه پریود حرکت رول کشتی مشابه بدون حجم افزوده

ب) محاسبه پریود کشتی مشابه با احتساب حجم افزوده

Ans:

الف)

$$T_1 = \lambda^{1/2} T_2$$

$$\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{12,000}{10,000} = \lambda^3 = \frac{6}{5} \Rightarrow \lambda = 1.062 \Rightarrow \lambda^{1/2} = 1.031$$

$$T_1 = 1.031 \times 10 = 10.31 \text{ sec}$$

ب)

$$T_1 = \lambda^{1/2} T_2$$

$$\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{1.16 \times 12,000}{1.16 \times 10,000} = \frac{6}{5} = \lambda^3 \Rightarrow \lambda = 1.062 \Rightarrow \lambda^{1/2} = 1.031$$

$$\Rightarrow T_1 = 10.31$$

ملاحظه می‌شود که لحاظ شدن یا لحاظ نشدن حجم افزوده، تناسب پریود نوسانات بین کشتی اصلی و کشتی مشابه را دچار تغییر نمی‌کند.

مثال: یک کشتی دارای شعاع ژیراسیون اصلی محور دوران (رول) برابر 30.8 فوت و ارتفاع متاسنتر عرضی 4.84 فوت و جابجایی 15,000 تن است

اگر ضریب میرایی در حالتی که در آب آزاد نوسان می‌کند برابر 32,000 ft-ton-sec

باشد، مطلوب است محاسبه دامنه حرکت رول پس از سه نوسان کامل در صورتی

که انحراف اولیه برابر 7 درجه باشد (یعنی در $t=0$ داریم $\phi = 7^\circ$ و $\frac{d\phi}{dt}=0$) همچنین

اینرسی جسم افزوده برابر 20 درصد اینرسی جسم واقعی کشتی است.

Ans:

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \underbrace{\frac{bg}{\Delta' k_{xx}^2}}_{2\nu} \frac{d\phi}{dt} + \underbrace{\frac{\Delta g \overline{GM_t}}{\Delta' k_{xx}^2}}_{\omega_\phi^2} \phi = 0$$

معادله کلی حرکت

$$\Delta' = \Delta + \delta\Delta = 1.2\Delta$$

حل معادله فوق به صورت زیر است

$$\phi = e^{-\nu t}\left(C\cos\omega_d t + D\sin\omega_d t\right)$$

$$2\nu = \frac{b}{I'_{xx}} = \frac{32{,}000 \times 32.2}{1.2\left[15{,}000 \times 30.8^2\right]} = 0.063 \ \text{sec}^{-1}$$

$$\Rightarrow \nu = 0.0301 \ \text{sec}^{-1}$$

$$\omega_\phi^2 = \frac{\Delta g \overline{GM_t}}{\Delta' k_{xx}^2} = \frac{32.2 \times 4.84}{1.2 \times 949} = 0.137 \ \text{rad/sec}^2$$

$$\rightarrow \omega_d = \sqrt{\omega_\phi^2 - \nu^2} = \sqrt{0.137 - 0.0009} = 0.369 \ \text{rad/sec}$$

برای بدست آوردن ضرایب C و D از شرایط مرزی استفاده می‌کنیم

در $t=0$ مقدار $\phi = 7^\circ$ است که با جایگذاری در رابطه ϕ خواهیم داشت:

$$C = 7$$

همچنین در $t=0$ مقدار $\frac{d\phi}{dt} = 0$ است بنابراین:

$$0 = e^{-\nu t}(\omega_d C \sin\omega_d t + D\omega_d \cos\omega_d t) - \nu e^{-\nu t}(C\cos\omega_d t + D\sin\omega_d t)$$

$$\Rightarrow 0 = D\omega_d - C\nu \rightarrow D = \frac{C\nu}{\omega_d} = \frac{7\times 0.0301}{0.369} = 0.571$$

در نهایت معادله به صورت زیر به دست می‌آید که یک منحنی میرا شونده را نمایش می‌دهد:

$$\phi = e^{-0.0301t}(7\cos 0.369t + 0.571\sin 0.369t)$$

و $T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{6.28}{0.369} = 17$ sec

مدتی که به منزله گذشت سه پریود (T_d) است یعنی 3×17

$$\Rightarrow \phi = e^{-0.0301\times(3\times 17)}[7\cos(0.369\times 3\times 17) + 0.571\sin(0.369\times 3\times 17)]$$

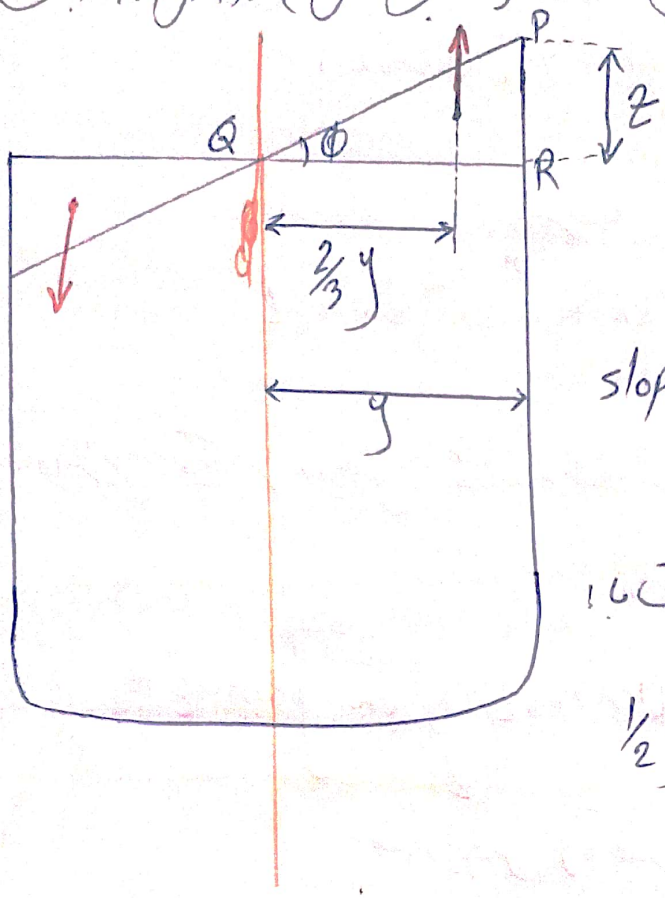
$$\Rightarrow \phi = e^{-1.54}(7+6) = 1.50^\circ$$

منحنی ϕ برحسب زمان را با استفاده از رابطه به دست آمده ϕ می‌توان ترسیم کرد

بنابراین با داشتن ضرایب a و b و c می‌توان رفتار کشتی را بررسی کرد

ممان تحریک حرکت رول

علت بروز ممان تحریک حرکت رول، تغییر نیروی بویایی بدنه در امواج می‌باشد. این ممان با انتگرال گیری گوه بویایی وارد شده به داخل آب (مطابق شکل) در حاصل بدنه بدست می‌آید.



شیب سطح آزاد برابر است با:

$$slope = \tan\phi = \frac{z}{y} \rightarrow z = y \times slope$$

بنابراین مساحت مثلث PQR برابر است با:

$$\frac{1}{2} y \times y \times slope$$

ممان بویایی این گوه برابر است با:

$$\rho g \propto (\text{Volume حجم}) \propto \frac{2}{3} y$$

(مرکز سطح) بازو

چون یک ممان هم در سمت چپ شناور وارد می‌شود بنابراین ممان کل به صورت دو برابر است:

$$\Delta M_\phi = 2\rho g (\text{Volume}) \times \frac{2}{3} y$$

$$\Rightarrow \Delta M_\phi = 2\rho g \left(\frac{1}{2} y^2 \tan\phi \, dx\right) \frac{2}{3} y = \frac{2}{3} \rho g y^3 \frac{\partial \zeta}{\partial y} dx$$

$$\cancel{= \left[\frac{2}{3} \rho g y^3 k \zeta_a \sin\mu \cos(kx\cos\mu + \omega t)\, dx\right] \sin\omega t}$$

از قبل داشتیم:

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx\cos\mu - \omega_w t)$$

و شیب موج برحسب زیر تقریب می‌شود

$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial y} = \alpha_M \cos(kx\cos\mu) = k\,\zeta_a \sin\mu \cos(kx\cos\mu)$$

$$\Rightarrow \Delta M_\phi = \Big[\tfrac{2}{3}\rho g y^3 \overset{\text{عدد موج}}{k}\,\zeta_a \sin\mu \cos(kx\cos\overset{\text{زاویه برخورد}}{\mu})\,dx\Big]\sin\omega_e t$$

بنابراین ممان در طول شناور برحسب زیر بدست می‌آید

$$\boxed{M_\phi = \Big[\tfrac{2}{3}\rho g k\,\zeta_a \sin\mu \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx\cos\mu)\,y^3\,dx\Big]\sin\omega_e t}$$

ممان تحریک حرکت رول

مقدار نیم عرض (با تغییر x مقدار نیم عرض (y) تغییر می‌کند)

- اگر فرض شود که $M_\phi = M_0\cos(\omega_e t + \varepsilon_1)$ بنابراین دامنه ممان (M_0) برابر است با:

$$M_0 = \tfrac{2}{3}\rho g k\,\zeta_a \sin\mu \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx\cos\mu)\,y^3\,dx$$

و زاویه فاز بین ممان تحریک و دامنه ممان موج برابر است با $\varepsilon_1 = \frac{\pi}{2}$ از آنجا که

$\sin\theta = \cos(\theta - \frac{\pi}{2})$ لذا دامنه بی‌بعد ممان تحریک برابر است با:

$$f_0 = \frac{M_0}{\rho g k \zeta_a L B^2 T} = \tfrac{2}{3}\,\frac{\sin\mu}{LB^2T}\int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx\cos\mu)\,y^3\,dx$$

- برای امواج از پهلو (امواج عرضی که $\mu = 90^\circ$) دامنه ممان رول دهنده برابر است با:

$$M_0 = \frac{2}{3}\rho g k \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y^3 dx \xrightarrow[\text{چنانچه } \overline{BM} \simeq \overline{GM_t} \text{ فرض شده که فرض درستی نیست}]{\overline{BM} = \frac{I}{\nabla}} M_0 = \rho g \nabla k \zeta_a \overline{GM_t}$$

$I = \frac{2}{3}\int_{-L/2}^{L/2} y^3 dx$ ممان اینرسی عرضی

شیب موج

$$\alpha_M = k\zeta_a \longrightarrow M_0 = \rho g \nabla \alpha_M \overline{GM_t} \Longrightarrow M_\phi = \Delta \alpha_M \overline{GM_t} \sin\omega_e t$$

$$\Rightarrow \boxed{M_\phi = C\alpha_M \sin\omega_e t}$$

ضریب ممان بازگرداننده

برای شبیه‌سازی، ممان رول دهنده M_ϕ برای هر جهت موج به غیر از موج عرضی برابر است با:

$$\boxed{M_\phi = C\alpha'_M \sin\omega_e t} \quad \text{و} \quad \alpha'_M = \alpha_M \sin\mu$$

نکته: بیشترین ممان رول در موج عرضی اتفاق می‌افتد

مثال: مطلوب است محاسبه ممان تحریک رول کشتی مثال صفحه 3-23 جزوه.

فرض کنید که موقعیت طول مرکز دریایی در مقطع وسط کشتی است و همچنین

$\mu = 120^\circ$

باید سعی کنیم انتگرال موجود در رابطه ممان تحریک را تحلیل دهیم

شماره مقطع	x	y	y^3	$kx\cos\mu$	$\cos(kx\cos\mu)$	$y^3\cos(kx\cos\mu)$	ضرایب سیمپسون	تابع
0	9.6	0	0	-1.57	0	0	1	0
5	4.8	1.296	2.177	-0.78	0.707	1.539	4	6.156
10	0	1.296	2.177	0	1	2.177	2	4.354
15	-4.8	1.296	2.177	0.78	0.0707	1.539	4	6.156
20	-9.6	0	0	1.57	0	0	1	0

sum = 16.669

از انتگرال گیری داریم

$$\frac{1}{3} \times \text{فاصله مقاطع} \times sum = \frac{1}{3} \times 4.8 \times 16.666 = 26.666$$

$$\Longrightarrow f_0 = \frac{2\sin\mu}{3LB^2T} \times \text{انتگرال} = \frac{2}{3} \times \frac{0.866}{19.2 \times (2.592)^2 \times 1.144} \times 26.666 = 0.1043$$

و دامنه ممان تحریک حرکت رول برابر است با:

$$M_0 = \rho g k \zeta_a L B^2 T f_0 = 1.93 \times 32.2 \times 0.327 \times 0.2 \times 19.2 \times (2.592)^2 \times 1.144 \times 0.1043 = 62.6 \ ft\text{-}lb$$

جلسه بیست و هشتم

«حرکات مستقل رول شق در موج منظم»

«بخش سوم»

حرکت رول در امواج منظم دریا

معادله حرکت رول در امواج منظم عبارتست از:

$$I'_{xx}\frac{d^2\phi}{dt^2}+b\frac{d\phi}{dt}+\Delta\overline{GM_t}\,\phi=\Delta\overline{GM_t}\,\alpha'_m\sin\omega_e t$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\phi}{dt^2}+\frac{bg}{\Delta' k_{xx}^2}\frac{d\phi}{dt}+\frac{\Delta\overline{GM_t}}{\Delta' k_{xx}^2}\phi=\frac{\Delta\overline{GM_t}}{\Delta' k_{xx}^2}\alpha'_m\sin\omega_e t$$

- بردار امواج عرضی ω_e می‌تواند با ω_ϕ جابجا شود که فرکانس واقعی موج است.

نکته: وقتی کشتی با سرعت شروع به حرکت رول می‌کند، راه حل آن تغییر مسیر حرکت دریا سرعت حرکت است که باعث تغییر فرکانس برخورد می‌شود و همزمانی را (یا تشدید که همیشه باعث چنین حرکات رول سنگینی می‌شود) را از بین می‌برد.

- حل معادله دیفرانسیل فوق به صورت زیر بدست می‌آید

$$\phi=e^{-\nu t}\left(C\cos\omega_d t+D\sin\omega_d t\right)+\left(\frac{\alpha'_m\,\omega_\phi^2}{\sqrt{(\omega_\phi^2-\omega_e^2)^2+4\nu^2\omega_e^2}}\right)\times$$

$$\sin\left[\omega_e t-\tan^{-1}\left(\frac{2\nu\omega_e}{\omega_\phi^2-\omega_e^2}\right)\right]$$

که در آن

$$\omega_d = \sqrt{\omega_\phi^2 - \nu^2} \quad , \quad \phi_a = \frac{\alpha'_M \, \omega_\phi^2}{\sqrt{(\omega_\phi^2 - \omega_e^2)^2 + 4\nu^2 \omega_e^2}}$$

$$\varepsilon_2 = \tan^{-1}\left(\frac{2\nu\omega_e}{\omega_\phi^2 - \omega_e^2}\right)$$

با قرار دادن مقادیر فوق در رابطه خواهیم داشت:

$$\phi = e^{-\nu t}\left(C\cos\omega_d t + D\sin\omega_d t\right) + \phi_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

با قرار دادن Λ و K در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\boxed{\phi_a = \frac{\alpha'_M}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4K^2\Lambda^2}}} \quad , \quad \boxed{\tan\varepsilon_2 = \frac{2K\Lambda}{1-\Lambda^2}}$$

$0.035 < K < 0.1$

دامنه استاتیکی حرکت رول به صورت زیر بدست می‌آید:

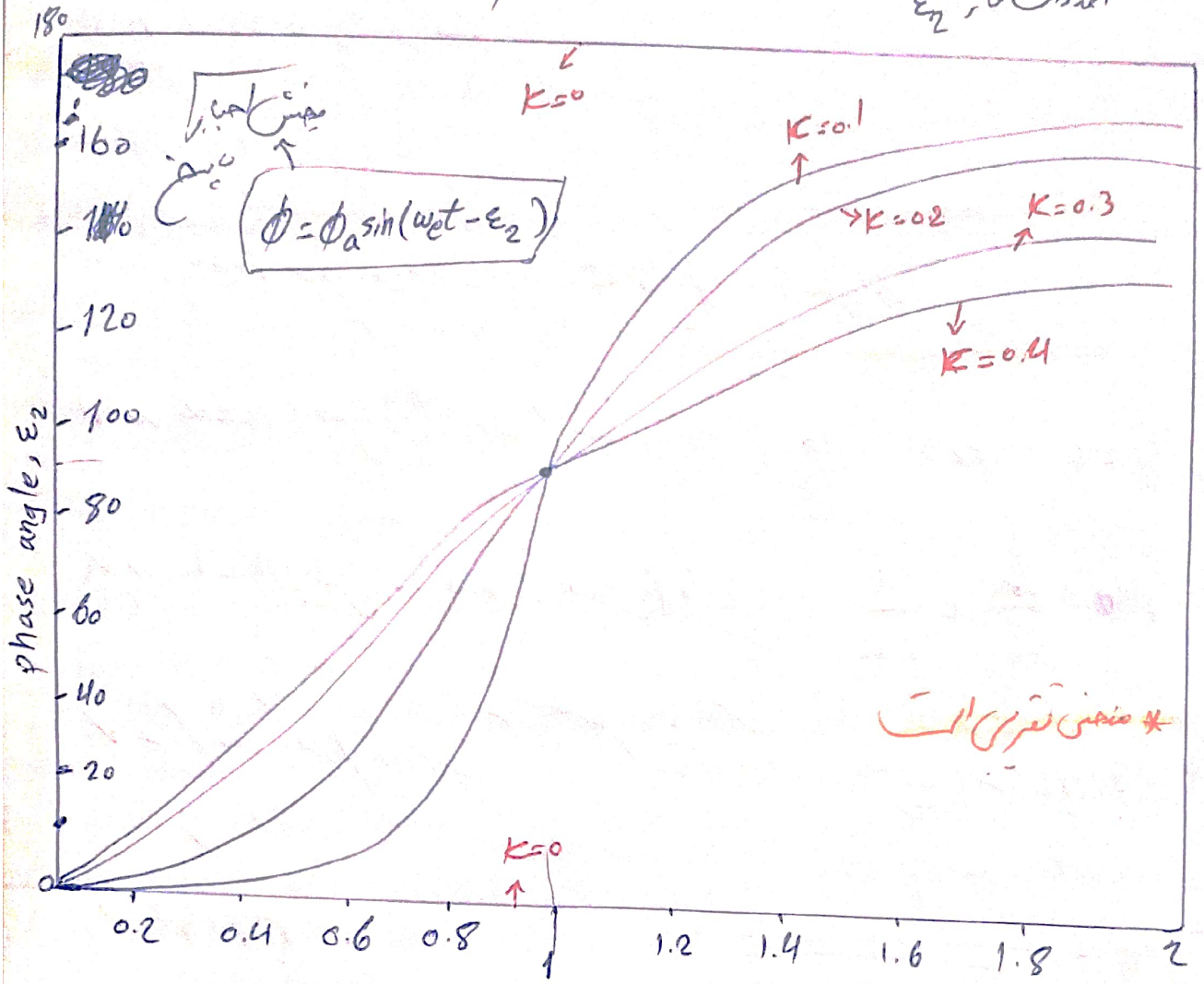
$$\phi_{st} = \frac{M_0}{C} = \frac{\Delta \overline{GM}_t \alpha'_M}{\Delta \overline{GM}_t} = \alpha'_M = \alpha_M \sin\mu$$

بنابراین ضریب بزرگنمایی (μ_ϕ) برابر است با:

$$\mu_\phi = \frac{\phi_a}{\phi_{st}} = \frac{\phi_a}{\alpha'_M} = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4K^2\Lambda^2}}$$

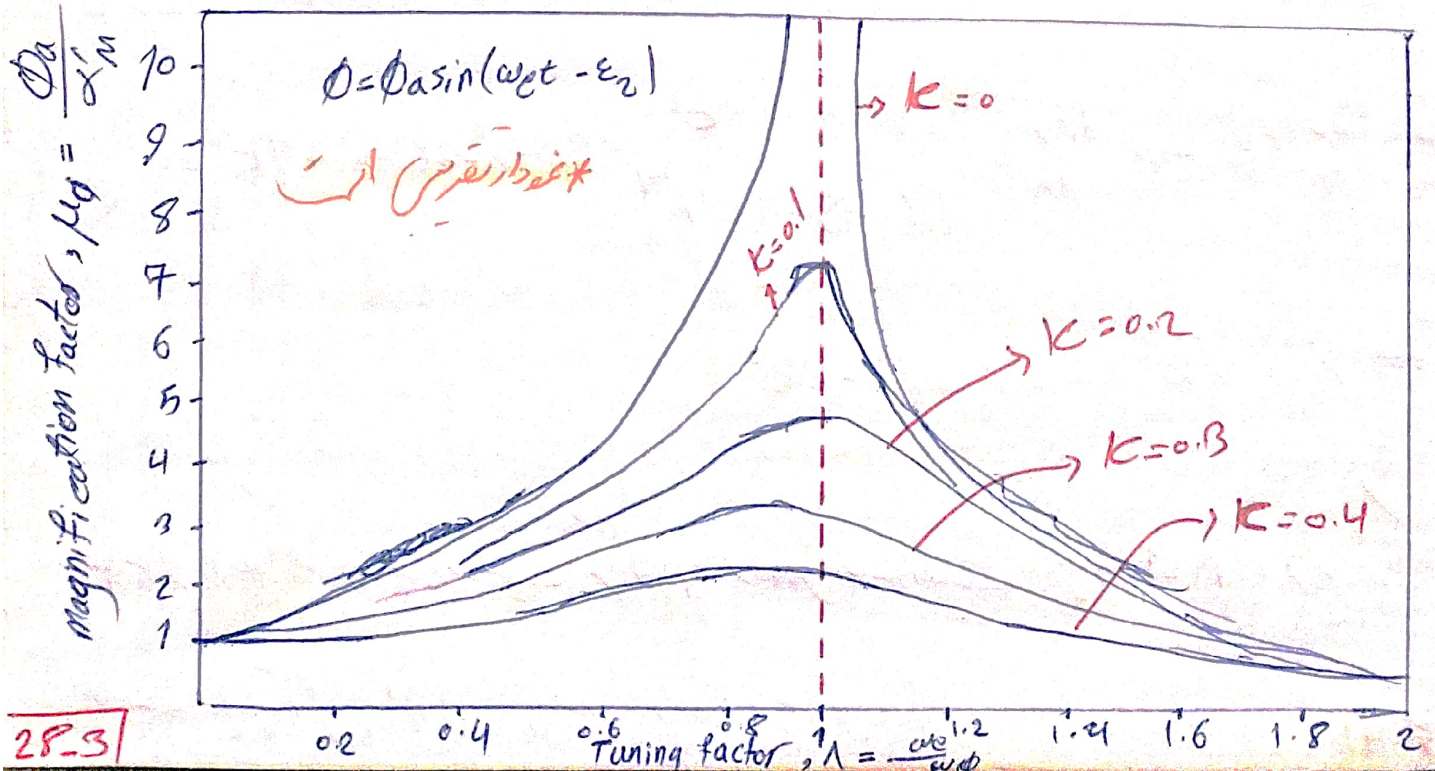
μ_ϕ دارای حداکثر مقادیر بین 5 و 10 است. اگر میرایی وجود نداشته باشد مقادیر ν و K هر دو صفر است و داریم: $\mu_\phi = \frac{\phi_a}{\phi_{st}} = \frac{1}{1-\Lambda^2}$

- در شکل زیر ~~[illegible]~~ اختلاف فاز ε_2 برحسب $\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\phi}$ رسم شده است.



- با توجه به نمودار اگر $\Lambda = 1$ باشد مقدار ε_2 برابر 90° است.

در شکل زیر ضریب بزرگنمایی ϕ برحسب Λ رسم شده است



با توجه به نمودار با افزایش K ، پیک منحنی زودتر اتفاق می‌افتد یعنی قبل از این که به $\Lambda = 1$ برسد، اتفاق می‌افتد.

چند نکته با توجه به منحنی

✓ در $\Lambda = 0$ برای تمام مقادیر K داریم: $\mu_\phi = 1$

✓ در $\Lambda = \infty$ (یعنی برای پریودها بی‌نهایت خیلی کوچک) داریم $\mu_\phi = 0$

✓ در $\Lambda = 1$ (یعنی برای حالت تشدید) داریم: $\mu_\phi = \frac{\phi_a}{\phi_{st}} = \frac{1}{2K}$

✓ برای مشتق گیری و بدست آوردن مقدار حداکثر ضریب بزرگنمایی (μ_ϕ) تغییر متغیر زیر را اعمال می‌کنیم

معادله اصلی: $\mu_\phi = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4K^2\Lambda^2}}$

$$y = \mu_\phi^2 \quad , x = \Lambda^2 \quad \Rightarrow y = \frac{1}{(1-x)^2 + 4K^2 x}$$

$$\Rightarrow \frac{dy}{dx} = 0 \rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{-2(1-x) + 4K^2}{[(1-x)^2 + 4K^2 x]} = 0 \rightarrow -2(1-x) + 4K^2 = 0$$

$$\Rightarrow x = 1 - 2K^2 \rightarrow \boxed{\Lambda = \sqrt{1 - 2K^2}}$$

- بنابراین حداکثر مقدار ضریب بزرگنمایی منطبق بر موقعیت تشدید ($\Lambda = 1$) نمی‌باشد بلکه در سمت چپ آن اتفاق می‌افتد که وابسته به K می‌باشد

هم اکنون با داشتن موقعیت حداکثر مقدار ضریب بزرگنمایی، می‌توانیم مقدار بزرگی آن را بدست آوریم.

$$(\mu_\phi)_{max} = \frac{1}{\sqrt{[1-(1-2k^2)]^2+4k^2(1-2k^2)}} = \frac{1}{2\sqrt{1-k^2}}$$

$$\Rightarrow \boxed{(\mu_\phi)_{max} = \frac{1}{2\sqrt{1-k^2}}}$$

نکته: معادلات نشان می‌دهند که مقدار بزرگ میرایی، نه تنها باعث کاهش دامنه نقطه حداکثر نوسان اجباری (یعنی بخش $\phi = \phi_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$ معادله) می‌شود بلکه باعث می‌شود که آن نقطه در مقادیر کوچکتر از 1 اتفاق افتد.

✓ وقتی $k > \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ می‌باشد، هیچ نقطه حداکثر در شکل وجود ندارد

✓ یادآوری می‌شود که ضریب میرایی (k) برای حرکت رول، معمولاً در مقایسه با عدد یک کوچک است.

✓ حرکات رول می‌تواند در صورتی زاویه راستای کشتی و موج بین صفر تا $45°$ و بین $135°$ تا $180°$ باشد، مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد بنابراین همانطور که قبلاً ذکر شد، اگر کشتی دچار حرکات رول سنگین شود عکس العمل مناسب برای آن، تغییر مسیر راستای حرکت و یا تغییر سرعت است که به موجب آن مرکز ثقل برخورد و همزمانی (تشدید)

تغییر می‌کند که به طور معمول، علت اصلی حرکات رول سنگین در دریا رفع می‌گردد.

- در منحنی سه صفحه قبل برای دور شدن از پدیده تشدید می‌بایست مقادیر Λ تغییر می‌کرد که

خود مستلزم آن است که ω_e تغییر کند برای تغییر ω_e با توجه به رابطه

$$\omega_e = \omega_w\left(1 - \frac{\omega_w}{g} V\cos\mu\right)$$

یا باید μ تغییر کند و یا V سرعت شناور.

مثال: برای کشتی با مقادیر $L_w = 900\,ft$ ، $V = 35$ knots ، $T_\phi = 15\,sec$

تعیین کنید که در چه راستای بیشترین مقادیر حرکت را تجربه خواهد کرد؟

Ans:

$$\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\phi} \approx 1 \Rightarrow \omega_e = \omega_w\left(1 - \frac{\omega_w}{g} V\cos\mu\right) = \omega_\phi$$

$$\omega_\phi = \frac{2\pi}{T_\phi} = \frac{2\pi}{15} = 0.419\ rad$$

$$\rightarrow \cos\mu = \frac{(\omega_w - \omega_\phi)\,g}{\omega_w^2\, V}$$

$$\omega_w = \sqrt{\frac{2\pi g}{L_w}} = \sqrt{\frac{2\pi \times 32.2}{900}} = 0.474\ rad$$

و از آنجا که $V = 35 \times 1.689\ ft/sec$ داریم

$$\cos\mu = \frac{(0.474 - 0.419)\times 32.2}{(0.474)^2 \times 35 \times 1.689} = 0.133 \Rightarrow \mu = 82.5^\circ \ \text{یا}\ -82.5^\circ$$

مثال: یک کشتی با سرعت 20 گره و زاویه راستای حرکت با موج 150 درجه در حال حرکت است

مطلوب است: الف) ترسیم مقدار ضرایب حرکت رول برحسب ضرایب فرکانس برای

فرکانس های موج ω_w بین صفر تا 2 در بازه های 0.1 . ابعاد مدیوطه کشتی عبارتند از:

$\Delta = 12500\ ton$, $GM = 5.97\ ft$, $k_{xx} = 30.8\ ft$, $L = 450\ ft$

همچنین جرم افزوده برابر 20 درصد جرم کشتی و ممان میرا کننده برابر 32000 ft-ton است

ب) حداکثر دامنه حرکت رول کشتی در شرایطی که ارتفاع 60 فوت باشد.

Ans:

الف)

$$\omega_\phi \text{ فرکانس طبیعی حرکت رول} = \sqrt{\frac{\Delta \overline{GM}_t}{I'_{xx}}} = \sqrt{\frac{\Delta \overline{GM}_t\, g}{1.2\Delta k_{xx}^2}} = \sqrt{\frac{5.79\times 32.2}{1.2\times(30.8)^2}} = 0.405$$

$$\nu \text{ ضریب میرایی} = \frac{b}{2I'_{xx}} = \frac{32{,}000}{2(\Delta/g)k_{xx}^2} = \frac{32{,}000}{2\left[\frac{1.2\times 12{,}500}{32.2}\right]} = 0.0362\ sec^{-1}$$

$$\Rightarrow k = \frac{\nu}{\omega_\phi} = \frac{0.0362}{0.405} = 0.089$$

$$\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\phi} = \frac{\omega_e}{0.405}$$

$$\omega_e = \omega_w\left(1 - \frac{\omega_w}{g} V\cos\mu\right)$$

$\mu = 150^\circ$, $V = 20\,knot = 20\times 1.689 = 33.78\ \frac{ft}{sec}$ برای

حال جدول زیر را تشکیل می‌دهیم که مقادیر ϕ آن از روابط زیر بدست می‌آیند

$$\omega_e = \omega_w\left(1-\frac{\omega_w}{g}V\cos\mu\right) \quad , \quad \mu_\phi = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2+4K^2\Lambda^2}} \qquad (I)$$

ω_w	$\eta = \frac{\omega_w V}{g}\cos\mu$	$\omega_e = \omega_w(1-\eta)$	$\Lambda_\phi = \frac{\omega_e}{\omega_\phi}$	μ_ϕ
0	0	0	0	1
0.1	-0.091	0.109	0.269	1.078
0.2	-0.182	0.236	0.583	1.497
0.3	-0.272	0.382	0.942	4.923
0.4	-0.363	0.546	1.346	1.179
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1.8	-1.725	5.177	⋮	⋮
1.9	-1.725	5.177	12.783	0.006
2	-1.816	5.681	13.904	0.005

$$\phi_a = \mu_\phi \phi_{st} \quad , \quad \phi_{st} = \frac{M_0}{C} = \frac{\Delta\overline{GM_t}\,\alpha_M}{\Delta\overline{GM_t}} = \alpha'_M = \alpha_M \sin\mu \qquad (-)$$

- از آنجا که $\sin\mu = \sin 150^\circ = 0.5$ بنابراین ϕ_a هنگامی حداکثر مقدار را دارد که ضریب بزرگنمایی μ_ϕ حداکثر مقدار را داشته باشد. بنابراین μ_ϕ در نقطه زیر حداکثر مقدار را دارد:

$$\Lambda = \sqrt{1-2K^2} = \sqrt{1-2\times(0.089)^2} = 0.992 \xrightarrow{(I)} \mu_\phi = 5.64$$

$$\Rightarrow (\phi_a)_{max} = 5.64\,\phi_{st} = 5.64\times 0.5\,\alpha_M = 2.82\,\alpha_M$$

$$L_w = \frac{2\pi g}{\omega_w^2} = \frac{2\pi\times 32.2}{(0.312)^2} = 2078 \text{ ft}$$

$$\Rightarrow \alpha_M = \frac{2\pi G_a}{L_w} = \frac{2\pi\times 30}{2078} = 0.091 \text{ rad}$$

$(\phi_a)_{max} = 2.82\,\alpha_M = 2.82 \times 0.091 = 0.257$ rad یا 14.73°

همچنین با داشتن $\Lambda = 0.992$ می‌توان مقدار ω_n را بدست آورد که برابر 0.312 است.

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 $\frac{12}{20}$ رادیان برای فرکانس برخورد 0.2 rad/sec در نظر بگیریم، نشان دهید که فرض کابیلی با گذشت زمان به تدریج محو خواهد شد در حالیکه دامنه نوسان اجباری بدون تأثیرپذیری، ثابت می‌ماند.

شرایط اولیه به صورت روبرو مشخص شده است: در $t=0$ داریم: $\phi=0$ و $\frac{d\phi}{dt}=0$

Ans:

حل عمومی این معادله همانطور که قبلاً بیان شد به صورت زیر است:

$$\phi = e^{-\nu t}\left(c_1\cos\omega_d t + c_2\sin\omega_d t\right) + \phi_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_\phi^2 - \nu^2}\quad,\quad \phi_a = \mu_\phi\,\alpha'_M\quad,\quad \varepsilon_2 = \tan^{-1}\left(\frac{2K\Lambda}{1-\Lambda^2}\right)$$

$$\mu_\phi = \frac{1}{\sqrt{(1-\Lambda^2)^2 + 4K^2\Lambda^2}}$$

الف)

شرایط اولیه $t=0 \rightarrow \phi=0 \Rightarrow 0 = c_1 - \phi_a \sin\varepsilon_2 \rightarrow c_1 = \phi_a \sin\varepsilon_2$

$$t=0 \rightarrow \frac{d\phi}{dt}=0$$

$$\frac{d\phi}{dt}=-\nu e^{-\nu t}(c_1\cos\omega_d t+c_2\sin\omega_d t)+e^{-\nu t}(-\omega_d c_1\sin\omega_d t+\omega_d c_2\cos\omega_d t)$$

$$+\phi_a\omega_e\cos(\omega_e t-\varepsilon_2) \Rightarrow c_2=\frac{\nu c_1-\phi_a\omega_e\cos\varepsilon_2}{\omega_d}$$

$$\Rightarrow c_2=\frac{\phi_a(\nu\sin\varepsilon_2-\omega_e\cos\varepsilon_2)}{\omega_d}$$

$$\nu=\frac{0.0724}{2}=0.0362\ \sec^{-1}, \quad \omega_\phi=\sqrt{0.164}=0.405\ \text{rad/sec}$$

$$\omega_d=\sqrt{\omega_\phi^2-\nu^2}=\sqrt{(0.405)^2-(0.0362)^2}=0.403\ \text{rad/sec}$$

$$\Lambda=\frac{\omega_e}{\omega_\phi}=\frac{0.2}{0.405}=0.494, \quad K=\frac{\nu}{\omega_\phi}=\frac{0.0362}{0.405}=0.089$$

$$\mu_\phi=1.314, \quad \phi_a=\mu_\phi\phi_{st}=\mu_\phi\alpha'_m=1.314\times\frac{\pi}{20}=0.206\ \text{rad} \ \underline{\angle}\ 11.83^\circ$$

$$\varepsilon_2=\tan^{-1}\left(\frac{2K_2\Lambda}{1-\Lambda^2}\right)=\tan^{-1}(0.11675)=0.116\ \text{rad}\ (6.659^\circ)$$

$$c_1=0.024 \rightarrow c_2=\frac{\phi_a(\nu\sin\varepsilon_2-\omega_e\cos\varepsilon_2)}{\omega_d}$$

$$\rightarrow c_2=\frac{0.206(0.0362\times0.116-0.2\times0.993)}{0.403}=-0.099$$

همانگونه که با استفاده از مقادیر بدست آمده معادله حرکت رول عبارتست از :

$$\phi=e^{-0.0362t}(0.024\cos 0.403t-0.099\sin 0.403t)+0.206\sin(0.2t-0.116)$$

که می‌توان با قرار دادن زمان‌های مختلف (مثلاً از صفر تا ۱۰ ثانیه) مقادیر ϕ مختلف را بدست آورد.

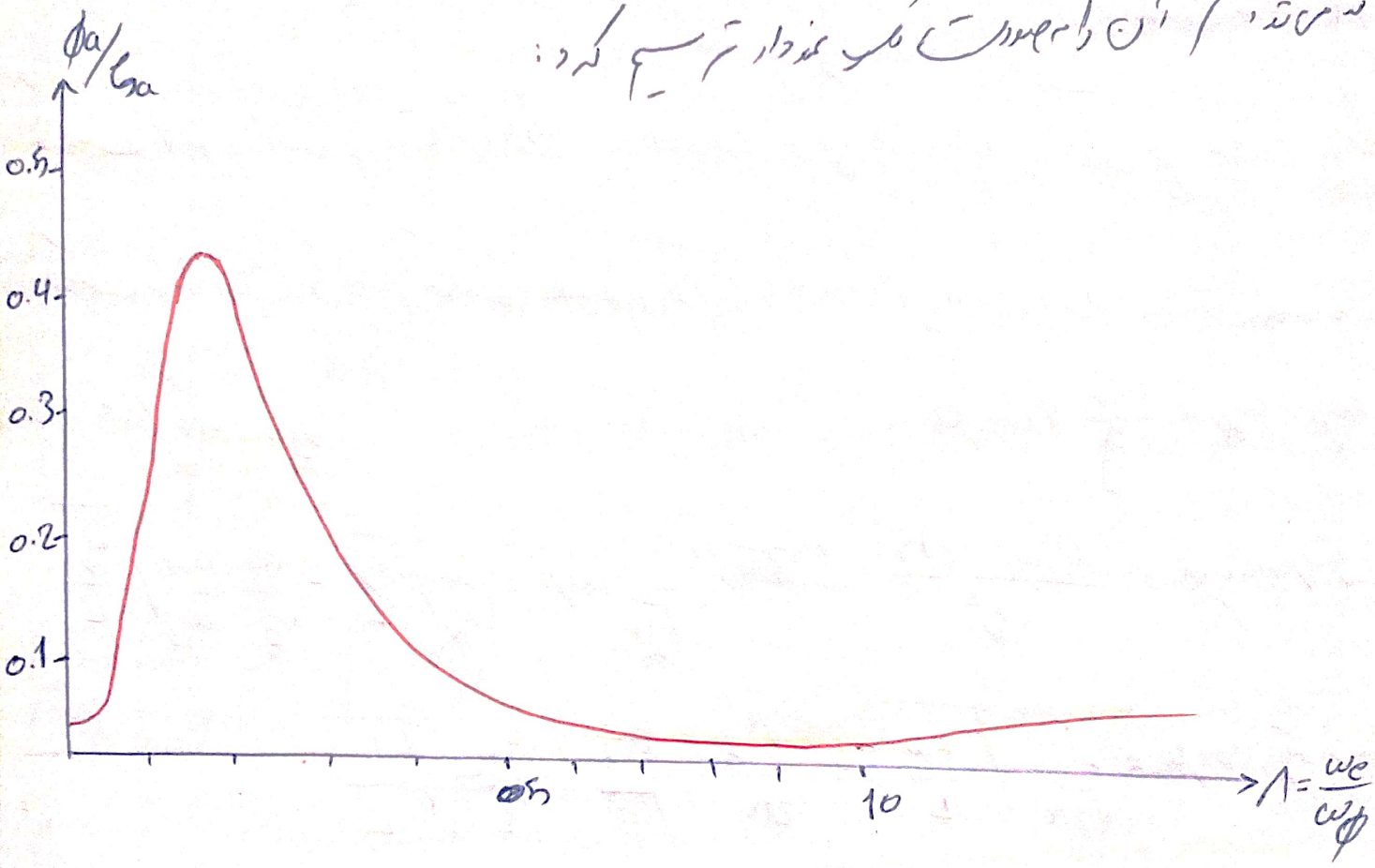
28-10

نسبت دامنه پاسخ به دامنه موج $\left(\frac{\phi_a}{\zeta_a}\right)$

$$\frac{\phi_a}{\zeta_a} = \frac{\phi_a}{\alpha'_m}\,\alpha'_m\,\frac{1}{\zeta_a} = \mu_\phi\,\frac{2\pi\,\zeta_a}{L_w}\sin\mu\,\frac{1}{\zeta_a} = \mu_\phi\,\frac{2\pi}{L_w}\sin\mu$$

داریم: $\frac{\omega_w^2}{g} = \frac{2\pi}{L_w} \Rightarrow \frac{\phi_a}{\zeta_a} = \mu_\phi\,\frac{\omega_w^2}{g}\sin\mu$

که می‌توان آن را به صورت یک نمودار ترسیم کرد:



* توجه: نمودارهایی که $\frac{\phi_a}{\alpha_m}$ را برحسب $\frac{L}{T}$ می‌دهد وجود دارد که می‌توان از آنها استفاده کرد.

جلسه بیست و نهم

«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 تاثیر زیادی بر خصوصیات حرکتی کشتی دارد. رابطه بین سرعت، راستای حرکت و ضریب فرکانس حرکت هیو را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} V\cos\mu$$

برای حرکت هیو

$$\Rightarrow V\cos\mu = \frac{(\omega_w - \omega_e)g}{\omega_w^2} \xrightarrow{\times \frac{1}{\sqrt{gL}}} \frac{V}{\sqrt{gL}}\cos\mu = \frac{1}{\omega_w}\sqrt{\frac{g}{L}} - \frac{\omega_e}{\omega_z}\frac{\omega_z}{\omega_w}\sqrt{\frac{g}{L}}$$

$$\Rightarrow F_n\cos\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{L_w}{L}} - \frac{\Lambda_z}{2\pi}\frac{\omega_z}{\sqrt{g}}\frac{L_w}{\sqrt{L}}\sqrt{\frac{L}{L}}$$

$$\Rightarrow \boxed{F_n\cos\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{L_w}{L}} - \frac{\Lambda_z}{2\pi}\left[\omega_z\sqrt{\frac{L}{g}}\right]\frac{L_w}{L}}$$

کمیت داخل براکت سمت راست معادله ($\omega_z\sqrt{\frac{L}{g}}$) فرکانس بی بعد نامیده می‌شود.

به همین صورت برای حرکات پیچ و رول خواهیم داشت

برای حرکت پیچ

$$\boxed{F_n \cos\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{L_w}{L}} - \frac{\Lambda_\theta}{2\pi}\left[\omega_\theta \sqrt{\frac{L}{g}}\right]\frac{L_w}{L}}$$

برای حرکت رول

$$\boxed{F_n \cos\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{L_w}{L}} - \frac{\Lambda_\phi}{2\pi}\left[\omega_\phi \sqrt{\frac{L}{g}}\right]\frac{L_w}{L}}$$

مناطق مختلف عملیات کشتی

1) منطقه زیر بحرانی — "subcritical zone" — $\boxed{\Lambda < 0.75}$

2) منطقه بحرانی — "critical zone" — $\boxed{\Lambda = 1}$

3) منطقه فوق بحرانی — "supercritical zone" — $\boxed{1.2 < \Lambda}$

منطقه بحرانی بین 0.75 تا 1.2 است چون از مطالب قبل داشتیم که Λ که در آن پیک نمودار ایجاد می‌شد برابر بود با $\Lambda = \sqrt{1-2k^2}$ بنابراین در تعریف مناطق زیر بحرانی مقدار Λ کمتر از 0.75 تعریف می‌شود.

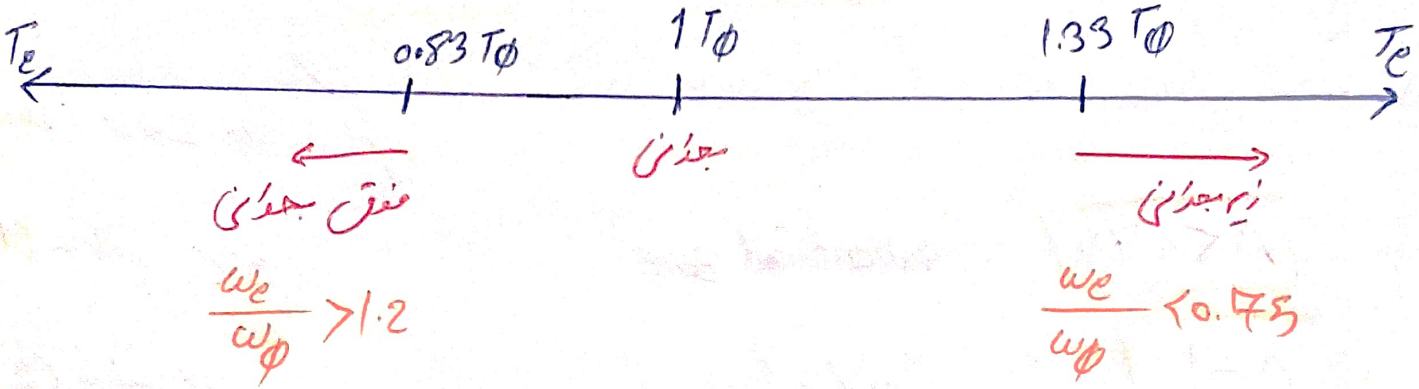
برای درک بهتر، محدوده‌ای را بر حسب پریود بدست می‌آوریم:

بحرانی: $\Lambda = 1 \rightarrow \omega_e = \omega_\phi \rightarrow \frac{2\pi}{T_e} = \frac{2\pi}{T_\phi} \rightarrow T_e = T_\phi \rightarrow$ پریود موج خورده با پریود حرکات رول برابر است

فوق بحرانی : $\Lambda > 1.2 \rightarrow \frac{\omega_e}{\omega_\phi} > 1.2 \rightarrow \omega_e > 1.2\,\omega_\phi \rightarrow \frac{1}{T_e} > \frac{1.2}{T_\phi} \rightarrow T_\phi > 1.2\,T_e$

زیر بحرانی : $\Lambda < 0.75 \rightarrow \frac{\omega_e}{\omega_\phi} < 0.75 \rightarrow \omega_e < 0.7\,\omega_\phi \rightarrow \frac{1}{T_e} < \frac{0.7}{T_\phi} \rightarrow T_e > \frac{T_\phi}{0.75}$

که می‌توان آن را بر روی یک محور رسم کرد



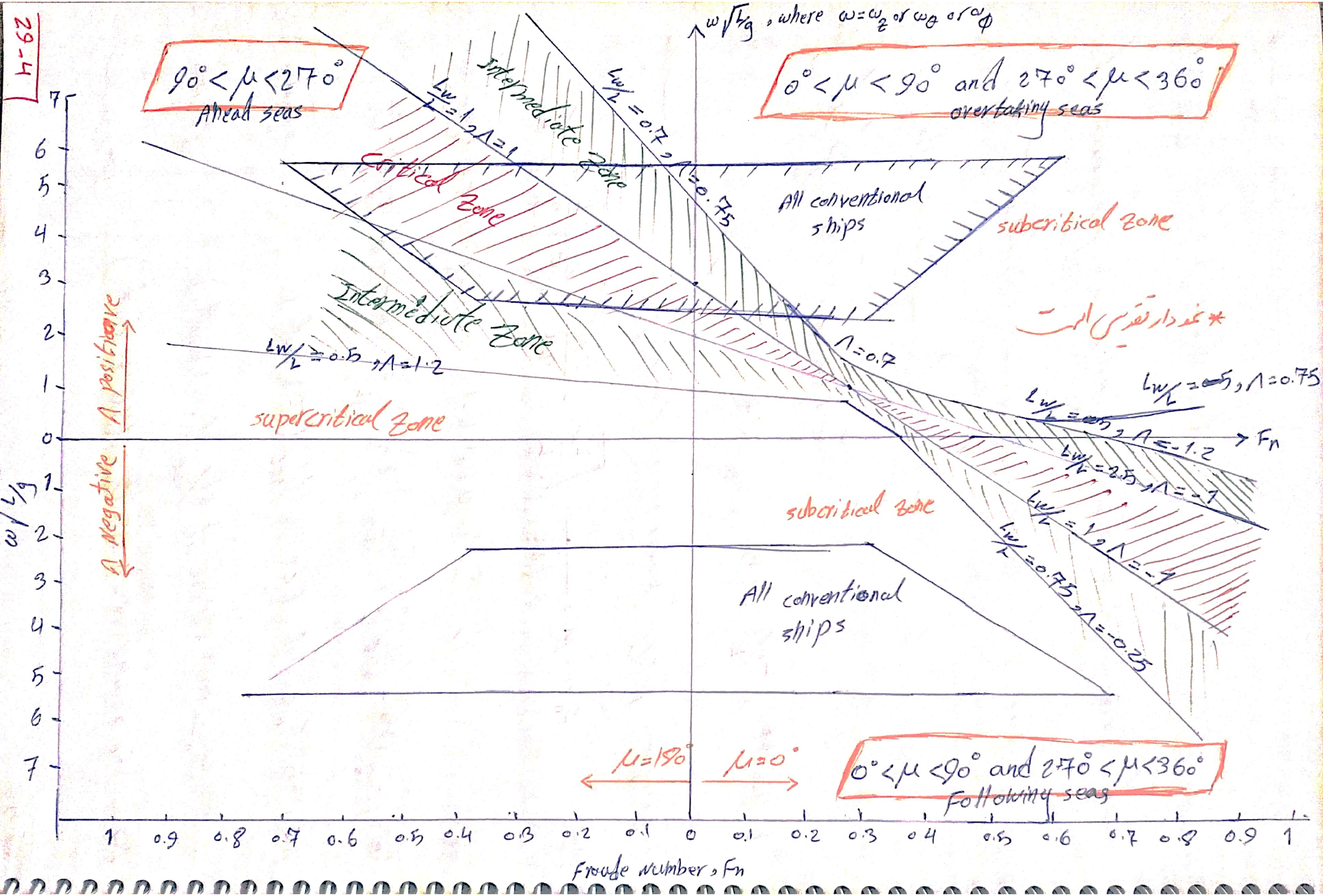
- در ادامه نمودار ارائه می‌شود که چهار پارامتر بی بعد زیر در آن وجود دارد:

$\frac{L_w}{L}$ ✓ Λ ✓ $\omega_\phi\sqrt{\frac{L}{g}}$ ✓ F_n ✓

محور افقی این نمودار محور فرود است و محور عمودی آن $\omega\sqrt{\frac{L}{g}}$ ، همچنین این نمودار برای زوایای پرچ‌زدن مختلف رسم شده است که خروجی آن مناطق مختلف عملیاتی کشتی یعنی بحرانی ، فوق بحرانی و زیر بحرانی می‌باشد

منحنی‌های برای Λ و $\frac{L_w}{L}$ های مختلف رسم شده است

- ذوزنقه‌ای موجود در شکل نواحی رایج کشتی‌ها می‌باشد


$\omega\sqrt{L/g}$, where $\omega = \omega_z$ or ω_θ or ω_ϕ
$90° < \mu < 270°$
Ahead seas
$0° < \mu < 90°$ and $270° < \mu < 360°$
overtaking seas
$L_w/L = 1$, $\Lambda = 1$
$L_w/L = 0.7$, $\Lambda = 0.75$
Intermediate Zone
Critical Zone
All conventional ships
subcritical Zone
Intermediate Zone
$L_w/L = 0.5$, $\Lambda = 1.2$
$\Lambda = 0.7$
* نمودار تقریبی است
$L_w/L = 0.5$, $\Lambda = 0.75$
$L_w/L = 0.5$, $\Lambda = -1.2$
supercritical Zone
$L_w/L = 2.5$, $\Lambda = -1$
$L_w/L = 1$, $\Lambda = -1$
$L_w/L = 0.75$, $\Lambda = -0.25$
subcritical Zone
All conventional ships
Λ positive
Λ Negative
$\mu = 180°$
$\mu = 0°$
$0° < \mu < 90°$ and $270° < \mu < 360°$
Following seas
F_n
Froude Number, F_n

چند نکته با توجه به نمودار

✓ در امواج از روبرو (Ahead seas) با ورود به منطقه فوق بحرانی بسیار بعید است

✓ در محدوده رایج کشتی ها در امواج از پشت معمولاً در حیطه زیر بحرانی بوده و دارای حرکات آرامی است مگر اینکه دارای سرعت نامتعارفی باشند. در خارج از این محدوده کشتی در حالت فوق بحرانی بوده و حرکات شدیدی را تجربه می کند

مثال: یک کشتی با اطلاعات زیر موجود است

$L = 400\ ft$, $L_w/L = 2.5$, $\omega_\theta = 0.7$

مطلوب است سرعت کشتی در امواج از روبرو در مناطق زیر بحرانی، بحرانی و فوق بحرانی

Ans:

$$F_n \cos\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{L_w}{L}} - \frac{\Lambda_\theta}{2\pi}\left[\omega_\theta\sqrt{\frac{L}{g}}\right]\frac{L_w}{L}$$

که برای امواج از روبرو و از پشت $\cos\mu = \pm 1$ یا -1 است بنابراین

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{6.28}}\sqrt{2.5} - \frac{\Lambda_\theta}{6.28}\left[0.7\sqrt{\frac{400}{32.2}}\right]2.5 = \frac{V}{\sqrt{gL}} = 0.63094 - \Lambda_\theta(0.98216) = \frac{V}{113.49}$$

منطقه زیر بحرانی: $\Lambda < 0.75$, $F_n < 0.106$, $V < 11.99\ ft/sec$ (7.1 knot)

منطقه بحرانی: $\Lambda = 1$, $F_n = 0.351$, $V = 36.86\ ft/sec$ (23.6 knot)

منطقه فوق بحرانی: $\Lambda > 1.2$, $F_n > 0.548$, $V = 62.15\ ft/sec$ (36.7 knot)

جلسه سی ام

«استخراج طیف پاسخ کشتی در امواج نامنظم»

«بخش اول»

منبع این بخش ← Dynamices of marine vehicles / chapter 6

طیف پاسخ = طیف حرکات مختلف شناور (رول، هیو و پیچ) در فرکانس های مختلف در معرض امواج نامنظم

نکته: اصول استخراج طیف پاسخ و تمام کاطیفی همانند روش طیف امواج است.

- در مثال زیر به بیان این نکته می پردازیم که چگونه با داشتن پاسخ کشتی (دامنه حرکات) ابرمی پارامترها را استخراج کنیم

مثال: دو دستگاه جدول زیر مربوط به حرکات رول کشتی در موج نامنظم است پارامترهای زیر را محاسبه کنید

Avorige roll , significant roll , one-tenth highest rolls , one-hundredth highest roll

دو برابر دامنه حرکت رول	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
تعداد دفعات وقوع	1	4	7	10	13	8	12	10	8	7	5	2	4	3	1	0	2	2	0	1
فراوانی تجمعی	1	5	12	22	35	43	55	65	73	80	85	87	91	94	95	95	97	99	99	100
سطر دوم × سطر اول	1	8	21	40	65	48	84	80	72	70	55	24	52	42	15	0	34	36	0	20
significant تابع									54 = 9×6	70	55	24	52	42	15	0	34	36	0	20
one-tenth highest roll تابع									13 = 13×1				13 = 13×1	42	15	0	34	36	0	20
one-hundredth highest roll تابع																				20

2 جمع سطر: sum2 = 100 ، 4 جمع سطر: sum4 = 767

5 جمع سطر: sum5 = 402 ، 6 جمع سطر: sum6 = 160 ، 7 جمع سطر: sum7 = 20

$$\text{Averag roll} = \frac{sum4}{sum2} = \frac{767}{100} = 7.67^\circ$$

$$\text{significant roll} = \frac{sum5}{\frac{1}{3} sum2} = \frac{402}{33} = 12.2^\circ$$

$$\text{one-tenth highest rolls} = \frac{sum6}{\frac{1}{10} sum2} = \frac{160}{10} = 16^\circ$$

$$\text{one-hundredth rolls} = \frac{sum7}{\frac{1}{100} sum2} = \frac{20}{1} = 20^\circ$$

نکته: طیف پاسخ نیز از توابع توزیع رایلی تبعیت می‌کند لذا همانند امواج از روابط رایلی در اینجا هم می‌توان استفاده کرد. برخی روابط مدیریتی بحث امواج که در اینجا هم می‌توان استفاده کرد در زیر آورده شده است.

$$P(x_i) = \frac{2x_i}{\bar{x}^2} e^{-\left(\frac{x_i^2}{\bar{x}^2}\right)}$$

x_i: دو برابر دامنه حرکت (هیو و رول و پیچ)

$P(x_i)$: درصد احتمال وقوع x_i

$\bar{x}$: مقدار متوسط مقادیر x_i

m_0: مساحت زیر نمودار طیف

$$\bar{x}^2 = \frac{2m_0}{8m_0} \rightarrow \bar{x} = RMS(\phi)$$

$$P(x_i) = \frac{2x_i}{8m_0} e^{-(x_i^2/8m_0)}$$

$$\bar{x}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 f(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} f(x_i)} = 8m_0$$

مفهوم RAO یا طیف انتقال

Response Amplitude Oprator (RAO) → اپراتور دامنه پاسخ

or

Transform spectrum → طیف انتقال

طیف پاسخ = RAO × طیف موج

منظور از RAO می‌تواند مقادیر زیر باشد

$$\left(\frac{\phi_a}{\zeta_a}\right)^2 \text{ or } \left(\frac{\theta_a}{\zeta_a}\right)^2 \text{ or } \left(\frac{z_a}{\zeta_a}\right)^2 \text{ or } \left(\frac{s_a}{\zeta_a}\right)^2$$

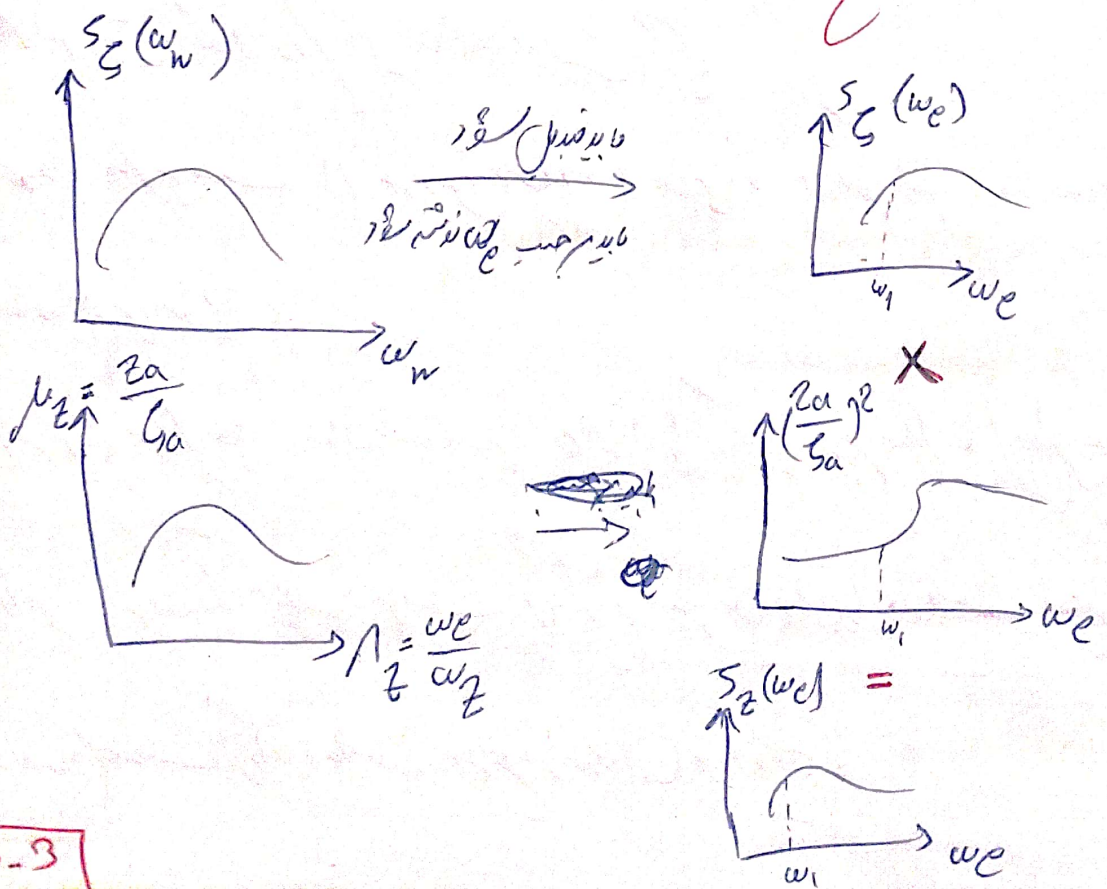
دامنه نیرو

مقاومت افزوده

$$\text{or } \left(\frac{R_{AW}}{\zeta_a}\right)^2 \text{ or } \left(\frac{BM}{\zeta_a}\right)^2$$

ممان خمشی

مراحل بدست آوردن طیف پاسخ



یعنی ابتدا باید طیف موجی که برحسب فرکانس موج (ω_w) بدست آمده را بر حسب فرکانس برخورد بدست آوریم و مقدار RAO از نمودار S_ζ را برحسب S_Z بدست می‌آید که نمودار این نمودار از روش تحلیلی یا تجربی بدست می‌آید که در جلسه قبل توضیح داده شد

حال برای یک فرکانس برخورد دلخواه (ω_1)، مقدار S_ζ را در مقدار RAO ضرب می‌کنیم و مقدار S_Z بدست می‌آید

$$S_\zeta \times RAO = \left(\frac{1}{2}\zeta_a^2\right) \times \left(\frac{Z_a}{\zeta_a}\right)^2 = \frac{1}{2} Z_a^2 = S_Z$$

نکته: طیف پاسخ در فرکانس برخورد که طیف موج دارای حداکثر مقدار است، لزوماً حداکثر نیست چون وابسته به مقدار RAO در آن فرکانس برخورد نیز هست

نکته: قسمت اصلی و مهم در بدست آوردن پاسخ کشتی، بدست آوردن نمودار RAO برحسب Λ است که از روی آن RAO بدست می‌آید.

- نمودار RAO برحسب Λ به روش تحلیلی یا تجربی در حوضچه کشش و در معرض امواج منظم استخراج می‌شود

- بنابراین برای حل مسئله ابتدا منحنی RAO را در یک موج منظم با ارتفاع موج مشخص ولی در فرکانس برخورد‌های مختلف بدست می‌آوریم سپس RAO را در طیف موج (برحسب فرکانس) برخورد ضرب می‌کنیم و طیف پاسخ را بدست می‌آوریم.

- در برخی از منابع خروجی نسبت $\frac{Z_a}{\zeta_a}$ را RAO می‌گویند.

مراحل استخراج طیف پاسخ

1) استخراج طیف موج بر حسب فرکانس موج به روش تجربی و در صورت عدم وجود اطلاعات آماری، استفاده از طیف‌های استاندارد.

2) استخراج طیف موج بر حسب فرکانس برخورد

3) استخراج پاسخ‌های شناور در حرکات مختلف (هیو، پیچ و رول) بطور مستقل و در موج منظم در فرکانس‌های مختلف (طول موج مختلف) ولی ارتفاع موج یکسان

4) استخراج نمودار RAO

5) استخراج طیف پاسخ از حاصلضرب مقادیر نمودار RAO در طیف امواج بر حسب فرکانس برخورد.

تبدیل طیف موج در فرکانس موج به فرکانس برخورد

برای این کار از رابطه زیر به دو استفاده می‌کنیم:

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2 V}{g} \cos\mu$$

که به صورت زیر کاربردی‌تر می‌شود:

$$S(\omega_e) = S(\omega_w) \times \frac{1}{1 - (2\omega_w V/g)\cos\mu}$$

نکته: مساحت زیر نمودار $S(\omega_e)$ و $S(\omega_w)$ باید باهم برابر باشند چرا که انرژی کل و ارتفاع موج مشخصه (که از مساحت زیر نمودار طیف بدست می‌آیند) ثابت هستند. لذا این مساحت در هر مبنایی که تفسیر شود باید ثابت بماند:

$$\int S(\omega_e)\, d\omega_e = \int S(\omega_w)\, d\omega_w$$

- رابطه با صفحه قبل داریم که به صورت زیر اثبات کرد:

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2 V}{g}\cos\mu \rightarrow \frac{d\omega_e}{d\omega_w} = 1 - \frac{2\omega_w V}{g}\cos\mu$$

داریم $\int S(\omega_e)\, d\omega_e = \int S(\omega_w)\, d\omega_w$

$$\Rightarrow S(\omega_e)\, d\omega_w \left(1 - \frac{2\omega_w V}{g}\cos\mu\right) = S(\omega_w)\, d\omega_w$$

$$\rightarrow \boxed{S(\omega_e) = \frac{S(\omega_w)}{1 - \left(2\omega_w V/g\right)\cos\mu}}$$

$$\Rightarrow S(\omega_e) = S(\omega_w)\, \frac{1}{\left[1 - \left(4\omega_e V/g\right)\cos\mu\right]^{1/2}}$$

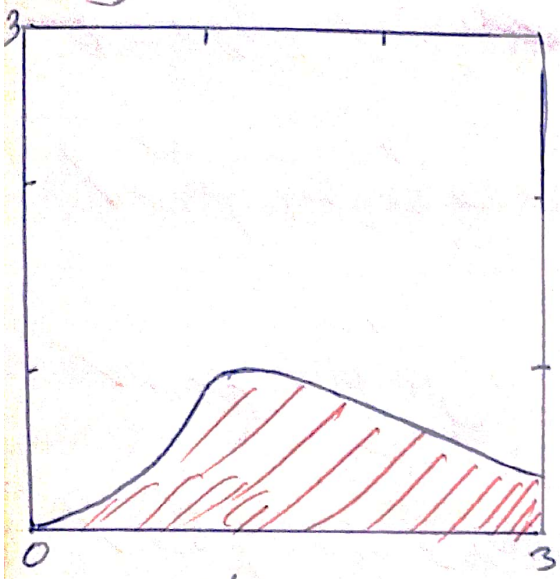
نکته: در امواج از روبرو با قدم به فرکانس برخورد، انرژی در یک باند عریض‌تر و فرکانس‌های بالاتر متمرکز می‌شود در حالیکه در امواج از پشت، انرژی در یک باند کم

عدد موج تر متمرکز می‌شود.

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2 V}{g} \cos\mu$$

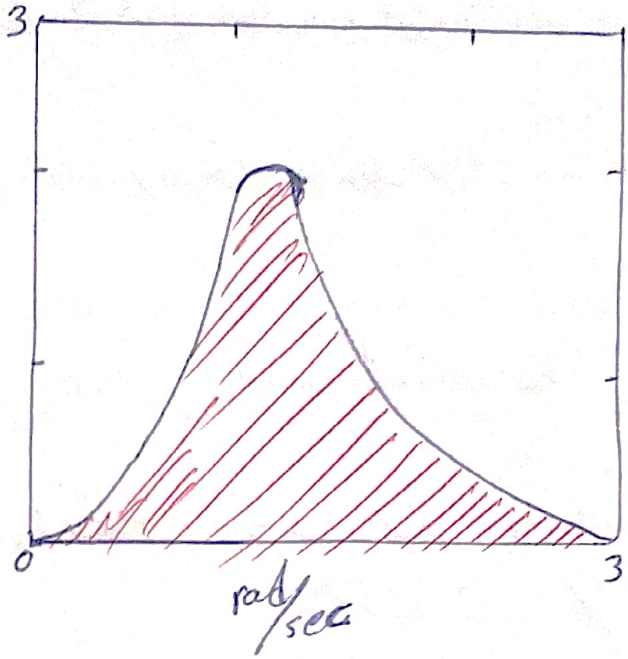
Head sea

$\frac{V_0}{g} = 0.33$ sec



Following sea

$\frac{V_0}{g} = 0$



استخراج RAO

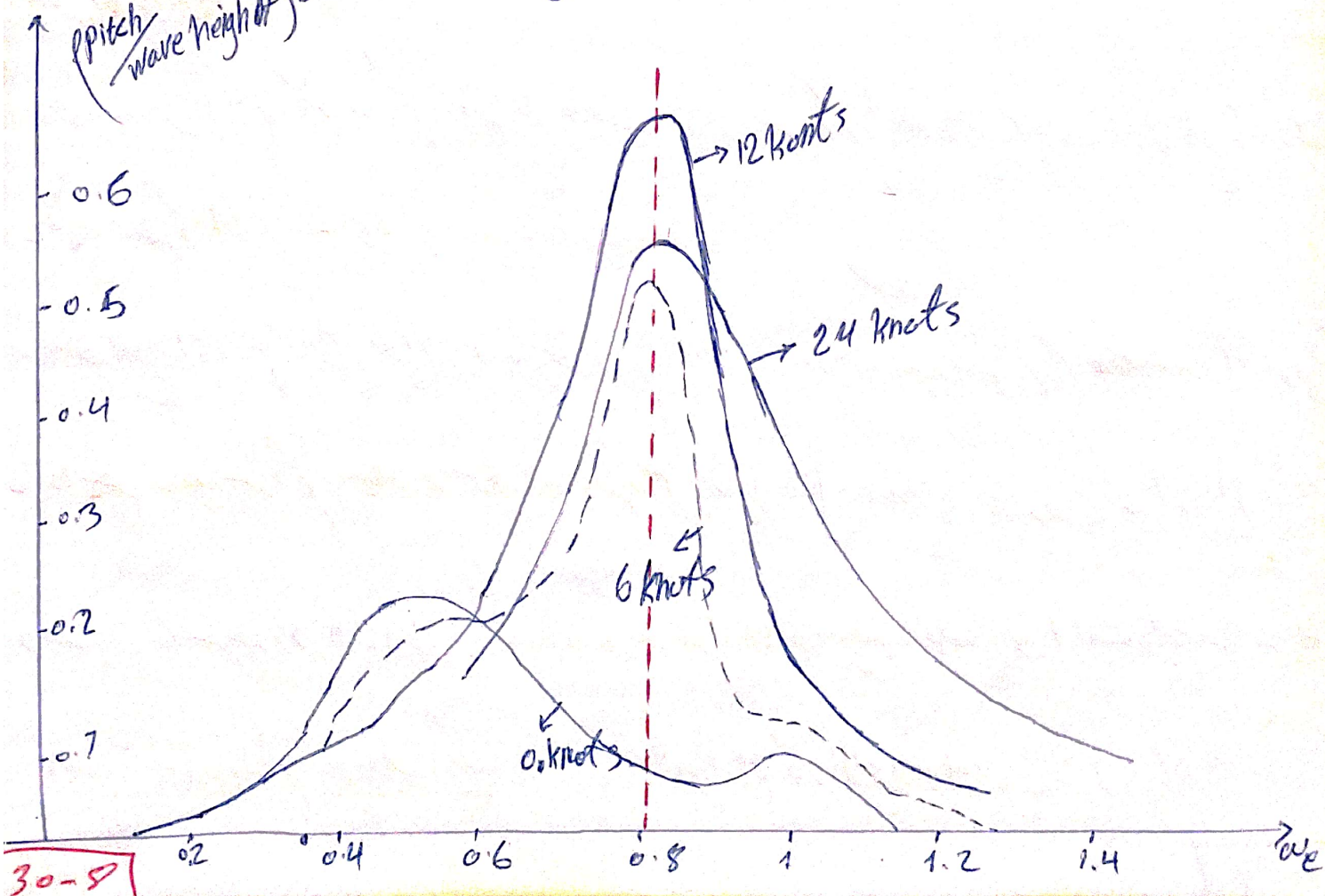
- بیشترین حجم کار برای استخراج طیف پاسخ بر روی استخراج نمودار پاسخ‌ها و RAO متمرکز است.

- استخراج از روش‌های تحلیلی و یا تجربی (تست در حوضچه کشش) انجام می‌شود

- نتایج باید برای طیف وسیعی از فرکانس‌های (طول موج‌های مختلف در ارتفاع ثابت و جهت‌های برخورد مختلف) برای هر سرعتی از وسیله به عامل مجزا استخراج شوند. لذا حالت‌های بسیار زیادی باید مدل‌سازی یا تست شوند که حجم کار بالایی به خود اختصاص می‌دهد.

نکاتی در مورد پدیده تشدید

- تشدید را هم در نمودار RAO و هم در نمودار پاسخ نهایی می‌توان ملاحظه کرد.
- فرکانس تشدید یک فرکانس نامطلوب است و باید از آن پرهیز شود
- بعد از فرکانس تشدید، امنت شدیدی در حرکات ملاحظه می‌شود.
- فرکانس تشدید حرکات مختلف با هم فرق دارند و هر حرکت به طور مجزا باید بررسی شود.
- در برخی مواقع ممکن است دو فرکانس رزونانس در منحنی‌ها مشاهده شود.
- فرکانس تشدید نمودار RAO ممکن است با فرکانس تشدید نمودار پاسخ نهایی یکسان نباشد.
- منحنی طیف موج نیز در منحنی پاسخ مؤثر است. (نمونه‌ای از نمودار RAO در زیر کشیده شده)



نمودار صفحه قبل برای مشاهده رفتار شناور (پاسخ گشتی) در محدوده تشدید آورده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود یک نمودار در تشدید اتفاق می‌افتد و همچنین نمودارهای برای سرعت‌های مختلف بدست می‌آید.

اصلاح روش سرهم بندی خطی

موارد گفته شده تنها با فرض اعتبار روش سرهم بندی خطی برای محاسبه پاسخ گشتی در موج نامنظم بیان شده است

در این روش دو فرض اساسی وجود دارد:

1) پاسخ گشتی به صورت هارمونیک ساده است یعنی پاسخ گشتی متناسب با دامنه موج است یعنی مثلاً با دو برابر شدن دامنه موج دامنه پاسخ هم دو برابر می‌شود و همچنین فرکانس پاسخ گشتی برابر با فرکانس برخورد است.

2) پاسخ گشتی در امواج دریا عبارتست از مجموع پاسخ‌های گشتی در سیستم‌های امواج مختلف که از مدرکن این است که پاسخ گشتی به یک موج خاص مستقل از دیگر امواج باشد با این فرض ما می‌توانیم امواج منظم در فرکانس‌های مختلف را با هم بررسی و سپس به موج نامنظم تعمیم دهیم

جلسه سی و یکم

«استخراج طیف پاسخ کشتی در امواج نامنظم»

«بخش دوم»

مقادیر طیفی پاسخ

با کمک مقادیر طیفی پاسخ می‌توان همانند طیف امواج، خصوصیات حرکتی (پاسخ) کشتی را بدست آورد مانند: RMS، مقدار متوسط، دامنه پاسخ $1/3$ و $1/10$ و $1/100$

طیف پاسخ هم از توزیع رایلی تبعیت می‌کند پس همان روابط قبل را اینجا هم می‌توان استفاده کرد برای محاسبه مقادیر طیفی:

$$RMS(\phi) = \sqrt{m_0}$$ مساحت زیر نمودار طیف پاسخ

$$(\phi)_{average} = 1.253\sqrt{m_0}$$

$$(\phi)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} \quad , \quad (\phi)_{1/10} = 2.545\sqrt{m_0} \quad , \quad (\phi)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0}$$

و اگر بخواهیم اثرات باند عریض و کم عرض را هم لحاظ کنیم داریم:

$$(\phi)_{av} = 1.253\sqrt{m_0} \times \sqrt{1-\varepsilon^2} \quad , \quad (\phi)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} \times \sqrt{1-\varepsilon^2}$$

$$(\phi)_{1/10} = 2.545\sqrt{m_0} \times \sqrt{1-\varepsilon^2} \quad , \quad (\phi)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} \times \sqrt{1-\varepsilon^2}$$

ضریب باند خود به صورت زیر بدست می‌آید

$$\boxed{\varepsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}}$$

و m های مختلف در حالت کلی به صورت زیر بدست می‌آیند

$$\boxed{m_n = \int_0^\infty \omega^n S_\phi(\omega_e)\, d\omega_e} \quad , \; n = 0, 1, 2, \dots$$

for $n = 2 \longrightarrow m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_\phi(\omega_e) \cdot d\omega_e$

* روابط فوق برای حرکت رول گفته شده است اما برای دیگر حرکات (هیو و پیچ) نیز صادق است.

مطالب است

مثال: اطلاعات مدجاب گشتی در دو سند اول جدول آمده با راهنمایی m_0 و m_2 و m_4 و ε و $\phi_{1/3}$ و $\phi_{1/3}$

ω_e	$S_\phi(\omega_e)$	ضرایب سیمپسون	تابع	ω_e^2	$\omega_e^2 S_\phi(\omega_e)$	ضرایب سیمپسون	تابع	$\omega_e^2 S_\phi(\omega_e)$	ضرایب سیمپسون	تابع
0.25	0	1	0	0.0625	0	1	0	0	1	0
0.5	22.8×10^{-2}	4	0.91	0.25	0.057	4	0.23	0.014	4	0.057
0.75	29.9×10^{-2}	2	0.598	0.5625	0.1682	2	0.34	0.095	2	0.19
1	9.4×10^{-2}	4	0.376	1	0.094	4	0.38	0.094	4	0.37
1.25	3.5×10^{-2}	2	0.704	1.5625	0.055	2	0.11	0.086	2	0.17
1.5	0.016	4	0.64	2.25	0.036	4	0.14	0.081	4	0.32
1.75	0.0063	2	0.0126	3.0625	0.01929	2	0.04	0.059	2	0.12
2	0.0028	4	0.0112	4	0.0112	4	0.04	0.045	4	0.18
2.25	0.0014	2	0.00028	5.0625	0.00709	2	0.01	0.036	2	0.071
2.5	0.001	4	0.004	6.25	0.00625	4	0.03	0.039	4	0.16
2.75	0.0006	1	0.0006	7.5625	0.00454	1	0.45	0.034	2	0.034
			$sum_0 = 2.05$				$sum_2 = 1.32$			$sum_4 = 1.68$

$$\longrightarrow m_0 = \frac{1}{3} \times \text{فاصله بین فرکانس برخوردها} \times sum_0 = \frac{1}{3} \times 0.25 \times 2.05 = 0.17 \ deg^2$$

$$m_2 = \frac{1}{3} \times \text{فاصله بین فرکانس برخوردها} \times sum_2 = \frac{1}{3} \times 0.25 \times 1.32 = 0.11 \ \frac{deg^2}{sec^2}$$

$$m_3 = \frac{1}{3} \times \text{فاصله بین فرکانس برخوردها} \times sum_4 = \frac{1}{3} \times 0.25 \times 1.68 = 0.14 \ \frac{deg^2}{sec^4}$$

$$\Longrightarrow \varepsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4} = \frac{0.17 \times 0.14 - (0.11)^2}{0.17 \times 0.14} = 0.49$$

$$\Longrightarrow \phi_{1/3} = 2\sqrt{m_0} \times \sqrt{1-\varepsilon^2} = 2\sqrt{0.17} \times \sqrt{0.51} = 0.59^\circ$$

$$\phi_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} \times \sqrt{1-\varepsilon^2} = 3.336 \times \sqrt{0.17} \times \sqrt{0.51} = 0.98^\circ$$

اشاره به برخی نکات در مورد پاسخ شناورها

- انتظار داریم که بزرگترین پاسخ‌ها در بزرگترین ارتفاع‌های امواج اتفاق بیافتد.
- برای کشتی‌های کوچک در آب‌های ساحلی باید از طیف امواج ساحلی استفاده کرد
- برای کشتی‌های معمولی (دارای طول بیش از 300 فوت (100 متر)) تا جایی که از ارتفاع موج موثر برای انتخاب طیف‌ها استفاده می‌شود، تغییر طیف، چندان باعث تغییر در طیف پاسخ و حرکات کشتی نمی‌شود. البته اگر بخواهیم از نتایج آن برای مقایسه و پیش‌بینی مقادیر سخت مدل استفاده کنیم بهتر است که از طیف‌های استاندارد (مانند ITTC) استفاده کنیم.

روش برم صفحه خطی برای پیش بینی حرکات کشتی در امواج نامنظم به شرطی صادق است که مقادیر RAO در امواج با مقادیر متوسط و حرکات ملایم بدست آمده باشد.

پیش بینی مقادیر حداکثر پاسخ به صورت تابعی از زمان

اگر T بازه زمانی اندازه‌گیری برحسب ساعت باشد و n تعداد دفعات مشاهده شده آنگاه خواهیم داشت:

$$n = (60)^2 \left(\frac{T}{4\pi}\right)\left(\sqrt{\frac{m_2}{m_0}} + \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}\right)$$

یا

$$n = (60)^2 \left(\frac{T}{4\pi}\right)\left(\frac{1+\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}\right)\sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

و بزرگترین موجی که محتمل‌ترین است به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\bar{\zeta}_n = \left\{2\log_e\left[\frac{60^2\, T}{2\pi}\sqrt{\frac{m_2}{m_0}}\right]\right\}^{1/2}\sqrt{m_0}$$

مثال: برای حرکات پیچ یک کشتی 520 فوق داده‌های زیر موجود است: $\theta_{max} = 9.48^\circ$

$$Time = 23.5\ min,\quad m_0 = 6.522\ deg^2,\quad m_2 = 3.562\ deg^2/sec^2,\quad m_4 = 2.276\ deg^2/sec^4$$

مطلوب است بزرگترین موجی که محتمل‌ترین است (یعنی هم محتمل‌ترین باشد و هم بزرگترین)

شاید بزرگترین باشد ولی محتمل‌ترین نباشد

Ans :

$$n = (\sigma_0)^2 \left(\frac{T}{4\pi}\right)\left(\sqrt{\frac{m_2}{m_0}} + \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}\right)$$

$$\Rightarrow n = (60^2)\left(\frac{23.5/60}{4\pi}\right)\left(\sqrt{\frac{3.562}{6.525}} + \sqrt{\frac{2.276}{3.562}}\right) = 172$$

$$\bar{\theta}_n = \left\{2\log_e\left[\frac{(60^2)T}{2\pi}\sqrt{\frac{m_2}{m_0}}\right]\right\}^{1/2}\sqrt{m_0}$$

$$= \left\{2\log_e\left[\frac{60\times 23.5}{2\pi}\sqrt{\frac{3.562}{6.522}}\right]\right\}^{1/2}\sqrt{6.522} = 3.2\sqrt{6.522} = 8.15^\circ$$

از صورت مسأله داشتیم که بزرگترین دامنه حرکت پیچ مشاهده شده 9.45° است و از پاسخ بدست آمده ملاحظه می‌شود که بزرگترین دامنه حرکتی که محتمل‌ترین است 8.15° است، بنابراین بزرگترین دامنه حرکت پیچ 16 % بیشتر است از بزرگترین دامنه حرکتی که محتمل‌ترین است.

جلسه بیستم و دوم

« پدیده‌ی دینامیکی »

منابع این بخش ←

Dynamics of marine vehicles / chapter 7

- در پدیده‌ی دینامیکی دو عامل مد نظر است:

حرکات عمودی: مرتبط است با حرکات هیو و پیچ

رول: مرتبط است با حرکت رول

علت مهم بودن بخش سینه کشتی در پدیده‌ی دریایی: قسمت پاشنه کشتی معمولاً حجم بالایی وزنی بیشتر نسبت به قسمت سینه کشتی دارد و بیشتر در آب فرو می‌رود و مرکز بویانی به سمت پاشنه

شناور حرکت می‌کند با حرکت مرکز بویانی به سمت پاشنه مرکز ثقل هم به سمت پاشنه می‌رود ($LCB = LCG$)

بنابراین در حرکت پیچ با انجام نوسانات کشتی حول مرکز ثقل، به دلیل آنکه مرکز ثقل فاصله زیادی تا سینه کشتی دارد دامنه حرکات پیچ سینه کشتی از پاشنه بیشتر می‌شود که این امر خود سبب می‌شود پدیده‌ی مینی مدشه و کوبش در سینه شناور نسبت به پاشنه بیشتر اتفاق بیافتد.

همچنین شتاب زیاد حرکات در پاشنه می‌تواند باعث صدمه دیدن تجهیزات الکترونیکی شود.

برخی اثرات دینامیکی روی کشتی

- خمیس عرشه
- اسلمینگ یا کوبش کف سینه بخصوص در آبخور بالاست

آبخور بالاست: هنگامی که کشتی بار خود را در مقصد خالی کرده و می‌خواهد بدون بار برگردد، کشتی سبک شده و آبخور آن بسیار کوچک می‌شود همچنین پایداری آن به سرعت کاهش می‌یابد. در این حالت با پر کردن مخازن بالاست کشتی، آبخور آن کمی افزایش می‌یابد به این آبخور جدید آبخور بالاست گویند.

* کاهش آبخور باعث افزایش پدیده کوبش کشتی می‌شود

- شناب عمودی (ناشی از هیو و پیچ) در نقاط بعدی مانند روبان‌ها، پایل فرماندهی و ماشین آلات سینه
- شناب جانبی
- افت سرعت در دریای مواجه ناشی از حرکات ناخواسته و خمیس عرشه و اسلمینگ
- چرخش آزاد موتور (Free racing) ناشی از بیرون زدن پروانه

- پارامترهایی که در ارتباط با پدیده‌های دینامیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند ← 1) فرکانس‌های وقوع خمیس عرشه و اسلمینگ 2) بزرگی فشار هجومی ناشی از اسلمینگ 3) تعیین مقاومت افزوده در دریا

علل کاهش عمق برد نسبت به عمق برد در آب ساکن

1- بالا آمدن موج سینه (موج خود بدنه نه موج دریا)

2- عبور کشتی در آب ناشی از سرعت کشتی (طبق قانون برنولی: کاهش فشار = افزایش

آبخور برای تأمین جریان)

عمق برد مؤثر:

$$h'(l) = h(l) - h_s(l)$$

$h'(l)$: عمق برد در حالتی که کشتی در حال حرکت است

$h(l)$: عمق برد در حالتی که کشتی در آب ساکن قرار دارد (استاتیکی)

$h_s(l)$: مقدار کاهش عمق برد

که $h_s(l)$ عبارت از رابطه زیر بدست می آید:

$$h_s(l) = \zeta_B - \zeta_S$$

ζ_B: ارتفاع ناشی از موج سینه تولید شده توسط خود سینه

ζ_S: ناشی از سرعت گرفتن شناور (sinkage due to speed)

نکته: از رابطه فوق زیاد نمی توان استفاده کرد برای بدست آوردن h_s از رابطه آمار زیر استفاده می شود:

$$\frac{h_s}{L} = k_1' F_n^2 \quad , \quad k_1' = k_1 \left(\frac{B}{L_E}\right)$$

L: طول کشتی (برحسب فوت)

$k_1 = 0.75$ ، B: عرض کشتی ، L_E: طول اینترس صفحه آبخور (برحسب فوت)

$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$: عدد فرود

مثال: برای یک کشتی به طول 60 اطلاعات روبرو موجود دارد: $C_B = 0.7$ ، $L = 400\ ft$ ، $L_E = 164\ ft$

$B = 57.14\ ft$

برای سرعت‌های مختلف زیر مقدار h_s استخراج شده است

V [knots]	6.21	8.53	10.82	13.1
h_s (ft)	1.61	3.02	4.86	7.09

حرکت عمودی

معادله جابجایی عمودی مرکز ثقل کشتی:

$$z = z_a \sin \omega_e t$$

و برای هر نقطه با فاصله ξ از مرکز ثقل:

$$z_\xi = (z_\xi)_a \sin \omega_e t$$

و جابجایی عمودی سینه کشتی در موج منظم به صورت زیر به دست می‌آید:

برای زوایای کوچک θ

$$z_b = z + \xi \sin\theta \simeq z + \xi\theta$$

z_b: جابجایی عمودی سینه ناشی از حرکت هیو

$\xi \sin\theta$: جابجایی عمودی سینه ناشی از حرکت پیچ

z و θ وقتی مثبت هستند که سینه به سمت بالا حرکت کند.

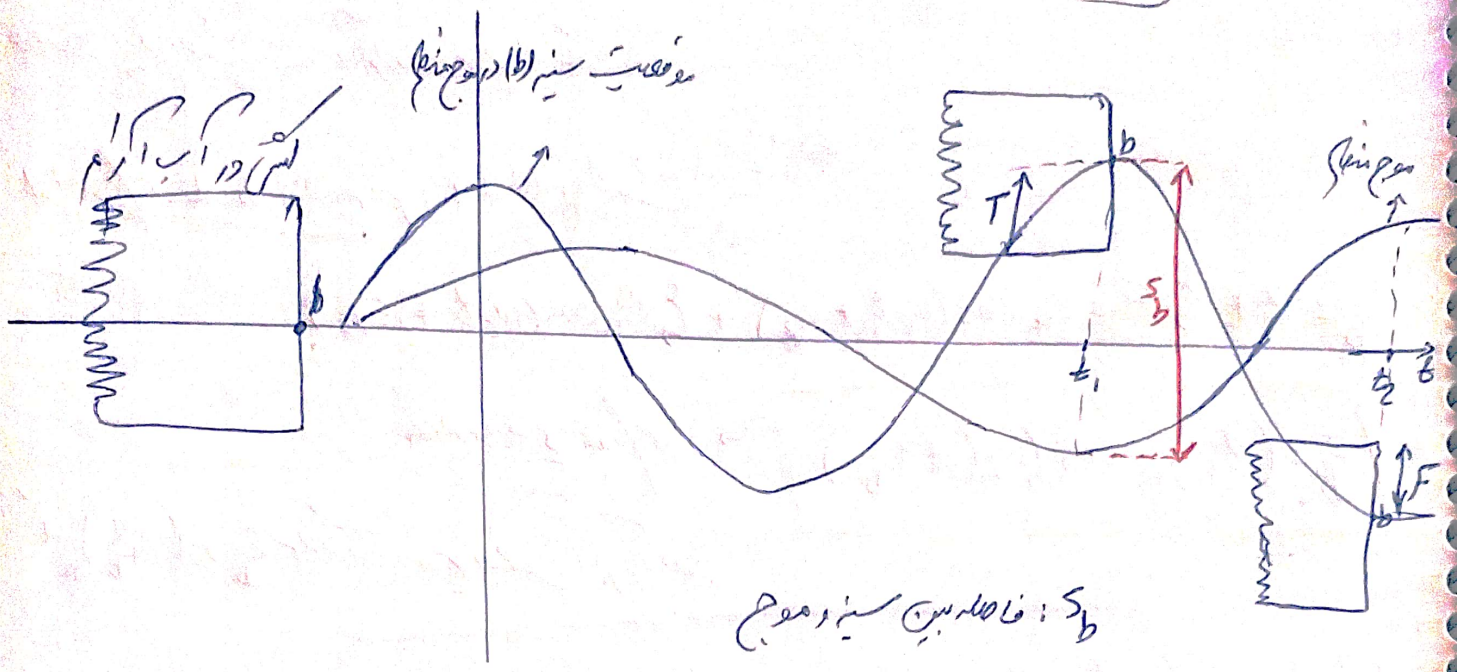
برای حالتی که در آب ساکن قرار دارد

- اگر سطح آب مبنا باشد و موج هم داشته باشیم خواهیم داشت

$$z_b = z + \xi\theta - \zeta$$

ζ: روی موج

نمودار زیر برای در یک حالت که مختلف موج و سینه شناور کور رسم شده است



S_b : فاصله بین سینه و موج

در t_1 سینه از آب بیرون می‌زند و در t_2 دوباره به زیر آب می‌رود

بنابراین سه حالت زیر را خواهیم داشت:

$z_b = 0 \Longleftrightarrow$ b در آب ساکن است

$z_b > 0 \Longleftrightarrow$ b بالاتر از آب ساکن است

$z_b < 0 \Longleftrightarrow$ b پایین‌تر از سطح آب ساکن است

همچنین بیرون زدن سینه زمانی که $S_b > T$ است اتفاق می‌افتد و همچنین در زمانی که $S_b < -F$ است اتفاق می‌افتد.

- معادله کلی حرکت هیو و پیچ را به صورت زیر داریم

$$z = z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z)$$

$$\theta = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta)$$

که در آن ε_z زاویه فاز حرکت هیو نسبت به حرکت موج است و ε_θ زاویه فاز حرکت پیچ نسبت به حرکت موج است.

لذا برای نقطه b (سینه کش) خواهیم داشت:

$$z_b = z + \xi\theta = z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z) + \xi\theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta)$$

$$\Rightarrow \boxed{z_b = (z_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_b)}$$ معادله جابجایی عمودی قسمت سینه

که $(z_b)_a$ و ε_b به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$(z_b)_a = \sqrt{z_a^2 + (\xi\theta_a)^2 + 2 z_a \xi \theta_a \cos(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)}$$

$$\tan\varepsilon_b = \frac{z_a \sin\varepsilon_z + \xi\theta_a \sin\varepsilon_\theta}{z_a \cos\varepsilon_z + \xi\theta_a \cos\varepsilon_\theta}$$

توجه: تعیین بیرون زدگی سینه یا خیس شدن باید بر مبنای منتهی الیه سینه باشد نه خیس بیشترین تغییرات عمودی را تجربه می‌کند. در طراحی، عمود سینه مد نظر قرار می‌گیرد.

- معادله موج باید در محل سینه محاسبه گردد:

$$\zeta = \zeta_a \cos(k_e x - \omega_e t)$$

عدد موج مؤثر: $k_e = \frac{2\pi}{(L_w)_e}$

$(L_w)_e$: طول موج مؤثر است که به صورت روبرو محاسبه می‌شود: $(L_w)_e = \frac{L_w}{\cos\mu}$

خلاصه فرآیند را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد

محاسبه ε_b و $(z_b)_a$ در محل سینه و سپس محاسبه z_b

موقعیت نسبی سینه با سطح موج

$s_b = z_b - \zeta_b$

محاسبه مقدار بالا آمدگی موج در محل سینه ζ_b

محاسبه z_a و ε_z در محل مرکز ثقل

محاسبه θ_a و ε_θ در محل مرکز ثقل

مثال: اطلاعات زیر برای یک کشتی داده شده است:

$L = 450\ ft$, $\mu = 180^\circ$ (i.e., head sea condition) , $L_w = 420\ ft$

$\xi =$ فاصله سینه از مرکز ثقل کشتی $= 225\ ft$, $h_w = 20\ ft$, $T = 25\ ft$

$F =$ فرو رفتگی $= 20\ ft$, $V_s = 20$ knots $(33.78\ ft/sec)$

همچنین مقادیر زیر را از مثال که قبل داریم:

$z_a = 5\ ft$ حرکات در مرکز ثقل , $\theta_a = 0.15$ rad , $\varepsilon_z = -40^\circ = -0.698$ rad , $\varepsilon_\theta = 15^\circ = 0.262$ rad

مطلوب است جابجایی عمودی قسمت سینه

Ans:

$$\omega_w = \sqrt{\frac{2\pi g}{L_w}} = 0.694\ rad/sec$$

$$\omega_e = \omega_w\left(1 - \frac{\omega_w V_s}{g}\cos\mu\right) = 1.2\ rad/sec$$

$$\varepsilon_b = \tan^{-1} \frac{z_a \sin\varepsilon_z + \xi_\theta \theta_a \sin\varepsilon_\theta}{z_a \cos\varepsilon_z + \xi_\theta \theta_a \cos\varepsilon_\theta} = \tan^{-1} \frac{5\sin(-40^\circ) + 225 \times 0.15 \sin(15^\circ)}{5\cos(-40^\circ) + 225 \times 0.15 \cos(15^\circ)}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_b = 8.62^\circ \ (\text{or } 0.15\,\text{rad})$$

همچنین مقدار $(z_b)_a$ را نیز می‌توان با یک جایگذاری ساده بدست آورد. $(z_b)_a = 36.8$

$$\Rightarrow z_b = (z_b)_a \cos(\omega_e t + 8.62^\circ)$$

بیشترین مقدار z_b زمانی اتفاق می‌افتد که $\cos(\omega_e t + 8.62^\circ) = 1$ یعنی

$$\omega_e t + 8.62 = 0^\circ \ \text{or} \ 360^\circ$$

$$\Rightarrow \omega_e t = -8.62^\circ \ \text{or} \ 351.38^\circ$$

- توجه شود که دامنه حرکت عمودی در مرکز ثقل برابر 5 فوت و در محل سینه برابر 36.8 فوت است. به همین دلیل تغییرات قسمت سینه به عنوان قسمت جداگانه مد نظر قرار می‌گیرد.

سرعت عمودی

سرعت عمودی نیز یک حرکت هارمونیک ساده است لذا روابط قبل اینجا هم صادق است.

سرعت عمودی در فاصله ξ از مرکز ثقل

$$z_\xi = (z_\xi)_a \sin\omega_e t$$

$$\Rightarrow \boxed{\dot{z}_\xi = \omega_e (z_\xi)_a \cos\omega_e t}$$

اختلاف فاز بین حرکت هیو و پیچ

دامنه سرعت $(\dot{z}_\xi)_a^2 = (\dot{z})_a^2 + \xi^2 (\dot{\theta})_a^2 + 2(\dot{z})_a(\dot{\theta})_a \xi \cos\varepsilon$

نکته: در حرکت در موج منظم دامنه سرعت عمودی بصورت زیر خلاصه می‌شود

$$\boxed{\begin{aligned} (\dot{z})_a &= \omega_e z_a \\ (\dot{z}_\xi)_a &= \omega_e (z_\xi)_a \end{aligned}}$$

شتاب عمودی

شتاب عمودی نیز یک حرکت هارمونیک ساده است لذا روابط قبل اینجا هم صادق است

$$\ddot{z} = \ddot{z}_a \sin\omega_e t$$

شتاب عمودی در فاصله ξ از مرکز ثقل

$$\ddot{z}_\xi = (\ddot{z}_\xi)_a \sin\omega_e t$$

$$(\ddot{z}_\xi)_a^2 = (\ddot{z})_a^2 + \xi^2 (\ddot{\theta})_a^2 + 2(\ddot{z})_a (\ddot{\theta})_a \xi \cos\varepsilon$$

نکته: در حرکت در موج منظم دلمنشاب جمله‌ها به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\boxed{\begin{aligned} (\ddot{z})_a &= \omega_e^2 (z_a) \\ (\ddot{z}_\xi)_a &= \omega_e^2 (z_\xi)_a \end{aligned}}$$

جلسه سی و سوم

« پدیده‌های دینامیکی »

بخش دوم

حرکت نسبی سینه

مطالعه حرکت نسبی سینه بسیار اهمیت دارد چون دو پدیده زیر را در بر می‌گیرد:

✓ زیر آب رفتن دک سینه

✓ بیرون زدن کف سینه که حالت شدید آن باعث اسلمینگ می‌شود.

- موقعیت سینه معمولاً از محل عمود سینه در نظر گرفته می‌شود.

نکته: اگر دامنه و تأخیر فاز حرکات هیو و پیچ نسبت به موج مشخص باشد، حرکت عمودی هر نقطه از کشتی (به فاصله ξ از مرکز ثقل) نسبت به موج از رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$s_\xi = z_\xi - \zeta_\xi$$

و برای قسمت سینه:

$$s_b = z_b - \zeta_b$$

$$= (z_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_b) - \zeta_a \cos(k_e \xi - \omega_e t)$$

$$= (z_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_b) - \zeta_a \cos\left(\frac{\pi \xi}{L_w} + \omega_e t\right)$$ → for head sea conditions.

$$\Rightarrow \boxed{s_b = (s_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_s)}$$

که در آن

$$(s_b)_a = \sqrt{(z_b)_a^2 + (\zeta_a)^2 - 2(z_b)_a \zeta_a \cos(k_e \xi - \varepsilon_b)}$$

$$\tan \varepsilon_s = \frac{\zeta_a \sin(k_e \xi) - (z_b)_a \sin \varepsilon_b}{\zeta_a \cos(k_e \xi) - (z_b)_a \cos \varepsilon_b}$$

با توجه به روابط دو حالت زیر به وجود می‌آید:

1) $z_b > \zeta_b \Rightarrow \boxed{s_b > 0}$ (نقطه b سینه بالای سطح موج قرار می‌گیرد) $\Leftarrow \boxed{s > T}$ آهنگ

$\Leftarrow$ کف سینه از آب جدا می‌شود.

2) $z_b < \zeta_b \Rightarrow \boxed{s_b < 0}$ (نقطه b سینه زیر سطح موج قرار می‌گیرد) $\Leftarrow \boxed{|s| > f}$ فرو رفته

$\Leftarrow$ دل سینه به زیر آب خواهد رفت و پدیده خیس شدن را خواهیم داشت

مثال: با توجه به آنچه از مثال صفحه 32-17 جزوه به دست آمد، مقدار s_b را محاسبه کنید؟

$\zeta_a = 10$

Ans:

$$(s_b)_a = \sqrt{36.8^2 + 10^2 - 2 \times 36.8 \times 10 \times \cos\left(\frac{2\pi}{420} \times 225 - 0.15\right)}$$

$$\Rightarrow (s_b)_a = 46.78 \text{ ft}$$

$$\tan \varepsilon_s = \frac{10 \sin[\pi(450/420)] - 36.8 \sin(0.15 \text{ rad})}{10 \cos[\pi(450/420)] - 36.8 \cos(0.15 \text{ rad})} = 0.168$$

$$\Rightarrow \varepsilon_s = 9.529^\circ \quad (\text{or } 0.166 \text{ rad}) \Rightarrow s_b = 46.78 \cos(\omega_e t + 0.166)$$

با توجه به مقادیر بدست آمده داریم:

$t=0$ در : $S_b = 46.14\ ft \Rightarrow S_b - T = 46.14 - 25 = 21.14\ ft$

از آنجا که عبارت $S_b - T$ مثبت است لذا کف سینه از آب بیرون می‌زند.

$t = \pi/\omega_e$ در : $S_b + F = -26.14\ ft$

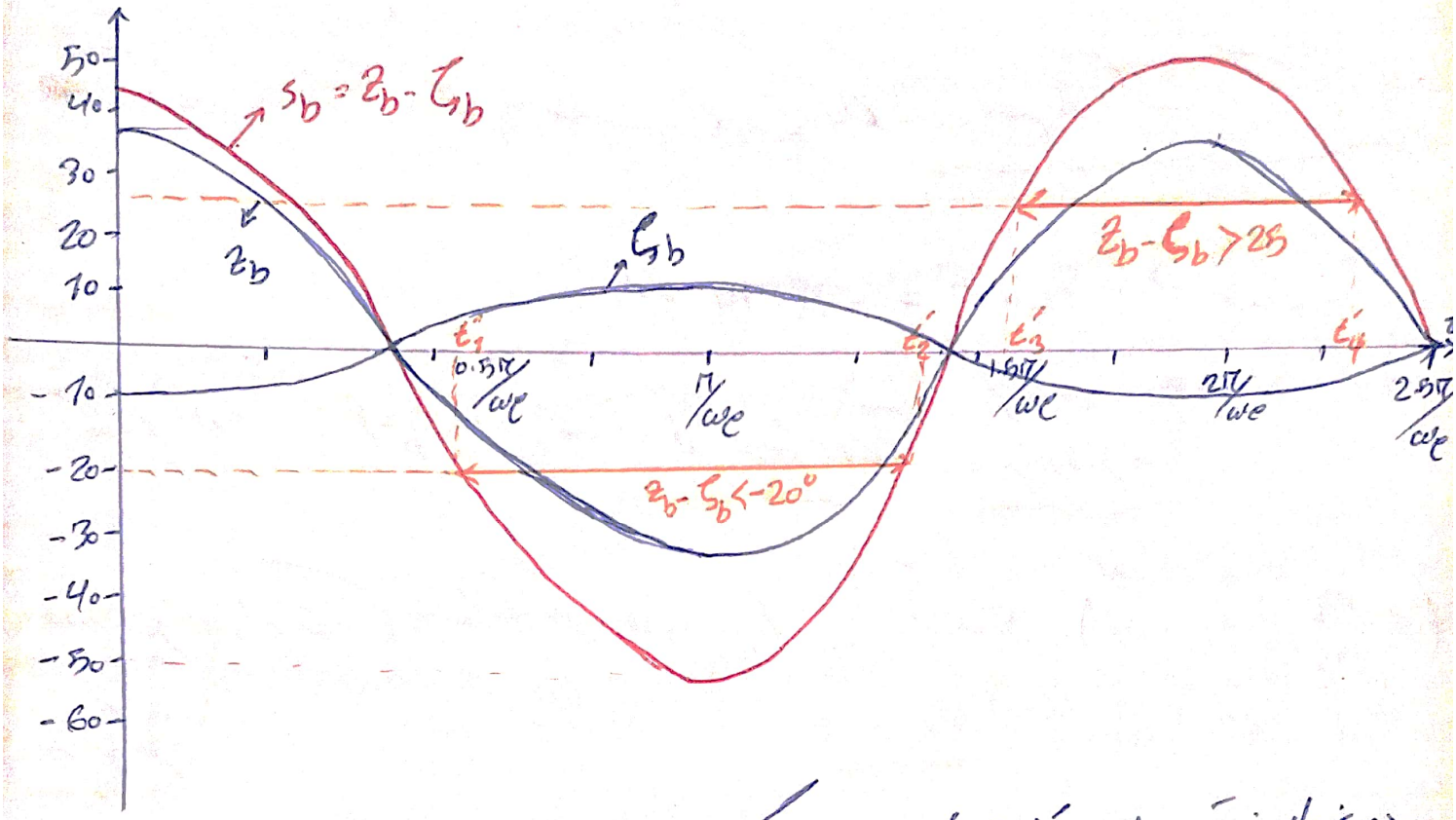
فرض بود

چون مقدار $S_b + F$ منفی است لذا عرشه به زیر آب می‌رود.

روند فوق را می‌توان به صورت یک جدول برای زمان‌های مختلف (به عنوان مثال $t = \frac{n\pi}{4\omega_e}$) ترسیم کرد.

t (sec)	$\omega_e t$ (rad)	$\omega_e t + \varepsilon_s$ (rad)	S_b	Relative forefoot motion $S_b - T$	Relative Deck motion $F + S_b$
0	0	0.166	46.14	21.2 (forefoot emerged)	66.2 (deck above water)
$\pi/4\omega_e$	0.25π	0.951	27.15	2.1 (forefoot emerged)	47.1 (deck above water)
$2\pi/4\omega_e$	0.5π	1.737	-7.75	-32.7 (forefoot submerged)	12.3 (deck above water)
$3\pi/4\omega_e$	0.75π	2.522	-38.1	-63.1 (forefoot submerged)	-18.1 (deck below water)
π/ω_e	π	3.305	-46.14	-72.2 (forefoot submerged)	-26.2 (deck below water)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

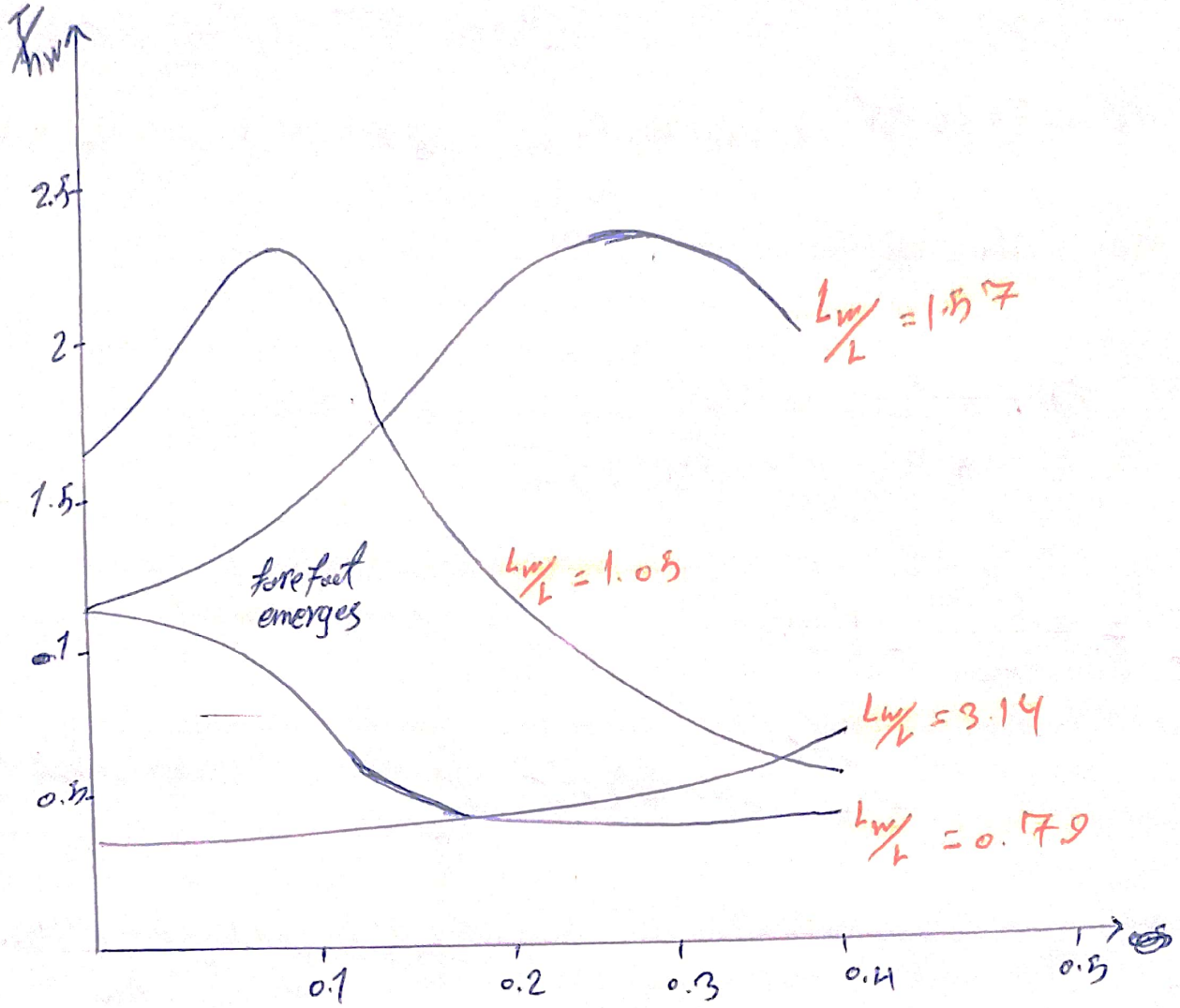
همچنین این اطلاعات را می‌توان بر روی نمودار زیر نمایش داد:



- در نمودار فوق از t_1' تا t_2'، بدلیل اینکه $Z_b - \zeta_b < -20°$ است بدنه به زیر آب می‌رود همچنین از t_3' تا t_4'، بدلیل اینکه $Z_b - \zeta > 25°$ است کف سینه از سطح آب جدا می‌شود.

نکته: برای موج از روبرو می‌توان از نمودار کاربردی که در صفحه بعد ارائه شده است، برای بررسی پدیده زدن کف سینه استفاده کرد. بدین صورت که اگر مقدار $\frac{T}{h_w}$ واقعی کشتی بیشتر از $\frac{T}{h_w}$ بدست آمده از این نمودار باشد، پدیده زدن کف شناور اتفاق نمی‌افتد.

$\frac{T}{h_w}$: نسبت آبخور به ارتفاع موج $\qquad$ $\frac{L_w}{L}$: نسبت طول موج به طول کشتی



Froude Number : $F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$

با توجه به نمودار فوق بدترین شرایط به ازای نسبت $L_w/L = 1.57$ برقرار است.

- برای L_w/L زیاد (مثلاً 3.14)، با افزایش عدد فرود (یا سرعت)، آهنگ بیشتری لازم است تا بتوان از زدن کف اتفاق نیافتد.

- برای L_w/L کم (مثلاً 0.79)، با افزایش عدد فرود (یا سرعت)، آهنگ کمتری لازم است تا بتوان از زدن کف اتفاق نیافتد. یعنی برای امواج ریزتر، آهنگ کمتری لازم داریم.

نکته مهم: همیشه با افزایش یا کاهش عدد فرود (سرعت)، امکان بیرون زدن کف سینه، کم یا زیاد نمی‌شود بلکه با توجه به نسبت طول موج به طول کشتی، یک نقطه بحرانی ماکزیمم ممکن است وجود داشته باشد.

مثال: برای یک کشتی با مشخصات زیر بررسی کنید که آیا کف از آب بیرون می‌زند یا خیر؟ (با توجه به نمودار صفحه قبل)

$L = 400\ ft$, $T = 25\ ft$, $V_s = 20\ knots$, $L_w = 628\ ft$

$h_w = 20\ ft$, $\mu = 180°$

Ans:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{20 \times 1.689}{\sqrt{32.2 \times 400}} = 0.3$$

$$L_w/L = \frac{630}{400} = 1.57$$

از نمودار صفحه قبل T/h_w برابر 2.3 بدست می‌آید.

مقدار T/h_w خود کشتی برابر است با:

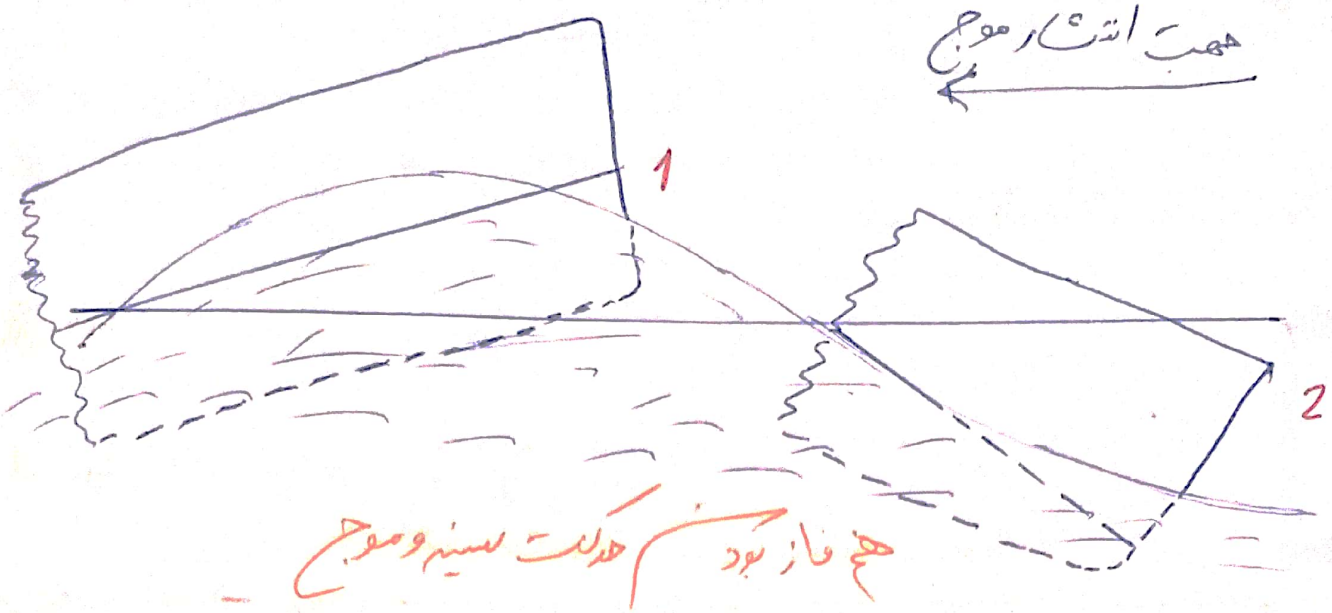
$$T/h_w = \frac{25}{20} = 1.25$$

چون T/h_w بدست آمده از نمودار (2.3) بزرگتر از T/h_w واقعی کشتی (2.25) است بنابراین بیرون زدن کف اتفاق می‌افتد.

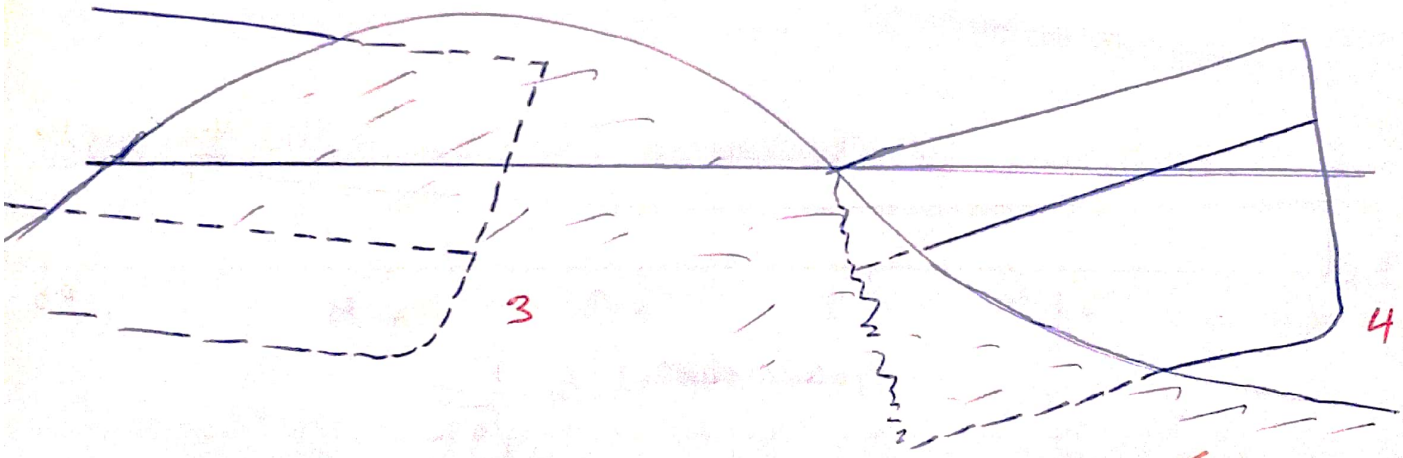
اختلاف فاز بین حرکت موج و حرکت سینه

اختلاف فاز بین موج و حرکت سینه به عواملی بستگی دارد که در شکل صفحه بعد نمایش داده شده است و شامل موارد زیر است:

- عدد فرود (سرعت)
- نسبت طول موج به طول کشتی
- زاویه برخورد (در شکل صفحه بعد 180° در نظر گرفته شده است)



هم فاز بودن حرکت سینه و موج



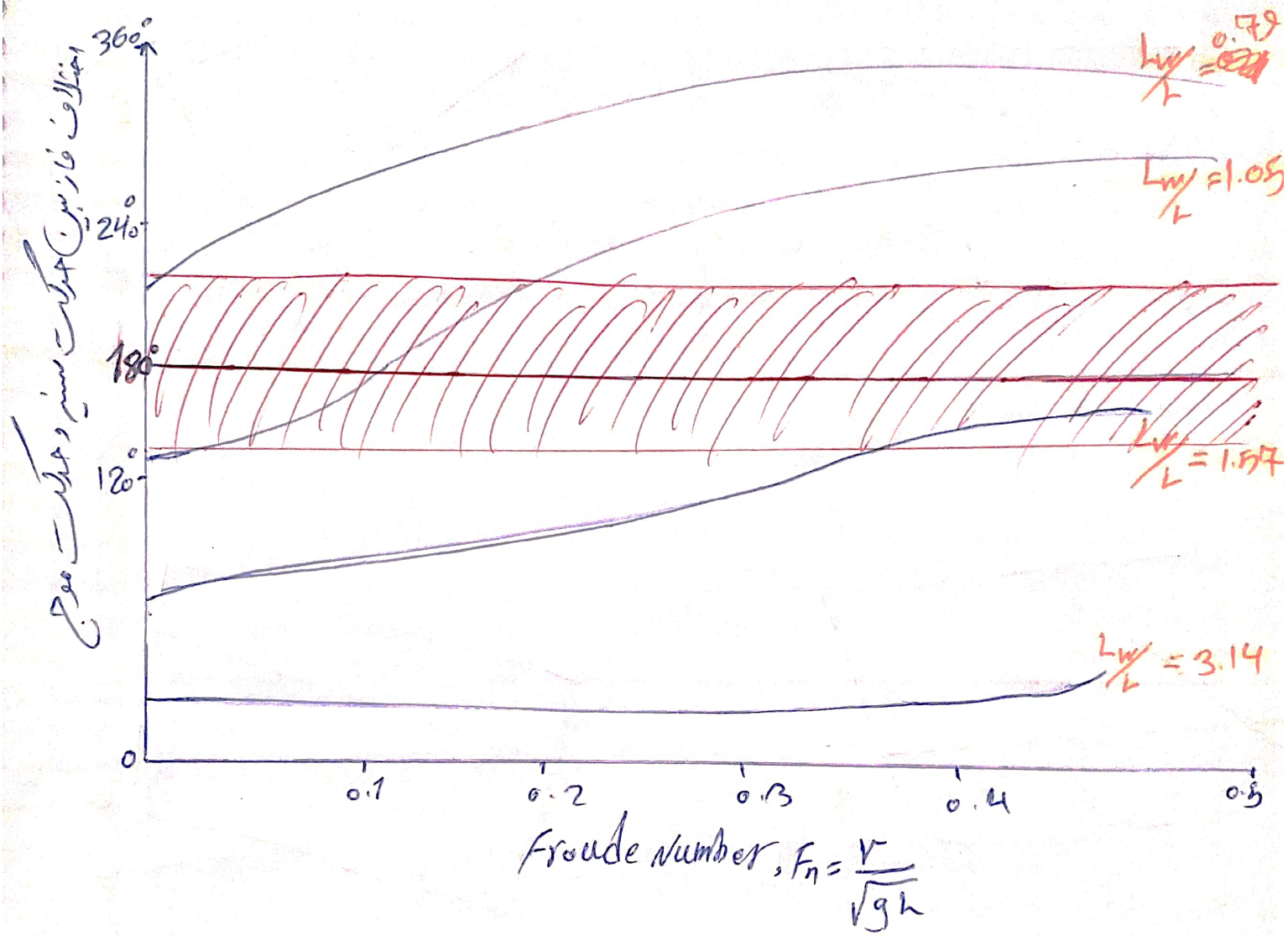
حرکت سینه در فاز مخالف موج - حالت نامطلوب

(هم افزایش احتمال خیس شدن و هم کوبش)

- اگر اختلاف فاز برابر 180 درجه باشد یعنی حرکت رو به پایین سینه با حرکت رو به بالا موج مواجه می‌شود و این می‌تواند یک حالت بحرانی باشد.

- اگر اختلاف فاز ۰ صفر یا 360 درجه باشد یعنی حرکت سینه از موج تبعیت می‌کند.

نمودار زیر کمک می‌کند تا درک بهتری از اختلاف فاز در ایام تا آن با نسبت طول موج به طول کشتی داشته باشیم.



- در نمودار فوق محدوده هاشور خورده قرمز رنگ محدوده‌ای بحرانی است

با توجه به نمودار:

✓ اگر L_w/L خیلی بزرگ باشد (مثلاً 3.14) با افزایش سرعت هم به ناحیه بحرانی نخواهیم رسید.

✓ اگر کشتی ساخته شده باشد و با توجه به اینکه تغییر طول موج دریا در اختیار ما نیست، فقط می‌توان سرعت کشتی را زیاد و کم کرد تا از محدوده بحرانی خارج شویم

سرعت نسبی سینه

- در اینجا منظور، سرعت عمودی است

- پروفیل موج در نقطه b:

$$\zeta_b = \zeta_a \cos\left(\frac{2\pi}{L_e}\xi - \omega_e t\right)$$

- سرعت موج و سرعت سینه در زاویه برخورد 180°:

$$\dot{\zeta}_b = \omega_e \zeta_a \sin\left(\frac{2\pi}{L_e}\xi - \omega_e t\right)$$

$\mu = 180°$ برای : $\dot{\zeta}_b = -\omega_e \zeta_a \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{L_w}\xi\right)$

سرعت نسبی سینه و موج نسبت به یکدیگر:

$$\dot{s}_b = \dot{z}_b - \dot{\zeta}_b$$

$$\dot{z}_b = \dot{z} + \xi\dot{\theta} = -(z_b)_a \omega_e \sin(\omega_e t + \varepsilon_b)$$

- $\dot{\zeta}_b$ و $\dot{z}_b$ وقتی مثبت هستند که حرکت رو به بالا باشد (قرارداد)

$$\dot{s}_b = \dot{z}_b - \dot{\zeta}_b = -(z_b)_a \omega_e \sin(\omega_e t + \varepsilon_b) + \omega_e \zeta_a \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{L_w}\xi\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\dot{s}_b = (\dot{s}_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{\dot{s}})}$$

که در آن :

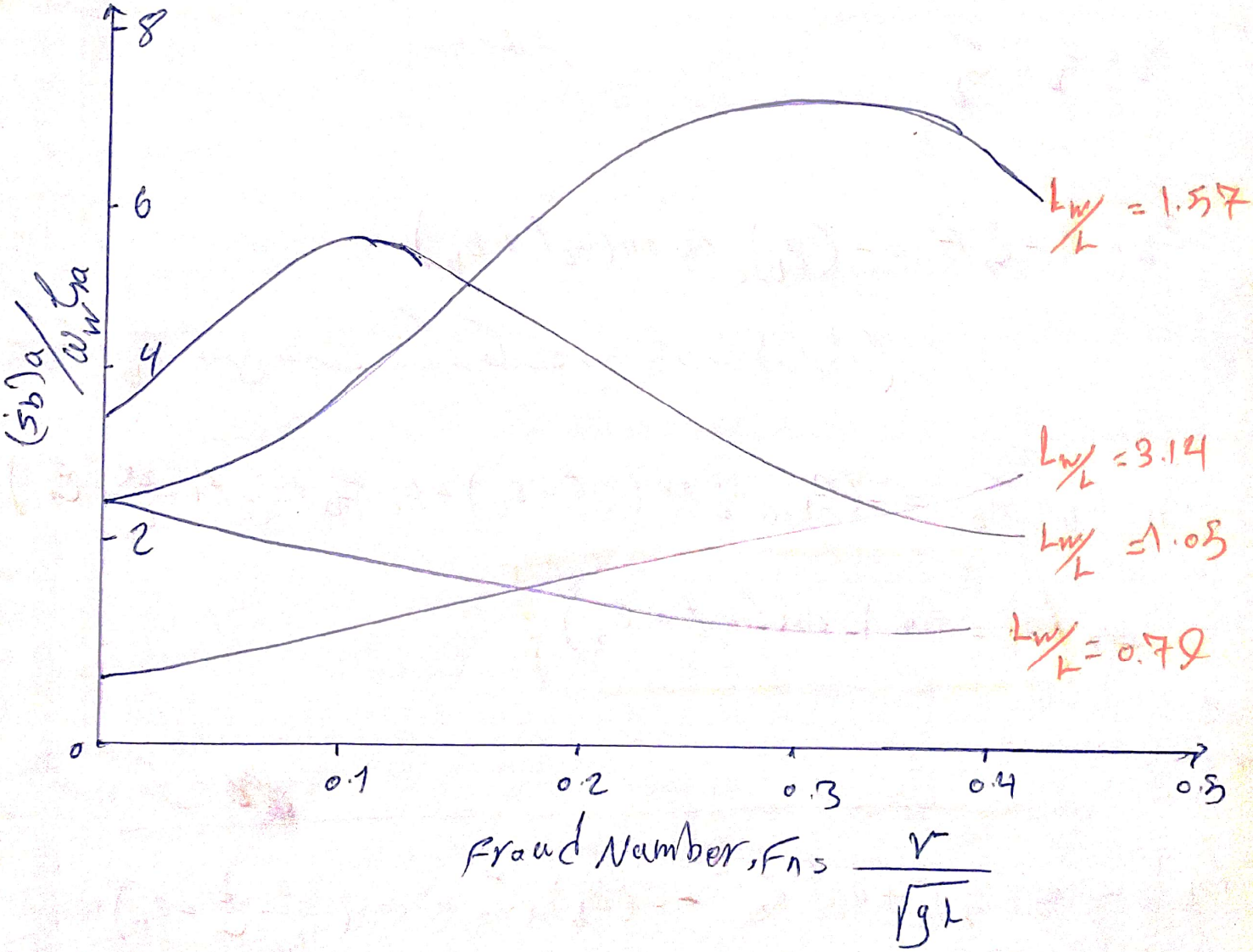
$$(\dot{s}_b)_a = \sqrt{\omega_e^2 (z_b)_a^2 + \omega_e^2 \zeta_a^2 - 2(z_b)_a \zeta_a \omega_e^2 \cos\left(\frac{2\pi}{L_w}\xi - \varepsilon_b\right)}$$

$$\tan\varepsilon_{\dot{s}} = \frac{(z_b)_a \omega_e \cos\varepsilon_b - \omega_e \zeta_a \cos\left[(2\pi/L_w)\xi\right]}{-(z_b)_a \omega_e \sin\varepsilon_b - \omega_e \zeta_a \sin\left[\frac{2\pi}{L_w}\xi\right]}$$

- بررسی‌های انجام شده به روش تحلیلی و تجربی نشان می‌دهد که بیرون زدگی سینه معمولاً همراه با سرعت بحرانی زیاد سینه است. البته این سرعت وابسته به اختلاف فاز بین موج در محل سینه و حرکت سینه است.

- واضح است که سرعت بحرانی زیاد سینه هنگامی اتفاق می‌افتد که اختلاف فاز برابر 180 درجه باشد.

- دامنه بی بعد سرعت بحرانی سینه برحسب عدد فرود و نسبت طول موج به طول کشتی:



چند نکته در مورد منحنی صفحه قبل:

در L_w/L برابر 1.57، عدد فرود بحرانی برابر 0.3 است لذا باید سرعت به کمتر یا بیشتر از این حد تغییر یابد.

در طول موج برابر با طول کشتی در عدد فرود برابر 0.1 در قله نمودار هستیم لذا باید با افزایش سرعت، از این نقطه عبور کرد.

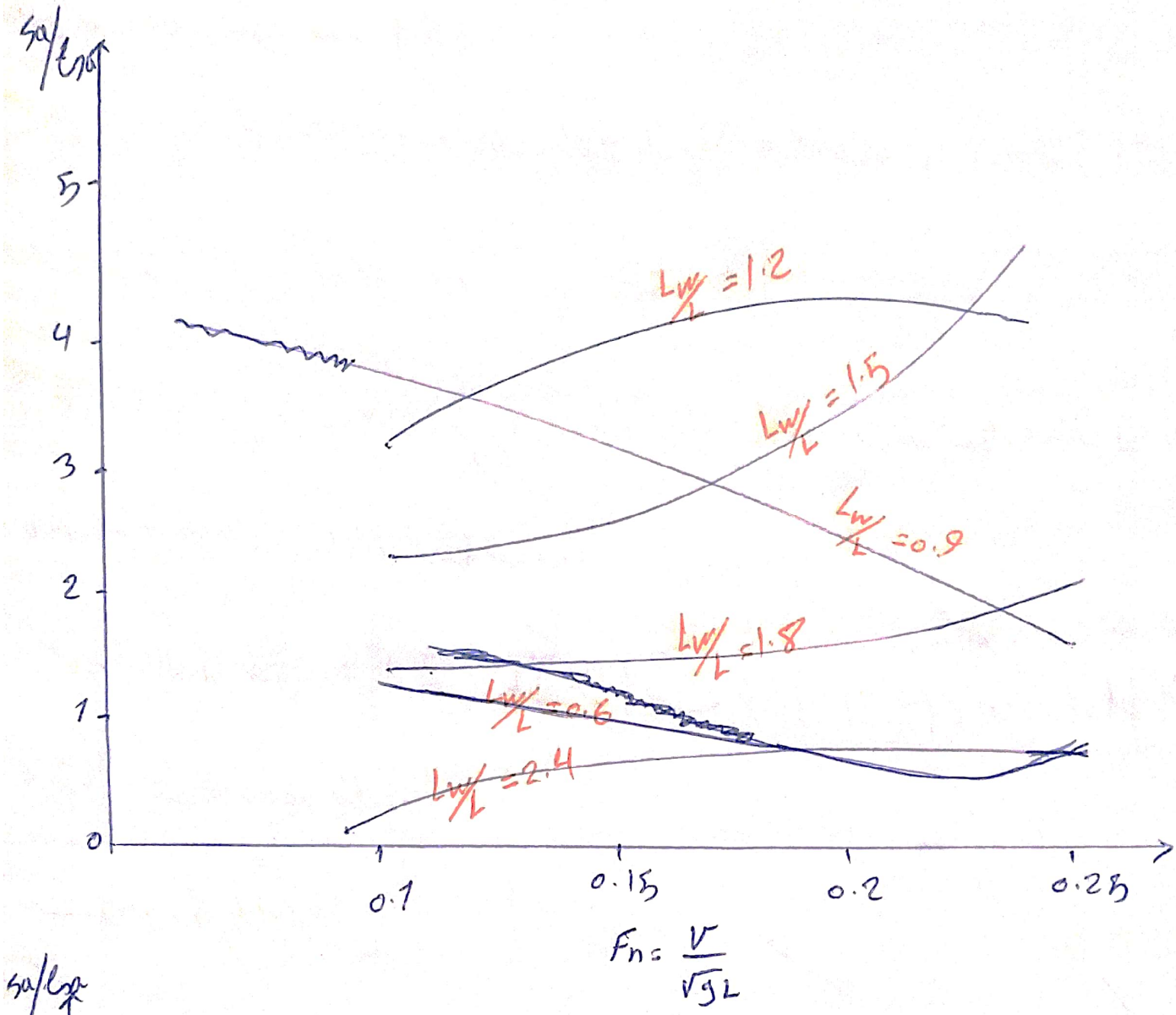
در حالتیکه طول موج کوچکتر از طول کشتی است یا طول موج خیلی بزرگتر از طول کشتی باشد، قله نمودار وجود ندارد.

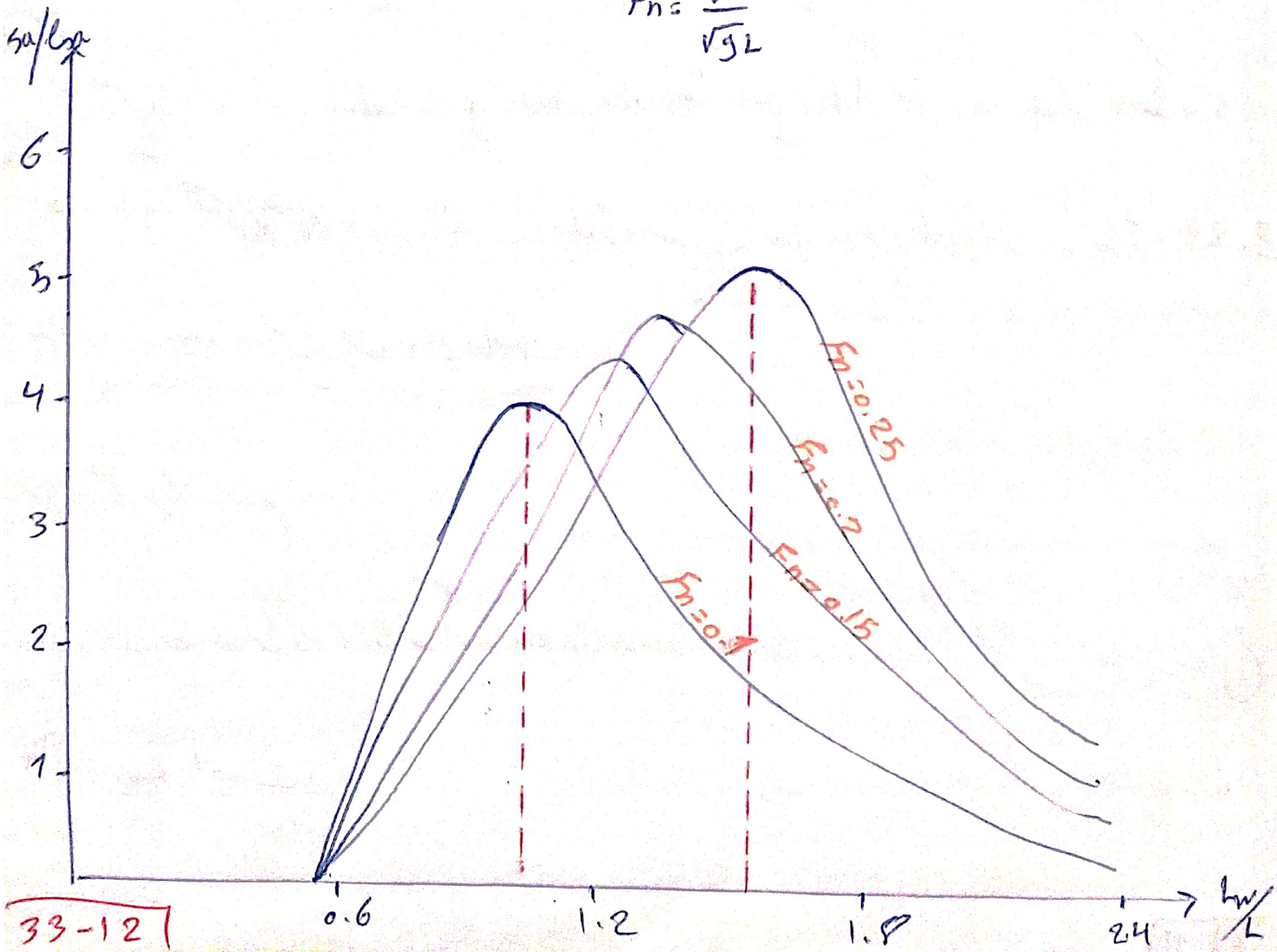
یک توصیه برای طراحی کشتی:

اگر کشتی برای یک منطقه خاص طراحی شده باشد تعیین طول کشتی باید طوری باشد که با توجه به طول موج غالب منطقه، نسبت طول موج به طول کشتی برابر 1، 1.5 و 2 نباشد و ترجیحاً در این محدوده هم نباشد.

نمودار کاربردی وسیع:

در صفحه بعد دو نمودار ارائه شده که با هم متناسب هستند و هر دو برای کشتی با ضریب بلوکی $C_B = 0.7$ است.


Sa/Lsat
5
4
3
2
1
0
Lw/L = 1.2
Lw/L = 1.5
Lw/L = 0.9
Lw/L = 1.8
Lw/L = 0.6
Lw/L = 2.4
0.1
0.15
0.2
0.25
Fn = V/√gL


Sa/Lsat
6
5
4
3
2
1
Fn = 0.25
Fn = 0.2
Fn = 0.15
Fn = 0.1
0.6
1.2
1.8
2.4
Lw/L

33-12

- در نمودار اول برای L_w/L کوچکتر از 1 : با افزایش سرعت، دامنه نسبی حرکات کاهش می‌یابد

و برای L_w/L بزرگتر از 1 : با افزایش سرعت دامنه نسبی حرکات افزایش می‌یابد

- با توجه به نمودار دومی : در طول ثابت کشتی و سرعت ثابت و طول موج‌های مختلف، حتماً

یک طول موج بحرانی وجود دارد که در آن بیشترین دامنه حرکات نسبی سینه کشتی

را داریم.

جلسه سی و چهارم

«پدیده‌های دینامیکی»

جلسه سوم

حرکت نسبی سینه در موج نامنظم

- آزمایش مدل و همچنین ثبت حرکات کشتی واقعی نشان داده است که حرکت نسبی سینه در موج نامنظم از همان قوانین آماری مانند حرکات هیو و پیچ و رول تبعیت می‌کند.

- از پدیده‌های مهم مورد بررسی در حرکات نسبی سینه، خیس شدن و بیرون زدن کف (کوبش) است.

- با مقایسه داده‌های تجربی با مقادیر تابع رایلی این نتیجه حاصل می‌شود که رفتار حرکات سینه از تابع رایلی تبعیت می‌کند.

نکته: طیف پاسخ حرکات نسبی سینه در موج نامنظم همانند طیف پاسخ هیو و پیچ و رول در موج نامنظم، از حاصلضرب طیف موج برخوردی در مقدار RAO (مربوط به آن حرکت) در همان فرکانس برخورد بدست می‌آید.

- مقدار RAO از تست مدل در موج منظم یا روش تحلیلی در موج منظم بدست می‌آید.

خود دامنه پاسخ در موج نامنظم همگی از تابع توزیع رایلی تبعیت می‌کنند لذا دامنه موثر (دامنه $1/3$)

حرکت نسبی سینه برابر است با $2\sqrt{m_{os}}\,CF$ که m_{os} مساحت زیر نمودار

طیف پاسخ برای حرکات نسبی سینه است و ضریب CF مربوط به باند باریک و

باند عریض بودن طیف پاسخ است.

نکته: طیف حرکات نسبی سینه S_s را می‌توان از ترکیب طیف موج نامنظم و طیف

حرکات هیو و پیچ در موج نامنظم بدست آورد:

$$\boxed{S_s = S_z + \frac{\pi L}{L_w} S_\theta - S_\zeta}$$

L: طول شناور

L_w: طول موج

S_s: طیف حرکات نسبی سینه

S_θ: طیف پاسخ حرکات پیچ

S_z: طیف پاسخ حرکات هیو

S_ζ: طیف موج نامنظم

- دامنه سرعت عمودی نسبی عبارتست از:

$$\boxed{(\dot{S}_a)_a = \omega_e S_a}$$

لذا بین طیف سرعت و طیف جابجایی رابطه‌ای وجود دارد و فقط با در دست داشتن طیف

جابجایی می‌توان با ضرب کردن در مقدار فرکانس به طیف سرعت رسید

به همین ترتیب بین مقدار RAO جابجایی و RAO سرعت، رابطه با توان دوم فرکانس برخورد می‌توان برقرار کرد (چون خود RAO همان توان دوم نسبت دامنه‌ها است) و نیاز به محاسبه مجدد RAO نیست:

$$\boxed{RAO\,(\text{برای سرعت}) = RAO\,(\text{برای جابجایی}) \times \omega_e^2}$$

$$\boxed{\int S_{\dot{s}}(\omega_e)\, d\omega_e = \int \omega_e^2 S_s(\omega_e)\, d\omega_e = m_{2s}}$$

- برای بدست آوردن RAO شتاب نیز می‌توان از همان RAO جابجایی استفاده کرد، با ضرب کردن در توان ۴ فرکانس برخورد. لذا نیاز به محاسبه مجدد RAO شتاب نیست:

$$\boxed{RAO\,(\text{برای شتاب}) = RAO\,(\text{برای جابجایی}) \times \omega_e^4}$$

$$\boxed{\int S_{\ddot{s}}(\omega_e)\, d\omega_e = \int \omega_e^4 S_s(\omega_e)\, d\omega_e = m_{4s}}$$

- بنابراین مما دوم طیف پاسخ = طیف سرعت

و مما چهارم طیف پاسخ = طیف شتاب

مثال: یک کشتی با طول 400 فوت و سرعت 20 نات در معرض امواج از روبرو با ارتفاع موج مشخصه 18.5 فوت قرار دارد. دامنه مشخصه حرکات بین سینه را بدست آورید؟

همچنین اطلاعات زیر از آزمایش در موج منظم نیز موجود است

$\frac{L_w}{L}$	0.5	0.75	1	1.25	1.8	3
$\left(\frac{\xi_a/L}{2\pi\xi_a/L_w}\right)^2$	0.0086	0.0477	0.2424	0.25	0.1592	0.0791

* از جدول فوق به راحتی می‌توان مقدار RAO را پیدا کرد

RAO یا جابجایی بین سینه

Ans:

ابتدا باید طیف موج را بدانیم به معلوم بود ارتفاع موج مؤثر از طیف ITTC استخراج کرد و سپس طیف را از فرکانس موج به فرکانس برخورد تبدیل کرد.

ω_w	$S_\zeta(\omega_w)$	ω_e	$S_\zeta(\omega_e)$
0.2	0	0	0
0.3	0.02	0.4	1
0.4	17.8	0.57	11
0.5	55.97	0.76	24.8
0.6	50.68	0.97	22.5
0.7	33.22	1.21	14.5
0.8	20.17	1.46	8.5
0.9	12.25	1.76	4
1	7.61	2.06	2.2

حال مقدار RAO را از جدولی که در صورت مسئله داده شده بدست می‌آوریم

$\frac{L_w}{L}$	$\left(\frac{S_a/L}{2\pi S_a/L_w}\right)^2$	L_w	ω_w	ω_e	$\left(\frac{S_a}{S_a}\right)^2$
0.5	0.0086	200	1.005	2.066	1.357
0.75	0.04077	300	0.821	1.528	3.344
1	0.2424	400	0.711	1.241	9.560
1.25	0.25	500	0.636	1.06	6.31
1.8	0.1592	720	0.53	0.824	1.937
3	0.0791	1200	0.41	0.587	0.346

توجه: در جدول فوق مقدار RAO اشتراک چندم از حاصلضرب شتاب دوم در $\left(\frac{2\pi L}{L_w}\right)^2$ بدست می‌آید.

حال حرکت نسبی و مقدار ممان کاملین را از جدول زیر بدست می‌آوریم

ω_e	$S_\zeta(\omega_e)$	~~$S_s(\omega_e)$~~	$\left(S_a/S_a\right)^2$	$S_s(\omega_e)$	ضریب سیمپسون	تابع ممان کاملین
0.4	1	~~0~~	0	0	1	0
0.6	13	~~5.2~~	0.4	5.2	4	20.8
0.8	27	~~45~~	1.7	45	2	90
1	21.5	~~109~~	5.1	109	4	436
1.2	15	~~125~~	8.3	125	2	250
1.4	10	~~60~~	6	60	4	240
1.6	5.5	~~14.3~~	2.6	14.3	2	28.6
1.8	3.5	~~6.3~~	1.8	6.3	4	25.2
2	2.5	~~4~~	1.4	4	1	4
						sum = 1095

بنابراین مساحت سطح زیر طیف پاسخ برابر است با:

$$m_{0s} = \frac{1}{3} \times \Delta\omega_e \times sum = 1/3 \times 0.2 \times 1095 = 73\ ft^2$$

و دامنه مشخصه حرکت نیز بصورت زیر بدست می‌آید

$$(S_a)_{1/3} = 2 \times \sqrt{m_{0s}} \times CF = 2 \times \sqrt{73} \times 1 = 17\ ft$$

در ابتدا فرض می‌کنیم $CF = 1$

حال برای بدست آوردن ضریب عدم‌قطعیت باید مقادیر m_2 و m_4 را نیز بدست آوریم

* مقادیر m_2 و m_4 به راحتی و با ضرب ω_e^2 و ω_e^4 در $S_s(\omega_e)$ و به صورتی که در جدول قبل برای m_0 بدست آوردیم، بدست می‌آیند که در این جا فقط مقادیر sum_2 و sum_4 را می‌آوریم:

$sum_2 = 1502.4$ و $sum_4 = 2431.9$

حال می‌توان m_2 و m_4 را به صورت زیر بدست آورد:

$$m_2 = 1/3 \times \Delta\omega_e \times sum_2 = 1/3 \times 0.2 \times 1502.4 = 100.15\ ft^2$$

$$m_4 = 1/3 \times \Delta\omega_e \times sum_4 = 1/3 \times 0.2 \times 2431.9 = 162.1\ ft^4$$

$$\Rightarrow \varepsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4} = \frac{1799.6}{11831} = 0.152$$

$$\Rightarrow CF = (1 - \varepsilon^2)^{1/2} = (1 - 0.152)^{1/2} = 0.921$$

$$\Rightarrow (S_a)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} \times CF = 2\sqrt{72.97} \times 0.921 = 15.73\ ft$$

با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول‌ها می‌توان نمودارهای مربوطه را نیز رسم کرد.

خیس عرشه (Deck wetness)

- زمانی که مقدار منفی جابجایی سینه بیشتر از فرکانس برد متمرکز سینه شناور باشد خیس عرشه اتفاق می‌افتد که توضیحات آن قبلاً گفته شده است.

- در متد لاتین دریانوردی با عنوان Green water shipping یا shipping green water از پدیده خیس عرشه یاد می‌شود.

برای احتمال خیس عرشه:

احتمال اندایش فرو رفتگی سینه به مقدار بیش از فرکانس برد موثر عبارتست از:

$$\boxed{P\{s \geq f(\ell)\} = e^{-[f(\ell)]^2/2m_{os}}}$$

که m_{os} برابر است با مساحت زیر طیف پاسخ حرکات نسبی سینه (در محل عمود سینه)

$$\boxed{m_{os} = \frac{1}{4}\left((S_a)_{1/3}\right)^2}$$

و $f(\ell)$ فرکانس برد موثر در محل عمود سینه است.

تعداد دفعات خیس عرشه

تعداد دفعات خیس عرشه در هر ساعت عبارتست از:

$$N_T = \frac{\text{احتمال خیس عرشه}}{\text{واحد پریود متوسط}} \times 3600 = \frac{P_F}{T} \times 3600$$

$$\Rightarrow \boxed{N_T = \frac{P_F}{T} \times 3600}$$

مقدار T را می‌توان برابر T_0 در نظر گرفت یا از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\boxed{T = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2m_{0s}}{2m_{0\dot{s}}}}}$$

- تعداد دفعات خیس شدن در هر ثانیه عبارتست از:

$$\boxed{N_W = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2m_{0s}}{2m_{0\dot{s}}}} \times \text{احتمال خیس شدن}}$$

مثال: احتمال خیس شدن یک نقطه برابر 0.05 (یا 5٪) است و میانگین پریود حرکت پیچ نیز 5 ثانیه است، محاسبه کنید که در یک ساعت و در فرض دریای 6 چه تعداد خیس شدن اتفاق می‌افتد؟

Ans:

$$N_T = \frac{P_F}{T} \times 3600 = \frac{0.05}{5} \times 3600 = 36 \ \frac{1}{hr}$$ (36 مرتبه بر ساعت)

مثال: برای یک کشتی با طول 400 ft و فرو رفتگی 24 ft که مساحت زیر نمودار طیف حرکت نسبی آن $m_{0s} = 73\ ft^2$ است، تعداد دفعات خیس شدن را بدست آورید؟ ($m_{2s} = 100.15$)

Ans:

$$N_W = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2m_{0s}}{2m_{0\dot{s}}}} \times e^{-[f'(d)]^2/2m_{0s}}$$

$$m_{0\dot{s}} = m_{2s} = 100.15 \ ft^2/sec^2$$

$$\Rightarrow N_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_{0s}}{m_{0\dot{s}}}} \times e^{-[f(\ell)]^2/2m_{0s}}$$

$$\Rightarrow N_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{146}{200.3136}} \times e^{-576/176} = 0.0026 \ 1/sec$$

یا به عبارتی 0.36 مرتبه در ساعت

نکته: طبق روابط گفته شده برای کاهش احتمال خزش در قسمت سینی باید مقدار فنر برد مؤثر در سینی افزایش یابد. بدین منظور کشش را در طول، انحنا دار می‌سازند که به این انحنا اصطلاحاً sheer گفته می‌شود که در واقع قسمت سینی و پاشنه کشش دارای ارتفاع بیشتر و در نتیجه فنر برد بیشتر نسبت به قسمت میانی کشش خواهند بود.

جلسه سی و پنجم

«پدیده‌ی دینامیکی»

«بخش چهارم - کوبش»

منبع این بخش: Dynamics of Marine vehicles / chapter 7

کوبش بدنه (اسلمینگ) "slamming"

برآمدن حرکات عمودی ناشی از هیو و پیچ که باعث جدایش کف بدنه از سطح موج و برخورد مجدد بدنه با سرعت زیاد به داخل آب و ایجاد فشار دینامیکی حداکثر در لبه ورودی به آب می‌شود.

- حرکات هیو و پیچ باعث جابجایی عمودی بسیار بزرگ می‌تواند باشد.
- این حرکات در شناورهای کوچک و متوسط می‌تواند باعث شتاب‌های عمودی زیادی شود.
- در سوپرتانکرها، بزرگی امواج در مقایسه با بزرگی طبیعی حرکات هیو و پیچ به قدری کوچک هستند که فقط باعث حرکات کوچک کشتی می‌شوند.
- البته پدیده کوبش در سوپرتانکرها در صورت بروز می‌تواند مخرب باشد بدلیل:

✓ دماغه بدنه جلو و تخت ✓ طول زیاد

نکته: یکی از مؤثرترین کارها برای کاهش صدمات، کاهش سرعت است هرچند که همیشه مؤثر نیست

این مدعنی در جلسه قبل توضیح داده شد که حرکات بدنی بسیار وابسته است به $\frac{L_w}{L}$

- این حرکات باعث وارد آمدن فشارهای دینامیکی زیادی به بدنه می‌شود که می‌تواند تا بیش از فشار معادل 40 متر آب باشد.

نکته: سه راه حل اصلی برای کاهش کوبش بدنه:

- کاهش سرعت
- شکل بدنه: انحنای طولی شکل بدنه - زاویه خیز کف ("deadrise")
- کاهش فشار دریایی مورد توقع از کشتی

- حداکثر فشار ناشی از کوبش، معمولاً در قسمت تحتانی و کف بدنه اتفاق می‌افتد.

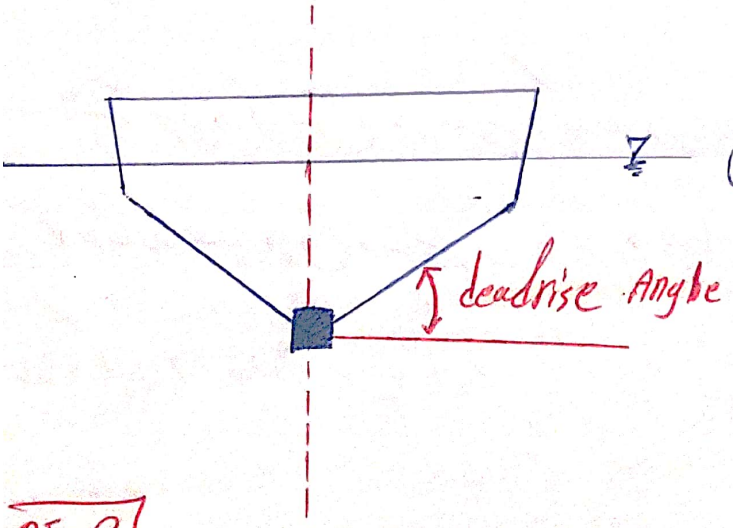
- کوبش به عنوان یک پدیده هیدرودینامیکی شناخته می‌شود که همراه با تغییرات ناگهانی شتاب است که در بدنه و پایه اتفاق می‌افتد که هر دو دارای تغییرات شتاب بالایی هستند.

- کوبش بدنه معمولاً خیلی شدیدتر از کوبش پایه است بدلیل:

- فاصله از مرکز ثقل
- میزان آب‌خور

زاویه خیز کف "deadrise"

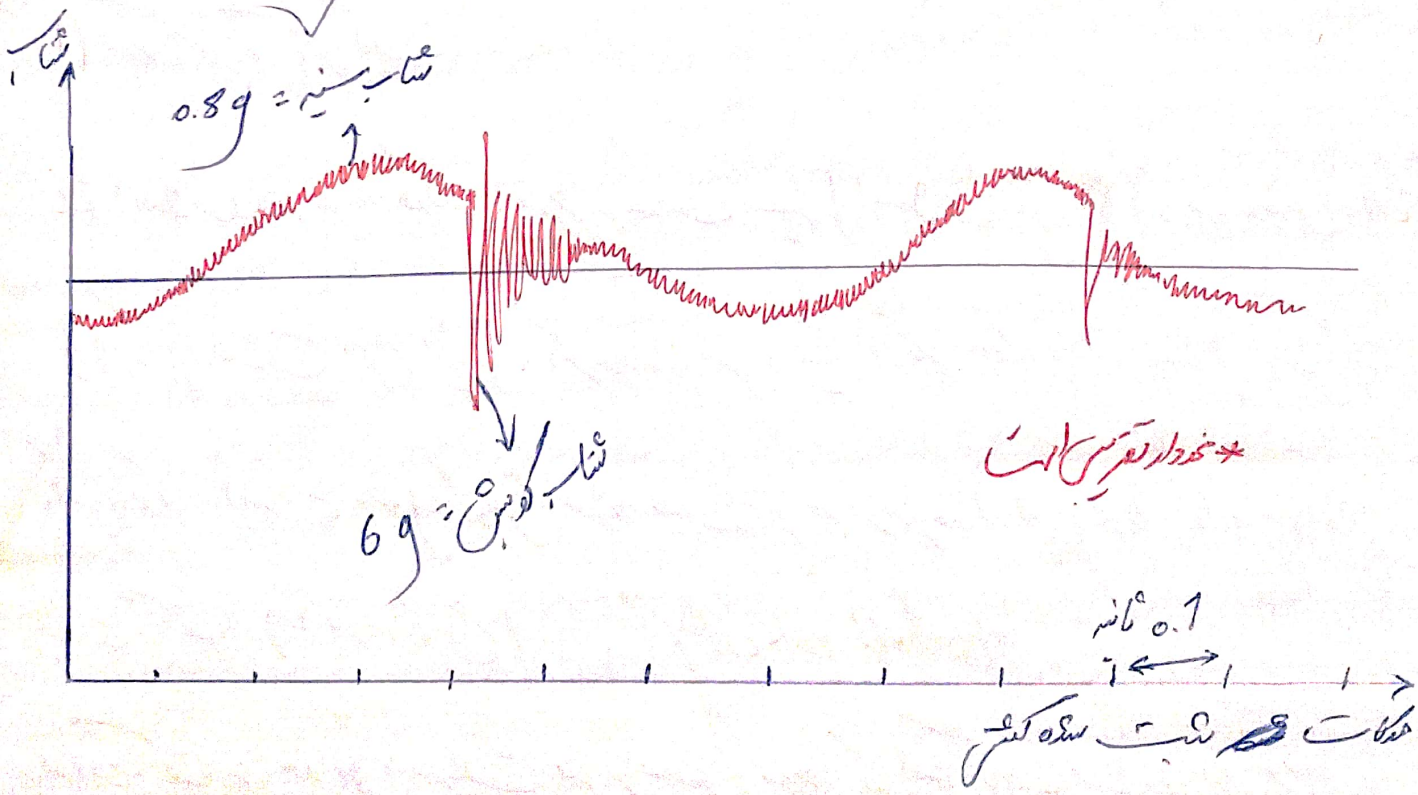
این زاویه در شکل روبرو نشان داده شده است



- معمولاً زاویه چنین کف در قسمت سینه بیشتر از قسمت کابینی و پاشنه است به دلیل آنکه شناور بتواند آب را بشکافد و نیروی مزاحمت کمتر (لازم) باشد.

- به طور خلاصه می‌توان گفت جابجایی زیاد قسمت سینه شناور باعث خارج شدن کف سینه از سطح موج می‌شود. سپس با ورود مجدد قسمت سینه به داخل آب با سرعت زیاد، اگر سرعت بیش از سرعت آستانه باشد پدیده کوبش اتفاق می‌افتد که باعث ایجاد تغییرات شدید و ناگهانی خواهد شد که این تغییرات ناگهانی باعث ایجاد فشارهای هیدرودینامیکی مضعف و شدید می‌شود و می‌تواند باعث خرابی یا شکست بدنه شود. به همین دلیل ماشین آلات حساس را در قسمت سینه نصب نمی‌کنند و معمولاً آنها را در قسمت کابینی و پاشنه کشتی قرار می‌دهند.

نکته: پدیده کوبش در بازه زمانی بسیار کوتاه اتفاق می‌افتد (مثلاً) در حدود 0.1 ثانیه



تغییرات ممنوط فشار نیز به همین گونه است که تغییرات ناگهانی در یک بازه بسیار کوتاه اتفاق می‌افتد.

فشارهای ناشی از کوبش:

✓ در یک مدت زمان بسیار کوتاه (در حد 0.01 ثانیه)

✓ اعمال فشار بر یک ناحیه بسیار محدود

- تغییرات ناگهانی شتاب و فشار باعث ناراحتی خدمه و مسافرین و بعضاً جابجایی ناخواسته بارها و حتی تغییر شکل موضعی بدنه می‌شود.

$1\ psi = 6900\ N/m^2\ (pa)$

نکته مهم: سه شرط دینامیکی باید برای مطالعه کوبش بررسی شوند:

1) میزان نزدیکی کف

2) اختلاف فاز بین حرکت موج و حرکت سینه (اختلاف فاز 180 در حد بدترین حالت است)

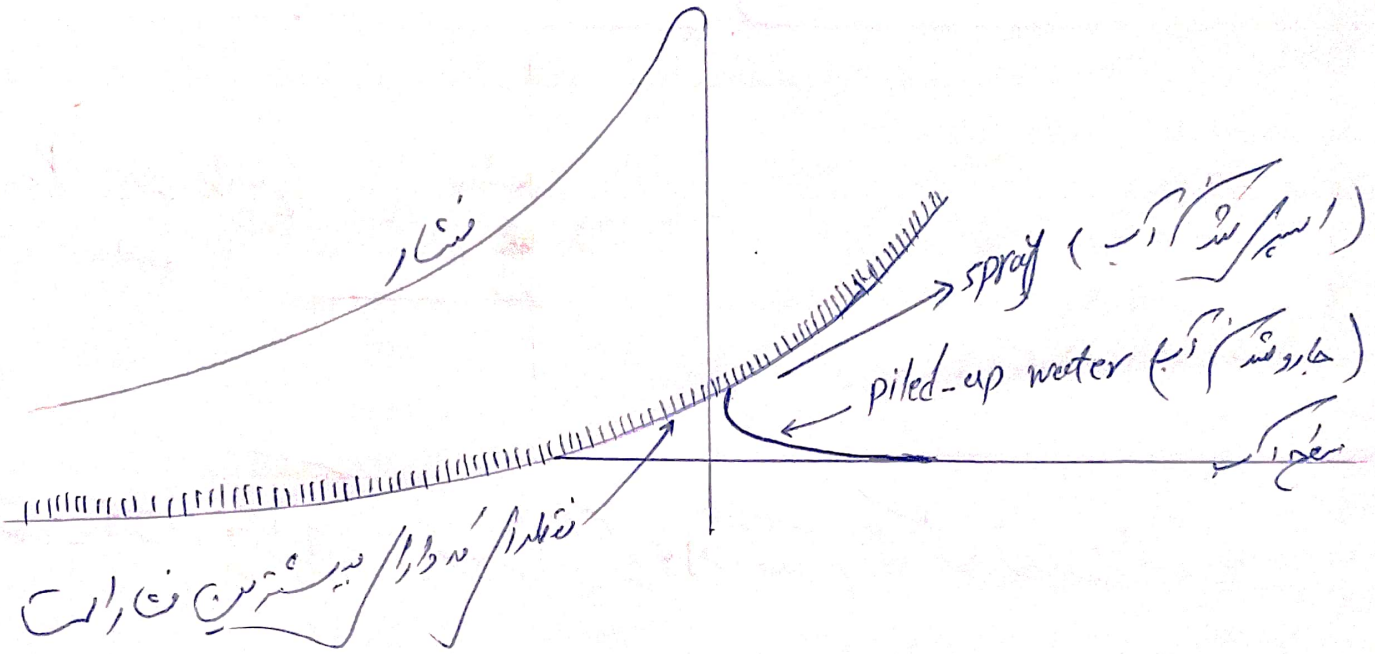
3) بزرگی سرعت نسبی سینه: اگر سرعت نسبی سینه از یک حدی بزرگتر باشد (سرعت آستانه)، کشتی ممکن است متحمل کوبش شود. بیشترین فشار در اولین لحظات وارد می‌شود.

سرعت آستانه (آستانه کوبش) "Threshold velocity"

سرعت آستانه: حداقل سرعت نسبی سینه و موج که اسلمینگ شروع می‌شود.

- سرعت آستانه برای کشتی های مختلف و حالات مختلف متفاوت است مثلاً برای یک کشتی 520 فوتی در حدود 12 ft/sec است. (12 ft/sec = 3.5 m/s)

- در شکل زیر شماتیکی از توزیع فشار بر کف کشتی نمایش داده شده است:

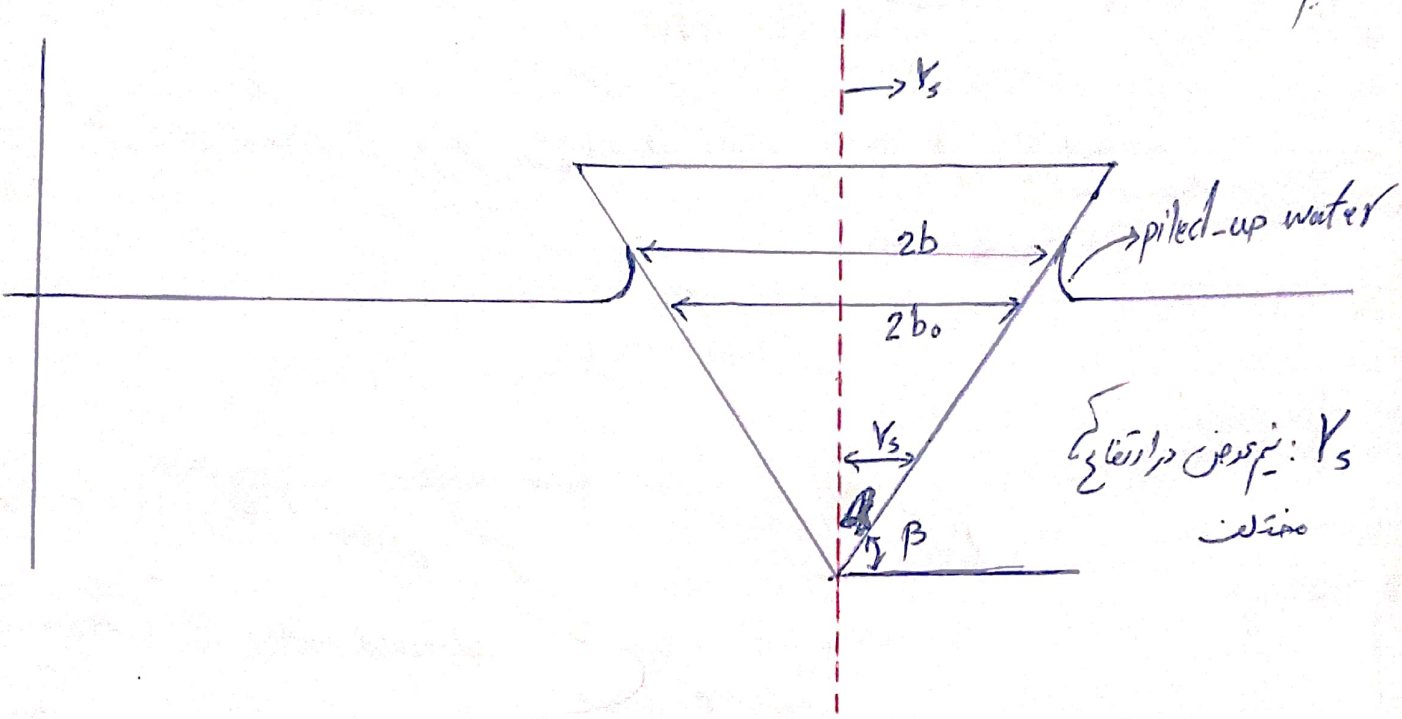


- در شکل فوق هنگامی که شناور پدیده کوبش را انجام می دهد بخشی از آب را به بالا حرکت می دهد که اصطلاحاً جارو شدن آب یا piled-up water گفته می شود.

- با افزایش سرعت کشتی موقعیت طولی مرکز فشار جهت به عقب حرکت می کند.

- رابطه ای فشار اعمال شده به کشتی با سرعت کشتی بر اساس داده های تجربی، $P = 0.086 V^2$ می باشد که شتاب با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد.

- برای بدست آوردن سرعت آستانه از شکل مقطع گوه (برای ساده سازی) استفاده می‌کنیم



V_s : نیم عرض در ارتفاع مختلف

سرعت آستانه از رابطه زیر بدست می‌آید (از آوردن آنها صرف نظر شده است):

$$\dot{s} = \sqrt{\frac{gb}{\sqrt{2\pi}} - V_s^2}$$

و به صورت بی بعد بدست آید:

$$\boxed{\frac{\dot{s}}{\sqrt{gL}} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{b}{\pi L} - \frac{V_s^2}{gL}}}$$

* ملاحظه می‌شود که سرعت آستانه وابسته به عدد فرود بدست آمده هرچند که نتایج تجربی چندان این وابستگی را تأیید نمی‌کند.

تئوری محاسبه نیروی گوه

نیروهای مختلفی که به قسمت سینه شناور وارد می‌شود از قرار زیر است:

$$F_i + F_d + (F_b - F_w - F_s) = 0$$

F_i: نیروی اینرسی $\quad F_d$: نیروی دمپینگ $\quad F_b$: نیروی بویایی $\quad F_w = gM_0$: نیروی وزن

F_s: دیگر نیروهای وارده به سینه شناور (force of the rest of the hull on the wedge)

از نیروهای دمپینگ و بویایی و وزن صرف‌نظر می‌شود (نیروی دمپینگ به دلیل کوچکی و نیروی وزن و نیروی بویایی نیز با همدیگر ساده می‌شوند) بنابراین داریم:

$$\boxed{F_i = F_s}$$

- F_i از تغییرات مومنتم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{مومنتم} = (\underbrace{M_0}_{\text{جرم گوه}} + \underbrace{a_z}_{\text{جرم اضافی گوه}})\,\dot{z} \rightarrow \text{سرعت}$$

$$\Rightarrow \boxed{F_i = \frac{d}{dt}(\text{مومنتم}) = (M_0 + a_z)\ddot{z} + \dot{a}_z \dot{z}}$$

بنابراین با جایگذاری در رابطه $F_i = F_s$ خواهیم داشت:

$$\boxed{(M_0 + a_z)\ddot{z} + \dot{a}_z \dot{z} = F_s}$$

- با توجه به رابطه‌ی صفحه قبل مقدار جرم افزوده و مشتق جرم افزوده برای ما بسیار مهم است.

$$\rightarrow F_s - M_0\ddot{z} = a_z\ddot{z} + \dot{a}_z\dot{z} \longrightarrow P = F_s - M_0\ddot{z} = a_z\ddot{z} + \dot{a}_z\dot{z}$$

$$\dot{a}_z = \frac{da_z}{dz} \times \frac{dz}{dt} = \frac{da_z}{dz} \times \dot{z}$$

$$\Longrightarrow \boxed{(M_0 + a_z)\ddot{z} + \frac{da_z}{dz}(\dot{z})^2 = F_s}$$

این معادله بیان می‌کند که جرم می‌تواند به عنوان نیروی میرایی متناسب با توان دو سرعت باشد و ضریب میرایی برابر با تغییرات جرم افزوده است.

رابطه زیر نیز اثبات می‌شود که از آوردن اثبات هدف نظر شده است:

$$\boxed{P = \frac{V_0\,\dot{a}_z}{\left(1 + \left(a_z/M_0\right)\right)^2}}$$

- از رابطه‌ی فوق می‌توان فهمید که اگر جرم جسم در مقایسه با جرم افزوده بسیار بزرگ باشد مقدار ضربه بسیار کوچک و برابر خواهد بود با:

$$M_0 \rightarrow \infty \Longrightarrow P = V_0\,\dot{a}_z$$

همچنین از این رابطه ساده شده می‌توان فهمید که شناب، اثری بر روی ضربه نخواهد داشت. (این حقیقت در مورد کشتی‌ها نیز صادق بوده است)

برای پیدا کردن جذب یا پارامتر a_z و a_z نقش مهمی بازی می‌کنند.

- جمع افزوده گره از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\boxed{a_z = \frac{1}{8}\pi^3 \rho z^2 \cot g^2 \beta}$$

- رابطه دیگری برای محاسبه فشار ناشی از گوشش ارائه شده است که به صورت زیر است:

$$P = \frac{1}{2}\rho V_0^2 \left[\frac{\pi}{\beta\sqrt{1-(x/b)^2}} - \frac{x^2 b^2}{1-(x^2/b^2)} + \frac{2\dot{z}}{V^2}\left(\sqrt{b^2-x^2}\right) \right]$$

P: فشار (برحسب psf) x: فاصله افقی از مقطع میانی

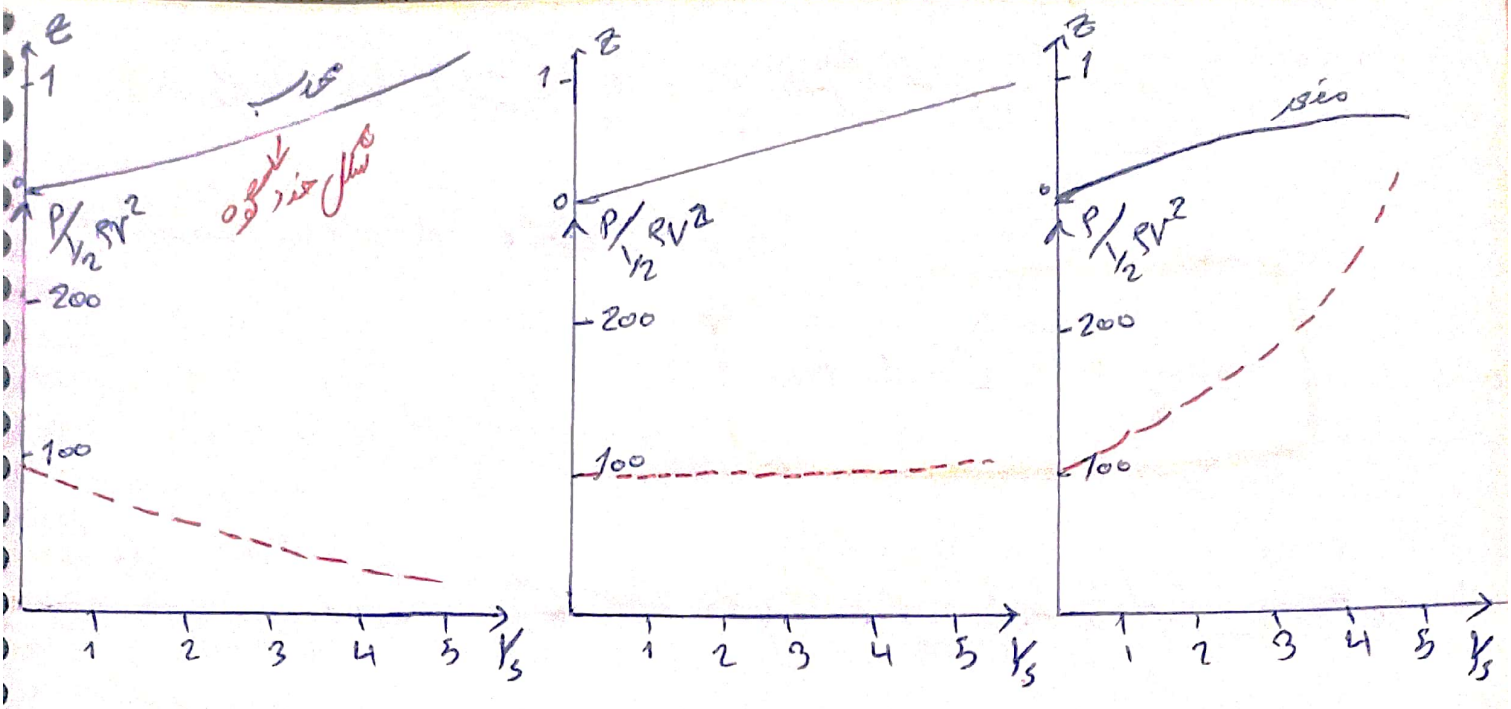
$V_0 = \dot{z}_x$: سرعت عمودی بین در فاصله x از مقطع میانی

$\dot{z}_x$: شتاب بین در فاصله x از مقطع میانی

β: زاویه خیز کف

b: برحسب z به صورت روبه رو بدست می‌آید: $b = \frac{\pi z}{2\beta}$

نکته: مقعر یا محدب بودن شکل مقطع عرضی بر مقدار فشار تأثیر دارد این تأثیر در شکل‌های صفحه بعد نشان داده شده است.



- در نمودار بالا قسمت منحنی شکل مقطع رسم شده و در قسمت پایین تر تغییر فشار آن رسم شده است. در شکل سمت چپ که رایج ترین حالت برای کشتی ها است حداکثر فشار با فرو رفتن در آب کاهش می یابد.

- در کشتی واقعی فشار حداکثر در ناحیه گیل اتفاق می افتد و این فشار حداکثر در اولین تماس با آب عبارت است از:

$$\frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho V^2} = 1 + \frac{r^2}{4\beta^2}$$

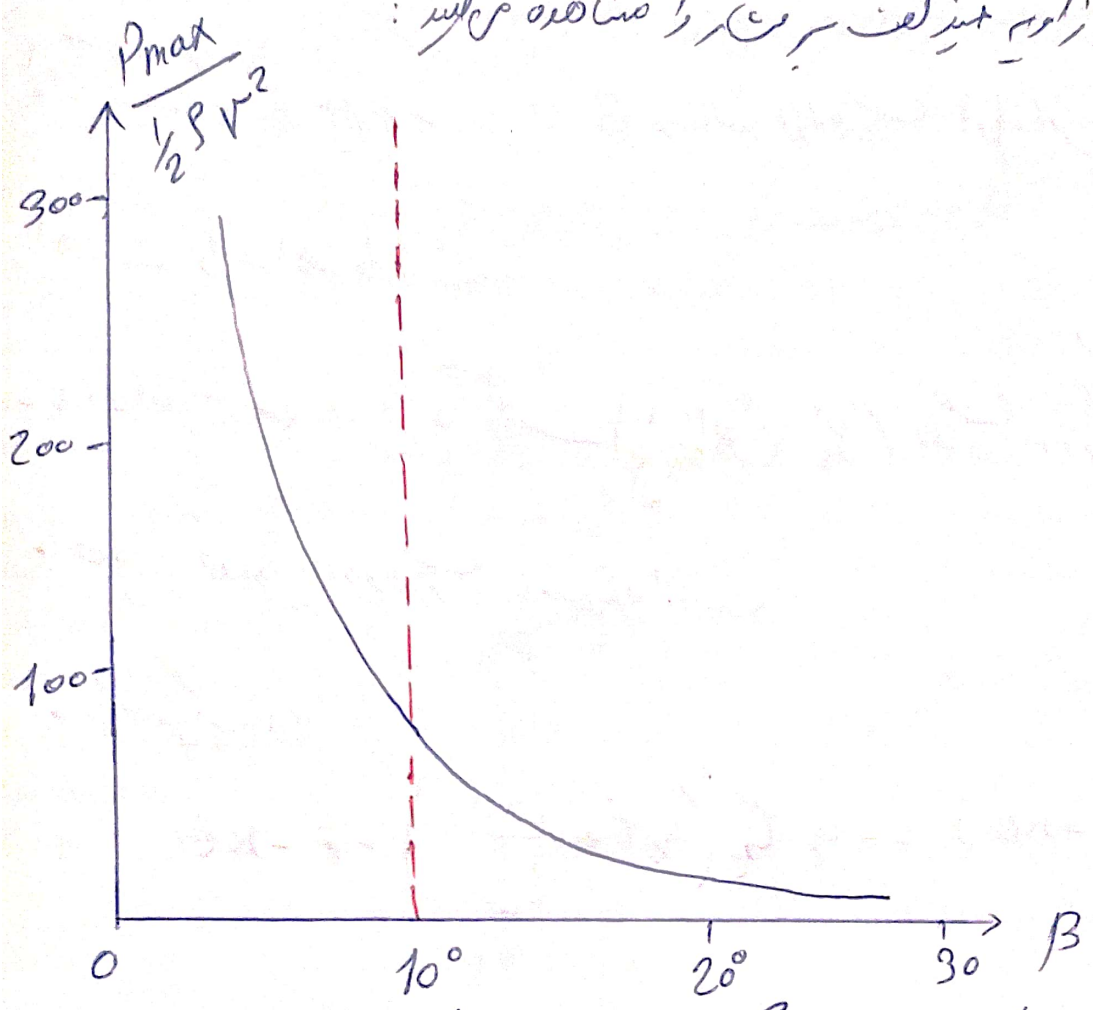
این مدل برای خیز کف صفر درجه صادق نیست و مقدار می خطایی می دهد لذا از رابطه زیر برای صفحه تخت استفاده می شود:

$$\frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{2C_0}{V}$$

C_0: سرعت صوت در آب است و برابر است با $1500\ m/s$

البته این رابطه برای تعیین مقادیر حدی است وگرنه فشار هیدرودینامیکی وابسته به سرعت نسبی و همچنین زاویه خمیدگی است.

- در شکل زیر تأثیر زاویه خمیدگی بر فشار را مشاهده می‌کنید:



این شکل نشان می‌دهد که هرچه زاویه خمیدگی (β) کوچکتر باشد، فشار حداکثر به صورت تصاعدی بیشتر می‌شود بخصوص برای زوایای کمتر از 10 درجه.

- برای فاصله‌ی x از وسط کشتی و لحاظ کردن سرعت پی‌کشتی و موج داریم:

$$P = P_0 \left[\frac{2}{\beta\sqrt{1-(Y_s/2b)^2}} + \frac{2}{\delta}\sqrt{\left(1-\frac{Y_s}{2b}\right)^2} - \frac{(Y_s/2b)^2}{1-(Y_s/2b)^2} \right]$$

$$p_0 = \frac{1}{2}\rho(\dot{z}_x)^2 \quad , \quad \delta = \frac{(\dot{z}_x)^2}{2b\ddot{z}_x}$$

- برای محل قبل V_s برابر صفر بوده و عبارت آخر صفر می‌شود.

- از آنجا که δ خیلی بزرگتر از β می‌باشد لذا عبارت اول این فرمول بیشترین اهمیت را خواهد داشت.

- با افزایش عمق رفتن در آب (افزایش V_s) عبارت دوم کوچکتر می‌شود و لذا فشار حاصل تفریق دو عبارت باقیمانده است.

و داشتیم که:

$$\dot{z}_x = \dot{\zeta} - (\dot{z} + x\dot{\theta}) = -\omega_e \zeta_a \left(\omega_e t + \frac{2\pi x}{L_w}\right) - \dot{z} - x\dot{\theta}$$

$$\ddot{z}_x = \ddot{\zeta} - (\ddot{z} + x\ddot{\theta}) = \omega_e^2 \zeta_a \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi x}{L_w}\right) - \ddot{z} - x\ddot{\theta}$$

نکته: سرعت بیشتر و به مقدار زیادی فشار رکوش را تحت تأثیر قرار می‌دهد بدلیل

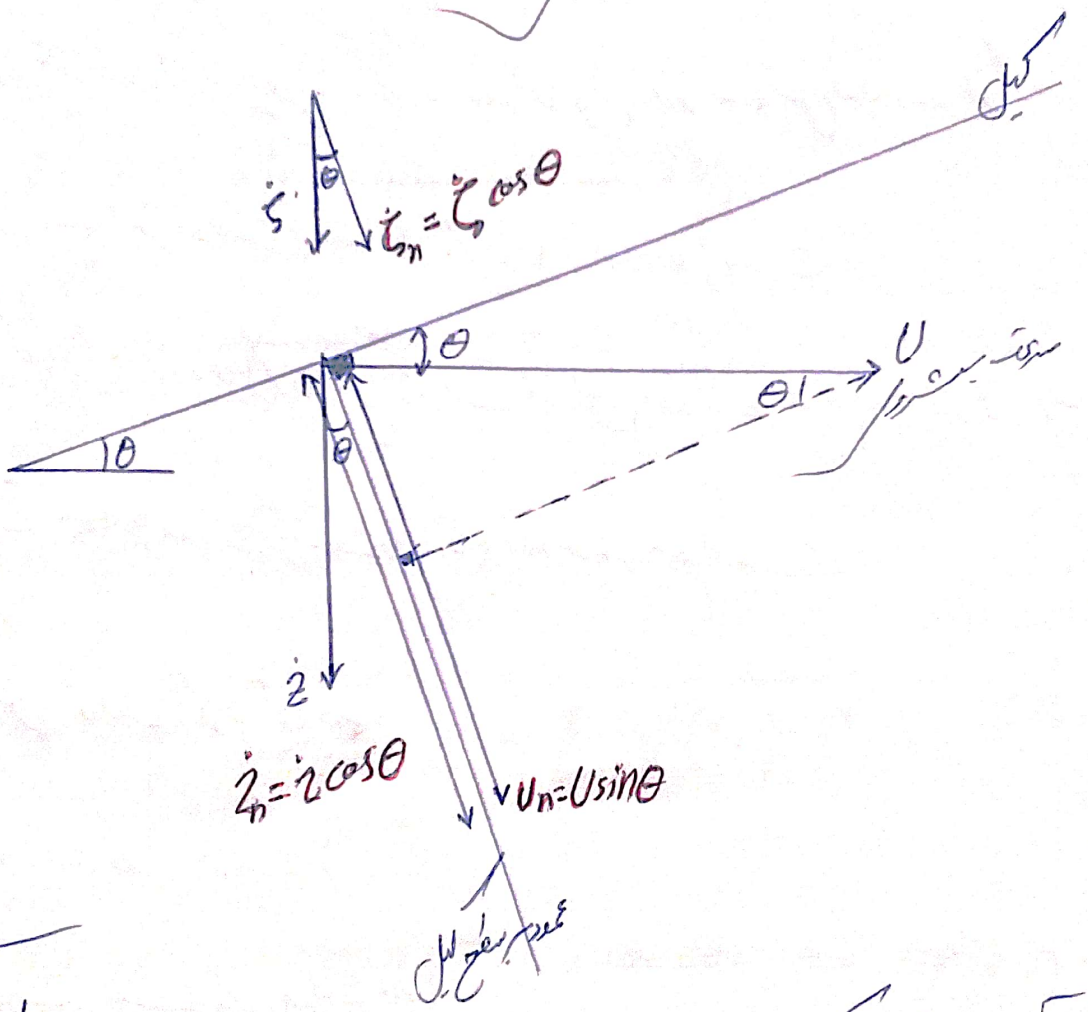
✓ تغییر حرکت نسبی سیال و موج با توجه به تغییر فرکانس برخورد

✓ فشار رکوش وابسته به مؤلفه نرمال (عمود بر سطح) سرعت نسبی است و بنابراین سرعت دو بر جلو می‌تواند تأثیر مهمی داشته باشد.

- در لحظه‌ای که زاویه پیچ صفر است، سرعت کشش هیچ مؤلفه سرعتی عمود بر کیل ندارد لذا در زاویه پیچ صفر کوبش اتفاق می‌افتد.

برای محاسبه اثر سرعت پیشروی بر سرعت نسبی به صورت زیر عمل می‌کنیم:

در شکل زیر کیل شناور و سرعت پیشروی (U) نمایش داده شده است



علاوه بر مؤلفه‌ای عمودی که در شکل فوق نشان داده شده است، اثر زاویه پیچ را بر آن مقطعی که در فاصله x از محور عمودی قرار دارد به صورت $x\dot{\theta}$ بدست می‌آید و در مجموع مؤلفه‌ای عمود بر کیل (محور y)

عمودی سرعت به صورت روبرو بدست می‌آید:

$$V_n = U_n + x\dot{\theta} + \dot{z}_n - \dot{\zeta}_n$$

که با قرار دادن مقادیر موجود در شکل خواهیم داشت:

$$V_n = U\sin\theta + (\dot{z} - \dot{\zeta})\cos\theta + x\dot{\theta}$$

برای زوایای کوچک $\Longrightarrow$ $\boxed{V_n \simeq U\theta + x\dot{\theta} + \dot{z} - \dot{\zeta}}$

با توجه به رابطه بالا فوق دو حالت قابل بررسی است:

✓ اگر کوبش در زاویه پیچ نزدیک صفر اتفاق افتد ← یعنی سرعت عمودی سینه جدا کننده است ← اثر سرعت پیشروی قابل صرفنظر است

✓ اگر کوبش در زوایای پیچ بزرگ اتفاق افتد ← یعنی سرعت عمودی سینه جداکننده است ← اثر سرعت پیشروی قابل ملاحظه و مهم است

- شدیدترین حالت کوبش:

✓ زاویه خیز کف صفر باشد

✓ سرعت پیشروی حداکثر باشد

- تغییرات فشار در مکان‌های مختلف از طول بدنه و در زمان‌های مختلف اتفاق می‌افتد.

- زاویه خیز کف اثر بسیار قابل ملاحظه‌ای بر فشار ضربه دارد مثلاً اگر زاویه از صفر به 20 درجه افزایش یابد، فشار ضربه با حداکثر، به میزان 50 درصد کاهش می‌یابد.

مثال: بر روی یک شناور با مشخصات زیر حداکثر فشار ضربه را محاسبه کنید؟

$L = 400\ ft$, $\beta = 10^\circ$, $B = 65\ ft$, $T = 0.5\ ft$, $\dot{z} = 40\ ft/sec$

$\beta = 0.175$, $Y_s = 10\ ft$, $2b = 30\ ft$

Ans:

$$p = p_0 \left[\frac{2}{\beta\sqrt{1-(Y_s/2b)^2}} + \frac{2}{\delta}\sqrt{\left(1-\frac{Y_s}{2b}\right)^2} - \frac{(Y_s/2b)^2}{1-(Y_s/2b)^2} \right]$$

$$p_0 = \frac{1}{2}\rho(\dot{z}_x)^2 = \frac{1}{2}\times 2\times 40^2 = 1600\ lb/ft^2$$

$$\delta = \frac{(\dot{z}_x)^2}{2b\ddot{z}_x} = \frac{40}{30\times 64.4} = 0.02\ sec/ft$$

$$\ddot{z}_x = 2g = 64.4\ ft/sec^2$$

$$\Rightarrow p = 1600\left[\frac{2}{0.175\sqrt{1-(10/30)^2}} + \frac{2}{0.02}\sqrt{\left(1-\frac{10}{30}\right)^2} - \frac{(10/30)^2}{1-(10/30)^2}\right]$$

$$\Rightarrow p = 1600\,(12.12 + 66.67 - 0.375) = 125456\ psf\ (\text{or } 871\ psi)$$

احتمال بروز پدیده کوبش

دانستیم که احتمال پیدایش کوبش از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$prob\{\text{forefoot emergence}\} = e^{-(T^2/2m_{0s})}$$

احتمال افزایش سرعت نسبی نسبت به بیش از سرعت آستانه:

$$prob\{\dot{s}_a \geq V_0\} = e^{-(V_0^2/2m_{0\dot{s}})}$$

حاصلضرب این دو احتمال برابر است با احتمال وقوع کوبش:

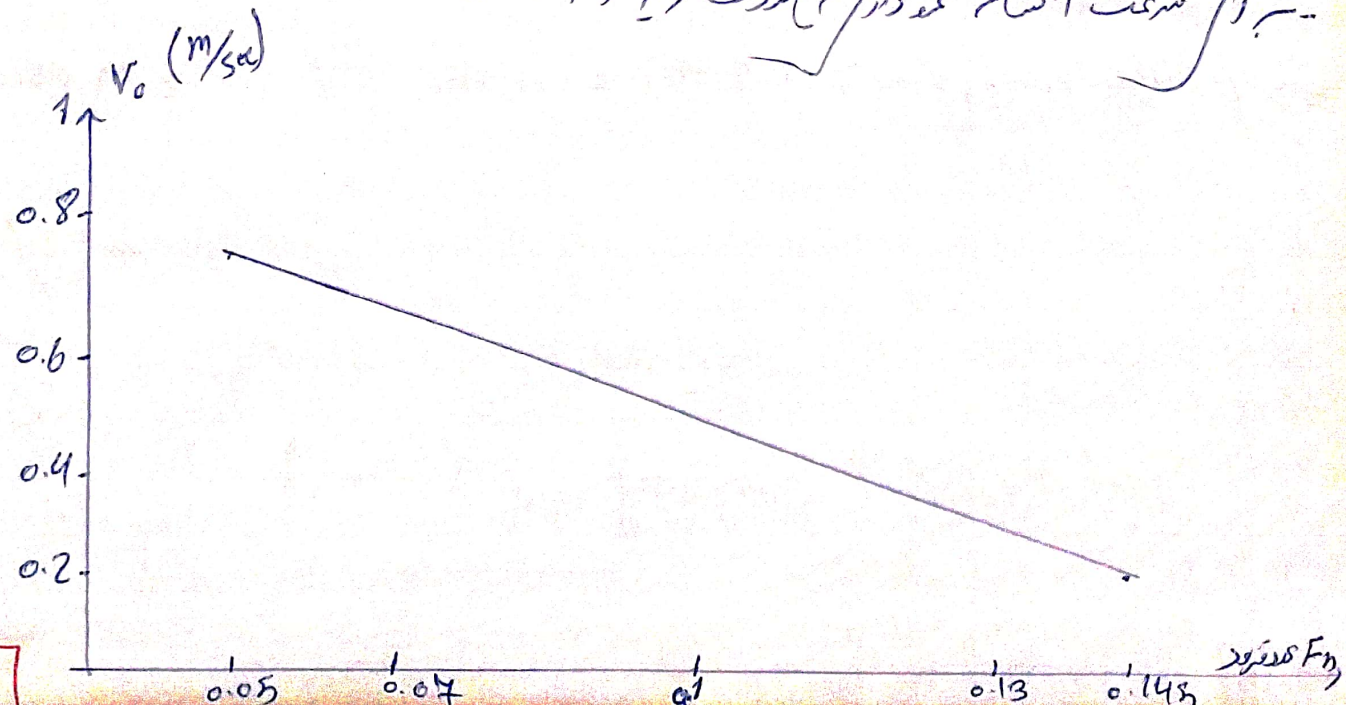
$$\boxed{prob\{slam\} = e^{-(T^2/2m_{0s} + V_0^2/2m_{2s})}}$$

تعداد دفعات کوبش در ثانیه (عدد کوچکتر از یک):

$$N_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_{2s}}{m_{0s}}} \times prob\{slam\}$$

پس از بدست آوردن تعداد دفعات، آن را با معیارهای در پاراگرافی که در درس مهندسی اقیانوس به آن اشاره شده مقایسه می‌کنیم.

برای سرعت آستانه نمودار به صورت زیر ارائه شده است



مثال: یک کشتی دارای مشخصات زیر است

$L = 550\ ft$, T = draft at station 2 $= 17.1\ ft$

V = ship speed $= 10$ knots , $2m_{0s} = 605\ ft^2$, $2m_{0\dot{s}} = 305\ ft^2/sec$

برای وضعیت دریایی (sea state) 7 و سرعت باد 41 knots و ارتفاع موج مشخصه 35 فوت، تعداد دفعات اسلمینگ در 30 دقیقه را محاسبه کنید.

Ans:

برای کشتی 520 فوتی، سرعت آستانه برابر بود با $12\ ft/sec$. حال با استفاده از قانون ضرور برای کشتی 550 فوتی، مقدار V_0 را به صورت زیر بدست می‌آورید:

$$V_0 = 12\sqrt{\lambda} = 12\sqrt{\frac{550}{520}} = 12.6\ ft/sec$$

$$N_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{152.5}{302.5}}\, e^{-\left[(17.1)^2/605 + (12.6)^2/305\right]} = 0.041\ sec^{-1}$$

$0.041 \times 60 \times 30 = 75$ → تعداد دفعات کوبش در 30 دقیقه

احتمال فاصله زمانی بین ضربات کوبش

احتمال اینکه فاصله زمانی بین ضربات کوبش از زمان t_0 بیشتر باشد عبارتست از:

$$p\{\text{time interval between successive impacts} > t_0\} = e^{-N_s(t^* - t_0)}$$

که N_s تعداد دفعات پدیده کوبش در واحد زمان (ثانیه) است و t^* پریود طبیعی حرکت پیچ است.

معیارهای طراحی در کوبش

- برای کشتی‌های قدیمی‌تر معیار 1 یا 2 مرتبه اسلمینگ در هر 100 نوسان حرکت پیچ قابل قبول بود اما در کشتی‌های مدرن امروزی 3 یا حتی 4 مرتبه اسلمینگ نیز قابل قبول است.
- همچنین حداکثر سرعت نسبی در 0.1 Lpp از پیشنهاد، اگر 18 ft/sec (5.5 m/s) باشد قابل قبول است در صورتی که تعداد اسلمینگ 2 یا 3 مرتبه باشد.
- یک معیار دیگر برای حد قابل قبول برای ضربات کوبش، تنش whipping در قسمت میانی در محل دک اصلی می‌باشد. به عنوان مثال برای یک کشتی 500 فوتی، این تنش می‌تواند 850 psi یا 60 kg/cm² باشد.
- یک معیار دیگر می‌تواند شتاب مسنج به اندازه 0.5 m/s² باشد.
- معیار دیگر می‌تواند فشار وارد بر گلف به اندازه 15 psi یا (1 kg/cm²) باشد.

جلسه سی و نهم

« پدیده‌ی دینامیکی »

« بحث پنجم: اثرات رول بر پایداری استاتیکی در موج - دریازدگی »

منابع این بحث:

✓ Maritime Engineering Reference Book / chapter 7 / pp. 509-519

✓ principles of Naval Architecture / pp: 142

✓ Dynamics of marine vehicles / chapter 7 / pp: 162

اثرات حرکت رول ("Rolling Effects")

- فرکانس پاسخ رول تقریباً همان فرکانس RAO خواهد شد در واقع یک نمودار پاسخ با یک نمودار RAO تقریباً در یک ω اتفاق خواهد افتاد. اما در حرکات دیگر لزوماً اینگونه نخواهد شد مثلاً در حرکت جابجایی عمودی، فرکانس پاسخ تقریباً با فرکانس موج یکسان خواهد شد.

- لذا خصوصیات اثرات حرکت رول با حرکت عمودی تا حدودی متفاوت است.

- در تعیین پاسخ حرکت رول نمودار RAO نقش اصلی را دارد ولی در تعیین پاسخ حرکت عمودی، طیف موج نقش اصلی را دارد.

- قله نمودار پاسخ حرکات عمودی در موج از بستر در $0.5\ sec^{-1} \approx \omega_e$ اتفاق می‌افتد.

- قله نمودار پاسخ حرکات عمودی در موج از پاشنه در $0.3\ sec^{-1} \approx \omega_e$ اتفاق می‌افتد.

نکته: تخمین دامنه حرکت رول به روش تحلیلی چندان مطابقی با نتایج تجربی ندارد که علت آن را می‌توان عدم دقت کافی در تخمین ضریب میرایی رول به روش تحلیلی دانست. چون در روش تحلیلی، با فرض خطی بودن پتانسیل روابط را بدست می‌آوردیم و می‌دانیم که لزجت در میرایی حرکت رول نقش محوری دارد که این عامل با فرض خطی بودن پتانسیل از روابط حذف می‌شود.

نکته: موقعیت قله نمودار پاسخ حرکت رول، هم در موج از پشت و هم در موج از پاشنه در فرکانس $\omega_e \simeq 0.5\ sec^{-1}$ اتفاق می‌افتد. این فرکانس برابر فرکانس قله نمودار پاسخ حرکت عمودی در حالت موج از پشت است.

فرکانس $\omega_e \simeq 0.5\ sec^{-1}$ معادل پریود $T_e = 12.6\ sec$ می‌شود که برای پریود حرکت رول منطقی است.

پایداری استاتیکی در امواج

بحث مربوط به پایداری در درس هیدرواستاتیک توضیح داده شد در اینجا به ذکر چند نکته می‌پردازیم

- در حالت Hogging حداقل پایداری را داریم.
- در حالت sagging حداکثر پایداری را داریم.

در حالت hogging :

- کاهش قابل ملاحظه فرم برد در قسمت میانی و حتی انگلیزفتگی عرشه
- افزایش فرم برد در قسمت بینه و پاشنه
- جابجایی عرضی و عمودی مرکز بویانی ناشی از انگلیزفتگی قسمت میانی در زوایای هیل بزرگتر = کاهش $\overline{GZ}$
- این جابجایی مرکز بویانی و کاهش $\overline{GZ}$ در کشتی‌های با بلبک یا C_B کوچک که برای سرعت‌های بالا طراحی می‌شوند شدیدتر است
- حداکثر کاهش مقدار $\overline{GZ}$ در حالت hog در طول موجی برابر طول کشتی اتفاق نمی‌افتد بلکه در طول موج بین $0.75L_s$ تا $0.9L_s$ اتفاق می‌افتد (L_s طول کشتی است)

نکته: در بررسی حالت hog و sag با تغییر طول موج مقدار ارتفاع موج نیز تغییر می‌یابد. عدد تیزی موج (نسبت ارتفاع موج به طول موج) در حدود 0.05 خواهد بود. برای مقادیر دقیق‌تر می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\frac{H_w}{L_w} = \frac{1}{10 + 0.05 L_w}$$

تیزی موج جزرانی ← $\frac{H_w}{L_w} = \frac{1}{7}$

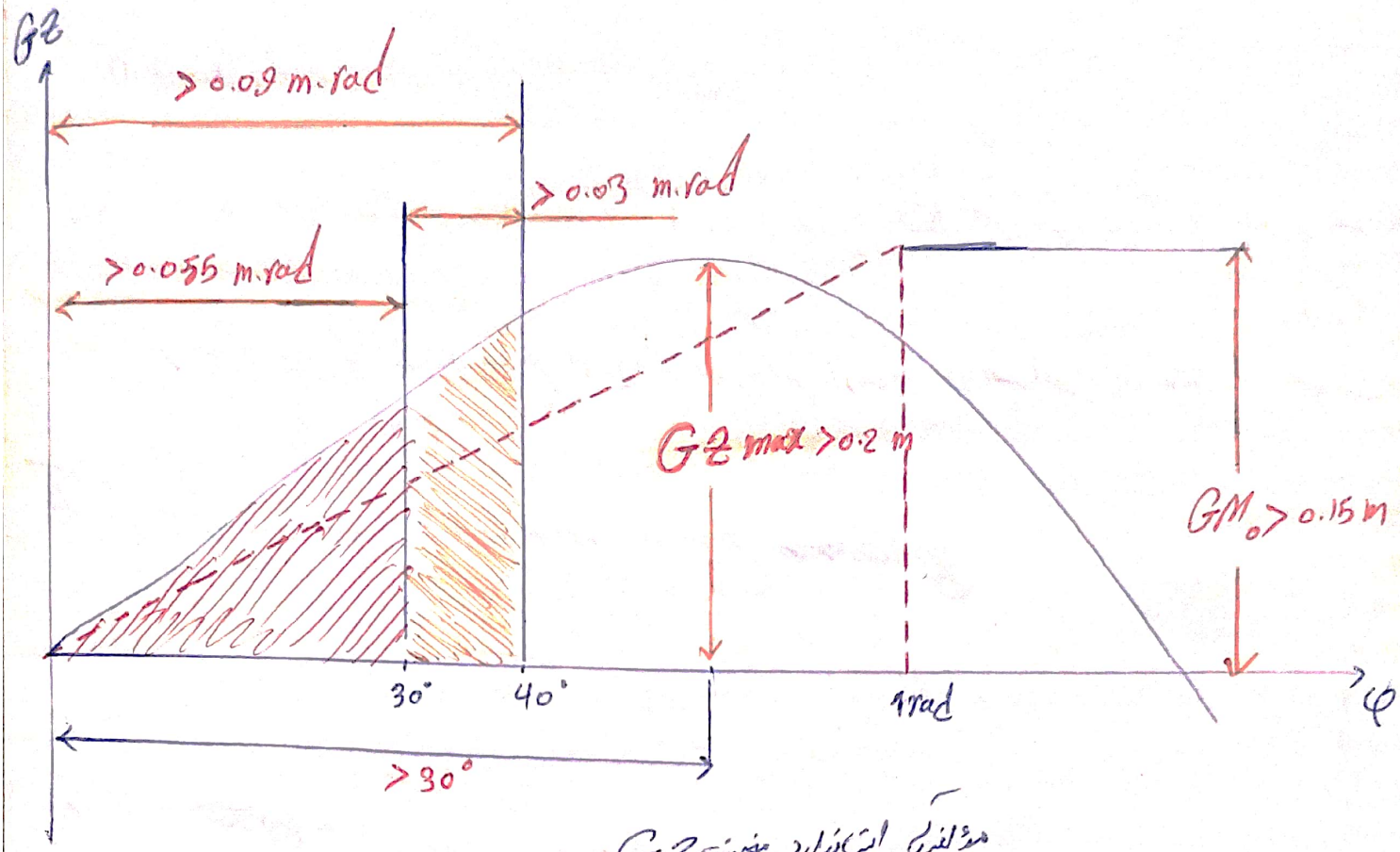
نکته: سرعت شناور نیز بر پایداری و مقدار GZ مؤثر است! در حالت hog با افزایش سرعت، پایداری افزایش می‌یابد ولی در حالت sag با افزایش سرعت پایداری کاهش می‌یابد.

نکته: مسائل پایداری از نظر قوانین موسسات استاندارد، بسیار مهم است ولی تحلیل پایداری در موج طولی، در طول موج‌ها مختلف و سرعت‌های مختلف بسیار مشکل است. لذا IMO اقدام به ارائه فرمولی برای ضریب C نموده است که با اعمال آن روی حداقل نیازمندی‌های منحنی GZ (در حالت کلی) دیگر نیازی به تحلیل مجدد پایداری نمی‌باشد.

* کلیه مقادیر استاندارد منحنی GZ بر مقدار C تقسیم می‌شود (C کوچکتر از یک است)

در واقع با تقسیم مقادیر بر C که یک عدد کوچکتر از یک است، مقادیر حداقلی که برای پایداری باید تأمین شود افزایش می‌یابد. مقادیر ابتدای حداقل‌های پایداری در جدول زیر آمده است و مقادیر پس از اعمال ضریب C در صفحه بعد آمده است.

No	criterion ≥	Required	Dimension
1a	e_{30}	0.009/C	metre . rad
1b	e_{40}	0.016/C	"
2	e_{30-40}	0.006/C	"
3	GZ at $\geq 30°$	0.033/C	metre
4	GZ_{max}	0.042/C	metre
5	$e_{\theta Z\ total}$	0.028/C	metre . rad



منحنی استاندارد منحنی GZ

- در نمودار فوق توجه کنید که مساحت زیر نمودار GZ تا زاویه 30° ، قبل از اعمال ضریب C برابر 0.009 m.rad (از جدول صفحه قبل) بوده و در نمودار فوق و پس از اعمال ضریب C برابر است با 0.055 m.rad . که نشان می‌دهد که باید پایداری شناور بیشتر شود نسبت به حالت قبل. (یعنی باید پایداری بیشتر تأمین شود تا مقدار مساحت زیر منحنی استاندارد باشد)

- IMO برای محاسبه ضریب C رابطه زیر را ارائه کرده است:

$$C = \frac{T \cdot D'}{B^2} \cdot \sqrt{\frac{T}{KG}} \cdot \left(\frac{C_B}{C_W}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{100}{L_{PP}}}$$

T: آبخور B: عرض قالبی کشتی KG: ارتفاع مرکز ثقل از کیل C_B: ضریب بلوکی C_W: ضریب صفحه آبخور

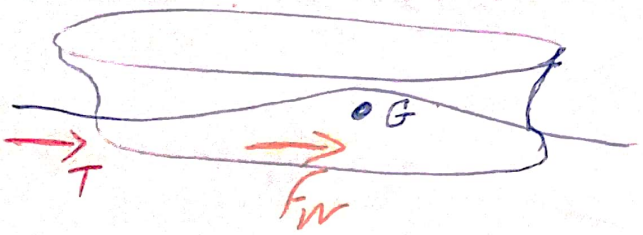
D: مقدار فرم برد با در نظر گرفتن hathe

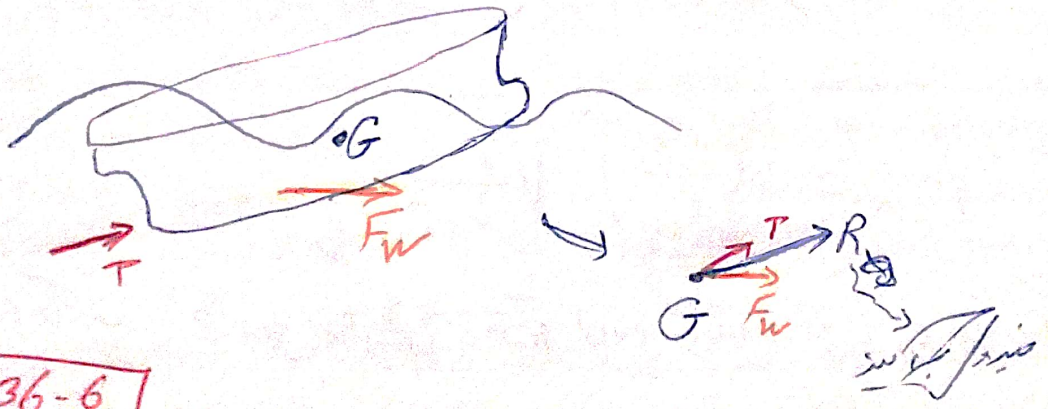
دیاگرام ها ارائه شده برای کشتی ها با طول بزرگتر از ۱۰۰ متر و RG بزرگتر از T (که جفت) است.

نکته: از دیدگاه پایداری همواره موج از پاشنه خطرناکتر از موج از سینه است. بدلیل هم جهت شدن نیروی تراست و نیروی حاصل از موج

در حالت موج از پاشنه، نیرو و ممان که پیچ شدیدی به کشتی اعمال می‌شود که خود باعث اعمال ممان که جابجایی بزرگ می‌شود.

- در دو شکل زیر نشان داده شده است که هنگامی که شناور در معرض موج از پاشنه است و همزمان زاویه پیچ هم دارد و همچنین با توجه به هم جهت شدن نیروی موج و نیروی تراست شناور، شناور تمایل دارد زاویه پیچ را افزایش دهد که این حالت نامطلوبی است.





حال فرض کنید که شناور دچار حرکات پیچ با زوایای بزرگ شده است در این صورت

هنگامی که سینه شناور به زیر آب می‌رود و عدد شنجیس می‌شود در واقع آبخور شناور

افزایش یافته است که با افزایش آبخور، سطح زیر منحنی GZ کاهش می‌یابد و پایداری

شناور کاهش می‌یابد. لذا حرکات پیچ شدید خود باعث ایجاد حرکات رول شدید می‌شود و

احتمال غرق شدن را افزایش می‌دهد. طبق آمار مدیریت آمده از کشتی‌های غرق شده نیز، علت

غرق شدن آنها قبل از زوایای رول شدید، زوایای پیچ شدید بوده است.

- بنابراین زوایای رول شدید در دو حالت به وجود می‌آید:

1) رزونانس ($\omega_e = \omega_\phi$) یا $T_e = T_\phi$

2) موج جلوی ← زمانی که $\frac{T_e}{T_\phi} = 0.5, 1, 1.5, 2, \dots$

و خطرناکترین حالت در موج از پاشنه است که در $F_n = 0.2$ و $T_\phi = 5\sqrt{L/g}$ جدی‌تر

می‌شود.

- اگر قوانین استاندارد را معیار طراحی قرار دهیم، بعید است کشتی دچار این گونه حرکات شدید

و غرق شود.

دریازدگی "seasickness" در حالت کلی تر MSI (motion sickness Incidence)

منابع این قسمت :

✓ Dynamics of marin vehicles / chapter 7, 16

✓ principles of Naval Architecture / Vol. III

✓ کتاب جامع مهندسی معماری دریایی / ویرایش دوم

✓ دینامیک متحرک های دریایی / محمد سعید سیف - امین نجفی

- این علم در واقع به بحث بررسی حرکات جانبی که بر بدن انسان اعمال می شود و است برای حفظ تعادل بدن دو کار مجزا انجام می شود:

1) دید چشم و ارسال وضعیت بدن به مغز

2) احساس کردن وضعیت بدن توسط مایع داخل گوش میانی و ارسال به مغز

در صورت عدم تطابق پیام چشم و گوش میانی به مغز، دریازدگی اتفاق می افتد.

- در صورتی که شخص در کشتی که در حال حرکت (رول و پیچ و حرکات بری و ...) است باشد چشم، دیواره ها اطراف را ثابت می بیند ولی کشتی در حال حرکت است و گوش میانی این را حس می کند که این عدم تطابق پیام چشم و گوش به مغز باعث عکس العمل اشتباه بدن می شود و دریازدگی اتفاق می افتد.

- دریازدگی در کلی بهت به سایر وسایل نقلیه (مانند هواپیما، ماشین و ...) در حالت کلی بیشتر اتفاق می‌افتد.

نکته: سه عامل حرکتی موثر در دریازدگی وجود دارد که فرقی نمی‌کند که حاصل از کدام نوع حرکت (رول، پیچ و ...) باشد:

1) دامنه شتاب عمودی: دو عامل حرکتی هیو و پیچ در ایجاد آن نقش دارند

2) دوره تناوب یا فرکانس نوسانات

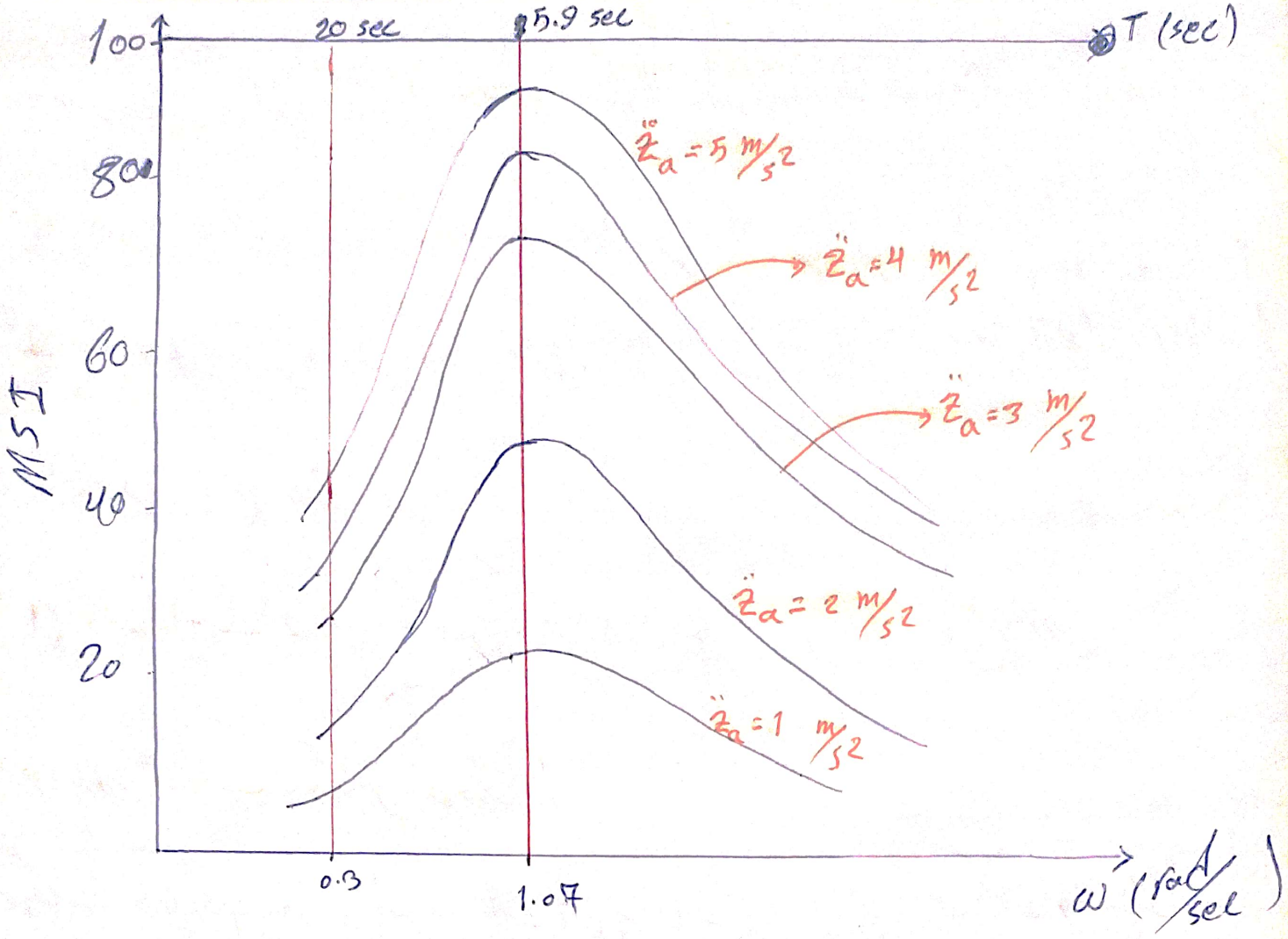
یک دریازدگی در فرکانس 1.07 rad/sec یا پریود 6 ثانیه معمولاً اتفاق می‌افتد

کاهش شدید دریازدگی در پریود 20 ثانیه یا فرکانس 0.3

نشان دهنده اهمیت حرکت رول

3) مدت زمان نوسانات: نشان دهنده مدت زمان دریازدگی در شرایط مواجه

- در صفحه بعد نمودار آورده شده است که برای مدت زمان دو ساعت استخراج شده است که اگر برای چهار ساعت استخراج می‌شد دریازدگی (MSI) شدیدتر می‌شد.



با توجه به نمودار فوق، در یک فرکانس مشخص با افزایش شتاب محور، احتمال دریازدگی افزایش می یابد.

- همچنین با افزایش پریود بعد از حدود 7 ثانیه (فرکانس کمتر از 0.14 هرتز) احتمال دریازدگی کاهش می یابد.

بر طبق رابطه ی ($T = \frac{2\pi k}{\sqrt{g \cdot GM}}$) برای افزایش T و کاهش دریازدگی می بایست ارتفاع متاسنتر (GM) را کاهش داد که به معنای کاهش پایداری است که این خاصیت MSI (شاخص دریازدگی)، در ابتدای قرن بیستم مهندسین معماری دریایی را شگفت زده کرد.

stiff ship (کشتی سرکش) ← پایداری زیاد ← $\overline{GM}$ زیاد ← پریود نوسانات کوتاه ← حرکات شدید

Tender ship (کشتی آرام) ← پایداری کم ← $\overline{GM}$ کم ← پریود نوسانات بلند ← حرکات ملایم

نکته مهم: هرچه کشتی پایدارتر باشد احتمال است که بیشتر از پروفیل موج تبعیت کند و حرکات تندتری دارد. یعنی کشتی پایدارتر، شتاب‌ها بیشتری دارد ولی دامنه حرکات کوچکتری دارد.

- معیار شتاب دریازدگی با توجه به شتاب‌های عمودی از قرار زیر است:

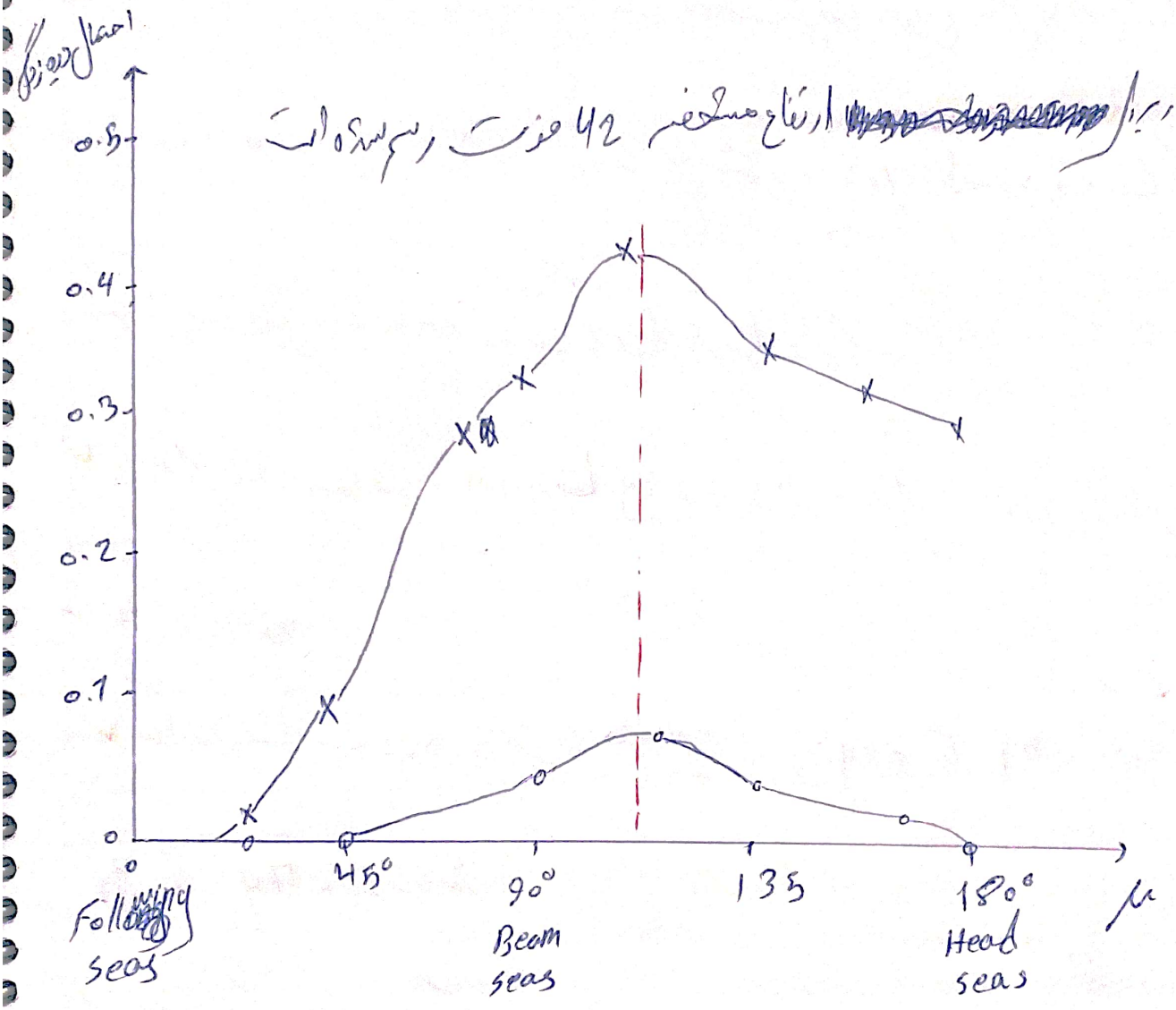
✓ مقدار شتاب عمودی 0.2g تا 0.1g می‌تواند به عنوان محدوده انسانی دریازدگی در نظر گرفته شود

✓ حداکثر شتاب عمودی در کشتی‌های جابجایی 0.2g تا 0.5g و در کشتی‌های تندرو 4g تا 7g می‌تواند باشد

✓ از آنجا که شتاب حرکت رول به ندرت از 0.2g عبور می‌کند لذا شتاب ناشی از حرکات هیو و پیچ می‌تواند به عنوان عامل اصلی دریازدگی در نظر گرفته شود.

✓ با در نظر گرفتن معیار شتاب عمودی 0.15g به عنوان معیار دریازدگی (معیار معرفی شده در سال 1962)، اثر زاویه برخورد در احتمال عبور از معیار

دریازدگی برای شده است (برای یک کشتی با $\frac{L}{H}=17.5$ و سرعت 11 گره) که در شکل زیر مشاهده می‌کنید



* نمودار برای ارتفاع مشخصه 42 فوت رسم شده است

- در نمودار فوق چیک نمودار در حدود 110° اتفاق می‌افتد که نشان دهنده حالتی در میان موج جانبی (Beam seas) و موج از روبرو (Head seas) است. در واقع در این حالت بیشترین احتمال دریازدگی را داریم.

- کارایی خدمه در شاوری کوچکتر که حرکات بیشتری دارند کاهش می‌یابد. همچنین دامنه نوسانات نیز در کاهش کارایی خدمه نقش دارد ولی اهمیت آن به اندازه شتاب عمودی و پریود نوسانات نیست.

جلسه سی و هفتم

«حرکت رول غیرخطی مستقل»

«بخش اول»

منابع این جلسه: Dynamics of marine vehicles - chapter 10

سوالات مطرح:

- چرا کشتی در دریا به یکباره دچار حرکات رول سنگین و ناگهانی می‌شود؟
- شرایط بروز و زمان حرکت رول چیست؟
- اثرات آن بر طراحی کشتی چیست؟

- حرکات هیدرودینامیک با روش تحلیلی قابل بررسی است و اثرات غیرخطی آنها نیز زیاد و پرزحمت است ولی تخمین حرکت رول دشوار است به دلیل نقش بسزای اثرات غیرخطی و همچنین لزجت که تأثیر زیادی را در ضریب میرایی می‌گذارد.

معادله خطی حرکت رول به صورت زیر گفته شد

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M(t)$$ → برای حرکت اجباری

a و b و c هر سه ثابت هستند

- برای زوایای رول کوچک (کمتر از 8 درجه)، معادلات خطی به کار می‌رود و دقت کافی دارد.

- برای زوایای رول بزرگ، معادلات غیرخطی به کار می‌روند چون معادلات خطی دقت کافی ندارند.

منظور از غیرخطی بود:

معادله خطی: $a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M(t)$

✓ جذب همان میرایی غیرخطی

$$\underset{\text{خطی}}{b\dot{\phi}} \xrightarrow{\text{غیرخطی}} b_1\dot{\phi} + b_2\dot{\phi}^2 + b_3\dot{\phi}^3 + \cdots$$

✓ جذب همان بازگرداننده غیرخطی

$$\underset{\text{خطی}}{c\phi} \xrightarrow{\text{غیرخطی}} c(\phi, t) = c_1(t)\phi + c_3(t)\phi^3 + c_5(t)\phi^5 + \cdots$$

* توجه کنید که c_1 وابسته به زمان است. ولی b وابسته به زمان در نظر گرفته نشده است.

نکته: در زوایای غلتش کوچک (کوچکتر از 8 درجه)، مقادیر توان 2 و بالاتر بسیار کوچکتر از توان یک خواهند بود (چون ϕ و $\dot{\phi}$ و $\ddot{\phi}$ برحسب رادیان نوشته می‌شود و برای زاویه کوچکتر از 8 درجه یک عدد بین صفر و یک و کوچک خواهد شد) لذا قابل صرف‌نظر کردن است. ولی در زوایای غلتش بزرگ همه مقادیر با توان‌های مختلف قابل ملاحظه هستند.

- در واقع معادلات خطی حالت ساده شده‌ای از معادلات غیرخطی است.

توجه: پارامتر زمان در همه بازگرداننده دخیل است. (در فرض خطی، ضرایب c جزو جزو مستقل از زمان هستند)

- برای پیش‌بینی حداکثر دامنه رول شناور بررسی غیرخطی حرکت رول بسیار مهم است

- در حرکات کشتی در موج، زاویه رول در واقع باید متناسب با شیب موج (α) هم در نظر گرفته شود ولی در معادلات خطی، برای پرهیز از پیچیدگی معادلات، همه نیروهای و همه بازگرداننده فقط تابعی از ϕ در نظر گرفته می‌شوند. در این صورت داریم:

$$I'_{xx}\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + \Delta\overline{GM}(\phi-\alpha) = 0$$

$$\ddot{\phi} + \frac{bg}{\Delta_1 k_{xx}^2}\dot{\phi} + \frac{\Delta\overline{GM}\cdot g}{\Delta_1 k_{xx}^2}\phi = \frac{\Delta\overline{GM}\cdot g}{\Delta_1 k_{xx}^2}\alpha$$

که در آن $\Delta_1 = \Delta + \Delta'$ بود و اگر موج سینوسی در نظر گرفته شود:

$$\alpha = \alpha'_M \sin\omega_e t$$

و با جایگذاری رابطه اخیر در معادله حرکت رول خطی داریم:

$$\ddot{\phi} + 2\nu\dot{\phi} + \omega_\phi^2\phi = \alpha'_M\omega_\phi^2 \sin\omega_e t$$

چهار حالت کلی برای بررسی معادلات رول غیرخطی

1) معادلات حرکت خطی $b_2 = c_3 = c_5 = 0$

2) میرایی خطی - ممان بازگرداننده غیرخطی اولی ثابت یا مستقل از زمان

$b_2 = 0$; c_1, c_3, c_5 not function of time.

3) میرایی غیرخطی - ممان بازگرداننده خطی

$c_3 = c_5 = 0$; c_1 not a function of time.

4) میرایی خطی - ممان بازگرداننده خطی اولی تابعی از زمان

$b_2 = c_3 = c_5 = 0$; c_1 a function of time.

حالت دوم: میرایی خطی با ممان بازگرداننده غیرخطی اولی ثابت یا مستقل از زمان

$$\alpha \ddot{\phi} + b\dot{\phi} + f(x) = M_0 \cos \omega_e t \quad , \quad f(x) = c_1\phi + c_3\phi^3$$

$$\Rightarrow I'_{xx}(\omega_e)\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c_1\phi + c_3\phi^3 = M(\omega_e t)$$

$\Delta \bar{G}\bar{Z} = c_1\phi + c_3\phi^3$ سیستم چند جمله‌ای است که تا دو جمله نوشته شده است.

$$\ddot{\phi} + b'\dot{\phi} + c_1'\phi + c_3'\phi^3 = M_0' \cos \omega_e t$$

ضرایب c_1 و c_2 از دو شرط مسئله بدست می‌آیند:

در زوایای غلتش کوچک $\overline{GZ} = \overline{GM}\,\phi$

در زاویه پایدار $\overline{GZ} = 0$

نکته: اثر همساز کننده بازگرداننده غیرخطی این است که پریود طبیعی $\frac{2\pi}{\omega_\phi}$ برخلاف معادلات خطی دیگر ثابت نیست و با زاویه رول تغییر می‌کند. به دلیل اینکه ω_ϕ که از رابطه $\omega_\phi = \sqrt{\frac{c_1}{a}}$ بدست می‌آید و باید توجه به تغییر پهنا به زمان، تغییر می‌کند.

- M_0' دامنه همساز تحریک حرکت رول است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$M_0'^2 = \underbrace{\left[(c_1' - \omega_e^2)A + \frac{3}{4}c_3' A^3\right]^2}_{s^2(\omega_e, A)} + b'^2 A^2 \omega_e^2 = M_0'^2$$

$$\Rightarrow \boxed{M_0'^2 = s^2(\omega_e, A) + b'^2 A^2 \omega_e^2}$$

که در آن:

A: دامنه حرکت

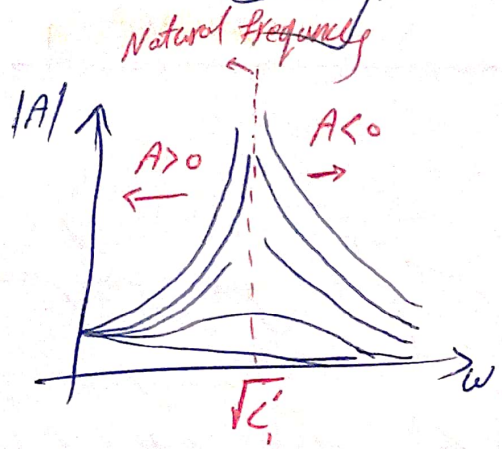
$c_1' = \frac{c_1}{a}$, $c_3' = \frac{c_3}{a}$

- بر اساس این معادله می‌توان منحنی‌های پاسخ را برحسب A (دامنه حرکت رول کنترلی) و M (دامنه محرک تحریک رول) و فرکانس بی‌بعد ترسیم کرد.

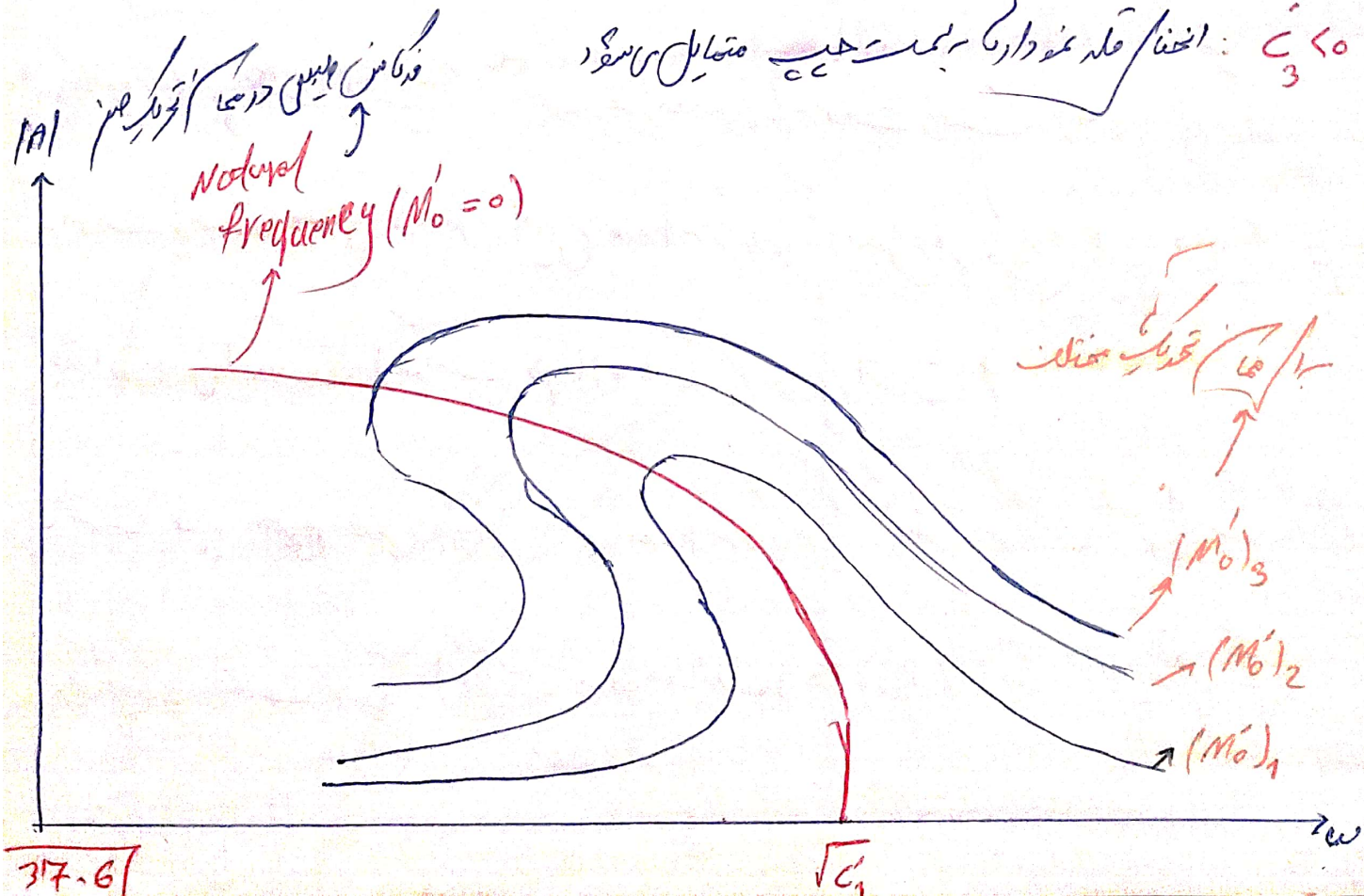
- وقتی $C_3'=0$ باشد همان معادله نوسانات اجباری (از مباحث قبل) بدست می‌آید.

بایستی به مقدار C_3' سه حالت رخ می‌دهد:

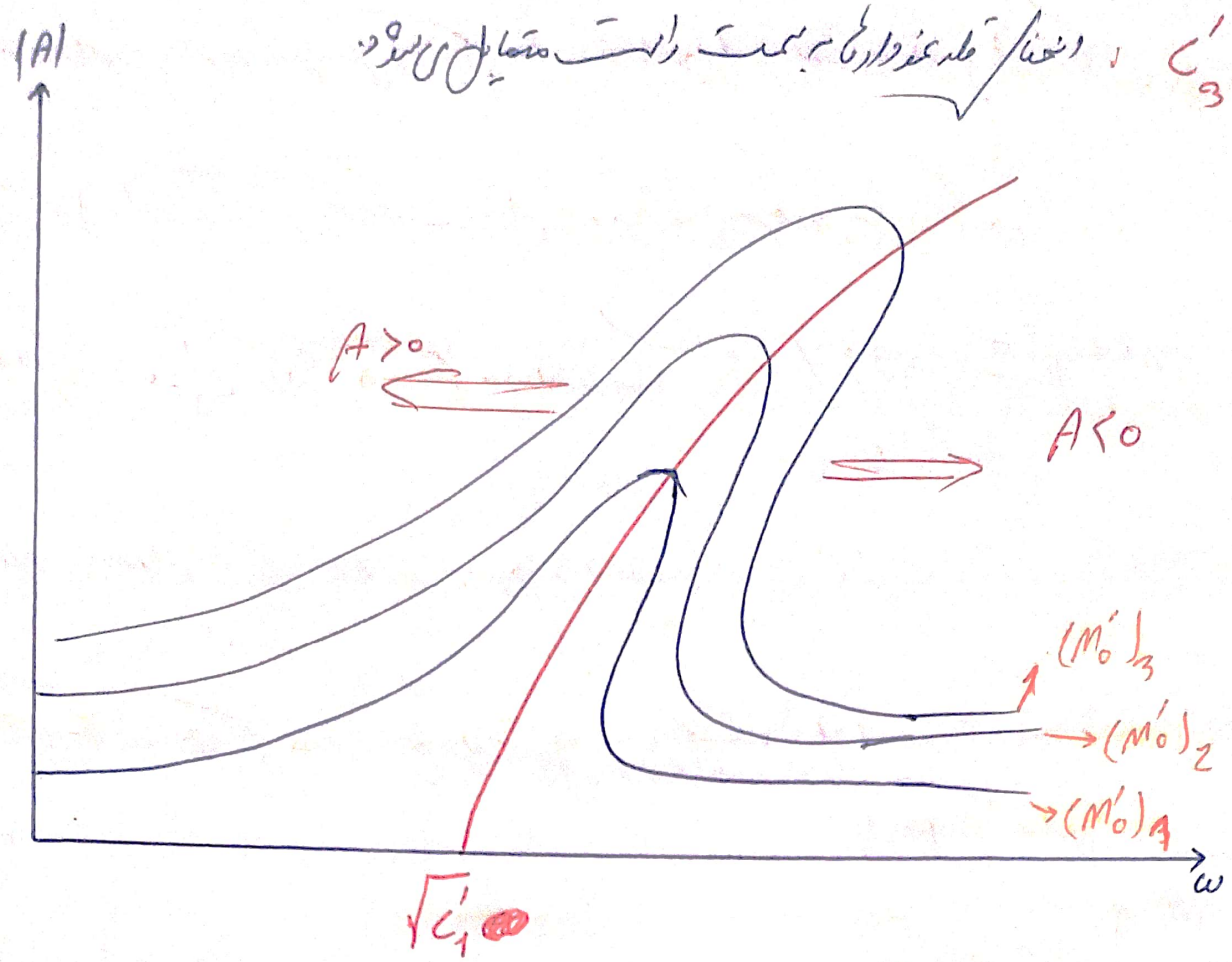
$C_3'=0$: همان نمودار پاسخ حرکت رول در نوسانات اجباری است



$C_3'<0$: انحنای قله نمودارها به سمت چپ متمایل می‌شود



$C_3' > 0$: انحنای قله نمودارها به سمت راست متمایل می‌شود.



نکته: مقادیر فرکانس طبیعی به ازای جمله تحریک صفر (نوسان آزاد) بدست می‌آید که در ازای $C_3'=0$ نمودار یک عدد ثابت (یک فرکانس ثابت) است ولی در $C_3'>0$ و یا $C_3'<0$ فرکانس طبیعی ثابت نیست و یک مسیر منحنی را به سمت راست یا چپ طی می‌کند.

- سمت راست منحنی فرکانس طبیعی مربوط به فرکانس‌های بیشتر از فرکانس طبیعی است که A دارای مقدار منفی است. (حرکت هم فاز با نیروی خارجی است)

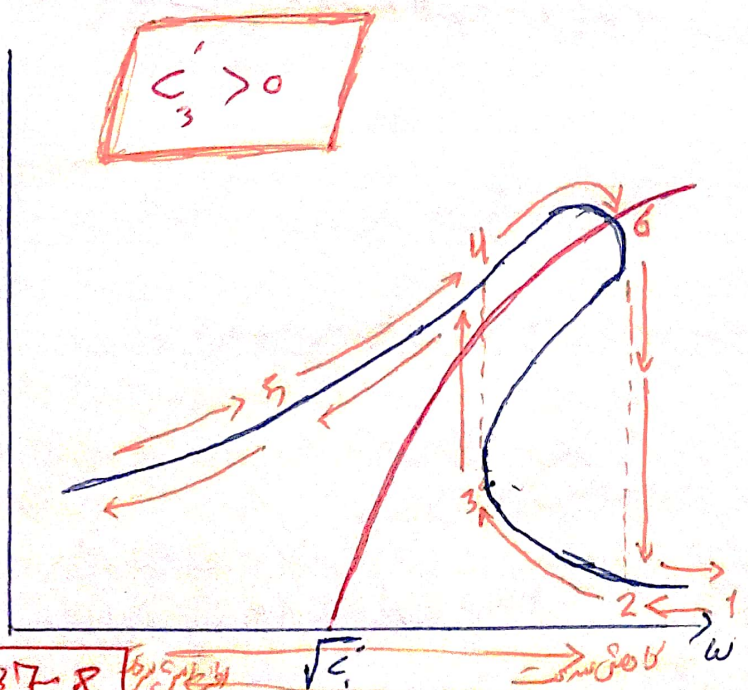
- سمت چپ منحنی فرکانس طبیعی مربوط به فرکانس‌های کمتر از فرکانس طبیعی است که A دارای مقدار مثبت است (حرکت در فاز مخالف (180 درجه) با نیروی خارجی است.

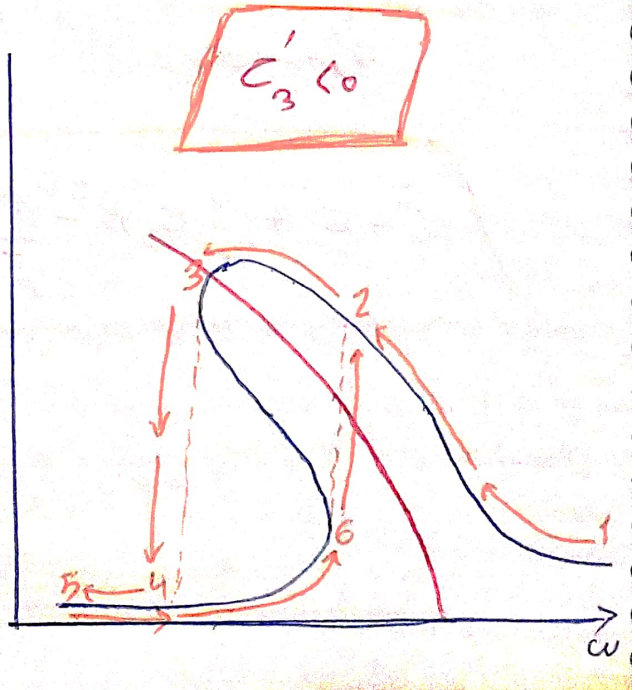
علت تغییرات ناگهانی حرکت رول غیرخطی چیست؟

- این نمودارها نشان می‌دهند که با تغییر فرکانس برانگیزش (در یک دامنه تحریک ثابت - موج ثابت) دامنه حرکت رول می‌تواند به یک باره جهش (افزایش یا کاهش) داشته باشد.

- این رفتار در جهت افزایش فرکانس یا کاهش فرکانس کاملاً متفاوت است.

- در نمودارهای زیر که برای دو حالت $c_3'>0$ و $c_3'<0$ رسم شده است مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت (افزایش فرکانس (طبق رابطه $\omega_e = \omega - \frac{\omega}{g}$)) یا افزایش سرعت یک جهش یا تغییر ناگهانی در دامنه حرکت به وجود می‌آید به عنوان مثال با کاهش سرعت (افزایش فرکانس) در نمودار مربوط به $c_3'>0$، منحنی حرکت دامنه رول غیرخطی از نقطه 6 به یک باره به نقطه 2 جهش می‌کند و یا با افزایش سرعت و عبور از نقاط 1 و سپس 2، در نقطه 3 به یک باره جهش رخ خواهد داد و به نقطه 4 می‌رود.





- اما برای حالتی که $c_3=0$ است تغییرات همانند حالت خطی است.

حال به ادامه حل معادله زیر می‌پردازیم

$$\ddot{\phi} + b'\dot{\phi} + c_1'\phi + c_3'\phi^3 = M_0' \cos \omega_e t$$

حل این معادله را می‌توان به روش تکرار (iteration) انجام داد و حل ساده شده آن

بدون در نظر گرفتن عبارت میرایی به صورت زیر است:

$$\ddot{\phi} + c_1'\phi + c_3'\phi^5 = M_0' \cos \omega_e t \quad \sim \text{حالت بدون میرایی}$$

$$\Rightarrow \phi = A\cos\omega_e t + \frac{c_3' A^3}{32\left(c_1' + \frac{3}{4}c_3' A^2 - M_0'/A\right)} \cos 3\omega_e t$$

- که در آن A دامنه حرکت دوم می‌باشد که از معادلات خطی (که در حلقه‌های قبل تشریح شده بود) بدست می‌آید و همچنین فرکانس پرتشدید باید از رابطه زیر محاسبه شود:

$$\boxed{\omega_e^2 = c_1' + \frac{3}{4}c_3' A^2 - \frac{M_0'}{A}}$$

مثال: برای یک کشتی با تناژ $\Delta = 12,500\ ton$ ، محدوده زوایای غلتش در حالتی که ممان بازگرداننده مثبت است برابر است با $0°$ تا $80°$ و $\overline{GM} = 5.79\ ft$.

حرکت رول

مطلوب است محاسبه ضرایب ممان بازگرداننده غیرخطی

Ans:

$$\text{ممان بازگرداننده} = \overline{GZ}\,\Delta = C_1\phi + C_3\phi^3$$

دو شرط مرزی که گفته شد را اعمال می‌کنیم

شرط مرزی اول: زوایای غلتش کوچک

$$\Delta\overline{GZ} = C_1\phi$$

$$\overline{GM}\sin\phi\,\Delta = C_1\phi \Rightarrow \overline{GM}\phi\Delta = C_1\phi \Rightarrow C_1 = \Delta\overline{GM} = 12,500 \times 5.79$$

$$\Rightarrow C_1 = 72375\ ft\text{-}tons$$

شرط مرزی دوم: در زاویه پایدار ناپایدار ($80°$)، ممان بازگرداننده صفر است

$$0 = C_1\phi + C_3\phi^3 \Rightarrow C_3 = -\frac{C_1}{\phi^2} = -\frac{72375}{(1.39\,rad)^2} = -37124\ ft\ tons$$

$$\Rightarrow \text{ممان بازگرداننده} = 72375\phi - 37124\phi^3$$

که با دادن مقادیر ϕ مختلف می‌توان ممان بازگرداننده را برحسب ϕ محاسبه کرد

همچنین می‌توان ممان شتاب را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$a = \frac{\Delta}{g}k_{xx}^2 = 441850 \Rightarrow C_1' = \frac{C_1}{a} = 0.1638 \quad , \quad C_3' = \frac{C_3}{a} = 0.0845$$

که می‌توان منحنی پاسخ را برای مقادیر مختلف از نیروی تحریک بدست آورد

مثلاً نیروی تحریک $M_0' = 0 , 0.0287 , 0.05$ را در معادله قرار داده و نمودار A برحسب ω_e را رسم می‌کنیم

$$\left[(c_1' - \omega_e^2)A + \frac{3}{4}c_3' A^3\right]^2 + b'^2 A^2 \omega_e^2 = M_0'^2$$

با قرار دادن مقادیر c_1' و c_3' و M_0 (از b' می‌توان صرف نظر کرد) در رابطه فوق، می‌توان به سادگی نمودار مربوطه را ترسیم کرد که از آوردن آن در جزوه صرف نظر شده است

نکته: باید یادآور شد که حرکت دور احتیاری پاسخ بازگرداننده غیرخطی ممکن است فرکانس‌هایی داشته باشد که کمتر از فرکانس برخورد باشد که به نوسانات subharmonic شناخته می‌شود در حرکت پاسخ بازگرداننده خطی فرکانس تا حرکت احتیاری همیشه برابر فرکانس برخورد است

نکته: به دلیل شکل خاص منحنی‌های پاسخ دور، این امکان وجود دارد که در یک فرکانس معین، مقادیر مختلفی از دامنه حرکت دور را داشته باشیم!

پدیده جهش غلتش ("Lurching")

- با توضیحاتی که تاکنون داده شده به علل پدیده جهش غلتش پی بردیم.

- از آنجا که این پدیده در فرکانس‌های مختلفی ممکن است اتفاق بیافتد لذا طراح کشتی باید اطمینان حاصل کند که در بیشترین مقادیر حد ممکن از زاویه رول، کشتی غرق نخواهد شد و صدمه هم نخواهد دید.

جلسه سی و هشتم

«حرکت رول غیرخطی مستقل»

«بخش دوم»

میرایی غیرخطی با ممان بازگرداننده خطی

- تحت شرایط نیروی تحریک سینوسی برای این حالت داریم:

$$a\ddot{\phi} + \underbrace{b_1\dot{\phi} + b_2\dot{\phi}|\dot{\phi}|}_{\text{میرایی غیرخطی}} + \underbrace{\Delta\overline{GM}\phi}_{\text{ممان بازگرداننده خطی}} = \underbrace{M_0\cos\omega_e t}_{\text{ممان تحریک سینوسی}}$$

در آب آرام (بدون ممان تحریک) داریم:

$$\ddot{\phi} + \omega_\phi^2\phi + \mu f(\dot{\phi}) = 0$$

و حل آن عبارت است از:

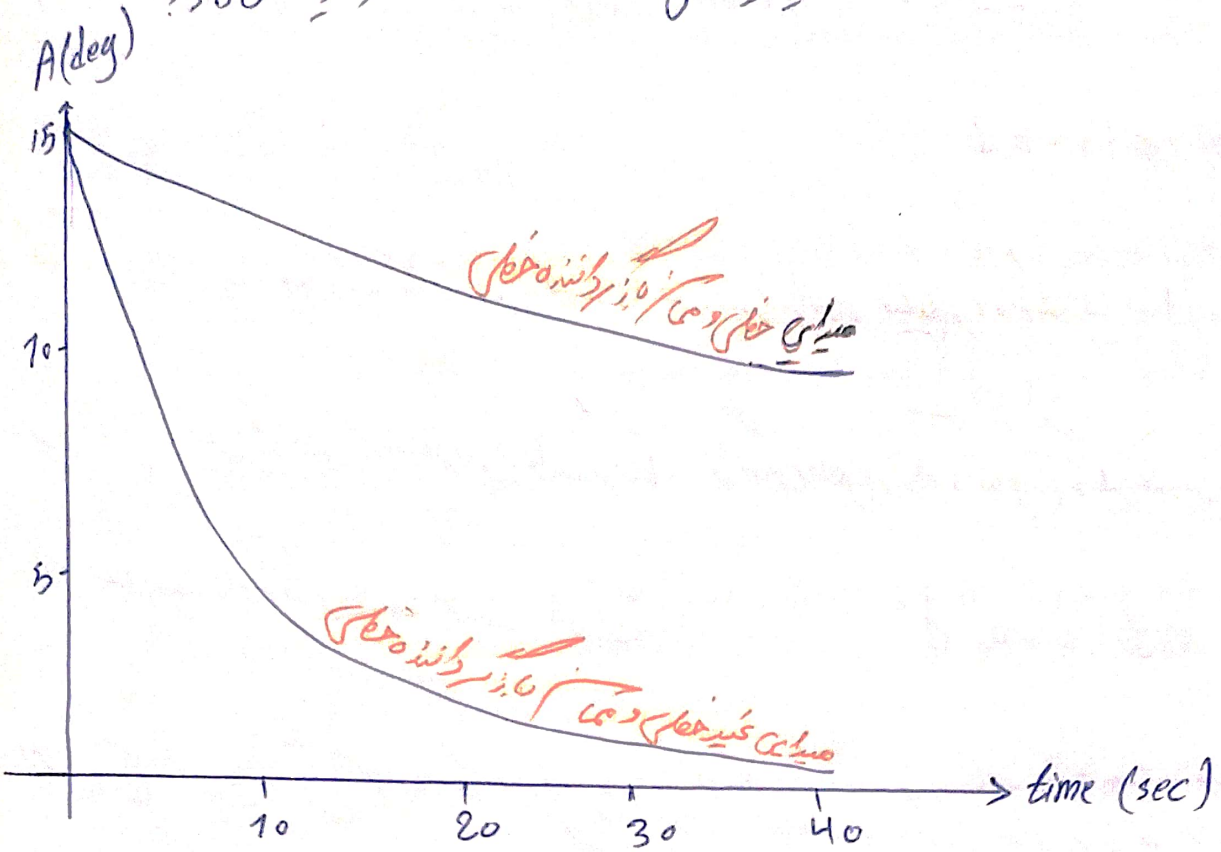
$$A = \frac{\frac{b_1}{2}\frac{\phi_a}{\phi_a s + (b_1/2)}e^{-[(b_1/2)t]}}{1 - s\frac{\phi_a}{\phi_a s + (b_1/2)}e^{-[(b_1/2)t]}}$$

که در آن $s = \frac{4b_2\omega_\phi}{3\pi}$ و به ازای $t=0$ ، $A=\phi_a$ خواهد بود.

- وجود عامل $s\frac{\phi_a}{\phi_a s+(b_1/2)}e^{-[(b_1/2)t]}$ در مخرج کسر باعث میرایی سریع حرکت رول می‌شود

زیرا با افزایش t مخرج کسر بزرگ شده و مقدار A کاهش می‌یابد.

با توجه به نمودار زیر که برای دو حالت میرایی خطی + بازگرداننده خطی و میرایی غیرخطی + بازگرداننده خطی ارائه شده است متوجه می‌شویم که در حالت میرایی غیرخطی، دامنه نوسانات سریعتر کاهش می‌یابد.



- برای تعیین مقادیر b_1 و b_2 از روابط زیر می‌توان استفاده کرد:

$$b_1 = \frac{2k_1 \Delta \bar{G}m}{\pi \omega_\phi} \quad , \quad b_2 = \frac{3k_2 \Delta \bar{G}m}{4\omega_\phi^2}$$

- در صورتی که $s=0$ باشد همان معادله میرایی خطی بدست می‌آید (در صورتی $s=0$ می‌شود که یا $\omega_\phi=0$ باشد و یا $b_2=0$ باشد) با قرار دادن $s=0$ در معادله صفحه قبل خواهیم داشت:

$$A = \phi_a e^{-[(b_1/2)t]}$$

- بررسی‌های تحلیلی نشان داده است که ممان حاصل از نیروی اصطکاکی وارد بر یک سیلندر در حال دوران کاملاً مغروق در یک سیال ویسکوز را می‌توان از رابطه زیر حساب کرد:

$$M(\dot{\phi}) = -b_1 \dot{\phi}$$

که در آن b_1 ضریب تناسب است که وابسته به ابعاد سیلندر، ویسکوزیته سیال و پریود یا فرکانس نوسانات استوانه است. با افزایش دامنه نوسانات وابستگی خطی رابطه با عزوق دیگر معتبر نیست و با توان 2 سرعت زاویه‌ای رول متناسب است:

$$M(\dot{\phi}) = -b_2 \dot{\phi}^2$$

آزمایشات بیشتر نشان داد که برای دامنه نوسانات رول زیاد، ممان میرایی می‌تواند با توان 3 و 4 و سرعت زاویه‌ای رول متناسب باشد:

$$M(\dot{\phi}) = -b_3 \dot{\phi}^3$$

ولی برای دامنه‌های متوسط همان توان 2 کافی است. برای سرعت زاویه‌ای کوچک، عبارات دوم این رابطه در مقایسه با عبارات اول بسیار کوچک خواهند شد و همان رابطه اول خطی تا حد دقیق است.

مثال: دامنه نوسانات حرکت رول کشتی با استفاده از تست رولینگ آن کشتی به صورت زیر بدست آمده است. مطلوب است محاسبه k_1 و k_2

$15^\circ, 11^\circ, 8.5^\circ, 6.5^\circ, 5^\circ, 4.1^\circ, 3.3^\circ, 2.6^\circ$

Ans:

$$\boxed{-\frac{d\phi}{dn} = k_1\phi + k_2\phi^2}$$

• در جدول زیر مقدار متوسط دامنه نوسان و اختلاف دو نوسان متوالی بدست آورده می‌شود

$\delta\phi$ (deg)	ϕ (deg)	ϕ_m (deg)
	15	
4		13
	11	
2.5		9.75
	8.5	
2		7.5
	6.5	
1.5		5.75
	5	
0.9		4.55
	4.1	
0.8		3.7
	3.3	
0.7		2.95
	2.6	

$$\text{for } \phi_m = 2.95^\circ \longrightarrow \begin{cases} k_1\, 2.95 + k_2 (2.95)^2 = 0.7 \\ k_1\, 13 + k_2 (13)^2 = 4 \end{cases}$$

$$\text{for } \phi_m = 13^\circ \longrightarrow$$

$$\Longrightarrow k_1 = 0.216 \quad , \quad k_2 = 0.00707$$

$$\Longrightarrow -\frac{d\phi}{dn} = 0.216\,\phi + 0.00707\,\phi^2$$

حال می‌توان برای دیگر مقادیر ϕ، مقدار $-\frac{d\phi}{dn}$ را محاسبه کرد.

- حالات زیر را برای کاهش دامنه نوسانات می‌توان در نظر گرفت:

1) میرایی خطی:

$$M(\dot\phi) = -b_1\dot\phi$$

$$\boxed{\ddot\phi + 2\zeta\dot\phi + \omega_\phi^2\phi = 0}$$

لذا کاهش دامنه عبارتست از:

$$\delta\phi_{k+1} = \phi_k\left(1 - e^{-\zeta T_\phi/2}\right) = k_1\phi_k$$

$$k_1 = 1 - e^{-\zeta T_\phi/2}$$

2) میرایی درجه دوم :

$$M(\dot{\phi}) = -b_2 \dot{\phi}^2$$

$$\boxed{\ddot{\phi} + b_1' \dot{\phi}^2 + \omega_\phi^2 \phi = 0}$$

لذا کاهش دامنه عبارت است از :

$$\delta\phi_{k+1} = \frac{4}{3} b_2' \phi_k^2 = k_2 \phi_k^2 \quad , \quad k_2 = \frac{4}{3} b_2'$$

3) میرایی دو جمله ای

$$M(\dot{\phi}) = -b_1 \dot{\phi} - b_2 \dot{\phi}^2$$

$$\boxed{\ddot{\phi} + 2\nu \dot{\phi} + b_2' \dot{\phi}^2 + \omega_\phi^2 \phi = 0}$$

لذا کاهش دامنه عبارت است از :

$$\delta\phi_{k+1} = \underbrace{\frac{2}{3} b_2' e^{-\nu T_\phi'/2} \left(1 + e^{-\nu T_\phi'/2}\right)}_{k_3} \phi_k^2 + \underbrace{\left(1 - e^{-\nu T_\phi'/2}\right)}_{k_1} \phi_k$$

$$\Longrightarrow \delta\phi_{k+1} = k_1 \phi_k + k_3 \phi_k^3$$

4) اگر میرایی به صورت چند جمله ای نوشته شود :

$$M(\dot{\phi}) = b_1 \dot{\phi} + b_2 \dot{\phi}^2 + b_3 \dot{\phi}^3 + \cdots$$

و کاهش دامنه عبارت است از :

$$\delta\phi = k_1 \phi_m + k_2 \phi_m^2 + k_3 \phi_m^3 + \cdots$$

ϕ_m : متوسط دامنه و $k_1, k_2, k_3, \cdots$: ثابت اند

- برای زوایای کوچک که $\overline{Gz} = \overline{Gm}\phi$ منحنی گشتاور میرایی در حد بحرانی را داریم:

$$\boxed{\frac{d\phi}{dn} = k_1 \phi_m + k_2 \phi_m^2}$$

و

$$k_1 = \frac{\pi b_1 \omega_\phi}{2\Delta \overline{Gm}} \Longrightarrow b_1 = \frac{2\Delta k_1 \overline{Gm}}{\pi \omega_\phi}$$

$$k_2 = \frac{4 b_2 \omega_\phi^2}{3\Delta \overline{Gm}} \Longrightarrow b_2 = \frac{3\Delta k_2 \overline{Gm}}{4\omega_\phi^2}$$

b_1 و b_2 را به صورت دیگر هم می‌توان نوشت:

$$b = b_1 + b_2 \phi$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \phi$$

$$\delta_1 = 2k_1 \quad , \quad \delta_2 = \frac{3\pi k_2}{4\omega_\phi}$$

$$\Rightarrow \boxed{b = \frac{\Delta \overline{Gm}}{\pi \omega_\phi}\left(\delta_1 + \delta_2 \phi\right) = \frac{\Delta \overline{Gm}}{\pi \omega_\phi}\,\delta}$$

در نهایت معادله حرکت با فرض میرایی غیرخطی و همان بازگرداننده خطی عبارت است از:

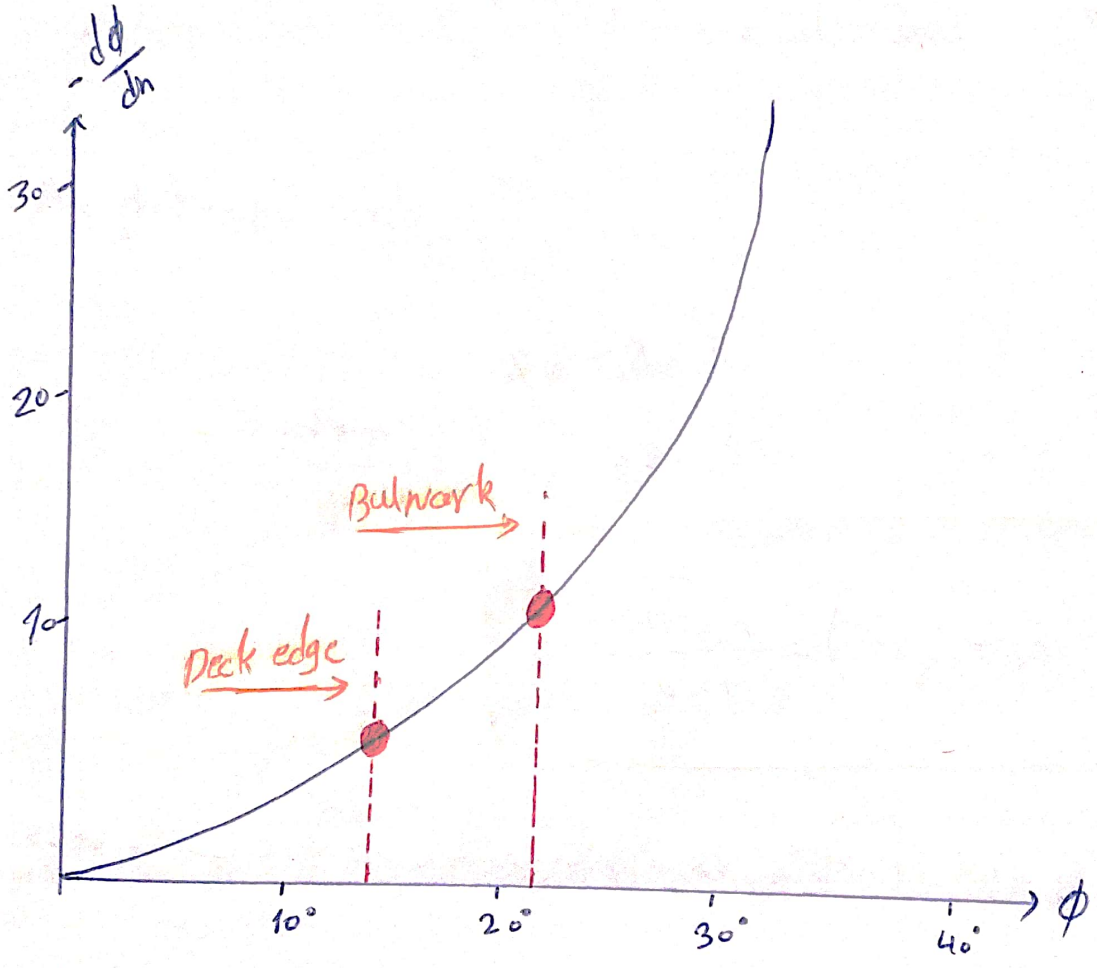
$$a\ddot{\phi} + b_1\dot{\phi} + b_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| + \Delta \overline{Gm}\phi = M_0 \cos\omega_e t$$

$$\Rightarrow \boxed{I'_{xx}\ddot{\phi} + \left(\frac{\Delta \overline{Gm}}{\pi \omega_\phi}\,\delta\right)\dot{\phi} + \Delta \overline{Gm}\phi = M_0 \cos\omega_e t}$$

- این معادله در نهایت یک معادله خطی است و می‌تواند مانند معادلات ساده خطی حل شوند. البته این معادله برای زوایای تا حد متوسط می‌تواند صادق باشد.

- برای زوایای بزرگ معادله اصلی پایدار شده هم صادق نیست و باید عوامل ϕ^3 و ϕ^4 وجود داشته باشند. این معادلات را نیز می‌توان با روش δ حل نمود یا از روش تک عددی حل نمود.

- تغییرات غیرخطی کاهش زاویه فوسانات با دامنه نوسانات در نمودار زیر آمده است. در نمودار زیر در دو حالت شیب منحنی تغییرات بیشتر خواهد داشت حالتی که لبه عرشه به زیر آب می‌رود و حالتی که لبه Bulwark به زیر آب می‌رود.



- مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه نوسانات، میزان تغییرات ($-\frac{d\phi}{dh}$) نیز افزایش می‌یابد یعنی حرکات رول سریعتر میرا می‌شود.

میرایی خطی و ممان بازگرداننده خطی با ضرایب وابسته به زمان

$$I'_{xx}\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + C(t)\phi = M_0 \cos\omega_e t$$

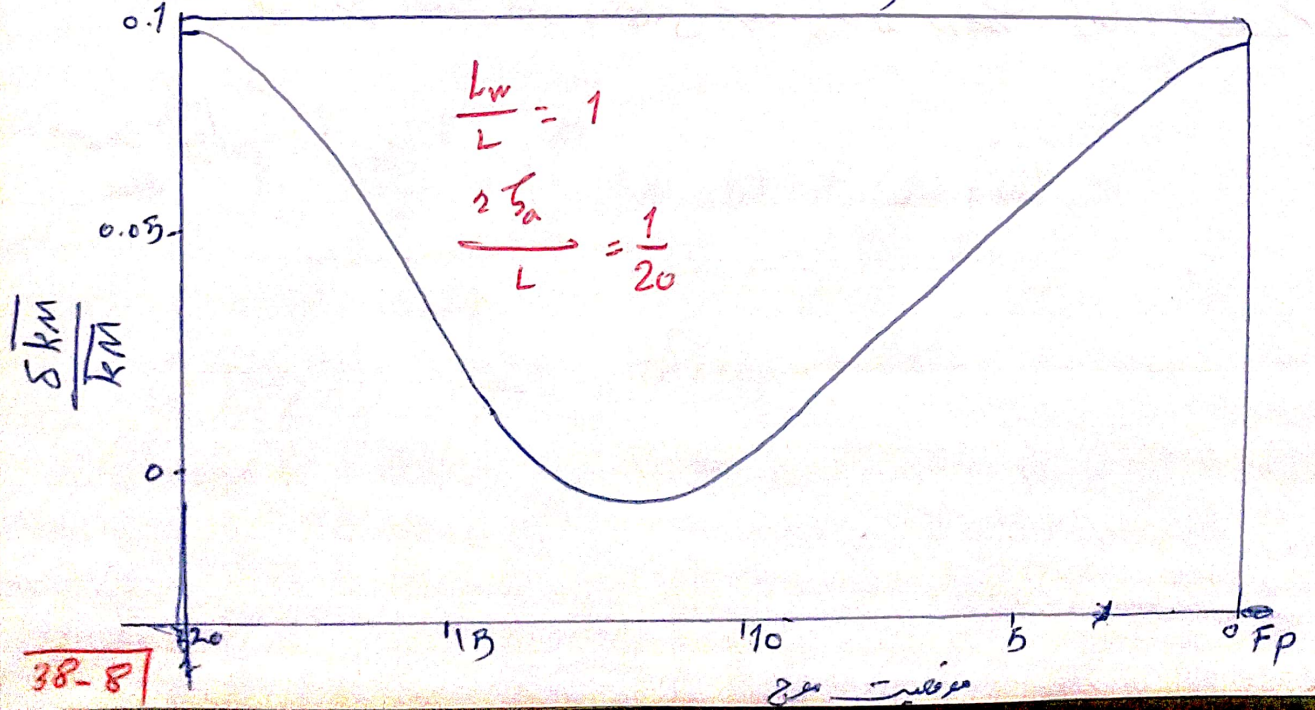
یک روش معمول برای تعیین $C(t)$ آزمایش در حوضچه است که با کج کردن مدل در یک زاویه و نگه داشتن آن در همان حالت و اندازه گیری ممان بازگرداننده بدست می آید بنابراین داریم:

$C(t)\phi = M$ = ممان میل دهنده مرکز آب آرام

$C(t) = \Delta \overline{GM}$ = ثابت

در اینجا $C(t)$ ثابت است و تئوری خطی را می توان استفاده کرد البته در امواج محدود یا امواج طولی که سینه تا پاشنه کشتی توسط قله یا قعر موج طی می شود، تغییرات فشار باعث حرکت هیو و تغییرات آبخور شده و $\overline{GM}$ تغییر می کند و دیگر ثابت نیست.

نمودار زیر برای درک بهتر تغییرات $\overline{KM}$ (یا $\overline{GM}$) یک شناور در معرض موج آورده شده است



حال داریم:

$$\frac{\delta \overline{KM}}{\overline{KM}} \times \frac{\overline{KM}}{\overline{GM}} = \frac{\delta \overline{KM}}{\overline{GM}} \simeq \frac{\delta \overline{GM}}{\overline{GM}}$$

و معادله را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$I_{xx}\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + \Delta \overline{GM}\left(1 + \frac{\delta \overline{GM}}{\overline{GM}} \sin\omega_e t\right) = M_0 \sin\omega_e t$$

- در حالت موج از روبرو و ممان تحریک برابر صفر است. لذا معادله Mathieu که به صورت زیر است

بدست می‌آید:

$$I_{xx}\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + \Delta \overline{GM}\left(1 + \frac{\delta \overline{GM}}{\overline{GM}} \sin\omega_e t\right) = 0$$

از خصوصیات این معادله این است که در حالت بدون میرایی، در یک مقادیر خاص از فرکانس، حل معادله به سمت بی‌نهایت میرود. مقادیر پریود مربوط به این فرکانس‌ها عبارت است از: $T = \frac{T_\phi n}{2}$ و $n = 1, 2, 3, \ldots$

- طراح کشتی باید چنین برهمی پایداری با در نظر گرفتن پریودهای جداگانه و فرکانس، مقادیر حداکثر زاویه رول ممکن را در نظر گرفته و در طراحی پایداری کشتی لحاظ کند تا کشتی صدمه نبیند.

از آنجا که این زوایا به صورت یکباره و ناگهانی بروز می‌کنند لذا در صورت پایداری ضعیف کشتی، می‌تواند منجر به واژگونی کشتی شود.

پایداری کشتی در برابر ممان‌های خارجی ناگهانی

وقتی یک ممان یکباره و ناگهانی به کشتی وارد می‌شود دچار شتاب می‌شود.

در هر زاویه خمش، ممان برآیند برابر است با: $M_{ke} - M_R$

که M_{ke} ممان ناشی از انرژی جنبشی و M_R ممان بازگرداننده است.

با صرف نظر کردن از میرایی معادله را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\boxed{I'_{xx}\ddot{\phi} = M_{ke}(\phi) - M_R(\phi)}$$

با انتگرال گیری و جایگذاری عبارت $\dot{\phi}\,dt = d\phi$ و $\ddot{\phi} = \frac{d\dot{\phi}}{dt}$ داریم:

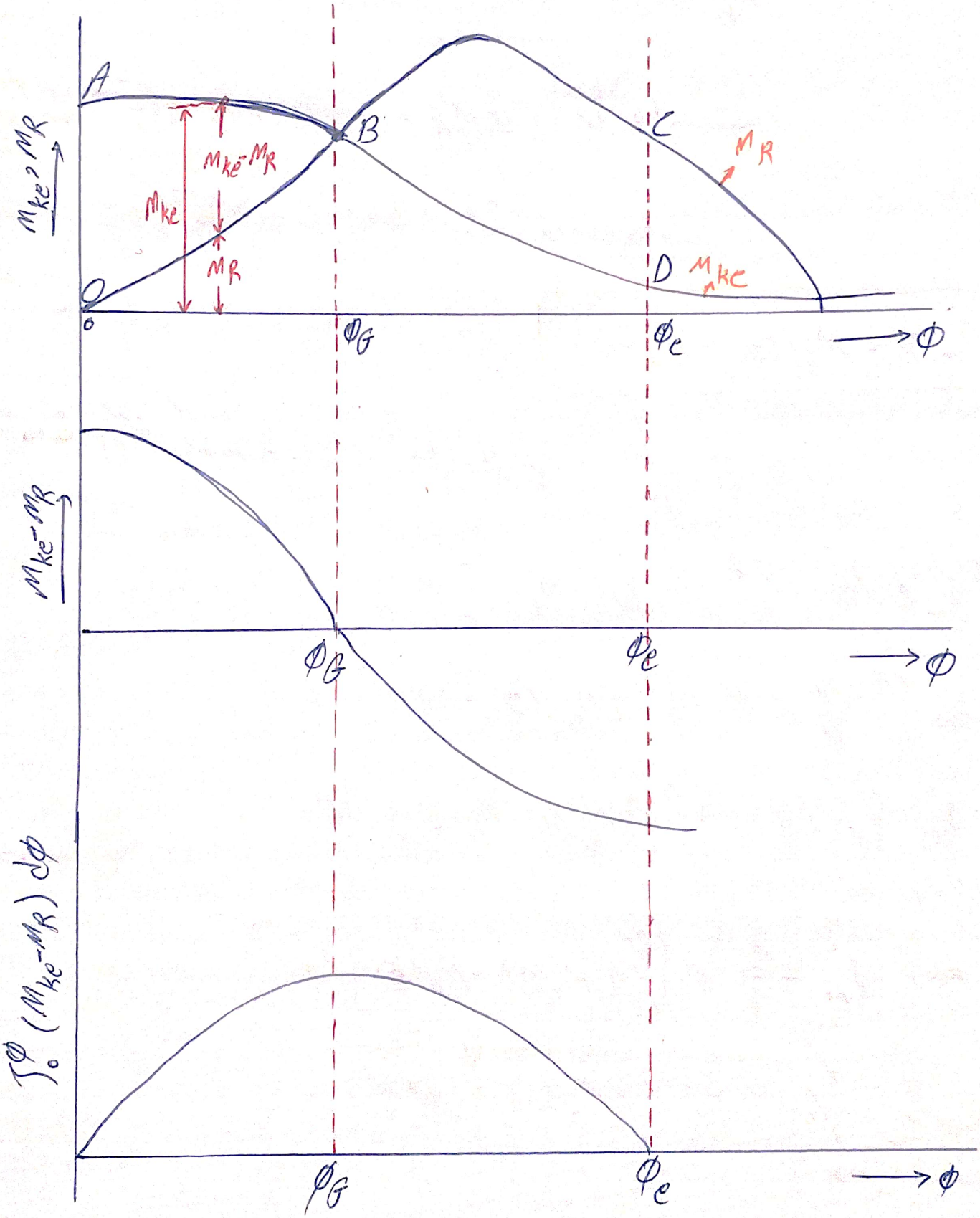
$$\int_0^{\phi} I'_{xx}\ddot{\phi}\,d\phi = \int_0^{\phi}\left[M_{ke}(\phi) - M_R(\phi)\right]d\phi$$

$$\Rightarrow I'_{xx}\int_0^{\phi}\frac{d\dot{\phi}}{dt}\dot{\phi}\,dt = \int_0^{\phi}\left[M_{ke}(\phi) - M_R(\phi)\right]d\phi$$

$$\rightarrow I'_{xx}\int_0^{\phi}\dot{\phi}\,d\dot{\phi} = \int_0^{\phi}\left[M_{ke}(\phi) - M_R(\phi)\right]d\phi$$

$$\Rightarrow \boxed{\underbrace{I'_{xx}\frac{\dot{\phi}^2}{2}}_{\text{انرژی جنبشی در یک زاویه خاص}} = \underbrace{\int_0^{\phi}\left[M_{ke}(\phi) - M_R(\phi)\right]d\phi}_{\text{کار انجام شده توسط ممان‌ها}}}$$

در شکل زیر ممان ke و ممان بازگرداننده برای یک کشش پایدار رسم شده است که در آن ϕ_G زاویه پایداری استاتیکی و ϕ_e زاویه پایداری دینامیکی است.



- ϕ_e زاویه‌ای است که در آن مساحت OAB با BCD برابر است

- در حالت صفحه قبل شناور در اثر تماس واژگون کننده غرق می‌شود و تا زاویه ϕ_e کج شده

و سپس در زاویه ϕ_G به تعادل می‌رسد.

- در نقطه‌ای ϕ_e سمت زاویه‌ای برابر صفر می‌شود.

- اما در حالت ناپایدار که نمودار آن در صفحه بعد آورده شده است، شناور در اثر تماس خارجی

اعمال شده غرق می‌شود چون پس از تقاطع دو نمودار در محل ϕ_{G_2} هنوز دو مساحت با هم

برابر نشده‌اند و به تعادل دینامیکی نمی‌رسند. مساحت قسمت هاشور خورده کوچکتر از مساحت ABO است

- یک طراح کشتی باید:

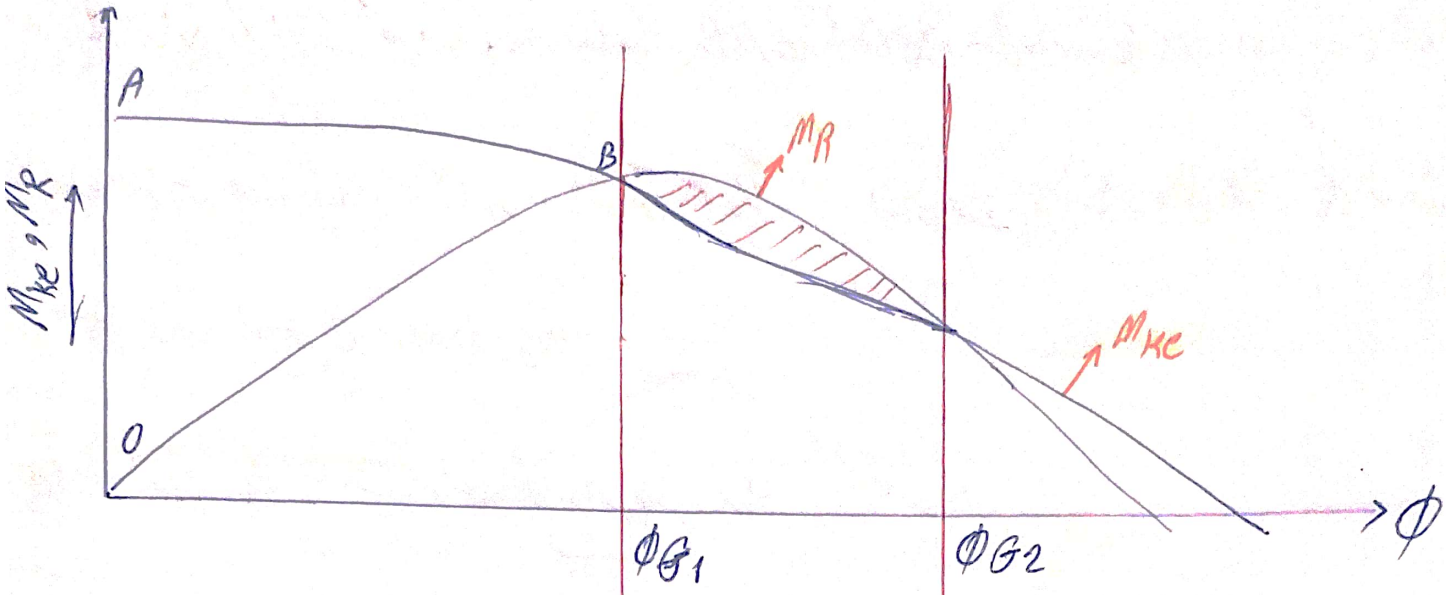
✓ فرکانس‌ها رزونانس و شرایط رزونانس را شناسایی کند

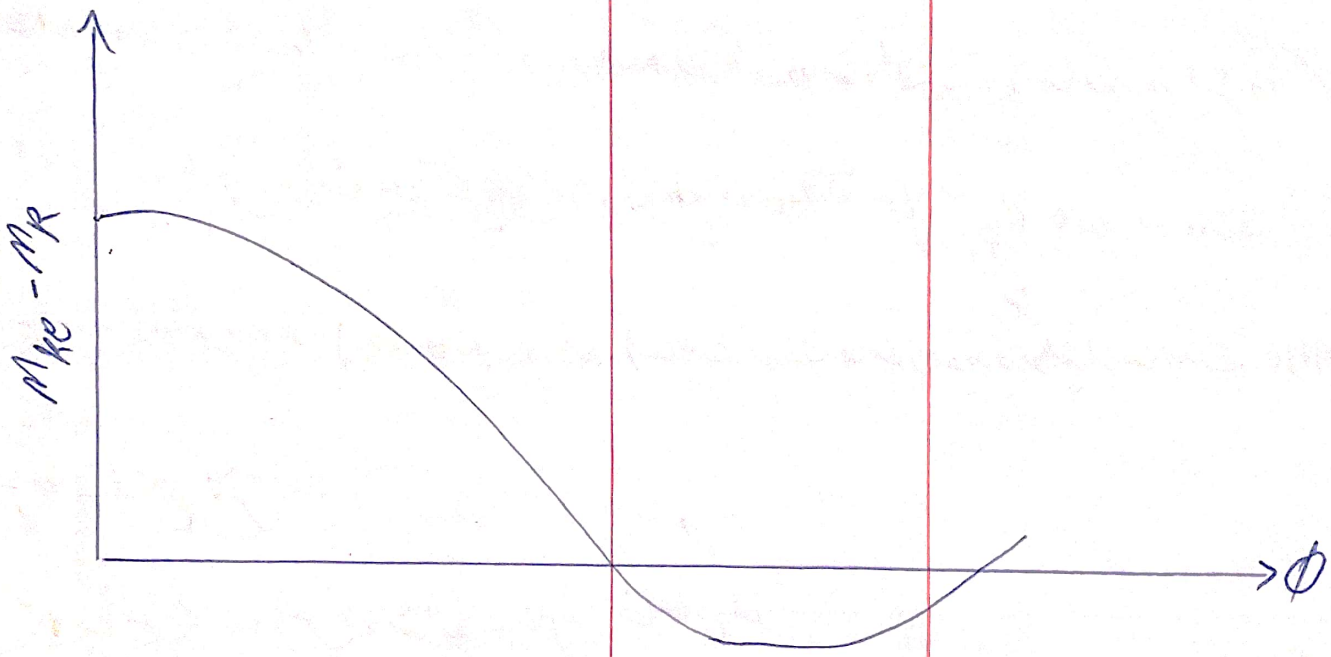
✓ از معادلات غیرخطی برای تخمین و پیش‌بینی حداکثر زوایای غلتش استفاده کند

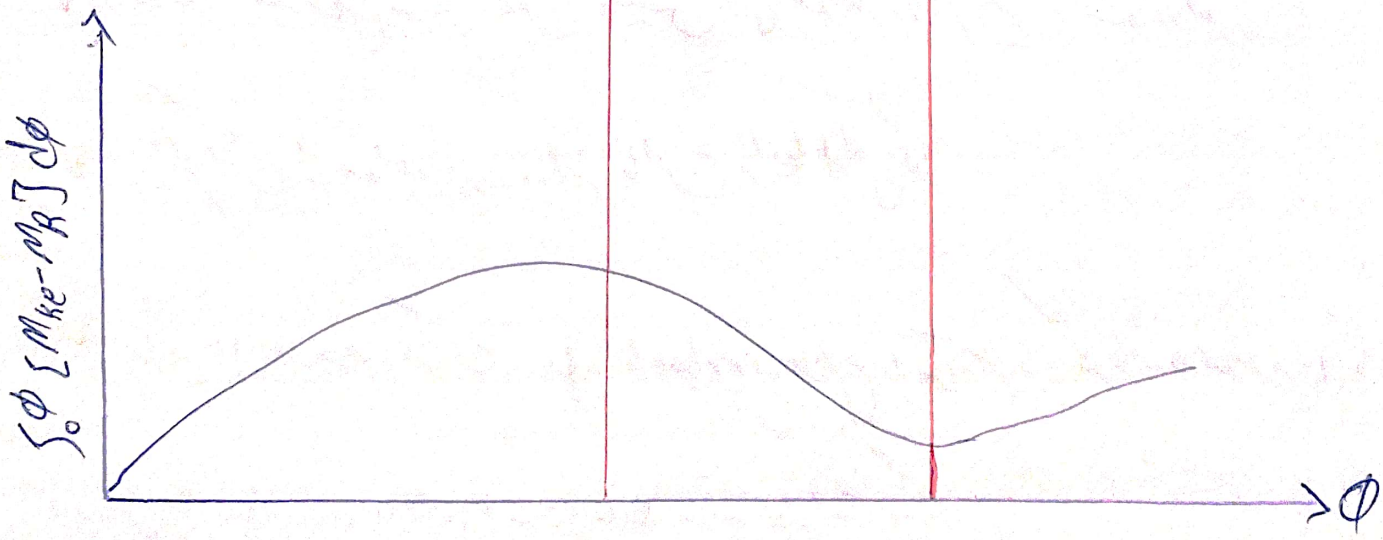
✓ پایداری کشتی را در مواجه با نیروهای مزاحم با این شرایط طراحی کند

✓ برای حل غیرخطی حرکت رول با میدان غیرخطی یا تماس با بازگرداننده غیرخطی از کامپیوتر

و روش‌های عددی مانند Range-kutta مرتبه چهار استفاده کند.


A
B
O
M_{Ke}, M_R
M_R
M_{Ke}
ϕ
ϕ_{G1}
ϕ_{G2}


$M_{Ke} - M_R$
ϕ


$\int_0^{\phi} [M_{Ke} - M_R] d\phi$
ϕ

38-13

جلسه سی و نهم

«مقاومت و توان افزوده در امواج دریایی»

بخش اول

- حفظ سرعت در دریا بسیار مهم است

$P = R.V$ ← توان موتور کشتی

معنای تخمین توان موتور کشتی ← تأمین سرعت در آب آرام بعلاوه 30-15 درصد افزایش برای مقابله با باد و موج

- در سرعت ثابت با افزایش مقاومت (مقاومت افزوده)، توان نیز افزایش می‌یابد: $(P=RV)$

- برای تخمین مقاومت افزوده هم از روش‌های تحلیلی استفاده می‌گردد و هم از روش‌های تجربی. که البته نتایج روش تحلیلی در برخی موارد چندان با روش تجربی همخوانی ندارد ولی باز هم برای پیش‌بینی مقاومت افزوده مناسب است.

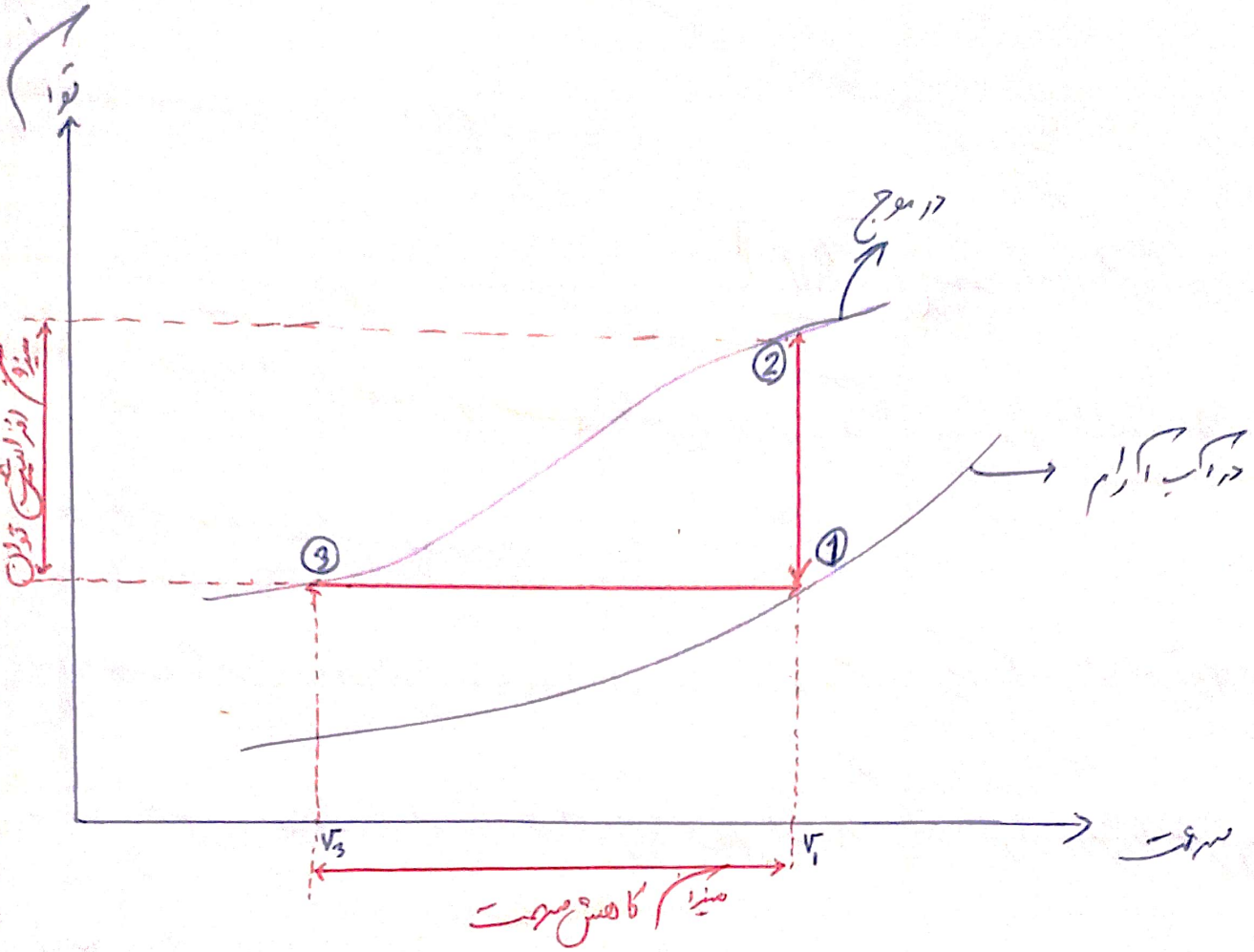
نکته: در شرایط آزمایش مدل برای مقاومت افزوده، حالت موج از روبرو به کشتی بدترین حالت محسوب می‌شود.

- دو روش برای تخمین مقاومت افزوده بر طبق رابطه $P=RV$:

✓ کاهش سرعت در توان ثابت

✓ افزایش توان مورد نیاز برای حفظ سرعت ثابت

که می‌توان آن را بر روی نمودار زیر که برای دو حالت آب آرام و دریای مواج رسم شده است، نشان داد:



- در نمودار فوق، کشتی برای حفظ سرعت خود (V_1) باید توان بیشتری تولید کند یعنی از میزان توان P_1 که در آب آرام لازم داشته است تا با سرعت V_1 حرکت کند باید به توان P_2 در دریای مواج برسد تا همان سرعت V_1 را داشته باشد.

یا برای آنکه با همان توان P_1 که تولید می‌کرده است بخواهد در دریای مواج مسیر بدهد باید سرعت خود را کاهش دهد (از V_1 به V_3)

- کاهش سرعت به دو حالت کلی انجام می‌شود:

1) غیرارادی

2) ارادی: کاهش عمدی سرعت برای کاهش حرکات هیدرو پیچ و جلوگیری از صدمه به کشتی، بار و مسافرین.

عوامل متعدد کاهش سرعت (غیرارادی):

- مقاومت افزوده ناشی از وزش باد
- مقاومت افزوده ناشی از حرکات ناخواسته بخصوص هیدروپیچ (اثرات حرکت رول خیلی کمتر است.)
- مقاومت افزوده ناشی از انعکاس موج برخوردی به بدنه
- مقاومت افزوده حرکت جانبی و جابجایی کشتی در صفحه افقی و اعمال زاویه سکان
- افت بازدهی رانش ناشی از ① تغییر محیط کار کرد پروانه نسبت به آب آرام ② میرایی زدگی پروانه

- عوامل افت بازدهی پروانه به صورت دقیق‌تر موارد زیر هستند:

1) افزایش مقاومت که به معنای افزایش بار بر روی پروانه است

2) کاهش سرعت کشتی به معنی کاهش سرعت سیال ورودی به پروانه

3) تغییرات پیوسته جهت سیال ورودی به صفحه پروانه

4) فرو رفتن و بیرون آمدن متناوب پروانه و مکش هوا

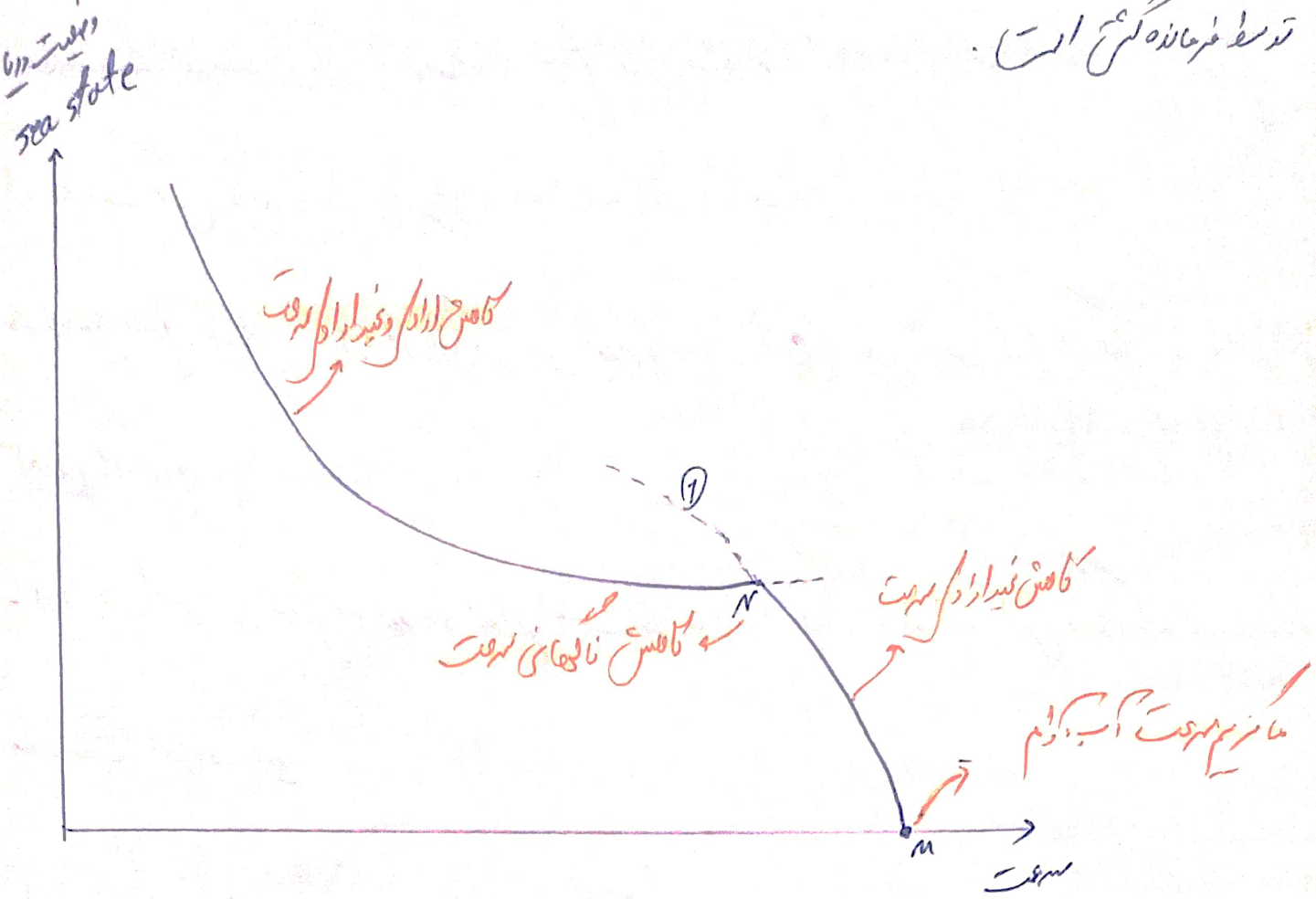
5) کاهش بازدهی ماشین آلات سیستم رانش

عوامل کاهش ارادی سرعت:

- خمیدگی بیش از حد مجاز
- کوبش
- شتاب کم بیش از حد
- بیرون زدن پروانه
- مشکل حفظ مسیر

- در صورت بروز عوامل فوق مجبوریم کاهش سرعت دهیم و به صورت ارادی سرعت را کم می‌کنیم. برای بیان بهتر این موضوع، نمودار ارائه شده است که در صفحه بعد آورده شده است. در این نمودار وضعیت دریای (sea state) برحسب سرعت نمایش داده شده است. ماکزیمم سرعت در نقطه M در آب آرام اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع موج دریا سرعت کاهش می‌یابد. اما از یک نقطه به (نقطه N در نمودار) این کاهش سرعت بسیار شدیدتر است. این به دلیل کاهش ارادی سرعت

توسط فرمانده گرفته است.



در شکل فوق اگر کاهش ارادی سرعت انجام نشود مسیر خط چین (T) ادامه پیدا خواهد کرد.

مقاومت افزوده در موج منظم (لزوم در نظر گرفتن کوپل بین هیو و پیچ)

$$\boxed{R_{AW} = \frac{-k}{2}\left(F_a Z_a \sin\varepsilon_{ZF} + M_a \theta_a \sin\varepsilon_{\theta M}\right)}$$

R_{AW} : مقاومت افزوده در موج منظم (lb)

k : عدد موج

F_a : دامنه نیروی تحریک حرکت هیو (lb)

M_a : دامنه ممان تحریک حرکت پیچ (ft-lb)

Z_a : دامنه حرکت هیو (ft)

θ_a : دامنه حرکت پیچ (rad)

ε_{ZF} : اختلاف فاز بین نیروی تحریک و حرکت هیو (deg)

$\varepsilon_{\theta M}$: اختلاف فاز بین ممان تحریک و حرکت پیچ (deg)

- مقاومت افزوده را می‌توان به صورت انرژی صرف شده برای ایجاد میدانی بیان کرد. این انرژی از طرف کشتی باید تأمین شود

دو عامل اصلی میدانی: ① اصطکاک بین بدنه و سیال ② موج انتشاری از حرکت بدنه (عامل اصلی)

- لذا با دانستن انرژی موجود در امواج انتشاری ناشی از حرکات ناخواسته کشتی می‌توان به تخمین مقاومت افزوده رسید.

رابطه Joosen :

این رابطه با در نظر گرفتن ضریب میرایی حرکات هیو و پیچ به صورت زیر بدست آمده است:

$$R_{AW} = \frac{\omega_e^3}{2g}\left(b_z z_a^2 + b_\theta \theta_a^2\right)$$

ω_e : فرکانس برخورد (rad/sec)

b_z : ضریب دمپینگ حرکت هیو $(\frac{lb.sec}{ft})$

b_θ : ضریب دمپینگ حرکت پیچ $(ft.lb.sec)$

- در ظاهر این فرمول مستقل از سرعت نوشته شده است اما می‌دانیم که ω_e خود وابسته به سرعت است.

- این فرمول با این فرض نوشته شده است که دامنه موج و دامنه حرکت در مقایسه با نصف طول کشتی $(L/2)$ کوچک هستند و پارامتر فرکانس $\omega_e^2 L/2g$ حدود ۱ است. و عدد فرود در حدود $\sqrt{B/L}$ است.

- این مرحله، مقاومت افزوده را کاملاً برابر با اتلاف انرژی توسط حرکات در نظر میگیرد.

- برای حالت موج منظم از سینه (head sea) مقاومت افزوده عبارت است از:

$$\boxed{\frac{R_{AW}}{\rho g \zeta_a^2 (B^2/L)} = \frac{L^2}{32B^2}\left[\left(\frac{z_a}{\zeta_a}\right)^2 P_1 + \frac{\pi^2 L^2}{L_w^2}\left(\frac{\theta_a l_w}{2\pi \zeta_a}\right)^2 P_3 - \frac{2\pi L}{L_w}\left(\frac{L_w \theta_a}{2\pi \zeta_a}\right)\left(\frac{z_a}{\zeta_a}\right) P_2 \cos\varepsilon\right]}$$

که در آن:

$$P_1 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2}\frac{2}{L}\rho \nabla \sqrt{\frac{g}{L}}\, B_{33}$$

$$P_2 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2}\frac{2}{L}\rho \nabla \sqrt{\frac{g}{L}}\,(B_{35}+B_{53})$$

∇: حجم جابجایی (ft^3)

$$P_3 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2}\frac{2}{L}\rho \nabla \sqrt{\frac{g}{L}}\, 4B_{55}$$

$$z = z_a \cos\omega_e t$$

$$\theta = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon)$$

$$\varepsilon = |\varepsilon_z - \varepsilon_\theta|$$

که ضرایب B_{33} و $B_{35}+B_{53}$ و B_{55} با استفاده از منحنی های زیر بدست می آیند

$$B_{33} = \frac{1}{\omega_e \nabla}\sqrt{g/L}\int b_n \, d\xi$$

$\xi = \frac{2x}{L}$: موقعیت طولی بی بعد

$$B_{35}+B_{53} = \frac{2}{\omega_e \nabla}\sqrt{\frac{g}{L}}\int \xi b_n \, d\xi$$

$$B_{55} = \frac{1}{\omega_e \nabla}\sqrt{\frac{g}{L}}\int \xi^2 b_n \, d\xi$$

در واقع اجزای فرمول قبل را می‌توان به سه روش محاسبه کرد:

✓ هم دامنه حرکات و هم ضرایب میرایی از روش نوار

✓ دامنه حرکات از روش تجربی و ضرایب میرایی از روش نوار

✓ هم دامنه حرکات و هم ضرایب میرایی از روش تجربی

- این فرمول دارای تطابق خوبی با نتایج تجربی است بخصوص در سرعت کم و بالا. البته این رابطه برای فرکانس‌های بعد $\omega_e^2 B / 2g$ تا ۶ صادق است و هرگونه مقاومت با این مقدار می‌تواند نتایج را با خطا مواجه کند. بنابراین در حالت سرعت پایین یا امواج بلند، خطا ممکن است زیاد شود. البته در سرعت کم پایین خطای تجربی نیز قابل ملاحظه می‌باشد. $\left(\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} U \cos\mu\right)$

مثال: برای کشتی با اطلاعات زیر مقاومت افزوده را محاسبه کنید

$L = 4.8\ ft$, $B = 0.648\ ft$, $V = 1.415$ knots (i.e., $2.394\ ft/sec$)

$\nabla = 0.7106\ ft^3$, $L_w = L$ (i.e., $\omega_w = 6.49\ rad/sec$ در آب عمیق) , $\zeta_a = 0.05\ ft$

$z_a = 0.0307\ ft$ $\theta_a = 0.0404\ rad$, $\cos\varepsilon = 0.0122$, $f = 1.9905$

$$\int b_n(\xi)\, d\xi = 3.171\ lb\text{-}sec/ft$$

$$\int b_n(\xi)\, \xi\, d\xi = 0.045\ lb\text{-}sec$$

$$\int b_n(\xi)\, \xi^2\, d\xi = 8.815\ lb\text{-}sec\text{-}ft$$

Ans: $\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} V\cos\mu = 6.49 - \frac{6.49^2}{32.2} 2.394(-1) = 9.62$ rad/sec

$$B_{33} = \frac{1}{\omega_e \nabla}\sqrt{\frac{g}{L}}\int b_n \, d\xi = \frac{1}{9.62 \times 0.7106} \times \sqrt{\frac{32.2}{4.8}}(3.171) = 1.201$$

$$B_{35} + B_{53} = \frac{2}{\omega_e \nabla}\sqrt{\frac{g}{L}}\int \xi \, b_n \, d\xi = \frac{2}{9.62(0.7106)} \times \sqrt{\frac{32.2}{4.8}}(0.045) = 0.0341$$

$$B_{55} = \frac{1}{\omega_e \nabla}\sqrt{\frac{g}{L}}\int \xi^2 b_n \, d\xi = \frac{1}{9.62(0.7106)} \times \sqrt{\frac{32.2}{4.8}}(8.815) = 3.34$$

$$K_1 = \frac{\omega_e^3}{\rho g^2}\frac{2}{L}\rho\nabla\sqrt{\frac{g}{L}} = \frac{(9.62)^3}{1.9905(32.2)^2}\left(\frac{2}{4.8}\right) \times 1.9905 \times 0.716 \times 2.59 = 0.6581$$

$$\Rightarrow P_1 = K_1 B_{33} = 0.79$$

$$P_2 = K_1 (B_{35} + B_{53}) = 0.0224$$

$$P_3 = K_1 (B_{55}) = 8.792$$

که با جایگذاری در فرمول صفحه 39-7 خواهیم داشت (به علت طولانی بودن فرمول از نوشتن آن صرف نظر شده است):

$$R_{AW} = 0.802 \, lb$$

- با توجه به تحلیل ابعادی سده و روابط قبل در مورد مقاومت افزوده می‌توان گفت:

✓ مقاومت افزوده متناسب با توان 2 ارتفاع موج است

✓ مقاومت افزوده مستقل از مقاومت در آب ساکن است.

✓ مقاومت افزوده تابعی از حرکات هیو و پیچ و اختلاف فاز آنها با موج است.

✓ حداکثر مقاومت افزوده موقعی انتظار می‌رود که در فرکانس حرکت هیو و پیچ داریم. یعنی شناورهایی که غواص دریایی و حرکتی ضعیفی دارند همچنین دارای مقاومت افزوده بالایی هستند.

✓ از آنجا که مقاومت افزوده به صورت نتیجه موج انتشاری در نظر گرفته می‌شود لذا می‌توان در نظر گرفت که انرژی صرف سده در اثر میرایی اصطکاکی چندان اهمیتی ندارد لذا پدیده مقاومت افزوده یک پدیده هیدرودینامیکی است که اصولاً متأثر از انیرژی و موج است. بنابراین مقاومت افزوده از قانون فرود تبعیت می‌کند چنانکه مقاومت کل کشتی از حاصلضرب مقاومت مدل در توان 3 ضریب مقیاس بدست می‌آید.

✓ از آنجا که مقاومت افزوده متناسب با توان 2 ارتفاع موج است مقاومت افزوده بی بعد به صورت روبرو بیان می‌شود.

$$\sigma_{AW} = \frac{R_{AW}}{\rho g \zeta_a^2 (B^2/L)}$$

✓ از آنجا که مقاومت افزوده یک پدیده غیر وشکوه است لذا آزمایش مقاومت افزوده را می‌توان با یک مدل کوچک انجام داد (جمع اثرات این مدل دیگر مهم نیست).

✓ از آنجا که مقاومت افزوده درصد کوچکی از مقاومت کل است لذا این آزمایش باید با دقت و وسواس زیاد انجام شود (نتایج بهتر در سرعت‌های بالاتر)

- از معادلات تئوری برای امواج منظم می‌توان نتیجه گرفت:

✓ همگرایی پیچ بهترین فاکتور در مقاومت افزوده در سرعت‌های پایین است ولی حرکت هیدرودینامیکی اثرات بزرگتری در سرعت‌های بالا است.

✓ انعکاس موج از کناره‌های بدنه نسبتاً کوچک است.

✓ حداکثر مقاومت افزوده در سرعتی اندکی بالاتر از سرعت رزونانس پیچ اتفاق می‌افتد

✓ با مقایسه نتایج تئوری با تجربی مشخص شده است که در روش تئوری، مقدار مقاومت افزوده برای سرعت‌های پایین و طول موج‌های بلند تخمین دست بالا (overestimate) می‌دهد ولی برای طول موج‌های کوچک (دریای ملایم) تخمین دست پایین (underestimate) می‌دهد.

تخمین مقاومت افزوده در موج نامنظم

- تخمین مقاومت افزوده را می‌توان به همان روش حرکات در موج نامنظم و برهم‌نهی خطی استفاده کرد که شامل مراحل زیر است:

1) تعیین طیف موج برای یک سرعت دریایی خاص یا یک سرعت باد معین با استفاده از رابطه ITTC

2) بدست آوردن مقدار RAO با استفاده از روش تحلیلی یا تجربی در موج منظم

البته روش برهم‌نهی خطی به شرطی درست است که مقاومت افزوده متناسب با توان 2 دامنه موج باشد یعنی

$$R_{AW} \propto \zeta_a^2 \quad \text{یا} \quad \sqrt{R_{AW}} \propto \zeta_a$$

3) برای هر یک از فرکانس‌ها، هر نقطه از طیف پاسخ (مقاومت افزوده) از حاصلضرب مقدار طیف موج در مقدار RAO برای همان فرکانس برخورد بدست می‌آید.

$$R_{AW} = 2\int_0^{\infty} S_\zeta(\omega_e)\,\frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega_e)\cdot d\omega_e$$

بنابراین مقدار مقاومت افزوده متوسط عبارتست از:

$$R_{AW\,\text{متوسط}} = 2m_0$$

نکته: در اینجا منظور از مقدار RAO مقدار $\frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}$ است چرا که خود مقاومت افزوده R_{AW} متناسب با ζ_a^2 است و لذا اینجا R_{AW} دارای توان 2 نیست.

$$RAO \longrightarrow \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}$$

مثال: برای یک کشتی ω_e ، ζ_a و $S_\zeta(\omega_e)$ و R_{AW} به صورت آنچه در جدول آمده است داده شده است مقدار مقاومت افزوده متوسط را در امواج نامنظم حساب کنید. (چهار ستون اول داده شده است)

ANS:

ω_e (rad/sec)	ζ_a (ft)	$S_\zeta(\omega_e)$ (ft²-sec)	R_{AW} (tons)	R_{AW}/ζ_a^2 (tons/ft²)	$S_\zeta(\omega_e)\times\frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}$ (tons-sec)	ضرایب سیمپسون	تابع
0.2	4	0	0	0	0	1	0
0.6	5	19	100	4	76	4	304
1	5	20	400	16	320	2	640
1.4	5	7.5	225	9	67.5	4	270
1.8	2	3.5	0	0	0	1	0
							Sum = 1214

$$\Rightarrow m_0 = \frac{1}{3}(0.4)\times 1214 = 162 \text{ tons}$$

فاصله ω_e ها

مقاومت $R_{AW} = 2m_0 = 2\times 162 = 324$ tons

البته مقاومت افزوده کشتی در موج نامنظم را می‌توان به طور مستقیم از تست مدل در موج نامنظم (در دو حالت سرعت ثابت و یا توان ثابت) و مقایسه مقدار متوسط مقاومت با مقدار مقاومت در آب ساکن بدست آورد.

معمولاً نیاز به تست یا تحلیل در حالت دریای مواج تا حداکثر سرعت نیست چون کشتی در دریای مواج به صورت اختیاری (ارادی) اقدام به کاهش سرعت می‌کند.

جلسه چهلم

مقاومت و توان افزوده در امواج دریایی

بخش دوم

تخمین توان افزوده

راه اول: از طریق مقاومت افزوده ⟵ $P = \frac{P_E}{\eta} = \frac{RV}{\eta}$

- با افزایش مقاومت، راندمان نیز در امواج دریا کاهش می‌یابد بنابراین علاوه بر مقاومت افزوده که به صورت مستقیم بر توان مورد نیاز تأثیر می‌گذارد راندمان سیستم نیز به صورت معکوس تأثیرگذار است.

راه دوم: از طریق افزایش گشتاور موتور (T) ⟵ $P_B = T.\omega$ توان موتور

در اینجا منظور از ω سرعت زاویه‌ای دوران موتور است.

- سه عامل (1) تفاوت شرایط محیطی پروانه نسبت به آب آزاد (2) اثرات حرکت محدود ناشی از هیدروپیچ بر جهت سیال ورودی به پروانه (3) اثرات حرکت افقی ناشی از موج و اسلو و حرکت ذرات موج بر جهت سیال ورودی به پروانه، باعث می‌شوند که گشتاور و دور پروانه برای حفظ سرعت ثابت افزایش بیابد.

- اثرات ارتفاع موج روی تراست (یا گشتاور) به صورت تجربی در موج منظم مطالعه شده است در دو حالت سرعت ثابت و rpm ثابت. نتایج این آزمایش به صورت زیر است

1) برای rpm ثابت پروانه: تغییر تراست و گشتاور متناسب با توان 2 ارتفاع موج است.

2) برای سرعت ثابت کشتی: هر دو عامل افزایش تراست و گشتاور متناسب با توان 2 ارتفاع موج است

3) برای ارتفاع ثابت و طول موج متفاوت موج منظم: دامنه افزایش گشتاور در امواج طویل بیشتر است. در ارتفاع و طول موج ثابت، با افزایش سرعت، مقدار دامنه گشتاور کاهش می‌یابد

نکته: در آزمایش‌هایی که به آزمایش خودش رانش (self propulsion) معروف است به بررسی تأثیرات موج منظم بر اندازه پروانه نسبت به حالت آب آرام پرداخته شد و نتیجه مهم زیر حاصل شد.

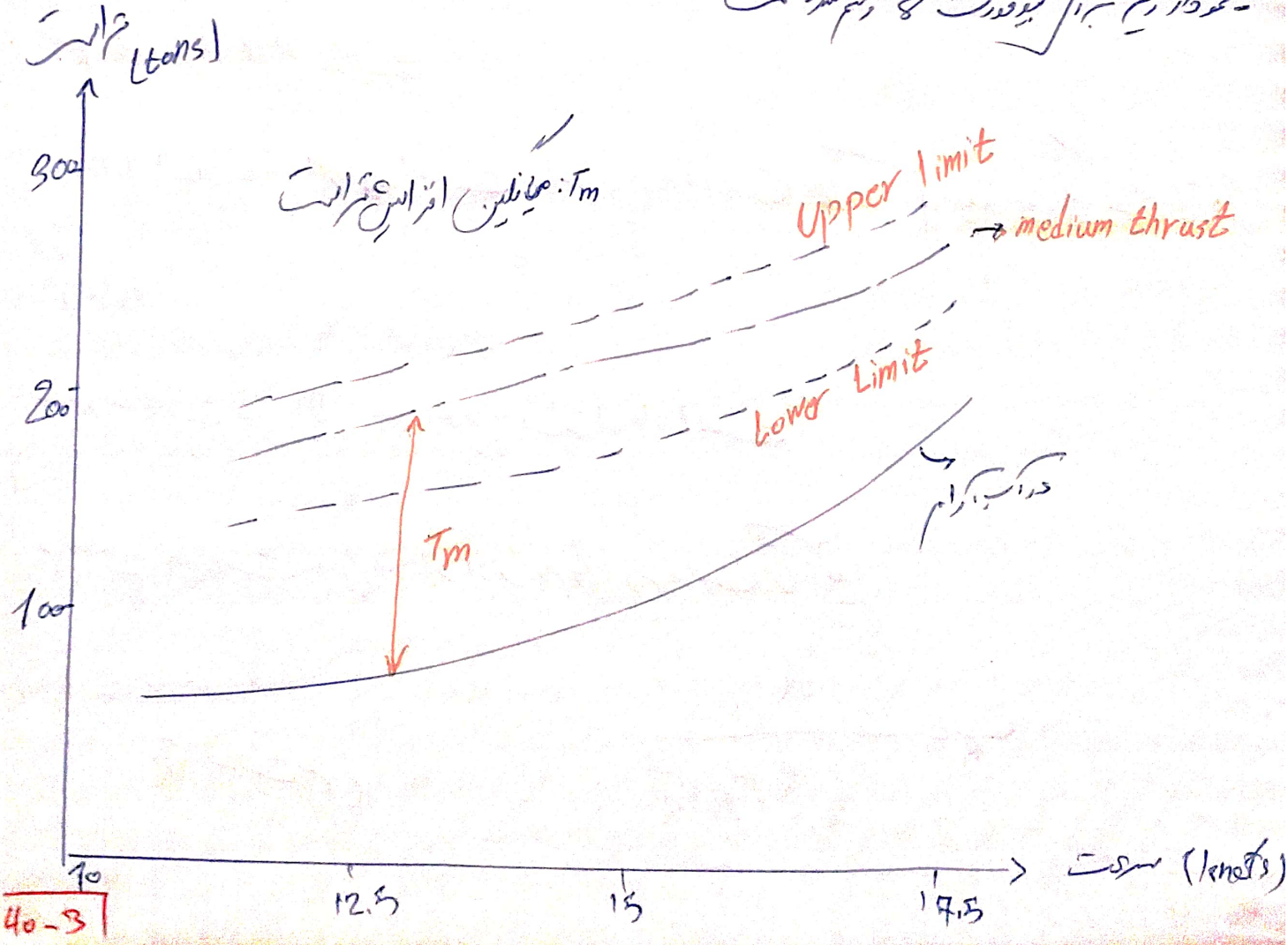
نتیجه مهم: فاکتورهای آزمایش خودش رانش در آب مواج برابر مقادیر آب آرام است. این جمع‌بندی آنالیز بازدهی رانش را ساده می‌کند.

تراست گشاور در امواج نامنظم

برای سرعت، تراست، گشاور و rpm در موج نامنظم می‌توان گفت:

- تغییرات سرعت در rpm ثابت و تغییرات rpm در سرعت ثابت از تابع توزیع نرمال (گاوسی) تبعیت می‌کند.
- افزایش متوسط تراست و گشاور در امواج نامنظم از توزیع نرمال تبعیت می‌کند (مستقل از روش سرعت ثابت یا rpm ثابت)
- تغییرات تراست و گشاور در موج نامنظم از توزیع رایلی تبعیت می‌کند مستقل از روش آن

- نمودار زیر برای پروفورت ۵ رسم شده است



برای گشاور نیز نمودار مشابه نمودار صفحه قبل وجود دارد.

اثر حرکت رول بر مقاومت افزوده

- آزمایشات رول اجباری در آب ساکن نشان داده است که پریود حرکت رول در مقاومت اهمیتی ندارد ولی دامنه حرکت رول دارای اهمیت است.

- با افزایش سرعت، افزایش مقاومت ناشی از حرکت رول کاهش می‌یابد.

- اگر دامنه حرکت رول کمتر از 10 درجه باشد افزایش مقاومت ممکن است کمتر از 3 درصد باشد.

- حرکات رول روی پراکنش گشاور و دور پروانه اثر چندانی ندارد.

سهم باد در افزایش مقاومت

باد شامل ایجاد موج است بنابراین به صورت همزمان بر مقاومت کشتی تاثیر می‌گذارند.

- در سرعت‌های بالا، سهم موج بیشتر از باد است.

- ضریب مقاومت ناشی از باد از رابطه زیر بدست می‌آید:

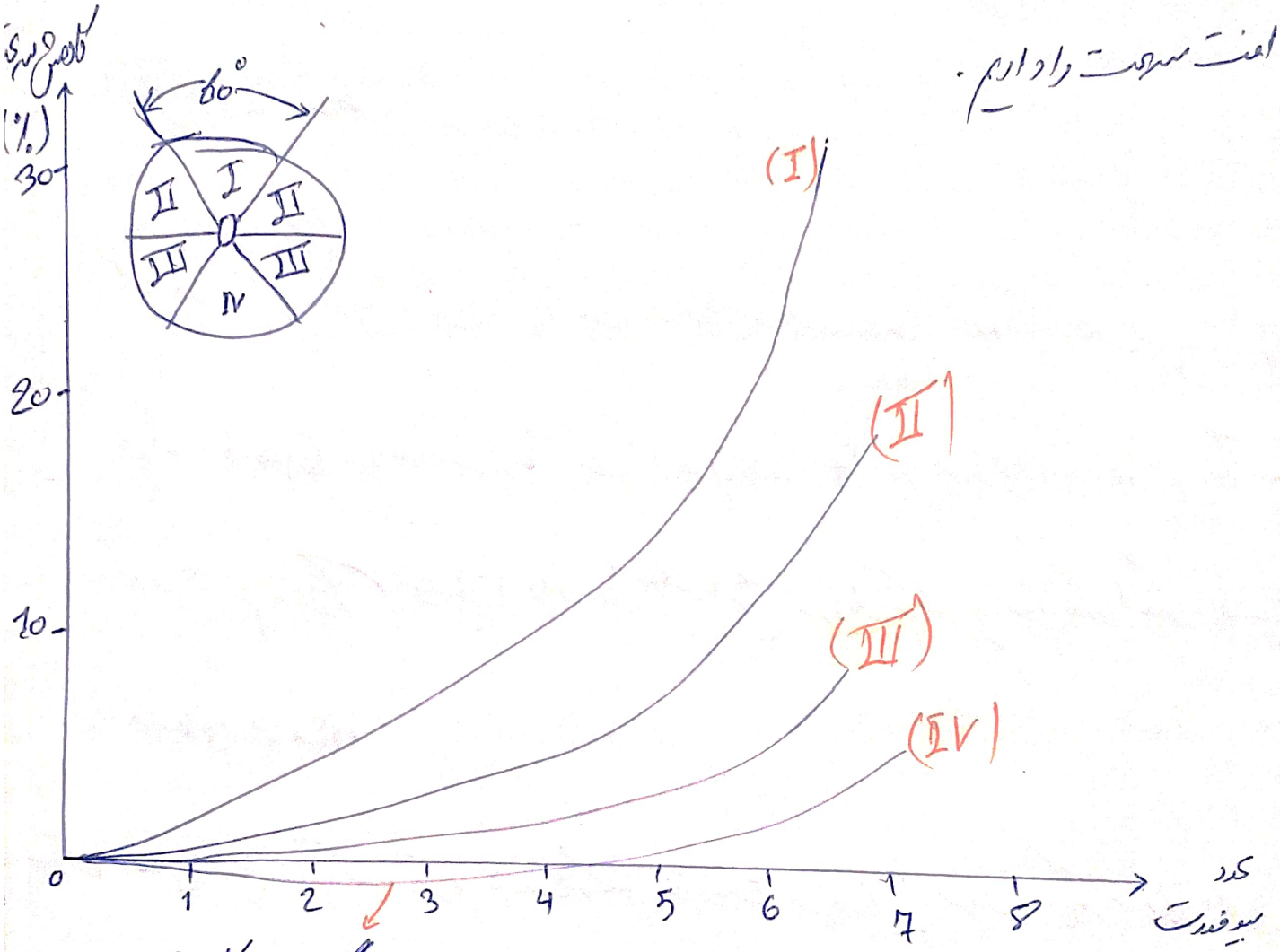
$$C_R = \frac{R_{wind}}{\frac{1}{2}\rho A_R V_R^2}$$

V_R: سرعت نسبی

جمع بندی

نمودار زیر از آزمایش کشتی واقعی بدست آمده است.

- در حالت موج از روبرو بیشترین افت سرعت و در حالت موج از پشت کمترین افت سرعت را داریم.



در این حالت مقدار کاهش سرعت منفی شده است یعنی سرعت به بیش از سرعت خود کشتی افزایش می‌یابد

- در کشتی‌های مدرن امروزی در دریای مواج، علی‌رغم موجود بودن نیروی موتور، سرعت کاهش می‌یابد به دلیل کوبش، خمیدگی بدنه، شتاب‌های زیاد و بیرون زدن پروانه

✓ در شرایط بار سبک (آبخور کم)، سرعت کشتی در بیوفورت 4 یا 5 در موج از روبه‌رو کاهش می‌یابد به خاطر کوبش و جیرکوبش زدن پروانه

✓ در شرایط بار سنگین (آبخور حداکثر)، کاهش سرعت کشتی در بیوفورت 6 یا 8 اتفاق می‌افتد به خاطر: خیس شدن و جابجایی بارها

✓ در شرایط بار کیسه متوسط (آبخور متوسط)، یک حالت ایده‌آل محسوب می‌شود چرا که به خاطر غرق بردن مناسب، آب تا بیوفورت 7 روی عرشه می‌آید. در این آبخور کوبش هم به حداقل محاول ایجاد صدمات به کشتی در نظر گرفته می‌شود مگر اینکه باعث جابجایی بار شود.

✓ حبابی سینه در آب آرام باعث کاهش مقاومت و افزایش سرعت می‌گردد ولی معمولاً در دریای مواج باعث صدمات کوبش شدیدتر و در نتیجه کاهش سرعت می‌گردد. لذا یک کشتی بدون حبابی سینه ممکن است حفظ سرعت در دریای مواج را بهتر انجام دهد.

✓ یک تخمین کلی برای درصد کاهش سرعت در حالت موج از روبه‌رو برای کشتی‌های بدون

محاسبه سینه با سرعت متوسط:

جواب: برحسب درصد بیان می‌شود

L: طول کشتی برحسب متر

بیوفورت 5 : $\frac{900}{L} + 2$

بیوفورت 6 : $\frac{1300}{L} + 6$

بیوفورت 7 : $\frac{2100}{L} + 11$

بیوفورت 8 : $\frac{3600}{L} + 18$

توجه: این فرمول فقط طول را در نظر گرفته و لذا دقیق نیست!

جلسه چهل و یکم

«اثرات موج در طراحی سازه کشتی»

منابع این قسمت: Dynamics of marine vehicles / chapter 13 / pp: 249-277

- اثرات منحصر به فرد امواج بر طراحی سازه کشتی بدلیل شتاب که اعمال شده ناشی از حرکت است.

- دو عامل اصلی از نتیجه بارگذاری خارجی: ① نیروی برشی ② ممان خمشی

- ممان پیچشی نیز عامل سوم است که کم اهمیت تر است.

- قوانین استانداردها در طراحی سازه کشتی نقش محوری دارند که نتیجه آن ساده شدن فرآیند طراحی کشتی و همچنین اطمینان کافی از نتیجه طراحی است.

- عدم کفایت قوانین استاندارد در: ① کشتی های خاص (نوع یا ابعاد مثلاً سوپرتانکرها) ② بارگذاری های خاص (ناشی از کاربری خاص)

- ممان های خمشی در سه صفحه ایجاد می شوند: ① ممان خمشی در صفحه عمودی ② ممان خمشی در صفحه افقی ③ ممان خمشی در صفحه عرضی

- ممان خمشی مثبت زمانی است که کیل کشتی کشیده می شود و عرشه آن جمع می شود (قرارداد) در صفحه عمودی

- ممان خمشی مثبت در صفحه افقی زمانی است که سمت راست شناور جمع می شود (قرارداد)

- هر مقطع از کشتی در معرض بارگی خارجی قرار می‌گیرد که به صورت فشار وارد بر سطح بدنه مدل می‌شود:

✓ انتگرال اول این فشارها در کل طول کشتی = نیروی برشی

✓ انتگرال دوم این فشارها در کل طول کشتی = ممان خمشی

- بارگی خارجی عبارتند از: (1) تفاضل وزن و بویانسی در هر مقطع از طول بدنه (2) نیروی خارجی

- بارگی خارجی مجموع برآیند سه حالت است: (1) ساکن در آب آرام (تابعی از جابجایی داخلی کشتی و شکل کاسه بدنه) (2) حرکت در آب آرام و تولید موج ناشی از حرکت (3) ناشی از امواج دریا (ممان‌های حاصل از عامل دوم و سوم را «ممان خمشی موج» گویند)

$$\boxed{M = M_s + M_w}$$

M_s: حالتی که کشتی ساکن ولی آب دریا حرکت می‌کند

M_w: حالتی که کشتی حرکت می‌کند. (ممان ناشی از موج)

- ممان خمشی ناشی از موج، خود ترکیبی از چهار عامل زیر است:

1) تغییر شکل حجم داخل آب (بویانسی ناشی از موج (از حرکت خود کشتی و موج دریا) و حرکات هیدرو بیم)

2) تغییر بویانسی ناشی از اثر اسمیت (کاهش فشار ناشی از حرکت ذرات موج)

3) بارگی ناشی از نیروی اینرسی (این نیروها تابعی از جرم کشتی هستند مانند جرم افزوده)

4) بارگذاری ناشی از نیروهای هیدرولیکی (خود شامل دو مولفه است ① هیدرولیک موج ② هیدرولیک ویسکوز)

- ممان های خمشی موج تابعی هستند از: شکل صفحه، بجوار - شکل مقاطع عرضی - شعاع ژیراسیون - وزن - سرعت و غیره

- معمولاً ممان های خمشی در اطراف مقاطع میانی به حداکثر می رسند و به سمت سینه و پاشنه کشتی به صفر می رسند لذا: در طراحی سازه، قسمت میانی از اهمیت خاصی برخوردار است

- برای مدلسازی موج در مباحث سازه ای معمولاً فرض می شود که یک موج ترکوئیدی با طول موج برابر طول کشتی و ارتفاع موج برابر با: $\frac{L_w}{20}$ یا $1.1\sqrt{L_w}$

نکته: دو حالت حدی برای ممان های خمشی عمودی: Hogging & sagging

که حالت Hogging بسیار خطرناک تر از sagging است.

- باید اثر اسمیت (smith) در اصلاح بویانسی و نحوه توزیع بویانسی در طول کشتی لحاظ شود.

زیرا اسمیت (smith): اثر حرکات جزئی ذرات موج بر روی کاهش فشار سیال و کاهش بویانسی

- در هر مقطع عرضی از طول تیر، تنش ناشی از ممان‌های خمشی عمودی و افقی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\boxed{\sigma = \sqrt{\left(\frac{M_V z}{I_V}\right)^2 + \left(\frac{M_H y}{I_H}\right)^2}}$$

M_V: ممان خمشی عمودی

M_H: ممان خمشی افقی

y: فاصله از محور z (افقی)

z: فاصله از محور y (عمودی)

I_V: ممان اینرسی حول y

I_H: ممان اینرسی حول z

گذری بر درس استاتیک

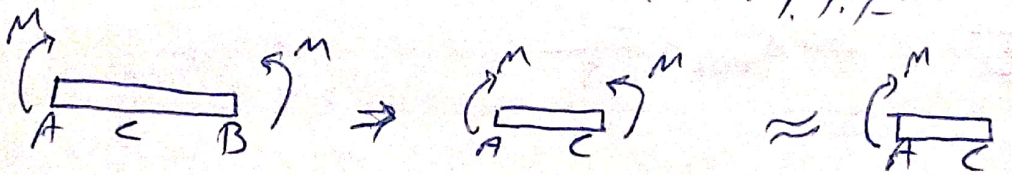
خمش خالص عضوی که تحت اثر کوپل مساوی (متقابل) عمود بر صفحه طولی خود قرار دارد در وضعیت خمش خالص است:

- در ناحیه خمش خالص، برش صفر است. بنابراین مقدار ممان ثابت است

$$\frac{dM}{dx} = V = 0 \Rightarrow M = \text{constant}$$ (ثابت)

در این وضعیت برآیند نیروهای داخلی در هر مقطعی معادل با یک کوپل است.

- مشاهده می‌شود که اگر برش در عضو AB در نقطه C بزنیم، مقابل قطعه AC ایجاب می‌کند که نیروی وارد از طرف سمت دیگر برابر با M باشد.



تنش خمشی

تنش محور ناشی از خمش (تنش خمشی) در ناحیه کشسان از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_x = \frac{-My}{I}$$

M: لنگر مؤثر در مقطع مطابق قرارداد علامت رویه روبه است: ( )

y: فاصله از تار خنثی که در بالای محور مثبت و در پایین محور منفی است.

I: ممان اینرسی مقطع حول تار خنثی است

σ_x مثبت کشش و σ_x منفی فشاری است.

اساس مقطع:

تنش خمشی ماکزیمم در دورترین تار از تار خنثی (چه در سمت کشش و چه در سمت فشاری) رخ می‌دهد بنابراین:

$$\sigma_{max} = \frac{-Mc}{I}$$

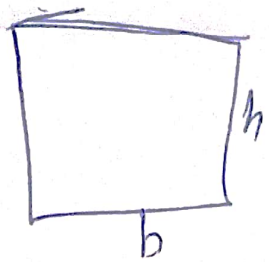
که c فاصله دورترین تار از تار خنثی است.

$\frac{I}{c}$ را اساس مقطع کشسان (مدول مقطع کشسان) می‌نامند.

$$S = \frac{I}{c} \quad \Rightarrow \sigma_{max} = \frac{-M}{S}$$

مثال: $\frac{S}{A}$ مقطع مستطیلی را بدست آورید و نتیجه را تفسیر کنید

Ans:



$$\frac{S}{A} = \frac{I}{cA} = \frac{\frac{1}{12}bh^3}{\frac{h}{2}\times bh} = \frac{h}{6}$$

نتیجه: هرچه عرض تیر کمتر و ارتفاع آن بیشتر باشد، اساس مقطع بیشتر است.

بارگذاری وارد بر کشش سکان در آب کدام

نیروی برشی در آب سکان (انتگرال اول):

$$\boxed{V_x = \int_0^x W\,dx = \int_0^x w\,dx - \int_0^x b\,dz}$$

ممان خمشی در آب سکان (انتگرال دوم):

$$\boxed{M_x = \int_0^x \int_0^x W\,dx\,dx = \int_0^x \int_0^x w\,dx\,dx - \int_0^x \int_0^x b\,dx\,dx}$$

در این حالت وضعیت تعادل برای تساوی وزن و بویایی و مرکز ثقل طولی و بویایی

باید رعایت شود.

- طبق استاندارد ABS اگر ممان خمشی آب ساکن بیشتر از مقدار زیر نباشد دیگر نیاز به افزایش اساس مقطع (section modalus) نیست

$$\boxed{S < fB(C_B+0.5)}$$

B : عرض

C_B : ضریب بلوکی (نباید کمتر از 0.68 باشد)

C : برای کشتی های بارگی برابر 1 و برای کشتی های نفتکش برابر 1.03

- S و f از جدول زیر بدست می آیند

Lengh (ft)	f	S for oil carriers	S for other ships
600	590	3.78	4.25
800	1175	3.78	4.285
1000	1921	3.9	4.38

بارگی وارد بر کشتی متحرک در آب آرام

- با افزایش عدد فرود ممان خمشی افزایش می یابد

- با افزایش ضریب بلوکی ممان خمشی افزایش می یابد (ممان مثبت یا منفی)

- در یک عدد فرود مشخص، در کشتی های تندرو (با ضریب بلوکی کوچک) دارای خمش حالت سالینگ

و در کشتی های کندرو (با ضریب بلوکی بزرگ) دارای خمش حالت هالینگ هستیم

ممان خمشی ناشی از حرکت هیو در آب آرام

هر جزئی از وزن کمین حرکت هیو دچار شتاب می‌شود بنابراین نیروی افزایش می‌یابد. اثر آن را می‌توان بر روی وزن به صورت وزن اصلاح شده نمایش داد:

$$\boxed{W + \frac{W'}{g}\ddot{z} = W \pm \frac{W'}{g}\omega^2 z_a}$$

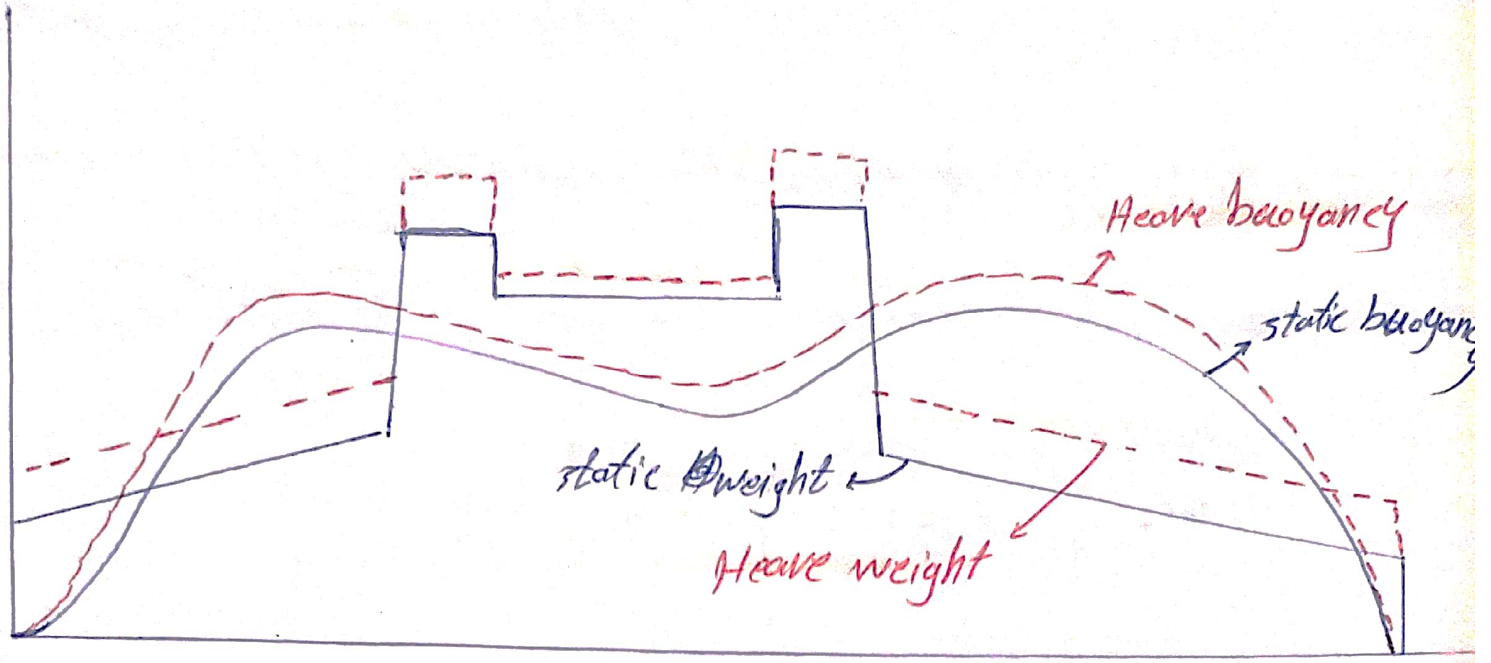
در اثر حرکت هیو افزایش بویانسی عبارتست از $\rho g A_{wp} z$ لذا تغییرات روی نیروی بویانسی نیز باید اعمال گردد.

- لذا ممان خمشی ناشی از هیو عبارتست از:

$$B_M = \int\left(\int\left(W(x) \pm \frac{W'}{g}(x)\,\omega^2 z_a\right)dx\right)dx - \int\left(\int \rho g A(x)\,dx\right)dx$$

$$\pm \int\left(\int 2\rho g\, y(x)\, z_a\, dx\right)dx$$

- اثرات ممان خمشی ناشی از حرکت هیو در آب آرام را می‌توان بر روی نمودار نیز نشان داد که در صفحه بعد رسم شده است. توجه کنید که در این نمودار توزیع وزن و بویانسی در حالت استاتیک و در حالتی که حرکت هیو داریم رسم شده است.



- توجه کنید که وزن تغییر نمی‌کند ولی به دلیل تغییر شناوری تأثیر موج‌ها وزن تغییر می‌کند.

- سطح زیر نمودار و مرکز سطح نمودار بویانسی هیو و وزن هیو باید با هم برابر باشند.

همان خمش ناشی از حرکت پیچ در آب آرام

شتاب وارد از حرکت پیچ وابسته به موقعیت از محور عرضی دارد لذا برخلاف هیو با برای همه نقاط یکسان نیست:

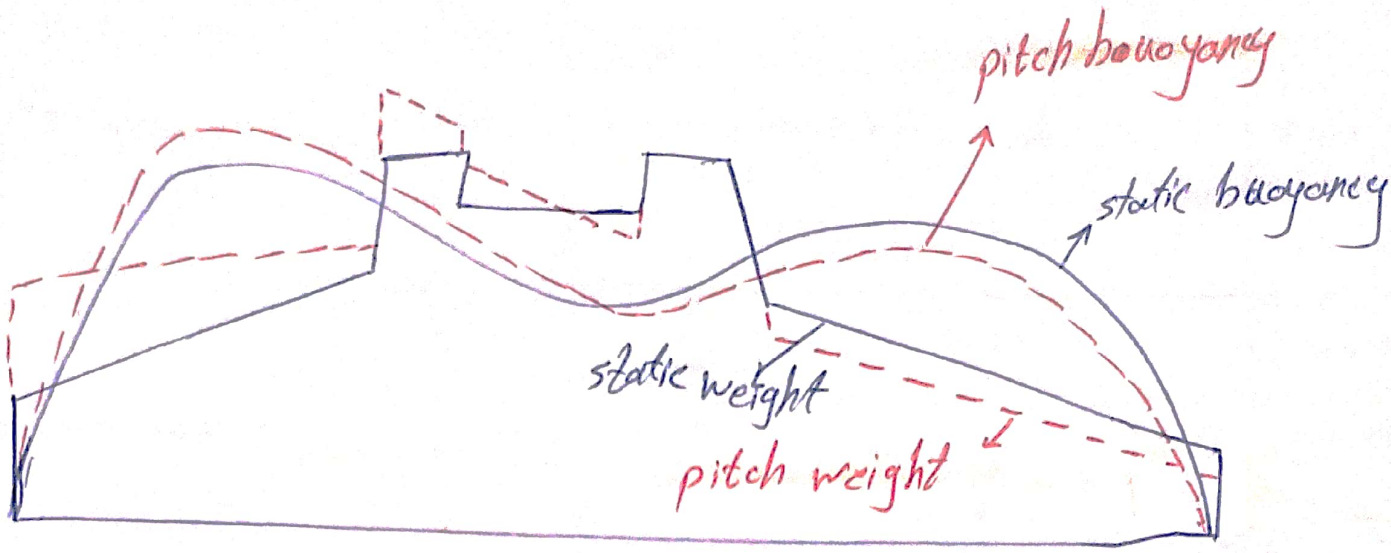
$$\theta = \theta_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

$$x \frac{d^2\theta}{dt^2} = -x\omega_e^2 \theta$$

$$= -x\omega_e^2 \theta_a \sin(\omega_e t - \varepsilon_2)$$

تغییرات توزیع وزن و توزیع بویانسی برای همان خمش ناشی از حرکت پیچ در آب آرام

نیز در صفحه بعد رسم شده است.

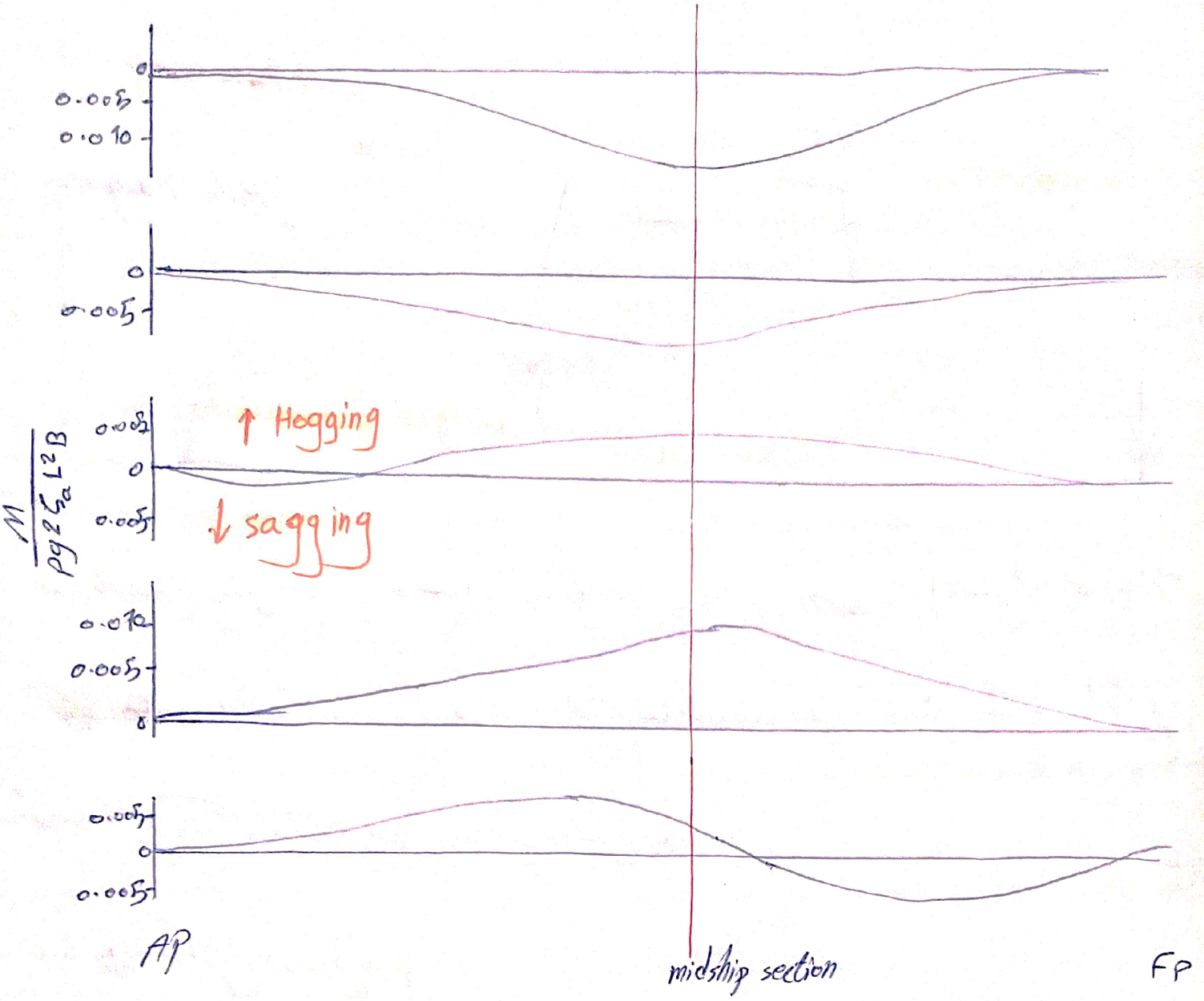


نمودار فوق زمانی است که سینه‌ها پاشنه به سمت بالا رفته و پاشنه (پاسینه) به سمت پایین رفته است بنابراین در یکی افزایش شناب و در دیگری کاهش شناب را داریم.

که به توزیع وزن و توزیع بویانسی تأثیر مستقیم می‌گذارد.

بارگذاری وارد بر کشتی در موج منظم

در نمودار صفحه بعد که برای یک کشتی 60 با $C_B=0.7$ ، $\frac{L_W}{L}=1$ و $F_n=0.2$ ارائه شده است موج بر روی بدنه در حال حرکت است و مماس‌های مختلف را بر کشتی وارد می‌کند. در زمان‌های مختلف یک منحنی مماس‌ی بعد در قسمت‌های مختلف کشتی وارد می‌شود. بنابراین پارامترهای مؤثر بر مماس وارد بر کشتی C_B ، $\frac{L_W}{L}$ و F_n خواهد بود.



- این بارها با توزیع هیدرو جمع می‌شود و کل بارها وارد بر کشتی را نتیجه می‌دهد.

- برای بدست آوردن عکس‌العمل‌ها و نیروها و لنگرهای در کتاب‌های مختلف وجود دارد در همین کتاب Dynamic of marine vehicles هم وجود دارد که می‌توان از آنها استفاده کرد.

بارگذاری وارد بر کشتی در موج نامنظم

- با فرض اینکه مقدار ممان را در موج منظم داریم می‌توان همانند قبل با ضرب طیف موج در مقدار RAO (که در اینجا مقدار آن $\left(\frac{BM}{\zeta_a}\right)^2$ است) طیف پاسخ را بدست آورد.

با استفاده از طیف پاسخ بدست آمده می‌توان ممان خمشی مشخصه (significant bending moment) را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\boxed{\text{significant bending moment} = 2\sqrt{m_0} \times CF}$$

CF : ضریب بحرانی باند

m_0 : مساحت زیر طیف پاسخ

- استفاده از روش نوار در محاسبه ممان‌های خمشی وارد بر کشتی ← از صفحه‌های 256 کتاب

Dynamics of marin vehicles

- روش محاسبه نمودار پاسخ (ممان خمشی و بعد) همانند روش‌های قبلی در محاسبه نمودار پاسخ استفاده از طیف موج و RAO

جلسه چهل و دوم

«روش‌های کاهش غلتش در شناورها»

منابع این بخش: Dynamics of marine vehicles/chapter 14: motion stabilization

Design of passive antiroll tanks for roll stabilization in the non-linear rang/ K.S. Youssef, S.A. Ragab/ Journal of ocean engineering/2002/pp: 177-192

performance analysis of U Tube Tank for Roll stabilization/Ramana Reddy. A. V/ V. Anantha subramanian/ Ramesh. A. S

فیلم‌های آموزشی هیدرواستاتیک - مجموعه ۱۹: روش‌های کاهش غلتش شناور

- با استفاده از تجهیزات کاهش غلتش می‌توان کارهای زیر را انجام داد:

کاهش دامنه حرکات

کاهش شتاب‌ها

کاهش پدیده‌های نامطلوب مانند گوبش و خیس شدن

به دلایل زیر، تمرکز کاهش غلتش بر روی حرکت رول متمرکز است:

① دامنه بیشتر حرکات رول نسبت به پیچ

② نقش مؤثر در دریانوردی

③ از بین حرکات کشتی تا کنون حرکت رول به جدی میرا شده است خیر:

✓ نیاز به همان گشتاور برای کاهش غلتش عرضی نسبت به طولی

✓ وجود یک نمودار پاسخ رول در فرکانس رزونانس - در محدوده این فرکانس می‌توان

به جدی حرکت رول را کنترل کرد.

✓ در حرکات پیچ، ناحیه رزونانس بجدی تعریف نشده لذا به نیروها و همان آنها بیا بزرگی نیاز است

سه روش کلی برای پایدارسازی حرکات

1) افزایش ضریب میرایی ("damping stabilization")

مانند نصب بالچه ضدغلتش (bilg keel) و یا بالک پایدارساز (fin stabilizer)

2) کاهش فرکانس طبیعی کشتی (افزایش پریود نوسانات طبیعی) "tuning stabilizer"

✓ افزایش عبارت $\Lambda = \frac{\omega_e}{\omega_\phi}$ به مقدار خیلی بزرگتر از 1

- همچنین طبق رابطه $T_\phi = \frac{2\pi}{\omega_\phi}$ به معنای افزایش پریود نوسانات است.

- این روش چندان توصیه نمی‌شود چرا که به دلیل عدم تغییر قابل ملاحظه شعاع ژیراسیون، امکان

طبق رابطه $T = \frac{2\pi k}{\sqrt{gGM}}$ افزایش پریود نوسانات، مجبور می‌شویم $\overline{GM}$ را کاهش

بدهیم و این به معنی کاهش پایداری است.

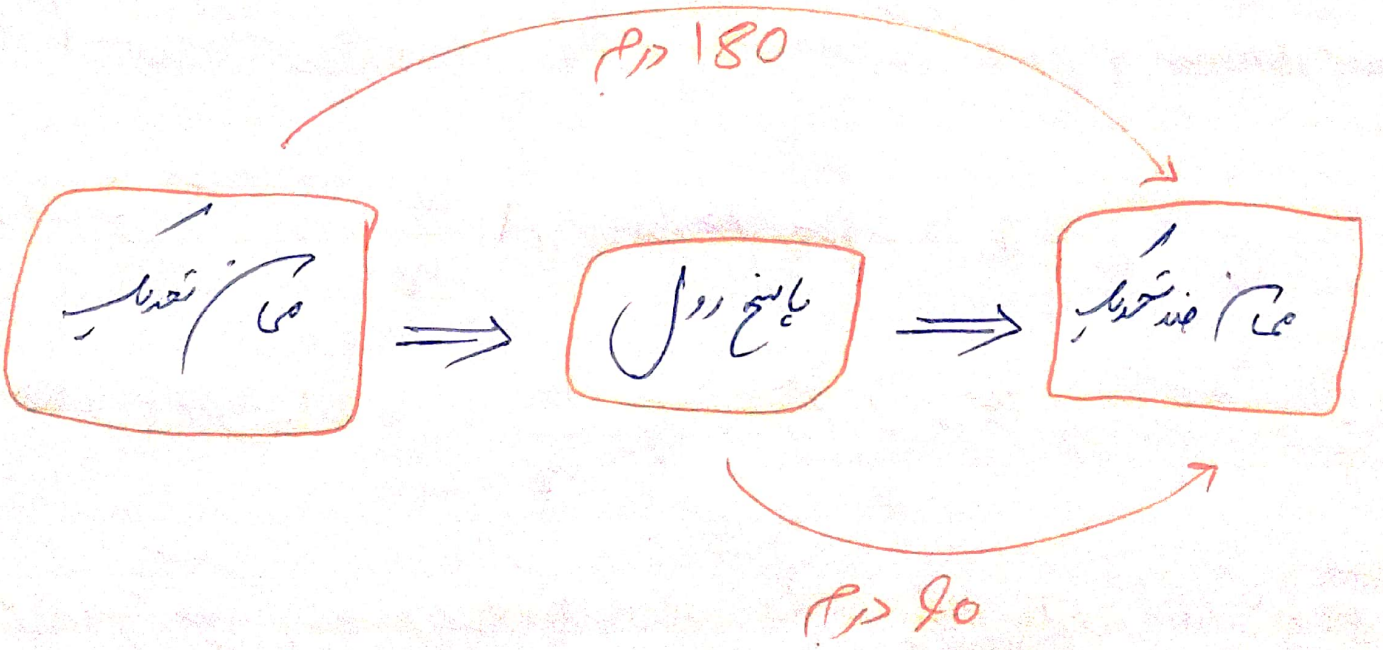
- همچنین در دریا به دلیل وجود فرکانس‌های متفاوت از موج‌ها این امکان وجود دارد که با اصلاح یک فرکانس و دور شدن از یک آن، در یک فرکانس دیگر از دریا قرار بگیریم

بنابراین به دو دلیل فوق این روش چندان توصیه نمی‌شود.

3) کاهش مستقیم نیروی تحریک (equilibrum stabilizer)

- اعمال نمای پایدارساز در فاز مخالف نمای تحریک = کاهش دامنه نمای تحریک (پایدارساز غیرمیرایی)

- مانند: مخازن ضدغلتش و نیروی استبلایزر



مثال: برای صفر کردن ممان تحدیب رول یک کشتی با ممان پایدارساز 75500 ft-ton نیاز است (از مثال یک صفحه قبل) که باید در عرض کشتی معادل یک نیروی 100 تنی است که باید در داخل کشتی ایجاد شود.

برای همین اطلاعات فرض کنیم که طول موج برابر طول کشتی است (600 فوت) ممان تحدیب پیچ برابر 600000 ft-ton است و حدوداً به یک نیروی 1000 تنی !! در داخل کشتی نیاز است که اصلاً تولید آن منطقی نیست

نکته: برخی مواقع حالت ترکیبی از پایدارساز میدانی و غیرمیدانی مطلوب است چرا که:

✓ پایدارساز غیرمیدانی (مانند مخازن ضدغلتش) باید دقیقاً در محدوده فرکانس رزونانس اعمال شوند وگرنه کارایی آنها شدیداً افت می‌کند.

✓ پایدارساز میدانی در همه شرایط اثر می‌کند (هرچند ممکن است مقدار آنها کمتر باشد)

پایدارساز رول

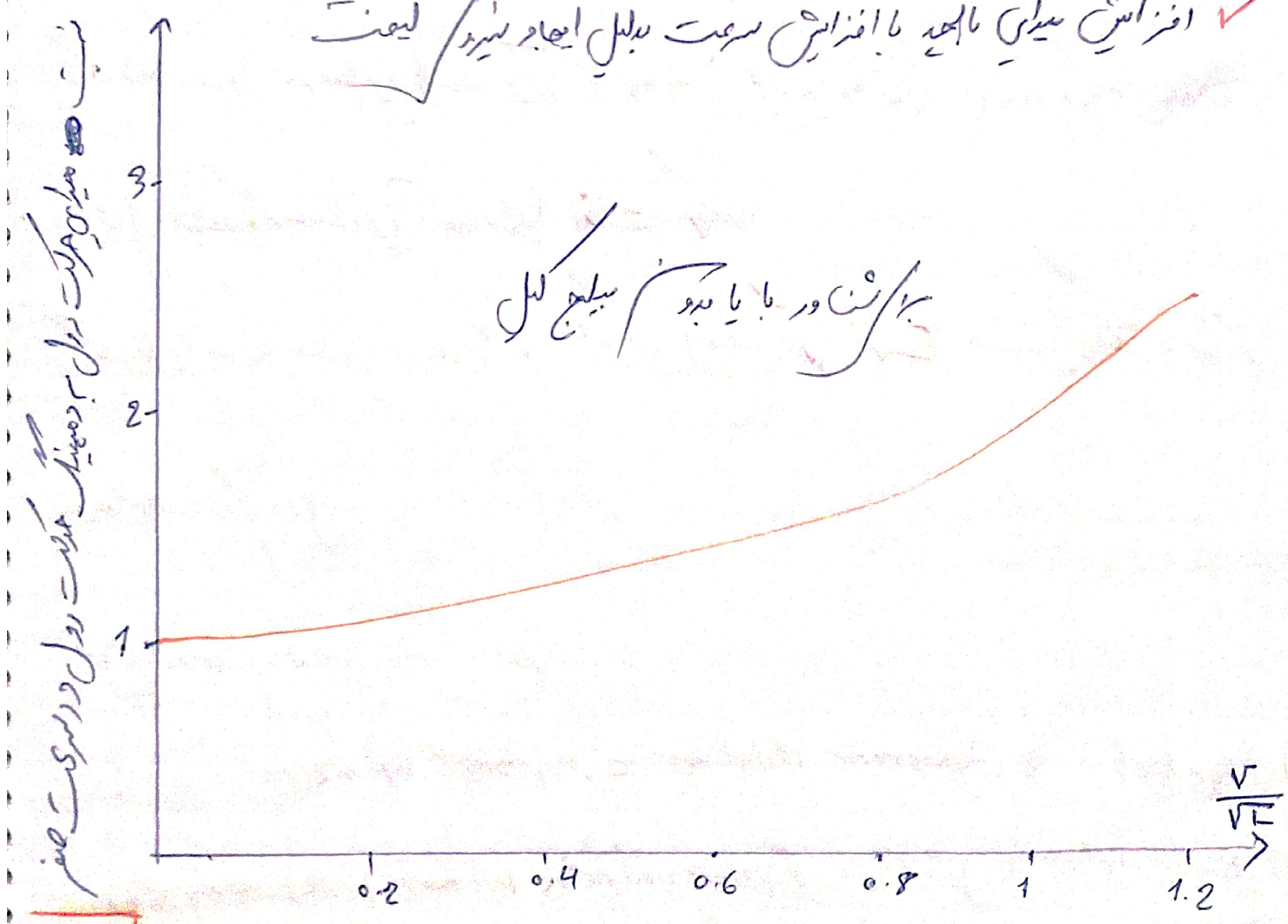
انواع روش‌های کاهش غلتش عرضی:

a. Bilge keels b. Gyroscopic stabilizer c. Movement of weight

d. Rudder action e. Jet flaps f. passive and active roll tanks g. stabilizing fins

بالجیه ضدغلتش (bilge keel)

- رایج ترین و ساده ترین روش
- طول بالجیه : 25 تا 50 درصد طول کشتی
- عرض : 1 تا 3 فوت (تا حداکثر عرض کشتی)
- همراستا با خط جریان برای کاهش مقاومت روبه جلو (ولی مقاومت وجود دارد)
- اثر میرایی بالجیه ناشی از افزایش مقاومت حرکت عرضی در اثر : نیروی لزجت - جریانات گردابه ای - نیروی لیفت
- افزایش میرایی بالجیه با افزایش سرعت بدلیل ایجاد نیروی لیفت



✓ نیروی مقاومت متناسب با توان ۲ سرعت است لذا در اینجا متناسب با توان ۲ سرعت خطی یا لحظه $(r\omega)^2$ است.

✓ ممان میرایی یا لجید در حرکت رول حول مرکز ثقل عبارت است از:

$$\boxed{\underbrace{CAr^2\omega^2}_{\text{نیروی مقاومت}}\ \underbrace{r}_{\text{بازو}} = CAr^3\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 = \frac{CAr^3}{2240}\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2} \quad \text{ft-ton-sec}$$

A: مساحت بیلج کیل

r: متوسط فاصله سطح بیلج کیل تا مرکز ثقل شناور

C: ضریب فشار نرمال وارد بر سطح بیلج کیل - تقریباً 1.1 تا 1.7 (وابسته است به نسبت طول به عرض و ورق)

$\omega = \frac{d\phi}{dt}$: سرعت زاویه‌ای

- از قبل داشتیم که ضریب میرایی از رابطه زیر بدست می‌آمد:

$$b = \frac{16\pi^2 M}{3\Delta \overline{GM}\, T_\phi^2}$$

که M، ممان میرایی است که با قرار دادن ممان میرایی بجای آن خواهیم داشت:

$$b = \frac{16\pi^2}{3\Delta \overline{GM}\, T_\phi^2}\left(\frac{CAr^3}{2240}\right) = \frac{CAr^3}{1680\, I'_{xx}}$$

- از روابط صفحه قبل می‌توان نتیجه گرفت که میدانی افزایش می‌یابد با:

✓ افزایش مساحت بالچه

✓ افزایش سرعت زاویه‌ای (سرعت مماسی)

✓ افزایش بازو (فاصله بالچه تا محور رول) با توان 3

✓ کاهش تناژ و کاهش ارتفاع متاسنتر $\overline{GM}$

✓ کاهش ممان اینرسی؛ لذا بالچه در کشتی‌های کوچک با ممان اینرسی کوچک مؤثرتر است

- در واقع سرعت زاویه‌ای ترکیبی از دامنه رول (وابسته به پایداری و تناژ) و زمان تناوب (وابسته به ممان اینرسی و پایداری ($\overline{GM}$)) است.

$$T_\phi = 2\pi\sqrt{\frac{I_{xx}}{\Delta \overline{GM}}}$$

- ضریب میدانی را از تست رولینگ هم می‌توان بدست آورد.

- فرمول تجربی زیر را می‌توان برای رابطه‌ای بین خصوصیات کشتی، ابعاد بالچه و میدانی رول در سرعت صفر استفاده کرد

$$\left(\frac{b}{b_c}\right)_0 = \frac{0.55\left(A_{BK}\, w^{1/2} + 0.0024 L B d^{1/2}\right) d^{5/2}\ \phi^{1/2}}{\Delta B^2}$$

که در آن :

$\left(\frac{b}{b_c}\right)_0$: نسبت میدانی واقعی به میدانی بحرانی در سیستم خطی

b_c : میدانی بحرانی حرکت رول و برابر است با $2\sqrt{c I_{xx}}$ در یک سیستم خطی (مانند کشتی)

A_{BK} : کل مساحت بیلج کیل (ft^2)

W : پهنای بیلج کیل (ft)

Δ : جابجایی اتن بزرگ معادل با 1016 کیلوگرم

L : طول خط آب‌خور (ft)

ϕ : زاویه رول (رادیان)

B : عرض خط آب‌خور (ft)

d : فاصله از سنتر اولین در خط آب‌خور با کیل

- برای اصلاح اثر سرعت بر روی میدانی حرکت رول داریم :

$$\Delta\left(\frac{b}{b_c}\right) = \left(\frac{b}{b_c}\right)_v - \left(\frac{b}{b_c}\right)_0 = 0.000855\left(\frac{L}{B}\right)\left(\frac{L}{GM}\right)^{1/2} \times \left(\frac{F_n}{C_B}\right)\left[1 + \frac{F_n}{C_B} + 2\left(\frac{F_n}{C_B}\right)^2\right]$$

$\Delta\left(\frac{b}{b_c}\right)$: تغییر ضریب میدانی رول ناشی از سرعت پیشروی V

$\left(\frac{b}{b_c}\right)_V$: نسبت میدانی در سرعت پیشروی V

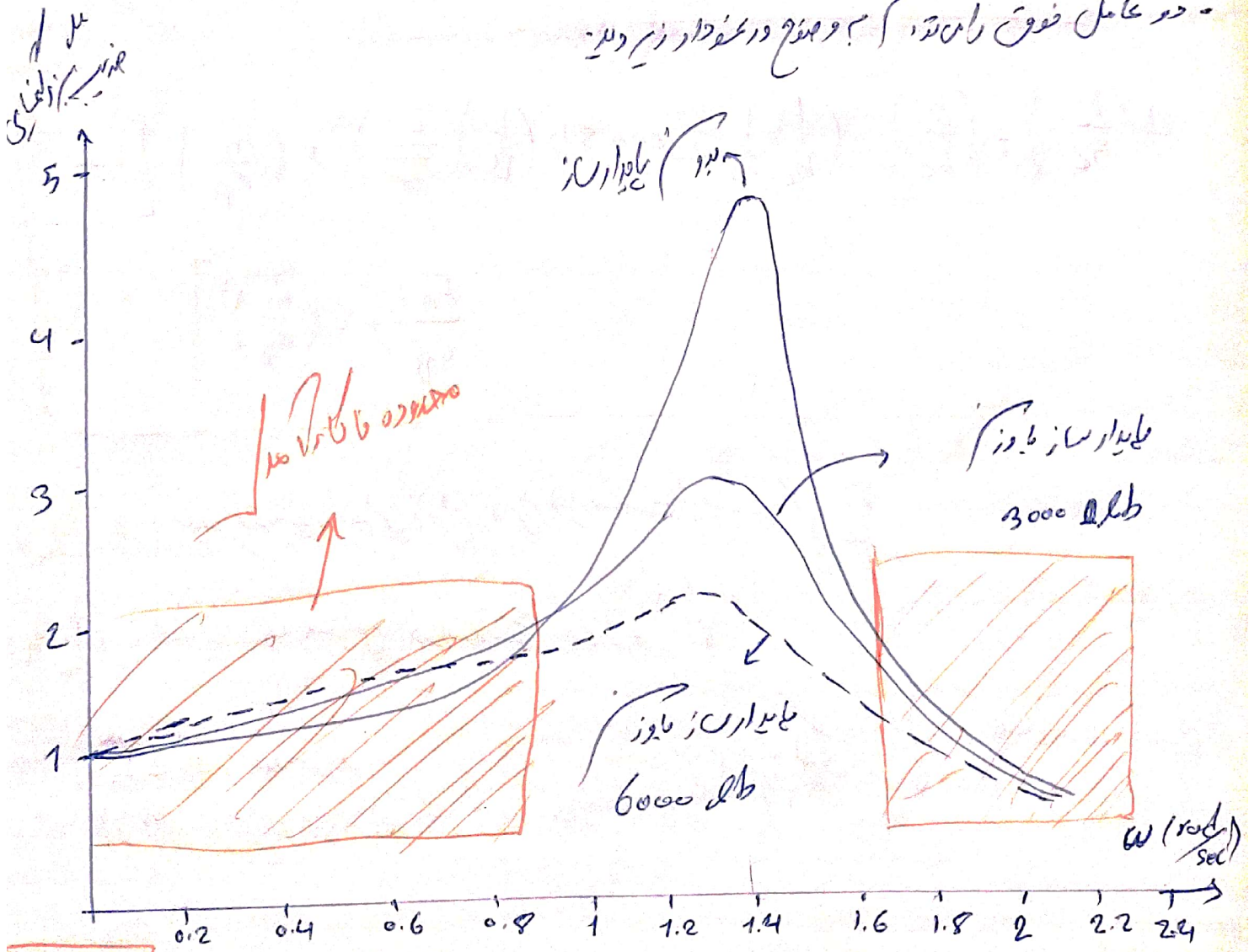
$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$: عدد فرود

C_B : ضریب بلوکی

وزنه‌های پایدارساز (جذب‌کننده)

- ✓ جابجایی جرمی وزنه‌ها با اختلاف فاز مخالف با حرکت دورانی
- ✓ تحمیل نیرو می‌تواند باعث کاهش پایداری شود (با توجه به موقعیت قرارگیری)
- ✓ در کشش‌های کوچک می‌تواند مفید باشد: جابجایی با پریود نزدیک به پریود طبیعی کشش
- ✓ هرچه وزن وزنه‌ها بیشتر باشد میرایی بیشتر می‌شود
- ✓✓ فقط در محدوده رزونانس کارایی دارد (عجیب)

- دو عامل فوق را می‌توان با توجه به نمودار زیر دید:



مخازن پایدارساز (ضدغلتش)

✓ اولین بار در سال 1874 استفاده شد

✓ عامل اصلی کارایی مخازن: اختلاف فاز بین حرکت سیال داخل مخزن و حرکت شناور

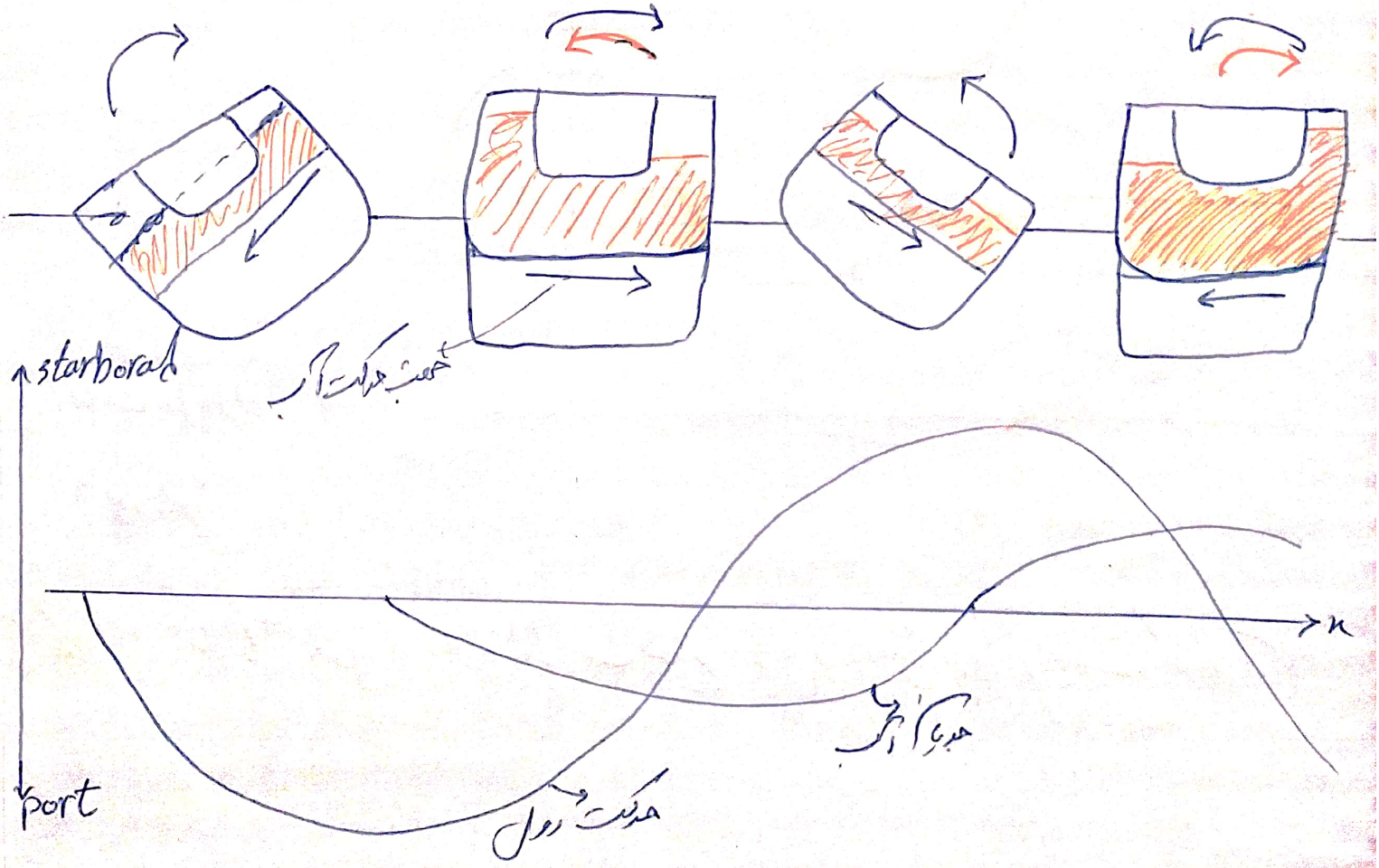
انواع مخازن:

1) عامل (Active): دارای پمپ برای جابجایی حجمی آب

2) غیرعامل (passive): بدون پمپ - جابجایی طبیعی با توجه به فرکانس طبیعی مخزن

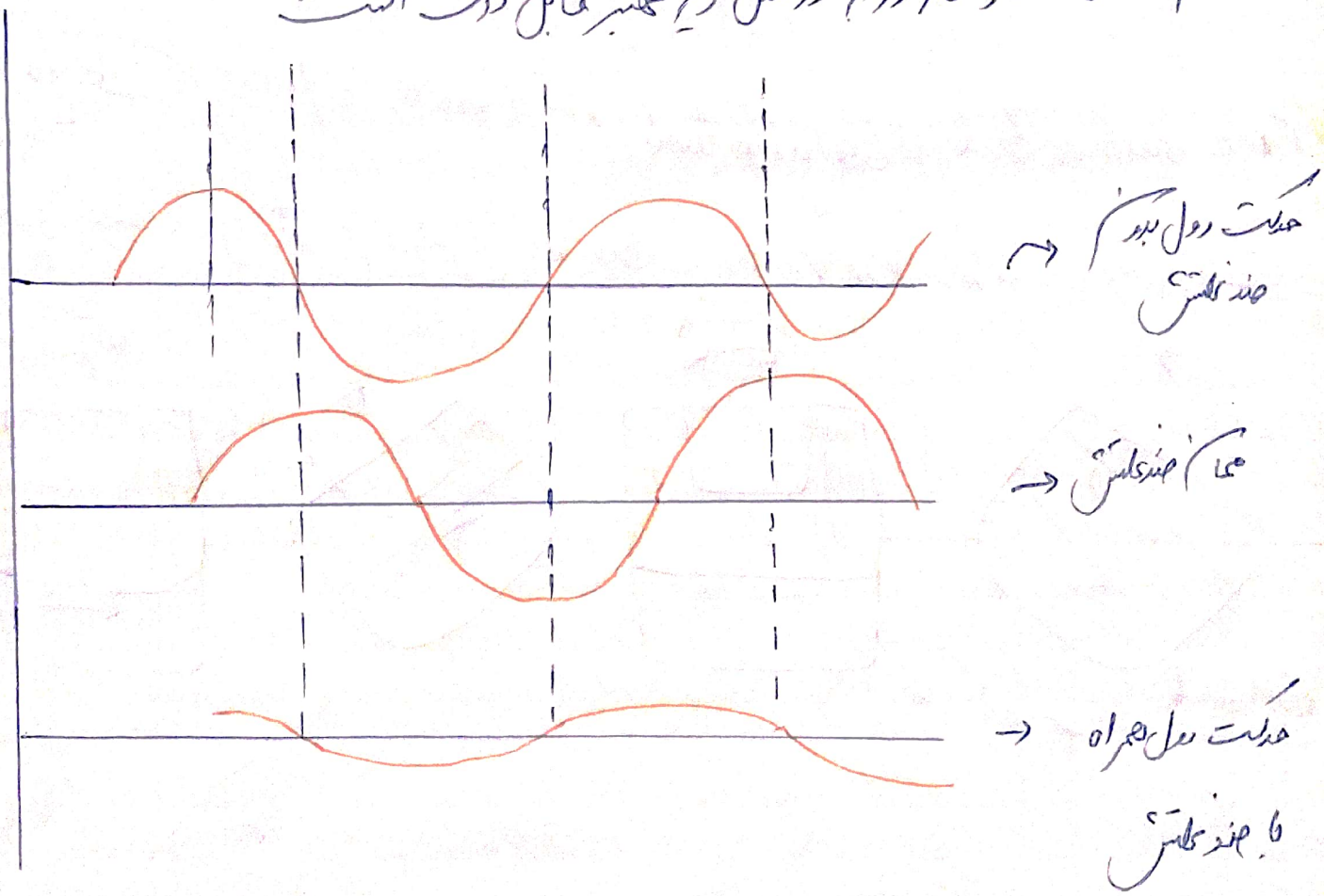
دو نوع مخزن غیرعامل (passive) ← ✓ U-Tube tank ✓ Free surface tank

- بین حرکت رول و همان ضدغلتش باید اختلاف فاز 90 درجه باشد در زیر رسم شده است.



توضیحی مختصر در مورد شکل صفحه قبل: در ابتدا گشتاور به سمت چپ حرکت کرده که همراه با این حرکت آب مخازن نیز به سمت چپ حرکت می‌کند هنگامی که گشتاور به حداکثر حرکت رول خود به سمت چپ رسید شناور تمایل خواهد داشت که زاویه حرکت رول خود را کاهش دهد که همانی به سمت راست ایجاد می‌کند (به دلیل نیروی بویایی) در این حالت به دلیل جمع شدن آب در سمت چپ مخازن، همانی در خلاف جهت حرکت (همان) گشتاور ایجاد می‌کند که باعث خنثی شناور می‌شود. این روند در سمت دیگر یعنی سمت راست گشتاور نیز تکرار می‌شود.

- مفهوم اختلاف فاز ۹۰ درجه در شکل زیر بهتر قابل درک است



نکته: از اشکالات مخزن ایجاد اثرات سطح آزاد و کاهش پایداری است که میدانیم

کاهش ارتفاع متاسنتر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\boxed{\frac{\rho}{\rho_s} \quad \frac{i}{\nabla}}$$

ρ_s: چگالی آب دریا

ρ: چگالی سیال داخل مخزن

i: ممان اینرسی سطح آزاد مخزن

- از دیگر اشکالات مخازن ضد فلش، ضربات به دیواره‌ها (sloshing) و برخورد آب با سقف مخزن و کاهش شدید تأثیرگذاری، است. (ارتفاع مخزن یک پارامتر مهم است)

- فرم ساده شده رابطه فوق با توجه به شکل منحنی مخازن به صورت زیر است:

$$\frac{i}{\nabla} = \frac{5WB^2}{48\Delta h}$$

$\frac{i}{\nabla}$: اثر اصلاحی سطح آزاد روی ارتفاع متاسنتر

W: وزن مخزن سیال

Δ: جابجایی

B: عرض

h: عمق سیال در درون مخزن

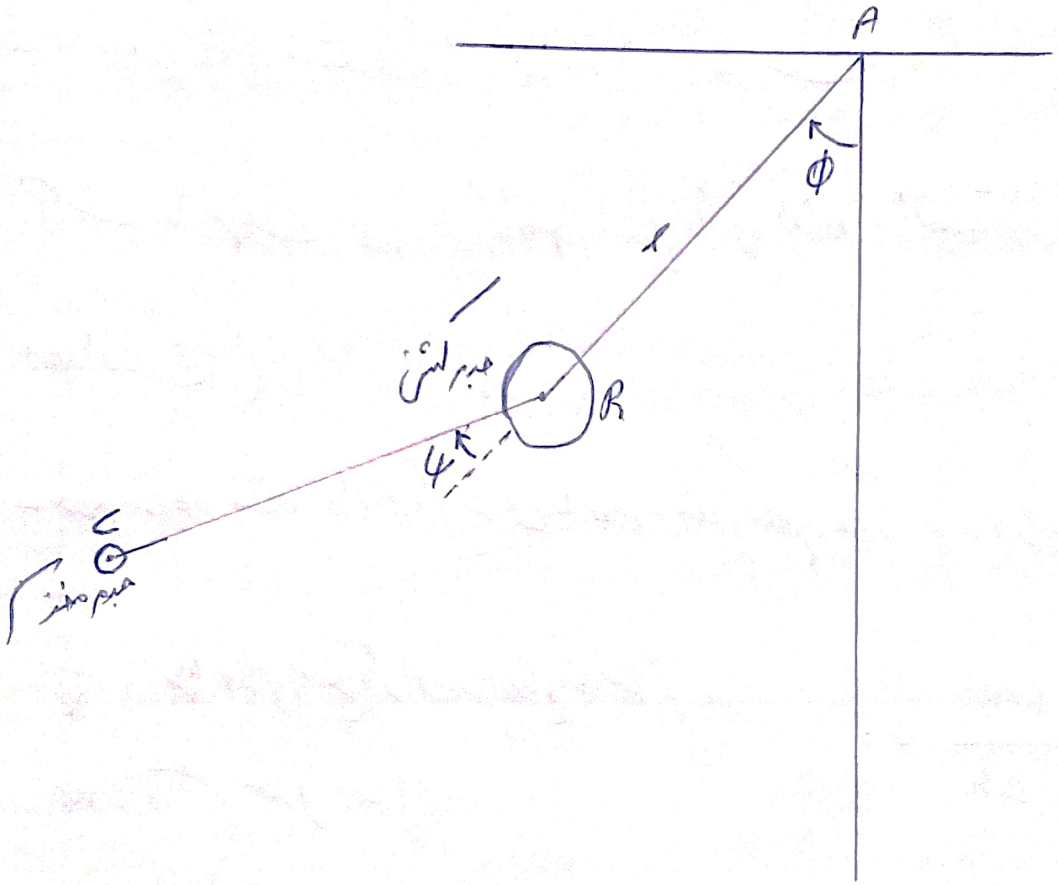
- اثر سطح آزاد مخازن ⇐ کاهش ارتفاع متاسنتر ⇐ افزایش پریود نوسانات طبیعی ⇐ کاهش فرکانس طبیعی کشتی ⇐ کاهش احتمال رزونانس (چرا که احتمال کمتر وجود دارد که کشتی در معرض امواج بلندتر قرار گیرد.)

جلسه چهل و سوم

«روش‌های کاهش نمایش در شاورها»

بخش دوم

شبیه‌سازی اثر هندسه با پاندول



- جسم بزرگتر شبیه‌سازی شده جسم کشش است که با طنابی به طول l آویزان شده است. رابطه حرکت این پاندول با روش تحلیلی و به سادگی با نوشتن نیروی وارد بر جسم به صورت مقابل بدست می‌آید:

$$l\ddot{\psi} + g\sin\psi = 0 \longrightarrow$$ بدون خودگرم شدن میدانی

$$\xrightarrow[\text{زوایای کوچک}]{\text{با}} l\ddot{\psi} + g\psi = 0 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{g}{l}} \Rightarrow \boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}$$

با توجه به این رابطه پریود حرکتی پاندول مستقیماً متناسب از طول طناب است. بنابراین طول AB و BC باید با هم برابر باشند تا پریود طبیعی دو قسمت با هم برابر باشد.

سه پارامتر مهم برای کاهش خمش عبارتست از:

1) فرکانس: که در پاندول، معادل طول طناب است (طبق رابطه $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$) و در مخازن ضد خمش به دو عامل ابعاد و شکل مخزن و ارتفاع آب داخل مخزن وابسته است. که باید فرکانس طبیعی مخزن برابر فرکانس طبیعی کشتی شود.

2) مقدار جرم: که در پاندول، وابسته است به وزن پاندول و در مخزن ضد خمش وابسته است به وزن آب داخل مخزن و عرض موج مخزن

3) تاخیر فاز: در پاندول، وابسته است به تفاوت طول دو طناب و در مخازن ضد خمش وابسته است به میرایی مخزن (دامنه حرکات کشتی و ابعاد و شکل مخزن)

- باید اختلاف فاز حرکت سیال درون مخزن با حرکت رول برابر 90 درجه باشد

بررسی معادله پاسخ رول با اعمال نقش مخزن ضد خمش

$$a\ddot{\phi}+b\dot{\phi}+c\phi=M$$ → شامل جرم مخازن

$$\phi=\phi_a \sin \omega_e t$$

$$M=M_{wa}\sin(\omega_e t+\varepsilon_w)+M_{ta}\sin(\omega_e t+\varepsilon_t)$$

M_{wa} : دامنه ممان خارجی ناشی از موج

M_{ta} : دامنه ممان تحریک ناشی از مخزن

ε_w : اختلاف فاز بین ممان تحریک موج و حرکت رول

ε_t : اختلاف فاز بین ممان تحریک مخزن و حرکت رول (توجه: ε_t منفی است)

ϕ_a : دامنه حرکت رول

ω_e : فرکانس زاویه‌ای برخورد

که با جایگذاری خواهیم داشت:

$$(c - a\omega_e^2 - \Delta c)\sin(\omega_e t) + (b\omega_e + \Delta b\,\omega_e)\cos\omega_e t = \frac{M_{wa}}{\phi_a}\sin(\omega_e t + \varepsilon_w)$$

که Δc و Δb از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\Delta c = \frac{M_{ta}}{\phi_a}\cos\varepsilon_t \quad , \quad \Delta b = \frac{M_{ta}}{\omega_e \phi_a}\sin\varepsilon_t$$

حل معادله فوق عبارت است از:

$$\phi_a = \frac{M_{wa}}{\sqrt{(c - a\omega_e^2 - \Delta c)^2 + (b - \Delta b)^2\omega_e^2}}$$

$$\varepsilon_w = \tan^{-1}\left(\frac{(b - \Delta b)\,\omega_e}{c - a\omega_e^2 - \Delta c}\right)$$

M_{wa} از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$M_{wa} = \Delta k' \zeta_a e^{-k' z_e} \overline{G_m}$$

که در آن $k' = \frac{2\pi}{L'_w}$ عدد موج موثر و $L'_w = \frac{L}{\cos\mu}$ طول موج موثر است و

ζ_a دامنه موج و همچنین z_e متوسط عمق موثر زیر سطح آب است.

- فرکانس طبیعی معمولی (بدون مخزن) خنثی برابر است با:

$$\omega_\phi = \sqrt{\frac{c}{a}}$$

- فرکانس طبیعی سیستم (فرکانس طبیعی موثر) عبارتست از:

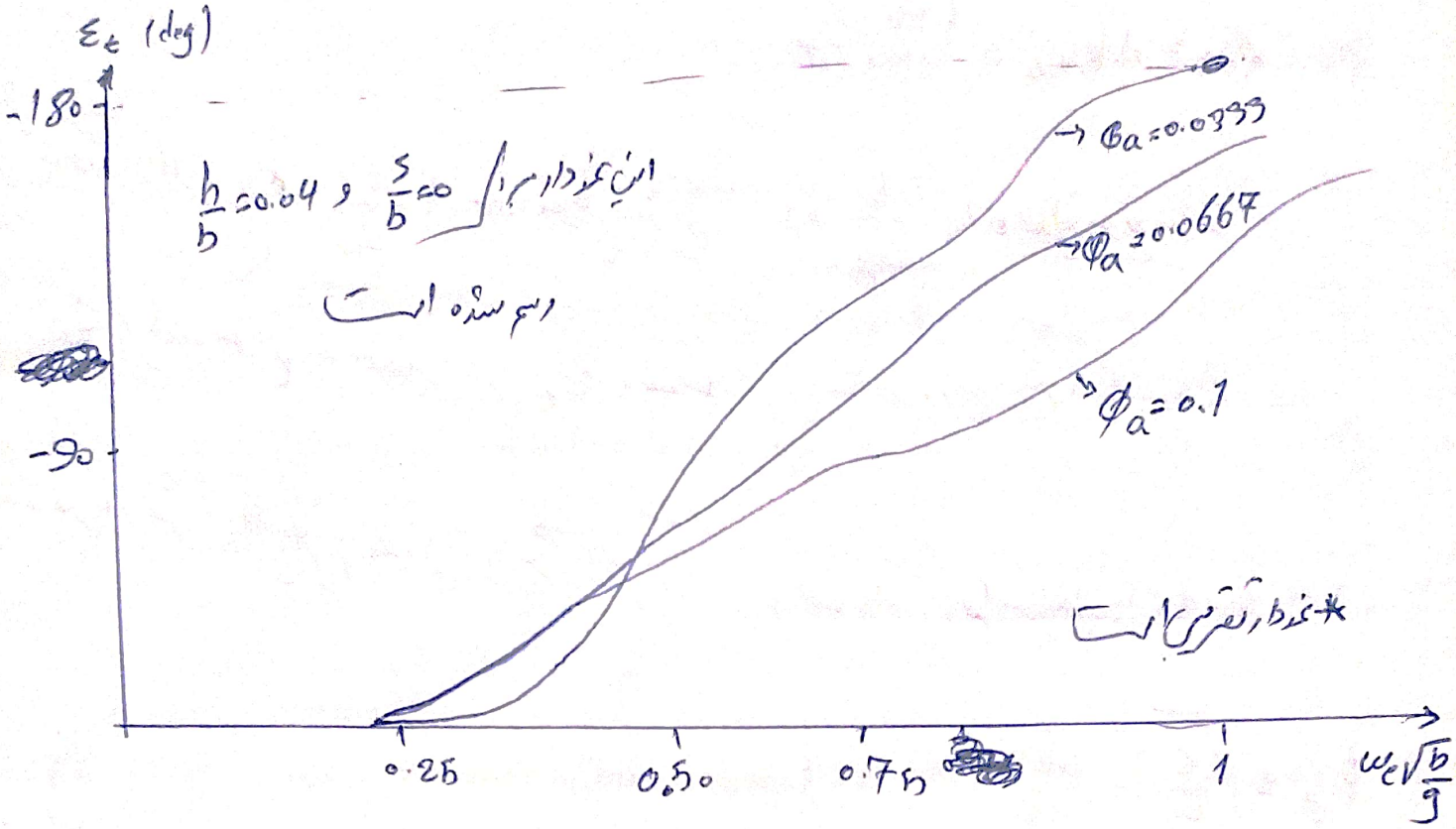
$$\omega'_\phi = \sqrt{\frac{c - \Delta c}{a}}$$

- با قرار دادن عبارت فوق در رابطه ε_w، مقدار ε_w برابر 90 درجه می‌شود.

- همان ناشی از مخزن (M_{ta}) و تأخیر فاز آن ε_t را باید با بدست آوردن عدد یا تجربی برای فرکانس برخوردهای مختلف و برای نسبت‌های ابعاد مخزن بدست آورد.

- همان مخزن را می‌توان همچنین با زاویه هیل احتمال شده در آب آرام در شرایط استاتیکی به روش تحلیل بدست آورد.

- در نمودار زیر مقدار اختلاف فاز برحسب فرکانس بی بعد ($\omega_e\sqrt{\frac{b}{g}}$) در دامنه‌های مختلف ترسیم شده است



- در نمودار فوق که برای $\frac{s}{b}=0$ و $\frac{h}{b}=0.04$ رسم شده است در $\omega_e\sqrt{\frac{b}{g}}=0.75$ ما به اختلاف فاز 90° می‌رسیم و می‌بینیم که دامنه حرکت رول تأثیر چندانی در آن ندارد

✓ انتقال آب در مخازن را می‌توان به صورت یک پدیده موج در نظر گرفت و برای مقیاس بندی از تشابه فرود استفاده کرد.

✓ برای نسبت h/b ثابت، عمق مخزن متناسب با b^3 است.

✓ ارتفاع آب داخل مخزن (h) در تعیین فرکانس طبیعی مخزن بسیار اهمیت دارد.

✓ دامنه عمق مخزن (در عرض ثابت) در محدوده فرکانس طبیعی مفصل متناسب است با $\sqrt{\frac{h}{b}}$

✓ فرکانس طبیعی کشتی در بارگیری‌های مختلف تغییر می‌کند

✓ در این شرایط مخزن نمی‌تواند در محدوده فرکانس رزونانس رول عمل کند لذا بهتر است جابجایی آب بین مخازن تحت کنترل و قابل تغییر باشد تا بتوان فرکانس آن را حداقل برابر با فرکانس طبیعی کشتی در حرکت رول قرار داد.

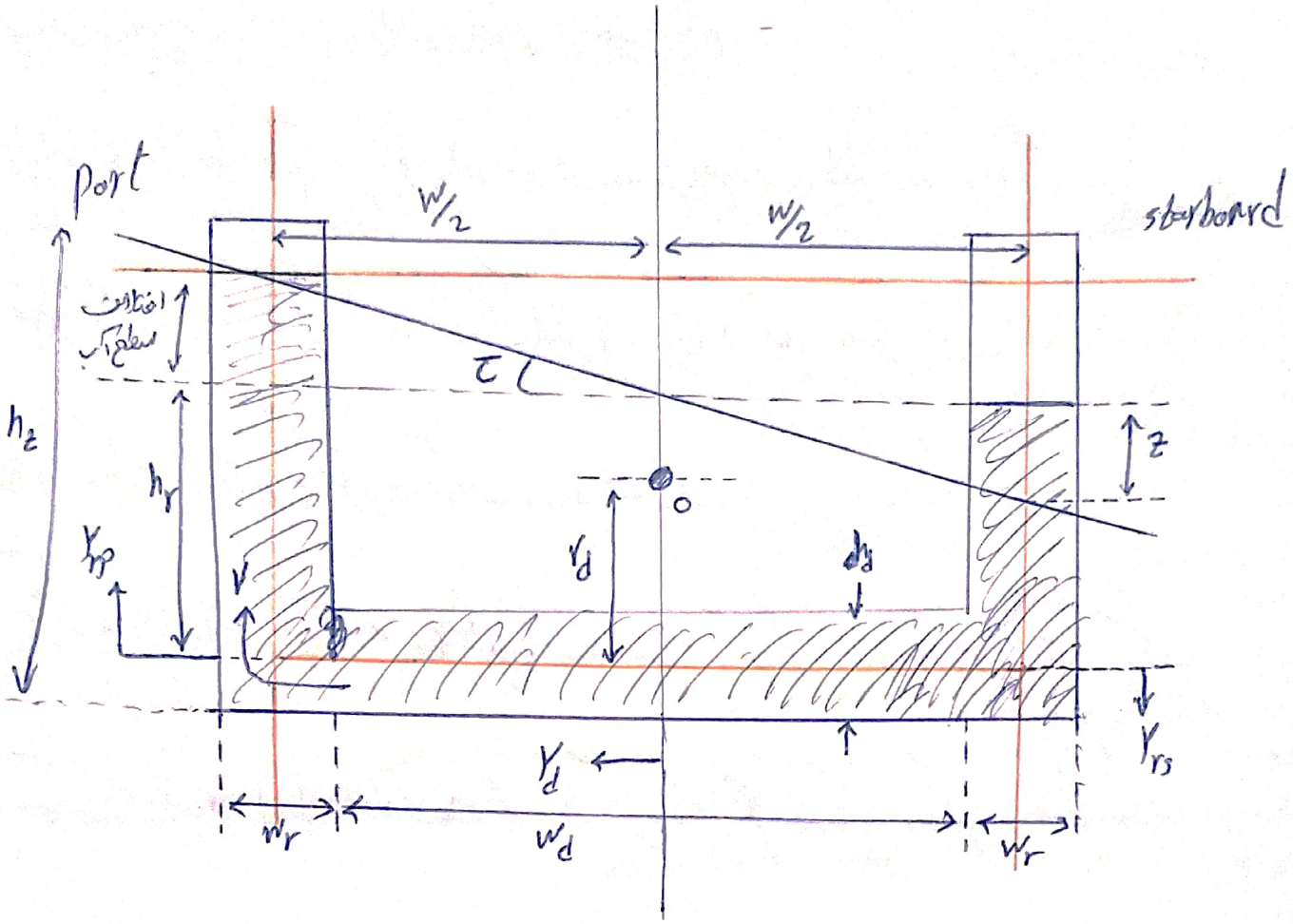
✓ شیر هدایت بالای مخازن U شکل، راحت‌ترین راه برای تنظیم فرکانس مخزن

✓ مخازن غیرعامل (passive) برای کشتی‌های خدماتی و ویدکش‌ها که بارگیری متغیر دارند مناسب اند.

✓ در دریای مواج و امواج نامنظم هم تغییر ناگهانی جهت حرکت رول نامطلوب است چون مخزن فرصت کافی برای پاسخ ندارد

محاسبه فرکانس طبیعی مخزن

در شکل صفحه بعد پارامترهای هندسی یک مخزن چندگانه U شکل مشخص شده است که از آنها برای محاسبه فرکانس طبیعی مخزن استفاده می‌کنیم.



بنابراین معادله منفرد را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$a_{\tau\tau}\ddot{\tau} + b_{\tau\tau}\dot{\tau} + c_{\tau\tau}\tau + \left[a_{\tau 4}\ddot{\phi} + c_{\tau 4}\phi\right] = 0$$

که در آن:

$$a_{\tau 4} = Q_t\,(Y_d + h_r) \quad , \quad c_{\tau 4} = Q_t\, g$$

$$a_{\tau\tau} = Q_t\left(h_r + \frac{w_r}{h_d}\,\frac{w}{2}\right)$$

$$b_{\tau\tau} = Q_t\, q_f\, w_r\left(\frac{w}{2h_d^2} + \frac{h_r}{w_r^2}\right)$$

$$c_{\tau\tau} = Q_t\, g = c_{\tau 4}$$

$$\boxed{Q_t = \frac{1}{2}\rho_t\, w_r\, w^2\, x_t}$$

که x_t ، طول مخزن همراستا با طول کشتی است یعنی مخزن در جهت طولی از کشتی امتداد پیدا کرده است. و q_t ، مختصه میدان خطی مخزن است.

بنابراین فرکانس طبیعی مخزن به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\boxed{\omega_t = \sqrt{\frac{c_{\tau\tau}}{a_{\tau\tau}}} = \sqrt{\frac{2g\,h_d}{w_r w + 2h_r h_d}}}$$

- اما معادله حرکتی مخزن را که در صفحه قبل آورده بودیم را به صورت زیر نوشت:

$$a_{\tau\tau}\ddot{\tau} + b_{\tau\tau}\dot{\tau} + c_{\tau\tau}\tau + a_{\tau 4}\ddot{\phi} + c_{\tau 4}\phi = 0$$

و معادله حرکت کشتی نیز به شکل زیر است:

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + C_{44}\phi + a_{4\tau}\ddot{\tau} + c_{4\tau}\tau = M_{ex}$$

$a_{4\tau}$ و $c_{4\tau}$ را می‌توان به روش تحلیلی بدست آورد که در اینجا از بدست آوردن آنها صرف نظر می‌کنیم و فرض را بر این می‌گذاریم که مقادیر آنها مشخص است. بنابراین با حل معادله، دامنه پاسخ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\phi_0 = \frac{M_0}{\alpha^2+\beta^2}\sqrt{\left[\alpha(c_{\tau\tau}-\omega_e^2 a_{\tau\tau}) - \beta\omega_e b_{\tau\tau}\right]^2 + \left[\alpha\omega_e b_{\tau\tau} + \beta(c_{\tau\tau}-\omega_e^2 a_{\tau\tau})\right]^2}$$

که در آن مقادیر α و β به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\alpha = (c_{\tau\tau} - \omega_e^2 a_{4\tau})^2 + \omega_e^2 b_{\tau\tau} B_{44} - (c_{44} - \omega_e^2 (I_{xx} + A_{44}))(c_{\tau\tau} - \omega_e^2 a_{\tau\tau})$$

$$\beta = \omega_e b_{\tau\tau} (c_{44} - \omega_e^2 (I_{xx} + A_{44})) + \omega_e B_{44} (c_{\tau\tau} - \omega_e^2 a_{\tau\tau})$$

نحوه تعیین میرایی q_f:

$$\boxed{q_f = \frac{b}{2\sqrt{a\, c}}}$$

q_f را می‌توان از طریق تست مدل یا تست کشتی واقعی بدست آورد. همچنین می‌توان از روش تئوری نیز مقدار آن را بدست آورد.

- ضریب میرایی بدست آمده حاصل جمع 3 میرایی است:

$$b = b(\text{wave radiation}) + b(\text{viscous}) + b(\text{tank})$$

نوشتن آزادسازی حرکت رول با میرایی:

در تست رولینگ عملاً میرایی وجود دارد لذا معادلات حاکم از این حالت تبعیت می‌کنند:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = 0$$

$$\rightarrow \ddot{\phi} + \frac{b}{a}\dot{\phi} + \frac{c}{a}\phi = 0 \quad \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{c}{a} \quad , 2\delta = \frac{b}{a}$$

$$\Rightarrow \ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = 0$$

که با حل معادله خواهیم داشت :

$$\phi = \phi_0 \cdot \exp(-\delta t) \cos \omega_0 t$$

اگر فقط یک نقطه برای ما مهم باشد و بخواهیم میزان کاهش را در هر پریود حساب کنیم می‌توانیم از

عامل $\cos \omega_0 t$ صرف نظر کنیم بنابراین خواهیم داشت :

$$\boxed{\frac{\phi}{\phi_0} = \exp(-\delta t)}$$

$$\text{for } t = T_n \Rightarrow \phi(t = T_n) = \phi_0 \exp(-\delta \cdot T_n) = \phi_n$$

$$\text{for } t = T_{n+1} \Rightarrow \phi(t = T_{n+1}) = \phi_0 \exp(-\delta \cdot T_{n+1}) = \phi_{n+1}$$

T_n : تناوب n ام $\qquad$ T_{n+1} : تناوب $(n+1)$ ام

$$T_0 = T_{n+1} - T_n$$

$$\Rightarrow \frac{\phi_{n+1}}{\phi_n} = \frac{\phi_0 \exp(-\delta T_{n+1})}{\phi_0 \exp(-\delta T_n)} = \exp(-\delta \cdot T_0)$$

T_0 : پریود حرکت مدل درست روی لیگ (فرض می‌شود ثابت است)

$$\Rightarrow \delta = \frac{1}{T_0} \cdot \ln\left(\frac{\phi_n}{\phi_{n+1}}\right)$$

ϕ_n و ϕ_{n+1} و همچنین T_0 از تست روی لیگ انجام شده موجود است.

- با داشتن δ مقدار b از رابطه $2\delta = \frac{b}{a}$ بدست می‌آید اما b بدست آمده میرایی کل سیستم است که تشکیل شده بود از سه نوع میرایی ($b = b(\text{wave radiation}) + b(\text{viscous}) + b(\text{tank})$)

بنابراین برای بدست آوردن میرایی مخزن $b(\text{tank})$ یک بار کشتی را بدون مخزن تست می‌کنیم و مقدار میرایی را بدست می‌آوریم و یک بار دیگر کشتی را با مخزن تست می‌کنیم و میرایی را بدست می‌آوریم که از این طریق می‌توان میرایی مخزن را محاسبه کرد.

نکته: کاهش آب داخل مخزن (در مواقعی که نیاز نباشد) می‌تواند مزایای زیر را داشته باشد:

- ✓ کاهش وزن
- ✓ بارگیری آب شیرین بیشتر
- ✓ کاهش اثر سطح آزاد
- ✓ بارگیری سوخت بیشتر برای برد بیشتر

نکته: هرچه نسبت آب داخل مخزن بیشتر باشد بهتر است ولی در حدود 85 درصد وزن کشتی لحاظ می‌گردد.

استفاده از مخازن فعال (active) دو فایده زیر را دارد:

1) پاسخ سریعتر به تغییر ناگهانی رول

2) تطابق با بارگیری‌های مختلف کشتی (تنظیم پریود طبیعی مخزن با پریود طبیعی کشتی)

- مهم مفاز کر فعال از شتاب سنج برای حس کردن تغییرات حرکت رول (حتی حرکات کوچک) استفاده می‌شود

- مفاز کر فعال دارای بازدهی بالاتر از 80 درصد در کاهش عکسش هستند (در منابع دیگر 90 درصد)

- مفاز کر فعال برخلاف مفاز کر منفعل (passive)، حتی برای یک تک موج هم عکس العمل نشان می‌دهند و نیاز به توالی امواج برای عکس العمل نیست.

نکته: لزوماً این قدر گفت هرچه میدان مغناطیسی (qf) افزایش یابد دامنه حرکت رول کاهش می‌یابد زیرا تا یک مقدار کاهش حرکت رول را خواهیم داشت و پس از آن با افزایش qf دامنه حرکت رول افزایش می‌یابد.

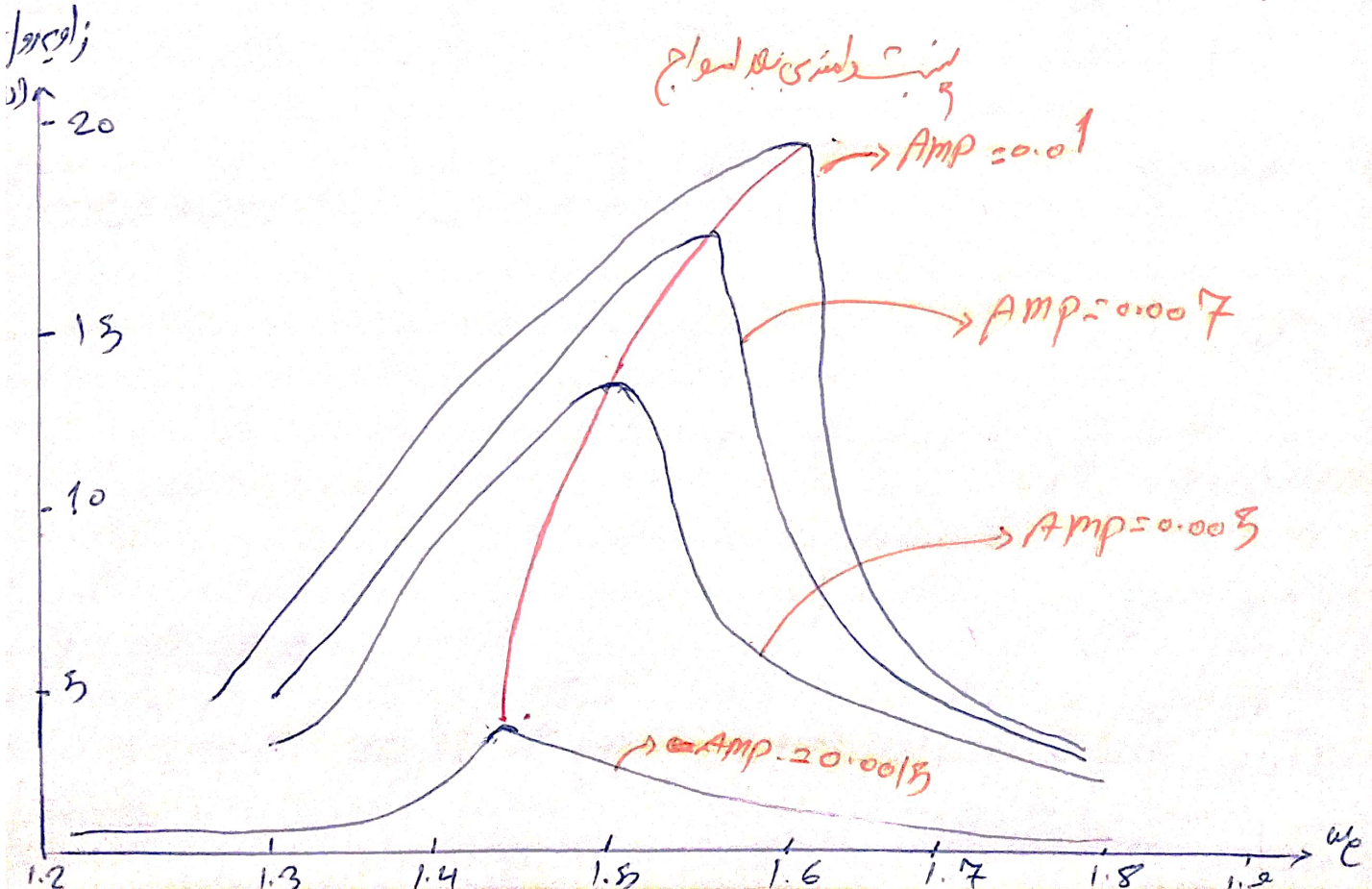
جلسه چهل و چهارم

«روش کاهش نوسان در شناورها»

«جلسه سوم»

کارکرد مخازن در زوایای نوسان بزرگ (فرض یک دامنه‌ی بزرگ)

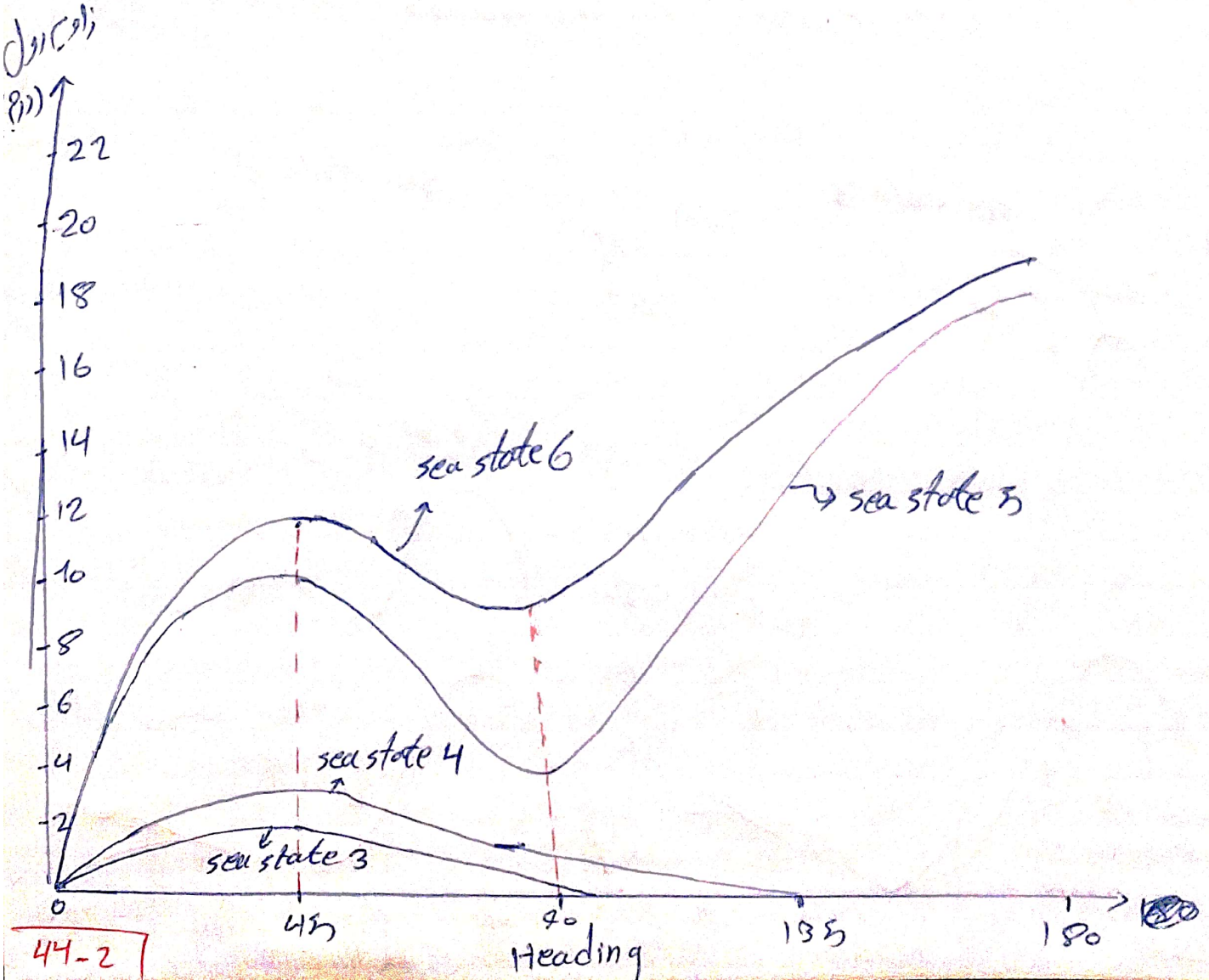
در امواج با ارتفاع بلند، به دلیل ایجاد زوایای رول بزرگ، اثرات غیرخطی بروز می‌کند. با اثرات غیرخطی، دیگر فرکانس طبیعی ثابت نیست و رأس نمودارها یا منحنی به سمت چپ یا راست متمایل می‌گردد. لذا این قدرت فرکانس مخزن را برابر با فرکانس طبیعی اعمال کرده، بنابراین از مخازن فعال (Active) استفاده می‌شود. نمودار زیر زاویه حرکت رول را برحسب فرکانس برخورد در نسبت‌های بعد دامنه امواج مختلف نشان می‌دهد.



- در نمودار قبل مشاهده می‌شود که منحنی‌ها در فورس‌های بالا (دامنه امواج بالاتر) به سمت راست متمایل می‌شوند که باعث می‌شود فرکانس طبیعی در فرکانس‌های مختلف برخورد اتفاق بیافتد و نتوان یک فرکانس طبیعی را مبنا قرار داد و مخزن ضدغلتش منفعل (passive) را متناسب با آن طراحی کرد. بنابراین همانطور که گفته شد باید از مخازن فعال (active) استفاده کرد.

یک نمودار صحیح:

در منحنی زیر زاویه حرکت رول برحسب زاویه برخورد در فورس‌های دریایی مختلف داده شده است

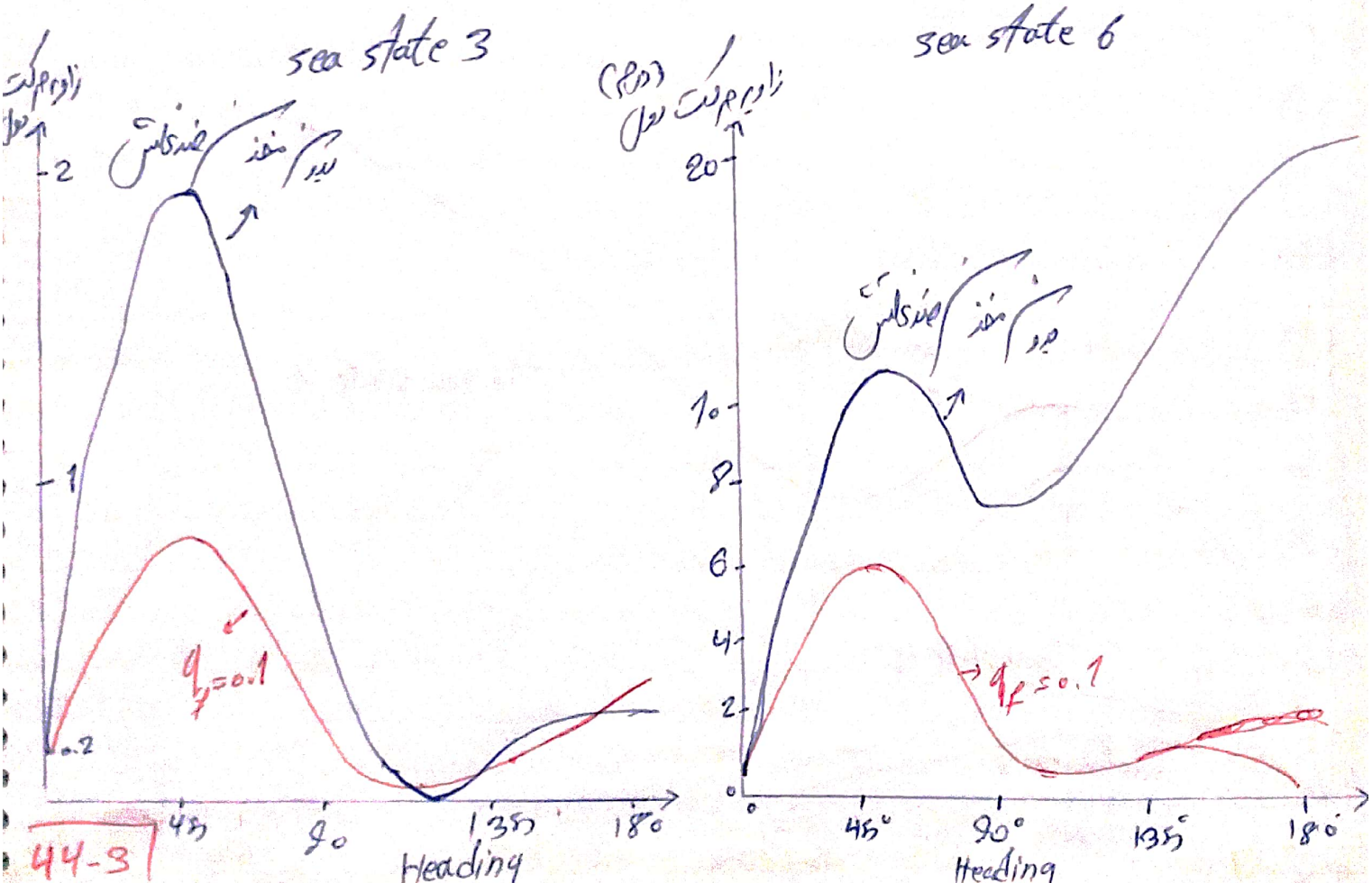


از نمودار صفحه قبل می‌توان نتایج زیر را گرفت:

✓ در فورس‌های دریایی بزرگ معمولاً پیک نمودار در زاویه 45° اتفاق می‌افتد. که به علت غیرخطی بودن حرکات است.

✓ در فورس‌های دریایی 3 و 4 و در زاویه برخورد 180° حرکت رول بسیار ناچیز و تقریباً صفر است ولی در فورس‌های دریایی 5 و 6 و در زاویه برخورد 180° بیشترین مقدار حرکت رول صورت می‌پذیرد.

- نمودار صفحه قبل برای کشتی بدون مخزن ضدغلتش ترسیم شده است در نمودار که بعد تأثیر مخزن ضدغلتش بر کشتی را در فورس‌های دریایی بزرگ مشاهده خواهیم کرد:



- از نظر وارنگ صفحه قبل مشخص می‌شود هنگام کار ضد غلتش تا بالا زیادی در فرودس که دریایی خیلی بزرگ دارند و می‌توانند تا 95% حرکت رول را کاهش دهند.

بال ضد غلتش (stabilizer fin)

✓ کارآمدترین روش کاهش غلتش کشتی

✓ جمع شدن به داخل بدنه برای کاهش اتلاف نیرو

✓ بسیار مناسب برای کشتی‌های مسافربری و کشتی‌هایی که بار نشکستنی حمل می‌کنند

✓ در کشتی‌های نظامی: در ناوهواپیمابر برای افق نگه داشتن عرشه - در کشتی‌های کوچک و متوسط نظامی برای کارایی بیشتر سیستم سلاح و FCS

✓ تناسب نیروی لیفتی که ایجاد می‌کند با توان ۲ سرعت کشتی (افت شدید در سرعت‌های کمتر از ۱۰ گره)

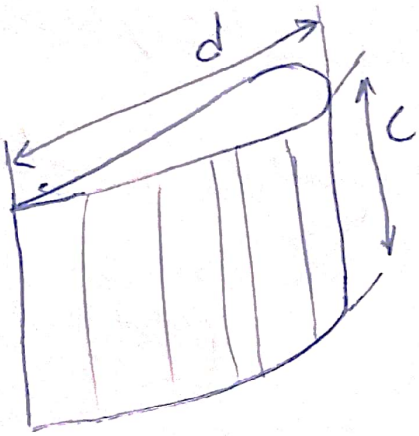
عملکرد بال ضد غلتش

بال‌های ضد غلتش از بدنه خارج می‌شوند و به گونه‌ای قرار می‌گیرند که زاویه حمله فویل‌ها نیروی لیفتی ایجاد کنند که مماس حاصل از این نیرو در خلاف جهت مماس حرکت حرکت رول باشد. لذا هنگام غلتش کشتی، یکی از فویل‌ها نیروی لیفت به سمت بالا ایجاد خواهد کرد و فویل دیگر نیروی لیفت به سمت پایین ایجاد خواهد کرد.

- با افزایش زاویه حمله تا یک زاویه مشخص (زاویه واماندگی یا stall) باعث افزایش نیروی لیفت ایجاد شده می‌شود و پس از آن با افزایش زاویه حمله با جدایش جریان زیاد شده و گرابی به وجود آمده باعث کاهش نیروی لیفت می‌شوند.

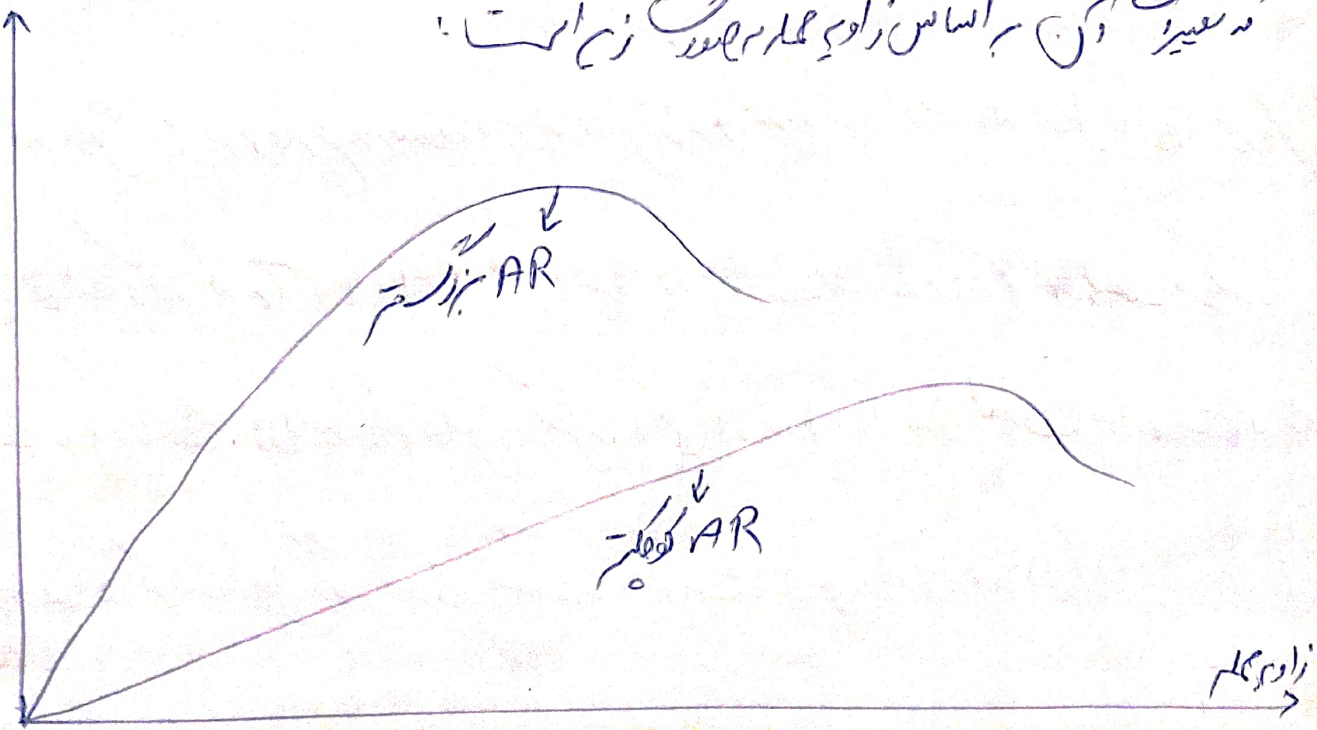
- در کتاب Theory of wing sections، نیروی لیفت و درگ در زوایای مختلف حمله برای مقاطع فویل‌های مختلف رسم شده است که می‌تواند مفید باشد.

- دیگر پارامتر مهم در مقاطع فویل‌ها ضریب منظری (aspect ratio) است که به صورت زیر تعریف می‌شود



$$AR = \frac{c}{d}$$

که تغییرات آن بر اساس زاویه حمله به صورت زیر است:



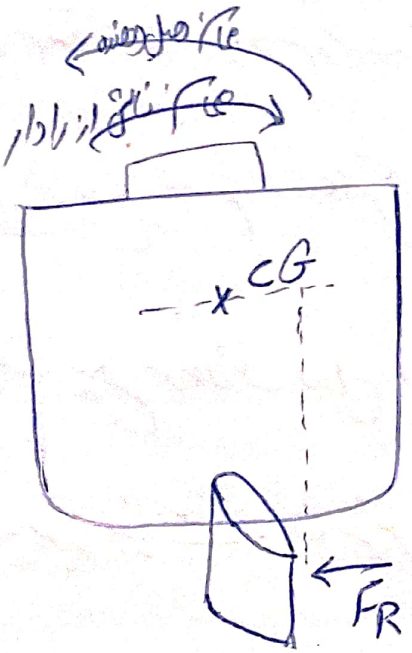
سکان چندعملکرد (Stabilizer Rudder)

✓ کاربرد مناسب در کشتی‌های کوچک

✓ ابعاد سکان را نمی‌توان خیلی بزرگ در نظر گرفت به دلیل ایجاد ناپایداری در پاید واسوی

نحوه عملکرد سکان چندعملکرد

با زاویه دادن به سکان نیرویی به آن وارد می‌شود که دارای دو مؤلفه است یکی از این مؤلفه‌ها در جهت عرضی است که با توجه به فاصله آن از مرکز ثقل باعث در واقع محور رول (محور x طولی شناور) می‌تواند همان هرچند جهت مقابل با همان تحریک حرکت رول ایجاد کند.



جبران بازوی کوچک آن (یعنی فاصله مؤلفه نیروی عرضی رادار تا مرکز ثقل) را می‌تواند با سرعت بالای سیال خروجی از سرعت جبران کند.

- این نوع چندعاملش در محدوده رزنانس کارایی مؤثرتری دارند.

نکته: از سیستم‌های چندعاملش می‌توان به صورت ترکیبی (از چند نوع سیستم چندعاملش) استفاده کرد که بسیار مؤثرتر است نسبت به حالت تکی آنها.

پایدارسازی حرکت پیچ

✓ پایدارسازی حرکت پیچ معمولاً انجام نمی‌شود مگر در مواردی از قبیل:

- ایجاد کوبش شدید
- چندبات سازه‌ای و ارتعاش شدید و غیرقابل کنترل
- نیروی محرکه زیاد پروانه

✓ نیاز به جرم کمک بسیار بزرگ است بنابراین اشغال حجم و تحمیل وزن بسیار زیاد برای هر نوع سیستم چندعاملش مانند مخازن و ژیروسکوپ را در پی دارد.

✓ حرکت پیچ برخلاف رول، حساس به ناحیه رزنانس نیست چون دارای فرکانس یک نوک تیز نیست. بنابراین یک جابجایی چندعاملش پیچ در محدوده فرکانس یک وسیعی کارایی دارد. (مطالب تکمیلی در مورد جابجایی چند پیچ در فصل 14 کتاب Dynamics of marine vehicles)

✓ کارایی زیاد فین در امواج کوتاه و کارایی کم در امواج طویل

✓ حبابی باشند هم وجود دارد

✓ حبابی ضد غلتش هیچ نباید از آب بیرون بزند حتی اگر ممکن است باعث تحمیل شرایط سنگین و شتاب‌های زیاد به شناور شود

✓ حتی می‌تواند باعث کاهش مقاومت شود (مانند بالبوس)

- سایر مباحث تکمیلی از انواع روش‌های کاهش غلتش و جزئیات بیشتر طراحی از کتاب:

Dynamics of Marine vehicles / فصل 14 تا 16

جلسه چهل و پنجم

« سایر ملاحظات دریایی در طراحی کشتی »

(بخش اول)

- موفقیت یک کشتی به عملکرد موفق آن در دریا وابسته است.

✓ قبلاً به دلیل پیچیدگی و حجم بالای طراحی دریایی، اصلاً تحلیل دریایی انجام نمی‌شد و کل طراحی در شرایط آب آرام انجام می‌شد ولی امروزه با توسعه امکانات سخت‌افزار و توسعه روش‌های تئوری و محاسبه نرم‌افزارهای طراحی این امر حتی در مراحل اولیه طراحی نیز مقدور شده است.

✓ پارامترهای متعددی از خصوصیات شناور در دریاهای واقعی هستند مانند ابعاد هندسی (طول، عرض، دماغه)، ضرایب هندسی بدنه، مشخصات جرمی و اینرسی، پایداری و ارتفاع متاسنتر، وجود یا عدم وجود حبابی سینه، عدد فرود (سرعت) و ...

✓ برخی از آنها اثرات متضاد با یکدیگر دارند. لذا همه این پارامترها را نمی‌توان با هم و همزمان فرموله کرد لذا تک به تک بررسی می‌شوند.

✓ تقریباً همه پارامترها تا کنون به نوعی بحث شده اند ولی در اینجا به برخی پارامترها بصورت دقیق تر پرداخته می شود.

اثر طول به خصوص در دریامانی

✓ طول مهمترین پارامتر هندسی کشتی است که اثرات ویژه ای بر رفتار دریامانی کشتی دارد.

✓ طول بر حرکات هیو و پیچ اثرات منحصر به فرد دارد.

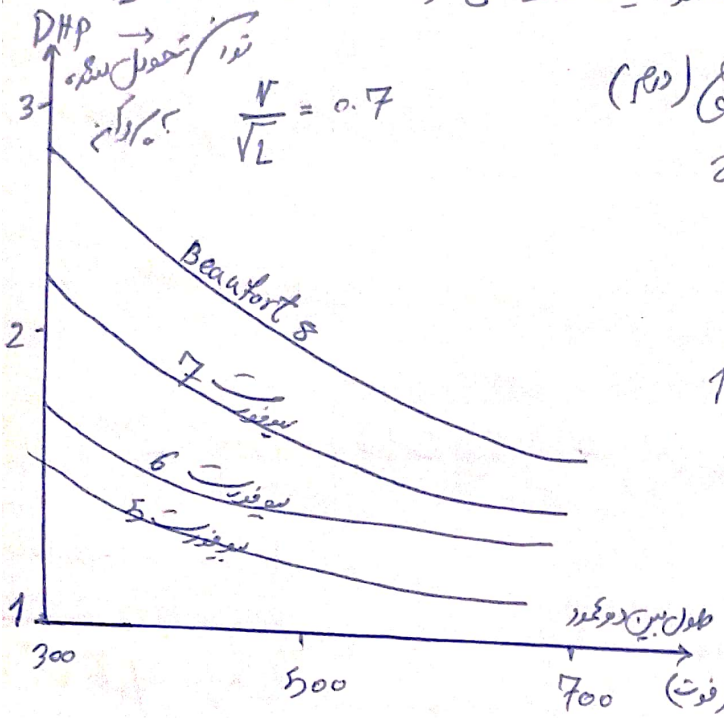
✓ علت کاهش سرعت اختیاری کشتی اینست که با موج کوتاهتر همزمان و مواجه می شود (از برابر طول موج موثر و طول کشتی بزرگتر شود)! لذا هرچه کشتی طویلتر باشد به کاهش سرعت کمتری نیاز دارد!

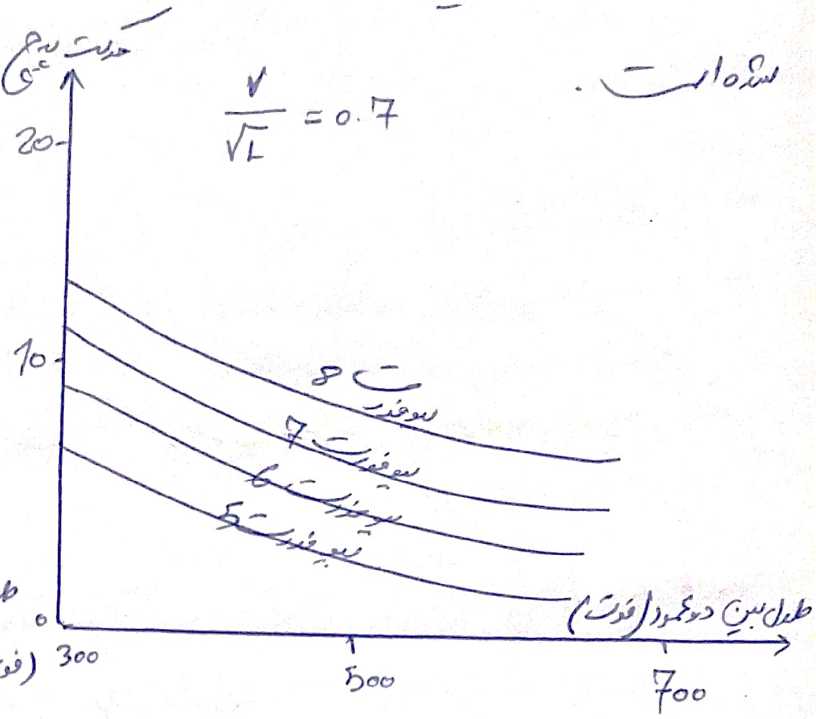
✓ لذا کشتی با طول بیشتر، راحت تر می تواند سرعت خود را حفظ کند و کاهش سرعت اختیاری در آنها کمتر است.

✓ آزمایشات کشتی در دریا نشان داده است که شتاب عمودی در قسمت میانه در کشتی طویلتر، خیلی کمتر از کشتی کوتاهتر است.

مهم: لذا از دیدگاه دریامانی، هرچه طویلتر بهتر

دو نمونه از نمودارهایی که تأثیر افزایش طول بر خصوصیت دریایی را نشان می‌دهند در زیر آورده شده است.





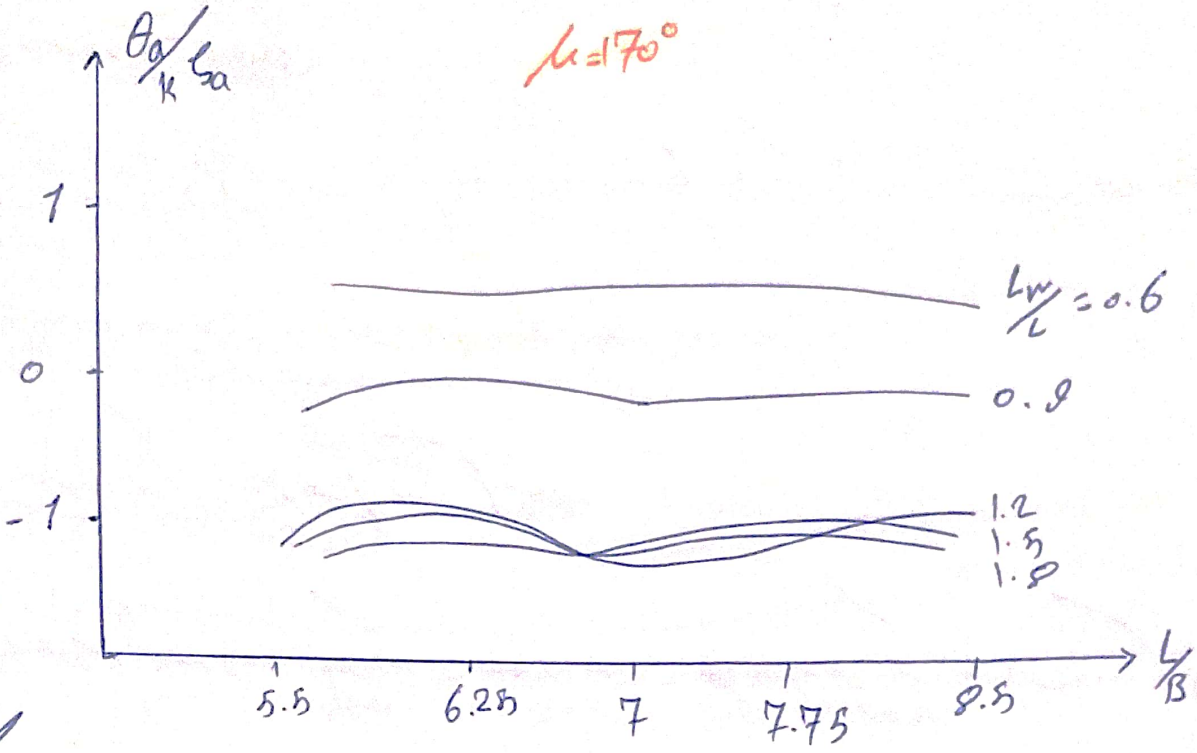
با توجه به نمودارهای فوق هرچه طول کشتی بیشتر می‌شود مقدار پیچ کوچکتر می‌شود و این به معنای خصوصیت دریایی بهتر است. همچنین هرچه سرعت افزایش می‌یابد (افزایش نسبت $\frac{V}{\sqrt{L}}$ در نمودارهای فوق)، توان تحویلی مورد نیاز کاهش می‌یابد (البته نمودارهای مربوط به آن رسم نشده است).

- ملاحظه می‌شود که با افزایش طول، همه خصوصیات دریایی بهبود می‌یابد. (نمودارهای آورده شده است می‌توانند آنها را در نمودارهای مربوطه پیدا کرد)

اثر عرض بر خصوصیات دریایی

طراحان کشتی ترجیح می‌دهند که از نسبت $\frac{L}{B}$ کوچکتر (عرض بزرگتر در طول ثابت) استفاده کنند ولی این انتخاب چقدر اهمیت دریایی را در پی خواهد داشت.

نمودار صفحه بعد این رفتار را نشان می‌دهد.

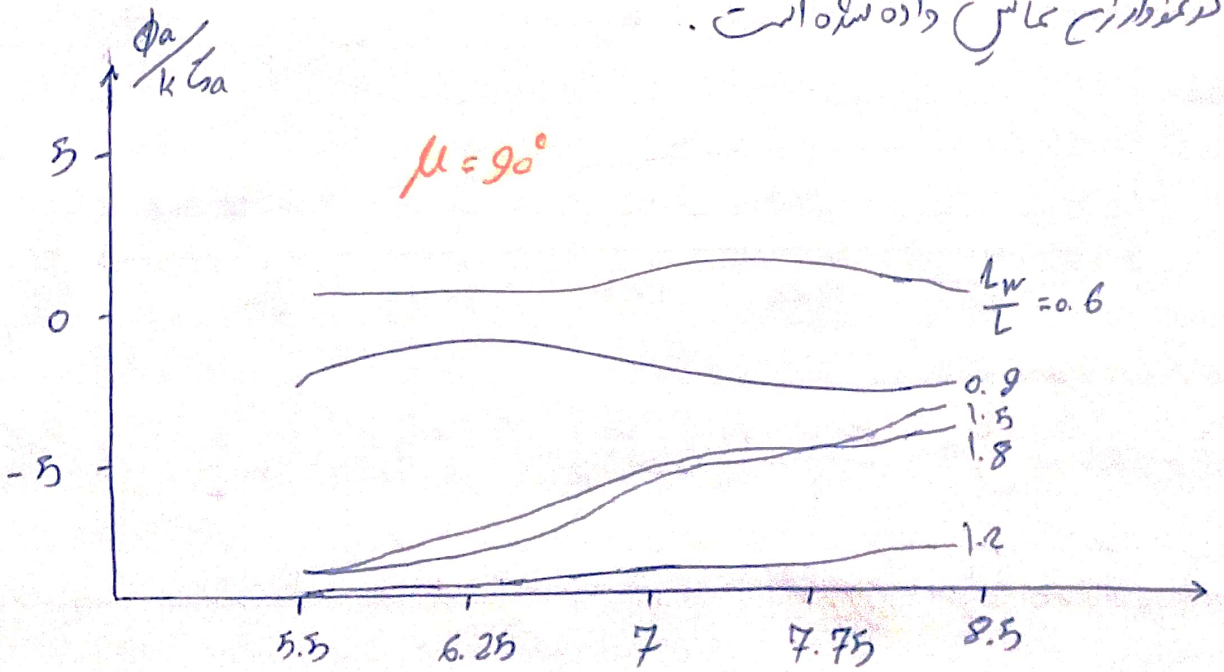


- مشاهده می‌شود که با افزایش یا کاهش نسبت L/B ، دامنه‌ی بعد حرکت پیچ آنچنان تغییر نمی‌کند بنابراین

در بعضی خصوصیت دریاهای ، بعضی را زیاد ملاک قرار نمی‌دهند و آن را به دیگر پارامترها طراحی وا می‌گذارند.

- اما در برخی از نسبت‌ها $\frac{L_w}{L}$ با افزایش B ، دامنه‌ی بعد حرکت رول $\left(\frac{\phi_a}{k\zeta_a}\right)$ کاهش می‌یابد

که در نمودار زیر نمایش داده شده است.



اثر آبخور بر خصوصیات دریایی

✓ حرکات کشتی با افزایش نسبت L/T رفتارهای متضادی دارد که وابسته به نسبت طول موج است.

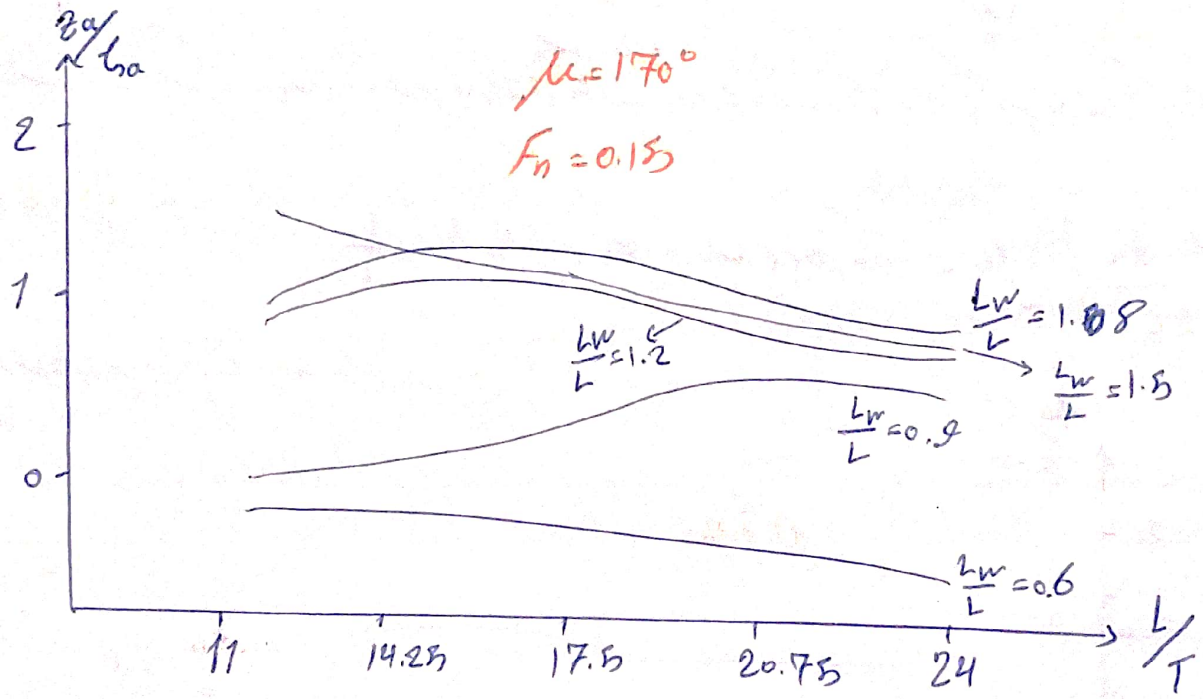
یعنی در برخی موارد بهتر و در برخی موارد بدتر می‌شود (مطابق نمودارها).

✓ در طول موج‌های بزرگتر نتایج بهتری نشان می‌دهد.

- نمودار زیر تأثیر آبخور را بر دامنه حرکت هیو در نسبت طول موج به طول کشتی مختلف نشان می‌دهد

برای دیگر پارامترهای دریایی مانند دامنه حرکت رول، پیچ، شتاب، سود و نیاز و ... نیز نمودارهای مربوطه وجود

دارد.

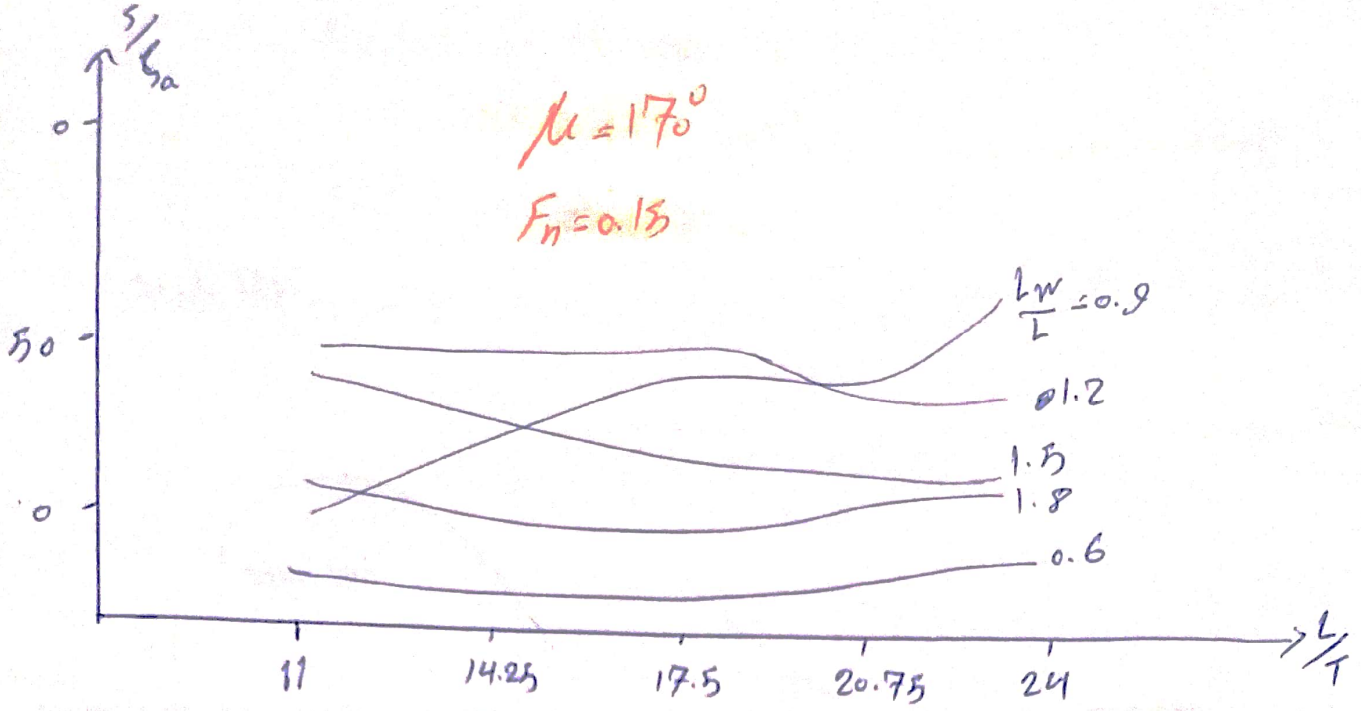


- مشاهده می‌شود که در $\frac{L_w}{L}$ های بزرگتر از 1، کاهش آبخور می‌تواند باعث کاهش دامنه حرکت هیو

شود و به بهبود خصوصیت دریایی شناور کمک کند. البته باید توجه کرد که کاهش آبخور ممکن است

باعث افزایش دیگر پارامترهای دریایی مانند $\frac{\zeta}{h_a}$ شود (با توجه به نمودار صفحه بعد) از نقاط دریایی

نامطلوب است.

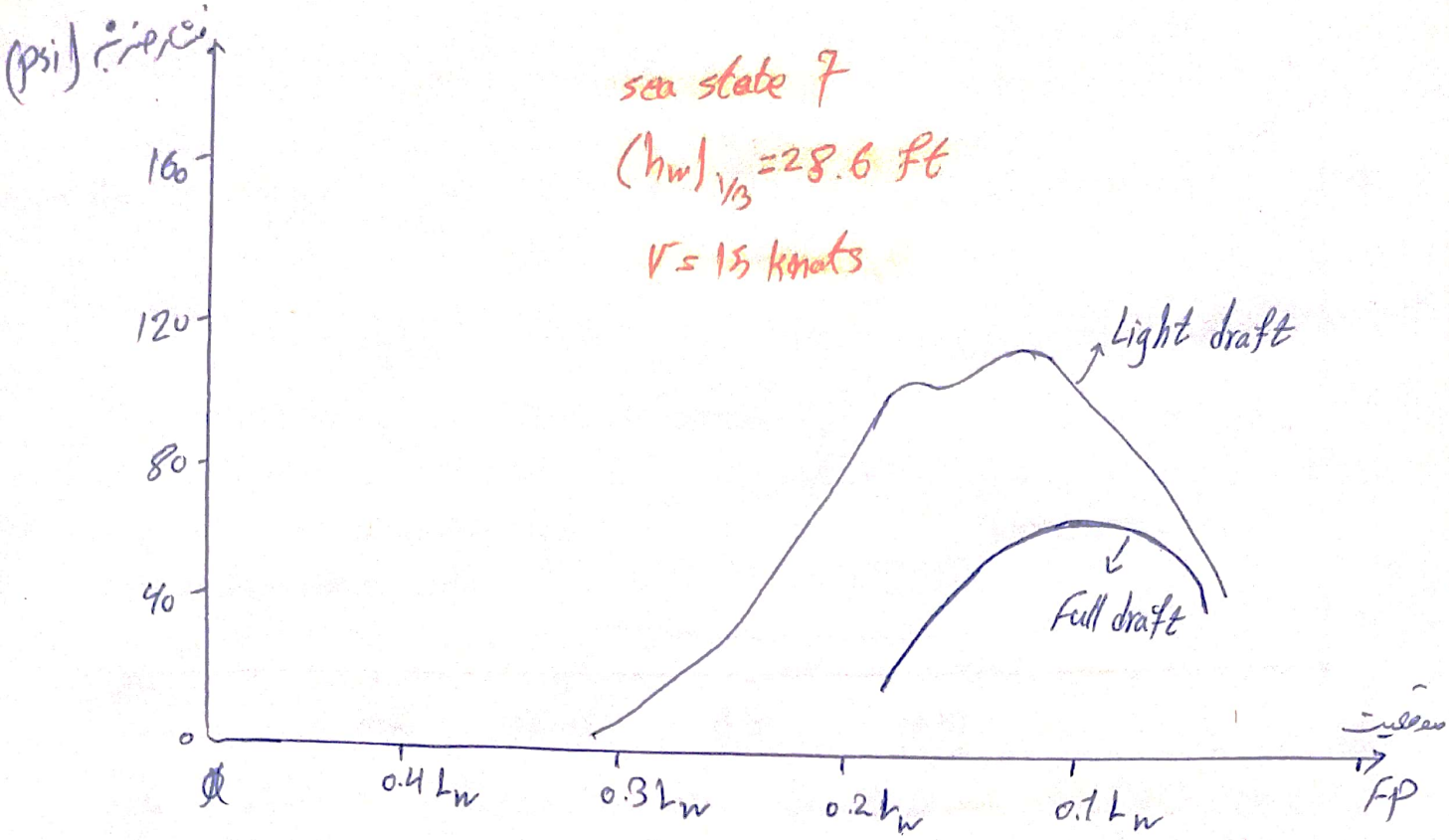


✓ از نظر کوبش، افزایش آبخور (بخصوص آبخور سینه) بسیار اهمیت دارد و کوبش کاهش می‌یابد.

همچنین با افزایش آبخور، موقعیت پیک فشار کوبش به جلوتر منتقل می‌شود.

✓ توصیه شده است که برای پرهیز از ضربات سنگین کوبش، نسبت T/L بزرگتر از 0.045 باشد.

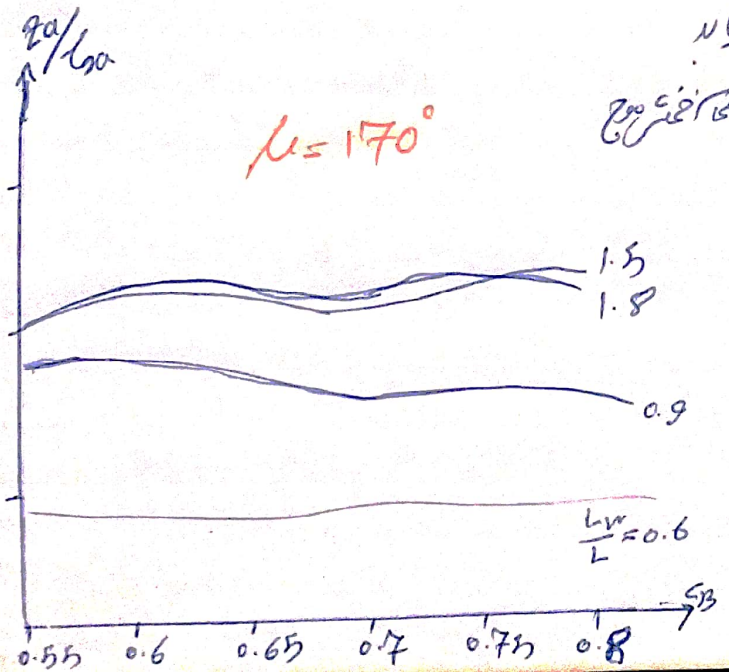
✓ کاهش آبخور کشتی در شرایط آبخور سبک بسیار خطرناک است. این موضوع را می‌توان به وضوح در شکل صفحه بعد مشاهده کرد.

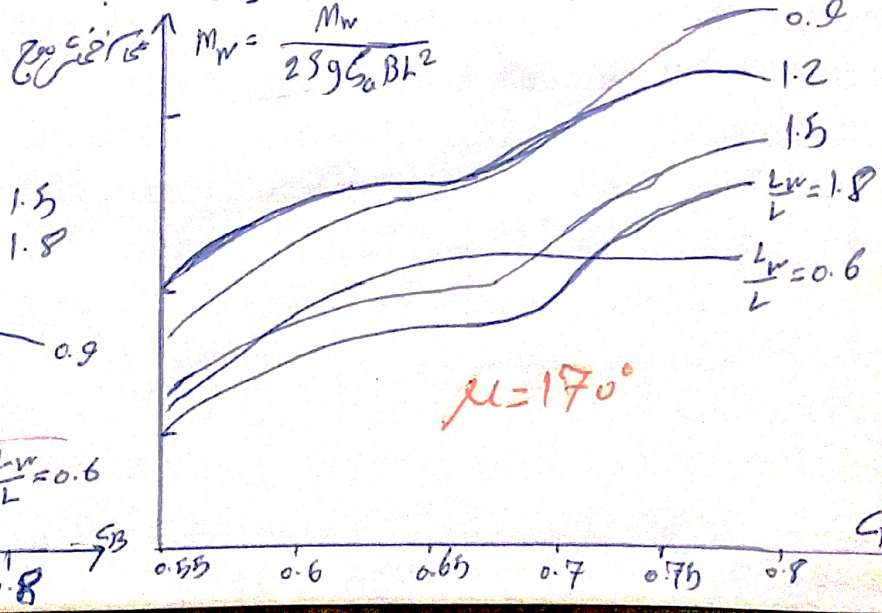


✓ هرچه نسبت L/B کاهش می‌یابد میزان خمش افزایش می‌یابد. اما با کاهش نسبت L/T، میزان خمش رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد و وابسته به عدد فرود است.

اثر ضریب بلوکی بر مشخصات دریایی

در حالت کلی ضریب بلوکی اثر کمی بر مشخصات دریایی دارد. و فقط میزان خمش موج است که به شدت با افزایش ضریب بلوکی افزایش می‌یابد

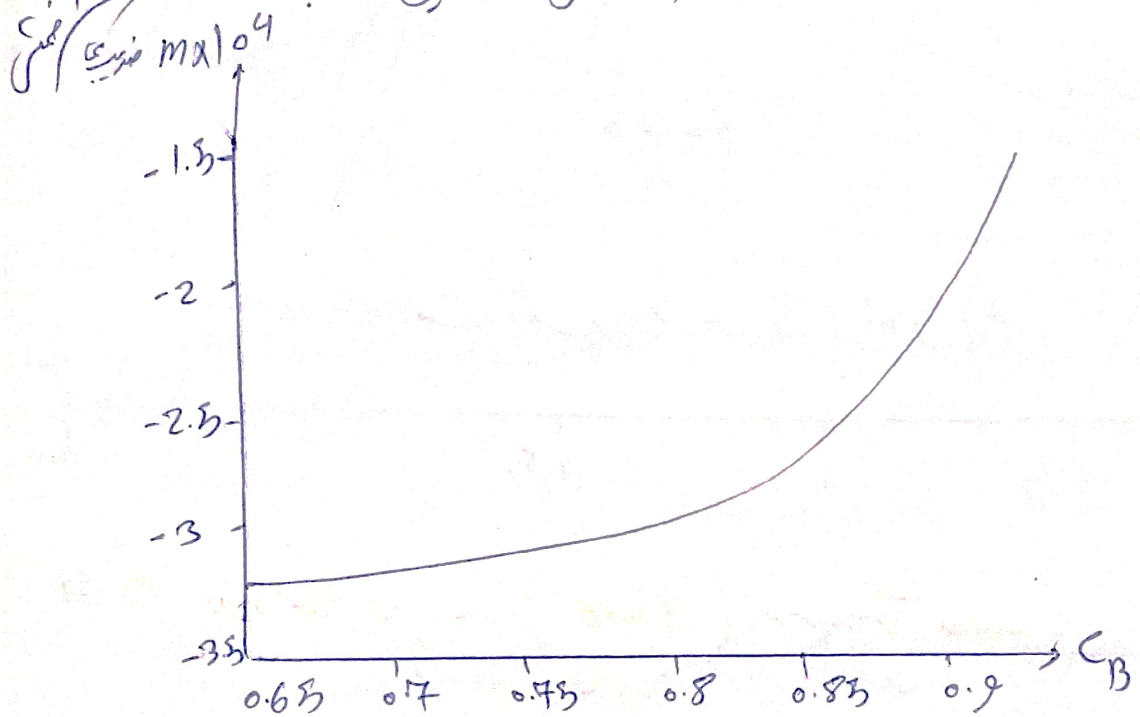




مثلاً حداکثر خمش موج در ضریب بلوکی 0.8 به مقدار 40 % بیشتر از ضریب بلوکی 0.6 است.

اثر ضریب صفحه آبخور بر خصوصیات دریایی

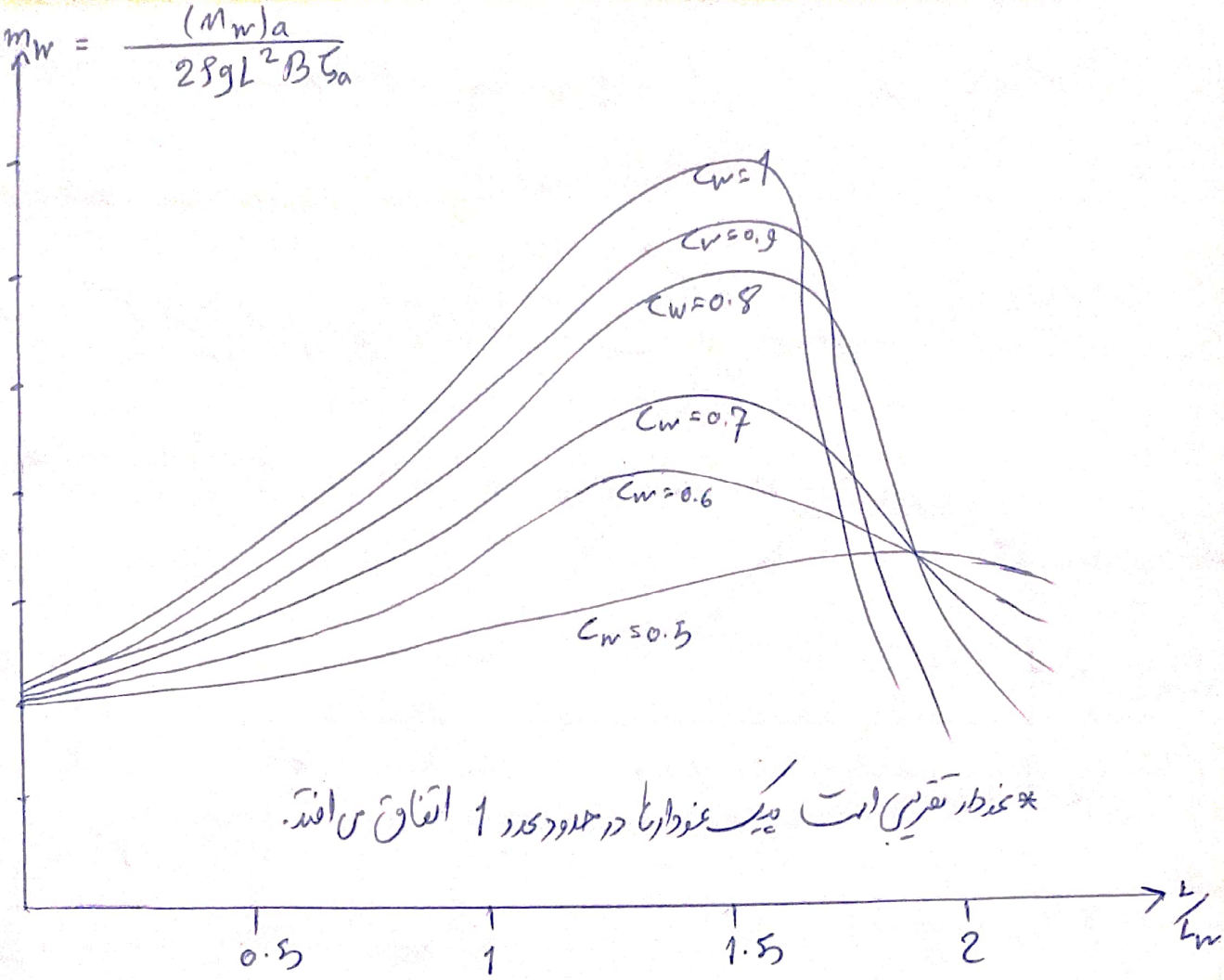
هر دو عامل حداکثر خمش عمودی موج و حداکثر خمش آب ساکن متناسب ضریب صفحه آبخور هستند. یعنی با افزایش ضریب صفحه آبخور حداکثر خمش افزایش می‌یابند.



- لذا با تمرکز بر حداکثر خمش، ضریب صفحه آبخور مهمتر از ضریب بلوکی است.

✓ نمودار از مقادیر حداکثر خمش موج ناشی از موج دریا و موج تولید شده توسط بدنه به صورت تابعی از ضریب صفحه آبخور و نسبت طول موج در نمودار صفحه بعد تشریح شده است. این نمودار نشان می‌دهد که حداکثر خمش در طول موج‌هایی تقریباً برابر طول کشتی اتفاق می‌افتد.

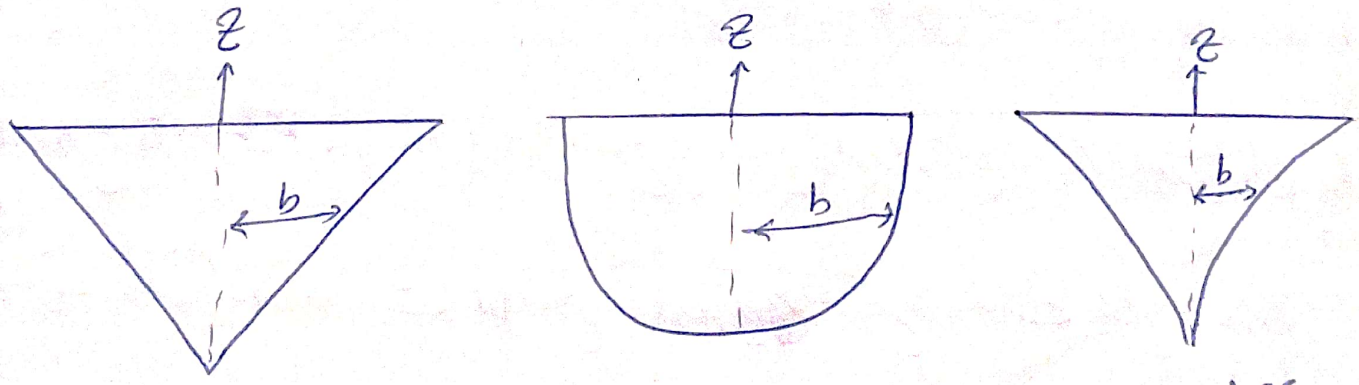
همچنین با کاهش ضریب صفحه آبخور نقطه حداکثر خمش در طول موج کمی کوتاه‌تر از طول کشتی اتفاق می‌افتد.



* نمودار تقریبی است و یک نمودارها در حدود عدد 1 اتفاق می افتد.

اثر فرم برد و انحنای بدنه (flare) بر خصوصیات دریایی

در زیر سه مدل مقطع بدنه نشان داده شده است



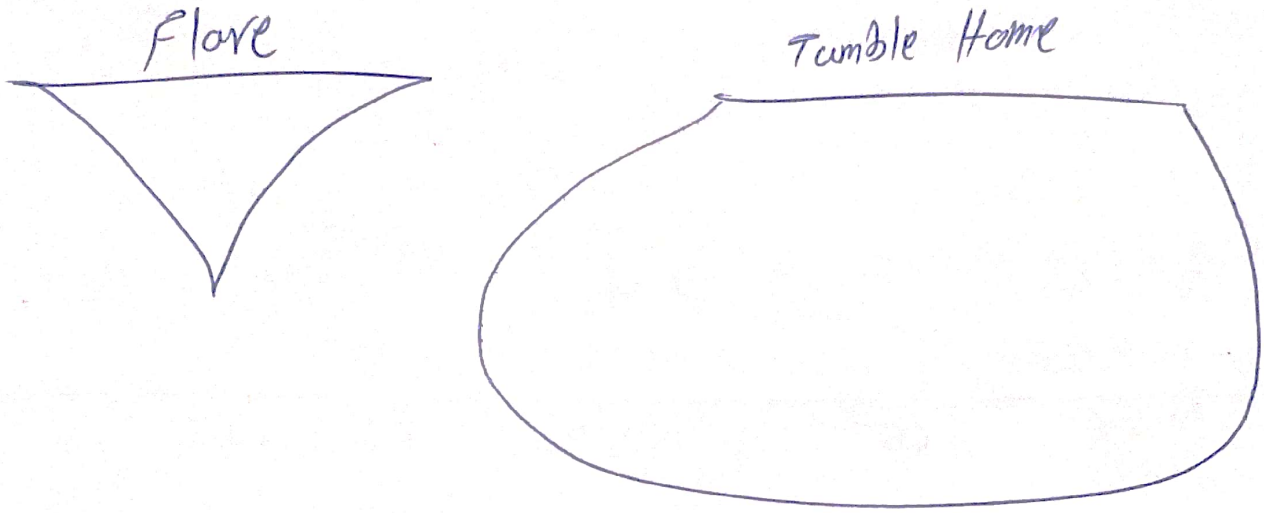
$b = k z$ — مقطع شیب

$b = k\sqrt{z}$

$b = k \cdot z^{1.25}$ — مقطع فلیر flare

Flare: outward curvature of ships hull surface above the waterline.

Tumble Home: opposit of flare.



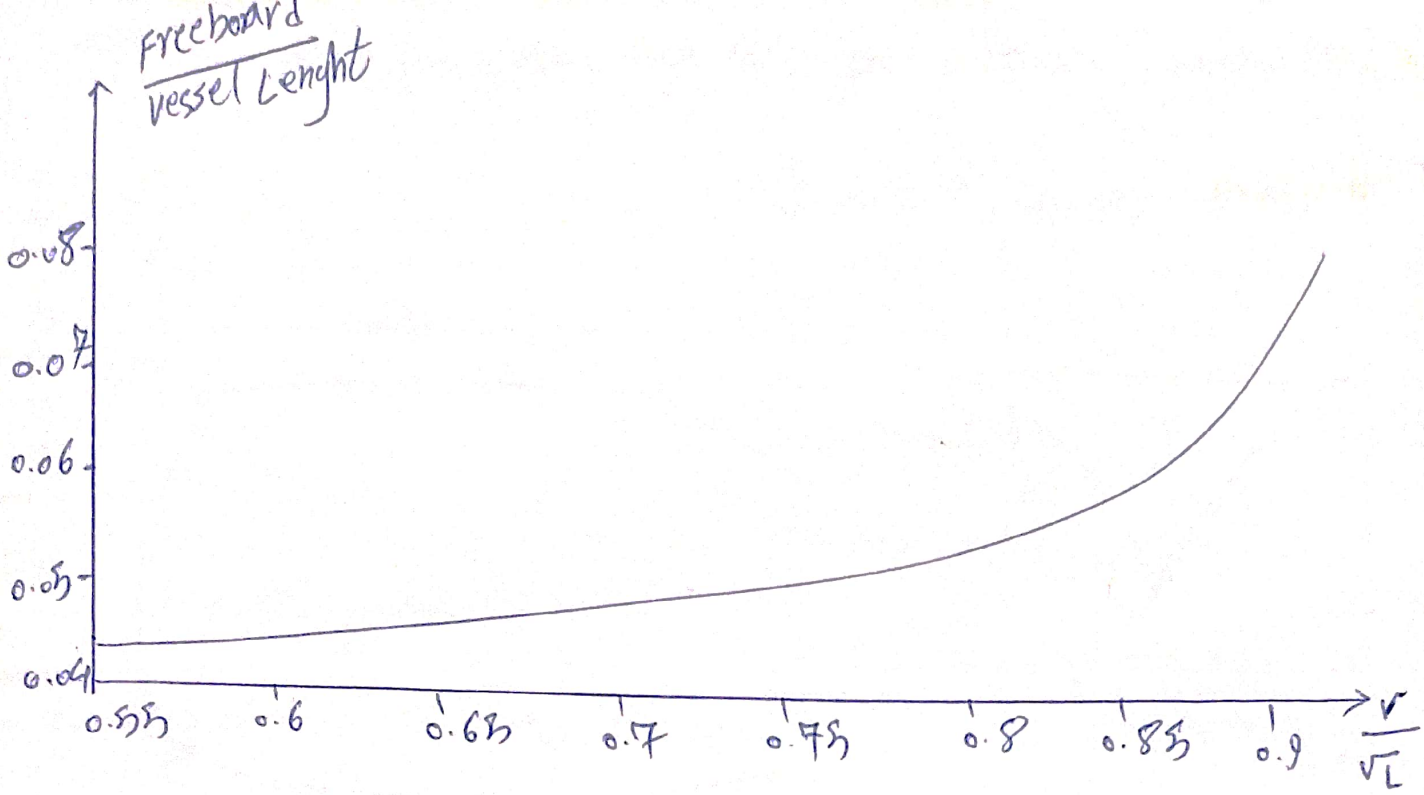
✓ آزمایش مدل برای صدها پایی از شکل بدنه نشان داده است که تغییر شکل بدنه بالای خط آب چندان اثری بر حرکات کشتی ندارد بجز در مورد خیس شدن.

✓ فری برد و انحنای عرضی بدنه تأثیر زیادی در کاهش خیس شدن دارند.

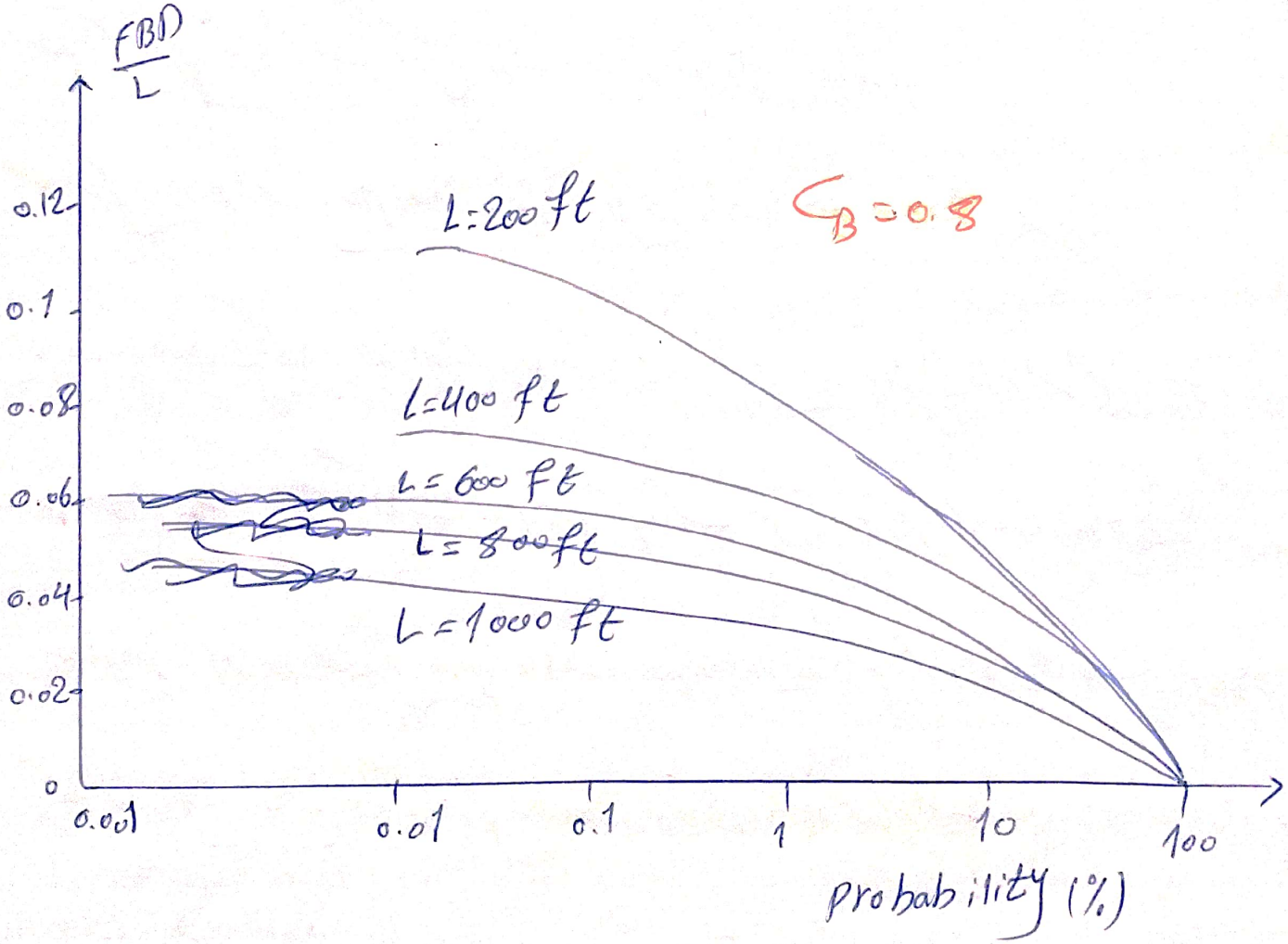
✓ هرچه سرعت کشتی افزایش یابد نسبت فری برد به طول باید افزایش یابد.

✓ انحنای عرضی بدنه به حرکت رو به پیشرو کشتی در آب حین فرو رفتن سینه در موج کمک می‌کند. البته مقدار بیش از حد انحنای عرضی باعث تشدید حرکات کوبش و افت سرعت می‌شود.

✓ نمونه‌ای از مقادیر پیشنهادی درصد بعد نشان داده شده است. درصد بعد نسبت فری برد به طول شناور بر حسب $\frac{V}{\sqrt{L}}$ ترسیم شده است.



- در نمودار زیر نسبت فری بورد به طول را برحسب درصد احتمال خیس شدن ترسیم شده است



- در یک فری بورد ثابت هرچه طول کشتی بیشتر باشد احتمال خیس شدن کمتر می‌شود.

نکته: دیگر این نکته جالب است که کشتی‌های کوچکتر باید دارای شیب طولی عرشه (sheer) بزرگتری باشند تا دارای فرابرد بزرگتری شوند چون حرکات کشتی خیلی وابسته به طول است و هرچه کشتی کوچکتر باشد دارای حرکات شدیدتری است.

نتایج تحلیل دریایی روی اثرات sheer برای کشتی با طول 656 فوت و بزرگتر، به صورت نمودارهای استخراج شده که در اینجا فقط به ذکر نتایج بسنده می‌کنیم:

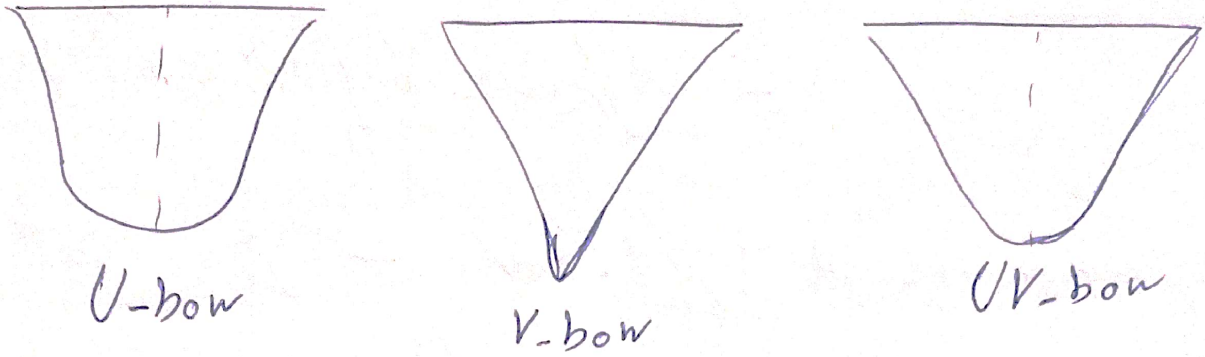
- در سرعت و ضریب بلوکی ثابت، برای کاهش احتمال خیس عرشه به فرابرد بزرگتری احتیاج داریم.
- در سرعت و احتمال خیس عرشه ثابت برای ضریب بلوکی کمتر به فرابرد کوچکتری احتیاج داریم.
- در ضریب بلوکی ثابت و احتمال خیس عرشه ثابت، برای سرعت‌های بیشتر، فرابرد بزرگتری احتیاج داریم.

برای افزایش موضعی فرابرد در قسمت سینه، نصب یک نیم عرشه بسیار مطلوب دارد (Forecastole deck)

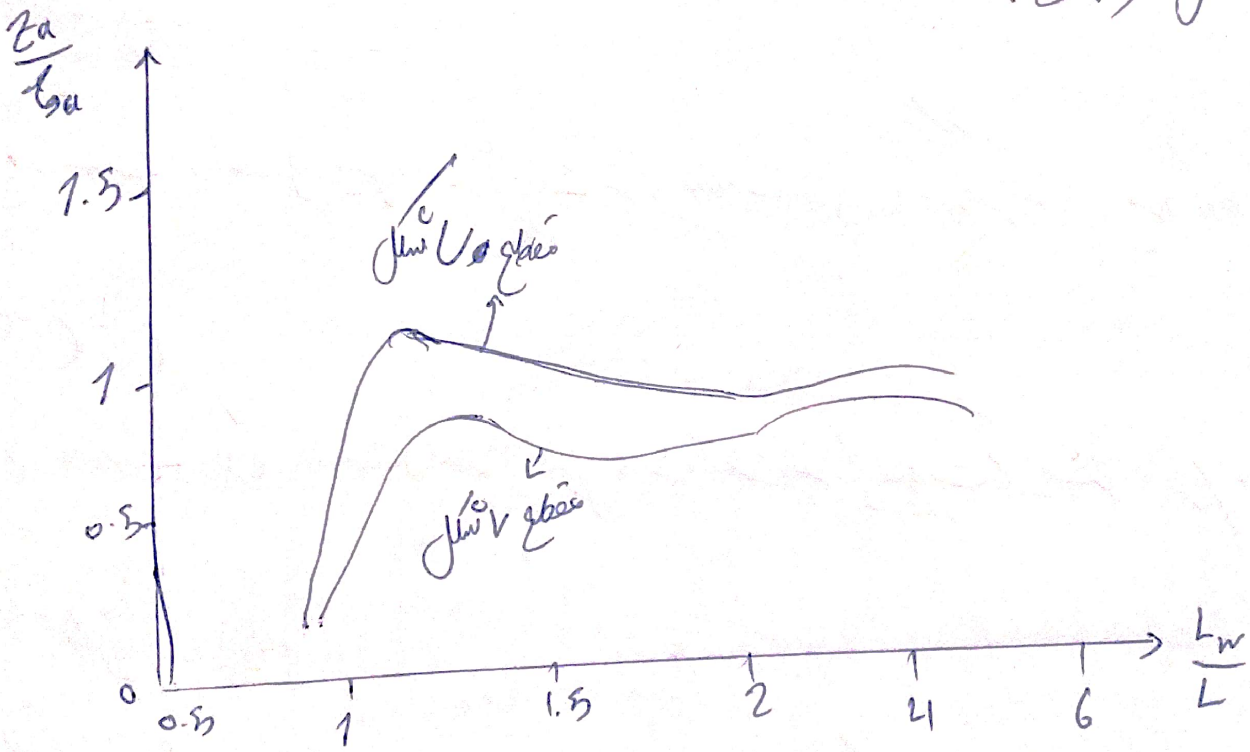
آب روی نیم عرشه نباید به عقب بازگردد لذا نیم عرشه تا عرض کامل بدنه امتداد می‌یابد.

اثر مقطع عرضی بدنه بر خصوصیات دریایی

سه شکل مقطع بدنه در زیر نشان داده شده است



تحلیل ها نشان می دهد که برای هر محدوده مقادیر طول موج، دامنه حرکت هیو مقطع V شکل از U شکل کمتر است.



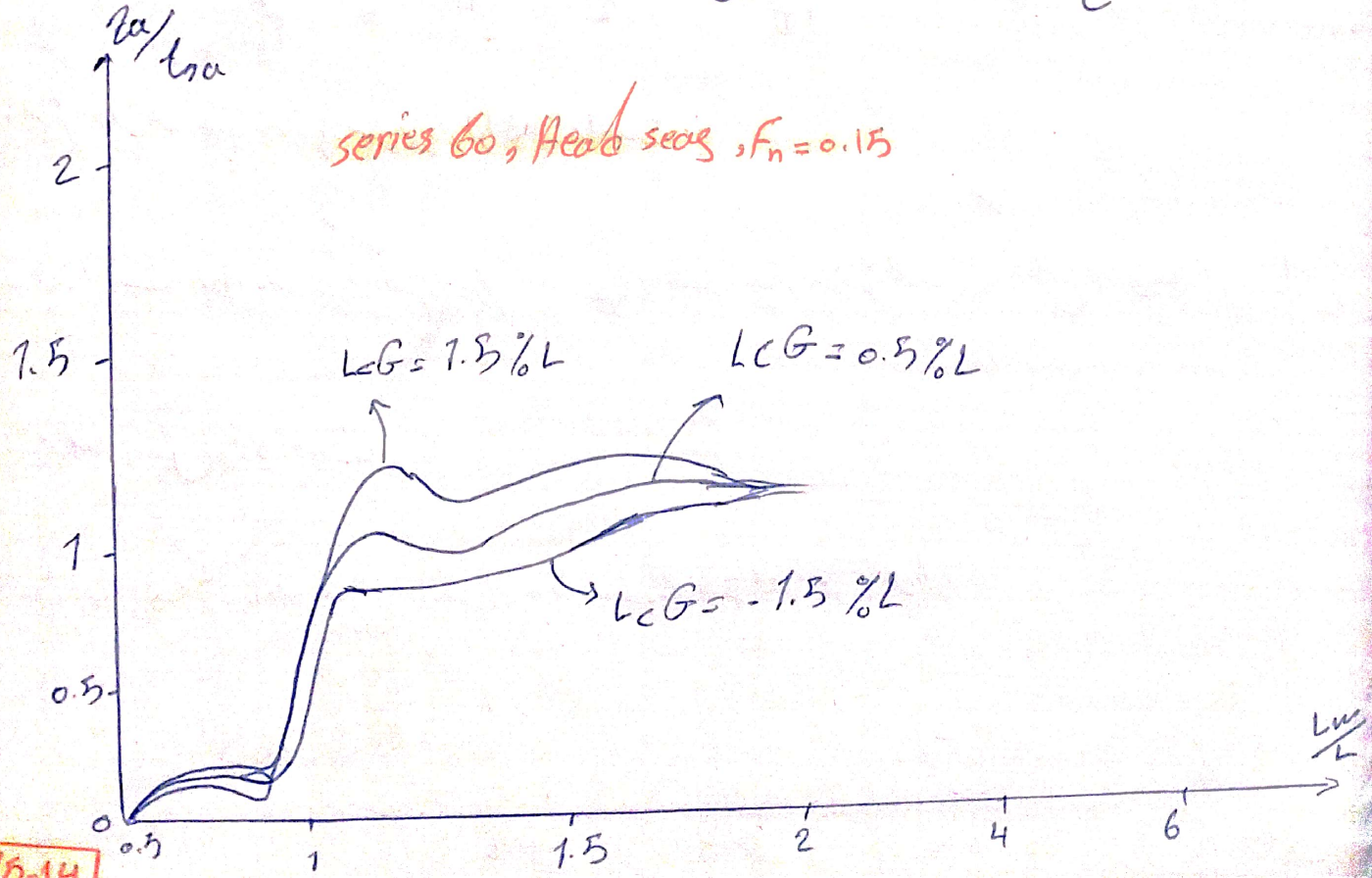
مطالعات تجربی نشان داده است که بدنه با مقطع V شکل دارای فرکانس کوبش بیشتر است ولی فشار کوبش در هر ضربه کمتر است. به عبارت دیگر برای رسیدن به یک فشار کوبش ثابت (که توسط سازه بدنه قابل تحمل باشد) با بدنه V شکل نسبت

به U شکل به سرعت تا بالاتر می‌توان رسید

- حجم افزوده و میدانی این دو مقطع با هم متفاوت است ولی تفاوت اصلی در میدانی است.
- ضریب میدانی (b) مقطع V شکل از مقطع U شکل بزرگتر است
- از نظر قدرت حرکتی، مقطع V شکل از U شکل بهتر است.

اثر LCG بر خصوصیات دریایی

- اگر LCG متمایل به جلو باشد حرکات پیچ و شتاب سینه در موج از روبرو کاهش می‌یابد.
- اگر LCG متمایل به عقب باشد حرکات هیو کاهش خواهد داشت.
- با هر دو ابزار تحلیلی و تجربی اثبات شده است که بین LCF و LCB نباید فاصله چندانی باشد و پاسخ کم دریایی به این جدایش، شدید است.



جلسه چهل و نهم

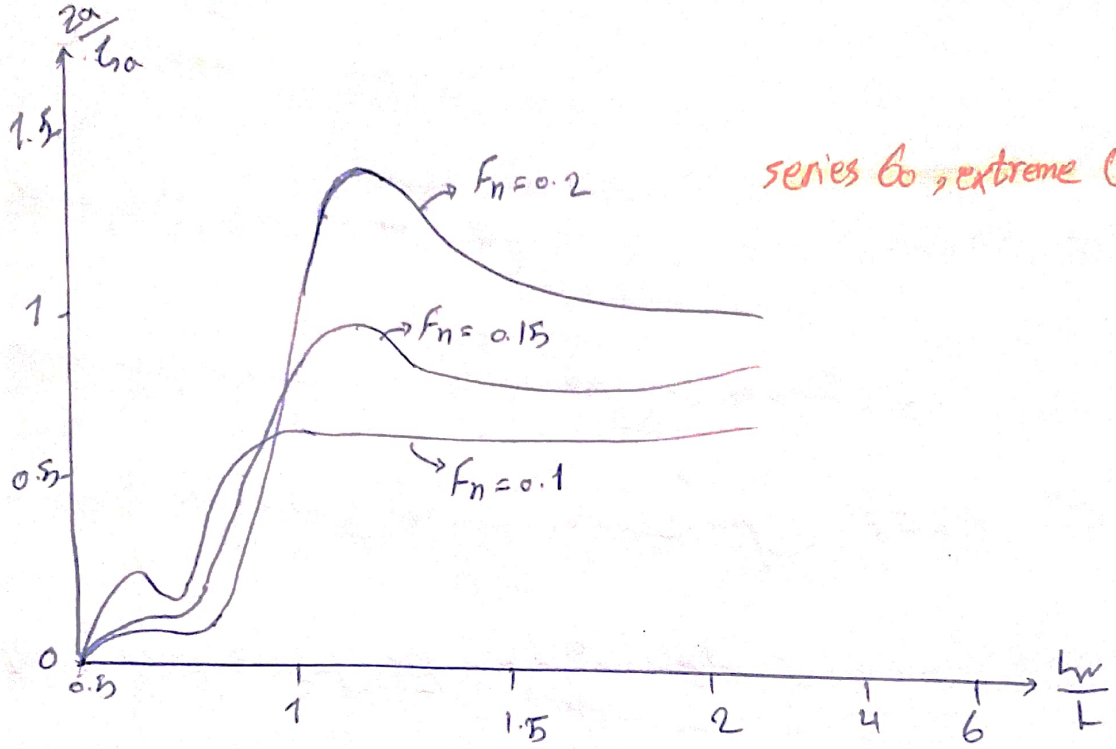
«سایر ملاحظات دریایی در طراحی کشتی»

بخش دوم

اثر سرعت بر خصوصیات دریایی

سرعت اثر کمی روی حرکت هیچ دارد ولی اثر زیادی روی حرکات هیو و شتاب سینه و شتاب پاشنه دارد.

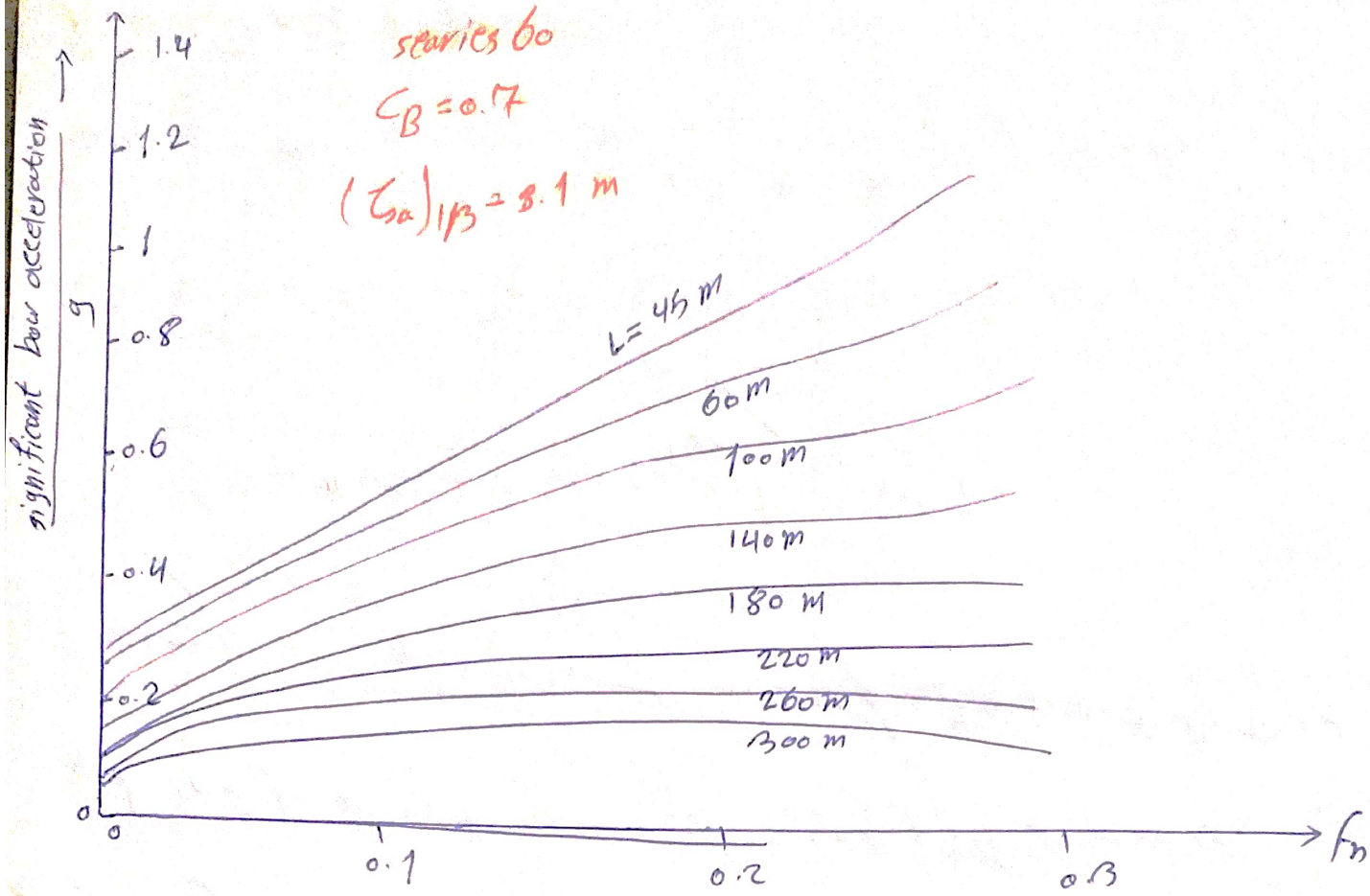
series 60, extreme U-form



- برای دیگر خصوصیات دریایی نیز نمودار ارائه شده است.

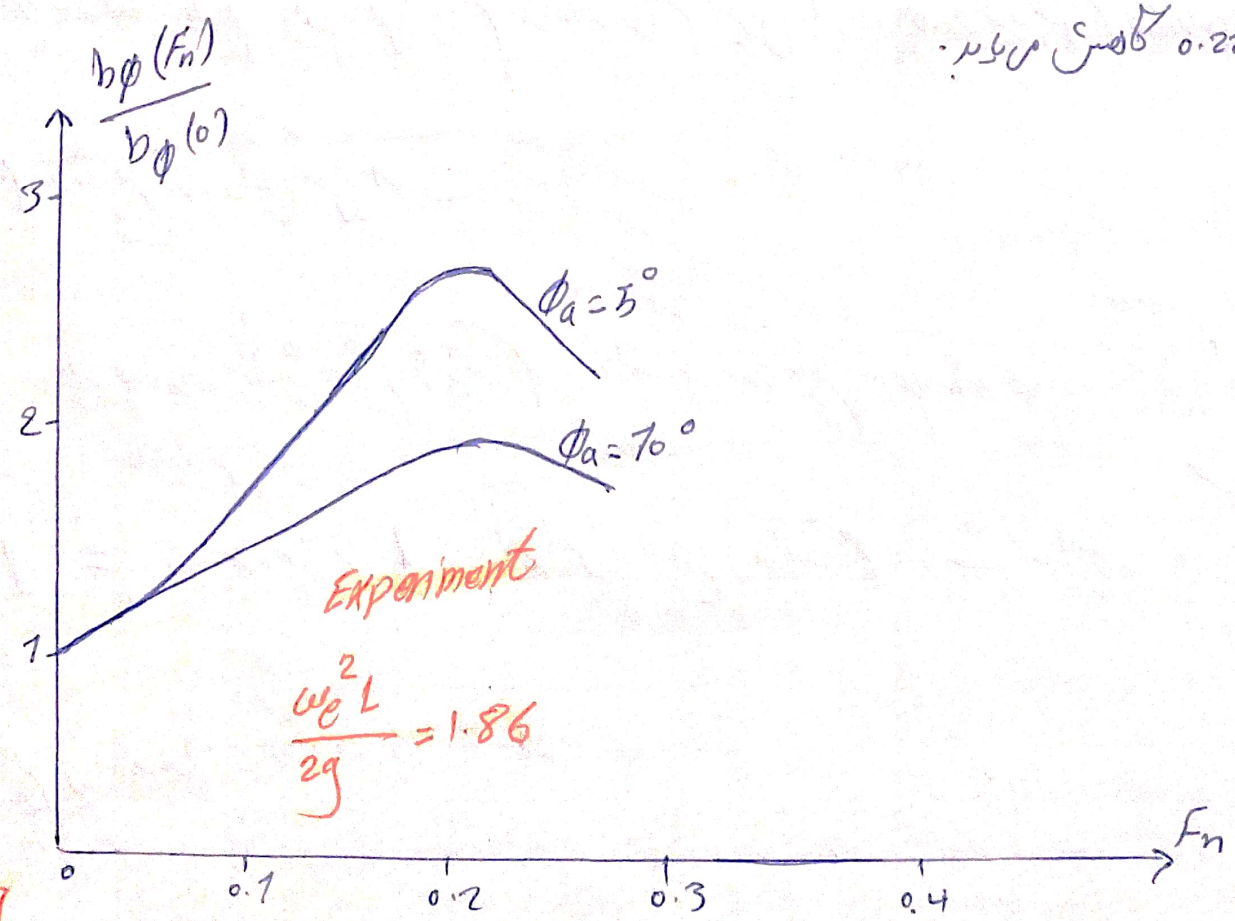
- اثرات طول و سرعت کشتی روی شتاب کی سینه بسیار مؤثر است. شکل صفحه بعد این تأثیر را به خوبی نشان داده است.

- مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، شتاب کی سینه افزایش می‌یابد.



- مشاهده می‌شود که با کاهش طول، نرخ افزایش شتاب عمودی نیز افزایش می‌یابد.

✓ میدان حرکت رول به شدت وابسته به سرعت است. پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر در حدود فرود حدود 0.22 کاهش می‌یابد.



اثر حجم و شعاع ژیراسیون بر خصوصیات دریایی

معمولاً با توجه به نمودار پاسخ در کشتی تجاری، کاهش شعاع ژیراسیون باعث کاهش حرکات هیو و پیچ و حرکات فنر سینه می‌شود. شتاب سینه نیز کاهش می‌یابد لذا:

«هرچه حجم و شعاع ژیراسیون کمتر، بهتر!»

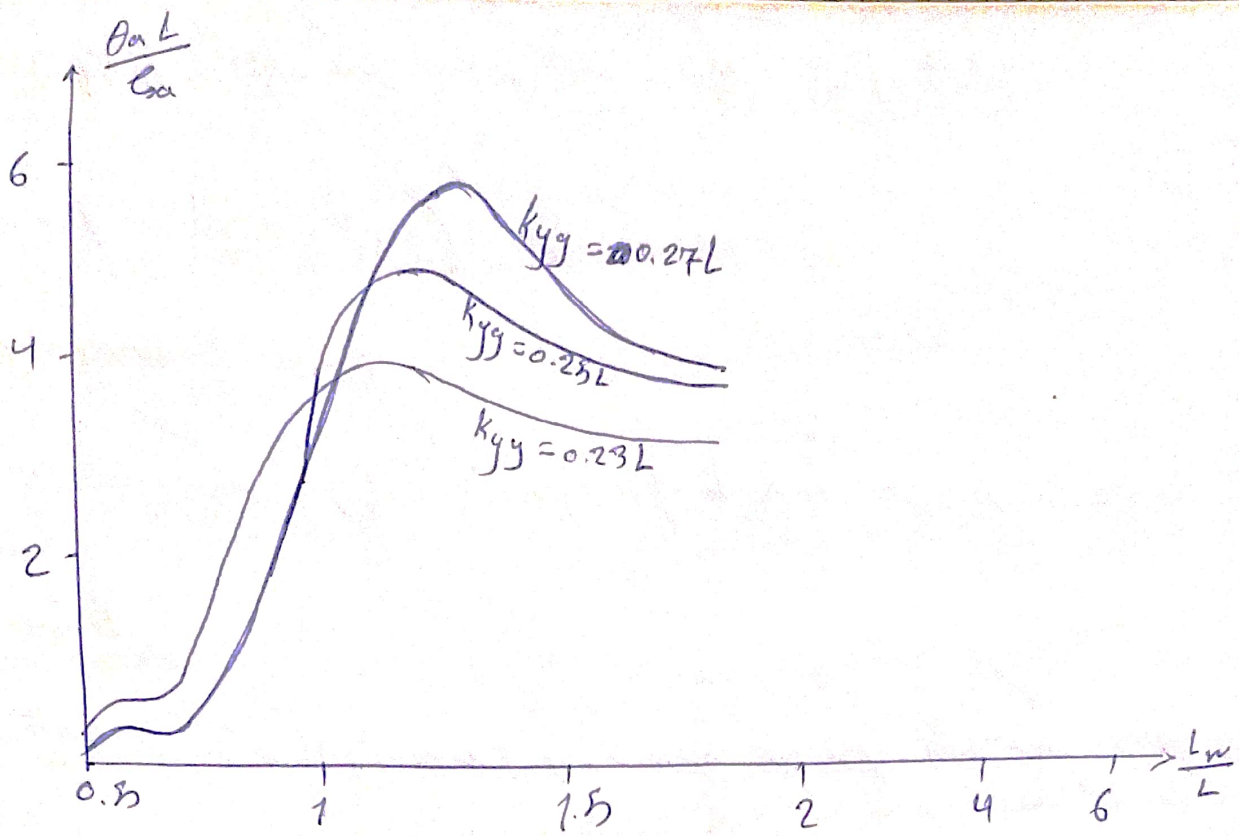
- در حالت کلی افزایش طول و آکسفورد بیشتر، تناژ بیشتر به ما می‌دهد و مطلوب‌تر است و پس از طراحی و رسیدن به طول و آکسفورد مناسب، کاهش تناژ و مماس اینرسی می‌تواند مفید باشد.

✓ یک تناژ کمتر برای بازدهی دریایی بسیار مطلوب است.

✓ یک شعاع ژیراسیون کوچکتر برای بازدهی دریایی بسیار مطلوب است.

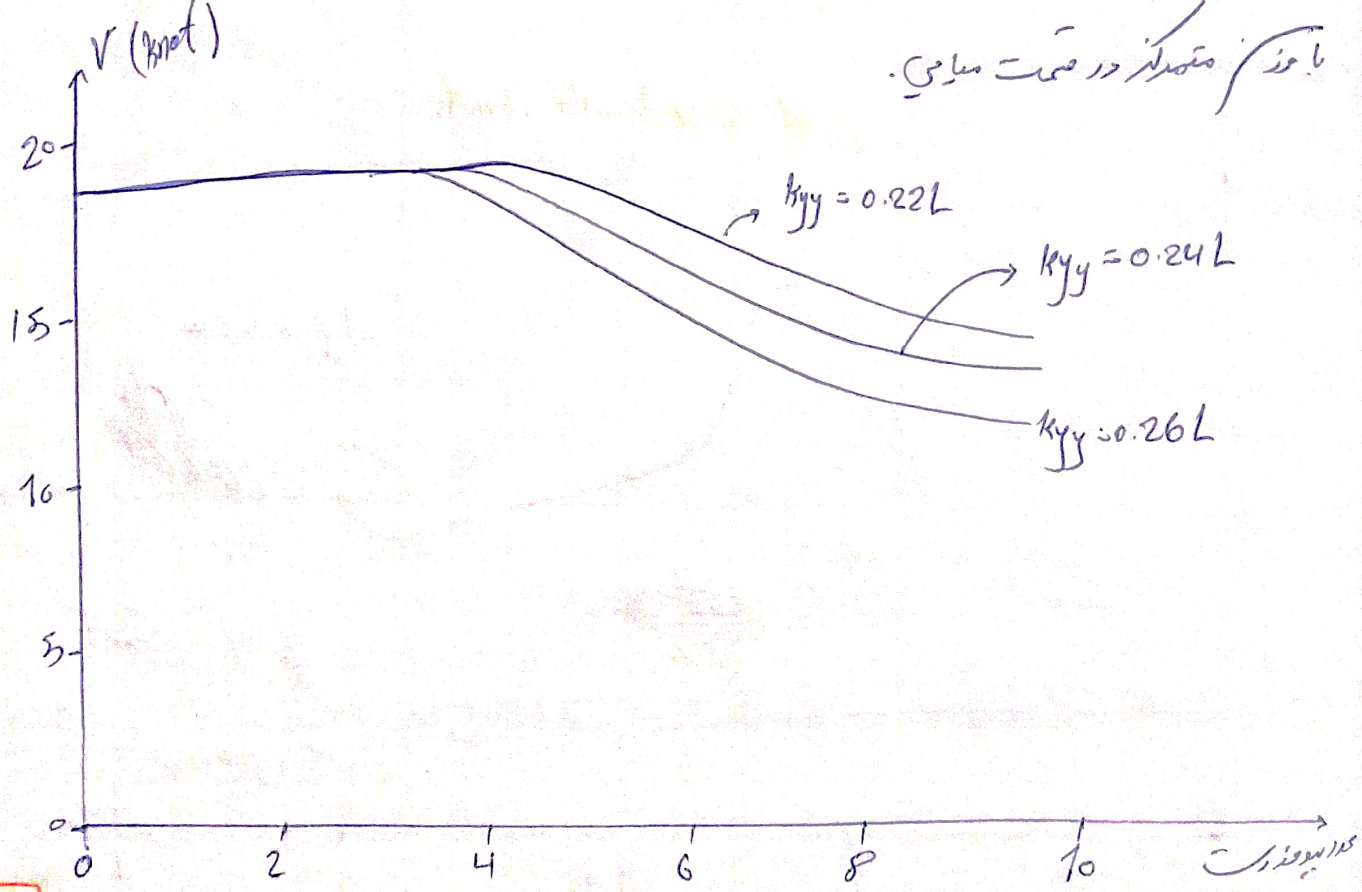
✓ عملاً در یک طراحی واقعی نمی‌توان تناژ و مماس اینرسی را زیاد محدود کرد چون وابسته به جایمانی داخلی و توزیع حجم داخل کشتی است.

✓ در نمودار صفحه بعد تأثیر شعاع ژیراسیون بر دامنه حرکت پیچ ترسیم شده است و نشان می‌دهد که برای $\frac{L_w}{L}$ های بزرگتر از 1، افزایش شعاع ژیراسیون باعث افزایش دامنه حرکت پیچ می‌شود لذا از دیدگاه دریایی نامطلوب است.



- برای دیگر پارامترها دریایی نیز نمودارها ارائه شده است.

شکل زیر به عنوان مثال نشان می‌دهد که یک کشتی 500 فوتی در موج از روبرو با مرکز اینرسی طولی بزرگتر (یعنی تمرکز حجم‌ها در طرفین طولی) متحمل امنت سرعت بیشتری می‌شود نسبت به یک کشتی با مرکز متمرکز در قسمت میانی.



✓ تغییرات عمق آبخوری در کشتی‌های کوچکتر عبارت از کشتی‌های بزرگتر است. (از نظر طولی)

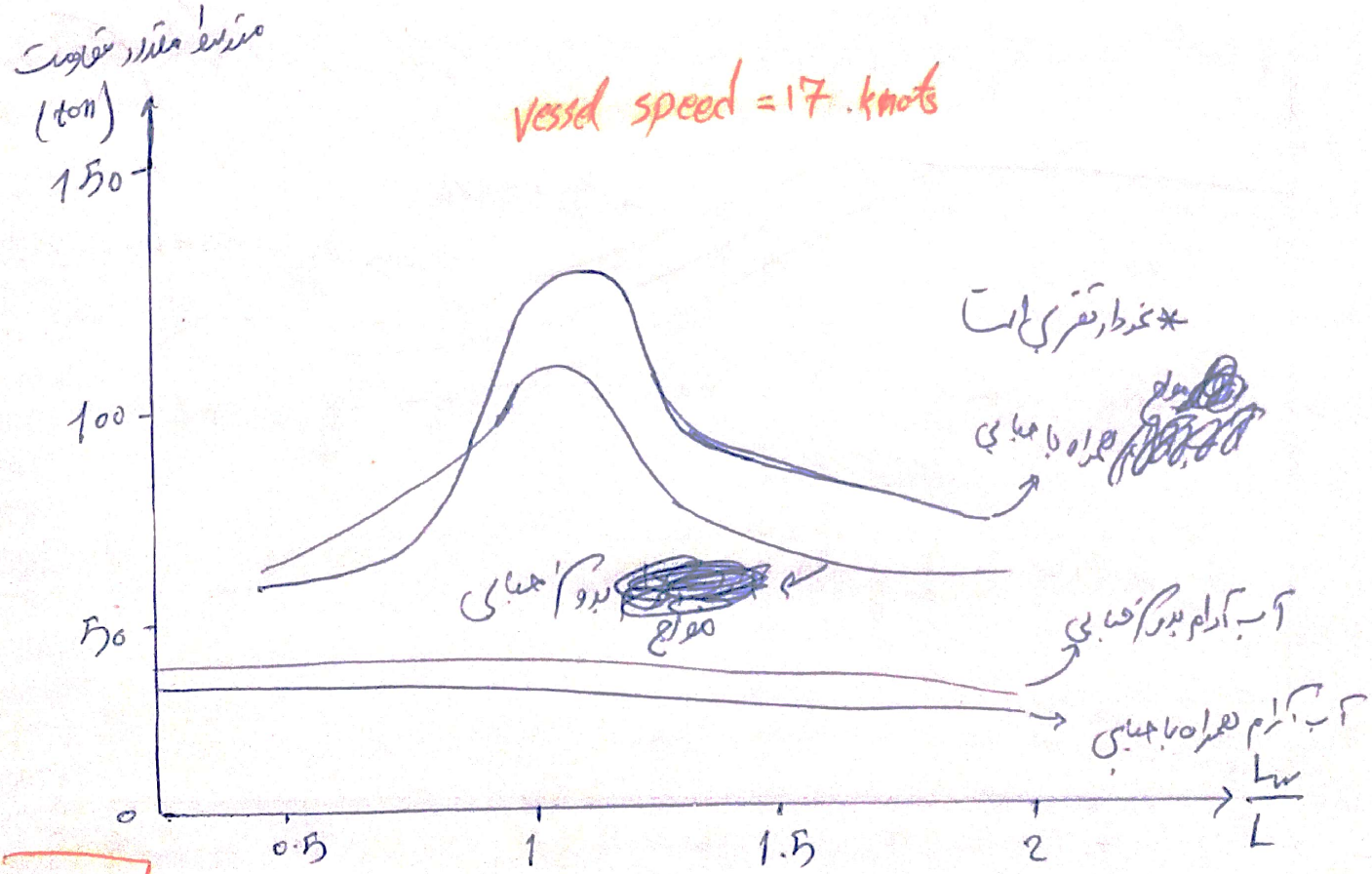
✓ شناب عمودی با افزایش شعاع زیر آب کمتر می‌شود.

۱۰- جلبک‌های سینه در خصوصیات دریایی

✓ یک جلبک سینه بزرگ می‌تواند باعث کاهش قابل ملاحظه حرکات هیو و پیچ شود و همچنین در سرعت‌های بالا

✓ اثرات جلبک‌های سینه در کاهش مقاومت می‌تواند در برخی طول موج‌ها کاملاً برعکس شرایط آب آرام باشد یعنی باعث افزایش مقاومت شود.

✓ مطابق نمودار ذیل، در طول موج‌های کم جلبک‌های سینه باعث کاهش مقاومت می‌شود ولی در طول موج‌های بزرگ و در دریای مواج شدت باعث افزایش مقاومت می‌گردد.



✓ جایی بسیار به همانهای خمشی اثرات کاملاً مطلوب دارد.

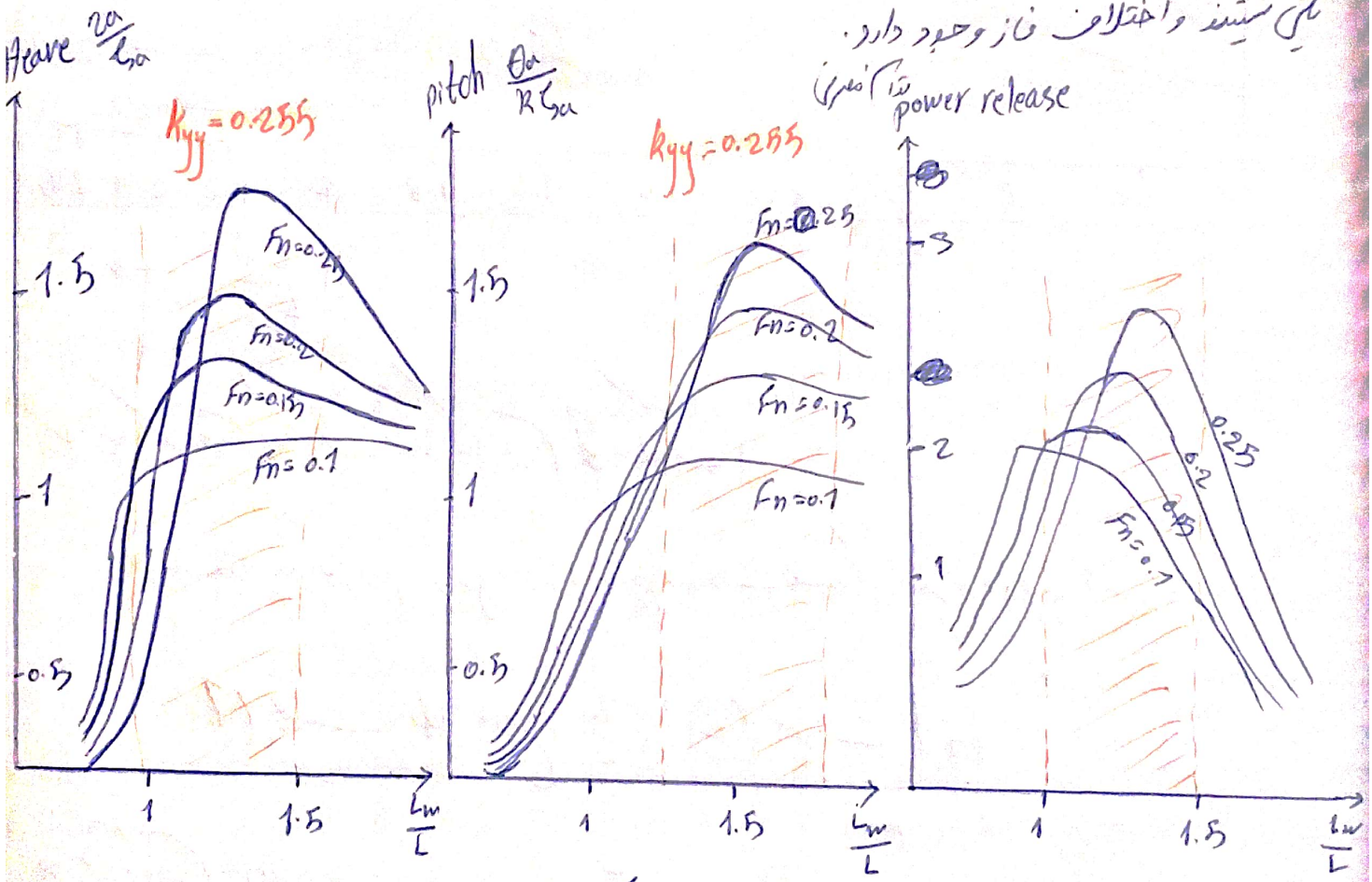
اثر مشخصات امواج بر مشخصات دریایی

اثر طول موج بر مشخصات دریایی

✓ حداکثر حرکات کشتی در محدوده طول موج $\frac{L_w}{L} = 1-2$ رخ می‌دهد.

✓ حداکثر توان اضافی مورد نیاز در محدوده طول موج $\frac{L_w}{L} = 1-1.5$ رخ می‌دهد.

✓ جالب است بدانید طول موج مورد نظر برای حداکثر حرکات و حداکثر توان مصرفی یکی نیستند و اختلاف فاز وجود دارد.

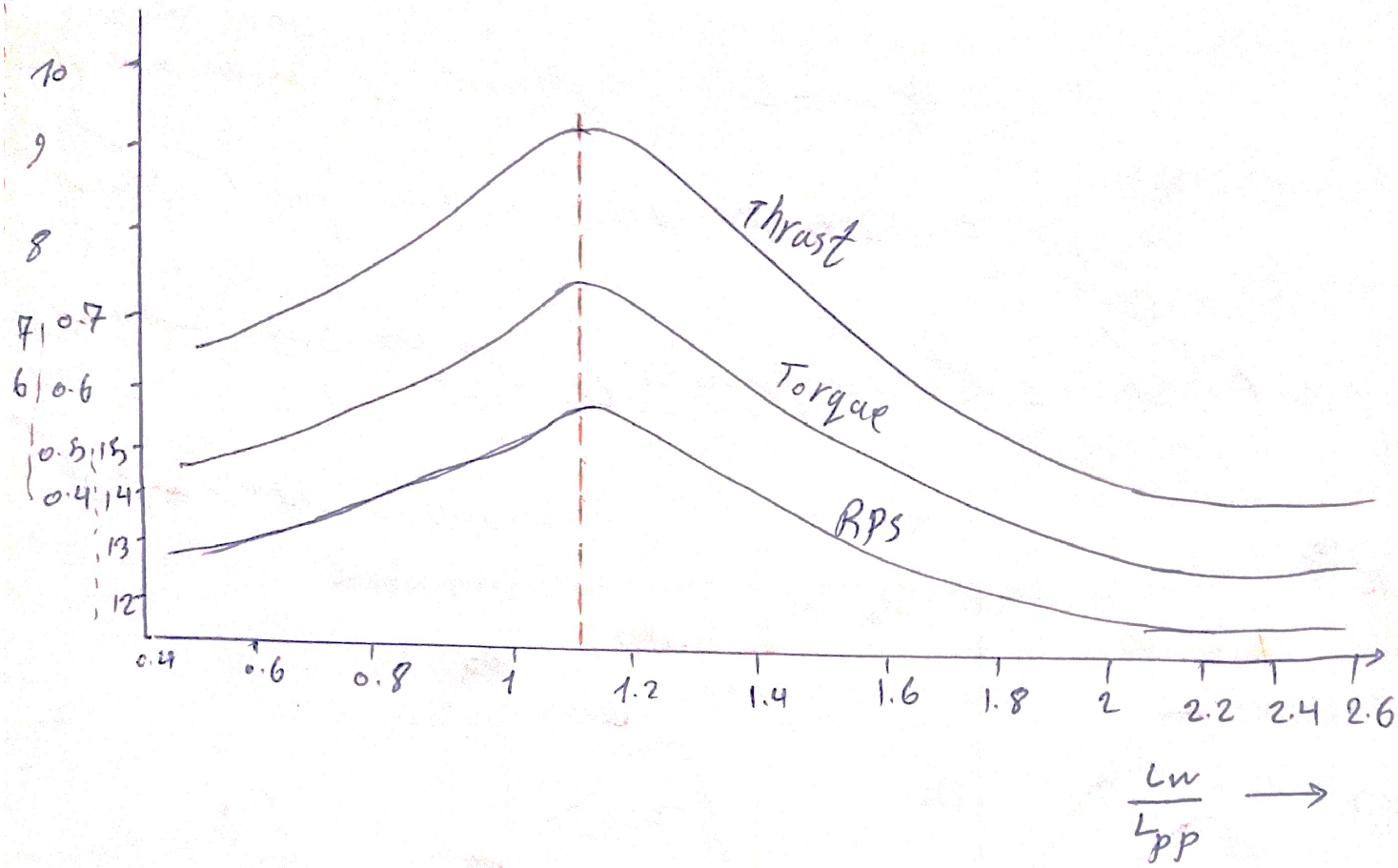


✓ طول موج رایج برای وقوع کوبش بین 0.7-1.5 برابر طول کشتی است.

✓ شدیدترین کوبش تقریباً در طول موج برابر طول کشتی مورد انتظار است.

✓ نمونه‌ای از نتایج تجربی برای یک کشتی و دو پروانه در امواج در ذیل آمده است.

✓ حداکثر مقدار این پارامترها در یک طول موج نسبی رخ می‌دهد.



✓ حداکثر ممان هالینگ و حداکثر ممان سلینگ؛

هم در مقدار حداکثر و هم در محل وقوع با هم متفاوت هستند که وابسته به دو عامل است:

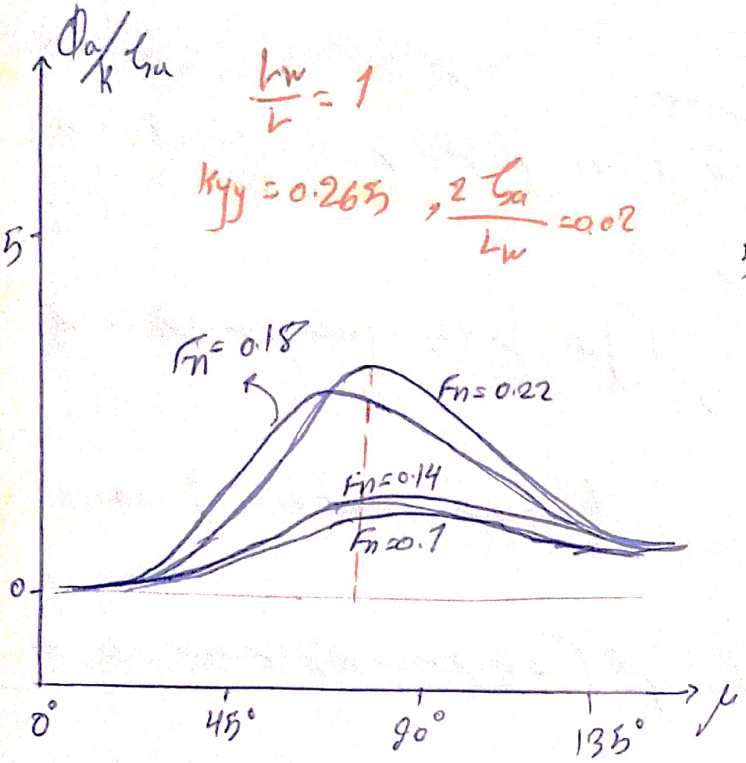
1) نسبت طول موج $\left(\frac{L_w}{L}\right)$ 2) سرعت (F_n)

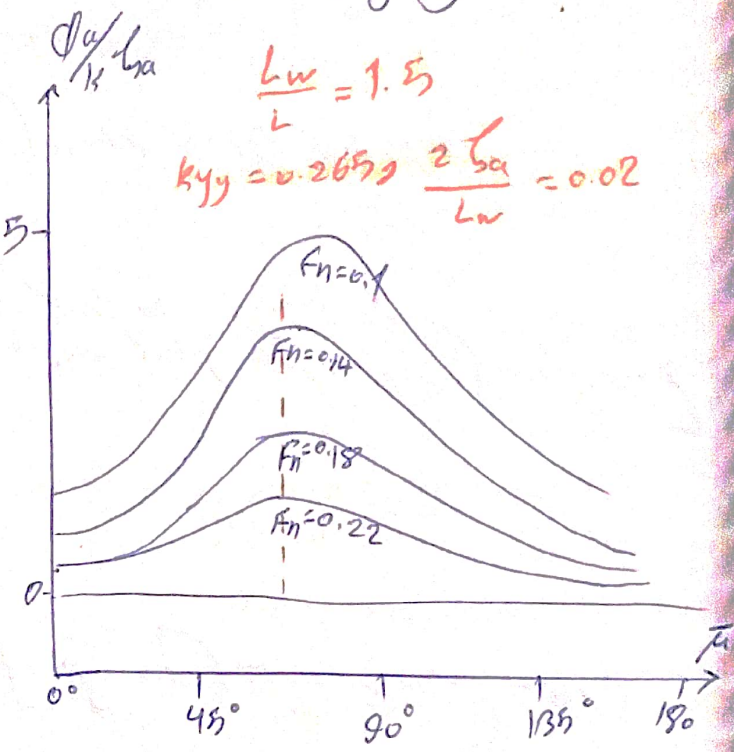
* از آوردن نمودارها صرف نظر شده است.

اثر جهت موج بر خصوصیات دریامانی

✓ ماکزیمم تحریک حرکت رول اصولاً در موج حدود 50 درجه بیشترین مقدار است.

✓ حالت رزنانس حرکت رول همیشه در طول موج‌های $\frac{L_w}{L}=1$ و 1.5 و در موج از جهت اتفاق می‌افتد





✓ رزنانس حرکت پیچ همیشه در موج از پشت (محدوده 45 درجه جلو شاور یعنی 135 درجه) اتفاق می‌افتد.

✓ رزنانس حرکت هیو معمولاً در طول موج برابر طول کشتی و در محدوده زاویه برخورد از پشت (90 تا 135 درجه) رخ می‌دهد.

✓ شتاب حرکت هیو در موج حدود 110 درجه بیشترین مقدار است.

✓ حرکت نسبی سینه در موج از روبرو بیشترین مقدار است.

✓ رزنانس افزایش تداکر مورد نیاز همیشه در موج از روبرو اتفاق می‌افتد.

✓ در طول موج برابر طول کشتی بیشترین مقادیر افزایش تداکر را داریم

✓ در طول موج‌های کوتاه‌تر از طول کشتی، رزنانس تداکر در محدوده زوایای 120-150 درجه اتفاق می‌افتد.

✓ در طول موج‌های بلندتر از طول کشتی، رزنانس تداکر در زاویه 180 درجه اتفاق می‌افتد.

✓ در طول موج معادل 1.5 برابر طول کشتی یا بزرگتر، کاهش محسوسی در تداکر مورد نیاز رخ می‌دهد. (عذر دارکی مربوط نیز وجود دارد)

* عذر دارکی مربوط به اثر جهت موج بر جمع کنندگی عمودی و افقی و جمع پیچشی نیز در منابع موجود است.

✓ اثر طول موج و جهت موج بر جمع پیچشی:

- در زاویه 120 درجه و همچنین 30 و 60 درجه به حداکثر می‌رسد این پیک‌ها تقریباً همزمان با رزنانس حرکت رول است.

و ارتفاع موج به خصوصیات دریایی

✓ لحظه پیچ به طور خطی متناسب است با ارتفاع موج.

✓ افزایش شتاب تقریباً متناسب با تداکر و ارتفاع موج است.

در دریای آرام و متوسط: فرض تناسب حرکات با دامنه موج منطقی است.

البته فرض خطی بودن حرکت رول با دامنه موج حتی در دریای متوسط نیز چندان درست نیست.

افزایش ارتفاع موج باعث افزایش فشار کوبش می‌شود.

در دریای طوفانی احتمال (افزایش) وسعت کوبش بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد بخصوص در سرعت‌های بالا

دریانوردان گزارش کرده‌اند که معمولاً:

- در فورس 5 هیچ کوبشی را تجربه نکرده‌اند
- در فورس 6 کوبش‌ها اتفاقی شروع می‌شود
- در فورس 7 کوبش با دفعات زیاد بروز می‌کند
- در فورس‌های بالاتر از 7 فشار کوبش بسیار شدید می‌شود بخصوص در سرعت‌های بالا

با افزایش ارتفاع موج، جابجایی نسبی سینه نیز افزایش می‌یابد (بخودی‌خود آن موجود است)

با افزایش ارتفاع موج مؤثر، مقاومت افزوده افزایش می‌یابد. (بخودی‌خود آن موجود است)

با افزایش عدد بیوفورت و ارتفاع موج، بازدهی راستی افت می‌کند (بخودی‌خود آن موجود است)

نکته: جایگزین کردن شرایط موج نامنظم با موج منظم بوسیله پریود متوسط موج نامنظم و ارتفاع موج مؤثر کار

چندان درست نیست چون در موج منظم تعریف ارتفاع موج، فاصله قله تا قعر موج است ولی در موج نامنظم تعریف ارتفاع موج موثر، برابر یک سوم بلندترین امواج است. یعنی با این نوع جایگزینی، ارتفاع موج را بالاتر از حالت واقعی موج نامنظم و شرایط را سخت‌تر در نظر گرفته‌ایم.

جلسه چهل و هفتم

«خواص دریایی انواع شناورها»

بخش اول

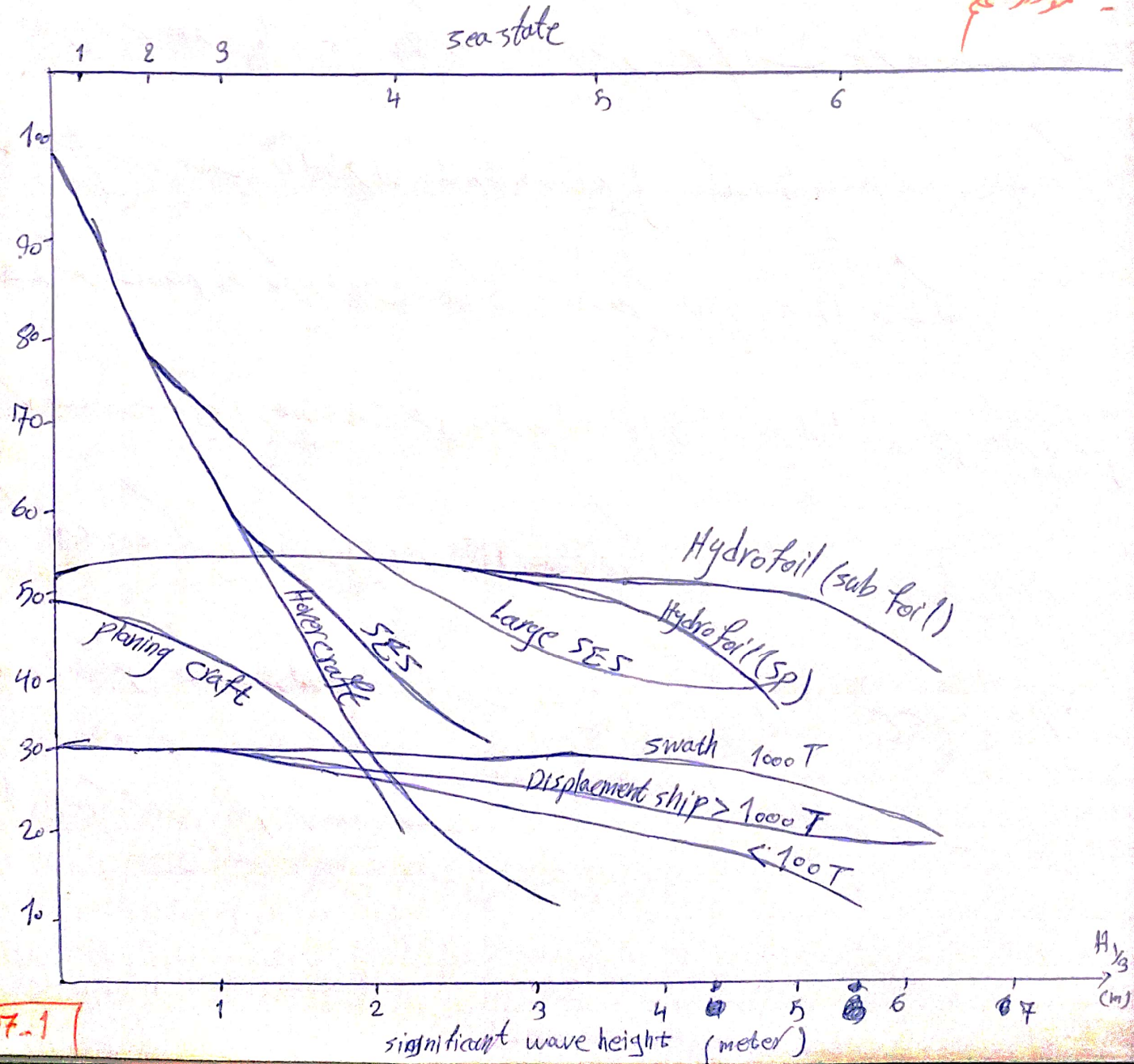
منابع این بخش:

Dynamics of Marin vehicles / chapter 17

کتاب جامع مهندسی معماری دریایی (ویراستی دوم) / قسمت اول

اسلایدهای آموزش درس دینامیک متحرک های دریایی - دکتر نسیف

یک نمودار مهم



نکاتی در مورد نمودار صفحه قبل

✓ برای رسیدن به سرعت 50 گره، شناورهای سرشی (planing craft) می‌توانند مناسب باشند اما اشکال عمده این نوع شناورها، افت سریع سرعت است. که در $H_{1/3} = 2.3$ به سرعت 20 گره می‌رسد.

✓ برای رسیدن به سرعت 100 گره شناورهای از سطحی (SES) و هاورکرافت‌ها (Hovercraft) می‌توانند مناسب باشند. این نوع شناورها نیز همانند شناورهای سرشی افت سرعت خیلی شدیدی دارند به صورتی که در $H_{1/3} = 3m$ به 20 گره می‌رسند بنابراین برای آب‌های مواج مناسب نیستند.

✓ برای حفظ سرعت در امواج بلند، شناورهای هیدروفویلی (Hydrofoil) مناسب‌ترین گزینه هستند این شناورها می‌توانند ماکزیمم سرعت 50 گره را در فورس‌های دریایی 5 و 4 حفظ کنند.

✓ شناورهای جابجایی نیز حفظ سرعت خوبی در فورس‌های دریایی بالا (امواج بلند) دارند و ماکزیمم سرعتی که می‌دهند کمتر از هیدروفویل‌ها است (حدود 30 گره)

نکته: روند کاهش حرکات در امواج (و حفظ سرعت در هیم)، حاصل گرفتن از سطح موج یا در واقع فرار از تغییرات پوبانی ناشی از موج است.

انواع شناورهای پیشرفته :

1) شناورهای سرشی ← تک بدنه ← اسپیدی به سرعت 25 تا 40 گره

2) شناورهای هیدروفویل ← اسپیدی به سرعت 40 تا 60 گره ← دارای دو نوع ① submerged foils ② surface piercing است.

3) شناورهای چند بدنه ← مانند کاتاماران ها و کشتی های SWATH (small waterplan Area Twin Hull ship)

← اسپیدی به سرعت 15 تا 30 گره دریایی

3) شناورهای هاورکرافت ← مانند Air cushion vehicle (ACV) surface Effect ship (SES)

که به سرعت 80 تا 100 گره دریایی می رسند

نکته : خصوصیت دیگر حرکت شناورها در امواج، شناب عمودی وارد بر کشتی است که می تواند بسیار مهم باشد

شناب عمودی مرکز ثقل برای چند نمونه از شناورها در زیر آمده است.

هیدروفویل با فویل های کاملاً مغروق : 0.03g - 0.04g هیدروفویل از نوع شناور آب : 0.1g

شناورهای اثر سطحی : 0.07g شناورهای SWATH : 0.15g شناورهای سرشی : 0.35g

خصوصیات دریایی کاتاماران

مزیت کاتاماران نسبت به کشتی های تک بدنه هم تراز :

✓ ایجاد مساحت عرشه بزرگتر (20-40 % بزرگتر) ✓ پایداری عرضی بیشتر

- کاتاماران ها علی رغم دامنه حرکت رول کوچکتر، دارای شتاب های بزرگتر هستند و در نتیجه حرکات چندان تفاوتی ندارند.

- حرکات هم در موج از سینه در کاتاماران ها، حرکات هیو و پیچ است به دلیل ضربه به کف شناور، خیس شدن و دیده اسلمینگ

- شناورهای دوبدنه با سطح آب جفور کوچک دارای حرکات آرامتر و دریامانی مطمئن هستند.

- دو نوع کاتاماران: 1) Auxiliary submarine Research (ASR) 2) Attack Aircraft carrier (CVA)

عمدتاً مدیوها به مقایسه این دو نوع شناور در منابع موجود است.

در مورد کاتاماران ها می توان گفت:

- موج انتشاری اندک حرکات بدنه کاتاماران
- تناسب ضرایب هیدرودینامیک با موج انتشاری
- ضرایب هیدرودینامیک کوچک کاتاماران ها در مقایسه با سایر شناورها
- زوایای رول کوچک ← پایداری بیشتر
- پریود طبیعی رول کوچک
- نزدیک شدن پریود طبیعی حرکت رول و پیچ

ایجاد دریازدگی شدید در کاتاماران ها در مقایسه با یک بدنه هم قیاس (هم طول)

- توصیه می‌شود نصب بالک جلو (هیدروفویل) بر روی قسمت مغروق کاتاماران با شاوری SWATH برای کاهش حرکات رول و پیچ، ضربات اسلمینگ و همچنین ورود به بدنه، انجام شود.

نصب بالک در قسمتی از بدنه می‌تواند فرمان پذیری بهتری داشته باشد و در واقع در اثر امواج نیروی کمتری آنها کم شود.

- نیروی زد بدنه و نیروی زدن پروانه، حرکات پیچ شدید و رزونانس را مختل می‌شود.

خصوصیات دریایمای شناورهای سریع (planing crafts)

سه عامل مهم در دریایمانی شناورهای تندرو: ① افزایش مقاومت ② حرکات هیو و پیچ ③ شتاب

- نمودارهای صفحه بعد مقاومت افزوده را در سرعت‌های مختلف برای دو حالت موج از روبرو و موج از پاشنه را نمایش می‌دهد.

در این نمودارها، از یک $\frac{V}{\sqrt{L}}$ خاص به بعد، شناور از قله یک موج به قله موج بعدی می‌رسد

و لذا نمودار مقاومت افزوده افقی می‌شود.

در سرعت‌های پایین ($\frac{V}{\sqrt{L}} < 2.5$) رفتار دریایمانی شناورهای تندرو شبیه کشتی‌های خواهد بود. همچنین در این شرایط، افزایش L/B کشتی باعث کاهش حرکات هیو و پیچ

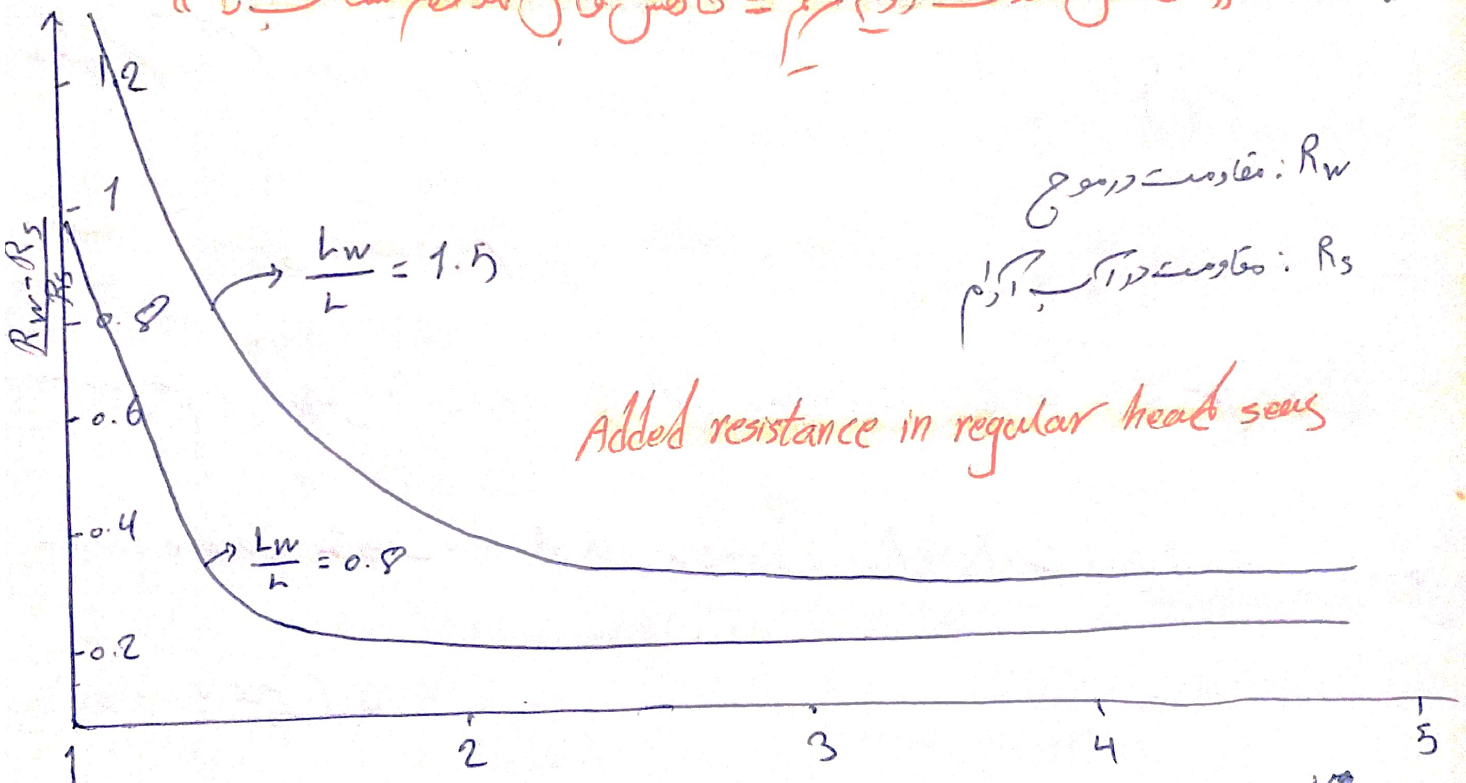
خواهد شد.

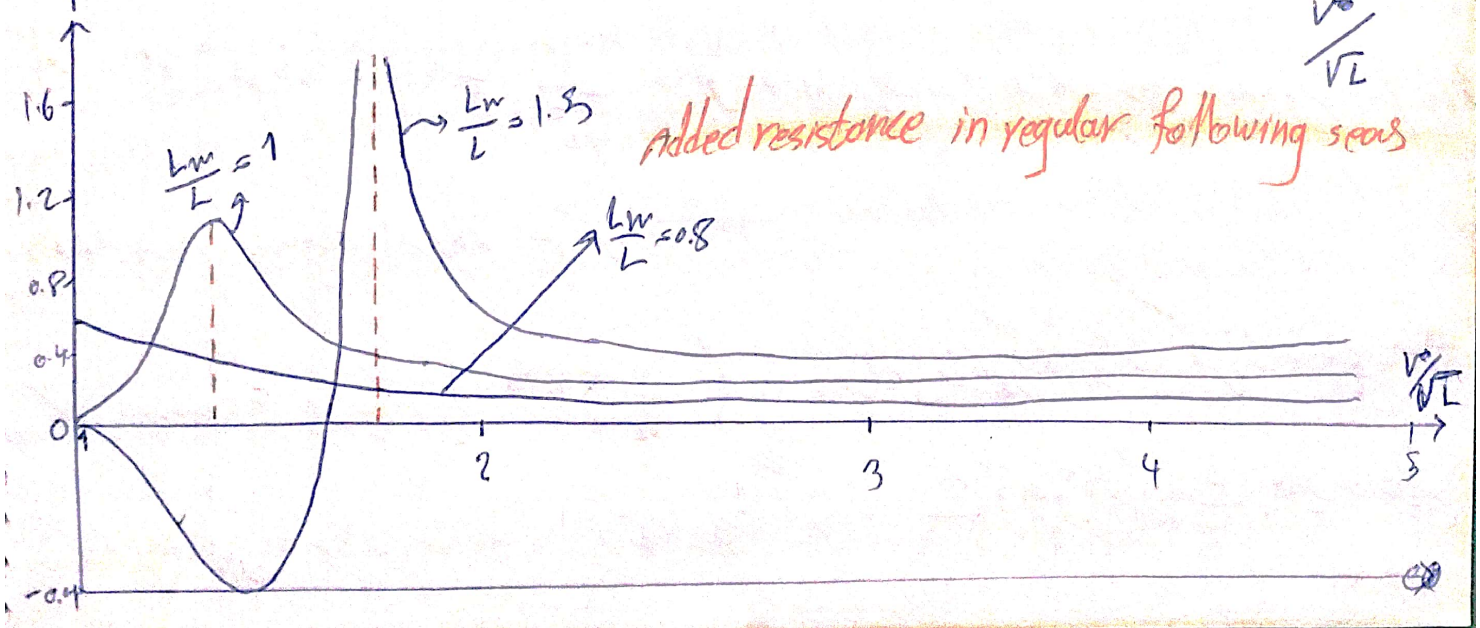
✓ در سرعت‌های بالا $\left(\frac{V}{L} > 2.5\right)$ نیروی لیفت مهمترین پارامتر است و لذا رفتار دریاهای آن بسیار متفاوت است.

✓ زاویه تریم بر مقدار لیفت بسیار موثر است.

✓ نیروی ضد بال وارد بر بدنه مناسب است با توان 2 زاویه تریم در هر دو مقطع

لذا: «کاهش اندک زاویه تریم = کاهش قابل ملاحظه شتاب»





✓ در نمودار حالت موج از پاشنه برخلاف موج از سینه دارای قله نمودار رزنانس مقاومت هستیم (یعنی

برخلاف تصور معمول، در حالت موج از سینه دارای حالات رزنانس مقاومت نیستیم!)

✓ مقادیر قله نمودار مقاومت در موج از پاشنه در شناورهای تندرو برخلاف تصور معمول، بیشتر از

موج از سینه است.

- در حرکات هیدروپیچ شناورهای تندرو، اگر مقدار سرعت به حالت فرکانس طبیعی هیدروپیچ کشتی نزدیک

باشد، رزنانس خواهیم داشت $\frac{V}{\sqrt{L}} < 2.5$ (نمودارها در منابع موجود است)

- در حالت کلی در شناورهای تندرو، شتاب‌ها در حالت موج از سینه خیلی بیشتر از موج از پاشنه است.

ملاحظه می‌شود که نمودارها غیرخطی و افزاینده هستند یعنی: هرچه سرعت بیشتر، شتاب بیشتر

فنابراین یکی از محدودیت‌ها در حد سرعت شناورهای تندرو، شتاب‌ها هستند.

* نمودارها مربوط به تغییرات شتاب در $\frac{V}{\sqrt{L}}$ های مختلف در منابع موجود است.

- در حالت موج از سینه، تغییرات به صورت غیرخطی و با شیب زیاد است به گونه‌ای که مقادیر شتاب

در فورس دریایی 5 معادل 5 برابر فورس دریایی 3 است. (البته تغییرات غیرخطی از $\frac{V}{\sqrt{L}} = 2$

شروع می‌شود.

- در حالت موج از پاشنه تفاوت زیادی در شتاب‌ها در فورس 3 و 5 مشاهده نمی‌شود.

محاسبه مقاومت افزوده و شتاب در CG و در قسمت سینه (10 درصد طول LOA عقب‌تر از نوک سینه)

در شناور با تندرو

Added resistans

For $\frac{V_k}{\sqrt{L}} = 2$: $\frac{R_{AW}}{wb^3} = 66\times10^{-6}\left(\frac{H_{1/3}}{b}+0.5\right)\frac{(L/b)^3}{C_\Delta}+0.0043(\tau-4)$

For $\frac{V_k}{\sqrt{L}} = 4$: $\frac{R_{AW}}{\Delta} = \frac{0.3\,H_{1/3}/b}{1+2H_{1/3}/b}\left(1.76-\frac{\tau}{6}-2\tan^3\beta\right)$

For $\frac{V_k}{\sqrt{L}} = 6$: $\frac{R_{AW}}{wb^3} = \frac{0.158\,H_{1/3}/b}{1+(H_{1/3}/b)\left[0.12\beta-21C_\Delta(5.6-L/b)+7.5(6-L/b)\right]}$

Average impact acceleration [g units]

شتاب مرکز ثقل $\bar{n}_{CG} = 0.85\left(\frac{H_{1/3}}{b}+0.07\right)\frac{\tau}{4}\left(\frac{5}{3}-\frac{\beta}{30}\right)\left(\frac{L/b}{3}-\frac{2}{3}\right)\times\frac{\left(V/4\sqrt{L}\right)^{1.4}}{C_\Delta}$

شتاب سینه $\bar{n}_{bow} = 0.2+\left[0.45+0.16\left(\frac{4}{V/\sqrt{L}}-1\right)\right]\left(2.25+\frac{L}{b}\right)\bar{n}_{CG}$

که در آنها: b: عرض (ft) ضریب: $C_\Delta = \frac{\nabla}{B_x^3}$ استاتیکی (beam-loading)

B_x: ماکزیمم خط آب عرضی w: وزن مخصوص آب $\left(\frac{lb}{ft^3}\right)$

β: زاویه دیدرایز (deadrise) (deg) τ: زاویه تریم سطح سرشن (deg)

R_{AW}: مقاومت افزوده در موج (lb) Δ: جابجایی شناور (lbs)

Δ_{LT} : جابجایی شناور (long tons) ∇ : حجم جابجایی شناور (ft^3)

V : سرعت (ft/sec) V_k : سرعت (knot)

محدوده کاربرد فرمول صفحه قبل :

پارامتر	محدوده
$\Delta_{LT}/(0.01L)^3$	100 - 250
L/b	3 - 5
Trim (deg)	3 - 7
Deadrise (deg)	10 - 30
$H_{1/3}/b$	0.2 - 0.7
$V_k/\sqrt{L}$	2 - 6

تخمین مقدار $1/3$ و $1/10$ بزرگترین شتاب‌ها

$$\bar{n}_{1/N} = \bar{n}\left(1+\log_e N\right) \Longrightarrow \begin{cases} n_{1/3} = 2.1\,\bar{n} \\ n_{1/10} = 3.3\,\bar{n} \end{cases}$$

تخمین احتمال وقوع $1/3$ و $1/10$ بزرگترین شتاب‌ها

$$P[n > n_{specified}] = e^{-(n/\bar{n})} \Longrightarrow \begin{cases} P_{1/3} = 12\,\% \\ P_{1/10} = 4\,\% \end{cases}$$

جلسه چهل و هشتم

«خواص دریایی انواع شناورها»

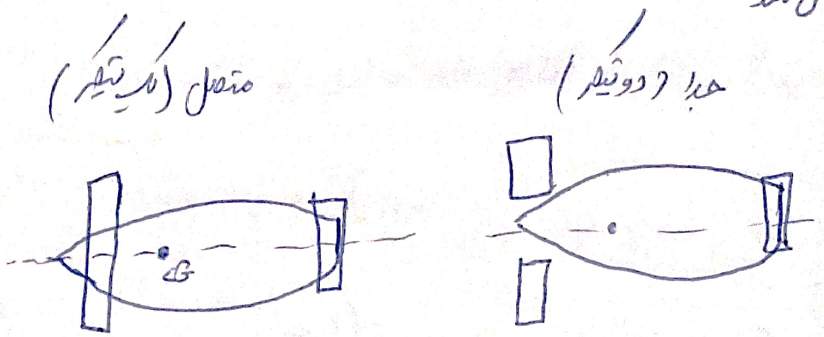
بخش دوم

خصوصیات دریایی کشتی هیدروفویل

تولید نیروی لیفت توسط هیدروفویل تا زیر آب باعث جدا شدن سطح بدنه با آب می‌شود و سطح خیس به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که در نتیجه آن کاهش قابل ملاحظه‌ای مقاومت اصطکاکی و باعث می‌شود شناور به سرعت‌های بالا برسد.

شناورهای هیدروفویل کاربردهای مختلف مسافربری، نظامی و حمل کالا دارند.

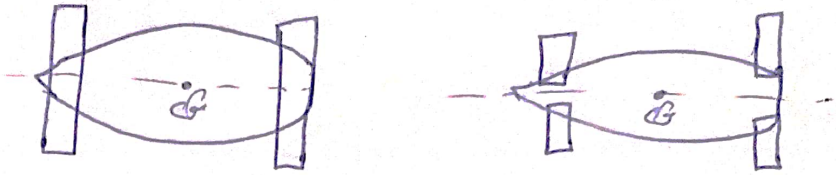
- فویل‌ها می‌توانند یک تیکه یا چند تیکه باشند
- با توجه به موقعیت قرارگیری مرکز ثقل (LCG)، اندازه فویل‌ها حساب و جلو مشخص می‌شود در واقع عمل‌ها که نیروی لیفت به وجود آمده توسط هیدروفویل‌ها حول CG تولید می‌کنند باید یکسان باشد بدین منظور ۵ محدود فاصله از مرکز ثقل (بازو ممان) را با افزایش اندازه هیدروفویل و در نتیجه افزایش نیروی لیفت، جبران می‌کنند



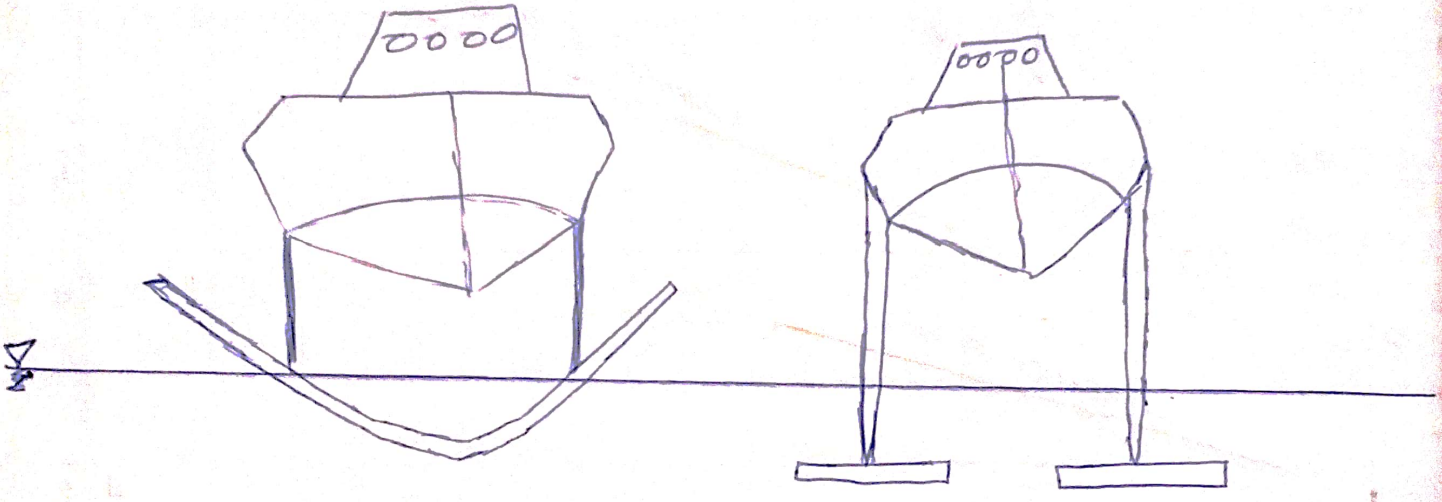
Conventional $0 < \frac{x}{L} < 0.35$

canard $0.65 < \frac{x}{L} < 1$

Tandem $0.35 < \frac{x}{L} < 0.65$



از نظر قرارگیری هیدروفویل ها دو نوع زیر رایج است:

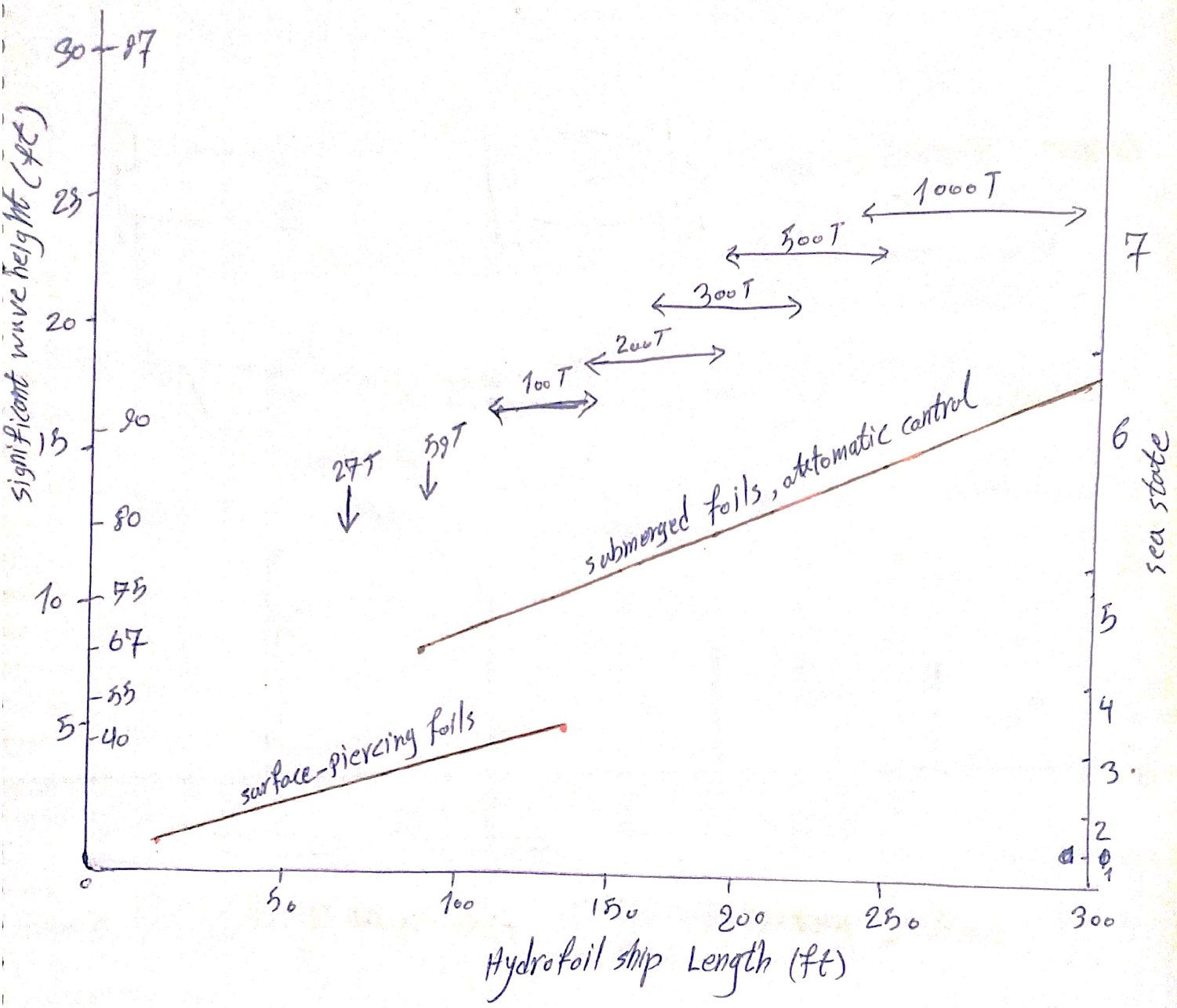


surface piercing Fully submerged

از لحاظ دریایی:

- برای دریای با موج متوسط (Moderate)، فویل کاملاً متقاطع سطح (surface piercing) توصیه می‌شود
- برای دریای کاملاً مواج (Extreme sea)، حالت فویل مغروق (Fully submerged) توصیه می‌شود.

- در زیر نمودار کاربرد آورده شده است که می‌تواند تعیین کننده نوع هیدروفویل باشد:



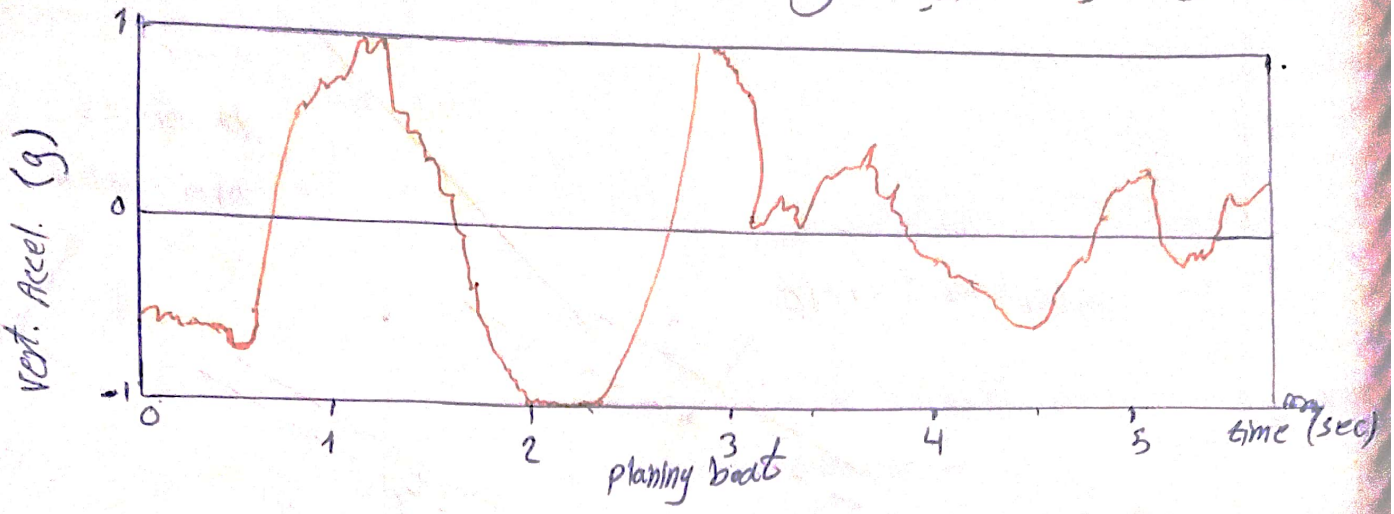
- اصطلاح Foil Borne برای زمانی استفاده می‌شود که بدنه شناور از سطح آب جدا شده باشد و

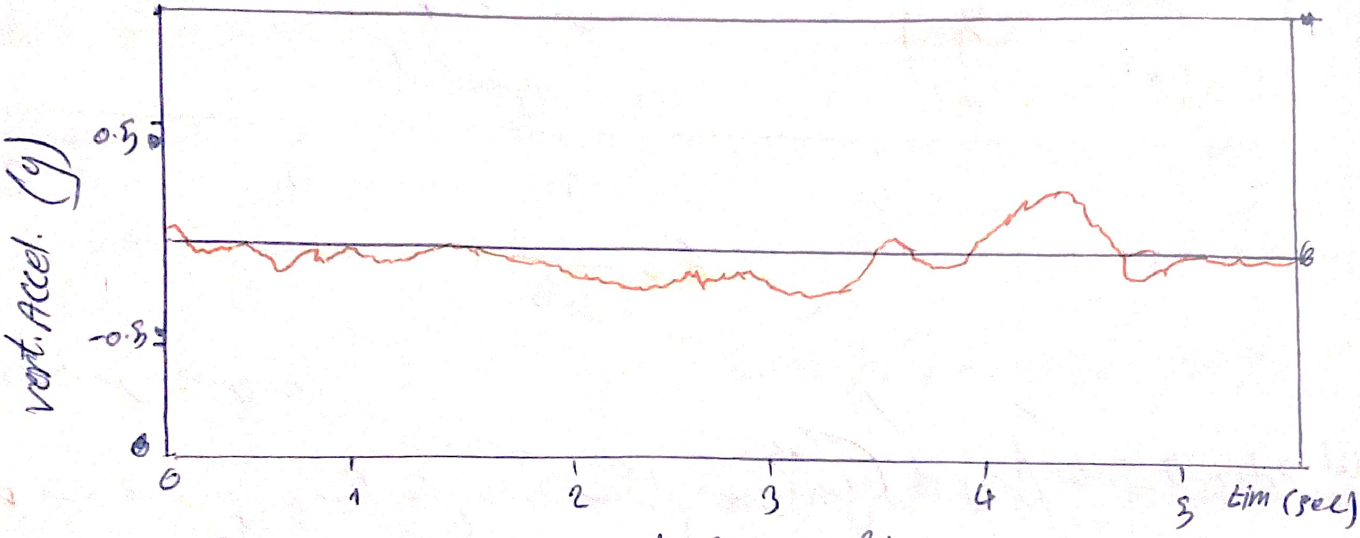
اصطلاح Hull Borne زمانی استفاده می‌شود که بدنه از سطح آب جدا نشده باشد.

✓ در آب‌های مواج برای کاهش ضربات وارد بر بدنه، لازم است که از خطوط چاین در سرتاسر بدنه استفاده شود.

در زیر نمونه‌ای از تاریخچه زمانی شتاب قائم یک شناور پرواز و یک شناور هیدروفویل در امواج از روبه رو

در معرض وضعیت دریایی مشخص آورده شده است.

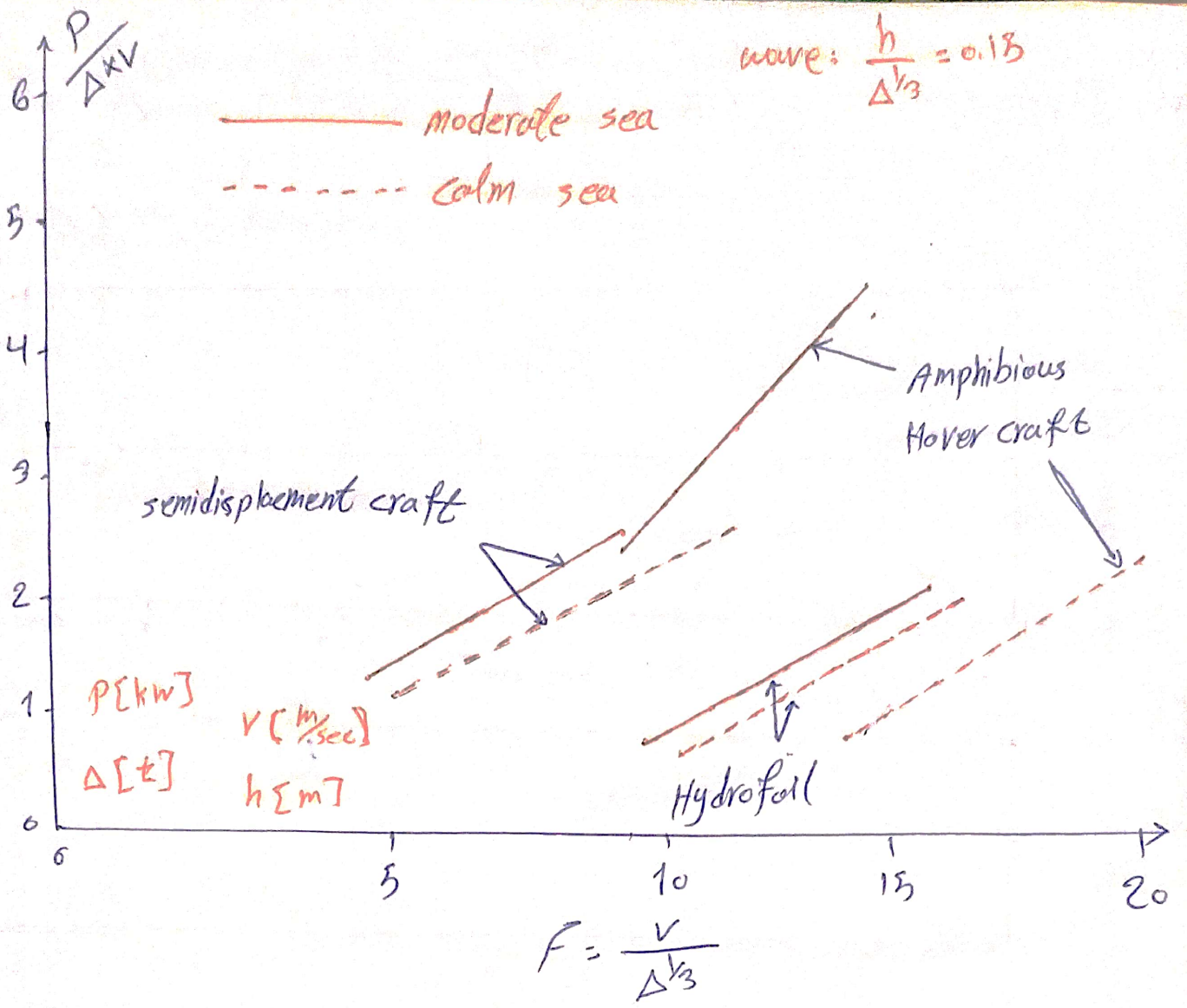




Hydrofoil craft

در صفحه بعد نمودارهای ارائه شده است که توان مورد نیاز به نفع شناور از جمله شناور هیدروفویل را با هم مقایسه کرده است می‌دانیم که برای رسیدن به توان بالا، نیازمند مصرف سوخت بیشتر است.

نمودارها برای دو حالت دریای مواج (Moderat sea) و دریای آرام (calm sea) ترسیم شده است محور افقی $\frac{V}{\Delta^{1/3}}$ است و محور عمودی $\frac{P}{\Delta \times V}$ است در واقع محور عمودی نشان می‌دهد که به ازای یک Δ ثابت و یک سرعت ثابت چه مقدار توان لازم است.

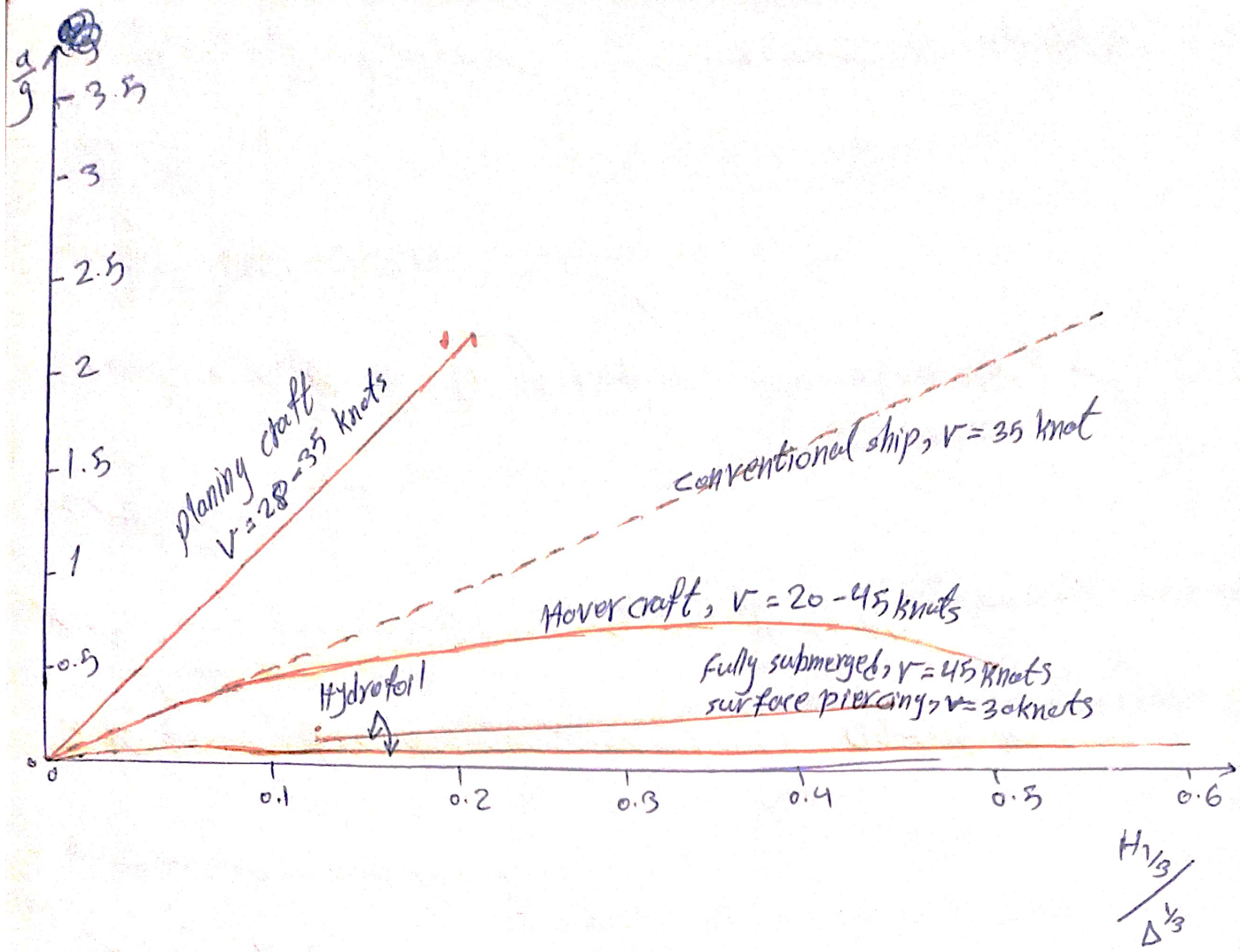


از نمودار فوق نتیجه می‌شود:

✓ شناور هیدروفویل در دریای مواج و در آب آرام، تقریباً توان یکسانی برای حرکت لازم دارد. اما شناور هاورکرافت در دریای مواج توان خیلی بیشتری نسبت به حالتی که در آب آرام حرکت می‌کند احتیاج دارد.

✓ در دریای مواج شناور هیدروفویل نسبت به دو نوع شناور دیگر توان کمتری لازم دارد و سوخت کمتری مصرف می‌کند (البته به ازای یک سرعت بالا)

- در صفحه بعد نمودارهای برای مقایسه شناب ناشی وارد به شناورهای مختلف ارائه شده است که باز هم برتری هیدروفویل و هاورکرافت را نسبت به سایر شناورها نشان می‌دهد.



برای طراحی شکل کلی بدنه و آرایش بالک ها :

برای آب آرام : بدنه معمولی + بالکهای Tandom (مرکز ثقل در وسط)

برای دریای مواج : دارای سینه باریک + بالک های canard (مرکز ثقل به سمت پاشنه)

برای حفظ کردن حرکات رول و پیچ در حین hull borne : بالکهای canard (مرکز ثقل به سمت پاشنه) + surface piercing

شکل کلی بدنه در شناورهای هیدروفویل :

- اگر بدنه اغلب برای حالت hull borne طراحی شده باشد ← نیاز به بلند شدن بدنه در سرعت های پایین ← بدنه بیلج گرد معمولی یا soft chin
- اگر بدنه اغلب برای حالت foil borne طراحی شده باشد ← بدنه دارای hard chin یا stepped form (وابسته به سرعت بلند شدن)

نکته: در آب کم عمق موج برای کاهش عمق دچار وارد می‌شود ← ضرورت استفاده از خطوط مایین در ترسیم بدنه

خصوصیات دریاهای زیر دریایی

- زیر دریایی در عمق تنفس (اسنورکل) یا عمقی کمتر از پایه موج (wave base) همچنان در معرض اثرات موج است.

✓ عمق غوطه‌وری کامل در مجاورت دریاهای برابر نصف طول موج بود.

✓ عمق غوطه‌وری کامل در مجاورت مقاومت موج سازی برابر 3D تا 5D بود.

- نکات حساسیت دریاهای زیر دریایی:

✓ کم بودن ارتفاع متاسنتر در مقایسه با کشش هم‌تراز

✓ برابر ارتفاع متاسنتر طولی و عرضی در زیر آب

✓ قرارگیری در حالت پویایی جنبشی

✓ اثرات شدید مکش موج عبوری بر روی زیر دریایی نزدیک سطح

- پارامترهای مهم در بررسی دریاهای زیر دریایی: ✓ رول ✓ پیچ ✓ هیو ✓ نیروی مکش

- مطلوب است که پریود نوسانات تا حد ممکن بلند باشد

- تقریباً در زیر دریایی: $\boxed{T_\theta = \frac{1}{2} T_\phi}$ sec

- حرکات هیو و پیچ و رول در زیر دریایی هارمونیک هستند که احتمال بروز رزنانس وجود دارد که در محدوده رزنانس دامنه حرکات می‌تواند 10-3 برابر شود.

روش‌های کاهش تلاطم حرکت رول زیردریایی:

- در زیردریایی‌های قدیمی: بیلج کیل - مخازن ضد تلاطم

- در زیردریایی‌های امروزی: اصولاً روش استفاده نمی‌شود چون زیردریایی کمتر در سطح آب یا نزدیک سطح آب ظاهر می‌شود. بعضاً در صورت ضرورت از بیلج کیل استفاده می‌شود که نتیجه استفاده از آن کاهش 1.5-2 برابر تلاطم رول است (عدم کارایی در تلاطم‌های کوچک)

- پرچک‌ها و بالک‌ها نیز در کاهش حرکت رول زیردریایی مؤثر اند.

نکته: در حالتی که زیردریایی در زیر آب است قضیه برعکس خواهد شد یعنی پریود نوسانات طبیعی حرکت پیچ بزرگتر از حرکت رول خواهد شد. چرا که:

- ارتفاع متاسنتر طولی خیلی کاهش خواهد یافت و برابر مقدار BG (از چند ده متر به حدود چند سانتی متر معادل 3-5 درصد قطر بدنه فشار) خواهد شد.

- شعاع ژیراسیون طولی در زیردریایی بیش از عرضی است چون معمولاً نسبت $\frac{L}{D} > 10$

$$T_\phi = \frac{2\pi k_{xx}}{\sqrt{g \cdot BG}}$$

$$T_\theta = \frac{2\pi k_{yy}}{\sqrt{g \cdot BG}}$$

$$\Longrightarrow T_\theta > T_\phi$$

- نیروی کشش رو به بالا می‌تواند ناشی از دو عامل زیر باشد:

1) ناشی از حرکت زیر دریایی در مجاورت سطح آزاد: سرعت گرفتن سیال بین بدنه و سطح آزاد - متناسب با توان 2 سرعت

2) ناشی از حرکت موج دریا: اختلاف سرعت افقی ذرات سیال (حرکات اربیتال ذرات) بین بدنه و کیل

- نیروی کشش متناسب با توان 2 دامنه موج است.

- نیروی کشش به صورت نمایی با افزایش عمق، کاهش می‌یابد. (نمودار در منابع موجود است)

نکته: موج طولی (از عقب یا جلو) بیشترین نیروی کشش را نسبت به موج عرضی ایجاد می‌کند چرا که:

- موج طولی ← عدم تبعیت حرکات از حرکات ذرات موج (عدم تبعیت زیر دریایی از موج طولی) ← ایجاد اختلاف فشار زیاد ← ایجاد کشش شدید

- موج عرضی ← باعث ایجاد حرکات رول و پیچ و هیو ← تبعیت حرکات از حرکات موج (تبعیت زیر دریایی از موج عرضی) ← عدم ایجاد اختلاف فشار زیاد ← عدم ایجاد کشش شدید

⇐ لذا فرماندهان سعی می‌کنند جهت زیر دریایی را در راستای عرضی نسبت به موج قرار دهند!

- در سرعت تا بالاتر علی رغم این که سرعت مکش بیشتر است اما می توان کنترل بهتری بر روی زیر دریایی داشت.

- غلبه بر ایجاد نیروهای موجی که ناخواسته: ① تغییر راستا از طولی به عرضی ② عملکرد سطوح کنترلی برای حفظ عمق و تریم ③ عملکرد مخازن هیدرو

- حفظ عمق در حالت تنفس برای عملکرد مناسب سیستم اسنورکل هم بسیار مهم است.

48-10

جلسه چهل و نهم

«تست های دریایی در حوضچه کشش»

بخش اول

- در ITTC یک بخش به مبحث دریایی (The seakeeping committee) اختصاص داده شده است

آزمایشگاه دریایی ایران

محل	طول (متر)	عرض (متر)	عمق (متر)	حداکثر سرعت ارابه ($\frac{m}{s}$)
حوضچه کشش آزمایشگاه ملی دریایی ایران	391	6	4.5	18
حوضچه کشش دانشگاه مالک اشتر شیراز	140	7	3	بیش از 10
حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان	107	3	2.2	3
" " " " هرمز	25	2.5	2.5	6
" " " " امام خمینی	16	2.5	2	3

معضل اصلی آزمایشگاه های دریایی ایران: (1) عدم وجود پروژه های تحقیقاتی مادر (2) عدم استقبال از پروژه های دانشجویی

(3) عدم وجود متدهای مرجع برای ساخت مدل، انجام آزمایشات، اصلاح و استخراج نتایج (4) عدم انگیزه و احساس مسئولیت مسئولین آزمایشگاه برای افزایش بهره وری

چرا ما مدل دریایی انجام می‌دهیم؟

- روش‌های تحلیلی دریایی دقیق هستند ولی برای بدنه‌های معمولی نه کاتاماران‌ها و هاورکرافت‌ها و ...

- روش‌های تحلیلی در جاهایی کارایی دارند که اثر لزجت مهم نباشد (عدم کارایی جریان‌های تیانیل در حرکت رول)

- آزمایش کشش واقعی در دره دریا ← (1) فراهم نشدن شرایط دریایی دلخواه (2) خطرات تست دریایی در دریا (3) مشکل تأمین آب‌خور حداکثر (4) هزینه بر بودن

هدف از انجام آزمایش دریایی:

1) بررسی کارایی و اصلاح روش‌های تئوری موجود (تئوری بازار و ضرایب هیدرودینامیک مربوطه در چندین مدل بر اساس نتایج تجربی اصلاح شده است - مجهود مشکل غیرخطی بودن در دریای مواج برای برهم‌کنش خطی در تحلیل طبیعی)

2) تابع انتقال (پاسخ) یا RAO در دریای آرام و متوسط از روش‌های تحلیلی بدست می‌آید ولی در حوزه مواج صددرصد از روش تجربی بدست می‌آید

3) طراحی شکل بدنه مناسب نه فقط برای بدنه‌های معمولی بلکه برای بدنه‌های خاص

4) تخمین بارهای ناشی از موج بر روی سازه‌ها و بهینه‌سازی سازه‌ها

5) کاربرد ویژه در شناورها تندرو به دلیل غیرخطی بودن شدید رفتار دریایی در سرعت های بالا

6) بررسی دقیق پدیده های غیرخطی مانند کوبش، بیرون زدگی پروانه و خیس شدن

پارامترهای قابل تغییر و تنظیم در تست های دریایی:

برای مدل: ① زاویه برخورد ② سرعت ③ درجات آزادی

برای موج: ① ارتفاع موج ② طول موج (پریود، فرکانس موج)

چندوجهی های هم از آزمایش مدل: ① بررسی حرکات هیو و پیچ و رول و سرج و شتاب ها ② مقاومت افزوده ③ نیروها و ممان های وارد بر بدنه و تغییر شکل های سازه ای بدنه ④ پدیده های دریایی کوبش و خیس شدن

شرایط حوضچه کشش برای آزمایش دریایی

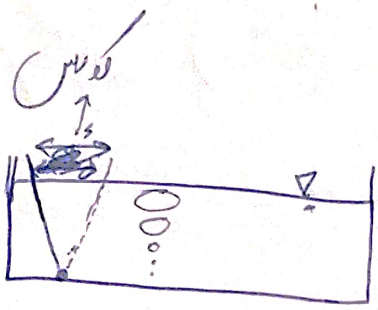
شرایط فیزیکی حوضچه کشش بسیار مهم است. به عنوان مثال فرض باید به گونه ای باشد که موج های انتشاری (تولید شده توسط بدنه کشتی) پس از برخورد به دیواره های حوضچه و بازگشت از آن دوباره به مدل برخورد نکنند. بنابراین معمولاً تست های دریایی را در حوضچه های مدرج انجام می دهند.

تولید موج در حوضچه

دو عامل مهم تولید موج (منظم) : ① طول موج - دوره تناوب (برابر است با دوره تناوب حرکت سیستم موج ساز)

② ارتفاع موج (دامنه موج) وابسته است به دامنه حرکت و شکل مقطع سیستم موج ساز

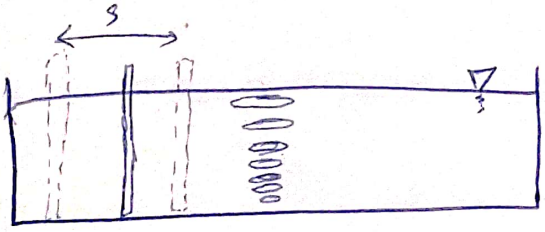
برخی از انواع موج سازها :



① موج ساز لولایی : در کف لولا شده است

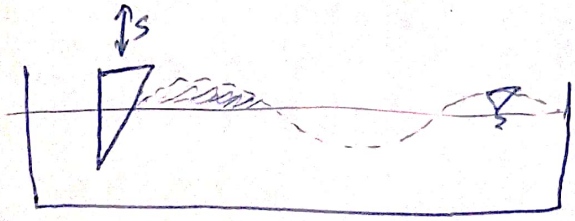
- میزان زاویه ای که موج ساز حرکت می کند بیانگر ارتفاع و دامنه موج تولیدی خواهد بود و زمان رفت و برگشت بیانگر پریود موج و طول موج تولیدی است.

- این نوع موج ساز برای شبیه سازی آب عمیق به کار برده می شود



② موج ساز پیستونی : ماژول ها به صورت با هم حرکت می کنند

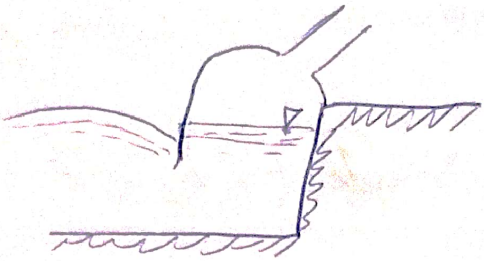
- این نوع موج ساز برای شبیه سازی آب کم عمق به کار برده می شود



③ موج ساز کوه ای

- نوع دیگر از موج ساز هم وجود دارد که ترکیبی از موج ساز لولایی و پیستونی است که هم می تواند آب عمیق را شبیه سازی کند و هم آب کم عمق را.

(4) موج ساز پنوماتیکی (pneumatic)



بر اساس فشار و مکش هوا کار می‌کند

تئوری ایجاد موج:

تئوری گالوین (Galvin): مقدار آب جابجا شده توسط موج ساز باید برابر با حجم آب زیر قله موج نسبت به خط ثابت باشد.

حلم پنهاهم

" تست کی دریایی در حوضچه کشش "

" بخش دوم "

ارتباط مدل و کشتی

$$\frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} = \lambda$$

مقیاس ابعاد : $\lambda_L = \frac{L_s}{L_m}$ مقیاس چگالی : $\lambda_\rho = \frac{\rho_s}{\rho_m}$ مقیاس سطح : $\lambda_S = \lambda_L^2$

مقیاس سرعت پیشروی : $\lambda_V = \frac{V_s}{V_m}$ مقیاس حجم : $\lambda_m = \lambda_\rho \cdot \lambda_L^3$ مقیاس جرم : $\lambda_\nabla = \lambda_L^3$

مقیاس زمان : $\lambda_t = \frac{\lambda_L}{\lambda_V}$ مقیاس شتاب : $\lambda_a = \frac{\lambda_V^2}{\lambda_L}$

ارتباط پریود نوسانات کشتی و مدل

$$T_s = \frac{2\pi k_s}{\sqrt{g \cdot \overline{GM}_s}} \quad , \quad T_m = \frac{2\pi k_m}{\sqrt{g \cdot \overline{GM}_m}}$$

$$\Rightarrow T_s = \frac{2\pi \lambda k_m}{\sqrt{g \cdot \lambda \overline{GM}_m}} = \frac{\lambda\, 2\pi k_m}{\sqrt{\lambda}\sqrt{g \cdot \overline{GM}_m}} = \sqrt{\lambda}\, T_m \Rightarrow \boxed{T_s = \sqrt{\lambda}\, T_m}$$

از روش دیگر نیز می توان بدست آورد:

سرعت — مکان

$$V = \frac{L}{T} \Rightarrow T = \frac{L}{V} = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda}$$

زمان

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m}$$

$$\frac{V_s}{V_m} = \sqrt{\lambda}$$

- جدول زیر پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد.

parameter	Fully scalle vesel	model
Length	L	L/λ
Density	ρ	ρ/c
Time	t	$t/\sqrt{\lambda}$
mass	m	$m/c\lambda^3$
velocity	V	$V/\sqrt{\lambda}$
Acceleration	a	a
Force	F	$F/c\lambda^3$
moment	M	$M/c\lambda^4$
pressure	P	$P/c\lambda$
Frequency	ω	$\omega\sqrt{\lambda}$
Bending rigidity	EI	$EI/c\lambda^5$
modulus of elasticity	E	E/e
section area moment of inertia	I	$Ie/c\lambda^5$

توزیع جرمی مدل

مهم است که توزیع جرمی در مدل مشابه توزیع جرمی در کشتی واقعی باشد.

اهمیت و کلیاتی توزیع جدی

✓ توزیع دقیق جدی در بحث مقاومت چندان مهم نبود چون یا مدل ثابت می‌شد یا فقط دارای دو درجه آزادی یا دامنه محدود بود.

✓ در مبحث دریاهای با توزیع جدی بسیار اهمیت دارد بخصوص در آزمایشات دریایی مواج که دامنه حرکات بزرگ است. کلاً هر جا که جسمی از دینامیک است مباحث جدی اولویت دارند

✓ توزیع جدی با کمک وزنه‌ها بالاست (سری) انجام می‌شود

- برای توزیع جدی مناسب باید چهار شرط تناسب زیر بین مدل و کشتی برقرار باشد:

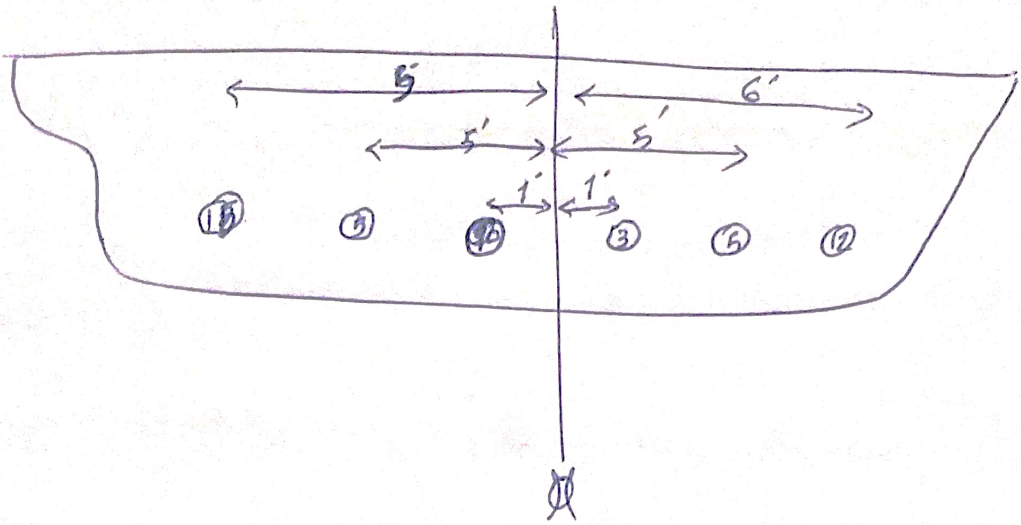
① وزن کل (جابجایی) ② موقعیت طولی مرکز ثقل ③ شعاع ژیراسیون (همان اینرسی)

④ همان اول وزن

* شرط چهارم فقط در صورتی نیاز است که به همان خمشی بدنه نیاز باشد

* اغلب مهندسین به اشتباه تصور می‌کنند که اگر سه شرط اول برآورده شوند، شرط چهارم خود به خود برآورده می‌شود در حالی که اینطور نیست.

* مثال صفحه بعد توضیحی برای این مسئله است.



Ans

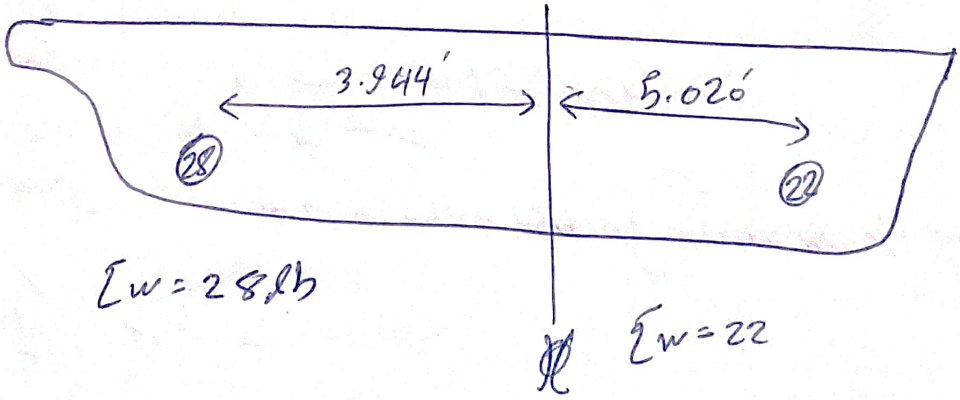
$\Sigma w = 30$ lbs $\qquad \Sigma w = 20$ lb

$\Sigma wx = 10+15+75 = 100$ ft-lb $\qquad \Sigma wx = 3+25+72 = 100$ ft

$\Sigma wx^2 = 10+45+375 = 430$ ft^2-lb $\qquad \Sigma wx^2 = 3+125+432 = 560$ ft^2-lb

Total weight $= \Delta = \Sigma w = 30+20 = 50$ lb

Total $gI_{yy} = \Delta k_{yy}^2 = \Sigma(wx^2) = 430+560 = 990$ ft^2-lb



$\Sigma w = 28$ lb $\qquad \Sigma w = 22$

$\Sigma wx = 28 \times 3.944 = 110.43$ ft-lb $\qquad \Sigma wx = 110.3$ lb

$\Sigma wx^2 = 28 \times 3.944^2 = 436$ ft^2-lb $\qquad \Sigma(wx^2) = 554$ ft^2-lb

Total weight $= 28+22 = 50$ lb

Total $gI_{yy} = \Delta k_{yy}^2 = \Sigma wx^2 = 436+554 = 990$ ft^2-lb

50-4

مشاهده می‌شود که وزن کل، موقعیت مرکز ثقل و شعاع ژیراسیون اجسام آبزی با هم برابر نمی‌باشد اصل وزن یکسان نیستند.

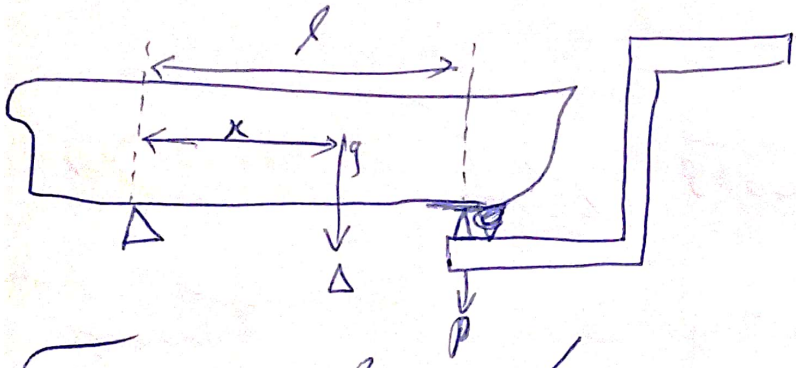
چگونگی تعیین مرکز ثقل طولی

ارتباط بین مرکز ثقل مدل و کشتی به صورت زیر است:

برای کشتی — برای مدل

$$X_{CG} = \lambda x_{CG} \qquad Y_{CG} = \lambda y_{CG} \qquad Z_{CG} = \lambda z_{CG}$$

- برای تعیین مرکز ثقل طولی، مدل را بر روی دو لبه تکیه‌گاهی قرار می‌دهیم و حول یکی از تکیه‌گاه‌ها ممان می‌گیریم (در شکل نشان داده شده است)



در شکل فوق فقط x مجهول است. بقیه پارامترها. وسایل اندازه‌گیری، اندازه گرفته می‌شود. x از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta x = P \times l$$

$$\Rightarrow x = \frac{P}{\Delta} \times l$$

تعیین مرکز ثقل عمودی و شعاع پایداری مدل

روش اول) آزمایش کعبی: تعیین مرکز ثقل عمودی با استفاده از کج کردن مدل (شبیه آزمایش کعبی کشتی واقعی)

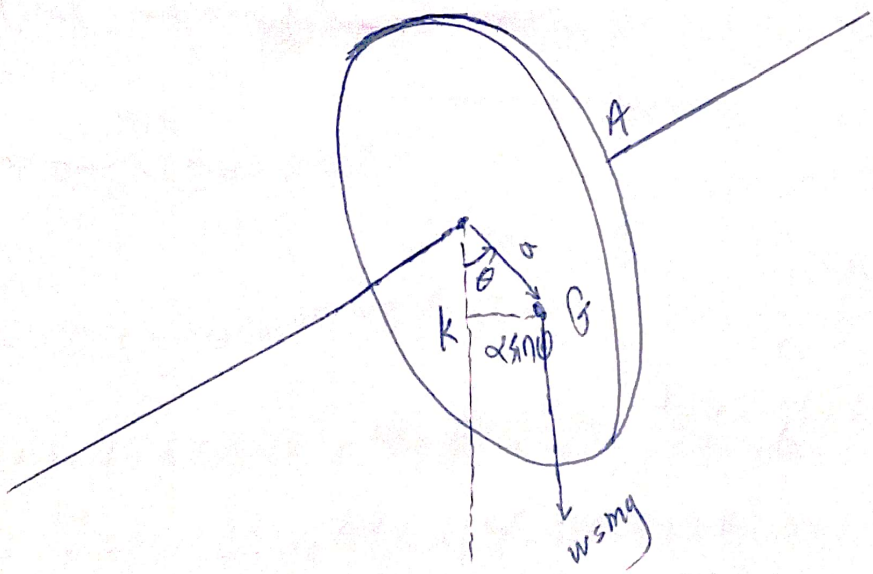
جابجایی عرضی یک وزنه و ایجاد ممان $M = w \times d$

$$\overline{GM} = \frac{w \times d}{\Delta \tan\phi}$$

با داشتن $\overline{GM}$، مقدار $\overline{KG}$ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM}$$

روش دوم) مدل آویزان: تعیین $\overline{KG}$ و ممان دوم با استفاده از نوسان مدل و اندازه‌گیری پریود نوسانات



$$\sin\theta = \frac{\overline{GK}}{a}$$

$$\Rightarrow \overline{GK} = a\sin\theta$$

$$\left.\begin{aligned} M_o &= w\,a\sin\theta = Mga\sin\theta \\ I_a\frac{d\omega}{dt} &= I_a\frac{d^2\theta}{dt^2} \end{aligned}\right\} \Rightarrow I_a\frac{d^2\theta}{dt^2} = -Mga\sin\theta$$

$$\sin\theta \approx \theta \Rightarrow I_a\frac{d^2\theta}{dt^2} = -Wa\theta = -Mga\theta$$

$$\Rightarrow I_a\frac{d^2\theta}{dt^2} + Mga\theta = 0 \Rightarrow \frac{d^2\theta}{dt^2} + \underbrace{\frac{Mga}{I_a}}_{\omega_0^2}\theta = 0$$

$$\Longrightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{Mga}{I_a}} = \sqrt{\frac{Mga}{Mk_a^2}} = \sqrt{\frac{ga}{k_a^2}}$$

فرکانس طبیعی

$$\Longrightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{I_a}{Mga}} = 2\pi\sqrt{\frac{k_a^2}{ga}} \Rightarrow k_a^2 = \frac{g}{(2\pi)^2}T^2 a$$

حال ممان اینرسی حول مرکز ثقل به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Mk_a^2 = I_a = I_G + Ma^2$$
$$= M(k_G^2 + a^2)$$

* ممان اینرسی حول مرکز ثقل کمتر از دیگر حالات است

$$\Longrightarrow k_a^2 = k_G^2 + a^2 \rightarrow k_G^2 = k_a^2 - a^2$$

با جایگذاری k_a $\Longrightarrow$ $k_G^2 = \frac{g}{(2\pi)^2}T^2 a - a^2$

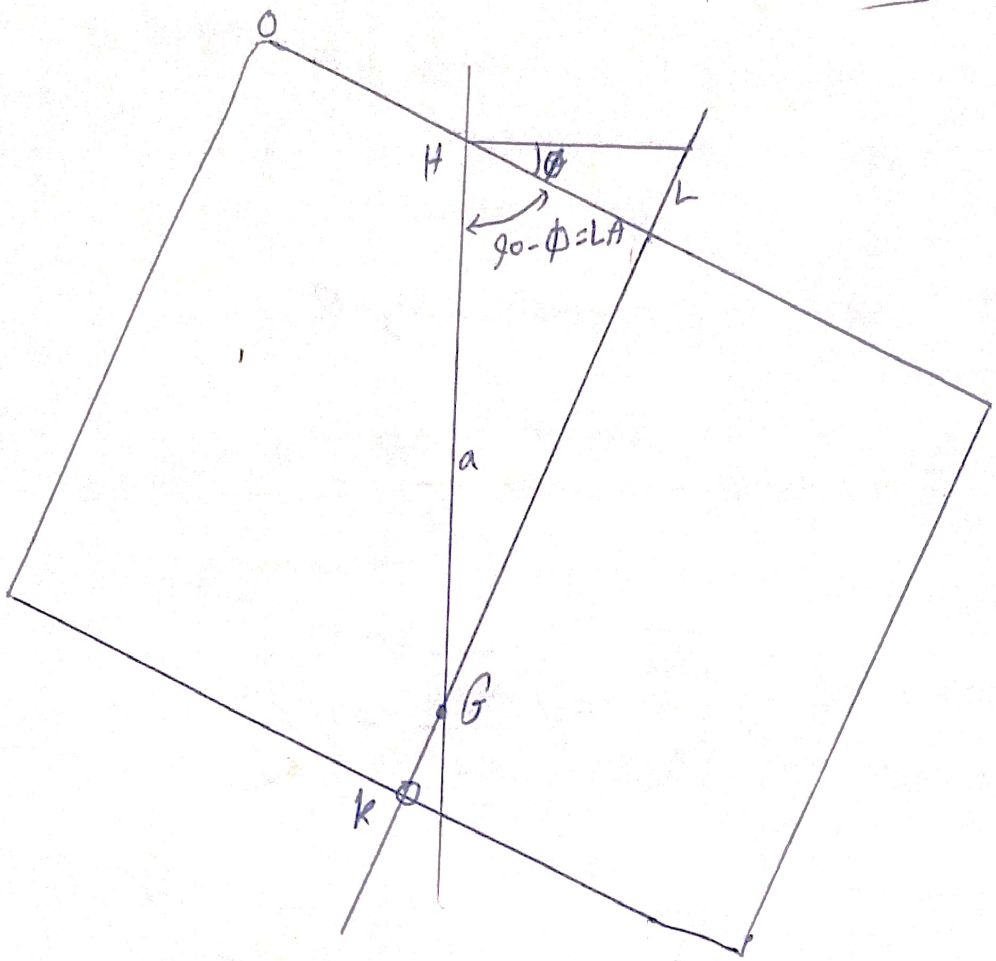
اگر a برحسب فوت باشد و T برحسب ثانیه:

$$k_G^2 = 0.815\,T^2 a - a^2$$

و اگر a برحسب اینچ و T برحسب ثانیه

$$k_G^2 = 9.78\,T^2 a - a^2$$

اگر همین کار را برای کشتی انجام دهیم به صورت زیر می‌شود:



در این حالت کشتی را از نقطه H گرفته

$$\cos(90-\phi) = \frac{\overline{HL}}{a} \Rightarrow a = \frac{\overline{HL}}{\cos(90-\phi)}$$

از شکل : $\overline{HL} = \frac{B}{2} - \overline{HO}$

$\overline{HL}$ مشخص است و همچنین زاویه ϕ نیز مشخص است بنابراین a را بدست می‌آید

مقدار a را در رابطه $k_G^2 = 0.815^2 a - a^2$ قرار می‌دهیم و k_G بدست می‌آید

- اما در شکل مقدار $\overline{KG}$ را می‌توان به صورت زیر حساب کرد:

$$\overline{GL} = \overline{HL} \tan(90^\circ - \phi) \Rightarrow \overline{KG} = \overline{KL} - \overline{GL}$$

مثال: برای یک کشتی 5 فوتی مقادیر زیر در آزمایش مشخص است مطلوب است محاسبه k_{nn} و $\overline{KG}$

Angle $A = 90^\circ - \phi^\circ = 35$

$\overline{OL} = 3.313$ in

$\overline{OH} = 1$ in

$\overline{KL} = 4.125$ in

$T = 0.68$ sec

Ans:

$$\cos 35^\circ = \frac{\overline{HL}}{a}$$

$$\overline{HL} = \overline{OL} - \overline{OH} = 3.313 - 1 = 2.313 \text{ in} \Rightarrow a = \frac{2.313}{\cos 35^\circ} = 2.82 \text{ in}$$

$$k_G^2 = k_{nn}^2 = 9.78 T^2 a - a^2 = 9.78 (0.68)^2 \times 2.82 - (2.82)^2$$

$$\Rightarrow k_{nn} = 2.19 \text{ in}$$

$$\overline{KG} = \overline{KL} - \overline{GL}$$

$$\overline{GL} = a \tan 35^\circ = 2.82 \times 0.7 = 1.974 \text{ in}$$

$$\overline{KG} = 4.125 - 1.974 = 2.151 \text{ in}$$

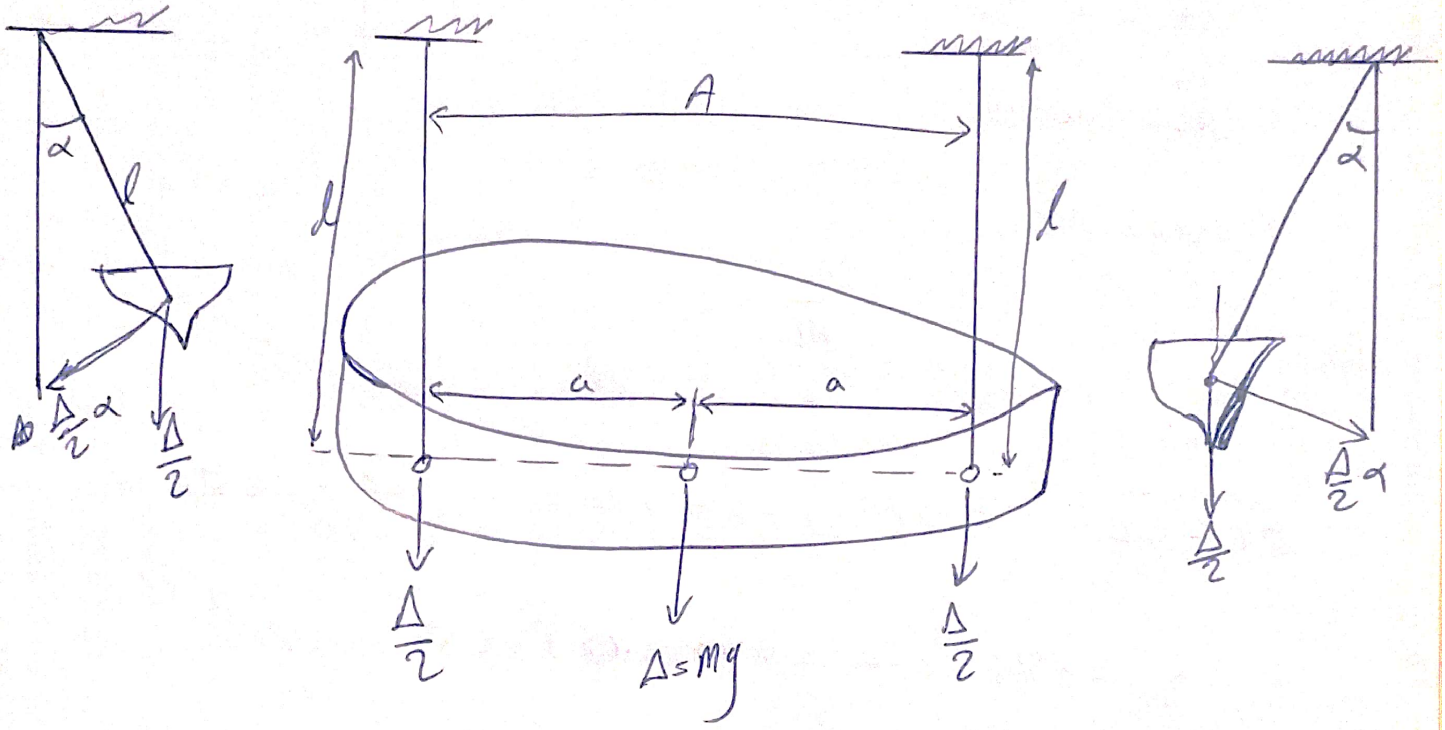
تعیین شعاع ژیراسیون طولی (عرضی)

با استفاده از همان اصول آزمایش دو مدل آویزان، میتوان شعاع ژیراسیون طولی را

نیز معلوم نمود.

تعیین شعاع ژیراسیون / ممان اینرسی

دوش ~~[illegible]~~ بیفیلار (Bifilar) : چرخش مدل آویزان در صفحه افقی



شناور را در صفحه افقی چرخانده‌ایم

$$I_{zz}\ddot{\psi} = M$$

$$M = -\frac{\Delta}{2}\alpha 2a = -\Delta a \alpha$$

برای ایجاد ارتباط بین α و ψ از روابط زیر استفاده می‌کنیم (از شکل بدست می‌آید)

$$l\alpha = a\psi \rightarrow \alpha = \frac{a}{l}\psi$$

$$\Rightarrow M = -\frac{\Delta a^2}{l}\psi \rightarrow I_{zz}\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{\Delta a^2}{l}\psi = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\psi}{dt^2} + \underbrace{\frac{\Delta a^2}{l}\cdot\frac{1}{Mk_{zz}^2}}_{\omega_0}\psi = 0$$

$$\Rightarrow \omega_0^2 = \frac{\Delta a^2}{l} \cdot \frac{g}{\Delta k_{zz}^2} = \frac{g a^2}{l k_{zz}^2}$$

$$\Rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{g a^2 / l k_{zz}^2}}$$

$$\Rightarrow k_{zz} = \frac{T^2 g a^2}{4\pi^2 l} \quad \Rightarrow k_{zz} = \frac{\sqrt{g}}{4\pi} \cdot \frac{AT}{\sqrt{l}} \quad , A = 2a$$

اگر l و a برحسب فوت باشند و T برحسب ثانیه:

$$\boxed{k_{zz} = 0.451 \frac{AT}{\sqrt{l}}}$$

نکته: آزمایش Bifilar را برای مدل‌های بزرگ (5-6 متر) می‌توان با دقت مناسب انجام داد.

توجه: هر گونه خطا در مرحله تعیین مشخصات جرمی می‌تواند تحلیل‌های دینامیکی را با خطا/فایل مدل‌سازی دوباره رو کند.

مثال ۱: برای مدل با اطلاعات زیر k_{zz} را محاسبه کنید:

$l = 7\ ft \quad A = 43\ in$

$L_{model} = 4.76\ ft \qquad T_{avg} = 1.886$

Ans:

$$k_{zz} = 0.451 \frac{TA}{\sqrt{l}} = \frac{0.451 (1.886)(43/12)}{\sqrt{l}} = 1.151\ ft$$

که 1.151 برابر است با 24.1 % طول مدل

مثال: برای میل با مشخصات زیر k_{yy} را محاسبه کنید!

$a = 22.99$ in , $T = 1.783$

Ans:

$$k_{yy} = 0.815\, T^2 a - a^2$$

$$\Longrightarrow k_{yy} = 0.815\,(1.783)^2 \frac{22.99}{12} - \left(\frac{22.99}{12}\right)^2$$

$$\Longrightarrow k_{yy} = 1.14 \text{ ft}$$