



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مکانیک

موضوع سمینار: مدلسازی دینامیکی شش درجه آزادی شناور سطحی به همراه تولید
برنامه

نگارش
حمید باب

استاد راهنما
دکتر محمد سعید سیف

خرداد 1403

چکیده:

مدلسازی شش درجه آزادی کشتی اهمیت زیادی در طراحی و تحلیل رفتار این سازه‌های شناور دارد. این رویکرد در مقایسه با مدل‌های سه درجه آزادی، پیش‌بینی دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری از حرکات کشتی ارائه می‌دهد. بررسی همزمان حرکات هیو، چرخش طولی و عرضی، حرکات عرضی، غلتش و پیچش، به طراحی بهتر سیستم‌های کنترل و هدایت منجر شده و اینمی را افزایش می‌دهد. این امر همچنین به بهبود عملکرد کشتی از جمله افزایش سرعت، کاهش مصرف سوخت و استحکام بدن کمک می‌کند. علاوه بر این، مدل‌سازی شش درجه آزادی امکان شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تر رفتار کشتی را فراهم آورده و به مهندسان در درک و تحلیل دقیق‌تر اثرات حرکات و نیروهای مختلف یاری می‌رساند. در مجموع، این رویکرد به طراحی بهینه‌تر و عملکرد مطلوب‌تر کشتی‌ها کمک شایانی می‌کند.

در این سمینار ابتدا سعی داریم با آشنایی مقدماتی با شناور‌ها و انواع آن مقدماتی از آن را بیاموزیم، همچنین در گام بعدی با مفاهیم ارتعاشی سر و کار خواهیم داشت تا مدل‌سازی شناور را بهتر درک کنیم.

در فصل سوم درجات آزادی مختلف شناور را بررسی می‌کنیم و هر یک را مشخص می‌کنیم که به چه صورتی می‌باشد و ارتباط بین آنها چیست، در انتها نیز با توجه به روابط موجود برنامه‌ای را برای آن می‌نویسیم تا نمودار حرکات هیو، پیچ و رول را بتوانیم بیابیم.

کلید واژه‌ها: مدل‌سازی، درجه، شناور، کشتی

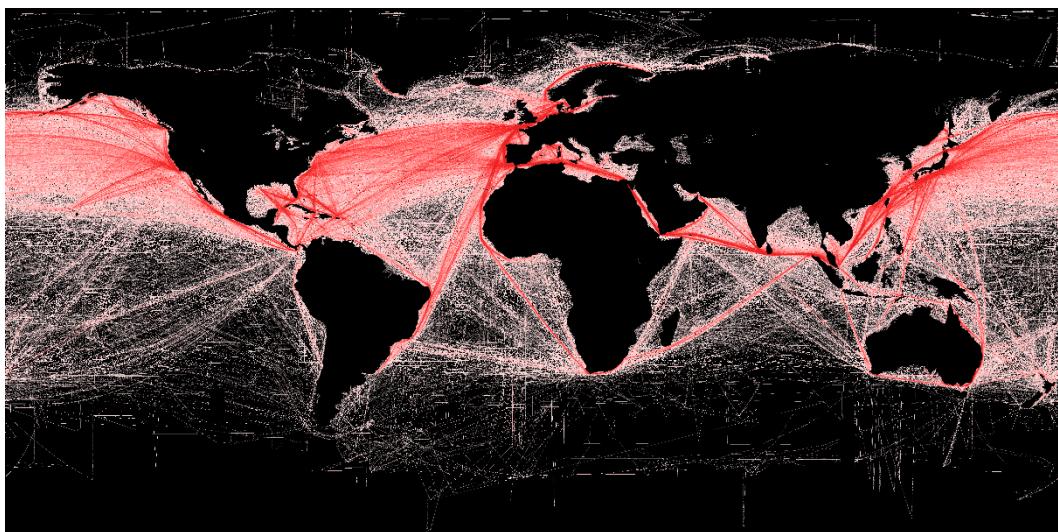
فهرست مطالب

| | |
|----|---|
| 2 | چکیده..... |
| 4 | فصل 1: کشتی..... |
| 4 | 1-1 صنعت حمل و نقل دریایی |
| 6 | 2-1 انواع کشتی ها |
| 7 | 2-1-1 تجهیزات مختلف کشتی..... |
| 9 | فصل 2: مفاهیم ارتعاشاتی |
| 9 | 2-1) نیرو های تحریک در محیط دریا |
| 11 | 2-2) مفاهیم اولیه ارتعاشات |
| 11 | 2-2-1 نوسانات نیروی تراست و گشتاور پروانه |
| 12 | 2-2-2 دیاگرام کمپل |
| 14 | 2-2-3 دیاگرام safe |
| 15 | فصل 3: مدلسازی دینامیکی 6 درجه آزادی |
| 15 | 3-1 ماهیت معادلات ارتعاشی در کشتی |
| 18 | 3-2 معادلات حرکت در درجات آزادی مختلف |
| 18 | 3-2-1 معادله حرکت هیو شناور |
| 21 | 3-2-2 معادله حرکت پیج شناور |
| 23 | 3-2-3 معادله حرکت رول شناور |
| 28 | 3-3 ترکیب 6 درجه آزادی با توجه به کوپل |
| 29 | فصل 4: تحلیل حرکت دینامیکی شناور |
| 29 | 4-1 مدلسازی حرکت پیج و هیو در حالت کوپل |
| 30 | پیوست کد |
| 33 | منابع |

فصل 1 : کشتی

1-1) صنعت حمل و نقل دریایی :

حمل و نقل دریایی^۱ به جابجایی افراد، کالاها و ... بهوسیله انواع شناور ها از روی دریاهای، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، کanal‌ها و رودخانه‌ها کالاهايی که از طریق دریا حمل می‌شوند گفته می‌شود، معمولاً این بارها دارای حجم و وزن زیادی می‌باشند. حمل و نقل در دریا امروزه از اهمیت بالایی برخوردار است، دریا گذرگاه مناسبی برای اهداف مختلف و متنوعی است که با کشتی‌ها انجام می‌شود.² در صد تجارت جهانی از طریق این نوع حمل و نقل صورت می‌گیرد بنابراین حمل و نقل دریایی قلب اصلی اقتصاد و تجارت جهانی است.



تصویر 1-1 : ترافیک دریایی در جهان

اهمیت این صنعت بگونه‌ای است که کشورها در روابط دیپلماتیک به دنبال ارتباط گرفتن و ذینفع شدن از آن هستند، کشورهای محصور خشکی^۳ که با دریای آزاد در ارتباط نیستند به دنبال برقراری ارتباط با جهان توسط دریاها و اقیانوس‌ها هستند. کشور ما از نظر جغرافیایی در یکی از استراتژیک‌ترین مکان‌های جهان قرار گرفته است؛ ما هم از شمال، به دریای خزر و از جنوب به خلیج فارس و دریای عمان متصل هستیم. این را می‌توان دلیل آن دانست که جهان، ایران را از نظر استراتژیک پراهمیت می‌داند.

حمل و نقل دریایی نسبت به بقیه روش‌ها ارزانتر بوده و به همین دلیل صاحبان کالا و شرکت‌های تجاری ترجیح می‌دهند کالای خود را از طریق مسیرهای آبی حمل کنند. از طریق کشتی‌ها حمل کالا با حجم بالا

¹ Maritime Transportation

² LandLock

ممکن است. از طریق آب های آزاد محموله های نسبتا سنگین تا حدود 200 تا 500 هزار تن را به سهولت می توان با یک کشتی از بندری به بندر دیگر جابه جا کرد که قابل مقایسه با هیچ ابزار حمل و نقلی دیگری نیست. در این بخش مزیت های بسیار حمل و نقل دریایی توسط کشتی ها نسبت به حمل و نقل های دیگر اشاره می شود :

1) قیمت پایینتر نسبت به سایر وسایل حمل و نقل

2) ظرفیت بالای بارگیری

3) تقریبا عدم نیاز به سرمایه گذاری در زمینه زیر ساخت در دریا

4) ایمن تر بودن حمل و نقل دریایی

5) نیروی کار کمتر

با ادامه رشد جمعیت جهان ، به ویژه در کشورهای در حال توسعه ، حمل و نقل دریایی با هزینه کمتر ، کارآمد و آسان تر نقشی اساسی در رشد و توسعه پایدار جوامع دارد. علاوه بر آنکه حمل و نقل از طریق آب همانطور که گفتیم ، آسان تر و ارزان تر است چالش های متنوعی همچون چالش های صنعتی مربوط به کشتیرانی و چالش های اقتصادی مربوط به بنگاه های اقتصادی را در پی دارد.



تصویر 1-2 : خروج گاز های آلینده از اکبروز یک کشتی

یکی از چالش های اساسی آلودگی محیط زیست ناشی از سوخت کشتی ها دانست که بر محیط دریا تاثیر بسزایی می گذارد؛ در نتیجه فرآیند های احتراق در موتور کشتی ، آلینده های مختلف را در جو منشر می کنند که اصلی ترین آنها اکسیدهای گوگرد (SO_x)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ذرات معلق (PM) و مونوکسید کربن (CO) هستند.

در حال حاضر کشتی ها مسئول بیش از 3٪ از انتشار گازهای گلخانه ای جهانی هستند، این موضوع سبب می شود بررسی های هیدرودینامیکی، سازه ای و ... در مورد کشتی ها مورد اهمیت واقع شود.

2-1) انواع کشتی ها



تصویر 3-1 : انواع کشتی های دنیا

کشتی ها کاربرد های گسترده ای در اکتشاف ، تجارت ، جنگ ، مهاجرت ، استعمار ، حمل سکوهای (حفاری یا استخراج نفتی) و ... دارند که بسته به کاربرد آنها انواع مختلفی در جهان ساخته شده است که میتوان به انواع و کاربرد و ظرفیت هر یک از آنها در جدول 1-1 اشاره کرد :

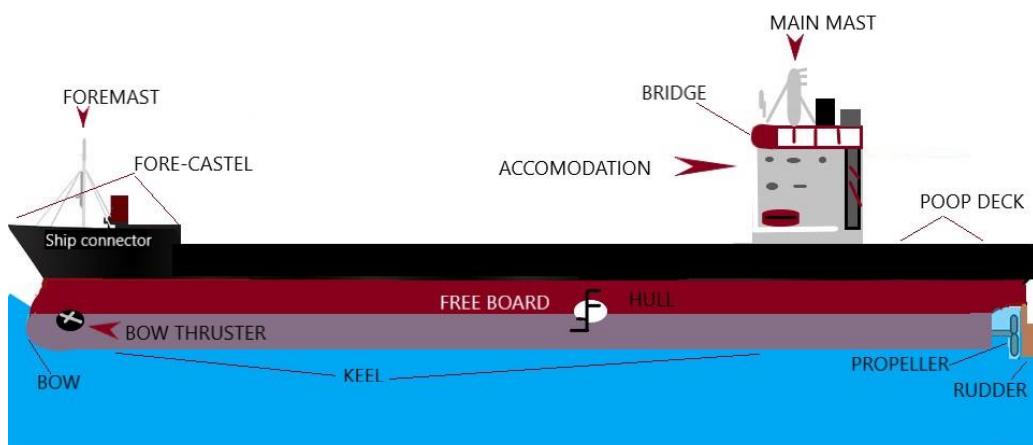
جدول 1-1: انواع کشتی ها با شرح کاربرد و ظرفیت

| نام کشتی | کاربرد | حداکثر ظرفیت |
|---------------|--|----------------|
| Container | حمل کانتینر ها – بزرگترین شناور تجاری | 24000TEU |
| Bulk carriers | حمل فله های بسته بندی نشده مانند غلات ، زغال سنگ و ... | 400000 DWT |
| Tanker | ذخیره یا حمل ، مایعات و گازها | DWT 120,000 |
| General Cargo | حمل کالا های بسته بندی شده مانند مواد غذایی ، ماشین آلات ، پوشاش و ... | 22,000 .TEU |
| O.B.O | حمل ترکیبی بار های مایع و خشک مانند نفت ، زغال سنگ ، روغن و ... | 100,000DWT |
| RO-RO | حمل وسایل چرخدار مانند اتومبیل ، کامیون ، تریلر و قطار و .. | Vehicles |

| | | |
|-------------------|--|--------------------|
| 8000 | | |
| passenger 5400 | جنبه گردشگری و جابجایی مسافران در هتل های لوکس و ... | Cruise ship |

1-2-1) تجهیزات مختلف کشتی

کشتی ها مانند یک شهر شناور دارای بخش های مختلف و متفاوتی هستند؛ در تمامی کشتی های مختلف، قسمت های اصلی وجود دارند که علت وجود هر یک از آنها را باید بدانیم، در شکل 1-3 این قسمت ها بصورت شماتیک اشاره شده اند و در ادامه به معرفی مختصر از چند قسمت مهم شناور می پردازیم تا در موضوع مدلسازی با درک این تجهیزات بهتر بتوانیم آن را درک کنیم.



تصویر 1-4: انواع قسمت های مختلف شناور ها

1- بدن¹: کشتی دارای یک بخش آب بندی شده است که بدن نام دارد، انواع مختلفی از شکل ظاهری بدن ها وجود دارد که هر یک کاربرد های بخصوصی را دارند، این شکل از بدن باشد از نظر هزینه، ملاحظات هیدرودینامیکی (پایداری، تحمل وزن و...)، ملاحظات هیدرودینامیکی (قدرت موتور و پروانه، سرعت ، مقاومت و...) مورد ارزیابی قرار بگیرد و براساس کاربردی که مدنظر سازنده است انتخاب شود.

2- بدن فوکانی² : خدمه و ناویبان کشتی که مسئولیت اصلی هدایت موقعیت کشتی در هر زمانی را دارند در محیطی به نام بدن فوکانی زندگی میکنند، این محیط دارای اتاق ناویانی، خواب و استراحت، غذا و.. است.

¹ Hull

² Super Structure

3- موتور: در شناور ها، نیروی محرکه اجزایی مثل پروانه یا برق کشتی را موتور کشتی تامنی می کند.



تصویر 1-5 : موتور کشتی

موتور نیروی لازم برای پیش روی در دریا، مانورپذیری کشتی را فراهم می کند و از آنجایی که شرایط محیطی سخت و خشن است باید دارای اینمی لازم برای کار کرد باشد، به همین موتور های کشتی توسط شرکت های فوق تخصصی که در طراحی و ساخت موتور های دریایی تخصصی دارند تولید می شوند مانند شرکت رولز رویس که در تصویر 1-5 نمونه موتور تولیدی در این شرکت نمایش داده شده است.

موتور های کشتی ها انواع مختلفی هستند که از نوع بخار، دیزل، توربین گاز و الکتریکی می توان اشاره کرد که هر یک براساس اندازه و کاربرد مورد نظر کشتی انتخاب می شوند، برای کشتی های بزرگ سرعت شفت باید 100تا 200 دور بر دقیقه و توان موتور 12تا 50 مگاوات باشد که مقادیری قابل توجه است.

4- سکان¹: ابزاری که در کشتی برای هدایت و مانور کشتی ها استفاده می شود، سکان که در پشت بخش پروانه قرار می گیرد روی یک محور عمودی می چرخد تا با انحراف جریان، نیروی عرضی را ایجاد کنند؛ می توان با افزایش ناحیه سکان، نوع سکان بهتر و ... اثر بخشی سکان را بهبود داد. سکان های مربوط به کشتی های VLCC یا کانتیربر بیشتر مرحله عملیاتی آنها مربوط به حفظ مسیر می باشد در نتیجه زوایای آن تا 35 درجه محدود می شود ولی در بعضی شناور ها این مانور پذیری اهمیت بیشتری دارد.

5- پروانه²: یکی از مهمترین بخش ها در سیستم پیشرانش شناور های دریایی پروانه ها هستند که وظیفه به حرکت در آوردن شناور را دارند. در فصل بعدی با ارتعاشات کشتی بیشتر آشنا خواهیم شد و مفاهیم اولیه آن را طرح بحث خواهیم کرد.

¹ Rudder

² Propeller

فصل دوم : مفاهیم ارتعاشاتی

2-1) نیرو های تحریک در محیط دریا

پروانه ها غالبا علت اصلی سر و صدا و ارتعاش کشتی ها هستند و باعث کاهش بازدهی، خرابی های زیاد و... می شوند. در برخی موارد، ارتعاشات ناشی از پروانه حتی ممکن است به اندازه کافی بزرگ باشد که باعث آسیب خستگی به ساختار کشتی شود. استانداردهای متعددی برای بررسی سر و صدای کشتی درونی، ارتعاش و انتشار نویز از راه آب وجود دارد. نیروهای ارتعاشی و صدای ناشی از پروانه ها را می توان بر اساس نوع تحریک سازه کشتی به دو قسمت اصلی تقسیم کرد، یک دسته بخش صلب و نوع دیگر الاستیک است؛ بخش اول تحت عنوان دریامانی¹ بررسی می شود و بخش دوم که بخش اصلی ارتعاشات است در ادامه بررسی می شود؛ تحریکات دریایی می توانند محوری، خمشی و پیچشی باشند که در بخش مانور است.

نیرو های نوسانی می توانند ناشی از موج دریا که بر کشتی وارد می شود باشند که سبب خمش بدن می شود، همچنین جریان های گردابه ای که به پروانه وارد می شود سبب ایجاد نیرو های ناپایایی می شوند و نیرو های نوسانی را ایجاد می کنند.

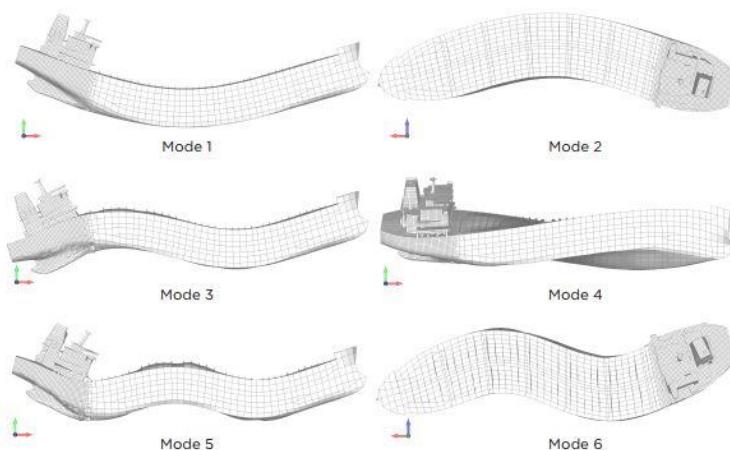
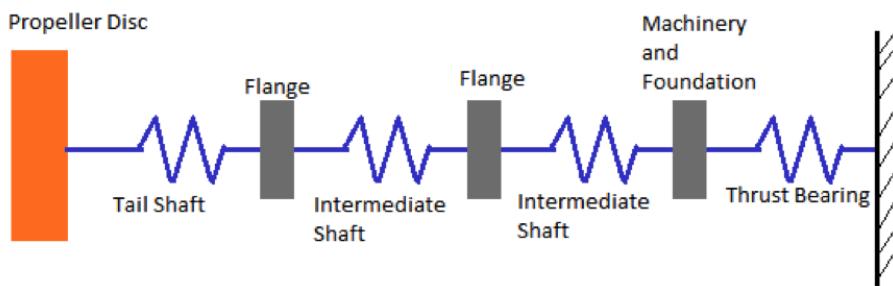


Figure 2 - First six global natural vibration modes of a cargo vessel

تصویر 2-1) مدهای انعطاف‌پذیر (خمشی و پیچشی) یک کشتی نمونه

¹ Seakeeping

موج دریا معمولاً مدهای صلب کشته و مدهای انعطاف‌پذیر اولیه را خطرناک هستند معمولاً، تحریک می‌کند. معمولاً آن چیزی که به عنوان ارتعاشات در کشتی‌ها شناخته می‌شود، لرزش اجزای آن توسط تحریک موتورها، پمپ‌ها، کمپرسورها و ... در داخل کشتی است. به دلیل انعطاف‌پذیر بودن فنداسیون تجهیزات و موتورها در کشتی، مشکلات ارتعاشاتی در آنها نسبت به نصب‌شان در خشکی معمولاً بیشتر است. بعنوان موتورهای رفت و برگشتی چهار سیلندر به ترتیب اولویت دارای تحریکات $2x$, $4x$ و $6x$ و ... و موتور شش سیلندر دارای تحریکات $3x$, $6x$ و $9x$ و ... هستند که توانایی تحریک تجهیزات اطراف را دارند.



تصویر 2-2) سیستم ارتعاشی بخش پیش رانش شناور

مهمنترین تحریک و حدود 80 درصد مشکلات ارتعاشی در کشتی ناشی از پروانه است و معمولاً برای اجزای اطراف خود با فرکانس $N\omega$ (تحریک ارد پره پروانه¹) مشکل ایجاد می‌کند که N برابر با تعداد پره‌ها است و ω نماد سرعت دورانی پروانه است و اصطلاح مربوط به این تحریک، تکان خوردن دم سگ² است. مهمترین بخش تحت خطر این تحریک، ارتعاشات محوری مجموعه پروانه، شفت و موتور است که بصورت سیستم ارتعاشی در تصویر 3-4 نمایش داده شده است.

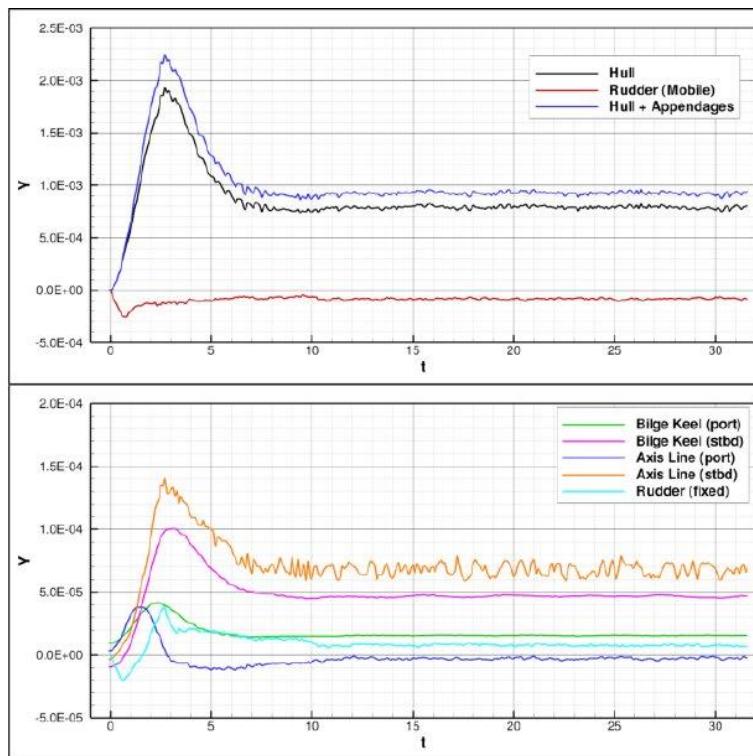
¹ Propeller blade rate

² Tail wagging the dog

2-2) مفاهیم اولیه ارتعاشات

در این بخش مفاهیم پایه‌ای که برای بررسی ارتعاشات لازم است را مطالعه می‌کنیم و به بررسی نوسانات آن می‌پردازیم تا درک مدلسازی شناور بهتر باشد.

1-2-2) نوسانات نیروی تراست و گشتاور پروانه: از جمله موارد قابل بحث نوسانات نیروهای تراست و گشتاور پروانه می‌باشد، از لحاظ تحلیلی می‌توانیم که فرض کنیم زمانی که یک پروانه در حال چرخش است، بدلیل اختلاف فشار در بالا و پایین پروانه، سرعت در بخش پایینی بیشتر از بخش بالایی پروانه شود و باعث می‌شود نوساناتی رخ دهد تا تراستی که توسط پروانه ایجاد می‌شود دچار نوساناتی باشد، همچنین علاوه بر تراست می‌تواند روی گشتاور مورد نظر تاثیر بگذارد که در تصویر 3-9 نمونه‌ای از نوسانات تراست اشاره شده است.



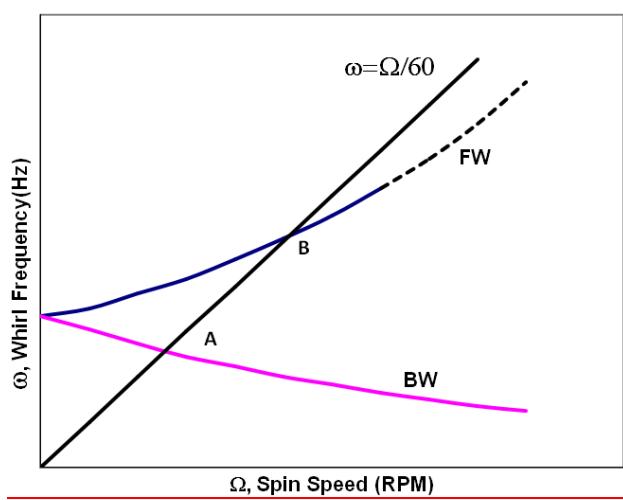
تصویر 2-3) نوسانات تراست بر بدنه و اجزای دیگر آن

در واقع با توجه به نیروهای نوسانی که به پروانه وارد می‌شود، ضرایب تراست و ضرایب گشتاور دچار نوساناتی هر چند محدود خواهند بود که سبب نوسانی بودن تراست و گشتاور است، باید در کشتی‌ها تحقیقات لازم در این جهت انجام شود تا بهترین عملکرد لازم انجام شود.

2-2-2) دیاگرام کمپل: از مهمترین دیاگرام های موجود، دیاگرام کمپل است. دیاگرام کمپل فرکانس های طبیعی قطعات و تحریکات را به صورت تابعی از سرعت دورانی نشان می دهد و به نام ویلفرد کمپل¹ که این مفهوم را اولین بار ارائه کرد، نام گذاری شده است. در سیستم های روتوری فرکانس های طبیعی سیستم وابسته به سرعت دورانی است. در تجهیزات دریایی با خاطر تغییر اثرات سیال اطراف روی سازه در سرعت دورانی متفاوت و همچنین تغییر سرعت دورانی، تغییر فرکانس وجود دارد که این تغییرات را می توان در نمودار کمپل رسم کرد و محدوده عملکردی های مناسب را تشخیص داد.

این نمودار معمولاً به دو صورت بدست می آید:

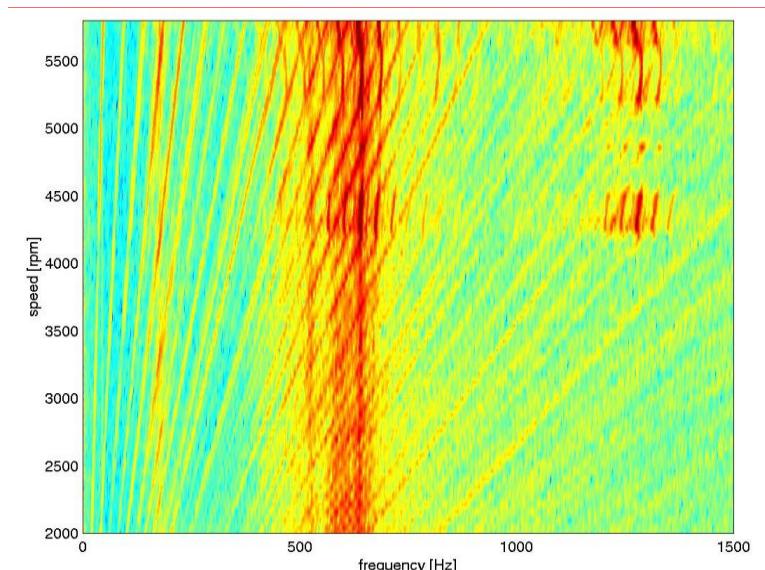
- **تحلیلی:** مقادیر محاسبه شده فرکانس های طبیعی به صورت تابعی از سرعت شفت بدست می آید و با بررسی این فرکانس ها و فرکانس های تحریک، محل تقاطع آنها نشان دهنده رزونانس در سیستم است و باید دقت کنیم که محدوده کارکرد پروانه مورد نظر در این ناحیه قرار نگیرد. البته با توجه به میزان نزدیکی این رزونانس ها به سرعت کاری و دمپینگ مودال در مد مورد نظر، میزان خطرناک بودن این رزونانس ها مشخص می شود.



تصویر 2-4) دیاگرام کمپل روتور ساده فرضی (نقاط برخورد ناحیه های رزونانس هستند و باید از این محدوده سرعت دورانی دور تر باشد)

¹ Wilfred Campbell

- تجربی: با اندازه‌گیری ارتعاشات سیستم و بدست آوردن پاسخ فرکانسی آن، محل مکزیموم‌های آن نشان دهنده فرکانس‌های طبیعی سیستم است و با در نظر گرفتن این نمودارها در فرکانس‌های متفاوت، در مجموع دیاگرام کمپل سیستم بدست می‌آید، نمونه ای از دیاگرام کمپل از تست در تصویر ۳-۵ نمایش داده شده است.

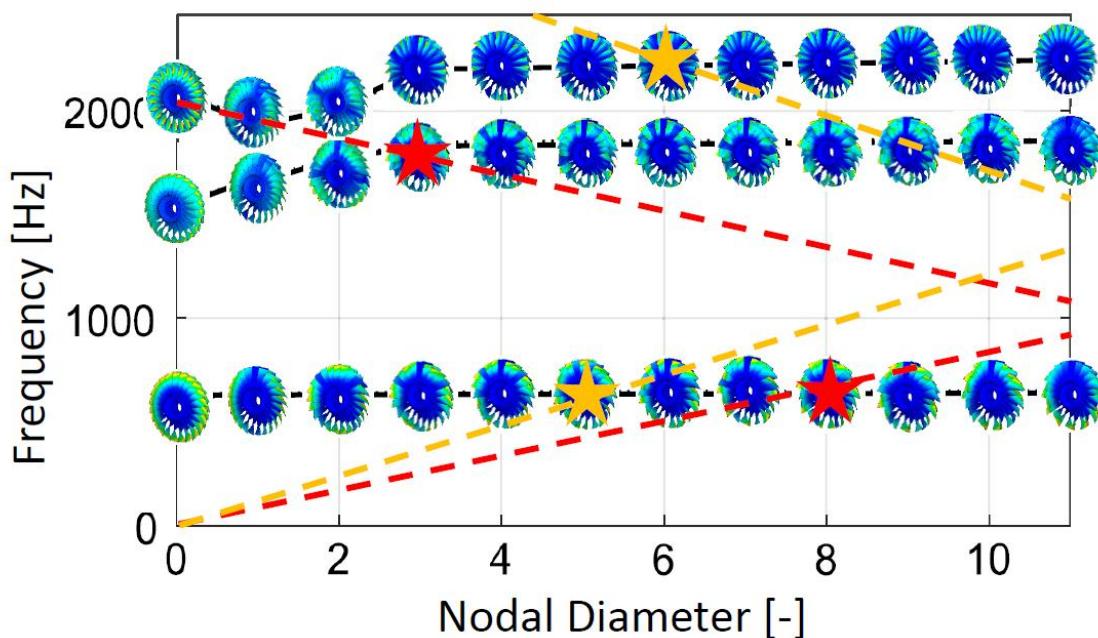


تصویر ۲-۵) دیاگرام کمپل حاصل داده های تجربی

این موضوع در تجهیزات مختلف کشتی به خصوص در پروانه کشتی نیز دنبال می‌شود، نمودارهای تحریک خارجی با عبارت $1x$, $2x$, $3x$ و ... نامگذاری شده و به صورت خط مستقیم در دیاگرام کمپل ترسیم می‌شوند. $1x$ مربوط به نابالانسی جرمی (چون در نابالانسی فرکانس تحریک برابر با سرعت دورانی است)، $2x$ مربوط به n_x ناهمنژازی^۱ نصب اجزا و یا اردر دوم تحریکات $1x$ یا توان کمتر است و n_x مربوط به نوسانات آبرودینامیک برای پروانه ای با n پره است. باید دقیق کرد که با توجه به داده های دیاگرام کمپل محدوده عملکرد تجهیز مورد نظر را میتوانیم تنظیم کنیم.

¹ Misalignment

3-2-2) دیاگرام Safe: علاوه بر نمودار کمپل که در آن فرکانس‌های طبیعی و تحریکات اعمالی به سیستم مورد نظر را بصورت تابعی از دور کاری نشان می‌دهد و برای بررسی رزونانس از آن استفاده می‌شود، در قطعات متقارن محوری از نمودار SAFE¹ برای بررسی رزونانسی استفاده می‌شود.



تصویر 2-6) دیاگرام Safe پروانه شناور

در این دیاگرام علاوه بر تطابق فرکانس تحریک و طبیعی به عنوان شرط لازم، شباهت شکل مدهای سیستم و شکل تحریک به عنوان شرط کافی رزونانس مطرح است. در نمودار SAFE فرکانس طبیعی و تحریک بر حسب مدهای قطری² رسم می‌شود. معمولاً³ سعی می‌شود که از دو نمودار کمپل و SAFE بصورت پشت سرهم برای بررسی رزونانس قطعی در سیستم استفاده شود. بطور خلاصه می‌توان گفت که در نمودار SAFE زمانی که سه خط، فرکانس تحریک، شکل تحریک و فرکانس طبیعی همزمان با هم تقاطع کنند، رزونانس واقعی رخ می‌دهد. این فصل جهت آشنایی با مفاهیم اصلی ارتعاشاتی این مطالب گفته شده است تا درک مناسب تری از مدلسازی شناور وجود داشته باشد، در فصل بعدی مدلسازی 6 درجه شناور را بررسی می‌کنیم.

¹ Singh's Advanced Frequency Evaluation

² nodal diameters

فصل سوم : مدلسازی دینامیکی 6 درجه آزادی

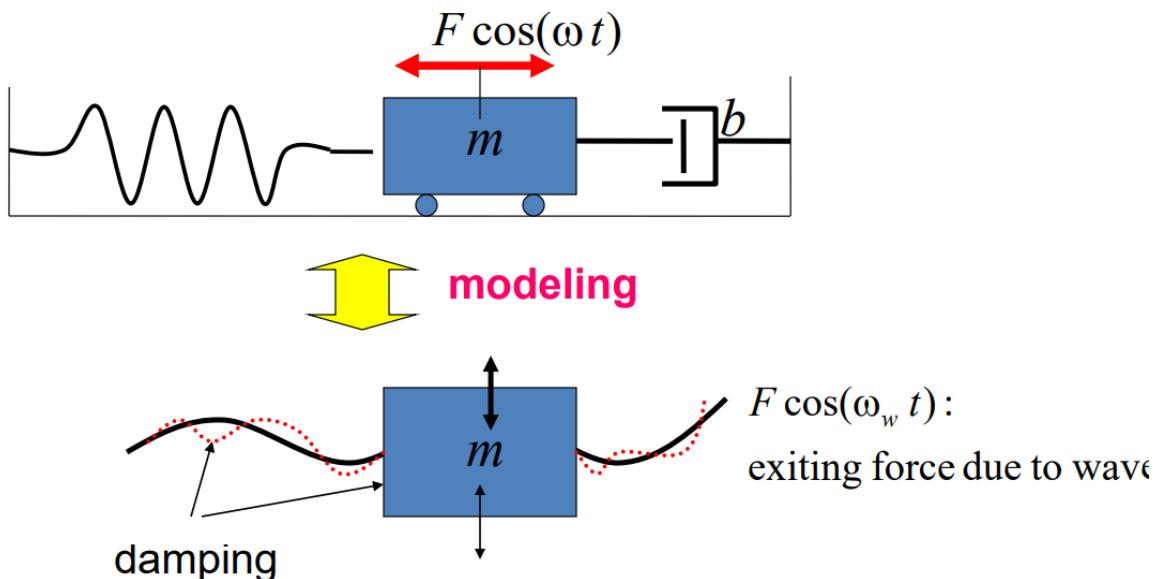
1-3) ماهیت معادلات ارتعاشی در کشتی

باتوجه به اینکه پروفیل موج به صورت تابع کسینوسی است، آن را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$y(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$

که در این رابطه A دامنه موج، ω فرکانس زاویه ای و ϕ زاویه فاز موج است، این تابع کسینوسی نشان می دهد که موج به صورت نوسانی و تناوبی در زمان تغییر می کند؛ به همین دلیل سبب ارتعاش در سازه خواهد شد و برای کشتی باید سیستم نوسانی در نظر گرفت.

در مقدمه باید بدانیم که میتوان این سیستم را جرم فنر یا جرم فنر دمپر در نظر گرفت که بسته به نوع سیستم آن را لحاظ خواهیم کرد و برایه $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F(t)$ میباشد.



تصویر 3-1) مدلسازی سیستم حرکت هیو شناور

بطور مثال برای حرکت هیو برای مدلسازی آن طبق تصویر 3-1 میدانیم که آن را مانند سیستم نوسانی جرم فنر دمپر در نظر میگیریم و پارامتر هایی مانند دمپر و فنریت را با توجه به روابط موجود بدست می آوریم.

پاسخ های مدلسازی سیستم شامل یک بخش عمومی و یک بخش خصوصی می باشند.

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t)$$

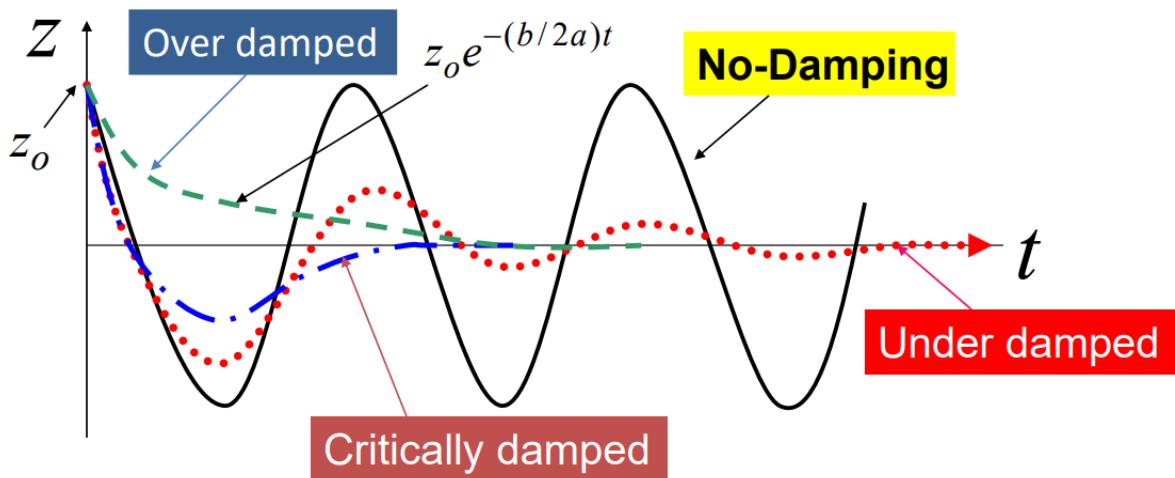
$$x_h(t) = c_1 \sin(\omega t) + c_2 \cos(\omega t)$$

همچنین $x_p(t)$ بر اساس نیروی خارجی وارد میتواند متفاوت باشد و باید بر اساس آن نوشت. همچنین فرکانس طبیعی و دمپینگ به صورت زیر می باشد:

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

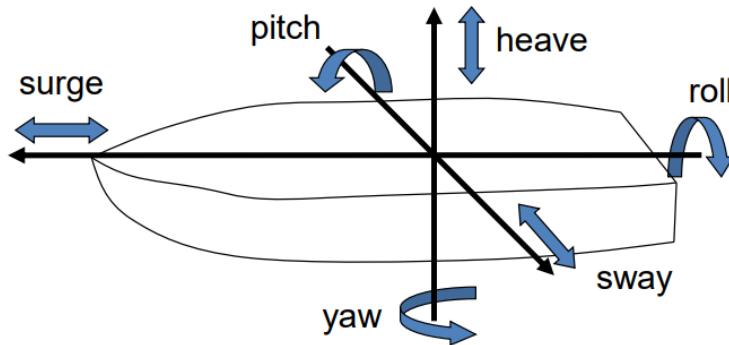
$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

که ζ ضریب دمپینگ شناور می باشد، سبب می شود که وضعیت آن به چه صورتی پیش برود، در صورتی که هرچه ضریب دمپینگ بیشتر باشد سریعتر به تعادل می رسد، در نمودار ۱-۳ این منحنی برای چهار حالت آورده شده است.



نمودار ۱-۳) پاسخ سیستم نوسانی

درجات آزادی مختلف کشتی، 6 درجه هستند که به دو دسته حرکات انتقالی و دورانی تقسیم‌بندی می‌شوند. برای هر کدام از این حرکات مدلسازی دینامیکی را می‌توان انجام داد.



تصویر 3-2) درجات آزادی شناور

همانطور که در تصویر 3-2 مشخص است، 3 درجه آزادی متعلق به حرکات انتقالی هستند؛ حرکت در راستای طول و حرکت در راستای عرضی خاصیت برگانندگی ندارند ولی حرکت در راستای محور قائم خاصیت برگانندگی دارد و پایدار خواهد بود. همچنین 3 درجه آزادی متعلق به حرکات دورانی می‌باشد؛ حرکت حول محور طولی (رول) تا درجات معینی و حول محور قائم خاصیت برگردانندگی دارد اما دوران حول محور عرضی (یاو) خاصیت برگردانندگی ندارد، این مطالب از آنجایی گفته شده است که در ادامه مدلسازی سیستم نوسانی درجات آزادی هیو، پیچ و رول در نظر گرفته می‌شود چون برگردانندگی دارند.

فرکانس برخورد شناور یک مفهوم می‌باشد که بسیار شبیه به مفهوم دوپلر است، اثر دوپلر در دریاهای و امواج نیز وجود دارد، موج وقتی نزدیک یا دور می‌شود فرکانس های متفاوتی دارد، این مفهوم در نیرویی که به شناور وارد میکنیم میتواند پراهمیت باشد و رابطه آن بصورت زیر است:

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

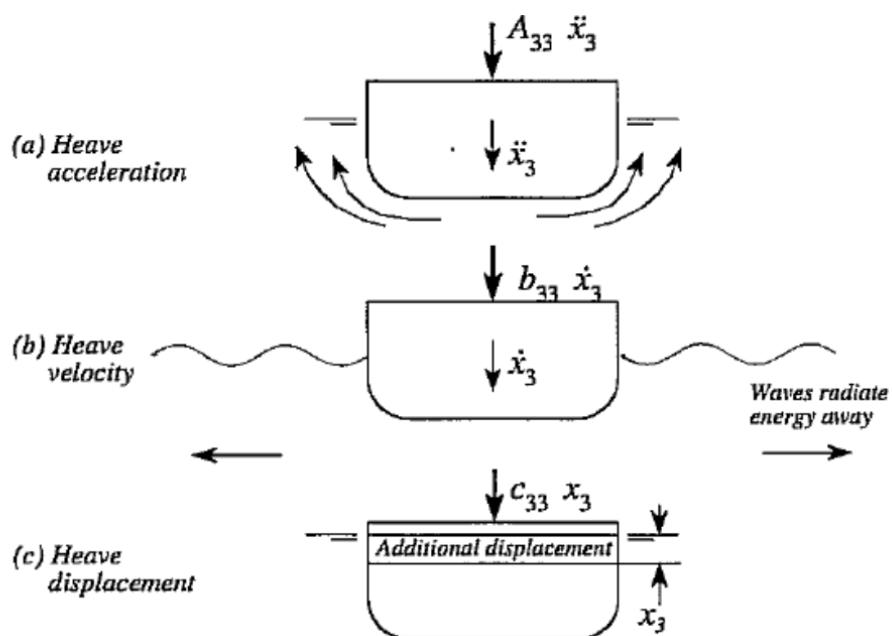
که در آن W فرکانس موج برخوردی، V سرعت شناور و μ زاویه برخورد موج به شناور می‌باشد؛ این مفاهیم در ادامه در روابط مدلسازی هر یک از درجات میتواند پراهمیت باشد.

3-2) معادلات حرکت در درجات آزادی مختلف

در این سمینار 6 درجه آزادی شناور معادلات آن بررسی خواهد شد و ارتباطات بین این درجات آزادی نیز گفته می‌شود، در این بخش فرض یک درجه آزادی داریم و بقیه درجات آزادی مقید شده اند و برای حرکت هیو، پیچ و رول معادلات حاکم بر آن را خواهیم نوشت و در ادامه مدلسازی 6 درجه آزادی شناور را براساس معادلات مشخص می‌کنیم.

3-1) معادله حرکت هیو¹ شناور

حرکت هیو یکی از شش درجه آزادی اصلی حرکت یک شناور در محیط دریایی است. هیو به حرکت عمودی یا حرکت صعود و نزول شناور در امتداد محور عمودی (محور Z) اشاره دارد.



تصویر 3-3) بخش های مختلف معادله حرکت هیو

همانطور که در تصویر 3-3 مشخص شده است حرکت هیو شناور تحت تأثیر چندین عامل است:

¹ Heave motion

نیروهای هیدرودینامیکی^۱: نیروهای ناشی از برخورد امواج دریا با بدنه شناور باعث ایجاد نیروهای نوسانی بر روی شناور می‌شوند. این نیروها باعث ایجاد تحریک در حرکت هیو شناور می‌گردند؛ که در کل باعث ایجاد شتاب و مقداری جرم افزوده خواهند بود (بطور معمول مقدار آن را برابر جرم خود شناور میتوان لحاظ کرد.)

میرایی: میرایی سیستم شناور به دلیل اصطکاک بین شناور و آب و همچنین سیستم‌های کنترلی و میرایی نصب شده بر روی شناور، باعث کاهش دامنه نوسانات حرکت هیو می‌شوند، دقیق داشته باشید که میرایی خطی سازی می‌شود تا بتوان آن را حل کرد، همچنین روی سطح آب وجود دارد و زیر آب بسیار کم می‌باشد.

نیروهای هیدرواستاتیک^۲: نیروی شناوری و نیروی وزن شناور باعث ایجاد یک نیروی برگشتی می‌شوند که به سمت موقعیت تعادل شناور بر روی آب هدایت می‌شوند. این نیروها باعث ایجاد یک سختی هیدرواستاتیک در سیستم می‌گردد، دقیق شود که در زیر آب برای شناورهای زیرسطحی نیروی هیدرواستاتیک وجود ندارد.

در مدل‌سازی حرکت هیو شناور، معمولاً از یک سیستم جرم-فتر-دمپر استفاده می‌شود. در این مدل، جرم شناور، سختی هیدرواستاتیک و میرایی سیستم به عنوان پارامترهای اصلی در نظر گرفته می‌شوند. تحریک موج نیز به عنوان یک نیروی خارجی وارد بر شناور در نظر گرفته می‌شود، رابطه حرکت هیو بصورت زیر می‌باشد:

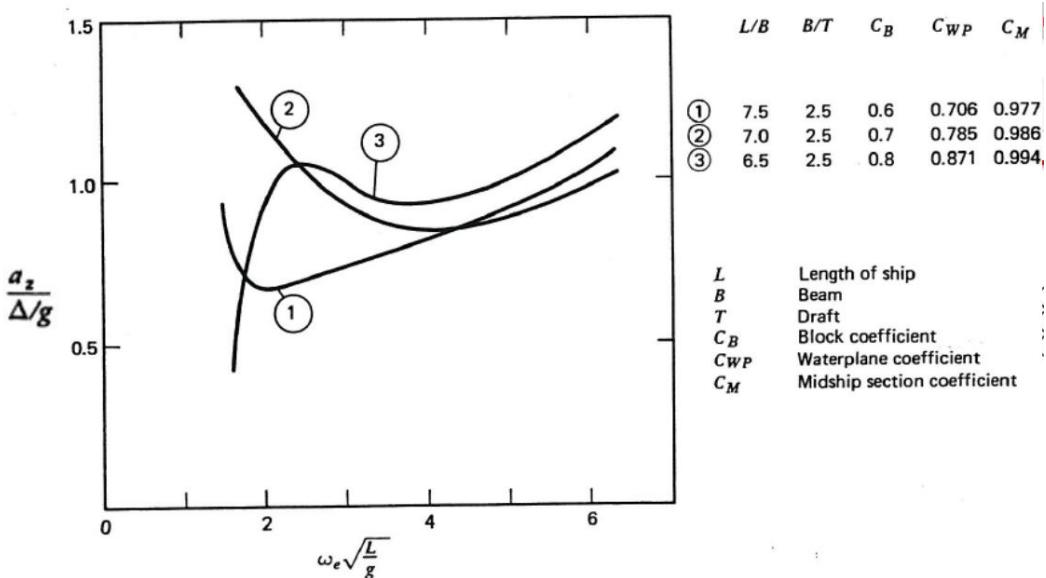
$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_0 \cos \omega_e t$$

با تنظیم مناسب این پارامترها که براساس جداول و روابط قابل یافتن یا با توجه به تست‌های تجربی میتوان آن‌ها را یافت و در ادامه میتوان با حل معادلات حاکم بر سیستم، پاسخ حرکت هیو شناور را در زمان محاسبه و بررسی کرد. این اطلاعات برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های کنترلی و ارزیابی پایداری شناور بسیار حائز اهمیت است.

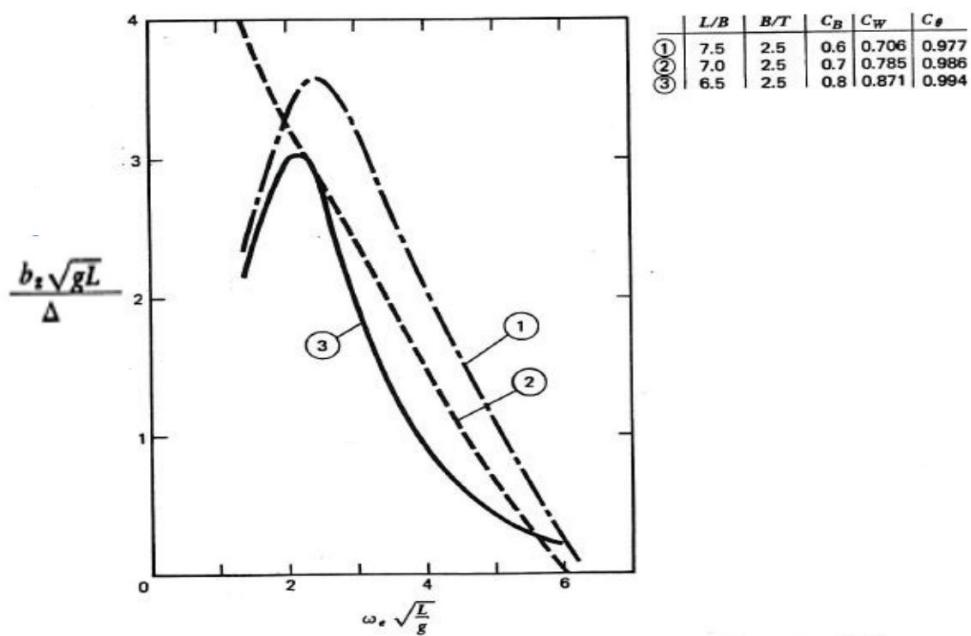
برای یافتن پارامترهای مورد نظر از روش‌های مختلفی میتوان بدست آورد؛ تست تجربی، مدل‌سازی عددی یا استفاده از منحنی‌های تقریبی که در آن براساس آزمایش‌های مختلف مقدار بدست آمده است.

¹ Hydrodynamic force

² Additional Displacement/ Hydrostatic force



نمودار 3-2) نمودار تعیین جرم افزوده شناور در حرکت هیو



نمودار 3-3) تعیین ضریب میرایی شناور در حرکت هیو

همچنین سختی بویانسی در معادله حرکت هیو بصورت زیر تعریف میشود:

$$C = \rho g A_{WP}$$

با استفاده از روابط مشخص شده معادله حرکت هیو را میتوان تعیین کرد.

3-2-2) معادله حرکت پیچ^۱ شناور

مانند حرکت هیو، در مدل سازی حرکت پیچ شناور نیز از یک سیستم جرم-فنر-دمپر استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی این مدل شامل جرم شناور و ممان اینرسی، سختی هیدرواستاتیک و میرایی سیستم هستند. تحریک امواج دریا نیز به عنوان ورودی به این سیستم در نظر گرفته می‌شود؛ زوایای حرکت پیچ باید کوچکتر از ۵ درجه باشند تا بتوانیم خطی آن را تحلیل کنیم، در غیر این طورت نیازمند به حل دقیق زوایا می‌باشیم.

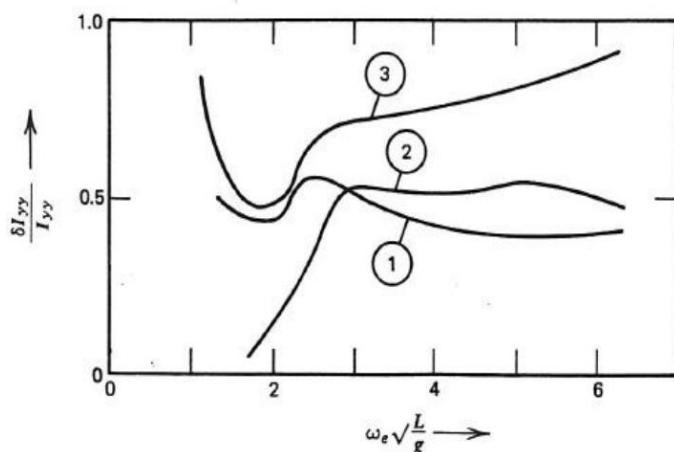
$$a \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + c\theta = M_0 \cos \omega_e t$$

معادله بالا پارامترهایی دارد که باید آن‌ها را بیابیم بصورتی که برای ممان اینرسی افزوده داریم که (Kyy) شعاع زیرا سیون، (Mمان اینرسی) :

$$a = Iyy + \delta Iyy = \frac{\Delta}{g} kyy^2 + \delta Iyy = \frac{\Delta'}{g} kyy^2$$

$$I_{yy} \approx \rho \int_{-L/2}^{L/2} A(x)x^2 dx$$

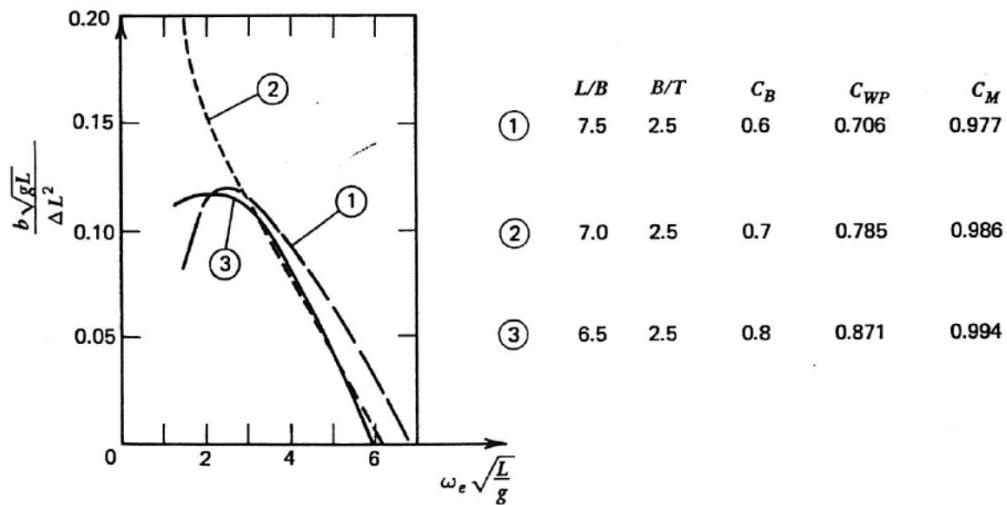
$$Kyy = (0.24L, 0.25L)$$



| | L/B | B/T | C_B | C_{WP} | C_M |
|---|-------|-------|-------|----------|-------|
| 1 | 7.5 | 2.5 | 0.6 | 0.706 | 0.977 |
| 2 | 7.0 | 2.5 | 0.7 | 0.785 | 0.986 |
| 3 | 6.5 | 2.5 | 0.8 | 0.871 | 0.994 |

نمودار 3-4) تعیین ضریب ممان افزوده شناور در حرکت پیچ

¹ Pitch motion



نمودار 3-5) تعیین ضریب میرایی شناور در حرکت پیچ

برای یافتن ضریب فنریت، بدلیل آنکه ماهیت سختی بولانسی دارد از رابطه زیر استفاده میکنیم:

$$c\theta = \rho g \theta \int_{-L/2}^{L/2} x^3 y(x) dx$$

$$C = \Delta \times GML$$

همچنین نیروی وارد بر شناور در حرکت پیچ بصورت زیر می باشد:

$$M_0 = 2\rho g \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} y(x) \times \sin(kx \cos \mu) dx$$

پاسخ این معادله را میتوانیم با درج این ضرایب بیابیم، باید توجه داشت که یک اختلاف فاز بین پاسخ و موج وجود دارد که این اختلاف فاز بین پاسخ و نیروی موج (1) و اختلاف فاز بین نیروی موج و موج (2) می باشد که حاصل جمع آن را اختلاف فاز پاسخ می نامیم.

بررسی و مدل سازی حرکت پیچ شناور به منظور طراحی و بهینه سازی سیستم های کنترلی و ارزیابی پایداری شناور بسیار اهمیت دارد، به خصوص در حرکت های اسلمینگ این موضوع اهمیت دوچندانی را دارد چون شناور با شتاب های بالایی به آب برخورد می کند.

3-2-3 معادله حرکت رول¹ شناور

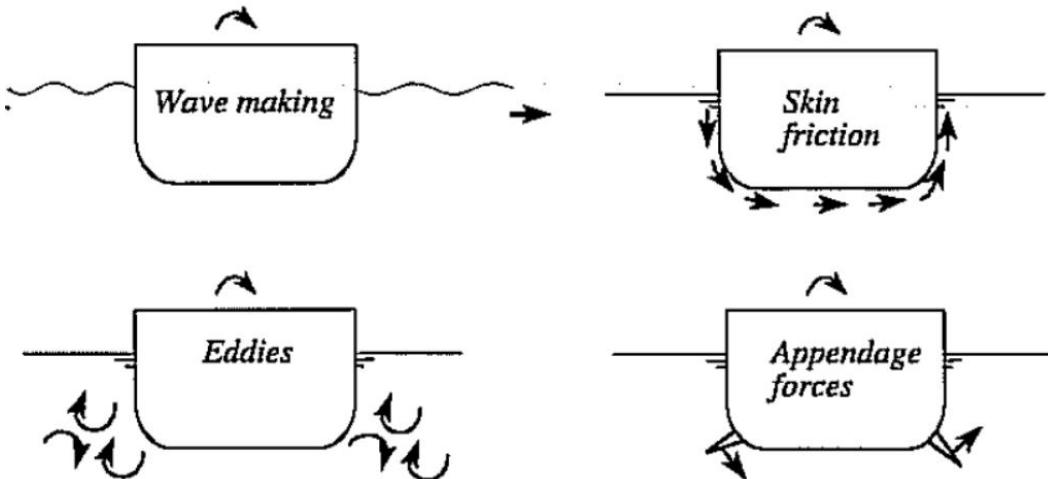
حرکت رول کشتی نیز یکی از حرکات بسیار مهم شمرده می‌شود، این حرکت غلتش عرضی می‌باشد و فرضیات قبلی مانند تحلیل در درجه های پایین همچنان باقی است، معادله حرکت رول بصورت زیر می‌باشد:

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

که ضریب برابر می‌باشد با I_{xx} ممان اینرسی حول محور طولی (بدنه صلب) و δI_{xx} نشان دهنده ممان توده ای از آب که تحت تاثیر این حرکت می‌باشد- فرض می‌شود $(\delta\Delta = 1.2\Delta)$

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

$$K_{xx} = (0.33B, 0.45B)$$



تصویر 3-4) عوامل ایجاد دمپینگ

همچنین دمپینگی ناشی از ساخت موج، اصطکاک های روی سطح، وجود بیلچ کیل²، وجود اغتشاشات هوا و تنش های سطحی آب باشد که به سبب اینکه عوامل مختلفی روی آن تاثیرگذار هستند غیرخطی است و باید آن را خطی سازی کرد.

$$B(\dot{\phi}) = B_1 \dot{\phi} + B_2 |\dot{\phi}| \dot{\phi} + B_3 \dot{\phi}^3$$

¹ Pitch motion

² Bilge Keel

که در خطی سازی به صورت زیر تقریب زده خواهد شد:

$$B_{eq} = B_f + B_e + B_w + B_L + B_{BK}$$

میرایی اصطکاکی در اثر تنش اصطکاکی سیالات روی سطح بدن کشته ایجاد می شود و زمانی که کشته می چرخد شکل می گیرد. بنابراین می توان تصور کرد که تحت تأثیر امواج باشد. برای سرعت صفر ($U=0$)، کاتو (1965) بیانی برای میرایی اصطکاک می دهد. در یک میدان جریان آرام بر حسب ضریب میرایی خطی معادل به شرح زیر است:

$$B_{f0} = \frac{4}{3\pi} \rho S r_e^3 R_0 \omega C_f$$

که C_f به صورت زیر می باشد:

$$C_f = 1.328 \left[\frac{2\pi v}{3.22 r_e^2 R_0^2 \omega} \right]^{1/2}$$

و r_e بصورت زیر می باشد:

$$r_e = \frac{1}{\pi} \left[(0.887 + 0.145 C_B) \frac{S}{L} - 2OG \right]$$

در روابط بالا p چگالی سیال، v ویسکوزیته سیال، W فرکانس موج، B, D, L به ترتیب طول و ارتفاع و عرض شناور، C_B ضریب بلوكه شناور، R_0 شاعع موثر حرکت رول (بر حسب رادیان)، OG فاصله بین still water و مرکز ثقل شناور می باشد و S نیز سطح خیس شده شناور می باشد.

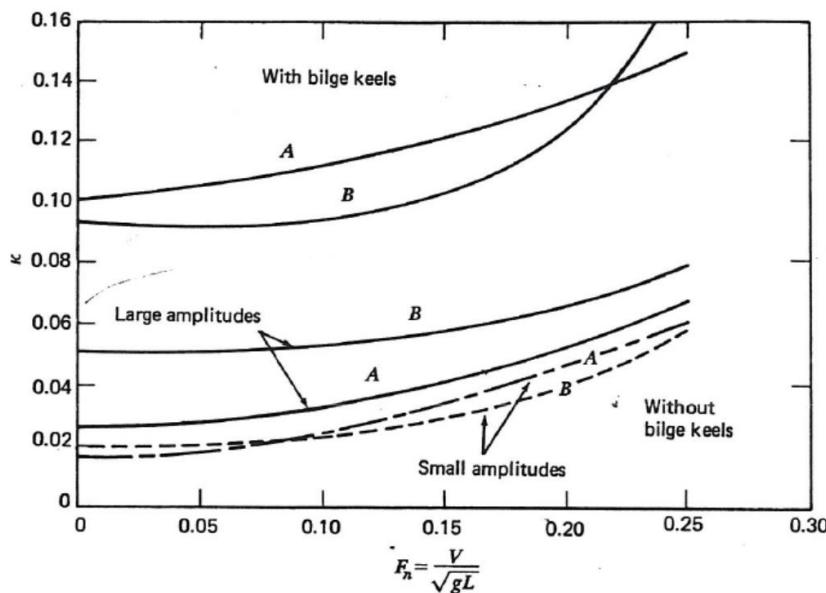
میرایی گردابی در نظر گرفته شده برای یک بدن در رول به دلیل جدا شدن در گوشه های تیز و گردابه های ایجاد شده توسط جداسازی جریان می باشد. این ناشی از تغییر فشار در گوشه های تیز بدن به دلیل جدا شدن جریان در پایین کشته می باشد.

$$B_{e0} = \frac{4}{3\pi} \rho D^4 R_0 \omega C_p C_R$$

و همچنین ضریب دمپینگ ناشی از موج میتواند به صورت زیر باشد:

$$B_w = B_{w0} \frac{1}{2} \{ [(A_2 + 1) + (A_2 - 1) \tanh 20(\tau - 0.3)] + (2A_1 - A_2 - 1) \exp(-150(\tau - 0.25)^2) \}$$

و پارامتر های دیگر ضریب میرایی بدین صورت میتوان براساس منبع موجود یافت.

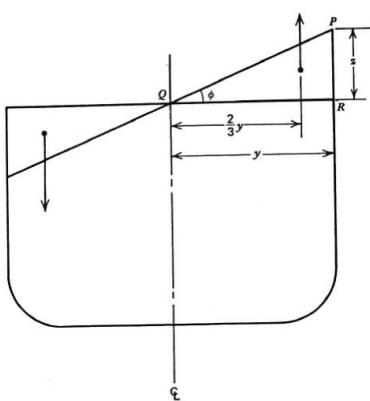


نمودار 3-6) تعیین ضریب دمپینگ در حرکت رول

همچنین براساس برخی منابع نمودار هایی برای تخمین ضریب دمپینگ نیز وجود دارد که در نمودار 3-3 براساس عدد فرود عملکردی شناور، ضریب میرایی را میتوان تخمین زد.

برای سختی که از جنس هیدرواستاتیکی نیز می باشد به صورت زیر داریم :

$$C = \rho g \nabla G M T$$



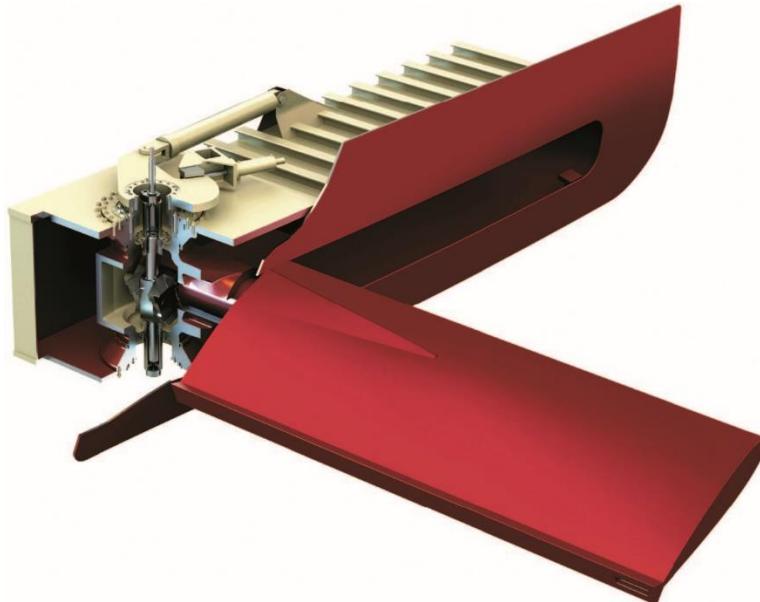
تصویر 3-5) تخمین ممان وارد بر شناور

ممان وارد شده برای محاسبه حرکت رول شناور بدین صورت محاسبه میشود که موج را خطی فرض میکنیم، البته این مشروط به آن است که طول موج و ارتفاع آن به چه صورتی باشد تا خطی فرض شود؛ شناور در سکشن های مختلف ممان مختلفی دارد و باید انتگرال گیری شود. ممان ماکزیمم در حالت رخ می دهد و به صورت زیر تخمین زده می شود:

$$M_0 = \rho g \nabla k \zeta G M t$$

بدین صورت معادله حرکت رول را میتوانیم تعیین کنیم و حرکت رول را تخمین بزنیم.

به دلیل آنکه فرکانس غلتتش عرضی میتواند تاثیراتی روی کارکرد شناور و کارکرد خدمه داشته باشد، باید آن را کنترل کرد، بدین منظور از Fin stabilizers یا استابیلایزرهای بالهای، یکی از روش‌های مؤثر در کاهش حرکت رول (Roll) کشتی هستند.



تصویر 3-6) شماتیک fin stabilizer در کشتی

این سیستم‌ها به طور چشمگیری می‌توانند میرایی حرکت رول را افزایش دهند. اثر این سیستم‌ها به شرح زیر است:

ایجاد گشتاور بازگرداننده:

فین‌های استابیلایزر در هنگام چرخش کشتی به دور محور طولی (رول)، با ایجاد نیروهای هیدرودینامیکی، گشتاورهای بازگرداننده‌ای را در جهت مخالف رول ایجاد می‌کنند، این گشتاورها باعث می‌شوند که کشتی به موقعیت تعادل خود بازگردد و از ادامه چرخش رول جلوگیری کنند.

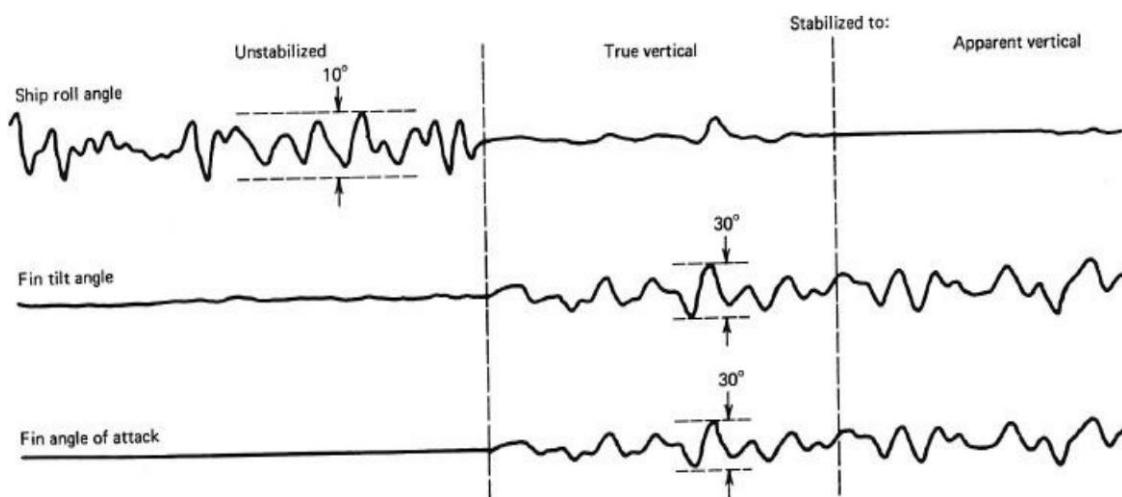
افزایش میرایی:

حرکت رول کشتی باعث ایجاد نیروهای هیدرودینامیکی بر روی فین‌های استابیلایزر می‌شود، این نیروها باعث ایجاد نیروهای اصطکاکی و در نتیجه افزایش میرایی حرکت رول می‌گردند؛ با افزایش میرایی، دامنه نوسانات حرکت رول کاهش می‌یابد.

کنترل فعال:

بسیاری از سیستم‌های استabilایزر بالهای دارای قابلیت کنترل فعال هستند، در این حالت، حسگرهای سنسور میزان رول، سرعت رول و شتاب رول را اندازه‌گیری کرده و سیستم کنترلی بر اساس این اطلاعات، حرکت فین‌های استabilایزر را به طور مؤثرتری کنترل می‌کند.

این سیستم‌های کنترل فعال می‌توانند میرایی حرکت رول را به میزان قابل توجهی افزایش دهند.



تصویر 3-7) منحنی حرکت رول شناور قبل و بعد از فعال شدن stabilizer

در مجموع، استabilایزرهای بالهای با ایجاد گشتاورهای بازگرداننده و افزایش میرایی، به طور چشمگیری می‌توانند حرکت رول کشتی را کاهش دهند و پایداری آن را بهبود بخشدند. استفاده از این سیستم‌ها به ویژه در کشتی‌های بزرگ و سنگین که مستعد حرکات رول هستند، بسیار مفید و موثر است.

در بخش بعدی به ارتباط بین درجات آزادی میپردازیم.

3-3 ترکیب 6 درجه آزادی با توجه به کوپل

در بخش قبلی برای تحلیل هر یک از درجات آزادی، بقیه درجات را مقید کردیم و معادلات آن را مشخص نمودیم؛ در این بخش ترکیب همه درجات را میتوانیم مدل کنیم.

$$Mij\ddot{\eta}j = \sum F$$

که نیروی آن ناشی از Excitation، Restoring، Radiation و (نیروی موج) میباشد.

معادلات آن بصورت ماتریسی بشکل زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & Mz_C & 0 \\ 0 & M & 0 & -Mz_C & 0 & Mx_C \\ 0 & 0 & M & 0 & -Mx_C & 0 \\ 0 & -Mz_C & 0 & I_{44} & 0 & -I_{46} \\ Mz_C & 0 & -Mx_C & 0 & I_{55} & 0 \\ 0 & Mx_C & 0 & -I_{64} & 0 & I_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} & 0 & B_{15} & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ B_{31} & 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & B_{62} & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\xi}_3 \\ \dot{\xi}_4 \\ \dot{\xi}_5 \\ \dot{\xi}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \\ \ddot{\xi}_3 \\ \ddot{\xi}_4 \\ \ddot{\xi}_5 \\ \ddot{\xi}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix}$$

در این معادله که یک معادله کامل 6 درجه آزادی شناور است تانیرات یک حرکت بر حرکت دیگر آورده شده است، بطور مثال چند مورد آن را در ادامه بررسی میکنیم؛ a16 surge بر yaw تاثیر حرکت چون surge می باشد که 0 است چون تقارن وجود دارد، c11 و c22 صفر می باشد چون فنریت آن صفر است. c13 در سرعت های پایین صفر می باشد، با داشتن این مقادیر میتوانیم پاسخ را پیدا کنیم و پاسخ حرکت شناور را در هر یک از درجات آزادی با توجه به کوپل درجات آزادی بیابیم.

در معادله بالا ζ از 1 تا 6 به ترتیب Yaw، Pitch، Roll، Heave، sway و surge می باشد.

در جهت ساده سازی میتوانیم فرض کنیم که حرکات heave، pitch، surge با یکدیگر در جهت طولی کوپل هستند و همچنین yaw, roll, sway با یکدیگر در جهت عرضی کوپل می باشند

فصل چهارم : تحلیل حرکت دینامیکی شناور

1-4) مدلسازی حرکت رول شناور

با توجه به بخش 3-2-3 معادله حرکت شناور را میتوانیم بنویسیم، در این برنامه a, b, c را به عنوان ورودی براساس پارامتر های داده شده توسط کاربر مشخص میکنیم.

روابط داده شده است در کد مورد نظر و مقادیر ورودی باید توسط کاربر داده شود که بخش راهنمای آن در بخش 3-2-3 آورده شده است.

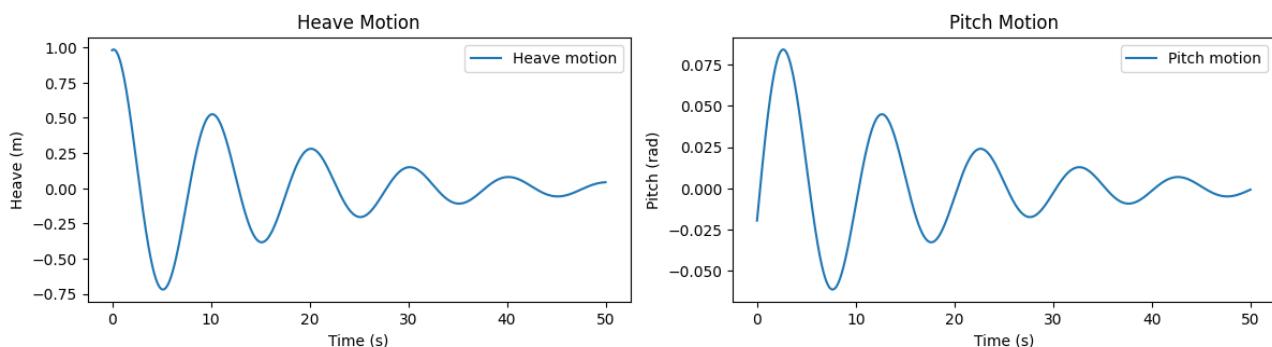
در پیوست کد این مدلسازی آورده شده است.

2-4) مدلسازی حرکت پیج و هیو در حالت کوپل

براساس مفاهیم گفته شده در بخش 3-2-3 و 2-2-3 در رابطه با هر یک از این حرکات و ترکیب آنها میتوانیم ارتباط آنها را بیابیم.

$$\begin{bmatrix} M + A_{33} & -Mx_C + A_{35} \\ -Mx_C + A_{53} & A_{55} + I_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_3 \\ \ddot{\xi}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_3 \\ \dot{\xi}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_3 \\ \xi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{ext,3} \\ F_{ext,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_0 F_3^A e^{i\omega t} \\ \eta_0 F_5^A e^{i\omega t} \end{bmatrix}$$

معادله حرکت آن را تعریف کنیم، مشخصات شناور را میتوان تعریف نمود در ابتدا و به عنوان ورودی کاربر میتواند به کد بدهد، خروجی آن به ازای مقادیری که در یک پروژه وجود داشته است به صورت نمودار های زیر میباشد.



نمودار 4-1) حرکت پیج و هیو بر حسب زمان

پیوست کد:

کد حرکت دینامیکی رول -

```
- import numpy as np
- import matplotlib.pyplot as plt
- from scipy.integrate import odeint

-
- def second_order_ode(y, t, a, b, c, M0, w):
-     theta, theta_dot = y
-     theta_dot_dot = (-b * theta_dot - c * theta + M0 * np.cos(w * t)) / a    #teta**
-     return [theta_dot, theta_dot_dot]

-
- def solve_second_order_ode(a, b, c, M0, w, initial_theta,
initial_theta_dot, t_span):

-     initial_conditions = [initial_theta, initial_theta_dot]
-     t = np.linspace(t_span[0], t_span[1], 1000)
-     solution = odeint(second_order_ode, initial_conditions, t,
args=(a, b, c, M0, w))
-     return solution
- #user
- a = float(input("Enter the value of 'a': "))
- b = float(input("Enter the value of 'b': "))
- c = float(input("Enter the value of 'c': "))
- M0 = float(input("Enter the value of 'M0': "))
- w = float(input("Enter the value of 'w': "))
- initial_theta = float(input("Enter the initial roll angle: "))
- initial_theta_dot = float(input("Enter the initial roll rate: "))
- t_span = (0, 50)

-
- solution = solve_second_order_ode(a, b, c, M0, w, initial_theta,
initial_theta_dot, t_span)

-
- # Plot the solution
- plt.figure(figsize=(10, 6))
- plt.plot(np.linspace(t_span[0], t_span[1], solution.shape[0]),
solution[:, 0])
- plt.xlabel('Time (s)')
- plt.ylabel('Roll Angle (rad)')
- plt.title('Solution of the Second-Order ODE')
- plt.grid()
- plt.show()
```

کد حرکت کوپل پیچ و هیو -

```
- import numpy as np
- import matplotlib.pyplot as plt

-
- # Get user input
- m = float(input("Enter the mass of the ship (kg): "))
- I_yy = float(input("Enter the moment of inertia about the y-axis (kg.m^2): "))
- k_h = float(input("Enter the heave stiffness (N/m): "))
- k_p = float(input("Enter the pitch stiffness (N.m/rad): "))
- b_h = float(input("Enter the heave damping coefficient (N.s/m): "))
- b_p = float(input("Enter the pitch damping coefficient (N.m.s/rad): "))
- wave_height = float(input("Enter the wave height (m): "))
- wave_period = float(input("Enter the wave period (s): "))

-
- zeta_h = b_h / (2 * np.sqrt(m * k_h)) # Heave damping ratio
- zeta_p = b_p / (2 * np.sqrt(I_yy * k_p)) # Pitch damping ratio
- wave_frequency = 2 * np.pi / wave_period # Wave frequency (rad/s)

-
- t = np.linspace(0, 50, 2000) # Time range (s)

-
- z = (wave_height / 2) * np.exp(-zeta_h * wave_frequency * t) * np.cos(wave_frequency * t - np.arctan(2 * zeta_h)) # Heave motion
- theta = (wave_height / (2 * wave_period)) * np.exp(-zeta_p * wave_frequency * t) * np.sin(wave_frequency * t - np.arctan(2 * zeta_p)) # Pitch motion

-
- # Calculate the heave and pitch forces and moments
- z_dot = np.gradient(z, t) # Calculate the derivative of heave motion
- theta_dot = np.gradient(theta, t) # Calculate the derivative of pitch motion

-
- F_h = k_h * z + b_h * z_dot # Heave force
- M_p = k_p * theta + b_p * theta_dot # Pitch moment

-
- # Calculate the heave-pitch coupled motion
- w_n_h = np.sqrt(k_h / m) # Heave natural frequency
- w_n_p = np.sqrt(k_p / I_yy) # Pitch natural frequency
- z_c = z - (I_yy / m) * theta # Coupled heave motion
- theta_c = theta - (m / I_yy) * z # Coupled pitch motion

-
- # Plot the results
```

```
- plt.figure(figsize=(12, 6))
-
- plt.subplot(2, 2, 1)
- plt.plot(t, z, label='Heave motion')
- plt.xlabel('Time (s)')
- plt.ylabel('Heave (m)')
- plt.title('Heave Motion')
- plt.legend()
-
- plt.subplot(2, 2, 2)
- plt.plot(t, theta, label='Pitch motion')
- plt.xlabel('Time (s)')
- plt.ylabel('Pitch (rad)')
- plt.title('Pitch Motion')
- plt.legend()
-
- plt.tight_layout()
- plt.show()
```

مراجع:

1. Lectures of Dynamic Marine of Vehicle of Dr Seif
2. Simulation of Ship Motions in a Seaway, Harald Böttcher
3. Empirical calculation of roll damping for ships and barges
4. Empirical calculation of roll damping for ships and barges, Empirical calculation of roll damping for ships and barges
5. Effect of Coupled Heave-Pitch Motion on a Vessel Moving in Regular Water Ways, Harry-Ameh