

آنالیز و کنترل مقید حرکت غلتش عرضی یک شناور نظامی با باله‌های فعال

حمید ملکی زاده^۱، محمدرضا جاهد مطلق^۲، بیژن معاونی^۳، علی معرفیان پور^۴

h.malekizadeh@srbiau.ac.ir

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق گرایش کنترل دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
- ۲- دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۴- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

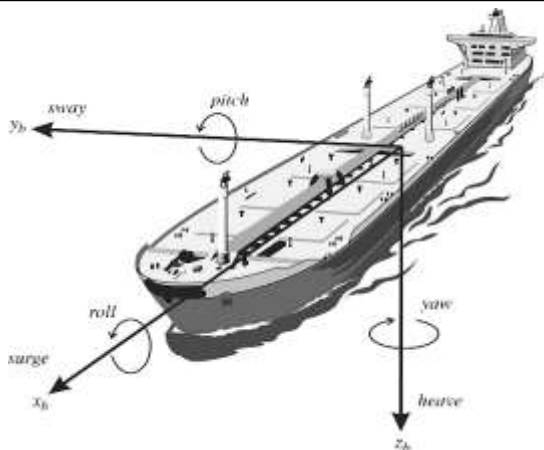
چکیده

یکی از مهم‌ترین حرکات یک شناور در امواج دریا، حرکت غلتش عرضی است. شتاب‌های عرضی و عمودی ناشی از این حرکت، باعث اختلال در عملکرد خدمه، افزایش زمان مأموریت، دریازدگی کارکنان، آسیب رساندن به محموله، ناکارآمدی و کاهش عملکرد تجهیزات الکترونیکی، واژگونی شناور، افزایش مصرف انرژی و در کل سبب ناپایداری عرضی شناور می‌گردد. جهت جلوگیری از این پیامدها، انتخاب پایدارساز و سیستم کنترلی مناسب ضروری است. هدف از این تحقیق این است که ضمن آنالیز حرکت غلتش عرضی یک شناور نظامی، کنترل‌کننده مناسب جهت کاهش دامنه این حرکت با استفاده از پایدارساز باله‌های فعال طراحی گردد. بدین منظور ابتدا مدل مناسب برای حرکت غلتش عرضی شناور و همچنین پایدارساز باله استخراج شده است. از آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی به منظور بررسی رفتار باله‌ها با سیال و همچنین محاسبه ضریب نیروی برآ باله‌ها استفاده شده است. یک کنترل‌کننده LQR مقید به منظور کنترل حرکت غلتش عرضی در حضور محدودیت‌های عملگر الکتروهیدرولیکی باله‌ها طراحی و استفاده شده است. به منظور افزایش اعتبار نتایج این تحقیق، عملکرد این کنترل‌کننده با نتایج یک کنترل‌کننده PID مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی کاهش قابل توجه دامنه غلتش عرضی و دست‌یابی به استاندارد ناتو در این زمینه را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: حرکت غلتش عرضی شناور، باله‌های فعال، آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی و کنترل‌کننده LQR مقید.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۳/۳۱



شکل (۱) حرکات شش درجه آزادی شناور [۲].

برای هر نوع شناور، با توجه به کاربردی که دارد (حمل و نقل، نشست و برخاست هلی کوپتر، ماهی گیری، گشت، مسافربری و غیره) تمامی حرکات دینامیکی شناور مطلوب نیست و حرکات نامطلوب که ناشی از محیط اطراف است بوجود می آید. مسئله ای که در دریامانی^۳ شناورها مطرح می گردد این است که حرکات دینامیکی شناور باید طوری باشد که شناور قابلیت عملیات پذیری داشته باشد، یعنی بتواند با توجه به نوع کاربری، مأموریت خود را به خوبی انجام دهد، از این رو همیشه تلاش بر این است که در طی فرایند طراحی، جانمایی و بارگذاری شرایط به گونه ای باشد که حرکات دینامیکی شناور در محدوده قابل قبولی باشد. در چنین وضعیتی، نیاز به سیستم های پایدارکننده^۴ به منظور جلوگیری از حرکات نامطلوب احساس می شود [۴]. یکی از مسائلی که تأثیر مهمی روی عملکرد و توانایی شناورها و سازه های دریایی دارد، سیستم های پایدارکننده حرکات شناور می باشد که از آن برای کاهش حرکات نامطلوب در مسیر دریایی استفاده می شود. با کمک این ابزار که نقش عملگر را در حالت فعال در یک سیستم کنترل حلقه بسته دارند، دامنه، سرعت، شتاب و همچنین تأثیرات دینامیکی مرتبط به طور قابل توجهی کاهش می یابد. در حقیقت سیستم های کاهنده غلتش عرضی، به شناور این امکان را می دهند که در شرایط سخت دریایی و در مدت زمان طولانی تر قابلیت انجام عملیات مورد نظر خود را داشته باشد [۴].

۱- مقدمه

تقابل نیروها و گشتاورهای مؤثر بر رفتار شناور با بدنه آن موجب حرکات شش درجه آزادی، شامل سه حرکت انتقالی (جابجایی های طولی، عرضی و عمودی)^۱ و سه حرکت دورانی (غلتش های طولی، افقی و عرضی)^۲ مطابق شکل (۱) می شود. از میان حرکات یک شناور در دریا حرکت غلتش عرضی یکی از مهمترین این حرکات می باشد [۱]. دلایل اهمیت حرکت غلتش عرضی و نیاز به پایدارسازی و کنترل آن، بیشتر در موارد زیر است [۲] و [۳].

- شتاب عرضی تولید شده بوسیله حرکت غلتش عرضی در عملکرد خدمه اختلال ایجاد می کند و مدت زمان انجام یک مأموریت توسط کارکنان افزایش پیدا می کند و در برخی مواقع به طور کامل از انجام کار باز می دارد. در این زمینه می توان به شناورهای نظامی اشاره کرد که این موضوع سبب می شود شناور غیر عملیاتی شود.

- شتاب عمودی ایجاد شده بوسیله حرکت غلتش عرضی شناور در مکان های دور از خط مرکزی شناور، می تواند سبب دریازدگی کارکنان شود.

- شتاب غلتش عرضی سبب آسیب به محموله شناور می شود، بخصوص وقتی که بار شناور جزء بارهای نرم مانند میوه جات باشد. همچنین این شتاب می تواند سبب باز شدن بسته های بار شود.

- شتاب و زاویه غلتش عرضی در شناورهای نظامی سبب ناکارآمدی تجهیزات و کاهش عملکرد مناسب خواهد شد. بسیاری از تجهیزات الکترونیکی بازدهی خود را از دست داده و تجهیزاتی مثل لانچرها، سیستم های ردیابی و هدف گیری سلاح ها و کارکرد سونار دچار اختلال خواهند شد.

- علت اصلی واژگونی شناور در امواج، از دست دادن پایداری در حرکت غلتش عرضی است.

- کاهش حرکت غلتش عرضی باعث کاهش حرکت غلتش افقی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی برای حرکت سکان پاشنه می شود.

- اگر غلتش عرضی در امواج در نظر گرفته شود، می توان تداخل غلتش عرضی با سایر حرکات را نادیده فرض کرد.

³ Seakeeping

⁴ Stabilizer

¹ Surge, Sway and Heave

² Pitch, Yaw and Roll

مشترک برای غلبه بر محدودیت‌ها، کاهش بهره کنترل کننده است. اما ممکن است همیشه شرایط بهم‌ریختگی دینامیکی وجود نداشته باشد، بنابراین این روش می‌تواند باعث کاهش عملکرد کلی سیستم کنترل شود. یک روش کنترل جایگزین که می‌تواند برای فائق آمدن بر محدودیت‌ها اعمال شود، کنترل LQR مقید است [۵]. مرجع [۱۵] به منظور کاهش حرکت غلتش عرضی در شناورهای کروز، کنترل کننده LQR را برای امواج منظم و کنترل کننده LQR با فرکانس‌های وزنی را برای امواج نامنظم استفاده کرده است اما در این مرجع محدودیت‌های پایدارساز باله در طراحی کنترل کننده لحاظ نشده است.

به طور کلی، می‌توان روند و مواردی که در این مقاله انجام شده است را به صورت زیر مشخص کرد.

در بخش دوم، انتخاب یک شناور نظامی و بررسی قابلیت دریانوردی آن، بدون سیستم‌های پایدار کننده حرکت غلتش عرضی با استفاده از نرم افزار مکسرف^۵ در حوزه فرکانس انجام شده است.

در بخش سوم، انتخاب و تحلیل رفتار دینامیکی سیستم پایدارساز به کمک روش آنالیز سیالات دینامیک محاسباتی انجام شده است.

در بخش چهارم، مدلسازی حرکت غلتش عرضی شناور نمونه به همراه سیستم پایدارساز باله انجام شده است.

در بخش پنجم، طراحی کنترل کننده LQR مقید برای مدل حرکت غلتش عرضی به همراه عملگر باله صورت گرفته است.

در بخش ششم، نتایج شبیه‌سازی ضمن مقایسه با نتایج حاصل از کنترل کننده PID، بحث و بررسی شده و تأثیر کنترل کننده به همراه پایدارساز باله‌های فعال در کاهش دامنه حرکت غلتش عرضی و رسیدن به استاندارد ناتو برای زوایای مجاز غلتش عرضی جهت عملیاتی بودن شناور مشخص شده است.

۲- بررسی دریامانی غلتش عرضی شناور نمونه

در بررسی دریامانی که با استفاده از نرم‌افزار هیدرودینامیکی مکسرف انجام شده است، معلومات مسأله شامل مشخصات بدنه شناور، اطلاعات موج و محیط اطراف و مجهولات شامل

سیستم‌های پایدارساز غلتش عرضی بیش از سه دهه است که مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱]. انواع مختلفی از ابزارهای ضد غلتش عرضی به منظور کاهش حرکت غلتش عرضی نامطلوب معرفی شده‌اند [۵]. پایدارساز باله^۱ از نوع فعال به دلیل کاهش بیش از ۷۵ درصد دامنه غلتش عرضی و همچنین محل قرارگیری آن در زیر خط آبخور و نزدیک به مرکز جرم شناور که تداخل غلتش عرضی با سایر حرکات را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، به عنوان مؤثرترین روش ضد غلتش عرضی برای شناورهای با سرعت متوسط به بالا در نظر گرفته شده است [۶]. پایدارسازها با کنترل زاویه مکانیکی باله بر اساس زاویه و سرعت غلتش عرضی، دامنه حرکت غلتش عرضی را کاهش می‌دهند [۷].

دو محدودیت اصلی روی پایدارساز باله وجود دارد که شامل اشباع زاویه مکانیکی باله و بهم‌ریختگی دینامیکی^۲ می‌باشد [۳]. اشباع زاویه مکانیکی باله باعث هدر رفت انرژی می‌شود که یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها برای یک شناور نظامی است. بهم‌ریختگی دینامیکی یک رخداد غیرخطی ناشی از اثرات هیدرودینامیکی است. وقتی زاویه برخورد باله با سیال به آستانه مشخصی می‌رسد، بهم‌ریختگی دینامیکی رخ می‌دهد که سبب از دست رفتن گشتاور غلتش عرضی می‌شود که نتیجه آن کاهش عملکرد سیستم کنترل است [۸]. بهم‌ریختگی دینامیکی وابسته به ضریب نیروی برآ^۳ باله است و با زاویه مؤثر برخورد بین سیال و باله تغییر می‌کند. بنابراین محققین به منظور آنالیز رفتار باله در سیال و محاسبه ضریب نیروی برآ از نتایج تجربی و آزمایشگاهی [۹]، آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی^۴ [۱۰] و روابط تجربی [۱۱] استفاده کرده‌اند. در این مقاله از روش‌های دوم و سوم برای محاسبه و رسم ضریب نیروی برآ بر اساس زاویه مؤثر برخورد باله با سیال و همچنین آنالیز سیال استفاده شده است و نتایج این دو روش با هم مقایسه گردیده است. کنترل کننده PID بطور معمول برای سیستم‌های پایدارساز

باله استفاده شده است، بطور نمونه در [۱۰]، [۱۲] و [۱۳] اما به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن مدل و همچنین محدودیت‌های روی پایدارساز باله، دستیابی به عملکرد بهینه سیستم کنترل خیلی سخت است [۱۴]. یک رویکرد

⁴ Computational Fluid Dynamics (CFD)

⁵ Maxsurf

¹ Fin Stabilizer

² Dynamic Stall

³ Lift

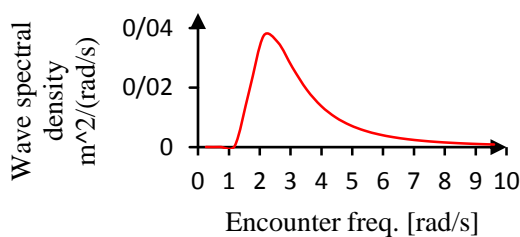
$$S_{ITTC}(\omega) = \frac{172.75 \bar{H}_{1/3}^2}{\omega^5 P_{avr}^4} \exp\left(-\frac{691}{\omega^4} P_{avr}^4\right) \quad (1)$$

که $\bar{H}_{1/3}$ شاخص ارتفاع موج و P_{avr} شاخص دوره تناوب موج است. برای حالت دریا^۲ پایین و متوسط $\bar{H}_{1/3} < 4m$ و برای حالت دریای متوسط و شدید $4m < \bar{H}_{1/3} < 8m$ است. به طور مثال برای سرعت ۲۵ نات و در حالت موج از روبرو طیف موج به صورت شکل (۳) است.

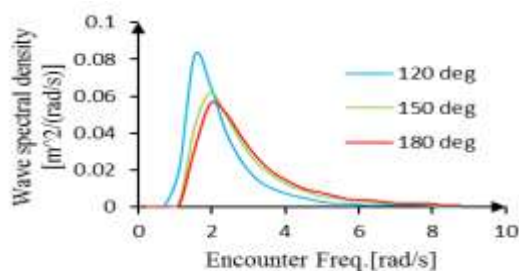
۳-۲- آنالیز حرکت غلتش عرضی شناور در موج

شکل‌های (۴) و (۵) نمودارها و مقادیر مربوط به طیف برخورد و طیف پاسخ حرکت غلتش عرضی را در سه زاویه ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ در سرعت ۲۰ نات نشان می‌دهند. از آنجایی که ارتفاع موج با انرژی موج رابطه مستقیم دارد، طیف‌های موج، طیف چگالی انرژی را برحسب فرکانس بیان می‌کند.

پاسخ شناور به نیروی تحریک موج نیز مانند موج، رفتاری نامنظم دارد و برای ارائه جامع و کلی این رفتار نیز از روش طیفی استفاده می‌شود.



شکل (۳) طیف موج ITTC برای $\bar{H}_{1/3} = 1.4m$ و $P_{avr} = 4.3s$



شکل (۴) نمودار طیف برخورد در سرعت ۲۰ نات.

ضرایب هیدرودینامیک و پاسخ شناور به نیروهای تحریک می‌باشد.

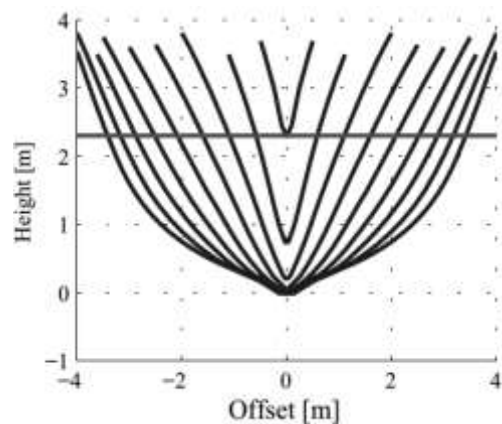
هدف از این بخش، ارائه وضعیت دریامانی حرکت غلتش عرضی و شتاب‌های ناشی از آن می‌باشد. مطالبی که در این بخش ارائه می‌شود معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد سیستم پایدارساز خواهد بود.

۱-۲- مشخصات شناور

شناور مورد مطالعه یک شناور نظامی است که فرم بدنه آن با مشخصات جدول (۱) به صورت شکل (۲) است.

۲-۲- مشخصات طیف موج

طیف موج شامل ارتفاع امواج بر حسب فرکانس است. طیف مورد استفاده برای مدل موج در این مقاله طیف^۱ ITTC می‌باشد که از دقت خوبی برخوردار است. این طیف موج به صورت زیر تعریف می‌شود [۴].



شکل (۲) نمای سه بعدی بدنه شناور نظامی [۲].

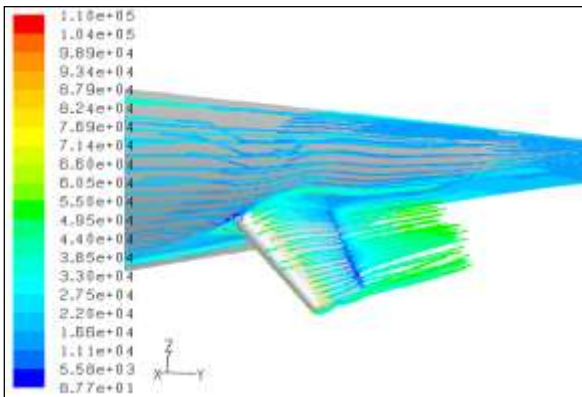
جدول (۱) ابعاد و مشخصات اصلی شناور نظامی [۲]

مشخصه	مقدار	واحد
جابجایی	۳۶۴/۷۸	تن
طول	۵۲/۵	متر
عرض	۸/۶	متر
آبخور	۲/۲۶	متر
ارتفاع متاسنتریک عرضی	۱	متر
سرعت نامی	۲۰	نات
دوره تناوب غلتش عرضی	۶/۷۶	ثانیه

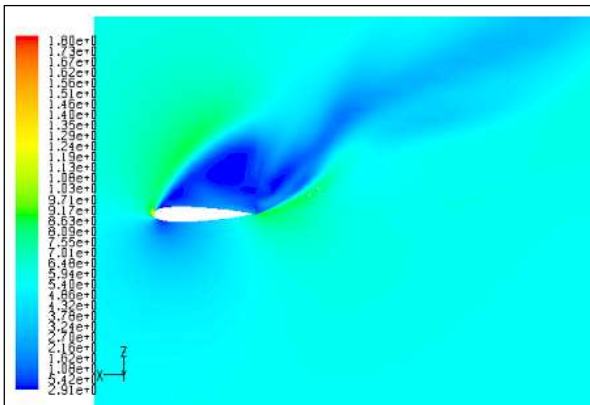
² Sea State

¹ International Towing Tank Conference

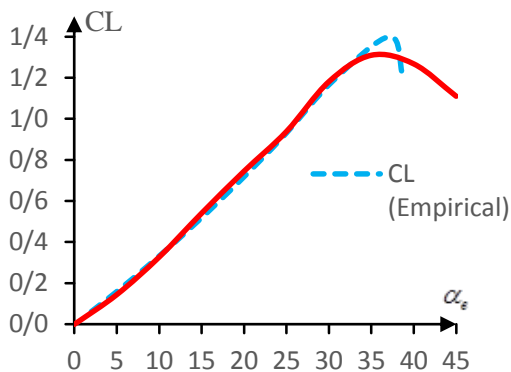
بررسی دقیق خطوط جریان و لایه مرزی در باله با زاویه حمله ۳۵ درجه (مطابق شکل (۶)) و همچنین کانتور فشار دینامیکی برای زاویه حمله ۳۵ درجه (مطابق شکل (۷)) و ضریب نیروی برآ بر حسب زاویه مؤثر باله (مطابق شکل (۸)) برای شناور نمونه با استفاده از آنالیز دینامیک سیال محاسباتی با روش حجم محدود بدست آمده است.



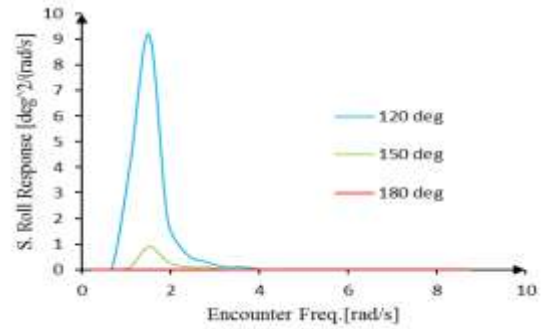
شکل (۶) نمایش خطوط جریان در باله با زاویه حمله ۳۵ درجه.



شکل (۷) کانتور فشار دینامیکی برای زاویه حمله ۴۵ درجه.



شکل (۸) نمودار ضریب نیروی برآ بر حسب زاویه مؤثر برخورد باله شامل مقادیر فرمول‌های تجربی و مقادیر عددی.



شکل (۵) نمودار طیف پاسخ غلتش عرضی.

بررسی رفتار دینامیکی حرکت غلتش عرضی شناور در موج نشان می‌دهد که شناور به نوسانات غلتش عرضی حساس می‌باشد. کاهش میزان حرکت و شتاب غلتش عرضی سبب ارتقاء سطح عملیات‌پذیری شناور خواهد شد. از اینرو استفاده از تجهیزات کاهنده غلتش عرضی می‌تواند یک راهکار مؤثر باشد.

۳- انتخاب و تحلیل دینامیکی سیستم پایدارساز غلتش عرضی

در سال‌های گذشته پایدارسازهای مختلفی برای متعادل‌سازی حرکت غلتش عرضی شناورهای مختلف استفاده شده است که پرکاربردترین آنها مخازن ضد غلتش عرضی، سکان و باله‌های فعال می‌باشند. پایدارساز باله‌های فعال به دلایلی از جمله کاهش تا حدود ۹۰ درصد دامنه غلتش عرضی، ایجاد گشتاور بزرگ نسبت به مرکز جرم شناور در مقایسه با پایدارساز سکان، ایجاد تداخل خیلی کوچک و قابل صرف‌نظر بین غلتش عرضی و غلتش افقی به دلیل محل قرار گرفتن باله‌ها روی بدنه و طراحی نسبتاً ساده، مؤثرترین پایدارساز، به خصوص در سرعت‌های بالا هستند [۲] و [۴]. پایدارساز باله مورد استفاده برای شناور مورد بررسی دارای مشخصات مطابق جدول (۲) است.

جدول (۲) مشخصات باله شناور مورد بررسی [۲].

مشخصه	مقدار	واحد
سطح باله	۳/۴	متر مربع
طول اسپین	۱/۳	متر
وتر متوسط	۱/۳	متر
بازوی باله	۴/۲	متر
ضریب شکلی	۰/۶۶	
مقطع	NACA 0015	

۴- مدل سازی غلتش عرضی شناور به همراه پایدارساز باله

با توجه به اینکه ما در این مطالعه از پایدارساز باله استفاده می کنیم و محل قرار گرفتن باله ها در وسط و نزدیک به مرکز جرم شناور است و کمترین تداخل را با سایر حرکات ایجاد می کند، تداخل بین حرکات را نادیده گرفته و مدل را با یک درجه آزادی تحلیل می کنیم. مدل دینامیکی یک درجه آزادی زاویه غلتش عرضی شناور که مشتق شده از دینامیک حرکت شناور، به صورت رابطه (۶) است [۱۶].

$$I_{xx} \ddot{\phi} = \tau_d - \tau_f - \tau_h \quad (6)$$

$$p = \dot{\phi}$$

در این رابطه ϕ زاویه غلتش عرضی و p سرعت غلتش عرضی، τ_f گشتاور مخالف تحریک ایجاد شده توسط باله ها، τ_d گشتاور اغتشاش ناشی از امواج τ_h گشتاور هیدرودینامیکی ناشی از تقابل سیال و شناور در اثر حرکت غلتش عرضی شناور و I_{xx} اینرسی دورانی در غلتش عرضی است. ال به بررسی و محاسبه هر یک از گشتاورهای مؤثر بر حرکت غلتش عرضی می پردازیم.

۴-۱- بررسی و محاسبه گشتاور مخالف تحریک باله ها

گشتاور مخالف تحریک ایجاد شده توسط باله ها به صورت رابطه (۷) قابل بیان است [۱۶].

$$\tau_f = \rho V^2 A_f r_f C_L(\alpha_e) \quad (7)$$

که در آن ρ چگالی آب، v سرعت شناور و A_f و r_f به ترتیب مبین سطح و بازوی گشتاور باله هستند.

۴-۲- بررسی و محاسبه گشتاور هیدرودینامیکی

این گشتاور ناشی از تقابل سیال و شناور در اثر حرکت غلتش عرضی شناور است. این گشتاور مشابه سیستم جرم-کمک فنر- فنر شامل سه ترم طبق رابطه (۸) است [۱].

$$\tau_h = K_p \dot{p} + f_1(\phi, \dot{\phi}) + k(\phi) \quad (8)$$

K_p گشتاور اینرسی هیدرودینامیکی^۵ است و ضریب K_p همان جرم افزوده شده^۸ در اثر غلتش عرضی است.

شکل (۶) خطوط جریان را در آستانه بهم ریختگی و شکل (۷) میزان فشار دینامیکی را در حالت بهم ریختگی دینامیکی تشریح می کنند. بر اساس شکل (۸) اگر زاویه مؤثر باله α_e (زاویه برخورد بین باله و راستای سرعت سیال) از زاویه α_{stall} (زاویه بهم ریختگی دینامیکی) که در این تحقیق حدود ۳۵ درجه است، بیشتر شود حالت بهم ریختگی دینامیکی بوجود می آید و نیروی برآ منفی می شود. بحث به هم ریختگی دینامیکی یکی از قیود حاکم بر سیستم غلتش عرضی- باله است. تقریبی که برای ساده سازی و ممکن بودن عملیات کنترل در نظر گرفته می شود بدین صورت است که ناحیه عملکرد را ناحیه خطی در نظر می گیریم.

وهیکر^۱ و فهلنر^۲ (۱۹۵۸) مقاطع مختلفی با ضرایب شکلی کوچک را مورد آزمایش قرار دادند و نهایتاً روابط تجربی (۲) تا (۵) را جهت محاسبه شیب منحنی و ضریب نیروی برآ بدست آوردند [۱۱].

$$\left[\frac{dC_L}{d\alpha_e} \right]_{\alpha_e=0} = \frac{1.95\pi}{57.3(1+3/a)} [rad^{-1}] \quad (2)$$

$$C_L = \left[\frac{dC_L}{d\alpha_e} \right]_{\alpha_e=0} \times \alpha_e + \frac{C_D}{a} \left[\frac{\alpha_e}{57.3} \right]^2 \quad (3)$$

$$C_D = 0.1 + 1.6 \frac{C_T}{C_R} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \alpha_{stall} = 1.05 - 0.445a + 0.075a^2 \text{ (rad)} & a < 3 \\ \alpha_{stall} = 0.39 \text{ (rad)} & a > 3 \end{cases} \quad (5)$$

در روابط فوق $dC_L/d\alpha_e$ ، C_L ، C_D ، C_T ، C_R و a به ترتیب شیب نمودار ضریب نیروی برآ، ضریب نیروی برآ، ضریب نیروی پسا^۳، طول وتر در ابتدای باله^۴، طول وتر در انتهای باله^۵ و ضریب شکلی باله^۶ می باشند. با توجه به مشخصات باله های شناور و روابط فوق $dC_L/d\alpha_e = 0.34$ و $\alpha_{stall} = 0.62$ (rad) بدست می آید. برای استفاده از این روابط ساده شده، لازم است که نیروی برآ در ناحیه خطی بماند. از اینرو قید $|\alpha_e| \leq \alpha_{stall}$ بایستی برآورده شود.

⁵ Root Chord

⁶ Aspect Ratio

⁷ Inertia Hydrodynamic Moment

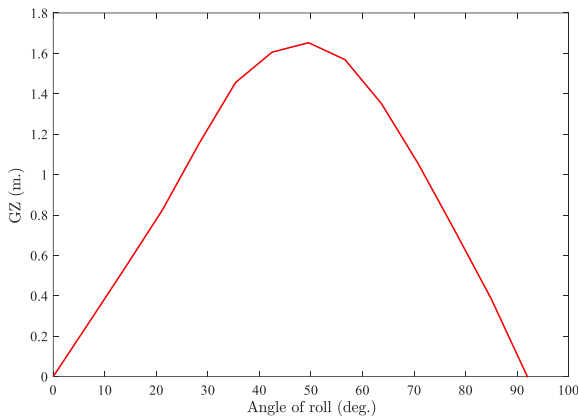
⁸ Added Mass

¹ Whicker

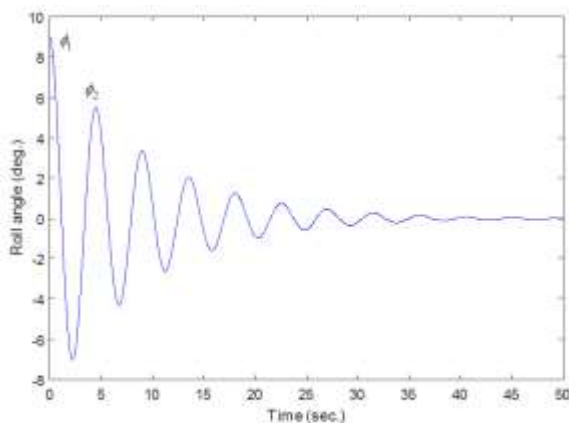
² Fehlnr

³ Drag

⁴ Tip Chord



شکل (۹) نمودار GZ شناور.



شکل (۱۰) آزمایش غلتش عرضی آزاد.

ضریب میرایی به صورت زیر محاسبه می شود [۱۷].

$$\zeta \cong \frac{\ln(\phi_1/\phi_2)}{2\pi} \quad (12)$$

با این روش ضریب میرایی 0.075 و دوره تناوب غلتش عرضی 6.122 ثانیه بدست می آید. روش دیگر برای محاسبه ضریب میرایی استفاده از روابط تجربی است که با استفاده از روابط تجربی طبق مرجع [۴] برای شناورهای نظامی این مقدار 0.078 بدست می آید.

با توجه به روابط استاندارد (۱۳) تا (۱۵) می توان ضرایب هیدرودینامیک را برای شناور نمونه بدست آورد [۱۷].

$$k_p = 2\zeta_\phi \sqrt{\Delta GM (I_{xx} + K_p)} \quad (13)$$

$$I_{xx} + K_p = \frac{\Delta GM}{\omega_\phi^2} \quad (14)$$

$$\omega_\phi = \frac{2\pi}{T_\phi} \quad (15)$$

$f_1(\phi, \dot{\phi})$ گشتاور میرایی غلتش عرضی است که با رابطه زیر قابل بیان است.

$$f_1(\phi, \dot{\phi}) = k_p p + k_{p|p}|p| \quad (9)$$

$k_p p$ جمله میرایی خطی است، که استهلاک ناشی از ایجاد اموج واصطکاک بدنه خطی است.

$k_{p|p}|p|$ جمله میرایی غیر خطی است، که استهلاک ناشی از اثرات ویسکوزیته است.

نیروهای میراکنندگی حرکت غلتش عرضی شناور به طور عمده می تواند ناشی از موج سازی، اصطکاک، تولید گردابه و وجود سطوح اضافی مثل بیلج کیل^۱ باشد.

$k(\phi)$ گشتاور برگرداننده غیر خطی است که به صورت زیر قابل بیان است.

$$k(\phi) = \rho g \nabla GZ(\phi) \quad (10)$$

GZ بازوی گشتاور برگرداننده است که با زاویه غلتش عرضی شناور تغییر می کند. نمودار GZ بر حسب زاویه غلتش عرضی برای شناور مورد بررسی در شکل (۹) رسم شده است.

$k(\phi)$ را می توان یک رابطه تقریباً خطی در نظر گرفت، زیرا $\rho g \nabla$ نیروی شناوری است که در آن چگالی آب، g شتاب جاذبه و ∇ حجم سیال جابجا شده می باشند و بازوی برگرداننده جهت تولید گشتاور $GZ(\phi)$ را می توان به صورت $GZ(\phi) \approx GM \phi$ در نظر گرفت [۱]. GM ارتفاع متاسنتریک است و مقدار آن برای شناور نمونه یک متر است. بنابراین

$$k(\phi) = k_\phi \phi$$

$$k_\phi = \rho g \nabla GM \quad (11)$$

یعنی در صورتی که شناور به زاویه غلتش عرضی ϕ برسد. ممان بازگردان برابر با $\rho g \nabla GM \phi$ خواهد بود.

۴-۳- محاسبه ضریب میرایی و پریود طبیعی غلتش عرضی شناور نمونه

ابتدا با آزمایش غلتش عرضی آزاد با استفاده از نرم افزار مکسرف، زاویه غلتش عرضی را مطابق شکل (۱۰) به ازای زاویه اولیه ۹ درجه بدست می آوریم. با توجه به اینکه دو پیک اولیه $\phi_1 = 9 \text{ deg}$ و $\phi_2 = 5.6 \text{ deg}$ می باشند.

¹ Bilge Keel

لازم به ذکر است که عملگر باله نمی تواند با هر سرعتی و به هر اندازه حرکت کند. اشباع عملگر باله می تواند باعث هدر رفت انرژی (محدودیت بزرگ در شناور) شود. از اینرو تغییرات و سرعت تغییرات زاویه مکانیکی باله دارای محدودیت می باشند.

۴-۵- مدل فضای حالت غلتش عرضی - باله

بر اساس روابط (۱) تا (۱۸) مدل حرکت غلتش عرضی به همراه عملگر باله می تواند بصورت زیر خلاصه شود.

$$(I_{xx} + K_p)\ddot{\phi} + k_p\dot{\phi} + k_{p|p}|\dot{\phi}| = \tau_d - K_\alpha\alpha_e$$

$$\alpha_e = -\frac{R_f p}{V} - \alpha_m$$

$$T_e \dot{\alpha}_m + \alpha_m = K_{dc} \alpha_c \quad (19)$$

در سرعت های پایین و نزدیک به صفر ضریب میرایی غیرخطی $k_{p|p}$ حدود ۶۰ درصد ضریب میرایی خطی k_p است و در سرعت ۱۵ تا ۲۰ نات حدود ۵ درصد و در سرعت ۲۵ تا ۳۰ نات صفر درصد است [۱۸]. بنابراین می توانیم از جمله غیرخطی گشتاور میرایی صرف نظر کنیم. یک مدل فضای حالت خطی برای توصیف حرکت غلتش عرضی می تواند به صورت زیر توصیف شود.

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{-\Delta GM}{I_{xx} + K_p} x_1(t) + \frac{(k_\alpha R_f / V) - k_p}{I_{xx} + K_p} x_2(t)$$

$$+ \frac{k_\alpha}{I_{xx} + K_p} u(t) + \frac{1}{I_{xx} + K_p} \tau_d(t)$$

$$\dot{x}_3(t) = k_2 x_3(t) + k_1 u(t) \quad (20)$$

که متغیرهای حالت عبارتند از
 $x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T = [\phi(t), p(t), \alpha_m(t)]^T$
 که:

$$u(t) = \alpha_c(t)$$

$$k_1 = \frac{k_{dc}}{T_e} \quad k_2 = \frac{1}{T_e}$$

محدودیت های عملیاتی بایستی بصورت زیر در نظر گرفته شوند.

- محدودیت ورودی که انعکاس اشباع زاویه مکانیکی باله است و به صورت زیر لحاظ می شود.

$$|\alpha_c| \leq \alpha_{sat} \quad (21)$$

- محدودیت حالت که به منظور جلوگیری از بهم ریختگی دینامیکی است و به صورت زیر لحاظ می شود:

با توجه به کلیه موارد و روابط مطرح شده ضرایب هیدرودینامیک برای شناور مورد بررسی مطابق جدول (۳) بدست می آیند.

جدول (۳) ضرایب هیدرودینامیکی حرکت غلتش عرضی شناور.

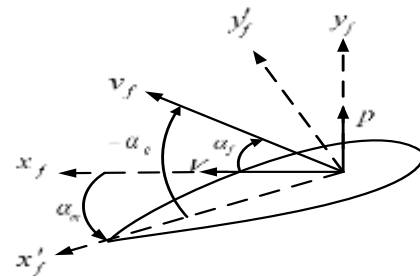
مقدار	نماد	کمیت
0.4837528×10^6	k_p	ضریب میرایی خطی
0.4221876×10^6	$k_{p p }$	ضریب میرایی غیر خطی
4.774745×10^6	$I_{xx} + k_p$	ممان اینرسی همراه با جرم افزوده

۴-۴- مدل دینامیکی باله

زاویه مکانیکی باله با توجه به ترانسمیترهای نصب شده روی بازوی باله و فیدبک داخلی از وضعیت آن، از یک مدل دینامیکی پیروی می کند. در حقیقت با اعمال فرمان α_c به باله، عملگر الکترو هیدرولیکی باله بلافاصله پاسخ نمی دهد و دارای لختی است. چنین دینامیکی را می توان به صورت (۱۶) مدل کرد که در آن T_e ثابت زمانی عملگر، K_{dc} بهره DC عملگر و α_m زاویه مکانیکی باله است [۱۶].

$$T_e \dot{\alpha}_m = K_{dc} \alpha_c - \alpha_m \quad (16)$$

رابطه بین زاویه مکانیکی باله و زاویه مؤثر باله مطابق شکل (۱۱) به صورت رابطه (۱۷) است [۲].



شکل (۱۱) باله سمت راست.

$$\alpha_e = -\alpha_f - \alpha_m \quad (17)$$

α_f زاویه ناشی از ترکیب سرعت شناور V و سرعت غلتش عرضی p است. رابطه α_f را می توان بصورت زیر نوشت.

$$\alpha_f = \arctan\left(\frac{R_f p}{V}\right) \approx \frac{R_f p}{V} \quad (18)$$

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله شرایط دریا بصورت نامنظم و امواج ۹۰ درجه و سرعت شناور ۲۰ نات در نظر گرفته شده است. بر اساس محاسبات بخش سوم برای باله‌های پایدارساز، محدودیت‌های زاویه مکانیکی باله‌ها، سرعت زاویه‌ای باله‌ها و فرمان ورودی بصورت زیر در طراحی کنترل‌کننده لحاظ شده‌اند.

$$-1.3(\text{rad}) < u < 1.3(\text{rad})$$

$$-0.43(\text{rad/s}) < \dot{x}_3 < 0.43(\text{rad/s})$$

$$-0.62(\text{rad}) < x_3 < 0.62(\text{rad})$$

چگالی آب دریا و ثابت جاذبه عبارتند از:

$$\rho = 1025 (\text{kg/m}^3)$$

$$g = 9.81 (\text{m/s}^2)$$

و پارامترهای طراحی کنترل‌کننده به صورت زیر لحاظ شده‌اند.

$$R = 0.01 \quad Q = \text{diag}(1, 0.1, 0.1)$$

سیستم حلقه بسته غلتش عرضی- باله با اعمال کنترل‌کننده LQR مقید به ازای زاویه غلتش عرضی اولیه ۱۲ درجه شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج کنترل‌کننده PID استفاده شده در مرجع [۸] و همچنین با حالت بدون استفاده از کنترل‌کننده مقایسه شده است و در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است دامنه زاویه غلتش عرضی در حالت استفاده از کنترل‌کننده LQR مقید کوچکتر از کنترل‌کننده PID است. بر اساس استاندارد ناتو (۱۹۹۸) در زمینه غلتش عرضی مقدار مؤثر دامنه غلتش عرضی بایستی کوچکتر یا مساوی ۴ درجه باشد [۲۱]، که با استفاده از کنترل‌کننده LQR مقید، به این مهم رسیده‌ایم.

برای ارزیابی عملکرد سیستم حلقه بسته حرکت غلتش عرضی از شاخص درصد کاهش غلتش عرضی^۲ استفاده شده است که بیشتر سازندگان ابزارهای کاهنده غلتش عرضی از این شاخص برای معرفی عملکرد محصولات خود به صورت رابطه (۲۵) استفاده می‌کنند. درصد کاهش نقاط بیشینه برای حرکت غلتش عرضی شاخصی برای سنجش سیستم پایدارساز می‌باشد.

$$RRR = 100 \left(1 - \frac{\bar{\phi}_s}{\bar{\phi}_u} \right)_{\omega_e = \omega_p} \quad (28)$$

$$|\alpha_e| = \left| \frac{R_f}{V} P + \alpha_m \right| \leq \alpha_{\text{stall}} \quad (22)$$

۵- طراحی کنترل‌کننده

در این بخش یک کنترل‌کننده LQR مقید بصورت یک کنترل‌کننده بهینه برای پایدارسازی حرکت غلتش عرضی شناور طراحی می‌شود. هدف این کنترل‌کننده تنظیم متغیرهای حالت با حداقل عمل کنترلی است. بنابراین سیستم پیوسته خطی و نامتغیر با زمان را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۱۹].

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \quad (23)$$

با استفاده از تقریب مرتبه اول اویلر با زمان نمونه‌برداری $T_s = 0.5 \text{ sec}$. مدل گسسته با زمان آن به صورت زیر است.

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \quad (24)$$

که:

$$x \in R^3 \quad u \in R$$

ورودی کنترل بهینه $u(t)$ بایستی تابع هزینه (۲۵) را با وجود قیود خطی (۲۶) مینیمم کند.

$$J(u(t), u(t+1), \dots, x(t)) = \sum_{\tau=t}^{\infty} x(\tau)^T Q x(\tau) + u(\tau)^T R u(\tau) \quad (25)$$

$$\begin{aligned} Gx(\tau+1) &\leq g \\ Hu(\tau) &\leq h \end{aligned} \quad (26)$$

این روابط به ازای شرایط زیر صادق می‌باشند:

$$H \in R \quad G \in R^{1 \times 3} \quad Q \geq 0 \quad R > 0 \quad \tau \geq t$$

ضمن اینکه جفت (A, B) کنترل‌پذیر و فرض می‌شود که:

$$g, h > 0$$

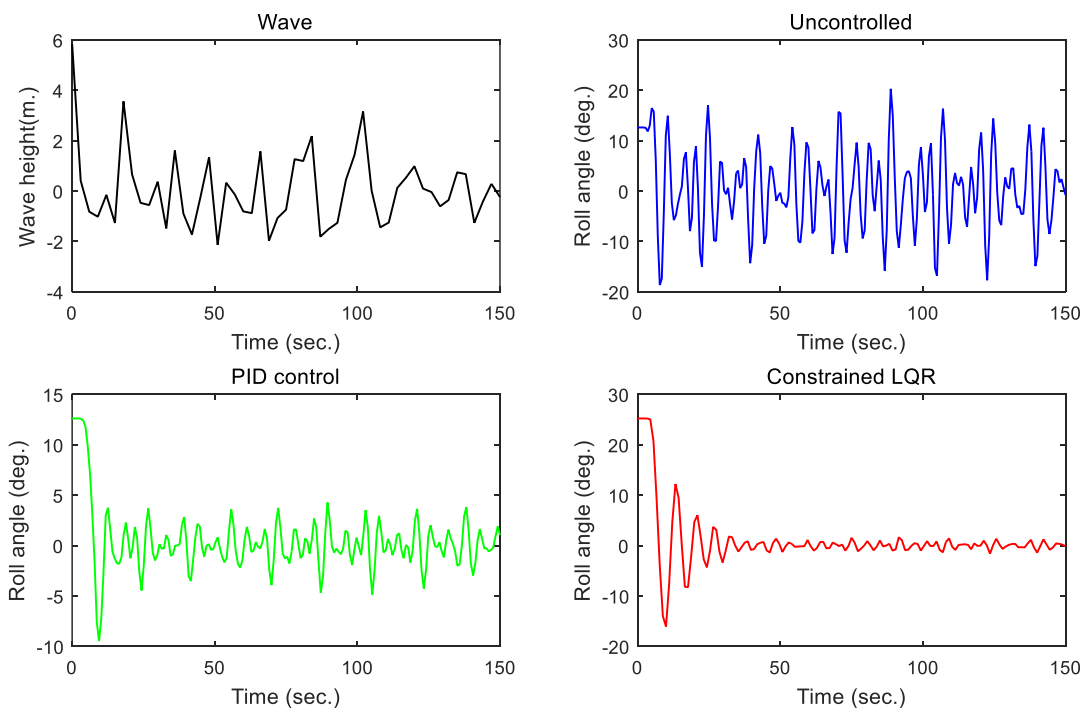
تابع هزینه بهینه به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$F(x(t)) = \min_{u(t), u(t+1), \dots} J(u(t), u(t+1), \dots, x(t)) \quad (27)$$

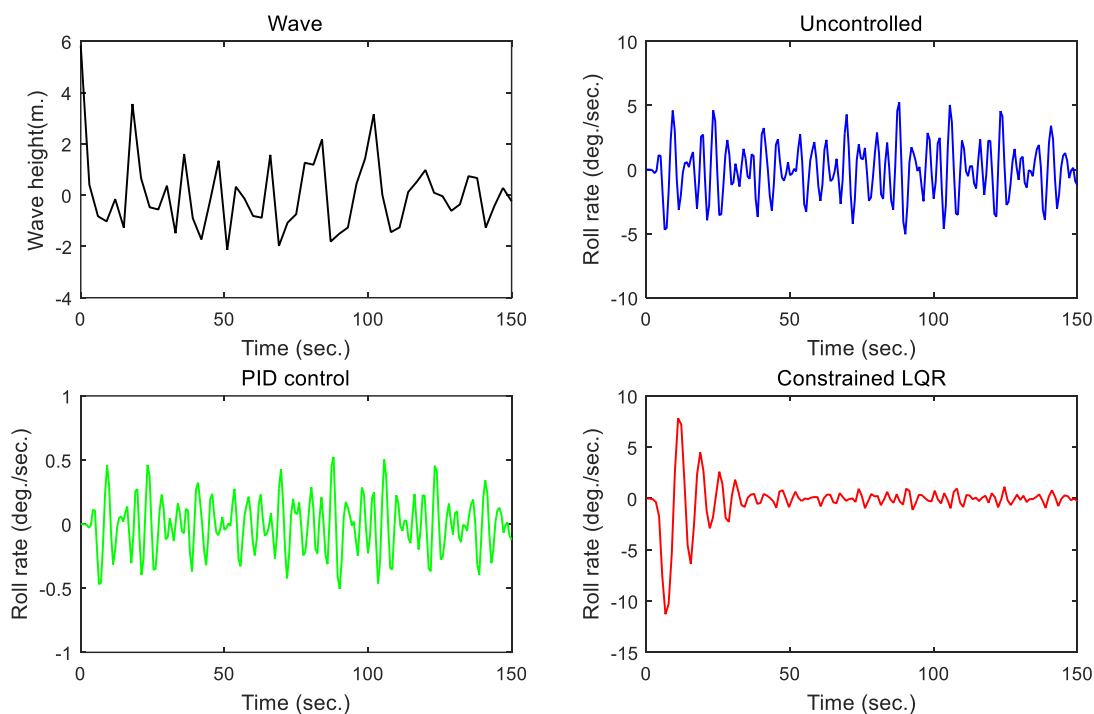
این مینیمم‌سازی با توجه به دینامیک‌های سیستم (۲۱) انجام می‌شود. و قیود (۲۶) در هر زمان روی مسیر اعمال شده‌اند. روش‌های مختلفی برای حل اینگونه مسائل وجود دارد. ما طراحی LQR مقید را با استفاده از روش برنامه ریزی مربعی متوالی^۱ با توابع هدف مربعی که یک الگوریتم مؤثر است استفاده کرده‌ایم [۲۰].

¹ Sequential Quadratic Programming (SQP)

² Reduction of Roll at Resonance (RRR)



شکل (۱۲) مقایسه پاسخ زاویه غلتش عرضی برای کنترل کننده های PID و LQR و حالت بدون کنترل کننده به ازای زاویه غلتش عرضی اولیه ۱۲ درجه.



شکل (۱۳) مقایسه پاسخ سرعت غلتش عرضی برای کنترل کننده های PID و LQR و حالت بدون کنترل کننده.

این شاخص با توجه به شکل (۱۲) در حالت استفاده از کنترل کننده PID حدود ۶۵ درصد و در حالت استفاده از کنترل کننده LQR مقید بیش از ۸۰ درصد بدست می آید.

جهت محاسبه شاخص موج، مقادیر نمودار را برای حدود ۴۰ قله یا پیک حرکت غلتش عرضی در هر دو حالت با سیستم پایدارساز (ϕ_s) و بدون سیستم پایدارساز (ϕ_u) استخراج و استفاده می کنند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا برای مشخص شدن اهمیت حرکت غلتش عرضی یک شناور نظامی بحث دریامانی این حرکت با استفاده از نرم‌افزار تحلیلیگر مکسرف انجام شد. سپس با انتخاب پایدارساز باله، به تحلیل آن به روش دینامیک سیال محاسباتی پرداخته شد. در ادامه مدل دینامیکی غلتش عرضی شناور به همراه سیستم پایدارساز بصورت تجربی استخراج گردید و ضرایب هیدرودینامیکی برای شناور نمونه محاسبه شد و در نهایت یک کنترل‌کننده LQR مقید به منظور لحاظ کردن محدودیت‌های عملیاتی در حرکت غلتش عرضی شامل اشباع زاویه مکانیکی باله و به‌هم‌ریختگی دینامیکی طراحی شده است. به منظور اعتبارسنجی بیشتر، نتایج شبیه‌سازی برای کنترل‌کننده LQR مقید با نتایج کنترل‌کننده PID، در حضور امواج نامنظم مقایسه شده است. در حالت استفاده از کنترل‌کننده اول مقدار مؤثر دامنه غلتش عرضی به حد قابل قبولی کاهش یافته و محدودیت عملکرد عملیاتی در زمینه غلتش عرضی بر اساس استاندارد ناتو برآورده شده است.

۸- مراجع

- Maritime Association of the Mediterranean, Creta, Greece, 2002.
- [9] Lee, C. M., Park, I. R., Chun, H. H., Lee, S. J. "Effect of Free Surface and Strut on Fins Attached to a Strut", *Ocean Eng.* Vol. 28, pp. 159-177, 2000.
- [10] Surendran, S., Lee, S.K., Kim, S.Y. "Studies on an Algorithm to Control the Roll Motion using Active Fins", *Ocean Eng.*, Vol. 34, pp. 542-551 Apr. 2007.
- [11] Whicker, L. F., Fehlner, L.F. "Free-Stream Characteristics of a Family of Low Aspect-Ratio, All-Movable Control Surface for Application to Ship Design", DTMB Report, 1958.
- [12] Alarçin, F. "Conventional PID and Modified PID Controller Design for Roll Fin Electro-Hydraulic Actuator", *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 11, No.3, pp. 233-248, Jan.2014.
- [13] Demirel, H. "Modified Pid Control Design for Roll Fin Actuator of Nonlinear Modelling of the Fishing Boat". *Polish Maritime Research*, Vol. 21, pp.3-8, Jan.2014.
- [14] Moradi, M., Malekizade, H., "Robust Adaptive First-Second-Order Sliding Mode Control to Stabilize the Uncertainfin-roll Dynamic", *Ocean Eng.*, Vol. 69, pp. 18-23, 2013.
- [15] Sungkyun Lee, Key-Pyo Rhee, Jin-Woo Choi, "Design of the Roll Stabilization Controller, using Fin Stabilizers And pod propellers", *Applied Ocean Research*, Vol. 33, pp. 229-239, 2011.
- [16] Hinostroza, M. A., Luo, W., Soares, C. G. "Robust Fin Control for Ship Roll Stabilization based on L2-gain Design", *Ocean Engineering*. Vol. 94, pp. 126-131, Jan. 2015.
- [17] Pascoal, R., Rodrigues, B., Soares, C.G. "Forced Rolling Trials On Board a Portuguese Navy Frigate", *Marine Technology*. Vol. 43, No. 3, pp. 115-125, Jul. 2006.
- [18] Zhang J. W. , Andrews D. J. "Roll Damping Characteristics of a Trimaran Displacement Ship", *International Shipbuilding Progress*. Vol. 46, pp. 445-472, 1999.
- [19] Johansen, T. A., Petersen, I., Slupphaug, O. "On Explicit Suboptimal LQR with State and Input Constraints", *On proceedings of The 39th IEEE Conference*. Vol.1, pp. 1-8, 2000.
- [20] Stathopoulos, G., Korda, M., Jones, C. "Solving the Infinite-Horizon Constrained LQR Problem using Splitting Techniques", *EPFL-REPORT-197368*, 2014.
- [21] Crossland, P. "The Effect of Roll-Stabilization Controllers on Warship Operational Performance", *Control Eng. Practice*. Vol. 11, pp.423-431, 2003.
- [1] Perez, T., Blanke, M. "Ship Roll Damping Control", *Annual Reviews in Control*. Vol. 36, pp. 129-147, Apr. 2012.
- [2] Perez, T. "Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilization using Rudder and Fins", Springer-Verlog., London, 2005.
- [3] Perez, T., Goodwin, G. C. "Constrained Predictive Control of Ship Fin Stabilizers to Prevent Dynamic Stall", *Control Eng. Practice*, Vol. 16, pp. 482-494, Apr. 2008.
- [4] Lewis, V.E. "Principles of Novel Architecture Vol. III, Motion in Waves and Controllability", *The Society of Nav. Archit. And Marine Eng.*, Jersey City, 1989.
- [5] Lloyd, R. J. M. A. "Sea keeping: Ship Behavior in Rough Weather", Ellis Horwood Ltd, Chichester, UK, 1989.
- [6] Sellars, F. H., Martin, J. P. "Selection and Evaluation of Ship Rol Stabilization Systems. *Marine Technology*", SNAME. Vol. 29, pp. 84-101, Feb. 1991.
- [7] Ghaemi, R., Sun, J., Kolmanovsky, I.V. "Robust Control of Ship Fin Stabilizers Subject to Disturbances and Constraints", *American Control Conference*. pp. 537-542, Jun. 2009.
- [8] Gaillarde, G. "Dynamic Behavior and Operation Limits of Stabilizer Fins", *In IMAM International*