

ارائه روشی برای کنترل پایداری رول شناور مطابق با استانداردهای رده بندی با استفاده از سویچ کنترلر PID جهت کنترل ژایرواستابلایزر و جسم جابه جاشونده

رامبد رستگاری*
محمد مهدی پناهیان**

چکیده:

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۰۷
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۰۱

از میان حرکات کشتی، حرکات رول، پیچ و هیو بیشترین تأثیر را در راحتی و آسایش خدمه و مسافران و عملکرد خدمه بر روی عرشه دارند و به همین لحاظ از بیشترین اهمیت بررسی برخوردار هستند. علاوه بر این مطابق با استانداردهای بین المللی برای شناورهای نظامی محدودیت های واژگونی شناور در هنگام عملیات مانور، پرواز و فرود هلی کوپتر و جابه جایی آن بر روی شناورهای با قابلیت حمل بالگرد، زاویه شیب کانتینر پرتاب موشک و عملیات پرتاب موشک، بارگذاری و پرتاب اژدر و اتصال بین دو شناور، میزان رول از اهمیت ویژه ای برخوردار است. شناورهای سطحی شش نوع حرکت در راستای محورهای مختصات (سرج، اسوی و هیو) و چرخش حول محور مختصات (رول، پیچ و یاو) را تجربه می کنند. هدف از این تحقیق کنترل و کاهش حرکت رول شناور در محدوده استاندارد عملکرد شناور مطابق با استانداردهای رده بندی بین المللی با استفاده از دو سیستم مجزای کاهنده رول به وسیله یک سویچ کنترلر PID است که با توجه به عملکردهای از پیش تعیین شده از هریک از سیستم های مذکور در کاهش رول استفاده شده و پس از شبیه سازی معادلات نتایج به دست آمده، حاکی از اثربخشی سیستم و کاهش رول شناور در محدوده استاندارد است.

واژگان کلیدی:

پایداری سازی رول، ژایرواستابلایزر، کنترلر PID، سویچ کنترلر، جرم جابه جاشونده

۱ مقدمه

سابقه تاریخی کاربرد تجهیزات پایداری ساز رول به دو قرن گذشته بر می گردد [۱]. سیستم های کاهنده رول شناور دو نوع هستند. نوع اول سیستم هایی داخلی هستند که در داخل شناور نصب می شوند که عبارتند از ژایرو استابلایزر و جابه جایی جرم (جابه جایی مایع در مخازن یو شکل و جابه جایی جسم جامد). نوع دوم سیستم های خارجی هستند که عبارتند از تیر اصلی خن (بیلج کیل)، بالک (فین)، کنترلر سکان و تریم تب که درون آب قرار دارند و با استفاده از اثرات هیدرو دینامیکی رول را کنترل می کنند. هریک از سیستم های فوق الذکر دارای معایب و مزیت هایی هستند، برای مثال سیستم های خارجی در حالت سکون کارایی نداشته و درگ هیدرو دینامیکی ایجاد می کنند ولی سبک بوده و جرم کمی دارند، در مقابل سیستم های داخلی در حالت سکون نیز کارآمد بوده و در عوض جرم و قیمت بالاتری دارند. روش های کنترلی

مختلف برای کنترل هر یک از سیستم های مذکور ارائه شده و توسعه یافته اند. استفاده از فین و سکان و ترکیب چند کنترلر برای کنترل آنها جهت پایداری سازی رول شناور [۲]، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کنترل فین های فعال در یک کنترلر PID جهت پایداری سازی رول شناور [۳] کنترل ژایرو استابلایزرها به روش غیر خطی^۱ و مقایسه آن با کنترلر [۴]، [۵] PID کنترلر غیر فعال و فعال ژایرو استابلایزرها با کنترلر PID و کنترل چرخ عکس العملی و کنترل قاب آزاد [۶]، [۷] است. از دیگر روش های کنترل رول کشتی می توان به استفاده از مخازن پایدارکننده فعال و منفعل [۸]، [۹] اشاره کرد که در آن هر سیستم تانک تنظیم رول شامل سه تانک برابر است که در طول خط مرکزی شناور توزیع شده است، که هر کدام از آنها شامل دو داکت عمودی هستند که به ته شناور با کانال های افقی مرتبط شده اند. پمپی در میان کانال های افقی برای هر تانک ایزوله شده است. پمپها برای سیستم

1. Sliding mode control (SMC)

* استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند

** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی پرند

تانک تنظیم رول فعال روشن شده؛ اما برای سیستم تانک تنظیم رول غیر فعال خاموش می‌شوند. کنترل رول کشتی به وسیله بال‌های پایدارکننده و بررسی اثرات هیدرودینامیکی بین آن‌ها [۱۰]، کنترل رول کشتی با استفاده از وزنه‌های جابه‌جاشونده کنترل شده بر روی عرشه شناور به وسیله یک کنترلر PID برای فرمان‌دادن به مکان وزنه و یک مدل سرومکانیزم برای پیش‌بینی مکان حقیقی وزنه جابه‌جاشونده [۱۱]، سیستم کنترلی چند ورودی چند خروجی^۲ که دارای دو ورودی پایدارکننده فینی و پروانه‌های عرضی هستند [۱۲]، نیز از راهبردهای کنترلی مختلف در این زمینه هستند.

در این مقاله از یک سوئیچ کنترلر PID و دو سیستم ژایرواستابلایزر و جرم جابه‌جاشونده برای پایدارسازی رول شناور استفاده شده است، که در شرایط مختلف از هر دوی این سیستم‌ها به صورت هم‌زمان و یا جداگانه می‌توان برای پایدارسازی رول شناور استفاده کرد. استفاده از این دو سیستم برای پایداری رول شناور روش جدیدی است و می‌تواند برای این کار محدودیت‌های هزینه و وزن را کاهش دهد.

۲ مدل‌سازی سیستم

هنگام طراحی سیستم‌های کنترل فیدبک برای شناور، مدل‌های مرتبه کاهش یافته مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا بیشتر شناورها تحرک در تمام درجات آزادی را ندارند و این امر به وسیله تجزیه حرکت کشتی به دسته‌های چهار درجه آزادی، سه درجه آزادی و یک درجه آزادی امکان‌پذیر است. مدل‌های یک درجه آزادی می‌توانند برای طراحی کنترلرهای حرکت رو به جلوی کشتی (سرج)، اتوپیلوت‌های سمت (یاو) و سیستم‌های دمپینگ رول مورد استفاده قرار گیرند [۱۳]. در این تحقیق، سیستم یک درجه آزادی برای تحلیل رول شناور مورد استفاده قرار گرفته است. فرض بر این است که تحریک رول به وسیله دو نیروی موج و باد صورت می‌پذیرد و در مقابل برای کاهش رول از گشتاور ایجاد شده توسط ژایرو استابلایزر و جرم جابه‌جا شونده استفاده خواهد شد.

۳ گشتاورها و نیروهای تحریک رول

نیروها و گشتاورهای اعمال شده به شناور از طرف امواج نامنظم به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته شده اند. طیف‌های چگالی انرژی بیانگر مقدار انرژی امواج در فرکانس‌های مختلف هستند که در آب‌های عمیق برای حالت موج کاملاً توسعه یافته به صورت روابط استاندارد پیشنهاد می‌شوند. در این راستا روابط استاندارد بسیاری برای شرایط جغرافیایی مختلف ارائه شده است. مدل‌های استاندارد بیشتر روابط ساده متناسب با داده‌های اندازه‌گیری شده میدان مطالعاتی خاص هستند. غالب این مدل‌های استاندارد که در یک نقطه (بدون توجه به جهت موج) استفاده می‌شوند طبق معادله (۱) هستند [۱۴]، [۱۵].

$$S(f) = \frac{A}{f^5} \exp\left(-\frac{B}{f^4}\right) \quad (1)$$

که f فرکانس و A و B ثابت‌ها هستند. این ثابت‌ها در مدل‌های مختلف می‌توانند از ارتفاع موج، دوره تناوب چکادی^۳ یا دوره تناوب میانگین و یا دیگر پارامترها باشند. انتخاب مدل طیف استاندارد، به خصوصیات منطقه مورد مطالعه وابسته است. برای این منظور طیف‌های پیشنهاد شده مورد بررسی قرار گرفته اند تا طیف مناسب برای داده‌های خلیج فارس انتخاب شود. پارامترهای مهم برای بیان رفتار امواج موج عبارتند از: ξ_a (دامنه موج یا فاصله بین سطح آزاد در حالت سکون با قله یا قعر موج)، H_a (ارتفاع موج که معادل با دو برابر دامنه موج است)، λ طول موج (فاصله افقی بین دو قله یا قعر متوالی)، T_p (دوره تناوب موج یا زمان به وجود آمدن دو قله یا قعر متوالی)، T_z (زمان لازم برای دو نقطه تقاطع صفر به سمت بالا به‌طور متوالی)، α (زاویه شیب لحظه ای موج)، α_0 (بیشینه زاویه شیب موج)، H/λ (تیزی موج) است. مقادیر ارتفاع، دامنه، پرپود و سایر پارامترهای ذکر شده در بالا در امواج نامنظم همواره در حال تغییر هستند. بنابراین بهتر است که متوسط آن‌ها را یعنی

$$\overline{H_a}, \overline{\xi_a}, \overline{T_z}, \overline{T_p}$$

به کار گرفت:



$\xi_{1/3}$: دامنه مشخصه موج (مقدار متوسط یک سوم بزرگترین اندازه گیری های انجام شده برای ξ_a)
ارتفاع مشخصه موج (مقدار متوسط یک سوم بزرگترین اندازه گیری های انجام شده برای H_a)

فرمول بندی ریاضی طیف های انرژی تک جهت امواج بر مبنای دو پارامتر اصلی ارتفاع مشخصه موج $H_{1/3}$ و دوره تناوب متوسط موج T است. از جمله طیف موج های معروف می توان به طیف موج برت اشنایدر اشاره کرد که برای ناحیه آب های آزاد مورد استفاده قرار می گیرد. طیف موج دیگر، طیف پیرسون مسکوویچ می باشد که در دومین همایش بین المللی ISSC (۱۹۶۷) و دوازدهمین کنفرانس بین المللی ITTC در سال ۱۹۶۹ به عنوان طیف استاندارد مورد پذیرش قرار گرفته است که برای دریای باز (آب های کاملاً توسعه یافته) استفاده می شود. در سال های ۱۹۶۸ و ۱۹۶۹ یک برنامه وسیع اندازه گیری موج به نام جانسواپ^۴ در یک مسیر ۱۰۰ مایلی از دریای شمال تا جزیره سیلت اجرا شد. تحلیل داده های به دست آمده از این اندازه گیری منجر به ارائه طیفی برای مناطق محدود به ساحل (موجگاه های محدود) که امواج آن ها توسط باد تولید می شوند (امواج محلی در این محدوده امواج تنها توسط باد و در همان منطقه تولید شده است و امواج موجگاه های دور دست (دوراً) در این محدوده مشاهده نمی شود. بنابراین با توجه به موقعیت جغرافیایی دریای خلیج فارس و محدود بودن آن به سواحل اطراف، می توان از طیف موج جانسواپ برای امواج استفاده کرد.

طیف جانسواپ بر اساس مطالعات و اندازه گیری های صورت گرفته در دریای شمال توسط هاسلمن و همکاران در سال ۱۹۷۳ ارائه شده است. رابطه ریاضی این طیف به صورت رابطه (۲) بیان می شود:

$$S_{J\zeta}(\omega_e) = 0.658CS_{B\zeta}(\omega) \frac{g}{(g - 2\omega U \cos(\mu))}$$

U : سرعت رو به جلوی کشتی، صفر فرض شده است. جهت Heading μ نسبت به موج های عرضی $\mu=90$

فرض شده است.

طیف دو پارامتری $S_{B\zeta}$ به صورت رابطه (۳) داده شده است (بر اساس ITTC):

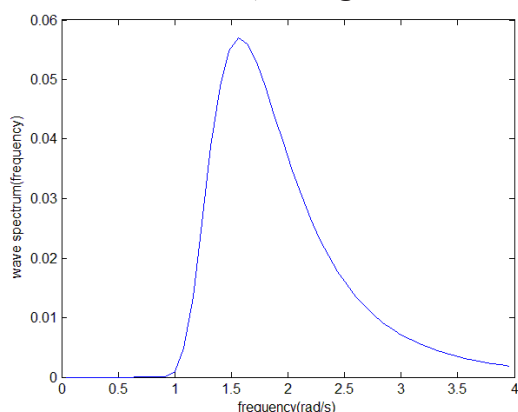
$$S_{B\zeta} = \frac{A}{\omega^5} e^{\frac{-B}{\omega^4}} \quad (3)$$

که $B = \frac{691}{T^4}$ و $A = \frac{172.75H_{1/3}}{T^4}$ است.

با ضرب معادله (۳) در $\frac{\omega_n^4}{g^2}$ ، طیف دامنه موج برابر می شود با طیف انرژی شیب موج.

$$S_{J\alpha}(\omega_e) = 0.658C \frac{A}{\omega g^2} e^{\frac{-B}{\omega^4}} \frac{g}{(g - 2\omega U \cos(\mu))} \quad (4)$$

در شکل (۱) طیف موج جانسواپ نشان داده شده است.



شکل ۱: طیف موج جانسواپ

دامنه موج و دامنه شیب موج هر جزء موج در طیف می تواند به صورت روابط (۵) و (۶) بیان شود:

$$\xi_{n5} = \sqrt{2S_{J\zeta}(\omega_n)\delta\omega} \quad (5)$$

$$\alpha_{n5} = \sqrt{2S_{J\alpha}(\omega_n)\delta\omega} \quad (6)$$

از طیف شیب موج و دامنه موج ارتفاع موج نامنظم شبیه سازی شده و بازه زمانی شیب می تواند به صورت روابط (۷) و (۸) شبیه سازی شود:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{N_{freq}} \zeta_{n0} \cos(\omega_n t + \psi_n) \quad (7)$$

$$\alpha(t) = \sum_{n=1}^{N_{freq}} \alpha_{n0} \sin(\omega_n t + \psi_n) \quad (8)$$

که ω_n و ψ_n فرکانس و زاویه فاز جزء n ام موج را بیان می کند. این نظریه از طریق برهم نهی^۵ فرکانس تصادفی و سینوس های فازی، سابقه زمانی نامنظم حالت دریایی داده شده را فراهم می آورد. شکل (۲) ارتفاع موج بر حسب زمان را برای طیف

4. Joint North Sea Wave Project(JONSWAP)
5. Superposition

نیروها و گشتاورهای به وجود آمده توسط باد برای یک شناور در حال حرکت محاسبه می‌شود. در یک شناور متحرک، نیروها و گشتاورهای اعمالی به شناور، با توجه به سرعت نسبی باد و زاویه برخورد به صورت معادلات (۱۰) محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$T = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 \begin{bmatrix} C_X(Y_{rw})A_{Fw} \\ C_Y(Y_{rw})A_{Lw} \\ C_Z(Y_{rw})A_{Fw} \\ C_K(Y_{rw})A_{Lw}H_{Lw} \\ C_M(Y_{rw})A_{Fw}H_{Fw} \\ C_N(Y_{rw})A_{Lw}L_{oa} \end{bmatrix}$$

که ρ_a چگالی هواست و پارامترهای H_{Lw} و H_{Fw} مرکز بالای خط آبخور صفحات جلویی A_{Fw} و جانبی A_{Lw} هستند.

پروفیل میانگین سرعت باد از پروفیل لایه مرزی ارائه شده توسط برت اشنایدر^۶ در سال ۱۹۶۹ تبعیت می‌کند که مطابق با رابطه (۱۱) است:

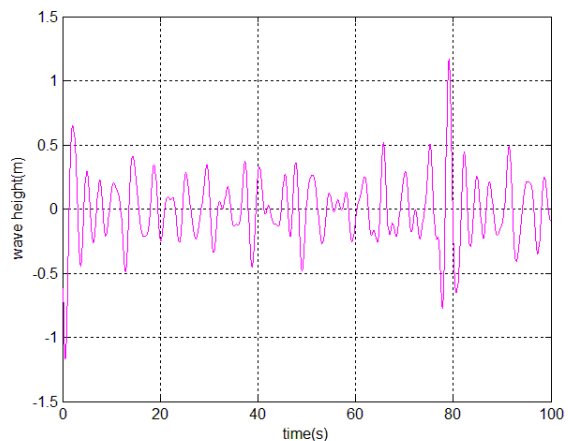
$$V_w(h) = V_{10}(h/10)^\alpha \quad (11)$$

که V_{10} سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریاست. h ارتفاع از سطح آب و ضریب α برابر با ۰٫۱۷ است. ضرایب بی بعد باد ($C_X, C_Y, C_Z, C_K, C_M, C_N$) معمولاً در ارتفاع ۱۰ متری از سطح آب به عنوان ارتفاع مرجع محاسبه می‌شوند. برای شناورهای سطحی معمولاً فرض می‌شود که Z_{wind} و M_{wind} برابر با صفر هستند. درحالی که گشتاور در جهت رول (K_{wind}) برای شناورها و سازه‌های دریایی مورد استفاده و محاسبه قرار می‌گیرند. برای شناورهای شبه زیر سطحی علاوه بر X_{wind} و Y_{wind} و N_{wind} هر دوی K_{wind} و M_{wind} مورد نیاز هستند. شکل (۴) سرعت باد، جهت باد و زاویه برخورد را نسبت با پاشنه شناور نشان می‌دهد.

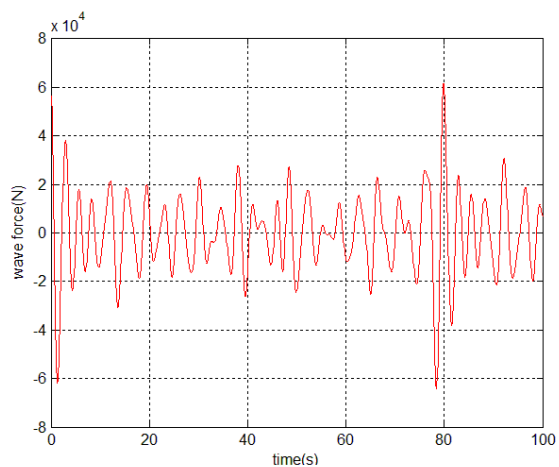
موج جانسواپ نشان می‌دهد. عبارت نیروی F_x که به وسیله برهم نهادی عبارات نیروی سینوسی منفرد توصیف می‌شود، به وسیله تابع گوسی به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود [۷]

$$\frac{F_{40}}{A} = \frac{F_i}{\sqrt{2\pi}\delta^2} e^{-(x_n - \mu_0)^2 / 2\delta^2} \quad (9)$$

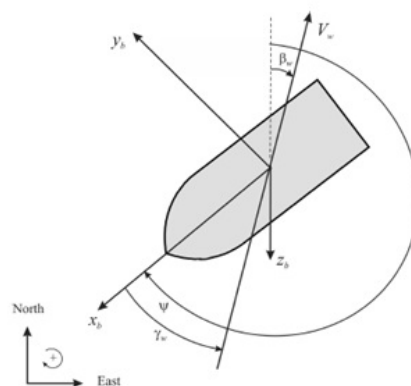
که x_n فرکانس جزء n ام است، F_n دامنه نیرویی به ازای دامنه موج A برای n امین جزء است و μ_0 فرکانس موج متوسط و δ^2 واریانس است. شکل (۳) نیروی وارد شده از طرف امواج را در جهت رول نشان می‌دهد. ارتفاع مشخصه موج ۱ متر، دوره تناوب متوسط موج ۴ ثانیه، زاویه هدینگ ۹۰ درجه، فرکانس زاویه‌ای مشخصه ۴ هرتز، گام فرکانس زاویه‌ای ۰٫۰۸ هرتز و ضریب نیرویی موج: ۲۰۰۰۰۰ نیوتن فرض شده است. در این تحقیق



شکل ۲: ارتفاع موج جانسواپ



شکل ۳: نیروی تولید شده توسط امواج در جهت رول



شکل ۴: زوایای برخورد باد و حرکت شناور

$$(S_L, S_H) = (S_L, H_{LW}) \quad (18)$$

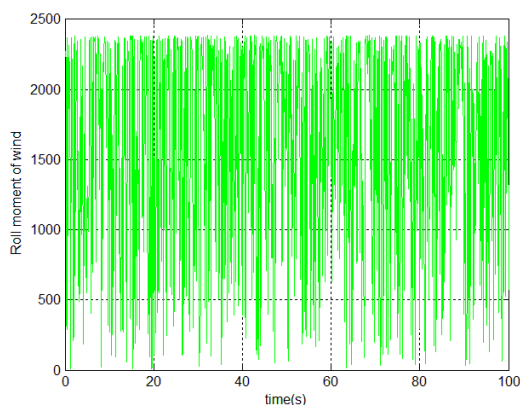
$$C_X(\gamma_w) = -CD_t \frac{A_{LW}}{A_{FW}} \frac{\cos(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_t}{CD_l}\right) \sin^2(2\gamma_w)} \quad (19)$$

$$C_Y(\gamma_w) = CD_t \frac{A_{LW}}{A_{FW}} \frac{\sin(\gamma_w)}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_t}{CD_l}\right) \sin^2(2\gamma_w)}$$

$$C_K(\gamma_w) = kC_Y(\gamma_w)$$

$$C_N(\gamma_w) = \left[\frac{S_1}{L_{oa}} - 0.18(\gamma_w - \frac{\pi}{2}) \right] C_Y(\gamma_w)$$

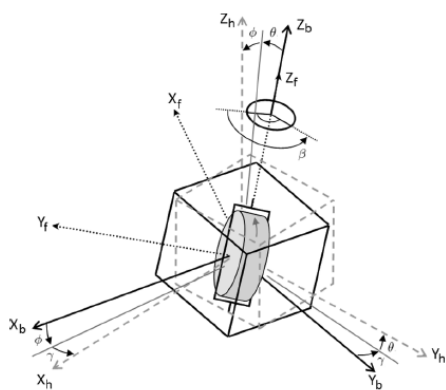
شکل (۵)، گشتاور اعمال شده از طرف باد با سرعت ۱۰ نات به شناوری با سطح برخورد روبرویی (A_{FW}) مترمربع، سطح برخورد جانبی (A_{LW}) مترمربع و طول ۱۷ متر را نشان می دهد. مقادیر عددی ثابتها برای یک قایق تندرو از منبع [۱۳] استخراج شده اند:



شکل ۵: گشتاور ایجاد شده توسط باد در جهت رول

۴ گشتاورها و نیروهای استهلاک رول

همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است برای توصیف سیستم ژيروسکوپی، دستگاههای مختصات راستگرد مورد استفاده قرار می گیرد [۷].



شکل ۶: دستگاه های مختصات و زوایا

سرعت نسبی باد در راستای x و y با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۶) محاسبه می شوند:

$$V_{RW} = \sqrt{u_{RW}^2 + v_{RW}^2} \quad (12)$$

$$\gamma_{RW} = -\text{atan2}(v_{RW}, u_{RW}) \quad (13)$$

$$u_{RW} = u - u_w \quad (14)$$

$$v_{RW} = v - v_w \quad (15)$$

$$u_w = V_w \cos(\beta_w - \psi) \quad (16)$$

$$v_w = V_w \sin(\beta_w - \psi)$$

ضرایب باد بر اساس تئوری صفحه هلمولتز-کیرشفیل توسط بلندرمان^۷ (۱۹۹۴) محاسبه شده اند. بارهای وارده از طرف باد به وسیله ۴ پارامتر اصلی محاسبه می شوند که عبارتند از: مقاومت عرضی CD_l و طولی CD_t ، پارامتر نیروی عرضی δ و فاکتور گشتاور رول k . مقادیر عددی برای شناورهای مختلف در جدول زیر داده شده است. ضرایب مقاومت طولی در جدول زیر بر اساس رابطه (۱۷) مقیاس بندی شده است:

$$CD_l = CD_{lAF}(\gamma_w) \frac{A_{FW}}{A_{LW}} \quad (17)$$

که مقادیر برای دو زاویه ۰ و ۱۸۰ درجه داده شده اند. مقدار ضریب مقاومت طولی (۰) برای باد جلو و ضریب مقاومت طولی (۱۸۰) برای باد پشت مورد استفاده قرار می گیرد. با فرض مرکز مساحت برخورد جانبی به صورت رابطه (۱۸) که بالای خط آبخور قرار دارد، ضرایب باد به صورت رابطه (۱۹) به دست آمده است. در نهایت پس از جای گذاری در فرمول بالا گشتاورها و نیروهای باد به دست خواهند آمد.

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، دستگاه‌های مختصات مراکز مرحله خود را دارند و دستگاه‌های مختصات جسم (قایق) و چرخ طیار مرجع برای منطبق شدن با محورهای اصلی اینرسی قایق و چرخ طیار چرخش‌ها حول محور ثابت شده بر روی جسم (X_b, Y_b, Z_b) ، به وسیله $(\theta, \varphi, \gamma)$ نشان داده می‌شوند و چرخش‌ها از (X_b, Y_b, Z_b) به (X_h, Y_h, Z_h) را بیان می‌کند. مومنومم زاویه‌ای کل یک سیستم ژيروسکوپي به صورت جمع مومنومم زاویه‌ای چرخ طیار و اجزای قاب که گشتاورهای عملگر حول سه محور در دستگاه مختصات متصل به جسم (X_b, Y_b, Z_b) می‌تواند برای هر جزء به صورت رابطه (۲۰) بیان شود:

$$\dot{H}_b = \dot{H}_{b*} \Omega_i \times H_{b*} = \frac{a}{dt} (A_i I_i \omega_i) + \Omega_i \times A_i I_i \omega_i$$

که A_i ماتریس چرخشی توصیف‌کننده چرخش i امین جزء است، تبدیل گشتاور اجزا در محورهای متصل به جسم وقتی که اجزا از (X_f, Y_f, Z_f) به (X_b, Y_b, Z_b) می‌چرخد. ω_i و \dot{H}_i چرخش‌ها و مومنومم جرمی اینرسی i امین جز نسبت به (X_f, Y_f, Z_f) را بیان می‌کنند. H_b گشتاور زاویه‌ای نسبی است و Ω_i کجی متقارن (معادل با عملیات ضرب خارجی) حرکات جسم که توسط i امین جز تجربه می‌شود.

و با استفاده از قانون معکوس ترنسپوز $(AB)^T = B^T A^T$ تأثیر هریک از اجزا به صورت رابطه (۲۱) بیان می‌شود:

$$(21)$$

$$\dot{H}_b = A_i I_i \omega_i + (\omega_i^T (A_i I_i)^T)^T + \Omega_i \times A_i I_i \omega_i = (A_i I_i) \omega_i + (A_i I_i + \Omega_i \times A_i I_i) \omega_i$$

که رابطه (۲۱) تأثیر هر جزء است که می‌تواند به شکل $H = D\omega + E\omega$ بیان شود که D بستگی به اینرسی و تعیین جهت دارد و E بستگی به اینرسی و نرخ تغییر جهت و حرکات جسم (قایق) دارد. با فرض اینکه اجزای چرخ طیار حول X_f محصور شده‌اند و حول X_f می‌چرخند و حرکت تقدیمی در راستای Z_f است و چرخ طیارها مرکز جرم‌هایی مشابه دارند که در مبدأ

دستگاه‌های مختصات مرجع قرار دارند و دستگاه‌های مختصات مرجع جسم با محورهای اصلی اینرسی جسم‌ها روی هم قرار می‌گیرند. بنابراین:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad I_i = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\Omega^* = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\gamma} & \dot{\phi} \\ \dot{\gamma} & 0 & -\dot{\theta} \\ \dot{\phi} & \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}, \quad \omega_i = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (23)$$

که ω_i برای چرخ طیار و اجزاء قاب می‌تواند به ترتیب به صورت $[0 \ \psi_{f1}^0 \ \beta_{f1}^0]^T$ و $[0 \ 0 \ \beta_{g1}^0]^T$ بیان شود. $\dot{\psi}$ و $\dot{\beta}$ نرخ چرخشی و حرکت تقدیمی است و I_{yy} ممان جرمی اینرسی حول محور چرخش (y_f) است و حرکات چرخ طیار، θ, φ و γ به ترتیب حرکات رول، پیچ و یاو هستند.

گشتاور اعمالی پیرامون (X_b, Y_b, Z_b) برای هر جزئی می‌تواند به صورت رابطه (۲۴) بیان شود:

$$(24)$$

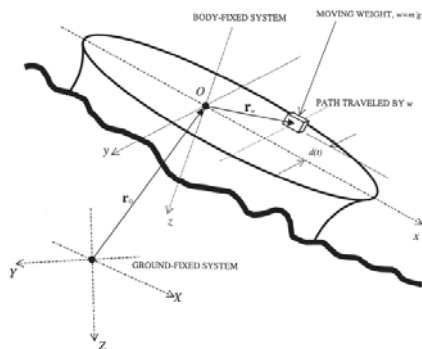
$$\dot{H}_b = \begin{bmatrix} I_{yy} \dot{\psi} \sin \beta + I_{yy} \dot{\psi} \beta \cos \beta - I_{yy} \dot{\psi} \dot{\gamma} \cos \beta + I_{zz} \dot{\phi} \dot{\beta} \\ I_{yy} \dot{\psi} \cos \beta - I_{yy} \dot{\psi} \beta \sin \beta + I_{yy} \dot{\psi} \dot{\gamma} \sin \beta - I_{zz} \dot{\theta} \dot{\beta} \\ I_{zz} \dot{\beta} - I_{yy} \dot{\psi} \dot{\phi} \sin \beta + I_{yy} \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \beta \end{bmatrix}$$

با فرض جانمایی یک سیستم ژيروسکوپي دو قلو که دو چرخ طیار در حال چرخش هستند و خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند، با محورهای چرخشی افقی که حرکات چرخ طیار را با فشار در حرکت یاو محدود می‌کند و از تأثیرات قاب صرف‌نظر می‌کنند. معادلات ژيروسکوپي حرکت به صورت رابطه (۲۵) بیان می‌شود:

$$\dot{H}_{\text{twin}} = \begin{bmatrix} 2I_{yy} \dot{\psi} \sin \beta + 2I_{yy} \dot{\psi} \beta \cos \beta \\ 2I_{yy} \dot{\psi} \dot{\gamma} \sin \beta \\ 2I_{yy} \dot{\psi} \dot{\phi} \sin \beta \end{bmatrix} \quad (25)$$

رابطه (۲۵) گشتاور منتج شده سیستم را بیان می‌کند. به‌طور قابل توجهی اگر حرکات پیچ و یاو کوچک باشند، سیستم فقط گشتاورهای رول ایجاد می‌کند. علاوه بر این اگر $\dot{\psi} = 0$ باشد، یعنی وقتی $\cos \beta = 0$ باشد، تکنیکی وجود دارد که هیچ گشتاور پایدارسازی نمی‌تواند حول محور رول تولید شود. گشتاور تولید شده در جهت رول بدون اعمال کنترل و به‌صورت تابعی از





شکل ۸ - شناور با سیستم کاهش رول بوسیله جرم جابجاشونده

جرم جابجا شونده تنها در جهت y حرکت می کند. لذا شتاب آن نسبت به زمین در دستگاه مختصات متصل به شناور به صورت رابطه (۲۸) است:

$$(28)$$

$$a_w = \dot{u}(t)i + \dot{v}(t)j + \dot{w}(t)k + \omega \times (v_0 + 2dj + \omega \times r_w) + \alpha \times r_w + \ddot{d}j$$

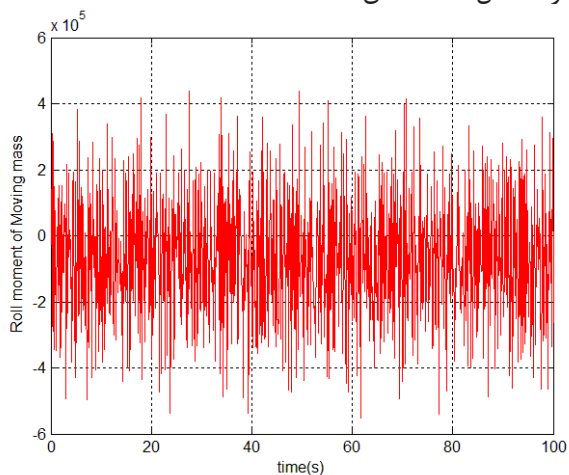
گشتاور ایجاد شده در جهت رول به صورت رابطه (۲۹)

می باشد که m' جرم جسم جابجا شونده است.

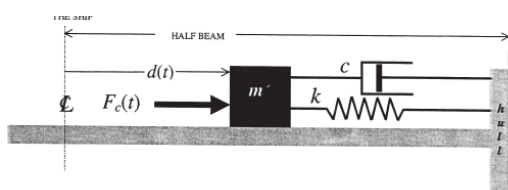
$$(29)$$

$$M = m' \begin{bmatrix} z_w(g_y - \dot{v} - ru + pw - \ddot{d} - \dot{r}x_w + \dot{p}z_w - rpz_w + r^2d + p^2d - pqx_w) \\ -d(g_z - \dot{w} - pv + qu - 2\dot{p}d - \dot{p}d + \dot{q}z_w - rpz_w + p^2z_w + q^2z_w - rqd) \end{bmatrix}$$

گشتاور اعمال شده در جهت رول توسط جرم جابجاشونده به صورت تابعی از اعداد تصادفی و رندوم در شکل (۹) نشان داده شده است.



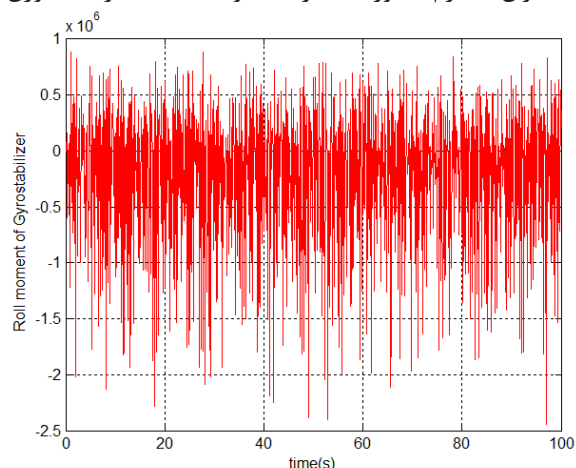
شکل ۹ : گشتاور اعمال شده در جهت رول توسط جرم جابه جاشونده



شکل ۱۰ : شماتیک سیستم جرم جابه جاشونده

اعداد تصادفی در شکل (۷) نشان داده شده است.

میزان جرم مورد نیاز حدود ۱ تا ۲ درصد وزن



شکل ۷ - گشتاور ایجاد شده توسط ژایرواستابلیزر در جهت رول

در شکل (۸) شناوری با جسم جابجا شونده برای استهلاک رول نمایش داده شده است [۱۱]. دو دستگاه

مختصات متصل به زمین و متصل به شناور برای توصیف حرکات شناور و وزنه مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به جابجایی بار و خدمه، ممکن است مرکز جرم شناور تغییر کند لذا مبدا مختصات در مرکز جرم قرار ندارد. موقعیت کشتی با r_0 و موقعیت جرم جابجاشونده با r_w در رابطه شماره (۲۶) تعریف شده اند. I, J, K و بردارهای اصلی دستگاه مختصات متصل به زمین و z, i, k بردارهای اصلی دستگاه مختصات متصل به شناور هستند.

$$r_0 = X_0(t)I + Y_0(t)j + Z_0(t)K \quad (26)$$

$$r_w = X_w i + d(t)j + Z_w k$$

بردارهای سرعت خطی و سرعت زاویه ای و شتاب خطی و شتاب زاویه ای شناور در دستگاه مختصات متصل به کشتی با روابط (۲۷) نمایش داده می شوند:

$$(27)$$

$$v_0 = u(t)i + v(t)j + w(t)k$$

$$\omega = p(t)i + q(t)j + r(t)k$$

$$a_0 = \dot{u}(t)i + \dot{v}(t)j + \dot{w}(t)k + \omega \times v_0$$

$$\alpha = \dot{p}(t)i + \dot{q}(t)j + \dot{r}(t)k$$

جابه‌جایی شناور را تشکیل می‌دهد. برای این سیستم محدودیت‌هایی برای شتاب و سرعت جابه‌جایی جسم وجود دارد که باید مدنظر قرار گیرد. همچنین موقعیت جسم نیز از دیگر محدودیت‌های مسئله است. محدودیت‌های فوق‌الذکر به صورت رابطه (۳۰) هستند:

$$|d(t)| \leq d_{\max}, |\dot{d}(t)| \leq \dot{d}_{\max} \text{ and } |\ddot{d}(t)| \leq \ddot{d}_{\max}$$

۵ محدودیت‌های عملیاتی شناورهای نظامی مطابق با استانداردهای بین‌المللی

برای برخی از عملیات‌ها و فرایندهای شناورهای نظامی مطابق با استانداردها و قواعد بین‌المللی محدودیت‌هایی در میزان رول شناور وجود دارد که مطابق با جداول زیر ارائه شده‌اند [۱۶].

جدول ۱: معیارهای پرواز و فرود هلیکوپتر

محدودیت عملیاتی			نوع عملکرد
موقعیت	محدودیت	حرکت	
-	۱٫۸ درجه	رول	جابه‌جایی هلیکوپتر
-	۱٫۸ درجه	پیچ	
-	۲٫۵ درجه	رول	پرواز هلیکوپتر
-	۱٫۵ درجه	پیچ	
-	۲٫۵ درجه	رول	پرواز کوتاه ^۸
-	۱٫۵ درجه	پیچ	
-	۲٫۵ درجه	رول	فرود هلیکوپتر
-	۱٫۵ درجه	پیچ	
محل فرود	۱ متر بر ثانیه	سرعت عمودی	

جدول ۲: معیارهای جابه‌جایی با اتصال بین دو شناور

محدودیت عملیاتی			پارامترهای محدودکننده
موقعیت	محدودیت	حرکت	
-	۲٫۲ درجه	رول	تجهیزات: زاویه سرخوردگی روی Pallet truck ^۹
-	۲٫۲ درجه	پیچ	
محل اتصال	۰٫۵ بر دقیقه	MII	افراد
محل اتصال	۲۰ درصد خدمه، ۴ ساعت	MSI	
محل اتصال	۰٫۵ بر ساعت	شاخص خستگی عرشه	

جدول ۳: معیارهای سیستم موشک هدایت‌شونده

محدودیت عملیاتی		محدودیت زیرسیستم‌ها
محدودیت	حرکت	
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	پرتاب‌کننده ^{۱۰}
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	عملکرد جابه‌جایی خودکار موشک
۲٫۵ درجه	رول یا پیچ	عملکرد جابه‌جایی دستی موشک

جدول ۴: معیارهای سیستم اژدر

محدودیت عملیاتی		محدودیت زیر سیستمها
محدودیت	حرکت	
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	پرتاب کننده
۱٫۳ درجه	رول یا پیچ	بارگذاری اژدر بر روی نوار نقاله
۱٫۵ درجه	رول یا پیچ	بارگذاری اژدر به صورت دستی
۳٫۸ درجه	رول یا پیچ	بارگذاری مستقیم به صورت خودکار

جدول ۵: معیارهای توپها

محدودیت عملیاتی			نمونه توپ
موقعیت	محدودیت	حرکت	
-	۳٫۸ درجه	رول	۵ اینچ / ۵۴
-	۳٫۸ درجه	پیچ	
نوک لوله تیربار یا راکتانداز	۰٫۵ متر بر ثانیه	سرعت عمودی	

جدول ۶: معیارهای سیستم تجهیزات پشتیبانی (مانند جابه‌جایی مهمات و ...)

محدودیت عملیاتی		
موقعیت	محدودیت	حرکت
-	۱٫۸ درجه	رول
-	۱٫۸ درجه	پیچ
موقعیت انجام وظیفه	۱ بر دقیقه	وقفه تشدید شده حرکت

جدول ۷: معیارهای پیش فرض خدمه

موقعیت	محدودیت		پارامتر
	شناور تندروری کوچک	شناور نظامی	
-	۴ درجه	۴ درجه	رول
-	-	۱٫۵ درجه	پیچ
عمود سینه	0.65g	0.275g	شتاب عمودی
پل فرماندهی	0.275g	0.2g	شتاب عمودی
پل فرماندهی	0.1g	0.1g	شتاب عرضی

معادلات حرکت رول کشتی [۷]

بیان کاملاً غیر خطی حرکات کشتی در رابطه (۳۱) نشان داده شده است:

$$(31)$$

$$F = [M + A]\ddot{x} + B(u)\dot{x} + \int_0^t K(t - \tau, u)\dot{x}(\tau)d\tau + [G + G'(u)]x$$

ممان‌های تحریک، تابعی از فرکانسی و ماتریس جرمی افزوده (مستقل از سرعت) $[M+A]$ ماتریس دمپینگ و البته به سرعت $B(u)$ ، ماتریس نیروی سختی G و $G'(u)$ و اثرات وابسته به سرعت Fluid Memory معمولاً بسیار پیچیده برای اهداف کنترلی مطرح شده‌اند و فرض‌های ساده‌سازی معمولاً انجام می‌شود. با فرض حرکات خطی، معادلات حرکت می‌تواند به صورت رابطه (۳۲) بیان شود:

$$F_j e^{i\omega t} = \sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{x}_k + B_{jk}\dot{x}_k + C_{jk}x_k], \quad j = 1 - 6 \quad (32)$$

اگر نیروهای Surge و پاسخ‌ها در مقایسه با سایر حرکات کوچک باشند و فرض تشابه سمت راست و چپ کشتی ماتریس‌های ضریب تأثیر می‌تواند به دو مجموعه از حرکات کوپل Pitch-heave و Sway-Roll-Yaw کاهش پیدا کند. علاوه بر این، با فرض اینکه تأثیرات ضمیمه ساکن از جمله تأثیرات yaw و Sway بر حرکات رول کوچک هستند، حرکت رول می‌تواند جدا شده و به صورت رابطه (۳۳) بیان شود:

$$F_1 + F_2 - F_3 - F_4 = (I + A)\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta \quad (33)$$

که θ : بیان کننده حرکت رول است. F_1 عبارت نیروی موج، F_2 عبارت نیروی باد، F_3 عبارت نیروی ژایرواستابلایزر، F_4 عبارت نیروی جرم جابه‌جاشونده، I اینرسی رول سیستم، A جرم افزوده، B دمپینگ رول و C عبارت سختی مدل است. در این مقاله عبارت‌های اینرسی، جرم افزوده، دمپینگ و سختی به صورت تقریبی برابرند با:

$$I = mk^2$$

$$A = 0.31$$

$$B = 2\beta_d \sqrt{C(I + A)}$$

$$C = \omega_{*4}^2 (I + A)$$

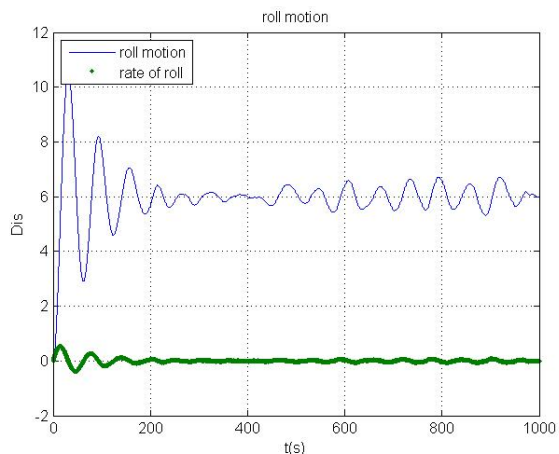
که K بیانگر شعاع ژیراسیون رول، m جرم شناور، β_d نرخ دمپینگ، ω_{*4} فرکانس رول طبیعی دمپ نشده است. شعاع ژیراسیون رول K فرض شده است که $4/0$ عرض شناور و نرخ دمپینگ $0/1$ فرض شود. شکل (۱۱) حرکت رول و سرعت آن را بدون اعمال نیروهای ژایرواستابلایزر و جرم جابه‌جاشونده برای یک شناور با طول ۵۰ متر، عرض ۷٫۹ متر، ارتفاع آبخور ۳ متر و تناژ جابه‌جایی ۶۷ تن نمایش می‌دهد.

در نظر گرفتن رول شناور در حد قابل قبول رعایت و حتی المقدور از صرف هزینه اضافی و وزن زیاد جلوگیری کرد.

۷ مراجع

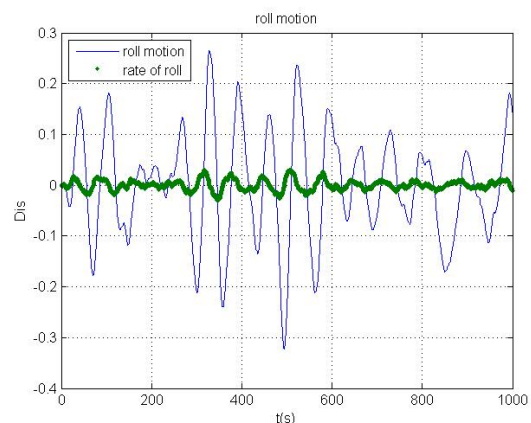
- [1] T. Perez and M. Blanke, "Ship roll damping control," *Annu. Rev. Control*, vol. 36, no. 1, pp. 129–147, Apr. 2012.
- [2] A. J. Koshkouei and L. Nowak, "Stabilisation of ship roll motion via switched controllers," *Ocean Eng.*, vol. 49, pp. 66–75, Aug. 2012.
- [3] Z. Liu and H. Jin, "Extended radiated energy method and its application to a ship roll stabilisation control system," *Ocean Eng.*, vol. 72, pp. 25–30, Nov. 2013.
- [4] H. Haghghi and M. R. Jahed-Motlagh, "Ship roll stabilization via sliding mode control and gyro-stabilizer," in *Maritime Shipping Conference*, 2012, no. Lxii.
- [5] H. Sira-Ramirez, "On the sliding mode control of nonlinear systems," *Syst. Control Lett.*, pp. 303–312, 1992.
- [6] N. Townsend and A. Sheno, "A Gyroscopic Wave Energy Recovery System for Marine Vessels," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 271–280, 2012.
- [7] N. C. Townsend and R. A. Sheno, "Control Strategies for Marine Gyrostabilizers," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 243–255, 2014.
- [8] K. S. Youssef, S. a Ragab, A. H. Nayfeh, and D. T. Mook, "Design of passive anti-roll tanks for roll stabilization in the nonlinear range," *Ocean Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 177–192, Feb. 2002.
- [9] O. a. Marzouk and A. H. Nayfeh, "Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks," *Ocean Eng.*, vol. 36, no. 9–10, pp. 661–671, Jul. 2009.
- [10] Z. Segal and A. Segal, "Hydrodynamic interaction of roll stabilizing wings," *Ocean Eng.*, vol. 41, pp. 27–32, Feb. 2012.
- [11] T. W. Treakle, D. T. Mook, and A. H. Nayfeh, "A time-domain method to evaluate the use of moving weights to reduce the roll motion of a ship," *Ocean Eng.*, vol. 27, pp. 1321–1343, 2000.
- [12] S. Lee, K.-P. Rhee, and J.-W. Choi, "Design of the roll stabilization controller, using fin stabilizers and pod propellers," *Appl. Ocean Res.*, vol. 33, no. 4, pp. 229–239, Oct. 2011.
- [13] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, First Edit. 2011, p. 582.

[۱۴] و. جهانمرد، م. داستان، م. ت. پور، م. س. سیف و ح. مهدیقلی، "تولید رکورد تاریخچه زمانی امواج بر مبنای



شکل ۱۱: حرکت رول و سرعت آن بدون پایدارساز

با توجه به معیارهای قیدشده در جداول محدودیت‌های عملیاتی شناورهای نظامی و میزان رول شناور در محدوده ۶ درجه، لازم است رول شناور با استفاده از تجهیزات پایدارساز رول کاهش یابد. پس از اعمال تجهیزات پایدارساز و کنترل آن‌ها جهت کاهش رول شناور، نمودار حرکت رول و سرعت آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است. جرم جسم جابه‌جاشونده ۲۰۰ کیلوگرم بوده و جرم دیسک دوار ژایرواستابلایزر ۱۰۰ کیلوگرم بوده و با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه با دور ثابت در حال گردش است.



شکل ۱۲: حرکت رول و سرعت آن با پایدارساز

۶ نتیجه‌گیری

با مقایسه شکل‌های (۱۱) و (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از سیستم مورد مطالعه در کاهش رول موثر بوده و می‌تواند رول شناور را در محدوده استاندارد عملیاتی شناور پایدار نماید. پایدارسازی رول در این مورد می‌تواند با تنظیم پارامترهای مسئله تغییر نماید، لذا می‌توان محدودیت‌های اجرا را با

طیف حاصل از شرایط حدی منطقه خلیج فارس در دوره بازگشت‌های مختلف “پنجمین همایش ملی صنایع فرا ساحل، ۱۳۹۲.

[۱۵] علیرضا روشن بین، “بررسی تاثیر مشخصات امواج دریا در حرکات شناورهای تندرو” همایش صنایع دریایی، ۱۳۸۵.

[16] NATO Unclassified-STANAG 4154 (Edition 3), Common Procedures for Sea keeping in the Ship design Process, December 2000

