

انتخاب ابعاد بهینه‌ی فلاپویل جابروی ضد غلتش جهت نصب بر روی شناور تندرو

موسی دماوندی، روزبه شفقت*، مرتضی دردل

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۵/۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۹

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2017.42317](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.42317)

چکیده

جابروهای ضد غلتش از جمله تجهیزات کارآیی هستند که به منظور افزایش پایداری شناورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. جابروی ضد غلتش بر مبنای مفاهیم ژيروسکوپی و با استفاده از ممان حاصل از فلاپویل، گشتاوری مخالف با گشتاور موج ایجاد کرده، جلوی رول ناخواسته‌ی شناور را می‌گیرد. نخستین گام در طراحی جابروی ضد غلتش، طراحی فلاپویلی است که با توجه به گشتاور حاصل از امواج دریا و سرعت زاویه‌ای موج، گشتاور مناسبی را برای کاهش غلتش شناور اعمال نماید. با توجه به این که گشتاور بازگرداننده‌ی جابرو رابطه‌ی مستقیمی با ممان اینرسی جرمی دارد، برای افزایش گشتاور بازگرداننده، باید یک فلاپویل با ممان اینرسی بالا برگزید؛ در مقابل، افزایش ممان اینرسی، باعث افزایش جرم فلاپویل نیز می‌شود. در این مطالعه با در نظر گرفتن شرایط امواج خلیج فارس، برای بهینه‌سازی جرم و ممان اینرسی، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده است؛ به طوری که کم‌ترین جرم و بیشترین ممان اینرسی حاصل شود. در نهایت ابعاد تمامی انتخاب‌های بهینه‌ی فلاپویل‌ها در قالب نمودار جبهه‌ی پرتو ارائه شده است تا بر اساس نتایج به دست آمده، شرایط عملکردی با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند جرم و تعداد جابرو در یک شناور مورد بررسی قرار گیرد.

واژگان کلیدی: جابروی ضد غلتش، فلاپویل، ممان اینرسی جرمی، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: rshafaghat@nit.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به گسترش استفاده‌ی روزافزون از شناورهای تندرو در کاربردهای نظامی و غیرنظامی، حفظ تعادل و پایداری این دسته از شناورها در مقابله با تلاطم امواج دریا، همواره یکی از مباحث مهم به شمار می‌رود. با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده، بهترین گزینه‌ی پایدارساز برای کاهش غلتش شناورهای تندرو، جابروهای ضد غلتش^۱ می‌باشند.

جابرویی ضد غلتش بر مبنای مفاهیم ژيروسکوپیی و با استفاده از ممان حاصل از فلاپویل، گشتاوری مخالف با گشتاور موج ایجاد کرده، جلوی رول ناخواسته‌ی شناور را می‌گیرد. از مزیت‌های جابروهای ضد غلتش می‌توان به مکان نصب آن‌ها اشاره نمود که به‌طور کامل در داخل شناور نصب می‌شوند و بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی بدنه هیچ‌گونه اثر منفی نمی‌گذارند. نخستین گام در طراحی جابرویی ضد غلتش، طراحی فلاپویلی است که با توجه به گشتاور حاصل از امواج دریا و سرعت زاویه‌ای موج، گشتاور مناسبی را برای کاهش غلتش شناور اعمال نماید. با توجه به این‌که گشتاور بازگرداننده‌ی جابرو، رابطه‌ی مستقیمی با ممان اینرسی جرمی دارد، برای افزایش گشتاور بازگرداننده، باید یک فلاپویل با ممان اینرسی بالا برگزید؛ در مقابل، یکی از پیامدهای ناخواسته‌ی افزایش ممان، افزایش جرم فلاپویل می‌باشد؛ لذا انتخاب بهینه‌ی فلاپویل به شکلی که در کنار سبکی دارای ممان اینرسی بالایی نیز باشد از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

اولین جابرویی ثبت شده برای به‌کارگیری در شناورها، مربوط به یک اژدر است که شامل چرخ طیار به قطر ۱۶ اینچ (۰/۴ متر) و سرعت چرخشی ۱۶۰۰۰ rpm (۱۶۷۵ rad/s) می‌باشد. اولین جابرو استفاده شده در شناورها از نوع غیرفعال بوده، که دکتر اتو اشلیک^۲ در سال ۱۹۰۴ برای کاهش غلتش پیشنهاد داد. شایان توجه است که جابروهای فعال در حیطه‌ی دریایی،

نخستین بار در یک شناور مدل توسط المر اسپری^۳ در سال ۱۹۰۸ معرفی شد. اولین مدل واقعی از جابروهای فعال در شناور آس وُردن^۴ در سال ۱۹۱۲ نصب شد. سپس در سال ۱۹۱۵ المر اسپری اختراع جابروهای فعال را با نصب بر روی چندین شناور نظامی به نام خود ثبت کرد. در ادامه‌ی این کاربردهای نظامی، جابروهای فعال تا سال ۱۹۶۶ بر روی تقریباً ۴۰ شناور دیگر نصب شدند. بزرگ‌ترین شناوری که جابرویی فعال بر روی آن نصب شد، شناور ایتالیایی، کنت دی ساویا^۵ (۱۹۳۲-۱۹۵۰) با تناژ ۴۱۷۰۰ تن بود که توانسته بود غلتش این شناور را تا ۶۰ درصد کاهش دهد. از سال ۱۹۵۰ توسعه‌ی چشم‌گیری در مورد جابروهای فعال به ثبت نرسید، درحالی‌که در مقایسه با آن، اخیراً جابروهای ضد غلتش توسعه‌ی مناسبی یافته‌اند (Townsend N. et al., 2007).

همان‌طور که اشاره شده است، برای طراحی یک جابرویی ضد غلتش ابتدا باید فلاپویل آن را طراحی کرد. یو^۶ و همکارانش، چگونگی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی هندسه‌ی فلاپویل را با استفاده از روش مبتنی بر طراحی تجربی (DOE^۷) ارائه دادند (Uwe L. et al., 1997). کرس^۸ شکل بهینه‌ی فلاپویل را بر اساس بهترین توزیع ضخامت در امتداد شعاع، به‌منظور دستیابی به حداقل سطح تنش، به دست آورد. وی برای دستیابی به این هدف از دو روش المان محدود دو بعدی و روش تحلیلی استودولا^۹ استفاده کرد (Kress G., 2000). دمز و تورانت^{۱۰} دو روش برای طراحی بهینه‌ی فلاپویل‌های کامپوزیتی^{۱۱} به‌منظور دستیابی به حداکثر انرژی جنبشی ارائه کردند؛ روش اول بر اساس قطعه-قطعه کردن فلاپویل به بخش‌های مشابه کوچک‌تر و در روش دوم جنس فلاپویل تابعی از

³ Elmer Sperry

⁴ USS Worden

⁵ Conte Di Savoia

⁶ Uwe

⁷ Design of Experiments

⁸ G.R Kress

⁹ Stodola

¹⁰ Dems and Turant

¹¹ fiber- reinforced

¹ Anti-Rolling Gyro (ARG)

² Dr. Otto Schlick

سرعت زاویه‌ای موج انجام می‌شود. شایان توجه است، در انتها نیز با در نظر گرفتن ویژگی‌های امواج خلیج فارس و بر اساس نتایج به دست آمده از ممان اینرسی و جرم، ابعاد فلاپویل برای بهترین هندسه انتخابی (با توجه به شرایط عملکردی) مشخص می‌شود. فلاپویل بهینه، فلاپویلی است که در کنار دارا بودن ممان اینرسی بالاتر، جرم پایین‌تری داشته باشد. برای این‌که افزایش ممان اینرسی و کاهش جرم فلاپویل به‌طور هم‌زمان انجام شود، با تشکیل توابع هدف مناسب برای هرکدام از خواسته‌ها، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه برای نیل به اهداف مورد نظر استفاده شده است. با به کار بردن این روش ابعاد بهینه‌ی فلاپویل به دست می‌آید.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱- عملکرد جاپروهای ضد غلتش

با توجه به شکل ۱، در تشریح اصول کاری یک جاپرو غیرفعال برای کنترل غلتش شناور باید گفت: بر طبق اصل ژيروسکوپ، تقابل بین اندازه حرکت زاویه‌ای فلاپویل (H) و سرعت زاویه‌ای غلتش شناور به واسطه‌ی نیروی امواج ($\dot{\phi}$)، سبب ایجاد گشتاور ژيروسکوپی (T_g) می‌شود.

گشتاور ایجاد شده توسط جاپروی ضد غلتش به کمک روابط (۱) و (۲) به دست می‌آید:

$$H=I \times \omega \quad (1)$$

$$T_g = H \times \dot{\phi} \quad (2)$$

که در آن؛ I ممان اینرسی فلاپویل و ω سرعت زاویه‌ای الکتروموتور متصل به فلاپویل می‌باشد.

همگن‌سازی است (Dems K. and Turant J., 2009). هنگل^۱ و همکارانش، با استفاده از روش المان محدود به ارزیابی تنش‌ها در حاشیه و بازوی^۲ فلاپویل پرداختند پرداختند و نتایج به دست آمده را با محاسبات تحلیلی اعتبارسنجی نمودند. نوع فلاپویل‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع فلاپویل‌های بازودار بوده که ۴، ۶ و ۸ بازو داشتند (Dhenge, S. et al., 2012). مولیسواران و یوگش^۳ انرژی ذخیره شده در فلاپویل را برای پنج ماده‌ی چدن خاکستری، آلیاژ آلومینیوم، فولاد^۴، کامپوزیت فیبر کربن (۴۰٪ اپوکسی) و فیبر شیشه‌ای (۴۰٪ اپوکسی) به‌صورت تابعی از جرم، شعاع فلاپویل و سرعت زاویه‌ای بررسی کردند و در نهایت کامپوزیت را به عنوان ماده‌ی بهینه برای جنس فلاپویل پیشنهاد دادند (Mouleswaran K. and Yogesh K.). نیودا^۵ و همکاران، وزن فلاپویل دستگاه منگنه‌کوب را بر اساس الگوریتم ژنتیک با توجه به قیدهایی شامل وزن فلاپویل، تنش شافت، تنش در لبه‌ی بیرونی، تنش ناشی از ضربه و پایداری فلاپویل بهینه کردند (Naidu et al., 2013). راتود و ستیش^۶ به طراحی تحلیلی فلاپویل‌های دارای بازو پرداختند که برای عملیات سوراخ کردن پرسی به کار می‌روند. هم‌چنین ابعاد این فلاپویل‌ها نیز با توجه به قیدهایی شامل سرعت دورانی فلاپویل، ضخامت صفحه فولادی سوراخ شونده و قطر فلاپویل مورد ارزیابی قرار گرفته است (Rathod B. and Satish R. 2014).

با توجه به اهمیت به‌کارگیری جاپروهای ضد غلتش در راستای پایداری بیشتر شناورهای تندرو و نیز با در نظر گرفتن اهمیت هندسه‌ی فلاپویل در عملکرد بهینه‌ی جاپرو، در این مطالعه سعی شده است تا روند انتخاب یک فلاپویل بهینه مورد بررسی قرار گیرد. طراحی فلاپویل با توجه به گشتاور حاصل از امواج دریا و

¹ S.M. Dhenge

² Rim and ram

³ Mouleswaran and Yogesh

⁴ Maraging steel

⁵ Appala Naidu

⁶ Rathod and Satish

$$I = \int r^2 dm \quad (3)$$

$$dm = \rho dV = \rho dV_1 + \rho dV_2$$

$$dV_1 = 2\pi r h_1 dr, \quad dV_2 = 2\pi r h_2 dr$$

$$I = \int r^2 \rho dV_1 + \rho dV_2 \quad (4)$$

$$I = \rho \frac{\pi}{2} [h_2(r_2^4 - r_1^4) + h_1 r_1^4] \quad (5)$$

با کمک رابطه‌ی (۵)، ممان اینرسی فلاپویل بر حسب ابعاد آن به دست می‌آید که در این کار به عنوان یکی از توابع هدف شناخته می‌شود. همچنین رابطه‌ی جرم فلاپویل به عنوان تابع هدف دیگر، بر حسب ابعاد آن به صورت رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید:

$$m = \rho \pi [h_1 r_1^2 + h_2 (r_2^2 - r_1^2)] \quad (6)$$

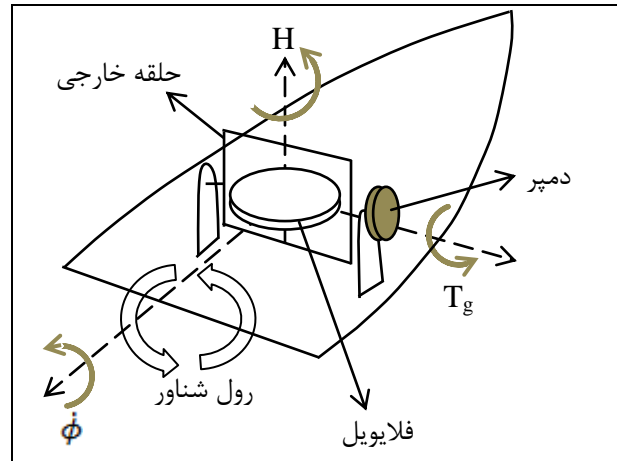
۳-۲- تعیین قیود و نوع جابجایی

پس از تعیین توابع هدف، مشخص نمودن قیودهای مسئله حائز اهمیت فراوانی می‌باشد. در طراحی تجهیزات صنایع دریایی همواره سعی بر آن است که این تجهیزات تا حد امکان بیشترین راندمان را در کمترین فضا داشته باشند. با توجه به محدودیت‌های موجود برای جابجایی، از قبیل کمبود فضای آزاد برای نصب، محدودیت حجم، محدودیت وزن و توان مورد نیاز برای به کار انداختن آن‌ها، ضروری است که ابعاد و وزن جابجایی (ها) کنترل شود. برای شناسایی بازه‌های مناسب برای قیودها، شناور تندروی کوگار به عنوان شناور هدف گزینش شده است. مشخصات اصلی شناور کوگار در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات اصلی شناور مدل

زاویه تریبم اولیه	عمق	عرض	طول	جابجایی
۲ درجه	۱/۵ متر	۲/۹ متر	۱۳/۲ متر	۲۳/۴ تن

به منظور تعیین دقیق قیودهای مسئله، دو رویکرد مورد توجه قرار گرفته است. ابتدا با بررسی‌های به عمل آمده در رابطه با فضای در اختیار در شناور تندروی کوگار و

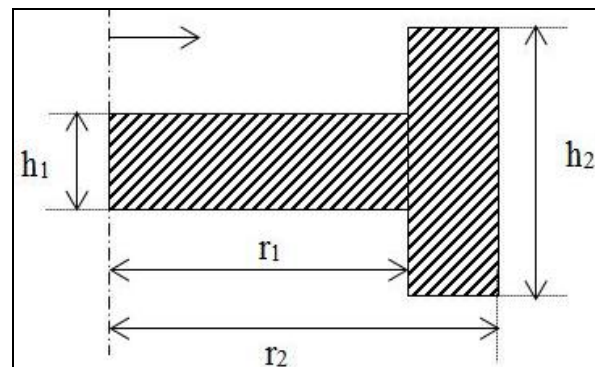


شکل ۱. نحوه عملکرد یک جابجایی غیرفعال برای کنترل غلش شناور

۲-۲- محاسبات مربوط به فلاپویل

طبق روابط حاکم بر ممان اینرسی، برای این که فلاپویل ممان اینرسی جرمی بزرگ‌تری داشته باشد، باید توزیع جرم در فاصله دورتری از محور دوران قرار گیرد؛ بنابراین برش سطح مقطع فلاپویل به صورت شکل ۲ در نظر گرفته شده است.

بر اساس شکل کلی فلاپویل، با کمک انتگرال‌گیری می‌توان ممان اینرسی (I) و جرم فلاپویل را محاسبه نمود (مریام جی. ال.، کریگ ال. جی. ۲۰۰۴).



شکل ۲. هندسه‌ی فلاپویل جابجایی ضد غلش

موجود، قیدهای رابطه‌ی (۷) برای طراحی در نظر گرفته شده‌اند:

$$150 \leq r_1 < r_2 \leq 250 \text{ mm}$$

$$50 \leq h_1 < h_2 \leq 170 \text{ mm} \quad (۷)$$

$$m \leq 200 \text{ kg}$$

همچنین در تعریف این قیدها جنس فلایویل از فولاد با چگالی 7800 kg/m^3 در نظر گرفته شده است.

نیز نیاز کاربر، شرایط بحرانی وزنی و حجمی شناور استخراج شدند؛ سپس به منظور الگوبرداری از نمونه‌های موجود در صنعت دریایی، جایروهای پایدارساز مورد استفاده برای شناورهای ساخت شرکت فرتی (FERRETTI) مورد بررسی قرار گرفتند. ابعاد اصلی این قایق‌ها به همراه مشخصات جایروهای به کار رفته در آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به مطالب بیان شده و بر اساس محدودیت‌های

جدول ۲. قایق‌های مجهز به جایروهای ضد غلتش، ساخت شرکت فرتی

FY	Dimensions of Boat			ARG		
	Model	Length m.	Width m.	Displacement Tons	Quantity	
2000*					4000*	
	Ferretti 880	26.94	6.72	82.00		2
	Ferretti 830	23.99	6.25	68.00		2
	Ferretti 810	23.99	6.00	62.50		2
	Ferretti 760	23.15	5.95	54.00		2
	Ferretti 730	22.20	5.48	48.80	1	1
	Ferretti 680	20.63	5.63	45.00		1
	Ferretti 620	18.75	5.10	34.50		1
	Ferretti 590	17.86	5.25	32.50		1
	Ferretti 550	16.92	4.93	28.80	1	
	Ferretti 500	15.37	4.60	22.40	1	
	Ferretti 460	14.15	4.34	19.00	1	

Specifications	ARG	
	*Serie 2000	**Serie 4000
Anti-Rolling Torque at Rated RPM	12,500Nm MAX	25,000Nm MAX
Rated RPM	4,400rpm	3,750rpm
Angular Momentum at Rated RPM	2,500Nms	5,000Nms

مسئله‌ی بهینه‌سازی به صورت رابطه‌ی (۸) خواهد بود.

$$m = \rho\pi[h_1r_1^2 + h_2(r_2^2 - r_1^2)]$$

$$I = \rho \frac{\pi}{2} [h_2(r_2^4 - r_1^4) + h_1r_1^4]$$

$$150 \leq r_1 < r_2 \leq 250 \text{ mm} \quad (۸)$$

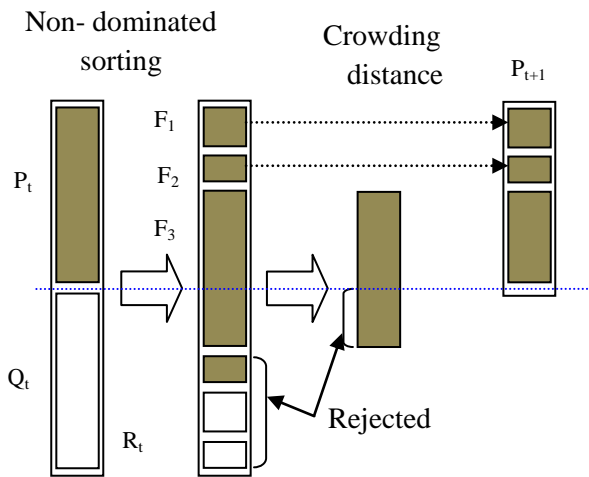
$$50 \leq h_1 < h_2 \leq 170 \text{ mm}$$

$$m \leq 200 \text{ kg}$$

۲-۴- تعریف مسئله

همان‌طور که در گذشته نیز اشاره شده است، هدف از بهینه‌سازی ابعاد فلایویل در این پژوهش، دستیابی به بیشترین مقدار ممان اینرسی با کمینه کردن جرم می‌باشد؛ لذا توابع هدف؛ توابع جرم و ممان اینرسی به همراه قیدهای معرفی شده، به عنوان مسئله‌ی بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ بنابراین

- تکرار مرحله ۵ تا دستیابی به تعداد کل تکرارهای مورد نظر (Deb K. at al., 2000).



شکل ۳. ساختار مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه (Deb K. at al., 2000)

۲-۵-۱ بهینه‌سازی ابعاد فلاپویل

همان‌طور که گفته شد فلاپویل بهینه، فلاپویلی است که ممان اینرسی بالا و جرم پایین داشته باشد. برای بهینه‌سازی جرم و ممان اینرسی فلاپویل، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده است. با توجه به توابع هدف و قیدهای ارائه شده، بهینه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب انجام شده است. نمودار پرتو^۳ در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این الگوریتم تعداد نسل‌ها (تعداد تکرارها) ۱۵۰ و تعداد جمعیت اولیه ۲۰۰ در نظر گرفته است.

۲-۶ اطلاعاتی از امواج خلیج فارس

با توجه به این‌که مطالعه بر اساس مشخصات غالب امواج خلیج فارس صورت گرفته است، در این بخش به‌طور کلی به ویژگی‌های امواج این دریا پرداخته می‌شود.

۲-۵ الگوریتم بهینه‌سازی

دب^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۰ برای حل مسائل و مشکلات مدل الگوریتم ژنتیک کلاسیک، الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب^۲ را پیشنهاد دادند. مشکلات عمده مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه‌ی پیشین عبارت‌اند از: حجم بالای محاسبات در هر تکرار که منجر به افزایش زمان اجرای مدل می‌گردد و عدم نگهداری تعداد مناسب مقادیر برتر در طول اجرای مدل. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مراحل اجرای این مدل بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت زیر است:

۱- تولید نسل والد تصادفی (P_0) به تعداد N ؛
 ۲- مرتب نمودن نسل اولیه والد بر اساس جواب‌های نامغلوب؛

۳- در نظر گرفتن رتبه‌ای متناسب با تراز نامغلوب برای هر جواب نامغلوب (۱ برای بهترین تراز، ۲ برای بهترین تراز بعد و ...)

۴- تولید نسل فرزندان (Q_0) به تعداد N با استفاده از عملگرهای انتخاب، تولیدمثل و جهش؛

۵- با توجه به نسل اول تولیدشده که شامل کروموزوم‌های والد و فرزندان هستند، تولید نسل جدید به شرح زیر:

- ترکیب کروموزوم‌های والد (P_t) و فرزندان (Q_t) و تولید نسلی (R_t) به تعداد $2N$ ؛

- مرتب نمودن نسل (R_t) بر اساس روش دسته‌بندی نامغلوب و شناسایی جبهه‌های نامغلوب (F_1, F_2, \dots, F_l)؛

- تولید نسل والد برای تکرار بعد (P_{t+1}) با استفاده از جبهه‌های نامغلوب تولید شده به تعداد N ؛

- اعمال عملگرهای تولیدمثل و جهش بر روی نسل والد جدید تولید شده (P_{t+1}) و تولید نسل فرزندان (Q_{t+1}) به تعداد N ؛

¹ Deb

² Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

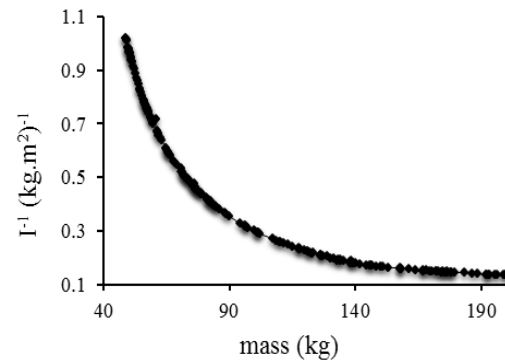
³ Pareto

بوشهر برای فصول مختلف سال نشان می‌دهد که میانگین تناوب امواج حدود سه ثانیه است (شکل ۶) (درخشان و همکاران، ۱۳۸۳ و لاری و همکاران، ۱۳۸۴).

همان‌طور که اشاره شده است، شناور مورد نظر در این تحقیق از نوع شناورهای تندرو پروازی می‌باشد. این نوع شناورها به دلیل سبکی و نوع فرم بدنه، دچار حرکات بسیار شدیدی می‌شوند که توأم با ضربات آب به بدنه خواهد بود و باعث ایجاد پدیده اسلمینگ می‌شود؛ لذا در وضعیت‌های دریایی بد، عملاً کارایی آن‌ها بسیار افت کرده و قابل استفاده نیستند. بنابراین حوزه کارایی آن‌ها بیشتر به آب‌های آرام محدود می‌باشد (سیف و توکلی، ۱۳۹۳)؛ لذا با توجه به مشخصه‌های آب‌های آرام که دارای محدوده‌ی موج بین ۰/۱ تا ۰/۵ متر می‌باشند، ارتفاع امواج در هنگام دریانوردی برابر ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است.

۳. نتایج

شایان توجه است که پیش از ورود به بحث نتایج و تحلیل، باید اثرات متقابل موج و شناور به منظور تعیین سرعت زاویه‌ای غلتش و نیز گشتاورهای ناخواسته‌ی وارد بر شناور مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور فرض می‌شود، سیستم در برخورد با امواج، به‌صورت خطی عمل می‌کند؛ بنابراین سرعت زاویه‌ای غلتش ناشی از برخورد امواج را می‌توان از حاصل ضرب عملگرهای دامنه‌ی پاسخ^۱ حرکت رول در سرعت زاویه‌ای موج منظم به‌دست آورد.



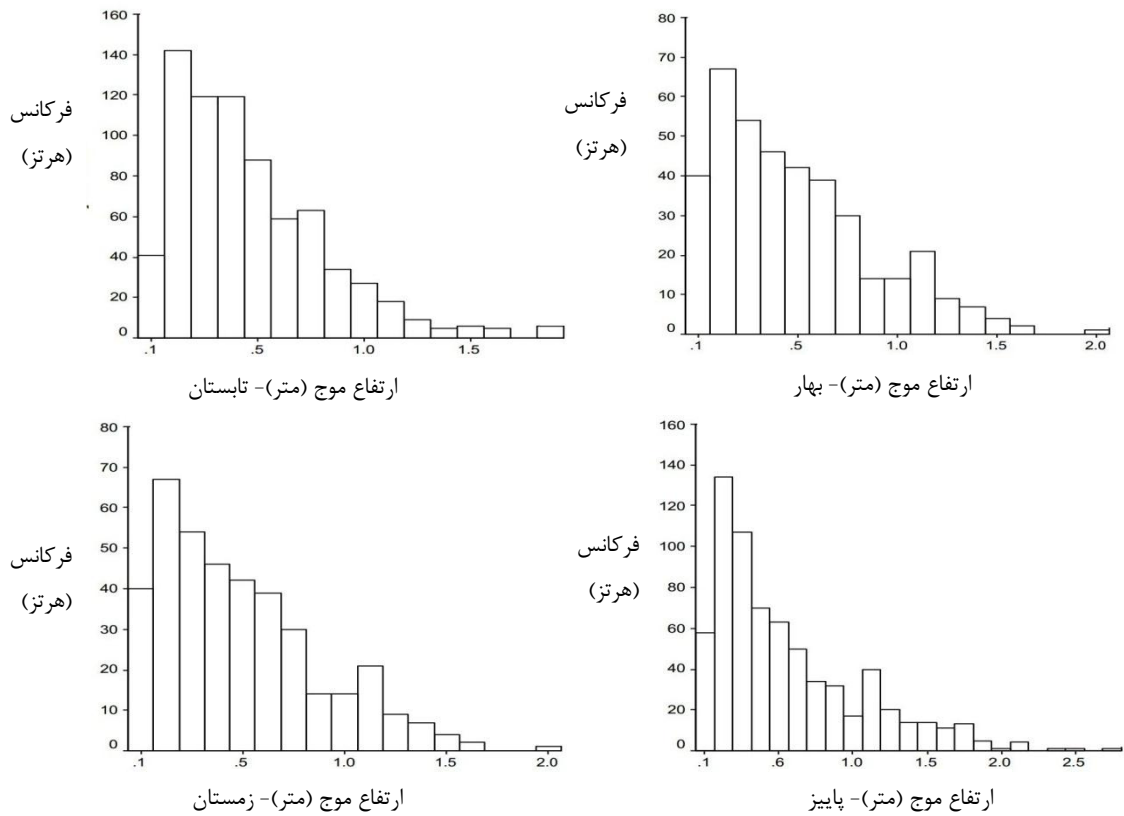
شکل ۴. نمودار جبهه پرتو

خلیج فارس یک دریای حاشیه‌ای و نیمه بسته با عمق میانگین حدودی ۳۵ متر، جزء آب‌های کم‌عمق محسوب می‌شود. عرض آن ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر و سطح آن در حدود ۲۴۰ هزار کیلومتر مربع می‌باشد. خلیج فارس در محدوده‌ی عرض جغرافیایی مناطق گرمسیری کره زمین و بین عرض‌های ۲۵ تا ۳۰ درجه شمالی قرار گرفته، به همین جهت آب‌وهوای غالب آن گرم و مرطوب است؛ به‌طوری‌که دمای آن حداکثر به ۴۵ درجه (و حتی تا ۵۰ درجه سلسیوس) نیز می‌رسد.

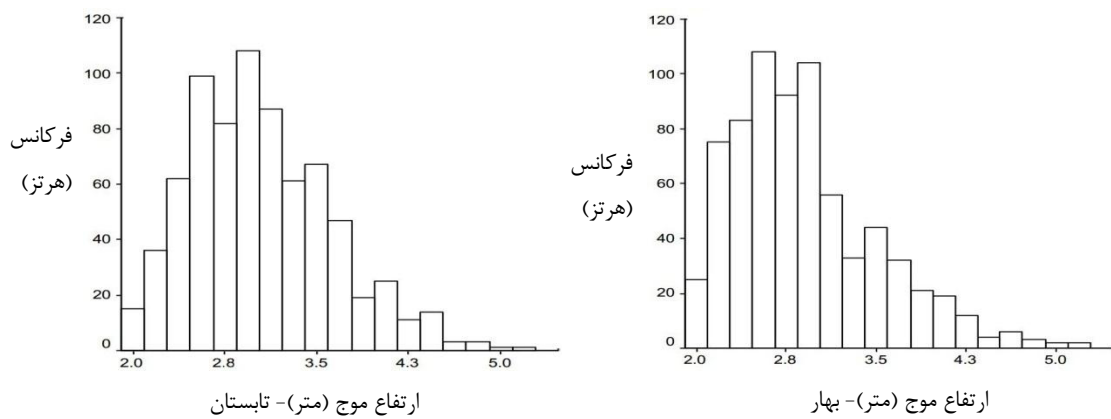
با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده (شکل ۵)، بیشترین میانگین ارتفاع امواج در این دریا، مربوط به فصل‌های پاییز و زمستان است. در مجموع در ۷۰ درصد اوقات، وضعیت دریا در خلیج فارس آرام و یا دارای تلاطم کمی است؛ به‌نحوی‌که میانگین ارتفاع امواج در طول سال در حدود نیم متر می‌باشد. تقریباً در ۲ الی ۳ درصد از اوقات، دریا ممکن است در سراسر منطقه دارای تلاطم با امواجی به ارتفاع ۱/۵ متر یا بیشتر باشد (درخشان، ۱۳۸۳ و لاری و همکاران، ۱۳۸۴).

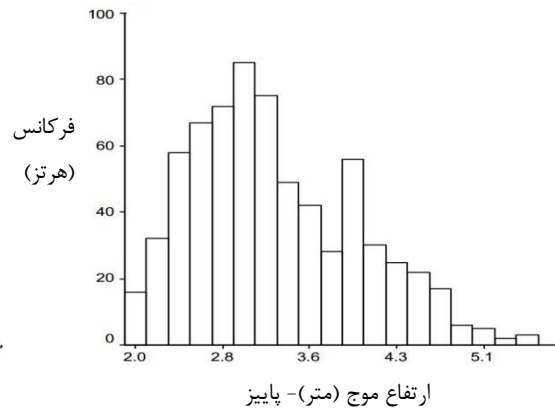
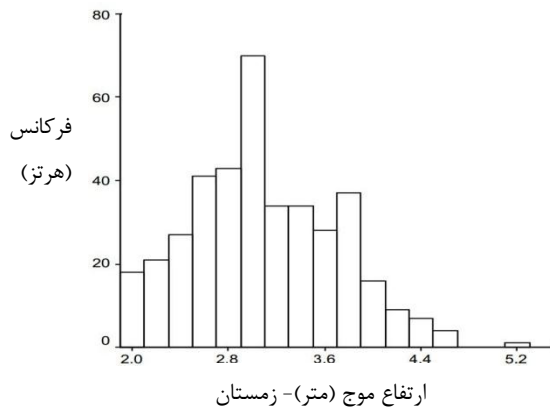
پریود امواج در قسمت شمالی خلیج فارس به دلیل فاصله محدود بین دو ساحل، کوتاه و بین ۲ تا ۶ ثانیه است. با این حال در موارد نادری در این قسمت از خلیج فارس، امواج با پریود ۱۰ ثانیه هم دیده شده است. نمودار فراوانی پریود امواج مشخصه در منطقه‌ی

¹ Response Amplitude Operator (RAO) or transfer function



شکل ۵. نمودار فراوانی فصلی ارتفاع موج مشخصه بر حسب متر در خلیج فارس (لاری و همکاران، ۱۳۸۴).





شکل ۶. نمودار فراوانی فصلی پریود موج مشخصه بر حسب متر در خلیج فارس (لاری و همکاران، ۱۳۸۴).

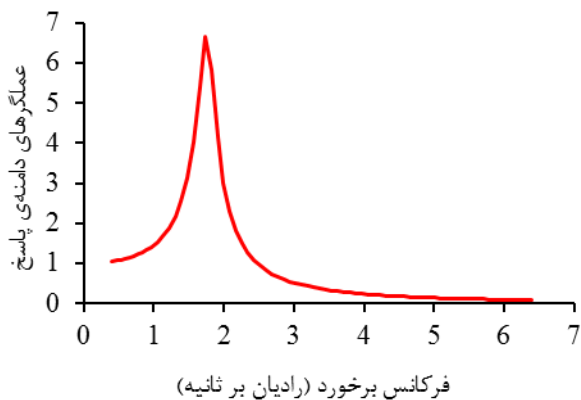
سانتیمتر)

جدول ۴. مشخصات امواج خلیج فارس

ارتفاع موج	دوره تناوب موج	زاویه برخورد امواج
۰/۵ متر	۳ ثانیه	۹۰ درجه

سرعت زاویه‌ای موج (v) را می‌توان بر اساس دوره‌ی تناوب موج (T) به صورت رابطه‌ی (۹) محاسبه کرد:

$$v = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{3} = 2.1 \text{ rad / sec} \quad (9)$$



شکل ۷. نمودار عملگرهای دامنه‌ی پاسخ بر حسب فرکانس برخورد

حال به کمک شکل ۷ و سرعت زاویه‌ای به دست آمده برای موج، مقدار عملگرهای دامنه‌ی پاسخ

برای این منظور، در ابتدا به کمک نرم افزار Maxsurf (ماژول Seakeeper) نمودار عملگرهای دامنه‌ی پاسخ به دست می‌آید. الگوی موج به کار رفته در اینجا، طیف موج پیشنهاد شده توسط کنفرانس بین‌المللی حوضچه‌ی کشش^۱ بوده و از تئوری نواری^۲ برای محاسبه عملگرهای دامنه‌ی پاسخ استفاده شده است. شناور دارای تریم اولیه ۲ درجه می‌باشد که با اعمال این زاویه تریم، طول خط آب‌خور ۱۱/۵۷ متر خواهد شد. اطلاعات مورد نیاز دیگر در جدول ۳ نشان داده شده است. مشخصات امواج نیز همان مشخصات امواج خلیج فارس می‌باشد (جدول ۴). از آنجایی که بررسی حرکات رول مد نظر می‌باشد، بحرانی‌ترین حالت در نظر گرفته می‌شود که در آن زاویه برخورد امواج با شناور ۹۰ درجه^۳ خواهد بود. پس از تحلیل شناور، نمودار رول عملگرهای دامنه‌ی پاسخ بر حسب فرکانس برخورد به صورت شکل ۷ به دست می‌آید.

جدول ۳. سرعت، تریم اولیه و تعداد نوارها برای

تحلیل شناور در سی‌کیپر

سرعت شناور	تریم اولیه	طول خط آب‌خور (با توجه به تریم اولیه)	تعداد نوارها
۶۰ نات	۲ درجه	۱۱/۵۷ متر	۲۰۰ تا (ضخامت هر نوار ۵/۷)

¹ International Towing Tank Conference (ITTC)

² Strip theory

³ Beam Sea

در حالتی که از یک جابرو استفاده می‌شود، توزیع جرم فلاپویل در فاصله دورتری از محور دوران قرار گرفته، این توزیع جرمی باعث افزایش ممان اینرسی می‌شود؛ بنابراین توصیه می‌شود که تا حد امکان از یک جابرو به جای دو یا چند جابرو برای کاهش غلتش شناور استفاده شود. البته در مواردی که مشکلات فضای نصب وجود داشته باشد، امکان استفاده از دو یا چند جابرو نیز وجود دارد. شایان ذکر است که رجوع به محصولات شرکت فرتی نیز به عنوان یک نمونه‌ی تجاری موجود، تأیید می‌کند که استفاده از یک جابرو بهتر از دو جابرو کوچک‌تر خواهد بود؛ بر این اساس، در قایق‌های فرتی، استفاده از یک عدد جابرویی سری ۴۰۰۰ به جای دو عدد جابرویی سری ۲۰۰۰ (جدول ۲) می‌تواند شاهدی بر این ادعا باشد.

جدول ۵. حالت‌های مختلفی از تعداد جابرو (ها) به همراه جرم و ممان اینرسی فلاپویل آن‌ها

تعداد جابرو (ها)	جرم فلاپویل (ها) (kg)	ممان اینرسی فلاپویل (ها) (kg.m ²)
۱ عدد	۲۰۰	۷/۵۱۵
۲ عدد	۲۰۰ = ۱۵۰ + ۵۰	۷/۲۱ = ۶/۱۷ + ۱/۰۴
۲ عدد	۲۰۰ = ۱۰۰ × ۲	۶/۸ = ۳/۴ × ۲
۳ عدد	۱۹۹/۵ = ۶۶/۵ × ۳	۵/۱۶ = ۱/۷۲ × ۳

حرکت رول برابر ۲/۲ خواهد بود. با توجه به مقادیر به دست آمده، سرعت زاویه‌ای غلتش شناور به واسطه‌ی نیروی امواج ($\dot{\phi}$) محاسبه می‌شود:

$$\dot{\phi} = v \times \text{Roll RAO} \quad (10)$$

$$= 2.1 \times 2.2 = 4.62 \text{ Rad / s}$$

هم‌چنین بر اساس محاسبات انجام شده، مقدار گشتاور وارد به شناور توسط امواج خلیج فارس (در شرایط تعریف شده‌ی امواج) ۹/۵ KN.m به دست آمده است.

۳-۱- تعیین تعداد جابرو (ها)

یکی از معضلات موجود در شناورهای تندرو، کمبود فضای فیزیکی جهت نصب تجهیزات می‌باشد؛ لذا به منظور نصب جابرویی مناسب، توجه به فضای در اختیار مهم است. گاهی به کارگیری چند جابرویی کوچک‌تر به جای یک جابرویی بزرگ می‌تواند راه حل مناسبی برای مدیریت فضای در اختیار باشد؛ بنابراین بررسی امکان استفاده از چند جابرویی کوچک‌تر به جای یک جابرویی بزرگ می‌تواند پاسخی برای این نیاز باشد.

با توجه به نتایج حاصل از نمودار پرتو (جرم و ممان اینرسی) و قید وزن، امکان تعیین تعداد جابروها وجود خواهد داشت. برای دستیابی به یک جمع‌بندی مناسب، ۴ حالت در نظر گرفته شده است که در این حالت‌ها مجموع جرم فلاپویل‌ها برابر یا کمتر از ۲۰۰ کیلوگرم می‌باشد. این حالت‌ها شامل یک فلاپویل ۲۰۰ کیلوگرمی، یک فلاپویل ۱۵۰ کیلوگرمی به همراه یک فلاپویل ۵۰ کیلوگرمی، ۲ عدد فلاپویل ۱۰۰ کیلوگرمی و ۳ عدد فلاپویل ۶۶/۵ کیلوگرمی می‌باشد. جرم و ممان اینرسی هر یک از این حالت‌ها در جدول ۵ و شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد جابروها بهبودی در اندازه‌ی ممان اینرسی کل دیده نشده، بلکه ممان اینرسی جرمی کل نیز کاهش می‌یابد که البته این امر می‌تواند منطقی باشد؛ چون

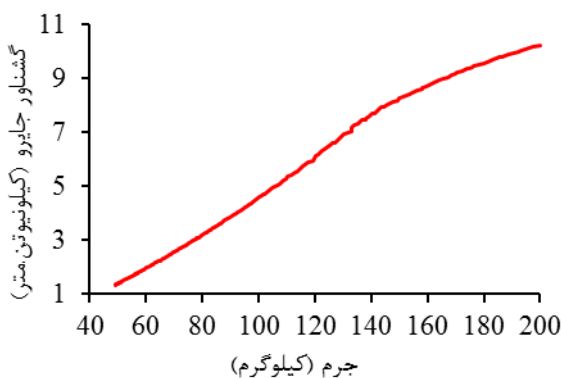
به کمک نمودار پرتو (شکل ۴) و جدول ۶، ابعاد فلاپیولی که این ممان اینرسی را داشته باشد، تعیین و در جدول ۷ نشان داده شده است. حال به کارگیری روابط (۱) و (۲) و با داشتن مقادیر ممان اینرسی از نمودار پرتو (شکل ۴)، $\dot{\phi}$ از رابطه (۱۰) و سرعت زوایه فلاپیویل (ω) گشتاور تولید شده توسط جایرو را می‌توان در جرم‌های مختلف محاسبه کرد. نتایج حاصل از محاسبه گشتاور جایرو در جرم‌های مختلف در شکل ۹ نمایش داده شده است.

جدول ۶ محاسبه ممان اینرسی فلاپیویل برای تولید گشتاوری برابر با گشتاور امواج

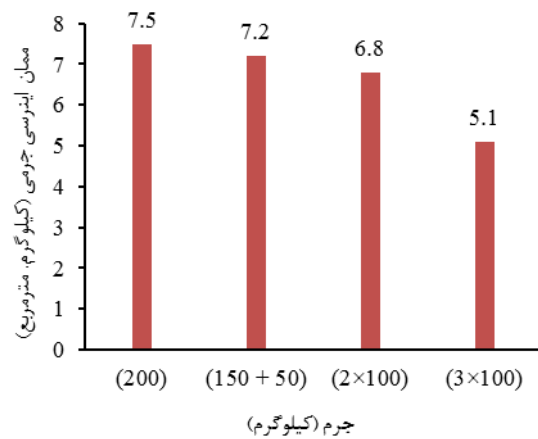
I (kg.m ²)	(rad/s) ω	H (N.m.s)	$\dot{\phi}$ (rad/s)	T _g (KN.m)
۶/۹۷	۲۹۵	۱۲۸ ۲۰۵۶	۴/۶۲	۹/۵

جدول ۷. به دست آوردن ابعاد هندسی فلاپیویل به کمک نمودار پرتو و مقدار ممان اینرسی

r1 (mm)	r2 (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	m (kg)	I (kg.m ²)
۱۶۷/۲	۲۵۰	۵۰	۱۶۹/۸	۱۷۸/۰۳	۶/۹۷



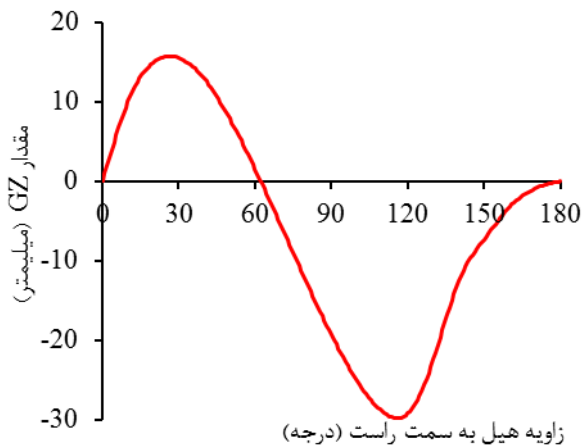
شکل ۹. تغییرات گشتاور تولید شده توسط جایرو بر حسب جرم



شکل ۸. نمودار ستونی ممان اینرسی جایروها بر حسب تغییر تعداد جرم‌ها

۳-۲- مطالعه‌ی یک نمونه‌ی موردی

با استناد به مشخصه‌های قالب امواج در شرایط عملیاتی خلیج فارس، گشتاور وارد شده به شناور توسط امواج معادل ۹/۵ KN.m به دست آمده است؛ بنابراین شرایط انتخاب فلاپیویل بهینه باید به گونه‌ای باشد که گشتاور اعمال شده از طرف جایرو بتواند با این گشتاور ناخواسته مقابله نماید. از این رو اندازه‌ی گشتاور تولید شده توسط جایرو برابر ۹/۵ KN.m در نظر گرفته می‌شود. گشتاور تولید شده از طرف جایرو به دو پارامتر یعنی جرم فلاپیویل و سرعت دورانی فلاپیویل وابسته است؛ بنابراین پیش از انتخاب فلاپیویل بهینه باید سرعت دورانی فلاپیویل مشخص شده باشد. سرعت دورانی فلاپیویل برابر با سرعت دورانی الکتروموتور در نظر گرفته شده است. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده بر روی الکتروموتورهای مناسب در بازار و با در نظر گرفتن محدودیت‌های وزنی الکتروموتور و متعلقات آن، بیشینه‌ی سرعت دورانی الکتروموتور ۲۸۴۰ rpm انتخاب می‌شود؛ بنابراین $\omega = 2840 \text{ rpm} = 295 \text{ rad/s}$ حال با توجه به گشتاور وارد شده به شناور توسط امواج و با کمک روابط (۱) و (۲)، مقدار ممان اینرسی فلاپیویل برای تولید این اندازه گشتاور محاسبه شده و مقدار آن در جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۱۰. منحنی GZ شناور

بنابراین شعاع دور زدن به کمک رابطه‌ی (۱۱) برابر است با:

$$R = \frac{U^2}{g \times \tan \phi} = \frac{(60 \times 0.5144)^2}{9.81 \times \tan 62.2} = 52.2 \text{ m}$$

۳-۲-۲- تأثیر جابروی بر روی زاویه هیل و شعاع

دور زدن شناور مدل

برای مشاهده اثر ژيروسکوپ بر روی زاویه هیل و شعاع دور زدن، مساحت ناشی از اثر ژيروسکوپ به منحنی GZ اولیه اضافه می‌شود. این مساحت با عبارت $\int GZ'.d\theta$ نشان داده شده است و مقدار آن به کمک رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$\int GZ'.d\theta = \frac{T_g}{\Delta} \quad (12)$$

که در آن T_g (N.m) گشتاور تولید شده توسط جابروی و Δ (N) جرم شناور می‌باشد؛ بنابراین در شناور مجهز به جابروی به مقدار $\int GZ'.d\theta$ به مساحت زیر منحنی GZ افزوده می‌شود. برای توضیحات بیشتر به مرجع (دماوندی، ۱۳۹۳) رجوع شود.

زاویه هیل نهایی به خاطر وجود جابروی، با استفاده از نمودار گشتاورهای تولید شده توسط جابروی (شکل ۹)، نمودار GZ (شکل ۱۰) و رابطه‌ی ۱۲ محاسبه

۳-۲-۱- بررسی زاویه هیل و شعاع دور زدن در

شناور مدل مجهز به جابروی

پیش از شروع محاسبات، فرض می‌شود که جرم کل جابروی در مقابل جرم شناور قابل چشم‌پوشی است و سرعت شناور ۶۰ نات می‌باشد.

ابتدا به منظور استخراج منحنی GZ شناور در حالت بدون جابروی، شناور مورد نظر در نرم‌افزار مکسرف مدل و به کمک ماژول هیدرومکس (Hydromax) تحلیل می‌شود. بارگذاری شناور به صورت جدول ۸ بوده، منحنی GZ شناور در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار GZ در زاویه ۶۲/۲ درجه صفر می‌شود.

جدول ۸. بارگذاری شناور مدل در حالت بار کامل

موقعیت عمودی مرکز ثقل	موقعیت عرضی مرکز ثقل	موقعیت طولی مرکز ثقل	جرم مشخصه کل	مشخصه
۰/۷۹۰ (متر)	۰/۰	۵/۴۱۴ (متر)	۲۳/۴ (تن)	بار کامل

پس از به دست آوردن زاویه هیل از روی نمودار GZ، شعاع دور زدن شناور به کمک رابطه‌ی (۱۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$R = \frac{U^2}{g \times \tan \phi} \quad (11)$$

که R (m) شعاع دور زدن، U (m/s) سرعت شناور، ϕ (deg) زاویه هیل و g شتاب گرانش می‌باشد (Faltinsen O.M., 2005).

۴. بحث و نتیجه گیری

هدف این تحقیق، طراحی یک فلاپویل بهینه برای جاپرویی ضد غلتش در یک شناور تندرو بوده است. به منظور تعیین مشخصات امواج، از محیط عملیاتی خلیج فارس استفاده شده است. پس از تعریف مسئله، بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب و به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه انجام شده، در نهایت ابعاد بهینه‌شده به صورت نمودار پرتو ارائه شده است. در ادامه گشتاور مخالف تولید شده توسط جاپرو با جرم‌های مختلف برای مقابله با موج دریا ارائه شده و در انتها افزایش زاویه هیل و کاهش شعاع دور زدن به خاطر استفاده از جاپرو، مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده:

۱. در شرایط یکسان محیطی و با فرض برابر بودن جرم و سرعت زاویه‌ای، استفاده از یک جاپرو به جای چند جاپرو (که دارای جرم معادل هستند)، مطلوب‌تر می‌باشد.

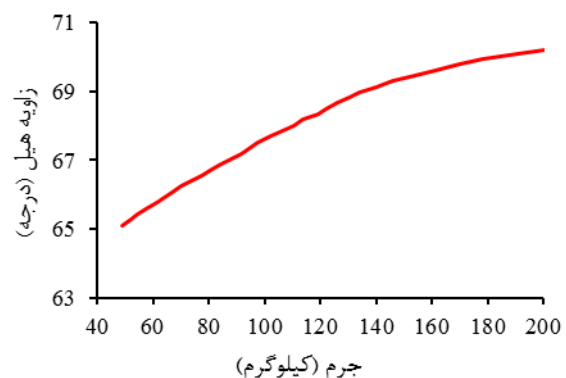
۲. افزایش ممان اینرسی باعث افزایش گشتاور تولید شده توسط فلاپویل می‌شود.

۳. افزایش گشتاور تولید شده توسط جاپرو، باعث ایجاد ممان بازگرداننده بزرگ‌تر و در نتیجه زاویه هیل کم‌تر خواهد شد.

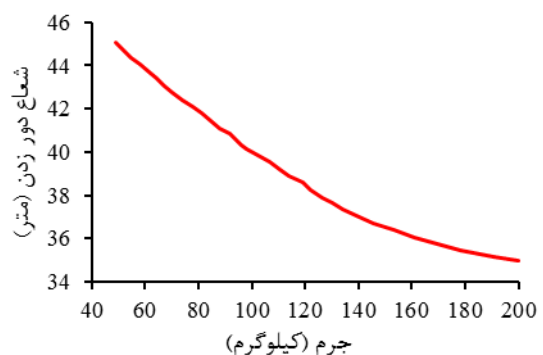
۴. زاویه هیل کم‌تر باعث می‌شود که شعاع دور زدن شناور در سرعت ثابت، کاهش یابد و به این ترتیب سبب افزایش پایداری شناور در هنگام دور زدن می‌شود.

۵. در مطالعه‌ی موردی، استفاده از جاپرویی ضد غلتش، باعث افزایش ۱۲ درصدی زاویه‌ی هیل و کاهش ۳۱ درصدی شعاع دور زدن شده است.

شده و در شکل ۱۱ بر حسب جرم نشان داده شده است. حال به کمک رابطه‌ی ۱۱ و زاویه هیل نهایی (شکل ۱۱) شعاع دور زدن محاسبه و در شکل ۱۲ رسم می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۱ و ۱۲)، با افزایش جرم و به دنبال آن افزایش گشتاور تولید شده توسط جاپرو، زاویه هیل نهایی افزایش و شعاع دور زدن کاهش می‌یابد. برای مطالعه‌ی موردی و با در نظر گرفتن اثر جاپرو، اندازه‌ی زاویه‌ی هیل نهایی ۶۹/۹ درجه و شعاع دور زدن ۳۵/۵ متر می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار زاویه هیل نهایی به خاطر وجود جاپرو بر حسب جرم



شکل ۱۲. نمودار شعاع دور زدن با جاپرو بر حسب جرم

منابع

- Faltinsen O.M. 2005. Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles. Cambridge university press. page: 176-178.
- Kress, G. 2000. Shape optimization of a flywheel. Structural and Multidisciplinary Optimization. Page: 74-81.
- Lautenschlager, Uwe, L., Eschenauer, H.A. and Mistree F. 1997. Multiobjective flywheel design: a doe-based concept exploration task. Advances in Design Automation page: 14-17.
- Mouleeswaran K. and Yogesh K. 2012. OPTIMIZATION OF FLYWHEEL MATERIALS USING GENETIC ALGORITHM. OPTIMIZATION.
- Naidu G. A., Charyulu, T.N., Naidu, R. and Satyanarayana D. 2013. Optimization of Flywheel Weight using Genetic Algorithm. IJSETR.
- Rathod B. and Satish R. 2014. A Case Study on Design of a Flywheel for Punching Press Operation. IJEAT.
- Townsend, N., Murphy, A. and Sheno R. 2007. A new active gyro stabiliser system for ride control of marine vehicles. Ocean engineering. Page: 1607-1617.
- Sh. Derakhshan, A.R M. Gharebaghi, M.R Choghanlou, Prediction of specification sea wave with experimental methods in Bushehr region, The 1st National Congress on Civil Engineering, 2003. (In Persian)
- M. damavandi, R Shafaghat, M. Mohebbi, M. Dardel, Selection of optimization stability system for high speed craft and evaluation of effects them, The 3st conference of high speed boat, 2014. (In Persian)
- M. Seaif, M.T Dakharabadi, Principles of modern ship design, Sharif, 2013. (In Persian)
- K. Lari, A. A. Bidokhti, M. Shafieefar, Comparison the results of different methods of predicting wind-induced waves in the Persian Gulf (Bushehr region), Journal of Earth and Space Physics, Vol. 31, No. 1, pp. 15-25, 2005. (In Persian)
- G. L. Meriam, Engineering mechanics, 6th edition, Translated by S. M. Moghaddas, pp. 715-722, Esfahan: Sepahan, 2004.
- Deb K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. 2000. A fast elitist non-dominated Sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. Indian Institute of Technology. India.
- Dems, K. and Turant, J. 2009. Two approaches to the optimal design of composite flywheels. Engineering Optimization, page: 351-363.
- Dhenge, S., Bhope, D. and Khamankar, S. 2012. Investigation of stresses in arm type rotating flywheel. IJEST.

Selection the optimum dimensions for flywheel of Anti-Rolling Gyro which installation on high speed craft

Mousa Damavandi, Rouzbeh Shafaghat*, Morteza Dardel

Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

Abstract

Anti-Rolling Gyro (ARG) is one of the useful equipment which is used for enhancing stability of vessels. ARG produces a moment against wave torque and reduces undesirable vessel roll based on gyroscopic concepts and using flywheel moment. The first step in designing ARG is flywheel design which exerts appropriate moment in order to reduce rolling of vessel with attention to the sea wave moments and angular velocity of the waves. According to direct relation of righting moment of gyro with mass moment inertia, in order to increase righting moment, it should be chosen a flywheel with high moment inertia, in the contrary, increasing moment inertia also leads to increasing mass of flywheel. In this study, with regards to conditions of waves of Persian Gulf, for optimizing of mass and moment inertia, non-dominated sorting multi objective genetic algorithm (NAGA-II) is used, in a way that minimum mass and maximum moment inertia will be gained. Finally, the dimension of all the flywheel optimal options are demonstrated in the form of pareto diagram, in order that performance conditions regarding parameters including mass and the number of gyros in a vessel based on gained results, are being investigated.

Keywords: Anti-Rolling Gyro, Flywheel, Mass Moment Inertia, Multi-objective Optimization, Genetic Algorithm

List of tables & figures

Figure 1: Operational Principle of Anti Rolling Gyro (ARG)

Figure 2 : The Geometry of flywheel of Anti Rolling Gyro

Figure 3 : Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) procedure

Figure 4 : Diagram of Pareto

Figure 5 : Diagram of seasonal abundance significant wave period in meters in the Persian Gulf

Figure 6 : Diagram of seasonal abundance significant wave period in meters in the Persian Gulf

Figure 7 : Diagram of Response Amplitude Operator in terms of collision frequency response

Figure 8 : Histogram of moment of inertia Gyro by changing the number of mass

Figure 9 : Changes of torque generated by gyro in mass

Figure 10 : GZ curve of vessel

Figure 11 : Diagram of heel angle due to gyro in mass

Figure 12 : Diagram of turning radius Equipped with gyro

Table 1 : Specification of high speed craft model

Table 2 : Boats Equipped with ARG (made of company Ferretti)

Table 3 : Speed, initial trim and number of strips for the analysis of vessel in Seakeeper

* Corresponding author, E-mail: rshafaghat@nit.ac.ir

Table 4 : Specification waves of Persian Gulf

Table 5 : Several conditions of number gyro(s) with mass and moment of inertia with them flywheel

Table 6 : Calculate the moment of inertia of the flywheel to produce torque equal to the torque waves

Table 7 : To obtain the geometrical dimensions of the flywheel with the help of diagram pareto and the moment of inertia

Table 8 : loading conditions of vessel in full load