

## بهینه‌سازی المان‌های سازه‌ای پل اتصالی شناور سه‌بدنه تحت ممان خمشی عرضی حاصل از امواج

عادلہ گرایلی<sup>۱</sup>، محمدحسن قاسمی<sup>۲</sup>، مهدی یوسفی فرد<sup>۳</sup>

yousefifard@aut.ac.ir

- ۱- کارشناسی ارشد، مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل  
 ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل  
 ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

### چکیده

هدف از انجام این مطالعه، کاهش وزن سازه شناور سه‌بدنه نظامی با استفاده از بهینه‌سازی ابعاد المان‌های سازه‌ای پل اتصالی آن، تحت ممان خمشی عرضی حاصل از امواج به روش اجزای محدود در نرم افزار آنسیس است. افزودن بدنه‌های کناری به بدنه اصلی در این شناورها باعث بهبود قابلیت دریامانی و رفتار شناور در امواج می‌گردد. از طرفی با توجه به عدم تقارن فشار وارد شده از سوی امواج به این بدنه‌ها، طراحی پل اتصالی نیازمند در نظر گرفتن ملاحظات بیشتری می‌باشد. این موضوع، در تقابل با امواج دارای زاویه برخوردی غیر از ۱۸۰ درجه، قابل توجه است. بنابراین در مقاله پیش‌رو، با استفاده از فرضیات بدست آمده برای نیروی حاصل از امواج، بر اساس آیین‌نامه مؤسسه رده‌بندی لویدز، طراحی سازه شناور با استفاده از ساده‌سازی‌هایی انجام پذیرفت. طراحی سازه اولیه شناور بر مبنای نیازمندی‌های ارائه شده از سوی آیین‌نامه مورد نظر برای شناورهای سه‌بدنه صورت گرفت. با تکیه بر تحقیقات انجام شده در این حوزه، سازه بدنه شناور به شکل ساده شده و با استفاده از المان‌های هندسی غیر پیچیده شبیه‌سازی گردید. قبل از حل مسئله اصلی، اطمینان از روش حل، بر مبنای یک مسئله نمونه معتبر ارائه شده است. همچنین، مشخصات شناور، روند صحت‌گذاری، جزئیات شبکه‌بندی و نتایج حل مسئله به تفصیل ارائه گردیده است. تحلیل عددی سازه شناور منجر به نتایجی گردید که بر اساس آن می‌توان المان‌های سازه‌ای را برای کاهش وزن شناور تغییر داد. بر این اساس، کاهش ۳ درصدی وزن سازه شناور بر مبنای تغییر در ابعاد المان‌های سازه‌ای پل اتصالی بعنوان یک دستاورد در این مطالعه ارائه می‌گردد.

واژگان کلیدی: شناور سه‌بدنه، پل اتصالی، ممان خمشی عرضی حاصل از امواج، بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۴/۱۲/۰۱  
 تاریخ پذیرش مقاله : ۹۵/۰۶/۱۸

## ۱- مقدمه

شناورها است. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیق فنک و چن [۱] در سال ۲۰۰۸ اشاره نمود. آن‌ها مقادیر نیروهای وارد بر بدنه‌های شناور تراپاران را به دست آوردند و بر اساس آن به بهترین جانمایی بدنه‌های کناری نسبت به بدنه اصلی دست یافتند. همچنین حافظ و الکووت [۲] در سال ۲۰۱۲ و چن و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۵ این کار را تکرار کردند و برای موقعیت‌های مختلف طولی و عرضی بدنه‌های کناری نسبت به بدنه اصلی در شرایط مختلف دریایی، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور را بدست آوردند. در سال ۲۰۱۲ شزاد و همکاران [۴] با استفاده از نرم‌افزار تحلیل هیدرودینامیکی انسیس آکوا و با در نظر گرفتن تئوری پتانسیل سه بعدی غیر خطی و تئوری تابش و تفرق، خستگی در شناور را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین تأثیر خستگی بر روی پل اتصالی و در محل اتصال آن به بدنه‌ها است.

همان‌گونه که بیان شد، مطالعات صورت گرفته بر روی سازه شناورهای چند بدنه به ویژه شناور تراپاران، به علت فرم نوین و پیچیده ای که دارند بسیار اندک است. از جمله در سال ۲۰۱۱ لیو و همکاران [۵] با استفاده از روش آزمایش مدل، استحکام طولی شناور سه بدنه را مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها همچنین با استفاده از روش تحلیل عددی اجزای محدود، استحکام طولی شناور واقعی و مدل را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت نیز با بررسی استحکام خمشی حدی بر روی مدل، نتایج را با در نظر گرفتن تشابه بین مدل واقعی و مدل آزمایشگاهی، به مدل اصلی تعمیم دادند. همچنین در این سال میزینی و همکاران [۶] با استفاده از نرم‌افزارهای حل عددی به بررسی و بهینه‌سازی سازه‌ای و هیدرودینامیکی شناور تندرو تراپاران که برای حمل تریلر طراحی شده بود، پرداختند.

تحلیل سازه‌ای با استفاده از روش المان محدود ابزاری جهت طراحی سازه‌ای شناورها است. با استفاده از این روش می‌توان محدوده مجاز طراحی یک شناور را به دست آورد. تحلیل سازه‌ای شناور چند بدنه با استفاده از روش تحلیلی المان محدود در سال ۱۹۹۱ توسط موریس [۷] برای یک شناور کاتاماران آلومینیومی بزرگ صورت گرفت.

در سال ۲۰۰۰ هولاند و همکاران [۸] به بررسی استحکام عرضی شناور کاتاماران ۶۰ متری با استفاده از روش تحلیل

تقاضا جهت افزایش سرعت و بهبود دریامانی شناورهای تجاری و نظامی، باعث پیشرفت سریع شناورهای تندرو و پیشرفته در دهه‌های اخیر شده است. شناورهای دو یا چند بدنه از لحاظ قابلیت‌های دریامانی و هیدرودینامیکی دارای برتری‌هایی می‌باشند. هر چند افزایش سطح عرشه در این شناورها یک مزیت محسوب می‌شود، ایجاد فاصله بین بدنه‌های شناور باعث نیاز به تقویت بیشتر در ناحیه پل اتصالی<sup>۱</sup> می‌گردد. با وجود اینکه سبک بودن بدنه این شناورها از الزامات اولیه طراحی آنها می‌باشد، سازه پل اتصالی بعنوان یک گلوگاه در فرآیند طراحی خودنمایی می‌کند. بخصوص در مقابل بارهای نامتقارن عرضی (نظیر برخورد زاویه‌دار با امواج)، پل اتصالی می‌تواند اولین نقطه ضعف این شناورها باشد. به همین علت، هرگاه مطالعه‌ای بر روی شناورهای چند بدنه صورت می‌گیرد، تحلیل پل اتصالی دارای اولویت می‌باشد. شناورهای سه بدنه که به نام تراپاران یا حتی تک‌بدنه پایدار شده<sup>۲</sup> معرفی شده‌اند، در سال‌های اخیر برای مقاصد نظامی، دارای جذابیت بسیار زیادی می‌باشند. افزایش سطح عرشه در ناحیه پاشنه شناور منجر به امکان فرود مناسب‌تر بالگرد می‌شود. همچنین به علت شکل بدنه خاص شناورهای نظامی، زاویه رول در حرکات دینامیکی شناور، هنگامی که با امواج عرضی مواجه می‌گردد به یکی از پدیده‌های نامطلوب تبدیل می‌شود. علاوه بر راهکارهای مرسوم برای کنترل این حرکات، می‌توان با استفاده از بدنه‌های کناری، شناور پایدارتری را تولید نمود. تمامی این مزایا هنگامی قابل بهره‌برداری است که بتوان با کمترین وزن سازه‌ای، آنها را در اختیار داشت. در ادامه، تحقیقات انجام شده بر روی این موضوع ارائه شده است. نحوه شبیه‌سازی و فرضیات مورد استفاده در این مطالعه، با تکیه بر تحقیقات معتبر منتشر شده ارائه شده است.

تحقیقات صورت گرفته بر روی شناور تراپاران از زمانی که اولین مدل از این شناورها به نام آر-وی-ترایتون در سال ۲۰۰۰ وارد چرخه مصرف شد، آغاز گردید. به علت فرم بدنه نوین و پیچیده شناور تراپاران، تحقیقات صورت گرفته اغلب محدود به بررسی‌های هیدرودینامیکی این نوع

<sup>۱</sup> Crossdeck<sup>۲</sup> Stabilized Monohull

جهت به دست آوردن خصوصیات المان‌های سازه‌ای و نیروهای وارد بر پل اتصالی بر اساس آیین‌نامه محاسبه شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای اطمینان از درستی روش حل، با استفاده از یک مسئله نمونه، فرآیند صحت‌گذاری انجام شده است. در نهایت نیز نتایج بهینه‌سازی به صورت جدول و شکل ارائه شده است.

## ۲- شرح مسئله

### ۲-۱- معرفی شناور

فرض می‌گردد شناور سه‌بدنه‌ای که در این مجموعه مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد، از نوع شناورهای جابه‌جایی<sup>۱</sup> است و جهت اهداف نظامی طراحی می‌شود. با توجه به محدوده سرعت و ابعاد این شناور، چنین فرضی کاملاً منطقی می‌باشد. بر اساس تحقیق‌های مشابه و به‌علت اثرات کم انحنای سازه در بار وارد شده به پل اتصالی شناور، شکل بدنه‌ها به صورت ساده و بدون هیچگونه پیچیدگی سازه‌ای شبیه‌سازی می‌شوند. خصوصیات و ابعاد اولیه شناور در جدول (۱) ارائه شده است. جهت تحلیل شناور از فولاد نرم با خصوصیات بیان شده در جدول (۲) استفاده می‌گردد. مجموعه‌ای از ورق‌ها و تقویت‌کننده‌های اصلی و فرعی با هندسه‌ای غیرپیچیده، المان‌های سازه‌ای شناور را تشکیل می‌دهند. برای دست‌یابی به حدود ابعادی المان‌های مدنظر، که شامل ضخامت ورق و ضخامت و ارتفاع وب و پهنای فلنج تقویت‌کننده‌ها می‌شود، طبق معادلات ۱ تا ۳ از آیین‌نامه مؤسسه رده‌بندی لویدز برای شناورهای نظامی [۱۴] و همچنین شناورهای سه‌بدنه [۱۵] استفاده گردید و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۱) خصوصیات و ابعاد اصلی شناور سه‌بدنه.

مشخصات کلی شناور	ابعاد	واحد
عرض کلی شناور	۳۲	متر
جابه‌جایی کلی شناور	۴۵۰۰	تن
جابه‌جایی بدنه‌ی کناری شناور	۲۰۰	تن
طول بدنه‌ی اصلی	۱۲۰	متر
عرض بدنه‌ی اصلی	۱۰	متر
طول بدنه‌ی کناری	۵۰	متر
عرض بدنه‌ی کناری	۲	متر
آبخور بدنه‌ی اصلی	۳٫۷۵	متر
آبخور بدنه کناری	۲	متر

عددی اجزای محدود پرداختند. همچنین در سال ۲۰۰۴ اوجادا و همکاران [۹] تحلیل سازه‌ای شناور کاتاماران کامپوزیتی کوچک که تحت نیروی حاصل از کوبش قرار گرفته بود را با استفاده از نرم افزار انسیس ارائه نمودند. در زمینه بهینه‌سازی سازه‌ای شناورهای چند بدنه تحقیقات اندکی در سال‌های اخیر صورت گرفته است. از جمله در سال ۲۰۰۹ سکولسکی [۱۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی شناور کاتاماران پرداخت و ابعاد و فواصل اجزای شناور را به ازای کمینه ساختن وزن سازه بهینه نمود. همچنین سکولسکی [۱۱] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه ساختن ابعاد و فواصل اجزای شناور کاتاماران بر اساس دو تابع هدف وزن و خستگی در شناور پرداخت. در همین سال، محمود شهید و هوانگ دی بو [۱۲] با استفاده از بهینه‌سازی سازه شناور سه بدنه بر مبنای الگوریتم ژنتیک، نتایجی مبتنی بر کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور ارائه دادند. آن‌ها در این مجموعه، شکل دماغه شناور را جهت کاستن مقاومت وارد از طرف آب دریا بهینه نمودند. در نهایت در سال ۲۰۱۵ فونتنس و همکاران [۱۳] به تحلیل و بهینه‌سازی شناور سه‌بدنه کوچک آلومینیومی تحت ممان‌های خمشی، پیچشی و فشار حاصل از کوبش پرداختند. آن‌ها پس از اعمال بارگذاری‌ها و به دست آوردن نقاط با حداکثر تنش، نتایج خود را برای شبکه‌بندی‌های مختلف نیز مورد بررسی قرار دادند و در نهایت، سازه شناور را به ازای به حداقل رسیدن وزن و حداکثر استحکام بهینه نمودند.

شناور سه‌بدنه از یک بدنه میانی و دو بدنه کناری تشکیل شده است. این بدنه‌ها توسط یک عرشه سراسری به نام پل اتصالی به یکدیگر متصل شده‌اند. پل اتصالی تحت امواج عرضی در محل اتصالش به بدنه‌ها تحت تنش بالایی قرار می‌گیرد و در نتیجه در طراحی‌ها باید کاملاً مورد توجه قرار گیرد و به اندازه کافی مستحکم ساخته شود. در نتیجه در این مجموعه ابعاد پل اتصالی که شامل ضخامت ورق‌ها و ضخامت و ارتفاع وب تقویت‌کننده‌ها می‌باشند، جهت کاهش وزن و در عین حال برقراری استحکام شناور بهینه می‌گردند. در ابتدا، شناور تحلیل شده در این مطالعه معرفی گردیده است. مشخصات سازه‌ای مواد و همچنین المان‌های سازه‌ای ارائه شده است. علاوه بر آن فرضیات حل، شرایط مرزی و روش آن تشریح شده و سپس، معادلات حاکم

<sup>۱</sup> Displacement

خصوصیات تقویت کننده‌های فرعی:

$$I = \frac{0.8 \times 100 c_I P_{des} S l_e^2}{f_\sigma E}, cm^4$$

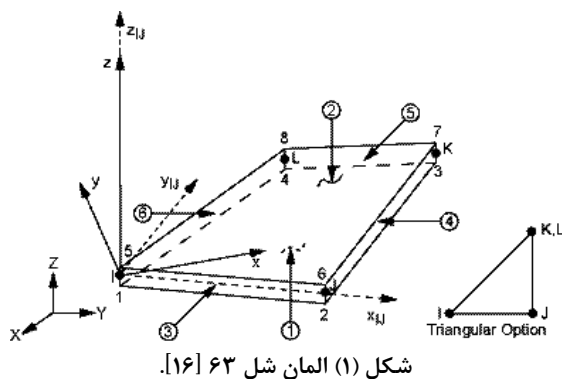
$$Z = \frac{0.8 \times c_Z P_{des} S l_e^2}{f_\sigma \sigma_{yd}}, cm^3 \quad (3)$$

$$A_w = \frac{0.8 \times c_A P_{des} S l_e}{100 f_\tau \tau_{yd}}, cm^2$$

مهم‌ترین مسئله در تعیین ابعاد المان‌های سازه‌ای، شامل نوع بارگذاری، فواصل میان تقویت کننده‌ها و طول تقویت کننده‌ها است. نوع تقویت کننده‌های مورد نظر جهت شبیه‌سازی، به صورت فلت بار انتخاب شده است. همانگونه که از معادلات (۲) و (۳) مشخص است خصوصیات تقویت کننده‌ها شامل ممان اینرسی، مدول مقطع و مساحت وب است. بر اساس نوع تقویت کننده مورد استفاده می‌توان از معادلات بیان شده جهت به دست آوردن ابعاد آن‌ها استفاده کرد.

## ۲-۲- روش تحلیل

شبیه‌سازی، در محیط نرم افزار المان محدود آنسیس ۱۲ و بر اساس داده‌های اولیه شناور صورت می‌پذیرد. برای شبکه‌بندی و تحلیل ورق و تقویت کننده‌های مورد استفاده در شناور از المان (شکل ۶۳)<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. این المان توانایی تحمل تنش‌های خمشی و غشایی را دارد و از قابلیت تحمل بارهای صفحه‌ای و بارهای عمودی در عین حال تحمل تغییر شکل‌های بزرگ برخوردار است. المان مذکور بر اساس آن چه در شکل (۱) نشان داده شده است دارای شش درجه آزادی در هر یک از گره‌ها است که شامل جابه‌جایی در جهت‌های X، Y و Z و نیز دوران حول محورها X، Y و Z است [۱۶].



<sup>۱</sup> Shell63

## جدول (۲) خصوصیات مواد ساخت.

مشخصات فولاد	مقدار (N/mm <sup>2</sup> )
مدول الاستیسیته	۲۰۰×۱۰ <sup>۳</sup>
حداکثر استحکام مجاز	۲۳۵
حداکثر استحکام کششی	۴۰۰-۴۹۰

## جدول (۳) ابعاد المان‌های سازه‌ای.

نوع سازه	نوع المان	ابعاد (mm)
	ورق	۱۸،۵
کف خارجی بدنه میانی	وب فریم عرضی	۴۰×۱۴
	استیفنر طولی	۲۵×۴،۵
کف داخلی بدنه میانی	ورق	۱۲
	وب فریم عرضی	۴۰×۱۲
	استیفنر طولی	۲۵×۳
ساید بدنه میانی	ورق	۳۴
	وب فریم عرضی	۵۵×۹،۵
	استیفنر طولی	۲۵×۵،۵
عرشه خیس پل اتصالی	ورق	۲۷
	وب فریم عرضی	۵۰×۶
	استیفنر طولی	۲۵×۴،۵
ساید پل اتصالی	ورق	۵،۵
	وب فریم عرضی	۱۵×۶
	استیفنر طولی	۱۰×۲،۵
عرشه بالایی پل اتصالی	ورق	۵،۱۱
	وب فریم عرضی	۳۰×۶
	استیفنر طولی	۲۵×۲،۵
کف بدنه کناری	ورق	۹
	استیفنر عرضی	۳۰×۴
	استیفنر طولی	۲۵×۲،۵
ساید بدنه کناری	ورق	۱۶
	استیفنر عرضی	۳۵×۸،۵
	استیفنر طولی	۲۵×۳
عرشه داخلی بدنه کناری	ورق	۸
	استیفنر عرضی	۱۵×۶
	استیفنر طولی	۱۰×۳

ضخامت ورق:

$$t_p = 22.4 s f_{serv} f_{ar} \sqrt{\frac{P_{des}}{f_\sigma \sigma_{yd}}} \times 10^{-3}, mm \quad (1)$$

خصوصیات تقویت کننده‌های اصلی:

$$I = \frac{0.5 c_I P_{des} S l_e^2}{f_\sigma E} \times 10^5, cm^4$$

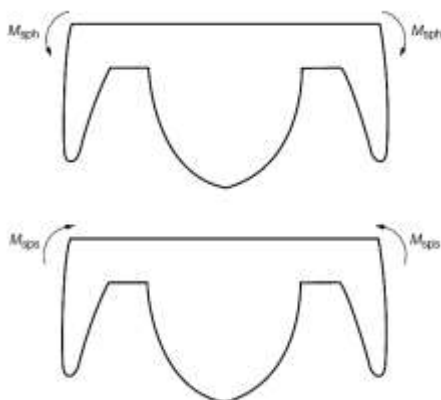
$$Z = \frac{0.5 \times c_Z P_{des} S l_e^2}{f_\sigma \sigma_{yd}} \times 10^3, cm^3 \quad (2)$$

$$A_w = \frac{0.5 \times 10 \times c_A P_{des} S l_e}{f_\tau \tau_{yd}}, cm^2$$

## ۲-۴- ممان خمشی عرضی

در نتیجه فشار نامتقارنی که از سمت امواج دریا بر شناور وارد می‌شود، بدنه های کناری تمایل به دور و یا نزدیک شدن به بدنه میانی را دارند که این امر منجر به ایجاد نیروهای عرضی بر روی شناور می‌گردد. از جمله این نیروها می‌توان به ممانی نوین در شناورهای چندبدنه به نام ممان خمشی عرضی که در نتیجه وجود پل اتصالی در شناور ایجاد می‌شود اشاره نمود. این ممان در عرض پل اتصالی به صورت یکنواخت توزیع شده است و هنگامی که استحکام پل اتصالی مدنظر باشد دارای اهمیت است (مطابق شکل (۳)).

ممان خمشی عرضی بر اساس زاویه و جهت اعمال فشار نامتقارن امواج بر شناور، باعث ایجاد دو حالت هاگینگ<sup>۶</sup> و ساگینگ<sup>۷</sup> می‌گردد. در حالت اول، بدنه های کناری به بدنه میانی نزدیک می‌شوند و باعث ایجاد کشش در سطح بالایی پل اتصالی می‌گردند. حالت ساگینگ دارای شدت بسیار بیشتری نسبت به حالت هاگینگ است و باید مورد توجه قرار گیرد. در این حالت، در نتیجه دور شدن بدنه های کناری از بدنه میانی، سطح بالایی پل اتصالی تحت فشار قرار می‌گیرد. بر اساس معادلات (۴) و (۵)، ممان خمشی عرضی در دو ناحیه شناور که مربوط به محل اتصال بدنه ها به پل اتصالی است معادلات متفاوتی دارد. مکان و موقعیت نواحی تحت تأثیر این ممان در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۵].

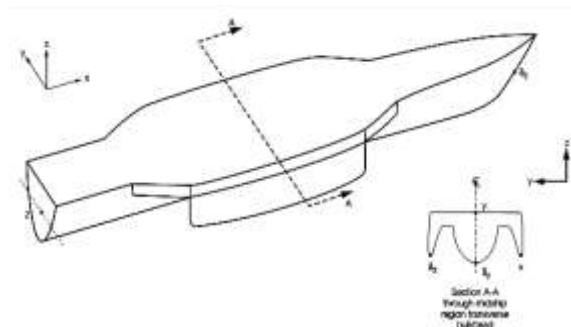


شکل (۳) محل اعمال ممان خمشی عرضی [۱۵].

نکته مهمی که باید به آن اشاره گردد این است که در این مجموعه در تحلیل سازه‌ای، از اثرات غیر خطی و همچنین باکلینگ<sup>۱</sup> روی شناور صرف نظر می‌شود و شناور تنها به صورت استاتیکی تحلیل می‌گردد.

## ۲-۳- شرایط مرزی و محور مختصات

یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر تحلیلی، ایجاد و اعمال شرایط مرزی مناسب است. برای رسیدن به پاسخی درست، سازه باید به شکلی صحیح مقید گردد. آیین‌نامه شناورهای سه بدنه از موسسه رده بندی لویدز بر اساس شکل (۲) و جدول (۴)، شرایط مرزی مورد نظر برای شناور را صراحتاً ارائه نموده است. همچنین بر اساس شکل (۲)، جهت مثبت محورهای مختصات برای محور X در جهت طولی و به سمت سینه شناور، محور Y در قسمت میانی سطح مقطع شناور و به سمت پورت<sup>۲</sup> و در نهایت محور Z در جهت عمودی و از کف شناور به سمت عرشه شناور در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۲) شرایط مرزی شناور سه بدنه [۱۵].

جدول (۴) شرایط مرزی شناور سه بدنه

موقعیت مکانی	شرایط مرزی
نقطه‌ای در مرکز ثقل عمودی شناور در برابر صفر است	جاهه‌جایی در جهت محور Z
سینه <sup>۳</sup> و پاشنه <sup>۴</sup>	برابر صفر است
نقطه ای در کف و عرشه بالکهد میانی	جاهه‌جایی در جهت محور Y
قسمت شامتیر اصلی <sup>۵</sup> بدنه‌های کناری در بالکهد میانی	برابر صفر است
	جاهه‌جایی در جهت محور X
	برابر صفر است

<sup>1</sup> Buckling

<sup>2</sup> Port

<sup>3</sup> Fore

<sup>4</sup> Aft

<sup>5</sup> Keel

<sup>6</sup> Hogging

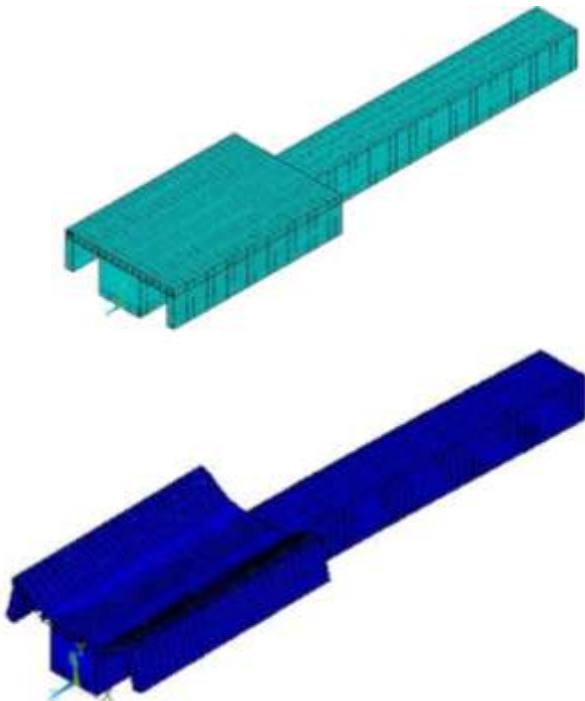
<sup>7</sup> Sagging

جدول (۵) مقادیر ممان خمشی عرضی در حالت‌های هاگینگ و ساگینگ.

مقدار	نوع بارگذاری
۲۰۵۶۰	ممان خمشی عرضی هاگینگ وارد بر نقطه I
۲۲۸۵	ممان خمشی عرضی هاگینگ وارد بر نقطه O
۶۵۹۱۲	ممان خمشی عرضی ساگینگ وارد بر نقطه I
۷۳۲۳	ممان خمشی عرضی ساگینگ وارد بر نقطه O

بر اساس مقادیر ممان خمشی عرضی حاصل شده برای شناور مورد نظر که در جدول (۵) آمده است، مقدار این ممان در حالت ساگینگ بسیار بیش‌تر از حالت هاگینگ است. همچنین مقدار این ممان در محل اتصال بدنه میانی با پل اتصالی بیش‌تر از مقدار آن در محل برخورد بدنه‌های کناری با پل اتصالی است. در نتیجه در این پژوهش جهت بهینه‌سازی، تنها از ممان خمشی عرضی حالت ساگینگ در محل برخورد بدنه میانی با پل اتصالی، استفاده می‌گردد.

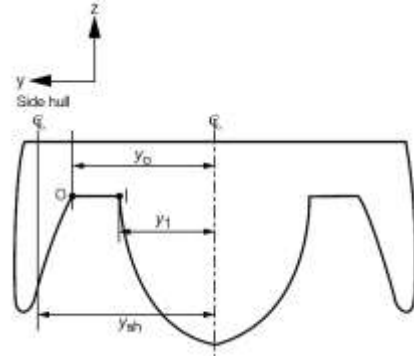
در نهایت و پس از طراحی شناور در نرم‌افزار و اعمال شرایط مرزی و نیروها، نمایی سه‌بعدی از شناور قبل و بعد از بارگذاری به صورت شکل (۶) ارائه می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، بیشترین اثر این ممان بر روی پل اتصالی است.



شکل (۶) نمای سه‌بعدی مقطع شناور سه‌بدنه قبل و بعد از اعمال ممان خمشی عرضی حالت ساگینگ.

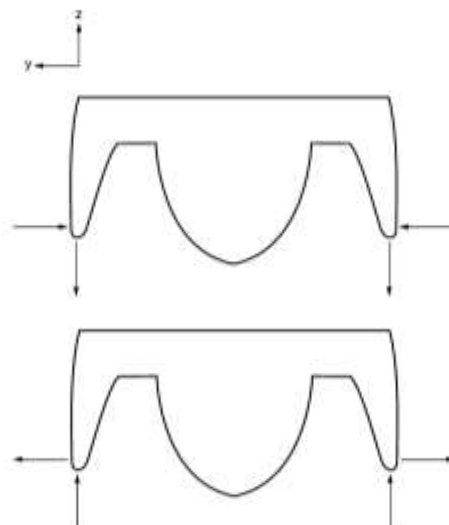
$$M_{sph} = \begin{cases} 9.81 f_{serv} W_{sh} (1 + a_z) \left( y_{sh} - \frac{B_{mh}}{2} \right), po.I & (۴) \\ 9.81 f_{serv} W_{sh} (1 + a_z) (y_{sh} - y_o), po.O \end{cases}$$

$$M_{sps} = \begin{cases} 9.81 f_{serv} \frac{(\Delta - 2\Delta_{sh})}{2} a_z \left( y_{sh} - \frac{B_{mh}}{2} \right), po.I & (۵) \\ 9.81 f_{serv} \frac{(\Delta - 2\Delta_{sh})}{2} a_z (y_{sh} - y_o), po.O \end{cases}$$



شکل (۴) نقاط تحت تاثیر ممان خمشی عرضی [۱۵].

نحوه اعمال ممان خمشی عرضی حالت هاگینگ و ساگینگ بر اساس شکل (۵)، به صورت دو مؤلفه نیرو در دو جهت عرضی و عمودی تجزیه می‌شود. مؤلفه نیروی عمودی در طول بدنه کناری و در راستای کیل آن به صورت گسترده وارد می‌گردد. همچنین مؤلفه نیروی عرضی نیز به صورت گسترده در قسمت بیرونی بدنه کناری و در امتداد تقویت‌کننده‌ها در آن منطقه وارد می‌شود. مقادیر نیروهای اعمالی باید به گونه‌ای انتخاب گردند که در نتیجه، مقدار ممان خمشی در محل برخورد بدنه‌ها به پل اتصالی را نتیجه دهند [۱۵].



شکل (۵) نحوه اعمال ممان خمشی عرضی [۱۵].

## ۳- بهینه‌سازی

به بیان ریاضی بهینه‌سازی که شامل کمینه و یا بیشینه نمودن یک تابع هدف به نام  $F_s$  است به صورت زیر بیان می‌شود. اساس کار بهینه‌سازی به روش اجزای محدود به این صورت است که تابعی مانند  $F_s$  به عنوان تابع هدف جهت کمینه و یا بیشینه‌سازی برگزیده می‌گردد. این تابع با استفاده از قیدهایی بر اساس معادلات ۶ و ۷ مقید می‌گردد. معادله ۸ نیز حد بالا و پایین متغیرهای طراحی را تعریف می‌کند.

$$g_j(s) \leq 0, j = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$h_j(s) \leq 0, k = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$s_i^l \leq s_i \leq s_i^u, i = 1, \dots, n \quad (8)$$

بهینه‌سازی جهت رسیدن به بهترین پاسخ ممکن بر مبنای پارامترهایی محدود و یا نامحدود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع در این فرآیند، چندین المان می‌توانند از لحاظ کمی بهینه گردند. در طراحی سازه‌ای شناورهای نظامی هدف اصلی این است که از وزن سازه به ازای آن که حداکثر تنش وارده کمتر از تنش مجاز سازه باشد بکاهند. در بهینه‌سازی با سه نوع متغیر سروکار داریم. متغیرهای طراحی، مقادیر وابسته‌ای هستند که بر حسب بهترین طراحی تغییر می‌کنند. در این مجموعه ضخامت ورق‌ها و ضخامت و ارتفاع وب تقویت‌کننده‌های پل اتصالی طبق جدول (۶) به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب شده‌اند. مکان و اسامی المان‌های سازه‌ای پل اتصالی در شکل (۷) نیز نشان داده شده است. حدود بالا و پایینی که برای متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود بر اساس امکان ساخت و عملیات و همچنین محدودیت‌های موجود در آیین نامه تعیین می‌گردند. نکته‌ای که باید به آن اشاره گردد این است که، بر اساس آیین‌نامه، حداقل ضخامت برای ورق‌ها جهت جلوگیری از جوش ۵ میلی‌متر، تقویت‌کننده‌های اصلی ۶ میلی‌متر و تقویت‌کننده‌های فرعی ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [۱۵، ۱۴]. متغیرهای حالت که متغیرهای وابسته نیز نامیده می‌شوند باعث مقید شدن طراحی می‌گردند. در این مجموعه تنش معادل فون مایسز با مقدار کمی حداکثر ۲۱۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع، به عنوان متغیر وابسته انتخاب شده است. تابع هدف که در این بررسی وزن سازه انتخاب شده است،

در واقع متغیر وابسته‌ای است که در طراحی مقدار آن حداقل می‌گردد و با هر تغییر در متغیرهای طراحی مقدار آن نیز تغییر می‌کند.

در این مطالعه، بهینه‌سازی توسط نرم افزار المان محدود (انسیس ۱۲) انجام می‌گیرد. در این نرم افزار با تعریف متغیرهای طراحی، متغیرهای حالت و تابع هدف و همچنین تعیین روش بهینه‌سازی می‌توان سازه‌ای عظیم و پیچیده را بهینه نمود. روش‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی موجود است، اما جهت بهینه‌کردن سازه‌های پیچیده از دو روش پیشرفته به نام‌های تقریب زیرمسئله<sup>۱</sup> و مرتبه اول<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد. روش مرتبه اول به علت آنکه برای طراحی‌های حساس و با دقت بالا پاسخ مطلوبی ارائه می‌دهد، در این مجموعه به عنوان روش مطلوب جهت بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت نرم افزار، پس از چندین بار تکرار حل، بهترین پاسخ را ارائه می‌نماید.

جدول (۶) متغیرهای طراحی پل اتصالی شناور سه‌بدنه.

متغیر طراحی	ابعاد اولیه	
	حد پایین	حد بالا
ارتفاع وب فریم عرضی عرشه خیس	۴۵۰	۶۰۰
ارتفاع استیفر طولی عرشه خیس	۲۰۰	۳۰۰
ارتفاع وب فریم عرضی ساید	۱۳۵	۱۶۵
ارتفاع استیفر طولی ساید	۶۰	۱۱۰
ارتفاع وب فریم عرضی عرشه بالایی	۲۵۰	۳۵۰
ارتفاع استیفر طولی عرشه بالایی	۱۵۰	۲۲۰
ضخامت وب فریم عرضی عرشه خیس	۶	۲۰
ضخامت استیفر طولی عرشه خیس	۲٫۵	۱۲
ضخامت وب فریم عرضی ساید	۶	۱۵
ضخامت استیفر طولی ساید	۲٫۵	۱۲
ضخامت وب فریم عرضی عرشه بالایی	۶	۱۵
ضخامت استیفر طولی عرشه بالایی	۲٫۵	۱۲
ضخامت عرشه خیس	۲۰	۳۰
ضخامت ساید	۵	۳۰
ضخامت عرشه بالایی	۵	۳۰

## ۴- صحنه‌گذاری

پس از ارائه روابط حاکم بر مسئله و قبل از شروع فرایند حل عددی، نیاز است که صحت روش عددی مورد استفاده در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گیرد. به همین منظور مقایسه‌ای با روش پیشین کومار و همکاران [۱۷] انجام

<sup>1</sup> Subproblem Approximation

<sup>2</sup> First Order

متغیر حالت انتخاب شده است. بر اساس آیین نامه، مقدار تنش معادل نباید از ۲۱۰ نیوتن بر میلی متر مربع بیشتر گردد. همانگونه که در جدول (۱۰) مشاهده می‌گردد حداکثر مقدار این تنش در سازه پس از بهینه‌سازی برابر با ۱۱۵/۱۹ می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که تنش معادل فون مایسز انتظارات را برآورده ساخته است.

در نهایت، هدف از بهینه‌سازی در این پژوهش، کاستن وزن شناور به‌ازای تغییرات ابعاد سازه‌ای پل اتصالی بود. در جدول (۹) و شکل (۱۰) نیز تغییرات وزن سازه بعد از بهینه‌سازی ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در نتیجه این بهینه‌سازی به میزان ۳٪ کاهش وزن در سازه شناور مشاهده شد. این مقدار کاهش برای یک شناور نظامی که یکی از اهداف اصلی در آن رسیدن به سرعت بالا است قابل توجه است.

در شکل (۱۱) نیز تغییرات ارتفاع وب تقویت‌کننده‌ها برای مقطع پل اتصالی نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است در نتیجه بهینه‌سازی به‌ازای اعمال ممان خمشی عرضی حالت ساگینگ، میزان کاهش ارتفاع وب تقویت‌کننده‌ها در این شکل کاملاً محسوس است.

#### ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مطالعه، هدف اصلی بهینه‌کردن ابعاد اجزای پل اتصالی شناور سه‌بدنه نظامی به‌ازای ممان خمشی عرضی حالت ساگینگ حاصل از برخورد امواج زاویه دار به شناور، جهت کاهش وزن شناور می‌باشد. در خصوص اهمیت سازه پل اتصالی در شناورهای سه‌بدنه توضیحاتی ارائه گردید. وظیفه این پل، اتصال ایمن بدنه‌ها و مقابله با تغییر شکل سازه می‌باشد. این بخش از سازه، هنگامی که در معرض امواج عرضی قرار می‌گیرد، به جهت بروز عدم تقارن در بارهای وارده به آن بیشترین بار را تحمل می‌کند. اولین گام در تحلیل سازه‌ای چنین ساختاری، تعیین بارهای وارد بر آن می‌باشد. آیین‌نامه‌های مؤسسات رده‌بندی در این خصوص با در نظر گرفتن حالات حدی، ضرایب اطمینان بیشتری را پیشنهاد می‌دهند. این در حالی است که با اعمال شرایط خاص سازه و تحلیل‌های مستقیم می‌توان سازه بهینه‌تری را از لحاظ وزن و فرم هندسی ارائه نمود. ابعاد اولیه بدست آمده از آیین‌نامه و تعاریف مورد استفاده در فرآیند بهینه‌سازی ارائه شده است.

می‌گیرد. آن‌ها در پژوهش خود جهت شبیه‌سازی ورق از المان سالیید ۱۷۳ و جهت شبیه‌سازی تقویت‌کننده از المان بیم ۲۳ بهره بردند و حداکثر جابه‌جایی سازه بدون تقویت‌کننده و همراه با تقویت‌کننده را به‌ازای نیروی فشار و بار متمرکز به دست آوردند. در پژوهش پیشرو از المان شل ۶۳ هم برای ورق و هم برای تقویت‌کننده استفاده شده است. ابعاد ورق به صورت  $1000 \times 1000 \times 10$  میلی متر و ابعاد تقویت‌کننده به شکل فلت بار به صورت  $800 \times 40 \times 10$  میلی متر است. محل قرار گیری تقویت‌کننده نیز به صورت شکل (۸) است.

همانگونه که در جدول (۷) دیده می‌شود، مقادیر حداکثر جابه‌جایی المان ورق ساده و ورق تقویت شده با یک تیر در وسط آن در مجموعه پیشرو با مقادیر به دست آمده در مقاله ارائه شده توسط کومار و همکاران [۱۶] مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج ارائه شده و به دست آوردن تغییرات این مقادیر در ستون انتهایی جدول کاملاً مشخص است که تغییر در نتایج به‌ازای تغییر نوع المان مورد استفاده در شبکه بندی سازه کاملاً ناچیز بوده و روش حاضر با دقت مناسبی مقدار حداکثر جابه‌جایی را به دست آورده است.

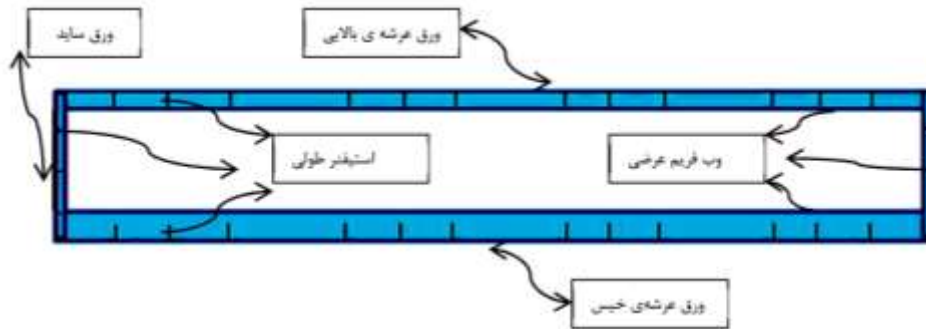
#### ۵- نتایج

پس از آشنایی با مراحل بهینه‌سازی، نتایج مربوط به آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول (۸) و شکل (۹) تغییرات متغیرهای طراحی که شامل ضخامت ورق‌های پل اتصالی و ضخامت و ارتفاع وب تقویت‌کننده‌ها در پل اتصالی است در نتیجه بهینه‌سازی به‌ازای ممان خمشی عرضی حالت ساگینگ ارائه شده است. همانگونه که از نتایج قابل مشاهده است، تاثیر تغییر ارتفاع وب تقویت‌کننده‌ها نسبت به ضخامت تقویت‌کننده‌ها در کاهش وزن سازه شناور قابل توجه است. همچنین تغییر ضخامت ورق‌های مورد استفاده در پل اتصالی در نتیجه این بهینه‌سازی کاهش چشم‌گیری ندارد. و تنها ضخامت ورق پایینی پل اتصالی که در معرض امواج قرار دارد و تحت تاثیر ممان خمشی قرار می‌گیرد دچار تغییر قابل ملاحظه در نتیجه بهینه‌سازی شده است. در این مجموعه تنش معادل فون مایسز به‌عنوان

<sup>1</sup> Solid73

<sup>2</sup> Beam3





شکل (۷) المان‌های سازه‌ای پل اتصالی .



شکل (۸) ورق تقویت شده مدل‌سازی شده با استفاده از المان Shell63.

جدول (۷) مقایسه نتایج صحت سنجی روش مورد استفاده در مقاله.

درصد خطا	حداکثر جابجایی - مقاله حاضر	حداکثر جابجایی - مقاله کومار و همکاران	نوع المان	شرایط مرزی و بارگذاری
۰,۲۹	۰,۰۶۹۳	۰,۰۶۹۱	ورق ساده	مرزها به صورت گیردار-فشار گسترده ( $1 \text{ KN/m}^2$ )
۲,۴	۰,۰۱۴	۰,۰۴	ورق تقویت شده	مرزها به صورت گیردار-فشار گسترده ( $1 \text{ KN/m}^2$ )
۱,۰۷	۰,۳۴	۰,۳۴۴	ورق ساده	مرزها به صورت گیردار-بار متمرکز ( $1 \text{ KN/m}$ ) در مرکز
۱,۳۷	۰,۱۵۷۸	۰,۱۶	ورق تقویت شده	مرزها به صورت گیردار-بار متمرکز ( $1 \text{ KN/m}$ ) مرکز

جدول (۸) مقادیر متغیرهای طراحی قبل و بعد از بهینه‌سازی.

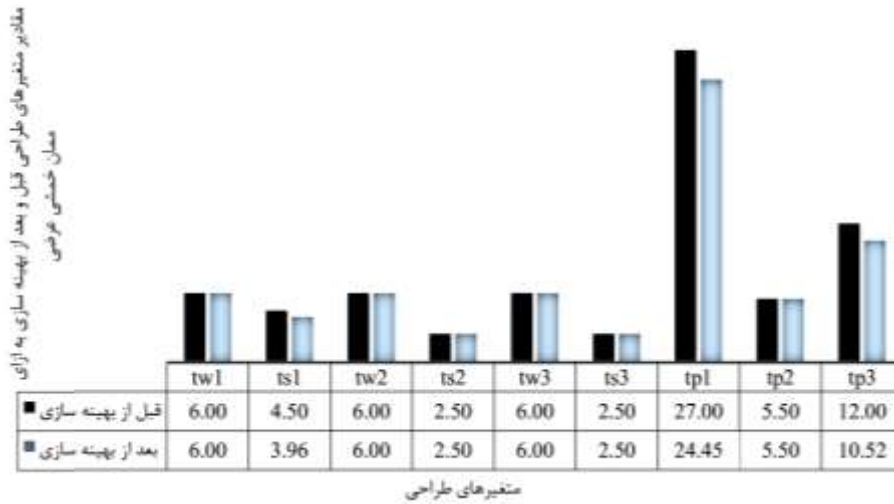
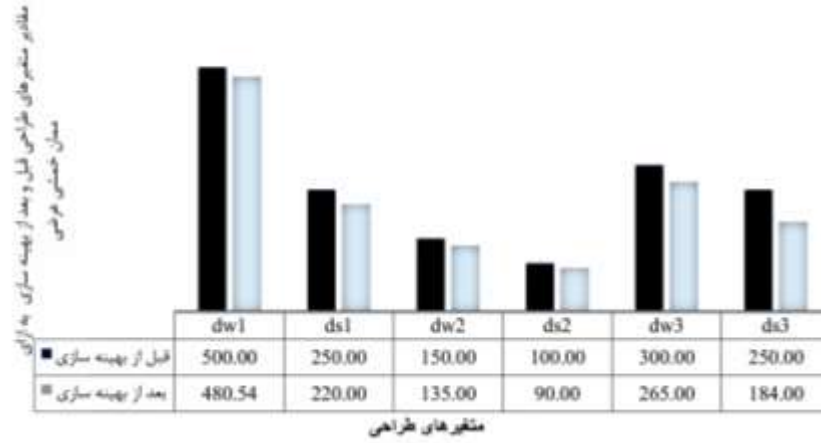
درصد تغییرات	بعد از بهینه‌سازی	قبل از بهینه‌سازی	متغیرهای طراحی
۹,۸	۴۵۰,۸۴	۵۰۰	ارتفاع وب فریم عرضی عرشه خپسی
۱۲	۲۲۰	۲۵۰	ارتفاع استیفینر طولی عرشه خپسی
۱۰	۱۳۵	۱۵۰	ارتفاع وب فریم عرضی ساید
۱۰	۹۰	۱۰۰	ارتفاع استیفینر طولی ساید
۱۱,۷	۲۶۵	۳۰۰	ارتفاع وب فریم عرضی عرشه بالایی
۸	۱۸۴	۲۰۰	ارتفاع استیفینر طولی عرشه بالایی
۰	۶	۶	ضخامت وب فریم عرضی عرشه خپسی
۱۲	۳,۹۶	۴,۵	ضخامت استیفینر طولی عرشه خپسی
۰	۶	۶	ضخامت وب فریم عرضی ساید
۰	۲,۵	۲,۵	ضخامت استیفینر طولی ساید
۰	۶	۶	ضخامت وب فریم عرضی عرشه بالایی
۰	۲,۵	۲,۵	ضخامت استیفینر طولی عرشه بالایی
۹,۴	۲۴,۴۵	۲۷	ضخامت عرشه خپسی
۰	۵,۳۵	۵,۵	ضخامت ساید
۱۲	۱۰,۲۵	۱۲	ضخامت عرشه بالایی

جدول (۹) مقادیر متغیر حالت قبل و بعد از بهینه‌سازی.

تنش مجاز	بعد از بهینه‌سازی	قبل از بهینه‌سازی	متغیر حالت
۲۱۰	۱۱۵,۱۹	۱۹۰,۹۳	تنش معادل (مگاپاسکال)

جدول (۱۰) مقدار وزن شناور قبل و بعد از بهینه سازی.

تابع هدف	قبل از بهینه سازی	بعد از بهینه سازی
وزن شناور(تن)	۴۵۰۰	۴۳۶۵



شکل (۹) تغییرات متغیرهای طراحی و تابع هدف قبل و بعد از بهینه سازی.



شکل (۱۰) تغییرات تابع هدف قبل و بعد از بهینه سازی.



شکل (۱۱) مقطعی پل اتصالی قبل و بعد از بهینه‌سازی.

#### ۷- مراجع

- [1] Fang, M. C. and Chen, T. Y., "A Parametric Study of Wave Loads on Trimaran Ships Traveling in Waves", Ocean Engineering, Vol. 53, pp. 749-762, 2008.
- [2] Hafez, K. and El-Kot, A., "Comparative Investigation of the Stagger Variation Influence on the Hydrodynamic Interference of High Speed Trimaran", Alexandria Engineering, Vol. 51, pp. 153-169, 2012.
- [3] Chen, X. j., Yu, W., Wu, G. h., Liu, J. and Hearn, G. E., "A Fast Numerical Method for Trimaran Wave Resistance Prediction" Ocean Engineering, Vol. 107, pp. 78-84, 2015.
- [4] Shehzad, K., Huilong, R., Guoqing, F. and Khurram, A., "Study on Spectral Fatigue Assessment of Trimaran Structure" Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, Vol. 5, pp.1015-1021, 2012.
- [5] Liu, W., Wu, W., Xu, S. and Li, X., "Study on Longitudinal Ultimate Strength Analysis Method for High Speed Trimaran", International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 910-914, 2011.
- [6] Mizine, I., Brenner, M., Chitrapu, M., Danilczyk, W., Hagesteijn, G. and Harries, S., "Trimaran Hull Form Development for America's Marine Highways Express Service Trailership", International Conference on Fast Sea Transportation, pp.755-762, 2011.
- [7] Morris, J., "Three Dimensional Structural Analysis of a Large Wave Piercing Catamaran dDesign", High Speed Marine Transportation IMAS 91, pp.89-102, 1991.
- [8] Heggelund, S. E., Moan, T. and Oma, S., "Transverse Strength Analysis of Catamarans", Marine Structures, vol. 13, pp. 517-535, 2000.
- [9] Ojeda, R., Prusty, B. G. and Salas, M., "Finite Element Investigation on the Static Response of a Composite Catamaran under Slamming Loads", Ocean Engineering, Vol.31, pp.901-929, 2004.
- [10] Sekulski, Z., "Structural Weight Minimization of High Speed Vehicle-Passenger Catamaran by

در آخر نیز ابعاد المان‌های سازه‌ای پل اتصالی به ازای ممان خمشی عرضی در حالت ساگینگ و با هدف کاهش وزن شناور و برقراری استحکام لازم بهینه‌سازی شد و مشخص گردید در این پژوهش ارتفاع وب تقویت کننده‌ها و ضخامت ورق‌های پل اتصالی بیش‌ترین تأثیر را در کاهش وزن بر عهده داشتند. در نتیجه، محدوده تعریفی که برای متغیرهای طراحی در نظر گرفته شد و با استفاده از آن، وزن شناور به مقدار ۳٪ کاهش یافت.

این مقدار کاهش وزن برای چنین شناورهایی که هدف اصلی در آنها دستیابی به سرعت بیشتر و مانور مناسب است، بسیار قابل توجه است. نکته‌ای که می‌توان به آن اشاره نمود این است که با توجه به فرم پیچیده‌ای که شناور سه‌بدنه دارد و تأثیر نحوه قراگیری طولی و عرضی دو بدنه کناری نسبت به بدنه میانی شناور سه بدنه در مقدار و نوع بارگذاری‌های وارد بر سازه و تعداد محدود شناورهای پیشرفته ساخته شده در جهان، جهت طراحی عملی و کاربردی این نوع از شناورها نمی‌توان تنها به نتایج حاصله از آیین‌نامه‌ها استناد نمود و بهترین روش جهت طراحی و تحلیل آن‌ها، انجام یک سری طراحی‌های مستقیم در مناطق خاص و حساس شناور همچون پل اتصالی که سازه‌ای جدید نسبت به شناورهای سنتی پیشین است.

همچنین جهت رسیدن به پاسخی دقیق و عملی باید شناور با دقت زیاد و با تمام پیچیدگی هندسی طراحی گردد. در این پژوهش از آثار غیرخطی و همچنین باکلینگ بر روی شناور صرف‌نظر گردید. لازم به ذکر است که جهت دستیابی به دقت بیشتر، اثرات آن‌ها نیز می‌بایست مدنظر قرار گیرند.

- Genetic Algorithm”, Polish Maritime Research, Vol. 16, pp.11-23, 2009.
- [11] Sekulski, Z., “Multi-objective Optimization of High Speed Vehicle-Passenger Catamaran by Genetic Algorithm”, Polish Maritime Research, Vol.18, pp.3-30, 2011.
- [12] Mahmood, S. and De-bu, H., “Hull Form Optimization of Trimaran Using Genetic Algorithm”, International Conference on Computational Science and Engineering, 2011.
- [13] Fuentes, D., Salas, M., Tampier, G. and Troncoso, C., “Structural Design and Optimisation of an Aluminium Trimaran”, Analysis and Design of Marine Structures, pp.545-553, 2015.
- [14] R, L. “Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships”. 2015.
- [15] R, L. “Rules for the Classification of Trimarans”. 2015.
- [۱۶] فردوسی حسین آبادی، امید، خدمتی، محمدرضا، "تحلیل سازه شناور تندرو آلومینیومی تک بدنه با کمک نرم افزار اجزای محدود"، فصلنامه علوم و فناوری دریا، چاپ هفتاد، مرداد ۱۳۹۳.
- [17] Kumar Singh, D., Duggal, S. K. and Pal, P., “Analysis of Stiffened Plates using FEM – A Parametric Study”, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol.2, No.4, pp.1650-1656, 2015.