شبیه‌سازی عددی تاثیر چاین بر عملکرد شناورهای پروازی

محمد امین رحمن ستایش[۱] ، رضا خزائی[۲]، سجاد حاجی زاده[۳]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه خلیج فارس، rahmansetayesh12@gmail.com
[۲] کارشناس ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه خلیج فارس، khazaee@mehr.pgu.ac.ir
[۳] استادیار گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، hajizadeh@pgu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳

کلمات کلیدی:
چاین
شناور پروازی
شناور تندرو
شبیه‌سازی عددی

چکیده

شناورهای پروازی در صنعت دریایی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. موضوع اصلی و پراهمیت در طراحی این نوع شناورها، سرعت بالا و مقاومت کم بدنه است. یکی از مهمترین تغییراتی که در بدنه‌ی شناورهای پروازی اعمال شد، ایجاد چاین بود. در این جا سعی بر آن است تا به طور خاص به بررسی تاثیر چاین بر عملکرد شناورهای پروازی پرداخته شود و بعد از تحلیل نتایج، چاین بهبود یافته از نظر عملکرد هیدرودینامیکی شناور پروازی مشخص گردد. روش مورد استفاده برای تحلیل جریان پیرامون شناور پروازی مورد نظر، شبیه‌سازی عددی است. در این روش به محاسبه نیروی مقاومت بدنه، نیروی لیفت، زاویه پیچ و مقدار هیو شناورهای مورد نظر پرداخته شده است. پس از صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته برای شناور پروازی C در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی فرم‌های تغییر یافته‌ی این شناور پروازی در چهار اندازه چاین مختلف انجام شد و با رفتار هیدرودینامیکی شناور پروازی C مقایسه شد. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته، کمترین مقاومت و بیشترین میزان تریم را شناور با نسبت پهنای چاین به عرض کل ۵/۴۳ درصد و بیشترین میزان هیو را شناور با نسبت پهنای چاین به عرض کل ۵/۸۷ درصد به ثبت رساندند. همچنین بیشترین مقاومت در شناور با نسبت پهنای چاین به عرض کل ۴/۵۷ درصد مشاهده شد.

Numerical simulation of the effect of chine on the performance of planing hull

Mohammad Amin Rahmansetayesh[1], Reza Khazaee[2], Sajad Hajizadeh[3*]

[1] Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; rahmansetayesh12@gmail.com
[2] Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; khazaee@mehr.pgu.ac.ir
[3] Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; hajizadeh@pgu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Jul 2023
Accepted: 25 Sep 2023

Keywords:
Chine
Planing Hull
High-Speed Craft
Numerical Simulation

ABSTRACT

Planning vessels have a special significance in the marine industry. The main and most significant aspect of designing these types of vessels is achieving high speed by having low body resistance. One of the key modifications applied to the hulls of planning vessels was the development of the chine. This research aims to analyze the impact of the chine on planning hulls using numerical analysis. After analyzing the results, improved chine can be specified in terms of the hydrodynamic performance of the hulls. The chosen method to analyze the flow around the planning hull forms is numerical simulation. This method calculates the resistance force, lift force, pitch angle, and heave amount of the intended hulls. The numerical simulations of different modifications of the C planning hulls were compared to the hydrodynamic behavior of the C-hull after verifying the results of the numerical simulations and validation of results with the laboratory results of the former reference. Based on the results obtained from the numerical simulations, the hull with 5.43% chine width to beam ratio recorded the lowest resistance. The highest trim was observed in the hull with 5.43% chine width to beam ratio, and the hull with 5.87% chine width to beam ratio registered the highest heave. Moreover, the hull with 4.57% chine width to beam ratio exhibited the highest resistance in the simulations.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]

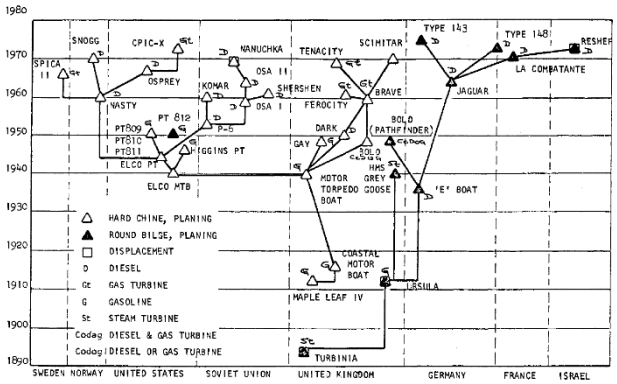
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

۱ - مقدمه

شناورهای پروازی در صنعت دریایی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. موضوع اصلی و پراهمیت در طراحی این نوع شناورها، سرعت بالا و مقاومت بدنه پایین آن است. لذا برای رسیدن به این مهم در طراحی بدنه، تغییراتی ایجاد می‌کنند. از جمله این تغییرات، می‌توان به اضافه کردن اسپری ریل و پله، تغییرات در نوع سیستم رانش و سایر روش‌ها اشاره نمود. یکی از مهمترین تغییراتی که در بدنه‌های شناورهای معمول جهت رسیدن به سرعت‌های پروازی اعمال شد، ایجاد چاین برای شناورهای معمول بود. این شکستگی عرضی در فرم بدنه شناور، موجب می‌شود تا جریان سیال با گذشتن از روی این شکستگی جدا شده و به محیط پیرامون اسپری می‌شود [۱]. علاوه بر آن، در شناورهای پروازی چاین دار، چاین باعث ایجاد یک نیروی ناشی از فشار هیدرودیناکی مثبت در کناره‌های چاین می‌گردد که به عنوان یک مقاومت در برابر افت فشار عمل می‌کند [۲]. با توجه به این که در هر بدنه برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی آن طراحی متفاوتی در نظر گرفته می‌شود، لذا برای شناورهای تندرو بسیار مهم است که چاین طراحی شده عملکرد مناسبی داشته باشد.

ایده شناورهای تندرو، که امروزه با آن‌ها آشنا هستیم، از دهه ۱۸۰۰ میلادی [۱] تکامل یافتند. سویتسکی و گُر [۱] تاریخچه تکامل شناورهای پروازی را ارائه کرده‌اند. در شروع قرن بیستم، با هدف آنکه شناورها به منظور حمل اژدرهای خودپیشران و یا جهت مقابله با این سلاح‌های مخرب توسعه یافته در آن بازه زمانی، شناورهایی تحت عنوان قایق حامل اژدر و قایق نابودگر اژدر ساخته شد که تا به امروز مورد استفاده صنایع نظامی دریایی در کشورهای مختلف می‌باشد. در ابتدا این شناورها با استفاده از موتور بخار پیستونی کار می‌کردند و عموماً بدنه‌های دایره‌ای شکل بدون شکستگی داشتند. در ابتدای سال ۱۸۷۲ میلادی [۱]، راموس توسعه یک کشتی پروازی پله‌دار ۲۵۰۰ تنی را ارائه کرد که توسط ویلیام فرود به دلیل غیر واقعی بودن ایده رد شد. در ادامه در سال ۱۸۹۴ میلادی، چارلز پارسونز، مخترع انگلیسی، با نصب کردن موتور توربین بخار بر روی شناور ۴۵ تنی طراحی شده توسط وی، که توربینیا نام داشت، توانست با تکیه بر بدنه باریک با مقطع دایره‌ای شکل به سرعت ۳۵ گره دریایی برسد.

اختراع موتور احتراق داخلی، کلید رسیدن به سرعت بالاتر و تکامل قایق‌های کوچک‌تر به منظور سبکی و محدوده عملیاتی وسیع تر بود. این امر با جایگزینی سوخت به جای توده‌های عظیم ذغال‌سنگ و مخزن‌های بخار آب ممکن شد. در سال ۱۸۹۶ میلادی، بریتانیا شروع به مستند سازی تعدادی ثبت اختراع در خصوص طراحی فرم بدنه جهت داشتن قابلیت پروازی با تکیه بر فرم پاشنه ترانزوم و یک یا دو پله عرضی کرد. در سال ۱۹۱۰ میلادی، تورنیکرافت، در انگلستان، بر روی یک فرم بدنه پله‌دار ۲۵ فوتی تحقیق و آزمایش کرد که توانست به سرعتی در حدود ۳۵ گره دریایی برسد. این تحقیقات باعث شد تا ساخت قایق موتوری ساحلی ۵۵ فوتی CMB با سرعت ۴۶ گره دریایی، تک پله با وزن ۱۴ تن، با قابلیت حمل دو اژدر و پنج نفر خدمه ساخته شود. این شناور در جنگ جهانی اول، با موفقیت در دریاهای مواج دریای شمال و کانال انگلستان استفاده شد. در جنگ جهانی دوم، توسعه شناورهای پروازی، بهبود و ادامه یافت. برای مثال شناورهای هارد چاین به شکلی توسعه یافتند که از نظر تعداد با شناورهای با مقطع دایره‌ای شکل برابر شدند. بریتانیا، آلمان و ایالات متحده آمریکا، هر کدام بر اساس نیازهایشان به توسعه این فرم شناورها پرداختند که در نهایت در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ میلادی فرم بدنه‌ای استاندارد تحت عنوان PT یا همان شناور گشت‌زنی با قابلیت حمل اژدر در جهان مورد استفاده قرار گرفت. شناورهای پروازی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، الهام گرفته از همان شناورهای مورد استفاده در جنگ جهانی دوم هستند. به طور خاص، بریتانیا و ایالات متحده، تمایل به استفاده از فرم بدنه هارد چاین داشتند؛ در حالی که آلمان علاقه‌مند به استفاده از شناورهای با مقطع دایروی بودند. در **شکل ۱** تاریخچه شناورهای پروازی در صنایع نظامی به صورت درخت خانواده که توسط سویتسکی و گور [۱] ارائه شده است، قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱- درخت خانواده شناورهای نظامی کوچک ارائه شده توسط سویتسکی و گور [۱]

در سال ۱۹۶۴ میلادی، سویتسکی [۳] برای بررسی دینامیک شناورهای پروازی یک مدل ریاضی استخراج نمود. با استفاده از مدل ریاضی سویتسکی، می‌توان مقاومت، هیو، پیچ، طول خیس و لیفت شناور پروازی را بدست آورد. سویتسکی مدل ریاضی خود را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آورد. مدل ریاضی سویتسکی تا به امروز یکی از دقیق‌ترین نتایج را در بین مدل‌های

ریاضی نیمه تجربی پدید آورده است به طوری که در بسیاری از مقالات یا نرم‌افزارهای تجاری مانند مکسرف[۱] از آن استفاده می‌گردد. همچنین از دیگر مزایای این روش می‌توان به سادگی روابط و سرعت بالای حل مسئله دانست. سویتسکی [۱] در سال ۱۹۸۰ در تحقیقی جامع به دلایل شکل‌گیری شناورهای پروازی پرداخت. سویتسکی در این مقاله علل استفاده از چاین را در شناورهای پروازی شرح داده است، همچنین به تفاوت‌های بدنه‌های شناورهای باری و پروازی پرداخته است. سویتسکی در این مقاله علت استفاده از چاین در شناورهای پروازی را، ایجاد یک فشار مثبت و درنتیجه یک نیروی لیفت می‌داند که در کاهش نیروی درگ موثر است. همچنین سویتسکی [۱] در این مقاله به استفاده از ۲ چاین در شناورهای پروازی برای کاهش حرکت پریودیک رول نیز اشاره کرده است. سویتسکی [۴] در سال ۲۰۰۳ میلادی به بررسی شناورهای پروازی تک بدنه پرداخته است. سویتسکی در این مقاله اشاره کرده است که برای رسیدن به نسبت سرعت (در واحد گره دریایی) به جذر طول (در واحد فوت) بیشتر از ۳، داشتن چاین برای شناور پروازی لازم است. همچنین سویتسکی [۴] در این مقاله بیان کرده است که شناورهای پروازی دارای چاین، به منظور توسعه فشار دینامیکی مثبت به کف بدنه شناور ساخته شده‌اند که باعث پرواز شناور و کاهش ترم بویانسی شناور می‌شود. در سال ۲۰۰۶ میلادی، مِیمِن و همکاران [۵] به بررسی اثر دو چاین در عملکرد شناور پروازی به صورت تجربی پرداختند. در این مقاله اشاره شده است که دو چاین شناور باعث افزایش بازوی ممان بازگرداننده (GZ) می‌شود که این افزایش به دلیل زیاد شدن سطح خیس شناور در اثر چاین دوم است. همچنین نشان داده شده است که شناور با دو چاین نسبت به شناور با یک چاین، ۱۴ درصد بیشتر ضریب دفع کننده(دمپ) رول دارد. البته در این مقاله نشان داده شده که شناور با دو چاین ۱۲ درصد مقاومت بیشتری نسبت به شناور با یک چاین دارد. در سال ۲۰۰۷ میلادی، سویتسکی و همکاران [۶] به بررسی اثر نیروی اسپری ویسکر روی شناورهای پروازی پرداخت. در مدل ریاضی ارائه شده توسط سویتسکی در سال ۱۹۶۴ میلادی [۳]، برای محاسبه مقاومت شناور، تنها به مولفه‌های مقاومت فشاری و مقاومت ویسکوز شناور پروازی پرداخته شده است. سویتسکی و همکاران در این مقاله در سال ۲۰۰۷ میلادی، به توسعه مدل ریاضی پیشین پرداختند و با اضافه کردن مولفه مقاومت ناشی از اسپری آب به واسطه وجود چاین در شناور پروازی، این مدل ریاضی را به روزرسانی کردند. در سال ۲۰۰۹ میلادی، روسلّی [۲] به بررسی دینامیک بدنه‌های تندرو پرداخت. در این پایان‌نامه، به هیدرودینامیک شناورهای پروازی با استفاده از روش نیمه تجربی مطابق با تئوری‌های لواندوفسکی پرداخته شد و بر اساس فرم بدنه-های سری ۶۲ و سری فریدزما، که همگی بدنه‌های پروازی هستند، انجام گردید. در این پژوهش روشی جدید برای کوپل حرکت‌های هیو،پیچ و رول، یک مدل ریاضیاتی ارائه شد. نتایج این پژوهش به دلیل کمبود نتایج آزمایشگاهی، مورد صحت‌سنجی دقیق صورت نگرفت. بریتزولارا و ویلا [۷]، در سال ۲۰۱۰ میلادی، به بررسی یک شناور پروازی با دو درجه آزادی با استفاده از ناویر-استوکس به روش میانگین رینولدز پرداختند. در این پژوهش، بریتزولارا، به بررسی مقاومت، تریم و هیو شناور پروازی پرداختند و نتایج به دست آمده را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و نتایج بدست آمده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، از دقت خوبی برخوردار بوده است. همچنین بریتزولارا در این پژوهش، مدل ریاضی سویتسکی را با ناویر-استکوس به روش میانگین رینولدز ترکیب کرد و نتایج مقاومت، تریم و هیو را بدست آورد. آن‌ها این روش را DINAV نام‌گذاری کردند و این کد را که بر اساس جاوا / سی++[۲]بوده را با حلگر نرم‌افزار استار سی سی ام +[۳]ترکیب کردند. در سال ۲۰۱۰ میلادی، تانتون و همکاران [۸]، به بررسی آزمایشگاهی یک فرم بدنه پروازی با یک چاین سخت پرداختند. این تحقیق در حوضچه کشش دانشگاه ساتهمپتون انجام گرفت. این سری بدنه پروازی به سری ساتهمپتون مشهور است. این مقاله به عنوان چهارچوب اصلی این مقاله انتخاب شده است. مدل C از این سری فرم بدنه‌های پروازی به عنوان گزینه مطالعه موردی این مقاله برگزیده شده است. دلیل اصلی این انتخاب، وجود نتایج آزمایشگاهی این شناور بود. در این مقاله، علاوه بر بررسی عملکرد هیدرودینامیکی شناور C، فرم بدنه‌های تک پله و دو پله این بدنه نیز مورد تست مقاومت قرار گرفت. در این مقاله علاوه بر مقاومت این سری فرم بدنه، نتایج تریم، هیو و سطح خیس نیز ارائه گردیده است. در سال ۲۰۱۳ میلادی، یوسفی و همکاران [۹]، در یک پژوهش به گردآوری روش‌های استفاده شده برای آنالیز و بررسی عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای پروازی در دهه‌های گذشته پرداختند. در این مقاله روش-های مورد استفاده در دهه‌های گذشته، به دو دسته کلی نیمه تجربی و عددی تقسیم بندی شده است. در این مقاله به مزایا و معایب این روش‌ها پرداخته شده و برای هر روش یک مقاله معتبر به عنوان نمونه آورده شده است. در این مقاله اشاره شده است که از مزیت‌های روش دینامیک سیالات محاسباتی، استفاده در مسائلی است که به کمک روابط نیمه تجربی و معادلات ریاضی قابل حل نمی‌باشند. همچنین در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی نیز برتری‌هایی دارد

[۱] MAXSURF
[۲] JAVA/C++
[۳] STAR-CCM+

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

که به عنوان نمونه می‌توان به بررسی رفتار شناور در مقیاس واقعی، کم شدن زمان پژوهش و راحت‌تر بودن تحلیل نتایج اشاره کرد. در سال ۲۰۱۴ میلادی، گریگوروپولوس [۱۰] به بررسی تجربی رفتار دینامیکی شناور پروازی با دو چاین در موج‌های نامنظم پرداخت. در این مقاله اشاره شده است که در مورد دریامانی شناورهای پروازی به خصوص شناورهای پروازی چاین دار، داده‌های محدودی منتشر شده است. در این پژوهش شناور در ۳ نسبت طول به عرض متفاوت و ۳ ضریب وزنی مختلف تست شده و عملکرد هیدرودینامیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش ضریب طول به عرض در ضریب وزنی ثابت، زاویه تریم و مقاومت شناور بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش وزن شناور در ضریب طول به عرض ثابت، زاویه تریم در سرعت‌های پایین و هیو شناور کمی افزایش داشته و مقاومت شناور نیز زیاد می‌گردد. چاکیجی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۵ میلادی به بررسی عددی یک شناور پروازی در آب آرام پرداختند. در این مقاله اشاره شده است که تمامی شناورهای پروازی حداقل دارای یک چاین هستند. چاکیجی و همکاران دلیل استفاده از چاین را جدایش جریان بیان کرده‌اند که باعث نیروی لیفت و تریم دینامیکی می‌گردد. همچنین در این مقاله بیان شده است که در شناورهای پروازی که دو چاین دارند، چاین بالایی سطح خیس شناور را در سرعت‌های پایین افزایش می‌دهد و باعث افزایش پایداری می‌گردد و چاین پایینی وظیفه جدایش جریان را بر عهده می‌گیرد. در سال ۲۰۱۵ میلادی، فریسک و تگهال [۱۲]، پایان‌نامه‌ای با موضوع تحلیل دینامیک سایلات محاسباتی یک فرم بدنه پروازی سریع پرداختند. در این پایان نامه نتایج مقاومت، هیو و تریم شناور مربوطه ارائه گردیده است. در این پایان‌نامه، دو نرم‌افزار استار سی سی ام + و انسیس فلوئنت[۴]استفاده گردید. در این پژوهش، برای حالت دو درجه آزادی، نرم‌افزار انسیس فلوئنت در پیدا کردن پاسخ‌های پایدار دچار مشکل شد. در مقابل، تنها نرم‌افزار استار سی سی ام + توانست برای شبیه‌سازی‌های عددی دو درجه آزادی مورد استفاده قرار گیرد. اعداد فرود این شبیه‌سازی‌ها بین ۰/۴۴۷ و ۱/۷۹ قرار داشت. نتایج عددی الگوی مشخص آزمایشگاهی را دنبال می‌کرد. همچنین آن‌ها نشان دادند که میزان مقاومت، تریم و هیو تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی در حالت پروازی دارند. میزان خطای پیش‌بینی شده در این حالت زیر ۱۰ درصد بود. فرم بدنه این تحقیق، با نام بدنه آتنا، برای مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت. این بدنه، یک فرم نیمه پروازی با طول بین دو عمود ۴۶/۹ متر در حالت مقیاس اصلی است. در شبیه‌سازی‌های عددی با مقیاس ۱:۸/۵۵۶ مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۲۰۱۷ میلادی، کاظمی و همکاران [۱۳] به بررسی تاثیر شرایط مختلف بارگزاری بر عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور پروازی چاین‌دار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. در این مقاله شناور در ۱۸ حالت با دو وزن متفاوت در ۳ سرعت متفاوت و ۳ مرکز جرم متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که با اضافه شدن وزن شناور، مقاومت و زاویه تریم نهایی نیز افزایش پیدا می‌کنند. همچنین با افزایش سرعت شناور، با ثابت بودن سایر متغیرها، مقاومت شناور افزایش می‌یابد در حالی که تریم شناور کاهش پیدا می‌کند. همچنین با جابجایی مرکز جرم شناور به سمت پاشنه، زاویه تریم افزایش می‌یابد در حالی که مقاومت شناور کم می‌شود و باعث پیدایش ناپایداری طولی شناور یا پورپویز می‌گردد؛ و در نهایت با افزایش وزن شناور، احتمال رخ دادن ناپایداری طولی یا پورپویز بیشتر می‌شود [۱۳]. در سال ۲۰۱۷ میلادی، کیم و همکاران [۱۴] نشان دادند که چاین، نه تنها در طرز قرارگیری نهایی شناور تاثیر دارد بلکه کمک به بالانس بدنه می‌کند. علاوه بر آن موقعیت چاین، از نقطه نظر میزان نیروی مقاومت، تأثیر ویژه‌ای در عملکرد فرم بدنه دارد. آنالیز چاین در زوایای ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۹ درجه در سرعت ۳۰ گره دریایی انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین زاویه تریم در زاویه چاین ۱۶ درجه اتفاق افتاد و بیشترین میزان هیو در زاویه چاین ۱۵ درجه اتفاق افتاد. همچنین کمترین مقاومت بدنه نیز در زاویه چاین ۱۶ درجه حاصل شد. در سال ۲۰۱۷ میلادی، دی لوکا و پنسا [۱۵]، به مطالعه یک شناور تک بدنه پروازی، با اینترسپتور و بدون آن پرداختند. بدنه آن‌ها دارای یک چاین سخت است. در این مقاله، یک تحلیل سیستماتیک آزمایشگاهی بر روی این فرم بدنه انجام شده است. نتایج تریم و مقاومت به صورت کامل در سه وزن ارائه شده است. آن‌ها نتایج لیفت و هیو خود را ارائه نداده‌اند که به عنوان یکی از معایب این مرجع به شمار می‌آید. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که با افزایش سرعت، مقاومت شناور افزایش یافته و شرایط طرز قرارگیری نهایی شناور دستخوش تغییر خواهد شد. علاوه بر آن، تاثیر اینترسپتور بر دینامیک شناور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بخش بدین صورت بود که استفاده از اینترسپتور موجب بهبود پایداری هیدرودینامیکی شناور مذکور می‌گردد. لزوم استفاده از اینترسپتور، به آن دلیل است که فرم بدنه پروازی چاین دار آن‌ها، علی‌رغم شرایط مطلوبی که داشت، توانسته است با این تغییرات به لحاظ پایداری هیدرودینامیکی طولی در حالت بهینه‌تری قرار گیرد. مانچینی و همکاران [۱۶]، در سال ۲۰۱۷ میلادی، به بررسی یک شناور پروازی پرداختند. آن‌ها ادعا کردند که شبیه‌سازی عددی یک فرم بدنه پروازی در مقایسه با کشتی‌های جابجایی پیچیده‌تر است. بر این اساس، آن‌ها به ضرورت وجود آزمایشات

[۴] ANSYS FLUENT

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

تجربی اشاره کردند. آن‌ها در این پژوهش، یک بدنه پروازی از سری سیستماتیک ناپل (NSS/Naples Systematic Series) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها به روش دینامیک سیالات محاسباتی، نشان داد که باید توسط داده‌های آزمایشگاهی اعتبار سنجی صورت بگیرد، به صورتی که بتوان به نتایج شبیه‌سازی عددی اطمینان کرد.

در سال ۲۰۲۱ میلادی، ویلر و همکاران [۱۷]، به بررسی عددی یک شناور پروازی با چاین سخت به روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. در این پژوهش تاثیر وزن شناور در حالت وزن عادی و با وزن اضافه بار در آب آرام، در شرایط پایا پرداخته شده است. در این مقاله اشاره شده است که شناور با ۴۰ درصد وزن بیشتر، ۳۰ درصد افزایش درگ را به همراه دارد.

لاکاتوش و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۲ میلادی، به بررسی یک شناور پروازی با ۷ مدل چیدمان اسپری ریل، ۷ مدل چاین و ۷ مدل اسپری ریل به شکل V در ۴ سرعت در بازه فرود ۱/۷۴۲ تا فرود ۳/۲۶۱ به صورت آزمایشگاهی پرداختند. در این پژوهش اشاره گردیده که اسپری ریل در نسبت طول به وزن بیشتر از ۵/۱۷۴ و فرود بیشتر از ۳، باعث کاهش مقاومت تا ۲/۴ درصد می‌شود. همچنین در فرودهای کمتر از ۲/۵، اسپری ریل باعث افزایش مقاومت تا ۸/۳ درصد می‌شود. در بازه فرود بین ۲/۵ تا ۳، اسپری ریل باعث افزایش مقاومت تا ۲ درصد می‌شود. همچنین در این پژوهش اشاره شده که چاین در فرودهای بالای ۲/۵ نیروی لیفت را در مرکز جرم افزایش داده و مرکز فشار را به عقب شناور اتقال می‌دهد، تریم شناور را تا ۰/۳ درجه و مقاومت کل را تا ۳ درصد کاهش می‌دهد. همچنین دراین پژوهش اشاره شده است که استفاده از چاین در فرودهای بالای ۲/۵ کاربرد دارد.

در سال ۲۰۲۲ میلادی، پاکورارو و همکاران [۱۹]، به بررسی تاثیرات ویژگی های مختلف بدنه شناور پروازی از جمله تونل، اسپری ریل و ویسکرها بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور پروازی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. در این پژوهش اشاره شده که تونل تاثیر مثبت به سزایی در عملکرد هیدرودینامیکی شناور نداشته است. همچنین در این پژوهش به بررسی تاثیر پهنای اسپری ریل بر عملکرد هیدرودینامکی شناور پرداخته شده است.

۲ – تئوری و معادلات حاکم

در تجزیه و تحلیل عملکرد شناورهای پروازی از معادلات متعددی استفاده می‌شود. در کتاب‌ها و مقالات پیشین بسیاری به بررسی تئوری‌ها و معادلات حاکم بر رفتار شناورهای تندرو در شرایط آب آرام و مواج پرداخته‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به فالتینسن [۲۰]، سویتسکی [۳] و لواندووسکی [۲۱] اشاره کرد. همچنین برای شبیه‌سازی عددی شناور تندرو نیز معادلات و تئوری های زیادی دخیل هستند که از جمله آن‌ها می‌توان از قوانین نیوتن و معادله حاکم بر جریان سیال نام برد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

۲-۱- تئوری و معادلات حاکم بر شناور تندرو

با حرکت یک شناور در آب، عوامل متعددی در محاسبه مقاومت کل شناور تاثیرگذار است. مقاومت کل شناور را می‌توان به طریق رابطه (۱) تعریف کرد:

$$R_T = R_P + R_F = R_{VP} + R_W + R_F \qquad (۱)$$

که در آن، R_P مقاومت فشاری، R_F مقاومت اصطکاکی، R_T مقاومت کل، R_{VP} مقاومت ویسکوز فشاری، R_W مقاومت موج‌سازی می‌باشد. همچنین مقاومت شناور را می‌توان به صورت بی بعد به شکل زیر نوشت:

$$C_T = C_P + C_F = C_{VP} + C_W + C_F \qquad (۲)$$

که C_T ضریب مقاومت کل شناور، C_P ضریب مقاومت فشاری، C_F ضریب مقاومت اصطکاکی، C_V ضریب مقاومت ویسکوز، C_W ضریب مقاومت موج‌سازی است. از آنجایی که مقاومت کل شناور به طراحی بدنه، حرکات و شرایط سیال وابسته است، ضریب مقاومت کل شناور را می‌توان به صورت زیر نیز تعریف کرد:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \qquad (۳)$$

در معادله فوق، R_T مقاومت کل شناور، ρ چگالی آب، V سرعت و S سطح خیس شناور می‌باشد. تعریف عدد فرود به صورت زیرانجام می‌شود:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \qquad (۹)$$

در فرمول محاسبه عدد فرود، F_r عدد فرود، V سرعت شناور، g شتاب گرانش و L طول شناور می‌باشد. **۲-۲ تئوری و معادلات حاکم بر دینامیک سیالات محاسباتی**

در شبیه‌سازی عددی شناور تندرو، برای مدل کردن جریان توربولانسی از رابطه ناویر-استوکس به روش میانگین گیری از عدد رینولدز استفاده شده است. این معادلات بر اساس قوانین بنیادی فیزیک بنا شده است که شامل قانون پایستگی جرم، قانون دوم حرکتی نیوتن و قانون اول ترمودینامیک می‌باشد. معادلات ناویر-استوکس که معادلات حاکم بر جریان سیال برای سیالات تراکم پذیر است با در نظرگیری اثر گرانش بر جریان، معادله تکانه در راستای i برای یک المان دو بعدی به صورت زیر است:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (۱۱)$$

و معادله پیوستگی به فرم $\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0$ خواهد بود. در معادلات بالا، U_i سرعت در راستای i ، U_j سرعت در راستای j ، P فشار سیال، ν ویسکوزیته سیال، g_i شتاب گرانش در راستای i می‌باشد. به دلیل آنکه معادلات پایستگی بر پایه مفاهیم جامداتی به دست آمده است، برای محاسبه مولفه‌های تنش برشی دچار مشکل خواهند شد. از آنجایی که تنش‌های ویسکوز وابسته به تغییرات سرعت در راستاهای x، y و z هستند، معادلات ناویر-استوکس به جای معادلات پایستگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استفاده از این معادلات باید فرض‌های متعددی را در نظر گرفت. در ابتدا سیال باید ایزوتروپیک باشد. بدین معنا که تنش‌های ویسکوز تابعی از جهت‌های مختصات نیستند. سپس سیال باید نیوتنی باشد که تنش‌های ویسکوز وابسته به نرخ کرنش باشند. معادلات نهایی برای جریان تراکم ناپذیر در سه جهت مختصات کارتزین به صورت زیر است:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \rho g_x \quad (۱۲)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \rho g_y \quad (۱۳)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \rho g_z \quad (۱۴)$$

در معادلات بالا، (u, v, w) مولفه‌های سرعت در سه جهت مختصات کارتزین هستند. ρ دانسیته سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، $\hat{g} = (g_x, g_y, g_z)$ بردار شتاب گرانش و p فشار سیال می‌باشد.

اغتشاش همان حالات تصادفی حرکت سیال است که به دلیل تغییرات سرعت و فشار نسبت به زمان ایجاد می‌گردد. جریان سیال عموماً حاوی گردابه است. حتی اگر سرعت متوسط و فشار در یک یا دو راستا وجود داشته باشد، اغتشاشات سیال به صورت سه بعدی ایجاد خواهد شد. رایج‌ترین مدل توربولانسی، روش تفکیک رینولدز[۵] برای سرعت ها و فشارهای لحظه‌ای جریان سیال می‌باشد. مقادیر سرعت و فشار لحظه‌ای جریان در معادلات ناویر-استوکس مطابق با [۲۲] قرار داده می‌شود و سپس معادله ناویر-استوکس به روش میانگین رینولدز را به فرم زیر خواهیم داشت:

$$\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx} + \nu\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}\right) - \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}\right) \quad (۱۵)$$

در معادله ناویر-استوکس به روش میانگین رینولدز یازده مجهول وجود دارد. پنج مورد آن مربوط به خواص سیال و شش مورد دیگر تنش‌های رینولدز هستند.

۳ – مدل‌سازی عددی به روش دینامیک سیالات محاسباتی

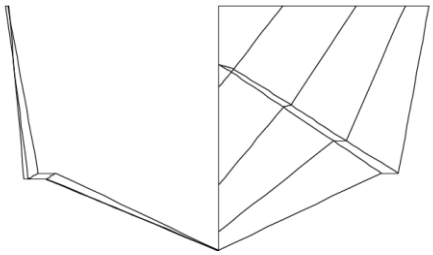
۳-۱- طراحی بدنه پروازی

فرم بدنه شناور پروازی مورد استفاده در این مقاله، بدنه C از سری ساتهمپتون، مورد استفاده در مقاله تانتون و همکاران [۸]، می‌باشد که با استفاده از خطوط بدنه ارائه شده درمتن مقاله بیان شده می‌باشد. بدنه سه بعدی با استفاده از نرم افزار تجاری راینو[۶]نسخه ۶ مجدداً طراحی گردیده شده است. در **شکل ۲** خطوط بدنه شناور پروازی C از سری ساتهمپتون از نمای روبرو، که توسط تانتون و همکاران [۸] ارائه شده است، را نمایش می‌دهند. **شکل ۳** خطوط بدنه شناور پروازی C از سری ساتهمپتون، که با استفاده از نرم‌افزار راینو، طراحی شده و در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است را از نمای روبرو نشان می‌دهد.

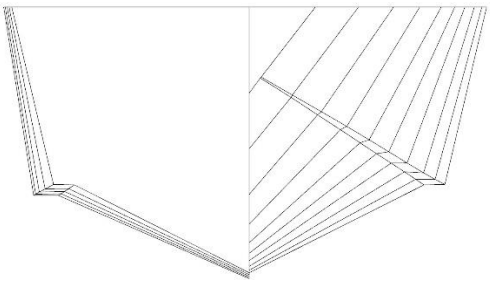
[۵] Raynolds Decomposition

[۶] RHINO

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]



شکل ۲- خطوط بدنه شناور پروازی C از سری ساتهمپتون از نمای روبرو ارائه شده [۸]



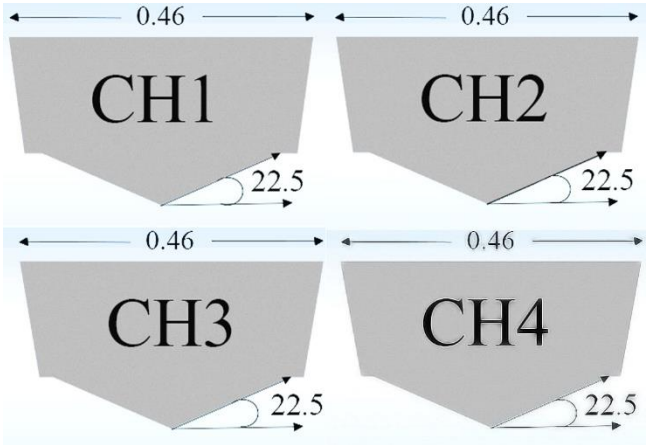
شکل ۳: خطوط بدنه شناور پروازی C از سری ساتهمپتون طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار راینو مورد استفاده در این مقاله

در **جدول ۱** مشخصات شناور پروازی C مورد استفاده در این مقاله ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات بدنه شناور پروازی C از سری ساتهمپتون ارائه شده توسط تانتون و همکاران [۸]

طول	۲ متر
عرض	۰/۴۶ متر
ارتفاع	۰/۰۹ متر
پهنای چاین در پاشنه	۰/۰۲۳ متر
وزن	۲۴۳/۴۰ نیوتن
نسبت طول به عرض	۴/۳۵
زاویه ددرایز	۲۲/۵ درجه
مرکز جرم	۰/۳۳ متر

پس از طراحی بدنه مورد نظر، برای ایجاد تغییر در ابعاد چاین شناور جهت بررسی تاثیر عملکرد چاین شناور در هیدرودینامیک شناور، نیاز به استخراج پهنای چاین شناور طراحی شده در هر مقطع بوده که به وسیله نرم‌افزار راینو این داده‌ها به دست آمده است. پس از استخراج اندازه پهنای چاین شناور پروازی C در هر مقطع از خطوط بدنه آن، به تغییر پهنای چاین شناور به منظور ایجاد چهار بدنه پروازی جدید برای بررسی اثر چاین بر هیدرودینامیک شناورهای پروازی پرداخته شد. با توجه به این که پهنای چاین شناور پروازی C، ۰/۰۲۳ متر بوده، پهنای چاین شناورهای پروازی جدید در محل پاشنه را به اندازه ۰/۰۰۲ $\pm$ و ۰/۰۰۴ $\pm$ متر تغییر داده و اندازه پهنای چاین در محل پاشنه شناورهای پروازی جدید به ترتیب به ۰/۰۲۵، ۰/۰۲۷، ۰/۰۲۱ و ۰/۰۱۹ تغییر پیدا کرد. در این مقاله، به منظور راحتی، فرم بدنه‌ای که عرض آن ۰/۰۲۷ بوده ،CH1 نام-گذاری شده است. همچنین بدنه با چاین ۰/۰۲۵ CH2، بدنه با چاین ۰/۰۲۱ CH3 و بدنه با چاین ۰/۰۱۹ CH4 خطاب شده‌اند. نکته حائز اهمیت در طراحی بدنه‌های شناورهای پروازی جدید، تغییر نکردن سایر مشخصات بدنه مانند عرض شناور یا زاویه ددرایز شناور می‌باشد. در طراحی شناورهای پروازی جدید، تنها تغییر ایجاد شده، اندازه پهنای چاین شناورها بوده تا در بررسی‌های پیش‌رو، فقط تأثیر اندازه پهنای چاین شناور پروازی مورد مطالعه قرار بگیرد. در **شکل ۴** می‌توان نمای پشت شناورهای پروازی جدید را مشاهده نمود. مطابق با **شکل ۴** می‌توان دریافت که در شناورهای پروازی جدید، عرض شناورها و زاویه ددرایز آن‌ها مساوی و بدون تغییر در مقابل شناور پروازی C می‌باشند.



شکل ۴- نمای پشت شناورهای پروازی جدید، طراحی شده در نرم‌افزار راینو

همچنین به منظور بررسی تغییرات پهنای چاین شناور مورد بحث، مشخصات پهنای چاین بدون بعد در **جدول ۲** نمایش داده شده است.

جدول ۲: نسبت پهنای چاین شناورهای پروازی به عرض شناور به درصد

شناور	نسبت پهنای چاین به عرض شناور
C	٪ ۵
CH1	٪ ۵/۸۷
CH2	٪ ۵/۴۳
CH3	٪ ۴/۵۷
CH4	٪ ۴/۱۳

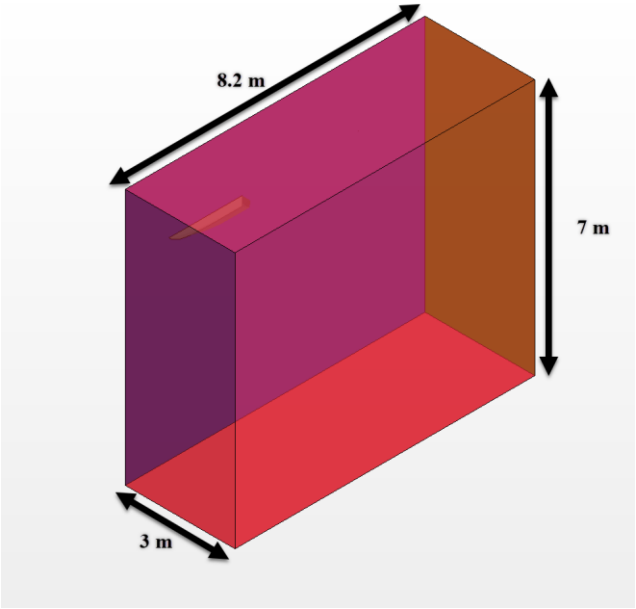
۲-۳- مدل سازی عددی شناورهای پروازی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

به منظور گسسته سازی فضای دامنه محاسباتی از شبکه‌بندی تریمر[۷]استفاده شده است. برای مدل‌سازی بهتر جریان در نزدیکی دیواره از شبکه‌بندی لایه منشوری[۸]استفاده گردید. تعداد لایه‌های شبکه‌بندی منشوری، ۴۰ لایه انتخاب شد. ارتفاع کل آن به میزان ۵ درصد از طول پایه انتخاب شده است. طول پایه در این شبیه-سازی‌ها، ۱ متر انتخاب گردید. برای نشان دادن سطح آزاد سیال از روش حجم سیال استفاده شده است. همچنین، مقدار فاز میانی ۰/۵ به عنوان صفحه نمایش سطح آزاد مایع لحاظ شده است. همانند [۲۳] از الگوریتم محاسبه کیفیت بالای فاز میانی[۹]برای گسسته سازی ترم‌های همرفتی معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین رینولدز استفاده شده است. برای حل معادله ناویر-استوکس روی شبکه‌بندی انجام شده از حلگر ضمنی غیر پایا استفاده شده است. بر اساس [۲۳]، این حلگر دامنه وسیعی از اعداد کُرانت را پوشش می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود تا اعداد کُرانت بزرگتر از یک را هم در گام‌های زمانی بزرگ‌تر بتوان استفاده کرد. برای ایجاد دامنه محاسباتی، از یک مکعب مستطیل استفاده شده است. در **جدول ۳** ابعاد دو گوشه‌ی مقابل دامنه محاسباتی مورد استفاده ارائه شده است. بعلاوه در **شکل ۵** ، نمای پرسپکتیو ابعاد دامنه محاسباتی نمایش داده شده است.

جدول ۳: ابعاد دامنه محاسباتی استفاده شده

گوشه ۱	گوشه ۲
۵- متر	۳/۲ متر
۰ متر	۳ متر
۵- متر	۲ متر

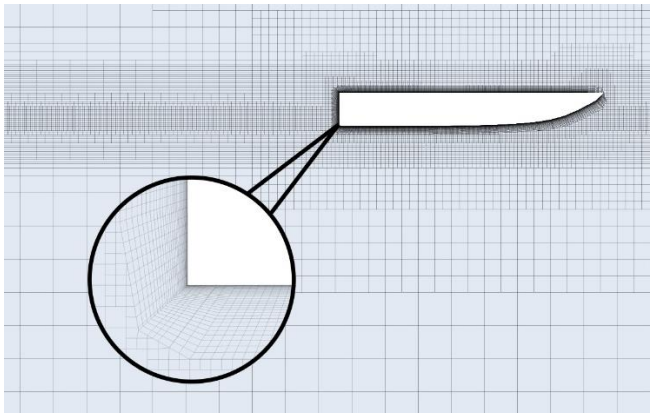


شکل ۵: ابعاد دامنه محاسباتی از نمای پرسپکتیو

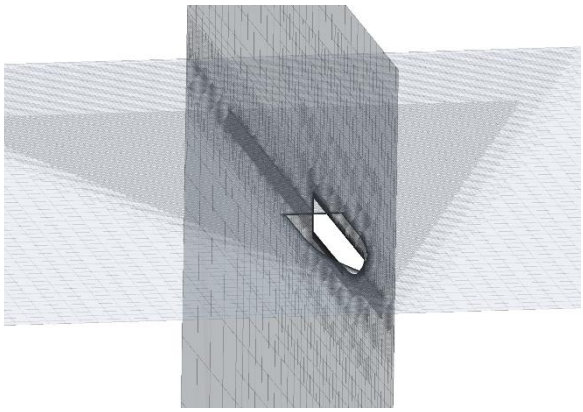
شبکه‌بندی ایجاد شده با استفاده از روش اتوماتیک[۱۰]انجام گرفته است. برای ترمیم هندسه وارد شده به نرم‌افزار از قابلیت شبکه‌بندی مجدد سطوح[۱۱]استفاده شد. برای بهبود شبکه‌بندی در ناحیه سطح آزاد آب و همچنین سطح شناور از ۳ حجم کنترل تریمر[۱۲]استفاده شده است. علاوه بر این، برای مدل‌سازی بهتر جریان سیال در برخورد با شناور و نمایش امواج کلوین[۱۳]از ۳ حجم کنترل تریمر استفاده گردید. در تنظیمات شبکه‌بندی، نرخ رشد حجمی[۱۴]شبکه، بر روی حالت آرام (تدریجی)[۱۵]تنظیم شده است. در **شکل ۶** نمای کناری شبکه‌بندی دامنه محاسباتی را نمایش می‌دهد. همچنین در **شکل ۶**، نمای نزدیک‌تر شیوه‌ی توزیع شبکه لایه منشوری در قسمت انتهایی شناور مورد نظر نمایش داده شده است. در **شکل ۷** نمای پرسپکتیو شبکه‌بندی دامنه محاسباتی به همراه حجم کنترل-های تریمر در کل دامنه محاسباتی به نمایش گذاشته شده است.

[۷] Trimmer
[۸] Prism layer mesher
[۹] HRIC Scheme
[۱۰] Automated Mesh
[۱۱] Surface Remesher
[۱۲] Trimmer Volume Control
[۱۳] Kelvin Wake
[۱۴] Volume Growth rate
[۱۵] Slow

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]



شکل ۶- نمای کناری شبکه‌بندی دامنه محاسباتی به همراه شبکه لایه منشوری از نمای نزدیک‌تر



شکل ۷- نمای پرسپکتیو شبکه‌بندی به همراه حجم کنترل های تریمر

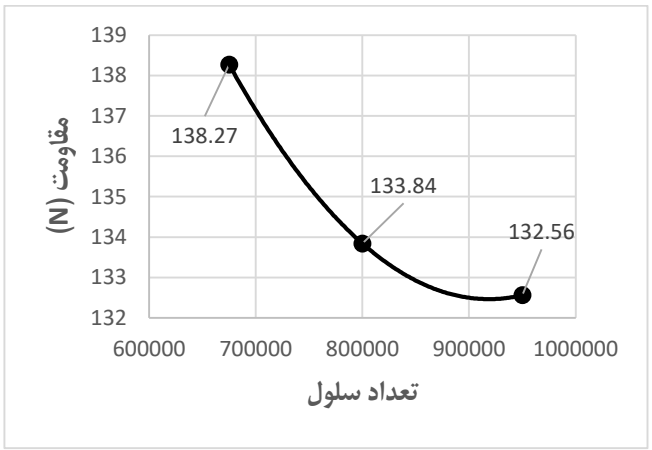
در تنظیمات فیزیک حل مسئله در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، مدل اغتشاش $k-\omega$ انتخاب گردیده است. بر اساس فریسک [۱۲]، مدل توربولانس $k-\omega\ sst$ عملکرد خوبی را برای بسیاری از جریان‌های پیچیده (جریان‌های دارای گرادیان فشار معکوس و جریان‌های جداشونده)، نشان داده است. این مدل توربولانس به دلیل دربرداشتن هر دو مدل $k-\omega$ و $k-\epsilon$ عملکرد مناسبی در قیاس با نتایج تجربی دارد. همچنین مطابق [۱۲] ، این مدل توربولانس متداول ترین روش برای شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیک کشتی است. همچنین برای مدل کردن جریان دو فاز سیال، از مدل چند فازی اویلری استفاده گردید. همچنین از مدل حجم سیال برای امواج نیز استفاده شده است. برای بهتر مدل کردن رفتار سیال از کشش سطحی سیال نیز استفاده شده است. درجه آزادی بدنه شناورهای پروازی در بخش ۶ درجه آزادی[۶] نرم افزار، بر روی آزادی حرکتی پیچ و هیو شناور تنظیم شده است. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، به منظور ایجاد شرایط اولیه حل معادلات ناویر-استوکس، برای شرط اولیه سرعت، سرعت ورودی حجم سیالِ موج مسطح[۷] و برای شرط اولیه فشار، فشار هیدرواستاتیک جریان آب انتخاب گردید. گام زمانی استفاده شده در مقاله، ۰/۰۱ ثانیه است.

برای این شبیه‌سازی‌ها از روش شاخص همگرایی شبکه[۱] [۲۴, ۲۵]، به منظور بررسی استقلال شبکه استفاده شده است. با استفاده از این روش می‌توان به محاسبه میزان همگرایی شبکه پرداخت. برای محاسبه میزان همگرایی، ابتدا باید سه شبکه‌بندی ریز، متوسط و درشت ایجاد نمود. سپس با استفاده از مقادیر محاسبه شده در هر شبکه‌بندی، به محاسبه نسبت تمایز پرداخته شد. در **جدول ۴**، میزان مقاومت محاسباتی برای سه حالت فوق‌الذکر ارائه شده است.

جدول ۴- محاسبه استقلال از شبکه

شماره	نوع شبکه‌بندی	تعداد سلول	مقدار مقاومت
۱	ریز	۹۵۰۰۰۰	۱۳۲/۵۶
۲	متوسط	۸۰۰۰۰۰	۱۳۳/۸۴
۳	درشت	۶۷۵۰۰۰	۱۳۸/۲۷

بر اساس روش شاخص همگرایی شبکه، اگر پارامتر $R=\frac{\phi_2-\phi_1}{\phi_3-\phi_2}$ شرط $0<R<1$ را ارضا کند، شرایط همگرایی یکنواخت برقرار است. مقدار $R=0.29$ برای **جدول ۴** بدست آمده که نشان‌دهنده وجود همگرایی یکنواخت در این حل عددی است. در **شکل ۸** منحنی مقاومت کل محاسباتی در مطالعه‌ی استقلال از شبکه نمایش داده شده است.



شکل ۸- منحنی استقلال از شبکه

برای صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به روش دینامیک سیالات محاسباتی، ابتدا مدل‌سازی آب آرام شناور C از سری ساتهمپتون صورت گرفت. در این شبیه‌سازی‌ها، شناور پروازی C از سرعت ۴/۰۵ تا ۱۳/۰۹ متر بر ثانیه، معادل فرود حجمی ۲/۳۹ تا

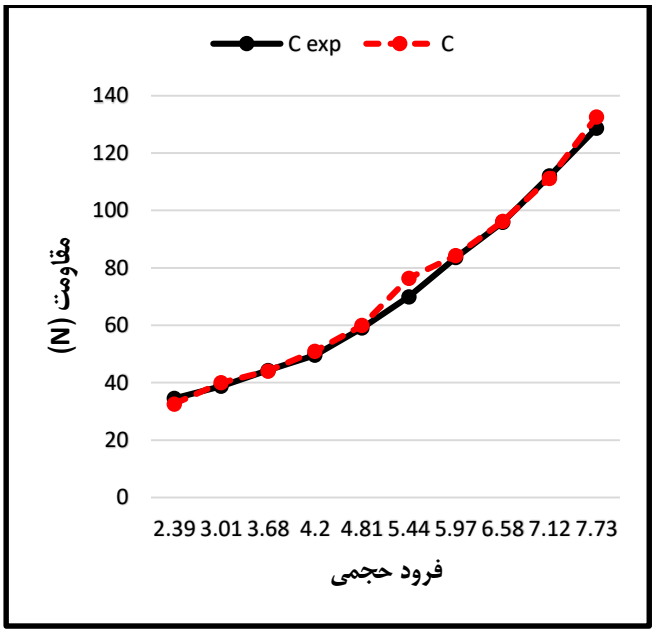
[۱] Grid Convergence Index

[۶] 6-DOF

[۷] VOF Flat Wave

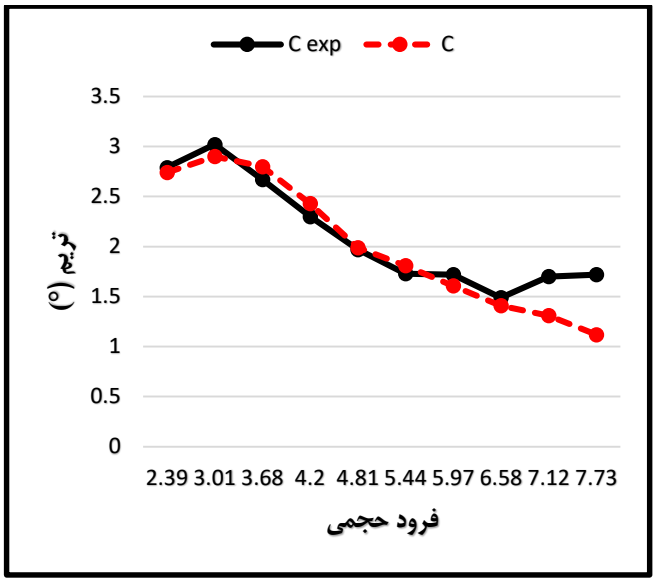
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

۷/۷۳ مدل‌سازی شد. نتایج مقاومت شناور پروازی C در این شبیه-سازی‌ها در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی تانتون و همکاران [۸] حاکی از خطای متوسط ۲/۷۷ درصدی این شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. در **شکل ۹** نمودار مقاومت بر حسب فرود حجمی شناور پروازی C آورده شده است.

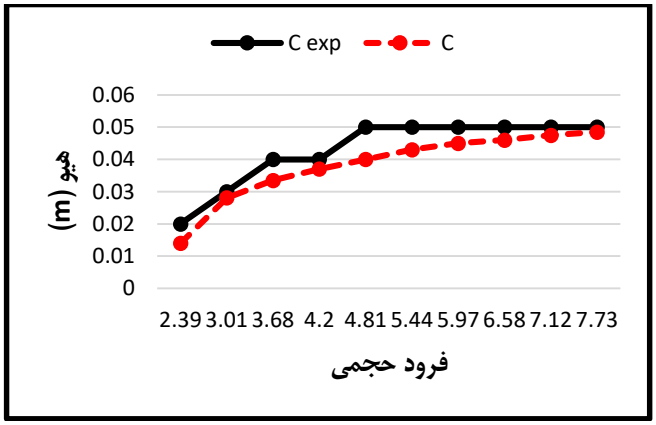


شکل ۹- نمودار مقاومت بر حسب فرود حجمی شناور پروازی C در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته و داده‌های آزمایشگاهی

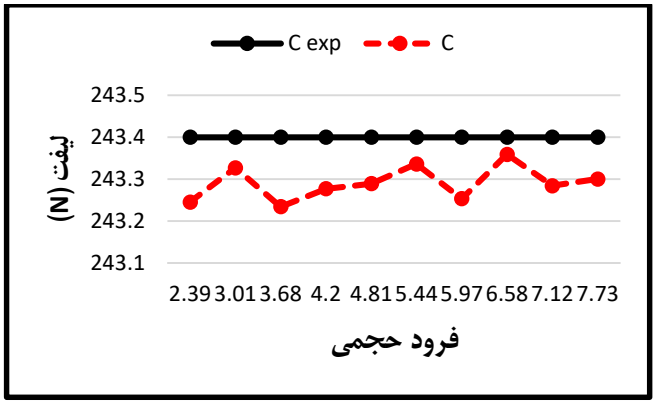
به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها برای پایداری هیدرودینامیکی شناور پروازی، نتایج تریم و هیو و لیفت شناور نیز مورد بررسی قرار گرفت. در **شکل ۱۰** نمودار تریم بر حسب فرود حجمی شناور پروازی C ارائه شده است. خطای متوسط تریم شناور پروازی C در این شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تانتون و همکاران، ۹/۱۶ درصد بوده است. در **شکل ۱۱**، نتایج هیو شناور پروازی C در این شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تانتون و همکاران برحسب فرود حجمی ارائه شده است. خطای متوسط هیو شناور پروازی C در این شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تانتون و همکاران، ۱۲/۰۱ درصد بوده است. نتایج لیفت شناور پروازی C در این شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تانتون و همکاران بر حسب فرود حجمی، در **شکل ۱۲** نمایش داده شده است. اهمیت این موضوع در آن است که تعادل نیروهای عمودی وارد بر شناور، مورد بررسی قرار گیرد. از نقطه نظر عددی اختلاف ناچیز موجود در **شکل ۱۲** نشان‌دهنده خطای ناچیز عددی در حل دینامیک سیالات محاسباتی مربوطه است.



شکل ۱۰- نمودار تریم بر حسب فرود حجمی شناور پروازی C در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته و داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۱۱- نمودار هیو بر حسب فرود حجمی شناور پروازی C در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته و داده‌های آزمایشگاهی

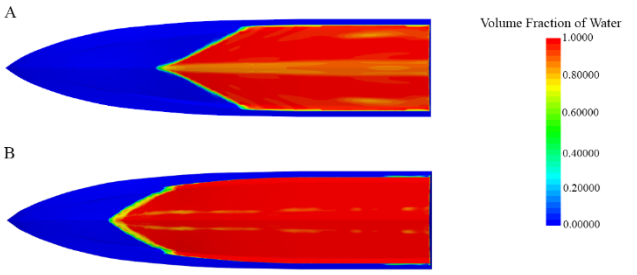


شکل ۱۲- نمودار لیفت بر حسب فرود حجمی شناور پروازی C در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته و داده‌های آزمایشگاهی

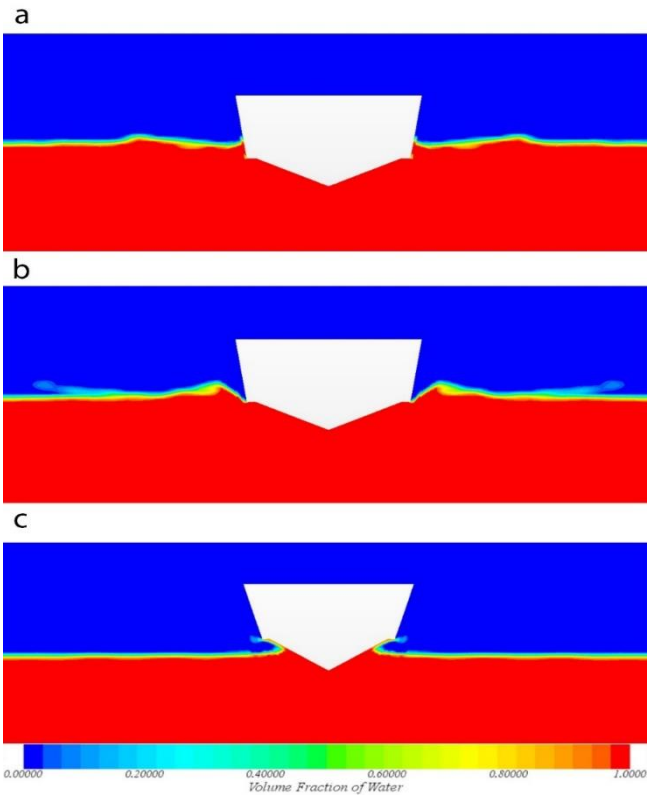
برای صحت‌سنجی بهتر نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته و نبود خطای ناشی از هوادهی در شبیه‌سازی‌ها، از کانتور کسر حجمی سیال استفاده شد. در **شکل ۱۳** کانتور کسر حجمی سیال سطح خیس شناور پروازی C در سرعت‌های ۴/۰۵ و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

۹/۲۱ متر بر ثانیه معادل با فرود حجمی ۲/۳۹ و ۵/۴۴ نمایش داده شده است. همچنین در **شکل *۱۴*** کانتور کسر حجمی سیال شناور پروازی C در سه مقطع عرضی پاشنه، ۲۵ درصد طول شناور از پاشنه و ۶۰ درصد طول شناور از پاشنه در سرعت ۴/۰۵ متر بر ثانیه معادل فرود حجمی ۲/۳۹ نمایش داده شده است.

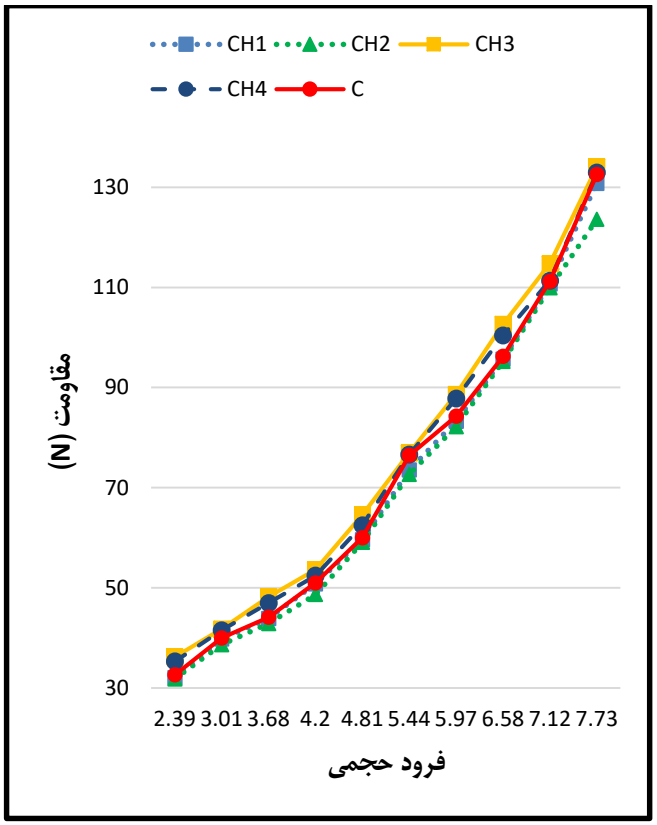


شکل ۱۳- کانتور کسر حجمی سیال سطح خیس شناور پروازی C. (A فرود حجمی ۵/۴۴، B) فرود حجمی ۲/۳۹



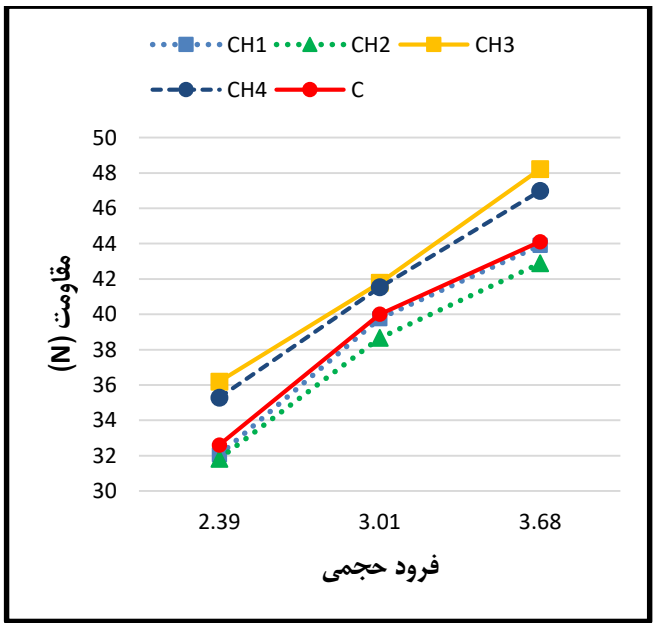
شکل ۱۴- کانتور کسر حجمی سیال شناور پروازی C در فرود حجمی ۲/۳۹. a) پاشنه شناور، b) ۲۵ درصد طول شناور از پاشنه، c) ۶۰ درصد طول شناور از پاشنه

پس از صحت سنجی نتایج بدست آمده، نتایج بدست آمده از شبیه-سازی‌های عددی شناورهای پروازی CH1، CH2، CH3 و CH4 ارائه شده است. نمودار مقاومت شناورهای پروازی C، CH1، CH2، CH3 و CH4 در **شکل *۱۵*** نمایش داده شده است.



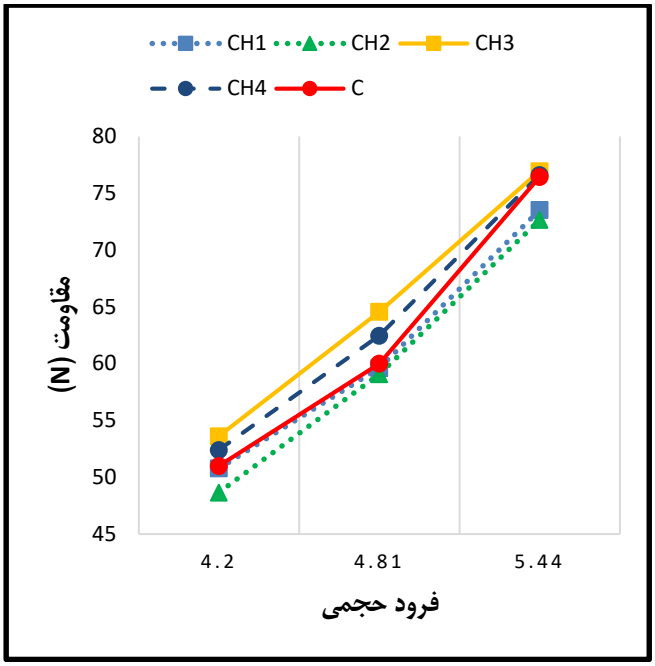
شکل ۱۵- نمودار مقاومت شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته

برای بررسی و مقایسه بهتر نتایج، این نمودار به سه قسمت تقسیم شده و در **شکل *۱۶***، **شکل *۱۷*** و **شکل *۱۸*** قابل مشاهده می‌باشد.

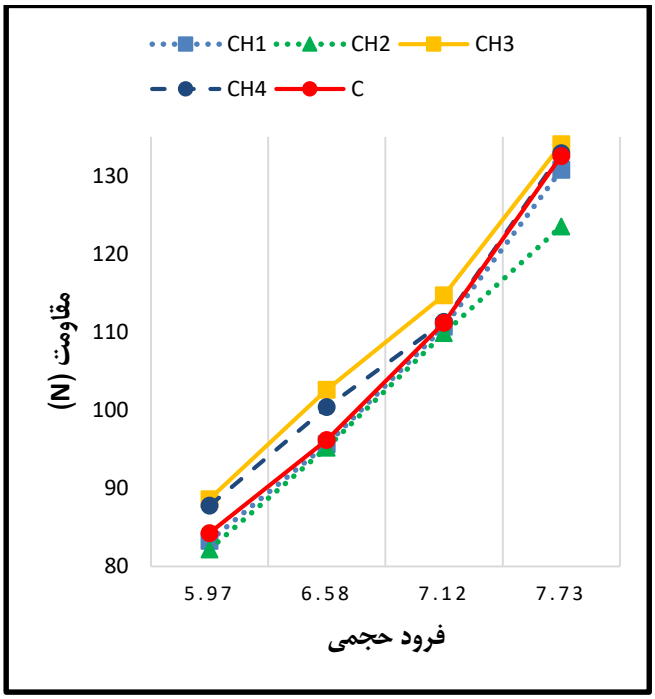


شکل ۱۶- نمودار مقاومت شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۲/۳۹، ۳/۰۱ و ۳/۶۸

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

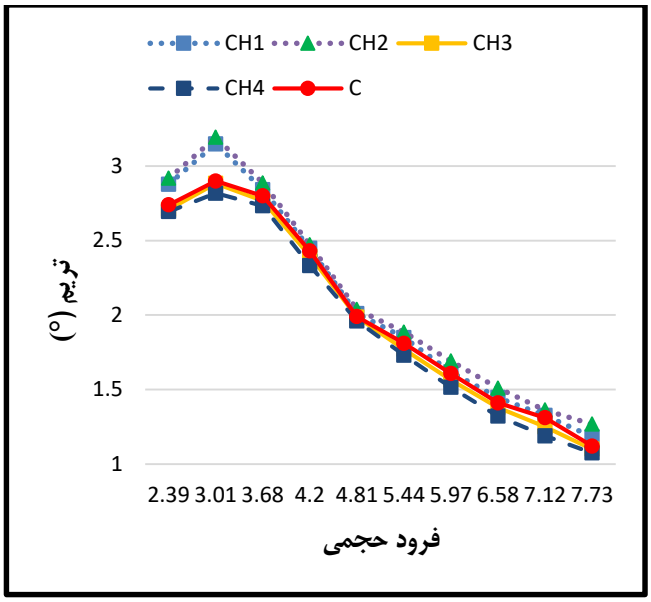


شکل ۱۷- نمودار مقاومت شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۴/۲، ۴/۸۱ و ۵/۴۴



شکل ۱۸- نمودار مقاومت شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۵/۹۷، ۶/۵۸، ۷/۱۲ و ۷/۷۳

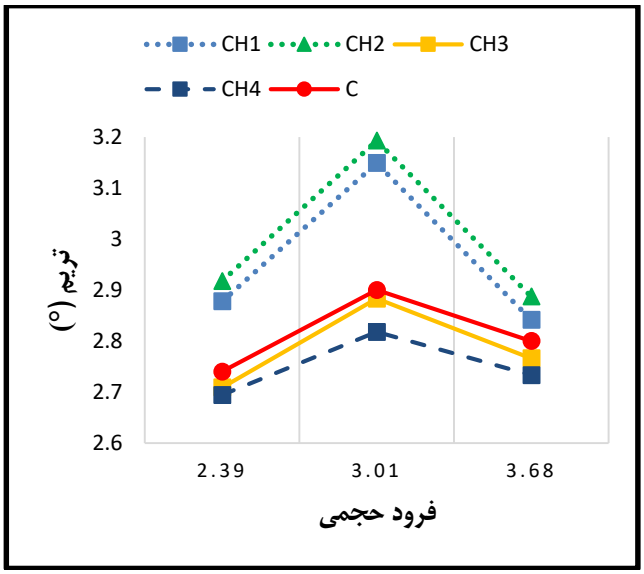
در شبیه‌سازی شناور پروازی CH1، مقاومت شناور در مقایسه با شناور پروازی C به طور متوسط با ۱/۱۲ درصد کاهش همراه بود. همچنین در شبیه‌سازی شناور پروازی CH2، نتایج مقاومت شناور در مقایسه با شناور پروازی C به طور متوسط ۳/۱۱ درصد کاهش را نشان داده است. با توجه به نتایج به دست آمده، در شبیه‌سازی شناور پروازی CH3، مقاومت شناور در مقایسه با شناور پروازی C به طور متوسط با ۵/۴۳ درصد افزایش همراه بود. همچنین در شبیه‌سازی شناور پروازی CH4، مقاومت شناور در مقایسه با شناور پروازی C به طور متوسط با ۳/۴۶ درصد افزایش را به دنبال داشت. بیشترین کاهش مقاومت مربوط به شناور CH2 در فرود ۷/۷۳ با ۶/۸ درصد کاهش و بیشترین افزایش مقاومت مربوط به شناور CH3 با ۱۱/۰۱ درصد افزایش بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته، کمترین مقاومت را شناور CH2 و همچنین بیشترین مقاومت را شناور CH3 داشته است. نمودار تریم شناورهای پروازی C، CH1، CH2، CH3 و CH4 در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته بر حسب فرود حجمی در **شکل ۱۹** نمایش داده شده است.



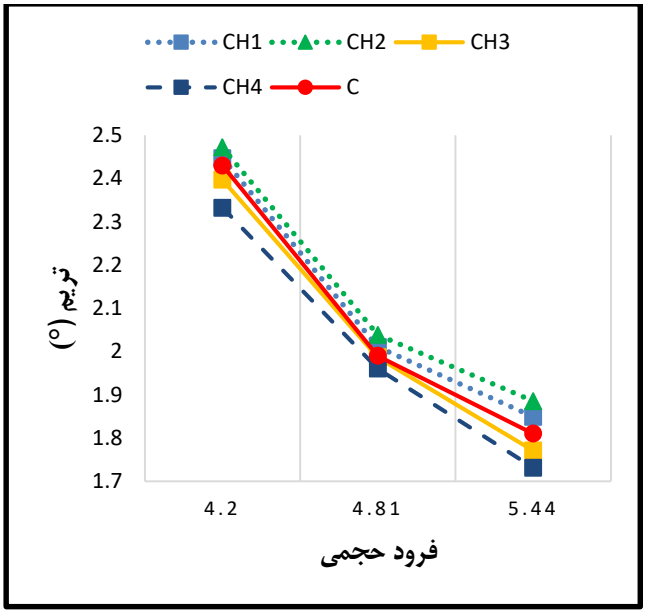
شکل ۱۹- نمودار تریم شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته

به منظور مقایسه بهتر نتایج تریم شناورهای پروازی با یکدیگر، نمودار تریم به سه قسمت تقسیم گردید و در **شکل ۲۰**، **شکل ۲۱** و **شکل ۲۲** قابل مشاهده می‌باشد.

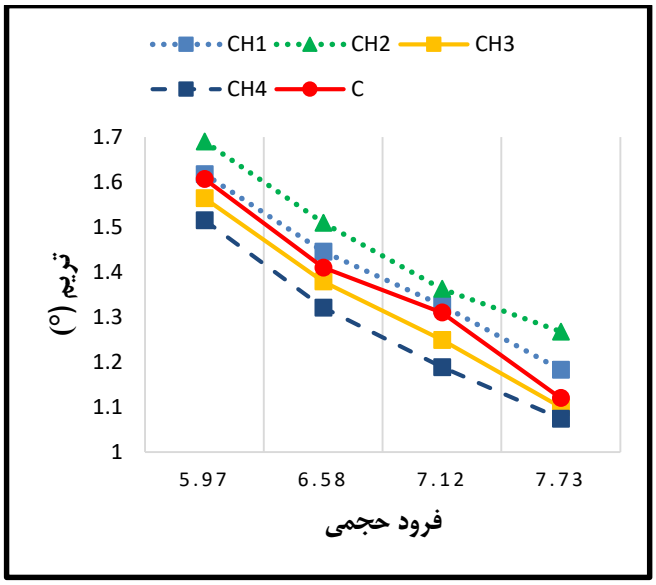
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]



شکل ۲۰- نمودار تریم شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۲/۳۹، ۳/۰۱ و ۳/۶۸

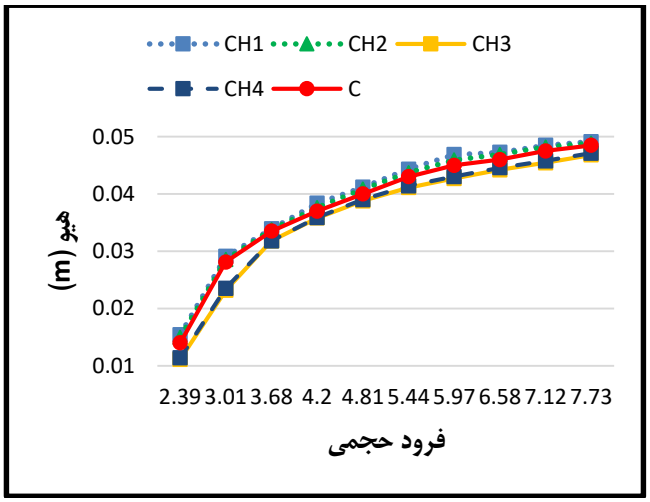


شکل ۲۱- نمودار تریم شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۴/۲، ۴/۸۱ و ۵/۴۴



شکل ۲۲- نمودار تریم شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۵/۹۷، ۶/۵۸، ۷/۱۲ و ۷/۷۳

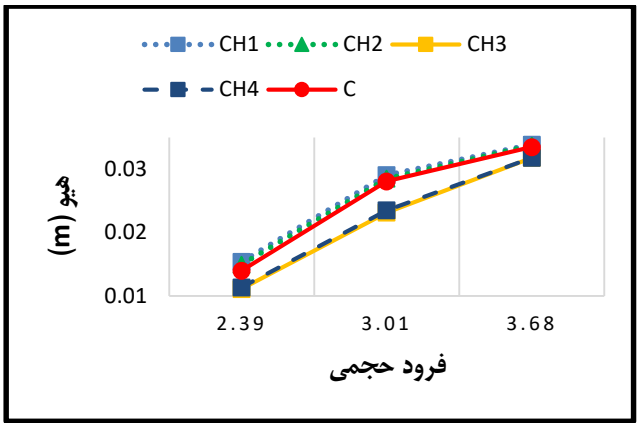
نمودار هیو شناورهای پروازی C، CH1، CH2، CH3 و CH4 در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته بر حسب فرود حجمی در **شکل ۲۳** ارائه گردیده است.



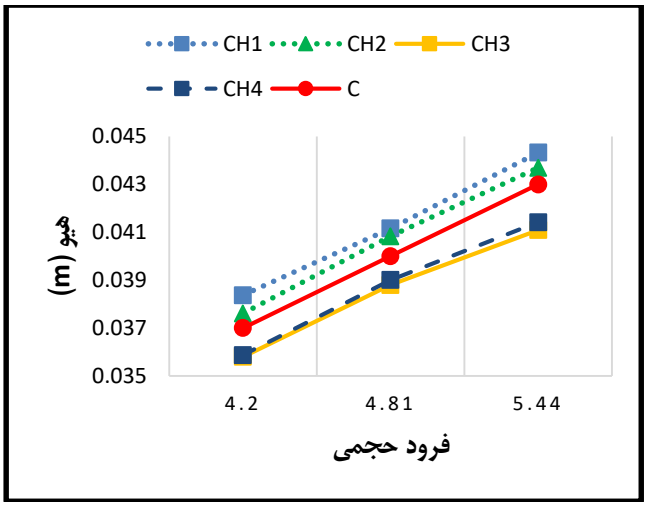
شکل ۲۳- نمودار هیو شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه‌سازی-های عددی صورت گرفته

جهت مقایسه بهتر نتایج هیو شناورهای پروازی با یکدیگر، نمودار هیو به سه قسمت تقسیم گردید و در **شکل ۲۴**، **شکل ۲۵** و **شکل ۲۶** نشان داده شده است.

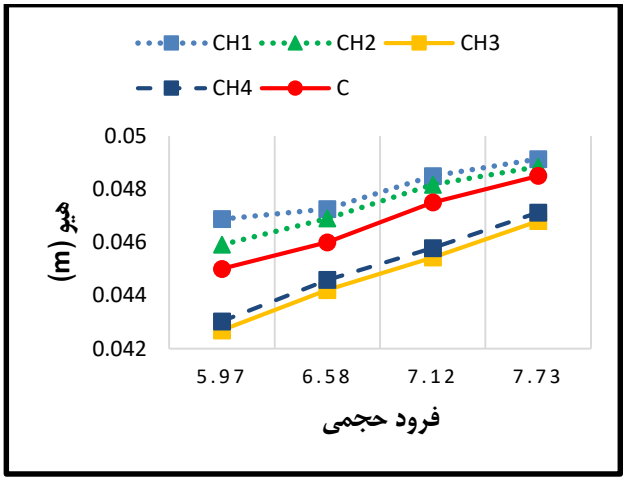
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]



شکل ۲۴- نمودار هیو شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۲/۳۹، ۳/۰۱ و ۳/۶۸



شکل ۲۵- نمودار هیو شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۴/۲، ۴/۸۱ و ۵/۴۴



شکل ۲۶- نمودار هیو شناورهای پروازی در مقایسه با هم در شبیه-سازی‌های عددی صورت گرفته در فرود حجمی ۵/۹۷، ۶/۵۸، ۷/۱۲ و ۷/۷۳

با توجه به نتایج به دست آمده، تریم و هیو شناور پروازی CH1 در مقایسه با شناور پروازی C، به طور متوسط، به ترتیب ۲/۹ و ۳/۴۹ درصد افزایش را در پی داشتند. همچنین تریم و هیو شناور پروازی CH2 در مقایسه با شناور پروازی C، به طور متوسط، به ترتیب افزایش ۵/۷۴ و ۲/۰۶ درصدی را به دنبال داشتند. پس از بررسی نتایج به دست آمده، تریم و هیو شناور پروازی CH3 در مقایسه با شناور پروازی C، به طور متوسط، به ترتیب ۱/۸ و ۷/۰۹ درصد کاهش را به همراه داشتند. همچنین تریم و هیو شناور پروازی CH4 در مقایسه با شناور پروازی C، به طور متوسط، به ترتیب ۴/۲۲ و ۶/۳۳ درصد کاهش را در پی داشتند. بیشترین افزایش تریم مربوط به شناور CH2 در فرود ۷/۷۳ با ۱۳/۱۷ درصد افزایش و بیشترین کاهش تریم مربوط به شناور CH4 با ۹/۲۷ درصد کاهش بوده است. همچنین بیشترین افزایش هیو مربوط به شناور CH1 در فرود ۲/۳۹ با ۱۰/۱۷ درصد افزایش و بیشترین کاهش هیو مربوط به شناور CH3 در فرود ۲/۳۹ با ۲۰/۶۵ درصد کاهش بوده است. لذا، با توجه بررسی نتایج به دست آمده، بیشترین تریم را شناور CH2 و بیشترین هیو را شناور CH1 به ثبت رساندند. همچنین، کمترین تریم را شناور CH4 و کمترین هیو را شناور CH3 از خود به نمایش گذاشتند.

۴ – نتیجه گیری

در ابتدا نتایج شبیه‌سازی عددی شناور پروازی C در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مرجع بررسی شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان از دقت مناسب روش عددی در مقایسه با روش آزمایشگاهی دارد. در این شبیه‌سازی‌ها، خطای متوسط مقاومت شناور پروازی C در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ۲/۷۷ درصد بوده است. همچنین خطای متوسط تریم و هیو شناور پروازی C در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۹/۱۷ و ۱۲/۰۱ درصد محاسبه شده است. پس از صحت-سنجی نتایج شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی شناورهای پروازی CH1، CH2، CH3 و CH4 و مقایسه آن‌ها با رفتار هیدرودینامیکی شناور پروازی C صورت گرفت. دستاوردهای این پژوهش به شرح زیر است:

۱- با طراحی بدنه با پهنای چاین ۵/۴۳ درصد عرض شناور، مقاومت بدنه به طور متوسط ۳/۱۱ درصد کاهش داده شد. بیشینه کاهش مقاومت در فرود ۷/۷۳ به میزان ۶/۸ درصد بوده است.

۲- بدترین حالت پهنای چاین این شناور پروازی، پهنای چاین ۴/۵۷ درصد عرض شناور بوده است که به طور متوسط ۵/۴۳ درصد افزایش مقاومت را به همراه داشت. بیشترین افزایش مقاومت در این حالت مربوط به فرود ۲/۳۹ با ۱۱/۰۱ درصد بوده است.

۳- میزان کاهش مقاومت ناشی از روش انتخاب شده در این مقاله، محدود است. طبق نتایج، کاهش مقاومت ناشی از تغییرات پهنای چاین، بین ۰/۵ تا ۶/۸ درصد بوده است. بر اساس [۱۹]، تغییرات مقاومت ناشی از تغییرات در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

طراحی بدنه مانند اسپری ریل بین ۲/۵ تا ۹/۷ درصد است. لذا، تغییر ابعاد پهنای چاین و اسپری ریل روش‌های محدودی برای کاهش مقاومت کل بدنه هستند.

ت

۵ - مراجع

1. Savitsky, D. and J.L. Gore, *Re-evaluation of the planing hull form.* Journal of Hydronautics, 1980. **14**(2): p. 34-47.
2. Ruscelli, D., *Dynamics of high-speed craft*. 2009, PhD Thesis, University of Genoa, Genoa.
3. Savitsky, D., *Hydrodynamic design of planing hulls.* Marine Technology and SNAME News, 1964. **1**(04): p. 71-95.
4. Savitsky, D., *On the subject of high-speed monohulls.* Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) Section Papers, Athens, Greece, Oct, 2003. **2**.
5. Maimun, A., et al., *EFFECT OF DOUBLE CHINE ON PLANING HULL VESSEL PERFORMANCE*.
6. Savitsky, D., M.F. DeLorme, and R. Datla, *Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls.* Marine Technology and SNAME News, 2007. **44**(01): p. 35-56.
7. Brizzolara, S. and D. Villa. *CFD simulation of planing hulls*. in *Seventh International Conference On High-Performance Marine Vehicles*. 2010.
8. Taunton, D., D. Hudson, and R. Shenoi, *Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls-part 1: performance in calm water.* International Journal of Small Craft Technology, 2010. **152**: p. 55-75.
9. Yousefi, R., R. Shafaghat, and M. Shakeri, *Hydrodynamic analysis techniques for high-speed planing hulls.* Applied ocean research, 2013. **42**: p. 105-113.
10. Grigoropoulos, G.J. and D.P. Damala, *Dynamic performance of the National Technical University of Athens Double-Chine Series hull forms in random waves.* Journal of Ship Production and Design, 2014. **30**(3): p. 101-108.
11. Çakıcı, F., et al. *A computational investigation of a planing hull in calm water by U-RANSE Approach.* in *International conference on advances in applied and computational mechanics, Izmir, Turkey*. 2015.
12. Frisk, D. and L. Tegehall, *Prediction of high-speed planing hull resistance and running attitude.* A numerical study using computational fluid dynamics. Master of Science, Department of Shipping and Marine Technology Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2015.
13. Kazemi, H. and M. Salari, *Effects of Loading Conditions on Hydrodynamics of a Hard-Chine Planing Vessel Using CFD and a Dynamic Model*. International Journal of Maritime Technology, 2017. **7**: p. 11-18.
14. Kim, J., J. Choi, and J. Oh, *A Study on the Resistance Characteristics of Leisure Boat According to Chine Shape*. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 2017. **23**(5): p. 566-573.
15. De Luca, F. and C. Pensa, *The Naples warped hard chine hulls systematic series.* Ocean Engineering, 2017. **139**: p. 205-236.
16. Mancini, S., F. De Luca, and A. Ramolini. *Towards CFD guidelines for planing hull simulations based on the Naples Systematic Series*. in *MARINE VII: proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*. 2017. CIMNE.
17. Wheeler, M.P., K.I. Matveev, and T. Xing, *Numerical study of hydrodynamics of heavily loaded hard-chine hulls in calm water*. Journal of Marine Science and Engineering, 2021. **9**(2): p. 184.
18. Lakatoš, M., et al., *The effect of spray rails, chine strips and V-shaped spray interceptors on the performance of low planing high-speed craft in calm water.* Applied Ocean Research, 2022. **122**: p. 103131.
19. Pacuraru, F., A. Mandru, and A. Bekhit, *Cfd study on hydrodynamic performances of a planing hull*. Journal of Marine Science and Engineering, 2022. **10**(10): p. 1523.
20. Faltinsen, O.M., *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. 2005: Cambridge university press.
21. Lewandowski, E.M., *The dynamics of marine craft: maneuvering and seakeeping*. Vol. 22. 2004: World scientific.
22. Versteeg, H.K. and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 2007: Pearson education.
23. Khazaee, R., *Numerical Simulation of Waterjet Propulsion System for a Planing Hull*, in *Faculty of Engineering*. 2019, Persian Gulf University: Persian gulf university's library. p. 90.
24. ITTC, *Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-01-01, Uncertainty*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]

Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures. 2017.

25. Wilson, R.V., et al., *Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—Part 2: Application for RANS simulation of a cargo/container ship*. J. Fluids Eng., 2001. **123**(4): p. 803-810.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.10.6]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.153]