تحلیل مقاومت و رفتار هیدرودینامیکی یک شناور دو بدنه‌ای بدون سرنشین به روش تجربی و عددی

علیرضا پارسائی[۱]، حسن فروزانی[۲*]، علیرضا بینش[۳]

[۱] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز. (Alireza.parsaei2@gmail.com)
[۲] استادیار، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز. (hforouzani@mut.ac.ir)
[۳] دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز. (binesh@mut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

کلمات کلیدی:
شناور بدون سرنشین
حوضچه کشش
دینامیک سیالات محاسباتی
مقاومت هیدرودینامیکی
استار-سی‌سی‌ام+

چکیده

در این مطالعه مقاومت کل و تاثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار هیدرودینامیکی یک شناور بدون سرنشین دو بدنه‌ای به روش عددی (دینامیک سیالات محاسباتی) با استفاده از نرم افزار استار-سی سی ام+ و روش تجربی (تست حوضچه کشش) در حوضچه کشش کوثر مورد بررسی قرار گرفته است. تست شناور در دو تناژ و چهار سرعت مختلف انجام شده است. مقایسه نتایج حاصل از هر دو روش بیانگر تطابق مطلوب بین نتایج تحلیل تجربی و عددی می‌باشد و در نهایت مشخص شد که افزایش وزن شناور تا مقدار بیشینه‌ی خود در سرعت عملیاتی، تنها افزایش ۱۷٪ مقاومت کل را به همراه خواهد داشت. همچنین در انجام آزمایش‌ها مشخص شد که علیرغم طراحی شناور برای سرعت‌های عملیاتی پایین، امکان دستیابی به سرعت‌های سرشی و یا بالاتر نیز وجود دارد، اما بدلیل عدم تولید نیروی برآی هیدرودینامیکی مناسب در سرعت‌های بالا، مقاومت هیدرودینامیکی به شدت افزایش خواهد یافت. افزایش وزن مدل به میزان ۴ کیلوگرم باعث افزایش زاویه پیچ تا ۹٪، بیشینه فشار وارد بر بدنه تا ۱۲٪ و دامنه‌ی موج نزدیک بدنه تا ۹٪ خواهد شد.

Experimental and Numerical analysis of an unmanned twin-hull surface vessel (USV) hydrodynamic resistance and behavior

Alireza Parsaei[1], Hassan Forouzani[2*], Alireza Binesh[3]

[1] M.Sc., Mechanical Eng., Malek ashtar university of technology; email address (Alireza.parsaei2@gmail.com)
[2] Associate prof., Naval architecture Eng., Malek ashtar university of technology; email address (hforouzani@mut.ac.ir)
[3] Assistant prof., Mechanical Eng., Malek ashtar university of technology; email address (binesh@mut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 25 Sep 2023
Accepted: 13 Nov 2023
Available online: 13 Nov 2023

Keywords:
Unmanned hull surface vessel (USV)
Towing tank
Computational fluid dynamics
Hydrodynamic Resistance
STAR-CCM+

ABSTRACT

In this study, the total resistance and effects of different parameters on the hydrodynamic behavior of a twin-hull unmanned surface vessel have been investigated using the numerical method (CFD) using STAR-CCM+ and the experimental method (towing tank test) in Kowsar towing tank (KTT). Hull has been tested in two tonnages and at four different speeds. The comparison of the results of both methods shows an eligible match between the results of experimental and numerical analysis. Finally, it was found that vessel weight increasing to its maximum value at the operating speed will only increase the total resistance by 17%. Also, during the experiments, it was found that despite the vessel's design for low operating speeds, it is possible to achieve planning speeds or higher. Still, due to a lack of hydrodynamic lift generation at high speeds, hydrodynamic resistance will increase significantly. An increase of 4 kg in hull mass will increase the pitch angle up to 3%, the maximum pressure on the body up to 12%, and the wave height near the body up to 9%.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

۱ - مقدمه

امروزه پیشرفت علم، باعث بهینه‌سازی استفاده از انرژی و زمان شده است. صنایع دریایی نیز همانند سایر صنایع از پیشرفت علم بهره‌مند بوده و سعی در تولید بسترهای جدید برای استفاده‌ی حداکثری از منابع انرژی داشته‌اند. تنوع کاربردها در کنار کاهش هزینه‌ها ایجاد تمایل به توسعه و ساخت این نوع شناورها را افزایش داده است. در اواخر قرن بیستم میلادی توسعه شناورها با کاربردهای تحقیقاتی، اکتشافی، زیست محیطی و نظامی باعث تولید شناورهای بدون سرنشین[1]شد که علاوه بر سرعت و پایداری بالا، امکان کنترل از راه دور را نیز دارند. در واقع شناورهای بدون سرنشین بدون حضور نیروی انسانی قادر به انجام مأموریت‌های مختلف هستند.

پایداری شناور و دستیابی به سرعت مورد نظر از مهم‌ترین اهداف حائز اهمیت در طراحی شناورها هستند. شناورهای چند بدنه‌ای بدلیل پیکربندی خاصشان، از مصرف سوخت پایین‌تر و پایداری بهتری نسبت به شناورهای متعارف برخوردارند؛ به همین دلیل در طراحی شناورهای بدون سرنشین، توجهات به سمت شناورهای چندبدنه‌ای جلب شده است. بطور کلی شناورهای بدون سرنشین را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

جدول ۱ - دسته‌بندی شناورهای بدون سرنشین

نوع	کاربری
تحقیقاتی	عمق‌سنجی دریا، بررسی پدیده‌ها و تغییرات زیست محیطی، بررسی نحوه ارتباط بین وسیله‌های دریایی، زیردریایی، هوایی و زمینی به منظور انجام هدف مشترک، آزمایش بدنه‌ی شناورهای جدید و آزمایش سیستم‌های پیشرانش و کنترلی
زیست محیطی	نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف محیط‌زیست، تعیین آلودگی و پاکسازی محیط
اکتشافی	اکتشافات در حوزه‌ی نفت و گاز، مین‌روبی و تعمیرات ساحلی
نظامی	بررسی و شناسایی زیردریایی‌ها، گشت‌زنی ساحلی، انهدام تهدیدات و کمک‌رسانی

در کاربردهای تحقیقاتی، اکتشافی و زیست محیطی استفاده از شناورهایی با ابعاد بزرگ، بدلیل دشواری در حمل و نقل، مصرف سوخت بالا و هزینه‌های تعمیر و نگهداری بهینه نبوده، لذا استفاده از شناورهای بدون سرنشین با ابعاد کوچک از اولویت بالاتری برخوردار است. علاوه بر این ابعاد کوچک شناور امکان استفاده در دریاچه ها و آب های کم عمق را ارائه می‌کند.

در این مطالعه سعی شده است که با استفاده از روش تجربی (تست حوضچه کشش) و روش عددی (دینامیک سیالات محاسباتی) مقاومت و رفتار هیدرودینامیکی یک شناور دو بدنه‌ای بررسی شود. شناور در دو وزن ۲۰kg و ۲۴kg و چهار سرعت ۱ m/s، ۱/۳۵، ۲/۵ و۳ تست شده است. در روش عددی از نرم افزار STAR-CCM+ استفاده شده است. شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی، دو فازی با دو درجه آزادی هیو و پیچ بوده است. در روش تجربی، مدل هم اندازه با شناور اصلی و با استفاده از روش پرینت سه بعدی و از جنس فیلامنت PLA و ABS ساخته شده است. تست تجربی در حوضچه کشش کوثر دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز انجام شده است. لازم به ذکر است که در تمامی قسمت های تحلیل عددی و تجربی شناور، پیشنهادات ITTC بکارگرفته شده است. پس از انجام تست و تحلیل ها، نتایج حاصل از هر دو روش با یکدیگر مقایسه شده و اثر پارامترهای مختلف بر روی رفتار هیدرودینامیکی شناور، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ - پیشینه تحقیق

وانک و همکاران[۱] در سال۱۹۹۳ در دانشگاه امآی‌تی شناور آرتمیس[2]را به عنوان اولین شناور سطحی بدون سرنشین، با هدف عمق سنجی در دریا طراحی و تولید کردند که بدلیل ابعاد کوچک، مشکل پایداری و دریامانی داشت. در سال ۱۹۹۶ شناور ایسز[3]که نسخه بهبود یافته شناور آرتمیس بود، به منظور استفاده‌ی گسترده‌تر ساخته شد. وظیفه اصلی این شناور، عکس‌برداری از کف دریا (هیدروگرافی[4]) بود. این شناور در مواردی مانند استحکام، سرعت و مشخصه‌های دریامانی از عملکرد بهتری نسبت به نسخه‌ی اولیه خود برخوردار بود[۲]. در تابستان سال ۱۹۹۸ میلادی شناور ایسز به آزمایشگاه دانشگاه امآی‌تی بازگردانده شد تا از نظر سیستمی ارتقا داده شود. در سال ۲۰۰۰ میلادی شناور دو بدنه‌ای اتوکت[5]که نسخه ارتقا یافته شناور ایسز بود، در دانشگاه امآی‌تی آمریکا ساخته شد. شناور اتوکت بدلیل داشتن سیستم میراگر موج یکی از بهترین شناورهای بدون سرنشین ساخته شده در آن زمان بود. وظیفه اصلی این شناور، گشت‌زنی به منظور امدادرسانی به شناورهای مغروق بود[۳].

در سال ۱۹۹۸ در دانشگاه روستوک[6]آلمان، یک شناور دو بدنه‌ای بر اساس فرم بدنه‌ی دلفین طراحی شد که در نهایت باعث توسعه یک بستر تجربی به منظور ارتقا در سطح کیفی طراحی بدنه‌ی شناورهای بدون سرنشین گردید. این پژوهش گام بزرگی در نحوه توسعه بدنه‌ی

[1] Unmanned Surface Vehicle (USV)
[2] ARTHEMIS
[3] ACES (Autonomous Coastal Exploration System)
[4] Hydrography
[5] AUTOCAT
[6] ROSTOK

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

شناورها بر اساس اطلاعات تجربی بود. شناوری که بر این اساس ساخته شد مسین[1]نام داشت[۴].

در سال ۲۰۰۱ میلادی صنایع هوا-دریا سن‌دیگو در آمریکا طراحی شناور بادی سخت تنه‌ای[2]را با کاربری نظامی آغاز کرد که اسپارتان اسکوت[3]نام داشت[۵]. هدف این شناور انهدام قایق‌های کوچک و تهدیدات انتحاری در مرزهای آبی بیان شده است. این شناور به سیستم مکان یابی[4]مجهز بود و قادر است مسیریابی بین نقاط تعریف شده را انجام دهد. همچنین این شناور قابلیت مین‌روبی و شلیک گلوله با استفاده از فناوری پردازش تصویر را دارد.

در سال ۲۰۰۳ در اسرائیل، صنایع دفاعی رافائل[5][۵و۶] از شناور نظامی کنترل از راه دور خود با نام پروتکتور[6]رونمایی کرد. طول این شناور بادی سخت تنه‌ای تک بدنه، m ۹ بوده و بیشینه سرعت آن به ۵۰ گره دریایی می‌رسد. در سیستم رانش این شناور، از واترجت و موتور دیزل استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۴ در کشور ایتالیا شناور سیسامو[7]با پیشرانش الکتریکی و با هدف نمونه برداری محیطی و اقیانوس‌شناسی طراحی و ساخته شد. اولین بار شناور سیسامو در قطب جنوب مورد آزمایش قرار گرفت. این شناور دو بدنه‌ای به دلیل پایداری عرضی مناسب، ظرفیت بارگیری و دسترسی آسان به عرشه باعث شد که توجهات به سمت تولید شناورهای چند بدنه‌ای جلب شود [۲].

در سال ۲۰۰۶ شناور رووز[8]با جنس بدنه‌ی فایبرگلاس[9]در کشور پرتغال طراحی شد. این شناور از لحاظ فرم بدنه و جاگذاری مشابه شناور سیسامو بود. شناور رووز نقش یک پل ارتباطی بین دستگاه‌های مغروق و سیستم‌های کنترلی را ایفا می کرد. همچنین این شناور از قابلیت گشت‌زنی و غریق نجات برخوردار است [۲و۷].

تحقیقات دانشگاهی، نقش بزرگی در پیشرفت شناورهای بدون سرنشین داشته‌اند. هدف این تحقیقات طراحی شناورهایی بود که بتوانند در آبهای کم عمق، خدمات‌رسانی کنند. شناور لورکا[10]که توسط گرنستد و همکاران [۸] طراحی شد. لورکا یک شناور تک بدنه‌ای بود که امکان انجام عملیات در آبهای کم عمق و عمیق را داشت. ضعف پایداری در شناورهای تک بدنه‌ای باعث شد که محققان دانشگاهی به طراحی شناورهای چند بدنه‌ای علاقه‌مند شوند. شناورهای کاتاماران از پایداری بهتر، ظرفیت بالاتر و سطح عرشه وسیع‌تری نسبت به شناورهای تک‌بدنه‌ای برخوردارند و این موضوع نظرات را به سمت شناورهای کاتاماران جلب کرده است [۹ و ۱۰ و۱۱].

در سال ۲۰۱۳ شناور بدون سرنشین دوبدنه‌ای سونوبات[11]توسط شرکت آلمانی اِوو لاجیکس[12]به منظور اهداف اکتشافی و تحقیقاتی طراحی و تولید شد. مهم‌ترین مزیت این شناور، ابعاد کوچک و برخورداری از سیستم هیدروگرافی بود[۱۲]. در نسخه‌ی اولیه‌ی این شناور سیستم رانش از نوع واترجت بوده و در نسخه‌ی بعدی که با نام سونوبات ۵ تولید شد، سیستم رانش به سیستم پروانه‌ای[13]تغییر یافت. نیروی پسای[14]این شناور، برای دستیابی به سرعت m/s ۵، N ۱۰۰ است و برای غلبه بر این نیرو، از موتور الکتریکی براشلس با توان W ۷۰۰ استفاده شده است. بیشینه زمان آماده به کار این شناور ۲۰ ساعت در سرعت ۱٫۱ متر بر ثانیه است. سیستم‌های عمق‌سنجی[15]این شناور امکان شناسایی و تصویربرداری در محدوده‌ی m ۰٫۵ تا m ۱۰۰ را دارا می باشد[۱۲].

پس از شناور سونوبات، شناورهایی مانند هایکت[16][۱۳]، هرون[17] [۱۴]، اکرب[18][۱۵] و مارو[19][۱۵] در سالهای ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ به بازارجهانی عرضه شدند. تا آنجا که کارلسون و همکاران [۱۶]، برای جلوگیری از ورود گیاهان به سیستم پیش‌رانش و کاهش کارایی پروانه‌ها، در شناور هرون از سیستم رانش متفاوت واترجت بسته استفاده کردند.

اما در کنار تحقیقات صنعتی و آزمایشهای تجربی، تحقیقات نظری نیز از پیشرفت چشمگیری برخوردار بوده و محققان فراوانی در این زمینه فعال بوده‌اند. مولند و اینسل [۱۷] با بکارگیری روشهای تجربی و آماری تاثیر مؤلفه‌های مختلف مقاومت را در محدوده عدد فرود ۰٫۲ تا ۱ بررسی کردند. نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با اطلاعات بدست آمده از تئوری مقاومت موج خطی داشت. مولند[۱۸] در مطالعات تجربی دیگری تاثیر نسبت عرض به عمق و طول به جابجایی در شناورهای پرسرعت کاتاماران را بررسی نمود.

زارافونیتیس و همکاران[۱۹] با استفاده از روش‌های عددی و تجربی تاثیر عدم تقارن نیم بدنه‌ها در شناورهای پرسرعت کاتاماران را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ی این بررسی، پیشنهاد روش‌های عددی به عنوان یک روش قابل اعتماد بود. همچنین عدم تقارن بدنه‌های جانبی در کاتاماران‌ها بدلیل فیزیک پیچیده امواج، باعث افزایش مقاومت کل خواهد شد.

[1] MESSIN
[2] Rigid-hulled inflatable boat (RHIB)
[3] Spartan Scout
[4] GPS
[5] Rafael Advanced Defence Systems
[6] Protector
[7] Sesamo
[8] ROAZ
[9] Fiber Glass
[10] LORCA
[11] Sonobot
[12] Evologics
[13] Brushless electric motor
[14] Drag Force
[15] S2C - Echo-Sounder
[16] Hycat
[17] Heron
[18] ACRAB
[19] MARV

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

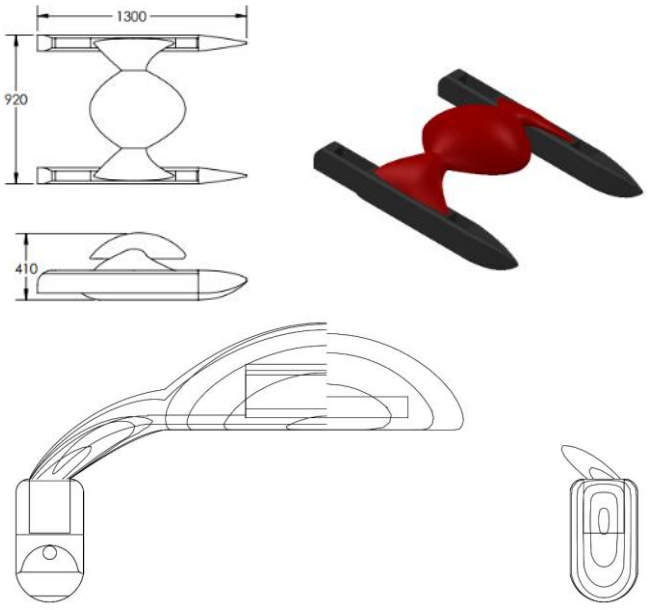
احمد و همکاران[۲۰] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تاثیر تغییر زاویه بین بدنه‌های جانبی کاتاماران‌ها بر مقاومت کل را بررسی کردند. نتیجه‌ی مطالعه، کاهش ٪۵ مقاومت کل در زاویه ۰٫۹۸- درجه بود.

بریزولارا و همکاران [۲۱] با بکارگیری روش‌های عددی و دینامیک سیالات محاسباتی توانستند یک فرم بدنه بهینه برای یک شناور بدون سرنشین سوات[1] پیشنهاد دهند. این فرم بدنه‌ی باعث کاهش ٪۳۰ توان مورد نیاز در بیشینه سرعت شناور می‌شود.

۳ - روش تحقیق

۳-۱- مشخصات شناور

بدلیل پایداری بالای شناورهای چند بدنه‌ای، اغلب شناورهای بدون سرنشین از این نوع هستند. علاوه بر این، تحقیقات علمی بسیاری برای دستیابی به یک فرم بدنه‌ی ایده‌آل برای شناورهای بدون سرنشین در حال انجام است که نشان از اهمیت این موضوع دارد. در این پژوهش طرح شناور آرین از شناور سونوبات۵ الگوبرداری شده است. هندسه و خطوط بدنه‌ی شناور در شکل ۱ و مشخصات هندسی شناور در جدول ۲ ارائه شده است[۲۲]. واحدها در شکل ۱، میلیمتر است.



شکل ۱ - نمایی از هندسه و خطوط بدنه شناور آرین

جدول ۲ - مشخصات هندسی شناور سونوبات ۵ [۲۲]

مشخصه	مقدار
طول (mm)	۱۳۰۰
عرض(mm)	۹۲۰
ارتفاع با آنتن (mm)	۸۰۵
ارتفاع بدون آنتن (mm)	۴۱۰
جابجایی (kg)	تا ۲۷
آبخور(mm)	۱۲۰
ضریب بلوکی	۰/۷۰۷
ضریب منشوری	۰/۷۶۱
ضریب صفحه آبخور	۰/۷۴۳
ضریب مقطع میانی	۰/۹۳

یکی از بخش‌های مهم در تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور، محاسبه‌ی مقاومت کل است. با محاسبه‌ی مقاومت کل در سرعت مورد نظر می‌توان توان مصرفی مورد نیاز را تعیین کرد و همچنین با بهینه سازی فرم بدنه، به کاهش مقاومت کل و بهینه‌سازی مصرف انرژی پرداخت[۲۳].

بر اساس مشخصات فنی شناور آرین، حداکثر سرعت قابل دستیابی ۵ m/s بوده و سرعت عملیاتی آن ۱ m/s تعیین شده است. رابطه‌ی (۱) توسط سازمان جهانی دریانوردی[2] برای تعیین نوع شناورها ارائه شده است.

$$V_{Max} > 3.7\ \nabla^{0.1667} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱)، ∇ معرف جابجایی با واحد تن و V معرف سرعت با واحد m/s است. رابطه‌ی (۱) بیانگر این موضوع است که اگر بیشینه سرعت شناور از مقدار بالا بیشتر باشد، شناور از نوع تندرو بوده و در غیر این صورت شناور غیرتندرو است.

۳-۲- روش عددی

۳-۲- ۱- معادلات حاکم

در روش دینامیک سیالات محاسباتی از معادلات ناویر استوکس به عنوان اصلی‌ترین معادلات حاکم بر مسائل مربوطه یاد می شود که این معادلات متشکل از معادله‌ی پیوستگی و معادلات مومنتوم است. روابط (۲) و (۳) به ترتیب تعریفی از معادله‌ی پیوستگی و معادلات مومنتوم را ارائه می‌کند.

$$\nabla . u = 0 \qquad (۲)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \qquad (۳)$$

در رابطه‌ی (۲)، ρ معرف چگالی سیال، u معرف بردار سرعت سیال، g بیانگر شتاب گرانش، μ بیانگر ویسکوزیته دینامیکی سیال و p بیانگر فشار سیال است.

بدلیل اینکه در تحلیل‌های هیدرودینامیکی، جریان آشفته است؛ لذا مقادیر میانگین پارامترهای مختلف جریان از اهمیت بیشتری

[1] Swath

[1] International maritime organization

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

برخوردار است که موجب استفاده از مقادیر میانگین و نوسانات لحظه‌ای در معادلات ناویر-استوکس می شود که با عنوان RANS یا Reynolds-averaged Navier-Stokes معرفی می شوند.

۳-۲-۲- فرضیات و تنظیمات حل

حل این مسئله با توجه به فیزیک آن، به صورت سه بعدی با دو درجه آزادی هیو و پیچ، به صورت دو فازی با بکارگیری معادلات میانگین رینولدز ناویر- استوکس و مدل آشفتگی k-epsilon با استفاده از نرم افزار تجاری STAR-CCM+ انجام شده است. حرکت شناور در این شبیه‌سازی با استفاده از ابزار DFBI و شبکه‌بندی متحرک overset، مدل شده است. کنفرانس جهانی حوضچه کشش برای تحلیل مقاومت، مدل آشفتگی k-epsilon را بدلیل فرض جریان کاملا آشفته و صرف نظر از لزجت مولکولی پیشنهاد کرده است. همچنین این مدل از سرعت محاسباتی بیشتری نسبت به مدل k-omega SST برخوردار است[۲۴]. شکل ۲ و ۳ به ترتیب نمایی از دامنه محاسباتی و شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. روابط (۴)، (۵) و (۶) به ترتیب تعریفی از انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف مربوط به مدل توربولانسی k-epsilon و لزجت اددی[1] را ارائه می کنند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+2\mu_t E_{ij}E_{ij}-\rho\varepsilon \quad (۵)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}2\mu_t E_{ij}E_{ij}-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۶)$$

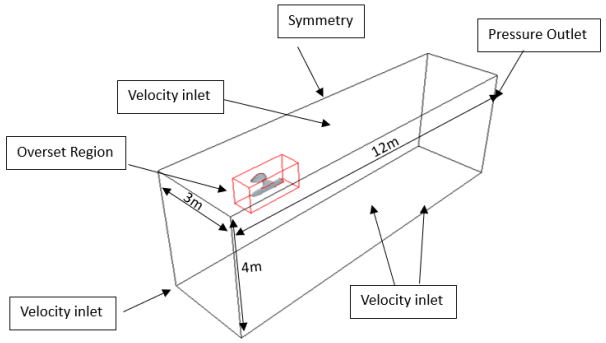
$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۷)$$

مقادیر ثابت‌های استفاده شده در روابط مدل توربولانسی k-epsilon به شرح زیر است.

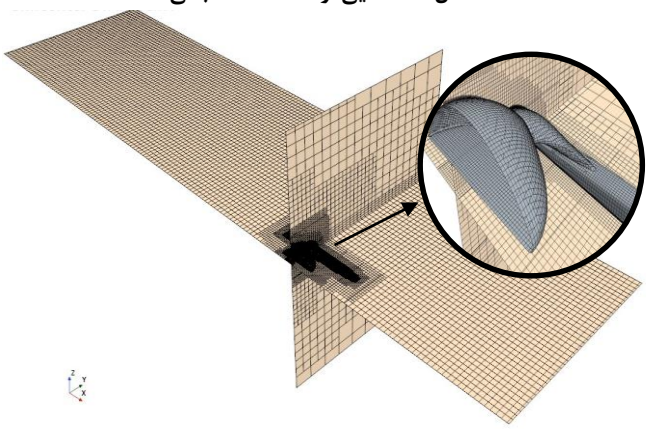
$C_\mu=0.09\ \ \sigma_k=1.00\ \ \sigma_\varepsilon=1.30$
$C_{1\varepsilon}=1.44\ \ C_{2\varepsilon}=1.92$

۳-۳-۲- دامنه محاسباتی و شبکه بندی

شبکه‌بندی شناور در محیط نرم افزار STAR-CCM+ انجام شده است. المان‌های شبکه‌بندی از نوع Trimmed cell بوده و در نزدیکی بدنه‌ی شناور از شبکه لایه مرزی استفاده شده است تا تغییرات فشار به بهترین نحو محاسبه شود. تعداد لایه‌های مرزی در نزدیک بدنه ۶ لایه بوده و ضخامت شبکه لایه مرزی ۶ میلی متر در نظر گرفته شده است. برای دقت بیشتر در محاسبه سطح آزاد و شکل موج، شبکه‌بندی در این ناحیه ریزتر شده است. ITTC در مورد ابعاد دامنه محاسباتی پیشنهاد کرده است که فاصله بین شناور تا بالادست، پایین دست و کنار حداقل اندازه‌ی طول بین دو عمود شناور باشد[۲۵]. فاصله بین سینه‌ی شناور تا ابتدای دامنه محاسباتی در حدود ۳ برابر طول شناور و فاصله‌ی بین پاشنه‌ی شناور تا انتهای دامنه‌ی محاسباتی در حدود ۶ برابر طول شناور در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ - نمایی از دامنه محاسباتی



شکل ۳ - نمایی از شبکه بندی

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، از سه شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز استفاده شده است و در نهایت پارامترهای مختلف در این حل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۳- روش تجربی

در تحلیل های هیدرودینامیکی، مطمئن‌ترین و دقیق‌ترین روش، آزمایش مدل در حوضچه کشش است. آزمایش حوضچه کشش بدلیل نیاز به ساخت مدل و تجهیزات گران قیمت بسیار هزینه‌بر است. علاوه بر این، ابعاد حوضچه کشش بدلیل اهمیت مقیاس بین مدل و شناور در تشابه ابعادی بسیار حائز اهمیت است. مشخصات ابعادی حوضچه کشش کوثر (حوضچه کشش دانشگاه صنعتی مالک اشتر) در جدول ۳ شرح داده شده است.

[1] eddy viscosity

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

جدول ۳ - مشخصات ابعادی حوضچه کشش کوثر

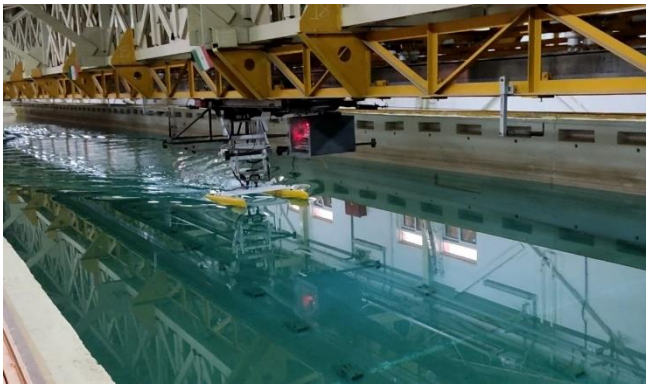
نام	طول (m)	عرض (m)	عمق (m)	حداکثر سرعت ارابه (m/s)
حوضچه کشش کوثر-KTT	۱۴۰	۷	۳	تا ۱۵

۳-۳-۱- ساخت مدل

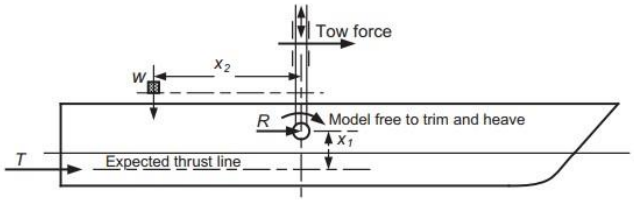
گام نخست در تست حوضچه کشش، ساخت مدل بر اساس ابعاد حوضچه کشش است. برای کاهش اثر دیواره جانبی، اثرات کف و آب کم عمق لازم است که نسبت عرض مدل به عرض شناور اصلی و ارتفاع مدل به ارتفاع شناور اصلی کمتر از ۰٫۱ باشد. بدلیل ابعاد کوچک شناور مورد نظر، مدل هیدرودینامیکی ساخته شده برای آزمایش حوضچه کشش، با ابعادی برابر شناور اصلی ساخته شده است. مدل به روش پرینت سه بعدی و از جنس‌های PLA و ABS ساخته شده است. بدلیل فشار ناشی از برخورد سینه‌ی شناور با سطح آب، قسمت سینه‌ی شناور با فیلامنت ABS که از استحکام بیشتری نسبت به فیلامنت PLA برخوردار است، ساخته شده است. سایر قسمت‌های شناور نیز از جنس PLA پرینت شده‌اند. برای ایجاد استحکام بیشتر در هر بدنه یک لوله کربن به طول ۷۵ سانتی متر و قطر ۱۵ میلیمتر استفاده شده است. برای تثبیت فاصله بین دو بدنه از دو قوطی آلومینیومی با ابعاد مقطع ۲ cm × ۲ و با طول ۹۲ cm استفاده شده است. شکل ۴ نمایی از نحوه ساخت مدل هیدرودینامیکی برای تست حوضچه کشش را نمایش می‌دهد.

شکل ۴ - نحوه ساخت مدل

در آزمایش حوضچه کشش محل اتصال گیره کشش[1] به ارابه باید در نقطه برخورد راستای نیروی ثقل و راستای نیروی رانش باشد؛ اما در شناور مورد نظر امکان نصب گیره کشش در این نقطه، میسر نیست. درصورتی که گیره کشش در موقعیت ذکر شده نصب نشود، نتایج با خطاهای زیادی همراه خواهد بود. برای رفع این مشکل می‌توان گیره کشش را در موقعیت طولی مرکز جرم و در کمترین فاصله با راستای خط رانش نصب کرد. اعمال نیروی رانش در این نقطه باعث ایجاد یک گشتاور خواهد شد. با قرار دادن یک وزنه در یک فاصله‌ی مشخص می‌توان یک گشتاور خنثی کننده تولید کرد که گشتاور ناشی از نیروی رانش را خنثی کند و خطای آزمایش را به حداقل برساند. در این پژوهش فاصله‌ی محل قرار گیری وزنه‌ها برای تنظیم مرکز جرم ۴۰cm بوده است. مقدار وزنه‌ی خنثی کننده‌ی ممان بر اساس این فواصل و مقادیر مقاومت حاصل از روش عددی تعیین شده است. شکل ۵ نمایی از حوضچه کشش کوثر را نمایش می‌دهد. شکل ۶ نمایی از نحوه تعیین محل نصب گیره کشش را نمایش می‌دهد[۲۶]. در جدول ۴ مقادیر وزنه های لازم برای خنثی سازی ممان ناشی از تغییر محل اتصال گیره کشش ارائه شده است.



شکل ۵ - نمایی از حوضچه کشش کوثر



شکل ۶ - نمایی از نحوه تعیین محل نصب گیره کشش[۲۶]

جدول ۴- مقادیر وزنه‌های خنثی کننده ممان

جرم(g) / سرعت(m/s)	شناور با وزن ۲۰kg	شناور با وزن ۲۴kg
۱	۹۶	۱۱۶
۱٫۳۵	۱۹۰	۲۱۰
۲٫۵	۵۳۲	۶۶۴
۳	۶۴۷	۷۶۲

افزودن وزنه‌های خنثی کننده‌ی ممان ممکن است باعث ایجاد یک پیچ هیدرواستاتیکی ناچیز شود. اعمال این وزنه‌ها بدین صورت بوده که نصف مقدار وزنه به بدنه چپ و نصف دیگر به سمت راست اعمال شده است.

[1] Pilon

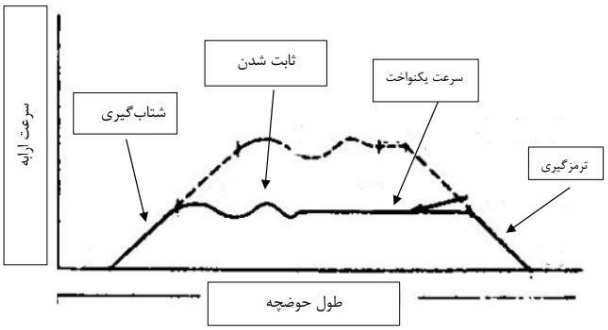
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

۳-۳-۲- نحوه تست مدل

اولین گام در تست حوضچه کشش، اطمینان از کالیبره بودن تجهیزات اندازه‌گیری است. در این مطالعه سنسورهای سرعت سنج، دینامومتر و زاویه سنج کاملا کالیبره شده و بر اساس محدوده مقاومت، از سنسور با دقت $\pm$۰/۱ N استفاده شده است.

در آزمایش حوضچه کشش، چهار فاز حرکتی وجود دارد که در شکل ۷ نمایی از فازهای مختلف تست حوضچه کشش ارائه شده است [۲۷].



شکل ۷ - نمایی از فازهای مختلف تست حوضچه کشش[۲۶]

فاز شتاب‌گیری ارابه معمولاً با شتاب g ۰/۰۵ رخ می‌دهد که پس از دستیابی به سرعت مورد نظر، مدت زمانی طی خواهد شد تا سرعت ارابه ثابت شود. پس از آن، فاز حرکت یکنواخت آغاز خواهد شد که در آن اطلاعات مورد نظر جمع‌آوری می‌شوند. معمولاً مدت زمان انجام فاز حرکت یکنواخت، ۷ ثانیه است. پس از جمع آوری اطلاعات، ارابه وارد فاز ترمزگیری با شتاب g ۰/۰۷ خواهد شد. براساس دستورالعمل ITTC [۲۷]، دمای حوضچه کشش ۱۵°Cبوده و به منظور قابل استناد بودن نتایج، هر تست حوضچه کشش حداقل سه مرتبه تکرار شده است. لازم به ذکر است که بین هر تست مدت زمان ۴۰ تا ۵۰ دقیقه صرف شده است تا آب کاملا آرام شود.

۳-۳-۳- عدم قطعیت

وجود خطا در هر آزمایش تجربی امری اجتناب‌ناپذیر است و نتایج تجربی همواره دارای مقداری خطا هستند. به منظور تعیین میزان خطا لازم است که برای نتایج بدست آمده میزان عدم قطعیت تعیین شود؛ لذا برای محاسبه‌ی عدم قطعیت تست‌های تجربی (عدم قطعیت دینامومتر) از رابطه‌ی (۴) که توسط ITTC [۲۸]پیشنهاد داده شده، استفاده شده است.

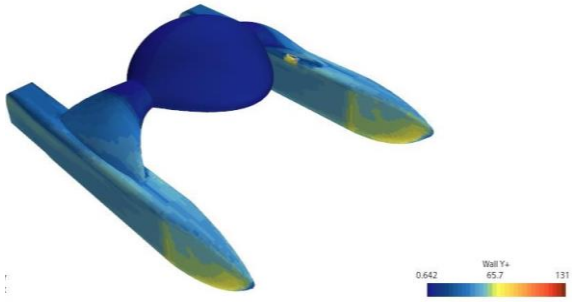
$$U^2 = P^2 + B^2 \qquad (۴)$$

که P معرف انحراف معیار، B معرف دقت تجهیزات و U معرف عدم قطعیت است.

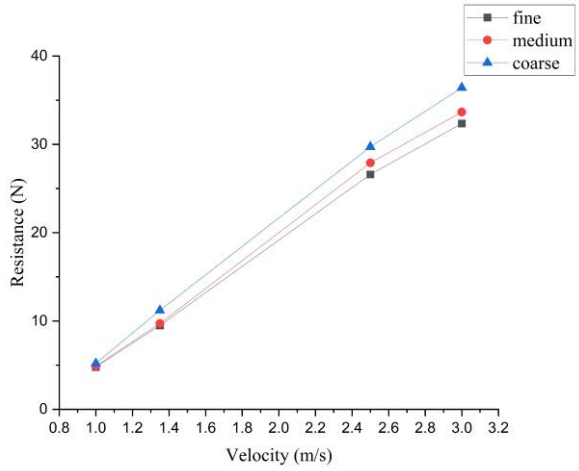
۴- دقت نتایج

در این مطالعه محاسبه مقاومت کل و پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی یک شناور کاتاماران با استفاده از روشهای عددی و تجربی انجام شده است و نتایج حاصل از هر دو روش تطابق مطلوبی را نشان می‌دهند. به منظور اطمینان از نتایج حل عددی، مقادیر Y^+ و همچنین استقلال حل از شبکه بررسی شده است. در این مطالعه تعداد سلول‌ها در شبکه بندی ریز، متوسط و درشته به ترتیب ۲۱۴۲۶۹، ۴۸۶۲۶۹ و ۷۹۲۳۶۵ بوده است. در آزمایشهای تجربی نیز برای اطمینان از داده‌ها، طبق استاندارد ITTC، هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شده و در انتها نیز عدم قطعیت محاسبه شده است.

با توجه به مدل توربولانسی k-epsilon و توابع نزدیک دیواره، بر اساس پیشنهاد ITTC مقدار Y^+ مناسب در محدوده $۳۰<Y^+<۳۰۰$ است[۲۹]. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدارY^+ بر روی بدنه در سرعت ۳ m/s برابر با ۱۳۱ است که نشان از کیفیت حل می‌باشد. از طرف دیگر به‌منظور بررسی کیفیت شبکه‌بندی، مقدار مقاومت با سه شبکه درشت، متوسط و ریز محاسبه و نتایج در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۸ - نمایی از مقادیر Y^+ بر روی بدنه شناور در سرعت ۳ m/s



شکل ۹ - نمایی از مقادیر مقاومت در شبکه بندی‌های مختلف

بر اساس شکل ۹، با ریز شدن شبکه بندی، مقدار خطا کاهش یافته است و بیشینه مقدار اختلاف در شبکه بندی متوسط و ریز به ۴/۹۲ درصد رسیده است که مقدار قابل قبولی است. درنهایت از نتایج شبکه بندی ریز برای مقایسه با نتایج تجربی استفاده شده است.

۵- نتایج

۵-۱-مقاومت

در محاسبه‌ی مقاومت کل شناور در سرعت‌های کمتر از ۱/۵ m/s بدلیل کوچک بودن مقدار تغییرات، خطای ما بین دو روش عددی و

تجربی بیشتر از سایر نقاط بوده اما با افزایش سرعت، اختلاف بین نتایج در رفتار هیدرودینامیکی شناور بیشتر شده است. میزان عدم قطعیت آزمایش‌ها نیز با استفاده از رابطه‌ی (۴) محاسبه شده است و در کنار نتایج مقاومت ارائه شده است. در جداول ۵ و ۶ به ترتیب نتایج مربوط به محاسبه‌ی مقاومت کل شناور با وزن‌های ۲۰ kg و ۲۴ kg ارائه شده است.

بر اساس جداول ۵ و ۶، کوچک بودن مقادیر مقاومت در سرعت‌های پایین در مقایسه با مقادیر مقاومت در سرعت‌های بالاتر باعث شده که درصد خطا در محاسبه‌ی مقاومت کل در سرعت‌های پایین نسبت به سرعت‌های بالا بیشتر باشد.

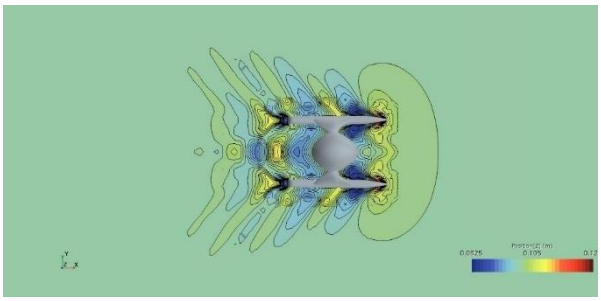
جدول ۵ - مقاومت کل با وزن ۲۰ kg

سرعت (m/s) / روش	مقاومت کل (روش تجربی) (N)	مقاومت کل (روش عددی) (N)	درصد خطا
۱	۵٫۲±۰٫۰۵۸	۴٫۸	-۷٫۶
۱/۳۵	۹٫۷۸±۰٫۱۰۷	۹٫۵	-۲٫۸
۲/۵	۲۵٫۴۱±۰٫۴۲۵	۲۶٫۶	۴٫۶
۳	۳۳٫۲۱±۰٫۵۴	۳۲٫۳۶۵	-۲٫۵

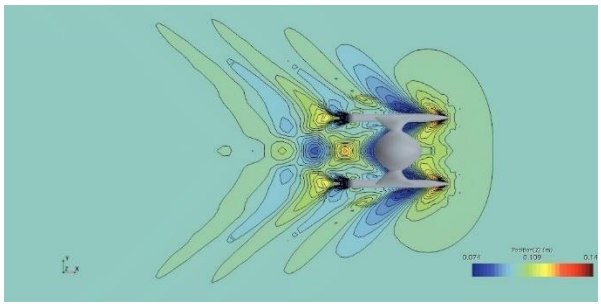
جدول ۶ - مقاومت کل با وزن ۲۴ kg

سرعت (m/s) / روش	مقاومت کل (روش تجربی) (N)	مقاومت کل (روش عددی) (N)	درصد خطا
۱	۵٫۴۸±۰٫۰۸۵	۵٫۸۴	-۶٫۱
۱/۳۵	۱۰٫۲۹±۰٫۰۹۷	۱۰٫۵۴	۲٫۴
۲/۵	۳۳٫۷۸±۰٫۲۹۹	۳۳٫۲	-۱٫۷
۳	۳۹٫۴۷±۰٫۴۹۸	۳۸٫۱۰۵	-۳٫۴

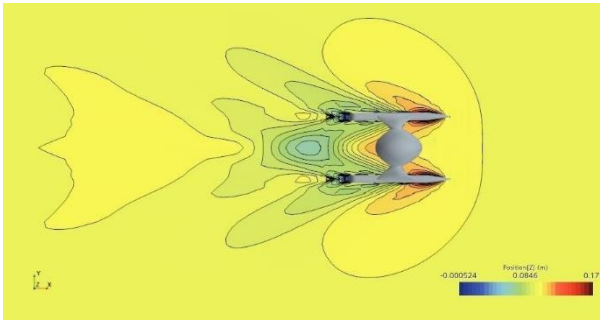
بر ا ساس جدول۴، با در نظر گرفتن نتایج حا صل از روش تجربی به عنوان مرجع، بیشـــینه خ طا در روش عددی.٪۷٫۶ بوده اســـت. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ سطح آزاد در سرعت‌های مختلف و وزن ۲۰kg را نمایش می‌دهند و شـکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نمایی از تسـت حو ضچه کشش مدل در وزن و سرعت های مختلف نمایش می دهند.



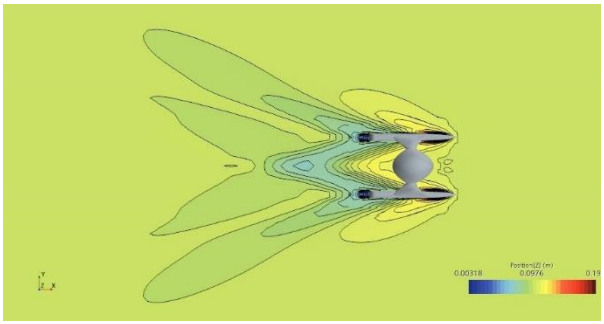
شکل ۱۰ - نمایی از سطح آزاد در سرعت ۱m/s



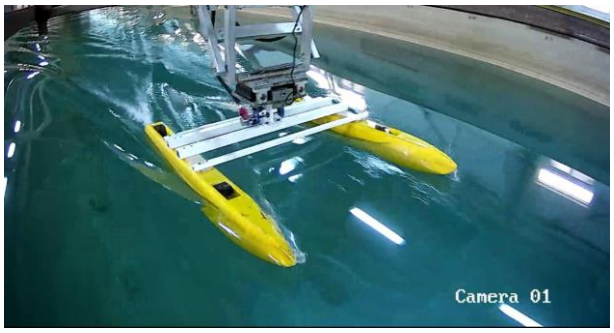
شکل ۱۱ - نمایی از سطح آزاد در سرعت ۱٫۳۵ m/s



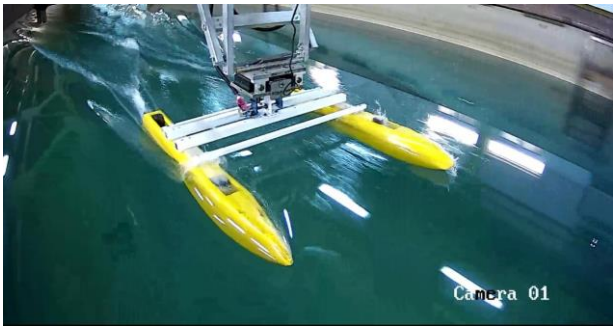
شکل ۱۲ - نمایی از سطح آزاد در سرعت ۲٫۵ m/s



شکل ۱۳ - نمایی از سطح آزاد در سرعت ۳ m/s



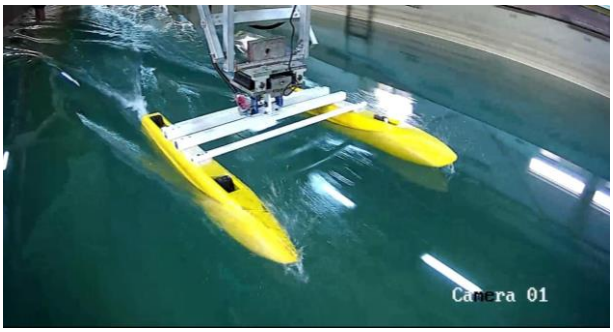
شکل ۱۴ - نمایی از تست مدل با وزن ۲۰ kg در سرعت ۲٫۵ m/s



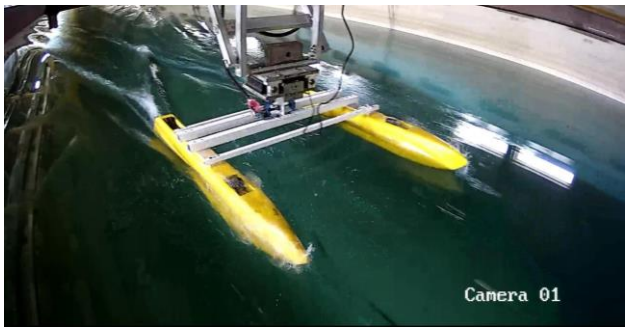
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

شکل ۱۵ - نمایی از تست مدل با وزن ۲۰ kg در سرعت ۳ m/s



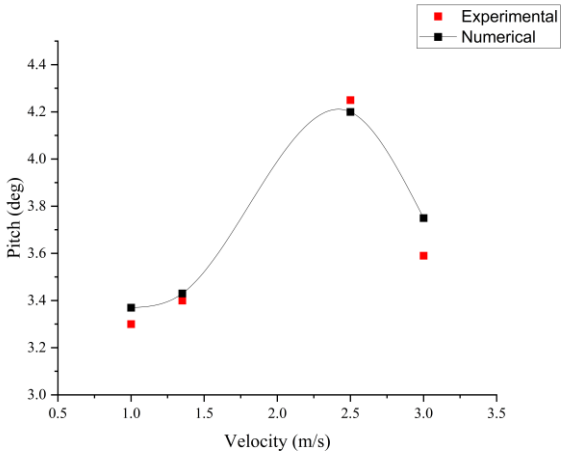
شکل ۱۶ - نمایی از تست مدل با وزن ۲۴ kg در سرعت ۲٫۵ m/s



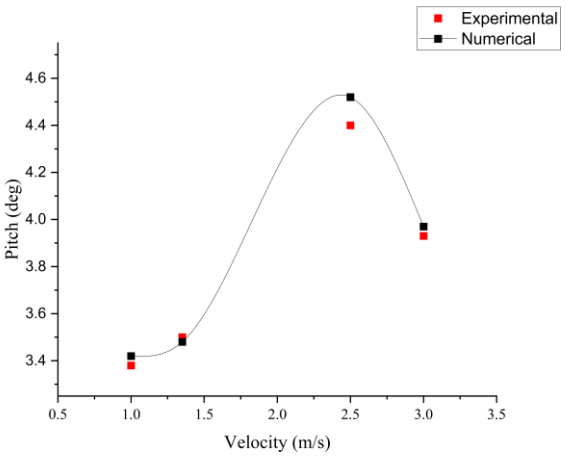
شکل ۱۷ - نمایی از تست مدل با وزن ۲۰ kg در سرعت ۳ m/s

۵-۲- زاویه پیچ و حرکت هیو

با توجه به اینکه روش‌های بکارگرفته شده در محاسبه مقاومت کل، از تطابق مناسبی نسبت به یکدیگر برخوردار بوده‌اند، لذا می‌بایست در پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی شناور نیز، مشابه یکدیگر عمل کنند. در شناورهای پرسرعت، افزایش سرعت شناور باعث ایجاد لیفت هیدرودینامیکی و حرکت هیو مثبت خواهد شد. بر اساس روابط شناورهای پرسرعت، شناور مورد نظر با دستیابی به سرعت ۲٫۵ m/s به ناحیه هامپ (Hump) خواهد رسید و زاویه پیچ شناور نیز به بیشینه مقدار خود می‌رسد که نشان دهنده‌ی شروع فاز سرش خواهد بود. اما در عمل نتیجه عکس بوده و در هر دو روش عددی و تجربی، صرفا مقاومت کل به شدت افزایش یافته و لیفت هیدرودینامیکی محسوسی تولید نشده است. افزایش سرعت و عدم ایجاد لیفت هیدرودینامیکی، سبب بالا آمدن آب بر روی سطح شناور و افزایش سطح خیس شده که درنهایت باعث افزایش مقاومت موج سازی خواهد شد. از دلایل عدم ایجاد لیفت هیدرودینامیکی می‌توان به هندسه‌ی U شکل و زیر بدنه‌ی گرد بدنه‌های جانبی و عدم وجود ویژگی‌های یک شناور پر سرعت مانند استپ عرضی، پد هیدرودینامیکی نام برد. علاوه بر این پاشنه شناور کاملا تخت بوده است. این ویژگی ها باعث شده که این شناور در دسته‌ی شناورهای نیمه سرشی قرار گیرد چراکه لیفت هیدرودینامیکی محسوسی تولید نمی‌کند اما قابلیت دستیابی به سرعت‌های سرشی را دارد. کاربرد تحقیقاتی این شناور و جانمایی سیستم‌های تحقیقاتی در زیر بدنه‌ی میانی برای هیدروگرافی و الزام مغروق بودن آنها باعث شده که از این افزایش مقاومت صرف نظر شود. از طرفی سرعت عملیاتی این شناور ۱ m/s است. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹به ترتیب نمایی از تغییرات زاویه پیچ با وزن ۲۰ kg و ۲۴ kg بر حسب سرعت نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌های ۱۸ و ۱۹ با افزایش سرعت زاویه پیچ شناور افزایش یافته است. با دستیابی شناور به سرعت ۲٫۵ m/s و ورود به محدوده‌ی نیمه سرشی، زاویه پیچ به بیشینه‌ی مقدار خود می رسد و با گذر از این سرعت زاویه پیچ شروع به کاهش یافتن کرده است. بر اساس شکل‌های ۱۸ و ۱۹، افزایش وزن شناور در سرعت‌های کم تاثیر ناچیزی بر روی زاویه‌ی پیچ خواهد داشت اما با افزایش سرعت این تاثیرات بیشتر خواهند شد به صورتی که در سرعت‌های ۲٫۵ m/s و ۳ m/s، زاویه‌ی پیچ شناور با وزن ۲۴ kg، به ترتیب ٪ ۳/۵ و ٪۹ بیشتر از زاویه پیچ شناور با وزن ۲۰kg بوده است. شکل ۲۰ نمایی از بالا آمدن آب بر روی بدنه در سرعت ۳ m/s را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو روش دماغه شناور با سطح آب مماس شده و ترکیبی از ا سپری و جریان آب، سطح فوقانی جلوی بدنه را پوشش می‌دهد. اما از طرف دیگر در ق سمت پا شنه شناور سطح آزاد آب به خوبی تو سط روش عددی شبیه‌سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی تطابق بسیار مناسبی دارد.

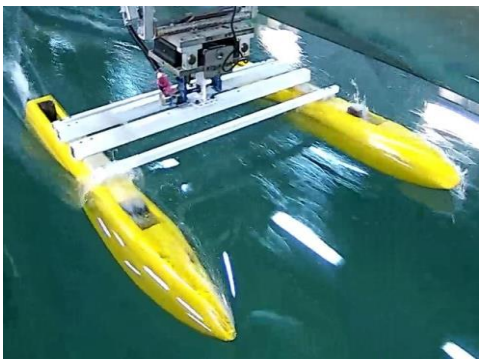


شکل ۱۸ - نمایی از تغییرات زاویه پیچ با وزن ۲۰kg

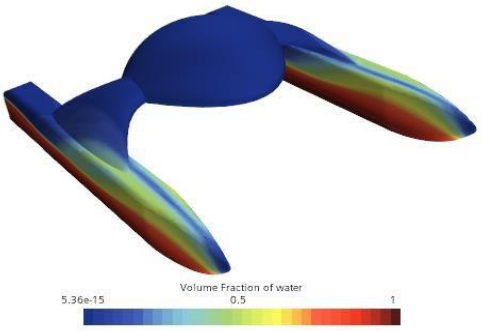


شکل ۱۹ - نمایی از تغییرات زاویه پیچ با وزن ۲۴kg

(الف)



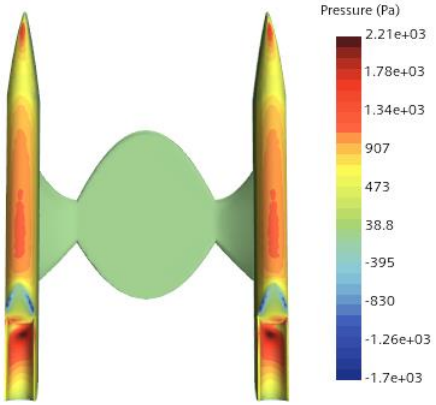
(ب)



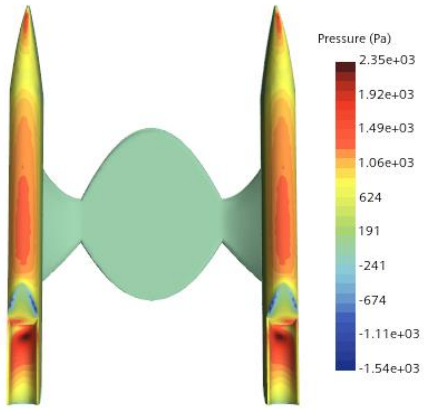
شکل ۲۰- نمایی از بالا آمدن آب بر روی بدنه در سرعت ۳ m/s
(الف)روش تجربی (ب)روش عددی

۵-۳-تاثیر افزایش وزن بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی

بطور کلی افزایش وزن باعث افزایش سطح خیس شده که همین امر باعث افزایش مقاومت موج سازی و مقاومت کل خواهد شد. با توجه به جدول ۳ و ۴، مقاومت کل در سرعت ۳ m/s با افزایش وزن شناور از ۲۰ kg به ۲۴ kg، ۱۸٫۸٪ افزایش یافته است. همچنین افزایش وزن باعث افزایش فشار وارده بر روی سینه‌ی شناور از سمت سیال خواهد شد و در نتیجه بیشینه زاویه پیچ افزایش خواهد یافت. شکل ۲۱ و ۲۲ به ترتیب نمایی از فشار وارده بر روی شناور با وزن ۲۰ kg، ۲۴kg در سرعت ۲٫۵ m/s را نمایش می‌دهد که با افزایش وزن، فشار وارده بر بدنه نیز افزایش یافته است.

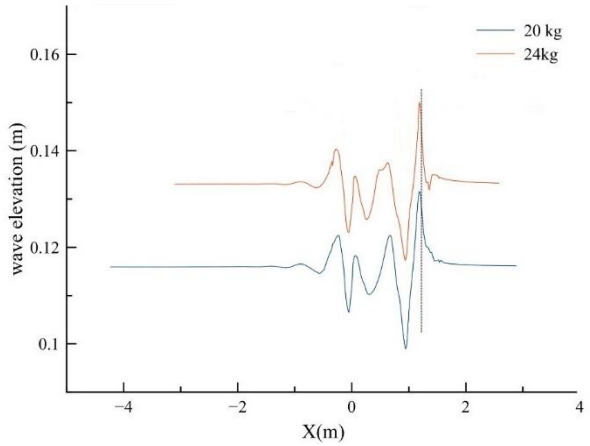


شکل ۲۱ - نمایی از فشار وارده بر روی شناور با وزن ۲۰ kg



شکل ۲۲ - نمایی از فشار وارده بر روی شناور با وزن ۲۴ kg

همچنین افزایش وزن، بدلیل افزایش سطح خیس باعث نزدیک شدن اولین قله‌ی موج به جلوی سینه‌ی شناور خواهد شد و در سرعت‌های بالا بدلیل بالا آمدن آب ، باعث افزایش مقاومت ا سپری و موج‌سازی خواهد شد. شکل ۲۳ نمایی از نزدیک شدن اولین قله‌ی موج به جلوی شناور را نمایش می‌دهد. افزایش وزن شناور باعث افزایش دامنه‌ی امواج نیز خواهد شد؛ بصورتی که افزایش وزن از ۲۰ kg به ۲۴ kg باعث افزایش ٪۹ دامنه موج شده است.

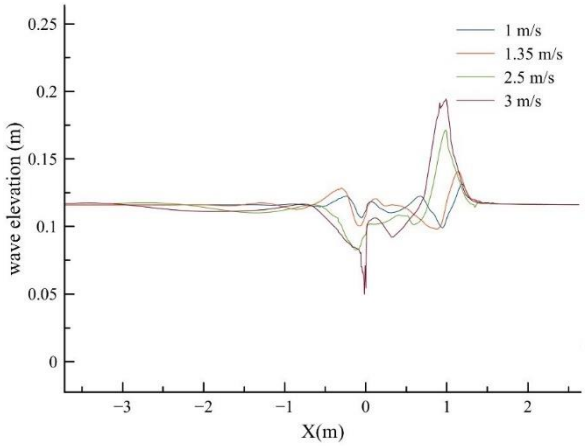


شکل ۲۳ - نمایی از نزدیک شدن اولین قله‌ی موج به جلوی شناور

۵-۳-تاثیر افزایش سرعت بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی

بدیهی ا ست که با افزایش سرعت، مقاومت افزایش می یابد و علاوه بر این افزایش سرعت باعث افزایش دامنه و طول موج خواهد شد. شکل ۲۴ نمایی از افزایش دامنه و طول موج با افزایش سرعت شناور را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۶ افزایش سرعت از ۱ m/s به ۳ m/s باعث افزایش ارتفاع موج سینه تا ٪۶۰ شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]



شکل ۲۴ - نمایی از افزایش دامنه و طول موج با افزایش سرعت شناور

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی اثرات سرعت و وزن بر مقاومت و رفتار هیدرودینامیکی یک شناور بدون سرنشین دو بدنه‌ای پرداخته شده است. در این مطالعه از دو روش عددی و تجربی استفاده شد که نتایج حاصل از هر دو روش دارای تطابق مطلوبی بودند. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

۱- بطور کلی شناورهای دوبدنه‌ای بدلیل پایداری عرضی بالا و فراهم سازی دسترسی آسان به بخش مختلف، نوع مناسبی برای استفاده در کاربرد شناورهای بدون سرنشین هستند.

۲- در ساخت مدل‌های تست حوضچه کشش می‌توان از روش پرینت سه بعدی به عنوان یک روش قابل اطمینان از لحاظ دقت و استحکام استفاده نمود.

۳- با توجه به اینکه شناور مورد نظر از نوع شناور نیمه سرشی بوده و هیچکدام از ویژگی‌های شناورهای سرشی اعم از استپ عرضی یا مقطع V-shape را نداشته اما امکان دسترسی تا حداقل سه برابر سرعت عملیاتی را دارد.

۴- با توجه به سرعت عملیاتی و کاربرد تحقیقاتی این شناور و جانمایی سیستم‌های تحقیقاتی در زیر بدنه‌ی میانی برای هیدروگرافی و الزام مغروق بودن آن، می‌توان از این افزایش مقاومت صرف نظر کرد.

۵- افزایش وزن شناور به میزان ۴ کیلوگرم باعث افزایش سطح خیس شده که همین امر باعث افزایش مقاومت موج سازی و مقاومت کل تا ٪۱۸، افزایش بیشینه‌ی فشار وارد بر بدنه تا ٪۱۲ و دامنه موج نزدیک بدنه تا ٪۹ خواهد شد.

۶- همچنین افزایش وزن شناور به میزان ۴ کیلوگرم باعث افزایش زاویه پیچ به مقدار ٪۳/۵ در سرعت ۲/۵ m/s و مقدار ٪۹ در سرعت ۳ m/s شده است.

۷- مراجع

[1]. T. Vaneck, J. Manley, C. Rodriguez, and M. Schmidt, “Automated Bathymetry using an Autonomous Surface Craft,”NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 43 No 4, Winter 1996-1997. DOI:10.1109/MetroSea55331.2022.9950994

[2]. J. E. Manley, "Unmanned surface vehicles, 15 years of development," OCEANS 2008, Quebec City, QC, Canada, 2008, pp. 1-4, DOI:10.1109/OCEANS.2008.5152052

[3]. J. Manley, A. Marsh, W. Cornforth, and C. Wiseman, “Evolution of the Autonomous Surface Craft AutoCat” Proceedings of Oceans 2000, MTS/IEEE Providence, RI, October, 2000 , DOI:10.1109/OCEANS.2000.881292

[4]. Majohr, J., & Buch, T. (2006). Modelling, simulation and control of an autonomous surface marine vehicle for surveying applications measuring dolphin MESSIN.IEE Control Engineering Series, 69, 329–352, DOI:10.1049/PBCE069E_ch16

[5]. Motwani, A. (2012). A survey of uninhabited surface vehicles. MIDAS technical report. MIDAS.SMSE.2012.TR.001. MIDAS.

[6]. Mindef , Factsheet -Unmanned Surface Vessels (USV), https://www.nas.gov.sg/archivesonline/data/pdfdoc/MINDEF_20050517001/MINDEF_20050517003.pdf

[7]. Matos, A., Silva, E., Almeida, J., Martins, A., Ferreira, H., Ferreira, B.,Lobo, V. (2017). Unmanned Maritime Systems for Search and Rescue. Search and Rescue Robotics - From Theory to Practice. DOI:10.5772/intechopen.68449

[8]J. Grenestedt, J. Keller, S. Larson, J. Patterson, J. Spletzer, and T. Trephan, “Lorca: A high performance usv with applications to surveillance and monitoring,” in 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). IEEE, 2015, pp. 1–6. DOI:10.1109/SSRR.2015.7443020

[9]. C. Specht, E. Świtalski, and M. Specht, “Application of an autonomous/unmanned survey vessel (asv/usv) in bathymetric measurements,” Polish Maritime Research, vol. 24, no. 3, pp. 36–44, 2017. DOI:10.1515/pomr-2017-0088

[10]. K. T. Suhari, K. S. Apryandika, and M. Rahmawati, “The small hydrography marine boundary boat (shumoo) for mapping bathymetry of shallow water area,” in Proceedings of The 1st Geomatics International Conference (GEOICON)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]

[20]. Ahmed, T.M., Abdelrahman, A.M., Hassan, A.M.A. et al. CFD optimization of a displacement catamaran's configuration for minimized calm water resistance. Mar Syst Ocean Technol (2023) DOI:10.1007/s40868-022-00123-0
[21]. Brizzolara, S., Curtin, T., Bovio, M. et al. Concept design and hydrodynamic optimization of an innovative SWATH USV by CFD methods. Ocean Dynamics 62, 227–(2102) 732. DOI:10.1007/s10236-011-0471-y
[22]. HPM , EvoLogics Sonobot 5 Digest, Unmanned System Technology,86-91, May/April 2021
[23].Larsson, L. and Baba, E., "Ship resistance and flow computations", Advances in marine Hydrodynamics, M. Ohkusu (ed.), Comp. Mech. Publ., pp. 1–75, 1996
[24]. Resistance Committee, "Testing and Data Analysis Resistance Test", 25th ITTC, ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 2008.
[25]. Resistance Committee, "Practical Guidelines for Ship CFD Application", ITTC,ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5–03–02–04,2014
[26]. Anthony F. Molland, Ship Resistance and Propulsion, Cambridge University Press, 2017 DOI: 10.1017/CBO9780511974113
[27]. Resistance Committee, "Testing and Data Analysis Resistance Test", ITTC,ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-02-01,2011
[28]. Resistance Committee, "General Guidline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests", ITTC,ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5–02–02–02,2014
[29]. Resistance Committee, "Practical Guidelines for Ship CFD Application", ITTC,ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5–03–02–03,2011
2016 "Utilization of Satellite Technology for Natural Resources Exploration, 2016. DOI:10.13140/RG.2.2.21326.46408
[11]. K. Suhari, H. Karim, P. H. Gunawan, and H. Purwanto, "Small rov marine boat for bathymetry surveys of shallow waters-potential implementation in Malaysia," International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, vol. 42, 2017 DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W5-201-2017
[12]. Kebkal, K., et al. "Sonobot—Autonomous unmanned surface vehicle for hydrographic surveys with hydroacoustic communication and positioning for underwater acoustic surveillance and monitoring." Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, Rhodes, Greece. 2014.
[13]. alpha-sigma , Sonobot iso-Anschit , https://alpha-sigma.eu/portfolio/sonobot/ , 2015 ,Europe
[13]Searobotics,"Hycat",https://www.searobotics.com/images/products/asvs/sr-surveyor/SRHycat-SpecSheet. pdf, 2019.
[14].OCEANALPHA,"Esm-30," https://www.oceanalpha.com/product-item/esm30/, 2019.
[15].Clearpathrobotics,"Heron," https://www.clearpathrobotics.com/heron-unmannedsurface-vessel/, 2019
[16]. D. F. Carlson, A. Fürsterling, L. Vesterled, M. Skovby, S. S. Pedersen, C. Melvad, and S.Rysgaard, "An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring," Hardwarex, p. e00059, 201 DOI: 10.1016/j.ohx.2019.e00059
[17]. M. Insel, A.F. Molland, " An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans." R. Inst. Nav.Archit. 134, 1–20 (1992)
[18]. A.F. Molland, J.F. Wellicome, P.R. Couser, "Resistance experiments on a systematic series of high speed displacementcatamaran forms: Variation of length-displacement ratio and breadth-draught ratio." Ship Science Report No. 71. University of Southampton, UK. (1994).
[19]. G. Zaraphonitis, D. Spanos, A. Papanikolaou, Numerical and Experimental Study on the Wave Resistance of Fast Displacement Asymmetric Catamarans, in: InternationalEuroConference on High Performance Marine Vehicles. (2001)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.40.6.4]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.40.63]