



Investigation on the longitudinal center of gravity effects on a planing hull's seakeeping parameters at calm water and regular wave by the CFD method

Hamed Amoun Juneghani¹, Sajad Ardeshiri^{2*}, Hasan Karimi Baseri³

¹ MCs of Ship Hydromechanics, Persian Gulf University; hamedamounjuneghani@gmail.com

² Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology; sajjad_ardeshiri@yahoo.com

³ MCs of Ship Hydromechanics, Malek Ashtar University of Technology; hassankarimibaseri@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 24 Aug 2025

Last modification: 2 Sep 2026

Accepted: 6 Sep 2026

Available online: 13 Sep 2026

Article type:

Research paper

Keywords:

Seakeeping

Center of Gravity

Planning hull

Fridsma

Numerical Investigation

ABSTRACT

The hydrodynamic analysis of high-speed vessels is an important step in hydrodynamic design. To increase the accuracy of seakeeping calculations, studying the effective parameters is important. Uncertainty and error in hydrostatic calculations, such as the accurate determination of the center of gravity in conducting experiments, may affect the results. In this paper, the effect of the location of the center of gravity on the results of numerical simulation of a vessel has been investigated in comparison with laboratory results. For this purpose, the center of gravity of a planing vessel in calm water and regular wave conditions has been investigated in the longitudinal direction by approximately 1% of the vessel's length forward and aft of the vessel's center of gravity. The results show a significant effect of changing the location of the center of gravity on the navigation results. The results show that changing the center of gravity can have a maximum effect of 5% on the resistance, 20% on the heave, and 9% on the pitch motion of the vessel.

ISSN: 2645-8136



DOI:

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]



بررسی تاثیر محل مرکز ثقل طولی بر دریامانی شناور تندرو در آب آرام و موج منظم

حامد آمون جونقانی^۱ , سجاد اردشیری^۲ , حسن کریمی باصری^۳ 

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه خلیج فارس، hamedamounjuneghani@gmail.com

^۲ دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، sajjad_ardeshiri@yahoo.com

^۳ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، hassankarimibaseri@gmail.com

چکیده

تحلیل دریامانی شناورهای تندرو از مراحل مهم در طراحی هیدرودینامیک است و افزایش دقت در محاسبات دریامانی باعث تحلیل دقیق تر رفتار شناور خواهد شد. بنابراین، بررسی پارامترهای موثر در محاسبات، در افزایش دقت تحلیل دریامانی یک شناور حائز اهمیت است. عدم قطعیت و خطا در محاسبه پارامترهای هیدرواستاتیک مانند تعیین دقیق مرکز ثقل در انجام آزمایشات، ممکن است بر روی نتایج تاثیر گذار باشد. در این مقاله تاثیر محل مرکز ثقل طولی بر روی نتایج شبیه سازی عددی یک شناور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور مرکز ثقل یک شناور تندرو در شرایط آب آرام و موج منظم در راستای طولی به میزان تقریباً ۱ درصد طول شناور جلو تر و عقب تر از مرکز ثقل شناور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن است که تغییر مرکز ثقل شناور می تواند تاثیر حداکثر ۵ درصد در مقدار مقاومت شناور، ۲۰ درصدی در مقدار هیو شناور و همچنین ۹ درصد پیچ شناور داشته باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

دریامانی

مرکز ثقل

شناور تندرو

فریزما

شبیه سازی عددی

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



۱- مقدمه

شناورهای تندرو به دلیل توانایی‌های منحصر به فرد در سرعت و مانورپذیری، نقش مهمی در صنعت دریایی ایفا می‌کنند. این شناورها به دلیل طراحی خاص خود، می‌توانند در شرایط مختلف دریایی عملکردهای متفاوتی از خود نشان دهند. از جمله استفاده-های این دسته از شناورها می‌توان به کاربرد در صنعت های امداد و نجات و شناورهای هلال احمر و گارد ساحلی، صنعت گردشگری و صنعت نظامی به دلیل سرعت بالا و قابلیت مانور بالا اشاره نمود. در شرایط آب آرام، برخورداری از اطلاعات دقیق درباره‌ی نحوه حرکت و رفتار شناور تندرو ضروری است. در این محیط، نوسانات دریایی ناچیز بوده و همین امر امکان تحلیل دقیق‌تری از کارایی و پایداری ذاتی شناور را فراهم می‌کند. امواج منظم به عنوان استاندارد برای بررسی رفتار دینامیک شناور در شرایط متعادل‌تر، می‌تواند زمینه ساز بررسی واکنش شناور به نوسانات محیطی، شود. امواج منظم به طراحان این اجازه را می‌دهد تا حد نوسانات و شتاب‌های وارد بر شناور را پیش‌بینی و کنترل کنند. شناورهای تندرو، تحت تاثیر پارامترهای متعددی مانند زاویه حمله شکل بدنه، توزیع وزن، مشخصات موج و ... هستند که باید به دقت بررسی شوند. هرکدام از این پارامترها می‌تواند به صورت مجزا یا در تعامل با دیگر متغیرها، رفتار کلی شناور را تحت تاثیر قرار دهد.

برای بررسی رفتار شناور می‌توان از روش تست‌های آزمایشگاهی، روش تحلیلی و یا روش محاسبات عددی و سی‌افدی^۱ استفاده نمود. با توجه به صرفه اقتصادی و زمانی روش سی‌افدی امروزه استفاده از این روش محبوبیت و رواج زیادی یافته است. در ادامه به بررسی برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه پرداخته شده است.

در سال ۲۰۱۹ ایمابیو ایبینابو^۲ و دنیل تامونودوک بیپی^۳ [1] به تحلیل حرکات یک شناور اف‌پی‌اس او^۴ جهت شناسایی دامنه‌ی حرکات آن در دریا و کمک به انجام عملیات‌های فراساحل مربوط به این شناور، پرداختند. شناور بکار گرفته شده دارای طولی برابر ۲۸۰ متر، عرض ۵۹ متر، بیشترین ارتفاع ۵۳۱ متر و آبخور ۸۲۵ متری میباشد توضیح و بررسی روش محاسبه‌ی دامنه‌ی پاسخ حرکات در ۶ درجه‌ی آزادی و در نرم افزار انسیس ای کیودبیلیوای^۵ انجام شده است. این شبیه‌سازی در ۷ زاویه‌ی موج مختلف انجام شده است. نتایج از تمایل برای رسیدن به حداکثر مقدار حرکت هیو در شرایطی که جهت امواج از ۱۸۰

درجه (رو برو) به ۹۰ درجه (از پهلو) تغییر می‌کند، در نمودار بی بعد خبر می‌دهد. از یک کد متلب برای اعتبارسنجی نتایج حرکت هیو در امواج از روبرو استفاده گردیده که پس از مقایسه نتایج برنامه‌ی متلب و نرم افزار انسیس ای کیودبیلیوای، تطابق خوبی میان نتایج مشاهده شده است.

احمد فطریه^۶ و همکاران در سال ۲۰۲۱ [2] به بررسی عملکرد دریامانی یک کشتی آموزشی با استفاده از روش سی‌افدی پرداختند. در این پژوهش بر روی رאו هیو و پیچ شناور تمرکز شده و پارامترهای موثر بر آن مانند طول موج، جهت موج و سرعت شناور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بر طبق نتایج این پژوهش، امواج کوتاه‌تر تاثیر کمی بر روی هیو و پیچ شناور داشته ولی امواج بلندتر موجب افزایش مقادیر رאו شناور و در نتیجه کاهش کیفیت دریامانی شناور علی‌الخصوص در امواج از پشت، می‌شود.

سانشینگ هوانگ^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۱ [3] در طی پژوهشی، رفتار یک شناور را از طریق سی‌افدی در امواج دو جهته و یک جهته با یکدیگر مقایسه کردند. در این پژوهش رفتار شناور در امواج مختلف شبیه‌سازی شده است. پس از اعتبارسنجی نتایج با داده‌های تجربی مشخص شده که پاسخ‌های شناور در امواج دو طرفه شدیدتر می‌باشد.

در سال ۲۰۲۳ سیلویا پنینو^۸ و آنتنیو اسکاماردلا^۹ [4] در پژوهشی بر روی شناوری تحقیقاتی، به ارزیابی حرکات شناور در حوزه زمان و فرکانس پرداختند. نویسندگان از یک کد منبع باز^{۱۰} ای‌ام‌آی^{۱۱} برای محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی و نیروهای تحریک، و از معادلات کامینز^{۱۲} برای محاسبه‌ی حرکات هیو و پیچ شناور در حوزه‌ی زمان، استفاده نمودند. نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها با داده‌های برخط بدست آمده از یک گوشی هوشمند در داخل شناور، مقایسه شده که در نتیجه اختلاف حرکات شناور کمتر از ۱۰ درصد و اختلاف مقدار شتاب‌های شناور کمتر از ۱۵ درصد محاسبه شد.

در سال ۲۰۲۳ سالواتر کاپاسو^{۱۳} و همکاران [5] با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار مستقل از شبکه^{۱۴} به بررسی هیدرودینامیک یک شناور پروازی در امواج منظم (موج از روبرو) پرداختند. در این پژوهش یک روش شبیه‌سازی موج ارائه و استفاده شده است که علاوه بر دقت بالا در شبیه سازی، بار

⁶ Ahmad Fitriadhy⁷ Songxing Huang⁸ Silvia Pennino⁹ Antonio Scamardella¹⁰ Open source¹¹ NEMOH¹² Cummins¹³ Salvatore Capasso¹⁴ Mesh free smoothed particle hydrodynamics (SPH)¹ CFD (computational fluid dynamic)² Imabibo Ibinabo³ Daniel T. Tamunodukobipi⁴ FPSO(Floating Production Storage and Offloading)⁵ ANSYS AQWA

محاسباتی را نیز کاهش می‌دهد و مقایسه نتایج حاصله نیز دقت خوب این روش را تایید می‌کند.

عسکری سیار و همکاران در سال ۲۰۲۰ [6]، به بررسی حرکات هیو و پیچ یک شناور با فرم سینه معکوس پرداخته‌اند. فرم سینه مدل‌ها بصورت سینه معکوس با دو زاویه معکوس ۴۵ و ۶۰ درجه باز طراحی شده و آزمایش‌ها در سرعت‌های ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر بر ثانیه بر روی مدل انجام شده است. نتایج نشان داده که با کاهش زاویه سینه مدل به ۴۵ درجه حرکات مدل بهبود پیدا می‌کند. نتایج همچنین نشان داده اندرکنش حرکات مدل با یکدیگر باعث ایجاد نقاط ماکزیمم و مینیمم محلی بر روی پاسخ‌ها می‌شود.

عجمی و همکاران در سال ۲۰۲۱ [7]، یک روش جدید ابداعی برای کاهش غلتش و پایدارساز کشتی‌ها با استفاده از تورهای ماهیگیری معمولی ارائه داده‌اند. یافته‌های حاصل از این تحقیق برای شناور پروازی نشان از کاهش دامنه حرکات تا ۲۰ درصد در امواج منظم دارد.

بی غرض و همکاران در سال ۲۰۲۲ [8]، به تحلیل و بررسی اندرکنش یک شناور تجاری کانتینربر با امواج سطحی نامنظم آب توسط دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین محاسبه پارامترهای دریامانی این سازه یعنی عملگر دامنه پاسخ (RAO)، طیف پاسخ حرکتی در حرکت سازه پرداخته‌اند. پس از بررسی و تحلیل اعتبارسنجی مدل عددی و ابزار تحلیل، به بررسی پارامترهای مختلف دریامانی و دینامیکی برای یک شناور تجاری کانتینربر در حالت سطحی در جهت‌های مختلف برخورد موج نامنظم به شناور پرداخته شده است.

نجفی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [9]، به بررسی تاثیر المان هیدرودینامیکی پله‌ی عرضی بر مقاومت شناور تندروی تک بدنه پرداخته‌اند. در این پژوهش بر روی مدل فریدزما در سه زاویه جانبی مختلف در سرعت‌ها و پارامترهای مختلف هندسی پله (شامل ارتفاع‌ها و مکان‌های مختلف پله)، انجام گرفته و در خروجی بخش تجربی تحقیق؛ مکان و ارتفاع بهینه پله در زوایای جانبی مختلف بررسی شده است. از دیگر دستاوردهای خروجی این تحقیق می‌توان به روند ساخت مدل جدیدی از شناور که هم‌زمان می‌تواند ترکیبی از چند مدل باشد اشاره کرد.

مونسان و همکاران در سال ۲۰۲۳ [10]، مهمترین شاخص شناورهای هیدروفویلی یعنی دریامانی آنها در در معرض امواج منظم و نامنظم تحت زوایای مختلف برخورد موج با شناور را مورد بررسی قرار داده‌اند. با استفاده از روش عددی، حرکات سرج، هیو، رول و پیچ هم‌زمان آزاد نگه داشته شده و تاثیرات آنها بر روی یکدیگر لحاظ شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش و تغییر در مؤلفه‌های موج منظم و سرعت شناور، باعث ایجاد تغییرات کمتری

در حرکات شناور هیدروفویلی نسبت به شناور سرشی می‌شود بجز در مواجهه امواج پاشنه با شناور که در این حالت شناور سرشی در مجموع عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. بنابراین باید گفت خطرناک‌ترین حالت برای شناور هیدروفویلی زوایای برخورد کمتر از ۹۰ درجه بخصوص زاویه برخورد صفر درجه یعنی امواج پاشنه است.

نیک سرشت و همکاران در سال ۲۰۲۵ [11]، به بررسی عددی عملکرد دریامانی یک شناور سرشی در امواج منظم دریایی با تمرکز بر دو درجه آزادی حرکات هیو و پیچ پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت شناور و ورود آن به فاز سرشی منجر به کاهش عملگرهای پاسخ دامنه (RAO) حرکات هیو و پیچ و در نتیجه بهبود عملکرد دریامانی می‌شود، هرچند نیروی پسا و دامنه حرکات به‌طور نسبی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ارتفاع و طول موج موجب افزایش دامنه حرکات و شتاب کوبشی می‌شود؛ با این حال، بیشینه شتاب عمودی در بدترین حالت برابر با $2/6g$ ثبت شد که کمتر از حد مجاز $4g$ برای شناورهای پرسرعت است.

بررسی پارامترهای موثر در تخمین دقیق شرایط دریامانی یک شناور حائز اهمیت است. یکی از پارامترهایی که می‌تواند در تخمین صحیح دریامانی یک شناور دارای اهمیت باشد مرکز ثقل شناور می‌باشد. در این پژوهش تاثیر مرکز ثقل شناور بر روی پارامترهای دریامانی مدل شناور تندرو فریزما مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از روش سی‌افدی استفاده گردیده است. شناور در نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام‌پلاس^{۱۵} شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی جرارد فریزما [12] در شرایط آب آرام و موج منظم مقایسه شده است.

نتایج نشان دهنده آن است که با تغییر کوچکی بر روی محل مرکز ثقل شناور تاثیرات قابل توجهی بر نتایج داده‌های شبیه‌سازی قابل مشاهده است. همچنین از این نتایج می‌توان اینگونه برداشت نمود که اعمال عدم قطعیت‌های ناشی از داده برداری آزمایشات مانند مرکز ثقل می‌تواند بر روی دقت نتایج شبیه‌سازی عددی تاثیر گذار باشد.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر مسئله، معادله پیوستگی و معادلات رنز برای حالت ناپایای سه بعدی سیال غیرقابل تراکم هستند. معادله پیوستگی بصورت زیر می‌باشد [13]:

مدل چندفازی حجم سیال در نرم افزار استارسی-سیامپلاس از جمله مدل‌های شبیه‌سازی کننده‌ی سطح آزاد و پیش بینی کننده‌ی توزیع و حرکت سطح آزادهای مخلوط نشدنی می‌باشد که محدوده‌ی وسیعی از کاربردها را در صنایع مختلف پوشش می‌دهد. برای استفاده از این مدل جهت شبیه سازی سطح آزاد بایستی از شبکه بندی با کیفیت مناسب استفاده نمود.

توزیع فازها و مکان هریک در سطح آزاد، به وسیله‌ی کسر حجمی سیال α_i مشخص میگردد. کسر حجمی سیال i ام به صورت زیر تعریف میگردد:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (۷)$$

که V_i حجم سیال i ام و V حجم سلول است. مجموع کسر حجمی تمامی سیالات موجود در یک سلول بایستی برابر ۱ شود:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \quad (۸)$$

که N تعداد فاز سیالات موجود میباشد.

بر اساس مقدار کسر حجمی سیال داریم:

$$\alpha_i = 0 - \text{سلول کاملاً از سیال } i \text{ ام خالی میباشد.}$$

$$\alpha_i = 1 - \text{سلول کاملاً با سیال } i \text{ ام پر شده است.}$$

$0 < \alpha_i < 1$ - مقادیر بین ۰ و ۱ کسر حجمی سیال بیانگر وجود سطح آزادی از فازهای مختلف سیال در آن سلول میباشد.

ویژگی‌های سیال موجود در یک سلول دارای سطح آزاد به

ویژگی‌های سیالات موجود در آن بستگی دارد.

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (۹)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (۱۰)$$

$$C_p = \sum_i \frac{(C_p)_i \rho_i}{\rho} \alpha_i \quad (۱۱)$$

که در روابط بالا، ρ_i چگالی، μ_i ویسکوزیته دینامیکی و $(C_p)_i$ گرمای ویژه‌ی فاز i ام میباشد.

در شکل ۱ نمای وی‌اُف حاصل از شبیه‌سازی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشخص است، فازهای هوا و آب در مسئله به خوبی از یکدیگر تفکیک شده که نشانگر دقت خوب شبکه بندی و شبیه سازی سطح آزاد می‌باشد.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

سرعت U می‌تواند بصورت میانگین سرعت و سرعت نوسانی بیان شود:

$$U_i = \bar{U}_i + u'_i \quad (۲)$$

معادله ممنتوم بصورت زیر قابل ارائه است [13]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (۳)$$

در معادلات ممنتوم، U_i معادل سرعت میانگین و u'_i معادل سرعت متغیر نوسانی در جهت مختصات کارتزین x_i است. P بیان کننده فشار میانگین، ρ چگالی و ν لزجت سینماتیکی سیال است.

برای شبیه سازی دقیق جریان حول شناور از مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$ استفاده شده است. مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$ مدلی است که در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است و از دقت قابل قبولی نیز برخوردار است [14] [15]. در شبیه سازی، تنسور تنش رینولدز بصورت معادله (۴) محاسبه می‌شود [16]:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (۴)$$

در این معادله، عبارت ν_t دی ویسکوزیتی هست که بصورت $\nu_t = \frac{C_\mu K^2}{\varepsilon}$ تعریف می‌شود بطوری که C_μ یک ثابت بدون بعد با مقدار ($C_\mu = 0.09$) است. و عبارت k انرژی سینماتیکی اغتشاشی و ε نرخ اضمحلال اغتشاشی i است. علاوه بر معادلات پیوستگی و تکانه، دو معادله (۵) و (۶) جابجایی برای بدست آوردن عبارات k و ε حل می‌شود [17]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (k U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon \quad (۵)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (k U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (۶)$$

توضیحات بیشتری در مورد مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$ را می‌توان در مطالعات ویلکاکس مطالعه کرد [18].

۲-۲- شبیه سازی سطح آزاد

برای شبیه‌سازی سطح آزاد در این پژوهش از مدل حجم سیال 16 وی‌اُف استفاده گردیده است.

۳- شبیه سازی

۳-۱- مشخصات هندسی شناور مدل

در این پژوهش به بررسی پارامتر هیدرواستاتیکی مرکز ثقل بر روی دریامانی شناور فریزما در آب آرام و موج منظم پرداخته شده است. پارامتر هندسی مورد نظر، مرکز ثقل طولی شناور بوده که برای بررسی تاثیر آن، در دو حالت آب آرام و موج منظم مرکز ثقل طولی شناور به طور جداگانه، ۱ درصد طول شناور عقب تر و ۱ درصد طول شناور جلوتر از محل اصلی آن منتقل شده (حدود یک درصد طولی شناور) و دریامانی شامل حرکات هیو و پیچ و مقاومت شناور مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱ خلاصه ای از سناریوی حل آورده شده است.

جدول ۱- سناریوی حل

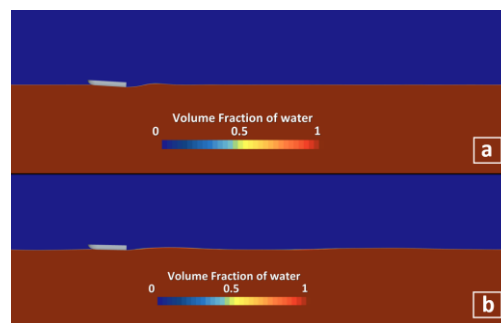
وضعیت مرکز ثقل در شبیه سازیها	(1% L) جلوتر
	بدون تغییر
	(1% L) عقب تر
شرایط شبیه سازی	آب آرام
	موج منظم
درجات آزادی شناور	هیو
	پیچ
مدل توربولانسی	کاپسیلون
شبیه سازی دوفازی و سطح آزاد	وی آف
روش حل	ناپایدار غیرصریح
روش شبکه بندی	مش اُورست

این شناور توسط جرارد فریزما در آزمایشگاه مورد ارزیابی و پژوهش قرار گرفته و نتایج تجربی حاصل از آن در دو گزارش مجزا جمع بندی و ارائه گردیده است [12].

در فرآیند بررسی رفتار شناور فریزما، در ابتدا هندسه ی شناور در نرم افزار سالیدورک^{۱۸} ترسیم گردیده و سپس در نرم افزار استار-سی سی ام پلاس به شبیه سازی آن در سه بعد و در دو درجه آزادی هیو و پیچ، و در دو شرایط آب آرام و موج منظم پرداخته شده است. برای انجام این شبیه سازیها از مدل توربولانسی $k - \varepsilon$ ، مدل وی آف^{۱۹}، روش حل ناپایدار غیرصریح^{۲۰} و همچنین مدل شبکه بندی اُورست^{۲۱} استفاده گردیده است. مشخصات هندسی شناور فریزما در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی مدل شناور فریزما

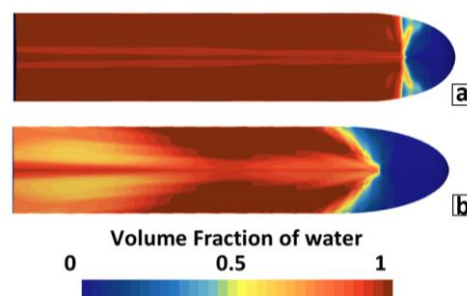
مشخصه	واحد	مقدار
طول	m	1.143



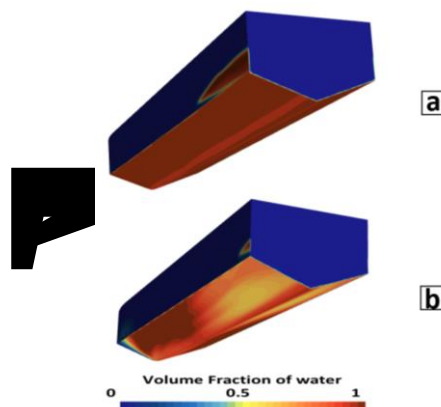
شکل ۱- نمای وی آف شبیه سازی شده در دو حالت آب آرام و موج منظم: (a) نما از کنار در آب آرام (b) نما از کنار در موج منظم

در شکل ۲ نیز نمای زیر شناور ارائه گردیده که تفاوت سطح خیس در دو حالت آب آرام و موج منظم به خوبی قابل مشاهده است. هوادهی عددی^{۱۷} در حالت آب آرام با شبکه بندی مناسب به حداقل رسیده که این موضوع در شکل ۲ a قابل مشاهده است. هوادهی موجود در موج منظم نیز به دلیل ماهیت فیزیک مسئله و وجود موج بوده و جزو خطای عددی محسوب نمی گردد (شکل ۲ b).

خشکی پاشنه یکی از ویژگی های شناورهای تندرو و پروازی بوده که بدلیل سرعت و نیروی لیفت بالا و شکل بدنه ی این نوع شناورها رخ می دهد و در شکل ۳ a و b به ترتیب در حالت آب آرام و موج منظم قابل مشاهده می باشد.



شکل ۲- نمای وی آف از سطح خیس شناور در دو حالت آب آرام و موج منظم: (a) نمای زیر شناور در آب آرام (b) نمای زیر شناور در موج منظم



شکل ۳- نمایه وی آف از بدنه شناور و سطح خیس در آن پدیده خشکی پاشنه مشخص می باشد: (a) در دو حالت (b) موج منظم

¹⁸ SOLIDWORKS

¹⁹ VOF

²⁰ Implicit unsteady

²¹ Overset

خروجی جریان در نظر گرفته می‌شود. بنابر تجربه و فیزیک مسئله، ابعاد از توصیه‌ی آی‌تی‌سی، بزرگتر و بصورت زیر تعریف شده است:

- در جلوی شناور برابر ۳ طول شناور
- در پشت شناور برابر ۹ طول شناور
- در عرض شناور (پهلوی) برابر ۴ طول شناور از خط میانی^{۲۵}
- در بالا برابر ۲ طول شناور
- در پایین برابر ۴ طول شناور

شرایط مرزی و اولیه مناسب، تاثیر به سزایی در حل عددی یک مساله دارد. شرط مرزی مناسب باعث افزایش دقت محاسباتی و کاهش خطاهای شبیه‌سازی می‌گردد. انتخاب شرایط مرزی بایستی با توجه به مسئله‌ی مورد نظر بوده و بیشترین هماهنگی را با شرایط فیزیکی و محیطی داشته باشد تا بدین وسیله موجب افزایش دقت حل گردد.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شرط مرزی وجه جلویی، بالا و پایین دامنه‌ی حل شناور بعنوان ورودی سرعت و شرط مرزی وجه پشت دامنه حل شناور بعنوان خروجی فشار در نظر گرفته شده است. به دلیل استفاده از روش اورست، وجوه سمت کنار، بالا، پایین، پشت و روبروی شناور در دامنه حل کوچک (اورست) به عنوان شرط مرزی اورست مش، انتخاب شده اند. شرط مرزی بدنه شناور به عنوان دیواره بدون لغزش و مابقی شرایط مرزی بدلیل تقارن، شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده اند.

عرض	m	0.2286
ارتفاع	m	0.142875
ددرایز ^{۲۳}	$^{\circ}$	20
تریم اولیه	$^{\circ}$	0.86
مرکز ثقل اصلی	$[m, m, m]$	[0.46863, 0, 0.0672]
ممان اینرسی	$[kg - m^3, kg - m^3, kg - m^3]$	[1.0, 0.2987766, 1.0]
آبخور	m	0.06
دامنه موج	m	۰.۰۳۸۱۷۶۲
طول موج	m	۶.۸۵۸
وزن	kg	7.26
سرعت	m/s	3.9845

هندسه ترسیم شده شناور فریزما در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.



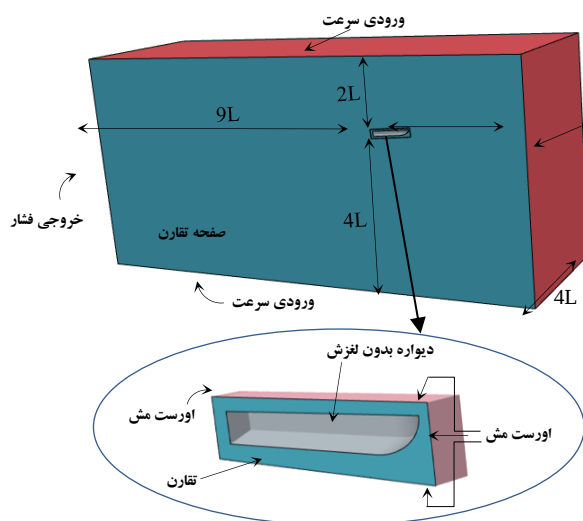
شکل ۴- ابعاد مختلف شناور فریزما

۳-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

در شکل ۵ می‌توان ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده را مشاهده کرد.

از روش حل اورست^{۲۳} برای مشاهده حرکات استفاده شده است. در این روش دو دامنه‌ی حل در اطراف شناور تعریف می‌گردد. دامنه‌ی بزرگتر، ثابت و دامنه‌ی دیگر در نزدیکی شناور تعریف شده که دامنه‌ی اورست نامیده می‌شود. این دامنه حرکت کرده و با بدنه‌ی شناور حرکت میکند.

بنابر توصیه آی‌تی‌سی^{۲۴} [14]، دامنه‌ی محاسباتی به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که کمترین تاثیر مرزها بر روی حل، اعمال گردد. طبق توصیه آی‌تی‌سی، مقدار ابعاد دامنه از یک تا دو برابر طول شناور در سمت ورودی و از سه تا پنج برابر طول شناور در سمت



شکل ۵- ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

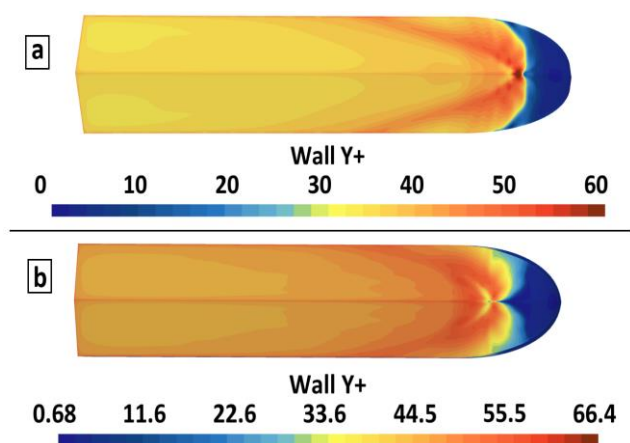
از مدل‌های شبکه بندی تریمر، لایه مرزی و همچنین تعریف چندین بلاک جهت بهبود کیفیت شبکه بندی در مناطق مورد

²³ Deadrise angle

²⁴ Overset

²⁴ ITTC(International Towing Tank Conference)

نظر، کمک گرفته شده است. در شبکه تریمر، سلول های شش وجهی با کیفیت مطلوب ایجاد میشود. در شکل 6 شبکه بندی صورت گرفته در سه نما ارائه گردیده است.



شکل ۷- Y^+ روی بدنه شناور در دو حالت آب آرام و موج منظم: (a) موج منظم (b) آب آرام

ضخامت کل لایه مرزی با استفاده از رابطه‌ی (۱۷) برابر 0.01925 m تخمین زده شده است.

$$\delta(x) = 0.37 \frac{x}{Re^{1/5}} \quad (17)$$

برای انجام محاسبات این پژوهش از گام زمانی 0.001 ثانیه بر طبق توصیه آی تی تی سی ۵۷ [14] که در رابطه‌ی ((۱۸)) بدان اشاره شده است و تعداد تکرار معادلات داخلی ۵ برای حل این مسئله استفاده شده است که از نظر عدد کورانت 27 و میزان خطای محاسباتی، دارای دقت قابل قبولی میباشد.

$$\Delta t = 0.001 \sim 0.0025 \frac{L}{U} \quad (18)$$

عدد کورانت برابرست با $C = U \frac{\Delta t}{\Delta x}$. جهت انجام شبیه سازی، عدد کورانت بایستی مقداری کمتر از ۱ داشته باشد که بر همین اساس نسبتی مناسب میان اندازه‌ی شبکه بندی و گام زمانی بایستی برقرار گردد [20].

$$\Delta t = 0.001\text{ s} \quad (19)$$

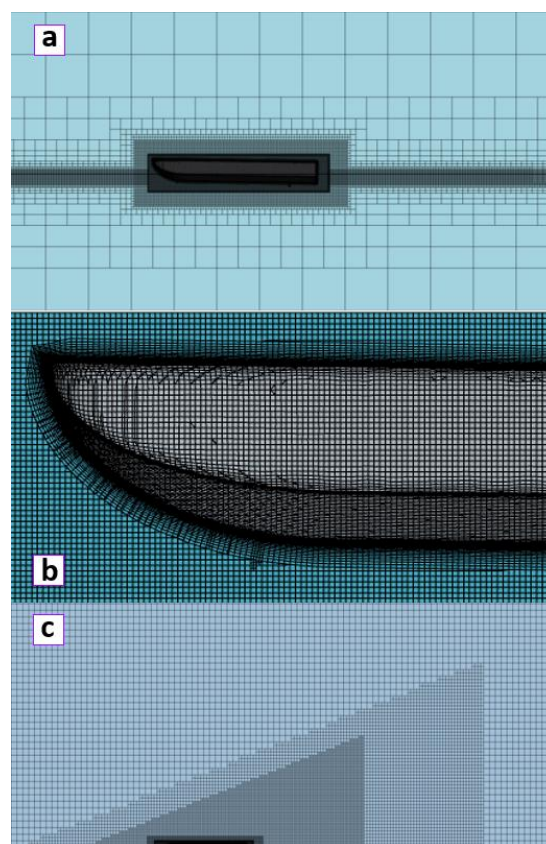
$$\Delta x = 0.006\text{ m} \quad (20)$$

$$U = 3.9845 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (21)$$

$$C = 3.9845 \times \frac{0.001}{0.006} = 0.664 < 1 \quad (22)$$

۳-۳- استقلال از شبکه

جهت بررسی استقلال از شبکه‌ی مسئله‌ی مورد نظر از ۷ شبکه بندی با تعداد سلول های مختلف استفاده گردیده است. جهت بررسی تاثیر شبکه بندی بر روی پاسخ های مسئله در نقاط ۱ تا ۷ مقادیر مقاومت و پیچ شناور محاسبه گردیده و به صورت نمودار و جدول ارائه شده اند.



شکل ۶- شبکه بندی ایجاد شده: (a) نمای از کنار شبکه بندی به همراه شبکه بندی سطح آب و دامنه های حل (b) شبکه بندی لایه مرزی (c) شبکه بندی سطح آب از بالا

ارتفاع اولین سلول لایه مرزی از طریق روابط ۱۲ تا ۱۶ محاسبه گردیده و همانطور که در شکل ۷ مشخص است، وای پلاس 26 مسئله در موج منظم در حدود ۴۰ و در آب آرام در حدود ۴۵ می باشد که این مقادیر در بازه‌ی مناسب قرار دارند [19].

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (12)$$

$$C_{f_{\text{external flow}}} = 0.058 Re^{-0.2} \quad (13)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot U^2 \quad (14)$$

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (15)$$

$$\Delta y_1 = \frac{Y + \cdot \mu}{\rho \cdot U_\tau} \quad (16)$$

²⁷ Courant Number

²⁶ Y^+

جدول ۴- مقادیر مربوط به GCI حل

پارامتر R	اختلاف مقاومت در دو نقطه شبکه بندی	مقاومت در نقاط مختلف شبکه بندی
۰.۶	اختلاف میان دو نقطه‌ی ۵ و ۶	مقاومت در نقطه ۵ ۱۲.۲۰
۰.۰۵	اختلاف میان دو نقطه‌ی ۶ و ۷	مقاومت در نقطه ۶ ۱۲.۲۳
		مقاومت در نقطه ۷ ۱۲.۲۸

بر طبق [21] هنگامی که $0 < R < 1$ پاسخ‌ها دارای همگرایی می‌باشند.

۴-۳- اعتبار سنجی

جهت اعتبار سنجی، مدل شناورفریزما به ترتیب در دو شرایط آب آرام و موج منظم در سرعت 3.9845 متر بر ثانیه شبیه‌سازی‌ها گردید و نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در جدول ۵ نتایج حاصل از شبیه سازی آب آرام با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده آن است که خطای مربوط به محاسبه مقاومت شناور 8.44 درصد و خطای حرکت پیچ معادل 12.38 درصد می‌باشد. مقدار درصد خطا بصورت رابطه زیر محاسبه شده است:

$$E = \left| \frac{\text{مقدار آزمایشگاهی} - \text{مقدار شبیه سازی}}{\text{مقدار آزمایشگاهی}} \right| \times 100 \quad (23)$$

جدول ۵- مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی آب آرام با نتایج

آزمایشگاهی

پارامتر	شبیه سازی	آزمایشگاهی	خطا (%)
مقاومت (نیوتن)	۱۲.۲۰۰	۱۱.۲۵	۸.۴۴
پیچ (درجه)	۳.۵۰۵۰	۴.۰۰۰۰	۱۲.۳۸
هیو (متر)	۰.۰۱۲	-	-

در

جدول ۶ نتایج حاصل از شبیه سازی موج منظم با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده آن است که خطای مربوط به مقاومت 0.61 درصد و خطای محاسبات حرکت هیو معادل 7.43 درصد می‌باشد.

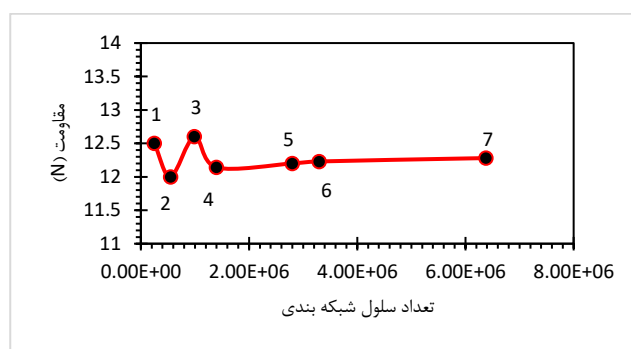
جدول ۶- مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی موج منظم با نتایج

آزمایشگاهی

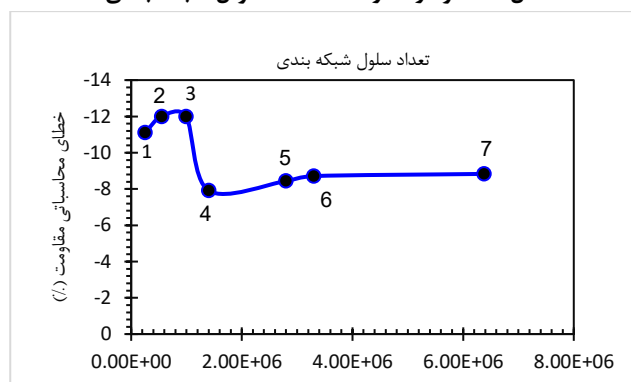
پارامتر	شبیه سازی	آزمایشگاهی	خطا (%)
مقاومت (نیوتن)	۱۲.۱۱۰	۱۲.۰۳۶	۰.۶۱
پیچ (درجه)	۴.۷۷۰	۴.۹۳۰	۳.۲۵
هیو (متر)	۰.۰۷۹۵	۰.۰۷۴۰	۷.۴۳

جدول ۳- مقاومت محاسبه شده در مقابل تعداد سلول شبکه بندی

تعداد سلول شبکه بندی	مقاومت (نیوتن)
۱	۱۲.۵۰
۲	۱۲.۰۰
۳	۱۲.۶۰
۴	۱۲.۱۴
۵	۱۲.۲۰
۶	۱۲.۲۳
۷	۱۲.۲۸



شکل ۸- نمودار مقاومت-تعداد سلول شبکه بندی



شکل ۹- خطای محاسباتی مقاومت-تعداد سلول های شبکه بندی

همانطور که در شکل ۸ مشخص است، در نقاط شماره‌ی ۴ تا ۷ میزان تغییرات مقاومت با تعداد سلول‌های شبکه بندی کاهش یافته و در یک بازه‌ی نسبتاً کوچک می‌باشد. بنابراین، خطا نیز در نقاط ۴ تا ۷ در یک بازه‌ی نسبتاً کوچک (شکل ۹) می‌باشد و این شبکه‌بندی‌ها برای شبیه سازی مسئله مناسب به نظر می‌رسند. از آنجا که دقت محاسبات در نقاط ۴ تا ۷ در محدوده‌ی مناسبی قرار داشته و همچنین با در نظر گرفتن پارامتر زمان، جهت کاهش زمان محاسبات از شبکه بندی شماره ۵ با تعداد سلول‌های ۲ میلیون و ۸۰۰ هزار برای شبیه‌سازی این مسئله استفاده گردیده است.

علاوه بر روش فوق، از روش GCI نیز برای بررسی همگرایی استفاده شده نتایج در جدول ۴ ارائه گردیده است.

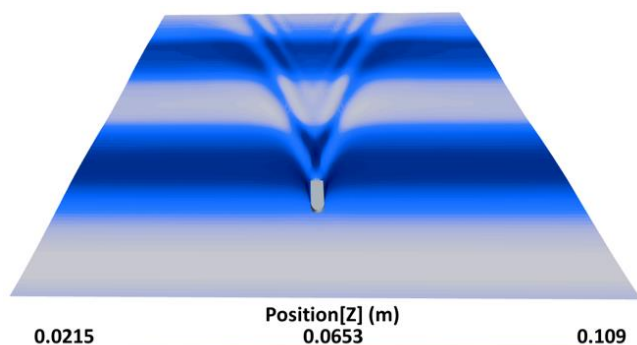
حالت، ۳۷.۴۷ درصد است. نتایج نشان دهنده تاثیر چشمگیر در محاسبات دریامانی با تغییر مرکز ثقل شناور در آب آرام می باشد.

جدول ۷- نتایج بدست آمده در آب آرام ناشی از جابجایی مرکز ثقل

موقعیت مرکز ثقل (سانتیمتر)	مقاومت شبیه سازی (نیوتن)	مقاومت آزمایشگاه (نیوتن)	خطای مقاومت (%)	پیچ شبیه سازی (درجه)	پیچ آزمایشگاه (درجه)	خطای پیچ (%)	هیو شبیه سازی (متر)	هیو شبیه سازی (متر)	خطای هیو (%)
به عقب	12.24	11.25	8.80	3.9	4	2.5	0.0135	0.019	28.95
بدون تغییر	12.71	11.25	12.98	3.44	4	14.10	0.019	0.019	0.00
جلو	12.84	11.25	14.13	3.07	4	23.25	0.01183	0.019	37.74

۳-۶- شبیه سازی موج منظم

جهت محاسبه تاثیر مرکز ثقل بر روی داده های دریامانی در موج منظم نیز، مرکز ثقل شناور در سه موقعیت شامل بدون تغییر، ۱ درصد از طول شناور عقب تر و ۱ درصد از طول شناور جلوتر از مرکز ثقل اعلام شده آزمایشگاهی، شبیه سازی شد و داده های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل 11 سطح آب شبیه سازی شده در موج منظم را نشان می دهد. با توجه به داده ها، حداکثر ارتفاع قله موج تشکیل شده در این شرایط برابر با ۰.۱۰۹ متر و مینیمم قعر موج برابر ۰.۰۰۹۹۱- می باشد.

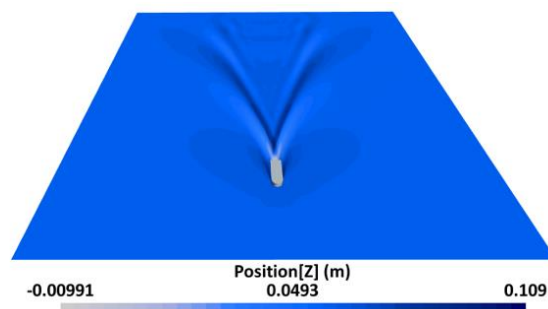


شکل ۱۱ - نمایی از سطح آزاد شبیه سازی شده در موج منظم

ایجاد شبکه بندی مناسب در دامنه ی حل، مخصوصا شبکه بندی در راستای Z ، علاوه بر تاثیر بر دقت حل مسئله، بر روی شبیه سازی فازها و سطح آزاد نیز تاثیر ویژه ای دارد. در شکل 11 شبیه سازی سطح آزاد موج نامنظم ارائه شده است. شکل 11 نشان می دهد که شبکه بندی دارای کیفیت قابل قبولی بوده و شبیه سازی هریک از فازهای آب و هوا و همچنین نواحی تداخل آن ها به خوبی انجام شده است.

۳-۵- شبیه سازی آب آرام

جهت محاسبه تاثیر مرکز ثقل بر روی داده های دریامانی در آب آرام، مرکز ثقل شناور در سه موقعیت شامل بدون تغییر، ۱.۵ سانتیمتر عقب تر و ۱.۵ سانتیمتر جلوتر از مرکز ثقل اعلام شده آزمایشگاهی، شبیه سازی شد و داده های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل 10 سطح آب شبیه سازی شده در آب آرام را نشان می دهد. با توجه به داده ها، حداکثر ارتفاع قله موج تشکیل شده در این شرایط برابر با ۰.۱۰۹ متر و مینیمم قعر موج برابر ۰.۰۰۹۹۱- نسبت به سطح صفر آب می باشد.



شکل ۱۰ - نمایی از سطح آزاد شبیه سازی شده در آب آرام

همانطور که در جدول 7 نیز قابل مشاهده است، خطای محاسباتی حاصل از شبیه سازی در آب آرام در فاصله ۱.۵ سانتیمتر عقب تر از مرکز ثقل برای مقاومت و پیچ به ترتیب ۸.۸ درصد و ۲.۵ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی می باشد. با توجه در دسترس نبودن مقدار آزمایشگاهی برای حرکت هیو، مقدار بدست آمده از روش عددی معیار انجام کار قرار گرفت. بنابراین، برای حرکت هیو در در فاصله ۱.۵ سانتیمتر عقب تر از مرکز ثقل ۲۸.۹۵ درصد انحراف از مقدار اولیه را شاهد هستیم. برای حالت بدون تغییر مرکز ثقل، خطای مقاومت و حرکت پیچ به ترتیب ۱۲.۹۸ و ۱۴.۱ درصد است. همچنین در شبیه سازی آب آرام با فاصله مرکز ثقل ۱.۵ سانتیمتر جلوتر، خطای محاسباتی برای مقاومت و پیچ به ترتیب ۱۴.۱۳ درصد و ۲۳.۲۵ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی می باشد. همچنین انحراف حرکت هیو از داده شبیه سازی برای این

تخمین هیو شناور است. خطاهای مربوط به شبیه سازی بدون تغییر مرکز ثقل در موج منظم به ترتیب برای مقاومت شناور، حرکت پیچ و هیو شناور برابر ۰.۸۹ درصد، ۹.۲۹ درصد و ۴.۰۵ درصد می باشد که در این حالت نیز بیشترین میزان خطا مربوط به تخمین پیچ شناور و کمترین میزان خطا مربوط به خطای شبیه سازی مقاومت شناور است.

به منظور بررسی میزان دقت ورودی های پارامترهای استاتیک در نتایج دریامانی شناور تندرو، پارامتر مرکز ثقل طولی در شرایط آب آرام و موج منظم در راستای طولی بر روی شناور تندرو بررسی گردید. نتایج نشان دهنده آن است که جابجایی محل مرکز ثقل بر روی نتایج دریامانی موثر می باشد به نحوی که در شبیه سازی آب آرام:

۱- جابجایی مرکز ثقل شناور به میزان تقریباً یک درصد طول

به سمت جلو موجب خطای تخمین ۱۴.۱۳ درصدی مقاومت شناور، ۲۳.۲۵ درصدی پیچ و ۳۷.۷۴ درصدی هیو شناور نسبت به نتایج آزمایشگاهی می گردد که در این حالت مقادیر خطاهای مقاومت، پیچ و هیو شناور نسبت به حالت بدون تغییر در شبیه سازی عددی، به ترتیب ۱.۱۵ درصد، ۹.۱۵ درصد و ۳۷.۷۴ درصد افزایش داشته است.

۲- جابجایی مرکز ثقل به میزان تقریباً یک درصد طول به سمت عقب موجب خطای شبیه سازی ۸.۸۰ درصدی مقاومت شناور، ۲.۵ درصدی حرکت پیچ و ۲۸.۹۵ درصدی هیو شناور نسبت به نتایج آزمایشگاهی می گردد که در این حالت نسبت به حالت بدون تغییر مرکز ثقل شناور در شبیه سازی عددی، مقدار خطای مقاومت به میزان ۴.۱۸ درصد کاهش، خطای حرکت پیچ ۱۱.۶۰ درصد کاهش و مقدار خطای هیو شناور ۲۸.۹۵ درصد افزایش داشته است. در شبیه سازی شناور در موج منظم با جابجایی مرکز ثقل به میزان یک درصد طول شناور:

۱- جابجایی مرکز ثقل به سمت سینه، خطای تخمین مقاومت شناور با افزایش ۵.۱۳ درصدی نسبت به حالت بدون جابجایی مرکز ثقل برابر ۶.۰۲ درصد، خطای پیچ با افزایش ۲.۸۸ درصدی نسبت به حالت بدون تغییر برابر ۱۲.۱۷ درصد و خطای تخمین هیو شناور با کاهش ۲.۷۰ درصدی نسبت به حالت بدون تغییر برابر ۱.۳۵ درصد محاسبه گردید.

۲- به سمت پاشنه، خطای محاسباتی شبیه سازی مقاومت شناور برابر ۲.۷۹ درصد، خطای پیچ ۶.۲۹ درصد و خطای هیو ۵.۴۱ درصد بدست آمده است که نسبت به حالت بدون تغییر مرکز ثقل، خطای مقاومت ۱.۹۰ درصد

همانطور که در جدول ۸ نیز قابل مشاهده است، خطای محاسباتی حاصل از شبیه سازی در موج منظم در فاصله ۱ درصد از طول شناور به سمت عقب تر از مرکز ثقل برای مقاومت، پیچ و هیو به ترتیب ۲.۷۹ درصد، ۶.۲۹ درصد و ۵.۴۱ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی می باشد. برای حالت بدون تغییر مرکز ثقل، خطای مقاومت و حرکت پیچ و هیو به ترتیب ۰.۸۹ و ۹.۲۹ و ۴.۰۵ درصد است. همچنین در شبیه سازی موج منظم با فاصله ۱ درصد از طول شناور به سمت جلوتر از مرکز ثقل، خطای مقاومت و حرکت پیچ و هیو به ترتیب ۶.۰۲، ۱۲.۱۷ و ۱.۳۵ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی می باشد.

نتایج نشان دهنده تغییر در محاسبات دریامانی با تغییر مرکز ثقل شناور در موج منظم است اما این تغییرات در مقایسه با آب آرام کوچکتر می باشد.

جدول ۸- نتایج بدست آمده در موج منظم ناشی از جابجایی مرکز ثقل

موقعیت مرکز ثقل (سانتیمتر)	مقاومت شیب سازی (نیوتن)	مقاومت آزمایشگاه (نیوتن)	خطای مقاومت (%)	پیچ شیب سازی (درجه)	پیچ آزمایشگاه (درجه)	خطای پیچ (%)	هیو شیب سازی (متر)	هیو آزمایشگاه (متر)	خطای هیو (%)
عقب	۱۱.۷	۱۲.۰۳۶	۲.۷۹	۴.۶۲	۴.۹۳	۶.۲۹	۰.۰۷۸	۰.۰۷۴	۵.۴۱
بدون تغییر	۱۲.۱۴۳	۱۲.۰۳۶	۰.۸۹	۴.۴۷	۴.۹۳	۹.۲۹	۰.۰۷۷	۰.۰۷۴	۴.۰۵
۱ % L به جلو	۱۲.۷۶	۱۲.۰۳۶	۶.۰۲	۴.۳۳	۴.۹۳	۱۲.۱۷	۰.۰۷۵	۰.۰۷۴	۱.۳۵

۴- نتیجه گیری

شبیه سازی آب آرام و موج منظم برای یک شناور تندرو اعتبارسنجی شد و مقادیر مربوط به دریامانی آن شامل، مقاومت، حرکت هیو و پیچ استخراج گردید. نتایج شبیه سازی تطابق مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند به نحوی که در حالت بدون تغییر مرکز ثقل شناور در آب آرام، خطای شبیه سازی مقاومت شناور برابر ۱۲.۹۸ درصد، خطای حرکت پیچ برابر ۱۴.۱۰ درصد و خطای هیو برابر صفر می باشد. بیشترین مقدار خطا در این حالت مربوط به خطای پیچ شناور و کمترین خطا مربوط به

- directional cross wave compared with in uni-directional regular wave. *Applied Ocean Research*, 107, 102426. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102426>
- 4- Pennino, S., & Scamardella, A. (2023). *Motions Assessment Using a Time Domain Approach for a Research Ship in Antarctic Waters*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 558. <https://doi.org/10.3390/jmse11030558>
- 5- Capasso, S., Tagliafierro, B., Mancini, S., Martínez-Estévez, I., Altomare, C., Domínguez, J. M., & Viccione, G. (2023). *Regular Wave Seakeeping Analysis of a Planing Hull by Smoothed Particle Hydrodynamics: A Comprehensive Validation*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 700. <https://doi.org/10.3390/jmse11040700>
- 6- Askary Sayar, M., & Askarian Khob, A. (2017). *Navy Ship Theory* (9th ed., Vol. 1, K. Mayes, Ed.). Springer.
- 7- Aliakbari, T., Adjami, M., & Moonesun, M. (2020). *The Seakeeping Investigation of an Inverted Bow Hull by Experimental Method*. *Journal of Marine Engineering*, 16(31), 123–130. <https://doi.org/10.29252/marineeng.16.31.123> (In Persian)
- 8- Bigharaz, Z., Hajizadeh, S., & Abyn, H. (2022). *Investigation the effect of irregular wave on the seakeeping of a container ship*. *Journal of Marine Engineering*, 18(35), 141–150. <https://doi.org/10.52547/marineeng.18.35.141> (In Persian)
- 9- Ameri, M. J., Danesh, N. A., & Kazemi, H. (2023). *Experimental Study of Geometric Parameters of transverse Steps on High Speed vessels drag at different deadrise angle of the vessels body*. *Journal of Marine Engineering*, 18(37), 57–69. <https://doi.org/10.61186/marineeng.18.37.57> (In Persian)
- 10- Karimi Baseri, H., Fereidooni, J., Moonesun, M., & Adjami, M. (2023). *Analysis of hydrofoil craft in regular and irregular waves*. *Journal of Marine Engineering*, 19(38), 90–105. <https://doi.org/10.61186/marineeng.19.38.90> (In Persian)
- 11- Nikseresht, A. H., & Ghodrat, M. (2025). *Numerical study on seakeeping performance*

افزایش، خطای پیچ ۳۰۰ درصد کاهش و خطای هیو ۱۳۶ درصد افزایش داشته است.

۳- نتایج فوق نشان دهنده تاثیر گذار بودن محل مرکز ثقل طولی بر روی دقت نتایج می باشد و باید مقدار دقت در تعیین محل مرکز ثقل طولی و عدم قطعیت آن در انجام محاسبات در نظر گرفته شود.

کلید واژگان

- 1- Seakeeping
- 2- Computational Fluid Dynamic
- 3- Heave
- 4- Pitch
- 5- Drag
- 6- Regular wave
- 7- Calm water

۵- فهرست علائم

μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال (Pa-s)
ρ	چگالی سیال (kg/m ³)
U	سرعت شناور (m/s)
L	طول شناور (m)
Δy_1	ضخامت لایه اول لایه مرزی سیال (m)
Δt	گام زمانی (s)
Δx	اندازه ی کوچکترین شبکه ی استفاده شده (m)
$\bar{h}$	هیو متوسط (m): متوسط قله های نمودار هیو نسبت به میانگین نمودار
$\bar{\theta}$	پیچ متوسط (degree): متوسط قله های نمودار پیچ نسبت به میانگین نمودار
θ_{dc}	پیچ متوسط (degree): متوسط کل پیچ شناور
h_{dc}	هیو متوسط کل هیو شناور

۶- مراجع

- 1- Ibinabo, I., & Tamunodukobipi, D. T. (2019). *Determination of the Response Amplitude Operator(s) of an FPSO*. *Engineering*, 11(9), 541–556. <https://doi.org/10.4236/eng.2019.119038>
- 2- Fitriadhy, A., Dewa, S., Mansor, N. A., Adam, N. A., Ng, C. Y., & Kang, H. S. (2021). *CFD Investigation into Seakeeping Performance of a Training Ship*. *CFD Letters*, 13(1), 19–32. <https://doi.org/10.37934/cfdl.13.1.1932>
- 3- Huang, S., Jiao, J., & Chen, C. (2021). *CFD prediction of ship seakeeping behavior in bi-*

- of a DTMB planing hull craft in regular sea waves. *Journal of Marine Engineering*, 21(46), 101–117.
<https://doi.org/10.61882/marineeng.21.46.9>
(In Persian)
- 12- Fridsma, G. (1969). *A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats* (Davidson Laboratory Report R-1275). Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ.
- 13- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (8th ed.). McGraw-Hill Education, New York, USA.
- 14- ITTC. (2011). *Recommended Procedures and Guidelines: Resistance Test* (ITTC Recommended Procedures 7.5-02-02-01). International Towing Tank Conference.
- 15- Siemens Digital Industries Software. (2022). *Simcenter STAR-CCM+ User Guide: Turbulence Modeling and Theory*. Siemens PLM Software.
- 16- Nunn, R. H. (1989). *Intermediate Fluid Mechanics*. Taylor & Francis Group, New York, NY.
- 17- Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-Layer Theory* (9th ed., Vol. 1, K. Mayes, Ed.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- 18- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD* (3rd ed.). DCW Industries, La Cañada, CA.
- 19- Siemens Digital Industries Software. (2022). *Simcenter STAR-CCM+ User Guide: Simulating Physics and Near-Wall Treatment*. Siemens.
- 20- Siemens Digital Industries Software. (2022). *Simcenter STAR-CCM+ User Guide: Aeroacoustics and Unsteady Solver Settings*. Siemens.
- 21- ITTC. (2017). *Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation, Methodology and Procedures* (ITTC Recommended Procedures 7.5-03-01-01). International Towing Tank Conference.
-