J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 49, 2026. (87-99)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

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 Juneghani [1], Sajad Ardeshiri [2*], Hasan Karimi Baseri [3]

[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 planning 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/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۴۹، ۱۴۰۵، (۹۹-۸۷)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بررسی تاثیر محل مرکزثقل 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

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

شبیه‌سازی عددی

چکیده

تحلیل دریامانی شناورهای تندرو از مراحل مهم در طراحی هیدرودینامیک است و افزایش دقت در محاسبات دریامانی باعث تحلیل دقیق‌تر 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 شبیه‌سازی 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 تقریبا ۱ درصد طول شناور جلوتر و عقب‌تر از مرکز ثقل شناور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن است که تغییر مرکز ثقل شناور می‌تواند تاثیر حداکثر ۵ درصد در مقدار مقاومت شناور، ۲۰ درصدی در مقدار هیو شناور و همچنین ۹ درصد پیچ شناور داشته باشد.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

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 کارآیی و پایداری ذاتی شناور را فراهم می‌کند. امواج منظم به عنوان استانداری 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[1] 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 ایمابیبو ایبینابو[2] و دنیل تامونودوک بیپی [3] [1] به تحلیل حرکات یک شناور اف‌پی‌اس او[4]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 ۵.۳۱ متر و آبخور ۸.۲۵ متری میباشد توضیح و بررسی روش محاسبه‌ی دامنه‌ی پاسخ حرکات در ۶ درجه ی آزادی و در نرم افزار انسیس اِی‌کیودبیلیوای[5] 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 اِی‌کیودبیلیوای، تطابق خوبی میان نتایج مشاهده شده است.

احمد فطریه[6] و همکاران در سال ۲۰۲۱ [2] به بررسی عملکرد دریامانی یک کشتی آموزشی با استفاده از روش سی‌اف‌دی پرداختند. در این پژوهش بر روی رائو 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 رائو شناور و در نتیجه کاهش کیفیت دریامانی شناور علی الخصوص در امواج از پشت، می‌شود.

سانشینگ هوانگ[7] 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[8] و آنتنیو اسکاماردلا[9][4]در پژوهشی بر روی شناوری تحقیقاتی، به ارزیابی حرکات شناور در حوزه زمان و فرکانس پرداختند. نویسندگان از یک کد منبع باز[10] اِن‌ای‌اِم‌اُاِچ[11] برای محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی و نیروهای تحریک، و از معادلات کامینز[12] 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[13] و همکاران[5] با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار مستقل از شبکه[14] 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

[1] CFD (computational fluid dynamic)
[2] Imabibo Ibinabo
[3] Daniel T. Tamunodukobipi
[4] FPSO(Floating Production Storage and Offloading)
[5] ANSYS AQWA

[6] Ahmad Fitriadhy
[7] Songxing Huang
[8] Silvia Pennino
[9] Antonio Scamardella
[10] Open source
[11] NEMOH
[12] Cummins
[13] Salvatore Capasso
[14] Mesh free smoothed particle hydrodynamics (SPH)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

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

عسکری‌سیار 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 ۴۵درجه حرکات مدل بهبود پیدا می کند. 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. یافته های 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 بلخصوص 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 ۲/۶g ثبت شد که کمتر از حد مجاز ۴gبرای 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 استارسی‌ام‌پلاس[15] 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 می باشد[13]:

[15] STARCCM+

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

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

سرعت U می تواند بصورت میانگین سرعت و سرعت نوسانی بیان شود:

$$U_i = \overline{U}_i + u_i' \quad (۲)$$

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 می شود[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 ادی ویسکوزیتی هست که بصورت $\nu_t = \frac{C_\mu K^2}{\varepsilon}$ تعریف می شود 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]:

$$\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial (\mathrm{kU_j})}{\partial \mathrm{x_j}} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left[\left(\nu + \frac{\nu_\mathrm{t}}{\sigma_\mathrm{k}}\right)\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{x_J}}\right] + \mathrm{P_k} - \epsilon \quad (۵)$$

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

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 [۱۶] (وی اُ اِف) استفاده گردیده است.

مدل چندفازی حجم سیال در نرم افزار استارسی‌سی‌ام‌پلاس 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 می دهد. 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 سیالِ 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:

$\alpha_i = 0$ – سلول کاملا از سیال i ام خالی میباشد.

$\alpha_i = 1$ – سلول کاملا با سیال i 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.

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

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

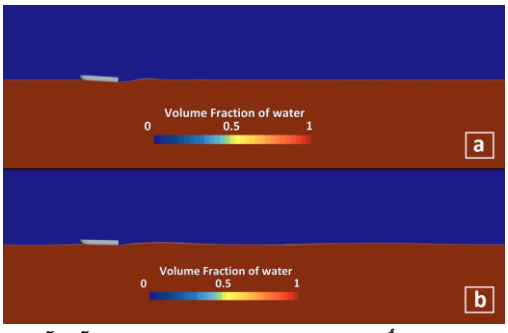
$$C_p = \sum_i \frac{(C_p)_i \rho_i}{\rho}\alpha_i \quad (۱۱)$$

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

در شکل 1 نمای وی‌اُف حاصل از شبیه‌سازی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل 1 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.

[16] Volume of Fluid

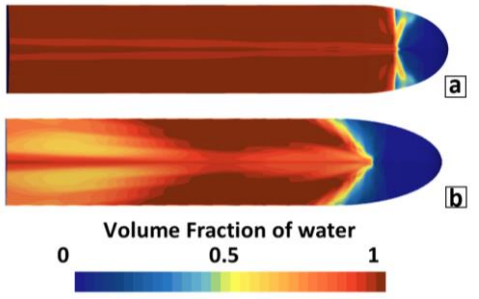
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]



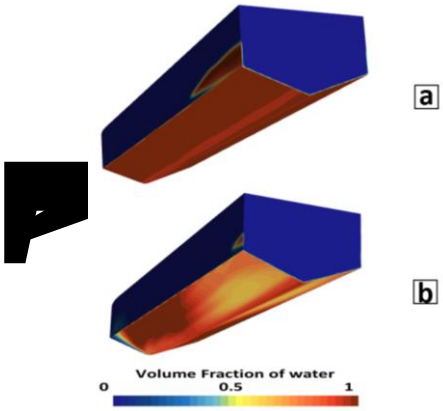
شکل ۱- نمای وی‌اُاِف شبیه سازی شده در دو حالت آب آرام و موج منظم:a) نما از کنار در آب آرام b) نما از کنار در موج منظم

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 نمی‌گردد (**شکل ۲** b).

خشکی پاشنه یکی از ویژگی‌های شناورهای تندرو و پروازی بوده که بدلیل سرعت و نیروی لیفت بالا و شکل بدنه‌ی این نوع شناورها رخ می‌دهد و در **شکل ۳** a و b به ترتیب در حالت آب آرام و موج منظم قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲- نمای وی‌اُاِف 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 وی‌اُاِف از بدنه شناور و سطح خ[illegible] در آن پدیده خشکی پاشنه مشخص میباشد؛ در دو حالت:a) [illegible] b) موج منظم

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 **1** خلاصه‌ای از سناریوی حل آورده شده است.

جدول ۱- سناریوی حل

وضعیت مرکز ثقل در شبیه سازی‌ها	(1% L) جلوتر
	بدون تغییر
	(1% L) عقب‌تر
شرایط شبیه سازی	آب آرام
	موج منظم
درجات آزادی شناور	هیو
	پیچ
مدل توربولانسی	کا اپسیلون
شبیه سازی دوفازی و سطح آزاد	وی اُ اِف
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 هندسه‌ی شناور در نرم افزار سالیدورک[۱۸] ترسیم گردیده و سپس در نرم افزار استار-سی‌سی‌ام‌پلاس به شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی‌ها از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ ، مدل وی اُ اِف[۱۹]، روش حل ناپایدار غیرصریح[۲۰] و همچنین مدل شبکه بندی اُورست[۲۱] استفاده گردیده است.

مشخصات هندسی شناور فریزما در جدول 2 ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات هندسی مدل شناور فریزما

مشخصه	واحد	مقدار
طول	m	1.143

[18] SOLIDWORKS
[19] VOF
[20] Implicit unsteady
[21] Overset

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

عرض	m	0.2286
ارتفاع	m	0.142875
ددرایز[۲۲]	°	20
تریم اولیه	°	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

درشکل 5 می‌توان ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده را مشاهده کرد.

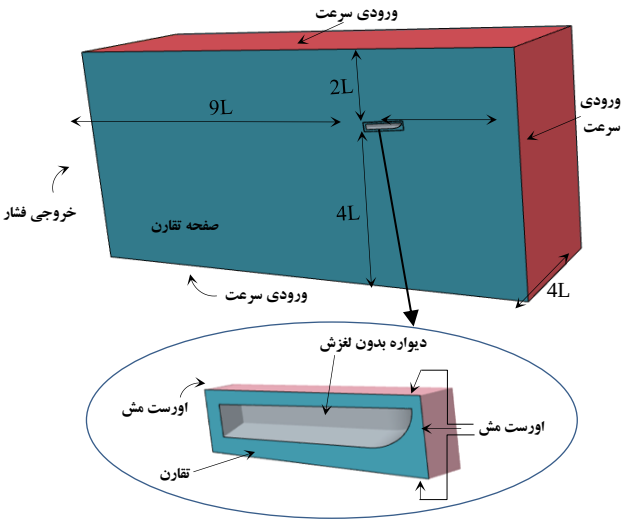
از روش حل اورست[۲۳] برای مشاهده حرکات استفاده شده است. در این روش دو دامنه‌ی حل در اطراف شناور تعریف میگردد. دامنه‌ی بزرگتر، ثابت و دامنه‌ی دیگر در نزدیکی شناور تعریف شده که دامنه‌ی اورست نامیده میشود. این دامنه [illegible] با بدنه‌ی شناور حرکت میکند.

بنابر توصیه آی‌تی‌تی‌سی[۲۴] [14] [illegible] دامنه‌ی محاسباتی به گونه ای در نظر گرفته می‌شود که [illegible] تاثیر مرزها بر روی حل، اعمال گردد. طبق توصیه آی‌تی‌تی‌سی [illegible] مقدار ابعاد دامنه از یک تا دو برابر طول شناور در سمت ورودی و [illegible] موج‌های جریان اعمالی بر روی شناور و از سه تا پنج برابر طول [illegible] در سمت خروجی جریان در نظر گرفته می‌شود. بنابر تجربه و فیزیک مسئله، ابعاد از توصیه‌ی آی‌تی‌تی‌سی، بزرگتر و بصورت زیر تعریف شده است:

- در جلوی شناور برابر۳ طول شناور
- در پشت شناور برابر ۹ طول شناور
- در عرض شناور (پهلو) 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 5 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.



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

[illegible]

[illegible] Deadrise angle

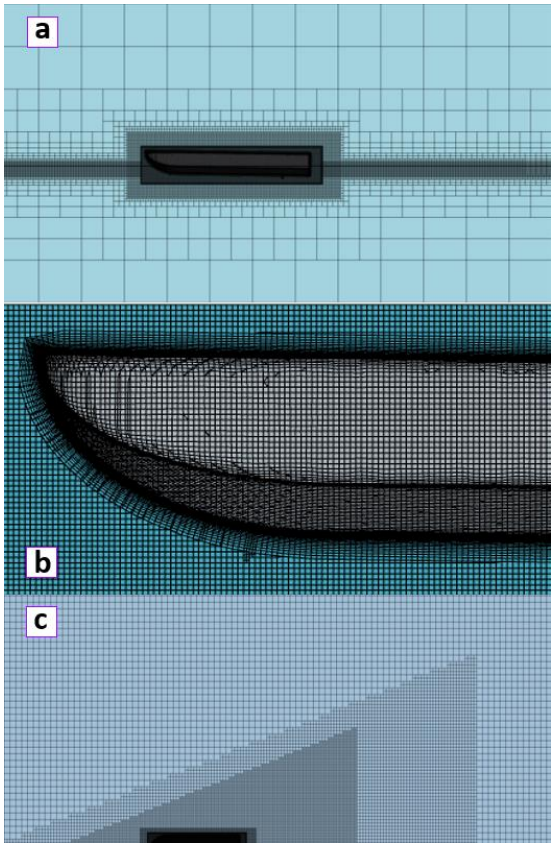
[23] Overset

[24] ITTC(International Towing Tank Conference)

[25] Centerline

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

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 ۶– شبکه بندی ایجاد شده: a)نمای از کنار شبکه بندی به همراه شبکه بندی سطح آب و دامنه‌های 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، وای‌پلاس[۲۶] مسئله در موج منظم در حدود ۴۰ و در آب آرام در حدود ۴۵ می‌باشد که این مقادیر در بازه‌ی مناسب قرار دارند[19].

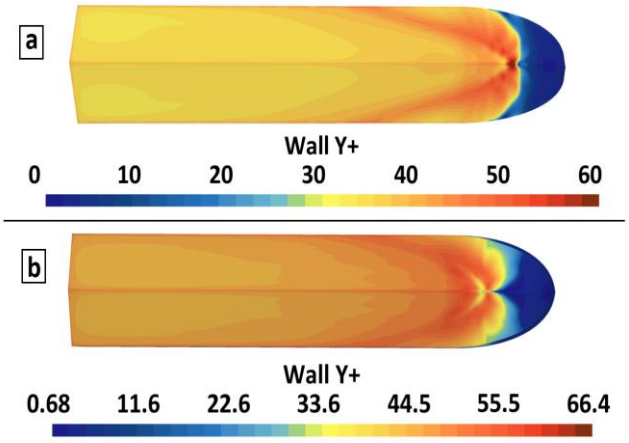
$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (۱۲)$$

$$C_{f_{\text{external flow}}} = 0.058\ \mathrm{Re}^{-0.2} \quad (۱۳)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot U^2 \quad (۱۴)$$

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (۱۵)$$

$$\Delta y_1 = \frac{Y+ \cdot \mu}{\rho \cdot U_\tau} \quad (۱۶)$$



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.

$$\delta(x) = 0.37 \frac{x}{Re^{\frac{1}{5}}} \quad (۱۷)$$

برای انجام محاسباتِ این پژوهش از گام زمانی 0.001 ثانیه بر طبق توصیه آی‌تی‌تی‌سی۵۷ [14] که در رابطه‌ی (۱۸) بدان اشاره شده است و تعداد تکرار معادلات داخلیِ ۵ برای حل این مسئله استفاده شده است که از نظر عدد کورانت[۲۷] و میزان خطای محاسباتی، دارای دقت قابل قبولی میباشد.

$$\Delta t = 0.001 \sim 0.0025 \frac{L}{U} \quad (۱۸)$$

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].

$$\Delta t = 0.001\ s \quad (۱۹)$$

$$\Delta x = 0.006\ m \quad (۲۰)$$

$$U = 3.9845 \frac{m}{s} \quad (۲۱)$$

$$C = 3.9845 \times \frac{0.001}{0.006} = 0.664 < 1 \quad (۲۲)$$

۳-۳- استقلال از شبکه

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

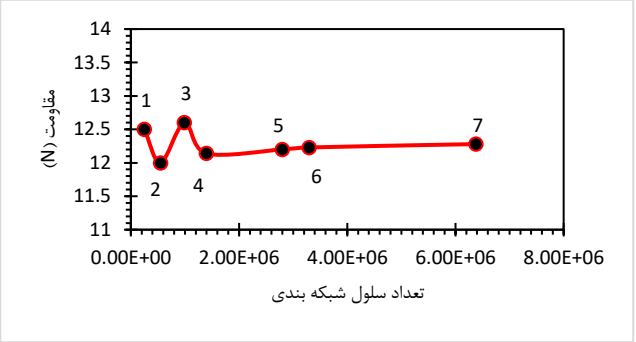
[26] $Y+$

[27] Courant Number

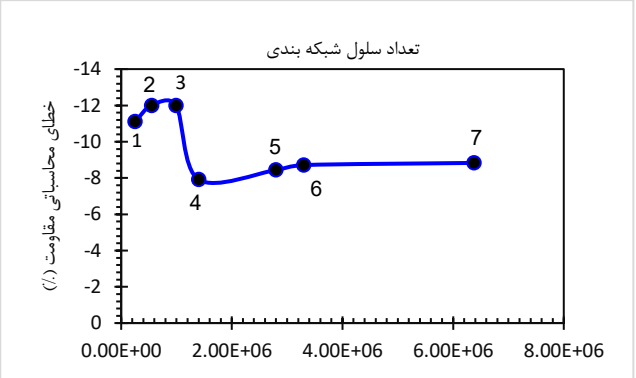
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

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

	مقاومت (نیوتن)	تعداد سلول شبکه بندی
۱	۱۲.۵۰	250000
۲	۱۲.۰۰	550000
۳	۱۲.۶۰	990000
۴	۱۲.۱۴	1400000
۵	۱۲.۲۰	2800000
۶	۱۲.۲۳	3300000
۷	۱۲.۲۸	6380000



شکل ۸ -نمودار مقاومت-تعداد سلو ل شبکه بندی



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

همانطور که در شکل 8 مشخص است، در نقـاط شـماره‌ی ۴ تـا ۷ میزان تغییرات مقاومت با تعداد سلول‌هـای شـبکه بنـدی کـاهش یافته و در یک بازه‌ی نسبتا کوچک میباشد. بنابراین، خطـا نیـز در نقاط ۴ تا ۷ در یک بازه‌ی نسبتا کوچک (شکل 9) می‌باشد و ایـن شبکه‌بندی‌ها برای شبیه سازی مسئله مناسب به نظر می‌رسند.

از آنجا که دقت محاسبات در نقاط ۴ تا ۷ در محـدوده‌ی مناسـبی قرار داشته و همچنین با در نظر گرفتن پارامتر زمان، جهت کاهش زمان محاسبات از شبکه بندی شـماره ۵ بـا تعـداد سـلول‌هـای ۲ میلیون و ۸۰۰ هزار برای شبیه‌سازی این مسئله اسـتفاده گردیـده است.

علاوه بـر روش فـوق، از روش GCI نیـز بـرای بررسـی همگرایـی استفاده شده نتایج در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- مقادیر مربوط به GCI حل

مقاومت در نقاط مختلف شبکه بندی		اختلاف مقاومت در دو نقطه شبکه بندی		پارامتر R
مقاومت در نقطه ۵	۱۲.۲۰	اختلاف میان دو نقطه‌ی ۵ و ۶	۰.۰۳۰	۰.۶
مقاومت در نقطه ۶	۱۲.۲۳	اختلاف میان دو نقطه‌ی ۶ و ۷	۰.۰۵	
مقاومت در نقطه ۷	۱۲.۲۸			

بـر طبـق [21] هنگـامی کـه $0 < R < 1$ پاسـخ‌هـا دارای همگرایی می‌باشند.

۳-۴- اعتبار سنجی

جهت اعتبار سنجی، مدل شناورفریزما به ترتیب در دو شرایط آب آرام و موج منظم در سرعت ۳.۹۸۴۵ متر بر ثانیه شبیه‌سازی‌ها گردید و نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در جدول 5 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 ۸.۴۴ درصد و خطای حرکت پیچ معادل ۱۲.۳۸ درصد می‌باشد. مقدار درصد خطا بصورت رابطه زیر محاسبه شده است:

$$E = \left| \frac{\text{مقدار آزمایشگاهی} - \text{مقدار شبیه سازی}}{\text{مقدار آزمایشگاهی}} \right| \times 100 \quad (۲۳)$$

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 6 نتایج حاصل از شبیه سازی موج‌منظم با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده آن است که خطای مربوط به مقاومت ۰.۶۱ درصد و خطای محاسبات حرکت هیو معادل ۷.۴۳ درصد می‌باشد.

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

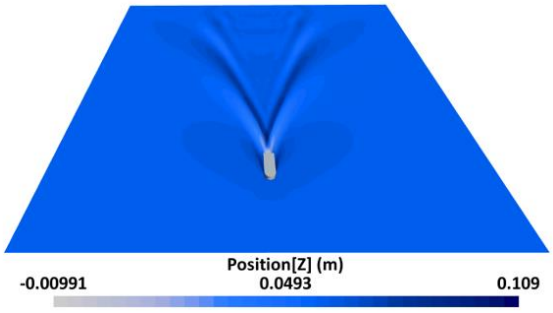
پارامتر	شبیه سازی	آزمایشگاهی	خطا (٪)
مقاومت (نیوتن)	۱۲.۱۱۰	۱۲.۰۳۶	۰.۶۱
پیچ (درجه)	۴.۷۷۰	۴.۹۳۰	۳.۲۵
هیو (متر)	۰.۰۷۹۵	۰.۰۷۴۰	۷.۴۳

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

ایجاد شبکه بندی مناسب در دامنه‌ی حل، مخصوصا شبکه بندی در راستای z ، علاوه بر تاثیر بر دقت حل مسئله، بر روی شبیه‌سازی فازها و سطح آزاد نیز تاثیر ویژه‌ای دارد. در شکل 11 شبیه‌سازی سطح آزاد موج نامنظم ارائه شده است. شکل 11 نشان می‌دهد که شبکه بندی دارای کیفیت قابل قبولی بوده و شبیه‌سازی هریک از فازهای آب و هوا و همچنین نواحی تداخل آن‌ها به خوبی انجام شده است.

۳-۵- شبیه سازی آب آرام

جهت محاسبه تاثیر مرکز ثقل بر روی داده‌های دریامانی در آب آرام، مرکز ثقل شناور در سه موقعیت شامل بدون تغییر، ۱.۵ سانتیمتر عقب‌تر و ۱.۵ سانتیمتر جلوتر از مرکز ثقل اعلام شده آزمایشگاهی، شبیه‌سازی شد و داده‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل 10 سطح آب شبیه سازی شده در آب آرام را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌ها، 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 می‌باشد.



شکل ۱۰ - نمایی از سطح آزاد شبیه‌سازی شده در آب آرام

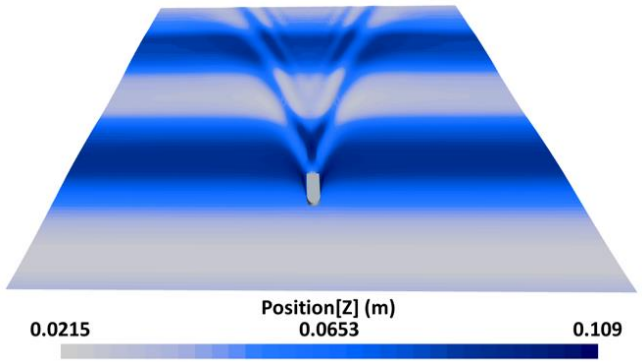
همانطور که در جدول 7 نیز قابل مشاهده است، خطای محاسباتی حاصل از شبیه سازی در آب آرام در فاصله ۱.۵ سانتیمتر عقب تر از مرکز ثقل برای مقاومت و پیچ به ترتیب ۸.۸ درصد و ۲.۵ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه در دسترس نبودن مقدار آزمایشگاهی برای حرکت هیو، مقدار بدست آمده از روش عددی معیار انجام 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 می‌باشد. همچنین انحراف حرکت هیو از داده شبیه‌سازی برای این حالت، ۳۷.۴۷ درصد است. نتایج نشان‌دهنده تاثیر چشمگیر در محاسبات دریامانی با تغییر مرکز ثقل شناور در آب آرام می‌باشد.

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

موقعیت مرکز ثقل(سانتیمتر)	مقاومت شبیه‌سازی(نیوتن)	مقاومت آزمایشگاه(نیوتن)	خطای مقاومت(٪)	پیچ شبیه‌سازی(درجه)	پیچ آزمایشگاه(درجه)	خطای پیچ(٪)	هیو شبیه‌سازی(متر)	هیو شبیه‌سازی(متر)	خطای هیو(٪)
1% L 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
1% L به 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 داده‌های دریامانی در موج منظم نیز، مرکز ثقل شناور در سه موقعیت شامل بدون تغییر، ۱ درصد از طول شناور عقب‌تر و ۱ درصد از طول شناور جلوتر از مرکز ثقل اعلام شده آزمایشگاهی، شبیه‌سازی شد و داده‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل 11 سطح آب شبیه سازی شده در موج منظم را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌ها، حداکثر ارتفاع قله موج تشکیل شده در این شرایط برابر با ۰.۱۰۹ متر و مینیمم قعر موج برابر ۰.۰۲۱۵ نسبت به سطح میانگین آب می‌باشد.



شکل ۱۱ - نمایی از سطح آزاد شبیه‌سازی شده در موج منظم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

همانطور که در جدول 8 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 می‌باشد. 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 ۱درصد 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 می‌باشد.

نتایج نشان‌دهنده تغییر در محاسبات دریامانی با تغییر مرکز ثقل شناور در موج منظم است اما این تغییرات در مقایسه با آب آرام کوچکتر می‌باشد.

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

موقعیت مرکز ثقل(سانتیمتر)	مقاومت شبیه‌سازی(نیوتن)	مقاومت آزمایشگاه(نیوتن)	خطای مقاومت(٪)	پیچ شبیه‌سازی(درجه)	پیچ آزمایشگاه(درجه)	خطای پیچ(٪)	هیو شبیه‌سازی(متر)	هیو آزمایشگاه(متر)	خطای هیو(٪)
۱ % L به جلو	12.76	12.036	6.02	4.33	4.93	12.17	0.075	0.074	1.35
بدون تغییر	12.143	12.036	0.89	4.47	4.93	9.29	0.077	0.074	4.05
۱ % L به عقب	11.7	12.036	2.79	4.62	4.93	6.29	0.078	0.074	5.41

۴- نتیجه گیری

شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی تطابق مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند به نحوی که در حالت بدون تغییر مرکز ثقل شناور در آب آرام، خطای شبیه‌سازی مقاومت شناور برابر ۱۲.۹۸ درصد، خطای حرکت پیچ برابر ۱۴.۱۰ درصد و خطای هیو برابر صفر می‌باشد. بیشترین مقدار خطا در این حالت مربوط به خطای پیچ شناور و کمترین خطا مربوط به 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 می‌باشد 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 ورودی‌های 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 می‌باشد به نحوی که در شبیه سازی در آب آرام:

۱- جابجایی مرکز ثقل شناور به میزان تقریبا 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 می‌گردد که در این حالت مقادیر خطاهای مقاومت، پیچ و هیو شناور نسبت به حالت بدون تغییر در شبیه‌سازی عددی، به ترتیب ۱.۱۵ درصد، ۹.۱۵ درصد و ۳۷.۷۴ درصد افزایش داشته است.

۲- جابجایی مرکز ثقل به میزان تقریبا 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 می‌گردد که در این حالت نسبت به حالت بدون تغییر مرکز ثقل شناور در شبیه‌سازی 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

افزایش، خطای پیچ ۳.۰۰ درصد کاهش و خطای هیو ۱.۳۶ درصد افزایش داشته است.

۳- نتایج فوق نشان‌دهنده تاثیر گذار بودن محل مرکز ثقل طولی بر روی دقت نتاج می‌باشد 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

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

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-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*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

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 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]