

شبیه‌سازی عددی حرکات سه درجه آزادی زیردریایی در امواج

نامنظم جهت تخمین نیروی درگ

صالح امینی^۱، محمود رستمی ورنوسفادرانی^{۲*}، مجتبی دهقان منشادی^۳، حسین نوروزی^۴

دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹؛ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰)

DOR: <https://dorl.net/dor/>

چکیده

در مطالعه حاضر شبیه‌سازی حرکت زیردریایی در نزدیکی سطح آزاد آب در معرض امواج نامنظم انجام شده است. در این مقاله از روش URANS با رویکرد شبکه‌بندی اورست و روش کسر حجمی سیال جهت شبیه‌سازی سطح آزاد آب در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام استفاده شده است. هندسه مورد مطالعه در این شبیه‌سازی زیردریایی هوشمند بدون سرنشین سابوف با ملحقیات است. از آنجاکه آزادی حرکات زیردریایی می‌تواند اثر قابل توجهی بر نتایج نیروی درگ بگذارد، شبیه‌سازی‌ها در حالتی که زیردریایی در سه جهت هیو، پیچ و رول آزاد باشد انجام و نیروی درگ محاسبه شده است. همچنین اثر زوایای برخورد و مشخصات مختلف امواج بر نیروی درگ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دامنه حرکات پیچ ناشی از افزایش ارتفاع موج، نیروی درگ نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این در امواج پشت سر نوسانات نیروی درگ حداقل است و حداکثر مقدار نیروی درگ محاسبه شده در امواج روبرو است. در امواج با ارتفاع مشخصه ۰/۴۳م نیز حداکثر نیروی درگ در امواج روبرو ۴۴۴N و در امواج پهلو ۳۲۲N است.

واژه‌های کلیدی: زیردریایی سابوف، نیروی درگ، امواج نامنظم، سه درجه آزادی.

Numerical simulation of submarine motions in three degrees of freedom in irregular waves for drag force estimation

Saleh Amini¹

Mahmood Rostami
Varnosfaderani

Mojtaba Dehghan
Manshadi³

Hosein Norozi

Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Isfahan, Iran

(Received: 2023/08/21, Revised: 2023/12/08, Accepted: 2023/12/28, Published: 2024/02/19)

ABSTRACT

In this paper, the simulation of submarine motion near the free surface of water exposed to irregular waves has been done. In this article, URANS method with overset grid approach and volume fraction of fluid method have been used to simulate the free surface of water in Star CCM software. The geometry studied in this simulation is the Sobuff submarine model with fully appendages. Since the freedom of motion of the submarine can have a significant effect on the results of the drag force, the simulations are performed in the case that the submarine is free in the three directions of heave, pitch and roll, and the drag force has been calculated. Also, the effect of different encounter angles and characteristics of waves on the drag force has been investigated. The results show that with the increase in the range of pitch motions due to the increase in the height of the wave, the drag force also increases. In addition, in following waves, the fluctuation of the drag force is minimal, and the maximum value of the calculated drag force is in head waves. In waves with a characteristic height of 0.43 meters, the maximum drag force in head waves is 444 N and in beam waves is 322 N. The results show that with the increase in the significant height of the waves, the drag force also increases.

Keywords: Suboff Submarine, drag force, three degrees of freedom, irregular waves.

^۱ - دانشجوی دکتری: salehamini@mut-es.ac.ir

^۲ - استادیار: rostamivf@aut.ac.ir

^۳ - استاد: dehghanmanshadi@gmail.com

^۴ - دکتری: h.nouroozi@aut.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

۱- مقدمه

زیردریایی‌ها معمولاً نسبت به شناورهای سطحی از سرعت-های کمتری برخوردار هستند، اما دارای مزیت اصلی حرکت در زیر سطح هستند. تحقیقات انجام شده در زمینه زیرسطحی‌های بدون سرنشین در کشورهای صنعتی جهان در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. یکی از مؤلفه‌هایی که در مشخص نمودن محدوده عملیاتی شناور اهمیت بسزایی دارد پاسخ حرکات شناور به امواج است. امواج ناشی از باد باعث افزایش ضریب درگ و تغییر در حرکات شناور می‌شوند. حرکات شناور و رفتار دریا مانی برای حفظ پایداری و افزایش کارایی شناور اهمیت بسیار زیادی دارد. از همین جهت تحقیق در خصوص دامنه پاسخ حرکات و رفتار زیردریایی در حضور امواج حائز اهمیت است.

در سال‌های اخیر، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به دلیل پیشرفت کامپیوترها و بالا بودن هزینه‌های آزمایشگاهی کاربرد زیادی داشته است. راندنی و همکاران [۱] شبیه‌سازی‌های عددی را برای به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی AUV^۵ زیردریایی بدون سرنشین هوشمند ارائه کردند. تیان و همکاران [۲] شبیه‌سازی‌های عددی و یک الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی طرح ناوگان زیردریایی بدون سرنشین برای به حداقل رساندن درگ استفاده کردند. در مطالعات عددی فوق زیردریایی بدون در نظر گرفتن اثرات سطح آزاد و گرانش و در حالت تک فازی شبیه‌سازی شده است. برخی از محققان از روش‌های تجربی یا عددی برای مطالعه تأثیر سطح آزاد بر عملکرد هیدرودینامیکی زیردریایی بدون سرنشین استفاده کرده‌اند. سالاری و روا [۳] با استفاده از روش URANS به مطالعه ضرایب هیدرودینامیکی در اعماق مختلف با مدل-های آشفتگی متفاوت پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد ضرایب هیدرودینامیکی هیو و پیچ در نزدیکی سطح آزاد آب بیشتر می‌شوند. کی دونگ و همکاران [۴] شبیه‌سازی زیردریایی در نزدیک سطح آزاد تحت امواج با قله بلند را با استفاده از روش URANS انجام داده‌ند و تأثیر عمق و امواج نامنظم بر رفتار هیدرودینامیکی زیردریایی را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد با نزدیک شدن به سطح آزاد مقاومت

L/D	-	نسبت طول به قطر
W	N	نیروی وزن
B	N	نیروی بویان سی
I	Kgm ²	ممان اینرسی
m	kg	جرم بدنه
ρ	kg/m ³	چگالی
μ	kg/m.s	لزجت دینامیکی
T	s	دوره تناوب موج
T _e	s	دوره تناوب برخورد
ω	1/s	فرکانس موج
Z	m	حرکت هیو
ϕ	rad	رول
θ	rad	پیچ
S _{ζ} (ω_e)	m ² /s	طیف امواج
F	N	نیروی حجمی
$D^* = \frac{h}{D}$	-	عمق بی بعد
T _{cutt off}	s	کوتاه‌ترین دوره تناوب
τ	pa	تنش برشی
T _{Ph}	s	زمان فیزیکی
N	-	تعداد موج

⁵ Autonomous underwater vehicles

دریامانی شناور را بررسی کردند. در این مطالعات از روش حجم محدود جهت گسسته سازی معادلات، الگوریتم سیمپل جهت کوپل معادلات سرعت و فشار در نرم افزار استار سی سی ام^۷ و ماژول DFBI^۸ جهت ایجاد قابلیت آزادی حرکت شناور استفاده شده است.

در مطالعات قبلی اثر سطح آزاد بر عملکرد هیدرودینامیکی زیردریایی بدون سرنشین عمدتاً بدون در نظر گرفتن موج نامنظم که غالب شرایط دریا را شامل می شود، لحاظ شده است. با توجه به تأثیر مشخصات سطح آزاد بر عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای سطحی یا زیرسطحی، مطالعه رفتار هیدرودینامیکی در حضور امواج نامنظم حائز اهمیت است. نتایج محققین تأثیر سطح آزاد را بر رفتار هیدرودینامیکی زیردریایی تأیید می کند. در حضور اثر سطح تغییر نیروها و ممان های وارد بر زیردریایی می تواند حرکات شش درجه آزادی زیردریایی را تحت تأثیر قرار دهد. از طرفی در حضور امواج حرکات شش درجه آزادی زیردریایی تحت تأثیر قرار می گیرند که در این بین حرکات دریامانی شامل هیو^۹، رول^{۱۰} و پیچ^{۱۱} اهمیت بیشتری دارند. در مطالعات قبلی تمرکز محققین بیشتر بر روی محاسبه نیروها و ممان ها بدون در نظر گرفتن آزادی حرکات بوده است. حال آنکه آزادی حرکت زیردریایی می تواند بر محاسبه نیروی درگ شناور اثرگذار باشد. حرکات هیو زیردریایی فاصله زیردریایی از سطح آزاد را تغییر می دهد که به واسطه این تغییر عمق می تواند بر رفتار هیدرودینامیکی زیردریایی و نیروی درگ اثر بگذارد. تغییر در زوایای حرکت پیچ و رول نیز مستقیماً بر الگوی جریان سیال اطراف بدنه تأثیر گذاشته و می تواند باعث تغییر مقدار نیروی درگ شود. به همین جهت برای محاسبه نیروی درگ در این مقاله تأثیر حرکات یاد شده بر محاسبه نیروی درگ بررسی شده است. از طرفی با توجه به تأثیر زوایای برخورد بر الگوی جریان، اثرات زاویه برخورد موج در محاسبه نیروی درگ نیز بررسی خواهد شد؛ بنابراین در مقاله حاضر محاسبه نیروی درگ تحت اثر امواج نامنظم با در نظر گرفتن حرکات هیو، پیچ و رول زیردریایی انجام می شود. شبیه سازی در امواج با

لیفت و ممان ها افزایش می یابد. تیان و همکاران [۵] به صورت عددی یک زیردریایی بدون سرنشین هوشمند بدون ملحقات را در نزدیکی سطح آزاد با امواج منظم و هندسه ثابت شبیه سازی نمودند. کاریکو و همکاران [۶] به بررسی پاسخ زیردریایی جوبرت خودران در نزدیک سطح آزاد با استفاده از روش اورست^۶ دینامیکی با پروانه و سطوح کنترل پرداختند. مطالعه آنها در حالتی که زیردریایی ثابت فرض شده بود انجام شد. امیری و همکاران [۷] چگونگی اثر گذاری سطح آزاد را بر حرکات مقید زیردریایی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعات از مکانیسم حرکت صفحه ای جهت انجام شبیه سازی استفاده شده است. سونگیون و همکاران [۸] به بررسی پایداری زیردریایی در نزدیکی سطح پرداختند و تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی را در حضور اثر سطح بررسی نمودند. ژاویلینگ و همکاران [۹] اثر سطح آزاد و بستر دریا را بر عملکرد هیدرودینامیکی زیردریایی مقایسه نمودند. نعمت اللهی و همکاران [۱۰] خصوصیات هیدرودینامیکی یک مدل زیردریایی بدون سرنشین هوشمند و برهمکنش آن با سطح آزاد را با استفاده از نرم افزار انسیس به صورت عددی بررسی کردند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش چشمگیر مقادیر نیروهای درگ، لیفت و ممان پیچ وارد بر بدنه با تغییر عمق و نزدیک شدن به سطح آزاد است. شریعتی و موسوی زادگان [۱۱] تأثیر ملحقات را بر ویژگی های هیدرودینامیکی زیردریایی سابوف در نزدیکی سطح آزاد مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها متمرکز بر الگوی موج و مقدار نیروی مقاومت بوده است. در این مطالعات اکثراً زیردریایی بدون آزادی حرکت شبیه سازی شده است. بررسی رفتار دریامانی شناورها و دامنه حرکات آنها تحت اثر امواج سطحی دارای اهمیت است و از اینرو در سال های اخیر مطالعات بسیاری در این حوزه صورت گرفته است.

ژبالونگ و همکاران [۱۲] عملکرد دریامانی کشتی را در امواج متقاطع مورد بررسی قرار دادند و دامنه حرکات هیو و پیچ را محاسبه نمودند. دایجونگ کیم و همکاران [۱۳] قابلیت مدل غیرخطی URANS برای شبیه سازی قابلیت های حفظ مسیر و چرخش شناور با خرابی سیستم رانش در امواج را مورد ارزیابی قرار دادند. سونگ ژینگ و همکاران [۱۴] اثر امواج تک جهته و دو جهته را بر عملکرد

⁷ Star ccm+

⁸ Dynamic free body interaction

⁹ Heave

¹⁰ Roll

¹¹ Pitch

⁶ Overset mesh

جدول (۱) مشخصات هندسه سابوف

Principal particulars of SUBOFF	Bare hull	Fully appendage
	$\lambda = 2.8$ scale	$\lambda = 1$ scale
ρ (kg/m ³)	۹۹۷/۵۶۱	۹۹۷/۵۶۱
m (kg)	۳۱/۳۱	۵۲۵
∇ (m ³)	۰/۰۳۱۳۸	۰/۵۲۶۲
A (m ²)	۰/۷۵۷۱	۶/۳۳۴۳
Overall Length (mm)	۱/۵۵۱	۴/۳۵۶
Diameter (m)	۰/۱۸۱	۰/۵۰۸
Bow Part Length (m)	۰/۳۲۴	۱/۰۱۶
Stern Part Length (m)	۰/۸۶۱	۱/۱۱۱
Parallel Part Length (m)	۰/۳۶۶	۲/۲۲۹

اعتبارسنجی

جهت انجام اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با تحقیقات آزمایشگاهی هافندن و همکاران [۱۷] (که مورد استفاده دیگر محققین [۷، ۹، ۱۱] جهت معتبرسازی نتایج بوده است) مقایسه شده است. اعتبارسنجی در عمق ثابت و اعداد فرود مختلف مطابق با جدول ۲ انجام شده است.

جدول (۲) تنظیمات شبیه‌سازی در اعتبارسنجی

Froude numbers	Velocity (m/s)	D* (h/d)	ρ (kg/m ³)
۰/۱۳	۰/۵	۱/۳	۹۹۷،۵۶۱
۰/۲۸	۱/۰۷۷		
۰/۳۶	۱/۳۸۴		
۰/۶۴	۲/۴۶۳		

در این حالت از شبیه‌سازی شرط مرزی ورودی، پایین و بالا و کنار سرعت ورودی، شرط مرزی خروجی فشار خروجی، شرط مرزی کنار تقارن و روش کسر حجمی سیال [۱۸] جهت شبیه‌سازی فصل مشترک دو سیال انتخاب شده است. همچنین با هدف کاهش زمان محاسبات باتوجه به تقارن هندسه و فیزیک جریان، نیمی از جسم شبیه‌سازی و از شرط مرزی تقارن در نیمه بریده شده زیرسطحی استفاده شده است.

ضریب درگ زیردریایی در حالت‌های مختلف به‌دست‌آمده در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی مطابقت خوبی با نتایج تجربی هافندن [۱۷] و شریعتی [۱۱] دارد.

مشخصات متفاوت انجام خواهد شد. مجموع حالات شبیه‌سازی هشت حالت خواهد بود.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات بقای جرم و ممتموم هستند که عبارت‌اند از:

$$\frac{\rho \partial}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (۱)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (۲)$$

تانسور تنش τ_{ij} به صورت زیر است:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (۳)$$

ترم دوم در سمت راست تأثیرپذیری ناشی از انبساط حجمی است.

همچنین ضریب درگ به‌دست‌آمده در مطالعات یاد شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C_T = \frac{R}{\frac{1}{2} \rho L^2 V^2} \quad (۴)$$

۳- شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی

در این بخش پس از معرفی هندسه، مطالب مربوط به اعتبارسنجی، تنظیمات حل عددی و استقلال از شبکه، دامنه و گام زمانی و عدم قطعیت بیان می‌شود.

هندسه

هندسه مورد استفاده در این مطالعه زیرسطحی بدون سرنشین سابوف است [۱۵، ۱۶]. شکل ۱ هندسه سابوف با ملحقات و بدون ملحقات را نشان می‌دهد.

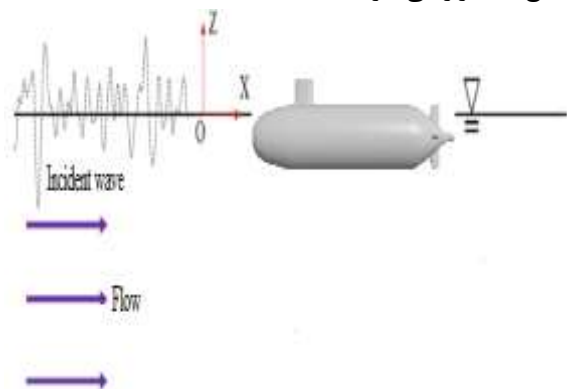


شکل (۱) هندسه سابوف با ملحقات و بدون ملحقات

لازم به ذکر است جهت انجام اعتبارسنجی از مدل بدون ملحقات با طول ۱/۵۵۱m و در ادامه جهت انجام شبیه‌سازی از مدل با طول ۴/۳۵۶m با ملحقات کامل استفاده شده است. مشخصات هندسی مدل در جدول ۱ آمده است. مرکز بویانسی در $x_{cb} = 0.4621 L$ است.

حالت های مختلف شبیه سازی

شبیه سازی ها در امواج نامنظم با ارتفاع مشخصه و پریود پیک متفاوت، زوایای مختلف برخورد موج با بدنه انجام خواهد شد. شکل ۴ نحوه قرارگیری زیردریایی را در شبیه سازی نمایش می دهد. زیردریایی با آبخور مشخص در سطح آب قرار می گیرد.



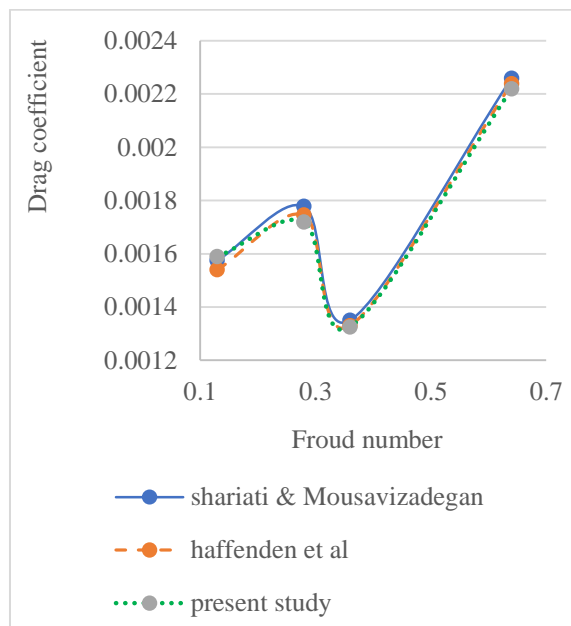
شکل (۴) نحوه قرارگیری زیردریایی در شبیه سازی

شبیه سازی ها در زوایای برخورد مختلف موج انجام شده است. زاویه برخورد موج از روبرو^{۱۲} برابر با ۱۸۰ درجه، موج از پشت سر^{۱۳} برابر با صفر درجه و امواج از پهلو^{۱۴} برابر ۹۰ درجه است.

در تمامی حالات شبیه سازی، امواج از نوع نامنظم تولید خواهد شد. برای تولید موج نامنظم از طیف موج جانسواپ استفاده شده است [۱۹]. در امواج نامنظم نسبت پریود پیک موج به ارتفاع مشخصه موج به صورت زیر پیشنهاد می شود تا با اعمال محدودیت در شیب موج از وقوع پدیده شکست موج دوری شود. همچنین در تمامی امواج تولید شده این نسبت ثابت در نظر گرفته شده است.

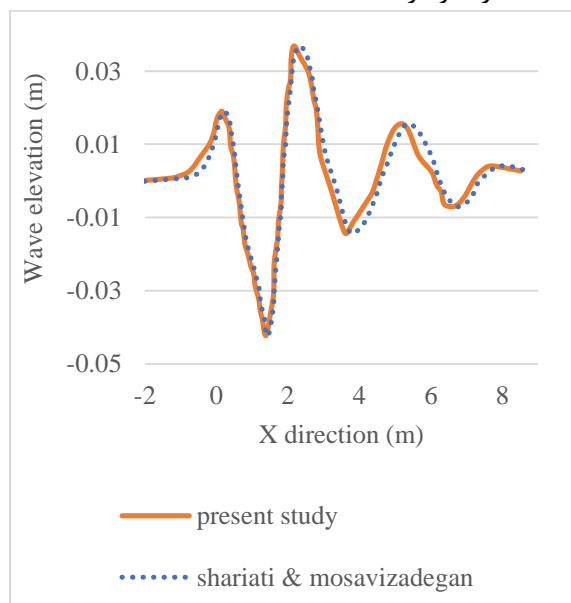
$$3.6 < \frac{\text{Peak Wave Period}}{\sqrt{\text{Significant Wave Height}}} < 5$$

سرعت و عدد فرود در تمامی حالات شبیه سازی یکسان خواهد بود. نهایتاً مشخصات حالات مختلف شبیه سازی در جدول ۳ خلاصه می شود. ارتفاع سطح آزاد آب از خط مرکزی زیردریایی ۰/۱۲۷m در نظر گرفته شده است.



شکل (۲) ضرایب درگ زیردریایی بر حسب عدد فرود، نتایج عددی مقاله حاضر در مقایسه با نتایج هافندن و همکاران [۱۷] و شریعتی و موسوی زادگان [۱۱]

علاوه بر این شکل موج ایجاد شده تحت تأثیر حرکت زیردریایی در نزدیکی سطح آب و مقایسه با نتایج شریعتی و همکاران [۱۱] انجام و در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این حالت از شبیه سازی عدد فرود برابر با ۰.۵۵ و عمق بی بعد ۱.۳ در نظر گرفته شده است.



شکل (۳) ارتفاع سطح آزاد آب بر حسب موقعیت مکانی در دامنه، مقایسه نتایج عددی مقاله حاضر با نتایج شریعتی و موسوی زادگان [۱۱]

¹² Head sea

¹³ Following sea

¹⁴ Beam sea

تنظیمات حل عددی

جدول (۳) حالت‌های مختلف شبیه‌سازی

حالت شبیه‌سازی	زوایای برخورد موج با بدنه θ	تعداد درجات آزادی	ارتفاع مشخصه موج H_s (m)	پریود پیک T_p (s)	فرکانس زاویه‌ای پیک ω_p (rad/s)	سرعت v (m/s)	عدد فرود F_r
۱	۱۸۰	۰	۰/۴۶۵	۲/۴۵۵	۲/۵۵۷۸	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶
۲	۱۸۰	۳	۰/۴۳	۲/۳۶۱	۲/۶۶	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶
۳	۹۰	۳	۰/۴۳	۲/۳۶۱	۲/۶۶	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶
۴	۱۸۰	۳	۰/۴۶۵	۲/۴۵۵	۲/۵۵۷۸	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶
۵	۹۰	۳	۰/۴۶۵	۲/۴۵۵	۲/۵۵۷۸	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶
۶	۰	۳	۰/۴۶۵	۲/۴۵۵	۲/۵۵۷۸	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶
۷	۱۸۰	۳	۰/۵	۲/۵۵	۲/۴۶۲۳	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶
۸	۹۰	۳	۰/۵	۲/۵۵	۲/۴۶۲۳	۲/۰۵۷	۰/۳۱۴۶

منطقه دمپینگ^{۱۷} موج جهت جلوگیری از برگشت موج در نظر گرفته می‌شود که به طول دامنه اضافه خواهد شد. این مقدار برای هر حالت از شبیه‌سازی متفاوت و برابر با یک طول موج خواهد بود [۹، ۱۱].

استقلال از شبکه و گام زمانی

در جریان‌های گذرا علاوه بر شبکه توجه به گام زمانی اهمیت دارد. (ITTC (2011) توصیه می‌کند که حداقل ۱۰۰ مرحله زمانی در هر دوره برخورد باید برای شبیه‌سازی موج معمولی استفاده شود. همچنین برای موج نامنظم وجود حداقل ۶۰ مرحله زمانی در کوتاهترین دوره برخورد (که تقریباً نصف پریود پیک است) پیشنهاد شده است [۱۵]:

$$\Delta T = \frac{T_e}{100} \quad \text{for regular waves}$$

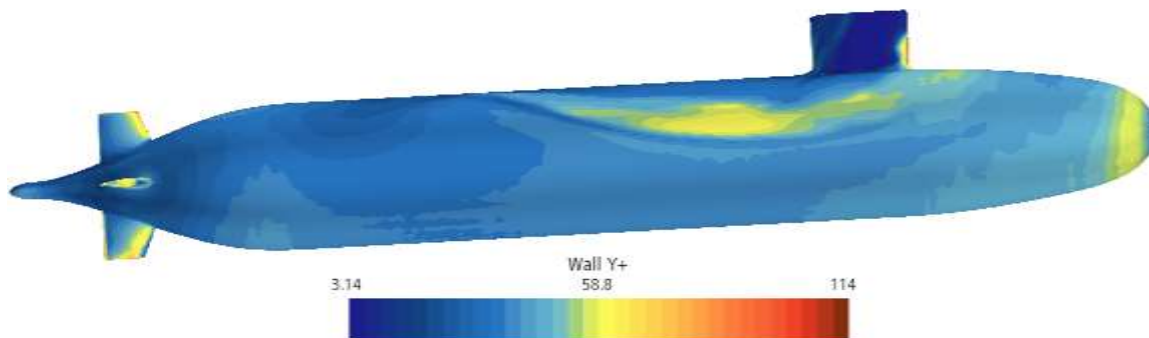
$$\Delta T = \frac{T_{\text{cutt off}}}{60} \quad \text{for irregular waves}$$

همچنین در خصوص تولید شبکه محاسباتی در مبحث امواج ITTC پیشنهاد نموده است که در هر ارتفاع موج حداقل ۱۰ سلول و در هر طول موج حداقل ۴۰ سلول و در امواج نامنظم برای کوتاه‌ترین طول موج حداقل ۲۰ سلول وجود داشته باشد [۲۲]. در راهنمای نرم‌افزار استار سی سی ام نیز پیشنهاد شده است به ازای هر طول موج ۸۰ تا ۱۶۰ سلول و به ازای هر ارتفاع موج ۱۶ تا ۳۲ سلول جهت شبکه‌بندی سطح آزاد انتخاب شود [۲۳].

در مقاله حاضر جهت انجام شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار تجاری استار سی سی ام و روش [۲۰] URANS استفاده شده است. شبکه‌بندی اورست و ماژول DFBI^{۱۵} برای ایجاد قابلیت حرکت شناور استفاده خواهد شد.

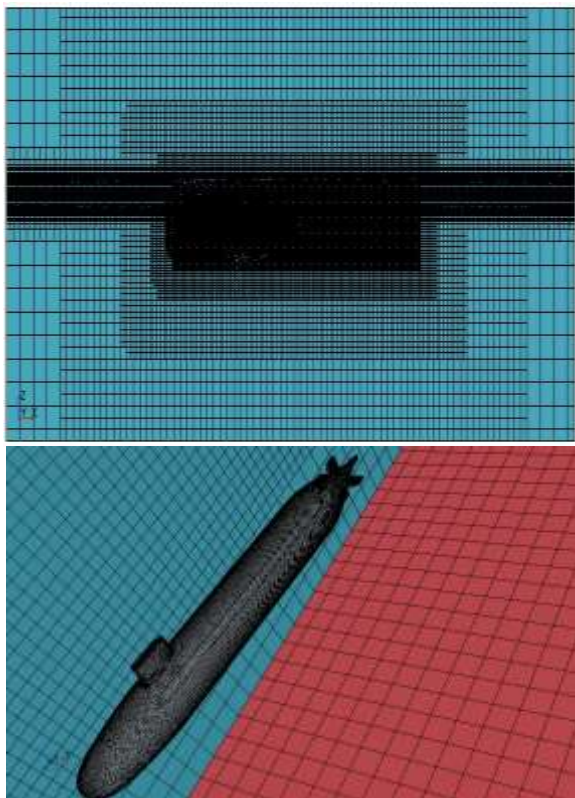
یکی از عوامل موثر بر نوع شبکه، مدل آشفتگی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی است. برای شبیه‌سازی عددی جریان‌های دوفازی دارای خطوط منحنی معمولاً از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ تحقق‌پذیر^{۱۶} استفاده می‌شود. مدل آشفتگی $k - \epsilon$ تحقق‌پذیر سازش خوبی بین هزینه محاسباتی و دقت فراهم می‌کند. در این مطالعه از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ تحقق‌پذیر استفاده شده است [۵، ۱۰، ۱۲، ۲۱]. با توجه به نوع مدل توربولانسی انتخاب شده مقادیر اولین سلول شبکه تعیین می‌شود. برای مدل توربولانسی انتخابی مقدار بی بعد وای پلاس باید بین سی تا صد باشد. در شکل ۵ مقادیر وای پلاس در محدوده یاد شده نشان دهنده دقت شبکه‌بندی در مرزهای دیواره استدر این مطالعه از دو دامنه متفاوت برای شبیه‌سازی امواج از پهلو و امواج از روبرو استفاده شده است. شکل ۶ دامنه محاسباتی را نشان می‌دهد. با توجه به عدم تقارن در فیزیک جریان و محاسبه همزمان دامنه حرکات هیو، پیچ و رول امکان مدل‌سازی نیمی از هندسه با هدف کاهش زمان محاسبات وجود نخواهد داشت. همچنین در قسمت انتهایی دامنه،

¹⁵ Dynamic free body interaction¹⁶ Realizable



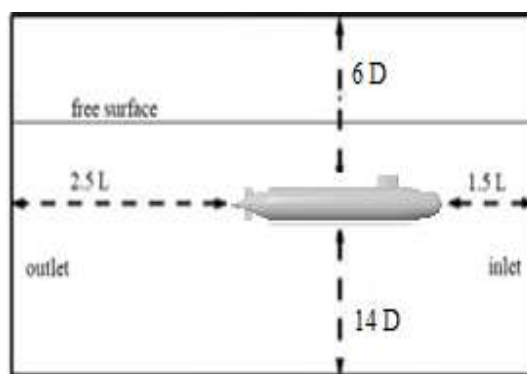
شکل (۵) مقدار وای پلاس روی بدنه در مدل توربولانسی $k - \epsilon$ Realizable

توسط نرم افزار استار سی سی ام شبکه ای از نوع شبکه با سازمان و غیریکنواخت در دامنه محاسباتی تولید شده است. شکل ۷ نحوه شبکه بندی را نشان می دهد. به دلیل وجود گرادیان های شدید سرعت در نزدیکی هندسه تراکم نودهای شبکه با یک نسبت رشد کوچک به نزدیکی دیواره بدنه منتقل شده است. همچنین تراکم شبکه در فصل مشترک دو سیال بیشتر است.

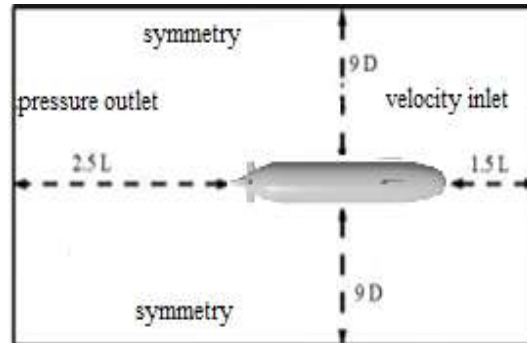


شکل (۷) شبکه بندی

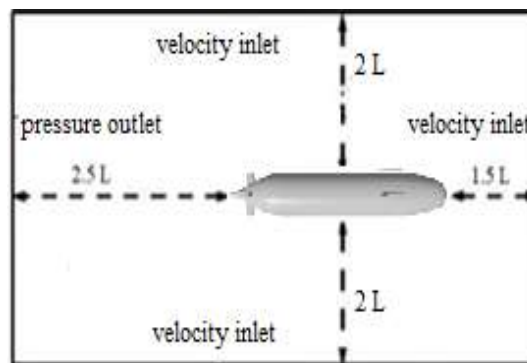
همچنین یک طرح شبکه اورست برای تسهیل حرکت کشتی در امواج استفاده می شود [۲۴]. شکل ۸ نحوه حرکت



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۶) دامنه محاسباتی (الف) نمای روبرو، (ب) نمای بالا در شبیه سازی امواج با زاویه ۱۸۰ و صفر، (پ) نمای از بالا در شبیه سازی امواج پهلو

که در آن \emptyset مقدار به دست آمده شبیه سازی در هر کدام از شبکه بندی ها است. برای بررسی عدم قطعیت بایستی حداقل سه شبکه بندی در نظر گرفته شود و در هر کدام از شبکه بندی ها با تنظیمات یکسان حل عددی انجام شود. پس گذشت زمان مناسب از حل عددی با استفاده از نتایج به دست آمده از هر شبکه مقدار R_G محاسبه می شود. با توجه به رابطه فوق چهار حالت امکان پذیر است [۲۵]. حالت های مختلف همگرایی در جدول ۵ خلاصه شده است.

در حالت های سوم و چهارم امکان بررسی عدم قطعیت وجود ندارد و تنها در حالت های اول و دوم می توان عدم قطعیت را بررسی نمود. در حالت های سوم و چهارم امکان بررسی عدم قطعیت وجود ندارد و شبکه محاسباتی مناسب نیست.

جدول (۵) محدوده همگرایی

حالت	R_G	نتیجه
۱	$0 < R_G < 1$	همگرایی یکنواخت
۲	$-1 < R_G < 0$	همگرایی نوسانی
۳	$R_G > 1$	واگرایی یکنواخت
۴	$R_G < -1$	واگرایی نوسانی

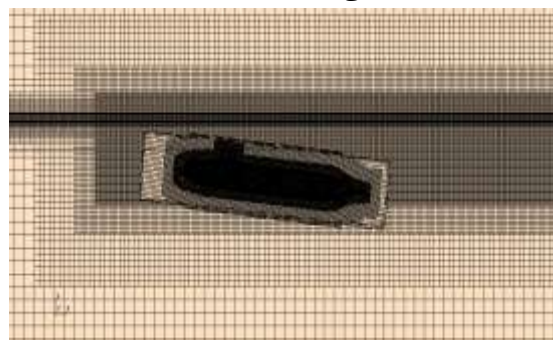
شاخص همگرایی در جدول ۶ برای حرکات هیو، پیچ و رول خلاصه شده است. مقادیر R_G نشان می دهد نیروی هیو در محدوده مجانبی همگرایی است. در حالی که حرکت پیچ دارای رفتار همگرایی نوسانی است.

جدول (۶) محاسبه نسبت همگرایی شبکه

R_G	شبکه			پارامتر مدنظر (درجه)
	III	II	I	
هیو	۰/۱۱۶۷۵	۰/۱۱۶۶۰۳	۰/۱۱۵۰۰۳	۰/۰۹۳۴
پیچ	۴/۴۸۹۰۱	۴/۴۰۳۳۶	۴/۶۱۸۲	-۰/۳۹۸۶۶
رول	۰/۱۱۸۵۱۴۹	۰/۱۱۸۴۱۳	۰/۱۱۷۶۶۱۰	۰/۱۳۵۵

شاخص همگرایی شبکه^{۱۸} نشان دهنده فاصله بین نتیجه حل و مقدار دقیق است که در حالت دوم از رابطه (۵) محاسبه می شود.

بلوک اورست به همراه بدنه با حفظ کیفیت شبکه در حین شبیه سازی را نشان می دهد.



شکل (۸) حرکت بلوک اورست در پس زمینه

استقلال از شبکه و گام زمانی

مطالعه استقلال از شبکه در شبیه سازی حالت هشت انجام شده است. در این راستا، تلاش شده است تا با استفاده از یک ضریب اصلاح ثابت برابر با ۱،۲، شبکه در تمام جهات ابعادی به صورت یکنواخت اصلاح شود [۷]. استفاده از این ضریب امکان انجام یک مطالعه سیستماتیک را فراهم می کند. با این حال، به دلیل استفاده از یک شبکه غیر یکنواخت، نسبت تعداد سلول ها بین دو شبکه متوالی با ضریب اصلاح مذکور متناسب نیست. جدول ۴ بررسی استقلال از شبکه را برای سه شبکه متفاوت نمایش داده است. در هر شبکه مقادیر مربوط به دامنه حرکات هیو، پیچ و رول مقایسه شده است.

جدول (۴) نتایج استقلال از شبکه

شبکه	گام زمانی (s)	ضریب اصلاح شبکه	تعداد سلول (میلیون)	رول (Degree)	هیو (m)	پیچ (Degree)
I	0.02	۱/۲	۳/۲۸۱	۰/۱۷۶۶	۰/۱۱۵۰	۴/۶۱۸۲
II	0.02 / 1.2 ²	۱/۲	۵/۴۵۳	۰/۱۸۴۱	۰/۱۱۶۶	۴/۴۰۳۳
III	0.02 / 1.2 ⁴	۱/۲	۸/۷۵۹	۰/۱۸۵۱	۰/۱۱۶۷	۴/۴۸۹۰

بررسی عدم قطعیت

برآورد عدم قطعیت مرتبط با گسسته سازی های مکانی و زمانی مستلزم محاسبه نسبت همگرایی (R_G) نتایج حل است که از رابطه (۴) محاسبه می شود.

$$R_G = \frac{\varepsilon_{G32}}{\varepsilon_{G21}} \quad (۴)$$

$$\varepsilon_{G21} = \emptyset_{II} - \emptyset_I$$

$$\varepsilon_{G32} = \emptyset_{III} - \emptyset_{II}$$

$$r_{23} = \frac{h_{II}}{h_{III}}$$

کریستوفر [۲۷] پیشنهاد می کند مقدار نسبت اصلاح شبکه بندی بزرگتر از ۱,۳ بوده و حتی در شبکه های بدون ساختار نیز دارای ساختار منظمی باشند. پس از محاسبه ضریب اصلاح بین شبکه ها، مرتبه گسسته سازی برای هر دو رویکرد به صورت زیر برآورد می شود:

$$P_G = \frac{1}{\ln r_{23}} \left[\ln \left(\frac{1}{R_G} \right) + \ln \left(\frac{r_{23}^{P_G} - 1}{r_{12}^{P_G} - 1} \right) \right] \quad (10)$$

باید توجه داشت که مقدار تئوری مرتبه گسسته سازی ۲ است. انحراف از مقدار تئوری را می توان با عوامل متعددی از جمله غیر خطی بودن مسئله، مدل سازی آشفتگی و کیفیت شبکه مرتبط دانست. در صورت همگرایی فوق العاده مرتبه گسسته سازی، یعنی $P_G > 2$ ، همانطور که توسط اکا و هوکسترا [۲۸] پیشنهاد شده است، برای محاسبه مقدار GCI ، مقدار P_G با مقدار تئوری آن ۲ جایگزین می شود. بر اساس نتایج اکا و هوکسترا [۲۸]، همگرایی بالای مشاهده شده P_G قابل اعتماد نیست و نتیجه غیر خطی بودن مسئله، مدل سازی آشفتگی و کیفیت شبکه است. علاوه بر این، هر دو روش از معادله زیر برای پیش بینی عدم قطعیت شبکه استفاده می کنند:

$$e_{21} = \left| \frac{\theta_{II} - \theta_I}{\theta_I} \right| \times \%100 \quad (11)$$

$$GCI_{23} = F_S \left| \frac{e_{23}}{(r_{23}^{P_G} - 1)} \right| \quad (12)$$

که در آن F_S یک عامل ایمنی است و توصیه می شود برای مطالعات همگرایی مقدار ۱,۲۵ به آن اختصاص داده شود. از آنجاکه مقدار e بر حسب درصد به دست می آید، مقدار GCI نیز بر حسب درصد محاسبه خواهد شد. مقدار GCI نشان دهنده فاصله بین نتیجه حل و مقدار دقیق است. بنابراین، مقدار کوچک GCI نشان می دهد که راه حل به مقدار دقیق نزدیک است. باید توجه داشت که در محاسبه GCI هنگامی که روش پیشنهاد شده توسط روچ استفاده می شود، r_{23} با R_G جایگزین می شود.

جداول ۸ مقادیر P_G و GCI مرتبط با نتایج شبکه دوم را نشان می دهد. در این شبیه سازی چون ضریب اصلاح ثابت فرض شده است، مقدار P_G محاسبه شده از هر دو روش یکسان است. بنابراین مقادیر محاسبه شده برای GCI نیز

$$GCI = \frac{1}{2} |\theta_U - \theta_L| * 100\% \quad (5)$$

که در آن θ_L و θ_U حداکثر و حداقل نتایج حاصل از مطالعه همگرایی مربوطه هستند. هرچه مقدار شاخص همگرایی شبکه کمتر باشد، پاسخ به دست آمده به حل دقیق نزدیکتر و خطای محاسباتی کمتر است. عدم قطعیت حرکت پیچ باتوجه به نوسانی بودن همگرایی آن با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می شود. جدول ۷ مقادیر مربوط به شاخص همگرایی شبکه را برای حرکت پیچ نشان می دهد. مقدار شاخص همگرایی شبکه به دست آمده برای حرکت پیچ کمتر از سه درصد و قابل قبول می باشد.

جدول (۷) شاخص همگرایی شبکه برای حرکت پیچ با همگرایی نوسانی

پارامتر مدنظر	θ_U (degree)	θ_L (degree)	GCI%
پیچ	۴/۴۶۱۸۲	۴/۴۰۳۳۶	۲/۹۲۳

در حالت یک که در آن همگرایی یکنواخت شبکه وجود دارد و پاسخها در محدوده مجانبی قرار دارند، دو رویکرد مختلف برای محاسبه عدم قطعیت شبکه به کار گرفته می شود. در رویکرد اول که توسط روچ [۲۶] پیشنهاد شده است، ضریب اصلاح بین شبکه ها به عنوان یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده و با رابطه (۶) تعریف می شود:

$$r_G = \frac{\Delta x_{GI}}{\Delta x_{GII}} = \frac{\Delta x_{GII}}{\Delta x_{GIII}} \quad (6)$$

که در آن Δx_G اندازه سلول هر کدام از شبکه ها است. سپس مرتبه گسسته سازی با رابطه (۷) محاسبه می شود:

$$P_G = \frac{\ln \left(\frac{1}{R_G} \right)}{\ln r_G} \quad (7)$$

اما در رویکرد دوم که مبتنی بر رویه پیشنهادی مک هیل و فریدمن [۲۷] است، ضریب اصلاح بین شبکه ها متغیر در نظر گرفته شده و در هر مرحله اصلاح جداگانه محاسبه می شود. در این رابطه ابتدا h_i با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می شود.

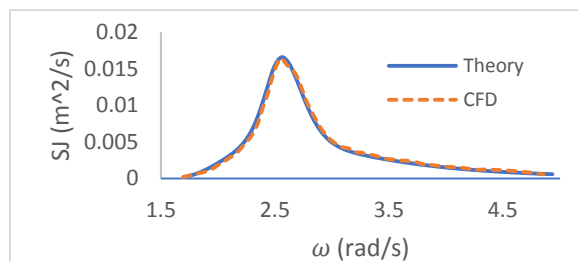
$$h_i = [(\Delta x_{\max})(\Delta y_{\max})(\Delta z_{\max})]^{1/3} \quad (8)$$

$$h_i = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \Delta V_i}{N} \right)^{1/3}$$

سپس ضریب اصلاح بین شبکه های I تا II و II تا III با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می شود:

$$r_{12} = \frac{h_I}{h_{II}} \quad (9)$$

در شکل ۹ نتایج طیف موج تئوری و شبیه‌سازی مقایسه شده است که نشان دهنده مطابقت طیف موج تولید شده با مقادیر تئوری است.



شکل (۹) طیف انرژی موج بر حسب فرکانس زاویه‌ای در حالت تئوری و شبیه‌سازی عددی

زمان شبیه‌سازی در موج نامنظم بر اساس تعداد موج و متوسط پیروید موج مطابق با رابطه زیر تعیین می‌شود؛ بنابراین زمان محاسبات در محدوده ۱۰۰s در نظر گرفته شده است.

$$T_{ph} \cong N \times \bar{T} \quad (16)$$

۴- نتایج و بحث

شبیه‌سازی‌ها در سطح آزاد آب باهدف بررسی اثرات آزادی حرکت بر نیروی درگ زیردریایی انجام شده است. به همین دلیل در ابتدا نیروی درگ زیردریایی بدون در نظر گرفتن آزادی حرکات هیو، پیچ و رول محاسبه شده است. سپس مقادیر درگ در حالت مشابه و با در نظر گرفتن درجات آزادی هیو، پیچ و رول محاسبه شد. همچنین اثر تغییر زاویه برخورد و مشخصات موج مورد بررسی قرار گرفته است. صد ثانیه شبیه‌سازی عددی با سیستم ۱۲ هسته‌ای ۳٫۵ گیگاهرتز و رم ۳۲ گیگابایتی نزدیک به ۳۲۰ ساعت برای امواج از روبرو و پشت سر و نزدیک به ۴۵۰ ساعت برای امواج از پهلو زمان نیاز دارد. شکل ۱۰ سطح آزاد آب در شبیه‌سازی حالت یک (جدول ۵) و نمایه کسر حجمی آب^{۲۰} را در اطراف سطح بدنه در شبیه‌سازی حالت چهار (جدول ۵) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، کسر حجمی آب برای منعکس کردن وضعیت سلول محاسباتی استفاده می‌شود. مقدار ۰/۵ به این معنی است

در هر دو رویکرد روج و مک هیل و فریدمن یکسان است. باتوجه به اینکه در شبیه‌سازی انجام شده مقدار محاسبه شده $P_G > 2$ بود، مقدار تئوری آن $P_G = 2$ در محاسبه GCI جایگزین شده است.

در نهایت، باتوجه به تغییر ناچیز در نتایج بین شبکه‌های II تا III ، و باتوجه به خطای بالاتر در نتایج بین شبکه‌های I تا II ، تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده در مطالعه حاضر با استفاده از شبکه II انجام شده است. تعداد سلول در این شبکه بندی حدوداً ۵٫۵ میلیون برای شبیه‌سازی امواج از روبرو و حدود ۷ میلیون برای امواج از پهلو است.

جدول (۸) عدم قطعیت و مرتبه گسسته‌سازی برای حرکات هیو و رول

پارامتر مدنظر		مقادیر
رول	هیو	
۴/۲۵۷۹	۱/۳۹۱۲	$e_{II-I} \%$
۰/۵۵۳۴۱	۰/۱۲۶	$e_{III-II} \%$
۳/۸۹۳۵	۶/۵۰۲۴	P_G
۱۲/۰۹۶۵	۳/۹۵۲۴	$GCI_{GRoache} \% S_{II-I}$
۱/۵۷۲۱	۰/۳۵۸۱	$GCI_{GRoache} \% S_{III-II}$

موج نامنظم

در شبیه‌سازی انجام شده جهت تولید موج نامنظم از طیف موج جانسواپ^{۱۹} [۱۹] استفاده شده است. فرمول بندی زیر جهت محاسبه انرژی طیف موج جانسواپ استفاده می‌شود. با جایگذاری مشخصات موج انتخاب شده برای انجام شبیه‌سازی در فرمول بندی زیر نهایتاً انرژی طیف موج تئوری محاسبه می‌شود.

$$S_f(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \quad (13)$$

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} (H_s^2 \omega_p^4) \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right)$$

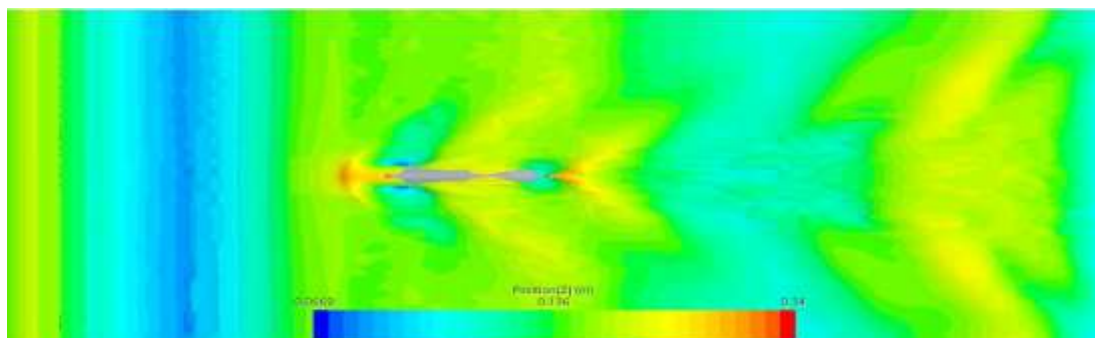
$$A_\gamma = 1 - 0.287 \ln(\gamma) \quad (14)$$

$$\gamma = 3.3$$

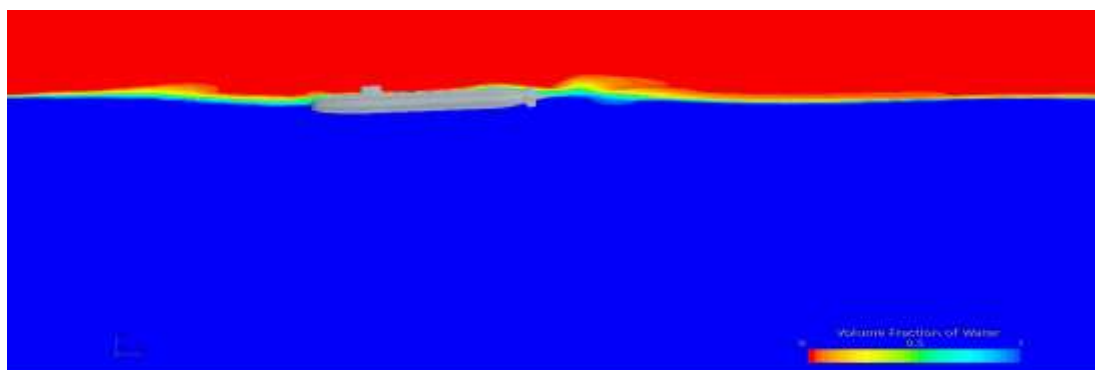
$$\begin{cases} \omega \leq \frac{2\pi}{T_p} = \omega_p \rightarrow \sigma_a = 0.07 \\ \omega > \frac{2\pi}{T_p} = \omega_p \rightarrow \sigma_b = 0.09 \end{cases} \quad (15)$$

موج ۱۸۰ درجه است. حداکثر دامنه حرکت پیچ ۵/۳۵- درجه و حداکثر دامنه حرکت رول ۰,۸۱ درجه است. زاویه برخورد امواج از روبرو موجب افزایش دامنه حرکت پیچ نسبت به حرکت رول می شود. دامنه نوسانات حرکت هیو بین ۰/۱۵m تا -۰/۲۵m است.

که یک سلول محاسباتی با ۵۰٪ آب و ۵۰٪ هوا پر شده است که نشان دهنده سطح آزاد است. مقدار ۰ و ۱ نشان دهنده یک سلول محاسباتی است که به ترتیب به صورت کامل با هوا و یا آب پر شده است. شکل ۱۱ مقادیر دامنه حرکات هیو، پیچ و رول را در شبیه سازی حالت دو نشان می دهد. در این حالت از شبیه سازی ارتفاع مشخصه موج ۰/۴۳m و زاویه برخورد

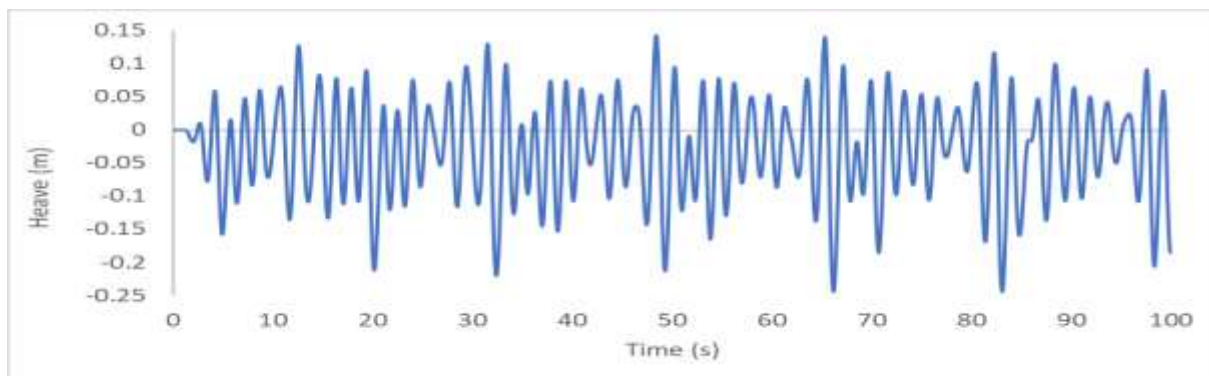


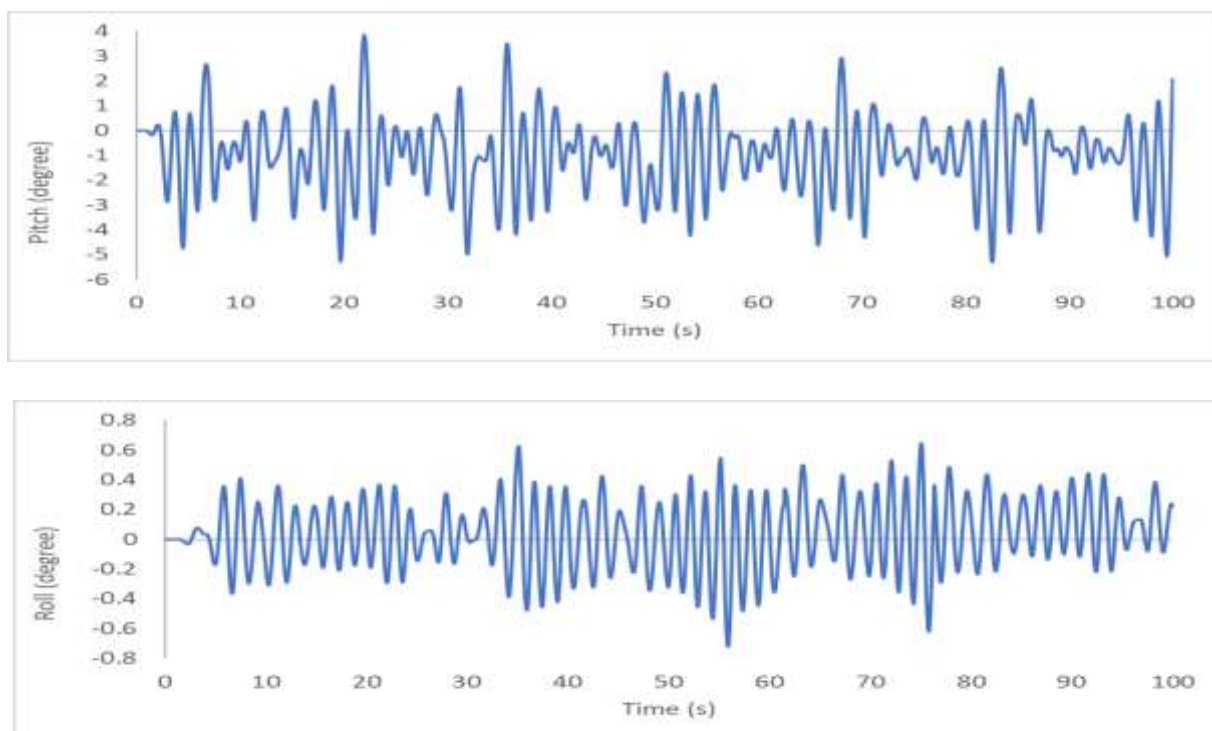
(الف)



(ب)

شکل (۱۰) (الف) سطح آزاد آب شبیه سازی حالت یک زمان ۳۵S (ب) کسر حجمی آب در شبیه سازی حالت چهار زمان ۳۵S

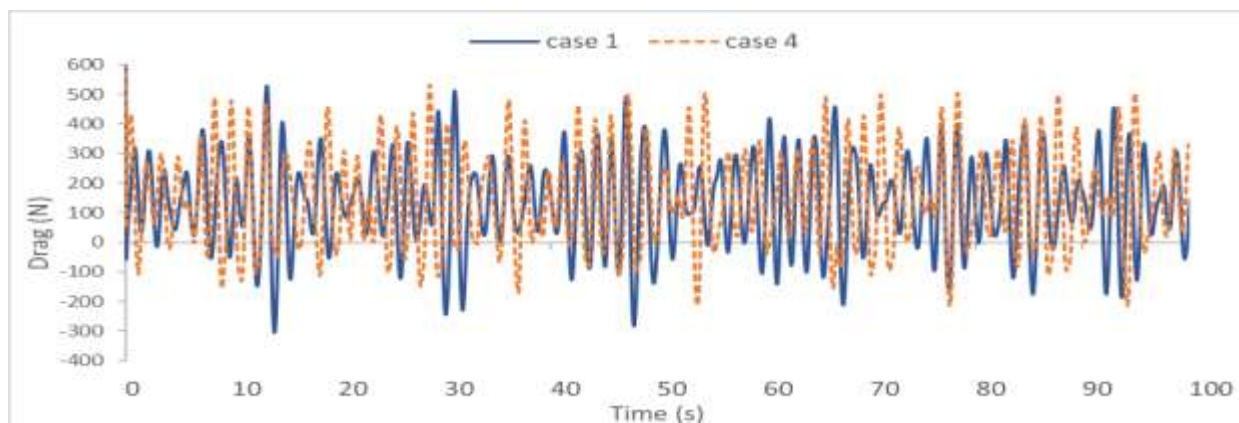




شکل (۱۱) دامنه حرکات هیو، پیچ و رول بر حسب زمان در شبیه‌سازی حالت دو (جدول ۶) در مرکز جرم شناور

شود. در این بین تأثیر زاویه پیچ زیردریایی به دلیل تغییر زاویه حمله جریان بیشتر است. از طرفی تغییر ارتفاع از سطح آزاد آب به واسطه نوسانات حرکت هیو می‌تواند در رفتار هیدرودینامیکی زیردریایی تأثیرگذار باشد. کاهش فاصله از سطح آزاد به واسطه تغییر حرکت هیو، اثر سطح را افزایش می‌دهد و افزایش فاصله از سطح موجب کاهش اثر سطح خواهد شد. کاهش فاصله از سطح افزایش درگ موجسازی را در پی خواهد داشت.

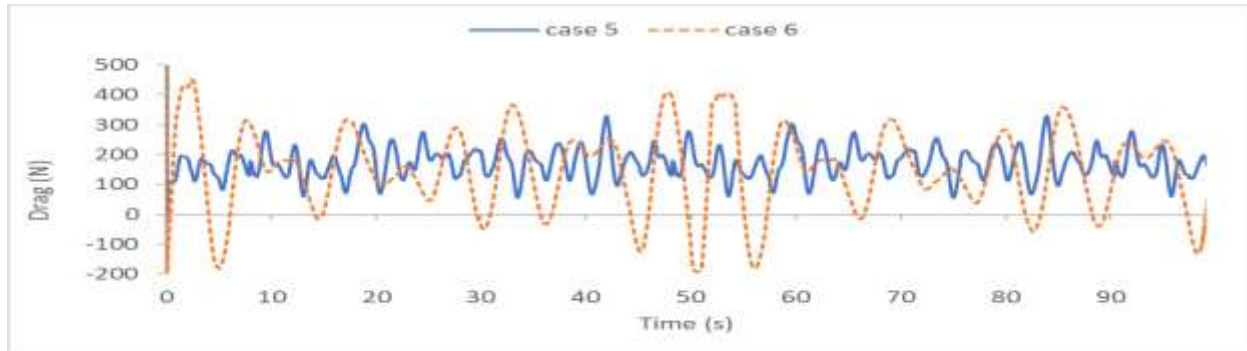
شکل ۱۲ مقدار نیروی درگ محاسبه شده زیردریایی سابوف را در امواج از روبرو با ارتفاع مشخصه $0.465m$ در دو حالت شبیه‌سازی حالت یک (بدون حرکات هیو، پیچ و رول) و شبیه‌سازی حالت چهار (با آزادی حرکات هیو، پیچ و رول) مقایسه می‌کند. همانگونه که در شکل مشخص است در شبیه‌سازی حالت ۴ نیروی درگ افزایش 7.89% درصدی دارد. با توجه به تغییر زاویه پیچ و رول در حالتی که آزادی حرکت وجود دارد، الگوی جریان در اطراف زیردریایی تغییر کرده و موجب افزایش درگ شکلی و نهایتاً درگ کل می-



شکل (۱۲) نیروی درگ بر حسب زمان در شبیه‌سازی حالت یک (بدون آزادی حرکت) و شبیه‌سازی حالت چهار (با آزادی حرکات هیو، پیچ و رول) در موج با ارتفاع مشخصه $0.465m$

نسبت به حرکت رول دارد. به همین دلیل مقدار نیروی درگ در امواج از پشت سر نسبت به امواج از پهلو بیشتر است. همچنین فرکانس نوسانات نیروی درگ در امواج از پشت سر کمتر از امواج از پهلو است.

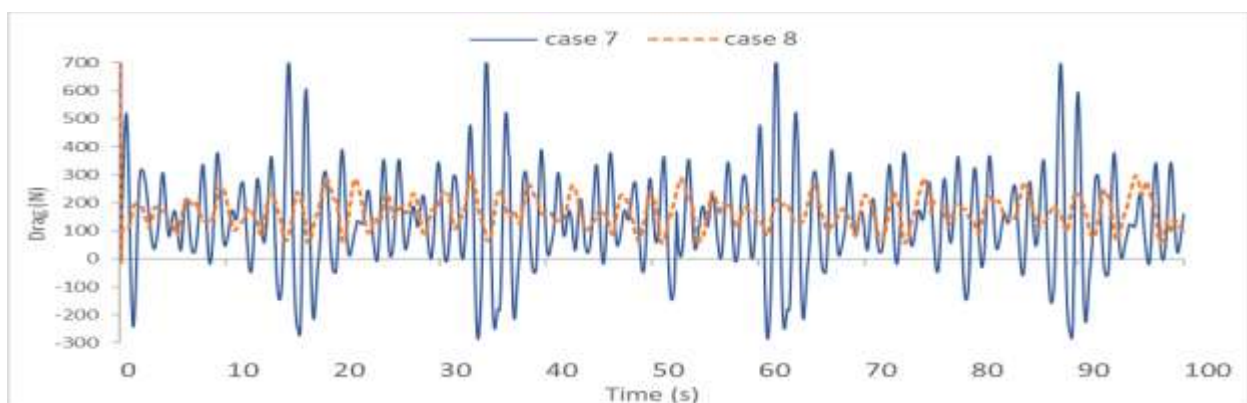
شکل ۱۳ مقدار نیروی درگ را در امواج از پهلو (شبیه سازی حالت پنج) و امواج از پشت سر (شبیه سازی حالت شش) با ارتفاع مشخصه $0.465m$ مقایسه می کند. در امواج از پهلو دامنه حرکات رول افزایش بیشتری نسبت به حرکت پیچ و در امواج از پشت سر دامنه حرکت پیچ افزایش بیشتری



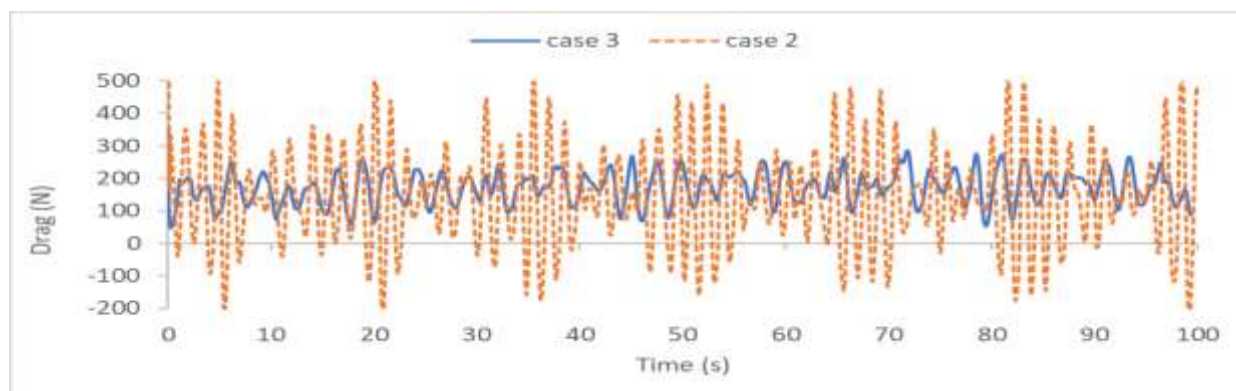
شکل (۱۳) نیروی درگ بر حسب زمان در زاویه موج صفر درجه (شبیه سازی حالت شش) و 90° درجه (شبیه سازی حالت پنج) با ارتفاع مشخصه موج $0.465m$

شکل ۱۵ مقدار نیروی درگ را در امواج از روبرو (شبیه سازی حالت دو) و امواج از پهلو (شبیه سازی حالت سه) با ارتفاع مشخصه $0.43m$ مقایسه می کند. نتایج نشان می دهد مقدار و فرکانس نوسانات نیروی درگ در امواج با زاویه 180° درجه نسبت به امواج از پهلو بیشتر است. مقایسه نتایج ارائه شده در اشکال (۱۹-۲۲) افزایش نیروی درگ با ارتفاع مشخصه امواج را نشان می دهد.

شکل ۱۴ مقدار نیروی درگ را در امواج از روبرو (شبیه سازی حالت هفت) و امواج از پهلو (شبیه سازی حالت هشت) با ارتفاع مشخصه $0.5m$ مقایسه می کند. نتایج نشان می دهد نیروی درگ در امواج با زاویه 180° درجه نسبت به امواج از پهلو بیشتر است که می تواند به دلیل دامنه بیشتر حرکات پیچ در امواج از روبرو نسبت به امواج از پهلو باشد. همچنین فرکانس نوسانات نیروی درگ در امواج از پهلو کمتر از امواج از روبرو است.



شکل (۱۴) نیروی درگ بر حسب زمان در زاویه موج 180° درجه (شبیه سازی حالت هفت) و 90° درجه (شبیه سازی حالت هشت) با ارتفاع مشخصه $0.5m$



شکل ۱۵) نیروی درگ بر حسب زمان در موج ۱۸۰ درجه (شبیه‌سازی حالت دو) و ۹۰ درجه (شبیه‌سازی حالت سه) با ارتفاع مشخصه ۰/۴۳m

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نیروی درگ زیردریایی در حضور امواج نامنظم و در نظر گرفتن درجات آزادی هیو، پیچ و رول محاسبه شده است. نرم‌افزار تجاری استار سی‌سی‌ام جهت انجام شبیه‌سازی استفاده شده است. استفاده از شبکه‌بندی اورست قابلیت حرکت بدنه در شبکه را فراهم نموده است. هندسه مورد استفاده سابوف با ملحقات است. اثرات زوایای برخورد مختلف و مشخصات متفاوت موج بر نیروی مقاومت مورد بررسی قرار گرفته است. مجموع تعداد حالات شبیه‌سازی هشت مورد می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد آزادی حرکات هیو، پیچ و رول بر نیروی درگ تأثیر قابل توجهی دارند. مقدار افزایش نیروی درگ در امواج از روبرو بیشتر از دیگر زوایا خواهد بود که می‌تواند به واسطه افزایش دامنه حرکات پیچ باشد که در امواج از روبرو بیشتر از امواج از پهلو است. همچنین افزایش ارتفاع مشخصه امواج موجب افزایش نیروی درگ خواهد شد [۱۶].

۶- مراجع

1. Dong, K., et al., *CFD research on the hydrodynamic performance of submarine sailing near the free surface with long-crested waves*. Journal of Marine Science and Engineering, 2022. **10**(1): p. 90.
2. Tian, W., B. Song, and H. Ding, *Numerical research on the influence of surface waves on the hydrodynamic performance of an AUV*. Ocean Engineering, 2019. **183**: p. 40-56.
3. Carrica, P.M., Y. Kim, and J.E. Martin, *Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water and waves*. Ocean Engineering, 2019. **183**: p. 87-105.
4. Amiri, M.M., et al., *How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine?* Applied ocean research, 2018. **76**: p. 34-50.
5. Kim, S.P., *CFD as a seakeeping tool for ship design*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2011. **3**(1): p. 65-71.
6. Ling, X., et al., *Comparisons between seabed and free surface effects on underwater vehicle hydrodynamics*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2022: p. 100482.
7. Nematollahi, A., A. Dadvand, and M. Dawoodian, *An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study*. Ocean Engineering, 2015. **96**: p. 205-214.
8. Shariati, S.K. and S.H. Mousavizadegan, *The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface*. Applied Ocean Research, 2017. **67**: p. 31-43.
9. Z., Leong, , *Numerical investigation of the hydrodynamic interaction between two underwater bodies in relative motion*. Applied Ocean Research, 2015. **51**: p. 14-24.
10. Tian, W., et al., *Layout optimization of two autonomous underwater vehicles for drag reduction with a combined CFD and neural network method*. Complexity, 2017. **2017**.
11. Salari, M. and A. Rava, *Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity*.

23. CD-adapco, *User Guide STAR-CCM+ Version 15.02*. 2020.
24. Tezdogan, T., A. Incecik, and O. Turan, *Full-scale unsteady RANS simulations of vertical ship motions in shallow water*. Ocean Engineering, 2016. **123**: p. 131-145.
25. Stern, F., R. Wilson, and J. Shao, *Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes*. International journal for numerical methods in fluids, 2006. **50**(11): p. 1335-1355.
26. Roache, P.J., *Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics*. Annual review of fluid Mechanics, 1997. **29**(1): p. 123-160.
27. Engineers, A.S.o.M., *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer: An American National Standard*. 2009: American Society of Mechanical Engineers.
28. Eça, L. and M. Hoekstra, *Evaluation of numerical error estimation based on grid refinement studies with the method of the manufactured solutions*. Computers & Fluids, 2009. **38**(8): p. 1580-1591.
12. Jiao, J. and S. Huang, *CFD simulation of ship seakeeping performance and slamming loads in bi-directional cross wave*. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. **8**(5): p. 312.
13. Kim, D., et al., *Nonlinear URANS model for evaluating course keeping and turning capabilities of a vessel with propulsion system failure in waves*. International journal of naval architecture and ocean engineering, 2022. **14**: p. 100425.
14. Huang, S., J. Jiao, and C. Chen, *CFD prediction of ship seakeeping behavior in bi-directional cross wave compared with in uni-directional regular wave*. Applied Ocean Research, 2021. **107**: p. 102426.
15. Groves, N.C., T.T. Huang, and M.S. Chang, *Geometric characteristics of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF models (DTRC model numbers 5470 and 5471)*. David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept, 1989.
16. Farajollahi, A.h., *Experimental Investigation of the Effects of Arrangement of Vortex Generators on Behavior of a Vortical Flow around an Axisymmetric Body*. Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal, 2019. **8**(1): p. 55-65 (in persian).
17. Wilson-Haffenden, S., et al., *An investigation into the wave making resistance of a submarine travelling below the free surface*. Australian Maritime College, Launceston, 2009.
18. Pasandidehfard, M.-., M. Saberinia, and M. Izadfar, *Analysis of Submerged 2D Hydrofoils with Finite Depth*. Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal, 2020. **8**(2): p. 1-17 (in persian).
19. Hou, X.-R. and Z.-J. Zou, *Parameter identification of nonlinear roll motion equation for floating structures in irregular waves*. Applied Ocean Research, 2016. **55**: p. 66-75.
20. Dashtimanesh, A., R. Mallahzade, and H. Hatami Rashkvastaei, *Performance Computation of Planing Trimaran Tunneled Boat Using Numerical Simulation*, in in *The 4th National Speed Boats Conference* 1395 (in persian).
21. S. Veysi, H. Ghassemi, and M. Bakhtiari, *Investigation of Wave Pattern Around a Stepped Planning Hull*, in *The 4th National Speed Boats Conference* 1394 (in persian).
22. ITTC. *Fresh Water and Seawater Properties*. in *In Proceedings of the 26th International Towing Tank Conference*. 28 August–3 September 2011. Rio De Janeiro, Brazil.

