

بررسی حرکات شناور هیدروفویلی در امواج منظم و نامنظم

حسن کریمی باصری^۱، جلیل فریدونی^۲، محمد مونسان^{۳*}، مهدی عجمی^۴^۱ کارشناسی ارشد مهندسی معماری دریایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک،
(hassankarimibaseri@gmail.com)^۲ استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، (j.fereidooni@gmail.com)^۳ استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، (m.moonesun@gmail.com)^۴ استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، (Mahdi.adjami@gmail.com)

چکیده

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۲

کلمات کلیدی:

تحلیل دریامانی

شناور هیدروفویلی

شناور سرشی

امواج منظم و نامنظم

در این مقاله مهمترین شاخص شناورهای هیدروفویلی یعنی دریامانی آنها در معرض امواج منظم و نامنظم تحت زوایای مختلف برخورد موج با شناور مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار STAR CCM+ انجام شده است. حرکات سرج، هیو، رول و پیچ همزمان آزاد نگه داشته شده اند و تاثیرات آنها بر روی یکدیگر لحاظ شده است. جهت صحت سنجی شبیه سازی انجام شده از مدل USV01 که نتایج تست آزمایشگاهی آن وجود دارد استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش و تغییر در مؤلفه های موج منظم و سرعت شناور، باعث ایجاد تغییرات کمتری در حرکات شناور هیدروفویلی نسبت به شناور سرشی می شود بجز در مواجهه امواج پاشنه با شناور که در این حالت شناور سرشی در مجموع عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. بنابراین باید گفت خطرناک ترین حالت برای شناور هیدروفویلی زوایای برخورد کمتر از ۹۰ درجه علی الخصوص زاویه برخورد صفر درجه یعنی امواج پاشنه است.

Analysis of Dynamics of hydrofoil craft in regular and irregular waves

Hassan Karimi Baseri¹, Jalil Fereidooni², Mohammad Moonesun^{3*}, Mehdi Adjami⁴¹ MSC in Naval Architecture, Malek Ashtar University of Technology; hassankarimibaseri@gmail.com² Department of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, j.fereidooni@gmail.com³ Faculty of Civil engineering, Shahrood University of Technology; m.moonesun@gmail.com⁴ Faculty of Civil engineering, Shahrood University of Technology; Mahdi.adjami@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 06 Jan 2023

Accepted: 01 Apr 2023

Keywords:

Seakeeping Analysis

Hydrofoil Craft

Planing Craft

Regular and Irregular Waves

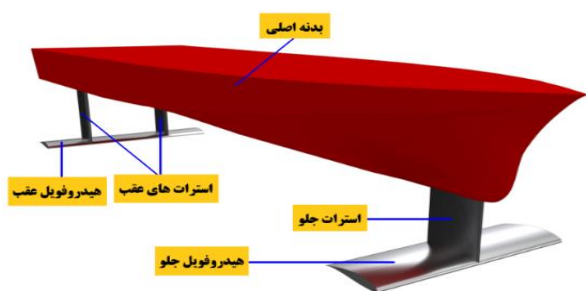
ABSTRACT

In this article, the most important specifications of hydrofoil floats, i.e. their seakeeping under regular and irregular waves under different encounter angles of wave, has been investigated. Numerical simulation has been done using STAR CCM+ software. Surge, heave, roll and pitch motions are kept free at the same time and their effects on each other are taken into account. USV01 model, whose laboratory test results are available, was used to validate the simulation. The results show that the increase and change in the regular wave components and speed of the craft, cause less changes in the movements of the hydrofoil craft compared to the planing craft, except in the following sea, where planing craft performs better overall. Therefore, it should be said that the most dangerous situation for a hydrofoil craft is encounter angles less than 90 degrees, especially zero-degree encounter angle, i.e. following sea.

۱- مقدمه

امروزه در کشور ما تعداد زیادی از شناورهای تک بدنه و دو بدنه نظامی و تجاری وجود دارند که بخش عمده‌ی از آنها در فورس دریایی بالا (بالتر از ۳) دچار حرکات شدیدی شده و عملاً غیرقابل استفاده هستند. یک نقطه ضعف عمده در شناورهای تک بدنه، خواص دریامانی ضعیف و شدت زیاد حرکات در امواج می‌باشد بخصوص برای دریای عمان. این معضل بطور حادثتری گریبانگیر قایق‌های تندرو نیز می‌باشد که در فورس‌های دریایی متوسط و بالا دچار حرکات شدید شده و عملاً کارایی عملیاتی خود را از دست می‌دهند. همچنین ناوچه‌ها و کشتی‌های بزرگتر نیز در دریای عمان با این مشکل در برخی فصول سال مواجه هستند. این موضوع وقتی حادثتر می‌شود که شناورهای مورد نظر در محدوده اقیانوسی (دریای عمان) بخواهند حرکت کنند این مسأله برای شناورهای نظامی از اهمیت دو چندانی برخوردار است چراکه هیچگاه شناورهای نظامی در شرایط جنگی نباید صحنه نبرد را به خاطر موج شدن یا امواج بودن دریا ترک کنند.

شناورهای هیدروفویلی دارای دو یا چند بال با مقطع فویل (که بدان هیدروفویل گویند) در زیر بدنه هستند که به کمک این بالها، شناور از سطح آب جدا شده و می‌تواند با سرعت بالایی حرکت کند (شکل ۱). نیروی برآی تولید شده توسط هیدروفویل‌ها با سرعت شناور متناسب بوده و به توان دو آن افزایش خواهد داشت. با افزایش سرعت شناور، نیروی برآی نیز افزایش خواهد یافت و این افزایش به حدی خواهد بود که بدنه شناور از سطح آب جدا می‌شود که منجر به کاهش سطح خیس شناور و در نتیجه کاهش مقاومت می‌شود بنابراین شناور می‌تواند به سرعت‌های بالا برسد. در این زمان با توجه به جدا شدن بدنه از سطح آب، نیروی مقاوم یکباره کاهش خواهد یافت. پس از بلند شدن بدنه از سطح آب بایستی نیروی برآی ثابت باقی بماند [1]. ولی باید توجه داشت که فلسفه اصلی طراحی هیدروفویل در زیر بدنه صرفاً رسیدن به سرعت‌های بالا نیست (چراکه این مزیت را با انواع دیگر شناورها نیز می‌توان بدست آورد) بلکه علت عمده، خواص دریامانی خوب این شناورها در حالت بلند شدن بدنه از سطح آب است. در این حالت، حجم بویانسی اصلی بدنه از سطح آب فاصله می‌گیرد و فقط فویل‌هایی کوچک در داخل آب باقی می‌مانند بطوریکه در معرض امواج، تغییرات بویانسی بسیار ناچیزی اتفاق می‌افتد که قابل صرف نظر است و شناور دارای حرکات بسیار آرام و پایدار خواهد بود. در نتیجه، این شناورها سه مزیت عمده را توأم باهم خواهند داشت: 1) رسیدن به سرعت بالا در آب آرام 2) حفظ این سرعت بالا در دریای امواج 3) نوسانات و تلاطم بسیار کم در معرض امواج بزرگ دریا.

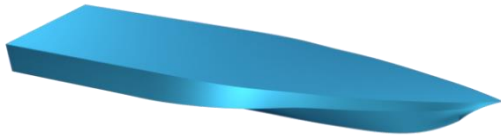


شکل ۱: مشخصات ظاهری شناور هیدروفویلی (کاملاً مغروق)

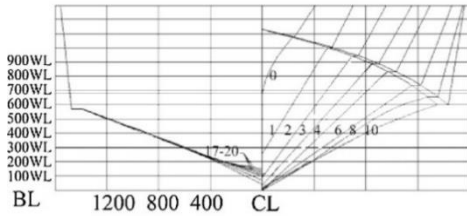
دو نوع سیستم هیدروفویلی که امروزه بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند سیستم هیدروفویلی شکافنده سطح و سیستم هیدروفویلی کاملاً مغروق می‌باشد که از آنها برای پیکر بندی شناورهای هیدروفویلی استفاده می‌شود. با تغییر عمق غوطه‌وری هیدروفویل‌های شکافنده سطح، مساحت سطح خیس آنها افزایش و کاهش می‌یابد و به طور خودکار تثبیت ارتفاع را فراهم می‌کنند. همچنین به دلیل V شکل بودن، می‌توانند ثبات جانبی خود را داشته باشند. اما هیدروفویل‌های کاملاً مغروق نمی‌توانند به تنهایی پایداری هیدرودینامیکی کافی داشته باشند. با این حال، کنترل و تثبیت پیکر بندی هیدروفویل‌های کاملاً مغروق با استفاده از یک سیستم کنترل «مصنوعی» مناسب امکان‌پذیر است. کنترل از راه دور (مکانیکی، الکتریکی، و غیره) انجام می‌شود که زوایای حمله هیدروفویل‌ها را تغییر می‌دهد. بنابراین باید توجه داشت که حفظ پایداری هیدرودینامیکی در هیدروفویل‌های کاملاً مغروق دشوار است.

شناور دارای هیدروفویل کاملاً مغروق نیروی مقاوم بالاتری در منحنی هامپ و سرعت برخاستن کمتری نسبت به شناور دارای هیدروفویل شکافنده سطح دارد. این نیروی پسای اضافی که برای هیدروفویل‌های کاملاً مغروق به وجود می‌آید به علت نیاز آنها به تولید نیروی بالابرنده لازم برای رسیدن به سرعت بالابرنده طراحی شده است که از طریق تغییر زاویه حمله (افزایش آن) به وجود می‌آید و در نتیجه نیروی پسای بیشتری بطور همزمان تولید می‌نماید [2].

در زمینه شناورهای هیدروفویلی و تحلیل حرکات آنها در معرض امواج مطالعات نسبتاً خوبی در خارج از کشور انجام گرفته است ولی متأسفانه در داخل کشور در این زمینه دانش اندکی موجود است. با بررسی برخی مقالات انجام شده در این زمینه، این مطلب دریافت شد که تا به امروز تحقیقات صورت گرفته بدین گونه بوده است که عمدتاً خواص دریامانی یک شناور تندرو مانند شناور سرشی یا کاتاماران نسبت به زمانی که یک تک فویل در سینه شناور نصب شده باشد، بررسی و مقایسه شده است [3-5]. بعلاوه اینکه فقط برخورد موج از رو به رو مورد بررسی قرار گرفته است و پاسخ شناور به دیگر زوایای برخورد موج از جمله موج از بغل (موج



شکل ۲: شناور USV01 طراحی شده در نرم افزار Rhino



شکل ۳: خطوط بدنه شناور USV01 [3]

جدول ۱: مشخصات شناور USV01 [3]

طول سراسری (متر)	2.75	زاویه تریم اولیه (درجه)	0
عرض (متر)	0.87	مرکز ثقل طولی (متر)	1.048
عمق قالب‌بندی شده (متر)	0.325	اینرسی چرخشی (کیلوگرم بر متر مربع)	58.6
جابجایی (کیلوگرم)	125.4	زاویه خیز کف (درجه)	18
آبخور (متر)	0.132	ارتفاع عمودی مرکز ثقل (متر) *	0.1334

* ارتفاع عمودی مرکز ثقل با استفاده از دیگر مشخصات شناور محاسبه شده است.

۲-۲ معادلات حاکم

معادله پیوستگی و معادله N-S (معادله ناور-استوک) به عنوان معادلات حاکم در نظر گرفته شدند. برای جریان ویسکوز و تراکم ناپذیر معادلات پیوستگی و حرکت می‌توانند به شرح زیر باشند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + S_i \quad (2)$$

که در آن $\rho, i, j = 1, 2, 3$ چگالی سیال، θ ضریب ویسکوزیته سینماتیک و u_i, u_j مؤلفه سرعت گذرا هستند و u'_i, u'_j مؤلفه سرعت نوسانی (بالا رونده و پایین رونده) و $\overline{u'_i u'_j}$ مؤلفه سرعت متوسط هستند همچنین S_i چشمه (منبع) است [13].

۲-۳ رفتار سطح آزاد

چگونگی ردیابی دقیق محل اتصال دو سیال یک بخش تحقیقاتی مهم برای مسئله جریان دو فازی است. در پژوهش حاضر، از روش

با زاویه 90 درجه) مورد توجه نبوده است. که البته این خود نشان از اهمیت تحقیق و به روز بودن موضوع دارد. اگر چه مطالعات بر روی دریامانی شناورهای هیدروفویلی و حتی به طور کلی شناورهای هیدروفویلی بسیار محدود صورت پذیرفته است، اما مطالعات زیادی چه در خارج از کشور و چه در داخل کشور بر روی پدیده‌های مربوط به هیدروفویل‌ها مانند کاویتاسیون، اثرات سطح آزاد بر روی نیروی برآی هیدروفویل‌ها و ... انجام شده است [6-11].

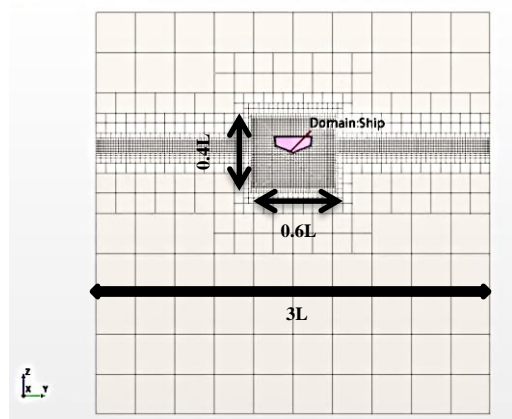
وجه تمایز شاخص این تحقیق استفاده از دو هیدروفویل بر روی بدنه اصلی شناور است که یکی در عقب شناور و دیگری در قسمت جلوی شناور قرار می‌گیرد. استفاده از دو هیدروفویل تأمین پایداری طولی را به شدت سخت می‌کند. بعلاوه اینکه در این پژوهش از سیستم کاملاً مغروق استفاده شده است که نسبت به سیستم شکافنده سطح پایداری عرضی کمتری دارد. اما دلیل اینکه این نوع سیستم در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است این است که هیدروفویل‌های کاملاً مغروق نسبت به هیدروفویل‌های شکافنده سطح در سرعت کمتری شناور را از آب جدا می‌کند و در سرعت‌های بالاتر دارای مقاومت کمتری هستند. علاوه بر این هیدروفویل‌های شکافنده سطح سبب بالا و پایین شدن و تکان‌های شدید در شناور شده و در شناورهای بزرگ بسیار دست و پا گیر می‌باشند [2].

۲-۲ شرح فیزیک مسئله و اعتبار سنجی

۲-۱ مشخصات شناور

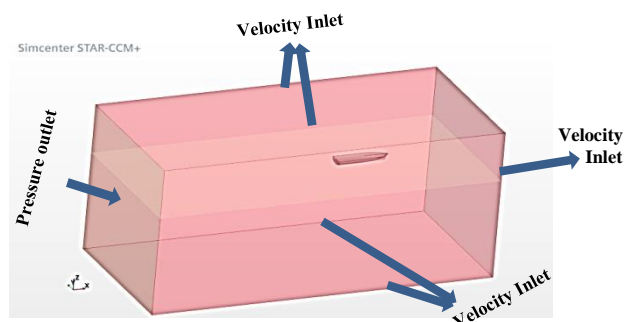
بدنه اصلی که برای قایق هیدروفویلی استفاده می‌شود تقریباً همان عملکرد سایر شناورهای دریایی را دارد، یعنی حمایت شناوری (در حالت شناور یا در حالت استراحت)، و ایجاد فضای بسته و غیره. به طور تقریبی، بدنه‌ای که ثابت شده باشد بدون فویل با سرعت نزدیک به سرعت برخاستن موفقیت آمیز است، در صورت برآورده شدن برخی دیگر از الزامات، برای بدنه اصلی یک شناور هیدروفویلی مناسب است. بنابراین بدنه‌ای که برای یک شناور هیدروفویلی طراحی شده است ممکن است به طور کلی شبیه یک قایق معمولی باشد که برای سرعت نزدیک به برخاستن طراحی شده است [12]. در این پژوهش یک مدل آزمایشگاهی از شناور USV01 به عنوان بدنه اصلی که قرار است هیدروفویل‌ها و استرات‌ها بر روی آن نصب شوند انتخاب شده است. این شناور یک شناور سرشی است. مدل سه بعدی این شناور در نرم افزار Rhino طراحی شده است که در شکل ۲ و شکل ۳ و جدول ۱ مشخصات آن آورده شده است [3].

nter STAR-CCM+



شکل ۵: نمای از رو به رو و نمایش ابعاد دامنه محاسباتی

در کلیه حالت‌ها برای ورودی و کلیه مرزهای جانبی دامنه، شرط مرزی سرعت ورودی^۱ و برای مرز خروجی جریان، شرط مرزی فشار خروجی^۲ اعمال گردید. شرط مرزی شناور نیز دیواره بدون لغزش خواهد بود. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل نیز در شکل ۶ آورده شده‌است.



شکل ۶: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل

۲-۵ شبکه بندی و استقلال از شبکه شناور سرشی

اولین مرحله جهت انجام شبیه‌سازی عددی جریان در داخل یک میدان، که به‌ویژه در مورد جریان‌های لزج، بایستی به دقت انجام گیرد، شبکه‌بندی میدان و تبدیل آن از یک محیط پیوسته به محیط گسسته به منظور اعمال روش‌های عددی می‌باشد. در این پژوهش، از شبکه‌بندی هیبرید استفاده شده‌است. شبکه در نرم افزار STAR CCM+ به روش تریمر^۳ تولید شده‌است.

شبکه اطراف سطح شناور ریزتر شده تا حدی که تغییرات به خوبی دیده شوند. همچنین شبکه مربوط به سطح آزاد آب ریز می‌شود تا امواج ب درستی شکل بگیرند. از آنجایی که از مدل شبکه تریمر

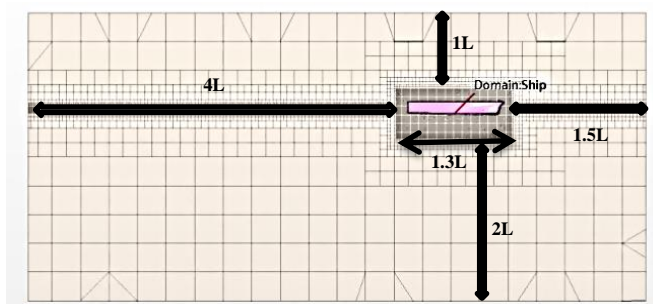
حجم محدود برای گسسته سازی معادله حاکم استفاده شده است و رایج‌ترین روش تعقیب سطح آزاد سیال، روش VOF است.

روش VOF (حجم سیال) که توسط نیکولز و هیرت [14] در سال 1981 پیشنهاد شد، عمدتاً از ردیابی ناحیه مایع برای ثبت شکل سطح آزاد سیال و مکان آن استفاده می‌کند. اصل اساسی روش VOF محاسبه تابع نسبت حجمی F یک سیال در یک سلول شبکه است. در اینجا تابع F برای تعیین سطح مرزی جریان دو فازی، با درک تغییر حجم سطح آزاد سیال استفاده می‌شود [15]. تابع F به عنوان نسبت حضور یا عدم حضور یک سیال مشخص در فضای سلول شبکه تعریف می‌شود. به طور خلاصه، اگر مایع مشخصی در سلول وجود نداشته باشد، $F = 0$. اگر مرزی بین سیال مشخص شده و سیال دیگر در سلول شبکه وجود داشته باشد، $0 < F < 1$. اگر سلول شبکه پر از سیال مشخص شده باشد، $F = 1$. تابع F معادله دیفرانسیل زیر را برآورده می‌کند:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (۳)$$

۲-۴ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

میدان محاسباتی و شبکه اطراف شناور در نرم افزار STAR-CCM+ ساخته شده و جریان سیال در آن دامنه تحلیل شده است. برای تأیید صحت محاسبات عددی، ابعاد شبکه سطح بدنه و سطح مرزی دامنه محاسباتی همگی به صورت نسبتی از طول شناور (L) بیان شده است. همچنین برای جلوگیری از مشکلات احتمالی جریان مانند بازتاب موج، مرزهای دامنه محاسباتی باید به اندازه کافی دور از بدنه کشتی قرار گیرد. علاوه بر این برای شبیه سازی حرکت کشتی در شرایط امواج، دامنه محاسباتی باید بتواند حداقل پنج طول موج کامل را در خود جای بدهد با توجه به این نکته ابعاد انتخاب شده دامنه محاسباتی همانند آنچه در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است تنظیم می‌شود. کوچک‌کی که در اطراف شناور دیده می‌شود حجم کنترل است که در بخش شبکه بندی توضیح داده خواهد شد.



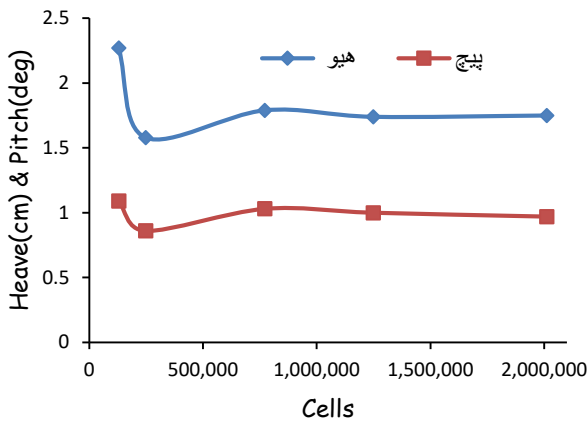
شکل ۴: نمای جانبی و نمایش ابعاد دامنه محاسباتی

¹ Velocity Inlet

² Pressure outlet

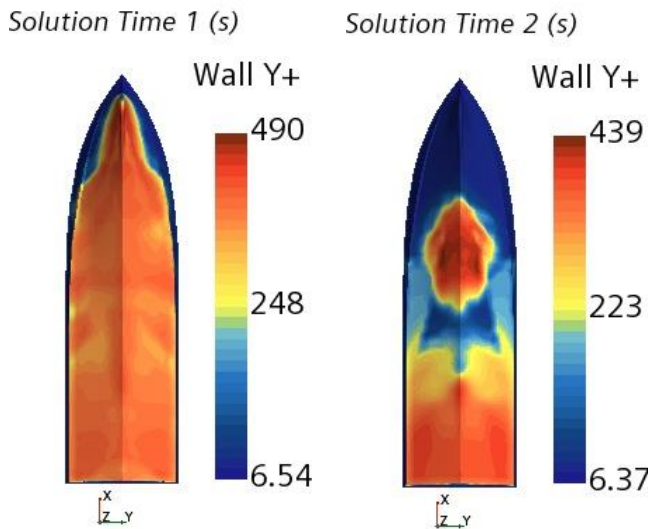
³ Trimmer

یافته‌های تحقیق توضیح داده خواهد شد). شبکه بندی در پنج سطح انجام شده است که درشت‌ترین سطح آن، حدود 130 هزار سلول دارد و ریزترین سطح آن، تقریباً 2 میلیون سلول را شامل می‌شود. طبق این نمودار، سطح شبکه‌بندی شماره 4 (با تعداد سلول حدود یک میلیون و دویست و پنجاه هزار) اندازه بهینه می‌باشد و به عنوان شبکه‌بندی نهایی انتخاب می‌گردد. تصاویر مربوط به شبکه بندی سطح 4 در شکل 4، شکل 5، شکل 7، شکل 8 و شکل 9 قابل مشاهده است.



شکل 10: نمودار هیو و پیچ برحسب تعداد سلول‌های شبکه

برای محاسبات کلی هیدرودینامیکی، مقدار $Y+$ بین 30 تا 300 کنترل می‌شود، به این ترتیب، مقدار $Y+$ روی 250، برای مدل مبتنی بر تابع دیواره، پنج لایه با نرخ رشد شبکه 1.3 تنظیم شد [3]. در شکل 11 کانتور $Y+$ ارائه شده است.



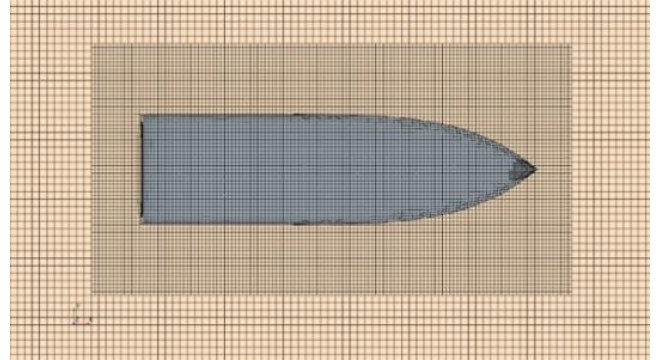
شکل 11: کانتور $Y+$ در ثانیه 1 و ثانیه 2 حرکت شناور

۲_۶ شرایط و تنظیمات شبیه‌سازی

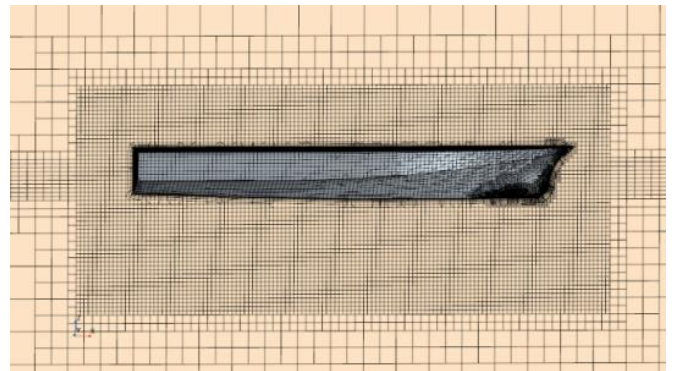
تحلیل جریان به صورت گذرا با چگالی ثابت تنظیم گردیده است. در جدول ۲ خلاصه‌ای از شرایط حل آمده است.

جدول ۲: تنظیمات حل

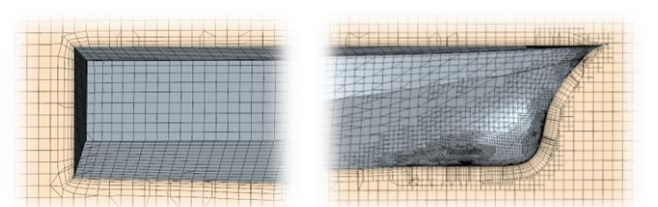
استفاده می‌شود، به کمک ایجاد هندسه‌های غیردامنه‌ای و کنترل حجمی شبکه⁴ ایجاد شبکه با دقت و کنترل بسیار زیادی امکان‌پذیر است. شکل 7، شکل 8 و شکل 9 شبکه‌بندی دامنه را همراه با کنترل‌های حجمی نشان می‌دهد.



شکل 7: شبکه‌بندی اطراف شناور سرشی از نمای بالا



شکل 8: شبکه‌بندی اطراف شناور سرشی از نمای جانبی

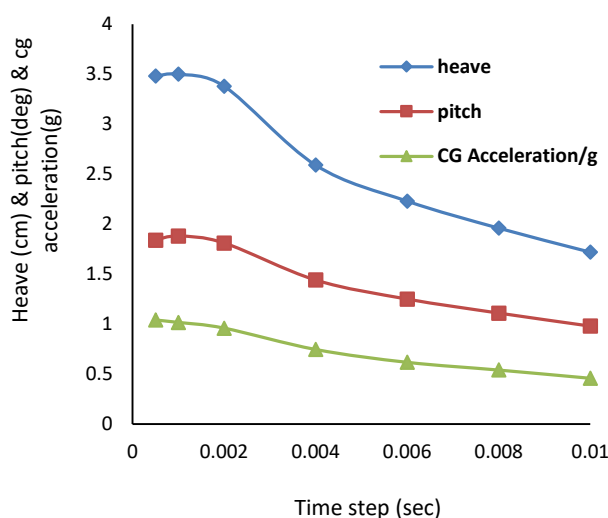


شکل 9: شبکه‌بندی روی بدنه شناور سرشی در ناحیه سینه و پاشنه

هرچقدر سلول‌های شبکه ریزتر شوند، دقت محاسبات و همچنین هزینه محاسبات افزایش می‌یابد؛ بنابراین یافتن شبکه‌ای که از نظر هزینه محاسباتی و دقت در یک نقطه بهینه قرار داشته باشد، حائز اهمیت است.

نتایج نهایی مطالعه شبکه در شکل 10 آورده شده است (مقادیر هیو و پیچ فاصله قله تا قعر حرکت سینوسی می‌باشد که در بخش

⁴ Volumetric Control



شکل ۱۲: استقلال از گام زمانی

۲_۸ اعتبارسنجی (مقایسه نتایج تجربی و عددی)

در شروع فرآیند شبیه‌سازی عددی و پیش از حل مسئله اصلی، معمولاً شبیه‌سازی یک آزمایش تجربی که جزئیات و نتایج آن در دسترس است، انجام می‌شود و نتایجی که به دست می‌آید با نتایج آزمایش مقایسه می‌گردد تا میزان خطا و دقت روش حل مشخص شود. این فرایند، اعتبارسنجی نامیده می‌شود.

آزمایش تجربی که برای اعتبارسنجی استفاده شده در آزمایشگاه هیدرودینامیکی پرسرعت موسسه تحقیقات ویژه هواپیماهای چین^۶ (موسسه شماره ۶۰۵) انجام شده است. این آزمایشات به منظور بررسی عملکرد دریامانی و مقاومت شناور سرشی در امواج منظم انجام شده است [3].

آزمایشات تجربی برای سرعت ۸ متر بر ثانیه و ارتفاع موج ۰.۰۷ متر انجام شده است و نتایج حرکات هیو، پیچ و شتاب عمودی مرکز ثقل استخراج شده است. حل عددی نیز برای همین سرعت و ارتفاعات موج، با تنظیماتی که گفته شد انجام شده است. نتایج در شکل ۱۳ ارائه شده است.

مورد	تنظیمات	توضیح
Space	Three-Dimensional	مدل سه‌بعدی
Time	Implicit Unsteady	زمان‌بندی در حالت ناپایا
Material	Multiphase	ماده: چند فازی (دوفازی)
Multiphase Model	Volume of Fluid (VOF)	مدل چند فازی: حجم سیال (VOF)
Viscous Regime	Turbulent	نوع جریان: مغشوش
Turbulence Models	RANSE k - ω Realizable	مدل اغتشاشی: رنز

در شبیه‌سازی‌های گذرا، باید تعداد تکرار در هر گام زمانی نیز مشخص شود. در این پژوهش هر گام زمانی در ۵ تکرار حل می‌شود. چگالی آب ۹۹۷٫۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ویسکوزیته دینامیکی آب ۰٫۰۰۰۸۸۹ پاسکال ثانیه تنظیم شده است.

۲_۷ استقلال از گام زمانی

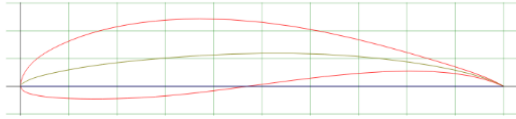
در شبیه‌سازی‌های گذرا علاوه بر تعریف گام زمانی^۵ می‌بایست استقلال از گام زمانی نیز انجام شود. بدین منظور گام زمانی را در هر مرحله کوچک می‌کنیم تا جایی که نتایج (در این جا حرکات هیو، پیچ و شتاب مرکز ثقل) تقریباً ثابت شوند. نتیجه این کار برای پژوهش حاضر در شکل ۱۲ آورده شده است. با توجه به نمودار، حرکات برای مقادیر کمتر از ۰.۰۰۲ ثانیه (یعنی مقادیر ۰.۰۰۱ ثانیه و ۰.۰۰۰۵ ثانیه) تقریباً ثابت است. بنابراین مقدار ۰.۰۰۲ ثانیه برای گام زمانی تنظیم می‌شود.

⁶ Verification

⁷High-speed Hydrodynamic Laboratory of Special Research Institute of China

⁸Time Step

در شناورهای هیدروفویلی نیاز به نیروی برآی زیاد و معمولاً در یک جهت وجود دارد از این رو در این نوع شناورها معمولاً فویل‌های نامتقارن به کار برده می‌شوند. در این پژوهش از فویل FX 63-137 13.7% smoothed (fx63137sm-il) استفاده می‌کنیم. شکل مقطع این فویل به صورت آنچه در شکل ۱۵ نشان داده شده است [17].



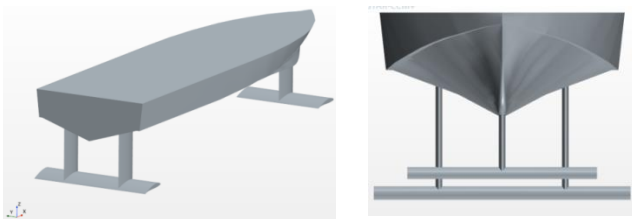
شکل ۱۵: مقطع فویل fx63137sm-il [17]

همچنین مشخصات هندسی و مکان قرارگیری هیدروفویل‌ها و استرات‌ها در مقاله دیگری تحت عنوان «تخمین مشخصات هندسی و مکان قرارگیری هیدروفویل‌ها و استرات‌های یک نمونه شناور هیدروفویلی» که توسط نویسندگان این مقاله نگارش شده است، ارائه شده است [18]. این مقادیر در جدول ۳ آورده شده است.

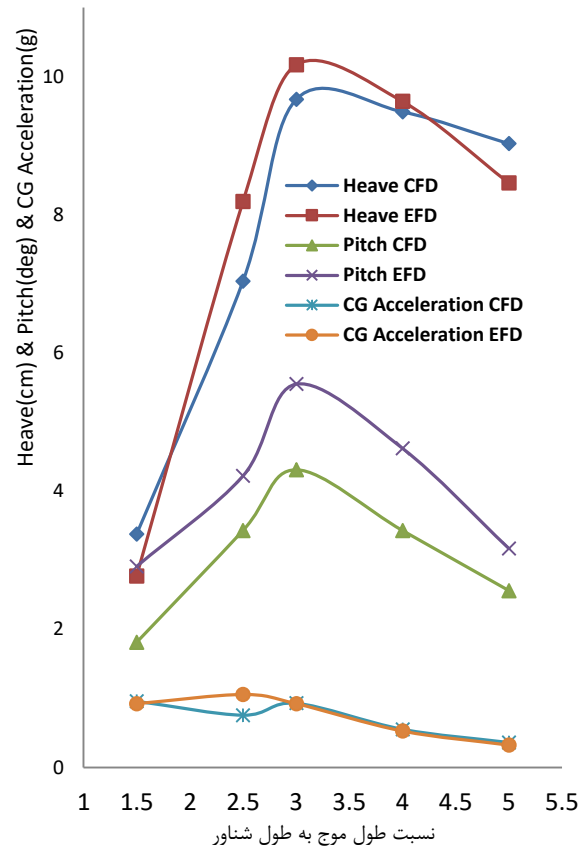
جدول ۳: مشخصات فویل انتخاب شده

مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
0.19	وتر هیدروفویل جلو	0.19	وتر هیدروفویل عقب
6	زاویه حمله هیدروفویل جلو (درجه)	8	زاویه حمله هیدروفویل عقب (درجه)
1.331	ضریب برآی هیدروفویل جلو	1.475	ضریب برآی هیدروفویل عقب
0.026	ضریب پسای هیدروفویل جلو	0.033	ضریب پسای هیدروفویل عقب
0.586	دهانه هیدروفویل جلو	0.79	دهانه هیدروفویل عقب

در نهایت با توجه به بدست آمدن مشخصات هیدروفویل‌ها و استرات‌ها، می‌توان مدل سه بعدی شناور هیدروفویلی را در نرم افزار STAR CCM+ طراحی کرد. تصاویری از نماهای مختلف شناور هیدروفویلی طراحی شده در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ ارائه شده است.

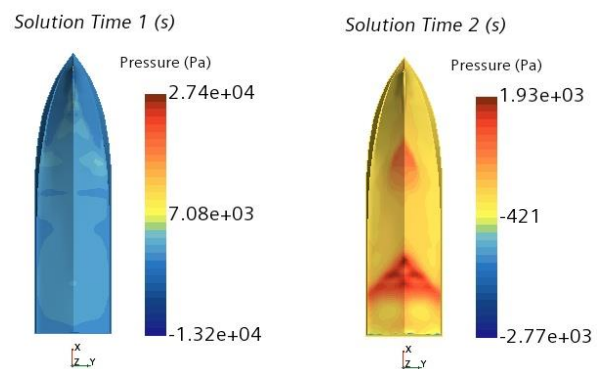


شکل ۱۶: نمای سه بعدی ونمای از رو به روی شناور هیدروفویلی طراحی شده



شکل ۱۳: نمودار مقایسه نتایج تجربی (مرجع [3]) و عددی در سرعت ۸ متر بر ثانیه و ارتفاع موج ۰.۰۷ متر

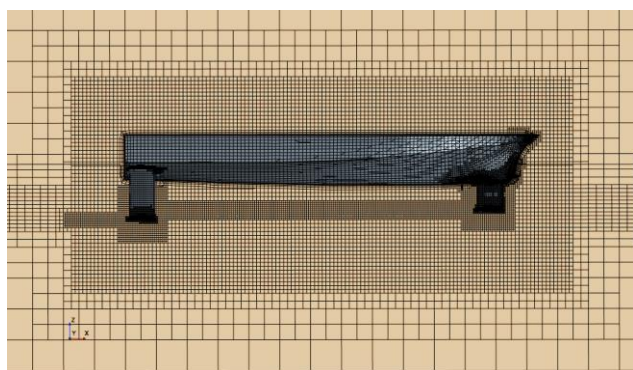
توزیع فشار بر روی بدنه مدل سرشی با توجه به گذرا بودن شبیه سازی و همچنین به علت وجود موج متغیر است در شکل ۱۴ در چند لحظه مختلف کانتور فشار آورده شده است.



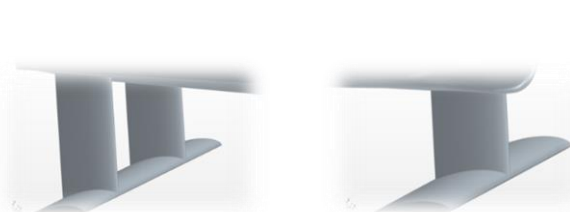
شکل ۱۴: کانتور فشار وارد بر شناور در ثانیه ۱ و ۲

۳ تخمین مشخصات هندسی و مکان قرارگیری هیدروفویل‌ها و استرات‌ها

تخمین مشخصات هندسی و مکان قرارگیری هیدروفویل‌ها و استرات‌های شناورهای هیدروفویلی به دلیل تأثیر زیادی که بر مشخصات هیدرودینامیکی شناور از جمله سرعت، دریامانی، مانور و ... دارند، بسیار دارای اهمیت است.



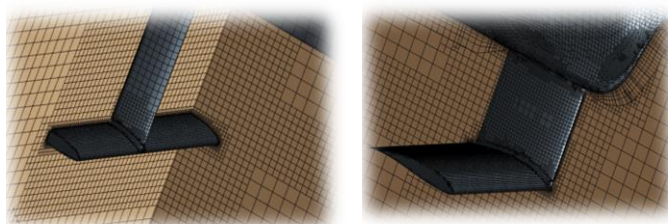
شکل ۲۰: نمای کنار شبکه بندی دامنه حل



شکل ۱۷: نمای نزدیک هیدروفویل جلو و عقب

۳-۱ شبکه بندی و استقلال از شبکه شناور هیدروفویلی

پس از قرار دادن هیدروفویل ها و استرات ها بر روی مدل سه بعدی بدنه شناور لازم است تا شبکه اطراف هیدروفویل ها و استرات ها کوچک تر شوند. علاوه بر این تلاطم جریان (در سرعت های بالاتر گردابه ها) به وجود آمده در اثر حرکت هیدروفویل جلو در سیال بر روی نیروی برآ و پسای هیدروفویل و استرات های عقب تأثیر می گذارد بنابراین شبکه بندی ناحیه مابین هیدروفویل جلو و عقب نیز باید ریزتر شوند. حجم کنترل را به گونه ای ایجاد می کنیم که با ایجاد حرکات هیو، پیچ و رول شناور همچنان شبکه اطراف شناور کوچک بماند. ابعاد حجم کنترل در شکل ۱۸ آورده شده است (ابعاد بر حسب متر می باشد).



شکل ۲۱: شبکه بندی اطراف هیدروفویل ها و استرات ها

۴ نتایج

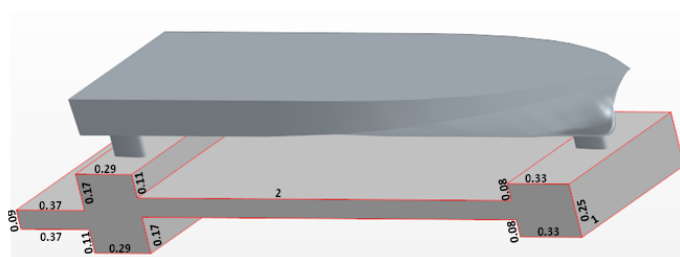
در این بخش ابتدا نمودار سرعت بر حسب مقاومت برای هر دو شناور سرشی و هیدروفویلی استخراج می شود پس از آن روند انجام شبیه سازی ها و در نهایت تأثیر پارامترهای مختلف بر حرکات (دریامانی) شناور مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۱ نمودار مقاومت_سرعت

قبل از شروع شبیه سازی های مربوط به تحلیل دریامانی شناور، نمودار مقاومت_سرعت هم برای شناور هیدروفویلی و هم برای شناور سرشی استخراج شده است تا هم مقایسه ای باشد بین میزان مقاومت این دو نوع شناور و هم تاییدی باشد بر شبیه سازی های انجام شده بر روی شناور هیدروفویلی.

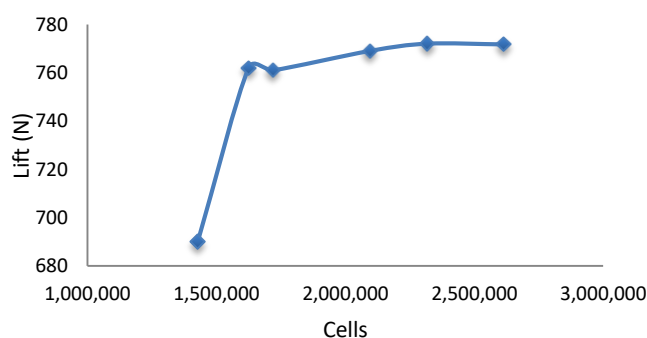
برای استخراج نمودار مقاومت سرعت شناور هیدروفویلی به صورت عددی، شناور را در سرعت های مختلف حرکت می دهیم در واقع هر شبیه سازی برای یک سرعت مشخص انجام می شود. در این شبیه سازی ها از شش درجه آزادی شناور هیدروفویلی فقط حرکت انتقالی در جهت محور Z (یعنی حرکت هیو شناور) آزاد گذاشته می شود تا شناور موقعیت جدید خود را پیدا کند و در آنجا میزان مقاومت شناور مشخص شود.

نمودار مقاومت بر حسب سرعت شناور، برای شناورهای هیدروفویلی و سرشی در شکل ۲۲ ارائه شده است.



شکل ۱۸: ابعاد حجم کنترل اطراف هیدروفویل ها و استرات ها

شبکه کوچک می شود و نمودار آن بر حسب تعداد سلول بدست می آید. (شکل ۱۹)

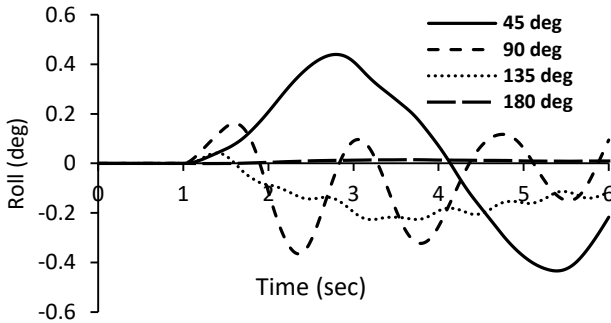


شکل ۱۹: مجموع نیروی برآی هیدروفویل ها بر حسب تعداد سلول

بنابراین شبکه بندی سطح ۴ به عنوان مبنای محاسبات قرار می گیرد. تصاویر مربوط به این شبکه بندی در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ قابل مشاهده است.

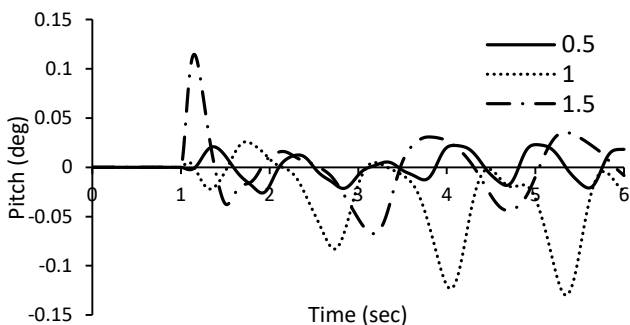
۳_۴ حرکت رول

نتایج خروجی‌ها نشان می‌دهد که با برخورد امواج منظم به شناور، خروجی حرکت رول سینوسی و منظم نخواهد شد البته این امر برای زوایای برخورد 180 درجه و 0 درجه طبیعی است چرا که راستای برخورد موج و راستای محور دوران حرکت رول (محور X) یکسان است اما برای زاویه برخورد 90 درجه انتظار می‌رفت که حرکات سینوسی منظم باشند که اینگونه نبود (شکل ۲۳).



شکل ۲۳: حرکت رول شناور برای زوایای مختلف در سرعت ۱۰ گره و نسبت طول موج به طول شناور ۱.۵

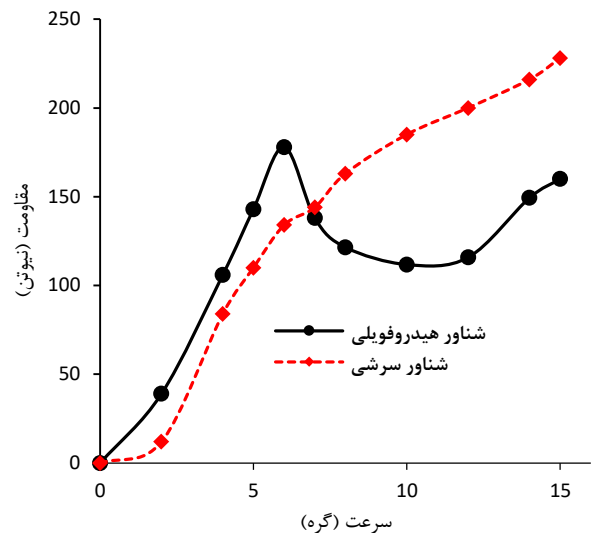
علت را می‌توان در ممان بازگرداننده حرکت رول جستجو کرد از آنجایی که ممان بازگرداننده مستقیماً با مقاومت اصطکاکی و مقاومت اصطکاکی نیز مستقیماً با زبری سطح در ارتباط است می‌توان گفت یکی از علل شکل نگرفتن کامل حرکت رول لحاظ نکردن زبری سطح در طراحی سه بعدی هیدروفویل‌ها است. یکی دیگر از علل‌های شکل نگرفتن کامل حرکت رول را می‌توان بزرگ بودن اندازه شبکه زده شده روی سطح و اطراف هیدروفویل‌ها بیان کرد. بنابراین نمی‌توان حرکت رول را به خوبی تحلیل کرد و انتظار نتایج دقیقی از آن داشت. همچنین حرکت پیچ برای زاویه ۹۰ درجه شکل سینوسی و منظمی ندارد (شکل ۲۴).



شکل ۲۴: حرکت پیچ شناور برای زاویه ۹۰ درجه، سرعت ۱۰ گره و نسبت طول موج به طول شناور ۱.۵ و ۱.۰

۴_۴ تأثیر طول موج بر حرکات شناور

در این بخش تأثیر طول موج بر هرکدام از حرکات هیو، پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب سینه شناور مورد بررسی قرار



شکل ۲۲: نمودار مقاومت_سرعت شناور هیدروفویلی و شناور سرشی

۲_۴ روند انجام شبیه سازی ها

برای اینکه بتوان تعادل شناور هیدروفویلی (در آب آرام) حفظ شود و شناور در حالت foil borne باقی بماند باید گشتاور وارده به شناور صفر باشد بدین منظور مراحل زیر به منظور انجام شبیه سازی ها در مواجهه با امواج باید انجام شود:

۱) ابتدا در آب بدون موج (آب آرام) و در سرعت مورد نظر پس از گذشت چند ثانیه که نیروها و گشتاورها بر روی هیدروفویل‌ها شکل گرفت (تقریباً 1 ثانیه بسته به سرعت شناور) حرکت هیو شناور را آزاد می‌کنیم تا موقعیت دقیق قرارگیری شناور در راستای محور Z مشخص شود.

۲) سپس در موقعیت جدید با بسته بودن حرکات هیو، پیچ، رول و دیگر حرکات شناور شبیه سازی را تا آنجایی که گشتاور پیچ (و رول) وارده به شناور تقریباً مقدار ثابتی شود ادامه می‌دهیم. معکوس این گشتاور را در شبیه سازی در حضور امواج به عنوان گشتاور خارجی به شناور اعمال می‌کنیم تا شناور بتواند تعادل خود را حفظ کند.

۳) شبیه سازی را در امواج با اعمال گشتاور خارجی به شناور انجام می‌دهیم. همانند قبل لازم است زمانی بگذرد تا نیروها بر روی هیدروفویل‌ها شکل بگیرد.

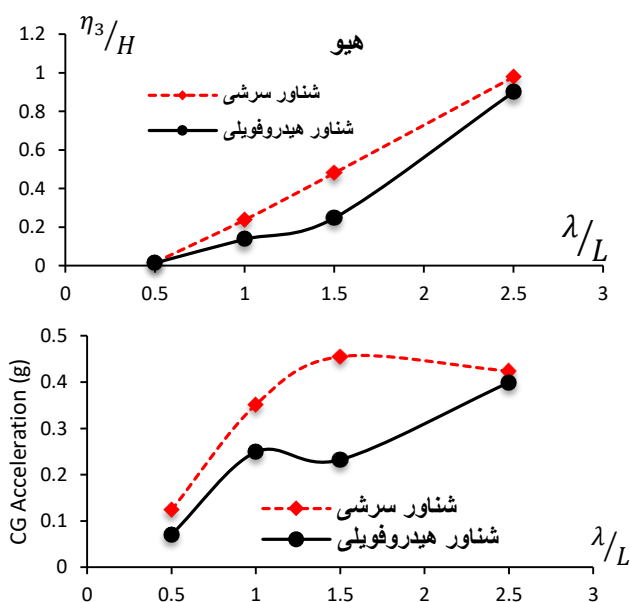
پارامترهای خروجی شامل هیو، پیچ، رول، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب سینه شناور می‌باشد. با توجه به این که این حرکات در مواجهه با امواج منظم اکثراً رفتاری سینوسی دارند، فاصله قله تا قعر را ملاک محاسبات قرار می‌دهیم. پس از گذشت سه الی چهار طول موج تقریباً فاصله قله تا قعر موج سینوسی ثابت می‌شود و مبنای محاسبات قرار می‌گیرد. در مواردی که رفتار شناور به طور کامل سینوسی نباشد، پس از گذشت دو الی سه طول موج فاصله دو قله و قعر متوالی موج ملاک محاسبات قرار می‌گیرد.

با توجه به نمودار تغییرات حرکت پیچ برای طول موج‌های نزدیک به طول شناور عملکرد هر دو شناور تقریباً یکسان است. ولی برای $\lambda/L = 2.5$ (و احتمالاً بیشتر از آن) شناور هیدروفویلی عملکرد بهتری دارد. در مجموع پیچ هر دو شناور با افزایش طول موج، افزایش یافته است.

همانطور که در نمودارهای شتاب‌ها مشاهده می‌شود در مجموع می‌توان گفت با افزایش طول موج، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب سینه برای هر دو شناور هیدروفویلی و سرشی افزایش می‌یابند. افزایش شتاب عمودی مرکز ثقل با افزایش طول موج برای شناور سرشی بسیار بیشتر از شناور هیدروفویلی است که این به معنای افزایش احتمال دریازدگی خدمه یا مسافران، افزایش احتمال صدمه به تجهیزات الکترونیکی و ... در شناور سرشی می‌باشد.

می‌گیرد. تمام شبیه سازی های این بخش در سرعت 10 گره، زاویه برخورد 180 درجه و ارتفاع موج $H = 0.0625 m$ انجام شده است. شکل ۲۵ تأثیر افزایش طول موج بر حرکات هیو، پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناورهای هیدروفویلی و سرشی در مواجهه با امواج از رو به رو را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج، هیو شناور نیز افزایش می‌یابد. افزایش حرکت هیو شناور سرشی تقریباً به صورت خطی و شناور هیدروفویلی غیرخطی اتفاق افتاده است. همچنین عملکرد شناور هیدروفویلی بسیار بهتر بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که در طول موج برابر با طول شناور و 1.5 برابر آن هیو شناور هیدروفویلی بسیار کمتر از هیو شناور سرشی می‌باشد.

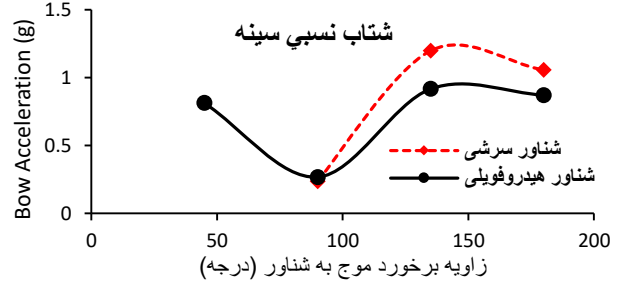
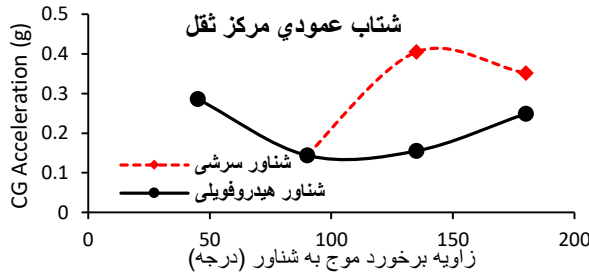
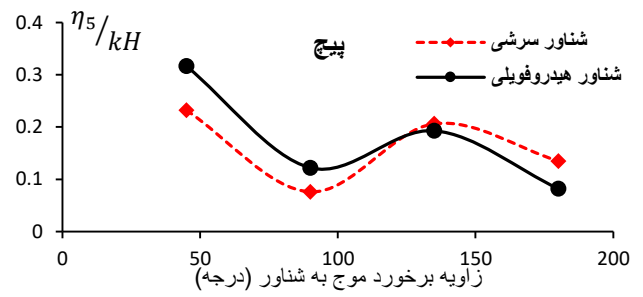
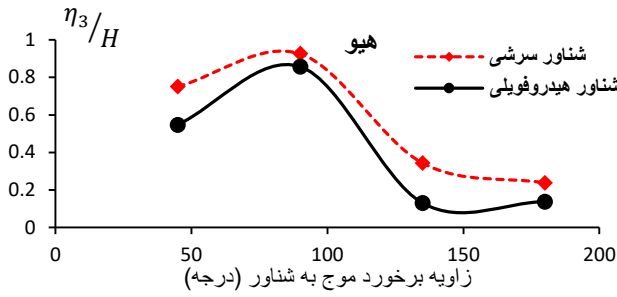


شکل ۲۵: تغییرات هیو، پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناور با افزایش طول موج

حرکت هیو اعمالی در زاویه 90 درجه اتفاق می‌افتد. با توجه به نمودار حرکت پیچ، امواج پاشنه خطرناک‌تر از امواج سینه به نظر می‌رسند. همچنین امواجی که تحت زاویه برخورد 45 تا 90 درجه به شناور برخورد می‌کنند برای پیچ شناور هیدروفویلی خطرناک‌تر از شناور سرشی است. شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناور در زاویه 90 درجه برای شناور سرشی و هیدروفویلی تقریباً برابر است. در امواج برخوردی با زوایای بیشتر از 90 درجه، شناور هیدروفویلی عملکرد مطلوب‌تری دارد. همچنین در زاویه 90 درجه شتاب اعمال شده به شناورها کمترین مقدار است.

۴-۵ تأثیر زاویه برخورد بر حرکات شناور

اینکه امواج از چه سمتی (سینه، پاشنه و یا از کنار) به شناور وارد شود دارای اهمیت است و می‌تواند شرایط خاصی را در هر حالت ایجاد کند لذا لازم است تا زوایای مختلف برخورد موج به شناور مورد بررسی قرار بگیرند. شبیه سازی ها در سرعت 10 گره، ارتفاع موج $H = 0.0625 m$ و نسبت طول موج به طول شناور 1 در زوایای برخورد مختلف انجام شده است و نمودارهای آن در شکل ۲۶ آورده شده است. در منحنی حرکت هیو مشاهده می‌شود که امواجی که تحت زاویه 90 درجه یا کمتر از آن به شناور برخورد می‌کنند هیو بیشتری به شناورها اعمال می‌کنند و بیشترین



شکل ۲۶: تغییرات هیو، پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناور هیدروفویلی و سرشی با تغییر زاویه برخورد موج به شناور

زاویه برخورد موج به شناور هم صفر درجه تنظیم شده است. نتایج این شبیه سازی ها در شکل ۲۷ برای حرکات هیو، پیچ و شتابها آورده شده است.

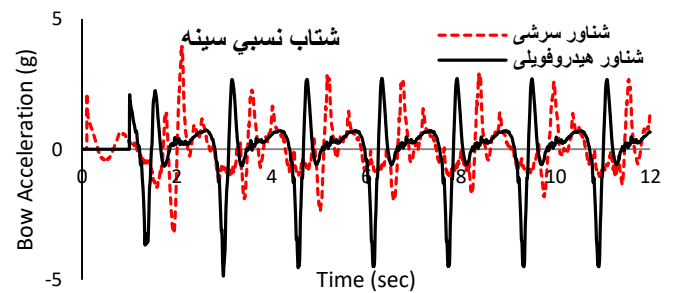
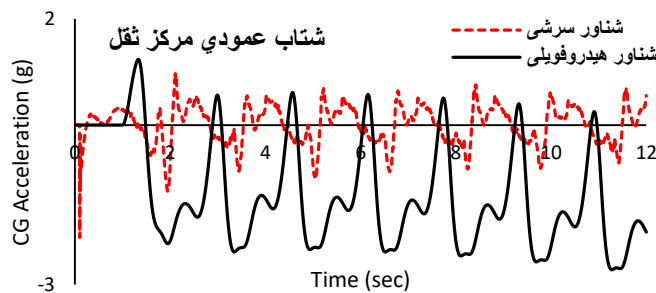
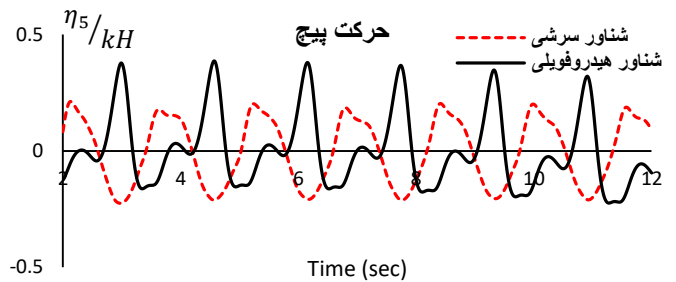
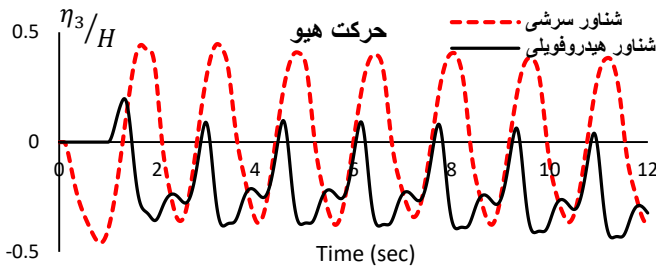
علت آنکه حد متوسط نمودار حرکت هیو و نمودار شتاب عمودی مرکز ثقل پایین تر از صفر می باشد این است که شناور در مکان دقیق تعادل عمودی قرار نگرفته است یعنی جایی که مجموع نیروی لیفت هیدروفویل های جلو و عقب برابر با نیروی وزن شناور باشد همانطور که گفته شد مکان تعادل عمودی شناور در دریای آرام محاسبه شده و از همین موقعیت برای دریای امواج استفاده شده است که اختلاف به وجود آمده ناشی از این موضوع است و اجتناب ناپذیر است.

۴_۵_۱ امواج پاشنه (زاویه برخورد 0 درجه)

امواج پاشنه می توانند شرایط خطرناکی را برای شناور هیدروفویلی رقم بزنند. در صورتی که سرعت موج پاشنه از سرعت شناور کمتر باشد، شناور به موج برخورد می کند که تقریباً می توان گفت حالتی شبیه به امواج از رو به رو اتفاق می افتد. اما در صورتی که سرعت موج پاشنه از سرعت شناور بیشتر باشد موج به شناور برخورد می کند که حالت خطرناک تری است. در پژوهش حاضر، این دو مورد را شبیه سازی شده است.

سرعت موج کمتر از سرعت شناور

برای اینکه سرعت موج کمتر از سرعت شناور باشد می بایست طول موج کوتاه باشد از این رو $\frac{\lambda}{L} = 0.5$ را شبیه سازی می کنیم. همچنین سرعت شناور 10 گره، ارتفاع موج $H = 0.0625 m$ و

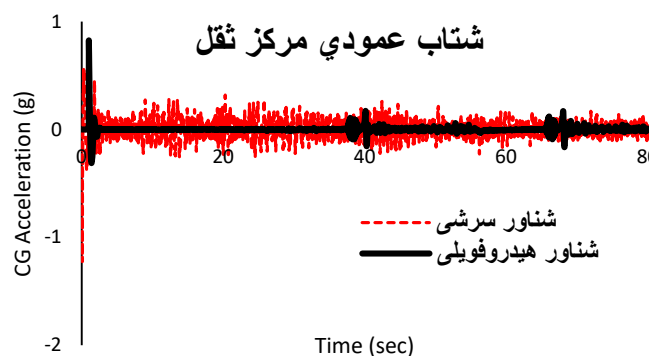
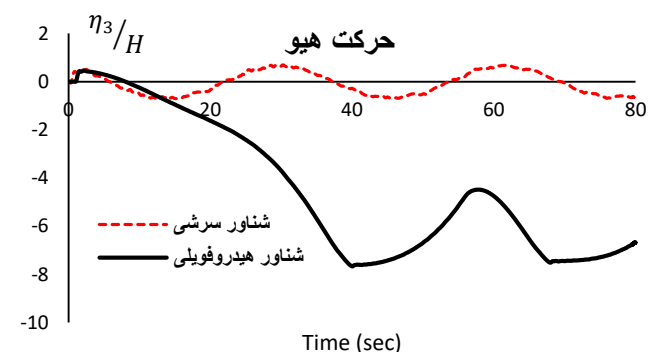


شکل ۲۷: تغییرات حرکات هیو، پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناور هیدروفویلی و سرشی در معرض امواج از پاشنه (سرعت موج

کمتر از سرعت شناور

می‌کنیم. همچنین سرعت شناور 10 گره و ارتفاع موج $H = 0.0625 m$ تنظیم شده است و زاویه برخورد موج به شناور هم صفر درجه می‌باشد. نتایج این شبیه سازی ها در شکل ۲۸ برای حرکات هیو، پیچ و شتابها آورده شده است.

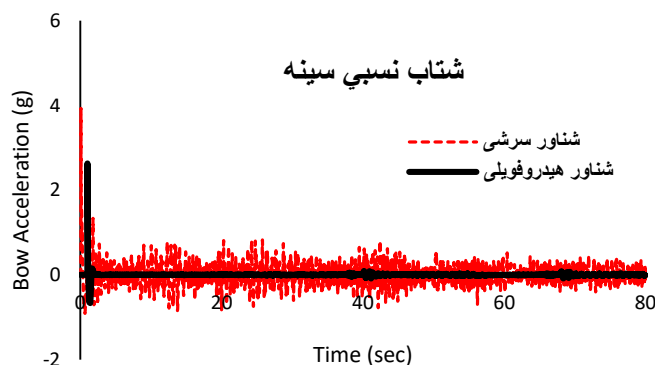
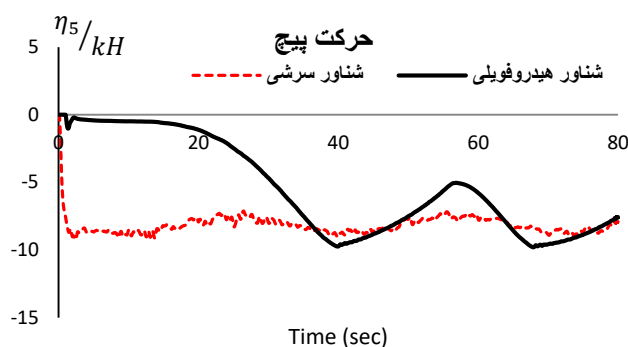
همانطور که از نتایج مشخص است زمانی که سرعت موج بیشتر از سرعت شناور است (طول موج بسیار بزرگ باشد) عملکرد هیو و پیچ شناور سرشی مطلوب تر از شناور هیدروفویلی به نظر می‌رسد از طرفی به شناور هیدروفویلی شتاب کمتری وارد می‌شود.



همانطور که مشخص است در این حالت که سرعت موج از سرعت شناور کمتر است، فاصله قله تا قعر حرکت هیو شناور هیدروفویلی کمتر از شناور سرشی است و از این نظر عملکرد بهتری دارد. اما در مورد حرکات پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه قضیه برعکس است و شناور سرشی عملکرد بهتری دارد.

سرعت موج بیشتر از سرعت شناور

برای اینکه سرعت موج بیشتر از سرعت شناور باشد می‌بایست طول موج بزرگ باشد از این رو $\frac{\lambda}{L} = 13.884$ را شبیه سازی



شکل ۲۸: تغییرات حرکات هیو، پیچ، شتاب مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناور هیدروفویلی و سرشی در معرض امواج از پاشنه (سرعت موج بیشتر از سرعت شناور)

همانطور که انتظار می‌رفت و از نمودارهای شکل ۲۹ نیز مشخص است با افزایش ارتفاع امواج حرکت هیو شناورهای هیدروفویلی و سرشی نیز افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان افزایش حجم بویانسی ناشی از افزایش ارتفاع موج بیان کرد. همچنین مشاهده می‌شود که در طول موج‌های بزرگتر، تأثیر افزایش ارتفاع موج بر روی حرکت هیو شناور سرشی بیشتر است.

افزایش ارتفاع بر روی حرکت پیچ شناور نیز تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش آن می‌شود. (شکل ۲۹) همچنین به علت بیشتر بودن حجم بویانسی شناور سرشی نسبت به شناور هیدروفویلی، تأثیر افزایش ارتفاع موج بر حرکات هیو و پیچ شناور سرشی بسیار بیشتر از شناور هیدروفویلی است. همانند حرکت هیو، در طول موج‌های بزرگتر، تأثیر افزایش ارتفاع موج بر روی حرکت پیچ شناور بیشتر است که این امر در شناور سرشی بیشتر نیز می‌باشد.

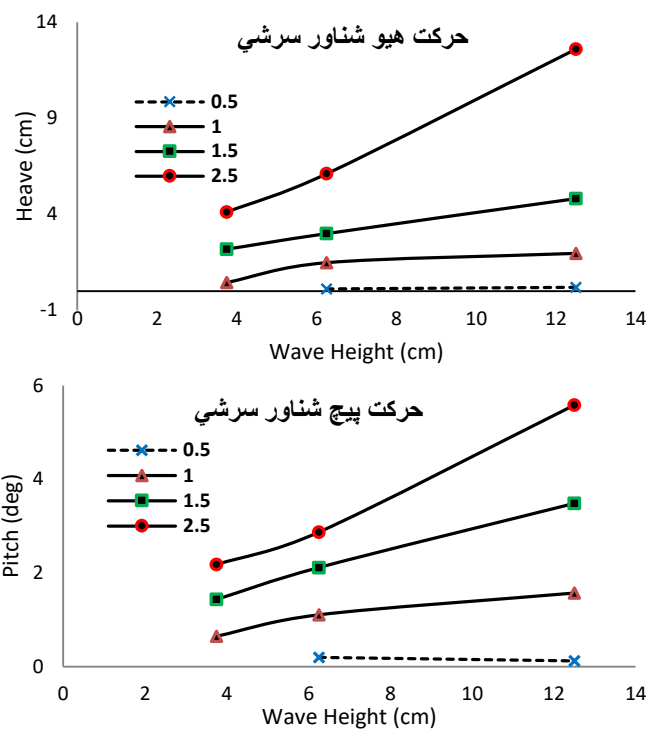
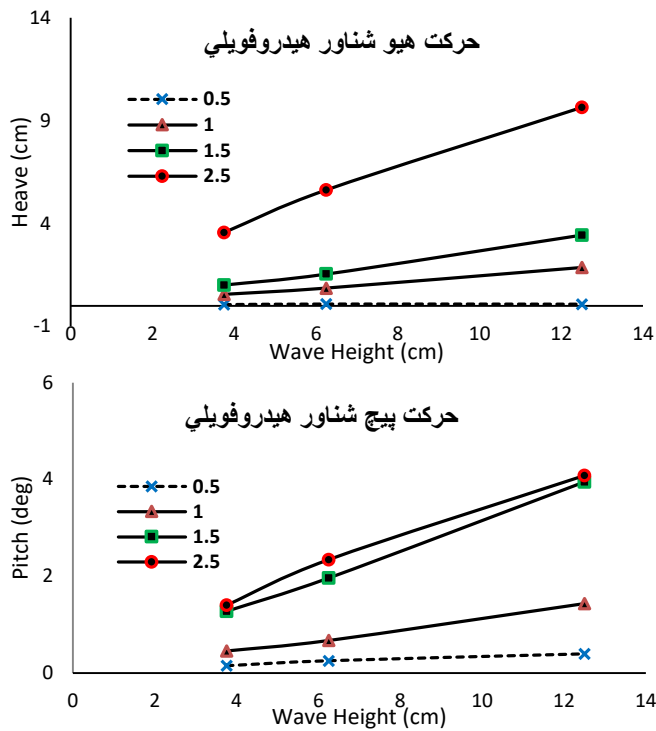
در مجموع باید گفت خطرناک‌ترین زاویه برخورد به شناور هیدروفویلی زاویه برخورد صفر درجه یعنی امواج پاشنه است. بنابراین در مواقعی که امواج از پاشنه به سمت شناور می‌آیند بهتر آن است که در مسیر حرکت تغییری ایجاد شود که یکسان بودن راستای انتشار موج و حرکت کشتی از بین برود و زاویه برخورد موج به شناور تغییر کند.

۴_۶ تأثیر ارتفاع امواج بر حرکات شناور

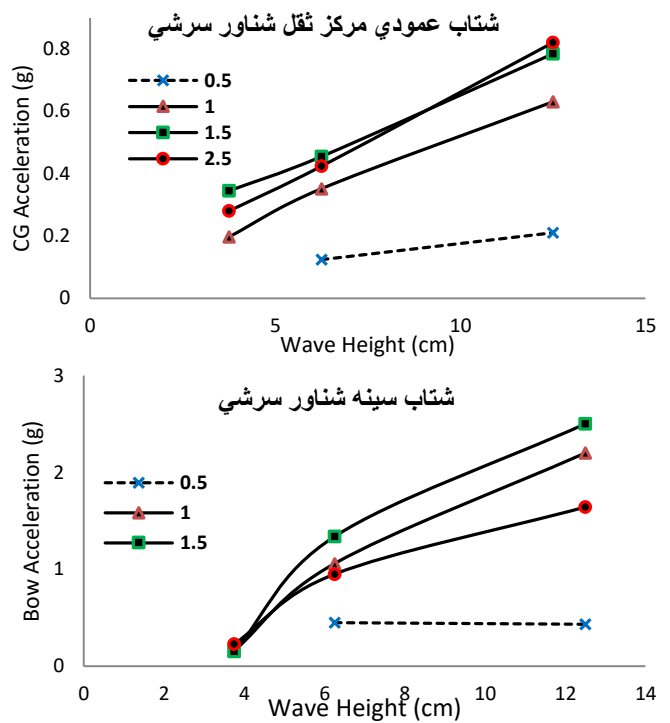
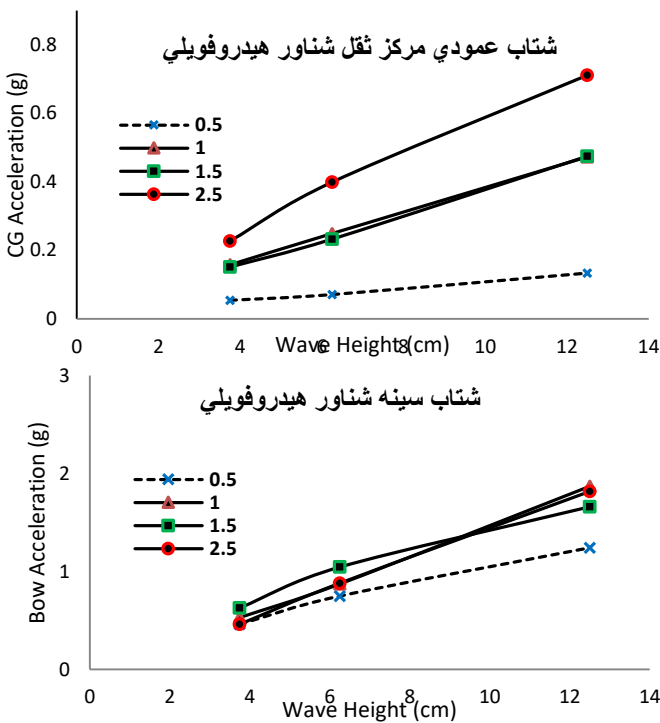
یکی از پارامترهای بسیار مهم در تحلیل دریامانی یک شناور ارتفاع موج برخوردی است که می‌تواند به یک باره شتاب و ضربه بزرگ به شناور وارد کند. از این رو شبیه سازی ها برای ارتفاع موج‌های مختلف انجام شده است. همچنین سرعت شناور 10 گره و زاویه برخورد 180 لحاظ شده است.

هیدروفویلی تقریباً یکسان باشد اما نرخ افزایش شتاب سینه شناور هیدروفویلی کمتر از شناور سرشی است. البته برای $\frac{\lambda}{L} = 0.5$ اینگونه نیست.

نمودارهای مربوط به شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه در شکل ۳۰ آورده شده است همانطور که از نمودارها مشخص است با افزایش ارتفاع موج شتاب نیز افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد نرخ افزایش شتاب عمودی مرکز ثقل برای هر دو شناور سرشی و



شکل ۲۹: مقایسه تغییرات هیو و پیچ شناورهای هیدروفویلی و سرشی با افزایش ارتفاع موج

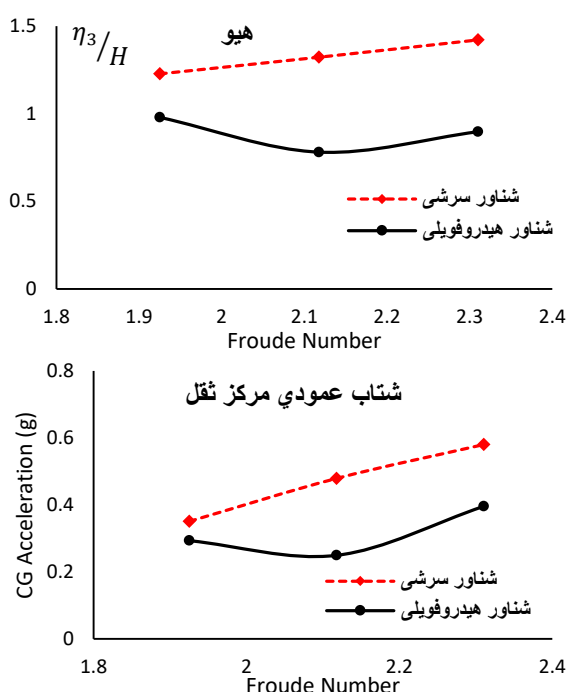


شکل ۳۰: مقایسه تغییرات شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناور هیدروفویلی و سرشی با افزایش ارتفاع موج

۷_۴ تأثیر سرعت حرکت شناور بر حرکات شناور

شناور یکسان است. علت یکسان بودن تقریبی حرکت پیچ برای هر دو شناور هیدروفویلی و سرشی این است که در نسبت طول موج به طول شناور 2.5 ($\frac{\lambda}{L} = 2.5$) شناورها به علت زیاد بودن طول موج اصطلاحاً بر موج سوار می‌شوند و از حرکت موج پیروی می‌کنند.

شتاب‌های وارد بر شناور در هر دو شناور هیدروفویلی و سرشی نیز با افزایش سرعت، افزایش می‌یابند. البته همانطور که در شکل ۳۱ نشان داده شده است، افزایش شتاب شناور سرشی بیشتر از شناور هیدروفویلی است که البته این اختلاف در شتاب سینه بسیار بیشتر است.



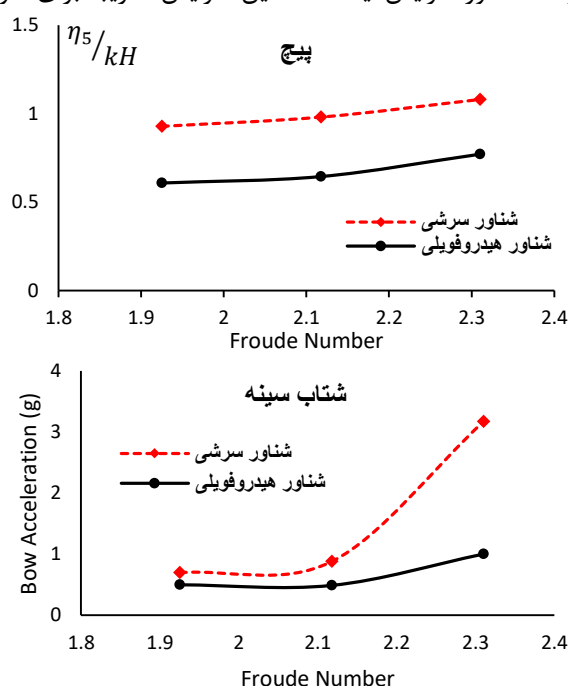
شکل ۳۱: تغییرات هیو، پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناور هیدروفویلی و سرشی با افزایش عدد فرود

شناور سرشی امکان مقایسه بهتر حرکات شناور سرشی با شناور هیدروفویلی از بین می‌رود بدین منظور انحراف از مقدار میانگین حرکات معیار قرار گرفته و نمودارها را بر این اساس رسم شده‌اند. انحراف از مقدار میانگین حرکت هیو و پیچ در شکل ۳۲ و شکل ۳۳ آورده شده است.

حرکت هیو هر دو شناور در ابتدا شبیه به هم بود اما رفته رفته شناور هیدروفویلی عملکرد بهتری از خود نشان داده است. اما در حرکت پیچ شناور هیدروفویلی کاملاً بر شناور سرشی غلبه دارد. این عملکرد خوب شناور هیدروفویلی در بررسی شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب عمودی سینه بهتر قابل مشاهده است (شکل ۳۴ و شکل ۳۵).

تأثیر سرعت شناور بر حرکات آن در معرض امواج دریا مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور شبیه سازی های در سرعت‌های 10، 11 و 12 گره انجام شده است. در ادامه حرکات هیو، پیچ و شتاب‌های وارده به شناور تحت زاویه برخورد 135 درجه موج به شناور، ارتفاع موج $H = 0.0625 m$ و $\frac{\lambda}{L} = 2.5$ بررسی شده است.

با افزایش سرعت شناور، حرکت هیو شناور سرشی تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد (شکل ۳۱) اما حرکت هیو شناور هیدروفویلی در این سه سرعت مختلف شناور، تقریباً ثابت است. پیچ شناور همانطور که در شکل ۳۱ بررسی شده است با افزایش سرعت شناور افزایش یافته که این افزایش تقریباً برای هر دو



۴_۸ امواج نامنظم

امواج دریا امواج نامنظم هستند بنابراین بررسی امواج نامنظم نیز می‌تواند کمک کننده باشد. از این رو شبیه سازی ها برای موج نامنظم با مشخصات ارائه شده در جدول ۴ و در سرعت 10 گره شناور برای هر دو شناور سرشی و هیدروفویلی انجام شده است.

جدول ۴: مشخصات موج نامنظم شبیه سازی شده

پیرسون موسکوچ	طیف موج
0.0625	ارتفاع مشخصه امواج (متر)
6	پریود موج بین دو قله متوالی (ثانیه)
۱۸۰	زاویه برخورد موج (درجه)

با توجه به اینکه موقعیت اولیه شناور سرشی تغییر می‌کند همچنین به دلیل تریم اولیه ناشی از موقعیت افقی مرکز ثقل

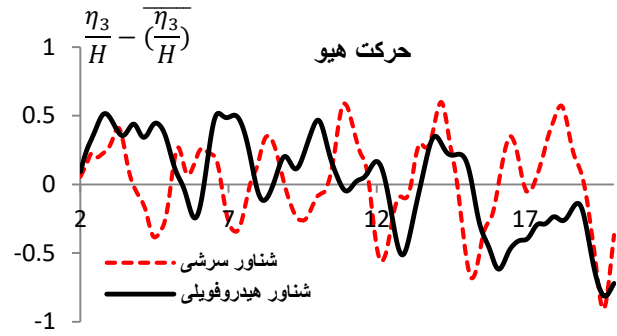
در این پژوهش رفتار دریامانی شناور هیدروفویلی و شناور سرشی و همچنین تغییرات مقاومت این دو شناور با افزایش سرعت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شبیه سازی های عددی برای نشان دادن تأثیر مؤلفه های امواج منظم و همچنین سرعت شناور بر روی مؤلفه های دریامانی شناورهای هیدروفویلی و سرشی انجام شد. بر اساس نتایج حاصل از افزایش طول موج و ارتفاع موج مشخص گردید که با افزایش این دو مؤلفه موج منظم، همه حرکات شناورهای هیدروفویلی و سرشی افزایش می یابد که این افزایش در حرکات شناور سرشی قابل توجه تر است.

در خصوص زاویه برخورد موج به شناور، زوایای برخورد ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که حرکت هیو ناشی از امواج تحت زاویه ۹۰ درجه یا کمتر، شدیدتر است و بیشترین مقدار آن در زاویه ۹۰ درجه اتفاق می افتد. با توجه به منحنی حرکت پیچ، امواج پاشنه خطرناک تر از امواج سینه به نظر می رسند. همچنین امواجی که تحت زاویه برخورد ۴۵ تا ۹۰ درجه به شناور برخورد می کنند برای پیچ شناور هیدروفویلی خطرناک تر از شناور سرشی است. در زاویه ۹۰ درجه شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه شناورها کمترین مقدار را دارد. و در امواج برخوردی با زوایای بیشتر از ۹۰ درجه، شناور هیدروفویلی عملکرد مطلوب تری دارد.

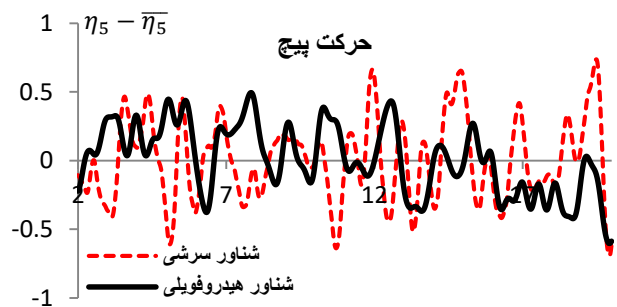
امواج پاشنه به دلیل اهمیت به صورت جداگانه در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید در حالتی که سرعت موج از سرعت شناور کمتر است، فاصله قله تا قعر حرکت هیو شناور هیدروفویلی کمتر از شناور سرشی است و از این نظر عملکرد بهتری دارد. اما در مورد حرکات پیچ، شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه قضیه برعکس است و شناور سرشی عملکرد بهتری دارد. و در حالتی که سرعت موج بیشتر از سرعت شناور است عملکرد هیو و پیچ شناور سرشی مطلوب تر از شناور هیدروفویلی به نظر می رسد از طرفی به شناور هیدروفویلی شتاب کمتری وارد می شود.

با افزایش سرعت شناور، حرکت هیو شناور سرشی تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد اما حرکت هیو شناور هیدروفویلی تقریباً ثابت است. همچنین پیچ شناور افزایش یافته که این افزایش تقریباً برای هر دو شناور یکسان است. شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه در هر دو شناور هیدروفویلی و سرشی نیز با افزایش سرعت، افزایش می یابند. البته افزایش شتاب شناور سرشی بیشتر از شناور هیدروفویلی است که این اختلاف در شتاب نسبی سینه بسیار بیشتر است.

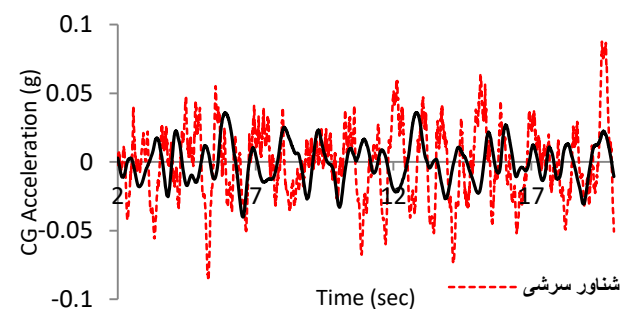
در بررسی موج نامنظم مشخص شد که حرکت هیو هر دو شناور در ابتدا شبیه به هم بوده اما رفته رفته شناور هیدروفویلی عملکرد بهتری از خود نشان داده است. در حرکت پیچ اما شناور



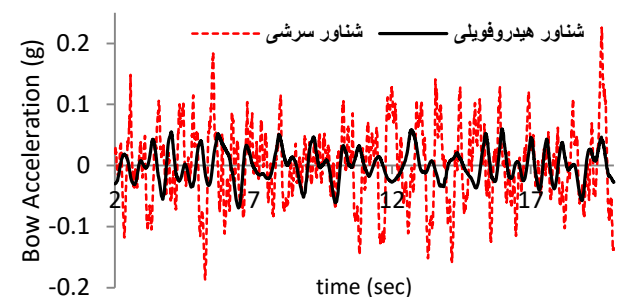
شکل ۳۲: انحراف حرکت هیو شناور هیدروفویلی و سرشی از مقدار میانگین خود در معرض امواج نامنظم



شکل ۳۳: انحراف حرکت پیچ شناور هیدروفویلی و سرشی از مقدار میانگین خود در معرض امواج نامنظم (بر حسب درجه)



شکل ۳۴: انحراف شتاب عمودی مرکز ثقل شناور هیدروفویلی و سرشی از مقدار میانگین خود در معرض امواج نامنظم



شکل ۳۵: انحراف شتاب سینه شناور هیدروفویلی و سرشی از مقدار میانگین خود در معرض امواج نامنظم

۵ جمع بندی و نتیجه گیری

11- ح. ژرفی، م. ندایی بنه و م. اسدی، تحلیل و شبیه سازی پدیده کایتاسیون حول هیدروفویل توسط نرم افزار انسیس فلونت ۲۰۱۷.

12- I. GIBBS AND COX, *HYDROFOIL HANDBOOK VOLUME 1*. 1954.

13- S. L. Tolentino, O. González, and J. Mírez, *Comparative evaluation of DES and SAS turbulence models for incompressible flow in a Venturi tube* INCAS Bulletin 14-2 (2022) 87–101.

14- C. W. Hirt and B. D. Nichols, *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*, Journal of Computational Physics 39-1 (1981) 201–225.

15- R. Scardovelli and S. Zaleski, *Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow*, Annual Review of Fluid Mechanics 31 (1999) 567–603.

16- S. L. Chen, S. L. Yang, and Q. Ma, *An experimental study on hydrodynamic characteristics of Gliding-Hydrofoil Craft*, Journal of Marine Science and Technology 19-1 (2011) 89–96.

17- *No Title*. [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx63137s-m-il>.

۱۸- ح. کریمی و م. مونسان، تخمین مشخصات هندسی و مکان قرارگیری هیدروفویل‌ها و استرات‌های یک نمونه شناور هیدروفویلی ۲۲ Marine Industries Conference (MIC2022) (2022) .

هیدروفویلی کاملاً بر شناور سرشی غلبه دارد. این عملکرد خوب شناور هیدروفویلی در بررسی شتاب عمودی مرکز ثقل و شتاب نسبی سینه بهتر قابل مشاهده است.

در مجموع باید گفت خطرناک‌ترین حالت برای شناور هیدروفویلی زوایای برخورد کمتر از ۹۰ درجه علی‌الخصوص زاویه برخورد صفر درجه یعنی امواج پاشنه است. بنابراین در مواقعی که امواج از پاشنه به سمت شناور هیدروفویلی می‌آیند بهتر آن است که در مسیر حرکت تغییری ایجاد شود که یکسان بودن راستای انتشار موج و حرکت کشتی از بین برود و زاویه برخورد موج به شناور تغییر کند.

۶- مراجع

1- م. مونسان، کتاب جامع مهندسی معماری دریایی ویریش دوم_فصل چهارم، کانون پژوهش، ۱۳۹۱.

2- ک. عالم پور و ع. دهقانیان، اصول طراحی شناور های هیدروفویل، ۱۳۹۰.

3- X. Bi, H. Shen, J. Zhou, and Y. Su, *Numerical analysis of the influence of fixed hydrofoil installation position on seakeeping of the planing craft*, Applied Ocean Research 90 (2019) .

4- M. Torabi Azad, A. Nowruzzi, and M. Sadeghi, *A numerical analysis of hydrofoil operation near the water surface and development of a method to calculate the HYSUCAT dynamic performance in the conceptual design phase*, Indian Journal of Geo-Marine Sciences (2018) .

5- N. Kornev, K. Günter Hoppe, A. Nesterova, and G. Migeotte, *Design of Hydrofoil Assisted Catamarans using a Non-Linear Vortex Lattice Method*, Marine-Engineering YR - 2005, 2 . 37-54 K1-Catamaran K1-Hydrofoil K1-Vortex La.

6- M. H. Chung, *Numerical study of rowing hydrofoil performance at low Reynolds numbers* Journal of Fluids and Structures (2008) .

7- G. D. Xu and Q. Meng, *Waves induced by a two-dimensional foil advancing in shallow water* Engineering Analysis with Boundary Elements (2016) .

8- Q. Wu, B. Huang, G. Wang, and Y. Gao, *Experimental and numerical investigation of hydroelastic response of a flexible hydrofoil in cavitating flow*, International Journal of Multiphase Flow (2015) .

9- E. Esmaeilifar, M. H. Djavarehshkian, B. F. Feshalami, and A. Esmaeili, *Hydrodynamic simulation of an oscillating hydrofoil near free surface in critical unsteady parameter*, Ocean Engineering (2017) .

10- م. ا. صالحی، تحلیل عددی تاثیر توامان تغییرات عمق نسبی و زاویه حمله بر مشخصه های هیدرودینامیکی یک هیدروفویل متحرک در نزدیک سطح دریا ۱۳۹۸.