

محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور تندرو در حرکت سرچ به روش شبیه‌سازی عددی

محمدحسین راستی^۱، سجاد حاجی‌زاده^{۲*}

^۱ دانشجوی ارشد مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، mhrasti313@gmail.com

^۲ استادیار مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، hajizadeh@pgu.ac.ir

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

کلمات کلیدی:

ضرایب هیدرودینامیکی

جرم افزوده

شناور تندرو

نوسان اجباری

ناوبر استوکس رینولدز میانگین

چکیده

امروزه که ضرائب هیدرودینامیکی شناورهای تندرو به موضوعی مهم تبدیل شده است، روش‌های متفاوتی برای محاسبه این پارامترها وجود دارد. از جمله آن‌ها می‌توان به محاسبه به روش تئوری نواری، آزمایش نوسان اجباری در حوضچه کشش و شبیه‌سازی عددی اشاره کرد. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار STAR-CCM+ و روش دینامیک سیالات محاسباتی، به شبیه‌سازی عددی نوسان اجباری شناور اقدام شده است. سپس ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده، میرایی و ضریب بازگرداننده محاسبه شده‌اند. در انتها نیز نتایج بدست آمده با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده و میزان خطای روش حاضر بررسی شد. همانطور که مشاهده می‌گردد درصد خطای نتایج حل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کمتر از ده درصد بوده که می‌توان از روش پیشنهاد شده برای بدست آوردن ضرائب هیدرودینامیکی شناور تندرو با دقت بالایی استفاده نمود.

Calculation of Hydrodynamic Coefficients of a High-Speed Boat in Surge Motion Using Numerical Simulation

First Author Full Name¹, Second Author Full Name^{2*}

¹ Marine engineering graduate student, Persian Gulf University; mhrasti313@gmail.com

² Associate Professor of Marine Engineering, Persian Gulf University; hajizadeh@pgu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 14 Feb 2023

Accepted: 13 Nov 2023

Available online: 13 Nov 2023

Keywords:

Hydrodynamic coefficients

Added mass

high speed boat

Forced oscillation

Reynolds Averaged Navier Stokes

ABSTRACT

Today, the issue of calculating the hydrodynamic coefficients of high-speed vessels is getting more attention. There are different methods for this purpose. Among these methods, one can mention strip theory, forced oscillation tests in the towing tank, and numerical simulation. In this research, STAR-CCM+ software utilized the computational fluid dynamics method to simulate the forced oscillation of the vessel. Subsequently, the added mass, damping, and restoring coefficients are computed. Finally, the obtained results have been compared with experimental values, and the accuracy of the current method has been examined.

۱ - مقدمه

میرایی و نیروی بازگرداننده سیال نیز حرکت متفاوتی نسبت به نوسان در خلأ دارد. او اینگونه مشاهده نمود که مقداری جرم، به جرم آونگ افزوده شده است [۱]. پس از وی اولین تحقیقات راجع به کارایی و عملکرد شناورهای تندرو را فان کارمن بر پایه تئوری

مدتی پس از کشف ضرایب میرایی و بازگرداننده و معادله نوسان کننده‌ها، در سال ۱۸۲۸ فردریک بسل مفهوم جرم افزوده را ایه کشف نمود. وی مشاهده نمود که آونگ نوسان کننده با احتساب

کامل‌ترین پژوهش‌های انجام شده در این زمینه مربوط به وینسنت و همکاران [۱۲] است. آنها ابتدا در آزمایشگاه یک گوه کوچک را به سطح آب برخورد داده و نیروهای وارد بر آن و رفتار جریان آب بعد از برخورد را ثبت کردند. سپس با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی همان برخورد و همان تصاویر را شبیه‌سازی نمودند. در نهایت نیز مدلی ریاضی برای اسپری جریان به اطراف، پس از برخورد گوه به سطح آب، ارائه دادند.

در پژوهشی دیگر با استفاده از روش آزمایشگاهی و حوضچه کشش، تروش پس از تایید عملکرد حوضچه کشش دانشگاه میشیگان، ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور را در محدوده رژیم جریان پروازی بدست آورد. وی با اعمال حرکت‌های اجباری به بدنه مورد نظر در رژیم جریان پروازی، نیروها و گشتاورهای وارد بر آن را اندازه گرفت. سپس با استفاده از نیروهای بدست آمده مقادیر ضرایب جرم افزوده و میرایی را بدست آورد [۱۳ و ۱۴].

در سال‌های اخیر بر اساس مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی عددی پژوهش‌هایی در زمینه محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناورهای سطحی و شناورهای زیر دریایی انجام شده است. این پژوهش‌ها بیشتر با نگاه کنترل شناور و خودکار نمودن آن‌ها انجام گرفته است. لازم به ذکر است که محدوده سرعت مورد استفاده در پژوهش‌های صورت گرفته در محدوده رژیم جریان جابجایی است [۲۰-۱۵]. همچنین در ایران نیز در زمینه محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی می‌توان به پژوهش‌های جوانمرد، ابادری و اردشیری اشاره کرد [۲۱-۲۳].

و در پژوهش حاضر با شبیه‌سازی عددی نوسان اجباری به روش دینامیک سیالات محاسباتی، حجم محدود، شرایط آزمایش‌های تروش معادل سازی شده است. سپس به همان روش ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه و با مقادیر ارائه شده توسط تروش مقایسه گردیده است. هدف از انجام این پژوهش دست‌یابی به چینی مناسب و سریع از شرایط حل و شبکه بندی، جهت محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه‌های مختلف است.

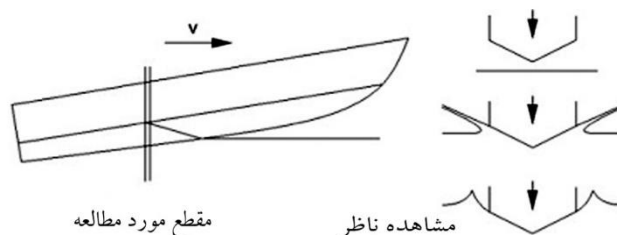
۲- معادلات حاکم

معادلات اساسی حاکم بر این مسئله، به مانند دیگر مسائل سیالاتی معادلات پیوستگی و ناویر استوکس است. از آنجا که از تغییرات دمایی در طول جریان صرف نظر شده است لذا معادلات انرژی استفاده نشده‌اند. در ادامه معادلات ضرایب ارائه خواهد شد.

۲-۱- معادلات ضرایب هیدرودینامیکی

جرم اضافه شده یا جرم مجازی، اینرسی است که به یک سیستم اضافه می‌شود، زیرا جسم شتابدار باید مقداری از حجم سیال اطراف را در حین حرکت در آن حرکت دهد چراکه جسم و مایع

جرم افزوده در مدل‌سازی بارهای وارده بر شناور پروازی انجام داد. وی ابعاد مسئله را از سه بعد کاهش داده و به دو بعد تبدیل کرد. برای این کار که بعدها به تئوری ۲/۵ بعدی نیز مشهور شد، مسئله سه‌بعدی را به ورود دوبعدی مقاطع عرضی به آب تقریب زد. فرض‌های ساده کننده وی تقریب مقاطع عرضی بدنه با گوه مثلثی شکل و برخورد متقارن و عمودی مقاطع به سطح آب بود [۲]. تحقیقات وی همچنان پایه و اساس بسیاری از مدل‌های تحلیلی است. جزئیات این روش در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱. روش حل دو و نیم بعدی.

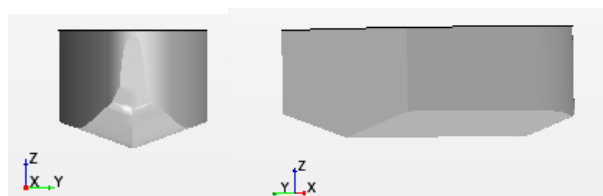
پس از فان کارمن محققینی همچون فالتینسن، ساتورف و رادراسترم نیز در زمینه برخورد مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی بدنه به آب را بررسی کردند [۳-۵]. در این میان اما شاخص‌ترین و مؤثرترین پژوهش، تحقیقات واگنر بر روی این موضوع بود. وی کار خود را بر روی شناورهای پروازی و نشست و برخاست هواپیماهای آبنشین انجام داد. نتایج وی مطابقت مناسبی با نتایج فان کارمن در محدوده چاین خشک داشت اما تفاوت کار وی با فان کارمن در نظر گرفتن اثر اسپری در جرم افزوده بود. او در این تقریب مقدار جرم افزوده ناشی از اسپری مقادیر را بسیار بزرگ‌تر از مقادیر واقعی در نظر گرفت و همین موضوع باعث ایجاد مسیری اشتباه در زمینه تئوری جرم افزوده گشت. این موضوع در مطالعات پین مورد توجه قرار گرفت و اشکالات آن برطرف شد [۶،۷]. در سال‌های بین ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰ میلادی موضوع جرم افزوده، موضوعی جذاب برای محققان بوده و آنها با روش‌های مختلفی همچون روش‌های تمام آزمایشگاهی، روش‌های تمام تحلیلی و یا با روش‌های نیمه تجربی، سعی در یافتن روابطی مناسب جهت تخمین یا بدست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی شناورها نمودند. [۸-۱۱] روابط بدست آمده دارای نواقصی از جمله برآورد بیش از اندازه ضرایب، محدود بودن به شرایط عملکردی خاص و یا فرض فرکانس بی نهایت سطح آب، بودند.

با گسترش دینامیک سیالات محاسباتی در زمینه‌های مختلف، محققانی با استفاده از آن سعی در برآورد و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه کردند. در این زمینه نیز تئوری نواری و شبیه‌سازی برخورد گوه دو بعدی به سطح آب پیشگام بود. یکی از

این شبیه سازی با بدنه ارائه شده در مقاله تروش [۱۴] انجام شده است. خصوصیات مدل در جدول ۱ آمده است. این بدنه از نوع منشوری بوده و دارای زاویه خیز کف ۲۰ درجه است. طول آن ۲ متر و عرض آن ۳۲ سانتی متر می‌باشد. حجم بدنه در شکل ۲ دیده می‌شود.

جدول ۱. خصوصیات بدنه شناور.

| پارامتر | مقدار |
|---------------------------------|-------|
| طول (متر) | ۲/۱ |
| عرض (متر) | ۰/۳۲ |
| زاویه خیز کف (درجه) | ۲۰ |
| زاویه تریم (درجه) | ۴ و ۶ |
| طول خیس به عرض (lw/B) | ۳ |
| طول مرکز ثقل به عرض (lcg/B) | ۱/۴۷ |
| عرض مرکز ثقل به عرض (vcg/B) | ۰/۶۵ |



شکل ۲. حجم توپر بدنه شناور.

۳-۲- شرایط جریان

در این شبیه سازی از شرایط تست تروش استفاده شده است. تروش آزمایشاتش را در پنج فرکانس، چهار سرعت و سه زاویه تریم انجام داده است. وی این ۱۲ آزمایش را برای چهار ضریب هیدرودینامیکی مختلف تکرار کرده است. این ضرایب عبارتند از: B_{55} و B_{35} و B_{53} و B_{33} و A_{55} و A_{35} و A_{53} و A_{33} . ضرایب $C_{i,j}$ نیز معادل مقدار هیدرواستاتیکی لحاظ شده است. با اینحال در این پژوهش تنها به محدوده سرعت جریان پروازی اکتفا شده در نتیجه، محدوده های زیر پروازی سرعت و تریم ۸ درجه حذف شده اند. بدین ترتیب شبیه سازی تنها در شرایط تریم ۴ و ۶ درجه، با ضریب سرعت ۲/۵ انجام شده است. شرایط جریان مورد استفاده در شبیه سازی های این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خصوصیات جریان مورد مطالعه.

| پارامتر | مقدار |
|----------------------------|-----------------------------------|
| ضریب سرعت (C_p) | ۲/۵ |
| فرکانس (Hz) | ۴/۷۲ و ۶/۱۱ و ۷/۷۷ و ۹/۴۴ و ۱۱/۱۱ |
| دامنه حرکت هیو خالص (متر) | ۰/۳۸۱۶ |
| دامنه حرکت پیچ خالص (درجه) | ۰/۹ |

اطراف آن نمی‌توانند فضای فیزیکی یکسانی را به طور همزمان اشغال کنند. برای سادگی، می‌توان آن را به عنوان حجمی از سیال که با جسم حرکت می‌کند، مدل سازی کرد، اگرچه در واقعیت همه سیال به درجات مختلف شتاب می‌گیرد. به طور کلی، جرم افزوده یک تانسور مرتبه دوم است که بردار شتاب سیال را به بردار نیروی حاصله روی جسم مرتبط می‌کند. ضریب جرم افزوده بدون بعد نیز جرم افزوده تقسیم بر جرم سیال جابجا شده است به عبارتی از تقسیم جرم افزوده بر چگالی سیال ضربدر حجم بدنه حاصل می‌شود. لازم به ذکر است جرم افزوده غیرلج بوده و ربطی به اصطکاک ندارد. معادله (۱) تانسور جرم افزوده را نشان می‌دهد:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در نتیجه معادله ارتعاشی بدنه در هر راستا به شکل معادله (۲) خواهد بود:

$$(m + A_{ij})\ddot{x} + B_{ij}\dot{x} + k_{ij}x = f(t) \quad (2)$$

و فرکانس طبیعی سیستم نیز از معادله (۳) محاسبه خواهد شد:

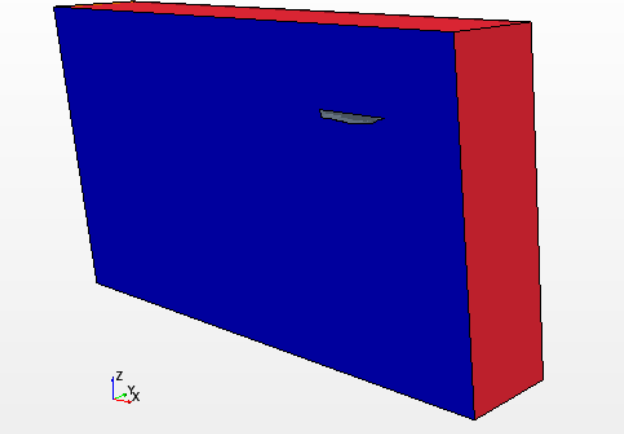
$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m'}} = \sqrt{\frac{k}{m + A_{ij}}} \quad (3)$$

همچنین لازم به ذکر است A_{ij} ، B_{ij} و k_{ij} به ترتیب بیانگر تانسور جرم افزوده، تانسور میرایی و تانسور سختی می‌باشند و می‌توانند توابعی از ω و x باشند. همین مسئله باعث می‌شود که در عین حال که معادله (۲) به صورت خطی نوشته می‌شود، معادله‌ای غیر خطی باشد. البته با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و روابط تجربی بدست آمده از آن‌ها می‌توان نشان داد که معمولاً این ضرایب در هندسه های منشوری، نوسانات کوچک و سرعت-های پایین تر از محدوده پروازی، تقریباً خطی عمل می‌کنند. واضح است که این فرض‌ها در مورد رژیم جریان پروازی صدق نمی‌کنند، و به همین دلیل دینامیک شناور پروازی غیر خطی است.

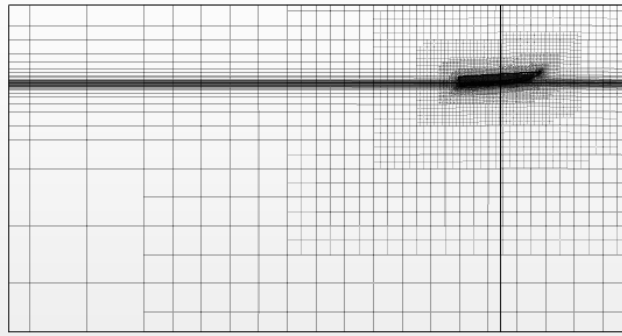
۳- شرایط حل

۳-۱- شناور مورد آزمایش

Simcenter STAR-CCM+

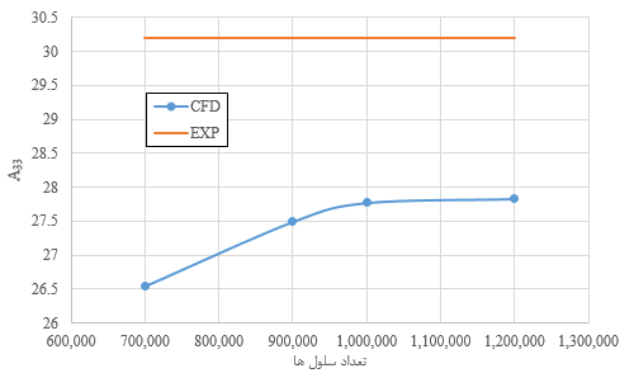


شکل ۳. دامنه محاسباتی. در این شکل دیواره های ورودی به رنگ قرمز و دیواره متقارن به رنگ آبی است. همچنین دیواره روبرو به دیواره متقارن و دیواره کف نیز از نوع ورودی مماسی بوده و دیواره انتهایی دامنه محاسباتی از نوع خروجی تعیین شده است.



شکل ۴. شبکه بندی اطراف بدنه و دامنه محاسباتی.

در شکل ۵ نمودار استقلال از مش برای تعداد کل ۷۰۰ هزار، ۹۰۰ هزار، یک میلیون و ۱/۲ میلیون برای A_{33} در فرکانس ۱۱/۱ هرتز و تریم ۶ درجه ارائه شده است. نتایج مذکور از همگرایی یکنواخت و نزدیک به مقدار آزمایشگاهی برخوردار است.



شکل ۵. منحنی استقلال از شبکه.

۳-۳- شرایط حل عددی

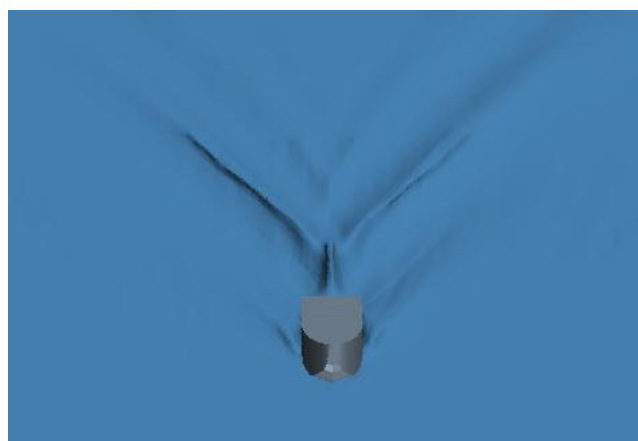
شبیه سازی های این پژوهش در نرم افزار تجاری دینامیک سیالات محاسباتی Star CCM+ انجام شده است. در این شبیه سازی از شبکه بندی جابجا شونده استفاده شده است. دلیل انتخاب این شبکه بندی حساسیت کمتر به حرکات شناور و عدم تغییر تعداد سلول شبکه بندی در حین حل است. به دلیل اینکه این نوع از شبکه بندی در حین حل تغییر نمی یابد یا اصطلاحاً ریمش نمی شود، زمان حل نسبت به شبکه بندی های تغییر شکل دهنده و شبکه بندی های انطباقی کاهش می یابد.

از آنجا که این شبیه سازی ها پایا نبوده اما با فرکانسی مشخص در حال تکرار است، حلگر زمانی انتخاب شده از نوع ناپایدار ضمنی (با گام زمانی ۰/۰۰۱) انتخاب شده است. همچنین از آنجا که حرکات جسم اجباری است نیازی به ارائه جرم و ممان اینرسی به نرم افزار نیست. مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق $k-\epsilon$ است و از مدل Flat VOF Wave استفاده شده است. فاز های سیالاتی مورد استفاده نیز از نوع اوپلری و غیر قابل تراکم و غیر قابل انحلال در یکدیگر می باشند. خلاصه شرایط حل عددی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. خصوصیات و چیدمان حل عددی.

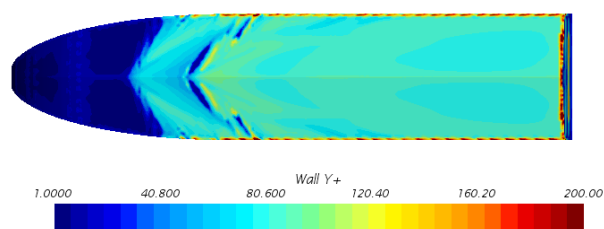
| پارامتر | مقدار |
|-----------------------------|------------------------|
| ابعاد دامنه محاسباتی (متر) | $12 \times 4 \times 8$ |
| گام زمانی (ثانیه) | ۰/۰۰۱ |
| اندازه کوچک ترین سلول (متر) | ~۰/۰۰۱ |
| تعداد کل سلول های شبکه بندی | ~۱۰۰۰۰۰۰ |
| مدل توربولانسی | $k-\epsilon$ |

دامنه محاسباتی مورد استفاده در این پژوهش مشابه دامنه محاسباتی شینگارت [۱۵] انتخاب شده است. دامنه محاسباتی و شبکه بندی آن نیز در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۸. نمایی از سطح آزاد آب در شبیه سازی حرکت اجباری در خط مستقیم با تریم و عمق مغروق ثابت.

از آنجا که در این شبیه‌سازی اندازه سلول‌های چسبیده به دیواره درشت است، لذا از تابع دیواره جریان با y^+ بالا استفاده شده است. شکل ۶ مقادیر y^+ روی بدنه را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقدار تابع دیواره y^+ روی بدنه.

جدول ۴. جدول مقادیر نیروهای بدست آمده در حرکت اجباری در خط مستقیم.

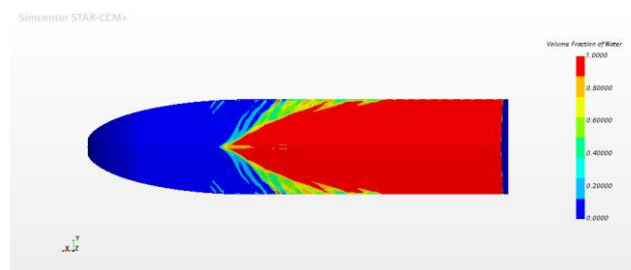
| مقدار | | | | پارامتر |
|-------|-------|-------|-------|----------|
| ۲/۵ | | ۲ | | C_D |
| ۶ | ۴ | ۶ | ۴ | τ |
| ۸۶/۴۳ | ۵۱/۲۱ | ۶۸/۷۹ | ۴۰/۵۵ | F_{11} |
| ۱۴/۶۵ | ۸/۷۱ | ۱۰/۴۶ | ۶/۳۲ | F_{31} |

۴- نتایج

در این مطالعه ابتدا نیروهای وارد بر شناور در حالت آب آرام، در سرعت و تریم‌های مشخص شده، بدست آمد. این نیروها جهت محاسبه نیروهای وارد بر شناور با حرکت اجباری مورد نیاز بوده و از نتیجه نیروهای شبیه‌سازی های دارای حرکت اجباری کسر می‌شود. شکل ۵ نمای زیر بدنه شناور را در این بخش از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶ سطح آزاد در این شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در جدول ۴ آمده است.

در جدول ۴، C_D ضریب سرعت شبیه‌سازی و τ زاویه تریم اجباری برحسب درجه است. F_{11} همان نیروی مقاومت سیال در برابر حرکت بدنه است. F_{31} نیروی وارد شده به بدنه در راستای Z به دلیل حرکت سرج است.

پس از آن حرکت پیچ و هیو خالص به شناور اعمال شد. این حرکات هرکدام در دو سرعت و پنج فرکانس بررسی شد. نتایج محاسبه ضرایب در حوضچه کشش و شبیه‌سازی عددی در حرکت هیو خالص در جدول ۵ آمده است. نتایج محاسبه ضرایب در حوضچه کشش و شبیه‌سازی عددی در حرکت پیچ خالص نیز در جدول ۶ آمده است. در شکل ۷ نمایی از شبیه‌سازی حرکت هیو اجباری در ضریب سرعت ۲/۵ با تریم ثابت ۴ درجه ارائه شده است. در این نما میدان سرعت و VOF زیر بدنه مشاهده می‌شود.



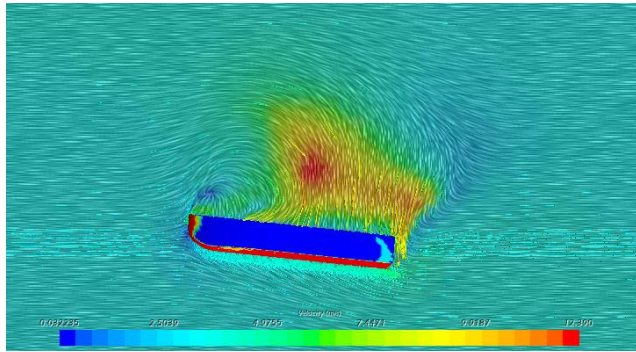
شکل ۷. نمای VOF در زیر بدنه در شبیه‌سازی حرکت اجباری در خط مستقیم با تریم و عمق مغروق ثابت.

جدول ۵. نتایج محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه در حرکت هیو خالص و تریم ۴ درجه.

| نتایج حوضچه کشش | | | | |
|-----------------|----------|----------|----------|--------|
| B_{35} | B_{33} | A_{35} | A_{33} | فرکانس |
| -۳۱/۴۷ | ۱۲۲/۲۴ | -۳/۳ | ۳۶/۲۶ | ۴/۷۲ |
| -۲۹/۸۰ | ۱۲۶/۳۱ | ۲/۳۱ | ۳۱/۳۱ | ۶/۱۱ |

| | | | | |
|--------|--------|------|------|-------|
| ۵۷۹/۰۵ | ۱۶۷/۹۸ | ۰/۵۶ | ۰/۷۸ | ۱۱/۱۱ |
|--------|--------|------|------|-------|

طبق جداول ۵ تا ۷ نتایج شبیه‌سازی عددی نسبت به آزمایشات مرجع [۱۴] از دقت مناسبی برخوردار است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی می‌توان به نتایج مناسبی رسید.



شکل ۹. نمایی از حرکت بدنه در شبیه‌سازی حرکت هیو اجباری. در این نما میدان سرعت و VoF زیر بدنه دیده می‌شود. خط رنگی پایین معرف سرعت است.

۵ - نتیجه گیری

چنانچه پیش از این نیز اشاره شد، هدف از این پژوهش دستیابی به مدلی مناسب جهت شبیه‌سازی حرکت هیو و پیچ اجباری، جهت محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه شناور، در رژیم جریان پروازی است. با توجه به نتایج و نرخ پایین خطای آن، این مهم حاصل شده است. همچنین در آینده می‌توان از این چینه‌س حل، جهت بدست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی دیگر بدنه‌ها و استفاده از آن‌ها در معادلات کنترلی استفاده نمود. از دیگر نتایج این چینه‌س می‌توان به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی در شرایط ناپایداری شناور نیز اشاره کرد. چرا که در چینه‌س‌هایی که در آنها بدنه در شرایط حرکت آزاد قرار دارد، در شرایط ناپایدار بدنه باعث خطای چینه‌س حل شده و اصطلاحاً شبیه‌سازی با خطای اجرای رایانه‌ای مواجه می‌شود. بدین ترتیب بعنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی، می‌توان ناپایداری‌هایی همچون چاین‌روی را نیز شبیه‌سازی کرده و ضرایب بدنه و تغییرات آنها را نیز بدست آورد.

۶ - مراجع

- 1- Stokes, G. G. (1851). *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums.*
- 2- Schneekluth, Herbert, Volker Bertram. (1998) *Ship design for efficiency and economy.* Vol. 218. Oxford: Butterworth-Heinemann,.
- 3- Ross, W.J., Bicycle. (1948), Google Patents.
- 4- Faltinsen, O. M. (2007). *Challenges in hydrodynamics of ships and ocean structures.*

| | | | | |
|-------|-------|------|--------|--------|
| ۹/۴۴ | 29 | ۲/۳۱ | ۱۳۳/۸۸ | -۳۱/۴۷ |
| ۱۱/۱۱ | ۲۶/۳۶ | ۲/۳۱ | ۱۳۹/۷۰ | -۳۲/۵۸ |

نتایج حل عددی

| | | | | |
|-------|-------|-------|--------|--------|
| ۴/۷۲ | ۳۸/۲۱ | -۳/۲۱ | ۱۲۸/۸۰ | -۳۳/۱۶ |
| ۶/۱۱ | ۳۲/۹۹ | ۲/۴۳ | ۱۳۳/۰۹ | -۳۱/۴۰ |
| ۹/۴۴ | ۳۰/۵۶ | ۲/۴۳ | ۱۴۱/۰۶ | -۳۳/۱۶ |
| ۱۱/۱۱ | ۲۷/۷۷ | ۲/۴۳ | ۱۴۷/۱۹ | -۳۴/۷۲ |

جدول ۶. نتایج محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه در حرکت هیو خالص و تریم ۶ درجه.

نتایج حوضچه کشش

| فرکانس | A_{33} | A_{35} | B_{33} | B_{35} |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| ۴/۷۲ | ۲۸/۹۴ | ۰/۸۱ | ۴۵۵/۳۷ | -۱۰۲/۲۱ |
| ۶/۱۱ | ۲۹/۹۰ | ۰/۸۱ | ۴۳۷/۵۱ | -۱۰۲/۲۱ |
| ۹/۴۴ | ۳۰/۵۴ | ۰/۸۱ | ۴۴۶/۴۴ | -۹۶/۵۴ |
| ۱۱/۱۱ | ۳۰/۱۹ | ۰/۸۱ | ۴۶۴/۳۰ | -۱۰۲/۲۱ |

نتایج حل عددی

| | | | | |
|-------|-------|-----|--------|---------|
| ۴/۷۲ | ۳۸/۲۱ | ۰/۹ | ۴۷۵/۴۸ | -۱۰۹/۳۲ |
| ۶/۱۱ | ۳۲/۹۹ | ۰/۹ | ۴۶۳/۲۹ | -۱۰۹/۳۲ |
| ۹/۴۴ | ۳۰/۵۶ | ۰/۹ | ۴۶۷/۸۶ | -۱۰۹/۳۲ |
| ۱۱/۱۱ | ۲۷/۷۷ | ۰/۹ | ۴۸۷/۳۷ | -۱۰۹/۳۲ |

جدول ۷. نتایج محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه در حرکت پیچ خالص.

نتایج حوضچه کشش

| فرکانس | A_{55} | A_{53} | B_{55} | B_{53} |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| ۴/۷۲ | ۰/۷۳ | ۱/۰۵ | ۱۸۰/۵۳ | 511 |
| ۶/۱۱ | ۱ | ۱/۶۷ | ۱۶۸/۵۰ | ۵۴۸/۸ |
| ۹/۴۴ | ۰/۶۳ | ۰/۷۳ | ۱۶۰/۳۸ | ۵۲۹/۸۶ |
| ۱۱/۱۱ | ۰/۷۳ | ۰/۵۲ | ۱۵۶/۴۶ | ۵۳۲/۳۲ |

نتایج حل عددی

| | | | | |
|------|------|------|--------|--------|
| ۴/۷۲ | ۰/۷۸ | ۱/۱۳ | ۱۹۳/۸۳ | ۵۴۸/۶۴ |
| ۶/۱۱ | ۱/۰۷ | ۱/۷۹ | ۱۸۰/۹۱ | ۵۸۹/۲۲ |
| ۹/۴۴ | ۰/۶۸ | ۰/۷۸ | ۱۷۲/۱۹ | ۵۶۸/۸۸ |

waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11), 418.

- 21- Ardeshiri S, Yari E. Calculation Submarine Hydrodynamic Coefficient by Hybrid Method. *Marine Engineering* 2023; 19 (38) :38-50(In Persian)
- 22- Abazari A, Behzad M. A review of the researches on the added mass and damping coefficients for the heave plates of the offshore platforms at translational and rotational oscillations. *Marine Engineering* 2020; 16 (31) :65-81(In Persian)
- 23- Javanmard E, Mansoorzadeh S. Numerical Investigation of an Underwater Vehicle Accelerated Motion and Determination of Its Added Mass Coefficients. *Marine Engineering* 2016; 11 (22) :1-13(In Persian)

Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, 58(3), 268-277.

- 5- Patel, P., & Premchand, M. (2015). *Numerical Investigation of the Influence of Water Depth on Ship Resistance*. *International Journal of Computer Applications*, 116, 10-17.
- 6- Wagner, H. (1931). *Landing of seaplanes* (No. NACA-TM-622).
- 7- Payne, P. R. (1974). *Coupled pitch and heave porpoising instability in hydrodynamic planing*. *Journal of Hydronautics*, 8(2), 58-71..
- 8- Khazaei, R., Rahmansetayesh, M. A., & Hajizadeh, S. (2019). *Hydrodynamic evaluation of a planing hull in calm water using RANS and Savitsky's method*. *Ocean Engineering*, 187, 106221.
- 9- Hajizadeh, S., Seif, M., & Mehdigholi, H. (2016). *Determination of ship maneuvering hydrodynamic coefficients using system identification technique based on free-running model test*. *Scientia Iranica*, 23(5), 2154-2165.
- 10- Savitsky, D. (1964). *Hydrodynamic design of planing hulls*. *Marine Technology and SNAME News*, 1(04), 71-95.
- 11- Martin, M. (1978). *Theoretical determination of porpoising instability of high-speed planing boats*. *Journal of ship research*, 22(01), 32-53..
- 12- Vincent, L., Xiao, T., Yohann, D., Jung, S., & Kalso, E. (2018). *Dynamics of water entry*. *Journal of Fluid Mechanics*, 846, 508-535.
- 13- Troesch, A. W., & Falzarano, J. M. (1993). *Modern nonlinear dynamical analysis of vertical plane motion of planing hulls*. *Journal of ship research*, 37(03), 189-199.
- 14- Troesch, A. W. (1992). *On the hydrodynamics of vertically oscillating planing hulls*. *Journal of Ship Research*, 36(04), 317-331.
- 15- Sheingart, Z. (2014). *Hydrodynamics of high speed planing hulls with partially ventilated bottom and hydrofoils* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- 16- Ling, X., Leong, Z. Q., Chin, C., Woodward, M., & Duffy, J. (2022). Regression analysis and curve fitting for the hydrodynamic coefficients of an underwater vehicle undergoing straight-ahead motion. *Ocean Engineering*, 262, 112135.
- 17- Huang, H., Zhou, Z., Li, H., Zhou, H., & Xu, Y. (2020). The effects of the circulating water tunnel wall and support struts on hydrodynamic coefficients estimation for autonomous underwater vehicles. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, 1-10.
- 18- Cely, J. S., Saltaren, R., Portilla, G., Yakurangi, O., & Rodríguez-Barroso, A. (2019). Experimental and computational methodology for the determination of hydrodynamic coefficients based on free decay test: Application to conception and control of underwater robots. *Sensors*, 19(17), 3631.
- 19- Xu, H., & Soares, C. G. (2019). Hydrodynamic coefficient estimation for ship manoeuvring in shallow water using an optimal truncated LS-SVM. *Ocean Engineering*, 191, 106488.
- 20- Zhao, Y. P., Chen, Q. P., Bi, C. W., & Cui, Y. (2019). Experimental investigation on hydrodynamic coefficients of a column-stabilized fish cage in