

بررسی عملکرد یک شناور تک‌بدنه پله‌دار در آب آرام و موج

محمدحسین راستی^۱، سجاد حاجی‌زاده^۲

۱- دانشگاه خلیج فارس، mhrasti313@gmail.com

۲- دانشگاه خلیج فارس، hajizadeh@pgu.ac.ir

چکیده:

از آنجاکه کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور مزیت‌هایی همچون کاهش مصرف سوخت در سرعت ثابت و یا افزایش سرعت در مصرف سوخت ثابت را به همراه دارد؛ طراحان بسیاری به ارائه طرح‌ها و تغییرات هندسه شناور در جهت کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناورها پرداخته‌اند. برای کاهش مقاومت هیدرودینامیکی نیز بایستی مقاومت ویسکوز و موج‌سازی را کاهش داد. برای همین منظور در مورد مقاومت موج‌سازی شناور می‌توان نشان داد که این جزء مقاومت در عدد فرود طولی‌های بالاتر از ۱/۷۶ قابل چشم‌پوشی است. امروزه برای کاهش مقاومت ویسکوز نیز از ایجاد پله در بدنه استفاده می‌شود. برای این منظور بدنه دوپله سری ساوتهمپتون مدل C-2 انتخاب شده و کارایی آن در آب آرام و موج مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر عددی در شرایط آب آرام و موج تطابق مناسبی با نتایج تجربی مراجع پیشین دارد. در این مطالعه شناور در ۵ سرعت و ۲ موج منظم شبیه‌سازی شده است. این بررسی به کمک نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام انجام شده است.

واژه‌های کلیدی:

شناور تندرو، شبیه‌سازی عددی، شناور دوپله، شناور پله‌دار، شناور پروازی، معادلات ناویر-استوکس رینولدز میانگین

Investigating The Performance of a Stepped Single-Hull in Calm Water and Waves

Mohammad Hosein Rasti¹, Sajad Hajizadeh²

1- Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

2- Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Abstract

Since reducing the hydrodynamic resistance of the vessel brings advantages such as reducing fuel consumption at a constant speed or increasing the speed at constant fuel consumption, many designers started to provide designs and changes in the geometry of the vessel in order to reduce the hydrodynamic resistance of the vessel. In order to reduce the hydrodynamic resistance, the viscous and wave resistance should also be reduced. For this purpose, it can be shown that this component of resistance is noticeable in longitudinal Froude numbers higher than 1.76. Today, creating steps in the body is also used to reduce viscose resistance. For this purpose, the Southampton series C-2 double-stepped hull was selected and its efficiency was investigated in calm and rough water. Numerical values in calm and rough water conditions are in good agreement with the experimental results of previous references. In this study, the vessel is simulated at 5 speeds and 2 regular waves. This review was done with the help of StarCCM software.

Keywords

High-Speed Boat, Numerical Simulation, Double-Stepped Boat, Stepped Vessel, Planing Hull, Averaged Navier-Stokes Reynolds Equations

مقاومت در عدد فرود طولی‌های بالاتر از $1/76$ قابل چشم‌پوشی است. جزء موج‌سازی مقاومت هیدرودینامیکی شناور در اعداد فرود طولی بالاتر از $1/76$ بیش از ۹۰ درصد کاهش یافته و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. به همین دلیل در شناورهای پروازی از این بخش از مقاومت صرف‌نظر شده و مقاومت هیدرودینامیکی شناور را تابعی از ویسکوزیته می‌دانند. به عبارتی در شناورهای پروازی مجموع مقاومت ویسکوز فشاری و مقاومت اصطکاکی مورد بحث است.

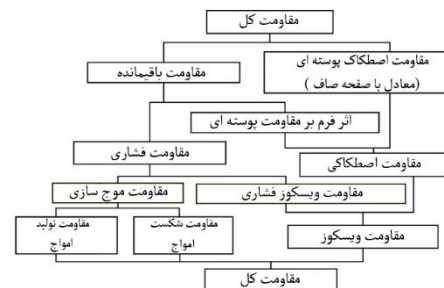
مقاومت ویسکوز شناور تابعی از سرعت و سطح خیس شده شناور است. از آنجا که سرعت همواره در حال افزایش است، برای کاهش مقاومت ویسکوز بایستی سطح خیس را کاهش داد. اولین راه‌حل کاهش سطح خیس، در سال ۱۸۷۲ توسط رو راموس در ساسکس انگلستان ارائه شد. وی اولین کسی بود که از ساختار پله عرضی استفاده کرد. از دیگر طرح‌های اجرا شده در دهه ۱۹۲۰ می‌توان به طرح جان تورنیکرافت اشاره کرد. وی با طراحی و ساخت بدنه‌ای پله‌دار توانست سرعت شناور خود را تا ۳۵ نات افزایش دهد [۶].

پله در واقع یک بریدگی عرضی بود که بدنه شناور را به دو قسمت جلویی و عقبی تقسیم کرده و قسمت عقبی را کمی به بالا می‌برد. بدین ترتیب پله یک ناپیوستگی عرضی در کف بدنه ایجاد می‌کرد. در ساخت پله نیازی به تغییر خطوط آفست بدنه شناور نبوده و با بالا بردن خطوط آفست، پله ایجاد شده که همین باعث ساخت آسان آن در کارخانه می‌شود [۷].

هدف از ایجاد پله در شناورها جدایش جریان از بدنه و اتصال دوباره آن به شناور است. بدین ترتیب که با افزایش سرعت، جریان از پله جدا شده و هوا از کنارها به محل پله وارد می‌شود. بدین ترتیب یک شکاف هوا در جریان آب ایجاد می‌شود. با جدایش جریان از پله بخشی از بدنه خشک شده و سطح خیس شناور کاهش می‌یابد. کاهش سطح خیس باعث کاهش مقاومت ویسکوز گشته و به تبع آن مقاومت کل شناور نیز کاهش می‌یابد. نمونه‌ای از این رخداد در شکل ۲ نشان داده شده است [۸].

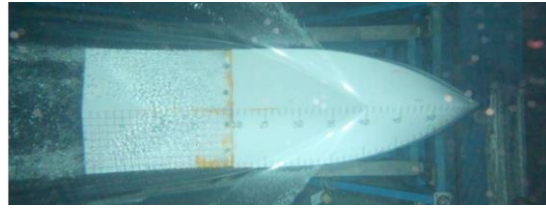
پیش از ویلیام فرود به کشتی‌سازی به‌عنوان یک هنر نگریسته می‌شد تا آنجا که آن را جزئی از معماری می‌دانستند [۱]. وی اولین کسی بود که نیروی مقاومت آب در برابر حرکت شناورها را مورد بررسی قرار داد [۲]. او نیروی مقاومت هیدرودینامیکی را به دو بخش مقاومت اصطکاکی و مقاومت باقیمانده تقسیم کرد و عمده مقاومت باقیمانده را ناشی از پدیده موج‌سازی دانست [۳]. این امواج را پس از فرود، کلونین مورد مطالعه قرار داد و به همین دلیل به نام امواج کلونین شناخته می‌شوند. وی نشان داد که هر جسم شناور متحرک دو سیستم از امواج واگرا را در اطراف خود ایجاد می‌کند. سیستم اول، سیستم امواجی است که توسط سینه ایجاد می‌شوند و سیستم دوم امواج تولید شده از پاشنه شناور می‌باشد.

از آنجا که کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور مزیت‌هایی همچون کاهش مصرف سوخت در سرعت ثابت و یا افزایش سرعت در مصرف سوخت ثابت را به همراه دارد؛ طراحان بسیاری به ارائه طرح‌ها و تغییرات هندسه شناور در جهت کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناورها پرداخته‌اند [۴]. این طرح‌ها به تدریج و به موازات بهبود تدریجی فناوری پیشرانش، بر روی شناورهای معمول که تک بدنه بودند توسعه یافتند و باعث افزایش سرعت خدماتی شناورها شدند [۵]. از همین رو اولین شناورهای که در زمینه کاهش مقاومت به نتایج چشمگیری دست پیدا کردند شناورهای تک بدنه پروازی بودند. در شکل ۱ اجزای مقاومت هیدرودینامیکی کل و رابطه آن‌ها با یکدیگر نمایش داده شده است.



شکل ۱- اجزای مقاومت هیدرودینامیکی

برای کاهش مقاومت هیدرودینامیکی بایستی اجزای تشکیل‌دهنده آن را کاهش داد. برای همین منظور در مورد مقاومت موج‌سازی شناور می‌توان نشان داد که این جزء



شکل ۲- نمونه‌ای از جدایش جریان بدنه پله‌دار پروازی [۸]

در بدنه‌های پروازی بدون پله با افزایش سرعت، عمده‌گرادیان مثبت فشار و برآ شناور در نزدیکی خط سکون و در جلوی مرکز جرم ایجاد می‌شود. این در حالی است که در بخش‌های دیگر کف بدنه که جریان از چاین عبور می‌کند و فشار خط سکون به چاین برخورد می‌نماید گرادیان فشاری منفی ایجاد می‌شود [۹]. به همین دلیل در کف بدنه مناطق کم‌فشاری وجود دارد که چندان در تولید برآ کارا نبوده اما مقاومت اصطکاکی ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، به علت وجود این مناطق تریم شناور از حالت بهینه دور شده و کارایی سطح تولیدکننده برآ کاهش می‌یابد. این کاهش کارایی شامل افزایش نسبت L/D و کاهش ضریب منظری می‌شود. تفاوت توزیع فشار در حالت چاین خشک و چاین خیس در شکل ۳ دیده می‌شود.



شکل ۳- شماتیک پروفیل فشار قبل و بعد از رسیدن

جریان به چاین

برای افزایش فشار در کف بدنه و افزایش نسبت L/D دو راهکار وجود دارد: راهکار اول کاهش زاویه خیزکف و راهکار دوم ایجاد پله است. گرچه با کاهش زاویه خیزکف کارایی بدنه در تولید نیروی برآ افزایش می‌یابد اما این تغییر در بدنه ناپایداری‌هایی مانند اسلمینگ را تشدید می‌کند. راهکار دوم با ایجاد پله در مکان صحیح و جدایش جریان از بدنه است و بدین ترتیب مقاومت هیدرودینامیکی کاهش یافته و تریم شناور نیز به حالت بهینه نزدیک می‌شود. برخورد دوباره جریان به بدنه، منطقه‌ای پرفشار و خط سکون جدیدی ایجاد کرده که نه تنها کاهش برآ را جبران می‌کند بلکه آن را افزایش نیز می‌دهد. اولین تحقیقات راجع به کارایی و عملکرد شناورهای تندرو را فان

کارمن بر پایه تئوری 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 $2/5$ بعدی نیز مشهور شد مسئله سه‌بعدی را به ورود دوبعدی مقاطع عرضی به آب تقریب زد. [۸]

پس از فان کارمن محققینی همچون فالتینسن، ساتورف و رادراسترم نیز برخورد مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی بدنه به آب را بررسی کردند [۱۰-۱۲]. 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 [۱۳، ۱۴].

پس از واگنر مورد توجه‌ترین تحقیقات مربوط به تحقیقات سویتسکی و مورابیتو در زمینه عملکرد شناورهای پروازی است. سویتسکی با انجام آزمایش‌ها متعدد روابطی نیمه تجربی برای ضرایب نیرو برآ هیدرودینامیکی و مقاومت هیدرودینامیکی استخراج نمود. علاوه بر آن با استفاده از روابط سویتسکی ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده و دمپینگ شناور را نیز در هر سرعت و هر زاویه تریم مشخص به دست آورد؛ البته روابط سویتسکی برای زوایای تریم بین ۲ تا ۱۵ درجه مناسب است [۲۲-۱۵].

از آنجاکه تحقیقات آزمایشگاهی زمان‌بر و پرهزینه‌اند محققان به دنبال یافتن راهی برای محاسبه رفتار شناورهای تندرو در خارج از آزمایشگاه بودند. ابتدا روش‌های تحلیلی و مستقیم مورد توجه واقع شدند. در روش‌های تحلیلی با اعمال فرض‌های ساده‌کننده‌ای همچون سیال ایده‌آل، جریان دوبعدی و خطی سازی شرایط مرزی جریان حول بدنه را تحلیل می‌کنند. در تحلیل دوبعدی دو رویکرد برخورد عرضی و طولی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخورد عرضی حل تحلیلی تئوری فان کارمن بوده و در تحلیل طولی شناور را فاقد زاویه خیزکف در نظر می‌گیرند. در این

میان می‌توان به کارهای ژائو و فالتینسن، وروس و سواندر، متیوف و مایلر، ماکاسایف اشاره نمود [۲۳-۲۷].

با گسترش و کارآمد شدن رایانه‌ها، حل‌های عددی مبتنی بر محاسبات تکرارشونده نیز مورد توجه قرار گرفتند. در این روش‌ها معمولاً با تقریب‌هایی معادلات ناویر-استوکس برای جریانی خاص با شرایط مرزی و شرایط اولیه مشخص به صورت عددی حل می‌شوند. مجموعه این روش‌ها را دینامیک سیالات محاسباتی می‌نامند. روش‌های محاسباتی به دو زیرگروه عمده دوبعدی و سه‌بعدی تقسیم می‌شوند. بخش دوبعدی مشابه با روش‌های تحلیلی دارای دو شکل عرضی و طولی بوده و اهداف نیز به همان صورت است، تنها تفاوت در روش به دست آوردن جواب و چگونگی اعمال تقریب‌هاست. چرا که در حل تحلیلی شرایط حل مورد تقریب واقع شده اما در حل عددی معادلات اصلی تقریب زده می‌شوند. در بخش سه‌بعدی مسئله برای مدل متشابه شناور و یا برای مدل اصلی شناور در یک حوضچه کشش مجازی حل می‌شود. از جمله برتری‌های شبیه‌سازی عددی نسبت به مدل‌های تحلیلی تخمین بهتر نیروها و نمایش سطح آزاد جریان سیال است. چنانکه با شبیه‌سازی دقیق و صحیح می‌توان تمام رخدادهایی که برای مدل در حوضچه کشش رخ می‌دهد را شبیه‌سازی کرد. با این حال از معایب آن می‌توان به مدت زمان لازم برای شبیه‌سازی و تعدد مدل‌های موجود اشاره کرد چراکه این تعدد بیش از آن که رفع مسئله باشد خود مسئله‌ای جدید است و با انتخاب غلط مدل یا بازه مورد استفاده از مدل امکان خطا را افزایش می‌دهد. به همین دلیل در تحقیقاتی که بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی انجام گرفت ابتدا روش و مش را با چند بدنه که نتایج آزمایشگاهی آن‌ها موجود است صحت‌سنجی می‌کنند. در این زمینه می‌توان به کارهای بریتزولارا، فایسون، شنگارت، ویسی و همکاران، لطفی و همکاران و حاجی‌زاده و همکاران اشاره کرد [۲۷، ۲۸-۳۸]. شکل ۱۴ نمای سطح زیرآبی را از پژوهش لی و همکاران نشان می‌دهد [۳۹].

۲- معادلات حاکم

بیشتر جریان‌های مورد مطالعه در مهندسی دارای میدان سرعت نامنظم و نوسانی هستند. اغلب این نوسانات در مقیاس‌های کوچک و فرکانس‌های بالایی هستند که حل آنها در زمان و مکان هزینه‌های محاسباتی زیادی را به

همراه دارد. به جای حل دقیق معادلات حاکم بر جریان‌های آشفته (شبیه‌سازی عددی مستقیم)، استفاده از مقادیر متوسط یا فیلتر شده و تقریبی ساختارهای نوسانی کوچک هزینه زمانی کمتری دارد. مدل‌های آشفتگی رویکردهای مختلفی برای مدل‌سازی این ساختارها ارائه می‌کنند. مدل‌های آشفتگی که در نرم‌افزار Simcenter STAR-CCM+ پیاده‌سازی می‌شوند را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

- مدل‌های آشفتگی ناویر استوکس رینولدز میانگین
 - شبیه‌سازی‌های حل مقیاس
- این معادلات اساساً با معادلات اصلی ناویر-استوکس یکسان هستند؛ با این تفاوت که اکنون یک عبارت اضافی در معادلات تکانه ظاهر می‌شود:

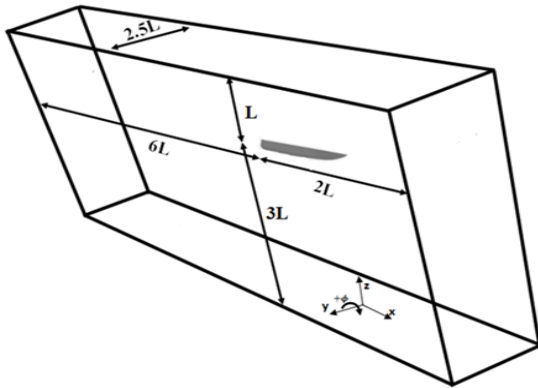
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}} \otimes \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot \bar{\mathbf{p}} \mathbf{I} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{T}} + \mathbf{T}_{RANS}) + \mathbf{f}_b \quad ۱$$

این عبارت اضافی تانسور تنش است که تعریف زیر را دارد:

$$\mathbf{T}_{RANS} = -\rho \left(\begin{array}{ccc} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{array} \right) + \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \quad ۲$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفتگی است. برای به دست آوردن k از مدل K-Epsilon استفاده شده است. این مدل یکی از مدل‌های آشفتگی متداول است. اگرچه عملکرد مناسبی در گرادین‌های فشار معکوس بزرگ ندارد. مدل K-Epsilon یک مدل دو معادله‌ای است، به عبارتی شامل دو معادله انتقالی اضافی برای محاسبه خواص آشفتگی جریان است. از این معادلات می‌توان برای محاسبه تأثیرات جابجایی و پخش در انرژی آشفتگی بهره برد. اولین متغیر انتقالی، انرژی جنبشی آشفتگی یا همان K است و دومین متغیر انتقالی در این مدل، اتلاف آشفتگی یا همان اپسیلون است [۴۰]. مدل K-Epsilon توسعه‌یافته با ضرایب اصلاح‌شده پیشنهاد شده برای جریان‌های ساده، همان نتایج مدل استاندارد را خواهد داد ولی برای جریان‌های پیچیده‌ای نظیر بازچرخشی، خطوط جریان منحنی و نیز جریان‌های چرخشی نتایج بهتر و دقیق‌تری را نسبت به مدل استاندارد به وجود خواهد آورد. در مواردی که جواب‌های مدل استاندارد در مقایسه با جواب‌های حاصل از آزمایش دقت خوبی دارد بهتر است از مدل توسعه‌یافته استفاده نمود.

همانند شکل ۵ دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده، به صورت مکعب مستطیل است و با توجه به رابطه طول دامنه محاسباتی با افزایش سرعت، زیادتر می شود اما در مطالعه حاضر به دلیل به وجود آوردن شرایط یکسان و یکپارچه سازی روند حل، دامنه محاسباتی برای تمامی سرعت ها و در تمامی شبیه سازی های استفاده شده در این مقاله یکسان در نظر گرفته شده که شکل ابعاد این دامنه محاسباتی را برای تمامی شرایط و سرعت ها نشان می دهد. در این شکل L همان طول شناور است که برابر ۲ متر می باشد.



شکل ۵- شکل دامنه محاسباتی

در این مسئله برای نزدیک کردن شرایط به محیط دریا، صفحات ورودی، کف، بالا و پشت دامنه به صورت جریان ورودی در نظر گرفته شده و صفحه خروجی جریان به صورت فشار خروجی اعمال شده است. با این کار شرایط دریای آزاد برای مدل صدق خواهد کرد. به دلیل تقارن در بدنه شناور، صفحه روبرویی به صورت متقارن در نظر گرفته شده تا فقط نیمی از شناور مدل شود و از حجم محاسبات کاسته شود.

جدول ۱- شرایط دیواره ها در شبیه سازی

نوع	شرایط مرزی	صفحه دامنه
بدون لغزش	دیواره	بدنه شناور
سرعت عمودی	سرعت ورودی جریان	صفحه ورودی
فشار هیدرواستاتیکی	فشار خروجی جریان	صفحه خروجی
سرعت مماسی	سرعت ورودی جریان	صفحه بالا
سرعت مماسی	سرعت ورودی جریان	صفحه پایین
سرعت مماسی	سرعت ورودی جریان	صفحه کناری
تقارن در مرکز	صفحه تقارن	صفحه روبرویی

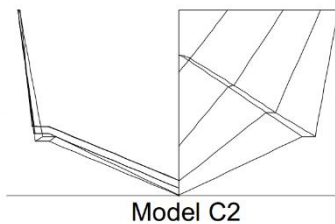
روش حجم سیال توسط هیرت و نیکولز [۴۱] ارائه شده است. این روش برای حل مسائل مرز مشترک دو یا چند سیال مخلوط نشدنی طراحی شده است. در اینجا از روش حجم سیال برای محاسبه سطح مشترک بین آب و هوا استفاده می شود. زمانی که معادلات حجم سیال حل می شود؛ استارسی سی ام فرض انتقال میدان سرعت و فشار را در سیال آب و هوا برای مسئله اعمال می کند. در این مطالعه هیچ تغییر فازی بین سیال ها مجاز نیست بدین معنی که هوا نمی تواند در آب حل و یا سیال آب به هیچ عنوان تبخیر نمی گردد.

موج منظمی که برای این مدل انتخاب شده است موج مرتبه اول است که بر اساس تقریب درجه اول از تئوری امواج استوکس مدل می شود. این تقریب قادر به تولید امواجی است که دارای نوسان سینوسی منظم باشند.

برای شبیه سازی امواج نامنظم از دو نوع طیف موج JONSWAP و Pierson-Moskowitz می توان استفاده کرد که در این شبیه سازی ها، از طیف موج JONSWAP استفاده شده است. در واقع طیف JONSWAP طیف Pierson-Moskowitz را گسترش می دهد تا دریاهای محدود، نظیر خلیج فارس را نیز در بر بگیرد و حالت های دریایی در حال توسعه را توصیف کند.

۳- هندسه و دامنه محاسباتی

بدنه مورد استفاده در این پژوهش مدل C-2 ساوتهمپتون بوده است. همان طور که از نمای کناری خطوط بدنه شناور در شکل مشاهده می شود، مدل C-2 دارای دو پله بوده و این پله ها عمود بر خط مرکزی شناور هستند که این پله ها دارای ارتفاعی به اندازه ۰/۰۱ متر هستند. این مدل بر مبنای مدل C ساخته شده و تمامی ابعاد آن مطابق با ابعاد مدل C می باشد. در شکل ۴ خطوط بدنه مدل C-2 ارائه شده است.



شکل ۴- خطوط بدنه مدل C-2

در جدول ۳ سرعت‌های مورد استفاده در این تحقیق آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اعداد فرود طولی مورد بررسی، در محدوده بالاتر از عدد فرود پروازی است. اعداد فرود حجمی نیز جهت تشخیص تغییرات حجم خیس ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر سرعت، ضریب سرعت، فرود حجمی، فرود طولی و رینولدز جریان در شبیه‌سازی‌های مختلف

شماره	سرعت (m/s)	C_v	Fr_{∇}	Fr_L	Re [$\times 10^6$]
۱	۴/۰۵	۲/۰۷	۲/۴۰	۱/۱۴	۴/۸۱
۲	۵/۱۰	۲/۶۱	۳/۰۱	۱/۵۱	۵/۴۸
۳	۶/۲۵	۳/۱۹	۳/۶۹	۱/۹۳	۶/۱۷
۴	۷/۱۱	۳/۶۳	۴/۲۰	۲/۲۶	۶/۶۶
۵	۸/۱۳	۴/۱۶	۴/۸۱	۲/۶۲	۷/۳۹
۶	۹/۱۸	۴/۶۹	۵/۴۳	۲/۹۹	۸/۱۸
۷	۱۰/۱۳	۵/۱۸	۵/۹۹	۳/۳۴	۸/۷۸
۸	۱۱/۱۳	۵/۶۹	۶/۵۸	۳/۷۷	۹/۱۴
۹	۱۲/۰۵	۶/۱۶	۷/۱۲	۴/۰۳	۱۰/۱۷

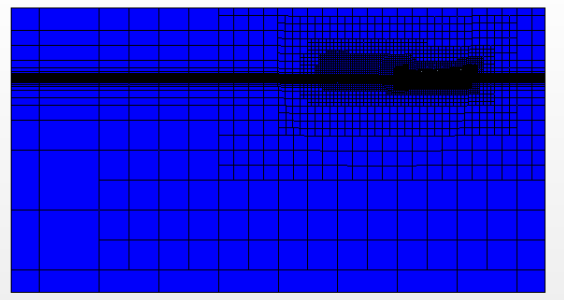
در جدول ۴ و ۵ مشخصات موج‌های مورد استفاده در این مطالعه آمده است.

جدول ۴- مشخصات موج‌های منظم تابانیده شده

ارتفاع موج	فرکانس موج	طول موج	عدد موج	سرعت شناور
۰/۰۵	۱	۱/۵۶	۴/۰۲	۴
۰/۰۵	۱	۱/۵۶	۴/۰۲	۶
۰/۰۵	۱	۱/۵۶	۴/۰۲	۸
۰/۰۵	۱	۱/۵۶	۴/۰۲	۱۰
۰/۱	۰/۶۶	۳/۵۱	۱/۷۸	۴
۰/۱	۰/۶۶	۳/۵۱	۱/۷۸	۶
۰/۱	۰/۶۶	۳/۵۱	۱/۷۸	۸
۰/۱	۰/۶۶	۳/۵۱	۱/۷۸	۱۰

مقدار Y^+ بر روی سطح بدنه شناور دوپله مورد بررسی در محدوده بالای عدد ۳۰ بوده است؛ لذا تابع دیواره از نوع Y^+ بالا بوده است؛ بنابراین تابع دیواره در شبیه‌سازی حاضر به شکل مناسبی اصلاح شده است. این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است.

در این شبیه‌سازی برای ایجاد یک مش سازمان‌یافته و دقیق در اطراف مدل‌ها و در طول دامنه محاسباتی از ترکیب چند نوع شبکه‌بندی مختلف استفاده شده است. اولین شبکه‌بندی که بر روی سطح زده می‌شود مش سطحی است. این نوع مش که یک مش پایه محسوب می‌شود در کل دامنه محاسباتی و در سه جهت برای ایجاد شبکه‌بندی حجمی و بهینه‌سازی آن استفاده می‌شود. برای بهبود دقت حل در سطح دیواره‌ها و بدنه مورد نظر از نوعی شبکه‌بندی دیگر به نام مش منشوری لایه‌ای استفاده گردیده است. از این نوع شبکه‌بندی برای تولید سلول‌های منشوری موازی در اطراف مرز با چندلایه‌ی مختلف استفاده می‌شود. با ترکیب این دو نوع شبکه‌بندی می‌توان یک شبکه سازمان‌یافته را برای شبیه‌سازی ایجاد کرد؛ همچنین در این شبیه‌سازی برای بالا بردن کیفیت مش در سطح آزاد آب، از شبکه‌بندی تریمر استفاده شده است. شکل ۶ شبکه‌بندی مسئله را نشان می‌دهد.

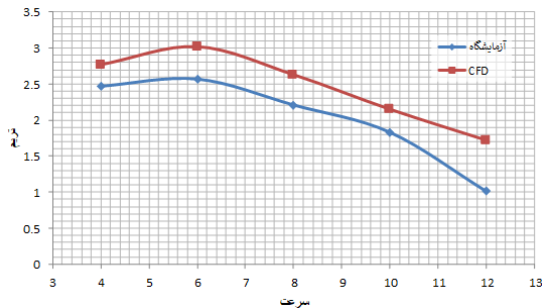


شکل ۶- شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

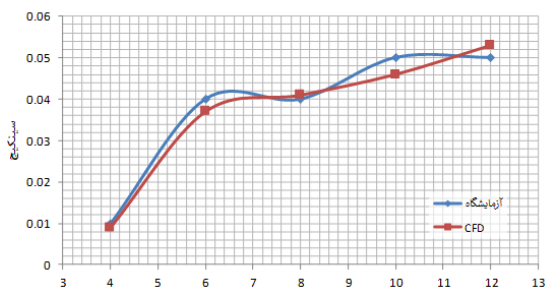
گام زمانی حل در این پژوهش ۰/۰۰۰۵ ثانیه بوده است. تعداد تکرار داخلی در هر گام زمانی برابر با ۱۰ عدد بوده است. در جدول ۲ تنظیمات توربولانس مدل، گام زمانی، نوع حلگر و دینامیک دو درجه آزادی مورد استفاده گردآوری شده است. ضمناً جهت پوشش حل معادلات حرکت، در حین حرکت بدنه از شبکه‌بندی دینامیکی مورفینگ استفاده شده است.

جدول ۲- تنظیمات شبیه‌سازی

Type	Implicit unsteady
Turbulence model	k-ε
Multiphase model	VOF
Time Step (s)	0/0005
DOF	Pitch & Heave
Motion	DFBI Morphing



شکل ۱۰- نمودار تریم دینامیکی بر حسب سرعت شناور
در شکل ۱۱ تغییرات سینکیج بر حسب سرعت نشان داده شده و با مقادیر تجربی مقایسه شده است.



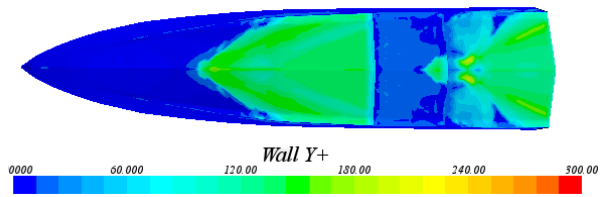
شکل ۱۱- نمودار سینکیج بر حسب سرعت شناور

چنانچه مشاهده می‌شود نتایج از دقت مناسبی برخوردار بوده و اختلاف چندانی با نتایج اصلی ندارد. به دلیل عدم ذکر چگالی آب در کار تانتون، تفاوت در چگالی و ویسکوزیته آب نیز تفاوت در مقدار سینکیج و به تب آن تفاوت در مقدار تریم را باعث شده است. مقادیر خطا در جدول ۶ آمده است.

جدول ۵- خطای نتایج شبیه‌سازی در آب آرام

درصد خطا				پارامتر	
۱۲	۱۰	۸	۶	۴	سرعت
۷/۵۲	۸/۱۵	۷/۱۶	۷/۱۹	۷/۱۸	مقاومت
۱۹/۴۲	۱۷/۴۸	۱۹	۱۷/۵۱	۱۲/۱۴	تریم
۶	۸	۲/۵	۷/۵	۱۰	سینکیج

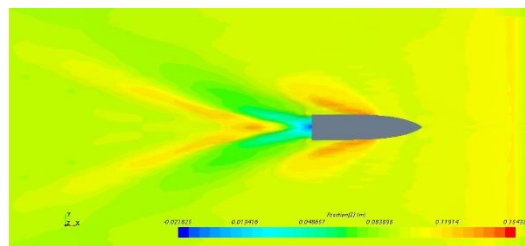
در شکل ۱۱ و ۱۲ نیز نتایج RMS مقاومت و تریم در آب موج آمده است. در شکل ۱۲، در سرعت ۶ متر بر ثانیه به دلیل برخورد جریان بازگشتی به پله افزایش مقاومت را شاهد هستیم. همچنین بیشینه مقاومت در سرعت ۱۰ متر ثانیه رخ داده و با افزایش سرعت و دامنه موج، مقاومت نسبت به حالت آب آرام افزایش یافته است.



شکل ۷- تصویر y^+ بر روی سطح بدنه

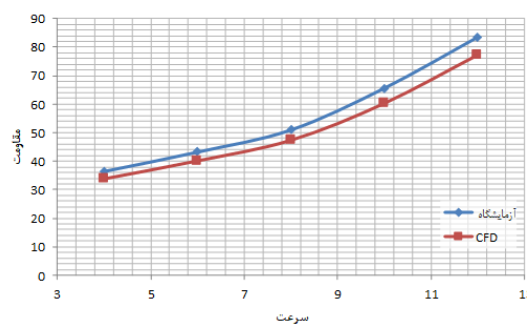
۴- نتایج

شبیه‌سازی در آب آرام در سرعت‌های جدول ۱-۳ انجام شده است. نتایج در پارامترهای زاویه تعادل تریم دینامیکی، هیو، مقاومت هیدرو دینامیکی شناور انجام شده است. نتایج حاصله در شکل ۸ تا ۱۱ آمده است. در شکل ۸ الگوی موج کلون در اطراف بدنه نشان داده شده است.



شکل ۸- الگوی موج کلون اطراف بدنه

چنانچه در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت مقاومت هیدرو دینامیکی افزایش یافته است. نتایج شبیه‌سازی نیز با اختلاف کمی نتایج حوضچه کشش را دنبال کرده است. این اختلاف ناشی از خطای تجمعی در مش بالاست.



شکل ۹- نمودار مقاومت هیدرو دینامیکی بر حسب سرعت شناور

در شکل ۱۰ نمودار تریم ارائه شده است. تریم با افزایش سرعت کاهشی است.

[4] Schneekluth, Herbert, and Volker Bertram. Ship design for efficiency and economy. Vol. 218. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

[5] Ross, W.J., Bicycle. 1948, Google Patents.

[6] Bertram, Volker. Practical ship hydrodynamics. Elsevier, 2011.

[7] Borrass, K., et al. (1993). "Scrape-off layer-based modeling of the density limit in beryllated JET limiter discharges." Nuclear fusion 33(1): 63.

[8] Garland, W.R. and K.J. Maki, A numerical study of a two-dimensional stepped planing surface. Journal of Ship Production and Design, 2012. 28(2): p. 60-72.

[۹] اسفندیاری، آ، پیش‌بینی کارایی شناورهای پروازی پله‌دار با استفاده از روش‌های حجم محدود-حجم سیال، ۱۳۹۵، خلیج فارس بوشهر.

[10] Faltinsen, O., Challenges in Hydrodynamics of Ships and Ocean Structures. Vol. 58. 2007.

[11] Clement, E.P. and J.D. Pope, Stepless and stepped planing hulls-graphs for performance prediction and design. International Shipbuilding Progress, 1961. 8(84): p. 344-360.

[12] Clement, E.P., J. Hollingsworth, and R. Scher. The dynaplane design for planing motorboats. In 9th International Conference on Fast Sea Transportation. Shanghai: FAST. 2007.

[13] Wagner, H., Landing of seaplanes. 1931.

[14] Savitsky, D., On the subject of high-speed monohulls. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Greece, 2003.

[15] Savitsky, D., Planing craft. Naval Engineers Journal, 1985. 97(2): p. 113-141.

[16] Savitsky, D. and P.W. Brown, Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water. Marine Technology, 1976. 13(4): p. 381-400.

[17] Savitsky, D., M.F. DeLorme, and R. Datla, Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls. Marine Technology, 2007. 44(1): p. 35-56.

[18] Savitsky, D. and J.L. Gore, Re-evaluation of the planing hull form. Journal of Hydronautics, 1980. 14(2): p. 34-47.

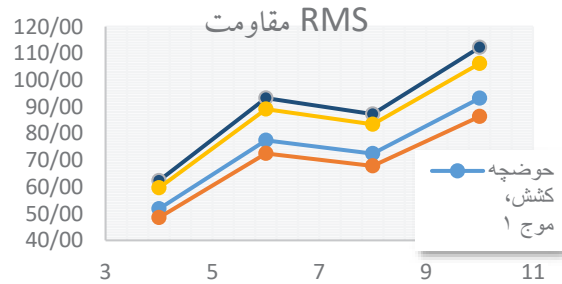
[19] Savitsky, D. and M. Morabito, Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls. Marine Technology, 2010. 47(1): p. 1-16.

[20] Savitsky, D. and J.W. Neidinger, Wetted area and center of pressure of planing surfaces at very low speed coefficients. 1954, STEVENS INST OF TECH HOBOKEN NJ.

[21] Loui, S., S. Yamashita, and M. Parish, Ventilated aft swept flow interrupter hull. 2010, Google Patents.

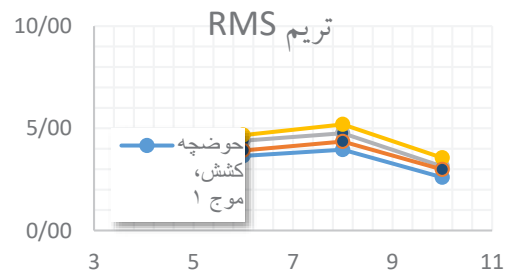
[22] De Marco, A., et al., Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull. 2017. 64: p. 135-154.

[23] Matveev, K. and M.J.P.o.t.I.o.M.E. Miller, Part M: Journal of Engineering for the Maritime



شکل ۱۲- RMS مقاومت

RMS تریم در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با افزایش تریم افزایش چندانی نداشته و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه افت کرده است. همچنین مقدار میانگین مربعات تریم، نسبت به حالت آب آرام میزان بیشتری را به خود اختصاص داده است.



شکل ۱۳- RMS تریم

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این کار به بررسی عددی هیدرودینامیک شناور دوپله پروازی پرداخته شد. بررسی در دو حالت کلی آب آرام و موج منظم انجام شد. این مطالعه به روش مش مورفینگ و دو درجه آزادی انجام شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی تطابق مناسبی با نتایج حوضچه کشش داشته است. حداکثر خطا در نیروی مقاومت هیدرودینامیکی ۸/۱۵ درصد بوده که مقدار خطای کمتر از ۱۰ درصد اختلاف را نشان می‌دهد.

مراجع

- [۱] دشتی‌منش، عباس؛ بررسی رفتار هیدرودینامیکی شناورهای پروازی. ۱۳۹۵: دانشگاه امیرکبیر، ج ۱.
- [۲] دشتی‌منش، عباس؛ بررسی رفتار هیدرودینامیکی شناورهای پروازی. ۱۳۹۵: دانشگاه امیرکبیر، ج ۲.
- [۳] مونسان، محمد. جامع مهندسی دریایی. ۱۳۸۸ ایران. دانشگاه مالک اشتر.

and possible implications with static intact stability rules, *Transaction RINA, International Journal of Small Craft Technology*, 153, b73-b86.

[40] Nomoto K, 1966. Response analysis of manoeuvrability and its application to ships design, 60th Anniversary Series, Society of Naval Architects, 11, 43-51.

[41] Storms BL, Jang CS, 1994, Lift enhancement of an airfoil using a Gurney flap and vortex generators, *Journal of Aircraft*, 31(3).

Environment, Air cavity with variable length under a model hull. 2011. 225(2): p. 161-169.

[24] Tavakoli, S., et al., Determination of Hydrodynamic Coefficients related to Roll Motion of High-Speed Planing Hulls. 2015.

[25] Brizzolara, S., Watercraft device. 2014, Google Patents.

[26] Brizzolara, S. Hydrodynamic analysis of interceptors with CFD methods. in *Proceedings of the 7th International Conference on Fast Sea Transportation, Fast*. 2003.

[27] Fine, N.E. and D.C. Kring. Modeling the flow over planing hulls with ventilated or cavitating steps. In *Proceedings of the 2013 Grand Challenges on Modeling and Simulation Conference*. 2013. Society for Modeling & Simulation International.

[28] Brizzolara, S., et al., Concept design and hydrodynamic optimization of an innovative SWATH USV by CFD methods. 2012. 62(2): p. 227-237.

[29] Molini, A. and S. Brizzolara. Hydrodynamics of interceptors: a fundamental study. in *Proceeding of the International Conference on Marine Research and Transportation, ICMRT*. 2005.

[30] CATERINO, F.D., et al., A Numerical Way for a Stepped Planing Hull Design and Optimization. 2018.

[31] Perring WG, Glauert H. 1933. The stability on the water of a seaplane in planing condition. *R & M* 1493.

[32] Klemin A, 1939. An introduction to porpoising. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 6(9), 311-318.

[33] Benson JM, 1942. The porpoising characteristics of a planing surface representing the forebody of a flying-boat hull, National Advisory Committee for Aeronautics; Washington, DC, United States, NACA-WR-L-479.

[34] Benson JM, Kline MM, 1943. The effect of deadrise upon the high angle porpoising characteristics of two planing surface in tandem, NACA AR 3F30

[35] Kenneth SM, Davidson SM, Locke JR, Some systematic model experiments on the porpoising characteristics of flying-boat hulls, NACA ARR No. 3F12.

[36] Sottorf BW, 1942. Systematic model researches on the stability limits of the dvl series of float designs, NACA, technical memorandum 1254.

[37] Katayama T, Fujimoto M, Ikeda Y, 2006, A study on transverse stability loss of planing craft at super high forward speed, In *Proceedings of the 9th International Conference on Ships and Ocean Vehicles*, Rio Dejnoro, Brazil.

[38] Katayama T, Fujimoto M, 2008, A study on directional instability of high-speed planing hull based on simulation, In *Proceedings of the 6th OSAKA colloquium on seakeeping and stability of ships*, Osaka, Japan

[39] Ruscelli D, Gualeni P, Vivani M, An overview of planing monohulls transverse dynamic stability