

ارزیابی تأثیر جانمایی‌های مختلف طولی و عرضی بدنه‌های جانبی بر مقاومت شناور سه‌بدنه در آب آرام به روش تجربی و عددی

مهدی یوسفی فرد*
اشکان معبودی
سیاوش عزیزی
محسن شاکری

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، yousefifard@nit.ac.ir
کارشناس ارشد، مهندسی معماری کشتی-سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، ashkan.maboodi@stu.nit.ac.ir
کارشناس ارشد، مهندسی معماری کشتی-سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، azizisiavash_mp@yahoo.com
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، shakeri@nit.ac.ir

چکیده

اهمیت تغییر جانمایی طولی و عرضی بدنه‌های جانبی یک شناور سه‌بدنه بر مقاومت کل شناور در آب آرام بسیار مورد توجه بوده است. چرا که می‌توان با تغییر این جانمایی، مقدار مقاومت موج‌سازی را به حداقل رساند. در این پژوهش، برای صحت‌سنجی حل عددی، جانمایی طرح اصلی در آزمایشگاه بررسی شده و مقدار مقاومت و سایر متغیرهای مرتبط با آن به دقت ثبت شده است. سپس یک مدل عددی در نرم‌افزار OpenFOAM ایجاد شده و در یک تانک عددی، جزئیات جریان سیال اطراف شناور بررسی شده است. علاوه بر دقت مناسب نتایج حل عددی، می‌توان دریافت که تغییرات جانمایی عرضی بدنه‌های جانبی اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی مقاومت کل شناور دارند. این در حالی است که در مورد این شناور، اثرات تغییر جانمایی طولی بدنه‌های جانبی در مقاومت شناور بسیار محدود می‌باشد. فاصله‌ی عرضی بدنه‌های جانبی از بدنه‌ی اصلی بصورت بی‌بعد و برای ۴ جانمایی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و در خصوص جانمایی طولی نیز چنین فرآیندی تکرار شده است. تغییر جانمایی عرضی بدنه‌های جانبی می‌تواند منجر به کاهش ده درصدی در مقاومت کل یک شناور سه‌بدنه شود. **واژه‌های کلیدی:** شناور سه‌بدنه، جانمایی طولی و عرضی، مقاومت کل، روش آزمایشگاهی، حل عددی.

Evaluating the Effect of Different Transversal and Longitudinal Positions of the Side Hulls on the Trimaran Resistance in Calm Water by Experimental and Numerical Methods

M. Yousefifard
A. Maboodi
S. Azizi
M. Shakeri

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

The importance of changing the longitudinal and transverse layout of the side hulls of a trimaran ship on the total resistance in calm water has been of great interest. Wave making resistance can be reduced by changing the layout of side hulls. In this study, for verification of numerical solution, some changes in the side hull arrangements are investigated by experimental method and the amount of resistance and its related variables have been carefully recorded. Then, a numerical model is developed in OpenFOAM code, and in a numerical tank, the details of the fluid flow around the ship are investigated. In addition to the proper accuracy of numerical results, it can be seen that transverse position of the side hulls has a significant effect on ship total resistance. However, the variation in drag force due to the changing in longitudinal position of side hulls is. The effect of the transverse distance between the side hulls and the central line of the main hull has been studied dimensionlessly on four different positions. A similar analysis has been performed for changes in the longitudinal position of the side hulls. Changing the transverse layout of the side hulls can result in a 10% reduction in the total resistance of trimaran.

Keywords: Trimaran, longitudinal and transverse arrangement, total resistance, experimental method, numerical solution.

این جانمایی بر کاهش مقاومت کل شناور در آب آرام ارائه شده است. تمرکز بیشتر این تحقیقات بر روی تغییرات جانمایی عرضی و همچنین مقاومت آب آرام^۲ شناور بوده است. در ادامه به مرور مهمترین پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره شده است. اندرز و ژانگ بر روی یک سری پروژه‌های طراحی شناور سه‌بدنه برای آینده تحقیق کردند [۱]. آنها مدل‌های مختلف شناور سه‌بدنه را با توجه به تعداد زیادی از ملاحظات طراحی مورد بحث و بررسی قرار و

۱- مقدمه

شناورهای سه‌بدنه^۱ به علت ارائه‌ی سطح عرشه و پایداری بیشتر و همچنین مزایای هیدرودینامیکی توانسته‌اند در بسیاری از کاربردهای نظامی و تجاری مورد استفاده قرار گیرند. هرچند محل قرارگیری بدنه‌های جانبی این شناورها تا حد زیادی تابع جانمایی تجهیزات و الزامات کاربری آنها می‌باشد، با این حال تحقیقات زیادی بر روی اثر

¹ trimaran

² calm water resistance

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: yousefifard@nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۴

با توجه به مقایسه‌هایی که انجام دادند یک مدل شناور سه‌بدنه را پیشنهاد دادند. آکرز و همکاران نیز یک فرم بدنه‌ی شناور سه‌بدنه را طراحی و مقاومت آن را در آب آرام به روش آزمایشگاهی بررسی نمودند [۲]. آنها اثرات آرایش‌های مختلف برای بدنه‌های جانبی، تقارن، جابجایی و زاویه‌ی حمله را بر روی مشخصات مقاومت شناور بررسی نمودند. در تحقیق دیگری بارتورلو و همکاران علاوه بر موارد فوق، تأثیر برخورد موج منظم از روبرو و مقایسه‌ی شناور سه‌بدنه با شناور کاتاماران و تک‌بدنه با توانایی سرویس‌دهی برابر را بررسی کردند [۳]. کانگ و همکاران طراحی و بررسی عملکرد قدرت یک شناور سه‌بدنه‌ی ۲۵۰۰ تنی را انجام دادند [۴]. در تحقیق آنها تأثیر موقعیت بدنه‌های جانبی بر مقاومت هیدرودینامیکی شناور سه‌بدنه ارزیابی و نتایج آن با یک شناور تک‌بدنه مقایسه گردید. سیف و امینی با استفاده از روش عددی به مقایسه‌ی عملکرد شناورهای چندبدنه و کاتاماران با فرم بدنه‌ی پروازی پرداختند [۵]. دگیولی و همکاران نیز در سال ۲۰۰۵ پژوهشی بر روی شناور سه‌بدنه با فرم بدنه ویگلی^۱ صورت دادند [۶]. در پژوهش آنها مقایسه‌ای بین روش آزمایشگاهی و روش‌های نظری انجام شد. در این پژوهش نشان داده شد که بهترین حالت پیکربندی شناور سه‌بدنه بسیار وابسته به سرعت شناور است. بگوویچ و همکاران در سال ۲۰۰۶ شناور سه‌بدنه با دو فرم مختلف در محدوده‌ی عدد فرود ۰/۲۵ تا ۰/۶ و مقیاس ۱ به ۳۰ را مورد بررسی قرار دادند [۷]. این تحقیق جهت بررسی تأثیر زاویه‌ی طولی^۲، موقعیت و شکل بدنه‌های جانبی بر روی مقاومت هیدرودینامیکی و مقایسه‌ی روابط ITTC-57 و ITTC-78 صورت گرفت. نتایج نشان داد که موقعیت بهینه‌ی بدنه‌های جانبی در کاهش مقاومت هیدرودینامیکی وابسته به تریم شناور می‌باشد و همچنین در اعداد فرود بیشتر، روابط ITTC-57 و ITTC-78 از دقت بالاتری برخوردارند. آرمسترانگ در سال ۲۰۰۶ عملکرد یک شناور سه‌بدنه‌ی بزرگ را به‌صورت تجربی و با استفاده از نمونه‌ی واقعی مورد ارزیابی قرار داده است [۸]. سیف و زاروکیان به بررسی تجربی مقاومت هیدرودینامیکی شناور سه‌بدنه پرداختند [۹]. آنها اثرات غلتش طولی و تأثیر جابجایی بدنه‌های جانبی بر مقاومت شناور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اثرات افزایش زاویه‌ی طولی نتایج متفاوتی نشان داده اما با افزایش فاصله‌ی عرضی بدنه‌های جانبی در سرعت ثابت، مقاومت کل شناور کاهش می‌یابد. توماس مینارد و همکاران مطالعه‌ای بر روی مقاومت موج فرم بدنه‌های مختلف تریماران به صورت عددی و آزمایش تجربی انجام دادند [۱۰]. هدف اصلی پژوهش آنها تعیین مقاومت موج هر کدام از بدنه‌ها در جانمایی‌های متفاوت طولی و عرضی بدنه‌های جانبی بود که با استفاده از روش عددی و همچنین آزمایشات تجربی صورت گرفت. اسلاتسکی یک شناور سه‌بدنه را با استفاده از قرار دادن بدنه‌ی شناور DTMB به‌جای بدنه‌ی مرکزی و تغییر در موقعیت‌های بدنه‌های جانبی، تغییر زاویه‌ی بدنه‌های کناری را نسبت به بدنه‌ی مرکزی به صورت تجربی بررسی نمود [۱۱]. او نتایج آزمایش خود را با نتایج شناور دویبدنه در یک جابجایی برابر مقایسه کرد، که عملکرد هیدرودینامیکی شناور سه‌بدنه مناسب‌تر بود.

رویز و همکاران یک شناور نظامی سه‌بدنه را با هدف بررسی تفاوت نتایج مدل، در چند حوضچه‌ی کشتی مورد ارزیابی قرار دادند [۱۲]. مقایسه‌ی نتایج آزمایش در چهار حوضچه نسبت به یکدیگر نشان داد که در اعداد فرود پایین نتایج به هم نزدیک‌تر بودند. وانگ ژونگ و لوژیا پینگ برای شبیه‌سازی عددی مقاومت موج شناور سه‌بدنه با استفاده از شرایط مرزی سطح آزاد غیر خطی، مفهوم حوزه‌ی زمان و نظریه‌ی موج غیرخطی با استفاده از تابع گرین با توسعه‌ی روش پانل^۳ سه‌بعدی برای حل مسائل موج‌سازی شناور سه‌بدنه ارائه کردند [۱۳]. آنها برای بررسی روش خود از چند نمونه‌ی مختلف شناور سه‌بدنه استفاده و نتایج حاصل را با مقادیر به‌دست آمده از نتایج تجربی مقایسه نموده و دریافتند که روش آنها می‌تواند با دقت بالایی مقاومت موج‌سازی^۴، زاویه‌ی طولی و جابجایی عمودی برای فرم بدنه‌های مختلف را تخمین بزند. زو مین و ژانگ شی لیان برای یک شناور سه‌بدنه، اثرات برهم کنش بین بدنه‌ی اصلی و بدنه‌های جانبی، جانمایی‌های مختلف و اثرات طولی بدنه‌های جانبی بر روی بارگذاری امواج را به روش عددی بررسی کردند [۱۴]. آنها در کار خود از نظریه‌ی پتانسیل سه‌بعدی و تابع گرین استفاده کردند و آنالیز طیفی را برای بارگذاری‌های مختلف بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول بدنه‌های کناری، ممان خمشی عرضی و طولی برای جابجایی یکسان در هر عدد فرود افزایش می‌یابد. فرناندز به تحلیل و مقایسه‌ی شناورهای سه‌بدنه از طریق روش نواری^۵ و محاسبات عددی جریان سیال پرداخت [۱۵]. یانور و همکاران به صورت تجربی به تحلیل مقاومت یک شناور سه‌بدنه با بدنه‌های جانبی نامتقارن و جانمایی‌های متفاوت طولی و عرضی در بازه‌ی اعداد فرود ۰/۱ تا ۰/۶ پرداختند [۱۶]. نتایج نشان داد که نیروی مقاومت مؤثر در عدد فرود ۰/۳۵ و زمانی که بدنه‌های جانبی با نسبت فاصله‌ی طولی به فاصله عرضی ۰/۱ قرار دارند، به میزان ۱۷ درصد کاهش پیدا می‌کند. اکبری و کیل‌آبادی و همکاران رفتار دینامیکی یک مدل شناور سه‌بدنه با نسبت طول به عرض ۱۲/۹۶ و با بدنه‌های جانبی به فرم ویگلی را به صورت تجربی در حوضچه‌ی کشتی^۶ بررسی نمودند [۱۷]. آنها آزمایشات دریامانی را برای مطالعه‌ی حرکات جابجایی عمودی^۷ و غلتش طولی^۸ در اعداد فرود مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که در اعداد فرود کم، اختلاف میان مقادیر RAO^۹ حرکات جابجایی عمودی و غلتش طولی در اثر تغییر طول موج، فرکانس موج و دامنه‌ی موج گسترده نیست، اما با افزایش عدد فرود این اختلاف بیشتر می‌شود. داویس و هولوی با استفاده از روش عددی به مقایسه‌ی حرکات شناورهای دو، سه و چندبدنه در بازه‌ی اعداد فرود ۰/۲ تا ۰/۸ پرداختند [۱۸]. نتایج پژوهش آنها نشان داد که شتابی که مسافران در یک شناور دویبدنه احساس می‌کنند تا دو برابر شتابی است که در یک شناور سه‌بدنه با طول بیشتر حس می‌شود. سوپومین و همکاران به بررسی عملکرد هیدرودینامیکی شناور سه‌بدنه از نوع کانال به صورت انجام

³ panel method

⁴ wave making resistance

⁵ strip theory

⁶ towing tank

⁷ heave

⁸ pitch

⁹ Response Amplitude Operator

¹ wigley hull

² trim

حلقه‌ری مبتنی بر شبکه‌بندی دینامیک استفاده شده است که منجر به افزایش دقت نتایج حل عددی در مسائل شامل جسم متحرک می‌گردد. عملکرد مناسب چنین حلقه‌هایی توسط سایر پژوهشگران نیز به اثبات رسیده است [۲۸].

۲- معادلات حاکم

حرکت سیال بوسیله حل معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر-استوکس رینولدی^۳ شبیه‌سازی می‌گردد. همچنین تکنیک حجم سیال^۴ به همراه تراکم مصنوعی^۵ برای تشخیص مرز آب و هوا در شبیه‌سازی جریان دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است. جزئیات چگونگی اعمال این روش در نرم‌افزار OpenFOAM توسط جاساک [۲۹] و همچنین روشه [۳۰] ارائه شده و در اینجا بطور خلاصه مروری بر آنها ارائه می‌گردد. معادلات حرکت سیال دو فازی شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم بوده که به شرح زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g)U) = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma \quad (2)$$

که در اینجا، U و U_g به ترتیب سرعت سیال و سرعت حرکت سلول‌های شبکه می‌باشند. همچنین فشار p_d فشار دینامیک است که از رابطه‌ی $p_d = p_0 - \rho g \cdot x - p$ بدست می‌آید (یعنی تفاضل فشار کل، فشار هیدرواستاتیک و فشار استاتیک). شتاب گرانش نیز به صورت $g = (0, 0, -9.81)$ تعریف می‌گردد. لزجت دینامیکی مؤثر نیز برابر است با $\mu_{eff} = \rho(v + \nu_t)$ ، که در آن ν_t و ν به ترتیب معرف لزجت سینماتیک و گردابه‌ای می‌باشند. f_σ نیز جمله‌ی منبعی در اثر کشش سطحی است.

همانطور که اشاره شد، تکنیک حجم سیال برای ارائه‌ی تخمین دقیقی از سطح آزاد سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله‌ی انتقال در این روش به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

که در اینجا بیانگر نسبت حجمی می‌باشد، که می‌توان بر اساس آن مشخصات سیال درون هر سلول را محاسبه نمود.

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{air} \\ \alpha = 0 & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{interface} \end{cases} \quad (4)$$

در معادله‌ی (۳) منظور از U_r همان سرعت دامنه‌ی جریان است که اثرات سرعت در مرز مشترک آب و هوا را اعمال می‌نماید [۳۱]. از سوی دیگر، کشش سطحی در معادله‌ی (۲) بصورت $f_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha$ تعریف می‌شود، که در آن σ همان کشش سطحی آب (۰/۰۷ کیلوگرم بر مجذور ثانیه) و κ انحنا‌ی سطح آزاد سیال است که با استفاده از تعریف نسبت حجمی (α) قابل محاسبه می‌باشد. چگالی و لزجت دینامیکی ترکیبی نیز در این روش با استفاده از تعاریف زیر قابل محاسبه می‌باشد.

آزمایش بر روی مدل و تحلیل عددی پرداختند [۱۹]. پژوهش آنها نشان داد که عملکرد مقاومت شناور به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر موقعیت طولی مرکز ثقل و وزن شناور است. یانگ و همکاران نیز به بررسی روش جدید بهینه‌سازی هیدرودینامیکی پرداخته‌اند که در آن علاوه بر تأثیر موقعیت بدنه‌های جانبی، اثرات فرم این بدنه‌ها و فاصله‌ی آنها تا بدنه‌ی اصلی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۰]. مارک پاوکو و موریاتو دو شناور سه‌بدنه‌ی جابجایی را در محدوده‌ی سرعت جابجایی^۱ به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. آنها اثرات آب کم‌عمق و عمیق را بر روی مقاومت، جابجایی عمودی و غلتش طولی مورد بررسی قرار دادند. کلایر مارکوموسکات و همکاران در زمینه‌ی تحلیل مقاومت یک شناور سه‌بدنه تحقیقاتی را انجام دادند [۲۲]. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش فاصله‌ی بدنه‌های جانبی از بدنه‌ی مرکزی باعث کاهش مقاومت در سرعت یکسان می‌گردد. همچنین افزایش فاصله‌ی موقعیت قرارگیری طولی بدنه‌ها باعث کاهش مقاومت در سرعت‌های یکسان می‌گردد. سی اچ سان و همکاران تحلیل عددی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی بر روی مقاومت کل شناور سه‌بدنه را ارائه نمودند [۲۳]. آنها با استفاده از روش عددی مدل‌های مختلف شناور سه‌بدنه را شبیه‌سازی و مقاومت آنها در آب آرام را به دست آوردند و دریافتند که با افزایش نسبت طول به عرض، مقدار مقاومت کاهش می‌یابد. دنگ و همکاران جریان حول دو شناور سه‌بدنه در دو حالت شش درجه آزادی و ثابت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی نمودند [۲۴]. آنها نتایج را با نتایج آزمایشگاهی خود در حوضچه‌ی کشش مقایسه و تأیید کردند. لوهیلما و همکاران یک شناور سه‌بدنه‌ی جابجایی^۲ را در جانمایی‌های مختلف و در محدوده‌ی عدد فرود ۰/۱۵ تا ۰/۲۷ به‌صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند [۲۵]. اکبری وکیل‌آبادی و همکاران به مطالعه‌ی جریان حول بدنه و محاسبه‌ی مقاومت یک شناور سه‌بدنه با بدنه‌های جانبی با فرم ویگلی با شبیه‌سازی عددی و همچنین آزمایش مدل در حوضچه کشش پرداختند [۲۶]. آنها جانمایی‌های مختلف بدنه‌های جانبی را برای دستیابی به کمترین نیروی مقاومت بررسی کرده و مشاهده نمودند که با افزایش عدد فرود، میزان نسبت نیروی مقاومت به سرعت افزایش می‌یابد. اخیراً لین دو و همکاران روشی سریع برای تخمین مقاومت شناورهای سه‌بدنه با فرم بدنه‌ی غیر ویگلی برای استفاده در مراحل اولیه‌ی طراحی ارائه دادند [۲۷]. روش آنها مقاومت کل را ترکیبی از مقاومت لزجی و مقاومت موج‌سازی در نظر می‌گیرد.

در این مطالعه اثرات تغییر جانمایی بدنه‌های جانبی بر مقاومت یک شناور سه‌بدنه در آب آرام مورد ارزیابی قرار گرفته است. جانمایی‌های متعددی بررسی شده و بازه‌ی گسترده‌ای از طول و عرض برای این تغییرات در نظر گرفته شد. با توجه به نسبت طول به عرض کمتر بدنه‌ی اصلی نسبت به شناورهایی که تاکنون توسط سایر محققان بررسی شده‌اند، رفتار متفاوتی نیز مشاهده شده است. از سوی دیگر، حجم جابجایی بدنه‌های جانبی این شناور نسبت به بدنه‌ی اصلی کم است و همین امر باعث شده است نتایج کسب شده در این مطالعه برای یک شناور متفاوت، دارای جذابیت باشد. همچنین در این مطالعه از

³ Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)

⁴ Volume OF Fluid (VOF)

⁵ artificial compression

¹ displacement velocity

² displacement

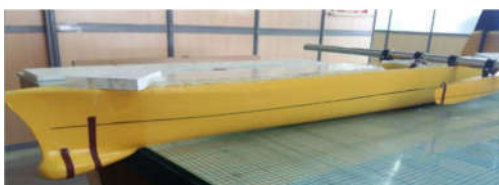


شکل ۲- فرایند ساخت مدل چوبی توسط دستگاه برش سه‌بعدی

برابری همزمان عدد فرود و رینولدز بین مدل و نمونه‌ی اصلی امکان‌پذیر نمی‌باشد. به‌علت وجود سطح آزاد آب، برای انجام آزمایش با مقیاس کوچک‌تر، تنها برابری عدد فرود در اولویت قرار دارد.

$$Fr_s = Fr_m = \sqrt{V^2/Lg} \rightarrow V_m = \sqrt{L_m/L_s} \cdot V_s \quad (6)$$

ابعاد مدل به‌گونه‌ای است که برابری عدد رینولدز مدل و شناور واقعی به‌طور هم‌زمان عملاً غیرممکن است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با معشوش نمودن جریان اطراف مدل به‌صورت مصنوعی، می‌توان رژیم جریان مدل و نمونه‌ی اصلی را به‌صورت یکسان در نظر گرفت و به همین دلیل، سهم نیروی اصطکاکی^۳ و سایر نیروهای وارد شده به مدل (از قبیل نیروی فشاری و نیروهای ناشی از موج‌سازی^۴ اطراف کشتی)، بر اساس قوانین تجربی قابل محاسبه است. جهت انجام این کار می‌توان با نصب سیم، نوار زبر یا ماسه جریان اطراف مدل را آشفته نمود [۳۲]. همچنین در این شکل خط آبخور به دقت بر روی شناور مشخص شده است.



شکل ۴- نصب نوار زبر به‌عنوان آشفته‌ساز مصنوعی

ابعاد تانک عددی نیز بر اساس پژوهش‌های مشابه توسط سایر محققین و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته توسط حلگر interDyMFoam برای تحلیل دینامیکی شناورها به روش عددی انتخاب شده است. در شکل ۵ و جدول ۲ ابعاد تانک عددی و همچنین در شکل ۶ نوع شرایط مرزی اعمال شده در آنها ارائه شده است.

جدول ۲- ابعاد دامنه‌ی حل بر اساس طول بین دو عمود کشتی^۵

متغیر	ابعاد دامنه
L/L_{pp}	۷
B/L_{pp}	۳/۱۶
D/L_{pp}	۲/۶۷
h/L_{pp}	۰/۶۷

^۳ frictional force

^۴ wave making resistance

^۵ Length between perpendiculars (LBP or LPP)

$$\begin{cases} \rho = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g \\ \mu = \alpha\mu_l + (1 - \alpha)\mu_g \end{cases} \quad (5)$$

علاوه بر معادلاتی که برای بقای جرم و مومنتوم ارائه شد و همچنین معادلات روش حجم سیال، نیاز است تا معادلات مربوط به انتقال تنش برشی نیز بعنوان روش شبیه‌سازی جریان آشفته در نظر گرفته شود [۳۲].

۳- معرفی مسئله

شناور مورد بررسی در این پژوهش، یک شناور سه‌بدنه بوده که می‌بایست به سرعت ۱۵ گره‌ی دریایی^۱ (معادل عدد فرود ۰/۲۱۴) دست یابد. در شکل ۱ نمایی از فرم بدنه‌ی این شناور، در جدول ۱ نیز مشخصات شناور اصلی و مدل ارائه شده است.



شکل ۱- طرح شناور سه‌بدنه‌ی تحلیل شده در این پژوهش

جدول ۱- مشخصات شناور اصلی و مدل

مشخصه	واحد	نمونه‌ی اصلی	مدل
مقیاس	-	۸۹/۵۹	۱
حجم جابجایی	تن	۴۹۲۷/۷	۰/۰۰۶۶
آبخور از کف	متر	۴/۸۱	۰/۰۵۳۹
طول خط آب (Lpp)	متر	۱۳۸/۸۷	۱/۵۵
عرض روی خط آب	متر	۳۰/۶۶	۰/۳۵۳
سطح خیس	متر مربع	۲۴۷۲/۱	۰/۳۰۸
ضریب منشوری C_p	-	۰/۶۶۳	۰/۶۶۳
ضریب بلوکی C_b	-	۰/۶	۰/۶
مرکز جرم از کف	متر	۴/۹۹۷	۰/۰۵۵۷
مرکز جرم از پاشنه	متر	۶۱/۰۵۴	۰/۶۸۱
عدد فرود طراحی	-	۰/۲۱۴	۰/۲۱۴
سرعت طراحی معادل	متر بر ثانیه	۷/۷۷	۰/۸۵

در شکل ۲ نمایی از مراحل برش مدل چوبی با دستگاه برش سه‌بعدی^۲ نمایش داده شده است.

^۱ knot

^۲ Computer Numerical Control (CNC)

نیروها و حرکات مدل قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۸- نمایی از نصب تجهیزات مورد نیاز برای آزمایش و قرارگیری مدل در حوضچه‌ی کشش

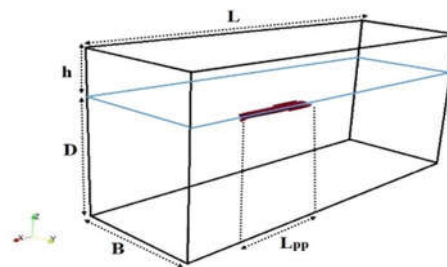
نتایج به دست آمده از آزمایش مدل در این جانمایی به‌عنوان مرجع صحت‌سنجی نتایج عددی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. استفاده از اعداد بی‌بعد ضریب مقاومت کل^۴ (که در ادامه توضیح داده خواهد شد) و همچنین عدد فرود برای مقایسه‌ی داده‌های مدل و نمونه‌ی اصلی بسیار کاربردی خواهد بود. لازم به ذکر است که در اینجا دو اصطلاح نیرو^۵ و مقاومت^۶، معادل یکدیگر بوده و در حوزه‌ی مهندسی دریا معمولاً از مقاومت به‌جای نیرو استفاده می‌گردد. همچنین مقاومت کل شناور شامل چندین بخش است که می‌توان با جداسازی آنها، اثرات مقیاس را به حداقل رساند. این اجزا شامل مقاومت اصطکاکی، فشاری، موج‌سازی و سایر موارد کوچک است که در آیین‌نامه‌های مربوط به هر آزمایشگاه، نحوه‌ی محاسبه‌ی آنها ذکر شده است.

۴- نتایج

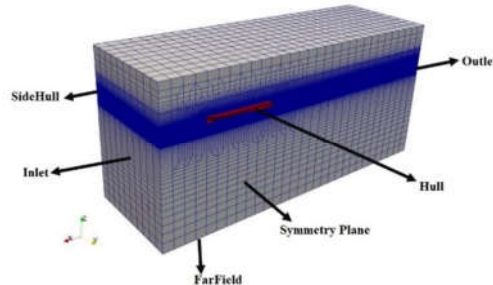
همانطور که اشاره شد، تحلیل این مسئله به دو روش تجربی و عددی صورت گرفته است. در تحلیل تجربی، یکی از جانمایی‌های موجود (جانمایی پیشنهاد شده در طراحی کشتی) مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس، نتایج با استفاده از حل عددی به سایر جانمایی‌ها بسط داده شده است.

۴-۱- نتایج تحلیل تجربی

آزمایش کشش مدل در آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس انجام شده است. این آزمایشگاه دارای یک حوضچه‌ی کشش با طول ۴۰۲ متر بوده که یکی از معتبرترین مراکز تحقیقاتی در این زمینه می‌باشد. نحوه‌ی انجام آزمایش به‌گونه‌ای است که ابتدا شناور از حوضچه‌ی تنظیم زاویه‌ی طولی^۷ خارج شده و پس از اطمینان از شرایط آب آرام و عدم تأثیر امواج بر نتایج آزمایش، سرعت‌های مدنظر با شتاب پیش‌تر گفته شده اعمال می‌شود. پس از گذشت زمان مناسب و ثبت داده‌ها، سرعت اعمالی افزایش پیدا کرده و به همین ترتیب ثبت داده‌ها در بازه‌های مختلف زمانی انجام می‌شود [۳۴]. شکل ۹ و ۱۰ به



شکل ۵- ابعاد دامنه‌ی حل



شکل ۶- شرایط مرزی و شبکه‌بندی اعمال شده

جانمایی‌های مختلف بدنه‌های جانبی در آزمایش کشش^۱ در شکل ۷ نمایش داده شده است. از آنجا که محدودیت‌های زیادی در انجام آزمایش برای تمامی جانمایی‌ها و در سرعت‌های مختلف شناور وجود داشته و امکان ثبت داده برای تمامی حالات موجود غیرقابل‌دسترس است، آزمایش کشش بر روی مدل تجربی برای یک حالت انتخابی صورت گرفته است. پس از اطمینان از صحت نتایج تجربی، سایر جانمایی‌ها در حل عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این شکل محورهای عمود سینه^۲ و پاشنه^۳ به ترتیب با نمادهای AP و FP نمایش داده شده است. فاصله‌ی طولی بدنه‌ی جانبی از عمود پاشنه تا مرکز بدنه‌ی جانبی اندازه‌گیری شده و با تقسیم بر طول شناور بی‌بعد شده و با X/L نمایش داده شده است. به همین صورت برای فاصله‌ی عرضی نیز فاصله‌ی بین خط مرکزی دو بدنه اندازه‌گیری شده است (Y/L) . چهار فاصله‌ی طولی و چهار فاصله‌ی عرضی مورد بررسی قرار گرفته و هر یک از آنها با نماد لاتین مشخص شده‌اند. در کل ۱۶ جانمایی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۷- جانمایی بدنه‌های جانبی بر اساس متغیرهای بی‌بعد

در شکل ۸ نحوه‌ی جانمایی بدنه‌های جانبی شناور و همچنین حسگرها و تجهیزات نصب شده‌ی مورد نیاز برای اعمال کشش و ثبت

⁴ Total resistance coefficient

⁵ force

⁶ resistance

⁷ trim tank

¹ towing test

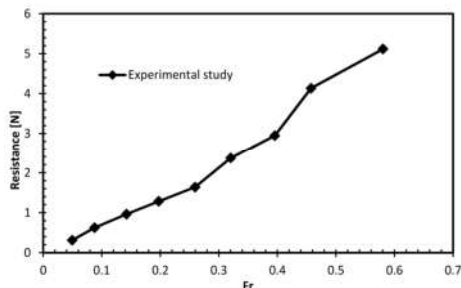
² fore perpendicular

³ aft perpendicular

وضوح این مسئله را نمایش می‌دهد.



شکل ۹- نمایش مدل شناور حین تست تجربی

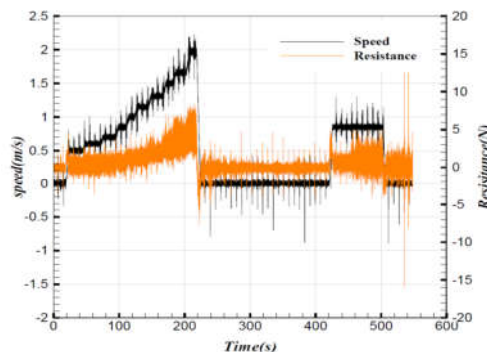


شکل ۱۲- مقدار نیروی مقاومت وارد بر مدل شناور سه‌بدنه به ازای اعداد فرود مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودار در محدوده‌ای تا عدد فرود ۰/۲۵ نسبت به بازه‌های دیگر دارای شیب کمتری می‌باشد. لذا می‌توان سرعت طراحی شناور را در همین بازه در نظر گرفت. باید توجه داشت که این رفتار نمودار مقاومت به‌طور قابل توجهی به فرم بدنه مربوط بوده و نمی‌توان آن را برای سایر شناورها در نظر گرفت.

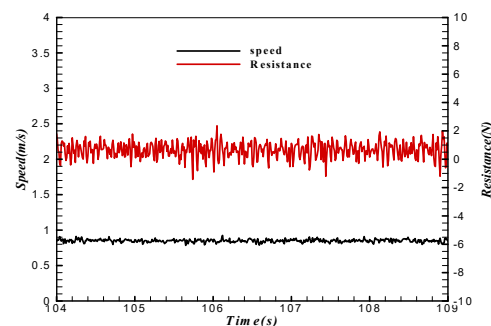
۲-۴- نتایج تحلیل عددی

با استفاده از روش‌های عددی می‌توان هزینه‌های انجام آزمایش را تا حد زیادی کاهش داده و علاوه بر آن، بسیاری از داده‌هایی که در شرایط آزمایشگاهی ثبت آنها دشوار است را ارائه نمود. همچنین می‌توان کانتورها و نمودارهای مورد نیاز را در مرحله‌ی پس‌پردازش^۱ به‌دست آورد. در اینجا از تحلیل شش درجه آزادی^۲ استفاده شده و به مدل اجازه داده شده است تا بر مبنای مشخصات فیزیکی خود و نیروی اعمال شده از سوی آب، حرکت کند. نیروی اعمال شده در راستای افقی و عمودی ثبت و همچنین مقدار جابجایی عمودی و غلتش طولی شناور با زمان نیز بررسی شده است. همچنین برای حل عددی از یک رایانه مجهز به پردازنده‌ی Core i7-6700K با فرکانس مرجع ۴ گیگاهرتز و بهره‌گیری از ۶۴ گیگابایت حافظه استفاده شده است. برای اطمینان از پایداری نتایج، ۲۰ ثانیه از رفتار دینامیکی شناور شبیه‌سازی شده است. برای بررسی اثرات شبکه‌بندی بر دقت نتایج، از ۵ حالت مختلف استفاده شده است. در جدول ۳ نتیجه‌ی بدست آمده در هر حالت شبکه‌بندی برای شناور با بدنه‌های جانبی در وضعیت طراحی اولیه و دقت بدست آمده برای مقاومت کل در سرعت طراحی اولیه (Fr=0.214) ارائه شده است. با توجه به کاهش شیب نمودار خطای ناشی از حل عددی، حالت (e) برای سایر محاسبات انتخاب شده است.



شکل ۱۰- نمودار اعمال سرعت و محاسبه‌ی مقاومت کل مدل سه‌بدنه

جهت اطمینان از صحت داده‌های تجربی، انجام آزمایش مطابق قوانین سه بار تکرار شده است. نمودار نیروی مقاومت شناور مدل سه‌بدنه در حالت جانمایی طرح اولیه (X/L=0.1935, Y/L=0.1035) و در سرعت ۰/۸۵ متر بر ثانیه در بازه‌ی زمانی ۵ ثانیه در حوضچه‌ی کشش در شکل ۱۱ نشان داده شده است، که پس از ثبت داده‌ها، میانگین آنها به‌عنوان مقاومت کل شناور مدل در نظر گرفته می‌شود.

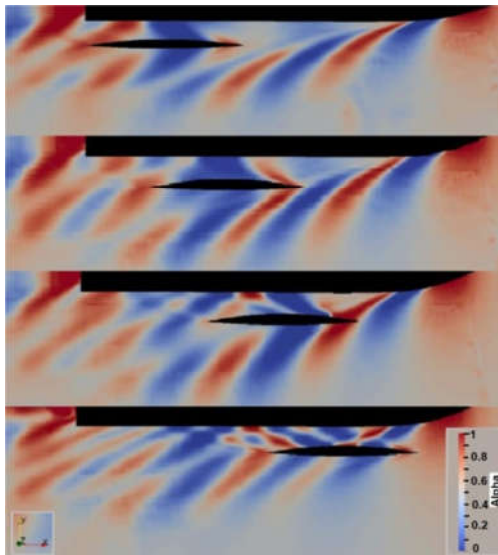


شکل ۱۱- نمودار نوسانات مقاومت و سرعت مدل سه‌بدنه در حال جانمایی F در آزمایشگاه

در شکل ۱۲ مقاومت مدل تجربی در سرعت‌های انتخاب شده و عدد فرود متناظر با آنها ارائه شده است. نتایج تجربی ارائه‌شده مربوط به حالت جانمایی طراحی که پیشتر نیز به مشخصات آن اشاره شد و در اعداد فرود مختلف با نتایج حل عددی در همان ابعاد و جانمایی مورد بررسی قرار گرفته است.

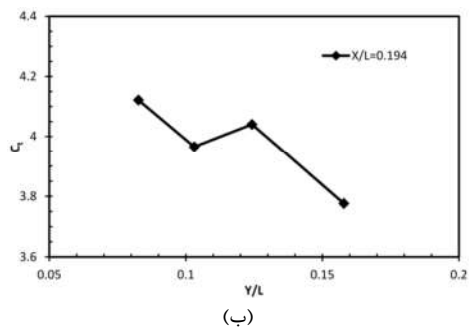
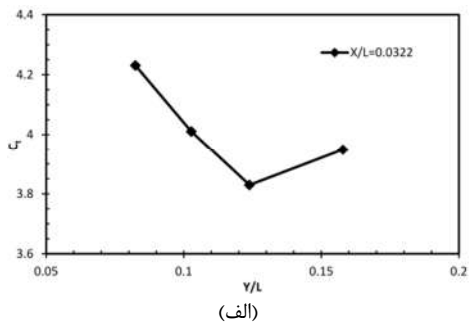
¹ Post-Processing

² 6 Degrees of Freedom (6DOF)



شکل ۱۴- مقایسه‌ی سطح آزاد تشکیل شده در اطراف مدل عددی در جانمایی‌های طولی متفاوت

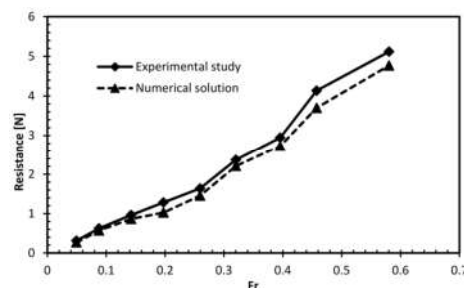
در شکل ۱۴ و با نزدیک‌تر شدن موقعیت طولی بدنه‌های جانبی به سمت سینه‌ی شناور، بدنه‌های جانبی در معرض امواج واگرایی تولید شده توسط بدنه‌ی اصلی قرار گرفته و این امر موجب افزایش مقاومت اعمال شده بر بدنه‌های جانبی و به تبع آن مقاومت کل شناور می‌گردد. در ادامه، اثرات تغییر جانمایی بدنه‌های جانبی در راستای عرض شناور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۱۵ به ازای هر جانمایی طولی که با (X/L) نمایش داده شده است، مقدار ضریب نیروی مقاومت کل در مقابل جانمایی عرضی متفاوت ارائه شده است. مقادیر فاصله از خط مرکزی شناور در راستای عرض شناور و همچنین مقدار جابجایی در راستای طول با استفاده از طول شناور (L) بی‌بعد شده است.



جدول ۳- بررسی استقلال از شبکه‌ی حل عددی

حالت	تعداد کل سلول‌ها	مقاومت کل (نیوتن)	درصد خطا از حل تجربی
الف	۱۸۰۱۴۰۲	۱/۰۱	۱۳/۴۴
ب	۲۲۶۸۸۸۴	۱/۰۸	۱۱/۶۳
ج	۲۶۰۴۹۰۶	۱/۱۵	۹/۸۰
ه	۳۰۵۶۴۱۶	۱/۲۱	۶/۸۲
و	۳۲۱۴۴۰۲	۱/۲۳	۶/۵۴

تولید شبکه با بیش از سه میلیون سلول برای شبیه‌سازی باعث شده است که زمان صرف شده برای هر تحلیل عددی بیش از ۷۰ ساعت باشد. با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود اختلاف اندکی میان نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد، متوسط اختلاف بین حل عددی و تحلیل آزمایشگاهی ۱۰ درصد و خطای ناشی از حل عددی در سرعت طراحی کمتر از ۷ درصد بوده است.



شکل ۱۳- نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل سه‌بدنه

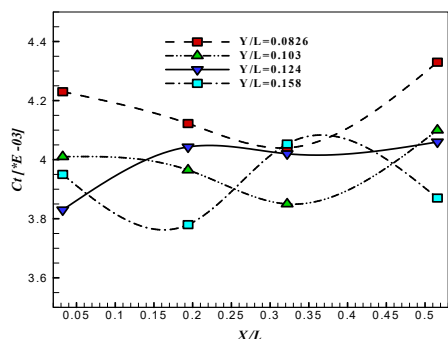
رابطه‌ی حاکم بر مقاومت کل شناور و ضریب نیروی مقاومت را می‌توان بر اساس معادله‌ی (۷) ارائه نمود. با در دست داشتن مقادیر نیرو، سرعت، سطح خیس^۱ و چگالی، می‌توان ضریب نیروی مقاومت وارد بر شناور را محاسبه نمود. کاهش مقدار ضریب بی‌بعد مقاومت به‌منزله‌ی کاهش مقاومت وارد بر شناور می‌باشد. لذا برای کاهش مقاومت در شرایط یکسان، یعنی شرایطی که سرعت، سطح خیس شناور و چگالی آب تغییر نمی‌کند، می‌بایست ضریب مقاومت (C_t) کاهش پیدا کند. کاهش این متغیر در هیدرودینامیک می‌تواند ناشی از کاهش ضریب مقاومت اصطکاکی، مقاومت موج‌سازی یا ضریب فرم بدنه باشد. با توجه شرایط حل عددی که سرعت و فرم بدنه تمامی حالات یکسان و شرایط مشابه در نظر گرفته شده، تغییرات ضریب مقاومت کل ناشی از تغییرات ضریب مقاومت موج‌سازی می‌باشد.

$$R = C_t \left(\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \right) \rightarrow C_t = R / \left(\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \right) \quad (7)$$

در شکل ۱۴ نیز کانتور سطح آزاد تشکیل شده در اطراف شناور در چند حالت جانمایی طولی مختلف و عدد فرود ۰/۲۱۴ ارائه شده است. در این کانتور، نقاطی از سطح آب که دارای ارتفاع بیشتری می‌باشند با رنگ قرمز مشهود است. همچنین تداخل امواج تشکیل شده در سینه‌ی شناور (بدنه‌ی اصلی) با بدنه‌های جانمایی به‌وضوح مشاهده می‌گردد.

¹ wetted surface

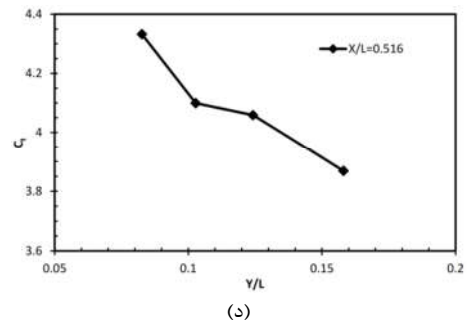
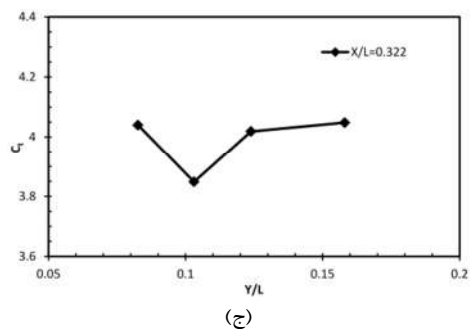
هرچند تغییر در جانمایی طولی بدنه‌های جانبی تابع جانمایی کلی شناور بوده و نمی‌توان تغییر چندانی را در این حوزه اعمال نمود، با این حال تغییرات جانمایی طولی این بدنه‌ها بر مقاومت کلی شناور نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌گردد تغییرات طولی جانمایی، اثرات قابل‌توجه و پیش‌بینی پذیری را ارائه نکرده است. با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد که با نزدیک بودن بدنه‌ی جانبی به بدنه‌ی مرکزی، در حالت (Y/L) برابر با 0.0826 طول شناور و تحت تأثیر قرار گرفتن موج واگرایی ایجاد شده توسط بدنه‌ی مرکزی در تمامی حالات، مقدار مقاومت و همچنین ضریب مقاومت کل دارای مقدار قابل‌توجهی بود و تغییرات کمی مشاهده می‌شود. در نزدیکی پاشنه به دلیل قرار گرفتن در منطقه پرفشار و تحت تأثیر جدایش جریان و همچنین در نزدیکی سینه‌ی شناور و قرار گرفتن در قله‌ی موج واگرایی ایجاد شده توسط بدنه‌ی مرکزی نسبت به سایر حالات ضریب مقاومت کل بیشتر است.



شکل ۱۶- کلی مقاومت شناور در جانمایی‌های طولی و عرضی متفاوت

در شکل ۱۶ و در حالت (Y/L) برابر با 0.103 طول شناور به دلیل فاصله گرفتن بدنه‌ی جانبی از بدنه‌ی مرکزی از پاشنه نسبت به سایر حالات مقدار ضریب مقاومت کل کمتر بوده و در سایر حالات تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود. در نزدیکی پاشنه موج ایجاد شده توسط بدنه‌ی جانبی باعث تأثیر بر بدنه‌ی مرکزی و افزایش مقدار ضریب مقاومت و در نتیجه افزایش مقاومت می‌شود. با افزایش فاصله و حرکت در راستای طول، با قرار گرفتن بدنه‌ی جانبی در محدوده‌ای که قعر موج ایجاد شده توسط بدنه‌ی مرکزی به بدنه‌ی جانبی می‌رسد، این پدیده باعث کاهش مقاومت موج‌سازی بدنه‌ی جانبی و همچنین کاهش مقاومت کل می‌شود. در شکل ۱۶ و در فاصله‌ی (Y/L) برابر 0.158 رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به قرار گرفتن بدنه‌ی جانبی به قله و قعر موج واگرایی بدنه‌ی مرکزی نسبت داد. البته باید توجه داشت که این رفتار فقط در سرعت یکسان مشاهده می‌شود و با تغییر سرعت و تغییر زاویه‌ی موج واگرایی می‌تواند رفتار نامشخصی داشته باشد.

با مقایسه و بررسی کلی نمودارهای ضریب مقاومت کل در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد که در یک جانمایی عرضی و با تغییر در راستای طول تغییرات چندانی در مقاومت رخ نمی‌دهد و تأثیر جانمایی عرضی بیشتر است. البته باید در نظر داشت که امکان دارد این رفتار برای سایر خطوط بدنه‌ها متفاوت باشد. در جدول ۴ مقادیر ضریب مقاومت کل جهت مقایسه‌ی تمامی حالات جانمایی ارائه شده است.



شکل ۱۵- مقاومت شناور در جانمایی‌های عرضی و طولی متفاوت

در شکل ۱۵-الف) و با قرار گرفتن بدنه‌ی جانبی در فاصله‌ی (X/L) برابر با 0.322 طول مرکز بدنه‌ی جانبی از پاشنه، به دلیل وجود جدایش در پشت بدنه‌ی مرکزی و وجود نقطه‌ی پرفشار تداخل موج به وجود آمده بین بدنه‌ی مرکزی و جانبی نامطلوب بوده و با فاصله گرفتن از این ناحیه در امتداد عرض، به تدریج این اثر کاهش پیدا کرده و از مقدار ضریب مقاومت کاسته می‌شود. با افزایش بیش از اندازه‌ی فاصله، مقدار مقاومت به سمت مقدار ضریب مقاومت مجموع افزایش می‌یابد. در شکل ۱۵-ب) و در فاصله‌ی طولی (X/L) برابر با 0.194 نیز به‌جز یک تغییر، رفتاری مطابق با موقعیت طولی قبل را نیز می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فاصله از بدنه‌ی مرکزی ابتدا با ضریب مقاومت کاهش یافته و سپس با افزایش، ضریب مقاومت به سمت ضریب مقاومت مجموع بدنه‌ها میل می‌کند. در شکل ۱۵-ج) و در فاصله‌ی طولی (X/L) برابر با 0.322 تغییرات مقدار ضریب مقاومت متفاوت است. به دلیل ایجاد موج واگرا توسط بدنه‌ی مرکزی و قرار گرفتن بدنه‌ی جانبی در این موج، تداخل نامطلوب رخ داده و مقدار ضریب مقاومت تنها در یک محدوده کاهش داشته و پس از آن با افزایش روبروست. در شکل ۱۵-د) و در فاصله‌ی طولی بدنه‌ی (X/L) برابر با 0.516 و با نزدیک شدن بدنه‌ی جانبی به مرکز شناور، ابتدا با قرار گرفتن در قله‌ی موج واگرایی ایجاد شده توسط بدنه‌ی مرکزی تداخلی نامطلوب صورت گرفته و به تدریج با افزایش فاصله و گذر از موج واگرایی ایجاد شده، مقدار ضریب مقاومت کاهش می‌یابد. در نهایت با افزایش فاصله، مقدار ضریب مقاومت به سمت مقدار مجموع نزدیک خواهد شد. از آنجا که طراحی اولیه‌ی بدنه‌های جانبی در حالتی ارائه شده است که مقدار X/L برابر 0.194 می‌باشد، می‌توان مشاهده نمود که در همین جانمایی طولی نیز، مقدار ضریب مقاومت از بیشینه‌ی $4/12$ تا کمترین مقدار معادل $3/78$ تغییر کرده است. یعنی تغییر 9 درصدی در مقاومت کل ثبت شده است.

جدول ۴- ضریب مقاومت کل شناور سه‌بدنه در حالات مختلف جانمایی

در عدد فرود ۰/۲۱۴

جانمایی	X/L	Y/L	C_t
A	۰/۰۳۲۳	۰/۰۸۲۶	۴/۲۳۱
B	۰/۰۳۲۳	۰/۱۰۳۲	۴/۰۱۱
C	۰/۰۳۲۳	۰/۱۲۳۹	۳/۸۳۰
D	۰/۰۳۲۳	۰/۱۵۷۹	۳/۹۵۳
E	۰/۱۹۳۵	۰/۰۸۲۶	۴/۱۲۲۴
F	۰/۱۹۳۵	۰/۱۰۳۲	۳/۹۶۵
G	۰/۱۹۳۵	۰/۱۲۳۹	۴/۰۴۳
H	۰/۱۹۳۵	۰/۱۵۷۹	۳/۷۸
I	۰/۲۹۸۴	۰/۰۸۲۶	۴/۰۴
J	۰/۲۹۸۴	۰/۱۰۳۲	۳/۸۵
K	۰/۲۹۸۴	۰/۱۲۳۹	۴/۰۲
L	۰/۲۹۸۴	۰/۱۵۷۹	۴/۰۵۳
M	۰/۵۱۶۱	۰/۰۸۲۶	۴/۲۳
N	۰/۵۱۶۱	۰/۱۰۳۲	۴/۱۰
O	۰/۵۱۶۱	۰/۱۲۳۹	۴/۰۶
P	۰/۵۱۶۱	۰/۱۵۷۹	۳/۸۹

بدنه‌های جانبی از بدنه‌ی اصلی می‌تواند منجر به کاهش ۱۰ درصدی مقاومت کل این شناور شود. این کاهش توان، ارتباط مستقیمی با توان موتور و مصرف سوخت این شناور دارد. از یک سو کاهش مصرف سوخت دارای اثرات اقتصادی و محیط زیستی مثبت بوده و از سوی دیگر، کاهش فضای مورد نیاز برای جانمایی موتور اصلی و مخازن سوخت منجر به افزایش فضای مفید برای کاربردهای دیگر می‌گردد. لازم به ذکر است که افزایش بیشتر این فاصله باعث افزایش مقاومت شده و مقدار مقاومت در بیشترین فاصله به مجموع مقاومت هر سه بدنه نزدیک می‌گردد. در این پژوهش علاوه بر اعتبارسنجی یک حل عددی مبتنی بر نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM و تشکیل یک تانک عددی با ابعاد قابل قبول، نتایج تغییر جانمایی بدنه‌های جانبی بر مقاومت کل نیز به دقت مورد ارزیابی قرار گرفت.

۶- سپاسگزاری

می‌بایست از همکاری دلسوزانه‌ی جناب آقای مهندس هاشمی ریاست محترم آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس که امکان انجام آزمایش‌هایی با کیفیت بسیار زیاد را برای حمایت از این پژوهش فراهم آوردند تشکر و قدردانی نمود.

۷- نمادها

C_B	ضریب ظرافت بدنه
C_P	ضریب منشوری
C_t	ضریب مقاومت
C_{WP}	ضریب صفحه‌ی آب‌خور
f_σ	جمله‌ی منبع در اثر کشش سطحی
g	شتاب گرانش
P_d	فشار دینامیکی
U	سرعت سیال
U_g	سرعت حرکت سلول‌های شبکه
P	فشار استاتیک
P_0	فشار کل
P_d	فشار دینامیکی
α	نسبت حجمی
σ	کشش سطحی
κ	انحنای سطح آزاد سیال
μ	لزجت دینامیکی

۸- مراجع

- [1] Andrews D and J.W. Zhang, Trimaran Ships the Configuration for the Frigate of the Future. *Naval engineers journal*, Vol. 107, No.3, pp. 77-94, 1995.
- [2] Benjamin B.A., An investigation of the resistance characteristics of powered trimaran side-hull configurations. *Transaction of SNAME* Vol. 105, pp. 349-373, 1997.
- [3] Bertorello C., Bruzzone D., Cassella P., Zotti I., Trimaran Model Test Results and Comparison with Different High Speed Craft, in *Practical Design of Ships and Other Floating Structure*. Elsevier, pp. 143-149. 2001.

از مقایسه‌ی مقادیر ضریب مقاومت کل در جدول ۴ در یک سرعت و عدد فرود مشخص، بیشترین مقدار در دو جانمایی A و M و کمترین مقدار در جانمایی H می‌باشد. با مقایسه‌ی کمترین و بیشترین مقدار می‌توان دریافت که در جانمایی H تا ۱۰ درصد کاهش ضریب مقاومت و درعین‌حال کاهش مقاومت کل وجود دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات تغییر طولی و عرضی جانمایی بدنه‌های جانبی بر مقاومت کل یک شناور سه‌بدنه مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای آزمایش تجربی از یک مدل چوبی در آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس استفاده شده است و جانمایی طراحی اولیه‌ی شناور جهت بهره‌گیری از نتایج در فرآیند صحت‌سنجی بررسی گردید. پس از اطمینان از صحت حل عددی بر مبنای نتایج تجربی موجود، اثرات تغییر جانمایی طولی و عرضی بدنه‌های جانبی بر مقاومت کل و برای ۱۶ جانمایی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج تحلیل عددی، اثرات تغییر در جانمایی طولی بر مقاومت کل این شناور در آب آرام ناچیز بوده و در مقابل، اثر تغییر در جانمایی عرضی قابل توجه می‌باشد. این در حالی است که نتایج ارائه شده توسط برخی محققان دیگر با این موضوع کاملاً در تضاد است. علت اصلی این امر، تفاوت فرم بدنه‌ی مرکزی و شکل‌گیری موج اطراف آن می‌باشد، که اندرکنش متفاوتی را با بدنه‌های جانبی به همراه دارد. همچنین نسبت حجم جابجائی بدنه‌ی اصلی نسبت به بدنه‌های جانبی نیز بیشتر از شناورهای سه‌بدنه‌ی مشابه بوده و نتایج ارائه شده در این مطالعه می‌تواند برای شناورهایی با مشخصات مشابه مفید باشد. هرچند جانمایی بدنه‌های جانبی تا حد زیادی تابع ملاحظات طراحی و چیدمان تجهیزات شناور است، دانستن بهترین جانمایی با دیدگاه کاهش مقاومت می‌تواند در فاز طراحی مفهومی کمک زیادی به تعیین محل نصب بدنه‌های جانبی نماید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تغییر فاصله‌ی عرضی

- [21] Pavkov, M. and M. Morabito, Experimental Investigation of Trimaran Models in Shallow Water. *Journal of Ship Production and Design*, Vol. 30(2), pp. 66-78, 2014.
- [22] Muscat-Fenech, C. and A.M.G. La Rosa, Resistance analysis for Trimaran. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 8(1), pp. 7-14, 2014.
- [23] Changhwan Son, Prasanta K Sahoo, Vaibhav Aribenchi and Srikanth Asapana, CFD Simulation of Resistance of Highspeed Trimaran Hullforms. In *13th International Conference on Fast Sea Transportation*, FAST 2015, USA, September 2015.
- [24] Deng, R., et al., The effect of trimming and sinkage on the trimaran resistance calculation. *Procedia Engineering*, No. 126, pp. 327-331, 2015.
- [25] Luhulima, R.B., I.K.A.P. Utama, and A. Sulisetyono, Experimental Investigation into the Resistance Components of Displacement Trimaran at Various Lateral Spacings.
- [26] Karim Akbari Wakilabadi, Mohammad Reza Khedmati, Abbas HasanAbadi, Alireza Mohammadi., Resistance Prediction for a Novel Trimaran with Wave Piercing Bow. *IJMT* Vol. 9, pp. 33-40, 2018.
- [27] Lin Du, Hamid Hefazi and Prasanta Sahoo, Rapid resistance estimation method of non-Wigley. *ships and Offshore Structures*, March 2019.
- [28] م. مصدری، ش. وکیلی پور، م.سیدنیا، "تحلیل جریان ناپایا حول یک ایرفویل توربین باد نوسانی توسط کد مستن-باز OpenFOAM"، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره ۸۶، جلد ۴۹، شماره ۱، صفحه ۳۲۹-۳۳۸، بهار ۱۳۹۸.
- [29] Jasak H. *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows*, Ph.D. Thesis, Imperial College, London, UK, 1996.
- [30] Rusche H. *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-phase Flows at High Phase Fractions*, Ph.D. Thesis, Imperial College, London, UK, 2002.
- [31] Berberović E, Van Hinsberg N, Jakirlić S, Roisman I, Tropea C., Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution. *Physical Review E*, Vol. 79(3), 36306. 2009.
- [32] Menter FR. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 23(4), pp. 305-312, 2009.
- [33] ا. نجفی، م. علوی، "بررسی اثر انحنای عرضی شناور تندرو بر مؤلفه‌های هیدرودینامیکی آن"، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره ۹۲، جلد ۵۰، شماره ۳، صفحه ۲۶۶-۲۵۹، پاییز ۱۳۹۹.
- [4] Kang K.J., C.J. Lee. and D.H. Kim., Hull Form Development and Powering Performance Characteristics for a 2,500 ton Class Trimaran, *Practical Design of ships and Other Floating Structures. Elsevier*. p. 151-157, 2001.
- [5] Seif, M. S. and Amini, E., Performance Comparison Between Planing Monohull and Catamaran at High Froude Numbers., *Iranian Journal of Science & Technology*, Volume 28, Number B4
- [6] Degiuli, N., A. Werner, and I. Zotti. An experimental investigation into the resistance components of Trimaran configurations. In FAST 2005 International Conference on Fast Sea Transportation. 2005.
- [7] Ermina Begovic, Andrea Bove, Dario Bruzzone, Sebastiano Caldarella, Pasquale Cassella, Marco Ferrando, Emilio Tincani, Igor Zotti., Co-operative investigation into resistance of different trimaran hull forms and configurations. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 175-182, 2006.
- [8] Armstrong, T., On the performance of a large high-speed trimaran. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 123-131, 2006.
- [۹] سیف م. و زاروکیان آ.، بررسی تجربی مقاومت هیدرودینامیکی شناورهای سه‌بدنه. هشتمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، بوشهر، ایران، ۱۳۸۵.
- [10] Thomas Mynard, Prasanta K Sahoo, Jon Mikkelsen, Don McGreer., Numerical and experimental study of wave resistance for trimaran hull forms. In *6th International Conference on High-Performance Marine Vehicles*, 16th - 18th September, Naples, Italy, 2008.
- [11] Jonathan Slutsky, Resistance and Component Hull Interactions of a High-Speed Trimaran Sealift Ship. *Naval Surface Warfare Center Carderock DIV BETHESDA MD Hydromechanics Directorate*, 2008.
- [12] Royce, R., et al. Facility comparison on model calm water resistance characteristics of a trimaran. In *ATTC 2010*. 2010.
- [13] WANG Zhong, LU Xiao-ping., Numerical Simulation of Wave Resistance of Trimarans By Nonlinear Wave Making Theory With Sinking and Trim Being Taken Into Account. *Journal of Hydrodynamics*, 2011.
- [14] Xu, M. and S.I. Zhang, A numerical study on side hull optimization for trimaran. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 23, pp. 265-272, 2011.
- [15] Pérez Fernández, R., SEAKEEPING IN THE NAVIGATION-EXAMPLE IN TRIMARAN SHIPS. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, Vol. 2(3), 2012.
- [16] Yanuar, Gunawan, M. A. Talahatu, Ragil T. Indrawati and A. Jamaluddin., Resistance analysis of unsymmetrical trimaran model with outboard sidehulls configuration. *Journal Marine Sci. Appl.* Vol. 12, pp. 293-297, 2013
- [17] Karim Akbari Wakilabadi Mohammad Reza Khedmati Mohammad Saeed Seif., Experimental study on heave and pitch motion characteristics of a wave-piercing trimaran. *Transactions of FAMENA*, Vol. 38(3), pp. 13-26, 2014
- [18] M R Davis & D S Holloway., A comparison of the motions of trimarans, catamarans and monohulls. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 4, pp. 183-195, 2007.
- [19] Su, Y.-m., et al., Numerical and experimental analyses of hydrodynamic performance of a channel type planing trimaran. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 26(4), pp. 549-557, 2014.
- [20] Chi, Y., F. Huang, and K. Hyunul, Hydrodynamic optimization of a triswach. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, Vol. 26(6), pp. 856-864, 2015.