

## بررسی تأثیر فاصله طولی پله عرضی دوم از پاشنه بر عملکرد شناور کوگار تحت شرایط بارگذاری مختلف

حمید کاظمی<sup>۱</sup>  
دانشجوی دکترا

محمد مهدی دوستدار<sup>۲</sup>  
دانشیار

کاهش مقاومت هیدرودینامیکی و دستیابی به سرعت‌های بالاتر، یکی از اهداف اصلی در طراحی شناورهای پروازی است. برای این منظور، بهره‌گیری از تحلیل درست هیدرودینامیکی از گام‌های مهم به شمار می‌رود. در این مطالعه، مدل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از گسسته سازی حجم محدود بر روی شبکه ساختاریافته جهت بررسی الگوی جریان زیر بدنه شناور کوگار دوپله در حالت های مختلف، ارائه شده است. بنابراین برای شبیه‌سازی عددی شناور از نرم افزار تجاری انسیس سی اف ایکس استفاده شده است. برای بررسی توزیع دو فاز سیال و مدل‌سازی سطح آزاد از روش  $VOF^3$  استفاده شده است. بدین ترتیب، معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال پیرامون شناور، حل و توزیع سرعت و فشار در دامنه محاسباتی بدست خواهد آمد.

واژه های راهنما: دینامیک سیالات محاسباتی، شناور پروازی، شناور دوپله، موقعیت طولی پله دوم.

### ۱- مقدمه

با آشکار شدن اهمیت شناورهای تندرو پروازی برای کاربردهای مختلف؛ تقاضا برای استفاده از این شناورها رو به افزایش است. از این رو طراحی مناسب و تحلیل دقیق این شناورها اهمیت ویژه‌ای یافته است. تعیین مقاومت هیدرودینامیکی یک شناور، جهت تخمین توان مورد نیاز حرکت آن الزامی است. این مساله در مرحله طراحی و همچنین در موضوعات مربوط به بهینه سازی هیدرودینامیکی فرم بدنه شناورها حائز اهمیت است. بدنه‌های پروازی با رسیدن به سرعت کافی از نیروی لیفت هیدرودینامیکی برای غلبه بر ۵۰ تا ۹۰ درصد نیروی وزن خود استفاده می‌کنند [۱]. بدین ترتیب امکان رسیدن به سرعت‌های بالاتر برای این نوع شناورها فراهم می‌شود. با افزایش سرعت، تریم دینامیکی شناور تغییر کرده و با بالا آمدن شناور (رسیدن به حالت پروازی) مقاومت هیدرودینامیکی کاهش می‌یابد.

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران stableboat.90@hotmail.com  
<sup>۲</sup>نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران mdostdar@ihu.ac.ir

<sup>3</sup> VOF= Volume of fluid

بهینه‌ترین زاویه تریم برای شناورهای پروازی بدون پله، که در این حالت کمترین نسبت نیروی درگ به لیفت اتفاق می‌افتد، در مطالعه‌ای توسط سویتسکی [۲]، تقریباً معادل ۴ درجه گزارش شده است. در بدنه های پروازی رایج، با افزایش سرعت شناور، زاویه تریم کاهش یافته و باعث خروج شناور از این حالت بهینه خواهد شد. استفاده از بدنه‌های دارای پله عرضی در کف شناور، به عنوان یکی از راه کارهای حل این مشکل ارائه شده است [۲].

به طور کلی، تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای تندرو پروازی، به سه روش؛ تست‌های آزمایشگاهی، روش‌های تحلیلی (فرمول رگرسیون) و روش‌های حل عددی (دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) محدود است. با این حال، تست‌های حوضچه کشش از نظر مالی و زمانی بسیار پرهزینه هستند. از سوی دیگر، روش‌های تحلیلی و تجربی نیز، تنها برای بدنه‌های منشوری ساده کاربرد دارد. با وجود افزایش پیچیدگی‌های هندسه و فرم بدنه‌های جدید، نیاز به یک روش بسیار کارآمد بیش از پیش احساس می‌شود. روش‌های عددی دینامیک سیالات محاسباتی، به عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل چنین مسائلی ارائه شده‌اند.

امروزه استفاده از این ابزار به صورت موازی با تست‌های حوضچه کشش، برای معتبرسازی نتایج عددی و همچنین کاهش تعداد تست‌ها کاربرد یافته است [۳]. پژوهش‌های آزمایشگاهی و تست مدل شناورهای پروازی، برای چندین دهه و تا به امروز انجام شده و گزارش‌ها و اسناد بسیاری در این زمینه ارائه شده است. از این موارد می‌توان به تست‌های آزمایشگاهی گسترده (کلمنت و بلونت) بر روی سری سیستماتیک (سری ۶۲) اشاره کرد [۴].

مطالعات انجام گرفته در زمینه شبیه‌سازی عددی شناورهای تندرو با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی محدود به دهه اخیر است. به عنوان یکی از اولین مطالعات در این زمینه، (کاپوننتو) از حل گر RANS برای بررسی و تحلیل هیدرودینامیکی شناور تندرو بهره گرفت. او در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های پایا برای بدنه ثابت در ۳ حالت تریم و ۳ آب‌خور مختلف (در مجموع ۹ شبیه‌سازی در هر سرعت) انجام و سپس با استفاده از میانبایی، حالت نهایی حرکتی شناور را تخمین زد [۵]. در مطالعه ای در سال (۲۰۰۸)، قاسمی و همکارانش [۶] روشی ترکیبی برای تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناورهای پروازی ارائه دادند. آنها در این مطالعه، ابتدا فشار هیدرودینامیکی و سپس مقاومت و لیفت فشاری را با استفاده از روش المان مرزی محاسبه نمودند. سپس مولفه مقاومت اصطکاکی براساس تئوری لایه مرزی ویسکوز بدست آمد. چهار تست آزمایشگاهی برای معتبرسازی این روش انجام گرفت که کارآمد بودن این روش را اثبات نمود.

(بریزولارا و سرا) [۷] در مطالعه‌ای به بررسی عددی صفحه پروازی در موقعیت ثابت پرداخته و نتایج آنرا با نتایج آزمایشگاهی موجود و همچنین روش‌های سویتسکی [۸] و شافورد [۹] مقایسه کرده است. خطای ۵ تا ۱۰ درصدی گزارش شده در این مطالعه، نشان از قابلیت مناسب روش دینامیک سیالات محاسباتی برای این مساله است. (سایسکی و مرایتو) به صورت آزمایشگاهی، الگوی ویک سطح آزاد در پشت بدنه‌های پروازی منشوری را بررسی کردند. علاوه براین، آنها فرمول‌هایی تجربی برای تعریف کمی الگوی ویک در خط مرکزی و همچنین در فاصله (B ۴/۱) از خط مرکزی شناور ارائه کردند [۲]. (هی و همکارانش) در سال (۲۰۰۶) مطالعه ای [۱۰] را ارائه کردند که در آن به شبیه‌سازی جریان دوفازی پیرامون اجسام متحرک بر اساس معادلات ناویر استوکس و روش شبکه بندی پویا و قابل تطبیق پرداخته شده بود.

این روش عددی برای محاسبه جریان غیرپایای اطراف یک بدنه منشوری که به صورت متقارن و نامتقارن به سطح آب برخورد می‌کند استفاده شد. انطباق بسیار خوب نتایج، کاربردی بودن روش فوق را برای مدل‌سازی دقیق سطح آزاد مشخص نمود. (سو و همکارانش) یک روش جدید دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی شناورهای پروازی ارائه کردند [۱۱]. این روش عددی براساس معادلات متوسط رینولدزی ناویراستوکس بود. باید اضافه نمود که معادلات حجم سیال و شش درجه آزادی حرکت نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده بود. دقت روش فوق برای پیش بینی رفتار حرکتی و همچنین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بسیار خوب ارائه شده است.

(گارلند و مکی) تاثیرات تغییر ارتفاع و موقعیت پله بر یک شناور پروازی را بررسی کردند. آنها در این مطالعه، شبیه سازی‌ها را در آب‌خورد و زاویه تریم ثابت انجام دادند [۱۲]. (مکاسیو) مدلی ریاضی را براساس جریان پتانسیل برای بدنه شناور پروازی دارای پله به صورت دو بعدی توسعه داد. این مدل با دریافت ورودی‌هایی مانند عدد فرود، عدد کاویتاسیون و موقعیت طولی مرکز جرم، قادر به ارائه نتایجی از جمله تریم دینامیکی آب‌خورد نهایی و مساحت خیس شناور است [۱۳]. (قدیمی و همکارانش) در مطالعه ای برنامه ای کامپیوتری براساس روش مورایتو توسعه دادند [۱۴].

در این تحقیق، مطالعه پارامتری بر روی پارامترهای مختلف فیزیکی انجام گرفت. علاوه بر این موقعیت اسپری و همچنین پروفیل سه بعدی اسپری نیز مورد بررسی قرار گرفت. (تنتون و همکاران) سری جدیدی از بدنه های هاردچاین پروازی را در مطالعه‌ای آزمایشگاهی بررسی کرده و نتایج عملکرد آنها را در آب آرام و شرایط موج ارائه دادند. در این آزمایش‌ها، ۳ مدل از یک بدنه یکسان در حالت‌های بدون پله، ۱ پله و ۲ پله مورد مطالعه قرار گرفت [۱۵]. (وانگ و همکارانش) مطالعه ای بر روی شبیه سازی عددی شناور پروازی در امواج منظم در زوایای برخورد مختلف و در ۳ سرعت مختلف انجام دادند. در این پژوهش، از حل گر متوسط رینولدزی ناویراستوکس، حجم سیال و همچنین حل گر ۶ درجه آزادی حرکت استفاده شده بود [۱۶].

(لطفی و همکاران) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی رفتار شناور پروازی دارای پله عرضی پرداختند. در این مطالعه از شبیه‌سازی پایا برای شناور ساکن استفاده شده و نتایج با بهره گیری از تکنیک جدید ارائه شده برای میان یابی، برای رفتار شناور تخمین زده شده و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است [۳]. لی و همکاران [۱۷] در سال (۲۰۱۴)، هفت حالت مختلف پاشنه در سه حالت وزن مختلف را در سرعت های مختلف با استفاده از ساخت مدل، تست و آزمایش کردند. در همه ی تست ها نشان داده شد که ایجاد پله ی عرضی باعث کاهش مقاومت شناور در مقایسه با شناورهای بدون پله می شود. آنها نشان دادند که در سرعت های مختلف، شناور دو پله ای که دارای کوتاهترین ارتفاع پله در قسمت جلو و بلندترین ارتفاع پاشنه در قسمت عقب را دارد، کمترین میزان درگ در سرعت های مختلف را دارا می‌باشد. همچنین نشان دادند که تریم استاتیک در شناورهای با پله عرضی همواره بیشتر از شناورهای بدون پله می‌باشد. تیمینس [۱۸] در سال (۲۰۱۴) به مطالعه ی پایداری شناورهای دارای پله پرداخت. در این مطالعه سیزده شناور دو پله که توسط ۸ سازنده معروف ساخته شده اند را دسته بندی کرده و با انتخاب مدلی از روابط حاصل از دسته بندی آنها به مطالعه پایداری حرکت یاو تحت شرایط بارگذاری در سرعت های مختلف و آزمایش PMM و محاسبه مشتقات حرکت yaw و sway برای تصدیق ناپایداری این بدنه ها پرداخت.

تست حرکت یاو آزاد تحت شرایط بارگذاری مختلف مرکز ثقل طولی، جا به جایی در سرعت های مختلف نشان از ناپایداری حرکت طولی بدنه دارد. همچنین تست PMM تصدیقی بر ناپایداری حرکت طولی مدل شناور مذکور است. بختیاری و همکاران [۱۹] در سال (۲۰۱۶) به مطالعه شبیه سازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایشگاهی شناورهای پلانینگ دارای پله ی عرضی پرداختند. جریان سطح آزاد اطراف پله با روش RANSE و با استفاده از نرم افزار انسیس سی اف ایکس شبیه سازی شده است. مدل اغتشاشی استفاده شده در این مطالعه k-e بوده و توزیع سطح آزاد به روش VOF انجام شده است. نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. نتایج عددی درگ، توزیع فشار، سطح خیس، اسپری اب، پروفیل ویک توسط بدنه ارائه شده و بر روی آن در سرعت های مختلف بحث شده است. به این نتیجه دست یافتند که شناورهای دارای پاشنه، به علت کاهش سطح خیس شناور، باعث کاهش درگ کل شناور می شوند. ژیانگ و همکاران [۲۰] در سال (۲۰۱۷) به مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر پله عرضی بر روی کاهش درگ در شناورهای سه بدنه (trimaran) پرداختند. آنها در این مطالعه به شبیه سازی عددی جریان اطراف پاشنه تریماران بدون و با پله عرضی در اعداد فرود حجمی ۳,۱۴ تا ۵,۸۳ پرداختند و برای اعتبارسنجی از داده های آزمایشگاهی استفاده کردند. نتایج نشان میدهد که هوا به زیر بدنه ی اصلی کشیده میشود. پله مساحت سطح خیس را کم میکند و راندمان بدنه ی اصلی را بهتر کرده و به طور موثری مقاومت را کم میکند. هنگامی که سرعت افزایش پیدا میکند تأثیر پله بیشتر شده و در بیشترین سرعت، مساحت سطح خیس بدنه به ۴۹,۱ درصد کاهش پیدا میکند، لیفت بدنه ۱۶,۱ درصد بیشتر شده و مقاومت ۱۷ درصد کاهش می یابد. موج داخل تونل تست به علت کاهش سطح خیس کاهش می یابد.

با وجود این که تا به امروز، شبیه سازی های متعددی توسط این ابزار برای شناورهای پروازی صورت گرفته، اما در اکثر موارد به صورت پایا بوده است. تحلیل دینامیکی این شناورها به دلیل پیچیدگی های متعدد کمتر انجام شده است. وجود مساله دو فازی سطح آزاد، به همراه شبکه بندی متحرک برای اعمال رفتار حرکتی شناور، از جمله این پیچیدگی ها در تحلیل جریان حول شناورهای پروازی و دینامیک آنهاست.

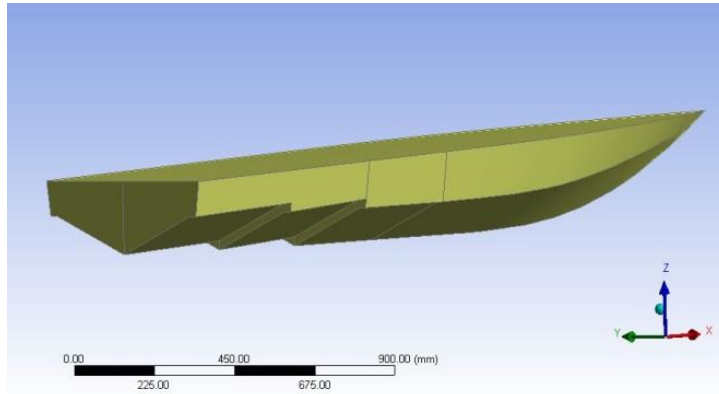
در این پژوهش، تأثیر طولی پله ی دوم، بر روی رفتار هیدرودینامیکی شناور کوگار تحت شرایط بارگذاری مختلف بررسی می شود. بدین صورت که اثر جا به جایی طولی پله ی عرضی دوم بر روی مقاومت شناور، توزیع فشار روی بدنه، الگوی جریان اطراف شناور تحت سرعت ها و وزن های مختلف مطالعه می شود. همچنین اثر حساسیت توزیع بار بر روی شناور کوگار بر روی مقاومت کل در سرعت های مختلف نیز بررسی می گردد. پس از انجام مطالعه استقلال شبکه، رفتار حرکتی و مقاومت هیدرودینامیکی شناور با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و شبیه سازیها معتبرسازی شده است.

در شبیه سازی استاتیکی، شناور در سه زاویه تریم ۱، ۲ و ۳ درجه؛ سه آبخور ۱۰/۷، ۱۱/۷۷، و ۱۲/۸۴ سانتی متر، و در سه سرعت ۸/۰۵۲، ۱۱/۵۰۲ و ۱۴/۹۵۳ متر بر ثانیه مدلسازی شده است. خطوط جریان پیرامون شناور و همچنین الگوی توزیع فشار و ضریب مقاومت اصطکاکی روی کف شناور و شکل سطح آزاد و الگوی موج اطراف شناورها از دیگر پارامترهای ارزشمند شبیه سازی های استاتیکی می باشد.

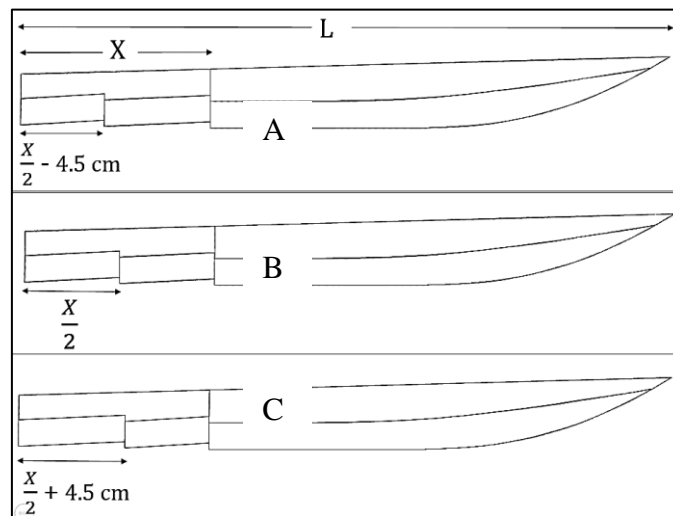
در نهایت مقایسه ای بین هر سه روش انجام شده و نتایج ارائه می شود.

## ۲- هندسه مدل

در این مطالعه، فرم ساده شده (بدون نوار اسپری و ...) شناور کوگار به عنوان مدل مورد بررسی انتخاب شده است. طول و عرض این مدل، به ترتیب برابر با  $۲/۶۳$  و  $۰/۵۴$  متر می باشد. مدل سه بعدی دوپله این شناور در شکل (۱) و جداول (۱) و (۲) مدل‌های ایجاد شده با فواصل طولی مختلف پله دوم ( $۳۴$ ،  $۳۸/۵$  و  $۴۳$  سانتی متر) در شکل (۲) نمایش داده شده است. این مدل‌ها به ترتیب مدل A، B و C نام دارند.



شکل ۱- تصویر مدل سه بعدی بدنه دو پله شناور کوگار



شکل ۲- بدنه شناور کوگار دو پله در موقعیت‌های مختلف پله دوم

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل

طول شناور [m]	عرض شناور [m]	زاویه ددرایز [degree]	اسکیل مدل	فاصله پله اول از پاشنه (x) [m]
۲,۶	۰,۵۴	۲۴,۴۳	۱/۵	۰,۷۷

**جدول ۲- مشخصات هندسی مدل و پله های عرضی مدل**

ارتفاع پله اول [mm]	ارتفاع پله دوم [mm]	دراخت [cm]	وزن [kg]	درصد مرکز طولی ثقل از پاشنه
۱۳	۱۲	۱۰,۷	۶۸	۳۳
		۱۱,۷	۷۶	ارتفاع مرکز ثقل از کف [cm]
		۱۲,۸	۸۴	۲۳

**جدول ۳- کار آماری مربوط به پله های شناورهای تندرو معروف در دنیا**

مکان پله دوم از سینه نسبت به طول	مکان پله اول از سینه نسبت به طول	شناور	ردیف
٪۸۱	٪۷۰	ریب ۳۳	۱
٪۸۲	٪۷۰	ips16	۲
٪۸۴	٪۷۰	باور	۳
٪۸۰	٪۶۹	ریب ۵۵	۴

با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که مکان پله اول از سینه ۷۰ درصد طول بوده و مکان پله دوم از سینه نیز بالای ۸۰ درصد طول شناور می‌باشد. پس مبنای فاصله پله اول و دوم در شناور کوگار مورد بررسی بر اساس کار آماری بر حسب طول شناور از شناورهای تندرو مطرح دنیا بوده و فاصله پله ی دوم برای شناور کوگار حالت B به صورت ۸۵ درصد از طول در نظر گرفته شده و ۱ تا ۱,۱ درصد کم و زیاد می‌شود تا حالت A و C برای پله دوم ایجاد شود.

### ۳- مطالعه آزمایشگاهی

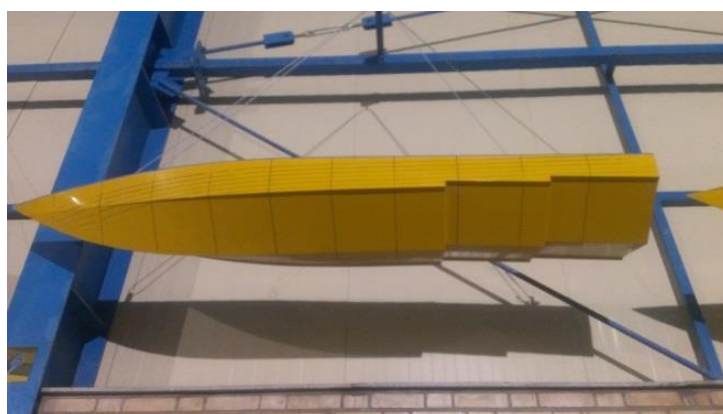
برای بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها و معتبرسازی نتایج عددی از مطالعه آزمایشگاهی استفاده شده است. بررسی آزمایشگاهی مدل ۲/۶۳ متری شناور کوگار، در حوضچه کشش آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس که یکی از بزرگترین و مجهزترین حوضچه‌های کشش در ایران است، صورت گرفته است. شکل (۳) تصویری از این حوضچه و شکل (۴) تصویری از مدل و جدول (۴) مشخصات حوضچه را نشان می‌دهند. شناور کوگار دوپله مدل B در سه حالت بارگذاری مختلف، مطابق با جدول (۵) تست شده و نتایج آن ارائه شده است. نمونه تصاویری از تست این شناور در شکل (۵) نمایش داده شده است.

**جدول ۴- مشخصات حوضچه کشش آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس**

چگالی آب در دمای 25°C [kg/m <sup>3</sup> ]	ارتفاع [m]	عرض [m]	طول [m]
۱۰۲۵	۴	۶	۴۰۰



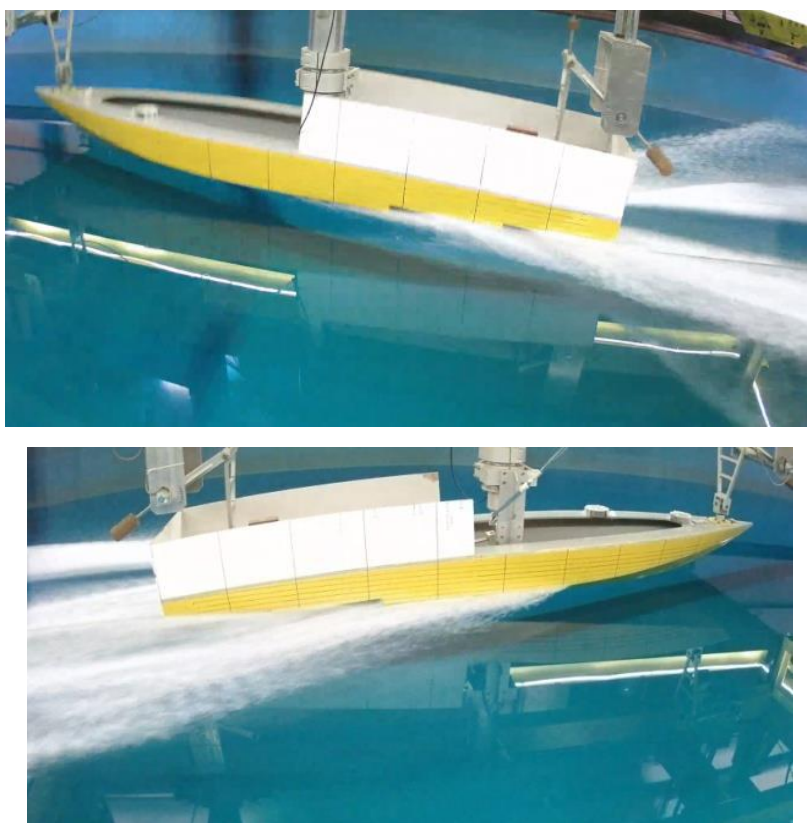
**شکل ۳- حوضچه کشش خلیج فارس**



**شکل ۴- مدل دو پله شناور کوگار**

**جدول ۵- حالات مختلف کشش شناور دو پله در آزمایشگاه**

شماره تست	وزن (kg)	موقعیت طولی مرکز جرم نسبت به پاشنه (m)	سرعت (m/s)
۱	۷۶/۶	۰/۸۸۹	۱۱/۵۰۲
۲	۸۶/۱	۱/۰۴۶	۱۱/۵۰۲
۳	۵۷/۳۶	۰/۹۲۲	۸/۰۵



شکل ۵- تست مدل شناور دو پله کوگار B در آزمایشگاه دریایی خلیج فارس

#### ۴- شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی

جهت شبیه‌سازی عددی مدل شناور کوگار، از روش دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه معادلات رنس استفاده شده است. در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های پایا (steady) در نرم افزار تجاری CFX انجام گرفت. در این نرم‌افزار با حل گر حجم محدود، از مدل چندفازی آب- هوا برای پیش‌بینی الگوی موج در سطح آزاد و همچنین مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  برای اعمال اثرات آشفتگی جریان استفاده شده است. شناور به صورت کامل (نه با شرط تقارن) مدل شده است.

#### ۴-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

تحلیل حرکت جریان سیال بر پایه معادلات ناویر استوکس استوار است که هم برای جریان آشفته و هم برای جریان آرام قابل استفاده است. بنابراین جریان غیر یکنواخت لزج اطراف بدنه یک شناور را می‌توان توسط معادلات ناویر استوکس مدل نمود. از طرفی برای در نظر گرفتن تمام اثرات جریان مغشوش و حل دقیق این معادلات، به شبکه‌بندی بسیار ریزی نیاز است. از اینرو برای حل جریان مغشوش معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس (RANS) معرفی شده‌اند. این معادلات بر مبنای ابزار آماری به نام تجزیه رینولدز به دست می‌آیند، به این صورت که برای یک جریان مغشوش، میدان سرعت و میدان فشار را می‌توان به دو بخش؛ مقدار متوسط فشار و سرعت  $\bar{u}_i, \bar{p}_i$  و مقدار مغشوش فشار و سرعت  $u'_i, p'_i$  تقسیم کرد.



اگر سیال غیر قابل تراکم به صورت سه بعدی و همچنین تحت تاثیر میدان گرانشی زمین فرض شود، معادلات مقدار متوسط زمانی ناویر استوکس به شرح زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + g_i + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

که  $g_i$  مولفه‌های شتاب گرانش در راستای محورهای مختصات اینرسی است.  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال و  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j}$  مولفه‌های تانسور تنش رینولدز است. مقدار مولفه‌های این تانسور با استفاده از مدل‌های آشفتگی به دست می‌آید.

#### ۲-۴- مدل آشفتگی

مدل ریاضی جامعی برای شبیه‌سازی آشفتگی برای همه انواع جریان‌ها وجود ندارد. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در اطراف بدنه شناور از مدل دو معادله‌ای  $k - \varepsilon$  که یکی از پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی برای مسائل آیرودینامیک و هیدرودینامیک است، استفاده شده است. در این مدل تنش رینولدز به صورت ویسکوزیته گردابی اضافی در نظر گرفته می‌شود، که برخلاف ویسکوزیته دینامیکی که مشخصه سیال بوده، این ویسکوزیته تابع رژیم جریان است.

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

که در این رابطه  $k$  انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم،  $\varepsilon$  نرخ میرایی انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم و  $C_\mu$  ثابت بی بعد با مقدار متوسط  $0.09$  است. پارامترهای  $k$  و  $\varepsilon$  از معادلات انتقال (۴) و (۵) به دست می‌آیند [۱۳].

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{z1} P_k - C_{z2} \rho \varepsilon) \quad (5)$$

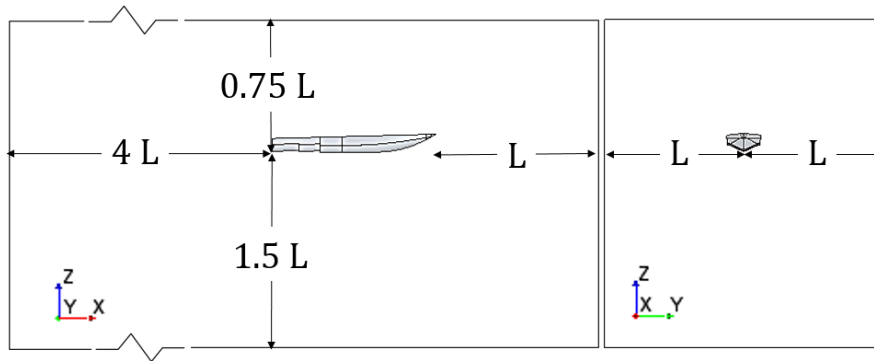
که در آن،  $P_k$  به صورت زیر تعریف شده است.

$$P_k = \mu_t \nabla \bar{U} \cdot (\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{U} [3\mu_t \nabla \cdot \bar{U} + \rho k] \quad (6)$$

#### ۳-۴- دامنه محاسباتی

دامنه محاسباتی مناسب به گونه‌ای انتخاب می‌شود که اثرات ناشی از جریان برگشتی در خروجی و اثرات دیواره‌ها در مرزهای جانبی وجود نداشته باشد. فاصله مرزهای ورودی، خروجی جریان، مرزهای جانبی افقی و عمودی از انتهای بدنه مدل به ترتیب ۲، ۴، ۱ و ۱/۵ برابر طول مدل در نظر گرفته شده است.

ابعاد اصلی محدوده محاسباتی و موقعیت شناور درون آن، در شکل (۶) مشاهده می‌شود.

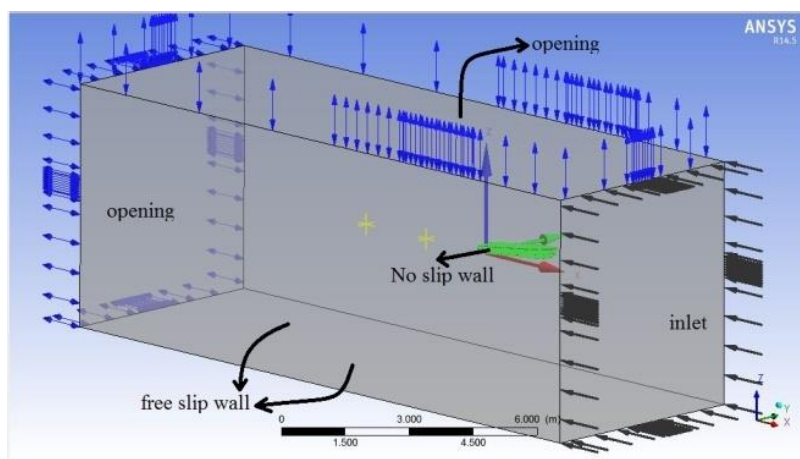


شکل ۶- دامنه محاسباتی در شبیه‌سازی عددی

#### ۴-۴- شرایط مرزی

برای مدل‌سازی جریان پیرامون شناور و رسیدن به جواب یکتا از حل معادلات متوسط زمانی ناپیراستوکس، شرایط مرزی دامنه محاسباتی شامل؛ بدنه مدل، ورودی و خروجی محدوده و همچنین دیواره‌های اطراف باید به صورت دقیق تعیین شوند. با توجه به شکل (۷) شرایط مرزی به صورت زیر اعمال شده‌است:

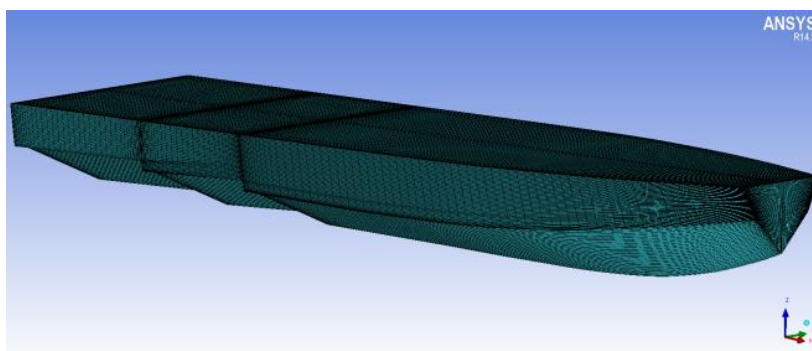
- ۱- ورودی (مرز سمت راست)؛ از نوع inlet که جریان با سرعت یکنواخت مشخص وارد می‌شود.
- ۲- خروجی و سطح بالا (مرز سمت چپ، مرز بالایی)؛ از نوع opening که جریان با توزیع فشار هیدرواستاتیکی می‌تواند وارد و یا خارج شود.
- ۳- دیواره‌های جانبی و کف (سطح پایین و سطوح جانبی)؛ از نوع دیوار لغزش آزاد که سیال بر روی آن جریان داشته و تحت تاثیر اصطکاک سیال با دیواره قرار نمی‌گیرد.
- ۴- دیوار (سطح بدنه)؛ سطوح بدنه مدل به عنوان دیوار نفوذ ناپذیر و بدون لغزش تعریف شده‌اند.



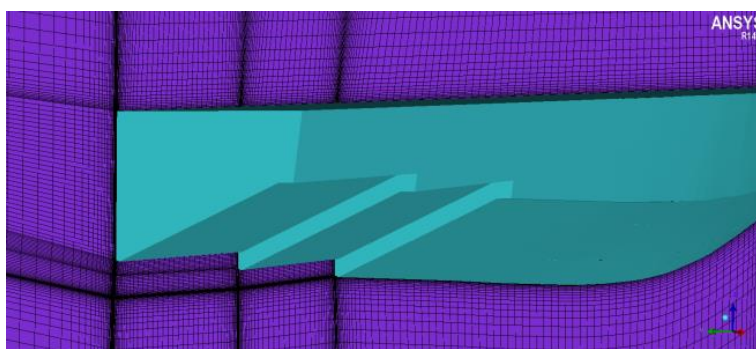
شکل ۷- شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی عددی

#### ۴-۵- تولید شبکه

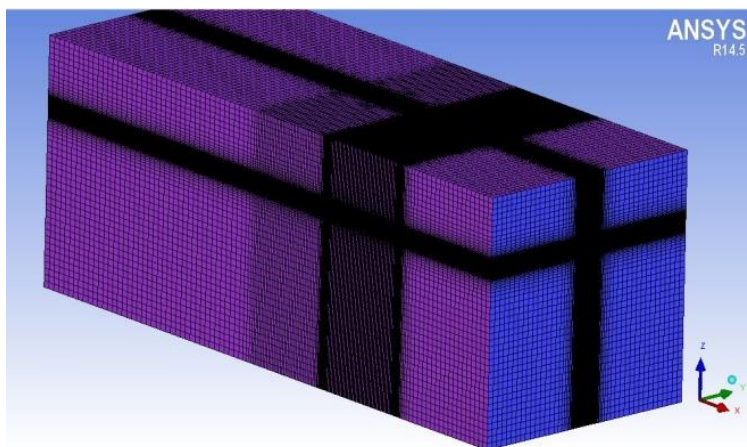
روش‌های شبکه‌بندی گوناگونی برای تقسیم‌بندی محدوده محاسباتی وجود دارد. برای شبکه‌بندی محدوده محاسباتی از شبکه ۶ وجهی استفاده شده‌است. این شبکه بندی در موقعیت‌های مختلف از جمله پیرامون شناور و سطح آزاد آب با سلول‌های ریزتر بهبود یافته است. به منظور محاسبه دقیق‌تر نیروها و شبیه‌سازی دقیق‌تر پروفیل موج در پشت شناور، ناحیه و یک شناور نیز با شبکه ریزتر بهبود یافته است. در نزدیک سطح بدنه سلول‌های شش‌وجهی منظم با دقت بالا، به گونه‌ای ایجاد می‌شوند که مرزهای بدنه به صورت دقیق مدل‌سازی شوند. برای افزایش دقت در بخش‌هایی از سطح بدنه که تغییرات شدیدتری وجود دارد، مانند اطراف چاین‌ها، از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. نمونه‌ای از شبکه تولید شده در محدوده محاسباتی، اطراف بدنه در شکل‌های (۸) تا (۱۰) مشاهده می‌شود. به منظور تولید شبکه منظم شش‌وجهی در میدان محاسباتی، ابتدای مدل به میزان کمی تعدیل شده است. از آنجایی که این قسمت از بدنه در بیرون از آب قرار داشته و دارای مساحت کوچکی می‌باشد، تاثیر چندانی بر مقاومت کل شناور نخواهد داشت.



شکل ۸- شبکه بندی دیواره شناور



شکل ۹- شبکه تولید شده اطراف شناور



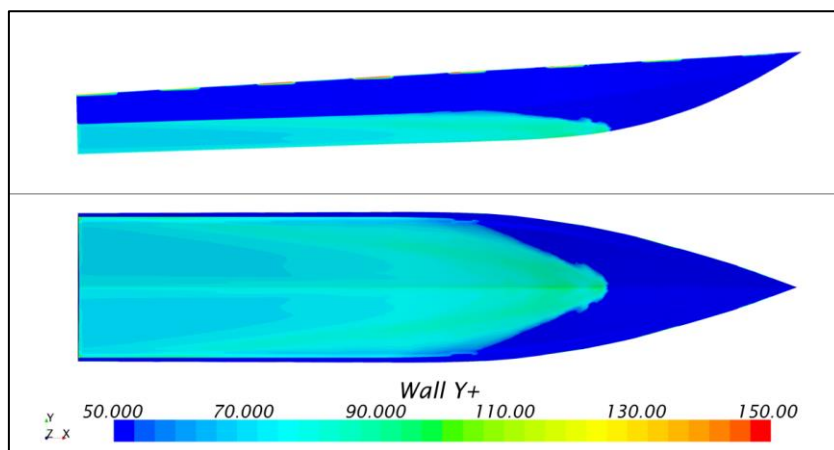
شکل ۱۰- شبکه میدان محاسباتی

برای افزایش دقت پیش‌بینی لایه مرزی اطراف بدنه از تکنیک لایه‌های منشوری استفاده شده است. این لایه‌ها که ضخامت مجموع آن‌ها برابر ضخامت لایه مرزی است، به صورت دقیق مرزهای بدنه را دنبال می‌کنند. در بررسی کیفیت مدل‌سازی لایه مرزی پارامتر بدون بعد  $y^+$  به عنوان معیار مهمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پارامتر به فاصله بی‌بعد اولین گره از شبکه نسبت به سطح مربوط است. مقدار این پارامتر از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau \Delta y}{\mu} \quad (7)$$

که در این رابطه  $\Delta y$  فاصله بین دیوار و اولین گره شبکه،  $u_\tau$  سرعت اصطکاکی می‌باشد. بر اساس روابط تجربی مقدار مطلوب  $y^+$  برای جریان در اطراف بدنه شناور بین ۵۰ تا ۲۰۰ می‌باشد. بدین ترتیب، ضخامت لایه اول برای داشتن مقدار مناسب  $y^+$  ثابت در نظر گرفته شده است.

در شکل (۱۱) نمونه‌ای از توزیع مقدار  $y^+$  روی بدنه شناور نمایش داده شده است که مشاهده می‌شود مقدار متوسط این پارامتر روی بدنه حدود ۵۳ می‌باشد.



شکل ۱۱- پارامتر  $y^+$  بر روی بدنه شناور دو پله مدل B

#### ۴-۶- مطالعه استقلال شبکه

یکی از مسائل مهم در حل عددی استفاده از شبکه‌ای است که نتایج حاصله از آن، مستقل از تعداد و اندازه المان‌ها باشد. به عبارت دیگر شبکه‌بندی مدل باید به گونه‌ای انتخاب شود که با ریزتر شدن اندازه‌ی المان‌ها دیگر تغییری در نتایج ایجاد نگردد. از طرفی چون استفاده از شبکه‌ی بسیار ریز باعث افزایش مدت زمان انجام محاسبات می‌شود؛ اندازه المان‌ها تا حد نیاز باید کوچک شوند به گونه‌ای که زمان محاسبات بیش از حد طولانی نشود. به همین منظور و برای اطمینان از دقت شبکه‌بندی، مطالعه استقلال شبکه صورت گرفته است. برای مدل دو پله، سه شبکه محاسباتی متفاوت با تعداد ۵/۸۹، ۶/۹۶، و ۸/۲۱ میلیون المان ایجاد شده و شبیه‌سازی برای بدنه شناور در زاویه تریم ۲ درجه، آب‌خور ۱۱/۷۷ سانتی متر و سرعت ۱۱/۵۰۲ متربرثانیه (۲۱/۳ نات) انجام شد.

مقاومت هیدرودینامیکی در این شرایط برای شبکه‌های مختلف در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۶- نیروی درگ در شبکه‌بندی مختلف شناور کوگار دو پله

شماره	تراکم شبکه	تعداد المان	درگ (N)
۱	کم	۵۸۸۶۱۹۶	۲۴۵/۰۰۸
۲	متوسط	۶۹۵۶۰۸۸	۲۳۱/۳۱۳
۳	زیاد	۸۲۱۴۷۴۴	۲۴۰/۸۱۱

این شبیه‌سازی‌ها بر روی سخت‌افزاری با پردازنده (Intel core i7 - 3.4GHz) با ۱۶ گیگابایت حافظه پردازشی انجام گرفته است. به طور میانگین، ۲۰۰۰ تکرار برای هر شبیه‌سازی نیاز بوده است. در این تعداد تکرار، حل عددی به همگرایی قابل قبولی می‌رسد. به طور تقریبی، برای شبکه با تراکم متوسط، زمان حل برابر ۶۸ ساعت طول کشیده است. با توجه به جدول (۲) و اینکه اختلاف نیروی درگ شبکه متوسط و شبکه زیاد کمتر از ۴ درصد است، شبکه بندی متوسط به عنوان شبکه مناسب انتخاب گردید.

#### ۵- معتبرسازی شبیه‌سازی

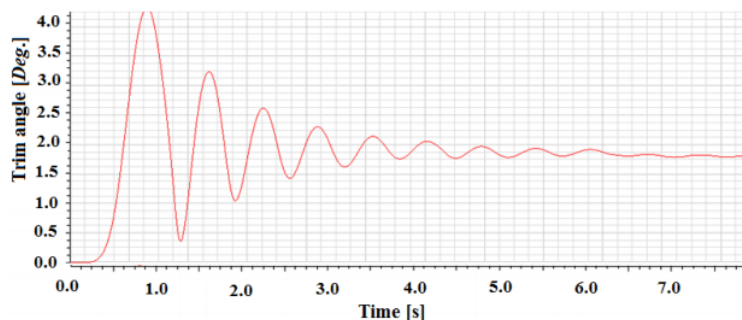
برای بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها و معتبرسازی نتایج، به مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی انجام شده پرداخته شده است. در این مرحله از شبیه‌سازی با تراکم شبکه متوسط استفاده شده است. بنابراین مدل دوپله شناور کوگار B در حوضچه کشش تست شده و سپس نتایج آن با نتایج عددی مقایسه شده است. در جدول (۷) و شکل (۱۲) نتایج درگ و تریم شناور دوپله در دو حالت تست شده، برای هر دو روش آزمایشگاهی و عددی ارائه شده است. برای مقایسه بهتر، میزان خطای روش عددی نیز بیان شده است.

مطابق با جدول (۷)، حداکثر میزان خطا برای درگ شناور دو پله، ۱۲/۴ درصد بوده و مطابقت رضایت بخشی با نتایج تجربی دارد.

**جدول ۷- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای درگ شناور دو پله**

برحسب نیوتن و تریم شناور بر حسب درجه

شماره تست	آزمایشگاهی	عددی	خطا %	تریم آزمایشگاهی	تریم عددی
۱	۲۰۲/۰۰۴	۱۷۶/۹۴۵	۱۲/۴	۱/۹	۲/۶
۲	۲۱۷/۶۹۳	۲۰۴/۸۴۷	۵/۹	۲/۲	۲/۵۶
۳	۱۲۱/۲	۱۲۷	۴/۸	۲/۳۴	۲/۵۸



شکل ۱۲- تریم دینامیکی شماره تست ۱

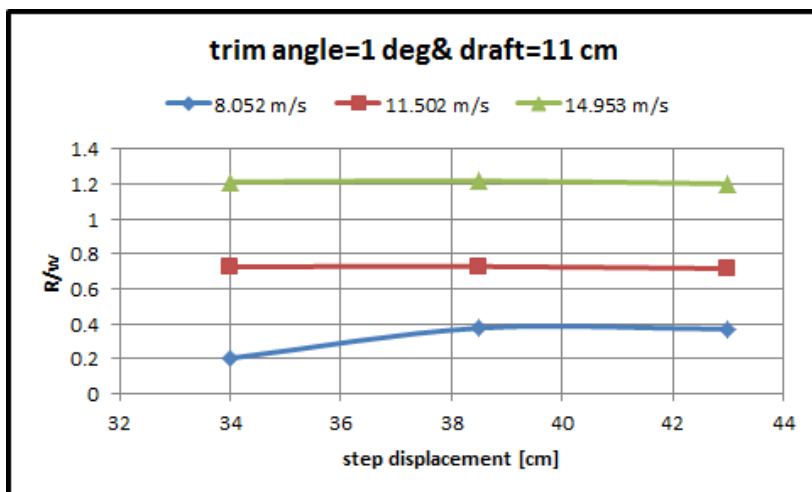
**۶- نتایج**

به منظور مطالعه تاثیر تغییر محل طولی پله دوم بدنه شناور کوگار، از نرم افزار ANSYS CFX استفاده شده است. برای این منظور، شناور دو پله کوگار در شرایط بارگذاری، تریم و سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از بدنه‌های دوپله مدل A، B و C در ۲۷ حالت مختلف بارگذاری شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی‌ها در سه آبخور ۱۰/۷، ۱۱/۷۷، و ۱۲/۸۴ سانتی متر، سه زاویه تریم ۱، ۲ و ۳ درجه و در سرعت‌های ۸/۰۵۲، ۱۱/۵۰۲ و ۱۴/۹۵۳ متر بر ثانیه صورت گرفته است.

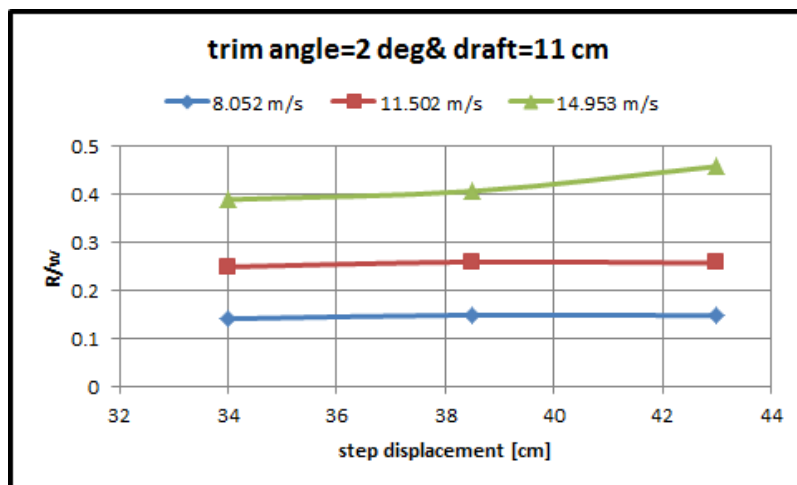
ابتدا تغییرات نیروی مقاوم در ازای فواصل مختلف قرار گیری پله‌ها بررسی می‌شود. برای درک بهتر تاثیر فاصله دو پله از هم در نیروی مقاوم ایجاد شده ناشی از حرکت مدل در سیال، نمودارهای مقایسه‌ای ارائه شده است. برای یادآوری لازم به ذکر است که در این مقاله در مدل‌های دارای دو پله، محاسبات برای دو پله با سه فاصله ۳۴، ۳۸/۵ و ۴۳ سانتیمتر بررسی و مقایسه شده‌اند.

همچنین مقدار نیروی مقاوم در زاویه تریم و آبخور ثابت برای مدل‌های با فواصل پله مختلف در هر سه سرعت مقایسه شده است.

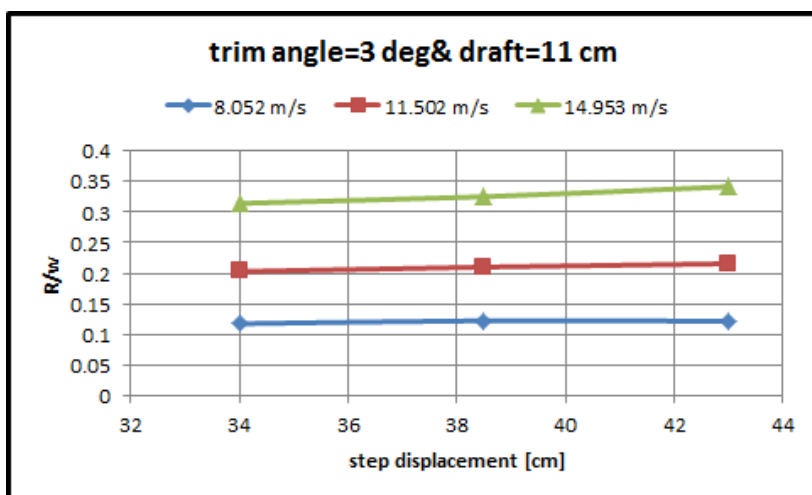
ابتدا نتایج حاصل شده در آبخور ثابت ۱۱/۸۴ سانتی متر و زاویه تریم های ۱ و ۲ و ۳ درجه در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- منحنی بی بعد نیروی درگ به وزن شناور در حالت A, B و C با تریم یک درجه در سرعت‌های مختلف



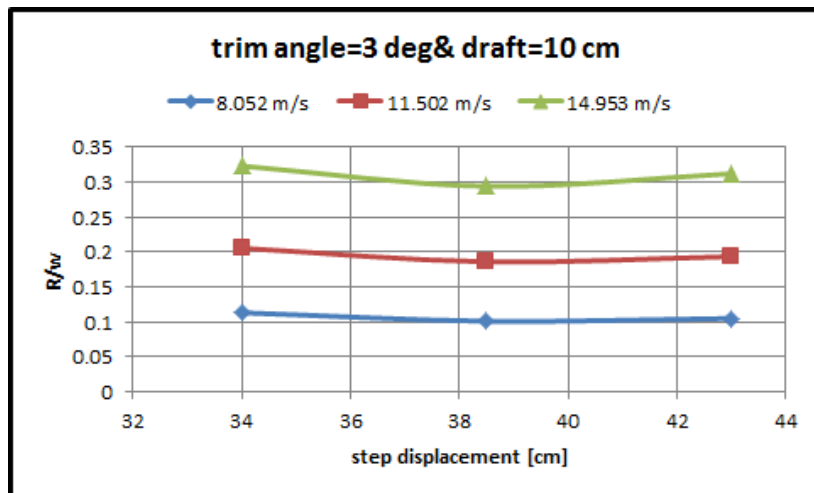
شکل ۱۴- منحنی بی بعد نیروی درگ به وزن شناور در حالت A, B و C با تریم دو درجه در سرعت‌های مختلف



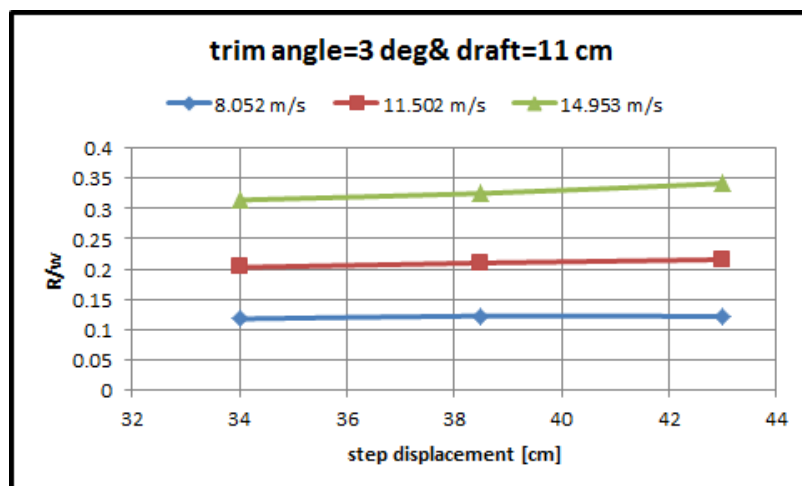
شکل ۱۵- منحنی بی بعد نیروی درگ به وزن شناور در حالت A, B و C با تریم سه درجه در سرعت‌های مختلف

اختلاف مقاومت تریم ۱ با ۳ درجه بسیار زیاد می باشد و هر چه سرعت مدل کمتر می شود این اختلاف کمتر می شود که این نشان دهنده این می باشد که توزیع بارروی شناورهای تندرو بسیار با اهمیت می باشد و باید حداکثر دقت را در بارگذاری داشت.

همانطور که از شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) مشاهده می شود اگر بارگذاری برای بار ثابت تعریف شده باشد بطوریکه مرکز ثقل متغیر با تریم های ۱،۲ و ۳ درجه بدست آیند کمترین درگ برای سرعت ۱۴/۹۵۳ متر بر ثانیه برای حالتی که تریم ۳ درجه می باشد که دلیل آن نیروی لیف زیاد در سرعت بالا می باشد که برخورد شناور با آب کم می شود. در ادامه، نتایج حاصل شده در زاویه تریم ۳ درجه و آب‌خورهای مختلف در شکل‌های (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) بیان می شود.

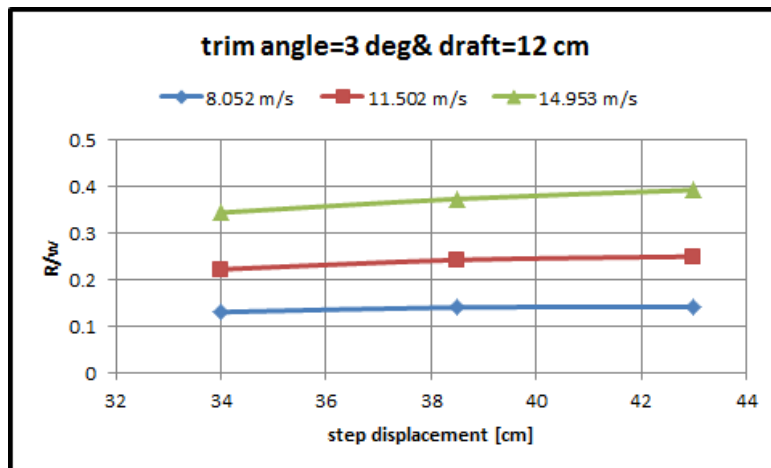


شکل ۱۶- منحنی بی بعد نیروی درگ به وزن شناور با آب‌خور ۱۰ cm در سرعت‌های مختلف



شکل ۱۷- منحنی بی بعد نیروی درگ به وزن شناور با آب‌خور ۱۱ cm در سرعت‌های مختلف





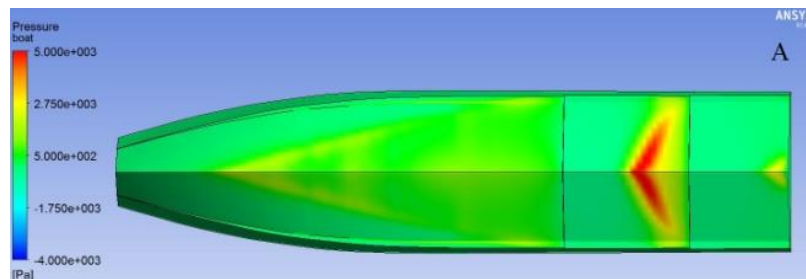
شکل ۱۸- منحنی بی بعد نیروی درگ به وزن شناور با آبخوردگی ۱۲cm در سرعت‌های مختلف

در تریم ثابت با افزایش بارگذاری در سرعت ۱۴/۹۵۳ متر بر ثانیه هرچه بارگذاری افزایش پیدا می کند نسبت نیروی درگهای پله ها کاهش پیدا می کند و در یک بارگذاری و یک سرعت ثابت با افزایش فاصله پله دوم از ترانزوم گرچه الگوی کف آب بهتر می شود اما این کار باعث رسیدن زودتر و بیشتر اسپری آب به بدنه ی سوم شده که افزایش درگ را باعث می شود.

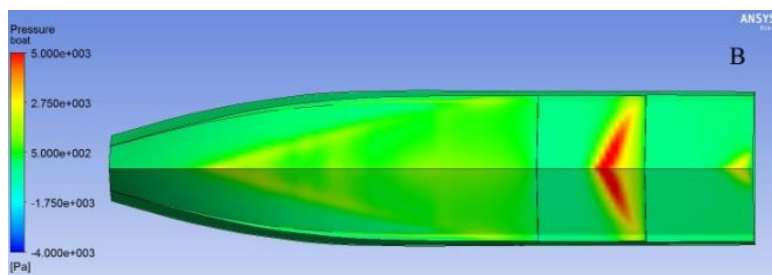
در نمودار مربوط به آبخوردگی ۱۰ سانتیمتر مشخص است که با افزایش فاصله پله ها مقدار نیروی مقاوم تنها در بازه های کوچکی تغییر می کند به گونه ای که در منحنی مربوط به سرعت ۱۱/۵۰۲ متر بر ثانیه تقریباً افزایشی در کار نیست. مشاهدات در سایر نمودارها نیز به همین گونه است. البته از تمامی منحنی ها پیداست که با افزایش مقدار سرعت مقدار نیروی مقاوم افزایش پیدا می کند به گونه ای که مقدار نیروی مقاوم برای سرعت های مختلف در سه سطح کاملاً متفاوت بررسی می شوند.

شکل های (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) کانتور فشار در کف شناور را در سرعت ۱۴m/s، زاویه تریم ۲ درجه، و آبخوردگی ۱۱cm برای هر سه مدل A، B و C نشان می دهد. منحنی فشار شناور کوگار دو پله، در خط مرکزی برای هر سه مدل A، B و C در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

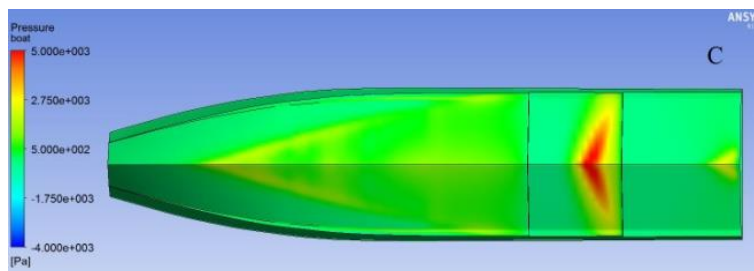
در شکل (۲۳)، تنش برشی در کف شناور در سرعت ۱۴m/s، زاویه تریم ۲ درجه، و آبخوردگی ۱۱cm برای هر سه مدل A، B و C نشان داده شده است.



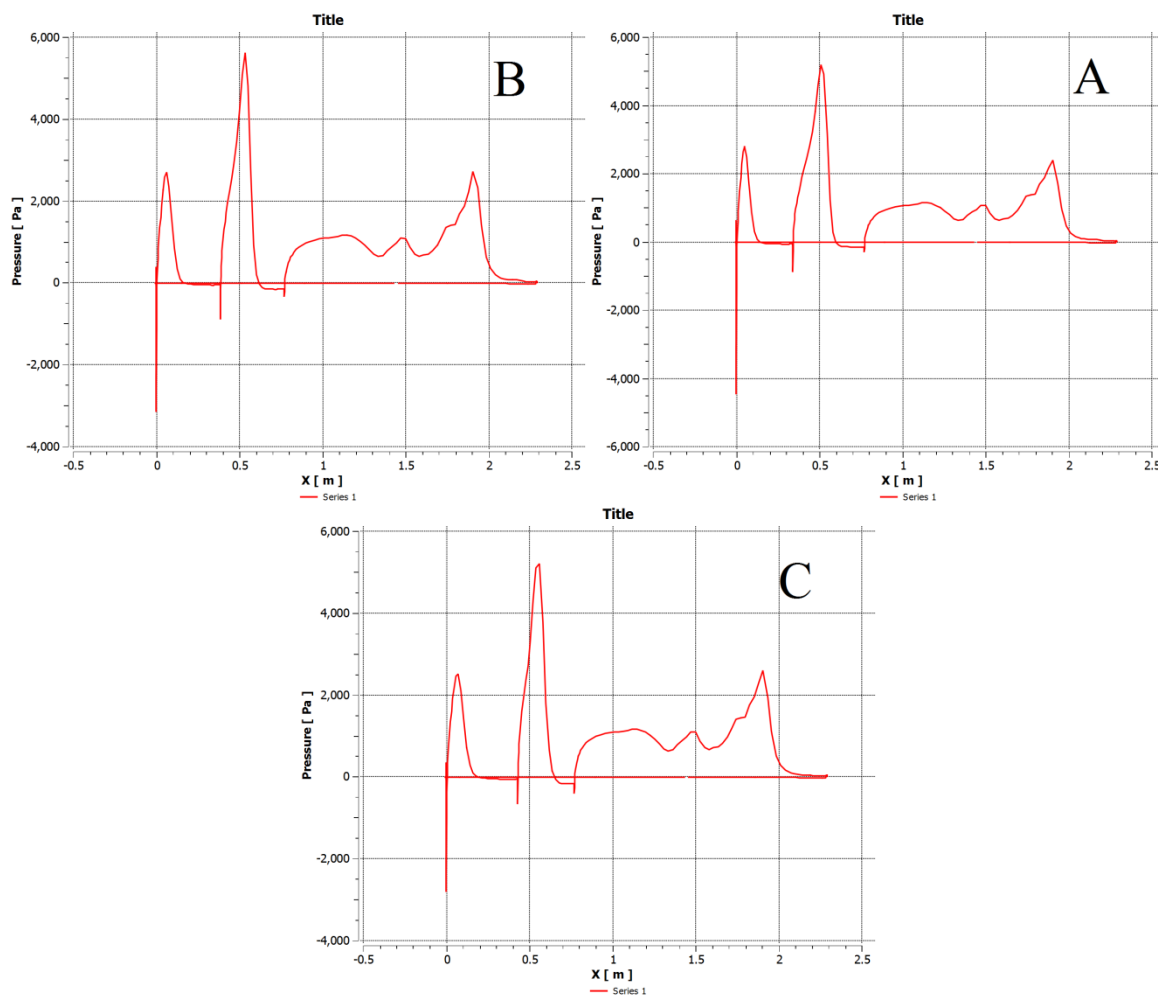
شکل ۱۹- کانتور فشار کف شناور (فاصله پله دوم از ترانزوم ۳۴cm)



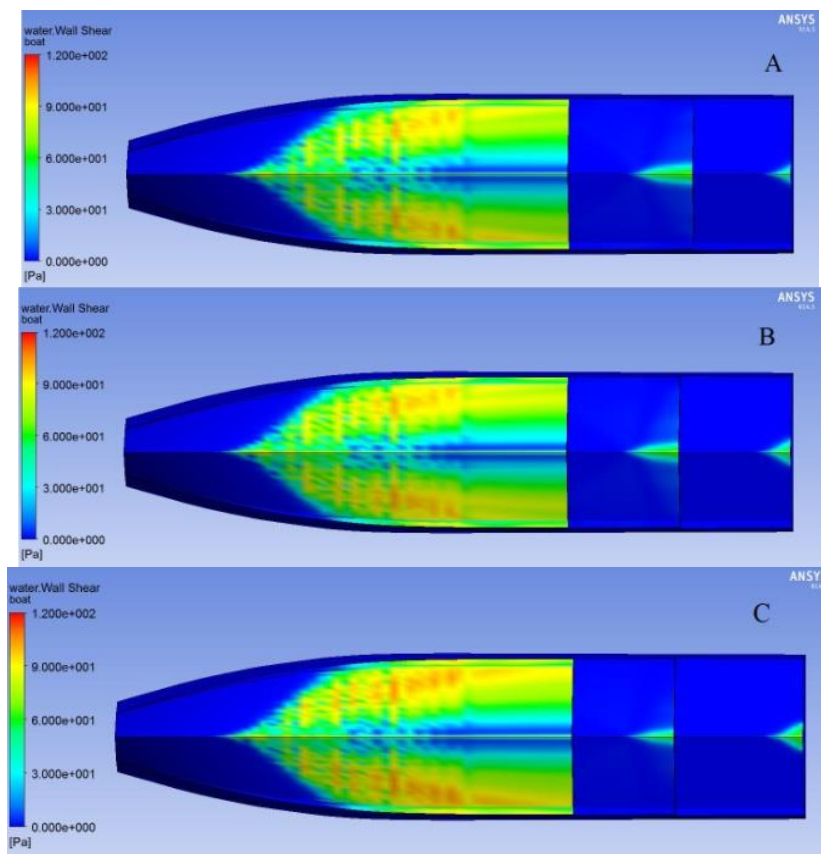
شکل ۲۰- کانتور فشار کف شناور (فاصله پله دوم از ترانزم ۳۸/۵cm)



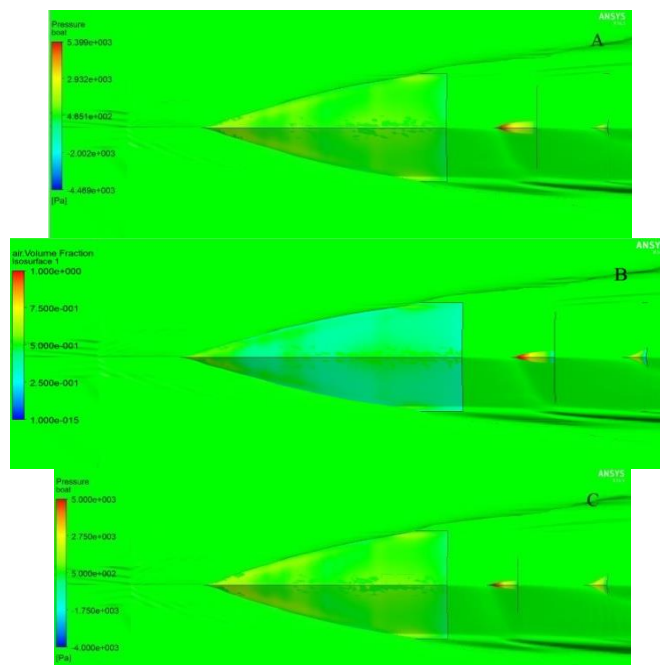
شکل ۲۱- کانتور فشار کف شناور (فاصله پله دوم از ترانزم ۴۳cm)



شکل ۲۲- منحنی فشار سنترلاین شناور برای هر سه مدل A، B و C

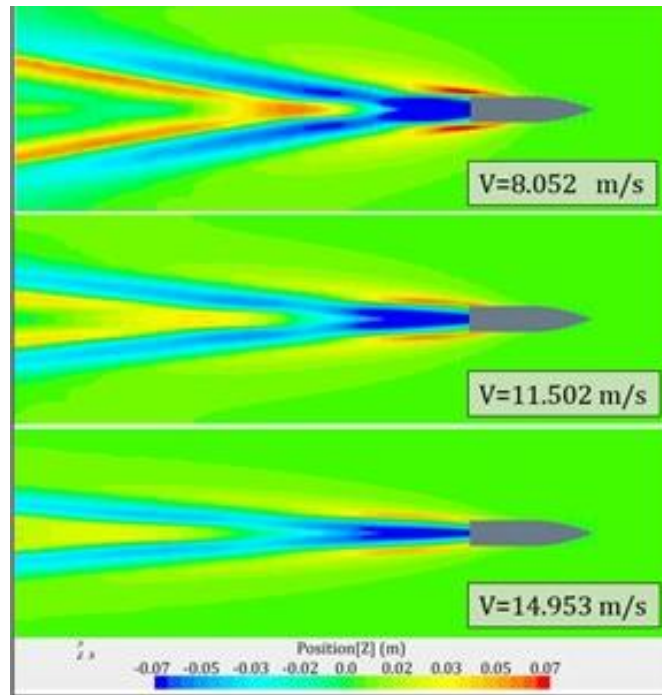


شکل ۲۳- تنش برشی کف شناور برای هر سه مدل A، B و C



شکل ۲۴- نمایش سطح آزاد کف شناور برای هر سه مدل A، B و C در سرعت ۱۴ متر بر ثانیه و تریم ۲

همانطور که در شکل (۲۳) مشاهده می شود توزیع تنش برشی در مدلی که فاصله پله از ترانزوم برابر ۴۳ سانتی متر می باشد (مدل C) تقریباً در پله دوم و ترانزوم مساوی تقسیم شده است.



شکل ۲۵- الگوی موج اطراف شناور کوگار مدل B با افت ۱۱cm

همانطور که در شکل (۲۴) مشاهده می شود وقتی فاصله پله دوم از ترانزوم زیاد می شود مثلث سطح خیس شده در کف شناور بهتر از حالتی که پله دوم به ترانزوم نزدیکتر است تشکیل می شود. همانطور که در شکل (۲۵) ملاحظه می شود، با افزایش سرعت شناور، عرض ناحیه و یک در پشت شناور کاهش یافته و قله ی موج حاصل از حرکت در پشت شناور نیز کاهش می یابد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت شناور، اینتراکشن بین بدنه و سطح آب کاهش یافته، که باعث کاهش سینکج می گردد.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی و مقایسه محل طولی پله دوم مدل شناور کوگار در حالت های مختلف از تریم، آبخور و سرعت به صورت عددی پرداخته شد. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، نرم افزار ANSYS CFX برای شبیه سازی عملکرد شناور بکار گرفته شد. پس از انجام مطالعه استقلال شبکه و انتخاب شبکه مناسب، نیروهای وارد بر شناور برای حالات تست شده در آزمایشگاه بدست آمد. با مقایسه نتایج تحلیل های عددی و مطالعه آزمایشگاهی، مطابقت قابل قبولی مشاهده شد. یکی از ویژگی های خوب تحلیل عددی توانایی ارائه خطوط جریان پیرامون شناور، الگوی توزیع فشار و تنش برشی بر روی بدنه شناور و ویک با سرعت بالا در محاسبات و هزینه کمتر می باشد.

از نتایج بدست آمده ملاحظه می شود که :

- ۱- اگر بارگذاری برای بار ثابت تعریف شده باشد بطوریکه مرکز ثقل تابعی از تریم باشد، به دلیل برخورد کمتر آب با سطح شناور کمترین درگ برای سرعت های بالاتر در تریم های بزرگتر حاصل می شود.
- ۲- هر چه تریم افزایش یابد مقاومت هیدرودینامیکی افزایش می یابد. میزان این افزایش به تغییرات سرعت بستگی دارد.

- ۳- در تریم ثابت بویژه در سرعت‌های بالا با افزایش بارگذاری، نسبت نیروی درگ پله‌ها کاهش پیدا می‌کند.
- ۴- در یک بارگذاری و یک سرعت ثابت با افزایش فاصله پله دوم از ترانزوم درگ شناور افزایش پیدا می‌کند.
- ۵- هر چه سرعت افزایش پیدا کند شیب افزایش درگ بیشتر است.
- ۶- وقتی فاصله پله دوم از ترانزوم زیاد می‌شود مثلث سطح خیس شده در کف شناور بهتر از حالتی که پله دوم به ترانزوم نزدیکتر است تشکیل می‌شود.

## مراجع

- [1] Doctors, L.J., "Hydrodynamics of High-speed Small Craft", Technical Report, University of Michigan, (1985).
- [2] Savitsky, D., and Morabito, M., "Surface Wave Contours Associated with the Forebody Wake of Stepped Planing Hulls", *Mar. Technol.* Vol. 47, No. 1, pp. 1–16, (2010).
- [3] Lotfi, P., Ashrafizaadeh, M., and Kowsari Esfahan, R., "Numerical Investigation of a Stepped Planing Hull in Calm Water", *Ocean Eng.* Vol. 94, pp. 103–110, (2015).
- [4] Clement, E.P., and Blount, D.L., "Resistance Tests of Systematic Series of Planing Hull Forms", *SNAME Transaction*, Vol. 71, pp. 491-579, (1963).
- [5] Caponnetto, M., "Practical CFD Simulations for Planing Hulls", In: *Proceedings of Second International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles*, Hamburg, pp. 128–138, (2001).
- [6] Ghassemi, H, and Su, Y., "Determining the Hydrodynamic Forces on a Planing Hull in Steady Motion", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 7, pp. 147-156, (2008).
- [7] Brizzolara, S., and Serra, F., "Accuracy of CFD Codes in the Prediction of Planing Surfaces Hydrodynamic Characteristics", In: *Second International Conference on Marine Research and Transportation*, Ischia, Italy, pp. 147–159, (2007).
- [8] Savitsky, D., "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", *Mar. Technol.* Vol. 1, No. 1, pp. 71-95, (1964).
- [9] Shuford, C.L., "A Theoretical and Experimental Study of Planing Surfaces Including Effects of Cross Section and Plan Form", *NACA-report-1355*, (1958).
- [10] Hay, A., Leroyer, A., and Visonneau, M., "H-adaptive Navier–Stokes Simulations of Free-surface Flows around Moving Bodies", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 11, pp. 1-18, (2006).
- [11] Su, Y., Chen, O., Shen, H., and Lu, W., "Numerical Simulation of a Planing Vessel at High Speed", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 11, pp. 178-183, (2012).
- [12] Garland, W.R., and Maki, K.J., "A Numerical Study of a Two-dimensional Stepped Planing Surface", *J. Ship Prod. Des.* Vol. 28, No. 2, pp. 60–72, (2012).

- [13] Makasyeyev, M.V., "Numerical Modeling of Cavity Flow on Bottom of a Stepped Planing Hull", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 12, pp. 350-359, (2009).
- [14] Ghadimi, P., Tavakoli S., Dashtimanesh, A., and Pirooz, A., "Developing a Computer Program for Detailed Study of Planing Hull's Spray Based on Morabito's Approach", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 13, pp. 402-415, (2014).
- [15] Taunton, D., Hudson, D., and Shenoi, R., "Characteristics of a Series of High Speed Hard Chine Planing Hulls-Part 1: Performance in Calm Water", *Int. J. Small Craft Technol.* Vol. 152, pp. 55-75, (2010).
- [16] Wang, S., Su, Y., Zhang, X., and Yang, J., "RANSE Simulation of High-speed Planning Craft in Regular Waves", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 11, pp. 447-452, (2012).
- [17] Lee, E., Pavkov, M., and McCue-Weil, L., "The Systematic Variation of Step Configuration and Displacement for a Double-step Planing Craft", *Journal of Ship Production and Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 89-97, (2014).
- [18] Connor Timmins, "Yaw Stability of a Recreational Stepped Planing Hull", In: *Proceedings of Second International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles*, Hamburg, pp. 148-158, (2014).
- [19] Bakhtiari, M., Veysi, S., and Ghassemi, H., "Numerical Modeling of the Stepped Planing Hull in Calm Water", *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, Vol. 29, No. 2, pp. 236, (2016).
- [20] Jiang, Y., Yang, D., Sun, H., and Zou, J., "Numerical Research on Influence of Step on Hydrodynamic Performance of Planning Trimaran Hull", *Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, Vol. 45, No. 2, pp. 12-16 and 22. doi:10.13245/j.hust.170203, (2017).

### فهرست نمادهای انگلیسی

- $u_i$  : سرعت در جهت  $i$
- $g_i$  : شتاب گرانش در جهت  $i$
- $k$  : انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم
- $y^+$  : فاصله بی بعد اولین گره از شبکه نسبت به سطح

### نمادهای یونانی

- $\rho$  : چگالی سیال
- $\mu$  : لزجت دینامیکی
- $\varepsilon$  : نرخ میرایی انرژی جنبشی بر واحد جرم

## Abstract

The basis of planing vessels motion is the use of low drag force to lift force. One of the main goals in the design of planing vessels is to reduce the hydrodynamic resistance and achieve higher speeds. For this purpose, using a hydrodynamic correct analysis is an important step.

In this study, a three-dimensional model of computational fluid dynamics is presented using a finite volume discretization on a structured network to study the flow pattern under the body of COUGAR model in different modes. Therefore, for the numerical simulation of COUGAR model, the commercial software of the ANSYS-CFX has been used. The VOF method was used to study the distribution of two fluid phases and free surface modeling. Thus, the fundamental equations governing the flow of fluid around the cougar model are solved and the distribution of velocity and pressure in the computational domain will be obtained.

In these simulations, the model is considered constant and the fluid moves. Simulations at trim angles of 1, 2 and 3 degree and drafts of 10.7, 11.77 and 12.84 cm (equivalent to weights 9.5, 10.5 and 11.5 tons in the main vessel) and three speeds of 8.52, 11.5 and 14.95 meters per second (35, 50 and 65 knots for the main vessel) is done. The Studied geometry is two-steps cougar model. The length of the second step is three different distances from the aft and values 34, 38.5, and 43 cm. Thus, the exact results of the vessel hydrodynamic resistance, the pressure distribution on the body, the waveform and the lifting force will be obtained for all three bodies. For verification, the independence of the network as well as the validation of the results with the laboratory model is carried out. Comparison of the simulation results with the experimental results of the 38.5 cm model, which was tested in the Persian Gulf National Laboratory, is in good agreement. The maximum error rate for drag of two-step vessel at a speed of 11.5 m / s is 12.4% and satisfies the experimental results. Studies show that in a loading and constant velocity, the vessel drag increases with the increase of the second step length from of aft vessel.