

## تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای تندرو با پله‌های عرضی - تحلیل حساسیت شرایط بارگذاری به هواگیری پله‌های عرضی

محمود سالاری<sup>۱\*</sup>، حمید کاظمی<sup>۲</sup> و محمد مهدی دوستدار<sup>۳</sup>

دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۲۸)

### چکیده

تمایز اساسی بین شناورهای دریایی سرشی و شناورهای متداول جابجایی و شبه جابجایی، بهره‌گیری از نسبت نیروی هیدرودینامیکی علاوه بر نیروی بویانسی است. میدان فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده در کف این شناورها باعث کاهش ارتفاع آب‌خور شناور و در نتیجه کاهش نیروی مقاومت در آنها می‌شود. کاهش مقاومت هیدرودینامیکی، دستیابی به سرعت‌های بالاتر به‌ازای توان پیش‌برنده معین را فراهم می‌نماید. یکی از روش‌های افزایش کارایی سطوح هیدرودینامیکی کف بدنه در شناورهای دریایی سرشی استفاده از پله‌های عرضی در محل مناسبی از کف بدنه می‌باشد. طراحی صحیح موقعیت و ارتفاع پله‌های عرضی متناسب با موقعیت مرکز جرم، شرایط بارگذاری و سرعت، امری مهم و حساس می‌باشد. این پله‌ها در صورت عدم تطابق با شرایط فوق‌الذکر می‌توانند اثرات نامطلوبی بر هیدرودینامیک شناور نیز داشته باشند. در این تحقیق، به کمک دینامیک سیالات عددی میدان و الگوی جریان روی یک شناور تندرو تک پله‌ای و دو پله‌ای در دو حالت شرایط صحیح کاربری و شرایط بارگذاری نامناسب تحلیل شده است. برای بررسی توزیع دو فاز آب و هوا و مدل‌سازی اثر سطح آزاد از روش نسبت حجم (VOF) استفاده شده است. این شبیه‌سازی‌ها برای مدل یک شناور واقعی بنام "کوگار" در دو حالت تک پله‌ای و دو پله‌ای انجام گرفته است. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌ها، بررسی استقلال از شبکه و همچنین معتبرسازی نتایج با مدل آزمایشگاهی انجام گرفته است. تاکید این مقاله بر بررسی وضعیت هواگیری مناسب پشت پله‌های عرضی برای شناورهای سرشی با تک پله‌ای و دو پله‌ای می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که حساسیت رفتار هیدرودینامیکی شناورهای تندرو پله‌دار به بارگذاری، سرعت و زاویه تریم بسیار بیشتر از شناورهای بدون پله می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** هیدرودینامیک شناور تندرو، دینامیک سیالات عددی، پله عرضی، هواگیری پشت پله

## Hydrodynamic Analysis of Stepped Planning Vessels – Sensitivity Analysis of Loading Condition to Air Breathing of Transvers Steps

M. Salari, H. Kazemi, and M.M. Doustdar

Engineering and Research School

Imam Hossein University

(Received: 11/January/2017; Accepted: 18/May/2017)

### ABSTRACT

Main difference between planning vessels, conventional displacement, and semi-displacement marine vessels is in their utilization hydrodynamic loads in addition to buoyancy force. The hydrodynamic pressure field on the bottom surface of planning vessels decreases the vessel draught and the thereafter their resistance. The resistance reduction introduces achieving higher speeds. One of the methods for improving hydrodynamic efficiency of planning vessels is utilization of transverse steps under their bottoms. Selecting their locations and heights has high sensitivity to loading conditions, speed, and center of gravity of the vessel. If proper design does not occur, it maybe followed by un-favorite effects. In this research, the flow field over the bottom of two stepped high speed planning vessels at different lading conditions were obtained, using CFD. VOF method was used for capturing the interface between water and air. Simulation was performed for one-step and two-step planning vessels of Cigar. For validating of the simulations, a grid-independency study and some comparisons with experiments are carried out. The emphasis of this study was on identification of the sensitivity of loading conditions on air-breathing of the transverse steps. The results show that the sensitivity is much higher than the traditional non-stepped planning vessels.

**Keywords:** Planning Boat Hydrodynamics, CFD, Transverse Step, Air Breathing of Steps.

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): msalari@ihu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری: stableboat.90@hotmail.com

۳- دانشیار: mdostdar@ihu.ac.ir

## ۱- مقدمه

می‌باشد. استفاده از پردازش‌های عددی به صورت همزمان با انجام تست مدل شناور در حوضچه‌های کشش، برای معتبرسازی نتایج عددی از یک سو و کاهش تعداد تست‌های تجربی از سوی دیگر به کار می‌روند [۲-۳]. هریک از روش‌های عددی و تجربی دارای مزایا و معایب منحصر به فردی می‌باشند. معمولاً تست‌های تجربی در آزمایشگاه‌های دریایی همراه با داده‌های معتبر و پرهزینه بوده و از طرفی تعداد داده‌های خروجی عموماً پارامترهای انتگرالی نظیر مقاومت و لیفت و زوایای وضعیتی و سینماتیکی بدنه به همراه تصاویری از الگوی جریان خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به روش CFD معمولاً کم هزینه بوده و علاوه بر استخراج داده‌های انتگرالی نظیر مقاومت و لیفت، کلیه جزئیات میدان فشار، سرعت و خطوط جریان قابل و پردازش می‌باشند. قطعاً تکیه بر داده‌های عددی بدون یک اعتبارسنجی قابل قبول توسط داده‌های تجربی کاری اشتباه خواهد بود.

پژوهش‌های آزمایشگاهی و تست مدل شناورهای پروازی و یا سرشی، برای چندین دهه و تا به امروز انجام شده و گزارش‌ها و اسناد بسیاری در این زمینه ارائه شده است. تست‌های سیستماتیک آزمایشگاهی کلمنت و بلانت بر روی بدنه سری ۶۲ یکی از بارزترین این کارها می‌باشد [۴]. جزئیات بیشتری درباره تحقیقات انجام شده در این زمینه را می‌توان در مرجع [۵] یافت.

مطالعات انجام گرفته به روش شبیه‌سازی عددی و دینامیک سیالات محاسباتی بر روی شناورهای سرشی، محدود به دهه اخیر می‌باشد. به عنوان یکی از اولین مطالعات در این زمینه، کاپونتو از حلگر RANS برای بررسی و تحلیل هیدرودینامیکی شناور تندرو بهره گرفت [۶]. او در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های پایا برای یک هندسه و بدنه ثابت را در ۳ حالت زاویه تریم و ۳ مقدار آبخور مختلف انجام داد. سپس با استفاده از میان‌بایی، حالت نهایی حرکتی شناور را تخمین زد. برزولارا و سیرا [۷] در مطالعه‌ای به بررسی عددی یک صفحه سرشی 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 بین نتایج عددی و تجربی در این مطالعه، نشان از قابلیت مناسب روش دینامیک سیالات محاسباتی برای این نوع مسائل است. سویتسکی و مورایتو به صورت آزمایشگاهی، الگوی ویک سطح

اهمیت شناورهای تندرو پروازی و یا سرشی برای کاربردهای مختلف؛ تقاضا برای استفاده از این شناورها را افزایش داده است. طراحی و تحلیل این شناورها به علت حساسیت زیاد رفتار دینامیکی آنها به پارامترهای هندسی بدنه و پروانه، شرایط بارگذاری و سرعت از دقت و اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بدون توجه دقیق به پارامترهای موثر بر رفتار دینامیکی این شناورها در مرحله طراحی عملاً دسترسی به یک شناور بهینه و سرعت بالا امکان‌پذیر نمی‌باشد.

شناورهای با بدنه پروازی یا سرشی ابتدا همانند شناورهای جابجایی بر سطح دریا استقرار می‌یابند و پس از حرکت نمودن از حالت سکون و رسیدن به سرعت معینی، با افزایش اثرات نیروهای هیدرودینامیکی سطوح برآ ساز کف شناور، به تدریج از وضعیت‌های جابجایی و نیمه جابجایی عبور کرده و به وضعیت سرشی یا پروازی در می‌آیند. در چنین شرایطی ضمن کم شدن آبخور آنها، حدود ۵۰ تا ۹۰٪ از وزن این شناورها توسط نیروی بالابرنده هیدرودینامیکی سطوح سرشی کف تحمل می‌شود [۱]. کاهش عمق آبخور بدنه در مقایسه با شناورهای جابجایی و نیمه جابجایی، به معنی کاهش نیروی مقاومت بدنه در حال حرکت بوده و به تبع آن امکان رسیدن به سرعت‌های بالاتر برای این نوع شناورها به‌ازای توان محرکه ثابت فراهم می‌شود.

امروزه تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای تندرو پروازی و یا سرشی، به سه روش تست‌های آزمایشگاهی، روش‌های تحلیلی و تجربی (فرمول‌های رگرسیونی) و روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) محدود شده است. واضح است که تست‌های تجربی در حوضچه‌های کشش آزمایشگاه‌های دریایی از نظر مالی و زمانی بسیار پرهزینه هست. از طرفی دیگر بدون اعتبارسنجی سایر روش‌های عددی و تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی، عملاً اعتبار سایر روش‌ها زیر سؤال خواهد بود. روش‌های تحلیلی و روابط نیمه تجربی نیز عموماً برای بدنه‌های منشوری ساده به‌دست‌آمده و کاربرد دارند. معمولاً هندسه و فرم بدنه این نوع شناورها دارای پیچیدگی‌های هندسی و ضمامم مختلفی هستند لذا برای تحلیل هیدرودینامیکی این شناورها نیاز به استفاده از روش‌های کارآمدتری احساس می‌شود. امروزه روش‌های عددی دینامیک سیالات محاسباتی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در خدمت تحلیل چنین مسائلی

پایا برای شناور ساکن استفاده شده و نتایج با بهره‌گیری از تکنیک جدید ارائه‌شده برای میانمایی، برای رفتار شناور تخمین زده شده و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است. همچنین سیف و آقاجانی اثر پله عرضی بر مقاومت یک شناور تندرو را به صورت تحلیل عددی بررسی نمودند [۱۸].

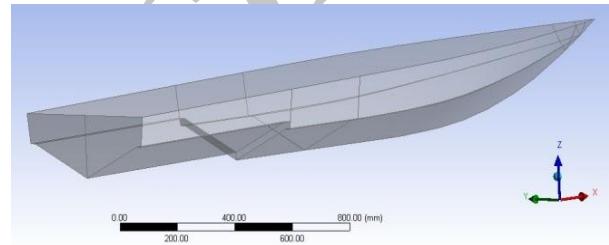
از میان روش‌های مختلف، یکی از روش‌های عملی برای افزایش بیشتر بازدهی هیدرودینامیکی سطوح لیفت‌ساز (کف) این شناورها، استفاده از پله‌های عرضی در قسمت مناسبی از کف این شناورها می‌باشد. معمولا این پله‌های عرضی در یک سوم انتهایی طول بدنه شناور نصب می‌شوند جایی که خطوط جریان آب (در حالت بدون پله) تقریبا موازی سطوح کف شناور شده‌اند. به عبارت دیگر جایی که تقریبا نیروی لیفت هیدرودینامیکی بسیار کم شده در حالی که مقاومت اصطکاکی همچنان وجود دارد. امروزه این پله‌های عرضی به صورت تکی، دوتایی و یا چندتایی استفاده می‌شوند. این پله‌های عرضی منجر به افزایش زاویه نسبی برخورد جریان به سطوح انتهایی بعد از هر پله عرضی شده و در نتیجه منجر به افزایش فشار و تولید نیروی لیفت در قسمت انتهایی بدنه می‌شوند. در بدنه‌های پروازی رایج و بدون پله عرضی، با افزایش سرعت شناور، زاویه تیریم کاهش یافته و باعث خروج شناور از حالت بهینه هیدرودینامیکی خواهد شد. استفاده از بدنه‌های دارای پله عرضی در کف شناور، به عنوان یکی از راه کارهای حل این مشکل ارائه شده است [۲]. از طرفی دیگر، طراحی صحیح موقعیت اجرا و ارتفاع آنها از حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد. اطمینان از هواگیری کافی پله‌های عرضی از طریق کانال‌های جانبی امری مهم در طراحی شناورهای سرشی می‌باشد. چنانچه این موضوع به درستی اجرا نشود عملا باعث کاهش نسبت نیروی برآ به مقاومت در این شناورها نیز خواهد شد. این مقاله سعی در روشن شدن اهمیت این مطلب دارد و نشان داده خواهد شد که اگر ملاحظات فوق در نظر گرفته نشوند مشکلاتی در هواگیری و یا ایجاد فشار منفی در این شکستگی‌ها به وجود می‌آید و باعث افزایش مقاومت و کاهش اثرات مفید و راندمان هیدرودینامیکی شناور می‌گردد.

آزاد در پشت بدنه شناورهای پروازی منشوری را بررسی کردند [۲]. علاوه بر این، آنها فرمول‌هایی تجربی برای تعریف کمی الگوی یک در خط مرکزی و همچنین در فاصله  $(1/4 B)$  از خط مرکزی شناور را ارائه کردند. قدیمی و همکارانش در مطالعه‌ای برنامه‌ای کامپیوتری براساس روش مورابیتو توسعه دادند [۱۰]. در این تحقیق، مطالعه پارامتری بر روی پارامترهای مختلف فیزیکی انجام گرفت. علاوه بر این، موقعیت اسپری و همچنین پروفیل سه‌بعدی اسپری نیز مورد بررسی قرار گرفت. گارلند و ماکی تاثیرات تغییر ارتفاع و موقعیت پله برای یک شناور پروازی سرشی را بررسی کردند. آنها در این مطالعه، شبیه‌سازی‌ها را در آب‌خور و زاویه تیریم ثابت انجام دادند [۱۱]. از آنجا که معمولا زاویه برخاست کف شناورهای تندرو ثابت نمی‌باشد آقایان توکلی، وفایی صفت و سیف به محاسبه مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناور تندرو با زاویه ددرایز متغیر پرداختند [۱۲]. قاسمی و باقرزاده اثر سایر ضمائم بدنه یک شناور تندرو را بررسی و به صورت خاص تاثیر اینترسپتور بر کنترل حرکات طولی شناورهای تندرو را تحلیل نمودند [۱۳]. همچنین منصور، قاسمی و موسوی زادگان در ادامه تحلیل‌های خود به بررسی و نحوه کنترل زاویه تیریم شناور تندرو به کمک استفاده از اینترسپتور پرداختند [۱۴].

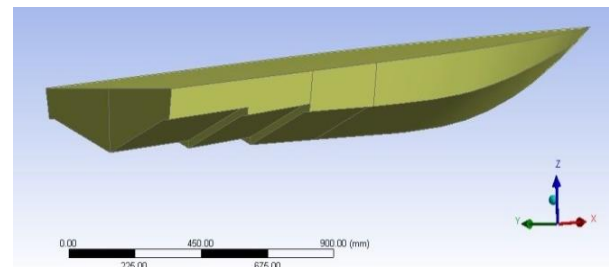
ماکاسیوف مدلی ریاضی براساس جریان پتانسیل برای بدنه شناور پروازی دارای پله به صورت دوبعدی توسعه داد. این مدل با دریافت ورودی‌هایی مانند عدد فرود، عدد کاویتاسیون و موقعیت طولی مرکز جرم، قادر به ارائه نتایجی از جمله تیریم دینامیکی آب‌خور نهایی و مساحت خیس شناور است [۱۵]. تانتون و همکاران سری جدیدی از بدنه‌های سرشی با چاین سخت 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 [۱۶]. وانگ و همکارانش مطالعه‌ای بر روی شبیه‌سازی عددی شناور پروازی در امواج منظم در زوایای برخورد مختلف و در سه سرعت مختلف انجام دادند. در این پژوهش، از حلگر متوسط رینولدزی ناویر استوکس، حجم سیال و همچنین حلگر ۶ درجه آزادی حرکت استفاده شده بود [۱۷]. لطفی و همکارانش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی رفتار شناور پروازی دارای پله عرضی پرداختند [۳]. در مطالعه آنها، از شبیه‌سازی

## ۲- هندسه مورد مطالعه

در این مطالعه، فرم ساده شده (بدون اسپری ریل‌ها و ...) یک شناور تندرو واقعی به نام کوگار به عنوان مدل مورد بررسی انتخاب شده است. طول و عرض این مدل با مقیاس یک پنجم، به ترتیب برابر با ۲/۶۳ و ۰/۵۴ متر بوده است. به مدل این بدنه پله‌های عرضی افزوده شده و مدل سه‌بعدی این شناور در حالت تک پله‌ای و دو پله‌ای در در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که فاصله پله اول از ترنژوم برابر با ۷۷ سانتی‌متر از پاشنه و فاصله پله دوم از ترنژوم در سه حالت الف) ۳۴ سانتی‌متر از پاشنه ب) ۳۸/۵ سانتی‌متر از پاشنه ج) ۴۳ سانتی‌متر از پاشنه مطالعه شده است.



شکل (۱): مدل سه‌بعدی بدنه شناور در حالت تک پله‌ای.



شکل (۲): مدل سه‌بعدی بدنه شناور در حالت دو پله‌ای.

## ۳- مطالعه آزمایشگاهی

برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و معتبرسازی آنها از مطالعه آزمایشگاهی استفاده شده است. طول مدل شناور تست ۲/۶۳ متر بوده که دارای دو هندسه به دو صورت تک پله و دوپله می‌باشد. هر یک از مدل‌ها در دو حالت بارگذاری مختلف، مطابق با جدول‌های ۱ و ۲ تست آزمایشگاهی شده به طوری که نتایج آن در جدول‌های ۴ و ۵ با نتایج عددی مقایسه شده‌اند. نمایی از شناور مدل حین تست در آزمایشگاه در شکل ۳ نمایش داده شده است.

## جدول (۱): شرایط تست در حوضچه کشش برای شناور

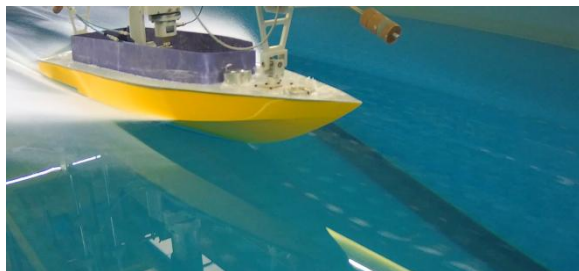
تک پله.

شماره تست	وزن (kg)	موقعیت طولی مرکز جرم (m)	سرعت (m/s)
۱	۹۰	۰/۸۰۰	۱۱/۵
۲	۱۰۲	۰/۸۶۹	۱۱/۵

## جدول (۲): شرایط تست در حوضچه کشش برای شناور

دو پله.

شماره تست	وزن (kg)	موقعیت طولی مرکز جرم (m)	سرعت (m/s)
۱	۷۶/۶	۰/۸۸۹	۱۱/۵
۲	۸۶/۱	۱/۰۴۶	۱۱/۵



شکل (۳): نمایی از تست مدل شناور.

## ۴- مطالعه عددی

به منظور شبیه‌سازی عددی مدل شناور، از روش دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه معادلات RANS استفاده شده است. در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های به صورت پایا و در نرم‌افزار تجاری CFX انجام گرفت. در این نرم‌افزار با حلگر 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.

## ۴-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

حرکت جریان سیال بر پایه معادلات ناویر استوکس استوار است که هم برای جریان آشفتگی و هم برای جریان لایه‌ای قابل استفاده است. بدین ترتیب جریان غیریکنواخت ویسکوز اطراف بدنه یک شناور دریایی را می‌توان توسط معادلات ناویراستوکس

مقدار متوسط  $0.09$  است. پارامترهای  $k$  و  $\varepsilon$  از معادلات انتقال (۴) و (۵) به دست می‌آیند [۱۱].

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (۴)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{z1} P_k - C_{z2} \rho \varepsilon) \quad (۵)$$

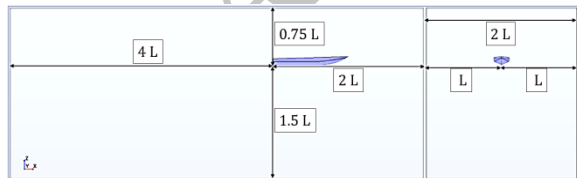
در روابط فوق،  $P_k$  به صورت زیر تعریف شده است:

$$P_k = \mu_t \nabla \bar{U} \cdot (\nabla \bar{U} + \nabla \bar{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{U} [3\mu_t \nabla \cdot \bar{U} + \rho k] \quad (۶)$$

از روش VOF برای مدل سازی توزیع دوفاز آب و هوا و مدل سازی اثرات سطح آزاد استفاده شده است. معادله تعیین درصد حجمی به عنوان یک معادله ترانسپورت همزمان با سایر معادلات حاکم فوق الذکر حل می‌شود و مرز بین سیال آب و هوا از طریق این معادله تعیین می‌شود.

### 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  $2, 4, 1$  و  $1/5$  برابر طول مدل در نظر گرفته شده است. ابعاد اصلی محدوده محاسباتی و موقعیت شناور درون آن، در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



نمای روبرو      نمای جانبی

شکل (۴): دامنه محاسباتی در شبیه‌سازی عددی.

### ۴-۴- شرایط مرزی

برای مدل سازی جریان پیرامون شناور و رسیدن به جواب یکتا از حل معادلات متوسط زمانی ناویراستوکس، شرایط مرزی دامنه محاسباتی شامل؛ بدنه مدل، ورودی و خروجی محدوده و

مدل نمود. با این حال برای در نظر گرفتن اثرات جریان مغشوش و حل این معادلات، به شبکه‌بندی بسیار ریزی نیاز است. برای حل جریان مغشوش معادلات متوسط زمانی ناویراستوکس (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 غیرقابل تراکم به صورت سه‌بعدی و همچنین تحت تاثیر میدان گرانشی زمین فرض شود، معادلات مقدار متوسط زمانی ناویراستوکس به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (۱)$$

$$\frac{\partial (\bar{u}_i)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial (\bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + g_i + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (۲)$$

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

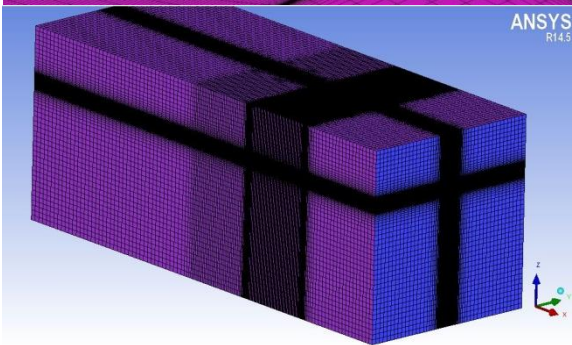
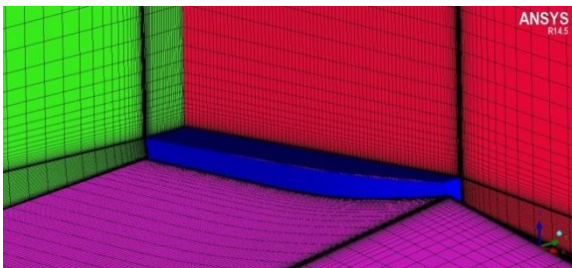
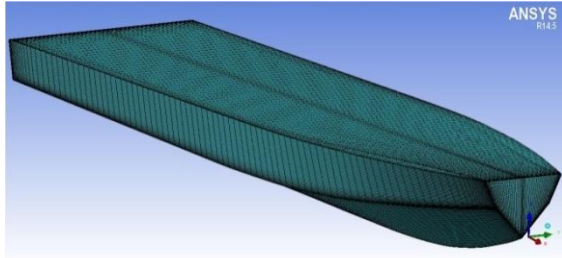
### ۲-۴- مدل سازی آشفتگی و جریان دوفازی

برای مدل سازی 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 بر خلاف ویسکوزیته دینامیکی که مشخصه سیال بوده، این ویسکوزیته تابع رژیم جریان است، یعنی:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}, \quad (۳)$$

که  $k$  انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم،  $\varepsilon$  نرخ میرایی انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم است.  $C_\mu$  ثابت بی بعد با

شده است. به همین دلیل شکل پخ خوردگی در دماغه شناور مشاهده می‌شود. البته این قسمت هیچ تماسی با آب ندارد که بر نتایج تأثیری داشته باشد.



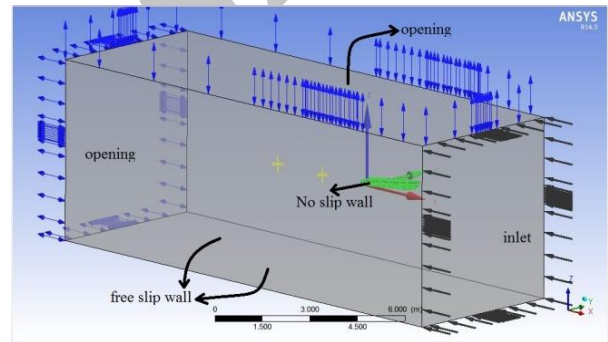
شکل (۶): شبکه‌بندی دیواره شناور و ناحیه اطراف شناور. در بررسی کیفیت مدل‌سازی لایه مرزی پارامتر بدون بعد  $Y^+$  به عنوان معیار مهمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پارامتر به فاصله بی‌بعد اولین گره از شبکه نسبت به سطح مربوط است. مقدار این پارامتر از رابطه (۷) به دست می‌آید:

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

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 ۷ نمونه‌ای از توزیع مقدار  $Y^+$  روی بدنه شناور نمایش داده شده است که

همچنین دیواره‌های اطراف باید به صورت دقیق تعیین شوند. توجه به شکل ۵ شرایط مرزی به صورت زیر اعمال شده است:

- ۱- ورودی (مرز سمت راست)؛ از نوع جریان ورودی که جریان با سرعت یکنواخت مشخص وارد می‌شود،
- ۲- خروجی و سطح بالا (مرز سمت چپ، مرز بالایی)؛ از نوع فشار ثابت 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 تأثیر اصطکاک سیال با دیواره قرار نمی‌گیرد و
- ۴- دیوار (سطح بدنه)؛ سطوح بدنه مدل به عنوان دیوار نفوذ ناپذیر و بدون لغزش تعریف شده‌اند.



شکل (۵): شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی عددی.

#### ۵-۴- تولید شبکه

روش‌های شبکه‌بندی گوناگونی برای تقسیم‌بندی محدوده محاسباتی وجود دارد. برای شبکه‌بندی محدوده محاسباتی از شبکه ۶ وجهی با سازمان استفاده شده است. این روش، روشی بهینه و قدرتمند در تولید شبکه‌های با سازمان با حداقل عدم تقارن<sup>۱</sup> است. 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. 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 شکل ۶ مشاهده می‌شود. به منظور تولید شبکه منظم شش وجهی در میدان محاسباتی، حدود ۳۰ سانتی متر از ابتدای مدل بریده

به جدول ۲ و اینکه اختلاف نیروی مقاومت شبکه متوسط و شبکه زیاد کمتر از ۲/۲ درصد است، شبکه بندی متوسط به عنوان شبکه مناسب انتخاب گردید.

#### ۷-۴- مقایسه نتایج و معتبرسازی حل عددی

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. در جداول ۴ و ۵ نتایج مقاومت شناور تک پله ای و دوپله ای 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.

**جدول (۴):** مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای شناور تک پله‌ای.

شماره تست	مقاومت (نتایج آزمایشگاهی) [N]	مقاومت (حل عددی) [N]	خطا (%)
۱	۲۰۰/۹	۱۸۶/۲	۷/۳
۲	۲۲۰/۵	۲۱۸/۰	۱/۱

**جدول (۵):** مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای شناور دو پله‌ای

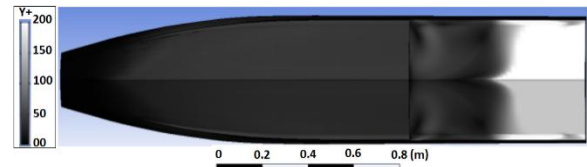
شماره تست	مقاومت (نتایج آزمایشگاهی) [N]	مقاومت (حل عددی) [N]	خطا (%)
۱	۲۰۲/۰	۱۷۶/۹	۱۲/۴
۲	۲۱۷/۷	۲۰۴/۸	۵/۹

مطابق جدول ۴، حداکثر میزان خطا برای مقاومت شناور تک پله ای، ۷/۳ درصد و مطابق با جدول ۵، حداکثر میزان خطا برای مقاومت شناور دو پله ای، ۱۲/۴ درصد بوده که نشان از مطابقت نسبتاً خوب آنها دارد.

#### ۵- ارزیابی و تحلیل نتایج عددی

به منظور مطالعه اثرات الگوی جریان جداشونده از روی پله‌های عرضی در زیر بدنه در دو حالت مختلف هواگیری مناسب و نامناسب، تحلیل‌های عددی اعتبارسنجی شده ای برای دو شناورهای تک پله ای و دو پله ای در شرایط بارگذاری مختلف انجام شده است مطابق جداول ۱ و ۲ انجام شده است که نتایج مقایسه ای آن در جداول ۴ و ۵ ارائه شدند. از آنجا که ابعاد

مشاهده می‌شود مقدار متوسط این پارامتر روی بدنه حدود ۵۴ می‌باشد.



شکل (۷): پارامتر  $Y+$  بر روی بدنه شناور تک پله ای

#### ۶-۴- 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.

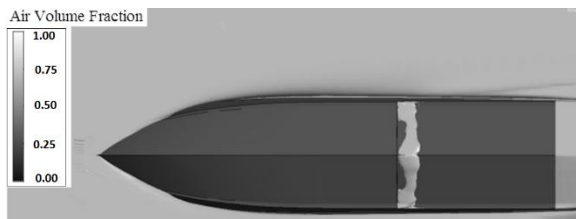
به همین منظور و برای اطمینان از دقت شبکه‌بندی، مطالعه استقلال شبکه صورت گرفته است. برای مدل تک پله، سه شبکه محاسباتی متفاوت ایجاد شده و شبیه‌سازی برای بدنه شناور در زاویه تریم ۲ درجه، آب‌خور ۱۰/۷ سانتی متر و سرعت ۱۱/۵ متر بر ثانیه انجام شده است. مقاومت هیدرودینامیکی در این شرایط برای شبکه‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است. در نمودار شکل ۸ نیز روند همگرایی نتایج شبیه‌سازی نمایش داده شده است.

**جدول (۳):** تغییرات مقاومت بدنه در شبکه‌بندی مختلف شناور تک پله‌ای.

شماره	تراکم شبکه	تعداد المان	مقاومت (N)
۱	کم	۴۹۰۸۵۴۴	۱۷۰/۸
۲	متوسط	۶۰۲۵۰۸۸	۱۶۵/۴
۳	زیاد	۷۱۴۰۱۳۶	۱۶۹/۱

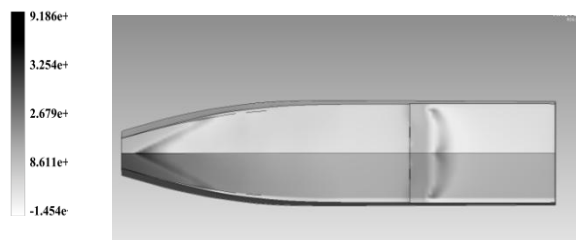
این شبیه‌سازی‌ها بر روی سخت‌افزاری با پردازنده ( Intel core i7 - 3.4GHz) با ۱۶ گیگابایت حافظه پردازشی انجام گرفته است. به طور میانگین، ۲۰۰۰ تکرار برای هر شبیه‌سازی نیاز بوده است. این زمان تعداد تکرار متناسب با زمان پایا شدن حرکات شناور است. به طور تقریبی، برای شبکه با تراکم متوسط، زمان حل برابر ۶۸ ساعت طول کشیده است. با توجه

هندسی و موقعیت پله‌های عرضی نسبت به بدنه اصلی شناور ثابت می‌باشند می‌توان نتیجه گرفت که شرایط بارگذاری و سرعت منجر به تغییرات الگوی جریان پشت پله‌های عرضی می‌شوند. با تغییر شرایط بارگذاری و یا تغییر سرعت شناور، وضعیت هواگیری پشت پله شناور نیز تغییر می‌کند. واضح است که طراحی پله‌های عرضی در شناورهای تندرو برای محدوده معینی از سرعت و شرایط بارگذاری انجام می‌شود که چنانچه این شرایط تغییر کند الگوی هیدرودینامیکی جریان در کف شناور نیز تغییر کرده و با افزایش مقاومت همراه خواهد شد. به عبارت دیگر دینامیک یک شناور تندرو تابعی از شرایط جرمی و فرم هندسی و سرعت حرکت بدنه می‌باشد و تغییر در هر یک از این مولفه‌ها منجر به یک وضعیت تعادلی دیگر خواهد شد. به صورت کلی انتظار می‌رود با افزایش مقدار بارگذاری (آبخور بیشتر) و یا جابجایی مرکز جرم به سمت عقب، احتمال هواگیری مناسب برای پله‌های عرضی کمتر شود، البته با افزایش سرعت عملاً میزان آبخور تعادلی کمتر و زاویه تریم نیز کمتر می‌شود. بر این مبنا انتظار کلی بر این است که برای یک شناور با بارگذاری مشخص، با افزایش سرعت وضعیت هواگیری پله‌های عرضی نیز بهتر خواهد شد.



شکل (۸): تغییرات نسبت حجمی هوا به آب روی سطوح سرشی (کف) شناور تک پله در شرایط بارگذاری

$$[V=8.05 \text{ m/s}, D=12.84 \text{ cm}, \text{Trim}=1]$$



شکل (۹): تغییرات میدان فشار روی سطوح سرشی (کف) شناور تک پله‌ای در حالت بارگذاری

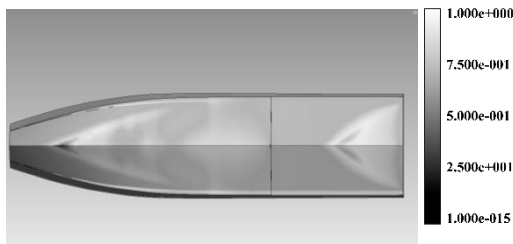
$$[V=8.05 \text{ m/s}, D=12.84 \text{ cm}, \text{Trim}=1]$$

در شکل ۱۰ تغییرات فشار بر روی خط کیل (خط میانی) شناور کوگار تک پله ای را در حالت هواگیری نامناسب نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در ناحیه جلویی یا سینه شناور یک ناحیه پرفشار بوجود می‌آید که نیروی برآی هیدرودینامیکی مناسبی را نیز ارائه می‌کنند. در ادامه مشاهده می‌شود به علت عدم هواگیری مناسب پشت پله عرضی یک ناحیه با فشار منفی ایجاد شده که علاوه بر کاهش نیروی لیفت هیدرودینامیکی منجر به افزایش قابل توجه مقاومت شناور و افزایش سطح خیس در ناحیه پایین دست پشت پله عرضی می‌شود.

۵-۱- ارایه و تحلیل نتایج برای شناور با تک پله عرضی  
تاکید این تحقیق بر شناسایی وضعیت‌های هواگیری مناسب و نامناسب پشت پله‌های عرضی در شناورهای تندرو سرشی بوده است. به این منظور رفتار شناور پروازی کوگار با تک پله عرضی در شرایط مختلفی از سرعت و آبخور (یا بارگذاری) و زوایای تریم مختلف بدست آمده است.

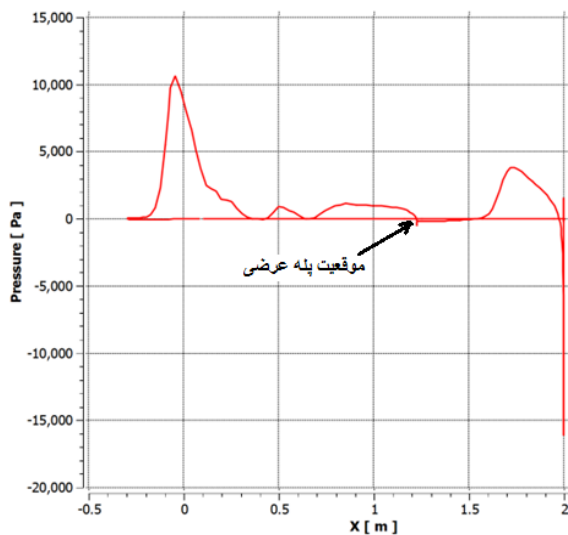
نتایج حاصله نشان می‌دهند که برای برخی از وضعیت‌های بارگذاری و سرعت هواگیری پشت پله عرضی مناسب نبوده و جدایش مناسبی برای جریان آب رخ نداده و آب تا نزدیک پله عرضی پیشروی می‌نماید. در شکل ۸ این وضعیت هواگیری نامناسب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تنها ناحیه کوچکی پشت پله عرضی هواگیری شده و سایر نواحی کف بدنه مستقیماً با آب در تماس می‌باشند و تنش برشی بر کل کف بدنه وارد می‌شود. قطعاً این وضعیت مزیت پله عرضی را تبدیل به عیب نموده و منجر به افزایش نیروی مقاومت کلی بدنه می‌نماید. میدان فشار مرتبط با وضعیت فوق‌الذکر در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که یک ناحیه پرفشار در





شکل (۱۲): تغییرات میدان فشار روی سطوح سرشی (کف) شناور تک پله‌ای در حالت بارگذاری  
 $[V=8.05 \text{ m/s}, D=10.7 \text{ cm}, Trim=1]$

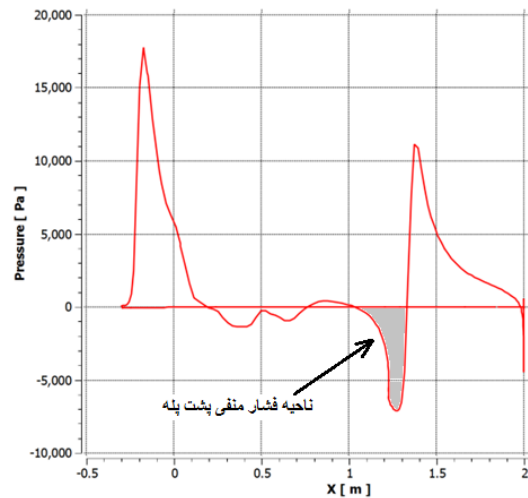
تغییرات مقدار فشار در راستای خط کیل شناور و کف شناور در شکل ۱۳ ترسیم شده است مشاهده می‌شود که دیگر پشت پله عرضی ناحیه فشار منفی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و کارکرد شناور در شرایط مناسبی قرار دارد.



شکل (۱۳): نمودار تغییرات فشار روی خط کیل شناور کوگار تک پله در حالت هواگیری مناسب  
 $[V=8.05 \text{ m/s}, D=10.7 \text{ cm}, Trim=1]$

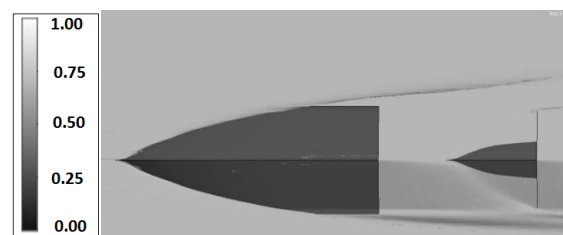
## ۲-۵- ارایه و تحلیل نتایج برای شناور با دو پله عرضی

تغییرات میدان فشار و نسبت حجمی آب به هوا برای شناور کوگار دو پله ای برای شرایط مشخص بارگذاری و سرعت در شکل‌ها ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. در این شرایط مشاهده می‌شود که نواحی پشت پله‌های عرضی اول و دوم به درستی شکل نگرفته است و هواگیری مناسبی رخ نداده و لذا جدایش جریان پشت پله‌ها طبق انتظار نمی‌باشد. تغییرات فشار روی خط کیل شناور در شکل ۱۶ نشان داده شده و این منحنی به صورت دقیقتری قابل رویت می‌باشد.



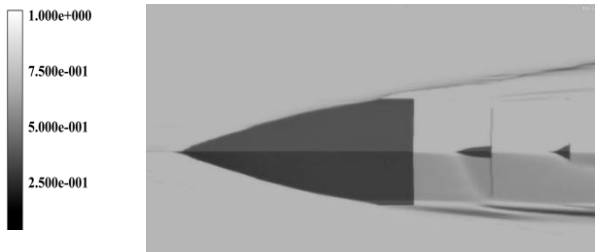
شکل (۱۰): نمودار تغییرات فشار روی خط کیل شناور کوگار تک پله در حالت هواگیری نامناسب  
 $[V=8.05 \text{ m/s}, D=12.84 \text{ cm}, Trim=1]$

با تغییر شرایط بارگذاری و کاهش آب‌خور از ۱۲/۸۴ سانتیمتر به ۱۰/۷ سانتیمتر و یا به عبارتی دیگر با کاهش بار و زن قابل حمل شناور و حفظ سرعت و تریم شناور برای همین شناور تک پله ای مشاهده می‌شود که الگوی جریان پشت پله عرضی کاملاً تغییر می‌کند و با هواگیری مناسب پله‌های عرضی، ناحیه عمده ای از سطح سرشی پشت پله به صورت خشک باقی می‌ماند (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) و تنها بخشی مثلی در فاصله زیادی از پله عرضی شکل گرفته است. این وضعیت علاوه بر اینکه منجر به کاهش نیروی مقاومت کلی بدنه می‌شود نیروی فشاری آن نیز می‌تواند بازوی مناسبی با مرکز جرم (که معمولاً کمی جلوتر از پله عرضی قرار می‌گیرد) داشته باشد و زاویه تریم شناور را کنترل نماید. شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تغییرات نسبت حجمی هوا به آب (به عنوان معیاری از نواحی خیس و خشک) و تغییرات میدان فشار برای این شناور در حالت هواگیری مناسب را نشان می‌دهد.



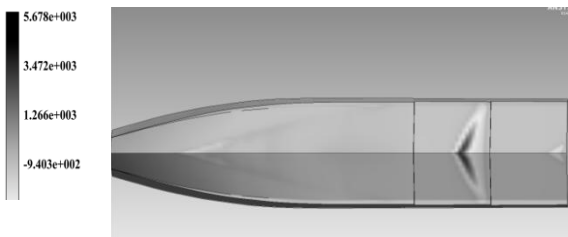
شکل (۱۱): تغییرات نسبت حجمی هوا به آب روی سطوح سرشی (کف) شناور تک پله در شرایط بارگذاری  
 $[V=8.05 \text{ m/s}, D=10.7 \text{ cm}, Trim=1]$

منحنی توزیع فشار برای شناور دو پله‌ای کوگار و شرایط یادشده در بالا، در شکل ۱۹ نشان داده شده است نواحی فشار منفی پشت پله تقریباً حذف شده و شناور به حالت مناسب طراحی خود نزدیک شده است.

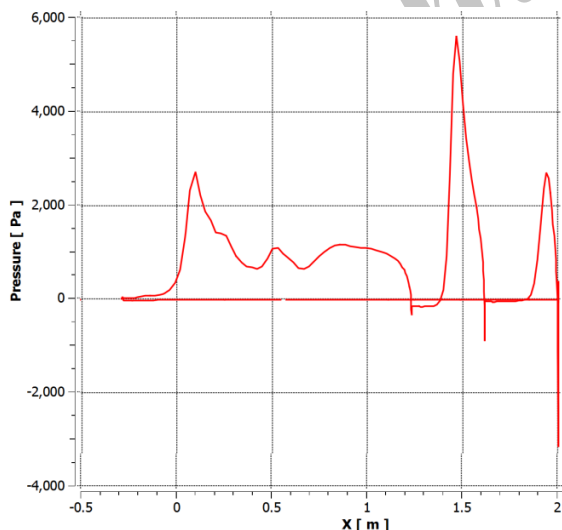


شکل (۱۷): تغییرات نسبت حجمی هوا به آب روی سطوح سرشی (کف) شناور دو پله‌ای در شرایط بارگذاری

$$[V=8.05 \text{ m/s}, D=11.77 \text{ cm}, \text{Trim}=3]$$

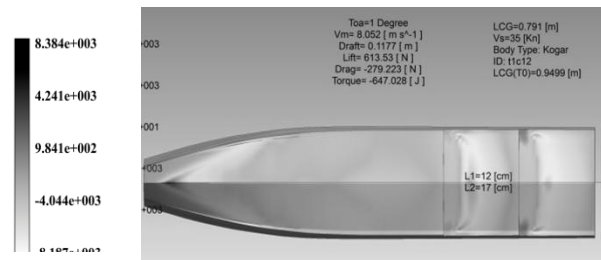


شکل (۱۸): تغییرات میدان فشار روی سطوح سرشی (کف) شناور دو پله‌ای در حالت بارگذاری.



شکل (۱۹): نمودار تغییرات فشار روی خط کیل شناور کوگار دو پله‌ای در حالت هواگیری مناسب

$$[V=8.05 \text{ m/s}, D=11.77 \text{ cm}, \text{Trim}=3]$$



شکل (۱۴): تغییرات میدان فشار روی سطوح سرشی (کف)

شناور دو پله‌ای در حالت بارگذاری

$$[V=8.05 \text{ m/s}, D=11.77 \text{ cm}, \text{Trim}=1]$$

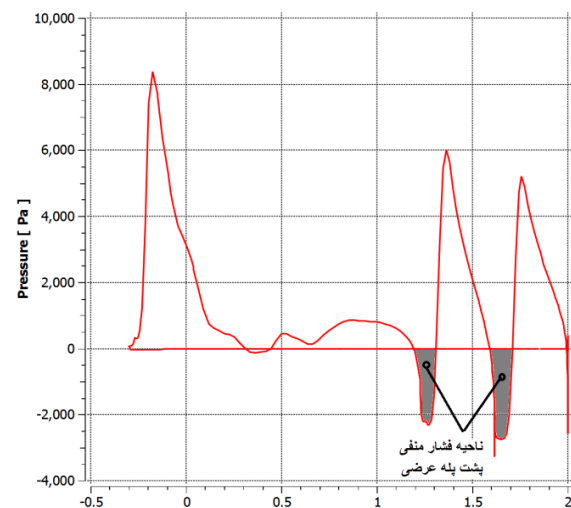


شکل (۱۵): تغییرات نسبت حجمی هوا به آب روی سطوح

سرشی (کف) شناور دو پله‌ای در شرایط بارگذاری

$$[V=8.05 \text{ m/s}, D=11.77 \text{ cm}, \text{Trim}=1]$$

$$[V=8.05 \text{ m/s}, D=11.77 \text{ cm}, \text{Trim}=1]$$



شکل (۱۶): نمودار تغییرات فشار روی خط کیل شناور کوگار دو پله‌ای در حالت هواگیری مناسب.

با افزایش زاویه تریم شناور و حفظ سرعت و آب‌خور و یا وزن شناور مشاهده می‌شود که هواگیری به پله‌های عرضی انجام می‌شود و نواحی فشار منفی پشت پله‌های عرضی حذف می‌شوند. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ این مطلب را نشان می‌دهد.

## ۶- نتیجه‌گیری

اصطلاحاً مثلث فشار تا قبل از شروع پله دوم به صورت کاملی در بالادست پله دوم شکل گرفته باشد.

۵- تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که طراحی پله دوم بسیار مشکل‌تر از پله اول می‌باشد زیرا برای شناورهای دو پله ای باید الزامات هیدرودینامیکی لازم برای هر دو پله‌ها تامین شود و این کاملاً بستگی به سرعت، تریم و بارگذاری شناور دارد.

۶- نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، راهنمای مناسبی برای طراحان این نوع شناورها خواهد بود.

۷- شناورهای دو پله‌ای حساسیت کمتری به زاویه تریم دارند و چنانچه به درستی طراحی شوند حساسیت کمتری هم به موقعیت مرکز جرم خواهند داشت.

۸- ایجاد ناپایداری طولی (پورپویزینگ) در شناورهای پله‌دار در سرعت‌های بالاتری رخ می‌دهد و استفاده از پله می‌تواند سرعت کروز شناورها را نسبت به شناورهای بدون پله به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

تاکید این مقاله بر شناسایی شرایط مناسب برای هواگیری و یا عدم هواگیری پشت پله‌های عرضی شناورهای پله‌دار بوده است. در بخش اول این مقاله، به بررسی تجربی و اندازه‌گیری رفتار مدل شناور تندرو کوگار در دو حالت (۱) با یک پله عرضی و (۲) با دو پله عرضی در یک سرعت و چند بارگذاری مختلف به صورت آزمایشگاهی پرداخته شد. این داده‌ها برای اعتبارسنجی نتایج عددی بعدی به‌کارگیری شد. در ادامه، شبکه استاتیکی پایا، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی با کمک نرم‌افزار ANSYS CFX شبیه‌سازی‌های جریان سیال بر روی شناور تندرو ارائه شد. پس از انجام مطالعه استقلال شبکه و انتخاب شبکه مناسب، نیروها و حرکات شناور برای حالات انجام شده در آزمایشگاه به‌دست آمد. با مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و مطالعه آزمایشگاهی، مطابقت قابل قبولی مشاهده شد. در بخش نهایی مقاله وضعیت‌های مختلفی از هواگیری مناسب و نامناسب برای شناور سرشی تک پله‌ای و دو پله‌ای از پله و تحلیل شد. مقایسه نتایج فوق‌الذکر نشان می‌دهد که:

## ۷- 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", Marine Technology, Vol. 47, No. 1, pp. 1-16, 2010.
3. Lotfi, P., Ashrafizaadeh, M. and Esfahani, R.K. "Numerical Investigation of A Stepped Planing Hull in Calm Water", Ocean Eng., Vol. 94, No. 1, 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, No. 1, pp. 491-579, 1963.
5. Faltinsen, O.M. "Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles", Cambridge University Press, New York, NY 10011-4211, USA, 2006.
6. Caponnetto, M. "Practical CFD Simulations for Planing Hulls", In: The Second International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles, Hamburg, pp. 128-138, 2001.
7. Brizzolara, S. and Serra, F. "Accuracy of CFD Codes in the Prediction of Planing Surfaces Hydrodynamic Characteristics", The Second International Conference on Marine Research and Transportation. pp. 147-159, 2007.

۱- در صورت عدم توجه به بارگذاری، مرکز ثقل (تریم) شناور و سرعت شناور اقدام به ایجاد پله در کف شناور نماییم باعث عدم هواگیری مناسب برای پله عرضی شده و نه تنها کارایی هیدرودینامیکی شناور بهبود نمی‌یابد بلکه باعث افزایش مقاومت آن نیز خواهد شد.

۲- نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی در حالت‌های مختلفی از سرعت، زاویه تریم و شرایط بارگذاری، نشان می‌دهند که این نوع شناورها بسیار حساس به شرایط بارگذاری و سرعت می‌باشند و تعیین دقیق موقعیت پله‌های عرضی باید در مرحله طراحی آنها بررسی دقیق شود. برای یک شناور ساخته شده باید محدودیت‌های بارگذاری اعم از وزن و یا مرکز جرم بار را مطابق شرایط طراحی اعمال نمود تا از هواگیری پله‌های عرضی اطمینان کافی پیدا نمود.

۳- در هر حال بارگذاری باید طوری صورت پذیرد که در سرعت طراحی، دهانه جانبی پله‌های عرضی مستقیماً به هوا راه داشته باشد تا هواگیری پله‌ها بطور صحیحی صورت گیرد.

۴- در فاز طراحی، محل پله دوم نسبت به ترنژوم و یا فاصله از پله اول باید طوری طراحی گردد که آب جدا شده از پله اول در سطح بالادستی آن به سطح زیرین شناور برخورد نماید و

8. Savitsky, D. "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", Marine Technology, 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. 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", J. Marine Science and Application, Vol. 13, No. 1, pp. 402-415, 2014.
11. 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.
12. Tavakoli, M., Vafaesezat, M., and Seif, M.S. "Hydrodynamic Characteristics of Planning Boat with Variable Dead-raise", The 13<sup>th</sup> Marine Industries Conf., Kish, Iran, 2012. (In Persian).
13. Ghasemi, H. and Bagherzade, M., "Study of Dynamic Stability of Planning Boats Equipped with Interceptor", The 14<sup>th</sup> Marine Industries Conf., Tehran, Iran, 2013 (In Persian).
14. Mansori, M., Ghasemi, H., Mosavizadegan, M. "Trim Control of Planning Boats Using Interceptor", In: Proceeding of the 11<sup>th</sup> Marine Industries Conf., Tehran, Iran. (In Persian).
15. Makasyeyev, M.V. "Numerical Modeling of Cavityflow on Bottom of a Stepped Planing Hull", The Seventh International Symposium Cavitation, Ann Arbor, Michigan, USA, 2009.
16. 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, No. 1, pp. 55-75, 2010.
17. Wang, S., Su, Y., Zhang, X., and Yang, J. "RANSE Simulation of High-speed Planning Craft in Regular Waves", J. Marine Science and Application, Vol. 11, No. 1, pp. 447-452, 2012.
18. Aghajani, A. and Seif, M.S. "Comparison of the Effects of Transverse Steps on Resistance of Planning Boat", The 15<sup>th</sup> Marine Industries Conference, Tehran, 2014 (In Persian).