



## بررسی عددی تأثیر تغییرات ارتفاع پله عرضی در زاویه پله صفر بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور پروازی تک بدنه

محمدجواد عامری<sup>۱</sup>، حسین احمدی دانش آشتیانی<sup>۲\*</sup>، امین نجفی<sup>۳</sup>، حمید کاظمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- تعیین تأثیر تغییرات ارتفاع پله در عرض در طراحی شناورهای تندرو در سرعت‌ها و پارامترهای مختلف بدنه.
- تعیین بهترین پله بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور
- معرفی روش جدید در طراحی پله در شناورهای تندرو

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

\*نویسنده مسئول:

[h\\_a\\_danesh@azad.ac.ir](mailto:h_a_danesh@azad.ac.ir)

کلیدواژه‌ها:

پله عرضی

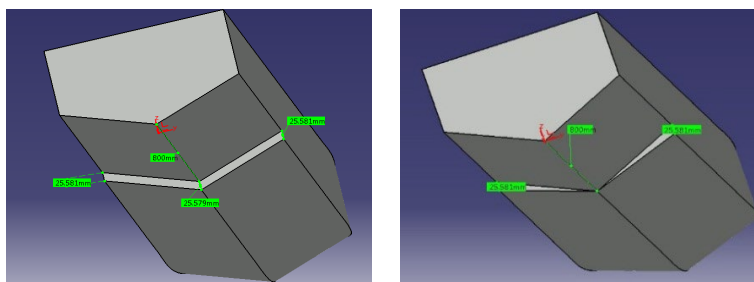
ارتفاع پله عرضی

شناور پروازی

شبیه‌سازی عددی

تکنیک شبکه‌بندی متحرک

### چکیده گرافیکی



### چکیده

بیشتر تحقیقات انجام شده در راستای بررسی تأثیر پله بر هیدرودینامیک شناور پله‌دار، در ارتفاع ثابت پله در عرض انجام گرفته است. این خلأ محققان را بر آن داشت که به بررسی تأثیر ارتفاع متغیر پله در عرض بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور تندرو بپردازند. بدین منظور سه مدل فریزما، شامل یک مدل بدون پله و دو مدل پله‌دار دیگر که ارتفاع پله متغیری در عرض دارند انتخاب شده است. مبنای انتخاب تغییر مثلی و تغییر یکنواخت ارتفاع پله در عرض می‌باشد. مقایسه نتایج شناور بدون پله با سایر شناورهای دارای پله، منجر به حصول اطلاعات سودمندی از ویژگی‌های هیدرودینامیکی ارتفاع متغیر پله در عرض نسبت به ارتفاع ثابت شناور شده است. در این تحقیق بین دو مدل با پله عرضی و نیز شناور ساده (بدون پله) از نظر ویژگی‌های هیدرودینامیکی نظیر مقدار زاویه‌تریم، نسبت درگ به لیفت، مقدار سطح خیس و نیروی مقاومت کل مقایسه صورت گرفته و بهینه‌ترین مدل مشخص شده است. نتایج بیانگر آن است که پله با ارتفاع ثابت باعث کاهش حدود ۳۰٪ نیروی مقاومت در مدل گردیده و نسبت به پله با ارتفاع متغیر میزان کاهش درگ بیشتری دارد؛ اما در پله با ارتفاع متغیر در عرض میزان تریم شناور مقدار کمتری نسبت به پله با ارتفاع ثابت دارد. در طراحی‌ها می‌بایست به هر دو مورد توجه داشت.

## ۱- مقدمه

با توجه به اینکه سرعت از جمله پدیده‌های فیزیکی است که به‌صورت نسبی بیان می‌شود فلذا طبق تحقیقات انجام‌شده و قوانینی که توسط سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) صورت گرفته و به‌صورت کدهای خاصی به نام (HSC) ارائه‌شده است، به شناوری تندرو گفته می‌شود که سرعت آن در نامساوی  $V > 3.7 \nabla^{0.1667}$  صدق کند.

در این رابطه،  $\nabla(m^3)$  حجم آب جابجا شده نسبت به خط آب‌خور شناور و  $V(m/s)$  سرعت حرکت شناور است. که در مرز حائل بین یک شناور تندرو و معمولی مشخص شده است. شناور با سرعت بالاتر شناور تندرو بوده و در سایر موارد شناور جابجایی یا نیمه جابجایی می‌باشد. در شناورهای تندرو قسمت عمده وزن توسط نیروی لیفت هیدرودینامیکی تحمل می‌شود [۱]. با افزایش سرعت در شناورهای تندرو، نسبت درگ به لیفت شناور افزایش می‌یابد. یکی از راه‌ها و استراتژی‌های موفق در بهبود نسبت درگ به لیفت استفاده از پله‌های عرضی است.

از جمله مهم‌ترین مزایای بدنه‌های پله‌دار، نسبت درگ به لیفت پایین در سرعت‌های بالا و نیز کاهش سطح خیس‌شده به دلیل جدایش جریان از پله می‌باشد. در واقع دو بعد مهم پله که ارتفاع پله و فاصله طولی پله از پاشنه ترنسام است، نقش مهمی بر هیدرودینامیک شناورهای پله‌دار خواهد داشت. با تغییر هرکدام از ابعاد پله ویژگی‌های هیدرودینامیکی وابسته دیگری از جمله تریم دینامیکی بدنه، فرورفتگی پاشنه در آب، دبی هوای مکیده شده به پشت پله، سرعت پلنینگ بدنه، سرعت شروع ناپایداری طولی (پورپوزینگ) تغییر خواهند کرد که تغییر این ابعاد در کل بر مقدار مقاومت کل، نیروی لیفت کلی اعمالی بر بدنه، مقدار سطح خیس پاشنه تأثیر می‌گذارد. با ثابت نگه‌داشتن تمامی ویژگی‌های یک بدنه پله‌دار و تغییر ارتفاع پله دو تغییر اساسی در شرایط هیدرودینامیکی و هیدرو استاتیکی بدنه ایجاد می‌شود که عبارت‌اند از:

- هوای محبوس بین بدنه و سطح آب همانند یک دمپینگ عمل کرده و باعث کنترل شدت حرکت

عمودی شناور و در نتیجه نرم‌تر شدن حرکات شناور (حرکات بالا و پایین) می‌شود.

- افزایش هوادهی باعث افزایش سطح خشک و کاهش سطح خیس پشت پله می‌شود.
- تغییر ارتفاع پله باعث کاهش بویانسی در قسمت پشت پله شده و فرورفتگی پاشنه در آب و در نهایت آب‌خور و تریم دینامیکی افزایش می‌یابد.

افزایش ارتفاع پله بایستی متناسب با فاصله پله از ترنسام باشد (علی‌الخصوص در شناورهای دو پله) به این معنی که در یک ارتفاع مشخص پله افزایش فاصله پله از ترنسام باعث افزایش سطح خیس می‌شود و در واقع عملکرد پله را کاهش می‌دهد. افزایش سطح خیس پشت پله اگرچه درگ اصطکاک را افزایش می‌دهد ولی باعث افزایش نیروی لیفت و همچنین افزایش پایداری دینامیکی شناور می‌شود. در واقع در شناور تندرو افزایش نیروی لیفت گاهی بسیار مهم‌تر از کاهش درگ می‌باشد. پله در بهترین حالت کاهش ۵ تا ۷ درصد درگ اصطکاک را به دنبال دارد و از طرفی موتورهای تعبیه‌شده روی شناورهای تندرو معمولاً با ضریب اطمینان خوبی طراحی می‌شود و کاهش این مقدار درگ اصطکاک تأثیری در عملکرد موتور ندارد در نتیجه معمولاً برای طراحان افزایش لیفت بسیار باارزش‌تر از کاهش درگ می‌باشد زیرا افزایش لیفت علاوه بر کاهش زاویه تریم شناور به‌صورت غیرمستقیم باعث کاهش درگ اصطکاک نیز می‌شود. در نتیجه نسبت مهم در طراحی و آزمون شناورهای پله‌دار، نسبت درگ به لیفت می‌باشد که هر چه این نسبت کوچک‌تر باشد (بدین معنی که درگ کم و نیروی لیفت زیاد است)، عملکرد پله بهتر می‌باشد.

در کل افزایش ارتفاع پله (با ثابت بودن سایر پارامترها) در سرعت‌های پایین (قبل از رژیم پروازی) مقاومت کل بدنه را افزایش می‌دهد و دلیل آن افزایش مقاومت اصطکاک به دلیل ایجاد پله می‌باشد ولی با افزایش سرعت و انجام عملیات هوادهی، فضای (تقریباً) خشک بین پله و سطح آب افزایش‌یافته و همچنین جریان از لبه پله جدا شده و مقاومت در سرعت‌های بالاتر کاهش می‌یابد. درعین حال در صورت کاهش سطح خیس تعادل دینامیکی شناور نیز می‌تواند به خطر بیافتد که در فرآیند تغییر ارتفاع پله این نکته بسیار

1 International Maritime Organization

2 High Speed Craft Code

نتایج سویتسکی بوده و دقت زیادی نخواهند داشت. ولی در مقابل، روش‌های شبیه‌سازی عددی می‌توانند برای محاسبات عملکرد بدنه‌های پله‌دار، استفاده شوند. امروزه از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات برای این منظور استفاده و نتایج حاصل، دقت بسیار خوبی را نشان می‌دهد [۱].

مبنای صحت سنجی نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر، مطالعات فریدزما [۲] می‌باشد. در تحقیق فریدزما با تغییر مرکز ثقل، مقدار بارگذاری، نسبت ابعادی بدنه و زاویه ددرایز، نتایج موثق تجربی حاصل شد که با دسته‌بندی نتایج طبق تغییرات پارامترهای فوق‌الذکر، نمودارهای ارائه‌شده در مقاله فریدزما به‌عنوان یکی از منابع مفید و پراستفاده برای بررسی هیدرودینامیک بدنه‌های بدون پله و ساده با زاویه ددرایز ثابت در طول، است.

در پژوهشی کاظمی و سالاری [۳]، از روش عددی حجم محدود به‌طور سه‌بعدی برای آنالیز هیدرودینامیک شناور تندروری بدنه تخت استفاده کردند. در این پژوهش در ۱۸ حالت شرایط بارگذاری و سرعت، تست‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی برای شناور کوگار انجام‌شده است و حالت‌هایی که منجر به ناپایداری می‌شوند، مشخص گردیده است. آگوستینو د مارکو و همکاران [۴]، به بررسی آزمایشگاهی و عددی شناور پله‌دار RIB<sup>۱</sup> پرداختند که در پژوهش مذکور از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با تکنیک شبکه‌بندی تغییرشکل‌دهنده و مرفینگ‌گرید استفاده‌شده است. برای سرعت‌های بالاتر از سرعت هامپ شبکه‌بندی همپوشان عملکرد بهتری نسبت به شبکه‌بندی مرفینگ در قیاس با نتایج تجربی دارد. در تحقیق مذکور میزان خطای نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی حداکثر ۸/۹٪ بوده است. پیام لطفی و همکاران [۵]، مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی با استفاده از حجم سیال را برای بررسی ویژگی‌های سطح بدنه شناور که حاوی یک پله عرضی است، ارائه داده‌اند. در این پژوهش مدل  $k - \epsilon$  برای بررسی اثرات توربولانسی اعمال‌شده است و شبیه‌سازی‌ها به‌طور پایا در نرم‌افزار Ansys CFX v12.1 انجام‌شده است، همچنین شبکه‌بندی غیر ساختاریافته

حائز اهمیت می‌باشد که افزایش ارتفاع پله هرچند که عملکرد هیدرودینامیکی را به‌واسطه کاهش درگ بهبود می‌بخشد ولی میزان افزایش ارتفاع بایستی تا جایی صورت گیرد که سطح خیس پاشنه از بین نرود زیرا در این صورت پایداری بدنه به خطر خواهد افتاد. تغییر ارتفاع پله به چند صورت زیر می‌تواند صورت گیرد که مدل‌های استفاده‌شده در پژوهش موجود منطبق بر موارد زیر می‌باشند:

- ارتفاع پله روی خط میانی در کف شناور کمترین مقدار بوده و با نزدیک شدن به چاین ارتفاع پله افزایش یابد.
- ارتفاع پله در کل عرض بدنه ثابت و بدون آهنگ تغییرات باشد.
- به‌منظور افزایش سطح خیس در پاشنه شناور زاویه ددرایز کاهش یابد
- تغییر ارتفاع پله در عرض شناور با آهنگ مشخصی (افزایشی یا کاهش) از نقطه میانی بدنه روی خط مبنا تا نقطه چاین در کناره بدنه تغییر کند

بر اثر تغییر ارتفاع پله پارامتر مهم دیگری که بر عملکرد شناور بسیار مؤثر است زاویه تریم است که مقدار آن متناسب با تغییر سرعت تغییر می‌کند. زاویه تریم تأثیر مهمی بر مقاومت شناور دارد و نقش مهمی را در پایداری طولی شناور ایفا می‌کند. وقتی که زاویه تریم کاهش می‌یابد، قسمت بیشتری از بدنه شناور با آب تماس پیدا کرده و سطح خیس افزایش می‌یابد. این امر از این جهت حائز اهمیت است که مقاومت اصطکاکی به‌طور خطی با میزان سطح خیس شناور تغییر می‌کند و کاهش سطح خیس شناور، دلیل مهمی برای طراحی شناورهای پله‌دار می‌باشد. در نتیجه در سرعت‌های بالا که زاویه تریم کاهش می‌یابد و منجر به افزایش سطح خیس شناور بدون پله می‌شود، استفاده از پله به‌واسطه داشتن زوایای تریم بیشتر، سطح خیس را کاهش می‌دهد. امروزه، سه روش برای تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای پله‌دار وجود دارد که عبارت‌اند از: روش‌های آزمایشگاهی، روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی. روش‌های آزمایشگاهی (مثل تست کشش و ...) زمان‌بر و پرهزینه هستند. روش‌های تحلیلی معمولاً برای هندسه‌های ساده به کار می‌روند و بر مبنای

<sup>1</sup> Rigid Inflatable Boat

توانست مقاومت کل و نیروی لیفت کل اعمالی بر هر نیم بدنه را با استفاده از روش‌های تحلیلی محاسبه کند. با بررسی تحقیقات پیشین جای خالی تحقیقی که در آن به بررسی تأثیر تغییر ارتفاع در عرض یا به عبارت دیگر تأثیر ارتفاع متغیر پله در عرض بر هیدرودینامیک شناور تندرو بپردازد خالی است، از این رو در این تحقیق به این بررسی پرداخته شده است.

## ۲- هندسه مدل‌های مورد استفاده در روند شبیه‌سازی عددی

برای مدل پایه (ساده بدون پله) نتایج تجربی مدل فریدزما در دو طول متفاوت موجود می‌باشد. در شکل ۱ می‌توان نمایی از مدل فریدزما بدون پله را مشاهده نمود و در جداول ۱ و ۲ نیز جزئیات بارگذاری و فنی مدل آورده شده است. در شکل ۲ و شکل ۳ می‌توان نمایی از بدنه‌های پله‌دار مورد استفاده در روند شبیه‌سازی‌های عددی را با ارتفاع پله منحصر به فرد و فاصله یکسان از پاشنه ترنسام (برای تمامی مدل‌های Ls یکسان می‌باشد)، مشاهده نمود. فاصله پله از پاشنه برای تمام شناورها، ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد تغییرات ارتفاع پله در عرض تفاوت دارد (بیشینه ارتفاع پله برای تمامی مدل‌ها یکسان می‌باشد). پله شناور با بدنه شماره M-01 در عرض ارتفاع متغیر داشته و در صفحه‌های جانبی بیشینه ارتفاع پله ۲۵/۵۸ میلی‌متر است و در محور مرکزی شناور روی خط مبنای بدنه ارتفاع پله به صفر می‌رسد. در جدول ۳ مشخصات مدل‌های پله‌دار استفاده شده در شبیه‌سازی عددی ارائه شده است.



شکل (۱): هندسه پایه مدل ساده فریدزما بدون پله [۲].

چهاروجهی<sup>۱</sup> بر روی مدل اعمال شده است و در شبیه‌سازی از حلقه حجم محدود به همراه مدل چند فازي هوا/ آب برای پیش‌بینی الگوی موج سطح آزاد استفاده شده است که حداکثر خطا نیز در پیش‌بینی نیروی مقاوم ۱۱/۲ درصد بوده است.

ویلیام گارلند [۶]، با معرفی پله عرضی در کف بدنه در قسمت مناسب، کاهش اساسی در نیروی مقاومت اصطکاکی را نتیجه گرفته است. برای بررسی‌های کمی در تئوری پله برای شناور، مدل NSWC/Norfolk با درجات آزادی در راستاهای پیچ و هیو در آزمایشگاه هیدرودینامیک آکادمی نیروی دریایی آمریکا مورد تست قرار گرفته است. آزمون‌های تجربی برای این شناور با بدنه ساده (بدون پله) و دارای پله با سه ارتفاع مختلف صورت گرفته است. شناور پله‌دار با بیشینه ارتفاع پله بیشترین مقادیر هیو و تریم را به خود اختصاص داده است و نیروی مقاوم آن در سرعت‌های بالاتر کاهش قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به شناور بدون پله با شرایط بارگذاری مشابه داشته است.

یکی از مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته روی هیدرودینامیک بدنه‌های تک پله مربوط به پژوهش سویتسکی [۷] می‌باشد که در نتیجه با ثبت نتایج تجربی مربوط به جریان ویک تشکیل شده در پاشنه شناورهای مدل یا در ایز ثابت در محدوده ۱۰ تا ۳۰ درجه، روابطی برای محاسبه فاصله افقی پرش جریان سیال جدا شده از پله روی خط میانی و در یک چهارم عرض بدنه شناور، حاصل شد. با استفاده از روابط به دست آمده از پژوهش سویتسکی می‌توان مثلث خیس تشکیل شده در پاشنه شناور را رسم کرد و سطح خیس پاشنه را با تقریب خوبی برای بدنه‌های با در ایز ثابت در محدوده ۱۰ تا ۳۰ درجه محاسبه نمود. مدتی بعد از سویتسکی در همان سال ساوان [۸] توانست با انجام تحقیقات کامل تجربی و تحلیلی بر روی بدنه‌های پله‌دار با در ایز ثابت در طول و استفاده از روابط ارائه شده توسط سویتسکی، روشی برای محاسبه نیروی مقاوم و نیروی لیفت بدنه‌های تک پله ارائه دهد که در روش مذکور بدنه پله‌دار به دو نیم بدنه جلویی و عقبی پله تقسیم می‌شود که با تصحیح روش سویتسکی برای محاسبه مقاومت بدنه‌های بدون پله

<sup>1</sup>Tetrahedral

جدول (۲): مشخصات هندسی مدل بدون پله فریدزما با طول ۲/۵ متری.

پارامترها	نماد	یکا	مقدار
طول کل	LOA	m	۲/۵
عرض	B	m	۰/۵
آبخور در پاشنه	TAP	m	۰/۱۱۳۷
وزن جابجایی	Δ	N	۴۷۸/۷۲۸
موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه	LCG	m	۰/۹
موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل	VCG	m	۰/۰۹۱
تریم	τ	deg	۱/۲۶
زاویه خیز کف	β	°	۲۰

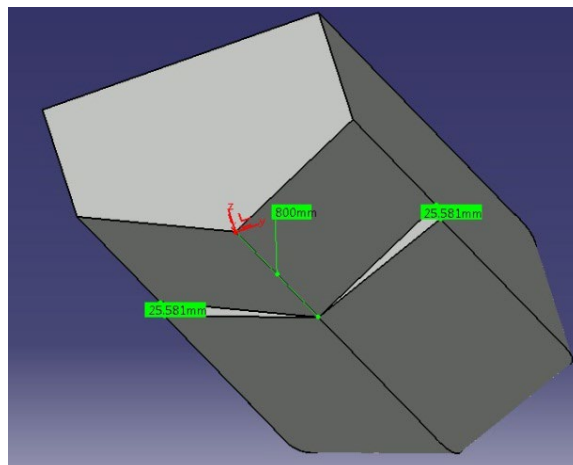
### ۳- روند شبیه‌سازی عددی تحقیق

به کمک نرم‌افزار تجاری Star CCM+ شبیه‌سازی عددی شناور مبتنی بر روش حجم محدود که دارای دو درجه آزادی در راستای هیو و پیچ است انجام گرفته است. شبیه‌سازی جریان بر پایه حل معادلات ناویر-استوکس بوده و از مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  استفاده شده است. الگوریتم SIMPLE برای کوپل کردن میدان‌های سرعت و فشار به کار گرفته شده است. علاوه بر این، روش کسر حجمی برای مشخص نمودن فازهای آب‌وهوا و سطح اشتراک آن‌ها اعمال شده است. معادلات ناویر-استوکس و بقای جرم در روابط (۱) و (۲) آورده شده است.

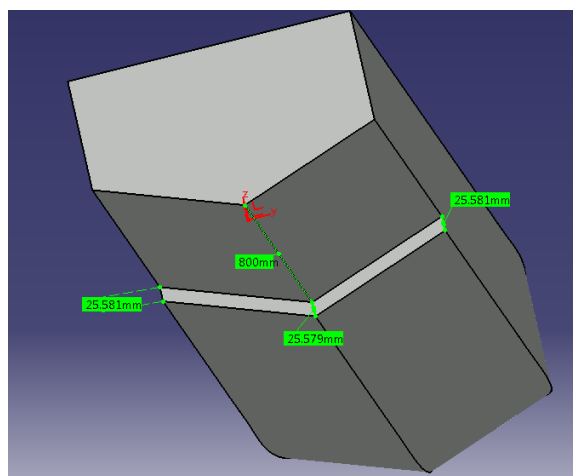
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

محدوده محاسباتی حل طوری انتخاب شده است تا اثرات شرایط مرزی بر جواب حل کمترین تأثیر ممکن را داشته باشد [۱]. فواصل در نظر گرفته شده برای محدوده حل عددی مسئله به صورت شکل ۴ در نظر گرفته شده‌اند. برای شرایط مرزی نیز همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، دیواره شناور شرط نفوذناپذیری و عدم لغزش را دارد. همچنین یکی از دیواره‌های جانبی شرط تقارن را دارد.



شکل (۲): مدل شناور با ارتفاع متغیر پله در عرض از کم به زیاد (M-01).



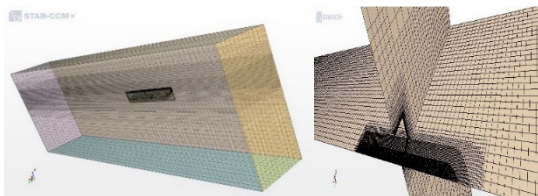
شکل (۳): مدل شناور با ارتفاع ثابت پله در عرض (M-02).

جدول (۱): مشخصات هندسی مدل بدون پله فریدزما با طول ۱/۵ متری.

پارامترها	نماد	یکا	مقدار
طول کل	LOA	m	۱/۵
عرض	B	m	۰/۳
آبخور در پاشنه	TAP	m	۰/۰۹۴۲
وزن جابجایی	Δ	N	۱۶۱/۳۷۴
موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه	LCG	m	۰/۹۷۴
موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل	VCG	m	۰/۰۸۸۲
تریم	τ	deg	۲/۲
زاویه خیز کف	β	°	۲۰

جدول (۳): مشخصات هندسی شناورهای پله‌دار.

نام مدل	طول (m)	عرض (m)	زاویه خیز کف (درجه)	موقعیت طولی مرکز جرم (فاصله از پاشنه) (mm)	موقعیت عمودی مرکز جرم (فاصله از کل) (mm)	آبخور در پاشنه (mm)
M-01	۲/۵	۰/۵	۲۰	۹۰۰	۹۳/۵	۱۲۸/۷
M-02	۲/۵	۰/۵	۲۰	۹۰۰	۹۸/۰	۱۴۲/۴



شکل (۶): شبکه‌بندی محدوده محاسباتی با استفاده از روش تریمر.

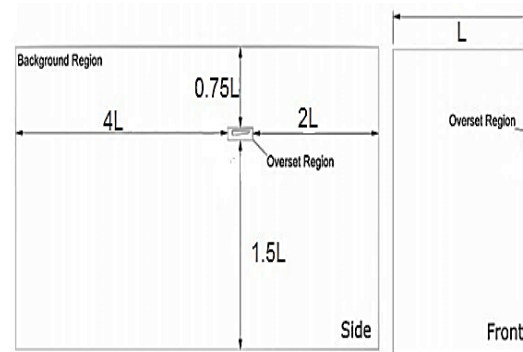
برای لایه‌مرزی توربولانت که در بسیاری از قسمت‌های سطح خیس شناور رخ می‌دهد، اندازه اولین سلول در سطح شناور نقش بسیار مهمی بر نتایج محاسباتی دارد. برای بررسی کیفیت شبکه‌بندی در لایه‌مرزی، پارامتر بی‌بعد  $y^+$  معیار مهمی محسوب می‌شود. در حقیقت این پارامتر فاصله بی‌بعد اولین سلول را از سطح نشان می‌دهد و از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau \Delta y}{\mu} \quad (3)$$

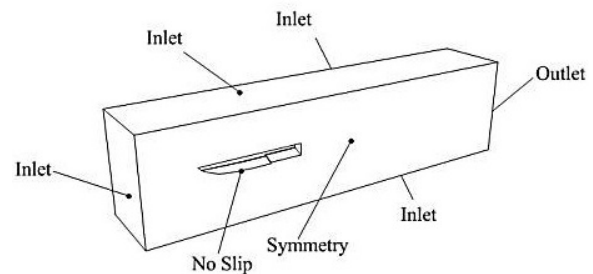
که در رابطه فوق،  $\Delta y$  فاصله بین دیواره و اولین سلول بوده و  $u_\tau$  سرعت اصطکاکی است. برای لایه‌مرزی توربولانت که از مدل توربولانسی  $k - \epsilon$  استفاده می‌کند، مقدار توصیه‌شده برای  $y^+$  بین ۵۰ تا ۱۵۰ است.

برای اعتبارسنجی حل از نتایج موجود در مقاله زراعتگر و همکاران [۱۱] استفاده شده است. در اینجا از نتایج مربوط به زاویه خیز کف ۲۰ درجه در آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس مورد آزمون قرار گرفته است، با نتایج تجربی حاصل از مدل فریدزما بدون پله ۱/۵ متری در نرم‌افزار Star CCM+ برای سرعت‌های نشان داده‌شده در جدول ۴، پردازش صورت گرفته است. مقادیر به‌دست‌آمده برای زاویه تریمر، نیروی مقاومت حاصل از حل توسط نرم‌افزار برای سرعت‌های مذکور نشان داده‌شده است. در جدول ۴ می‌توان مقایسه بین نتایج عددی و نتایج تجربی و میزان خطای آن را برای مدل ۱/۵ متری مشاهده نمود.

شرط فشار خروجی نیز در انتهای جریان اعمال شده است. بقیه مرزها نیز شرط سرعت ورودی را دارند. برای تحلیل، محدوده حل به حجم‌های محدود توسط شبکه‌بندی ساختاریافته تقسیم شده است. اندازه سلول‌ها در نواحی دیواره بدنه، سطح آزاد آب، ناحیه پشت شناور و نواحی جانبی شناور ریزتر شده است (به دلیل حساسیت رفتار جریان در این قسمت‌ها که بر مقادیر حاصل شده در نتیجه شبیه‌سازی می‌توانند تأثیر زیادی بگذارند). برای مدل‌سازی شناور متحرک از روش شبکه‌بندی اوریست استفاده شده است [۱۰] که همپوشانی نواحی متحرک بدنه شناور و ثابت اطراف شناور را منجر می‌شود. این شبکه‌بندی متحرک بوده و از روش جابه‌جایی و دوران در بدنه شناور استفاده می‌شود. در شکل ۶ می‌توان نمایی از شبکه‌بندی را مشاهده نمود.



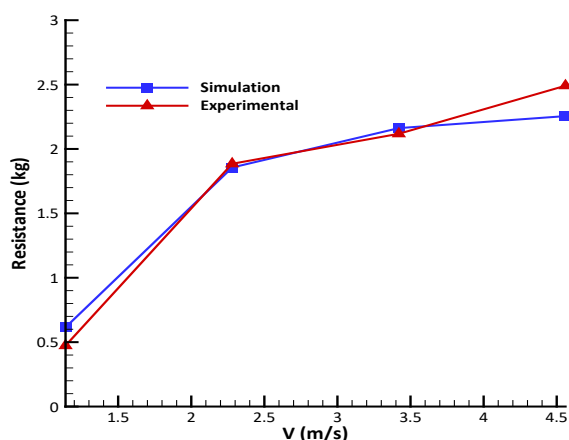
شکل (۴): محدوده محاسباتی حل [۹].



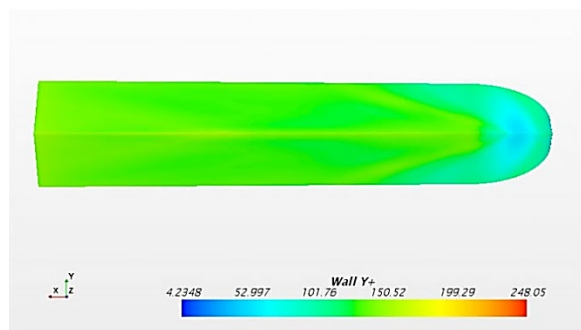
شکل (۵): شرایط مرزی موردنظر جهت شبیه‌سازی عددی تحقیق.

جدول (۴): مقایسه پارامترهای به دست آمده از حل عددی (پروژه حاضر) با مقادیر موجود در پژوهش تجربی زراعتگر و همکاران [۱۱].

V (m/s)	$Fr_L$	میزان خطا (%)	زاویه تریم (درجه)		میزان خطا (%)	نیروی مقاوم (kg)	
			زاویه تریم (مقاله حاضر)	زاویه تریم ([۱۱])		نیروی مقاوم کل (مقاله حاضر)	نیروی مقاوم کل ([۱۱])
۰	۰/۰۰	-	۲/۲	۲/۲	-	۰	۰
۱/۱۴	۰/۳۰	۲۵	۳	۲/۴	۲۴/۶۸	۰/۶۲۸	۰/۴۷۳
۲/۲۸	۰/۵۹	۲/۴۵	۵	۴/۸۸	۱/۵۶	۱/۸۵۶	۱/۸۸۵
۳/۴۲	۰/۸۹	۳/۷۲	۵/۵۷	۵/۳۷	۲/۰۳	۲/۱۶۲	۲/۱۱۸
۴/۵۶	۱/۱۹	۵/۵۷	۵/۵۷	۶/۰۹	۱۰/۴۶	۲/۲۵۵	۲/۴۹۱



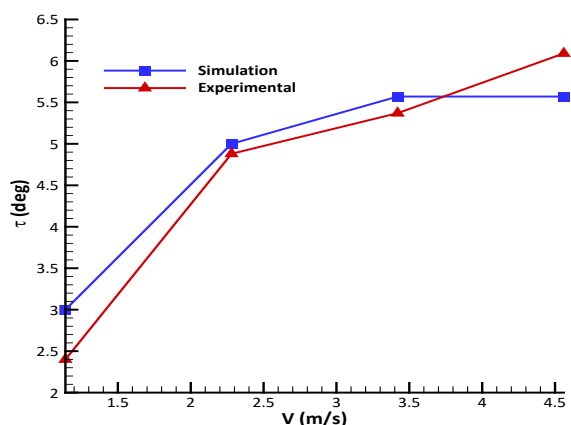
شکل (۸): اعتبار سنجی حل عددی شناور فریدزما با نتایج تجربی [۲] (نیروی مقاوم).



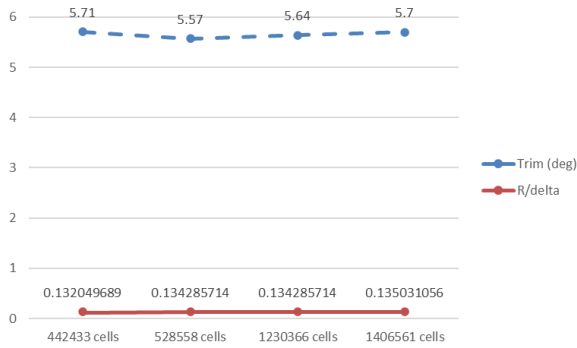
شکل (۹): توزیع تابع دیواره در سطح زیرین شناور فریدزما ۱/۵ متری در سرعت ۳/۴۳ متر بر ثانیه.

شکل‌گیری موج در اطراف این شناور را نیز در سرعت ۳/۴۳ متر بر ثانیه می‌توان در شکل ۱۱ ملاحظه نمود، همان‌طور که مشاهده می‌شود دو نوع موج در اثر حرکات شناور منتشر

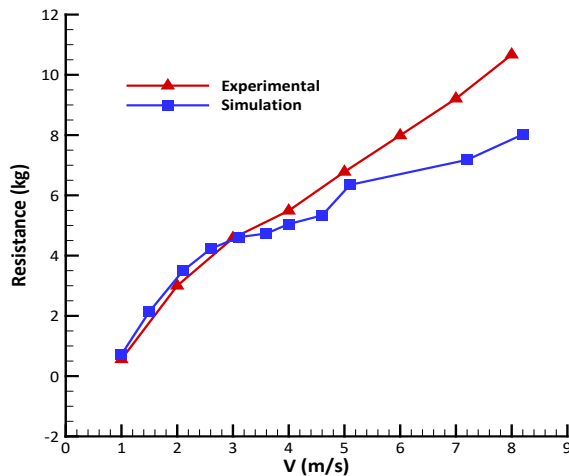
در شکل ۷ و شکل ۸ نیز مقادیر مربوط به نیروی مقاوم و زاویه تریم حاصل از حل عددی و نتایج تجربی قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است، مقادیر پارامترها که از روش عددی حاصل شده‌اند، با تقریب خوبی در سرعت‌های پایین‌تر با مقادیر تجربی همخوانی دارند. لازم به ذکر است حل بالا برای ۵۲۸۵۵۸ تعداد سلول انجام شده است. مقادیر عدد  $y^+$  و نیز توزیع فشار در کف شناور را می‌توان در شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه نمود. با نگاه بر توزیع فشار وارد بر کف مدل (شکل ۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که علت تمرکز فشار در کف شناور به این خاطر می‌باشد که در کف شناور فشار از نوع برخوردی بوده و در کناره‌ها از نوع اسپری می‌باشد و لذا مقدار کمتری است.



شکل (۷): اعتبار سنجی حل عددی با نتایج تجربی [۲] (زاویه تریم دینامیکی).



شکل (۱۲): فرآیند استقلال از شبکه‌بندی برای زاویه‌تیریم دینامیکی و نیروی مقاومت در سرعت ۳/۴۲ متر بر ثانیه.

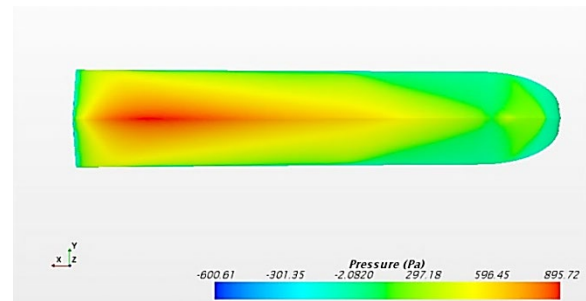


شکل (۱۳): مقایسه نیروی مقاومت حاصل از شبیه‌سازی عددی و تست‌های تجربی برای شناور ۲/۵ متری.

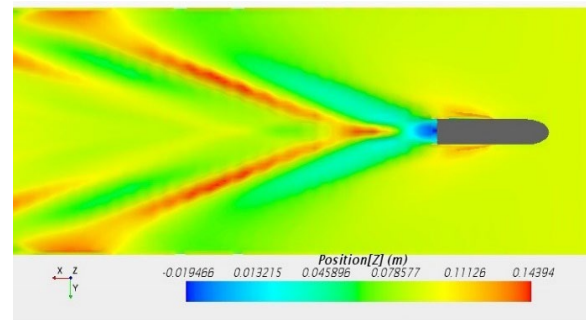
جدول (۵): مقایسه بین نیروی مقاوم برای شناور فریدزما ۲/۵ متری

V (m/s)	تجربی (kg)	نیروی مقاوم نسبت	عددی (kg)	نیروی مقاوم شبیه‌سازی	میزان خطا (%)
۲	۳	۳	۳/۴۹	۳	۱۶/۳
۳	۴/۵۸	۴	۴/۶۱	۴	۰/۷
۴	۵/۴۹	۵	۵/۰۵	۵	۸/۱
۵	۶/۷۸	۶	۶/۳۵	۶	۶/۴
۷	۹/۲۱	۹	۷/۱۸	۹	۲۲/۱
۸	۱۰/۶۷	۱۰	۸/۰۲	۱۰	۲۴/۸

می‌شود: موج عرضی و موج واگرا. علت تشکیل این امواج تداخل امواج منتشرشده در سینه و پاشنه شناور می‌باشد که باعث شکل‌گیری امواج عرضی و واگرا می‌شود.



شکل (۱۰): توزیع فشار نسبی بر سطح زیرین شناور فریدزما ۱/۵ متری در سرعت ۳/۴۳ متر بر ثانیه.



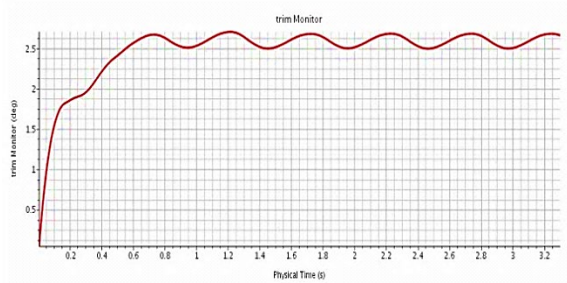
شکل (۱۱): شکل‌گیری موج در اطراف شناور در سرعت ۳/۴۳ متر بر ثانیه - مدل فریدزما ۱/۵ متری.

برای اطمینان از اینکه حل مستقل از شبکه‌بندی است، برای سرعت ۳/۴۲ متر بر ثانیه، مقادیر پارامترها برای سه تعداد شبکه‌بندی به‌دست‌آمده است.

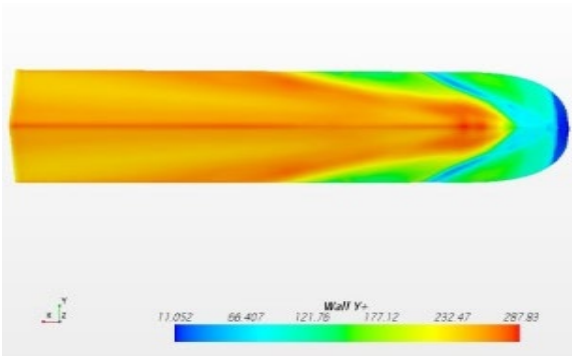
در شکل ۱۲ می‌توان برای سه تعداد سلول شبکه‌بندی، مقادیر زاویه‌تیریم و نیروی مقاوم را مشاهده نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود باوجود اینکه تعداد سلول‌ها دو و سه برابر شده است، نتایج تفاوت چندانی نکرده است ولی به دلیل رعایت محدوده صحیح  $y+$  شبکه با تعداد سلول ۵۲۸۵۵۸ استفاده شده است.

فرآیند اعتبارسنجی با شناور ۲/۵ متری نیز انجام شده است. داده‌های تجربی این شناور از آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس گرفته شده است. در جدول ۵ می‌توان مقایسه‌ای بین نتایج عددی و داده‌های تجربی برای شناور ۲/۵ متری انجام شده است و در شکل ۱۳ نیز برای نیروی مقاومت این مقایسه انجام شده است.

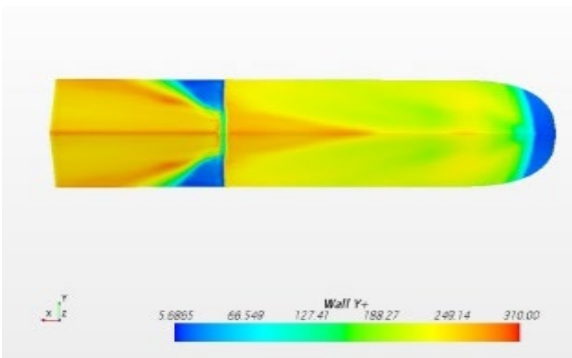




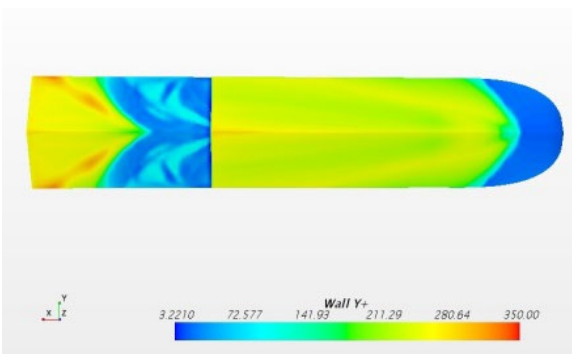
شکل (۱۵): نمودار ناپایداری شناور فریدزما ۲/۵ متری در سرعت ۱۸ نات.



شناور بدون پله

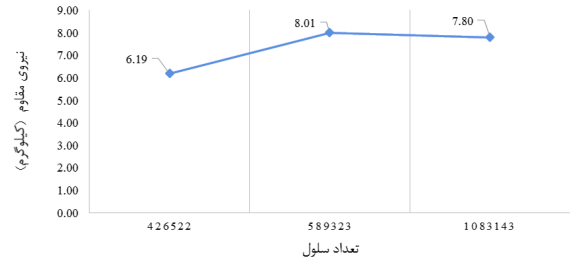


شناور M-01



شناور M-02

شکل (۱۶): کانتور توزیع عدد  $\gamma^+$  در سطح کف مدل‌های مورد بررسی در سرعت ۱۴ نات.



شکل (۱۴): استقلال از شبکه‌بندی برای نیروی مقاومت.

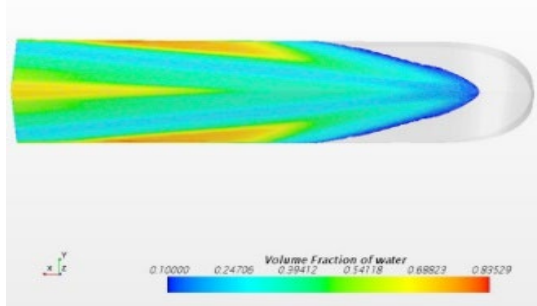
شناور فریدزما ۲/۵ متری در سرعت ۱۸ نات دچار ناپایداری می‌گردد. در شکل ۱۵ می‌توان نمودار تریم دینامیکی این شناور را در سرعت ناپایداری ملاحظه نمود که بر اثر وقوع پورپویزینگ رفتار نوسانی شناور حول محور  $Y$  باعث تغییرات جابجایی سینه و پاشنه به صورت متناوب و دوره‌ای خواهد شد که این رفتار تناوبی در نمودار تریم دینامیکی شناور نیز قابل مشاهده می‌باشد.

#### ۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تحقیق

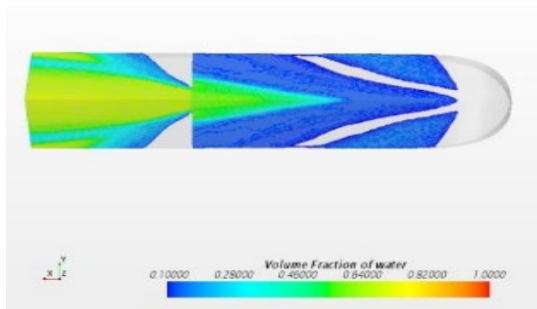
در این بخش کانتورها و نمودارهای مربوط به دو شناور پله‌دار و نیز شناور فریدزما با بدنه ساده که ویژگی‌های هیدرو دینامیکی را نشان می‌دهد آورده شده است. در شکل ۱۶ مقادیر  $\gamma^+$  برای شناور بدون پله و دو شناور دیگر در سرعت ۱۴ نات آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقدار عدد  $\gamma^+$  در این شناورها بین اعداد ۵۰ تا ۲۵۰ است که مقدار توصیه شده برای مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  است. نمودار توزیع فشار در سطح زیرین شناورهای مورد بررسی نیز در شکل ۱۷ نشان داده شده است و در شکل ۱۸ نیز می‌توان سطح خیس کف شناورها را در سرعت ۱۴ نات مشاهده نمود. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود با کاهش ارتفاع پله در عرض میزان سطح خیس شناور به میزان کمتری کاهش پیدا می‌کند و این بدان معناست که با کاهش ارتفاع پله در عرض درگ به میزان کمتری کاهش پیدا می‌کند اما به نسبت شناور بدون پله درگ کاهش می‌یابد.

با بررسی شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود که با پرش آب از روی پله یک تمرکز فشار در انتهای شناور ایجاد می‌شود و به عبارتی دارای دو مرکز فشار در کف شناور خواهیم بود.

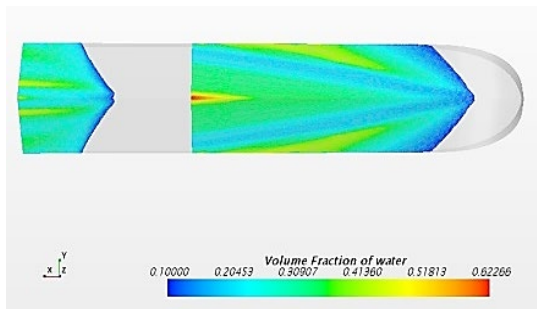
این امر اولاً به علت جدایش جریان از لبه پله و ایجاد سطح خشک در پشت پله می‌باشد و دیگری در بدنه‌های پله‌دار به دلیل افزایش زاویه‌تیریم سطح خیس نسبت به شرایط بدون پله بیشتر شده و مقاومت اصطکاکی بدنه را کاهش می‌دهد. با توجه به شکل فوق شناور بدون پله بیشترین مقدار نیروی مقاوم را دارد سپس شناور با پله ارتفاع متغیر و در ادامه کمترین میزان درگ و نیروی مقاوم مربوط به شناور با پله عرضی ارتفاع ثابت است (شکل ۱۹)؛ اما در میزان زاویه تیریم شناور برعکس بوده و بیشترین میزان تیریم مربوط به شناور با ارتفاع پله ثابت و کمترین میزان زاویه تیریم مربوط به شناور بدون پله است (شکل ۲۰).



شناور بدون پله

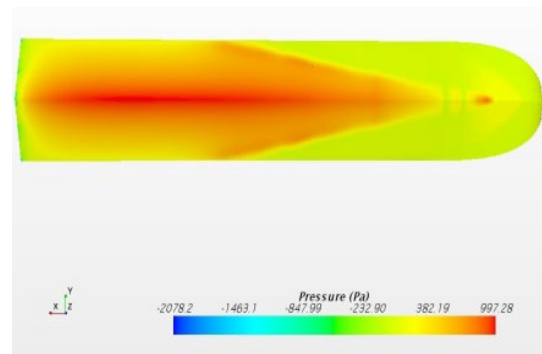


شناور M-01

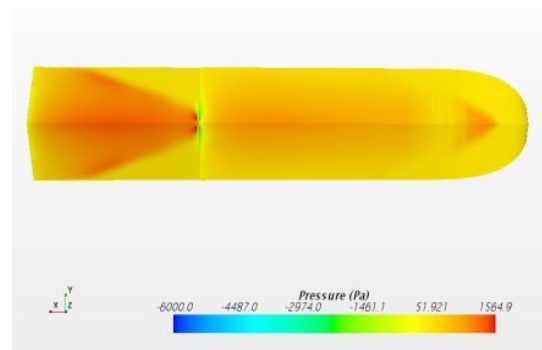


شناور M-02

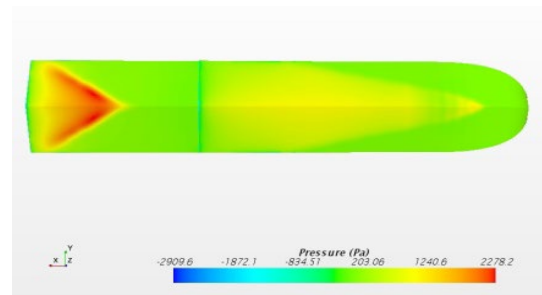
شکل (۱۸): کانتور سطح خیس شناور ( $VOF_{water} > 0.1$ ) در سطح کف مدل‌های مورد بررسی در سرعت ۱۴ نات.



شناور بدون پله



شناور M-01



شناور M-02

شکل (۱۷): کانتور توزیع فشار نسبی در سطح کف

مدل‌های مورد بررسی در سرعت ۱۴ نات.

در نبود پله، شناور در کف دارای یک مرکز فشار است و با تغییر سطح خیس کف، این مرکز شروع به جابجایی در کف شناور کرده و باعث ناپایداری دینامیکی شناور می‌شود؛ بنابراین پله با ایجاد دو مرکز فشار باعث پایداری شناور می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، ایجاد پله در کف شناور در سرعت‌های پایین (کمتر از سرعت پلنینگ) به دلیل افزایش سطح تماس بدنه با آب و افزایش درگ اصطکاکی مقاومت کل نسبت به بدنه بدون پله افزایش می‌یابد ولی با عبور از سرعت پلنینگ ایجاد پله و افزایش ارتفاع آن باعث کاهش مقادیر مقاومت کل می‌گردد و دلیل

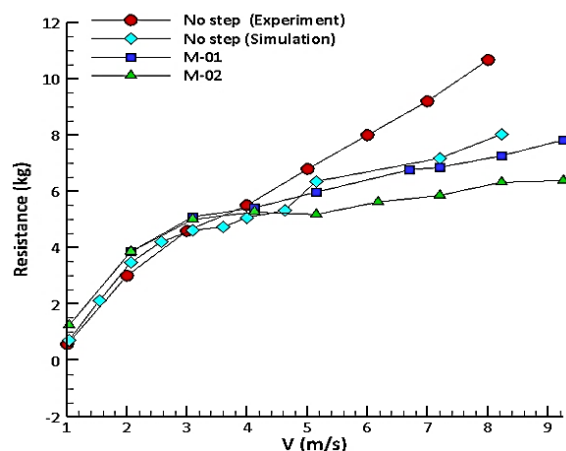
در ادامه افزایش درگ شناور؛ اما در مورد زاویه‌تریم بین مدل شناور با ارتفاع پله متغیر نسبت به ارتفاع پله ثابت، مدل ارتفاع متغیر دارای زاویه‌تریم کمتری است و دلیل این امر در سطح خیس پس از پله است که در مدل شناور با ارتفاع متغیر این سطح بیشتر بوده و بنابراین توزیع فشار هیدرودینامیکی در انتهای شناور بیشتر شده و به تبع آن زاویه‌تریم کاهش می‌یابد.

در جدول ۶ نیز مقایسه بین سرعت ناپایداری شناور بدون پله و دو شناور پله‌دار و نیز ماکزیمم مقدار نیروی مقاوم و نیز ماکزیمم مقدار تریم دینامیکی نشان داده شده است.

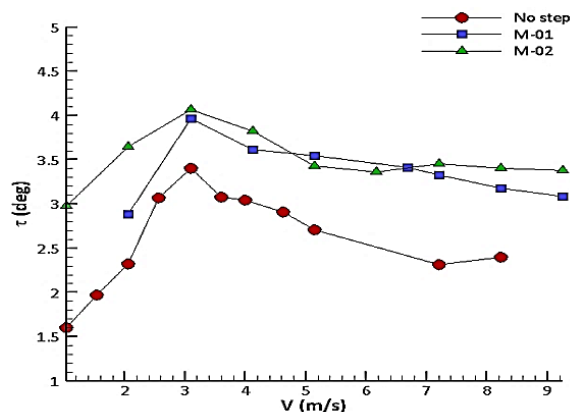
در شکل ۲۱ مقاومت کل مدل شناورها در حالت با و بدون پله با یکدیگر مقایسه شده است. میزان کاهش درگ در مدل با پله ارتفاع ثابت (M-02) بیشتر بوده اما میزان زاویه‌تریم در مدل با ارتفاع ثابت (M-01) بیشتر است. این بدین معناست که در طراحی شناور پله‌دار چنانچه هدف از طراحی فقط کاهش درگ باشد بهتر است از پله با ارتفاع ثابت در بدنه شناور استفاده کرد، اما اگر هدف کاهش درگ و افزایش پایداری باشد به نظر می‌رسد پله با ارتفاع متغیر در عرض کارایی بیشتری دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر تغییر ارتفاع پله تخت در عرض بر پارامترهای هیدرودینامیکی درگ و زاویه تریم شناور پرداخته شده است. مدل مورد استفاده در این تحقیق مدل فریدزما بوده. در ابتدا نتایج مدل بدون پله ۱/۵ و ۲/۵ متری با نتایج تجربی آزمایشگاه دریایی صحت سنجی شده است. پس از صحت سنجی دو مدل فریدزما با زاویه ددرایز، طول، عرض، وزن و مرکز ثقل، سرعت و مکان پله یکسان طراحی و تنها تفاوت آن‌ها در ارتفاع پله است. در یک مدل ارتفاع پله در عرض مدل شناور ثابت (M-02) و در دیگر مدل ارتفاع پله در عرض متغیر در نظر گرفته (M-01) در نظر گرفته شده است، شبیه‌سازی عددی با مدل بدون پله، با پله ارتفاع ثابت و پله ارتفاع متغیر انجام گرفته و نتایج حاکی از آن است که با ایجاد پله درگ شناور نسبت به مدل بدون پله کاهش و تریم آن افزایش می‌یابد، میزان کاهش درگ در



شکل (۱۹): مقایسه نیروی مقاوم بین شناور ساده و دو شناور پله‌دار.



شکل (۲۰): مقایسه زاویه‌تریم دینامیکی بین شناور ساده و دو شناور پله‌دار.

این نتایج را می‌توان بدین صورت توجیه کرد که در شناور بدون پله از آنجایی که سطح خیس شناور نسبت به شناور پله‌دار بیشتر می‌باشد بنابراین شناور نیروی مقاوم و درگ بیشتری خواهد داشت با ایجاد پله در شناور از آنجایی که سطح خیس شده شناور با پرش آب از روی پله کمتر خواهد شد بنابراین این کاهش درگ توجیه‌پذیر است. از طرفی در مقایسه بین شناور با ارتفاع پله ثابت و متغیر همان گونه که در نتایج به دست آمده مشاهده شد، میزان درگ و نیروی مقاوم شناور با ارتفاع متغیر بیشتر از مدل شناور با ارتفاع ثابت بیشتر بود، دلیل این امر را نیز در همان سطح خیس می‌توان یافت. با تغییر ارتفاع پله در عرض میزان پرش آب از کیزان پرش در حالتی که ارتفاع پله در عرض ثابت است کم‌تر است و این یعنی بیشتر شدن سطح خیس و

hydrodynamic performance of one-and doubled-stepped planing flat plates: A numerical simulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2020;234(1):181-95.

[2] Fridsma G. A systematic study of the rough-water performance of planing boats. Stevens Inst of Tech Hoboken NJ Davidson Lab; 1969.

[3] Kazemi H, Salari M. Effects of loading conditions on hydrodynamics of a hard-chine planing vessel using CFD and a dynamic model. International Journal of Maritime Technology. 2017;7:11-8.

[4] De Marco A, Mancini S, Miranda S, Scognamiglio R, Vitiello L. Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull. Applied Ocean Research. 2017;64:135-54.

[5] Lotfi P, Ashrafizaadeh M, Esfahan RK. Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water. Ocean engineering. 2015;94:103-10.

[6] Garland WR. Stepped planing hull investigation. United States Naval Academy. 2010.

[7] Savitsky D, Morabito M. Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls. Marine Technology and SNAME news. 2010 Jan 1;47(01):1-6.

[8] Svahn D. Performance prediction of hulls with transverse steps. A Report of Masters Thesis, The Royal Institute of Technology, KTH, Centre for Naval Architecture. 2009.

[9] ITTC Specialist Committee. Recommended procedures and Guidelines-Practical Guidelines for Ship CFD Applications. In Proceedings of the 26th International Towing Tank Conference. Rio de Janeiro 2011 (p. 18).

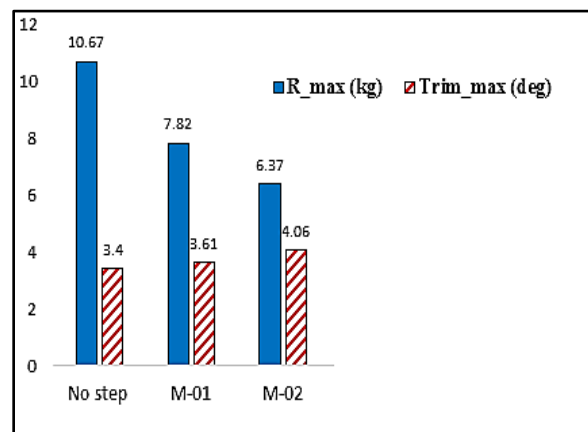
[10] Dashtimanesh A, Tavakoli S, Kohansal A, Khosravani R, Ghassemzadeh A. Numerical study on a heeled one-stepped boat moving forward in planing regime. Applied Ocean Research. 2020 Mar 1;96:102057.

[۱۱] ح. زراعتگر، ح. قاسمی، ع. ا. م. آهنگری، ع. عسگری، س. ا. هاشمی. بررسی اثر تغییر زاویه خیز کف شناور منشوری پروازی بر مقاومت، تریم و بالا آمدگی به روش تست مدل و فرمول‌های تجربی (رگراسیونی). پنجمین همایش ملی شناورهای تندرو، ۱۳۹۵.

مدل با پله ارتفاع ثابت بیشتر بوده (حدود ۴۰ درصد) اما میزان زاویه‌تریتم در مدل با ارتفاع ثابت بیشتر است. می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در طراحی شناور پله‌دار چنانچه هدف از طراحی فقط کاهش درگ باشد بهتر است از پله با ارتفاع ثابت در بدنه شناور استفاده کرد، اما اگر هدف کاهش درگ و افزایش پایداری باشد به نظر می‌رسد پله با ارتفاع متغیر در عرض کارایی بیشتری دارد زیرا در این‌گونه پله‌ها زاویه‌تریتم نسبت به شناور بدون پله بیشتر ولی از مدل با ارتفاع پله ثابت کمتر است.

**جدول (۶):** مقایسه سرعت ناپایداری و ماکزیمم مقدار نیروی مقاوم و زاویه‌تریتم دینامیکی.

نوع شناور	نیروی درگ حداکثر (kg)	حداکثر زاویه‌تریتم (deg)	سرعت شروع ناپایداری (knot)
No step	۱۰/۱۴-۶۷/۵	۳/۴	۱۸-۲۰
M-01	۷/۸۲	۳/۶۱	۱۸
M-02	۶/۳۷	۴/۰۶	۲۰



**شکل (۲۱):** مقایسه ماکزیمم مقدار نیروی مقاوم و تریتم دینامیکی برای شناورهای مورد مطالعه.

## ۶- مراجع

[1] Dashtimanesh A, Roshan F, Tavakoli S, Kohansal A, Barmala B. Effects of step configuration on



## Numerical Investigation of the Effect of Changes in the Height of the Transverse Step at the Zero-step Angle on the Hydrodynamic Performance of the Single Body Planning Vessel

M. J. Ameri<sup>1</sup>, H. Ahmadi-Danesh-Ashtiani<sup>2\*</sup>, A. Najafi<sup>3</sup>, H. Kazemi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

### HIGHLIGHTS

- Determining the effect of step height changes in width in the design of high-speed vessels at different speeds and body parameters.
- Determining the best step on the hydrodynamic performance of the planing vessels
- Introducing a new method in the design of stairs in high-speed stepped planing vessels.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 28 January 2023

Received in revised form: 8 February 2023

Accepted: 3 March 2023

Available online: 3 March 2023

\*Correspondence:

[h\\_a\\_danesh@azad.ac.ir](mailto:h_a_danesh@azad.ac.ir)

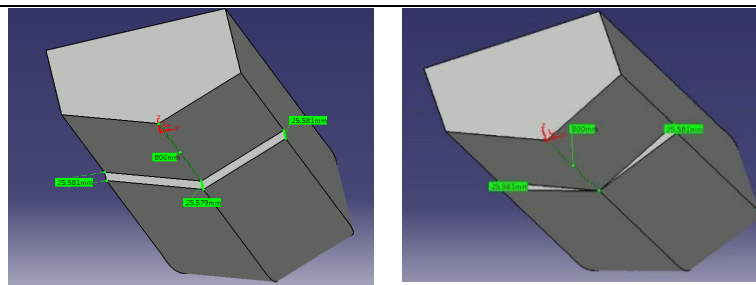
#### How to cite this article:

M.J. Ameri, H. Ahmadi-Danesh-Ashtiani, A. Najafi, H. Kazemi. Numerical investigation of the effect of changes in the height of the transverse step at the zero-step angle on the hydrodynamic performance of the single body planning vessel. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023; 19(3):33-45.

#### Keywords:

Transverse step  
Transverse step's height  
Planing vessel  
Numerical simulation  
Moving network technique

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ABSTRACT

Most of the researches on the effect of the step on the hydrodynamics of the stepped vessels have considered uniform step height across the width. This gap prompted the researchers to investigate the effect of the variable height of the step in the width on the hydrodynamic performance of the planing vessels. For this purpose, three Frisima models have been selected, including one model without steps and two models with steps that have variable step height in width. The basis for choosing the triangular change is the uniform change of the height of the step in the width. Comparing the results of the float without steps with other vessels with steps has led to obtaining useful information about the hydrodynamic characteristics of the variable height of the step in width compared to the fixed height of the vessels. In this research, two models with transverse steps and a simple vessel (without steps) were compared in terms of hydrodynamic characteristics such as trim angle value, drag-to-lift ratio, wet surface value and total resistance force, and the most optimal model was determined. The results show that the step with fixed height reduces the resistance force about 30 percent and has a greater drag reduction than the step with variable height. But in the step with variable height, the trim is less than the step with the same height. In the designs, attention should be paid to both.