

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1400.7.1.9.0](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1400.7.1.9.0)

درصد همانندی: ۱٪

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناورهای پله‌دار به روش تحلیلی

ریحانه اسکندری^۱، علیرضا بینش^{۲*}، مصطفی منفرد مسقانی^۳

eskandari.rh@gmail.com

binesh@mut.ac.ir

mmonfared@mut.ac.ir

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^{۲*} نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

چکیده

استفاده از پله عرضی روشی برای کاهش مقاومت اصطکاکی و افزایش سرعت شناورهاست. در شناورهای سرشی با افزایش سرعت و وارد شدن به ناحیه سرشی و جدا شدن آب از پله، سطح خیس شده کاهش یافته و در نتیجه نیروی پسا کاهش خواهد یافت. در این پژوهش یک روش مناسب تحلیلی برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی شناورهای سرشی پله‌دار ارائه شده و نتایج حاصل از این روش با داده‌های آزمایشگاهی یک شناور مشخص پله‌دار برای سه ارتفاع پله با ابعاد ۲، ۴ و ۶ درصد عرض، اعتبارسنجی شده است. در روش یادشده با استفاده از روابط نیمه تجربی موجود برای ابعاد هندسی موج ایجادشده در پاشنه شناورهای سرشی، روش ساویتسکی توسعه داده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش توسعه یافته نسبت به روش ساویتسکی عملکرد بسیار بهتری داشته و تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. پس از اعتبارسنجی روش ارائه شده، اثر پارامترهای هندسی شامل ارتفاع پله، موقعیت قرارگیری مرکز جرم و فاصله مکانی پله روی مشخصات هیدرودینامیکی شناور مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر بهینه برای این پارامترها به دست آمده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، روش تحلیلی ارائه شده کاربرد مؤثری در طراحی و بررسی رفتار هیدرودینامیکی زیر بدنه شناورهای پله‌دار سرشی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: شناور سرشی پله‌دار، مشخصه‌های هیدرودینامیکی، ارتفاع و موقعیت مکانی پله، زاویه تریم، نیروی پسا

۱. مقدمه

شناورهایی که در سطح دریا حرکت می‌کنند به سه دسته شناورهای جابه‌جایی، نیمه جابه‌جایی و سرشی تقسیم

می‌شوند. تا زمانی که شناورها ساکن هستند یا با سرعت کمی حرکت می‌کنند در دسته شناورهای جابه‌جایی قرار می‌گیرند. هم‌اکنون کارخانه‌ها در ساخت شناورهایی با سرعت زیاد

معادله انتگرال مرزی از قضیه گرین^۵ روی سطح خیس و آزاد بدنه گرفته شده و تهویه در پاشنه با فرمول تجربی دکتر^۶ تخمین زده شده است. این روش برای به دست آوردن سه نوع از شناورهای سرشی که شامل صفحه تخت^۷، گوه‌ای شکل و شناورهای سرشی با زاویه عرضی^۸ مختلف به کار برده شده و خصوصیات هیدرودینامیکی آن‌ها برای سرعت‌های مختلف محاسبه شده است. نتایج عددی توزیع فشار، نیروی پسا، نیروی برآ و ارتفاع موج برای سه هندسه مختلف بدنه برآورد شده و نشان داده شد که تطابق خوبی با داده‌های آزمایشی دارد [۳].

یوسفی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ روش‌های موجود برای تجزیه و تحلیل بدنه‌های سرشی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای ارائه مطالعه‌ای جامع در مورد روش‌های موجود رویکردها را به دو دسته تقسیم کردند: روش تحلیلی-تجربی و روش‌های عددی.

هر روش برای طیف محدودی از موارد قابل استفاده است. آن‌ها روش‌های المان محدود، حجم محدود و روش المان مرزی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این موضوع بود که روش المان محدود دقت مناسبی برای تحلیل ساختاری شناورها دارد، روش المان مرزی مناسب‌ترین روشی است که شامل الگوهای موج می‌شود، هرچند برای جریان‌های لزج با سطح آزاد مختلط توصیه نمی‌شود و در نهایت روش حجم محدود مناسب‌ترین روش برای جریان‌های آشسته سطح آزاد است [۴].

کیم^۹ و همکارانش در سال ۲۰۱۳، سه بدنه سرشی که تقریباً دارای جابه‌جایی و ابعاد یکسان بودند را در نظر گرفتند. ویژگی‌های هیدرودینامیکی این بدنه‌ها در سرعت بالا با استفاده از آزمایش‌های مدل تخمین زده شد. آزمایش‌هایی در امواج منظم برای اندازه‌گیری هیو^{۱۰} و پیچ^{۱۱} مدل انجام شد. هدف آن‌ها طراحی شناورهای سرعت بالا برای بهبود مقاومت و عملکرد دریامانی^{۱۲} بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که زاویه عرضی کوچک بر کاهش مقاومت اثر می‌گذارد، اما باعث حرکت‌های شدید عمودی در موج می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد بهبود عملکرد دریامانی با بزرگ

مانند قایق‌های مسابقه‌ای و ماهیگیری ورزشی از شناورهای پله‌دار استفاده می‌کنند. شناورهای سرشی پله‌دار بیشتر با روش سعی و خطا توسعه یافته‌اند. هزینه اصلاح بدنه این نوع شناورها در مقایسه با هزینه اجرای مطالعات تجاری کمتر است. شرکت‌ها به انتشار اطلاعاتی که در این حوزه به دست آورده‌اند؛ تمایلی ندارند و به این صورت از سود و منفعت خود محافظت می‌کنند. بیشترین پژوهش‌ها در این زمینه مربوط به شناورهای آب‌نشین است. محققان همچنین با توسعه روش ساویتسکی تا حدودی توانایی پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیک بدنه‌های سرشی پله‌دار را نیز پیدا کرده‌اند [۱] و [۲].

توجه به شناورهای سرشی از دیرباز تاکنون مورد توجه معماران شناور بوده است. ساویتسکی^۱ در سال ۱۹۶۴، رفتار شناورهای سرشی را مورد بررسی قرار داد و یک روش تجربی برای پیش‌بینی ترمیم و مقاومت شناورهای سرشی بدون پله ارائه داد. قبل از پژوهش صورت گرفته توسط ساویتسکی، محققان مختلف، شناورهای سرشی را برای توصیف خصوصیات هیدرودینامیکی آن‌ها در ترمیم ثابت و طول خیس شده میانگین و سرعت مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف ساویتسکی توسعه معادله‌های تجربی بوده که به ویژگی‌های فیزیکی مختلف شناورهای سرشی، شامل نیروی برآ، نیروی پسا، نیروی پیچ و ناحیه سطح خیس شده بدنه وابسته است. به همین منظور مجموعه آزمایش‌های مدل در آزمایشگاه دیویدسان^۲ روی شناورهای سرشی در ترمیم ثابت انجام شد. نیروی برآ، مقاومت، ترمیم، طول خیس شده میانگین به نسبت عرض^۳ اندازه‌گیری شد. همه اطلاعات جمع‌آوری شده آنالیز شد و ارتباط تجربی بین خصوصیات هیدرودینامیکی مختلف در این نوع شناورها استخراج شد. این روش سال‌هاست که برای معماران شناور بسیار مفید است، زیرا روشی سریع برای تخمین مستقیم عملکرد خطی شناورهای سرشی بدون پله در آب‌های آرام است [۱].

کهنسال و قاسمی در سال ۲۰۱۰ میلادی یک الگوریتم عددی مبنی بر روش المان مرزی^۴ برای پیش‌بینی خصوصیات هیدرودینامیکی فرم شناورهای سرشی مختلف ارائه کردند.

کردن نسبت طول به عرض امکان‌پذیر است [۵].

در سال ۲۰۱۵ بررسی عددی شناورهای سرشی پله‌دار در آب آرام با یک پله عرضی با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم سیال توسط لطفی و همکارانش انجام شد. در این پژوهش یک روش جدید سعی و خطا برای شبیه‌سازی حالت پایدار میدان جریان اطراف بدنه ارائه شد [۶].

محمود سالاری و همکارانش در سال ۱۳۹۴ تأثیر هوادهی به پله‌های عرضی شناورهای تندرو سرشی بر کاهش قله منحنی مقاومت آن‌ها را با بررسی رفتار هیدرودینامیکی دو مدل بدنه، یکی بدون پله عرضی و دیگری با یک پله عرضی در حوضچه کشش به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد تا قبل از مرحله سرشی، مقاومت حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد بیشتر بوده و بعد از مرحله سرش مقاومت ۵ درصد کاهش یافته است. هوادهی پشت پله راه‌کاری مناسب برای کاهش منحنی "مقاومت-سرعت" در شروع مرحله سرشی این شناورهاست [۷].

قاسمی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ هیدرودینامیک یک شناور سرشی پله‌دار را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای سرشی با مدل ساویتسکی تعمیم یافته شده برای شناورهای بدون پله و پله‌دار بررسی شد. خصوصیات هیدرودینامیکی مؤثر شناور با یک برنامه محاسباتی پیش‌بینی شد. نتایج حاصله نشان داد که در بدنه بدون پله افزایش زاویه عرضی بدنه و موقعیت مرکز جرم باعث افزایش نیروی پسا می‌شود [۸].

در سال ۲۰۱۶ ارزیابی معادله دینامیکی برای شناورهای سرشی با هندسه دلخواه و زاویه عرضی بدنه مختلف با استفاده روش محاسباتی نیمه تجربی که پایه آن روش ساویتسکی است، توسط اسکاتر^{۱۳} و همکاران انجام شد. در نتیجه برای شناورهای با چاین^{۱۴} سخت، شدت نیروی برآ و فشار مرکزی برای موازنه دینامیکی و نیروی پسا برای رژیم سرشی تعیین شد [۹].

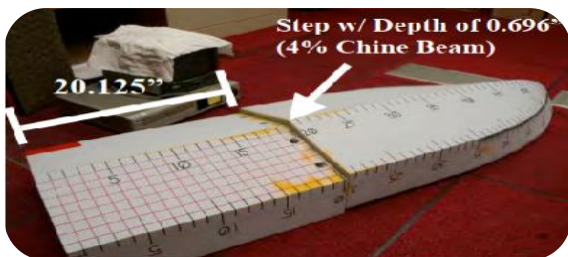
دی مارکو^{۱۵} و همکارانش در سال ۲۰۱۷، آنالیز عددی و

تجربی روی شناورهای سرشی پله‌دار را انجام دادند. نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی با هم مقایسه و تطابق خوبی ارائه شد. به دلیل وزن پایین و حساسیت بدنه مدل به نیروهای خارجی، از روش پایین تراست^{۱۶} استفاده شد. نتایج نشان داد که گردابه‌ها در منطقه خیس نشده بدنه در سرعت‌های بالاتر از ۲/۳۶ متر بر ثانیه ظاهر می‌شوند. آزمایش حوضچه کشش بیانگر این موضوع بود که ناحیه خیس نشده پشت بدنه تقریباً تحت تأثیر گردابه‌های سه‌بعدی است که از پشت هوا در دو طرف پله ایجاد شده‌اند [۱۰].

در سال ۲۰۱۷، دشتی منش و همکارانش روش ساده شده برای محاسبه تریم و مقاومت شناورهای سرشی دوپله‌ای را ارائه کردند. مدل ریاضی ساویتسکی تعمیم و با استفاده از تئوری خطی و یک، یک مدل جدید ریاضی پیشنهاد داده شد. برای تأیید مدل از داده‌های تجربی موجود استفاده شد. روش محاسباتی و الگوریتم محاسباتی برای تعیین تریم و مقاومت بدنه‌های دو پله‌ای ارائه و توسعه داده شد [۱۱].

دشتی منش و همکارانش در سال ۲۰۲۰، تأثیر عدم تقارن یک شناور تک پله‌ای بر مشخصات عملکردی آن را به صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج حاصله، نیروی پسای وارد بر وسیله در سرعت‌های مورد مطالعه قرار داده شده در حدود ۲۵٪ با قرارگیری شناور در شرایط عدم تقارن افزایش یافته است [۱۲]. بیلانندی و همکارانش تأثیر زاویه پاشنه بر عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای تک پله‌ای و دو پله‌ای را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصله بیانگر این موضوع بود که زاویه پاشنه تأثیر کمتری بر عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور دو پله‌ای دارد [۱۳]. اسفندیاری و همکارانش در سال ۲۰۲۰، به روش عددی، عملکرد یک شناور بدون پله و دو پله‌ای را در آب موج بررسی کردند. در این پژوهش هیو، پیچ و شتاب عمودی دو شناور برای بررسی رفتار دینامیکی آن‌ها مورد تحلیل قرار داده شد و نشان دادند که در طول امواج بزرگ‌تر از طول شناور، دامنه هیو برای حالتی که دو پله به انتهای شناور اضافه شده است، بین ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش یافته است. همچنین پیچ شناور با وجود پله‌های مورد اشاره در حدود ۱۸ تا ۳۲ درصد کاهش یافته

در سرعت بالا به طور کامل از پله جدا شده و یک ناحیه خشک بین پله تا نقطه‌ای بین پله و انتهای شناور به وجود آمده است. تصور اشتباهی است که استفاده از پله باعث افزایش سرعت شناور می‌شود، در صورتی که به کارگیری پله مناسب سبب می‌شود تا مرکز جرم این نوع شناورها در مقایسه با شناورهای بدون پله در فاصله دورتری از پاشنه قرار داشته باشد و در نتیجه وسیله عملکرد مناسبی در سرعت بالا داشته باشد. مزیت دیگر پله، ایجاد نیروی پسای هامپ کمتر در سرعت گذراست.



شکل ۱. موقعیت مکانی پله مدل [۱۷]

روش ساویتسکی نیاز به اصلاح و ترکیب با یک روش جدید دارد تا بتوان رفتار شناور پله‌دار را پیش‌بینی کرد. در این بخش مدل‌های ریاضی برای شناورهای پله‌دار ارائه و تشریح شده است. فرض بر این است که شناور در سرعت ثابت و بدون شتاب در حال حرکت است. نیروهای وارد بر شناور در راستاهای عمودی و افقی در شکل ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، نیروهای اصلی وارد به شناور در راستای عمودی، نیروهای برآ و وزن هستند، اما زمانی که شناور دارای زاویه تریم است؛ مؤلفه‌ای از نیروی پسای اصطکاکی و نیروی پیشران نیز در این راستا قرار می‌گیرند، بنابراین:

$$\begin{aligned} \uparrow: N_1 \cos \tau_1 + N_2 \cos \tau_2 + T \sin(\tau_2 + \varepsilon) - \\ mg - D_{f1} \sin \tau_1 - D_{f2} \sin \tau_2 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

همچنین معادله مربوط به نیروهای وارد بر وسیله در راستای افقی به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \rightarrow: T \cos(\tau_2 + \varepsilon) + N_1 \sin \tau_1 - N_2 \sin \tau_2 - \\ D_{f1} \cos \tau_1 - D_{f2} \cos \tau_2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

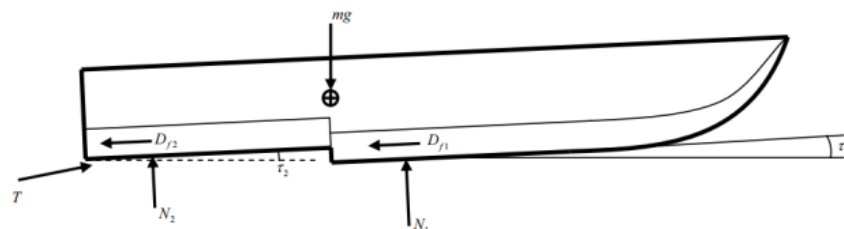
است [۱۴]. ساجدی و قدیمی، تأثیر محل پله بر پدیده پروپوزینگ یک شناور را به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که شناور بدون پله در سرعت ۸ متر بر ثانیه دچار پدیده پروپوزینگ شده در صورتی که شناور تک پله در این سرعت کاملاً پایدار بوده است. همچنین نتایج نشان داد، چنانچه محل پله با فاصله بیشتری از انتهای شناور قرار داده شود، وسیله پایدارتر خواهد بود [۱۵]. نجفی و همکارانش، در سال ۲۰۲۱، سطح خیس شده یک شناور دو پله‌ای را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. به همین منظور نیروی پسا، طول جدا شده، تریم وسیله و سطح خیس شده در هندسه‌های مختلف از دو پله عرضی در سرعت‌های سرشی بررسی شد [۱۶].

وضعیت کنونی مطالعات نشان می‌دهد که بخش اعظمی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه در ارتباط با شکل ظاهری بدنه شناورهای سرشی پله‌دار و بدون پله هستند. بنابراین در این پژوهش، یک روش مناسب و اعتبارسنجی شده برای بررسی تأثیر خصوصیات هندسی پله عرضی مانند ارتفاع و عرض پله بر نیروی مقاوم و زاویه تریم دینامیکی شناورهای سرشی پله‌دار ارائه شده است.

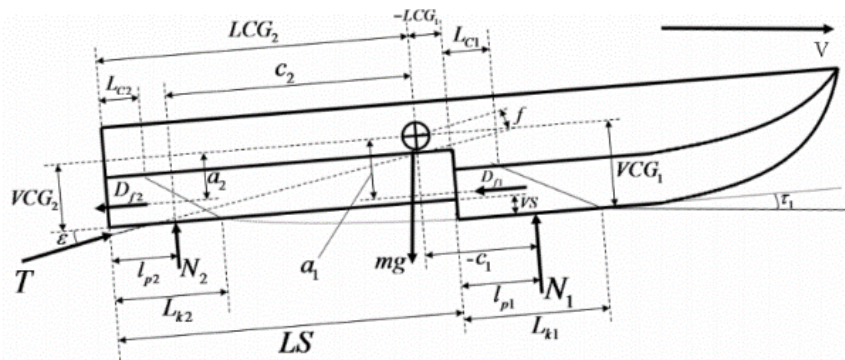
۲. تئوری

همان‌طور که بیان شد، همه شناورها تا زمانی که با سرعت کم حرکت می‌کنند در دسته شناورهای جابه‌جایی قرار می‌گیرند. در این پژوهش فرض می‌شود که شناور در سرعت کروز قرار دارد. شناورهای سرشی برخلاف دو نوع شناور دیگر، تقریباً بیشتر نیروی برآی خود را از فشار هیدرودینامیکی تولید می‌کنند. طراحی بدنه‌ای با پله عرضی باعث می‌شود سطح خیس شده کاهش و در نتیجه نیروی پسا کاهش یابد.

در سرعت‌های بالا جریان از پله عرضی جدا شده و باعث کاهش مقاومت بدنه پله‌دار نسبت به بدنه بدون پله عرضی می‌شود. در این پژوهش مشابه روش ساویتسکی و با استفاده از استخراج کد محاسباتی، مشخصه‌های هیدرودینامیکی یک شناور سرشی تک بدنه‌ای پله‌دار محاسبه و پیش‌بینی شده است. شکل ۱ نشان‌دهنده یک نمونه شناور پله‌دار است. آب



شکل ۲. نیروهای اصلی وارد به شناور پله‌دار [۱۷]



شکل ۳. نیروهای وارد به شناور پله‌دار همراه با زاویه تریم [۱۷]

مقدار اولیه زاویه تریم انتخاب شد، ضریب برآ صفحه تخت از نمودارهای طراحی ارائه شده توسط ساویتسکی تکرار شده یا پیدا می‌شود. با استفاده از ضریب برآ صفحه تخت، میانگین طول خیس شده به نسبت عرض از جدول‌های طراحی دوباره استخراج می‌شود. با استفاده از میانگین طول خیس شده نسبت به عرض، مرکز فشار برای نیروی برآ از یک معادله تجربی محاسبه می‌شود. مرکز فشار نقطه‌ای است که در آن نیروی برآ در سطح سرشی عمل می‌کند. مقاومت اصطکاکی به وسیله ناحیه سطح خیس شده و ضریب اصطکاکی اسکونر^{۱۷} محاسبه می‌شود. ضریب اصطکاکی اسکونر از نمودارهای طراحی محاسبه می‌شود. با استفاده از وزن شناور، نیروی برآ سرشی، نیروی پیشران و مقاومت اصطکاکی، گشتاور حول موقعیت مرکز جرم محاسبه می‌گردد. زاویه تریم مکرراً تکرار می‌شود تا زمانی که گشتاور صفر شود. در سرعت‌های بالا جریان از پله عرضی جدا شده و باعث کاهش مقاومت بدنه پله‌دار نسبت به بدنه بدون پله عرضی می‌شود [۱].

۲-۲. اصلاح روش ساویتسکی

در این تحقیق مشابه روش ساویتسکی و با استفاده از استخراج کد محاسباتی، مشخصه‌های کلی یک شناور سرشی تک بدنه

گشتاور حول مرکز جرم برای شناور پله‌دار با استفاده از شکل ۳ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N_1 c_1 + N_2 c_2 + D_{f1} a_1 + D_{f2} a_2 - T \cdot f = 0 \quad (3)$$

$$a_1 = VCG_1 - \frac{b_1}{4} \tan \beta_1 \quad (4)$$

$$a_2 = VCG_2 - \frac{b_2}{4} \tan \beta_2 \quad (5)$$

$$f = (VCG_2 + e) \cos \epsilon - LCG_2 \sin \epsilon \quad (6)$$

باید توجه کرد که مقدار c_1 منفی می‌باشد. بنابراین در معادله ۳ اولین مقدار یعنی $N_1 c_1$ منفی می‌شود. LCG_1 مانند LCG در بدنه بدون پله اندازه گیری می‌شود و پله مانند پاشنه شناور است. در این مورد این بدان معنی است که مرکز ثقل پشت پاشنه واقع شده که این غیرممکن است. بنابراین برای دورتر شدن مرکز ثقل تعدادی پله باید به مدل اضافه شود.

۱-۲. روش ساویتسکی

در این پژوهش شناور به دو ناحیه جلو و پشت پله تقسیم می‌شود. برای قسمت جلو شناور، از روش ساویتسکی برای حدس تریم به روش سعی و خطا استفاده می‌شود. در روش ساویتسکی حل روش پیش‌بینی شناور سرشی با انتخاب یک مقدار صحیح برای زاویه تریم آغاز می‌شود. هنگامی که

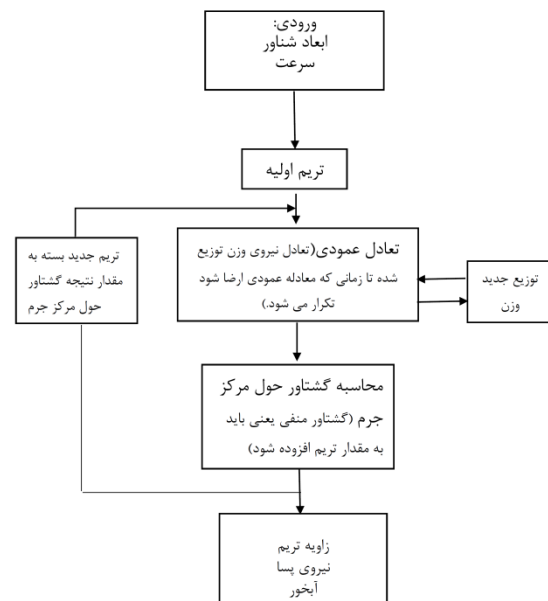
است. نتایج به دست آمده از کد محاسباتی و مقایسه آن با تست تجربی نشان از تطابق خوب بین نتایج کد نوشته شده و نتایج تجربی محاسبه شده برای این شناور است. در این بخش ابتدا ارتفاع پله ۲ درصد، ۴ درصد و ۶ درصد عرض در کد وارد شده، نیروی پسا و تریم ارتفاع پله‌های مورد اشاره با نتایج تجربی مقایسه شده است.

جدول ۱. ابعاد مدل تجربی مورد مطالعه [۲]

طول کل	۱/۵ متر
طول بین دو عمود	۱/۴ متر
طول چابن	۱/۴۶ متر
عرض ماکزیمم	۰/۴۵ متر
عرض چابن	۰/۴۴ متر
زاویه خیز کف	۱۵°
جابه‌جایی	۲۶/۰۵۸ کیلوگرم
طول مرکز جرم (از پاشنه به جلو)	۰/۶ متر
ارتفاع مرکز جرم	۰/۰۷۶۲ متر
زاویه شفت	۱۰°
طول پله تا پاشنه	۰/۵۱ متر

مدل ساویتسکی به‌طور کلی کاهش تریم با افزایش سرعت را پیش‌بینی کرده است. نتایج مدل ساویتسکی بیانگر اختلاف زیاد این مدل با مدل پله‌دار گارلند است. به همین منظور برای کاهش این خطا در این مطالعه از روش ساویتسکی اصلاح شده استفاده شده است، همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، در مقایسه با داده‌های تجربی، روش ساویتسکی اصلاح شده از دقت بیشتری برخوردار است. در شکل ۵ تغییرات تریم بر حسب سرعت در ارتفاع پله ۲ درصد در سه روش تجربی، ساویتسکی و اصلاح شده ساویتسکی ارائه شده است. نتایج بیانگر کاهش زاویه تریم با افزایش سرعت در ناحیه سرشی است. از سرعت ۳/۹۶ متر بر ثانیه تا سرعت ۵/۴۹ متر بر ثانیه، نمودار تریم تجربی و ساویتسکی اصلاح شده اختلاف نسبتاً زیادی با یکدیگر دارند، اما با افزایش سرعت این دو نمودار به هم نزدیک شده و درصد اختلاف تریم به دست آمده از روش تجربی و ساویتسکی اصلاح شده کاهش یافته است.

پله‌دار محاسبه شده است. محاسبات برای ناحیه جلو شناور دقیقاً مشابه روش ساویتسکی است، اما برای بدنه عقب شناور نیاز به داشتن چندین پارامتر خواهد بود. در این روش مشابه روش ساویتسکی عمل می‌شود و درصدی از وزن شناور را در قسمت جلو پله و درصد دیگر در عقب پله در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم ابتدا ۰/۶ درصد از وزن شناور به قسمت جلو شناور و مابقی به پشت پله اختصاص داده شده است و در یک حلقه تازمانی که نیروی برآ جلو و عقب شناور برابر وزن شناور شود، این حلقه تکرار می‌شود. هنگامی که نیروهای تعادلی محاسبه شدند، آنگاه گشتاور حول مرکز جرم برآورد می‌شود [۱۷]. الگوریتم مورد استفاده در روش ساویتسکی اصلاح شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

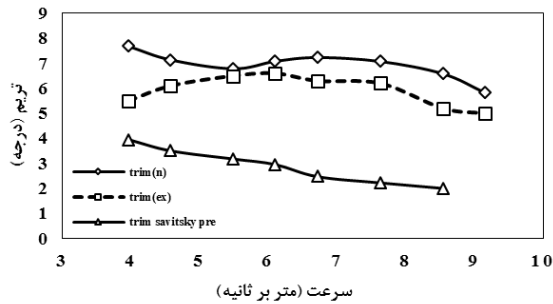


شکل ۴. الگوریتم روش ساویتسکی اصلاح شده مورد استفاده در این پژوهش

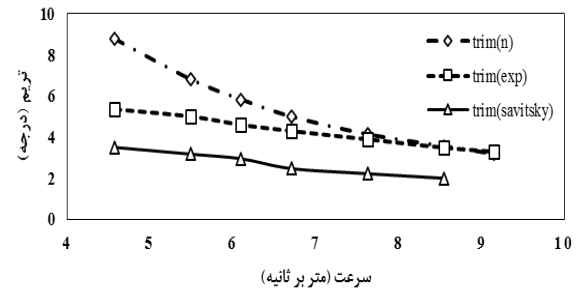
۳. اعتبارسنجی نتایج

با توجه به عدم دسترسی به نتایج تجربی مناسب برای شناورهای سرشی برای تأیید صحت حل، از نتایج مدل یک شناور تک بدنه‌ای استفاده شده است. مشخصات بدنه شناور نمونه در جدول ۱ ارائه شده است.

برای اعتبارسنجی شناور نمونه در ۷ سرعت ۴/۵۷۵، ۴/۴۹، ۵/۴۹، ۶/۱، ۶/۷۱، ۷/۶۲۵، ۸/۵۴ و ۹/۱۵ متر بر ثانیه مدل‌سازی شده



شکل ۷. تغییرات تریم برحسب سرعت از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۶ درصد عرض



شکل ۵. تغییرات تریم برحسب سرعت از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۲ درصد عرض

تغییرات نیروی پسا برحسب سرعت در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است نیروی پسای محاسبه‌شده از کد محاسباتی، بیشتر از مقدار تجربی در ارتفاع پله ۲ درصد عرض است، اما شیب هر دو نمودار تقریباً مشابه تغییر می‌کند.

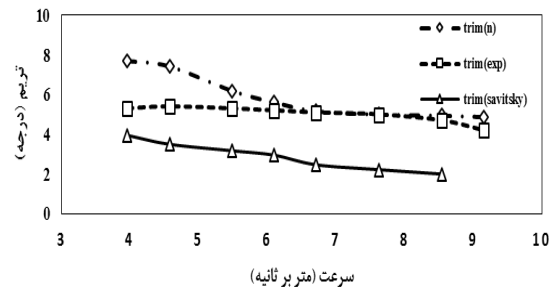
عدد فرود حجمی یک عدد بدون بعد است که بر اساس سرعت، شتاب گرانش زمین و حجم جابه‌جایی تعریف می‌شود:

$$F_{nV} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}}} \quad (7)$$

عدد فرود حجمی معرف بدون بعد بهتری نسبت به عدد فرود استاندارد است، زیرا طول میانگین شناور با تغییر سرعت تغییر می‌کند. طبق معادله بالا شناورهایی که مقدار F_{nV} کمتر از ۱، بین ۱ و ۳ و بیشتر از ۳ است، به ترتیب در محدوده جابه‌جایی، نیمه جابه‌جایی و سرشی قرار دارند. در این جا مقدار ∇ حجم جابه‌جایی در نظر گرفته شده است.

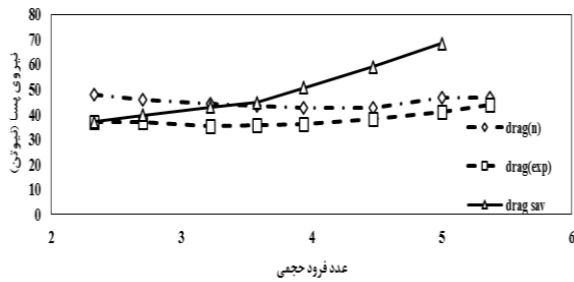
شکل ۹ بیانگر نیروی پسا برحسب فرود حجمی برای ارتفاع ۲ درصد عرض است. نیروی پسای برآورد شده از روش ساویتسکی اصلاح‌شده نتایج بهتری را نسبت به روش ساویتسکی ارائه می‌کند. همان‌طور که از نتایج مشخص است، با ورود به ناحیه سرشی، درصد اختلاف نتایج تجربی و عددی نیز کاهش یافته است. به طوری که در سرعت ۹/۱۵ متر بر ثانیه، میزان اختلاف ۰/۲۹ درصد است که بیانگر دقت بسیار زیاد کد محاسباتی در برآورد نیروی پسا است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در ارتفاع پله ۴ درصد عرض، اختلاف تریم به‌دست آمده از روش ساویتسکی اصلاح‌شده و روش تجربی، بسیار اندک است. همچنین مانند ارتفاع پله ۲ درصد در این ارتفاع پله نیز کاهش زاویه تریم با افزایش سرعت مشاهده می‌شود. در این شکل تقریباً از سرعت ۵/۴۵ متر بر ثانیه، نتایج حاصل از روش ساویتسکی اصلاح‌شده تطابق بسیار خوبی با تریم تجربی داشته است. همچنین تریم محاسبه‌شده از روش ساویتسکی اختلاف زیادی با مقدار تجربی را نشان می‌دهد.



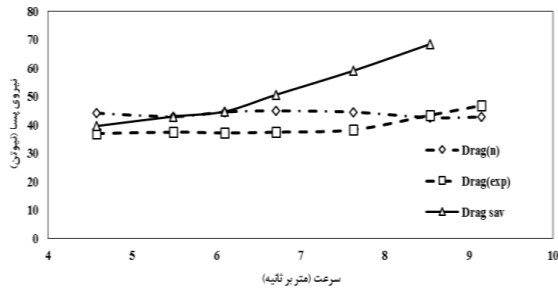
شکل ۶. تغییرات تریم برحسب سرعت از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۴ درصد عرض

در شکل ۷ تریم‌های حاصل از سه روش تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده در ارتفاع پله ۶ درصد عرض نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، اختلاف بسیار زیادی بین تریم به‌دست آمده از روش ساویتسکی و تریم تجربی وجود دارد. همچنین از سرعت ۵/۴۵ متر بر ثانیه تا ۹/۱۵ متر بر ثانیه نتایج تجربی و روش ساویتسکی اصلاح‌شده تطابق بسیار خوبی دارند. اختلاف زیاد مقادیر تریم تجربی و روش ساویتسکی بیانگر این است که روش ساویتسکی، رفتار شناور پله‌دار را به خوبی پیش‌بینی نمی‌کند.

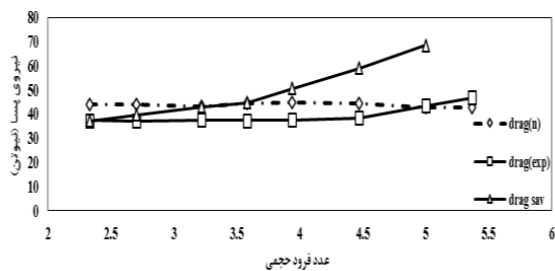


شکل ۱۰. تغییرات نیروی پسا برحسب عدد فرود حجمی از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۴ درصد عرض

مشابه تغییرات نیروی پسا برحسب سرعت و عدد فرود حجمی برای ارتفاع‌های پله ۲ و ۴ درصد عرض، نمودارهای مذکور برای ارتفاع پله ۶ درصد عرض نیز به شرح زیر ارائه شده است.

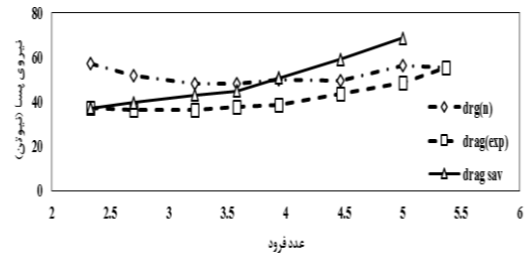


شکل ۱۱. تغییرات نیروی پسا برحسب سرعت از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۶ درصد عرض



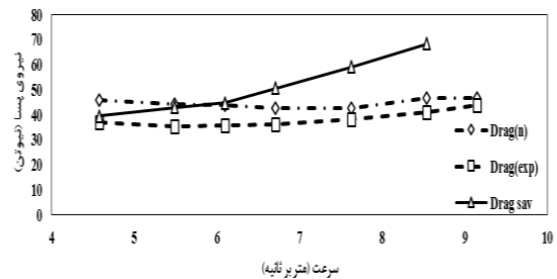
شکل ۱۲. تغییرات نیروی پسا برحسب عدد فرود حجمی از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۶ درصد عرض

میانگین اختلاف میان مقادیر نیروی پسا در سرعت‌های مختلف و درصد ارتفاع‌های متفاوت برای روش ساویتسکی اصلاح‌شده و روش تجربی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۸. تغییرات نیروی پسا برحسب عدد فرود حجمی از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۲ درصد عرض

در شکل ۹ تغییرات نیروی پسا برحسب سرعت در ارتفاع پله ۴ درصد عرض نشان داده شده است. مشخص است که هر دو نمودار تجربی و عددی روند تغییراتی یکسانی دارند. کمترین درصد اختلاف ایجادشده از نتایج تجربی و عددی در سرعت ۹/۱۵ متر بر ثانیه بوده که برابر با ۵/۹۵ درصد است.



شکل ۹. تغییرات نیروی پسا برحسب سرعت از روش‌های تجربی، ساویتسکی و ساویتسکی اصلاح‌شده برای ارتفاع پله ۴ درصد عرض

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، با وارد شدن به ناحیه سرشی و عدد فرود حجمی بیشتر از ۳، مقادیر دو نمودار تجربی و ساویتسکی اصلاح‌شده تطابق بسیار بالایی دارند. در مقادیر عدد فرود حجمی ۳ و بالاتر که بیانگر ورود به ناحیه سرشی است، شیب نمودار نیروی پسا به صورت تدریجی افزایش یافته است و این بدان معناست که با افزایش سرعت در ناحیه سرشی، نیروی پسا نیز افزایش یافته است. شیب بیشتر نمودار ساویتسکی نسبت به عدد فرود حجمی، بیانگر افزایش بیشتر نیروی پسای پیش‌بینی‌شده با افزایش سرعت است.

تریم شناور در ارتفاع پله‌های ۲ و ۴ درصد عرض کاهش یافته و برای ارتفاع پله ۶ درصد عرض، تغییرات تریم با سرعت، بسیار کم است. در سایر ارتفاع‌های پله، تا یک سرعت مشخص تریم شناور افزایش و روندی کاهشی را دنبال می‌کند.

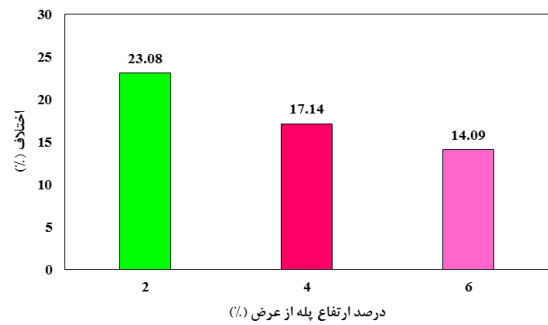
همچنین تغییرات نیروی پسا شناور برحسب سرعت نیز بیانگر این است که کمترین میزان نوسانات و در نهایت مقدار نیروی پسا در سرعت‌های مختلف متعلق به شناور با ارتفاع پله‌های ۴ و ۶ درصد عرض است. بنابراین براساس مجموعه تغییرات نیروی پسا و تریم شناور برحسب سرعت، می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع پله ۶ درصد عرض، بهینه‌ترین حالت است.

۴-۲. موقعیت مکانی مرکز جرم

در ادامه با تغییر در موقعیت مکانی مرکز جرم (فاصله از پاشنه تا پله) عملکرد شناور مورد بررسی قرار داده شد. در این بررسی نیروی پسا و تریم در پنج مرکز جرم مختلف مورد ارزیابی قرار داده شده است به این شکل که به مرکز جرم اولیه به نسبت‌های ۵ و ۱۰ درصد طول پشتی شناور (LS) اضافه و کم شده است.

مقایسه تریم در مرکز جرم‌های مختلف نشان می‌دهد که جابه‌جایی مرکز جرم به سمت جلو شناور، سبب کاهش تریم شده است، بنابراین کمترین و بیشترین تریم در مراکز جرمی LCG2+.1LS و LCG2-.1LS قرار دارد.

شکل تغییرات مقادیر نیروی پسا در سرعت‌های مختلف برحسب تغییر موقعیت مکانی مرکز جرم نیز مشابه با تغییرات تریم است و با جابه‌جایی مرکز جرم به سمت جلو شناور، نیروی پسا کاهش یافته است. در نتیجه کمترین و بیشترین نیروی پسا در مراکز جرمی LCG+.1LS و LCG-.1LS رخ داده است. پس در ارتفاع پله ۶ درصد عرض با تغییر در موقعیت مرکز جرم و بررسی پنج حالت مختلف این نتیجه حاصل شد که اگر موقعیت مرکز جرم به اندازه ۱۰ درصد طول پشتی پله (LS) اضافه شود شناور به شرایط بهینه‌تری خواهد رسید و کاهش تریم و نیروی پسا را در پی خواهد داشت.



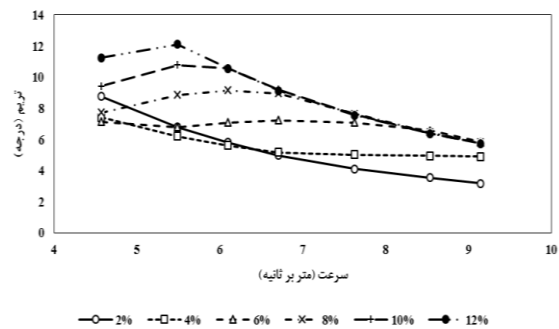
شکل ۱۳. میانگین اختلاف درصد میان مقادیر نیروی پسا در سرعت‌های مختلف و درصد ارتفاع‌های متفاوت برای روش ساویتسکی اصلاح شده و روش تجربی

۴. مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی پسا و تریم شناور

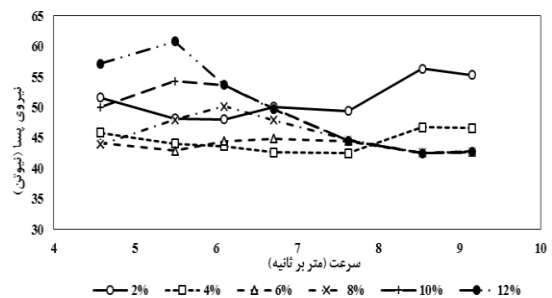
در این بخش از پژوهش تأثیر ارتفاع پله، موقعیت مکانی پله از پاشنه و موقعیت مکانی مرکز جرم روی نیروی پسا و تریم شناور بررسی شده است.

۴-۱. ارتفاع پله

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان‌دهنده تغییرات تریم و نیروی پسا شناور در سرعت‌های مختلف برحسب ارتفاع پله‌های ۲ تا ۱۲ درصد عرض است.



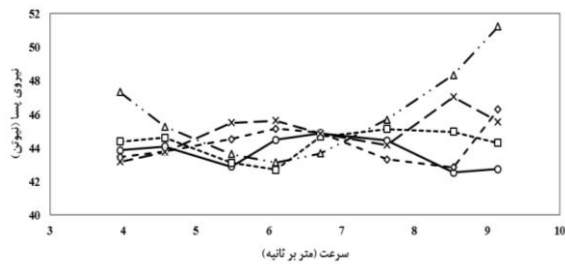
شکل ۱۴. تغییرات تریم برحسب سرعت در ارتفاع پله مختلف



شکل ۱۵. تغییرات نیروی پسا برحسب سرعت در ارتفاع پله مختلف

همان‌طور که از شکل ۱۴ مشخص است، با افزایش سرعت،

کاهش تریم قابل توجهی به دست آمده است. همچنین تغییرات نیروی پسا نشان می‌دهد که در موقعیت طولی اولیه پله عرضی، کمترین نیروی پسا حاصل شده است.



—○— LS -□- LS+1b2 -◇- LS-1b2 -△- LS+2b2 -×- LS-2b2

شکل ۱۹. تغییرات نیروی پسا بر حسب سرعت

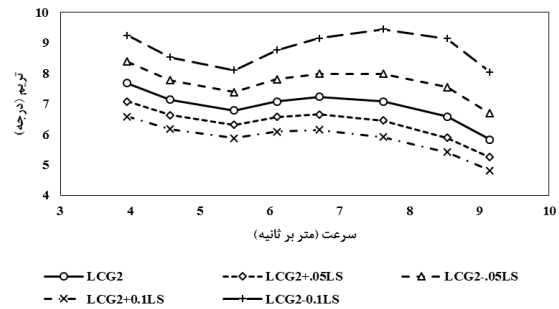
در موقعیت مکانی مختلف پله

۵. نتیجه گیری

با اضافه کردن پله عرضی به شناور می‌توان مقدار سطح خیس شده شناور و در نتیجه نیروی پسای وارد به شناور را کاهش و در نتیجه عملکرد شناور در سرعت‌های بالا را بهبود بخشید.

مقایسه نتایج تجربی و ساویتسکی نشان داد که روش ساویتسکی نمی‌تواند پیش‌بینی خوبی را در مورد شناورهای پله‌دار ارائه کند و به همین دلیل باید روش ساویتسکی برای شناورهای پله‌دار اصلاح شود. به همین منظور در این پژوهش با توسعه کد محاسباتی، روش ساویتسکی اصلاح شده و برای شناورهای پله‌دار استفاده شده است. در نتیجه، ابتدا به منظور اعتبارسنجی روش توسعه داده شده، نتایج مربوط به یک شناور پله‌دار، شامل نیروی پسا و تریم در سرعت‌ها و ارتفاع پله‌های مختلف با داده‌های تجربی مقایسه شده است. مقایسه نتایج بیانگر دقت مناسب روش توسعه داده شده برای استخراج مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناورهای پله‌دار است. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف شامل؛ ارتفاع پله، موقعیت مکانی پله از پاشنه و موقعیت مکانی مرکز جرم روی مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناورهای پله‌دار مطالعه شده است.

بررسی‌ها نشان داد که ارتفاع پله تأثیر بسزایی روی تریم و نیروی پسای شناور دارد. به همین منظور در ارتفاع پله‌های مختلف ۲ تا ۱۲ درصد عرض، مطالعات انجام شد و بهینه‌ترین عملکرد هیدرودینامیکی شناور در ارتفاع پله ۶ درصد عرض

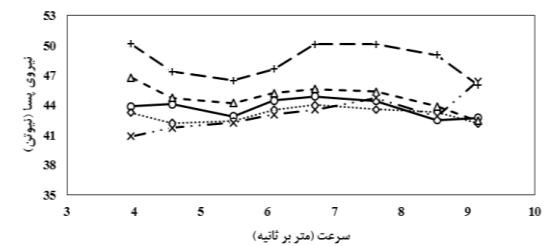


—○— LCG2 -□- LCG2+0.5LS -◇- LCG2-0.5LS

-×- LCG2+0.1LS -△- LCG2-0.1LS

شکل ۱۶. تغییرات تریم بر حسب سرعت

در موقعیت مکانی مختلف مرکز جرم



—○— LCG2 -□- LCG2+(0.5LS) -◇- LCG2-(0.5LS)

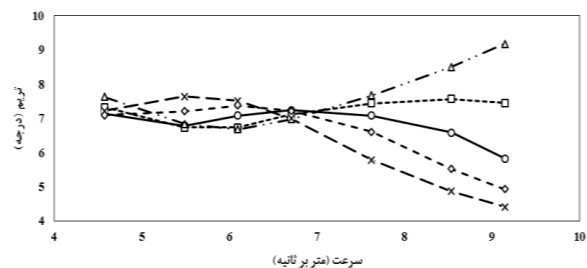
-×- LCG2+(0.1LS) -△- LCG2-(0.1LS)

شکل ۱۷. تغییرات نیروی پسا بر حسب سرعت

در موقعیت مکانی مختلف مرکز جرم

۳-۴. موقعیت مکانی پله از پاشنه

در این بخش از پژوهش با تغییر در طول فاصله پله از پاشنه (LS) نیروی پسا و تریم شناور مطالعه شده است. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ تغییرات نیروی تریم و پسا بر حسب سرعت در موقعیت‌های مختلف مکانی پله از پاشنه شناور ارائه شده است.



—○— LS -□- LS+1b2 -◇- LS-1b2 -△- LS+2b2 -×- LS-2b2

شکل ۱۸. تغییرات تریم بر حسب سرعت در موقعیت مکانی مختلف پله

بنابراین موقعیت مکانی طول پشت پله اولیه ۱۰ و ۲۰ درصد عرض کاهش و افزایش داده شده و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده است.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۱۸، در موقعیت طولی LS+0.2b بیشترین مقدار تریم حاصل شده و در LS-0.2b

- 15;94:103-10.
- [V] سالاری محمودی، سیف محمد سعید، تیموری مهدی. تحلیل تجربی تأثیر هوادهی به پله‌های عرضی شناورهای تندرو سرشی بر کاهش قله منحنی مقاومت آن‌ها. دریا فنون. ۱۳۹۴؛ (۱)۲: ۲۲-۳۲.
- [8] Ghassemi H, Kamarlouei M, Veysi ST. A hydrodynamic methodology and CFD analysis for performance prediction of stepped planing hulls. Polish Maritime Research. 2015(2):23-31.
- [9] Schachter RD, Ribeiro HJ, Da Conceição CA. Dynamic equilibrium evaluation for planing hulls with arbitrary geometry and variable deadrise angles-The virtual prismatic hulls method. Ocean Engineering. 2016 Mar 15;115:67-92.
- [10] 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 Mar 1;64:135-54.
- [11] Dashtimanesh A, Tavakoli S, Sahoo P. A simplified method to calculate trim and resistance of a two-stepped planing hull. Ships and Offshore Structures. 2017 Mar 13;12(sup1):S317-29.
- [12] 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.
- [13] Bilandi RN, Dashtimanesh A, Tavakoli S. Hydrodynamic study of heeled double-stepped planing hulls using CFD and 2D+ T method. Ocean Engineering. 2020 Jan 15;196:106813.
- [14] Esfandiari A, Tavakoli S, Dashtimanesh A. Comparison between the dynamic behavior of the non-stepped and double-stepped planing hulls in rough water: a numerical study. Journal of Ship Production and Design. 2020 Feb 1;36(01):52-66.
- [15] Sajedi SM, Ghadimi P, Ghadimi A, Sheikholeslami M. Experimental appraisal of hydrodynamic performance and motion of a single-stepped high-speed vessel in calm water and regular waves. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2021 Sep;235(17):3223-35.
- [16] Najafi A, Nowruzi H, Ameri MJ, Karami M. An experimental study of the wetted surfaces of two-stepped planing hulls. Ocean Engineering. 2021 Feb 15;222:108589.

به دست آمد. از مقایسه تریم در مرکز جرم‌های مختلف این نتیجه به دست آمد که جابه‌جایی مرکز جرم به سمت جلو شناور، سبب کاهش تریم شده و بنابراین کمترین و بیشترین تریم در مراکز جرمی $LS+0.2b$ و $LS-0.2b$ استخراج شد.

از دیگر مواردی که بر عملکرد شناور تأثیر خواهد داشت موقعیت مکانی پله است. از نتایج استنباط شد که در موقعیت طولی $LS+0.2b$ بیشترین مقدار تریم حاصل شده و در موقعیت طولی $LS-0.2b$ کاهش تریم قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. همچنین تغییرات نیروی پسا نشان می‌دهد که در موقعیت طولی اولیه پله عرضی، کمترین نیروی پسا به دست آمده است.

سپاسگزاری

این مطالعه با حمایت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا انجام شده است. از پشتیبانی مادی و معنوی صورت گرفته کمال تقدیر و تشکر را داریم.

مراجع

- [1] LEE EA. Advancements in the Analysis of Stepped Planing Hulls [Dissertation]. Blacksburg, Virginia;2014.
- [2] Garland WR. Stepped planing hull investigation. Society of naval architects and marine engineering. 2010; 119448-455.
- [3] Kohansal AR, Ghassemi H. A numerical modeling of hydrodynamic characteristics of various planing hull forms. Ocean Engineering. 2010 Apr 1;37(5-6):498-510.
- [4] Yousefi R, Shafaghat R, Shakeri M. Hydrodynamic analysis techniques for high-speed planing hulls. Applied ocean research. 2013 Aug 1;42:105-13.
- [5] Kim DJ, Kim SY, You YJ, Rhee KP, Kim SH, Kim YG. Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2013 Mar 1;5(1):161-77.
- [6] Lotfi P, Ashrafizaadeh M, Esfahan RK. Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water. Ocean engineering. 2015 Jan

[17] 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 Jun.

پی نوشتها

1. Savitsky
2. Davidson
3. Aspect ratio
4. Boundary element method (BEM)
5. Green's theorem
6. Doctor's formula
7. Flat plate
8. Dead rise
9. KIM
10. Heave
11. Pitch
12. Seakeeping
13. Schachter
14. Chine
15. De Marco
16. Down thrust
17. Schoenher