بررسی تجربی تاثیر پارامترهای هندسی پله‌های عرضی بر درگ شناور تندروی تک بدنه در زوایای جانبی مختلف بدنه شناور

محمدجوادعامری[۱]، حسین احمدی‌دانش‌آشتیانی[۲]، امین نجفی[۳]*، حمید کاظمی[۴]

[۱]دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب،mjameri1397@gmail.com
[۲]استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب،hdanesh1381@yahoo.com
[۳]استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)،najafi.sharif@yahoo.com
[۴]استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)،stableboat.90@hotmail

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۶/۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

کلمات کلیدی:
شناور تندرو
پله‌ی عرضی
ارتفاع پله
مکان پله
روابط تحلیلی

چکیده

با بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه شناورهای تندرو، تحقیقات محدودی در راستای بررسی رفتار و سایر پارامترهای هیدوردینامیکی شناورهای پله‌دار انجام گرفته است. با توجه به این نکته که این نوع از شناورها نسبت به شناورهای تندروی مشابه می‌توانند عملکرد هیدرودینامیکی مناسبتری داشته باشند، تحقیق و مطالعه در این راستا جزو نیازها و اولویت طراحان می‌باشد. براساس این هدف در این پژوهش به بررسی تاثیر المان هیدرودینامیکی پله‌ی عرضی بر درگ شناور تندروی تک بدنه پرداخته شده است. از آنجا که در این تحقیق به دنبال ارائه نتایج کلی بوده لذا تحقیقات تجربی انجام شده در این پژوهش بر روی مدل فریدزما در آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج فارس، در سه زاویه جانبی مختلف در سرعت‌ها و پارامترهای مختلف هندسی پله (شامل ارتفاع‌ها و مکان‌های مختلف پله)، انجام گرفته و در خروجی بخش تجربی تحقیق؛ مکان و ارتفاع بهینه پله در زوایای جانبی مختلف بررسی شده است. از دیگر دستاوردهای خروجی این تحقیق می‌توان به روند ساخت مدل جدیدی از شناور که هم‌زمان می‌تواند ترکیبی از چند مدل باشد اشاره کرد.

Experimental Study of Geometric Parameters of transverse Steps on High Speed vessels drag at different deadrise angle of the vessels body

Mohammad javad Ameri[1], Hossein Ahmadi danesh[2], Amin Najafi[3]*, Hamid Kazemi[4]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, *mjameri1397@gmail.com*
[2] Assistant Professor, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, *hdanesh1381@yahoo.com*
[3] ***Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, najafi.sharif@yahoo.com***
[4]*Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, stableboat.90@hotmail*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 26 Aug 2022
Accepted: 2 Jan 2023

Keywords:
Planing vessels
Transverse Step
Steps Height
Steps location
Analytical Formula

ABSTRACT

By investigating the research in the field of planing vessels, limited research has been conducted to investigate the behavior and other hydromantic parameters. Given that such vessels can have better hydrodynamic performance than similar vessels, research and study is one of the needs and priorities of designers. With this purpose, this study examines the effects of the transverse steps hydrodynamic element on the single hull planing vessel. Since researchers in this study are looking for general and not specific results, empirical research conducted on the Friedzema model, at three different deaerise angles as well as in different speeds and geometric parameters (different heights and locations steps) and at the exit of the experimental part of the research, the location and heights of the steps are expressed at different angles. Other output results of the present study are the process of building a new model of vessel that can simultaneously combine several models.

۱ – مقدمه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

شناور تندرو به‌عنوان یک سازه دریایی خاص دارای حرکات زیادی در سیال آب می‌باشد که طراحی آن را به‌طور ویژه‌ای مشکل کرده است. از جمله قسمت‌های مهم در طراحی بدنه شناورهای تندرو، پله‌های عرضی می‌باشد. در شناورهای تندرو دو مقاومت اصطکاکی ناشی از تنش برشی و مقاومت القایی یا فشاری ناشی از فشار نرمال وجود دارد که پله‌های عرضی نقش کاهش دهنده مقاومت اصطکاکی را در شناورهای تندرو دارند. از آنجا که تحلیل این گونه سازه‌ها به‌صورت دقیق، به علت ماهیت پیچیده سیال که در معادلات ناویراستوکس نمایان می‌شود مشکل می‌باشد، در صده اخیر بیشتر کارهای انجام شده برای پیش‌بینی رفتار شناور تندرو پله‌دار، در آزمایشگاه‌ها و حوضچه‌های کشش انجام شده است.

در بازه سال‌های ۱۹۴۹-۱۹۵۴، کروکوسکی و ساویتسکی[1] خلاصه گزارشی را ارائه کردند که در آن بطور کامل مشخصات سطح سرشی، درگ و سطح خیس چند بدنه شناور مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۱۹۵۰ مواردی[2] از این نتایج برای توسعه یک روش محاسباتی در تخمین مشخصه‌های سطح سرشی استفاده کرده است [۱] و [۲].

در سال۱۹۵۴، ساویتسکی و نیدنگیر[3] این مطالعات را توسعه داده و مطالعات تجربی سطح سرشی، که به معادلات ساویتسکی مشهورند را ارائه کردند. بطوریکه با این معادلات محدوده کاربرد متغیرها در پارامترهای سرشی افزایش یافت. اگر چه این روش‌ها اصلاحاتی را به خود دیده‌اند ولی تا به امروز بطور گسترده مورد استفاده بوده و همچنان معتبر است [۳].

در جنگ جهانی دوم شناورهای تندرو کوچک با توجه به عوامل مهمی همچون سرعت، قابلیت اختفاء و قابلیت مانورپذیری مطلوب بسیار مورد توجه قرار گرفتند و از دهه ۱۹۶۰ به بعد به‌عنوان بخش مهمی از ساختار رزم دریایی مورد نظر کارشناسان نظامی قرار گرفت.

تا سال ۱۹۶۰ به اندازه‌ای که به شکل انحناها در شناورهای وینگ پرداخته شده، موضوع انتخاب شکل انحنای مناسب برای قایق‌های موتوری پله‌دار انجام نگرفته است. البته یکی از تحقیقات برجسته‌ای که در این زمینه انتشار یافته و می‌توان برای طراحی شکل انحنای قایق‌های پله‌دار از آن استفاده کرد، توسط ویرجیل جانسون[4] در سال ۱۹۶۱ ارائه شده است [۴].

در سال ۱۹۶۱ کلمنت و پوپ[5] بر روی شناورهای پله‌دار و بدون‌پله بررسی‌های فراوانی انجام دادند و نمودارهایی را جهت مقایسه عملکردی و میزان قابل توجه کاهش درگ در شرایط وجود پله مشاهده نمودند. معمولاً در یک شناور پله‌دار، محدوده ضرایب وجه، نسبت طول به عرض سطح سرشی را برای بدنه جلوئی یا سطح سرشی را درمحدوده ۱/۵تا ۲/۵ فرض می کنند. نمودار بدست آمده در این مرجع نشان می‌دهد که برای این محدوده از مقادیر ضریب وجه، زاویه حمله بهینه چگونه خواهد بود. (لازم است در این مجموعه زاویه برخاست کف ثابت نگاه داشته شود.) [۵].

در سال ۱۹۶۶ برآن[1] اثر پله‌های V شکل درون‌رو را مورد بررسی قرار داد و نتایج بدست آمده درخصوص مرکز فشار، لیفت و سطح خیس در ضرایب منظری مختلف به‌صورت روابط تجربی ارایه کرد. برآون با انجام کارهای تجربی و تحلیلی انجام گرفته در آزمایشگاه داویدسون موفق شد تا ابزارهایی را برای طراحی سطح سرشی منشوری با لبه‌های عقبی به عقب برگشته در یک قایق پله‌دار ارائه کند. وی مدل‌هایی از سطوح سرشی را که دارای زوایای برخاست کف متفاوت و لبه‌های عقبی برگشته بودند را آزمایش کرد . سپس بااستفاده از اطلاعات این آزمایش‌ها، فرمول‌هایی را برای نتیجه‌گیری مشخصات کارایی سطوح پلنینگ بدست آورد. معادلات برآون برای تهیه یک سری نمودارها که نمایانگر سطوح سرشی با لبه‌های عقبی برگشته مستقیم بودند استفاده شدند. بطوریکه درمحدوده وسیعی از زوایای برخاست کف و زاویه برگشت پله‌ها کاربرد مناسبی داشت [۶].

در سال ۱۹۶۷ مور[2] بر روی برخی از شناورهای پله‌ای بررسی‌های انجام داد و نتایج تئوری وتجربی محدودی را ارایه کرد [۷].

در سال ۱۹۹۱ کلمنت و همکاران در مورد تاثیر پله بر روی شناورهای پلنینگ تحقیقاتی انجام دادند و نمودارهای را بدست آوردند که نشان می‌دهد که در طراحی ناحیه مناسب در یک شناور سرشی محل پله کجاست. به عنوان مثال برای یک ضریب وجه حدود ۱/۵، مرکز فشار بر روی کف یک سطح سرشی که در آنها زوایای برخاست کف برابر ۵، ۱۰، ۱۵ درجه باشد حدود ۸۴٪ طول متوسط خیس شده جلوئی نسبت به لبه عقبی می‌باشد. این عدد برای کارکرد در زاویه تریم بهینه ارائه شده است. در طراحی مناسب یک قایق پله‌دار لازم است که قسمت سینه به‌گونه‌ای طراحی شود که اسپری تولید شده توسط این قسمت باعث خیسی قسمت عقب نشود و مقاومت را نیفزاید. این نکته در حقیقت همان مسئله‌ای است که استفاده و کاربرد سطوح سرشی با لبه عقبی صاف را محدود می‌کند. نمونه‌هایی از مدل تست این پدیده در افزایش نیروی درگ در این مرجع ارائه شده است. مشکل بالقوه در یک بدنه پله‌دار همان خیس شدن کف بدنه عقبی است. چون باعث افزایش نیروی مقاومت خواهد شد.

[1] Savitsky &kroukovsky
[2] Murady
[3] Savitsky & neidinger
[4] Virgil Johnson
[5] Clement&poop

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

این مشکل را می‌توان با بکارگیری پله‌هایی که به سمت عقب برگشته باشند تا حدود زیادی حل کرد. این مطلب توسط کلمنت در سال ۱۹۶۴ تشریح شده است. با به عقب کشیدن پله‌ها می‌توان راندمان سرشی را به خوبی تا سرعت‌های بالاتر حفظ کرد. یک سطح سرشی با لبه‌های به عقب برگشته (برای یک شناور پله‌دار) می‌تواند به عنوان یک سطح منشوری، که خطوط باتوک[1] آن مستقیم هستند یا سطوح انحنادار دارد، بکار گرفته شود [۸] و [۹]. نتایج مقاومت دو نوع قایق سرشی که تفاوت آنها تنها در داشتن پله است در سال ۲۰۰۳ توسط کلمنت بررسی شد. در این آزمایش از مدل‌های آزمایشگاه داویدسون به شماره No.2849، که یک مدل از دسته طرح‌های با بدنه V شکل رای هانت[2] می‌باشد استفاده شده است. مدل DTMB به شماره NO.4667-1 نیز یک بدنه اصلی است که جزو سری ۶۲ بوده و بدنه‌ای بدون پله می‌باشد. شماره بدنه ارائه شده برای این بدنه‌ها را می‌توان برای یافتن مشخصات هندسی این بدنه‌ها استفاده کرد. در این مرجع گزارشی از نتایج مدل تست ۲۷ ترکیب‌بندی مختلف برای بدنه تک پله‌ای ارائه شده است. مشخصات مورد مطالعه در این مدل تست عبارتند از زاویه برخاست کف، ارتفاع پله، زاویه بین خط کیل بدنه جلو و عقب و همچنین طول بدنه عقبی که از پارامترهای مهم تلقی می‌شوند [۱۰].

در سال ۲۰۰۹ ساویستکی گزارش علمی را تحت عنوان کانتورهای ویک بدنه جلویی در شناورهای تک پله ارائه داده است که در این کار بر روی انواع متعددی از شناورهای تک بدنه تک پله‌ای آزمایشاتی انجام داد که نتایج به‌صورت فرمول‌های تجربی برای پروفیل ویک در ددرایز مختلف حاصل شد [۱۱].

ساویتسکی، مورابیتو در سال ۲۰۰۹ به بررسی پروفیل ویک ایجاد شده در پشت بدنه پله‌دار در زوایای برخاست ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه در شناور بدنه منشوری پرداختند. نتایج این تحقیق فرمول‌های ریاضی که بر مبنای نتایج تست‌های آزمایشگاهی به دست آورده شده‌اند بوده است. این روابط می‌توانند باعث سهولت شرایط طراحی بدنه‌های پله دار شوند. روابط مذکور برای محدوده‌ای از متغیرها از قبیل زاویه تریم، ضریب سرعت و ضریب بارگیری این بدنه‌ها قابل استفاده می‌باشند [۱۲].

در سال ۲۰۱۲ گارلند و مکی یک مطالعه عددی بر روی شناور تندرو پله‌ای به‌صورت دوبعدی انجام دادند که مقدار ارتفاع بهینه را برای داشتن حداکثر لیفت ممکن بررسی نمودند [۱۳].

در تحقیق متیو در سال ۲۰۱۲ جهت مدل‌سازی دوبعدی سطوح پروازی دارای پله، روش چشمه‌های گسسته‌ی هیدرودینامیکی استفاده شده است. تغییرات ارتفاع آب، طول سطح خیس شده و توزیع فشار در ارتفاع مشخصی از بدنه و عدد فرود محاسبه شده است. حفره‌های هوای تحت فشار که عملکرد هیدرودینامیکی را بهبود می‌بخشد می‌توان توسط این روش مدل گردد. نتایج ارائه شده شامل مثال‌های اعتبارسنجی شده، محاسبات پارامتری بدنه‌ی تک پله و عملکرد متناوب تعداد بی‌شمار پله بر سطح شناور است. نشان داده شده است که پله‌های عرضی می‌توانند منجر به افزایش نسبت لیفت به درگ شوند اگر چه در شرایط یکسان نسبت به بدنه‌ی بدون پله لیفت کمتری دارند. عملکرد سیستم چند پله‌ای نسبت به الگوی موج ایجاد شده در بین سطح شناور حساس است و به عدد فرود و فاصله‌ی نسبی پله‌ها بستگی دارد [۱۴].

در سال ۲۰۱۳ بررس عددی توسط لطفی و همکارانش بر روی یک شناور مدل پله‌دار در اعداد فرود حجمی ۲ الی ۷ صورت گرفت و مقایسه‌ای بین درگ، لیفت و زاویه تریم انجام گرفت [۱۵].

داکتور در سال ۲۰۰۵ بر روی طول و ارتفاع ویک چند نمونه شناور نیمه تندرو بررسی‌هایی انجام داد و روابطی برای طول و ارتفاع ویک به‌دست آورد [۱۶].

تا به حال در سراسر دنیا تحقیقات زیادی در رابطه با عملکرد هیدرودینامیکی و کاهش مقاومت شناورهای پلنینگ پله‌دار انجام شده است. ولی تا به حال علیرغم گزارشات موجود از نگرانی عملکرد این شناور در حین دور زدن و تغییر مسیر، پژوهش‌های چندانی در مورد تعادل این شناورها در حرکت یاو ارائه نشده است. در سال ۲۰۱۴ تیمینیس[3] به بررسی مانور شناور پله‌دار پرداخت. نتایج بیانگر این نکته بود که در شناورهای تندرو پلنینگ پله‌دار به دلیل کاهش سطح خیس به میزان زیاد و تماس کم بدنه با آب به تعادل شناور هنگام تغییر مسیر و دور زدن در سرعت‌های بالا به میزان زیادی لطمه وارد می‌شود. که این پدیده را مایکل پیتر در مقاله‌ای به‌صورت کامل به‌عنوان "شناورهای پله دار در سرعت‌های بالا مرگبار هستند" منتشر نمود [۱۷].

اشرفی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۵ مدل محاسباتی سه بعدی با استفاده از حجم سیال (VOF)[4] را برای بررسی ویژگی‌های سطح بدنه شناور که حاوی یک پله ی عرضی است، ارایه دادند. در این تحقیق نیروی مقاوم، لیفت، زاویه‌ی تریم دینامیکی و مساحت سطح خیس خروجی با داده‌های آزمایشگاهی در دسترس و نیز داده‌های نیمه‌تجربی در محدوده اعداد فرود حجمی بین ۲/۴۱ تا ۷/۱۲ مقایسه شده است. نتایج کمی و کیفی به دست آمده همبستگی مورد قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارند، از این‌رو می‌توانند به‌طور قابل اطمینان در بررسی‌های هیدرودینامیک بدنه‌ی دارای پله مورد استفاده قرار گیرند [۱۸].

قاسمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به شبیه‌سازی سه‌بعدی و بررسی عددی شناورهای تندروی پله‌دار در آب آرام پرداختند. نتایج تحلیل عددی این تحقیق شامل: درگ، توزیع فشار در کف بدنه، سطح

[1] Brown
[2] Mour
[3] Timmins
[4] Volume of Fluid

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

خیس بدنه، اسپری آب و پروفیل ویک با نتایج حاصل از معادلات تجربی ساویتسکی در سرعت‌های مختلف مقایسه شده‌اند [۱۹].

دشتی‌منش و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی عددی حرکات عمودی شناور در امواج هدینگ پرداخته‌اند. در تحقیق مورد نظر روش حل با استفاده از تئوری کلی مسائل حجم محدود و حجم سیال می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی در محیط نرم افزار STAR-CCM+ انجام شده است. پاسخ دینامیکی شناور برای دو طول موج به‌صورت عددی مدل شده است، یکی طول موج کوچکتر از طول شناور و دیگری طول موج بزرگتر از طول شناور. با استفاده از شبیه‌سازی عددی حرکات هیو و پیچ و همچنین شتاب عمودی شناور نیز مدل و محاسبه شده‌اند. در حالتی‌که طول موج بزرگتر از طول شناور می‌باشد دامنه‌ی حرکت هیو شناور با دو پله عرضی در کف ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین حرکت پیچ بدنه پروازی در حالتی که دو پله در کف شناور تعبیه شده است ۱۸ تا ۳۲ درصد کمتر می‌شود. نهایتا می‌توان مشاهده کرد وقتی طول موج بزرگتر از طول شناور باشد ماکزیمم شتاب عمودی شناور حدود ۰/۲ تا ۰/۷ شتاب ثقل کاهش می‌یابد [۲۰].

مارکو و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی و عددی شناورهای دارای پله و پدیده‌ی دینامیک سیالات که عموماً در شناورهای دارای پله در قسمت انتهایی بدنه و پله اتفاق می‌افتد؛ پرداختند. این مقاله نتایج آزمایشگاهی از تست شناور با بدنه‌ی تک پله‌ای را در حوضچه‌ی کشش با آب آرام نشان می‌دهد. تحت شرایط یکسان، میدان جریان توسط معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر-استوکس (RANS)[1] و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)[2] با تکنیک‌های مختلف مش متحرک (overset/ chimera/ morphing grid) بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی در هماهنگی و تطابق با نتایج آزمایشگاهی بود. الگوی جریان که از روش عددی LES با شبکه‌بندی ریز به‌دست آمده بود با بررسی‌هایی که از تصاویر ثبت شده در حوضچه حاصل شده بود مشابه هم بودند [۲۱].

ساهو و همکاران درسال ۲۰۱۷ در تحقیقی مدل ریاضی را برای پیش بینی عملکرد بدنه شناورهای دارای پله توسعه دادند. مدل ریاضی ساویتسکی اصلاح شده و به همراه تئوری خطی گردابه، مدل ریاضی جدیدی ارایه شده است که قادر است تریم، نیروی مقاوم و سایر پارامترهای مرتبط با بدنه‌ی شناور با پله‌ی عرضی را پیش‌بینی کند. برای اعتبارسنجی مدل، داده‌های تجربی موجود مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده در تطابق خوبی با داده‌های تجربی قرار دارند، طوری‌که طبق ادعای مولفان، مدل ریاضی توسعه یافته می‌تواند در طراحی مفهمومی شناور با پله عرضی مورد استفاده قرار گیرد [۲۲].

در سال ۲۰۱۸ قدیمی و همکاران به بررسی تاثیر پله‌های عرضی بر نیرو و ممان حرکت یاو شناور تندروی تک بدنه پرداختند. در این تحقیق محققان، شناور دو پله و بدون پله را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. تحقیق حاضر با نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی انجام گرفته و صحت‌سنجی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است [۲۳].

با بررسی تحقیقات پیشین به‌نظر میرسد تحقیق جامع و تجربی که همزمان به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی پله‌ی عرضی تخت و همچنین زاویه برخاست بر درگ شناور را مورد بررسی قرار داده باشد انجام نگرفته و تحقیق اینچنینی می‌تواند پایگاه داده مناسبی جهت طراحی پله و همچنین صحت‌سنجی تحقیقات تحلیلی و عددی آتی را فراهم سازد. در این راستا در این تحقیق مدل‌هایی از خطوط بدنه فریدزما به عنوان خطوط بدنه پایه‌ای در زوایای برخاست ۲۰،۱۵ و ۳۰ درجه به نحوی ساخته شده که امکان تغییر ارتفاع و مکان پله در هر اندازه‌ای میسر باشد و سپس در ارتفاع، مکان‌های متفاوت پله و همچنین در سرعت‌های مختلف مدل‌ها تست شده و داده‌های درگ وارد بر شناور استخراج می‌شود و در نهایت مکان و ارتفاع مناسب از جهت بیشترین کاهش درگ تعیین و بیان خواهد شد.

۲ - معرفی مدل مورداستفاده

مدل استفاده شده در تحقیق حاضر مدل منشوری فریدزما می‌باشد، این مدل از بالای چاین دارای دیواره صاف می‌باشد. زاویه برخاست مدل در طول و عرض ثابت می‌باشد. مدل فریدزما به دلیل دیواره صاف قسمت بالای چاین این امکان را می‌دهد که تغییرات پله‌ها در مدل‌ها به‌صورت یک مکانیزم پیوسته ساخته شود. جدول ۱ ویژگی‌های کلی مدل‌ها را بیان می‌کند.

جدول ۱- مشخصات کلی مدل فریدزما در نظر گرفته‌شده

پارامترها	نماد علمی	مقدار
طول کلی مدل (mm)	LOA_m	۲۵۰۰
عرض بیشینه مدل (mm)	B_m	۵۰۰
نسبت طول به عرض مدل	$\frac{L}{B}$	۵
نوع بدنه مدل		منشوری و بدنه دیواری
تغییرات زاویه ددرایز (^{o})	β	۳۰ – ۲۰ - ۱۵
جابجایی کلی مدل (kg)	Δ	۴۸/۸۳
محدوده سرعت شناور مدل (knot)	V_m	۲۰-۴

[1] Reynolds Averaged Navier Stokes

[2] Large Eddy Simulation

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]

[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

فاصله مرکز ثقل از عمود پاشنه(mm)	LCG_m	٪ ۳۶LOAs

جدول ۲ بیان‌کننده شناوری خواهد بود که مشخصات مدل آن در جدول ۱ بیان‌شده است.

جدول ۲- مشخصات کلی شناور اصلی در نظر گرفته شده

پارامترها	نماد علمی	مقدار
طول کلی شناور (mm)	LOA_s	۲۰۰۰۰
عرض بیشینه شناور (mm)	B_s	۴۰۰۰
نسبت طول به عرض شناور واقعی	$\frac{L}{B}$	۵
نسبت تشابه	λ	۸
تغییرات زاویه ددرایز (^{o})	β	۱۵ - ۲۰ - ۳۰
جابجایی کلی شناور (kg)	Δ	۲۵۰۰۰
محدوده سرعت شناور (knot)	V_s	۴۰ - ۱۰۰
فاصله مرکز ثقل از عمود پاشنه(mm)	LCG_s	٪ ۳۶LOA

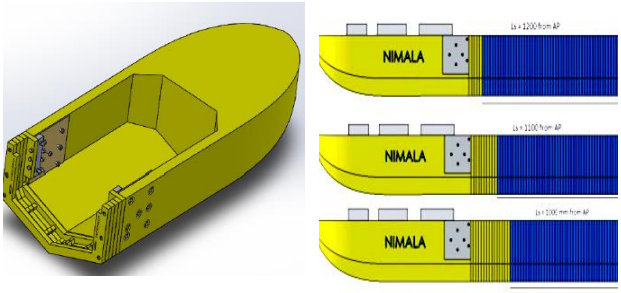
پس از بیان مشخصات مدل و شناور در جداول ۱ و ۲ حال به سراغ ساخت مدلی می‌رویم که بتواند پاسخگوی تحقیق در تغییر ارتفاع و مکان پله باشد، چنانچه نتوان تغییرات ارتفاع و مکان پله را در یک مدل اعمال کرد نیاز به ساخت تعداد زیادی مدل می‌باشد که این امر امکان‌پذیر نیست. در این راستا در ادامه توضیحاتی کلی از مدل چند مقطعی ارائه می‌شود.

۲-۱- ساخت مدل چند مقطعی

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد برای طراحی پله در بدنه شناور تندرو؛ دو پارامتر فاصله پله از پاشنه و ارتفاع پله به عنوان پارامترهای کاربردی انتخاب شده و تصمیم بر آن شد که در زوایای برخاست متفاوت موقعیت پله و ارتفاع آن تغییر کند. لذا برای انجام این تحقیق و بررسی، نیاز به تولید تعداد زیادی مدل خواهد بود. به عنوان مثال با فرض سه زاویه برخاست و سه موقعیت طولی پله با تغییرات سه گانه ارتفاع در تمامی حالات، حدوداً بدون احتساب برهم کنش‌ها و مدل‌های کوپل برای هر مدل ۹ حالت منحصربه‌فرد بایستی آزموده شود که برای سه زاویه برخاست ۲۷ حالت منحصربه‌فرد وجود دارد و به همین تعداد نیز مدل مجزا موردنیاز است. این شرایط علاوه بر هزینه‌ی بسیار بالا، مستلزم زمان زیادی برای ساخت و آماده‌سازی این مدل‌ها خواهد بود. همچنین با افزایش تعداد مدل‌ها ممکن است خطا در ساخت و اجرای آزمون مدل افزایش یابد، به علاوه به دلیل افزایش تعداد مدل‌ها خطای انسانی ممکن است افزایش یابد که این امر می‌تواند آزمون مدل‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهد. لذا در صورت امکان ساخت مدلی انعطاف پذیر نسبت به دو پارامتر طول پله و ارتفاع پله بسیار مفید خواهد بود. شکل ۱ نمایی از مدل چند مقطعی و نحوه اتصال قسمت‌ها به یکدیگر را نشان داده است.

شکل ۱- نحوه اتصال قسمت سینه به مقاطع قسمت پاشنه

پس از بررسی‌های انجام شده و طراحی‌های اولیه برای ساخت مدل چند مقطعی، تصمیم گرفته شد که قسمت پاشنه متشکل از چند بلوک باشد که هر یک از این بلوک‌ها خود متشکل از چند مقطع است تا تغییرات ارتفاع بین بلوک‌ها اتفاق بیفتد. یعنی یک بلوک به صورت کامل و یکپارچه تا پایان تست‌ها باقی بماند وسایر بلوک‌ها نسبت به یکدیگر جابجا شوند. در شکل ۲ موقعیت بلوک‌ها نسبت به یکدیگر نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه‌ای از جانمایی شماتیک جابجایی طولی مقاطع نسبت به یکدیگر

۳ - انجام تست‌های تجربی درگ

محاسبه دقیق مقاومت و همچنین تحلیل آن تاثیر زیادی بر تعیین توان و طراحی سیستم رانش شناور دارد. پس از طراحی اولیه بدنه و انجام محاسبات هیدرواستاتیک و انجام چیدمان اولیه بدنه بایستی مقاومت شناور محاسبه شود. برای محاسبه مقاومت شناورهای جابه-جایی روش‌های دقیقی وجود دارد که می‌توان با دقت خوبی مقاومت را به‌دست آورد. برخی از این روش‌ها عبارتند از: روش هولتروپ[1]، روش سری[2]۶۰، روش ون ارتمرسن[3] و... به دلیل پیچیدگی فیزیک جریان حول بدنه شناورهای تندرو برای برای محاسبه مقاومت شناورهای تندرو کمی پیچیدگی وجود دارد.

[2] Series 60 method
[3] Van Oortmerssen

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

برخی از پدیده‌های جریان حول بدنه شناورهای تندرو و شناورهای تجاری معمولی متفاوت می‌باشد و شناورهای تندرو به دلیل جدا شدن بدنه از آب (پلنینگ) تغییرات فشار حول بدنه بیشتر است، که این امر باعث به وجود آمدن پدیده‌های متفاوت‌تر از بدنه‌های جابه جایی می‌شود. مانند مقاومت ناشی از اسپری آب. به دلیل وجود این تفاوت‌ها روش‌های مورد استفاده برای محاسبه مقاومت بدنه‌های تندرو کمی متفاوت‌تر از روش‌های مورد استفاده برای بدنه‌های جابه جایی می‌باشد. از جمله روش‌های متداول برای به‌دست آوردن مقاومت‌های رایج و ساده شناورهای تندرو عبارتند از: روش ساویتسکی، روش وای من[1]، روش بلانت و فوکس[2] و... با وجود روش‌های تئوری و تثبیت شده برای محاسبه مقاومت بدنه‌های تندرو، در صورتی که بدنه دارای پیچیدگی‌های سازه‌ای یا المان‌هایی مانند پله، اسپری ریل، اینترسپتور و... باشد روش‌های ذکر شده نمی‌توانند مقاومت را به خوبی مدل کنند. چنانچه بدنه از حالت معمول و ساده خارج شود با استفاده از انجام مدل تست تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی، مقاومت و رفتار شناور تندرو را تعیین می‌کنند. در تحقیق حاضر برای بررسی تاثیر المان هیدرودینامیکی پله بر درگ و مقاومت شناور سه نوع مدل متفاوت استفاده شده است؛ که دارای زاویه برخاست متفاوت می‌باشند. در ابتدا برای تحلیل تاثیر پله بر مقاومت شناور بایستی مقاومت بدنه‌های بدون پله را استخراج کرد.

۳-۱- تست مقاومت مدل بدون پله

در ابتدا مدل‌های فریدزما در زوایای ددرایز ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درجه ساخته‌شده و در سرعت‌های مختلف در آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج‌فارس تست شدند. در خلال تست پارامترها با استفاده از تصویر و فیلم‌های به‌دست‌آمده و با تکنیک پردازش تصویر اندازه‌گیری می‌شوند. همان‌طور که در بخش دوم پژوهش بیان شد در ساخت مدل‌ها از روشی استفاده شده است که به‌توان ارتفاع و مکان پله را در طول شناور تغییر داد. در ادامه به بررسی تجربی تأثیر پله بر پرش آب در قسمت انتهایی شناور پرداخته می‌شود.

قبل از انجام تست می‌بایست مدل و ماکتی با یک مقیاس مشخص از روی نمونه اصلی شناور با در نظر گرفتن تشابه هندسی ساخته شود. سپس با تشابه عدد فرود سرعت تست مدل از روی سرعت شناور اصلی تعیین میگردد؛ و در ادامه با مشابه قرار دادن اعداد بی‌بعدی همچون رینولدز، فرود، وبر و ... تشابه دینامیکی حاصل می‌شود. با برقراری سه تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی می‌توان نتایج تست مدل را به شناور اصلی تعمیم داد. در ادامه ابتدا به انتخاب، تعیین ابعاد، ساخت و آماده‌سازی مدل جهت انجام مدل تست پرداخته می‌شود. پس از طراحی مدل‌ها و قبل از انجام تست‌های تجربی، هیدرواستاتیک شناور با توجه به ابعاد و شرایط بارگذاری مدل بررسی می‌شود. تحلیل هیدرواستاتیک شناور در نرم افزار مکسرف انجام شده است. متغیرهای ورودی به نرم‌افزار تناژ و موقعیت مرکز ثقل، و متغیرهای خروجی محل آبخور در سینه و پاشنه شناور و همچنین زاویه‌ی تریم هیدرواستاتیکی می‌باشد. جدول ۳ بیانگر مشخصات هیدرواستاتیک و سایر الزامات هندسی مورد نیاز جهت انجام مدل تست می‌باشد. لازم به توضیح است که در جدول ۳، LCG برابر با ۰/۳۶ طول مدل و همچنین در ۹۰۰ میلیمتری از عمود پاشنه (AP) قرار دارد.

جدول ۳- مشخصات هیدرواستاتیک مدل‌های بدون پله

مورد	تریم (°)	درفت (mm)	طول نمونه (m)	جابجایی نمونه (ton)	طول مدل (mm)	جابجایی مدل (kg)	نسبت تشابه	تغییرات زاویه ددرایز (°)
۱	۱/۱۸	۱۰۰/۸	۲۰	۲۵	۲۵۰۰	۴۸/۸۳	۸	۱۵
۲	۱/۲۶	۱۱۳/۷	۲۰	۲۵	۲۵۰۰	۴۸/۸۳	۸	۲۰
۳	۱/۶	۱۴۲/۱	۲۰	۲۵	۲۵۰۰	۴۸/۸۳	۸	۳۰

پس از تعیین هیدرواستاتیک مدل و طی روند آماده‌سازی مدل از قبیل خط کشی مدل، بستن مدل به ارابه، تعیین راستای کشش، تنظیم وزن و آبخور و کالبیراسیون سنسورها، مدل آماده تست شدن می‌باشد. سرعت تست مدل از روی سرعت شناور اصلی و با توجه به تشابه عدد فرود تعیین شده است. در جدول ۴ سرعت انجام تست مدل شناور آورده شده است.

جدول ۴- سرعت تست مدل شناور

سرعت شناور (m/s)									
۳/۶	۳/۸	۳/۹	۳/۲	۲/۳	۲/۵	۲/۶	۱/۸	۱	۱/۱
۹	۶	۳	۱	۸	۵	۲	۹	۷	۴
سرعت مدل (m/s)									
۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵

پس از تعیین سرعت شناور با زاویه برخاست (ددرایز) مختلف تست‌ها انجام شده و نتایج تست‌ها در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ آورده شده است.

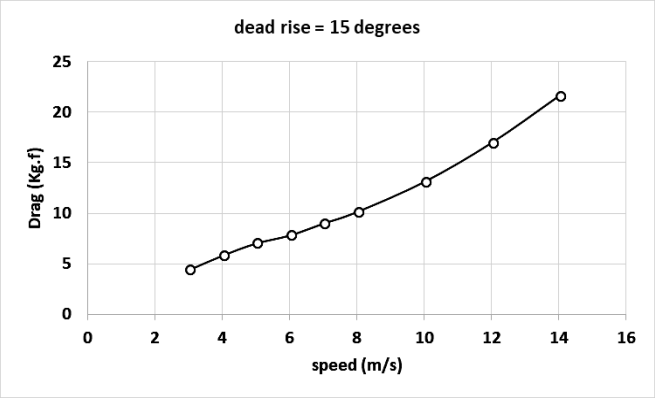
[1] Wyman method

[2] Blount and fox method

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]

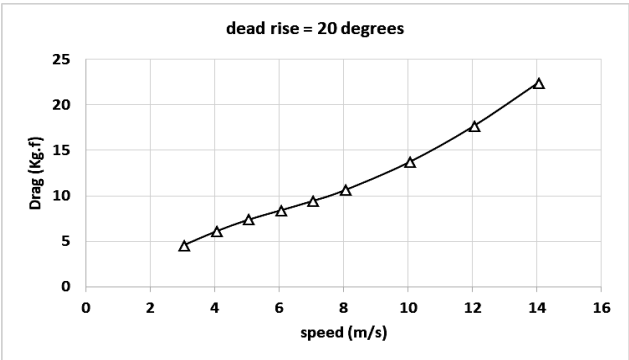
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]

[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

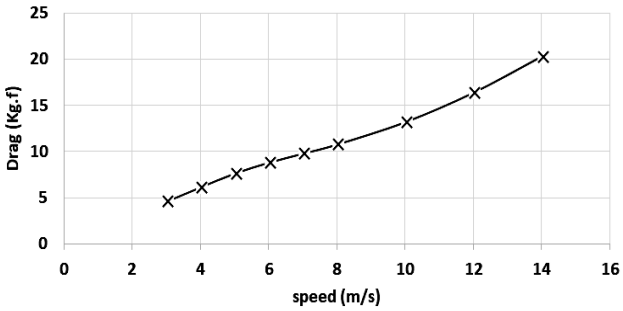


شکل ۳- نمودار مقاومت – سرعت مدل بدون پله فریدزما با زاویه برخاست(ددرایز) ۱۵ درجه

با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که مقاومت بدنه تا رسیدن به نقطه پلنینگ درحال افزایش می‌باشد پس از پلن کردن مدل مقداری مقاومت کاهش می‌یابد که این تغییر به دلیل تقسیمات نمودار، زیاد واضح نمی‌باشد. ولی نقطه پلنینگ در واقع نقطه‌ای از نمودار مقاومت-سرعت می‌باشد که پس از آن تغییر شیب نمودار وجود خواهد داشت (برای این مدل بین ۴/۵ تا ۶) می‌باشد.

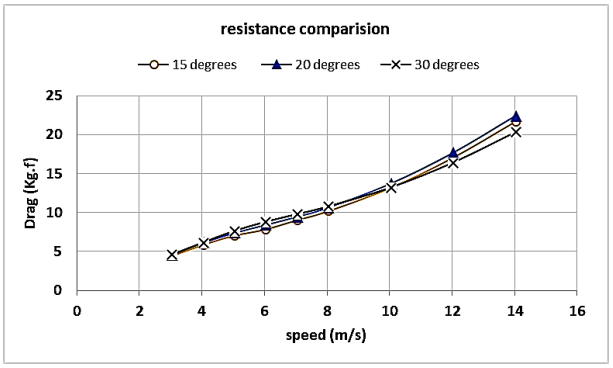


شکل ۴ - نمودار مقاومت–سرعت مدل بدون پله فریدزما با زاویه برخاست(ددرایز) ۲۰ درجه



شکل ۵- نمودار مقاومت–سرعت مدل فریدزما بدون پله با زاویه ددرایز ۳۰ درجه

با مقایسه مقادیر مقاومت سه مدل ذکر شده با توجه به ثابت بودن تمامی ویژگی‌های سه مدل، می‌توان تاحدودی تغییرات زاویه ددرایز و تاثیر آن بر هیدرودینامیک مدل‌های بدون پله را مشاهده نمود. با توجه به نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود که هرچه ددرایز مدل بزرگتر می‌شود آبخور پاشنه بزرگ‌تر شده و دلیل این موضوع کاهش بویانسی به دلیل برداشتن قسمتی از بدنه در اثر بزرگ کردن زاویه ددرایز می‌باشد. تغییرات زاویه ددرایز به‌منزله تغییر حجم بدنه است. با بزرگ شدن ددرایز گویا حجم بویانسی ذخیره بدنه کاهش یافته، در نتیجه نیروی بویانسی کاهش و مدل داخل آب فرو می‌رود، با فرو رفتن بدنه در آب و افزایش آبخور بدنه، مقاومت بدنه افزایش می‌یابد. در مدل-های با ددرایز کمتر، نسبت مقاومت به وزن کمتر می‌شود ولی با افزایش ددرایز به‌دلیل بزرگ شدن مقاومت بدنه، این نسبت بزرگ‌تر می‌شود. در بدنه‌های با ددرایز کوچکتر وضعیت دریامانی و مانور شناور خوب نیست و شناور با ددرایز کوچک‌تر زودتر دچار پروپویزینگ و ناپایداری می‌شود ولی مدل‌های بدنه با ددرایز بزرگ‌تر در عین افزایش نسبت مقاومت به وزن، دریامانی و تعادل مناسبی دارند.



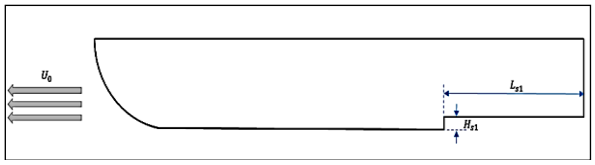
شکل ۶ - مقایسه مقادیر مقاومت مدل های فریدزما با زاویه ددرایز متفاوت ۱۵ ، ۲۰ و ۳۰ درجه

۳-۲-تست مقاومت مدل شناور پله‌دار

هنگام تست شناور پله‌دار می‌بایست ارتفاع و مکان پله را تغییر داده و تاثیر این دو پارامتر بر درگ شناور را ثبت کرد، اما این نکته مهم است که میزان و گام و بازه‌ی تغییرات ارتفاع و مکان پله چگونه و به چه ترتیبی باشد. در این راستا در ادامه به بررسی چگونگی تغییر ارتفاع و مکان پله در طول تست پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱- تاثیرات فاصله پله از پاشنه ترانسوم بر هیدرودینامیک شناورهای پله‌دار

فاصله پله از پاشنه ترانسوم در عملکرد پله تاثیرگذار است به اینصورت که در قسمت پشت پله نیروی لیفت تشکیل می‌شود و هرچه این قسمت بزرگتر شود نیروی لیفت اضافی تولید شده به سبب ایجاد پله افزایش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است که فاصله پله تا پاشنه ترانسوم محدود به مقادیر بیشینه و کمینه می‌باشد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود پله تقریبا در بخش انتهایی شناور قرار دارد و مدل آزمایشگاهی را به دو قسمت تقسیم می‌کند.



شکل ۷- شماتیکی از شناور تک پله و معرفی متغیرهای ورودی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

L_{s1} طول قسمت انتهایی شناور است که به عنوان یکی از پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است.H_{s1} که نشان دهنده ارتفاع پله است؛ پارامتر دوم ورودی و U_0 سرعت شناور، نسبت به سیالی که در آن قرار دارد(آب) نیز به عنوان پارامتر سوم درنظر گرفته شده است. بازه‌ی تغییرات پارامترهای ورودی در فضای طراحی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- بازه‌ی تغییرات پارامترهای ورودی در یک زاویه ددرایز (برخاست) ثابت

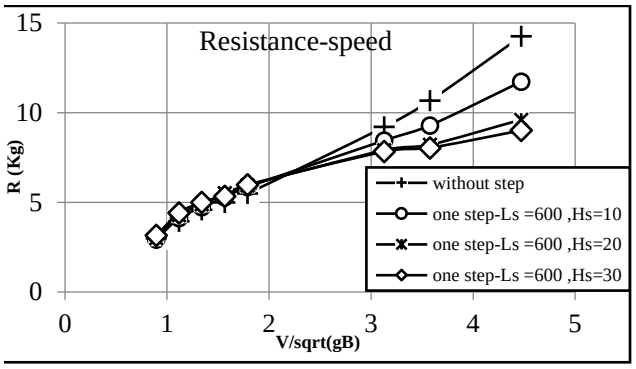
پارامترها	بازه‌ی تغییرات
سرعت (m/s)	$3 \le U_0 \le 10$
ارتفاع پله (mm)	$2\%B(10) \le H_s \le 6\%B(30)$
طول پله (mm)	$10\%L_{OA}(300) \le L_{S1} \le 48\%L_{OA}(1100)$

حال با استفاده از طراحی آزمایش‌ها[1](DOE) به انتخاب نمونه‌های اولیه برای شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه تعداد پارامترهای ورودی ۳ عدد است، تعداد نمونه تست‌های اولیه در یک زاویه برخاست (ددرایز) ثابت برابر ۴۰ عدد از تعداد ۱۵۰ حالت ممکن انتخاب می‌گردد. نتایج هرحالت به تفکیک خواهد آمد و در نهایت مقایسه کاملی بین این حالت‌ها انجام خواهد گرفت. نتایج بدست آمده به‌صورت جدول، نمودار و تصاویر ثبت شده دوربین می‌باشد. از آن جایی که عملکرد پله در سرعت‌های پایین تاثیر زیادی بر کاهش سطح خیس شناور ندارد و محدوده کاربرد شناورهای تندرو در سرعت‌های بالا است در سرعت‌های پایین فقط مقادیر نیروی مقاومت آورده شده و مقدار سطح خیس در این سرعت‌ها مورد بحث قرار نمی‌گیرد. برای هر حالت پله، تست‌ها درسرعت‌های ۲ تا ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده و برنامه انجام تست‌ها مطابق جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶- برنامه تست‌های مدل تک پله با ددرایز ۲۰ درجه

شماره حالت	موقعیت طولی پله از پاشنه (mm)	ارتفاع پله(mm)	سرعت شناور(m/s)	شماره حالت	موقعیت طولی پله از پاشنه (mm)	ارتفاع پله(mm)
۷	۱۱۰۰	۱۰	۲ تا ۴	۲۱	۸۰۰	۲۰
۸	۱۱۰۰	۱۰	۷ و ۸	۲۲	۸۰۰	۳۰
۹	۱۱۰۰	۱۰	۱۰	۲۳	۸۰۰	۳۰
۱۰	۱۱۰۰	۲۰	۲ تا ۴	۲۴	۸۰۰	۳۰
۱۱	۱۱۰۰	۲۰	۷ و ۸	۲۵	۶۰۰	۱۰
۱۲	۱۱۰۰	۲۰	۱۰	۲۶	۶۰۰	۱۰
۱۳	۱۱۰۰	۳۰	۲ تا ۴	۲۷	۶۰۰	۱۰
۱۴	۱۱۰۰	۳۰	۷ و ۸	۲۸	۶۰۰	۲۰
۱۵	۱۱۰۰	۳۰	۱۰	۲۹	۶۰۰	۲۰
۱۶	۸۰۰	۱۰	۲ تا ۴	۳۰	۶۰۰	۲۰
۱۷	۸۰۰	۱۰	۷ و ۸	۳۱	۶۰۰	۳۰
۱۸	۸۰۰	۱۰	۱۰	۳۲	۶۰۰	۳۰
۱۹	۸۰۰	۲۰	۲ تا ۴	۳۳	۶۰۰	۳۰
۲۰	۸۰۰	۲۰	۷ و ۸	۳۴	۶۰۰	۳۰

در ادامه برای درک بهتر تاثیر پارامترهای هندسی پله بر مقاومت شناور، نمودارهای مقاومت-سرعت مدل تک پله با ددرایز ۲۰ درجه در نمودارهای ۸ تا ۱۰ آورده شده است.

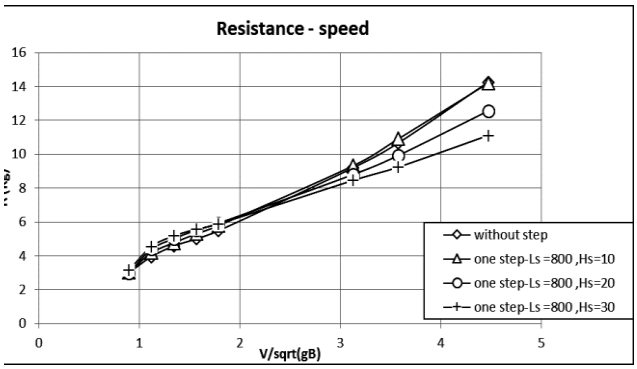


شکل ۸- تغییر ارتفاع پله در فاصله ۰/۲۴ طول کلی از ترانسوم و ددرایز ۲۰ درجه

همانگونه که در شکل ۸ مشخص می‌باشد قبل از پلن کردن کامل بدنه، ایجاد پله و همچنین بزرگ کردن ارتفاع پله باعث افزایش مقاومت بدنه نسبت به حالت بدون پله می‌شود ولی بعد از پلنینگ کامل بدنه، ایجاد پله و افزایش ارتفاع پله باعث کاهش مقاومت کلی بدنه شده است به‌طوریکه بعد از پلن کردن، مدل با ارتفاع پله ۳۰ میلیمتر (۶٪ عرض) کمترین مقاومت را دارد و بیشترین مقاومت بعد از پلنینگ را مدل‌های بدون پله و با کمترین ارتفاع پله (۲٪ عرض) دارا می‌باشند.

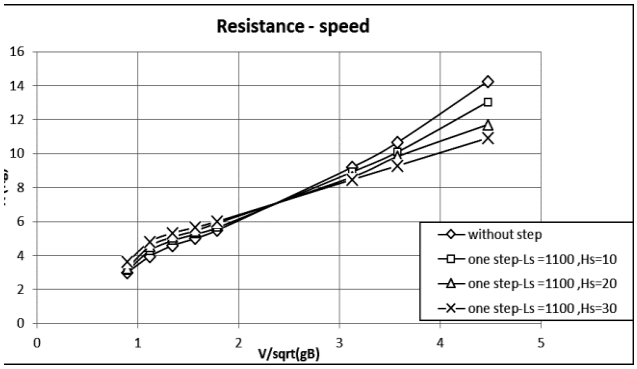
[1] Design Of Experiments

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]



شکل ۹- تغییر ارتفاع پله در فاصله ۰/۳۲ طول کلی از ترانسوم و ددرایز ۲۰ درجه

با توجه به نمودار شکل ۹ با افزایش ارتفاع پله در فاصله ثابت از پاشنه ترانسوم (۳۲٪ طول کلی بدنه) مقادیر مقاومت نسبت به حالت بدون پله کمتر می‌شوند. برای این فاصله همانطور که مشخص می‌باشد پله با ارتفاع ۱۰ میلیمتر (۲٪ عرض بدنه) تاثیر زیادی بر مقادیر مقاومت-ها ندارد و تقریبا نتایج این مورد بر نتایج مدل بدون پله با زاویه ددرایز ۲۰ درجه منطبق می‌باشد. قبل از پلنینگ کامل بدنه مدل با بیشترین ارتفاع پله بیشترین مقاومت را نیز نسبت به مدل بدون پله و سایر مدل‌های پله‌دار مشابه دارا می‌باشد.



شکل ۱۰ - تغییر ارتفاع پله در فاصله ۰/۴۴ طول کلی از ترانسوم و ددرایز ۲۰ درجه

برای فاصله ۱۱۰۰ میلیمتر (۴۴٪ طول کلی از ترانسوم) مدل بدون پله بعد از پلن کامل بدنه بیشترین مقادیر مقاومت را دارد و قبل از پلن کامل بدنه، مدل با بزرگترین ارتفاع پله (۶ ٪ عرض) بزرگترین مقادیر مقاومت را نسبت به سه مدل دیگر دارا می‌باشد.

۳-۲-۲- تاثیرات زاویه ددرایز (برخاست) بر هیدرودینامیک شناورهای پله‌دار

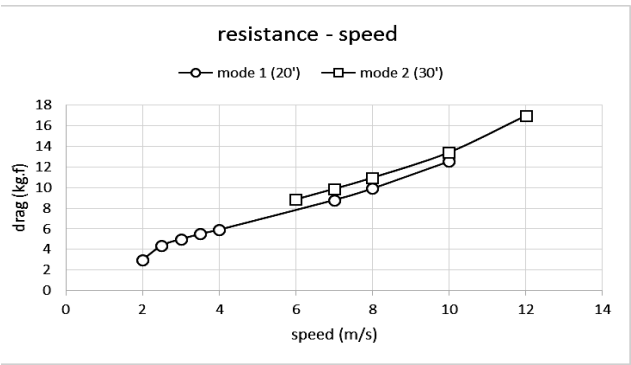
در ادامه در این بخش پس از مشخص شدن تاثیر تغییر ارتفاع و مکان پله بر مقادیر مقاومت شناور، به بررسی تاثیر زاویه ددرایز بر تغییرات مقاومت بدنه‌های پله‌دار پرداخته می‌شود. به این منظور دو مدل بیان شده در جدول ۷ که از نظر ابعاد پله و شرایط بدنه و بارگذاری یکسان می‌باشند انتخاب و تست‌های تجربی بر روی آنها انجام و سپس مقادیر مقاومت در سرعت‌های مختلف برای دو مدل، در جدول ۸ مقایسه خواهند شد.

جدول ۷- دو مدل انتخاب شده جهت بررسی تاثیر زاویه ددرایز در بدنه پله‌دار

شماره مدل‌ها	زاویه ددرایز (درجه)	فاصله مرکز ثقل از عمود پاشنه (mm)	موقعیت طولی پله از پاشنه (mm)	جابجایی کلی (Kg)	نسبت طول به عرض
۱	۲۰	۳۶	۳۲	۴۸/۸۳	۵
۲	۳۰	۳۶	۳۲	۴۸/۸۳	۵

جدول ۸- مقادیر مقاومت بدنه پله‌دار با ددرایز ثابت ۲۰ و ۳۰ درجه در شرایط کاملا یکسان

شماره حالت	V = ۲	V = ۵/۸	V = ۳	V = ۵/۸	V = ۴	V = ۸	V = ۷	V = ۱۰
مدل ۱ (درگ)	۲/۹۹	۴/۳۹	۵/۰۱	۵/۵۲	۵/۹۳	۸/۸۱	۹/۹۳	۱۲/۵۶
مدل ۲ (سرعت)				V = ۶	V = ۷	V = ۸	V = ۱۰	V = ۱۲
مدل ۲ (درگ)				۸/۷۷	۹/۹	۱۰/۷۸	۱۳/۴۴	۱۷



شکل ۱۱ - مقایسه مقاومت برای دو مدل تک پله با شرایط کاملا یکسان و ارتفاع پله ۲۰ میلیمتر (۴٪ عرض) و ددرایز متفاوت

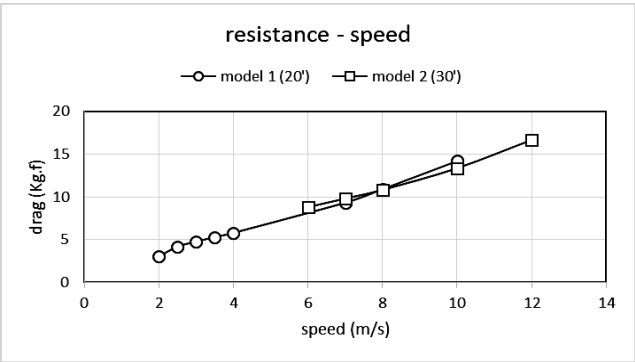
طبق نمودار ۱۱ و پیش‌بینی اولیه با افزایش زاویه ددرایز و ثابت بودن شرایط بارگذاری و بدنه، تریم و میزان فرورفتگی بدنه پشت پله در آب افزایش می‌یابد که این باعث افزایش مقاومت در سرعت‌های پایین می‌شود ولی با افزایش سرعت به دلیل کاهش سطح خیس پشت پله

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

و شکل‌گیری نیروی لیفت اضافی در پشت پله در قسمت پاشنه مدل، تریم دینامیکی و میزان فرورفتگی بدنه در آب کاهش یافته و مقاومت نسبت به مدل بدون پله کاهش می‌یابد. اما برای دو مدل فوق تمامی شرایط یکسان و تنها زاویه ددرایز بدنه متفاوت می‌باشد. مدل با زاویه ددرایز بزرگتر به دلیل فرورفتگی بیشتر در آب و بیشتر بودن مقادیر تریم دینامیکی در تمامی سرعت‌ها و همچنین کمتر بودن سطح خیس پاشنه (کم شدن نیروی لیفت اضافی پشت پله و بیشتر شدن زاویه تریم نسبت به مدل با ددرایز کوچکتر) و کم شدن نیروی لیفت پشت پله دارای مقادیر بزرگتر نیروی مقاومت کل در سرعت‌های مختلف نسبت به بدنه با زاویه ددرایز کوچکتر می‌باشد. در مورد ارتفاع ۱۰ میلیمتر (۲٪ عرض بدنه) و همچنین ۳۰ میلیمتر (۶٪ عرض بدنه) نیز در این فاصله با ویژگی‌های یکسان برای دو مدل مذکور مقادیر مقاومت به شرح جدول ۸ می‌باشند.

جدول ۸- مقادیر مقاومت کل برای بدنه های تک پله فریدزما با ددرایز ثابت ۲۰ و ۳۰ درجه در شرایط کاملا یکسان و ارتفاع پله ۱۰ میلیمتر (۲٪ عرض بدنه)

شماره حالت	مدل ۱ (درگ)	مدل ۲ (سرعت)	مدل ۲ (درگ)
V = ۲	۳/۰۳		
V = ۲/۵	۴/۱۷		
V = ۳	۴/۷۷		
V = ۳/۵	۵/۳	V = ۶	۷/۷
V = ۴	۵/۷۹	V = ۷	۹/۱
V = ۷	۹/۳۳	V = ۸	۱۰/۳
V = ۸	۱۰/۹۱	V = ۱۰	۱۳/۳۷
V = ۱۰	۱۴/۲	V = ۱۲	۱۶/۶۸



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر مقاومت برای دو مدل تک پله با شرایط کاملا یکسان و ارتفاع پله ۱۰ میلیمتر (۲٪ عرض بدنه) و ددرایز متفاوت

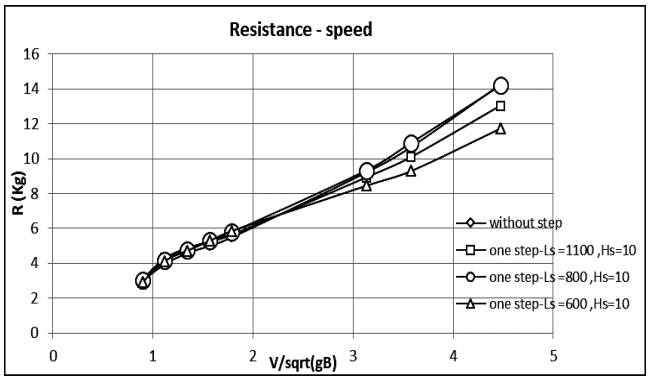
در نمودار ۱۲ برای سرعت‌های بالاتر از ۸ متر بر ثانیه مقادیر مقاومت کل برای مدل با ددرایز ۲۰ درجه بزرگتر از مقادیر مقاومت برای مدل با ددرایز ۳۰ درجه شده است و دلیل آن هم عدم تناسب موقعیت و ابعاد پله با شرایط مدل می‌باشد. یکی از علل تغییرات ناگهانی که به‌اینصورت در رفتار هیدرودینامیکی مدل رخ می‌دهد، عدم تناسب ابعاد پله با شرایط بدنه یا شرایط بارگذاری شناور می‌باشد. به‌طور مختصر در بدنه با ددرایز بزرگتر لیفت پاشنه کمتر می‌شود، در نتیجه فرورفتگی پاشنه در آب بیشتر شده و سطح خیس پاشنه بزرگتر می‌گردد. که این موضوع به معنی افزایش درگ اصطکاکی نیز می‌باشد. ولی در بدنه با زاویه ددرایز کوچکتر نیروی لیفت پاشنه بزرگتر بوده و میزان فرورفتگی پاشنه در آب کمتر شده و سطح خیس پاشنه کوچکتر می‌شود این به معنی کاهش درگ اصطکاکی می‌باشد. پس در کل می‌توان گفت درگ اصطکاکی بدنه با ددرایز کوچکتر کمتر از مقاومت بدنه با ددرایز بزرگتر می‌باشد که مقدار این تغییر با توجه به شرایط بارگذاری و موقعیت پله می‌تواند متفاوت باشد.

۳-۲-۳-تاثیرات فاصله از پاشنه ترانسوم و ارتفاع پله بر هیدرودینامیک شناورهای پله‌دار

یکی دیگر از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر هیدرودینامیک شناور پله‌دار، فاصله پله از پاشنه ترانسوم می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله پله از پاشنه جریان سیال جدا شده در محل پله، فرصت و مکان بزرگتری برای برخورد با بدنه پیدا کرده و ارتفاع مثلث خیس تشکیل شده در پاشنه بیشتر می‌شود که این باعث افزایش سطح خیس پشت پله می‌گردد، با افزایش سطح خیس پشت پله، نیروی لیفت اضافی تولید شده در بخش پاشنه شناور افزایش یافته و در عین حال درگ اصطکاکی نیز افزایش می‌یابد. بایستی توجه شود که تنظیم مقادیر فاصله پله از ترانسوم و ارتفاع پله باید با یکدیگر متناسب بوده تا جایی که نسبت درگ به لیفت پشت پله کمترین مقدار ممکن بوده و شناور پایداری دینامیکی طولی و عرضی مناسبی در سرعت‌های بالا داشته باشد .برای مقایسه تاثیر فاصله پله از ترانسوم تمامی موارد را در یک ارتفاع پله ثابت مقایسه کرده و با تغییر ارتفاع و ثابت نگه داشتن آن این کار تکرار می‌شود. همانطور که از نمودارهای ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌گردد با ثابت نگه داشتن ارتفاع پله و افزایش فاصله پله از ترانسوم، سطح خیس درگ اصطکاکی زیاد شده و به حالت بدون پله نزدیک تر می‌گردد. اما تنها کاهش درگ دلیلی بر مناسب بودن عملکرد پله نمی‌باشد بلکه گاهی با کاهش سطح خیس و درگ اصطکاکی تعادل دینامیکی شناور به خطر می‌افتد. برای قیاس دقیق‌تر در مورد بدنه‌های پله‌دار بایستی نسبت درگ به لیفت را مورد تحلیل قرار داد به دلیل عدم وجود تجهیزات لازم در انجام مدل تست‌ها نمی‌توان نیروی لیفت را به صورت مجزا محاسبه نمود، به همین دلیل قیاس نمونه تست‌ها فقط با مقایسه مقادیر درگ اصطکاکی انجام گرفته است. در ابتدا مدل‌های تک پله با زاویه ددرایز ۲۰ درجه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع نمودارهای ۱۳ الی ۱۵ مقادیر مقاومت را برای مدل‌های تک پله با ددرایز ثابت ۲۰ درجه در

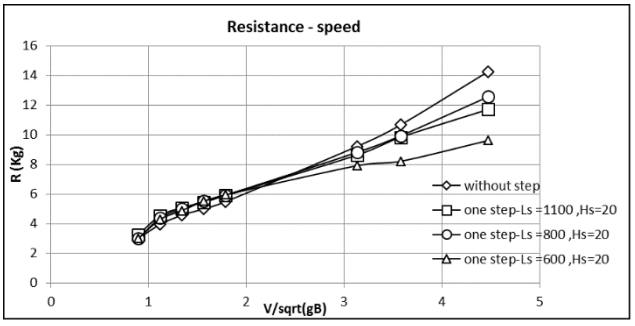
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

شرایط بارگذاری یکسان و ارتفاع ثابت پله نشان می‌دهد. تنها بعد متغییر در مدل‌های مورد نظر فاصله طولی پله از پاشنه ترانسوم می‌باشد که این مقدار از ۱۱۰۰ میلیمتر (۴۴٪ طول کلی بدنه) تا ۶۰۰ میلیمتر (۲۴ ٪ طول کلی بدنه) تغییر می‌کند. شکل شماره ۱۳ تغییرات فاصله طولی پله را برای ارتفاع ثابت ۱۰ میلیمتر (۲۰٪ عرض) نشان می‌دهد.

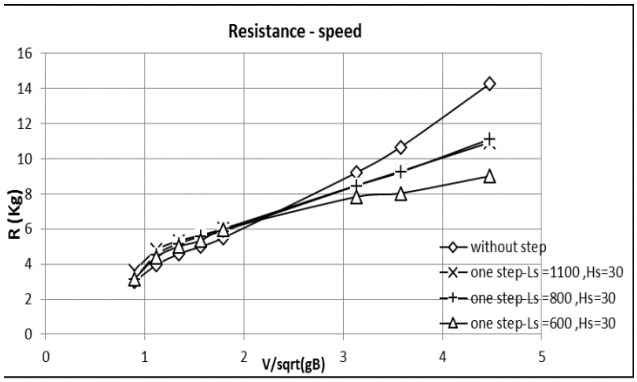


شکل ۱۳- مقایسه مقادیر مقاومت برای سه مدل تک پله با شرایط کاملا یکسان و ارتفاع پله ۱۰ میلیمتر (۲٪ عرض بدنه) در فواصل طولی متفاوت

همانگونه که در نمودار فوق مشخص می باشد با افزایش ارتفاع پله از پاشنه مقادیر مقاومت به مقادیر مربوط به بدنه بدون پله نزدیک می‌شوند چرا که با افزایش فاصله طولی پله سطح خیس پشت پله بزرگ‌تر شده و همچنین تریم استاتیکی نیز بزرگتر می‌شود، افزایش سطح خیس پشت پله و تاثیر آن بر مقاومت (تغییر مقدار مقاومت اصطکاکی بدنه) بسیار چشم‌گیر بوده و در بدنه‌های پله دار این موضوع بسیار مهم می‌باشد. نمودار های ۱۴و ۱۵ تغییرات فاصله طولی پله را برای مدل‌های پله‌دار با ارتفاع پله ۲۰ میلیمتر (۴٪ عرض) و ۳۰ میلیمتر (۶٪ عرض) نشان می‌دهند. در ارتفاع‌های متفاوت همواره تغییر فاصله طولی پله تاثیر یکسانی بر هیدرودینامیک بدنه‌های پله‌دار دارد که صرف‌نظر از مقدار ارتفاع پله با افزایش فاصله طولی پله از پاشنه ترانسوم مقدار سطح خیس بدنه در قسمت پاشنه افزایش می‌یابد. که این موضوع باعث افزایش مقاومت و همچنین افزایش نیروی لیفت پشت پله و کاهش تریم دینامیکی بدنه می‌شود. ولی افزایش سطح خیس و میزان تاثیر آن بر مقاومت بسیار زیاد بوده به طوری که افزایش نیروی لیفت و کاهش فرورفتگی پاشنه در مقابل آن ناچیز می‌باشد.



شکل ۱۴- مقایسه مقادیر مقاومت برای سه مدل تک پله با شرایط کاملا یکسان و ارتفاع پله ۲۰ میلیمتر (۴٪ عرض بدنه) در فواصل طولی متفاوت



شکل ۱۵- مقایسه مقادیر مقاومت برای سه مدل تک پله با شرایط کاملا یکسان و ارتفاع پله ۳۰ میلیمتر (۶٪ عرض بدنه) در فواصل طولی متفاوت

نکته‌ای که در نمودارهای فوق به چشم می‌خورد افزایش مقادیر مقاومت مربوط به مدل دارای فاصله طولی ۸۰۰ میلیمتر (۳۲ ٪ طول کلی بدنه) می‌باشد که در هر سه نمودار مقادیر مقاومت آن از مقادیر مربوط به مدل دارای فاصله طولی ۱۱۰۰ میلیمتر (۴۴٪ طول بدنه) بیشتر یا مساوی آن می‌باشد. یکی از دلایل این ناهمخوانی عدم تناسب فاصله پله با ارتفاع آن می‌باشد و اینکه برای بارگذاری موجود و شرایط بدنه مورد نظر پدیده‌هایی مانند اسپری اضافی جریان در سرعت‌های بالا باعث این افزایش و خطا می‌شود. با مقایسه مقادیر مربوط به مدل با فاصله طولی ۶۰۰ میلیمتر (۲۴ ٪ طول بدنه) با مقادیر مربوط به مدل بدون پله و مدل پله‌دار با فاصله طولی ۱۱۰۰ میلیمتر می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فاصله طولی پله از ترانسوم باعث افزایش مقاومت کل و نزدیک شدن شرایط مدل پله‌دار به حالت بدنه بدون پله می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بصورت تجربی به بررسی تاثیر زاویه ددرایز، ارتفاع و مکان پله بر درگ و مقاومت وارد برشناور پرداخته شده است. در راستای جامع‌سازی نتایج از مدل فریدزما در سه زاویه ددرایز (برخاست) مختلف استفاده شده است. مدل‌های مذکور به نحوی ساخته شده که امکان تغییر ارتفاع و مکان پله در هر حالت دلخواهی را داشته باشد. خلاصه نتایج حاصل شده از تست‌های تجربی در سه راستای تاثیر ارتفاع، مکان پله و زاویه ددرایز به شرح زیر احصاء گردید.

در کل می‌توان تاثیرات تغییر ارتفاع پله در مدل‌های تک پله با ددرایز ثابت به‌صورت موارد زیر بیان کرد:

۱- افزایش ارتفاع پله باعث کاهش بویانسی بدنه و فرورفتن قسمت انتهایی بدنه در آب می‌شود که این خود باعث افزایش تریم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

استاتیکی و فرورفتگی پاشنه (افزایش سینکیج[1]) و افزایش آبخور پاشنه می‌شود.

۲- افزایش ارتفاع پله باعث افزایش فاصله طولی پرش جریان آب جدا شده از پله شده که این امر سبب افزایش سطح خشک و کاهش سطح خیس کف بدنه در قسمت پشت پله می‌شود.

۳- افزایش ارتفاع با کاهش دادن سطح خیس پشت پله باعث کاهش نیروی لیفت اضافی در پشت پله و باعث افزایش تریم دینامیکی و آبخور پاشنه در سرعت‌های پایین می شود.

۴- افزایش ارتفاع پله باعث کاهش سطح خیس و کاهش مقاومت اصطکاکی بدنه در سرعت های بالاتر (بعد از پلن کامل بدنه) می-شود.

۵- افزایش ارتفاع باعث کاهش نیروی لیفت پاشنه می‌شود در نتیجه با افزایش ارتفاع در سرعت‌های بالا درگ اصطکاکی کاهش می‌یابد (به دلیل کاهش سطح خیس پاشنه) ولی نیروی لیفت پاشنه نیز کاهش می‌یابد که این باعث افزایش تریم دینامیکی در سرعت‌های بالاتر می‌شود.

تاثیرات تغییر فاصله طولی پله از پاشنه ترانسوم بر هیدرودینامیک و رفتار شناور تک بدنه پله‌دار را می‌توان به صورت موارد زیر بیان نمود:

۱- افزایش فاصله طولی پله از ترانسوم به دلیل کاهش بویانسی، باعث افزایش تریم استاتیکی بدنه و فرورفتگی پاشنه در آب (افزایش آبخور پاشنه) می‌شود.

۲- افزایش فاصله طولی پله از پاشنه ترانسوم باعث افزایش ارتفاع مثلث خیس تشکیل شده در پاشنه شناور می‌شود و در نتیجه سطح خیس پشت پله (سطح خیس پاشنه) افزایش پیدا می‌کند.

۳- افزایش فاصله طولی پله باعث افزایش سطح خیس پاشنه و در نتیجه افزایش چشمگیر درگ اصطکاکی و در نهایت افزایش مقاومت کل بدنه می‌شود.

۴- افزایش فاصله طولی پله باعث افزایش سطح خیس پاشنه شناور و در نتیجه باعث افزایش نیروی لیفت در پاشنه شناور و کاهش تریم دینامیکی می‌شود.

۵- مراجع

1- B.V.Korvin Kroukovsky, D.savitsky and W.F.Lehman,"Wetted area and center of pressure of planning surfaces," Stevens' instirute of Technology, Davidson laboratory report No.360.August 1949.

2- A.B.Murray,"The Hydrodynamics of planning hulls," paper presented at the February 1950 meeting of the New England section of SXAME.

3- D.Savirsky and J.W.Neidlinger,"Wetted area and center of pressure of planing surfaces at very low speed coelficocnts,"Stevens institute-of Technology, Davidson laboratory report no, 493, July 1954.

4- Johnson, V.E., Jr.,"Theoretical and experimental investigation of supercavitating hydrofoils operating near the free water surface,"NASA technical report R-93, 1961.

5- Clement, E.P., and pope, J.D.,"Steeples and stepped planning hulls-graphs for performance prediction and design," DTMB report 1490(Jan 1961).

6- Brown, P.W.,"An analysis of the forces and moments on Re-Entrant Vie-Step planning surfaces, "Davidson laboratory letter report 1142(May 1966).

7- Moore, W.L.,"Cambered planing surfaces for stepped hulls-some theoretical and experimental results,"DTMB report 2387(Feb 1967).

8- Clement, E.P., and koelbel, J.G, Jr.,"Effects of step design on the performance of planning motorboats, "Fourth biennial power boat symposium. SE sect., SNAME (Feb 1991).

9- Clement, E.P.,"A lifting surface approach to planing boat design,"DTMB report 1902(Sep 1964).

10- Clement, E.P., and blount, D.L.,"A configuration for stepped planing boat having minimum drag." 2003.

11- SAVITSKY, D., AND MORABITO, Surface wave contours associated with the forebode wake of stepped planing hulls, Marine Technology, 47, 1, 1–16 M. 2010.

12- David Svahn "Performance Prediction of Hulls with Transverse Steps"2009

13- William R. Garland* and Kevin J. Maki " A Numerical Study of a Two-Dimensional Stepped Planing Surface" Journal of Ship Production and Design, Vol. 28, No. 2, May 2012

14- Matveev, K. I. (2012). "Two-dimensional modeling of stepped planing hulls with open and pressurized air cavities". International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 4(2), 162-171.

15- Payam Lotfi, Mahmud Ashrafizaadeh., "Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water", 2013

16- Lawrence J. Doctors, "Influence of the Transom-Hollow Length on Wave Resistance", 5th International Conference on High Performance Marine Vehicles, 8-10 November, 2006, Australia

17- Connor Timmins, 2014 "Yaw Stability of a Recreational Stepped Planing Hull"

[1] Sinkage

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]

18- Lotfi, P., Ashrafizaadeh, M., & Esfahan, R. K. (2015). “Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water”. Ocean engineering, 94, 103-110.
19- Bakhtiari, M., Veysi, S., & Ghassemi, H. (2016). “Numerical modeling of the stepped planing hull in calm water”. International Journal of Engineering-Transactions B: Applications, 29(2), 236.
20- Esfandiari.A, Tavakoli.S, Dashtimanesh.A, (2017). “Comparison between the dynamic behavior of the non-step and double-stepped planing hulls in rough water”: A numerical study, Journal of Ship Production and Design.
21- De Marco, A., Mancini, S., Miranda, S., Scognamiglio, R., & Vitiello, L. (2017). “Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull”. Applied Ocean Research, 64, 135-154.
22- Dashtimanesh, A., Tavakoli, S., & Sahoo, P. K. “Development of a simple mathematical model for calculation of trim and resistance of two stepped planing hulls with transverse steps”.
23- Ghadimi, P., Panahi, S. & Tavakoli, S. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. (2019), “Hydrodynamic study of a double-stepped planing craft through numerical simulations” 41: 2. https://doi.org/10.1007/s40430-018-1501-1

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-30]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.5.0]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.57]