# مطالعه عددی اثرات تغییر ارتفاع و موقعیت طولی پله، در یک ورق پروازی

**بهاره برملا[۱] ، احمدرضا کهنسال[۲*]، عباس دشتی منش[۳]**

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، گروه مهندسی دریا؛ bahare.barmala@yahoo.com
[۲] استادیار، دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی دریا؛ kohansal@pgu.ac.ir
[۳] استادیار، دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی دریا؛ a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۱

*کلمات کلیدی:*
*شناورهای پله‌دار*
*تحلیل عددی*
کاهش درگ اصطکاکی
شناورهای پروازی
هیدرودینامیک

**چکیده**

برای اکثر شناورها، مقاومت اصطکاکی بدنه در آب، بیشترین سهم را در مقاومت کل کشتی دارد؛ بنابراین در چند دهه گذشته تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی کاهش مقاومت اصطکاکی کشتی انجام‌شده است. در این میان، شناورهای پله‌دار با کاهش قابل‌توجه در میزان سطح خیس جایگاه ویژه‌ای در شناورهای تندرو پروازی دارند. در این پژوهش تأثیر ایجاد تک پله عرضی در ورق تخت در آب آرام با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و تحلیل‌شده است. ابتدا شناور به‌صورت ورق پروازی درتریم و آبخور ثابت در آب آرام مدل شده است. با اضافه کردن پله عرضی به هندسه مدل، نسبت درگ اصطکاکی به لیفت کل ورق ارزیابی گردیده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج موجود مقایسه شده‌اند. همچنین، تغییرات مقدار درگ اصطکاکی و طول سطح خیس در اثر جابجایی موقعیت طولی پله و تغییر در ارتفاع پله بررسی‌شده‌اند.

# A Numerical Study of the Effects of Changing the Height and Location of the Step on a Planing Flat Plate

**Bahare Barmala[1], Ahmadreza Kohansal[2*], Abbas Dashtimanesh[3]**

*[1] M.Sc. Student, Marine Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; bahare.barmala@yahoo.com*
*[2] Assistant Professor, Marine Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; kohansal@pgu.ac.ir*
*[3] Assistant Professor, Marine Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; a.dashtimanesh@pgu.ac.ir*

**ARTICLE INFO**

*Article History:*
Received: 9 Mar. 2016
Accepted: 21 Dec. 2016

*Keywords:*
Step hull
Numerical analysis
Reduction of the friction drag
Planing hull
Hydrodynamics

**ABSTRACT**

For most vessels, the frictional resistance of the hull in the water has the largest share in the total resistance of the ship, so in the past few decades much research have been done on reducing the frictional resistance of ships. Among these, stepped vessels with a significant reduction in the amount of wetted surface have a special place. In this study, the effect of a single transverse-step on a flat plate is investigated in calm water with computational fluid dynamics methods. First, the vessel is modeled as a planing flat plate in a fixed trim and draft. By adding a transverse step to the geometry of the model, the proportion of frictional drag to the lift is calculated and compared with the other results. Also, changing the amount of frictional drag and wetted surface due to the changing of the longitudinal position and height of the step are investigated.

## ۱ - مقدمه

پله‌های عرضی[۱] به‌صورت یک شکستگی در کف شناورهای پروازی[۲] ایجاد می‌شوند. با برخورد سیال با این پله، یک جدایش جریان در کف شناور به وجود می‌آید که باعث کاهش سطح خیس شناور و درنتیجه کاهش درگ اصطکاکی می‌شود. این کاهش درگ در کاهش توان موردنیاز و میزان مصرف سوخت تأثیرگذار است. همچنین وجود پله باعث تولید نیروی لیفت اضافی در قسمت عقب شناور می‌شود. زمانی که یک شناور پروازی سرش می‌کند، فشار



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]

آب روی بخش پشتی بدنه بسیار کم است. بنابراین، سطوح نزدیک به ترانزوم[۳] نقش بسیار کوچکی در تولید لیفت دینامیکی خواهند داشت. بااین‌وجود، این بخش دارای درگ اصطکاکی شدیدی بوده و باعث افزایش مصرف سوخت و افزایش قدرت موردنیاز خواهد شد. برای برطرف کردن این مشکل می‌توان یک شکستگی، با عمق مناسب در کف بدنه و در محل مناسب قرار داد تا جریان سیال عبوری از کف بدنه، از بخش جلویی پله جدا شده و بخش‌هایی از بخش پشتی بدنه خشک بماند.

بسیاری از تحقیقات پایه‌ای درزمینه شناورهای پروازی ابتدا بر روی یک ورق تخت انجام شده است. یکی از اولین کارها درزمینه ورق تخت پروازی، توسط ستورف [۱] انجام شد. مطالعات ایشان پایه و اساس سایر آزمایش‌های تجربی بر روی ورق تخت و فرم بدنه‌های وی شکل بوده است. همچنین واگنر [۲] پژوهش‌هایی درزمینه طراحی شناور پروازی بر روی سطح آب انجام داده است. وی مطالعات خود را تا حد زیادی مبتنی بر تحقیقات نظری و نتایج تجربی ستورف انجام داد. یک سری آزمایش‌ها نیز توسط شومیکر [۳] صورت پذیرفت که شامل بارهای اندازه‌گیری شده بر روی بدنه‌های پروازی با عرض ثابت و زاویه خیز کف متفاوت بود. نتایج وی مستقیماً در طراحی شناور پروازی با کف وی شکل استفاده می‌شود. سیدوف [۴] با شبیه‌سازی‌های ریاضی بر روی شناورهای پروازی، مطالعاتی درزمینه ورق تخت پروازی دوبعدی انجام داده است. پیرسون و لژونر [۵] محاسبات نظری درزمینه نیروی دینامیکی ایجادشده بر روی ورق تخت پروازی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که سرعت با زاویه خط سکون رابطه مستقیمی دارد.

اکثر مطالعات اشاره‌شده به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده‌اند. ازآنجاکه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ازنظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نبود، برخی از محققین مانند اسمایلی [۶] و اشنایتزر [۷] تلاش کردند که به‌جای مطالعات تجربی بر روی ورق تخت پروازی از روش‌های تحلیلی استفاده کنند. آن‌ها در مطالعات خود درزمینه پاشش آب در ورق تخت پروازی، فرض کردند که پاشش آب فقط تابعی از طول مغروق ورق بوده و مستقل از زاویه تریم است. بریزولرا و سررا [۸] مطالعات عددی را در نقاط ثابتی روی بدنه پروازی انجام دادند و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و به دقت‌های خوبی نسبت به مطالعات آزمایشگاهی پیشین دست یافتند. به‌طور متوسط ۱۰ درصد خطا در پیش‌بینی مقاومت کلی و ۵ درصد خطا در پیش‌بینی نیروی لیفت به دست آمد که این نشان‌دهنده توانایی روش عددی در به دست آوردن جواب دقیق برای سطوح پروازی بود. سواهن [۹] با ترکیب معادلات حرکت و روش ساویتسکی، یک روش نیمه تجربی را برای محاسبه مشخصات بدنه شناورهای پله‌دار پروازی ارائه کرد. او توان موردنیاز را به دست آورد و با توان موردنیاز موتور نصب‌شده بر روی بدنه سه قایق مقایسه کرد. نتایج رضایت بخشی با موتورهای واقعی حاصل گردید.

علاوه بر این، ماکاسیف [۱۰] به کمک مدل‌سازی ریاضی، جریان سیال اطراف یک صفحه پله‌دار دوبعدی را با روش حل پتانسیل جریان شبیه‌سازی کرد. او فرض کرد که با اختصاص دادن عدد کاویتاسیون[4]، عدد فرود[5] و مرکز ثقل طولی بدنه قادر به پیش‌بینی پارامترهایی مانند آبخور، زاویه‌تریم و طول خیس شده بدنه باشد. ساویتسکی و مورابیتو [۱۱] طی یک گزارش موفق شدند که پروفیل خط ویک را برای دو حالت - یکی از خط کف[6] و دیگری از $\frac{1}{4}$ خط عرضی[7] بدنه رسم کنند. با توجه به معادلاتی که از این خطوط به دست می‌آید، شکل ویک به طول کف خیس، زاویه خیز کف، تریم و سرعت شناور بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که ویک با سرعت زیاد خارج می‌شود که این موضوع باید در محاسبات در نظر گرفته شود و علاوه بر اینکه محل برخورد آب با کف و $\frac{1}{4}$ عرض را نشان می‌دهند، زاویه برخورد آن‌ها را نیز مشخص می‌کند. این زاویه می‌تواند به‌عنوان یک‌تریم محلی[8]در نظر گرفته شود و از آن برای محاسبه لیفت در قسمت عقب بدنه استفاده می‌شود. ماتیو [۱۲] در سال ۲۰۱۲ برای مدل کردن جریان دائمی اطراف بدنه پروازی پله‌دار دوبعدی از چشمه‌های هیدرودینامیکی نقطه‌ای استفاده کرد. روش او قادر به مدل‌سازی بدنه‌های تک پله‌ای و چند پله‌ای تحت‌فشار و ایرکاویتی بود. تاونتون و همکارانش [۱۳] مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی نوع جدید شناورهای تندرو با بدنه‌هایی با شکستگی یا چاین تیز داشتند و گزارشی از نتایج این آزمایش‌ها در آب آرام ارائه دادند. یک بخش از تجارب آن‌ها شامل سه مدل با فرم بدنه یکسان می‌شد که هرکدام دارای یک پله، دو پله و بدون پله بودند. آن‌ها برای هر یک از مدل‌ها، پارامترهای سطح خیس، مقاومت، زاویه‌تریم دینامیکی و آبخور را به دست آورده و تأثیر نسبت ابعادی را در محدوده وسیعی از سرعت‌های مختلف بررسی کردند. نتایج ایشان، کاهش مقاومت در شناورهای پله‌دار نسبت به شناورهای بدون پله را نشان می‌داد.

در مطالعات عددی گارلند و مکی [۱۴] تحقیقاتی در مورد ارتفاع پله و موقعیت طولی پله بر روی صفحه پروازی انجام شد. آن‌ها دو شبیه‌سازی را در حالت آبخور و زاویه تریم ثابت انجام دادند؛ و متوجه شدند که ارتفاع پله تأثیر بسیار زیادی بر کاهش مقاومت دارد. درواقع، ارتفاع پله تا جایی می‌تواند بزرگ باشد که جریان دوباره به بدنه تماس پیدا کند. علاوه بر این، محل پله وابستگی ضعیفی به نسبت درگ به لیفت دارد و محل پله را می‌توان با توجه به محدودیت‌های دیگر طراحی، نظیر پایداری دینامیکی و مانوردهی تعیین نمود.

در این مطالعه ابتدا یک ورق پروازی دارای تک پله عرضی در آب آرام و با تریم و آبخور ثابت مدل شده است. سپس نسبت درگ اصطکاکی به لیفت



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]

کل ورق بصورت عددی محاسبه شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج موجود مقایسه شده‌اند. همچنین، تغییرات مقدار درگ اصطکاکی و طول سطح خیس در اثر جابجایی موقعیت طولی پله و تغییر در ارتفاع پله بررسی‌شده‌اند.

## ۲ - معادلات اساسی حاکم

برای شبیه‌سازی جریان سیال اطراف ورق از معادلات ناویر-استوکس، معادلات سطح آزاد و مدل توربولانسی مناسب استفاده می‌شود. معادلات ناویراستوکس، مدل ریاضی کاملی را برای تحلیل جریان سیال ارائه می‌کنند. این معادلات را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد [۱۵]:

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)=g_i-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+V\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j\partial x_j} \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=0 \quad (۲)$$

در این معادلات $u_i$ مؤلفه سرعت، P فشار و $g_i$ مؤلفه نیروی گرانش هست. معادلات مهم دیگر معادلات توربولانسی $\kappa-\varepsilon$ است. فرم بهبودیافته‌ای از معادلات توربولانسی $RNG\ \kappa-\varepsilon$ وجود دارد که با توجه به شرایط مسئله در نظر گرفته‌شده است. در این تحقیق از این رابطه برای مدل‌سازی توربولانسی استفاده‌شده است:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\nabla.(\rho U\varepsilon)=\nabla.\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon\,RNG}}\right)\Delta\varepsilon\right]+\frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon1\,RNG}(P_k+P_{\varepsilon b})-C_{\varepsilon2\,RNG}\rho\varepsilon\right) \quad (۳)$$

که در آن:

$$C_{\varepsilon1\,RNG}=1.42-f_\eta \quad (۴)$$

$$f_\eta=\frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{4.38}\right)}{1+\beta_{RNG}\eta^3} \quad (۵)$$

$$\eta=\sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu\,RNG}\varepsilon}} \quad (۶)$$

برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌ها در سطح مشترک دو سیال، از روش حجمی مدل‌سازی سطح آزاد استفاده‌شده است. ρ خاصیت فیزیکی همانند چگالی، لزجت و ... در کل میدان است:

$$\rho=\rho_2+\alpha(\rho_1-\rho_2) \quad (۷)$$

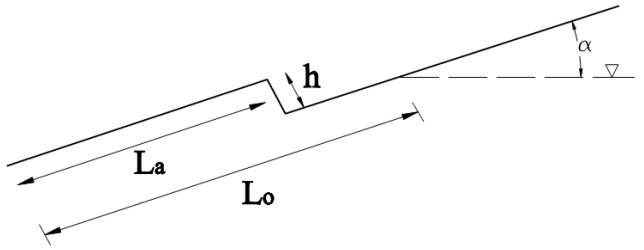
درصد حضور دو سیال درون هر المان محاسباتی با α نسبت حجمی نشان می‌دهد که به‌صورت زیر است [۱۵]:

$$\alpha=\begin{cases} Fluid\ 1 & 1 \\ Fluid\ 2 & 0 \\ At\ Interface & 0<\alpha<1 \end{cases} \quad (۸)$$

در ادامه به معرفی مدل‌های مسئله و شرایط مرزی پرداخته می‌شود.

## ۳- مدل‌سازی عددی و دامنه محاسباتی

با توجه به اینکه محل قرارگیری پله در کف شناور است، می‌توان بدنه شناور پروازی را به‌صورت فرم ساده یعنی ورق تخت با آبخور و تریم ثابت در نظر گرفت. اگر سیال در راستای افقی به صفحه برخورد کند، نیروها به‌صورت دو مؤلفه، عمودی (لیفت) و دیگری نیروی درگ اصطکاکی می‌باشند. به‌طور مختصر ابعاد و خصوصیات مدل انتخاب‌شده در شکل ۱ نشان داده شده‌است.




**شکل ۱- هندسه مدل ورق پروازی پله‌دار**

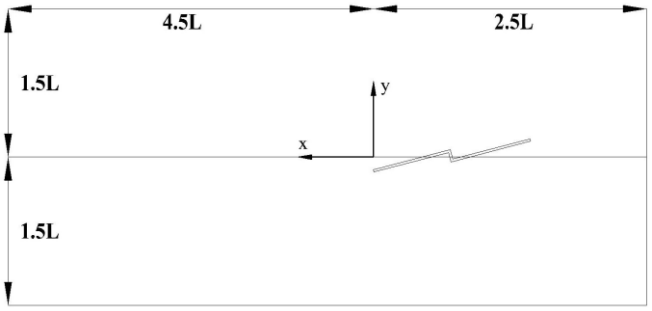
$L_o$ طول خیس ورق در حالت اولیه حرکت است. در شناورهای پروازی بدون زاویه خیز کف، آب در قسمت جلوی سطح، بالا می‌آید که باعث می‌شود طول خیس در حال حرکت بزرگ‌تر از طول تعریف‌شده در حالت بدون حرکت باشد. با توجه به اینکه زاویه‌تریم ۴ الی ۵ درجه منجر به حداقل مقدار نسبت درگ به لیفت می‌شود، زاویه‌تریم ۵ درجه و سرعت سیال ورودی ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. همچنین $L_a$ موقعیت طولی پله نسبت به پاشنه ترانزوم و h ارتفاع پله است؛ که هریک نقش بسیار مهمی در مقدار لیفت و مقاومت مدل ارائه‌شده دارند. معمولاً ارتفاع پله را ۳-۵ درصد عرض بدنه در نظر می‌گیرند. انتخاب مناسب ابعاد دامنه محاسباتی و گسسته سازی از مواردی است که در یک حل عددی باید توجه ویژه‌ای بدان داشت. اصولاً ابعاد دامنه محاسباتی باید طوری انتخاب شود که مرزها کمترین تأثیر را بر روی نتایج داشته باشند. به‌عنوان‌مثال ابعاد دامنه محاسباتی در شکل ۲- الف برحسب طول ورق نمایش داده‌شده است.

به‌منظور کنترل و بهینه کردن تعداد و ابعاد سلول‌های شبکه‌بندی سعی شد تا دامنه محاسباتی به چند ناحیه مجزا تقسیم شود. بااین‌وجود به علت تعداد قابل‌توجه نمونه‌های موردبررسی و زمان‌بر

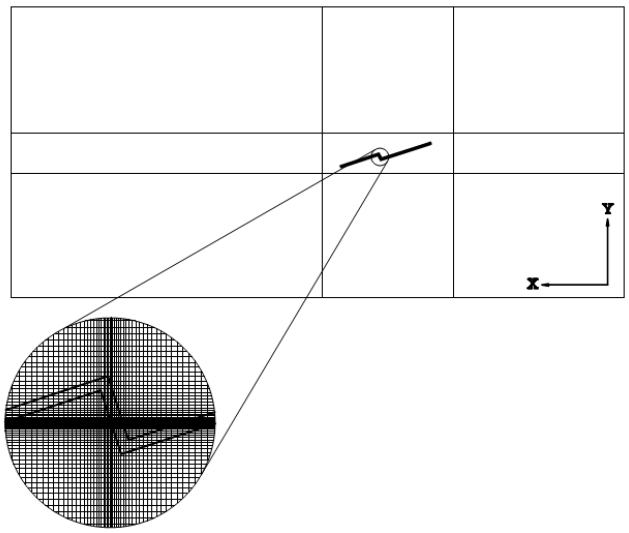


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]

بودن، در ناحیه کوچکی در اطراف مدل از شبکه‌بندی با مش‌هایی ریزتر و در بقیه دامنه محاسباتی از شبکه‌بندی با مش‌هایی بزرگ‌تر استفاده شد (شکل ۲- ب). نکته قابل‌ملاحظه در استفاده از این روش، بالا بردن دقت پاسخ‌های به‌دست‌آمده در اطراف ورق است. شبکه‌بندی دارای ۳۵۰۰۰۰ المان می‌باشد که با ابعاد هندسه، نوع مسئله و دقت موردنیاز متناسب است.




**۲ (الف) دامنه حل عددی**




**۲ (ب) شبکه‌بندی دامنه محاسباتی**

**شکل ۲- ابعاد و مشخصات دامنه محاسباتی،(الف): دامنه حل عددی، (ب): شبکه‌بندی دامنه محاسباتی**

در اطراف سطح آزاد آب به دلیل تغییرات سریع، نیاز به تمرکز بیشتر در شبکه‌بندی وجود دارد. مکان دیگری که نیاز به اصلاح اندازه شبکه‌بندی دارد، مرز ورق است. ورق به‌صورت صلب در نظر گرفته می‌شود و نیازی به شبکه‌بندی در آن نیست.

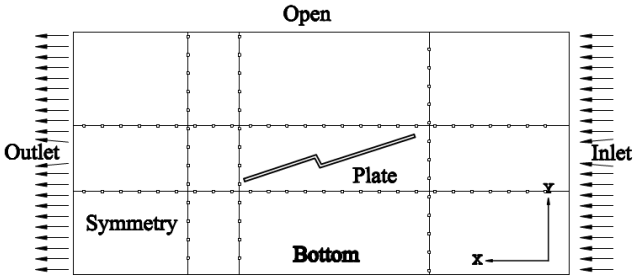
## ۴- تعیین شرایط مرزی

بر اساس شرایط مسئله، در ابتدای دامنه محاسباتی (سمت جلوی ورق) از شرط مرزی ورودی و در انتهای دامنه محاسباتی (سمت عقب ورق) از شرط مرزی خروجی استفاده گردید. شرط مرزی در کف دامنه محاسباتی را از نوع دیواره و در بالای دامنه محاسباتی از نوع دریچه با فشار صفر در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی به کار گرفته‌شده برای حل این مسئله در جدول۱ نشان داده شده‌اند.

**جدول۱- شرایط مرزی مسئله**

| نام | شرط مرزی | نوع مقدار مرزی |
|---|---|---|
| Inlet | Inlet | Normal Speed |
| Outlet | Outlet | Static Pressure |
| Top | Openning | Relative Pressure – 0 (Pa) |
| Bottom | Wall | Free Slip wall |
| Plate | Wall | No Slip wall |
| Symmetry | Symmetry | - |

شرایط مرزی لازم برای بخش‌های مختلف دامنه محاسباتی مسئله نیز در شکل۳ ارائه‌شده است.




**شکل ۳- تعریف مرزهای دامنه محاسباتی**

## ۵- هندسه‌های مختلف موردمطالعه

برای به دست آوردن مناسب‌ترین ارتفاع و موقعیت طولی پله، از شرایط مختلف تغییر در هندسه مدل استفاده شده است. در جدول ۲ مدل‌های B1 که در آن‌ها ارتفاع پله تغییر می‌کند نشان داده شده است.

**جدول ۲- شرایط مختلف حل عددی مدل B1**

| نمونه | h (m) | $L_a$ (m) |
|---|---|---|
| B11 | ۰/۰۰۵ | ۰/۹ |
| B12 | ۰/۰۱ | ۰/۹ |
| B13 | ۰/۰۱۵ | ۰/۹ |
| B14 | ۰/۰۲ | ۰/۹ |

همچنین جدول۳ مدل‌های متفاوت B2 که در آن‌ها موقعیت طولی پله نسبت به پاشنه ترانزوم متغیر است آورده شده است.

**جدول ۳- شرایط مختلف حل عددی مدل B2**

| نمونه | h (m) | $L_a$ (m) |
|---|---|---|
| B21 | ۰/۰۲ | ۰/۸ |
| B22 | ۰/۰۲ | ۰/۸۵ |
| B23 | ۰/۰۲ | ۰/۹ |

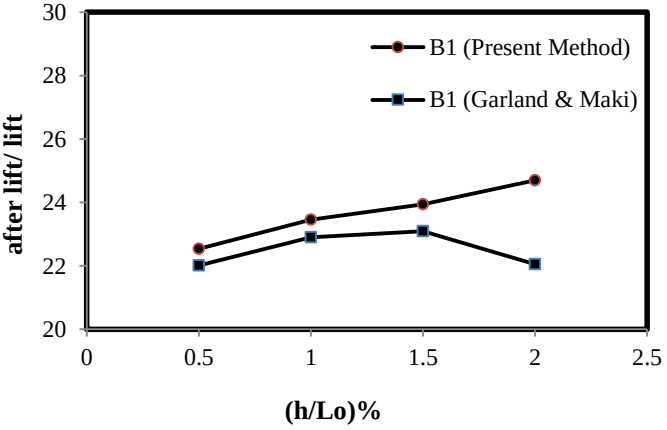
### ۵-۱- مدل B1

در گام اول، ارتفاع پله در ورق افزایش پیدا می‌کند و اثر آن بر درگ اصطکاکی و مقدار نیروی لیفت بررسی می‌شود. در شکل ۴ نسبت



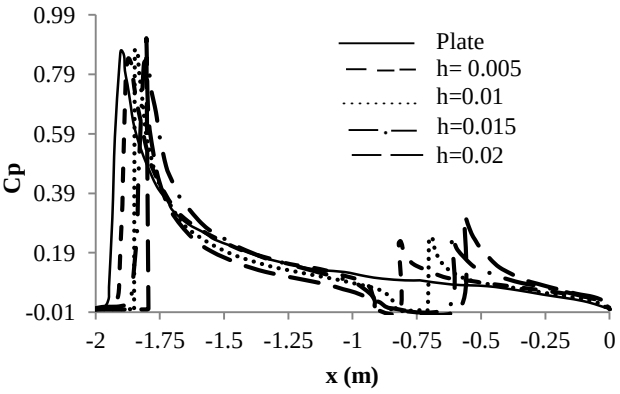
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]

لیفت اعمال‌شده بر روی ناحیه بعد از پله به لیفت کل در ارتفاع‌های مختلف پله نشان داده شده است. می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع پله، سهم لیفت ایجادشده در ناحیه بعد از پله افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در ارتفاع ۰/۰۲ نسبت به ارتفاع ۰/۰۵ متر، سهم این لیفت حدود ۲/۱۶۲ درصد افزایش پیداکرده است و به ۲۴/۷ درصد می‌رسد. نکته قابل‌توجه دیگری که در این نمودار مشاهده می‌شود این است که نتایج به‌دست‌آمده برای این نسبت در این مطالعه، با مقادیر این نسبت در نتایج گارلند و مکی تفاوت ناچیزی دارد. برای مثال، ماکزیمم این مقدار در مطالعه کنونی در ارتفاع ۰/۰۲ و در نتایج گارلند و مکی در ارتفاع ۰/۰۱۵ ایجاد می‌شود. دلیل این تفاوت می‌تواند ناشی از خطای نرم‌افزار، تفاوت در مش بندی و متفاوت بودن دامنه باشد.

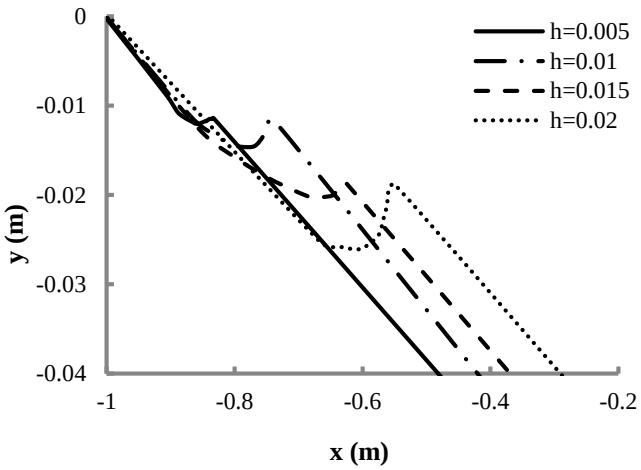



**شکل ۴- نسبت لیفت در ناحیه پشت پله به لیفت کل در مدل‌های B1**

طبق شکل ۵ که نمودار ضریب فشار در طول ورق پروازی تک پله را در ارتفاع‌های متفاوت پله و ورق تخت پروازی بدون پله نشان می‌دهد، چندین نکته قابل مشاهده است. فشار در ابتدا و انتهای ورق تک پله درست مشابه فشار در ورق پروازی بدون پله صفر است. همچنین با افزایش ارتفاع پله، قله فشار به سمت جلو پیشروی کرده و در ناحیه پشت پله به سبب جدایش جریان و




**شکل ۵- مقایسه ضریب فشار بر روی ورق پله‌دار با تغییر ارتفاع پله از تحلیل عددی تحقیق حاضر برای نمونه مدل‌های B1**




**شکل ۶- مقایسه سطح آزاد در محل پله بر روی ورق پله‌دار با تغییر ارتفاع پله از تحلیل عددی تحقیق حاضر برای نمونه مدل‌های B1**

خشک شدن بخشی از ورق در پشت پله، فشار در آن قسمت صفر شده است و نقطه فشار ماکزیمم بعد از پله با افزایش ارتفاع پله در حال افزایش است.

شکل ۶ تغییرات سطح آزاد در محل پله را در اثر تغییر در ارتفاع پله نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع پله، جریان پایین‌دست به سمت عقب جابجا می‌شود. آبی که از پله جدا می‌شود، مانند یک سطح آزاد رفتار نموده و دوباره به بخش پشتی پله می‌رسد.

اگر زاویه‌تریم ورق کوچک فرض شود نیروی هیدرودینامیکی قائم به (سمت بالا) می‌تواند به‌عنوان لیفت مدنظر قرار گیرد. البته این یک قیاس صحیح و قانونمند نیست، چون به‌طورکلی اصول لیفت برای این نوع شناورها متفاوت است ولی با توجه به کوچک بودن مقادیر تریم می‌تواند یک تقریب قابل‌قبول باشد.

برای به‌دست آوردن درگ اصطکاکی از رابطه زیر استفاده می‌شود.

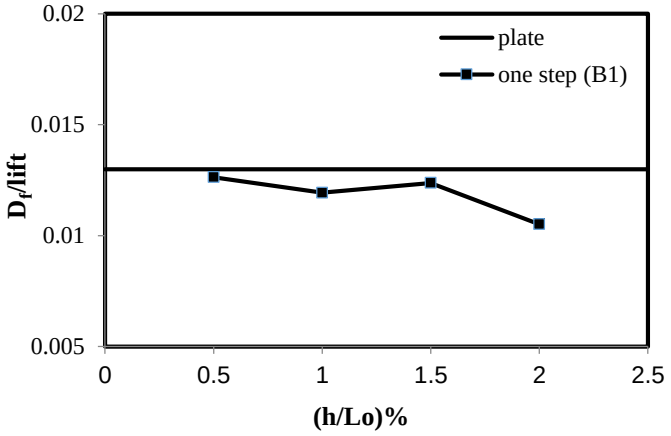
$$D_f = C_f.\frac{1}{2}\rho_w v^2 L_d B \qquad (۹)$$

در این رابطه $C_f = 0.025,$ در نظر گرفته شده است. $B$ را به دلیل دوبعدی بودن مسئله برابر با ۱ در نظر می‌گیریم $L_d$ برابر طول سطح خیس است [۷]. همان‌گونه که در شکل ۷ قابل‌مشاهده است، نسبت درگ اصطکاکی به لیفت کل در بیشترین ارتفاع نسبت به کمترین ارتفاع در حدود ۲۹ درصد کاهش پیدا می‌کند.



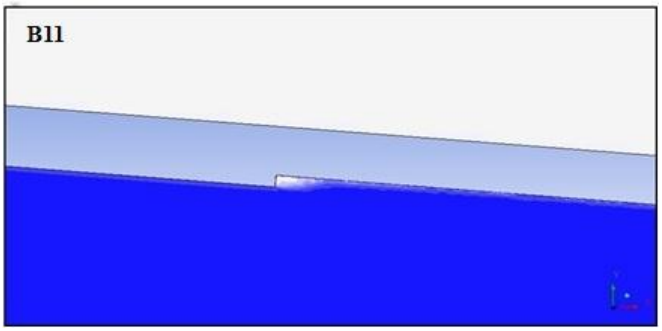
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]

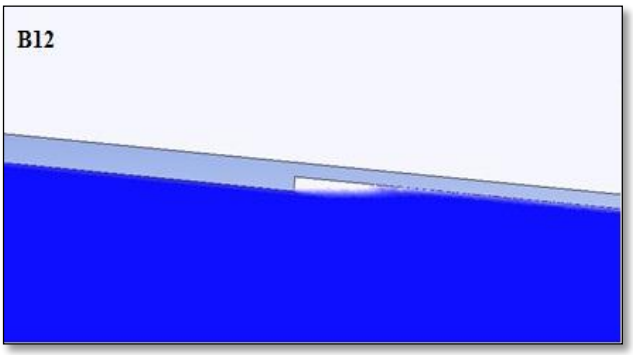



**شکل ۷- نسبت درگ اصطکاکی به لیفت کل در مدل‌های B1**

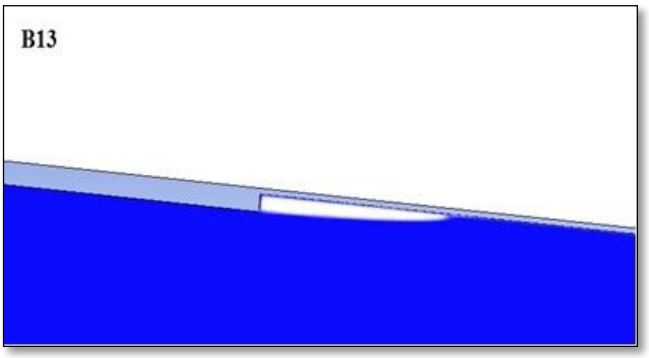
شکل ۸ جریان سطح آزاد سیال در محل پله برای مدل‌های مختلف B1 را نشان می‌دهد.



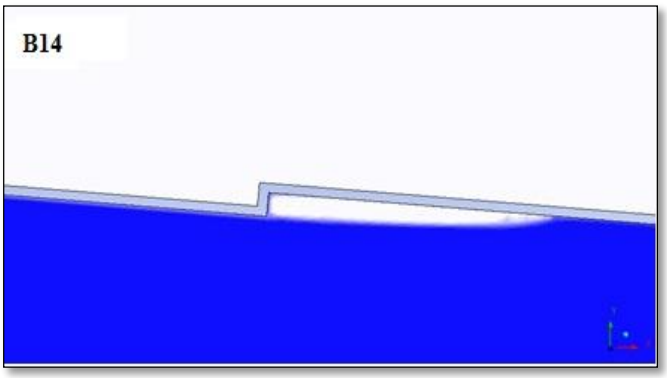

**۸ (الف) مدل B11**




**۸ (ب) مدل B12**




**۸ (ج) مدل B13**



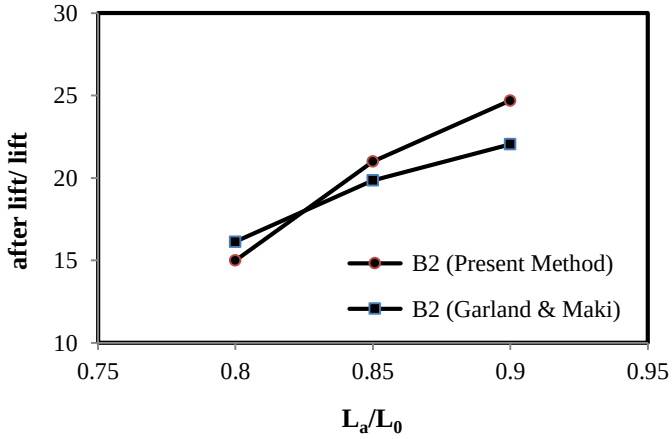

**۸ (د) مدل B14**

**شکل ۸- جریان سطح آزاد در محل پله در مدل‌های B1،(الف): مدل B11، (ب): مدل B12، (ج): مدل B13، (د): مدل B14**

## ۵-۲- مدل B2

در گام دوم، موقعیت طولی پله نسبت به پاشنه ترانزوم جابجا می‌شود تا مکان مناسب پله برای بهبود نتایج مشخص شود. با جابجایی موقعیت طولی پله سه مدل دیگر تعریف شده است. هر چه نسبت لیفت اضافی پشت پله به لیف کل بیشتر باشد، نتیجه مطلوب‌تری در افزایش لیفت کلی دارد. طبق شکل ۹ که نسبت لیفت پشت پله به لیفت کل را نشان می‌دهد، با نزدیک شدن محل پله به مرکز فشار، این نسبت به بالاترین مقدار خود حدود ۲۴/۷ درصد می‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که هر چه محل پله به مرکز فشار و جرم نزدیک‌تر باشد، این نسبت نتیجه مطلوب‌تری دارد.

شکل ۱۰ نمودارهای سطح آزاد و جدایش جریان در محل پله را برای مدل‌های B2 نشان می‌دهد. محل طولی پله در ورق متغیر قرار داده‌شده است. هر چه فاصله پله نسبت به مرکز فشار بیشتر می‌شود ناحیه خشک پشت پله افزایش می‌یابد.



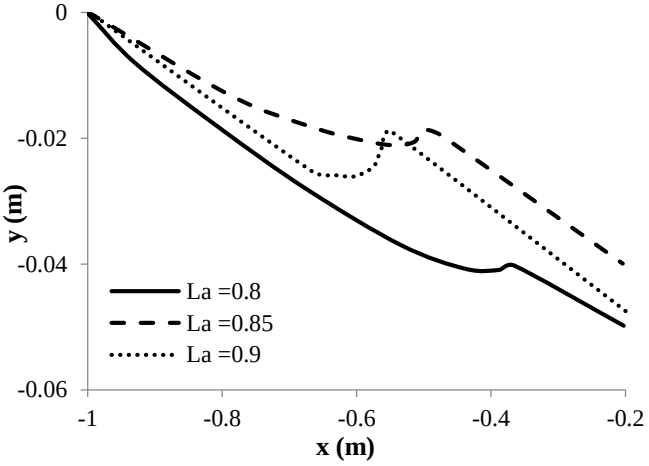

**شکل ۹- نسبت لیفت پشت پله به لیفت کل در مدل‌های B2**



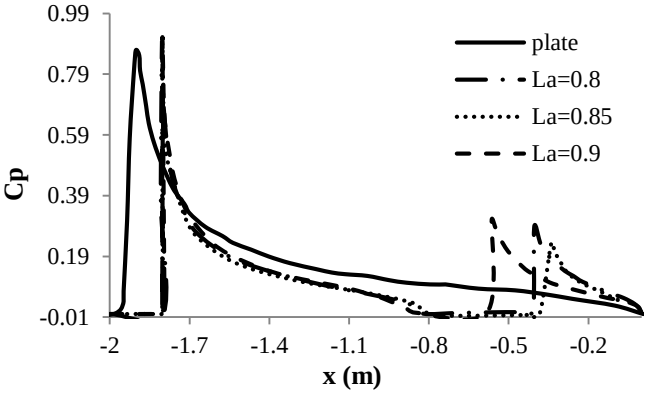
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]

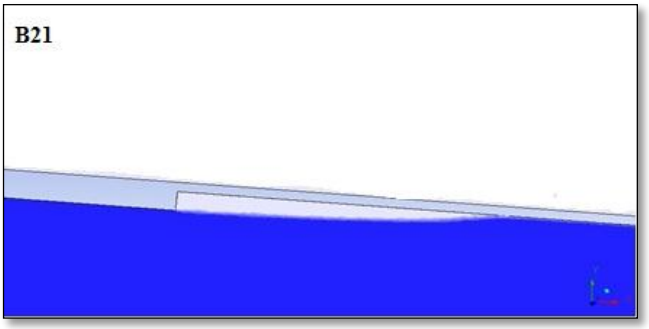
شکل ۱۱ مقایسه ضریب فشار ورق پله‌دار در اثر جابجایی موقعیت طولی پله و ورق تخت بدون پله را نشان می‌دهد. با فاصله گرفتن محل پله از مرکز فشار و مرکز جرم ورق، قله فشار ماکزیمم بعد از پله کاهش پیدا می‌کند. می‌توان به این نتیجه رسید که فشار آب وابستگی کمی در محل طولی پله نسبت به ارتفاع پله دارد.



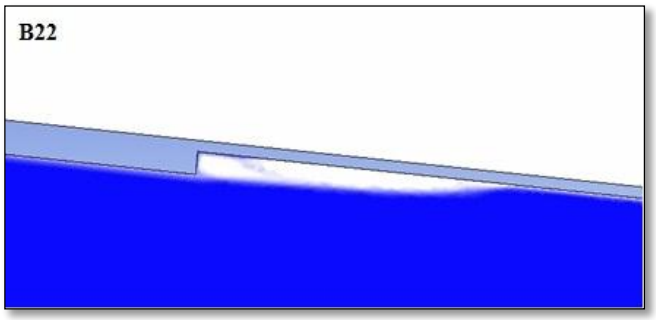

**شکل ۱۰- مقایسه سطح آزاد در محل پله بر روی ورق پله‌دار با جابجایی محل پله از تحلیل عددی تحقیق حاضر برای نمونه مدل‌های B2**



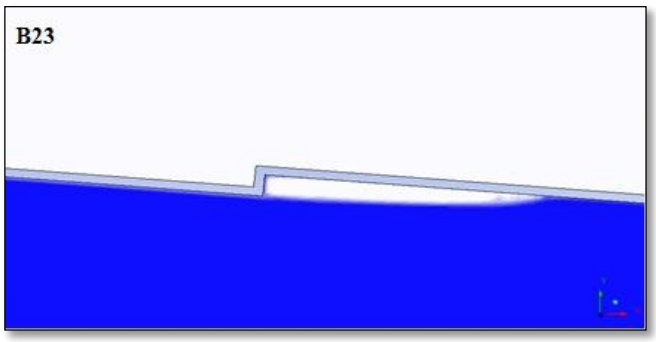

**شکل ۱۱- مقایسه ضریب فشار بر روی ورق پله‌دار با جابجایی محل پله از تحلیل عددی تحقیق حاضر برای نمونه مدل‌های B2**




**۱۲ (الف) مدل B21**



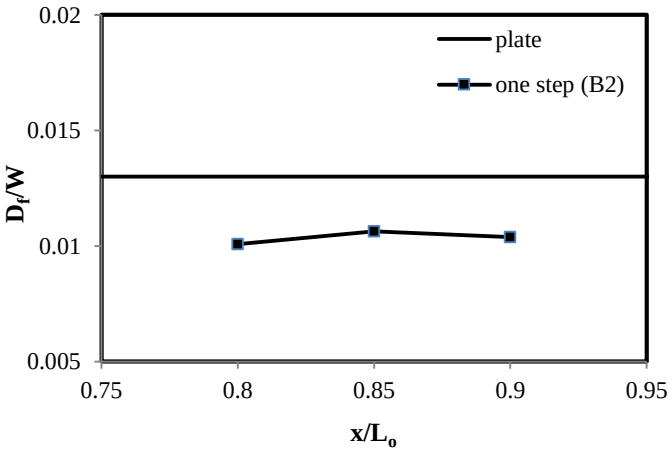

**۱۲ (ب) مدل B22**




**۱۲ (ج) مدل B23**

**شکل ۱۲- جریان سطح آزاد در محل پله در مدل‌های B2،(الف): مدل B21، (ب): مدل B22، (ج): مدل B23**

شکل ۱۲ جریان سیال در محل برخورد با پله برای مدل‌های **B2** که بیانگر تغییر در موقعیت طولی پله هستند را نشان می‌دهد. درگ اصطکاکی متناسب با طول سطح خیس تغییر می‌کند و با آن رابطه مستقیمی دارد و همان‌طور که طول سطح خیس با افزایش فاصله از مرکز فشار و جرم کمتر می‌شود درگ اصطکاکی هم کاهش می‌یابد. شکل ۱۳ نسبت درگ اصطکاکی به لیفت کل را با تغییر محل طولی پله نشان می‌دهد. این مقدار در فاصله ۰/۸ متر از پاشنه ترانزوم، حدود ۳ درصد نسبت به فاصله ۰/۹ متری از پاشنه ترانزوم کمتر است.




**شکل ۱۳- نسبت درگ اصطکاکی به لیفت کل در مدل‌های B2**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]

با دقت در نمودارها می‌توان گفت که افزایش ارتفاع پله در کاهش مقاومت اصطکاکی اثر مثبتی داشته و همچنین با افزایش فاصله موقعیت طولی پله از مرکز فشار و جرم نتایج مناسبی در کاهش نسبت درگ به لیفت دارد. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت، تغییر در ارتفاع پله نسبت به موقعیت طولی پله، تأثیر بیشتری در بهبود نتایج دارد، چراکه درگ اصطکاکی با افزایش ارتفاع پله حدود ۲۹ درصد کاهش می‌یابد ولی با افزایش موقعیت طولی نسبت به مرکز فشار حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج حاصله با نتایج گارلند و مکی تطابق خوبی داشته که نشان از دقت مدل‌سازی انجام‌شده در حل مسائل سطح آزاد است.

## ۶- نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای مؤثر در بهبود کارایی شناورهای پروازی استفاده از المان‌های هیدرودینامیکی مانند پله است. بدنه پله‌دار چیدمانی جایگزین برای بدنه‌های پروازی محسوب می‌شود. در این مطالعه، سعی بر آن بود تا با به‌کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی جریان سیال در ورق پروازی پله‌دار در آب آرام شبیه‌سازی شود. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی ورق پروازی پله‌دار نشان داد که با افزایش ارتفاع پله و فاصله گرفتن پله نسبت به مرکز فشار، نسبت درگ به لیفت کاهش می‌یابد. همچنین از نمودارهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی می‌توان گفت نقش تأثیرات تغییر در ارتفاع پله در مقایسه با جابجایی موقعیت طولی پله از اهمیت بیشتری برخوردار است.

## کلید واژگان

1- Transverse steps
2- Planing vessels
3- Transom
4- Froude number
5- Keel Line
6- Beam Line
7- Local Trim

## ۶ - مراجع


1- Sottorf, W., (1932), *Experiments with planing surfaces*, Report NACA TM 739, Washington, D.C. (USA)

2- Wagner H., (1932), *Über Stoß-und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten*, ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 12(4), pp 193-215

3- Shoemaker, J. M., (1934), *Tank tests of flat and v-bottom planing surfaces*, Report NACA TN 509, Washington, D.C. (USA)

4- Sedov, L. I., (1965), *Two-dimensional Problems in Hydrodynamics and Aerodynamics*, Interscience, New York

5- Pierson, JD, and Leshnover, S., (1950), *A study of the flow, pressures and loads pertaining to prismatic vee-planing sur-faces*, Experimental Towing Tank Laboratory Report. Report N382, Stevens Institute of Technology, NJ, USA.

6- Smiley, R. F., (1952), *The Application of Planing Characteristics to the Calculation of the Water-Landing Loads and Motions of Seaplanes of Arbitrary Constant Cross Section* (No. NACA-TN-2814). NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION WASHINGTON DC.

7- Schnitzer, E., (1952), *Theory and procedure for determining loads and motions in chine-immersed hydrodynamic impacts of prismatic bodies* (No. NACA-TN-2813). NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION WASHINGTON DC.

8- Brizzolara, S., Serra, F.,(2007), *Accuracy of CFD codes in the prediction of planing surfaces hydrodynamic characteristics*, 2nd International Conference on Marine Research and Transportation, pp. 147-159

9- Svahn, D., (2009), *Performance Prediction of Hulls with Transverse Steps*, A Report of Master's Thesis, The Royal Institute of Technology, KTH, Centre for Naval Architecture.

10- Makasyeyev, M. V., (2009), *Numerical modeling of cavity flow on bottom of a stepped planing hull*, Proceedings of the 7th International Symposium Cavitation, Paper no. 116

11- Savitsky, D., & Morabito, M. (2010), *Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls*, Marine Technology, Vol. 47(1), pp 1-16

12- 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, Vol 4(2), pp 162-171

13- Taunton, D. J., Hudson, D. A., Shenoi, R. A., (2010), *Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls-part 1: performance in calm water*, International Journal of Small Craft Technology, Vol 152, pp 55-75

14- Garland, W. R., Maki, K. J., (2012), *A numerical study of a two-dimensional stepped planing surface*, Journal of Ship Production and Design, Vol 28(2), pp 60-72

۱۵- ساجدی، م.، سالاری، م.، شفایی، ه. (۱۳۹۲). *تحلیل دینامیک سیالات عددی جریان پشت یک بدنه شناور پلنینگ و بدنه با تک پله عرضی*، مجموعه مقالات پانزدهین همایش صنایع دریایی، کیش.


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.25.2.8 ]