# تحلیل هیدرودینامیکی شناور تندرو تک پله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش سطح پاسخ

**امین نجفی[۱]، محمدرضا نگهداری[۲]***

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین(ع)، najafi.sharif@yahoo.com
[۲] دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، negahdari@cmu.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲

*کلمات کلیدی:*
شناور سرشی
هیدرودینامیک
پله عرضی
نیروی پسا
دینامیک سیالات محاسباتی

**چکیده**

استفاده از فرم پله در کف شناور، در صورتی که به درستی و در موقعیت مناسب خود طراحی و اجرا شود، از عوامل موثر در کاهش مقاومت و افزایش پایداری در شناورهای تندرو سرشی می باشد. وجود پله در کف این نوع شناورها باعث ایجاد یک جدایش جریان می‌شود و همین موضوع باعث کاهش سطح خیس بر روی شناور و در نتیجه کاهش نیروی پسا بر روی بدنه و همچنین کاهش تریم دینامیکی می‌گردد. در این مطالعه با ایجاد تغییرات در سه پارامتر ورودی یک فضای طراحی ایجاد گردید. پارامتر های ورودی شامل سرعت خطی شناور، فاصله پله از پاشنه شناور و تغییر ارتفاع پله در عرض شناور می باشد. مطالعات حاضر با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی همراه شده با روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی توسط نرم افزار STAR CCM صورت پذیرفت. همچنین از روش طراحی آزمایش ها و روش باکس بنکن برای انتخاب نمونه ها و از مدل کریگینگ برای فرآیند سطح پاسخ استفاده گردید. همچنین از الگوریتم ژنتیک و روش غربالگری برای پیدا کردن نقاط بهینه استفاده شده است. پارامترهای خروجی مورد بررسی شامل نیروی پسا و برآ وارد بر بدنه شناور و تریم کلی شناور می باشد. نتایج آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ورودی نشان می دهد که سرعت شناور تاثیرگذارترین پارامتر بر روی مقادیر پارامترهای خروجی است. نتایج حاصل از بررسی نشان می دهدکه با افزایش سرعت، نیروی برا وارد بر بدنه به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه ددرایز پاشنه، مقدار نیروی برآ کاهش می‌یابد که این روند به‌صورت پیوسته نیست و در زاویه ددرایزهای بالا تا حدودی ثابت است. همچنین با افزایش سرعت جریان، مقدار تریم کل شناور کاهش می‌یابد. اما این تغییرات در زاویه ددرایز های مختلف متفاوت است. با افزایش زاویه ددرایز مقدار تریم افزایش می‌یابد. علت این امر هوادهی بهتر در این حالت است. همچنین نتایج نشان می دهد، با افزایش فاصله پله از پاشنه مقدار تریم کاهش می‌یابد.

# Hydrodynamic analysis of high speed planning vessel with a single step using computational fluid dynamics and response surface method

**Amin Najafi [1], Mohammad Reza Negahdari [2*]**

*[1] Faculty of Mechanical Engineering, Imam Hossein University; najafi.sharif@yahoo.com*
*[2] Faculty of Marine Engineering, Chabahar Maritime University; negahdari@cmu.ac.ir*

**ARTICLE INFO**

*Article History:*
Received: 18 Nov 2021
Accepted: 21 Feb 2023

*Keywords:*
Planning hull
hydrodynamic
Drag force
Step
computational fluid dynamics

**ABSTRACT**

The use of the step form in the bottom of the vessel, if it is designed and implemented correctly and in its appropriate position, is one of the effective factors in reducing resistance and increasing stability in high speed vessels. The presence of a step in the bottom of these types of vessels creates a flow separation, and this reduces the wet surface on the hull and as a result reduces the drag force on the body and also reduces the dynamic trim. In this study, a design space was created by making changes in three input parameters. The input parameters include the linear speed of the vessel, the distance of the step from the stern of the vessel and the change of the height of the step in the width of the vessel. The present studies have been investigated using computational fluid dynamics simulation combined with the response surface method. Computational fluid dynamics simulation was done by STAR CCM software. Also, the experiment design method and the Box-Benken method were used to select the

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

samples and the Kriging model was used for the response level process. Genetic algorithm and screening method have also been used to find optimal points. The investigated output parameters include drag and lift force on the body of the vessel and overall trim of the vessel. The results of the sensitivity analysis on the input parameters show that the vessel speed is the most influential parameter on the values of the output parameters. The results of the investigation show that with increasing speed, the force on the body increases continuously. As the angle of the deadrise increases, the amount of lift force decreases, which is not continuous and is somewhat constant at high deadrise angles. Also, with the increase of the current speed, the trim value decreases. But these changes are different in different angles. Trim amount increases with the increase of deadrise angle. The reason for this is better ventilation in this case. Also, the results show that the amount of trim decreases with the increase of the step distance from the stern.

**۱ - مقدمه**

در سال های اخیر مطالعات زیادی برای ارزیابی و بررسی میزان تاثیر عوامل مختلف بر روی شناورهای سرشی مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش نیروی پسا وارد بر بدنه شناور و افزایش میزان پایداری آن از جمله مهمترین موارد مورد بررسی می باشد. بنابراین ایجاد تغییرات هندسی در بدنه شناور و استفاده از شناور در شرایط محیطی مناسب در رسیدن به حالت بهینه کمک شایانی می تواند بکند. استفاده از پله در کف بدنه شناور یکی از موارد موثر در کاهش نیروی پسا و افزایش پایداری شناور می باشد. وجود پله در کف شناور باعث کاهش سطح خیس و در نتیجه کاهش نیروی پسا وارد بر بدنه شناور و همچنین کاهش تریم دینامیکی می گردد.

تاکنون مطالعات زیادی برای بررسی هیدرودینامیک شناورهای سرشی صورت پذیرفته است. سویستکی[۱] در سال ۱۹۶۴ در بررسی یک شناور سرشی بدون پله در زاویه ددرایزهای مختلف و توانست روابطی برای نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه در حالت های مختلف بدست آورد. فریدزما[۲] با معرفی یک شناور سرشی منشوری به بررسی رفتار آن در امواج منظم و نامنظم پرداخت. سویستکی و همکاران[۳] با بررسی اثر اسپری آب در پاشنه و اثر آن بر روی نیروی پسا را بررسی کردند. با افزایش قدرت محاسباتی استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه سازی رفتار هیدرودینامیکی شناورهای سرشی افزایش یافت. به طور مثال کاپنتو[۴] با استفاده از روش حجم محدود به منظور حل معادلات پیوستگی و ناویر استوکس کوپل شده با معادلات حجم سیال به بررسی شناور سرشی پرداختند. ازکوتا[۵] با استفاده از معادلات RANS حرکات شناور را در حالت پایدار و غیر پایدار در آب آرام، موج منظم و نامنظم بررسی کرد. ساوندر و همکاران به بررسی تاثیر زاویه ددرایز بر روی عملکرد شناور سرشی با استفاده از استار سی سی ام پرداختند. وانگ و همکاران[۶] با استفاده از معادلات RANS به همراه روش حجم سیال، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور را محاسبه کردند. آن ها همچنین تاثیر موج را بر روی مولفه های هیدرودینامیکی و پیشروی شناور مورد بررسی قرار دادند. نجفی و همکاران[۷] به بررسی تاثیر اینترسپتور بر روی شناور کاتاماران پرداختند. آن ها ضرایب هیدرودینامیکی ناشی از وجود و عدم وجود اینترسپتور را مورد بررسی قرار دادند که به طور گسترده ای در کنترل حرکت شناور موثر است. لی و همکاران[۸] شناور با هفت حالت پاشنه و دارای سه وزن و سرعت های مختلف را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در تمامی تست ها نشان داده شد که شناور دارای پله عرضی دارای مقاومت کمتری نسبت به حالت بدون پله می باشد. نورقاسمی و همکاران[۹] به بررسی اثر زاویه پله عرضی بر روی هیدرودینامیک شناور سرشی پرداختند. آن ها با درنظر گرفتن شناور به صورت دودرجه آزادی، خروجی های نیروی پسا، تریم، بالا آمدگی مرکز جرم و طول کیل و چاین خیس شده را بدست آوردند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته درمورد رفتار هیدرودینامیکی شناورهای سرشی، نیاز به مطالعات بیشتر در این حوزه با در نظر گرفتن پارامترهای فضای طراحی احساس می‌شود. استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی همراه شده با فرآیند پاسخ سطحی می تواند در کاهش هزینه های محاسباتی و رسیدن به پاسخ ها در یک فضای پیوسته کمک شایانی بکند. همچنین استفاده از این روش در بررسی حساسیت پارامترها و تشخیص شرایط بهینه می تواند موثر باشد[۱۰, ۱۱]. باکس و ویلسون[۱۲] یک روش آماری را ارائه کردند که به روش پاسخ سطحی معروف است که به ارزیابی چند پارامتر طراحی در یک فضای طراحی می‌پردازد.

در این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی همراه شده با روش پاسخ سطحی به بررسی تاثیر پارامترهای سرعت شناور، فاصله پله از پاشنه شناور و تغییر ارتفاع پله در عرض شناور بر روی هیدرودینامیک شناور پرداخته شده است. شناور به صورت یک جسم صلب دارای حرکت دورانی و حرکت طولی در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر جریان به صورت آشفته گذرا در نظر گرفته شده و جریان دوفاز توسط معادلات حجم سیال مدلسازی



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

شده است. برای رسیدن به پاسخ بهینه از روش های بهینه سازی تکاملی[۱]و به طور خاص از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. ابتدا برای هر کدام از پارامترهای خروجی (توابع هدف) به طور جداگانه با استفاده از روش بهینه سازی غربالگری[۲]نقاط بهینه مشخص می گردد. روش کار غربالگری نمونه گیری مستقیم[۳]توسط یک تولید کننده شبه تصادفی و سپس مرتب سازی نمونه ها بر اساس اهداف می باشد. توابع هدف در این بخش شامل نیروی درگ و برآ، زاویه تریم و بررسی شرایط ایجاد ناپایداری طولی می باشد. همچنین نقطه بهینه با در نظر گرفتن شرایطی که هر سه پارامتر خروجی به طور همزمان در حالت بهینه خود باشند، با استفاده از روش بهینه سازی MOGA[۴] بدست آمده است.

## ۲- روابط و معادلات حاکم

در این تحقیق شناور به صورت یک جسم صلب بر روی آب قرار دارد. جریان آب به صورت مغشوش درنظر گرفته شده و به علت بوجود آمدن تغییرات وابسته به زمان معادلات به صورت گذرا در نظر گرفته می شود. بنابراین معادلات حاکم بر جریان آشفته در اطراف شناور به صورت کوپل شده با معادلات حرکت جسم صلب همراه گردد. معادلات حاکم بر آن عبارتست از معادله پیوستگی و ناویراستوکس که پس از اعمال متوسط گیری رینولدز به صورت زیر می باشند: [۱۳]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j)=0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{x_j}(\tau_{ij}-\rho\overline{u_i' u_j'})+g_i \quad (۲)$$

که در روابط بالا $\rho$ چگالی جریان، $P$ فشار، $u$ سرعت و $g$ شتاب جاذبه و $\rho\overline{u_i'u_j'}$ بیانگر تنش‌های رینولدز می‌باشد. بر اساس روابط ویسکوزیته گردابه‌ای[۵]که تنش‌های رینولدز و گرادیان‌های سرعت را با هم مرتبط می سازد، معادلات متوسط گیری بالا به صورت زیر در می‌آیند : [۱۳]

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+g_i \quad (۳)$$

که در رابطه (۳) آن $\mu_{eff}$ ویسکوزیته موثر[۶]نامیده می‌شود و به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\mu_{eff}=\mu+\mu_t \quad (۴)$$

مدلسازی تانسوز تنش، نسبتاً مشکل می‌باشد زیرا برای تعیین آن نیاز به اطلاعات دقیقی در خصوص ساختار پدیده توربولانس در سیال است که غالباً در دسترس نمی‌باشد. لذا برای تعیین اندازه تنش‌های رینولدز باید از یکی از مدل‌های توربولانسی موجود استفاده گردد. به همین علت از مدل $K-\varepsilon$ استفاده گردید که در این معادلات $K$ معرف انرژی جنبشی جریان آشفته و $\varepsilon$ نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته می باشد.

برای سطح مشترک آب و هوا و به علت تغییرات شدید وابسته به زمان و مکان از مدل حجم سیال استفاده گردید. در این حالت از معادلات زیر برای محاسبه نسبت آب و هوا در هر مرحله زمانی استفاده می شود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+\vec{\nabla}.(\alpha\vec{u})=0 \quad (۵)$$

در حالتی که کل حجم سلول در بردارنده آب باشد $\alpha$ برابر یک می گردد؛ در حالتی که کل حجم سلول دربردارنده هوا باشد $\alpha$ برابر صفر و در حالتی که بخشی از سلول شامل آب و بخشی شامل هوا باشد $\alpha$ بین صفر و یک خواهد بود. در این مدل برای حل معادلات پیوستگی و ناویر استوکس از چگالی و لزجت موثر که از رابطه های زیر بدست می آید استفاده می شود: [۱۳]

$$\rho_{eff}=\alpha\rho_{air}+(1-\alpha)\rho_{water} \quad (۶)$$

$$v_{eff}=\alpha v_{air}+(1-\alpha)v_{water} \quad (۷)$$

شناور به صورت یک جسم صلب دارای حرکت انتقالی و دورانی درنظر گرفته شده است. فاصله مرکز جرم شناوراز پاشنه برابر ۰.۹ متر و از کیل شناور قبل از پله برابر ۰،۱۱ متر می باشد. معادلات حرکات انتقالی به صورت زیر است: [۶]

$$m\ddot{X}_G=\sum F_{Ext} \quad (۸)$$

که در معادله (۸)، $m$ جرم جسم می باشد و $\ddot{x}_G$ بیانگر تانسور شتاب انتقالی مرکز جرم است. همچنین معادلات حرکات دورانی حول مرکز جرم به صورت زیر است:

$$I\ddot{\theta}_G=\sum M_{Ext} \quad (۹)$$

که در معادله (۹)، $I$ تانسور ممان اینرسی و $\ddot{\theta}_G$ تانسور شتاب زاویه ای حول مرکز جرم می باشد. از آنجا که ساختار هندسی شناور در راستای عرض متقارن است بنابراین تنها یک حرکت انتقالی در راستای محور $z$ و حرکت دورانی در راستای محور $y$ برای شناور درنظر گرفته شده است.

## ۳- فرآیند بهینه سازی

برای بدست آوردن مولفه های مقاومت در بدنه پله دار بایستی از ترکیب روش ساویستکی و تئوری ویک که توسط ساوان ارائه شده

---

[۱] Evolutionary
[۲] Screening
[۳] Sampling direct
[۴] Multi-Objective Genetic Algorithm
[۵] Eddy – Viscosity
[۶] Effective Viscosity

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

است، استفاده کرد. برای این منظور باید پارامترهایی که در ادامه آمده است به ترتیب محاسبه شوند.

ضریب سرعت بر اساس عرض محلی به شکل زیر خواهد بود: [۱۴]

$$C_{V2} = \frac{V}{\sqrt{g.b_{2L}}} \quad (۱۰)$$

ضرایب نیروی لیفت یا برآ نیز با روابطی که در ادامه آمده است، بدست می آید: [۱۴]

$$C_{L0_2} = \tau_{2L}^{1.1}\left(0.012\lambda_{2L}^{0.5} + \frac{0.0055\lambda_{2L}^{2.5}}{C_{V2}^2}\right) \quad (۱۱)$$

$$C_{L\beta_2} = C_{L0_2} - 0.0065\beta_{2L}C_{L0_2}^{2.5} \quad (۱۲)$$

زمانی که از این ضرایب برای محاسبه نیروی برآ استفاده می شود، نیروی حاصله بر سطح آب عمود است. به منظور دستیابی به مولفه عمودی این نیرو که باید بر نیروی وزن غلبه کند، نیروی برآی حاصله باید دو بار تصویر شود: یک بار به علت زاویه دردرایز محلی و دیگری به سبب زاویه تریم محلی که در ادامه مشاهده می شود.

$$F_{L2_2} = \frac{1}{2}C_{L\beta_2}\rho V^2 b_2^2 \cos(\beta_2 - \beta_1) \quad (۱۳)$$

$$F_{L2} = F_{L2_2}\cos(\tau_2 - \tau_{2L}) \quad (۱۴)$$

در این مرحله بایستی بعد از بدست آوردن نیروی برآ بدنه عقب شرط تعادل عمودی بدنه پله دار بررسی شود. برای این منظور رابطه زیر تعریف شده که با یک حدس اولیه برای مقدار وزنی که باید بدنه اول حمل نماید، شروع می شود. این حدس با مقدار اولیه $\Omega$ تعریف می شود و به جای مقدار mg مقدار زیر نوشته می شود:

$$F_{L1} = \Omega mg \qquad 0 \le \Omega \le 1 \quad (۱۵)$$

با قرار دادن در شرط زیر در صورت برآورده شدن شرط مورد نظر، مقدار وزنی که بدنه جلو باید حمل نماید، بدست می آید:

$$\uparrow: F_{L1} + F_{L2} - mg = \gamma \quad (۱۶)$$

فاصله بین راستای اثر نیروی تراست از مرکز ثقل نی بصورت زیر بدست می آید:

$$f = (VCG_2 + e)\cos(\varepsilon) - LCG_2\sin(\varepsilon) \quad (۱۷)$$

مرکز فشار بدنه اول و دوم نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C_{P1} = 0.75 - \frac{1}{\frac{5.21C_{V1}^2}{\lambda_1^2} + 2.39} \quad (۱۸)$$

نیروهای عمودی نیز از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$N_1 = \Omega\frac{mg}{\cos\tau_1} = \frac{F_{L1}}{\cos\tau_1}$$
$$N_2 = (1-\Omega)\frac{mg}{\cos\tau_2} = \frac{F_{L2}}{\cos\tau_2} \quad (۱۹)$$

در نهایت بایستی معادله گشتاور پیچشی ارضا شود:

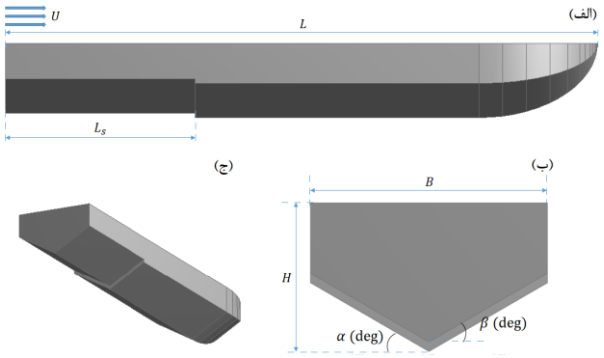
$$CG: N_1c_1 + N_2c_2 + D_{f1}a_1 + D_{f2}a_2 - T.f = 0 \quad (۲۰)$$

شرط برقراری این معادله آن است که گشتاور کل برابر با صفر باشد. اگر مقدار آن منفی باشد، بدان معنی است که زاویه تریم برای برقراری تعادل عمودی خیلی کم می باشد و زاویه بیشتر برای بررسی مجدد مورد نیاز می باشد. این عمل تا آنجا تکرار می شود که گشتاور مثبت شود. گشتاور متعادل تقریباً بین دو تریم نهایی بدست آمده قرار دارد. زاویه تریم دقیق تر از طریق درون یابی بین دو تریم نهایی بدست می آید. [۱۴]

## ۴- مدلسازی

### ۴-۱- هندسه

در این مطالعه، از شناور فریدزما استفاده شده که به صورت یک شناور منشوری است. برای یکسان بودن نتایج مابین مدل ایجاد شده و شناور واقعی بایستی مدل ساخته شده دقیقاً با یک مقیاس یکسان در همه ابعاد نسبت به شناور اصلی کوچک شده باشد و تمام جزئیات ساختاری شناور اصلی را دارا باشد. مشخصات هندسی مدل ایجاد شده در جدول زیر مشاهده می شود. همانطور که در شکل زیر مشاهده می شود به وسیله یک بریدگی در ناحیه عقبی شناور به سمت بالا یک پله در کف شناور بوجود آمده است. همانطور که در شکل ۱ (الف) مشاهده می شود طول شناور برابر ۲/۵ متر، شکل زیر(ب) مشاهده می شود عرض شناور (B) برابر ۰/۵ متر و ارتفاع شناور(H) (از کیل در قسمت سینه تا سطح بالایی) برابر ۰/۳۱۲ متر می باشد. همچنین زاویه دردرایز شناور در قسمت جلویی پله($\alpha$) ثابت و برابر ۳۰ درجه درنظر گرفته شده است.




**شکل ۱: شناور فریدزما مدل شده (الف) نما از جانب، (ب) نما از عقب و (ج) نمای سه بعدی**

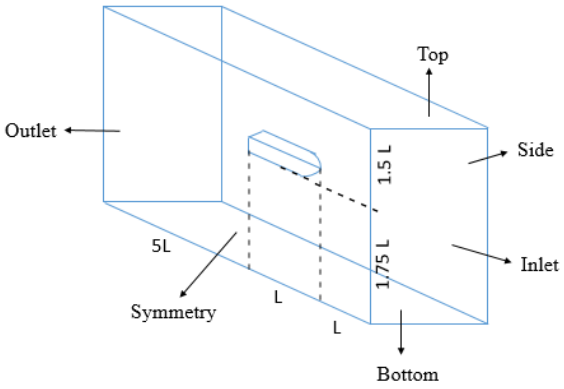
### ۴-۲- محدوده محاسباتی و شرایط مرزی

جریان حول شناور نسبت به عرض آن متقارن است بنابراین می توان ناحیه محاسباتی را به یک ناحیه از خط تقارن در وسط شناور در نظر گرفت. ابعاد دامنه محاسباتی و فاصله مرزها از شناور به گونه ای انتخاب گردیده است که امکان اعمال شرایط به مانند حالت واقعی باشد. در شکل ۲ نمایی از دامنه محاسباتی به همراه



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

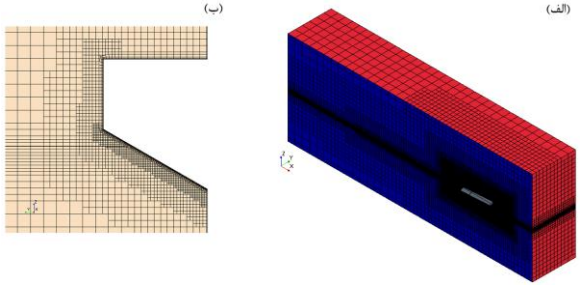
شرایط مرزی آورده شده است. در ورودی دامنه محاسباتی شرط مرزی سرعت ورودی به صورت جریان عمود بر سطح با سرعتی برابر سرعت شناور(به علت ثابت نگه داشتن شناور) اعمال گردید. در مرز خروجی شرایط مرزی فشار خروجی با توزیع فشار هیدرواستاتیکی وابسته به مکان اعمال گردید. صفحه کناری با شرط مرزی دیوار با لغزش آزاد، کف محدوده محاسباتی دارای شرط دیوار بصورت عدم لغزش، صفحه متقارن شرط تقارن، به صفحه بالایی دامنه محاسباتی شرط مرزی سرعت ورودی که با توجه به ویژگی جریان اطراف دامنه اجازه ورود و خروج جریان داده می شود و برای بدنه شناور شرط دیوار به صورت عدم لغزش اعمال می گردد.




**شکل ۲: محدوده محاسباتی و شرایط مرزی**

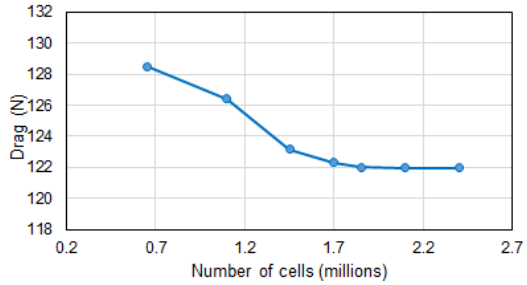
### ۴-۳- شبکه بندی محدوده محاسباتی

تولید شبکه با کیفیت بالا در حل یک مساله عددی بسیار حائز اهمیت است. برای نیل به این مهم همانطور که در شکل ۳ مشهود است محدوده محاسباتی به چندین بخش مجزا تقسیم گردید تا به شبکه با کیفیت بالا و همچنین تعداد مناسب برسد. با توجه به این که تغییرات در نواحی نزدیک به سطح مشترک آب و هوا بیشتر است و همچنین این تغییرات در نزدیکی سطح شناور نیز بسیار بالاست، لذا ابعاد سلول های محاسباتی در این مکان ها کوچکتر از نواحی اطراف دامنه محاسباتی است. همچنین با توجه به ایجاد لایه مرزی در اطراف بدنه شناور و گرادیان های بالای سرعت در راستای عمود بر بدنه از مش لایه مرزی استفاده گردید. ضخامت بی بعد اولین مش لایه مرزی بر روی بدنه شناور $y^+ = 45$ درنظر گرفته شد و تعداد ۱۱ لایه مش لایه مرزی در سطح بدنه استفاده گردید.




**شکل ۳: (الف) نمای سه بعدی از محدوده محاسباتی شبکه بندی شده (ب) نمای دوبعدی در صفحه yz در اطراف بدنه شناور**

برای مستقل شدن مقادیر خروجی از تعداد سلول های محاسباتی، به مطالعه تغییرات یک پارامتر خروجی در تعداد سلول های مختلف پرداخته شد. پارامتر خروجی مورد نظر برای این امر نیروی پسا وارد بر بدنه شناور می باشد. این مطالعه برای شناور با فاصله از پاشنه ۸۰۰ میلی متر، زاویه ددرایز پاشنه ۳۰ درجه و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. دلیل انتخاب این زاویه به عنوان زاویه ددرایز، به علت بالاتر بودن تعادل شناور در این حالت می باشد. تعداد سلول های محاسباتی برای این حالت برابر با ۱,۸۵ میلیون می باشد و برای مدل های مختلف نیز در همین حدود می باشد.




**شکل۴: تغییرات نیروی پسا وارد بر بدنه شناور نسبت به تعداد سلول ها در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه**

## ۵- روش سطح پاسخ

با توجه به هزینه محاسباتی بالا و زمان‌بر بودن استفاده از روش‌های عددی مثل دینامیک سیالات محاسباتی در بررسی تاثیر پارامترهای مختلف (مخصوصا زمانی که چند پارامتر به‌طور همزمان بررسی می‌گردد) و بهینه‌سازی سیستم‌ها و گسترده بودن فضای طراحی در این کار از روش سطح پاسخ استفاده گردید. در این بخش، به قواعد و مقررات نوشتاری و ساختاری به تفکیک و به صورت مشروح پرداخته خواهد شد.

### ۵-۱- پارامترهای ورودی و خروجی

در این مطالعه با تغییر پارامترهای ورودی در بازه‌ای مشخص یک فضای طراحی ایجاد می‌گردد که در آن به بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی و پیدا کردن نقاط بهینه با توجه به نتایج خروجی پرداخته‌شده است.

پارامترهای ورودی که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می گردد شامل سه پارامتر اصلی سرعت شناور، فاصله پله از پاشنه و زاویه ددرایز بعد از پله (تغییر

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

ارتفاع پله در عرض شناور) می باشد. بازه‌ی تغییرات مورد نظر برای مطالعه پارامترهای ورودی به‌صورت جدول ۱ است:

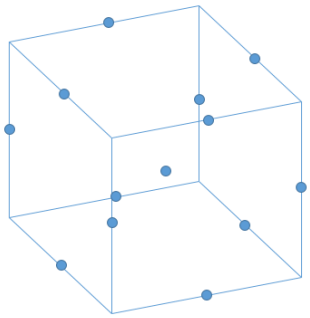
**جدول ۱: بازه ی تغییرات پارامترهای ورودی**

| نام پارامتر | بازه تغییرات |
|---|---|
| سرعت شناور (m/s) | $۸ \leq U \leq ۱۲$ |
| فاصله پله از پاشنه شناور (m) | $۰/۱ \leq L_s \leq ۶$ |
| زاویه ددرایز بعد از پله (بخش پاشنه) (deg) | $۲۷ \leq \beta \leq ۳۳$ |

پارامترهای خروجی شامل دو بخش نیروهای وارد بر بدنه شناور و جابجایی های ایجاد شده بر روی آن است. نیروهای وارد بر بدنه شامل نیروی پسا و برآ وارد بر شناور می باشد و مولفه های جابجایی شامل تریم کلی شناور و بالا آمدگی[۷]مرکز جرم شناور می باشد.

### ۵-۲- انتخاب نمونه ها

انتخاب نمونه‌ها یا همان طراحی آزمایش‌ها[۸]تاثیر بسزایی در بازدهی محاسبات دارد و باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که تمام ناحیه محاسباتی را شامل شود. از روش باکس بنکن[۹] برای انتخاب نمونه‌ها استفاده گردید. استفاده از این روش زمانی که تعداد پارامترهای ورودی کم است مناسب می باشد. نحوه توزیع نمونه ها در فضای طراحی در شکل ۵ آمده است. تعداد نمونه ها برای سه پارامتر ورودی برابر ۱۳ عدد می باشد.



**شکل ۵: توزیع نمونه ها در روش باکس بنکن برای سه پارامتر ورودی**

### ۵-۳- فرآیند پاسخ سطحی

هدف این بخش استفاده از یک روش برای دست آوردن یک تابع است که متغیرهای مستقل آن پارامترهای طراحی و متغیرهای وابسته آن خروجی‌های مسئله می‌باشد. باید تلاش شود تا بهترین روش مدل‌سازی با بهترین تابع انتخاب شود تا بتواند تمام فضای حل را به‌درستی پوشش دهد. روش استفاده شده در این تحقیق روش کریگینگ اصلاح‌شده می‌باشد. مدل کریگینگ در واقع از دو بخش درون‌یابی[۱۰]و رگرسیون[۱۱]تشکیل‌شده است. روش کریگینگ ترکیبی از یک مدل چندجمله‌ای[۱۲]به همراه نوسانات[۱۳]در اطراف روند کلی است: [۹]

$$L(\lambda) = f(\lambda) + g(\lambda) \quad (۲۱)$$

در رابطه (۱۰)، $L(\lambda)$ تابع ناشناخته‌ای (پاسخ نهایی) از متغیر طراحی $\lambda$ ، $f(\lambda)$ یک تابع چندجمله‌ای از $\lambda$ و $g(\lambda)$ یک فرآیند گاوسی توزیع نرمال شده با میانگین صفر، واریانس $\sigma^2$ و کواریانس غیر صفر است.

### ۵-۴-بهینه سازی

برای رسیدن به پاسخ بهینه از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و به‌طور خاص الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. ابتدا برای هرکدام از پارامترهای خروجی (توابع هدف) به‌طور جداگانه با استفاده از روش بهینه‌سازی غربالگری[۱۴]نقاط بهینه مشخص می‌گردد. اصل کار روش غربالگری نمونه‌گیری مستقیم توسط یک تولیدکننده شبه تصادفی و سپس مرتب‌سازی نمونه‌ها بر اساس اهداف می‌باشد. توابع هدف در این بخش شامل کمترین نیروی پسا وارد بر بدنه، بیشترین نیروی برآ وارد بر بدنه و کمترین مقدار تریم کلی شناور می‌باشد.

همچنین نقطه بهینه با در نظر گرفتن شرایطی که چند پارامتر خروجی به‌طور هم‌زمان در حالت بهینه خود باشند با استفاده از روش بهینه‌سازی MOGA به دست آمد.

## ۶- نتایج

در این بخش ابتدا به بررسی مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته بر روی مدل اولیه پرداخته شد و نتایج به دست آمده با مطالعات گذشته مقایسه و مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. در مرحله بعد نتایج حاصل از روش سطح پاسخ برای هرکدام از متغیرهای خروجی آورده شد و نقاط طراحی بهینه معرفی گردید.

---

[۷] Heave
[۸] Design of Experiments
[۹] Box-Behnken Design

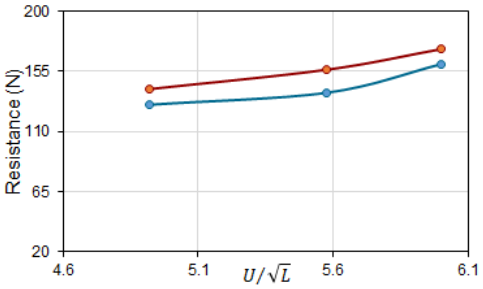
[۱۰] Interpolation
[۱۱] Regression
[۱۲] Polynomial
[۱۳] Fluctuations
[۱۴] Screening



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

### ۶-۱- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مطالعات عددی به بررسی نتایج به دست آمده برای شناور بدون پله و مقایسه آن ها با مطالعه فریدزما[۲] که در سال ۱۹۶۹ صورت پذیرفته می باشد. برای همین وزن مدل برابر ۳۸ کیلوگرم و در زاویه دراز ۳۰ درنظر گرفته شد. با توجه به طول ۲٫۵ متری شناور بازه تغییرات سرعت از ۶ متر بر ثانیه تا ۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (به علت نزدیکی این بازه به بازه مطالعاتی مسئله اصلی). همچنین فاصله مرکز جرم مورد بررسی هم ۰/۸۷۵ متر از پاشنه درنظر گرفته شد.

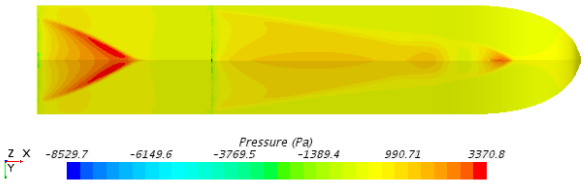



**شکل ۶: : مقایسه نتایج عددی در این مطالعه و نتایج تجربی فریدزما[۲]**

### ۶-۲- مطالعه موردی

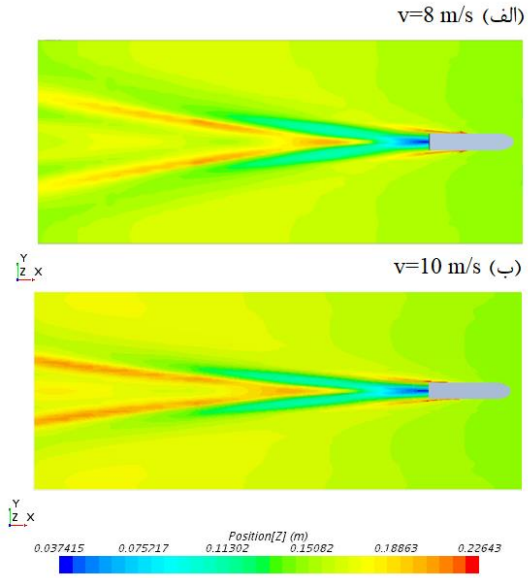
مدل اولیه مورد مطالعه شناور با فاصله پله از پاشنه ۰/۸ متر، زاویه دراز در پاشنه ۳۰ درجه و در سرعت حرکت ۱۰ متر بر ثانیه می باشد. همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، دلیل انتخاب این زاویه به عنوان زاویه دراز، به علت بالاتر بودن تعادل در این حالت می باشد. با افزایش زاویه دراز، تریم استاتیکی به علت افزایش حجم منفی (بویانسی منفی) بیشتر می گردد. همچنین با افزایش زاویه دراز، تریم دینامیکی نیز افزایش می یابد. علت این موضوع این است که در شناورهای دارای دراز کم، مولفه عمودی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر کف بدنه بیشتر است. لذا تا قبل از رسیدن به حالت پروازی کامل، چون مرکز فشار در جلو مرکز ثقل واقع شده است، باعث می شود قسمت سینه شناور بالاتر بیاید و به همین علت تریم افزایش می یابد. در بخش تجربی با استفاده از چند مدل ساخته شده با زوایای دراز کمتر از ۳۰ درجه و بیشتر از آن در سرعت های مختلف، نتایج هیدرودینامیکی مقایسه شده است.

در شکل (۷) کانتور فشار بر روی سطح بدنه نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود در نقطه برخورد آب با کف شناور، فشار زیادی در ناحیه کف شناور بوجود می آید و توزیع فشار تا سطح پله تقریباً یکسان است. با عبور جریان از پله به علت ایجاد سطح خشک فشار کاهش یافته دوباره با برخورد آب به دیواره شناور فشار افزایش می یابد.




**شکل ۷: کانتور توزیع فشار بر روی سطح زیرین شناور( پله در موقعیت ۸۰۰ میلی متر از پاشنه)**

به دلیل حرکت شناور آب اطراف بدنه تغییر شکل یافته و از الگوی نسبتا منظمی پیروی می‌کند. شکل ۸ این الگوی موج اطراف بدنه شناور را نمایش می‌دهد. همان طوری که دیده می‌شود با افزایش سرعت، زاویه پخش موج کمتر(عرض ناحیه موج کاهش می یابد) و میزان فرو رفتگی موج پشت پاشنه بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر اینتراکشن بین بدنه و سطح آب کاهش می یابد؛ که این تغییرات با فیزیک واقعی حرکت شناور در آب تطابق دارد.




**شکل ۸: الگوی موج تولید شده اطراف بدنه شناور در سرعت‌های مختلف**

### ۶-۳- نقاط طراحی انتخاب‌شده و نتایج شبیه‌سازی برای آن‌ها

مقادیر مربوط به هر پارامتر ورودی در نقاط طراحی ایجادشده با استفاده از روش باکس بنکن در جدول زیر مشاهده می‌شود. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مقادیر پارامترهای خروجی مربوط در نقاط طراحی مختلف به دست آمد. بیشترین هزینه محاسباتی و زمان انجام فرآیند مرتبط با به دست آوردن خروجی برای هر کدام از نقاط طراحی می‌باشد. نتایج حاصل‌شده از شبیه‌سازی به‌وسیله دینامیک سیالات محاسباتی نیز در جدول ۲ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش مدل در سرعت های مختلف نشان می دهد که با توجه به احتمال وقوع ناپایداری

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

طولی[5]شناور در زوایای تریم بیشتر از ۳ درجه، با افزایش زاویه ددرایز در پاشنه می توان بر این مشکل غلبه نمود. این موضوع با آزمایش مدل در زوایای ددرایز نزدیک به ۳۰ درجه و حتی بیشتر از آن، مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

**جدول ۲: مقادیر پارامترهای ورودی بدست آمده با روش باکس-بنکن و پارامترهای خروجی بدست آمده از شبیه سازی عددی**

| شماره مدل | سرعت ورودی (m/s) | فاصله پله از شناور (m) | زاویه ددرایز در بخش پاشنه ($\beta$)(°) | نیروی پسا وارد بر شناور (N) | نیروی برآورد بر شناور (N) | تریم شناور (°) | بالاآمدگی شناور (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۰ | ۸۰۰ | ۳۰ | ۱۲۲,۳۵ | ۲۳۶ | ۳,۶ | ۰,۰۵۷ |
| ۲ | ۸ | ۸۰۰ | ۲۷ | ۸۹ | ۲۳۰ | ۴,۰۱ | ۰,۰۴۹۵ |
| ۳ | ۱۲ | ۸۰۰ | ۲۷ | ۱۲۸,۶ | ۲۳۷,۷ | ۳,۳۸ | ۰,۰۵۹ |
| ۴ | ۸ | ۸۰۰ | ۳۳ | ۹۷ | ۲۳۱ | ۳,۶۸ | ۰,۰۵۶ |
| ۵ | ۱۲ | ۸۰۰ | ۳۳ | ۱۳۷,۳۶ | ۲۳۹,۵ | ۳,۰۸ | ۰,۰۶۱ |
| ۶ | ۸ | ۶۰۰ | ۳۰ | ۸۱ | ۲۳۴ | ۴,۲۹ | ۰,۰۴۸ |
| ۷ | ۱۲ | ۶۰۰ | ۳۰ | ۱۲۵,۳ | ۲۳۹ | ۳,۵۱ | ۰,۰۵۴ |
| ۸ | ۱۰ | ۶۰۰ | ۲۷ | ۸۸,۱۵ | ۲۳۱ | ۴,۲۱ | ۰,۰۴۹ |
| ۹ | ۱۰ | ۶۰۰ | ۳۳ | ۱۰۰,۶ | ۲۳۴ | ۳,۸۹ | ۰,۰۵۲ |
| ۱۰ | ۸ | ۱۰۰۰ | ۳۰ | ۹۹ | ۲۳۷ | ۳,۶۸ | ۰,۰۵۱ |
| ۱۱ | ۱۲ | ۱۰۰۰ | ۳۰ | ۱۳۵,۸ | ۲۳۹,۳۵ | ۳,۱۳ | ۰,۰۵۸ |
| ۱۲ | ۱۰ | ۱۰۰۰ | ۲۷ | ۱۲۶,۴ | ۲۳۸,۹۵ | ۳,۴۸ | ۰,۰۵۷۳ |
| ۱۳ | ۱۰ | ۱۰۰۰ | ۳۳ | ۱۰۷,۲ | ۲۳۵ | ۳,۶ | ۰,۰۵۱۵ |

پس از ساخت مدل جانشین و به دست آوردن مقادیر خروجی‌های مشخص‌شده (نیروی پسا وارد بر بدنه و ...) در تمام فضای طراحی، به بررسی تاثیر پارامترهای ورودی (سرعت جریان،زاویه ددرایز در پاشنه و فاصله پله از پاشنه) بر روی مقادیر خروجی و نقاط بهینه مقادیر خروجی در فضای طراحی پرداخته می‌شود.

### ۶-۴- نتایج پاسخ سطحی

با استفاده از نتایج حاصل‌شده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل جانشین ساخته می‌شود. پس از ساخت مدل جانشین و به دست آوردن مقادیر خروجی‌های مشخص‌شده (نیروی پسا وارد بر بدنه و ...) در تمام فضای طراحی به‌صورت توابع پیوسته، در این بخش به بررسی نتایج و تاثیر پارامترهای ورودی (سرعت جریان،زاویه ددرایز در بخش پاشنه و فاصله پله از پاشنه) بر روی مقادیر خروجی و نقاط بهینه مقادیر پارامترهای خروجی در فضای طراحی پرداخته می‌شود.

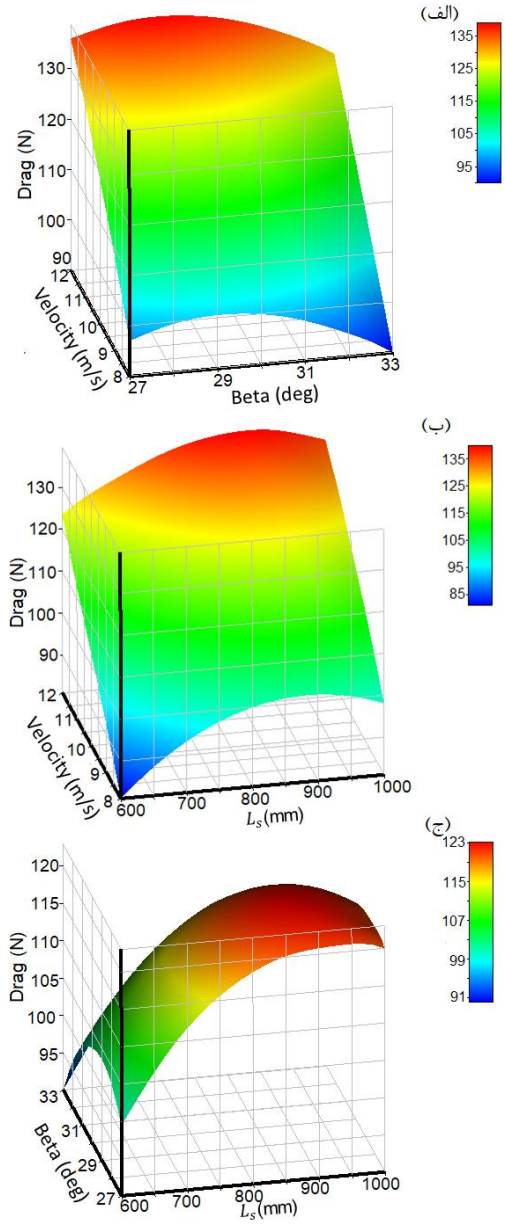
#### ۶-۴-۱- نیروی پسا وارد بر بدنه

اولین پارامتر خروجی مورد بررسی در این مطالعه تغییرات نیروی پسا وارد بر بدنه است. همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود رابطه بین افت فشار و پارامترهای طراحی به‌صورت سه‌بعدی آورده شده است. لازم به ذکر است که مقدار پارامترهایی که در هر شکل به‌عنوان متغیر ورودی مورد بررسی نیستند در میانه‌ی بازه‌ی طراحی آن‌ها قرار دارد.

[5] proposing



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

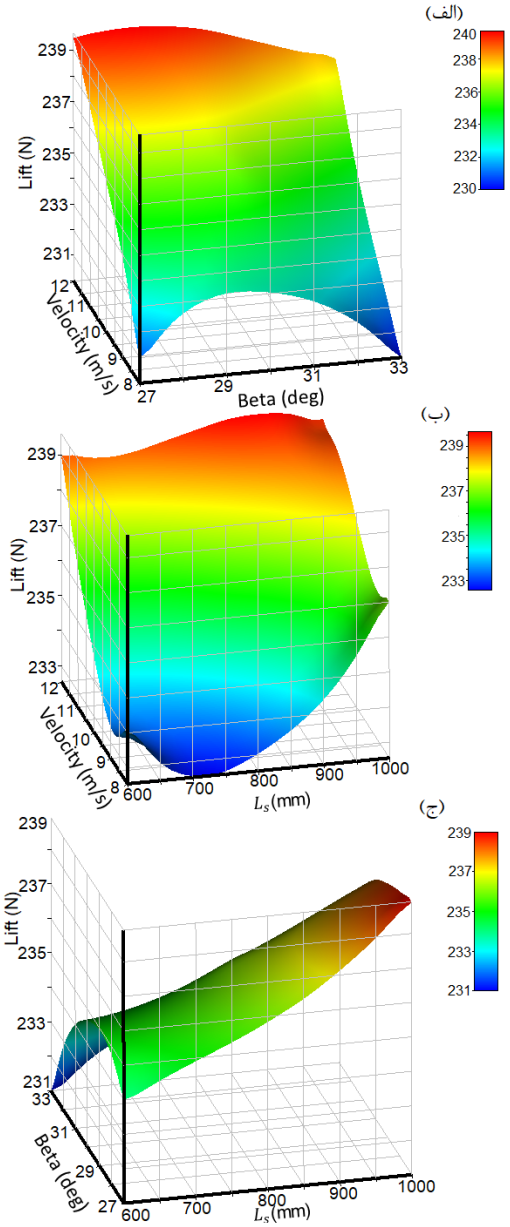



**شکل۹: : نمودارهای مربوط به تغییرات نیروی پسا برحسب پارامترهای ورودی. (الف) نیروی پسا برحسب سرعت جریان و زاویه دردایز پاشنه (ب) نیروی پسا برحسب سرعت جریان و فاصله پله از پاشنه (ج) نیروی پسا برحسب زاویه دردایز پاشنه و فاصله پله از پاشنه**

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، نیروی پسا وارد بر بدنه به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه دردایز پاشنه ، مقدار نیروی پسا کاهش می‌یابد که این روند به‌صورت پیوسته نیست و در زاویه دردایزهای بالا تا حدودی ثابت است. علت این امر در هوادهی بهتر در زاویه دردایزهای بالا می‌باشد. تاثیر سرعت بر تغییرات نیروی پسا بیشتر از تاثیر زاویه دردایز پاشنه می‌باشد. با افزایش فاصله نیز نیروی پسا افزایش می‌یابد.

### ۶-۴-۲- نیروی برآ وارد بر شناور

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، نیروی برآ وارد بر بدنه به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه دردایز پاشنه، مقدار نیروی برآ کاهش می‌یابد که این روند به‌صورت پیوسته نیست و در زاویه دردایزهای بالا تا حدودی ثابت است. تاثیر سرعت بر تغییرات نیروی پسا بیشتر از تاثیر زاویه دردایز پاشنه می‌باشد. با افزایش فاصله نیز نیروی برآ افزایش می‌یابد. علت این امر در لیفت بالای ایجادشده در قسمت پاشنه شناور می‌باشد.

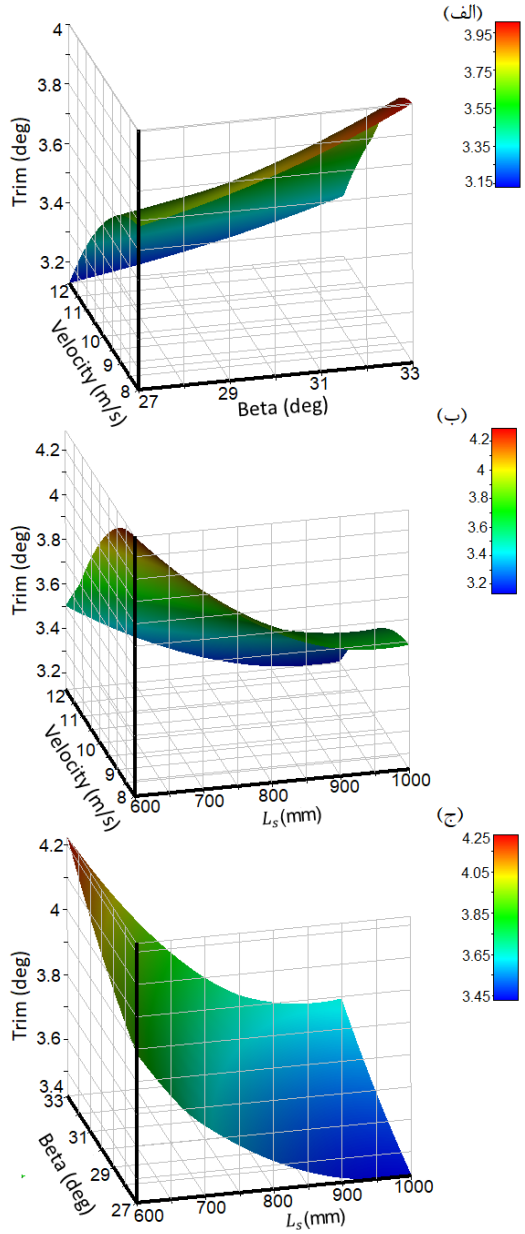



**شکل ۱۰: نمودارهای مربوط به تغییرات نیروی برآ برحسب پارامترهای ورودی. (الف) نیروی برآ برحسب سرعت جریان و زاویه دردایز پاشنه (ب) نیروی برآ برحسب سرعت جریان و فاصله پله از پاشنه (ج) نیروی پسا برحسب زاویه دردایز پاشنه و فاصله پله از پاشنه**

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

### ۶-۴-۳- تریم کل شناور

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان، مقدار تریم کل شناور کاهش می‌یابد. اما این تغییرات در زاویه ددرایز های مختلف متفاوت است. با افزایش زاویه ددرایز مقدار تریم افزایش می‌یابد. علت این امر هوادهی بهتر در این حالت است. با افزایش فاصله پله از پاشنه مقدار تریم کاهش می‌یابد.




**شکل ۱۱: نمودارهای مربوط به تغییرات تریم کل شناور برحسب پارامترهای ورودی. (الف) تریم کل شناور برحسب سرعت جریان و زاویه ددرایز پاشنه (ب) تریم کل شناور برحسب سرعت جریان و فاصله پله از پاشنه (ج) تریم کل شناور برحسب زاویه ددرایز پاشنه و فاصله پله از پاشنه**

### ۶-۵- بهینه سازی

پس از ساخت مدل و پیش‌بینی مقادیر خروجی در تمام فضای طراحی، حال با صرف هزینه محاسباتی بسیار پایین با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نقاط بهینه در فضای طراحی مشخص گردید. برای به دست آوردن نقاط بهینه بر اساس نتایج، کمترین میزان نیروی پسا وارد بر شناور، بیشترین میزان نیروی برآ و کمترین میزان تریم کلی شناور را شامل می شود. و حالت چند هدفه به‌عنوان نقاط بهینه انتخاب می‌گردند. همچنین در حالت چند هدفه حالتی که بیشترین نیروی برآ و حالتی که کمترین نیروی پسا وارد شده بر بدنه و کمترین نیروی پسا و کمترین تریم کلی در مساله ایجاد گردد.

**جدول ۳: نقاط بهینه در فضای طراحی**

| شماره | سرعت ورودی (m/s) | فاصله پله از شناور (mm) | زاویه ددرایز ($\beta$)(°) | نیروی پسا وارد بر شناور (N) | نیروی برآ وارد بر شناور(N) | تریم شناور (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۸ | ۶۰۰ | ۳۳ | ۶۸ | – | – |
| ۲ | ۱۲ | ۱۰۰۰ | ۲۷٫۸ | – | ۲۴۰٫۷ | – |
| ۳ | ۱۲ | ۹۶۲٫۶ | ۲۷ | – | – | ۹٫۰۴۶ |
| ۴ | ۸٫۰۶۶ | ۸۳۷ | ۲۷٫۱۹۱ | ۱۰۰٫۴۳ | – | ۳٫۶۴ |
| ۵ | ۸٫۰۳۷ | ۶۱۵ | ۳۰٫۳۷۸ | ۸۲ | ۲۳۳٫۳۵ | – |

در جدول ۳، شماره های ذکر شده برای موارد زیر است:

شماره یک (۱) برای حالتی است که نیروی پسا به تنهایی به‌عنوان خروجی هدف کمترین مقدار شود. شماره دو (۲) برای حالتی است که نیروی برآ به تنهایی به‌عنوان خروجی هدف بیشترین مقدار شود. شماره سه (۳) برای حالتی است که تریم کلی شناور به‌تنهایی به‌عنوان خروجی هدف کمترین مقدار شود. شماره چهار (۴) برای حالتی است که میزان تریم و نیروی پسا به‌عنوان خروجی های هدف کمترین مقدار شوند. شماره پنج (۵) برای حالتی است که نیروی برآ بیشینه و نیروی پسا کمینه گردد.

### ۶-۶- آنالیز حساسیت

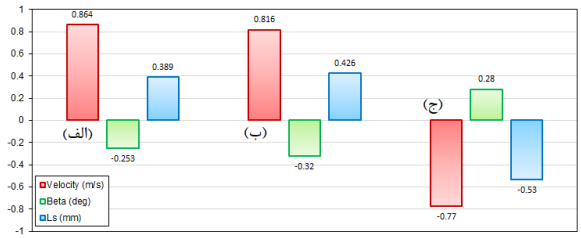
نتایج حاصل برای آنالیز حساسیت کلی[۶] به‌دست‌آمده از فرآیند بهینه‌سازی، کمک می‌کند تا حساسیت پارامترهای خروجی به پارامترهای ورودی مشخص گردد. مقادیر مثبت بیانگر رابطه مستقیم بین پارامتر ورودی و پارامتر خروجی می‌باشند. به‌طور مثال با افزایش پارامتر ورودی پارامتر خروجی نیز افزایش می‌یابد. هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر شود رابطه بین پارامترها کمتر

[۶] global sensitivity analysis



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

است. مقادیر منفی بیانگر رابطه معکوس بین پارامتر ورودی و پارامتر خروجی است.




**شکل ۱۲:: آنالیز حساسیت کلی (الف) نیروی پسا وارد بر بدنه (ب) نیروی برآ وارد بر بدنه (ج) تریم کل شناور ؛ برحسب پارامترهای ورودی**

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سرعت جریان تأثیرگذارترین پارامتر بر روی پارامترهای ورودی است. همچنین زاویه ددرایز در بخش پاشنه کمترین میزان تاثیر را درمیان پارامترهای دیگر بر مقادیر خروجی دارد.

## ۷- نتیجه‌گیری

استفاده از فرآیند مدل‌سازی بر اساس جانشینی کمک شایانی در کاهش هزینه‌های محاسباتی شبیه‌سازی عددی در شناخت بهتر رفتار هیدرودینامیکی شناور سرشی ایفا کرد. در این مقاله با ایجاد یک فضای طراحی شامل سه پارامتر ورودی سرعت شناور، فاصله پله از پاشنه شناور و زاویه ددرایز در قسمت پاشنه سعی بر پیدا کردن مدل و موقعیت و رفتار شناور سرشی تک پله گردید. ابتدا شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بر روی ۱۳ نقطه طراحی اولیه انجام گرفت و با استفاده از نتایج آن به‌وسیله فرآیند روش سطح پاسخ در تمام فضای طراحی پاسخ‌های پارامترهای خروجی مشخص گردید؛ و نقاط بهینه محلی و همچنین میزان تاثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی (نیروی پسا، برآ و تریم کلی شناور) مشخص گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی و فرآیند مدل‌سازی بر اساس جانشینی می‌توان نتیجه گرفت:

۱- سرعت شناور تاثیرگذارترین پارامتر بر روی پارامترهای خروجی در فضای طراحی است.

۲- با افزایش فاصله پله از پاشنه شناور نیروی پسا و برای وارد بر شناور افزایش و تریم کلی شناور کاهش می یابد؛ اما تاثیرگذاری آن بر تریم شناور بیشتر است.

۳- با افزایش زاویه ددرایز در بخش پاشنه نیروی پسا و برای وارد بر شناور کاهش و تریم کلی شناور افزایش می یابد؛ اما تاثیرگذاری آن بر نیروی برآ وارد بر شناور بیشتر است.

## ۸- منابع و مراجع

[1] D. Savitsky, Hydrodynamic design of planing hulls, J Marine technology, 1(1) (1964) 71-95.
[2] G. Fridsma, A systematic study of the rough-water performance of planing boats, STEVENS INST OF TECH HOBOKEN NJ DAVIDSON LAB, 1969.
[3] D. Savitsky, M.F. DeLorme, R. Datla, Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls, J Marine Technology, 44(1) (2007) 35-56.
[4] M. Caponnetto, Practical CFD simulations for planing hulls, HIPER′01 Germany, (2001) 128-138.
[5] R. Azcueta, Steady and unsteady RANSE simulations for Littoral Combat Ships, in: 25th. Symposium on Naval Hydrodynamics, St. John's, Canada, 2004.
[6] S. Wang, Y. Su, Z. Wang, X. Zhu, H. Liu, Numerical and experimental analyses of transverse static stability loss of planing craft sailing at high forward speed, J Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 8(1) (2014) 44-54.
[7] A. Najafi, S. Alimirzazadeh, M.S. Seif, RANS simulation of interceptor effect on hydrodynamic coefficients of longitudinal equations of motion of planing catamarans, J Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering, 37(4) (2015) 1257-1275.
[8] E. Lee, M. Pavkov, L.J.J.o.S.P. McCue-Weil, The systematic variation of step configuration and displacement for a double-step planing craft, J Journal of Ship Production Design, 30(2) (2014) 89-97.
[9] H. Nourghasemi, M. Bakhtiari, H. Ghassemi, Numerical study of step forward swept angle effects on the hydrodynamic performance of a planing hull, J Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, (2017).
[10] N.V. Queipo, R.T. Haftka, W. Shyy, T. Goel, R. Vaidyanathan, P.K. Tucker, Surrogate-based analysis and optimization, J Progress in aerospace sciences, 41(1) (2005) 1-28.
[11] S. Razavi, B.A. Tolson, D.H. Burn, Review of surrogate modeling in water resources, J Water Resources Research, 48(7) (2012).
[12] G.E. Box, K.B. Wilson, On the experimental attainment of optimum conditions, J Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 13(1) (1951) 1-38.
[13] Y.A. Cengel, Fluid mechanics. (2010): Tata, McGraw-Hill Education.
[14] D.J.A.R.o.M.T. Svahn, The Royal Institute of Technology, KTH, Centre for Naval Architecture,

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]
[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]

Performance prediction of hulls with transverse steps (2009).

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.9.4 ]

[ DOI: 10.52547/marineeng.18.37.105 ]