ارزیابی اثر نصب گُوِه‌ی پاشنه برکنترل ناپایداری و کاهش مقاومت یک شناور دوبدنه‌ی نیمه‌پروازی

مهدی یوسفی‌فرد[۱*] ، اشکان معبودی[۲]

[۱] استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک؛ yousefifard@nit.ac.ir
[۲] کارشناس ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک؛ ashkan.maboodi@stu.nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

کلمات کلیدی:
شناور دوبدنه
بدنه‌ی نیمه‌پروازی
گُوِه‌ی پاشنه
ناپایداری دینامیکی

چکیده

در این پژوهش تمرکز اصلی بر روی پایش ناپایداری‌های دینامیکی بوجود آمده در یک شناور دوبدنه‌ی نیمه‌پروازی و کاهش دامنه‌ی این حرکات با استفاده از گُوِه‌ی پاشنه می‌باشد. این کار با استفاده از تحلیل مدل در اعداد فرود متفاوت در دو حالت بدنه‌ی اولیه و بدنه‌ی مجهز به گُوِه انجام گرفته است. حل عددی نیز با استفاده از حل معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر-استوکس و کد متن‌باز اوپن‌فوم ارائه شده است. علاوه بر صحت‌سنجی روش حل عددی بر مبنای داده‌های تجربی می‌توان مشاهده نمود که نصب گُوِه در پاشنه‌ی شناور اثر بسیار مثبتی در کاهش دامنه‌ی ناپایداری حرکات شناور در آب آرام داشته است. تأثیر این کاهش ناپایداری را می‌توان در نمودار مقاومت-سرعت شناور نیز مشاهده نمود. مهمترین دست‌آورد این تحقیق ایجاد یک تانک عددی معتبر برای شبیه‌سازی حرکات دینامیکی شناور و ثبت دقیق جزئیات جریان سیال در اطراف بدنه‌های پروازی و نیمه‌پروازی می‌باشد. حاصل نصب گُوِه و تحلیل عددی و تجربی، ثبت کاهش ۱۲ درصدی در مقاومت شناور در سرعت طراحی آن می‌باشد.

Evaluation of the effect of stern wedge on instability control and reduction of the resistance of a semi-planing catamaran

Mahdi Yousefifard[1*], Ashkan Maboodi [2]

[1] Assistant Professor, Babol Noshirvani University of Technology; yousefifard@nit.ac.ir
[2] Master of Science, Babol Noshirvani University of Technology; ashkan.maboodi@stu.nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 25 Jul. 2019
Accepted: 26 Nov. 2019

Keywords:
Catamaran
Semi-planing hull
Stern wedge
Hydrodynamics instability

ABSTRACT

In this research, the main focus is on monitoring the dynamic instability created in a semi-planing catamarn and reducing the amplitude of these movements using a stern wedge. This is done using the model analysis in different Froude numbers in both the original and modified body conditions. Numerical analysis is also provided by solving the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations and OpenFOAM open-source code. In addition to verifying the numerical solution method based on experimental data, it can be seen that the installation of a stern wedge of the ship has a very positive effect on reducing the range of dynamic motions in calm water. The effect of this motion decrease can also be seen in the resistance-speed chart. The most important achievement of this research is the creation of a numerical tank for simulating dynamic motions and accurate recording of details of fluid flow around the planing and semi- planing hulls. The result of the stern wedge installation and numerical and experimental analysis is a 12 percent reduction in ship resistance at design speed.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]

۱ - مقدمه

استفاده از ابزارهایی نظیر گُوِه در پاشنه[۱]، فِلَپ[۲] و یا اینترسِپتور[۳] برای بهبود رفتار دینامیکی بدنه‌ی شناورهای پروازی[۴] و نیمه پروازی[۵] رایج است. ایجاد نیروی بَرا[۶] در چنین بدنه‌هایی منجر به کاهش سطح خیس و به تبع آن کمتر شدن مقاومت (بخصوص در سرعت‌های زیاد) می‌گردد. استفاده از گُوِه‌ی پاشنه نیز یکی از ابزارهای مؤثر در حوزه‌ی شناورهای نیمه‌پروازی می‌باشد که می تواند منجر به تغییر در توزیع فشار کف شناور و جلوگیری ناپایداری حرکات دینامیکی شناور گردد. در ادامه سعی شده است مهم‌ترین پژوهش‌های انجام گرفته در خصوص کنترل دینامیکی شناورها و کاهش مقاومت آنها ارائه گردد.

کارافیات در سال ۱۹۸۷ اثر نصب گُوِه‌ی پاشنه بر کاهش مصرف سوخت یک شناور نظامی از نوع فریگیت[۷] را با استفاده از روش تحلیلی بر اساس تاریخچه‌ی داده‌های چنین شناورهایی بررسی نمود [۱]. نتایج نشان می‌دهد نصب گُوِه در چنین شناورهایی می تواند تا ۶ درصد کاهش توان در سرعت بیشینه را به همراه داشته باشد. کار آنها یکی از اولین تحقیق‌های انجام گرفته در این حوزه می‌باشد. بوجوویچ و ساهو اثرات نصب گُوِه بر عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور جابجائی با سرعت بالا را ارزیابی نموده و توانستند با استفاده از چنین ابزاری توان مورد نیاز برای دستیابی به سرعت طراحی این شناور را کاهش دهند[۲].

اخیراً نیز جادمیکو و همکاران تحقیق کاملی را در خصوص اثرات نصب گُوِه و فِلَپ در پاشنه‌ی یک شناور تندرو تک‌بدنه بر روی مقاومت این شناور و مقایسه‌ی این دو مورد ارائه نمودند [۳]. آنها با استفاده از شبیه‌سازی به روش عددی توانستند ۳/۵ درصد مقاومت شناور را در سرعت طراحی و با استفاده از فِلَپ در پاشنه کاهش دهند. سالاس و تامپیر در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی اثر سه تجهیز نصب شده بر روی بدنه‌ی شناورهای جابجائی[۸] و نیمه‌جابجائی[۹] بر روی کاهش مقاومت آنها را ارزیابی نمودند [۴]. آنها با نصب فِلَپ پاشنه و اینترسِپتور در شناور جابجائی و همچنین ایجاد اسپری‌ریل[۱۰] در شناور نیمه‌جابجائی توانستند مقاومت آنها را در یک بازه‌ی ۵ تا ۱۰ درصدی کاهش دهند. اثرات نصب اینترسِپتور در پاشنه‌ی شناورهای تندرو برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی آنها در آب آرام توسط جانگام و همکاران مورد بررسی قرار گرفته و توزیع فشار ناشی از افزودن آن بر مبنای روش حل عددی ارائه شده است [۵]. جان و همکاران نیز با استفاده از روش آزمایشگاهی، اثر نصب گُوِه و فلَپ در پاشنه و همچنین اینترسِپتور را بر عملکرد شناورهای تندرو تک و دوبدنه بررسی نمودند [۶]. هدف اصلی از انجام آزمایش آنها دستیابی به بهترین ابزار برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی تغییر فرم بدنه بوده است.

تحقیق تجربی کاملی بر روی ابعاد اینترسِپتور نصب شده بر روی یک شناور تندرو بر عملکرد هیدرودینامیکی آن به روش عددی توسط منصوری و همکاران انجام شده است [۷]. آنها از یک تحلیل عددی مبتنی بر روش حجم محدود استفاده نموده و توانستند اثرات منفی طراحی ابعاد نامناسب اینترسِپتور بر افزایش مقاومت از یک سو و تأثیر مثبت در کاهش مقاومت و کنترل تریم شناور را از سوی دیگر ارائه نمایند. همچنین در تحقیق آنها، رابطه‌ی ریاضی بین عدد رینولدز و ابعاد اینترسِپتور بدست آمده است. سانگ و همکاران اخیراً اثرات نصب اینترسِپتور و فِلَپ در پاشنه‌ی نوع خاصی از شناور را مورد ارزیابی قرار داده و حتی طرح‌های ترکیبی با استفاده از این دو نوع ابزار را نیز بررسی نمودند [۸]. آنها این بررسی را در بازه‌ای از اعداد فرود انجام داده و اثربخشی بیشتر نصب این ابزارها در محدوده‌ی خاصی از اعداد فرود را اثبات نمودند. اثر نصب اینترسِپتور در شناورهای تفریحی و کاهش نیروی درگ آنها نیز توسط دِی و کوپِر به روش آزمایشگاهی بررسی شده است [۹]. آنها تأثیر نصب اینترسِپتور را با فِلَپ‌هایی که بیرون از آب نصب می‌گردند مقایسه نمودند وتوانستند با استفاده از نصب اینترسِپتور، در بازه‌ی مشخصی از سرعت، توان لازم برای شناور را کاهش دهند.

اخیراً پارک و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی توانستند یک سامانه‌ی مجهز به اینترسِپتور متغیر را طراحی کنند تا بتواند در شرایط مختلف دریانوردی بهترین عملکرد را ارائه دهد [۱۰]. آنها آزمایش‌های خود را در آب آرام و همچنین در موج منظم و نامنظم انجام داده و مقدار تریم شناور در امواج را نیز تا حد زیادی کاهش داده و به تبع آن توانستند مقدار نیروی درگ کمتری را ثبت نمایند. منصوری و فرناندز نیز با به‌کارگیری روش عددی توانستند اثرات نصب اینترسِپتور بر کنترل ناپایداری حرکات جابجائی عمودی[۱۱] و غلتش طولی[۱۲] شناور پروازی را بررسی نمایند [۱۱].

آوکی و بارلاس تحقیق آزمایشگاهی برای ارزیابی اثرات نصب اینترسِپتور بر روی بدنه‌های پروازی را ارائه نمودند [۱۲]. آنها اینترسِپتورهایی با ابعاد مختلف را در پاشنه‌ی یک بدنه‌ی پروازی نصب نموده توانستند بهترین عملکرد را در حالتی که ارتفاع اینترسِپتور متغیر است بدست آورند. در تحقیقی دیگر، منصوری و فرناندز توانستند با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی اثرات نصب اینترسِپتور بر افزایش نیروی لیفت و درگ یک شناور تندرو را مورد ارزیابی قرار داده و ارتباط منطقی بین ابعاد و سرعت شناور و همپنین مشخصات اینترسِپتور ارائه نمایند [۱۳]. قدیمی و همکاران نیز اثرات نصب گُوِه در پاشنه‌ی یک شناور تندرو بر بهبود عملکرد هیدرودینامیکی آن در آب آرام را به روش آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴]. آنها با نصب گُوِه و ثبت اطلاعاتی نظیر مقاومت بدنه و مقدار جابجائی عمودی و غلتش طولی توانستند ناپایداری هیدرودینامیکی بدنه‌ی پروازی را حذف نمایند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]

همانطور که مشاهده می‌گردد، تمرکز بیشتری بر روی کنترل دینامیکی بدنه‌های پروازی (بخصوص با استفاده از ابزارهایی نظیر اینترِ سپتور) وجود داشته و به کاهش مقاومت بدنه‌های نیمه‌پروازی با استفاده از ابزارهای ساده‌تر نظیر گُوِه کمتر توجه شده است. به همین دلیل در این مطالعه کاهش حرکات و همچنین مقاومت یک شناور دوبدنه‌ی نیمه‌پروازی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲ - معادلات حاکم

حرکت سیال بوسیله‌ی حل معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر-استوکس[۱۳] شبیه‌سازی می‌گردد. همچنین تکنیک حجم سیال[۱۴] به همراه تراکم مصنوعی[۱۵] برای تشخیص مرز آب و هوا در شبیه‌سازی جریان دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است. جزئیات چگونگی اعمال این روش در نرم‌افزار اوپن‌فوم توسط جاساک [۱۵] و همچنین روش [۱۶] ارائه شده و در اینجا بطور خلاصه مروری بر آنها مشاهده می‌گردد.

معادلات حرکت سیال دو فازی شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم بوده که به شرح زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla \cdot U = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \left(U - U_g\right) U\right) = -\nabla p_d - g \cdot \mathrm{x} \nabla \rho + \nabla \cdot \left(\mu_{eff} \nabla U\right) + \left(\nabla U\right) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma \qquad (۲)$$

که در اینجا، U و U_g به ترتیب سرعت سیال و سرعت حرکت سلول‌های شبکه می‌باشند. همچنین p_d فشار دینامیک است که از رابطه‌ی $p_d = p - \rho g \cdot x$ بدست می‌آید (یعنی تفاضل فشار کل و فشار هیدرواستاتیک). شتاب گرانش نیز به صورت $g = (0,0,-9.81)$ تعریف می‌گردد. ویسکوزیته‌ی دینامیکی مؤثر نیز برابر است با $\mu_{eff} = \rho(\upsilon + \upsilon_t)$، که در آن υ و υ_t به ترتیب معرف ویسکوزیته‌ی سینماتیک و گردابه‌ای[۱۶] می‌باشند. f_σ هم ترم منبعی در اثر کشش سطحی است.

همانطور که اشاره شد، تکنیک حجم سیال برای ارائه‌ی تخمین دقیقی از سطح آزاد سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله‌ی انتقال در این روش به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\partial \alpha}{dt} + \nabla \cdot \left[\left(U - U_g\right)\alpha\right] + \nabla \cdot \left[U_r (1-\alpha)\alpha\right] = 0 \qquad (۳)$$

که در اینجا α بیانگر نسبت حجمی می‌باشد، که می‌توان بر اساس آن مشخصات سیال درون هر سلول را محاسبه نمود.

$$\begin{cases} \alpha = 0 & air \\ \alpha = 1 & water \\ 0 < \alpha < 1 & \text{int}\, erface \end{cases} \qquad (۴)$$

در معادله‌ی (۳) منظور از U_r همان سرعت دامنه‌ی جریان است که اثرات سرعت در مرز مشترک آب و هوا را اعمال می‌نماید [۱۷]. از سوی دیگر، کشش سطحی در معادله‌ی (۴) بصورت $f_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha$ تعریف می‌شود که در آن σ همان کشش سطحی آب (۰/۰۷ کیلوگرم بر مجذور ثانیه)، κ انحنای سطح آزاد سیال است که با استفاده از تعریف نسبت حجمی (α) قابل محاسبه می‌باشد. چگالی و ویسکوزیته‌ی دینامیکی ترکیبی نیز در این روش با استفاده از تعاریف زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_1 + (1-\alpha)\rho_g \\ \mu = \alpha \mu_1 + (1-\alpha)\mu_g \end{cases} \qquad (۵)$$

علاوه بر معادلاتی که برای بقای جرم و مومنتوم ارائه شد و همچنین معادلات روش حجم سیال، نیاز است تا معادلات مربوط به انتقال تنش برشی[۱۷] نیز بعنوان روش شبیه‌سازی جریان آشفته در نظر گرفته شود [۱۸].

همچنین، معادله‌ی تغییرات مرکز جرم شناور عبارت است از:

$$m \frac{dv}{dt} = f \qquad (۶)$$

که در آن، m بیانگر جرم شناور، f نشان‌دهنده‌ی برآیند نیروهای وارد بر شناور و v نیز سرعت حرکت در مرکز جرم شناور می‌باشد. معادله‌ی حاکم بر حرکت زاویه‌ای نیز بر اساس دوران حول مرکز جرم شناور به شکل زیر نوشته می‌شود:

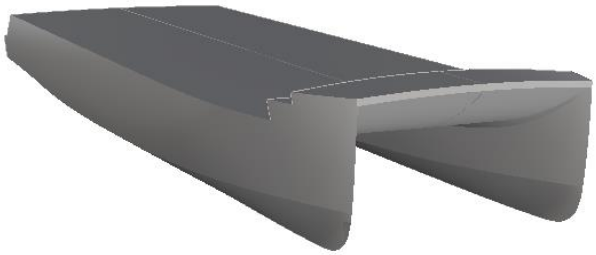
$$M \frac{d\omega}{dt} + \omega \times M\omega = n \qquad (۷)$$

در حالی‌که M تانسور ممان اینرسی، ω سرعت زاویه‌ای جسم صلب و n نیز ممان تحریک اعمال شده بر شناور می‌باشد. نیروی اعمال شده در معادله‌ی (۶) و همچنین ممان تحریک اشاره شده در معادله‌ی (۷) با استفاده از حل عددی جریان سیال و بر مبنای توزیع فشار بر سطح زیر آب شناور در هر زمان بدست می‌آیند. جابجائی شناور در هر لحظه بر اساس سرعت و فشار اعمال شده از سوی سیال به بدنه محاسبه می‌گردد.

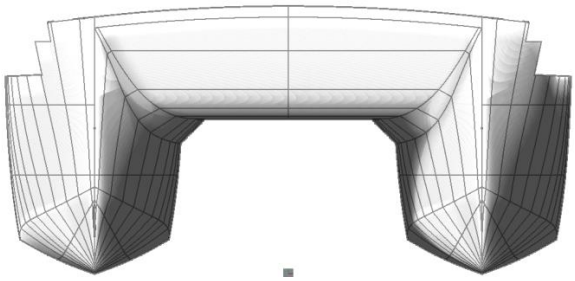
۲ - معرفی مسئله

شناور مورد بررسی در این پژوهش، یک شناور دوبدنه از نوع نیمه‌پروازی بوده که می‌بایست به سرعت ۲۳ گره‌ی دریایی (معادل عدد فرود[۱۸] ۰/۷۴۷) دست یابد. در شکل ۱ نمایی از فرم بدنه‌ی این شناور ارائه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]



(الف)



(ب)

شکل ۱ - طرح شناور دوبدنه‌ی تحلیل شده در این پژوهش

در جدول ۱ نیز مشخصات شناور اصلی و مدل تجربی و عددی ارائه شده است. محدودیت در ساخت مدل چوبی با استفاده از دستگاه برش باعث شده است تا حداکثر طول خط آب معادل ۱/۶ متر برای ساخت مدل تجربی انتخاب شود. مدل عددی نیز به همین اندازه در نرم‌افزار راینو ساخته شده است.

جدول ۱- مشخصات شناور اصلی، مدل عددی و تجربی

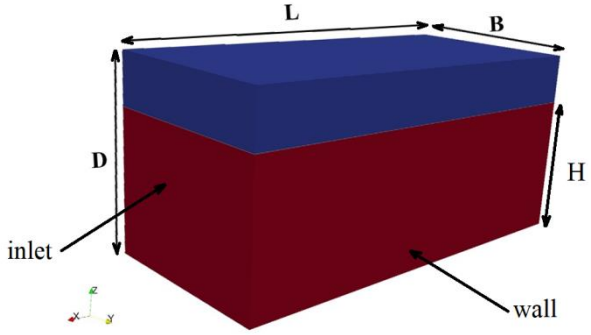
مشخصه	شناور اصلی	مدل
مقیاس	۱	۱ : ۱۵/۹۶
آبخور در وسط شناور (متر)	۱/۲۳۷	۰/۰۷۷۵
آبخور در عمود سینه (متر)	۱/۱۸۲	۰/۰۷۴
آبخور در عمود پاشنه (متر)	۱/۲۹۷	۰/۰۸۱
آبخور در مرکز شناوری (COF) (متر)	۱/۲۴۴	۰/۰۷۷۹
تریم پاشنه (متر)	۰/۱۰۹	۰/۰۰۶۸
طول خط آبخور (متر)	۲۵/۵۴۸	۱/۶
بیشترین عرض (متر)	۷/۹۷۹	۰/۴۹۹۹
حداکثر عرض هر نیم بدنه (متر)	۲/۴۸۷	۰/۱۵۵
سطح خیس (متر مربع)	۱۷۲/۱۷۷	۰/۶۷۶
مساحت صفحه آبخور (متر مربع)	۱۰۴/۵۹۵	۰/۴۱
ضریب منشوری CP	۰/۷۱۲	۰/۷۱۲
ضریب ظرافت بدنه CB	۰/۵۵۲	۰/۵۵۲
ضریب صفحه‌ی آبخور Cwp	۰/۸۶	۰/۸۶
فاصله تا مرکز بویانسی LCB	۱۱/۳۹۵	۰/۷۱۴
فاصله تا مرکز شناوری LCF	۱۱/۱۴۸	۰/۶۹۸
سرعت طراحی (متر بر ثانیه)	۱۱/۸۳	۲/۹۶
جابجایی (تن)	۸۶	۰/۰۲۱۱

مشخصه	شناور اصلی	مدل
عدد فروددر سرعت طراحی	۰/۷۴۷	۰/۷۴۷

ابعاد تانک عددی نیز بر اساس پژوهش‌های مشابه توسط سایر محققین و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته توسط حلگر اینترداِیم‌فوم[19] برای تحلیل دینامیکی شناورها به روش عددی انتخاب شده است. در شکل ۲ ابعاد تانک عددی و نوع شرایط مرزی اعمال شده در آنها ارائه شده است. ابعاد دامنه‌ی حل عددی عبارت است از:

- طول دامنه (L): ۱۵ متر
- عرض دامنه (B): ۸ متر
- ارتفاع دامنه (D): ۷ متر
- عمق آب (H): ۵ متر

شرط مرز ورودی بر اساس سرعت شناور تعریف شده است. در خروجی نیز از شرط فشار جهت تعادل جریان سیال بهره گرفته شده است. همچنین جهت برر سی کامل اثرات متقابل هر دو بدنه، شناور بصورت کامل شبیه سازی شده و در مرزهای اطراف تانک عددی از شرط عدم لغزش استفاده شده است. در نقاط منطبق بر بدنه‌ی مدل نیز شرط عدم لغزش سیال اعمال شده است.



شکل ۲ - ابعاد دامنه‌ی حل و نوع شرایط مرزی اعمال شده

در جدول ۲ مشخصات فیزیکی سیال و در جدول ۳ تنظیمات حل عددی ارائه گردیده است.

جدول ۲- ثابت‌های مشخصات فیزیکی در حل عددی

ثابت‌های فیزیکی	ویسکوزیته‌ی سینماتیکی(υ) [m^2/s]	چگالی آب [kg/m^3]	کشش سطحی [N/m]	شتاب جاذبه [m/s^2]
مقادیر	$1X10^{-6}$	۹۹۸	۰/۰۷	(۰، ۰، ۹/۸۱)

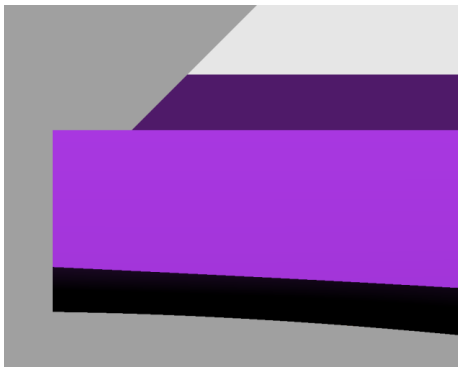
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]

جدول ۳- مقادیر تنظیمات مورد استفاده در حلگر

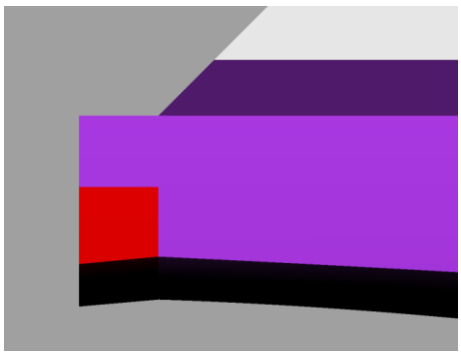
متغیر	مقادیر
حداکثر عدد کورانت	۰/۵
گام زمانی اولیه (ثانیه)	۰/۰۰۰۱
فاکتور ضریب آرامش (فشار)	۰/۴
فاکتور ضریب آرامش (سرعت)	۰/۸

لازم به ذکر است که مقدار اولیه‌ی گام زمانی توسط کد عددی در هر تکرار به‌روز شده و مقدار آن با بیش از ۰/۰۰۵ ثانیه نیز رسیده است. بر همین اساس مقدار زمان متوسط برای انجام محاسبات هر تکرار نیز حدود ۳ ثانیه ثبت شده است و انجام محاسبات برای ۲۰ ثانیه حرکت شناور بیش از ۲۴ ساعت به طول انجامیده است.

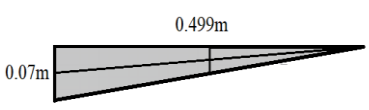
در شکل ۳ نیز نمایی از پا شنه‌ی شناور در دو حالتِ با و بدون گُوِه مشاهده می‌گردد. گُوِه‌ی طراحی شده برای این شناور (نمونه‌ی اصلی) نیز دارای ارتفاع ۷۰ میلیمتر و طول ۴۹۹ میلیمتر می‌باشد. مشخصه‌ی اصلی این گُوِه زاویه‌ی آن بوده که معادل ۸ درجه در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

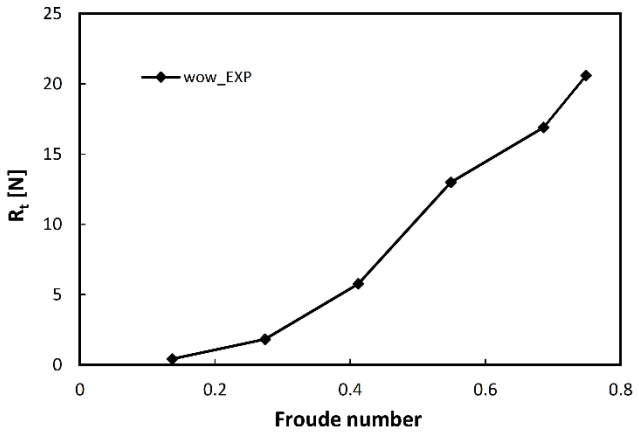
شکل ۳ - پروفیل پاشنه‌ی شناور بدون گُوه (سمت چپ)،با گُوِه (سمت راست) و برش طولی گُوِه (پایین)

۳- نتایج تحلیل تجربی

در این پژوهش از تحلیل آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی حل عددی که در ادامه ارائه خواهد شد استفاده می‌گردد. بر اساس مشخصات فیزیکی ارائه شده در جدول ۱ مدلی از جنس چوب ساخته شده و پس از تنظیم مقدار جرم و محل مرکز جرم، مقدار مقاومت حاصل از تست کشش در آب آرام برای مدلِ بدون گُوِه اندازه گیری شده است. داده‌های ثبت شده در آزمایشگاه شامل مقدار نیروی اعمال شده در محل مرکز شناوری و همچنین نوسانات عمودی سینه و پاشنه می‌باشد.

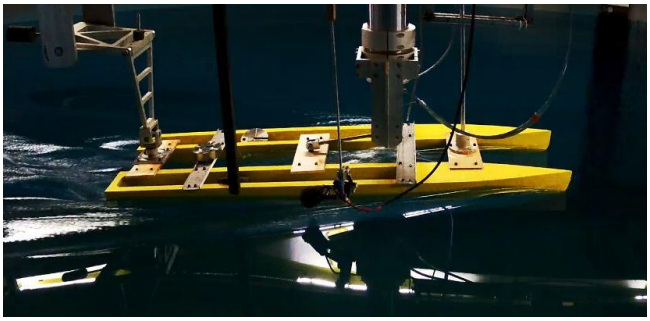
۳-۱- بررسی تجربی شناور بدونِ گُوِه

در شکل ۴ این داده‌ها در ۶ سرعت متفاوت ثبت شده و نمودار نیروی مقاومت بر حسب عدد فرود رسم گردیده است.



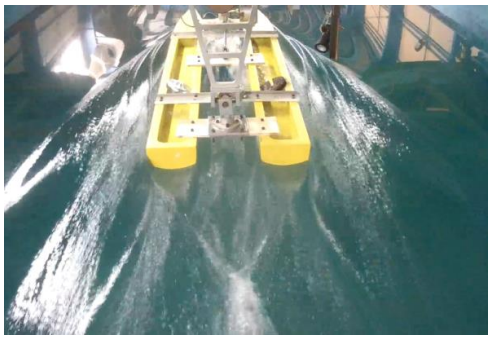
شکل ۴ - نیروی متوسط ثبت شده در آزمایشگاه در هر عدد فرود برای حالتِ بدون گُوِه

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، شیب قابل توجه نمودار مقاومت بر حسب عدد فرود در اعداد فرود بیش از ۰/۷ کاملاً بر رفتار شناور در سرعت طراحی تأثیرگذار است. در شکل ۵ نیز نمایی از موج تولید شده در پا شنه‌ی شناور در سرعت طراحی و در مدل شناور دوبدنه در دو حالتِ با و بدون گُوِه ارائه شده است.



(الف)

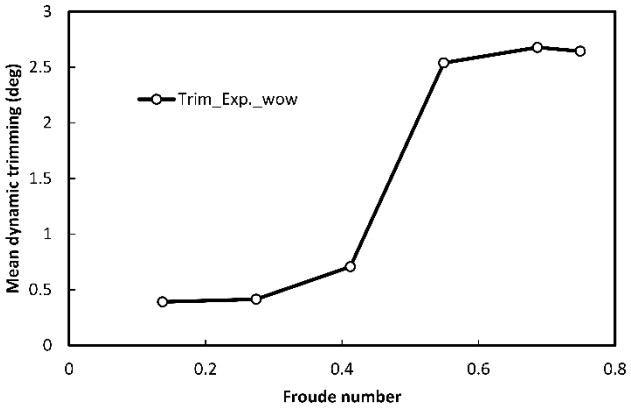
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]



(ب)

شکل ۵ - آزمایش مدل شناورِ بدونِ گُوِه در سرعت طراحی

در شکل ۶ مقدار متو سط تریم ثبت شده برای مدل تجربی در هر سرعت نیز ارائه شده است. لازم به ذکر است که این مقدار بر حسب درجه و جهت مثبت آن در حالتی است که سینه‌ی شناور به سمت بالا حرکت کرده با شد. از طرفی مقدار آن بصورت متو سط تغییرات تریم دینامیکی شناور در هر سرعت ارائه شده است.



شکل ۶ - تریم ثبت شده‌ی شناور در حالتِ بدون گُوِه در سرعت‌های مختلف

افزایش شدید تریم شناور با افزایش سرعت منجر به ناپایداری دینامیکی شده که در بخش تحلیل عددی بیشتر به آن پرداخته می‌شود. تحلیل تجربی شناور بدون گُوِه برای استفاده در صحت‌سنجی نتایج حل عددی صورت گرفته و دوباره در بخش عددی به آنها پرداخته خواهد شد.

۳-۲- بررسی عدم قطعیت تحلیل تجربی

بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط کنفرانس بین‌المللی حوضچه‌ی کشش [۱۹] عدم قطعیت ناشی از تحلیل تجربی می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

- ✓ هندسه‌ی مدل
- ✓ کالیبراسیون دینامومتر
- ✓ دمای آب
- ✓ سرعت کشش
- ✓ تکرار آزمایش

در جدول ۴ مقدار عدم قطعیت بدست آمده در هر عدد فرود بر اساس دستورالعمل اشاره شده ارائه گردیده است.

جدول ۴- بررسی عدم قطعیت تحلیل تجربی

عدم قطعیت (درصد)	سرعت مدل (متر بر ثانیه)	عدد فرود
۰/۹۸	۰/۴۶	۰/۱۳۷
۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۲۷۴
۰/۸۶	۱/۳۸	۰/۴۱۲
۰/۸۸	۱/۸۴	۰/۵۴۹
۰/۸۲	۲/۳۰	۰/۶۸۶
۰/۷۹	۲/۵۳	۰/۷۴۹

خطای ناشی از ساخت مدل توسط دستگاه برش سه‌بُعدی با مقایسه‌ی حجم جابجائی مدل و مقدار اندازه‌گیری شده از مدل مقیاس اصلی در نرم‌افزار راینو محاسبه شده است. از خطای کالیبراسیون دینامومتر و تغییرات دمای آب حین آزمایش، با توجه به مستندات موجود صرفنظر شده است. بنابراین تنها نوسانات سرعت آزمایش در حین انجام آزمون کشش و همچنین تغییرات مقدار نیروی ناشی از تکرار آزمایش در نظر گرفته شده است.

آزمایش کشش در سرعت طراحی ۵ مرتبه و در سایر سرعت‌ها سه مرتبه تکرار شده است و برای تعیین مقدار مقاومت از میانگین داده‌ها در این آزمایش‌ها استفاده شده است. مقدار بدست آمده برای عدم قطعیت نیروی مقاومت در سرعت طراحی کمتر ۰/۸ درصد بدست آمده است. البته این مقدار در سرعت‌های کم، اندکی بیشتر بوده، اما همچنان کمتر از یک درصد بدست آمده است. در جدول ۲ نتایج بررسی عدم قطعیت در اعداد فرود مختلف و برای مدل بدونِ گُوِه ارائه شده است.

۴- نتایج حل عددی

متغیرهای ثبت شده در حل عددی از تنوع بیشتری برخوردار است و می‌توان کانتورها و نمودارهای مورد نیاز را در مرحله‌ی پس‌پردازش بدست آورد. همانند تحلیل تجربی، در اینجا نیز اولین نمودار بدست آمده، مقدار نیرو بر حسب عدد فرود برای مدل عددی در دو حالتِ با و بدون گُوِه می‌باشد. با این کار می‌توان اثرات نصب گُوِه را بخصوص در سرعت طراحی این شناور مشاهده نمود.

در اینجا از تحلیل شش درجه آزادی استفاده شده است و به مدل اجازه داده شده است تا بر مبنای مشخصات فیزیکی خود و نیروی اعمال شده از سوی آب، حرکت کند. نیروی اعمال شده در راستای افقی و عمودی ثبت شده و همچنین مقدار جابجائی عمودی و غلتش طولی شناور با زمان نیز بررسی شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]

همچنین برای حل عددی از یک رایانه مجهز به پردازنده Core i7-6700K با فرکانس مرجع ۴ گیگاهرتز و بهره‌گیری از ۶۴ گیگابایت حافظه استفاده شده است. برای اطمینان از پایداری نتایج، ۲۰ ثانیه از رفتار دینامیکی شناور شبیه‌سازی شده است. تولید شبکه با بیش از ۱ میلیون سلول برای شبیه‌سازی باعث شده است که زمان صرف شده برای هر تحلیل عددی بیش ۲۴ ساعت باشد.

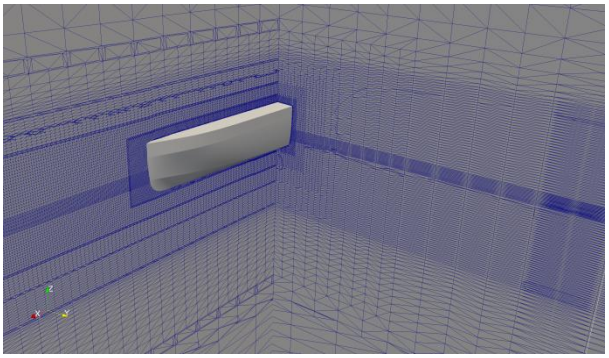
۴-۱- بررسی استقلال از شبکه

قبل از ارائه‌ی نتایج حل عددی، مشخصات شبکه‌ی مورد استفاده در این حل ارائه شده است. شبکه‌ی اولیه در اینجا یک مکعب بوده که ابعاد آن در بخش ۲ بر حسب ابعاد شناور ارائه شده است. در جدول ۳ مشخصات شبکه‌بندی دامنه‌ی حل ارائه شده است. مقادیر i، j و k به ترتیب تعداد سلول‌ها در راستای y،x و z در حالت اولیه می‌باشد. سپس با استفاده از شش مرحله بهبود، شبکه‌بندی ریزتر شده تا در نهایت، یک لایه شبکه‌ی بسیار ریز اطراف شناور را احاطه کند. پنج حالت مختلف شبکه‌بندی در نظر گرفته شده و اثرات ریز شدن سلول‌ها تا جایی که نتیجه‌ی حل عددی برای تخمین مقاومت در سرعت طراحی تغییر نکند ادامه داده شده است. مقدار مقاومت و درصد تغییر نسبت به شبکه‌ی بزرگ‌تر در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که حالت D بعنوان شبکه‌بندی نهائی انتخاب شده است.

جدول ۵- بررسی تأثیر شبکه بر دقت حل عددی

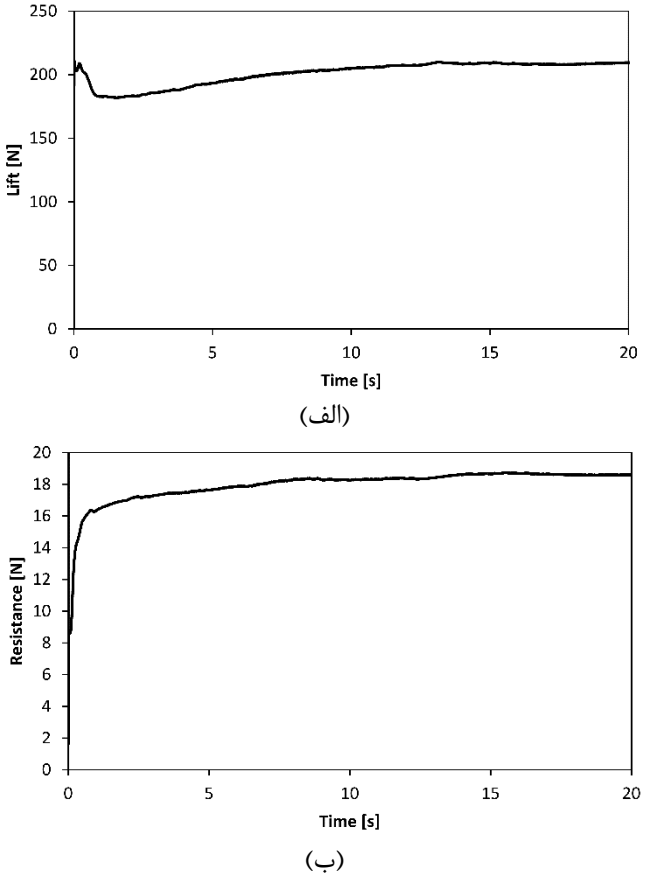
حالت	تعداد سلول i, j, k	تعداد سلول نهائی	مقدار مقاومت (نیوتن)	درصد خطا از حل تجربی
A	۵۰-۲۲-۱۰۲	۵۷۵،۴۸۷	۲۵/۳۴	۲۳/۰۵
B	۵۴-۲۴-۱۰۸	۶۸۴،۵۹۷	۲۳/۶۰	۱۴/۶۲
C	۵۶-۲۶-۱۱۴	۸۴۲،۹۵۶	۲۲/۰۸	۷/۲۳
D	۶۰-۲۸-۱۲۲	۱،۰۷۹،۲۱۸	۲۱/۱۲	۲/۵۷
E	۶۴-۳۰-۱۲۸	۱،۳۰۶،۹۰۱	۲۱/۰۸	۲/۳۸

در شکل ۷ نیز نمایی از برش شبکه‌ی اطراف مدل شناور ارائه شده است.



شکل ۷ - برش طولی و عرشی شبکه‌ی اطراف مدل عددی یکی از بدنه‌ها

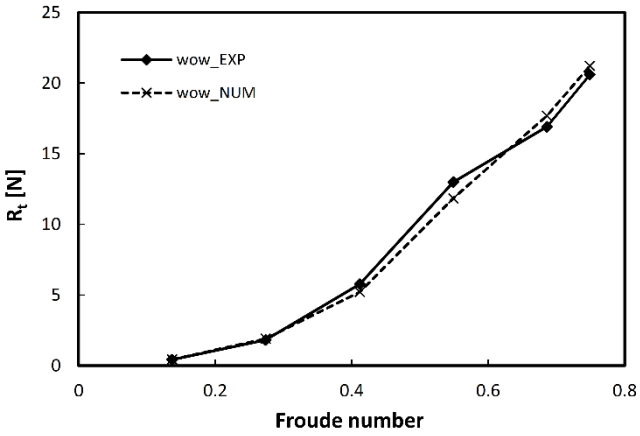
در شکل ۸ نمودار تغییرات نیروی برا و پسا برای مدل در سرعت طراحی ارائه شده است. مقاومت نهایی شناور بر اساس متوسط‌گیری داده‌ها در ۵ ثانیه‌ی انتهایی محاسبه گردیده است.



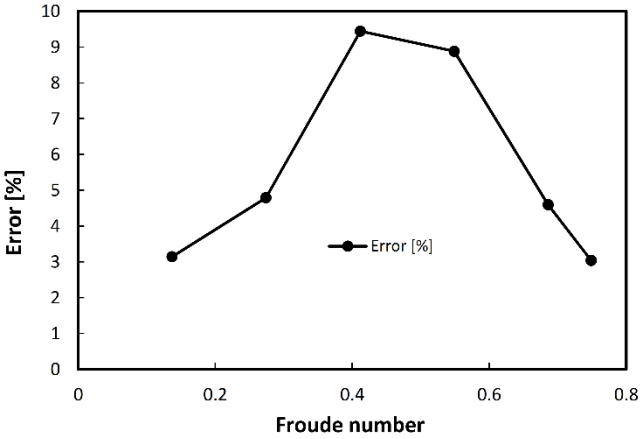
شکل ۸ - نیروی برا (الف) و مقاومت (ب) متوسط ثبت شده در حل عددی در سرعت طراحی

با توجه به وجود داده‌های آزمایشگاهی برای مدل بدونِ گُوِه، مقدار مقاومت در هر عدد فرود به نمونه‌ی اصلی تعمیم داده شده و مقدار توان مؤثر بدست آمده برای هر عدد فرود حاصل از حل عددی و بررسی آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده و در شکل ۹ ارائه گردیده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، تطابق مناسبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. بخصوص با نزدیک شدن به نقطه‌ی طراحی، این تطابق افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ مقادیر خطای محاسبه شده ارائه شده است. بیشترین خطا در عدد فرود ۰/۴۱۲ ثبت شده که کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. خطای حل عددی در نواحی اطراف سرعت طراحی کمتر از ۳ درصد بوده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]

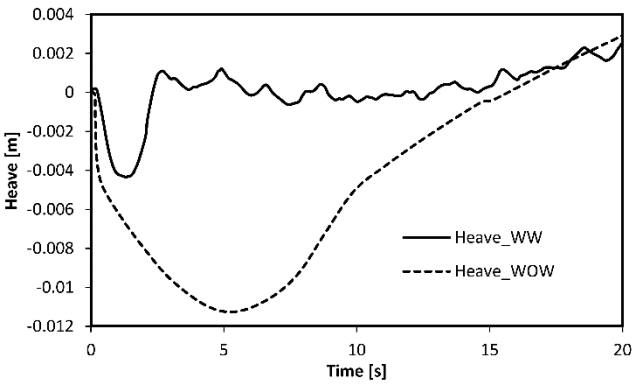


شکل ۹ – مقایسه‌ی مقاومت شناور اصلی بدونِ گُوِه ناشی از دو تحلیل تجربی و عددی

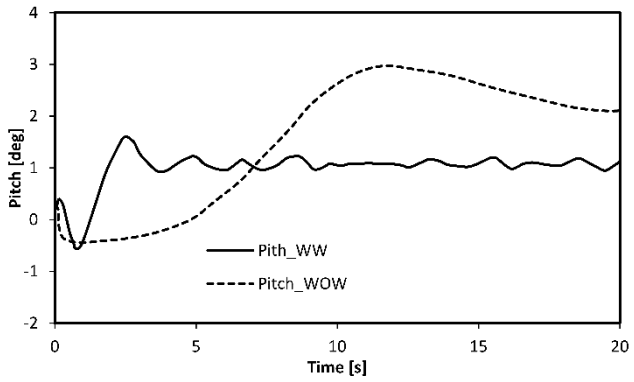


شکل ۱۰ – مقدار خطای ناشی مقایسه‌ی مقاومت شناور اصلی بدونِ گُوِه در دو تحلیل تجربی و عددی

در شکل ۱۱ و ۱۲ نیز تغییرات ثبت شده برای دو حرکت جابجایی عمودی و غلتش طولی در یک بازه‌ی زمانی مشخص ارائه شده است.



شکل ۱۱ – حرکت جابجایی عمودی شناور در دو حالتِ با (ww) و بدون گُوِه (wow) در سرعت طراحی

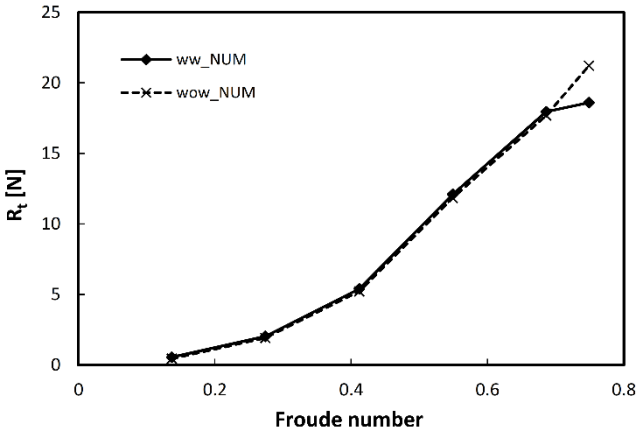


شکل ۱۲ – حرکت غلتش طولی شناور در دو حالتِ با و بدون گُوِه در سرعت طراحی

تغییرات محل مرکز جرم در راســـتای عمودی (جابجائی عمودی) نسبت به محل آن در حالت آب آرام و سرعت صفر اندازه‌گیری شده اســـت. این حرکت در حالتِ بدون گُوِه دارای نوســـان بســـیار زیادی بوده و این نو سان در بازه‌ی زمانی بزرگی رخ می‌دهد. پس از ن صب گُوِه، جابجائی عمودی به ســـرعت به حالت پایدار رســـیده و تغییرات آن ب سیار اندک می‌با شد. اما در خ صوص غلتش طولی این مو ضوع کمی متفاوت ا ست. یعنی نو سانات غلتش طولی همچنان م شاهده شده و ناپایداری دینامیکی در این حرکت کاملاً مشهود می‌باشد. در صـــورتی که با نصـــب گُوِه در پاشـــنه، زاویه‌ی تریم ثابت (با دامنه‌ی نوسانات ناچیز) و رو به پاشنه ایجاد شده است. همچنین مقدار تریم شـــناور با نصـــب گُوِه در پاشـــنه تا حد زیادی کاهش می‌یابد که این موضوع در ادامه مورد بررسی بیشتری قرار می‌گیرد.

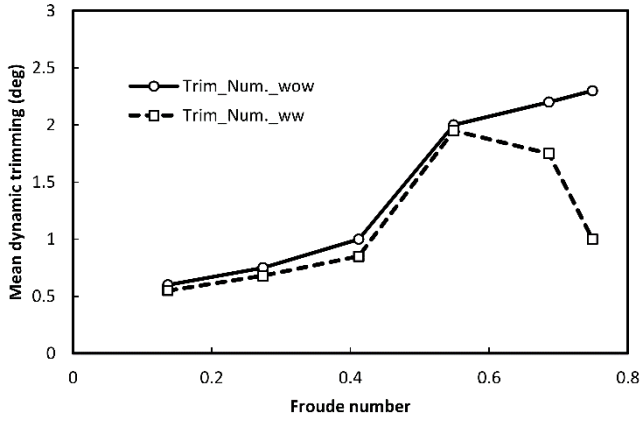
در شکل ۱۰ نمودار مقاومت ثبت شده برای دو حالتِ با و بدون گُوِه در تحلیل عددی ارائه شـــده اســـت. همانطور که مشـــاهده می‌گردد، افزودن گُوِه به پا شنه‌ی شناور باعث کاهش مقاومت از سرعت ۲/۳ متر بر ثانیه به بعد شـــده اســـت (معادل عدد فرود ۰/۶۸۶). در این صـــورت می‌توان مطمئن بود که با اســـتفاده از چنین ابزاری می‌توان عملکرد هیدرودینامیکی مناســـبی را انتظار داشـــت، در صـــورتی که سرعت طراحی شناور در محدوده‌ی عدد فرود بیش از ۰,۷ در نظر گرفته شود. (که در مورد این شناور کاملاً صادق می‌باشد.)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]



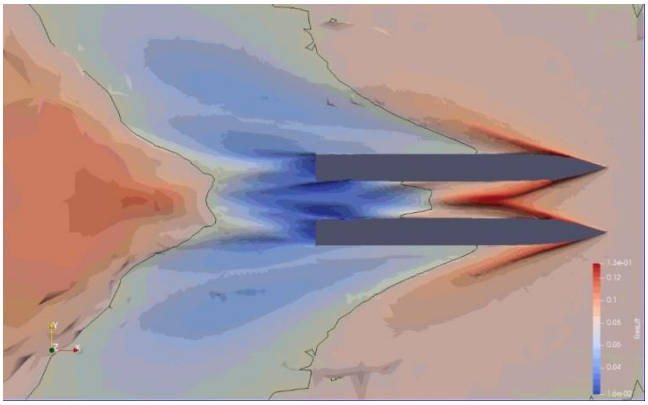
شکل ۱۳ - نیروی متوسط ثبت شده در حل عددی در هر سرعت برای دو حالتِ با و بدون گُوِه

همانطور که مشاهده می‌گردد، در سرعت ۲/۵۳ متر بر ثانیه مقدار مقاومت مدل در حل عددی برای شناور با و بدونِ گُوِه به ترتیب ۱۸/۶ و ۲۱/۲ نیوتن بد ست آمده ا ست. در این سرعت، ن صب گُوِه توانسته است بیش از ۱۲ درصد نیروی مقاومت شناور را کاهش دهد. این مقدار در مقابل کاهش مصرف سوخت در طی مدت عملکرد این شناور کاملاً قابل توجه می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری است که نصب گُوِه اثر مثبتی در کاهش مقاومت در سرعت‌های کم ندارد. کاهش مقاومت شناور در سرعت طراحی قابل توجه می‌باشد. این امر با در نظر گرفتن کاهش نوسانات دینامیکی شناور کاملاً قابل توجیه می‌با شد. در شکل ۱۴ نیز اثرات ن صب گُوِه بر تغییرات زاویه‌ی تریم شناور در هر سرعت ارائه شده است.



شکل ۱۴ - مقایسه‌ی اثر نصب گُوِه بر تغییرات تریم دینامیکی متوسط شناور در هر سرعت

همانطور که م شاهده می‌گردد، ن صب گُوِه در پا شنه منجر به کاهش تریم دینامیکی متوسط شناور شده است. اما این کاهش از عدد فرود ۰/۶ به بعد خودنمائی می‌کند. علت آن هم ایجاد نیروی بَرای منا سب در سرعت‌های بی‌شتر ا ست. در ادامه کانتور سطح آزاد آب در سرعت طراحی (شکل ۱۵) و همچنین ف شار وارد شده بر کف شناور (شکل ۱۶) در دو حالتِ با و بدون گُوِه ارائه شده است.

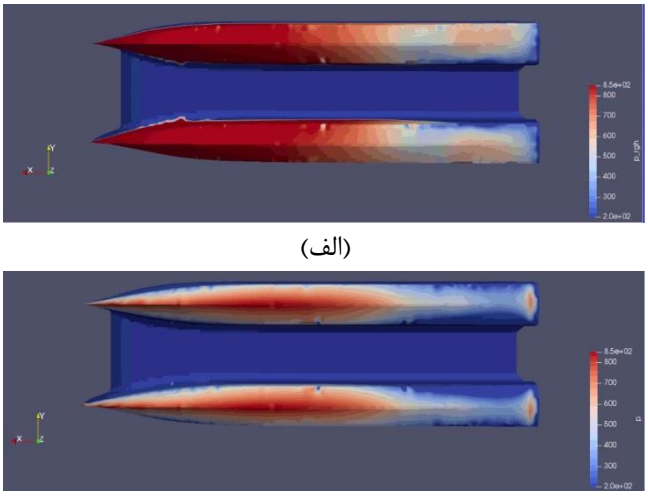


(الف)

(ب)

شکل ۱۵ - کانتور سطح آزاد آب در حالت بدون گُوِه (الف) و با گُوِه (ب) در سرعت طراحی

در شکل ۱۵ برشی در ارتفاع معادل سطح آرام آب (خط سیاه‌رنگ) ایجاد شده تا نقاط بالاتر (با رنگ قرمز) و پایین‌تر (با رنگ آبی) از آن قابل ت شخیص با شد. ن صب گُوِه در پا شنه اثرات کمی بر جریان پ شت پا شنه دا شته و کاهش ارتفاع آب در این ناحیه م شاهده می گردد.



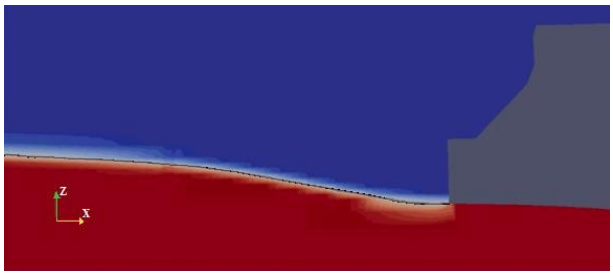
(الف)

(ب)

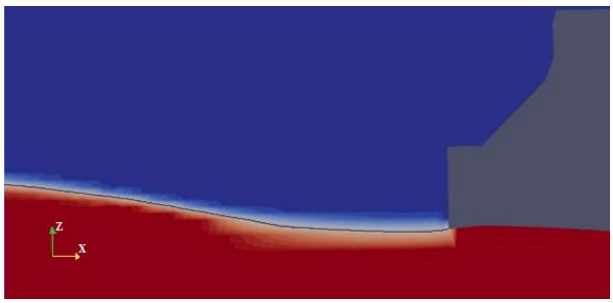
شکل ۱۶ - توزیع فشار وارد بر کف شناور در حالت بدون گُوِه (الف) و با گُوِه (ب) درسرعت طراحی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]

همچنین در شکل ۱۶ افزایش محسوس فشار در ناحیه‌ی اطراف گُوِه مشاهده می‌گردد که دلیل اصلی آن نصب گُوِه و ایجاد نیروی بَرا و به تبع آن تغییر پروفیل فشار در آن ناحیه می‌باشد. علاوه بر آن، در شکل ۱۷ برش طولی از خط مرکزی یک نیم‌بدنه ارائه شده و تغییرات سطح آزاد در آن ناحیه مشاهده می‌گردد. افزودن گُوِه به ناحیه‌ی پاشنه‌ی شناور باعث کاهش ارتفاع پاشش آب در ناحیه‌ی پشت ترانزوم شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷ - برش سطح آزاد آب در انتهای شناور در دو حالت بدون (الف) و با (ب) گُوِه در سرعت طراحی

۵- بحث و نتیجه‌گیری

همانطور که مشاهده گردید، در اینجا از دو روش عددی و تجربی برای ارزیابی اثرات نصب گُوِه‌ی پاشنه در عملکرد هیدرودینامیکی شناور دوبدنه‌ی نیمه‌پروازی بهره گرفته شد. بدنه‌هایی از جنس چوب با مقیاس تقریبی یک به شانزده ساخته شده و در حوضچه‌ی آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس در آب آرام و در سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. از سوی دیگر، مدلی با همان طول در یک تانک عددی که در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم تولید شده است با استفاده از روش عددی به دقت تحلیل شده و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. مقدار مقاومت شناور اصلی در محدوده‌ای که نتایج آزمایشگاهی بدست آمده بود با داده‌های تجربی مقایسه شد و اختلاف اندکی بدست آمد. بر همین اساس اثر متغیرهایی نظیر مقدار مقاومت در هر سرعت، جایجائی عمودی، غلتش طولی و سایر عوامل مؤثر در ناپایداری شناور در دو حالت با و بدون گُوِه مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثرات نصب گُوِه در پاشنه‌ی چنین بدنه‌ای در سرعت طراحی کاملاً مشهود می‌باشد. هرچند نصب گُوِه باعث افزایش ناچیز نیروی مقاومت شناور در سرعت‌های کم شده است، کنترل ناپایداری دینامیکی شناور در سرعت‌های زیاد منجر به کاهش مقاومت در سرعت طراحی گردیده است. بر اساس حل عددی معتبر، در این پژوهش اثرات نصب گُوِه منجر به افزایش سرعت طراحی گردید و اختلاف ۱۲ درصدی برای مقاومت شناور در دو حالتِ با و بدونِ گُوِه ثبت گردید. توزیع فشار در کف شناور ثبت شده و دامنه‌ی تغییرات ناپایداری‌های دینامیکی شناور مورد مقایسه قرار گرفته است. روش عددی حاضر که مبتنی بر حلگر اینتردایم‌فوم نرم‌افزار اوپن‌فوم می‌باشد نیز توانسته است به‌خوبی حرکات دینامیکی شناور را ثبت نموده و می‌توان از آن برای توسعه‌ی چنین روش‌هایی در شناورهای پروازی با سرعت‌هایی بسیار بیشتر نیز استفاده نمود.

۵ - تشکر و قدردانی

می‌بایست از همکاری دلسوزانه‌ی جناب آقای مهندس هاشمی ریاست محترم آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس که امکان انجام آزمایش‌هایی با کیفیت بسیار زیاد را برای حمایت از این پژوهش فراهم آوردند تشکر و قدردانی نمود.

کلید واژگان

1- Stern wedge
2- Flap
3- Interceptor
4- Planing
5- Semi-planing
6- Lift
7- Frigate
8- Displacement
9- Semi-displacement
10- Sprayrail
11- Heave
12- Pitch
13- Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)
14- Volume OF Fluid (VOF)
15- Artificial compression
16- Eddy viscosity
17- Shear Stress Transport
18- Froude number
19- interDyMFoam

۶ - مراجع

1- Karafiath, G., Fisher, S.C., (1987), *The effect of stern wedges on ship powering performance*. Naval Engineering Journal, May, p.27-11.

2- Bojovic, P., Sahoo, P.K., (2004) *Effect of stern wedges and advanced spray rail system on calm water resistance of high-speed displacement hull forms*, Proceedings of Pacific 2004 International Maritime Conference; 2004 February 3-5; Sydney.

3- Jadmiko, E., Syarif, I., Arif, L., (2018), *Comparison of Stern Wedge and Stern Flap on Fast Monohull*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]

Vessel Resistance, International Journal of Marine Engineering Innovation and Research, Vol.3(2), p.41-9.
4- Salas, M., Tampier, G., (2013), *Assessment of appendage effect on forward resistance reduction*, Ship Science & Technology, Vol.7(13), p.37-9.
5- Jangam, S., Subramanian, V.A., Krishnankutty, P., (2019), *Computational Study on the Hydrodynamic Effects of Interceptors Fitted to Transom of Planing Vessel*, Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018), Lecture Notes in Civil Engineering 22; 2019 Jan 18; Singapore.
6- John, Sh., Khan, M.D.K., Praveen, P.C., Korulla, M., Panigrahi, P.K., (2011), *Hydrodynamic performance enhancement using stern wedges, stern flaps and interceptors for ships*, International Conference on Ship and Offshore Technology; 2011Dec 8-9; INDIA Kharagpur.
7- Mansoori, M., Fernandes, A.C., Ghassemi, H., (2017), *Interceptor design for optimum trim control and minimum resistance of planning boats*, Applied Ocean Research, Vol.69, p.100-6.
8- Song, K., Guo, Ch., Gong, J., Li, P., Wang, L., (2018), *Influence of interceptors, stern flaps, and their combinations on the hydrodynamic performance of a deep-vee ship*, Ocean Engineering, Vol.170, p.306-15.
9- Day, A.H., Cooper, Ch., (2011), *An experimental study of interceptors for drag reduction on high-performance sailing yachts*, Ocean Engineering, Vol.38, p.983-12.
10- Park, J.Y., Choi, H., Lee, J., Choi, H., Woo, J., Kim, S., et al., (2019), *An experimental study on vertical motion control of a high-speed planning vessel using a controllable interceptor in waves*, Ocean Engineering, Vol.173, p.841-10.
11- Mansoori, M., Fernandes, A.C., (2016), *The interceptor hydrodynamic analysis for controlling the porpoising instability in high speed*, Applied Ocean Research, Vol.57, p.40-12.
12- Avci, A.G., Barlas, B., (2019), *An experimental investigation of interceptors for a high speed hull*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.11(1), p.256-18.
13- Mansoori, M., Fernandes, A.C., (2015), *Hydrodynamics of the interceptor on a 2-D flat plate by CFD and experiments*, Journal of Hydrodynamics, Vol.27(6), p.919-15.
14- Ghadimi, P., Sajedi, S.M., Tavakoli, S., (Articles in Press), *Experimental Study of the Wedge Effects on the Performance of a Hard-chine Planing Craft in Calm Water*, Scientia Iranica, DOI: 10.24200/sci.2018.20607.
15- Jasak, H., (1996), *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows*, Imperial College, London, UK (Ph.D.thesis.
16- Rusche, H., (2002), *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-phase Flows at High Phase Fractions*, Imperial College, London, UK (Ph.D.thesis).
17- Berberović, E., Van Hinsberg, N., Jakirlić, S., Roisman, I., Tropea, C., (2009), *Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution*, Physical Review E., Vol.79(3), p.36306.
18- Menter, F.R., (2009), *Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective*, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.23(4), p.305–12.
19- ITTC, Recommended Procedures. General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 7.5-02-02-02, 2014.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.11.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.69]