

Numerical investigation of the added resistance of a twin-hull ship equipped with a stern wedge in a regular wave

M. Barati ^{*1}M. Yousefifard ² M. Shakeri ³ 

Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

(Received: 2024/07/15, Revised: 2024/10/04, Accepted: 2024/11/12, Published: 2024/12/01)



DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.3.1>

ABSTRACT

In the current study, dynamics of a twin-hull ship has been evaluated in regular waves. Numerical solution has been done using the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations and the interDyMFoam solver of openFoam open-source code. The results of the numerical solution in calm water present acceptable agreement with the published experimental data. The maximum speed of the ship in calm water is equivalent to Froude Number=0.747 and assuming the maximum engine power is constant, the ship has been able to reach a speed equivalent to the Froude Number=0.274 in waves. Although the presence of the wedge in calm water condition has caused the lift force and the control of longitudinal instabilities, but the same wedge has caused the imbalance of pressure forces at a lower speed and in a state where the ship is moving in waves. In general, the result of the forces acting on the ship in the waves has led to an increase in the range of heave and pitch motions (5 and 7 percent respectively) for the body equipped with a wedge, which is a weak point for the ship equipped with a wedge. Installing the wedge has increased the added resistance in waves by 4.26%. Although, the addition of the wedge has reduced the longitudinal instability in calm water at design speed, but for this ship it was proven that the addition of the wedge leads to the deterioration of the ship dynamics in waves. So, a controllable angle stern wedge could be installed to have the best performance in all conditions.

Keywords: Stern wedge, twin-hull ship, regular waves, added resistance, longitudinal instability

بررسی عددی مقاومت افزوده‌ی یک شناور دوبدنه‌ی مجهز به گوه‌ی پاشنه در موج منظم

محسن شاکری ¹ مهدی یوسفی فرد ^{2*} مصطفی براتی ¹

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱)

چکیده

در این پژوهش رفتار دینامیکی یک شناور دوبدنه تحت اثر افزودن گوه پاشنه در امواج منظم مورد ارزیابی قرار گرفته است. حل عددی دینامیک شناور با استفاده از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر - استوکس و حلگر اینتردایم فوم نرم‌افزار متن‌باز اپن فوم صورت گرفته است. نتایج حل عددی در آب آرام با داده‌های آزمایشگاهی منتشر شده تطابق قابل‌قبولی (بیشترین خطای کمتر از ۳ درصد) دارد. بیشترین سرعت شناور در آب آرام، معادل عدد فرود ۰/۷۴۷ بوده و با فرض ثابت بودن حداکثر توان موتور، شناور توانسته است در آب موج به سرعتی معادل عدد فرود ۰/۲۷۴ دست پیدا کند. هر چند وجود گوه در آب آرام باعث ایجاد نیروی برآ در پاشنه و کنترل ناپایداری‌های طولی شده است، اما همین گوه باعث عدم توازن نیروهای فشاری در سرعت کمتر و در شرایط آب موج شده است. در مجموع، برآیند نیروهای وارد بر شناور در امواج منجر به افزایش دامنه حرکات جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی به ترتیب به مقدار ۵ و ۷ درصد برای شناور مجهز به گوه شده است. این امر یک نقطه ضعف برای شناور دارای گوه در شرایط موج می‌باشد؛ بنابراین، نصب گوه باعث افزایش ۴/۲۶ درصدی مقاومت افزوده در امواج شده است. افزودن گوه برای کاهش ناپایداری طولی در آب آرام و سرعت طراحی مطلوب بوده، اما برای این شناور خاص ثابت شد که افزودن گوه‌ی پاشنه با زاویه ثابت می‌تواند در رفتار شناور در امواج اثر نامطلوب داشته باشد. به همین دلیل برای دستیابی به عملکرد مناسب در همه شرایط کاری، می‌بایست از گوه با امکان تغییر زاویه استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: گوه‌ی پاشنه، شناور دوبدنه، امواج منظم، مقاومت افزوده، ناپایداری طولی

۱- کارشناس ارشد (نویسنده پاسخگو): mostafabarati@nit.ac.ir

۲- استادیار: yousefifard@nit.ac.ir

۳- استاد: shakeri@nit.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی دینامیک و مقاومت شناور در امواج می‌تواند کمک شایانی به طراحان در راستای افزایش قابلیت دریانوردی، ایمنی و افزایش طول عمر شناور کند. از طرفی کاهش مقاومت شناور در امواج می‌تواند باعث کاهش مصرف سوخت آن شود. امواج دریا موجب ایجاد پدیده‌هایی چون پروپوزینگ^۱ (ناپایداری طولی)، کوبش کف^۲ (برخورد سینه شناور به سطح آب در اثر حرکت دینامیکی)، خیسی عرشه^۳ و پدیده‌هایی از این دست می‌گردد که به صورت غیرمستقیم باعث محدود نمودن سرعت در دریا می‌شوند. ناپایداری شناور و به دنبال آن ریسک صدمه رسیدن به آن در امواج یکی از موضوعات مهم در شناورهای نیمه جابه‌جایی^۴ می‌باشد. شناورهای چند بدنه به علت عرض نسبی بیشتر، در غلتش عرضی^۵ پایداری مناسبی دارند و این موضوع در مورد این‌گونه شناورها از اهمیت کمی برخوردار است. ولی ناپایداری‌های دینامیکی از قبیل کاهش ناگهانی تریم^۶، بروچینگ^۷ (تغییر ناگهانی مسیر شناور در اثر باد)، پروپوزینگ یا ترکیب حرکات جابه‌جایی عمودی^۸ و غلتش طولی^۹ از جمله ناپایداری‌های مهم در شناورهای نیمه جابه‌جایی هستند که موجب آسیب خدمه یا از بین رفتن شناور می‌گردد. بهبود عملکرد هیدرودینامیکی یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی شناور می‌باشد. یکی از روش‌های بهبود رفتار هیدرودینامیکی شناورها افزودن زائده‌هایی از قبیل گوهی پاشنه^{۱۰}، اینترسپتور^{۱۱}، تریم تب^{۱۲} و فلپ پاشنه^{۱۳} به بدنه شناور می‌باشد. گوهی پاشنه یکی از زائده‌های مؤثر در حوزه شناورهای نیمه جابه‌جایی است. زیرا می‌تواند با ایجاد نیروی برآ^{۱۴} و تغییر توزیع فشار در کف شناور، باعث بهبود مقاومت و کاهش ناپایداری گردد. در مقالات زیادی اثر نصب گوه بر عملکرد هیدرودینامیکی

شناور در آب آرام بررسی شده است. اما اثر نصب گوه بر رفتار دینامیکی در امواج کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در سال ۱۹۴۷ دوکان [۱] نشان داد که با استفاده از گوه‌ها و تریم‌تب‌ها می‌توان حرکت اسکوات^{۱۵} شناور پروازی را کاهش داد. مونک [۲] در سال ۱۹۵۸ با استفاده از روش آزمایشگاهی به بررسی نصب گوه در قسمت پاشنه‌ی شناور پروازی پرداخت. سپس رابطه‌ای برای تعیین اندازه‌ی گوه برای شناورهای کوچک تندر و یافت. ساویتسکی [۳] در سال ۱۹۶۴ آزمایش‌هایی را روی تعدادی از شناورهای V شکل انجام داد و روابط نیمه‌تجربی برای محاسبه‌ی نیروی مقاومت و برا ارائه کرد. او معادلاتی را بر اساس روش آماری به دست آورد و روندی را برای محاسبه‌ی نیروی مقاومت و برآ در شناورهای تندر و پیشنهاد نمود. نتایج او نشان داد که در هنگام نصب گوه یا تریم‌تب بر روی یک شناور پروازی، عوامل زیادی باید در تجزیه و تحلیل عملکرد هیدرودینامیکی در نظر گرفته شوند. ساویتسکی و برون [۴] در سال ۱۹۷۶ معادلاتی را برای مدل‌سازی فلپ و گوهی پاشنه بدست آوردند. آن‌ها نشان دادند که فلپ و گوه به عنوان یک زائده‌ی رایج، برای کنترل تریم بدنه‌ی شناورهای تندر و استفاده می‌شود. تحقیق آنها به این نکته اشاره می‌کند که گوهی نصب شده بر روی شناور، در حالی که ساده و ارزان‌ترین وسیله برای کنترل تریم است؛ عمدتاً در سرعت‌های طراحی می‌تواند مقاومت بدنه و مصرف سوخت شناور را کاهش دهد. در سال ۱۹۷۸ میل وارد [۵] تحقیقاتی در زمینه‌ی طراحی شکل بدنه و همچنین اثر گوه و فلپ در عملکرد هیدرودینامیکی شناور انجام داد. مطالعات نشان داد که گوه و فلپ دارای اثر دوگانه هستند که علاوه بر تأثیر ظاهری و تغییر غلتش طولی، باعث افزایش نیروی هیدرودینامیکی بر روی بدنه نیز می‌شوند. اثر گوه بر روی مقاومت افزوده^{۱۶} شناورهای پروازی و نیمه‌پروازی نیز توسط وانگ [۶] در سال ۱۹۸۰ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در ادامه‌ی تحقیقات، در سال ۱۹۸۷ کارافیات و فیشر [۷] یکی از اولین پژوهش‌های مهم انجام شده در مورد بررسی تأثیر نصب گوهی پاشنه بر روی عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور نظامی از نوع فریگت را ارائه دادند. آنها از روش تحلیلی و آزمایشگاهی مدل، برای ارزیابی تأثیر نصب گوه استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که

¹ porpoising² slamming³ deck wetness⁴ semi-displacement⁵ roll⁶ trim⁷ broaching⁸ heave⁹ pitch¹⁰ Stern wedge¹¹ interceptor¹² trim tab¹³ stern flap¹⁴ lift¹⁵ squat¹⁶ added resistance

نصب گُوه در پاشنه برای سرعت بیشینه تا ۶ درصد کاهش توان را به همراه داشته است. گریگورپولوس و لوکاکیس [۸] در سال ۱۹۹۶ به مطالعه‌ی اثر نصب گُوه بر مقاومت شناورهای پروازی در آب آرام پرداختند. آن‌ها تأثیر نصب گُوه‌های مختلف در پاشنه با طول‌های ۲، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد طول خط آب‌خور برای عدد فرود حجمی بیشتر از ۳ را در آزمایشگاه بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که گُوه با طول ۲ تا ۵ درصد طول خط آب‌خور تأثیر مثبتی بر مؤلفه‌های هیدرودینامیکی دارد. بوجویچ و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۰ تأثیر گُوه‌ی پاشنه و اسپری ریل^۱ را در رفتار یک شناور نیمه‌جابجایی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌هایی با استفاده از ترکیب‌های مختلف از اسپری ریل و گُوه‌ی پاشنه انجام دادند. در این آزمایش‌ها تأثیر گُوه با زوایای ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درجه در رفتار شناور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از گُوه در زاویه‌ی بهینه می‌تواند مقاومت باقی مانده را تا ۱۰ درصد کاهش دهد. سال ۲۰۰۹ جانگ و همکاران [۱۰] تأثیر افزودن زائده‌های پاشنه را در یک شناور مسافری تندرو بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی نشان دادند که براکت و گُوه‌ی پاشنه می‌تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد دینامیکی شناور در آب آرام و موج داشته باشد. در سال ۲۰۱۹ ساجدی و همکاران [۱۱] تأثیر افزودن گُوه بر ناپایداری پروپوزینگ را با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی عددی آنها با استفاده از نرم افزار استار سی سی ام^۲ انجام شده است. آن‌ها به منظور بررسی تأثیر گُوه بر پایداری طولی شناور از دو گُوه با ارتفاع‌های ۵ و ۱۰ میلی‌متر استفاده نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از گُوه موجب کاهش ناپایداری پروپوزینگ و بهبود عملکرد هیدرودینامیکی شناور می‌شود و همچنین مقاومت شناور در حدود ۸ تا ۱۵ درصد در حالت پروازی کاهش یافته است. پاکورارو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹ به بررسی عددی تأثیر گُوه و اینترسپتور در مؤلفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور جابه‌جایی پرداختند. مؤلفه‌های هیدرودینامیکی در آن پژوهش شامل مقاومت کشتی، سینکج^۳ و تریم می‌باشند که در اعداد فرود بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۷ بررسی شدند. مقاومت شناور مجهز به گُوه در حدود ۲/۴ تا ۵/۵ درصد و با اینترسپتور در حدود ۲/۸ تا

۸/۸ درصد کاهش یافته است. لازم به ذکر است تأثیر گُوه برای عدد فرود کم ممکن است نامناسب باشد. به همین علت برای اعداد فرود کم پیشنهاد می‌شود ارتفاع گُوه کوتاه‌تر باشد. قدیمی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۹ به مطالعه‌ی تجربی اثر گُوه‌ی پاشنه بر روی عملکرد یک شناور پروازی Hard-Chine در آب آرام پرداختند. آن‌ها از دو گُوه با ارتفاع‌های ۵ و ۱۰ میلی‌متر در آزمایشات خود استفاده نمودند. نتایج نشان داد که نصب گُوه با ارتفاع ۵ میلی‌متر زاویه‌ی تریم را ۱۳ تا ۴۹ درصد و در ارتفاع ۱۰ میلی‌متر ۷ تا ۳۹ درصد کاهش داده است. همچنین مقاومت شناور در ارتفاع ۵ میلی‌متر ۶ تا ۱۵ درصد و در ارتفاع ۱۰ میلی‌متر ۲ تا ۱۱ درصد با کاهش رو به رو شده است. یوسفی‌فرد و معبودی [۱۴] در سال ۲۰۲۱ به مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی اثر گُوه بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور نیمه‌جابجایی کاتاماران در آب آرام پرداختند. در این مطالعه، تمرکز اصلی آن‌ها بهبود مقاومت در آب آرام و کنترل ناپایداری دینامیکی شناور نیمه‌جابجایی کاتاماران بوده است. در این راستا آن‌ها چهار گُوه با زاویه‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درجه طراحی و در پاشنه شناور نصب نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند بیشترین اثر گُوه با زاویه ۸ درجه ۱۲ درصد و گُوه ۶ درجه ۱۴ درصد مقاومت شناور را کاهش داده است. لازم به ذکر است با نصب گُوه تریم شناور در سرعت طراحی تا ۵۰ درصد کاهش یافته است.

استفاده از روش‌های عددی جهت تحلیل مسائل هیدرودینامیکی، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. نرم‌افزارهایی نظیر انسیس سی‌اف‌ایکس^۴ برای تحلیل مسائل هیدرودینامیکی توسط منفرد مسقانی و همکاران [۱۵] و همچنین ملک‌پور و مهدی [۱۶] استفاده شده است. نرم‌افزارهایی مانند انسیس فلونت^۵ و همچنین روش‌هایی نظیر هیدرودینامیک ذرات هموار^۶ نیز توسط محققان در حوزه هیدرودینامیک مورد توجه بوده‌اند [۱۷] و [۱۸].

باتوجه به مطالعه پژوهش‌های انجام شده در رابطه با شناورهای دوبنده‌ی نیمه‌جابجایی، تغییرات مقاومت افزوده و رفتار حرکات دینامیکی شناور در امواج منظم کمتر مورد توجه قرار گرفته است. واضح است که رفتار شناور با تغییر در سرعت‌های مختلف در دامنه و طول‌موج‌های متفاوت می‌تواند تأثیراتی بر روی حرکت و مقاومت آن

^۴ ANSYS CFX

^۵ ANSYS Fluent

^۶ Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)

^۱ spray rail

^۲ Star CCM

^۳ sinkage

است با $\mu_{eff} = \rho(v + v_t)$ که در آن v و v_t به ترتیب معرف ویسکوزیته‌ی سینماتیک و گردابه‌ای می‌باشند. f_σ هم ترم منبعی در اثر کشش سطحی است.

۲-۲- روش حجم سیال

در این مطالعه روش حجم سیال به همراه تراکم مصنوعی برای تشخیص مرز آب‌وهوا در شبیه‌سازی جریان دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است و طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

در معادله‌ی (۳) منظور از U_r همان سرعت دامنه‌ی جریان است که اثرات سرعت در مرز مشترک آب و هوا را اعمال می‌نماید [۲۱] و α نیز بیانگر نسبت حجمی سیال می‌باشد که می‌توان بر اساس آن مشخصات سیال درون هر سلول را محاسبه نمود.

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{air} \\ \alpha = 1 & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{interface} \end{cases} \quad (4)$$

کشش سطحی در معادله‌ی (۶) 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.

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_g \\ \mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_g \end{cases} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که در این مطالعه نیاز است معادلات مربوط به انتقال تنش برشی نیز به عنوان روش شبیه‌سازی جریان آشفته در نظر گرفته شود. مدل آشفته $k - \omega sst$ در جریان‌های داخلی که در آن‌ها تنش‌های برشی بسیار با اهمیت هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲، ۲۳]. سرعت زیاد و اهمیت تنش برشی در شبیه‌سازی شناورهای پروازی و نیمه‌جابجائی باعث شده است که این مدل آشفته‌گی بیشترین استفاده را در مسائل مرتبط با هیدرودینامیک این نوع از شناورها داشته باشد. بر همین اساس، در این مطالعه نیز از مدل مشابه برای شبیه‌سازی آشفته‌گی استفاده شده است.

۲-۳- معادله‌ی دینامیک جسم صلب

داشته باشد. در این مطالعه با استفاده از روش عددی مقدار حرکات شناور و مقاومت افزوده در عدد فرود ۰/۲۷۴ (متناظر با سرعت طراحی شناور) در امواج منظم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. سپس تأثیر اضافه نمودن گوه جهت بهبود مؤلفه‌های هیدرودینامیکی شناور بررسی گردیده است. تحلیل دینامیکی شناور مجهز به گوه پاشنه در آب موج و مقایسه نتایج با آب آرام و ارزیابی مقاومت افزوده در این حالت از نقاط بارز این مطالعه می‌باشد.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله پیش رو شامل معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات دینامیک جسم صلب و معادله موج منظم می‌باشد.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات اساسی مطرح شده در پدیده‌ی جریان سیال معادلات ناویر-استوکس^۱ هستند. این معادلات برای مسائل جریان سیال حاکم است و شامل معادله‌ی پیوستگی و معادله‌ی مومنتوم می‌باشد. معادلات ناویر-استوکس را می‌توان با استفاده از معادلات متوسط‌گیری شده‌ی رینولدز بازنویسی کرد. حرکت سیال بوسیله‌ی حل معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر-استوکس رینولدز برای جریان دو فازی شبیه‌سازی شده است. جزئیات چگونگی اعمال این روش و حجم سیال^۲ در نرم‌افزار اوپن‌فوم^{۲۱} توسط جاساک [۱۹] و همچنین روشه [۲۰] ارائه شده است. معادلات حرکت سیال دو فازی شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم بوده که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

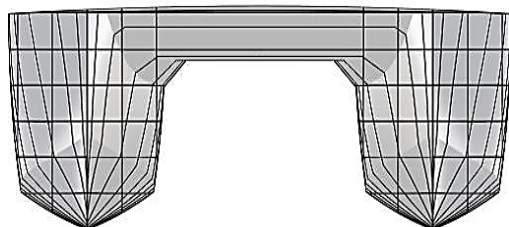
$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g)U) = \\ -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + \\ (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

که در اینجا، U و U_g به ترتیب سرعت سیال و سرعت حرکت سلول‌های شبکه می‌باشند. همچنین p_d فشار دینامیکی که از رابطه‌ی $p_d = p - \rho g \cdot x$ بدست می‌آید (یعنی تفاضل فشار کل و فشار هیدرواستاتیک). شتاب گرانش (g) نیز برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه در راستای Z تعریف می‌گردد. ویسکوزیته‌ی دینامیکی مؤثر نیز برابر

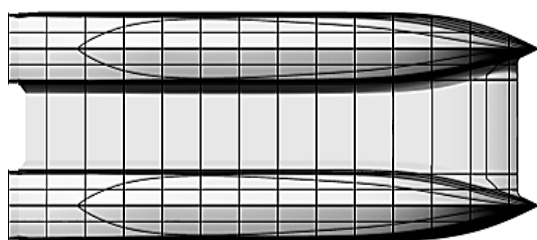
¹ Navier-Stokes

² Volume Of Fluid (VOF)

مدل عددی	مدل تجربی	شناور اصلی	مشخصه
۱: ۴/۱۲	۱: ۱۵/۹۶	۱	مقیاس
۰/۳۰۲	۰/۰۷۷۵	۱/۲۳۷	آبخور در وسط شناور (m)
۰/۲۸۶	۰/۰۷۴	۱/۱۸۲	آبخور در عمود سینه (m)
۰/۳۱۴	۰/۰۸۱	۱/۲۹۷	آبخور در عمود پاشنه (m)
۰/۳۰۱	۰/۰۷۷۹	۱/۲۴۴	آبخور در مرکز شناوری (m)
۰/۰۲۶۴	۰/۰۰۶۸	۰/۱۰۹	تربیم پاشنه (m)
۶/۲	۱/۶	۲۵/۵۴۸	طول خط آبخور (m)
۱/۹۳۶۶	۰/۴۹۹۹	۷/۹۷۹	بیشترین عرض (m)
۰/۶۰۳	۰/۱۵۵	۲/۴۸۷	حداکثر عرض نیم بدنه (m)
۱۰/۱۴۳	۰/۶۷۶	۱۷۲/۱۷۷	سطح خیس (m ²)
۶/۱۶۱	۰/۴۱	۱۰۴/۵۹۵	مساحت صفحه آبخور (m ²)
۰/۷۱۲	۰/۷۱۲	۰/۷۱۲	ضریب منشوری
۰/۵۵۲	۰/۵۵۲	۰/۵۵۲	ضریب ظرافت بدنه
۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۶	ضریب صفحه آبخور
۲/۷۶۵۷	۰/۷۱۴	۱۱/۳۹۵	فاصله تا مرکز بویانسی
۲/۷۰۵۸	۰/۶۹۸	۱۱/۱۴۸	فاصله تا مرکز شناوری
۵/۸۲۵	۲/۹۶	۱۱/۸۳	سرعت طراحی (m/s)
۱/۲۲۹	۰/۰۲۱۱	۸۶	حجم جابه‌جایی (m ³)
۰/۷۴۷	۰/۷۴۷	۰/۷۴۷	عدد فرود در سرعت طراحی



(الف)



(ب)

معادله تغییرات مرکز جرم شناور عبارت است از:

$$m \frac{dv}{dt} = f \quad (۶)$$

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:

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

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. همچنین جابه‌جایی شناور در هر لحظه بر اساس سرعت و فشار اعمال شده از سوی سیال به بدنه محاسبه می‌گردد.

۳ - معرفی مسئله

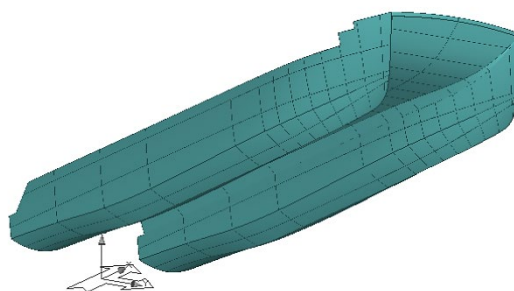
شناور مورد بررسی در این مطالعه، یک شناور دوبنده‌ی نیمه‌جابه‌جائی بوده که می‌بایست به عدد فرود $۰/۲۷۴$ (متناظر با سرعت طراحی شناور در آب موج) در موج منظم دست یابد. در جدول (۱) مشخصات شناور اصلی، مدل تجربی و عددی و در شکل (۱) نیز نمایی از هندسه بدنه شناور ارائه شده است. لازم به ذکر است که سرعت طراحی این شناور در آب آرام معادل عدد فرود $۰/۷۴۷$ می‌باشد. با فرض ثابت بودن توان موتور، حداکثر سرعتی که شناور در شرایط موج می‌تواند به دست آورد معادل عدد فرود $۰/۲۴۷$ است. از آنجاکه مدل آزمایشگاهی با طول کمتر و بر اساس ابعاد مجاز آزمایشگاه ساخته شده بود، برای صحت‌سنجی روش حل عددی از یک مدل عددی با همان ابعاد استفاده شد. سپس، یک مدل بزرگ‌تر با طول $۶/۲$ متر در حوضچه عددی و برای ارزیابی رفتار دینامیکی ساخته شده و بررسی حرکات شناور بر اساس آن انجام گردیده است. علت این امر، دستیابی به دقت بیشتر در شبیه‌سازی دینامیکی بوده است.

جدول (۱): مشخصات شناور اصلی، مدل تجربی و عددی [۱۴]

حوزه و همچنین استفاده از نسبت بی‌بعد ابعاد حوضچه به طول خط آب مدل (۶/۲ متر)، بررسی دقیق جریان سیال در محدوده‌ای به مشخصات شکل (۲) انجام شده است.

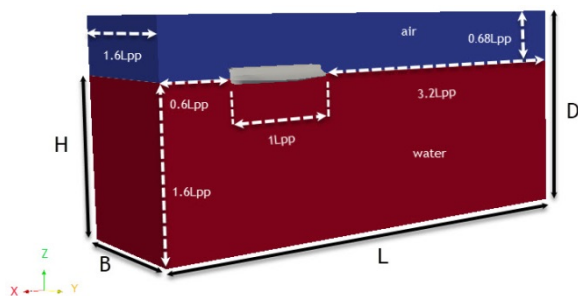
جدول (۲): ابعاد دامنه‌ی محاسباتی

مشخصه	L	B	H	D
مقدار (m)	۲۹/۷۶	۹/۹۲	۹/۹۲	۱۴/۱



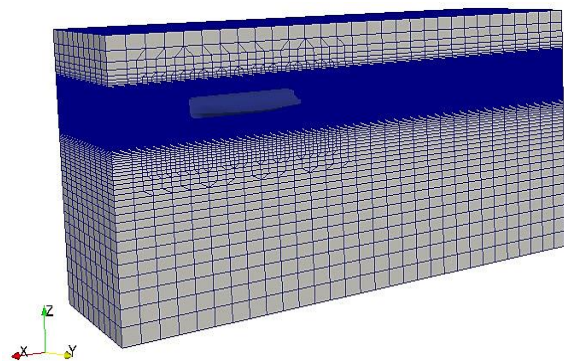
(ج)

شکل (۱): نمای شناور دو بدنه‌ی مطالعه حاضر

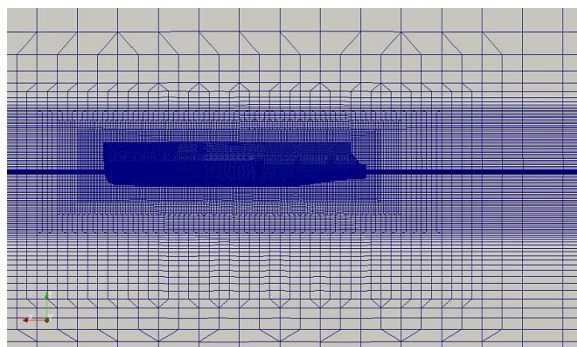


شکل (۲): نمای از دامنه‌ی محاسباتی

در شکل (۳) نیز شبکه‌بندی دامنه حل ارائه شده است که در تمام دامنه‌ی محاسباتی از سلول‌های منظم سازمان یافته‌ی درجه‌بندی شده^۴ و از نوع شش وجهی می‌باشد.



(الف)



(ب)

برای بررسی و ثبت حرکت‌های دینامیک شناور دوبدنه، ابتدا می‌بایست یک حوضچه عددی بر اساس ابعاد شناور که قابلیت ایجاد امواج با شرایط دلخواه داشته باشد را ساخت. سپس شناوری با قابلیت حرکت شش درجه آزادی^۱ و در حال حرکت در این حوضچه شبیه‌سازی شده است. براین اساس در نرم‌افزار اوپن‌فوم نیز از حل‌گر اینتردایم‌فوم برای حل این مسئله انتخاب گردیده است. نرم‌افزار اوپن‌فوم یک کد متن‌باز تحت سیستم‌عامل لینوکس است که توسط محققان زیادی برای تحلیل دینامیکی اجسام شناور در یک تونل موج عددی گسترش یافته است. حل‌گر اینتردایم‌فوم نیز امکان حل هم‌زمان معادلات حاکم بر سیال دو فازی و اثر آن بر دینامیک جسم شناور را فراهم می‌آورد. علاوه بر آن ایجاد موج منظم در تانک عددی بر اساس شرط مرزی ورودی نیز با استفاده از این حل‌گر امکان‌پذیر است. در این حل‌گر با استفاده از تعریف شرایط مرزی مدنظر، موج‌هایی با مشخصات دلخواه می‌توان ایجاد نمود که حرکات دینامیکی و نیروهای وارد بر شناور (مقاومت) را با جزئیات دقیق ثبت و ارائه دهد. در این حل‌گر از تکنیک شبکه‌ی تغییر شکل‌دهنده^۲ برای شبیه‌سازی حرکات بدنه نیز استفاده شده است. در این مطالعه ابعاد دامنه محاسباتی طوری ایجاد شده که حداقل معیارهای کنفرانس بین‌الملل حوضچه کشش^۳ رعایت شود و همچنین از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته توسط حل‌گر اینتردایم‌فوم برای تحلیل دینامیکی شناور جهت انتخاب نوع شرایط مرزی استفاده شده است. در جدول (۲) ابعاد دامنه محاسباتی آمده است (بر اساس شکل ۲) که از متغیرهای تأثیرگذار و حائز اهمیت حل عددی می‌باشد. بر اساس مقالات معتبر ارائه شده در این

^۴ grading mesh

^۱ Degrees Of Freedom (6DOF)

^۲ deforming mesh

^۳ International Towing Tank Conference (ITTC)

جدول (۳): مشخصات موج ورودی در دامنه‌ی محاسباتی

مؤلفه	واحد	مقادیر ورودی
نوع موج	-	استوکس مرتبه دوم
آب‌خورد	(m)	۰/۳۰۲
طول موج	(m)	۶/۳
دامنه ورودی	(m)	۰/۰۲
سرعت	(m/s)	۲/۱۳۶۹

سایر مشخصات فیزیکی تأثیرگذار در حل عددی از جمله فیزیک سیال در جدول (۴) و تنظیمات مورد استفاده در حلگر اینتردایم فوم در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که تنظیم گام زمانی بر اساس حداکثر مجاز عدد کورانت و گام زمانی اولیه، توسط کد عددی صورت می‌پذیرد. در هنگام ایجاد نوسانات شدید در حرکات دینامیکی، تنظیم فاکتور ضریب آرامش نیز به پایداری حل عددی کمک می‌کند. تنظیم این متغیرها بر اساس فرآیند صحت‌سنجی و مسائل مشابه انجام شده است.

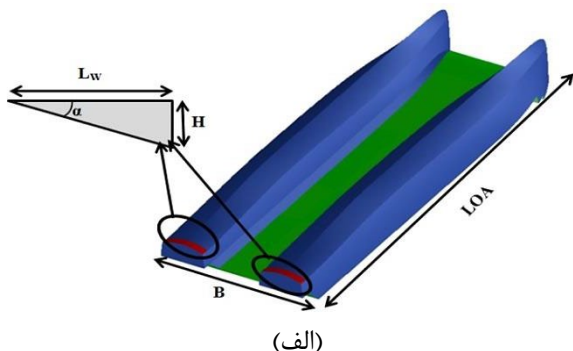
جدول (۴): ثابت‌های مشخصات فیزیکی سیال

ثابت‌های فیزیکی	ویسکوزیته‌ی سینماتیکی (ν)	چگالی آب	کشش سطحی	شتاب جاذبه
	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\left[\frac{N}{m}\right]$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
مقادیر	$1/0.9 \times 10^{-6}$	۱۰۲۵	۰/۰۷	(۰، ۰، ۹/۸۱)

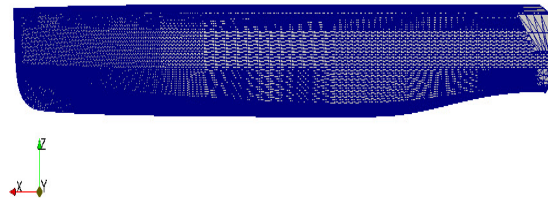
جدول (۵): مقادیر تنظیمات مورد استفاده در حلگر

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

در شکل (۵) نمایی از قرارگیری گوه در قسمت پاشنه‌ی شناور مشاهده می‌گردد. در جدول (۶) نیز مشخصات گوه‌های مورد بررسی در این شناور ارائه شده است.



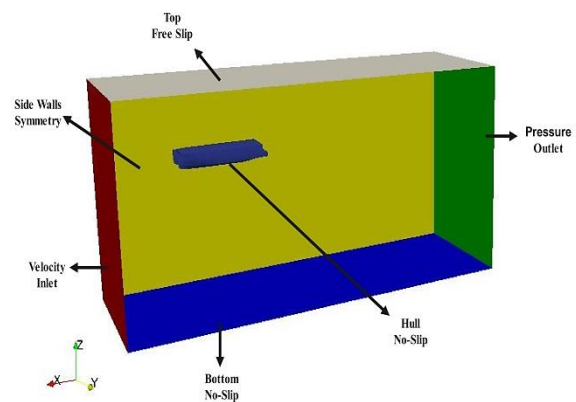
(الف)



(ج)

شکل (۳): شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی

در شکل (۴) نوع شرایط مرزی اعمال شده در دامنه‌ی محاسباتی ارائه شده است.

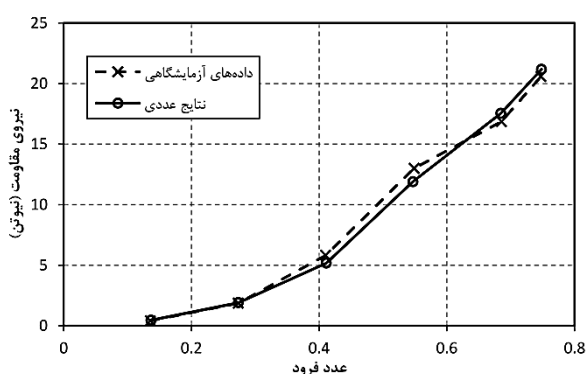
**شکل (۴): شرایط مرزی اعمال شده**

از عوامل مهم دیگر دینامیک شناور در شبیه‌سازی عددی، ایجاد امواج در دامنه محاسباتی می‌باشد. برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی شناور، تولید امواج منظم پایدار و ثبت داده‌های حرکت آن در یک دامنه حل بر اساس روش اویلری می‌باشد. دلیل استفاده از روش اویلری نیز وجود مرز دقیق بین دو سیال (آب و هوا) و استفاده از تکنیک حجم سیال^۱ برای مدل‌سازی سطح آزاد است. برای اطمینان از این موضوع، ارتفاع موج در چند ناحیه از اطراف مدل، نقاطی (حسگرهای مجازی) قرار داده شده است و تغییرات ارتفاع سطح آزاد را ثبت کرده و موج ورودی و موج واقعی اطراف شناور دوبنده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در این مطالعه از موج استوکس مرتبه دوم استفاده شده است که مشخصات بیشتر در جدول (۳) مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است که در اینجا منظور از سرعت، همان سرعت سیال در ورودی است که معادل سرعت شناور می‌باشد.

^۱ Volume Of Fluid (VOF)

۴-۱- صحت‌سنجی حل عددی

شناور دوبنده‌ای که در این پژوهش از لحاظ دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است در دو حالت با و بدون گُوه در آب آرام توسط یوسفی فرد و معبودی [۱۴] در ۶ عدد فرود مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. ابتدا شناوری با ابعاد آزمایشگاهی بدون گُوه در نرم‌افزار اوپن‌فوم شبیه‌سازی شده است. سپس نتایج مقاومت شناور طبق شکل (۶) براساس اعداد فرود مختلف با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است.

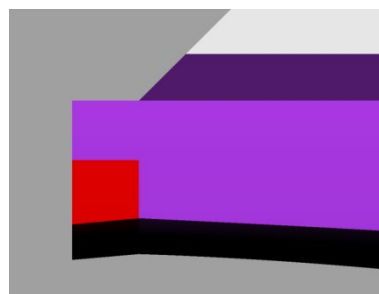


شکل (۶): مقدار متوسط مقاومت حل عددی و تجربی [۱۴] بدون گُوه در آب آرام (در سرعت طراحی)

طبق شکل (۶) درصد خطای بین نتایج حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی بدون گُوه در عدد فرود ۰/۷۴۷ (سرعت طراحی) کمتر از ۳ درصد می‌باشد و مطابقت مناسبی دارند.

۴-۲- تحلیل عددی دینامیک شناور

در این مطالعه هندسه مدل بر اساس فرم بدنه یک شناور دوبنده که توسط یوسفی فرد و معبودی [۱۴] با استفاده از روش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته انتخاب شده است. در مدل اصلی گُوه‌ای بهینه با زاویه ۶ درجه انتخاب شده است. سپس شناوری با طول خط آب ۶/۲ متر بدون گُوه و با گُوهی ۶ درجه، شبیه‌سازی شده است. در این مطالعه با فرض ثابت بودن حداکثر توان موتور مقدار عدد فرود در آب موج ۰/۲۷۴ بدست آمده است. سپس به تحلیل حرکت جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی شناور پرداخته شده است. لازم به ذکر است که برای تحلیل دینامیک شناور در امواج، موج منظمی منطبق بر مشخصات جدول (۳) تولید شده است و نتایج ارائه شده در امواج بر اساس این حالت



(ب)

شکل (۵): نمایی از شکل گُوه در پاشنه شناور

جدول (۶): مشخصات گُوه‌های مورد بررسی عددی

نوع	زاویه گُوه α (deg)	طول گُوه L_w (m)	ارتفاع گُوه H (m)
۱	۸	۰/۰۴۹	۰/۰۷
۲	۶	۰/۱۲	۰/۰۲

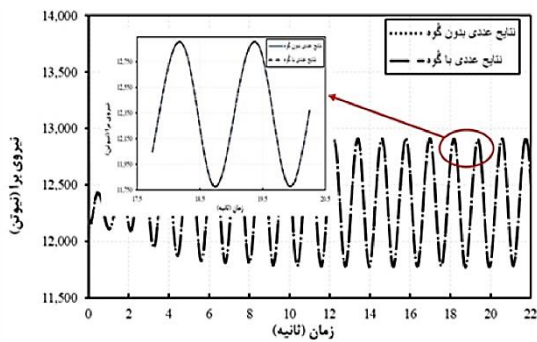
۴- نتایج حل عددی

با استفاده از حل عددی می‌توان متغیرها، کانتورها و نمودارهای متفاوت بیشتری که ثبت آن‌ها در شرایط آزمایشگاه دشوار است را ارائه نمود. همچنین حل عددی می‌تواند هزینه‌های تحقیق را تا حد زیادی کاهش دهد. حل عددی در این مطالعه با استفاده از یک رایانه با مشخصات پردازنده Core i7-6700K با فرکانس ۴ گیگاهرتز و حافظه ۶۴ گیگابایتی انجام شده است. برای یکنواختی حل عددی نتایج، ۲۰ ثانیه از رفتار دینامیکی شناور مدل شبیه‌سازی گردیده است. برای بررسی تأثیر تعداد شبکه‌بندی (استقلال از شبکه) شبیه‌سازی بر روی دقت نتایج، از ۳ حالت استفاده شده است. در جدول (۷) نتایج تأثیر تعداد شبکه‌بندی برای شناور مدل در حالت سرعت طراحی (معادل عدد فرود ۰/۷۴۷) در آب آرام به دست آمده است.

جدول (۷): بررسی استقلال از شبکه‌ی حل عددی

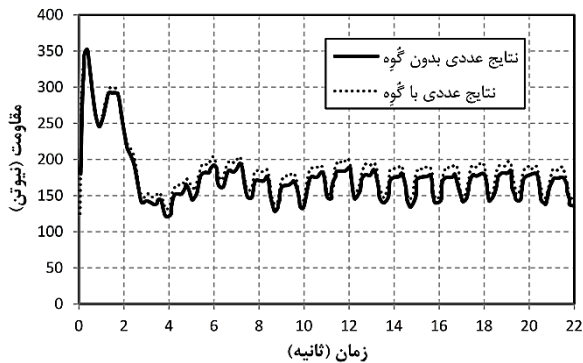
درصد خطا از حل تجربی	مقاومت کل حل عددی (N)	تعداد کل سلول‌ها	حالت
۹/۹	۱۹۰/۸	۱۲۶۸۸۸۴	۱
۲/۸	۲۰/۵۹	۲۰۵۶۴۱۶	۲
۲/۶	۲۰/۶۴	۲۲۱۴۴۰۲	۳

باتوجه به جدول (۷)، شبکه‌بندی برای حل عددی در این پژوهش حالت ۲ انتخاب شده است. زیرا براساس وجود درصد خطای کم بین نتایج حل عددی و آزمایشگاهی و کاهش زمان محاسبات حل در نظر گرفته شده است.



شکل (۹): تغییرات نیروی لیفت شناور دو بدنه با و بدون گُوه در موج منظم

دامنه‌ی نوسانات نیروی برآ پس از گذشت تقریباً ۷ ثانیه پایدار شده است. با توجه به شکل (۹) تقریباً نیروی برآ در دو حالت با و بدون گُوه بر روی هم منطبق هستند. یعنی در سرعت‌های کم، گُوه نمی‌تواند نیروی برآ (لیفت) بیشتری به شناور وارد کند تا منجر به کاهش مقاومت شناور (نیروی پسا) شود. در شکل (۱۰) نمودار نوسان اعمال شده به شناور دوبدنه در جهت x (مقاومت) بر حسب زمان در موج منظم ارائه شده است.

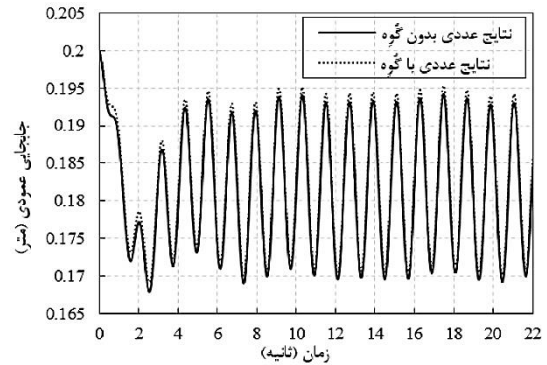


شکل (۱۰): تغییرات نیروی وارد به شناور در جهت محور x به صورت تابعی از زمان

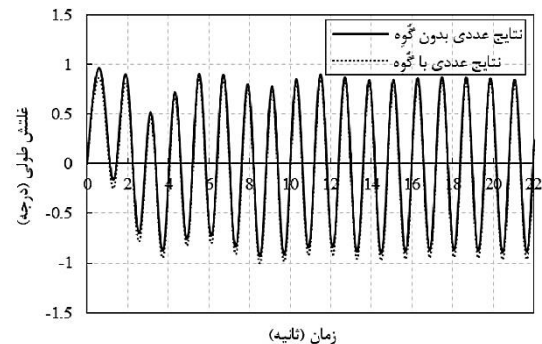
دامنه‌ی نوسان نیروی مقاومت پس از تقریباً ۱۲ ثانیه پایدار شده است. با توجه به شکل (۱۰) مقدار نیروی مقاومت برای شناور با گُوه نسبت به شناور بدون گُوه بیشتر می‌باشد. با توجه به تحلیل‌های شناور در دو حالت با و بدون گُوه می‌توان نتیجه گرفت که نصب گُوه در شناور دوبدنه نیمه‌جابجائی در عدد فرود ۰/۲۷۴ بخصوص بر رفتار آن در امواج تأثیر منفی داشته است.

در ادامه برای درک بهتر نتایج نمودارها، در جدول (۸) مقدار متوسط دامنه‌ی تغییرات جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی و مقدار متوسط نیروی برآ، مقاومت شناور دوبدنه در دو حالت با و بدون گُوه در موج منظم با عدد فرود ۰/۲۷۴ ارائه شده است.

می‌باشد. مطابق شکل (۷) و (۸) نمودار حرکت جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی در عدد فرود ۰/۲۷۴ در حالت با و بدون گُوه در موج منظم ارائه گردیده است.



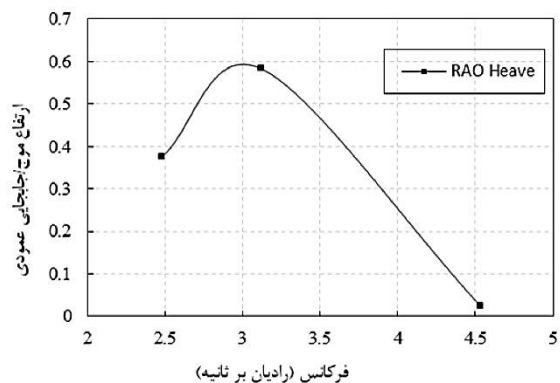
شکل (۷): تغییرات حرکت جابه‌جایی عمودی بر حسب زمان در موج منظم در حالت با و بدون گُوه



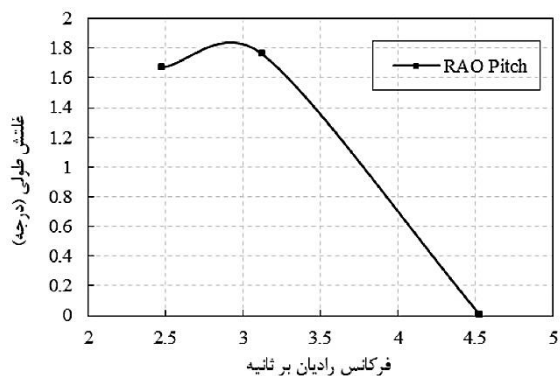
شکل (۸): تغییرات حرکت غلتش طولی در موج منظم در دو حالت با و بدون گُوه

باتوجه به شکل (۷) و (۸) دامنه‌ی نوسانات حرکت جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی به ترتیب پس از گذشت تقریباً ۶ تا ۸ ثانیه به مقدار نسبتاً پایداری رسیده است. متوسط دامنه‌ی نوسان نمودار حرکت جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی شناور دوبدنه مجهز به گُوه نسبت به شناور بدون گُوه در موج منظم، به ترتیب ۵ و ۷ درصد بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن گُوه به پاشنه شناور منجر به اندکی بدتر شدن رفتار دینامیکی آن در امواج شده است.

یکی دیگر از اهداف مهم در مطالعه حاضر محاسبه‌ی نیروی برآ و مقاومت شناور دوبدنه در موج منظم می‌باشد. چرا که در یک شناور نیمه‌جابجایی، نیروی برآ نقش مؤثری در کاهش نیروی مقاومت خواهد داشت. در شکل (۹) نمودار مربوط به نیروی برآ در مورد شناور با و بدون گُوه در عدد فرود ۰/۲۷۴ ارائه شده است.



شکل (۱۱): نمودار رانو حرکت جابه‌جایی عمودی بر حسب فرکانس‌های مختلف در عدد فرود ۰/۲۷۴



شکل (۱۲): نمودار رانو حرکت غلتش طولی بر حسب فرکانس‌های مختلف در عدد فرود ۰/۲۷۴

باتوجه به شکل (۱۱) نمودار رانو حرکت جابه‌جایی عمودی با افزایش فرکانس، مقدار حرکت جابه‌جایی عمودی کاهش یافته است. برای طول موج ۶/۳ متر (معادل فرکانس موج ۳/۱ رادیان بر ثانیه) بیشترین مقدار حرکت جابه‌جایی عمودی ثبت شده است. در شکل (۱۲) نمودار رانو غلتش طولی نیز با افزایش فرکانس مقدار حرکت غلتش طولی بسیار کاهش یافته است. هنگامی که طول موج با طول شناور تقریباً برابر شود؛ افزایش بسیار زیاد غلتش طولی اتفاق می‌افتد. بنابراین طول موج ۶/۳ متری برای شناور دوبنده در شرایط موج منظم و با عدد فرود ۰/۲۷۴ و دامنه‌ی موج ۰/۰۲ متر در یامانی مناسب نیست و می‌تواند باعث کاهش قابلیت دریامانی شناور گردد. (حد بحرانی برای شناور ایجاد می‌کند). لازم به ذکر است که این طول موج معادل فرکانس مطلق ۳/۱ رادیان بر ثانیه می‌باشد.

در ادامه به بررسی مقاومت افزوده شناور در موج منظم پرداخته شده است. هنگام حرکت شناور در آب مواج حرکات دینامیکی در شناور ایجاد می‌گردد و در نتیجه

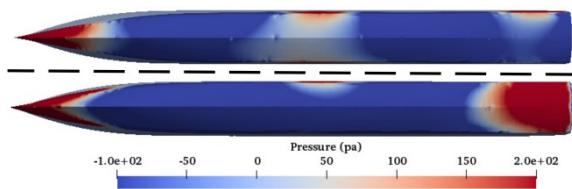
جدول (۸): مقادیر متوسط تغییرات حرکات و نیروهای بدست آمده برای شناور دوبنده در حالت با و بدون گوه در موج منظم

نوع جانمایی پاشنه شناور	واحد	بدون گوه	با گوه
تغییرات متوسط جابه‌جایی عمودی	(m)	۰/۱۸۱	۰/۱۸۲
تغییرات متوسط غلتش طولی	(deg)	-۰/۰۰۹۲۳	-۰/۰۷۴۲۵
تغییرات نیروی برا	(N)	۱۲۴۰۴/۳۶	۱۲۴۰۴/۰۴
مقاومت کل	(N)	۱۶۲/۷۸	۱۷۳/۰۷

باتوجه به جدول (۸)، نیروی برا در دو حالت با و بدون گوه در امواج تغییر زیادی نکرده است در حالی که تغییرات جابه‌جایی عمودی برای این دو حالت قابل مشاهده بود. بنابراین این تغییرات جابه‌جایی عمودی ناشی از توزیع فشار و به تبع آن تغییرات غلتش طولی است که بر روی مقاومت نیز تأثیر گذاشته است. بر اساس مقادیر جدول (۸) نصب گوه در پاشنه‌ی شناور دوبنده در شرایط موج منظم با دامنه‌ی ۲ سانتی‌متر، طول موج ۶/۳ متر و دوره‌ی تناوب ۲ ثانیه، باعث افزایش ۵/۷۸ درصدی مقاومت نسبت به شناور بدون گوه در عدد فرود ۰/۲۷۴ شده است.

در ادامه به بررسی نمودارهای رانو (RAO) شناور دوبنده با گوه در موج منظم پرداخته شده است. در اینجا نمودارهای رانو برای دو حرکت جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی شناور ارائه شده است. این نمودارها به صورت تابع بی‌بعدی از فرکانس برخورد و بر اساس نسبت دامنه حرکت به دامنه یا شیب موج به دست می‌آید. در این مطالعه، با ثابت نگه‌داشتن دامنه موج (۰/۰۲ متر) و تغییر طول موج‌هایی به اندازه ۳، ۶/۳ و ۱۰ متر، در عدد فرود ۰/۲۷۴ تا ۲۰ ثانیه از رفتار دینامیکی شناور در حالت گوه‌ی ۶ درجه شبیه‌سازی شده است. دامنه تغییرات جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی برای هر طول موج با زمان رسم شده و به صورت متوسط محاسبه گردیده است. نمودارهای مربوط به رانو حرکات جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی بر حسب فرکانس‌های مختلف به ترتیب در شکل (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است.

باتوجه به شکل (۱۳) نصب گُوه تأثیری کمی بر جریان پشت پاشنه‌ی شناور داشته و کاهش ارتفاع آب مشاهده می‌شود.



شکل (۱۴): کانتور فشار در موج برای حالت با (پایین) و بدون (بالا) گُوه در زمان ۲۱/۶ ثانیه

همچنین در شکل (۱۴) برای شناور با گُوه افزایش محسوس فشار در اطراف پاشنه آن مشاهده می‌شود. این افزایش فشار در سرعت‌های کم باعث افزایش مقاومت شناور شده است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

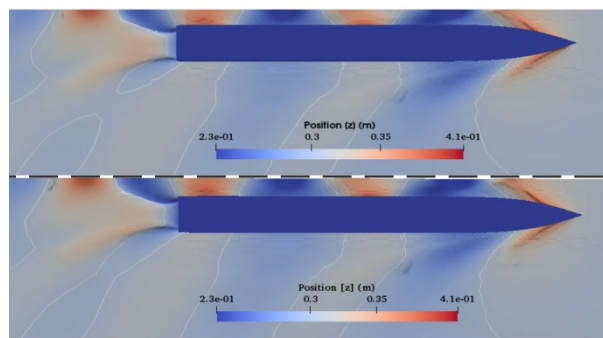
نکته‌ای که در تحلیل دینامیکی شناورهای مجهز به تجهیزات کنترل‌کننده ناپایداری طولی کمتر بر روی آن تمرکز شده است، اثرات نصب گُوه بر روی حرکات دینامیکی و مقاومت افزوده شناورها در امواج می‌باشد. به همین دلیل در اینجا رفتار دینامیکی یک شناور دوبنده نیمه‌جابجایی در حضور امواج منظم در دو حالت با و بدون گُوه مورد ارزیابی قرار گرفته است. صحت‌سنجی روش حل عددی با استفاده از تحلیل مقاومت همین شناور دوبنده در آب آرام مقایسه و با داده‌های معتبر آزمایشگاهی منتشر شده، انجام گرفته است. با ثبت مقاومت برای این شناور در سرعت طراحی کمتر از ۳ شبیه‌سازی، مطابقت قابل‌قبولی (حداکثر خطای کمتر از ۳ درصد) با نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده است. سپس، شناوری با طول خط آب ۶/۲ متر در حالت بدون گُوه و با گُوه‌ی ۶ درجه (زاویه‌ای که بهترین شناور بهترین عملکرد را در آب آرام داشته است)، مدل‌سازی شده است. همان‌طور که اشاره شده، استفاده از مدل بزرگ‌تر به علت ثبت دقیق رفتار دینامیکی در امواج بوده است. تحلیل عددی برای شناور دوبنده در موج برای دو حالت با گُوه‌ی ۶ درجه و بدون گُوه انجام شد و نتایج طبق جدول (۹) با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج در آب موج نشان می‌دهند که با نصب گُوه در پاشنه شناور در عدد فرود ۰/۲۷۴ توزیع فشار در قسمت انتهایی کف شناور نسبت به حالت اولیه افزایش پیدا کرده است. درحالی‌که مقدار نیروی برآ برای کل کشتی

مقدار زیادی از انرژی سیستم رانش صرف غلبه بر نیروی اضافی خواهد شد؛ بنابراین بخشی از انرژی شناور اتلاف می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که مقدار انرژی اضافی که از بین می‌رود با نام مقاومت افزوده در موج شناخته می‌شود. در پژوهش حاضر مقدار مقاومت افزوده از حاصل تفاوت بین مقاومت شناور در آب آرام و موج منظم محاسبه شده است. در جدول (۹) مقدار مقاومت در آب آرام، مقاومت کل (موج منظم) با دامنه ۲ سانتی‌متر و طول موج ۶/۳ متر ارائه شده است.

جدول (۹): مقادیر مقاومت آب آرام، مقاومت کل و مقاومت افزوده شناور در دو حالت با و بدون گُوه در عدد فرود ۰/۲۷۴

جانمایی	مقاومت آب آرام (N)	مقاومت کل (N)	مقاومت افزوده (N)
با گُوه	۱۶۵/۸۱	۱۷۳/۰۷	۷/۲۶
بدون گُوه	۱۵۵/۸۳	۱۶۲/۷۸	۶/۹۵

همان‌طور که در جدول (۹) مشاهده می‌گردد، با نصب گُوه مقاومت افزوده شناور دوبنده افزایش پیدا کرده است. همچنین گُوه علاوه بر این که در سرعت‌های کم تأثیری بر روی نیروی برآ نداشته است، باعث افزایش فشار در کف شناور در ناحیه‌ی پاشنه گردیده است. با ترکیب حرکات جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی ناپایداری دینامیکی برای شناور دوبنده در حالت گُوه‌ی ۶ درجه در عدد فرود ۰/۲۷۴ رخ داده است. بنابراین، به همین علت مقداری از انرژی شناور اتلاف شده است. در نتیجه، با نصب گُوه برای شناور دوبنده در موج منظم مقدار مقاومت افزوده ۴/۲۶ درصد نسبت به شناور بدون گُوه افزایش پیدا کرده است. در ادامه کانتور سطح آزاد آب در سرعت طراحی شکل (۱۳) و همچنین فشار وارد شده بر کف شناور شکل (۱۴) در دو حالت با و بدون گُوه ارائه شده است.



شکل (۱۳): کانتور ارتفاع سطح آزاد شناور در حالت با (پایین) و بدون (بالا) گُوه در موج منظم در زمان ۲۱/۶ ثانیه

6. Wang CT. Wedge effect on planing hulls. *Journal of Hydronautics*. 1980 Oct;14(4):122-4.
7. Karafiath The effect of stern wedges on ship powering performance. *Naval Engineers Journal*. 1987 May 1;99(3):27-38.
8. Grigoropoulos GJ, Loukakis TA. Effect of wedges on the calm water resistance of planing hulls. In 1st International Conference on Marine Industry, Varna, Bulgaria 1996 Jun.
9. Bojovic P, Sahoo PK, arcas Salas M. A Study On Stern Wedges And Advanced Spray Rail Syatem On Calm Water Resistance Of High-Speed Displacement Hull Forms. *Proc. of International Maritime Conference, Sydney, Australia 2004*.
10. Jang HS, Lee HJ, Joo YR, Kim JJ, Chun HH. Some practical design aspects of appendages for passenger vessels. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009 Sep 1;1(1):50-6.
11. Mahdi Sajedi S, Ghadimi P, Sheikholeslami M, Ghassemi MA. Experimental and numerical analyses of wedge effects on the rooster tail and porpoising phenomenon of a high-speed planing craft in calm water. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019 Jul;233(13):4637-52.
12. Pacuraru S, Pacuraru F, Presura A. Numerical investigation on fast displacement ship hydrodynamics. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 Aug 1 (Vol. 591, No. 1, p. 012111)*. IOP Publishing.
13. Ghadimi P, Sajedi SM, Tavakoli S. Experimental study of the wedge effects on the performance of a hard-chine planing craft in calm water. *Scientia Iranica*. 2019 Jun 1;26(3):1316-34.
14. Yousefifard M, Maboodi A. Numerical and experimental study of the stern wedge effects on the hydrodynamics performance of a semi-displacement catamaran in calm water. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020 Nov 20;14(2):401-15.
15. Monfared M, Binesh A, Abdollahifar A. Numerical Study of the Propulsion System Effects on the Aerodynamic Characteristics of a WIG Craft. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*. 2020 Feb 20;8(2):73-86. (In Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1398.8.2.6.9>
16. Mahdi M, Malekpoor M. Extraction of Hydrodynamic Coefficients of the Remus Underwater Vehicle Robot by Coupling the CFX Software Simulator and Kalman Filter Estimator Code. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*. 2022 Sep 21;11(1):71-81. (In Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.5.7>
17. Pirkhalili AA, Rostami Varnousfaaderani M, Dehghan Manshadi M. Numerical Simulation of Floating of Objects with by pressure field correction of SPH Method. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*. 2023 Mar 2;11(2):23-36. (In Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.3.7>
18. Barzegar Rahimi M, Jalalian A. Investigating the effect of the location of flow controllers on the reduction of vortices around the cylinder. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*. 2023 Feb 20;11(2):83-94. (In Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.7.1>

نسبت به حالت شناور بدون گوه تغییری نداشته است. همچنین با کوپل شدن حرکات جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی با یکدیگر توزیع مرکز جرم تغییر می‌کند و این امر موجب تغییر در توزیع نیروی بویانسی شناور گردیده است. به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر ارائه نمود:

- افزودن گوه پاشنه باعث افزایش دامنه نوسانات حرکت جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی در شرایط آب موج، به ترتیب معادل ۵ و ۷ درصد شده است.
 - افزودن گوه پاشنه اثر قابل توجهی بر تغییرات نیروی برا در امواج نداشته است. (کمتر از یک درصد)
 - در طول موج ۶/۳ متر که معادل فرکانس مطلق ۳/۱ رادیان بر ثانیه است، بیشترین نوسانات حرکت جابه‌جایی عمودی و غلتش طولی ثبت شده است.
 - در حالتی که طول موج ۶/۳ متر و دامنه موج ۲ سانتی‌متر باشد، در عدد فرود ۰/۲۷۴ مقدار مقاومت افزوده برای دو حالت با و بدون گوه به ترتیب ۷/۲۶ و ۶/۹۵ نیوتن ثبت شده است.
- بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در پژوهش حاضر نصب گوه باعث افزایش مقاومت افزوده در امواج و در سرعت طراحی موردنظر نسبت به شناور بدون گوه شده است. در نتیجه با توجه به نتایج آب آرام و موج منظم می‌توان بیان کرد که گوه‌ای با قابلیت تنظیم، به‌طوری که در سرعت‌های پایین بدون زاویه و در سرعت‌های بالاتر با زاویه مناسب طراحی شود، می‌تواند تأثیر بیشتری در عملکرد شناور در تمامی حالات داشته باشد. بدین معنی که تغییر زاویه گوه (به سمت صفر) در حالتی که شناور در امواج حرکت می‌کند باعث کاهش ۴/۲ درصدی مقاومت افزوده کشتی خواهد شد.

۷- مراجع

1. Ducane P. Small sea-going high speed craft. *Shipbuilding Ships*. 1947.
2. Monk E. The wedge. Experiments to measure its effectiveness in lifting and levelling hulls. *Yachting*. 1958;103:327-8.
3. Savitsky D. Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*. 1964 Oct 1;1(04):71-95.
4. Savitsky D, Brown PW. Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water. *Marine Technology and SNAME News*. 1976 Oct 1;13(04):381-400.
5. Millward A. Effect of wedges on the performance characteristics of two planing hulls. *Journal of Ship Research*. 1976 Dec 1;20(04):224-32.

19. Jasak H. Error analysis and estimation in the Finite Volume method with applications to fluid flows. Ph. D. thesis, Imperial College. 1996.
20. Rusche H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flow at high phase fractions. Ph. D. thesis, University of London. 2002.
21. Berberović E, van Hinsberg NP, Jakirlić S, Roisman IV, Tropea C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2009 Mar;79(3):036306.
22. Bi X, Zhuang J, Su Y. Seakeeping Analysis of Planing Craft under Large Wave Height. *Water*. 2020 Apr 2;12(4):1020.
23. Wang J, Zhuang J, Su Y, Bi X. Inhibition and hydrodynamic analysis of twin side-hulls on the porpoising instability of planing boats. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021 Jan 5;9(1):50.