# شبیه‌سازی عددی مدلِ یک کشتی نظامی به‌منظور بررسی تاثیر برجستگی سونار برروی مقاومت بدنه آن

کاوه یزدی[۱]، رسول کریمی[۲]، عباس زارع‌نژاد اشکذری[۳*]، ولی‌الله گیل[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، kaveyazdi61@gmail.com
[۲] استادیار، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، rasoolkarimi83@gmail.com
[۳] دانشیار، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، azarenezhad.a@gmail.com
[۴] دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، gil.vali110@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

*کلمات کلیدی:*
مقاومت شناور
دینامیک سیالات محاسباتی
حوضچه کشش
سونار دام
شناور نظامی

**چکیده**

محاسبه مقاومت بدنه شناور، یکی از مهمترین بخش‌ها در طراحی آن است. یکی از روش‌های مرسوم برای محاسبه مقاومت بدنه شناور، تست تجربی حوضچه کشش است. استفاده از تست‌های حوضچه کشش نیازمند ساخت مدل دقیقی از شناور مورد نظر است. در این مقاله، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به روی یک شناور نظامی، با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شده و سپس با نتایج آزمایش حوضچه کشش، که در همین پژوهش صورت گرفته است، مقایسه شده است. برای انجام تست حوضچه کشش، ابتدا هندسه شناور مورد نظر در نرم‌افزار کتیا مدل‌سازی و سپس با استفاده از پرینتر سه‌بعدی ساخته شد. مقایسه نتایج مقاومت تجربی و عددی نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل دینامیک سیالات محاسباتی توسعه داده‌شده عملکرد صحیحی دارد. سپس مدل شبیه‌سازی شده به همراه برجستگی سونار توسعه داده شد. نتایج نشان می‌دهد که وجود برجستگی سونار، سبب می‌شود که مقاومت بدنه شناور در سرعت‌های بیش از ۸/۷۴ گره دریایی به صورت خطی افزایش پیدا کند.

# Numerical simulation of a military ship model to analysis the impact of Sonar-dome on the hull resistance

**Kaveh Yazdi[1], Rasool Karimi[2], Abbas Zarenezhad Ashkezari[3*], Valiollah Gil[4]**

[1] *MSc. Student, Imam Khomeini Marine Sciences University;* kaveyazdi61@gmail.com
[2] *Assistant Professor, Imam Khomeini Marine Sciences University;* rasoolkarimi83@gmail.com
[3] *Associate Professor, Imam Khomeini Marine Sciences University;* azarenezhad.a@gmail.com
[4] *PhD. Student, Amirkabir University of Technology;* gil.vali110@gmail.com

**ARTICLE INFO**

*Article History:*
Received: 03 Sep 2023
Accepted: 18 Dec 2024
Available online: 23 Dec 2024

*Keywords:*
Vessel resistance
CFD
Towing Tank
Sonar dome
Military Ship

**ABSTRACT**

Calculation of the hull resistance is one of the most important parts in the design process. One of the conventional methods for calculating the resistance of the vessel is the experimental tests of the towing tank. The use of towing tank tests requires the construction of an accurate model of the vessel. In this paper, computational fluid dynamics simulation was performed on a military vessel, using Ansys Fluent software, and compared with the results of the towing tank test, which was carried out in this research. To perform the towing tank test, first the geometry of the vessel was modeled in CATIA software, then it was constructed using a 3D printer. Comparing the experimental and numerical resistance results shows that there is a good agreement between the numerical and experimental results. Therefore, it can be concluded that the developed computational fluid dynamics model has a correct performance. Then the simulated model was developed along with Sonar dome. The results show that the presence of Sonar dome causes the hull resistance to increase linearly at speeds of more than 8.74 knots.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.20.44.5 ]

**۱ - مقدمه**

با توجه به اهداف و نیازهای متفاوتی که در بهره برداری از شناورها مطرح است، انواع متفاوتی از شناورها طراحی و ساخته شده‌اند. علاوه بر این، تلاش‌های زیادی برای بدست آوردن کیفیت مطلوب در عملکرد شناورها انجام گرفته است و همچنان در قالب‌های جدیدی به عنوان بهینه‌سازی ادامه دارد. برای تحقق این امر از تمامی روش‌های ممکن مانند تحلیل‌های تئوری، تحلیل‌های آماری، روش‌های تجربی و آزمایشگاهی و روش‌های عددی استفاده می‌شود. مهم‌ترین، پرکاربردترین و در عین‌حال قابل اعتمادترین این روش‌ها در طراحی و بهینه‌سازی شناورها، روش تجربی است [۱]. در این روش می‌توان با آزمایش یک مدل از شناور در ابعاد کوچک‌تر به نتایج مورد نیاز برای طراحی دست یافت. در مرحله طراحی شناور، جهت نهایی کردن فرم بدنه به روش دقیقی نیاز است تا بتوان به کمک آن از خواص بدنه انتخاب شده آگاهی یافت و در صورت لزوم آن را بهینه نمود. هر چند روش‌هایی (مانند استفاده از روش‌های آماری، تجربی و تحلیل عددی) در این زمینه وجود دارد، ولی مطمئن‌ترین روش شناخته شده، انجام تست مدل است. در تست مدل با شبیه‌سازی شناور واقعی در مقیاس کوچک‌تر، خصوصیات هیدرودینامیکی فرم بدنه بررسی می‌شود و به محاسبات و طرح‌های بدست آمده تا این مرحله صحه گذاشته می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های مدل می‌توان در خصوص مقدار مقاومت، قدرت موتور و نوع سیستم رانش شناور واقعی تصمیم‌گیری نهایی را انجام داد.

تست مدل کشتی‌ها، در چند نوع مختلف انجام می‌گیرد که مهمترین آنها عبارتند از تست مقاومت، تست آب آزاد، تست سیستم رانش، تست دریامانی و تست مانور. در تست مقاومت کشتی، مدل در حوضچه کشش کشیده می‌شود و نیروی وارد بر مدل در سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. تست‌های مدل باید با مدل‌هایی انجام گیرد که تشابه کاملی با کشتی واقعی داشته باشند [۲]. در این صورت می‌توان نتایج حاصل از تست مدل را با در نظر گرفتن یک فاکتور مقیاس، به کشتی واقعی تعمیم داد. در این تست‌ها جنس مدل برحسب شرایط، از چوب، فایبرگلاس، خمیر اپوکسی و موم ساخته می‌شود. این روش متکی بر آنالیز ابعادی است. آنالیز ابعادی در اصل روشی است برای بدست آوردن دانش کلی در مورد مسائلی که درک تحلیلی آن‌ها بسیار پیچیده است. مزیت مهم این روش این است که با اطلاع از متغیرهای حاکم بر مسئله می‌توان با استفاده از گروه‌های بی بعد تعداد پارامترهای مورد نیاز در بررسی مسئله را کاهش داد. پس از انجام آزمایش‌های هیدرودینامیکی مدل، با استناد به نتایج به‌دست آمده شامل مقدار مقاومت، حرکات و رفتار در امواج، مقاومت افزوده، و ضرایب هیدرودینامیکی مانور، طراح تدابیر لازم را در خصوص ادامه روند طراحی شناور و همچنین بهینه‌سازی بدنه شناور، اتخاذ می‌نماید [۳].

شکل حبابی سینه کشتی و محل قرارگیری سونار در کشتی، سهم چشمگیری در مقاومت کل کشتی دارند. افزایش بازدهی و کاهش مصرف انرژی، همواره یکی از اهداف طراحی است. به همین منظور، مطالعاتی با موضوع تاثیر حبابی سینه و بهینه‌سازی آن مطرح شده است.

در سال ۲۰۲۱ میلادی، شمشیری و مونسان [۴] به بررسی عددی اثر حبابی سینه بر نیروی مقاومت یک کشتی کانتینربر پرداختند. در تحقیق ایشان اشاره شده است که انتخاب یک هندسه مناسب برای حبابی سینه، می‌تواند مقاومت کل را تا حدود ۱۳،۳ درصد کاهش دهد.

لوو و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی، هندسه حبابی سینه را بهینه کردند و درنتیجه آن، موفق شدند که مقاومت کل یک کانتینربر را به مقدار ۲،۸۵ درصد کاهش دهند [۵]. یانگ و همکاران [۶] با بررسی مقاومت یک نفتکش با هندسه‌های متفاوت حبابی سینه، توانستند با انتخاب یک فرم مناسب حبابی سینه، مقدار مقاومت شناور را ۳۰ درصد کاهش دهند. در سال ۲۰۱۷ میلادی، یوو و همکاران [۷] با طراحی بهینه حبابی سینه یک کشتی فله‌بر، توانستند مقاومت موج‌سازی آن را تا حدود ۱۳ درصد کاهش دهند. هانگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۷ میلادی، با بررسی هندسه حبابی سینه یک کشتی ماهیگیری توانستند به یک فرم بهینه برای آن دست یابند که در نتیجه آن، مقاومت کل بدنه حدود ۲ درصد کاهش یافت. در سال ۲۰۱۹ میلادی، لی و همکاران [۹] با بررسی اثرات هندسه سینه یک شناور فله‌بر، دریافتند که در یک فرم خاص برجستگی سینه، مولفه فشاری مقاومت در آب آرام تا حدود ۹ درصد کاهش می‌یابد.

شایان ذکر است که انجام تست‌های تجربی حوضچه کشش به منظور بهینه‌سازی فرم بدنه شناور، می‌تواند بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر باشد، و به همین جهت از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. برای رفع این مشکل، از روش‌های عددی به منظور محاسبه مقاومت بدنه شناورها استفاده می‌شود [۱۹-۱۰]. یکی از روش‌های عددی معتبر در زمینه ساخت شناورهای نظامی و غیر نظامی، روش دینامیک سیالات محاسباتی است. با استفاده از این روش می‌توان مقاومت بدنه را در حالات مختلف به دست آورده و براساس آن نیروی پیشران مورد نیاز شناور را محاسبه کرد.

برای آنکه بتوان به مدلی معتبر در دینامیک سیالات محاسباتی دست یافت، ضروری است که شبیه‌سازی انجام شده، با استفاده از نتایج تجربی حوضچه کشش صحت‌سنجی شود. در این صورت می‌توان به مدل دینامیک سیالات محاسباتی اطمینان کرد، و برای

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.20.44.5 ]

محاسبه مقاومت بدنه شناور در فرم‌ها و شرایط مختلف از آن بهره برد.

در این مقاله، ابتدا نتایج حوضچه کشش برای یک شناور نظامی ارائه می‌شوند. سپس مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به روی همان هندسه انجام شده و با استفاده از نتایج تجربی صحت‌سنجی می‌شود. در نهایت، پس از حصول اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی، مقاومت بدنه شناور نظامی به همراه برجستگی سونار، با استفاده از این روش محاسبه شده و تاثیر وجود آن بر نیروی پیشران مورد نیاز بررسی می‌شود.

## ۲ - تئوری مقاومت و رفتار دینامیکی یک شناور

محاسبه مقاومت شناورها مبحثی بسیار مهم و یکی از شاخه‌های علم هیدرودینامیک شناورهاست. برای محاسبه مقاومت ایجاد شده توسط سیال در برابر حرکت شناور که شامل مولفه‌های مختلفی از انواع مقاومت‌ها است، روش‌های گوناگونی ارائه شده‌اند. دو مورد از روش‌های کارآمد در طراحی شناورها عبارتند از روش عددی و روش تجربی. معمولا نوع جریان سیال در مسئله حرکت کشتی در آب، جریان تراکم‌ناپذیر و ایده‌آل درنظر گرفته می‌شود. در چنین شرایطی، معادله ناویر-استوکس که بیان‌کننده ترم‌های فشاری و ویسکوز است، به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right] = \rho\,\frac{du}{dt} \quad (۱)$$

معادله (۱) در راستای محور طولی شناور نوشته شده است.

همانطور که گفته شد، روش‌های تجربی و آزمایشگاهی برای تخمین مقاومت شناور از دقت بالایی برخوردار هستند. یکی از این روش‌ها، روش هولتروپ است. این روش برای تخمین و پیشگویی مقاومت تانکرها، کشتی‌های حمل کالای عمومی، شناورهای ماهیگیری، کشتی‌های کانتینربر، ناوچه‌های جنگی و یدک‌کش‌ها طراحی شده است. تخمین مقاومت کشتی با کمک این روش با استفاده از تست مدل و رابطه زیر امکان‌پذیر است [۲۱]:

$$R_T = (1+K)R_F + R_{APP} + \\ +R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (۲)$$

تعریف هرکدام از مولفه‌های استفاده شده در معادله (۲) در جدول (۱) آورده شده است.

**جدول ۱- تعریف مولفه‌های مقاومت**

| نماد | $R_F$ | $R_A$ | $R_W$ | $R_{APP}$ | $R_{TR}$ | $R_B$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| عنوان | مقاومت اصطکاکی | مقاومت هوا | مقاومت موج | مقاومت ضمائم | مقاومت پاشنه تخت | مقاومت حبابی سینه |

## ۳ – شبیه‌سازی عددی

هدف از این مطالعه، به دست آوردن تاثیر برجستگی سونار بر مقاومت بدنه شناور نظامی است. برای انجام این کار، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تست حوضچه‌کشش برای شناور مورد نظر، بدون حضور برجستگی سونار انجام می‌گیرد، تا از دقت محاسباتی شبیه‌سازی اطمینان حاصل شود. سپس شبیه‌سازی عددی به روی هندسه شناور مورد نظر با حضور برجستگی سونار صورت می‌گیرد و مقادیر مقاومت آن با مقادیر مقاومت حالت بدون برجستگی سونار مقایسه می‌شود. انتظار می‌رود که حضور برجستگی سونار به روی بدنه شناور، مقاومت بدنه برای سرعت‌هایی بالاتر از یک مقدار مشخص، دچار افزایش شود.

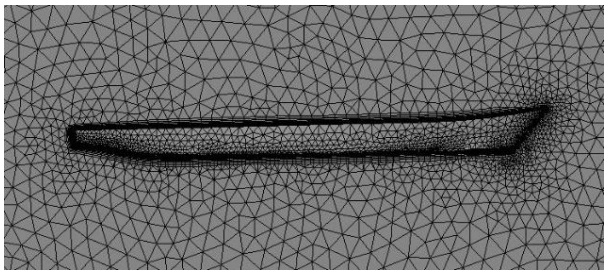
شبکه‌بندی هندسه‌ی شناور مورد نظر با استفاده از ماژول شبکه‌بندی نرم‌افزار انسیس انجام شده است. سلول‌های محاسباتی به صورت شش وجهی بوده و شبکه در محل‌هایی که احتیاج به دقت حل بالاتر وجود دارد، ریز شده است. برخی از این نواحی عبارت اند از، سطح آزاد سیال، بدنه‌ی شناور، پشت شناور (جایی که ویک اتفاق می‌افتد) و محل قرارگیری برجستگی سونار. شکل (۱) نشان‌دهنده شبکه‌بندی ایجاد شده برای شناور مورد نظر است. همچنین شکل (۲) یک نمای کلی از محدوده محاسباتی و ابعاد آن را نشان می‌دهد که توسط ۷ مرز از فضای بیرون جدا شده است و در آن، L، طول شناور می‌باشد. شرح شرایط مرزی در جدول (۲) آورده شده است. هنگام انتخاب ابعاد دامنه حل باید توجه داشت که اثر آشفتگی یا ویک بدنه شناور بر روی شرایط مرزی تاثیر نداشته باشد. بدین منظور باید بدنه از مرز فاصله کافی داشته باشد. در شبیه‌سازیِ انجام گرفته، ابعاد و تنظیمات دامنه حل، براساس دستورالعمل‌ها و توصیه‌های ITTC، انتخاب گردیده است [۲۲-۲۴]. گام زمانی برای ثبات همگراییِ نتایج عددی، به ویژه در مدل‌سازی دقیق شناورها، بسیار حیاتی است. گام زمانی به فیزیک مسئله، سرعت انجام پدیده و سایز شبکه بستگی دارد و می‌بایست با در نظر گرفتن همه این پارامترها انتخاب گردد. از طرفی، باید توجه داشت که گام زمانی به گونه‌ای انتخاب شود که مشکلی برای همگرایی ایجاد نکند. در صورت بزرگ فرض کردن گام زمانی، خطاهای بزرگی در تخمین مقادیر نیرویی ایجاد می‌گردد. بطور کلی روش کار بدین صورت است که برای شروع شبیه‌سازی ابتدا یک گام زمانی کوچک انتخاب می‌گردد. سپس می‌بایست رفتار باقی مانده ها را در نظر گرفت تا شبیه سازی همگرا شود. اگر این همگرایی در تکرارهای پایین اتفاق افتاد می‌توان سایز گام زمانی را افزایش داد. در کار حاضر، با توجه به استانداردهای ITTC ، مقدار گام زمانی $10^{-2}$ ثانیه تنظیم شده است. این مقدار علاوه بر اینکه باعث حفظ ثبات و دقت در حل عددی مسئله می‌شود، همزمان اجازه می‌دهد که شناور به طور



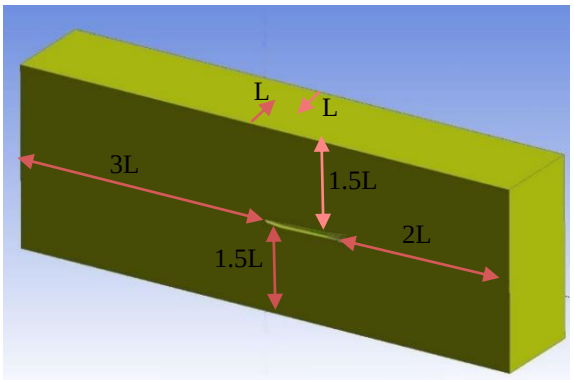
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.20.44.5 ]

مناسب در جهت جریان حرکت کند و نتایج به درستی همگرا شوند. برای حل معادلات حاکم بر مسئله از روش حل عددی و با استفاده از مجموعه نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلوئنت که برمبنای روش گسسته‌سازی حجم محدود است، استفاده شده است [۲۵]. با در نظر گرفتن نقطه محاسباتی در مرکز هر سلول، کلیه متغیرهای میدان در این نقطه محاسبه می‌شود که این روش باعث مستقل شدن میدان سرعت و فشار از یکدیگر می‌گردد که برای حل این مشکل از الگوریتم میانیابی ری و چاو [۲۶] استفاده می‌شود. از الگوریتم سیمپل برای کوپل کردن میدان سرعت و فشار استفاده شده است. همواره انتخاب مدل اغتشاشی مناسب برای تحلیل یک مدل عددی به منظور رسیدن به جواب هایی دقیق‌تر دارای اهمیت است. برای مدل کردن جریان آشفتگی اطراف شناور، از مدل آشفتگی k-ε که یکی از پرکاربردترین مدل‌های توربولانسی برای مسائل هیدرودینامیکی بوده و بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط محققین مختلف [۲۷-۲۸] برای شبیه‌سازی جریان در این گونه مسائل مناسب است، استفاده شده است.



**شکل ۱ - شبکه‌بندی هندسه شناور مورد نظر**




**شکل ۲ - دامنه محاسباتی مورد مطالعه**

**جدول ۲ - شرایط مرزی اعمال شده**

| مرز انتخابی | شرایط مرزی |
|---|---|
| ورودی | سرعت ثابت در ورودی |
| خروجی | اعمال فشار در خروجی |
| مرز بالایی | اعمال فشار اتمسفر |
| مرز پایینی | اعمال شرط دیواره |
| صفحه تقارن | اعمال شرط تقارن |
| مرز پشتی | اعمال شرط دیواره |
| بدنه شناور | اعمال شرط دیواره |

## ۴ – استقلال از شبکه

برای اطمینان از این که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، به اندازه سلول‌های محاسباتی وابستگی ندارند، انجام تست استقلال از شبکه ضروری است. برای این منظور، مدل شناور در چهار اندازه شبکه متفاوت شبیه‌سازی و نیروی مقاومت برای آن محاسبه گردید. نتایج حاصل از این تست در جدول (۳) درج شده است.

**جدول ۳ – پارامترهای استقلال از شبکه**

| شبکه | تعداد سلول‌ها | مقاومت بدنه | درصد خطا |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۹۹۴۱۲ | ۱۲/۱۰۳ | ۶/۹ |
| ۲ | ۱۲۱۷۶۵ | ۱۱/۵۵ | ۴/۵ |
| ۳ | ۱۴۶۱۱۸ | ۱۱/۶۴۳ | ۰/۸ |
| ۴ | ۱۷۳۲۵۱ | ۱۱/۶۳۷ | ۰/۷۸ |

با توجه به درصد خطای کم مشاهده شده در شبکه های سوم و چهارم، هر کدام از این دو شبکه را می‌توان مبنای محاسبات عددی در نظر گرفت. لذا به‌منظور کاهش زمان و حجم محاسبات، تعداد سلول‌های محاسباتی که برای انجام شبیه‌سازی عددی انتخاب شد برابر با ۱۴۶۱۱۸ می‌باشد.

## ۵ – انجام تست حوضچه کشش

تست تجربی حوضچه کشش در آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس انجام شده است. طول و عرض و ارتفاق این حوضچه کشش به ترتیب عبارت است از ۴۰۰، ۶ و ۴/۵ متر. در این آزمایش، ارتفاع آبخور شناور مدل نیز برابر با ۸۸ میلی‌متر بود. مشخصات هیدرواستاتیکی مدل در جدول ۴ آورده شده‌اند.

**جدول ۴- مشخصات هیدرواستاتیکی مدل**

| عنوان | مقدار |
|---|---|
| طول بین دو عمود (سانتی‌متر) | ۲۲۹,۰ |
| آبخور (سانتی‌متر) | ۸/۸ |
| عرض (سانتی‌متر) | ۲۹/۸۶ |
| جابه‌جایی (کیلوگرم) | ۳۳۰ |
| ضریب بلوک | ۰/۵۹۵ |

قبل از آن که مدل مورد نظر در حوضچه کشش مورد آزمایش قرار گیرد، موقعیت مرکز ثقل و ممان اینرسی آن محاسبه می‌شود. شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نشان‌دهنده میز محاسبه مرکز ثقل

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.20.44.5 ]

و میز محاسبه ممان اینرسی مدل هستند. شرایط بارگذاری شناور و مدل در جدول (۵) آمده است.

در این آزمایش، تست حوضچه کشش برای ۹ سرعت گوناگون انجام شد. مدل پس از بارگذاری درون حوضچه کشش قرار داده می‌شود. شکل (۵) نشان‌دهنده نحوه بارگذاری و تنظیم خط آب مدل در حوضچه کشش است. در شکل (۶) نیز مدل شناور در حال حرکت در حوضچه کشش را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از انجام آزمایش کشش در جدول (۶) آورده شده است.



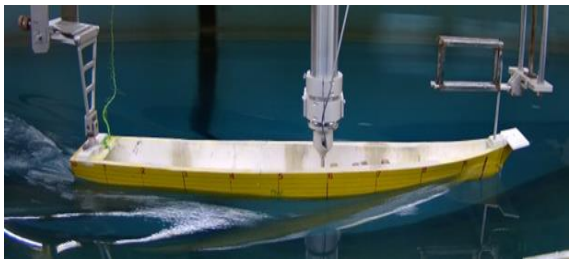
**شکل ۳ - محاسبه مرکز ثقل مدل**



**شکل ۴ - محاسبه ممان اینرسی مدل**



**شکل ۵ - نحوه بارگذاری مدل در حوضچه کشش**



**شکل ۶ - نمای مدل حین انجام تست کشش**

**جدول ۵ - وضعیت بارگذاری کشتی و مدل**

| مشخصه | وزن شناور (ton) | فاصله طولی مرکز ثقل شناور از عمود پاشنه (m) | فاصله عمودی مرکز ثقل از خط مبنا (کف شناور) (m) |
|---|---|---|---|
| شناور حقیقی | ۶۶۱۱ | ۶۳/۹۵۷ | ۵/۲۰۵ |
| مدل | ۰/۳۳ | ۱/۰۹۲ | ۰/۰۸۸ |

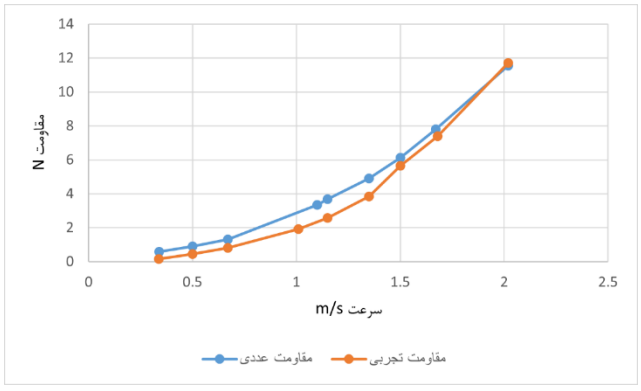
**جدول ۶ – نتایج تست مدل**

| سرعت (m/s) | ۰/۳۳۷ | ۰/۵ | ۰/۶۷ | ۱/۰۱ | ۱/۱۵ | ۱/۳۴۹ | ۱/۵ | ۱/۶۸ | ۲/۰۲ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقاومت (N) | ۰/۶۶ | ۰/۹۰۸ | ۱/۱۸ | ۱/۵۶ | ۱/۹۳۶ | ۲/۲۸۴ | ۳/۶۲۴ | ۵/۸ | ۷/۸۹۶ |

## ۵ – بحث و نتایج

### ۵-۱- اعتبارسنجی

در این بخش، برای حصول اطمینان از صحت عملکرد مدل‌سازی انجام‌شده، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج به دست آمده از حوضچه کشش مقایسه گردید. همچنین، انحراف نتایج عددی از تجربی نیز محاسبه گردید تا میزان دقت مدل‌سازی نیز ارزیابی شود. شکل (۷) نشان‌دهنده مقاومت به‌دست‌آمده برای شناور از دو روش تجربی (تست حوضچه کشش) و عددی (دینامیک سیالات محاسباتی) است. درصد خطای به دست آمده میان نتایج عددی و تجربی، با استفاده از معیار RMSE، ۴/۶ درصد است که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین نتایج عددی و تجربی است.




**شکل ۷ – مقادیر مقاومت عددی و تجربی در سرعت‌های مختلف**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.20.44.5 ]

### ۲-۵- تاثیر برجستگی سونار در مقاومت بدنه شناور

پس از آن که حل CFD توسط نتایج حوضچه کشش اعتبارسنجی شد، از این روش برای محاسبه مقاومت بدنه به همراه برجستگی سونار استفاده می‌شود. جدول زیر نشان‌دهنده مقاومت به‌دست‌آمده از روش CFD برای دو حالت با سونار و بدون سونار است. شکل (۸) نشان‌دهنده شبکه‌بندی مورد استفاده برای حل این مسئله است. همچنین نتایج مقاومت بدنه برای دو حالت «با سونار» و «بدون سونار» در جدول (۷) آمده است.

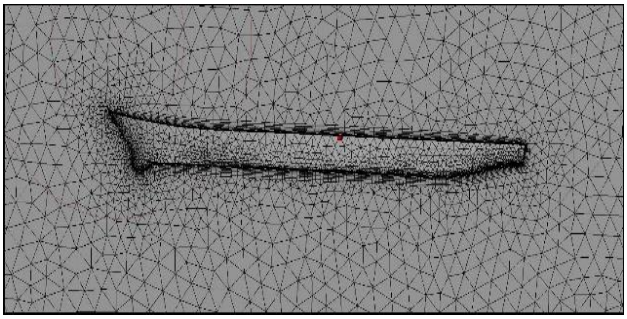
**جدول ۷– مقادیر مقاومت بدون سونار و با سونار**

| سرعت (m/s) | اختلاف مقاومت (درصد) | مقاومت بدون سونار (N) | مقاومت با سونار (N) |
|---|---|---|---|
| ۲/۵۷ | ۵/۵۶۹ | ۰/۵۸ | ۰/۶۱۵ |
| ۳/۸۵ | ۴/۸۶ | ۰/۹ | ۰/۹۴۶ |
| ۵/۱۴ | ۵/۲۱ | ۱/۳۱ | ۱/۳۸۲ |
| ۷/۷۱ | ۵/۸۵ | ۳/۳۵ | ۳/۵۵۸ |
| ۸/۷۴ | ۰/۰۰ | ۳/۶۸ | ۳/۶۸ |
| ۱۰/۲۸ | ۴/۷۵ | ۴/۹۱ | ۵/۱۵۵ |
| ۱۱/۵۷ | ۵/۹۲ | ۶/۱۲ | ۶/۵۰۵ |
| ۱۲/۸۶ | ۴/۸۵ | ۷/۸ | ۸/۱۹۸ |
| ۱۵/۴۳ | ۵/۶۶ | ۱۱/۵۵ | ۱۲/۲۴۳ |

همچنین، مقادیر مقاومت اصطکاکی و مقاومت موج که به روش عددی تخمین زده شده‌اند، در جدول ۸ آورده شده‌اند.

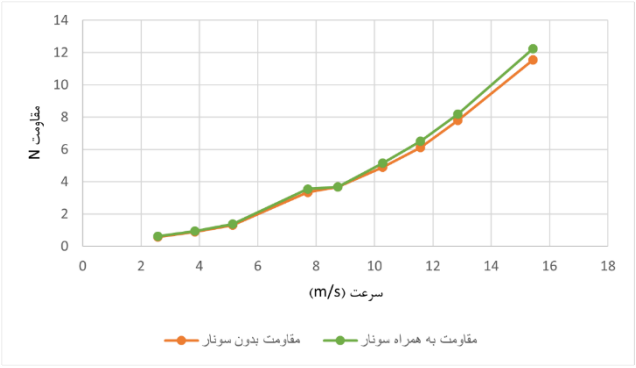
**جدول ۸- مقادیر مقاومت اصطکاکی و مقاومت موج در سرعت‌های مختلف**

| سرعت (گره دریایی) | مقاومت اصطکاکی (نیوتون) | مقاومت موج (نیوتون) |
|---|---|---|
| ۵ | ۰/۵۲ | ۹/۱۲۸ |
| ۷/۵ | ۱/۰۳ | ۸/۱۸۸ |
| ۱۰ | ۲/۱ | ۶/۹۳۳ |
| ۱۵ | ۴/۷۲ | ۵/۲۰۷ |
| ۲۰ | ۸/۴ | ۳/۹۸ |
| ۲۲/۲۵ | ۱۰/۱۶ | ۳/۵۹ |
| ۲۵ | ۱۳/۱۲ | ۳/۰۸۵ |



**شکل ۸ - شبکه‌بندی هندسه شناور مورد نظر با برجستگی سونار**

در شکل (۹) مقاومت بدنه در حالت بدون سونار و به همراه سونار آورده شده است. مشاهده می‌گردد بعد از سرعت ۸/۷۴ m/s مقاومت بدنه با سونار، به صورت خطی نسبت به مقاومت بدنه بدون سونار، افزایش پیدا می‌کند.




**شکل ۹ - مقاومت بدنه در حالت با سونار و بدون سونار**

### ۶ - نتیجه گیری

در کار حاضر، ابتدا مقاومت بدنه بدون ملحقات با استفاده از روش‌های تست حوضچه کشش و CFD انجام شد. مقایسه نتایج این دو روش نشان داد که خطای روش عددی برابر با ۴/۶ درصد است. این بدین معنی است که روش CFD این قابلیت را دارد که با دقت زیادی، مقاومت بدنه شناور را پیش‌بینی کند. سپس مقاومت بدنه شناور هدف به همراه برجستگی سونار با استفاده از روش عددی محاسبه گردید. نتایج حاصله نشان داد که مقاومت بدنه با سونار پس از گذر از یک سرعت مشخص، نسبت به حالت بدون سونار دچار افزایش می‌شود. این سرعت برای شناور هدف برابر با ۸/۷۴ m/s است.

### ۷ - مراجع

[1] Webster, W.C., (1988), *Prediction and measurement of the performance of free-flooding ship antirolling tanks*, Society of Naval Architects and Marine Engineers-Transactions, Vol.96, p.1386–1395.

[2] Voxakis, P., (2012), *Ship hull resistance calculations using cfd methods*, Massachusetts Institute of Technology, p.77-78.

[3] Deng, R., Wang, S., Hu, Y., Wang, Y., Wu, T., (2021), *The effect of hull form parameters on the hydrodynamic performance of a bulk carrier*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.9, p.373.

[4] Shamshiri M., Moonesan M., (2021), "Investigation of the bulbous bow effect on the resistance of a container ship by CFD method" Journal of marine engineering, Vol. 33, P. 111-121

[5] Lu, Y., Xin C., An-kang, H., (2016) *A hydrodynamic optimization design methodology for a ship bulbous bow under multiple operating conditions*, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 10.1, pp330-345.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.20.44.5 ]

*Recommended Procedures and Guidelines*, Revision, p.1–10.
[23] ITTC, (2008), *ITTC 2008 - 25th International Towing Tank Conference, Proceedings*. Vol.1. 2008.
[24] ITTC, (2014), *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Practical guidelines for ship CFD applications*. 7.5-03-02-03 (Revision 01).
[25] *ANSYS Fluent Theory Guide*, (2013), ANSYS, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, November.
[26] Rhie, C., Chow, W., (1983), *Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation*, AIAA journal, Vol.21(11), p.1525-1532.
[27] Liu, T.L., Guo, Z.M., (2013), *Analysis of wave spectrum for submerged bodies moving near the free surface*, Ocean Engineering, Vol.58(0), p.239-251.
[28] Nematollahi, A., Dadvand, A., Dawoodian, M., (2015), *An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study*, Ocean Engineering, Vol.96, p.205-214.
[6] Yang, K, Yonghwan K., (2017*) Numerical analysis of added resistance on blunt ships with different bow shapes in short wave,* Journal of Marine Science and Technology 22.2, pp 245-258.
[7] Yu, Y. Jin-Won, H., (2017) *Bow hull-form optimization in waves of a 66,000 DWT bulk carrier,* International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 9.5 pp 499-508.
[8] Hong, Z. C., (2017) *Self-blending method for hull form modification and optimization,* Ocean Engineering 146, pp 59-69.
[9] Lee, Y., Cheol-Min, C., (2019) *Effect of bow hull forms on the resistance performance in calm water and waves for 66k DWT bulk carrier,* International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 11.2, pp723-735.
[10] Ravenna, R., (2022), *Predicting the effect of hull roughness on ship resistance using a fully turbulent flow channel*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.10, 1863.
[11] Selim, B., Sercan, E., (2023), *Optimizing ship speed depending on cargo and wind-sea conditions for sustainable blue growth and climate change mitigation*, Journal of Marine Science and Technology, Vol.28, p.659–674.
[12] Demirel, Y.K., (2017), *Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD*. Applied Ocean Research, Vol.62, p.100-118.
[13] Wehausen, J.V., (1973), *The wave resistance of ships*, Advances in Applied Mechanics, Vol.13, p.93–245.
[14] Doust, D.J., Obrien, T.P., (1959), *Resistance and propulsion of trawlers*, Transaction NEC, Vol.75, p.355.
[15] Hughes, G., (1966), *An analysis of ship model resistance into viscous and wave component*, NPL, Part1 and 2.
[16] Havelock, T.H., (1909), *The wave-making resistance of ships: a theoretical and practical analysis*, Publisher: Royal Society, Vol.82, doi:https://doi.org/10.1098/rspa.1909.0033.
[17] Luke, W.J., (2021), *Experimental investigation on wake and thrust deduction values*, Transaction S.N.A.
[18] Harvald, S.A., (1950), *Wake of merchant ships*. The Danish technical press, Doctors Thesis, Copenhagen, Denmark.
[19] Astrup, N.C., (1954), *On the influence of form upon ski friction resistance*, Publisher: SSPA, Vol.31, 10. Granville.
[20] White F.M., (2016), "Fluid Mechanics", 8th edition, McGraw Hill Publications, Chapter 4.
[21] Molland F., Turnock R., (2017), "Ship resistance and propulsion", Cambridge University Press 978-1-107-14206-0.
[22] S. W. Instructions D. Indication, (2002), *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines ITTC –*

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.20.44.5 ]