بررسی اثر حبابی سینه بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور به صورت عددی

سجاد حاجی زاده[۱]، حسن آبین[۲]، میلاد پزنده کار[۳*]

[۱] استادیار گروه مهندسی دریا دانشگاه خلیج فارس، Hajizadeh@pgu.ac.ir
[۲] استادیار گروه مهندسی دریا دانشگاه خلیج فارس، abynhassan@pgu.ac.ir
[۳] کارشناسی ارشد مهندس معماری کشتی سازی، دانشگاه خلیج فارس، milad.pazandehkar@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

کلمات کلیدی:
حبابی سینه،
مقاومت فشاری
مقاومت اصطکاکی
KCS،
STAR-CCM+

چکیده

بهینه‌سازی حبابی سینه، یکی از راه‌های افزایش بهره‌وری در کشتی‌ها شناخته می‌شود. به منظور بررسی اثرات تغییرات طول حبابی سینه بر روی نیروی مقاومت شناور KCS، طول حبابی سینه نسبت به حالت مرجع به مقدار ۵ ٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ افزایش و ۵ ٪ کاهش، داده شد و سپس در سه عدد فرود ۰/۲۲ ، ۰/۲۶ و ۰/۳ در نرم افزار STAR-CCM+ شبیه سازی صورت گرفت. جهت بررسی اعتبار نتایج در گام نخست، حل عددی به کمک نتایج تجربی، اعتبار سنجی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر آن است که با کاهش طول حبابی‌سینه، مقاومت کل در سه عدد فرود یاد شده افزایش یافته است، اما افزایش طول حبابی سینه موجب کاهش مقاومت کل گردیده است. همچنین با افزایش عدد فرود نقش حبابی سینه در کاهش مقاومت کل، محسوس‌تر می‌باشد.

Numerical Simulation of the effect of Ship Bulbous on Hydrodynamic parameters

Sajad Hajizadeh[1], Hassan Abyn[2], Milad Pazandehkar[3*]

[1] Assistant Professor of marine engineering, Persian Gulf University; Hajizadeh@pgu.ac.ir
[2] Assistant Professor of marine engineering, Persian Gulf University, abynhassan@pgu.ac.ir
[3] Master of Science of Marine Engineering of Persian Gulf University; milad.pazandehkar@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 4 Jun 2022
Accepted: 15 Oct 2022

Keywords:
Bulbous Bow
Pressure Resistance
Friction resistance
KCS
STAR-CCM+

ABSTRACT

Bulbous bow optimization for ship is one of the ways to increase the efficiency of the ship through its hydrodynamic performance. In this study, with the aim of STAR-CCM +, the effects of changes in bulbous bow length for the KCS ship on hydrodynamic behaviour investigated. For this purpose, the leng3th of the bulbous bow was reduced by 5%, and increase 5%, 15% and 25% compared to the baseline, and then simulations were performed on three Froude numbers of 22/0, 26/0and 30/0. Their results of the simulations show that with reducing the bulbous bow length by 5%, the total resistance in the three Froud number increased, respectively, but increased the bulbous bow length the total resistance reduced. Also, with increasing Froude number, the effect of the bulbous bow length will be more influence in reducing the total resistance.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

۱ - مقدمه

در طول پنجاه سال اخیر، صنعت دریانوردی، چهره‌ی اقتصادی جهانی را متحول نموده است[۱]، به گونه‌ای که نزدیک به ۹۰ درصد از تجارت جهانی، به کمک کشتی‌ها صورت می‌گیرد[۲]. بحران‌های جهانی همچون همه‌گیری ویروس کرونا، اهمیت حمل و نقل دریایی به عنوان یک بخش ضروری برای جابجایی کالاهای حیاتی و تداوم تجارت جهانی را بیش از پیش آشکار نمود[۳]. از سویی با فزونی یافتن فشار ناشی از افزایش قیمت سوخت و کنترل‌های صورت گرفته طبق شاخص طراحی انرژی بهینه[1] (EEDI) بر انتشار گاز CO2، فناوری‌های اقتصادی و طبیعت دوستانه، به امری حیاتی در صنعت دریانوردی تبدیل شده و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بهینه‌سازی فرآیند های حمل و نقل و مصرف سوخت در حال انجام است. در پی این فشارها، صنعت کشتی سازی به دنبال آن است که با بهره‌گیری از راه حل-هایی ضمن کاهش هزینه‌های ساخت و اجرا، به سوی کشتی‌های سبز حرکت نماید[۴]. یکی از عوامل موثر در کاهش مصرف سوخت شناور و آلودگی‌ها، طراحی بهینه شکل بدنه، به ویژه حبابی سینه می‌باشد[۵]. حبابی سینه، برآمدگی جلوی سینه کشتی می‌باشد که در زیر سطح آب قرار دارد[۶]. حبابی سینه با کاهش نیروی مقاومت، راندمان سوخت را بهبود می‌بخشد[۷]. بیشترین اثربخشی حبابی سینه در کشتی‌هایی با آبخور بیش از ۱۵ متر و یا شناورهایی است که در پیرامون بیشینه سرعت خود تردد می‌کنند [۸]. بررسی نتایج نشان می‌دهد، حبابی سینه می-تواند با کاهش مقاومت در برابر حرکت، ضمن کاستن از نیروی محرکه مورد نیاز، تا ۱۵ درصد موجب صرفه‌جویی در مصرف سوخت گردد[۹].

اثر هیدرودینامیکی حبابی سینه بر تغییر توزیع جریان پیرامون سینه استوار است. حرکت سینه کشتی در آب همواره باعث ایجاد موجی می‌گردد که به موجب آن بخشی از توان موتور به هدر می-رود. اگر بتوان شکل و موقعیت حبابی سینه را به گونه‌ای طراحی کرد که با ایجاد موج ثانویه، موجب خنثی سازی موج اولیه شود، عملکرد هیدرو دینامیکی شناور بهبود خواهد یافت. در این فرایند حبابی سینه امواجی تولید می‌نماید که با امواج ناشی از سینه کشتی تداخل می‌کند. یک حبابی سینه با طراحی مناسب، با تضعیف سیستم موج کلی، مقاومت موج سازی کشتی را کاهش می دهد [۱۰].

نگاهی به تاریخ نشان می‌دهد که حبابی سینه اختراع نشد، بلکه کشف شد[۱۱]. در واقع پیدایش حبابی سینه را می توان به فعالیت‌های نظامی اواخر قرن۱۹ و اوایل قرن ۲۰ نسبت داد[۱۲]. محققان به هنگام بررسی کشتی‌های جنگی امریکایی، متوجه شدند که در کشتی‌های اژدر افکن که لوله پرتاب اژدر در بخش جلوی آن‌ها و هم راستا با بدنه کشتی قرار داشت، انحنای سر این لوله باعث کاهش چشم گیر مقاومت کشتی در برابر حرکت در آب می‌شد[۱۳].

پس از آن، اولین حبابی سینه در دهه ۱۹۲۰ برای دو کشتی مسافربری آلمانی فعال در اقیانوس اطلس شمالی با نام‌های "برمن[۲]" و "اروپا[۳]" ساخته شد[۱۴و۱۵]. در طول جنگ جهانی دوم، برخی از کشتی‌های جنگی مانند رزم ناو "یاماتو[۴] (۱۹۴۰) از حبابی سینه استفاده کردند. اما تحقیقات سیستماتیک در زمینه حبابی سینه، از اواخر دهه ۱۹۵۰ آغاز شد. کشتی یاماشیرو مارو[۵] یکی از نخستین شناورهایی بود که بر پایه‌ی این پژوهش‌ها، توسط کارخانه کشتی سازی میتوسوبیشی در سال ۱۹۶۳ ساخته شد. این کشتی با بهره‌مندی از حبابی سینه، با توان ۱۳۵۰۰ اسب بخار، توانست به سرعت ۲۰ گره دریایی دست یابد، در حالی که کشتی‌های مشابه با ۱۷۵۰۰ اسب بخار می‌توانستند به این سرعت دست یابند [۱۵ و ۱۶].استفاده تجاری از حبابی سینه از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد[۱۷].

تا نیمه‌های قرن پیش، عمده‌ی مطالعات در این زمینه در حوضچه‌های کشش و با هزینه‌های بالا انجام می‌شد. خوشبختانه، امروزه با توجه به پیشرفت نرم افزارهای CAD می‌توان طراحی مناسبی از شکل حبابی سینه داشت و سپس به کمک نرم افزارهای CFD تحلیل عددی مناسب و نسبتا دقیقی از رفتار سیال به دست آورد. با توسعه دانش، شبیه‌سازی های CFD مورد اعتماد بیشتری واقع شده‌اند و به طور گسترده برای تعریف مقاومت و مشخصات جریان پیرامون کشتی استفاده می‌شوند. در ادامه به طور خلاصه به چند نمونه استفاده موفقیت آمیز از مطالعات صورت گرفته، اشاره می‌شود:

بلانچارد و همکارانش در سال ۲۰۱۳، در پژوهشی به بررسی مفید بودن حبابی سینه در کشتی‌های ماهیگیری در راستای کاهش نیروی مقاومت، با استفاده از یک روش بهینه‌سازی خودکار هیدرودینامیکی پرداختند. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی، کاهش نیروی مقاومت را نشان داد[۱۸]. یانگ و هونگ در سال ۲۰۱۴، به معرفی روش جدیدی برای ایجاد و اصلاح حبابی سینه برای یک کشتی آماده از سری ۶۰ پرداختند. مقایسه بین سه حالت بدون حبابی سینه، با حبابی سینه اولیه و با حبابی سینه بهینه شده، کاهش نیروی مقاومت در حالت بهینه شده را نشان داد[۱۷]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۶، با تغییر ابعاد حبابی سینه یک کشتی ماهیگیری، به بررسی اثر آن بر مقاومت کل پرداختند. برای این منظور، با تغییر پارامترهای طول، عرض و ارتفاع به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

صورت جداگانه، شبیه‌سازی در سرعت‌های مختلف از ۳ تا ۱۴ گره دریایی صورت گرفت. با بررسی داده‌ها، بعد طول به عنوان موثرترین پارامتر بر مقاومت شناسایی شد. نتایج نشان داد که با افزایش طول حبابی سینه، مقاومت کل به میزان قابل توجهی کاهش می یابد، در حالی که کاهش آن موجب افزایش مقاومت می‌گردد[۱۹]. هانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، مطالعه‌ای را بر روی کشتی ماهیگیری در راستای بهینه سازی حبابی سینه انجام دادند. نتایج حاصل، کاهش ٪ ۲ در مقاومت کل را نشان داد[۲۰]. علیزاده و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی عددی یک شناور و بهینه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی آن پرداختند. در این بهینه‌سازی مقاومت کل به میزان ٪ ۱/۷ کاهش یافت[۲۱]. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۸، به سرپرستی ماتیوس ماسچ، به کمک CFD، تاثیر حبابی سینه بر تریم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور بدنه کشتی کانتینری KCS انتخاب شد. بدست آوردن زاویه تریم مناسب در هر سرعت عملیاتی و بررسی تاثیر حبابی سینه بر عملکرد KCS به کمک محاسبه اختلاف مقاومت آن در سرعت‌های مختلف دو هدف اصلی این پژوهش بود. در مجموع ۸۶۸ شبیه سازی بر روی ۴۰ مدل KCS صورت گرفت و اثر تغییر ابعاد حبابی سینه در سرعت و تریم‌های مشخص، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هر سه سرعت، تریم θ=0.25° مفیدترین بوده و مدل ۳۳ به عنوان مناسب ترین مدل انتخاب شد[۲۲]. سنر و یلدمیری در سال ۲۰۱۸، در راستای افزایش بازده سوخت و محیط زیستی بودن کشتی‌ها، اقدام به بهینه‌سازی حبابی سینه یک کشتی نمودند. در این مطالعه دوازده بدنه مختلف از طریق تغییر شکل حبابی سینه در راستا X وZ تولید شد. بهینه‌ترین مدل، مقاومت را به میزان ٪۱/۳ کاهش داد[۲۳]. شمشیری و مونسان در سال ۲۰۲۱، به بررسی اثر حبابی سینه بر روی مقاومت یک کشتی پرداختند. در این پژوهش، اثر حبابی سینه، در دو حالت با حبابی سینه و بدون آن شبیه‌سازی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که حبابی سینه ارتفاع موج ساخته شده روی بدنه و همچنین سطح آزاد را کاهش داده است. همچنین حبابی سینه در رفتار هیدرودینامیکی شناور اثر مثبت داشته که با افزایش عدد فرود، این اثر افزایش می یابد[۲۴].

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می دهد که با انتخاب فرم مناسب حبابی سینه، امکان کاهش مقاومت کشتی وجود دارد. با این حال مطالعاتی که به صورت اختصاصی اثر حبابی سینه را بررسی کنند، بسیار اندک هستند. از سویی طراحی حبابی سینه می‌بایست متناسب با هر کشتی باشد. در این مقاله به بررسی اثرات تغییر طول حبابی سینه بر روی رفتار هیدرودنیامیکی به ویژه نیروی مقاومت شناور (مقاومت)، به کمک روش CFD بر روی کشتی KCS که نتایج تجربی آن موجود است، پرداخته می‌شود. هدف این مطالعه بهینه‌سازی طول حبابی سینه کشتی برای تسهیل فرایند حرکت و در نتیجه کاهش سوخت مصرفی و آلودگی‌های محیط زیستی می‌باشد.

۲-معادلات حاکم

در این پژوهش جهت بررسی اثر جریان آب در اطراف شناور از روش‌های عددی استفاده شده است. معادلات پایستگی جرم، پایستگی اندازه حرکت سیال و معادلات RANS از جمله معادلات حاکم بر این شبیه سازی می باشد.

جهت بررسی پایستگی جرم در سیال تراکم ناپذیر از معادله (۱) استفاده شده است:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (۱)$$

و معادله (۲) بیانگر اندازه حرکت سیال می‌باشد:

$$\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial(\mathrm{U_i U_j})}{\partial \mathrm{x_j}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x_i}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left[\nu\left(\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial \mathrm{U_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right)\right] - \frac{\partial(\overline{\acute{u}_i \acute{u}_j})}{\partial \mathrm{x_j}} = 0 \qquad (۲)$$

در معادله (۲) $\mathrm{U_i}$ و $\acute{\mathrm{u}}_\mathrm{i}$ نشان دهنده سرعت متوسط و تغییرات سرعت در جهت محور $\mathrm{x_i}$، P فشار میانگین، ρ چگالی و ν بیانگر ویسکوزیته می‌باشد. برای محاسبه تنش رینولدز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\overline{\acute{u}_i \acute{u}_j} = -\mathrm{v_t}\left(\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial U_j}{\partial \mathrm{x_i}}\right) + \frac{2}{3}\delta_{\mathrm{ij}} k \qquad (۳)$$

که در این رابطه v_t بیانگر ویسکوزیته ادی[۶] می باشد و برابر با :

$$\mathrm{v_t} = {\mathrm{C}_\mu k^2}/{\varepsilon} \qquad (۴)$$

بدین منظور C_μ ثابت تجربی و k انرژی جنبشی و ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی جریان آشفته می‌باشد.

معادله‌ی k:

$$\frac{\partial(\rho k u_t)}{\partial x_t} + \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial X_j}\left[\frac{u_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial X_j} + 2u_t E_{ij}E_{ij} - \rho\epsilon\right] \qquad (۵)$$

معادله‌ی ε :

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial X_I} = \frac{\partial}{\partial X_J}\left[\frac{u_t}{\sigma_\epsilon}\frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{K}2u_t E_{ij}E_{ij} - \rho C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{K}\right] \qquad (۶)$$

که در آن u_i برابر با مولفه‌ی سرعت در جهت مربوطه است. E_{IJ} معرف مولفه‌ی نرخ تغییر شکل است. μ_T نشان دهنده‌ی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

ویسکوزیته‌ی معادل گردابه است. برای محاسبه لزجت آشفتگی از رابطه‌ی (۷) می توان استفاده کرد:

$$\mu_T = \rho C_\mu \qquad (۷)$$

برخی ثابت‌های قابل تنظیم شامل ، $C_{\epsilon 2}$و $C_{\varepsilon 1}$ ضرایب تجربی و σ_εوσ_k به ترتیب اعداد پرانتل[۷] و اشمیت[۸] آشفته می‌باشند. این ثابت‌ها به وسیله مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی بدست آمده‌اند و برای جریان هم دمای بدون انتقال جرم، ضرایب بهینه شده، مطابق جدول ۱ هستند.

جدول ۱- ضرایب مدل آشفتگی $k-\varepsilon$.

ضریب	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
مقدار	۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰

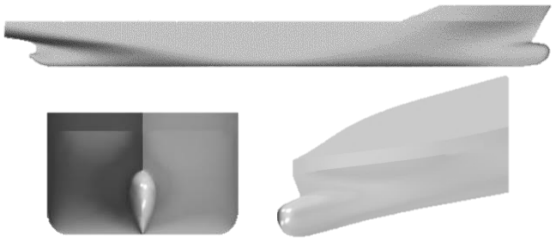
برای تحلیل و شناخت موج اطراف کشتی از روش کسر حجمی استفاده شده است. در این روش، یک معادله‌ی دیفرانسیل برای هر جز از حجم سلول حل می‌گردد، که در انتها مقدار جز حجم سیال در هر سلول معین می شود. هدف از این نوع مدل کردن پیدا کردن فصل مشترک بین فازها در نقاط مختلف دامنه می‌باشد. ایده اصلی روش حجم سیال معرفی یک تابع φ است که مقدار آن در هر نقطه‌ای که توسط سیال مرجع اشغال شده برابر تابع خاصیت در آن نقطه می‌باشد.

- φ=1 بیانگر سلولی است که از آب پرشده است.
- φ=0 مربوط به سلولی است که از آب خالی است.
- $1> \varphi > 0$ مربوط به سلولی است که شامل سطح آزاد است [۲۵].

۳ – معرفی مدل هندسی، دامنه حل و شبکه بندی

۳-۱- مدل هندسی

کشتی کانتینربر KCS به عنوان بدنه اصلی جهت بررسی اثر حبابی سینه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. این مدل، یک کشتی کانتینربر مدرن و دارای حبابی سینه است، که توسط یک موسسه تحقیقاتی کره ای فعال در زمینه کشتی معرفی شد تا زمینه اعتبار سنجی برای محاسبات CFD و فیزیک سیال را فراهم آورد. شکل ۱، نمای جانبی و مقابل کشتی را نمایش می دهند.



شکل۱: نمای مقابل و جانبی کشتی نمونه KCS.

این بدنه، معرف کشتی‌های کانتینربر امروزی به همراه حبابی سینه و با ظرفیت تخمینی ۳۶۰۰ TEU است. با توجه به حجم بالای داده‌های تجربی و محاسباتی این بدنه، که می‌توان از آن‌ها در اعتبارسنجی بهره برد، مدل KCS، جهت بهینه‌سازی در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۲ بیانگر مشخصات هندسی، تست این کشتی و مقیاس مورد استفاده است.

جدول ۲-مشخصات هندسی و شرایط تست کشتی مدل KCS با توجه به مقیاس مورد استفاده[۲۶].

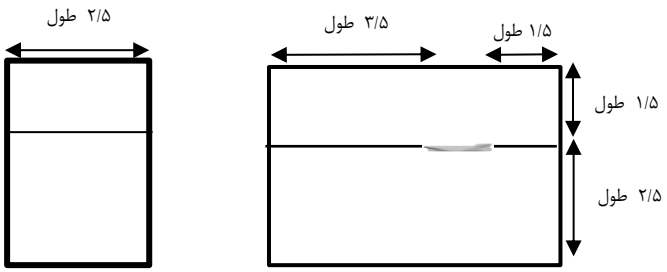
عنوان	نماد	کشتی مدل
مقیاس	λ	۳۱/۶۰
طول بین دو عمود	L_{BP}	m۷/۲۸
طول صفحه آبخور	L_{WL}	m۷/۳۶
بیشینه عرض صفحه آبخور	B_{WL}	m۱/۰۲
آبخور	T	m ۰/۳۴
حجم جابجایی	∇	m^3 ۱/۶۵
سطح خیس	S_{W}	$m^2$۹/۴۴
ضریب بلوکی	C_{B}	۰/۶۵
مرکز بویانسی تا عمود پاشنه	LCB	m۳/۵۳
مرکز ثقل تا عمود پاشنه	LCG	m ۳/۵۳
مرکز ثقل تا کیل	VCG	m۰/۲۳
نسبت شعاع ژیراسیون حول محور ۷	r_{yy}	L_{BP} ۰/۲۵
عدد فرود(بر مبنای طول بین دو عمود)	Fr	۰/۲۶
سرعت پیشروی	U	$\frac{m}{s}$۲/۱۹۶
چگالی آب	ρ	$\frac{kg}{m^3}$۹۹۷/۵۶
ضریب مقاومت کل	C_{T}	۰/۰۰۳۷۱۱

۳-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

یکی از مهم‌ترین بخش‌های شبیه سازی و تحلیل، انتخاب دامنه‌ی محاسباتی متناسب با مساله پژوهش است. ابعاد دامنه‌ی محاسباتی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

می‌بایست به اندازه‌ای بزرگ باشدکه تاثیری بر روی نتایج نگذارد. برای این منظور در نرم افزار +STAR-CCM، میدان محاسبات



در اطراف مدل به صورت شکل ۲ ایجاد شد.

شکل ۲- دامنه ی محاسباتی و شرا یط مرزی

دامنه‌ی محاسبات ۵ برابر طول کلی شناور در نظر گرفته شد، به طوری که فاصله‌ی بین ابتدای دامنه تا عمود سینه و فاصله‌ی عمود پاشنه تا انتهای دامنه به ترتیب: ۱/۵ و ۳/۵ برابر طول بین دو عمود کشتی باشد. همچنین عرض دامنه به میزان L_{BP} ۲/۵ در نظر گرفته شد. ارتفاع دامنه از سطح آب تا بالا و از سطح آب تا پایین به ترتیب برابر ۱/۵ و ۲/۵ برابر طول بین دو عمود است.

۲-۲-شرایط مرزی

براساس مساله و هدف مورد نظر در پژوهش، می‌توان شرایط مرزی را تعیین نمود. انتخاب مناسب و اصولی شرایط مرزی، گامی مهم در جهت دستیابی به پاسخ‌های صحیح و قابل اعتماد است. برای شرط مرزی ورودی، بردار سرعت جریان بالادست و برای شرط مرزی خروجی، مقدار فشار اسـتاتیک تنظیم گردید. دیواره عدم لغزش به عنوان شرط مرزی روی شناور در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به تقارن جریان سیال و هندسه مدل نسبت به صفحه، xz، جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی، مدل به صورت نیمه، طراحی و شبیه سـازی شده و شرط مرزی تقارن به‌کار رفته است. در جدول۳ نوع مرزهایی در نظرگرفته شده برای مساله، مشخص شده است.

جدول ۳-شرایط مرزی دامنه محاسباتی.

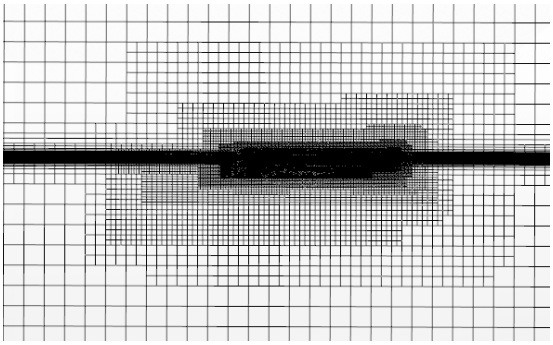
نام صفحه	شرایط مرزی
صفحه بالایی	سرعت ورودی
صفحه پایینی	سرعت ورودی
صفحه ورودی	سرعت ورودی
صفحه خروجی	فشار خروجی
صفحه جانبی	متقارن

۳-شبکه بندی

نخستین گام در اجرای شبیه‌سازی عددی جریان در داخل یک میدان، شبکه‌بندی میدان است. طی فرایند شبکه‌سازی میدان، محیط پیوسته به محیطی گسسته تبدیل می‌گردد و شبکه‌ای در این فرایند مطلوب است که ضمن منطبق بودن با مرز، شرایط مرزی به صورت مطلوب بر آن اعمال شود و همچنین پدیده‌های جریان را به خوبی دریابد.

۳-۱- شبکه بندی دامنه حل

شبکه‌ی مورد نیاز دامنه‌ی حل در این مطالعه، به کمک قابلیت تولید خودکار شبکه نرم افزار Star-CCM+ ایجاد شد. به علت تغییرات حجمی تریم در سطح آزاد و هندسه‌های پیچیده‌ای به مانند کشتی (که دارای نواحی متفاوتی به مانند سینه و پاشنه است)، از شبکه‌بندی هیبریدی دامنه‌ی حل بهره گرفته شد. شکل۳، نمایی از شبکه‌ی ایجاد شده را نمایش می‌دهد.



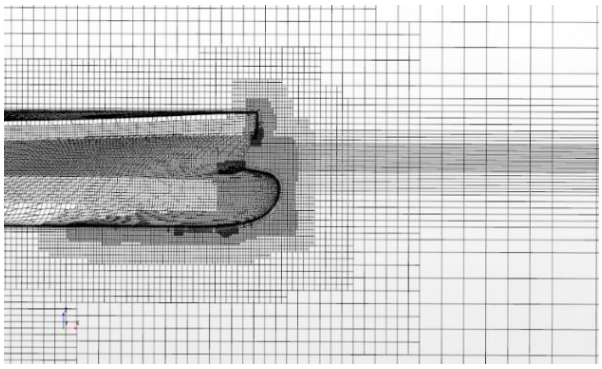
شکل ۳-شبکه بندی دامنه ی حل.

۳-۲-شبکه بندی هندسه

با توجه به اینکه تغییرات تنش در نزدیکی بدنه کشتی مخصوصا در قسمت در سینه و پاشنه بیشتر است تعداد گره‌های بیشتری برای این ناحیه پیشبینی شده است.شکل ۴ نشان دهنده گره های نمای کلی از این شبکه بندی می‌باشد. افزایش گره‌هـا در منـاطقی با تغییر زیاد فرم بدنه و پیچیدگی بیشتر باعث مـی‌شـود تـا دقـت محاسبات بالاتر رفته و از دقت قابل قبول‌تری برخوردار باشد.

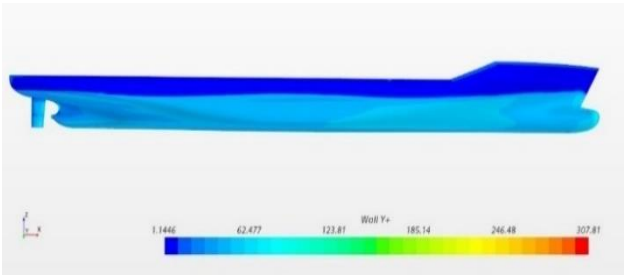
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

ردیف	اندازه مش	اندازه ی شبکه (متر)	تعداد شبکه	مقاومت R	درصد خطا%
۱	درشت	۰/۱۰۳۱	۱۰۱۹۸۹۲	۹۱/۱۸	۸/۸
۲	متوسط	۰/۰۸۱	۱۲۸۴۹۸۴	۸۶/۷۸	۳/۶
۳	یز	۰/۰۶۵	۱۶۱۸۹۷۹	۸۳/۹۳	۰/۲
۴	بسیار ریز	۰/۰۵۱	۲۰۳۹۷۸۷	۸۲/۰۹	۱/۵



شکل ۴- شبکه بندی دامنه ی حل از نمای جانبی.

مقدار y^+ بیانگر فاصله اولین گره تا سطح دیواره در بدنه کشتی می باشد. در مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ مقدار y^+ باید بین ۳۰-۳۰۰ تعیین شود، مقادیر کمتر از ۳۰۰ این معیار، موجب اعتبار توابع دیواره می گردد. هرچه این مقدار به ۳۰ نزدیک تر باشد، نتایج دقیق تری به همراه خواهد داشت. شکل ۵، نمایی از y^+ ، بدنه‌ی کشتی مدل را نمایش می دهد.



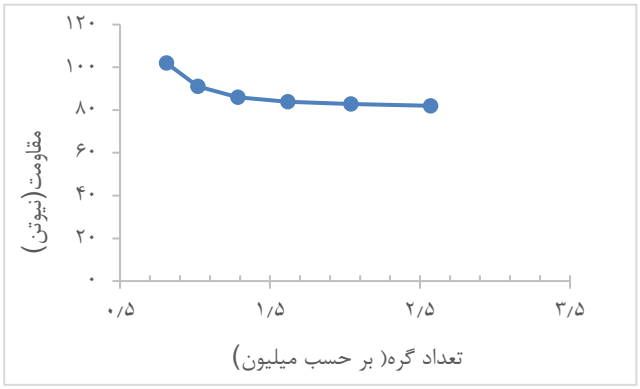
شکل۵- توزیع y^+ ، در چهار نمای مختلف بر روی بدنه ی کشتی.

۳-۳-استقلال از شبکه

در شبیه‌سازی‌های عددی می‌بایست شبکه‌ای یافت که ضمن بهینه بودن از نظر هزینه محاسبات و زمان، نتایجی با کمترین میزان خطا را تولید نموده و سخت افزارهای موجود قادر به انجام آن باشند، بنابراین یافتن اندازه‌ی مش مناسب، در کیفیت داده‌ها بسیار موثر است. در این مطالعه برای دستیابی به یک شبکه‌ی بهینه، به تدریج شبکه ریز و ریزتر شد. این فرایند تا جایی ادامه یافت که نتایج تحلیل مورد انتظار که در این مورد، مقاومت بود، با تغییر اندازه، تغییر چندانی نکند. برای شروع کار، شبکه‌بندی ابتدایی، با یک شبکه‌بندی درشت آغاز شد که اندازه‌ی آن ۰/۱۳ متر بود. این اندازه، در واقع اندازه‌ی شبکه‌بندی مرجع در نرم افزار STAR-CCM+ است، در مراحل بعدی اندازه‌ی شبکه ، $\frac{1}{\sqrt[3]{2}}$ برابر شبکه‌بندی مرحله ی قبلی بود. جدول ۴، نشان دهنده تعداد شبکه و مقدار تغییر مقاومت مدل می‌باشد.

جدول ۴- مقدار مقاومت مدل در تعداد گره های انتخاب شده.

شکل۶، نمودار تعداد گره بر حسب مقاومت می‌باشد. همانطور که نمودار نشان می‌دهد، بعد از ۱۶۱۸۹۷۹عدد گره، مقاومت به صورت تقریبا خطی در آمده است و اینجا نقطه‌ای است که شبکه به استقلال دست یافته است. جدول ۵ مشخصات شبکه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۶-نمودار تعداد گره های شبکه بندی نسبت به مقاومت کل مدل.

جدول۵-مشخصات شبکه بندی مورد استفاده

تعداد سلول	۱۶۱۸۹۷۹
تعداد ردیف لایه ی مرزی	۶
ضخامت کل لایه مرزی	۲cm

جهت محاسبه‌ی همگرایی مش، از نسبت تغییرات زیر استفاده می‌شود(۲۵):

$$R_G=\frac{\epsilon_{23}}{\epsilon_{12}}=\frac{\epsilon_2-\epsilon_3}{\epsilon_1-\epsilon_2} \qquad (۸)$$

$$\begin{cases} 0<R_G<1 & \text{همگرایی} \\ R_G<0 & \text{نوسان} \\ R_G>1 & \text{واگرایی} \end{cases} \qquad (۹)$$

که ϵ_1، ϵ_2 و ϵ_3 به ترتیب مقاومت کل حاصل از مش درشت، متوسط و ریز در جدول ۴ می‌باشد. نسبت تغییرات

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

مقاومت کل برای مش ریز به عنوان مش انتخابی ۰.۶۵ می باشد، که همگرایی مش را تایید می‌نماید.

۴- تنظیم شرایط شبیه سازی

جهت شبیه‌سازی نمونه از نرم افزار STAR-CCM+، نسخه ۱۵/۰۶ استفاده شده است. برای حل فیزیک مسأله نیاز به استفاده از روابط و عملگرهای مختلفی دارد که هماهنگ با شرایط مساله باشند. انتخاب درست و مناسب این عملگرها در شبیه‌سازی بسیار مهم می‌باشد. جدول ۶ شرایط‌های مناسب برای حل مسأله را نشان می‌دهد.

جدول ۶- شرایط حل

فضای حل	سه بعدی
زمان بندی	ضمنی
ماده	چند فازی اویلری
مدل چند فازی	(VOF)کسر حجمی
مدل حالت	چگالی ثابت
رژیم جریان	مغشوش(k-ε)
درجات آزادی	دو درجه آزادی هیو و پیچ

برای بررسی بر هم کنش بین آب و هوا و ساختار موج از مدل VOF[9] استفاده شده است. در تمام مدت محاسبه چگالی مواد تغییری نمی‌کند، بنابراین از مدل چگالی ثابت برای تعیین خاصیت سیال پیرامون کشتی استفاده شده است. برای تعریف حالت جریان مغشوش از رژیم جریانی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است که جهت توصیف جریان پیرامون کشتی از اعتبار قابل قبولی برخوردار است. شبیه‌سازی حرکت کشتی بستگی به دو درجه آزادی پیچ و هیو دارد.

۵- اعتبار سنجی شبیه سازی عددی

برای اینکه یک تحلیل عددی از اعتبار کافی جهت ارایه و استفاده برخوردار باشد باید با یک نمونه تجربی مقایسه شود و میزان خطای آن مشخص شود. براساس رابطه‌ی ۱۰، مقاومت حاصل از ضریب مقاومت تست تجربی در شرایط آب آرام محاسبه شده است.

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho A V^2} \qquad (۱۰)$$

R_T بیانگر نیروی مقاومت کل، A مساحت سطح خیس کشتی و V سرعت کشتی می‌باشد. C_F نیز با انتگرال گیری از تنش برشی سطح خیس بدست می‌آید.

همچنین، با توجه به شرایط حل عددی، دامنه‌ی محاسباتی، شبکه بندی و تنظیمات کلی مورد استفاده در تحلیل‌های اصلی، کشتی مدل KCS در عدد فرود ۰/۲۶ در نرم افزار استار تحلیل شد. در جدول ۷، نتایج مقاومت کل حاصل از تست تجربی و شبیه‌سازی آورده شده است.

جدول ۷- مقایسه مقاومت کل در تست تجربی و حل عددی

تست تجربی(N)	شبیه سازی عددی(N)	درصد خطا%
۸۳/۷۵	۸۳/۹۳	۰/۲۱

مقدار خطای محاسبات با استفاده از رابطه ۱۱ مقدار ۰/۲۱ درصد، به دست آمده که زیر ۱ درصد بوده و قابل قبول می‌باشد. با توجه به اینکه خطای محاسبه شده بسیار ناچیز بوده شبکه‌بندی استفاده شده برای این مدل و مدل‌های مشابه معتبر می‌باشد.

$$\%E = \left|\frac{\text{مقدار عددی} - \text{مقدار تجربی}}{\text{مقدار تجربی}}\right| \times 100 \qquad (۱۱)$$

۶- تغییر طول حبابی سینه

هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر تغییرات طول حبابی سینه بر روی مقاومت کل می‌باشد. برای این منظور در گام نخست با کمک نرم افزارهای CAD، تغییرات طول در حبابی سینه ایجاد شده و سپس با بهره‌گیری از نرم افزار شبیه سازی STAR-CCM+، اثر این تغییرات طول، بر روی مقاومت کشتی در سه عدد فرود، مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل مورد استفاده در این پژوهش، کشتی KCS، با مقیاس ۳۱/۶ :۱می‌باشد. این مدل، به عنوان هندسه‌ی مرجع در نظر گرفته شده و سایر تغییرات طول براساس آن انجام گردیده است. در مجموع چهار تغییر طول اعمال شده است. یک تغییر کاهشی و سه تغییر افزایشی می‌باشد. با در نظر گرفتن مدل مرجع، پنج هندسه در نرم افزارSTAR-CCM+ در سه عدد فرود مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. جهت سهولت در خوانش، هر یک از مدل ها و اعداد فرود با یک نماد اختصاصی معرفی می-شوند. شکل۷، نمایی از اندازه ی حبابی سینه در مدل های مختلف مورد استفاده را نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

شکل۷: مقایسه اندازه حبابی سینه در مدل های مختلف

۷- نتایج

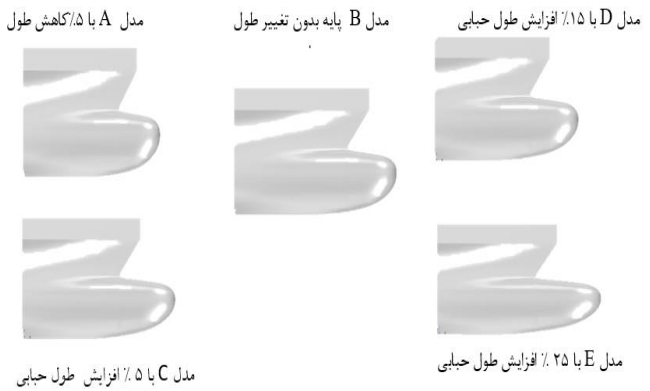
با توجه به سرعت عملیاتی کشتی‌هایی همچون KCS، سه سرعت مختلف ۲۰/۵ و ۲۴ و ۲۷ گره دریایی جهت تحلیل انتخاب شد. متناظر با این مقادیر، سرعت نسبی آب و کشتی مدل، به ترتیب برابر ۱/۸۶ ،۲/۱۹۶ و ۲/۵۲ متر بر ثانیه و عدد فرود آن ۰/۲۲ ، ۲۶/ و ۰/۳۰ می‌باشد.

نتایج تحلیل هیدرودینامیکی شامل مقادیر مقاومت اصطکاکی و مقاومت فشاری و مقاومت کل برای هر سه عدد فرود یاد شده بدست آمده است. به کمک این نتایج اثر تغییر طول حبابی سینه را می‌توان مقایسه نمود. جدول ۸، شامل نتایج نیروی مقاومت فشاری، مقاومت اصطکاکی و مقاومت کل، در پنج مدل می‌باشد.

جدول ۸-مقدار انواع مقاومت اصطکاکی، فشاری و کل، برای پنج مدل در سه عدد فرود.

	Fr	Aمدل	مدلB	Cمدل	Dمدل	Eمدل
مقاومت اصطکاکی (N)	۰/۲۲	۴۷.۱۲۵۳	۴۷.۱۲۵۸۸	۴۷.۱۲۶۴۶	۴۷.۱۳۶۶۱	۴۷.۲۰۴۸۲
	۰/۲۶	۶۴.۷۵۳۸	۶۴.۷۹۹۹۲	۶۴.۸۴۵۹۹	۶۴.۸۹۳۳۵	۶۴.۹۱۶۵۴
	۰/۳۰	۸۴.۶۶۷۲۲	۸۴.۷۴۹۹۳	۸۴.۸۳۲۴	۸۴.۹۶۶۸۶	۸۵.۰۶۶۳۳
مقاومت فشاری (N)	۰/۲۲	۷.۱۶۰۰۷۸	۷.۱۲۸۹۹	۷.۰۹۷۹۰۲	۷.۰۱۶۳۷۷	۶.۷۷۸۱۱۶
	۰/۲۶	۱۹.۲۲۲	۱۹.۱۳۷۴۲	۱۹.۰۵۲۸۳	۱۸.۸۳۴۴۷	۱۸.۵۸۸۳۵
	۰/۳۰	۶۳.۰۵۸۵۵	۶۲.۸۴۷۶۳	۶۲.۶۳۶۷۲	۶۲.۱۳۶۲۷	۶۱.۷۴۸۵۴
مقاومت کل (N)	۰/۲۲	۵۴.۲۸۵۳۷	۵۴.۲۵۴۸۷	۵۴.۲۲۴۳۶	۵۴.۱۵۲۹۸	۵۳.۹۸۲۹۴
	۰/۲۶	۸۳.۹۷۵۸۶	۸۳.۹۳۷۴۳	۸۳.۸۹۸۸۲	۸۳.۷۲۷۸۱	۸۳.۵۰۴۸۹
	۰/۳۰	۱۴۷,۷۲۶۳	۱۴۷,۵۹۷۶	۱۴۷,۴۶۸۹	۱۴۷,۱۰۳۰	۱۴۶,۸۱۴۹

با توجه به نتایج موجود در جدول۸، در عدد فرود۰/۲۲ افزایش طول حبابی سینه موجب افزایش مقاومت اصطکاکی و کاهش مقاومت فشاری گردیده است. مقاومت اصطکاکی در عدد فرود ۰/۲۲، برای پنج مدل در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت اصطکاکی نیز افزایش



یافته است.

اما در شکل۹، با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت فشاری کاهش یافته است. جمع این دو مقاومت، مقدار مقاومت کل وارد بر مدل شناور را مشخص می‌نماید. بررسی نمودار شکل ۱۰، نشان می‌دهد که با وجود افزایش مقاومت اصطکاکی سهم مقاومت فشاری بیشتر بوده و در نهایت با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت کل کاهش یافته است.

با توجه به نتایج موجود در جدول ۸ در عدد فرود۰/۲۶، افزایش طول حبابی سینه موجب افزایش مقاومت اصطکاکی و کاهش مقاومت فشاری گردیده است. مقاومت اصطکاکی و فشاری در عدد فرود ۰/۲۶، برای پنج مدل در نمودار شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت اصطکاکی نیز افزایش یافته است. اما با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت فشاری کاهش یافته است. جمع این دو مقاومت، مقدار مقاومت کل وارد بر مدل شناور را در شکل ۱۳ مشخص می‌نماید.

با توجه به نتایج موجود در جدول۸، در عدد فرود۰/۳۰، افزایش طول حبابی سینه موجب افزایش مقاومت اصطکاکی و کاهش مقاومت فشاری گردیده است. مقاومت اصطکاکی در عدد فرود۰/۳۰، برای پنج مدل در نمودار شکل ۱۴ نشان داده شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

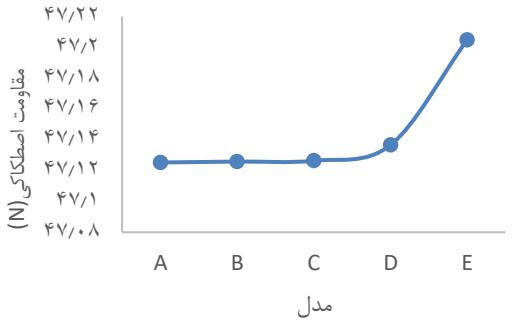
است. با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت اصطکاکی نیز افزایش یافته است.

اما در نمودار شکل ۱۵، با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت فشاری کاهش نمودار یافته است. جمع این دو مقاومت، مقدار مقاومت کل وارد بر مدل شناور را مشخص می‌نماید. بررسی نمودار شکل ۱۶ نشان می‌دهد که با وجود افزایش مقاومت اصطکاکی سهم مقاومت فشاری بیشتر بوده و در نهایت با افزایش طول حبابی سینه مقدار مقاومت کل کاهش یافته است.

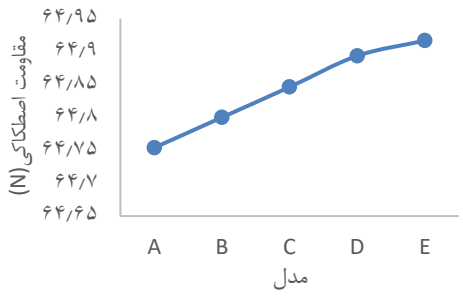
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]

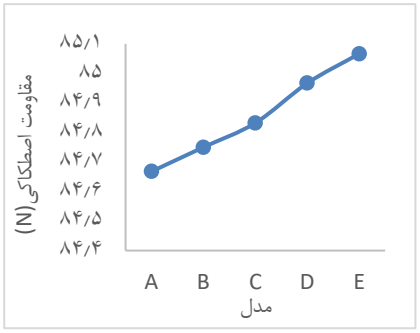
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]



شکل۸: نمودار مقاومت اصطکاکی در عدد فرود ۰/۲۲



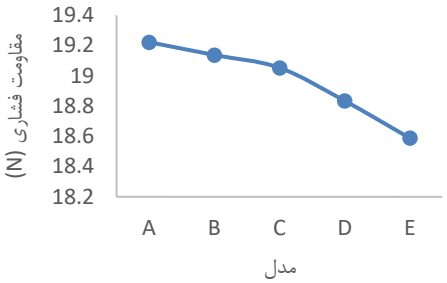
شکل۱۱- نمودار مقاومت اصطکاکی در عدد فرود۰/۲۶



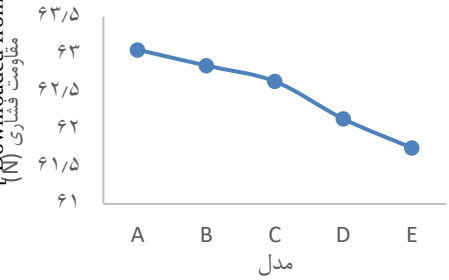
شکل۱۴- نمودار مقاومت اصطکاکی در عدد فرود۰/۳۰



شکل ۹- نمودار مقاومت فشاری در عدد فرود ۰/۲۲



شکل۱۲: نمودار مقاومت فشاری در عدد فرود۰/۲۶



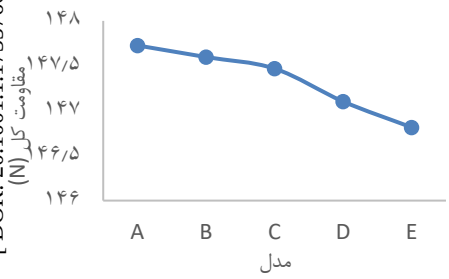
شکل ۱۵- نمودار مقاومت فشاری در عدد فرود۰/۳۰



شکل ۱۰- نمودار مقاومت کل در عدد فرود ۰/۲۲



شکل ۱۳- نمودار مقاومت کل در عدد فرود۰/۲۶



شکل۱۶- نمودار مقاومت کل در عدد فرود۰/۳۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

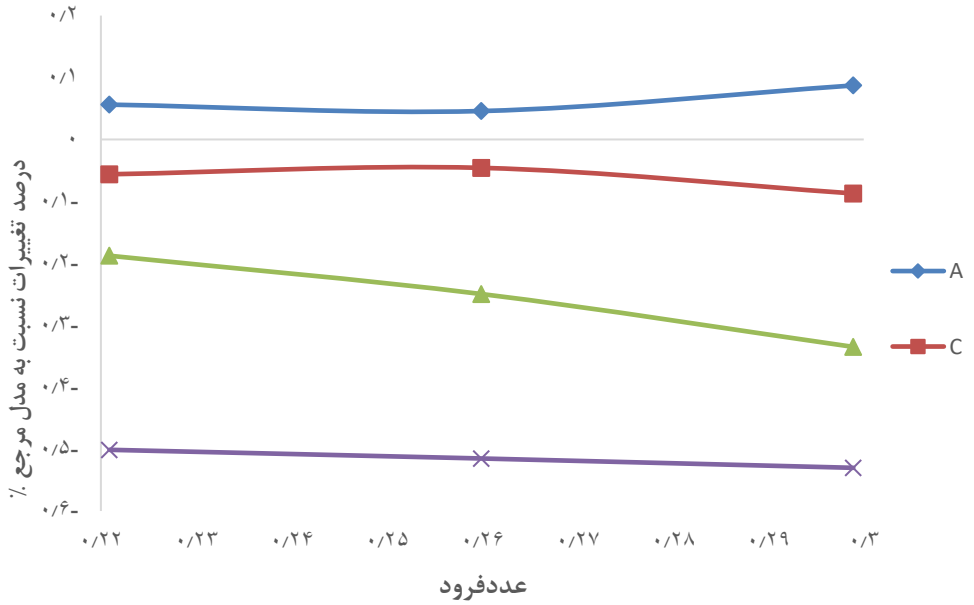
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

جدول۹ و شکل۱۷ نشان دهنده‌ی درصد تغییرات مقاومت اصطکاکی، فشاری و کل، برای پنج مدل انتخابی در سه عدد فرود می‌باشد. شکل ۱۷، نشان می‌دهد در مدل A که حاصل کاهش مقدار طول حبابی سینه است؛ با افزایش عدد فرود مقاومت کل افزایش می یابد.

بررسی نتایج در مدل‌های C,Dو E که حاصل افزایش طول حبابی سینه هستند، نشان می‌دهد که در اعداد فرود بالا تر مقدار تاثیر حبابی سینه بر کاهش مقاومت کل بیشتر می‌باشد.

جدول ۹- درصد تغییرات مقاومت اصطکاکی و فشاری و کل در سه عدد فرود.

	Fr	مدلA	مدل(مرجع)B	مدلC	مدلD	مدلE
مقاومت اصطکاکی	۰.۲۲۰۹	-۰.۰۰۱۲۴	۰.۰	۰.۰۰۱۲۳۵	۰.۰۲۲۷۶۲	۰.۱۶۷۵۱۴
	۰.۲۵۹۹	-۰.۰۷۱۰۹	۰.۰	۰.۰۷۱۰۹	۰.۱۴۴۱۷۸	۰.۱۷۹۹۷۴
	۰.۲۹۸۹	-۰.۰۹۷	۰.۰	۰.۰۹۷۰۰۵	۰.۲۵۵۹۶۶	۰.۳۷۳۳۸
مقاومت فشاری	۰.۲۲۰۹	۰.۴۳۶۰۷۸	۰.۰	-۰.۴۳۶۰۸	-۱.۵۷۹۶۶	-۴.۹۲۱۷۸
	۰.۲۵۹۹	۰.۴۴۲۰۰۱	۰.۰	-۰.۴۴۲	-۱.۵۸۳۰۲	-۲.۸۶۹۱
	۰.۲۹۸۹	۰.۳۳۵۵۹۵	۰.۰	-۰.۳۳۵۵۹	-۱.۱۳۱۸۸	-۱.۷۴۸۸۲
مقاومت کل	۰.۲۲۰۹	۰.۰۵۶۲۲۲	۰.۰	-۰.۰۵۶۲۳	-۰.۱۸۷۷۹	-۰.۵۰۱۲۱
	۰۰۲۵۹۹	۰.۰۴۵۸۹۳	۰.۰	-۰.۰۴۵۸۹	-۰.۲۴۹۶۲	-۰.۵۱۵۲
	۰.۲۹۸۹	۰.۰۸۷۱۱۹۸	۰.۰	-۰.۰۸۷۲	-۰.۳۳۴۹۹	-۰.۵۳۰۲۹



شکل۱۷- نمودار درصد تغییرات مقاومت کل در مدل‌ها، نسبت به مدل مرجع در سه عدد فرود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

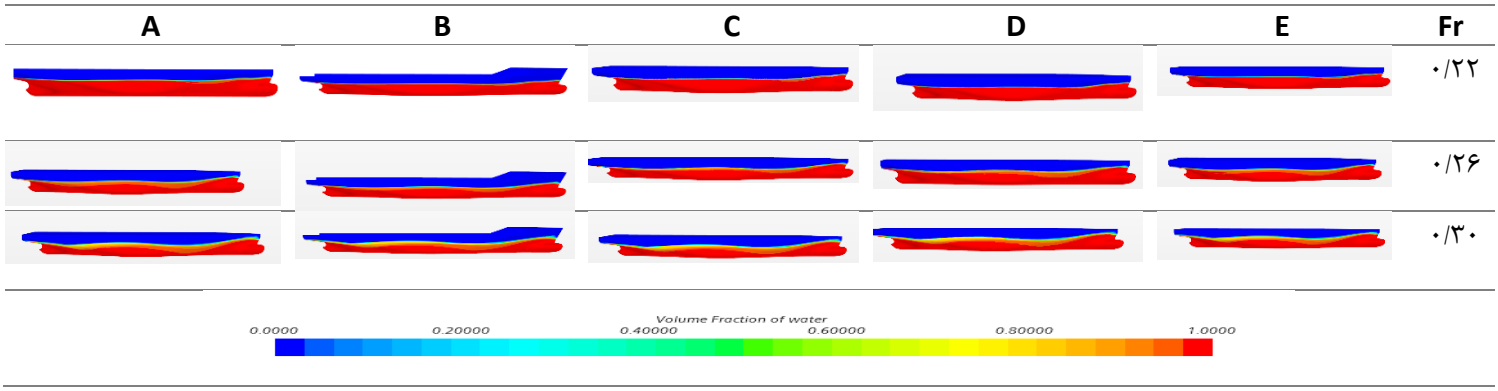
جهت بررسی اثر حبابی سینه می‌بایست موجی که بر بدنه کشتی منتشر می‌شود، مورد مطالعه قرار گیرد. در شکل ۱۸، کانتور کسر حجمی آب روی بدنه بر روی پنج مدل را نشان داده شده است. طبق این شکل با افزایش سرعت کشتی تغییرات ارتفاع موج و اثر آن پیرامون کشتی افزایش می‌یابد. افزایش طول حبابی سینه نیز، موجب کاهش ارتفاع موج ساخته شده روی بدنه می‌گردد.

شکل۱۹، ضریب توزیع اصطکاکی بر روی بدنه در پنج مدل و در سه عدد فرود را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می دهد که با افزایش طول بدنه، ضریب توزیع اصطکاکی کاهش پیدا می‌کند و با افزایش عدد فرود در هر مدل، ضریب توزیع اصطکاکی افزایش می‌یابد.

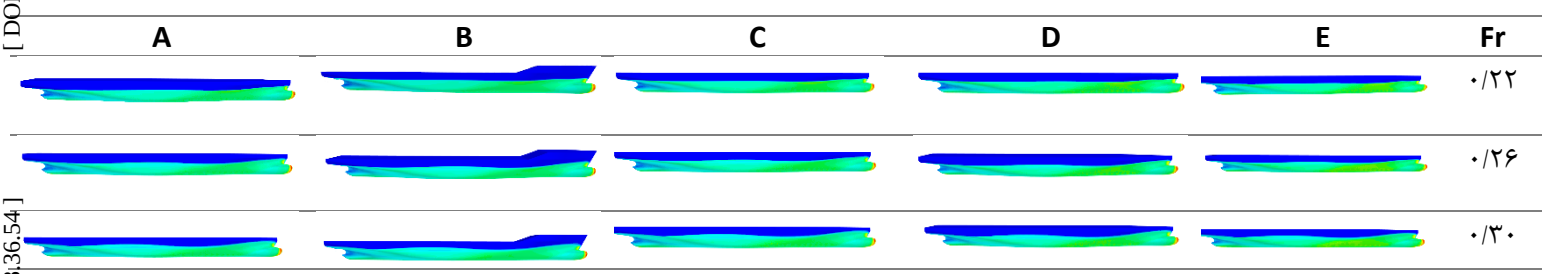
شکل۲۰، الگوی موج پیرامون پنج مدل در سه عدد فرود را نشان می‌دهد. با افزایش طول حبابی سینه، ارتفاع موج ساخته شده روی بدنه و همچنین سطح آزاد کاهش یافته است. از سویی با افزایش سرعت، ارتفاع موج‌ها بیشتر شده و تاثیر موج‌های عرضی و واگرا بر محیط اطراف شناور کاملا مشخص است. کمترین ارتفاع موج در سینه و پاشنه شناور با رنگ قرمز مشخص شده است.

شکل۲۱، میزان تریم پنج مدل در اعداد فرود مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد، با افزایش طول حبابی سینه، میزان تریم کاهش می‌یابد. تریم دینامیکی با افزایش سرعت روند افزایشی داشته و پس از رسیدن به بیشینه، به تدریج کاهش یافته و به یک مقدار تقریبا ثابت در سرعت های بالا میل می‌کند.

شکل۲۲، نمودار سینکیج پنج مدل در سه عدد فرود می‌باشد. در هر سه سرعت با افزایش طول حبابی سینه، میزان سینکیج افزایش و با افزایش عدد فرود میزان سینکیج کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت قسمت بیشتری از شناور به نزدیکی سطح آب می رسد و با کاهش سرعت، شناور به میزان بیشتری در آب واردمی‌شود.

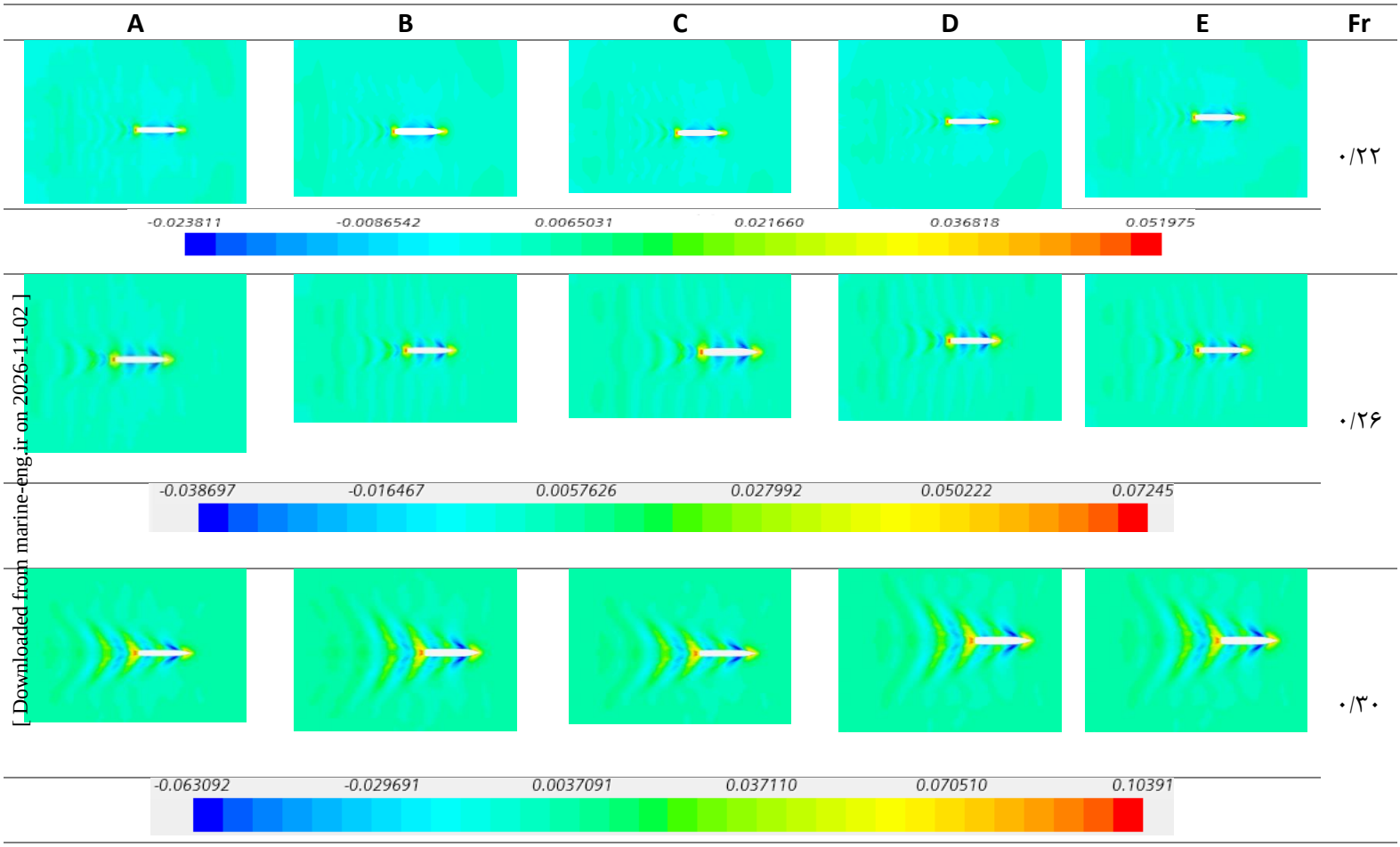


شکل۱۸: کانتور کسر حجمی آب روی بدنه‌ی پنج مدل.

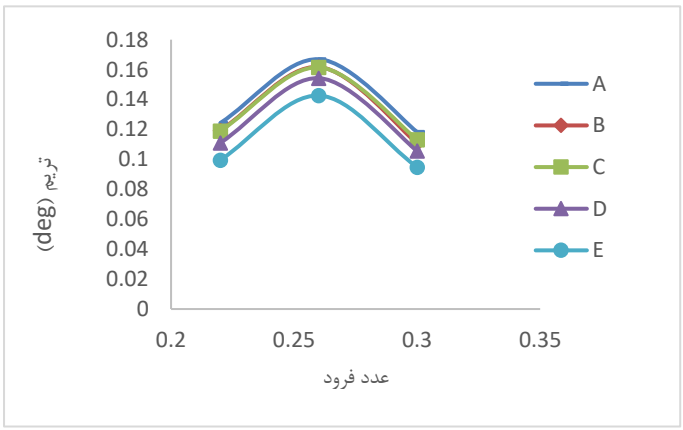


شکل۱۹: توزیع ضریب اصطکاکی بر روی بدنه‌ی پنج مدل.

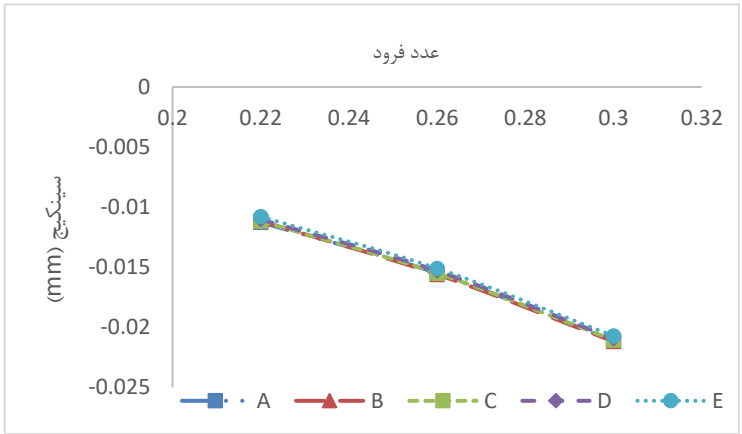
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]



شکل۲۰: پروفیل موج ایجاد شده پیرامون مدل‌ها در سرعت های مختلف



شکل۲۱: نمودار تریم برای پنج مدل در سه عدد فرود.



شکل۲۲: نمودار سینکیج پنج مدل در سه عدد فرود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

۸- نتیجه گیری

برای بررسی اثر کاهش و افزایش طول حبابی سینه بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور، مقاومت در پنج مدل(A، B ، C، E،D) از کشتی کانتینربر KCS، در سه عدد فرود ۰/۲۲، ۰/۲۶و ۰/۳۰ مقایسه شد. مدل B به عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شد. با کاهش طول حبابی سینه، مقاومت کل، افزایش یافته است. بنابراین کاهش طول حبابی سینه، بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور اثر منفی دارد. در نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش طول حبابی سینه، میزان مقاومت اصطکاکی افزایش و مقاومت فشاری کاهش یافت؛ و در نتیجه مقاومت کل، که حاصل جمع این دو مقاومت است، کاهش می‌یابد. در میان پنج مدل به کار رفته، مدل E، با دارا بودن کمترین میزان مقاومت کل در سه عدد فرود، به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. البته افزایش طول حبابی سینه نیز، خود دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که با توجه به آن‌ها، نمی‌توان طول آن را به هر میزان افزایش داد و اصولا جلوتر از نوک سینه شناور، به علت خطر تصادم‌های احتمالی، امتداد پیدا نمی‌کند. بررسی مقاومت، در اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد که اثر افزایش یا کاهش طول حبابی سینه، در اعداد فرود بالاتر محسوس‌تر است. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده، افزایش طول حبابی سینه، ارتفاع موج ساخته شده روی بدنه و همچنین سطح آزاد را کاهش داده است.

۹ - کلید واژگان

1. Energy Efficiency Design Index
2. Bermen
3. Europe
4. Yamuta
5. Yamashiro
6. Eddy
7. Pyrantel
8. Schmitt
9. Volume of friction

۱۰ - مراجع

1-Yu, L., Xin, Ch., Xunbin, Y., (2019), *Hydrodynamic Design Study on Ship Bow and Stern Hull Form Synchronous Optimization Covering Whole Speeds Range*, Mathematical Problems in Engineering Journal. Vol.1, p. 19.

2- Center for Statistics of Iran Department of planning and supervision., (2011), *Results of the survey of energy carriers' consumption in urban households in 2011 – 2012*, https://www.amar.org.ir (In Persian).

3- The Review of Maritime Transport, (2020), *The coronavirus disease 2019 pandemic: lessons learned from first -hand experiences*, the United Nations Conference on Trade and Development, VOL.1, P. 112.

4-Yu, L., Xin, C., An-kang, H., (2016), *A hydrodynamic optimization designs methodology for a ship bulbous bow under multiple operating conditions*, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Journal, VOL.10, p.330-345.

5-Yim, B., (1965), *Analyses of Spherical Bulbs on a Ship Bow*, Inc. Technical Report, p. 28 - 39.

6- https://en.wikipedia.org/wiki/Bulbous_bow.

7- Yang, C., Hung, F., (2014), *A New Method for Ship Bulbous Bow Generation and Modification*, International Ocean and Polar Engineering Conference Busan, p. 2-3.

8-Wigley, W.C.S., (1936), *The Theory of the Bulbous Bow and its Practical Application*, North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, London.

9- Bray, P., (2004) *Bulbous bows*, http://www.dieselduck.info/library/01%20articles/bulbous_bows.htm, December.

10- Chakraboty, S., (2021), *What's The Importance Of Bulbous Bow Of Ships?* https://www.marineinsight.com/naval-architecture/why-do-ships-have-bulbous-bow.

11- Song, C., Cui, W., (2020), *Review of Underwater Ship Hull Cleaning Technologies*, Journal of Marine Science and Application. Vol. 19, p. 415–429.

12- Bertman, V., schneek luth, H., (1998) *Ship design for efficency and economy*, Elsevier, p.87-89.

13- Yim, B., (1974), *A Simple Design Theory and Method for Bulbous Bows of Ships*, Journal of Ship Research, VOL.18, p. 141-152.

14- Chen, P. F., Huang, C. H., Fang, M. C., & Chou, J. H., (2006), *An Inverse Design Approach in Determining the Optimal Shape of Bulbous Bow with Experimental Verification*, Journal of ship research, VOL. 50, p.1.

15- Mayer, j., (2008), *Ship Bulbous Bow*, Mannheim, Germany. Vol.2, p.12.

16-Mahmood, S., Huang, D., (2012), *Computational Fluid Dynamics Based Bulbous Bow Optimization Using a Genetic Algorithm*, Journal of Marine Science and Application, VOL.11, p.286-294.

17- Carlton, J.S., (2019), *Marine Propellers and Propulsion (Fourth Edition)*, Elsevier.

18- Li, Ch., Wang, Y., Jiha, ch., (2016), *Study on the shape parameters of bulbous bow of tuna longline fishing vessel*, International Conference on Energy and Environmental Protection, p. 250-255.

19- Blanchard, L., Berrini. E., (2013), *BULBOUS BOW SHAPE OPTIMIZATION*, V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, p.3-4.

20- Hong, Z., Zong, A., (2017) *Self-blending method for hull form modification and optimization*, Journal Ocean Engineering, Vol.146, p.59–69.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]

21-Alizadeh, E., (2017), *Investigation of fast craft hydrodynamic behavior with static trim changes* ,5th national conference of fast craft, (in Persian).
22- Maasch, M., Shivachev, E., Day, A., Turan, O., (2018), *A numerical trim methodology study for the Kriso Container Ship with bulbous bow form variation*, 13th International Marine Design Conference.
23- Sener, B., Yildirim, M., (2017), *Bulbous Bow Optimization Of KCS in Trems of Partiality Parametric Modeling*, International Journal of Mechanical and Production Engineering, Vol.6, p. 2320-2092.
24- Shamshiri, M., Moonesun, M., (2021) *Investigation of the Bulbous Bow Effect on the Resistance of a Container Ship by CFD Method*, Marine Engineering Journal, Vol. 33, p. 121-111.
25- Amiri, A., Shakeri, M., Ramiar, A., Jafaryadeh, M., (2000), *Numerical study of Iran-Bushehr Ship motions and added resistance in regular head waves using STAR-CCM+*, Marine Engineerin Journal, Vol 31, p. 41-52.
26- http://www.simman2008.dk/KCS/kcs_geometry

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.36.6.9]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.36.54]