کاهش مصرف سوخت شناور تجاری با بهینه‌سازی تریم

محمد سعید سیف[۱] ، علیرضا کاظمی پور[۲]*

[۱] استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا ، دانشگاه صنعتی شریف؛ alireza.kazemipour@mech.sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

کلمات کلیدی:
کاهش درگ
بهینه‌سازی تریم
شبیه‌سازی عددی
مصرف ویژه سوخت

چکیده

امروزه تلاش برای کاهش در مصرف سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های جوی، صرفه‌جویی اقتصادی و همچنین هماهنگ شدن با قوانین جدید نگرانی پیشروی صنعت کشتیرانی است. به‌منظور برآوردن و رسیدن به این اهداف تلاش‌ها و تحقیقات زیادی صورت گرفته است که در این مقاله برخی از روش‌های کاهش مصرف سوخت ازجمله بهینه‌سازی تریم شناور در آبخور طراحی موردبررسی قرارگرفته است. در این راستا مقاومت مدل شناور کانتینرKCS در آبخور طراحی محاسبه‌شده است. این تحلیل به‌صورت حل عددی و آزمایش تجربی برای تریم‌های ۰/۱- تا ۰/۱+ انجام پذیرفته است. نتیجه حاصل از مقاومت بدنه شناور مدل به بدنه اصلی تعمیم داده‌شده است در این خصوص، مدل ریاضی سامانه رانش کشتی در محیط محاسباتی سیمولینک نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی گردیده است و با استفاده از این مدل، به ازای تریم‌های مختلف میزان مصرف ویژه سوخت شناور ارائه‌شده است.. با توجه به نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی بدنه شناور کاهش ۱/۵ درصدی مصرف سوخت به ازای تریم بهینه نتیجه شده است.

Ship Trim Optimization for the Reduction of Fuel Consumption

Mohammad Saeid Seif[1], Alireza Kazemipour[2*]

[1] Professor of Centre of excellence in hydrodynamic & dynamic of marine vehicles, Sharif University of Technology.
[2] M.Sc. of Naval Architecture and marine engineering, department of mechanical engineering, Sharif University of Technology.

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Aug. 2018
Accepted: 18 May 2019

Keywords:
Drag Reduction
Trim Optimization
Numerical Simulation
Specific Fuel Consumption

ABSTRACT

Greenhouse gas emissions and atmospheric pollutants, economic savings, as well as alignment with the new rules of the shipping industry's leading is a new concern. In order to meet and achieve these goals, many efforts have been made. In this paper, some methods for reducing fuel consumption, including optimization of floating trim, have been considered in design draught. In this regard, the body resistance of model of the KCS container ship is calculated in design draught; This analysis was performed by numerical solution and experimental test for -0.1 to +0.1 trim range. And the results of ship model analysis was generalized to the main body. In this regard, the mathematical model of ship propulsion system is implemented in the MATLAB-Simulink software; and by using this model for different trims, rates of ship specific fuel consumption presented. According to the results of modeling and simulation of the floating body, a reduction of 1.5% of fuel consumption has been achieved due to optimization of the trim.

۱ - مقدمه

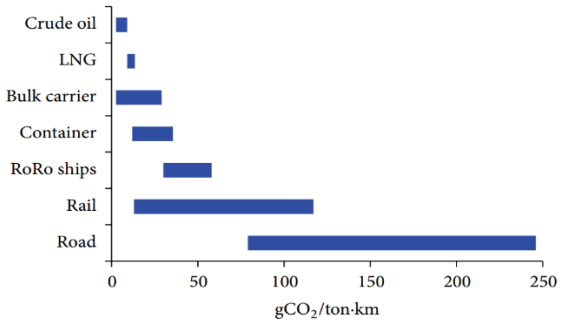
حدود ۹۰ در صد از تجارت‌های جهانی به‌و سیله ک شتی‌ها از طریق صنعت دریایی انجام می شود. هزینه سوخت یکی از بخش‌های مهم و تأثیرگذار در هزینه‌های شـــناورها اســـت. مصـــرف ســـوخت در شناورهای بزرگ در حدود۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ لیتر ساعت می‌ر سد و با توجه به این‌که به‌طور متو سط سرانه م صرف انرژی برای هر نفر در ایران در سال ۱۳۹۰ معادل ۳۰۰۰ لیتر نفت سفید بوده است، مصرف سوخت یک کشتی در یک ساعت بیش از مصرف سوخت یک سال

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

یک خانواده است [۱]. هزینه سوخت یک کشتی که ۲۰ ساعت در طول روز به فعالیت مشغول است در مرتبه میلیون دلار برای یک سال کاری خواهد بود. بر این اساس حتی تغییرات کوچک باعث کاهش مصرف سوخت تأثیرات چشم‌گیری داشته و نتایج قابل‌ملاحظه به دنبال خواهد داشت. به‌نحوی‌که کاهش تنها ۱ درصدی مصرف سوخت می‌تواند باعث صرفه‌جویی ۵۰هزار دلاری برای فله‌برهای متوسط و ۳۰۰ هزار دلار برای کانتینر برهای بزرگ در سال را حاصل شود[۳].

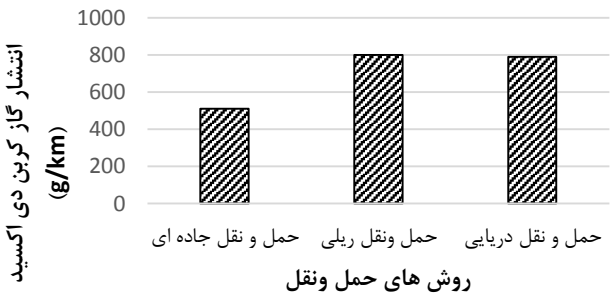
مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار گازهای آلاینده در محیط زیست شده است. آمار نشان می‌دهد که انتشار گوگرد بین سال‌های ۱۹۹۰تا ۲۰۲۰ با ۲ درصد افزایش از ۶۴/۶ میلیون تن به ۶۶/۱ میلیون تن خواهد رسید. همچنین انتشار ازت و کربن بین سال‌های مذکور به ترتیب با ۱۳درصد افزایش از ۲۴میلیون تن به ۲۷ میلیون تن و با ۴۲ درصد افزایش از ۵/۶ گیگا تن به ۸/۳۷ گیگا تن برسد که به‌این‌ترتیب با افزایش میزان آلاینده‌ها، محیط زیست بیشتر در معرض آسیب قرار خواهد گرفت[۲].

شکل۱ میزان انتشار گاز CO_2 توسط وسایل نقلیه ریلی، جاده‌ای و برخی از انواع شناورها را در سال ۲۰۱۴ در سطح جهانی نشان می‌دهد. در این نمودار، میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید برحسب گرم به ازای جابجایی هر تن بار به مسافت یک کیلومتر نشان داده‌شده است.



شکل ۱- میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید توسط وسایل نقلیه مختلف برحسب گرم[۴].

نمودار شکل۲ نیز میزان این انتشار را برای شناورهای کانتینربر، کامیون‌ها و قطارهای کانتینربر با توجه به ظرفیت حمل‌ونقل آن‌ها در سال ۲۰۱۴ را نشان داده است.



شکل۲- میزان انتشار کربن دی‌اکسید توسط وسایل نقلیه کانتینربر[۴].

مشاهده خواهد شد که اطلاعات نشان داده شده در شکل ۲ صرفاً برای شناورهای کانینربر بوده و در مجموع برای سایر شناورها نیز می‌تواند این میزان تولید آلودگی بسیار چشم‌گیرتر باشد[۴]. و کاهش مصرف سوخت نیز تأثیر به سزایی در کاهش تولید آلودگی خواهد داشت.

به‌منظور کاهش مصرف سوخت و بهسنه سازی کشتی ها تلاش‌ها و تحقیقات زیادی پژوهش صورت گرفته است. شرکت ABB مجموعه کاملی از محصولات نرم‌افزاری تولید نموده است که می‌تواند مصرف سوخت کشتی را به‌طور بی‌سابقه‌ای تا ۲۰ درصد کاهش دهند [۸]. سونارسی در سال ۲۰۱۵ به شبیه‌سازی موتور شناور، دور موتور و انتقال قدرت به شفت و پروانه پرداخت و با مدل‌سازی ریاضی موتور و پروانه نرخ مصرف سوخت، دور موتور متناسب، نیروی تراست و گشتاور پروانه برای دستیابی به‌سرعت موردنظر شناور را تخمین زده است [۶]. ادوارد کی نام[۱] و رابرت جینلی[۲] در آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، گزارشی تحت عنوان مدلسازی مصرف وسایل نقلیه متعارف و پیشرفته و برآورد فیزیکی نرخ انتشار آلایندگی آن‌ها در سال۲۰۰۵ پرداختند. در این مطالعه مصرف سوخت موتور سیکلت‌ها، موتورهای دیزل با سوخت سنگین، موتورهای احتراق داخلی، وسایل نقلیه هیبریدی و هیدروژنی را مورد بررسی قرارداده اند [۷] ونگ گوان و همکاران در سال ۲۰۱۵ مقاله‌ای تحت عنوان تحلیل عملکرد موتور دو زمانه دریایی شامل توربوشارژر کات-اوت[۳] با استفاده از مدل صفر بعدی در مجله انرژی منتشر نمودند. در این پژوهش توروبوشارژ همراه با سیلندر موتور به صورت مدولار در محیط متلب، مدل سازی شده است [۵]. سلما شرباز[۴] و همکارش ون‌یانگ دوان[۵] از دانشگاه هاربین چین در زمینه بهینه‌سازی تریم شناور فعالیت کرده و مقاله‌ای تحت عنوان بررسی تأثیر تریم بر روی مقاومت یک شناور کانتینربر در سال ۲۰۱۴ در مجله Scientific World منتشر نموده است. ایشان در مقاله خود بدنه یک شناور کانتینربر (KSC) را در تریم‌های مثبت و منفی به صورت پایا توسط نرم‌افزار و تحلیل کامپیوتری موردبررسی قرار داده است. در این مقاله نمودارهای مقاومت شناور برای یک عدد فرود مشخص و تریم های مثبت و منفی از ۰/۱- تا ۰/۱+ تحلیل نموده و نمودار تغییرات مقاومت شناور را استخراج نموده است [۴].

اغلب تحقیقات و پژوهش هایی که تا کنون انجام شده است، در راستای بهینه سازی طرح های اولیه و پایه ای برای شناور ها و سیستم رانش بوده است تا با این کار میزان مصرف سوخت را کاهش داده و پس از یک طراحی بهینه، سیستم رانش متناسب با نیروهای مقاوم حرکتی انتخاب و بر روی شناور نصب شود. در این پژوهش هدف بررسی اثرات تریم و آبخور جهت کاهش مصرف سوخت در شناورهای تجاری و تنظیم مصرف سوخت با کنترل موتور از طریق مدل‌سازی سیستم رانش و ارتباط آن با بدنه است.

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

۲ - روش‌های کاهش مصـــرف ســـوخت در زمان بهره‌برداری شناورها

شناورها ازنقطه‌نظر کاربری به دسته‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند که با توجه به فعالیت آن‌ها مصرف سوخت نیز متفاوت خواهد بود اما نکته قابل‌بررسی در همه آن‌ها اهمیت کاهش مصرف سوخت است. طبق قوانین موسسه رده‌بندی ABS کنترل سفر دریای از طریق برنامه‌ریزی زمان حرکت شناور و کنترل مسیر دریانوردی به‌صورت لحظه‌ای می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش مصرف سوخت داشته باشد که این مدیریت با استفاده از سازمان‌دهی چندین موضوع ازجمله موارد زیر است[۸].

۱- سرعت بهینه در سفر دریایی
۲- مسیر بهینه سفر[۶]
۳- تریم یا درفت بهینه
۴- زبری سطح
۵- بهینه‌سازی پروانه و سیستم رانش

۳- بهینه سازی تریم

مقاومت هیدرودینامیکی بدنه شناورها اغلب در دو یا یک آبخور با تریم صفر بهینه‌سازی می‌شوند تا کمترین مقاومت را در زمان حرکت داشته باشند. به‌طوری‌که در زمان بارگیری کامل شناور، سینه و پاشنه شناور به نحوی باشد تا رژیم جریان کم‌ترین مقاومت را روی بدنه شناور ایجاد کند. تغییرات کوچک آبخور می‌تواند باعث برهم زدن رژیم جریان و افزایش مقاومت و درنتیجه افزایش مصرف سوخت شود. گاهی اوقات حتی در حالت وزن سبک شناور اگر درتریم نادرستی حرکت کند، مقاومت و مصرف سوخت از وقتی‌که شناور به‌صورت کامل بارگیری کرده است بیش‌تر می‌شود[۸]. برای یک سفر ممکن است کالای بارگیری شده به نحوی باشد که شناور به‌اندازه کافی بارگیری نکند و وزن موردنظر آبخور طراحی را ایجاد نکرده و مجبور شود که در آبخوری متفاوت از آبخور طراحی حرکت کند. در این حالت‌ها نحوه توزیع بار، آب بالاست و سایر مواد مصرفی نیز بر تریم شناور تأثیر می‌گذارند که این مورد باید توسط افسران عرشه و خدمه شناور کنترل شوند تا بتوانند با استفاده از آب بالاست شناور را درتریم موردنظر نگه‌دارند. امروزه برای محاسبه‌تریم بهینه شناور در آبخور مورد موردنظر ابزارهای زیادی استفاده می‌شود که این ابزارها و نرم‌افزارها صرفاً برای یک شناور موردبررسی قرارگرفته و توسط آزمایش یا حل عددی نمودارهایی برای بهترین حالت تریم شناور بر اساس آبخور استخراج نموده و در شناور مربوطه مورداستفاده قرار می‌دهند[۸].

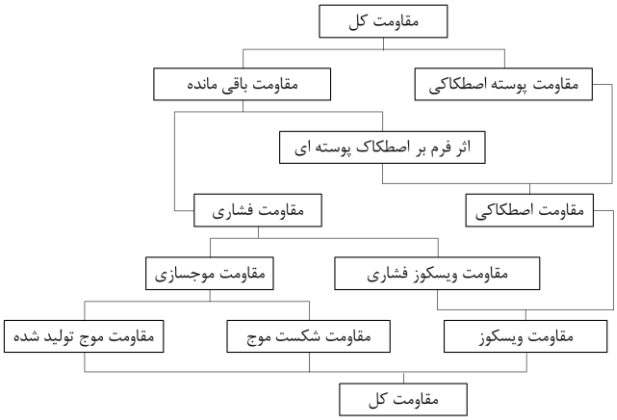
۴-محاسبه مقاومت شناورها

نیرویی که از طرف سیال بر شناور وارد می‌شود و در برابر حرکت شناور ایستادگی می‌کند را مقاومت شناور گویند. فرمول عمومی محاسبه مقاومت برای یک جسم در حال حرکت در سیال به‌صورت رابطه ۱ است[۹].

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \qquad (۱)$$

که در این فرمول ρ چگالی سیالی است که جسم در آن حرکت می‌کند، A سطح خیس شده جسم توسط سیال یا سطح در معرض سیال موردنظر بوده، V سرعت حرکت جسم نسبت سیال بوده و C_D ضریب مقاومت است.

مقاومت، انواع مختلفی دارد که در شکل ۳ نشان داده‌شده است



شکل ۳- انواع مقاومت در شناورها[۱۰].

یکی از مهم‌ترین انواع مقاومت در بحث شناورها مقاومت اصطکاکی است. که ضریب این مقاومت در شناورها معمولاً با استفاده از رابطه تجربی ۲ محاسبه می‌شود که این فرمول معروف به ITTC-57 است[۹].

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} \mathrm{R}_e - 2)^2} \qquad (۲)$$

R_e در رابطه ۲ معرف عدد رینولدز جریان است که عدد رینولدز نیز با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{R}_e = \frac{Vl}{\nu} \qquad (۳)$$

در رابطه ۳ پارامترهای V، l، ν به ترتیب بیان‌گر سرعت حرکت شناور، طول شناور و مقدار ویسکوزیته(گرانروی) سیال هستند. مقاومت اصطکاکی در شناورهای مختلف متفاوت بوده و به نوع بدنه و آبخور وابسته است که ۳۰ تا ۹۰ درصد مقاومت کل را شامل می‌شود.[۵].

برای یک شناور که با سرعت ثابت در آب آرام حرکت می‌کند، زمانی که سرعت شناور ثابت است، طبق قانون دوم نیوتن نیروی تراست و نیروی مقاومت شناور برابر است.

در معادله ۴، T نیروی تراست و R نیروی مقاومت شناور است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

با توجه مفهوم قانون دوم نیوتن، واضح است که با کاهش مقاومت شناور، نیروی تراست موردنیاز برای حرکت شناور در یک سرعت ثابت نیز کاهش می‌یابد. درنتیجه نیروی محرکه تحت بار سبک‌تری کارکرده و میزان مصرف سوخت کاهش می‌یابد[۱۱].

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad \Rightarrow T - R = ma = 0 \qquad (۴)$$

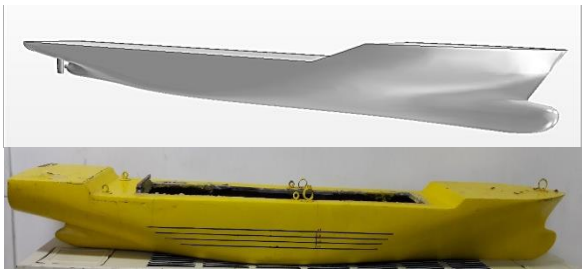
۵-محاسبه نیروی مقاومت شناور مدل

هدف از انجام این بخش تعیین مؤلفه‌های مختلف نیروی مقاومت بدنه شناور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایش تجربی است؛ تا بتوان با استفاده از آن نیروی تراست لازم از جانب پروانه را نیز تعیین نمود. در این خصوص مدل شناور کانتینربر KCS انتخاب گردیده است که دارای ابعاد و اندازه‌هایی مطابق با جدول۱ است.

جدول۱- مشخصات ابعادی شناور مدل KCS و نمونه اصلی

پارامتر	ابعاد مدل	ابعاد شناور
طول(متر)	۱/۱۸۵	۲۳۲/۵
عرض(متر)	۰/۱۶	۳۲/۲
آبخور(متر)	۰/۰۵۵	۱۰/۸
سطح خیس	۰/۲۵	۹۵۳۰
چگالی آب(kg/m^3)	۱۰۰۰	۱۰۲۵
ضریب بلوکی	۰/۶۵۱۰	۰/۶۵۱۰

شکل ۴ نیز نمای از بدنه ساخته شده جهت آزمایش تجربی و نمایی از آن در نرم‌افزار star ccm+ را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مدل شناور KCS

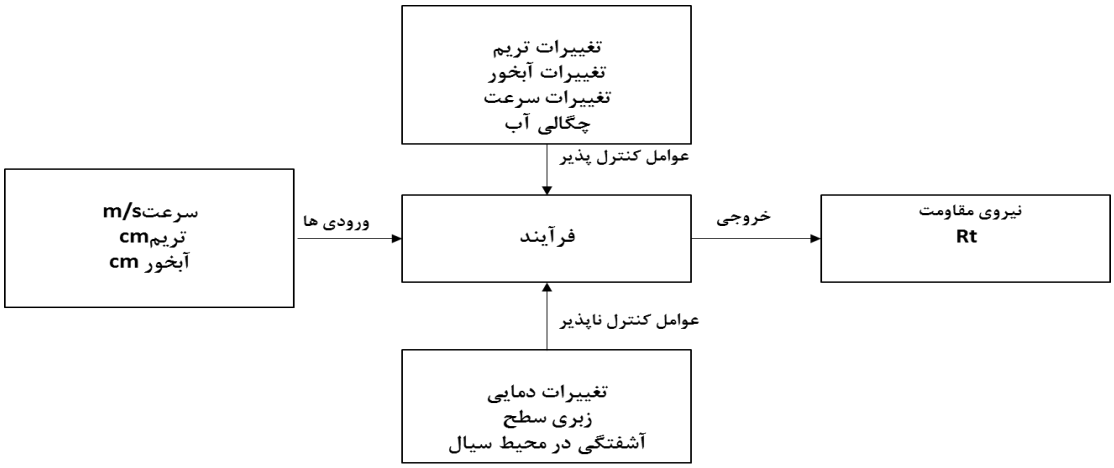
حال با توجه به محاسبه مقاومت شناور KCS به روش‌های عددی و تجربی، نیازمند برنامه‌ریزی دقیقی از تحلیل‌ها و آزمایش‌ها بوده تا بتوان تغییرات مقاومت شناور در آبخور، تریم و سرعت‌های مختلف محاسبه نمود. این فرآیند به‌صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده‌شده است

پارامترهای متغیر در این بخش از آزمایش عبارت‌اند از سرعت، آبخور و تریم که در جدول ۲ محدوده تغییرات هر یک از این متغییرها ارائه‌شده است. با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و به روش CCD-RMS، آزمایش‌ها در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت طراحی گردید. این آزمایش‌ها نیز با توجه به تعداد پارامترهای متغیر شامل ۲۰ تست، به مرکزیت تریم صفر، آبخور ۵cm و سرعت ۰/۶۸۱ m/s تعریف شده است.

جدول ۲- بازه تغییرات متغییرهای ورودی

draft(cm)	trim(cm)	V(m/s)
۴ < D < ۶	-۱/۶ < t < ۱/۶	۰/۴۰۹< V <۰/۹۵۴

تعداد و شرایط آزمایش‌هایی که می‌بایست انجام پذیرد طبق طراحی آزمایش‌ها به صورت جدول۳ خواهد بود. در این جدول run شماره آزمایش‌ها بوده که نشان دهنده ۲۰ آزمایش است.



شکل ۵- فرآیند طراحی آزمایش

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

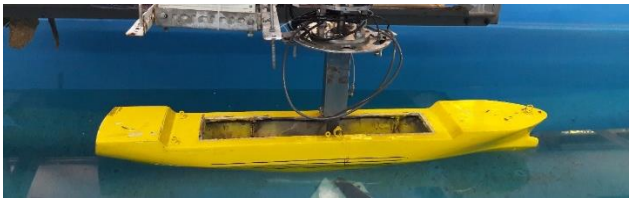
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

جدول ۳- جدل آزمایش‌های طراحی‌شده در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

run	speed(m)	trim(cm)	draft(cm)
۱	۰/۶۸۱۵	۰	۵
۲	۰/۸۴۳۵۲۹	۰/۹۵۱	۴/۴۰۴۵
۳	۰/۵۱۹۴۷۱	-۰/۹۵۱	۵/۵۹۴۶
۴	۰/۵۱۹۴۷۱	۰/۹۵۱	۴/۴۰۴۵
۵	۰/۶۸۱۵	۰	۵
۶	۰/۸۴۳۵۲۹	-۰/۹۵۱	۴/۴۰۴۵
۷	۰/۶۸۱۵	۰	۴
۸	۰/۶۸۱۵	۰	۶
۹	۰/۶۸۱۵	۰	۵
۱۰	۰/۶۸۱۵	-۱/۶	۵
۱۱	۰/۶۸۱۵	۰	۵
۱۲	۰/۶۸۱۵	۱/۶	۵
۱۳	۰/۴۰۹	۰	۵
۱۴	۰/۵۱۹۴۷۱	-۰/۹۵۱	۴/۴۰۴۵
۱۵	۰/۸۴۳۵۲۹	-۰/۹۵۱	۵/۵۹۴۶
۱۶	۰/۸۴۳۵۲۹	۰/۹۵۱	۵/۵۹۴۶
۱۷	۰/۵۱۹۴۷۱	۰/۹۵۱	۵/۵۹۴۶
۱۸	۰/۶۸۱۵	۰	۵
۱۹	۰/۹۵۴	۰	۵
۲۰	۰/۶۸۱۵	۰	۵

۵-۱. آزمایش تجربی

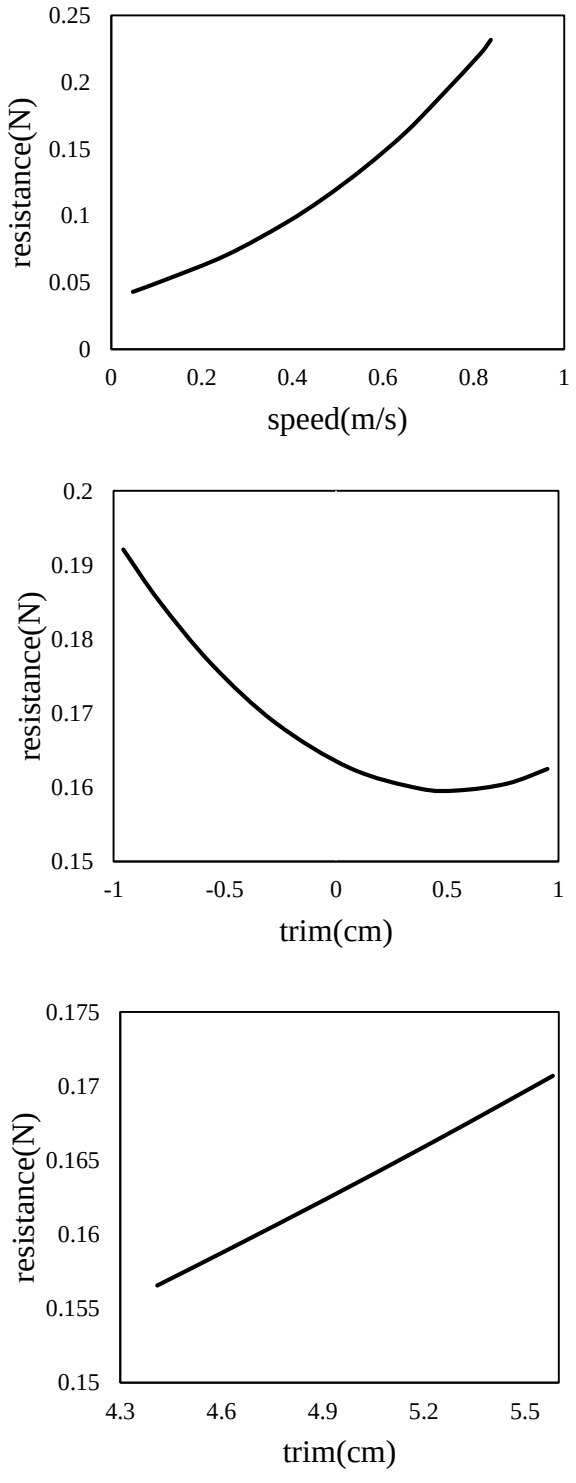
جهت انجام آزمایش‌ها از حوضچه کشش دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است شناور مدل در نقطه مرکز ثقل به دینامومتر متصل شده و درجات آزادی آن مهار گردید تا بتوان شناور را در تریم موردنظر قرار داده و مقاومت بدنه را در آبخور مشخص و در سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری نمود.



شکل ۶- نصب شناور به دینامومتر

با توجه به برنامه تست‌های مشخص‌شده در روش طراحی آزمایش در جدول ۳، آزمایش‌ها انجام شده است.

در شکل‌های ۷ (الف) تا (ج) نیز چگونگی تغییرات مقاومت بدنه با سرعت، تغییرات تریم و تغییرات آبخور نشان داده‌شده است. همان‌طور که از منحنی‌ها نیز مشخص است. با افزایش سرعت مقاومت شناور افزایش‌یافته است. نتایج حاصل از تست نشان می‌دهد که الزاماً در تریم صفر مقاومت کینه نبوده و در تریم‌های مثبت کاهش مقاومت نتیجه شده است. تغییرات مقاومت با آبخور نیز رفتاری تقریباً خطی داشته و با افزایش آبخور، مقاومت شناور نیز افزایش‌یافته است.



شکل۷- الف) تغییرات مقاومت برحسب سرعت ب) تغییرات مقاومت برحسب تریم ج) تغییرات مقاومت برحسب آبخور

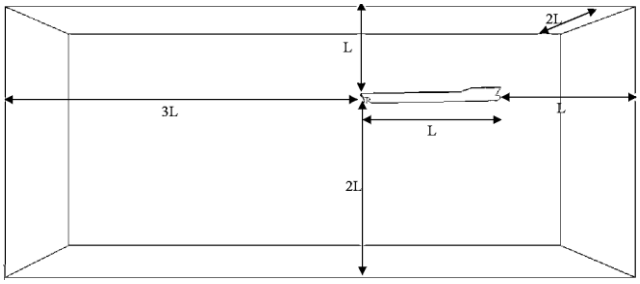
۵-۲-شبیه‌سازی در نرم‌افزار Star ccm+

برای انجام شبیه‌سازی، جئومتری مدل شناور وارد نرم‌افزار شده و یک میدان محاسباتی با عرض در حدود ۴ برابر طول شناور، طول و ارتفاع میدان محاسباتی نیز به ترتیب برابر ۵ و۳ برابر طول مدل،

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

مطابق با شکل۸ در نظر گرفته‌شده است. ابعاد میدان تحلیل متناسب با ابعاد بدنه مدل براساس پیشنهاد پژوهش های پیشین و ممانعت از اثر دیواره ها بر تحلیل انتخاب شده‌اند [۴].



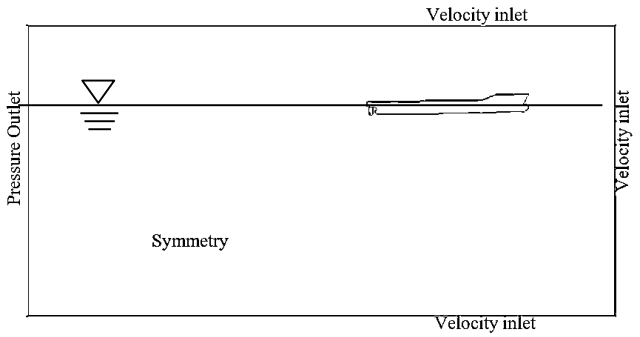
شکل ۸- میدان محاسباتی برای انجام شبیه‌سازی

پس از آماده‌سازی و ایجاد توپولوژی تحلیل، فیزیک حاکم بر مسئله و شرایط مرزی مشخص خواهد شد. فیزیک مسئله در اصل متغیرهای اساسی شبیه‌سازی همچون فشار، سرعت، دما و... را تعریف می‌کند و همچنین بر اینکه چه فرمول‌های ریاضی بر مسئله حاکم باشند نیز تأثیر می‌گذارد.

شبیه‌سازی جریان مقاومت یک مسئله چند فیزیکی گذرا بوده که به وصورت دوفازی انجام شده است.

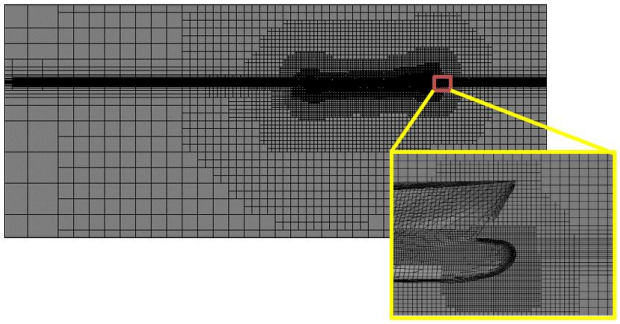
۵-۳-شرایط مرزی و شبکه‌بندی میدان محاسباتی

برای انجام امر شبیه‌سازی نیاز است تا مرزهای دامنه محاسبات مشخص و شرایط اولیه بررسی‌شده بر روی آن‌ها اعمال گردد تا فرایند تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی شروع و به نتیجه برسد. بر این اساس وجوه دامنه محاسبات به‌عنوان مرز دامنه نام‌گذاری و شرط-گذاری شده‌اند که در شکل ۸ نشان‌دهنده این مسئله است.



شکل ۸- مرزهای دامنه محاسباتی

پس از مشخص شدن فیزیک مسئله، میدان حاکم بر شبیه‌سازی با توجه به اهمیت رفتار سیال و تأثیر آن بر مقاومت به شبکه‌های مختلف تقسیم‌بندی خواهد شد. شکل ۹ مدل و شبکه بندی دامنه محاسبات را نشان می‌دهد.

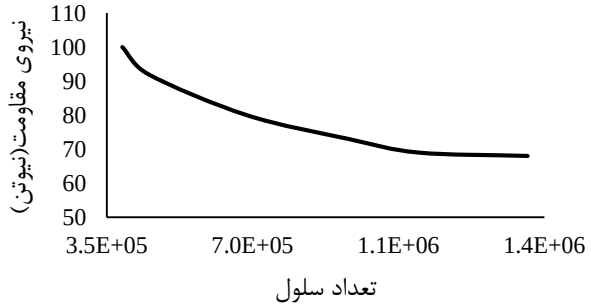


شکل ۹- شبکه بندی

۵-۴-عدم وابستگی به مش

جهت صحت سنجی این شبیه‌سازی با تغییر اندازه سلول‌ها، در شرایط و فیزیک توضیح داده‌شده در بخش قبل ابعاد و اندازه سلول‌ها برای شناور با تغییر Base size، تغییر داده‌شده است تا کمترین تعداد سلولی که بعدازآن، نتیجه برای این میدان محاسباتی ثابت است مشخص شود و سایر شبیه‌سازی‌ها با همان تعداد سلول انجام شود و از این طریق مقدار خطای شبیه‌سازی کمینه شود.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات نیروی درگ برحسب تعداد سلول های مختلف انجام پذیرفته نشان می‌دهد. برای این امر شبیه‌سازی برای مدل شناور در نرم‌افزار برای هفت سلول بندی مختلف انجام پذیرفت و همان‌طور که از شکل نیز مشخص است، بعد آزمون‌وخطای پنجم، با افزایش تعداد سلول‌ها تغییر چشمگیری درنتیجه مشاهده نشده است. بنابراین تعداد تقریبی ۱,۱۰۰,۰۰۰ سلول برای این شبیه‌سازی می‌تواند مثمر ثمر واقع‌شده و خطای کمتری را در برداشته است.



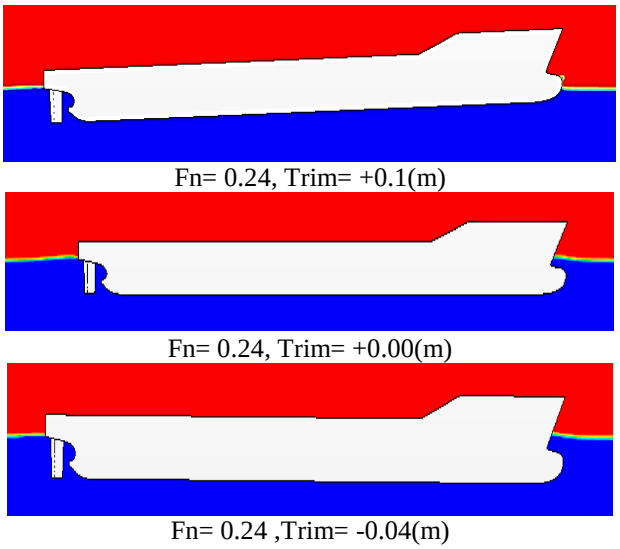
شکل ۱۰- منحنی عدم وابستگی شبیه‌سازی به شبکه بندی

۵-۵-شبیه‌سازی

پس از انجام فرآیندهای پیش‌پردازش و مشخص شدن برنامه راه، شبیه‌سازی برای مدل شناور KCS در عدد فرود۰/۲۲۷ و آبخور طراحی در بازه تریم ۰/۱- تا ۰/۱+ متر با گام‌های ۰/۰۲ متری انجام پذیرفته است. شکل۱۱ برخی ازتریم‌های اعمال شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

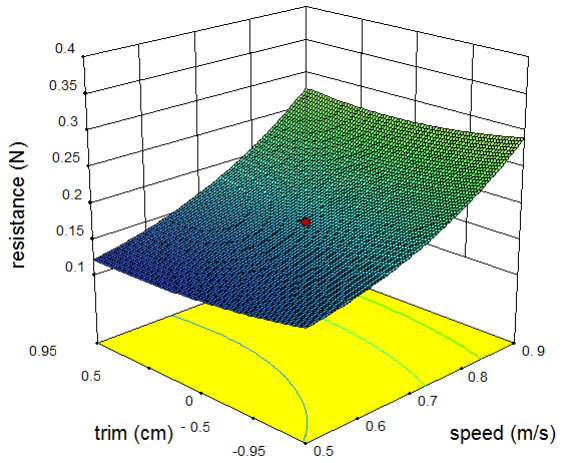
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

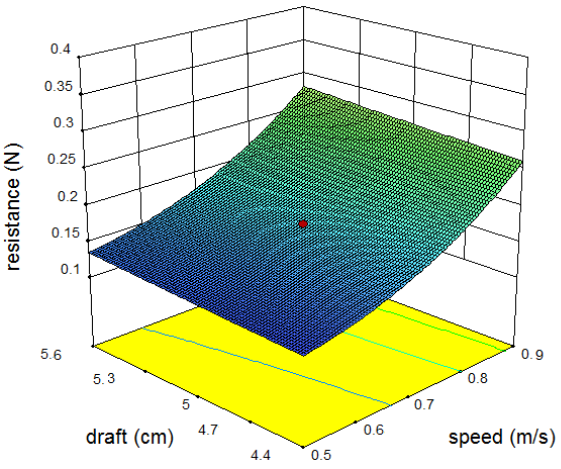


شکل ۱۱- نمایش تریم های مختلف

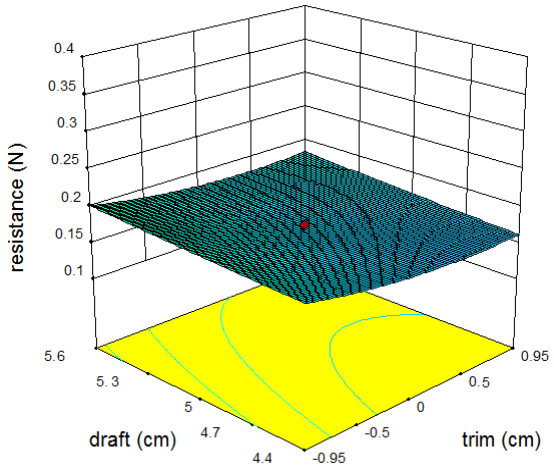
در شکل۱۲ (الف)،(ب) و(ج) نیز تغییرات مقاومت به‌صورت همزمان و دو به دو با پارامترهای سرعت، تریم و آبخور به‌صورت سه بعدی نشان داده‌شده است.



(الف)



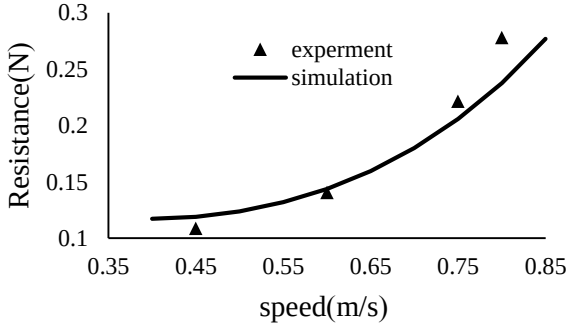
(ب)



(ج)

شکل ۱۲- نمودار سه بعدی اثر پارامترها بر مقاومت

برای اطمینان از نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایش تجربی نیز در آبخور ۵ سانتی‌متر و تریم صفر در نمودار شکل ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند و مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از تست تجربی و عددی در این روش از تحلیل نتایج تا ۱۰ درصد دارای خطا است.



شکل۱۳- مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی درتریم صفر و آبخور ۵/۵cm

۵-۶-تشابه مدل و کشتی اصلی با استفاده از روش ITTC 1957

با انجام آزمایش یا حل عددی منحنی مقاومت کل مدل برای تریم‌های مختلف در یک سرعت ثابت به دست خواهد آمد که با استفاده از قوانین تشابه می‌توان نتایج مدل را به کشتی واقعی تعمیم داد. برای این کار روش‌های مختلفی وجود دارد که عبارتنداز: ۱-روش ITTC 1957 ۲-روش فرود ۳-روش هافز-پروهاسکا ۴-روش ITTC 1978 . در این مقاله از روش ITTC 1957 برای تعمیم نتایج مدل به کشتی واقعی استفاده گردیده است.

در این روش مقاومت کل به دو مؤلفه مقاومت اصطکاکی و مقاومت باقی‌مانده تقسیم می‌شود که در رابطه ۵ نشان داده‌شده است[۱۰].

$$R_T = R_F + R_R \qquad (۵)$$

برای مدل بین ضرایب مقاومت رابطه ۶ برقرار است:

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

$$C_{Tm} = C_{Fm} + C_{Rm} \quad (۶)$$

و برای کشتی بین ضرایب رابطه ۷ برقرار است:

$$C_{Ts} = C_{Fs} + C_{Rs} + C_A \quad (۷)$$

C_A ضریب تصحیح ناصافی بدنه کشتی است که باید به ضریب مقاومت کل کشتی اضافه گردد. برای کشتی‌های نو مقدار آن حدوداً ۴درصد و برای کشتی‌های کارکرده در حدود ۱۰ درصد مقاومت اصطکاکی است.

با توجه به تشابه فرود، ضریب مقاومت باقی‌مانده مدل و کشتی برابر است. درنتیجه:

$$C_{Rs} = C_{Rm} = C_R \quad (۸)$$

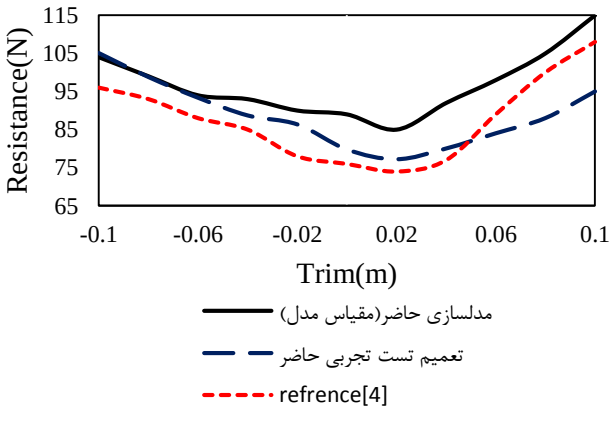
بنابراین ضریب مقاومت اصطکاکی نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردیده و با توجه به رابط ۵ تا ۸ مقاومت کل کشتی با جایگذاری در رابطه ۱ محاسبه خواهد شد[۱۲]. بنابراین مقاومت شناور اصلی با توجه به نتایج مقاومتR مدل به صورت رابطه ۹ بر حسب سرعتV، آبخورD و تریمT نتیجه می شود.

$$R = 2200 - 482V - 135T - 18D + 5.6VT + 20T^2 \quad (۹)$$

بنابراین می توان در هر سرعت و آبخور تریم بهینه را از نقطه نظر کمینه مقاومت محاسبه نمود و با ورودی دادن به سیستم رانش متناسب با آن رفتار موتور و پروانه شناور را رصد نموده و تغییرات مصرف ویژه سوخت ترمزی شناور را گزارش داد.

۵-۷-اعتبار سنجی شبیه سازی

نتایج حاصل از شبیه سازی حاضر و همچنین آزمایش تجربی به مدل۷/۳۵۷ متری تعمیم داده شده و با نتایج مرجع [۴] مقایسه گردیده و درشکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایش تجربی

۶-مدل‌سازی سیستم رانش

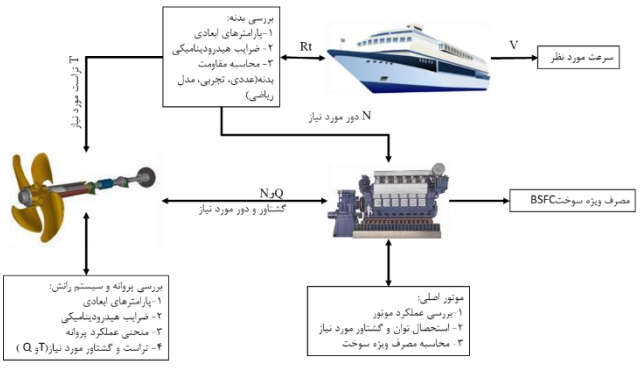
مدل ریاضی سامانه رانش کشتی در محیط محاسباتی سیمولینک نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و اجرا گردیده است که بخش‌های مختلف این مدل‌سازی عبارتند از:

- موتور اصلی کشتی با استفاده از روش مدل مقدار متوسط سیکل، همراه با معادلات دیفرانسیل مربوطه برای محاسبه سرعت میل‌لنگ موتور و سرعت شفت توربوشارژر مدل‌سازی شده است.
- فرآیندهای ترمودینامیکی و دینامیک جریان در اجزای موتور برای محاسبه پارامترهای مختلف موتور موردتوجه قرارگرفته‌اند.
- با استفاده از بقای مومنتوم زاویه‌ای و تعادل انرژی سیستم انتقال قدرت در ترکیب با راندمان سیستم انتقال قدرت برای محاسبه سرعت میل‌لنگ موتور استفاده‌شده است.
- با توجه به معادلات حاکم و تجربی پروانه برای محاسبه گشتاور و نیروی تراست به کار گرفته‌شده است.
- معادلات دیفرانسیل استخراج‌شده با استفاده از دینامیک حرکت رو به جلو شناور جهت محاسبه سرعت به کار گرفته‌شده‌اند.

در نهایت برای شبیه‌سازی سامانه رانش یک کشتی تجاری و پارامترهای عملکردی مربوط استفاده گردیده است.

مدل‌سازی عددی سیستم رانش

برای مدل‌سازی عددی شناور و سیستم رانش ابتدا کلیه بخش‌های مرتبط با مدل‌سازی معرفی و چگونگی ارتباط هر بخش با بخش دیگر به‌صورت بلوک دیاگرام شکل ۱۵ نشان داده‌شده است.



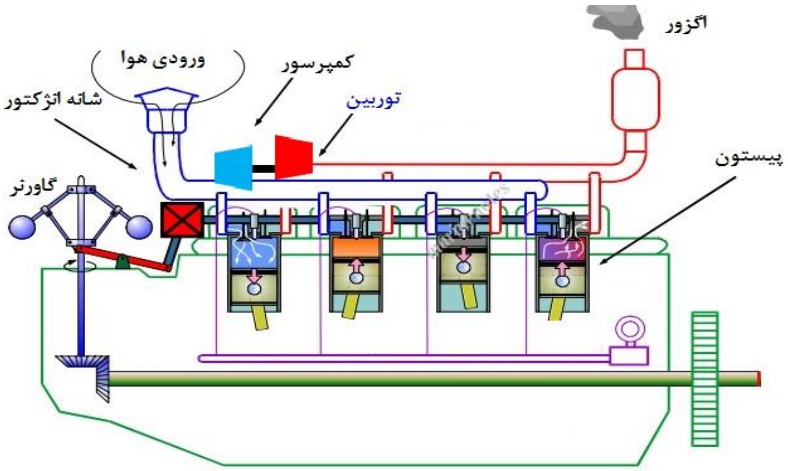
شکل ۱۵- بلوک دیاگرام بخش‌های مختلف جهت مدل‌سازی

همان‌گونه که در شکل ۱۵ نیز نشان داده‌شده است بخش‌های مختلف مدل‌سازی شامل:

بدنه(دینامیک حرکت رو به جلو)، سیستم انتقال قدرت(موتور) و پروانه بوده که مدل‌سازی سیستم انتقال قدرت به‌خودی‌خود شامل مدل‌سازی گاورنر و توربوشارژر موتور جهت مشخص شدن میزان

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]



شکل ۱۶- ارتباط اجزای موتور

مصرف ویژه سوخت است. سپس کلیه این مدل‌ها با یکدیگر کوپل خواهد شد.

۶-۱-مدل سازی موتور

موتور کشتی بر اساس فرآیندهایی که در بخش‌های مختلف آن اتفاق می‌افتد مدل‌سازی شده است. عوامل مختلفی در موتورهای احتراق داخلی دو زمانه و چهارزمانه دریای بر مصرف سوخت تاثیرگذار خواهند بود که عبارتند از:

۱- نحوه عملکرد گاورنر(شکل ۱۶)
۲- مجموعه توربو شارژر وچگونگی احتراق و راندمان آن
۳- نحوه عملکرد سیستم سوخت رسانی و گرانروی
۴- چگونگی پاشش سوخت و زمان آن
۵- سیستم خنک کاری و دمای آب دریا
۶- عملکرد سیستم روغن کاری

دو عامل ابتدایی یاد شده در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته و مدل سازی شده‌اند. درشکل۱۶ شامل سیلندرهای موتور، گاورنر و توربوشارژر و ارتباط بین این اجزا است. هوای گرم خروجی از اگزوز منجر به چرخش توربین شده و با توجه به ارتباط مستقیم بین توربین و کمپرسور هوای تازه ابتدا در داخل محفظه اسکونج فشرده شده و به داخل محفظه وارد می‌شود. پس از آن با توجه به دور موتور، گاورنر موقعیت شانه انژکتور را به نحوی تغییر می‌دهد تا متناسب با دور موتور، سوخت کافی به محفظه وارد و با هوای فشرده شده در مخلوط و احتراق صورت گیرد[۱۱].

۶-۲-مدل‌سازی پروانه

برای پروانه کشتی خواه به‌صورت گام ثابت باشد خواه به‌صورت گام قابل‌کنترل، گشتاور و نیروی تراست آن با استفاده از ضرایب بدون بعد به ترتیب به‌صورت روابط ۱۱و ۱۲محاسبه می‌شوند:

$$Q_p = K_Q \rho_{sw} N_P^2 D_P^5 \qquad (۱۰)$$

$$T_p = K_T \rho_{sw} N_P^2 D_P^4 \qquad (۱۱)$$

ضرایب بدون بعد گشتاور و تراست از معادلات چندجمله‌ای مربوط به سری‌های پروانه واگنینگن نوع B به‌صورت روابط۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند[۱۳]:

$$K_Q = \sum C Q_{s,t,u,v} J^s (\mathrm{P/D_P})^t (\mathrm{A_E/A_o})^u Z_P^v \qquad (۱۲)$$

$$K_T = \sum C T_{s,t,u,v} J^s (\mathrm{P/D_P})^t (\mathrm{A_E/A_o})^u Z_P^v \qquad (۱۳)$$

در روابط بالا تعداد تیغه‌های پروانه، Z_P، ضریب سطح دیسک، $\mathrm{A_E/A_o}$، نسبت گام به قطر، $\mathrm{P/D_P}$ ، ضریب پیشروی پروانه، J ، به‌عنوان ورودی‌های معادله موردنیاز می‌باشند که برای یک پروانه انتخاب‌شده دو مورد اول ثابت می‌باشند. علاوه بر این برای پروانه‌ای با گام ثابت نسبت گام به قطر نیز مقدار ثابت خواهد بود. برای پروانه با گام قابل‌کنترل، مقادیر $\mathrm{P/D_P}$ می‌توانند بر اساس یک فهرست از پیش تعیین‌شده و یا یک سیستم کنترلی تغییر نمایند. عدد پیشروی پروانه، J، به‌سرعت پیشروی V_A (سرعت رسیدن آب به پروانه)، سرعت دورانی پروانه و قطر پروانه مطابق رابطه ۱۵ بستگی دارد:

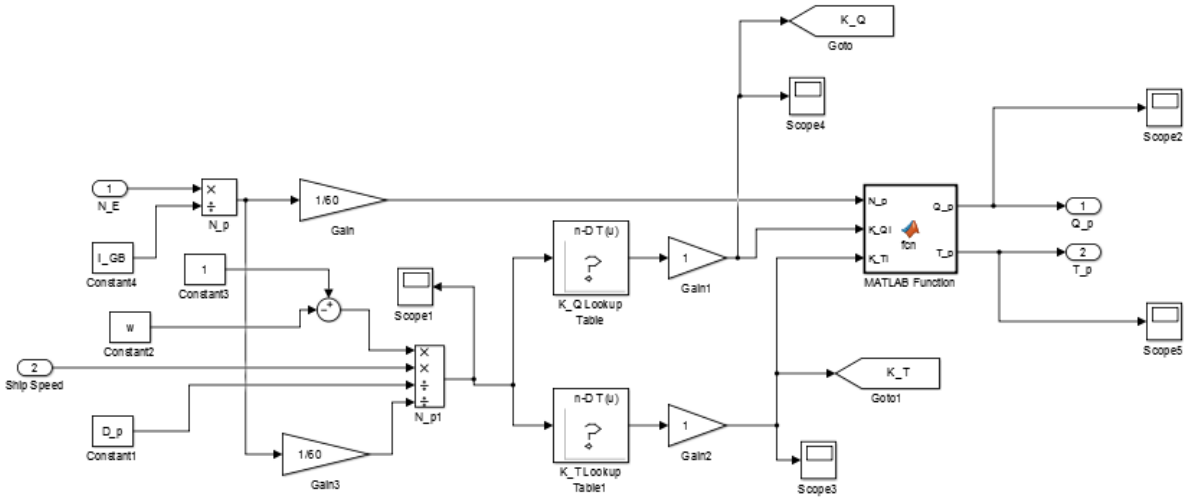
$$J = \frac{V_A}{N_P D_P / 60} \qquad (۱۴)$$

سرعت پیشروی با استفاده از سرعت کشتی و مقدار کسر ویک w ،که مقدار ثابت را در محدوده 0.2 تا 0.45 برای کشتی‌های تک پروانه در برمی‌گیرد قابل‌محاسبه است و از رابطه ۱۵به دست می‌آید:

$$V_A = (1-\mathrm{w})\,\mathrm{V_S} \qquad (۱۵)$$

راندمان آب‌باز پروانه با استفاده از رابطه ۱۷ تعریف‌شده است:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]



شکل ۱۷- شبیه‌سازی سیستم رانش در سیمولینک

$$\eta_0 = K_T J / (\mathrm{K}_Q 2\pi) \qquad (۱۶)$$

سرعت محیطی تیغه پروانه به‌وسیله رابطه۱۸ بیان می‌شود:

$$V_u = 0.7 D_P (\pi \mathrm{N}_P / 60) \qquad (۱۷)$$

نسبت لغزش واقعی پروانه [۱۳]، که به‌عنوان یک پارامتر قابل‌استفاده برای بیان بارگذاری روی پروانه تحت شرایط عملکردی مختلف است به‌وسیله رابطه ۱۹ قابل‌محاسبه است:

$$\mathrm{SR}_R = 1 - \frac{V_A}{P\,\mathrm{N}_P / 60} \qquad (۱۸)$$

در مواردی که تنها هدف مدل‌سازی موتور است، مدل‌سازی پروانه و حرکت کشتی کارآمد نیست و برای محاسبه گشتاور پروانه، Q_p ، استفاده‌شده در رابطه ۱، از قوانین حاکم بر پروانه‌ها استفاده‌شده است. که با استفاده از آن‌ها نرخ ماکسیمم توان پیوسته موتور را طبق رابطه ۲۰ می‌توان محاسبه نمود[۱۳].

$$Q_p = K_P N_E^2 \quad , \quad K_P = \frac{Q_{E.MCR}}{N_{E.MCR}^2} \qquad (۱۹)$$

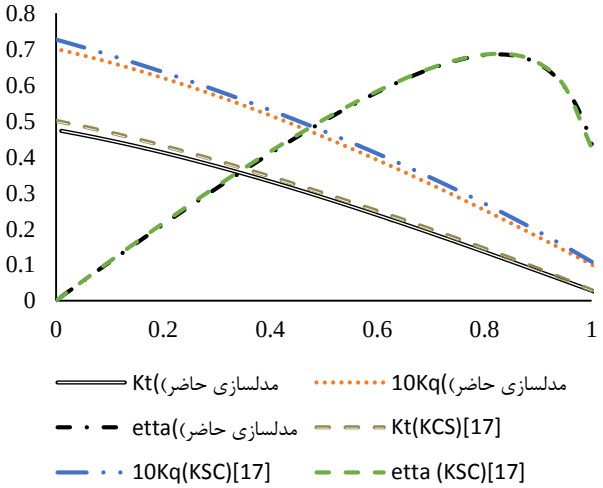
با توجه به روابط ریاضی موجود پروانه سامانه رانش شناور برای یک نوع پروانه گام ثابت، مطابق شکل ۱۷ در نرم‌افزار متلب/سیمولینک مدل‌سازی گردیده است.

با توجه به روابط ریاضی موجود پروانه سامانه رانش شناور برای یک نوع پروانه گام ثابت واگینگن نوعB، که اطلاعات متناسب با بدنه شناور KCS در جدول ۴ نشان داده‌شده است[۱۵].

جدول ۴- اطلاعات پروانه واگینگن نوعB [۱۳].

پارامتر	نماد	مقدار
نسبت گام	$\frac{P}{D}$	۰/۹۹۷
قطر پروانه	D	۷/۹
تعداد پره	Z_P	۵
نسبت سطح	$\frac{A}{A_E} = EAR$	۰/۸

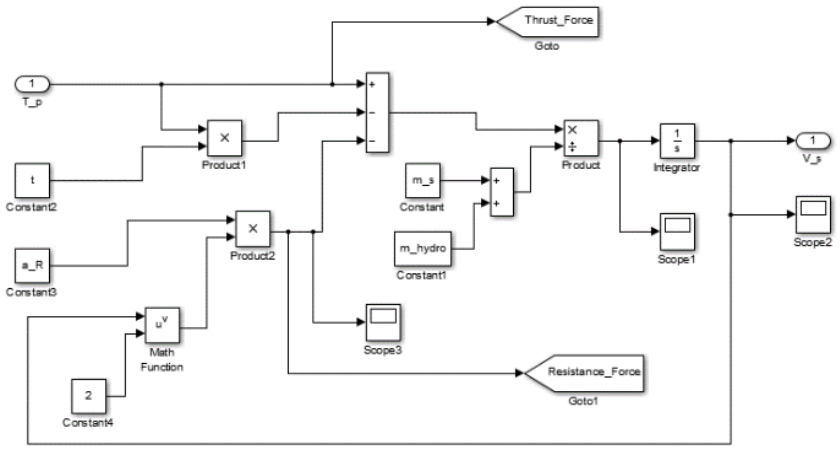
با توجه به ابعاد هندسی پروانه و نوع بدنه KCS با ضریب ویک۰/۶ منحنی عملکرد پروانه برای دورهای مختلف به‌صورت شکل ۱۸خواهد شد. که این نتایج با منحنی عملکرد ارائه شده در پژوهش‌های پیشین برای این پروانه مقایسه شده که دارای ۳ درصد تفاوت است[۱۷].



شکل ۱۸- منحنی عملکرد پروانه KCS

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]



شکل ۱۹- مدل‌سازی حرکت سرج شناور

۶-۳-مدل‌سازی حرکت طولی کشتی

با به‌کارگیری دینامیک سرج کشتی معادله دیفرانسیل رابطه ۲۱ برای محاسبه سرعت طولی کشتی استخراج‌شده است:

$$T_P = F + R_S + (\mathrm{m}_s + \mathrm{m}_{hydro})\frac{dV_s}{dt} \qquad (۲۰)$$

مقاومت کشتی، R_S، به‌عنوان یک تابع مرتبه دوم از سرعت کشتی، V_s ، در نظر گرفته‌شده است. جرم m_s ، که جرم کشتی است حاصل‌ضرب مقدار حجم جابجایی کشتی و چگالی آب دریا است. m_{hydro} یک جرم مجازی اضافه‌شده بوده که ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی ایجادشده در اثر حرکت شتابدار یک جسم در سیال، در محاسبات مورداستفاده قرار می‌گیرد[۱۳]. مقدار کسر نیروی کششی تراست، F، با استفاده از ضریب کسر نیروی کششی، t، به‌صورت رابطه۲۲ داده‌شده است:

$$F = tT_P \qquad (۲۱)$$

ضریب کسر نیروی کششی می‌تواند به‌صورت مقادیر ثابت در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۳برای کشتی‌های تک پروانه [۱۳] و یا به‌صورت تابعی از سرعت کشتی در نظر گرفته‌می‌شود. و این مدل‌سازی بر اساس این روابط مطابق یا شکل ۱۹ در نرم‌افزار متلب سیمولینک انجام‌پذیرفته‌است

۶-۴-پیاده‌سازی مدل سامانه رانش کشتی

مدل ریاضی اجزای سامانه رانش کشتی که در محیط سیمولینک متلب مطابق شکل۲۰ پیاده‌سازی شده است.

الف) بلوک‌هایی که ورودی‌های زیرمدل ها باید در آن‌ها وارد شوند

ب) بلوک‌هایی که در آن‌ها مقادیر اولیه سرعت میل‌لنگ موتور، سرعت شفت توربو شارژر و سرعت کشتی اعمال می‌شوند

ج) بلوک‌هایی که انتگرال‌گیری معادلات دیفرانسیل مدل در آن‌ها انجام می‌شود

د) بلوک‌هایی که محاسبه پارامترهای اجزای سامانه رانش کشتی در آن‌ها صورت می‌پذیرد

ه) بلوک مربوط به‌سرعت خواسته‌شده از موتور

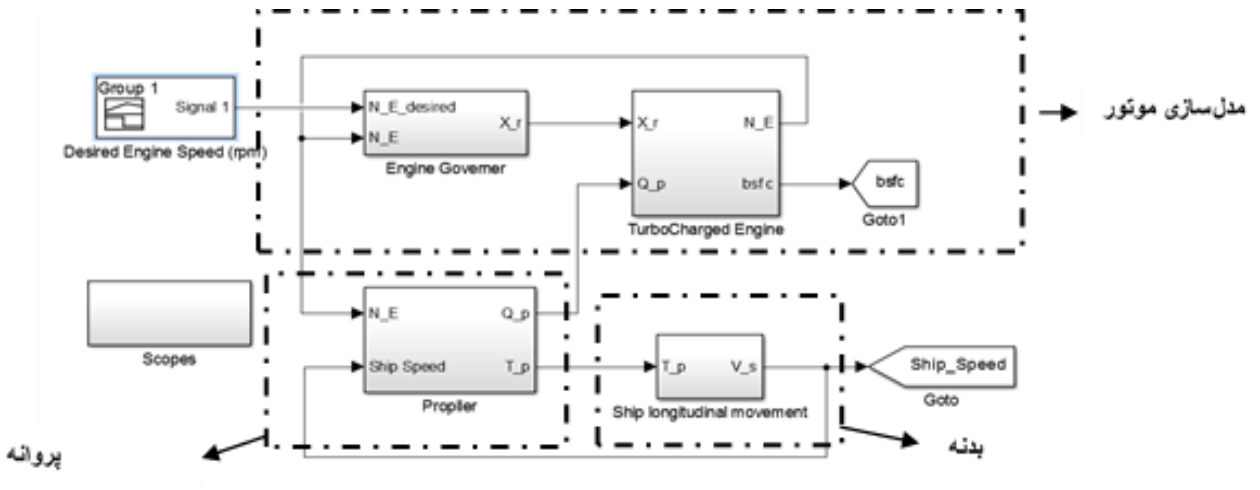
خ) بلوک گاورنر موتور

ز) بلوک مربوط به خروجی مدل اطلاعات ورودی موردنیاز برای مدل‌سازی سامانه رانش در گروه‌های زیر دسته‌بندی‌شده‌اند: اطلاعات هندسی اجزا، ویژگی‌های محیط کاری (هوا، گاز خروجی، آب دریا) و ثابت‌های زیرمدل‌ها.

در ابتدای زمان شبیه‌سازی مقادیر سه متغیر مستقل (نرخ جریان جرمی هوا، فشار و دمای گاز خروجی) تخمین زده می‌شوند. برای هر پله زمانی مقادیری برای سرعت موتور، سرعت شفت توربوشارژر و سرعت کشتی اخذ می‌گردد (مقادیر اولیه آن‌ها در شروع زمان شبیه‌سازی در نظر گرفته‌شده بود)، پارامترهای موردنیاز زیرمدل‌ها محاسبه‌شده و دستگاه معادلات جبری غیرخطی متشکل از معادلات حاکم بر موتور با استفاده از روش نیوتن در حل معادلات غیرخطی حل‌شده است[۱۴].

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]



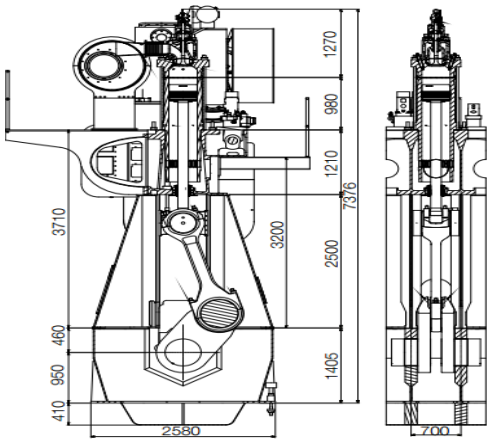
شکل ۲۰- مدل‌سازی کوپل شده سامانه رانش، در سیمولینک متلب

۶-۵-شبیه‌سازی

سامانه رانش یک نمونه کشتی تجاری با نام KCS با استفاده از روش مدل‌سازی شرح داده‌شده، شبیه‌سازی‌شده است. کشتی موردنظر از نوع کانتینربر با وزن مرده ۵۳۳۳۰ تن است. سامانه رانش کشتی شامل یک موتورMAN S50ME-B9 است[۱۴]. موتور ۹ سیلندر از نوع دیزل دریایی دوزمانه، تقویت‌شده به‌وسیله یک واحد توربوشارژر، در حال کار روی سیستم توربوشارژینگ فشارثابت بوده، که به‌صورت مستقیم از طریق سیستم انتقال قدرت (مجموعه شفت‌ها و یاتاقان‌ها) به پروانه کشتی متصل شده است. در ابتدا مدل موتور پیاده‌سازی گردیده و مقادیر ثابت مدل کالیبره شدند به‌طوری‌که نتایج شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف موقعیت شانه انژکتور و گاورنر موتور هماهنگی مناسبی با مقادیر داده‌شده به‌وسیله سازنده موتور داشته‌اند. موتورS50ME-B9 ساخت کمپانی مان در شکل۲۱ نیز نشان داده‌شده است. این نوع موتور دارای رابط شاتون، کورس پیستون ۲ متری بوده و نسبت قطر به کورس ۴ است. حداکثر سرعت این موتور در حالت MCR[۷] برابر ۱۰۰ دور در دقیقه است و هر سیلندر این نوع موتور در حالت بار کامل ۱۸۰۰ کیلو وات و در مجموع در هر دو سیکل کاری موتور ۱۶۲۰۰ کیلو وات توان تولید می‌نماید.

جدول۵- پارامترهای موتورS50ME-B

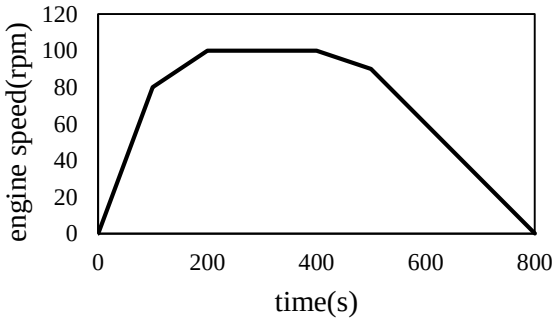
پارامتر	مقدار
قطر سیلندر	۵۰۰ میلی متر
تعداد سیلندر	۹
طول کورس	۲۰۰۰ میلی‌متر
توان ترمزی در MCR	۱۶۲۰۰کیلووات
سرعت موتور در MCR	۱۰۰ دور در دقیقه
BMEP در MCR	۱۶ بار



شکل ۲۱- موتورS50ME-B9 و محفظه احتراق ساخت کمپانی مان[۱۴].

۷-بررسی نتایج

سامانه رانش این شناور با سرعت موتور متغیر جهت بررسی عملکرد موتور در ۸۰۰ ثانیه مدل‌سازی انجام پذیرفته است که در شکل ۲۲ تنظیم سرعت ورودی توسط اپراتور در بازه ۸۰۰ ثانیه نشان داده‌شده است.



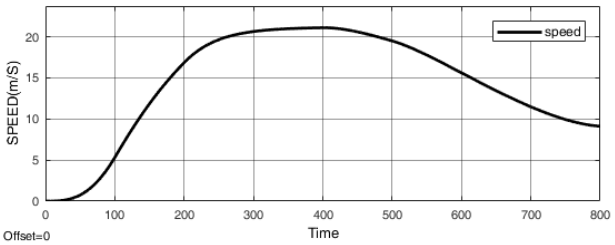
شکل ۲۲- تغییرات سرعت موتور در یک بازه ۸۰۰ ثانیه ازمدل سازی

شناور نیز از حالت سکون در آب آرام شروع به حرکت کرده و زمانی که سرعت پروانه ۱۰۰ دور در دقیقه است، شناور به‌سرعت ۲۲ متر بر ثانیه می‌رسد و با کم شدن سرعت موتور، در ثانیه ۴۰۰ به بعد

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

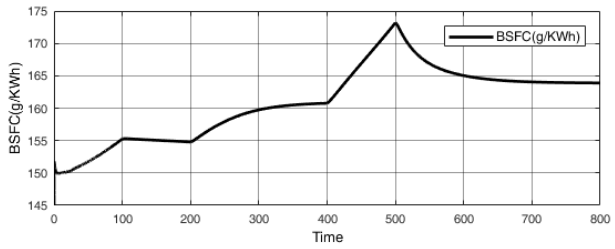
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

سرعت کشتی نیز رو به کاهش می‌رود. این تغییرات سرعت شناور در شکل ۲۳ نشان داده‌شده است.



شکل ۲۳- تغییرات سرعت شناور در بازه زمانی مدل‌سازی شده

تغییرات مصرف ویژه سوخت ترمزی نیز در ۸۰۰ ثانیه مدل‌سازی نیروی محرکه مطابق با شکل ۲۴ محاسبه گردیده است.



شکل ۲۴- تغییرات مصرف ویژه سوخت ترمزی

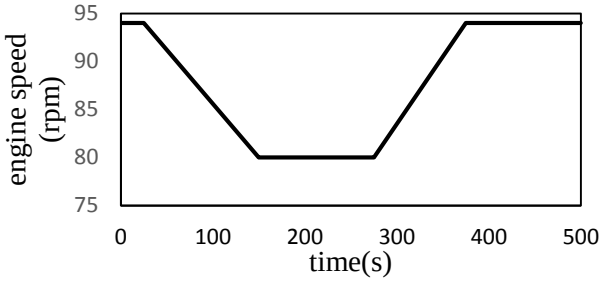
در شبیه‌سازی نیروی محرکه در ثانیه‌های ۲۰۰ تا ۴۰۰ که سرعت موتور به ۱۰۰ دور در دقیقه می‌رسد و با سرعت ثابت حرکت می‌کند، متوسط مصرف ویژه سوخت ترمزی به $(g / KW.h)$ ۱۶۲ رسیده است. که مطابق با کاتالوگ شکل ۲۵، BSFC بین ۱۵۷/۹ تا ۱۶۷/۸ است.

Brake specific fuel consumption (BSFC) in g/kWh					
Full load					
Rating point		R1	R2	R3	R4
BMEP, bar		21.0	14.1	21.0	16.5
BSFC	Standard Tuning	167.8	161.8	167.8	161.8
Part load, % of R1	85	70	85	70	65
Tuning variant	Standard	Standard	Delta	Delta	Low-Load
BSFC	164.2	162.5	163.5	161.0	157.9

شکل۲۵-کاتالوگ موتور مان S50ME-B9 تحت بارهای مختلف در شرایط اندیکاتوری

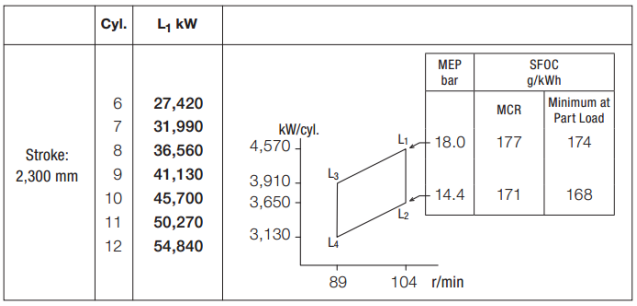
۷-۱-صحت سنجی مدل توربوشارژر و گاورنر

جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده برای موتور S50ME-B9 در بخش قبل به پژوهش آقای گراسیموس ئوتکاتوس[۸] مرجع[۱۶] مراجعه کرده و شبیه‌سازی را برای موتور مان توربو شارژ 9K90MC با سناریو ۵۰۰ ثانیه ای شکل ۳۴ تکرار شده است[۱۶].



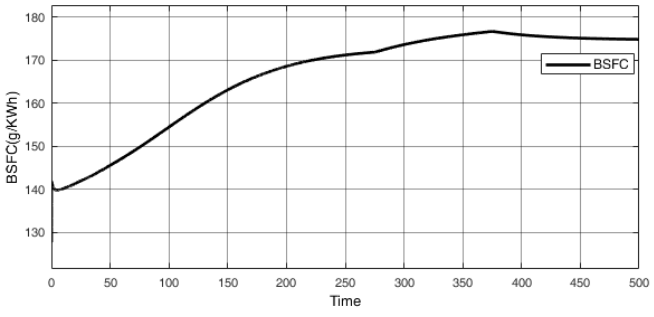
شکل ۲۶- سناریو مدل‌سازی موتورMAN 9K90MC [۱۶].

با توجه به کاتالوگ مصرف ویژه سوخت این موتور نیز در حالت ۷۵ تا ۱۰۰ درصد بار در محدوده g/Kw.h ۱۶۸-۱۷۷ است که در شکل۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۲۷- مصرف ویژه سوخت موتور 9K90MC در بارهای ۷۵-۱۰۰ درصد[18]

بنابراین مصرف ویژه سوخت مطابق با سناریوی شکل ۲۶ نیز در شبیه سازی به صورت شکل ۲۸ نتیجه شده است. در این شبیه‌سازی مصرف ویژه سوخت در ثانیه‌های ۱۵۰ تا ۲۷۵ که سرعت موتور به ۸۰ دور در دقیق متعادل گشته در حدود g/Kw.h ۱۷۳ بوده و در حالت بار کامل در ثانیه های ۳۷۵ به بعد به g/Kw.h ۱۷۶ رسیده که مطابق با حدود ۱ درصد خطا مطابق با کاتالوگ موتور است.



شکل ۲۸- مصرف ویژه سوخت ترمزی موتور 9K90MC در ۵۰۰ ثانیه شبیه سازی

۸-بهینه سازی تریم

با توجه به مدل‌سازی های انجام شده و همچنین مشخص شدن میزان مقاومت بدنه شناور اصلی، نتایج به مدل سیستم رانش وارد شده و با توجه به آبخور و سرعت مورد نظر، تریم بهینه جهت کمینه

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

جدول ۶- دور و توان موتور با توجه به مدل‌سازی سیستم رانش

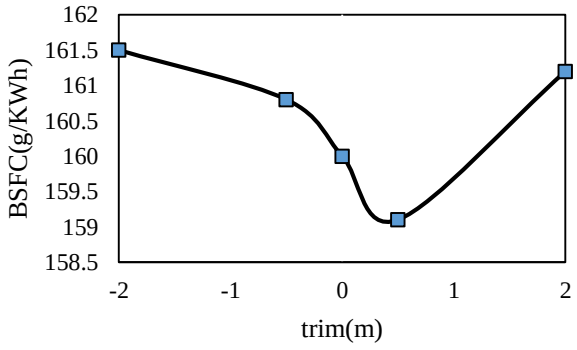
ردیف	تریم(m)	آبخور(m)	(m/s)	مقاومت بدنه(KN)	(rpm)	(KW)
۱	-۲	۱۰/۸	۱۲	۱۳۷۹/۴۸	۸۹	۱۶۵۰۰
۲	-۰/۵	۱۰/۸	۱۲	۱۲۷۳/۸۵	۸۰	۱۵۳۰۰
۳	۰	۱۰/۸	۱۲	۱۲۶۹/۰۹	۷۴	۱۵۲۰۰
۴	۰/۵	۱۰/۸	۱۲	۱۲۵۴/۱	۷۰	۱۵۰۵۰
۵	۲	۱۰/۸	۱۲	۱۳۰۰	۸۵	۱۵۶۰۰

کردن مقاومت مشخص می‌شود. مطابق با شکل۷ و ۱۲ زمانی که شناور در آبخور طراحی(۱۰/۸ متر) قرار گرفته و می‌بایست به سرعت طراحی(۱۲ متر بر ثانیه) حرکت کند، تریم بهینه با توجه به محدوده در نظر گرفته شده محاسبات و مقدار مقاومت آن مشخص خواهد شد. بنابراین تریم بهینه برابر با ۰/۵+ متر بوده و مقاومت بدنه در این شرایط ۱۲۵۴ کیلونیوتن است. در حالتی که تریم شناور صفر بوده و شناور با سرعت و آبخور طراحی حرکت کند ۱۲۶۹/۰۹ کیلونیوتن خواهد بود.

بنابراین زمانی که شناور در آبخور طراحی بوده و با سرعت طراحی حرکت می‌کند، بهینه ترین حالت برای سفر دریایی در آب آرام قرار دادن شناور در تریم ۰/۵ + است و در این حالت ۱/۲ درصد مقاومت شناور کاهش یافته است.

با توجه به مقاومت بدنه، مدل سیستم رانش و مدل پروانه، دور موتور را جهت حرکت با سرعت طراحی در برخی از تریم‌ها توسط نرم افزار درجدول ۶ ارائه شده است.

حال با توجه به سرعت مورد نیاز موتور جهت تامین نیروی تراست توسط موتور، شبیه سازی برای یک بازه ۱۰۰ ثانیه با سرعت ثابت موتور که در جدول ۶ ارائه شده، انجام پذیرفته و مصرف ویژه سوخت ترمزی در سرعت و آبخور طراحی برای تریم‌های مختلف ترسیم شده است. حداقل مصرف ویژه سوخت مربوط به تریم ۰/۵+ متر و حداکثر آن مربوط به تریم ۲- متر بوده که در شکل۴۰ نشان داده‌شده است.

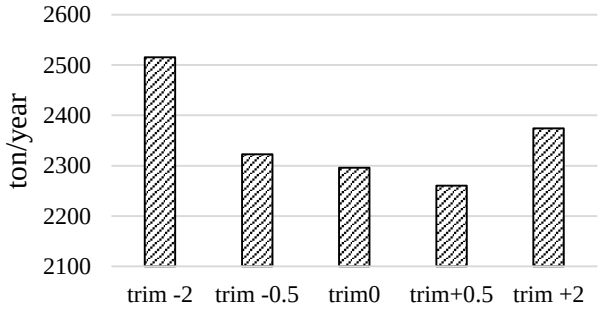


شکل ۲۹- مصرف ویژه سوخت در تریم‌های مختلف

به طور تقریبی مدت زمان سفر شناورهای کانتینربر ۵۹۰۰ ساعت در سال، معادل ۲۴۵ روز است.که تخمین زده می‌شود ۱۰ تا ۲۵ درصد از این زمان را در حال تعمیر یا توقف در لنگرگاه است. و با فرض اینکه تنها ۵۰ درصد از زمان باقی مانده را در حرکت با لود بالای ۷۰ درصد باشد، مصرف سوخت با استفاده از رابطه۲۲ محاسبه می‌شود.

$$FC = H\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{POT_i}{100}BSFC\,\frac{LHV_{ISO}}{LHV_{HFO}}P_{b,i}\right) \qquad (۲۲)$$

که در این رابطه H ساعت کاری موتور، POT درصد کار موتوردر یک بارگذاری خاص بوده، BSFC مصرف ویژه سوخت ترمزی که در شکل ۲۹ نشان داده شده است،LHV ارزش حرارتی پایینی سوخت که برای حالت ایزو و واقعی بوده که این نسبت ۱ درنظر گرفته شده است. و همچنین P_b توان ترمزی موتور بوده و اندیس i برای براگذاری‌های مختلف موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. حال با فرض POT=40 میزان مصرف سوخت برای حرکت شناور در تریم بهینه و تریم صفر در نمودار شکل ۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۳۰- کاهش مصرف سوخت با بهینه سازی تریم در POT=40 و سرعت و آبخور طراحی

با توجه به نتایج حاصل‌شده در این پژوهش برای بدنه شناور کانتینربرKCS تریم بهینه برای شناور در آبخور و سرعت طراحی، ۰/۵+ متر بوده که در این حالت مقاومت کل شناور کمترین مقدار را خواهد داشت. در این تریم مقاومت شناور۱۲۵۴ کیلو نیوتن است. مصرف ویژه سوخت شناور با توجه به نتایج مدلسازی شکل ۱۹ برابر (g/kwh) ۱۵۹/۱ بوده و این مقدار در حالت تریم صفر شناور(g/kwh) ۱۶۰ بوده است.

مشاهده می‌شود که این شناور به ازای تریم ۰/۵+ نسبت به تریم صفر آبخور و سرعت طراحی خود به اندازه ۱/۲ درصد کاهش مقاومت

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

بدنه و ۱/۵ درصد کاهش مصرف سوخت به ازای ۱۰۰ روز کاری موتور با لود ۷۰ درصد به همراه داشته است.

۹- جمع‌بندی

کاهش مقاومت شناورها به هر نحو ممکن، منجر به کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را منجر می‌شود. با استفاده از روش‌های تحلیل عددی و تجربی و همچنین تحلیل نتایج به روش های آماری، مقاومت شناور برحسب تریم، آبخور و سرعت فرموله گردیده است. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت کلی عبارتند از:

- با استفاده از روش های آماری و طراحی آزمایش‌ها می توان با کمترین هزینه و در کمترین زمان به راحتی اثر برخی تغییرات همچون آبخور، سرعت و تریم بر مقاومت مدل یک شناور را فرموله کرد. این مهم تغییرات مقاومت در هر وضعیت بارگیری را نتیجه داده و می‌توان باتوجه به شرایط و مدیریت سفر، با تغییرات تریم و سرعت، شناور را در کمترین حالت مقاومت بدنه قرار داد.
- حرکت شناور در کمترین میزان مقاومت، تاثیر بسزایی در مصرف سوخت و انتشار کربن دی اکسید خواهد داشت. لذا در سفرهایی که شناور ملزم به حرکت با سرعت بیشینه است، می توان با تریم بهینه مصرف سوخت شناور را تا ۱/۵ درصد کاهش داد.
- با مدل سازی موتور، پروانه و بدنه شناور و ارتباط این سه مشاهده می شود که بسته به نوع موتور، کمترین میزان مصرف سوخت الزاما با کاهش دور اتفاق نخواهد افتاد، بنابراین گاهی با کاهش سرعت شناور، میزان مصرف ویژه سوخت ترمزی برخلاف کاهش مقاومت، به دلیل عملکرد موتور در دور نامناسب افزایش پیدا خواهد کرد.
- استفاده از تریم بهینه و کاهش مقاومت برای شناورهای تجاری به نسبت سایر روش های کاهش مصرف سوخت بسیار کم هزینه و کاربردی بوده و همچنین نیاز به برنامه های مدیریتی جهت کنترل مسیر و سرعت را نخواهد داشت، هرچند که استفاده از این تکنیک می تواند در اجرای سایر روش های کاهش مصرف سوخت نیز مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال در روش مدیریتی بهینه سازی سرعت نیز می توان با تنظیم تریم شناور میزان کاهش مصرف سوخت را تا حدی افزایش داد.

۱۰-کلید واژگان

1-Edward K. Nam
2-Robert Giannelli
3-Cut-out
4-Salma Sherbaz
5- Wenyang Duan
6- Weather Routing
7-Maximum continues rating
8-Gerasimos Theotokatos

۱۱- مراجع

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

2- Organization for Energy Efficiency (2011), *"Clause" and "Note 19 of the Law of the Second Program of Development and the Rules of Procedure.* (In Persian)

3-Thomas Hellstrom, (2002), *optimizing control at sea:The Experience of seapacer project*.

4-salma, sherbaz, Wenyang Duan, (2014), *Ship Trim Optimization: Assessment of Influence of Trim on Resistance of MOERI Container Ship*. Hindawi Publishing Corporation the Scientific World Journal Volume, Article ID 603695, 6 pages.

6- Edward V. Lewis, *Principles of Naval Architecture , Resistance, Propulsion and Vibration*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 601 Pavonia Avenue Jersey City.

7- Edward K. Nam, Robert Giannelli., (2005), *Fuel Consumption Modeling of Conventional and Advanced Technology Vehicles in the Physical Emission Rate Estimator (PERE)*. Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency.

8-ABS, (2015), *Ship Energy Efficiency Measures*, Houston, TX 77060 USA,

9- Holtrop, J., Mennen, G. G. J., (1982). *An Approximate Power Prediction Method*. International Shipbuilding Progress, Vol 29, No 335, pp. 166.

10-Munesan.M, (2010), *Encyclopedic Marine Engineering Architecture*, kanun pajuhesh.

11-Jazayeri.A, Gholami.S.A, Safaei.A, (2016), *Modeling and Simulation of Ship Driving System in the Simulink Environment*, Naval Engineers Conference, First Course, Tehran Olympic Hotel.

12- ITTC, (2012). *Speed and Power Trials*, Part 2, 7.5-04-01-01.2.

13- Edward V. Lewis, *Principles of Naval Architecture, Resistance, Propulsion and Vibration", The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 601 Pavonia Avenue Jersey City,

14- MAN B&W, (2017*), Low Speed Small Bore Engines – Now with Electronic Control*.

15- Hagiwara, H., (1989), *Weather routing of sail assisted motor vessels*. PhD. Delft University.

16- Theotokatos, Gerasimos, (2015), *Marine Engine/ Ship Propulsion System Simulation*, Department of Naval Architecture, Ocean & Marine Engineering University of Strathclyde. November.

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]

17- Chao Wang, Shuai Sun, Liang Li, Liyu Ye, (2016), *Numerical prediction analysis of propeller bearing force for full-scale hullepropellererudder system*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 8, 589e601.

18- MAN B&W, (2010), K90MC-C6-TII. Project Guide, Camshaft Controlled Two-stroke Engines. April.

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

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.5.3]