

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	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸	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 از جمله بهینه‌سازی تریم شناور در آب‌خور طراحی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا مقاومت مدل شناور کانتینر KCS در آب‌خور طراحی محاسبه شده است. این تحلیل به صورت حل عددی و آزمایش تجربی برای تریم‌های -0.1 تا $+0.1$ انجام پذیرفته است. نتیجه حاصل از مقاومت بدنه شناور مدل به بدنه اصلی تعمیم داده شده 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 ارائه شده است. با توجه به نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی بدنه شناور کاهش $1/5$ درصدی مصرف سوخت به ازای تریم بهینه نتیجه شده است.
کلمات کلیدی: کاهش درگ بهینه‌سازی تریم شبیه‌سازی عددی مصرف ویژه سوخت	

Ship Trim Optimization for the Reduction of Fuel Consumption

Mohammad Saeid Seif¹, 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.

شناورهای بزرگ در حدود ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ لیتر ساعت می‌رسد و با توجه به این‌که به‌طور متوسط سرنانه مصرف 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

۱ - مقدمه

حدود ۹۰ درصد از تجارت‌های جهانی به وسیله کشتی‌ها از طریق صنعت دریایی انجام می‌شود. هزینه سوخت یکی از بخش‌های مهم و تأثیرگذار در هزینه‌های شناورها است. مصرف سوخت در

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

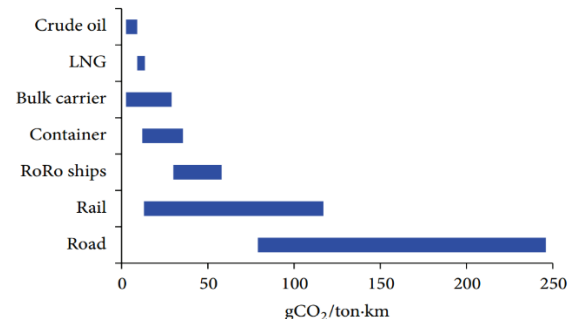
به‌منظور کاهش مصرف سوخت و بهینه‌سازی کشتی‌ها تلاش‌ها و تحقیقات زیادی پژوهش صورت گرفته است. شرکت ABB مجموعه کاملی از محصولات نرم‌افزاری تولید نموده است که می‌تواند مصرف سوخت کشتی را به‌طور بی‌سابقه‌ای تا ۲۰ درصد کاهش دهند [۸]. سونارسی در سال ۲۰۱۵ به شبیه‌سازی موتور شناور، دور موتور و انتقال قدرت به شفت و پروانه پرداخت و با مدل‌سازی ریاضی موتور و پروانه نرخ مصرف سوخت، دور موتور متناسب، نیروی تراست و گشتاور پروانه برای دستیابی به سرعت 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 آلودگی آن‌ها در سال ۲۰۰۵ پرداختند. در این مطالعه مصرف سوخت موتور سیکلت‌ها، موتورهای دیزل با سوخت سنگین، موتورهای احتراق داخلی، و وسایل نقلیه هیبریدی و هیدروژنی را مورد بررسی قرار داده اند [۷]. ونگ گوان و همکاران در سال ۲۰۱۵ مقاله‌ای تحت عنوان تحلیل عملکرد موتور دو زمانه دریایی شامل توربو شارژر کات-اوت^۳ با استفاده از مدل صفر بعدی در مجله انرژی منتشر نمودند. در این پژوهش توربوشارژر همراه با سیلندر موتور به صورت مدولار در محیط متلب، مدل‌سازی 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 کانینربر در سال ۲۰۱۴ در مجله Scientific World منتشر نموده است. ایشان در مقاله خود بدنه یک شناور کانینربر (KSC) را در تریم‌های مثبت و منفی به صورت پایا توسط نرم‌افزار و تحلیل کامپیوتری مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله نمودارهای مقاومت شناور برای یک عدد فرود مشخص و تریم‌های مثبت و منفی از ۰/۱- تا ۰/۱+ تحلیل نموده و نمودار تغییرات مقاومت شناور را استخراج نموده است [۴].

اغلب تحقیقات و پژوهش‌هایی که تا کنون انجام شده است، در راستای بهینه‌سازی طرح‌های اولیه و پایه‌ای برای شناورها 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.

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. به‌نحوی که کاهش تنها ۱ درصدی مصرف سوخت می‌تواند باعث صرفه‌جویی ۵۰ هزار دلاری برای فله‌برهای متوسط و ۳۰۰ هزار دلار برای کانینرهای بزرگ در سال را حاصل شود [۳].

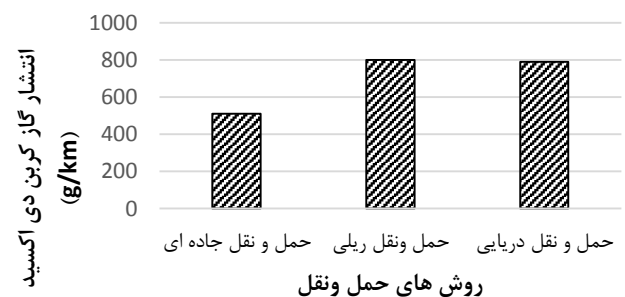
مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار گازهای آلاینده در محیط زیست شده است. آمار نشان می‌دهد که انتشار گوگرد بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ با ۲ درصد افزایش از ۶۴/۶ میلیون تن به ۶۶/۱ میلیون تن خواهد رسید. همچنین انتشار ازت و کربن بین سال‌های مذکور به ترتیب با ۱۳ درصد افزایش از ۲۴ میلیون تن به ۲۷ میلیون تن و با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

شکل ۱ 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 بر حسب گرم به ازای جابجایی هر تن بار به مسافت یک کیلومتر نشان داده شده است.



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

نمودار شکل ۲ نیز میزان این انتشار را برای شناورهای کانینربر، کامیون‌ها و قطارهای کانینربر با توجه به ظرفیت حمل‌ونقل آن‌ها در سال ۲۰۱۴ را نشان داده است.



شکل ۲- میزان انتشار کربن دی‌اکسید توسط وسایل نقلیه کانینربر [۴].

۲ - روش‌های کاهش مصرف سوخت در زمان بهره‌برداری

شناورها

شناورها از نقطه نظر کاربری به دسته‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند که با توجه به فعالیت آن‌ها مصرف سوخت نیز متفاوت خواهد بود اما نکته قابل بررسی 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 به صورت لحظه‌ای می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش مصرف سوخت داشته باشد که این مدیریت با استفاده از سازمان‌دهی چندین موضوع از جمله 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- بهینه‌سازی 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. به طوری که 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 در نتیجه افزایش مصرف سوخت شود. گاهی اوقات حتی در حالت وزن سبک شناور اگر در تریم نادرستی حرکت کند، مقاومت و مصرف سوخت از وقتی که شناور به صورت کامل بارگیری کرده است بیش‌تر می‌شود [۸]. برای یک سفر ممکن است کالای بارگیری شده به نحوی باشد که شناور به اندازه کافی بارگیری نکند و وزن مورد نظر 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 در تریم مورد نظر نگاه‌دارند. امروزه برای محاسبه تریم بهینه شناور در آب‌خور مورد نظر ابزارهای زیادی استفاده می‌شود که این ابزارها و نرم‌افزارها صرفاً برای یک شناور مورد بررسی قرار گرفته و توسط آزمایش یا حل عددی نمودارهایی برای بهترین حالت تریم شناور بر اساس آب‌خور استخراج نموده و در شناور مربوطه مورد استفاده قرار می‌دهند [۸].

۴- محاسبه مقاومت شناورها

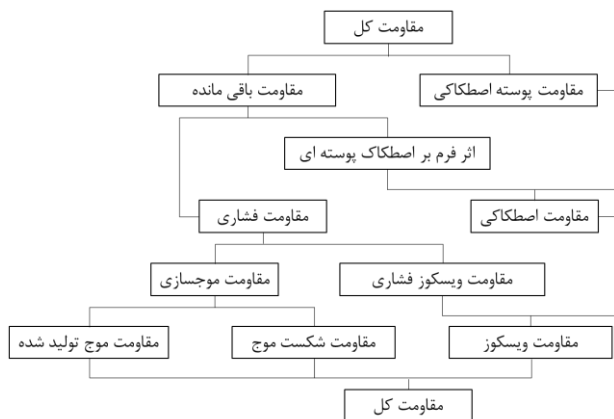
نیروی که از طرف سیال بر شناور وارد می‌شود و در برابر حرکت

شناور ایستادگی می‌کند را مقاومت شناور گویند. فرمول عمومی محاسبه مقاومت برای یک جسم در حال حرکت در سیال به صورت رابطه ۱ است [۹].

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

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 مورد نظر بوده، V سرعت حرکت جسم نسبت سیال بوده و C_D ضریب مقاومت است.

مقاومت، انواع مختلفی دارد که در شکل ۳ نشان داده شده 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].

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} R_e - 2)^2} \quad (2)$$

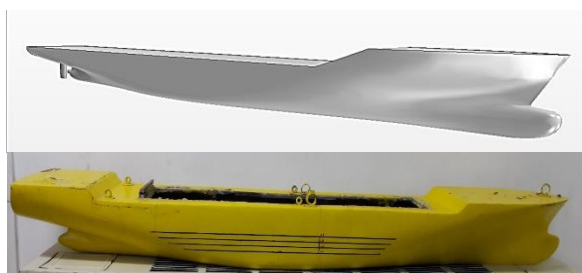
R_e در رابطه ۲ معرف عدد رینولدز جریان است که عدد رینولدز نیز با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$R_e = \frac{Vl}{\nu} \quad (3)$$

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.



شکل ۴- مدل شناور KCS

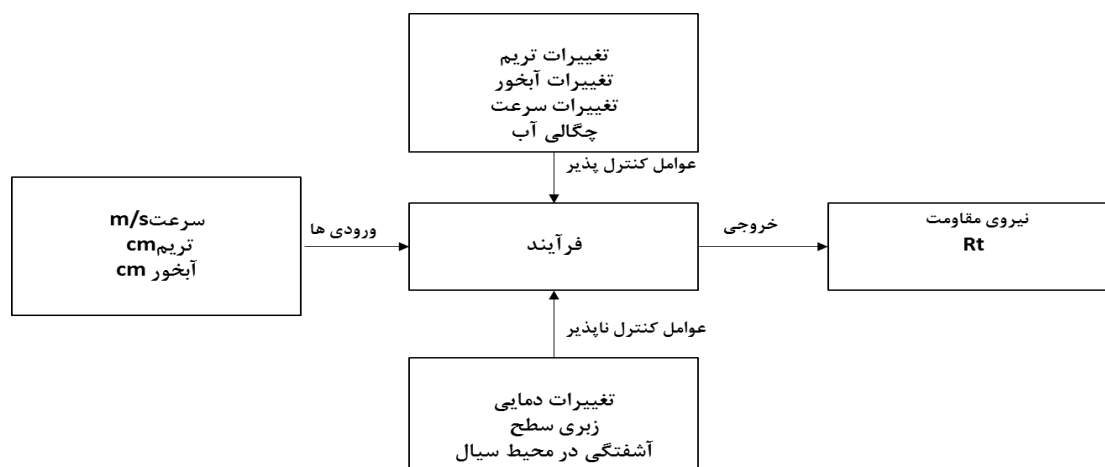
حال با توجه به محاسبه مقاومت شناور KCS به روش‌های عددی و تجربی، نیازمند برنامه‌ریزی دقیقی از تحلیل‌ها و آزمایش‌ها بوده تا بتوان تغییرات مقاومت شناور در آب‌خور، تریم و سرعت‌های مختلف محاسبه نمود. این فرآیند به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است

پارامترهای متغیر در این بخش از آزمایش عبارت‌اند از سرعت، آب‌خور و تریم که در جدول ۲ محدوده تغییرات هر یک از این متغیرها ارائه شده 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 متغیرهای 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 جدول ۳ خواهد بود. در این جدول run شماره آزمایش‌ها بوده که نشان دهنده ۲۰ آزمایش است.



شکل ۵- فرآیند طراحی آزمایش

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. در نتیجه نیروی محرکه تحت بار سبک‌تری کار کرده و میزان مصرف سوخت کاهش می‌یابد [۱۱].

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

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 کانتینریر KCS انتخاب گردیده است که دارای ابعاد و اندازه‌هایی مطابق با جدول ۱ است.

جدول ۱- مشخصات ابعادی شناور مدل KCS و نمونه اصلی

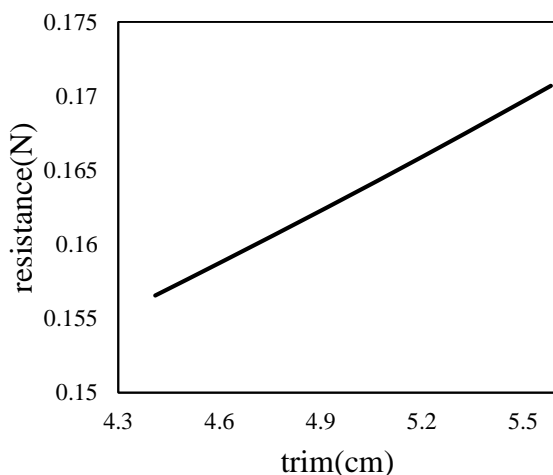
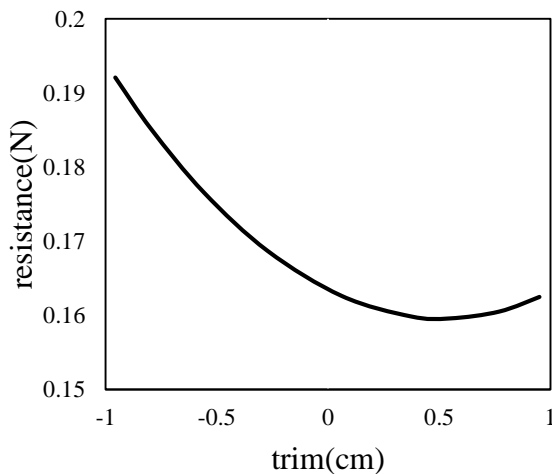
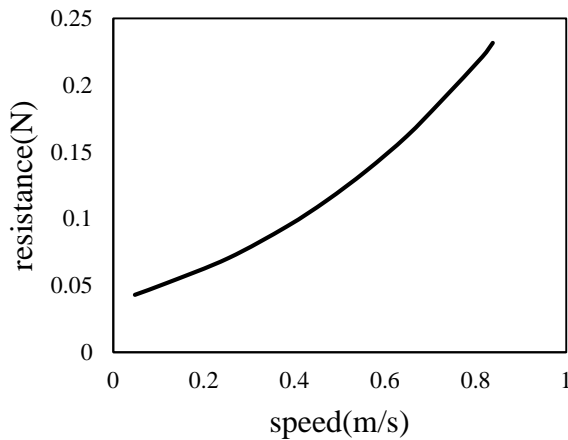
پارامتر	ابعاد مدل	ابعاد شناور
طول (متر)	۱/۱۸۵	۲۳۲/۵
عرض (متر)	۰/۱۶	۳۲/۲
آب‌خور (متر)	۰/۰۵۵	۱۰/۸
سطح خیس	۰/۲۵	۹۵۲۰
چگالی آب (kg/m^3)	۱۰۰۰	۱۰۲۵
ضریب بلوکی	۰/۶۵۱۰	۰/۶۵۱۰

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

جدول ۳- جدل آزمایش‌های طراحی‌شده در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

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

کاهش مقاومت نتیجه شده است. تغییرات مقاومت با آبخور نیز رفتاری تقریباً خطی داشته و با افزایش آبخور، مقاومت شناور نیز افزایش یافته است.



شکل ۷- الف) تغییرات مقاومت بر حسب سرعت ب) تغییرات مقاومت بر حسب تریم ج) تغییرات مقاومت بر حسب 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 و ۳ برابر طول مدل،

۵-۱- آزمایش تجربی

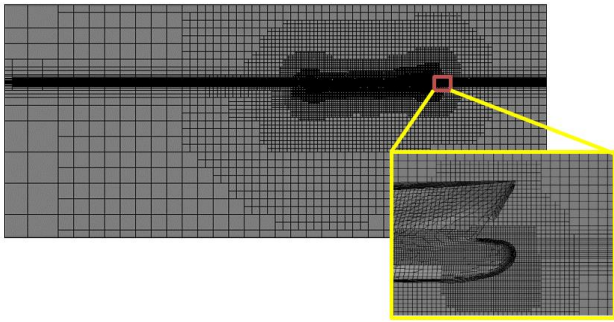
جهت انجام آزمایش‌ها از حوضچه کشش دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است شناور مدل در نقطه مرکز ثقل به دینامومتر متصل شده و درجات آزادی آن مهار گردید تا بتوان شناور را در تریم موردنظر قرار داده و مقاومت بدنه را در آبخور مشخص و در سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری نمود.



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 داده شده است. همان‌طور که از منحنی‌ها نیز مشخص است، با افزایش سرعت مقاومت شناور افزایش یافته است. نتایج حاصل از تست نشان می‌دهد که الزاماً در تریم صفر مقاومت کینه نبوده و در تریم‌های مثبت

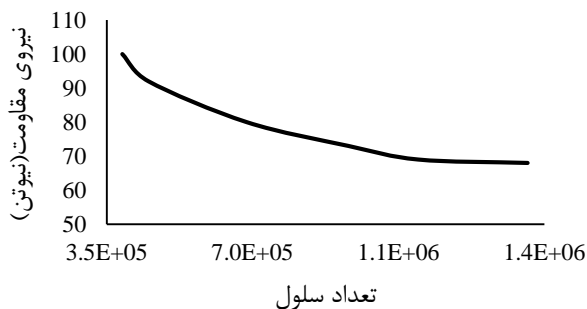


شکل ۹- شبکه بندی

۵-۴- عدم وابستگی به مش

جهت صحت سنجی این شبیه سازی با تغییر اندازه سلولها، در شرایط و فیزیک توضیح داده شده در بخش قبل ابعاد و اندازه سلولها برای شناور با تغییر Base size، تغییر داده شده است تا کمترین تعداد سلولی که بعداز آن، نتیجه برای این میدان محاسباتی ثابت است مشخص شود و سایر شبیه سازیها با همان تعداد سلول انجام شود و از این طریق مقدار خطای شبیه سازی کمینه شود.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات نیروی درگ برحسب تعداد سلولهای مختلف انجام پذیرفته نشان می دهد. برای این امر شبیه سازی برای مدل شناور در نرم افزار برای هفت سلول بندی مختلف انجام پذیرفت و همان طور که از شکل نیز مشخص است، بعد آزمون و خطای پنجم، با افزایش تعداد سلولها تغییر چشمگیری در نتیجه مشاهده نشده است. بنابراین تعداد تقریبی ۱,۱۰۰,۰۰۰ سلول برای این شبیه سازی می تواند مثر و واقع شده و خطای کمتری را در برداشته است.

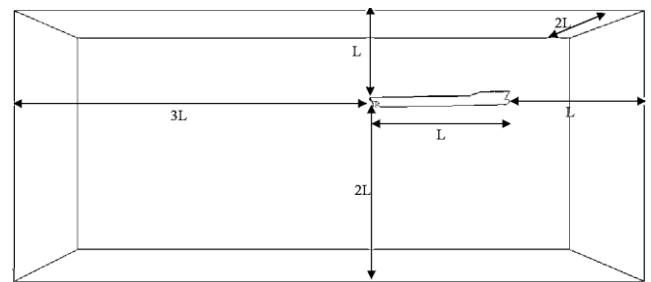


شکل ۱۰- منحنی عدم وابستگی شبیه سازی به شبکه بندی

۵-۵- شبیه سازی

پس از انجام فرآیندهای پیش پردازش و مشخص شدن برنامه راه، شبیه سازی برای مدل شناور KCS در عدد فرود ۰/۲۲۷ و آبجور طراحی در بازه تریم ۰/۱- تا ۰/۱+ متر با گامهای ۰/۰۲ متری انجام پذیرفته است. شکل ۱۱ برخی از تریمهای اعمال شده در شبیه سازی را نشان می دهد.

مطابق با شکل ۸ در نظر گرفته شده است. ابعاد میدان تحلیل متناسب با ابعاد بدنه مدل براساس پیشنهاد پژوهش های پیشین و ممانعت از اثر دیواره ها بر تحلیل انتخاب شده اند [۴].



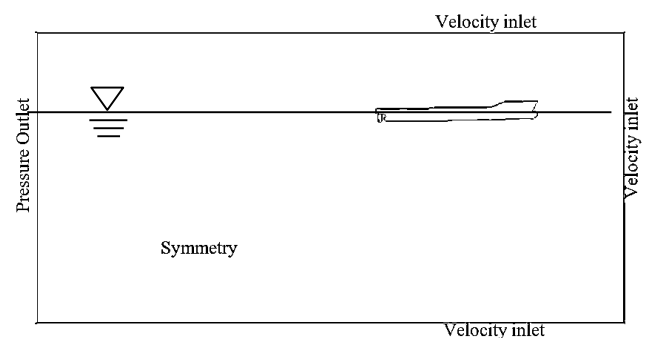
شکل ۸- میدان محاسباتی برای انجام شبیه سازی

پس از آماده سازی و ایجاد توپولوژی تحلیل، فیزیک حاکم بر مسئله و شرایط مرزی مشخص خواهد شد. فیزیک مسئله در اصل متغیرهای اساسی شبیه سازی همچون فشار، سرعت، دما و... را تعریف می کند و همچنین بر اینکه چه فرمولهای ریاضی بر مسئله حاکم باشند نیز تأثیر می گذارد.

شبیه سازی جریان مقاومت یک مسئله چند فیزیکی گذرا بوده که به صورت دوفازی انجام شده است.

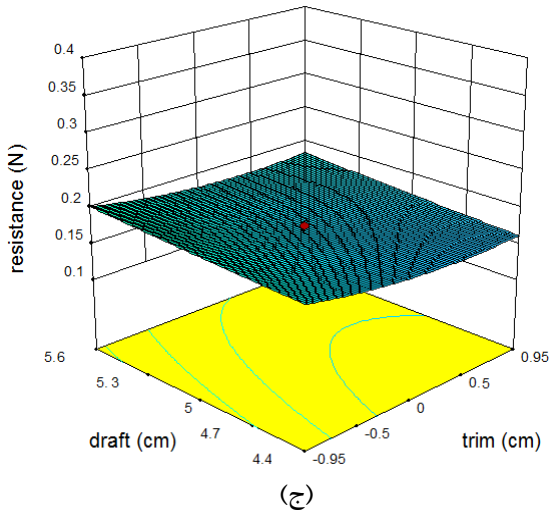
۵-۳- شرایط مرزی و شبکه بندی میدان محاسباتی

برای انجام امر شبیه سازی نیاز است تا مرزهای دامنه محاسبات مشخص و شرایط اولیه بررسی شده بر روی آنها اعمال گردد تا فرایند تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی شروع و به نتیجه برسد. بر این اساس وجوه دامنه محاسبات به عنوان مرز دامنه نام گذاری و شرط گذاری شده اند که در شکل ۸ نشان دهنده این مسئله است.



شکل ۸- مرزهای دامنه محاسباتی

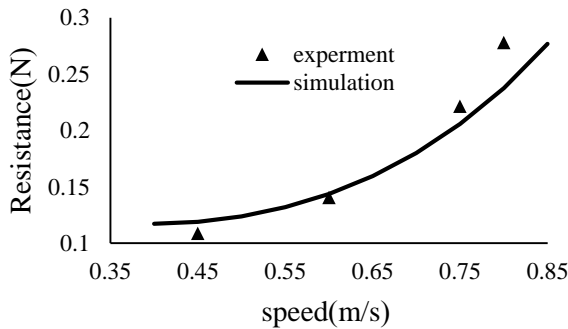
پس از مشخص شدن فیزیک مسئله، میدان حاکم بر شبیه سازی با توجه به اهمیت رفتار سیال و تأثیر آن بر مقاومت به شبکه های مختلف تقسیم بندی خواهد شد. شکل ۹ مدل و شبکه بندی دامنه محاسبات را نشان می دهد.



(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.



شکل ۱۳- مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی در تریم صفر و آبخور δ/δ_{cm}

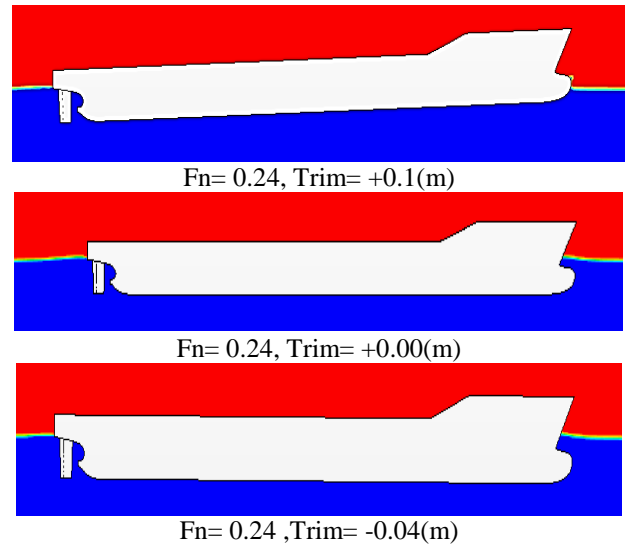
۵-۶- تشابه مدل و کشتی اصلی با استفاده از روش ITTC 1957

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 عبارتند از: 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 داده شده است [۱۰].

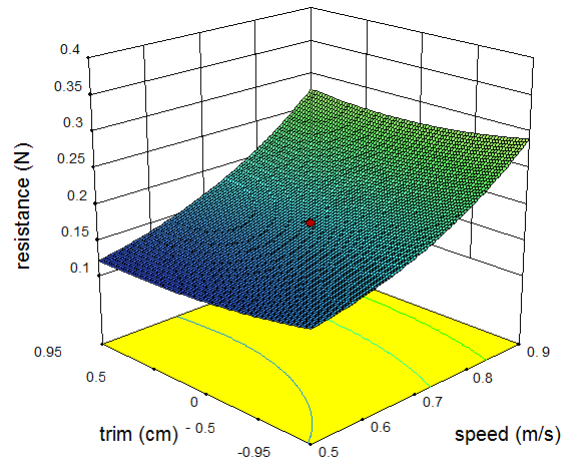
$$R_T = R_F + R_R \quad (5)$$

برای مدل بین ضرایب مقاومت رابطه ۶ برقرار است:

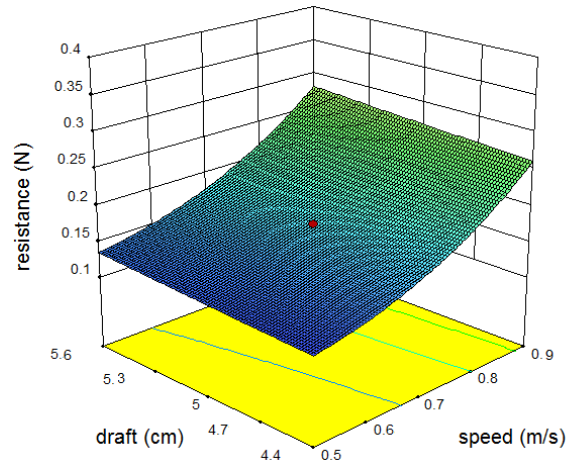


شکل ۱۱- نمایش تریم‌های مختلف

در شکل ۱۲ (الف)، (ب) و (ج) نیز تغییرات مقاومت به صورت همزمان و دو به دو با پارامترهای سرعت، تریم و آبخور به صورت سه بعدی نشان داده شده است.



(الف)



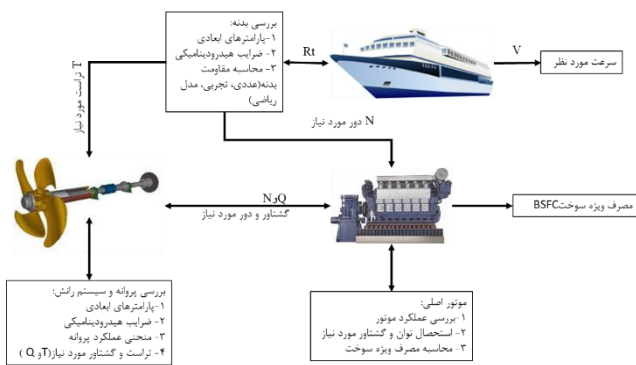
(ب)

۶-مدل سازی سیستم رانش

مدل ریاضی سامانه رانش کشتی در محیط محاسباتی سیمولینک نرم افزار متلب پیاده سازی و اجرا گردیده است که بخش های مختلف این مدل سازی عبارتند از:

- موتور اصلی کشتی با استفاده از روش مدل مقدار متوسط سیکل، همراه با معادلات دیفرانسیل مربوطه برای محاسبه سرعت میل لنگ موتور و سرعت شفت توربوشارژر مدل سازی شده است.
- فرآیندهای ترمودینامیکی و دینامیک جریان در اجزای موتور برای محاسبه پارامترهای مختلف موتور مورد توجه قرار گرفته اند.
- با استفاده از بقای مومنتوم زاویه ای و تعادل انرژی سیستم انتقال قدرت در ترکیب با راندمان سیستم انتقال قدرت برای محاسبه سرعت میل لنگ موتور استفاده شده است.
- با توجه به معادلات حاکم و تجربی پروانه برای محاسبه گشتاور و نیروی تراست به کار گرفته شده است.
- معادلات دیفرانسیل استخراج شده با استفاده از دینامیک حرکت رو به جلو شناور جهت محاسبه سرعت به کار گرفته شده اند.

در نهایت برای شبیه سازی سامانه رانش یک کشتی تجاری و پارامترهای عملکردی مربوط استفاده گردیده است. مدل سازی عددی سیستم رانش برای مدل سازی عددی شناور و سیستم رانش ابتدا کلیه بخش های مرتبط با مدل سازی معرفی و چگونگی ارتباط هر بخش با بخش دیگر به صورت بلوک دیاگرام شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- بلوک دیاگرام بخش های مختلف جهت مدل سازی

همان گونه که در شکل ۱۵ نیز نشان داده شده است بخش های مختلف مدل سازی شامل: بدنه (دینامیک حرکت رو به جلو)، سیستم انتقال قدرت (موتور) و پروانه بوده که مدل سازی سیستم انتقال قدرت به خودی خود شامل مدل سازی گاورنر و توربوشارژر موتور جهت مشخص شدن میزان

$$C_{Tm} = C_{Fm} + C_{Rm} \quad (6)$$

و برای کشتی بین ضرایب رابطه ۷ برقرار است:

$$C_{Ts} = C_{Fs} + C_{Rs} + C_A \quad (7)$$

C_A ضریب تصحیح ناصافی بدنه کشتی است که باید به ضریب مقاومت کل کشتی اضافه گردد. برای کشتی های نو مقدار آن حدوداً ۴ درصد و برای کشتی های کارکرده در حدود ۱۰ درصد مقاومت اصطکاکی است. با توجه به تشابه فرود، ضریب مقاومت باقی مانده مدل و کشتی برابر است. در نتیجه:

$$C_{Rs} = C_{Rm} = C_R \quad (8)$$

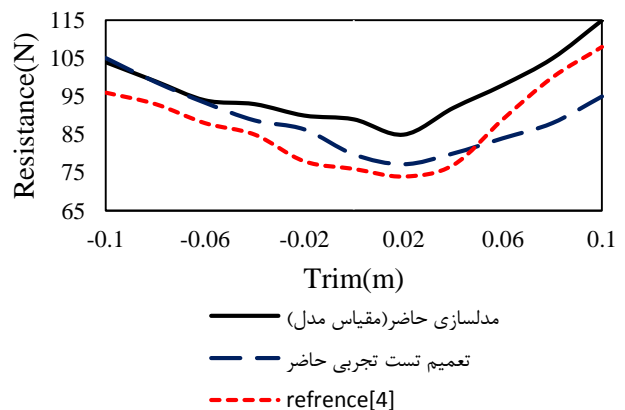
بنابراین ضریب مقاومت اصطکاکی نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردیده و با توجه به رابط ۵ تا ۸ مقاومت کل کشتی با جایگذاری در رابطه ۱ محاسبه خواهد شد [۱۲]. بنابراین مقاومت شناور اصلی با توجه به نتایج مقاومت R مدل به صورت رابطه ۹ بر حسب سرعت V، آب خور D و تریم T نتیجه می شود.

$$R = 2200 - 482V - 135T - 18D + 5.6VT + 20T^2 \quad (9)$$

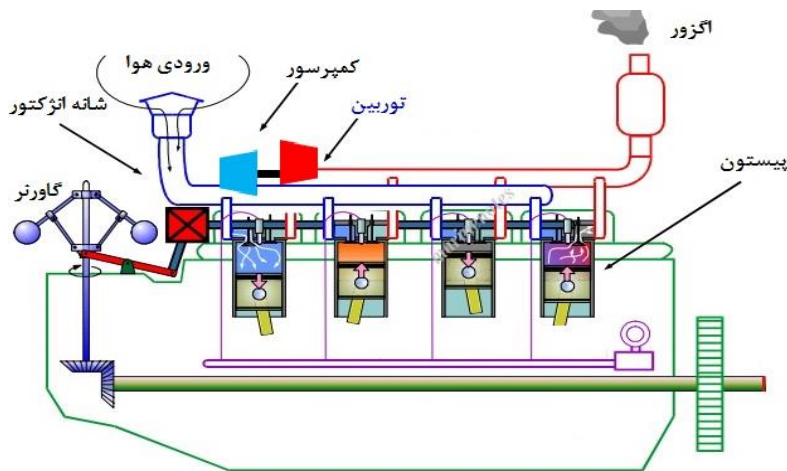
بنابراین می توان در هر سرعت و آب خور تریم بهینه را از نقطه نظر کمینه مقاومت محاسبه نمود و با ورودی دادن به سیستم رانش متناسب با آن رفتار موتور و پروانه شناور را رصد نموده و تغییرات مصرف ویژه سوخت ترمزی شناور را گزارش داد.

۵-۷-اعتبار سنجی شبیه سازی

نتایج حاصل از شبیه سازی حاضر و همچنین آزمایش تجربی به مدل ۷/۳۵۷ متری تعمیم داده شده و با نتایج مرجع [۴] مقایسه گردیده و در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایش تجربی



شکل ۱۶- ارتباط اجزای موتور

$$Q_p = K_Q \rho_{sw} N_p^2 D_p^5 \quad (10)$$

$$T_p = K_T \rho_{sw} N_p^2 D_p^4 \quad (11)$$

ضرایب بدون بعد گشتاور و تراست از معادلات چندجمله‌ای مربوط به سری‌های پروانه واگنینگن نوع B به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$K_Q = \sum C Q_{s,t,u,v} J^s (P/D_p)^t (A_E/A_o)^u Z_p^v \quad (12)$$

$$K_T = \sum C T_{s,t,u,v} J^s (P/D_p)^t (A_E/A_o)^u Z_p^v \quad (13)$$

در روابط بالا تعداد تیغه‌های پروانه، Z_p ، ضریب سطح دیسک، A_E/A_o ، نسبت گام به قطر، P/D_p ، ضریب پیشروی پروانه، J ، به‌عنوان ورودی‌های معادله موردنیاز می‌باشند که برای یک پروانه انتخاب شده 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 قابل کنترل، مقادیر P/D_p می‌توانند بر اساس یک فهرست از پیش تعیین شده 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:

$$J = \frac{V_A}{N_p D_p / 60} \quad (14)$$

سرعت پیشروی با استفاده از سرعت کشتی و مقدار کسر ویک w ، که مقدار ثابت را در محدوده ۰.۲ تا ۰.۴۵ برای کشتی‌های تک پروانه در برمی‌گیرد قابل محاسبه است و از رابطه ۱۵ به دست می‌آید:

$$V_A = (1-w) V_S \quad (15)$$

راندمان آب‌باز پروانه با استفاده از رابطه ۱۷ تعریف شده است:

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

۱-۶- مدل سازی موتور

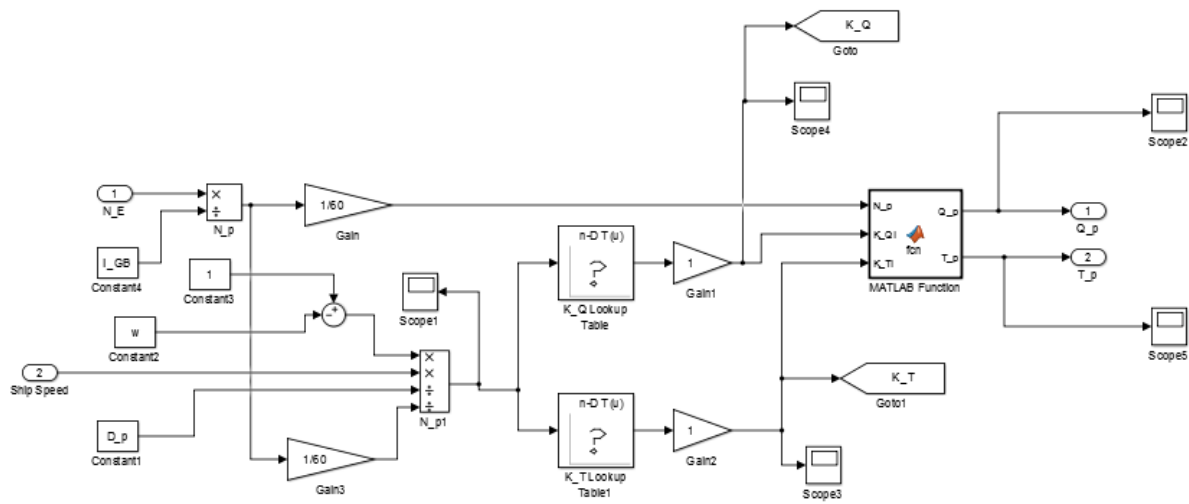
موتور کشتی بر اساس فرآیندهایی که در بخش‌های مختلف آن اتفاق می‌افتد مدل‌سازی شده است. عوامل مختلفی در موتورهای احتراق داخلی دو زمانه و چهارزمانه دریای بر مصرف سوخت تاثیرگذار خواهند بود که عبارتند از:

- ۱- نحوه عملکرد گاورنر (شکل ۱۶)
- ۲- مجموعه توربو شارژر و چگونگی احتراق و راندمان آن
- ۳- نحوه عملکرد سیستم سوخت رسانی و گرانیوی
- 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. در شکل ۱۶ 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].

۲-۶- مدل سازی پروانه

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

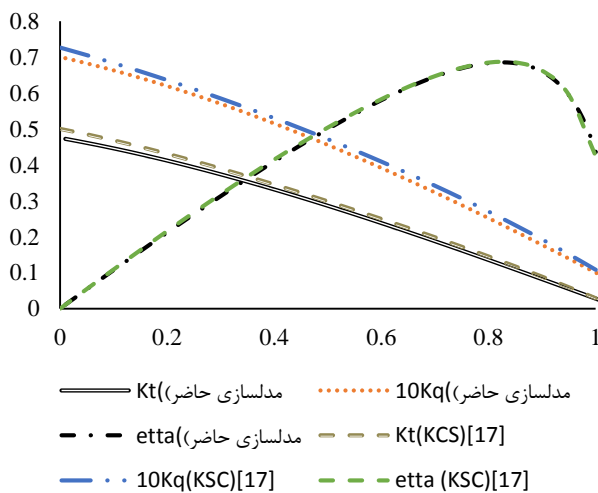


شکل ۱۷- شبیه سازی سیستم رانش در سیمولینک

جدول ۴- اطلاعات پروانه واگینگن نوع B [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 ویک ۰/۶ منحنی عملکرد پروانه برای دورهای مختلف به صورت شکل ۱۸ خواهد شد. که این نتایج با منحنی عملکرد ارائه شده در پژوهش های پیشین برای این پروانه مقایسه شده که دارای ۳ درصد تفاوت است [۱۷].



شکل ۱۸- منحنی عملکرد پروانه KCS

$$\eta_0 = K_T J / (K_Q 2\pi) \quad (16)$$

سرعت محیطی تیغه پروانه به وسیله رابطه ۱۸ بیان می شود:

$$V_u = 0.7 D_p (\pi N_p / 60) \quad (17)$$

نسبت لغزش واقعی پروانه [۱۳]، که به عنوان یک پارامتر قابل استفاده برای بیان بارگذاری روی پروانه تحت شرایط عملکردی مختلف است به وسیله رابطه ۱۹ قابل محاسبه است:

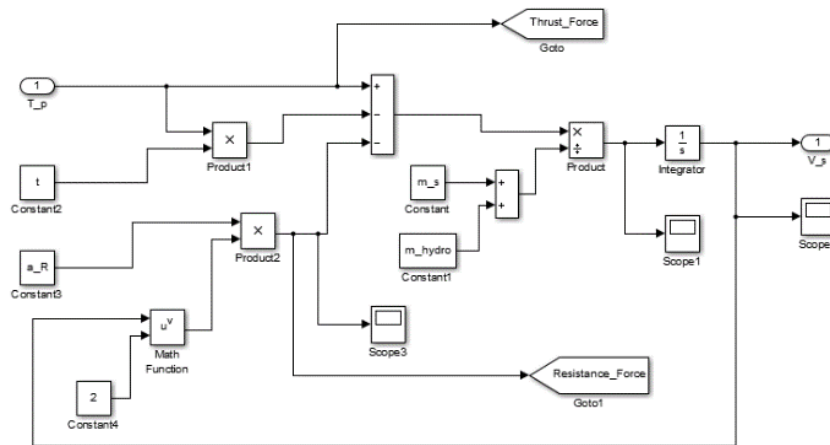
$$SR_R = 1 - \frac{V_A}{P N_p / 60} \quad (18)$$

در مواردی که تنها هدف مدل سازی موتور است، مدل سازی پروانه و حرکت کشتی کارآمد نیست و برای محاسبه گشتاور پروانه، Q_p ، استفاده شده در رابطه ۱، از قوانین حاکم بر پروانه ها استفاده شده است. که با استفاده از آن ها نرخ ماکسیمم توان پیوسته موتور را طبق رابطه ۲۰ می توان محاسبه نمود [۱۳].

$$Q_p = K_p N_E^2, \quad K_p = \frac{Q_{E.MCR}}{N_{E.MCR}^2} \quad (19)$$

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

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



شکل ۱۹- مدل سازی حرکت سرچ شناور

۴-۶- پیاده سازی مدل سامانه رانش کشتی

مدل ریاضی اجزای سامانه رانش کشتی که در محیط سیمولینک متلب مطابق شکل ۲۰ پیاده سازی شده است.

الف) بلوک هایی که ورودی های زیرمدل ها باید در آن ها وارد شوند
ب) بلوک هایی که در آن ها مقادیر اولیه سرعت میل لنگ موتور، سرعت شفت توربو شارژر و سرعت کشتی اعمال می شوند

ج) بلوک هایی که انتگرال گیری معادلات دیفرانسیل مدل در آن ها انجام می شود

د) بلوک هایی که محاسبه پارامترهای اجزای سامانه رانش کشتی در آن ها صورت می پذیرد

ه) بلوک مربوط به سرعت خواسته شده از موتور

خ) بلوک گاورنر موتور

ز) بلوک مربوط به خروجی مدل اطلاعات ورودی مورد نیاز برای مدل سازی سامانه رانش در گروه های زیر دسته بندی شده اند: اطلاعات هندسی اجزا، ویژگی های محیط کاری (هوا، گاز خروجی، آب دریا) و ثابت های زیرمدل ها.

در ابتدای زمان شبیه سازی مقادیر سه متغیر مستقل (نرخ جریان جرمی هوا، فشار و دمای گاز خروجی) تخمین زده می شوند. برای هر پله زمانی مقادیری برای سرعت موتور، سرعت شفت توربوشارژر و سرعت کشتی اخذ می گردد (مقادیر اولیه آن ها در شروع زمان شبیه سازی در نظر گرفته شده بود)، پارامترهای مورد نیاز زیرمدل ها محاسبه شده و دستگاه معادلات جبری غیرخطی متشکل از معادلات حاکم بر موتور با استفاده از روش نیوتن در حل معادلات غیرخطی حل شده است [۱۴].

۳-۶- مدل سازی حرکت طولی کشتی

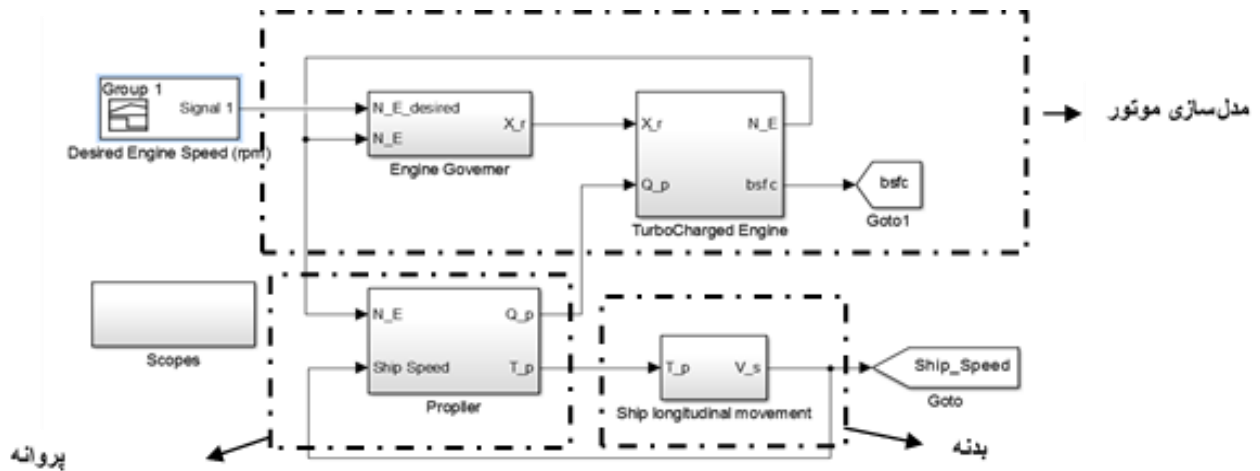
با به کارگیری دینامیک سرچ کشتی معادله دیفرانسیل رابطه ۲۱ برای محاسبه سرعت طولی کشتی استخراج شده است:

$$T_p = F + R_S + (m_s + m_{hydro}) \frac{dV_s}{dt} \quad (20)$$

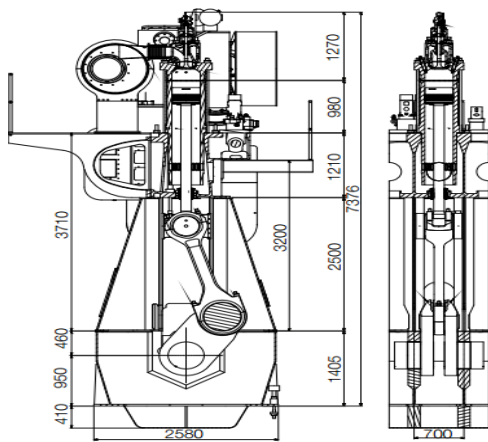
مقاومت کشتی، R_S ، به عنوان یک تابع مرتبه دوم از سرعت کشتی، V_s ، در نظر گرفته شده است. جرم m_s ، که جرم کشتی است حاصل ضرب مقدار حجم جابجایی کشتی و چگالی آب دریا است. m_{hydro} یک جرم مجازی اضافه شده بوده که ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی ایجاد شده در اثر حرکت شتابدار یک جسم در سیال، در محاسبات مورد استفاده قرار می گیرد [۱۳]. مقدار کسر نیروی کشتی تراست، F ، با استفاده از ضریب کسر نیروی کشتی، t ، به صورت رابطه ۲۲ داده شده است:

$$F = tT_p \quad (21)$$

ضریب کسر نیروی کشتی می تواند به صورت مقادیر ثابت در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۳ برای کشتی های تک پروانه [۱۳] و یا به صورت تابعی از سرعت کشتی در نظر گرفته می شود. و این مدل سازی بر اساس این روابط مطابق یا شکل ۱۹ در نرم افزار متلب سیمولینک انجام پذیرفته است



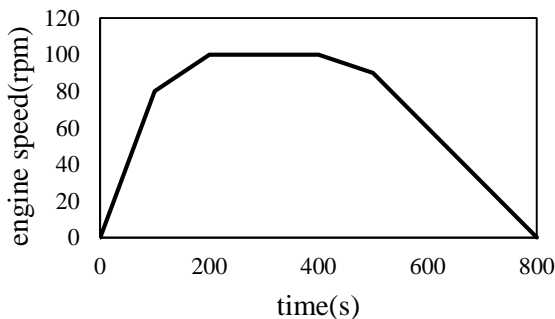
شکل ۲۰- مدل سازی کوپل شده سامانه رانش، در سیمولینک متلب



شکل ۲۱- موتور S50ME-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 مدل سازی انجام پذیرفته است که در شکل ۲۲ تنظیم سرعت ورودی توسط اپراتور در بازه ۸۰۰ ثانیه نشان داده شده است.



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

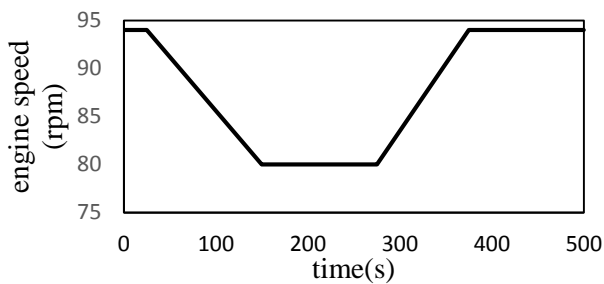
شناور نیز از حالت سکون در آب آرام شروع به حرکت کرده و زمانی که سرعت پروانه ۱۰۰ دور در دقیقه است، شناور به سرعت ۲۲ متر بر ثانیه می‌رسد و با کم شدن سرعت موتور، در ثانیه ۴۰۰ به بعد

۶-۵- شبیه سازی

سامانه رانش یک نمونه کشتی تجاری با نام KCS با استفاده از روش مدل سازی شرح داده شده، شبیه سازی شده است. کشتی مورد نظر از نوع کانتینربر با وزن مرده ۵۳۳۳۰ تن است. سامانه رانش کشتی شامل یک موتور MAN S50ME-B9 است [۱۴]. موتور ۹ سیلندر از نوع دیزل دریایی دوزمانه، تقویت شده به وسیله یک واحد توربوشاژر، در حال کار روی سیستم توربوشاژینگ فشار ثابت بوده، که به صورت مستقیم از طریق سیستم انتقال قدرت (مجموعه شفت ها و یاتاقان ها) به پروانه کشتی متصل شده است. در ابتدا مدل موتور پیاده سازی گردیده و مقادیر ثابت مدل کالیبره شدند به طوری که نتایج شبیه سازی برای مقادیر مختلف موقعیت شانه انژکتور و گاورنر موتور هماهنگی مناسبی با مقادیر داده شده به وسیله سازنده موتور داشته اند. موتور S50ME-B9 ساخت کمپانی مان در شکل ۲۱ نیز نشان داده شده 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 تولید می نماید.

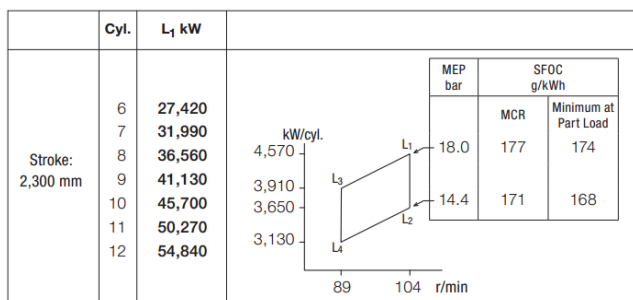
جدول ۵- پارامترهای موتور S50ME-B

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



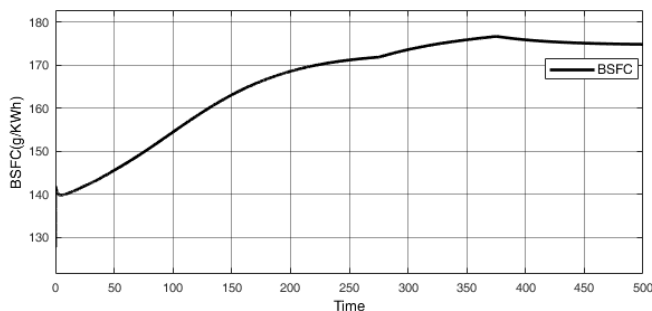
شکل ۲۶- سناریو مدل سازی موتور MAN 9K90MC [۱۶].

با توجه به کاتالوگ مصرف ویژه سوخت این موتور نیز در حالت ۷۵ تا ۱۰۰ درصد بار در محدوده ۱۶۸-۱۷۷ g/Kw.h است که در شکل ۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۲۷- مصرف ویژه سوخت موتور 9K90MC در بارهای ۷۵-۱۰۰ درصد [۱۸]

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

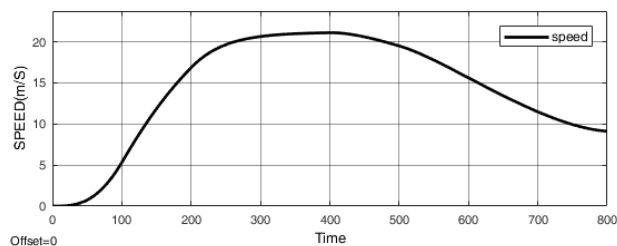


شکل ۲۸- مصرف ویژه سوخت ترمزی موتور 9K90MC در ۵۰۰ ثانیه شبیه سازی

۸- بهینه سازی تریم

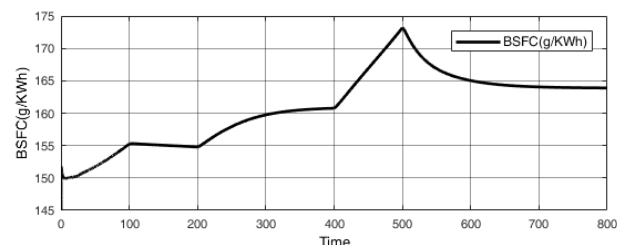
با توجه به مدل سازی های انجام شده و همچنین مشخص شدن میزان مقاومت بدنه شناور اصلی، نتایج به مدل سیستم رانش وارد شده و با توجه به آبخور و سرعت مورد نظر، تریم بهینه جهت کمینه

سرعت کشتی نیز رو به کاهش می رود. این تغییرات سرعت شناور در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۳- تغییرات سرعت شناور در بازه زمانی مدل سازی شده

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



شکل ۲۴- تغییرات مصرف ویژه سوخت ترمزی

در شبیه سازی نیروی محرکه در ثانیه های ۲۰۰ تا ۴۰۰ که سرعت موتور به ۱۰۰ دور در دقیقه می رسد و با سرعت ثابت حرکت می کند، متوسط مصرف ویژه سوخت ترمزی به ۱۶۲ (g / KW .h) رسیده است. که مطابق با کاتالوگ شکل ۲۵، ۲۵ 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
Part load, % of R1				
	85	70	85	70
Tuning variant	Standard	Standard	Delta	Delta
BSFC	164.2	162.5	163.5	161.0
			Low-Load	157.9

شکل ۲۵- کاتالوگ موتور مان S50ME-B9 تحت بارهای مختلف در شرایط اندیکاتور

۷-۱- صحت سنجی مدل توربوشارژر و گاورنر

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

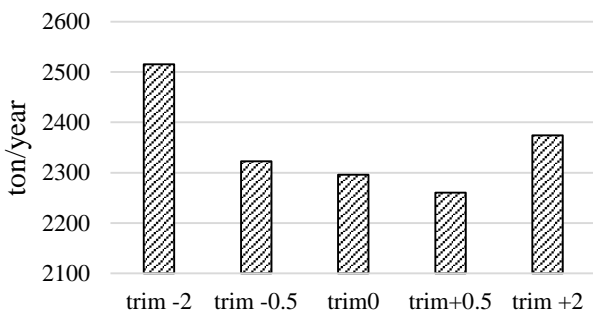
جدول ۶- دور و توان موتور با توجه به مدل سازی سیستم رانش

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

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 رابطه ۲۲ محاسبه می شود.

$$FC = H \sum_{i=1}^n \left(\frac{POT_i}{100} BSFC \frac{LHV_{ISO}}{LHV_{HFO}} P_{b,i} \right) \quad (22)$$

که در این رابطه H ساعت کاری موتور، POT درصد کار موتور در 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 در نظر گرفته شده است. و همچنین P_b توان ترمزی موتور بوده و اندیس i برای بارگذاری های مختلف موتور مورد استفاده قرار می گیرد. 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

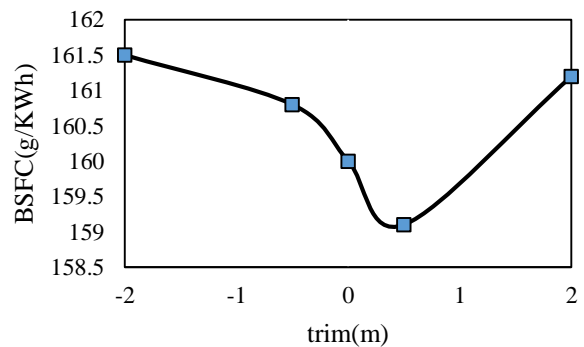
با توجه به نتایج حاصل شده در این پژوهش برای بدنه شناور کانتینربر KCS تریم بهینه برای شناور در آبخور و سرعت طراحی، $+0/5$ متر بوده که در این حالت مقاومت کل شناور کمترین مقدار را خواهد داشت. در این تریم مقاومت شناور 1254 کیلو نیوتن است. مصرف ویژه سوخت شناور با توجه به نتایج مدلسازی شکل ۱۹ برابر $159/1$ (g/kwh) بوده و این مقدار در حالت تریم صفر شناور (g/kwh) 160 بوده است.

مشاهده می شود که این شناور به ازای تریم $+0/5$ نسبت به تریم صفر آبخور و سرعت طراحی خود به اندازه $1/2$ درصد کاهش مقاومت

کردن مقاومت مشخص می شود. مطابق با شکل ۷ و ۱۲ زمانی که شناور در آبخور طراحی ($10/8$ متر) قرار گرفته و می بایست به سرعت طراحی (12 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 $+0/5$ متر بوده و مقاومت بدنه در این شرایط 1254 کیلو نیوتن است. در حالتی که تریم شناور صفر بوده و شناور با سرعت و آبخور طراحی حرکت کند $1269/09$ کیلو نیوتن خواهد بود.

بنابراین زمانی که شناور در آبخور طراحی بوده و با سرعت طراحی حرکت می کند، بهینه ترین حالت برای سفر دریایی در آب آرام قرار دادن شناور در تریم $+0/5$ است و در این حالت $1/2$ 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 تریم ها توسط نرم افزار در جدول ۶ ارائه شده است.

حال با توجه به سرعت مورد نیاز موتور جهت تامین نیروی تراست توسط موتور، شبیه سازی برای یک بازه 100 ثانیه با سرعت ثابت موتور که در جدول ۶ ارائه شده، انجام پذیرفته و مصرف ویژه سوخت ترمزی در سرعت و آبخور طراحی برای تریم های مختلف ترسیم شده است. حداقل مصرف ویژه سوخت مربوط به تریم $+0/5$ متر و حداکثر آن مربوط به تریم -2 متر بوده که در شکل ۴۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۹- مصرف ویژه سوخت در تریم های مختلف

به طور تقریبی مدت زمان سفر شناورهای کانتینربر 5900 ساعت در سال، معادل 245 روز است. که تخمین زده می شود 10 تا 25 درصد

- 4-Salma Sherbaz
- 5- Wenyang Duan
- 6- Weather Routing
- 7-Maximum continues rating
- 8-Gerasimos Theotokatos

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

۹- جمع بندی

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 روش‌های آماری، مقاومت شناور برحسب تریم، آب‌خور و سرعت فرموله گردیده است. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت کلی عبارتند از:

- با استفاده از روش‌های آماری و طراحی آزمایش‌ها می‌توان 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 با توجه 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، می‌توان 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 می‌شود 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 روش‌های کاهش مصرف سوخت بسیار کم هزینه و کاربردی بوده و همچنین نیاز به برنامه‌های مدیریتی جهت کنترل مسیر و سرعت را نخواهد داشت، هرچند که استفاده از این تکنیک می‌تواند در اجرای سایر روش‌های کاهش مصرف سوخت نیز مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال در روش مدیریتی بهینه سازی سرعت نیز می‌توان 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

۱۱- مراجع

- 1-Center for Statistics of Iran, Department 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 paju hesh.
- 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.

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

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