بهینه سازی ابعاد یک کشتی کانتینربر با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه

ابوذر ابراهیمی[۱] *

[۱] استادیار، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، ab_ebrahimi@cmu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

کلمات کلیدی:
بهینه سازی
کانتینربر
مقاومت هیدرودینامیکی
وزن سازه
الگوریتم ژنتیک

چکیده

امروزه حمل و نقل دریایی نقش بزرگی در تجارت جهانی دارد. ویژگیهای بارز حمل و نقل کانتینری کالا باعث شده است روز به روز بر تعداد کشتی های کانتینربر افزوده شود و پیشرفتهای چشمگیری در ساخت و بهره برداری از این کشتی ها حاصل گردد.

در این تحقیق، ابعاد اصلی یک کشتی کانتینربر با توجه به معیارهای مختلف بهینه سازی شده است. اهداف این بهینه سازی، کاهش مقاومت هیدرودینامیکی کشتی و کاهش وزن سازه کشتی می باشد. در ابتدا اطلاعات لازم برای بهینه سازی جمع آوری شده و قیود مسئله مشخص می گردد. سپس با استفاده از ماژول بهینه سازی الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب بهینه سازی انجام می گیرد. همچنین، یک کد نرم افزاری توسعه داده شده و مسئله بهینه سازی با استفاده از این کد حل می شود. نتایج نشان می دهد الگوریتم ژنتیک می تواند بعنوان ابزار مناسبی جهت بهینه سازی ابعاد کشتی ها مورد استفاده قرار بگیرد.

Optimization of a Container Ship Dimensions Using Multi-Objective Genetic Algorithm Method

Abouzar Ebrahimi[1]

[1] *Assistant Professor, Chabahar Maritime University, ab_ebrahimi@cmu.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 15 Jan 2022
Accepted: 7 Feb 2023

Keywords:
Optimization
Container Ship
Resistance
Steel Weight
Genetic Algorithm

ABSTRACT

Today, marine transportation has a significant role in global trade. The characteristics of the containerized shipping have made the number of container ships grow every day and made significant improvements in the construction and operation of these ships.

In this research, the main dimensions of a container ship are optimized according to different objectives. This optimization aims to reduce both hydrodynamic resistance and the steel weight of the ship. Initially, the information needed for optimization is specified, and the problem's constraints are determined. Then, the optimization is done using the optimization tool of the genetic algorithm toolbox in Matlab software. Also, a software code is developed, and the optimization case is done using this code. The results show that the genetic algorithm can be used as a practical tool for optimizing the dimensions of the ships.

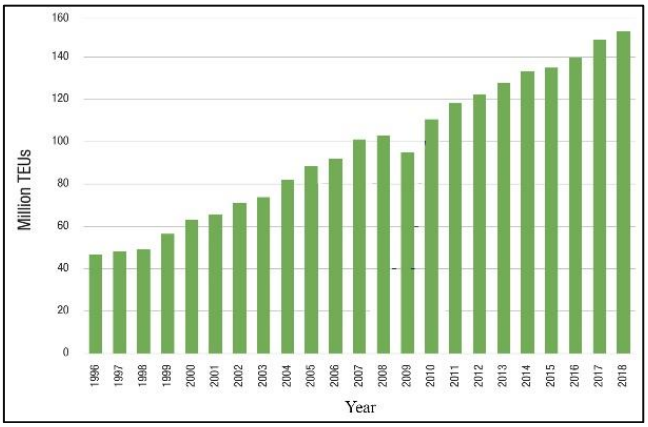
۱ – مقدمه

امروزه تجارت و حمل و نقل دریایی سـهم بزرگی از تجارت جهانی را به خود اختصـاص داده اسـت. کشـتی های بزرگ و غول پیکر روزانه میلیون ها تن کالا را بین کشـورها و بنادر مختلف جابجا می کنند. این امر باعث شـده اسـت صـنعت کشـتی سـازی بعنوان یک صـنعت مهم در جهان شـناخته شـود. ایده اسـتفاده از کشـتی های کانتینربر از سـال ۱۹۶۰ به ذهن صـنعتگران خطور کرد. ویژگیهای بارز حمل و نقل کانتینری کالا باعث شده است روز به روز بر تعداد کشـتی های کانتینربر افزوده شـود و پیشـرفتهای چشـمگیری در ساخت و بهره برداری از این کشتی ها حاصل گردد.

در این کشـتی ها، کانتینرها درون انبارها و بر روی عرشـه قرار می گیرد. با توجه به اینکه مقدار زیادی بار درون کانتینر قرار می گیرد و بارهای درون کانتینر نیز به بسـته بندی خاصـی نیاز ندارد، تخلیه و بارگیری کشتی بسیار سریع تر انجام می شود. این امر باعث شده

است سرعت حمل و نقل کالا بیش از ۸۰ درصد افزایش و هزینه ها بیش از ۳۵ درصد کاهش یابد.

یکی دیگر از مزایای کانتینربرها این است که کالاها درون کانتینر دارای ایمنی بالایی می باشند. در این کشتی ها از فضای انبار و عرشه به بهترین وجه استفاده می شود. زیرا کانتینربرها تنها کشتی هایی هستند که از فضای روی عرشه اصلی نیز برای حمل بار استفاده می کنند. بر اساس گزارش UNCTAD[1]، همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می شود، در سال ۲۰۱۸ میلادی حدود ۱۵۵ میلیون TEU توسط کشتی های کانتینربر جابجا شده است[۱].



شکل ۱- میزان جابجایی کالا توسط کشتی های کانتینربر[۱]

انتخاب ابعاد بهینه برای یک کشتی همواره یکی از دغدغه های مهندسین طراح کشتی بوده است. بیشتر شرکت های مطرح کشتی سازی دنیا، با بهره گیری از مشخصات کشتی های مشابه و بهینه سازی های مختلف، به فرم بدنه و ابعاد خاص خود دست یافته اند و اغلب کشتی های خود را با ابعاد و مشخصات کاملاً یکسان می سازند. به همین دلیل تحقیقات زیادی در مورد بهینه سازی ابعاد کشتی ها منتشر نشده است.

کارچالیس و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۴ تحقیقی را در مورد تعیین ابعاد اصلی یک کشتی کانتینربر و تخمین قدرت مورد نیاز آن منتشر کردند. آنها در این تحقیق فقط از مشخصات کشتی های مشابه استفاده کرده اند.

جونگ و همکاران [۳]۴ در سال ۲۰۱۹ در مرحله طراحی مفهومی یک کشتی، ابعاد و فرم بدنه آن را با توجه به کارایی آن در امواج بهینه سازی کردند. ابعاد اصلی کشتی بعنوان متغیرهای مسئله و مقاومت کشتی در امواج بعنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است و بهینه سازی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II انجام شده است.

ژیانپینگ و همکاران [۴] با استفاده از روش تئوری تصمیم گیری فازی ابعاد اصلی یک کشتی را با هدف کاهش توان مصرفی آن بهینه سازی کردند.

در این تحقیق، ابعاد اصلی یک کشتی کانتینربر توسط روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II بهینه سازی شده است. اهداف بهینه سازی، کاهش مقاومت هیدرودینامیکی کشتی و کاهش وزن سازه کشتی می باشد. بهینه سازی با استفاده از ماژول بهینه سازی الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب انجام شده است. سپس جهت بررسی صحت نتایج این روش، با استفاده از یک کد متلب مسئله بهینه سازی به روش دیگری حل شده و جوابها با روش قبل مقایسه شده است.

۲ – اطلاعات آماری

یکی از مهمترین مراحل در طراحی یک کشتی، جمع آوری اطلاعات کشتی های مشابه می باشد. با توجه به اینکه مراحل طراحی و تحلیل کشتی های مشابه بطور کامل طی شده است، استفاده از اطلاعات این کشتی ها سبب می شود ابعاد اصلی کشتی جدید بنحوی انتخاب شود که از لحاظ سازه ای، هیدرودینامیکی و پایداری در وضعیت مناسبی قرار بگیرد. همچنین، یکی از مراحل اصلی در مسائل بهینه سازی، جمع آوری این اطلاعات آماری است که می تولند منتج به توابع هدف یا قیود مسئله گردد. اندازه هر کشتی بوسیله ابعاد اصلی آن بیان می شود. این ابعاد عبارتند از طول کلی، طول بین دو عمود، طول خط آبخور، عرض کشتی، آبخور کشتی، ارتفاع کشتی.

هدف نهایی یک شرکت سازنده کشتی، طراحی بهینه یک کشتی برای هدف مشخص است و برای شروع پروسه طراحی، نیاز به اطلاعات اولیه و خواسته های مشتری است. یکی از اطلاعات مهم برای شروع طراحی و ساخت کشتی، ظرفیت حمل بار کشتی می‌باشد که برای کشتی های کانتینربر بر حسب TEU بیان می‌گردد. در این تحقیق، فرض شده است ظرفیت کشتی کانتینربر معادل ۶۰۰۰ TEU است. همچنین، سرعت کشتی برابر با ۲۲ نات یا حدوداً معادل ۴۰/۷ کیلومتر بر ساعت می باشد. این سرعت برای کشتی های کانتینربر به راحتی قابل دسترس است.

۲-۱- نسبت ابعاد اصلی

نسبت ابعاد اصلی کشتی ها معمولاً در محدوده مشخصی قرار دارد. این نسبت ها به نحوی است که کشتی علاوه بر ظرفیت حمل بار مناسب، از لحاظ هیدرودینامیکی و پایداری استاتیکی نیز در حالت مطلوبی قرار داشته باشد. اگر نسبت طول به عرض کشتی بیش از حد بزرگ باشد (کشتی لاغر)، اگر چه از لحاظ هیدرودینامیکی، مقاومت موجسازی آن کاهش می یابد اما از سوی دیگر سبب کاهش پایداری عرضی کشتی می گردد. این نسبت ها طی سالیان

[1] United Nations Conference on Trade and Development

متمادی با تجربه و کارهای تحقیقاتی بدست آمده است و برای کشتی های مختلف از قبیل نفتکش، فله بر، کانتینربر و ... متفاوت است. برای انتخاب بهتر این نسبت ها، اطلاعات بیش از ۴۰ کشتی کانتینربر با ظرفیت ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ TEU که در سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ توسط شرکت های مختلف کشتی سازی در جهان ساخته شده، استخراج شده است. آمار تعدادی از این کشتی ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- اطلاعات چند کانتینربر ساخته شده در سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

Name	TEU	DWT	Length	Beam	Draft
ABYAN	6501	81112	304.07	40	11.41
S AENEAS	5086	63059	293.84	32.32	10.98
AGIOS DIMITRIOS	6500	85515	299.2	40	10.72
ALEXANDRA	6900	80274	270.07	42.8	11.89
AMOLIANI	6700	80163	270	42.8	11.47
APL CALIFORNIA	6350	72447	293.18	40	9.27
HYUNDAI PRESTIGE	5023	63010	255.4	37.43	10.37
HYUNDAI OAKLAND	6350	72982	293.18	40	10.65
CORNELIA I	5083	63069	293.89	32.32	10.98
CMA CGM SWORDFISH	5095	65987	294.12	32.2	10.46
CMA CGM RACINE	6570	83216	299.97	40	10.91
HYUNDAI PRIVILEGE	5023	63016	255.4	38	10.92
HYUNDAI TACOMA	6350	72982	293.18	40	10.84
HYUNDAI TOKYO	6763	80059	303.83	40.11	9.86
HYUNDAI VANCOUVER	6258	71987	293.18	40	9.07
ITAL LAGUNA	5090	68038	294.07	32.2	10.95
ITAL LIBERA	5090	67986	294.07	32.2	10.78
KATHERINE	6900	80295	270.07	42.8	10.93
KMTC DUBAI	5380	65072	255	37	11.60

همانگونه که مشاهده می‌شود، نسبت طول به عرض این کشتی ها (L/B) در محدوده ۶/۳ تا ۹/۱ و نسبت عرض به آبخور (B/T) در محدوده ۲/۷۰ تا ۴/۴ قرار دارد.

نسبت دیگری که بر روی پایداری و وزن کشتی تاثیر دارد، نسبت طول به ارتفاع بدنه (D) است. برای کشتی‌های کانتینربر این نسبت بین ۱۲/۴ تا ۱۳/۶ پیشنهاد شده است[۵].

این نسبتها در فرایند بهینه سازی به عنوان قیود مسئله لحاظ خواهد شد:

$$\begin{cases} 6.3 \le \dfrac{L}{B} \le 9.1 \\ 2.7 \le \dfrac{B}{T} \le 4.4 \\ 12.4 \le \dfrac{L}{D} \le 13.6 \end{cases} \qquad (۱)$$

ضرایب شکل بدنه کشتی، ضرایب بی بعدی هستند که برای درک بهتر شکل کلی بدنه کشتی استفاده می شوند. هریک از این ضرایب بیان کننده مفهوم خاصی هستند. یکی از مهمترین ضرایب شکل بدنه کشتی، ضریب بلوکی[۱] یا ضریب چاقی بدنه است که از تقسیم حجم مغروق کشتی (∇) به حجم مکعب مستطیل احاطه کننده آن بدست می آید:

$$C_B = \frac{\nabla}{L.B.T} \qquad (۲)$$

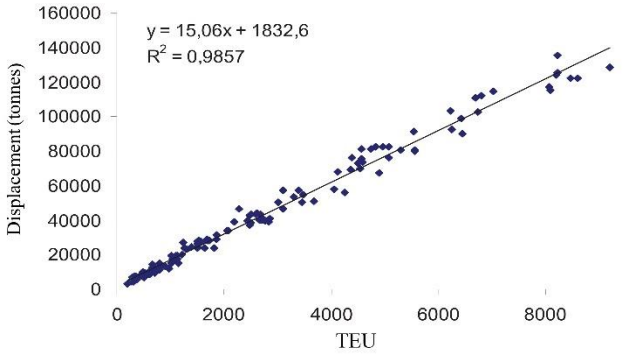
این ضریب نشان دهنده چاقی یا لاغری بدنه کشتی می‌باشد. با توجه به اطلاعات کشتی های مشابه، مقدار C_B این کشتی ها از ۰/۵۵ تا ۰/۶۵ متغیر است. با توجه به مقادیر توصیه شده برای کشتی های کانتینربر[۶]، در این تحقیق مقدار ضریب بلوکی کشتی مورد نظر در فرایند طراحی ۰/۵۷ انتخاب می شود. یکی دیگر از ضرایب بی بعد، ضریب صفحه آبخور (C_{WP}) است که طبق توصیه اشنیکلوث[۷] از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$C_{WP} = (1+2C_B)/3 \qquad (۳)$$

بنابراین با فرض ضریب بلوکی ۰/۵۷، C_{WP} برابر ۰/۷۱ بدست می آید.

۲-۲- تخمین جابجایی کشتی

یکی دیگر از اطلاعات مهم در شروع پروسه طراحی کشتی، وزن کل کشتی یا جابجایی می باشد. وزن کل با Δ نمایش داده می شود و عبارت است از وزن بار قابل حمل کشتی، وزن بدنه، ماشین آلات و غیره. محاسبه وزن کل کشتی بصورت دقیق نیاز به محاسبات بسیار پیچیده ای دارد که طراحان در مراحل اولیه طراحی از این کار اجتناب می کنند و وزن کل را بصورت تخمینی محاسبه می کنند و سپس در مراحل نهایی طراحی، وزن دقیق را بدست می آورند. در این تحقیق، وزن کل کشتی با استفاده از آمار کشتی های مشابه بصورت تقریبی محاسبه شده است. نمودار ظرفیت حمل کانتینر (TEU) بر حسب جابجایی کشتی در شکل ۲ مشاهده می شود. اطلاعات این نمودار از مرجع [۸] بدست آمده است.



شکل ۲ - نمودار ظرفیت حمل کانتینر بر حسب وزن کشتی [۸]

همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، در صورتی که رابطه بین TEU و جابجایی کشتی بصورت خطی فرض شود، این رابطه بصورت زیر خواهد بود:

$$\Delta = 15.06\ TEU + 1832.6 \quad (tonnes)$$

با توجه به اینکه ظرفیت کشتی مد نظر ۶۰۰۰ TEU است، وزن مرده کل کشتی تقریباً برابر با ۹۲۱۹۰ تن بدست می آید که با

فرض چگالی آب دریا (۱/۰۲۵)، حجم مغروق کشتی $89940\,m^3$ خواهد بود. با اعمال ضریب بلوکی، خواهیم داشت:

$$L.B.T \approx 157800\ m^3$$

رابطه فوق یکی از قیود مهم بهینه سازی می باشد. با توجه به اینکه در محاسبات از وزن تخمینی استفاده شده است، این مقدار با تلرانس ۱± درصد بصورت قید نامساوی اعمال می شود:

$$156200 \le L.B.T \le 159300\ m^3 \qquad (۴)$$

۳- پایداری استاتیکی کشتی

نکته مهمی که در طراحی یک کشتی باید مد نظر قرار گیرد، پایداری استاتیکی کشتی است. در طراحی کشتی ها، معمولاً فقط پایداری عرضی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. زیرا تقریباً همه کشتی ها دارای پایداری طولی بسیار مناسبی هستند. GM ارتفاع متاسنتریک کشتی است و مهمترین پارامتر در بررسی پایداری عرضی کشتی می باشد. سازمان بین المللی دریانوردی (IMO) الزاماتی را برای مقدار GM کشتیهای مختلف ارائه کرده است که طراحان و سازندگان کشتی موظفند این قوانین را رعایت کنند. IMO برای کشتی های کانتینربر، مقدار GM را حداقل ۰/۳ متر تعیین کرده است. این مقدار نیز بعنوان یکی از قیود بهینه سازی اعمال می شود:

$$GM \ge 0.3 \qquad (۵)$$

۳-۱- محاسبه GM

برای محاسبه GM، از رابطه زیر استفاده می شود:

$$GM = (KB + BM) - KG \qquad (۶)$$

KB فاصله کیل تا مرکز بویانسی کشتی، KG ارتفاع مرکز ثقل و BM شعاع متاسنتریک کشتی می باشد. محاسبه دقیق KG با ممان گیری از تمام المان های وزنی سازه کشتی، وزن بار، وزن ماشین آلات و غیره امکان پذیر می باشد. BM با تقسیم ممان دوم صفحه آبخور کشتی بر حجم مغروق کشتی بدست می‌آید. در مرحله طراحی اولیه کشتی، محاسبه دقیق KB، KG و BM امکان پذیر نیست. به همین دلیل در این تحقیق برای محاسبه این پارامترها از روابط تجربی که از آنالیز آماری کشتی های مختلف بدست آمده است، استفاده می شود[۷]:

$$KB = T(0.78 - 0.285\,C_B/C_{WP}) \qquad (۷)$$

$$BM = \frac{0.096 + 0.89\,C_{WP}^2}{12} \cdot \frac{B^2}{T.C_B} \qquad (۸)$$

$$KG = 0.01D[46.6 + 0.135(0.81 - C_B)\,(\mathrm{L/D})^2] + 0.008D(L/B - 6.5) \qquad (۹)$$

۴- توابع هدف

در این تحقیق، ابعاد بهینه برای یک کشتی کانتینربر با ظرفیت ۶۰۰۰ TEU انتخاب خواهد شد. اهداف بهینه سازی، کمینه شدن مقاومت هیدرودینامیکی کشتی و نیز وزن سازه ای کشتی است. مقاومت هیدرودینامیکی نیرویی است که از طرف آب بر بدنه کشتی وارد می شود و در برابر حرکت کشتی مقاومت می کند. کاهش مقاومت هیدرودینامیکی کشتی سبب می شود توان مورد نیاز کشتی کاهش یابد و مصرف سوخت آن نیز کم شود. همچنین با توجه به اینکه وزن فولاد مصرفی در ساخت کشتی‌ها بسیار زیاد می باشد، کاهش وزن سازه کشتی سبب صرفه جویی زیادی در هزینه اولیه ساخت می گردد.

۴-۱- مقاومت هیدرودینامیکی کشتی

مقاومت کل کشتی (R_T) ناشی از پارامترهای مختلفی می باشد و بصورت زیر بیان می شود:

$$R_T = R_F(1+k) + R_W \qquad (۱۰)$$

در رابطه فوق، R_F مقاومت اصطکاکی بدنه کشتی، R_W مقاومت موج سازی و $(1+k)$ فاکتور فرم بدنه کشتی می باشد. از سایر مولفه های مقاومت از قبیل مقاومت ملحقات بدنه، مقاومت هوا و ... به دلیل ناچیز بودن مقدار آنها در مقایسه با مولفه های فوق صرفنظر شده است.

مقاومت اصطکاکی کشتی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_F = 0.5 \times C_{F0} \times \rho \times S_{wet} \times V^2 \qquad (۱۱)$$

در این رابطه، ρ چگالی آب دریا ، C_{F0} ضریب اصطکاک پوسته ای، S_{wet} سطح خیس کشتی و V سرعت کشتی است. برای محاسبه C_{F0} از فرمول ارائه شده در کنفرانس بین المللی حوضچه کشش[۲] استفاده می شود:

$$C_{F0} = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2} \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه R_n عدد رینولدز است. فاکتور فرم k، نشان دهنده رابطه بین مقاومت اصطکاکی و مقاومت ویسکوز فشاری کشتی است و مقدار آن به شکل و فرم بدنه کشتی بستگی دارد. فاکتور فرم را می‌توان برحسب ابعاد و مشخصات بدنه کشتی توسط روابط تجربی هالتروپ [۹] محاسبه کرد:

$$1 + k = 0.93 + c_{12}\,(\mathrm{B/L}_R)^{0.92497} \times (0.95 - \mathrm{C}_P)^{-0.521448}(1 - \mathrm{C}_P)^{0.6906} \qquad (۱۳)$$

[2] International Towing Tank Conference- 1957

که:

$$L_R = L(1-C_P)$$

$$c_{12} = \begin{cases} (T/L)^{0.2228446} & T/L \geq 0.05 \\ 48.20(T/L-0.02)^{2.078} & \\ \quad +0.479948 & 0.02 < T/L < 0.05 \\ 0.479948 & T/L \leq 0.02 \end{cases} \quad (۱۴)$$

محاسبه سطح خیس شده یک کشتی در مرحله اولیه طراحی بصورت دقیق تقریباً غیرممکن است. زیرا بدنه کشتی دارای انحناهای مختلفی است که دارای رابطه ریاضی مشخصی نیستند. به همین دلیل در این مرحله برای محاسبه سطح خیس کشتی از روابط آماری تجربی استفاده می شود. یکی از روابطی که دقت خوبی دارد به صورت زیر می باشد[۴]:

$$S_{wet} = 0.995L(C_B.B + 1.919\ T) \quad (۱۵)$$

درکشتی ها، امواج ایجاد شده اطراف بدنه بخصوص در نواحی سینه و پاشنه دارای اهمیت زیادی است. این امواج در نتیجه توزیع فشار ناشی از حرکت کشتی می باشد و برآیند نیروهای وارده بر سینه و پاشنه برابر با مقاومت موج سازی خواهد بود. برای کشتی ها، مقدار مقاومت موج سازی به شکل حجم مغروق کشتی بستگی دارد. برای یک جسم در سرعت های بالا مقدار مقاومت موج سازی افزایش خواهد یافت. محاسبه دقیق مقاومت موج سازی کشتی ها به دلیل ماهیت پیچیده امواج امکان پذیر نیست. برای محاسبه این بخش مقاومت نیز روابط تجربی پیشنهاد شده است. یکی از این روابطی که توسط هالتروپ و مِنن[۱۰] ارائه شده است، به صورت زیر می باشد:

$$R_W = c_1 c_2 .C_B.\mathrm{L.B.D}.\rho g. \exp\left\{m_1 Fn^{-0.9} + m_2 \cos(\lambda Fn^{-2})\right\} \quad (۱۶)$$

در این رابطه:

$$c_1 = 2223105\ (\mathrm{B/L})^{3.78613}(T/B)^{1.07961}(90-i_E)^{-1.37565}$$

$$c_2 = \exp(-1.89\sqrt{c_3})$$

$$\mathrm{Fn} = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

$$i_E = 1 + 89\exp\left\{-(L/B)^{0.80856}(1-C_{WP})^{0.30484} (1-C_P)^{0.6367}(L_R/B)^{0.34574}(100\ C_B.B.T/L^2)^{0.16302}\right\}$$

در روابط فوق، c_2 ضریبی است که تاثیر حبابی سینه[۳] را بر روی مقاومت موج سازی اعمال می‌کند. در رابطه مقاومت موج سازی، Fn عدد فرود می باشد که بر مبنای طول خط آبخور محاسبه می شود. سایر پارامترها به شرح زیر بدست می آید:

$$\lambda = 1.446\ C_P - 0.03\ L/B$$

$$m_1 = 0.0140407\ L/T - 1.75254(C_B.L.B.T)^{1/3}/L - 4.79323\ B/L - c_{16}$$

$$c_{16} = 8.07981\ C_P - 13.8673\ {C_P}^2 + 6.984388\ {C_P}^3$$

$$m_2 = c_{15}{C_P}^2 \exp(-0.1/Fn^2)$$

$$\begin{cases} c_{15} = -1.69385 & L^2/(\mathrm{C_B.B.T}) < 512 \\ c_{15} = 0 & L^2/(\mathrm{C_B.B.T}) > 1727 \\ c_{15} = -1.69385 + (L/(C_B.L.B.T)^{1/3} - 8)/2.36 & 512 < L^2/(\mathrm{C_B.B.T}) < 1727 \end{cases}$$

$$c_3 = 0.56A_{BT}^{1.5} / \left[0.31BT\sqrt{A_{BT}}\right]$$

۴-۲-وزن بدنه کشتی

محاسبه وزن دقیق بدنه کشتی بسیار سخت و پیچیده است. زیرا بدنه یک کشتی از هزاران قطعه تشکیل شده است که توسط جوش به هم متصل شده اند. برای تخمین وزن بدنه کشتی از رابطه زیر که توسط آلمیدا [۱۱] در سال ۲۰۰۹ ارائه شده است، می توان استفاده کرد:

$$W_{St} = 0.0293L^{1.76}.B^{0.712}.D^{0.374} \quad (۱۷)$$

بنابراین توابع هدف را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

$$Minimize\ R_{Total} = f_1(L,B,T,D)$$

$$Minimize\ W_{St} = f_2(L,B,T,D)$$

همچنین، قیود بهینه سازی به ترتیب زیر می باشد:

[3] Bulbous Bow

$$g_1 : 6.3 - \frac{L}{B} \le 0$$

$$g_2 : \frac{L}{B} - 9.1 \le 0$$

$$g_3 : 2.7 - \frac{B}{T} \le 0$$

$$g_4 : \frac{B}{T} - 4.4 \le 0$$

$$g_5 : 1.7 - \frac{L}{D} \le 0$$

$$g_6 : \frac{L}{D} - 1.9 \le 0$$

$$g_7 : 156200 - L.B.T \le 0$$

$$g_8 : L.B.T - 159300 \le 0$$

$$g_9 : 0.3 - GM \le 0$$

۵- روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه

بهینه سازی را می توان فرآیند جستجوی بهترین راه حل در مجموعه ای از راه حل های ممکن توصیف کرد[۱۲]. اغلب مسائل مهندسی ماهیت غیرخطی دارند و بنابراین یا راه حل تحلیلی ندارند یا حل های پیچیده ای دارند. اینگونه مسائل دارای بیش از یک هدف هستند که حتی ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند؛ بنابراین برای رسیدن به جواب بهینه، نیازمند ابزارهای بهینه سازی پیچیده ای هستند[۱۳]. در بهینه سازی یک هدفه، می‌توان مجموعه‌ای از جواب ها را تعیین کرد که نسبت به سایر جوابها بهتر هستند. در نتیجه معمولاً یک جواب واحد به دست می آید. اما در بهینه سازی چند هدفه، هیچ روش مستقیمی برای تعیین اینکه آیا یک جواب بهتر از جواب دیگر است، وجود ندارد. زیرا پاسخ مجموعه ای از جوابها است که شامل چندین هدف متضاد است که باید بطور همزمان در نظر گرفته شوند[۱۴].

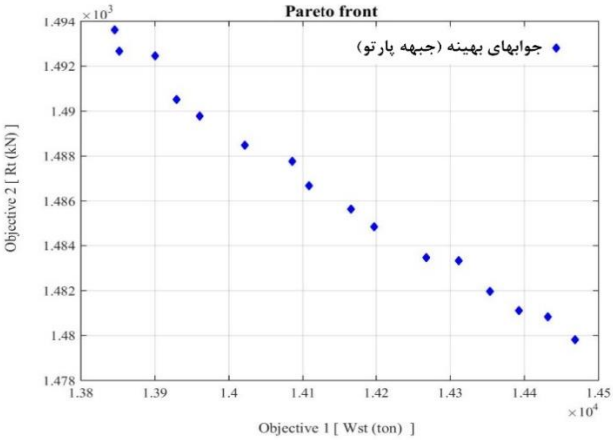
الگوریتم های تکاملی[4] اولین روش های فرا ابتکاری بودند که برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه ایجاد شدند. این روشها، همزمان با مجموعه ای از جوابهای ممکن (که اصطلاحاً جمعیت[5] نامیده می شوند) سر و کار دارند و این امکان را فراهم می کنند که با یک بار حل، چندین جواب بهینه پارتو[6] بدست آید. این الگوریتم‌ها از روش های اولیه برای حل یک مسئله استفاده می‌کنند و با انجام یک سری از تکرارها به راه‌حل مناسب دست می یابند. این الگوریتم‌ها غالباً از یک جمعیت اولیه شروع می‌کنند و در هر مرحله و تکرار حل، سعی می کنند به جوابهای بهتری برسند. پس از انتخاب جمعیت اولیه بصورت تصادفی، تابع هدف یا برازندگی برای هر یک از این اعضا محاسبه و یک نسل جدید ایجاد می شود. اعضا برحسب میزان برازندگی برای تولید نسل جدید (فرزندان) انتخاب می‌شوند. این افراد به‌عنوان والدین محسوب می‌شوند و ترکیب جدیدی از فرزندان را ایجاد می کنند. سپس تمامی فرزندان با جهش، تغییر ژنتیکی می‌یابند. اکنون میزان شایستگی (برازندگی) نسل جدید تعیین و در جمعیت جایگزین والدین شده و مجدداً نسل جدید را ایجاد می‌نمایند. این عمل تا جایی تکرار می شود که شرط پایان بهینه‌سازی برآورده شود. روش الگوریتم ژنتیک، یکی از زیر شاخه های الگوریتم های تکاملی است که استفاده از آن در مسائل بهینه سازی بسیار گسترده است. ایده اصلی در این الگوریتم، انتقال ویژگی های وراثتی از طریق ژن‌ها است. نخستین بار جان هالند[7] [۱۵] ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی های مهندسی را مطرح کرد.

در این تحقیق از ماژول الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب برای بهینه سازی ابعاد کشتی استفاده شده است. از آنجا که اهداف بهینه سازی، کمینه کردن مقاومت هیدرودینامیکی و نیز وزن سازه کشتی است، از ماژول الگوریتم ژنتیک چند هدفه متلب استفاده شده است. این ماژول از الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II[8]) برای بهینه سازی چند هدفه استفاده می کند.

۶- نتایج بهینه سازی

پس از انجام بهینه سازی دو هدفه، جبهه پارتو بدست می آید. جبهه پارتو شامل جوابهایی است که هیچکدام بر دیگری غلبگی ندارد و انتخاب یکی از این جوابها به نظر طراح بستگی دارد. در شکل ۳ جبهه پارتو بدست آمده در این بهینه سازی مشاهده می شود. مجموعه جوابهای بهینه شامل ۱۶ کشتی است و همانگونه که مشاهده می شود، جوابهایی که دارای مقاومت کمتری دارند، وزن سازه بیشتری دارند و بالعکس. این بدان معنی است که تمام جوابها نامغلوب هستند و هیچ جوابی در این مجموعه بر جواب دیگر برتری ندارد.

[4] Evolutionary algorithms
[5] Population
[6] Pareto
[7] John Holland
8 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II



شکل ۳- جبهه پارتو بدست آمده از روش الگوریتم ژنتیک

انتخاب ابعاد کشتی بهینه از بین این جوابها، به نظر طراح بستگی دارد. در صورتی که مقدار مقاومت کل و در نتیجه مصرف سوخت کشتی اهمیت بیشتری داشته باشد، کشتی هایی انتخاب می شود که مقاومت کمتری داشته باشد. اما در صورتی که وزن فولاد مصرفی و هزینه تمام شده کشتی در اولویت طراح باشد، کشتی انتخاب خواهد شد که دارای وزن فولاد کمتری باشد. ابعاد اصلی ۱۶ کشتی بهینه، مقدار وزن فولاد و مقاومت کل آنها در جدول ۲ آمده است.

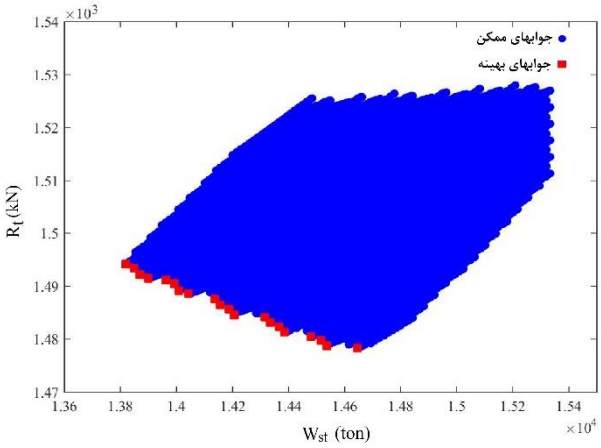
جدول ۲- اطلاعات ابعاد بهینه کشتی

	W_{St} (ton.)	R_T (kN)	L (m)	B (m)	T (m)
1	13846.0	1493.6	256.59	40.60	15.01
2	13852.3	1492.7	256.65	40.57	15.00
3	13900.5	1492.5	257.12	40.55	14.99
4	13929.2	1490.5	257.53	40.47	14.99
5	13960.6	1489.8	257.87	40.47	14.97
6	14021.5	1488.5	258.50	40.39	14.96
7	14085.4	1487.8	259.14	40.36	14.94
8	14108.0	1486.7	259.42	40.34	14.92
9	14166.4	1485.6	260.01	40.29	14.91
10	14197.0	1484.9	260.36	40.27	14.90
11	14267.7	1483.5	261.11	40.20	14.88
12	14311.4	1483.3	261.45	40.18	14.87
13	14353.3	1482.0	261.98	40.13	14.86
14	14392.4	1481.1	262.41	40.11	14.84
15	14431.6	1480.8	262.81	40.08	14.84
16	14353.3	1481.9	261.98	40.13	14.86
17	14311.3	1483.3	261.45	40.18	14.87

برای بررسی صحت نتایج بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از یک کد در محیط متلب استفاده شده است. این کد، با استفاده از روابط موجود استفاده شده در فرایند بهینه سازی، ابعاد بهینه کشتی را محاسبه می‌کند. این کد، برخلاف روش الگوریتم ژنتیک، تمام جواب های ممکن را بررسی می کند. مراحل این کد به شرح زیر است:

- برای تمام حالت های ممکن ابعاد اصلی کشتی، همه قیود بهینه سازی بررسی می شود. طول کشتی در محدوده ۲۲۰ تا ۳۰۰ متر، عرض در محدوده ۳۰ تا ۴۲ متر، آبخور در محدوده ۱۲ تا ۱۵ متر و ارتفاع در محدوده ۱۵ تا ۲۰ متر بررسی شده است.
- در صورتی که برای یک کشتی با طول، عرض، آبخور و ارتفاع مشخص، همه قیود بهینه سازی برقرار باشد، مقاومت هیدرودینامیکی و وزن بدنه آن کشتی محاسبه شده و در یک آرایه ذخیره می شود. این جوابها، بعنوان جواب ممکن[9] شناخته می شوند.
- با استفاده از الگوریتم O(MN2)، از میان تمام جوابهای ممکن بدست آمده در مرحله قبل، جوابهای غیرمغلوب انتخاب می شوند. جوابهای غیرمغلوب، جوابهایی هستند که از لحاظ توابع هدف، هیچکدام نسبت به دیگری غلبگی ندارند و هر جواب می تواند یک جواب بهینه محسوب شود.

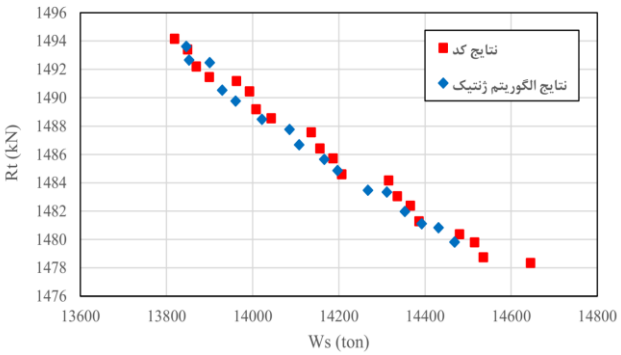
پس از بررسی تمام حالت های ممکن توسط کد فوق، جوابهای ممکن و جواب های بهینه (جواب های پارتو) بدست آمده و در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴- جبهه پارتو بدست آمده از کد متلب

جهت مقایسه بهتر نتایج روش الگوریتم ژنتیک با کد متلب، نتایج هر دو روش برای دو تابع هدف مسئله یعنی وزن فولاد و مقاومت هیدرودینامیکی کل، در شکل ۵ نمایش داده شده است.

[9] Feasible



شکل ۵- مقایسه نتایج کد متلب با روش الگوریتم ژنتیک NSGA-II

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، جوابهای بهینه بدست آمده از دو روش بسیار نزدیک به هم بوده و اختلاف ناچیزی با هم دارند. این موضوع نشان می دهد، روش الگوریتم ژنتیک این قابلیت را دارد که با دقت بسیار خوبی جهت بهینه سازی ابعاد کشتی مورد استفاده قرار گیرد. زمان مورد نیاز برای رسیدن به پاسخ های بهینه در روش الگوریتم ژنتیک، با یک سخت افزار مشخص در حدود ۲۰ ثانیه بود در صورتی که با همین سخت افزار، کد متلب برای رسیدن به جواب های بهینه، حدود ۲ ساعت زمان صرف می کند. این موضوع نشان می دهد، در بهینه سازی های غیر خطی و پیچیده که بررسی تمام حالت های ممکن هزینه محاسباتی زیادی دارد، استفاده از روش الگوریتم ژنتیک می تواند زمان و هزینه محاسبات را به طور چشمگیری کاهش دهد.

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق ابعاد یک کشتی کانتینربر به روش الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شد. در ابتدا اطلاعاتی در مورد ابعاد کشتی‌های کانتینربر جمع آوری شد که قیود مسئله بهینه سازی را مشخص می کند. توابع هدف در این مسئله، مقاومت هیدرودینامیکی کشتی و وزن بدنه کشتی است. سپس با استفاده از ماژول gamultiobj نرم افزار متلب که برای بهینه سازی چند هدفه توسعه داده شده است، بهینه سازی انجام شد. در انتها با استفاده از یک کد که در نرم افزار متلب نوشته شده است، جوابهای بهینه و جبهه پارتو برای مسئله فوق محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد جوابهای بدست آمده از روش الگوریتم ژنتیک بسیار نزدیک به نتایج کد متلب می باشد. کد نرم افزار متلب تمام حالت های ممکن را بررسی می کند. بنابراین، این کد بهینه ترین ابعاد کشتی با توجه به قیود مسئله را ارائه می دهد. از سوی دیگر، روش الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی تصادفی می باشد و زمان حل کوتاه تری نسبت به روش دیگر دارد. در بهینه سازی های پیچیده که زمان محاسبات بسیار طولانی است، استفاده از روش الگوریتم ژنتیک می تواند هزینه های محاسباتی را به طور چشمگیری کاهش دهد.

۸ – مراجع

1- Sirimanne, S.N., et al., (2019), *Review of maritime transport*, The United Nations Conference on Trade and Development.

2- Charchalis, A., (2014), *Determination of main dimensions and estimation of propulsion power of a ship*, Journal of KONES, Vol. 21.

3- Jung, Y.-W. and Y. Kim, (2019), *Hull form optimization in the conceptual design stage considering operational efficiency in waves*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 233(3): p. 745-759.

4- Jianping, C., et al., (2016), *Ship Hull Principal Dimensions Optimization Employing Fuzzy Decision-Making Theory*, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 216.

5- Molland, A.F., (2011), *The maritime engineering reference book: a guide to ship design*, construction and operation, Elsevier.

6- Barrass, B., (2004), *Ship design and performance for masters and mates*.: Elsevier.

7- Schneekluth, H. and V. Bertram, (1998), *Ship design for efficiency and economy*, Butterworth-Heinemann Oxford.

8- Charchalis, A. and J. Krefft, (2009), *Main dimensions selection methodology of the container vessels in the preliminary stage*, Journal of KONES, Vol. 16: p. 71-78.

9- Holtrop, J., (1984), *A statistical re-analysis of resistance and propulsion data*, International shipbuilding progress, 31(363), p. 272-276.

10- Holtrop, J. and G. Mennen, (1978), *A statistical power prediction method*, International shipbuilding progress, 25(290).

11- d'Almeida, J., (2009), *Arquitectura Naval–O Dimensionamento do Navio*. Prime Books.

12- Alexandrino, L., G.F. Gomes, and S.S. Cunha Jr, (2020), *A robust optimization for damage detection using multi-objective genetic algorithm, neural network and fuzzy decision making*, Inverse Problems in Science and Engineering, 28(1): p. 21-46.

13- Gomes, G.F. and R.S. Giovani, (2020), *An efficient two-step damage identification method using sunflower optimization algorithm and mode shape curvature*, Engineering with Computers: p. 1-20.

14- Gomes, G.F., et al., (2019), *A multi-objective sensor placement optimization for SHM systems considering Fisher information matrix and mode shape interpolation*, Engineering with Computers, 35(2): p. 519-535.

15- Holland, J.H., (1992), *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, MIT press.