

بهینه‌سازی چندهدفی در طراحی همزمان سیستم بدنه-پروانه شناور

حسن ذاکردوست، حسن قاسمی*، احسان اسماعیلیان

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۴ مرداد ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۲ بهمن ۱۳۹۴
پذیرش: ۹ اسفند ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۰ مرداد ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی
پروانه و بدنه
روش المان پره
مقاومت شناور
کاهش مصرف سوخت

چکیده: بهینه‌سازی سیستم پروانه-پروانه یک کشتی همواره یکی از جنبه‌های مهم طراحی به منظور کاهش هزینه‌ها، افت‌های مکانیکی و افزایش عمر قطعات سیستم بوده است. روش طراحی پیشنهادی رویکرد جدیدی برای بهینه‌سازی همزمان سیستم پروانه - بدنه ارائه می‌دهد. در این کار دو تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. تابع هدف اول مصرف سوخت چرخه عمر شناور و تابع هدف دوم با نام تابع هزینه شامل تراست، گشتاور و بازدهی‌های آب آزاد و اسکپو می‌باشد. جهت انجام بهینه‌سازی جامع، بدنه شناور و سیستم رانش به عنوان یک سیستم واحد و یکپارچه در نظر گرفته شده و از نمودار ماموریت شناور برای کمینه‌سازی هر دو تابع هدف در طول چرخه عمر شناور استفاده می‌گردد. پارامترهای کاویتاسیون و تنش پروانه نیز به عنوان قیود مسئله به کار گرفته شدند. الگوریتم تکاملی مشهور ان اس‌جی‌ای ۲ جهت بهینه‌سازی چندهدفی مسئله که در آن ابعاد و نسبت‌های اصلی پروانه و بدنه به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند به کار می‌رود. نتایج برای یک کشتی سری ۶۰- که با سیستم پیشرانش شامل یک پروانه سری-ب و موتور L51/60DF حرکت می‌کند ارائه می‌گردد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی یک روش مناسب و موثر برای طراحی همزمان پروانه - بدنه می‌باشد و منجر به کاهش قابل توجهی در هر دو تابع هدف گردیده است.

۱- مقدمه

بهینه‌سازی سیستم بدنه-پروانه از جنبه‌های مهم طراحی می‌باشد و باعث کاهش هزینه، و بهبود عملکرد و افزایش عمر سیستم رانش می‌شود. برای دستیابی به بهترین فرآیند بهینه‌سازی لازم است که تا حد امکان کلیه پارامترهای تاثیرگذار بر روی مسئله در نظر گرفته شود. علاوه بر پارامترهایی که معمولاً در طراحی و بهینه‌سازی پروانه مدنظر قرار می‌گیرد می‌توان از پارامتر اسکپو^۱ به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی سیستم پیشرانش که بر روی بازدهی سیستم پیشرانش و کاویتاسیون اثرگذار است استفاده کرد [۱]. این پارامتر برای شناورهای زیرسطحی خیلی مهم و حائز اهمیت است. تحلیل پروانه اسکپودار و بررسی عملکرد آن برای شناورهای زیردریایی با استفاده از روش المان مرزی توسط قاسمی و سایبانی ارائه شده است [۲].

اکثر کارهایی که در زمینه طراحی و بهینه‌سازی بدنه و پروانه انجام شده، تنها بدنه شناور و یا پروانه را با توجه به اهداف مدنظر بهینه کرده‌اند و کمتر کاری در زمینه بهینه‌سازی هم زمان سیستم بدنه-پروانه صورت پذیرفته است. در زمینه بهینه‌سازی بدنه شناور به طور نمونه دجهالا و همکاران [۳] یک روش بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی یک بدنه شناور از نقطه نظر هیدرودینامیکی مطرح کردند. در کار دیگری

که توسط زارافونیتیس و همکاران [۴] انجام گردید، مقاومت موج به عنوان تابع هدف انتخاب شد. موضوع اصلی مسئله کمینه کردن مقاومت‌های کل و موج بود. بعضی از بسته‌های نرم‌افزاری همچون ناپا^۲ برای نرم‌افزار طراحی و ابزار مدلسازی برای تولید سری‌های فرم بدنه، شپ‌فلو^۳ برای ارزیابی مقاومت و مدفروتیر^۴ برای بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. گاگرو و بریزولارا [۵] در مراحل طراحی کلی و محلی برای محاسبه مقاومت موجسازی به ترتیب از یک فرمول تحلیلی شبیه میشل و روش پنل استفاده نمودند. در کاری دیگر کیم و یانگ [۶] بهینه‌سازی یک کاتاماران را که توسط ترکیبی از روشهای انتقالی و درونیایی توابع پایه شعاعی مدلسازی شده بود، به کمک الگوریتم ژنتیک بر حسب مقاومت انجام دادند. عملکرد مقاومت توسط روشی بر مبنای تئوری نیومن-میشل ارزیابی گردید. بهینه‌سازی این کار توسط الگوریتم تکامل اختلاfi انجام گردید. ذاکردوست و همکاران [۷] بدنه شناورهای سری-۶۰ را با در نظر گرفتن مقاومت کل به عنوان تنها هدف خود بهینه‌سازی کردند. آن‌ها در کار خود از روش تئوری میشل جهت محاسبه مقاومت موج و از الگوریتم بهینه‌سازی استراتژی تکامل برای کمینه نمودن مقاومت استفاده کردند. در زمینه بهینه‌سازی پروانه لی و لین به بهینه‌سازی پروانه‌های سری-ب^۵ برای

2 NAPA
3 ShipFlow
4 mosedfrontier
5 B-series propeller

1 Skew

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gasemi@aut.ac.ir

افزایش بازدهی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند [۸]. در سال ۱۹۹۸ توزیع زاویه چرخش و توزیع کورد در جهت اسپن توسط لی و چو [۹] با به کار بردن الگوریتم بهینه‌سازی گرادیانی با یک روش برای تابع جریمه بهینه گردید. همچنین امکان‌سنجی بیشینه نمودن بازده با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در کاری که لی و لین [۸] انجام دادند بررسی گردید. پس از آن پلوسینسکی و همکاران [۱۰] یک پروانه خودچرخشی^۱ را با کمک الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن زوایای قرارگیری فیبرها در هر لایه به عنوان متغیرهای طراحی بهینه نمودند؛ هدف از اینکار بهبود بازده پروانه بود. در کار دیگری که توسط بورگر [۱۱] انجام گردید در جهت بهینه‌سازی طراحی، یک برنامه تحلیل عملکرد پروانه توسعه داده شد. در این کار از الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی استفاده گردید. چن و شیه با در نظر گرفتن قیود کاپیتاسیون، استحکام و توان یک تابع هدف را که متشکل از تابع بازدهی و توابع نیرو و ممان ارتعاشات بود را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه نمودند [۱۲]. کوپر بر روی بهینه‌سازی پروانه در شناورهای کانتینربری بزرگ تحقیقی انجام داد که در آن پروانه با توجه به سرعت مورد نیاز شناور بهینه می‌شد [۱۳]. گفاری و همکاران یک روش بهینه‌سازی طراحی را برای پروانه‌های دریایی سری-ب با هدفی مشابه با کار قبلی یعنی بیشینه نمودن بازده پروانه در یک سرعت مشخص ارائه دادند. آن‌ها فرآیندی را جهت یافتن مشخصات بهینه پروانه‌های دریایی سری-ب معرفی کردند. در این کار بهینه‌سازی چندین قید از جمله کاپیتاسیون، استحکام ماده و تراست موردنیاز پروانه در نظر گرفته شد [۱۴]. اکسی [۱۵] در کار خود روش جدیدی را برای مطالعه بهینه‌سازی چند هدفی پروانه کشتی ارائه داد. نسبت بازدهی و ضریب تراست پروانه به عنوان اهداف بهینه‌سازی انتخاب شدند. الگوریتم ان‌اس‌جی‌ای^۲ برای تقریب مجموعه جواب‌های پرتو به کار گرفته شد. در نهایت نیز از یک روش تصمیم‌گیری جهت انتخاب بهترین جواب استفاده گردید. مثالی از این فرآیند بهینه‌سازی با در نظر گرفتن پروانه سری-ب ارائه گردید. میرجلیلی و همکاران [۱۶] از روش بهینه‌سازی چند هدفی کلونی زنبور عسل برای بهینه کردن شکل پروانه‌های دریایی استفاده کردند. دو تابع هدف یعنی بیشینه نمودن بازدهی و کمینه کردن کاپیتاسیون در نظر گرفته شد. آزمایش‌های متعددی جهت مشاهده و تحلیل اثرات پارامترهای سازه‌ای (شکل و تعداد پره‌ها) و شرایط عملیاتی بر روی دو تابع هدف انجام گردید. نتایج نشان داد که این الگوریتم بهینه‌سازی قادر به پیدا کردن تقریبی بسیار دقیق و با توزیع یکنواخت جبهه بهینه پرتو درست می‌باشد. کمرلویی و همکاران به بهینه‌سازی سیستم رانش با در نظر گرفتن عملکردهای بازدهی اسکيو، تراست و گشتاور و بازدهی آب آزاد پرداختند. آن‌ها از الگوریتم استراتژی تکامل جهت بهینه‌سازی پروانه‌های سری-ب و نیز پروانه‌های DTRC استفاده کردند [۱۷]. علاقمندان می‌توانند سایر کارهای انجام شده در حوزه بهینه‌سازی پروانه را در مراجع [۱۸-۲۱] بیابند. در زمینه کاهش

1 Self-twisting
2 NSGA-II

مصرف سوخت ماتلی و همکاران [۲۲] به تاثیر پروانه بر روی کاهش مصرف سوخت و بازدهی پروانه با در نظر گرفتن نمودار ماموریت شناور پرداختند. بهینه‌سازی به صورت تک هدفه برای پروانه گام ثابت یک شناور نظامی و به منظور کاهش مصرف سوخت بود. در حوزه بهینه‌سازی سیستم بدنه-پروانه نیلسون به بهینه‌سازی بدنه و پروانه به صورت همزمان با هدف به حداقل رساندن مصرف سوخت با لحاظ نمودار ماموریت شناور پرداخت [۲۳]. در تحقیقات گذشته یا بدنه و یا پروانه به تنهایی به عنوان هندسه‌هایی که در الگوریتم بهینه‌سازی جریان بر روی آنها حل می‌شود در نظر گرفته می‌شود و در میان تحقیقات گذشته تنها در مقاله نیلسون [۲۳] این دو هندسه با هم در نظر گرفته شده‌اند که ایده کار فعلی نیز بر اساس کار ایشان بوده است.

در این مقاله روشی برای بهینه‌سازی چندهدفی بدنه و پروانه به عنوان سیستمی یکپارچه به منظور کمینه نمودن دو تابع هدف مصرف سوخت (LFC) و Cost (شامل ترکیب خطی تراست، گشتاور و بازدهی آب آزاد و اسکيو) ارائه می‌گردد. این روش به منظور بهینه‌سازی فرم بدنه و مشخصات پروانه یک شناور سری-۶۰ با استفاده از فرمول‌هایی نه چندان مشکل بر مبنای نسبت‌ها و پارامترهای اصلی بدنه و پروانه استفاده می‌شود. در قسمت‌های بعدی، روش‌های محاسبه مقاومت، مشخصات هیدرودینامیکی پروانه و مصرف سوخت توضیح داده خواهد شد و در ادامه آن الگوریتم بهینه‌سازی به کار رفته در این طراحی همزمان یعنی الگوریتم ان‌اس‌جی‌ای^۲ توصیف می‌شود. یک مثال با استفاده از شناور سری-۶۰ به همراه پروانه سری-ب جهت بهینه‌سازی فرم بدنه و پروانه برای کمینه نمودن دو تابع هدف نشان داده خواهد شد. تفاوت این کار با کار نلسون [۲۳] در این است که الف) الگوریتم به کار گرفته شده به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی الگوریتم مشهور ان‌اس‌جی‌ای^۲ بوده که یکی از تکنیک‌های الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که در مقایسه با الگوریتم‌های گرادیانی که در مقاله نلسون [۲۳] استفاده شده دارای مزایای زیادی می‌باشد. دو مزیت اصلی این الگوریتم‌ها در ادامه می‌آید. احتمال اینکه الگوریتم‌های گرادیانی در بهینه محلی گیر بیافتند بسیار زیاد بوده در حالیکه الگوریتم‌های تکاملی اینطور نمی‌باشند. در الگوریتم‌های گرادیانی نیاز به محاسبه مشتق تابع می‌باشد که نیاز به تابعی پیوسته می‌باشد که خود باعث افزایش هزینه محاسبات شده در حالیکه در الگوریتم‌های تکاملی تنها از خود تابع استفاده می‌گردد. ب) در مقاله نلسون [۲۳] تنها تابع مصرف سوخت سالیانه در نظر گرفته شده است در حالیکه در کار حاضر علاوه بر این تابع هدف، تابع هدف دیگری تحت عنوان تابع Cost که ترکیبی از بازدهی‌های پروانه و اسکيو و همچنین تراست و گشتاور می‌باشد در نظر گرفته شده است که در نتیجه به جای استفاده از الگوریتم تک هدفی از الگوریتم چندهدفی ان‌اس‌جی‌ای^۲ استفاده شده است. پ) در مقاله نلسون [۲۳] تنها قید کاپیتاسیون در نظر گرفته شده است در حالیکه در مقاله حاضر جهت جامع‌تر شدن تحقیق علاوه بر کاپیتاسیون، استحکام (تنش) پره نیز به عنوان قید دیگری به کار گرفته شد. ج) در مقاله نلسون [۲۳] جهت محاسبه عملکردهای پروانه از روش رگرسیون استفاده شده

در نهایت ضریب مقاومت کل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_T = C_v + C_f \quad (7)$$

۲-۲- تئوری المان پره

در این تئوری فرض می‌شود پروانه ترکیبی از المان‌های پره می‌باشد و در اثر حرکت هر یک از این المان‌ها در سیال نیروی هیدرودینامیکی در هر المان پره ایجاد می‌شود. همچنین فرض می‌گردد هر المان پره به صورت یک فویل رفتار می‌کند، مولفه محوری این نیرو، تراست و ممان مولفه عمودی این نیرو حول محور پروانه، گشتاور نامیده می‌شود. با انتگرال‌گیری از ممان و تراست نسبت به شعاع برای تمام پره‌ها ممان و گشتاور کل برای پروانه به دست می‌آید. برای کل پروانه، تراست و گشتاور به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$T = \int \frac{1}{2} \rho z c V_A^2 (c_1 \cos(\beta) - c_d \sin(\beta)) dr \quad (8)$$

$$Q = \int \frac{1}{2} \rho z c V_A^2 (c_1 \sin(\beta) - c_d \cos(\beta)) r dr \quad (9)$$

که در آن z تعداد پره و c طول کورد می‌باشد. پارامترهای مورد استفاده در این تئوری در شکل ۱ نشان داده شده است. بدین ترتیب ضرایب تراست، گشتاور و بازدهی پروانه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (10)$$

$$K_q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{K_T J}{K_q 2\pi} \quad (12)$$

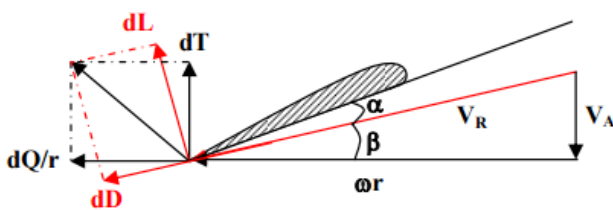


Fig. 1. Definition of used parameters in blade element theory
شکل ۱: تعریف پارامترهای به کار رفته در تئوری المان پره

ضریب J ضریب پیشروی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (13)$$

که در آن

$$V_A = V(1-w) \quad (14)$$

ضریب ویک، w ، را می‌توان بر حسب ضریب بلوکی C_B طبق مرجع [۲۶]

است در حالیکه در مقاله حاضر روش تئوری المان پره که روش دقیق‌تری نسبت به روش‌های رگراسیونی است به کار گرفته شد.

۲- تئوری و روابط حاکم

۲-۱- محاسبه مقاومت شناور

فرض می‌شود مقاومت شناور از دو مولفه مقاومت لزج (ویسکوز) و مقاومت موج تشکیل شده است. مقاومت موج در اثر انرژی که باید توسط کشتی به صورت پیوسته برای سیستم موج ایجاد شده بر روی سطح آب فراهم آید ایجاد می‌شود. مقاومت لزج متشکل از مقاومت اصطکاکی ناشی از حرکت شناور در سیال لزج و مقاومت فشار ناشی از اثرات لزجت می‌باشد. برای محاسبه مقاومت موج از تئوری میشل و برای مقاومت لزج از تئوری اصلاحی آی.تی.سی-۵۷ استفاده می‌گردد.

تئوری میشل تنها برای سیال همگن، غیرقابل تراکم، و غیر لزج و در نتیجه برای جریان غیر چرخشی که در آن اثرات کشش سطحی می‌تواند صرف نظر کرد، استفاده می‌شود و همچنین بدنه بایستی از نوع بدنه لاغر باشد. مقاومت موج را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۲۴]:

$$R_w = \pi \rho U^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |A(\theta)| \cos^3(\theta) d\theta \quad (1)$$

که در آن $|A(\theta)|$ تابع دامنه موج است. انرژی کل میدان موجی که در پشت بدنه ایجاد می‌شود را می‌توان با مشخص بودن $|A(\theta)|$ به آسانی محاسبه کرد. $|A(\theta)|$ را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$|A(\theta)| = \frac{2}{\pi} v \sec^3(\theta) \iint \frac{\partial \eta}{\partial x} e^{v \sec^2(\theta)(z + ix \cos(\theta))} dz dx \quad (2)$$

که در آن $v = g/V^2$ بوده و انتگرال بر روی صفحه مرکزی بدنه (cp) انتگرال‌گیری می‌شود. برای محاسبه مقاومت اصطکاکی نیز از رابطه آی.تی.سی-۵۷ به صورت زیر استفاده می‌گردد:

$$C_f = \frac{0.075}{(\log(Rn) - 2)^2} \quad (3)$$

که در آن

$$Rn = \frac{UL}{\nu} \quad (4)$$

عدد رینولدز می‌باشد. برای محاسبه ضریب مقاومت لزج از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$C_v = (1+k)C_f \quad (5)$$

که در این رابطه k فاکتور فرم بوده و به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۵]:

$$k = 0.6 \sqrt{V/L^3} + 9V/L^3 \quad 0.05 \leq k \leq 0.4 \quad (6)$$

۲-۳- کاویتاسیون

یکی از موضوعاتی که ممکن است تاثیر جدی بر عملکرد پروانه داشته باشد، کاویتاسیون می‌باشد، لذا این فاکتور می‌بایست برای طراحی صحیح پروانه در نظر گرفته شود. یکی از معروف‌ترین معیارهای کاویتاسیون مورد استفاده برای پروانه‌های دریایی معیاربوریل است [۲۷]. در این معیار از نموداری استفاده می‌شود که در آن ضریب بارگذاری تراست به صورت تابعی از عدد کاویتاسیون ارائه می‌گردد. معیار دیگری که برای جلوگیری از کاویتاسیون استفاده می‌شود معیار کلر است [۲۷]. یکی از راه‌های ساده برای کاهش کاویتاسیون افزایش نسبت مساحت پره می‌باشد. در معیار کلر نسبت مساحت پره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\left[\frac{A_E}{A_o} \right]_{min} = \frac{(1.3 + 0.3z)T}{(P_o - P_v)D^2} + K \quad (20)$$

که در آن $[A_E/A_o]_{min}$ نسبت مساحت پره کمینه می‌باشد و K برای شناورهای دو پروانه‌ای برابر ۰/۱ و برای شناورهای تک پروانه‌ای برابر ۰/۲ می‌باشد.

۲-۴- تنش پروانه

به دلیل شکل پیچیده پره‌های پروانه، محاسبه دقیق تنش ناشی از این نیروها کار دشواری است. در صورتی که مرکز جرم پره در شعاع $\bar{r} = \int_{r_0}^R \alpha r dr / \int_{r_0}^R r dr$ قرار داشته باشد نیروی گریز از مرکز از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$F_c = m_b \bar{r} (2\pi n)^2 \quad (21)$$

که در آن m_b جرم پره از شعاع r_0 تا نوک پره می‌باشد. ممان خمشی ناشی از نیروی گریز از مرکز در صفحه گذرنده از محور پروانه و عمود بر آن به ترتیب برابر است با:

$$M_R = F_c \cdot z_c \quad (22)$$

$$M_s = F_c \cdot y_c \quad (23)$$

ممان M_s و M_R ممان‌های ناشی از ریک و اسکویو هستند. برای محاسبه تنش در ابتدا مقطع پره را به ۲۶ مقطع در راستای کورد و ۱۱ مقطع در راستای شعاعی تقسیم می‌شود. نیروهای اعمالی به پروانه با انتگرال‌گیری به روش سیمپسون از حجم، ممان اینرسی و مساحت پره و به دنبال آن ممان ناشی از تراست و گشتاور را به دست آورده می‌شود. با استفاده از این مقادیر توسط رابطه‌ی زیر تنش پروانه محاسبه می‌گردد [۲۷]:

$$S = \frac{M_{x0}}{I_{x0}/y_0} - \frac{M_{y0}}{I_{y0}/x_0} + \frac{F_c}{a_0} \quad (24)$$

که در آن

به صورت زیر تعریف نمود:

$$w = 1.7643C_B^2 - 1.4745C_B + 0.2574 \quad (15)$$

هندسه پروانه و مشخصات هندسی آن شامل مساحت هر مقطع، حجم، جرم و مرکز گرانش هر پره محاسبه می‌گردد و در نهایت می‌توان این پارامترها را برای محاسبه تنش در مقاطع پره و ایجاد شکل هندسی پروانه بهینه و همچنین یافتن مشخصات بهینه پروانه سری-ب استفاده کرد. در کل، تراست محاسبه شده برای پروانه (T_{Cal}) باید برابر یا بزرگتر از مقاومت کل شناور باشد. تراست پروانه و تراست کمینه مورد نیاز (T_R) را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد:

$$T_{Cal} = K_T \rho n^2 D^4 \quad (16)$$

$$T_R = \frac{R_T}{n_p (1-t)} \quad (17)$$

که در آن R_T مقاومت کل شناور، n_p تعداد پروانه و t ضریب کاهش تراست بوده که تابعی از ضریب ویک می‌باشد. در این حالت برای محاسبه K_T مربوط به تراست مورد نیاز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$K_T = A J^2 \quad (18)$$

که A از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A = \frac{T_R}{\rho \times V_A^2 \times D^2} \quad (19)$$

همانطور که از شکل ۲ قابل مشاهده است از تقاطع K_T حاصل از رابطه (۱۸) با نمودار آب آزاد ضریب پیشروی J و دور پروانه و به دنبال آن بازدهی پروانه η_o به دست می‌آید.

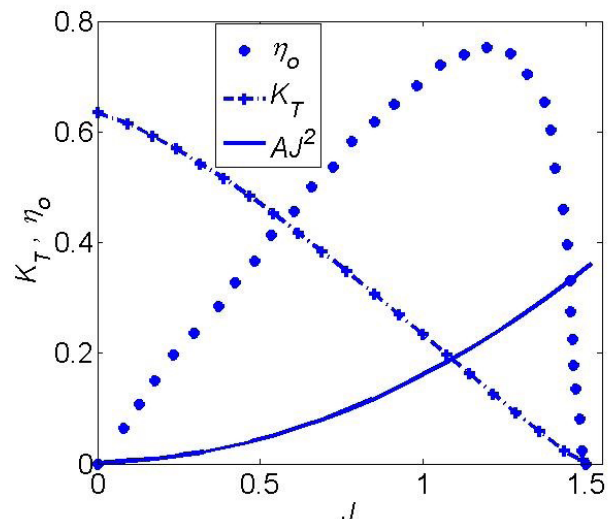


Fig. 2. Sample of intersection curves AJ^2 and K_T
شکل ۲: نمونه‌ای از تقاطع نمودار AJ^2 با نمودار K_T

که در آن QPC ضریب شبه‌رانش تاثیرگذار بر روی بدنه و پروانه بوده که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$QPC = \eta_H \eta_{RR} \eta_o \quad (30)$$

که در این معادله، η_H بازدهی بدنه، $\eta_{RR}=1$ بازدهی چرخشی نسبی و η_o بازدهی آب آزاد است.

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (31)$$

در اینجا فرض می‌شود افت‌های ناشی از شافت و بازدهی‌های یاتاقان ناچیز می‌باشند. از این رو $P_D = P_S$ که P_S توان شافت می‌باشد.

۲-۷- تابع چگالی ماموریت شناور

این تابع معرف سرعت حرکت شناور در طی زمان و در طول ماموریت‌های مختلف شناور می‌باشد. در اینجا فرض شده است که تابع ماموریت شناور مطابق شکل ۴ است.

برای تعیین مصرف سوخت شناور از تابع LFC که معرف مصرف سوخت شناور در طول چرخه عمر آن می‌باشد استفاده می‌شود [۲۳].

$$LFC = \int P(V) SFOC(V) P_D(V) dV L_h \quad (32)$$

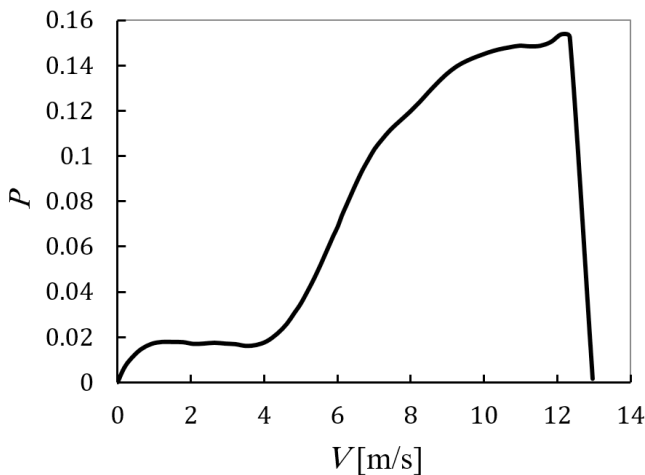


Fig. 4. Probability density function of ship speed
شکل ۴: تابع چگالی احتمال سرعت شناور [۲۳]

که در آن منظور از V و L_h به ترتیب سرعت شناور و مدت زمان مصرف سوخت می‌باشد. همچنین P ، $SFOC$ و P_D به ترتیب تابع چگالی احتمال سرعت، تابع مصرف سوخت ویژه شناور و توان تحویل داده شده به شناور می‌باشند.

۳- بهینه‌سازی چند هدفی

در حالت کلی می‌توان مسائل بهینه‌سازی چندهدفی را به صورت زیر بیان نمود:

$$M_{x0} = -(M_T + M_R) \cos \varphi - (M_Q - M_S) \sin \varphi \quad (25)$$

$$M_{y0} = -(M_T + M_R) \sin \varphi - (M_Q - M_S) \cos \varphi \quad (26)$$

در اینجا φ زاویه گام است.

۲-۵- اثر اسکيو

اسکيو پروانه بر روی کاپیتاسیون، فشارهای ارتعاشی، نیروهای شافت و بازدهی پروانه اثر می‌گذارد. اثر اسکيو بر روی بازدهی پروانه توسط رابطه تقریبی زیر که برحسب زاویه اسکيو می‌باشد تعیین می‌گردد [۲۸]:

$$\frac{\eta_{Skew}}{\eta_o} = 0.06687e^{-0.1148\theta_s} + 0.989e^{-0.001029\theta_s} \quad (27)$$

که در آن θ_s زاویه اسکيو می‌باشد. طبق این رابطه بازدهی پروانه اسکيو دار با زاویه اسکيو رابطه معکوس دارند.

۲-۶- مصرف سوخت چرخه عمر شناور

مصرف سوخت ویژه موتور، $SFOC$ ، توسط شرکت سازنده موتور بر حسب بار موتور تهیه می‌شود. برای این شناور نمودار مصرف سوخت ویژه مطابق با شکل ۳ می‌باشد.

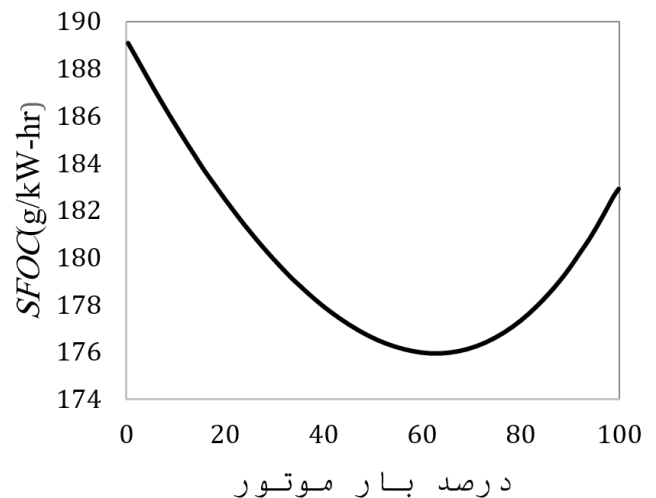


Fig. 3. ship specific fuel oil consumption
شکل ۳: مصرف سوخت ویژه شناور [۲۳]

رابطه توان موثر شناور، P_E با سرعت و مقاومت شناور به صورت زیر است:

$$P_E = R_T V \quad (28)$$

توان تحویل داده شده به پروانه P_D همان توان مورد نیاز پروانه است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_D = \frac{P_E}{QPC} \quad (29)$$

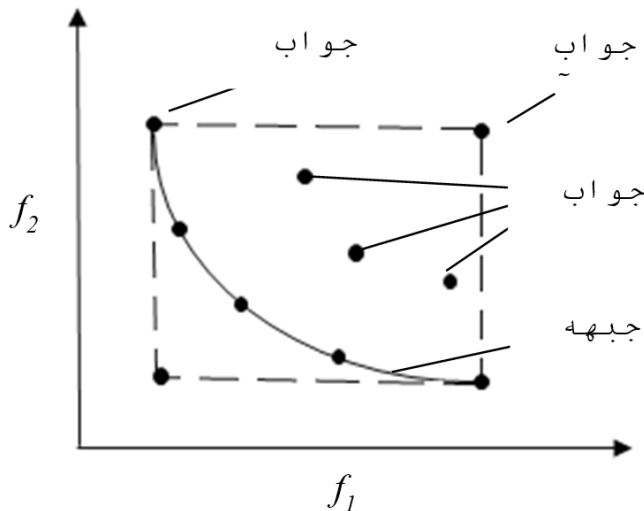


Fig. 5. Pareto frontier in multi-objective optimization

شکل ۵: جبهه پرتو در بهینه‌سازی چند هدفه

که تعداد تولید جمعیت بیشینه دست آید تکرار می‌شود. وقتی الگوریتم ان.اس.جی.ای ۲ خاتمه می‌یابد، جواب‌های نامغلوب جمعیت نهایی، جبهه پرتو را شکل می‌دهند. مراحل الگوریتم ان.اس.جی.ای ۲ در شکل ۶ نشان داده شده است. جدول ۱ پارامترهای به کار رفته در الگوریتم را نشان می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای الگوریتم ان.اس.جی.ای ۲

Table 1. NSGA-II algorithm parameters

مقدار پارامتر	پارامتر
۵۵۰	تکرار
۸	اندازه جمعیت
۳۰٪	درصد جهش
تصادفی	نوع جهش
۷۰٪	درصد ترکیب

پس از آن با توجه به مقادیر به دست آمده توابع هدف LFC و $Cost$ به دست می‌آیند. در مرحله بعد قیدهای مسئله بررسی شده و فرآیند تکرار تا زمانی که مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به دست آید و تا حداکثر تکرار حلقه الگوریتم ادامه می‌یابد. هدف کمینه نمودن دو تابع LFC و $Cost$ می‌باشد.

بردار متغیرهای طراحی به کار رفته در این جا به صورت زیر می‌باشد.

$$X = [L/B, B/T, T, EAR, z, D, P/D, J, Skew]$$

وزن مقادیر تراست، گشتاور، بازدهی آب آزاد و اسکيو در تابع هدف هزینه مطابق جدول ۲ می‌باشد. همچنین محدوده تغییرات بردار متغیرهای طراحی در جدول ۳ آورده شده است.

تشکیل بردار طراحی $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ به نحوی که بردار هدف زیر را با توجه به قیود طراحی بهینه نماید.

$$F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)]^T \quad (33)$$

قیود طراحی شامل p قید مساوی و q قید نامساوی به صورت زیر می‌باشد:

$$h_i(X) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (34)$$

$$g_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (35)$$

در یک بهینه‌سازی چندهدفی گفته می‌شود بردار طراحی U بر بردار طراحی V برتری دارد اگر و تنها اگر:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, u_i \leq v_i \wedge \exists j \in \{1, 2, \dots, n\}, u_j < v_j$$

به عبارتی دیگر وجود دارد حداقل یک u_j که کمتر از v_j است در حالیکه سایر مقادیر u کوچکتر یا مساوی مقادیر v نظیرشان هستند. نقطه X^* در دامنه جواب‌های امکان‌پذیر یک نقطه بهینه پرتو است اگر هیچ برداری مانند X در محدوده مجاز وجود نداشته باشد که باعث تنزل در بعضی از توابع هدف شود بدون آنکه افزایش مشابهی را در سایر توابع هدف داشته باشد. بهینه‌سازی پروانه و بدنه را می‌توان به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفی تعریف کرد. در بهینه‌سازی چند هدفی در حوزه هیدرودینامیک شناورها بر خلاف بهینه‌سازی تک هدفی با توجه به شرایط مسئله چندین جواب بهینه به صورت همزمان به طراح یا مالک شناور ارائه می‌گردد. در بهینه‌سازی دو هدفی این جواب‌ها نسبت به جواب‌های دیگر در یک تابع هدف برتر و در تابع هدف دیگر ضعیف‌تر هستند و هیچ جوابی یافت نمی‌شود که در هر دو تابع هدف برتر از سایر جواب‌ها باشد. به مجموعه‌ای از این جواب‌های نامغلوب، جواب بهینه پرتو و مقادیر تابع هدف متناظر با آن‌ها را جبهه پرتو گفته می‌شود. جبهه پرتو برای توابع دو هدفی f_1 و f_2 در شکل ۵ نشان داده شده است. در میان الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفی یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌ها، الگوریتم ان.اس.جی.ای ۲ می‌باشد [۲۹].

۳-۱- الگوریتم ان.اس.جی.ای ۲

در این مقاله، جبهه پرتو با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ان.اس.جی.ای ۲ به دست می‌آید. در الگوریتم ان.اس.جی.ای ۲، در ابتدا جمعیت اولیه تولید شده و سپس دسته بندی بر اساس دو معیار انجام می‌شود: الف) رتبه و ب) فاصله ازدحامی. سپس جمعیت انتخابی در یک رقابت با اعمال عملگرهای ژنتیک یعنی جهش و ترکیب تغییر کرده و فرزندان جمعیت را تولید می‌کند. در مرحله بعد مجموعه قدیمی جواب‌ها با جواب‌های جدید ترکیب می‌شوند تا یک جمعیت بزرگتر را ایجاد کنند و مقادیر شایستگی تمام این جواب‌ها محاسبه می‌گردد. جمعیتی با تناسب بهتر توسط دسته‌بندی نخبه‌گرا انتخاب می‌شوند که این جمعیت، والدین جمعیت بعدی می‌باشند. این مراحل تا زمانی

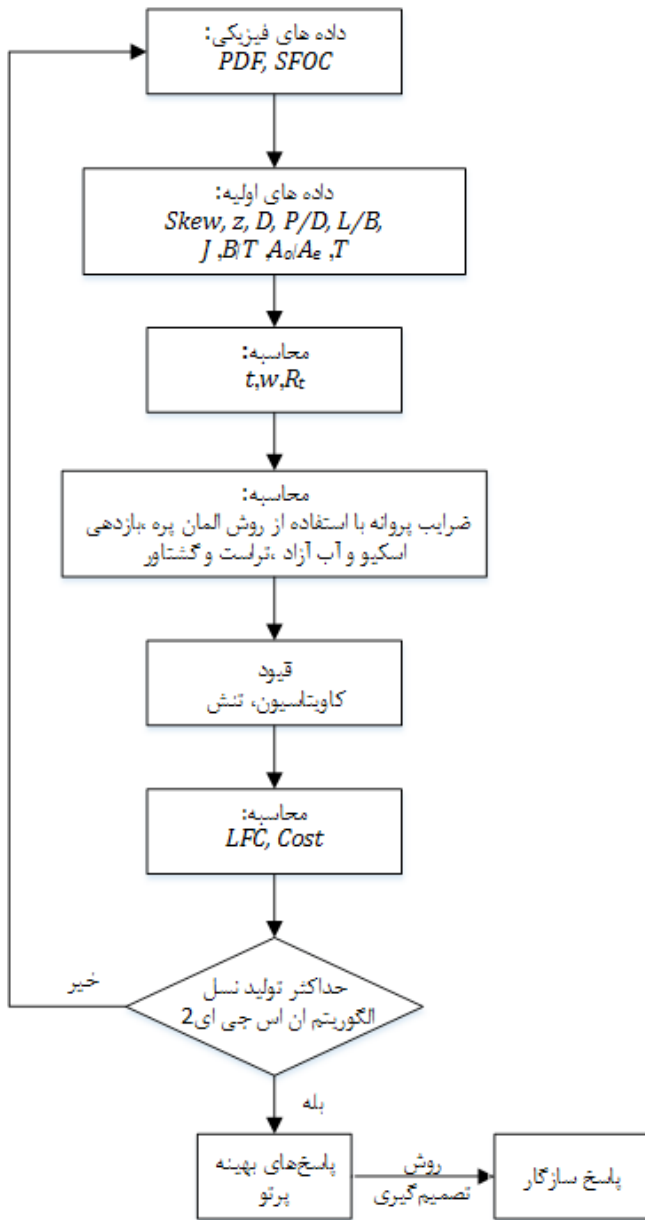


Fig. 7. General schematic of proposed study
شکل ۷: شماتیک کلی روش کار پیشنهادی

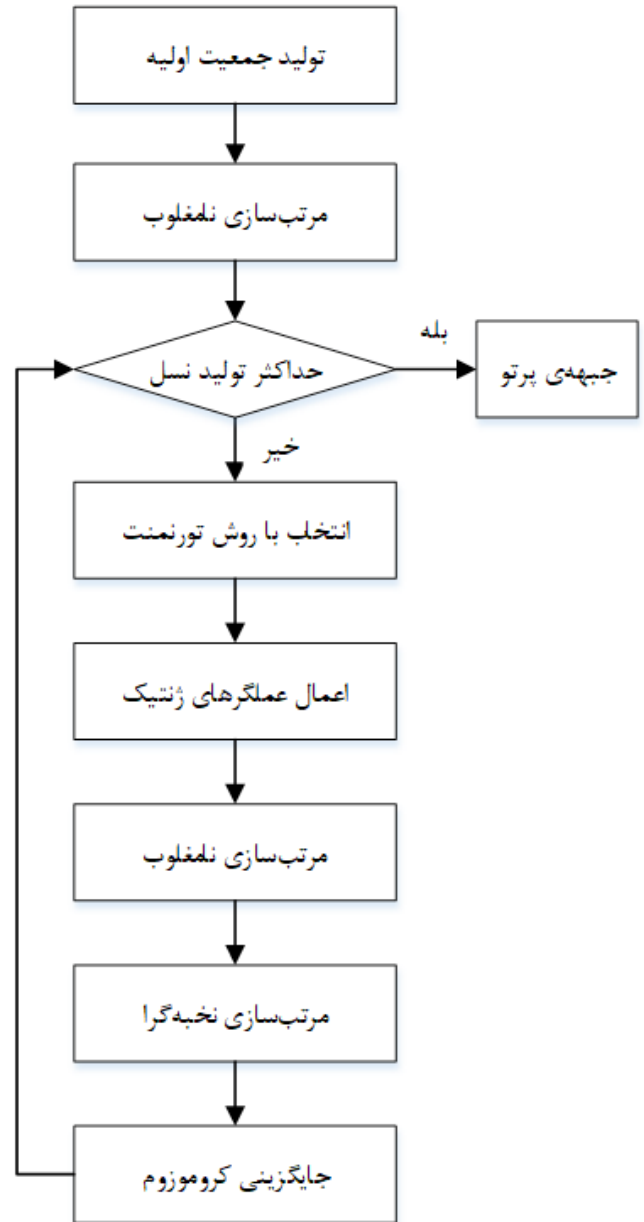


Fig. 6. NSGA-II algorithm steps
شکل ۶: مراحل الگوریتم ان.اس.جی.ای ۲

۴- بحث و بررسی نتایج

در این قسمت مسئله بهینه سازی قیددار بر اساس روش های بیان شده در قسمت های قبلی مورد تحلیل قرار می گیرد و سیستم بدنه-پروانه بهینه با حالت اولیه مقایسه می گردد. نتایج نشان می دهد که الگوریتم ارائه شده در این مقاله به خوبی توانسته اهداف مسئله را برآورده کند. برای اجرای کد نوشته شده از یک رایانه شخصی CPU 2.40 GHz استفاده گردید. زمان لازم برای اجرای این برنامه برای ۵۵۰ تکرار تقریباً نزدیک به ۵ ساعت به طول می انجامد.

شکل ۸ جبهه های پرتو حاصل از بهینه سازی را نشان می دهد. محور عمودی تابع LFC و محور افقی تابع $Cost$ را نمایش می دهد. نقاط نشان داده شده در شکل ۸ بیانگر این موضوع است که الگوریتم ان.اس.جی.ای

جدول ۲: وزن های پارامترهای تابع هدف $Cost$

Table 2. Weights of parameters in objective function $Cost$

هدف	بازدهی اسکپو	بازدهی آب آزاد	گشتاور	تراست
وزن	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲

به دلیل اینکه دو تابع گشتاور و بازدهی اسکپو نقشی در تابع هدف مصرف سوخت ندارند وزن آن ها بیشتر از دو تابع دیگر یعنی تراست و بازدهی آب آزاد قرار داده شد.

جدول ۳: محدودیت‌های اعمال شده

Table 3. Applied restrictions

حد بالا	حد پایین	متغیر طراحی
۷	۳	تعداد پره‌ها
۲۰	۱۰	زاویه ی اسکيو، درجه
۳۹	۰	تنش مجاز بیشینه، MPa
۱/۴	۰/۵	نسبت گام
۱/۵	۰/۴	ضریب پیشروی پروانه
۱۰/۸	۴/۴	قطر پروانه
۱/۰۵	۰/۵۵	نسبت سطح پره
۱۲	۸/۸	آبخور
۳/۶	۱/۲	نسبت عرض به آبخور شناور
۸	۵	نسبت طول به عرض شناور

۲ توانسته است به خوبی مجموعه جواب‌های بهینه پرتو را که به صورت یکنواخت در طول هر دو تابع هدف توزیع شده‌اند را بیابد.

توزیع یکنواخت جواب‌ها بیشتر ناشی از مکانیزم انتخاب بهترین جواب‌های هر نسل در الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد. در میان بهترین جواب‌ها انتخاب ارجح‌ترین جواب وابسته به شرایط مالک و طراح است. در اینجا برای یافتن بهترین جواب از روش تصمیم‌گیری نزدیک‌ترین فاصله به نقطه ایده‌آل^۱ استفاده شده است.

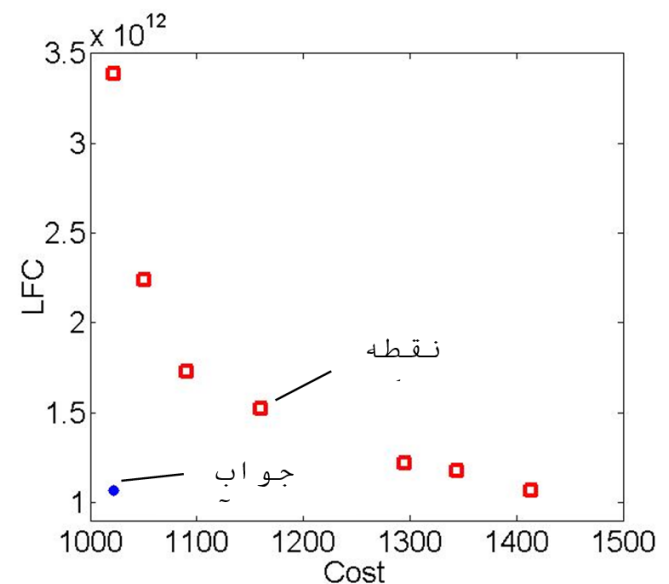


Fig. 8. Optimized points (Pareto frontier). Vertical axes is Lifetime fuel consumption and horizontal axes is Cost

شکل ۸: نقاط بهینه (جبهه پرتو). محوری عمودی مصرف سوخت چرخه عمر و محور افقی هزینه

بدین صورت که جهت یکسان شدن مرتبه، هر دو تابع هدف در بازه

1 Utopia point

صفر تا یک نرمال شده و فاصله هر یک از نقاط بهینه نسبت به نقطه ایده‌آل که مختصاتی برابر با مقدار کمینه هر دو تابع هدف دارد سنجیده می‌شود و در نهایت نقطه‌ای که کمترین فاصله را نسبت به نقطه ایده‌آل دارد به عنوان نقطه سازگار^۲ یا جواب ارجح انتخاب می‌گردد. در این مسئله دو نقطه ایده‌آل و سازگار به دست آمده در شکل ۸ نشان داده شده است.

مقادیر اولیه و بهینه پارامترهای طراحی مطابق جدول ۴ می‌باشد. نقطه سازگار در جدول ۴ معادل با مقدار بهینه ۵ است. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌گردد مقادیر بهینه متغیرهای طراحی بدنه یعنی L/B ، B/T و T تقریباً برای تمامی جواب‌های بهینه یکسان می‌باشند و این نشان دهنده این است که تفاوت نقاط بهینه بیشتر تحت تاثیر مشخصات پروانه می‌باشد. مقدار بهینه L/B در بازه $7/22$ تا $7/51$ تغییر می‌کند و مقدار بهینه B/T و T برای تمامی جواب‌های بهینه جبهه پرتو تقریباً مقداری ثابت و به ترتیب برابر با $1/39$ و $8/96$ می‌باشد.

در بین مشخصات پروانه نیز مقدار EAR برای تمامی نقاط جبهه پرتو مقداری ثابت و برابر با $0/56$ می‌باشد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد بهترین مقادیر دو تابع هدف LFC و $Cost$ برای سیستمی با تعداد پره‌های پروانه ۳ یا ۴ عدد به دست می‌آید زیرا سایر تعداد پره‌های پروانه منجر به تنزل یکی از دو تابع هدف و یا هر دو خواهد شد.

افزایش نسبت گام (P/D) منجر به افزایش تراست و گشتاور شده و در نتیجه احتمال رخ دادن پدیده کاویتاسیون افزایش می‌یابد.

بنابراین این مقدار باید به گونه‌ای بهینه گردد که تراست کافی تولید شده و در عین حال از کاویتاسیون جلوگیری شود. با توجه به اینکه در برنامه نوشته شده جهت تحلیل پروانه تمامی جواب‌ها قید کاویتاسیون را ارضا می‌کنند، لذا مقدار نسبت گام $1/02$ برای پروانه انتخابی می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

همانطور که ذکر شد افزایش زاویه اسکيو در پروانه مزایایی از جمله کاهش احتمال پدیده کاویتاسیون، جلوگیری از نوسانات فشار و بار دینامیکی ناگهانی روی پره و تولید نیروی محوری و گشتاور یکنواخت غیرنوسانی دارد، اما از سوی دیگر باعث کاهش بازدهی و تراست پروانه می‌گردد. لذا انتخاب مقداری بهینه برای زاویه اسکيو پروانه از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار بهینه این پارامتر همانطور که از جدول ۵ قابل مشاهده است برای تمام جواب‌های بهینه با تغییراتی نه چندان زیاد بین $10/09$ تا $10/35$ می‌باشد که می‌تواند مقداری منطقی برای پروانه‌های سری-ب باشد.

نمودار مقاومت برای شناور اولیه و بهینه شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود. محور عمودی سمت چپ نشانگر مقاومت اولیه و بهینه و محور سمت راست نشانگر نسبت مقاومت بهینه به مقاومت اولیه است. همانطور که در شکل دیده می‌شود مقاومت نسبت به حالت اولیه در تمام سرعت‌های حرکت شناور کاهش قابل توجهی دارد. با افزایش سرعت نسبت مقاومت اولیه به بهینه نیز افزایش یافته است. همانطور که در جدول ۴ نیز قابل مشاهده است این موضوع نشان دهنده این است که هر چند مقادیر بهینه

2 Compromise point

جدول ۴: پارامترهای طراحی اولیه و بهینه
Table 4. Optimized and initial design parameters

پارامتر	حد پایین	مقدار بهینه ۱	مقدار بهینه ۲	مقدار بهینه ۳	مقدار بهینه ۴	مقدار بهینه ۵	مقادیر بهینه ۶	مقدار بهینه ۷
L/B	۷/۴۴	۷/۲۲	۷/۵۱	۷/۴۷	۷/۳۳	۷/۳۹	۷/۴۴	۷/۴۰
B/T	۳/۵	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۳۹
T	۱۰/۱۵	۸/۹۷	۸/۹۵	۸/۹۵	۸/۹۷	۸/۹۷	۸/۹۵	۸/۹۷
EAR	۰/۸۹	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶
z	۴	۳	۴	۴	۳	۳	۴	۳
D	۷/۲۱	۴/۶۶	۵/۴۵	۵/۲۱	۴/۷	۴/۷۲	۵/۱۱	۴/۶۸
p/D	۱/۱۴	۰/۷۳	۱/۳۸	۱/۲۹	۰/۸۳	۱/۰۲	۱/۲۴	۰/۹۴
J	۱/۴۶	۰/۸۳	۱/۰۱	۰/۹۸	۰/۷۲	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۷۳
$Skew$	۱۸/۹۱	۱۰/۰۹	۱۰/۳۵	۱۰/۳۵	۱۰/۲۲	۱۰/۲۴	۱۰/۳۳	۱۰/۲۰
LFC	$۱/۵۵ \times 10^{12}$	$۲/۲۴ \times 10^{12}$	$۱/۵۲ \times 10^{12}$	$۳/۳۹ \times 10^{12}$	$۱/۰۷ \times 10^{12}$	$۱/۱۸ \times 10^{12}$	$۲/۲۴ \times 10^{12}$	$۱/۵۲ \times 10^{12}$
$Cost$	۴۹۹۳/۲	۱۰۲۲/۴	۱۴۱۴/۰	۱۳۴۴/۳	۱۰۵۰/۴	۱۱۵۹/۹	۱۲۹۵/۲	۱۰۹۰/۶

مقاومت است.

هر چه گشتاور با ثابت ماندن تراست کمتر گردد به جواب مطلوب نزدیکتر شده‌ایم. تغییرات گشتاور موردنیاز در سرعت‌های مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد که گشتاور نسبت به حالت اولیه کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. در سرعت‌های ابتدایی نسبت گشتاور بهینه به اولیه با شیب تندی افزایش می‌یابد و پس از یک روند ثابت در بازه‌ی قابل توجهی از سرعت‌های میانی مجدداً در سرعت‌های انتهایی روند افزایشی خود را ادامه می‌دهد (محور سمت راست شکل ۱۲).

با توجه به نمودار ماموریت شناور (شکل ۴) می‌توان سرعت طراحی شناور را برابر با ۱۲/۳۵ متر بر ثانیه در نظر گرفت. در اینجا به طور نمونه

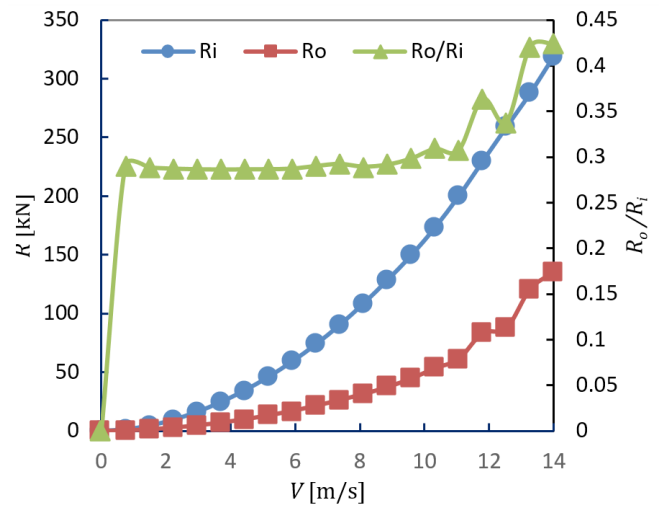


Fig. 9. Total resistance versus speed for initial and optimized ship
شکل ۹: نمودار مقاومت کل بر حسب سرعت برای شناور اولیه و بهینه

پارامترهای بدنه نسبت به یکدیگر تغییر چندانی ندارند اما نسبت به مقادیر اولیه خود تغییر قابل توجهی دارند.

نمودار آب آزاد پروانه در سرعت‌های مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. بازدهی در اکثر سرعت‌ها افزایش یافته در حالیکه ضریب گشتاور و تراست کاهش یافته است.

در شکل ۱۱ نمودار تراست مورد نیاز اولیه و بهینه (محور سمت چپ) و نسبت بین آنها (محور سمت راست) در سرعت‌های مختلف مشاهده می‌شود. تراست مورد نیاز سیستم رانش در سرعت‌های مختلف کاهش پیدا کرده است چرا که به وضوح روشن است طبق معادله (۲۶) تراست رابطه مستقیم با مقاومت دارد. روند تغییرات تراست در این شکل همانند روند تغییرات نمودار

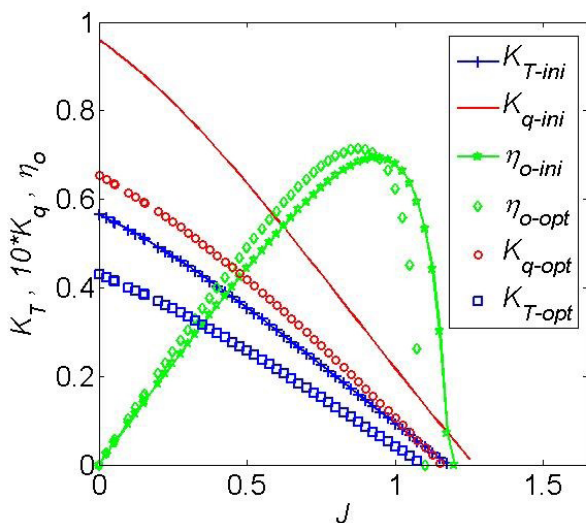


Fig. 10. Open water parameters of initial and optimized propellers

شکل ۱۰: پارامترهای آب آزاد پروانه اولیه و بهینه

کرده‌اند اما تراست شناور کاهش یافته است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز این موضوع را تایید می‌کنند. اما این موضوع در اینجا قابل ذکر است که میزان کاهش گشتاور بیش از میزان کاهش تراست بوده و همچنین عملکردهای بازدهی آب آزاد و بازدهی اسکپو افزایش یافته‌اند لذا در مجموع میزان هر دو تابع هدف بهبود یافته است که در جدول ۵ با مقایسه جواب‌های اولیه و جواب بهینه این موضوع تایید می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی چندهدفی جهت کمینه‌سازی دو تابع هدف LFC و $Cost$ (شامل تراست، گشتاور، بازدهی آب آزاد و بازدهی اسکپو) یک شناور با بهینه‌سازی همزمان هندسه بدنه و پروانه شناور ارائه گردید. جهت جلوگیری از بهینه‌سازی در یک سرعت طراحی، از نمودار احتمالاتی ماموریت شناور جهت توصیف عملیات شناور استفاده شد. از تئوری المان پره برای محاسبه مشخصات پره، تئوری تیر یک سرگردار برای محاسبه تنش پره، تئوری کاویتاسیون کلر و منحنی باکت برای تحلیل کاویتاسیون، منحنی مصرف سوخت ویژه ($SFOC$) برای تعیین مصرف سوخت شناور و در نهایت از الگوریتم ان اس جی ای ۲ برای فرآیند بهینه‌سازی استفاده گردید. پارامترهای تنش و کاویتاسیون به عنوان قیدهای مسئله در نظر گرفته شدند. نتایج نشان از عملکرد موثر این الگوریتم چندهدفی برای بهینه‌سازی همزمان بدنه و پروانه می‌باشد. با توجه به جداول ۴ و ۵ و همچنین اشکال ۹ تا ۱۲ به جز عملکرد تراست سایر عملکردهای اصلی بدنه و پروانه بهبود یافته‌اند و در مجموع هر دو تابع هدف LFC و $Cost$ جواب‌های بهینه پرتو نسبت به حالت سیستم بدنه-پروانه اولیه کاهش قابل توجهی پیدا کردند. اثر اسکپو نیز یک قید عملیاتی جدید جهت تخمین بازدهی پروانه و محدود کردن مسئله کاویتاسیون می‌باشد. با توجه به اینکه پارامترهای اصلی بدنه جواب‌های بهینه به دست آمده تقریباً یکسان می‌باشند می‌توان نتیجه گرفت مشخصات بدنه زودتر از مشخصات پروانه همگرا شده و تفاوت توابع هدف جبهه پرتو بیشتر تحت تاثیر پارامترهای پروانه می‌باشد. الگوریتم چندهدفی ارائه شده در این کار می‌تواند در فرآیند طراحی مرحله اولیه با توسعه سیستم‌ها در جهت کمینه نمودن مصرف سوخت، بهبود پارامترهای عملکردی پروانه و انتخاب بهترین سیستم بدنه-پروانه به کمک آید که در نهایت منجر به کاهش هزینه کل مالک شناور و همچنین آلودگی ناشی از کربن خروجی می‌گردد.

قابل ذکر است که می‌توان پارامترهای بیشتری را برای این مسئله چه در توابع هدف و چه در قیود مسئله تعریف کرد و این روش را برای سیستم‌های پیشرانس و بدنه‌های دیگر استفاده نمود. می‌توان ابعاد بدنه با روش‌هایی مانند نریز تغییر داده شود تا اثر شکل بدنه بر روی بهینه‌سازی بیشتر شود. با توسعه نمودار عملیاتی شناور و در نظر گرفتن داده‌های دیگری همچون حالت دریا و یا سایر داده‌های مشخص شناور، مصرف سوخت و پارامترهای عملکردی پروانه می‌تواند بهبود بهتری یافته و در نتیجه هزینه‌های چرخه

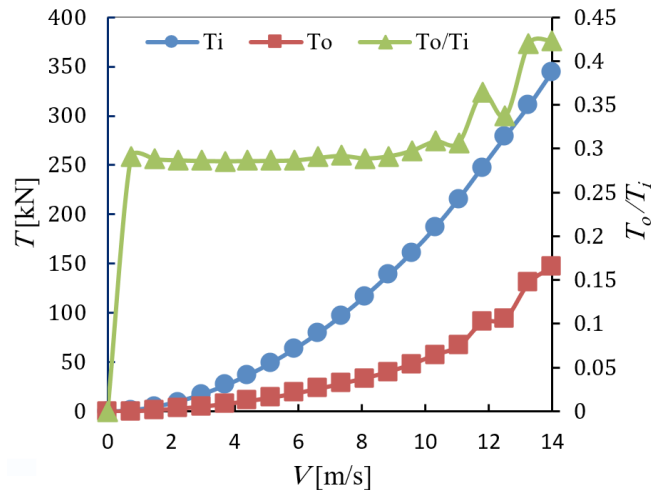


Fig. 11. Thrust versus speed for initial and optimized ship
شکل ۱۱: نمودار تراست بر حسب سرعت برای شناور اولیه و بهینه

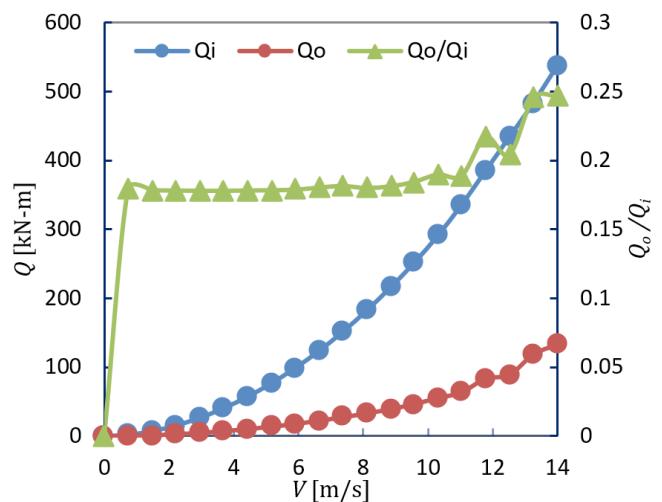


Fig. 12. Torque versus speed for initial and optimized propeller
شکل ۱۲: نمودار گشتاور بر حسب سرعت برای پروانه اولیه و بهینه

جدول ۵: درصد تغییرات عملکردهای جواب‌های اولیه و بهینه

Table 5. Changes percent of initial and optimized solution performances

عملکرد	R_T	T	Q	η_o	η_{skew}
جواب اولیه	۲۴۹/۷۵	۲۶۹/۴۵	۴۱۹/۰۴	۰/۶۹۳	۰/۶۷۸
جواب بهینه	۸۷/۶۳	۹۴/۵۵	۸۸/۴۷	۰/۷۱۴	۰/۷۱۳
درصد تغییر	۶۵	۶۵	۷۸	۳	۵

درصد تغییرات عملکردهای مهم سیستم بدنه-پروانه در جدول ۵ نمایش داده شده است. با توجه به داده‌های این جدول دیده می‌شود که عملکردهای مقاومت شناور و گشتاور جواب بهینه سازگار به صورت قابل توجهی نسبت به جواب اولیه بهبود یافته است.

عملکردهای بازدهی آب آزاد و بازدهی اسکپو نیز نسبتاً بهبود پیدا

عمر شناور را بیشتر کاهش دهد. علاوه بر آن می‌توان نقش پارامترهای بهینه‌سازی همچون اندازه جمعیت و عملگرهای ژنتیک را نیز بر روی نرخ همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی بررسی نمود.

فهرست علائم

T	تراست، kN	A_E	سطح گسترش یافته پره، m^2
T_R	تراست مورد نیاز، kN	$A(\theta)$	تابع دامنه موج
t_{de}	ضریب کاهش تراست	A_o	سطح دیسک پره، m^2
t	ضخامت، m	a_0	مساحت مقطع ریشه، m^2
u_a	سرعت القایی محوری، ms^{-1}	c	طول کورد، m
u_t	سرعت القایی مماسی، ms^{-1}	C_B	ضریب فرم بدنه
V	سرعت شناور، ms^{-1}	c_l	ضریب لیفت
V_A	سرعت پیشروی پروانه، ms^{-1}	c_d	ضریب مقاومت
w	ضریب ویک	C_f	ضریب مقاومت اصطکاکی
z	تعداد پره	C_T	ضریب مقاومت کل
z_c	فاصله نسبت به مرکز ثقل مقطع، m	C_v	ضریب مقاومت لزج
علائم یونانی		D	قطر پروانه، m
β	زاویه‌ی گام هیدرودینامیکی	F_C	نیروی گریز از مرکز، kN
α	زاویه‌ی حمله	g	شتاب گرانش، m^2s^{-1}
φ	زاویه‌ی گام هندسی	I_{x_0}	مدول مقطع حول محور x_0
θ_s	زاویه‌ی اسکيو	I_{y_0}	مدول مقطع حول محور y_0
η_H	بازدهی بدنه	L	طول شناور، m
η_o	بازدهی آب آزاد	LFC	سوخت مصرف شده در سال، gr
η_{RR}	بازدهی چرخشی نسبی	M_Q	ممان گشتاور، kN.m
η_{Skew}	بازدهی اسکيو	M_R	ممان ناشی از زاویه ریک، kN.m
ρ	چگالی، kgm^{-3}	M_s	ممان ناشی از اسکيو، kN.m
		M_T	ممان ناشی از تراست، kN.m
		M_{x_0}	ممان حول محور x_0 در مرکز ثقل مقطع، kN.m
		M_{y_0}	ممان حول محور y_0 در مرکز ثقل مقطع، kN.m
		n_p	تعداد پروانه
		P_E	توان موثر، kW
		Q	گشتاور، kN.m
		QPC	بازدهی شبه پیشران
		r	شعاع مقطع پره، m
		S	تنش مجاز بیشینه پروانه، kPa
		$SFOC$	مصرف سوخت ویژه، gr/kW-hr

منابع

- [1] H. Ghasemi, The effect of wake flow and skew angle on the ship propeller performance, *Scientia Iranica* 16(2) (2009).
- [2] H. Gassemi, M. Sayebani, Analysis of Highly Skewed Propeller and Power Prediction for the Submarine by Boundary Element Method, *Amirkabir Journal of Science and Research, Mechanical Engineering*, 42(2) (2010) 47-56.
- [3] R. Dejhalla, Z. Mrša, S. Vuković, A genetic algorithm approach to the problem of minimum ship wave resistance, *Marine Technology*, 39(3) (2002) 187-195.
- [4] G. Zaraphonitis, A. Papanikolaou, D. Mourkoyiannis, Hull form optimization of high speed vessels with respect to wash and powering, *Proceedings of IMDC*, 3 (2003) 43-54.
- [5] S. Gaggero, S. Brizzolara, An Integrated Tool For Concept And Final Design Of Optimum Swat-Hull Forms, *Proceeding of NAV 2006-Int. Conference on*

- Optimisation of Marine Propellers, *Procedia Computer Science*, 51 (2015) 2247-2256.
- [17] M. Kamarlouei, H. Ghassemi, K. Aslansefat, D. Nematy, Multi-Objective Evolutionary Optimization Technique Applied to Propeller Design, *Acta Polytechnica Hungarica*, 11(9) (2014).
- [18] E. Benini, Multiobjective design optimization of B-screw series propellers using evolutionary algorithms, *Marine Technology*, 40(4) (2003) 229-238.
- [19] D.S. Greeley, J.E. Kerwin, Numerical methods for propeller design and analysis in steady flow, *Transactions-Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 90 (1982) 415-453.
- [20] M.M. Karim, M. Ikehata, A genetic algorithm (GA)-based optimization technique for the design of marine propeller, in: *Proceedings of the propeller/shafting 2000 symposium*. Virginia Beach, USA, 2000.
- [21] J. Suen, J. Kouh, Genetic algorithms for optimal series propeller design, in: *Proceeding of the Third International Conference on Marine Technology*, ORDA, 1999.
- [22] M.R. Motley, M. Nelson, Y.L. Young, Integrated probabilistic design of marine propulsors to minimize lifetime fuel consumption, *Ocean Engineering*, 45 (2012) 1-8.
- [23] M. Nelson, D. Temple, J. Hwang, Y. Young, J. Martins, M. Collette, Simultaneous optimization of propeller-hull systems to minimize lifetime fuel consumption, *Applied Ocean Research*, 43 (2013) 46-52.
- [24] E.V. Lewis, Principles of naval architecture second revision, in: *Jersey: SNAME*, 1988.
- [25] J. Ghose, R. Gokarn, Basic ship propulsion, *Allied Publishers*, 2004.
- [26] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation*, *IEEE Transactions on*, 6(2) (2002) 182-197.
- Ship and Shipping Research*. GENOVA-ITALY (2006).
- [6] H. Kim, C. Yang, Hydrodynamic Optimization of Multihull Ships, *Proceedings of the FAST-11th International Conference on Fast Sea Transportation*, Hawaii, USA, (2011).
- [7] H. Zakerdoost, H. Ghassemi, M. Ghiasi, Ship hull form optimization by evolutionary algorithm in order to diminish the drag, *Journal of Marine Science and Application*, 12(2) (2013) 170-179.
- [8] Y.-J. Lee, C.-C. Lin, Optimized design of composite propeller, *Mechanics of advanced materials and structures*, 11(1) (2004) 17-30.
- [9] J. Cho, S.-C. Lee, Propeller blade shape optimization for efficiency improvement, *Computers & fluids*, 27(3) (1998) 407-419.
- [10] M.M. Pluciński, Y.L. Young, Z. Liu, Optimization of a self-twisting composite marine propeller using Genetic algorithms, *16th International conference on composite materials*, Kyoto, Japan, (2007).
- [11] C. Burger, Propeller performance analysis and multidisciplinary optimization using a genetic algorithm, *ProQuest*, 2007.
- [12] J.-H. Chen, Y.-S. Shih, Basic design of a series propeller with vibration consideration by genetic algorithm, *Journal of marine science and technology*, 12(3) (2007) 119-129.
- [13] G. Kuiper, New developments and propeller design, *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 22(5) (2010) 7-16.
- [14] M. Gaafary, H. El-Kilani, M. Moustafa, Optimum design of B-series marine propellers, *Alexandria Engineering Journal*, 50(1) (2011) 13-18.
- [15] G. Xie, Optimal preliminary propeller design based on multi-objective optimization approach, *Procedia Engineering*, 16 (2011) 278-283.
- [16] S. Mirjalili, A. Lewis, S.A.M. Mirjalili, Multi-objective

Please cite this article using:

H. Zakerdoost, H. Ghassemi, Ehsan Esmailian, Multi-objective Optimization for Simultaneous Ship System Design, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(3) (2017) 445-456.

DOI: 10.22060/mej.2016.797

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

