

بهینه سازی پروانه شناور سطحی رزمی برای کمینه نمودن مصرف سوخت

احسان اسماعیلیان^۱، حسن قاسمی^۲، حسن ذاکردوست^۳

Gasemi@aut.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

بهینه سازی پروانه همواره یکی از جنبه‌های مهم طراحی پروانه می‌باشد. کاهش مصرف سوخت در شناور ها نیز یکی از جنبه های مهم طراحی است و اگر شناور و سیستم رانش درست طراحی نشده باشند، هزینه های زیادی را به دنبال دارد. در شناورهای نظامی ممکن است وضعیت های مختلفی برای سیستم رانش در نظر گرفته شود تا در ماموریت های مختلف، شناور بهترین عملکرد را داشته باشد. در این مقاله یک روش جدید برای طراحی سیستم رانش یک شناور نظامی ارائه می‌شود و سه وضعیت مختلف سیستم رانش در وضعیت معمولی که تنها از یکی از موتورها و وضعیت نیمه قدرت در سرعت‌های متوسط و وضعیت تمام قدرت که به ترتیب از دو و چهار موتور استفاده میشود، در نظر گرفته می‌شود. همچنین، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سیستم رانش شناور به منظور افزایش بازدهی، تراست و کاهش گشتاور با لحاظ اسکيو، کاویتاسیون و تنش طراحی می‌شود و بهترین سرعتی که در آن شناور دارای کمترین مصرف سوخت است، بدست می‌آید.

واژگان کلیدی: کمینه کردن مصرف سوخت، بهینه سازی پروانه، الگوریتم ژنتیک، شناور رزمی، ماموریت های مختلف

تاریخ دریافت مقاله : ۹۴/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۱۰/۱۴

۱ - مقدمه

سپس از این پارامترها برای محاسبه‌ی تنش در پره، تعیین مشخصات بهینه پروانه‌ی سری B و کاهش مصرف سوخت استفاده می‌شود. فرآیند طراحی پروانه یک فرآیند طراحی چند هدفه است که در راستای به حداقل رساندن کاویتاسیون، مصرف سوخت و گشتاور پروانه و همچنین افزایش تراست، بازدهی پروانه، اسکيو و نیز لحاظ تنش است.

۲- تئوری و روش محاسبات

در این مقاله از تئوری المان پره برای محاسبه‌ی مشخصات پره، تئوری تیریک سرگردار برای محاسبه‌ی تنش پره، تئوری کاویتاسیون کلر و منحنی باکت برای تحلیل کاویتاسیون، منحنی مصرف سوخت ویژه (Specific Fuel Consumption = SFC) برای تعیین مصرف سوخت شناور و در نهایت از تکنیک الگوریتم ژنتیک برای فرآیند بهینه سازی استفاده می‌شود. در این مقاله متغیرهای ورودی به الگوریتم ژنتیک تعداد پره، قطر پروانه، زاویه‌ی اسکيو، نسبت گام، سرعت شناور و متغیر خروجی، مصرف سوخت لحاظ تراست و بازدهی پروانه بیشتر و کاهش گشتاور و بازدهی اسکيو تحت قید های تنش و کاویتاسیون می‌باشند.

۲-۱- تئوری المان پره

در اینجا از تئوری المان پره برای تعیین تراست و وابستگی آن به شکل پره استفاده می‌شود. در این تئوری فرض می‌شود پروانه ترکیبی از المان های پره می‌باشد و در اثر حرکت هر یک از این المان ها در سیال نیرویی در هر المان پره ایجاد می‌شود. مولفه محوری این نیرو تراست و ممان مولفه مماسی این نیرو حول محور پروانه، گشتاور نامیده میشود. با انتگرال گیری از گشتاور و تراست نسبت به شعاع برای تمام پره ها تراست و گشتاور کل برای پروانه بدست می‌آید.

اگر پروانه را به المان های مختلف تقسیم کنیم هر المان به صورت یک فویل رفتار می‌کند که در معرض سرعت V_R قرار دارد (شکل ۱). این سرعت شامل مولفه‌ی مماسی و مولفه‌ی چرخشی می‌باشد. برای هر مقطع تراست و گشتاور به صورت زیر اندازه گیری می‌شوند:

$$dT = \frac{1}{2} \rho z C V_A^2 (c_l \cos \beta - c_d \sin \beta) dr \quad (1)$$

کاهش مصرف سوخت و افزایش بازدهی سیستم رانش در تمامی شناور ها از اهمیت زیادی در طراحی برخوردار است و موجب کاهش هزینه ها و بهبود عملکرد شناور و افزایش عمر سیستم رانش می‌شود. همچنین، یک شناور نظامی بستگی به ماموریتی که دارد بایستی از یک، دو یا چهار موتور استفاده کند. بنابراین بایستی در فرآیند بهینه سازی این مسئله در نظر گرفته شود و سیستم رانش شناور برای ماموریت های مختلف بهینه شود. همچنین بایستی تنش وارد به پروانه از حد مجاز فراتر نرود. به تازگی، کارهایی در رابطه با بهینه سازی سیستم رانش بر اساس کاهش مصرف سوخت انجام گرفته است. به علاوه مقالات زیادی به بحث بهینه سازی پروانه و سیستم رانش پرداخته اند. لی در سال ۲۰۰۴ به بهینه سازی برای افزایش بازدهی در پروانه های سری B با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخت [۱]. چن در سال ۲۰۰۷ بهینه سازی پروانه را بر اساس ارتعاش و بازدهی هیدرودینامیکی انجام داد [۲]. کوپر در سال ۲۰۱۰ بر روی بهینه سازی پروانه در شناورهای کانتینربری بزرگ انجام داد که در آن پروانه با توجه به سرعت مورد نیاز شناور بهینه می‌شد [۳]. گفاری و همکارانش در سال ۲۰۱۱ یک روش طراحی را برای پروانه های سری B ارائه کردند که در آن پروانه های سری B با هدف افزایش بازدهی بهینه سازی می شدند [۴]. ژی در سال ۲۰۱۱ از تکنیک بهینه سازی چند هدفه‌ی پروانه استفاده کرد تا بازدهی و ضریب تراست را در یک سرعت مشخص بهینه کند [۵]. میشل و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به تاثیر پروانه بر روی کاهش مصرف سوخت و بازدهی پروانه پرداخت [۶]. نیلسون در سال ۲۰۱۳ بر روی بهینه سازی بدنه و پروانه را با یک هدف و آن هم به حداقل رساندن مصرف سوخت پرداخت [۷]. کمرلویی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بهینه‌سازی سیستم رانش بر اساس اسکيو، تراست و گشتاور و بازدهی پرداخت. بهینه سازی پروانه را می توان در مراجع [۸-۱۱] جستجو کرد.

در این مقاله، با استفاده از یک کد کامپیوتری، ضرایب پروانه با استفاده از تئوری المان پره محاسبه می‌شود. هندسه و مشخصات هندسی پروانه شامل مساحت هر مقطع، حجم، مرکز گرانش هر پره نیز محاسبه می‌شود.

$$m_b = \int_{r_0}^R \rho_m \alpha dr \quad (5)$$

که در آن چگالی ماده‌ی سازنده‌ی پروانه است. مرکز جرم پره در شعاع $\bar{r} = \frac{\int_{r_0}^R r dr}{\int_{r_0}^R dr}$ است. بدین ترتیب نیروی گریز از مرکز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید

$$F_C = m_b \bar{r} (2\pi n)^2 \quad (6)$$

ممان خمشی ناشی از نیروی گریز از مرکز در صفحه گذرنده از محور پروانه و عمود بر آن به ترتیب برابر است با

$$M_R = F_C \cdot z_C \quad (7)$$

$$M_S = F_C \cdot y_C \quad (8)$$

ممان M_S و M_R ممان های ناشی از ریک و اسکيو هستند. برای محاسبه ی تنش در ابتدا مقطع پره را به ۲۶ مقطع در راستای کورد و ۱۱ مقطع در راستای شعاعی تقسیم می‌کنیم و نیروهای اعمالی به پروانه توسط تراست و با انتگرال گیری به روش سیمپسون از حجم، ممان اینرسی و مساحت پره و به دنبال آن ممان ناشی از تراست و گشتاور را بدست می‌آوریم. با استفاده از این مقادیر از رابطه‌ی زیر تنش بدست می‌آید

$$S = \frac{M_{x0}}{I_{x0}/y_0} - \frac{M_{y0}}{I_{y0}/x_0} + \frac{F_C}{a_0} \quad (9)$$

که در آن

$$M_{x0} = -(M_T + M_R) \cos \varphi - M_Q \sin \varphi \quad (10)$$

$$M_{y0} = -(M_T + M_R) \sin \varphi - M_Q \cos \varphi \quad (11)$$

و φ زوایه‌ی گام است.

۴-۲- مشخصات هیدرودینامیکی پروانه

در اینجا در ابتدا برای محاسبه‌ی ضرایب تراست و گشتاور یک پروانه‌ی سری B با استفاده از توابع رگرسیونی طبق مرجع [۱۲] به صورت زیر بیان می‌شود

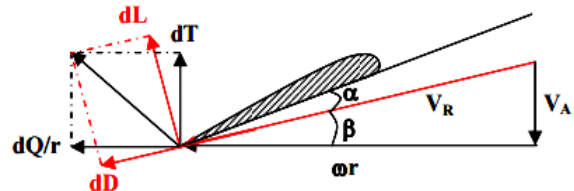
$$K_T = \sum C_{s,t,u,v}^T (J)^s \left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_e}{A_0}\right)^u (z)^v \quad (12)$$

$$K_Q = \sum C_{s,t,u,v}^Q (J)^s \left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_e}{A_0}\right)^u (z)^v \quad (13)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho z C V_A^2 (c_l \sin \beta - c_d \cos \beta) r dr \quad (2)$$

$$\eta = \frac{V dT}{\Omega d\Omega} \quad (3)$$

که در آن z تعداد پره، C طول کورد و Ω سرعت چرخش می‌باشد.



شکل (۱) تعریف پارامترهای به کار رفته در تئوری المان پره

۲-۲- بررسی کاویتاسیون

یکی از فاکتورهایی 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 پروانه های دریایی معیار بوریل (۱۹۴۳) می‌باشد [۱۲]. در این معیار از نموداری استفاده می‌شود که در آن ضریب بارگذاری تراست به صورت تابعی از عدد کاویتاسیون ارائه می‌شود. معیار دیگری که برای جلوگیری از کاویتاسیون استفاده می‌شود معیار کلس (۱۹۶۶) است [۱۲]. یکی از راههای ساده برای کاهش دادن کاویتاسیون افزایش نسبت مساحت پره می‌باشد. در معیار کلس نسبت مساحت پره به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\left[\frac{A_E}{A_0} \right]_{\min} = \frac{(1.3 + 0.3z)T}{(P_0 - P_V)D^2} + K \quad (4)$$

که در آن K مینیمم نسبت مساحت پره می‌باشد و برای شناورهای دو پروانه ای برابر ۰٫۱ و برای شناورهای تک پروانه ای برابر ۰٫۲ می‌باشد. برای اینکه کاویتاسیون رخ ندهد، بایستی $[A_E/A_0]$ برابر یا بزرگتر از $[A_E/A_0]_{\min}$ باشد.

۳-۲- تنش پروانه

به دلیل شکل پیچیده‌ی پره های پروانه محاسبه‌ی دقیق تنش ناشی از این نیروها کار دشواری است. اگر a سطح مقطع پره در شعاع r باشد، جرم پره پروانه بین شعاع r_0 و نوک پره به صورت زیر بدست می‌آید

که در آن نسبت پیشروی پروانه است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید

$$A = \frac{T_R}{\rho \times V_A^2 \times D^2} \quad (20)$$

از تقاطع K_T حاصل از معادله (۱۴) با K_T نمودار آب آزاد مطابق شکل (۲)، J و به دنبال آن η_0 بدست می‌آید.

۲-۵- اثر اسکيو پره

اسکیو پروانه بر روی کوايتاسیون، فشارهای ارتعاشی، نیروهای شافت و بازدهی پروانه اثر می‌گذارد. اثر اسکيو بر روی بازدهی پروانه توسط به رابطه‌ی تقریبی زیر که برحسب زاویه اسکيو می‌باشد تعیین می‌گردد

$$\frac{\eta_{skew}}{\eta_0} = 0.06687e^{-0.1148\theta_s} + 0.989e^{-0.001029\theta_s} \quad (21)$$

که در آن θ_s زاویه‌ی اسکيو بر حسب درجه و η_0 بازدهی آب آزاد است [۱۳]. طبق رابطه‌ی بالا بازدهی اسکيو و بازدهی آب آزاد پروانه رابطه‌ی معکوس دارند و بایستی بازدهی اسکيو کمتر حالت مطلوب می‌باشد.

۲-۶- بازدهی کل سیستم

مصرف سوخت ویژه‌ی موتور، SFC، توسط شرکت سازنده ی موتور بر حسب بار موتور تهیه می‌شود. توان موثر شناور با سرعت و مقاومت شناور از طریق رابطه زیر ارتباط دارند

$$P_E = R_T V \quad (22)$$

توان تحویل داده شده به پروانه از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد

$$P_D = \frac{P_E}{QPC} \quad (23)$$

که در آن QPC ضریب شبه‌رانش تاثیرگذار بر روی بدنه و پروانه است که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید

$$QPC = (\eta_H)(\eta_{RR})(\eta_0) \quad (24)$$

که در آن $\eta_{RR} = 1$ بازدهی چرخشی نسبی و η_0 بازدهی آب آزاد و η_H بازدهی بدنه است که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (25)$$

که در آن $C_{s,t,u,v}^Q$ و $C_{s,t,u,v}^T$ ضرایب تراست و گشتاور و s, t, u, v به ترتیب توان‌های $J, \frac{P}{D}, \frac{A_c}{A_0}$ و Z می‌باشند.

ضریب J ضریب پیشروی می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (14)$$

که در آن

$$V_a = V(1-w) \quad (15)$$

می‌باشد. w را می‌توان بر حسب ضریب بلوکی طبق مرجع [۷] به صورت زیر تعریف نمود

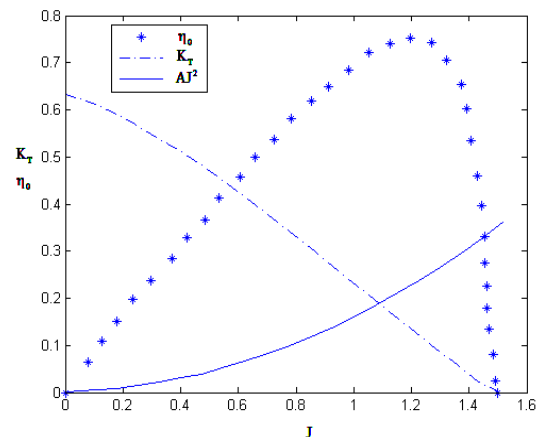
$$w = 1.7643C_B^2 - 1.4745C_B + 0.2574 \quad (16)$$

تراست پروانه (T_{Cal}) باید برابر یا بزرگتر از مقاومت کل شناور باشد. تراست پروانه و مینیمم تراست مورد نیاز (T_R) را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد

$$T_{Cal} = K_T \rho n^2 D^4 \quad (17)$$

$$T_R = \frac{R_T}{n_p(1-t_{de})} \quad (18)$$

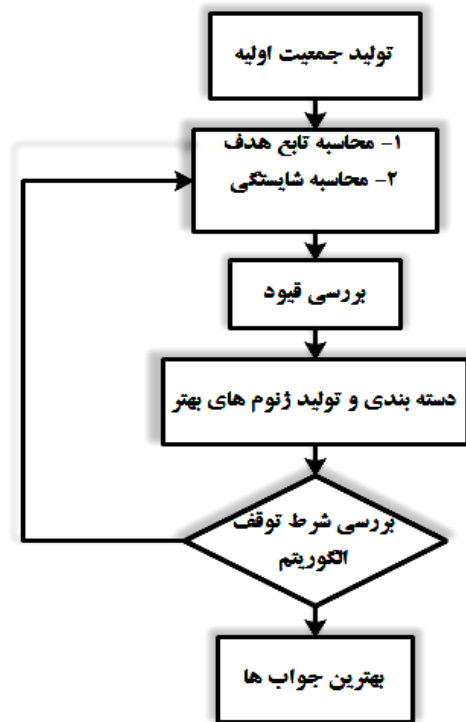
که در آن R_T مقاومت کل شناور، n_p تعداد پروانه و t_{de} ضریب کاهش تراست می‌باشد. در این حالت برای محاسبه‌ی



شکل (۲) نمونه‌ای از تقاطع نمودار AJ^2 با نمودار K_T

K_T از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود

$$K_T = AJ^2 \quad (19)$$



شکل (۳) مراحل الگوریتم ژنتیک

جدول (۱) پارامترهای به کار رفته در الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار پارامتر
تعداد تکرار	۵۰۰
اندازه جمعیت	۴۰
درصد جهش	٪۳۵
نوع جهش	تصادفی
درصد ترکیب	٪۵۰

۴- تعیین مصرف سوخت شناور

برای تعیین مصرف سوخت شناور از تابع LFC که معرف مصرف سوخت شناور به صورت زیر که در مرجع [۷] ارائه شده است استفاده می کنیم

$$LFC = \left(\int_V P(V) SFC(V) P_D(V) dV \right) L_H \quad (27)$$

که در آن منظور از v و L_H به ترتیب سرعت بهینه‌ی طراحی و مدت زمان مصرف سوخت شناور می باشد. P ، SFC و P_D ترتیب تابع چگالی احتمال سرعت، تابع مصرف سوخت ویژه‌ی شناور و توان تحویل داده شده به شناور می باشد. تابع چگالی

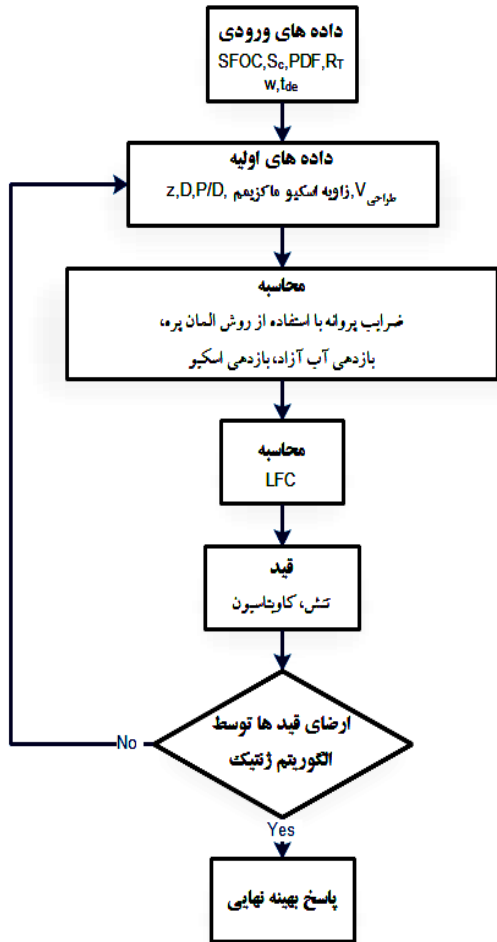
در اینجا فرض می شود افت های ناشی از شافت و بازدهی یاتاقان ناچیز می باشند. از اینرو $P_D = P_S$ که در آن P_S توان شافت می باشد.

۳- الگوریتم ژنتیک

یکی از معروف ترین الگوریتم های بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک می باشد. در این روش متغیرهای ورودی معرف ژنوتیپ و متغیرهای خروجی معرف فنوتیپ می باشد. در هر تولید نسل تابع ارزیابی بهترین ژن ها را انتخاب می کند. این ژن ها به عنوان والدین نسل بعد انتخاب می شوند. در هر نسل دو ژنوم بخشی از ژنهایشان را برای ایجاد نسل بعدی اهدا می کنند. اگر آنها تغییر پیدا نکنند، بدون تغییر به نسل بعدی منتقل خواهند شد. درصد ترکیب نشان دهنده اینست که ژنوم ها چگونه تغییر می کنند. برای خاتمه یافتن الگوریتم روش های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش ها تعداد دور تکرار حلقه است که در اینجا از این روش استفاده می شود. در شکل (۳) مراحل الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. جدول (۱) پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک را نشان می دهد. در این مقاله متغیرهای ورودی (تعداد پره، قطر پروانه، زاویه‌ی اسکیو، نسبت گام، سرعت شناور) و متغیرهای خروجی (تراست، گشتاور، بازدهی پروانه، بازدهی تراست، مصرف سوخت) می باشند.

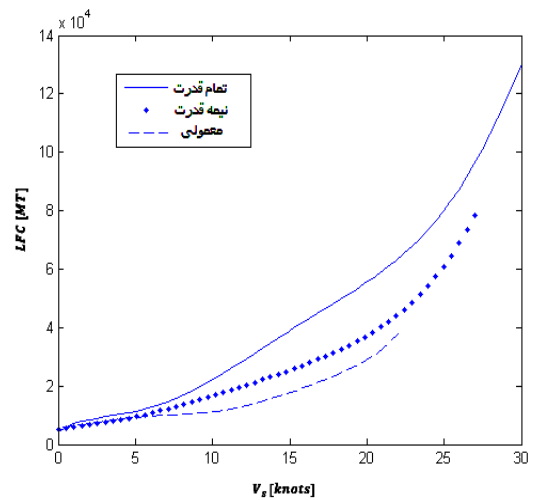
۵- محاسبه نتایج

روش محاسبات در شکل (۵) نشان داده شده است، با استفاده از تئوری المان پره محاسبه‌ی مشخصات پروانه، از تئوری تیریک



شکل (۵) روش بهینه سازی

احتمال سرعت معرف شناور در زمانهای مختلف می‌باشد. همچنین مصرف سوخت ویژه موتور، SFC، توسط شرکت سازنده موتور بر حسب بار موتور تهیه می‌شود. در شکل (۴) نمودار LFC برای سه شرایط مختلف شناور یعنی حرکت در وضعیت معمولی، نیمه قدرت و تمام قدرت بر اساس مرجع [۶] نشان داده شده است. برای بدست آوردن نمودار LFC، نمودارهای P، SFC و P_s ارائه شده در مرجع [۶] برای سرعت های مختلف در هم ضرب شده اند. توجه شود که در این مقاله فرض شد که $P_D = P_s$ می‌باشد و مدت زمان یک سال در نظر گرفته شده است.



شکل (۴) مصرف سوخت در یک سال (LFC) بر حسب سرعت در وضعیت های تمام قدرت، نیمه قدرت و معمولی

جدول (۲) محدودیت های اعمال شده

متغیر طراحی	حد پایین	حد بالا
تعداد پره ها	۳	۷
زاویه ی اسکیمو (درجه)	۱۰	۲۵
ماکزیمم تنش مجاز (MPa)	۰	۳۹ [Mpa]
نسبت گام	۰,۵	۱,۴
ضریب پیشروی پروانه	۰	۱,۵
سرعت شناور	۱۰ (نات)	۳۰ (نات)

جدول (۳) پارامترهای طراحی بدست آمده

پارامتر	داده اولیه	بهینه
Z	۶	۳
D (m)	۴	۴,۷۵۰۴
P/D	۰,۷	۰,۷۱۵
زاویه‌ی اسکيو (درجه)	۲۰	۲۴,۹۲۱۷
V_{Design} (نات)	۱۰,۵	۴,۲۹۳۹
LFC (در سال)	$۱,۷۵e+۰۴$ (MT)	$۹,۲۳۳e+۰۳$ (MT)
Q (KN.m)	۴۵	۳۶,۷۶
T (KN)	۵۳,۵	۶۲,۲۲۱۸
بازدهی اسکيو	۰,۶۵	۰,۵۸
بازدهی آب آزاد	۰,۵	۰,۶۰۱

حسب ماموریت های مختلف به صورت جدول (۴) فرض می‌شود. مثلاً در وضعیت ۱، ۶۰ درصد مصرف سوخت مربوط به حالت معمولی، ۲۰ درصد مربوط به حالت نیمه قدرت و ۲۰ درصد مربوط به حالت تمام قدرت می‌باشد.

جدول (۴) ضرایب معادله (۲۸) بر حسب ماموریت های مختلف

	وضعیت ۱	وضعیت ۲	وضعیت ۳
a	۰,۶	۰	۰
b	۰,۲	۰,۶	۰
c	۰,۲	۰,۴	۱

نمودار همگرایی به پاسخ بر حسب تکرار در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش حلقه‌ی تکرار، الگوریتم به جواب نزدیک تر می‌شود.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی پروانه با لحاظ محدودیت های طراحی و بر اساس بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد و نتایج زیر بدست آمد:

۱. طراحی پروانه بر اساس ۵ محدودیت انجام شد و نتایج معقول و عملی بر طبق شناور در نظر گرفته شده بدست آمد.
۲. علاوه بر پارامترهای پروانه، کاهش مصرف سوخت هم در پروانه در نظر گرفته شد.
۳. بهترین سرعتی که در آن شناور دارای کمترین مصرف سوخت و پروانه دارای بیشترین بازدهی است بدست آمد.
۴. پروانه طوری طراحی شد که در سه ماموریت شناور دارای بازدهی بالا و مهم تر از آن کمترین مصرف سوخت در سرعت طراحی باشد.

سرگردار برای محاسبه‌ی تنش پره، تئوری کاویتاسیون کلر و منحنی باکت برای تحلیل کاویتاسیون، منحنی مصرف سوخت ویژه (SFC) برای تعیین مصرف سوخت شناور، همچنین در هر تکرار قید های کاویتاسیون و تنش بررسی می‌شود تا بهترین طراحی در تعداد تکرار مشخص شده برای الگوریتم ژنتیک بدست آید. با توجه به محدوده‌ی متغیرهای مورد استفاده که در جدول (۲) نمایش داده شده است. نتایج به صورت زیر در جدول (۳) بدست می‌آید.

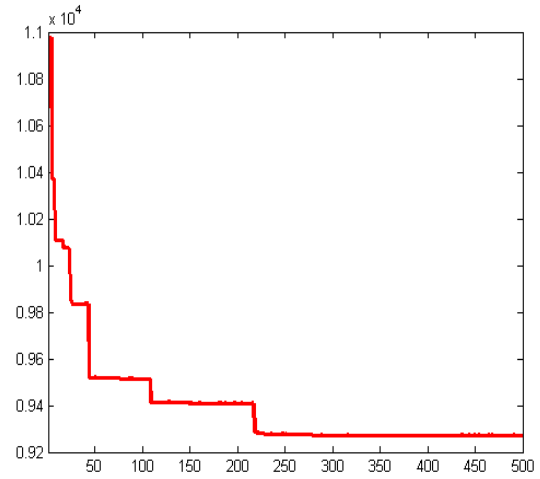
از آنجا که نیاز داریم پروانه در سه ماموریت مختلف شناور دارای بازدهی بهینه و مهم تر از آن کاهش مصرف سوخت بیشتر باشد،

در الگوریتم بهینه سازی برای LFC ضریب بیشتری قرار داده شد تا در هر سه ماموریت شناور پارامترهای طراحی پروانه تقریباً نزدیک به هم باشند، در حالیکه مصرف سوخت به بیشترین حالت ممکن مینیمم شود. برای بهینه سازی مصرف سوخت برای سه وضعیت طبق جدول (۴) به صورت زیر عمل می‌کنیم

$$LFC_{Total} = a LFC_1 + b LFC_2 + c LFC_3 \quad (28)$$

که در آن ضرایب a, b, c به ترتیب ضرایب مصرف سوخت در حالت معمولی، نیمه قدرت و تمام قدرت می‌باشد. این ضرایب بر

ممان حول محور γ_0 در مرکز ثقل مقطع	M_{γ_0}
سرعت دورانی پروانه	n
تابع چگالی احتمال سرعت	p
نسبت گام	P/D
توان تحیل داده شده به پروانه	P_D
توان موثر	P_E
گشتاور	Q
بازدهی شبه پیشرانس	QPC
شعاع مقطع پره	r
مقاومت کل شناور	R_T
ماکزیمم تنش مجاز پروانه	S_c
مصرف سوخت ویژه	SFC
تراست	T
تراست مورد نیاز	T_R
ضریب کاهش تراست	t_{de}
نسبت ضخامت	t/D
سرعت القائی محوری	u_a
سرعت القائی مماسی	u_t
سرعت شناور	V_s
سرعت پیشروی پروانه	V_A
ضریب ویک	w
تعداد پره	z
زاویه ی گام هیدرودینامیکی	β
زاویه ی حمله برحسب درجه	α
زاویه ی گام هندسی	ϕ
سرعت دورانی مقطع	Ω
زاویه ی اسکيو	θ_s
بازدهی بدنه	η_H
بازدهی آب آزاد	η_{OW}
بازدهی چرخشی نسبی	η_{RR}
بازدهی اسکيو	η_{skew}
چگالی	ρ
سرعت دورانی پروانه	ω



شکل (۶) نمودار همگرایی

۸- نامگذاری

A_E	سطح گسترش یافته ی پره
A_O	سطح دیسک پره
a_o	مساحت مقطع ریشه
C	طول کورد
C_B	ضریب فرم بدنه
c_l	ضریب لیفت
c_d	ضریب درگ
$C_{P\ min}$	ضریب فشار مینیمم
D	قطر پروانه
F_C	نیروی گریز از مرکز
I_{x0}	مدول مقطع حول محور X_0
I_{y0}	مدول مقطع در جهت محور γ_0
J	ضریب پیشروی
K_t	ضریب تراست
K_q	ضریب گشتاور
K_p	ضریب وتر
L	نیروی لیفت
LFC	سوخت مصرف شده در طول چرخه عمر
M_Q	ممان گشتاور
M_R	ممان ناشی از زاویه ریک
M_S	ممان ناشی از اسکيو
M_T	ممان ناشی از تراست
M_{x0}	ممان حول محور X_0 در مرکز ثقل مقطع

- ۹- منابع
8. Greeley DS, Kerwin JE (1982) Numerical methods for propeller design and analysis in steady flow. *SNAME Trans* 90:415–453
 9. Benini E (2003) Multiobjective design optimization of B-screw series propellers using evolutionary algorithms. *Mar Technol* 40:229–238
 10. Suen J-B, Kouh J-S (1999) Genetic algorithms for optimal series propeller design. In: Proceedings of the third international conference on marine technology, ORDA 99. Szczecin, Poland
 11. Karim MM, Ikehata M (2000) A genetic algorithm (GA)-based optimization technique for the design of marine propellers. In: Proceedings of the propeller/shafting 2000 symposium. Virginia Beach, USA
 12. J. Ghose and R. Gokarn, Basic Ship Propulsion, Delhi: Allied Publishers, 2004
 13. H. Ghassemi, The Effect of Wake Flow and Skew Angle on the Ship Propeller Performance, *Scientia Iranica*, Vol. 16, No. 2, 2009, pp. 149-158
 1. Y. Lee and C. Lin, Optimized Design of Composite Propeller, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 11, No. 1, 2004, pp. 17-30
 2. J. Chen and Y. Shih, Basic Design of a Series Propeller With Vibration Consideration By Genetic Algorithm, *Marine Science and Technology*, Vol. 12, No. 3, 2007, pp.119-129
 3. Kuiper G., 2010. New developments and propeller design. *J. Hydrodyn., Ser. B* 22 (5), 1368–1381.
 4. Gaafary M., El-Kilani H., Moustafa, M., 2011. Optimum design of B-series marinepropellers. *Alexandria Eng. J.* 50 (1), 13–18.
 5. Xie G., 2011. Optimal preliminary propeller design based on multi-objective optimization approach. *Proc. Eng.* 16, 278–283.
 6. Motley M, Nelson M, Young Y. Integrated probabilistic design of marine propulsors to minimize lifetime fuel consumption. *Ocean Engineering*, 12;45:1–8.
 7. Nelson M., Temple, D., Hwang, J., Young, Y., Martines, J., and Collette, M., 2013 Simultaneous Optimization of Propeller-Hull Systems to Minimize Lifetime Fuel Consumption. *Applied Ocean Research*, 43:46–52.