

بهینه سازی پروانه شناور برای کمینه نمودن مصرف سوخت

حسن قاسمی^۱، حسن ذاکردوست^۲

Gasemi@aut.ac.ir

۱- استاد دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- 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 شناورها 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 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

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، در یک شناور 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

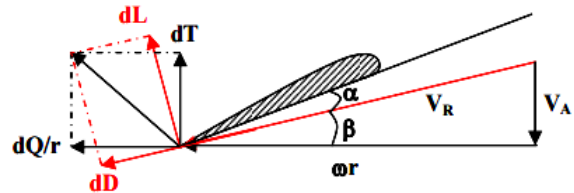
$$K_T = \sum C_{s,t,u,v}^T (J)^s \left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_e}{A_0}\right)^u (z)^v \quad (12)$$

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

$$dQ = \frac{1}{2} \rho z C V_A^2 (c_1 \sin \beta - c_d \cos \beta) r dr \quad (2)$$

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

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 کاویتاسیون، 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 ویژه موتور، SFC، توسط شرکت سازنده ی موتور بر حسب بار موتور تهیه می‌شود. توان موثر شناور با سرعت و مقاومت شناور از طریق رابطه زیرارتباط دارند

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

توان تحویل داده شده به پروانه از رابطه‌ی زیرمحاسبه 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 زیرتعریف 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 v, u, t, s 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

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

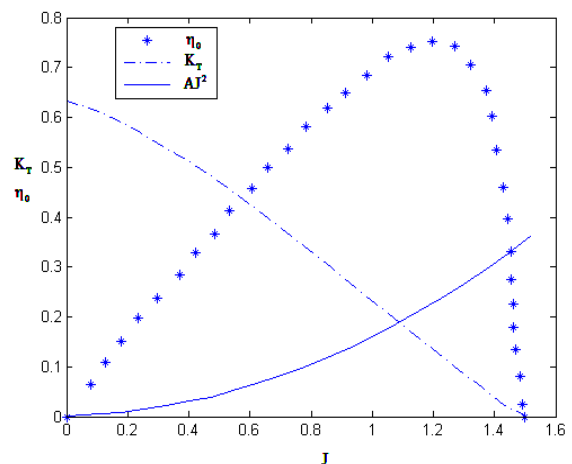
تراست پروانه (T_{Cal}) باید برابر یا بزرگتر از مقاومت کل شناور باشد. تراست پروانه و مینیمم تراست مورد نیاز (T_R) را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد

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

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

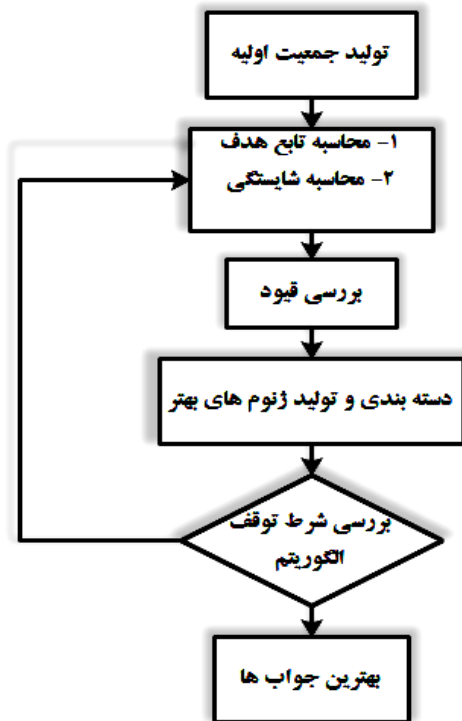
که در آن R_T مقاومت کل شناور، n_p تعداد پروانه و t_{de} ضریب کاهش تراست می‌باشد. در این حالت برای محاسبه‌ی K_T از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود

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



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

در زمانهای مختلف می‌باشد. همچنین مصرف سوخت ویژه‌ی موتور، SFC، توسط شرکت سازنده‌ی 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_D ارائه شده در مرجع [۶] برای سرعت‌های 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 (۳) مراحل الگوریتم ژنتیک

جدول (۱) پارامترهای به کار رفته در الگوریتم ژنتیک

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

در اینجا فرض می‌شود افت‌های ناشی از شافت و بازدهی یاتاقان ناچیز می‌باشند. از اینرو $P_D = P_S$ که در آن P_S توان شافت می‌باشد.

۳- الگوریتم ژنتیک

یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در این روش متغیرهای ورودی معرف ژنوتیپ و متغیرهای خروجی معرف فنوتیپ می‌باشد. در هر تولید نسل تابع ارزیابی بهترین ژن‌ها را انتخاب می‌کند. این ژن‌ها به عنوان والدین نسل بعدی انتخاب می‌شوند. در هر نسل دو ژنوم بخشی از ژنهایشان را برای ایجاد نسل بعدی اهدا می‌کنند. اگر آنها تغییر پیدا نکنند، بدون تغییر به نسل بعدی منتقل خواهند شد. درصد ترکیب نشان دهنده اینست که ژنوم‌ها چگونه تغییر می‌کنند. برای خاتمه یافتن الگوریتم روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها تعداد دور تکرار حلقه است که در اینجا از این روش استفاده می‌شود. در شکل (۳) مراحل الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. جدول (۱) پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. 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) می‌باشند. 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) می‌باشند.

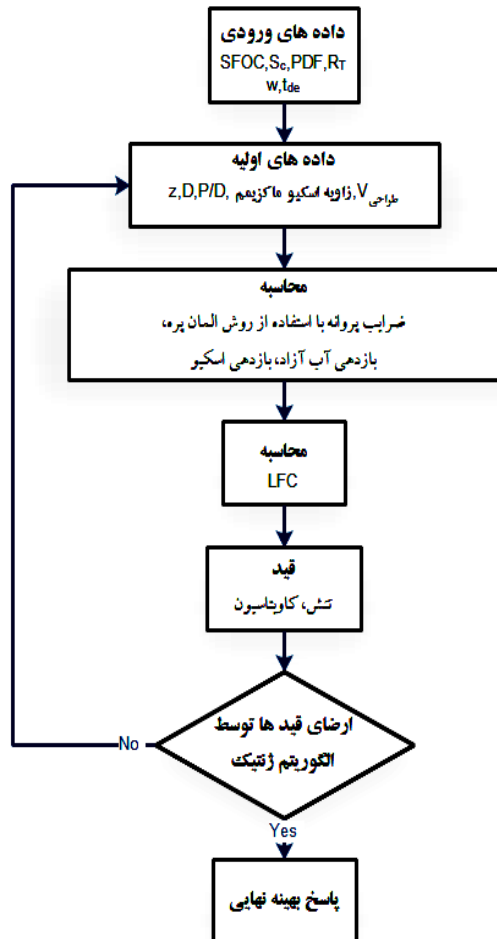
۴- تعیین مصرف سوخت شناور

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

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

که در آن منظور از V و L_n به ترتیب سرعت بهینه‌ی طراحی و مدت زمان مصرف سوخت شناور می‌باشد. P، SFC و P_D ترتیب تابع چگالی احتمال سرعت، تابع مصرف سوخت ویژه‌ی شناور و توان تحویل داده شده به شناور می‌باشد. تابع چگالی احتمال سرعت معرف سرعت شناور

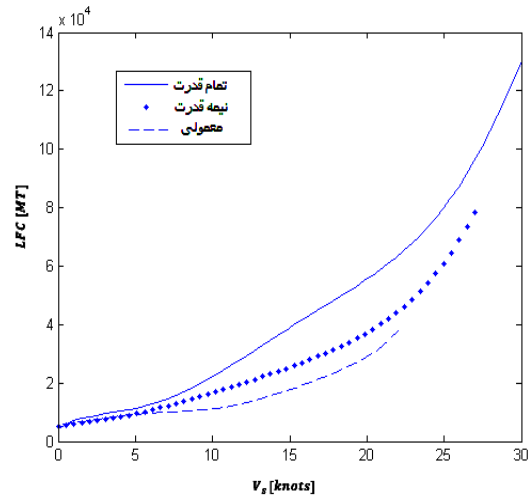
ضرایب بر حسب ماموریت های مختلف به صورت جدول (۴) فرض می شود. مثلاً در وضعیت ۱، ۶۰ درصد مصرف سوخت مربوط به حالت معمولی، ۲۰ درصد مربوط به حالت نیمه قدرت و ۲۰ درصد مربوط به حالت تمام قدرت می باشد.



شکل (۵) روش بهینه سازی

جدول (۲) محدودیت های اعمال شده

متغیر طراحی	حد پایین	حد بالا
تعداد پره ها	۳	۷
زاویه ی اسکیو (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)



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

۵- محاسبه نتایج

روش محاسبات در شکل (۵) نشان داده شده است، با استفاده از تئوری المان پره محاسبه ی مشخصات پروانه، از تئوری تیر یک سرگردار برای محاسبه ی 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 می شود تا بهترین طراحی در تعداد تکرار مشخص شده برای الگوریتم ژنتیک بدست آید. با توجه به محدوده ی متغیرهای مورد استفاده که در جدول (۲) نمایش داده شده است. نتایج به صورت زیر در جدول (۳) بدست می آید.

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 می کنیم

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

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

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.

جدول (۳) پارامترهای طراحی بدست آمده

پارامتر	داده اولیه	بهینه
Z	۶	۳
D (m)	۴	۴,۷۵۰۴
P/D	۰,۷	۰,۷۱۵
زاویه ی 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	۰,۶۰۰۱

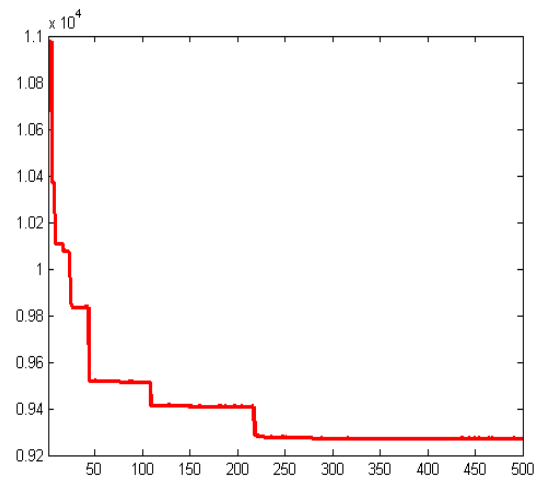
۸- نامگذاری

سطح گسترش یافته ی پره	A_E
سطح دیسک پره	A_O
مساحت مقطع ریشه	a_0
طول کورد	C
ضریب فرم بدنه	C_B
ضریب لیفت	c_l
ضریب درگ	c_d
ضریب فشار مینیمم	$C_{P_{min}}$
قطر پروانه	D
نیروی گریز از مرکز	F_C
مدول مقطع حول محور X_0	I_{x_0}
مدول مقطع در جهت محور Y_0	I_{y_0}
ضریب پیشروی	J
ضریب تراست	K_t
ضریب گشتاور	K_q
ضریب وتر	K_p
نیروی لیفت	L
سوخت مصرف شده در طول چرخه عمر	LFC
ممان گشتاور	M_Q
ممان ناشی از زاویه ریک	M_R

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 می شود با افزایش حلقه ی تکرار، الگوریتم به جواب نزدیک تر می شود.



شکل (۶) نمودار همگرایی

- ۹- منابع**
- [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-objectiveoptimization approach. Proc. Eng. 16, 278–283.
- [6] Motley M, Nelson M, YoungY. Integrated probabilistic design of marine propulsors to minimize lifetime fuel consumption.OceanEngineering, 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 FuelConsumption. Applied Ocean Research, 43:46–52.
- [8] Greeley DS, Kerwin JE (1982) Numerical methods for propel-ler design and analysis in steady fl ow. 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
- | | | |
|--|---------------|-----------------------------------|
| | M_s | ممان ناشی از اسکيو |
| | M_T | ممان ناشی از تراست |
| | M_{x0} | ممان حول محور X0 در مرکز ثقل مقطع |
| | M_{y0} | ممان حول محور Y0 در مرکز ثقل مقطع |
| | n | سرعت دورانی پروانه |
| | p | تابع چگالی احتمال سرعت |
| | P/D | نسبت گام |
| | P_D | توان تحیل داده شده به پروانه |
| | P_E | توان موثر |
| | Q | گشتاور |
| | QPC | بازدهی شبه پیشرانش |
| | r | شعاع مقطع پره |
| | R_T | مقاومت کل شناور |
| | S_c | ماکزیم تنش مجاز پروانه |
| | SFC | مصرف سوخت ویژه |
| | T | تراست |
| | T_R | تراست مورد نیاز |
| | t_{de} | ضریب کاهش تراست |
| | t/D | نسبت ضخامت |
| | u_a | سرعت القائی محوری |
| | u_t | سرعت القائی مماسی |
| | V_s | سرعت شناور |
| | V_A | سرعت پیشروی پروانه |
| | w | ضریب ویک |
| | z | تعداد پره |
| | β | زاویه ی گام هیدرودینامیکی |
| | α | زاویه ی حمله بر حسب درجه |
| | ϕ | زاویه ی گام هندسی |
| | Ω | سرعت دورانی مقطع |
| | θ_s | زاویه ی اسکيو |
| | η_H | بازدهی بدنه |
| | η_{ow} | بازدهی آب آزاد |
| | η_{RR} | بازدهی چرخشی نسبی |
| | η_{skew} | بازدهی اسکيو |
| | ρ | چگالی |
| | ω | سرعت دورانی پروانه |

- [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