

## تحلیل سازه‌ای پروانه کامپوزیتی دریایی به روش اجزاء محدود و بهینه‌سازی لایه چینی پره‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک

عبداله عیدانی نژاد<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا کبیری عطاآبادی<sup>۱</sup>، سیدحسین دیباجیان<sup>۱</sup>، امین مردان<sup>۲</sup>

۱. دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲. گروه هیدرومکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۲۹

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2016.14147](https://doi.org/10.22113/jmst.2016.14147)

### چکیده

در سالیان اخیر تقاضا برای استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع دریایی به دلیل بهبود عملکرد سازه‌ای و هیدرودینامیکی سازه‌های دریایی افزایش یافته است. از نظر تجاری مواد اولیه برای ساخت پره‌های کامپوزیتی موجود می‌باشد. ولی آنچه که بسیار اهمیت دارد، ترکیب صحیح از الیاف، رزین و قراردادن لایه‌ها بر روی یکدیگر برای دستیابی به سازه‌ای با استحکام بالا و عملکرد مناسب می‌باشد. در این مقاله جهت بهبود سختی و کنترل تغییر هندسه پره‌های یک پروانه از جنس کربن/اپوکسی از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی لایه چینی پره‌ها و دستیابی به لایه چینی با حداقل تغییر شکل نوک پره استفاده شده است. در واقع فرآیند بهینه‌سازی به کمک ارتباط بین نرم افزارهای آباکوس و متلب انجام گردیده است. زوایای بهینه پروانه کامپوزیتی با استفاده از این فرآیند بدست آمده‌اند.

**واژگان کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، پروانه دریایی، کامپوزیت، لایه چینی

## ۱. مقدمه

پروانه کشتی‌ها و زیردریایی‌ها عموماً از آلیاژ نیکل، آلومینیوم و برنز<sup>۱</sup> (NAB) به دلیل مقاومت در برابر خوردگی و استحکام تسلیم بالا ساخته می‌شوند. مشکلات زیادی در استفاده از این آلیاژ وجود دارد، چرا که ماشین‌کاری این ماده برای ساخت شکل پیچیده پره‌ها بسیار گران قیمت است. پره‌های از جنس NAB مستعد شکست خستگی هستند و خصوصیات میرایی آکوستیک نسبتاً ضعیفی دارند که می‌تواند منجر به سروصدای و ارتعاشات گردد. مشکلاتی از این قبیل باعث شده است، تا معماران کشتی به دنبال یافتن آلیاژهای غیر از NAB در ساخت پروانه کشتی‌ها باشند. این مواد جایگزین می‌توانند فولاد ضدزنگ، آلیاژ تیتانیوم و کامپوزیت‌ها باشند. استفاده از مواد کامپوزیت در صنایع کشتی‌سازی عموماً کارایی هیدرودینامیکی و سازه‌ای، سازه‌های دریایی را بهبود می‌بخشد. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیافی نظیر کربن و شیشه دارای نسبت وزن به استحکام بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، خصوصیات آکوستیکی بهتر و مشخصات غیرمغناطیسی می‌باشند. تحلیل سازه‌ای پره‌های دارای شکل سه بعدی پیچیده با روابط تئوری متداول (مانند روابط کتاب Ghosh-2004) مقادیری با دقت پایین نتیجه می‌دهد. در چنین مواردی روش المان محدود نتایجی مشابه و نزدیکتری به مقادیر تجربی خواهد داد.

اولین دیدگاه در مورد استحکام پره پروانه به وسیله Taylor (1993) ارائه شد؛ او پره‌ها را به صورت یک تیر یکسرگیردار که به توپی ثابت شده است، در نظر گرفت. مدل‌سازی کامپیوتری انجام شده توسط Lin (1991) نشان داده است که انواع خاصی از پروانه‌های کامپوزیتی راندمان هیدرودینامیکی نامناسبی دارند. لین از روش تحلیل اجزاء محدود برای مقایسه پره‌های از جنس NAB با پره‌های پروانه کامپوزیتی ساندویچی با مدول پایین با همان ابعاد استفاده نمود. بیشترین خیز نوک پره تحت بارهای هیدرودینامیکی در پره‌های

کامپوزیتی مقداری بزرگتر است. به طور مشابه کین و داو<sup>۲</sup> نشان دادند که بیشترین خیز پره‌های یک پروانه از جنس الیاف شیشه ۵ برابر بیشتر از آلیاژ NAB است. سختی پایین کامپوزیت‌ها دلیل خیز بیشتر می‌باشد. Gau-Feng Lin (1991) به محاسبه تنش‌ها برای یک پره پروانه کامپوزیتی که با الیاف کربن تقویت شده پرداخت. نتایج او نشان داد که برای پروانه‌های با ابعاد بزرگ تغییر شکل پره‌ها باید کنترل شود. همچنین LIN و Tsai (2008) به تحلیل ارتعاش آزاد زیر آب، یک پره پروانه کامپوزیتی و یک پره با آلیاژ آلومینیوم و مقایسه این دو پرداخته‌اند نتایج آن‌ها نشان داد که فرکانس طبیعی پروانه‌ها در آب و هوا متفاوت است. همچنین فرکانس‌های طبیعی پره پروانه کامپوزیتی با لایه چینی  $[\Theta_7/90/0]_s$  [0/90/-] از همان پره با لایه چینی  $[\Theta_7/90/0]_s$  [0/90/0] بیشتر می‌باشد.

Pavan Kishore (2013) امکان‌سنجی جایگزینی پره‌های یک پروانه از جنس آلیاژ نیکل-آلومینیوم-برنز را با پره‌های کامپوزیتی (از جنس کربن و شیشه/اپوکسی)، براساس معیار استحکام بررسی کرد. او به دلیل پیچیدگی هندسه پره‌ها، مدل‌سازی پروانه را در نرم افزار کتیا انجام داد و برای شبکه‌بندی پروانه از نرم افزار هایپر مش استفاده کرد. تنش‌ها، جابجایی و شکل مودهای فرکانس طبیعی هر دو پروانه NAB و کامپوزیتی را در نرم افزار انسیس محاسبه و بررسی کرد. نتایج کیشور نشان داد که با تغییر لایه چینی مواد پروانه کامپوزیتی می‌توان سختی (صلبیت) مشابهی با پروانه NAB بدست آورد و خیزهای نوک پره پروانه کامپوزیتی را کاهش داد.

MOHAMMED KHAN (2013) به طراحی و تحلیل سازه‌ای یک پروانه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه و کربن/اپوکسی پرداخت. تحلیل استاتیکی و فرکانس طبیعی دو پروانه مشابه از نظر هندسی از جنس کامپوزیت و آلیاژ NAB را در نرم افزار انسیس انجام داد. نتایج او نشان داد که تنش‌های

<sup>۲</sup>Kane and Dow<sup>۱</sup>Nickel-aluminum-bronze (NAB)

جدول-۱: داده‌های هندسی پروانه

تعداد پره‌ها	۶
قطر	۲/۱۴ متر
نسبت گام در $0.7R$	۰/۷۳
نسبت هاب	۰/۲۴
ریک	۰/۸- درجه
اسکیو	۰/۱۴- درجه

جدول-۲: مشخصات آلیاژ آلومینیوم

مقادیر	خواص
۱۲۱	E (Gpa)
۰/۳۴	$\nu$
۲۷۰۰	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
۲۲۰	$\sigma_Y$ (Mpa)

جدول-۳: مشخصات پروانه کامپوزیتی Hexcel IM 8552-72

$X_T$ MPa	۲۳۲۶/۲
$X_C$ MPa	۱۲۰۰/۱
$Y_T$ MPa	۱۶۰/۲
$Y_C$ Mpa	۱۹۹/۸
$S_T$ Mpa	۷۵/۳
$S_L$ Mpa	۹۲/۳
$E_1$ GPa	۱۷۱/۴۲
$E_2$ GPa	۹/۰۸
$G_{12}$ GPa	۵/۲۹
$\nu_{12}$	۰/۳۲
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	۱۵۰۰

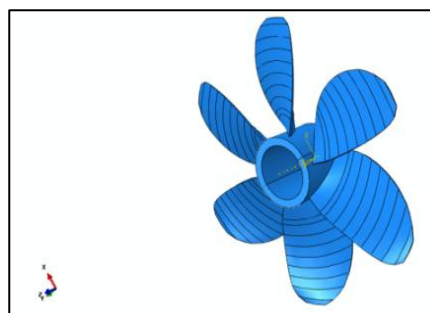
در روند تحلیل، پره‌ها به تویی ثابت فرض شده است. همچنین از ۳۴۹۳۸ المان C3D20R مکعبی (المان جامد محیط پیوسته سه بعدی غیرخطی، با ۲۰ گره به شیوه انتگرال کاهش یافته)<sup>۳</sup> برای شبکه‌بندی پروانه آلومینیومی و ۳۳۸۸۸ المان S4R مربعی (المان پیوسته خطی، چهارضلعی)<sup>۴</sup> در شبکه بندی پروانه کامپوزیتی بکار رفته است. روش شبکه‌بندی منظم برای هر دو

محاسبه شده برای پروانه فلزی به‌خوبی در محدود الاستیک مواد قرار دارند. همچنین نتایج تحلیل پروانه کامپوزیتی در محدوده ایمن تئوری شکست تسای-وو<sup>۱</sup> قرار داشتند.

تحلیل استاتیکی و فرکانس طبیعی دو پروانه آلومینیومی و کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی در این مقاله انجام شده است. مدل‌سازی پروانه به کمک محیط ویرایشگر آباکوس که براساس زبان برنامه نویسی پیتون می‌باشد، صورت گرفته است. در واقع مدل‌سازی پروانه با استفاده از این روش و اجرای آن در محیط گرافیکی آباکوس سبب شبکه‌بندی مناسب آن به روش منظم<sup>۲</sup> شده است. در ادامه به تشریح روند مدل‌سازی، تحلیل پروانه‌ها و بهینه‌سازی لایه چینی پره‌های کامپوزیتی پرداخته می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

در روند تحلیل پروانه، پس از مدل‌سازی پره‌ها به کمک محیط ویرایشگر آباکوس و اجرای آن در محیط گرافیکی به تعریف خواص پروانه، شبکه‌بندی آن، مونتاژ پره‌ها به تویی اعمال بارگذاری و شرایط مرزی و تحلیل سازه‌ای آن پرداخته می‌شود. شکل-۱ هندسه پروانه نهایی مورد مطالعه این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل-۱: مدل سه بعدی نهایی پروانه در آباکوس

پارامترهای اصلی پروانه در جدول-۱ نمایش داده شده است. مشخصات آلیاژ آلومینیوم به کار رفته در پروانه در جدول-۲ (DNV RULES, 2013) و مشخصات مواد پروانه کامپوزیتی به شرح جدول-۳ (Motley, 2009) می‌باشد.

<sup>۳</sup>A 20-node quadratic brick, reduced integration

<sup>۴</sup>A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration

<sup>۱</sup>Tsai-Wu Failure Theory

<sup>۲</sup>Structured meshing technique

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

تابع پتانسیل یک تابع بیضوی است که برای حل آن نیاز به تعریف  $\Phi$  روی مرز یا مشتق آن در راستای عمود بر مرز  $\partial\Phi/\partial n$  می‌باشد.

در روی سطح جسم، برای ارضا شدن شرط مرزی، صفر بودن مولفه سرعت عمود بر المان، می‌توان از شرط مرزی نیومن استفاده نمود که به آن شرط مرزی سینماتیکی گفته می‌شود. مقدار پتانسیل کل، جمع پتانسیل اغتشاشی ناشی از وجود جسم و پتانسیل ناشی از جریان ورودی، برابر صفر است.

$$\begin{aligned} \Phi = \text{Cons.} \rightarrow \Phi_{\text{inflow}} + \Phi_{\text{Pur.}} = \text{Cons.} \\ \rightarrow \frac{\partial(\Phi_{\text{inflow}} + \Phi_{\text{Pur.}})}{\partial n} = 0 \\ \rightarrow \frac{\partial\Phi_{\text{Pur.}}}{\partial n} = -\frac{\partial\Phi_{\text{inflow}}}{\partial n} \\ = -V_0 \cdot n \end{aligned} \quad (2)$$

ضخامت سطح و یک صفر در نظر گرفته می‌شود؛ و اختلاف سرعت‌های نرمال و اختلاف فشار در عرض این سطح صفر است. در حالیکه اختلاف پتانسیل می‌تواند وجود داشته باشد.

$$\begin{aligned} (\Delta p)_{\text{on } S_w} = p^+ - p^- = 0 \\ \left(\Delta \frac{\partial\Phi}{\partial n}\right)_{\text{on } S_w} = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial n}\right)^+ - \left(\frac{\partial\Phi}{\partial n}\right)^- = 0 \quad \{\Phi = \Phi_{\text{Pur.}}\} \end{aligned} \quad (3)$$

برای سطوح بالابر در حالات پایا، اختلاف پتانسیل در عرض سطح و یک، همان سیرکولاسیون در اطراف جسم است و در راستای خط جریان روی سطح و یک ثابت است:

$$(\Delta\Phi)_{\text{on } S_w} = \Phi^+ - \Phi^- \quad (4)$$

برای تعیین سیرکولاسیون در لبه انتهایی پره، به صورت منحصر به فرد، از شرط کوتا استفاده می‌شود. در کلی-ترین حالت، این شرط بیان می‌دارد که سرعت جریان در لبه انتهایی پره ثابت باقی می‌ماند.

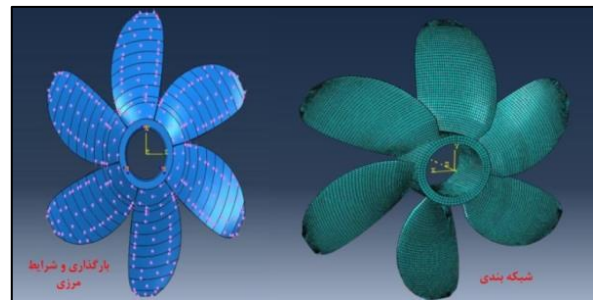
$$|\nabla\Phi|_{\text{T.E.}} < \infty \quad (5)$$

روی سطح کنترل بیرونی، در حالتی که این سطح در فاصله بینهایت از جسم قرار دارد، سرعت اغتشاشی ناشی از جسم باید از بین برود.

$$\nabla\Phi \rightarrow 0 \quad \{S_\infty \rightarrow \infty\} \quad (6)$$

در روش حل مبتنی بر المان مرزی، مسائل مقدار

پروانه استفاده شده است. شکل ۲- شبکه‌بندی (یک قسمت از پره برای نشان دادن بهتر شبکه‌بندی منظم پروانه نیز نشان داده شده است)، شرایط مرزی و بارگذاری یا توزیع فشار روی پروانه که از روش المان مرزی بدست آمده را نشان می‌دهد. در بخش بعد نحوه استخراج توزیع فشار روی پره‌ها توضیح داده شده است.



الف- شرایط مرزی و بارگذاری پروانه



ب- شبکه‌بندی

شکل ۲: بارگذاری و شبکه‌بندی پروانه

جهت تعیین توزیع فشار روی پروانه جریان پتانسیل و شرایط مرزی حاکم بررسی می‌شود. با فرض اینکه جریان در میدان حل خارجی حول جسم به اندازه کافی و موثر غیرویسکوز، تراکم‌ناپذیر و غیرچرخشی باشد، در حالت جریان پایا سرعت اغتشاشی در کلیه میدان حل به استثنای سطوح ناپیوسته میدان سرعت، که تشکیل دنباله سطح بالابر را می‌دهند، غیر چرخشی می‌باشد (Ghassemi-1997). به عبارت دیگر برای استفاده از معادله لاپلاس جهت مدل کردن جریان سیال حول پروانه، باید جریان در کلیه نقاط میدان به جز یک سری نقاط ناپیوستگی، که دنباله پروانه جایگزین آن‌ها می‌شود، غیرچرخشی باشد. بنابراین با در نظر گرفتن این فرضیات می‌توان از معادله لاپلاس استفاده نمود.

مرزی برای پتانسیل سرعت در خارج از سطح جسم را می توان، به یک معادله انتگرالی تبدیل کرد:

$$2\pi\phi(p) = \iint_{S_B} \left[ \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p; q)} - \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} \frac{1}{R(p; q)} \right] dS + \iint_{S_W} \Delta \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p; q)} dS \quad (7)$$

$$R = |Q - P| = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2} \quad (8)$$

مزایای بکارگیری روش پتانسیل اغتشاشی به شرح ذیل است. الف: دقت روش المان مرزی بر پایه پتانسیل یک مرتبه بالاتر از روش المان مرزی بر پایه سرعت است. ب: شرایط مرزی همواری وجود دارد. ج: تعیین  $\vec{n} \cdot \nabla \phi_\infty$  ساده تر از تعیین  $\phi_\infty$  است. د: این روش اجازه تعریف شار ورودی یا خروجی را می دهد و در نتیجه کوپل آن با لایه مرزی و کاویتاسیون ساده تر انجام می گیرد. سرعت های القایی در یک نقطه میدانی p در خارج سطح جسم، می تواند با استفاده از گرادیان پتانسیل سرعت  $\phi$ ، بدست آید:

$$v(p) = \nabla_p \phi(p) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \phi(q) \nabla_p \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p, q)} dS + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_W} \Delta \phi(q) \nabla_p \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p, q)} dS - \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} (V_I \cdot n_q) \nabla_p \frac{1}{R(p, q)} dS$$

اتصال به تویی بیشینه می باشند. مقادیر ویژه<sup>۱</sup> حاصل از تحلیل فرکانس طبیعی هر دو پروانه نیز محاسبه شده است. نتایج حاصل تحلیل استاتیکی و فرکانسی هر دو پروانه در ادامه تشریح می شود. شکل-۳ کانتور جابه جایی پره ها در راستای محور پروانه آلومینیومی (U3) را نشان می دهد. بیشترین جابه جایی در نوک پره ها اتفاق می افتد که مقدار آن ۲/۷ میلی متر می باشد. بیشترین مقدار تنش فون مایرز پروانه آلومینیومی همان طور که در شکل-۴ نشان داده شده است، ۱۰۰/۳ مگاپاسکال در ریشه پره می باشد.

از جدول-۳ خواص مکانیکی پروانه تعریف می شود. برای بررسی استحکام پره پروانه کامپوزیتی از تئوری شکست تسای-وو استفاده می شود. همچنین جنس

از آنجا که  $\frac{\partial \phi}{\partial n}$  روی سطح جسم معلوم است، رابطه (۷)، معادله انتگرالی Fredholm از نوع دوم برای متغیر  $\phi$  است. اختلاف پتانسیل در عرض سطح و یک برابر با اختلاف مقادیر پتانسیل روی سطح بالا و پایین پره در لبه انتهایی آن است. گسسته سازی رابطه (۷)، منجر به یک دستگاه معادلات خطی با مجهول  $\phi$  می شود. سرعت سطحی و در نتیجه فشار روی سطح جسم را می توان با مشتق گیری عددی از توزیع پتانسیل بدست آمده، محاسبه کرد. روشی که معرفی شد به روش پتانسیل اغتشاشی یا روش Morino معروف است. در رابطه (۷)،  $\vec{n}$  بردار نرمال عمود بر سطح است و R فاصله بین نقطه p در فضای xyz و نقطه q در فضای  $\xi\eta\zeta$  است.

(۹)

به کمک روش اختلاف محدود، می توان مشتقات پتانسیل در دو راستای شعاعی و طول کورد را تعیین نموده و توزیع سرعت و فشار را روی سطح پروانه را محاسبه کرد. بدین ترتیب از روش المان مرزی فشار بروی تک تک نقاط سطوح پره بدست می آید و به آن اعمال می شود.

### ۳. نتایج

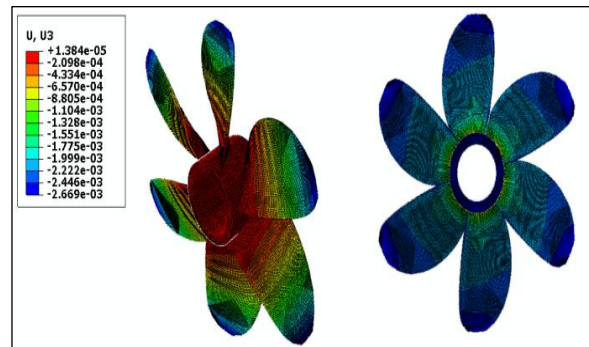
تحلیل اجزا محدود هر دو پروانه آلومینیومی و کامپوزیتی در نرم افزار آباکوس با هدف ارزیابی استحکام سازه ای آن ها با محاسبه تنش ها، تغییر شکل ها و فرکانس های طبیعی در این مقاله صورت گرفته است. بیشترین خیز هر دو پروانه در نوک پره می باشد، همچنین تنش ها در ریشه پره در ناحیه

<sup>۱</sup>Eigen values

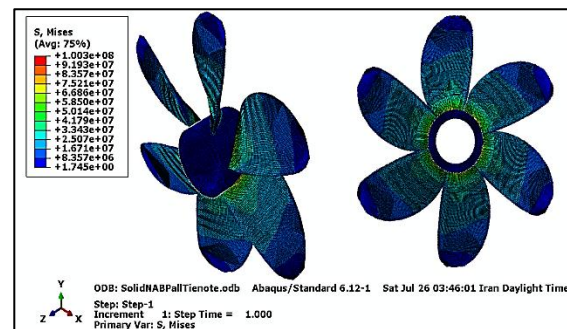
صفحه‌ای بدست می‌آیند. برای آشنایی با نحوه محاسبه تئوری این پارامترها به کتاب مکانیک مواد مرکب کاو-۲۰۰۶ مراجعه شود. تعیین ترکیب لایه چینی پره برای دستیابی به کارایی بهینه و سازه مستحکم، نیاز به دیدگاه بهینه سازی قوی دارد. قانون کلی یا پیشنهادی مرجع جهت لایه چینی پره‌های پروانه وجود ندارد و محققان براساس تحلیل‌های سازه‌ای یا هیدرودینامیکی پروانه‌های کامپوزیتی خود لایه چینی‌های مختلفی را پیشنهاد داده‌اند. در این مقاله نیز ابتدا براساس پیشنهادات مقالات و مطالعات انجام شده بر روی پروانه‌های کامپوزیتی دریایی چندین ترکیب لایه چینی برای چینش الیاف کربنی در پره بررسی شدند. دو قید جابجایی (خیز) کمینه در نوک پره (در مرتبه پره آلومینیومی (Pavan Kishore-2012)) و کمینه بودن مقادیر حاصل از تئوری شکست تسای-وو در نرم افزار آباکوس، معیار انتخاب چینش بهینه الیاف جهت ارضاء استحکام سازه‌ای پره می‌باشند. در نهایت به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب زوایای لایه چینی الیاف بهینه می‌شود. جدول-۴ نتایج تحلیل استاتیکی پروانه کامپوزیتی با دو معیار بیشترین مقدار تسای-وو و بیشترین خیز در نوک پره در راستای محور پروانه ( $U_3$ ) را نشان می‌دهد. مقادیر حاصل از تئوری شکست تسای-وو جهت بررسی شکست یا عدم شکست لایه‌ها کاربرد داشته و همچنین کمتر شدن بیشترین خیز نوک پره کامپوزیتی جهت عدم تغییر مشخصات هندسه پروانه کامپوزیتی، از نظر تحلیل سازه‌ای (Pavan Kishore - 2012) آن مدنظر می‌باشد.

با توجه به نتایج جدول-۴ ترکیب  $[0/90/-\theta/\theta/90_2/-]$  جهت لایه چینی پره‌های کربنی به دلیل خیز کمتر در نوک پره و مقادیر کمتر حاصل از تئوری شکست تسای-وو پیشنهاد می‌شود. جهت دستیابی به زاویه  $\theta$  ای که کمترین جابجایی نوک پره را دارد، ابتدا از اسکریپت نویسی در محیط ویرایشگر

توی پروانه کامپوزیتی آلیاژ آلومینیوم با مشخصات جدول-۲ می‌باشد.



شکل-۳: کانتور جابجایی پروانه آلومینیومی در راستای محور آن



شکل-۴: کانتور تنش فون مایزس پروانه آلومینیومی

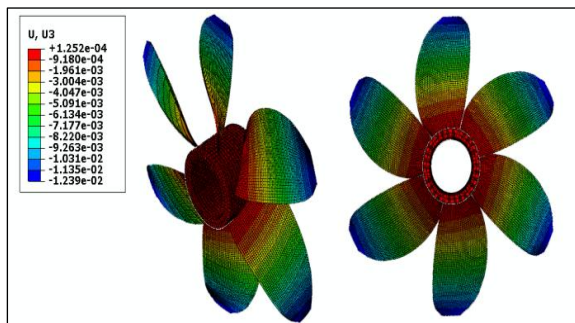
تئوری شکست تسای-وو بر پایه تئوری شکست انرژی کرنش کل بلترامی<sup>۱</sup> استوار است. تسای-وو از این تئوری برای یک تک لایه در حالت تنش صفحه‌ای استفاده کرد. یک تک لایه در صورتی به شکست خواهد رسید که شرط رابطه (۱۰) برآورده نشود (کاو-۲۰۰۶):

$$(10)$$

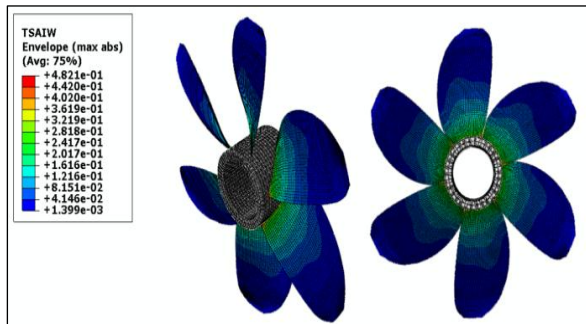
$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1$$

پارامترهای  $H_1, H_2, H_6, H_{11}, H_{22}, H_{66}$  در رابطه (۱۰)، مطابق با ۵ پارامتر استحکام برای تک لایه یعنی استحکام کششی طولی نهایی، استحکام فشاری طولی نهایی، استحکام کششی عرضی نهایی، استحکام فشاری عرضی نهایی و استحکام برشی نهایی درون

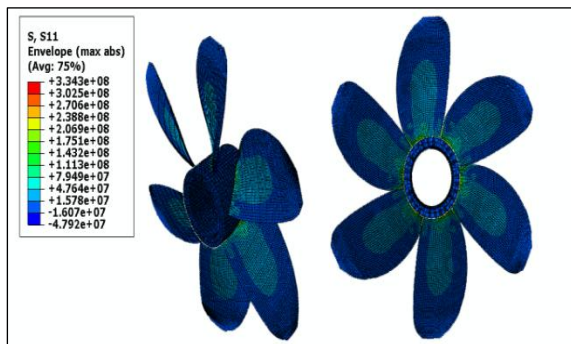
نوک پره پروانه آلومینیومی ۲/۷ میلی‌متر می‌باشد. بدین ترتیب خیز نوک پره کرنی تقریباً ۴/۵۹ برابر پره آلومینیومی مشابه خود می‌باشد. با بهینه کردن لایه چینی پره کرنی می‌توان مقدار خیز نوک پره آن را کاهش داد. شکل ۶- کانتور جابجایی پروانه را برای ترکیب لایه چینی  $[0/90/-77/77/90_2/-77/77]$  نشان می‌دهد. همچنین کانتورهای مقادیر حاصل از بیشترین مقادیر تئوری تسای-وو و تنش در راستای طول و عمود بر الیاف آورده در ادامه آورده شده‌اند.



شکل ۶- کانتور جابجایی پروانه کامپوزیتی در راستای محور آن

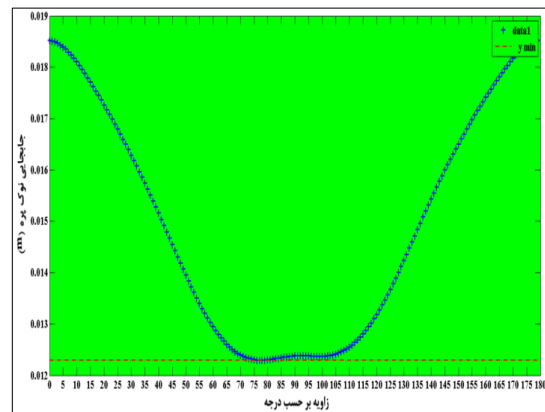


شکل ۷- کانتور بیشترین مقادیر حاصل از تئوری شکست تسای-وو



شکل ۸- کانتور تنش پروانه کامپوزیتی در راستای الیاف

آباکوس<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. برای تک‌تک لایه‌ها بیشترین مقدار حاصل از تئوری تسای-وو کمتر از یک بوده و شکست در لایه‌ها اتفاق نمی‌افتد. در شکل ۵- نمودار مقادیر جابجایی نوک پره از زاویه صفر تا صد و هشتاد درجه برای لایه چینی پیشنهادی  $[0/90/-\theta/\theta/90_2/-\theta/\theta]$  نشان داده شده است. در واقع هدف بررسی تغییر شکل‌ها و تنش‌های پروانه با استفاده از لایه چینی پیشنهادی می‌باشد. کمترین مقدار جابجایی نوک پره در زاویه ۷۷ درجه بوده و مقدار آن ۱۲/۳۹ میلی‌متر می‌باشد. نتایج تحلیل‌های پروانه کامپوزیتی در زاویه ۷۷ درجه نیز نشان می‌دهد که لایه چینی پیشنهادی کارایی لازم در کاهش خیز را دارا نمی‌باشد و لزوم کمینه‌سازی این خیز را در یک فرآیند بهینه‌سازی نشان می‌دهد. جدول ۵- نتایج تحلیل استاتیکی پروانه کامپوزیتی را برای ترکیب لایه چینی پیشنهادی در زاویه ۷۷ درجه نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار جابجایی نوک پره از زاویه صفر تا ۱۸۰ درجه

جدول ۵- نتایج تحلیل استاتیکی پروانه برای ترکیب لایه چینی  $[0/90/-77/77/90_2/-77/77]$

۱۲/۳۹	بیشترین خیز نوک پره (mm)
۱۳۰/۵ (Mpa)	بیشترین تنش در راستای عمود بر الیاف-S22
۳۳۴/۳ (Mpa)	بیشترین تنش در راستای الیاف-S11
۰/۴۸۲۱	بیشترین مقدار تسای-وو

باتوجه به نتایج جدول ۵- بیشترین خیز نوک پره پروانه کامپوزیتی ۱۲/۳۹ میلی‌متر می‌باشد. بیشترین خیز

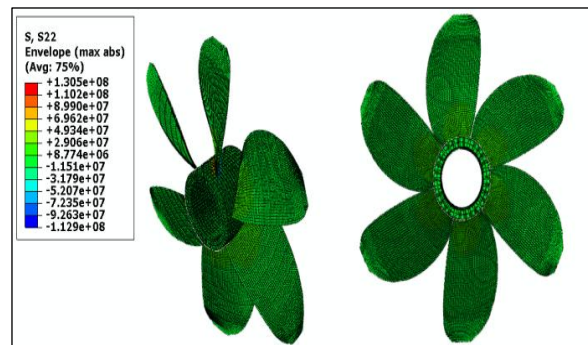
<sup>۱</sup>Abaqus PDE

جدول ۴- نتایج تحلیل استاتیکی پروانه کامپوزیتی با لایه چینی‌های مختلف

منبع	بیشترین خیز نوک پره (mm)	بیشترین مقدار تناسی-وو	ترکیب لایه چینی
Lin, G.-F-1991	۲۶/۴۵	۰/۵۸۰۸	[۰/۹۰/۴۵/۹۰/۰]
H. J. LIN-2005	۳۵/۶۶	۰/۵۸۶۱	[-۱۵/۱۵/۹۰/۰] <sub>s</sub>
Motley-2009	۱۶/۸۹	۰/۵۶۰۶	[۳۰/۳۰/۹۰/۹۰/۳۰]
Manudha et al., 2013	۶۴/۱۵	۰/۹۳۰۷	[۰ <sub>۱۳</sub> /۰ <sub>۱۳</sub> /۹۰ <sub>۱۳</sub> ]
Yin Lu Young-2011	۸۲/۹۸	۰/۹۸۵۹	[۱۵/۳۰/-۱۵/۰/-۳۰]
Azzam Ahmed-2012	۱۶/۵۷	۰/۴۶۹۹	[۰/۹۰/-۴۵/۴۵/۰/۹۰/-۴۵/۴۵] <sub>s</sub>
Azzam Ahmed-2012	۲۳/۸۸	۰/۵۴۴۴	[۴۵/۴۵/۹۰/۰/۴۵/۴۵/۹۰/۰] <sub>s</sub>
Mulcahy-2010	۱۶/۴۶	۰/۵۸۰۸	[۱۲۰/۳۰/۷۵/۳۰/-۱۵/۳۰] <sub>s</sub>
Hara and Yamatogi-2011	۱۷/۵۸	۰/۴۶۵۱	[۴۵/-۴۵/۹۰/۰/۴۵/-۴۵/۹۰/۰] <sub>s</sub>
Pavan Kishore -2014	۳۹/۰۵	۰/۷۸۸۳	[۴۵ <sub>۲</sub> /۰ <sub>۲</sub> /۹۰/۴۵/۰ <sub>۲</sub> -۴۵/۰/۹۰] <sub>s</sub>
الگو از (Azzam Ahmed-2012)	۱۴/۶۶	۰/۴۱۳۷	[۰/۹۰/-۴۵/۴۵/۹۰/۰/-۴۵/۴۵] <sub>s</sub>
الگو از (Azzam Ahmed-2012)	۱۸/۹۳	۰/۴۷۹۷	[۰/۹۰/-۳۰/۳۰/۰/۹۰/-۳۰/۳۰] <sub>s</sub>
الگو از (Azzam Ahmed-2012)	۱۶/۴۱	۰/۴۵۸۸	[۰/۹۰/-۳۰/۳۰/۹۰/۰/-۳۰/۳۰] <sub>s</sub>
الگو از (Azzam Ahmed-2012)	۱۴/۳۵	۰/۴۰۶۳	[۰/۹۰/-۶۰/۶۰/۰/۹۰/۰/-۶۰/۶۰] <sub>s</sub>
الگو از (Azzam Ahmed-2012)	۱۳/۰۵	۰/۳۶۹۷	[۰/۹۰/-۶۰/۶۰/۹۰/۰/-۶۰/۶۰] <sub>s</sub>
الگو از (Azzam Ahmed-2012)	۱۸/۷۳	۰/۵۵۶۰	[۴۵/-۴۵/۹۰/۰/۴۵/-۴۵/۹۰] <sub>s</sub>
پیشنهادی	۱۸/۶۱	۰/۴۷۹۷	[۰/۹۰/-۴۵/۴۵] <sub>s</sub>
پیشنهادی	۲۲/۴۰	۰/۵۱۰۴	[۰/۹۰/۴۵] <sub>s</sub>
پیشنهادی	۱۸/۶۱	۰/۴۷۹۷	[۰ <sub>۲</sub> /۹۰ <sub>۲</sub> /۰/-۴۵ <sub>۲</sub> /۴۵ <sub>۲</sub> ] <sub>s</sub>
پیشنهادی	۳۴/۸۸	۰/۶۰۴۳	[۴۵/-۴۵/۴۵/-۴۵] <sub>s</sub>

استفاده جعبه ابزار بهینه سازی الگوریتم ژنتیک متلب<sup>۱</sup> زوایایی از پره کامپوزیتی که در آن‌ها خیز کمینه است، یافته می‌شود. قبل از تکمیل فرآیند بهینه سازی لایه چینی به تحلیل فرکانس طبیعی پروانه‌ها پرداخته می‌شود.

جهت تحلیل فرکانسی طبیعی پروانه‌ها در نرم افزار آباکوس از تحلیل مقدار ویژه به روش Block Lanczos استفاده شده است. در واقع برای استخراج شکل پنج مود اول فرکانس طبیعی هر دو پروانه کامپوزیتی و آلومینیومی، شرایط مرزی و چگالی آن‌ها لازم می‌باشد. نوع تحلیل از استاتیکی/عمومی به فرکانسی تغییر یافته و شکل پنج مود اول فرکانسی حاصل می‌شود. با توجه به اینکه پروانه مورد نظر این تحقیق دارای دور کاری ۱۸۰ دور بر دقیقه بوده و شش پره می‌باشد، فرکانس

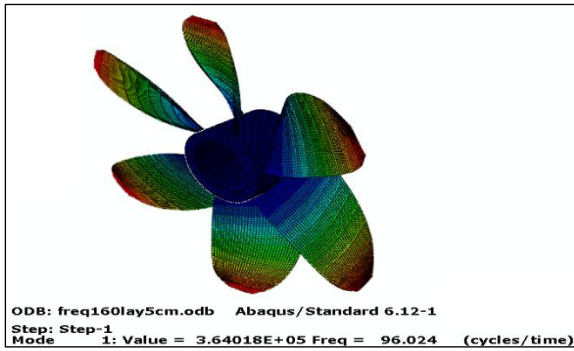


شکل ۹- کانتور تنش پروانه کامپوزیتی در راستای عمود برالیاف

مقادیر تنش در ریشه پروانه در ناحیه اتصال پره‌های کربنی به تویی فلزی بیشینه می‌باشند. خیز نوک پره پروانه کامپوزیتی در  $\theta=77$  در لایه چینی پیشنهادی که به کمک جدول ۴- حاصل شد همچنان نسبت پروانه آلومینیومی ۴/۵۹ برابر بیشتر است از این‌رو با

<sup>۱</sup>MATLAB Optimization GA Toolbox





شکل-۱۱: مود اول فرکانسی پروانه کامپوزیتی

نتایج تحلیل تحلیل استاتیکی پروانه کامپوزیتی برای لایه چینی پیشنهادی در زاویه  $\theta=77$  درجه که از اسکریپت نویسی کمترین جابجایی را داشت، نیز نشان داد که خیز نوک آن حدود  $4/59$  برابر پره آلومینیومی مشابه می‌باشد. از این رو جهت کم کردن این خیز از ارتباط بین آباکوس و متلب استفاده می‌شود. بدین منظور از جعبه ابزار بهینه سازی الگوریتم ژنتیک متلب با تعریف تابع شایستگی براساس خیز نوک پره کامپوزیتی استفاده شده است. ابتدا یک متغیر ( $\theta$ ) بهینه شده و سپس ۱۶ زاویه متغیر طبق لایه چینی پیشنهادی، به کمک الگوریتم ژنتیک با هدف کاهش خیز نوک پره بهینه می‌شود. بهینه‌سازی زوایای لایه چینی پیشنهادی در حالت چینش متقارن نیز بررسی شده است.

جهت ارتباط متلب و آباکوس و تبدیل کدها بین این دو نرم افزار فایل‌هایی را باید آماده ساخت. فایل‌های

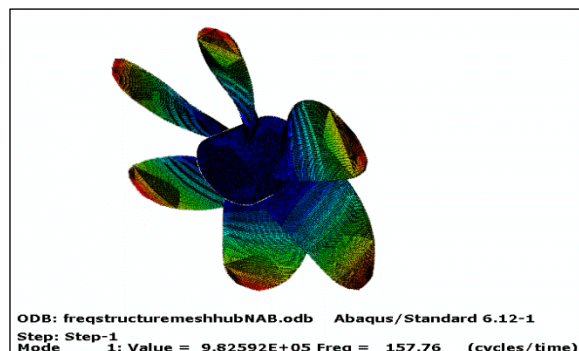
مورد نیاز عبارتند از: Main.m, Main.py و Var.py. فایل اول مربوط به نرم افزار متلب و فایل دوم و سوم مربوط به نرم افزار آباکوس می‌باشد. فایل‌ها با پسوند py، اسکریپت نوشته شده به زبان پیتون می‌باشند که در محیط ویرایشگر آباکوس نوشته شده‌اند. فایل Main.py شامل اسکریپت مربوط به مدل سازی و تحلیل پره پروانه کامپوزیتی به صورت دستوری می‌شود. در واقع در این محیط متنی تغییرات لازم بر روی لایه چینی پره کامپوزیتی جهت شروع روند بهینه سازی صورت می‌گیرد. فایل Main.m شامل کدهای بین برنامه‌ای جهت ارتباط متلب و آباکوس و

تحریک آن ۱۸ هرتز می‌باشد. فرکانس‌های طبیعی حاصله برای هر دو پروانه کامپوزیتی و آلومینیومی در محدوده فرکانس تحریک قرار ندارند، و احتمال پدیده تشدید در هر دو پروانه کم می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۶- مشاهده می‌شود تمامی فرکانس‌های طبیعی پروانه کامپوزیتی از پروانه آلومینیومی کمتر بوده و این موضوع نشان می‌دهد که جرم و سختی پره کامپوزیتی از پره آلومینیومی کمتر است.

جدول ۶- فرکانس‌های طبیعی هر دو پروانه (پره کامپوزیتی با لایه چینی  $[0/90/-77/77/90]_s$ )

شماره مود	پروانه آلومینیومی (cycles/second)	تحلیل مقدار ویژه	پروانه کامپوزیتی (cycles/second)
۱	۱۵۷/۷۶		۹۶/۰۲۴
۲	۴۳۰/۷۹		۲۶۷/۸۶
۳	۵۳۶/۳۸		۳۷۴/۷۷
۴	۷۶۴/۰۱		۶۸۵/۹۴
۵	۹۴۵/۱۱		۷۳۸/۶۹

سفتی کمتر پره کامپوزیتی سبب افزایش خیز در نوک آن می‌شود. در این تحقیق وزن پره کربنی ۳۲ درصد کمتر از پره آلومینیومی می‌باشد. شکل-۱۰ مود اول فرکانس طبیعی پروانه آلومینیومی و شکل-۱۱ مود اول فرکانس طبیعی پروانه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.



شکل-۱۰: مود اول فرکانسی پروانه آلومینیومی

فایل نتایج خیز پره امکان‌پذیر نیست. برای دستیابی به مقادیر خیز پره باید از نتایج شیء<sup>۱</sup> odb استفاده کرد. به‌طور کلی در آباکوس سه دسته شیء اساسی وجود دارد که عبارتند از (Abaqus 6.12 Documentation):

- Mdb و یا model base data که مربوط به مدل-سازی و اطلاعات مورد نیاز برای حل‌گر است.
- Odb یا output database که اطلاعات حاصل از حل مسئله در آن قرار گرفته است.
- Session که مربوط به نمایش است.

برای استخراج مقادیر خیز پره و دیگر پارامترها از شیء odb استفاده می‌شود. به‌طور کلی با کمک شیء odb می‌توان سه دسته فعالیت انجام داد. دسته اول فعالیت-ها مربوط به استخراج نتایج حاصل از حل‌گر آباکوس<sup>۲</sup> است. دسته دوم مربوط به نوشتن اطلاعات در یک odb و دسته سوم شامل مجموعه فعالیت‌های محاسباتی است. برای استخراج نتایج مربوط به جابجایی‌های پره در هر گره (و در نتیجه تعریف نُرْم) از دسته اول فعالیت‌های odb استفاده می‌شود. پس از تکمیل اسکریپت آن را با نام Main.py در همان پوشه مربوط به واسط گرافیکی<sup>۳</sup> پروانه ذخیره می‌شود. گام بعد ساخت یک فایل متلب Main.m برای اجرای آباکوس می‌باشد، به نحوی که اسکریپت نوشته شده در فایل Main.py که شامل تحلیل استاتیکی پروانه کامپوزیتی با یک متغیر مجهول یعنی زاویه  $\theta$  اجرا شود. این اجرا تا یافتن زاویه  $\theta$ ی که در آن نُرْم کمینه می‌باشد، در جعبه ابزار بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب ادامه می‌یابد. فایل Var.py برای نوشتن زاویه بهینه شده در آن، نیز ساخته می‌شود.

از الگوریتم ژنتیک در جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم افزار متلب، برای انجام فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. در این جعبه ابزار تمام عملگرهای مورد نیاز برای انجام بهینه‌سازی قرار داده شده است. هدف کلی بهینه‌سازی در این مقاله، کاهش جابجایی‌های پره

دستورهای اجرایی می‌شود. همچنین دستورات لازم جهت بهینه‌سازی لایه چینی پره و استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک (تعریف تابع هدف یا شایستگی) در این فایل موجود می‌باشد. فایل Var.py نیز شامل متغیرهای تعریف شده پس از اتمام هر مرحله از بهینه‌سازی می‌باشد (از این فایل به عنوان فایل کمکی برای انتقال داده خروجی بین آباکوس و متلب استفاده می‌شود). در این تحقیق متغیرها زوایای الیاف می‌باشند که در فایل Var.py نوشته می‌شوند.

تمام فعالیت‌هایی که در واسطه گرافیکی آباکوس انجام می‌گیرد، به‌صورت دستوراتی در فایلی با نام abaqus.rpy ذخیره می‌گردد. از طرف دیگر می‌توان تمام دستورات واسطه گرافیکی را به صورت توابع و دستوراتی در فایلی با پسوند \*.py نوشت و سپس فایل آماده شده را در آباکوس اجرا کرد. قواعد حاکم بر نگارش این دستورات از زبان برنامه نویسی پیتون تبعیت می‌کند و علاوه بر توابع اختصاصی آباکوس، دستورات پیتون نیز توسط آباکوس شناخته شده است. در این پژوهش هدف دستیابی به یک لایه چینی بهینه با معیار کمینه کردن خیز نوک پره کامپوزیتی می‌باشد. بدین ترتیب ابتدا فایل abaqus.rpy مربوط به پروانه کامپوزیتی در محیط ویرایشگر آباکوس باز می‌شود و سپس در یک فایل جدید با پسوند \*.py برای انجام اصلاحات لایه چینی پره (تعریف زاویه هر لایه به عنوان یک متغیر) کپی و ذخیره (با نام Main.py) می‌شود. با توجه به اینکه از الگوریتم ژنتیک متلب جهت دستیابی به لایه چینی بهینه استفاده خواهد شد، پس تکرار تحلیل پره پروانه کامپوزیتی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. زیرا الگوریتم بهینه‌سازی بعد از هر اجرا با توجه به نتایج بدست آمده به اصلاح لایه چینی پره و اجرای مجدد تحلیل می‌پردازد. این اجراها تا همگرایی جواب‌ها که براساس معیار توقف الگوریتم ژنتیک است، ادامه خواهند یافت. مرحله بعد، تعریف نُرْمی براساس بیشینه خیز نوک پره براساس نتایج تحلیل استاتیکی می‌باشد. برخلاف توضیحات قبل، استفاده از دستورات فایل abaqus.rpy برای خواندن

<sup>۱</sup>Odb objects

<sup>۱</sup>ODB File

<sup>۲</sup>Abaqus CAE

شود، ولی این کار نیاز به حافظه رایانه زیادی دارد و زمان اجرای برنامه نیز زیاد می شود. اگر تعداد اعضای جمعیت نیز کوچک تر از حد مشخصی باشد، جمعیت مورد نظر فقط قسمت کوچکی از فضای جستجو را نشان می دهد و ممکن است جستجو برای رسیدن به حل بهینه در این جمعیت موفقیت آمیز نباشد. پیشنهاد راهنمای جعبه ابزار این است که تعداد اعضای جمعیت در حالتی که تعداد متغیرها کمتر از پنج باشد ۵۰ و برای حالتی که تعداد متغیرها بیش از ۵ باشد، ۲۰۰ انتخاب شود. البته به صورت تجربی با تعداد اعضای جمعیت کمتر، امکان حصول جواب مناسب وجود دارد. در این پژوهش در حالت اول با یک زاویه مجهول تعداد جمعیت ۴۰ در نظر گرفته شده است. دامنه اولیه ۶۰ تا ۹۰ درجه جهت کاهش زمان حل انتخاب شده است. ضمن اینکه جوابها به خوبی همگرا شده اند. توابع مقیاس بندی: در این قسمت تابع رتبه<sup>۵</sup>، برای مقیاس بندی تابع شایستگی انتخاب شده است. این تابع، جوابهای بدست آمده را متناسب با میزان شایستگی و ارزش آنها رتبه بندی می کند. در واقع تابع رتبه امتیازات خام را براساس رتبه آنها مقیاس می کند.

توابع انتخاب: تابع انتخاب، والدین را برای تولید نسل بعدی براساس مقادیر تعیین شده توسط تابع مقیاس بندی انتخاب می کند. در این قسمت از تابع یکنوا پخشی<sup>۶</sup> انتخاب استفاده شده است. این تابع انتخاب، والدین را روی یک خط پخش کرده و بر اساس مقادیر مقیاس شده روی یک خط با گامهای مساوی جلو رفته و والدین را انتخاب می کند. تنظیمات مربوط به تولید مثل: با استفاده از تنظیمات مربوط به تولید مثل می توان نحوه تولید نسل بعدی را کنترل نمود. این تنظیمات در منوی باز تولید<sup>۷</sup> می باشد. گزینه های در دسترس در این منو عبارتند از: فرزندان نخبه<sup>۸</sup>: که تعداد افراد با بهترین مقدار شایستگی در نسل حاضر

کامپوزیتی بر مبنای تغییر زوایای الیاف و تغییر لایه چینی در هر لایه می باشد. به این ترتیب که ترتیب قرارگیری لایه ها و زاویه الیاف در هر لایه به گونه ای توسط الگوریتم ژنتیک انتخاب شود که تابع شایستگی نرم (بر اساس بیشینه خیز در نوک پره) کمینه شود. قبل از اجرای فرآیند بهینه سازی لازم است تنظیماتی در بخش های مختلف جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک انجام شود. این بخش ها به ترتیب عبارتند از:

تعریف مسئله: قسمت تعریف مسئله شامل تابع شایستگی و تعداد متغیرها می باشد. تابع شایستگی تابعی است که قرار است کمینه شود. تابع شایستگی به شکل @Main درج می شود که Main.m یک تابع متلب یا فایل متلب بوده و تابع شایستگی را با اجرا اسکریپت پیتون Main.py محاسبه می کند. تابع شایستگی براساس معیار کمینه کردن نرم خیز نوک پره تعریف می شود. تعداد متغیرها نیز برابر با تعداد لایه های پره کامپوزیتی می باشد. در حالت اول یک متغیر زاویه ( $\theta$ ) مجهول می باشد. در مراحل بعد به ترتیب هر ۸ زاویه لایه چینش متقارن و ۱۶ متغیر (کل لایه ها) لایه چینی پیشنهادی بهینه می شوند. قیدها: این بخش شامل قسمت های اصلی باند و تابع قید غیر خطی است. در قسمت باند، حد بالا و پایین متغیرها وارد می شود که در این جا محدوده 60 تا ۹۰ درجه (در حالت اول که فقط یک زاویه متغیر باشد) برای هر لایه برای کاهش زمان حل انتخاب شده است. در این مسئله از تابع قید غیر خطی استفاده نشده است. این قسمت شامل نوع جمعیت<sup>۱</sup>، اندازه جمعیت<sup>۲</sup> و تابع ایجاد<sup>۳</sup> می باشد. در قسمت نوع جمعیت، بردار دوبعدی<sup>۴</sup> انتخاب شده است. اندازه جمعیت تعداد اعضای جمعیت را در هر نسل مشخص می کند. اندازه جمعیت باید به درستی انتخاب شود، زیرا در صورتی که تعداد اعضای جمعیت بسیار زیاد باشد، اگرچه وضعیت جستجو ممکن است به صورت بهتری نمایش داده

<sup>۱</sup>Population Type

<sup>۲</sup>Population Size

<sup>۳</sup>Creation Function

<sup>۴</sup>Double Vector

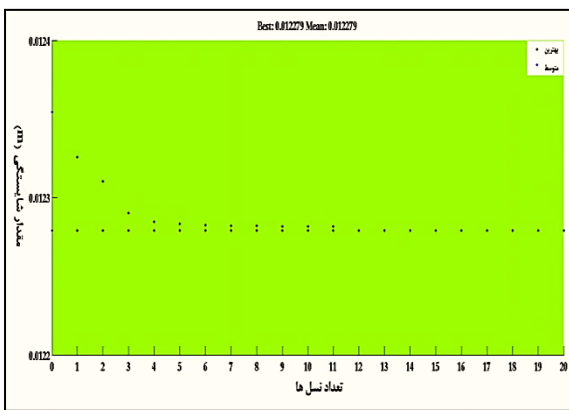
5- Rank

2- Stochastic uniform

3- Reproduction

8- Elite count

کردن لایه چینی پره پروانه کامپوزیتی نشان داده شده است. بهترین و متوسط مقدار شایستگی (نرم) از نسل دوازدهم همگرا شده است و مقدار هر دو ۱۲/۲۷۹ میلی متر می‌باشد. نقاطی که در پایین نمودار مشخص شده‌اند نشان دهنده بهترین مقادیر شایستگی در هر نسل هستند. نقاط بالایی نشان دهنده میانگین مقادیر شایستگی در هر نسل می‌باشند. همچنین در بالای نمودار، بهترین و میانگین مقادیر شایستگی در نسل حاضر به صورت عددی نمایش داده شده است. منظور از بهترین و میانگین مقادیر شایستگی در اینجا، نرم تعریف شده براساس خیز پره می‌باشد. همچنین مقدار زاویه بهینه  $\theta = 74/224$  بدست آمد.

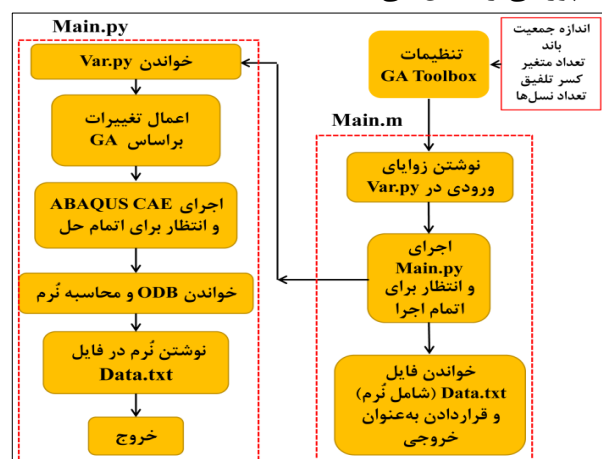


شکل-۱۳: نمودار بهترین و میانگین مقادیر شایستگی (نرم)

در گام بعد هر ۸ زاویه چینی متقارن به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود. برای این کار ابتدا در قسمت تعریف مسئله ۸ متغیر در نظر گرفته شده و در قسمت باند، حد بالا و پایین متغیرها به ترتیب از صفر تا ۹۰ درجه تعریف می‌شود. در قسمت جمعیت، تعداد اعضای جمعیت ۶۰ و دامنه اولیه از صفر تا ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. تابع مقیاس و انتخاب مشابه حالت قبل انتخاب شده و در قسمت تنظیمات تولید مثل تعداد فرزندان نخبه ۲ و کسر فرزندان تلفیق ۰/۵ لحاظ شده است. از تنظیمات پیش فرض برنامه در قسمت جهش و تلفیق و مهاجرت نیز استفاده شده است. معیار توقف در این حالت نیز در تعداد نسل‌ها

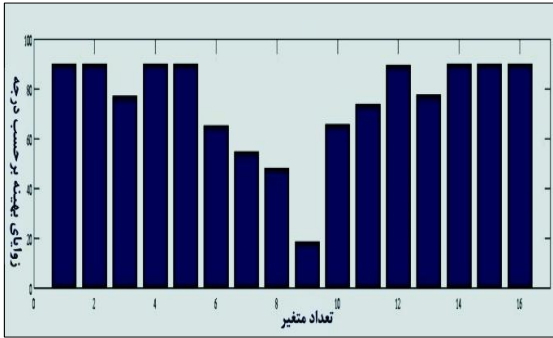
می‌باشد. که بدون تغییر به نسل بعدی منتقل می‌شوند. زمانی که این مقدار برابر با یک تعیین شود فقط بهترین فرد از جمعیت حاضر به نسل بعدی منتقل می‌شود. انتخاب مقادیر بالا برای این قسمت باعث کاهش کارایی الگوریتم ژنتیک می‌شود. مقدار پیش فرض این قسمت دو می‌باشد. راهنمای جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک تعداد فرزندان نخبه را ۵ درصد تعداد اعضای جمعیت پیشنهاد می‌کند.

کسر فرزندان تلفیقی<sup>۱</sup>: تعیین کننده تعدادی از افراد نسل بعدی (به جز نخبگان) است که با توجه به عملیات تلفیق تولید می‌شوند. مقدار این قسمت برابر با کسری بین ۰ تا ۱ قرار داده می‌شود. و مقدار پیش فرض آن ۰/۸ می‌باشد. در این مقاله برای حالت اول که یک زاویه بهینه می‌شود، مقدار کسر فرزندان تلفیق ۰/۶ و تعداد فرزندان نخبه به صورت پیش فرض انتخاب شده است. معیارهای توقف الگوریتم ژنتیک: معیار توقف در تعداد نسل لحاظ شده است. نمودار همگرایی بهترین و متوسط مقادیر شایستگی در هر نسل می‌تواند در انتخاب تعداد نسل‌ها مؤثر باشد. شکل-۱۲ فلوجارت روند بهینه سازی لایه چینی پره‌های پروانه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.



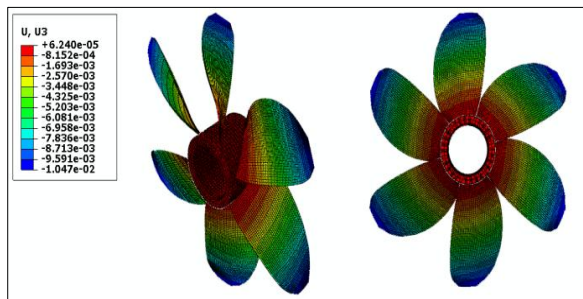
شکل-۱۲: فلوجارت روند بهینه‌سازی لایه چینی پره کامپوزیتی

در شکل-۱۳ نمودار بهترین و متوسط مقادیر شایستگی با استفاده از تولید ۲۰ نسل برای بهینه



شکل-۱۶: نمودار زوایای بهینه با بهترین مقدار شایستگی یا نرم

شکل-۱۷: کانتور جابجایی پروانه را با توجه به زوایای حاصل از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با ۱۶ زاویه مجهول نشان می‌دهد. بیشینه مقدار جابجایی در نوک پره ۱۰/۴۷ میلی‌متر می‌باشد، که نسبت به مقدار جابجایی لایه چینی پیشنهادی (۱۲/۳۹ میلی‌متر) ۱۵/۵ درصد کاهش یافته است.

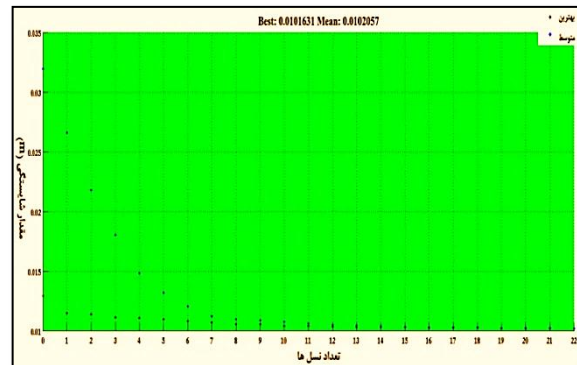


شکل-۱۷: کانتور جابجایی پروانه کامپوزیتی برای لایه چینی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک (با ۱۶ متغیر)

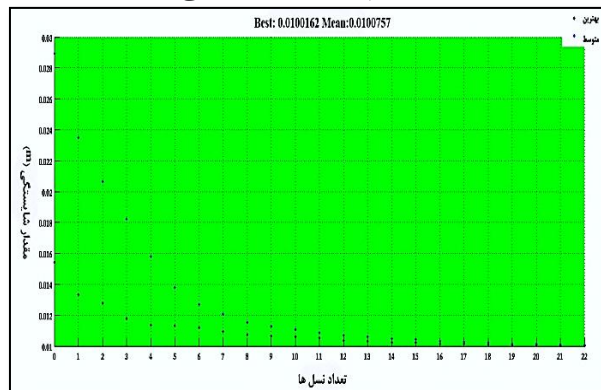
#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل استاتیکی و فرکانس طبیعی دو پروانه آلومینیومی و کامپوزیتی در این پژوهش صورت گرفت. تنش‌ها، تغییر شکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی هر دو پروانه بررسی و مقایسه شدند. نتایج نشان داد پروانه کامپوزیتی با حدود ۳۲ درصد وزن کمتر و با ترکیب لایه چینی  $s[-77/77/90/77/90/0]$  (با توجه به لایه چینی پیشنهادی) از نظر تئوری تسای-وو در محدوده ایمن قرار دارد. بیشترین جابجایی‌ها در نوک پره اتفاق می‌افتد. بیشترین مقادیر تسای-وو پروانه کامپوزیتی و تنش در هر دو پروانه در ناحیه اتصال

لحاظ شده است و به دلیل همگرایی مقدار شایستگی و کاهش زمان حل در ۲۲ نسل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک متوقف می‌شود. بهترین مقدار شایستگی (نرم) ۱۰/۱۶۳ میلی‌متر و متوسط مقدار شایستگی در این حالت (مطابق شکل-۱۴) ۱۰/۲۰۵۷ میلی‌متر بدست آمده است. از نسل ۱۵ به بعد جواب‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک همگرا می‌شود. مرحله آخر بهینه‌سازی هر ۱۶ زاویه لایه چینی پیشنهادی می‌باشد. تنظیمات جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک در این مرحله مشابه مرحله قبل می‌باشد با این تفاوت که در قسمت تعریف مسئله ۱۶ متغیر در نظر گرفته شده و در قسمت جمعیت، تعداد اعضای جمعیت ۸۰ لحاظ می‌شود.



شکل-۱۴: نمودار بهترین و میانگین مقادیر شایستگی (نرم) برای بهینه‌سازی با هر ۸ متغیر بهترین مقدار شایستگی (نرم) ۱۰/۱۶۲ میلی‌متر و متوسط مقدار شایستگی در این حالت ۱۰/۰۷۵۷ میلی‌متر بدست آمده است. از نسل ۱۸ به بعد جواب‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک همگرا می‌شود.



شکل-۱۵: نمودار بهترین و میانگین مقادیر شایستگی (نرم) برای بهینه‌سازی با هر ۱۶ متغیر

بیشترین جابجایی پره نسبت به پروانه کامپوزیتی با لایه چینی پیشنهادی ۱۵/۵ درصد کاهش می‌یابد. برای برقراری ارتباط بین نرم افزارهای آباکوس و متلب و استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب توصیه می‌شود از سیستم عامل لینوکس استفاده شود.

جدول ۷- مقایسه نتایج بیشترین جابجایی پروانه

در حالت‌های مختلف

نرم جابجایی در نوک پره (mm)	مشخصات لایه چینی پره
۱۲/۲۹۲	لایه چینی پیشنهادی از اسکریپت‌نویسی
۱۲/۲۷۹	لایه چینی بهینه شده با یک زاویه مجهول به کمک الگوریتم ژنتیک
۱۰/۱۶۳	لایه چینی بهینه شده با هشت زاویه مجهول (لایه چینی متقارن)
۱۰/۰۱۶۲	بهینه‌سازی لایه چینی پیشنهادی با هر ۱۶ زاویه مجهول

در واقع سیستم عامل ویندوز در اجراهای متوالی آباکوس از نرم افزار متلب بعد از چند مرحله ناتوان بوده و پیغام "عدم پاسخ حل" می‌دهد. در این پژوهش جهت ارتباط نرم افزار آباکوس و متلب و بهینه‌سازی لایه چینی پره کامپوزیتی از به کمک الگوریتم ژنتیک از سیستم عامل لینوکس نسخه CentOS6.5 استفاده شده است.

#### منابع

20084-5000  
Lin, Gau-Feng., "Three Dimensional Stress Analysis of a Fiber Reinforced Composite Thruster Blade", the society of naval architects and marine engineers.,1991.  
LIN, H.J., and Tsai, J.F., "Analysis of Underwater Free Vibrations of a Composite Propeller Blade," Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 27, No. 5/2008.  
Kishore, M.L.Pavan., and Behera, R.K., and

پره‌ها به تویی می‌باشد. همچنین فرکانس‌های طبیعی حاصله برای هر دو پروانه کامپوزیتی و آلومینیومی در محدوده فرکانس تحریک قرار ندارند و احتمال پدیده تشدید در هر دو پروانه ناچیز است. اما بیشترین جابجایی پره‌های پروانه کامپوزیتی با این لایه چینی نیز ۴/۵۹ برابر پروانه آلومینیومی مشابه خود بود. برای کاهش جابجایی‌های پره کامپوزیتی از ارتباط آباکوس و متلب استفاده شد و به کمک جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک لایه چینی که در آن جابجایی‌های پره کمتر شود، بدست آمد. الگوریتم ژنتیک جعبه ابزاری قدرتمند در نرم افزار متلب جهت مسائل بهینه‌سازی می‌باشد، استفاده از اسکریپت نویسی در آباکوس برای انجام بهینه‌سازی (با اجراهای متوالی آباکوس توسط متلب) دقت بهینه‌سازی را افزایش می‌دهد. زمان حل در فرآیند بهینه‌سازی لایه چینی پره با استفاده از این روش به تعداد متغیرها و اندازه جمعیت وابسته می‌باشد. به صورت تجربی با چندین اجرا می‌توان در صورت دستیابی به همگرایی مناسب نتایج (بهترین و متوسط مقدار شایستگی)، اندازه جمعیت را کاهش داد. جهت صحت‌سنجی کار الگوریتم ژنتیک ابتدا یک لایه بهینه شد. سپس ۱۶ زاویه متغیر طبق لایه چینی پیشنهادی، به کمک الگوریتم ژنتیک با هدف کاهش خیز نوک پره بهینه شدند. بهینه‌سازی زوایای لایه چینی پیشنهادی در حالت متقارن نیز مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۷- نتایج جابجایی‌های پروانه کامپوزیتی را براساس نرم تعریف شده را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. بهینه‌سازی لایه چینی پیشنهادی با ۱۶ زاویه متغیر طبق دارای کمترین نرم بوده (طبق جدول ۷-۷) و با بکارگیری این لایه چینی J.P Ghosh and R.P Gokaran. ,Basic ship propulsion, Department of Ocean Engineering and Naval Architecture Indian Institute 'of Technology Kharagpur, 2004.  
Taylor, D.W., The speed and power of ships, Washington. 1933.  
Lin, G.-F. (1991). Comparative Stress/Deflection Analysis of a Thick-Shell Composite Propeller Blade, DTRC/SHD-1373-01, David Taylor Research Center, Bethesda, MD

- Marine Propeller Blade, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2005.
- Manudha, T. Herath., and Prusty ,B. Gangadhara, Development of a shape-adaptive composite propeller using bend-twist coupling characteristics of composites, *Third International Symposium on Marine Propulsors, smp'13, Launceston, Tasmania, Australia, May 2013.*
- Yin Lu Young, and Michael R. Motley, Influence of Material and Loading Uncertainties on the Hydroelastic Performance of Advanced Material Propellers, *Second International Symposium on Marine Propulsors, smp'11, Hamburg, Germany, June 2011.*
- Azzam Ahmed, Prediction the damping and delamination of the composite propeller laminated, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 4 No.06 June 2012.
- N. L. Mulcahy and B. G. Prusty, Hydroelastic tailoring of flexible composite propellers, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 5, No. 4, 2010, 359–370.
- Y. Hara and T. Yamatogi, performance evaluation of composite marine propeller for a fishing boat by fluid-structure interaction analysis, *18<sup>TH</sup> International conference on composite materials*, 21-26 Aug 2011.
- Kishore, M.L.Pavan., and Behera, R.K., Determination of Optimal Stacking Sequence for Modal Characteristics Evaluation of Composite Marine Propeller Blade, *Journal of Mechanical Design and Vibration*, Vol.2, No. 4, 94-101, 2014.
- Abaqus 6.12 Documentation, a product of Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Optimization Tool, MATLAB 2014 Quick.
- Bezawada., Sreenivasulu., “Structural Analysis of NAB Propeller Replaced With Composite Material,” *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol.3, Issue.1. pp-401-405. Jan-Feb. 2013.
- MOHAMMED AHMED KHAN., Design and Dynamic analysis on composite propeller of ship using FEA, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol.2 , No.1, Pages:310 – 315. 2013.
- DNV, RULES FOR CLASSIFICATION OF Ships /High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft, PART ۴ CHAPTER ۵, Rotating Machinery, Driven Units, Propeller, JULY 2013.
- Motley, M.R., and Liu, Z., “Utilizing fluid-structure interactions to improve energy efficiency of composite marine propellers in spatially varying wake,” *Composite Structures*. March 18, 2009.
- Ghassemi H., “A Study On Hydrodynamic Analysis Of Propellers And Cavitation Prediction Of Hydrofoils By The Application Of Surface Panel Method”, Ph.D. Thesis, Yokohama National University, Japan, March 1997.
- Autar Kaw, *MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS*, Second Edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York, 2006.
- Kishore, M.L.Pavan., and Behera, R.K., Replacement of Nab Propeller Blade with Composite for Strength Criteria, *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, ISSN: 2319 – 6734. pp-42-46. Sep-Oct. 2012.
- Lin, G.-F., Comparative Stress/Deflection Analysis of a Thick-Shell Composite Propeller Blade, *DTRC/SHD-1373-01*, David Taylor Research Center, Bethesda, MD 20084-5000.1991.
- H. J. LIN., Strength Evaluation of a Composite

## Structural analysis of marine composite propeller by using FEM and determination of optimal stacking Sequence by GA

Abdullah Eidani Nezhad<sup>1\*</sup>, A.Kabiri<sup>2</sup>, S.H.Dibajian<sup>1</sup>, A.Mardan<sup>2</sup>

1- Department of Science & Marine Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Master degree

2- Department of Science & Marine Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Faculty of Hydrodynamic Management

### Abstract

There is an increasing interest in the marine industry to use composites to improve the hydrodynamic and structural performance of naval structures. The materials used within the composite are commercially available, and it is important the development of the right mix of fibers, resin and laminate lay-up that provide the desired mechanical and environmental performance for marine application. In this paper, to improve the stiffness and control the geometry of the blades of a marine propeller made of carbon/epoxy genetic algorithm to determination of optimal stacking Sequence is used. This method will minimize the deformation of tip blades. The optimization process has executed by linking ABAQUS and MATLAB software. Optimal angles of blade propeller obtained by using this process.

**Keywords:** Genetic algorithm, optimization, composite lay-up, marine propeller

Figure 1: The final 3D model of propeller in ABAQUS

Figure 2: Pressure Loads and meshing of propeller

Figure 3: Displacement in Z-Direction of NAB propeller

Figure 4: Von Mises Stress of NAB propeller

Figure 5: Displacement graph of the blade tip from 0 to 180 degrees

Figure 6: Displacement in Z-Direction of composite propeller

Figure 7: Maximum values obtained from Tsai-Wu failure criterion

Figure 8: Stresses in X-Direction of composite propeller

Figure 9: Stresses in Y-Direction of composite propeller

Figure 10: The first mode shape of NAB propeller

Figure 11: The first mode shape of composite propeller

Figure 12: Flowchart optimization process of stacking sequence composite blade

Figure 13: Best and mean fitness value (norm)

Figure 14: Best and mean fitness value (norm) to optimize with 8 variables

Figure 15: Best and mean fitness value (norm) to optimize with 16 variables

Figure 16: Optimal angles with the best fitness value (norm)

Figure 17: Displacement in Z-Direction of composite propeller for optimized lay-up using genetic algorithm (with 16 variables)

Table 1: Geometric data of the propeller

Table 2: Properties of aluminum alloy

Table 3: Material properties of Hexcel IM7-8552 for composite propeller

Table 4: Results of static analysis of composite propeller with different stacking sequence

Table 5: Results of static analysis of propeller for  $[0/90/-77/77/90_2/-77/77]_s$  lay-up

Table 6: Natural frequencies of both propellers (composite blade with  $[0/90/-77/77/90_2/-77/77]_s$  lay-up)

Table 7: Compare the results of most displacements of the propeller in different cases.

\*Corresponding author E-mail: abd9eidany@yahoo.com