

بررسی تأثیر زاویه‌ی بار در تعیین پارامترهای بهینه‌ی مؤثر بر صفحه‌های ارتوتروپیک نامحدود حاوی گشودگی شبه مربعی

دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
 استاد، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
 دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
 دانشجوی دکتری، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

محمد حسین بیاتی چالشتری
 کرامت ملک‌زاده فرد*
 محمد جعفری
 علیرضا پورموید

چکیده

صفحه حاوی گشودگی در کاربردهای صنعتی بسیاری دیده می‌شود. گشودگی به وجود آمده، منجر به تمرکز تنش و در نهایت به شکست و خرابی صفحه می‌گردد. از این رو، دانستن مقدار تمرکز تنش به دست آمده سبب طراحی مطمئن‌تری می‌شود. در این مقاله، به تحلیل تنش صفحه‌ای ارتوتروپیک و همسانگرد نامحدود حاوی گشودگی شبه مربعی که متأثر از زاویه بار است، پرداخته می‌شود. نکته حائز اهمیت این تحلیل به کارگیری از یک روش بهینه‌سازی به نام الگوریتم رقابت استعماری است که به وسیله آن پارامترهای بهینه کلی جهت دستیابی به کمترین مقدار تمرکز تنش در اطراف این گشودگی در صفحه‌های همسانگرد و ارتوتروپیک حاصل می‌گردد، سپس این الگوریتم با تقلید از روند تکامل اجتماعی، اقتصادی و سیاسی کشورها و با مدل‌سازی ریاضی بخش‌هایی از این فرآیند، عملگرهایی را در قالب منظم به صورت الگوریتم ارائه می‌دهد که می‌توانند به حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی کمک کنند. نتایج تنش بهینه به دست آمده از الگوریتم رقابت استعماری حاکی از رقابتی بودن این الگوریتم جهت اجتناب از قرار گرفتن در نقطه بهینه محلی است. پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست همسان‌سازی، رقابت استعماری و انقلاب تشکیل می‌دهند. متغیرهای طراحی در این پژوهش عبارتند از: زاویه‌ی الیاف، زاویه‌ی بار، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی، زاویه‌ی چرخش گشودگی و در نهایت جنس صفحه. نتایج حاصل شده از الگوریتم رقابت استعماری بیانگر مناسب بودن این روش در بهینه‌سازی صفحات می‌باشد. در این تحقیق برای اثبات درستی نتایج، از حل عددی اجزای محدود استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با انتخاب مناسب پارامترهای بهینه می‌توان مقدار تنش اطراف گشودگی را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: صفحات ارتوتروپیک نامحدود، الگوریتم رقابت استعماری، گشودگی شبه‌مربعی، حل تحلیلی.

The Effect of Load Angle in Determination of Optimal Parameters for Orthotropic Plates with Quasi-Square Cutout

M. H. Bayati Chaleshtari
 K. Malekzadeh Fard
 M. Jafari
 A. R. Pourmoayed

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
 Department of Aerospace Engineering, MalekAshtar University, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
 Department of Aerospace Engineering, MalekAshtar University, Tehran, Iran

Abstract

In this study, to examine the effect of different parameters on stress analysis of infinite plates with central quasi-square cutout using imperialist competitive algorithm and also to introduce general optimum parameters in order to achieve the minimum amount of stress concentration around this type of cutout on orthotropic plates are purposed. Basis of the presented method is expansion of analytical method conducted by Lekhnitskii for circular and elliptical cutouts. Design variables in this study include fiber angle, load angle, curvature radius of the corner of the cutout, rotation angle of the cutout and at last material of the plate. Imperialist competitive algorithm is the mathematical model and the computer simulation of human social evolution. Finite element numerical solution is employed to examine the results of present analytical solution. Overlap of the results of the two methods confirms the validity of the presented solution. Results showed that by selecting the aforementioned parameters properly, less amounts of stress could be achieved around the cutout leading to an increase in load-bearing capacity of the structure.

Keywords: Imperialist competitive algorithm, Infinite plates, Quasi-square cutout, Analytical solution.

زیادی دارد که در اصطلاح تمرکز تنش نامیده می‌شود. دانستن تمرکز تنش اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های مهندسی دارد. در زمینه تمرکز تنش برای مواد همسانگرد و غیرهمسانگرد حل‌های بسیاری صورت گرفته است. اکثر این حل‌های تحلیلی و عددی برای گشودگی‌های دایروی و بیضی می‌باشند. در این مقاله، حل تحلیلی برای گشودگی شبه مربعی انجام گرفته و همچنین با توجه به طولانی بودن مراحل آزمون و خطا برای یافتن طرح بهینه‌ی

۱- مقدمه

امروزه طراحی صفحه‌های فلزی و کامپوزیتی حاوی گشودگی در انواع سازه‌های مهندسی شامل هواپیما، فضاپیما، خودرو، کشتی و وسایل ورزشی از اهمیت بسیاری برخوردار است. کاربرد وسیع این دسته از مواد مرکب را می‌توان به طراحی وسایل نقلیه با هدف کاهش وزن که منجر به کاهش مصرف سوخت و استفاده از موتورهایی با توان کمتر خواهد شد، اشاره کرد. در طراحی بسته به تأثیر هندسه طرح یا چگونگی بارگذاری و تغییر جنس ماده در نقاطی از جسم، تنش شدت

*نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: kmalekzadeh@mut.ac.ir

آنها، از الگوریتم رقابت استعماری برای انسجام دادن به فرآیند جستجو در رسیدن به طرح بهینه و اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- مروری بر کارهای انجام شده

در زمینه گشودگی صفحات، کرش [۱] راه حل توزیع تنش با استفاده از متغیرهای حقیقی ارائه کرد. اینگلیس توانست با بسط راه حل کرش توزیع تنش اطراف گشودگی بیضوی را به دست آورد. راه حل او دقیق و مناسب بود اما به کارگیری آن برای شکل‌های نوک تیز دشوار بود [۲]. استفاده از روش متغیر مختلط در حل مسائل مقدار مرزی در الاستیستیک ی دوبعدی اولین بار توسط موشخلیشویلی [۳] برای مواد الاستیک همسانگرد ارائه شد. لخنیتسکی روش متغیر مختلط موشخلیشویلی را برای مواد الاستیک غیر همسانگرد بسط داد و حل عمومی برای محاسبه‌ی مولفه‌های تنش و جابه‌جایی در حالت تنش صفحه‌ای به دست آورد. او از روش سری ها برای به دست آوردن ضرایب تابع تنش استفاده کرد و راه حل بررسی توزیع تنش اطراف گشودگی ها با شکل‌های مختلف را در ورق نامحدود غیرهمسانگرد ارائه نمود [۴]. ساوین [۵] با استفاده از روش متغیر مختلط، مطالعاتی در زمینه‌ی صفحه‌های همسانگرد نامحدود حاوی گشودگی‌های مختلف و صفحه‌های ناهمسانگرد فقط برای گشودگی بیضی شکل و دایره‌ای انجام داد. سپس حل ساوین برای بریدگی مثلثی توسط دائوست و هووا [۶] بسط داده شد. در این تحقیق، با تعریف نسبت اضلاع به عنوان یک پارامتر، علاوه بر مثلث متساوی الاضلاع، مثلث متساوی الساقین و مواد غیر همسانگرد با در نظر گرفتن انحنای گوشه بریدگی حل شد. ولی در این تحلیل نیز بحثی از اثرات پارامترهایی مانند زاویه چرخش بریدگی، زاویه بار و زاویه لیاف برای مواد غیر همسانگرد صورت نگرفته است. ابوالفتح [۷] رابطه واحدی برای مولفه تنش مماس بر مرز بریدگی برای هندسه‌های دایره-بیضی-مثلث-مربع در صفحه نامحدود از ماده غیر همسانگرد خاص تحت کشش بیان نمود. او توانست نقاط روی هر بریدگی با شکل خاص را به دایره ای به شعاع واحد تبدیل کند. یودکادگانوکر و راتو توزیع تنش اطراف گشودگی مثلثی در ورق غیرهمسانگرد نامحدود را تحت بارگذاری درون صفحه‌ای با استفاده از روش گائو و بدون استفاده از جمع آثار به دست آوردند [۸]. باتیستا [۹] تمرکز تنش اطراف گشودگی‌های چندضلعی با هندسه‌های نسبتاً پیچیده را مورد بررسی قرارداد. او از بسط روش متغیر مختلط موشخلیشویلی [۳] و تابع نگاشت شوارتز-کریستفل استفاده کرد. سیمها وموهاپاترا از یک تابع نگاشت کلی برای یافتن توزیع تنش در اطراف انواع گشودگی ها در یک صفحه همسانگرد نامحدود استفاده کردند [۱۰]. لی و همکارانش با اعمال ضرایب تصحیح در تابع نگاشت همنا، توانستند توزیع تنش و جابه‌جایی حول گشودگی مستطیلی شکل با ابعاد دلخواه در ورق نامحدود همسانگرد و تحت بار تک محوری را به دست آورند [۱۱]. بنرجی و همکارانش [۱۲] با استفاده از روش عددی توزیع تنش اطراف گشودگی دایروی در صفحه‌های همسانگرد و اورتوتروپیک را تحت بارگذاری عرضی مطالعه کردند. آن‌ها تأثیر ضخامت صفحه و قطر گشودگی و جنس مواد را در صفحه‌های اورتوتروپیک، بر میزان تمرکز تنش مورد بررسی قرار دادند. از جمله تحقیقات صورت گرفته در

بهینه‌سازی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را می‌توان به کار آلانسو و همکارش [۱۳] اشاره کرد که به بررسی استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات برپایه‌ی حرکت دسته‌ی پرندگان در غالب روشی مناسب برای بهینه‌سازی سازه‌های کامپوزیتی پرداخته شده است. باربوسا و همکارانش [۱۴] به طراحی یک سازه‌ی مشبک کامپوزیتی تحت پیچش با بررسی تأثیر بسیاری از مواد و پارامترهای هندسی بر روی رفتار مکانیکی بهینه‌ی سازه پرداخته اند. در این کار تکنیک بهینه‌سازی اجتماع ذرات برای بیشینه‌سازی ثابت پیچشی سازه مورد استفاده قرار گرفته است. رضایی پژند و جعفری [۱۵] از روش متغیر مختلط ساوین برای مطالعه تمرکز تنش حول گشودگی های مختلف در ورق نامحدود فلزی استفاده کردند و یک حل تحلیلی برای صفحات حاوی گشودگی های مختلف ارائه دادند. جعفری و محمودزاده [۱۶] به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر صفحات همسانگرد حاوی گشودگی‌های چندضلعی منظم با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات پرداختند. اخیراً الگوریتم جدیدی با نام الگوریتم رقابت استعماری^۱ در زمینه محاسبات تکاملی، توسط آتش‌پز و لوکاس در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است که نه از یک پدیده طبیعی، بلکه از یک پدیده اجتماعی-انسانی الهام گرفته است [۱۷]. در الگوریتم رقابت استعماری، از آن جا که کشورها (مستعمرات) با یک زاویه معین به سمت استعمارگر حرکت می‌کنند، امکان گیر افتادن در دام بهینه محلی وجود دارد. از کاربردهای این الگوریتم می‌توان به زمینه کنترل و طراحی بهینه که توسط آتش‌پز و همکارانش صورت گرفته است اشاره کرد [۱۸-۲۱]. زندگی و همکارانش به مقایسه الگوریتم رقابت استعماری با الگوریتم ژنتیک پرداختند و به رقابتی بودن نتایج الگوریتم رقابت استعماری دست یافتند [۲۲]. کریمی و همکارانش به بررسی و بهینه‌سازی جریان انتقال گرما در خاک کننده‌ها با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری پرداختند [۲۳].

در این مقاله با تکیه بر حل تحلیلی لخنیتسکی و بسط این حل به گشودگی شبه‌مربعی منظم هندسی سعی شده است تا برای بارگذاری کشش تک‌محوری، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای اشاره شده جهت دستیابی به کمترین تنش بی‌بعد معرفی گردد. لازم به ذکر است، که مقدار تنش بی‌بعد در اطراف گشودگی به عنوان تابع هزینه^۲ (C.F.) برای الگوریتم رقابت استعماری در نظر گرفته شده است. تنش بی‌بعد به صورت بیشترین تنش ایجاد شده در اطراف گشودگی به تنش اعمالی تعریف شده است.

۳- تعریف مسأله

مطابق شکل (۱) صفحه ای را که در مرکز دارای یک بریدگی شبه مربعی و تحت تنش تک محوره کششی قرار گرفته، در نظر گرفته می شود. تنش در فاصله ای دور از بریدگی و تحت زاویه دلخواه (α) نسبت به محور افق اعمال می شود. محور اصلی بریدگی شبه مربعی در داخل صفحه می تواند زوایای مختلفی (β) را نسبت به محور افق داشته باشد. این زاویه، زاویه چرخش بریدگی نام گذاری شده است. ابعاد بریدگی نسبت به صفحه چنان است که بتوان صفحه را نامحدود

^۱ Imperialist Competitive Algorithm
^۲ Cost Function

چهار ریشه‌ی موهومی دارد که دارای ریشه‌های دو به دو مزدوج می‌باشد.

$$R_{11}\mu^4 - 2R_{16}\mu^3 + (2R_{12} + R_{66})\mu^2 + 2R_{26}\mu + R_{22} = 0 \quad (3)$$

معادله مشخصه که در رابطه‌ی (۲) نشان داده شده است، برای مواد همسانگرد به صورت رابطه‌ی (۴) می‌باشد.

$$R_{11}\lambda^4 + (2R_{12} + R_{66})\lambda^2 + R_{22} = 0 \quad (4)$$

در نهایت مؤلفه‌های تنش در یک صفحه‌ی اورتوتروپیک برحسب دو تابع پتانسیل $\Psi(Z_2)$ و $\Phi(Z_1)$ مطابق رابطه‌ی (۵) بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2\text{Re}[\mu_1^2\phi'(z_1) + \mu_2^2\psi'(z_2)] \\ \sigma_y &= 2\text{Re}[\phi'(z_1) + \mu_2^2\psi'(z_2)] \\ \tau_{xy} &= 2\text{Re}[\mu_1\phi'(z_1) + \mu_2\psi'(z_2)] \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق منظور از $\text{Re}[\]$ قسمت حقیقی عبارت داخل کروشه است. همچنین $Z_i = x + \mu_i y$ ($i = 1, 2$) و $\Phi(Z_1)$ و $\Psi(Z_2)$ توابع دلخواهی می‌باشند که با تعریف شکل گشودگی و اعمال شرایط مرزی تنش در اطراف گشودگی بدست می‌آیند. $\Phi''(Z_1)$ و $\Psi''(Z_2)$ به ترتیب مشتق دوم توابع $\Phi(Z_1)$ و $\Psi(Z_2)$ نسبت به Z_1 و Z_2 می‌باشد. در نهایت با انتقال دستگاه مختصات کارتزین به مختصات قطبی، می‌توان تنش‌های σ_r ، σ_θ و $\tau_{r\theta}$ را به دست آورد.

در این تحقیق با استفاده از روش متغیر مختلط، توزیع تنش اطراف گشودگی دایره‌ای که توسط ساوین و لخنیتسکی انجام گرفته، بررسی شد. برای بسط روش حل آن‌ها به سایر گشودگی‌ها ابتدا باید با استفاده از یک تابع نگاشت ساده ($Z_i = x + \mu_i y$) نقاط روی مرز گشودگی با شکل خاص (کانتور) را به خارج دایره‌ای به شعاع واحد تبدیل کرد که در این صورت X و Y از روابط (۶) و (۷) به دست می‌آیند [۶].

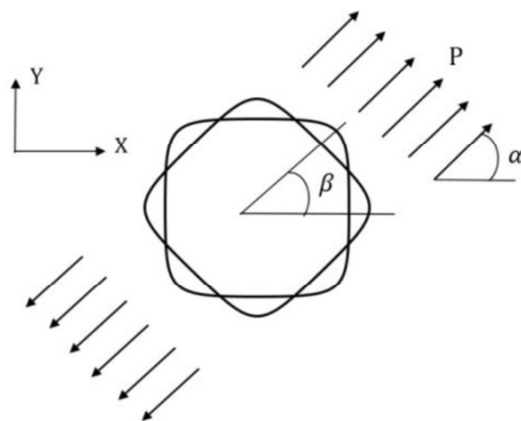
$$x = \lambda(\cos\theta + w \cdot \cos(n\theta)) \quad (6)$$

$$y = -\lambda(\sin\theta - w \cdot \sin(n\theta)) \quad (7)$$

در روابط بالا، پارامترهای مختلفی چون w ، λ و n وجود دارد که برای تعیین نوع گشودگی حائز اهمیت است. به نحوی که با انتخاب مناسب و تغییر این پارامترها، می‌توان گشودگی‌های مختلف را ایجاد کرد. پارامتر w معیاری برای نشان دادن انحنا‌ی گشودگی یا میزان نرمی و تیزی گوشه‌های گشودگی می‌باشد. λ پارامتری است که نشان دهنده‌ی اندازه و بزرگی گشودگی می‌باشد و در نهایت، پارامتر n نشان‌دهنده‌ی نوع هندسی گشودگی است. برای هر نوع گشودگی وقتی w کاهش می‌یابد، انحنا‌ی گوشه‌های گشودگی افزایش می‌یابد تا این که w به کمترین مقدار خود، یعنی $w=0$ می‌رسد. در این حالت گشودگی به دایره تبدیل می‌شود. تأثیر مقدار w در شکل ۲ نشان داده شده است، مطابق این شکل برای گشودگی چهارضلعی وقتی w کاهش می‌یابد گوشه‌های گشودگی ملایم‌تر می‌شود تا اینکه w به کمترین مقدار خود ($w=0$) می‌رسد. در این حالت شکل گشودگی به دایره تبدیل می‌شود.

تصور کرد. پارامترهای زاویه بار و زاویه چرخش در شکل (۱) به ترتیب با زاویه α و β مشخص شده اند. ماده رفتار الاستیک خطی و بین تنش و کرنش رابطه هوک برقرار است.

با اعمال شرایط مرزی ($\tau_{r\theta} = \sigma_r = 0$) تنها تنش ایجاد شده در اطراف گشودگی σ_θ است. همچنین مطابق شکل ۱، گشودگی به اندازه‌ی زاویه β نسبت به محور X چرخیده و گشودگی مرکزی عاری از بار می‌باشد.



شکل ۱- هندسه گشودگی در حالت بارگذاری تک محوری

۴- مدل سازی و روش حل

روش تحلیلی استفاده شده در این مقاله، برگرفته از گسترش روش حل تحلیلی ارائه شده توسط ساوین [۳] و لخنیتسکی [۴] می‌باشد. در این روش، تابع تنش به عبارتی تحلیلی با ضرایب نامعین تبدیل می‌شود و با مشخص شدن تابع تنش می‌توان تغییر مکان‌ها و تنش‌ها را محاسبه نمود. در حالت تنش صفحه‌ای با معرفی $F(x,y)$ به عنوان تابع تنش، معادله‌ی تعادل مطابق رابطه‌ی (۱) ارضا خواهد شد.

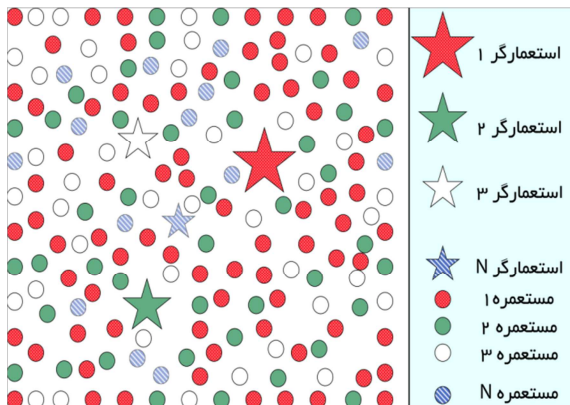
$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (1)$$

با استفاده از روابط تنش-کرنش رابطه سازگاری برحسب تابع تنش در غیاب نیروهای حجمی مطابق رابطه زیر خواهد بود [۴].

$$\begin{aligned} R_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} - 2R_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + (2R_{12} + R_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} \\ - 2R_{26} \frac{\partial^4 F}{\partial x^3 \partial y} + R_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

معادله‌ی (۲)، معادله‌ی سازگاری برای ماده‌ی غیرهمسانگرد می‌باشد که R_{ij} اعضای ماتریس نرمی کاهش یافته می‌باشند. بنابراین حل مسائل الاستیسیته‌ی صفحه‌ای در حالت دو بعدی، منجر به معرفی و حل معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی چهار خواهد شد که به کمک چهار اپراتور مشتق خطی مرتبه‌ی اول بیان می‌شود. و برای ماده‌ی ارتوتروپیک به صورت رابطه‌ی (۳) است. لخنیتسکی اثبات کرد که این معادله‌ی مشخصه مربوط به ماده‌ی ارتوتروپیک در حالت کلی

برآورد شدن یک شرط توقف ادامه می‌یابد. شکل ۳ نحوه تقسیم مستعمرات در بین امپریالیست‌ها را نمایش می‌دهد [۱۸].



شکل ۳- نحوه ایجاد امپراطورهای اولیه [۲۲]

۵-۱-۲- سیاست جذب

در این الگوریتم سیاست همگون سازی موجود در فرآیند استعمار به صورت حرکت مستعمرات به سمت کشور امپریالیست مدل می‌شود. شکل ۴ طرح کلی این حرکت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، کشور مستعمره^{۱۱} به اندازه x واحد به سمت کشور استعمارگر حرکت کرده و به سمت موقعیت جدید کشانده می‌شود. فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شده است. X نیز عددی تصادفی با توزیع یکنواخت است که به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$x \cong U(0, \rho \times d) \quad (8)$$

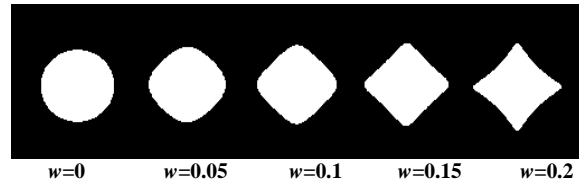
در رابطه (۸)، ρ عددی بزرگتر از یک و نزدیک به دو است. به منظور حرکت مستعمره به سمت استعمارگر در جهات مختلف، یک انحراف زاویه ای تصادفی کوچکی به جهت حرکت اضافه می‌گردد. این میزان انحراف با H نمایش داده می‌شود و از رابطه (۹) قابل محاسبه می‌باشد. [۱۷]

$$H \cong U(-v, v) \quad (9)$$

در رابطه (۹)، v پارامتری دلخواه می‌باشد که افزایش آن باعث افزایش جست و جوی اطراف امپریالیست می‌شود و کاهش آن باعث نزدیک شدن مستعمرات به بردار واصل مستعمره و استعمارگر می‌شود. در اکثر مسایل میزان $\pi/4$ می‌تواند انتخاب مناسبی برای H باشد.

۵-۱-۳- جابه‌جایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند، بدین معنی که به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت امپریالیست دارند. در این حالت



شکل ۲- تأثیر پارامتر w بر گوشه‌های گوشه‌دگی شبه مربعی

۵- الگوریتم رقابت استعماری

روش های بهینه سازی فرا ابتکاری در طی دو دهه اخیر محبوبیت و رواج بسیار زیادی را داشته است. در عین شگفتی، برخی از آن‌ها نظیر الگوریتم ژنتیک^۳، بهینه سازی کلنی مورچه^۴ و بهینه سازی ازدحام ذرات^۵ نه تنها در میان دانشمندان علوم کامپیوتر، بلکه دانشمندان رشته‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر طیف وسیعی از کارهای نظری، این روش های بهینه سازی در زمینه های مطالعاتی مختلف به کار گرفته شده اند. سادگی، انعطاف پذیری، مکانیسم عاری از مشتق گیری و اجتناب از نقطه بهینه محلی منجر به گسترش چشمگیر الگوریتم‌های فراابتکاری شده است.

الگوریتم ارائه شده در این مقاله به الگوریتم رقابت استعماری (ICA) معروف است که پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست همسان سازی^۶، رقابت استعماری^۷ و انقلاب^۸ تشکیل می‌دهند. در واقع این الگوریتم جواب‌های مسأله‌ی بهینه‌سازی را در قالب کشورها نگریسته و سعی می‌کند در طی فرآیندی تکرار شونده این جواب‌ها را رفته رفته بهبود داده و در نهایت به جواب بهینه مسأله برساند [۱۷].

۵-۱-۱- شکل دهی امپراطوری اولیه

در الگوریتم رقابت استعماری هر یک از اعضای جمعیت که آرایه ای از متغیرها می‌باشند یک کشور در نظر گرفته می‌شوند. سپس الگوریتم با ایجاد چندین کشور اولیه شروع می‌گردد. تعدادی از بهترین اعضای این جمعیت یعنی کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه به عنوان امپریالیست^۹ انتخاب می‌شوند. بقیه کشورهای باقی مانده، مستعمرات امپراطوری^{۱۰} را تشکیل می‌دهند. به منظور تقسیم مستعمرات اولیه بین امپریالیست‌ها به هر امپریالیست متناسب با قدرت آن، تعدادی از مستعمرات داده می‌شوند. برای انجام این کار می‌بایست هزینه نرمالیزه همه امپریالیست‌ها محاسبه شوند. هر امپریالیستی که دارای هزینه بیشتری باشد (امپریالیست ضعیف‌تری است) دارای هزینه نرمالیزه کمتری خواهد بود. سپس با توجه به هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه هر امپریالیست محاسبه گردیده و بر مبنای آن کشورهای مستعمره بین امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند. با داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکاملی که در یک حلقه قرار دارد تا

³ Genetic Algorithm

⁴ Ant Colony Optimization

⁵ Particle Swarm Optimization

⁶ Assimilation

⁷ Imperialistic Competition

⁸ Revolution

⁹ Imperialist

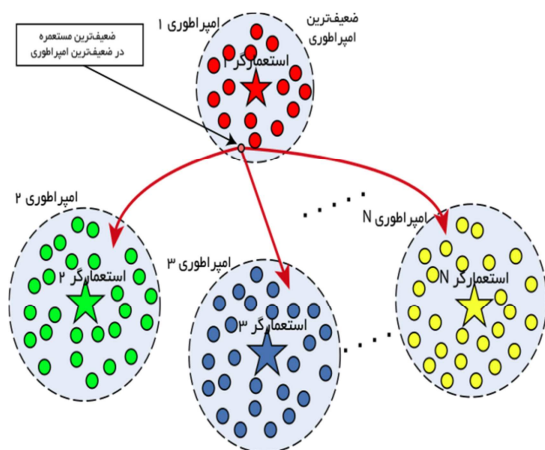
¹⁰ Empires

¹¹ Colony

کل امپراطوری تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن کشور امپریالیست شود و افزایش ξ نیز باعث افزایش تاثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراطوری در تعیین کل آن می‌گردد [۲۳].

۵-۱-۵- رقابت استعماری

هر امپراطوری که نتواند قدرت خود را افزایش دهد و قدرت رقابت خود را از دست به دهد در جریان رقابت ما بین امپریالیست‌ها حذف خواهد شد. مراحل حذف به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد، بدین معنی که به مرور زمان امپراطوری‌های ضعیف مستعمرات خود را از دست داده و امپراطوری‌های قوی تر این مستعمرات را تصاحب می‌کنند و بر قدرت خویش می‌افزایند. بدین ترتیب، در تکرار الگوریتم، ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراطوری گرفته می‌شود و سپس رقابتی میان کلیه امپراطوری‌ها برای تصاحب این مستعمره ایجاد می‌گردد. با توجه به شکل ۶، مستعمره مذکور لزوماً توسط قوی‌ترین امپراطوری تصاحب نخواهد شد، بلکه امپراطوری‌های قوی‌تر احتمال تصاحب بیشتری خواهند داشت. با تصاحب مستعمره توسط یکی از امپراطوری‌ها عملیات این مرحله از الگوریتم نیز به پایان می‌رسد [۱۷].



شکل ۶- رقابت استعماری [۱۸]

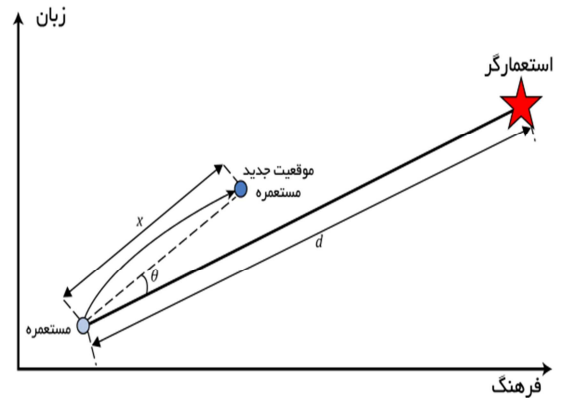
۵-۱-۶- سقوط امپراطوری‌های ضعیف

در جریان رقابت بین امپریالیست‌ها، امپراطوری‌های ضعیف به تدریج سقوط می‌کنند و مستعمراتشان را به امپراطوری‌های قوی‌تر می‌دهند. زمانی که یک امپراطوری تمام مستعمرات خود را از دست بدهد، حذف خواهد گردید.

۵-۱-۷- همگرایی

الگوریتم استعمارگر تا برآورده شدن شرط همگرایی و یا اتمام تعداد

کل تکرارها ادامه می‌یابد. پس از مدتی رقابت همه امپراطوری‌ها سقوط کرده و تنها یک امپراطوری باقی خواهد ماند و بقیه کشورها تحت کنترل این امپراطوری واحد قرار می‌گیرند. در چنین حالتی، تمام مستعمرات توسط یک امپراطوری واحد اداره می‌شوند. بنابراین

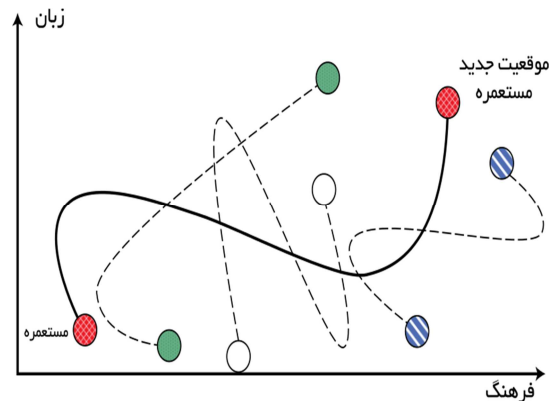


شکل ۴- حرکت مستعمره به سمت امپریالیست مربوطه [۱۷]

کشور استعمارگر و کشور مستعمره جای خود را با یکدیگر عوض می‌کنند و کشور امپریالیست جدید شروع به اعمال سیاست همگون سازی بر مستعمرات خود می‌کند [۲۱].

۵-۱-۳- انقلاب

بروز انقلاب تغییرات ناگهانی را در ویژگی‌های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابجایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود (شکل ۵). انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن در دره‌های محلی بهینگی نجات یابد که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آن را به یک محدوده بهینگی بهتری می‌برد.



شکل ۵- فرآیند انقلاب [۲۲]

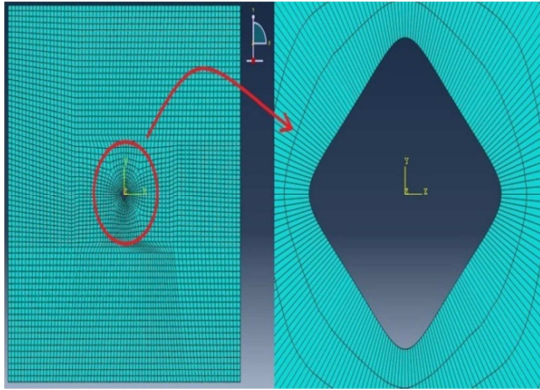
۵-۱-۴- محاسبه قدرت کل یک امپراطوری

قدرت یک امپراطوری برابر است با قدرت یک کشور استعمارگر و درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. بنابراین هزینه کل یک امپراطوری به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

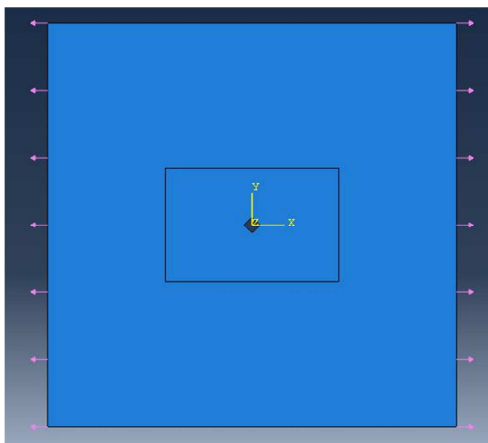
$$T.C_n = \text{cost}(\text{imperialist}_n) + \xi_{\text{mean}} \{ \text{cost}(\text{colonies-of-empire}_n) \} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، $T.C_n$ هزینه کل امپراطوری n ام می‌باشد. ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن ξ باعث می‌شود که هزینه

گشودگی کاملاً مطابق با مسئله‌ی حاضر شود. به منظور دستیابی به تعداد مش بهینه و افزایش دقت در نتایج حاصل از حل عددی اجزای محدود، مش‌بندی در اطراف گشودگی بسیار ریزتر از مرزهای خارجی صفحه صورت گرفته است. در این ناحیه تعداد المان‌ها از ۴۰ عدد تا ۱۸۰ عدد افزایش داده شد و مشاهده گردید از این عدد به بعد با افزایش تعداد المان‌ها نتایج ثابت می‌ماند.



شکل ۸- نحوه مش‌بندی در نرم افزار اجزای محدود



شکل ۹- نحوه‌ی بارگذاری در نرم‌افزار اجزای محدود

مقایسه‌ی مقدارهای بدست آمده تابع هزینه از روش حلّ تحلیلی در این حالت و حل عددی در یکی از حالت‌های بهینه ($\gamma=90$) نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۱، مقایسه‌ی مقدارهای بدست آمده تابع هزینه از روش حلّ تحلیلی در این حالت و حل عددی در یکی از حالت‌های بهینه ($\gamma=0$, $\beta=63/6778$, $\alpha=45$) به ازای ماده‌ی گرافیت/اپوکسی ارائه شده است. زاویه‌ی θ ، زاویه‌ی نقاط روی مرز گشودگی را نسبت به محور افقی مشخص می‌کند. نزدیکی نتایج دو روش در شکل ۱۰ و ۱۱ تأکیدی بر صحت نتایج ارائه شده می‌باشد.

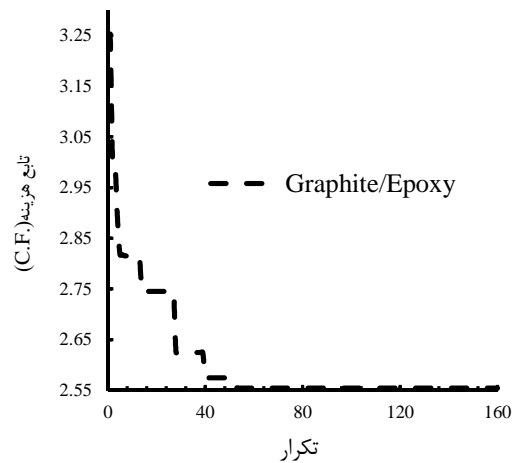
رقابت امپریالیستی به پایان رسیده و با برآورده شدن یکی از شرط‌های توقف، الگوریتم متوقف می‌شود [۲۰].

۶- بررسی رقابتی الگوریتم رقابت استعماری

قیدها دارای حدپایین و حدبالا می‌باشند، که براساس شکل گشودگی قابل تغییر هستند. برای گشودگی شبه‌مربعی محدوده‌ی قیود در این مقاله به صورت رابطه‌ی (۱۱) می‌باشد.

$$0 < \alpha < 90; 0 < \beta < 90; 0 < \gamma < 90; 0 < w < 0.33 \quad (11)$$

شکل ۷، نمودارهای همگرایی الگوریتم رقابت استعماری برای ماده گرافیت/اپوکسی در یکی از حالت‌های بهینه ($\alpha=30$, $w=0.05$) را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که به ازای حالت در نظر گرفته شده، الگوریتم رقابت استعماری مدام در حال بررسی نقاط بهینه محلی برای بدست آوردن دقیق‌ترین مقدار (بهینه‌ی مطلق) است.



شکل ۷- نمودار همگرایی الگوریتم رقابت استعماری

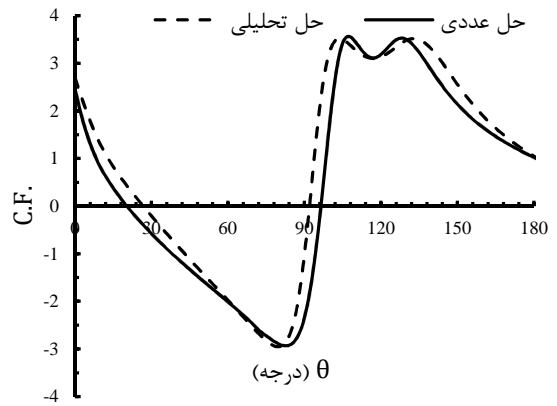
۷- بررسی درستی حل

برای بررسی نتایج حاصل از روش تحلیلی حاضر، از روش اجزای محدود (نرم افزار آباکوس) کمک گرفته شده است. بدین منظور ابتدا یک خروجی از کد برنامه‌ی بهینه‌سازی نوشته شده در متلب برای تعیین مقادیر بهینه‌ی یک گشودگی خاص گرفته شده است. سپس مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مختلف که از این روش به دست آمده عیناً وارد نرم افزار آباکوس گردید تا هندسه‌ی گشودگی کاملاً مطابق با حلّ تحلیلی حاضر باشد. به منظور تعیین تعداد شبکه‌ی بهینه، ناحیه‌ی اطراف گشودگی با اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی مطالعه شد. در این ناحیه تعداد المان‌ها از ۶۰ تا ۲۱۰ عدد افزایش داده شد و مشاهده گردید از این عدد به بعد با افزایش تعداد المان‌ها نتایج تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین این تعداد المان‌ها به عنوان تعداد المان شبکه‌ی بهینه در نظر گرفته شد و نتایج در این حالت به دست آمد. نحوه‌ی مش‌بندی و اعمال بارگذاری در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است. ابتدا یک خروجی از برنامه‌ی بهینه‌سازی نوشته شده در نرم‌افزار متلب برای تعیین پارامترهای بهینه مربوط به گشودگی شبه مربعی برای یک ماده خاص تعیین می‌شود. سپس پارامترها و مختصات بهینه شده‌ی به دست آمده عیناً وارد نرم‌افزار آباکوس گردیده تا هندسه‌ی

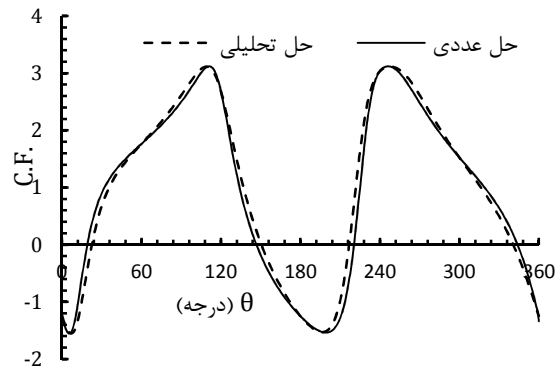
جدول‌های ۲ تا ۴ به همراه شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، مقادیر بهینه‌ی زاویه‌ی چرخش، زاویه‌ی الیاف و تنش بی‌بعد کمینه متناظر با هر زاویه‌ی بار و در انحناهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در جداول ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود، در $w=0/05$ کمترین مقدار تابع هزینه که همان تنش بهینه شده است، برای ماده کربن/اپوکسی رخ داده و مقدار تنش بهینه برابر $2/214$ است. با توجه به نتایج جدول‌های ۲ تا ۴ می‌توان نتیجه گیری نمود اولاً، در هر سه ماده مورد بررسی مقدار تنش بهینه در $w=0/05$ به ترتیب برای گرافیت/اپوکسی، کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی برابر $2/2192$ ، $2/2140$ و $2/3956$ حاصل می‌شود. ثانیاً، از نتایج حاصل شده از این مقاله می‌توان به این نتیجه رسید که تنها دایره بهترین حالت گشودگی نسیت، بلکه می‌توان با بهبود پارامترهای طراحی هم‌چون زاویه بار و زاویه چرخش به شکل بهتری که دارای مقدار تنش کمتر است دست یافت. هم‌چنین با توجه به نمودارهای ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده نیز می‌توان به راحتی به این نتیجه رسید که بیشترین مقدار تنش حاصل شده در حالت بهینه مربوط به $w=0/05$ در زاویه 45 درجه رخ می‌دهد. ماده کربن/اپوکسی در زاویه 45 درجه دارای بیشترین مقدار تنش بهینه شده است که معادل آن برابر $7/0394$ می‌باشد.

جدول ۲- نتایج بهینه در زوایای بار مختلف شیشه/اپوکسی (Glass/Epoxy)

$w=0$			
C.F.	β	γ	α
2/6595	-	59/1	0
2/6596	-	88/1	30
2/9915	-	0	45
2/6595	-	0/6	60
2/6595	-	33/4	90
$w=0/05$			
C.F.	β	γ	α
2/3956	44/7	69/1	0
2/4650	79/0265	90	30
2/5786	12/368	90	45
2/4651	77/5114	0	60
2/3956	45/3591	0	90
$w=0/1$			
C.F.	β	γ	α
2/70	45	88/6	0
2/9194	11/7312	90	30
2/9275	81/0264	0	45
2/9095	10/3094	0	60
2/7041	45/0651	0	90
$w=0/2$			
C.F.	β	γ	α
4/8932	44/9892	90	0
5/3641	86/3199	70/65	30
5/3935	79/1665	1/21	45
5/3553	3/8176	18/96	60
4/8983	45/02	0/471	90



شکل ۱۰- حل المان محدود و حل تحلیلی حاضر در $w=0/1$ (Carbon/Epoxy)



شکل ۱۱- حل المان محدود و حل تحلیلی حاضر در زاویه بار بهینه $w=0/05$ (گرافیت/اپوکسی)

۸- نتایج

خواص مکانیکی مواد استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. بر این اساس ابتدا سعی می‌شود تا برای یک صفحه‌ی نامحدود ناهمسانگرد حاوی گشودگی شبه‌مربعی، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری ICA، در هر زاویه‌ی بار، مقادیر بهینه‌ی دیگر متغیرهای طراحی و کمترین مقدار توزیع تنش اطراف گشودگی مورد بررسی قرار گیرد. سپس نتایج پارامترهای بهینه کلی برای گشودگی بیان شده ارائه می‌گردد.

جدول ۱- خواص مواد صفحه دارای گشودگی [۱۵]

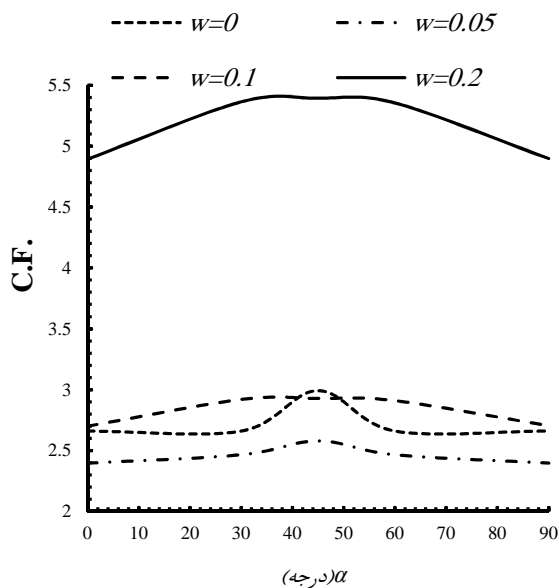
ماده	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
شیشه/اپوکسی ^{۱۲}	۶۹	۶۹	۲۷/۶	۰/۲۵
گرافیت/اپوکسی ^{۱۳}	۱۸۱	۱۰/۳	۷/۱۷	۰/۲۸
کربن/اپوکسی ^{۱۴}	۲۹۴	۶/۴	۴/۹	۰/۲۳

¹² Ce9000 Glass/Epoxy

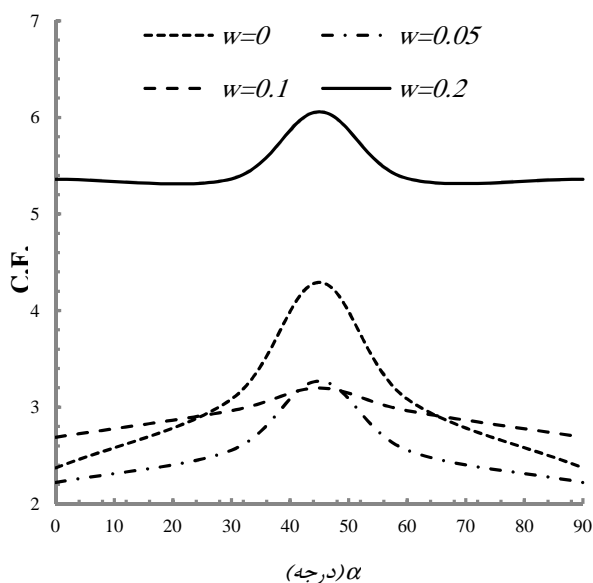
¹³ Graphite/Epoxy(T300/5208)

¹⁴ Carbon/Epoxy(GY-70/934)

۳/۰۲۰۶	۷۷/۳۴۱۴	.	۶۰
۲/۸۶۱۸	۳۸/۹۰۷۲	.	۹۰
$w=۰/۲$			
C.F.	β	γ	α
۵/۳۱۸۸	۷۱/۰۵۹	۶۵	.
۵/۳۹۷۱	۱۲/۳۷۱۹	۹۰	۳۰
۷/۰۳۹۴	۲۴/۴۹۲	۹۰	۴۵
۵/۳۴۸۶	۷۸/۲۲۲۲	.	۶۰
۵/۳۱۸۸	۱۸/۷۶۰۶	۲۶	۹۰



شکل ۱۲- نتایج بهینه در زوایای بار مختلف شیشه/اپوکسی (Glass/Epoxy)



شکل ۱۳- نتایج بهینه در زوایای بار مختلف گرافیت/اپوکسی (Graphite/Epoxy)

جدول ۳- نتایج بهینه در زوایای بار مختلف گرافیت/اپوکسی (Graphite/Epoxy)

$w=۰$			
C.F.	β	γ	α
۲/۳۷۱۷	-	۹۰	.
۳/۰۸۳۴	-	۹۰	۳۰
۴/۲۹۱۶	-	.	۴۵
۳/۰۸۳۴	-	.	۶۰
۲/۳۷۱۷	-	.	۹۰
$w=۰/۰.۵$			
C.F.	β	γ	α
۲/۲۱۹۲	۴۴/۹۹۷۳	۹۰	.
۲/۵۵۴۲	۹/۲۰۴۹۹	۹۰	۳۰
۳/۲۶۹۱	۶۳/۶۷۷۸	.	۴۵
۲/۵۵۴۲	۸۰/۷۹۸۹	.	۶۰
۲/۲۱۱۹	۴۴/۹۶۷۱	.	۹۰
$w=۰/۱$			
C.F.	β	γ	α
۲/۶۸۸۶	۴۴/۹۹۸	۹۰	.
۲/۹۶۳۹	۵/۸۵۲۲۵	۹۰	۳۰
۳/۱۹۷۷	۲۲/۲۸۵۷	۹۰	۴۵
۲/۹۶۳۹	۸۳/۹۳۱۵	.	۶۰
۲/۶۸۸۶	۴۴/۷۲۸	.	۹۰
$w=۰/۲$			
C.F.	β	γ	α
۵/۳۵۸۸	۵۶/۴۹۷۷	۸۲/۸۲۷۶	.
۵/۳۶۳۲	۶/۶۷۴۱	۹۰	۳۰
۶/۰۵۷۶	۲۱/۱۹۷	۹۰	۴۵
۵/۳۶۷۳	۸۳/۰۰۰۸	.	۶۰
۵/۳۵۸۸	۳۲/۷۶۱۹	.	۹۰

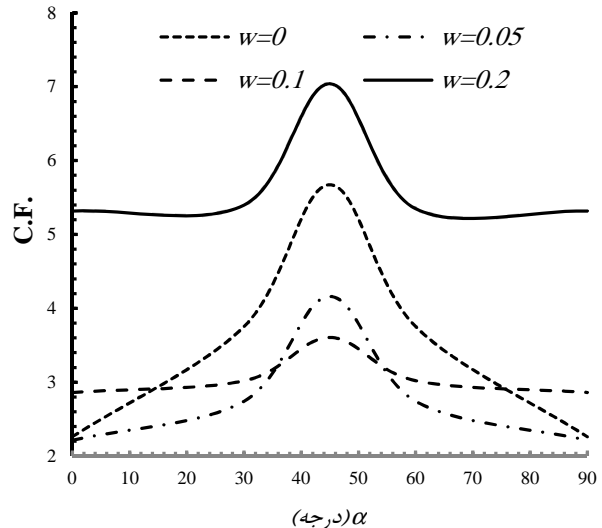
جدول ۴- نتایج بهینه در زوایای بار مختلف کربن/اپوکسی (Carbon/Epoxy)

$w=۰$			
C.F.	β	γ	α
۲/۲۶۱۴	-	۹۰	.
۳/۷۵۲۸	-	۹۰	۳۰
۵/۶۷۳۳	-	.	۴۵
۳/۷۵۲۸	-	.	۶۰
۲/۲۶۱۴	-	.	۹۰
$w=۰/۰.۵$			
C.F.	β	γ	α
۲/۲۱۴	۴۵	۹۰	.
۲/۷۴۲۳	۱۹/۲۸۰۵	۹۰	۳۰
۴/۱۶۱۳	۵۹/۹۳۳۵	.	۴۵
۲/۷۴۲۳	۱۴۸/۳	.	۶۰
۲/۲۱۴	۱۵۰	.	۹۰
$w=۰/۱$			
C.F.	β	γ	α
۲/۸۶۱۸	۵۰/۷۴۶۳	۹۰	.
۳/۰۱۹۱	۱۲/۶۱۶۹	۹۰	۳۰
۳/۶۰۵	۲۷/۲۸۰۷	۹۰	۴۵

زاویه‌ی الیاف مناسب هم در این کاهش تنش، تأثیر بسزایی دارد. که با انتخاب مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مذکور در یک انحنای خاص می‌توان تمرکز تنش را به مقدار قابل توجهی کاهش داد و به شکل گشودگی بهتری که دارای تنش کمتری است، دست یافت. الگوریتم بهینه‌سازی به کار رفته شده در این مقاله، الگوریتم رقابت استعماری می‌باشد. این الگوریتم بهینه‌سازی SI با بر پایه سیاست همسان‌سازی، رقابت استعماری و انقلاب تشکیل شده است. در واقع این الگوریتم جواب‌های مسأله‌ی بهینه‌سازی را در قالب کشورها نگریسته و سعی می‌کند در طی فرآیندی تکرار شونده این جواب‌ها را رفته رفته بهبود داده و در نهایت به جواب بهینه مسأله برساند. در این روش بر خلاف روش‌های تک مسیری، فضای جواب به طور همه جانبه جستجو می‌شود، پس امکان کمتری برای گرفتار شدن در یک نقطه بهینه محلی وجود خواهد داشت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم رقابت استعماری در بهینه‌سازی صفحات، الگوریتمی مناسب و قابل اطمینان است.

۹- مراجع

[1] Kirsch G., Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre, Veit Ver Deut Ing, Vol. 42, pp. 797-807, 1898.
 [2] Inglis C.E., Stresses in plate due to the presence of cracks and sharp corners, Trans Ins Nav Archit, Vol. 55, pp. 219-30, 1913.
 [3] Muskhelishvili N. I., Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, Second edition, pp. 361-366, Netherlands: Noordhoff, 1962.
 [4] Lekhnitskii S.G., Anisotropic Plates, Second edition, Gordon & Breach Science Publishers, New York New York, NY, USA, 1968.
 [5] Savin G.N., Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press, New York, NY, USA, 1961.
 [6] Daoust J., Hoa SV., An analytical solution for anisotropic plates containing triangular holes, Journal of Composite Structures, Vol. 19, pp. 107-30, 1991.
 [7] Abuefoutouh NM., Preliminary Design Of Unstiffend Composite Shells, Symposium Of 7th technical Conference of ASC, pp. 786-693, 1993.
 [8] Ukadgaonkar V.G., Rao D.K.N., A general solution for stresses around holes in symmetric laminates under in-plane loading, Composite Structures, Vol. 49, No. 3, pp. 339-354, 2000.
 [9] Batista M., On the Stress Concentration Around a Hole in an Infinite Plate Subject to Uniform Load at Infinity, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 53, No. 4, pp. 254-261, 2011.
 [10] Simha K.R.Y., Mohapatra S.S., Stressconcentration around irregular holes using complex variable method, Sadhna (India), Vol. 23, pp. 394-412, 1998.
 [11] Lei G.H., Ng C.W.W., Rigby D.B., Stress and displacement around an elastic artificial rectangular hole, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 127, pp. 880-890, 2001.
 [12] Banerjee M, Jain N.K, Sanyal S., Stress Concentration in Isotropic and Orthotropic Composite Plates with Center Circular Hole Subjected to Transverse Static Loading, International Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 109-113, 2013.
 [13] Alonso M.G, Duysinx p., Particle Swarm Optimization (PSO): An Alternative Method for Composite Optimization, 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Orlando, May 19 -24, Florida, USA, 2013.
 [14] Barbosa Ines C.J, Amélia M., Loja R., Design of a Laminated Composite Multi-C Structure Subjected to Torsion, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, September 7-12, St. Petersburg, Russia, 2014.



شکل ۱۴- نتایج بهینه در زوایای بار مختلف کربن/اپوکسی (Carbon/Epoxy)

همچنین جدول ۵ نتایج بهینه کلی به منظور دست‌یابی به بهترین حالت و بهینه‌ترین مقدار تنش، به ازای چهار متغیر طراحی یعنی انحنای گشودگی، زاویه‌ی بار، زاویه الیاف و زاویه‌ی چرخش در کنار یکدیگر که منجر به کمترین تمرکز تنش در هر سه ماده اشاره شده در این مقاله، ارائه گردیده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵، می‌توان به این نتیجه رسید که همواره گشودگی دایروی کمترین مقدار تنش را دارا نیست بلکه می‌توان با انتخاب صحیح پارامترهای بهینه به شکلی دست یافت که حداقل مقدار تنش (تنش بهینه) را دارا باشد.

جدول ۵- نتایج بهینه کلی برای سه ماده مورد بحث

ماده	α	γ	β	w	C.F.
شیشه/اپوکسی	۰	۷۱/۰۰۴	۴۴/۹۹۵	۰/۰۴۰۱۲	۲/۲۶۹۵
گرافیت/اپوکسی	۰	۹۰	۴۵/۰۰۴	۰/۰۳۲۳۲	۲/۱۶۹۱
کربن/اپوکسی	۰	۰/۰۰۱	۴۴/۹۹۸	۰/۰۲۶۰۰۴	۲/۱۰۸۱

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) به تعیین پارامترهای بهینه‌ی مؤثر بر تنش بی‌بعد اطراف گشودگی شبه-مربعی در زوایای بار مختلف واقع در صفحه‌های ارتوتروپیک حاوی گشودگی شبه‌مربعی پرداخته شد. متغیرهای طراحی در این مقاله عبارتند از: زاویه‌ی بار، زاویه‌ی چرخش، زاویه‌ی الیاف، انحنای گوشه‌ی گشودگی و جنس صفحه. تابع هزینه‌ی مورد نظر این مقاله بر پایه‌ی روش حل لختینسکی که فقط برای گشودگی‌های دایروی و بیضوی بود، با استفاده از نگاشت همنا و متغیر مختلط به گشودگی شبه‌مربعی تعمیم یافت. برای بررسی صحت حل نتایج ارائه شده از روش اجزای محدود استفاده شد، که مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو روش، صحت نتایج ارائه شده را تأیید می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی تنها پارامتر مؤثر بر کاهش تمرکز تنش نیست، بلکه زاویه‌ی چرخش گشودگی، زاویه‌ی بار و

- [15] Rezaeepazhand J., Jafari M., Stress Concentration in Metallic Plates with Special Shaped Cutout, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, pp. 96-102, 2010.
- [16] Jafari M., Mahmoodzadeh M., Optimization of Influence Parameter on isotropic plates with Regular polygonal cutouts using particle swarm Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 243-253, 2015.
- [17] Atashpaz-Gargari E., Lucas C., Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialist competition, *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007)*, pp. 4661-4667, 2007.
- [18] Atashpaz-Gargari E., Hashemzadeh F., Rajabioun R., Lucas C., Colonial competitive algorithm, a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, Vol. 1, No. 3, pp. 337-355, 2008.
- [19] Rajabioun R., Atashpaz-Gargari E., Lucas C., Colonial competitive algorithm as a tool for nash equilibrium point achievement, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5073, pp. 680-695, 2008.
- [20] Khabbazi A., Atashpaz-Gargari E., Lucas C., Imperialist competitive algorithm for minimum bit error rate beam forming, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, Vol. 1, No. 2, pp. 125-133, 2009.
- [21] Atashpaz- Gargari E., Hashemzade F., Lucas C., Designing mimo PID controller using colonial competitive algorithm, applied to distillation column process, In proceedings of IEEE CEC, within IEEE WCCI, Hong Kong, pp. 1929- 1934, 2008.
- [22] Ayough A., Zandieh M., Farsijani H., GA and ICA Approaches to Job Rotation Scheduling Problem: Considering Employees Boredom, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29th August-1st September, 2011.
- [23] Karimi A., Rezae E., Shahhosseini M., Optimization of Heat Transfer in an Air Cooler Equipped with Classic Twisted Tape Inserts using Imperialist Competitive Algorithm, *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 136-151, 2011.