Quarterly Journal of Defense Technology Engineering Imam Ali University
Spring 2025, Vol. 41

Original Research

Optimization of Multi-Layer Composite Materials with Geometric Defects Using a Genetic Algorithm

Aaliasghar Naderi[1*], Fariba Naderi[2]

[1] Associate Professor of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran

[2] Department of Education, Khoramabad, Iran

ARTICLE INFO

Received: 2025.03.26

Accepted: 2025.05.05

Published: 2025.06.05

Keyword:
Optimization
Genetic algorithm SN
Composite materials
Finite element method
Geometric defects

***Corresponding Author:**
Aliasghar Naderi
Email:
aa.naderi@modares.ac.ir

ABSTRACT

This paper presents a method for optimizing the weight of multi-layer composite materials with geometric defects under pure shear load applied to all edges. The optimization method employs a genetic algorithm and the finite element method. The design constraints include the Tsai-Hill failure criterion and the linear buckling load related to the plate. The design variables for optimizing the plate consist of the number of layers, the thickness of each layer, fiber orientations, layup sequence, defect geometry, edge reinforcement specifications around the hole, and the plate material. The plates optimized using this method are compared with non-optimized samples. The obtained results indicate the effectiveness of combining the genetic algorithm and the finite element method in finding optimal designs and reducing design time.In applying the genetic algorithm for optimization, the number, thickness, orientation, and arrangement of layers from selected materials—along with the dimensions of the hole reinforcement—are used for each generation. The fitness function of each generation is calculated by satisfying the failure criterion and buckling load factor through linear analysis in the finite element software. The fittest generation is then selected for iteration until the desired result is achieved. Under a specific load, the layer arrangement and thickness significantly influence the weight reduction of the multi-layer composite. Since the final design obtained from the initial configurations has a lower weight and better performance, the algorithm used in this study demonstrates strong capability in this field.

فصل نامه مهندسی فناوری‌های دفاعی دانشگاه افسری امام علی (ع)

بهار 1404 ، دوره 41

مقاله پژوهشی

بهینه سازی مواد مرکب چند لایه داری نقص هندسی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

علی اصغر نادری[1*]، فریبا نادری

[1] دانشیار مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی(ع)، تهران، ایران

[2]کارشناسی ارشد زیست شناسی آموزش و پرورش، خرم آباد، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: 1404/01/05

پذیرش مقاله: 1404/02/15

انتشار مقاله: 1404/03/15

کلید واژگان:

بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک

مواد مرکب، المان محدود

نقص هندسی

نویسنده مسئول*

علی اصغر نادری

پســـت الکترونیکـــی:

aa.naderi@modares.ac.ir

چکیده

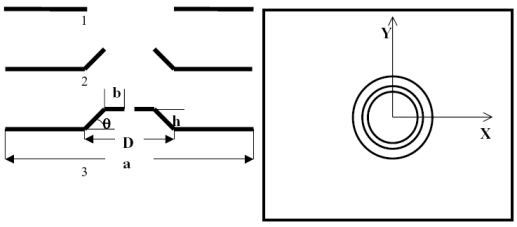
در این مقاله یک روش برای بهینه‌سازی وزن مواد مرکب چندلایه دارای نقص هندسی، تحت بار برشی خالص در تمامی لبه‌ها قرار گرفته است، ارائه شده است. در این روش برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک و المان محدود استفاده شده است. قیدهای طراحی، معیار واماندگی تسای-هیل و بار کمانش خطی مربوطبه صفحه هستند. متغیرهای طراحی برای بهینه‌سازی صفحه شامل تعداد لایه‌ها، ضخامت هرلایه، جهت الیافها، لایه چینی، هندسه نقص، مشخصات تقویت‌کننده لبه‌ی سوراخ وجنس صفحه هستند. صفحه‌های بهینه شده بااین روش با نمونه‌های بهینه نشده مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده حاکی از مفید بودن استفاده همزمان از الگوریتم ژنتیک و روش المان محدود در پیدا کردن نمونه های بهینه و نیز کم نمودن زمان طراحی است. در اعمال الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی تعداد، ضخامت، جهت‌گیری و چیدمان لایه‌ها از مواد انتخابی به همراه ابعاد تقویت کننده محل سوراخ صفحه، برای هر نسل استفاده می‌شود. تابع برازندگی هر نسل با ارضاء شرایط معیار واماندگی و ضریب بار کمانشی در نرم افزار المان محدود با تحلیل خطی محاسبه می‌شود ودر نهایت برازنده‌ترین نسل برای تکرار فرایند تا رسیدن به نتیجه مطلوب انتخاب می‌شود. در تحمل یک بار مشخص، چیدمان وضخامت لایه‌ها در کاستن وزن چند لایه خیلی مؤثر است. با توجه به اینکه طرح نهایی به‌دست آمده از طرح‌های اولیه دارای وزن کمتر و عملکرد بهتری است بنابر این الگوریتم استفاده شده در این تحقیق از توانایی خوبی در این حوزه برخوردار است.

1-مقدمه

مقالات طراحی سازه های کامپوزیتی و دخیل بودن متغیرهای متعدد در تعریف آنها ازمشکلاتی است که همواره طراحان دراستفاده حداکثرازقابلیت‌های این سازه‌ها پیش روی دارند. عموماً ایجاد نقص و سوراخ برای کم کردن وزن سازه و نیز به عنوان ورودی‌های سیستم الکتریکی و مکانیکی درهواپیما به‌کار گرفته می‌شوند. درطراحی صفحات کامپوزیتی وجود سوراخ‌ها یکی از مهمترین مشکلات طراحی و آنالیز چنین سازه‌هایی است. و به این منظور در تحقیقات گسترده‌ای که تا کنون ادامه دارد این مسئله مورد بررسی است. در سال 2001 ماک و گوربا از الگوریتم ژنتیک و المان محدود استفاده کردند تا به چیدمان بهینه یک صفحه چند لایه برسند و نتایج برای صفحه با سوراخ دایروی تحت بار کششی گزارش شده است[2]. در سال 2005 کانگ وکیم صفحات کامپوزیتی تقویت شده تحت بار فشاری را با الگوریتم ژنتیک برای وزن کمینه تحت قید کمانش طراحی کرده‌اند[3]. آلمیدا و آوراچ در سال 2009 از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی چند هدفه‌ی کمترین وزن و کمترین خیز برای صفحه چندلایه کامپوزیتی تحت بار در صفحه هدف استفاده کرده‌اند[3]. در بیشتر این تحقیقات رسیدن به وزن کمینه از اهداف آنالیز بوده است چراکه مشوق اصلی در استفاده از موادمرکب کاستن از وزن سازه است[4]. دراین مقاله نیز، هدف طراحی بهینه برای کمترین وزن ماده مرکب چند لایه با سوراخ تقویت شده تحت بار برشی می‌باشد. برای این منظور از روش‌های خطی ونرم‌افزار المان محدود برای آنالیز صفحه استفاده شده و نتایج حاصل از این آنالیز با یک کد کامپیوتری مرتبط شده است است تا در نهایت طرح بهینه استخراج گردد.

2- تعریف مسئله و مدل سازی

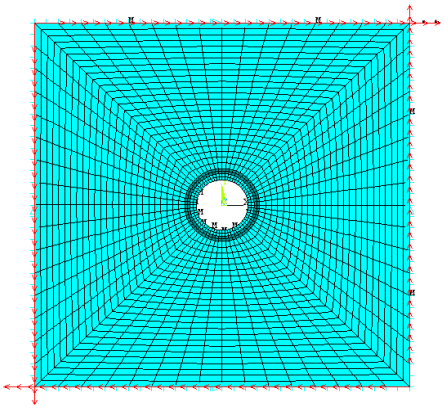
مسئله مورد بررسی عبارت‌است از آنالیز و بهینه‌سازی به‌منظور دستیابی به کمترین وزن یک صفحه ارتوتروپ مربع شکل با ضخامت متغییر برای هر نمونه و یک سوراخ دایروی مرکزی که ابعاد وشکل تقویت‌کننده اطراف سوراخ مانند شکل (1)، متغیر می‌باشد. یک بار برشی یکنواخت به مقدار N/mm 20 در صفحه به لبه های صفحه که تمامی روی تکیه گاه ساده قرار دارند، وارد می شود.



شکل (1)، اشکال مختلف صفحه

به منظور مدل سازی مسئله فرض شده است صفحه مورد بررسی در حالت عمومی دارای سوراخ با اندازه مختلف ونیز شرایط تقویت شده متفاوت از نمونه یک تا سه در شکل شماره (1) را دارا است و علاوه بر آن شعاع سوراخ و ضخامت صفحه در هر نمونه نیز متغییر می‌باشد.

برای مدل‌سازی و آنالیز از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. نوع المان پوسته است که دارای هشت گره در هر المان و شش درجه آزادی (سه تا جابجایی و سه تا چرخش) در هر گره است. [5].



شکل(2) مدل المان محدود و بارگذاری صفحه

مدل المان محدود و نحوه بارگذاری صفحه نمونه در شکل(2) نشان داده شده است. به منظور اعمال بار برشی یکنواخت لازم است مقدار6000 نیوتن بار در هر لبه بین گره های موجود تقسیم گردد. لبه‌ها روی تکیه‌گاه ساده قرار گرفته‌اند، بنابراین درجه آزادی تمامی گره‌ها در لبه های صفحه در جهت عمود بر المان‌ها مساوی صفر می‌شوند. همچنین در لبه‌های صفحه، درجه آزادی گره وسط هرضلع در جهت همان ضلع گرفته شده است. برای سنجش اعتبار بارگذاری صفحه یک وجه آن ثابت در نظر گرفته شده و مقدار 6000 نیوتن بار بر وجه مقابل اعمال می شود. سپس عکس العمل نیرویی بر وجه ثابت بدست آورده می‌شود که مساوی با مقدار نیروی اعمال شده است. همچنین نتایج حاصل از آنالیز یک نمونه صفحه که توسط نرم افزار Ms- Nastran [6]، انجام شده با نتایج بدست آمده ازآنالیزصفحه مقایسه می‌شوند. نمونه انتخاب شده یک صفحه مربعی به ابعاد300×300×2 میلیمتر با سوراخ می باشد. ماده کامپوزیتی استفاده شده برای صفحهT300/914Cمی‌باشد که خواص آن در پیوست ارائه شده است. صفحه دارای 16 لایه که هر لایه دارای ضخامت 0/125 میلیمتر است. جهت‌گیری الیاف در هرلایه به صورت : s(45/-45/45/-45/45/-45/45/-45)است. جدول (1) مقادیر مقایسه ای سنجش اعتبار مدل المان محدود را برای صفحه چندلایه کامپوزیتی نمونه با

مقادیر ارائه شده برای همین نمونه در مرجع [6] را نشان می‌دهد. با توجه به نزدیکی مقادیر جدول (1) می‌توان گفت که نتایج، نشان دهنده درستی مدل المان محدود و آنالیز می‌باشند.

جدول (1) مقادیر مقایسه ای صحت روش المان محدود

مشخصات نمونه mm	)	θ	W	مقادیر مرجع	مقادیر استخراج شده
ضریب بار کمانش	؛ 0	1 5	/0 kg323	2/147	137/2
ضریب اطمینان	؛ 0	1 5	/0 kg323	25/6	84/6
ضریب تمرکز تنش	؛ 0	)	/0 kg314	08/11	4/10

3- بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک

در این بخش یک تابع $\varphi(x)$ به نام تابع هدف تعریف می‌شود که تابعی از وزن بی بعد شده صفحه یعنی $\overline{w}$ می‌باشد. همانگونه که در رابطه (1) نشان داده شده است بیشنه سازی تابع هدف هم ارز با کمینه سازی وزن صفحه یعنی w می‌باشد که وزن هر صفحه با توجه به چگالی و هندسه مدل تعیین می‌شود.

$$\varphi(x) = 10 - \overline{w} \tag{1}$$

$$\overline{w} = \frac{w}{w_{\max}} \quad , \quad w_{\max} = 10 \ \ kg$$

در این مسئله تنها یک تابع هدف تعریف شده و هدف دست یابی به کمترین وزن سازه تحت قیدهای ذکر شده در رابطه (2) می‌باشد.

$$S.T = \left\{ \begin{array}{l} S.F \geq 1.2 \\ w \leq 10 \ kg \\ B.L.F \geq 1.5 \end{array} \right\} \tag{2}$$

در این رابطه S.F و B.L.F به ترتیب ضریب اطمینان و ضریب بار کمانش می‌باشند. برای وارد نمون قیدهای طراحی در حل مسئله از تکنیک رابطه سازی توابع جریمه خارجی که از متداول‌ترین روش‌ها در الگوریتم تکاملی به شمار می‌روند، استفاده می‌شود[7]. دراین روش مقدار برازندگی بر اساس مقدار تابع هدف و جریمه با اعمال ضریب جریمه در نسل مورد نظر مطابق رابطه (3) به‌دست می‌آید.

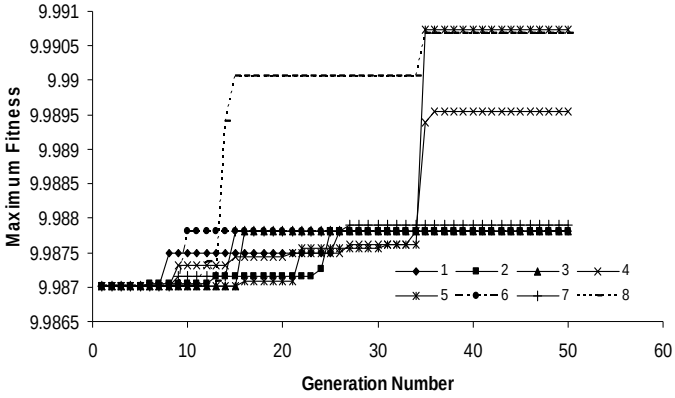
$$f(x) = \varphi(x) - \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \, p_i(x) \qquad (۳)$$

در این رابطه $f(x)$ تابع برازندگی یا تابع هدف اصلی و $p_i(x)$ مقدار تابع جریمه اختصاص یافته در اثر نقض قید i ام می‌باشد. این تابع جواب‌های در فضای پذیرفتنی را بدون تغییر گذاشته و جواب‌های خارج از فضای مقید را جریمه می‌کنند در نتیجه یک مسئله بهینه‌سازی نامقیدکه معادل مسئله بهینه‌سازی مقید اصلی است در نهایت به‌دست می‌آید. تعیین مقدار تابع جریمه و نحوه افزایش آن به دلیل تأثیری که بر جواب نهایی می‌گذارد، دارای اهمیت فراوان است. برای اعمال میزان اثر هر قید نسبت به قید دیگر می‌توان از یکسری ضرایب وزنی به نام ضریب تاکید استفاده کرد. تابع جریمه تعریف شده برای مسئله مورد نظر با رابطه (4) تعریف شده است.

$$P(x) = \frac{(\bar{w} - 1)}{2} + \frac{(1.5 - BLF)}{6} + \frac{(0.833 - Tsai)}{3} \qquad (4)$$

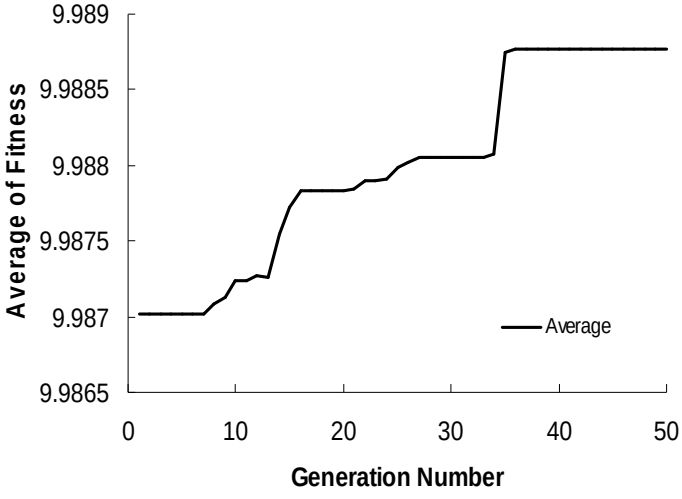
در این رابطه از قید هم ارز ضریب اطمینان یعنی تنش معیار تسای هیل در تابع جریمه استفاده شده است. با اعمال تابع جریمه به تابع هدف تابع هدف جدید (تابع برازندگی) به‌دست می‌آید، هرگاه مقدار قیدهای تعریف شده از حد در نظر گرفته شده تجاوز نماید، به جای حذف آن یک مقدار جریمه به تابع هدف آن تعلق می‌گیرد.

برنامه با انتخاب 25 کروموزوم (طرح) به صورت کاملاً تصادفی از فضای طراحی شروع به بهینه سازی و انتخاب طرح‌های برتر را آغاز می‌نماید. مبنای تمامی انتخابها یتم تصادفی می‌باشد و برای بررسی بهتر نحوه عملکرد برنامه به دفعات اجرا می‌گردد. در این مسئله برنامه مورد نظر هشت بار و هر بار تا پنجاه نسل با یک جمعیت اولیه مشخص اجرا شده است. شکل (3) نمودار تغیرات تابع برازندگی مسئله را در طی نسلهای متوالی برای هشت اجرای مختلف نشان می‌دهد.



شکل (3)نمودار تغییرات تابع برازندگی درطی نسلهای متوالی

شکل (4) نمودار تغیرات میانگین ماکزیمم تابع بهینگی را در طی نسلهای متوالی برای تمامی اجراهای برنامه را نشان می دهد.



شکل (4) نمودارتغیرات میانگین تابع بهینگی درنسلهای متوالی

4-نتایج و بحث

با توجه به شکل (3) دیده می‌شود که تقریباً در اکثر اجراهای کد برنامه، مقدار تابع برازندگی در نزدیکی نسل پنجاهم از جمعیت به طور دائم برای نسل‌های متوالی قبل و بعد از این نسل ثابت می‌ماند بنابراین برای صرفه جویی در وقت و رسیدن به اهداف بهینه سازی، بیشترین تعداد تولید نسل برابر پنجاه نسل در نظر گرفته می‌شود و برنامه اجرا می‌گردد. از چندین اجرای برنامه الگوریتم ژنتیک در یک رایانه شخصی، طرح‌های بهینه‌ی متعددی (نتایج متعددی) برای این مسئله خاص به‌دست آمده‌اند که هر کدام از این نتایج می‌تواند یک جواب مناسب برای مسئله باشد. دراینجا برای مقایسه از کل طرح‌های بدست آمده در نسل آخر یکی از اجراهای برنامه استفاده کرده و آن‌ها با نمونه‌های بهینه نشده مقایسه می‌گردند. جداول (3)و(4) به ترتیب نمونه های بهینه نشده و بهینه شده را نشان می‌دهند. از مقایسه جدول‌های مذکورنتایج زیر قابل استخراج هستند:

1 - ماده انتخابی در جمعیت اولیه از نوع ماده شماره 8 در جدول (1) با چیدمان s(45/45/-45/45/-45/45/-45/45/-45/45/-45/45/-45/45) می‌باشد. در صورتیکه در طرح بهینه از مواد با شماره 15 و 16 از همان جدول پیشنهاد شده است که دارای استحکام کششی در جهت الیاف به ترتیب در حدود 7 و 3 برابر ماده جمعیت اولیه و هر دو دارای چگالی درحدود 75/. چگالی ماده اولیه می‌باشند. بنابراین، وزن نمونه های بهینه شده از 12 تا 70 درصد کاهش یافته است. کمترین کاهش وزن برای ضخامت معادل نمونه اولیه با ضریب اطمینان 4/3 برابر و ضریب بار کمانشی 2/6 برابر معیار می‌باشد. در اینجا بهترین طرح با ارقام ضریب اطمینان و ضریب بار کمانشی در حد معیار یا به عبارت دیگر با بهترین برازندگی با 70 درصد کاهش وزن به‌دست آمده است که ضخامت آن تقریباً یک سوم طرح اولیه می‌باشد. بنابراین، این الگوریتم ابتدا مواد با استحکام بالا و چگالی کم را انتخاب کرده است که یک امر کاملاً بدیهی است ویا به عبارت دیگر برای رسیدن به مقدار بهینه در این نوع مسایل بایستی به سراغ مواد با استحکام کششی در جهت الیاف بالا و چگالی پایین رفت.

جدول(۳) نمونه صفحات قبل از بهینه شدن

شماره ماده	وزن (kg)	ضخامت هرلایه	تعداد لایه ها	لایه چینی	SF	BLF	θ	b (میلیمتر)	h(میلیمتر)	D (میلیمتر)	نمونه های بهینه نشده
۸	۳۱۴/۰	۱۲۵/۰	۱۶	(-45/45/-45/45/ - 45/45/-45/45)	۸۸/۵	۴۹/۱	۰	۰	۰	۶۰	۱
۸	۳۲۰/۰	۱۲۵/۰	۱۶	(-45/45/-45/45/ - 45/45/-45/45)	۰۹/۶	۰۱۱/۲	۴۵	۰	۸	۶۰	۲
۸	۳۲۳/۰	۱۲۵/۰	۱۶	(-45/45/-45/45/ - 45/45/-45/45)	۲۵/۶	۱۴۷/۲	۴۵	۵	۸	۶۰	۳

جدول(۴)نمونه صفحات بعد از بهینه شدن

شماره	درصد کاهش وزن	D (میلیمتر)	h (میلیمتر)	b (میلیمتر)	θ	BLF	SF	لایه چینی	تعداد لایه ها	ضخامت هرلایه	وزن (kg)	شماره ماده
1	۷۲/۱۲	۱۱۰	۹	۹	۶۰	۹/۳	۲۵/۵	(-75/-75/15/90 /90/90/90/60/-75/75/15/90)s	۲۴	۰۸۵/۰	۲۷۴/۰	۱۶
2	۵۸/۲۴	۷۰	۱۱	۹	۶۰	۱/۲	۲۳/۸	(90/-45/15/75/-45/90/90/60/-75/90/15/90)s	۲۴	۰۷/۰	۲۳۶/۰	۱۶
3	۲۶/۲۷	۱۱۰	۱۲	۵/۶	۶۰	۵۸/۲	۴۴/۷	(-75/-30/-45/30/ 90/45/90/45/-75/90/15/90)s	۲۴	۰۷/۰	۲۲۸/۰	۱۶
4	۱/۲۸	۱۱۰	۹	۹	۶۰	۲۷/۲	۸۴/۳	(-75/-75/15/90 /90/90/90/60/-75/90/15/90)s	۲۴	۰۷/۰	۲۲۵/۰۶	۱۶
5	۸۸/۳۰	۱۲۰	۱	۶	۶۰	۲۲/۲	۲۸/۲	(-60/-75/-60/45/ 90/60/-45/45/-75/90/15/90)s	۲۴	۰۷/۰	۲۱۷/۰	۱۵
6	۳۲/۳۳	۱۱۰	۱۲	۵/۶	۶۰	۹۵/۵	۳۶/۶	(-75/-45/-45/30 /90/90/90/60/-75/75/15)s	۲۲	۰۷/۰	۲۰۹/۰	۱۶
7	۳/۷۱	۱۲۰	۸	۹	۶۰	۶۷/۱	۴۳/۱۵	(-60/-75/-60/90 /15)s	۱۰	۰۷/۰	۰۹۲/۰۷	۱۶

2- همانگونه که در جدول (4) دیده می‌شود، حداکثر تابع هدف (کمترین وزن) مربوط به نمونه‌ای است که قیدهای طراحی آن به مرز نزدیک هستند. علت این امر آن‌است‌که وزن کمتر به معنای ضخامت کمتر و استحکام کمتر می‌باشد. بدیهی است که قید استحکام (قیدهای طراحی) با کاهش وزن در تقابل هستند. بنابراین در طراحی همواره بایستی به سراغ کمترین ضخامت ممکن از لایه‌ها رفت و این موضوع در این الگوریتم به صورت تصادفی قابل دستیابی است. ضخامت بهینه هر لایه 70 میکرومتر به‌دست آمده است.

3- در نمونه های شماره 2تا 4 در جدول شماره (4)، که مواد و ضخامت یکسان در هر لایه دارند دیده می‌شود که با تغییر جهت گیری های الیاف در هرلایه تغییر قابل ملاحظه‌ای در ضریب اطمینان و ضریب بار کمانشی به وجود می‌آید. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که زاویه الیاف در هر لایه و ترتیب قرار گرفتن آنها، یکی از پارامترهای بسیار موثر در طراحی بهینه صفحه‌های کامپوزیتی است. و درطول فرایند بهینه سازی جهت‌گیری الیاف در هرلایه آخرین متغیری است که همگرا می‌شود.

4- بنابراین برای دستیابی به بهترین طرح در میان کلیه اجراها، یعنی طرحی که دارای کمترین وزن و دارای بیشترین مقدار تابع بهینه‌گی است. بایستی به‌دنبال چیدمان مناسب بود که با اجرای برنامه الگوریتم ژنتیک می‌توان به یکی از انتخاب‌های مناسب از چیدمان این نوع مواد یعنی s (-60/-75/-60/90/15) رسید،

که در تحلیل‌های سنتی قابل حصول نیست.

5- نتیجه‌گیری

در بخش اغلب هدف اصلی در طراحی صفحه‌های چند لایه کامپوزیتی کم کردن وزن سازه مورد نظر تحت بار مشخص است. با توجه به‌اینکه صفحه‌ها در بیشتر موارد ناگزیر دارای سوراخ می‌باشند بنابراین در این مقاله هدف طراحی بهینه صفحه چند لایه کامپوزیتی با سوراخ با کمترین وزن ممکن برای معیار واماندگی و کمانش خاص است. از آنجاییکه طراحان درطراحی سازه های کامپوزیتی با متغیرهای متعدد، متنوع و ناپیوسته مواجه هستند، استفاده از الگوریتم های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، توسط اکثر محققان برای طراحی این نوع مواد پیشنهاد می‌شود. چون الگوریتم ژنتیک از قوانین احتمالات و انتخابهای تصادفی نقاط(همانندگردونه شانس) بهره می‌گیرد، کمتر با مشکل به دام افتادن در نقاط بهینه محلی مواجه می شود. بنابراین احتمال یافتن نقاط بهینه کلی (مطلق) در این روش بیشتر از روشهای بر پایه مشتق می‌باشد. ازطرفی، چون درمسائل بهینه سازی صفحات کامپوزیتی، مقدار بهینه کلی مشخص نمی‌باشد، لازم است برنامه بهینه سازی بکار رفته چندین بار برای نسلهای متوالی تکرار شود. بنابراین استفاده همزمان از الگوریتم ژنتیک و نرم افزارهای المان محدود (به علت بالا بردن سرعت پردازش)، در این گونه مسائل بسیار مفید است.

با توجه به موارد فوق در اینجا از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی تعداد، ضخامت، جهت‌گیری و چیدمان لایه‌ها از مواد انتخابی به همراه ابعاد تقویت کننده محل سوراخ صفحه، برای هر نسل از طرح‌های ممکن استفاده می‌شود. تابع برازندگی هر نسل با ارضاء شرایط معیار واماندگی و ضریب بار کمانشی با فرض پیوستگی لایه‌ها در نرم افزار المان محدود با تحلیل خطی محاسبه می‌شود ودر نهایت برازنده‌ترین نسل برای تکرار فرایند تا رسیدن به نتیجه مطلوب انتخاب می‌شود. در اعمال این الگوریتم در بهینه‌سازی وزن صفحات چندلایه از مواد مرکب دارای سوراخ تقویت شده می‌توان به یافته‌های زیر اشاره کرد:

1- در تحمل یک بار مشخص، چیدمان وضخامت لایه‌ها در کاستن وزن چند لایه خیلی مؤثر است و می‌توان با توجه به کمترین وزن حالت بهینه چیدمان و ضخامت لایه‌ها را به‌دست آورد.

2- الگوریتم ژنتیک به همراه نرافزار المان محدود، ابزاری قوی در جهت دستیابی به طرح بهینه کمترین وزن صفحه می‌باشد.

3-با توجه به اینکه طرح نهایی به‌دست آمده از طرح‌های اولیه دارای وزن کمتر و عملکرد بهتری است بنابر این الگوریتم استفاده شده در این تحقیق از توانایی خوبی در این حوزه برخوردار است.

6-منابع

1-Muc, A. and Gurba, W. "Genetic algoritms and finite element analysis in optimization of composite structures", Compos Struct, 54, pp.275-281, 2001.

2-Kang, J.H. and Kim C.G. "Minimum-Wight design of compressively loaded composite plates and stiffened panels for postbuckling strength by genetic algorithm", Compos Struct, 69, pp. 239-246, 2005.

3-Almeida, F.S. and Awruch, A.M. "Design optimization of composite laminated structures using genetic algorithms and finite element analysis", Compos Struct, 88, pp. 443-454, 2009.

4-Zhen Zhou Wang, Adam Sobey "A comparative review between GeneticAlgorithm use in composite optimisation andthe state-of-the-art in evolutionarycomputation", Composite Structures.Volume 233, 111739, 1989, 1 February 2020.

5- Barbero, E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus, 2nd ed.;CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2023.

6-R. Pandey, S. and Ramanath, k.s. "Stress concentration and stability studies in composite ribs with flanged cutouts", Word MSC.Aerospace Conference Toulouse ,france ,sept 24-26,2001.

7- Liu, X.; Qin, J.; Zhao, K.; Featherston, C.A.; Kennedy, D.; Jing, Y.; Yang, G. DesignOptimization of Laminated Composite Structures Using Artificial Neural Network andGenetic Algorithm. Compos. Struct., 305, 116500, 2022.