ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهینهسازی تک هدفی و چند هدفی ورق ساندویچی انحنادار با هستهی روغن اثرپذیر مغناطیسی به روش الگوریتم ژنتیک

كرامت ملكزادەفرد^{1*}، محسن رضائىحسنآبادى²، مصطفى ليوانى ³

1- دانشيار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالکاشتر، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالکاشتر، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالکاشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی kmalekzadeh@mut.ac.ir ،13445768

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این تحقیق بهینهسازی تک هدفی و چند هدفی ورق ساندویچی انحنادار با رویههای کامپوزیتی و هستهی روغن اثرپذیر مغناطیسی برای	مقاله پژوهشی کامل
بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول و کمینه کردن جرم با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ورق با حالتهای تک انحنایی و دو انحنایی	دريافت: 22 ارديبهشت 1393
انجام شده است. ورق ساندویچی مورد بررسی در این تحقیق به صورت انحنادار و دارای شرایط تکیهگاهی ساده است. برای استخراج معادلات	پذیرش: 15 مرداد 1393 ۱۹۹۰ - ۱۹۹۵
حرکت حاکم بر سیستم که منجر به یافتن توابع هدف بهینهسازی می شود، برای اولین بار از تئوری مرتبه بالای بهبود یافته ی ورق های	ارائه در سایت: 06 ابان 1393
ساندویچی و اصل همیلتون استفاده شده است. ضخامت رویهها، ضخامت هسته، زوایای الیاف و شدت میدان مغناطیسی به عنوان متغیرهای	کلید واژگان:
بهینه سازی در نظر گرفته شده است. در حالت تک هدفی مقادیر بهینه محاسبه شده و نتایج حاصل نشان از تمایل سازه به داشتن رویه هایی	بهینهسازی مرقب سانده بحد .
نازک و هسته ضخیم دارد که از نظر فیزیکی هم درست به نظر میرسد، چون روغن اثرپذیر مغناطیسی در هسته قرار گرفته و اثر قابل توجهی در	ورمی سیسوییپی روغن اثرپذیر مغناطیسی
افزایش ضریب استهلاک مودال دارد. در حالت دو هدفی جوابهای بهینه به صورت مجموعهای از نقاط که یک جبهه پرتو را تشکیل میدهند	تئوري مرتبه بالاي بهبوديافتهي ورق،هاي ساندويچي
حاصل شده است. در نهایت برای اولین بار در این زمینه، نقاطی بر اساس روش تاپسیس از بین مجموعه نقاط بهینه انتخاب شدهاند و مشاهده	الگوريتم ژنتيک
شده است که در حالت مشابه از لحاظ ابعاد و حرم، ضرب استهلاک مودال در ورق دو انحنابی بشتر از ورق تک انحنابی است.	

Single-objective and multi-objective optimization of curved sandwich panel with magneto-rheological fluid core using genetic algorithm

Keramat Malekzadeh Fard*, Mohsen Rezaei Hassanabadi, Mostafa Livani

Department of Aerospace Engineering, Malek ashtar University of Technology, Tehran, Iran. * P.O.B. 13445768 Tehran, Iran, kmalekzadeh@mut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Abstract

Original Research Paper Received 12 May 2014 Accepted 06 August 2014 Available Online 28 October 2014

Keywords: Optimization Sandwich Panel Magneto-Rheological Improved High Order Sandwich Panel Theory Genetic algorithm In this study, single-objective and multi-objective optimization of curved sandwich panel with composite face sheets and magneto-rheological core have been done to maximize the first modal loss factor and minimize the mass by using genetic algorithm. The studied sandwich panel was curved with simply support boundary condition. In order to derive the governing equations of motion, an improved high order sandwich panel theory and Hamilton's principle were used for the first time. The face sheet thickness, core thickness, fiber angles and intensity of the magnetic field have been considered as optimization variables. In single-objective optimization, the optimized values of variables were calculated. The results showed that the structures tend to have thick core and thin face sheets which seems physically true. As the magneto-rheological fluid placed in the core, it has a significant effect on the increasing of the modal loss factor. For the multi-objective optimization the Pareto front of optimal technique was presented. Then for the first time at this field, the set of optimal points are selected based on TOPSIS method and it was showed that in the case of similar size and mass, modal loss factor of double-curved panel is more than sigle-curved.

1- مقدمه

ویژگیهای دیگر نظیر قابلیت جذب انرژی، کاربرد در سازههای هوشمند، مقاومت صوتی و گرمایی و قابلیت خنککاری نیز از مواردی هستند که باعث افزایش کاربری این سازهها شده است [۲،3]. یک سازه ساندویچی اعم از تیر یا ورق، متشکل از دو رویهی¹ نازک و

ورقهای ساندویچی سازههای مهم و نوینی هستند که به دلیل ساختار منحصربهفرد، دارای نسبت استحکام به وزن بالایی میباشند. برخورداری از وزن کم، مقاومت در مقابل بار مشخص و قابلیت چندمنظوره بودن، کاربرد این ورقها را افزایش داده است [1].

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

K. Malekzadeh Fard, M. Rezaei Hassanabadi, M. Livani, Single-objective and multi-objective optimization of curved sandwich panel with magneto-rheological fluid core using genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 414-422, 2015 (In Persian)

¹⁻ Sheet

مستحکم است که یک هستهی¹ نرم، انعطافپذیر و نسبتاً ضخیم را در بر گرفتهاند. رویهها را معمولاً از ورقهای نازک و مستحکم فلزی و یا ورقهای چند لایه کامپوزیتی میسازند. هستهها نیز غالباً از پلیمرهای سبک، فومها و یا سازههای لانه زنبوری² ساخته میشوند.

روغنهایی که خواصشان با تغییر میدان مغناطیسی، تغییر میکند، روغن اثرپذیر مغناطیسی³ نامیده میشوند. این مواد با پاسخ زمانی سریعی که از خود نشان میدهند، در حد میلی ثانیه، کاربرد گستردهای در کنترل سازهها دارند.

این روغنها تحت تأثیر میدان مغناطیسی، تغییرات مشخص و سریعی در خواص سختی و میرایی از خود نشان میدهند. تنش تسلیم روغن MR در حدود 2 تا 3 کیلوپاسکال در غیاب میدان مغناطیسی است. این مقدار در حضور میدان مغناطیسی تا 80 کیلوپاسکال افزایش مییابد. این روغنها همچنین برای کنترل ارتعاشات با دامنههای بسیار بزرگ کاملاً مناسب هستند [4].

از جدیدترین کارهای انجام شده در مورد روغنهای MR میتوان به کار راجاموهان و همکاران [۵.6] اشاره کرد. آنها برای اولین بار ویژگیهای ارتعاشی یک تیر ساندویچی پرشدهی جزئی از MR را هم با روش اجزای محدود و هم به صورت تجربی بررسی کردند. اثر تغییر محل جز MR و پارامترهای مختلف مثل ضخامت رویهها و هسته بر پاسخ ارتعاشی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین آنها محل بهینهی قرارگیری لایههای MR جزئی برای ماکزیمم کردن ضریب استهلاک مودال تیر ساندویچی را مورد بررسی قرار دادند. آنها محل بهینهی قرارگیری لایههای AR جزئی را برای ماکزیمم کردن ضریب استهلاک مودال تیر جداگانه و همزمان مورد بررسی قرار دادند. همچنین ویولا و همکاران [7] یک چارچوب کلی برای فرمولبندی و محاسبات تحلیل دینامیکی پوسته و ورق دو انحنایی چند لایه با ضخامت متوسط را ارائه کردهاند. در این تحقیق مسائل دوبعدی ارتعاش پوسته با استفاده از روش مربع سازی دیفرانسیلی تعمیم یافته به صورت عددی حل شدهاند.

بهینهسازی یک فعالیت مهم و تعیین کننده در طراحی ساختاری است. طراحان زمانی قادر خواهند بود طرحهای بهتری تولید کنند که بتوانند با روشهای بهینهسازی در صرف زمان و هزینه طراحی صرفهجویی نمایند. امروزه هدف بسیاری از مهندسان و طراحان، طراحی سیستمهایی برای کاربردهای مهندسی در زمینه مکانیک، خودروسازی، ساختمانی، دریایی و ... است. در دنیای پررقابت امروزی، طراحی سیستمی با عملکرد آن مطابق خواسته طراح کافی نیست، بلکه لازم است آن سیستم بهترین باشد. بهترین یعنی سیستمی کارآمد، همه جانبه، منحصربهفرد و مقرون به صرفه باشد.

ابتدایی ترین تحقیقات در زمینه یبهینه سازی ورقهای ساندویچی در سالهای میانی دهه 70 میلادی انجام گرفت. در سال 1974 مطالعه بر روی بهینه سازی وزن تیرهای ساندویچی توسط هوانگ و آلسپائو [8] صورت گرفت. سپس فارشی و اشمیت [9] بر روی طراحی بهینه صفحات کامپوزیتی به وسیله یک روش عددی پیچیده کارکردند. در این تحقیق ضخامت صفحه یکامپوزیتی به صورت پیوسته در نظر گرفته شده بود.

در ابتدای قرن 21 میلادی تحقیقات فراوانی جهت بهینهسازی ورقهای کامپوزیتی چند لایه و ساندویچی صورت گرفت. با توسعه کامپیوترها و همچنین پیشرفت روشهای بهینهسازی، روزبهروز بر دقت و کاربرد این تحقیقات افزوده شد. بهینهسازی چند هدفی ورقهای چند لایه و صفحات ساندویچی با توجه به بار کمانش و ضخامت با استفاده از

تئوری مرتبه بالا توسط اسکیوا و همکاران [10] ارائه شد. همچنین طراحی بهینه صفحات چند لایه کامپوزیتی با محرک یکپارچه پیزوالکتریک توسط کوریا و همکاران [11] مورد بررسی قرار گرفت. ژنگ و همکاران [12] به بهینهسازی رفتار میرایی لایهها برای به حداقل رساندن انرژی ارتعاشی تیر ساندویچی پرداختند. هاتچینسون و ژو [13] ورقهای ساندویچی که در معرض بارهای دینامیکی ناشی از برخورد آب بودند را بهینهسازی کردند.

در سالهای اخیر نیز تحقیقات فراوانی بر روی بهینهسازی ورقهای كامپوزيتي ساندويچي صورت گرفته است. از آن جمله ميتوان به تحقيق ميلر و همکاران [14] اشاره کرد. در این تحقیق به بهینهسازی هسته لانه زنبوری صفحات ساندویچی برای افزایش بار کمانشی پرداخته شده است. لیمات و همکاران [15] به بهینهسازی انرژی مستهلک شده در ورقهای ساندویچی حاوی لایه الاستومر پرداختند. آنها پارامترهای مربوط به مواد و هندسه ورق را به صورت همزمان مورد بررسی قرار دادند. موکا و ویرزاگ [16] بهینهسازی ضخامت ورقهای کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند و اسلیسریز و روکنز [17] با متغیرهای گسسته سفتی ورق ساندویچی به طراحی بهینهی آن پرداختند. همچنین خلخالی و همکاران [18] بهینهسازی ورقهای ساندویچی با هسته موجدار را با به حداقل رساندن دو تابع هدف شامل وزن و انحراف ساختار، انجام دادهاند و مدل المان محدود سازه با استفاده از نرمافزار تجارى انسیس⁴ ایجاد شده که برای محاسبه انحراف ورق در شرایط مختلف به کار می رود. در همین سال نایاک و همکاران [19] یک روند کلی برای بهینهسازی ورق ساندویچی برای به حداقل رساندن اثرات بارگذاری هوا را مورد بررسی قرار دادند.

هدف از این تحقیق بهینهسازی تک هدفی و چند هدفی ورق ساندویچی انحنادار با رویههای کامپوزیتی و هستهی MR برای بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول و کمینه کردن جرم با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ورق با حالتهای تک انحنایی و دو انحنایی است. ورق ساندویچی مورد بررسی در این تحقیق به صورت انحنادار و دارای شرایط تکیهگاهی ساده است. برای استخراج معادلات حرکت حاکم بر سیستم که منجر به یافتن توابع هدف بهینهسازی میشود، برای اولین بار از تئوری مرتبه بالای بهبود یافتهی ورقهای ساندویچی برای ورق ساندویچی انحنادار با هستهی MR و اصل همیلتون استفاده شده است.

پس از استخراج معادلات حرکت حاکم بر سیستم و مقایسه با نتایج مشابه موجود در حیطهی این موضوع و اطمینان از صحت معادلات استخراج شده، در گام بعدی با استفاده از این مدل معتبر، بهینهسازی تک هدفی و چند هدفی برای ورق تک انحنایی و دو انحنایی انجام شده است. ضخامت رویهها، ضخامت هسته، زوایای الیاف و شدت میدان مغناطیسی به عنوان متغیرهای بهینهسازی در نظر گرفته شده است. در حالت تک هدفی رفتار ارتعاشی ورق از طریق یافتن شدت میدان مغناطیسی و ضخامت بهینه برای لایهها، بهینه شده، و در حالت چند هدفی همزمان با لحاظ کردن معیار رفتار ارتعاشی، کمینه شدن جرم ورق نیز در متغیرهای بهینهسازی در نظر گرفته شده است. از آنجا که در این تحقیق، متغیرهای بهینهسازی از نوع گسسته و پیوسته می باشند، بنابراین الگوریتم ژنتیک، به عنوان یکی از قوی ترین الگوریتههایی که به خوبی می تواند متغیرهای گسسته و پیوسته را به طور همزمان اداره کند، به منظور حل مسئله حاضر انتخاب شده است. از طرفی با توجه به اینکه مسئله بهینهسازی حاضر، یک بهینهسازی چند هدفی نیز است، بنابراین نسخه چند هدفی الگوریتم ژنتیک یعنی الگوریتم ژنتیک

4- ANSYS

¹⁻ Core 2- Honeycomb

³⁻ Magneto-Rheological (MR)

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 15

[[] Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04

با دستهبندی غیر برتر -2¹ [20] مورد استفاده قرار گرفته است. در حالت تک هدفی مقادیر بهینه محاسبه شده و در حالت دو هدفی جوابهای بهینه به صورت مجموعهای از نقاط که یک جبهه پرتو² را تشکیل میدهند حاصل شده است. به طوری که هر نقطه اگر از دید یک تابع هدف از سایر نقاط شرایط بدتری داشته باشد، حتماً از نظر تابع هدف دوم شرایط بهتری دارد. داشتن این نتایج از فرآیند بهینه سازی به طراح قدرت انتخاب میدهد که در شرایط مختلف، متناسب با نیاز بهترین پنل را برگزیند در نهایت برای اولین بار در این زمینه، نقاطی بر اساس روش تاپسیس از بین مجموعه نقاط بهینه انتخاب شدهاند [12].

2- روابط ساختاري

2-1- به دست آوردن معادلات حاکم بر سیستم

برای به دست آوردن معادلات حاکم بر سیستم، از تئوری مرتبه بالای بهبود یافتهی ورقهای ساندویچی (IHSAPT) استفاده گردیده است. طبق این تئوری، برای صفحات کامپوزیتی رویه، از تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی³[22] و برای هسته، عبارت چندجملهای جابجاییها که بر پایهی جابجاییهای مدل دوم فروستیگ⁴ میباشد، استفاده شده است [23]. سپس با استفاده از اصل انرژی پتانسیل کمینه، معادلات حاکم بر مسئله استخراج شده است.

با توجه به تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی، جابجاییهای ۷، ۷ و ۷ رویهها در جهتهای ۲، ۷ و z با فرض جابجاییهای خطی کوچک به صورت روابط (1) میباشند:

$$u_{i}(x, z, y, T) = u_{0}^{i}(x, y, T) + z_{i}\psi_{x}^{i}(x, y, T)$$

$$v_{i}(x, z, y, T) = v_{0}^{i}(x, y, T) + z_{i}\psi_{y}^{i}(x, y, T)$$

$$w_{i}(x, z, y, T) = w_{0}^{i}(x, y, T) \quad ;(i=t, b)$$
(1)

که در آن T بیانگر زمان، ^یلا و _v['] (_v ((i=t,b) مؤلفههای چرخش نرمال متقاطع حول محورهای X و Y صفحات میانی رویههای بالایی و پایینی، ^ub، ^{(J}b و ^{(J}w (i=t,b)، جابجاییهای X و Y و تغییر شکل عمودی رویههای بالایی و پایینی و ₍Z (i=t,b)، مختصه عمودی هر یک از رویهها که از صفحه میانی هر کدام از رویهها اندازه گیری میشود، می،باشند.

بر اساس مدل دوم فروستیگ، روابط جابجایی برای هسته به صورت روابط (2) میباشند: [23]

$$\begin{cases} u_{c}(x, y, z, T) = (1 + \frac{Z}{R_{xc}})u_{0}^{c}(x, y, T) + z_{c}u_{1}^{c}(x, y, T) \\ + z_{c}^{2}u_{2}^{c}(x, y, T) + z_{c}^{3}u_{3}^{c}(x, y, T) \\ v_{c}(x, y, z, T) = (1 + \frac{Z}{R_{yc}})v_{0}^{c}(x, y, T) + z_{c}v_{1}^{c}(x, y, T) \\ + z_{c}^{2}v_{2}^{c}(x, y, T) + z_{c}^{3}v_{3}^{c}(x, y, T) \\ w_{c}(x, y, z, T) = w_{0}^{c}(x, y, T) + z_{c}w_{1}^{c}(x, y, T) \\ + z_{c}^{2}w_{2}^{c}(x, y, T) + z_{c}w_{1}^{c}(x, y, T) \end{cases}$$

$$(2)$$

که در آن [°]µ و [°]y (*k=0,1,2,3*) مجهولات جابجاییهای درون صفحهای هسته و [°]k (*k=0,1,2*) مجهولات جابجاییهای عمودی آن میباشند. فرض شده که شتاب و سرعت در هسته توزیع یکسانی دارند.

در این تحقیق فرض شده که رویهها به صورت ایده آل به هسته چسبیدهاند. به عبارت دیگر شرایط پیوستگی جابجاییها در فصل مشترکها برقرار است. بنابراین هر سه مؤلفه جابجایی رویه بالایی و هسته، در فصل مشترک این دو، با

(7)

هم برابرند. این شرایط برای فصل مشترک رویه پائینی با هسته نیز برقرار است. به این ترتیب با فرض خمش کامل بین هسته و رویهها، شرایط سازگاری در اتصال بالا و پایین هسته و رویهها به صورت روابط (3) است:

$$u_{c}(z = z_{ci}) = u_{0}^{i} + \frac{1}{2}(-1)^{k} h_{i} \psi_{x}^{i}$$

$$v_{c}(z = z_{ci}) = v_{0}^{i} + \frac{1}{2}(-1)^{k} h_{i} \psi_{y}^{i} ; i = t \rightarrow k = 1 ; z_{ct} = \frac{h_{c}}{2}$$

$$w_{c}(z = z_{ci}) = w_{0}^{i} ; i = b \rightarrow k = 0 ; z_{cb} = -\frac{h_{c}}{2}$$
(3)

از آنجایی که MR در ناحیه قبل از تسلیم خاصیت مواد ویسکوالاستیک خطی را دارد لذا مدول برشی شکل مختلط داشته و وابسته به شدت میدان مغناطیسی است. در این تحقیق از رابطهای که راجاموهان و همکاران [6.6] برای ارتباط بین مدول برشی مختلط MR و شدت میدان مغناطیسی پیشنهاد دادهاند استفاده شده است. مدول برشی مختلط برای مواد ویسکوالاستیک به صورت رابطه (4) است:

$$G = G' + i G'' \tag{4}$$

که '**۵** و "**۵** به ترتیب مدول ذخیره و مدول اتلاف بوده و برای MR به صورت یک تابع چندجملهای از شدت میدان مغناطیسی *B* (بر حسب گاوس) به شکل رابطه (5) میشوند: [۵،6]

همیلتون [25] استفاده شده است که طبق رابطه (6) بیان می کند:

$$\tau$$
 $\delta Ldt = \int_{0}^{\tau} (\delta K - \delta U + \delta W_{out}) dt = 0$

(6)
$$\delta U$$
 که در آن δK نشان دهنده تغییرات انرژی جنبشی سیستم δU ، نشان دهنده نشان دهنده نشان دهنده نشان دهنده مناب دهنده م

نشاندهندهی تغییرات انرژی پتانسیل سیستم و δW_{ext} نشاندهندهی تغییرات انرژی ناشی از نیروهای وارده بر سیستم است که در اینجا چون هدف بررسی ارتعاشات آزاد سیستم میباشد، این مقدار برابر صفر است ($\delta W_{ext} = 0$).

در نهایت با جایگزینی میدانهای جابجایی (روابط 1 الی 3) و همچنین روابط مربوط به تنش لایهها [26] در روابط تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم [27] و استفاده از اصل همیلتون (رابطه 6) و اصل اساسی حساب تغییرات، معادلات حرکت برای ورق ساندویچی دو انحنایی با هسته MR، به صورت یک سیستم معادلات دیفرانسیل جزئی دارای 15 معادله و 15 مجهول به دست می آیند. [24]

در این تحقیق شرایط مرزی تکیهگاه ساده برای هر چهار لبهی ورق ساندویچی فرض شده است. میتوان نشان داد که پاسخهای مفروض رابطه (7) شرایط مرزی تکیهگاه ساده را ارضا میکنند. [28]

$$\begin{bmatrix} u_0^j(x, y, t) \\ v_0^j(x, y, t) \\ w_0^j(x, y, t) \\ \psi_x^j(x, y, t) \\ \psi_y^j(x, y, t) \\ u_k^c(x, y, t) \\ v_0^c(x, y, t) \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \begin{bmatrix} U_{0mn}^j(t)\cos(\alpha_m x)\sin(\beta_n y) \\ V_{0mn}^j(t)\sin(\alpha_m x)\cos(\beta_n y) \\ W_{0mn}^j(t)\cos(\alpha_m x)\sin(\beta_n y) \\ \Psi_{ymn}^j(t)\sin(\alpha_m x)\cos(\beta_n y) \\ U_{kmn}^c(t)\cos(\alpha_m x)\sin(\beta_n y) \\ U_{kmn}^c(t)\cos(\alpha_m x)\sin(\beta_n y) \\ U_{kmn}^c(t)\sin(\alpha_m x)\cos(\beta_n y) \\ W_{0mn}^c(t)\sin(\alpha_m x)\sin(\beta_n y) \end{bmatrix} \\ (k = 0, 1), (j = t, b)$$

¹⁻ Non-dominated Sorting genetic algorithm - II

²⁻ Pareto 3- FSDT

⁴⁻ Frostig

 W_{bmn}^c , V_{kmn}^c , U_{kmn}^c , Ψ_{ymn}^j , Ψ_{ymn}^j , W_{0mn}^j , V_{0mn}^j , U_{0mn}^j , (7) در رابطه وریه هستند که مجهولات رابطه و وابسته به زمان میباشند. α_m عبارت است از $\alpha_m = \frac{n\pi}{a}$ و $\alpha_m = \frac{n\pi}{a}$ است از $\beta_n = \frac{n\pi}{b}$ و n به ترتیب اعداد مربوط به نیم موج در راستاهای X و Y هستند.

با جایگزینی روابط (7) در معادلات حاکم بر حرکت سیستم و سپس با به کار بردن روش باقیمانده وزنی به روش تابع وزنی گالرکین [29.30]، معادلات حاکم به صورت سیستم معادلات دیفرانسیل معمولی کوپله به شکل رابطه (8) درمیآیند:

$$[M]\{\ddot{c}\} + [K]\{c\} = \{0\}$$

$$\{c\} = \{U_{0mn}^{t}(t), U_{0mn}^{b}(t), V_{0mn}^{t}(t), V_{0mn}^{b}(t), W_{0mn}^{t}(t), ...$$

$$W_{0mn}^{b}(t), \psi_{xmn}^{t}(t), \psi_{xmn}^{b}(t), \psi_{ymn}^{t}(t), \psi_{ymn}^{b}(t), ...$$

$$U_{0mn}^{c}(t), V_{0mn}^{c}(t), U_{1mn}^{c}(t), V_{0mn}^{c}(t)\}^{T}$$

$$\{8\}$$

بنابراین مسئلهی ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی انحنادار با تکیهگاه ساده، به معادلات استاندارد پاسخ سازهای تبدیل میشود. [۸] ماتریس سفتی و [*M*] ماتریس جرم میباشند.

نهایتاً با فرض ارتعاشات آزاد، با توجه به اینکه مدول برشی MR به صورت مختلط است (رابطه 4)، به یک مسئله مقدار ویژه با مقادیر ویژه مختلط خواهیم رسید. طبق رابطه (9) معادله مقادیر ویژه عبارت است از:

(9)
$$det \{ [K] - \tilde{\omega}^2 [M] \} = 0$$
 $\tilde{\omega}$ is cure face if (1) is according to the energy of the ene

$$\omega = \sqrt{\operatorname{Re}(\tilde{\omega}^2)}, \qquad \eta_{\nu} = \frac{\operatorname{Im}(\tilde{\omega}^2)}{\operatorname{Re}(\tilde{\omega}^2)}$$
(10)

2-2- بهینهسازی به الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی عمومی از روشهای فرا ابتکاری برای بهینهسازی گسسته است که مسائل جدول زمانبندی را حل مینماید. این روش در سال 1975 به وسیله هولند و در سال 1989 توسط گولدبرگ ابداع شده است. این روش نوعی روش جستجوی همسایه است که عملکردی مشابه ژن دارد. در طبیعت، فرایند تکامل هنگامی ایجاد میشود که چهار شرط زیر برقرار باشد:

الف) یک موجود توانایی تکثیر داشته باشد (قابلیت تولید مثل).

ب) جمعیتی از این موجودات قابل تکثیر وجود داشته باشد.

پ) چنین وضعیتی دارای تنوع باشد.

ت) این موجودات به وسیله قابلیتهایی در زندگی از هم جدا شوند.

در طبیعت، گونههای متفاوتی از یک موجود وجود دارند که این تفاوتها در کروموزومهای این موجودات ظاهر میشود و باعث تنوع در ساختار و رفتار این موجودات میشود. [31]

میتوان تعاریف و تفاوت مسائل بهینهسازی یک هدفی و چند هدفی را به صورت زیر بیان نمود:

تعریف 1: یک مسئله عمومی بهینه سازی تک هدفی به نحوی تعریف می شود که تابع f(X) مینیمم (ماکزیمم) شود در صورتی که قیود $X \in \Omega$ و $X \in \Omega$ و f(X)، $\{n_1, \dots, p\}$ و $j = \{1, \dots, m\}$ و $g_i(X) \le 0$ باشند. یک حل، تابع اسکالر f(X) را مینیمم (ماکزیمم) می کند، هنگامی که X بردار n بعدی متغیر تصمیم گیری $(n_1, X_2, \dots, X_n) = X$ از فضای Ω است.

و $b_i(X)=0$ و $g_i(X) \leq 0$ نماینده قیودی هستند که باید در حین $g_i(X)$

بهینهسازی (مینیمم یا ماکزیممسازی) تابع (f(X) برآورده شوند. البته X میتواند برداری از متغیرهای پیوسته یا گسسته باشد. بعلاوه، تابع f نیز میتواند پیوسته یا گسسته باشد.

تعریف 2 (مسئله عمومی بهینهسازی چند هدفی) : یک مسئله عمومی تعریف 2 (مسئله عمومی بهینهسازی چند هدفی) : یک مسئله عمومی بهینهسازی چند هدفی) کردن تابع برداری بهینهسازی چند هدفی $F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X))$ $g_i(X) = 0 = f_1 = f_1 = f_1 = f_2 = f_2 = X$ تعریف میشود. یک مسئله بهینهسازی چند هدفی مؤلفههای بردار F(X) ما مینیمم (ماکزیمم) میکند، به نحوی که X بردار n بعدی متغیرهای تصمیم گیری میکند، به نحوی که X بردار n بعدی متغیرهای تصمیم گیری میکند، به نحوی که X بردار n بعدی منغیرهای تصمیم $f_i(X) = (f_1, \dots, f_k)$ میکند، به نحوی که X بردار n بعدی متغیرهای تصمیم گیری میکند، به نحوی که X بردار n بعدی منغیرهای تصمیم $f_i(X) = 0$ و $f_i(X) = 0$ می باشد. همچنین اشاره شد که 0 (A) در میکند و $f_i(X) = 0$ می بردارهای میکن $f_i(X) = 0$ میکند میکند می بردارهای ممکن $f_i(X) = 0$ می بردارهای ممکن $f_i(X) = 0$ می بردارهای میکن میکن ما بردارهای ممکن میکند می بردارهای میکن

بنابراین، بهینه سازی چند هدفی شامل k هدف، که به شکل k تابع هدف منعکس می شوند، m+p قید روی توابع هدف و n متغیر تصمیم گیری است. k تابع هدف می توانند خطی، غیر خطی، پیوسته و یا گسسته باشند. بردار $F:\Omega \to \Lambda$ ، یک نگاشت از مقادیر متغیرهای تصمیم گیری بردار $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ به بردارهای $y = a_1, a_2, \dots, a_k$ است. بردار متغیرهای تصمیم گیری X نیز می تواند پیوسته یا گسسته باشد. شکل 1 نگاشت مسئله بهینه سازی چند هدفی را نشان می دهد.

 $X = \Omega$ ، بهینه پرتو نامیده میشود اگر و تنها اگر هیچ $\Omega = X$. وجود نداشته باشد که برای آن بردار ((X), $I_{x}, \dots, I_{x}, \dots, I_{x}) = V + F(X) = V$ بر بردار ((X), $I_{x}, \dots, I_{x}, \dots, I_{x}) = U$ مسلط باشد. به شکل دیگر این تعریف بیان میدارد که، با فرض حل مسئله مینیممسازی، X بهینه پرتو است، اگر هیچ X مجاز دیگری وجود نداشته باشد که چند تابع هدف را کاهش دهد بدون اینکه به طور همزمان حداقل یکی از دیگر توابع هدف را افزایش دهد.

در مسائل چند هدفی یک مجموعه از پاسخهای بدست آمده که به نوعی مصالحه بین چند تابع هدف را به نمایش می گذارند به عنوان مجموعه جواب نهایی پذیرفته می شوند. هر کدام از جوابهای این مجموعه می تواند پاسخ بهینهای برای توابع هدف باشد و انتخاب یک جواب از میان مجموعه پاسخهای بهینه به یک فرآیند تصمیم سازی نیاز خواهد داشت.

3- نتايج و تشريح

3-1- اعتبارسنجي معادلات

در این بخش مقایسهای بین نتایج عددی حاصله از معادلات به دست آمده در تحقیق حاضر با دیگر کارهای مشابه انجام شده است.

جدول 1 مشخصات مکانیکی و هندسی سازه مورد نظر را معرفی میکند.



DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.34.1

جدول 1 مشخصات مکانیکی و هندسی ورق ساندویچی دو انحنایی با هسته MR و ویههای کامیوزیتی [32]

	<u>.</u> ی <u>پرر</u> ی ۱۱	JJ
مشخصات هندسی	مشخصات مكانيكي رويهها	مشخصات مكانيكي هسته
	<i>E</i> ₁ = 24/51 GPa	
$h_c/h = 0/88 \qquad E_2 = E_3 = 7$ $a = 10h \qquad G_{12} = G_{13} =$ $a = b \qquad G_{23} = 1/3$	<i>E</i> ₂ = <i>E</i> ₃ = 7/77 GPa	
	$G_{12} = G_{13} = 3/34$ GPa	
	<i>G</i> ₂₃ = 1/34 GPa	ho =3500kg/m ³
$R_{c1}=R_{c2}=3a$	$R_{c2} = 3a$ $V_{12} = V_{13} = 0/078$ $G_{13} = G_{23} = G'$	$G_{13} = G_{23} = G' + iG''$
$h_t = h_b = 0/003 \text{ m}$	v ₂₃ = 0/49	
	ho =1800kg/m ³	

	دو انحنایی	ں ساندویچی	یعی برای ورق	کانسهای طب	مقادير فر	جدول 2	
	قدرمطلق	بیگلری و	قدرمطلق			فر کانس	
	اختلاف	جعفرى	اختلاف	آباكوس	تحقيق مان	طبيعي	
	(درصد)	[33]	(درصد)		حاصر	(Hz)	
	1/30	14/59	1/51	14/62	14/40	اول	
	1/23	26/86	1/33	26/89	26/53	دوم	
	0/48	27/35	3/17	28/06	27/17	سوم	
	0/84	35/54	1/94	35/94	35/24	چهارم	
	با هسته MR	ساندويچى	ع ی برای ورق	ئانسھای طبیہ	مقادیر فرآ	جدول 3	
	ـتلاف (درصد)	قدرمطلق اخ	ىگرى [34]	يق حاضر عس	بعى تحق	فركانس طب	,
	1/8	9	32/87	32/25	5	اول	-
	1/2	26	66/41	65/57	7	دوم	
	1/0	2	66/41	65/73	3	سوم	
	1/2	0	93/28	92/1	6	چهارم	
جدول 4 مقادیر بهینه برای ورق ساندویچی با هسته MR							
د	, اختلاف (درص] قدرمطلق	عسگرى[34	تحقيق حاضر	l	پارامترھ	
	5/00		0/20	0/19	h_{l}	(mm)	
	6/50		2/00	1/87	h_{a}	(mm)	
	6/61		0/484	0/452	I	m(kg)	
	6/53		0/13722	0/12826	۔ مودال	بب استهلاك	ضرب

لایه چینی رویههای بالایی و پایینی به صورت [0,90,0] است و ورق نسبت به صفحهی میانی متقارن میباشد.

در جدول 2 نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با استفاده از تئوری مرتبه بالای بهبودیافتهی ورقهای ساندویچی، با نتایج بدستآمده از مدلسازی در نرمافزار المان محدود آباکوس و همچنین نتایج بدستآمده با استفاده از تئوری مرتبه بالای ورقهای ساندویچی [33]، مقایسه شده است.

در جدول 3 نیز نتایج به دست آمده از این تحقیق برای ورق ساندویچی با هسته MR با استفاده از تئوری مرتبه بالای بهبودیافتهی ورقهای ساندویچی، با نتایج بدستآمده برای ورق ساندویچی با هسته MR با استفاده از تئوری مرتبه بالای ورقهای ساندویچی [34]، در حالتی که شدت میدان مغناطیسی برابر 150 گائوس میباشد، مقایسه شده است.

همچنین در جدول 4 نتایج بهینهسازی به دست آمده از این تحقیق با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک با نتایج بدستآمده از روش هجوم ذرات [34] مقایسه گردیده است.

جدول 2 مطابقت بسیار خوبی را بین نتایج نشان میدهد که این بیانگر اطمینان از صحت معادلات استخراج شده در تحقیق حاضر است. عدم تطبیق کامل به دلیل تفاوت در روش حل است. در روش المان محدود از فرضیات

ساده کنندهی کمتری نسبت به روش تحقیق حاضر در نظر گرفته میشود و در تئوری مرتبه بالای ورقهای ساندویچی، برای رویهها از تئوری کلاسیک ورقهای چند لایه استفاده شده و در آن از کرنشهای قائم و برشی عرضی رویهها صرفنظر شده است. جدول 3 نیز به همین صورت است.

3-2- بهينهسازي ورق ساندويچي انحنادار

در این بخش مشخصات هندسی ورق ساندویچی (ضخامت لایهها و زوایای الیاف) و شدت میدان مغناطیسی برای ورق ساندویچی با رویههای کامپوزیتی و هستهی MR برای بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول (به صورت تک هدفی) و سپس برای بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول و کمینه کردن جرم (به صورت دو هدفی)، برای حالتهای ورق تک انحنایی و دو انحنایی بهینه شدهاند.

مشخصات مکانیکی مواد بهکاررفته در ورق ساندویچی در این قسمت مطابق آنچه است که در جدول 1 آورده شده است.

همان طور که در رابطه (4) نشان داده شد، مدول برشی برای مواد ویسکوالاستیک به صورت مختلط است. رابطه (4) را میتوان به صورت رابطه (11) نیز نوشت:

$$G = G'(1+i\frac{G'}{G'}) \tag{11}$$

که در آن عبارت $\frac{G''}{G}$ برابر با ضریب استهلاک ماده (η) است که با توجه به روابط (5) بر حسب شدت میدان مغناطیسی (B) میباشد لذا بهینه سازی باید در مقداری از شدت میدان مغناطیسی بررسی گردد که در آن ضریب استهلاک ماده استهلاک بیشینه میباشد. شکل 2 نمودار ضریب استهلاک ماده ویسکوالاستیک بر حسب شدت میدان مغناطیسی را نشان میدهد.

از آنجایی که هدف یافتن بیشینه ضریب استهلاک است، با توجه به نمودار بالا، برای بهینهسازی، محدوده بین 0 تا 500 گائوس برای شدت میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده است، که در این محدوده ضریب استهلاک ماده دارای بیشترین مقادیر خود است.

تابع هدف در این تحقیق برای حالت تک هدفی ضریب استهلاک مودال و وزن $(f(X) = \eta_v(X))$ و در حالت دو هدفی، ضریب استهلاک مودال و وزن $(F(X) = \eta_v(X))$ و در حالت دو هدفی، ضریب استهلاک مودال و وزن $(F(X) = (\eta_v(X), m(X)))$ مغناطیسی(B) زوایای الیاف $(B_{13} = \theta_{12} - \theta_{12} = \theta_{12} - \theta_{11} = \theta_{12})$ ، ضخامت لایههای کامپوزیتی (h_t) و ضخامت هسته (h_c) است. ضریب استهلاک مودال تابعی از ضخامت رویهها و هسته، زوایای الیاف و شدت میدان مغناطیسی است. جرم سازه نیز متأثر از ضخامت و چگالی لایهها و هسته است. بنابراین روابط (12) بیان ریاضی متغیرهای طراحی و توابع هدف را نمایش می دهند.



Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04

میتوانند به صورت گسسته بین 90- تا 90+ درجه و با مقدار 5 درجه تغییر کنند. مقادیر شدت میدان مغناطیسی هم میتوانند به صورت گسسته بین 0 تا 500 گائوس با افزایش 10 گائوسی تغییر کنند. بدین ترتیب مسئلهٔ

بهينه سازى و قيدهاى حاكم بر آن به كمك رابطه (13) تعريف مى شود. $Max \ \eta = f(h_l, h_c, \theta_{l_1}, \theta_{l_2}, \theta_{l_3}, B)$ $Min \ m = f(h_l, h_c, \rho_l, \rho_c)$ $6h_l + h_c < 10$ $-6h_l - h_c < -2$ $\theta_{t1} < \frac{\pi}{2}, \ \theta_{t2} < \frac{\pi}{2}, \ \theta_{t3} < \frac{\pi}{2}$ $-\theta_{t1} < -\frac{\pi}{2}, \ -\theta_{t2} < -\frac{\pi}{2}, \ -\theta_{t3} < -\frac{\pi}{2}$ $B < 500, \ -B < 0$ (13)

در این تحقیق برای بهینهسازی به روش الگوریتم ژنتیک، تعداد جمعیت 50. تعداد نسلها 100 و درصد ترکیب فرآیند 70، احتمال تقاطع 6/6 و احتمال جهش 0/05در نظر گرفته شده است.

در ادامه با در نظر گرفتن شرایط فوق، در 4 مسئله بهینهسازی تک هدفی و دو هدفی ورق ساندویچی با حالتهای تک انحنایی و دو انحنایی بررسی شده است.

3-2-1- بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول ورق ساندویچی تک انحنایی با در نظر گرفتن قید جرمی

در این مسئله ورق ساندویچی تک انحنایی متقارن با رویههای کامپوزیتی متشکل از سه لایه با ضخامت برابر h_i و هسته MR با ضخامت h_c جهت بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول با در نظر گرفتن قید جرمی طراحی میشود. حداکثر جرم (m) مجاز ورق هم 500 گرم در نظر گرفته شده است.

حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده و نمودار مقادیر بهینه ضریب استهلاک مودال بر حسب نسلها در شکل 3 نشان داده شده است.

در شکل 3 نقاط دایروی نشان دهنده میانگین ضرایب استهلاک مودال به دست آمده از مقادیر مربوط به تمام جمعیت در هر نسل میباشند و نقاط لوزی شکل نشاندهنده بهترین ضریب استهلاک مودال در هر نسل میباشند. همان گونه که مشاهده میشود از نسل 21 به بعد مقدار بهینه تابع هدف تغییری نکرده و به عبارت دیگر همگرایی آغاز شده و نقاط میانگین و بهترین روی هم منطبق شدهاند و نهایتاً در نسل 51 الگوریتم متوقف شده است.

شکل 4 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل را نشان میدهد که روش خوبی برای اندازه گیری گوناگونی جمعیت است. همان طور که مشاهده می شود در نسل های ابتدایی این فاصله بیشتر بوده و هر چه به نسل های انتهایی نزدیک می شویم، این فاصله کاهش می یابد که این حالت، حالتی مناسب است.

در نهایت مقادیر بهینه برای متغیرها و تابع هدف برای این مسئله در جدول 5 آورده شده است.

3-2-2- بهینهسازی ورق ساندویچی تک انحنایی برای بیشینه ضریب استهلاک مودال و کمینه جرم

در این مسئله هدف به دست آوردن جوابهای بهینه پرتو برای بیشینه ضریب استهلاک مودال و کمینه جرم برای ورق ساندویچی تک انحنایی است. پارامترهای طراحی شامل شدت میدان مغناطیسی، زوایای الیاف، ضخامت لایههای کامپوزیتی و ضخامت هسته در نظر گرفته شده است.

419



شکل 3 نمودار مقادیر بهینه ضریب استهلاک مودال بر حسب نسلها در حالت تک هدفی ورق ساندویچی تک انحنایی



شکل 4 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل در حالت تک هدفی ورق ساندویچی تک انحنایی

جدول 5 مقادیر بهینه پارامترها و تابع هدف برای حالت تک هدفی ورق تک انحنایی

0		C. , , , , , ,
	متغيرها و تابع هدف	مقادير بهينه
	(mm) h_l	0/233
	$(mm) h_c$	0/835
	(deg) $\theta_{t1} = \theta_{b3}$	-15
	(deg) $\theta_{t2} = \theta_{h2}$	45
	(deg) $\theta_{12} = \theta_{11}$	90
	(G) B	320
	(kg) m	0/445
	ضريب استهلاك مودال	0/13105

 $Modal \ loss \ factor = f(h_1, h_c, \theta_{t_1}, \theta_{t_2}, \theta_{t_3}, B)$ $mass = f(h_1, h_c, \rho_1, \rho_c)$ (12)

محدودهی تغییر متغیرهای مربوط به ضخامت (ضخامت کل ورق) به صورت پیوسته بین 2 تا 10 میلیمتر در نظر گرفته شده است. زوایای الیاف هم

.ف برای حالت دو هدفی ورق تک انحنایی) مقادیر بهینه پارامترها و تابع هد	عدول ذ
-------------------------------------	---	--------

متغيرها و تابع هدف	مقادير بهينه
(mm) h_l	0/225
$(mm) h_c$	0/945
(deg) $\theta_{t1} = \theta_{h3}$	75
(deg) $\theta_{i2} = \theta_{i2}$	90
(deg) $\theta_{12} = \theta_{13}$	-60
$(\mathbf{G}) B$	400
(kg) m	0/492
ضريب استهلاك مودال	0/12691

همان طور که در شکل 6 دیده می شود به دلیل بهینه سازی چند هدفی، مجموعهای از نقاط به عنوان جوابهای برتر اتنخاب شده و یک جواب واحد عملاً وجود ندارد. همان طور که دیده می شود جواب های بهینه به صورت مجموعهای از نقاط که یک جبهه را تشکیل میدهند حاصل می شود. جبهه مذکور به نام جبهه پرتو شناخته میشود. در واقع جوابهای حاصله هیچ یک به معنی مطلق بهینه نیستند و بسته به نیاز میتوان یکی از این جوابهای بهینه را انتخاب نمود. ضمناً مقادیر ضریب استهلاک مودال به صورت منفی در نمودار نمایش داده شده که به دلیل روش حل الگوریتم ژنتیک میباشد و برای بدست آوردن مقادیر موردنظر در یک منفی ضرب میشوند.

بهمنظور انتخاب یک نقطهٔ طراحی از بین نقاط جبههٔ پرتو، از روش تاپسیس استفاده شده است [35]. به این ترتیب نقطه شماره 7 به عنوان نقطه طراحي برگزيده شد كه مقادير بهينه متغيرها و تابع هدف در اين نقطه در جدول 6 آورده شده است.

3-2-3- بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول ورق ساندویچی دو انحنایی با در نظر گرفتن قید جرمی

در این مسئله ورق ساندویچی متقارن دو انحنایی با رویه های کامپوزیتی متشکل از سه لايه با ضخامت برابر h_l و هسته MR با ضخامت h_c جهت بيشينه كردن ضريب استهلاك مودال اول با در نظر گرفتن قيد جرمي طراحي مي شود. حداکثر جرم مجاز ورق هم 500 گرم در نظر گرفته شده است.

حل این مسئله نیز توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده و نمودار بهترین مقادیر ضریب استهلاک مودال بر حسب نسل ها در شکل 7 نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل 7 مشاهده می شود از نسل 45 به بعد مقدار بهینهی تابع هدف تغییری نکرده و به عبارت دیگر همگرایی آغاز شده و نقاط ميانگين و بهترين روى هم منطبق شدهاند و نهايتاً در نسل 51 الگوريتم متوقف شده است.

شکل 8 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود در نسلهای ابتدایی این فاصله بیشتر بوده و هر چه به نسلهای انتهایی نزدیک میشویم، این فاصله کاهش مییابد.

در نهایت مقادیر بهینه برای متغیرها و تابع هدف برای این مثال در جدول 7 آورده شده است.

3-2-4- بهینه کردن ورق ساندویچی دو انحنایی برای بیشینه ضریب استهلاک مودال و کمینه جرم

در این مسئله هدف به دست آوردن جوابهای بهینه پرتو برای بیشینه ضریب استهلاک مودال و کمینه جرم برای ورق ساندویچی دو انحنایی است.

پارامترهای طراحی مانند مسائل قبل شامل شدت میدان مغناطیسی، زوایای الیاف، ضخامت لایههای کامپوزیتی و ضخامت هسته است.



شکل 5 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل در حالت دو هدفی ورق ساندویچی تک نحنابي





شکل 7 نمودار بهترین مقادیر ضریب استهلاک مودال بر حسب نسل ها برای حالت تک هدفی ورق ساندویچی دو انحنایی

شکل 5 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود در نسل های ابتدایی این فاصله بیشتر بوده و هر چه به نسلهای انتهایی نزدیک میشویم، این فاصله کاهش مییابد.



شکل 9 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل در حالت دو هدفی ورق ساندویچی دو انحنایی

جدول 7 مقادير بهينه پارامترها و تابع هدف براى حالت تک هدفي ورق دو انحنايي

متغيرها و تابع هدف	مقادير بهينه
(mm) h_l	0/312
$(mm) h_c$	1/689
(deg) $\theta_{t1} = \theta_{b3}$	-75
(deg) $\theta_{i2} = \theta_{i2}$	45
(deg) $\theta_{12} = \theta_{11}$	60
$(\mathbf{G}) B$	50
(kg) m	0/485
ضريب استهلاك مودال	0/166192

شکل 9 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل را نشان میدهد. در این مسئله نیز، همان طور که مشاهده میشود در نسلهای ابتدایی این فاصله بیشتر بوده و هر چه به نسلهای انتهایی نزدیک میشویم، این فاصله کاهش مییابد.

در شکل 10 نیز جبهه پرتو نشان داده شده است. همان طور که قبل گفته شد، مشاهده می شود که جواب های بهینه به صورت مجموعهای از نقاط که یک جبهه را تشکیل می دهند، حاصل می شود. در واقع جواب های حاصله هیچ یک به معنی مطلق بهینه نیستند و بسته به نیاز می توان یکی از این جواب های بهینه را انتخاب نمود.

در این مسئله نیز از روش تاپسیس برای انتخاب یک نقطهٔ طراحی از بین نقاط جبههٔ پرتو، استفاده شده است [35]. بر این اساس نقطه شماره 10 به عنوان نقطه طراحی برگزیده شد که مقادیر بهینه متغیرها و تابع هدف در این نقطه در جدول 8 آورده شده است.



جدول 8 مقادير بهينه پارامترها و تابع هدف براي حالت دو هدفي ورق دو انحنايي

 متغيرها و تابع هدف	مقادير بهينه
 $h_l \pmod{m}$	0/431
$h_c (mm)$	0/963
$\theta_{i1} = \theta_{i3}$ (deg)	-45
$\theta_{12} = \theta_{12}$ (deg)	60
$\theta_{12} = \theta_{12} (\deg)$	90
$B(\mathbf{G})$	310
m(kg)	0/473
ضريب استهلاك مودال	0/175866

با مقایسه جدولهای 6 و 8 مشاهده میشود که در حالت مشابه از لحاظ ابعاد و جرم، ضریب استهلاک مودال در ورق دو انحنایی بیشتر از ورق تک انحنایی است.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق ضخامت لایهی MR، ضخامت رویهها، زوایای الیاف و شدت میدان مغناطیسی به عنوان متغیرهای بهینهسازی در نظر گرفته شده و بیشینه ضریب استهلاک مودال در حالت تک هدفی (با تابع هدف ضریب استهلاک مودال) و بیشینه ضریب استهلاک مودال و کمینه جرم در حالت دو هدفی (با توابع هدف جرم و ضریب استهلاک مودال) برای ورق ساندویچی با رویههای کامپوزیتی و هستهی MR در حالتهای تک انحنایی و دو انحنایی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت تک هدفی مقادیر بهینه محاسبه شده و در حالت چند هدفی جبهه پرتو جوابهای بهینه ارائه گردیده است. در حالت تک هدفی نتایج حاصل نشان از تمایل سازه به داشتن رویههایی نازک و هسته ضخیم دلالت دارد که از نظر فیزیکی هم درست به نظر میرسد چون روغن MR در هسته قرار گرفته و اثر قابل توجهی در افزایش ضریب استهلاک مودال دارد. در حالت دو هدفی جوابهای بهینه به صورت مجموعهای از نقاط که یک جبهه را تشکیل میدهند حاصل می شود. در واقع جواب های حاصله هیچ یک به معنی مطلق بهینه نیستند و بسته به نیاز میتوان یکی از این جوابهای بهینه را انتخاب نمود. در نهایت در حالت دو هدفی به منظور انتخاب یک نقطهٔ طراحی از بین نقاط جبههٔ پرتو، از روش تاپسیس استفاده شده و مشاهده شده است که در حالت مشابه از لحاظ ابعاد و جرم، ضریب استهلاک مودال در ورق دو انحنایی بیشتر از ورق تک انحنایی میباشد.

- [12] H. Zheng, C.Cai, X.M. Tan, Optimization of partial constrained layer dampingtreatment for vibrational energy minimization of vibrating beams. *Comput.Struct*, Vol. 82, pp.2493–2507, 2004.
- [13] J.W. Hutchinson, Z. Xue, Metal sandwich plates optimized for pressure impulses. Int. J. of Mechanical Science, Vol. 47, pp. 545-567, 2005.
- [14] W. Miller, C. Smith, K. Evans, Honeycomb cores with enhanced buckling strength. *Compos Struct*, Vol. 93, pp.1072–1077, 2011.
- [15] N. Le Maout, E. Verron, J. Begue, Simultaneous geometrical and material optimal design of hybrid elastomer/composite sandwich plates, *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 1153–1157, 2011.
- [16] A. Muca, M. Muc-Wierzgon, An evolution strategy in structural optimization problems for plates and shells, *Compos Struct*, Vol. 94, pp. 1461–1470, 2012.
- [17] J. Sliseris, K. Rocens, Optimal design of composite plates with discrete variable stiffness, *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 15-23, 2013.
- [18] A. Khalkhali, N. Narimanzadeh, S. Khakshournia, S. Amiri, Optimal design of sandwich panels using multi-objective genetic algorithm and finite element method, *International Journal of Engineering*, Vol. 27, pp. 395-402, 2013.
- [19] S. K. Nayak, A. K. Singh, A. D. Belegundu, C. F. Yen, Process for design optimization of honeycomb core sandwich panels for blast load mitigation, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 47, pp. 749-763, 2013.
- [20] D. Kalyanmoy, Multi Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, John Wiley and Sons, New York, 2001.
- [21] M.H. Shojaeefard, R. Talebitooti, M. Torabi, R. A, Optimization of power transmission interaction of multilayered panel using genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 27-34, 2014. (In Persian)
- [22] J.M. Whitney, N.J. Pagano, Shear deformation in heterogeneous anisotropic plates, J ApplMech, Vol. 37, pp. 1031–1036, 1970.
- [23] Y. Frostig, O.T. Thomsen, High-order free vibration of sandwich panels with a flexible core, *Int J Solids Struct*, Vol. 41, pp. 1697–1724, 2004.
- [24] M. Rezaei hasanabadi, Optimization of double curved sandwich panels with magneto-rheological fluid layer using improved high order sandwich panel theory, M. Sc. Thesis, Department of Aerospace Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Tehran, 2014. (In Persian)
- [25] J.N. Reddy, Energy and variational methods in applied mechanics, First Edition, New York : John Wiley, 1984.
- [26] A. Keshmiri, A. Ghaheri, F. Taheri-Behrooz, Buckling and vibration of symmetrically-laminated composite elliptical plates restin on Winklertype foundation subjected to initial in-plane stresses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 19-26, 2014. (In Persian)
- [27] F. Sohani, H.R. Eipakchi, A survy on free vibration and buckling of a beam with moderately large deflection using first order shear deformation theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 1-14, 2014. (In Persian)
- [28] J.N. Reddy, Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells, Theory and Analysis, Second Edition, New york : CRC Press, 2004.
- [29] J. N. Reddy, Theory and analysis of elastic plate and shells, Second Edition,Lonon: Taylor & Francis, pp. 547, 2007.
- [30] R. Paknejada, F. Ashenai, K. Malekzadeh Fard, Response of fully-clamped composite laminated plate subjected to low velocity impact using Galerkin method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 50-45, 2014. (In Persian)
- [31] F.mohammadi, R.Sadegheani, Design optimization of viscielastic sandwitch cylindrical sheel considering, 12th Pan-American Congress of applied Mechanics, Port of spain, .2012.
- [32] M. Meunier, R.A. Shenoi, Free vibration analysis of composite sandwich plates ,*ProcImechE Part C. J. Mechanical Engineering Science*, Vol. 213, No. 7, pp. 715–727, 1999.
- [33] H. Biglari, A.A. Jafari, High-order free vibrations of doubly-curved sandwich panels with flexible core based on a refined three-layered theory, *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 2685-3694, 2010.
- [34] M. Asgari, Optimum design of composite sandwich panels with Magneto-Rheological fluid layer using new high order theory, M. Sc. Thesis, Department of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University, Tehran, 2010. (In Persian)
- [35] L. Dymova, P. Sevastjanov, A. Tikhonenko, An approach to generalization of fuzzy TOPSIS method, *Information Sciences*, Vol. 238, pp. 149-162, 2013.

5- فهرست علائم

-	•
a, b	طول و عرض ورق (m)
В	شدت میدان مغناطیسی (G)
G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	مدول برشی (GPa)
h	ضخامت کل ورق (m)
h_t, h_c, h_b	ضخامت رویهی بالایی، هسته و رویهی پایینی (m)
h_l	ضخامت لايه (m)
K,U	انرژی جنبشی و پتانسیل (J)
т	جرم (kg)
$R_{\it jt}$, $R_{\it jb}$, $R_{\it jc}$	شعاع انحنای صفحه میانی رویه بالایی، رویه پایینی و هسته
	(m) (j = x, y)
u_c, v_c, w_c	اجزاى جابجايى هسته
u_0^i, v_0^i, w_0^i	اجزای جابجایی رویهها (i = t, b)
علائم يونانى	
η	ضريب استهلاك
$\eta_{\mathbf{v}}$	ضريب استهلاك مودال
$\theta_{_{t1}}$, $\theta_{_{t2}}$, $\theta_{_{t3}}$	زوایای الیاف اول، دوم و سوم رویه بالایی (درجه)
$\theta_{\scriptscriptstyle b1}$, $\theta_{\scriptscriptstyle b2}$, $\theta_{\scriptscriptstyle b3}$	زوایای الیاف اول، دوم و سوم رویه پایینی (درجه)
n_{12}, n_{21}	ضرايب پواسون
ρ	حگالی (kgm ⁻³)

- م چگالی (kgm⁻³)) س فرکانس طبیعی (Hz) پ پ چرخش صفحه میانی حول *x*
- پ *ψ* چرخش صفحه میانی حول y

6- مراجع

- M. Mohammadian, A. Fereidoon, Multi objective optimization of sandwich panels using partical swarm algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 74-82, 2014. (In Persian)
- [2] A. Fereidoon, H. Hemmatian, A. Mohammadzadeh, E. Assareh, Sandwich panel optimization based on yielding and buckling criteria by using of imperialist competitive algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 25-35, 2013. (In Persian)
- [3] A. Fereidoon, M. Mohammadian, H. Hemmatian, Reliability based optimization of a prismatic core sandwich panel, *Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 89 - 102, 2011. (In Persian)
- [4] S. Sadat Fattahi, A. Zabihollah, Vibration of laminated composite structures integrated with magnetorheological fluid segments, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 156-160, 2013. (In Persian)
- [5] Vasudevan Rajamohan, Subhash Rakheja, Ramin Sedaghati. Vibration analysis of a partially treated multi-layer beam with magnetorheological fluid, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 3451–3469, 2010.
- [6] Vasudevan Rajamohan, Ramin Sedaghati, Subhash Rakheja. Optimum design of a multilayer beam partially treated with magnetorheological fluid, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 58-73, 2010.
- [7] E. Viola, F. Tornabene, N. Fantuzzi, General higher-order shear deformation theories for the free vibration analysis of completely doublycurved laminated shells and panels, *Composite Structures*, Vol. 95, 639-666, 2013.
- [8] S.N. Huang, D.W. Alspaugh, Minimum weight sandwich beam design, AIAA Journal, Vol.12, No.12, pp.1617-1618. 1974.
- [9] L.A. Schmit, B. Farshi, Optimum Design of Laminated Fiber Composite Plates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.11, No. 4, pp. 623-640, 1977.
- [10] M. Di Sciuva, M. Gherlone, D. Lomario, Multiconstrained optimization of laminated and sandwich plates using evolutionary algorithms and higher-order plate theories. *Comp. Struct.*, Vol. 59, pp.149-154, 2003.
- [11] V. Correia, C. Soares, Buckling optimization of composite laminated adaptive structures. *Comp. Struct.*, Vol. 62, pp. 315-321, 2003.