



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

کرامت ملک‌زاده فرد<sup>1\*</sup>، محسن رضائی حسن‌آبادی<sup>2</sup>، مصطفی لیوانی<sup>3</sup>

1- دانشیار، 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  
 \* kmalekzadeh@mut.ac.ir, 13445768

### چکیده

در این تحقیق بهینه‌سازی تک هدفی و چند هدفی ورق ساندویچی انحنا دار با رویه‌های کامپوزیتی و هسته‌ی روغن اثرپذیر مغناطیسی 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 انجام شده است. ورق ساندویچی مورد بررسی در این تحقیق به صورت انحنا دار 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 و اصل همپلتون استفاده 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 مقادیر بهینه محاسبه شده و نتایج حاصل نشان از تمایل سازه به داشتن رویه‌هایی 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 افزایش ضریب استهلاک مودال دارد. در حالت دو هدفی جواب‌های بهینه به صورت مجموعه‌ای از نقاط که یک جبهه پرتو را تشکیل می‌دهند حاصل شده است. در نهایت برای اولین بار در این زمینه، نقطه‌ای بر اساس روش تاپسیس از بین مجموعه نقاط بهینه انتخاب شده‌اند 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 است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 22 اردیبهشت 1393  
 پذیرش: 15 مرداد 1393  
 ارائه در سایت: 06 آبان 1393  
 کلید واژگان:  
 بهینه‌سازی  
 ورق ساندویچی  
 روغن اثرپذیر مغناطیسی  
 تئوری مرتبه بالای بهبود یافته‌ی ورق‌های ساندویچی  
 الگوریتم ژنتیک

## 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

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

### ABSTRACT

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 single-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،۳].  
 یک سازه ساندویچی اعم از تیر یا ورق، متشکل از دو رویه‌ی<sup>1</sup> نازک و

ورق‌های ساندویچی سازه‌های مهم و نوینی هستند که به دلیل ساختار منحصر به فرد، 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].

1- Sheet

Please cite this article using:

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)

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)

تئوری مرتبه بالا توسط اسکویا 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 کامپوزیتی ساندویچی صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به تحقیق میلر و همکاران [14] اشاره کرد. در این تحقیق به بهینه‌سازی هسته لانه زنبوری صفحات ساندویچی برای افزایش بار کمناشی پرداخته شده است. لیما 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 ویزراگ [16] بهینه‌سازی ضخامت ورق‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند و اسلیسرز 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 تجاری انسیس<sup>4</sup> ایجاد شده که برای محاسبه انحراف ورق در شرایط مختلف به کار می‌رود. 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 اتحادار 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 اتحادار 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 اتحادار 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 حین فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. از آنجا که در این تحقیق، متغیرهای بهینه‌سازی از نوع گسسته و پیوسته می‌باشند، بنابراین الگوریتم ژنتیک، به عنوان یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌هایی که به خوبی می‌تواند 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

مستحکم است که یک هسته‌ی<sup>1</sup> 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 زنبوری<sup>2</sup> ساخته می‌شوند.

روغن‌هایی که خواصشان با تغییر میدان مغناطیسی، تغییر می‌کند، روغن اثرپذیر مغناطیسی<sup>3</sup> نامیده می‌شوند. این مواد با پاسخ زمانی سریعی که از خود نشان می‌دهند، در حد میلی‌ثانیه، 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 [5,6] 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 MR جزئی را برای ماکزیمم کردن 5 ضریب استهلاک مودال اول تیر به طور 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 دویعدی ارتعاش پوسته با استفاده از روش مربع سازی دیفرانسیلی تعمیم یافته به صورت عددی حل شده‌اند.

بهینه‌سازی یک فعالیت مهم و تعیین‌کننده 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 پرقاب‌ت 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.

ابتدایی‌ترین تحقیقات در زمینه‌ی بهینه‌سازی ورق‌های ساندویچی در سال‌های میانی دهه 70 میلادی انجام گرفت. در سال 1974 مطالعه بر روی بهینه‌سازی وزن تیرهای ساندویچی توسط هوانگ و آل‌سپائو [8] صورت گرفت. سپس فارشی و اشمیت [9] بر روی طراحی بهینه‌ی صفحات کامپوزیتی به وسیله‌ی یک روش عددی پیچیده کارکردند. در این تحقیق ضخامت صفحه‌ی کامپوزیتی 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 کمناش و ضخامت با استفاده از

1- Core  
2- Honeycomb  
3- Magneto-Rheological (MR)

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:

$$\begin{aligned} u_c(z = z_{ci}) &= u_0^i + \frac{1}{2}(-1)^k h \psi_x^i \\ v_c(z = z_{ci}) &= v_0^i + \frac{1}{2}(-1)^k h \psi_y^i ; i = t \rightarrow k = 1 ; z_{ci} = \frac{h_c}{2} \\ w_c(z = z_{ci}) &= w_0^i ; i = b \rightarrow k = 0 ; z_{cb} = -\frac{h_c}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

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 [5,6] 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:

$$G = G' + iG'' \quad (4)$$

که  $G'$  و  $G''$  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: [5,6]

$$\begin{aligned} G' &= -3.3691B^2 + 4.9975 \times 10^3 B + 0.873 \times 10^6 ; \\ G'' &= -0.9B^2 + 0.8124 \times 10^3 B + 0.1855 \times 10^6 \end{aligned} \quad (5)$$

سپس برای به دست آوردن معادلات حاکم بر حرکت سیستم [24] از اصل همیلتون [25] استفاده شده است که طبق رابطه (6) بیان می‌کند:

$$\int_0^T \delta L dt = \int_0^T (\delta K - \delta U + \delta W_{ext}) dt = 0 \quad (6)$$

که در آن  $\delta K$  نشان‌دهنده‌ی تغییرات انرژی جنبشی سیستم،  $\delta U$  نشان‌دهنده‌ی تغییرات انرژی پتانسیل سیستم و  $\delta W_{ext}$  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 می‌آیند. [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]

$$\begin{bmatrix} u_k^j(x, y, t) \\ v_k^j(x, y, t) \\ w_k^j(x, y, t) \\ \psi_x^j(x, y, t) \\ \psi_y^j(x, y, t) \\ u_k^c(x, y, t) \\ v_k^c(x, y, t) \\ w_k^c(x, y, t) \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \begin{bmatrix} U_{0mn}^j(t) \cos(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) \\ V_{0mn}^j(t) \sin(\alpha_m x) \cos(\beta_n y) \\ W_{0mn}^j(t) \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) \\ \Psi_{xmn}^j(t) \cos(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) \\ \Psi_{ymn}^j(t) \sin(\alpha_m x) \cos(\beta_n y) \\ U_{kmn}^c(t) \cos(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) \\ V_{kmn}^c(t) \sin(\alpha_m x) \cos(\beta_n y) \\ W_{0mn}^c(t) \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) \end{bmatrix} \quad (k=0,1), (j=t,b) \quad (7)$$

با دستبندی غیر برتر-2 [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 پرتو<sup>2</sup> 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 بهینه‌سازی به طراح قدرت انتخاب می‌دهد که در شرایط مختلف، متناسب با نیاز بهترین پل را برگزیند در نهایت برای اولین بار در این زمینه، نقاطی بر اساس روش تاپسیس از بین مجموعه نقاط بهینه انتخاب شده‌اند [21].

## 2- روابط ساختاری

### 1-2- 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 برشی [22] و برای هسته، عبارت چندجمله‌ای جابجایی‌ها که بر پایه‌ی جابجایی‌های مدل دوم فروستگ<sup>4</sup> 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  $u, v, w$  رویه‌ها در جهت‌های  $x, y, z$  با فرض جابجایی‌های خطی کوچک به صورت روابط (1) می‌باشند:

$$\begin{aligned} u_i(x, z, y, T) &= u_0^i(x, y, T) + z_i \psi_x^i(x, y, T) \\ v_i(x, z, y, T) &= v_0^i(x, y, T) + z_i \psi_y^i(x, y, T) \\ w_i(x, z, y, T) &= w_0^i(x, y, T) ; (i=t, b) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $T$  بیانگر زمان،  $\psi_x^i$  و  $\psi_y^i$  ( $i=t, b$ ) مؤلفه‌های چرخش نرمال متقاطع حول محورهای  $x$  و  $y$  صفحات میانی رویه‌های بالایی و پایینی،  $u_0^i, v_0^i, w_0^i$  ( $i=t, b$ ) جابجایی‌های  $x$  و  $y$  و تغییر شکل عمودی رویه‌های بالایی و پایینی و  $z_i$  ( $i=t, b$ )، مختصه عمودی هر یک از رویه‌ها که از صفحه میانی هر کدام از رویه‌ها اندازه‌گیری می‌شود، می‌باشند.

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

$$\begin{cases} u_c(x, y, z, T) = (1 + \frac{z}{R_{xc}}) u_0^c(x, y, T) + z_c u_1^c(x, y, T) \\ \quad + z_c^2 u_2^c(x, y, T) + z_c^3 u_3^c(x, y, T) \\ v_c(x, y, z, T) = (1 + \frac{z}{R_{yc}}) v_0^c(x, y, T) + z_c v_1^c(x, y, T) \\ \quad + z_c^2 v_2^c(x, y, T) + z_c^3 v_3^c(x, y, T) \\ w_c(x, y, z, T) = w_0^c(x, y, T) + z_c w_1^c(x, y, T) \\ \quad + z_c^2 w_2^c(x, y, T) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن  $u_k^c$  و  $v_k^c$  ( $k=0,1,2,3$ ) مجهولات جابجایی‌های درون صفحه‌ای هسته و  $w_k^c$  ( $k=0,1,2$ ) 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 ایده‌آل 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

1- Non-dominated Sorting genetic algorithm - II  
2- Pareto  
3- FSDT  
4- Frostig

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

**تعریف 2** (مسئله عمومی بهبودسازی چند هدفی): یک مسئله عمومی بهبودسازی چند هدفی برای مینیمم (ماکزیمم) کردن تابع برداری  $F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X))$  مشروط به قیود  $g_j(X) \leq 0$ ،  $h_j(X) = 0$  و  $i = \{1, \dots, m\}$ ،  $j = \{1, \dots, p\}$ ،  $X \in \Omega$  تعریف می‌شود. یک مسئله بهبودسازی چند هدفی مؤلفه‌های بردار  $F(X)$  را مینیمم (ماکزیمم) می‌کند، به نحوی که  $X$  بردار  $n$  بعدی متغیرهای تصمیم‌گیری  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  از فضای  $\Omega$  باشد. همچنین اشاره شد که  $g_j(X) \leq 0$  و  $h_j(X) = 0$  نشان‌دهنده قیود مسئله می‌باشند که باید هنگامی که  $F(X)$  مینیمم (ماکزیمم) می‌شود، برآورده شوند.  $\Omega$  شامل تمامی بردارهای ممکن  $X$  است که می‌تواند برای محاسبه  $F(X)$  مورد استفاده قرار گیرد.

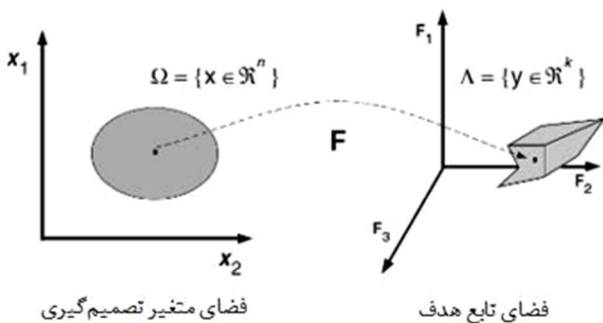
بنابراین، بهبودسازی چند هدفی شامل  $k$  هدف، که به شکل  $k$  تابع هدف منعکس می‌شوند،  $m+p$  قید روی توابع هدف و  $n$  متغیر تصمیم‌گیری است.  $k$  تابع هدف می‌توانند خطی، غیرخطی، پیوسته و یا گسسته باشند. بردار  $F: \Omega \rightarrow \Lambda$ ، یک نگاشت از مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  به بردارهای  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$  است. بردار متغیرهای تصمیم‌گیری  $X$  نیز می‌تواند پیوسته یا گسسته باشد. شکل 1 نگاشت مسئله بهبودسازی چند هدفی را نشان می‌دهد.

حل  $X \in \Omega$ ، بهینه پرتو نامیده می‌شود اگر و تنها اگر هیچ  $X' \in \Omega$  وجود نداشته باشد که برای آن بردار  $v = F(X') = (f_1(X'), \dots, f_k(X'))$  بر بردار  $u = F(X) = (f_1(X), \dots, f_k(X))$  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 می‌گذارند به عنوان مجموعه جواب نهایی پذیرفته می‌شوند. هر کدام از جواب‌های این مجموعه می‌تواند پاسخ بهینه‌ای برای توابع هدف باشد و انتخاب یک جواب از میان مجموعه پاسخ‌های بهینه به یک فرآیند تصمیم‌سازی نیاز خواهد داشت.

### 3- نتایج و تشریح

#### 3-1- اعتبارسنجی 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.



شکل 1 نگاشت مسئله بهبودسازی چند هدفی

در رابطه (7)  $W_{mn}^c, V_{km}^c, U_{kmn}^c, \Psi_{ymn}^j, \Psi_{ymn}^j, W_{0mn}^j, V_{0mn}^j, U_{0mn}^j$  ضرایب فوری هستند که مجهولات رابطه و وابسته به زمان می‌باشند.  $\alpha_m$  عبارت است از  $\alpha_m = \frac{m\pi}{a}$  و  $\beta_n$  عبارت است از  $\beta_n = \frac{n\pi}{b}$  و  $n$  و  $m$  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:

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

$$\{c\} = \{U_{0mn}^t(t), U_{0mn}^b(t), V_{0mn}^t(t), V_{0mn}^b(t), W_{0mn}^t(t), \dots, W_{0mn}^b(t), \Psi_{xmn}^t(t), \Psi_{xmn}^b(t), \Psi_{ymn}^t(t), \Psi_{ymn}^b(t), \dots, U_{0mn}^c(t), V_{0mn}^c(t), U_{1mn}^c(t), V_{1mn}^c(t), W_{0mn}^c(t)\}^T \quad (8)$$

بنابراین مسئله ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی اتحادار با تکیه‌گاه ساده، به معادلات استاندارد پاسخ سازه‌ای تبدیل می‌شود.  $[K]$  ماتریس سختی 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:

$$\det\{[K] - \bar{\omega}^2[M]\} = 0 \quad (9)$$

$\bar{\omega}$  به دست آمده از رابطه (9) به صورت یک عدد مختلط است که از آن می‌توان فرکانس‌های طبیعی سیستم،  $\omega$ ، و ضرایب استهلاک مودال سیستم،  $\eta_v$ ، برای مدهای مختلف ارتعاشی را از روابط (10) محاسبه کرد: [5,6]

$$\omega = \sqrt{\text{Re}(\bar{\omega}^2)}, \quad \eta_v = \frac{\text{Im}(\bar{\omega}^2)}{\text{Re}(\bar{\omega}^2)} \quad (10)$$

#### 2-2- بهبودسازی به الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی عمومی از روش‌های فرا ابتکاری برای بهبودسازی گسسته است که مسائل جدول زمانبندی را حل می‌نماید. این روش در سال 1975 به وسیله هولند و در سال 1989 توسط گولدربرگ 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 بهبودسازی تک هدفی و چند هدفی را به صورت زیر بیان نمود:

**تعریف 1:** یک مسئله عمومی بهبودسازی تک هدفی به نحوی تعریف می‌شود که تابع  $f(X)$  مینیمم (ماکزیمم) شود در صورتی که قیود  $g_j(X) \leq 0$ ،  $h_j(X) = 0$  و  $i = \{1, \dots, m\}$ ،  $j = \{1, \dots, p\}$ ،  $X \in \Omega$  برقرار باشند. یک حل، تابع اسکالر  $f(X)$  را مینیمم (ماکزیمم) می‌کند، هنگامی که  $X$  بردار  $n$  بعدی متغیر تصمیم‌گیری  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  از فضای  $\Omega$  است.

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

ساده‌کننده‌ی 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 صرف نظر شده است. جدول 3 نیز به همین صورت است.

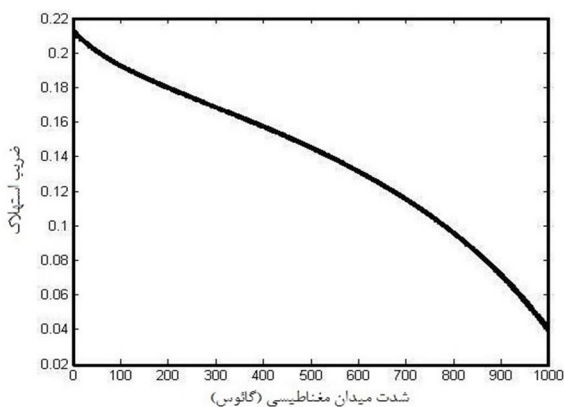
### 3-2- بهینه‌سازی ورق ساندویچی اتحادار

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 به کاررفته 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:

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

که در آن عبارت  $\frac{G''}{G'}$  برابر با ضریب استهلاک ماده ( $\eta$ ) است که با توجه به روابط (5) بر حسب شدت میدان مغناطیسی ( $B$ ) می‌باشد لذا بهینه‌سازی باید در مقداری از شدت میدان مغناطیسی بررسی گردد که در آن ضریب 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 ( $f(X) = \eta_v(X)$ ) و در حالت دو هدفی، ضریب استهلاک مودال و وزن ( $F(X) = (\eta_v(X), m(X))$ ) است. پارامترهای طراحی شامل شدت میدان مغناطیسی ( $B$ ) زوایای الیاف ( $\theta_{13} = \theta_{b1}, \theta_{12} = \theta_{b2}, \theta_{11} = \theta_{b3}$ )، ضخامت لایه‌های کامپوزیتی ( $h_l$ ) 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 می‌دهند.



شکل 2 نمودار ضریب استهلاک ماده بر حسب شدت میدان مغناطیسی

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

مشخصات مکانیکی هسته	مشخصات مکانیکی رویه‌ها	مشخصات هندسی
$E_1 = 24/51 \text{ GPa}$		
$E_2 = E_3 = 7/77 \text{ GPa}$		
$G_{12} = G_{13} = 3/34 \text{ GPa}$		
$G_{23} = 1/34 \text{ GPa}$	$\rho = 3500 \text{ kg/m}^3$	
$\nu_{12} = \nu_{13} = 0/078$	$G_{13} = G_{23} = G' + iG''$	
$\nu_{23} = 0/49$		
$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$		

جدول 2 مقادیر فرکانس‌های طبیعی برای ورق ساندویچی دو انحنایی

فرکانس طبیعی (Hz)	تحقیق حاضر	آباکوس	قدرمطلق اختلاف (درصد)	بیگری و جعفری [33]	قدرمطلق اختلاف (درصد)
اول	14/40	14/62	1/51	14/59	1/30
دوم	26/53	26/89	1/33	26/86	1/23
سوم	27/17	28/06	3/17	27/35	0/48
چهارم	35/24	35/94	1/94	35/54	0/84

جدول 3 مقادیر فرکانس‌های طبیعی برای ورق ساندویچی با هسته MR

فرکانس طبیعی	تحقیق حاضر	عسگری [34]	قدرمطلق اختلاف (درصد)
اول	32/25	32/87	1/89
دوم	65/57	66/41	1/26
سوم	65/73	66/41	1/02
چهارم	92/16	93/28	1/20

جدول 4 مقادیر بهینه برای ورق ساندویچی با هسته MR

پارامترها	تحقیق حاضر	عسگری [34]	قدرمطلق اختلاف (درصد)
$h_l$ (mm)	0/19	0/20	5/00
$h_c$ (mm)	1/87	2/00	6/50
$m$ (kg)	0/452	0/484	6/61
ضریب استهلاک مودال	0/12826	0/13722	6/53

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

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 مسئله بهینه‌سازی و قیدهای حاکم بر آن به کمک رابطه (13) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Max } \eta &= f(h_1, h_c, \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, B) \\ \text{Min } m &= f(h_1, h_c, \rho_1, \rho_c) \\ 6h_1 + h_c &< 10 \\ -6h_1 - h_c &< -2 \\ \theta_{11} &< \frac{\pi}{2}, \theta_{12} < \frac{\pi}{2}, \theta_{13} < \frac{\pi}{2} \\ -\theta_{11} &< -\frac{\pi}{2}, -\theta_{12} < -\frac{\pi}{2}, -\theta_{13} < -\frac{\pi}{2} \\ B &< 500, -B < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

در این تحقیق برای بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، تعداد جمعیت 50، تعداد نسل‌ها 100 و درصد ترکیب فرآیند 70، احتمال تقاطع 0/6 و احتمال جهش 0/05 در 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  $h_1$  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.

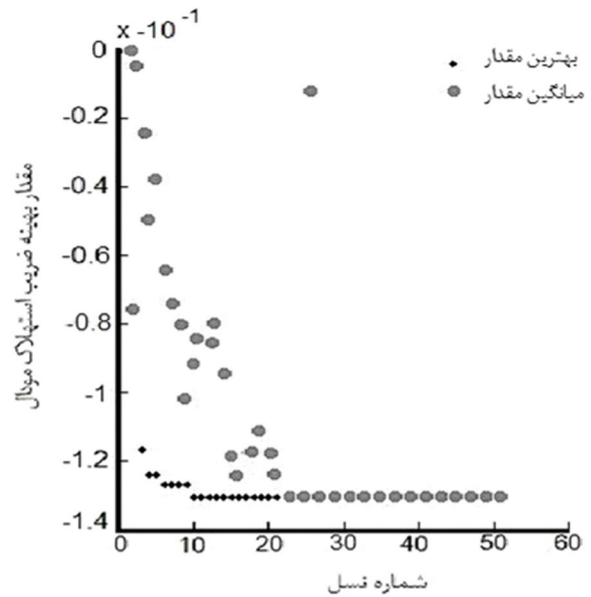
حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده و نمودار مقادیر بهینه ضریب استهلاک مودال بر حسب نسل‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. در شکل 3 نقاط دایروی نشان دهنده میانگین ضرایب استهلاک مودال به دست آمده از مقادیر مربوط به تمام جمعیت در هر نسل می‌باشند و نقاط لوزی شکل نشان‌دهنده بهترین ضریب استهلاک مودال در هر نسل می‌باشند. همان‌گونه 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 اندازه‌گیری گوناگونی جمعیت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نسل‌های ابتدایی این فاصله بیشتر بوده و هر چه به نسل‌های انتهایی نزدیک می‌شویم، این فاصله کاهش می‌یابد که این حالت، حالتی مناسب است.

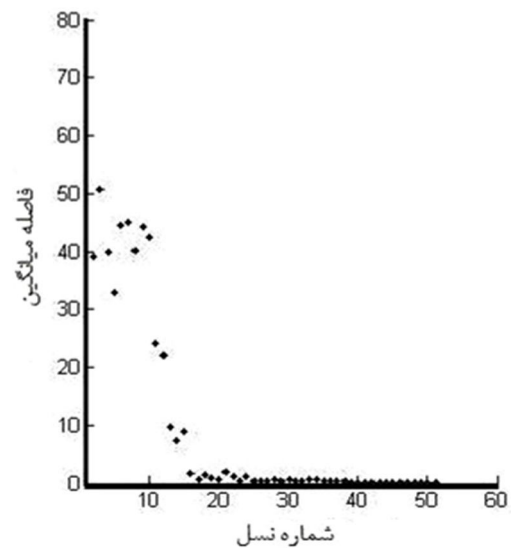
در نهایت مقادیر بهینه برای متغیرها و تابع هدف برای این مسئله در جدول 5 آورده شده است.

### 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.



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

متغیرها و تابع هدف	مقادیر بهینه
$h_1$ (mm)	0/233
$h_c$ (mm)	0/835
$\theta_{11} = \theta_{b3}$ (deg)	-15
$\theta_{12} = \theta_{b2}$ (deg)	45
$\theta_{13} = \theta_{b1}$ (deg)	90
$B$ (G)	320
$m$ (kg)	0/445
ضریب استهلاک مودال	0/13105

$$\begin{aligned} \text{Modal loss factor} &= f(h_1, h_c, \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, B) \\ \text{mass} &= f(h_1, h_c, \rho_1, \rho_c) \end{aligned} \quad (12)$$

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



جدول 6 مقادیر بهینه پارامترها و تابع هدف برای حالت دو هدفی ورق تک انحنایی

متغیرها و تابع هدف	مقادیر بهینه
(mm) $h_l$	0/225
(mm) $h_c$	0/945
(deg) $\theta_{r1} = \theta_{b3}$	75
(deg) $\theta_{r2} = \theta_{b2}$	90
(deg) $\theta_{r3} = \theta_{b1}$	-60
(G) $B$	400
(kg) $m$	0/492
ضریب استهلاک مودال	0/12691

همان طور که در شکل 6 دیده می‌شود به دلیل بهینه‌سازی چند هدفی، مجموعه‌ای از نقاط به عنوان جواب‌های برتر انتخاب شده و یک جواب واحد عملاً وجود ندارد. همان طور که دیده می‌شود جواب‌های بهینه به صورت مجموعه‌ای از نقاط که یک جبهه را تشکیل می‌دهند حاصل می‌شود. 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. به منظور انتخاب یک نقطه طراحی از بین نقاط جبهه پرتو، از روش تاپسیس استفاده شده است [35]. به این ترتیب نقطه شماره 7 به عنوان نقطه طراحی برگزیده شد که مقادیر بهینه متغیرها و تابع هدف در این نقطه در جدول 6 آورده شده است.

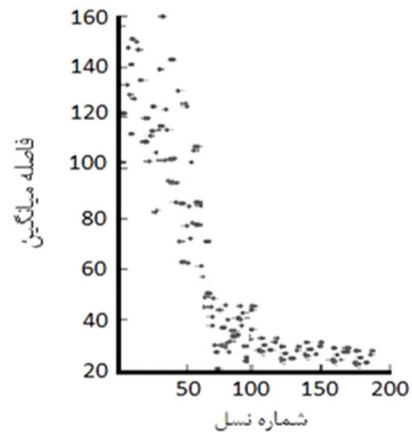
### 3-2-3- بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول ورق ساندویچی دو انحنایی با در نظر گرفتن قید جرمی

در این مسئله ورق ساندویچی متقارن دو انحنایی با رویه‌های کامپوزیتی متشکل از سه لایه با ضخامت برابر  $h_l$  و هسته MR با ضخامت  $h_c$  جهت بیشینه کردن ضریب استهلاک مودال اول با در نظر گرفتن قید جرمی طراحی می‌شود. 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 نسل‌ها در شکل 7 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود از نسل 45 به بعد مقدار بهینه‌ی 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.

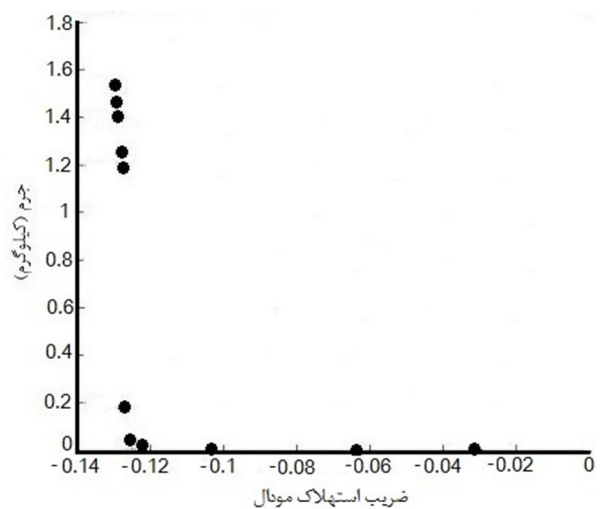
شکل 8 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در نسل‌های ابتدایی این فاصله بیشتر بوده و هر چه به نسل‌های انتهایی نزدیک می‌شویم، این فاصله کاهش می‌یابد. در نهایت مقادیر بهینه برای متغیرها و تابع هدف برای این مثال در جدول 7 آورده شده است.

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

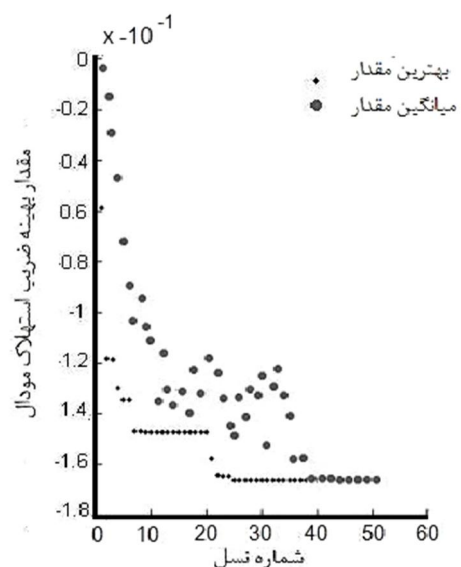
در این مسئله هدف به دست آوردن جواب‌های بهینه پرتو برای بیشینه ضریب استهلاک مودال و کمینه جرم برای ورق ساندویچی دو انحنایی است. پارامترهای طراحی مانند مسائل قبل شامل شدت میدان مغناطیسی، زوایای ایلف، ضخامت لایه‌های کامپوزیتی و ضخامت هسته است.



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

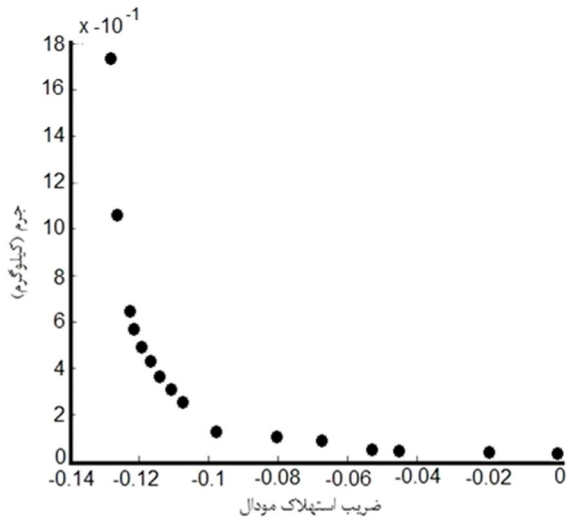


شکل 6 جبهه پرتو برای حالت دو هدفی ورق ساندویچی تک انحنایی



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

شکل 5 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.



شکل 10 جبهه پرتو برای حالت دو هدفی ورق ساندویچی دو انحنایی

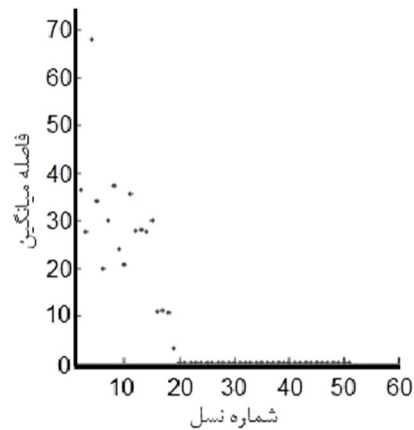
جدول 8 مقادیر بهینه پارامترها و تابع هدف برای حالت دو هدفی ورق دو انحنایی

مقادیر بهینه	متغیرها و تابع هدف
0/431	$h_l$ (mm)
0/963	$h_c$ (mm)
-45	$\theta_{r1} = \theta_{b3}$ (deg)
60	$\theta_{r2} = \theta_{b2}$ (deg)
90	$\theta_{r3} = \theta_{b1}$ (deg)
310	$B$ (G)
0/473	$m$ (kg)
0/175866	ضریب استهلاک مودال

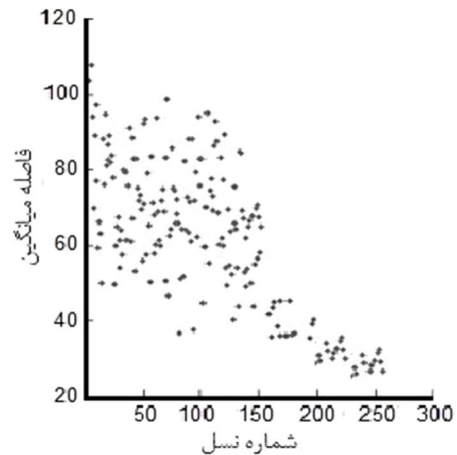
با مقایسه جدول‌های 6 و 8 مشاهده می‌شود که در حالت مشابه از لحاظ ابعاد و جرم، ضریب استهلاک مودال در ورق دو انحنایی بیشتر از ورق تک انحنایی است.

#### 4- نتیجه‌گیری

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 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. در نهایت در حالت دو هدفی به منظور انتخاب یک نقطه طراحی از بین نقاط جبهه 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.



شکل 8 فاصله میانگین بین افراد در هر نسل در حالت تک هدفی ورق ساندویچی دو انحنایی



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

جدول 7 مقادیر بهینه پارامترها و تابع هدف برای حالت تک هدفی ورق دو انحنایی

مقادیر بهینه	متغیرها و تابع هدف
0/312	$h_l$ (mm)
1/689	$h_c$ (mm)
-75	$\theta_{r1} = \theta_{b3}$ (deg)
45	$\theta_{r2} = \theta_{b2}$ (deg)
60	$\theta_{r3} = \theta_{b1}$ (deg)
50	$B$ (G)
0/485	$m$ (kg)
0/166192	ضریب استهلاک مودال

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 می‌شود که جواب‌های بهینه به صورت مجموعه‌ای از نقاط که یک جبهه را تشکیل می‌دهند، حاصل 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.

در این مسئله نیز از روش تاپسیس برای انتخاب یک نقطه طراحی از بین نقاط جبهه 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.



## 5- فهرست علائم

$a, b$	طول و عرض ورق (m)
$B$	شدت میدان مغناطیسی (G)
$G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$	مدول برشی (GPa)
$h$	ضخامت کل ورق (m)
$h_i, h_c, h_b$	ضخامت رویه‌ی بالایی، هسته و رویه‌ی پایینی (m)
$h_f$	ضخامت لایه (m)
$K, U$	انرژی جنبشی و پتانسیل (J)
$m$	جرم (kg)
$R_{j1}, R_{j2}, R_{j3}$	شعاع انحناى صفحه میانی رویه بالایی، رویه پایینی و هسته (m) ( $j = x, y$ )
$u_c, v_c, w_c$	اجزای جابجایی هسته
$u_0^i, v_0^i, w_0^i$	اجزای جابجایی رویه‌ها ( $i = t, b$ )

## علائم یونانی

$\eta$	ضریب استهلاک
$\eta_v$	ضریب استهلاک مودال
$\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}$	زوایای الیاف اول، دوم و سوم رویه بالایی (درجه)
$\theta_{b1}, \theta_{b2}, \theta_{b3}$	زوایای الیاف اول، دوم و سوم رویه پایینی (درجه)
$\eta_{12}, \eta_{21}$	ضرایب پواسون
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\omega$	فرکانس طبیعی (Hz)
$\psi_x$	چرخش صفحه میانی حول X
$\psi_y$	چرخش صفحه میانی حول Y

## 6- مراجع

- [12] H. Zheng, C.Cai, X.M. Tan, Optimization of partial constrained layer damping treatment 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 Winkler-type 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 survey 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, London: 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 viscoelastic sandwich cylindrical shell 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. *ProclmechE 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.
- [1] M. Mohammadian, A. Fereidoon, Multi objective optimization of sandwich panels using partial 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 doubly-curved 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.