

# بهینه‌سازی پانل ساندویچی هسته منشوری به وسیله الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته

ملکزاده فرد<sup>۱</sup>، لیوانی، مصطفی<sup>۲\*</sup>

۱- استاد مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- هیئت علمی دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۳)

## چکیده

در این پژوهش به طور جداگانه به بررسی بهینه‌سازی وزن پانل ساندویچی هسته منشوری تحت بارگذاری عرضی و طولی پرداخته شده است. برای حل مسائل بهینه‌سازی متناظر با بارگذاری‌های مذکور، از الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته مبتنی بر روش مدیریت قیود چندهدفه استفاده شده است. قیود مسئله‌ها بار کماتشی و تنش تسلیم هستند. با مقایسه نتایج الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته با نتایج بدست آمده بوسیله الگوریتم‌های تکاملی دیگر مبتنی بر روش تابع جریمه در مطالعات قبلی مشاهده می‌شود که در بارگذاری عرضی نتایج بدست آمده در این مطالعه مشابه با نتایج کارهای قبلی است، اما در بارگذاری طولی نتایج الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته بهتر می‌باشد. علاوه بر نتایج بهتر و آسانی کاربرد آن، مزیت دیگر الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته عدم نیاز به فرآیند آزمون و خطا برای تنظیم پارامترهای تابع جریمه است. مشاهده می‌شود که در هر دو نوع بارگذاری با افزایش شاخص بار مقادیر ارتفاع پانل، ضخامت هسته و رویه بعلاوه مقدار شاخص وزن افزایش می‌یابند تا از تسلیم و کماتش پانل جلوگیری شود؛ اما در یک مقدار ثابت شاخص بار با افزایش تعداد موج‌های هسته، شاخص وزن در بارگذاری عرضی رفتاری کاهنده و در بارگذاری طولی رفتاری افزایشی دارد. با این حال، ضخامت رویه و هسته رفتاری کاهنده و ارتفاع پانل رفتار افزایشی دارند.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی مقید، پانل ساندویچی هسته منشوری، الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته، بارگذاری طولی، بارگذاری عرضی.

## Optimization of the prismatic core sandwich panel by using the Improved Constrained Differential Evolution algorithm

Keramat Malekzadeh fard, Mostafa Livani

### Abstract

In this study, weight optimization of the prismatic core sandwich panel under the transverse and longitudinal loadings has been independently investigated. To solve the optimization problems corresponding to the mentioned loadings, the Improved Constrained Differential Evolution (ICDE) algorithm based on the multi-objective constraint handling method has been used. The constraints of the problems are buckling load and yield stress. By comparing the results of the ICDE with those obtained by the other evolutionary algorithms based on the penalty function method in the previous studies, it can be seen that the results of the transverse loading obtained in this study are equal to those of the previous works, but the results of the ICDE in the longitudinal loading are better. In addition to its better results and ease of Implementation, another advantage of ICDE is that there is no need to the process of trial and error to fine tuning of the penalty function parameters. It can be observed that for the both types of loading, values of the panel height, the thicknesses of the face and core in addition to the weight index are increased by increasing the load index to avoid yielding and buckling of the panel. But in a constant value of the load index, by increasing the core corrugate number, the weight index has a lowering behavior in the transverse loading and a rising behavior in the longitudinal loading. However, the thicknesses of the face and core have a lowering behavior and the panel height has a rising behavior.

**Key words:** Constraint optimization, the prismatic core sandwich panel, ICDE algorithm, transverse loading, longitudinal loading.

## مقدمه

سازه ساندویچی از دو رویه که اصولاً مقاوم در برابر بارهای عرضی (خمشی) و داخل صفحه‌ای است و یک هسته مقاوم در برابر بارهای برشی که رویه‌ها را در برابر کمانش یا چروکیدگی پایدار نگه می‌دارد، تشکیل شده است.

رویه‌ها معمولاً شامل مواد با استحکام بالا و نازک بوده در حالی که ماده هسته ضخیم و سبک اما با عملکرد نسبتاً پایین می‌باشد. انتخاب اجزاء اساساً وابسته به کاربرد خاص و معیار طراحی است [۱]. هسته سازه ساندویچی تقریباً می‌تواند از هر ماده یا شکل معماری باشد، اما در کل به چهار نوع تقسیم می‌شوند [۲]: (الف) فوم یا هسته یکپارچه، (ب) هسته لانه زنبوری، (پ) هسته شبکه‌ای و (ت) هسته خرپایی یا چین دار<sup>۱</sup>. پانل‌های ساندویچی با هسته منشوری به دلیل ویژگی وزن بسیار کم و استحکام بسیار زیاد به روش‌های نوین ساخته شده و به طور گسترده در کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. مقاومت گرمایی و صوتی در برابر انفجار و قابلیت تحمل بار زیاد سبب شده تا توجه روز افزونی به این سازه‌ها شود [۴]. علاوه بر موارد ذکر شده، وجود فضای خالی در هسته سبب امکان عبور جریان سیال و کاربرد آنها به عنوان مبدل‌های حرارتی فشرده و سازه‌ها با نیاز به خنک‌کاری فراهم شده است [۵، ۶].

والدویت و همکاران [۷] با روش ریاضی به تعیین ابعاد بهینه و حداقل وزن پانل ساندویچی تحت بارگذاری طولی پرداختند. بهینه‌یابی وزن پانل تحت بار خمشی توسط راتبان و همکاران صورت گرفت [۸]. لیاقت و سرایلو [۹] به دو روش تحلیلی و عددی (برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی) بهینه‌یابی وزن پانل‌ها با هسته لانه زنبوری را صورت دادند.

روش‌های بهینه‌سازی مرسوم علاوه بر نیاز به مشتق‌پذیری و پیوستگی تابع هدف و قیود مسئله، امکان نرسیدن به بهینه کلی<sup>۲</sup> مسئله، به ویژه زمانی که نقطه شروع نزدیک یک بهینه محلی باشد، وجود دارد [۱۰]. علاوه بر این زمان حل این روش‌ها با افزایش تعداد متغیرهای طراحی به صورت شدیدی رشد می‌کند. محققین برای رفع مشکلات ذکر شده فوق برای روش‌های کلاسیک، روش‌های بهینه‌سازی جدیدی را ارائه کرده‌اند. این روش‌ها الهام گرفته از طبیعت و قوانین فیزیک هستند و به روش‌های هیورستیک<sup>۳</sup> (کاوشی، ابتکاری) شهرت دارند. توانایی فرار از دام بهینه محلی را داشته و با احتمال

بالتری نسبت به روش‌های کلاسیک به بهینه کلی می‌رسند [۱۱].

تاکنون روش‌های هیورستیک (ابتکاری) زیادی مطرح گردیده است. در سال‌های اخیر تعداد ارائه این روش‌ها رو به افزایش بوده است. از بین آنها می‌توان به الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات<sup>۴</sup> [۱۲]، جستجوی هارمونی [۱۳]، الگوریتم خفاش [۱۴]، الگوریتم کرم شب‌تاب [۱۵]، الگوریتم ذرات باردار<sup>۵</sup> [۱۶]، الگوریتم چرخه آب<sup>۶</sup> [۱۷] و الگوریتم انعکاس صدای دلفین‌ها<sup>۷</sup> [۱۸] اشاره کرد.

فریدون و همکاران [۱۹] بر اساس روش قابلیت اعتماد و به کمک الگوریتم ژنتیک، به تعیین وزن بهینه پانل ساندویچی تحت بارگذاری عرضی پرداختند. بانرجی و همکاران [۲۰] از نرم‌افزار تجاری متلب<sup>۸</sup> برای ماکزیمم‌سازی استحکام برشی استفاده کردند.

طراحی بهینه پانل تحت بار عرضی با اعمال قیود تسلیم و کمانش با روش گروه ذرات توسط هم‌تیان و همکاران [۲۱] و با الگوریتم رقابت استعماری توسط فریدون و همکاران [۲۲] صورت پذیرفت. محمدیان و ابوالبشری به بهینه‌یابی تحت بار طولی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی<sup>۹</sup> پرداختند [۲۳].

در زمینه بهینه‌یابی چند هدفه پانل‌های ساندویچی، تان و سو [۲۴] از الگوریتم ژنتیک برای مینیمم‌سازی وزن و ماکزیمم‌سازی انتقال حرارت استفاده کردند. هادسون و همکاران [۲۵] به بهینه‌یابی همزمان وزن و هزینه پانل ساندویچی کف وسیله نقلیه ریلی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان<sup>۱۰</sup> پرداختند. بهین یابی همزمان وزن و خیز با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک بهبودیافته توسط خلخالی و همکاران [۲۶] و بهینه‌یابی همزمان وزن و راندمان انرژی با استفاده از روش شبیه‌ساز تبرید تدریجی<sup>۱۱</sup> توسط مارتین و ترال [۲۷] صورت پذیرفت. محمدیان و فریدون [۲۸] نیز بهینه‌یابی همزمان وزن و قابلیت انتقال حرارت با استفاده از الگوریتم گروه ذرات پرداختند.

در این مقاله بهینه‌یابی وزن پانل ساندویچی تحت دو بارگذاری جداگانه عرضی و طولی و با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته<sup>۱۲</sup> شامل ترکیبی از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته<sup>۱۳</sup> و یک مدل جدید قیاس‌سازی مبتنی بر بایگانی کردن<sup>۱۴</sup> جواب‌ها صورت گرفته و با مطالعات

گشتاور خمشی و  $V$  نیروی برشی ماکزیمم بر واحد عرض می‌باشند. همچنین وزن بر واحد عرض پانل به صورت  $W = 2\rho dl + N\rho dl / \cos\theta$  تعریف می‌شود که  $\rho$  چگالی صفحه رویه و هسته است. وزن مذکور را می‌توان به صورت بی‌بعد زیر بازنویسی کرد:

$$\Psi = \frac{W}{\rho l^2} = 2 \frac{d}{l} + \frac{N}{\cos\theta} \frac{d_c}{l} \quad (1)$$

که در آن  $\Psi$  شاخص وزن<sup>۱۵</sup> نامیده می‌شود. رابطه (۱) تابع هدف مسئله بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهد. تعریف قیود تسلیم و کمانش مسئله برای دو حالت بارگذاری عرضی و طولی در ادامه بیان می‌شوند. همچنین  $\Pi = V / \sqrt{EM}$  شاخص بارگذاری<sup>۱۶</sup> و معرف بار اعمال شده و  $E$  مدول الاستیسیته صفحات رویه‌ها و هسته می‌باشند [۷].  
- قیود مربوط به بارگذاری عرضی  
قیود تسلیم رویه:

$$g_1 = \Pi^2 \frac{E}{\sigma_y} \frac{l}{d} \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right)^{-1} - 1 \quad (2)$$

قیود تسلیم هسته:

$$g_2 = \frac{1}{N \sin\theta} \Pi^2 \frac{E}{\sigma_y} \frac{l}{d_c} - 1 \quad (3)$$

قیود کمانش رویه:

$$g_3 = \frac{48}{K_f \pi^2 N^2 \tan^2\theta} \Pi^2 \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right) \left( \frac{l}{d} \right)^3 - 1 \quad (4)$$

قیود کمانش هسته:

$$g_4 = \frac{12}{K_c \pi^2 N^3 \sin^3\theta} \Pi^2 \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right)^2 \left( \frac{l}{d_c} \right)^3 - 1 \quad (5)$$

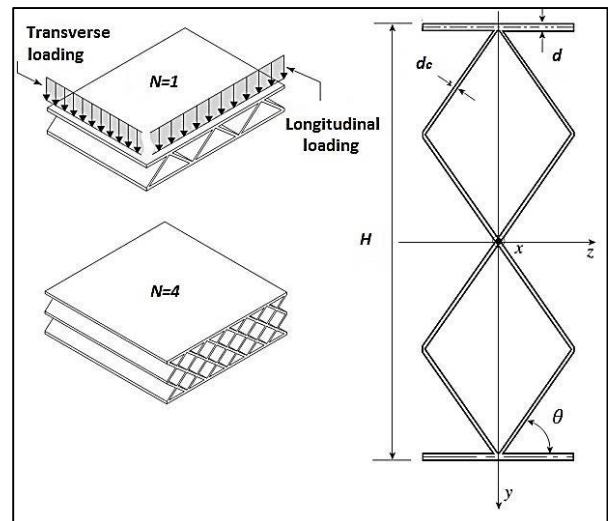
که در آن  $K_c$  و  $K_f$  با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$K_f = \left( \frac{2.4 \cos\theta (d_c / d)^3 + 1}{1.2 \cos\theta (d_c / d)^3 + 1} \right)^2 \quad (6)$$

مربوطه قبلی مقایسه می‌شود. در بخش بعد به توصیف پانل ساندویچی با هسته منشور و صورت‌بندی مسئله برای دو بارگذاری عرضی و طولی پرداخته می‌شود. سپس الگوریتم مذکور معرفی شده و در انتها نتایج بدست آمده و مقایسه آن با دیگر نتایج ارائه خواهد شد.

### پانل ساندویچی با هسته منشوری

پانل‌های ساندویچی با هسته منشوری شامل هسته با فضای خالی بوده که بنا به مقدار پارامتر موج هسته  $N$  نامگذاری می‌شوند. در شکل ۱ دو پانل با  $N=1$  و  $N=4$  و نحوه بارگذاری ارائه شده است. همچنین پارامترهای هندسی پانل ساندویچی نیز ارائه شده است.  $d$  ضخامت ورق رویه،  $d_c$  ضخامت بخش هسته و  $H$  ارتفاع کل پانل می‌باشند. زاویه قرارگیری صفحات افقی و مورب هسته برابر  $\theta = 54.7^\circ$  در نظر گرفته می‌شود، چرا که در زاویه مذکور سفتی برشی ماکزیمم می‌باشد [۲۹].



شکل ۱ - ترسیمی از دو پانل ساندویچی هسته موجی ( $N=1$ ) و هسته منشور ( $N=4$ ) به همراه راستاهای بارگذاری و متغیرهای هندسی طراحی [۷]

### صورت بندی مسئله

هدف یافتن متغیرهای هندسی بی‌بعد  $d/l$ ،  $d_c/l$ ،  $H/C$  و  $N$  است تا وزن بر واحد عرض سازه حداقل گردد. پارامتر  $l$  برای سهولت و تعمیم روند بهینه‌سازی در حالت‌های مختلف بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی و به صورت نسبت  $M/V$  تعریف شده است که با طول بارگذاری نسبت مستقیم دارد [۳].  $M$

مقادیر  $\Pi_{cb}^2$  (مجذور شاخص بار در خمش هسته) برای مقادیر مختلف  $N$  از روابط (۱۳) الی (۲۰) محاسبه می‌شوند. برای  $N=1$ :

$$\Pi_{cb}^2 = \frac{B}{C \sqrt{\frac{1}{K_b^2} + D \left[ \frac{1}{n \tan \theta} \frac{d}{l} \frac{l}{d_c} + \frac{1}{4 \sin \theta} \right]^2}} \quad (13)$$

که در آن:

$$B = \frac{\pi^2 \sin^2 \theta}{12(1-\nu^2)} N^2 \left( \frac{d_c}{l} \right)^2 \left[ \frac{d}{l} + \frac{N}{6 \cos \theta} \frac{d_c}{l} \right] \quad (14)$$

و:

$$C = \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \quad (15)$$

$$D = \frac{1}{K_s^2} \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right)^2 \quad (16)$$

برای  $N=2$ :

$$\Pi_{cb}^2 = \frac{B}{C \sqrt{\frac{1}{K_{cb}^2} + D \left[ \frac{1}{n \tan \theta} \frac{d}{l} \frac{l}{d_c} + \frac{1}{4 \sin \theta} \right]^2}} \quad (17)$$

برای  $N \geq 4$ :

$$\Pi_{cb}^2 = \min \left\{ \left( \Pi_{cb}^2 \right)^{N \geq 4, \text{inner}}, \left( \Pi_{cb}^2 \right)^{N \geq 4, \text{outer}} \right\} \quad (18)$$

که در آن:

$$\left( \Pi_{cb}^2 \right)^{N \geq 4, \text{inner}} = \frac{B}{C \sqrt{\frac{1}{K_{cb}^2} \frac{4}{N^2} + D \left[ \frac{1}{n \tan \theta} \frac{d}{l} \frac{l}{d_c} + \frac{1}{4 \sin \theta} \right]^2}} \quad (19)$$

$$\left( \Pi_{cb}^2 \right)^{N \geq 4, \text{outer}} = \frac{B}{C \sqrt{\frac{1}{K_c^2} + D \left[ \frac{1}{n \tan \theta} \frac{d}{l} \frac{l}{d_c} \right]^2}} \quad (20)$$

$$K_c = 1.375 \left( \frac{2.2 + 1.2(d_c/d)^3 / \cos \theta}{1.6 + 0.6(d_c/d)^3 / \cos \theta} \right); N=1 \quad (17)$$

$$K_c = 2.125 : N \geq 2$$

- قیود مربوط به بارگذاری طولی (برای تفاوت نوشتار از حرف بزرگ  $G$  برای قیود مربوطه استفاده شده است);  
قید تسلیم رویه:

$$G_1 = \Pi^2 \frac{E}{\sigma_y} \left[ \frac{\sqrt{N^2 + \frac{3}{\tan^2 \theta} \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right)^2}}{N \frac{d}{l} + \frac{N^2}{6 \cos \theta} \frac{d_c}{l}} \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right) \right] - 1 \quad (8)$$

قید تسلیم هسته:

$$G_2 = \Pi^2 \min_{y \in \left[ 0, \frac{H}{2} - d \right]} \left\{ \frac{\left[ \frac{\sigma_y \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right) \left[ \frac{d}{l} + \frac{N}{6 \cos \theta} \frac{d_c}{l} \right]}{E \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right)} \right]}{\sqrt{4 \left( \frac{y}{H-d} \right)^2 + 3A^2}} \right\} - 1 \quad (9)$$

که در آن:

$$A = \frac{1}{n \tan \theta} \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right) \frac{d}{l} \frac{l}{d_c} + \frac{1}{\sin \theta} \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right) \left( \frac{1}{4} - \left( \frac{y}{H-d} \right)^2 \right) \quad (10)$$

قید کمانش رویه:

$$G_3 = \Pi^2 \frac{24(1-\nu^2)}{K_c \pi^2 N^2 \tan^2 \theta} \left( \frac{l}{d} \right)^2 \left( \frac{H}{l} - \frac{d}{l} \right) \times \left[ \frac{1}{2} \frac{l}{d} + \frac{N}{12 \cos \theta} \frac{d_c}{l} \right]^{-1} - 1 \quad (11)$$

که در آن  $\nu$  ضریب پواسون<sup>۱۷</sup> و  $y$  فاصله از مرکز هسته تا رویه می‌باشند.  
قید کمانش هسته:

$$G_4 = \Pi^2 \left( \Pi_{cb}^2 \right)^{-1} - 1 \quad (12)$$

به طور کلی الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته مشابه روش تکامل تفاضلی است که از جهش و ترکیب برای تنوع در جمعیت در حال تکامل بهره می‌برد. الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته برای بهبود قابل توجهی در تنوع جمعیت الگوریتم تکامل تفاضلی و از مدل جدید قیاس سازشی مبتنی بر بایگانی کردن جواب‌ها برای انتخاب کارآمد اعضاء در نسل بعدی استفاده می‌کند. برای جزئیات بیشتر می‌توان به مطالعه جیا و همکاران [۳۲] مراجعه کرد، هر چند بخش‌های اجرایی مهم در ادامه ارائه خواهند شد.

### الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی توسط استورن و پرایس [۳۳] ارائه شد و یکی از بهترین الگوریتم‌ها در جستجوی بهینه کلی و پرکاربردترین روش در بهینه‌سازی با متغیرهای پیوسته می‌باشد. روند اصلی تکامل تفاضلی شامل چهار مرحله زیر می‌باشد:

مرحله ۱: مقداردهی اولیه

تولید جمعیت اولیه  $P_t$  شامل  $NP$  عضو با نمونه‌گیری تصادفی از فضای جستجو.

مرحله ۲: جهش

تولید بردار جهش  $v_i^{t+1}$  از هر عضو جمعیت جاری  $t$  بر اساس عملگر جهش. چهار عملگر جهش مطلوب در الگوریتم DE عبارتند از:

$$rand / 1: \vec{v}_i = \vec{x}_{r1} + F(\vec{x}_{r2} - \vec{x}_{r3}) \quad (23)$$

rand / 2:

$$\vec{v}_i = \vec{x}_{r1} + F(\vec{x}_{r2} - \vec{x}_{r3}) + F(\vec{x}_{r4} - \vec{x}_{r5}) \quad (24)$$

current - to - rand / 1:

$$\vec{v}_i = \vec{x}_{r1} + F(\vec{x}_{r2} - \vec{x}_{r3}) + F(\vec{x}_{r4} - \vec{x}_{r5}) \quad (25)$$

current - to - best / 1:

$$\vec{v}_i = \vec{x}_i + F(\vec{x}_{best} - \vec{x}_i) + F(\vec{x}_{r1} - \vec{x}_{r2}) \quad (26)$$

که در آن  $F$  یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است و اعداد صحیح  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  به طور تصادفی و با شرط  $I_5 \neq I_4 \neq I_3 \neq I_2 \neq I_1$  انتخاب می‌شوند؛  $\vec{x}_{best}$  و  $\vec{x}_i$  به ترتیب عضو جاری و بهترین عضو در جمعیت می‌باشند. اگر مؤلفه‌های

که در آن  $K_c = 4$ ؛  $K_s = 5/35$ ؛  $K_b = 23/9$  و  $K_{cb} = 7/81$  می‌باشند [۷].

بنابراین به طور خلاصه، مسئله بهینه‌سازی برای بارگذاری عرضی بصورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} \min \Psi \\ \text{subjected to } g_i \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (21)$$

و برای بارگذاری طولی:

$$\begin{cases} \min \Psi \\ \text{subjected to } G_i \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (22)$$

در ادامه الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته ارائه می‌شود که از آن برای حل مسائل بهینه‌سازی مذکور استفاده خواهد شد.

### الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته

قدرتمندی و کاربرد آسان الگوریتم‌های تکاملی سبب شده تا با روش‌های مدیریت قیود<sup>۱۸</sup> موجود ترکیب شده و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مقید تکاملی<sup>۱۹</sup> فراوانی شکل گیرند. این الگوریتم‌ها نیاز به ارضای دو تابع هدف، یکی داخل شدن سریع به ناحیه ممکن<sup>۲۰</sup> و دومی یافتن حل بهینه ممکن دارند [۳۰].

روش‌های مدیریت قید موجود را می‌توان به سه دسته شامل روش‌های مبتنی بر تابع جریمه<sup>۲۱</sup>، روش‌های مبتنی بر الویت جواب‌های ممکن نسبت به غیرممکن و روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه تقسیم کرد.

توابع پنالتی قدیمی‌ترین روش در مدیریت قیود هستند. اگرچه کاربرد آسانی دارند، اما به طور کلی یافتن تابع پنالتی مناسب برای مسئله بهینه‌سازی نیاز به تنظیمات مناسب فراوانی دارد. علاوه بر آن عملکرد الگوریتم مورد استفاده در بهینه‌یابی نیز تحت تأثیر انتخاب آن قرار خواهد گرفت [۳۱].

در این مطالعه، برخلاف مطالعات قبلی که در زمینه بهینه‌سازی پانل‌های ساندویچی با هسته منشوری صورت گرفته، از الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته که با روش مدیریت قیود مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه استفاده خواهد شد. لذا دیگر نیازی به فرایند آزمون و خطا برای یافتن تابع پنالتی مناسب نخواهد بود.

ب- تولید جمعیت اولیه  $P_t$  با  $NP$  عضو و با نمونه‌گیری تصادفی از فضای جستجو مرحله ۲:

الف- برای هر عضو  $\bar{x}_i$  ( $i=1,2,\dots,\mu$ ) در جمعیت  $P_t$  به طور همزمان سه فرزند براساس جهش و ترکیب به صورت زیر تولید می‌شوند:

- تولید اولین فرزند  $\bar{y}_1$  با استفاده از روابط (۲۳) و (۲۸).
  - تولید دومین فرزند  $\bar{y}_2$  با استفاده از روابط (۲۴) و (۲۸).
  - تولید سومین فرزند  $\bar{y}_3$  با استفاده از  $current - to - rand / best / 1$
  - و یک جهش BGA<sup>۲۵</sup> بهبودیافته [۳۲].
- ب- بروزرسانی جمعیت جدید فرزندان به صورت  $Q_t = \bar{y}_1 \cup \bar{y}_2 \cup \bar{y}_3$ .

اگر تعداد نسل جاری بیشتر از حد موردنظر باشد، آخرین استراتژی جهش  $current - to - rand / best / 1$  با تعویض رابطه (۲۵) با رابطه (۲۶) انجام می‌شود. رابطه (۲۵) به انتخاب تصادفی اطلاعات از فضای جستجو می‌پردازد تا قابلیت جستجوی کلی را افزایش دهد. در حالی که رابطه (۲۶) از اطلاعات بهترین عضو جمعیت جاری برای رسیدن به بهینه کلی استفاده می‌کند. بنابراین  $current - to - rand / best / 1$  سبب حفظ تعادل بین تنوع<sup>۲۶</sup> در جمعیت و همگرایی تکامل می‌شود.

#### مدل جدید قیاس سازشی مبتنی بر بایگانی کردن

سه وضعیت در جمعیت ترکیبی  $H_t = P_t + Q_t$  شامل جمعیت کاملاً غیرممکن<sup>۲۷</sup>، کاملاً ممکن و نیمه‌ممکن<sup>۲۸</sup> وجود دارند. اعضاء در ناحیه غیرممکن می‌توانند حاوی اطلاعاتی باشند که منجر به یافتن حل بهینه شود.

مدل جدید قیاس سازشی مبتنی بر بایگانی کردن روند متفاوتی را برای مدیریت نقض‌شدگی قیود در هر وضعیت بکار می‌گیرد تا کاندیدای جواب (هم ممکن و هم غیرممکن) برای نسل بعدی انتخاب شوند. به دلیل زیاد بودن مطالب مربوطه شامل شبه‌کدها<sup>۲۹</sup> و روابط متناظر، در ادامه خلاصه‌ای از روند مذکور ارائه می‌شود و برای جزئیات می‌توان به مطالعه جیا و همکاران [۳۲] مراجعه کرد.

- وضعیت اول: جمعیتی تنها شامل اعضاء غیرممکن

از بردار  $\bar{v}_i$  قیود مرزی را نقض کنند، بدین صورت اصلاح می‌شوند:

$$v_{i,j} = \begin{cases} 2L_j - v_{i,j} & \text{if } v_{i,j} < L_j \\ 2U_j - v_{i,j} & \text{if } v_{i,j} > U_j \\ v_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

که در آن  $L_j$  و  $U_j$  به ترتیب کران پایین و بالای متغیر  $j$  ام هستند.

مرحله ۳: ترکیب

تولید بردار آزمایشی  $\bar{u}_i$  با قراردادی چند آرایه از بردار  $\bar{v}_i$  به‌وسیله عملگر ترکیب<sup>۲۴</sup>. پرکاربردترین عملگر ترکیب، عملگر دو جمله‌ای است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & \text{rand} < \text{CR} \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

که در آن  $i \in \{1, 2, \dots, NP\}$ ؛  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ؛  $j_{\text{rand}}$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱؛  $CR$  پارامتر کنترل ترکیب؛  $n$  تعداد متغیرهای مسئله و  $NP$  تعداد اعضاء می‌باشند.

مرحله ۴: گزینش

مقایسه بردار  $\bar{u}_i$  با بردار  $\bar{x}_i$ . هر کدام که تابع هدف بهتری داشت در نسل بعدی حضور می‌باید:

$$\bar{x}_i = \begin{cases} \bar{u}_i & \text{if } f(\bar{u}_i) < f(\bar{x}_i) \\ \bar{x}_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

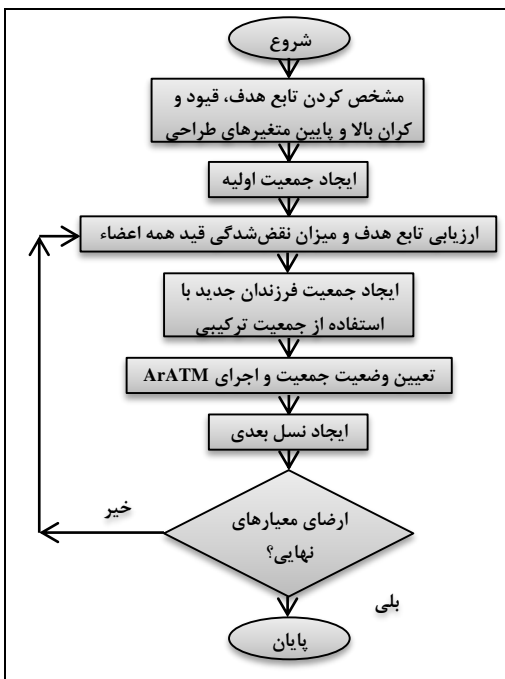
#### تکامل تفاضلی بهبودیافته

از  $\mu$  تا عضو در جمعیت والدین  $P_t$ ، یک جمعیت فرزندان جدید  $Q_t$  با  $\lambda$  تا عضو از طریق جهش  $rand / 1$  و  $rand / 2$  و جهش  $current - to - rand / best / 1$  تولید می‌شوند. آخرین جهش اشاره شده به منظور افزایش سرعت تکامل آخرین جمعیت فرزندان به سمت مقدار بهینه اضافه شده است، روابط مربوطه را می‌توان در مرجع [۳۲] یافت. روند اجرایی IDE شامل دو مرحله است:

مرحله ۱:

الف- تشکیل مجموعه تهی  $Q_t = \phi$ .

جنس پانل ساندویچی از آلایژ آلومینیم با خواص  $E=70GPa$  و  $\sigma_y=49MPa$ ،  $\rho=2800kg/m^3$  می‌باشد. برای اطمینان از نتایج حاصل (برای  $\sigma_y/E=0.007$ ) صورت پذیرفت. پارامترهای مورد نیاز الگوریتم در جدول ۱ ارائه شده‌اند. برای هر بارگذاری، نتایج حاصل از الگوریتم مورد مطالعه و مقایسه آن با دیگر الگوریتم‌های موجود ارائه شده است. برای مقایسه نتایج با دیگر الگوریتم‌ها، کران بالا و پایین متغیرهای هر مسئله مشابه با مراجع مورد مقایسه در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ - نمودار گردش الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته در

بهینه‌سازی وزن			
$\mu$	$\lambda$	F	CR
۶۰	۱۸۰	۰/۸	۰/۹

### همگرایی نتایج

در شکل ۳ عملکرد الگوریتم ICDE در رسیدن به وزن بهینه برای دو حالت بارگذاری طولی و عرضی،  $N=1$  و  $\Pi=0.01$  ارائه شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در تعداد تولید نسل یا تکرار کمی به نتیجه بهینه همگرا شده است که حاکی از قدرتمند الگوریتم می‌باشد.

در این وضعیت تمام اعضاء  $H_i$  قیود را نقض کرده‌اند و مسئله بهینه‌سازی مقید اولیه تبدیل به مسئله بهینه‌سازی دوهدفه خواهد شد. تابع هدف و تابع میزان نقض‌شدگی قید دو تابع هدف متفاوت، اما با اهمیت یکسان در طی فرآیند بهینه‌سازی خواهند بود. وظیفه مدل جدید قیاس‌سازی مبتنی بر بایگانی کردن در این وضعیت فرستادن جمعیت به سمت ناحیه همگن و با حفظ تنوع در جمعیت است.

- وضعیت دوم: جمعیتی شامل هم اعضاء ممکن و هم غیرممکن

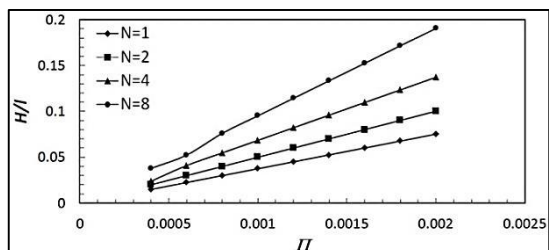
چون ممکن است بعضی از اعضاء غیرممکن دارای اطلاعات مفیدی در یافتن حل بهینه کلی داشته باشند، منطقی نیست تا تمام اعضاء غیرممکن نادیده گرفته شوند. در این وضعیت مدل جدید قیاس‌سازی مبتنی بر بایگانی کردن از روند نرمال کردن برای انتخاب نه تنها اعضاء ممکن با مقدار کوچک تابع هدف (فرض در مسئله مینیمم‌سازی)، بلکه برای انتخاب اعضاء غیرممکن با مقدار نقض‌شدگی کوچک قیود و مقدار کوچک تابع هدف استفاده می‌کند.

- وضعیت سوم: جمعیت تنها شامل اعضاء ممکن در این وضعیت مسئله تبدیل به مسئله بهینه‌سازی غیرمقید شده است، چون تنها مقدار تابع هدف مهم خواهد بود. در این وضعیت  $\mu$  تا عضو با کوچک‌ترین مقدار برای تابع هدف برای نسل بعدی  $P_{t+1}$  انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است در روابط مذکور  $t$  شماره تکرار الگوریتم را نشان می‌دهد. شرط توقف الگوریتم می‌تواند تعداد مشخصی از محاسبه تابع هدف، یکسان بودن مقدار تابع هدف بهترین عضو در چند تکرار متوالی و یا تعداد تکرار مشخص الگوریتم باشد. نمودار گردش الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است.

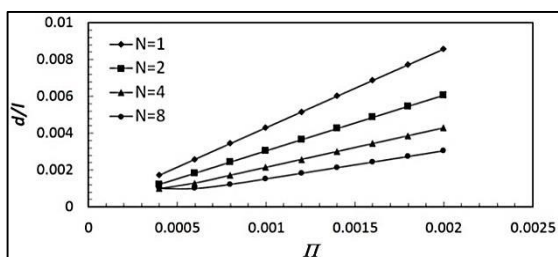
### ارائه نتایج و مقایسه

در این بخش ابتدا نتایج مربوط به بهینه‌سازی وزن پانل ساندویچی با هسته منشور با قیود تسلیم و کمانش تحت بارگذاری عرضی و سپس بارگذاری طولی ارائه خواهند شد. الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبود یافته در نرم‌افزار متلب با قابلیت تغییر تعداد متغیرها، قیود و تابع هدف برنامه‌نویسی شده است.

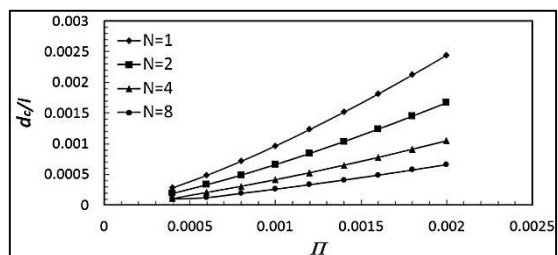
۸ می‌تواند برای مواردی که محدودیت فضا دارد، مناسب نباشد؛ چون ضمن اشغال فضای بیشتر، آن‌چنان که باید کاهش قابل ملاحظه‌ای را ایجاد نمی‌کند. بنابراین در این بارگذاری می‌توان پانل با  $N=4$  را به عنوان پانل بهینه در نظر گرفت.



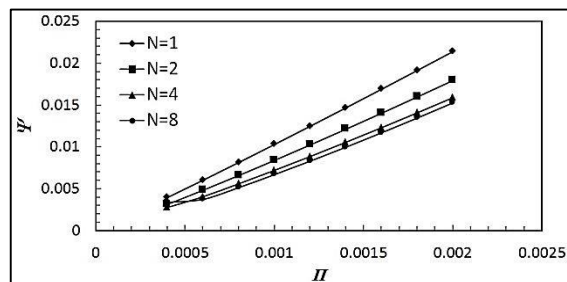
شکل ۴ - ارتفاع پانل نرمال شده بهینه بر حسب شاخص بار در بارگذاری عرضی ( $0.001 < d/l < 0.003$  و  $0.001 < H/l < 0.01$ )



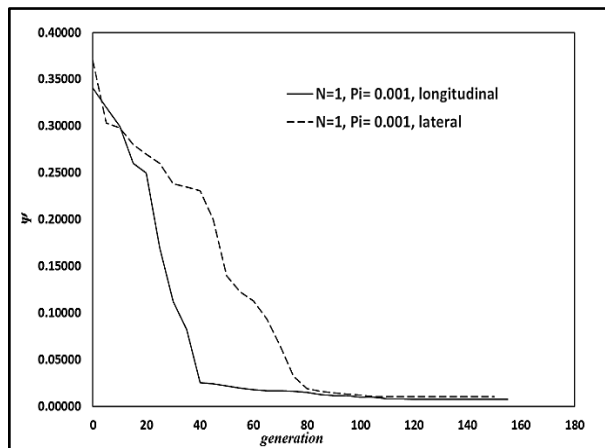
شکل ۵ - ضخامت رویه نرمال شده بهینه بر حسب شاخص بار در بارگذاری عرضی ( $0.001 < d_c/l < 0.003$  و  $0.01 < H/l < 0.2$ )



شکل ۶ - ضخامت هسته نرمال شده بهینه بر حسب شاخص بار در بارگذاری عرضی ( $0.001 < d/l < 0.01$  و  $0.01 < H/l < 0.2$ )



شکل ۷ - شاخص وزن بهینه بر حسب شاخص بار، بارگذاری عرضی ( $0.001 < d_c/l < 0.003$  و  $0.001 < d/l < 0.01$ ،  $0.01 < H/l < 0.2$ )



شکل ۸ - عملکرد الگوریتم ICDE در رسیدن به وزن بهینه برای دو حالت بارگذاری طولی و عرضی

### پانل ساندویچی تحت بارگذاری عرضی

همان‌طور که پیش‌تر ارائه گردید مسئله بهینه‌سازی متناظر با بارگذاری مذکور با رابطه (۲۱) تعریف می‌شود. بهینه‌سازی پانل برای چهار مقدار متفاوت برای متغیر موج هسته  $N (N=1, 2, 4, 8)$  و نه مقدار برای متغیر شاخص بار  $\Psi$  (از  $0.0004$  تا  $0.0022$  با نمو  $0.0002$ ) صورت پذیرفت. شکل‌های ۴ الی ۷ به ترتیب تغییرات ارتفاع پانل ( $H/l$ )، ضخامت رویه ( $d/l$ )، ضخامت هسته ( $d_c/l$ ) و شاخص وزن ( $\Psi$ ) را نسبت به شاخص بار ( $\Pi$ ) برای پانل‌ها با تعداد موج هسته متفاوت نشان می‌دهند. محدوده تغییرات متغیرهای مذکور به صورت  $0.001 < d/l < 0.01$ ،  $0.01 < H/l < 0.2$  و  $0.0001 < d_c/l < 0.003$  در نظر گرفته شده‌اند [۲۱].

همان‌طور که در شکل‌های ۴ الی ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش  $N$  و در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای  $\Pi$ ، مقادیر بهینه ضخامت‌های رویه و هسته کاهش و ارتفاع پانل افزایش یافته‌اند تا از کمانش و تسلیم پانل جلوگیری شود، در طرف دیگر شاخص وزن بهینه نیز با افزایش  $N$  کاهش می‌یابد. بنابراین دو گزینه برای انتخاب پانل بهینه، پانل با  $N=4$  و  $N=8$  می‌باشند.

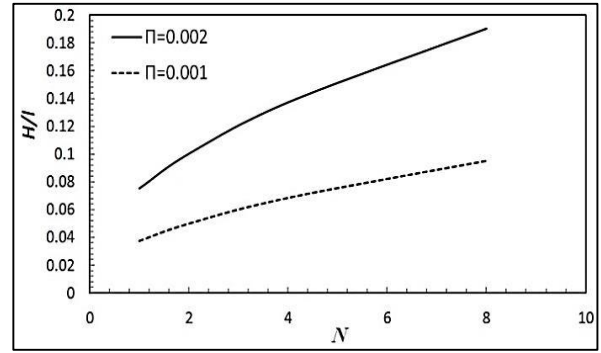
شاخص بار رفتاری افزایشی داشته، اما بر خلاف آن  $d/l$ ،  $\Psi$  و  $d_c/l$  به صورت کاهشی تغییر می‌کنند. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۱۱ دیده می‌شود، در یک مقدار ثابت از شاخص بار، با افزایش  $N$  نرخ کاهش شاخص وزن بهینه کاهش و تقریباً به صفر میل می‌کند؛ به عبارت دیگر، برای  $N$ ‌های بزرگتر دیگر کاهش وزنی مشاهده نمی‌شود. بنابراین افزایش  $N$  از ۴ به



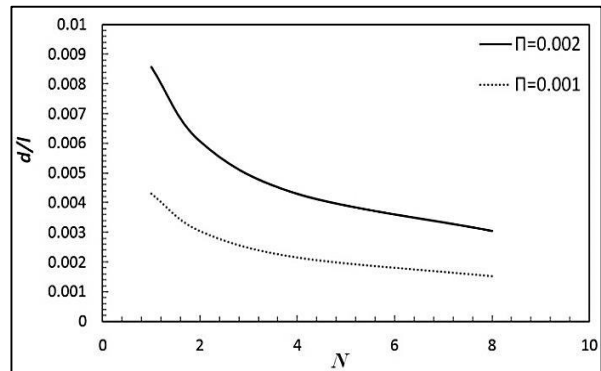
مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته با نتایج الگوریتم گروه ذرات [۲۱]، الگوریتم رقابت استعماری [۲۲] و روش ریاضی مرجع [۷] در جدول ۲ و شکل ۱۲ ارائه شده است. طبق جدول ۲ مقدار شاخص وزن سه الگوریتم با روش ریاضی برای شرایط مختلف  $N$  و  $\Pi$  کاملاً مشابه می‌باشند که در شکل ۱۲ نیز به وضوح دیده می‌شود.

جدول ۲ - متغیرهای طراحی و شاخص وزن بهینه حاصل از الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته، الگوریتم رقابت استعماری [۲۲] و گروه ذرات [۲۱] در بارگذاری عرضی

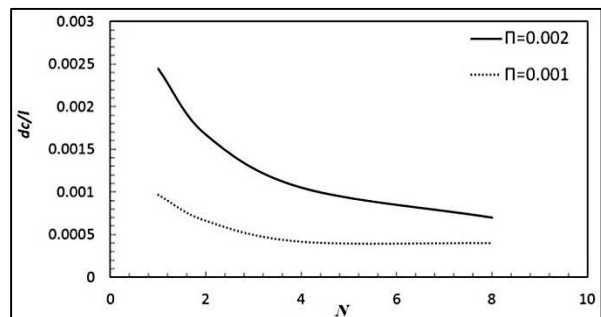
$N$	$\Pi$	الگوریتم	$d/l$	$d_c/l$	$H/l$	$\Psi$
۱	۰/۰۰۱	ICA	۰/۰۰۴۳۰۳۷	۰/۰۰۰۹۶۵۸	۰/۰۳۷۴۹۷۹	۰/۰۱۰۲۷۸۸
		PSO	۰/۰۰۴۳۰۳	۰/۰۰۰۹۶۶	۰/۰۳۷۵	۰/۰۱۰۲۷۸
		ICDE	۰/۰۰۴۳۰۳۳	۰/۰۰۰۹۶۵۸	۰/۰۳۷۵۰۰۱	۰/۰۱۰۲۷۸۲
	۰/۰۰۲	ICA	۰/۰۰۸۵۷۲۸	۰/۰۰۲۴۴۴۸	۰/۰۷۵۲۲۹۲	۰/۰۲۱۳۷۶۶
		PSO	۰/۰۰۸۵۷۳	۰/۰۰۲۴۵	۰/۰۷۵۲۳۱	۰/۰۲۱۳۷۶
		ICD	۰/۰۰۸۵۷۲۵	۰/۰۰۲۴۴۴۸	۰/۰۷۵۲۳۱	۰/۰۲۱۳۷۵۸
۲	۰/۰۰۱	ICA	۰/۰۰۳۰۴۴۰	۰/۰۰۰۶۶۱۷	۰/۰۴۹۹۷۴۸	۰/۰۰۸۳۷۸۳
		PSO	۰/۰۰۳۰۴۴	۰/۰۰۰۶۶۲	۰/۰۴۹۹۷۵	۰/۰۰۸۳۷۸
		ICDE	۰/۰۰۳۰۴۳۹	۰/۰۰۰۶۶۱۷	۰/۰۴۹۹۷۴۷	۰/۰۰۸۳۷۸۳
	۰/۰۰۲	ICA	۰/۰۰۶۰۶۷۵	۰/۰۰۱۶۷۱۲	۰/۰۱۰۰۲۶۱۰	۰/۰۱۷۹۱۹۲
		PSO	۰/۰۰۶۰۶۶	۰/۰۰۱۶۷۱	۰/۰۱۰۰۲۶۴	۰/۰۱۷۹۱۸
		ICD	۰/۰۰۶۰۶۶۲	۰/۰۰۱۶۷۱۴	۰/۰۱۰۰۶۳۹	۰/۰۱۷۹۱۷۵
۴	۰/۰۰۱	ICA	۰/۰۰۲۱۵۵۵	۰/۰۰۰۴۱۶۶	۰/۰۶۸۴۳۱۰	۰/۰۰۷۱۹۴۶
		PSO	۰/۰۰۲۱۵۵	۰/۰۰۰۴۱۷	۰/۰۶۸۴۴۵۶	۰/۰۰۷۱۹۳
		ICDE	۰/۰۰۲۱۵۴۶۶	۰/۰۰۰۴۱۶۶	۰/۰۶۸۴۵۶۰	۰/۰۰۷۱۹۲۹
	۰/۰۰۲	ICA	۰/۰۰۴۳۵۲۶	۰/۰۰۱۰۴۲۷	۰/۱۳۵۶۳۸۰	۰/۰۱۵۹۲۳۴
		PSO	۰/۰۰۴۲۹۹	۰/۰۰۱۰۵۱	۰/۱۳۷۲۳۵	۰/۰۱۵۸۷۵
		ICDE	۰/۰۰۴۲۹۸۵	۰/۰۰۱۰۵۱۵	۰/۱۳۷۲۳۴۷	۰/۰۱۵۸۷۵۵
۸	۰/۰۰۱	ICA	۰/۰۰۱۵۷۷۱	۰/۰۰۰۲۵۶۵	۰/۰۹۲۱۵۸۲	۰/۰۰۶۷۰۴۹
		PSO	۰/۰۰۱۵۲۵	۰/۰۰۰۲۶۲	۰/۰۹۵۲۲	۰/۰۰۶۶۸۱
		ICDE	۰/۰۰۱۵۲۴۷	۰/۰۰۱۵۲۴۷	۰/۰۹۵۲۲۰۴	۰/۰۰۶۶۸۰۷
	۰/۰۰۲	ICA	۰/۰۰۳۱۷۵۸	۰/۰۰۰۶۴۴۳	۰/۱۸۳۴۸۲۱	۰/۰۱۵۲۷۱۳
		PSO	۰/۰۰۳۰۵	۰/۰۰۰۶۶۱	۰/۱۹۰۴۱	۰/۰۱۵۲۴۹۲
		ICDE	۰/۰۰۳۰۴۹۸	۰/۰۰۳۰۴۹۸	۰/۱۹۰۴۱۲۹	۰/۰۱۵۲۴۹۲



شکل ۸ - ارتفاع پانل نرمال شده بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری عرضی ( $0.001 < d/l < 0.01$ ) و ( $0.0001 < d_c/l < 0.003$ )



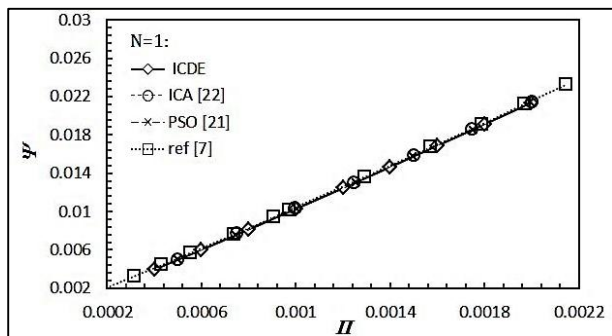
شکل ۹ - ضخامت رویه نرمال شده بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری عرضی ( $0.01 < H/l < 0.2$ ) و ( $0.0001 < d_c/l < 0.003$ )



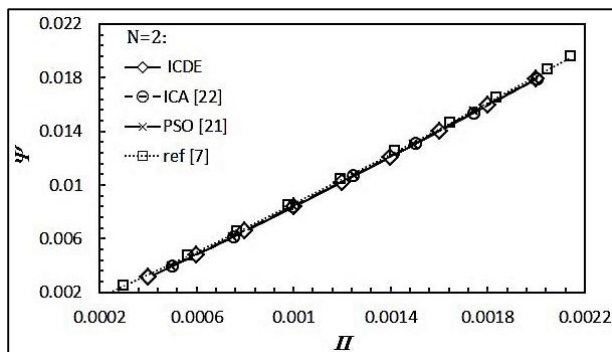
شکل ۱۰ - ضخامت هسته نرمال شده بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری عرضی ( $0.01 < H/l < 0.2$ ) و ( $0.001 < d/l < 0.01$ )

شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ به ترتیب تغییرات  $H/l$ ،  $d/l$ ،  $d_c/l$  و  $\Psi$  را نسبت به  $\Pi$  برای پانل‌ها با تعداد موج هسته متفاوت نشان می‌دهند.

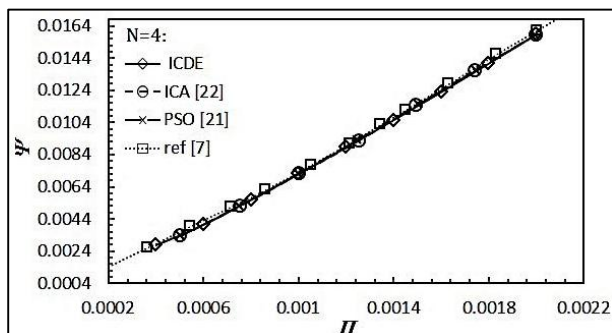
حدود متغیرها به صورت  $0.001 < H/l < 0.2$  و  $0.001 < d/l < 0.01$  و  $0.0001 < d_c/l < 0.003$  در نظر گرفته شده‌اند [۲۸].



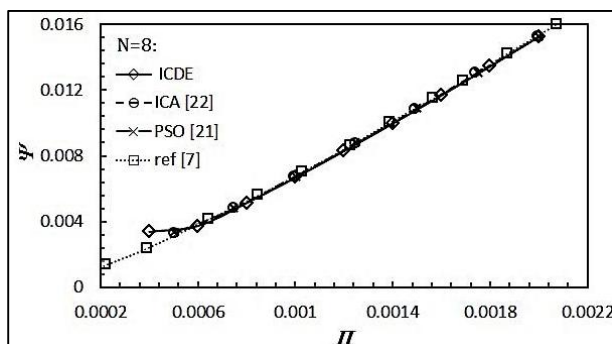
الف -  $N = 1$



ب -  $N = 2$

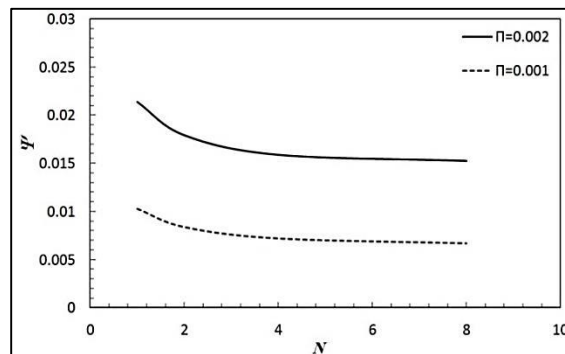


ج -  $N = 4$



د -  $N = 8$

شکل ۱۲ - مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته با نتایج حاصل از الگوریتم‌های رقابت استعماری [۲۲]، گروه ذرات [۲۱] و مرجع [۷] در بارگذاری عرضی



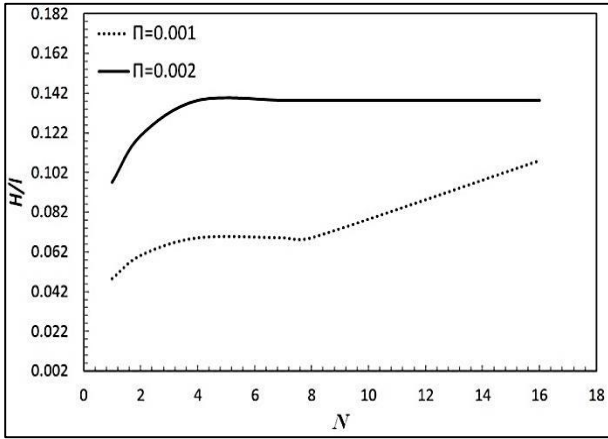
شکل ۱۱ - شاخص وزن بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری عرضی ( $0.1 < H/l < 0.2$ ,  $0.01 < d/l < 0.03$  و  $d_c/l < 0.0001$ )

### پانل ساندویچی تحت بارگذاری طولی

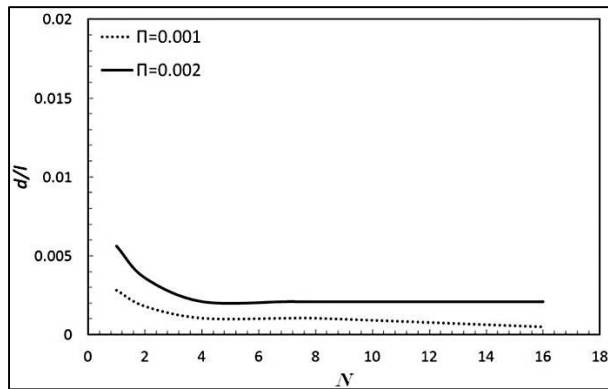
مسئله بهینه‌سازی متناظر با بارگذاری طولی با رابطه (۲۲) تعریف می‌شود. با چهار مقدار متفاوت برای متغیر موج هسته  $N$  ( $N = 1, 2, 4, 8$ ) و چهار مقدار برای متغیر شاخص بار  $\Psi$  (از  $0.0004$  تا  $0.002$  با نمو  $0.0002$ ) بهینه‌سازی پانل صورت گرفت.

مشاهده می‌شود برای یک مقدار ثابت  $\Pi$ ، با افزایش  $N$  برای جلوگیری از تسلیم و کمانش پانل بدلیل بارگذاری، مقادیر بهینه ضخامت‌های رویه‌ها ( $d/l$ ) و هسته ( $d_c/l$ ) کاهش و مقدار بهینه  $H/l$  افزایش یافته‌اند. شاخص وزن بهینه نیز با افزایش  $N$ ، افزایش می‌یابد. بنابراین در این نوع بارگذاری پانل با  $N = 1, 2$  طراحی‌ها بهینه می‌باشند. با این حال، اگر محدودیت فضا وجود داشته باشد  $N = 1$  را می‌توان به عنوان پانل بهینه‌تر در نظر گرفت.

برای بررسی تأثیر پارامتر شاخص بار، نمودار متغیرهای طراحی بر حسب دو مقدار شاخص بار در شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود در یک  $N$  ثابت، با افزایش شاخص بار مقادیر بهینه  $d/l$ ،  $d_c/l$  و  $H/l$  افزایش یافته‌اند. نمودارهای  $H/l$  و  $\Psi$  بر خلاف دو نمودار دیگر، برای هر دو مقدار شاخص بار به صورت افزایشی است. مطابق شکل ۲۰، نرخ افزایش شاخص وزن بهینه با افزایش بیشتر  $N$  دیگر تغییر چندانی نکرده است؛ تا جایی که از  $N = 4$  به بعد تغییرات شاخص وزن بهینه تقریباً صفر می‌باشد.

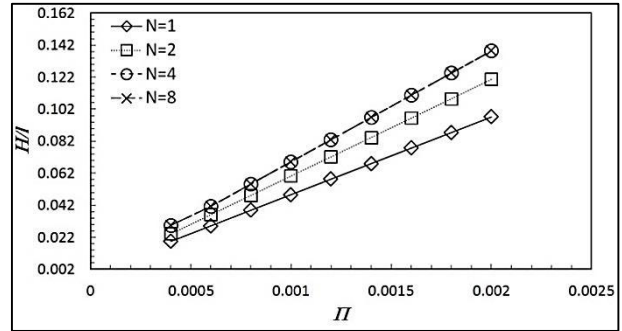


شکل ۱۷ - ارتفاع پانل نرمال شده بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری طولی ( $0.1 < d/l < 0.01$  و  $0.003 < d_c/l < 0.001$ )

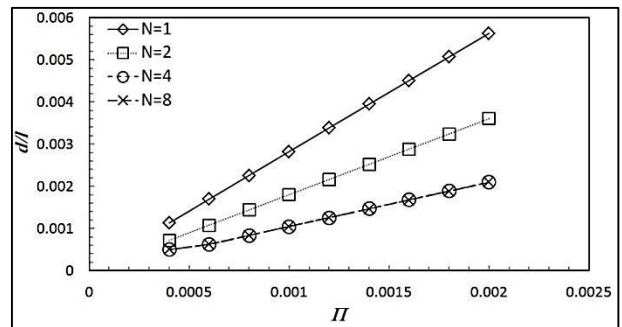


شکل ۱۸ - ضخامت رویه نرمال شده بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری طولی ( $0.2 < H/l < 0.1$  و  $0.003 < d_c/l < 0.001$ )

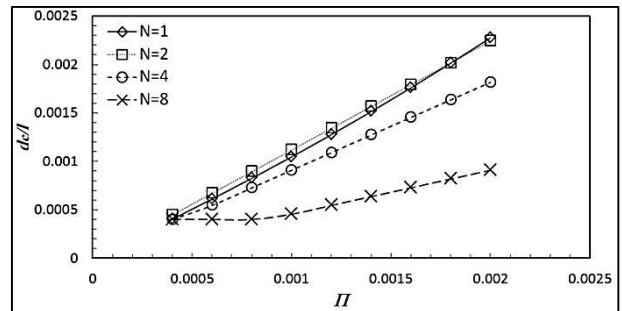
برای مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته از مراجع در دسترس شامل بکارگیری الگوریتم جستجوی گرانشی [۲۳]، الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات [۲۸] و روش ریاضی در مرجع [۷] استفاده شده است. مقایسه در جدول ۳ و شکل ۲۱ ارائه شده‌اند. نکته قابل توجه آن است که هر سه الگوریتم تکاملی نسبت به روش ریاضی نتایج به مراتب بهتری داشته‌اند. علاوه بر آن الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته به نتایج بهتری نسبت به دو الگوریتم تکاملی دیگر و همچنین روش ریاضی دست یافته است که حاکی از قدرتمندی این الگوریتم می‌باشد.



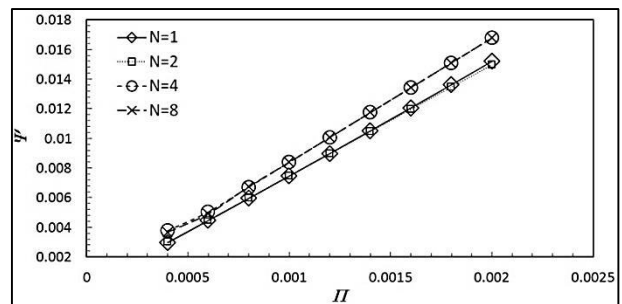
شکل ۱۳ - ارتفاع پانل نرمال شده بهینه بر حسب شاخص بار در بارگذاری طولی ( $0.1 < d/l < 0.003$  و  $0.001 < d_c/l < 0.001$ )



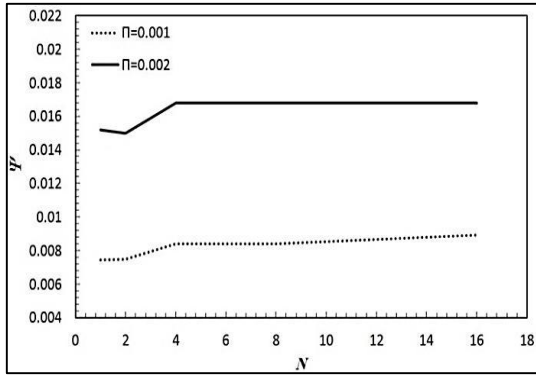
شکل ۱۴ - ضخامت رویه نرمال شده بهینه بر حسب شاخص بار در بارگذاری طولی ( $0.2 < H/l < 0.1$  و  $0.003 < d_c/l < 0.001$ )



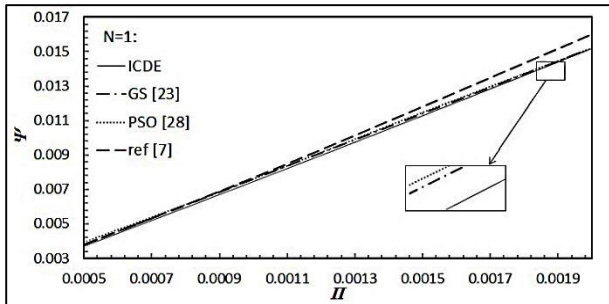
شکل ۱۵ - ضخامت هسته نرمال شده بهینه بر حسب شاخص بار در بارگذاری طولی ( $0.2 < H/l < 0.1$  و  $0.1 < d/l < 0.001$ )



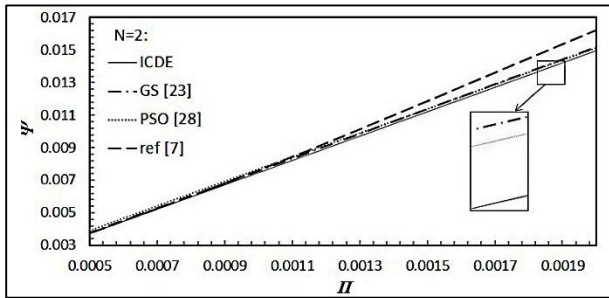
شکل ۱۶ - شاخص وزن بهینه بر حسب شاخص بار در بارگذاری طولی ( $0.2 < H/l < 0.1$ ،  $0.1 < d/l < 0.003$  و  $0.001 < d_c/l < 0.001$ )



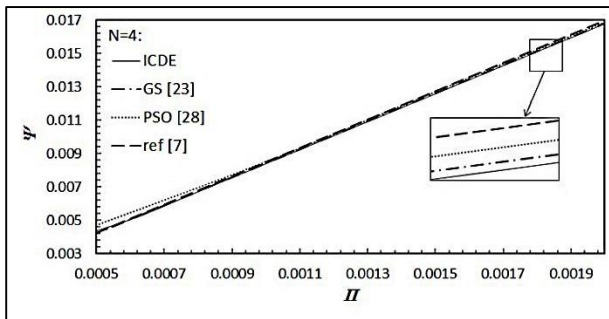
شکل ۲۰ - شاخص وزن بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری طولی ( $0.1 < H/l < 0.2$ ،  $0.001 < d/l < 0.1$  و  $0.0001 < d_c/l < 0.03$ )



الف-  $N = 1$



ب-  $N = 2$

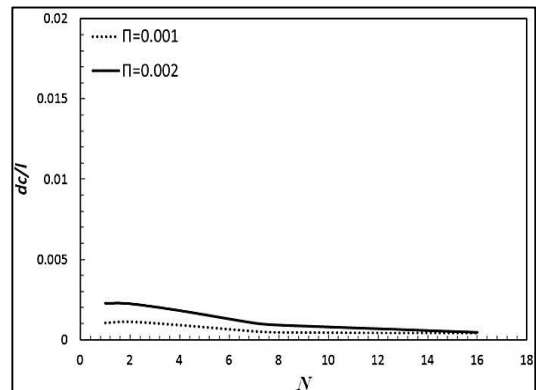


ج-  $N = 4$

شکل ۲۱ - مقایسه شاخص وزن حاصل از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته با الگوریتم‌های جستجوی گرانشی [۲۳]، گروه ذرات [۲۸] و مرجع [۷] در بارگذاری طولی برای  $N = 1, 2, 4$

جدول ۳ - متغیرهای طراحی و شاخص وزن بهینه حاصل از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته، الگوریتم جستجوی گرانشی [۲۳]، گروه ذرات [۲۸] و مرجع [۷] در بارگذاری طولی

$N$	$\Pi$	الگوریتم	$d/l$	$d_c/l$	$H/l$	$\Psi$
۱	۰/۰۰۱	PSO	-	-	-	۰/۰۰۷۶۰۵
		GS	۰/۰۰۲۹۱۹	۰/۰۰۱۰۲۲	۰/۰۴۷۴۴۳	۰/۰۰۷۶۰۶
	۰/۰۰۲	ICDE	۰/۰۰۲۸۲۲۰	۰/۰۰۱۰۴۶۷	۰/۰۴۸۶۲۴۵	۰/۰۰۷۴۵۵۳
		PSO	-	-	-	۰/۰۱۵۲۱۶
	۰/۰۰۲	GS	۰/۰۰۵۶۳۴	۰/۰۰۲۲۸۳	۰/۰۹۷۵۴۱	۰/۰۱۵۲۱۹
		ICDE	۰/۰۰۵۶۲۵	۰/۰۰۲۲۷۶۲	۰/۰۹۷۱۵۲۵	۰/۰۱۵۱۹۱۱
۲	۰/۰۰۱	PSO	-	-	-	۰/۰۰۷۷۰۱
		GSA	۰/۰۰۱۸۹۷	۰/۰۰۱۰۹۲	۰/۰۵۸۶۴۸	۰/۰۰۷۵۷۶
	۰/۰۰۱	ICDE	۰/۰۰۱۸۰۱۳	۰/۰۰۱۱۱۷۰	۰/۰۶۰۲۴۹۱	۰/۰۰۷۴۶۸۹
		PSO	-	-	-	۰/۰۱۵۱۳۸
	۰/۰۰۲	GS	۰/۰۰۳۷۸۳	۰/۰۰۲۲۰۳	۰/۱۱۹۴۶۴	۰/۰۱۵۱۹۲
		ICDE	۰/۰۰۳۶۰۲۵	۰/۰۰۲۲۴۳۱	۰/۱۲۰۶۰۳۳	۰/۰۱۴۹۶۸۸
۴	۰/۰۰۱	PSO	-	-	-	۰/۰۰۸۵۰۵
		GS	۰/۰۰۱۲۴۱	۰/۰۰۰۸۵۷	۰/۰۶۵۶۵	۰/۰۰۸۴۱۴
	۰/۰۰۱	ICDE	۰/۰۰۱۰۴۹۸	۰/۰۰۰۹۰۸۴	۰/۰۶۹۱۶۱۱	۰/۰۰۸۳۸۷۸
		PSO	-	-	-	۰/۰۱۶۸۵۴
	۰/۰۰۲	GS	۰/۰۰۲۵۰۸	۰/۰۰۱۷۰۵	۰/۱۳۰۳۸۶	۰/۰۱۶۸۱۹
		ICDE	۰/۰۰۲۰۹۹۹	۰/۰۰۱۸۱۷۲	۰/۱۳۸۳۸۶۷	۰/۰۱۶۷۷۹۰
۸	۰/۰۰۱	PSO	-	-	-	-
		GS	۰/۰۰۸۹۲	۰/۰۰۰۴۷۹	۰/۰۷۲۶۵۴	۰/۰۰۸۴۲۳
	۰/۰۰۱	ICDE	۰/۰۰۱۰۴۸۲	۰/۰۰۴۵۴۴	۰/۰۶۹۱۸۴۴	۰/۰۰۸۳۸۷۴
		PSO	-	-	-	-
	۰/۰۰۲	GS	۰/۰۰۱۶۲۳	۰/۰۰۰۹۸۱	۰/۱۴۸۷۸۲	۰/۰۱۶۸۳۲
		ICDE	۰/۰۰۲۰۹۵۶	۰/۰۰۰۹۰	۰/۱۳۸۴۰۱۱	۰/۰۱۶۷۷۶۳



شکل ۱۹ - ضخامت هسته نرمال شده بهینه بر حسب تعداد موج‌های هسته در بارگذاری طولی ( $0.1 < H/l < 0.2$  و  $0.001 < d/l < 0.1$ )

## بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بهینه‌سازی پانل ساندویچی هسته منشور تحت بارگذاری جداگانه عرضی و طولی بوسیله الگوریتم تکاملی تفاضل مقید بهبودیافته پرداخته شد. نتایج بر اساس تغییر تعداد موج‌های هسته و مقدار بار اعمال شده ارائه شدند. مشاهده شد که در هر دو نوع بارگذاری عرضی و طولی، با افزایش بار مقادیر ارتفاع پانل، ضخامت هسته و ضخامت رویه افزایش یافته‌اند تا از تسلیم و کمانش پانل جلوگیری شود؛ بعلاوه مقدار وزن نیز افزایش می‌یابد. اما در بارگذاری ثابت با افزایش تعداد موج‌های هسته، رفتار شاخص وزن با توجه به نوع بارگذاری تغییر می‌کند؛ به طوری که در بارگذاری عرضی رفتاری کاهنده و در بارگذاری طولی رفتاری افزایشی دارند. این تفاوت رفتار را می‌توان بدلیل وابستگی تمام قیود مسئله به پارامتر تعداد موج هسته در بارگذاری طولی دانست؛ در حالی که در بارگذاری عرضی تنها دو قید وابسته هستند. با این وجود، برای هر دو نوع بارگذاری، ضخامت‌های رویه و هسته رفتاری کاهنده و ارتفاع پانل رفتاری افزایشی داشتند. با توجه به رفتار شاخص و در نظر گرفتن محدودیت فضا، در بارگذاری عرضی پانل با تعداد موج هسته ۴ و در بارگذاری طولی پانل با تعداد موج ۱ به عنوان پانل با کارایی مؤثرتر نتیجه‌گیری شد. به منظور بررسی کارایی الگوریتم، نتایج با چند الگوریتم تکاملی و روش ریاضی مورد مقایسه قرار گرفت. در هر دو نوع بارگذاری الگوریتم مذکور، همانند دیگر الگوریتم‌ها تکاملی عملکردی بهتری را نسبت به روش ریاضی نشان داد. اگرچه در بارگذاری عرضی عملکرد الگوریتم‌های تکاملی یکسان بود؛ اما در بارگذاری طولی، الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته بهترین عملکرد را در بهینه کردن وزن پانل داشت. در کنار عملکرد بهتر، چون الگوریتم تکامل تفاضلی مقید بهبودیافته از روش مدیریت قیود چندهدفه استفاده می‌کند، نیازی به فرآیند آزمون و خطا در استفاده از تابع پنالتی ندارد، لذا می‌توان آن را جایگزینی کارا نسبت به روش‌های مورد بررسی در بهینه‌یابی پانل دانست.

## فهرست علائم

$d$	ضخامت صفحه رویه پانل ( $m$ )
$d_c$	ضخامت صفحه هسته پانل ( $m$ )
$CR$	پارامتر کنترل عملگر ترکیب در الگوریتم
$E$	مدول الاستیسته ( $N / m^2$ )

$F$	مدول الاستیسته ( $N / m^2$ )
$H$	ارتفاع پانل ( $m$ )
$K_c$	ضریب کمانش هسته
$K_f$	ضریب کمانش رویه
$N$	تعداد موج‌های هسته
$V$	نیروی برشی ماکزیمم
$\nu$	عملگر جهش در الگوریتم
$W$	وزن پانل در واحد عرض ( $N / m$ )
$x$	جواب‌های الگوریتم
$y$	فاصله از مرکز پانل تا رویه ( $m$ )

## علائم یونانی

$\epsilon_y$	کرنش تسلیم
$\theta$	زاویه قرارگیری صفحات افقی و مورب هسته ( $rad$ )
$\lambda$	تعداد اعضاء فرزندان در الگوریتم
$\mu$	تعداد اعضاء والدین در الگوریتم
$\nu$	ضریب پواسون
$\Pi$	شاخص بار
$\rho$	چگالی ( $kg / m^3$ )
$\sigma_y$	تنش تسلیم
$\Psi$	شاخص وزن

## زیرنویس‌ها

$best$	بهترین عضو در الگوریتم
$c$	هسته
$i$	تعداد قیود، شماره عضو در الگوریتم
$t$	شماره تکرار الگوریتم

## پی‌نوشت‌ها

- Corrugated core
- Global
- Heuristic
- Particle Swarm optimization (PSO)
- Charged System Search (CSS)
- Water Cycle Algorithm (WC)
- Echolocation Dolphin Optimization (EDO)
- MATLAB
- Gravitational Search (GS)
- Ant Colony (AC)
- Simulated Annealing (SA)
- Improved Constrained Differential Evolution (ICDE)
- Improved Differential Evolution (IDE)

- [8] Rathbun, H.J., Zok, F.W., Evans, A.G., "Strength optimization of metallic sandwich panels subject to bending", International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, No. 26, pp. 6643-6661, 2005.
- [9] Liaghat, G., Serailou, H., "Core optimal design in honeycomb structures under compression loading", Modares Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 37, pp. 73-82, 2009. (In Persian فارسی)
- [10] Rao, S.S., "Engineering optimization: theory and practice", 4th ed.: John Wiley and Sons, 2009.
- [11] Prugel-Bennett, A., "Benefits of a population: five mechanisms that advantage population-based algorithms", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 14, No. 4, pp. 500-517, 2010.
- [12] Kennedy, J., Eberhart, R., "Particle swarm optimization", in Proceeding of, IEEE, Vol.4, pp. 1942-1948.
- [13] Geem, Z., Kim, J., Loganathan, G.V., "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", SIMULATION, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68, 2001.
- [14] Yang, X.S., "A new metaheuristic bat-inspired algorithm", Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010), Eds., pp. 65-74: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [15] Yang, X.S., "Firefly algorithms for multimodal optimization", Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [16] Kaveh, A., Talatahari, S., "A novel heuristic optimization method: charged system search", Acta Mechanica, Vol. 213, No. 3-4, pp. 267-289, 2010.
- [17] Eskandar, H., Sadollah, A., A., Bahreininejad, M., Hamdi, "Water cycle algorithm – A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems", Computers & Structures, Vol. 110-111, pp. 151-166, 2012.
- [18] Kaveh, A., Farhodi, N., "A new optimization method: Dolphin echolocation", Advances in Engineering Software, Vol. 59, pp. 53-70, 2013.
- [19] Fereidoon, A., Mohammadian, M., Hemmatian, H., "Reliability-based optimization of a prismatic core sandwich panel", Journal of Civil Engineering ۱۴ Archiving-Based Adaptive tradeoff model (ArATM)  
۱۵ Weight index  
۱۶ Load index  
۱۷ Poisson  
۱۸ Constraint Handling  
۱۹ Constrained optimization Evolutionary Algorithm (COEA)  
۲۰ Feasible  
۲۱ Penalty function  
۲۲ Mutation  
۲۳ Current  
۲۴ Crossover  
۲۵ Breeder Genetic Algorithm  
۲۶ Diversity  
۲۷ Infeasible  
۲۸ Semi-feasible  
۲۹ Pseudo-code
- منابع و مراجع
- [1] Zenkert, D., "An introduction to sandwich construction", London: Engineering Materials Advisory Services, 1995.
- [2] Vinson, J.R., Sierakowski, R.L., "The behavior of structures composed of composite materials", The Netherlands: KLUWER Academic Publisher, 2002.
- [3] Wadley, H.N.G., Fleck, N.A., Evans, A.G., "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures", Composites Science and Technology, Vol. 63, No. 16, pp. 2331-2343, 2003.
- [4] Zok, F.W., altner, S.A., Wei, Z., Rathbun, H.J., McMeeking, R.M., Evans, A.G., "A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores", International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, No. 22-23, pp. 6249-6271, 2004.
- [5] Lu, T.J., Stone, H.A., Ashby, M.F., "Heat transfer in open-cell metal foams", Acta Materialia, Vol. 46, No. 10, pp. 3619-3635, 1998.
- [6] Min, J.K., Jeong, J.H., Ha, M.Y., Kim, K.S., "High temperature heat exchanger studies for applications to gas turbines", Heat and Mass Transfer, Vol. 46, No. 2, pp. 175-186, 2009.
- [7] Valdevit, L., Hutchinson, J.W., Evans, A.G., "Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores", International Journal of Solids and Structure, Vol. 41, No. 18-19, pp. 5105-5124, 2004.

- Structures and Materials, Vol. 16, No. 4, pp. 398-417, 2014.
- [27] Martínez-Martín, F.J., Thrall, A.P., "Honeycomb core sandwich panels for origami-inspired deployable shelters: Multi-objective optimization for minimum weight and maximum energy efficiency", Engineering Structures, Vol. 69, pp. 158-167, 2014.
- [28] Mohammadian, M., Fereidoon, A., "Multi objective optimization of sandwich panels using particle swarm algorithm", Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 74-82, 2014. (In Persian فارسی)
- [29] Gu, S., Lu, T.J., Evans, A.G., "On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, No. 11, pp. 2163-2175, 2001.
- [30] Wang, Y., Cai, Z., Guo, G., Zhou, Y., "Multiobjective optimization and hybrid evolutionary algorithm to solve constrained optimization problems", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Vol. 37, No. 3, pp. 560-575, 2007.
- [31] Coello Coello, C.A., "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 191, No. 11-12, pp. 1245-1287, 2002.
- [32] Jia, G., Wang, Y., Cai, Z., Jin, Y., "An improved  $(\mu+\lambda)$ -constrained differential evolution for constrained optimization", Information Sciences, Vol. 222, pp. 302-322, 2013.
- [33] Storn, R., Price, K., "Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", Journal of Global Optimization, Vol. 11, No. 4, pp. 341-359, 1997.
- Optimization, Vol. 22, No. 1, pp. 89-102, 2011. (in Persian فارسی)
- [20] Banerjee, S., Battley, M., Bhattacharyya, D., "Shear strength optimization of reinforced honeycomb core materials", Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 17, No. 7, pp. 542-552, 2010.
- [21] Hemmatian, H., Fereidoon, A., Rajabpour, M., "Optimization of prismatic core based on particle swarm algorithm", Modeling in Engineering, Vol. 8, No. 20, pp. 17-26, 2010. (In Persian فارسی)
- [22] Fereidoon, A., Hemmatian, H., Mohammadzadeh, A., Assareh, E., "Sandwich panel optimization based on yielding and buckling criteria by using of imperialist competitive algorithm", Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 25-35, 2013. (In Persian فارسی)
- [23] Mohammadian, M., Abolbashari, M.H., "Investigation the efficiency of gravitioanl search algorithm in optimization of sandwich structures under longitudinal loding with yielding and buckling constraints", Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 19-28, 2015. (In Persian فارسی)
- [24] Tan, X.H., Soh, A.K., "Multi-objective optimization of the sandwich panels with prismatic cores using genetic algorithms", International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, No. 17, pp. 5466-5480, 2007.
- [25] Hudson, C.W., Carruthers, J.J., Robinson, A.M., "Multiple objective optimisation of composite sandwich structures for rail vehicle floor panels", Composite Structures, Vol. 92, No. 9, pp. 2077-2082, 2010.
- [26] Khalkhali, A., Khakshournia, S., Nariman-Zadeh, N., "A hybrid method of FEM, modified NSGAI and TOPSIS for structural optimization of sandwich panels with corrugated core", Journal of Sandwich