



بررسی کارایی الگوریتم جستجوی گرانشی در بهینه‌سازی سازه‌های ساندویچی تحت بارگذاری طولی با در نظر گرفتن قیدهای تسلیم و کمانش

مصطفی محمدیان¹، محمدحسین ابوالبشری^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، گروه مکانیک، مرکز پژوهشی مهندسی تولید ناب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 91775-1111، abolbash@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 فروردین 1394

پذیرش: 17 خرداد 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

پانل ساندویچی هسته منشوری

قیدهای تسلیم و کمانش

بهینه‌سازی وزن

الگوریتم جستجوی گرانشی

چکیده

سازه‌های ساندویچی سازه‌هایی هستند که با وجود وزن کم دارای استحکام قابل‌توجهی می‌باشند. پانل‌های ساندویچی با هسته‌های باز و منشوری گروهی از این سازه‌ها بوده که دارای ویژگی‌هایی منحصر به فرد هستند. نام‌گذاری این پانل‌ها براساس تعداد موج‌های هسته صورت می‌گیرد. در این مقاله از روش الگوریتم جستجوی گرانشی در بهینه‌سازی وزن این پانل‌ها با در نظر گرفتن قیدهای تسلیم و کمانش استفاده شده است. این الگوریتم از جمله الگوریتم‌های ابتکاری است که الهام گرفته از نیروی جاذبه و قوانین حرکتی نیوتن می‌باشد. برای کمینه کردن وزن پانل، ضخامت هسته و رویه و ارتفاع پانل به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش بار در یک پانل معین، متغیرهای طراحی و وزن بهینه پانل افزایش می‌یابند. همچنین در یک بارگذاری مشخص، با افزایش تعداد موج‌های هسته، ضخامت هسته و رویه کاهش و وزن بهینه و ارتفاع پانل افزایش می‌یابند. همچنین پانل‌های با تعداد یک و دو موج در هسته دارای وزن بهینه کمتر و کارایی سازه‌ای بهتر نسبت به سایر پانل‌ها می‌باشند. مقایسه نتایج بیانگر کارایی روش الگوریتم جستجوی گرانشی در بهینه‌سازی وزن این پانل‌ها و رسیدن به جواب‌های بهینه کمتر و سرعت همگرایی مناسب می‌باشد.

Investigation the efficiency of gravitational search algorithm in optimization of sandwich structures under longitudinal loading with yielding and buckling constraints

Mostafa Mohammadian, Mohammad Hossein Abolbashari*

Department of Mechanical Engineering, Lean Production Engineering Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91775-1111 Mashhad, Iran, abolbash@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 April 2015
Accepted 07 June 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:
Sandwich Panel With Prismatic Core
Yielding and Buckling Constraints
Weight Optimization
Gravitational Search Algorithm

ABSTRACT

Sandwich structures have low weight and high stiffness. Sandwich panels with open and prismatic cores are a kind of these structures that have special properties. These panels are named based on the number of corrugations of the core. In this paper weight optimization of these panels is carried out by Gravitational Search Algorithm based on yielding and buckling constraints. This algorithm is a heuristic algorithm that is based upon the Newtonian gravity force and the laws of motion. For optimization of the weight, core and surface thickness and panel height are assumed as design variables. The results show that for a specific panel, the design variables and the weight of panel are increased by increasing the load. Also the core and surface thickness are decreased and the weight and panel height are increased by increasing core corrugate number at a specific loading. Also, the panels with one and two corrugates in the core, have the minimum weight and highest structural efficiency. By comparing the results with some previous studies, it is shown that the Gravitational Search Algorithm is a useful tool in achieving lower weight in these panels and has a good convergence rate.

1- مقدمه

مهندسی استفاده می‌شوند. این پانل‌ها به دلیل داشتن وزن کم و استحکام بالا مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [1]. برخی از انواع مختلف هسته در این پانل‌ها عبارت‌اند از هسته‌های موج‌دار¹، هسته‌های لانه زنبوری² و هسته‌های مشبک³. در این سازه‌ها به دلیل باز و متخلخل بودن هسته، تنها حدود 20%

سازه‌های ساندویچی سازه‌هایی هستند که در آن‌ها یک هسته در فضای بین دو رویه قرار گرفته است. عمده‌ترین ویژگی این سازه‌ها، کاهش وزن در حد بسیار چشمگیر و علاوه بر آن حفظ استحکام سازه در حد بسیار مطلوب می‌باشد. پانل‌های ساندویچی با شکل‌های هسته متفاوت از جمله این سازه‌ها بوده و به طور گسترده در صنایع هوافضا، قطارهای با سرعت بالا و سازه‌های

1- Corrugated cores
2- Honeycomb cores
3- Lattice cores

Please cite this article using:

M. Mohammadian, M. H. Abolbashari, Investigation the efficiency of gravitational search algorithm in optimization of sandwich structures under longitudinal loading with yielding and buckling constraints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 19-28, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از فضای داخلی سازه توسط هسته اشغال می‌شود.

در پانل‌های ساندویچی با هسته باز و منشوری معمولاً هسته و رویه از یک جنس ساخته می‌شوند. این پانل‌ها به دلیل داشتن هسته‌های باز، قابلیت عبور سیال را داشته و می‌توانند به عنوان یک مبدل حرارتی نیز استفاده شوند [2]. قابلیت جذب انرژی، کاربرد در سازه‌های هوشمند و مقاومت صوتی از جمله ویژگی‌های دیگر این پانل‌ها می‌باشد [3].

طراحی بهینه این پانل‌ها از نظر وزن با رعایت قیده‌های طراحی مانند تسلیم و کمانش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهینه‌سازی پانل‌های ساندویچی با استفاده از روش‌های مرسوم ریاضی توسط والدویت و همکاران [4] و با استفاده از روش قابلیت اعتماد توسط فریدون و همکاران انجام شده است [5]. راتبان و همکاران [6] نیز به بهینه‌سازی استحکام این پانل‌ها در بارگذاری خمشی پرداخته‌اند. همچنین پاسخ ارتعاشی پانل‌های ساندویچی با هسته موج‌دار با استفاده از روش المان طیفی¹ به دست آمده است [7].

امروزه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری که غالب آن‌ها با الهام از فرآیندهای فیزیکی و بیولوژیکی و طبیعت به وجود آمده و به صورت جمعیتی عمل می‌کنند، در مسائل مهندسی رو به افزایش است. این روش‌ها به دلیل استفاده مستقیم از مقادیر تابع و عدم نیاز به مشتق آن، در حل مسائل بهینه‌سازی یک هدفه و چند هدفه کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. الگوریتم‌های ابتکاری برخلاف روش‌های کلاسیک بر مبنای تصادف عمل کرده و جستجوی فضا را به صورت موازی انجام می‌دهند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان الگوریتم ژنتیک با الهام از علم وراثت و تکامل [8]، پخت شبیه‌سازی شده با الهام از مشاهدات ترمودینامیک [9]، الگوریتم ایمنی با شبیه‌سازی سیستم دفاعی انسان [10]، الگوریتم جستجوی جمعیت مورچه‌ها با شبیه‌سازی رفتار آن‌ها در جستجوی غذا [11]، الگوریتم گروه ذرات با تقلید از رفتار پرندگان [12] و الگوریتم رقابت استعماری الهام شده از رقابت استعماری کشورها را نام برد [13].

الگوریتم کلونی مورچه‌ها در بهینه‌سازی چند هدفه پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی کف وسایل نقلیه ریلی توسط هادسون و همکاران [14] استفاده شده است. همتیان و همکاران [15] نیز به بهینه‌سازی وزن پانل با در نظر گرفتن قیده‌های تسلیم و کمانش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات پرداخته‌اند. الگوریتم رقابت استعماری نیز توسط فریدون و همکاران [16] در بهینه‌سازی وزن پانل‌های ساندویچی مورد استفاده قرار گرفته است. تان و سو [17] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی دو هدفه وزن و قابلیت هدایت حرارتی پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری پرداخته‌اند. مدل‌سازی و بهینه‌سازی دو هدفه وزن و خیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط خلخالی و همکاران [18] در این پانل‌ها انجام شده است. همچنین لیاقت و سرایلو [19] به بهینه‌سازی هسته در سازه‌های لانه زنبوری تحت بارگذاری فشاری پرداخته‌اند. محمدیان و فریدون [20] با در نظر گرفتن شاخص‌های وزن و قابلیت هدایت حرارت، بهینه‌سازی چند هدفه این پانل‌ها را با استفاده از الگوریتم گروه ذرات انجام داده‌اند. بهینه‌سازی دو هدفه وزن و افزایش بازده انرژی با استفاده از الگوریتم چند هدفه پخت شبیه‌سازی شده در پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری صورت گرفته است [21].

لازم به ذکر است که در مراجع 5، 15، 16 و 20 بهینه‌سازی با در نظر گرفتن بارگذاری عرضی روی پانل انجام شده و بارگذاری طولی مورد توجه قرار نگرفته است.

الگوریتم جستجوی گرانشی² در سال 2009 توسط راشدی معرفی شد [22]. این الگوریتم با شبیه‌سازی قوانینی شبیه به قانون جاذبه و قانون حرکت نیوتن طراحی شده است. طبق قانون جاذبه نیوتن، دو جسم به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند که این نیرو متناسب با حاصل‌ضرب جرم دو جسم بوده و با توان دوم فاصله بین آن‌ها رابطه وارون دارد. قانون حرکت نیوتن نیز شتاب ایجاد شده در اثر نیروی وارده به جسم را بیان می‌کند. این شتاب تناسب مستقیم با نیروی وارده را داشته و به صورت معکوس وابسته به جرم می‌باشد. بنابراین دو جسم به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند و جسم کوچک‌تر به دلیل جرم کمتر به سمت جسم بزرگ‌تر کشیده خواهد شد. بدین ترتیب اگر نقاط بهینه محل جسم با جرم بزرگ‌تر در نظر گرفته شود، با استفاده از قانون جاذبه می‌توان این اطلاعات را به بقیه جرم‌ها منتقل کرده و آن‌ها را به سمت نقاط بهینه سوق داد.

ویژگی‌های مثبت این الگوریتم مانند همگرایی سریع، عدم توقف در بهینه‌های محلی و کاهش حجم محاسباتی نسبت به الگوریتم‌های تکاملی بستر جدیدی از تحقیقات را فرا روی محققین قرار داده است. از این الگوریتم بیشتر در حوزه مهندسی برق استفاده شده است [23-25]. روزی و صفوی‌نژاد [26] با استفاده از این الگوریتم به تحلیل معکوس انتقال حرارت تابشی در یک محفظه استوانه‌ای پرداخته‌اند. همچنین الگوریتم جستجوی گرانشی چند هدفه توسط همتیان و همکاران [27] در بهینه‌سازی مواد مرکب هیبرید مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مقاله ابتدا به تشریح پانل ساندویچی با هسته منشوری پرداخته و تابع وزن و قیده‌های تسلیم و کمانش بیان می‌شود. سپس روش الگوریتم جستجوی گرانشی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در پایان نیز نتایج بهینه‌سازی وزن پانل با استفاده از این الگوریتم ارائه شده و نحوه استفاده از آن با ذکر چند مثال توضیح داده می‌شود.

2- پانل ساندویچی با هسته منشوری

پانل‌های ساندویچی با هسته منشوری³ از هسته‌هایی تشکیل شده‌اند که دارای فضای خالی بوده و از شکل‌دهی ورق‌ها به وجود می‌آیند. نام‌گذاری این پانل‌ها براساس تعداد موج‌های هسته (n) می‌باشد. در شکل 1 پانل با $n=4$ تحت بارگذاری طولی نشان داده شده است. منظور از بارگذاری طولی در این پانل‌ها، هر یک از انواع حالت‌های بارگذاری است که با توجه به محل قرار گرفتن تکیه‌گاه، منجر به خمش پانل مطابق شکل 1 شود. متغیرهای طراحی که توسط پارامتر l بی بعد شده‌اند براساس شکل 1 عبارت‌اند از: H/l (فاصله صفحه‌های رویه)، d_c/l (ضخامت صفحه‌های هسته) و d/l (ضخامت صفحه‌های رویه). برای آن که نتایج ارائه شده در بهینه‌سازی برای حالت‌های مختلف بارگذاری و شرایط مختلف تکیه‌گاهی قابل تعمیم و استفاده باشند، پارامتر l که به صورت $l = M/V$ تعریف می‌شود، جهت بی‌بعد نمودن متغیرهای طراحی و وزن پانل استفاده گردیده است [1]. این پارامتر رابطه مستقیم با طول بارگذاری داشته و در آن M و V به ترتیب گشتاور خمشی و نیروی برشی بیشینه در واحد عرض پانل می‌باشند. همان‌طور که در شکل 2 مشخص است مقدار این پارامتر براساس نوع بارگذاری و شرایط مختلف تکیه‌گاهی تغییر می‌کند. همان‌طور که در ادامه بیان خواهد شد وزن بهینه نیز توسط این پارامتر بی بعد می‌گردد. بنابراین پس از بهینه‌سازی کافی است در هر حالت بارگذاری و تکیه‌گاهی مقدار l با توجه به شکل 2 انتخاب شده و

2- Gravitational Search Algorithm (GSA)

3- Sandwich panels with prismatic core

1- Spectral Element Method (SEM)

$$g_2 = \frac{V^2}{EM} \left\{ \min_{y \in \left[0, \frac{H-d}{2}\right]} \left\{ \frac{E}{\sigma_y} \left[\frac{d}{l} + \frac{n}{6\cos\theta} \frac{d_c}{l} \right] \left(\frac{H-d}{l} \right) \times A \right\} \right\}^{-1} \quad (3)$$

که پارامتر A در عبارت فوق طبق رابطه (4) می باشد.

$$A = \left(4 \left(\frac{y}{H-d} \right)^2 + 3 \left[B + \frac{1}{\sin\theta} C \right]^2 \right)^{-1/2} \quad (4)$$

B و C نیز به صورت رابطه های (5) و (6) می باشند:

$$B = \frac{1}{n \tan\theta} \left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right) \frac{d}{d_c} \quad (5)$$

$$C = \left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right) \left(\frac{1}{4} - \left(\frac{y}{H-d} \right)^2 \right) \quad (6)$$

قید کمانش رویه:

$$g_3 = \frac{24(1-\nu^2)}{K_c \pi^2 n^2 \tan^2\theta} \frac{V^2}{EM} \left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right) \left(\frac{l}{d} \right)^2 \left[\frac{d}{2l} + \frac{n}{12\cos\theta} \frac{d_c}{l} \right]^{-1} - 1 \quad (7)$$

قید کمانش هسته:

$$g_4 = \frac{V^2}{EM} \left(\frac{V^2}{EM} \right)^{-1}_{\text{corebuckling}} - 1 \quad (8)$$

در رابطه‌های فوق σ_y تنش تسلیم، ν ضریب پواسون، θ زاویه قرار گرفتن صفحه‌های هسته (شکل 1) و y پارامتر فاصله از مرکز هسته تا رویه می‌باشند.

مقدار عبارت $\left(V^2 / EM \right)_{\text{corebuckling}}$ که مربوط به کمانش صفحه‌های هسته

می‌باشد برحسب مقادیر مختلف n به صورت رابطه های (9) الی (11) خواهد بود [4]:

برای $n=1$:

$$\frac{V^2}{EM} = n^2 \frac{\pi^2 \sin^2\theta}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{d_c}{l} \right)^2 \left[\frac{d}{l} + \frac{n}{6\cos\theta} \frac{d_c}{l} \right]$$

1

$$\left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right) \sqrt{\frac{1}{K_b^2} + \frac{1}{K_s^2} \left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right)^2 \left[\frac{1}{n \tan\theta} \frac{d}{d_c} + \frac{1}{4 \sin\theta} \right]^2}} \quad (9)$$

برای $n=2$:

$$\frac{V^2}{EM} = n^2 \frac{\pi^2 \sin^2\theta}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{d_c}{l} \right)^2 \left[\frac{d}{l} + \frac{n}{6\cos\theta} \frac{d_c}{l} \right]$$

1

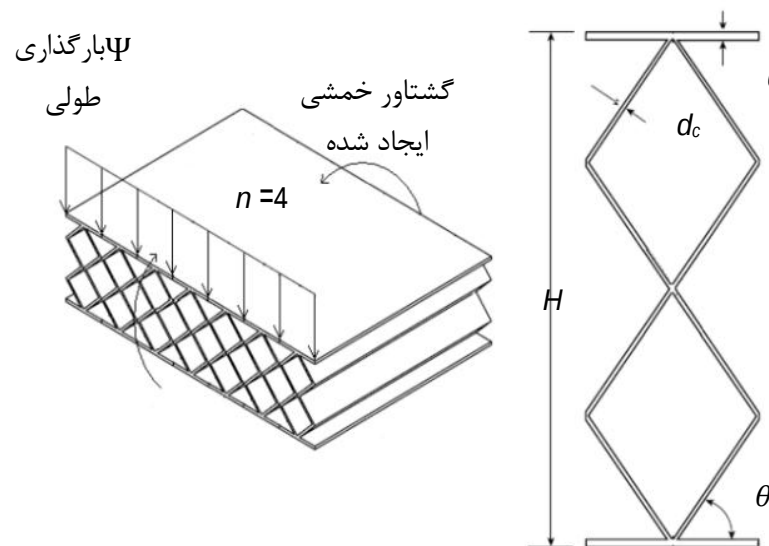
$$\left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right) \sqrt{\frac{1}{K_{cb}^2} + \frac{1}{K_s^2} \left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right)^2 \left[\frac{1}{n \tan\theta} \frac{d}{d_c} + \frac{1}{4 \sin\theta} \right]^2}} \quad (10)$$

برای $n \geq 4$:

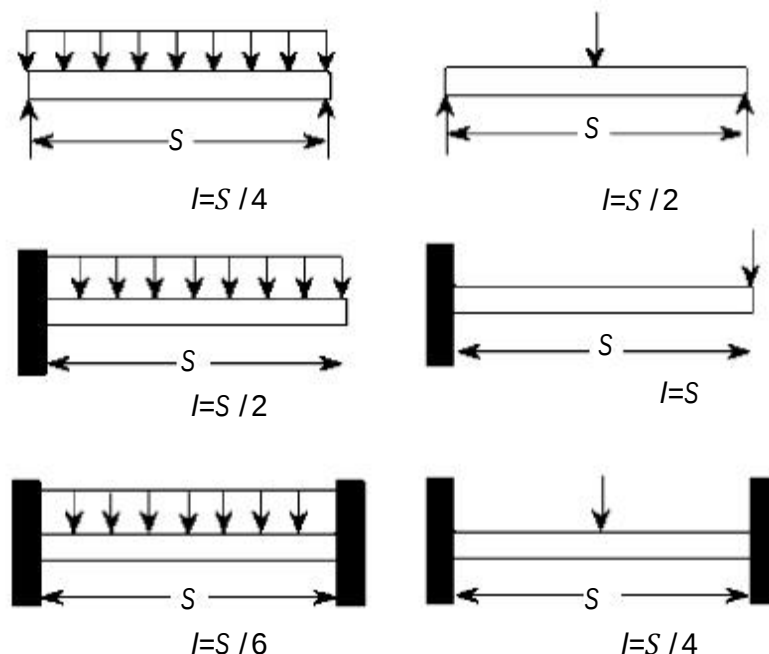
$$\frac{V^2}{EM} = \min \left\{ \left(\frac{V^2}{EM} \right)^{\text{inner}}, \left(\frac{V^2}{EM} \right)^{\text{outer}} \right\} \quad (11)$$

که داریم:

$$\left(\frac{V^2}{EM} \right)^{\text{inner}} = n^2 \frac{\pi^2 \sin^2\theta}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{d_c}{l} \right)^2 \left[\frac{d}{l} + \frac{n}{6\cos\theta} \frac{d_c}{l} \right]$$



شکل 1 پانل با $n=4$ تحت بارگذاری طولی و متغیرهای طراحی



شکل 2 رابطه متغیر l با نوع بارگذاری و طول سازه [1] قید تسلیم هسته

به کمک آن وزن بهینه پانل مورد نظر محاسبه گردد. در بخش 4-4 نحوه انجام این کار با ارائه چند مثال نشان داده شده است.

2-1- صورت‌بندی مسئله

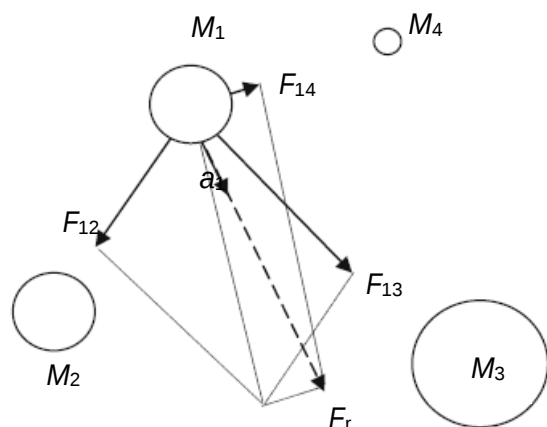
در این قسمت تابع وزن و قیدهای تسلیم و کمانش در بارگذاری طولی ارائه شده است. جهت سهولت در تحلیل مسئله دو پارامتر بی بعد $\Pi = V/\sqrt{EM}$ و $\Psi = W/\rho l^2$ معرفی می‌شوند که Π شاخص بارگذاری و معرف بار وارده و Ψ شاخص وزن سازه می‌باشند [1]. E و ρ به ترتیب مدول الاستیسیته و چگالی صفحه‌های رویه و هسته پانل می‌باشند. در این پانل‌ها عموماً هسته و رویه از یک ماده ساخته می‌شوند. وزن واحد عرض سازه توسط رابطه $W = 2\rho dl + \rho n l d_c / \cos\theta$ بیان می‌شود که در حالت بی بعد به صورت رابطه (1) خواهد بود.

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

قیدهای طراحی مربوط به تسلیم و کمانش اجزاء سازه برای بارگذاری طولی به صورت رابطه های (2) الی (8) می‌باشند [4]:

قید تسلیم رویه:

$$g_1 = \frac{V^2}{EM} \frac{\frac{E}{\sigma_y} \sqrt{n^2 + \frac{3}{\tan^2\theta} \left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right)^2}}{\left[n \frac{d}{l} + \frac{n^2}{6\cos\theta} \frac{d_c}{l} \right] \left(\frac{H-d}{l} - \frac{d}{l} \right)} - 1 \quad (2)$$



شکل 3 جهت نیرو و شتاب وارد بر جرم M_1 توسط جرم‌های پیرامون

برآیند نیروهائی که از جانب سایر جرم‌ها به آن وارد می‌شود (F_r)، شتاب می‌گیرد. در یک سیستم ایزوله با دو جسم 1 و 2، از جانب جسم 2 نیروی گرانشی به اندازه F_{12} به جسم 1 وارد می‌شود. بنابراین رابطه‌های (15) و (16) برای این دو جسم به صورت رابطه‌های (17) و (18) خواهند بود:

$$F_{12} = G \frac{M_{a2} M_{p1}}{R^2} \quad (17)$$

$$a_1 = \frac{F_{12}}{M_{i1}} \quad (18)$$

در این رابطه‌ها M_{i1} و M_{p1} به ترتیب جرم گرانشی غیرفعال و جرم اینرسی جسم اول و M_{a2} جرم گرانشی فعال جسم دوم می‌باشد.

طبق توضیحات داده شده، هر جرم محل و وضعیت سایر جرم‌ها را از طریق نیروی جاذبه گرانشی درک می‌کند. بنابراین می‌توان از این نیرو به عنوان ابزاری برای تبادل اطلاعات استفاده کرد [22].

در الگوریتم جستجوی گرانشی، محیط شامل یک دستگاه مختصات چند بعدی در فضای تعریف مسئله است. هر نقطه از فضا یک جواب مسئله خواهد بود. عامل‌های جستجو کننده مجموعه‌ای از جرم‌ها می‌باشند که هر جرم دارای سه مشخصه است: موقعیت جرم، جرم گرانشی و جرم اینرسی. قوانین حاکم بر این الگوریتم عبارت‌اند از [22]:

قانون گرانش: هر جرم در سیستم، تمام جرم‌های دیگر را به سمت خود می‌کشد. مقدار این نیرو با جرم گرانشی آن جرم و وارون فاصله آن دو جرم متناسب است.

قانون حرکت: سرعت فعلی هر جرم برابر با مجموع ضربی از سرعت قبلی جرم و تغییر سرعت آن است. تغییر سرعت یا شتاب هر جرم نیز برابر با نیروی وارد بر آن تقسیم بر جرم اینرسی خواهد بود.

سیستم به صورت مجموعه‌ای از N جرم تصور می‌گردد که موقعیت هر جرم جوابی از مسئله بهینه‌سازی خواهد بود. موقعیت بعد d از جرم i با x_i^d نشان داده می‌شود:

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \quad (19)$$

که n بیانگر بعد مسئله می‌باشد. در این سیستم در زمان t به جرم i از سوی جرم j در جهت بعد d نیرویی به اندازه $F_{ij}^d(t)$ وارد می‌شود که به صورت رابطه (20) خواهد بود [20]:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (20)$$

در رابطه فوق M_{pi} و M_{aj} به ترتیب جرم گرانشی فعال جرم i و جرم گرانشی غیرفعال جرم j می‌باشند. $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t و ε نیز یک عدد بسیار کوچک است. R_{ij} فاصله اقلیدسی (نرم 2) بین دو جرم است که با رابطه (21) به دست می‌آید [22]:

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\| \quad (21)$$

$$\frac{1}{\left(\frac{H}{l} - \frac{d}{l}\right) \sqrt{\frac{1}{K_{cb}^2} \frac{4}{n^2} + \frac{1}{K_s^2} \left(\frac{H}{l} - \frac{d}{l}\right)^2 \left[\frac{1}{n \tan \theta} \frac{d}{d_c} + \frac{1}{4 \sin \theta}\right]^2}} \quad (12)$$

$$\left(\frac{V^2}{EM}\right)^{outer} = n^2 \frac{\pi^2 \sin^2 \theta}{12(1-v^2)} \left(\frac{d_c}{l}\right)^2 \left[\frac{d}{l} + \frac{n}{6 \cos \theta} \frac{d_c}{l}\right]$$

$$\frac{1}{\left(\frac{H}{l} - \frac{d}{l}\right) \sqrt{\frac{1}{K_c^2} + \frac{1}{K_s^2} \left(\frac{H}{l} - \frac{d}{l}\right)^2 \left[\frac{1}{n \tan \theta} \frac{d}{d_c}\right]^2}} \quad (13)$$

در رابطه‌های فوق $K_c=4$ ، $K_s=5/35$ ، $K_b=23/9$ و $K_{bc}=7/81$ می‌باشند [4]. نحوه به دست آوردن قیدهای فوق در مرجع 4 با جزئیات کامل ارائه شده که به علت طولانی بودن، از ذکر مجدد آن خودداری گردیده است. به طور خلاصه مسئله بهینه‌سازی به شکل رابطه (14) بیان می‌شود که همان‌طور که گفته شد هدف بهینه‌سازی وزن با توجه به قیدهای تسلیم و کماتش در صفحه‌های هسته و رویه می‌باشد:

$$\text{Min: } \Psi = 2 \frac{d}{l} + \frac{n}{\cos \theta} \frac{d_c}{l} \quad \text{St: } g_i \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

که g_i ها طبق رابطه‌های (2) الی (13) بیان می‌شوند.

در این بخش تابع هدف و قیدهای مربوطه استخراج گردید. در الگوریتم‌های ابتکاری می‌توان با انتخاب پارامترهای مناسب و جستجوی بیشتر در فضای طراحی، به نقاط بهینه بهتری دست یافت. روش الگوریتم جستجوی گرانشی در بهینه‌سازی پانل‌های ساندویچی با هسته‌های باز تاکنون استفاده نشده و علاوه بر آن دارای مزایایی است که در مقدمه به برخی از آن‌ها اشاره شد. به همین دلیل این روش در بهینه‌سازی استفاده گردید. زیرا همان‌طور که در بخش نتایج مشاهده خواهد گردید با انتخاب پارامترهای مناسب، این روش در بهینه‌سازی یک هدفه وزن به نقاط بهینه بهتری در مقایسه با روش عددی دست یافته است. در ادامه روش الگوریتم جستجوی گرانشی و قواعد حاکم بر آن توضیح داده می‌شود.

3- الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی الهام گرفته از نیروی جاذبه و قوانین حرکتی نیوتن است. طبق قانون جاذبه نیوتن، نیروی جاذبه بین دو جسم با جرم‌های M_1 و M_2 و فاصله R ، با حاصل ضرب جرم آن دو جسم و وارون توان دوم فاصله بین آن‌ها متناسب بوده و به صورت رابطه (15) بیان می‌شود:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2} \quad (15)$$

که G ثابت گرانش نیوتن می‌باشد. از طرف دیگر طبق قانون دوم نیوتن، وقتی به جسم نیرویی وارد شود، جسم دارای شتابی به اندازه a خواهد شد که به جرم و اندازه نیروی وارده بستگی خواهد داشت. این قانون نیز به صورت رابطه (16) قابل بیان است:

$$a = \frac{F}{M} \quad (16)$$

رابطه‌های (15) و (16) نشان می‌دهند که هر جسم، جسم دیگر را به سمت خود می‌کشد. جرم بیشتر و فاصله کمتر بین دو جسم، منجر به افزایش نیروی جاذبه می‌گردد. به عبارتی دیگر اگر نیروی کشش بین دو جسم به حدی باشد که باعث حرکت شود، جسم کوچک‌تر به سمت جسم بزرگ‌تر حرکت خواهد کرد. مانند نیروی جاذبه زمین که اجسام را به سمت خود می‌کشد. مطابق شکل 3 در یک سیستم با چندین جرم، هر جرم در جهت

است. شرط توقف می‌تواند تعداد مراحل یا فاصله بین ضعیف‌ترین و قوی‌ترین عامل جمعیت در نظر گرفته شود.

4- ارائه نتایج و بحث

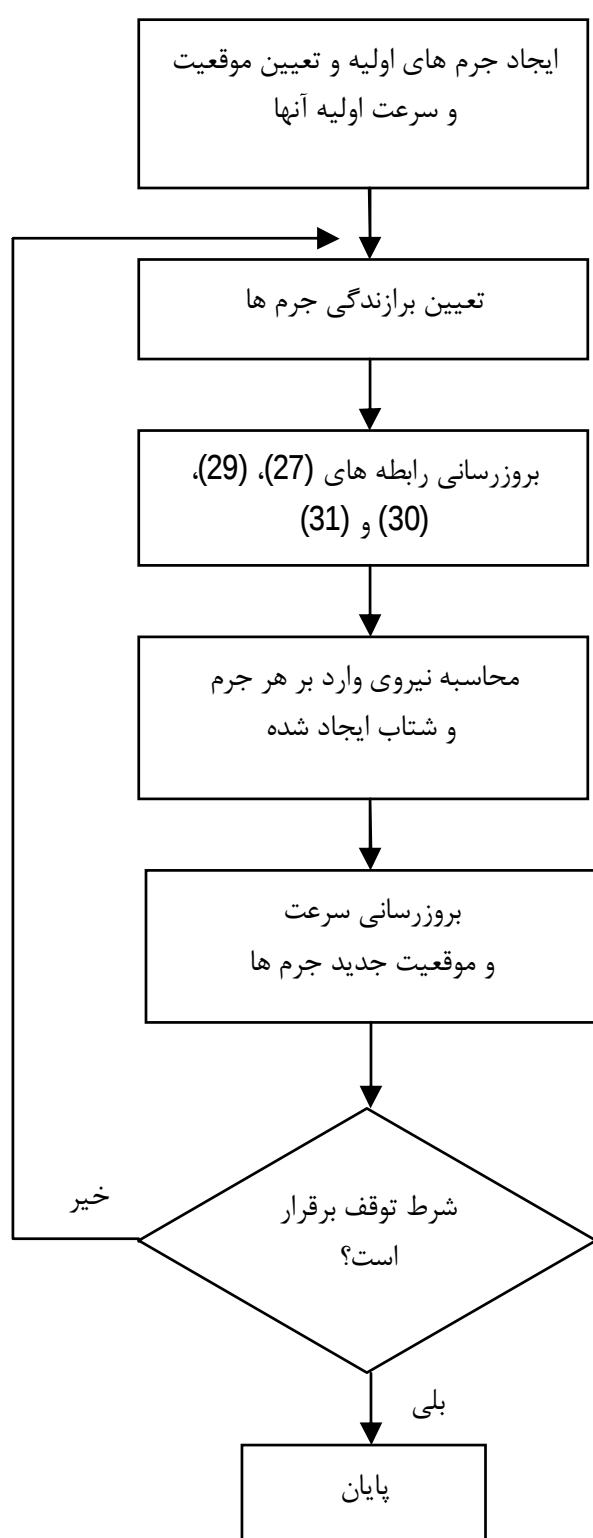
برنامه بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی گرانشی در نرم‌افزار متلب نوشته شده به طوری که می‌توان توابع هدف با متغیرهای متفاوتی را برای برنامه در نظر گرفت. جهت اعمال قیدها از روش تابع جریمه استفاده شده است. بدین ترتیب تابع هدف نهایی مجموع مقدار تابع هدف (رابطه (1)) و مقدار تابع جریمه خواهد بود:

$$F(x) = \Psi(x) + 10^{10}G(x) \quad (32)$$

که در آن:

$$G(x) = \sum_1^4 \langle g_i(x) \rangle \quad (33)$$

در رابطه فوق اگر قید نقض شود $\langle g_i(x) \rangle = 1$ و اگر قید نقض نشود $\langle g_i(x) \rangle = 0$ خواهد بود. قیدهای طراحی نیز همان رابطه‌های (2) الی (13) می‌باشند. در روش تابع جریمه، قیدها در یک ضریب بزرگ (10^{10}) ضرب می‌شوند. با انجام این کار، در صورتی که اندازه متغیرهای طراحی منجر به نقض قیدها شوند، اندازه تابع هدف، بسیار بزرگ شده و در روند بهینه‌سازی از میان متغیرهای طراحی دیگر حذف خواهند شد.



شکل 4 نمودار گردش الگوریتم جستجوی گرانشی

انحراف الگوریتم از قوانین فیزیکی در رابطه (20) مشهود است. زیرا طبق رابطه (15) نیرو با توان دوم فاصله رابطه وارون دارد. اما نتایج نشان می‌دهد برای داشتن یک الگوریتم جستجوی مناسب، استفاده از توان یک برای فاصله مناسب‌تر می‌باشد. نیروی وارد بر جرم i در زمان t در جهت بعد d $(F_i^d(t))$ برابر با مجموع تمام نیروهای است که سایر جرم‌ها بر این جرم وارد می‌کنند که به صورت رابطه (22) خواهد بود [22]:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rand}_j F_{ij}^d(t) \quad (22)$$

که rand_j یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ است که برای حفظ خصوصیت تصادفی بودن جستجو در نظر گرفته شده است. طبق قانون دوم نیوتن، هر جرم با وارد شدن نیرو شتابی به اندازه رابطه (23) به دست خواهد آورد.

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (23)$$

که در آن $a_i^d(t)$ شتاب جرم i در جهت بعد d در زمان t می‌باشد. M_{ii} جرم اینرسی جرم i است که مانند آنچه در طبیعت وجود دارد، جرم‌های گرانشی فعال، غیرفعال و اینرسی مساوی فرض می‌شوند [22].

$$M_{il} = M_{al} = M_{pl} = M_l \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

سرعت و شتاب هر جرم در زمان $t+1$ طبق رابطه‌های (25) و (26) خواهند بود [22]:

$$v_i^d(t+1) = \text{rand}_i v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (25)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (26)$$

در رابطه‌های فوق $v_i^d(t)$ سرعت جرم i ام در زمان t در بعد d خواهد بود. ثابت گرانش یک پارامتر مناسب برای کنترل توانایی جستجو و بهره‌وری در این الگوریتم است. مقادیر بزرگ آن باعث توانایی جستجوی بهتر و مقادیر کوچک آن منجر به افزایش توانایی بهره‌وری الگوریتم می‌شوند. با توجه به این که در مراحل اولیه لازم است الگوریتم به جستجوی نقاط بیشتر پرداخته و در مراحل پایانی باید با افزایش توان بهره‌وری به بهبود جواب‌های دیده‌شده پردازد، گزینه مناسب این است که با یک مقدار اولیه بزرگ شروع شده و به تدریج کاهش یابد. استفاده از رابطه‌نمایی در حل بسیاری از مسائل جهت کاهش ثابت گرانش موثر می‌باشد [24].

$$G(t) = G_0 e^{-\alpha \frac{t}{T}} \quad (27)$$

در این رابطه α و G_0 ضرایب مثبت و ثابت و T تعداد کل تکرارهای الگوریتم است که در ابتدا باید در نظر گرفته شوند. تنظیم جرم‌ها بر مبنای تابع هدف صورت گرفته به صورتی که عوامل با شایستگی بیشتر، جرم بیشتری را نیز خواهند داشت. این عمل توسط رابطه (28) انجام شده و توسط رابطه (29) اندازه جرم نرمال می‌شود [22].

$$m_i(t) = \frac{\text{fit}_i(t) - \text{worst}(t)}{\text{best}(t) - \text{worst}(t)} \quad (28)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (29)$$

در رابطه‌های فوق $\text{fit}_i(t)$ بیانگر میزان برازندگی جرم i در زمان t می‌باشد. $\text{best}(t)$ و $\text{worst}(t)$ به ترتیب میزان شایستگی ضعیف‌ترین و قوی‌ترین عامل جمعیت در زمان t هستند که در مسائل کمینه‌سازی با استفاده از رابطه‌های (30) و (31) به دست می‌آیند:

$$\text{worst}(t) = \max \text{fit}_j(t) \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad (30)$$

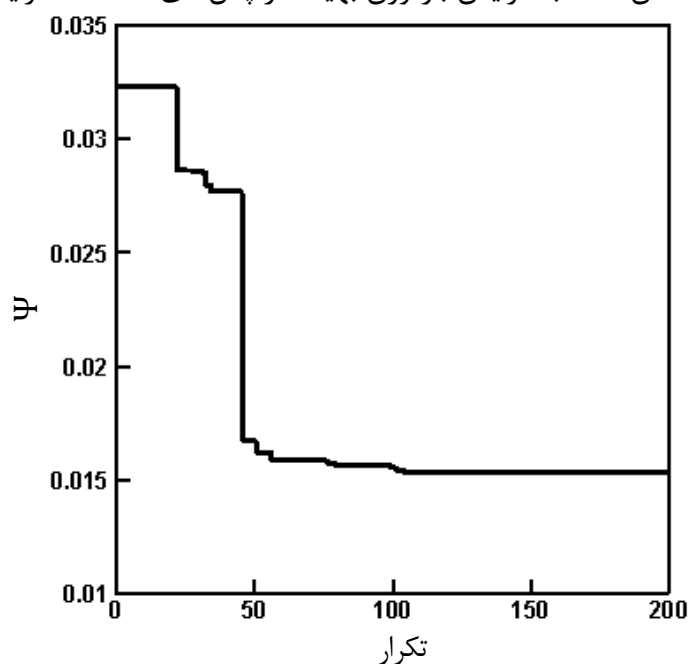
$$\text{best}(t) = \min \text{fit}_j(t) \quad j \in \{1, \dots, N\} \quad (31)$$

لازم به ذکر است که در کلیه رابطه‌های فوق t ، همان مرحله تکرار الگوریتم می‌باشد. مراحل اجرای الگوریتم در نمودار گردش شکل 4 نشان داده شده

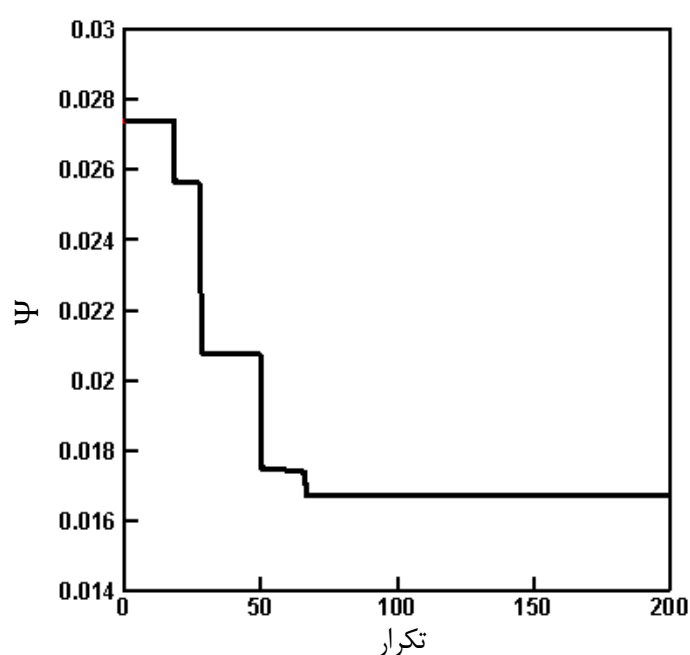
4-1- بررسی پارامترهای الگوریتم

استحکام برشی پانل تحت این زاویه ایجاد می‌شود [28]. الگوریتم، پانل با تعداد موج مشخص (n) را به ازای مقادیر مختلف بار (Π) در نظر گرفته و سبک وزن‌ترین پانل (کمترین Ψ) که بار اعمالی معین را تحمل کند تعیین می‌کند. بهینه‌سازی برای چهار پانل با مقادیر متفاوت n صورت گرفته که نتایج برای دو مقدار شاخص بار ($0/001$ و $0/002$) به عنوان نمونه در جدول 3 آورده شده است.

نمودارهای Ψ ، d/I ، d_c/I و H/I برحسب مقادیر مختلف Π برای پانل‌های مختلف در شکل‌های 7 الی 10 نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار شکل 7 مشخص است با افزایش بار وزن بهینه در پانل‌های مختلف، افزایش



شکل 5 نمودار شاخص وزن (Ψ) برحسب تعداد تکرار برای پانل $n=1$ و بار $\Pi=0/002$



شکل 6 نمودار شاخص وزن (Ψ) برحسب تعداد تکرار برای پانل $n=4$ و بار $\Pi=0/002$

جدول 3 شاخص وزن و مقادیر متغیرهای طراحی در پانل‌های مختلف

n	Π	d/I	d_c/I	H/I	Ψ
1	0/001	0/002919	0/001022	0/047443	0/007606
	0/002	0/005634	0/002283	0/097541	0/015219
2	0/001	0/001897	0/001092	0/058648	0/007576
	0/002	0/003783	0/002203	0/119464	0/015192
4	0/001	0/001241	0/000857	0/065650	0/008414
	0/002	0/002508	0/001705	0/130386	0/016819
8	0/001	0/000892	0/000479	0/072654	0/008423
	0/002	0/001623	0/000981	0/148782	0/016832

همان‌طور که در بخش 3 اشاره شد، α و G_0 دو پارامتر این الگوریتم می‌باشند. جهت بررسی اثر این پارامترها روی مقدار جواب حاصل شده با ثابت نگه‌داشتن تعداد تکرار و تعداد جرم‌ها، میانگین وزن بهینه در چندین بار اجرای تصادفی برنامه به دست آمده است. نتایج برای دو مقدار شاخص بار در دو پانل ($n=1$ و $n=4$) در جدول 1 نشان داده شده است. با توجه به این جدول، تقریباً انتخاب مقادیر بزرگ‌تر α و G_0 منجر به وزن بهینه کمتر در دو پانل گردیده است. کمترین وزن در دو پانل با $n=1$ و $n=4$ با انتخاب $\alpha=20$ و $G_0=150$ حاصل شده است.

تعداد جرم‌ها نیز در سرعت رسیدن به همگرایی الگوریتم موثر می‌باشند. با انتخاب چند مقدار برای تعداد جرم‌ها (40، 60، 80 و 100) می‌توان نشان داد که انتخاب تعداد 60 برای جرم‌ها، منجر به همگرایی سریع‌تر و وزن بهینه کمتر گردیده است. بنابراین با در نظر گرفتن پارامترهای جدول 2 بهینه‌سازی روی انواع پانل در بارگذاری‌های مختلف انجام شده است.

نمودار شکل‌های 5 و 6 روند الگوریتم برای رسیدن به وزن بهینه را در دو پانل نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است الگوریتم در تعداد تکرارهای کمی به جواب بهینه رسیده است. برای سایر پانل‌ها و بارگذاری‌های دیگر نیز نتایج تقریباً مشابهی حاصل شده است.

4-2- نتایج بهینه‌سازی وزن

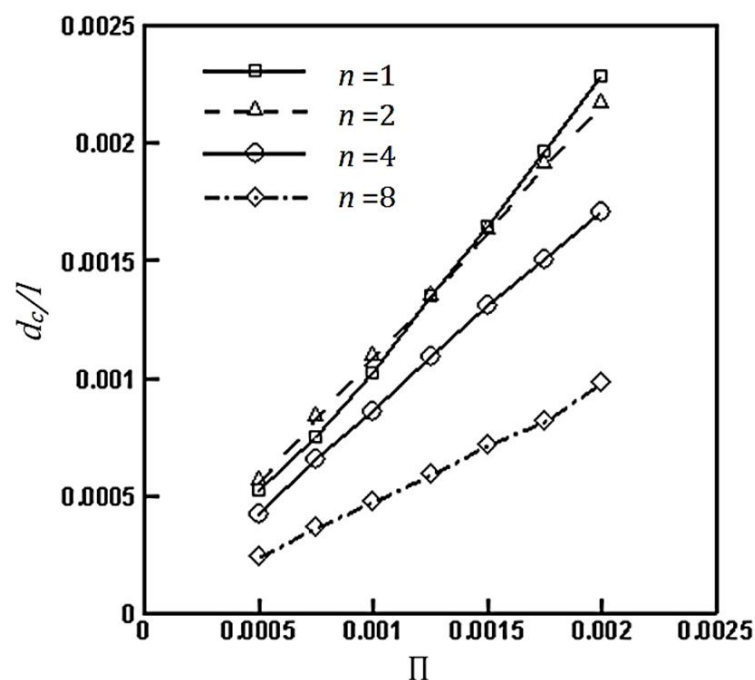
پانل ساندویچی از جنس آلایژ آلومینیوم با $\sigma_y = 490\text{MPa}$ و $E=70\text{GPa}$ انتخاب شده است. زاویه قرار گرفتن صفحه‌های هسته که در شکل 1 با θ نمایش داده شده برابر با $54/7^\circ$ درجه در نظر گرفته شده است. زیرا بیش‌ترین

جدول 1 میانگین وزن بهینه در چند بار اجرای برنامه

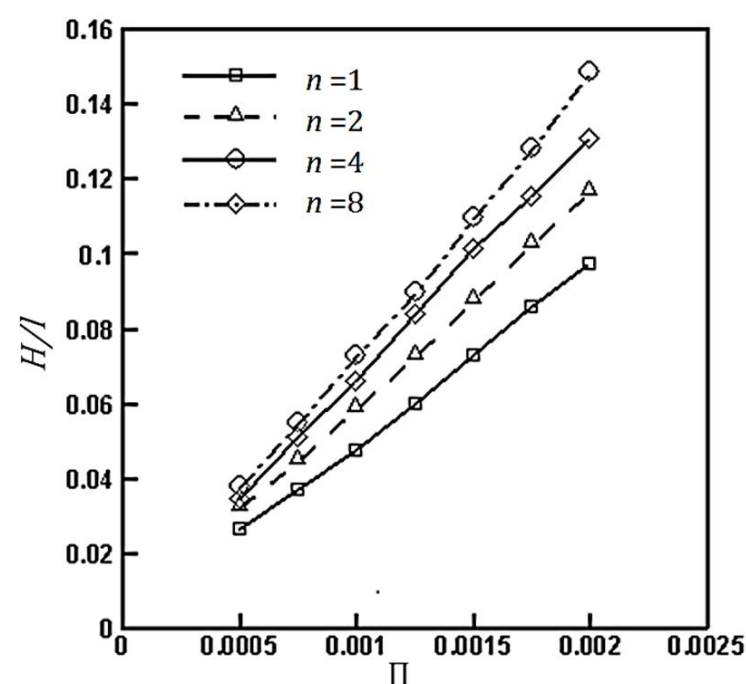
برای مقادیر متفاوت α و G_0				
α	G_0	Π	$n=1, \Psi$	$n=4, \Psi$
15	50	0/001	0/008306	0/008632
		0/002	0/016241	0/018011
		0/001	0/007951	0/008563
		0/002	0/016743	0/017582
20	100	0/001	0/0082187	0/008442
		0/002	0/016235	0/017025
		0/001	0/007808	0/008539
		0/002	0/015667	0/017284
25	150	0/001	0/007749	0/008479
		0/002	0/015602	0/016982
		0/001	0/007606	0/008414
		0/002	0/015219	0/016819
	50	0/001	0/007764	0/008504
		0/002	0/015467	0/016900
		0/001	0/007763	0/008440
		0/002	0/015305	0/016890
	150	0/001	0/007655	0/008424
		0/002	0/015415	0/016833

جدول 2 پارامترهای الگوریتم جستجوی گرانشی

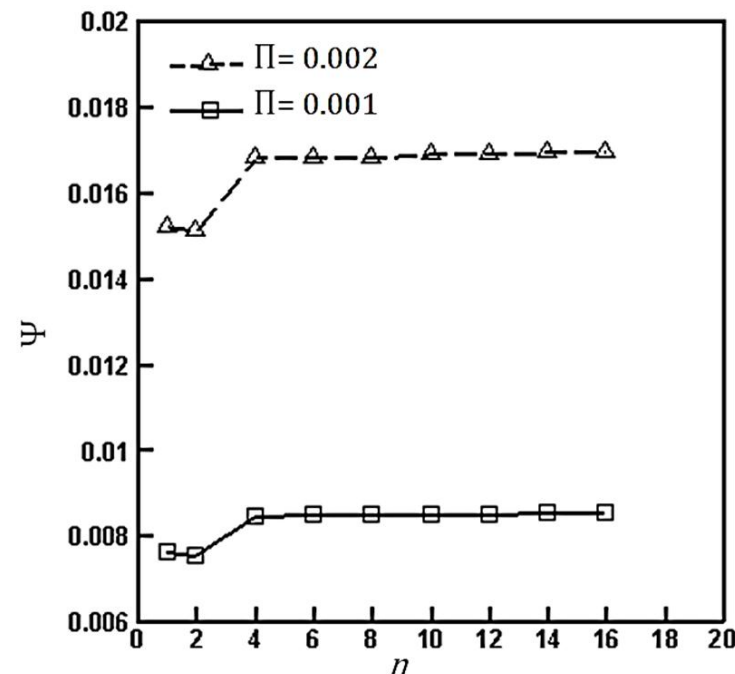
تعداد تکرار	تعداد جرم‌های اولیه	G_0	α
200	60	150	20



شکل 9 ضخامت هسته (d_c/l) برحسب شاخص بار (Π) در پانل‌های مختلف



شکل 10 ضخامت پانل (H/l) برحسب شاخص بار (Π) در پانل‌های مختلف



شکل 11 شاخص وزن (ψ) برحسب n برای دو مقدار شاخص بار

در نمودار شکل 11 مشخص است که پانل با $n=2$ در مقادیر مختلف بار دارای وزن بهینه کمتری است. همچنین با افزایش n ، وزنه بهینه افزایش چندانی را نخواهد داشت.

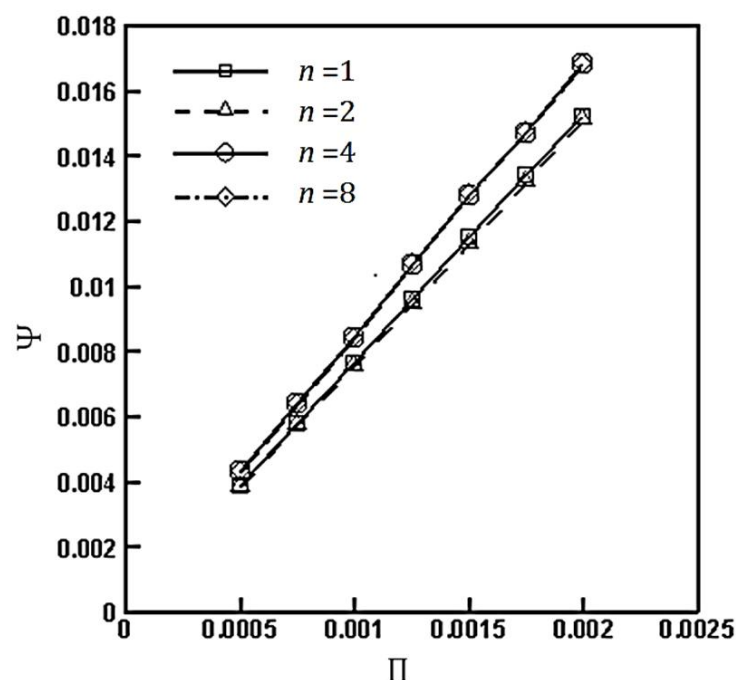
در نمودار شکل 14 مشاهده می‌گردد که در یک بار مشخص با افزایش n ، ضخامت پانل افزایش یافته، اما نرخ این افزایش به تدریج کاهش می‌یابد. به طوری که در مقادیر بالاتر n شیب نمودار تقریباً صفر می‌شود. بعبارت دیگر با افزایش n ضخامت پانل چندان تغییری نکرده و تقریباً ثابت خواهد ماند.

می‌یابد. دو پانل $n=1$ و $n=2$ در مقایسه با سایر پانل‌ها وزن بهینه کمتری را دارا می‌باشند. البته پانل با $n=2$ در بین تمام پانل‌ها وزنه بهینه کمتری را داراست ولی با توجه به اینکه پانل با $n=1$ دارای ضخامت کمتری است (نمودار شکل 10)، بنابراین این پانل ($n=1$) کاراترین پانل خواهد بود. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار این است که با افزایش n و در یک بار مشخص، وزن بهینه چندان تغییری ننموده است.

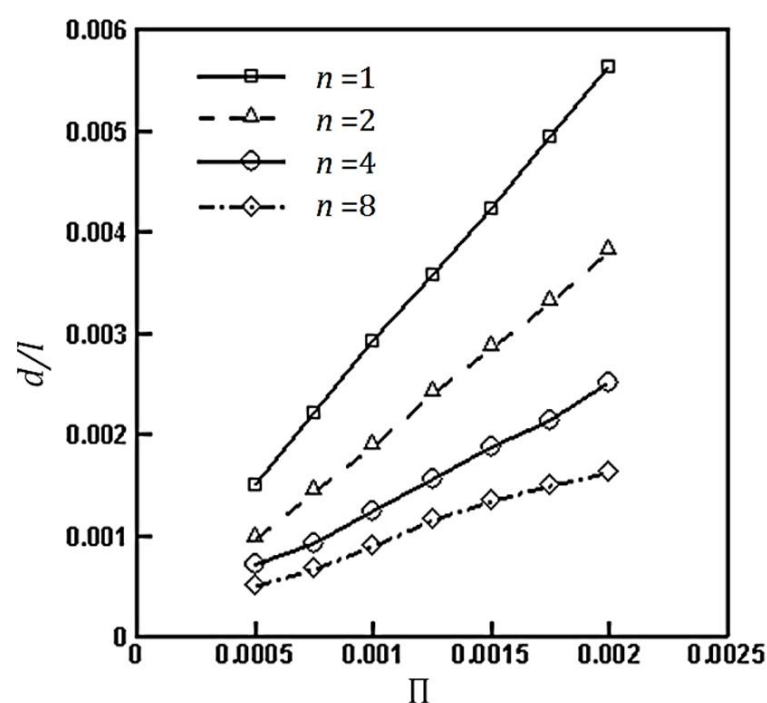
تغییرات سه متغیر d_c/l ، d/l و H/l با افزایش بار در نمودار شکل‌های 8 الی 10 نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار رفته و در نمودارها نیز کاملاً مشخص است، با افزایش بار این سه متغیر نیز افزایش می‌یابند. بررسی شیب نمودار شکل‌های 8 و 9 نشان می‌دهد که با افزایش n ، شیب در حال کاهش بوده و به عبارتی دیگر در پانل با n بالاتر، با افزایش بار میزان تغییر در ضخامت‌های رویه و هسته کمتر می‌باشد.

به عنوان نمونه اگر دو پانل $n=1$ و $n=8$ در نظر گرفته شوند، میزان تغییر در ضخامت رویه و هسته (نمودارهای 8 و 9) با افزایش چهار برابری بار، به ترتیب حدود 0/00175 و 0/0042 در پانل با $n=1$ بوده درحالی‌که در پانل با $n=8$ این تغییرات حدود 0/00075 در ضخامت هسته و 0/001 در ضخامت رویه می‌باشند.

در شکل‌های 11 الی 14 نمودارهای Ψ ، d_c/l و H/l برحسب n برای دو مقدار شاخص بار ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش n ، وزن بهینه و متغیرهای طراحی به یک مقدار ثابت میل می‌کنند.



شکل 7 شاخص وزن (ψ) برحسب شاخص بار (Π) در پانل‌های مختلف



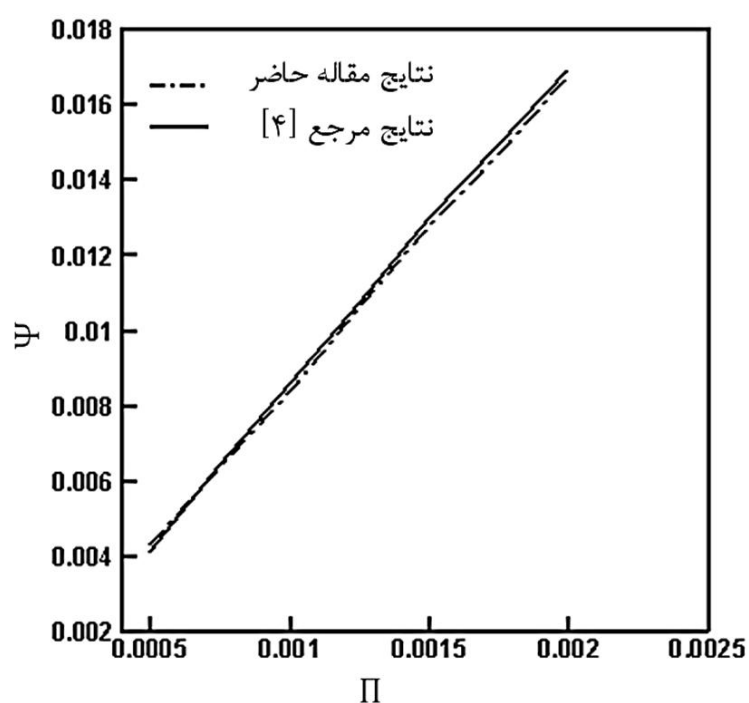
شکل 8 ضخامت رویه (d/l) برحسب شاخص بار (Π) در پانل‌های مختلف

وزن مشاهده شده که این مطلب اهمیت n را در رابطه (14) نشان می‌دهد، به عبارتی دیگر با توجه با رابطه (14) وزن پانل به سه پارامتر ضخامت هسته، ضخامت رویه و مقدار n وابسته می‌باشد، اما در هر دو نوع بارگذاری با وجود کاهش ضخامت‌های هسته و رویه و افزایش n ، دو رفتار متفاوت در مقدار وزن بهینه مشاهده می‌شود که همان‌طور که اشاره شد وزن بهینه در بارگذاری طولی، افزایش و در بارگذاری عرضی کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان در قیدهای شکست (تسلیم و کمانش صفحه‌های هسته و رویه) جستجو نمود. قیدها در بارگذاری طولی و عرضی به گونه‌ای هستند که در بارگذاری طولی و در یک بار مشخص شکست زودتر از بارگذاری عرضی صورت می‌گیرد، بنابراین در روند بهینه‌سازی با افزایش n و در یک بار مشخص وزن بهینه پانل در بارگذاری طولی افزایش می‌یابد تا بدین وسیله از تسلیم یا کمانش صفحه‌های رویه و هسته جلوگیری شود. بنابراین نوع بارگذاری (طولی یا عرضی) در مقدار وزن بهینه پانل و انتخاب پانل مناسب بسیار موثر خواهد بود. به طوری که در بارگذاری عرضی پانل‌های $n=4$ و $n=8$ [5]، و در بارگذاری طولی دو پانل $n=1$ و $n=2$ دارای کارایی مناسب می‌باشند. مقایسه شیب نمودار وزن در بارگذاری طولی و عرضی در یک پانل مشخص نشان می‌دهد در هر دو نوع بارگذاری شیب نمودار در حال کاهش بوده و به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند.

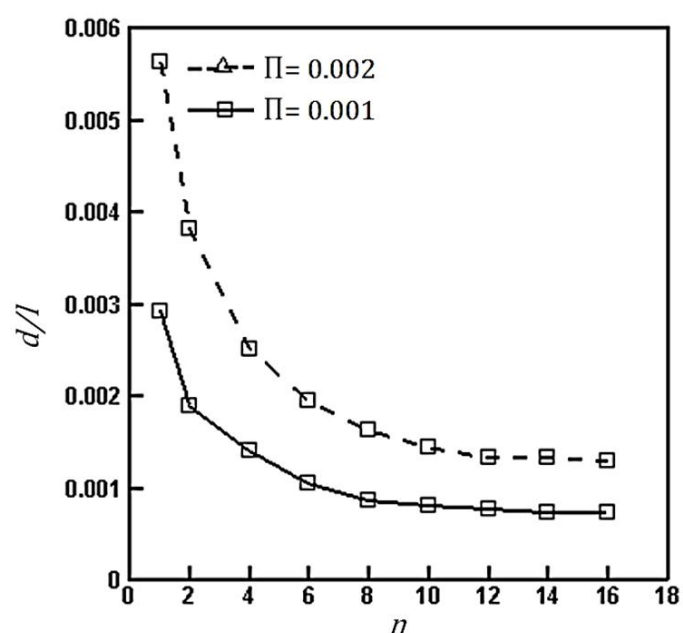
در نمودار شکل‌های 15 الی 17 مقایسه حل الگوریتم جستجوی گرانشی با حل مرجع 4 (که با روش عددی بهینه‌سازی انجام شده است) در مورد سه پانل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با انتخاب پارامترهای مناسب در اکثر موارد الگوریتم به وزن بهینه کمتری دست یافته است.

4-4- ارائه چند مثال

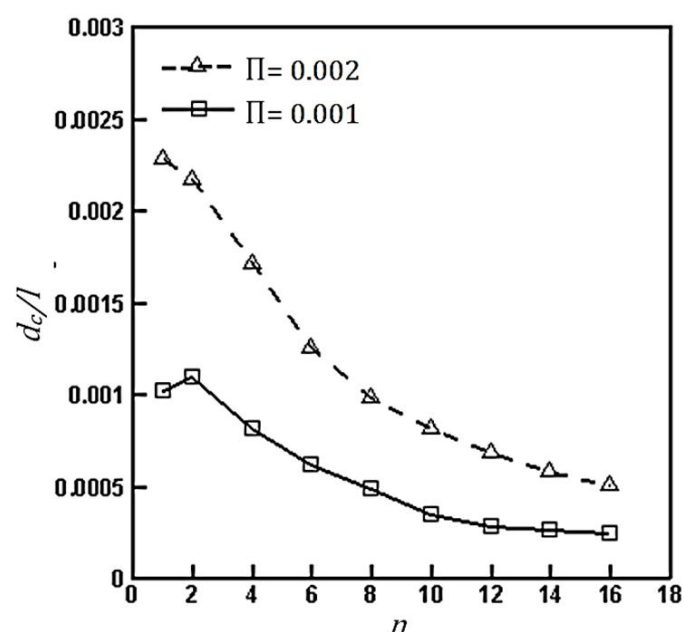
در این قسمت با ذکر چند مثال قابل تعمیم بودن نتایج حاصل شده در بخش قبل برای حالت‌های مختلف بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی متفاوت پانل نشان داده می‌شود. در تمامی مثال‌ها طول پانل (S)، 1 متر و عرض آن (T)، 2 متر فرض شده است. با توجه به جنس پانل (آلیاژ آلومینیوم)، چگالی آن kg/m^3 2800 می‌باشد. در هر مثال کمترین وزن پانل همراه با ابعاد آن به دست می‌آید. با این ابعاد پانل قادر به تحمل بار مورد نظر بوده و دچار تسلیم و کمانش نیز نخواهد شد.



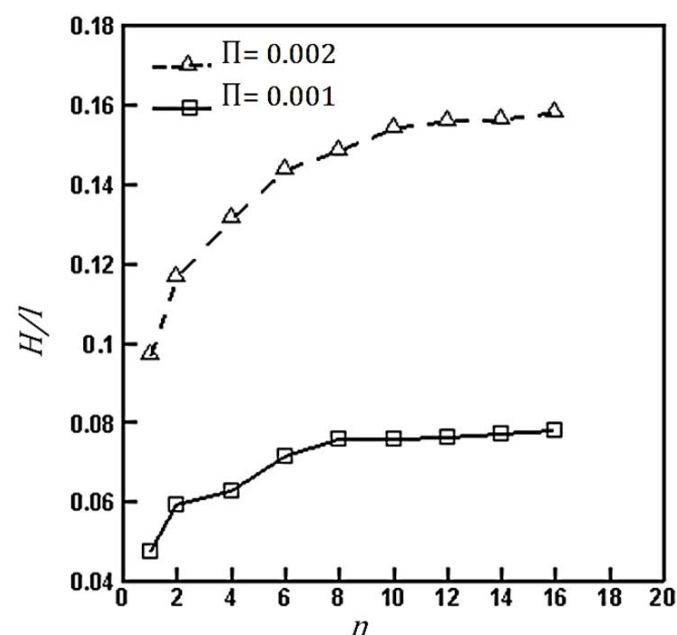
شکل 15 مقایسه نتایج روش جستجوی گرانشی در بهینه‌سازی وزن در پانل با $n=4$ با نتایج مرجع [4]



شکل 12 ضخامت رویه (d/I) برحسب n برای دو مقدار شاخص بار



شکل 13 ضخامت هسته (d_c/I) برحسب n برای دو مقدار شاخص بار



شکل 14 ضخامت پانل (H/I) برحسب n برای دو مقدار شاخص بار

3-4- مقایسه با نتایج سایر محققین

یادآوری می‌گردد که در مراجع 5، 15 و 16 که بهینه‌سازی براساس بار عرضی روی پانل انجام شده است، نتایج متفاوتی مشاهده می‌شود. در بارگذاری عرضی و در یک بار مشخص با افزایش n ، وزن بهینه پانل کاهش می‌یابد درحالی‌که همان‌طور که در نمودار شکل 11 مشاهده گردید تحت بارگذاری طولی وزن بهینه پانل افزایش می‌یابد.

نکته مهم دیگر این است که هم در بارگذاری طولی و هم در بارگذاری عرضی در یک بار مشخص با افزایش n ، دو متغیر d/I و d_c/I در حال کاهش می‌باشند، ولی در بارگذاری طولی افزایش وزن و در بارگذاری عرضی کاهش

۲۱/۳۰۶۶ کیلوگرم خواهد بود.

مثال ۲ پانل با $n=2$ و تکیه‌گاه یکسر گیردار با بارگذاری در انتهای پانل: با توجه به مثال ۱ و شکل ۱۸- ب گشتاور خمشی و نیروی برشی بیشینه به‌ترتیب برابر با $M_{\max}=PS$ و $V_{\max}=P$ خواهند بود. طبق رابطه (۳۵) مقدار شاخص بار برابر با ۰/۰۱۵ خواهد شد. بنابراین با توجه به نمودار شکل‌های ۷ الی ۱۰، مقادیر متغیرهای طراحی عبارتند از:

$$d = 0.002862l = 0.0028627m = 2.862mm \quad \text{ضخامت رویه:}$$

$$d_c = 0.001625l = 0.001625m = 1.625mm \quad \text{ضخامت هسته:}$$

$$H = 0.08762l = 0.08762m = 87.62mm \quad \text{ضخامت پانل:}$$

$$\Psi = \frac{W}{\rho l^2} = 0.01135 \rightarrow W = \rho l^2 \Psi = 31.78 \text{ kg/m}$$

W وزن واحد عرض پانل بوده و بنابراین وزن این پانل برابر با ۶۳/۵۶ کیلوگرم خواهد بود.

مثال ۳ پانل با $n=4$ تحت بار گسترده و تکیه‌گاه ساده: در این مثال نیز با توجه به شکل ۱۷- ج گشتاور خمشی و نیروی برشی بیشینه به‌ترتیب برابر با $M_{\max}=WS^2/8$ و $V_{\max}=WS/2$ خواهند بود. طبق رابطه (۳۵) مقدار شاخص بار برابر با ۰/۰۰۱ خواهد شد. این مقدار شاخص بار نیز دقیقاً در جدول ۳ موجود می‌باشد. بنابراین طبق این جدول و نوع پانل مقادیر متغیرهای طراحی عبارتند از:

$$d = 0.001241l = 0.00031m = 0.31mm \quad \text{ضخامت رویه:}$$

$$d_c = 0.000857l = 0.000214m = 0.214mm \quad \text{ضخامت هسته:}$$

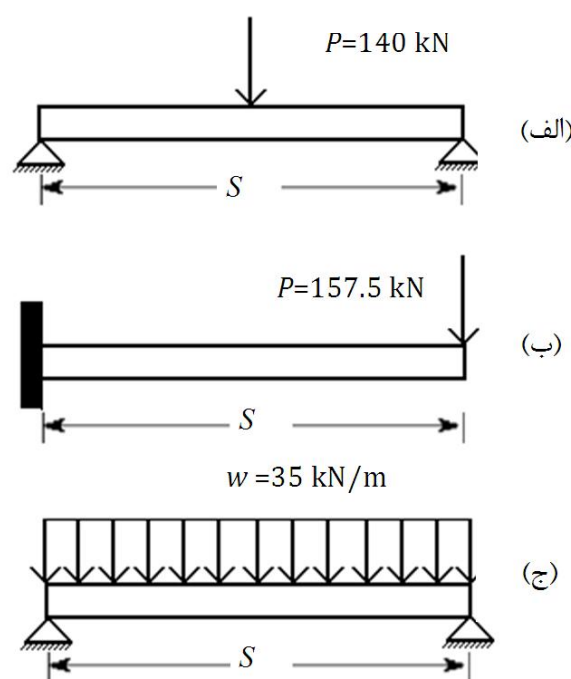
$$H = 0.06565l = 0.0164m = 16.4mm \quad \text{ضخامت پانل:}$$

$$\Psi = \frac{W}{\rho l^2} = 0.008414 \rightarrow W = \rho l^2 \Psi = 1.4725 \text{ kg/m}$$

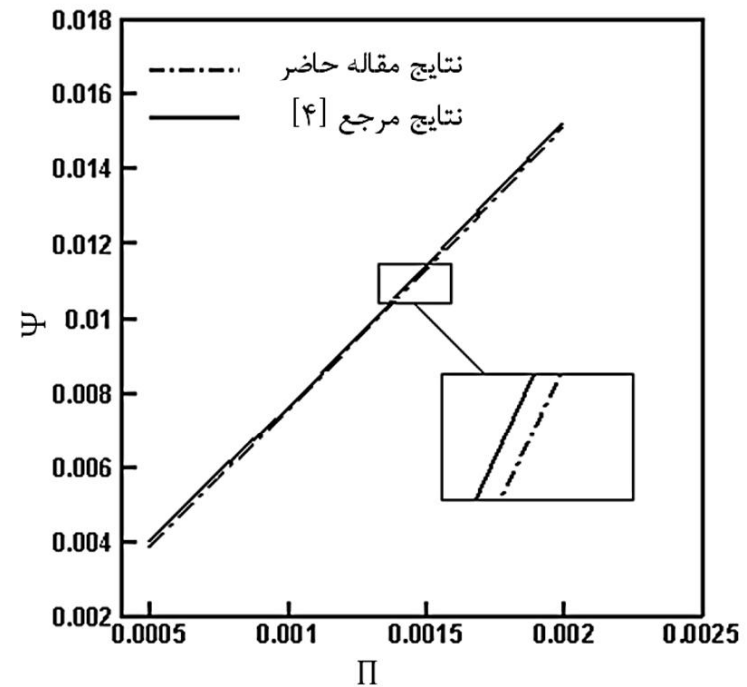
بنابراین وزن این پانل برابر با ۲/۹۴۵ کیلوگرم خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی وزن پانل‌های ساندویچی با هسته باز و منشوری در معرض بارگذاری طولی بر اساس قیدهای تسلیم و کماتش با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در یک پانل معین با افزایش بار، ضخامت هسته، ضخامت رویه، ارتفاع و وزن بهینه پانل افزایش می‌یابد. علاوه بر این در یک بارگذاری مشخص، افزایش تعداد

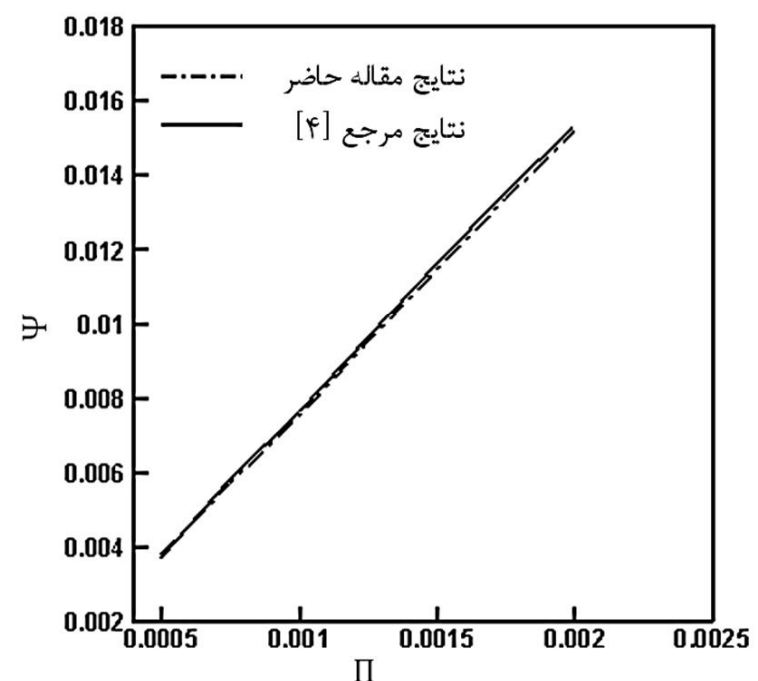


شکل ۱۸ پانل با بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی متفاوت



شکل ۱۶ مقایسه نتایج روش جستجوی گرانشی در بهینه‌سازی وزن

در پانل با $n=2$ با نتایج مرجع [۴]



شکل ۱۷ مقایسه نتایج روش جستجوی گرانشی در بهینه‌سازی وزن

در پانل با $n=1$ با نتایج مرجع [۴]

مثال ۱ پانل با $n=1$ و تکیه‌گاه ساده با بارگذاری در وسط آن: پانل و بارگذاری آن مطابق شکل ۱۸- الف می‌باشد. در این شرایط نیروی برشی و گشتاور خمشی بیشینه به ترتیب برابر با $V_{\max}=P$ و $M_{\max}=PS/2$ خواهند بود. l و Π نیز با دو رابطه (۳۴) و (۳۵) قابل محاسبه می‌باشند:

$$l = \frac{M_{\max}}{V_{\max}} \quad (34)$$

$$\Pi = \frac{V_{\max}}{\sqrt{EM_{\max}}} \quad (35)$$

با داشتن $P=140kN$, $S=1m$ و $E=70GPa$ مقدار شاخص بار (Π) برابر با ۰/۰۰۲ خواهد بود. این مقدار شاخص بار دقیقاً در جدول ۳ موجود می‌باشد. بنابراین طبق این جدول و نوع پانل ($n=1$), مقادیر متغیرهای طراحی عبارتند از:

$$d = 0.00563l = 0.002817m = 2.817mm \quad \text{ضخامت رویه:}$$

$$d_c = 0.002283l = 0.001141m = 1.141mm \quad \text{ضخامت هسته:}$$

$$H = 0.097541l = 0.04877m = 48.77mm \quad \text{ضخامت پانل:}$$

$$\Psi = \frac{W}{\rho l^2} = 0.015219 \rightarrow W = \rho l^2 \Psi = 10.6533 \text{ kg/m}$$

با توجه به این که W وزن واحد عرض پانل است، بنابراین وزن این پانل برابر با

- [4] L. Valdevit, J. Hutchinson, A. Evans, Structurally Optimized Sandwich Panels with Prismatic Cores, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, No. 18-19, pp. 5105-5124, 2004.
- [5] 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)
- [6] H. Rathbun, F. Zok, A. Evans, Strength Optimization of Metallic Sandwich Panels Subject to Bending, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 26, pp. 6643-6661, 2005.
- [7] Z. Wua, F. Li, Y. Wang, Vibration Band Gap Behaviors of Sandwich Panels with Corrugated Cores, *Computers and Structures*, Vol. 129, No. 1, pp. 30-39, 2013.
- [8] K. Tang, K. Man, S. Kwong, Q. He, Genetic Algorithms and Their Applications, *IEEE Signal processing Magazine*. Vol. 13, No. 6, pp. 22-37, 1996.
- [9] B. Suman, N. Hoda, S. Jha, Orthogonal Simulated Annealing for Multiobjective Optimization, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 34, No. 10, pp. 1618-11631, 2010.
- [10] D. Farmer, N. Packard, A. Perelson, The Immune System, Adaptation, and Machine Learning, *Physica D*, Vol. 22, No. 1-3, pp. 187-204, 1986.
- [11] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni, The Ant System: Optimization by A Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 26, No. 1, pp. 29-41, 1996.
- [12] M. Abolbashari, F. Nazari, R. Soltani, A Multi-Crack Effects Analysis and Crack Identification in Functionally Graded Beams Using Particle Swarm Optimization Algorithm and Artificial Neural Network. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 51, No. 7, pp. 299-313, 2014.
- [13] G. Atashpa, C. Lucas, Imperialist Competitive Algorithm: an Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, Malaysia, 4661-4667, 2007.
- [14] C. Hudson, J. Carruthers, M. Robinson, Multiple Objective Optimization of Composite Sandwich Structures for Rail Vehicle Floor Panels, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, pp. 2077-2082, 2010.
- [15] H. Hemmatian, F. Fereidoon, M. Rajabpour, Optimization of prismatic core based on particle swarm algorithm, *Modeling in Engineering*, Vol. 8, No. 20, pp. 17-26, 2010. (In Persian)
- [16] A. Fereidoon, H. Hemmatian, A. Mohammadzadeh, A. Assareh, 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)
- [17] X. Tan, A. Soh, 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.
- [18] A. Khalkhali, S. Khakshournia, N. Narimanzadeh, A Hybrid Method of FEM, Modified NSGAII and TOPSIS for Structural Optimization of Sandwich Panels with Corrugated Core, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 16, No. 4, pp. 398-417, 2014.
- [19] GH. Liaghat, H. Serailou, Core Optimal Design in Honeycomb Structures Under Compression Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 37, pp. 73-82, 2009. (In Persian)
- [20] M. Mohammadian, A. Fereidoon, Multi Optimization of Sandwich Panels Using Particle Swarm algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 82-74, 2014. (In Persian).
- [21] F. Martinez, A. Thrall, 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.
- [22] E. Rashed, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazd, GSA: A Gravitational Search Algorithm. *Information Sciences*, Vol. 179, No. 13, pp. 2232-2248, 2009.
- [23] A. Moradi, M. Ebadian, M. Daryabari, Discrimination of Inrush Currents From Faults Current In Power Transformers Using Gravitational Search Algorithm, *Intelligent Systems in Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 43-58, 2011. (In Persian)
- [24] Z. Baniassadi, H. Nezamabadi, M. Maghfoori, A Multiobjective Solution of Gravitational Search Algorithm for Benchmark Functions and Placement of SVC, *Intelligent Systems in Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 59-78, 2011. (In Persian)
- [25] M. Taghipour, A. Moradi, M. Yazdani, Identification of Magnetizing Inrush Current in Power Transformers using GSA Trained ANN for Educational Purposes, *IEEE Conference on Open Systems*, Malaysia: 23-27, 2011.
- [26] S. Roozi, A. Safavinejad, Inverse Analysis of Radiative Heat Transfer in A Cylindrical Container Using Gravitational Search Algorithm, *19th Annual Conference on Mechanical Engineering*, Birjand, Iran, 2011. (In Persian)
- [27] H. Hemmatian, A. Fereidoon, E. Assareh, Optimization of Hybrid Laminated Composites Using the Multi-Objective Gravitational Search Algorithm (MOGSA), *Engineering Optimization*, Vol. 46, No. 9, pp. 1169-1182, 2014.
- [28] S. Gu, T. Lu, A. Evans, 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.

موج‌های هسته، منجر به کاهش ضخامت هسته و رویه، و افزایش ارتفاع و وزن بهینه پانل می‌شود. بررسی نشان داد دو پانل با $n=1$ و $n=2$ دارای وزن بهینه کمتر بوده و پانل با $n=1$ به دلیل ضخامت کمتر دارای کارایی سازه‌ای مناسب‌تر می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج با مراجع 5، 14 و 15 نشان داد نوع بارگذاری (طولی یا عرضی) در انتخاب پانل مناسب بسیار موثر است. انتخاب پارامترهای مناسب در الگوریتم جستجوی گرانشی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، به طوری که انتخاب $\alpha=20$ و $G_0=150$ منجر به جواب بهینه کمتر نسبت به مرجع 4 گردیده است. همچنین این الگوریتم به دلیل استفاده مستقیم از مقادیر تابع و عدم نیاز به مشتق، در بهینه‌سازی پانل‌های ساندویچی بسیار مفید بوده و دارای توانایی لازم می‌باشد.

6- فهرست علائم

d	ضخامت صفحه های رویه (m)
d_c	ضخامت صفحه های هسته (m)
E	مدول الاستیسیته (N/m^2)
H	فاصله صفحه های رویه (m)
M	ممان خمشی بیشینه (Nm)
N	تعداد جرم‌ها
n	تعداد موج‌های هسته
t	مربوط به تکرار
V	نیروی برشی بیشینه (N)
W	وزن در واحد عرض (N/m)
y	متغیر فاصله از مرکز پانل تا رویه (m)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
θ	زاویه صفحه های هسته (rad)
σ_y	تنش تسلیم (N/m^2)
Π	شاخص بارگذاری
Ψ	شاخص وزن
α	پارامتر مربوط به الگوریتم

بالانویس‌ها

d	مربوط به بعد مسئله
i	مربوط به جرم ها
j	مربوط به جرم ها

زیرنویس‌ها

c	مربوط به هسته
i	مربوط به جرم ها
j	مربوط به جرم ها
max	بیش‌ترین

7-مراجع

- [1] N. Haydn, A. Norman, G. Anthony, Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures, *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 16, pp. 2331-2343, 2003.
- [2] J. Min, J. Jeong, M. Ha, K. Kim, High Temperature Heat Exchanger Studies for Applications to Gas Turbines, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 2, pp. 175-186, 2009.
- [3] F. Zok, S. Waltner, Z. Wei, H. Rathbun, R. McMeeking, A. Evans, 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.