



بهینه‌سازی چندهدفه پانل‌های ساندویچی با استفاده از الگوریتم گروه ذرات

مصطفی محمدیان^{۱*}، عبدالحسین فریدون^۲

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان، مرکز کردکوی، کردکوی

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* کردکوی، صندوق پستی ۴۸۸۱۶۴۴۴۷۹، m.mohammadian@kordkuyiau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۲ تیر ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۶ مهر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۵ بهمن ۱۳۹۲

کلید واژگان:

پانل ساندویچی با هسته منشوری

قید تسلیم و کمانش

بهینه‌سازی دوهدفه گروه ذرات

منحنی پرتو

در این مقاله بهینه‌سازی چندهدفه پانل‌های ساندویچی با هسته باز و منشوری مورد بررسی قرار گرفته است. نامگذاری این پانل‌ها براساس تعداد موج‌های هسته (n) صورت می‌گیرد. پانل به‌عنوان یک مبدل حرارتی در نظر گرفته شده که همزمان تحت بارگذاری طولی نیز قرار دارد. الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفه گروه ذرات با در نظر گرفتن وزن و شاخص انتقال حرارت به‌عنوان توابع هدف استفاده گردیده است. بهینه‌سازی به‌گونه‌ای انجام می‌شود تا پانل، ضمن اینکه دچار تسلیم و کمانش در صفحه‌های رویه و هسته در بارگذاری‌های مختلف نمی‌شود، دارای کمترین وزن و در عین حال بیشترین شاخص انتقال حرارت نیز باشد. نتایج نشان داد دو پانل با $n=1$ و $n=7$ پانل‌های مناسب در بهینه‌سازی یک‌هدفه و دوهدفه می‌باشند. همچنین، بیشترین شاخص انتقال حرارت به‌دست آمده توسط یک پانل مشخص در بارگذاری‌های مختلف تقریباً یکسان است. نمودارهای پرتوی حاصل شده از بهینه‌سازی دوهدفه دارای دو ناحیه متمایز بوده که در یک ناحیه افزایش وزن منجر به افزایش شدید شاخص انتقال حرارت، و در ناحیه دیگر این شاخص تقریباً ثابت می‌ماند. این نمودارها ابزاری مناسب جهت انتخاب پانل و ابعاد هندسی آن با توجه به اهمیت هریک از توابع هدف می‌باشند. مقایسه نتایج بیانگر کارایی روش گروه ذرات در بهینه‌سازی یک‌هدفه و دوهدفه این پانل‌هاست.

Multi objective optimization of sandwich panels using particle swarm algorithm

Mostafa Mohammadian^{1*}, Abdolhosein Fereidoon²

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Gorgan branch, Kordkuy Center, Kordkuy, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

*P.O.B. 4881644479 Kordkuy, m.mohammadian@kordkuyiau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received in Revised Form 13 July 2013
Accepted 08 October 2013
Available Online 25 January 2014

Keywords:

Prismatic Core Sandwich Panel
Yielding and Buckling Criteria
Multi Objective Particle Swarm Optimization
Pareto Diagram

ABSTRACT

In this paper, multi-objective optimization of sandwich panels with open and prismatic core has been studied. Naming these panels is based on the number of corrugations (n) of the core. The panel is considered as a heat exchanger that is loaded under longitudinal loading simultaneously. Multi-objective particle swarm optimization is used by considering weight and heat transfer index as objective function. Optimization is carried out so that the panel has minimum weight and maximum heat transfer index simultaneously; moreover it will not suffer from yielding and buckling in face and core plates. The results showed that two panels, i.e. $n=1$ and $n=7$ are very suitable in one-objective and two-objective optimizations. Also, maximum of heat transfer index obtained by a certain panel is nearly the same in various loadings. Pareto diagrams achieved out of two-objective optimization have two separate areas where in one area weight increase may cause an intense increase in heat transfer index and in another area this index remains almost constant. The diagrams are helpful in selecting suitable panel and its geometric dimensions based on significance of each objective functions. Comparing the results indicate efficiency of particle swarm method in one-objective and two-objective optimization of the panels.

۱- مقدمه

مقاومت صوتی از جمله ویژگی‌های دیگر این پانل‌ها می‌باشد [۴]. بهینه‌سازی در این پانل‌ها به‌صورت یک هدفه و چند هدفه انجام می‌شود. در بهینه‌سازی چند هدفه (برخلاف بهینه‌سازی یک هدفه) به‌جای یک تابع هدف، چندین تابع هدف باید به‌صورت همزمان بهینه شوند. در چنین شرایطی معمولاً مسئله دارای بیش از یک جواب بهینه خواهد بود که به آن‌ها جواب‌های بهینه پرتو^۱ گفته می‌شود [۵]. وزن، قابلیت هدایت حرارت، فرکانس طبیعی و خیز از جمله توابع هدفی هستند که در بهینه‌سازی این پانل‌ها می‌توانند مورد

پانل‌های ساندویچی با هسته‌های منشوری، سازه‌های نوین و مهمی هستند که دارای هسته‌های با فضای خالی بوده و با روش‌های جدید از جمله شکل‌دهی ورق‌ها تولید می‌شوند [۱]. برخورداری از وزن کم و مقاومت در مقابل بار مشخص خصوصیتی است که منجر به افزایش کاربرد این پانل‌ها شده است [۲]. همچنین این پانل‌ها، به‌دلیل داشتن فضای خالی در هسته، قابلیت هدایت جریان سیال را داشته و می‌توانند در مبدل‌های حرارتی نیز استفاده شوند [۳]. قابلیت جذب انرژی، کاربرد در سازه‌های هوشمند و

1- Pareto

Please cite this article using:

M. Mohammadian, A. Fereidoon, Multi objective optimization of sandwich panels using particle swarm algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 74-82, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

توجه قرار گیرند.

عموما هسته و رویه از یک ماده ساخته می‌شوند. متغیرهای طراحی براساس شکل ۱ عبارت‌اند از: H/l (فاصله صفحات رویه)، d_c/l (ضخامت صفحات هسته) و d/l (ضخامت صفحات رویه). پارامتر l به صورت نسبت $l=M/V$ تعریف می‌شود که رابطه مستقیم با طول بارگذاری دارد. M و V به ترتیب گشتاور خمشی و نیروی برشی ماکزیمم در واحد عرض پانل می‌باشند [۱].

۲-۱- صورت‌بندی مسئله با در نظر گرفتن تابع هدف وزن

در این قسمت تابع وزن و قیود تسلیم و کمانش در بارگذاری طولی پانل استخراج می‌شوند. جهت سهولت در تحلیل مسئله دو پارامتر بی‌بعد $\Pi = V/\sqrt{EM}$ و $\Psi = W/\rho l^2$ معرفی می‌شوند که Π شاخص بارگذاری و معرف بار وارده و Ψ شاخص وزن سازه می‌باشند [۱]. وزن واحد عرض سازه توسط رابطه $W=2\rho d l + n\rho d_c l/\cos\theta$ بیان می‌شود که در حالت بی‌بعد به صورت زیر خواهد بود:

$$\psi = W/\rho l^2 = 2\frac{d}{l} + \frac{n}{\cos\theta} \frac{d_c}{l} \quad (۱)$$

قیدهای طراحی مربوط به تسلیم و کمانش اجزاء سازه برای بارگذاری طولی به صورت زیر می‌باشند [۲]:

قید کمانش رویه:

$$g_1 = \frac{24(1-\nu^2)V^2}{K_c n^2 \tan^2 \theta EM} \left(\frac{H-d}{l}\right) \left(\frac{l}{d}\right)^2 \left[\frac{d}{2l} + \frac{n}{12\cos\theta} \frac{d_c}{l}\right]^{-1} - 1 \quad (\text{الف-۲})$$

قید تسلیم رویه:

$$g_2 = \frac{E}{EM} \frac{\sqrt{n^2 + \frac{3}{\tan^2 \theta} \left(\frac{H-d}{l}\right)^2}}{\left[\frac{n}{l} + \frac{n^2}{6\cos\theta} \frac{d_c}{l}\right] \left(\frac{H-d}{l}\right)} - 1 \quad (\text{ب-۲})$$

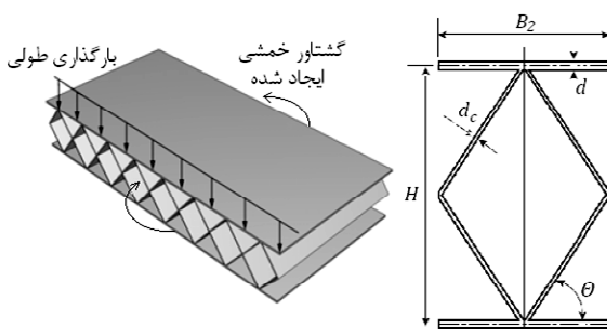
قید تسلیم هسته:

$$g_3 = \frac{V^2}{EM} \left\{ \frac{\frac{E}{\sigma_y} \left[\frac{d}{l} + \frac{n}{6\cos\theta} \frac{d_c}{l}\right] \left(\frac{H-d}{l}\right)}{\sqrt{4\left(\frac{y}{H-d}\right)^2 + 3\left[\frac{1}{n \tan\theta} \left(\frac{H-d}{l}\right) \frac{d}{l} + \dots\right]}} \right\}^{-1} \quad (\text{ج-۲})$$

$$\left. \left. \left. \frac{1}{\sin\theta} \left(\frac{H-d}{l}\right) \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{y}{H-d}\right)^2\right]\right]^2 \right\}^{-1} - 1 \right\}^{-1}$$

قید کمانش هسته:

$$g_4 = \frac{V^2}{EM} \left(\frac{V^2}{EM}\right)^{-1}_{\text{core buckling}} - 1 \quad (\text{د-۲})$$



شکل ۱ پانل با $n=2$ تحت بارگذاری طولی و متغیرهای طراحی

استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری، که غالبا الهام گرفته از طبیعت می‌باشند، در مسائل بهینه‌سازی مهندسی رو به افزایش است. الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات از جمله این روش‌هاست که اولین بار توسط کندی و ابرهارت [۶] ارائه شد. این الگوریتم از جمله الگوریتم‌های تکاملی است که در حل مسائل بهینه‌سازی کاربرد وسیعی پیدا کرده است. همچنین، به دلیل عملکرد مطلوب در فضاهای جستجوی نامعین و استفاده مستقیم از مقادیر تابع و عدم نیاز به مشتق آن، کاربری آن رشد فزاینده‌ای در حل مسائل بهینه‌سازی داشته و در حل مسائل تک‌هدفی و چندهدفی کاربرد وسیعی دارد. این الگوریتم قوی برای طراحی‌های خطی، غیر خطی و چند هدفه مناسب می‌باشد و به آسانی برای متغیرهای پیوسته، مجزا و صحیح به کار برده می‌شود [۷].

روش‌ها و توابع هدف مختلف در بهینه‌سازی پانل‌های ساندویچی به کار گرفته شده که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. بهینه‌سازی وزن با استفاده از روش‌های مرسوم ریاضی توسط والدویت و همکاران [۲] و با استفاده از روش قابلیت اعتماد توسط فریدون و همکاران انجام شده است [۸]. راتبان و همکاران نیز به بهینه‌سازی استحکام این پانل‌ها در بارگذاری خمشی پرداخته‌اند [۹]. الگوریتم کلونی مورچه‌ها در بهینه‌سازی چندهدفه پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی کف و وسایل نقلیه ریلی توسط هادسون و همکارانش استفاده شده است [۱۰]. همتیان و همکاران نیز به بهینه‌سازی وزن پانل با در نظر گرفتن قیود تسلیم و کمانش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات پرداخته‌اند [۱۱]. الگوریتم رقابت استعماری نیز یکی دیگر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری است که توسط فریدون و همکاران در بهینه‌سازی وزن پانل‌های ساندویچی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲]. تان و سو نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی دوهدفه وزن و قابلیت هدایت حرارتی پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری پرداخته‌اند [۱۳]. همچنین لیاقت و سرایلو به بهینه‌سازی هسته در سازه‌های لانه زنبوری تحت بارگذاری فشاری پرداخته‌اند [۱۴]. در تمامی مراجع [۸]، [۱۱] و [۱۲] بهینه‌سازی با در نظر گرفتن بارگذاری عرضی روی پانل انجام شده است.

در این مقاله ابتدا پانل با هسته منشوری تحت بارگذاری طولی مورد بررسی قرار گرفته و توابع هدف وزن و شاخص انتقال حرارت همراه با قیود تسلیم و کمانش در صفحات رویه و هسته استخراج می‌شوند. سپس الگوریتم یک‌هدفه و دوهدفه گروه ذرات بررسی شده و در مورد پارامترهای این الگوریتم صحبت خواهد شد. در بخش نتایج نیز ابتدا، با استفاده از این الگوریتم، بهینه‌سازی یک‌هدفه وزن و شاخص انتقال حرارت صورت گرفته و پانل‌های مناسب در این مرحله انتخاب خواهند گردید. سپس در بخش بعدی بهینه‌سازی دوهدفه روی پانل‌های منتخب انجام شده و نمودارهای پرتو ترسیم می‌شوند. منحنی‌های پرتو به دست آمده ابزار مفیدی را در اختیار طراح قرار می‌دهند تا بتواند، با توجه به اهمیت هر یک از توابع هدف، ابعاد پانل مناسب را انتخاب کند.

۲- پانل ساندویچی با هسته منشوری

پانل‌های ساندویچی با هسته منشوری 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 ۱ پانل با $n=2$ 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 ۱ شود. در این پانل‌ها

$$P = \Delta p u_0 W H_c = \frac{1}{2} (f_H \text{Re}_H^3) \left(\frac{\mu_f^3}{\rho_f} \right) (L W H_c^{-3}) \quad (5)$$

با در نظر گرفتن $\Phi = k_f \rho_f^2 / \mu_f^3$ ، $\Delta = 2H_c^2$ و $\Pi = Nu_H / f_H \text{Re}_H^3$ و همچنین روابط (۴) و (۵) خواهیم داشت [۱۵]:

$$\frac{Q}{(T_m(x) - T_f(x))P} = \Pi \Phi \Delta \quad (6)$$

رابطه فوق بیان می‌کند که پخش جریان حرارت در واحد اختلاف درجه حرارت برای یک مشخص پمپ برابر با حاصلضرب سه عدد بی‌بعد می‌باشد. برای یک ضخامت هسته و سیال سردکننده معین، یعنی Φ و Δ مشخص، بهینه کردن Q معادل با ماکزیم کردن Π می‌باشد. صورت دیگر رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{Q}{(T_{m,max} - T_{f,in})P} = \Pi^* \Phi \Delta^* \quad (7)$$

که در آن خواهیم داشت:

$$\Pi^* = \frac{Nu_H (H_c / L)^2}{f_H \text{Re}_H^3 \left[1 + \frac{Nu_H}{\text{pr} Nu_H (H_c / L)} \right]}$$

$$\Delta^* = 2L^2$$

Pr عدد پراختل سیال می‌باشد. با نوشتن $\Pi^* = \Pi_h / \Pi_p$ برای هر مقدار شاخص پمپ $\Pi_p = f_H \text{Re}_H^3 / (H_c / L)^3$ داریم [۱۵]:

$$\Pi_h = \frac{Nu_H}{(H_c / L) \left[1 + \frac{Nu_H}{\text{pr} Nu_H (H_c / L)} \right]} \quad (8)$$

Π_h تحت عنوان شاخص انتقال حرارت نامیده می‌شود. بنابراین تابع هدف در این قسمت رابطه (۸) بوده و هدف از بهینه‌سازی ماکزیم کردن این رابطه می‌باشد.

مقادیر Nu_H ، Re_H و Pr باید با توجه به ابعاد هندسی و نوع سیال تعیین شوند. سیال سردکننده آب در نظر گرفته شده که عدد پراختل آن $Pr = 3/57$ می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار رینولدز مشخص نیست، بنابراین آرام یا درهم بودن جریان را نمی‌توان مشخص نمود. هنگامی که $n = 1$ باشد در هسته فقط مسیرهای مثلثی شکل وجود خواهد داشت، در حالی که برای مقادیر $n \geq 2$ علاوه بر مسیرهای مثلثی، مسیرهای لوزی شکل نیز وجود دارند (شکل ۲). استفاده از دیاگرام مرجع ۱۵ منجر به محاسبه عدد رینولدز، ضریب اصطکاک و عدد نوسلت خواهد شد. در این دیاگرام ابتدا جریان در هر دو مسیر آرام فرض می‌شود. سپس با توجه به مقدار n مقدار رینولدز در هر مسیر به دست آمده و با مقدار بحرانی آن ($Re_{cr} = 2000$) مقایسه می‌شود. در صورت صحیح بودن فرض اولیه مقادیر Nu_H و Re_H محاسبه می‌شود. در غیر این صورت در ادامه دیاگرام فرض درهم بودن جریان در هر دو مسیر یا درهم بودن در مسیرهای لوزی شکل و آرام بودن در مسیرهای مثلثی منجر به تعیین Nu_H و Re_H خواهد شد.

در این بخش تابع‌های هدف و قیدهای مربوطه برای شاخص وزن و شاخص انتقال حرارت استخراج گردید. در مرجع ۲ از یک روش عددی در بهینه‌سازی یک‌هدفه شاخص وزن و در مرجع ۱۵ از روش الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی یک‌هدفه شاخص انتقال حرارت استفاده شده است. در الگوریتم‌های ابتکاری می‌توان با انتخاب پارامترهای مناسب و جستجوی بیشتر در فضای طراحی، به نقاط بهینه‌تری دست یافت. به دلیل آنکه روش الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی یک‌هدفه [۱۵] و دوهدفه [۱۳] پانل‌های ساندویچی استفاده شده است، روش گروه ذرات، که یکی دیگر از روش‌های ابتکاری است و برخی مزایای آن در مقدمه اشاره شد، در این مقاله استفاده

روابط عبارت $(V^2 / EM)_{\text{corebuckling}}$ نیز برحسب مقادیر مختلف n در مرجع ۲ موجود می‌باشند که به علت تعدد آن‌ها از ذکر مجدد خودداری گردیده است.

صورت خلاصه مسئله بهینه‌سازی در این قسمت به صورت زیر بیان می‌شود که همانطور که گفته شد هدف بهینه‌سازی وزن با توجه به قیود تسلیم و کمانش در صفحات هسته و رویه می‌باشد:

$$\text{Min: } \psi = 2 \frac{d}{l} + \frac{n}{\cos \theta} \frac{d_c}{l} \quad \text{St: } g_i \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

که g_i ها طبق روابط (۲) بیان می‌شوند.

۲-۲- صورت‌بندی مسئله با در نظر گرفتن تابع هدف شاخص انتقال حرارت
در این قسمت فرض می‌کنیم بار حرارتی یکنواخت Q از سطح بالایی پانل وارد شده و انتقال حرارت توسط سیال سردکننده‌ای که در حال عبور از فضای هسته می‌باشد انجام می‌شود. صفحه پایینی و کناره‌ها کاملاً عایق فرض شده‌اند (شکل ۲).

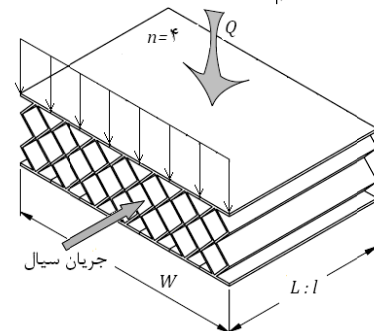
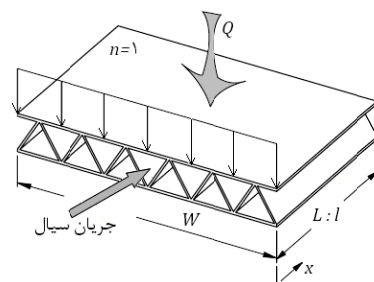
به منظور توصیف مشخصات جریان سه عدد بی‌بعد معرفی می‌شوند: عدد رینولدز (Re_H)، ضریب اصطکاک (f_H) و عدد نوسلت (Nu_H). این سه عدد مربوط به سرعت جریان سیال، تلفات اصطکاک و ضریب انتقال حرارت سطح پانل می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$Re_H = \frac{\rho_f u_0 H_c}{\mu_f} \quad (4-الف)$$

$$f_H = \frac{\Delta p H_c}{0.5 \rho_f u_0^2} \quad (4-ب)$$

$$Nu_H = \frac{h_H H_c}{k_f} = \frac{Q}{WL(T_m(x) - T_f(x))} \frac{H_c}{k_f} \quad (4-ج)$$

که در روابط فوق ρ_f ، μ_f و k_f به ترتیب چگالی، ویسکوزیته دینامیک و هدایت حرارتی سیال سردکننده می‌باشند. Δp افت فشار در طول L پانل است. u_0 سرعت متوسط سیال، $T_m(x)$ متوسط دما در صفحه بالایی در جهت W و $T_f(x)$ متوسط دمای سیال در جهت x می‌باشد. برای یک جریان توسعه یافته مقدار $T_m(x) - T_f(x)$ مستقل از x می‌باشد [۱۵]. توان پمپ لازم برای ایجاد جریانی با سرعت u_0 و افت فشار Δp برابر است با:



شکل ۲ جریان سیال در حال عبور از فضای هسته

جواب بهینه برمی‌گزینند. جواب‌های پرتو اغلب به‌صورت یک مجموعه جواب هستند که هیچ برتری نسبت به هم ندارند و به آن‌ها مجموعه جواب‌های غیر برتر نیز می‌گویند [۱۶].

نخستین نسخه چندهدفه الگوریتم گروه ذرات^۲ در سال ۱۹۹۹ ارائه شد [۱۷]. در این مقاله از روش مرجع ۱۸ در بهینه‌سازی دوهدفه استفاده شده است. این الگوریتم از عملگری به نام عملگر جهش واحد استفاده می‌کند که یک عضو از جمعیت را انتخاب کرده، مقدار یک بعد آن را به عددی در محدوده مقادیر معتبر تغییر می‌دهد. همچنین، یک سیاست نخبه‌گرایی به منظور نگه داشتن نتایج برتر و غالب در تکرارهای الگوریتم تعریف شده است. پاسخ‌های غالب در آرشیو خارجی، که ساختار شبکه‌ای دارد، ذخیره می‌شوند. انتخاب بهترین موقعیت ذره و بهترین موقعیت جمعیت طبق مکانیزم خاصی انجام می‌شوند. الگوریتم چندهدفه نمی‌تواند از رابطه‌های (۹) و (۱۰) برای شناسایی آن‌ها استفاده کند، زیرا همه پاسخ‌های غالب به یک میزان برتری دارند. تنها زمانی بهترین موقعیت کنونی ذره بروز می‌شود که ذره جدیدی مقدار قبلی آن را مغلوب کند. بهترین موقعیت جمعیت نیز در هر تکرار از بین پاسخ‌های غالب موجود در آرشیو انتخاب می‌شود [۱۹]. الگوریتم چندهدفه گروه ذرات به‌صورت شکل ۳ می‌باشد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱- بهینه‌سازی وزن پانل

ابتدا بهینه‌سازی یک‌هدفه وزن پانل (ψ) با توجه به قیود تسلیم و کماتش تحت بارگذاری طولی انجام می‌شود (رابطه (۳)). پانل و بارگذاری آن مطابق شکل ۱ می‌باشند. زاویه قرارگرفتن صفحات هسته، که در شکل ۱ با θ نمایش داده شده، برابر با $54/7$ درجه در نظر گرفته شده است. زیرا بیشترین استحکام برشی پانل تحت این زاویه ایجاد می‌شود [۲۰]. جنس پانل از آلایژ آلومینیوم با $\sigma_y/E = 0.007$ انتخاب شده است. محدوده متغیرهای طراحی به‌صورت $0.001 < d_c/l < 0.003$ و $0.001 < d/l < 0.01$ ، $0.01 < H/l < 0.2$ گرفته شده است.

الگوریتم گروه ذرات در نرم افزار مطلب^۳ نوشته شده و جهت بهینه‌سازی وزن استفاده شده است. پارامترهای این الگوریتم نقش موثری در رسیدن به بهینه کلی و سرعت همگرایی دارند. پارامترهای مورد نیاز برای الگوریتم در جدول ۱ آورده شده که این مقادیر با بررسی پارامترهای مختلف به‌دست آمده است.

نتایج بهینه‌سازی وزن پانل (ψ) برای مقادیر مختلف شاخص بار (H) در نمودار شکل ۴ برای چند پانل نشان داده شده است. در مرجع ۲ بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های مرسوم ریاضی برای مقادیر ۴، ۲، ۱، n انجام شده است. جدول ۲ مقایسه نتایج این روش را با کار والدویت و همکاران [۲] نشان می‌دهد.

نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد، با افزایش بار، وزن بهینه پانل افزایش می‌یابد. همچنین، دو پانل با $n=1$ و $n=2$ نسبت به سایر پانل‌ها در بارهای مختلف وزن بهینه کمتری را دارند. به‌طور کلی افزایش n منجر به افزایش وزن بهینه پانل شده، ولی این افزایش در مقادیر بالاتر n کمتر می‌باشد. شکل ۵ نیز تغییرات ارتفاع پانل نسبت به مقادیر مختلف بار را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است افزایش n منجر به افزایش ارتفاع پانل خواهد شد. بنابراین در این مرحله از بهینه‌سازی پانل با $n=1$ به‌عنوان بهترین پانل انتخاب

گردید. همانطور که در بخش نتایج خواهیم دید، با انتخاب پارامترهای مناسب، این روش در بهینه‌سازی یک‌هدفه وزن به نقاط بهینه بهتری در مقایسه با روش عددی دست یافته است. بنابراین روش گروه ذرات در بهینه‌سازی دوهدفه شاخص وزن و شاخص انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه روش الگوریتم گروه ذرات و قواعد حاکم بر آن در مسایل یک‌هدفه و چندهدفه توضیح داده می‌شود.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات^۱ اولین بار در سال ۱۹۹۵ با الهام از پرواز گروهی پرندگان مطرح شد. مانند همه الگوریتم‌های تکاملی دیگر، الگوریتم دسته ذرات نیز با ایجاد یک جمعیت تصادفی از افراد (در اینجا به‌عنوان یک گروه از ذره‌ها یا پرندگان خوانده می‌شود) شروع می‌شود که باید مقادیر بهینه آن‌ها تعیین شود.

در این الگوریتم هر ذره یک نقطه در فضای جستجو می‌باشد. هر ذره، در فضای جستجوی چند بعدی پرواز می‌کند و موقعیت خود را برحسب تجربه خود و همسایگانش تغییر می‌دهد. کارایی هر ذره (میزان نزدیکی هر ذره به بهینه سراسری) براساس تابع شایستگی تعیین شده اندازه‌گیری می‌شود. هر ذره دارای یک موقعیت X_i است که با سرعت V_i در فضای جستجو حرکت می‌کند. هر ذره به‌سمت بهترین نقطه‌ای که تا آن لحظه تجربه کرده حرکت می‌کند. هر ذره موقعیت خود را برحسب سرعت مشخصی در هر تکرار تغییر می‌دهد که این سرعت به‌طور تصادفی و بر مبنای تمایل حرکت ذره به‌سمت بهترین موقعیت ذره و بهترین موقعیت جمعیت تنظیم می‌شود. سرعت و موقعیت جدید هر ذره به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۱۶]:

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 \text{rand}(0,1)(pbest_i - X_i^t) + \dots \quad (9)$$

$$c_2 \text{rand}(0,1)(gbest_i - X_i^t)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (10)$$

V_i^{t+1} و X_i^{t+1} به ترتیب سرعت و موقعیت ذره در تکرار جدید می‌باشند. X_i^t و V_i^t سرعت و موقعیت کنونی ذره و $pbest_i$ و $gbest_i$ نیز به ترتیب بهترین موقعیت کسب شده ذره و بهترین موقعیتی که ذرات تاکنون کسب کرده‌اند می‌باشند. c_1 و c_2 پارامترهای شناختی و اجتماعی هستند که انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها منجر به تسریع همگرایی الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه‌های محلی می‌شود.

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه گروه ذرات

یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), \dots, f_m(x)\}; x \in D \quad (11)$$

که در آن $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردار متغیرهای طراحی و D فضای طراحی ممکن است که توسط قیود مسئله تعیین می‌شود و $f(x)$ توابع هدف را نشان می‌دهد [۵].

روش گروه ذرات علاوه بر بهینه‌سازی یک‌هدفه، در بهینه‌سازی مسایل چندهدفه نیز استفاده می‌شود. در بهینه‌سازی چندهدفی چند تابع هدف به‌طور همزمان بهینه می‌گردند. در این گونه مسایل برخلاف مسایل یک‌هدفی، که تنها یک نقطه اکسترمم برای مسأله وجود دارد، مجموعه‌ای از بردارهای طراحی به‌عنوان جواب به‌دست می‌آیند که اصطلاحاً نقاط پرتو خوانده می‌شوند و طراح مسأله براساس نیاز خود یکی از این نقاط را به‌عنوان

n	روش	Π	ψ
۱	گروه ذرات	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷۶۰۵
	مرجع ۲		۰/۰۰۷۶۸۲
۲	گروه ذرات	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵۲۱۶
	مرجع ۲		۰/۰۱۶۰۱۲
۳	گروه ذرات	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷۷۰۱
	مرجع ۲		۰/۰۰۷۶۲۳
۴	گروه ذرات	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵۱۳۸
	مرجع ۲		۰/۰۱۶۲۳۱
۵	گروه ذرات	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸۵۰۵
	مرجع ۲		۰/۰۰۸۴۸۹
۶	گروه ذرات	۰/۰۰۲	۰/۰۱۶۸۵۴
	مرجع ۲		۰/۰۱۶۹۸۷

۲-۴- بهینه‌سازی شاخص انتقال حرارت

در بخش ۲-۲ شاخص انتقال حرارت Π_h (رابطه (۸)) استخراج گردید. متغیرهای طراحی شامل d_c/L و H_c/L می‌باشند که جهت مقایسه نتایج با مرجع ۱۵ حدود آن‌ها به صورت $0.005 \leq H_c/L \leq 0.1$ و $0.0005 \leq d_c/L \leq 0.01$ و زاویه θ نیز برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. در این قسمت نیز از الگوریتم گروه ذرات نوشته شده در بخش قبل به منظور ماکزیمم‌سازی Π_h استفاده گردید. مشابه قسمت قبل جهت همگرایی بهتر الگوریتم پارامترهای مختلف بررسی شده که بهترین نتایج با پارامترهای جدول ۳ حاصل شده است. بهینه‌سازی برای پانل‌های مختلف برای مقادیر مختلف شاخص توان پمپ (Π_p) انجام شده و نتایج در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. جدول ۴ نیز مقایسه نتایج این روش را با روش الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده توسط والدویت [۱۵] نشان می‌دهد.

نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد افزایش Π_p در پانل‌های مختلف منجر به افزایش Π_h می‌گردد. در مقادیر متوسط و میانی Π_p ، پانل‌های مختلف تفاوت چندانی به لحاظ شاخص انتقال حرارت بهینه با یکدیگر ندارند. اما در مقادیر بسیار پایین ($\Pi_p=10^{-12}$) و بسیار بالای ($\Pi_p=10^{12}$) شاخص توان پمپ، وضعیت متفاوت است. به همین دلیل در این دو نقطه شاخص انتقال حرارت برای مقادیر مختلف n در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است پانل با $n=1$ در $\Pi_p=10^{12}$ و پانل با $n=7$ در $\Pi_p=10^{-12}$ دارای بیشترین مقدار شاخص انتقال حرارت می‌باشند. پانل با $n=1$ در بخش قبلی نیز به‌عنوان بهترین پانل که دارای کمترین وزن بهینه در بارگذاری‌های مختلف است انتخاب گردید. این پانل به لحاظ شاخص انتقال حرارت نیز دارای کارایی مناسب می‌باشد. بنابراین این دو پانل در بهینه‌سازی دوهدفه، که در بخش بعد بررسی خواهد شد، مورد توجه قرار خواهند گرفت.

۳-۴- بهینه‌سازی دوهدفه

در این قسمت شرایطی را در نظر می‌گیریم که پانل ضمن اینکه تحت بارگذاری طولی قرار گرفته، به‌عنوان یک مبدل حرارتی نیز استفاده شود (شکل ۲). سیال خنک‌کننده نیز آب در نظر گرفته شده است. دو تابع هدف مورد نظر در بخش‌های قبلی استخراج گردیدند. با توجه به شکل ۱ و رابطه $H_c=H-2d$ ، می‌توان تابع Π_h را نیز به صورت سه متغیر نوشت. بنابراین صورت خلاصه مسئله بهینه‌سازی دوهدفه به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min: } \psi = 2 \frac{d}{l} + \frac{n}{\cos \theta} \frac{d_c}{l}$$

$$\text{Max: } \Pi_h = \frac{\text{Nu}_H}{((H-2d)/L) \left[1 + \frac{\text{Nu}_H}{\text{PrNu}_H((H-2d)/L)} \right]} \quad (12)$$

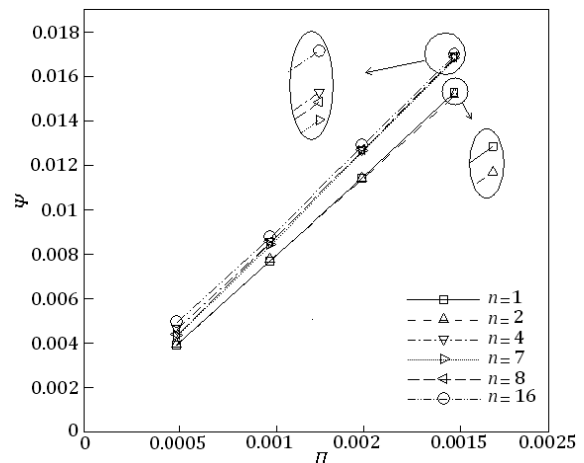
می‌شود. اگرچه در پانل با $n=2$ وزن بهینه کمتری را شاهد هستیم، ولی با توجه به نمودار شکل ۵ با افزایش n ، ارتفاع کلی پانل نیز افزایش می‌یابد و پانل با $n=2$ نسبت به پانل با $n=1$ ارتفاع بیشتری خواهد داشت.

جدول ۱ پارامترهای گروه ذرات در بهینه‌سازی وزن

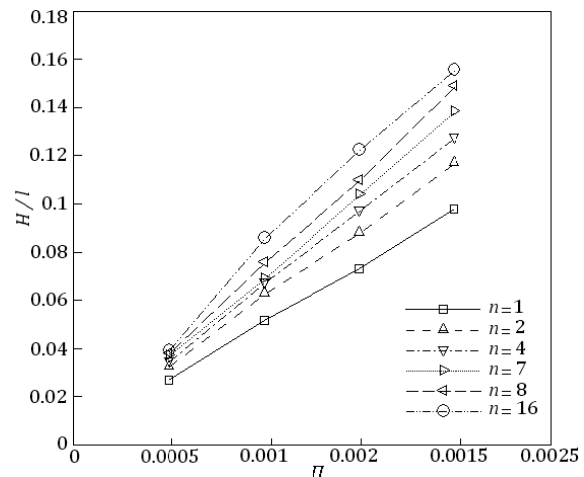
تعداد ذرات	C_1	C_2	w	تعداد تکرار
۱۰۰	۲	۱/۹۵	۰/۹۵	۲۰۰

1. SMOPSO{
2. Init Pop();
3. Init Velocity();
4. EvaluatePop();
5. Update Fbest();
6. Update Pbest();
7. Insert nodom();
8. Gbestpos=rnd(0,nodomfileSize)
9. For(i=1 to MAXCYCLES){
10. For(j=0 to MAXPARTICLES){
11. Update Velocity();
12. Update Particle(); }
13. Keeping();
14. Evaluate Pop();
15. Update Fbest();
16. Update Pbest();
17. Insert nodom();
18. Gbestpos=rnd(0,nodomfileSize) }
19. Print Statistics();

شکل ۳ الگوریتم چندهدفه گروه ذرات [۱۸]



شکل ۴ شاخص وزن (ψ) برحسب شاخص بار (Π_h) برای پانل‌های مختلف



شکل ۵ تغییرات ارتفاع پانل (H/l) نسبت به شاخص بار (Π) در پانل‌های مختلف

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد دو پانل با $n=1$ و $n=7$ پانل‌های مناسب در بهینه‌سازی یک‌هدفه بودند. بنابراین بهینه‌سازی دوهدفه نیز روی این دو پانل انجام شده است. نمودار شکل ۸ منحنی پرتو را برای دو پانل در مقدار بار $\Pi=0/0.16$ نشان می‌دهد. نتایج مشابهی نیز برای مقادیر مختلف شاخص بار (Π) در دو پانل حاصل شده است. این نمودارها مجموعه‌ای از نقاط بهینه را نشان می‌دهند. نقاط منحنی پرتو هیچ برتری نسبت به یکدیگر نداشته و هر نقطه از نمودار بیانگر یک نقطه طراحی است. هر نقطه از منحنی‌ها کمترین وزن را برای یک مقدار مشخص از شاخص انتقال حرارت نشان می‌دهد. همچنین این نقاط بیانگر بیشترین مقدار شاخص انتقال حرارت برای یک وزن مشخص پانل می‌باشند. البته آنچه از نمودارها مشخص است این است که بهبود یکی از توابع هدف منجر به بدتر شدن تابع هدف دیگر می‌شود. به‌عنوان مثال کاهش وزن پانل منجر به کاهش شاخص انتقال حرارت می‌شود. بنابراین اگر نقاط با وزن بهینه کمتر مدنظر قرار گرفته شوند باید توجه شود که این نقاط شاخص انتقال حرارت کمتری را نیز خواهند داشت. انتخاب نقاط با شاخص انتقال حرارت بسیار بالا نیز همراه با افزایش وزن پانل خواهد بود.

۴-۳-۱- رابطه بین دو تابع هدف

رابطه بین دو تابع هدف در پانل با $n=1$ برای مقادیر مختلف شاخص بار در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است هر نمودار شامل دو ناحیه است. ناحیه اول یک ناحیه تقریباً خطی با شیب نسبتاً بالاست که در آن افزایش وزن منجر به افزایش شدید شاخص انتقال حرارت می‌شود. البته این شیب با افزایش شاخص بار کمتر می‌شود. ناحیه دوم یک ناحیه با شیب بسیار کم است که در آن افزایش وزن منجر به افزایش قابل توجه شاخص انتقال حرارت نشده و این شاخص تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین هر نمودار دارای یک نقطه چرخش است که این دو ناحیه را از یکدیگر جدا می‌کند. این نقطه می‌تواند به‌عنوان یک نقطه بسیار مناسب در طراحی استفاده شود. چون این نقطه نسبت به نقاط قبل خود دارای شاخص انتقال حرارت بالاتر، و نسبت به نقاط بعد خود وزن بهینه کمتری را دارا می‌باشد.

مشخصات این نقطه در بارگذاری‌های مختلف در پانل با $n=1$ در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد که افزایش شاخص بار منجر به افزایش وزن بهینه پانل می‌شود و این همان نتیجه‌ای است که در بخش ۴-۱ استخراج گردید. نمودار مشابهی نیز برای پانل با $n=7$ حاصل شده است. با این تفاوت که فواصل نمودارها به یکدیگر نزدیک‌تر شده است. با توجه به شکل ۹ بیشترین مقدار شاخص انتقال حرارت قابل دستیابی برای مقادیر مختلف بار تقریباً یکسان است. جدول ۷ مقادیر متغیرهای طراحی و وزن پانل را برای بارهای مختلف در بیشترین مقدار شاخص انتقال حرارت قابل دستیابی نشان می‌دهد.

۴-۳-۲- کاربرد منحنی‌های پرتو

منحنی‌های پرتو به‌دست آمده ابزار مفیدی را در اختیار طراح قرار می‌دهند تا بتواند با توجه به اهمیت هر یک از توابع هدف، ابعاد پانل مناسب را انتخاب کند. فرض کنیم طراح با توجه به مقدار شاخص بار (به‌عنوان مثال $\Pi=0/0.16$) و فضای طراحی، پانل با $n=1$ را انتخاب کرده است. اگر مقدار شاخص انتقال حرارت مورد نظر 383000 باشد، با توجه به نمودار شکل ۸، کمترین وزن پانل برابر $0/0.325$ خواهد بود. با استفاده از نمودارهای شکل ۱۰ می‌توان مقادیر متغیرهای طراحی را نیز به‌دست آورد. با توجه به این

قیدهای طراحی نیز همان رابطه‌های (۳) خواهند بود. محدوده متغیرهای طراحی به‌صورت $0.015 < H/l < 0.2$ ، $0.0005 < d/l < 0.007$ و $0.0004 < d_c/l < 0.01$ در نظر گرفته می‌شود. زاویه θ نیز مشابه بخش ۴-۱ به‌منظور افزایش استحکام برشی پانل برابر با $54/7$ درجه انتخاب شده است.

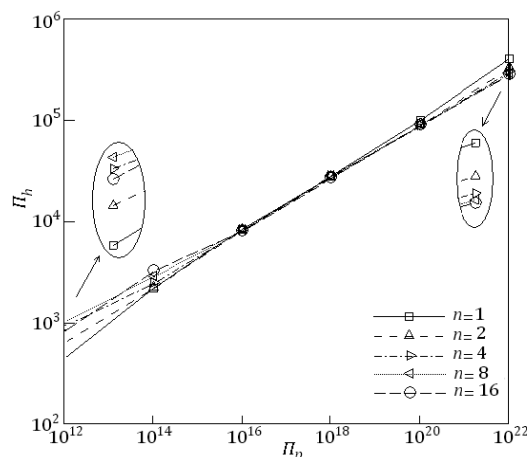
الگوریتم چندهدفه گروه ذرات جهت بهینه‌سازی دوهدفه به‌همراه آرشیو جهت ذخیره‌سازی نقاط غالب در نرم‌افزار مطلب نوشته شده است. پارامترهای این الگوریتم در جدول ۵ موجود می‌باشند. به‌منظور پیوستگی بیشتر نقاط در منحنی پرتو اندازه آرشیو بزرگ انتخاب شده است.

جدول ۳ پارامترهای گروه ذرات در بهینه‌سازی شاخص انتقال حرارت

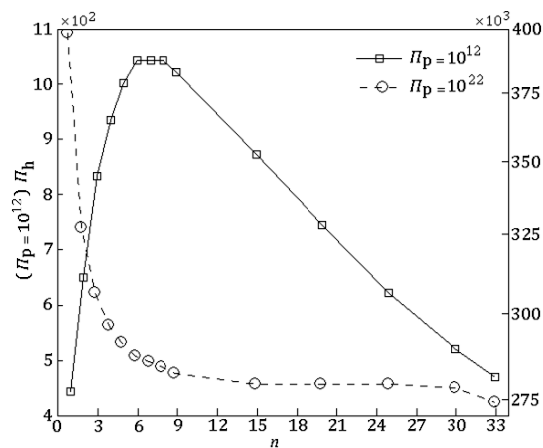
تعداد ذرات	C_1	C_2	w	تعداد تکرار
۱۰۰	۱/۹۵	۱/۹۵	۰/۹	۲۰۰

جدول ۴ مقایسه نتایج گروه ذرات با کار والدویت [۱۵] در بهینه‌سازی شاخص انتقال حرارت

n	روش	Π_p	Π_h
۱	گروه ذرات	1.0^{12}	۴۴۲
	مرجع ۱۵		۴۴۰
۱	گروه ذرات	1.0^{22}	۳۹۷۹۹۳
	مرجع ۱۵		۴۰۵۶۱
۴	گروه ذرات	1.0^{12}	۹۳۱
	مرجع ۱۵		۹۲۴
۴	گروه ذرات	1.0^{22}	۲۹۶۰۳۱
	مرجع ۱۵		۲۹۸۱۳۵



شکل ۶ تغییرات شاخص انتقال حرارت (Π_h) نسبت به شاخص پمپ (Π_p) در پانل‌های مختلف

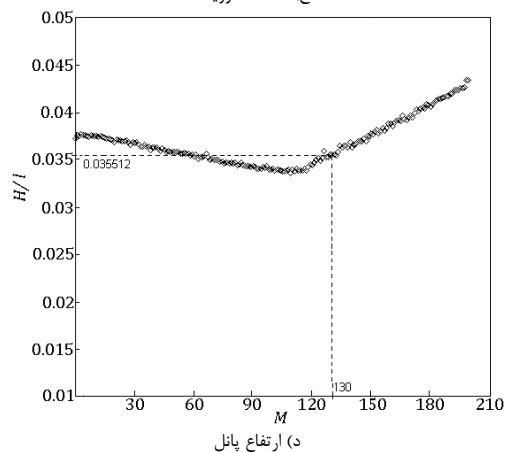
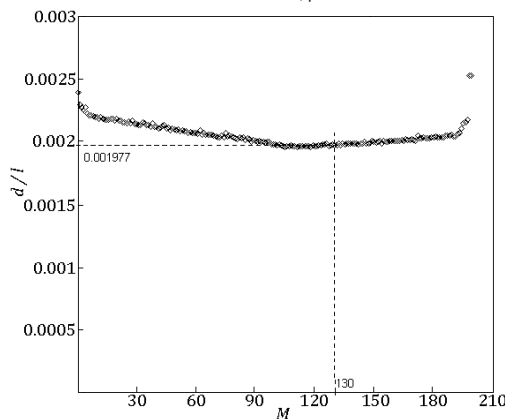
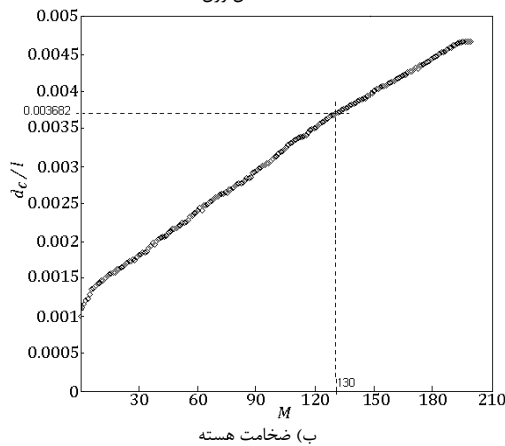
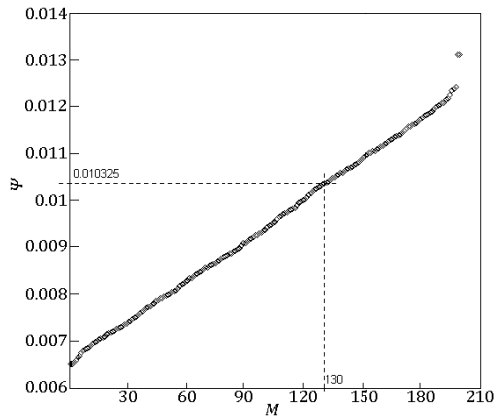


شکل ۷ شاخص انتقال حرارت (Π_h) در پانل‌های مختلف برای دو مقدار شاخص پمپ (Π_p)

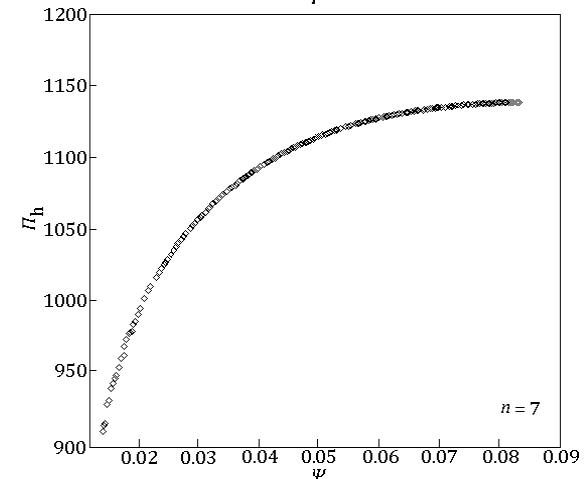
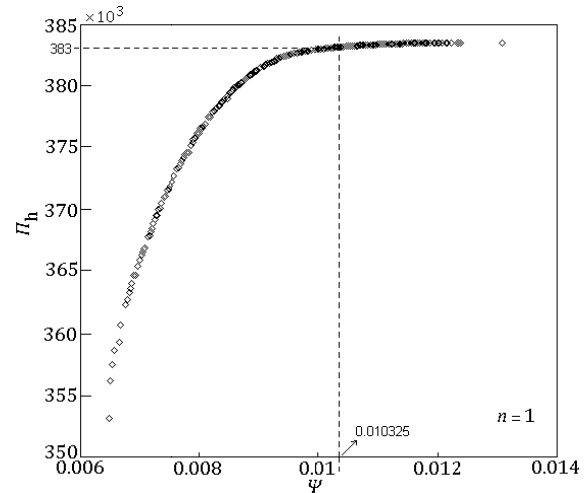
نمودارها نقطه ۱۳۰، که در آرشیو الگوریتم ذخیره شده است، نقطه مدنظر خواهد بود. بنابراین مقادیر متغیرهای طراحی برابر با $d/l=0/001977$ و $H/l=0/035512$ و $d_c/l=0/003682$ برای سایر مقادیر شاخص بار و پانل‌های دیگر نیز می‌توان نمودارهای مشابهی را به‌دست آورد.

جدول ۵ پارامترهای گروه ذرات در بهینه‌سازی دوهدفه

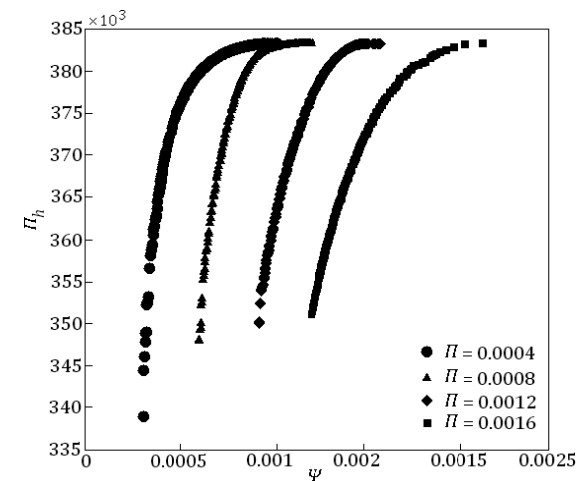
تعداد ذرات	نرخ جهش	اندازه آرشیو	C_1	C_2	تعداد تکرار
۲۰۰	۰/۵	۲۰۰	۱/۹۵	۱/۹۵	۱۸۰



شکل ۱۰ مقادیر شاخص وزن و متغیرهای طراحی برحسب شماره نقاط آرشیو (M) در پانل با $n=1$



شکل ۸ منحنی پرتو برای دو پانل برای شاخص بار $\Pi=0/0016$



شکل ۹ منحنی پرتو برای پانل با $n=1$ در مقادیر مختلف شاخص بار

جدول ۶ مشخصات نقطه چرخش در پانل با $n=1$

H/l	d _c /l	d/l	Ψ	Π _h	Π
۰/۰۳۰۷	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۷۹	۳۸۲۴۲۰	۰/۰۰۰۴
۰/۰۳۴۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۹۷	۳۸۲۴۵۰	۰/۰۰۰۸
۰/۰۴۷۶	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۴۲	۳۸۲۶۲۲	۰/۰۰۱۲
۰/۰۵۶۴	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۵۹	۰/۰۲۰۰	۳۸۲۸۴۲	۰/۰۰۱۶

جدول ۷ مقادیر وزن و متغیرهای طراحی در بیشترین شاخص انتقال حرارت قابل

دستیابی در پانل با $n=1$					
H/l	d _c /l	d/l	Ψ	Π _h	Π
۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۴۶	۰/۰۴۰۵	۰/۰۱۰۴	۳۸۳۳۴۹	۰/۰۰۰۴
۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۴۶	۰/۰۴۲۴	۰/۰۱۲۳	۳۸۳۳۴۹	۰/۰۰۰۸
۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۴۷	۰/۰۴۶۲	۰/۰۱۶۰	۳۸۳۳۴۹	۰/۰۰۱۲
۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۴۷	۰/۰۵۲۱	۰/۰۲۱۶	۳۸۳۳۴۸	۰/۰۰۱۶

۴-۴- مقایسه با نتایج سایر محققین

در جدول ۲، که در بخش ۴-۱ ارائه شد، مقایسه نتایج به‌دست آمده در بهینه‌سازی یک‌هدفه وزن با نتایج والدویت و همکاران [۲] ارائه شده است. در مرجع ۲ از روش عددی در بهینه‌سازی وزن استفاده گردیده است. همانطور که در این جدول مشخص است، روش گروه ذرات تقریباً در اکثر موارد به وزن بهینه کمتری در بارگذاری‌های مختلف رسیده است. بنابراین این روش در مقایسه با روش‌های عددی در بهینه‌سازی وزن پانل موثرتر می‌باشد. در مرجع ۱۵ نیز روش الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی شاخص انتقال حرارت پانل ساندویچی استفاده شده است. جدول ۴ نتایج روش گروه ذرات را با این مرجع مقایسه می‌نماید. تطابق خوبی بین نتایج دو روش مشاهده می‌شود.

همانطور که در مقدمه اشاره شد بهینه‌سازی دوده‌دهی وزن و شاخص انتقال حرارت توسط تان و سو [۱۳] در پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری و با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. نقطه چرخش و دو ناحیه متفاوت به‌دست آمده در نمودار شکل ۹ در نتایج تان و سو نیز مشاهده می‌شود. همچنین آن‌ها نیز نتیجه گرفتند بیشترین شاخص انتقال حرارت قابل دستیابی در بارگذاری‌های مختلف تقریباً ثابت می‌باشد. با توجه به این که نوع هسته پانل ارائه شده در این مقاله با هسته پانل به‌کارگرفته شده توسط تان و سو متفاوت است، وزن بهینه حاصل شده برای برخی مقادیر شاخص بار به یکدیگر نزدیک و برای برخی دیگر از مقادیر شاخص بار با یکدیگر متفاوت می‌باشد. به‌عنوان نمونه، با توجه به نمودار شکل ۹، برای دو شاخص بار $\Pi=0/0004$ و $\Pi=0/0016$ مقادیر شاخص وزن بهینه به ترتیب $0/0036$ و $0/0125$ می‌باشند، در حالی که در مرجع ۱۳ برای بارگذاری تقریباً مشابه مقادیر شاخص وزن بهینه به ترتیب $0/0042$ و $0/0031$ به‌دست آمده است.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله بهینه‌سازی نوعی از پانل‌های ساندویچی، که دارای واحدهای باز و منشوری هستند، مورد بررسی قرار گرفت. این پانل‌ها ضمن بارگذاری می‌توانند به‌عنوان مبدل حرارتی نیز استفاده شوند. بهینه‌سازی یک‌هدفه و چندهدفه روی این پانل‌ها توسط الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات صورت گرفته و نتایج ذیل حاصل شد:

- بهینه‌سازی یک‌هدفه وزن نشان داد وزن بهینه پانل با افزایش بار افزایش می‌یابد و پانل با $n=1$ در مقایسه با سایر پانل‌ها دارای کارایی بهتر در بارگذاری‌های مختلف است.

- بهینه‌سازی یک‌هدفه شاخص انتقال حرارت نشان داد افزایش شاخص توان پمپ منجر به افزایش شاخص انتقال حرارت می‌شود. در مقادیر بالای شاخص توان پمپ، پانل با $n=1$ و در مقادیر پایین آن، پانل با $n=7$ دارای بیشترین شاخص انتقال حرارت می‌باشند. در مقادیر میانی شاخص توان پمپ پانل‌های مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

- بهینه‌سازی دوده‌دهی روی دو پانل با $n=1$ و $n=7$ نشان داد با افزایش وزن پانل، شاخص انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

- نمودارهای پرتو حاصل شده از بهینه‌سازی دوده‌دهی دارای یک نقطه چرخش می‌باشند که دو ناحیه متمایز را روی نمودار ایجاد می‌کند. در ناحیه اول افزایش وزن منجر به افزایش شدید شاخص انتقال حرارت می‌شود، در حالی که در ناحیه دوم، با افزایش وزن، شاخص انتقال حرارت تقریباً ثابت می‌ماند. این نمودارها ابزار مفیدی را جهت انتخاب پانل مناسب در اختیار طراح قرار می‌دهند.

- بیشترین شاخص انتقال حرارت قابل دستیابی توسط یک پانل مشخص در بارگذاری‌های مختلف تقریباً یکسان می‌باشد.

- الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات روشی موثر در رسیدن به بهینه کلی با استفاده از متغیرهای پیوسته می‌باشد. این الگوریتم دارای توانایی لازم در بهینه‌سازی مسایل یک‌هدفه و چندهدفه بوده و قابل رقابت با سایر الگوریتم‌های ابتکاری است.

۶- فهرست علائم

d	ضخامت صفحات رویه (m)
d_c	ضخامت صفحات هسته (m)
H	فاصله صفحات رویه (m)
M	ممان خمشی بیشینه (Nm)
V	نیروی برشی بیشینه (N)
W	عرض پانل (m)
L	طول پانل (m)
u	سرعت (m/s)
σ_y	تنش تسلیم (N/m ²)
E	مدول الاستیسیته (N/m ²)

علائم بدون بعد

n	تعداد موج‌های هسته
Π	شاخص بارگذاری
Ψ	شاخص وزن
k_c	ضریب کماتش هسته
Π_p	شاخص توان پمپ
Π_h	شاخص انتقال حرارت
Φ	شاخص سیال
Re	عدد رینولدز
Pr	عدد پرانتل
Nu	عدد نوسلت

علائم یونانی

ρ	چگالی (kg/m ³)
θ	زاویه صفحات هسته (rad)
Δ	تغییرات
μ	لزجت دینامیک (kg/ms)

بالانویس‌ها

t	مربوط به زمان
i	مربوط به تکرار

زیرنویس‌ها

0	شرایط بالادست
c	مربوط به هسته
f	مربوط به سیال
m	مربوط به صفحه رویه بالا
max	بیشترین
in	ورودی
cr	بحرانی

۷- مراجع

- [8] 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)
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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.
- [14] 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)
- [15] L. Valdevit, A. Pantano, H. Stone, A. Evans, Optimal active cooling performance of metallic sandwich panels with prismatic cores, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 21-22, pp. 3819-3830, 2006.
- [16] R. Perez, K. Behdinin, Particle swarm approach for structural design optimization, *Computers and Structures*, Vol. 85, No. 19-20, pp. 1579-1588, 2007.
- [17] J. Moore, R. Chapman, Application of particle swarm to multiobjective optimization, *Conference in Department of Computer Science and Software Engineering*, Auburn University, 1999.
- [18] L. Cagnina, S. Esquivel, C. Coello, A Particle Swarm Optimizer for Multi-Objective Optimization, *Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 4, No. 5, pp. 204-210, 2005.
- [19] M. Amoozegar, M. Eftekhari, Automatic model-based software performance optimization based on MOPSO, *Intelligent Systems in Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-12, 2011. (In Persian)
- [20] 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.
- [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] 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.
- [3] T. Lu, H. Stone, M. Ashby, Heat transfer in open-cell metal foams, *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 10, pp. 3619-3635, 1998.
- [4] 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.
- [5] M. Karimi, H. Bakhtiari, A. Keshavarz, Modeling and multiobjective optimization of twist extrusion process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 73-60, 2013. (In Persian)
- [6] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1995.
- [7] D. Sha, H. Lin, A particle swarm optimization for multi-objective flowshop scheduling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 7-8, pp. 749-758, 2008.