

بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های فضاکار دولایه با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی اصلاح شده

مصطفی مشایخی^{۱*}، عیسی سلاجقه^۲ و رضا بیجاری^۳

- ۱- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
- ۲- استاد دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمان

*m.mashayekhi@vru.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۰/۰۹]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۸/۰۹]

چکیده

بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های گسسته بزرگ مقیاس، از چالش‌برانگیزترین مسائل بهینه‌سازی به شمار می‌روند. در این نوع بهینه‌سازی، هنگامی که سطح مقطع اعضا از میان مقادیر گسسته انتخاب می‌شوند، رسیدن به بهینه کلی دشوارتر می‌شود. در این مقاله، روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای نوینی برای بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های گسسته بزرگ مقیاس (شبکه‌های دولایه)، با در نظر گرفتن قیود مختلف و با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) ارائه شده است. بدین منظور، ابتدا با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها (ESO)، یک آنالیز حساسیت برای شناخت اعضای سازه‌ای مهم‌تر، انجام می‌شود. سپس نتایج این آنالیز حساسیت به شکلی استفاده می‌شود، که HSA بتواند با ایجاد یک جستجوی جهت‌دار در یک فضای طراحی کاهش یافته، توپولوژی بهینه شبکه‌های دولایه را بدست آورد. در روند بهینه‌سازی توپولوژی، وزن سازه کمینه می‌شود بطوریکه قیود مسئله بهینه‌سازی شامل تنش اعضا و جابه‌جایی گره‌ها و نیز ضریب لاغری اعضا ارضا شود. همچنین، وجود و عدم وجود اعضای شبکه پایین و جانی و نیز سطح مقطع اعضای سازه بعنوان متغیرهای طراحی انتخاب شده است. حذف اعضای شبکه پایین و جانی، از طریق حذف گره‌های شبکه پایین انجام شده است. به منظور کاهش فضای طراحی، از تقارن سازه برای حذف گروهی این گره‌ها استفاده می‌شود. نتایج عددی بدست آمده در این مقاله، کارایی روش دو مرحله‌ای ارائه شده را در یافتن توپولوژی بهینه شبکه‌های دولایه نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: سازه‌های گسسته، شبکه‌های دولایه، بهینه‌سازی توپولوژی، روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها، الگوریتم جستجوی هارمونی.

۱- مقدمه

امکانات موجود، برای دستیابی به هدفی خاص، که اصطلاحاً بهینه‌سازی نامیده می‌شود، بسته به هدف مورد نظر، می‌تواند فرآیندی مدیریتی و یا ریاضی باشد. در زمینه‌های مختلف مهندسی، برای خلق یک اثر، دو گروه

امروزه با افزایش جمعیت، تخصیص بهینه امکانات موجود برای نیل به اهداف مختلف سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و ... امری اجتناب ناپذیر به شمار می‌رود. استفاده هر چه بهتر از

توپولوژی، اعضای غیر ضروری آن حذف می‌شود. در یافتن توپولوژی بهینه سازه‌های گسسته، تلفیق روش‌های بهینه‌سازی با یکدیگر، کارایی آنها را در یافتن نقطه بهینه افزایش می‌دهد [6-9].

الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) یک روش فرا ابتکاری است که در سال ۲۰۰۱ به وسیله جیم و همکاران معرفی شد. این الگوریتم، از فرایند بداهه‌سرای موسیک گروه ارکستر پیروی می‌کند. هر نوازنده موسیک، گام‌هایی از ابزارهای موسیقی خود را می‌نوازد تا شرایطی بهتر در ارکستر به وجود آورد. هدف از این فرآیند، رسیدن به آهنگی است که هماهنگی کاملی از نواها داشته باشد. خروجی این هماهنگی کامل، صدای خوشایندی است که با استانداردهای زیباشناختی هماهنگی داشته باشد. به دلیل حجم محاسباتی کم، مفهوم ساده، پارامترهای کم و اجرای آسان، این الگوریتم به یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در سال‌های اخیر تبدیل شده است [10-15].

در این مقاله، نسخه‌ای از روش بهینه‌سازی سازه‌ای تکاملی که به وسیله استیون و همکاران ارائه شده است [16]، استفاده شده است و تعدادی از پارامترهای HSA بهبود یافته است، به گونه‌ای که در بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه، روش HSA بتواند مقادیر بهتری برای همه متغیرهای طراحی پیدا نماید [17].

۲- بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های فضاکار دولایه

در بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های فضاکار دولایه، هندسه سازه، موقعیت تکیه‌گاه‌ها و مختصات گره‌ها ثابت است. به منظور کاهش فضای طراحی، اعضای سازه مطابق روش ارائه شده در مرجع [7] گروه‌بندی می‌شوند. در این مسئله بهینه‌سازی، سطح مقطع اعضا وجود و عدم وجود گره‌های سازه به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند، به گونه‌ای که از تقارن سازه برای گروه‌بندی گره‌ها استفاده شده است. وجود

عمده طراحان و سازندگان فعالیت می‌کنند. بیشتر، طراحان از روش‌های مختلف بهینه‌سازی ریاضی، برای کاهش هزینه طرح، و سازندگان از روش‌های مدیریتی، برای کاهش زمان احداث پروژه بهره می‌برند.

در مسائل طراحی، علم بهینه‌سازی به عنوان ابزاری برای بدست آوردن طرح بهینه ارضا کننده قیود طراحی، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران و طراحان قرار داشته است. امروزه کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در مهندسی به طور چشمگیری رشد یافته است و در هر شاخه از مهندسی، ردپای بهینه‌سازی نیز مشاهده می‌شود [1].

سازه‌های فضاکار، از اجزایی با شکل‌های هندسی منظمی تشکیل شده‌اند که در کنار یکدیگر تکرار می‌شوند و با اتصال مکرر این اجزا، سازه‌های سبک، مستحکم و یکپارچه با ساختاری سه‌بعدی به وجود می‌آیند. از این نوع سازه‌ها برای پوشش مکان‌های وسیع بدون حضور ستون‌های داخلی مانند: استادیوم‌ها، سالن‌های تجاری، فرودگاه‌ها و غیره استفاده می‌شود و اغلب به سه گروه عمده شبکه‌ها، گنبد‌ها و چلیک‌ها تقسیم می‌شود. از میان این سه گروه، شبکه‌های تخت دولایه عمومی‌ترین نوع آنها هستند که امروزه به تعداد زیاد، استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر، تلاش‌های قابل توجهی در ارتباط با توسعه روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی صورت گرفته و استراتژی‌های متفاوتی که در بعضی از موارد وابسته به نوع مسئله هستند، اتخاذ شده‌اند. این روش‌ها، طراحان را قادر می‌سازند تا برای دستیابی به عملکرد مناسب سازه‌ها، پیکره سازه‌ای مناسب آنها را پیدا نمایند [2]. به عنوان نمونه، فوشس و شمش [3] از روش بهینه‌سازی توپولوژی برای طراحی سازه‌ها تحت تاثیر فشار آب استفاده کردند. آکزیگر و کوکوارا [4] از این روش برای بیشینه‌سازی مقادیر ویژه استفاده کردند، و میوت و آلن [5] از این روش برای طراحی سازه‌های هواکشان استفاده نمودند.

در بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های گسسته، معمولا از مفهوم سازه زمینه استفاده می‌شود. در این روش، سازه‌ای با بیشینه تعداد اعضا ایجاد می‌شود و در روند بهینه‌سازی

لاغری و ضریب لاغری مجاز عضو k ام است. برای جزییات بیشتر، به مرجع [7] مراجعه شود.

مسئله بهینه سازی مقید می تواند به مسئله بهینه سازی نامقید تبدیل شود، به گونه ای که تابع هدف اصلاح شده (Ψ) کمینه شود. در این مقاله، تابع هدف اصلاح شده به صورت زیر در نظر گرفته می شود [7]:

$$\psi = W (1 + C)^2 \quad (3)$$

به گونه ای که:

$$C(\bar{A}) = g_{\sigma}(\bar{A}) + g_{\lambda}(\bar{A}) + g_{\delta}(\bar{A}) \quad (4)$$

که C تابع جریمه است. قابل ذکر است که مقدار جریمه مربوط به هر یک از قیدها، تنها در صورتی محاسبه می شود که مقدار آنها مثبت باشد.

۳- الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)

الگوریتم جستجوی هارمونی یک الگوریتم جستجوی فرااکتشافی است که ایده اصلی آن، شبیه سازی هماهنگ کردن نوت های موسیقی، برای رسیدن به بهترین عملکرد است [10]. در روش هماهنگ کردن اجرای موسیقی - که می تواند بعنوان یک روند بهینه سازی دیده شود-، تنوع آلات موسیقی مشابه متغیرهای طراحی در مسئله بهینه سازی خواهد بود. صدای همه آلات موسیقی موجود، معادل یک جواب در مسئله بهینه سازی و ارزیابی هارمونی آن، معادل تابع هدف جواب خواهد بود. مهمترین پارامترهای این الگوریتم، مقدار در نظر گرفتن حافظه هارمونی^۱ (HMCR)، اندازه حافظه هارمونی^۲ (HMS) و مقدار تغییر دادن هارمونی^۳ (PAR) است [11]. مهمترین مراحل الگوریتم HSA در زیربخش های زیر توضیح داده شده است [12]:

۳-۱- تنظیم پارامترهای ورودی

هنگامیکه مسئله بهینه سازی آماده است، مقدار مناسب پارامترهای موجود در الگوریتم باید تعیین شوند. به علاوه،

و عدم وجود هر گروه گرهی، به وسیله یک متغیر (متغیر توپولوژی) مشخص می شود که به ترتیب مقدار ۱ و ۰ را به خود اختصاص می دهد و جزییات بیشتر در مرجع [7] قابل جستجو است.

به منظور دستیابی به سازه های اجرایی، وجود و عدم وجود گره های شبکه بالا به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته نشده اند. این مسئله باعث می شود که سطح بارگیر گره های شبکه بالا تغییر نکنند. همچنین، از متغیرهای گسسته برای بهینه سازی سطح مقطع اعضای سازه استفاده شده است. این متغیرها از مقاطع لوله ای شکل با قطر خارجی و ضخامت مشخص تشکیل شده اند. در طرح توپولوژی بهینه شبکه های دولایه، مقدار بهینه متغیرهای طراحی به شکلی از میان مقادیر گسسته جستجو می شود که وزن سازه (W) تحت تاثیر قیود تنش (g_{σ})، ضریب لاغری (g_{λ}) و جابه جای گره های آن (g_{δ}) کمینه شود [7]:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & W(\bar{\mathbf{A}}) = \rho^e \sum_{k=1}^{NMG} a_k \sum_{i=1}^{N_k} l_i \\ \text{Subject to} \quad & g_{\sigma}, g_{\lambda}, g_{\delta} \leq 0 \\ & \bar{\mathbf{A}} = [J_1, J_2, \dots, J_{NTV}, a_1, a_2, \dots, a_{NMG}]^T \quad (1) \\ & J_i \in [0, 1], \quad i = 1, 2, \dots, NTV \\ & a_k \in \tilde{\mathbf{A}}, \quad k = 1, 2, \dots, NMG \end{aligned}$$

که در این رابطه NMG تعداد گروه اعضا، NTV تعداد متغیرهای توپولوژی، J_i متغیر توپولوژی نام، N_k تعداد اعضای گروه k ام، ρ^e وزن مخصوص مصالح مصرفی، l_i طول عضو نام a_k سطح مقطع اعضای گروه k ام است که از لیست مقاطع عرضی داده شده ($\tilde{\mathbf{A}}$) انتخاب می شود.

در مسئله بهینه سازی توپولوژی، قیدهای تنش، ضریب لاغری و جابه جایی گره ها، به صورت زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\begin{aligned} g_{\sigma} &= \sum_k \max(|\sigma_k| / \bar{\sigma}_k - 1, 0) \\ g_{\lambda} &= \sum_k \max(\lambda_k / \bar{\lambda}_k - 1, 0) \\ g_{\delta} &= \sum_j \max(|\delta_j| / \delta_v - 1, 0) \end{aligned} \quad (2)$$

که در این رابطه δ_j ، δ_v ، σ_k ، $\bar{\sigma}_k$ ، λ_k و $\bar{\lambda}_k$ به ترتیب جابه جایی گره نام، جابه جایی مجاز قائم، تنش عضو، تنش مجاز، ضریب

1 Harmony memory considering rate

2 Harmony memory size

3 Pitch adjust rate

را برای جواب جدید x^{new} تعیین می‌کند، با احتمال HMCR، جواب نام فرد تصادفی نام از حافظه را برای آن در نظر می‌گیرد (ز بین ۱ تا HMS).

(ج) میزان تغییر: پس از انتخاب تصادفی مقدار x_i^{new} از حافظه که در قسمت قبلی شرح داده شد، مقدار این متغیر ممکن است با احتمال PAR به مقدار کوچکی (bw) اضافه و یا کاسته شود.

این سه حالت می‌تواند به صورت خلاصه، به شکل زیر نشان داده شود [10]:

$$x_i^{new} = \begin{cases} \text{w.p. HMCR} & \left\{ \begin{array}{l} \text{Select a new value for a variable} \\ \text{from HM, first. Then :} \\ \text{w.p. (1 - PAR) : do nothing,} \\ \text{w.p. PAR : choose a} \\ \text{neighborin g value.} \end{array} \right. \\ \text{w.p. (1 - HMCR)} & \text{Select a new value randomly} \end{cases} \quad (6)$$

که w.p. مخفف "با احتمال" خواهد بود.

۴-۳- به روز رسانی حافظه

اگر مقدار تابع هدف جواب x^{new} ، بهتر از بدترین جواب موجود در HM باشد، x^{new} جایگزین بدترین فرد موجود در HM خواهد شد.

۵-۳- خاتمه بهینه‌سازی

اگر الگوریتم HS شرط خاتمه بهینه‌سازی را برآورده سازد (به عنوان نمونه، به بیشینه تعداد تکرارها برسد)، بهینه‌سازی خاتمه می‌یابد و در غیر این صورت، جواب جدیدی ایجاد می‌شود.

۴- الگوریتم جستجوی هارمونی اصلاح شده (ESO-HSA)

در بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه، به منظور دستیابی به مقادیر بهتر برای متغیرهای توپولوژی با استفاده از روش HSA، ابتدا بهینه‌سازی اندازه اعضای سازه زمینه با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها (ESO) انجام می‌شود [6, 9]، که در بخش ۴-۱ توضیحات بیشتر ارائه خواهد شد. در حقیقت، یک آنالیز حساسیت با استفاده از یک روش

در کنار سه پارامتر توضیح داده شده یعنی HMS، HMCR و PAR، روش HSA پارامترهای دیگری مانند: بیشینه تعداد تکرار و بیشینه بازه تغییر متغیرها - که به همراه متغیر PAR عمل می‌کند، دارد که باید مقدار مناسب آنها تعیین شوند [13]. همچنین، مقدار عددی HMCR مهم است زیرا تضمین می‌کند که جواب‌های خوب، به عنوان اجزای جواب‌های جدید در نظر گرفته می‌شوند. اگر مقدار این پارامتر خیلی کم باشد (نزدیک ۰)، فقط تعداد کمی از جواب‌های خوب انتخاب می‌شوند و همگرایی ممکن است کند شود. اگر مقدار این متغیر زیاد باشد (نزدیک ۱)، بیشتر از مقادیر موجود در حافظه برای ایجاد طرح‌های جدید استفاده می‌شود و نواحی جدید کشف نمی‌شود و جواب بهینه نهایی چندان مناسب نیست.

۳-۲- ایجاد اولیه حافظه

هنگامی که فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی انجام شد و مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم انتخاب شد، یک فرآیند پیکره‌بندی تصادفی روی حافظه هارمونی (HM) انجام می‌شود. در این فرآیند، الگوریتم HSA به تعداد HMS راه حل تصادفی ایجاد می‌کند [14]. HM می‌تواند به شکل ماتریسی زیر ایجاد شود:

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & | & f(X^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 & | & f(X^2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} & | & f(X^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

که $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$ طرح تصادفی نام در فضای طراحی است.

۳-۳- اکتشاف نقطه جدید

هنگام تولید مقادیر جدید برای متغیرهای طراحی و اکتشاف نقاط جدید، الگوریتم HS سه گزینه انتخابی دارد: (الف) انتخاب تصادفی: هنگامی که HS مقدار x_i^{new} را برای جواب جدید x^{new} تعیین می‌کند، یک مقدار تصادفی از میان کلیه مقادیر مجاز و با احتمال (1-HMCR) انتخاب می‌کند.

(ب) در نظر گرفتن حافظه: هنگامی که HS مقدار x_i^{new}

دوم هستند. بنابراین در این مقاله، HSA به گونه‌ای اصلاح می‌شود که بتواند مقادیر بهتری برای متغیرهای توپولوژی بدست آورد. استفاده از این روش اصلاح شده باعث می‌شود که احتمال حذف اعضای مهمتر سازه کاهش یابد. بدین منظور، ابتدا درجه اهمیت گره‌های گروه λ_m با استفاده رابطه زیر تعیین می‌شود [7]:

$$IR^i = SA^i / SA_{\max} \quad (V)$$

$$SA_{\max} = \max(SA^i), i = 1, 2, \dots, nbj$$

که SA^i جمع سطح مقطع اعضای متصل به یکی از گره‌های موجود در گروه λ_m است و nbj تعداد گره‌های موجود در این گروه است. سپس، به منظور یافتن مقادیر بهتر برای متغیر توپولوژی λ_m (x_i^{new})، سه گزینه انتخابی در اکتشاف نقاط جدید در الگوریتم HS- که در بخش ۳-۳ توضیح داده شده است، به صورت زیر تغییر می‌یابد:

الف) انتخاب تصادفی: هنگامی که مقدار x_i^{new} را برای جواب جدید x^{new} تعیین می‌کند، اگر $IR^i < IR_{\min}$ ، روش HS با احتمال (1-HMCR) یکی از دو مقدار ۰ و ۱ را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و در غیر این صورت، مقدار x_i^{new} برابر با ۱ فرض می‌شود. قابل ذکر است که IR_{\min} کمینه درجه اهمیت است و مقدار مناسب آن به شکلی تعیین می‌شود که تعداد مناسبی از گروه‌های گرهی در معرض حذف تصادفی قرار گیرند [7].

ب) در نظر گرفتن حافظه: هنگام تعیین مقدار جدید x_i^{new} ، HS مقدار فرد تصادفی λ_m را (x_i^j) را با احتمال HMCR انتخاب می‌کند.

ج) میزان تغییر: پس از تعیین تصادفی x_i^{new} از حافظه هارمونی، با احتمال PAR، اگر $IR^i < IR_{\min}$ ، مقدار x_i^{new} برابر ($1 - x_i^j$) در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت، برابر ۱ فرض می‌شود.

در بهینه سازی توپولوژی سازه‌ها با استفاده از روش‌های HSA و ESO-HSA، سازه‌های ناپایدار زیادی تولید می‌شود. در این مقاله نیز پس از یافتن هر سازه ناپایدار، توپولوژی تصادفی جدیدی ایجاد و ناپایداری آن بررسی می‌شود. این روند تا

بهینه سازی (ESO) انجام خواهد شد تا اعضای مهمتر سازه (بر اساس نیروی داخلی آنها) یافت شود. سپس، از سطح مقطع بهینه بدست آمده برای اعضا، برای اصلاح HSA استفاده می‌شود که روش ESO-HSA نامیده شده و در بخش ۴-۲ ارائه شده است.

۴-۱- روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها (ESO)

در این مقاله، برای یافتن توپولوژی بهتر با استفاده از HSA، بعضی از پارامترهای HSA به شکلی بهبود می‌یابند که در بهینه سازی توپولوژی، احتمال حذف گره‌های مهمتر سازه کاهش یابد. بدین منظور، بهینه سازی اندازه سازه زمینه با استفاده از روش (ESO) - تا رسیدن تنش داخلی اعضا، به تنش هدف یکسان- باید انجام شود. مراحل گام به گام روش ESO به اختصار بشرح زیر است [6, 9, 16]:

- ۱- سطح مقطع اولیه یکسان و فرضی به همه اعضای سازه اختصاص می‌یابد.
- ۲- با استفاده از آنالیز اجزا محدود، نیرو و تنش داخلی اعضا محاسبه می‌شود.
- ۳- تنش داخلی تمام اعضا با تنش هدف یکسان مقایسه می‌شود. بنابراین، اگر تنش داخلی عضوی از تنش هدف بیشتر بود، سطح مقطع آن عضو کمی افزایش و اگر کمتر از تنش هدف بود، سطح مقطع آن عضو کمی کاهش می‌یابد.
- ۴- در صورت تغییر سطح مقطع یک عضو یا بیشتر، محاسبات از گام دوم تکرار می‌شود و در غیر این صورت، بهینه سازی خاتمه می‌یابد.

بنابراین در پایان اعمال روش ESO، برای رسیدن به تنش هدف یکسان، اعضای با سطح مقطع بیشتر دارای اهمیت بیشتری هستند و بهتر است در بهینه سازی توپولوژی سازه زمینه، احتمال حذف این اعضا کاهش یابد.

۴-۲- اصلاح ویژگی‌های آماری متغیرهای توپولوژی در روش HSA

در بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه، متغیرهای توپولوژی و سطح مقطع اعضا دو نوع متفاوت از متغیرهای طراحی را تشکیل می‌دهند، که متغیرهای نوع اول مهمتر از نوع

چگونگی بهینه‌سازی توپولوژی با استفاده از روش ESO-HSA به صورت شماتیک در شکل (۱) ارائه شده است. در این شکل r_1 ، r_2 و r_3 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ هستند و bw_c عرض باند در سیکل c ام است که با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [18]:

$$bw_c = bw_{\max} \times \exp \left[\ln \left(\frac{bw_{\min}}{bw_{\max}} \right) \times \frac{c}{MaxCycle} \right] \quad (8)$$

که bw_{\min} و bw_{\max} به ترتیب بیشینه و کمینه مقدار عرض باند و $MaxCycle$ مقدار بیشینه تعداد سیکل‌ها است، که در این مقاله برابر ۳۰۰۰۰ سیکل در نظر گرفته شده است.

۵- نمونه عددی

در این مقاله، برای نشان دادن کارایی و عملکرد روش بهینه‌سازی دو مرحله‌ای ارائه شده، یک شبکه دو لایه مربع روی مربع با ۸۴۱ گره و ۳۲۰۰ عضو تحت تاثیر بار ثقل یارائه شده است. ارتفاع شبکه دو لایه ۴۵۰ سانتی‌متر و طول چشمه‌ها در شبکه بالا و پایین ۳۰۰ سانتی‌متر است (شکل ۲) [7].

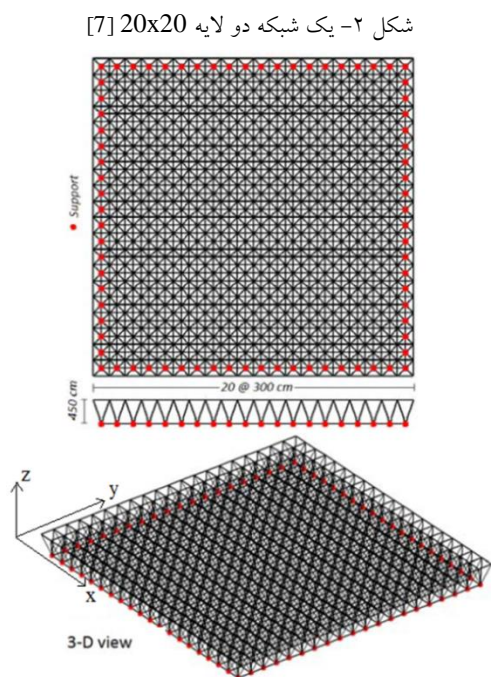


Fig. 2. A 20x20 double layer grid [7]

فرض شده است که سازه زمینه در تمام گره‌های اطراف شبکه پایین به تکیه‌گاه متصل است. همچنین، مصالح

رسیدن به یک توپولوژی پایدار ادامه می‌یابد. قابل ذکر است که پایداری سازه با استفاده از دترمینان ماتریس سختی آن تعیین می‌شود. به عبارت بهتر، اگر دترمینان ماتریس سختی سازه بزرگتر از صفر باشد، سازه پایدار و در غیر اینصورت، سازه ناپایدار است [7].

شکل ۱. الگوریتم بهینه‌سازی توپولوژی با استفاده از روش ESO-HSA

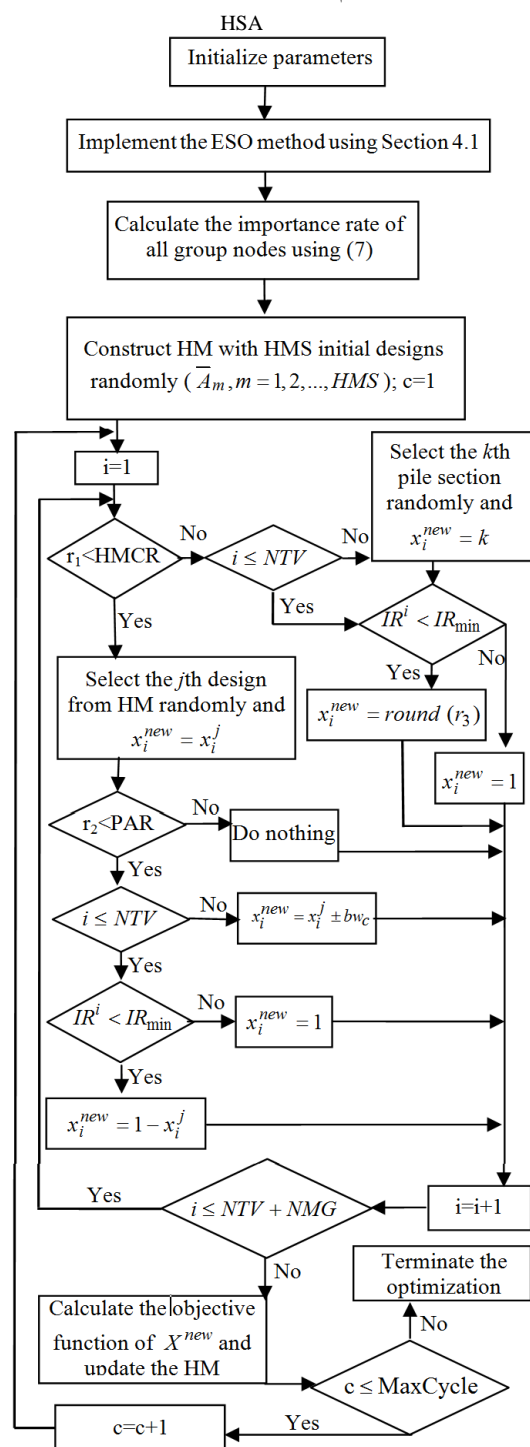


Fig. 1. Flowchart of the topology optimization with the ESO-HSA algorithm

متناسب با سطح مقطع بهینه آنها است. لازم به ذکر است، در قسمت (الف) هر شکل، به منظور جلوگیری از نمایش شکل‌های سیاه، کلیه اعضا با ضخامت یکسان رسم شده‌اند. با استفاده از روش‌های HSA و ESO-HSA، وزن بهینه بهترین سازه (از میان پنج اجرای مختلف)، به ترتیب 87044 kg و 78779 kg بدست آمده است. همچنین، سازه‌های بهینه به ترتیب در شکل‌های (۳ و ۴) نشان داده شده‌اند.

شکل ۳. توپولوژی بهینه بدست آمده با استفاده از روش HAS

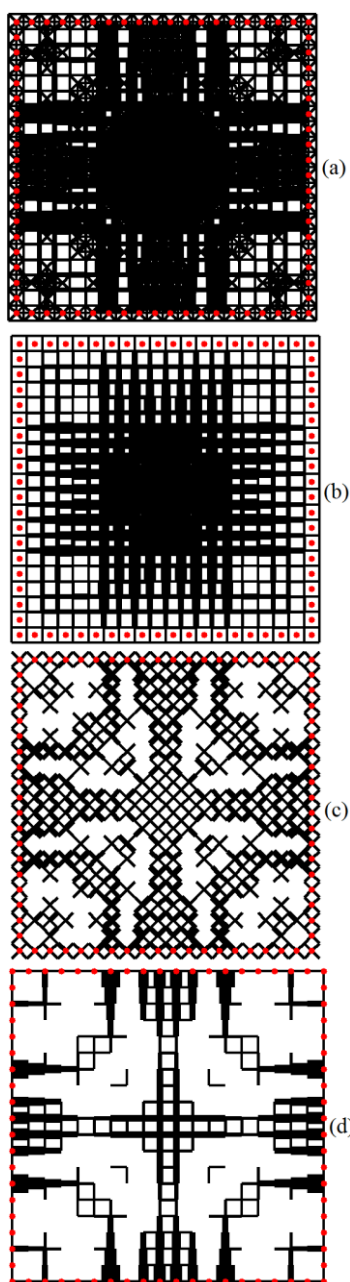


Fig. 3. Optimum topology found by HSA

مصرفی از جنس فولاد و با مدول الاستیسیته 2.1×10^6 kg/cm^2 و وزن واحد حجم 7850 kg/m^3 است. بارگسترده قائم وارد به سازه، ۱۸۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است، که به نسبت سطح بارگیر گره‌های شبکه بالا، بین آنها توزیع می‌شود. اعضای فشاری و کششی سازه به ترتیب به ۱۴ و ۳ گروه تقسیم شده‌اند که سطح مقطع آنها از میان ۱۹ نیمرخ لوله‌ای شکل مختلف، با قطر خارجی و ضخامت نشان داده شده در جدول (۱) (بر حسب سانتی‌متر) انتخاب می‌شود [7].

جدول ۱- نیمرخ‌های عرضی لوله‌ای شکل موجود [7]

No.	Outer diameter	Thickness	No.	Outer diameter	Thickness
1	4.83	0.26	11	16.86	0.45
2	6.03	0.29	12	19.37	0.45
3	7.61	0.29	13	21.91	0.45
4	8.89	0.32	14	24.45	0.63
5	10.16	0.36	15	27.30	0.63
6	10.80	0.36	16	32.39	0.71
7	11.43	0.36	17	35.56	0.80
8	13.30	0.40	18	40.64	0.88
9	13.97	0.40	19	45.72	1.00
10	15.90	0.45			

Table 1. Available pipe cross-section profiles [7]

نتایج عددی نشان می‌دهد که مقادیر عددی نشان داده شده در جدول (۲) برای پارامترهای موثر در الگوریتم‌های HSA و ESO-HSA، مقادیر مناسبی هستند.

جدول ۲- مقادیر عددی پارامترهای موثر در الگوریتم‌های HSA و

Parameter	ESO-HSA			
	HMS	PAR	HMCR	IR _{min}
Numerical Value	50	0.05	0.99	0.35

Table 2. Specifications of the HSA and ESO-HSA methods.

این نمونه با استفاده از روش‌های بهینه سازی HSA و ESO-HSA حل می‌شود. به منظور در نظر گرفتن طبیعت آماری این روش‌های بهینه سازی، در این نمونه، پنج اجرای متفاوت بهینه‌سازی با حافظه اولیه هارمونی متفاوت، انجام و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در همه شکل‌های ارائه شده از سازه‌های بهینه، شکل-های (الف تا د) به ترتیب نشان‌گر: شبکه دو لایه، شبکه بالا، شبکه جانی و شبکه پایین است. همچنین، ضخامت اعضا

بدست آمده از سایر روش‌های بهینه‌سازی فرااکتشافی که به تازگی چاپ شده‌اند ارائه شده است. همچنین، وزن بهترین طرح بدست آمده به صورت هاشور خورده نمایش داده شده است.

شکل ۴. توپولوژی بهینه بدست آمده با استفاده از روش ESO-HSA

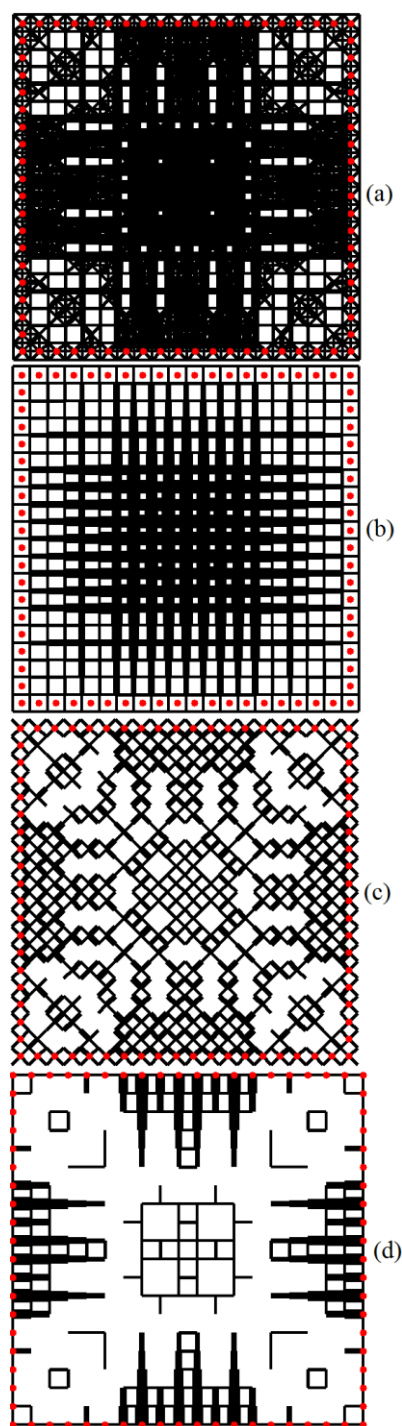


Fig. 4. Optimum topology found by ESO-HSA

جدول ۳. نتایج آماری بهینه‌سازی توپولوژی شبکه دولایه

Optimization method	Optimum weight (kg)					Mean	SD
	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5		
ESO-HSA	81245	78779	85562	80907	84266	82152	2732
HSA	89563	87044	95333	95333	90227	91504	3706
GSA [8]	170503	162439	173214	1655409	123362	163010	11758
ICA [8]	88504	90694	89877	89054	92254	90077	1473
ICA-GSA [8]	80601	81854	82589	83652	81973	82146	1093
GPS [9]	88571	87648	91013	87641	84396	87851	2378
ESO-GPS [9]	85895	82636	86323	86155	81312	84464	2325
ACO [7]	89652	89947	89910	85036	92542	89417	2717
MMA-ACO [7]	86152	85607	81927	87648	83116	84899	2312

Table 3. Statistical results of the topology optimization of double layer grid

این مقادیر نشان می‌دهند که روش ESO-HSA در بهینه سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه عملکرد بهتری نسبت به روش HSA و سایر روش‌های فرااکتشافی معرفی شده در سال‌های اخیر دارد. همچنین، در شکل (۵) منحنی‌های تاریخچه همگرایی مربوط به بهترین اجرای روش‌های

جدول (۴) نتایج آماری بهینه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از روش‌های HSA و ESO-HSA را نشان می‌دهد. این نتایج، شامل وزن‌های بهینه بدست آمده در پنج اجرای مختلف، میانگین (Mean) و انحراف معیار (SD) آنها است. در این جدول مقایسه‌هایی نیز با نتایج بهینه‌سازی

شماره لوله اختصاص یافته به اعضای هر تیپ، تنش مجاز و موجود مربوط به بحرانی‌ترین عضو هر تیپ (بر حسب kg/cm^2)، در جدول (۵) نشان داده شده است.

بهینه‌سازی HSA و ESO-HSA با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل، برتری قابل توجه روش ESO-HSA به لحاظ سرعت همگرایی نشان داده شده است.

جدول ۵. شماره لوله اختصاص یافته به اعضای هر تیپ، تنش مجاز و موجود مربوط به بحرانی‌ترین عضو هر تیپ

Type No.	HSA			ESO-HSA		
	Allocated pipe number	Allowable stress	Maximum internal stress	Allocated pipe number	Allowable stress	Maximum internal stress
1	4	402	338	4	402	344
2	7	667	525	5	525	515
3	8	1142	727	7	667	649
4	8	1142	774	8	826	626
5	11	1226	768	8	1142	818
6	10	1207	1029	8	1142	964
7	12	1263	892	8	1142	933
8	13	1290	951	10	1207	969
9	12	1263	1243	10	1207	985
10	13	1290	1050	11	1226	1216
11	14	1309	801	12	1263	1140
12	14	1309	888	12	1263	1248
13	14	1309	950	13	1290	1218
14	14	1309	1033	13	1290	1255
15	3	1440	835	3	1440	880
16	5	1440	1008	3	1440	1306
17	9	1440	1085	5	1440	1198

Table 5. The allocated pipe number to each element type, the allowable and the existence stress of the critical element of each type

مقادیر ارائه شده در جدول (۵) نشان می‌دهند که چگونه روش ESO-HSA توانسته است نسبت به روش HSA، سطح مقطع بهتری برای اعضای موجود در هر تیپ بدست آورد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه، یک روش دو مرحله‌ای جدید (ESO-HSA) ارائه شد. بدین منظور، ابتدا موقعیت گره‌های با درجه اهمیت زیاد با استفاده از روش ESO شناسایی شد و سپس خروجی‌های روش ESO (سطح مقطع بهینه اعضا) برای بهبود عملکرد HSA بکار گرفته شد.

شکل ۵. نمودار تاریخچه همگرایی بهترین توپولوژی بدست آمده با استفاده از روش‌های HSA و ESO-HSA

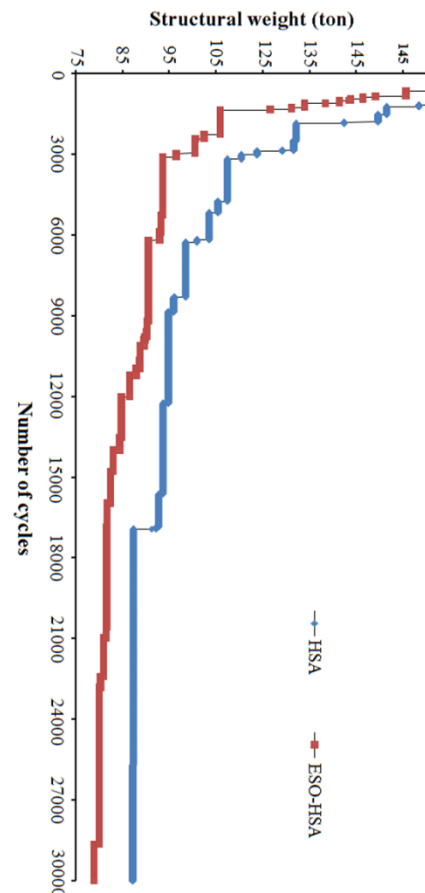


Fig. 5. Convergence curves recorded for the best optimization runs of HSA and ESO-HSA

در جدول (۴)، جابه‌جایی بیشینه سازه بهینه و مقدار مجاز آن نشان داده شده است. این مقادیر نشان می‌دهند که در این مسئله بهینه‌سازی، قید مربوط به جابه‌جایی گره‌ها، فعال نبوده است.

جدول ۴. جابه‌جایی بیشینه سازه بهینه تحت تاثیر بارهای ثقلی و مقدار مجاز آن

Maximum displacement of the structure (cm)		Allowable displacement (cm) [7]
HSA	ESO-HSA	
8.03	10.56	15.83

Table 4. Maximum displacement of the structure under gravitational loads and its allowable value

- [8] Mashayekhi M., Salajegheh E. & Dehghani M. 2015, A new hybrid algorithm for topology optimization of double layer grids, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, **5**(3), 353-374.
- [9] Dehghani M., Mashayekhi M. & Salajegheh E. 2016, Topology optimization of double- and triple-layer grids using a hybrid methodology, *Engineering Optimization*, **48**(8), 1333-1349.
- [10] Geem Z. W., Kim J. H. & Loganathan G. V. 2001, A new heuristic optimization algorithm: harmony search", *Simulation*, **76**(2), 60-68.
- [11] Wang C. M. & Huang Y. F. 2010, Self-adaptive harmony search algorithm for optimization, *Expert Systems with Applications*, **37**, 2826-2837.
- [12] Ricart J., Huttemann G., Lima J. & Baran B. 2011, Multiobjective harmony search algorithm proposals, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, **281**, 51-67.
- [13] Geem Z. W., 2010, State-of-the-art in the structure of harmony search algorithm, *Studies in Computational Intelligence*, **270**, 1-10.
- [14] Degertekin S., 2008, Optimum design of steel frames using harmony search algorithm, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **36**:393-401.
- [15] Kaveh A. & Ahangaran M. 2012, Discrete cost optimization of composite floor system using social harmony search model, *Applied Soft Computing*, **12**, 372-381.
- [16] Steven G. P., Querin O. & Xie M. 2000, Evolutionary structural optimisation (ESO) for combined topology and size optimization of discrete structures, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **188**, 743-754.
- [17] Bijari R., Topology optimization of double layer grid space structures using an enhanced harmony search algorithm, M.Sc. thesis, Islamic Azad Univ, Kerman Branch, 2016. (In Persian)
- [18] Mahdavi M., Fesanghary M. & Damangir E. 2007, An improved harmony search algorithm for solving optimization problems, *Applied Mathematics and Computation*, **188**, 1567-1579.

روش ارائه شده با موفقیت در بهینه سازی توپولوژی یک شبکه دولایه بزرگ مقیاس مشهور آزمایش شد. نتایج نشان داد که روش ESO-HSA بسیار قابل رقابت با سایر الگوریتم‌های فراکتشافی معرفی شده در سال‌های اخیر است. همچنین، مشخص شد که روش HSA در بهینه سازی توپولوژی سازه‌های گسسته بزرگ مقیاس، نسبت به روش‌های بهینه سازی GSA و ICA برتری بیشتری دارد.

References

۷- مراجع

- [1] Rao S. S. 1984, Optimization: Theory and applications, *John Wiley & Sons*, New Delhi .
- [2] Bendsoe M. P. & Sigmund O. 2004, Topology Optimization: Theory, Methods and Applications, Springer, Berlin.
- [3] Fuchs M. B. & Shemesh N. N. Y. 2004, Density-based topology design of structures subjected to water pressure using a parametric loading surface, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **28**, 11-19.
- [4] Achtziger W. & Kocvara M. 2007, On the maximization of the fundamental eigenvalue in topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **34**, 181-195.
- [5] Maute K. & Allen M. 2004, Conceptual design of aeroelastic structures by topology optimization structures, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **27**, 27-42.
- [6] Mashayekhi M., Fadaee M. J., Salajegheh J. & Salajegheh E. 2011, Topology optimization of double layer grids for earthquake loads using a two-stage ESO-ACO method, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, **2**(1), 211-232.
- [7] Mashayekhi M., Salajegheh E., Salajegheh J. & Fadaee M. J. 2012, Reliability-based topology optimization of double layer grids using a two-stage optimization method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **45**(6), 815-833.

Topology optimization of double layer grid space structures using an enhanced harmony search algorithm

M. Mashayekhi^{1*}, E. Salajegheh², R. Bijari³

1- Associate Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Eng., Vali-e-Asr University of Rafsanjan

2- Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Eng., ShahidBahonar University of Kerman

3- M.Sc. Student, Deptof Structural Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch

*m.mashayekhi@vru.ac.ir

Abstract:

Large-scale spatial skeletal structures belong to a special kind of 3D structures widely used in exhibition centers, supermarkets, sport stadiums, airports, etc., to cover large surfaces without intermediate columns. Space structures are often categorized as grids, domes and barrel vaults. Double layer grid structures are classical instances of prefabricated space structures and also the most popular forms which are frequently used nowadays. Topology optimization of large-scale skeletal structures has been recognized as one of the most challenging tasks in structural design. In topology optimization of these structures with discrete cross-sectional areas, the performance of meta-heuristic optimization algorithms can be increased if they are combined with continuous-based topology optimization methods. In this article, a hybrid methodology combining evolutionary structural optimization (ESO) and harmony search algorithm (HSA) methods is proposed for topology optimization of double layer grid structures subject to vertical load. In the present methodology, which is called ESO-HSA method, the size optimization of double layer grid structures is first performed by the ESO. Then, the outcomes of the ESO are used to improve the HSA. In fact, a sensitivity analysis is carried out using an optimization method (ESO) to determine more important members based on the cross-sectional areas of members. Then, the obtained optimum cross-sectional areas of members are used to enhance the HSA through a modification. Structural weight is minimized against constraints on the displacements of nodes, internal stresses and element slenderness ratio. In topology optimization of double layer grid structures, the geometry of the structure, support locations and coordinates of nodes are fixed and this structure is assumed as a ground structure. Presence/absence of bottom nodes, and element cross-sectional areas are selected as design variables. In topology optimization of the ground structure, tabulating of nodes is carried out based on structural symmetry: this leads to reduce complexity of design space and nodes are removed in groups of 8, 4 or 1. Also, to further reduce the search space, the members are grouped as mentioned in literature. The presence or absence of each node group is determined by a variable (topology variable) which takes the value of 1 and 0 for the two cases, respectively. The ground structure is assumed to be supported at the perimeter nodes of the bottom grid. Therefore, these supported nodes will not be removed from the ground structure. In order to achieve a practical structure, the existence of nodes in the top grid will not be considered as a variable. This causes the load bearing areas of top layer nodes to remain constant. Also, discrete variables are used to optimize the cross-sectional area of structural members. These variables are selected from pipe sections with specified thickness and outer diameter. The proposed approach is successfully tested in topology optimization problem of double layer grid structure. In particular, ESO-HSA is very competitive with other metaheuristic methods recently published in literature and can always find the best design overall. Also, it is determined that HSA method can find better answer in the topology optimization of large-scale skeletal structures, in comparison to optimum structures attained by the GSA and ICA.

Keywords: Skeletal structures, Double layer grid structures, Topology optimization, Evolutionary structural optimization, harmony search algorithm.