



## بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه بوسیله ترکیب الگوریتم رقابت استعماری بهبود یافته و روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها

حسین شایسته<sup>1</sup>، مصطفی مشایخی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

hosseineshayeste@gmail.com

2- استادیار، گروه عمران، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

m.mashayekhi@vru.ac.ir

### چکیده

در این مقاله از الگوریتم رقابت استعماری با حرکت تطبیقی که توسط روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها بهبود یافته است، جهت بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه استفاده شده است. الگوریتم رقابت استعماری با حرکت تطبیقی (MICA) برای ایجاد جستجوی هوشمندانه و هدفمندتر نسبت به الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، از هر دو جستجوی محلی و عمومی بهره می‌برد. از دو راهکار که شامل اصلاح در تولید سازه‌های پایدار تصادفی و کاهش لیست پروفیل‌های انتخابی می‌باشد، جهت اصلاح الگوریتم استفاده شده است. مثال‌های عددی نشان می‌دهند که روش ESO-MICA، نسبت به روش MICA، از کارایی بیشتری در یافتن توپولوژی بهینه‌ی شبکه‌های دولایه برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی توپولوژی، الگوریتم رقابت استعماری بهبود یافته، روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها، شبکه‌های دولایه

### 1. مقدمه

بهینه‌سازی توپولوژی انتخاب هم‌زمان توپولوژی، شکل و اندازه اعضا تشکیل دهنده سازه می‌باشد. این نوع از بهینه‌سازی در واقع همان بهینه‌سازی اندازه است با این تفاوت که به سطح مقطع اعضا و یا ضخامت المان‌ها می‌توان مقدار صفر را اختصاص داد. بهینه‌سازی توپولوژی بدلیل اینکه در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی حجم بیشتری از مصالح را کاهش می‌دهد از درجه اهمیت بالایی برخوردار است [1].

بهینه‌سازی توپولوژی با مطالعات مایکل بر روی انواع خریاها آغاز شد [2] و در سال‌های بعد با ارائه‌ی روش‌هایی که بر پایه ریاضیات هستند، این نوع بهینه‌سازی به شکل گسترده‌تری مورد استفاده قرار گرفت [3]. به طور کلی، روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم نمود. گروه اول روش‌های بر پایه ریاضیات بوده و گروه دوم، روش‌های تکاملی و شهودی می‌باشد. از انواع روش‌های مطرح بر پایه ریاضیات می‌توان به روش‌های همگن‌سازی [4] و روش SIMP [5] اشاره نمود. بدلیل ضعفی که روش‌های نوع



اول در برابر روابط پیچیده ریاضی دارند و همین طور کاهش احتمال همگرا شده به جواب بهینه کلی، روش‌های تکاملی ارائه گردیدند. روش‌های تکاملی با حذف تدریجی مواد زائد از فضای طراحی به جواب مورد نظر دست می‌یابند. از جمله روش‌های تکاملی می‌توان به مواردی از قبیل حداکثر تنش طراحی [6]، مرگ نرم [7]، انطباق معکوس [8] و بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها [9] اشاره کرد.

از سوی دیگر، با بالا رفتن قدرت و سرعت کامپیوترها، دسته‌ای از الگوریتم‌ها ارائه شدند که از طبیعت یا نحوه تکامل موجودات زنده الهام گرفته‌اند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به: الگوریتم ژنتیک (GA) [10-14]، الگوریتم جستجوی ذرات (PSO) [15]، الگوریتم رقابت استعماری (ICA) [16]، الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) [17]، اشاره کرد. از مشخصه‌های این الگوریتم‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: الف- معمولاً به فرضیاتی روی مساله از قبیل مشتق‌پذیری، نیاز ندارند. بنابراین این روش‌ها را می‌توان روی طیف وسیعی از مسایل اعمال نمود و ب- این روش‌ها برای مسایل پیوسته و گسسته قابل استفاده می‌باشند. رویکرد استفاده از سازه‌های فضاکار در بسیاری از پروژه‌ها در سراسر جهان، گواه قاطعی بر مزایای قابل توجه این نوع سازه‌هاست. در زمینه بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار مطالعات بسیاری صورت گرفته است. که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط جشن‌سده و همکاران [18]، سلاجقه و مشایخی [19]، مشایخی و همکاران [20-22] اشاره کرد.

در این مقاله نگارندگان جهت بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه از الگوریتم رقابت استعماری با حرکت تطبیقی که توسط روش بهینه‌سازی تکاملی بهبود یافته، استفاده نموده‌اند. الگوریتم رقابت استعماری با حرکت تطبیقی توسط خضری و همکاران [24] ارائه شده است. در این الگوریتم برای جلوگیری از امکان به دام افتادن در بهینه محلی، از دو جستجوی محلی و عمومی به طور همزمان استفاده شده که بدین ترتیب جستجو را هوشمندانه‌تر و دقیق‌تر می‌کند. جهت بهبود الگوریتم رقابت استعماری با حرکت تطبیقی، از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها استفاده شده است و از دو راهکار برای این بهبود، بهره برده شده است. این دو استراتژی شامل اصلاح در تولید سازه‌های پایدار تصادفی و کاهش لیست پروفیل‌های انتخابی می‌باشد. با اعمال این دو راهکار در الگوریتم، در واقع سعی شده است که با انجام اصلاحاتی، فضای طراحی مربوط به جستجوی مقدار بهینه کاهش یابد تا روش بهینه‌سازی مورد استفاده بتواند به جواب‌های بهتری دست یابد. توضیحات در مورد نحوه‌ی اعمال اصلاحات در الگوریتم در بخش‌های مربوطه بیان شده است.

## 2. فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی

برای آنکه بتوان از الگوریتم بهینه‌سازی برای بهینه کردن سازه‌ها استفاده کرد، لازم است تا مسئله بهینه‌سازی مورد نظر به شکل استاندارد تبدیل شود. در طرح بهینه شبکه‌های دولایه تحت تاثیر قیود استاتیکی، وزن سازه کمینه می‌شود بطوریکه قیود تنش ( $g_c$ )، ضریب لاغری ( $g_r$ ) و جابجایی ( $g_d$ ) ارضا گردند:



$$\text{Minimize } : W(\bar{A}) = \rho^e \sum_{k=1}^{NMG} a_k \sum_{i=1}^{N_k} l_i$$

$$\text{Subject to: } g_\sigma, g_\lambda, g_\delta \leq 0$$

$$\bar{A} = [J_1, J_2, J_3, \dots, J_{NTV}, a_1, a_2, a_3, \dots, a_{NMG}]^T \quad (1)$$

$$J_i \in [0, 1], \quad i = 1, 2, NTV$$

$$a_k \in A, k = 1, 2, 3, \dots, NMG$$

در رابطه  $NMG$  تعداد تپ‌های اعضا،  $N_k$  تعداد اعضای تپ  $k$ ام،  $a_k$  سطح مقطع اعضای تپ  $k$ ام انتخاب شده از لیست موجود لوله‌های فولادی ( $\bar{A}$ )،  $\rho^e$  چگالی اعضا و  $l_i$  طول عضو  $i$ ام است. قیود تنش و ضریب لاغری بوسیله روابط زیر بیان می‌شود:

$$g_\sigma = \sum_k \max(|\sigma_k| / \bar{\sigma}_k - 1, 0) \quad (2)$$

$$g_\lambda = \sum_k \max(|\lambda_k| / \bar{\lambda}_k - 1, 0) \quad (3)$$

که در این روابط،  $\sigma_k$ ،  $\bar{\sigma}_k$ ،  $\lambda_k$  و  $\bar{\lambda}_k$  به ترتیب تنش موجود، تنش مجاز، ضریب لاغری و لاغری مجاز عضو  $k$ ام از شبکه‌ی دولایه می‌باشند. در این مقاله، آیین نامه AISC جهت تعیین مقادیر مجاز قیود تنش و ضریب لاغری مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\bar{\sigma}_k = 0.6F_y \quad (\text{برای اعضای کششی}) \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_k = \bar{\sigma}_c \quad (\text{برای اعضای فشاری}) \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}_c = \begin{cases} \left[ \left( 1 - \frac{\lambda_k^2}{2C_c^2} \right) F_y \right] / \left( \frac{5}{3} + \frac{3\lambda_k}{8C_c} - \frac{\lambda_k^3}{8C_c^3} \right) & \text{for } \lambda_k < C_c \\ \frac{12\pi^2 E}{23\lambda_k^2} & \text{for } \lambda_k \geq C_c \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا  $F_y$  تنش تسلیم مصالح مصرفی و  $E$  مدول الاستیسیته است. همچنین،  $C_c$  از رابطه‌ی  $\sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$  بدست می‌آید. حداکثر ضریب لاغری اعضای فشاری و کششی به ترتیب 300 و 240 در نظر گرفته شده است. بنابراین قید ضریب لاغری اعضا بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\lambda_1 = \frac{K_k L_k}{r_k} \leq 300 \quad (\text{برای اعضای کششی}) \quad (7)$$

$$\lambda_1 = \frac{K_k L_k}{r_k} \leq 240 \quad (\text{برای اعضای فشاری}) \quad (8)$$

که  $r_k$  شعاع ژیراسیون و  $K_k$  ضریب طول کمانشی عضو  $k$ ام است که برای خرپاهای سه بعدی، واحد در نظر گرفته می‌شود. در روند بهینه‌سازی، مقدار مجاز جابجایی ( $\delta_v$ )، به اندازه عرض زمین تقسیم بر 360 در نظر گرفته شده است و قید جابجایی بصورت زیر بیان شده است:

$$g_\delta = \sum_j \max(|\delta_j| / \delta_v - 1, 0) \quad (9)$$

که  $\delta$  جایجایی قائم گره زام است.

### 3. الگوریتم رقابت استعماری

این الگوریتم، از چندین کشور در حالت اولیه شروع می‌شود. همه‌ی کشورها، به دو دسته تقسیم می‌شوند: استعمارگر و مستعمره. رقابت استعماری، هسته‌ی اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهد و باعث می‌شود که کلیه‌ی کشورها به مینیمم مطلق تابع هزینه، همگرا شوند. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی، که هر کدام از آن‌ها یک کشور نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان استعمارگر انتخاب و کشورهای باقی مانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن، یعنی کشور استعمارگر و مستعمرات آن، بستگی دارد. بیان ریاضی این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل می‌شود [16].

با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت استعماری میان آنها شروع می‌شود. هر امپراطوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کند و بر قدرت خود بیفزاید و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب، و به سیطره درآوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های استعماری، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. بدین ترتیب، با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپراطوری‌ها نزدیکتر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. شرط همگرایی با وجود یک امپراطوری واحد همراه با مستعمراتی که از لحاظ موقعیت به کشور استعمارگر خیلی نزدیک هستند، حاصل خواهد شد [16].

### 4. الگوریتم رقابت استعماری بهبود یافته (MICA)

همانطور که قبلاً ذکر شد، در الگوریتم رقابت استعماری، مستعمره با یک شعاع حرکت یکنواخت در مسیر جذب استعمارگر پیش می‌رود. اما در الگوریتم رقابت استعماری با حرکت تطبیقی با ایجاد یک شعاع حرکت تطبیقی، امکان جستجوی عمومی را برای الگوریتم رقابت استعماری فراهم می‌شود [23].  
روند کار به این صورت است که هر کشور به صورت چند بعدی با دو مقدار  $V_{id}$  و  $country_{id}$  که معرف موقعیت مکانی و جهت حرکت بعد  $d$ ام کشور نام هستند، مشخص می‌شود. در هر تکرار الگوریتم، مکان هر

مستعمره با دو مقدار بهترین، بروز می‌شود. اولین مقدار، بهترین جواب از لحاظ شایستگی است که تاکنون برای هر کشور بطور مجزا بدست آمده است و  $P\_best$  نام دارد و مقدار دیگر، کشور استعمارگر است و این مقدار  $P\_imperialist$  نام دارد [24]. در هر تکرار سیاست جذب الگوریتم، بعد از یافتن دو مقدار  $P\_best$  و  $P\_imperialist$ ، جهت حرکت و موقعیت جدید هر مستعمره به ترتیب بر طبق روابط (10) و (11) بروز می‌شود [23]:

$$V_{id}(t+1) = w(t) * V_{id} + c_1 * rand * (p\_best - country_{id}) + c_2 * rand * (p\_imperialist - country_{id}), \quad d \in 1, 2, 3, \dots, N_{var} \quad (10)$$

$$country_{id}(t+1) = country_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (11)$$

در رابطه (10)،  $w$ ، وزن اینرسی،  $c_1$  و  $c_2$  ضریب یادگیری شتاب و  $rand$  عددی تصادفی در بازه  $[0, 1]$  است. همچنین مقدار نهایی حرکت هر کشور برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم به بازه  $V_{id} \in [-v_{max}, v_{max}]$  محدود می‌شود. پارامترهای  $w, c_1, c_2$  نقش بسیار مهمی در رفتار همگرایی الگوریتم ایفا می‌کنند. هر کشور جهت حرکت در فضای جستجو به یک میزان خاص به سمت دو موقعیت  $P\_best$  و  $P\_imperialist$  حرکت نموده و بر اساس این دو موقعیت، موقعیت و جهت خود را بروز می‌نماید. اگر مقدار این پارامترها پایین باشد، به مستعمره کمک می‌کند تا با فاصله زیادی نسبت به سایر پاسخ بهینه حرکت نماید و در صورتی که این پارامترها بالا باشند مستعمره به طور ناگهانی به سمت این نقطه مینیم حرکت می‌نماید و دیگر فرصت جستجوی خود در محیط را از دست می‌دهد. در ابتدای جستجوی الگوریتم، جستجوی سراسری مناسبتر از جستجوی محلی مستعمرات می‌باشد. در این مرحله می‌توان  $w$  و پارامترهای رفتار اجتماعی را افزایش و پارامترهای شناختی مستعمرات را کاهش داد. در این صورت مستعمرات می‌توانند حداکثر تعامل را با یکدیگر داشته باشند و ناحیه بهتر (با شایستگی بهتر) را تشخیص دهند. پس از یافتن ناحیه مناسب مستعمرات بتدریج جستجوی محلی خود را آغاز می‌نمایند به گونه‌ای که پارامترهای شناختی مستعمرات افزایش و پارامتر اجتماعی و  $w$  مستعمرات کاهش می‌یابد. همانطور که تابع شایستگی مستعمرات بهتر و بهتر می‌شود باید مستعمره فضای جستجوی خود را کاهش دهد اما با دقت بیشتری در آن فضا حرکت یابد. هنگامی که مستعمرات به صورت محلی یک منطقه را جستجو می‌نمایند اگر به یکدیگر توجه نمایند و رفتار اجتماعی داشته باشند سریعاً همگرا می‌شوند چه بسا که این همگرایی زودرس باشد [23].

## 5. روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها

روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها یا ESO اولین بار توسط پرفسور استیون و زی ارائه گردیده است [24]. این روش با در نظر گرفتن یک معیار طراحی، که با توجه به نوع مسئله و نظر طراح تعیین می‌گردد به حذف تدریجی مواد زائد از فضای طراحی اقدام می‌نماید و برای این منظور، در پایان هر مرحله از فرآیند، از نتایج تحلیل المان محدود مسئله استفاده می‌کند. از جمله کاربردهای روش ESO در زمینه‌های مختلف بهینه‌سازی توپولوژی، می‌توان به مواردی از قبیل مسائل کمانش [25] مسائل فرکانس طبیعی [26] و مسائل با قید

جایجایی [27] اشاره نمود. در این مقاله برای مشخص کردن اعضای مهم سازه، از روش ESO استفاده شده است. مراحل گام به گام روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها در مرجع [20] بیان شده است.

## 6. الگوریتم رقابت استعماری بهبود یافته با روش بهینه‌سازی تکاملی سازه (ESO-MICA)

در این مقاله سعی شده است که با انجام اصلاحاتی، فضای طراحی مربوط به جستجوی مقدار بهینه هر نمونه کاهش یابد تا روش بهینه‌سازی مورد استفاده بتواند به جواب‌های بهتری دست یابد. در روند بهینه‌سازی توپولوژی، گره‌ها در دو مرحله حذف می‌شوند: الف- مرحله ایجاد جواب‌ها و ب- تولید مقادیر تصادفی جدید برای متغیرهای توپولوژی سازه‌های ناپایدار. به منظور جستجوی بهتر برای متغیرهای توپولوژی، یک استراتژی برای هر یک از مراحل الف و ب بکار گرفته شده است که در قسمت‌های بعد ارائه خواهد شد.

### 6.1 بهبود روش MICA با اصلاح تولید سازه‌های پایدار تصادفی

در روند بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه با استفاده از MICA، سازه‌های ناپایدار زیادی تولید می‌شود. در این تحقیق پس از یافتن سازه ناپایدار، سازه‌های تصادفی جدید جایگزین و پایداری آن بررسی می‌گردد. این رویه تا یافتن یک سازه پایدار ادامه می‌یابد. بمنظور افزایش کارایی روش ESO-MICA در تولید سازه تصادفی جدید، پارامتری به نام اهمیت گره تعریف می‌شود که از رابطه زیر بدست می‌آید [20]:

$$IR_i = \frac{SA_i}{SA_{\max}}, i = 1, 2, 3, \dots, ng \quad (12)$$

$$SA_{\max} = \max(SA_j), j = 1, 2, 3, \dots, nj \quad (13)$$

که در این رابطه،  $SA_i$  جمع سطح مقطع اعضای متصل به یکی از گره‌های گروه  $i$ ام،  $ng$  تعداد گره‌های گره‌ای و  $nj$  تعداد گره‌های شبکه پایین می‌باشد. گره‌های گروه  $i$ ام در صورتی بصورت تصادفی از سازه زمینه حذف می‌گردند که رابطه زیر برقرار باشد [20]:

$$IR_i \leq IR_{\min}, i = 1, 2, 3, \dots, ng \quad (14)$$

که  $IR_{\min}$  درجه اهمیت حداقل است. بنابراین، احتمال حذف گره‌های با اهمیت زیاد کاهش می‌یابد. مقدار  $IR_{\min}$  باید به گونه‌ای انتخاب شود که تعداد مناسبی از گره‌ها در معرض حذف احتمالی قرار گیرند.

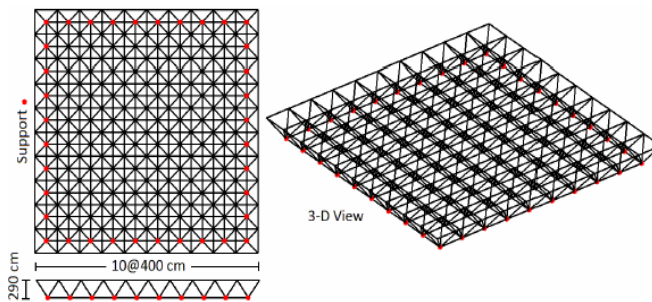
### 6.2 بهبود روش MICA با کاهش لیست پروفیل‌های انتخابی

پروفیل‌های اختصاص یافته به اعضای هر تیپ در روش بهینه‌سازی تکاملی، بر اساس مسئله بهینه‌سازی است که تنها دو قید در آن وجود دارد. هنگامی که در مسئله بهینه‌سازی چندین قید از قبیل تنش، تغییر مکان، ضریب

لاغری وجود دارد، به احتمال زیاد سطح مقطع بزرگتری باید به اعضا تخصیص یابد. بنابراین به احتمال زیاد می-توان از سطح مقطع های طراحی شده قبلی، به عنوان حد پایین پروفیل های موجود هر تیپ استفاده کرد [20].

## 7. مثال عددی: شبکه ی دولایه 10\*10

برای بررسی روش بهینه سازی مورد استفاده از یک شبکه دولایه ای با 221 گره و 800 عضو استفاده شده است. ارتفاع شبکه دولایه 290 سانتیمتر و اندازه چشمه های آن 400 سانتی متر در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری گره ها در بالا و پایین شبکه در سازه زمینه در شکل (1) نشان داده شده است [20].



شکل (1): شبکه ی دولایه 10\*10 [20]

فولاد مصرفی دارای مدول الاستیسیته  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  و چگالی  $7850 \text{ kg/m}^3$  است. همچنین بار اعمالی به سازه نیز  $180 \text{ kg/m}^2$  که به صورت بار مرده می باشد، در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این بار متناسب با سطح بارگیر هر گره به آن اعمال شده است.

در این مقاله، در همه ی شبکه های دولایه مورد بررسی، تعداد 100 کشور در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد کشورهای استعمارگر 10 عدد و  $\alpha = 0.1$  انتخاب شده اند. مقدار ضریب اهمیت 0.35 و ضرایب  $C_1$  و  $C_2$ ، 1.5، و  $w$  با توجه به تعداد تکرارها از 0.9 تا 0.2 انتخاب شده اند.

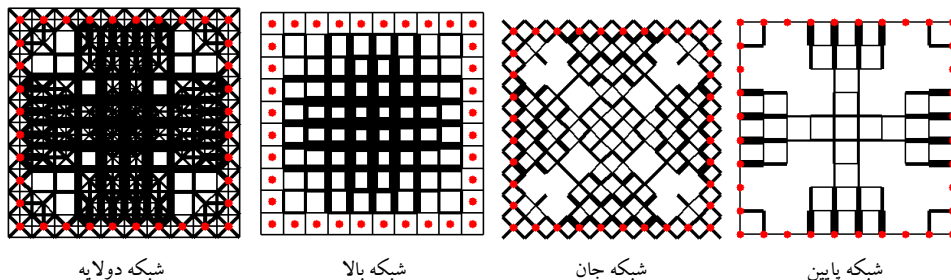
از پروفیل های لوله ای که در جدول (1) آمده جهت انتخاب سطح مقطع اعضا استفاده شده است (ابعاد در

جدول بر حسب سانتیمتر می باشند).

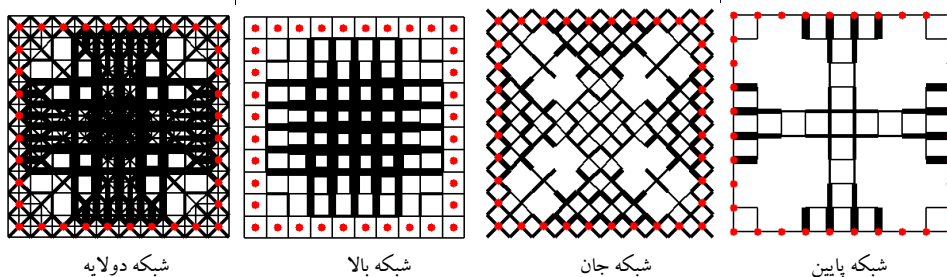
جدول (1): مشخصات مقاطع مورد استفاده

ردیف	قطر خارجی	ضخامت جداره	ردیف	قطر خارجی	ضخامت جداره	ردیف	قطر خارجی	ضخامت جداره	ردیف	قطر خارجی	ضخامت جداره
1	4.83	0.26	6	10.80	0.36	11	16.86	0.45	16	32.39	0.71
2	6.03	0.29	7	11.43	0.36	12	19.37	0.45	17	35.56	0.80
3	7.61	0.29	8	13.30	0.40	13	21.91	0.45	18	40.64	0.88
4	8.89	0.32	9	13.97	0.40	14	24.45	0.63	19	45.72	1
5	10.16	0.36	10	15.90	0.45	15	27.30	0.63			

در این مقاله شبکه دولایه  $10 \times 10$  با مشخصات هندسی و مصالحی که در بالا بیان شد تحت بهینه‌سازی توپولوژی و بهینه‌سازی اندازه قرار گرفت. وزن سازه در حالت بهینه‌سازی اندازه، مقدار 21497 کیلوگرم بدست آمده است. در شکل‌های (2) و (3) به ترتیب توپولوژی سازه بهینه‌ی بدست آمده از روش‌های MICA و ESO-MICA نشان داده شده است.



شکل (2): بهینه‌سازی توپولوژی با MICA



شکل (3): بهینه‌سازی توپولوژی با ESO-MICA

در جدول (2) نیز وزن‌های بدست از هر دو روش MICA و ESO-MICA در پنج اجرای مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میانگین و بهترین وزن بهینه بدست آمده از روش ESO-MICA کمتر از روش MICA می‌باشد. اگرچه مقدار انحراف معیار روش MICA کمتر از انحراف معیار روش ESO-MICA می‌باشد، اما همانطور که مشاهده می‌شود، روش ESO-MICA توانسته است در چهار اجرا، نسبت به بهترین جواب روش MICA، به جوابی بهتر دست یابد.

جدول (2): وزن بهینه‌ی بدست آمده

روش بهینه‌سازی	اجرای اول	اجرای دوم	اجرای سوم	اجرای چهارم	اجرای پنجم	میانگین	انحراف معیار
MICA	18632.41	18715.58	<b>17759.38</b>	18703.68	17909.14	18344	469.44
ESO-MICA	18435.18	17493.69	17579.88	<b>16852.51</b>	<b>16852.51</b>	17443	652.51



## 8. خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله برای بررسی بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه از MICA که توسط روش بهینه‌سازی تکاملی سازه بهبود یافته، استفاده شده است. الگوریتم رقابت استعماری با حرکت تطبیقی از ایده‌ی تکامل سیاسی- اجتماعی بشر الهام گرفته است و برای ایجاد جستجوی هوشمندانه و هدفمندتر نسبت به الگوریتم اصلی، از هر دو جستجوی محلی و عمومی بهره می‌برد. از دو راهکار که شامل اصلاح در تولید سازه‌های پایدار تصادفی و کاهش لیست تیپ‌های انتخابی می‌باشد، جهت اصلاح الگوریتم استفاده شده است. جهت بهره‌بردن از این دو راهکار، از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه استفاده گردیده است. با مقایسه نتایج حاصل از مثال‌های عددی، مشاهده می‌شود که الگوریتم ESO-MICA نسبت به روش MICA از عملکرد مناسب‌تری جهت بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه برخوردار است.

## 9. مراجع

- [1] سرهانی، م، و احمدی ندوشن، ب، ناپایداری‌های عددی در بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌ها به روش تکاملی ESO و ارائه راهکار مناسب برای غلبه بر آنها، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، 1391.
- [2] Michell AGM. The limits of economy of material in frame-structures, *Philosophical Magazine*, 8(47), 589-597, 1904.
- [3] Dorn WC, Gomory RE and Grenberg H. Automatic design of optimal structures, *Journal of Mechanical Design*, 3(1), 25-52, 1964.
- [4] Bendsoe MP, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using homogenization method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71(2), 197-224, 1988.
- [5] Bendsoe MP. Optimal shape design as a material distribution problem, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1(4), 193-202, 1989.
- [6] Hinton E, Sienz J. Fully stressed topological design of structures using an evolutionary approach, *Engineering Computations*, 12(3), 229-234, 1995.
- [7] Baumgartner A, Harzheim I and Mattek C. SOK soft kill option: the biological way to find an optimum structure topology, *International Journal of Fatigue*, 14(6), 387-393, 1992.
- [8] Reynolds D, Mcconnachie J, Bettes P, Christie WC and Bull JW. Reverse adaptivity a new evolutionary tool for structural optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45(5), 529-552, 1995.
- [9] Xie M, Steven GP. A simple evolutionary procedure for structural optimization, *Computers and Structures*, 49(5), 885-896, 1993.
- [10] Goldberg DE. *Genetic algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Co, Inc., Massachusetts, 1989.
- [11] Erbaturo F and Hasanc O. Optimum design of planar and space structures with genetic algorithms, *Computers and Structures*, 75(2), 209-224, 2000.

- [12] Adeli H and Cheng NT. Concurrent genetic algorithms for optimization of large structures, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, 7(3), 276-296, 1994.
- [13] Togan V and Daloglu AT. Optimization of 3D trusses with adaptive approaches in genetic algorithms, *Engineering Structures*, 28(7), 1019-1027, 2006.
- [14] Degertekin SO, Saka MP, and Hayalioglu MS. Optimal load and resistance factor design of geometrically nonlinear steel space frames via tabu search and genetic algorithm, *Engineering Structures*, 30(1), 197-205, 2008.
- [15] Perez RE and Behdinan K. Particle swarm approach for structural design optimization, *Computers and Structures*, 85(19), 1579-1588, 2007.
- [16] Atashpaz-Gargari E, Lucas C. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. *Evolutionary Computation*, 2007. *CEC 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers Congress on. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2007.
- [17] Rashedi E, Nezamabadi-pour H and Saryazdi S. GSA: A gravitational search algorithm, *Information Sciences*, 179(13), 2232-2248, 2009.
- [18] جشن سده، م، و سلاجقه، ع، و مشایخی، م، طرح بهینه لرزه ای شکل چلیک های دولایه فضاکار با استفاده از الگوریتم های وراثتی، کنفرانس زلزله، سازه و روش های محاسباتی، کرمان، جهاد دانشگاهی استان کرمان، ایران، 1390.
- [19] سلاجقه، ع، و مشایخی، م، کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی شکل و تعیین محل بهینه ستونهای سازه های فضاکار، پنجمین کنفرانس سراسری سیستم های هوشمند، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، 1382.
- [20] Mashayekhi M, Fadaee M, Salajegheh J and Salajegheh E. Topology optimization of double layer grids for earthquake loads using a two-stage ESO-ACO method, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 211-232, 2011.
- [21] Mashayekhi M, Salajegheh J, Fadaee M and Salajegheh E. A two-stage SIMP-ACO method for reliability-based topology optimization of double layer grids, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 4, 521-542, 2011.
- [22] Mashayekhi M, Salajegheh E, Salajegheh J and Fadaee M J. Reliability-based topology optimization of double layer grids using a two-stage optimization method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45, 815-833, 2012.
- [23] خضری، ش، و عثمانی، ا، و غلامی، م، الگوریتم رقابت استعماری بهبود یافته مبتنی بر حرکت تطبیقی، سومین همایش ملی مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، همدان، ایران، 1389.
- [24] Xie M, Steven GP. A simple evolutionary procedure for structural optimization, *Computer & Structures*, 49(5), 885-896, 1993.
- [25] Manickarajah D, Xie M and Steven G. Optimization of columns and frames against buckling, *Computers and Structures*, 75(1), 45-54, 2000.
- [26] Xie M, Steven G. Evolutionary structural optimization for dynamic problems, *Computers and Structures*, 58(6), 1067-1073, 1996.
- [27] Liang Q, Xie M and Steven G. Optimal topology selection of continuum structures with displacement constraints, *Computers and Structures*, 77(6), 885-896, 1999.