



ارائه الگوریتمی جدید مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی و تلفیق آن با الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی جهت بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های فضاکار تخت دولایه

میلاذ دهقانی¹، مصطفی مشایخی²

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

Eng.Miladdehghani@gmail.com

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

M.Mashayekhi@vru.ac.ir

چکیده

در این مقاله بهینه‌یاب جدیدی، مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی برای بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های فضاکار تخت دولایه ارائه گردیده است. در الگوریتم طراحی شده، به گونه‌ای شایسته موضوع نخبه‌گرایی، جستجوی همه‌جانبه و حافظه‌دار شدن الگوریتم رابطه‌مند شده است. برای انطباق الگوریتم با بحث بهینه‌سازی توپولوژی، توسط الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی (ESO)، سه گام اساسی به الگوریتم اضافه شد که تیپ‌بندی مناسب اعضای سازه، انتخاب سطح مقطع بهینه برای اعضا در یک فضای کاهش یافته و درجه اهمیت گره‌ها، را به دست بیاورد. با مقایسه نتایج، در نتیجه تلفیق الگوریتم با الگوریتم ESO، نسبت به خود الگوریتم، قابلیت الگوریتم در پیدا کردن مسیرهای بهینه‌تر بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی گرانشی، بهینه‌سازی توپولوژی، سازه فضاکار تخت دولایه، الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی

1- مقدمه

در سازه‌های فضاکار، ترکیب مجموعه تاشه و فرم هندسی، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های سازه در یک صفحه قرار نگرفته و از آن فراتر رفته و به سه بعد گسترش می‌یابند. در عمل، سازه‌های فضاکار به گروه‌هایی از سازه‌ها، عمدتاً شامل شبکه‌های تخت، چلیک‌ها، گنبد‌ها، دکل‌ها، شبکه‌های متشکل از کابل‌ها، سازه‌های غشایی، سازه‌های تاشو، سازه‌های کشبستی و نظایر آنها اطلاق می‌گردد. سیستم‌های نوین متشکل از عناصر کششی و فشاری خود متعادل‌کننده کشبستی امروزه از جذبه زیادی برخوردارند. سازه‌های فضاکار شکل‌های گوناگون و متنوع به خود گرفته و از انواع متفاوت مصالح مانند فولاد، آلومینیوم، چوب، بتن آرمه، مصالح مختلط و مواد پلاستیکی مسلح با انواع فیبرها، شیشه و ترکیبات این مصالح در ساخت سازه‌های فضاکار بهره‌گیری می‌شود. کاربری فضاهای بزرگ مانند استادیوم‌های ورزشی، سالن کارخانه‌ها، فرودگاه‌ها، ایجاب می‌نماید که محوطه مورد استفاده بدون هیچ ستون میانی و جدا کننده‌ای باشد. از ویژگی‌های سازه‌های فضاکار وزن بسیار کم و در عین حال مقاومت و سختی بالا این سازه‌ها می‌باشد، که مناسب برای اینگونه فضاها هستند.

بهینه‌یابی سازه فضاکار از آن جهت حایز اهمیت است که با کاهش وزن مرده سازه، علاوه بر صرفه‌جویی در مصالح و تخریب کمتر در محیط زیست، امکان افزایش دهانه‌های آزاد برای رفع نیازهای جوامع متحول فراهم گردید. در عین حال کاهش جرم به‌طور معمول از نظر رفتار لرزه‌ای نیز مطلوب تلقی می‌گردد. اخیراً بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. به عنوان مثال، در مرجع [1] برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌هایی مثل شبیه‌سازی بازپخت (SA)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم جستجوی اجتماع ذرات (PSO)، الگوریتم مورچگان (ACO) و جستجوی هارمونی (SH)، یک سازه‌ی فضاکار را برای کمینه‌کردن وزن سازه بدون توجه به بحث تیپ‌بندی و توپولوژی، مورد بررسی قرار داده است.



بهینه‌سازی توپولوژی یکی از مهمترین راهکارهای زیر شاخه‌های بهینه‌سازی می‌باشد که هدف آن تعیین بهترین آرایش سازه‌ای برای به حداکثر رساندن عملکرد سازه است. در زمینه‌ی توپولوژی بهینه‌سازی در اولین قدم، دانشمند انگلیسی آنتونی جرج مالدن میچل در سال 1904 یک تئوری طراحی جهت تعیین توپولوژی بهینه سازه‌های میله‌ای با حداقل جرم را توسعه داد [2]. پیریچر و رزوانی نیز در طی سال‌های 1974 و 1976 توپولوژی بهینه‌ی مسائل مختلف را با استفاده از روش‌های تحلیلی و بر اساس معیار بهینگی به دست آوردند [3 و 4]. بسته به نوع سازه، دو نوع بهینه‌سازی توپولوژی، گسسته و پیوسته وجود دارد. در زمینه‌ی بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های پیوسته روش‌های متفاوتی ارائه گردیده، که از جمله‌ی آنها می‌توان به روش مواد همسان‌گرد توپر با جریمه SIMP ایده‌ی اولیه این روش که با نام مدل توانی مصنوعی نیز معروف است ابتدا توسط بندسو [5] در سال 1989 بیان گردید و سپس رزوانی و همکاران [6] در سال 1992، شالوده اصلی آن را پایه ریزی نمودند، روش بهینه‌سازی تکاملی ESO که در سال 1992 توسط شای و استیون پیشنهاد شد و پایه آن بر شناخت و حذف تدریجی مواد ناکارآمد بر مبنای معیار تنش، از سازه استوار است [7] و روش مجانب‌های متحرک MMA، اشاره کرد. جهت بهینه‌سازی توپولوژی تقریباً همه‌ی نرم‌افزارها از این روش‌ها استفاده می‌کنند.

در طراحی سازه‌های فضاکار، اغلب اعضا از مجموعه منفصلی از مقاطع موجود در استانداردها یا در بازار یا تولیدات کارخانه سازنده انتخاب می‌شوند. بنابراین، روش برنامه‌ریزی ریاضی از این جنبه منفصل خواهد بود، بنابراین به‌طور معمول توابع پیوسته‌ای مانند تغییر مکان‌ها و تنش‌های سازه اغلب به روش انفصال یافته ایده‌آل‌سازی می‌گردند. به همین دلیل بهینه‌سازی سازه فضاکار دارای محیطی گسسته است، متغیرها از میان مقادیر تصادفی گسسته انتخاب می‌شوند و رسیدن به یک بهینه‌ی کلی دشوارتر از محیط‌های پیوسته می‌باشد. از مواردی که در زمینه بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های فضاکار ارائه گردیده است، می‌توان روش دومرحله‌ای MMA-ACO را نام برد که در آن، با استفاده از روش MMA اعضای موثرتر شناسایی گردیده و نتایج خروجی (سطح مقطع بهینه و نیروهای داخلی اعضا) جهت اصلاح ACO به کار گرفته می‌شود [8]. در روش دومرحله‌ای MMA-ACO در آن بحث وجود و عدم وجود گره‌ها به عنوان متغیرهای توپولوژی مطرح شده است. روش ESO-ACO یک روش دومرحله‌ای دیگری می‌باشد که توسط مشایخی ارائه گردیده است [9]. در این روش به جای در نظر گرفتن وجود و عدم وجود گره‌ها در روش MMA-ACO، وجود و عدم وجود اعضا به عنوان متغیرهای توپولوژی در نظر گرفته شده است. از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه، می‌توان به مراجع [10-12] اشاره کرد.

در این مقاله، برای بهینه‌سازی شبکه‌های دولایه با در نظر گرفتن قيود مختلف، روش بهینه‌سازی جدید ESO-MGSA ارائه شده است. در این روش ابتدا به وسیله‌ی روش موثر بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها، آنالیز حساسیتی جهت شناخت اعضای سازه‌ای مهمتر انجام می‌شود، تا الگوریتم MGSA بتواند در یک فضای کاهش یافته مناسب به دنبال جواب بهینه بگردد. الگوریتم جستجوی گرانشی [13]، از جمله الگوریتم‌های اکتشافی است که بر اساس قوانین گرانش و حرکت نیوتون عمل می‌کند. این الگوریتم در محیط‌های پیوسته قابلیت‌های بالایی دارد. از خاصیت بارز این الگوریتم قدرت آن در جستجوی محلی است. در بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های فضاکار، محیط مساله گسسته می‌باشد و متغیرها از میان مقادیر گسسته انتخاب می‌شود. مشکل اساسی الگوریتم GSA در محیط‌های گسسته، به دام افتادن در بهینه محلی است. در حالی که در این نوع مسائل نیاز به یک جستجوی همه‌جانبه است، تا بتوان بهترین آرایش و سطح مقطع را برای اعضای سازه‌ای به دست آورد. از دیگر مشکلات این الگوریتم، نداشتن یک حافظه برای ذخیره کردن بهترین جواب به دست آمده تا آخرین تکرار است. برای حل این مشکلات، در این مقاله اصلاحاتی بر روی الگوریتم صورت گرفته است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

2. بیان ریاضی مسئله بهینه‌سازی توپولوژی و تعریف قیدهای آن

هدف اصلی این تحقیق، به دست آوردن یک روش جستجوی آماری مناسب مانند الگوریتم MGSA است، به طوری که بتوان با در نظر گرفتن قيودی شامل ضریب لاغری، تنش، تغییر مکان و پایداری سازه، توپولوژی بهینه سازه‌های فضاکار بزرگ مقیاس را بدست آورد. متغیرهای



مسئله بهینه‌سازی توپولوژی علاوه بر سطح مقطع اعضا، وجود و عدم وجود آنها نیز می‌باشد که به صورت غیرمستقیم از طریق حذف گره‌های شبکه پایین این کار انجام می‌شود. در این تحقیق از مفهوم سازه زمینه جهت بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های گسسته استفاده شده است.

1.2. قیدهای استاتیکی مسئله بهینه‌سازی توپولوژی

در طرح بهینه شبکه‌های دولایه تحت تاثیر قیود قطعی استاتیکی، وزن سازه (W) کمینه می‌شود بطوریکه قیود تنش (g_σ)، ضریب لاغری (g_λ) و جابجایی (g_δ) ارضا گردد:

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

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

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

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

$$a_k \in \tilde{A}, \quad k = 1, 2, \dots, NMG$$

که در این رابطه NMG تعداد تیپ‌های اعضا، N_k تعداد اعضای تیپ k ام، a_k سطح مقطع اعضای تیپ k ام انتخاب شده از لیست موجود لوله‌های فولادی (A)، ρ^e چگالی اعضا، l_i طول عضو i ام و J_i متغیر بهینه‌سازی توپولوژی می‌باشد. قیود تنش و ضریب لاغری بوسیله روابط (2) و (3) بیان می‌شود:

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

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

که σ_k ، σ_{\max} ، λ_k ، λ_{\max} ، به ترتیب تنش موجود، تنش مجاز، ضریب لاغری و حد بالای ضریب لاغری عضو k ام شبکه دولایه می‌باشد. در این تحقیق آیین‌نامه AISI [14] جهت تعیین مقادیر مجاز قیود تنش و ضریب لاغری مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\sigma_{\max} = 0.6F_y \quad (4)$$

$$\sigma_{\max} = \bar{\sigma}_c \quad (5)$$

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



که در این رابطه F_y تنش مجاز تسلیم فولاد، E مدول الاستیسیته فولاد و C_c از رابطه $\sqrt{2\pi^2 E / F_y}$ به دست می آید. لاغری برای اعضای

کششی، حداکثر 300 و اعضای فشاری 240 می باشد. روابط مربوط به قیدهای طراحی برای لاغری، براساس روابط (7 و 8) ارائه گردیده است.

$$\lambda_k = k_k I_k / r_k \leq \bar{\lambda}_k = 300 \quad \text{برای اعضای کششی} \quad (7)$$

$$\lambda_k = k_k I_k / r_k \leq \bar{\lambda}_k = 240 \quad \text{برای اعضای فشاری} \quad (8)$$

k_k ضریب طول موثر عضو k ام و r_k شعاع ژیراسیون مقطع می باشد.

در روند بهینه سازی، مقدار مجاز جابجایی قائم (δ_v)، به اندازه عرض زمین تقسیم بر 360 در نظر گرفته شده است و قید جابجایی بصورت

زیر بیان می شود:

$$g_\delta = \sum_k \max(|\delta_j| / \delta_{\max} - 1, 0) \quad (9)$$

که δ_j جابه جایی قائم گره ی زام است.

3. الگوریتم بهینه سازی تکاملی (ESO)

در این مقاله برای مشخص کردن اعضای مهم سازه، از روش ESO استفاده شده است [14,15]. اعضای مهم سازه، اعضایی با سطح مقطع

بیشتر جهت رسیدن به تنش یکسان تعریف می شود. بدین منظور با استفاده از روش ESO مراحل گام به گام زیر جهت رسیدن به سازه ای با اعضای هم تنش انجام می شود.

گام 1- پارامترهای ورودی و مقدار اولیه ی متغیرهای طراحی a^0 تعیین می شود.

گام 2- بردار جابه جابه گره های طرح موجود $d(a^k)$ با استفاده از آنالیز اجزای محدود محاسبه می شود. $\sigma_i, i = 1, \dots, ne$

گام 3- برای سطح مقطع موجود a^k ، تنش های اعضا محاسبه می شود.

گام 4- تنش عضو a^k ، با تنش هدف σ_i مقایسه می شود.

گام 5- اگر تنش عضو از تنش هدف بیشتر است، سطح مقطع عضو به اندازه ی کوچکی (Δa) افزایش می یابد. واگر تنش عضو کمتر از تنش هدف است، سطح مقطع عضو به اندازه ی کوچکی Δa کاهش می یابد.

گام 6- اگر سطح مقطع عضو به مقدار حداقل یا حداکثر از پیش تعیین شده رسیده، مقطع آن بدون تغییر خواهد ماند.

گام 7- کنترل می شود که آیا سطح مقطع بدون تغییر قبلی نیاز به تغییر دارد یا خیر.

گام 8- در صورت عدم ارضای شرط همگرایی محاسبات از گام 2 تکرار می شود.

در این مقاله شرط همگرایی طبق رابطه ی زیر بیان می گردد.

$$\frac{|W_k - W_{k-1}|}{W_k} \times 100 < \varepsilon, W_0 = 0 \quad (10)$$



4. الگوریتم جستجوی گرانشی

در الگوریتم جستجوی گرانشی بهینه‌یابی به کمک طرح قوانین گرانشی و حرکت در یک سیستم گسسته با زمان انجام می‌شود. محیط سیستم همان محدوده‌ی حل مساله می‌باشد. طبق قانون گرانش هر جرم محل و وضعیت سایر اجرام را از طریق نیروی جاذبه گرانشی درک می‌کند. بنابراین می‌توان از این نیرو به عنوان ابزاری برای تبادل اطلاعات استفاده کرد میزان اجرام با توجه به تابع هدف محاسبه می‌شود. محیط شامل یک دستگاه مختصات چند بعدی در فضای تعریف مساله است. پس از تشکیل سیستم قوانین حاکم بر آن مشخص می‌شوند. این قوانین که برگرفته از قوانین طبیعت‌اند به صورت زیر نوشته شده‌اند. یک سیستم N ذره‌ای را در نظر بگیرید. مکان ذره‌ی i ام به صورت زیر است:

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

که x_i^d معرف مکان ذره‌ی i ام در بعد d ام است. در زمان t ام، نیروی اعمال شده توسط ذره‌ی i ام به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij} + \varepsilon} (x_i^d(t) - x_j^d(t)) \quad (12)$$

که M_{aj} جرم گرانشی فعال مربوط به ذرات و M_{pi} جرم گرانشی غیر فعال ذره‌ی i ام است. $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t ام، ε یک ثابت کوچک و $R_{ij}(t)$ فاصله‌ی اقلیدوسی بین ذرات i و j است:

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t) - X_j(t)\|_2 \quad (13)$$

برای دادن خاصیت تصادفی به الگوریتم، نیروی کل وارد بر ذره‌ی i ام در بعد d ام را به صورت حاصل ضرب وزن‌های تصادفی در مولفه d ام نیروهای وارد از سایر ذرات فرض می‌کنیم.

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rand}_j F_{ij}^d \quad (14)$$

که rand_j عددی تصادفی در بازه‌ی $[0, 1]$ است. بنابراین، طبق قانون حرکت، شتاب ذره‌ی i ام در زمان t ام و در جهت d ام به شکل زیر است:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (15)$$

در رابطه‌ی بالا جرم اینرسی ذره‌ی i ام در زمان t ام است. سرعت بعدی هر ذره به صورت مجموع کسری از سرعت فعلی آن و شتاب ذره محاسبه می‌شود بنابراین سرعت و مکان ذره طبق روابط زیر به دست می‌آید:

$$v_i^d(t+1) = \text{rand}_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (16)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (17)$$

که rand_j عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی $[0, 1]$ است.

ثابت گرانش در ابتدا مقدار دهی می‌شود و و برای کنترل دقت جستجو با گذشت زمان کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر ثابت گرانش تابعی از مقدار اولیه و زمان است. جرم اینرسی و گرانشی به سادگی توسط تابع ارزیابی محاسبه می‌شود. جرم سنگین‌تر معرف ذره موثرتر است. به عبارت دیگر، ذرات بهتر، جاذبه بیشتری دارند و کندتر حرکت می‌کنند. با یکسان در نظر گرفتن جرم اینرسی و گرانشی، مقدار این اجرام توسط معادلات زیر به روز رسانی می‌شوند:

$$M_i = M_{pi} = M_{ai}, i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

$$m_i(t) = \frac{\text{fit}_i(t) - \text{worst}(t)}{\text{best}(t) - \text{worst}(t)} \quad (19)$$



$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (20)$$

که $fit_i(t)$ مقدر تابع ارزیابی به ازای ذره نام در زمان t است و $best(t)$, $worst(t)$ برای کمینه‌سازی به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit(t) \quad (21)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit(t) \quad (22)$$

در ابتدای تشکیل سیستم، هر جسم به صورت تصادفی در یک نقطه از فضا قرار می‌گیرد که جوابی از مسأله است. در هر لحظه از زمان، اجرام ارزیابی شده سپس، تغییر مکان هر جرم پس از محاسبه روابط بالا محاسبه می‌شود. پارامترهای سیستم شامل: اجرام گرانشی، جرم اینرسی و ثابت گرانش نیوتن هستند که در هر مرحله بروز رسانی می‌شوند. شرط توقف می‌تواند پس از طی مدت زمان مشخصی تعیین شود. در الگوریتم جستجوی گرانشی، به هر جرم به نسبت برازندگی، در یک فرآیند نرمال سازی مقداری بین [0 و 1] اختصاص داده می‌شود و متناسب با آن بر حرکت خود و دیگر اجرام اثر می‌گذارد. در مساله بهینه‌سازی توپولوژی برخی اجرام به خاطر نقض محدودیت‌ها، جریمه بالایی به خود می‌گیرند. این امر باعث اختشاش در حرکت درست اجرام به سمت موقعیت بهینه می‌گردد. برای رفع این مشکل در الگوریتم اصلاح شده در هر تکرار، تمامی اجرام بر اساس برازندگی به ترتیب نزولی مرتب می‌شوند و N جرم برتر به عنوان سر گروه انتخاب می‌شوند. سپس از جرم‌های باقیمانده، N جرم برتر بعدی بصورت تصادفی در N گروه اولیه قرار می‌گیرند. این روند تخصیص تصادفی، تا قرارگیری کلیه اجرام در N گروه ادامه می‌یابد. پس از تخصیص کلیه اجرام، فرآیند نرمال سازی هر دسته بصورت جداگانه انجام می‌شود. لازم به ذکر است که هنگام محاسبه نیروها، تنها جرم برتر هر دسته، به اجرام گروه خود نیرو وارد می‌کند. با این کار خاصیت جستجوی محلی هر دسته حفظ شده است و الگوریتم جستجوی همه‌جانبه خواهد داشت. در تکرار بعد دوباره تمام اجرام بعد از ارزیابی، بر اساس برازندگی مرتب شده و اگر شرط همگرایی برقرار نبود مراحل بالا تکرار می‌شود. مراحل گام به گام الگوریتم اصلاح شده در زیر آورده شده است.

1. تعیین محیط سیستم و مقدار دهی اولیه
 2. جابه‌جایی اولیه اجرام
 3. ارزیابی اجرام
 4. مرتب کردن اجرام بر اساس برازندگی و انتخاب N جرم به عنوان اجرام برتر (سر گروه).
 5. تخصیص اجرام باقیمانده، بصورت تصادفی به N گروه.
 6. برای هر دسته: 1- به روز رسانی پارامترهای $G, Mg, best, worst, Mi$
 - 2- محاسبه نیروی وارد بر هر جرم از طرف جرم برتر آن مجموعه
 - 3- محاسبه شتاب و سرعت هر جرم
 7. به روزرسانی موقعیت اجرام
 8. اگر شرط توقف برآورده نشده است به مرحله 3 برو
- پایان.

5. روش پیشنهادی دو مرحله‌ای ESO-MGSA جهت انجام بهینه‌سازی توپولوژی

در این تحقیق سعی شده است که با انجام اصلاحاتی، فضای طراحی مربوط به جستجوی مقدار بهینه هر نمونه کاهش یابد. تا از روش بهینه-یاب اکتشافی مثل MGSA بتوان جواب‌های مناسب‌تری به دست آورد. با طی کردن گام‌های بیان شده در بخش 3 برای بهینه‌سازی تکاملی به



سازه‌ای با اعضای هم تنش برای مساله بهینه‌سازی می‌رسیم. این سازه جهت انجام سه اصلاح شرح داده شده در زیر برای الگوریتم MGSA به کار گرفته می‌شود.

الف-اصلاح تولید سازه‌های پایدار تصادفی

در روند بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه با استفاده از MGSA، سازه‌های ناپایدار زیادی تولید می‌شود. در این تحقیق، پس از یافتن هر سازه‌ی ناپایدار، سازه تصادفی جدیدی جایگزین و پایداری آن بررسی می‌گردد. این رویه تا یافتن یک سازه پایدار ادامه می‌یابد. در روش ESO-MGSA در تولید سازه تصادفی گره‌ها بصورت تصادفی در صورتی حذف می‌شود که رابطه زیر برقرار باشد [8]:

$$IR_i < IR_{\min}, i = 1, 2, \dots, NTV \quad (23)$$

که IR_{\min} درجه اهمیت حداقل است. بنابراین، احتمال حذف گره‌ها با اهمیت زیاد کاهش می‌یابد.

ب- تعیین تعداد تیپ‌های اعضای کششی و فشاری

پس از اعمال روش ESO، نیروی داخلی اعضا محاسبه می‌شود. با توجه به نیروی محاسبه شده و با در نظر گرفتن قیود تنش و ضریب لاغری در اعضا، پروفیل مناسب برای آنها طراحی می‌شود. سپس، اعضای دارای سطح مقطع یکسان (با در نظر گرفتن نیروی فشاری و کششی) در یک گروه (تیپ) قرار می‌گیرند. شمارش تعداد سطح مقطع مختلف، تعداد تیپ‌های مختلف اعضای کششی و فشاری را تعیین می‌کند [8].

ج- کاهش لیست پروفیل‌های موجود هر تیپ

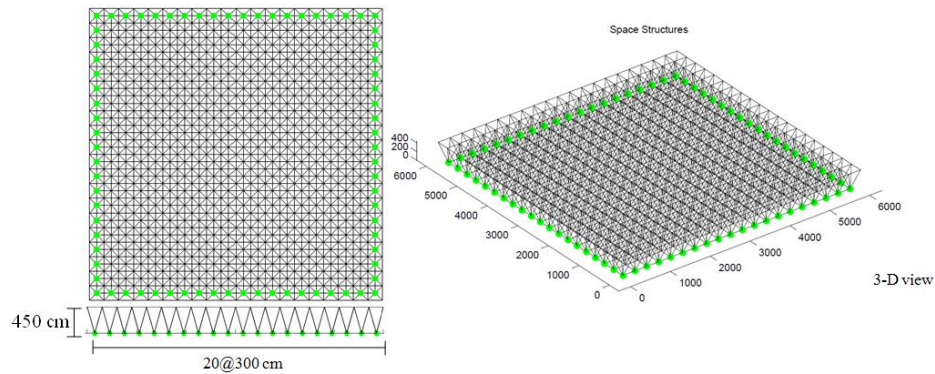
در بخش قبل، طراحی پروفیل هر عضو، تنها بر اساس قید تنش انجام شده است. به احتمال زیاد، هنگامی که دیگر قیود طراحی به مساله بهینه سازی اضافه گردد، مقاطع به دست آمده بزرگتر از مقاطع موجود برای هر عضو خواهد بود. پس می‌توان سطح مقطع اختصاص یافته به اعضا در بخش قبل را، به عنوان حد پایین پروفیل‌های موجود هر تیپ در نظر گرفت. برای اطمینان بیشتر فرمول زیر ارائه گردیده است [8]:

$$lb_k = dp_k - 0.1(NP) \geq 1, k = 1, 2, \dots, NMG \quad (24)$$

که dp_k شماره‌ی پروفیل تخصیص یافته به اعضای تیپ K ام و NP تعداد پروفیل‌های موجود می‌باشد.

6. مثال عددی

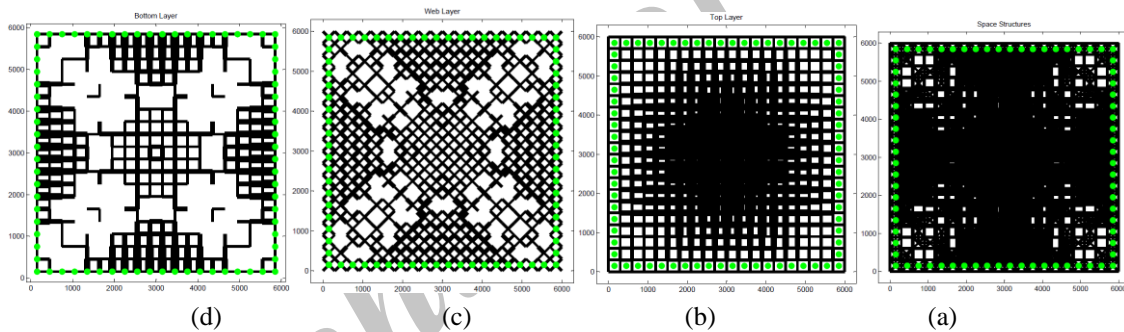
به منظور نشان دادن کارآیی روش ESO-MGSA در حذف اعضای غیر ضروری سازه، شبکه دولایه مربع روی مربع، با 841 گره و 3200 عضو در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته فولاد مصرفی $2.1 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}$ و چگالی آن $7850 \frac{kg}{m^3}$ در نظر گرفته شده است. سطح مقطع اعضا از لیست پروفیل‌های لوله‌ای شکل جدول (1) انتخاب می‌شوند. در این جدول OD قطر خارجی و T ضخامت برحسب سانتی‌متر است. شکل توپولوژی بهینه‌ی حاصل از الگوریتم‌های MGSA و ESO-MGSA به ترتیب در اشکال (2) و (3) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نیز در جدول (2) ارائه شده است.



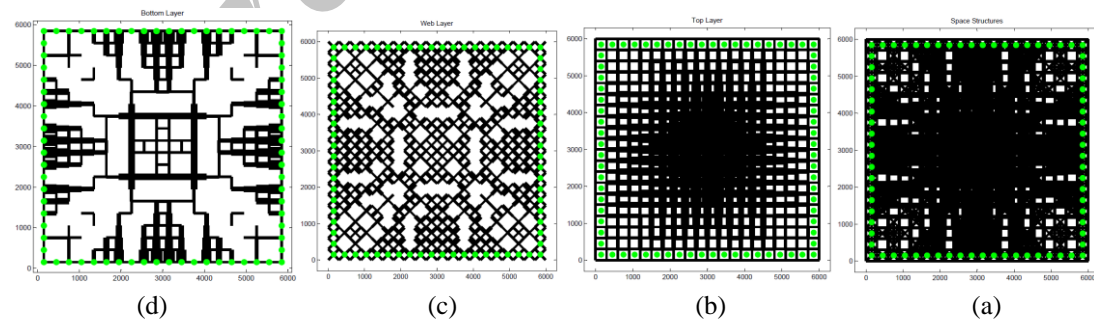
شکل (1): نمای بالا و نمای سه بعدی شبکه دولایه 20×20

جدول (1): مشخصات مقاطع لوله‌ای شکل

No	OD	TH	No	OD	TH	No	OD	TH	No	OD	TH
1	4.38	0.26	6	10.8	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	1.00
5	10.16	0.36	10	15.90	0.45	15	27.30	0.63			



شکل (2): بهینه‌سازی توپولوژی شبکه دولایه با الگوریتم MGSA: شبکه دولایه (a)، شبکه جان (b)، شبکه پایین (c)، شبکه بالا (d)



شکل (3): بهینه‌سازی توپولوژی شبکه دولایه با الگوریتم MGSA_ESO: شبکه دولایه (a)، شبکه بالا (b)، شبکه جان (c)، شبکه پایین (d)



جدول (3): نتایج به دست آمده برای وزن سازه در حالت بهینه‌سازی و بهینه‌سازی توپولوژی توسط الگوریتم ESO-MGSA, MGSA

روش بهینه سازی	MGSA	ESO-MGSA	ACO [8]	MMA-ACO [8]
وزن بهینه (kg)	84662	82652	85036	81927

همان طور که مشاهده می‌شود مقدار وزن بهینه به دست آمده با استفاده از الگوریتم ESO-MGSA از روش MGSA بهتر است. همچنین، روش MGSA نسبت به الگوریتم ACO در مرجع [8] عملکرد بهتری داشته است. اما وزن به دست آمده از الگوریتم ESO-MGSA در مقایسه با الگوریتم MMA-ACO بیشتر است که این اختلاف ناشی از اصلاحیه چهارمی است که در الگوریتم MMA-ACO انجام شده است.

7. نتیجه گیری

در این مقاله، بهینه‌یاب جدیدی مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی برای حل مساله بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های فضاکار تخت دولایه ارائه گردیده است. در الگوریتم طراحی شده، به گونه‌ای شایسته موضوع نخبه‌گرایی، جستجوی همه‌جانبه و حافظه‌دار شدن الگوریتم به خوبی رابطه‌مند شده‌اند. همچنین برای انطباق بیشتر الگوریتم ارائه شده با محیط بهینه‌سازی توپولوژی سازه فضاکار، این الگوریتم با الگوریتم ESO ترکیب گردیده است. سه گام اساسی برای بهبود عملکرد الگوریتم به آن اضافه شده است. نتایج ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد الگوریتم جستجوی گرانشی اصلاح شده، از عملکرد بالایی جهت رسیدن به توپولوژی بهینه سازه‌های گسسته پر عضو برخوردار است. همچنین، تلفیق الگوریتم MGSA با روش ESO، قابلیت آن را در پیدا کردن توپولوژی‌های بهتر بهبود بخشیده است.

مراجع

- [1] Hasançebi O, Çarbaş S, Doğan E, Erdal F, and Saka MP. Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures, *Computers and Structures*, 87(5), 284-302, 2009.
- [2] Michell AGM. The limits of economy of materials in frame structures, *Philosophical Magazine*, Series 6, 47(8), 589-597, 1904.
- [3] Prager, WA. Note on discretized Michell structures, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 349-355, 1974.
- [4] Rozvany GIN, Prager, W. Optimal design of partially discretized grillages, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 24, 125-136, 1976.
- [5] Prager W. Transmission optimale des charges par flexion, *Anales del Institute Technique du Batiment et de Travaux Publics*, Serie:Theories et Methodes de Calcul, 193, 82-91, 1976.
- [6] Bendsøe MP. Optimal shape design as a material distribution problem, *Structural Optimization*, 1, 193-202, 1989.
- [7] Bendsøe MP, Diaz A and Kikuchi N. Topology and generalized layout optimization of elastic structures, *In: Bendsøe MP, Mota Soares CA(eds): Topology Design of Structures*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 159-205, 1993.
- [8] Mashayekhi M, Salajegheh E, Salajegheh J, and Fadaee MJ. Reliability-based topology optimization of double layer grids using a two-stage optimization method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45(6), 815-833, 2011.
- [9] Mashayekhi M, Fadaee MJ, Salajegheh, J, and Salajegheh, E. Topology optimization of double layer grids for earthquake loads using a twostage ESO-ACO method, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 2(1), 211-232, 2011.



- [10] Mashayekhi M, Salajegheh J, Fadaee MJ, and Salajegheh E. A twostage SIMP-ACO method for reliability-based topology optimization of double layer grids, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 1(4), 521-542, 2011.
- [11] Fadaee MJ, Salajegheh E, Salajegheh, J and Mashayekhi, M. Reliability-based topology optimization of space structures using ant colony optimization, *Proceeding of the 10th International Conference on Computational Structures Technology*, Civil-Comp press, Scotland, 2010.
- [12] Salajegheh E, Mashayekhi M, Khatibinia M and Kaykha M. Optimum shape design of space structures by genetic algorithm, *International Journal of Space Structures*, 1(24),45-58, 2009.
- [13] Rashedi E, Nezamabadi-pour, H and Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm, *Information Sciences*, 179(13), 2232-2248, 2009.
- [14] American Institute of Steel Construction, AISC Manual, 2005.
- [15] Xie YM, Steven G.P. Evolutionary structural optimization, *Springer, London*, 1997.
- [16] Querin OM, Young V, Steven GP, Xie YM, Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 189, 559-573, 2000.

Archive of SID