



بهینه‌سازی طرح سازه‌های پیوسته دو بعدی با استفاده از روش الگوریتم تبرید تدریجی کارآمد

بهزاد لطف خدایی^۱ و محمد حسین ابوالبشری^{۲*}^۱ کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد^۲ استاد، گروه مکانیک، مرکز پژوهشی مهندسی تولید ناب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۲

چکیده

این مقاله، کاربرد یک الگوریتم بهینه‌سازی پایه‌ریزی شده بر اساس تبرید تدریجی را در بهینه‌سازی وزن و استحکام سازه‌های پیوسته دو بعدی ارائه می‌کند. الگوریتم CMLPSA که الگوریتم تبرید چند نقطه‌ای - چند سطحی اصلاح شده نام دارد، یک روش پیشرفته جستجو برای حالت‌هایی است که هر طرح کاندیدا از میان جمعیتی از نقاط انتخاب می‌شود که به صورت تصادفی تولید شده‌اند. اصطلاح چند نقطه‌ای برای همه طرح‌های عملی و غیرعملی ارائه می‌شود. افزون بر این، CMLPSA دارای یک استراتژی چند سطحی برای حالت‌های آزمایشی تولید شده به وسیله ادغام همه متغیرهای طرح است. در این مقاله، تأثیر پارامتر حذف المان و سرعت حذف المان به روش الگوریتم CMLPSA در بهینه‌سازی سازه‌های دو بعدی پیوسته بررسی شده، با نتایج تحقیقات قبلی مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که به ازای مقادیر مختلف پارامتر اولیه حذف المان و مقادیر مختلف پارامتر سرعت حذف المان، تغییر چندانی در میزان حجم نهایی و یا تنش ون مایرز نهایی سازه ارائه شده توسط CMLPSA مشاهده نمی‌شود و فقط شکل نهایی سازه برای مقادیر مختلف پارامتر سرعت حذف المان متفاوت است؛ اما میزان حجم نهایی و تنش ون مایرز نهایی سازه در مقایسه با تحقیقات قبلی در شرایط یکسان بهبود یافته‌اند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی سازه‌ها؛ المان محدود؛ روش تبرید تدریجی کارآمد

Design Optimization of 2D Continuum Structures using an Efficient Simulated Annealing Algorithm

B. Lotf Khodaei¹, M. H. Abolbashi^{2,*}¹MS.c., Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran² Prof., Mech. Eng. Department, Lean Production Engineering Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

This paper presents an optimization algorithm based on Simulated Annealing in design optimization of 2D continuum structures. The algorithm – denoted as CMLPSA (Corrected Multi-Level & Multi-Point Simulated Annealing) – implements an advanced search mechanism where each candidate design is selected from a population of trial points randomly generated. The multi-point strategy is adopted for both feasible and infeasible intermediate designs. CMLPSA includes a multi-level annealing strategy where trial points are generated by perturbing all design variables simultaneously (global level) or one by one (local level). In this paper, the effects of rejection ratio and evolutionary rate are investigated in design optimization of 2D continuum structures. The results of this study are also compared with other researches reported in the literature. It is concluded that for different values of initial discarding and rate of discarding parameters the final volume or von Mises stress of the optimum structure do not change considerably, but the final shape for different rate of discarding is changed. However, final volume and von Mises stress of the optimum structure are improved in comparison with other methods.

Keywords: Structural Optimization; Finite Element; Simulated Annealing.

۱- مقدمه

می‌دهد. در نهایت این عمل به طور چشمگیر، خطر همگرایی زودرس را کاهش می‌دهد [۱۱ و ۱۲].

الگوریتم مذکور در این قسمت توضیح داده می‌شود.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی CMLPSA

۲-۱- تعیین پارامترهای اولیه

قیده‌های اولیه G_k و تابع هدف W در این قسمت تعیین می‌شوند که در آن هدف، مینیمم کردن تابع هدف با توجه به قیود G_k است.

$$W(x_1, x_2, \dots, x_N), G_k(x_1, x_2, \dots, x_N) \leq \\ x_j^l \leq x_j \leq x_j^u \quad (1)$$

در این رابطه $(x_1, x_2, \dots, x_N), (j=1, \dots, N)$ ، به عنوان متغیرهای طرح در نظر گرفته شده، $G_k(x_1, x_2, \dots, x_N)$ تابع قید k ام بوده، x_j^l, x_j^u حد بالا و پایین متغیر j ام است.

بردار اولیه طرح $(X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{N,0})$ ، به عنوان بهترین طرح جاری X_{OPT} در فضای طرح در نظر گرفته می‌شود که نقطه P_{OPT} متناظر با همین طرح است و مقدار تابع هدف در این نقطه، به صورت W_{OPT} ذخیره می‌شود. پارامتر K ، معرف تعداد چرخه عملیات تبرید بوده، مقدار ماکزیمم و مینیمم آن به ترتیب، $K_{UM}=100$ و $K=1$ است.

از آنجایی که الگوریتم با بررسی مقدار تابع متروپولیس به منظور رد یا قبول نتیجه حاصل در یک چرخه، سعی در دور شدن از مینیمم محلی را دارد، به این منظور، دمای اولیه T_0 باید به اندازه کافی بالا در نظر گرفته شود تا کل فضای طرح مورد بررسی قرار بگیرد.

۲-۲- بررسی عملی بودن طرح

قیده‌های غیرخطی در X_{OPT} بررسی می‌شوند. اگر قیده‌ها رعایت شوند، الگوریتم مرحله سوم را اجرا می‌کند، در غیر این صورت، مرحله هشتم را که در ادامه توضیح داده شده است (بخش ۲-۸)، اجرا خواهد کرد.

۲-۳- انجام آنیلینگ کلی و ادغام تمامی متغیرها

گرایان تابع هدف $\nabla W(X_{OPT})$ در نقطه P_{OPT} بررسی می‌شود، هر متغیر تصادفی به طور $(\partial W / \partial x_j)$ بررسی

در مهندسی سازه، وظیفه سیستم‌های سازه تحمل بارهای مؤثر و معمولاً انتقال نیرو به تکیه‌گاه‌ها است. این سیستم‌ها، علاوه بر آن که باید ایمن و کارا باشند، در عین حال بایستی از کمترین هزینه و به نوعی از کمترین مصرف مصالح برخوردار باشند. در بحث‌های مربوط به المان محدود، بهینه‌سازی شکل به عنوان یک چالش اساسی نیازمند تغییر موقعیت گره‌ها در مدل المان محدود یا حذف المان با شرط پیوستگی سازه است [۱]. معمولاً اگر ایجاد حفره در طول فرآیند بهینه‌سازی مجاز باشد، این فرآیند بهینه‌سازی توپولوژی نامیده می‌شود. تحقیقات انجام گرفته، بیانگر این است که بهینه‌سازی توپولوژی، کارایی سازه را به طور وسیعی بهبود می‌بخشد [۲].

یک روش پیشرفته در این زمینه، روش همگن‌سازی است که توسط بندوز و کیکوچی ارائه شده است [۳]. اگر چه این روش بسیار پیچیده است، اما به عنوان یک ابزار برای بهینه‌سازی طرح سازه عمل می‌کند [۳-۶]. روش مشابه دیگری نیز بنام روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها توسط ژای و استیون ارائه شده است [۷].

الگوریتم تبرید تدریجی چند نقطه‌ای- چند سطحی (CMLPSA)، یکی از مدل‌های جدید اصلاح شده الگوریتم تبرید تدریجی است [۸]. طرح‌های کاندیدا در این روش، برای قرار گرفتن روی جهات تولیدی انتخاب می‌شوند [۹ و ۱۰]. مکانیسم ادغام متغیرهای طراحی توافق شده در الگوریتم، به منظور استفاده از روش‌های درست برای گسترش تابع هدف فعلی اصلاح شده است. در حقیقت ادغام متغیرها به گونه‌ای است تا سرعت تغییرات آشکار شده توسط تابع هدف را دنبال کند و جابه‌جایی طرح‌های غیر عملی متوسط نیز بهبود یابد [۸].

به نظر می‌رسد که ترکیب الگوریتم CMLPSA، مزایای بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر الگوریتم SA دارد. در وهله اول هر طرح تولید شده می‌تواند به طور مؤثر طرح بهینه فعلی را بهبود دهد. ثانیاً می‌تواند استراتژی تحقیق پایه‌ریزی شده روی همگرایی فعلی را تغییر دهد (طرح‌های عملی، جزئی و یا شدیداً غیرعملی متوسط). ثالثاً همگرایی محلی، دامنه قیده‌ها را بررسی می‌کند [۸]. این بررسی به طور چشمگیر احتمال عبور از مینیمم محلی را بدون استفاده از هیچ معیار احتمال افزایش

تغییرات $\Delta X_j^{q,fin}$ ، تغییراتی هستند که در مرحله سوم تعریف شده‌اند. از آنجا که ω_{min} کوچک‌ترین مقیاس در امتداد بردار تولیدی است، الگوریتم می‌کوشد تا جریمه احتمالی را کاهش دهد که در اثر ادغام متغیرهای بهینه‌سازی به وسیله حرکت در جهت S_{ND} ایجاد شده است.

۲-۶- بررسی کاهش تابع هدف توسط طرح کانیددا

تابع هدف و قیدها در P_{TR} بررسی می‌شوند. دو حالت ممکن است اتفاق بیفتد؛ حالت اول: اگر $\Delta X_j < 0$ و P_{TR} عملی باشد، طرح P_{TR} به عنوان طرح بهینه جدید ذخیره می‌شود. بردار X_{opt} و بهترین طرح به صورت $W_{OPT} = W_{TR}$ جایگذاری می‌شود و مرحله سوم اجرا می‌شود. حالت دوم: اگر $\Delta X_j < 0$ و P_{TR} غیرعملی باشد، الگوریتم یک تقریب مکعبی از P_{POT} ایجاد می‌کند. اگر این فرآیند نتیجه بخش باشد، مرحله سوم و در غیر این صورت مرحله هفتم را که در ادامه توضیح داده شده است (بخش ۲-۷)، اجرا خواهد کرد. در نهایت در صورتی که $\Delta X_j > 0$ باشد، الگوریتم باز هم مرحله هفتم را اجرا خواهد کرد.

۲-۷- آنیلینگ محلی

الگوریتم متغیرهای طرح را یک به یک حول P_{POT} فعلی ادغام می‌کند تا از مرزهای تعیین شده و مینیمم محلی فرار کنند و نیز تحذب و تقعر فضای طرح را به صورت محلی بررسی می‌کند. طرح کانیدد جدید تولید شده برای ژامین، متغیر $P_{TR,j}$ است.

تابع هدف در هر $P_{TR,j}$ محاسبه و تغییرات آن ΔW_j بررسی می‌شود. اگر $\Delta W_j < 0$ باشد، الگوریتم بردار X_j و W_j را در پایگاه داده Π_1 ذخیره می‌کند.

الگوریتم از Π_1 دو طرح $X_{j,SMALL}$ و $X_{j,LARGE}$ را انتخاب می‌کند که به ترتیب متناظر با کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین تغییرات تابع هدف $|\Delta W_j|$ می‌باشند و قیدها در این دو نقطه بررسی می‌شوند. اگر $X_{j,LARGE}$ طرح عملی باشد، آن را به عنوان بهینه جدید ذخیره می‌کند، در غیر این صورت، $X_{j,SMALL}$ را ذخیره خواهد کرد.

اگر $\Delta W_j > 0$ و قیدها رعایت شوند، الگوریتم تابع احتمال متروپلیس را تعریف می‌کند.

می‌شود تا در نهایت رابطه $\Delta X_j < 0$ حاصل شود. تغییرات متغیر ژام از روابط (۲) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial W}{\partial X_j} > 0 \rightarrow \Delta X_j = -(x_j^u - x_j^l) \cdot N_{RNDj} \cdot \mu_j \cdot \frac{W_{OPT,L-1}}{W_{OPT,L}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial X_j} < 0 \rightarrow \Delta X_j = (x_j^u - x_j^l) \cdot N_{RNDj} \cdot \mu_j \cdot \frac{W_{OPT,L-1}}{W_{OPT,L}}$$

در رابطه (۲)، پارامتر N_{RNDj} برای متغیر ژام در بازه $[0,1]$ تعریف می‌شود و μ_j ضریب وزن است که از رابطه $\|\partial W / \partial X_j\| / \|W(X_{OPT})\|$ به دست می‌آید.

پارامترهای $W_{OPT,L-1}$ و $W_{OPT,L}$ ، دو مقدار بهترین فعلی تابع هدف می‌باشند.

۲-۴- بهبود دامنه طرح

برای اطمینان از تناظر بین تغییرات تابع هدف و تغییرات، الگوریتم رابطه (۲) را ارائه می‌کند که برای رد یا پذیرش نتایج به دست آمده در هر بردار تولیدی به کار برده می‌شود.

$$\frac{W(X_{OPT}) - W(X_{OPT} + \delta S_{TR}^q)}{(\delta S_{TR}^q)^T W(X_{OPT})} \geq 0.75 \quad (3)$$

پارامتر δS_{TR}^q ، برای اطمینان از اینکه تغییرات تابع هدف در ناحیه امن بیفتند به کار برده می‌شود. این استراتژی، توسط لمبرتی و پاپالیتر ارایه شده، بیانگر یک تعریف کلاسیک از ناحیه امن است که برای اداره توافقی مقدار حرکت مجاز در فضای طرح در مورد بهینه‌سازی بر اساس مدل‌های تقریبی بکار می‌رود [۱۳ و ۱۴].

در ادامه، بردارهای تولیدی به مقیاس‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود. $S_{TR}^{q,final}$ فاکتور جدیدی است که از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$S_{TR}^{q,final} = \text{Min} \left[1, (\delta S_{TR}^q / S_{TR}^q) \right] S_{TR}^q \quad (4)$$

پارامتر ω_q نیز، از رابطه (۵) به دست می‌آید و در روابط بعدی از آن استفاده خواهد شد.

$$\omega_q = \left\| \frac{S_{TR}^{q,final}}{S_{TR}^q} \right\| \quad (5)$$

۲-۵- ارزیابی و انتخاب بهترین طرح کانیددا

هر بردار تولیدی $S_{TR}^{q,final}$ ، در محدوده طرح بهینه جاری P_{OPT} و طرح کانیدد (۶) محدود شده است.

$$P_{TR}^q \left(X_{OPT,1} + \omega_q \Delta X_1^{q,fin}, X_{OPT,2} + \omega_q \Delta X_2^{q,fin}, \dots, X_{OPT,N} + \omega_q \Delta X_N^{q,fin} \right) \quad (6)$$

$$\text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \left[\frac{|W_{\text{OPT},K} - W_{\text{OPT},K-1}|}{W_{\text{OPT},K}}; \right. \\ \left. \frac{|W_{\text{OPT},K-1} - W_{\text{OPT},K-2}|}{W_{\text{OPT},K-1}}; \right. \\ \left. \frac{|W_{\text{OPT},K-2} - W_{\text{OPT},K-3}|}{W_{\text{OPT},K-2}} \right] \\ \text{Max} \left[\frac{\|X_{\text{OPT},K} - X_{\text{OPT},K-1}\|}{\|X_{\text{OPT},K}\|}; \right. \\ \left. \frac{\|X_{\text{OPT},K-1} - X_{\text{OPT},K-2}\|}{\|X_{\text{OPT},K-1}\|}; \right. \\ \left. \frac{\|X_{\text{OPT},K-2} - X_{\text{OPT},K-3}\|}{\|X_{\text{OPT},K-2}\|} \right] \end{array} \right\} \leq \mathcal{E}_{\text{CONV}} \quad (10)$$

۲-۱۰- تعیین پارامترها برای چرخه جدید

اگر $k < 3$ باشد و یا شرط همگرایی برقرار نباشد، الگوریتم دما را به صورت $T_{K+1} = \beta_K T_K$ کاهش می‌دهد که پارامتر β_K از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$\beta_K = \left[\sum_{r=0}^{k-1} \beta_r / K \right] \cdot \text{Max} \left[\frac{0.95}{1 + \frac{N_{\text{REJE}}}{N_{\text{TRIA}}}}; \left(1 - \frac{W_{\text{FIN},K-1}}{W_{\text{INIT},K-1}} \right) \right] \quad (11)$$

در رابطه بالا T_K و T_{K+1} به ترتیب، مقادیر تابع هدف در شروع و پایان چرخه، N_{REJE} تعداد طرح‌های رد شده از ابتدا و $\sum_{r=0}^{k-1} \beta_r / K$ میانگین همه β_K ‌های تعریف شده قبلی می‌باشند.

۳- بررسی سازه‌های دو بعدی پیوسته

برای بررسی تأثیر الگوریتم در بهینه‌سازی سازه‌های دو بعدی پیوسته و مقایسه نتایج آن با تحقیقات قبلی انجام گرفته، یک نمونه سازه طراحی شده توسط ژای و استیونز [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته شده است. این سازه در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتفاع سازه ۵ متر بوده، طول آن ۱۰ متر است که به صورت 25×50 چهارگره‌ی مش‌بندی شده، ضخامت سازه 0.1 متر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین حجم اولیه سازه، 5 مترمکعب خواهد بود. جهت مش‌بندی مدل‌ها در کلیه تحلیل‌های انجام گرفته در این تحقیق، از المان PLAN 42

$$P(\Delta W_j) = e^{\frac{-\Delta W_j}{\sum_{r=1}^{NDW} \Delta W_r / NDW}} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، NDW تعداد نقاط آزمایشی از ابتدای که در این نقاط مقدار تابع هدف نسبت به مقدار قبلی افزایش یافته است و ΔW_r جریمه متناظر با تابع هدف است. هر طرح X_j با توجه به فرمول‌های (۸) رد یا پذیرش می‌شود.

$$P(\Delta W_j) > \text{Max}[NRD_j, P(\Delta W_{ND})] \Rightarrow \text{Accept} \quad (8)$$

$$P(\Delta W_j) < \text{Max}[NRD_j, P(\Delta W_{ND})] \Rightarrow \text{Reject}$$

$P(\Delta W_{ND})$ احتمال محاسبه شده برای تابع هدف متناظر با نقطه P_{ND} تعریف شده در جهت انحرافی S_{ND} است. هر طرح پذیرفته شده X_j در این مرحله، در پایگاه داده Π_2 ذخیره می‌شود.

اگر هیچ یک از نقاط تابع هدف را بهبود نبخشد، الگوریتم از پایگاه داده Π_2 طرح X_j^{BEST} را انتخاب و آن را به عنوان بهترین جواب ارائه می‌دهد.

۲-۸- بررسی یک طرح عملی یا طرح نقض کننده قیود

اگر فرآیند بهینه‌سازی از یک نقطه غیر عملی شروع شده باشد، در این صورت الگوریتم می‌خواهد به سمتی حرکت کند که محدودیت‌ها کمتر نقض شوند و تابع هدف بهبود یابد. پس الگوریتم محدودیت‌ها را خطی می‌کند و جهت NCV را تعریف می‌کند که معادل گرادیان منفی هر محدودیت نقض شده می‌باشند و این مقدار باید کوچک‌تر از صفر باشد.

$$\delta_{G,v} = -\nabla G_v(X_{\text{OPT}}), v = 1, \dots, NCV \quad (9)$$

۲-۹- بررسی همگرایی فرآیند بهینه‌سازی

اگر $k > 3$ باشد، الگوریتم معیار همگرایی را به صورت رابطه ۱۰ بررسی می‌کند.

در این مرحله، الگوریتم به ترتیب بهترین طرح و تابع هدف متناظر با آن را در k امین تکرار نشان می‌دهد. پارامتر همگرایی برابر 10^{-7} است. اگر رابطه ۱۰ برقرار باشد، فرآیند خاتمه یافته و الگوریتم خروجی‌ها را نشان می‌دهد.

افزار انسیس تعیین شوند. این فرآیند تا ارضای شرط همگرایی ادامه می‌یابد.

۳-۱- بررسی تأثیر سرعت رشد حذف المان

در این بررسی، پارامتر اولیه حذف المان ۱٪ و سرعت رشد این پارامتر ۰/۵٪ در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه هیچ محدودیتی در تعیین پارامتر اولیه حذف المان و سرعت رشد حذف المان وجود ندارد، تأثیر این پارامترها برای شش حالت مختلف سازه نمونه اولیه با المان بندی 25×50 بررسی می‌شود.

در سه مورد اولیه، پارامتر اولیه حذف المان ثابت و مقدار آن ۱٪ در نظر گرفته می‌شود، اما سرعت حذف المان برای مقادیر مختلف بررسی می‌شود.

شکل ۳، توپولوژی‌های نهایی حاصل از کاربرد الگوریتم را برای سرعت‌های حذف المان مختلف نشان می‌دهد.

شکل ۴، تغییرات تنش و ن میز مرتبط به سه حالت ذکر شده را به صورت یکجا نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که تغییرات تنش و ن میز در سه حالت تقریباً یکسان است.

شکل ۵، تغییرات حجم سازه مربوط به سه حالت ذکر شده را به صورت یکجا نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که کاهش حجم سازه در سه حالت تقریباً یکسان است، با این تفاوت که تعداد تکرار حلقه‌ها با سرعت حذف المان ۰/۲۵٪ تقریباً دو برابر دو حالت دیگر است.

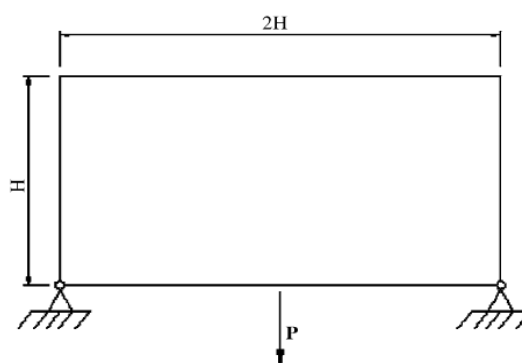
در جدول ۱، نتایج حاصل از این تحقیق برای سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت به ازای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن پارامتر حذف المان ۱٪ و سرعت‌های حذف المان مختلف ارائه شده است.

۳-۲- بررسی تأثیر پارامتر اولیه حذف المان

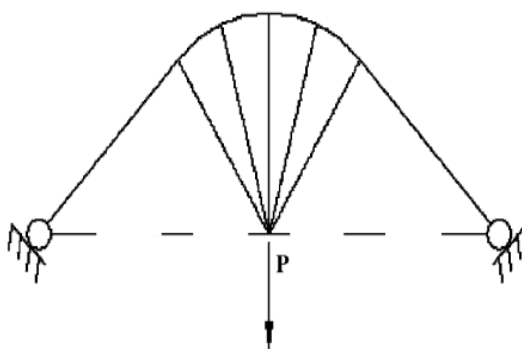
در این بخش، سرعت رشد حذف المان ثابت و مقدار آن ۰/۵٪ در نظر گرفته می‌شود، اما پارامتر اولیه حذف المان به ازای مقادیر مختلف بررسی می‌شود. شکل ۶، توپولوژی‌های نهایی حاصل از کاربرد الگوریتم را برای سرعت‌های حذف المان مختلف نشان می‌دهد.

استفاده شده است. مدول یانگ، ۱۰۰ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده‌اند. نیروی اعمالی F نیز، برابر ۱۰۰۰ نیوتن است.

مدل نشان داده شده در شکل ۲، یکی از نمونه سازه‌های میشل است که برای حالتی که بار اعمالی در وسط دو تکیه‌گاه ثابت اعمال شده، دارای کمترین وزن است [۱۶]. این سازه، سازه مورد بررسی بوده، برای پاسخ به این سؤال که آیا الگوریتم می‌تواند یک مدل توپولوژی شبیه به مدل میشل ارائه دهد یا خیر، بررسی‌های زیر دنبال می‌شود.



شکل ۱- سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت

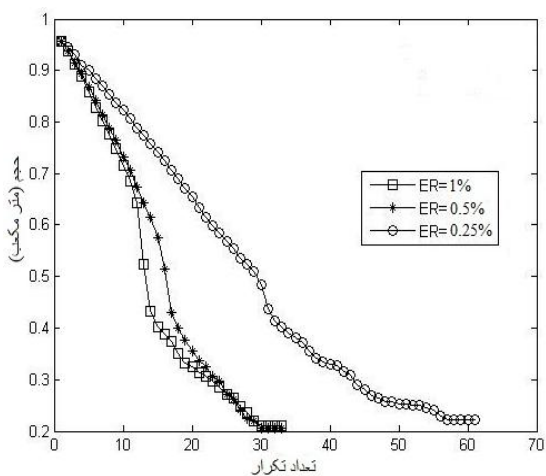


شکل ۲- سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت دارای کمترین وزن

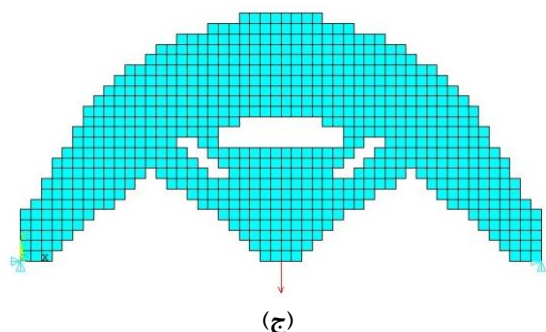
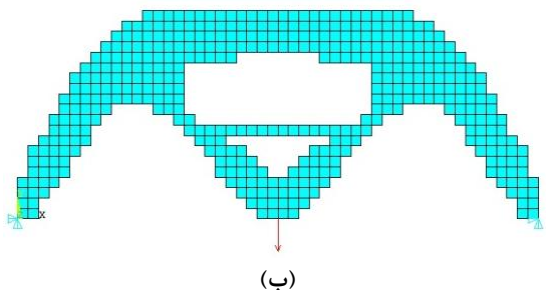
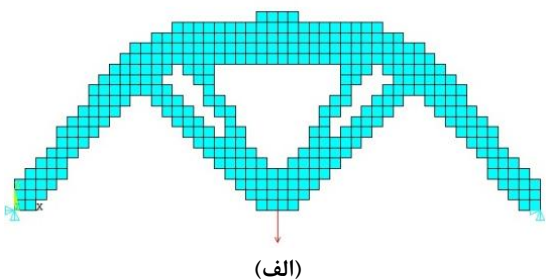
رابطه استفاده شده برای حذف المان به صورت زیر است که در آن RR_0 پارامتر اولیه حذف المان و ER سرعت رشد این پارامتر است.

$$RR_{i+1} = RR_i + ER \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

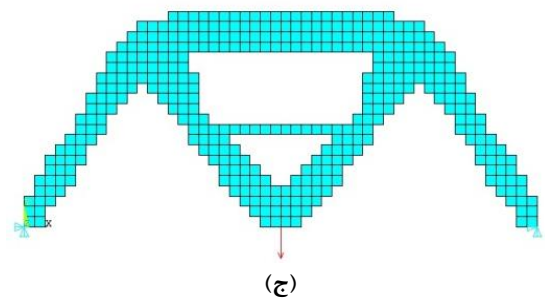
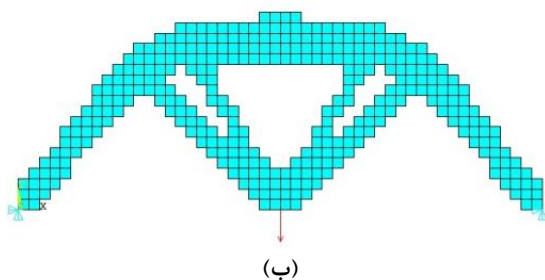
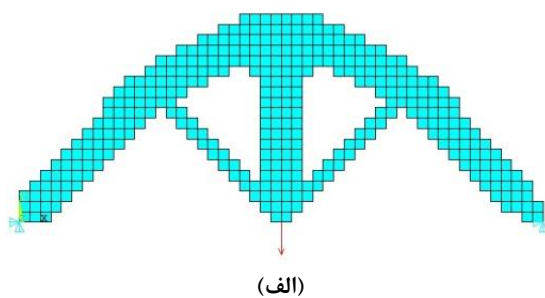
در هر حلقه تکرار، برنامه نوشته شده در نرم افزار مطلب با نرم افزار انسیس ارتباط برقرار کرده، تحلیل المان محدود سازه انجام می‌گیرد تا المان‌های کاندید برای حذف شدن توسط نرم



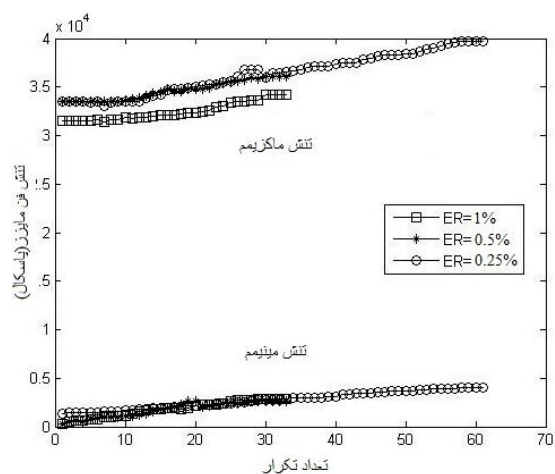
شکل ۵- نمودار تغییرات حجم سازه



شکل ۶- توپولوژی نهایی سازه برای المان بندی 25×50 و پارامتر سرعت حذف المان 0.5% و پارامتر اولیه حذف المان 1% . (الف) 0.5% ، (ب) 5% و (ج) 7.5%



شکل ۳- توپولوژی نهایی سازه برای المان بندی 25×50 پارامتر اولیه حذف المان 1% و پارامتر سرعت حذف المان 0.25% . (الف) 0.25% ، (ب) 0.5% و (ج) 1%



شکل ۴- نمودار تغییرات تنش سازه

جدول ۱- نتایج بررسی سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت برای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن پارامتر حذف المان ۱٪ و

سرعت‌های حذف المان مختلف توسط الگوریتم CMLPSA

درصد کاهش حجم	حجم نهایی (مترمکعب)	تنش ماکزیمم (پاسکال)	تنش مینیمم (پاسکال)	تعداد تکرار	پارامتر سرعت حذف المان
۷۷/۷۲	۱/۱۱۴	۳۹۷۲۸/۳	۴۰۳۸	۶۱	۰/۲۵٪
۷۹/۴۰	۱/۰۳۰	۳۶۰۵۳/۸	۲۶۶۸/۲۲	۳۳	۰/۵٪
۷۹/۰۴	۱/۰۴۸	۳۴۱۶۷/۸	۲۷۵۴/۶۸	۳۳	۱٪

شکل ۷، تغییرات تنش ون مایزرز مربوط به سه حالت ذکر شده را به صورت یکجا نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که تغییرات تنش ون مایزرز در سه حالت، تقریباً یکسان است.

شکل ۸، تغییرات حجم سازه مربوط به سه حالت ذکر شده را به صورت یکجا نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که تعداد تکرار حلقه‌ها با افزایش پارامتر اولیه حذف المان، کاهش یافته است. شایان‌ذکر است که کاهش حجم سازه نیز، با افزایش پارامتر اولیه حذف المان، روند نزولی به خود گرفته است.

در جدول ۲، نتایج حاصل از این تحقیق برای سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت به ازای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن سرعت حذف المان ۰/۵٪ و پارامتر اولیه حذف المان مختلف ارائه شده است.

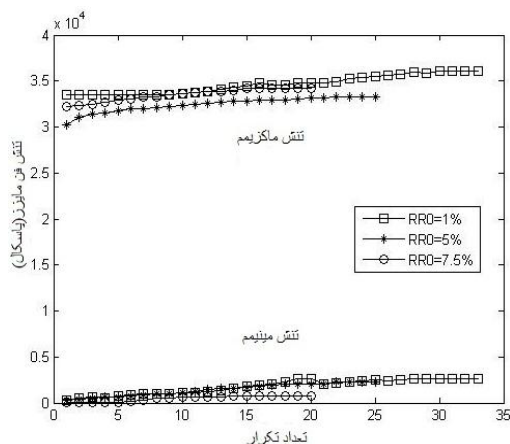
در جدول ۳، نتایج حاصل از این تحقیق برای سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت، به ازای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن پارامتر حذف المان ۱٪ و سرعت رشد پارامتر حذف المان ۰/۵٪ با تحقیقات قبلی مقایسه شده است [۱]. مشاهده می‌شود که این روش، مقادیر تنش ماکزیمم و مینیمم و حجم نهایی سازه را بهینه کرده است.

در جدول ۴، نتایج حاصل از این تحقیق برای سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت، به ازای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن پارامتر حذف المان ۱٪ و سرعت رشد پارامتر حذف المان ۰/۵٪ با تحقیقات قبلی مقایسه شده است [۱]. مشاهده می‌شود که این روش، مقادیر تنش ماکزیمم و مینیمم و حجم نهایی سازه را بهینه کرده است.

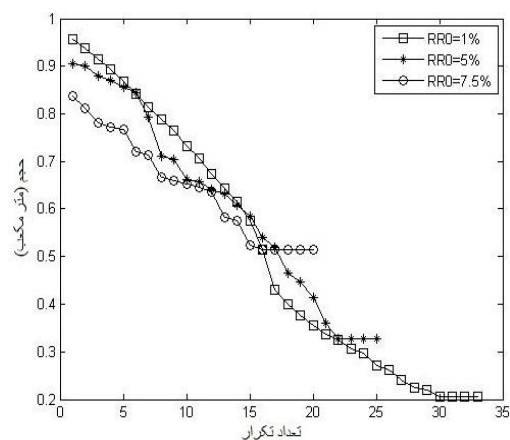
در جدول ۴، نتایج حاصل از این تحقیق برای سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت، به ازای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن پارامتر حذف المان ۱٪ و سرعت رشد پارامتر حذف المان ۰/۵٪ با تحقیقات قبلی مقایسه شده است [۱]. مشاهده می‌شود که این روش، مقادیر تنش ماکزیمم و مینیمم و حجم نهایی سازه را بهینه کرده است.

۴- نتیجه و جمع‌بندی

هدف روش CMLPSA که برای بهینه‌سازی طرح سازه‌ها در این مقاله ارائه شده است، فراهم آوردن یک سری از شکل‌های بهینه بر مبنای کاهش میزان تنش ون مایزرز در سازه است. این الگوریتم با تکیه بر طرح بررسی چند سطحی خود با ادغام همزمان و یا تک به تک متغیرها، با در نظر گرفتن شرط همگرایی عمل می‌کند و با جمعیتی از طرح‌های کاندیدا سروکار دارد که در هر تکرار تولید می‌شود. این روش با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعریف شده اولیه و با ارضای شرط همگرایی، کمترین وزن سازه را ارائه می‌دهد.



شکل ۷- نمودار تغییرات تنش سازه



شکل ۸- نمودار تغییرات حجم سازه

جدول ۲- نتایج بررسی سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت برای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن سرعت‌های حذف المان $0/5\%$ و

پارامتر اولیه حذف المان مختلف توسط الگوریتم CMLPSA

درصد کاهش حجم	حجم نهایی (مترمکعب)	تنش ماکزیمم (پاسکال)	تنش مینیمم (پاسکال)	تعداد تکرار	پارامتر اولیه حذف المان
۷۹/۴	۱/۰۳۰	۳۶۰۵۳/۸	۲۶۶۸/۲۲	۳۳	۱٪
۶۷/۲	۱/۶۴	۳۳۲۹۸/۲	۲۲۳۶/۳۹	۲۵	۵٪
۴۸/۶۴	۲/۵۶۸	۳۴۲۳۰/۱	۷۵۴/۰۸۳	۲۰	۷/۵٪

جدول ۳- مقایسه تنش ون مایز و حجم نهایی سازه میشل با دو تکیه‌گاه ثابت برای المان بندی 25×50 و در نظر گرفتن پارامتر

حذف المان 1% و سرعت رشد پارامتر حذف المان $0/5\%$ با تحقیقات قبلی

حجم (مترمکعب)	تنش مینیمم به ماکزیمم	تنش ماکزیمم (پاسکال)	تنش مینیمم (پاسکال)	طرح	وضعیت تکیه‌گاه‌ها
۵/۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۳۳۵۰۸/۴	۱۳	مدل اولیه	
۱/۰۳۰	۰/۰۷۴۰	۳۶۰۵۳/۸	۲۶۶۸/۲۲	مدل بهینه	دو تکیه‌گاه ثابت
۱/۱۹۹	۰/۱۵۱۶	۳۸۶۱۶/۷	۵۸۵۵/۸۰		

۴- مراجع

- [9] Genovese K, Lamberti L, Pappalettere C (2005) Improved global-local simulated annealing formulation for solving non-smooth engineering optimization problems. *Int J Solids Struct* 42:203-237.
- [10] Lamberti L, Pappalettere C (2007) Weight optimization of skeletal structures with multi-point simulated annealing. *Comput Model Eng Sci* 18:183-221
- [11] Chen TY, Su JJ (2002) Efficiency improvement of simulated annealing in optimal structural designs. *Adv Eng Software* 33: 675-80.
- [12] Huang MW, Arora JS (1997) Optimal design with discrete variables: some numerical experiments. *Int J Numer Methods Eng* 40: 165-88.
- [13] Lamberti L, Pappalettere C (2003) Move limits definition in structural optimization with sequential linear programming. Part I: Optimization algorithm. *Comput Struct* 81:197-213.
- [14] Lamberti L, Pappalettere C (2004) Improved sequential linear programming formulation for structural weight minimization. *Comput Methods Appl Mech* 193(33): 3493-3521.
- [15] Xie YM, Steven GP (1997) Evolutionary structural optimization. Springer, London.
- [16] Hemp WS (1973) Optimum structures. Clarendon Press, Oxford.
- [1] Abolbashari MH, Keshavarzmanesh S (2006) On various aspects of application of the evolutionary structural optimization method for 2D and 3D continuum structures. *Finite Elem Anal Des* 42(6): 478-491.
- [2] Chu DN, Xie YM, Hira A, Steven GP (1997) On various aspects of evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. *Finite Elem Anal Des* 24: 197-212.
- [3] Bendsoe MP, Kikuchi N (1988) Generating optimal topologies in structural design using homogenization method. *Comput Method Appl Mech Eng* 71: 197-224.
- [4] Bendsoe MP (1998) Optimal shape design as a material distribution optimization. *Struct Multidiscip Optim* 1: 193-202.
- [5] Suzuki K, Kikuchi N (1991) A homogenization method for shape and topology optimization. *Comput Methods Appl Mech Eng* 93: 291-318.
- [6] Diaz AR, Bendsoe MP (1992) Shape optimization of structures for multiple loading conditions using a homogenization method. *Struct Multidiscip Optim* 4: 22-77.
- [7] Xie YM, Steven GP (1993) A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Comput Struct* 49: 885-896.
- [8] Lamberti L (2008) An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures. *Comput Struct* 86(19-20): 1936-1953