



بهینه‌سازی اندازه و توپولوژی سازه‌های خرپایی فضاکار با استفاده از الگوریتم ترکیبی برنامه‌ریزی ژنتیکی و نلدر-مید

هیراد اسیمی¹، علی جمالی^{2*}، نادر نریمان زاده³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی 3576، ali.jamali@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 اسفند 1395

پذیرش: 07 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: 01 خرداد 1396

کلید واژگان:

برنامه‌ریزی ژنتیکی

بهینه‌سازی

توپولوژی

خرپا

چکیده

سازه‌های فضاکار کاربرد زیادی در ساخت سازه‌های واقعی از جمله پل‌ها، سازه‌های فضایی، کشتی‌ها و غیره دارند. این موضوع محققان را به منظور ارائه روش‌های کارآمدتر و نوین برای حصول طراحی مقاومتر و کم هزینه‌تر این نوع سازه‌ها جذب کرده است. در این مقاله یک الگوریتم ترکیبی به منظور بهینه‌سازی همزمان اندازه و توپولوژی سازه‌های خرپایی فضاکار ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، هدف نهایی کمینه کردن وزن سازه با یافتن سطوح مقاطع بهینه برای المان‌ها و نحوه اتصال بهینه بین گره‌های سازه تحت قیودهای استاتیکی است. قیودهای استاتیکی شامل پایداری سینماتیکی سازه، مقدار مجاز تنش در المان‌ها و جابجایی در گره‌ها می‌شود. در این الگوریتم ابتدا با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی (که اعضای جمعیت آن به صورت درخت بیان می‌شوند) سازه بهینه در فضای جستجو حاصل شده و سپس این پاسخ با استفاده از الگوریتم جستجوی محلی نلدر-مید بهبود داده می‌شود. روش پیشنهادی قابلیت یافتن المان‌ها و گره‌های زائد را در طی فرآیند بهینه‌سازی در فضای طراحی دارا است. روش ما روی تعدادی از مسائل عددی پیاده‌سازی شده است و با دیگر روش‌های محبوب و توانا در ادبیات تحقیق مقایسه شده است. نتایج روش پیشنهادی منجر به یافتن خرپاهایی با وزن کمتر در مقایسه با مطالعات پیشین شده است.

Sizing and topology optimization of spatial truss structures using hybrid algorithm of genetic programming and Nelder-Mead

Hirad Assimi, Ali Jamali*, Nader Nariman Zadeh

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

* P.O.B. 3576, Rasht, Iran, ali.jamali@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 February 2017
Accepted 27 April 2017
Available Online 22 May 2017

Keywords:

Genetic programming
Optimization
Topology
Truss

ABSTRACT

Implementing spatial structures is common in real-world structures such as bridges, space structures, and ships. This topic has attracted researchers to propose more efficient and pristine methods to obtain more robust and cheaper solutions for spatial structure optimization problems. This paper presents a hybrid approach for simultaneous optimization of sizing and topology of spatial truss structures using genetic programming and local search methods. It aims to find the optimal cross-sectional areas and connectivities between the joints of the truss to achieve minimum structural weight subjected to static constraints. These constraints include structural kinematic stability, maximum allowable stress in elements and maximum nodal displacements in joints. First, this approach utilizes the tree-form representation of trusses and evolves to the optimal structure in search space; afterward, Nelder-Mead algorithm enhances the obtained solution in the final step. The proposed method has the capability of identifying redundant truss members and joints in the design space. Our method was applied to some numerical problems and compared with other existing popular and competent techniques in the literature. The findings provided lighter truss structures in comparison with other references.

1- مقدمه

اخیر همواره مورد توجه محققان در سراسر دنیا بوده است. اهداف گوناگونی همچون کمینه کردن هزینه‌ها، بالابردن مقاومت سازه یا پیش‌بینی عدم قطعیت در پارامترهای سازه مورد مطالعه محققان بوده است. یکی از اهداف مورد مطالعه در تحقیقات پیشین، دستیابی به سازه‌هایی با وزن کمتر است که منجر به استفاده از مواد کمتر در سازه و کاهش نهایی هزینه ساخت سازه می‌شود. در این تحقیقات هدف اصلی کمینه کردن وزن

طراحی و توسعه سازه‌ها به منظور استفاده حداکثری از منابع موجود را بهینه‌سازی سازه می‌گوییم. امروزه با توجه به کمبود منابع مالی و در نظر گرفتن پیامدهای زیست محیطی، بهینه‌سازی سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. سازه‌های فضاکار خرپایی نقش مهمی در صنایع مرتبط به هوافضا، پل‌سازی، کشتی‌سازی و غیره دارند. این زمینه تحقیقاتی در دهه‌های

Please cite this article using:

H. Assimi, A. Jamali, N. Nariman Zadeh, Sizing and topology optimization of spatial truss structures using hybrid algorithm of genetic programming and Nelder-Mead, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 32-40, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌شوند و نتیجه آن بهبود میانگین برازندگی⁷ جمعیت در هر نسل نسبت به نسل قبل است. اطلاعات جزئی‌تر درباره نحوه عملکرد الگوریتم و عملگرهای آن در [7,6] قابل مشاهده است.

در حوزه بهینه‌سازی سازه از الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی به ندرت استفاده شده است. سو و یانگ یک الگوریتم پایه درختی به منظور بهینه‌سازی همزمان توپولوژی، شکل و اندازه ارائه کردند [8] و با تلفیق سیستم تصمیم‌گیر فازی آن را بهبود بخشیدند [9]. ژنگ و همکاران یک الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی خطی به منظور بهینه‌سازی همزمان توپولوژی، شکل و اندازه را روی خرپاها اعمال کردند [10]. اخیراً، فنتون و همکاران الگوریتم تکامل‌گرمای را (که نوعی الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی هست) به منظور بهینه‌سازی اندازه و شکل سازه‌ها به کار برده‌اند [11] و الگوریتم خود را به منظور در نظر گرفتن مسائل با شرایط مرزی مبهم⁸ ارائه کردند [12].

الگوریتم‌های جستجوی محلی همچون نلدر-مید [13] از جمله روش‌های بهینه‌سازی غیرگرادیانی است که با استفاده از یک نقطه حدس اولیه طی یک فرآیند تکراری به جواب بهینه همگرا می‌شود. نلدر-مید از سیمپلکس‌ها که اشکال هندسی هستند به منظور بهینه‌سازی استفاده می‌کند. سیمپلکس‌ها در فضای متغیرهای طراحی N بعدی از $N+1$ بعد تشکیل می‌شوند. به عنوان نمونه در فضای دوبعدی و سه‌بعدی، سیمپلکس‌ها به صورت یک مثلث و یک چهاروجهی به ترتیب تعریف می‌شوند. هرکدام از راس‌های سیمپلکس را می‌توان به صورت یک بردار نمایش داد. مقدار تابع هدف در هرکدام از این نقاط آزمایش ($N+1$ نقطه) سنجیده شده و طی یک روش هدفمند، الگوریتم با تغییر شکل سیمپلکس و جابجایی محل رئوس آن‌ها اقدام به کاهش مقادیر تابع هدف در نقاط آزمایش می‌کند. این فرآیند تا اقناع کردن شرط پایان الگوریتم نلدرمید ادامه می‌یابد. این شرط می‌تواند کوچک شدن اندازه سیمپلکس از یک مقدار محسوس، کمتر شدن مقدار تابع از هدف از یک مقدار معین و یا عدم تغییر جواب بهینه پس از تعداد مشخص محاسبه باشد. با توجه به اینکه الگوریتم‌های فراابتکاری ممکن است به پاسخ کلی همگرا نشوند، می‌توان الگوریتم‌های جستجوی محلی را با آن‌ها ترکیب کرد. الگوریتم‌های فراابتکاری همچون برنامه‌ریزی ژنتیکی ابتدا فضای جستجو را هدفمند کاوش کرده و به پاسخی کلی یا شبه کلی می‌رسند. سپس این نقطه به عنوان نقطه آغازین الگوریتم جستجوی محلی در نظر گرفته شده و الگوریتم جستجوی محلی با قابلیت ذاتی خود در همسایگی این نقطه، پاسخ بهینه بهتری را ارائه کند.

در این مقاله، کارایی ترکیب یک الگوریتم فراابتکاری و یک الگوریتم جستجوی محلی به منظور دستیابی به نقاط بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است. الگوریتمی ترکیبی پیشنهادی از برنامه‌ریزی ژنتیکی و الگوریتم جستجوی محلی نلدر-مید برای کاهش وزن سازه به منظور بهینه‌سازی خرپاهای فضاکار استفاده می‌کند.

2- صورت مساله

قیدهای وابسته به متغیرهای طراحی و مساله موجب محدود کردن فضای جستجو و تقسیم آن به فضای ممکن⁹ و غیرممکن¹⁰ می‌شود. فضای ممکن نشان دهنده فضای دلخواه طراح است. پاسخ‌های بالقوه‌ای که در این فضا قرار می‌گیرند کلیه قیدهای مساله را اقناع می‌کنند و پاسخ نهایی قطعا در این

سازه تحت قیدهای مساله هست. این قیدها می‌توانند شامل پایداری سینماتیکی سازه، مقدار مجاز تنش در المان‌ها، جابجایی در گره‌های سازه، کماتش در المان‌ها و فرکانس طبیعی سازه باشد.

بهینه‌سازی سازه‌های خرابی را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد. دسته اول به دنبال پیدا کردن بهینه‌ترین نحوه اتصال بین گره‌های سازه است که به آن بهینه‌سازی توپولوژی¹ گفته می‌شود. دسته دوم به دنبال یافتن بهینه‌ترین محل قرارگیری گره‌های سازه در فضای طراحی است که آن را بهینه‌سازی شکل² می‌نامند و دسته آخر در جستجوی بهینه‌ترین اندازه سطوح مقاطع برای المان‌های سازه است که به آن بهینه‌سازی اندازه³ گفته می‌شود. ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی و اندازه منجر به بهینه‌سازی اندازه سطوح مقاطع هرکدام از المان‌ها همزمان با در نظر گرفتن المان‌های جدید یا حذف المان‌های موجود می‌گردد.

روش‌های کلاسیک زیادی همچون تحلیل حساسیت یا روش‌های تقریبی به منظور بهینه‌سازی سازه استفاده شده است [2,1]. این روش‌ها هرچند قادر به حل مسائل بهینه‌سازی سازه بودند ولی در حل مسائل بزرگ و پیچیده ناکارآمد بودند [3]. این روش‌ها همچنین قادر به ارائه بیان مناسبی به منظور نمایش نحوه اتصال بین گره‌ها نبودند [4].

الگوریتم‌های تکاملی یک نوع از الگوریتم‌های فراابتکاری هستند که بستری ریاضیاتی را با الهام گرفتن از نظریه انتخاب طبیعی داروین به منظور حل مسائل بهینه‌سازی فراهم می‌کنند. با رشد و توسعه سیستم‌های کامپیوتری و همه گیر شدن الگوریتم‌های فراابتکاری، این روش‌ها توانایی خود را در پیدا کردن نقاط بهینه کلی⁴ در مسائل بهینه‌سازی سازه ثابت کردند [5]. یکی از معایب این روش‌ها محاسبات بالا و صرف هزینه زیاد محاسباتی است، که این موضوع با توجه به رشد روزافزون سیستم‌های محاسبه موازی قابل چشم‌پوشی است [3].

الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی یک الگوریتم فراابتکاری است که اعضای جمعیت آن برنامه‌های کامپیوتری هستند که به شکل درخت بیان می‌شوند و هرکدام می‌توانند یک پاسخ بالقوه برای مساله بهینه‌سازی باشند [6]. این الگوریتم توانایی خود را در بسیاری از حوزه‌ها همچون هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، شناسایی الگو، شبکه‌های عصبی، طراحی کنترلر، مدار و غیره ثابت کرده است [7].

الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی، بر پایه جمعیت و نسل است که هر نسل میانگین کارآمدی این جمعیت بهبود می‌یابد. این جمعیت از تعدادی درخت تشکیل می‌شود که این درخت‌ها دارای شاخ و برگ هستند که به آن‌ها تابع⁵ و پایانه⁶ می‌گوییم. به بیان دیگر توابع نقش ارتباط داخلی بین سطوح درخت را دارند و پایانه‌ها به عنوان آخرین گره یک مجموعه درون درخت عمل می‌کنند که از آن‌ها انشعاب دیگری ایجاد نمی‌شود. توابع می‌توانند شامل عملگرهای ریاضیاتی، منطقی یا عملگرهای مختص مساله باشند و پایانه‌ها شامل متغیرهای عادی، تصادفی و اعداد ثابت می‌شوند. الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی از دو ابزار به منظور یافتن پاسخ استفاده می‌کند. ابزار اول که الهام گرفته از نظریه انتخاب طبیعی داروین است منجر به بقای بهترین درخت‌ها و ایجاد درخت‌های بهتر در طی پروسه تکامل می‌شود. عملگرهای ژنتیکی الگوریتم، ابزار دوم هستند که منجر به کاوش هدفمند فضای جستجو

¹ Topology optimization

² Shape optimization

³ Sizing optimization

⁴ Global

⁵ Function

⁶ Terminal

⁷ Fitness

⁸ Ill-defined problems

⁹ Feasible

¹⁰ Infeasible

محدوده قرار می‌گیرد.

فضای طراحی عموماً به وسیله مفهومی به نام سازه پیش‌فرض¹ [14] بیان می‌شود. این سازه تمام حالت‌های ممکن نحوه اتصال المان‌ها به یکدیگر را داراست و مختصات اولیه گره‌های سازه و نوع آن‌ها از جنس آزاد یا تکیه‌گاهی مشخص شده است. گره‌های سازه‌ها عموماً به دو دسته الزامی² و اختیاری³ تقسیم‌بندی می‌شوند. گره‌هایی که از جنس تکیه‌گاهی هستند یا بارگذاری روی آن‌ها انجام می‌گیرد را گره الزامی و دیگر گره‌ها را اختیاری می‌نامند. واضح است که وجود گره‌های الزامی به منظور تامین شرایط مرزی اولیه مساله، حیاتی بوده و یک سازه بهینه ممکن، قطعاً این شرایط را باید داشته باشد [4].

برای در نظر گرفتن مساله بهینه‌سازی مقید سازه‌های خرابی، مفهوم جریمه کردن⁴ [15] سازه‌های غیرمکن در نظر گرفته شده است. قیدها از [4] مورد استفاده قرار گرفته است که صورت مساله بهینه‌سازی و قیدهای مورد استفاده در فرمول‌های (1) و (2) به ترتیب بیان شده است. متغیرهای طراحی: سطوح مقاطع المان‌های سازه مورد تحقیق هستند و A_i بیانگر سطح مقطع المان i ام است.

تابع هدف: در این مطالعه، تابع هدف مقدار مجموع وزن سازه و مقدار جریمه آن در نظر گرفته شده است. پارامترهای ρ_i و l_i به ترتیب بیانگر چگالی ماده و طول المان i ام هستند. پارامتر جریمه (P) مقداری است که توسط فرمول (2) بیان می‌شود.

قید G1: این قید مطلوبیت سازه را بررسی می‌کند. یک سازه ممکن، باید تمام نقاط الزامی را دارا باشد. این قید نقش مهمی در حذف سازه‌های غیرمکن بازی می‌کند و موجب اضافه شدن مقدار خیلی بزرگی به برازندگی سازه می‌شود تا احتمال بقای سازه نامطلوب را بسیار کاهش دهد.

قید G2: این قید پایداری سینماتیکی سازه را بررسی می‌کند. خرپا تحت بارگذاری در صورتی که تغییرشکل دهد می‌تواند تبدیل به مکانیسم شود. یکی از روش‌های محک زدن پایداری سینماتیکی سازه بررسی ماتریس سختی سازه است. در صورتی که ماتریس سختی، معین مثبت⁵ باشد، سازه پایدار سینماتیکی است. در صورتی که سازه ای این قید را نقض کند مقدار بزرگی به برازندگی سازه اضافه می‌شود تا احتمال بقای آن را کاهش دهد.

قید G3 و G4: در صورتی که سازه‌ای دو قید قبلی را نقض نکند، زیربرنامه آنالیز المان محدود⁶ (FEA) الگوریتم سازه را مورد تحلیل قرار داده و مقدار تنش در المان‌های سازه و مقدار جابجایی در گره‌های آن را محاسبه می‌کند. قید G3 بررسی می‌کند که تنش در المان‌های سازه از مقدار مجاز بیشینه تنش در سازه بیشتر نشده باشد و قید G4 مقدار جابجایی در گره‌های سازه را نسبت به مقدار مجاز جابجایی سازه می‌سنجد. در صورتی که هر کدام از قیدها نقض شوند مقدار جریمه ای به صورت جریمه عملگر پرانتزی⁷ [15] به برازندگی سازه اضافه می‌گردد. σ_i ، δ_i^{allow} و δ_j^{allow} به ترتیب بیانگر مقدار تنش در المان i ام، مقدار مجاز تنش در المان i ام، مقدار جابجایی در گره z ام و مقدار مجاز جابجایی در گره z ام هستند.

قید G5: این قید عدم نقض مقدار حداقل و حداکثر سطح مقطع (A_i^{max} و A_i^{min}) برای هر مساله را بررسی می‌کند و به علت این که خود الگوریتم به صورت خودکار سطوح مقاطع را در بازه مجاز تعریف می‌کند، این

قید خود به خود اقلان شده است.

متغیرهای طراحی: $A = [A_1, A_2, \dots, A_m]$

به منظور کمینه کردن: $f(A) = \sum_{i=1}^m \rho_i l_i A_i + P$

مقید به قیدهای: $G1 \equiv$ سازه مطلوب باشد

$G2 \equiv$ سازه پایدار سینماتیکی باشد

$G3 \equiv \sigma_i \leq \sigma_i^{allow} \quad i = 1, 2, \dots, n$

$G4 \equiv \delta_j \leq \delta_j^{allow} \quad j = 1, 2, \dots, m$

$G5 \equiv A_i \in [A_i^{min}, A_i^{max}] \quad i = 1, 2, \dots, n$ (1)

که پارامتر جریمه (P) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \begin{cases} 10^9 & \text{اگر قید G1 نقض شود} \\ 10^8 & \text{اگر قید G2 نقض شود} \\ 10^5 \left(\sum_{i=1}^m |G3_i| + |G4_k| \right) & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (2)$$

3- الگوریتم ترکیبی برنامه‌ریزی ژنتیکی و نلدر-مید

در این قسمت اجزای الگوریتم پیشنهاد شده به تفصیل بیان می‌شود و هدف نهایی به دست آوردن پاسخی است که شکل درختی دارد و بیانگر یک سازه خرابی بهینه است. این سازه کمترین وزن را دارد و در محدوده ممکن فضای جستجو قرار می‌گیرد. "شکل 1" بیانگر فلوجارت الگوریتم پیشنهادی است.

3-1- مجموعه توابع و پایانه‌ها

اولین گام برای به کارگیری الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی تعیین مجموعه توابع و ترمینال‌ها برای شکل‌گیری درخت‌ها است. به منظور بهینه‌سازی سازه، مجموعه توابع به صورت مجموعه ای از سطوح مقاطع در محدوده مجاز مساله تعریف می‌شوند. مجموعه پایانه‌ها نیز کلیه گره‌های تعریف شده در سازه پیش فرض مساله را در نظر می‌گیرد. معادله (3) بیانگر این دو مجموعه است.

Function set = $[A_1, A_2, \dots, A_m]$

Terminal set =

$$[N_1(x_1, y_1, z_1), N_2(x_2, y_2, z_2), \dots, N_n(x_n, y_n, z_n)] \quad (3)$$

3-2- محاسبه برازندگی

برازندگی یک درخت مقداری است که موجب کسب رضایت طراح می‌شود و فرآیند تکاملی الگوریتم را به سمت محدوده ممکن در فضای طراحی هدایت می‌کند. همانگونه که در معادله (1) بیان شده است، مقدار برازندگی درخت‌ها در این الگوریتم مجموع وزن سازه و مقدار جریمه اختصاص یافته به آن (در صورت نقض یکی از قیدها) است.

3-3- ایجاد جمعیت اولیه

الگوریتم پیشنهادی، سازه پیش فرض مساله را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند. دویست درخت به صورت تصادفی و با استفاده از روش رشد درخت به صورت شیئی⁸ [6] و با استفاده از مجموعه توابع و پایانه‌ها تشکیل می‌شود. این درختها می‌توانند شامل یک پاسخ کامل و قابل قبول از نگاه طراح یا

1. Ground structure

2. Essential

3. Optional

4. Penalty approach

5. Positive-definite

6. Finite element analysis

7. Bracket-operator penalty

8. Ramped half-and-half method

یک درخت قابل تفسیر به تنها یک سازه باشد [3].

سو و یانگ روشی کارآمد به منظور حل مساله نگاشت با حفظ یک به یک بودن آن ارائه کردند [8]. در این روش نقش المان‌ها و گره‌های سازه را به ترتیب همان توابع و پایانه‌های درخت بازی می‌کنند. شکل بیانگر یک درخت است که از مجموعه توابع $[A_1, A_2, \dots, A_6]$ و مجموعه پایانه‌های $[N_1, N_2, \dots, N_4]$ تشکیل شده است. همانگونه که بیان شد توابع همان سطوح مقطع و پایانه‌ها نیز مختصات گره‌های سازه نگاشت شده هستند. توابع در این نوع درختها از نوع دودویی بوده و دو آرگومان را می‌پذیرند. خروجی یک تابع A_i به صورت زیر بیان می‌شود:

- در صورتی که تابع A_i از سمت چپ بالا منشعب شده از عنصری دیگر در درخت باشد، خروجی A_i عنصر منشعب شده از آن در سمت راست است.
- در صورتی که تابع A_i از سمت راست بالا منشعب شده از عنصری دیگر در درخت باشد، خروجی A_i عنصر منشعب شده از آن در سمت چپ است.

به عنوان مثال در "شکل 2"، A_1 ریشه درخت را تشکیل می‌دهد. از این عنصر، دو تابع A_2 و A_4 منشعب شده‌اند که همان آرگومان‌های این عنصر هستند. A_2 توابع A_3 و A_5 را به هم متصل می‌سازد و A_5 دو پایانه N_4 و N_2 را وصل می‌کند. این بدین معنی است که المانی با سطح مقطعی به مقدار A_5 این دو گره را در فضای طراحی به هم وصل می‌کند. به علت این که A_5 منشعب شده از عنصری است که در سمت راست بالای آن قرار دارد، مقدار خروجی این تابع عنصر انشعاب شده در سمت چپ یعنی N_4 است. به صورت مشابه، A_3 نیز پایانه‌های N_2 و N_1 را متصل می‌کند که خروجی آن N_1 است. در نتیجه با توجه به خروجی‌های تعیین شده، A_2 دو آرگومان N_4 و N_1 را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و سطح مقطع المان مابین این دو گره در فضای طراحی را مشخص می‌کند. پس از اعمال این فرآیند برای کلیه توابع درخت و تعیین خروجی هرکدام از آن‌ها، نحوه اتصال بین گره‌های سازه مشخص می‌شود. "شکل 3" بیانگر خرپای رمزگشایی شده از درخت "شکل 2" است. این خرپا از شش المان و چهار گره تشکیل می‌شود. فرآیند رمزکردن از خرپا به درخت نیز به تفصیل در [8] بیان شده است که از توضیح آن صرف نظر شده است.

3-5- تحلیل المان محدود و محاسبه برازندگی

پس از رمزگشایی کلیه درخت‌های یک جمعیت و نگاشت آن‌ها به سازه خرپایی، مقدار برازندگی هرکدام از سازه‌ها (به منظور تعیین کارایی هرکدام از درخت‌ها در حل مساله) باید محاسبه شود. بدین منظور تابع هدف، وزن سازه است و مقدار برازندگی مجموع تابع هدف و مقدار جریمه اختصاص یافته به سازه در صورت نقض قید طبق معادلات (1) و (2) است. در این مطالعه، به منظور انجام تحلیل المان محدود و تحلیل استاتیکی سازه از نرم‌افزار اپن سیز¹ [16] استفاده شده است. این نرم‌افزار بستر و ابزارهای مناسبی را به منظور به کارگیری انواع المان‌ها، مواد و روش‌های حل به منظور تحلیل سازه را فراهم می‌سازد. از این نرم‌افزار قبلا در تحلیل و مدل‌سازی‌های دیگری نیز استفاده شده است [17].

3-6- عملگرهای ژنتیکی و انتخاب نسل بعد

عملگرهای ژنتیکی پیوند و جهش نقش کلیدی در هدایت هدفمند فرآیند

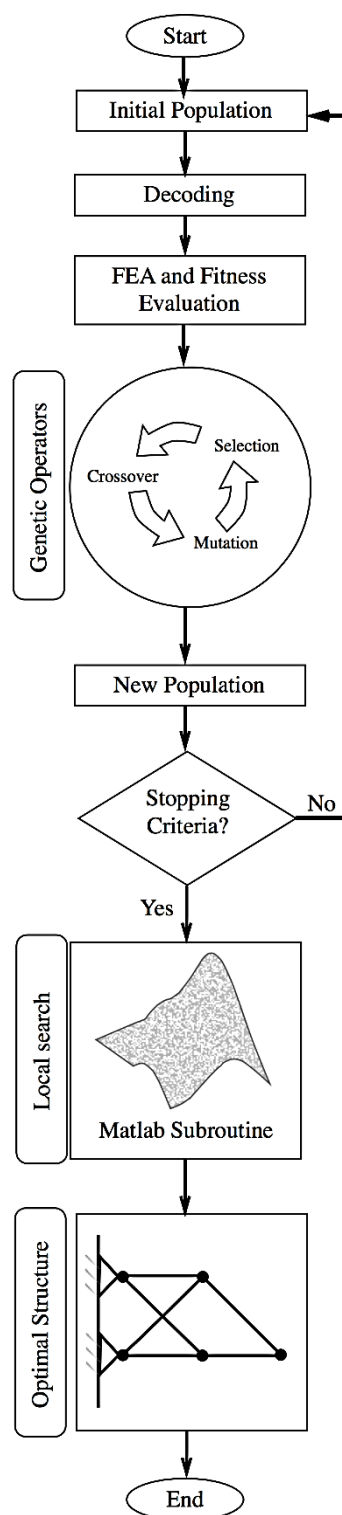


Fig. 1 The flowchart for the proposed algorithm

شکل 1 فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

پاسخ‌های ایتری باشند که در ادامه تعیین وضعیت می‌شوند.

3-4- رمزگشایی از درخت‌ها

چگونگی رمزگشایی یک درخت و نحوه خوانش یک سازه خرپا فاز مهمی از پروسه الگوریتم پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. نحوه نگاشت از درخت رمز شده به یک پاسخ (سازه) باید یک به یک باشد به این مفهوم که

¹.Opensees

و کل فرآیند الگوریتم تکرار می‌شود. این تکرار تا جایی ادامه دارد که شرط پایان الگوریتم در فاز اول اقیان شود. این شرط در این مطالعه، بیشینه تعداد نسل است که مقدار آن 500 نسل است. به این معنی که الگوریتم تا پانصد نسل ادامه می‌یابد. بهترین پاسخ یافت شده طی این فرآیند، پاسخ نهایی الگوریتم در فاز اول است.

3-8- اعمال الگوریتم جستجوی محلی

پس از تعیین سازه بهینه از نگاه الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی (که می‌تواند پاسخ کلی یا شبه کلی مساله باشد)، الگوریتم جستجوی محلی نلدر-مید به منظور بهبود پاسخ یافت شده در همسایگی آن به کار گرفته می‌شود. برای اعمال نلدر-مید از جعبه ابزار بهینه‌سازی برنامه متلب استفاده شده است. بدین منظور توپولوژی سازه بهینه، ثابت در نظر گرفته شده و تنها مقادیر سطوح مقاطع آن به عنوان متغیرهای طراحی مورد بهینه‌سازی توسط نلدر-مید قرار می‌گیرند. پاسخ این مرحله به عنوان پاسخ بهینه کل الگوریتم ترکیبی در نظر گرفته می‌شود.

4- نتایج

به‌منظور سنجش الگوریتم پیشنهاد شده برای بهینه‌سازی خرابی‌ها، این الگوریتم روی تعدادی مساله سازه فضاکار پیاده‌سازی شده است و نتایج حاصل با دیگر مطالعات پیشین مقایسه شده است. به‌علت این‌که الگوریتم‌های تکاملی ذات تصادفی دارند، برای هر کدام از مثال‌ها سی مرتبه الگوریتم پیشنهادی اجرا شده است و بهترین نتیجه حاصل به عنوان پاسخ بهینه ارائه شده است.

4-1- سازه بیست و پنج المانه

"شکل 4" سازه پیش‌فرض این مساله را نشان می‌دهد. این مساله از [18] اقتباس شده است. این سازه از بیست و پنج المان و ده گره تشکیل می‌شود. به‌دلیل این‌که سازه باید متقارن باشد این المان‌ها به هشت دسته تقسیم بندی می‌شوند که متغیرهای طراحی مساله در نظر گرفته می‌شوند. چهار گره تحت بارگذاری هستند و چهار گره دیگر نیز گره‌های تکیه گاهی هستند و دو گره آزاد هستند.

قید تنش مجاز برای سازه (σ^{allow}) برای هر دو حالت کششی و فشاری برای المان‌ها وضعیت مختلفی دارد که در جدول قید شده است. مقدار چگالی ماده 2767.990 kg/m^3 (0.1 pci) و مقدار مدول الاستیسیته آن 69.950 Gpa (10000 ksi) است. محدوده مجاز سطوح مقاطع برای سازه نیز از 0.0645 cm^2 تا 21.9354 cm^2 ($0.01 - 3.4 \text{ in}^2$) است. مقدار قید بیشینه جابجایی سازه (δ^{allow}) نیز 8.89 mm (0.35 in) برای کلیه گره‌ها در کلیه جهات است. سازه تحت بارگذاری چندگانه⁴ است به این صورت که سازه بهینه باید نسبت به هر دو نوع بارگذاری بهینه باشد. اطلاعات بارگذاری برای این مساله در جدول 1 فهرست شده است.

"شکل 5" بیانگر بهبود بهترین پاسخ طی فرآیند تکامل برای این مثال است. الگوریتم پیشنهادی پس از شروع با بهترین پاسخ به مقدار 310.49 kg (684.51 lb) در نسل اول پس از طی 74 نسل به مقدار 247.30 kg (545.19 lb) و پس از طی 500 نسل تغییری در این پاسخ ایجاد نشد و الگوریتم همگرا شد. پس از اعمال الگوریتم جستجوی محلی نلدر-مید، پاسخ به دست آمده در مرحله قبل به مقدار

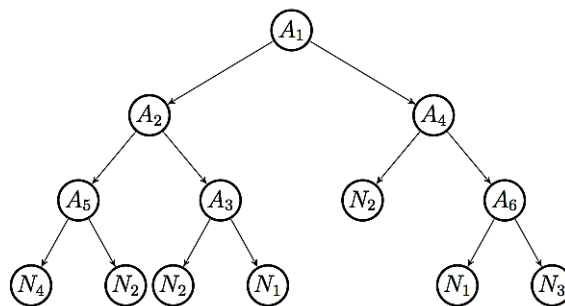


Fig. 2 Genetic programming tree-structure of a truss

شکل 2 نمایش درختی یک سازه در الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیکی

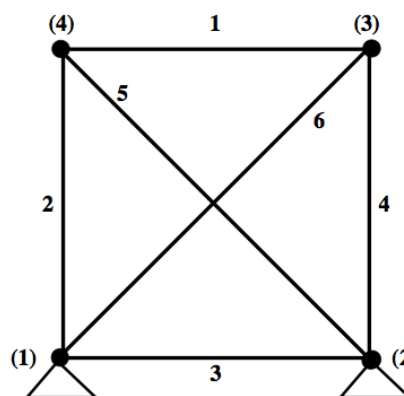


Fig. 3 Illustration of a decoded truss

شکل 3 نمایش یک سازه رمزگشایی شده

تکامل دارند. عملگر پیوند دو والد (درخت) را انتخاب کرده و هر کدام از آن‌ها را از دو نقطه تصادفی قطع می‌کند. سپس با جابجایی قسمت‌های قطع شده دو درخت با یکدیگر موجب تولید شدن دو فرزند (درخت) جدید می‌شود که به مفهوم پیمایش فضای جستجو است. عملگر جهش با انتخاب یک والد و از یک نقطه تصادفی، کل انشعابات درخت را از آن نقطه، حذف کرده و یک درخت جدید را در همان نقطه جایگزین می‌کند. این عملگر موجب فرار الگوریتم از نقاط بهینه محلی (که می‌توانند الگوریتم را گرفتار کنند) می‌شود. روش انتخاب برای هر دو الگوریتم به صورت تورنمنت¹ است. احتمال اعمال شدن هر کدام از عملگرهای ژنتیکی پیوند و جهش در این مطالعه به ترتیب 80 و 10 درصد در نظر گرفته شده است.

پس از اعمال شدن عملگرهای ژنتیکی، کلیه درخت‌های حاصل از این عملگرها و درخت‌های جمعیت اولیه در یک محل تجمع می‌شوند. سپس فرآیند انتخاب برای نسل بعد به صورت متناسب با برازندگی² صورت می‌گیرد. به این معنی که الگوریتم برای سازه‌هایی با برازندگی بهتر احتمال بقای بالاتری را در نظر می‌گیرد. در این مطالعه برای عملگر انتخاب برای نسل بعد از روش چرخ گردان³ استفاده شده است. به تعداد اندازه جمعیت اولیه، روش چرخ گردان اعمال شده و همین تعداد درخت به منظور تشکیل جمعیت برای نسل بعد انتخاب می‌شوند.

3-7- شرط پایان الگوریتم در فاز اول و استخراج پاسخ

پس از طی شدن مرحله قبل، جمعیت نسل بعد جایگزین جمعیت اولیه شده

¹. Tournament

². Fitness proportionate

³. Roulette wheel

⁴. Multiple loading

جدول 1 شرایط بارگذاری برای سازه فضاکار 25 المانه

Table. 1 Loading conditions for the 25-bar spatial truss

بارگذاری حالت دوم		بارگذاری حالت اول		گره	
P_z (kN)	P_y (kN)	P_x (kN)	P_z (kN)	P_y (kN)	P_x (kN)
-22.5	44.5	4.45	-22.5	89	0
-22.5	44.5	0	-22.5	-89	0
0	0	22.5	0	0	0
0	0	22.5	0	0	0

ازدحام ذرات، جستجوی هارمونی [22]، و الگوریتم بهینه‌سازی تبخیر آب [23] مقایسه شده است.

سازه بهینه حاصل در "شکل 6" نشان داده شده است. این سازه دو دسته المان را زائد تشخیص داده و تمام گره‌های فضای طراحی را درگیر می‌سازد. جدول 2 سطوح مقطع و وزن این سازه بهینه را در مقایسه با مطالعات پیشین فهرست کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پاسخ یافت شده توسط الگوریتم پیشنهادی از 0.03 درصد تا 0.09 درصد وزن سازه‌های یافت شده در مطالعات پیشین را بهبود بخشیده است.

4-2- سازه چهار طبقه 72 المانه

"شکل 7" سازه پیش‌فرض این مساله را نشان می‌دهد. این مساله از [18] اقتباس شده است. این سازه از هفتاد و دو المان و بیست گره تشکیل می‌شود. به دلیل این‌که سازه باید متقارن باشد این المان‌ها به شانزده دسته تقسیم بندی می‌شوند که متغیرهای طراحی مساله در نظر گرفته می‌شوند. چهار گره تحت احتمال بارگذاری هستند و چهار گره دیگر نیز گره‌های تکیه گاهی هستند و بقیه گره‌ها آزاد هستند.

قید تنش مجاز برای سازه (σ^{allow}) برای هردو حالت کششی و فشاری برای المان‌ها مقدار 172.375 MPa (25 ksi) است. مقدار چگالی ماده 2767.990 kg/m³ (0.1 pci) و مقدار مدول الاستیسیته آن 69.950 Gpa (10000 ksi) است. مقدار قید بیشینه جابجایی سازه (δ^{allow}) نیز 6.35 mm (0.25 in) برای کلیه گره‌های سقف سازه و در دو جهت X و Y است. این سازه دو حالت بارگذاری دارد که هرکدام جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند و شرایط بارگذاری در جدول فهرست شده است. برای حالت بارگذاری اول محدوده مجاز سطوح مقطع برای سازه نیز از 0.06452 تا 20.6451 cm² (0.1 – 3.2 in²) است. و برای سازه دوم نیز محدوده مجاز سطوح مقطع از 0.0645 تا 21.9354 cm² (0.01 – 3.4 in²) است. نتیجه حاصل با حل همین مساله برای توسط دیگر الگوریتم‌ها در مطالعات پیشین از جمله الگوریتم‌های تخمین تقریبی [19]، جستجوی هارمونی [20]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات [18]، بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری [21] و الگوریتم ژنتیک [24] مقایسه شده است.

4-2-1- حالت اول

الگوریتم پیشنهادی پس از شروع با بهترین پاسخ به مقدار 511.55 kg (1127.77 lb) در نسل اول پس از طی 463 نسل به مقدار 54.83 kg (120.89 lb) و پس از طی 500 نسل تغییری در این پاسخ ایجاد نشد و الگوریتم همگرا شد. پس از اعمال الگوریتم جستجوی محلی نلدر-مید، پاسخ به‌دست آمده در مرحله قبل به مقدار 46.93 kg (103.45 lb) بهبود یافت.

سازه بهینه حاصل در "شکل 8" نشان داده شده است. این سازه شش دسته المان را زائد تشخیص داده و تمام گره‌های فضای طراحی را درگیر می‌سازد.

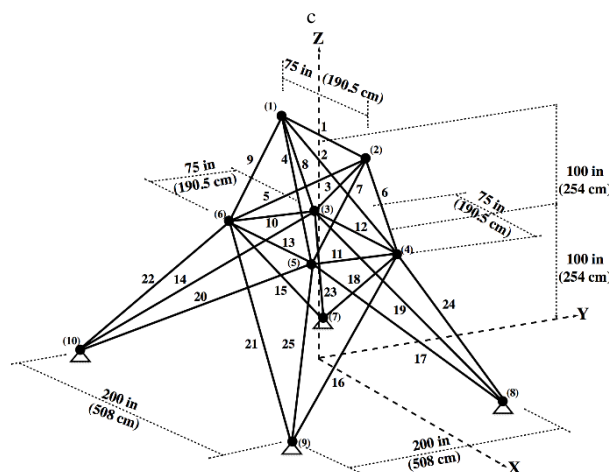


Fig. 4 Ground structure for the 25-bar spatial truss

شکل 4 سازه پیش‌فرض برای سازه فضاکار 25 المانه

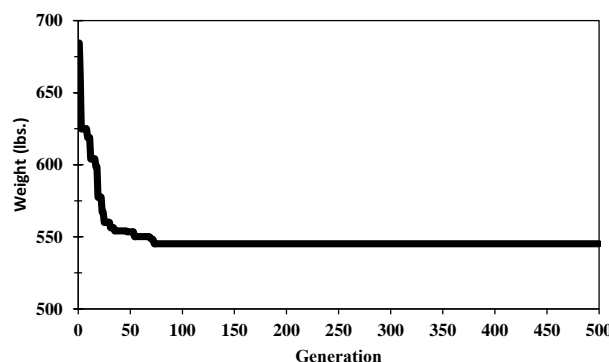


Fig. 5 The improvement of the best solution for the 25-bar special truss during the run

شکل 5 نمودار بهبود بهترین پاسخ برای سازه 25 المانه فضاکار در طی اجرای الگوریتم

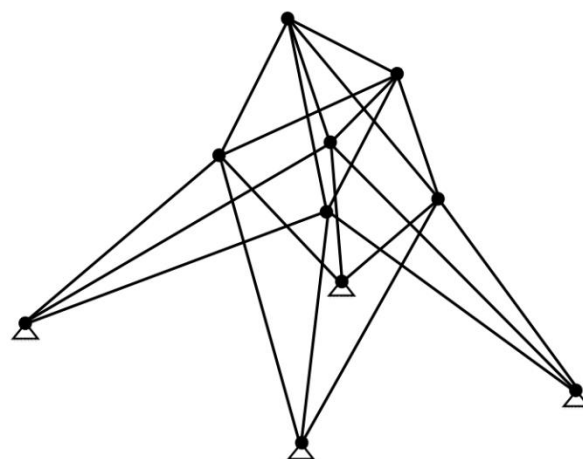


Fig. 6 Optimal structure for the 25-bar spatial truss

شکل 6 سازه بهینه برای سازه فضاکار 25 المانه

247.17 kg (544.92 lb) بهبود یافت. نتیجه حاصل با حل همین مساله توسط دیگر الگوریتم‌ها در مطالعات پیشین از جمله الگوریتم‌های تخمین تقریبی [19]، جستجوی هارمونی [20]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات [18]، بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری [21]، الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی

جدول 2 سطوح مقاطع بهینه برای سازه فضاکار 25 المانه

Table. 2 Optimal cross-sectional areas of 25-bar spatial truss structure

این مطالعه	سطوح مقاطع بهینه (in ²)						دسته المان‌ها
	[23]	[22]	[21]	[18]	[20]	[19]	
0.0103	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0470	0.0100	A ₁
1.9991	1.9814	2.0712	2.0712	1.9700	2.0220	1.9640	A ₂ -A ₅
2.9694	3.0023	2.9570	2.9570	3.0160	2.9500	3.0330	A ₆ -A ₉
-	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	A ₁₀ -A ₁₁
-	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0140	0.0100	A ₁₂ -A ₁₃
0.6847	0.6827	0.6891	0.6891	0.6940	0.6880	0.6700	A ₁₄ -A ₁₇
1.6782	1.6778	1.6209	1.6209	1.6810	1.6570	1.6800	A ₁₈ -A ₂₁
2.6679	2.6612	2.6768	2.6768	2.6430	2.6630	2.6700	A ₂₂ -A ₂₅
544.92	545.16	545.09	545.09	545.19	544.38	545.22	وزن سازه
-	0.044	0.031	0.031	0.050	0.099	0.055	درصد بهبود وزن در این مطالعه

1 in² = 6.452 cm²

1 lb = 0.454 kg

در کنار حذف المان‌های زائد از فضای طراحی دارد که برتری قابل توجه این الگوریتم نسبت به دیگر مطالعات است. توانایی الگوریتم در شناسایی المانهای زائد منجر به یافتن پاسخ‌های بهتر برای همه مثالها شده است و مخصوصاً این موضوع در مثال‌های سازه فضاکار 72 المانه محسوس‌تر است. الگوریتم معرفی شده با شناسایی المان‌های زائد و پخش کردن تنش کل سازه در المان‌های لازم سازه بدون نقض قیدهای جابجایی و تنش در سازه، خرابیهای سبکتری را به عنوان پاسخ بهینه ارائه کرده است. به منظور ادامه مطالعه در آینده پیشنهاد می‌شود که به منظور توسعه الگوریتم پیشنهادی، قیدهای دینامیکی همچون فرکانس طبیعی سازه نیز در نظر شود و همچنین می‌توان با در نظر

جدول 3 شرایط بارگذاری برای سازه فضاکار 72 المانه

Table. 3 Loading conditions for the 72-bar spatial truss

بارگذاری حالت دوم			بارگذاری حالت اول			گره
P _z (kN)	P _y (kN)	P _x (kN)	P _z (kN)	P _y (kN)	P _x (kN)	
-22.5	0	0	-22.5	22.5	22.5	17
-22.5	0	0	0	0	0	18
-22.5	0	0	0	0	0	19
-22.5	0	0	0	0	0	20

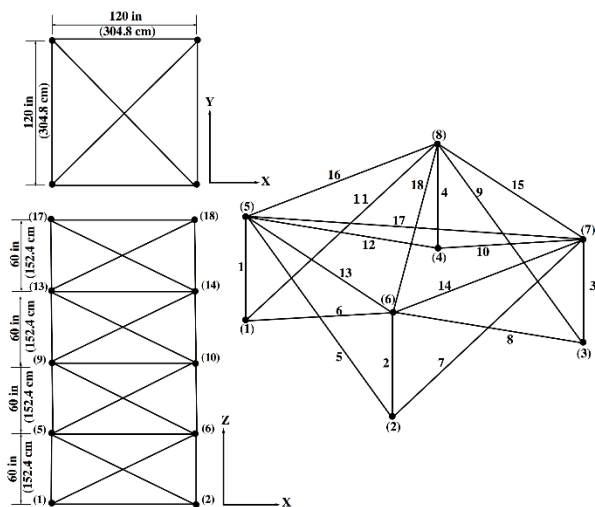


Fig. 7 Ground structure for the 72-bar spatial truss

شکل 7 سازه پیش‌فرض برای سازه فضاکار 72 المانه

جدول 4 سطوح مقاطع و وزن این سازه بهینه را در مقایسه با مطالعات پیشین فهرست کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پاسخ یافت شده توسط الگوریتم پیشنهادی از 72.01 درصد تا 72.75 درصد وزن سازه‌های یافت شده در مطالعات پیشین را بهبود بخشیده است.

4-2-2- حالت دوم

الگوریتم پیشنهادی پس از شروع با بهترین پاسخ به مقدار 316.34 kg (697.41 lb) در نسل اول پس از طی 377 نسل به مقدار 11.89 kg (26.22 lb) و پس از طی 500 نسل تغییری در این پاسخ ایجاد نشد و الگوریتم همگرا شد. پس از اعمال الگوریتم جستجوی محلی نلدر-مید، پاسخ به دست آمده در مرحله قبل به مقدار 11.69 kg (25.78 lb) بهبود یافت.

سازه بهینه حاصل در "شکل 9" نشان داده شده است. این سازه هفت دسته المان را زائد تشخیص داده و تمام گره‌های فضای طراحی را درگیر می‌سازد. جدول 5 سطوح مقاطع و وزن این سازه بهینه را در مقایسه با مطالعات پیشین فهرست کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پاسخ یافت شده توسط الگوریتم پیشنهادی از 92.91 درصد تا 93.15 درصد وزن سازه‌های یافت شده در مطالعات پیشین را بهبود بخشیده است.

5- جمع‌بندی

در این مقاله، الگوریتمی ترکیبی یافته از برنامه‌ریزی ژنتیکی و الگوریتم جستجوی محلی نلدر-مید به منظور بهینه کردن وزن سازه‌های فضاکار تحت قیود استاتیکی ارائه شد. هدف اصلی پیدا کردن اندازه سطوح مقاطع المان‌های سازه یا همان متغیرهای طراحی بود و ذات روش برنامه‌ریزی ژنتیکی ما را قادر ساخت تا علاوه بر بهینه‌سازی اندازه، بهینه‌سازی توپولوژی نیز همزمان صورت پذیرد که منجر به کشف سازه‌هایی با توپولوژی‌های جدید نسبت به مطالعات پیشین و همچنین کاهش محسوس وزن سازه‌ها در بعضی موارد شد. جمعیت اولیه‌ای که به صورت کاملاً تصادفی در فضای طراحی ایجاد شده بود در ادامه طی یک جستجوی هدفمند در فضای جستجو منجر به یافتن سازه بهینه‌ای شد که سپس برای بهبود آن از نلدر-مید استفاده شد تا در همسایگی سازه یافت شده در مرحله قبل، سازه بهتری پیدا بشود. الگوریتم پیشنهاد شده نشان داد که قابلیت به کارگیری المان‌های جدید را

جدول 4 سطوح مقاطع بهینه برای سازه فضاکار 72 المانه - حالت اول

Table 4 Optimal cross-sectional areas of 72-bar spatial truss structure - Case 1

این مطالعه	سطوح مقاطع بهینه (in ²)				دسته المان
	[21]	[18]	[20]	[19]	
0.4663	1.9064	1.8570	1.7901	2.078	A ₁ -A ₄
0.1130	0.5061	0.5050	0.5210	0.503	A ₅ -A ₁₂
-	0.1000	0.1000	0.1000	0.1	A ₁₃ -A ₁₆
-	0.1000	0.1000	0.1000	0.1	A ₁₇ -A ₁₈
0.2471	1.2617	1.2550	1.2290	1.107	A ₁₉ -A ₂₂
0.1145	0.5111	0.5030	0.5220	0.579	A ₂₃ -A ₃₀
-	0.1000	0.1000	0.1000	0.1	A ₃₁ -A ₃₄
-	0.1000	0.1000	0.1000	0.1	A ₃₅ -A ₃₆
0.2734	0.5317	0.4960	0.5170	0.264	A ₃₇ -A ₄₀
0.1133	0.5159	0.5060	0.5040	0.548	A ₄₁ -A ₄₈
-	0.1000	0.1000	0.1000	0.1	A ₄₉ -A ₅₂
0.2048	0.1000	0.1000	0.1010	0.151	A ₅₃ -A ₅₄
-	0.1562	0.1000	0.1560	0.158	A ₅₅ -A ₅₈
0.2255	0.5493	0.5240	0.5470	0.594	A ₅₉ -A ₆₆
0.1356	0.4097	0.4000	0.4420	0.341	A ₆₇ -A ₇₀
0.1629	0.5698	0.5340	0.5900	0.608	A ₇₁ -A ₇₂
103.45	379.63	369.65	379.27	388.63	وزن سازه
-	72.750	72.014	72.724	72.381	درصد بهبود وزن در این مطالعه

1 in² = 6.452 cm²
1 lb = 0.454 kg

جدول 5 سطوح مقاطع بهینه برای سازه فضاکار 72 المانه - حالت دوم

Table 5 Optimal cross-sectional areas of 72-bar spatial truss structure - Case 2

این مطالعه	سطوح مقاطع بهینه (in ²)				دسته المان
	[21]	[18]	[20]	[24]	
0.2166	1.8929	1.9070	1.9630	2.7550	A ₁ -A ₄
0.0122	0.5160	0.5240	0.4810	0.5100	A ₅ -A ₁₂
0.0116	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	A ₁₃ -A ₁₆
-	0.0100	0.0100	0.0110	0.0100	A ₁₇ -A ₁₈
0.2210	1.2917	1.2880	1.2330	1.3700	A ₁₉ -A ₂₂
0.0114	0.5176	0.5230	0.5060	0.5070	A ₂₃ -A ₃₀
-	0.0100	0.0100	0.0110	0.0100	A ₃₁ -A ₃₄
-	0.0100	0.0100	0.0120	0.0100	A ₃₅ -A ₃₆
0.2246	0.5229	0.5440	0.5380	0.4810	A ₃₇ -A ₄₀
-	0.5192	0.5280	0.5330	0.5080	A ₄₁ -A ₄₈
-	0.0100	0.0190	0.0100	0.0100	A ₄₉ -A ₅₂
-	0.0997	0.0200	0.1670	0.6430	A ₅₃ -A ₅₄
0.2061	0.1679	0.1760	0.1610	0.2150	A ₅₅ -A ₅₈
0.0120	0.5359	0.5350	0.5420	0.5180	A ₅₉ -A ₆₆
0.0118	0.4457	0.4260	0.4780	0.4190	A ₆₇ -A ₇₀
-	0.5818	0.6120	0.5510	0.5040	A ₇₁ -A ₇₂
25.78	363.84	364.86	364.33	376.5	وزن سازه
-	92.914	92.934	92.924	93.153	درصد بهبود وزن در این مطالعه

1 in² = 6.452 cm²
1 lb = 0.454 kg

گرفتن انتظارات شخص تصمیم گیرنده و طراح، امکان ارائه الگوریتمی چندهدفی به منظور به کارگیری ترجیحات شخص خیره مورد مطالعه قرار بگیرد.

6- مراجع

- [1] G. N. Vanderplaats, F. Moses, Automated design of trusses for optimum geometry, *Journal of the Structural Division*, Vol. 98, No. 3, pp. 671-690, 1972.
- [2] R. T. Haftka, Z. Gürdal, Sensitivity of Discrete Systems, *Elements of Structural Optimization*, pp. 255-304, Springer Netherlands, 1992.
- [3] R. Kicinger, T. Arciszewski, K. D. Jong, Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art, *Computers & Structures*, Vol. 83, No. 23, pp. 1943-1978, 2005.
- [4] K. Deb, Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, No. 5, pp. 447-465, 2001.
- [5] W. Hare, J. Nutini, S. Tesfamariam, A survey of non-gradient optimization methods in structural engineering, *Advances in Engineering Software*, Vol. 59, pp. 19-28, 2013.
- [6] J. R. Koza, Genetic programming on the programming of computer programs by natural selection, *MIT Press*, Vol. 1, No. 2, 1992.
- [7] R. Poli, J. Koza, Genetic Programming, *Search Methodologies*, Springer US, pp. 143-185, 2014.
- [8] C. K. Soh, Y. Yang, Genetic programming-based approach for structural

- (PEER) Center, 2006.
- [17] A. Usmani, J. Zhang, J. Jiang, Y. Jiang, I. May, Using opensees for structures in fire, *Journal of Structural Fire Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 57-70, 2012.
- [18] L. J. Li, Z. B. Huang, F. Liu, Q. H. Wu, A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures, *Computers & Structures*, Vol. 85, No. 7, pp. 340-349, 2007.
- [19] L. A. Schmit, B. Farshi, Some approximation concepts for structural synthesis, *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 5, pp. 692-699, 1974.
- [20] K. S. Lee, Z. W. Geem, A new structural optimization method based on the harmony search algorithm, *Computers & Structures*, Vol. 82, pp. 781-798, 2004.
- [21] S. O. Degertekin, M. S. Hayalioglu, Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization, *Computers & Structures*, Vol. 119, pp. 177-188, 2013.
- [22] A. Kaveh, T. Bakhshpoori, E. Afshari, An efficient hybrid particle swarm and swallow swarm optimization algorithm, *Computers & Structures*, Vol. 143, pp. 40-59, 2014.
- [23] A. Kaveh, T. Bakhshpoori, A new metaheuristic for continuous structural optimization: Water evaporation optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 54, No. 1, pp. 23-43, 2016.
- [24] H. Adeli, S. Kumar, Distributed genetic algorithm for structural optimization, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 156-163, 1995.
- optimization, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 31-37, 2000.
- [9] Y. Yang, C. K. Soh, Fuzzy logic integrated genetic programming for optimization and design, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 249-254, 2000.
- [10] Q. Z. Zheng, O. M. Querin, D. C. Barton, Geometry and sizing optimisation of discrete structure using the genetic programming method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 31, No. 6, pp. 452-461, 2006.
- [11] M. Fenton, C. McNally, J. Byrne, E. Hemberg, J. McDermott, M. O'Neill, Automatic innovative truss design using grammatical evolution, *Automation in Construction*, Vol. 39, pp. 59-69, 2014.
- [12] M. Fenton, C. McNally, J. Byrne, E. Hemberg, J. McDermott, M. O'Neill, Discrete planar truss optimization by node position variation using grammatical evolution, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 20, No. 4, pp. 577-589, 2015.
- [13] J. A. Nelder, R. Mead, A simplex method for function minimization, *The Computer Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 308-313, 1965.
- [14] W. S. Dom, Automatic design of optimal structures, *Journal De Mecanique*, Vol. 3, pp. 25-52, 1964.
- [15] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, pp. 276-301, Chichester, John-Wiley, 2001.
- [16] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, G. L. Fenves et al., OpenSees command language manual, *Pacific Earthquake Engineering Research*