

بهینه سازی شکل و اندازه-شکل سازه‌های خرپا با روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر

علی قدوسیان^۱، امین نیکوبین^۲، مجتبی ریاحی وزواری^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۸/۱۹	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۷/۲	
واژگان کلیدی: فراابتکاری، الگوریتم مثلث بهینه‌گر، سازه‌های خرپا، بهینه سازی شکل، بهینه سازی اندازه-شکل.	در این مقاله روش بهینه سازی فراابتکاری جدید تحت عنوان الگوریتم مثلث بهینه‌گر برای پایین آوردن وزن سازه‌های خرپا ارائه شده است. این روش از مثلث الهام گرفته است. در این روش بردار اولیه متغیرهای طراحی بعنوان قاعده مثلث (سطر اول) در نظر گرفته می‌شوند. سپس توابع هدف محاسبه و بهترین و بدترین پاسخ مشخص می‌شوند. بدترین پاسخ از جمعیت حذف می‌گردد و بقیه جمعیت با بازیابی سطر دوم را تشکیل می‌دهند. این عمل ادامه پیدا می‌کند تا به راس مثلث همان جواب بهینه برسد. در تکرار دوم، تعداد مشخصی از متغیرهای اولیه طراحی بوسیله جواب بهینه مثلث اول بازیابی و باقیمانده این جمعیت، جهت گریز از بهینه‌های محلی در بازه اولیه ایجاد می‌شوند. به این صورت قاعده مثلث بهینه دوم تشکیل می‌گردد. بعد مراحل قسمت قبل انجام می‌شود تا پاسخ بهینه مثلث دوم بدست آید. این عملیات تا برآورده شدن شرط همگرایی ادامه پیدا می‌کند. جهت اثبات توانمندی‌های الگوریتم پیشنهادی، بهینه سازی شکل و اندازه-شکل چهار سازه خرپا انجام می‌گیرد. نتایج آماری بدست آمده از بهینه سازی سازه‌های خرپا قابلیت الگوریتم مثلث بهینه‌گر را جهت دستیابی به پاسخ‌های بهینه بهتر در مقایسه با روش‌های بهینه سازی دیگر نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

هدف و قیود مسئله، امکان نرسیدن به بهینه کلی مسئله به ویژه زمانی که نقطه شروع نزدیک یک بهینه محلی باشد، وجود دارد [۲]. علاوه بر این زمان حل این روش‌ها با افزایش تعداد متغیرهای طراحی به صورت شدیدی رشد می‌کند. از طرف دیگر یکی از مهمترین فرضیاتی که برای حل مسایل با روش‌های کلاسیک علاوه بر پیوسته و مشتق پذیر بودن توابع مسئله بهینه‌سازی باید در نظر گرفته شود، محدب بودن آنها است، که این شرط ممکن است برای مسئله درست نباشد.

محققین برای رفع مشکلات ذکر شده فوق برای روش‌های کلاسیک، روش‌های بهینه‌سازی جدیدی را ارائه کرده‌اند. این روش‌ها الهام گرفته از طبیعت و قوانین فیزیک هستند

تاکنون روش‌های بهینه‌سازی زیادی ارائه شده‌اند. با توجه به نیازهای جدید بشر و پیچیده‌تر شدن مسائل بهینه سازی مهندسی نیاز به وجود ابزارهای قوی برای این منظور احساس می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک با وجود اینکه عملکرد مناسبی دارند ولی با موانع و مشکلاتی نیز مواجه هستند [۱]. روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک علاوه بر نیاز به مشتق پذیری و پیوستگی تابع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mrv@semnan.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

می‌کند. همچنین برای نشان دادن کارایی روش در مسائل مهندسی، بهینه سازی سازه‌های خرپا در نظر گرفته شده است.

در طول دهه های اخیر، الگوریتم های مختلف برای مسایل بهینه سازی خرپا که بسیار محبوب در زمینه بهینه سازی ساختاری می‌باشند، استفاده شده است. به طور کلی، سه دسته اصلی در برنامه های کاربردی بهینه سازی ساختاری وجود دارد: الف) بهینه سازی اندازه: سطح مقطع اعضا به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند [۱۶]، [۱۷]. ب) بهینه سازی شکل: مختصات گره‌ها متغیرهای طراحی می‌باشند [۱۷]. ج) بهینه سازی توپولوژی: مکان لینک‌ها در محل اتصال گره‌ها، به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند [۱۸]. بهینه سازی ساختار خرپا به معنی انجام همزمان بهینه سازی توپولوژی، هندسه (شکل) و اندازه می‌باشد [۱۹]. بهینه سازی توپولوژی و اندازه سازه خرپا با محدودیت‌های متعدد، به طور گسترده توسط روش‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است. هندسه بهینه تا حد زیادی می‌تواند به عملکرد ساختار خرپا بهبود بخشد. بسیاری از تلاش‌ها برای بهینه سازی خرپا با پیکربندی ثابت، که معمولا با تجربه طراح طراحی شده اند، انجام می‌گیرد. اگر بهینه سازی خرپا در هندسه غیر بهینه انجام شود، بهینه سازی ممکن است نتیجه محدودی داشته باشد. در مقابل، اگر بهینه سازی اندازه بر روی یک پیکربندی مطلوب انجام شود، مزایای زیادی را می‌توان برای طراحی به دست آورد. در حال حاضر، استراتژی مشترک برای بهینه سازی شکل خرپا، تکنیک‌های برنامه نویسی ریاضی مانند SUMT [۲۰]، برنامه ریزی خطی متوالی [۲۱] یا روش های برنامه نویسی محدب [۲۲] می‌باشند. برای بهینه سازی اندازه-شکل سازه با توپولوژی ثابت، بهینه سازی همزمان سطح مقطع و هندسه لازم می‌باشد. این کار با تلفیق تکنیک‌های بهینه سازی اندازه و شکل با هدف مینیمم سازی وزن با وجود محدودیت‌های جابجایی گره‌ها

و به روش‌های فراابتکاری شهرت دارند. روش‌های فراابتکاری معمولا برای رسیدن به جواب بهینه دارای فرایند نسبتا یکسانی هستند. در بیشتر این روش‌ها، فرایند الگوریتم با ایجاد تعدادی جواب تصادفی در ناحیه امکان پذیر، شروع می‌شوند و سپس با یک سری فرایند به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کنند. با توجه به اینکه این الگوریتم‌ها مبتنی بر جمعیت بوده و در حین فرایند جستجو و حرکت به سمت جواب بهینه، برای جستجوی تصادفی نیز سهمی قائل می‌شوند، بنابراین توانایی فرار از دام بهینه محلی را داشته و با احتمال بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک به بهینه کلی می‌رسند [۳].

تاکنون روش‌های فراابتکاری زیادی مطرح گردیده است. در سال‌های اخیر تعداد ارائه این روش‌ها رو به افزایش بوده است. از بین آنها می‌توان به روش شبیه‌سازی آهسته سرد شدن که در آن یک ماده تا بالاتر از دمای ذوب گرم می‌شود و سپس به تدریج با تولید شبکه کریستالی سرد می‌شود [۴]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات که از رفتار اجتماعی حیوانات از جمله پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته است [۵]، الگوریتم ژنتیک که از علم ژنتیک الگو گرفته و یک کلاس خاص از الگوریتم‌های تکاملی است [۶]، بهینه سازی کلونی مورچگان که از رفتار جستجوگرانه مورچه‌ها استفاده کرده است [۷]، الگوریتم زنبور عسل [۸]، تئوری جستجوی هارمونی [۹]، الگوریتم جستجوی گرانشی [۱۰]، الگوریتم بهینه سازی کرم شب تاب [۱۱]، الگوریتم ذرات باردار [۱۲]، الگوریتم چرخه آب [۱۳]، الگوریتم اشعه تابش [۱۴] و الگوریتم انعکاس صدای دلفین‌ها [۱۵] اشاره کرد. از آنجایی که هیچ کدام از الگوریتم‌های گفته شده ادعائی مبنی بر بهینه بودن در کلیه مسائل مختلف خطی و غیر خطی، مقید و نامقید و مسائل مختلف فنی را ندارند، راه برای روش‌های اکتشافی جدید بازگذاشته شده است. بنابراین این مقاله یک روش ابتکاری نو برای بهینه سازی معرفی کرده، که از شکل هندسی مثلث الهام گرفته است. این روش با ایجاد مثلث‌های بهینه در هر تکرار متغیرهای طراحی را به سمت جواب بهینه عمومی هدایت

معمولا هر متغیر طراحی از یک لیست گسسته انتخاب می‌گردد. تابع هدف وزن سازه می‌باشد و طراحی باید قیدهای تنش، جابجایی و... را برآورده کند. بهینه سازی سازه‌ای با متغیرهای گسسته به شکل زیر فرموله می‌شود [۳۲].

$$f(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad \text{مینیمم} \quad (1)$$

مقید به:

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_N) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$x^d \in S_d = \{X_1, X_2, \dots, X_p\} \quad (3)$$

$f(X)$ تابع هدف که وزن سازه خرپا می‌باشد. N و m ترتیب تعداد متغیرهای طراحی و تعداد قیدهای نامساوی ($g_j(X) \leq 0$) هستند. S_d شامل تمام متغیرهای گسسته مجاز (X_1, X_2, \dots, X_p) که در آن p نشان دهنده متغیرهای در دسترس است، می‌باشد [۳۲].

۳- شرح روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر

حرکت از قاعده مثلث به سمت راس آن به خوبی مفهوم بهینه سازی را می‌رساند. در این روش در هر تکرار یک مثلث بهینه ایجاد می‌شود. در این صورت دو مکانیزم بهینه‌گر یکی در هر مثلث و دیگری در هر تکرار وجود دارد که سرعت همگرایی را بالا می‌برد.

مراحل الگوریتم مثلث بهینه‌گر:

۱- مقدار دهی اولیه شامل: تعداد جمعیت اولیه (NP)، تعداد تکرارها، تعیین حد پایین (X_{lower}) و حد بالا (X_{upper}) هر متغیر طراحی و مشخص کردن پارامترهای β, α که $1 < \alpha < 2$, $0 < \beta < NP$ می‌باشد.

۲- بردار اولیه متغیرهای طراحی (X^0) به تعداد NP تشکیل می‌شود (رابطه ۴). این بردار قاعده مثلث بهینه اول را تشکیل می‌دهد. تابع هدف برای متغیرها محاسبه می‌گردد و سپس بهترین پاسخ ($FLbest$) و بدترین پاسخ ($FLworst$) مشخص می‌شوند. بدترین پاسخ به همراه بردار متغیرهایش از جمعیت اولیه حذف می‌شود و

و تنش‌المان‌ها انجام می‌گیرد. چنین بهینه سازی، معمولا با تعداد زیادی از متغیرهای طراحی متشکل از مناطق مقطعی و مختصات گره‌ها مواجه هست. مقاله‌های بهینه سازی سازه‌ای مربوط، گودبرگ و سمتانی [۲۳]، جنکینس [۲۴]، آدلی و چنگ [۲۵]، راجو و کریشنامورتی [۲۶]، و چو [۲۷]، هانگ و هی [۲۸]، تانگ، تونگ و گا [۲۹]، هاسن، ابی و ارباتور [۳۰] و کاوه و کالتجری [۳۱] می‌باشند.

روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر^۱ با الگوریتم از شکل مثلث ایجاد شده است. این الگو بخوبی مفهوم بهینه سازی فراابتکاری، یعنی رقابت اعداد تصادفی جهت رسیدن به بهینه کلی همان راس مثلث، را می‌رساند. در هر تکرار بهینه سازی این روش یک مثلث بهینه تولید می‌گردد. بنابراین روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه-گر در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، دارای دو متد همگراگر، یکی در آغاز هر تکرار و دیگری در هر مثلث، می‌باشد.

این مقاله بصورت زیر سازماندهی شده است:

فرمول‌بندی مسائل بهینه سازی در بخش دو ارائه شده است. در بخش سوم روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر بطور کامل شرح داده شده است. بخش چهارم کاربرد الگوریتم مثلث بهینه‌گر را برای بهینه سازی سازه-های خرپا بیان می‌کند. در این بخش، بهینه سازی شکل دو سازه خرپا و بهینه سازی اندازه-شکل دو سازه خرپا، انجام می‌گیرد و نتایج بدست آمده از روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر با مراجع دیگر مقایسه می‌شوند. نهایتا نتیجه‌گیری در بخش پنج بیان می‌گردد.

۲- فرمول‌بندی مسائل بهینه سازی

مسئله بهینه سازی سازه‌ای بصورت مسئله برنامه نویسی غیرخطی فرموله می‌شود. برای بهینه سازی سازه‌های خرپا، سطح مقاطع اعضا و مختصات نقاط به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند.

^۱ TOA: Triangular Optimizer Algorithm

$$X0_{new} = X_{NewLower} + rand \\ \times (X_{NewUpper} \\ - X_{NewLower})$$

end

Part 2:

for $\beta + 1 : NP$

$$X0_{new} = X_{lower} + rand \\ \times (X_{upper} - X_{lower})$$

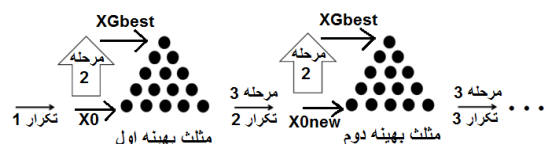
end

 X_{lower} ← حد پایین اولیه متغیرها X_{upper} ← حد بالای اولیه متغیرها $XGbest$ ← متغیرهای طراحی طراحی پاسخ بهینه مثلث قبلی $X_{NewLower}$ ← حد جدید پایین متغیرها $X_{NewUpper}$ ← حد جدید بالای متغیرها

رابطه ۶ شامل دو قسمت می‌باشد. قسمت اول عمل همگرایی را با تولید تعداد β تا متغیر طراحی در بازه جدید ایجاد شده حول جواب بهینه مثلث قبلی انجام می‌دهد. قسمت دوم با تولید تعداد، $NP - \beta$ ، تا متغیر طراحی در بازه اولیه تعریف شده، امکان ظهور نقاط بهینه جدید را فراهم می‌کند. در حقیقت قسمت دوم عمل گریز از بهینه های محلی را انجام می‌دهد.

۴- مراحل قسمتهای ۲ و ۳ تا اتمام تکرارها ادامه می‌یابد. یا این که با برآورده شدن شرط همگرایی مورد نظر از حلقه تکرار خارج شود. در نهایت جواب بهینه نهایی بدست می‌آید.

شکل ۱ نحوه انجام مراحل، با تعداد جمعیت اولیه ۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نحوه انجام الگوریتم مثلث بهینه‌گر با تعداد جمعیت اولیه ۵

جمعیت باقیمانده با اعمال فرمول ۵ سطر دوم مثلث بهینه اول را تشکیل می‌دهند. این عملیات تا رسیدن به جواب بهینه ($FGbest$)، سطر آخر (راس مثلث) ادامه پیدا می‌کند. بدین ترتیب در تکرار اول مثلث بهینه اول ایجاد می‌گردد.

$$X0 = X_{lower} + rand \times (X_{upper} - X_{lower}) \quad (4)$$

$$X_{i+1} = X_i + (\alpha^{-i})(XLbest - X_i) \\ + \frac{rand - 0.5}{3 + \ln(i + 1)} \quad (5)$$

 i ← شمارنده مراحل از قاعده تا راس مثلث X_{i+1} ← متغیرهای طراحی بازایی شده سطر $i+1$ X_i ← متغیرهای طراحی سطر i ام $XLbest$ ← متغیرهای طراحی پاسخ بهینه سطر i ام $rand$ ← عدد تصادفی بین صفر و یک \ln ← لگاریتم طبیعی

۳- در تکرار دوم متغیرهای اولیه طراحی ($X0_{new}$) توسط فرمول ۶ ایجاد می‌شوند. این بردار جدید قاعده مثلث بهینه دوم را تشکیل می‌دهد و سپس مراحل قسمت ۲ انجام می‌گردد تا به جواب بهینه مثلث بهینه دوم دست پیدا کند.

Part 1:

for $1 : \beta$

$$\text{if } (X_{upper} - XGbest) \\ < (XGbest - X_{lower})$$

$$X_{NewUpper} = XGbest + \frac{\beta}{NP} \\ \times (X_{upper} - XGbest)$$

$$X_{NewLower} = XGbest - \frac{\beta}{NP} \\ \times (X_{upper} - XGbest)$$

else

$$X_{NewUpper} = XGbest + \frac{\beta}{NP} \\ \times (XGbest - X_{lower}) \quad (6)$$

$$X_{NewLower} = XGbest - \frac{\beta}{NP} \\ \times (XGbest - X_{lower})$$

end

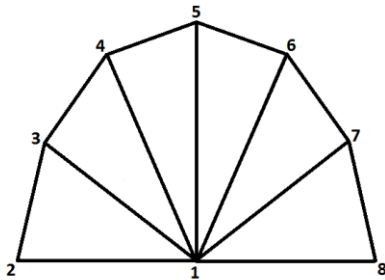
۴- مثال‌ها

باشند. جدول ۲ و شکل ۳ بترتیب نتایج بهینه و سازه بهینه بدست آمده را نشان می‌دهند.

جدول ۲- مقایسه پاسخ بهینه برای قوس مایکل

اولیه	بهینه	
	مرجع [۳۵]	
	الگوریتم مثلث	
	بهینه‌گر	
۵	(۰ - ۰/۵)	(۰ - ۱/۰۰۸)
۶ (گره (متر)	(۰/۵ - ۰/۵)	(۰/۵ - ۰/۸۶۷)
۷	(۱ - ۰/۵)	(۰/۸۴۸ - ۰/۵)
وزن (کیلوگرم)	۷۱/۴	۷۸/۶
	۷۸/۵۳۳۲	

جابجایی مشخصه (گره یک) از ۰/۴۸۰۵e-۲ به ۰/۱۱۶۸e-۲ متر کاهش یافت.



شکل ۳- شکل بهینه قوس مایکل

در جدول ۲ وزن سازه قوس مایکل، با روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر ۷۸/۵۳۳۲ کیلوگرم می‌باشد که در مقایسه با وزن ۷۸/۶ کیلوگرمی مرجع [۳۵]، کاهش یافته است.

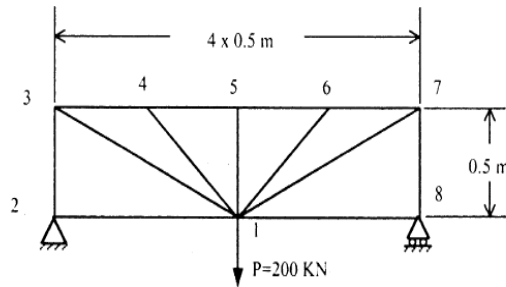
۴-۱-۲- پل ساده پشتیبانی

سازه پل ساده پشتیبانی برای بهینه سازی شکل استفاده می‌شود [۳۵]. المان‌های تیر برای اعضای گروه ۲ با سطح مقطع مستطیل شکل با ابعاد ۰/۰۰۵*۰/۰۰۸ مترمربع و اعضای گروه ۱ با سطح مقطع ۰/۰۰۵ مترمربع می‌باشند. مدول یانگ ۲/۱e۱۱ پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. جابجایی عمودی گره های ۸ و ۱۰ تحت بار مقید و ۰/۰۱ متر می

در این بخش، روش الگوریتم مثلث بهینه‌گر برای مسائل بهینه سازی شامل چهار سازه خریا استفاده می‌شود. الگوریتم مثلث بهینه‌گر در نرم افزار برنامه نویسی متلب اجرا می‌گردد. تجزیه و تحلیل تمام خریاها از طریق روش المان محدود (FEM) انجام می‌شود.

۴-۱-۱- قوس مایکل

طرح قوس نیم دایره محبوب مایکل اغلب توسط بهینه سازی توپولوژی [۳۳]، [۳۴] مورد توجه قرار می‌گیرد و همچنین برای بهینه سازی اندازه [۳۳] استفاده می‌شود. در مقاله وانگ، ژانگ و جیانگ [۳۵] بهینه سازی شکل این پیکربندی نیم دایره با محدودیت جابجایی انجام می‌گیرد.



شکل ۲- طرح اولیه قوس مایکل

طرح اولیه سازه در شکل ۲ نشان داده شده است و جابجایی مولفه عمودی گره گیرنده نیرو محدود و برابر با ۰/۱۱۶۸e-۲ متر است. مدول یانگ ۲/۱e۱۱ پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. سطح مقطع تمام اعضا ۰/۰۱۰ مترمربع می‌باشد. گره‌های ۳ و ۷ در جهت افقی و گره های ۴، ۵ و ۶ در جهت عمودی، قابلیت جابجایی دارند. در طول پروسه بهینه سازی، تقارن سازه حفظ می‌گردد.

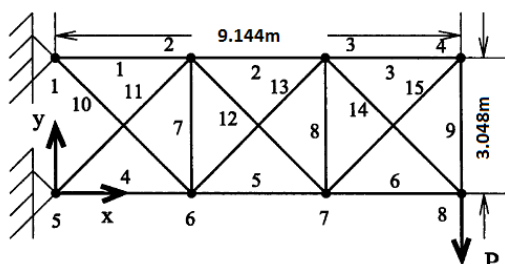
بازه متغیرهای طراحی ۱-۰/۰۱ متر است. جمعیت اولیه، ماکسیمم تکرار و β, α بترتیب ۳۰، ۹۰۰، ۱۲ و ۱/۳ می-

در جدول ۳ وزن سازه پل ساده پشتیبانی، با روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر ۴۸۹/۰۴۰۰ کیلوگرم می-باشد که در مقایسه با وزن ۴۸۹/۶ کیلوگرمی مرجع [۳۵]، کاهش یافته است.

۴-۲- بهینه سازی اندازه-شکل

۴-۲-۱- سازه خرپا ۱۵ عضوی

خرپا پانزده لینیکی نشان داده شده در شکل ۶ در نظر گرفته شده است. اطلاعات ورودی برای این خرپا در جدول ۴ آمده است.



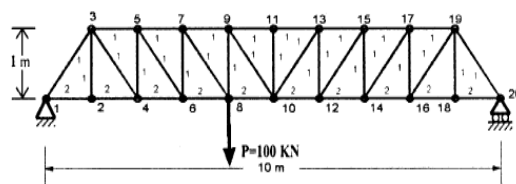
شکل ۶- طرح اولیه خرپا ۱۵ لینیکی

جدول ۴- داده های خرپا ۱۵ لینیکی

متغیرهای طراحی	
متغیرهای سطح	$A_i; i = 1, 2, \dots, 15$
متغیرهای هندسی	$x_r = x_p; x_r = x_v; y_r; y_p; y_r; y_p; y_r; y_p; y_r; y_p$
قیدها	
محدودیت تنش	$(\sigma_t)_i \leq 172.4 \text{ MPa}; i = 1, 2, \dots, 15$ $ (\sigma_c)_i \leq 172.4 \text{ MPa}; i = 1, 2, \dots, 15$
محدودیت-های جانبی برای متغیرهای هندسی (متر)	$2.54 \leq x_r \leq 3.556; 5.588 \leq x_p \leq 6.604$ $2.54 \leq y_r \leq 3.556; 2.54 \leq y_p \leq 3.556$ $1.27 \leq y_f \leq 2.286; -0.508 \leq y_g \leq 0.508$ $-0.508 \leq y_v \leq 0.508; 0.508 \leq y_\lambda \leq 1.524$ $P = 0.0254 \text{e-}2$
اطلاعات بارها	
	$node \lambda \rightarrow F_x = 0, F_y = -44.527 \text{ MN}$
خصوصیات مواد	
	$E = 6.895 \text{e}4 \text{ MPa}, \rho = 0.272 \text{ N/cm}^3$

جمعیت اولیه، ماکسیمم تکرار و β, α بترتیب ۳۵، ۱۱۵۰، ۱/۲ و ۱۵ می‌باشند. جدول ۵ پاسخ بهینه روش

باشد. پیکربندی اولیه در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. گره‌های پایین وتر ثابت باقی می‌مانند، درحالی‌که گره‌های بالای وتر در جهت عمودی منتقل می‌شوند. تقارن ساختار در طول فرآیند بهینه سازی حفظ می‌گردد. چنانچه شکل یا جدولی در یک ستون جا نگیرد، می‌توان آن را در دو ستون قرار داد.



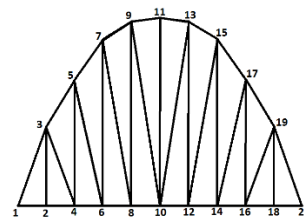
شکل ۴- طرح اولیه پل ساده پشتیبانی

بازه متغیرهای طراحی ۰/۰۱-۱ متر است. جمعیت اولیه، ماکسیمم تکرار و β, α بترتیب ۴۰، ۱۱۰۰، ۱۷ و ۱/۱۸ می‌باشند. جدول ۳ و شکل ۵ بترتیب نتایج بهینه و سازه بهینه بدست آمده را نشان می‌دهند.

جدول ۳- مقایسه پاسخ بهینه برای پل ساده پشتیبانی

اولیه	بهینه	
مرجع [۳۵]	الگوریتم مثلث بهینه‌گر	
۱۱	(۰ - ۱)	(۰ - ۲/۵۴۴)
۱۳	(۱ - ۱)	(۱ - ۲/۴۴۹)
۱۵ (متر)	(۲ - ۱)	(۲ - ۲/۱۷۲)
۱۷	(۳ - ۱)	(۳ - ۱/۶۱۶)
۱۹	(۴ - ۱)	(۴ - ۱/۰۴۲)
وزن (کیلوگرم)	۴۳۳/۵	۴۸۹/۶
	۴۸۹/۰۴۰۰	

جابجایی مشخصه گره ۸ از $1/7580 \text{e-}2$ به $0/9996 \text{e-}2$ متر کاهش یافت - جابجایی مشخصه گره ۱۰ از $1/8152 \text{e-}2$ به $0/9996 \text{e-}2$ متر کاهش یافت.

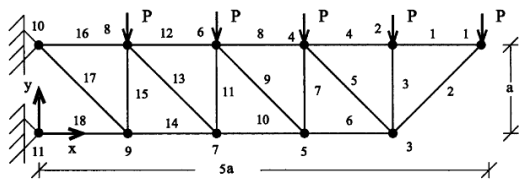


شکل ۵- شکل بهینه پل ساده پشتیبانی

۳۳/۷۳۲۵ کیلوگرم بدست آمده است که در مقایسه با وزن ۳۴/۷۸۴۸ کیلوگرمی مرجع [۳۶]، کاهش یافته است.

۴-۲-۲- سازه خرپا ۱۸ عضوی

در این بخش هدف بهینه سازی اندازه و هندسه خرپا ۱۸ لینیکی به نمایش گذاشته در شکل ۸ می باشد. اطلاعات ورودی در جدول ۶ نشان داده شده است. سطح مقاطع در ۴ مجموعه گروه بندی شده اند.



شکل ۸- طرح اولیه خرپا ۱۸ لینیکی (P و a بترتیب برابر با ۸۸/۹۶۴۴ کیلونیوتون و ۶/۳۵۰۰ متر می باشند)

جدول ۶- داده های خرپا ۱۸ لینیکی

متغیرهای طراحی	
$A_1 = A_7 = A_8 = A_{13} = A_{16}$	متغیرهای سطح
$A_2 = A_6 = A_{10} = A_{14} = A_{18}$	
$A_3 = A_9 = A_{11} = A_{15}$	
$A_4 = A_5 = A_{12} = A_{17}$	
$x_7; y_7; x_8; y_8; x_9; y_9; x_{10}; y_{10}$	متغیرهای هندسی
قیدها	
$(\sigma_t)_i \leq 137.9 \text{ MPa}; i = 1, 2, \dots, 18$	محدودیت تنش
$ (\sigma_c)_i \leq 137.9 \text{ MPa}; i = 1, 2, \dots, 18$	
$ (\sigma_c)_i \leq \frac{\alpha EA_i}{L_i^2}; i = 1, 2, \dots, 18$	محدودیت تنش کمانش اولر
$-5.715 \leq y_7, y_8, y_9, y_{10} \leq 6.223$	محدودیت
$19.685 \leq x_7 \leq 31.115; 13.335 \leq x_8 \leq 24.765$	های جانبی
$6.985 \leq x_9 \leq 18.415; 0.635 \leq x_{10} \leq 12.065$	برای متغیرهای هندسی (متر)
$P=0.0254$	
اطلاعات بارها	
$node 1, 2, 4, 6, 8 \rightarrow F_x = 0, F_y = -89.075 \text{ kN}$	
خصوصیات مواد	
$E = 6.895 \times 10^4 \text{ MPa}, \alpha = 4, \rho = 0.0272 \text{ N/cm}^3$	

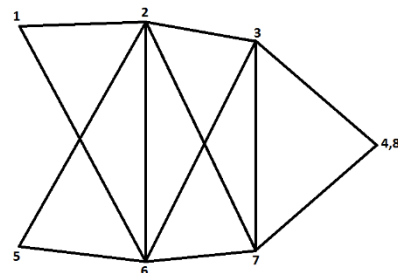
جمعیت اولیه، ماکسیمم تکرار و β, α بترتیب ۴۵، ۱۳۰۰، ۲۰ و ۱/۱۲ می باشند. جدول ۷ پاسخ بهینه روش الگوریتم مثلث بهینه گر را در مقایسه با مرجع [۳۶] نشان

الگوریتم مثلث بهینه گر را در مقایسه با مرجع [۳۶] نشان داده است. هندسه خرپا پس از بهینه سازی در شکل ۷ به نمایش گذاشته شده است. لازم به ذکر است که مختصات دو گره ۴ و ۸ در جهت y بسیار نزدیک به یکدیگر به دست آمده است.

جدول ۵- مقایسه پاسخ بهینه برای خرپا ۱۵ لینیکی

متغیرهای سطح (مترمربع)	الگوریتم مثلث بهینه گر	متغیرهای هندسی (متر)	الگوریتم مثلث بهینه گر	مرجع [۳۶]	الگوریتم مثلث بهینه گر
A1	۶/۹۷۴۲e-۴	X2	۶/۴۰۵۱e-۴	۲/۵۸۰۱	۳/۲۴۳۷
A2	۳/۴۷۷۴e-۴	X3	۳/۶۶۳۹e-۴	۵/۷۸۸۹	۶/۰۴۱۱
A3	۱/۸۵۱۶e-۴	Y2	۱/۶۱۲۳e-۴	۳/۴۲۳۹	۳/۱۰۲۷
A4	۶/۱۵۴۸e-۴	Y3	۵/۹۸۶۴e-۴	۳/۲۵۶۸	۲/۸۵۹۱
A5	۳/۴۷۷۴e-۴	Y4	۳/۹۱۳۵e-۴	۱/۳۹۳۵	۱/۴۰۲۱
A6	۰/۹۰۹۷e-۴	Y6	۱/۵۱۵۵e-۴	-۰/۴۱۷۸	-۰/۲۰۸۳
A7	۰/۷۱۶۱e-۴	Y7	۱/۲۲۵۸e-۴	-۰/۳۳۷۸	-۰/۰۶۳۳
A8	۰/۷۱۶۱e-۴	Y8	۰/۸۳۱۰e-۴	۱/۳۹۳۴	۱/۳۹۰۵
A9	۳/۴۷۷۴e-۴	وزن (کیلوگرم)			
A10	۲/۸۳۸۷e-۴				
A11	۳/۴۷۷۴e-۴	مرجع [۳۶]	الگوریتم مثلث بهینه گر		
A12	۱/۷۴۱۹e-۴				
A13	۱/۴۱۹۴e-۴				
A14	۰/۹۰۹۷e-۴				
A15	۱/۸۵۱۶e-۴				

ماکسیمم قدرمطلق تنش ۱۷۲/۳۶۲۰ مگاپاسکال



شکل ۷- شکل بهینه خرپا ۱۵ لینیکی

با توجه به جدول ۵ مشاهده می گردد که وزن خرپای پانزده عضوی با روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه گر

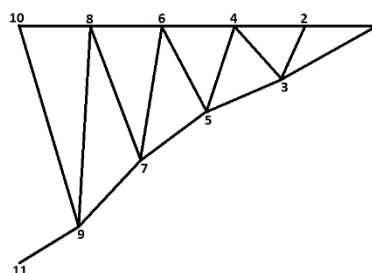
داده است. هندسه خرپا پس از بهینه سازی در شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است.

با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌گردد که وزن خرپای هجده عضوی با روش بهینه سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر ۲۰۵۴/۱۳۸۴ کیلوگرم بدست آمده است که در مقایسه با وزن ۲۰۵۵/۰۹۱۰ کیلوگرمی مرجع [۳۶]، کاهش یافته است.

جدول ۷- مقایسه پاسخ بهینه برای خرپا ۱۸ لینکی

متغیرهای سطح (مترمربع)	مرجع [۳۶]	الگوریتم مثلث	متغیرهای هندسی (متر)	مرجع [۳۶]	الگوریتم مثلث
A1	۸/۲۲۵۸e-۳	۸/۲۲۹۷e-۳	X3	۲۳/۳۰۳۲	۲۳/۲۹۱۹
A2	۱/۱۹۳۵e-۲	۱/۱۹۲۷e-۲	Y3	۴/۹۲۲۳	۴/۹۱۱۳
A3	۳/۰۶۴۵e-۳	۲/۸۵۹۴e-۳	X5	۱۶/۶۱۹۸	۱۶/۶۱۱۸
A5	۲/۰۹۶۸e-۳	۲/۰۹۳۰e-۳	Y5	۴/۰۶۲۶	۴/۰۶۱۶
وزن (کیلوگرم)					
مرجع [۳۶]		الگوریتم مثلث	X7	۱۰/۷۸۱۸	۱۰/۷۷۹۴
		بهینه‌گر	Y7	۲/۷۵۷۹	۲/۷۵۴۳
			X9	۵/۲۹۵۱	۵/۲۸۶۳
			Y9	۰/۹۵۵۹	۰/۹۵۵۰

ماکسیمم قدرمطلق تنش ۱۳۷/۸۹۴۵ مگاپاسکال



شکل ۹- شکل بهینه خرپا ۱۸ لینکی

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش فراابتکاری جدید و کارا برای حل مسائل بهینه سازی تحت عنوان الگوریتم مثلث بهینه‌گر ارائه کرده است. جهت نمایش کارایی روش در مسائل مهندسی، بهینه سازی اندازه و اندازه-شکل چهار سازه خرپا انجام شده است و بر اساس نتایج محاسباتی به دست آمده از چهار مسئله بهینه سازی خرپا، روش الگوریتم مثلث بهینه‌گر وزن سازه‌ی پایین‌تری از دیگر بهینه‌سازها پیدا کرده است. در نهایت روش الگوریتم مثلث بهینه‌گر از نظر الگوریتم، ساده و فقط دارای دو پارامتر ورودی β, α و از نظر کارایی روشی موثر و قابل اطمینان می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] AlRashidi, M. R., El-Hawary, M. E. (۲۰۰۷). "Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Solving the Discrete OPF Problem Considering the Valve Loading Effects". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 2030-2038.
- [2] Rao, S. S. (2009). "Engineering Optimization: Theory and Practice". 4th Edition, John Wiley and Sons.
- [3] Prugel-Bennett, A. (2010). "Benefits of a Population: Five Mechanisms that Advantage Population-Based Algorithms". Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, Vol. 14, No. 4, pp. 500-517.
- [4] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatto, M.P. Vecchi. (1983). "Optimization by simulated annealing". Science 220, pp. ۶۷۱-۶۸۰.
- [5] J. Kennedy, R.C. Eberhart. (1995). "Particle swarm optimization". in: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948.
- [6] M. Melanie. (1999). "An Introduction to Genetic Algorithms". Massachusetts: MIT Press.

- [7] M. Dorigo and C. Blum, (2005). "Ant colony optimization theory: A survey". *Theoretical Computer Science*, 344, pp. 243 – 278.
- [8] Pham DT, Ghanbarzadeh A, Koc E, Otri S, Rahim S and Zaidi M. (2005). "The Bees Algorithm". Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK.
- [9] Kang Seok Lee, Zong Woo Geem, (2005). "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice". *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 194, pp. ۳۹۰۲-۳۹۳۳.
- [10] Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi-pour, Saeid Saryazdi. (2009). "GSA: A Gravitational Search Algorithm". *Information Sciences* 179, pp 2232-2248.
- [11] Yang, X. S. (2009). "Firefly Algorithms for Multimodal Optimization". *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, Vol. 5792, pp. 169-178.
- [12] Kaveh, A., Talatahari, S. (2010). "A Novel Heuristic Optimization Method: Charged System Search". *Acta Mech*, Vol. 213, pp. 267-289.
- [13] Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A., Hamdi, M. (2012). "Water Cycle Algorithm—A novel Metaheuristic Optimization Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems". *Computers and Structures*, Vol. 110, pp. 151-166.
- [14] Kaveh, A., Khayatizad, M. (2012). "A New Meta-Heuristic Method: Ray Optimization". *Computers and Structures*, Vol. 112, pp. 283-294.
- [15] Kaveh, A., Farhodi, N. (2013). "A New Optimization Method: Dolphin Echolocation". *Advances in Engineering Software*, Vol. 59, pp. 53-70.
- [16] Kaveh A, Talatahari S. (2009). "Size optimization of space trusses using Big Bang–Big Crunch algorithm". *Comput Struct*; 87: pp. 1129-40.
- [17] Rahami H, Kaveh A, Gholipour Y. (2008). "Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm". *Eng Struct*; 30: pp. 2360-9.
- [18] Rasmussen MH, Stolpe M. (2008). "Global optimization of discrete truss topology design problems using a parallel cut-and-branch method". *Comput Struct*; 86: pp. 1527-38.
- [19] G.I.N. Rozvany, M. Zhou. (1996). "Advances in overcoming computational pitfalls in topology optimization". in: *Proc. of the Sixth AIAA/NASA/ISSMO Symp. on Multi-disc. Anal. and Optim.*, pp. 1122-1132.
- [20] L. Gil, A. Andreu. (2001). "Shape and cross-section optimization of a truss structure". *Comput. Struct.* 79, pp. 681-689.
- [21] N.L. Pedersen, A.K. Nielsen. (2001). "Optimization of practical trusses with constraints on eigenfrequencies, displacements, stresses and buckling". report no. 664, Technical University of Denmark.
- [22] W.H. Zhang, M. Domaszewski, C. Fleury. (1998). "A new mixed convex approximation method with applications for truss configuration optimization". *Struct. Optim.* 15, pp. 237-241.
- [23] Goldberg DE, Samtani MP. (1986). "Engineering optimization via genetic algorithm". *electronic computation*. New York: ASCE; pp. 471-6.
- [24] Jenkins WM. (1991). "Towards structural optimization via the Genetic algorithm". *Comput Struct* ;40: pp. ۱۳۲۱-۷.
- [25] Adeli H, Cheng NT. (1993). "Integrated genetic algorithm for optimization of space structures". *J Aerospace Eng, ASCE*; 6: pp. 315-28.
- [26] Rajeev S, Krishnamoorthy. (1992). "CS. Discrete optimization of structures using genetic algorithms". *J Struct Eng, ASCE*; 118: pp. 1233-50.
- [27] Wu S-J, Chow P-T. (1995). "Integrated discrete and configuration optimization of trusses using genetic algorithms". *Comput Struct*; 55(4): pp. 695-702.

- [28] Hwang S-F, He R-S. (2006). "A hybrid real-parameter genetic algorithm for function optimization". *Adv Eng Infor*; 20: pp. 7–21.
- [29] Tang W, Tong L, Gu Y. (2005). "Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables". *Internat J Numer Methods Engrg*; 62: pp. 1737–62.
- [30] Hasanc,ebi O, Erbatur F. (2001). "Layout optimization of trusses using improved GA methodologies". *Acta Mech*; 146: pp. 87–107.
- [31] Kaveh A, Kalatjari V. (2004). "Size/geometry optimization of trusses by the force method and genetic algorithm". *Z Angew Math Mech*; 84(5): pp. 347–57.
- [32] Li LJ, Huang ZB, Liu F. (2009). "A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables". *Comput Struct*; 87: pp. 435-43.
- [33] Y.M. Xie, G.P. Steven. (1997). "Evolutionary Structural Optimization". Springer, Berlin.
- [34] D.N. Chu. (1997). "Evolutionary structural optimization method for systems with stiffness and displacement constraints". Ph.D. Thesis, Department of Civil and Building Engineering, Victoria University of Technology, Melbourne, Australia.
- [35] D. Wang, W.H. Zhang, J.S. Jiang. (2002). "Truss shape optimization with multiple displacement constraints". *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*. 191, pp. 3597–3612.
- [36] H. Rahami, A. Kaveh, Y. Gholipour. (2008). "Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm". *Engineering Structures*.