

بهینه‌سازی سازه‌ی خرپا با استفاده از روش نیرو و الگوریتم بهینه‌سازی جایا

علی بزرگی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی علی‌نیا زبازی* (استادیار)

عادل مقصودپور (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۴۰۰
دوره ۳-۳، شماره ۱، ص. ۳۶-۲۷

در این تحقیق هدف کمیته کردن وزن سازه‌ی خرپا با به‌کارگیری فرمول‌بندی روش نیرو و الگوریتم بهینه‌سازی جایاست. قیود مسئله شامل قید تنش، جابه‌جایی و محدودیت سطح مقطع است و متغیرهای طراحی سطح مقطع اعضا در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم جایا یک الگوریتم جستجوی تصادفی است که برخلاف سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تولید جمعیت به پارامترهای تنظیم‌کننده‌ی خاصی نیازی ندارد. بررسی مثال‌های موجود نشان از کارایی روش ارائه شده دارد. نتایج نشان می‌دهد که جواب نهایی به نقاط شروع حساس نیست و فقط باید نقاط شروع به حد کافی بزرگ باشند تا در داخل فضای قابل قبول طراحی قرار گیرند. برخلاف سایر روش‌های تصادفی که عموماً نیاز به تعداد تکرار بسیار زیاد برای رسیدن به جواب دارند، در روش ارائه شده با تعداد چرخه‌ی به‌مراتب کمتر این امر حاصل شده است. همچنین نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش سریع وزن در چند چرخه‌ی اولیه است.

barzgariali@gmail.com
ali_alinia@srbiau.ac.ir
a.maghsoudpour@srbiau.ac.ir

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، روش نیرو، سازه‌ی خرپا، الگوریتم جایا.

۱. مقدمه

شناختی و الگوریتم جستجوی هارمونی به تعداد تقویت‌کننده و تنظیم کردن نرخ گام نیاز دارند.^[۱]

معمولاً برای تحلیل سازه‌ها از روش جابه‌جایی^[۱] استفاده می‌شود که در این روش تغییر مکان گره‌ها به‌عنوان مجهول در نظر گرفته می‌شود. محققان متعددی از ترکیب روش جابه‌جایی و الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی در بهینه‌سازی سازه‌ی خرپا استفاده کرده‌اند. مثلاً مثال اشمیت و فرشی^[۲] با استفاده از روش کره‌های محاطی وزن سازه‌ی خرپا را بهینه کردند. لی و جیم^[۳] در تحقیق خود از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده کردند. کلات‌جاری و طالب‌پور^[۴] با اصلاح روش ژنتیک به بهینه‌سازی اندازه و هندسه سازه‌ی خرپا پرداختند. اسیمی و همکارانش^[۵] از برنامه‌نویسی ژنتیک برای بهینه‌سازی اندازه و هندسه سازه بهره بردند.

در مقابل برخی محققان از روش نیرو^[۶] برای تحلیل سازه بهره گرفته‌اند. در این زمینه نیز از ترکیب روش نیرو و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تحقیقات زیادی انجام شده است. برای نمونه فرشی و اشمیت^[۶] با استفاده از روش نیرو مسئله‌ی بهینه‌سازی وزن سازه‌ی خرپا تحت چند حالت مختلف بارگذاری و تحت قید تنش را بررسی کردند. صدقاتی و سلیمان^[۷] بهینه‌سازی سازه‌ی خرپا و همچنین سازه‌ی قاب را با روش نیرو و تحت قید بسامد بررسی کردند. صدقاتی و اسماعیل‌زاده^[۸] الگوریتمی بر اساس برنامه‌نویسی درجه‌دو برای تحلیل سازه‌ی خرپا و تیر با روش نیرو ارائه کردند. کاوه و کلات‌جاری^[۹] با روش نیرو و الگوریتم ژنتیک و نظریه‌ی گراف به بهینه‌سازی وزن خرپا پرداختند.

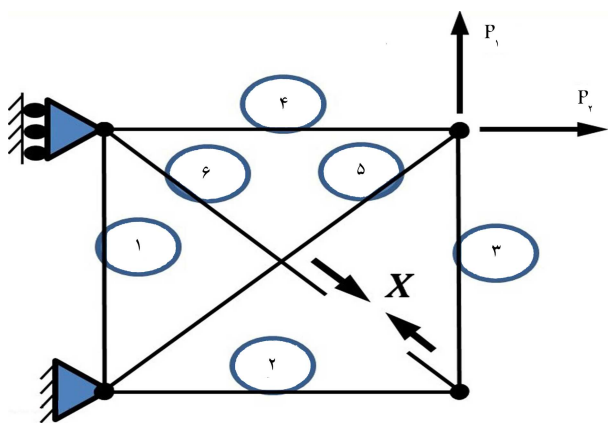
سازه‌ی خرپا دارای مصارف گوناگونی در صنعت است و محققان بسیاری در زمینه‌ی بهینه‌سازی آن و به‌خصوص بهینه‌کردن وزن سازه‌ی خرپا فعالیت داشته‌اند. به دلیل خصوصیت‌های ساده‌ی این سازه، عموماً انواع روش‌های نوین بهینه‌سازی ارائه شده در ابتدا بر روی این سازه بررسی می‌شود و سپس برای سایر سازه‌ها اعمال می‌شود.

الگوریتم‌های جستجوی تصادفی مرتبه‌صفر بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱. الگوریتم‌های تکاملی^[۱]، ۲. هوش ازدحامی^[۲]. از الگوریتم‌های تکاملی می‌توان به الگوریتم ژنتیک^[۳]، برنامه‌نویسی تکاملی^[۴]، برنامه‌نویسی ژنتیک^[۵]، دیفرانسیل تکاملی^[۶] اشاره کرد. بهینه‌سازی ازدحام ذرات^[۷] و بهینه‌سازی کلونی ذرات^[۸] از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر هوش ازدحامی هستند. برخی دیگر از الگوریتم‌ها از طبیعت الهام گرفته‌اند که از جمله‌ی آنها جستجوی هارمونی^[۹] و جستجوی گرانشی^[۱۰] است. هر الگوریتم بهینه‌سازی در طول انجام محاسبات عددی نیاز به تنظیم پارامترهایی دارد تا به بهترین عملکرد برسد. تمام الگوریتم‌ها، پارامترهای مشترکی مانند اندازه‌ی جمعیت و تعداد نسل دارند. برخی از الگوریتم‌ها نیاز به پارامترهای تنظیمی اضافه‌تری دارند. مثلاً الگوریتم ژنتیک به پارامترهایی مانند احتمال جهش و احتمال پیوند، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به اینرسی وزن، پارامترهای اجتماعی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۹/۳/۱۳۹۹، اصلاحیه ۱۹/۵/۱۳۹۹، پذیرش ۲۶/۶/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J40.2020.55805.1551



شکل ۱. مفهوم سازهی برش یافته در روش نیرو. عضو شماره ۶ به‌عنوان عضو زائد انتخاب شده است.

نظر گرفته می‌شود. از آن‌جا که درجه‌ی نامعین استاتیکی این خرپا یک است، یکی از اعضا (مثلاً عضو ۶) به‌عنوان عضو زائد و نیروی آن عضو به‌عنوان نیروی زائد در نظر گرفته می‌شود. سپس یک برش فرضی در آن ایجاد می‌شود. سازهی خرپا تحت بارگذاری تغییر شکل می‌یابد و باعث جابه‌جایی نقاط گرهی آن می‌شود و در عضو برش‌خورده یک جابه‌جایی فرضی ایجاد می‌شود. از آن‌جا که در واقعیت این جابه‌جایی فرضی در نقطه‌ی برش باید صفر باشد، نیروی این عضو زائد به‌گونه‌ی باید تعیین شود تا این فاصله‌ی ایجاد شده صفر شود. این امر منجر به ایجاد یک رابطه بین نیروهای خارجی اعمالی، سطح مقطع‌های اعضا، جنس ماده و هندسه‌ی سازه می‌شود که به معادلات سازگاری معروف‌اند.^[۲۷]

به‌طور کلی می‌توان گفت در روش نیرو، نیروهای داخلی عضوهای زائد به‌عنوان مجهول انتخاب می‌شوند. در یک خرپای m عضوی و n درجه آزادی که درجه‌ی نامعین استاتیکی آن R است، نیروی هر عضو را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:^[۲۷]

$$F_{ik} = \sum_{s=1}^n b_{o_{is}} P_{sk} + \sum_{s=1}^R b_{x_{is}} X_{sk} \quad (۱)$$

که در آن F_{ik} نیروی عضو i ام در بارگذاری k ام، $b_{o_{is}}$ ضریب اثر بار خارجی روی عضو i ام، P_{sk} بار خارجی در جهت آزادی s ام در بارگذاری k ام، $b_{x_{is}}$ ضریب اثر نیروی عضو زائد s ام بر روی عضو i ام و X_{sk} نیروی عضو زائد s ام در بارگذاری k ام است. با توجه به تعریف تنش در هر عضو خرپا و با استفاده از رابطه‌ی ۱، رابطه‌ی تنش به شکل رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\sigma_{ik} = \frac{\sum_{s=1}^n b_{o_{is}} P_{sk} + \sum_{s=1}^R b_{x_{is}} X_{sk}}{A_i} \quad (۲)$$

که A_s سطح مقطع عضو s ام است. در روش نیرو، نیروهای اضلاع زائد توسط رابطه‌ی سازگاری به تغییر شکل اعضا مرتبط می‌شوند:^[۲۷]

$$\sum_{s=1}^m b_{x_{rs}}^T \frac{l_s}{E_s A_s} F_{sk} = 0 \quad (۳)$$

که l_s اندازه‌ی طول عضو s ام و E_s ضریب کشسانی عضو s ام است. با جایگذاری رابطه‌ی ۱ در رابطه‌ی ۳، رابطه‌ی سازگاری به شکل زیر می‌شود:

$$\sum_{s=1}^m b_{x_{rs}}^T \frac{l_s}{E_s A_s} \left(\sum_{i=1}^n b_{o_{si}} P_{ik} + \sum_{i=1}^R b_{x_{si}} X_{ik} \right) = 0 \quad (۴)$$

رهامی و کاوه^[۱۱] با استفاده از روش نیرو و در نظر گرفتن سطح مقطع‌ها و نیروهای اضلاع زائد به‌عنوان متغیرهای طراحی، با بهره‌گیری از روش تابع جریمه^{۱۳} و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، تحلیل سازه و بهینه‌کردن وزن سازه را در هر چرخه توأم کردند به‌طوری که بعد از هر چرخه‌ی بهینه‌سازی دیگر نیازی به تحلیل دوباره‌ی سازه نیست. همچنین آنها این روش را برای تحلیل غیرخطی^[۱۲] نیز به‌کار بردند و در تحقیقی دیگر با ترکیب روش انرژی و نیرو با الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی شکل سازه پرداختند.^[۱۳] فرشی و علی‌نیا^[۱۴] با ترکیب روش کره‌ی محاطی و روش نیرو به بهینه‌سازی خرپا با چند حالت بارگذاری تحت قیود مختلف پرداختند.

کاوه و ملکوتی راد^[۱۶] ترکیب الگوریتم ژنتیک ترکیبی و روش ازدحام ذرات را برای بهینه‌سازی بر اساس روش نیرو به کار گرفتند. کاوه و احمدی^[۱۷] با استفاده از جستجوی سیستم شارژی مدیریت شده و ترکیب آن با روش نیرو توانستند اندازه، هندسه و پیکربندی سازه‌ی خرپا را بهینه‌کنند.

کیم و همکاران^[۱۸] در یک روش بهینه‌سازی دومرحله‌ی روش نیرو و الگوریتم ژنتیک را برای تعیین مکان‌های خرابی در سازه‌ی خرپا به‌کار بردند. کاوه و ایاجی^[۱۹] بهینه‌سازی رفتار دینامیکی سازه‌ی خرپا را تحت قید بسامد با بهره‌گیری از الگوریتم سیستم ذرات مرتعش بررسی کردند. سین و همکاران^[۲۰] روش نیروی یکپارچه^{۱۴} را با کمک روش برنامه‌ریزی مرتبه دو^{۱۵} و روش اجزای محدود وزن صفحات تقویت شده تحت قید کمناش بهینه کردند.

چن و همکاران^[۲۱] روش ترکیبی مبتنی بر جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات را برای بهینه‌کردن وزن سازه‌ی خرپا برای متغیرهای ناپیوسته به‌کار گرفتند. امیدو نسب^[۲۲] و گودرزی‌مهر روش ازدحام ذرات را با الگوریتم ژنتیک ترکیب کردند و با در نظر گرفتن متغیرهای گسسته وزن سازه‌ی خرپا را بهینه کردند.

کانو و همکاران^[۲۳] با بهبود روش ازدحام ذرات، این روش را برای بهینه‌کردن شکل و وزن سازه‌ی خرپا اعمال کردند. گرزویونسکی و سلجاک^[۲۴] روش جابه‌جایی را با الگوریتم جایا^{۱۶} برای بهینه‌کردن وزن سازه‌ی خرپا ادغام کردند.

الگوریتم جایا از جمله روش‌های تکاملی به حساب می‌رود و در سال ۲۰۱۶ توسط راتو^[۱۱] ارائه شده است و یک الگوریتم جدید به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی نامقید و مقید است. از مهم‌ترین ویژگی الگوریتم جایا که می‌توان به آن اشاره کرد عدم نیاز به تنظیم کردن پارامتر خاصی برای تولید کردن جمعیت است. دگر تکین و لمبرتی^[۲۵] به بهینه‌سازی اندازه‌ی خرپا با ترکیب الگوریتم جایا با روش جابه‌جایی پرداختند و در تحقیق دیگر از این محققان^[۲۶] بهینه‌سازی هندسه و هندسه و اندازه‌ی خرپا با اصلاح الگوریتم جایا انجام شده است.

در این مقاله بهینه‌سازی وزن سازه‌ی خرپای الاستیک تحت قیود تنش، قید جابه‌جایی، قید محدودیت بر سطح مقطع، و قید ارتباط بین سطح مقطع اعضا که می‌تواند تحت یک یا چند حالت مختلف بارگذاری استاتیکی قرار گیرد، بررسی می‌شود. روش نیرو به‌عنوان ابزار تحلیل و الگوریتم جایا به‌عنوان ابزار بهینه‌کردن انتخاب شده‌اند. هدف از این مقاله ترکیب این دو ابزار است تا بتوان از ویژگی‌های خوب هر یک به‌طور یکجا استفاده کرد.

۲. روش نیرو

در این مقاله از روش نیرو برای تحلیل سازه استفاده شده است. روش نیرو بر اساس کار مجازی استوار است. برای درک بهتر این روش یک خرپا مطابق شکل ۱ در

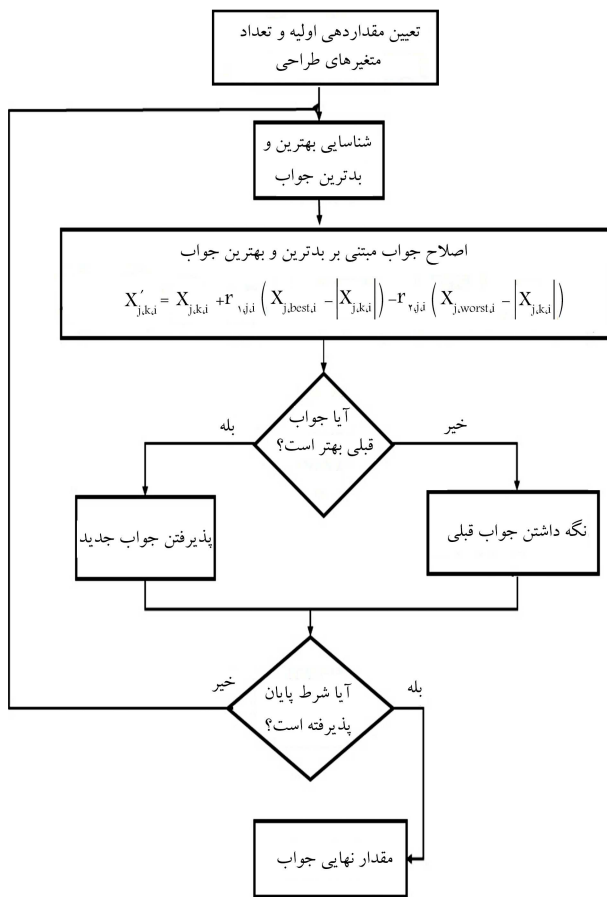
۴. الگوریتم جایا

الگوریتم جایا یک روش بهینه‌سازی ساده و در عین حال قدرتمند برای حل مسائل مقید و نامقید است.^[۱] این الگوریتم بر این اصل استوار است که برای رسیدن به بهترین جواب باید از جواب‌های موجود در هر تکرار به سمت بهترین جواب ارائه شده حرکت کرد و از بدترین جواب در همان تکرار نیز دور شد. تولید نقاط جدید در روش جایا با استفاده از رابطه‌ی ۹ می‌باشد:

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|) - r_{2,j,i}(X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|) \quad (9)$$

که $X'_{j,k,i}$ مقدار جدید متغیر طراحی تولید شده از جمعیت شماره 17 ام، k ام، j شماره مؤلفه‌ی هر نقطه از جمعیت و i شماره چرخه، $X_{j,k,i}$ مقدار متغیر طراحی در چرخه‌ی i ام، $X_{j,best,i}$ بهترین مقدار متغیر طراحی، $X_{j,worst,i}$ بدترین مقدار متغیر طراحی، $r_{1,j,i}$ و $r_{2,j,i}$ اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند. هر یک از اعضای جمعیت در این الگوریتم بر اساس رابطه‌ی ۹، مقدار خود را به‌روزرسانی می‌کنند.^[۱]

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، الگوریتم جایا عملیات جستجو در فضای طراحی مسئله به صورت موقعیت تصادفی برای بهینه کردن تابع هدف است. روند کار الگوریتم جایا بدین شکل است که تعدادی جمعیت جدید بر اساس رابطه‌ی ۹ و با استفاده از جمعیت کنونی ایجاد می‌شود. مقدار تابع هدف در نقاط



شکل ۲. روند نمای الگوریتم جایا.^[۱]

که k تعداد بارگذاری است. تعداد معادلات سازگاری در هر حالت بارگذاری به درجه‌ی نامعینی سازه بستگی دارد.

مقدار جابه‌جایی در روش نیرو به صورت زیر تعریف می‌شود:^[۲۷]

$$u_{jk} = \sum_{s=1}^m b_{jqs}^T \frac{l_s}{E_s A_s} F_{sk} \quad (5)$$

که u_{jk} جابه‌جایی درجه آزادی j ام در بارگذاری k ام است.

۳. بهینه‌سازی سازه‌ی خرپا در فرمول‌بندی روش نیرو

برای یک سازه‌ی خرپایی با m عضو و n درجه آزادی، هدف کمینه کردن وزن سازه است که به صورت رابطه‌ی ۶ می‌باشد:

$$\text{Minimize} \rightarrow W(A) = \sum_{i=1}^m \rho_i l_i A_i \quad (6)$$

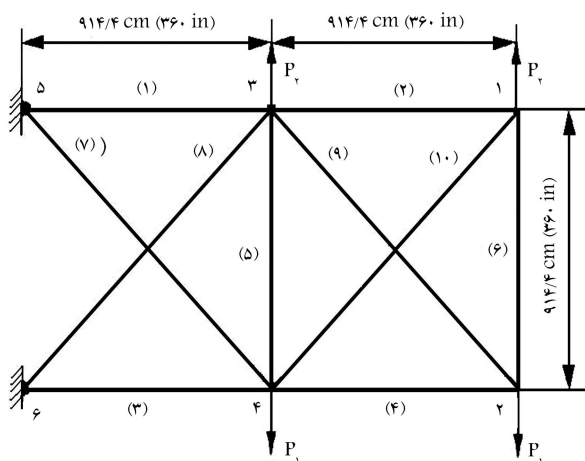
که در آن W کل وزن سازه، ρ_i جرم حجمی، l_i طول عضو و A_i سطح مقطع عضو i ام هستند. قیود در نظر گرفته شده عبارت‌اند از: ۱. قید تنش با در نظر گرفتن حد بالا و پایین ۲. قید جابه‌جایی ۳. قید سطح مقطع با محدودیت ۴. قید ارتباط بین سطح مقطع اعضا، که می‌توان به صورت رابطه‌ی ۷ بیان کرد:

$$\begin{aligned} \sigma_i^L &\leq \sigma_{ik} \leq \sigma_i^U \\ u_j^L &\leq u_{jk} \leq u_j^U \\ A_i^L &\leq A_i \leq A_i^U \\ i &= 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (7)$$

در آن σ_{ik} تنش عضو i ام در بارگذاری k ام، σ_i^L و σ_i^U مقادیر بالایی و پایینی مجاز برای تنش، u_{jk} مقدار جابه‌جایی راستای j ام در بارگذاری k ام، u_j^L و u_j^U مقادیر بالایی و پایینی مجاز برای جابه‌جایی، A_i^L و A_i^U مقادیر حد بالایی و پایینی برای سطح مقطع عضو i ام هستند. با توجه به تعریف قیود بیان شده در روابط ۲، ۳ و ۴ رابطه‌ی ۷ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} -\sigma_i^U A_i + \sum_{s=1}^j b_{x_{is}} X_{sk} &\leq -\sum_{s=1}^n b_{x_{is}} P_{sk} \\ \sigma_i^L A_i - \sum_{s=1}^j b_{x_{is}} X_{sk} &\leq \sum_{s=1}^n b_{x_{is}} P_{sk} \\ u_j^L &\leq \sum_{q=1}^m b_{jq}^T \frac{l_q}{E_q A_q} F_{qk} \leq u_j^U \\ i &= 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (8)$$

با توجه به قیود در نظر گرفته شده در این تحقیق، ملاحظه می‌شود که بهینه‌سازی به صورت غیرخطی است. در بهینه‌سازی غیرخطی عموماً یک نقطه‌ی آغازین در نظر گرفته می‌شود. سپس سازه در این نقطه تحلیل می‌شود و بعد از آن یک بار چرخه‌ی بهینه‌سازی با الگوریتم در نظر گرفته شده نقطه‌ی جدیدی به دست می‌دهد. سپس سازه در این نقطه‌ی جدید تحلیل می‌شود و این روند دوباره تکرار می‌شود تا همگرایی مطلوب حاصل آید. در این تحقیق از روش تابع جریمه استفاده شده است. تابع جریمه در اصل مسئله‌ی مقید را به نامقید تبدیل می‌کند. اساس کار این تابع به این صورت است که در صورت نقض قید، مقداری به‌عنوان جریمه به تابع هدف اضافه می‌کند.



شکل ۳. خرپای ۱۰ عضوی. [۲]

جدول ۱. نتایج خرپای ۱۰ عضوی: حالت اول.

شماره عضو	سطح مقطع اعضاء در نقطه بهینه (in ²)		
	مرجع [۲]	مرجع [۱۵]	این تحقیق
۱	۷,۹۳۸	۷,۹۳۷۹	۷,۹۳۹
۲	۰,۱	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰
۳	۸,۰۶۲	۸,۰۶۲۱	۸,۰۶۲
۴	۳,۹۳۸	۳,۹۳۷۹	۳,۹۳۸۸
۵	۰,۱	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰
۶	۰,۱	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰
۷	۵,۷۴۵	۵,۷۴۴۷	۵,۷۴۵۸
۸	۵,۵۶۹	۵,۵۶۹۰	۵,۵۶۷۰
۹	۵,۵۶۹	۵,۵۶۹۰	۵,۶۹۰
۱۰	۰,۱	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰
وزن (lb)	۱۵۹۳,۲	۱۵۹۳,۲	۱۵۹۳,۲

جمعیت جدید محاسبه و با مقادیر تابع هدف در نقاط قبلی مقایسه می‌شود. در صورتی که جواب در هر نقطه بهتر شده باشد مقدار جدید جایگزین نقطه‌ی متناظر در جمعیت می‌شود. اگر مقدار تابع هدف بهتر نشده باشد، همان نقطه‌ی اولیه در جمعیت نگه داشته می‌شود و مقدار جدید پذیرفته نخواهد شد. این عمل در هر چرخه تکرار می‌شود و در هر چرخه جمعیت نقاط طراحی به‌روزرسانی می‌شود و تا به دست آمدن همگرایی مورد نظر به سمت جواب بهینه ادامه می‌یابد.

۵. مثال عددی

برای نشان دادن کارایی روش ارائه شده چند مثال متداول حل و با کار محققان دیگر مقایسه می‌شود. مثال‌ها عبارت‌اند از خرپای ۱۰، ۲۵، ۷۲ و ۲۰۰ عضوی. برای انتخاب نقاط آغازین محدودیتی وجود ندارد و کافی است که به اندازه‌ی نسبتاً بزرگ باشند تا نقاط در محدوده فضای قابل قبول طراحی قرار گیرند که با توجه به سازهی خرپا این امر به سادگی قابل حصول است. این خصوصیت خود یکی از مزایای روش به حساب می‌آید که نیازی به روش‌های خاص برای انتخاب نقاط آغازین ندارد.

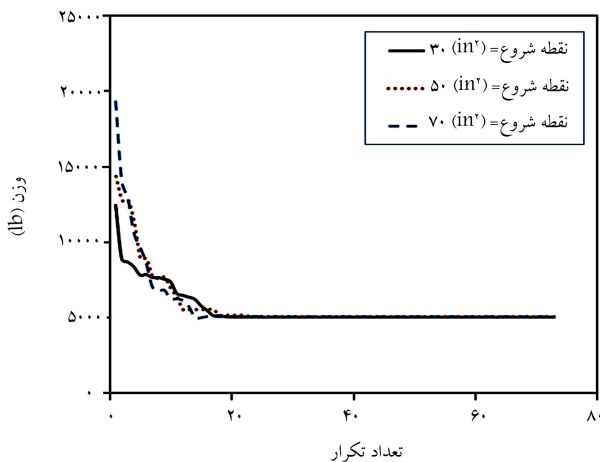
۱.۵. مثال خرپای ۱۰ عضوی

شکل ۳ خرپای ۱۰ عضوی را نشان می‌دهد. [۲] درجه‌ی نامعین استاتیکی آن ۲ و درجه آزادی آن برابر ۸ است. مدول الاستیسیته $E = 68947 MPa (10^9 Psi)$ ، جرم حجمی برابر با $\rho = 2768 Kg/m^3 (0.1 Pci)$ و مقدار حد تنش آن $\sigma = 172 MPa (250 Psi) \pm$ است. این مثال در ۲ حالت بررسی می‌شود. در حالت اول سازه تحت یک بارگذاری $P_1 = 444.82 KN (100 Kpsi)$ و تحت قید تنش بررسی می‌شود. در حالت دوم سازه تحت یک حالت بارگذاری که شامل می‌شود. جابه‌جایی عمودی تمام گره‌ها باید در محدوده $\pm 5.08 cm (2 in)$ قرار داشته باشد. نتایج به دست آمده در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است و نشان از توافق جواب‌های به دست آمده با سایر مراجع دارد. در شکل ۴ نمودار وزن بر حسب تعداد تکرار، برای حالت دوم رسم شده است. سه دسته نقاط آغازین نسبتاً بزرگ انتخاب شده است که همگی به سمت جواب همگرا شده‌اند و کاهش شدید وزن در چند چرخه‌ی اولیه مشهود است.

۲.۵. مثال خرپای ۲۵ عضوی

سازه‌ی خرپای فضایی ۲۵ عضوی در شکل ۵ نشان داده شده است. [۱۵] درجه‌ی نامعین استاتیکی این سازه ۷ و درجه آزادی آن برابر با ۱۸ است. ضریب الاستیسیته برابر با $E = 68947 MPa (10^9 Psi)$ و جرم حجمی آن برابر مستقل قرار دارد. در صورت استفاده از خاصیت تقارن، بارگذاری به ۲ حالت کاهش می‌یابد که در جدول ۳ ارائه شده است. در این حالت سطح مقطع اعضای سازه به یکدیگر مرتبط می‌شوند به طوری که به هشت گروه تقسیم می‌شوند.

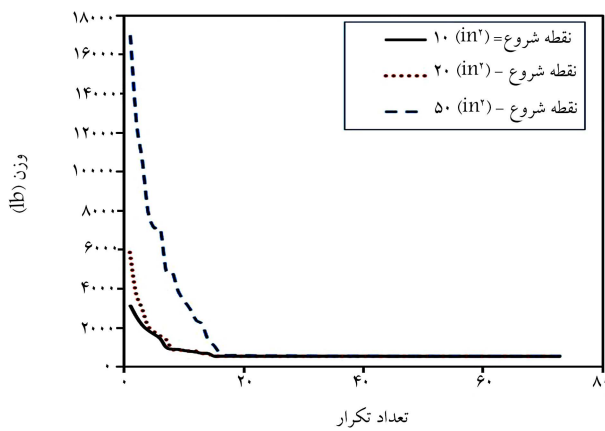
مقاومت حد کششی تنش تمام اعضا برابر است با $\sigma^u = 275.8 MPa (4 \times 10^4 Psi)$ و مقاومت حد فشاری اعضا مطابق با جدول ۴ است. قید سطح مقطع اعضا به صورت $0.06452 cm^2 (0.1 in^2)$ است و جابه‌جایی تمام گره‌ها در تمام جهات باید در محدوده $\pm 0.889 cm (0.35 in)$ باشد. نتایج به دست آمده در



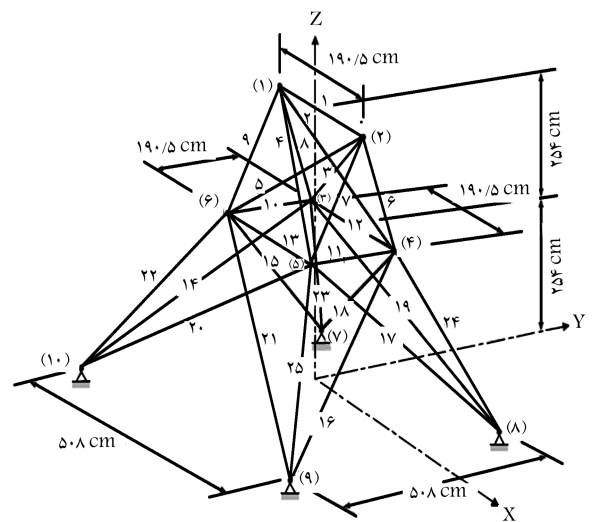
شکل ۴. نمودار وزن بر حسب تعداد تکرار خرپای ۱۰ عضوی: حالت دوم.

جدول ۲. نتایج خرابی ۱۰ عضوی: حالت دوم (سطح مقطع اعضا در نقطه بهینه (in^2)).

شماره اعضا	مرجع [۲]	مرجع [۲۸]	مرجع [۲۹]	مرجع [۳۰]	مرجع [۳۱]	مرجع [۳۲]	مرجع [۶]	مرجع [۱۲]	این تحقیق
۱	۲۴,۲۹	۲۵,۱۹	۲۵,۸۱	۲۳,۵۳	۲۴,۷۲	۲۳,۵۹	۲۳,۲۵	۲۳,۵۲۷۰	۲۳,۲۵
۲	۰,۱۰۰	۰,۳۶۳	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۲	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰
۳	۲۳,۳۵	۲۵,۴۲	۲۷,۲۳	۲۵,۲۹	۲۶,۵۴	۲۵,۲۵	۲۵,۷۳	۲۵,۲۹۴۱	۲۵,۵۴
۴	۱۳,۶۶	۱۴,۳۳	۱۶,۶۵	۱۴,۳۷	۱۳,۲۲	۱۴,۳۷	۱۴,۵۱	۱۴,۳۷۶۰	۱۴,۳۷
۵	۰,۱۰۰	۰,۴۱۷	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۸	۰,۱۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰
۶	۱,۹۶۹	۳,۱۴۴	۲,۰۲۴	۱,۹۷۰	۴,۸۳۵	۱,۹۷	۱,۹۷۷	۱,۹۶۹۸	۱,۹۶
۷	۱۲,۶۷	۱۲,۰۸	۱۲,۷۸	۱۲,۳۹	۱۲,۶۶	۱۲,۳۹	۱۲,۲۱	۱۲,۴۰۴۱	۱۲,۳۹
۸	۱۲,۵۴	۱۴,۶۱	۱۴,۲۲	۱۲,۸۳	۱۳,۷۸	۱۲,۸۰	۱۲,۶۱	۱۲,۸۲۴۵	۱۳,۵۶
۹	۲۱,۹۷	۲۰,۲۶	۲۲,۱۴	۲۰,۳۳	۱۸,۴۴	۲۰,۳۷	۲۰,۳۶	۲۰,۳۳۰۴	۲۰,۳۷
۱۰	۰,۱۰۰	۰,۵۱۳	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰
وزن (lb)	۴۶۹۱,۸۴	۴۸۹۵,۶۰	۵۰۵۹,۷	۴۶۷۶,۹۲	۴۷۹۲,۵۲	۴۶۷۶,۹۳	۴۶۶۸,۸۱	۴۶۷۷,۸	۴۶۷۷,۹



شکل ۶. نمودار وزن برحسب تعداد تکرار در خرابی ۲۵ عضوی.



شکل ۵. خرابی ۲۵ عضوی. [۱۵]

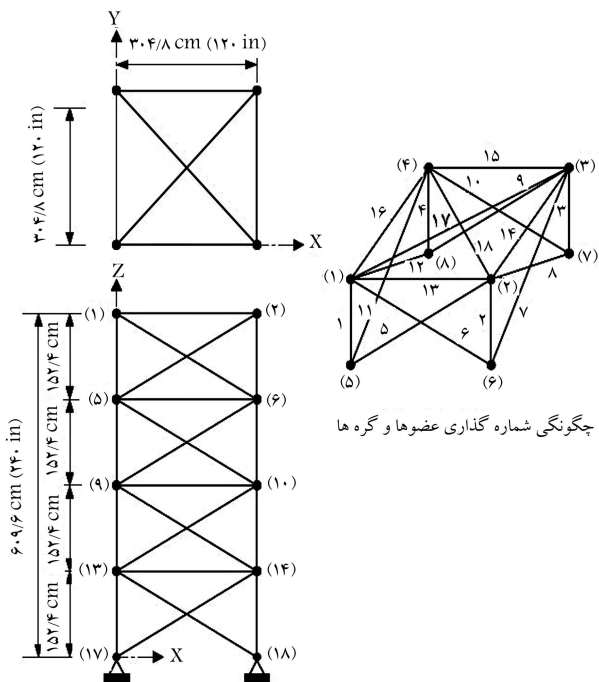
جدول ۳. بارگذاری خرابی ۲۵ عضوی. [۱۵]

شماره گره	بارگذاری اول (lb)			بارگذاری دوم (lb)		
	P_Z	P_Y	P_X	P_Z	P_Y	P_X
۱	-۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰	-۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۰
۲	-۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰	-۵۰۰۰	-۲۰۰۰۰	۰
۳	۰	۰	۵۰۰	۰	۰	۵۰۰
۶	۰	۰	۵۰۰	۰	۰	۵۰۰

جدول ۴ ارائه و با نتایج سایر محققان مقایسه شده است. نمودار روند کاهش وزن برحسب تعداد تکرار چرخه طراحی، برای ۳ نقطه‌ی آغازین مختلف در شکل ۶ ارائه شده است که همگی به سمت جواب بهینه همگرا شده‌اند.

۳.۵. مثال خرابی ۷۲ عضوی

در شکل ۷ خرابی ۷۲ عضوی نشان داده شده است. [۲] درجه‌ی نامعین استاتیکی این مثال ۲۴ و درجه آزادی آن ۴۸ است. ماده‌ی به کار گرفته شده آلومینیوم با



شکل ۷. خرابی ۷۲ عضوی. [۱۴]

جدول ۴. نتایج خرابی ۲۵ عضوی (سطح مقطع اعضاء در نقطه‌ی بهینه (in^2)).

شماره گروه	شماره اعضا	حد فشاری تنش	مرجع		
			[۲]	[۱۴]	[۳۰]
۱	A_1	-۳۵,۰۹۲	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰
۲	$A_2 : A_5$	-۱۱,۵۹۰	۱,۹۶۴	۱,۹۹۸۱	۱,۹۸۷
۳	$A_6 : A_9$	-۱۷,۳۵۰	۳,۰۳۳	۲,۹۸۲۸	۲,۹۹۳۵
۴	$A_{10} : A_{11}$	-۳۵,۰۹۲	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰
۵	$A_{12} : A_{13}$	-۳۵,۰۹۲	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰	۰,۰۱۰
۶	$A_{14} : A_{17}$	-۶۷,۵۹	۰,۶۷۰	۰,۶۸۳۷	۰,۶۸۴۰
۷	$A_{18} : A_{21}$	-۶۷,۵۹	۱,۶۸۰	۱,۶۷۵۰	۱,۶۷۶۹
۸	$A_{22} : A_{25}$	-۱۱,۰۸۲	۲,۶۷۰	۲,۶۶۶۸	۲,۶۶۷
وزن (lb)			۵۴۵,۲۲	۵۴۵,۳۷	۵۴۵,۱۶

بهینه‌سازی با ۳ نقطه‌ی آغازین مختلف را نشان می‌دهد که کاهش شدید وزن در چند چرخه‌ی اولیه و همگرایی به سمت جواب بهینه در همه حالت‌ها مشهود است.

جدول ۵. بارگذاری خرابی ۷۲ عضوی. [۲]

شماره گره	بارگذاری اول (lb)			بارگذاری دوم (lb)		
	P_Z	P_Y	P_X	P_Z	P_Y	P_X
۱	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰

۴.۵. مثال خرابی ۲۰۰ عضوی

شکل ۹ خرابی ۲۰۰ عضوی را نشان می‌دهد [۳۳] که دارای درجه‌ی نامعین استاتیکی $E = 206842 MPa$ (۳ ضریب الاستیسیته برابر $3 \times 10^6 Psi$) و جرم حجمی آن $(0.283 Pci)$ $\rho = 7833 Kg.m^{-3}$ است. کمترین مقدار مجاز برای سطح مقطع اعضا $(0.1 in^2)$ $0.6451 cm^2$ است. مقاومت حد تنش آن برابر است با $(1 \times 10^6 Psi)$ $\sigma_c = \pm 68795 MPa$. با توجه به تقارن در هندسه و بارگذاری، با استفاده از قید ارتباط بین سطح مقطع‌ها به ۲۹ گروه سطح مقطع تقسیم می‌یابد.

بارگذاری اعمالی بر این سازه شامل پنج حالت مستقل است. باید توجه داشت که با استفاده از قید ارتباط بین سطح مقطع‌ها بارگذاری به سه حالت کاهش می‌یابد. این پنج حالت بارگذاری عبارت‌اند از:

۱. نیروی برابر با $4450 N (10 Kpsi)$ در جهت x برگره‌های ۱، ۶، ۱۵، ۲۰، ۲۹، ۳۴، ۴۳، ۴۸، ۵۷، ۶۲، ۷۱ اعمال می‌شود؛

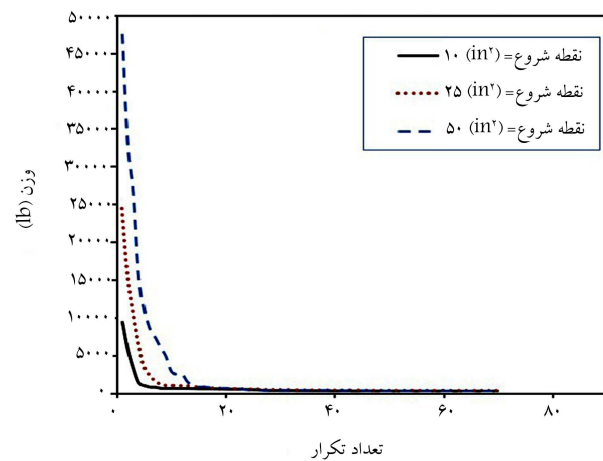
۲. نیرویی برابر با $4450 N (10 Kpsi)$ در جهت مثبت گرهِ‌های ۵، ۱۴، ۱۹، ۲۸، ۳۳، ۴۲، ۴۷، ۵۶، ۶۱، ۷۰، ۷۵ اعمال می‌شود؛

۳. نیرویی برابر با $4450 N (10 Kpsi)$ در جهت منفی y برگره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ...، ۷۱، ۷۲، ۷۳، ۷۴، ۷۵ اعمال می‌شود؛

۴. بارگذاری ۱ و ۳ هم‌زمان وارد می‌شود؛

۵. بارگذاری ۲ و ۳ هم‌زمان وارد می‌شود.

نتایج به دست آمده برای این مثال در جدول ۷ ارائه شده است و با نتایج سایر محققان مقایسه شده است. شکل ۱۰ نمودار تغییرات وزن برحسب تعداد چرخه‌ی بهینه‌سازی در ازای ۳ نقطه‌ی شروع متفاوت را نشان می‌دهد که همگی به سمت جواب بهینه همگرا شده‌اند.

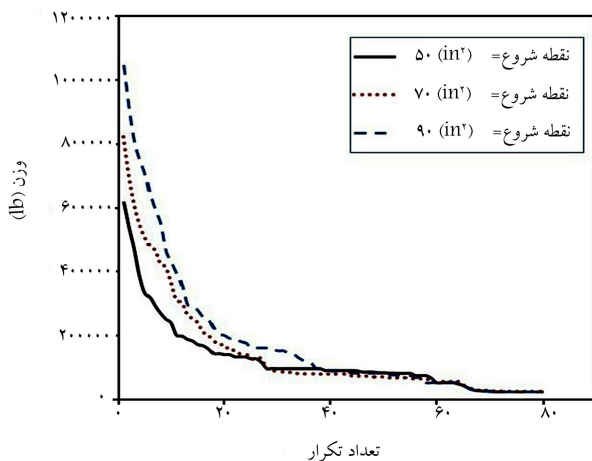


شکل ۸. نمودار وزن برحسب تعداد تکرار در خرابی ۷۲ عضوی.

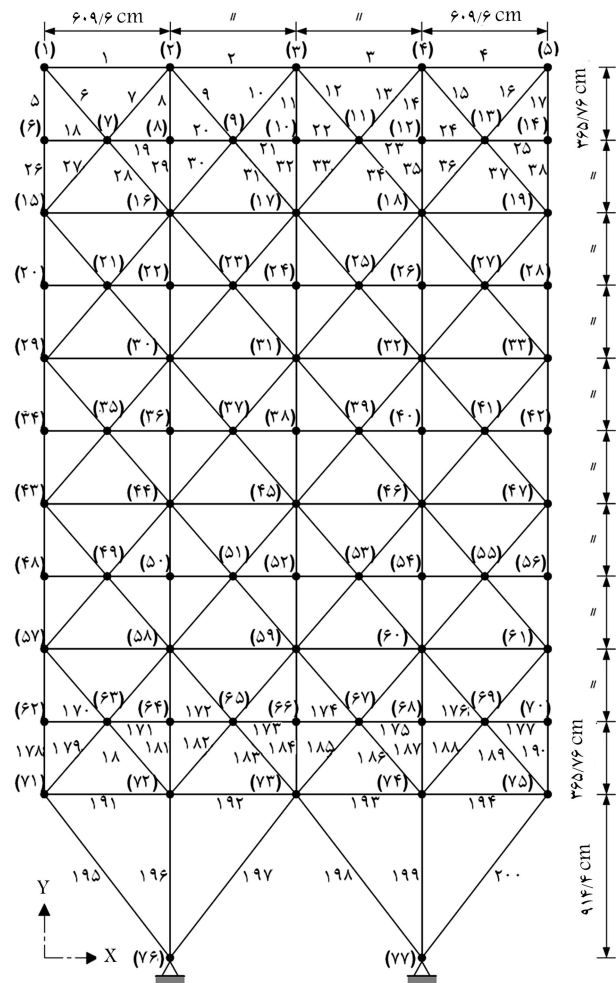
ضریب الاستیسیته $E = 68947 MPa (10^6 Psi)$ و جرم حجمی برابر با $\rho = 2768 Kg.m^{-3} (0.1 Pci)$ است. حد بالا و پایین تنش تمام اعضا برابر است با $\sigma_c = \pm 17274 MPa (25 \times 10^6 Psi)$ قید اندازه بر روی سطح مقطع اعضا به صورت $(0.1 in^2)$ $0.6452 cm^2$ است و جابه‌جایی تمام گرهِ‌ها در تمام جهات باید در محدوده‌ی $(0.25 in)$ $0.635 cm$ باشد. این سازه در حالت کلی تحت ۵ حالت بارگذاری است که با استفاده از قید ارتباط بین متغیرها، سطح مقطع اعضا سازه را می‌توان به یکدیگر مرتبط کرد به طوری که به شانزده گروه تقسیم می‌شود و در نتیجه می‌توان بارگذاری را به دو حالت کاهش داد (جدول ۵). در این حالت قید تنش، قید جابه‌جایی، قید اندازه روی سطح مقطع و قید ارتباط بین سطح مقطع‌ها در نظر گرفته می‌شود. نتایج به دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است و با نتایج سایر محققان مقایسه شده است. شکل ۸ نمودار تغییرات وزن برحسب تعداد چرخه‌ی

جدول ۶. نتایج خرابی ۷۲ عضوی (سطح مقطع اعضا در نقطه بهینه (in^2)).

شماره گروه	اعضاء	مرجع [۲]	مرجع [۲۵]	مرجع [۳۱]	مرجع [۳۲]	مرجع [۱۴]	این تحقیق
۱	$A_1 : A_2$	۰٫۱۵۸	۰٫۱۶۱	۰٫۱۵۶۴	۰٫۱۶۱	۰٫۱۵۶۵	۰٫۱۵۶
۲	$A_5 : A_{12}$	۰٫۵۹۴	۰٫۵۵۷	۰٫۵۴۶۴	۰٫۵۴۴	۰٫۵۴۵۷	۰٫۵۴۴
۳	$A_{13} : A_{16}$	۰٫۳۴۱	۰٫۳۷۷	۰٫۴۱۱۰	۰٫۳۷۹	۰٫۴۱۰۶	۰٫۴۵۴
۴	$A_{17} : A_{18}$	۰٫۶۰۸	۰٫۵۰۶	۰٫۵۷۱۲	۰٫۵۲۱	۰٫۵۶۹۷	۰٫۵۶۹۵
۵	$A_{19} : A_{22}$	۰٫۲۶۴	۰٫۶۱۱	۰٫۵۲۶۳	۰٫۵۳۵	۰٫۵۲۳۷	۰٫۵۲۴
۶	$A_{23} : A_{30}$	۰٫۵۴۸	۰٫۵۳۲	۰٫۵۱۷۸	۰٫۵۳۵	۰٫۵۱۷۱	۰٫۵۱۶
۷	$A_{31} : A_{32}$	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۳	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۰
۸	$A_{35} : A_{36}$	۰٫۱۵۱	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۱۱	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۰
۹	$A_{37} : A_{40}$	۱٫۱۰۷	۱٫۲۴۶	۱٫۲۷۰۲	۱٫۳۱۰	۱٫۲۶۸۵	۱٫۲۷۰
۱۰	$A_{41} : A_{48}$	۰٫۵۷۹	۰٫۵۲۴	۰٫۵۱۲۴	۰٫۴۹۸	۰٫۵۱۱۸	۰٫۵۱۲
۱۱	$A_{49} : A_{52}$	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۱۰	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۰
۱۲	$A_{53} : A_{54}$	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۳	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۰
۱۳	$A_{55} : A_{58}$	۲٫۰۷۸	۱٫۸۱۸	۱٫۸۶۵۶	۱٫۹۱۰	۱٫۸۸۶۴	۱٫۸۹۰
۱۴	$A_{59} : A_{60}$	۰٫۵۰۳	۰٫۵۲۴	۰٫۵۱۳۱	۰٫۵۲۵	۰٫۵۱۲۲	۰٫۵۲۶
۱۵	$A_{67} : A_{70}$	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۲۲	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۰
۱۶	$A_{71} : A_{72}$	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۳	۰٫۱۰۰۰	۰٫۱۰۰
	وزن (lb)	۳۸۸٫۶۳	۳۸۱٫۲	۳۷۹٫۶۲	۳۸۳٫۱۲	۳۷۹٫۶۵۳۶	۳۷۹٫۷



شکل ۱۰. نمودار وزن برحسب تعداد تکرار در خرابی ۳۰۰ عضوی.



شکل ۹. خرابی ۳۰۰ عضوی. [۳۳]

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش برای یافتن کمترین مقدار وزن سازه‌ی خرابا تحت قیود تنش، جابه‌جایی و محدودیت اندازه‌ی سطح مقطع که تحت چند حالت بارگذاری استاتیکی مختلف قرار دارد، ارائه شد. این امر با بهره‌گیری از روش نیرو به‌عنوان ابزار تحلیل سازه و ترکیب آن با الگوریتم جایا به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی به دست آمد. چهار مثال متداول برجسته در این زمینه بررسی شد و نتایج حاصل از این روش با آنچه توسط روش‌های دیگر ارائه شده است، مقایسه شد. در تمام مثال‌ها توافق کامل مشهود است که نشان از کارایی روش ارائه شده دارد.

در روش پیشنهادی نیازی به نقطه‌ی اولیه که دارای شرایط خاصی باشد نیست و فقط کافی است که سطح مقطع اولیه‌ی اعضا به حد کافی بزرگ انتخاب شوند که در محدوده‌ی قابل قبول قرارگیرند. نتایج به دست آمده برای نقاط اولیه‌ی مختلف نیز

جدول ۷. نتایج خرابی ۲۰۰ عضوی.

شماره سیاه گروه	اعضای گروه	سطح مقطع اعضاء در نقطه بهینه (in^2)			قید تنش ($10000 Psi = \pm 68,95 MPa$)
		مرجع [۳]	مرجع [۱۴]	این تحقیق	
۱	۱, ۲, ۳, ۴	۰,۱۲۵۳	۰,۱۴۶۷	۰,۱۴۶۴	
۲	۵, ۸, ۱۱, ۱۴, ۱۷	۱,۰۱۵۷	۰,۹۴۵۰	۰,۹۴۰۲	
۳	۱۹, ۲۰, ۲۱, ۲۲, ۲۳, ۲۴	۰,۱۰۶۹	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۶۵	
۴	۱۸, ۲۵, ۵۶, ۶۳, ۹۴, ۱۰۱, ۱۳۲, ۱۳۹, ۱۷۰, ۱۷۷	۰,۱۰۶۹	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰	
۵	۲۶, ۲۹, ۳۲, ۳۵, ۳۸	۱,۹۳۶۹	۱,۹۴۵۱	۱,۹۴۲۳	
۶	۶, ۷, ۹, ۱۰, ۱۲, ۱۳, ۱۵, ۱۶, ۲۷, ۲۸, ۳۰, ۳۱, ۳۳, ۳۴, ۳۶, ۳۷	۰,۲۶۸۶	۰,۲۹۶۲	۰,۲۹۶۳	
۷	۳۹, ۴۰, ۴۱, ۴۲	۰,۱۰۲۴	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰	
۸	۴۳, ۴۶, ۴۹, ۵۲, ۵۵	۲,۹۷۳۱	۳,۱۰۴۰	۳,۱۰۵۹	
۹	۵۷, ۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲	۰,۱۳۰۹	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰	
۱۰	۶۴, ۶۷, ۷۰, ۷۳, ۷۶	۴,۱۸۳۱	۴,۱۰۴۰	۴,۱۰۵۵	
۱۱	۴۴, ۴۵, ۴۷, ۴۸, ۵۰, ۵۱, ۵۳, ۵۴, ۶۵, ۶۶, ۶۸, ۶۹, ۷۱, ۷۲, ۷۴, ۷۵	۰,۳۹۶۷	۰,۴۰۳۴	۰,۴۰۴۰	
۱۲	۷۷, ۷۸, ۷۹, ۸۰	۰,۴۴۱۶	۰,۱۹۲۲	۰,۱۹۲۹	
۱۳	۸۱, ۸۴, ۸۷, ۹۰, ۹۳	۵,۱۸۷۳	۵,۴۲۸۲	۵,۴۵۵	
۱۴	۹۵, ۹۶, ۹۷, ۹۸, ۹۹, ۱۰۰	۰,۱۹۱۲	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰	
۱۵	۱۰۲, ۱۰۵, ۱۰۸, ۱۱۱, ۱۱۴	۶,۲۴۱	۶,۴۲۸۲	۶,۴۲۸۹	
۱۶	۸۲, ۸۳, ۸۵, ۸۶, ۸۸, ۸۹, ۹۱, ۹۲, ۱۰۳, ۱۰۴, ۱۰۶, ۱۰۷, ۱۰۹, ۱۱۰, ۱۱۲, ۱۱۳	۰,۶۹۹۴	۰,۵۷۸۳	۰,۵۷۵۳	
۱۷	۱۱۵, ۱۱۶, ۱۱۷, ۱۱۸	۰,۱۱۵۸	۰,۱۳۲۵	۰,۱۳۳۵	
۱۸	۱۱۹, ۱۲۲, ۱۲۵, ۱۲۸, ۱۳۱	۷,۷۶۴۳	۷,۷۹۲۶	۷,۹۹۰۱	
۱۹	۱, ۲, ۳, ۴	۰,۱	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰	
۲۰	۵, ۸, ۱۱, ۱۴, ۱۷	۸,۸۲۷۹	۸,۹۷۲۶	۸,۹۷۲۲	
۲۱	۱۹, ۲۰, ۲۱, ۲۲, ۲۳, ۲۴	۰,۶۹۸۶	۰,۷۰۴۸	۰,۷۰۵۰	
۲۲	۱۸, ۲۵, ۵۶, ۶۳, ۹۴, ۱۰۱, ۱۳۲, ۱۳۹, ۱۷۰, ۱۷۷	۱,۵۵۶۳	۰,۴۲۰۲	۰,۴۲۱۰	
۲۳	۲۶, ۲۹, ۳۲, ۳۵, ۳۸	۱۰,۹۸۰۶	۱۰,۸۶۶۶	۱۰,۸۶۷۱	
۲۴	۶, ۷, ۹, ۱۰, ۱۲, ۱۳, ۱۵, ۱۶, ۲۷, ۲۸, ۳۰, ۳۱, ۳۳, ۳۴, ۳۶, ۳۷	۰,۱۳۱۷	۰,۱۰۰۰	۰,۱۰۰۰	
۲۵	۳۹, ۴۰, ۴۱, ۴۲	۱۲,۱۴۹۲	۱۱,۸۶۶۶	۱۱,۸۶۶۲	
۲۶	۴۳, ۴۶, ۴۹, ۵۲, ۵۵	۱,۶۳۷۳	۱,۰۳۴۴	۱,۰۳۴۷	
۲۷	۵۷, ۵۸, ۵۹, ۶۰, ۶۱, ۶۲	۵,۰۰۳۲	۶,۶۸۳۸	۶,۶۸۴۲	
۲۸	۶۴, ۶۷, ۷۰, ۷۳, ۷۶	۹,۳۵۴۵	۱۰,۸۰۸۳	۱۰,۸۲۰۱	
۲۹	۴۴, ۴۵, ۴۷, ۴۸, ۵۰, ۵۱, ۵۳, ۵۴, ۶۵, ۶۶, ۶۸, ۶۹, ۷۱, ۷۲, ۷۴, ۷۵	۱۵,۰۹۱	۱۳,۸۳۳۹	۱۳,۹۵۶۹	
۲۵, ۴۵۶, ۸۲	۲۵, ۴۵۶, ۵۷	۲۵, ۴۴۶, ۷۶	۲۵, ۴۴۷, ۱	وزن (Ib)	

انتخاب بهترین طرح از میان چند طرح مختلف سازه حائز اهمیت است. از آنجایی که الگوریتم جایا یک روش تصادفی است انتظار می‌رفت که مانند دیگر روش‌ها، نیاز به تعداد تکرار زیاد برای رسیدن به جواب باشد، که در ترکیب با روش جابه‌جایی نیاز به تعداد تکرار زیاد دیده شده است.^[۲۱] اما همان‌طور که از نتایج نمودارهای به دست آمده به خوبی مشهود است از ترکیب الگوریتم جایا و روش نیرو، برای رسیدن به جواب بهینه به تعداد تکرار به مراتب کمتری نیاز است که این نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای روش ارائه شده است.

نشان‌دهنده این موضوع است که روش این تحقیق به انتخاب نقطه‌ی اولیه برای آغاز بهینه‌سازی حساس نیست که نکته‌ی مهمی در روش‌های بهینه‌سازی محسوب می‌شود. نمودارهای کاهش وزن نشان‌دهنده‌ی این موضوع هستند که در چند تکرار اولیه مقدار وزن سازه به میزان زیادی کاهش می‌یابد و همچنین بعد از چند چرخه‌ی آغازین کاملاً به نزدیکی‌های جواب بهینه می‌رسند و قیود فعال در نقطه‌ی بهینه مشخص می‌شوند که حتی می‌توان برای چرخه‌های انتهایی از دیگر روش‌های موجود بهینه‌سازی نیز بهره جست. این کاهش سریع در مقدار وزن از لحاظ طراحی و

پانوشتها

1. evolutionary algorithm
2. swarm intelligence
3. genetic algorithm
4. evolution programming
5. genetic programming
6. differential evolution
7. particle swarm optimization
8. ant colony optimization
9. harmony search
10. gravitational search
11. displacement method
12. force method
13. penalty function
14. integrated force method
15. sequential quadratic method
16. jaya algorithm
17. population

منابع (References)

1. Rao, R.V. "Jaya: a simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, **7**(1), pp. 19-34 (2016).
2. Schmit, L.A. and Farshi, B. "Some approximation concepts for structural synthesis", *AIAA Journal*, **12**(5), pp. 692-699 (1974).
3. Lee, K.S. and Geem, Z.W. "A new structural optimization method based on the harmony search algorithm", *Computers and Structures*, **82**(9-10), pp. 781-798 (2004).
4. Kalatjari, V.R. and Talebpour, M. "Sizing and topology optimization of truss structures by modified multi-search method", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **45**(3), pp. 351-363 (In Persian) (2011).
5. Assimi, H., Jamali, A. and Nariman-zadeh, N. "Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming", *Swarm and Evolutionary Computation*, **37**, pp. 90-103 (2017).
6. Farshi, B. and Schmit, A. "Minimum weight design of stress limited trusses", *Journal of the Structural Division*, **100**(1), pp. 97-107 (1974).
7. Sedaghati, R., Suleman, A. and Tabarrok, B. "Structural optimization with frequency constraints using the finite element force method", *AIAA Journal*, **40**(2), pp. 382-388 (2002).
8. Sedaghati, R. and Esmailzadeh, E. "Optimum design of structures with stress and displacement constraints using the force method", *International Journal of Mechanical Sciences*, **45**(8), pp. 1369-1389 (2003).
9. Kaveh, A. and Kalatjari, V. "Topology optimization of trusses using genetic algorithm, force method and graph theory", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **58**(5), pp. 771-791 (2003).
10. Kaveh, A. and Kalatjari, V. "Size/geometry optimization of trusses by the force method and genetic algorithm", *ZAMM Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, **84**(5), pp. 347-357 (2004).
11. Kaveh, A. and Rahami, H. "Analysis, design and optimization of structures using force method and genetic algorithm", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **65**(10), pp. 1570-1584 (2006).
12. Kaveh, A. and Rahami, H. "Nonlinear analysis and optimal design of structures via force method and genetic algorithm", *Computers and Structures*, **84**(12), pp. 770-778 (2006).
13. Rahami, H., Kaveh, A. and Gholipour, Y. "Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm", *Engineering Structures*, **30**(9), pp. 2360-2369 (2008).
14. Farshi, B. and Alinia-Ziazi, A. "Sizing optimization of truss structures by method of centers and force formulation", *International Journal of Solids and Structures*, **47**(18-19), pp. 2508-2524 (2010).
15. Farshi, B. and Alinia-ziazi, A. "Combination of force formulation and method of centers for minimum weight design of truss structures", *Sharif Journal*, **27-3**(2), pp. 75-65 (In Persian) (2010).
16. Kaveh, A. and Malakouti rad, S. "Hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for the force method-based simultaneous analysis and design", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering*, **34**, pp. 15-34 (2010).
17. Kaveh, A. and Ahmadi, B. "Sizing, geometry and topology optimization of trusses using force method and supervised charged system search", *Structural Engineering and Mechanics*, **50**, pp. 365-382 (2014).
18. Kim, N., Kim, Y.W., Lee, J. and et al. "Two-stage optimization based on force method for damage identification of planar and space trusses", *International Journal of Steel Structures*, **18**, pp. 1-12 (2018).
19. Kaveh, A. and Ilchi Ghazaan., M. "Vibrating particles system algorithm for truss optimization with multiple natural frequency constraints" *Acta Mech*, **228**, pp. 307-322 (2017).
20. Singh, A., Yang, F. and Sedaghati, R. "Design optimization of stiffened panels using finite element integrated force method" *Engineering Structures*, **159**, pp. 99-109 (2018).
21. Cheng, M., Prayogo, D., Wu, Y. and et al. "A Hybrid harmony search algorithm for discrete sizing optimization of truss structure", *Automation in Construction*, **69**, pp. 21-33 (2016).
22. Omidinasab, F. and Goodarzimehr, V. "Hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for truss structures with discrete variables" *Journal of Applied and Computational Mechanics*, **6**(3), pp. 593-604 (2020).
23. Cao, H., Qian, X., Zhijun Chen, Z. and et al. "Enhanced particle swarm optimization for size and shape optimization of truss structures", *Engineering Optimization*, **49**(11), pp. 1939-1956 (2017).
24. Grzywiński, M. and Selejdak, J. "Weight minimization of spatial trusses with genetic algorithm", *Quality Production Improvement*, **1** (1), pp. 238-243 (2019).
25. Degertekin, S.O., Lamberti, L. and Ugur, I.B. "Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the jaya algorithm", *Applied Soft Computing Journal*, **70**, pp. 903-928 (2018).

26. Degertekin, S.O., Lamberti, L. and Ugur, I.B. "Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm", *Applied Soft Computing Journal*, **79**, pp. 363-390 (2019).
27. Przemieniecki, J.S., *Theory of Matrix Structural Analysis*, Dover (2012).
28. Venkayya, V.B. "Design of optimum structures", *computer and structures*, **1**, pp. 265-309 (1970).
29. Dobbs, M.W. and Nelson, R.B. "Application of optimality criteria to automated structural design", *AIAA Journal*, **14**(10), pp. 1436-1443 (1976).
30. Rizzi, P. in "Optimization of multi-constrained structures based on optimality criteria", *17th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University Stanford, California pp.448-462 (1976).
31. Khan, M.R., Willmer, K.D. and Thornton, W.A. "An optimality criterion method for large-scale structures", *AIAA Journal*, **17**(7), pp. 753-761 (1979).
32. John, K.V., Ramak, C.V. and K.G.S. "Minimum weight design of trusses", *Applied Mathematical Modelling*, **7**(5), pp. 374-376 (1983).
33. Lamberti, L. "An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures", *Computers and Structures*, **86**(19-20), pp. 1936-1953 (2008).