

بهینه‌سازی گسسته سازه‌های خرابایی توسط روش مبتنی بر حساسیت سنجی، تقسیم بندی و تجدید حیات

سعید فراهی شهری^۱، محمد رضا قاسمی^{۲*} و سید روح الله موسوی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۹۷/۰۲/۱۸	
پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۰۹	
واژگان کلیدی: بهینه‌سازی گسسته، خرپا، حساسیت سنجی، تقسیم بندی، تجدید حیات.	تاکنون روش‌های متفاوتی برای مسائل بهینه‌سازی گسسته استفاده شده است. بکارگیری الگوریتم‌های فرا اکتشافی با توجه به عدم نیاز به مشتق گیری و خصوصیت جستجوی عمومی یکپارچه در مسائل پیچیده افزایش یافته است. در بعضی از این الگوریتم‌ها، تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی است که موجب تولید جمعیت‌های تکراری، وابستگی زیاد پاسخ نهایی به جمعیت اولیه، افزایش شمار تحلیل‌های تابع هدف و کاهش کارایی این الگوریتم‌ها می شود. در کار حاضر تلاش شده تا تولید و انتخاب جمعیت اولیه به صورت هوشمند صورت گیرد. در این مقاله، یک الگوریتم فرا اکتشافی جدید برای بهینه‌سازی مسائل گسسته معرفی شده که به سازه‌های خرابایی اعمال شده است. روش پیشنهادی الگوریتم SPR نامیده شده و بر مبنای تکنیک‌های حساسیت سنجی عضوهای خرابا، تقسیم بندی فضای جستجو و تجدید حیات ارائه شده است. نتایج بهینه‌سازی گسسته سازه‌های خرابایی نشان داده است که الگوریتم پیشنهادی SPR نسبت به تحقیقات قبلی، توانسته است با مقدار تحلیل‌های کمتر به پاسخ بهینه دست یابد و یا مقدار تابع هدف بهینه را بهبود بخشد.

۱- مقدمه

متغیرهای طراحی به حل مسئله پرداخته‌اند. در حالی که، در اکثر طرح‌های عملی متغیرهای اندازه، به ناچار از یک لیست شامل مقدارهای گسسته انتخاب می‌شوند که در بازار موجود هستند. گسسته بودن متغیرهای طراحی تا اندازه‌ای منجر به پیچیدگی مسئله می‌شود، چون اغلب روش‌های بهینه‌سازی، متغیرهای طراحی را به صورت پیوسته در نظر می‌گیرند. این عامل در مسائل گسسته نامناسب عمل می‌کند و منجر به جواب‌هایی دور از جواب بهینه کلی می‌گردد [۳ و ۲].

تاکنون الگوریتم‌های متفاوتی برای مسائل بهینه‌سازی خراباها استفاده شده است. در کل سه دسته اصلی در

در پنج دهه اخیر شمار زیادی از تکنیک‌های بهینه‌سازی برای حل مسائل استفاده شده است. تکنیک‌های بهینه‌سازی را به طور کلی می‌توان به تکنیک‌های مبتنی بر مشتق گیری و تکنیک‌های بدون مشتق گیری دسته بندی کرد. در سال‌های اخیر، تکنیک‌های جستجوی مستقیم مبتنی بر کنش و واکنش اجتماعی بین موجودات زنده به عنوان یک سازوکار جستجوی قوی شناخته شده است. تکنیک‌های متعلق به این موضوع، از رفتار جمعی یک گروه از حشره‌ها (زنبورها، مورچه‌ها، موربانها و ...) پیروی می‌کنند [۱]. اغلب این الگوریتم‌ها با فرض پیوسته بودن

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mrghasemi@hamoon.usb.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

متداول استفاده کردند [۱۲]. آهساکي الگوریتمی به منظور بهینه‌سازی همزمان هندسه و توپولوژی خرپاهای صفحه‌ای با فرض ثابت بودن مساحت مقطع عضوها ارائه کرد. در آن الگوریتم، تحلیل حساسیت جابجایی‌ها با توجه به مساحت عضوها و مختصات گره‌ها محاسبه شده و سپس طرح بهینه پیدا می‌گردد [۱۳]. کولاکوفسکی و هولنیکی یک روش جدید برای تحلیل حساسیت سازه‌ای بر اساس روش پیچیدگی مجازی^۷ ارائه کردند. روش پیشنهادی آن‌ها امکان محاسبه مشتق برای سازه‌های کشسان و همچنین سازه‌های الاستوپلاستیک را داشته است. این روش بر اساس داده‌های کرنش‌های موجود، جابجایی‌های پلاستیک دائمی، ماتریس نفوذ و تماس‌های بین عضوها استوار بوده است [۱۴]. آهساکي به منظور ارزیابی نظری و کیفیت تغییرهای پاسخ ناشی از تغییر متغیرهای طراحی، یک خرپای چهار عضوی با یک نقص (جابجایی یکی از گره‌ها در جهت X) را مورد بررسی قرار داد. تحلیل حساسیت برای تغییر مقطع عضوهای معلق خرپا انجام شده و یک فرمول‌بندی نظری برای تحلیل حساسیت حداقل مقادیرهای ویژه در حالت کشسان ارائه شده است [۱۵]. وانگ و همکاران یک روش بهینه‌سازی تکاملی برای حداقل کردن وزن سازه‌های خرپایی با در نظر گرفتن همزمان مختصات گره‌ها و مساحت عضوها به عنوان متغیرهای طراحی ارائه کردند. شکل خرپا توسط تحلیل حساسیت جابجایی گره‌ها بهینه‌سازی شده است و در نهایت پس از آن که همه‌ی مقادیرهای حساسیت‌ها در یک بازه‌ی محدود قرار گرفت، شرایط همگرایی بهینه‌سازی شکل تامین شده است [۱۶]. وانگ و همکاران یک روش تکاملی جابجایی گره‌ها برای بهینه‌سازی شکل خرپا به منظور کمینه کردن وزن ارائه کردند. مختصات گره‌ها به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته شده و توسط تحلیل حساسیت جابجا شده است تا در نهایت با تغییر تدریجی طرح اولیه، شکل بهینه خرپا به دست می‌آید [۱۷]. پدرسن و نیلسن به منظور بهینه‌سازی همزمان مساحت مقطع عضوها و موقعیت گره‌های سازه‌های خرپایی، ویژگی‌های حساسیت فرکانس‌های ویژه را به دست آوردند. این روش نیازمند در اختیار داشتن حساسیت‌های هدف و همچنین قیده‌ها برای پارامترهای طراحی مختلف

بهینه‌سازی سازه‌ای وجود دارد [۴]: الف- بهینه‌سازی اندازه (مساحت مقطع‌ها)، ب- بهینه‌سازی شکل [۶ و ۵] (مختصات گره‌ها)، ج- بهینه‌سازی توپولوژی. روش‌های فرا اکتشافی مانند الگوریتم ژنتیک، اجتماع ذرات و سایر روش‌های جستجوی تصادفی به منظور بهینه‌سازی خرپاها به کار رفته است [۷ و ۴]. الگوریتم‌های فرا اکتشافی کاربرد زیادی در بهینه‌سازی سازه‌ها داشته‌اند. میزان این تکنیک‌ها به دلایل عدم وابستگی به مشتق گیری، توانایی ذاتی سر و کار داشتن با متغیرهای پیوسته و گسسته و خصوصیت جستجوی عمومی یکپارچه برای تولید پاسخ‌های منطقی در مسائل پیچیده افزایش یافته است [۸]؛ همانطور که قدوسیان و همکاران یک الگوریتم فرا اکتشافی جدید به نام مثلث بهینه‌گر را به منظور بهینه‌سازی شکل و همچنین بهینه‌سازی شکل و اندازه سازه‌های خرپایی به کار گرفتند [۹]. مزیت‌های الگوریتم‌های فرا اکتشافی منجر به فاصله گرفتن از روش‌های کند و دشوار مانند روش‌های ریاضیاتی و روش معیارهای بهینگی^۱ شده است. درکل کارایی یک الگوریتم بهینه‌سازی با دو فاکتور مهم دقت طراحی نهایی و سرعت دستیابی الگوریتم به پاسخ بهینه همراه است [۸]. تحلیل حساسیت طراحی یک نقش اساسی در بهینه‌سازی سازه‌ای ایفا می‌کند. آرورا و هواگ سه روش مختلف اساسی برای تحلیل حساسیت طراحی در بهینه‌سازی و ارتباط بین آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند که این سه روش شامل روش کار مجازی^۲، روش فضای ثابت^۳ و روش فضای طراحی^۴ بوده است [۱۰]. سانتوس و چوی یک روش عددی برای تحلیل حساسیت طراحی سیستم‌های سازه‌ای غیرخطی از نظر هندسه و مصالح ارائه نمودند. در آن مدل، به منظور تحلیل حساسیت طراحی از یک روش پارامتر توزیع یافته^۵ استفاده شد تا فرمول‌بندی الاستیسیته‌ی پیوسته در مشتق‌گیری محفوظ بماند [۱۱]. وو و آرورا یک روش بهینه‌سازی ساده و موثر را به منظور یافتن بار بحرانی بهینه پیشنهاد کردند که از داده‌های محاسبه شده در طول تحلیل و داده‌های تحلیل حساسیت سایر قیده‌ها استفاده می‌کرد. آن‌ها سه روش تحلیل حساسیت برای ضریب بار بحرانی غیرخطی مربوط به نقطه دوشاخگی^۶ را ارائه و برای دستیابی به اندازه و توپولوژی بهینه چند مثال عددی

⁵ distributed parameter approach

⁶ bifurcation

⁷ virtual distortion method

¹ optimal criteria

² virtual load method

³ state space method

⁴ design space method

تکنیک‌های پیشنهادی شامل تکنیک حساسیت سنجی متغیرهای طراحی گسسته، تکنیک تقسیم بندی فضای جستجو، تکنیک تجدید حیات روند بهینه‌سازی و همچنین تکنیک‌های پیشنهادی برای جهش بوده است. الگوریتم پیشنهادی بر خلاف بسیاری از الگوریتم‌های موجود که در آنها جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود، به صورت هدفمند با استفاده از حساسیت سنجی متغیرهای طراحی (عضوهای خرپا) و تقسیم بندی فضای جستجو جمعیت اولیه را تولید می‌کند و با بهره‌گیری از روش تجدید حیات و تکنیک‌های جهش پیشنهادی، جستجوی عمومی و محلی در فضای طراحی را به صورت موثری انجام می‌دهد.

۲- بهینه‌سازی سازه‌های گسسته

یک مسئله بهینه‌سازی سازه‌ای با متغیرهای طراحی گسسته به عنوان یک مسئله غیر خطی با قیدهای غیر خطی شناخته می‌شود. در بهینه‌سازی اندازه یک سازه خرپایی، مساحت مقطع عضوهای خرپا، متغیرهای طراحی مسئله هستند. تابع هدف مسئله، وزن سازه خرپایی است. در مسائل بهینه‌سازی گسسته اندازه، کار اصلی انتخاب مقطع بهینه عضوها از یک لیست مقطع‌های استاندارد است، به گونه‌ای که وزن سازه در ضمن برآورده شدن قیدهای طراحی، کمینه گردد. مسئله طراحی بهینه برای متغیرهای گسسته می‌تواند با استفاده از رابطه (۱) بیان شود:

$$W(A) = \sum_{i=1}^n \rho_i L_i A_i \quad (1)$$

که در آن ρ_i ، L_i و A_i به ترتیب چگالی، طول و مساحت مقطع i -امین عضو خرپا است. $W(A)$ وزن سازه و n شمار متغیرهای طراحی مسئله است. در مسائل گسسته بردار D معرف لیست مقطع‌های موجود برای همه متغیرهای مسئله است که به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$D = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_i\} \quad (2)$$

که d شمار مقطع‌های موجود در لیست است. مقطع‌های طراحی شده باید برخی قیدهای نامساوی را تامین کنند. معادله (۳) و (۴) قیدهای نامساوی هستند که به ترتیب، شامل محدودیت تنش عضوها و محدودیت جابجایی گره‌های سازه خرپایی است.

بوده است [۱۸]. دیزنگیان و قاسمی یک روش مبتنی بر حساسیت را به منظور بهینه‌سازی اندازه سازه‌های خرپایی ارائه کردند که از چهار عمل‌گر مختلف به منظور دستیابی به طرح بهینه عمومی استفاده کرده است. یکی از عمل‌گرهای استفاده شده، تحلیل حساسیت مرزی بوده که درجه حساسیت هر متغیر طراحی را نسبت به سرپیچی از قیدها در مجاورت مرز ناحیه شدنی و نشدنی^۱ مشخص کرده است. روش تفاضل محدود به منظور تحلیل حساسیت به کار گرفته شده است. کارایی روش ارائه شده با استفاده از چند مثال خرپای متداول با متغیرهای طراحی پیوسته ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که این روش علاوه بر افزایش سرعت فرایند بهینه‌سازی، دستیابی به طرح بهینه عمومی بدون هیچ گونه سرپیچی از قیدها را نیز تضمین کرده است [۱۹]. دیزنگیان و قاسمی همچنین یک روش مبتنی بر رتبه بندی را به منظور بهینه‌سازی مقطع سازه‌ها پیشنهاد کردند. در این روش تکنیک تحلیل حساسیت مبتنی بر سرپیچی به عنوان یکی از مرحله‌ها، مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تعیین حساسیت نسبی هر متغیر طراحی نسبت به سایر متغیرها از مفهوم عددی تفاضل محدود استفاده شده است. آن‌ها این تکنیک را برای بهینه‌سازی چند خرپای متداول با متغیرهای طراحی پیوسته به کار گرفتند و نتایج نشان داد که روش ارائه شده ضمن دستیابی به پاسخ بهینه قابل قبول، شمار تحلیل‌ها را به میزان چهار تا هشت برابر پژوهش‌های قبلی کاهش داده است [۲۰].

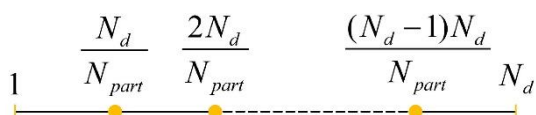
برخی از الگوریتم‌های فرا اکتشافی ضمن برتری‌هایی که دارند، دارای کاستی‌هایی نیز هستند. از جمله این که تولید جمعیت اولیه در بعضی از این الگوریتم‌ها به صورت تصادفی است. این امر موجب تولید جمعیت‌های تکراری، وابستگی زیاد پاسخ نهایی به جمعیت اولیه، افزایش میزان تحلیل‌های تابع هدف و کاهش کارایی این الگوریتم‌ها می‌شود. این مقاله به منظور بهبود دقت طراحی نهایی و سرعت دستیابی به پاسخ بهینه، یک الگوریتم فرا اکتشافی جدید را برای بهینه‌سازی مسائل گسسته معرفی می‌کند که به سازه‌های خرپایی دوبعدی و سه‌بعدی اعمال شده است. روش پیشنهادی الگوریتم SPR^۲ نامیده شده است و در آن ترکیبی از تکنیک‌های جدید استفاده شده است.

² sensitivity-partitioning-rebirthing algorithm

¹ feasible nonfeasible (FNF)

صورت تصادفی انجام می‌شود و از هیچ قانون و قاعده‌ای پیروی نمی‌کند. این کار باعث وابستگی پاسخ نهایی به جمعیت اولیه، ایجاد جمعیت‌های تکراری، افزایش قابل توجه میزان تحلیل‌ها و در نتیجه کاهش کارایی الگوریتم می‌شود. به منظور حل این مشکل، در الگوریتم پیشنهادی SPR از تکنیک تقسیم بندی لیست مقطع‌ها و انتخاب هوشمند جمعیت اولیه استفاده شده است. در این تکنیک مطابق شکل (۱)، لیست مقطع‌های موجود با توجه به شمار عضوهای آن (N_d)، به چند قسمت مساوی (N_{part}) تقسیم می‌شوند که در واقع، مقطع موجود در ابتدا و انتهای هر قسمت به عنوان نماینده‌ای از مقطع‌های اطراف خود حضور دارد.

سپس با اولویت متغیرهایی که از مرحله حساسیت سنجی، حساسیت بالاتری داشته‌اند، بهترین نماینده از لیست تقسیم‌بندی شده‌ی مقطع‌ها، برای هر متغیر طراحی انتخاب می‌شود. بهترین مقطع برای هر متغیر طراحی، مقطعی است که به ازای آن، مقدار تابع هدف کمینه شود. در واقع هدف از مرحله حساسیت‌سنجی و تقسیم بندی لیست مقطع‌ها این است که ابتدا متغیرهای با حساسیت بالا شناسایی و آرام گردند، سپس با ثابت شدن و به روزرسانی مقطع اختصاص داده شده به آن‌ها، سایر متغیرهای طراحی بهترین نماینده خود را از لیست مقطع‌ها شناسایی کنند.



شکل ۱- تقسیم بندی لیست مقطع‌ها

۳-۳- تکنیک تجدید حیات

همان‌طور که در قسمت قبلی مشخص شد، همه‌ی متغیرهای طراحی، بهترین نماینده خود را در لیست مقطع‌ها شناسایی کردند، اما ممکن است بهترین مقدار برای هر متغیر طراحی، در بازه اطراف نماینده شناسایی شده باشد. در این وضعیت نیاز است تا توسط تکنیک تجدید حیات، به هر متغیر طراحی اجازه حرکت در بازه‌ی اطراف نماینده انتخابی ($2 \times RB$) را به منظور خروج از وضعیت رکود الگوریتم داد. طبق شکل (۲)، در این تکنیک هر یک از متغیرهای طراحی می‌توانند یکی از مقطع‌های اطراف نماینده انتخابی را برگزینند تا بهترین مقدار تابع هدف به دست آید. این تکنیک یک فرآیند تکراری است و در هر

$$g_i = \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} - 1 \right| \leq 0 \quad (3)$$

$$g_j = \left| \frac{\Delta_j}{\Delta_{\max}} - 1 \right| \leq 0 \quad (4)$$

که در روابط فوق σ_i و Δ_j به ترتیب تنش محاسبه شده عضوها و جابجایی محاسبه شده گره‌های خرپا است. همچنین σ_{\max} و Δ_{\max} به ترتیب مقدار تنش و جابجایی مجاز هستند. به منظور تأمین قیدهای مسئله، از تابع جریمه رابطه (۵) استفاده شده است:

$$W_p(A) = \left(1 + \varepsilon_1 \sum_{k=1}^q \max \{0, g_k\} \right)^{\varepsilon_2} W(A) \quad (5)$$

که $W_p(A)$ وزن جریمه شده سازه، q شمار قیدهای مسئله، g_k k -امین قید مسئله، ε_1 و ε_2 نیز ضریب‌های عددی هستند که در مقاله حاضر به ترتیب، ۱۰ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

۳- شرح الگوریتم پیشنهادی SPR

۳-۱- تکنیک حساسیت‌سنجی اولیه متغیرهای طراحی

در این تکنیک ابتدا به همه متغیرهای طراحی، مقدار میانی موجود در لیست مقطع‌ها نسبت داده شده و تابع هدف به ازای آن ($avgv$) محاسبه می‌شود. سپس به هر یک از متغیرهای طراحی با در نظر گرفتن مقطع میانی لیست برای سایر متغیرها، کوچکترین مقطع موجود نسبت داده می‌شود و تابع هدف مربوط به کمینه سازی آن متغیر ($\min v_i$) محاسبه می‌شود.

با استفاده از این تکنیک، حساسیت هر متغیر نسبت به تغییر مقطع (sns_i) توسط رابطه (۶) مورد ارزیابی قرار گرفته و ذخیره می‌شود:

$$sns_i = \frac{(\min v_i - avgv)}{(avgv)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

که n شمار متغیرهای طراحی مسئله است. سپس بردار حساسیت متغیرهای طراحی نسبت به تغییر مقطع به صورت نزولی مرتب می‌شود تا متغیرهای با حساسیت بالا در صدر قرار گیرند.

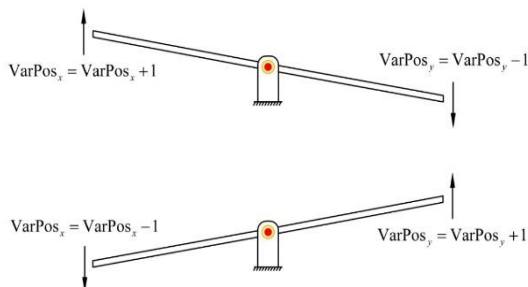
۳-۲- تکنیک تقسیم بندی لیست مقطع‌ها

در بسیاری از الگوریتم‌های موجود، تولید جمعیت اولیه به

جدید جایگزین نماینده قبلی آن متغیر خواهد شد. این جهش در هر تکرار فقط یک جمعیت جدید ایجاد می‌کند و در نتیجه تاثیر زیادی در افزایش شمار تحلیل‌های تابع هدف نخواهد داشت.

۳-۴-۲- جهش الاکلنگی

این نوع جهش از عملکرد الاکلنگ الهام گرفته شده است. با توجه به این که ممکن است کاهش یا افزایش مقطع برخی از متغیرهای طراحی وابسته به افزایش یا کاهش متغیر دیگری باشد، جهش الاکلنگی نیز در نظر گرفته شده است. در این جهش دو متغیر طراحی (X, Y) به تصادف انتخاب شده و مطابق شکل (۳) مانند الاکلنگ، یک بار متغیر اول (X) دچار افزایش مقطع و متغیر دوم (Y) دچار کاهش مقطع می‌شود و بار بعدی بر عکس. در شکل (۳)، منظور از VarPos موقعیت متغیر انتخاب شده در لیست مقطع‌ها است. تابع هدف در هر دو حالت محاسبه می‌شود و در صورتی که در هر کدام از حالت‌ها تابع هدف بهبود یابد، نماینده جدید متغیرهای مربوطه، جایگزین نماینده قبلی آن‌ها خواهد شد. جهش الاکلنگی نیز با توجه به این که در هر تکرار فقط دو جمعیت جدید ایجاد می‌کند، تاثیر قابل توجهی در افزایش شمار تحلیل‌ها نخواهد داشت.



شکل ۳- تکنیک جهش الاکلنگی

با توجه به مطلب‌های گفته شده، مراحل و روند الگوریتم پیشنهادی SPR، در شکل (۴) نشان داده شده است.

۴- مثال‌های عددی

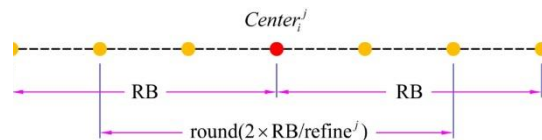
در این قسمت الگوریتم پیشنهادی SPR توسط مثال‌های بهینه‌سازی وزن سه خرپای مختلف در حالت‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مثال‌ها شامل خرپای مسطح ۱۰ عضوی، ۱۵ عضوی، ۲۰ عضوی و خرپای فضایی ۲۵ عضوی هستند. الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده است. الگوریتم SPR برای متغیرهای گسسته به همی این مثال‌ها اعمال شده است

تکرار، بهترین مقدار به دست آمده برای هر متغیر به عنوان نماینده جدید آن متغیر شناخته خواهد شد تا بازه‌های انتخابی شناور بوده و به صورت پویا به سمت بهترین پاسخ حرکت کنند.

بنابراین $center_i^j$ بهترین نماینده‌ی متغیر طراحی i -ام در تکرار j -ام است. در مرحله‌های ابتدایی تحلیل، برای تامین فضای جستجوی عمومی، بازه اطراف نماینده‌های انتخابی بزرگ است، اما به منظور کاهش میزان تحلیل‌ها و افزایش کارایی این تکنیک، لازم است که طول بازه در طول تحلیل به مرور کاهش یابد. به این منظور طبق رابطه (۷)، از پارامتر $refine^j$ استفاده شده است:

$$refine^j = 1 + (j - 1) \times refrate \quad (7)$$

که در رابطه فوق $refine^j$ ، j و $refrate$ به ترتیب، مقدار پارامتر تطبیق بازه در تکرار j -ام، شماره تکرار و نرخ تطبیق بازه است. در تکرار اول که مقدار $j = 1$ است، $refine^1 = 1$ خواهد بود و طبق شکل (۲)، بازه‌ی جستجو در اطراف نماینده انتخابی، همان $2 \times RB$ است. به مرور با افزایش میزان تکرارها، بازه‌ی جستجو در طول مدت تحلیل مسئله، کوچک‌تر ($round(2 \times RB / refine^j)$) می‌شود.



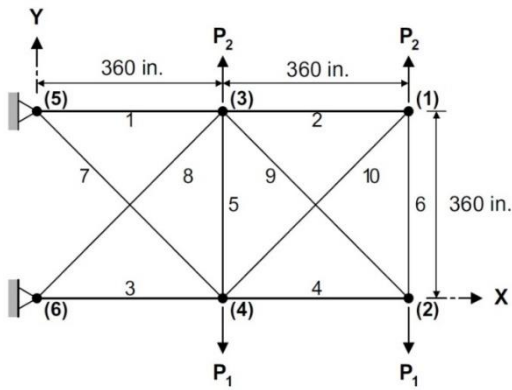
شکل ۲- تکنیک تجدید حیات

۳-۴-۴- تکنیک‌های جهش

با توجه به این که ممکن است در بعضی از مسئله‌ها، نماینده‌ی انتخاب شده برای هر یک از متغیرهای طراحی، به علت نزدیکی مقدار حساسیت‌ها و یا شمار زیاد عضوهای لیست مقطع‌ها، نماینده‌ی مناسبی نباشد، به کارگیری تکنیک‌های جهش تاثیر مثبتی در فرآیند یافتن محلی پاسخ بهینه خواهد داشت. در الگوریتم پیشنهادی SPR از دو نوع تکنیک جهش استفاده شده است:

۳-۴-۱- جهش تک متغیره

به منظور همگرایی سریع‌تر الگوریتم در هر تکرار، یکی از متغیرهای طراحی انتخاب و به تصادف یک مقطع کوچک‌تر یا یک مقطع بزرگ‌تر می‌شود. در صورتی که مقدار تابع هدف محاسبه شده در اثر این تغییر بهبود یابد، نماینده

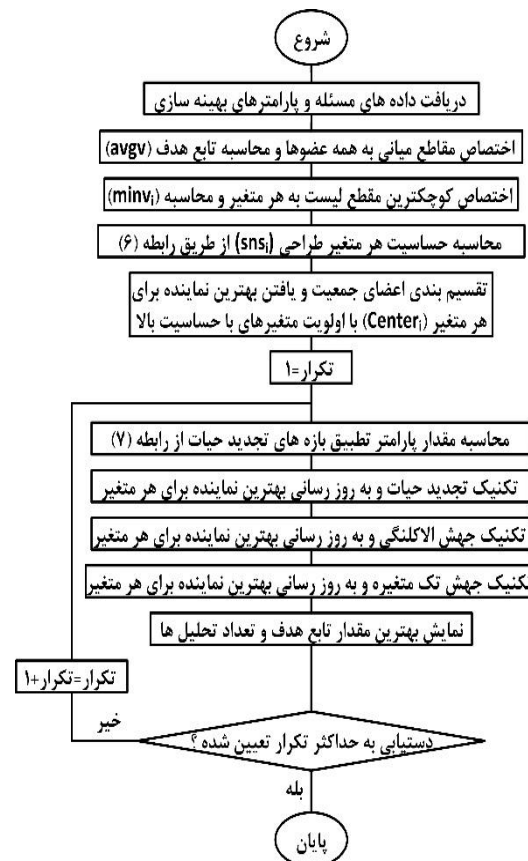


شکل ۵- خرپای ۱۰ عضوی

این مثال در مراجع مختلف به دو حالت مختلف در نظر گرفته شده است: در حالت ۱ مساحت مقطع‌ها از لیست $D = [1/62, 1/8, 1/99, 2/13, 2/38, 2/62, 2/63, 2/88, 2/93, 2/97, 3/13, 3/38, 3/47, 3/55, 3/84, 3/87, 3/88, 3/89, 4/8, 4/18, 4/22, 4/23, 4/49, 4/59, 4/97, 5/12, 5/74, 7/22, 7/97, 11/5, 13/5, 13/9, 14/2, 15/5, 16/9, 18/8, 19/9, 22, 22/9, 26/5, 30, 33/5]$ بر حسب اینج مربع انتخاب شده است و در حالت ۲ انتخاب مساحت مقطع‌ها از لیست $D = [0/5, 0/1, 0/8, 1/5, 2, 2/5, 3, 3/5, 4, 4/5, 5, 5/5, 6, 6/5, 7, 7/5, 8, 8/5, 9, 9/5, 10, 10/5, 11, 11/5, 12, 12/5, 13, 13/5, 14, 14/5, 15, 15/5, 16, 16/5, 17, 17/5, 18, 18/5, 19, 19/5, 20, 20/5, 21, 21/5, 22, 22/5, 23, 23/5, 24, 24/5, 25, 25/5, 26, 26/5, 27, 27/5, 28, 28/5, 29, 29/5, 30, 30/5, 31, 31/5]$ بر حسب اینج مربع صورت گرفته است. حساسیت متغیرهای طراحی خرپای ۱۰ عضوی در حالت ۱ و ۲ توسط رابطه (۶) محاسبه شده و در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده است. به منظور نمایش بهتر و امکان مقایسه‌ی راحت‌تر حساسیت متغیرهای طراحی، محور عمودی به صورت لگاریتمی در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۶) و (۷)، مشخص است که عضوهای ۳، ۱، ۷ و ۸ که در نزدیکی گره‌های تکیه گاهی قرار داشته‌اند و عضو ۴ که تحت بارگذاری بوده، دارای حساسیت بیشتری بوده‌اند و اولویت تکنیک تقسیم بندی مقطع‌ها با این عضوها بوده است.

تاریخچه همگرایی وزن بهینه حالت ۱ خرپای ۱۰ عضوی در شکل (۸) نشان داده شده است. الگوریتم SPR با ۱۳۳۰ تحلیل به وزن ۵۴۹۰/۷۴ پوند همگرا شده است.

و عملکرد آن با سایر الگوریتم‌ها مقایسه شده است. همه‌ی سازه‌های خرپایی با روش ماتریس سختی تحلیل شده‌اند. به جز خرپای ۲۰۰ عضوی که ۲۰ بار توسط الگوریتم پیشنهادی اجرا شده، بقیه‌ی مثال‌ها ۱۰ بار اجرا شده و میانگین و انحراف معیار در جدول‌ها گزارش شده است. شمار تحلیل‌های متناظر با اولین پاسخ بهینه حاصل شده، به عنوان شمار ارزیابی تابع هدف در نظر گرفته شده است.

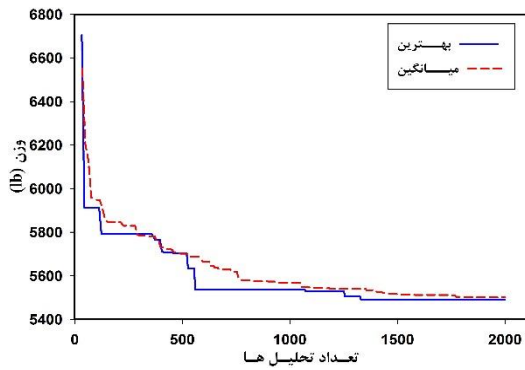


شکل ۴- مراحل الگوریتم پیشنهادی SPR

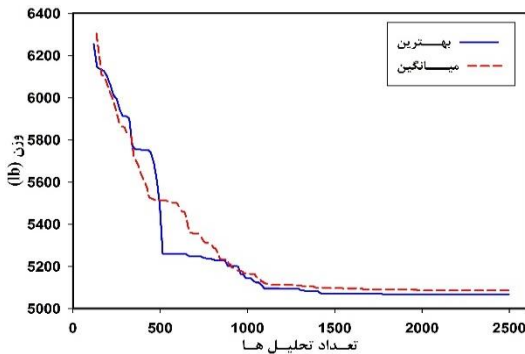
۴-۱- خرپای مسطح ۱۰ عضوی

سازه خرپایی ۱۰ عضوی توسط بسیاری از دانشمندان مطالعه شده است. [۱،۲،۸] و [۲۱-۲۶] چگالی و مدول الاستیسیته مصالح به ترتیب 0.1 lb/in^3 و 10000 ksi است. محدودیت تنش برای تمامی عضوها $\pm 25 \text{ ksi}$ بوده و همه‌ی گره‌ها در دو جهت x و y به تغییر مکان $\pm 2 \text{ in}$ محدود شده‌اند. در این مثال ۱۰ متغیر طراحی مختلف وجود دارد. بار قائم $P_1 = 10^5 \text{ lb}$ در گره‌های ۲ و ۴ و بار $P_2 = 0$ در گره‌های ۱ و ۳ اعمال شده است. شکل (۵) شرایط هندسی، تکیه‌گاهی و بارگذاری این خرپای طره‌ای را نشان می‌دهد.

نشان داده شده است.



شکل ۸- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرابی ۱۰ عضوی (حالت ۱)



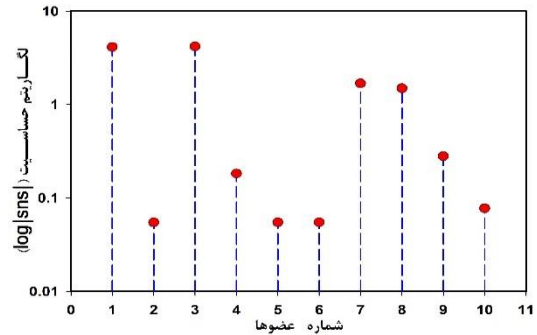
شکل ۹- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرابی ۱۰ عضوی (حالت ۲)

مشخص است که برای پاسخ بهینه ارائه شده، مقدار جابه‌جایی گره‌ها و تنش عضوهای خرابی ۱۰ عضوی برای حالت ۱ و ۲ در محدوده مجاز قرار گرفته است و قیدهای مسئله تامین شده است.

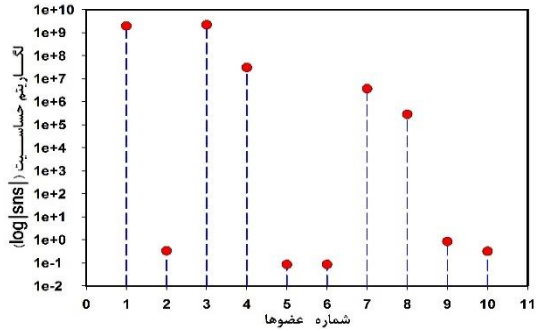
۴-۲- خرابی مسطح ۱۵ عضوی

خرابی ۱۵ عضوی نشان داده شده در شکل (۱۲)، توسط بعضی از دانشمندان مورد بررسی قرار گرفته است [۲، ۴، ۲۳، ۲۸-۲۶]. در این مثال چگالی و مدول الاستیسیته مصالح به ترتیب 7800 kg/m^3 و 200 GPa بوده است. محدودیت تنش برای هر یک از عضوهای خرپا $\pm 120 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده است. جابجایی مجاز هر یک از گره‌ها در دو جهت X و Y، $\pm 10 \text{ mm}$ بوده است.

در این مسئله، شمار متغیرهای طراحی ۱۵ عدد بوده است که از مجموعه $D = [0.113/2, 0.143/2, 0.145/9, 0.174/9, 0.185/9, 0.235/9, 0.265/9, 0.297/1, 0.308/6, 0.334/3, 0.338/2, 0.397/8, 0.407/6, 0.507/6, 0.736/7, 0.791/2, 1.063/7]$ بر حسب میلی متر مربع انتخاب شده‌اند.



شکل ۶- حساسیت عضوهای خرابی ۱۰ عضوی (حالت ۱)



شکل ۷- حساسیت عضوهای خرابی ۱۰ عضوی (حالت ۲)

مقایسه طرح‌های بهینه خرابی ۱۰ عضوی در حالت ۱ در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود الگوریتم SPR با ۱۳۳۰ تحلیل تابع هدف، پس از الگوریتم ADS [۸]، که با ۱۰۰۰ تحلیل به وزن $5490/74$ پوند رسیده، بهترین مقدار تابع هدف و شمار تحلیل‌ها را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها داشته است. میانگین و انحراف معیار الگوریتم پیشنهادی نیز پس از الگوریتم HHS [۲۳]، بهترین مقدار به دست آمده بوده است. البته باید توجه شود که این نتایج در شمار تحلیل‌های بسیار پایین‌تر از الگوریتم HHS [۲۳] حاصل شده است. در شکل (۹) تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرابی ۱۰ عضوی در حالت ۲ آورده شده است. الگوریتم SPR با 1779 بار تحلیل به وزن $5067/33$ پوند دست یافته است. در جدول ۲ طرح‌های بهینه خرابی ۱۰ عضوی در حالت ۲ مقایسه شده است. الگوریتم SPR در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، بهترین مقدار تابع هدف را با کمترین میزان تحلیل‌ها به دست آورده است. الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم WCA [۲۶]، میزان تحلیل‌ها را نزدیک به ۱/۲ درصد کاهش داده است. الگوریتم SPR از نظر میانگین و انحراف معیار، با اختلاف کمی پس از الگوریتم WCA [۲۶] و HHS [۲۳] قرار گرفته است. مقدار جابه‌جایی گره‌ها و تنش عضوهای خرابی ۱۰ عضوی برای حالت ۱ و ۲ در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)

جدول ۱- مقایسه طرح‌های بهینه خرپای ۱۰ عضوی (حالت ۱)

SPR	مساحت مقطع‌های بهینه (in ²)								متغیرهای طراحی
	EFA لی و همکاران [۲۴]	HHS چنگ و همکاران [۲۳]	aeDE ههو و همکاران [۲۲]	ADS حسنسی و آزاد همکاران [۸]	GSS آزاد و همکاران [۲۱]	ABC سونمز [۱]	HPSO لی و همکاران [۲]	PSO لی و همکاران [۲]	
۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۰	۳۳/۵	۳۰	۳۰	A1
۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	A2
۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۳۰	A3
۱۴/۲	۱۴/۲	۱۴/۲	۱۴/۲	۱۴/۲	۱۳/۹	۱۴/۲	۱۳/۵	۱۳/۵	A4
۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	A5
۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۸	A6
۷/۹۷	۷/۹۷	۷/۹۷	۷/۹۷	۷/۹۷	۱۱/۵	۷/۹۷	۷/۹۷	۱۱/۵	A7
۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۲/۹	۲۶/۵	۱۸/۸	A8
۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	A9
۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۸	۱/۸	A10
۵۴۹۰/۷۴	۵۴۹۰/۷۴	۵۴۹۰/۷۴	۵۴۹۰/۷۴	۵۴۹۰/۷۴	۵۵۳۳/۶۶	۵۴۹۰/۷۴	۵۵۳۱/۹۸	۵۵۸۱/۷۶	وزن (lb)
۵۵۰۰/۹۹	۵۵۲۸/۲۳	۵۴۹۳/۴۹	۵۵۰۲/۶۲	۵۵۳۹/۹۷	۵۵۸۲/۷۰	۵۵۱۰/۳۵	-	-	میانگین (lb)
۱۶/۰۱	۱۸/۳۶	۱۰/۴۶	۲۰/۷۸	۳۵/۸۶	۳۸/۹۰	۲۱/۵۱	-	-	انحراف معیار (lb)
۱۳۳۰	۲۰۵۰	۳۵۳۳	۲۳۸۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۲۵۸۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	شمار تحلیل‌ها

جدول ۲- مقایسه طرح‌های بهینه خرپای ۱۰ عضوی (حالت ۲)

SPR	مساحت مقطع‌های بهینه (in ²)						متغیرهای طراحی
	HHS چنگ و همکاران [۲۳]	WCA اسکندر و همکاران [۲۶]	IPSO قلی‌زاده [۲۵]	MBA سدالله و همکاران [۴]	HPSO لی و همکاران [۲]	PSOPC لی و همکاران [۲]	
۳۰/۵	۲۹/۵	۲۹/۵	۲۹/۵	۲۹/۵	۳۱/۵	۲۵/۵	A1
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	A2
۲۲/۵	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴/۵	۲۳/۵	A3
۱۵/۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵/۵	۱۸/۵	A4
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	A5
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	A6
۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	A7
۲۰/۵	۲۱	۲۱	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۰/۵	۲۱/۵	A8
۲۲/۵	۲۲	۲۲	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۰/۵	۲۳/۵	A9
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	A10
۵۰۶۷/۳۳	۵۰۶۷/۳۳	۵۰۶۷/۳۳	۵۰۶۷/۳۳	۵۰۶۷/۳۳	۵۰۷۳/۵۱	۵۱۳۳/۱۶	وزن (lb)
۵۰۷۰/۵۷	۵۰۶۸/۳۶	۵۰۶۸/۳۰	۵۰۷۴/۳۸	-	-	-	میانگین (lb)
۴/۴۶	۲/۳۴	۱/۷۴	۸/۶۷	-	-	-	انحراف معیار (lb)
۱۷۷۹	۵۰۰۰	۱۸۰۰	۵۶۰۰	۳۰۰۰	۲۵۰۰۰	-	شمار تحلیل‌ها

نمایش داده شده است. مشخص است که عضوهای ۵، ۸، ۱۴ و ۱۵ که در فرایند بهینه‌سازی خرپای ۱۵ عضوی نقش بسیار موثری داشته‌اند، دارای حساسیت بیشتری بوده و به خوبی توسط الگوریتم پیشنهادی شناسایی شده‌اند. با توجه به شکل‌های (۱۳-۱۵) و جدول‌های ۳-۵، عملکرد خوب الگوریتم پیشنهادی در تشخیص عضوهای حساس و

سه حالت مختلف بارگذاری به سازه اعمال شده است:

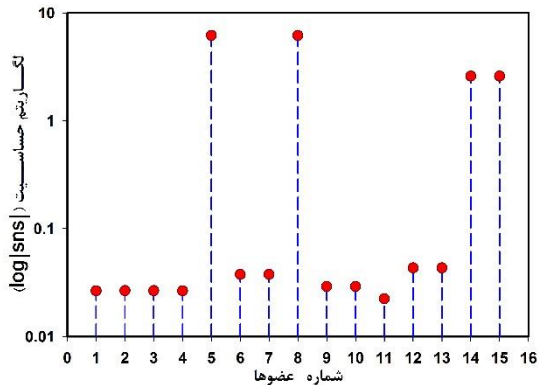
$$\text{حالت ۱: } P_1 = P_2 = P_3 = 35 \text{ kN}$$

$$\text{حالت ۲: } P_1 = P_3 = 35 \text{ kN}, P_2 = 0$$

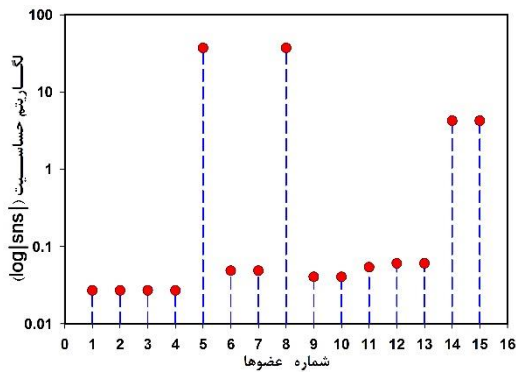
$$\text{حالت ۳: } P_1 = P_2 = 35 \text{ kN}, P_3 = 0$$

حساسیت متغیرهای طراحی خرپای ۱۵ عضوی در حالت‌های ۱، ۲ و ۳ محاسبه شده و در شکل‌های (۱۳-۱۵)

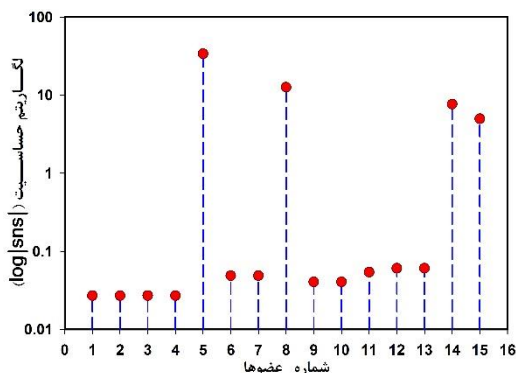
به طور چشمگیری کاهش داده است. الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم WCA [۲۶]، شمار تحلیل‌های تابع هدف را تقریباً ۷۶ درصد کمتر کرده است. میانگین وزن الگوریتم پیشنهادی (۱۰۵/۷۵۲) بسیار به مقدار بهینه (۱۰۵/۷۳۵) نزدیک بوده و انحراف معیار ۰/۰۴ نیز عملکرد قابل قبول الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- حساسیت عضوهای خرابی ۱۵ عضوی (حالت ۱)



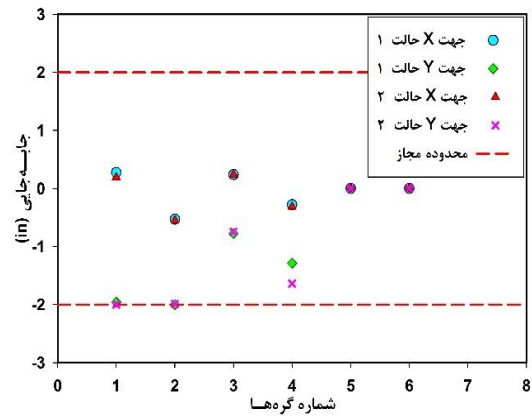
شکل ۱۴- حساسیت عضوهای خرابی ۱۵ عضوی (حالت ۲)



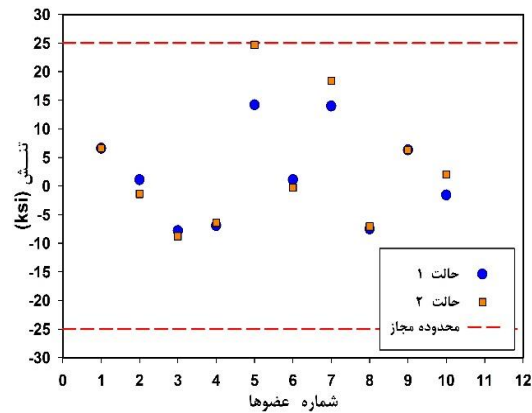
شکل ۱۵- حساسیت عضوهای خرابی ۱۵ عضوی (حالت ۳)

کنترل قیدهای جابه‌جایی گره‌ها و تنش عضوهای خرابی ۱۵ عضوی برای حالت‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. مقدار جابه‌جایی گره‌ها و تنش عضوهای خرابی ۱۵ عضوی برای پاسخ‌های بهینه ارائه

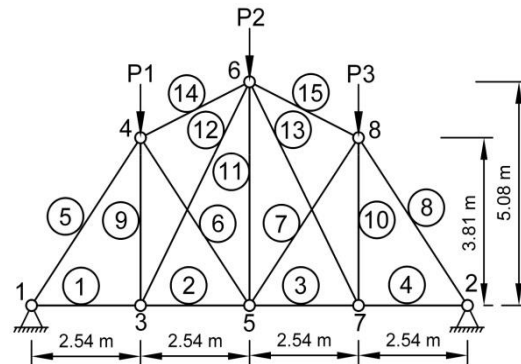
دستیابی سریع به پاسخ بهینه مشخص است.



شکل ۱۰- کنترل جابه‌جایی گره‌های خرابی ۱۰ عضوی

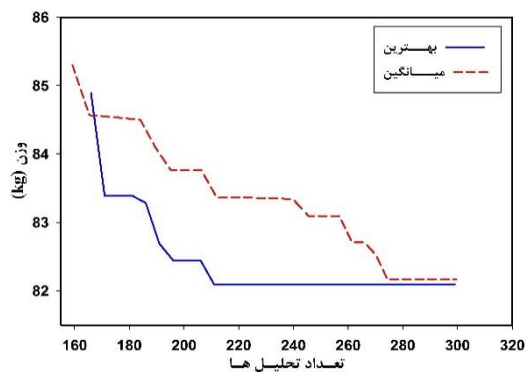


شکل ۱۱- کنترل تنش عضوهای خرابی ۱۰ عضوی

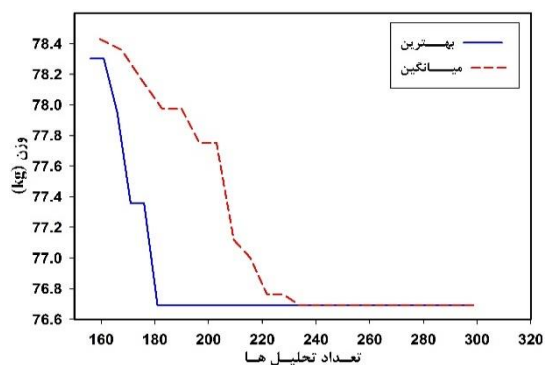


شکل ۱۲- خرابی ۱۵ عضوی

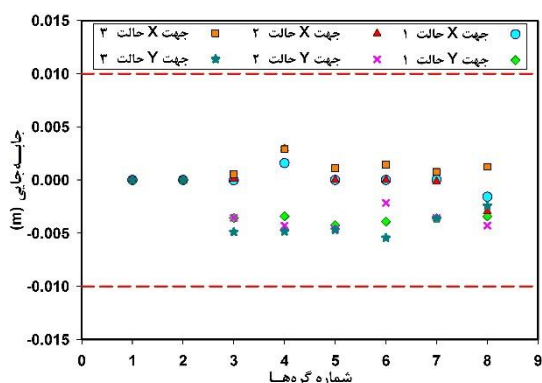
شکل (۱۶) تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرابی ۱۵ عضوی را در حالت ۱ نشان می‌دهد. الگوریتم SPR در ۱۸۱ تحلیل به وزن ۱۰۵/۷۳۵ کیلوگرم همگرا شده است. جدول ۳ طرح بهینه ارائه شده برای خرابی ۱۵ عضوی در حالت ۱ را توسط الگوریتم SPR نشان می‌دهد که با طرح بهینه‌ی سایر مقاله‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، ضمن دستیابی به پاسخ بهینه، میزان ارزیابی تابع هدف را



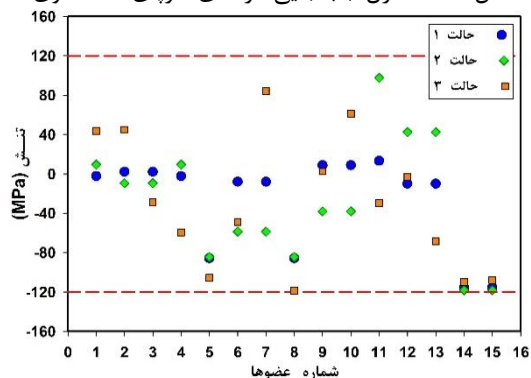
شکل ۱۷- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرپای ۱۵ عضوی (حالت ۲)



شکل ۱۸- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرپای ۱۵ عضوی (حالت ۳)

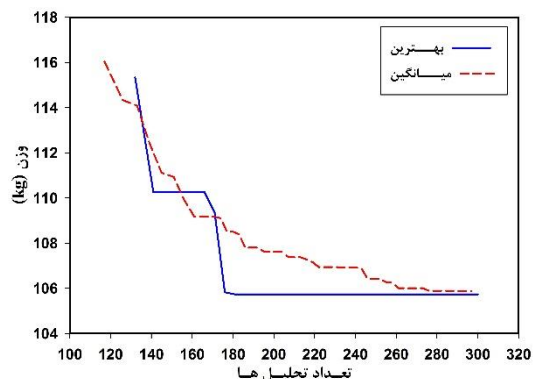


شکل ۱۹- کنترل جابه‌جایی گره‌های خرپای ۱۵ عضوی



شکل ۲۰- کنترل تنش عضوهای خرپای ۱۵ عضوی

شده، در هر سه حالت در محدوده مجاز قرار گرفته است و قیدهای مسئله تامین شده است.



شکل ۱۶- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرپای ۱۵ عضوی (حالت ۱)

تاریخچه همگرایی وزن بهینه حالت ۲ خرپای ۱۵ عضوی در شکل (۱۷) نشان داده شده است. الگوریتم پیشنهادی در ۲۱۱ تحلیل به وزن ۸۲/۰۹۵ کیلوگرم دست یافته است. در جدول ۴ طرح بهینه ارائه شده توسط الگوریتم SPR برای خرپای ۱۵ عضوی در حالت ۲ با سایر مقاله‌ها مقایسه شده است. در الگوریتم پیشنهادی ضمن دستیابی به پاسخ بهینه، شمار تحلیل‌های تابع هدف کاهش چشمگیری داشته است، به گونه‌ای که نسبت به الگوریتم WCA [۲۶]، شمار تحلیل‌های تابع هدف، تقریباً ۸۲/۴ درصد کاهش یافته است. الگوریتم پیشنهادی ضمن کاهش چشمگیر شمار تحلیل‌ها، میانگین وزن بسیار نزدیک به مقدار بهینه و انحراف معیار ناچیزی (۰/۱۶) داشته است.

شکل (۱۸) تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرپای ۱۵ عضوی را در حالت ۳ نشان می‌دهد. در الگوریتم SPR وزن ۷۶/۶۹۲ کیلوگرم با ۱۸۱ تحلیل حاصل شده است. مقایسه طرح‌های بهینه خرپای ۱۵ عضوی در حالت ۳، در جدول ۵ آورده شده است. الگوریتم SPR ضمن دستیابی به پاسخ بهینه، در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها کمترین شمار تحلیل را داشته است. الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم WCA [۲۶]، شمار تحلیل‌ها را تقریباً ۸۶/۶ درصد کاهش داده است. میانگین وزن ۷۶/۶۹۲ کیلوگرم و انحراف معیار صفر، نشان دهنده عملکرد بسیار خوب الگوریتم SPR است. الگوریتم پیشنهادی در تمامی حالت‌های بررسی شده برای خرپای ۱۵ عضوی، شمار تحلیل‌ها را به صورت بسیار چشمگیری کاهش داده است.

جدول ۳- مقایسه طرح‌های بهینه خربای ۱۵ عضوی (حالت ۱)

مساحت مقطع‌های بهینه (mm ²)							متغیرهای طراحی
SPR	TLBO سیدزاده و همکاران [۲۸]	WOA میرجلالی و لوپس [۲۷]	HHS چنگ و همکاران [۲۳]	WCA اسکندر و همکاران [۲۶]	MBA سدالله و همکاران [۴]	HPSO لی و همکاران [۲]	
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A1
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A2
۱۱۳/۲	۱۴۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A3
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A4
۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	A5
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A6
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A7
۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	A8
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A9
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A10
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A11
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A12
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A13
۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	A14
۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	A15
۱۰۵/۷۳۵	۱۰۸/۰۹۴	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵	وزن (kg)
۱۰۵/۷۵۲	۱۲۲/۷۵۸	-	۱۰۶/۱۵۷	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵	-	میانگین (lb) (kg)
۰/۰۴	-	-	۱/۰۹	۰	۰	-	انحراف معیار (kg)
۱۸۱	۲۰۵۴	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۷۵۰	۲۰۰۰	۷۵۰۰	شمار تحلیل‌ها

جدول ۵- مقایسه طرح‌های بهینه خربای ۱۵ عضوی (حالت ۳)

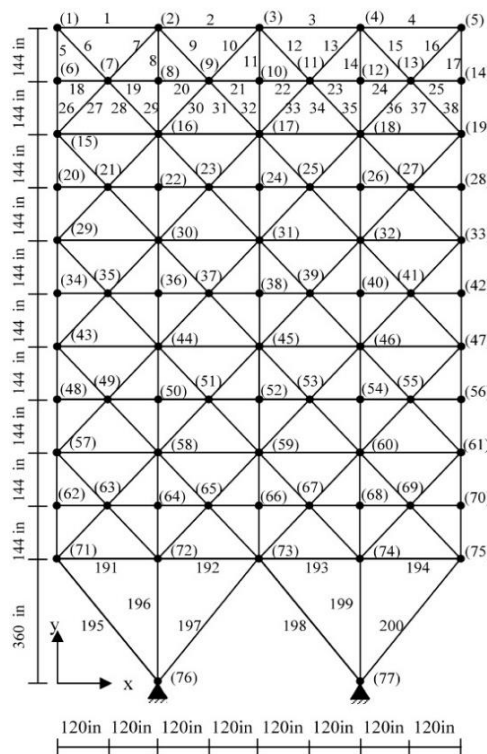
مساحت مقطع‌های بهینه (mm ²)			متغیرهای طراحی
SPR	WCA اسکندر و همکاران [۲۶]	MBA سدالله و همکاران [۴]	
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A1
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A2
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A3
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A4
۴۹۷/۸	۴۹۷/۸	۴۹۷/۸	A5
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A6
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A7
۲۶۵/۹	۲۶۵/۹	۲۶۵/۹	A8
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A9
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A10
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A11
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A12
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A13
۲۶۵/۹	۲۶۵/۹	۲۶۵/۹	A14
۲۳۵/۹	۲۳۵/۹	۲۳۵/۹	A15
۷۶/۶۹۲	۷۶/۶۹۲	۷۶/۶۹۲	وزن (kg)
۷۶/۶۹۲	۷۶/۶۹۲	۷۶/۶۹۲	میانگین (kg)
۰	۰	۰	انحراف معیار (kg)
۱۸۱	۱۳۵۰	۳۱۰۰	شمار تحلیل‌ها

جدول ۴- مقایسه طرح‌های بهینه خربای ۱۵ عضوی (حالت ۲)

مساحت مقطع‌های بهینه (mm ²)			متغیرهای طراحی
SPR	WCA اسکندر و همکاران [۲۶]	MBA سدالله و همکاران [۴]	
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A1
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A2
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A3
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A4
۴۹۷/۸	۴۹۷/۸	۴۹۷/۸	A5
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A6
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A7
۴۹۷/۸	۴۹۷/۸	۴۹۷/۸	A8
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A9
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A10
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A11
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A12
۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	A13
۱۸۵/۹	۱۸۵/۹	۱۸۵/۹	A14
۱۸۵/۹	۱۸۵/۹	۱۸۵/۹	A15
۸۲/۰۹۵	۸۲/۰۹۵	۸۲/۰۹۵	وزن (kg)
۸۲/۱۶۵	۸۲/۰۹۵	۸۲/۰۹۵	میانگین (kg)
۰/۱۶	۰	۰	انحراف معیار (kg)
۲۱۱	۱۲۰۰	۳۳۰۰	شمار تحلیل‌ها

۳-۴- خرابای مسطح ۲۰۰ عضوی

خرپای ۲۰۰ عضوی در شکل (۲۱) نمایش داده شده است.



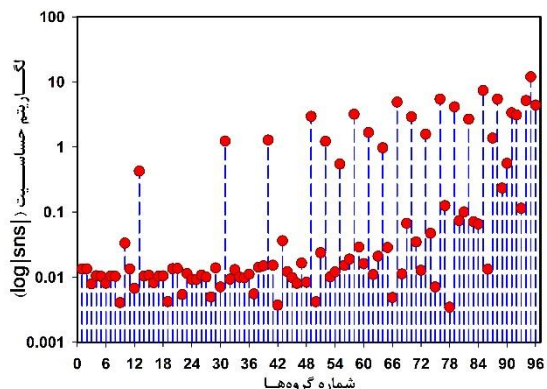
شکل ۲۱- خرابای ۲۰۰ عضوی

به ۹۶ گروه تقسیم بندی شده است. در این حالت مقدار تنش مجاز اعضا و جابجایی مجاز گره‌ها به ترتیب $\pm 0.5in$ و $\pm 30ksi$ در نظر گرفته شده است.

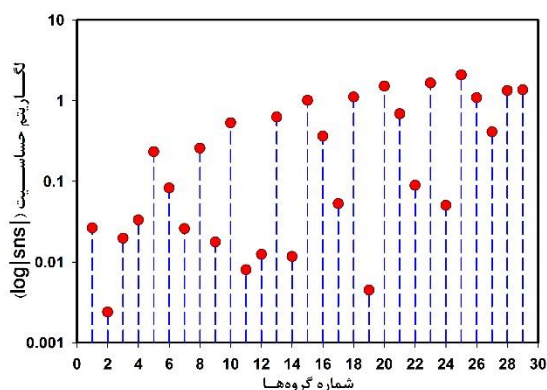
حالت ۲: در بعضی از مراجع [۲۲، ۲۴، ۳۶-۳۴]، عضوهای خرابای ۲۰۰ عضوی مطابق جدول پ-۲ پیوست به ۲۹ گروه تقسیم شده است. در این حالت، عضوهای خرابا در محدوده تنش $\pm 10ksi$ مقید شده‌اند.

حساسیت متغیرهای طراحی خرابای ۲۰۰ عضوی در حالت ۱ و ۲ در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده و با توجه تشخیص گروه‌های با حساسیت بالا، تکنیک تقسیم بندی با اولویت تعیین مقطع برای آن‌ها انجام شده است.

شکل (۲۴) تاریخچه همگرایی وزن بهینه خرابای ۲۰۰ عضوی را در حالت ۱ نشان می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی با ۳۰۷۰۷ تحلیل به وزن ۲۸۶۵۱/۹۲ پوند دست یافته است.



شکل ۲۲- حساسیت گروه‌های خرابای ۲۰۰ عضوی (حالت ۱)



شکل ۲۳- حساسیت گروه‌های خرابای ۲۰۰ عضوی (حالت ۲)

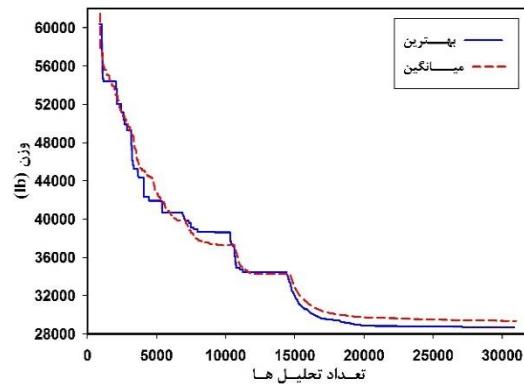
در جدول ۶ داده‌های طرح بهینه به دست آمده از الگوریتم SPR برای خرابای ۲۰۰ عضوی حالت ۱ ارائه شده است. با توجه به شمار زیاد متغیرهای طراحی خرابای ۲۰۰ عضوی در حالت ۱، در برخی مراجع مقطع‌های طراحی شده برای

در این مسئله چگالی مصالح و مدول الاستیسیته به ترتیب $0.283lb/in^3$ و $30000ksi$ بوده است. متغیرهای طراحی از لیست $D = [0.1, 0.347, 0.44, 0.539, 0.954, 2.142, 1.764, 1.488, 1.333, 1.174, 1.081, 0.954, 5.952, 4.805, 3.813, 3.565, 3.131, 2.8, 2.697, 1.429, 1.333, 1.085, 0.93, 0.825, 0.7192, 0.6572, 1.717, 1.918, 2.368, 2.808, 3.37, 33.7]$ بر حسب اینچ مربع انتخاب شده‌اند. سازه خرابای ۲۰۰ عضوی در معرض بار $1kip$ در جهت مثبت محور x گره‌های ۱، ۶، ۱۵، ۲۰، ۲۹، ۳۴، ۴۳، ۴۸، ۵۷، ۶۲ و ۷۱ و همچنین بار $10kip$ در جهت منفی محور y گره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۸، ۴۰، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸، ۵۰، ۵۲، ۵۴، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۲، ۶۴، ۶۶، ۶۸، ۷۰، ۷۱، ۷۲، ۷۳، ۷۴ و ۷۵ قرار گرفته است. در مراجع مختلف این مثال به دو حالت مختلف بررسی شده است:

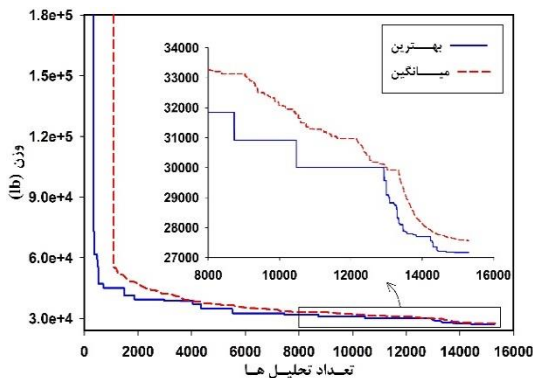
حالت ۱: در مقاله‌های ارائه شده در مراجع [۲۹-۳۳]، عضوهای خرابای ۲۰۰ عضوی مطابق جدول پ-۱ پیوست

هر یک از متغیرها گزارش نشده است.

سایر مراجع، بهترین پاسخ را برای خریای ۲۰۰ عضوی حالت ۲ ارائه کرده است، که در ضمن مناسب بودن شمار تحلیل‌ها، کمترین وزن بهینه را نسبت به سایر پژوهش‌ها ارائه کرده است. الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم EFA [۲۴]، مقدار تابع هدف را تقریباً یک درصد کاهش داده است. طبق جدول‌های ۷ و ۸، میانگین وزن و انحراف معیار الگوریتم SPR در هر دو حالت خریای ۲۰۰ عضوی نسبت به سایر مراجع بهبود یافته که نشان از عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی دارد.



شکل ۲۴- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خریای ۲۰۰ عضوی (حالت ۱)



شکل ۲۵- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خریای ۲۰۰ عضوی (حالت ۲)

بنابراین وزن بهینه شده توسط الگوریتم SPR به طور خلاصه، در جدول ۷ با سایر مقاله‌ها مقایسه شده است. الگوریتم SPR با ارائه وزن ۲۸۶۵۱/۹۲ پوند توانسته است مقدار وزن بهینه خریای ۲۰۰ عضوی حالت ۱ را نسبت به تمامی الگوریتم‌هایی که تاکنون ارائه شده است، به مقدار قابل توجهی بهبود ببخشد. الگوریتم پیشنهادی SPR نسبت به الگوریتم SALL [۳۳]، مقدار تابع هدف بهینه شده را ۱/۱۴ درصد کاهش داده است.

کنترل قیدهای جابه‌جایی گره‌ها و تنش عضوهای خریای ۲۰۰ عضوی برای حالت ۱ در شکل‌های (۲۶) و (۲۷) و کنترل قید تنش عضوهای خریای ۲۰۰ عضوی برای حالت ۲ در شکل (۲۸) نشان داده شده است.

تاریخچه همگرایی وزن بهینه خریای ۲۰۰ عضوی حالت ۲ در شکل (۲۵) نشان داده شده است. در الگوریتم SPR با ۱۴۹۱۰ تحلیل، وزن ۲۷۱۶۸/۶۸ پوند به دست آمده است. در جدول ۸ طرح‌های بهینه خریای ۲۰۰ عضوی حالت ۲ با سایر مقاله‌ها مقایسه شده است. الگوریتم SPR نسبت به

جدول ۶- طرح بهینه خریای ۲۰۰ عضوی (حالت ۱)

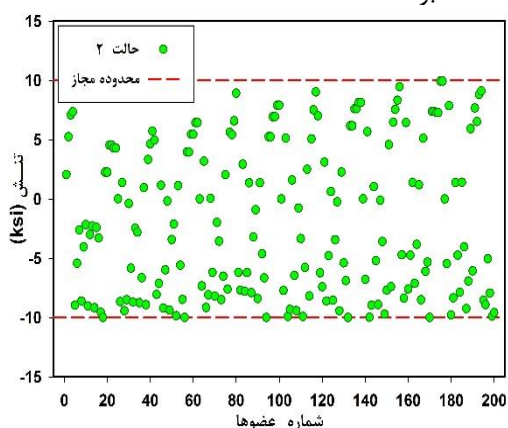
متغیرهای طراحی	مساحت بهینه (in ²)	متغیرهای طراحی	مساحت بهینه (in ²)	متغیرهای طراحی	مساحت بهینه (in ²)	متغیرهای طراحی	مساحت بهینه (in ²)	متغیرهای طراحی	مساحت بهینه (in ²)	متغیرهای طراحی	مساحت بهینه (in ²)
G1	۰/۹۵۴	G17	۰/۳۴۷	G33	۷/۱۹۲	G49	۱/۳۳۳	G65	۰/۱	G81	۱/۱۷۴
G2	۰/۵۳۹	G18	۰/۴۴	G34	۴/۸۰۵	G50	۰/۳۴۷	G66	۰/۳۴۷	G82	۲/۱۴۲
G3	۳/۱۳۱	G19	۳/۵۶۵	G35	۳/۸۱۳	G51	۴/۸۰۵	G67	۲/۱۴۲	G83	۰/۳۴۷
G4	۱/۰۸۱	G20	۳/۸۱۳	G36	۰/۵۳۹	G52	۱۷/۱۷	G68	۰/۱	G84	۰/۱
G5	۰/۱	G21	۳/۱۳۱	G37	۱/۱۷۴	G53	۰/۵۳۹	G69	۲/۸	G85	۱/۳۳۳
G6	۱/۷۶۴	G22	۰/۳۴۷	G38	۲/۱۴۲	G54	۰/۹۵۴	G70	۱۹/۱۸	G86	۰/۴۴
G7	۰/۳۴۷	G23	۹/۳	G39	۰/۱	G55	۱/۴۸۸	G71	۱/۳۳۳	G87	۲/۱۴۲
G8	۰/۱	G24	۰/۱	G40	۰/۱	G56	۱/۷۶۴	G72	۰/۹۵۴	G88	۲۳/۶۸
G9	۲/۸	G25	۳/۸۱۳	G41	۳/۸۱۳	G57	۰/۱	G73	۲/۶۹۷	G89	۱/۳۳۳
G10	۰/۱	G26	۰/۴۴	G42	۰/۳۴۷	G58	۰/۱	G74	۱/۱۷۴	G90	۱/۳۳۳
G11	۰/۵۳۹	G27	۳/۱۳۱	G43	۱۴/۲۹	G59	۲/۱۴۲	G75	۰/۱	G91	۳/۸۱۳
G12	۰/۵۳۹	G28	۰/۵۳۹	G44	۰/۵۳۹	G60	۰/۳۴۷	G76	۰/۳۴۷	G92	۰/۵۳۹
G13	۵/۹۵۲	G29	۰/۱	G45	۱/۱۷۴	G61	۱۹/۱۸	G77	۲/۱۴۲	G93	۰/۱
G14	۰/۵۳۹	G30	۰/۱	G46	۱/۳۳۳	G62	۰/۴۴	G78	۰/۱	G94	۱/۱۷۴
G15	۱/۴۸۸	G31	۲/۶۹۷	G47	۰/۱	G63	۱/۰۸۱	G79	۲۸/۰۸	G95	۲۸/۰۸
G16	۲/۱۴۲	G32	۰/۱	G48	۱/۰۸۱	G64	۲/۱۴۲	G80	۱/۰۸۱	G96	۲/۸
وزن (lb)											
۲۸۶۵۱/۹۲											

جدول ۷- مقایسه نتایج بهینه‌سازی خرپای ۲۰۰ عضوی (حالت ۱)

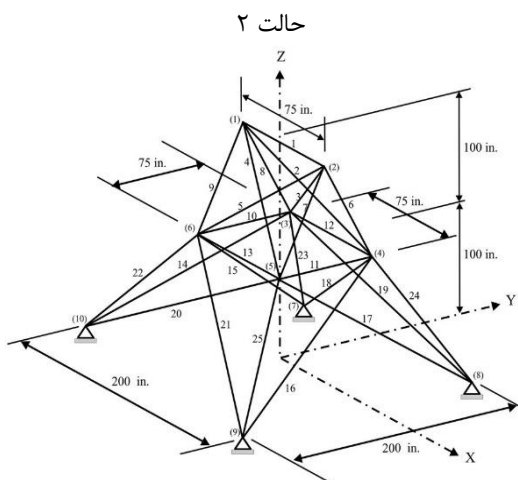
SPR	گريگيرک [۳۳] SALL	ژانگ و همکاران [۳۲] GSFP	دد و همکاران [۳۱] GA	قاسمی و همکاران [۳۰]		کای و تورایف [۲۹]	مقاله
				GA2-800	GA2-100		
۲۸۶۵۱/۹۲	۲۸۹۸۲	۲۹۵۸۶/۰۵	۳۰۸۶۸/۴۵	۳۰۹۰۵	۳۱۱۰۹	۳۱۰۱۴	وزن (lb)
۲۹۳۵۰/۴۴	-	۲۹۸۲۶/۰۲	-	-	-	۳۱۳۸۲/۲۵	میانگین (lb)
۴۰۷/۳۱	-	-	-	-	-	۳۴۱/۰۷	انحراف معیار (lb)
۳۰۷۰۷	۲۴۰۰۰	-	۱۲۲۴۰۰	-	-	-	شمار تحلیل‌ها

۴-۴- خرپای فضایی ۲۵ عضوی

سازه خرپای فضایی ۲۵ عضوی نشان داده شده در شکل (۲۹) توسط بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است [۲۲-۲۴، ۳۶، ۳۷]. چگالی و مدول الاستیسیته مصالح به ترتیب 0.1 lb/in^3 و 10000 ksi است. محدودیت تنش اعضا $\pm 40 \text{ ksi}$ و محدودیت جابه‌جایی گره‌ها در جهت x ، y و z $\pm 0.35 \text{ in}$ بوده است.

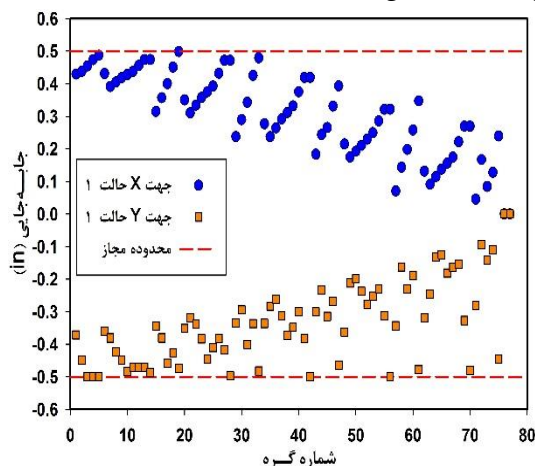


شکل ۲۸- کنترل تنش عضوهای خرپای ۲۰۰ عضوی

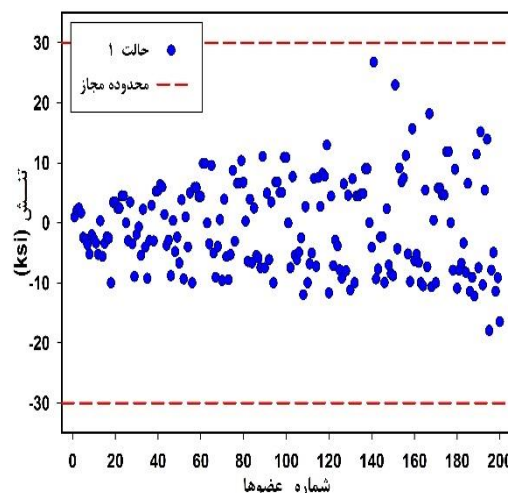


شکل ۲۹- خرپای فضایی ۲۵ عضوی [۳۸]

الگوریتم SPR ضمن بهبود وزن بهینه خرپای ۲۰۰ عضوی حالت ۱ و ۲، قیدهای مسئله را در هر دو حالت تامین کرده و هیچ‌گونه سرپیچی از قیدهای تنش و جابه‌جایی صورت نگرفته است (شکل‌های ۲۶-۲۸).



شکل ۲۶- کنترل جابه‌جایی گره‌های خرپای ۲۰۰ عضوی حالت ۱



شکل ۲۷- کنترل تنش عضوهای خرپای ۲۰۰ عضوی حالت ۱

جدول ۸- مقایسه طرح‌های بهینه خرپای ۲۰۰ عضوی (حالت ۲)

مساحت مقطع‌های بهینه (in ²)								متغیرهای طراحی
SPR	EFA لی و همکاران [۲۴]	FA لی و همکاران [۲۴]	MSCA قلی‌زاده و سجودی‌زاد ه [۳۶]	aeDE هه‌و و همکاران [۲۲]	ESASS آزاد و حسنی [۳۵]	ARCGA آزاد و حسنی [۳۵]	HACO HS-T طالب پور و همکاران [۳۴]	
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	G1
۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۱/۰۸۱	۱/۰۸۱	G2
۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	۰/۹۵۴	۰/۱	۰/۳۴۷	۰/۱	۰/۱	۰/۳۴۷	G3
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	G4
۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	G5
۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	۰/۴۴	۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	G6
۰/۳۴۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	G7
۳/۱۳۱	۳/۱۳۱	۳/۵۶۵	۳/۱۳۱	۳/۱۳۱	۳/۱۳۱	۳/۱۳۱	۳/۱۳۱	G8
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۳۴۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱	G9
۴/۸۰۵	۴/۸۰۵	۴/۸۰۵	۴/۸۰۵	۴/۸۰۵	۴/۸۰۵	۴/۸۰۵	۴/۸۰۵	G10
۰/۵۳۹	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۳۴۷	۰/۵۳۹	۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	۰/۴۴	G11
۰/۱	۰/۳۴۷	۰/۱	۰/۹۵۴	۰/۳۴۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱	G12
۶/۵۷۲	۵/۹۵۲	۵/۹۵۲	۵/۹۵۲	۵/۹۵۲	۵/۹۵۲	۵/۹۵۲	۵/۹۵۲	G13
۰/۱	۰/۳۴۷	۰/۹۵۴	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	G14
۶/۵۷۲	۶/۵۷۲	۷/۱۹۲	۶/۵۷۲	۶/۵۷۲	۶/۵۷۲	۶/۵۷۲	۶/۵۷۲	G15
۰/۵۳۹	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۴۴	۰/۵۳۹	۰/۵۳۹	G16
۰/۳۴۷	۰/۳۴۷	۰/۱	۰/۳۴۷	۰/۴۴	۰/۵۳۹	۱/۰۸۱	۱/۱۷۴	G17
۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۷/۱۹۲	۷/۱۹۲	۸/۵۲۵	G18
۰/۳۴۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۴۴	۰/۵۳۹	۰/۱	G19
۹/۳	۹/۳	۱۰/۸۵	۹/۳	۹/۳	۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۹/۳	G20
۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۱/۱۷۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۱/۳۳۳	۱/۳۳۳	G21
۰/۱	۱/۳۳۳	۰/۹۵۴	۱/۰۸۱	۱/۰۸۱	۱/۱۷۴	۱/۰۸۱	۰/۵۳۹	G22
۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۱۰/۸۵	۱۰/۸۵	۱۳/۳۳	G23
۰/۱	۰/۳۴۷	۰/۹۵۴	۰/۴۴	۰/۵۳۹	۰/۴۴	۰/۱	۱/۱۷۴	G24
۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۱۴/۲۹	۱۰/۸۵	۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	G25
۰/۹۵۴	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۲/۱۴۲	۱/۷۶۴	۱/۴۸۸	۲/۶۹۷	G26
۵/۹۵۲	۳/۸۱۳	۳/۵۶۵	۳/۸۱۳	۳/۸۱۳	۸/۵۲۵	۵/۹۵۲	۳/۵۶۵	G27
۱۰/۸۵	۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۸/۵۲۵	۱۳/۳۳	۱۳/۳۳	۸/۵۲۵	G28
۱۴/۲۹	۱۷/۱۷	۱۷/۱۷	۱۷/۱۷	۱۷/۱۷	۱۳/۳۳	۱۴/۲۹	۱۷/۱۷	G29
۲۷۱۶۸/۶۸	۲۷۴۲۱/۹۴	۲۸۲۵۰/۵۷	۲۷۶۹۳/۶۸	۲۷۸۵۸/۵	۲۸۰۷۵/۴۹	۲۸۳۴۷/۵۹	۲۸۰۳۰/۲	وزن (lb)
۲۷۵۴۹	۲۸۴۳۴/۶۰	۲۹۸۷۱/۹۱	۲۸۳۵۸/۴۶	۲۸۴۲۵/۸۷۱	-	-	-	میانگین (lb)
۲۴۳/۶۵	۷۴۹/۰۸	۱۱۵۰/۲۴	۴۵۶/۰۲	۴۸۱/۵۹	-	-	-	انحراف
۱۴۹۱۰	۶۱۱۰	۲۰۲۲۰	۱۲۰۰۰	۱۲۳۲۵	۱۱۱۵۶	۲۵۰۰۰	-	شمار تحلیل‌ها

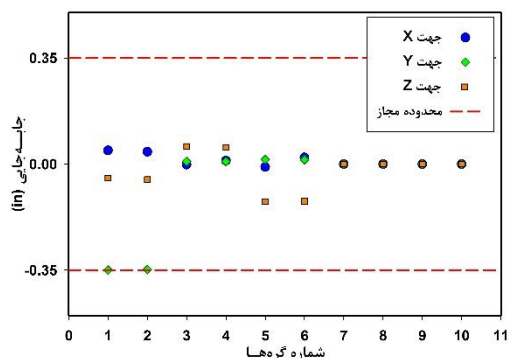
اینج مربع انتخاب شده‌اند. بار $10kip$ در جهت منفی محور Y و Z گره‌های ۱ و ۲ و بارهای $1kip$ ، $0.5kip$ و $0.6kip$ در جهت مثبت محور X ، به ترتیب در گره‌های ۱، ۳ و ۶ اعمال شده است. حساسیت متغیرهای طراحی خرپای ۲۵ عضوی در شکل (۳۰) آورده شده است.

عضوهای خرپا به ۸ گروه تقسیم شده‌اند: (۱) A_1 ، (۲) $A_2 - A_5$ ، (۳) $A_6 - A_9$ ، (۴) $A_{10} - A_{11}$ ، (۵) $A_{12} - A_{13}$ ، (۶) $A_{14} - A_{17}$ ، (۷) $A_{18} - A_{21}$ و (۸) $A_{22} - A_{25}$. متغیرهای طراحی از $D = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4]$ بر حسب

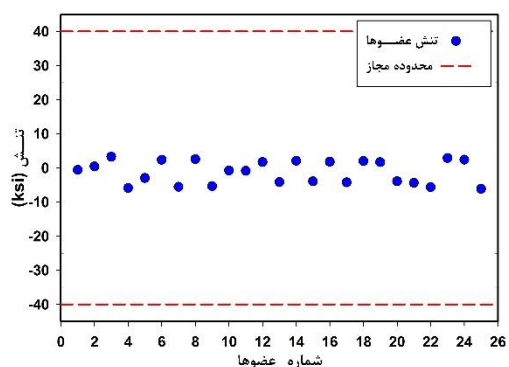
جدول ۹- مقایسه طرح‌های بهینه خریای ۲۵ عضوی

متغیرهای طراحی	مساحت مقطع‌های بهینه (in ²)					
	MSCA قلی‌زاده و سجودی‌زاده [۳۶]	EFA لی و همکاران [۲۴]	MSAA پارامو [۳۷]	HHS چنگ و همکاران [۲۳]	DE ههو و همکاران [۲۲]	aeDE ههو و همکاران [۲۲]
G1	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
G2	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
G3	۳/۴	۳/۴	۳/۴	۳/۴	۳/۴	۳/۴
G4	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
G5	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱
G6	۱	۱	۱	۱	۱	۱
G7	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
G8	۳/۴	۳/۴	۳/۴	۳/۴	۳/۴	۳/۴
وزن (lb)	۴۸۴/۸۵	۴۸۴/۸۵	۴۸۴/۸۵	۴۸۴/۸۵	۴۸۴/۸۵	۴۸۴/۸۵
میانگین (lb)	۴۸۴/۹۲	۴۸۴/۹۴	۴۸۵/۱۸	۴۸۴/۹۳	۴۸۴/۹۵	۴۸۶/۱۰
انحراف معیار (lb)	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۴۹	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۲۷
شمار تحلیل‌ها	۸۹۲	۵۰۰۰	۱۳۰۰	-	۵۰۰۰	۳۵۰۰

همچنین میانگین وزن و انحراف معیار الگوریتم SPR در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بهبود یافته است. قیدهای جابه‌جایی گره‌ها و تنش عضوهای خریای ۲۵ عضوی در شکل‌های (۳۲) و (۳۳) کنترل شده و هیچ‌گونه سرپیچی از قیدها مشاهده نشده است.



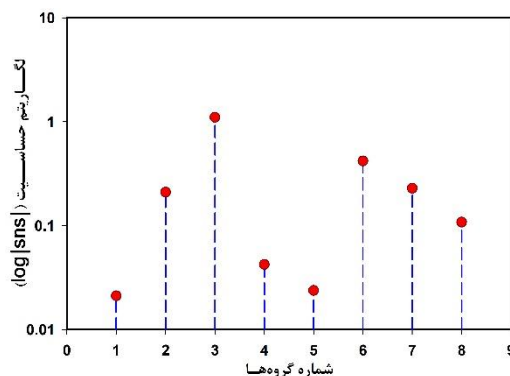
شکل ۳۲- کنترل جابه‌جایی گره‌های خریای ۲۵ عضوی



شکل ۳۳- کنترل تنش عضوهای خریای ۲۵ عضوی

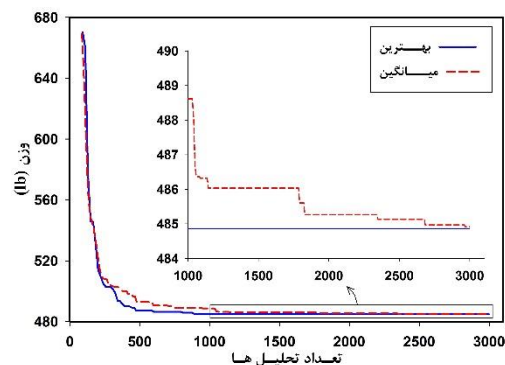
۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی کارا تحت عنوان SPR، برای حل مسائل سازه‌ای گسسته پیشنهاد شده است.



شکل ۳۰- حساسیت گروه‌های خریای ۲۵ عضوی

تاریخچه همگرایی وزن بهینه خریای ۲۵ عضوی در شکل (۳۱) نشان داده شده است. الگوریتم SPR با ۸۹۲ تحلیل به وزن ۴۸۴/۸۵ پوند همگرا شده است. مقایسه طرح‌های بهینه خریای ۲۵ عضوی در جدول ۹ آمده است. الگوریتم SPR با ۸۹۲ تحلیل، مقدار تابع هدف بهینه را یافته است و نسبت به الگوریتم EFA [۲۴]، تقریباً ۳۱ درصد شمار تحلیل‌ها را کاهش داده است.



شکل ۳۱- تاریخچه همگرایی وزن بهینه خریای ۲۵ عضوی

حیات و اعمال جهش‌های تک متغیره و الاکلنگی، موجب بهبود فرآیند جستجوی محلی شده است. نتایج حل مثال‌های عددی سازه‌های خرپایی با متغیرهای گسسته نشان داده است که الگوریتم SPR نسبت به سایر الگوریتم‌ها، توانسته است با میزان تحلیل‌های بسیار کمتر به پاسخ بهینه دست یابد. همچنین الگوریتم پیشنهادی مقدار تابع هدف بهینه ارائه شده در حالت‌های ۱ و ۲ مثال خرپای ۲۰۰ عضوی را نسبت به پژوهش‌های قبلی به مقدار قابل توجهی بهبود بخشیده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم SPR می‌تواند با موفقیت برای بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی با متغیرهای گسسته و یا سایر مسئله‌های همانند به کار گرفته شود.

این الگوریتم بر اساس تکنیک‌های حساسیت سنجی عضوهای خرپا، تقسیم بندی لیست مقطع‌ها و تجدید حیات پایه گذاری شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم SPR، از آن برای بهینه‌سازی چهار مثال سازه‌ای خرپایی در حالت‌های مختلف استفاده شده است. الگوریتم SPR با توجه به حساسیت سنجی اولیه اعضا و تقسیم بندی لیست مقطع‌ها، جمعیت اولیه را به صورت هوشمند تولید و انتخاب کرده و برخلاف برخی از الگوریتم‌های فرا اکتشافی، تحت تاثیر جمعیت اولیه تصادفی قرار نمی‌گیرد. تکنیک تجدید حیات پیشنهادی با در نظر گرفتن بازه اولیه مناسب، به فرآیند جستجوی عمومی کمک کرده است. با افزایش میزان تکرارها، کوچک شدن تدریجی بازه تجدید

۶- پیوست ها

جدول پ-۱. گروه بندی عضوهای خرابای ۲۰۰ عضوی (حالت ۱)

عضوها	گروه	عضوها	گروه	عضوها	گروه	عضوها	گروه
۱۴۶	G73	۱۱۴,۱۰۲	G49	۵۲,۴۶	G25	۴,۱	G1
۱۵۶,۱۵۳	G74	۱۱۳,۱۰۳	G50	۵۱,۴۷	G26	۳,۲	G2
۱۵۵,۱۵۴	G75	۱۱۲,۱۰۴	G51	۵۰,۴۸	G27	۱۷,۵	G3
۱۶۹,۱۵۷	G76	۱۱۱,۱۰۵	G52	۴۹	G28	۱۶,۶	G4
۱۶۸,۱۵۸	G77	۱۱۰,۱۰۶	G53	۶۲,۶۱,۵۸,۵۷	G29	۱۵,۷	G5
۱۶۷,۱۵۹	G78	۱۰۹,۱۰۷	G54	۶۰,۵۹	G30	۱۴,۸	G6
۱۶۶,۱۶۰	G79	۱۰۸	G55	۷۶,۶۴	G31	۱۳,۹	G7
۱۶۵,۱۶۱	G80	۱۱۸,۱۱۵	G56	۷۵,۶۵	G32	۱۲,۱۰	G8
۱۶۴,۱۶۲	G81	۱۱۷,۱۱۶	G57	۷۴,۶۶	G33	۱۱	G9
۱۶۳	G82	۱۳۱,۱۱۹	G58	۷۳,۶۷	G34	۶۳,۵۶,۲۵,۱۸,۱۷۷,۱۷۰,۱۳۹,۱۳۲	G10
۱۷۶,۱۷۵,۱۷۲,۱۷۱	G83	۱۳۰,۱۲۰	G59	۷۲,۶۸	G35	۲۴,۲۳,۲۰,۱۹	G11
۱۷۴,۱۷۳	G84	۱۲۹,۱۲۱	G60	۷۱,۶۹	G36	۲۲,۲۱	G12
۱۹۰,۱۷۸	G85	۱۲۸,۱۲۲	G61	۷۰	G37	۲۸,۲۶	G13
۱۸۹,۱۷۹	G86	۱۲۷,۱۲۳	G62	۸۰,۷۷	G38	۳۷,۲۷	G14
۱۸۸,۱۸۰	G87	۱۲۶,۱۲۴	G63	۷۹,۷۸	G39	۳۶,۲۸	G15
۱۸۷,۱۸۱	G88	۱۲۵	G64	۹۳,۸۱	G40	۳۵,۲۹	G16
۱۸۶,۱۸۲	G89	۱۳۸,۱۳۷,۱۳۴,۱۳۳	G65	۹۲,۸۲	G41	۳۴,۳۰	G17
۱۸۵,۱۸۳	G90	۱۳۶,۱۳۵	G66	۹۱,۸۳	G42	۳۳,۳۱	G18
۱۸۴	G91	۱۵۲,۱۴۰	G67	۹۰,۸۴	G43	۳۲	G19
۱۹۴,۱۹۱	G92	۱۵۱,۱۴۱	G68	۸۹,۸۵	G44	۴۲,۳۹	G20
۱۹۳,۱۹۲	G93	۱۵۰,۱۴۲	G69	۸۸,۸۶	G45	۴۱,۴۰	G21
۲۰۰,۱۹۵	G94	۱۴۹,۱۴۳	G70	۸۷	G46	۵۵,۴۳	G22
۱۹۹,۱۹۶	G95	۱۴۸,۱۴۴	G71	۱۰۰,۹۹,۹۶,۹۵	G47	۵۴,۴۴	G23
۱۹۸,۱۹۷	G96	۱۴۷,۱۴۵	G72	۹۸,۹۷	G48	۵۳,۴۵	G24

جدول پ-۲. گروه بندی عضوهای خرابای ۲۰۰ عضوی (حالت ۲)

عضوها	گروه	عضوها	گروه
۱۱۳,۱۱۲,۱۱۰,۱۰۹,۱۰۷,۱۰۶,۱۰۴,۱۰۳,۹۲,۹۱,۸۹,۸۸,۸۶,۸۵,۸۳,۸۲	G16	۴,۳,۲,۱	G1
۱۱۸,۱۱۷,۱۱۶,۱۱۵	G17	۱۷,۱۴,۱۱,۸,۵	G2
۱۳۱,۱۲۸,۱۲۵,۱۲۲,۱۱۹	G18	۲۴,۲۳,۲۲,۲۱,۲۰,۱۹	G3
۱۳۸,۱۳۷,۱۳۶,۱۳۵,۱۳۴,۱۳۳	G19	۱۷۷,۱۷۰,۱۳۹,۱۳۲,۱۰۱,۹۴,۶۳,۵۶,۲۵,۱۸	G4
۱۵۲,۱۴۹,۱۴۶,۱۴۳,۱۴۰	G20	۳۸,۳۵,۳۲,۲۹,۲۶	G5
۱۴,۱۴۷,۱۴۵,۱۴۴,۱۴۲,۱۴۱,۱۳۰,۱۲۹,۱۲۷,۱۲۶,۱۲۴,۱۲۳,۱۲۱,۱۲۰ ۱۵۱,۱۵۰,۸	G21	۳۷,۳۶,۳۴,۳۳,۳۱,۳۰,۲۸,۲۷,۱۶,۱۵,۱۳,۱۲,۱۰,۹,۷,۶	G6
۱۵۶,۱۵۵,۱۵۴,۱۵۳	G22	۴۲,۴۱,۴۰,۳۹	G7
۱۶۹,۱۶۶,۱۶۳,۱۶۰,۱۵۷	G23	۵۵,۵۲,۴۹,۴۶,۴۳	G8
۱۷۶,۱۷۵,۱۷۴,۱۷۳,۱۷۲,۱۷۱	G24	۶۲,۶۱,۶۰,۵۹,۵۸,۵۷	G9
۱۹۰,۱۸۷,۱۸۴,۱۸۱,۱۷۸	G25	۷۶,۷۳,۷۰,۶۷,۶۴	G10
۱۸۶,۱۸۵,۱۸۳,۱۸۲,۱۸۰,۱۷۹,۱۶۸,۱۶۷,۱۶۵,۱۶۴,۱۶۲,۱۶۱,۱۵۹,۱۵۸ ۱۸۹,۱۸۸,	G26	۷۴,۷۲,۷۱,۶۹,۶۸,۶۶,۶۵,۵۴,۵۳,۵۱,۵۰,۴۸,۴۷,۴۵,۴۴ ۷۵	G11
۱۹۴,۱۹۳,۱۹۲,۱۹۱	G27	۸۰,۷۹,۷۸,۷۷	G12
۲۰۰,۱۹۸,۱۹۷,۱۹۵	G28	۹۳,۹۰,۸۷,۸۴,۸۱	G13
۱۹۹,۱۹۶	G29	۱۰۰,۹۹,۹۸,۹۷,۹۶,۹۵ ۱۱۴,۱۱۱,۱۰۸,۱۰۵,۱۰۲	G14 G15

مراجع

- [1] M. Sonmez, "Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 43, No. 1, January 2011, pp. 85-97.
- [2] L.J. Li, Z.B. Huang, and F. Liu, "A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables", *Computers and Structures*, Vol. 87, No. 7-8, April 2009, pp. 435-443.
- [3] S.J. Wu, and P.T. Chow, "Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses", *Computers and Structures*, Vol. 56, No. 6, September 1995, pp. 979-991.
- [4] A. Sadollah, A. Bahreininejad, H. Eskandar, and M. Hamdi, "Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables", *Computers and Structures*, Vol. 102-103, July 2012, pp. 49-63.
- [۵] محمدرضا رضایی پزند و خسرو خالقی، "الگوی هندسه‌ی بهینه‌ی شکل سدهای قوسی بتنی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۰، بهار ۱۳۸۹، صفحه ۱۵-۱.
- [۶] علی قدوسیان، مجتبی شیخی و محمد رضا رستمی، "بهینه‌سازی شکل سطح تماس برای سازه‌ها تحت بارگذاری چندگانه به کمک روش تکاملی دوطرفه"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۸۶-۷۷.
- [۷] علی قدوسیان و مجتبی شیخی، "بهینه‌کردن موقعیت تکیه‌گاه‌های سازه جهت حداقل کردن ممان خمشی با الگوریتم گروه ذرات تحت بارگذاری چندگانه"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۲، پاییز ۱۳۸۹، صفحه ۶۷-۵۹.
- [8] O. Hasancebi, and S.K. Azad, "Adaptive dimensional search: A new metaheuristic algorithm for discrete truss sizing optimization", *Computers and Structures*, Vol. 154, July 2015, pp. 1-16.
- [۹] علی قدوسیان، امین نیکوبین و مجتبی ریاحی وزواری، "بهینه‌سازی شکل و اندازه-شکل سازه‌های خریا با روش بهینه‌سازی الگوریتم مثلث بهینه‌گر"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۵۱-۶۰.
- [10] J.S. Arora and E.J. Haug, "Methods of design sensitivity analysis in structural optimization", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 17, No. 9, September 1979, pp. 970-974.
- [11] J.L.T. Santos and K.K. Choi, "Sizing design sensitivity analysis of non-linear structural systems. Part II: Numerical method", *International Journal for Numerical Methods Engineering*, Vol. 26, No. 9, September 1988, pp. 2097-2114.
- [12] C.C. Wu and J.S. Arora, "Design sensitivity analysis of non-linear buckling load", *Computational Mechanics*, Vol. 3, No. 2, March 1988, pp. 129-140.
- [13] M. Ohsaki, "Simultaneous optimization of topology and geometry of a regular plane truss", *Computers and Structures*, Vol. 66, No. 1, January 1998, pp. 69-77.
- [14] P. Kolakowski and J. Holnicki-Szulc, "Sensitivity analysis of truss structures (virtual distortion method approach)", *International Journal for Numerical Methods Engineering*, Vol. 43, No. 6, November 1998, pp. 1085-1108.
- [15] M. Ohsaki, "Sensitivity analysis and optimization corresponding to a degenerate critical point", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 28-29, July 2001, pp. 4955-4967.
- [16] D. Wang, W.H. Zhang and J.S. Jiang, "Combined shape and sizing optimization of truss structures", *Computational Mechanics*, Vol. 29, No. 4-5, October 2002, pp. 307-312.
- [17] D. Wang, W.H. Zhang and J.S. Jiang, "Truss shape optimization with multiple displacement constraints", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, No. 33, June 2002, pp. 3597-3612.
- [18] N.L. Pedersen and A.K. Nielsen, "Optimization of practical trusses with constraints on eigenfrequencies, displacements, stresses, and buckling" *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 25, No. 5-6, December 2003, pp. 436-445.
- [19] B. Dizangian and M.R. Ghasem, "A fast marginal feasibility search method in size optimization of truss structures", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, Vol. 16, No. 5, October 2015, pp. 567-585.

- [20] B. Dizangian and M.R. Ghasem, "Ranked-based sensitivity analysis for size optimization of structures", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 137, No. 12, October 2015, Paper No. MD-15-1022.
- [21] S.K. Azad, O. Hasancebi and M.P. Saka, "Guided stochastic search technique for discrete sizing optimization of steel trusses: A design-driven heuristic approach", *Computers and Structures*, Vol. 134, April 2014, pp. 62-74.
- [22] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, T. Vo-Duy and T. Nguyen-Trang, "An adaptive elitist differential evolution for optimization of truss structures with discrete design variables", *Computers and Structures*, Vol. 165, No. C, March 2016, pp. 59-75.
- [23] M.Y. Cheng, D. Prayogo, Y.W. Wu and M.M. Lukito, "A Hybrid Harmony Search algorithm for discrete sizing optimization of truss structure", *Automation in Construction*, Vol. 69, September 2016, pp. 21-33.
- [24] D.T. Le, D.K. Bui, T.D. Ngo, Q.H. Nguyen and H. Nguyen-Xuan, "A novel hybrid method combining electromagnetism-like mechanism and firefly algorithms for constrained design optimization of discrete truss structures", *Computers and Structures*, Vol. 212, February 2019, pp. 20-42.
- [25] S. Gholizadeh, "Optimum design of structures by an improved particle swarm algorithm", *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 6, December 2010, pp. 777-793.
- [26] H. Eskandar, A. Sadollah and A. Bahreinejad, "Weight optimization of truss structures using water cycle algorithm", *International Journal of Optimization Civil Engineering*, Vol. 3, No. 1, March 2013, pp. 115-129.
- [27] S. Mirjalili and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm", *Advances in Engineering Software*, Vol. 95, May 2016, pp. 51-67.
- [۲۸] سید مجتبی سیدزاده اطاقسرائی، مجتبی جعفری صمیمی و سید رضا سیدزاده اطاقسرائی، "بهینه سازی وزن خرابای فولادی توسط الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش-یادگیری"، نشریه نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال ۱۲، شماره ۱۹، بهار و تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۷-۳۹.
- [29] J. Cai and G. Thierauf, "Evolution strategies for solving discrete optimization problems", *Advances in Engineering Software*, Vol. 25, No. 2-3, March-April 1996, pp. 177-183.
- [30] M.R. Ghasemi, E. Hinton and R.D. Wood, "Optimization of trusses using genetic algorithms for discrete and continuous variable", *Engineering with Computers*, Vol. 16, No. 3, March 1999, pp. 272-301.
- [31] T. Dede, S. Bekiroglu and Y. Ayvaz, "Weight minimization of trusses with genetic algorithm", *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 2, March 2011, pp. 2565-2575.
- [32] Y. Zhang, Y. Hou and S. Liu, "A new method of discrete optimization for cross-section selection of truss structures", *Engineering Optimization*, Vol. 46, No. 8, October 2013, pp. 1052-1073.
- [33] K. Grygierek, "Optimization of trusses with self-adaptive approach in genetic algorithms", *Architecture Civil Engineering Environment*, Vol. 9, No. 4, December 2016, pp. 67-78.
- [34] M.H. Talebpour, A. Kaveh and V.R. Kalatjari, "Optimization of skeletal structures using a hybridized ant colony-harmony search-genetic algorithm", *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, Vol. 38, No. C1, February 2014, pp. 1-20.
- [35] S.K. Azad and O. Hasancebi, "An elitist self-adaptive step-size search for structural design optimization", *Applied Soft Computing*, Vol. 19, June 2014, pp. 226-235.
- [36] S. Gholizade and R. Sojoudizadeh, "Modified Sine-Cosine Algorithm for Sizing Optimization of Truss Structures with Discrete Design Variables", *International Journal Optimization in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, April 2019, pp. 195-212.
- [37] C.M. Paramo, "Modified simulated annealing algorithm for discrete sizing optimization of truss structure", *Jordan Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 4, January 2018, pp. 683-697.
- [38] S.O. Degertekin, "Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures", *Computers and Structures*, Vol. 92-93, February 2012, pp. 229-241.