

طراحی سازه‌ها توسط الگوریتم ترکیبی برخورد دینامیکی اجسام بهبود یافته و ژنتیک تحت بارگذاری چندگانه

محمد ارجمند^۱، مجتبی شیخی ازغندی^۲

m.arjmand@buqaen.ac.ir

۱- مربی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بزرگمهر قائنات

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قائنات

چکیده

مقاله حاضر به ارائه یک روش جدید بهینه‌سازی ترکیبی با استفاده از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی برخورد دینامیکی اجسام و الگوریتم ژنتیک (GMCBO) می‌پردازد. یکی از نقاط ضعف الگوریتم برخورد دینامیکی اجسام، افتادن در دام بهینه محلی و عدم رسیدن به بهینه سراسری است. برای رفع این نقطه ضعف، در این پژوهش ابتدا اصلاحاتی بر روی فرایند الگوریتم برخورد دینامیکی اجسام انجام گرفته و سپس استفاده از اعمال بعضی از مفاهیم الگوریتم ژنتیک در طی مراحل فرایند بهینه‌سازی، علاوه بر بالا بردن سرعت همگرایی، باعث افزایش قدرت یافتن جواب بهینه سراسری و فرار از دام بهینه محلی می‌شود. برای ارزیابی چگونگی عملکرد روش ارائه شده، به طراحی بهینه چندین سازه خریای استاندارد پرداخته شده است. مقایسه نتایج تحلیل سازه‌ها به کمک روش GMCBO با دیگر روش‌های بهینه‌سازی نشان‌دهنده سرعت بالای همگرایی الگوریتم پیشنهادی و قدرت آن در یافتن جواب بهینه سراسری مسئله است.

واژگان کلیدی: برخورد اجسام، الگوریتم ژنتیک، متغیر گسسته، بارگذاری چندگانه.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۱/۱۹

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر روش‌های بهینه‌سازی زیادی برای حل مسائل بهینه‌سازی سازه‌ها از جمله سازه‌هایی دریایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سازه‌های دریایی شامل سازه‌های فراساحلی و ساحلی، سکوه‌های نفتی، سکوه‌های تفریحی، پایه‌های مخازن نفت و گاز، سازه‌های انتقال خطوط انرژی و غیره درون اعماق آب است. به عنوان نمونه جواسویچ و همکارانش به طراحی بهینه سازه دریایی با عملکرد خرابی برای پایه توربین بادی ساحلی جهت تولید انرژی پرداخته است [۱]. چافه‌پریت و همکارانش به طراحی بهینه سازه فراساحلی برای تعیین مقادیر سطح مقطع و ضرایب تمرکز تنش جهت پایه توربین بادی پرداخته‌اند [۲].

در حالت عمومی بهینه‌سازی سازه‌ها در سه گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شود. دسته اول بهینه‌سازی اندازه^۱ است که در آن متغیرهای طراحی مساحت هر یک از اعضای سازه می‌باشد [۳]. در دسته دوم بهینه‌سازی شکل^۲ سازه‌ها انجام می‌پذیرد [۴]. در این دسته مختصات نقاط اتصال اعضای سازه به یکدیگر، متغیر طراحی است. دسته آخر، بهینه‌سازی توپولوژی (ساختاری) سازه‌ها است. در این دسته چگونگی اتصال اعضای سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد [۵]. در بعضی از مسائل بهینه‌سازی، متغیرهای طراحی همزمان سطح مقطع اعضا، مختصات مفاصل و همچنین چگونگی ارتباط بین مفاصل سازه در نظر گرفته می‌شود [۶]. یک دسته‌بندی دیگر مسائل بهینه‌سازی بر اساس نوع متغیرهای طراحی، دو گروه متغیرهای پیوسته و گسسته است. اکثر مطالعات اخیر بر روی طراحی بهینه سازه‌ها با متغیرهای پیوسته صورت گرفته است. این موضوع در حالی است که اندازه استاندارد مقاطع موجود در بازار دارای مقادیر گسسته می‌باشند. بنابراین مهندسان باید انتخاب سطح مقطع‌ها را از یک لیست با مقادیر گسسته موجود انتخاب نمایند.

حل مسائل بهینه‌سازی گسسته به مراتب از مسائل پیوسته سخت‌تر است [۷ و ۸]. معمولاً، محققان از روش‌های ریاضی مانند گرد کردن بر روی راه‌حل‌های پیوسته، برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته، استفاده می‌کنند. این روش‌ها ممکن است مشکلاتی نظیر نقض قیود مسئله (افتادن در ناحیه امکان‌ناپذیر) را به وجود آورند. این نقطه‌ضعف باعث شده

است که محققان با استفاده از مدل‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری^۳ با متغیرهای گسسته به حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی بپردازند.

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری است که توانست تحول بزرگی در زمینه حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی ایجاد کند [۹]. الگوریتم ژنتیک (GA) اولین بار توسط گلدبرگ بر اساس الهام از قوانین حاکم بر طبیعت و بقای جانداران ارائه شد [۱۰]. در طی سال‌های اخیر روش‌های بهینه‌سازی زیادی نظیر تدریجی سرد شدن فلزات (SA) توسط کیرکپاتریک [۱۱]، گروه ذرات (PSO) توسط ابره‌ارت و کندی [۱۲]، گروه مورچگان (ACO) توسط دوریگو [۱۳]، جستجوی هارمونی (HS) توسط جیم و همکاران [۱۴]، ذرات باردار (CSS) توسط کاوه و طلعت‌اثری [۱۵]، چرخه آب (WCA) توسط اسکندر و همکاران [۱۶]، انفجار مین‌ها (MBA) توسط سعداله و همکاران [۱۷] و تکامل زمانی (TEO) توسط شیخی و همکاران [۱۸] و ... ارائه شده است.

هر یک از روش‌های بهینه‌سازی ارائه‌شده تاکنون دارای خصوصیات خاصی هستند. در صورتی که بتوان نقاط ضعف و قوت هر روش را تشخیص داد، می‌توان با ترکیب دو یا چند روش بهینه‌سازی به تقویت نقاط قوت و برطرف کردن نقاط ضعف آن‌ها پرداخت. برای این منظور اخیراً محققین به ترکیب روش‌های بهینه‌سازی پرداخته‌اند. کاوه و طلعت‌اثری به ترکیب روش‌های بهینه‌سازی گروه ذرات، گروه مورچگان و جستجوی هارمونی [۱۹] و همچنین ذرات باردار و گروه ذرات [۲۰] پرداخته‌اند. شیخی و قدوسی‌ان ترکیب روش رقابت استعماری و گروه مورچگان را انجام داده‌اند [۴]. شن و همکارانش دو روش گروه ذرات و جستجوی ممنوع را باهم ادغام کرده‌اند [۲۱]. سعداله و همکارانش دو روش چرخه آب و جستجوی مین‌ها را باهم ترکیب کرده‌اند [۲۲]. شجاعی و همکاران روش‌های گروه ذرات و مجانب‌های متحرک را باهم ادغام نموده‌اند [۲۳]. ارجمند و همکارانش به ترکیب الگوریتم انعکاس صدای دلفین‌ها و الگوریتم گروه مورچه‌ها پرداخته‌اند [۲۴]. ترکیب الگوریتم کرم شب تاب و تکامل تفاضلی توسط لیو و همکارانش انجام پذیرفته است [۲۵].

³ Meta Heuristic

¹ Size Optimization

² Shape (Geometry) Optimization

در رابطه فوق m_1 و m_2 به ترتیب جرم اجسام، v_1 و v_2 سرعت اجسام قبل از برخورد و v'_1 و v'_2 سرعت اجسام بعد از برخورد است. برای به دست آوردن سرعت اجسام بعد از برخورد نیاز به معادله دیگری است. برای این منظور از مفهوم ضریب استرداد که بیانگر توانایی اجسام برای بازیابی سرعتشان پس از برخورد است، می‌توان بهره برد. ضریب استرداد به صورت نسبت اندازه ضربه برگشت به اندازه ضربه تغییر شکل به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$e = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \quad (2)$$

در روابط فوق e ضریب استرداد است. با در نظر گرفتن روابط (۱) و (۲) به صورت همزمان و معلوم بودن سرعت‌های اولیه اجسام و همچنین ضریب استرداد می‌توان مقادیر سرعت اجسام پس از برخورد را به دست آورد.

$$v'_1 = \frac{(m_1 - em_2)v_1 + (m_2 + em_1)v_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

$$v'_2 = \frac{(m_2 - em_1)v_2 + (m_1 + em_2)v_1}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

در حین فرآیند برخورد مقداری از انرژی تلف خواهد شد. طبق نظریه کلاسیک برخورد، مقدار ضریب استرداد یک، به منزله داشتن حداکثر توانایی دو جسم برای بازیابی سرعت پس از برخورد است. این شرط برخورد الاستیک بدون اتلاف انرژی است. از طرفی دیگر مقدار ضریب استرداد صفر، برخورد کاملاً پلاستیک را نشان می‌دهد. در این صورت اجسام پس از برخورد به هم می‌چسبند و اتلاف انرژی آن‌ها حداکثر است. همه برخوردها در نقطه‌ای بین دو حالت برخورد الاستیک و کاملاً پلاستیک اتفاق افتاده و بنابراین مقدار ضریب استرداد بین صفر و یک است. جزئیات روابط حاکم بر برخورد اجسام در [۳۰] ارائه شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی برخورد دینامیکی اجسام نظیر دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری یک الگوریتم چند عامله است. در این الگوریتم برای هر عامل (جسم) با توجه به مقدار برازندگی که دارد، یک مقدار جرم با استفاده از رابطه (۵) اختصاص داده می‌شود.

$$m_i = \frac{1}{\frac{fit(i)}{1}} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^N \frac{1}{fit(k)}$$

یکی از نقاط قوت الگوریتم ژنتیک توانایی فرار از دام بهینه محلی به‌خصوص در مورد مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته است [۲۶]. از طرفی دیگر یکی از نقاط ضعف الگوریتم بهینه‌سازی برخورد دینامیکی اجسام عدم توانایی فرار از دام بهینه محلی است [۲۷]. در این مقاله سعی شده با استفاده از این نقطه قوت روش ژنتیک به برطرف کردن نقاط ضعف روش بهینه‌سازی برخورد دینامیکی اجسام در تحلیل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای طراحی گسسته پرداخته شود. ملاک برتری عملکرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری به منظور جستجوی کلی سه عامل اصلی حل سریع تر مسائل، حل مسائل بزرگ تر (مسائل با متغیرهای طراحی و قیود زیاد) و افزایش قدرت یافتن نقطه بهینه بهتر (رسیدن به نقطه بهینه کلی) است [۲۸ و ۲۹].

این تحقیق با ترکیب دو روش ذکر شده توانسته علاوه بر بالا بردن قدرت روش برخورد دینامیکی اجسام در مسائل مهندسی با متغیرهای گسسته، سرعت همگرایی روش را نیز افزایش دهد. در ادامه در بخش دوم و سوم به ترتیب توضیح چگونگی پیاده‌سازی روش الگوریتم برخورد دینامیکی اجسام و چگونگی ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در بخش چهارم مسئله بهینه‌سازی سازه‌ها تحت بارگذاری چندگانه مطرح شده و در بخش بعدی با ارائه حل چندین سازه خریابی استاندارد به بررسی و تفسیر نتایج پرداخته شده است. در نهایت در بخش آخر نتیجه‌گیری تحقیق ارائه می‌گردد.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی برخورد دینامیکی اجسام

الگوریتم بهینه‌سازی برخورد دینامیکی اجسام اولین بار در سال ۲۰۱۴ توسط کاوه و مهدوی ارائه شد [۲۷]. این الگوریتم از قوانین مهندسی حاکم بر برخورد دینامیکی اجسام با سرعت‌های مختلف الهام گرفته شده است. در این قسمت برای دست یافتن به معادلات حاکم بر برخورد اجسام، حرکت دو جسم با سرعت و جرم متفاوت در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه نیروهای تماس در حین برخورد مساوی و مخالفاند، بنابراین اندازه حرکت خطی سیستم ثابت می‌ماند و می‌توان قانون پایستگی اندازه حرکت خطی را نوشت.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (1)$$

تکرارهای الگوریتم، کیفیت جوابها بهتر می‌شود. در ابتدا مقدار ضریب استرداد بزرگتر در نظر گرفته شده تا توانایی الگوریتم در یافتن مناطق جدید خوب افزایش یابد. در حین پیش رفتن الگوریتم، ضریب استرداد کاهش می‌یابد تا در مناطق خوب پیدا شده، بهترین نقطه انتخاب گردد. این پارامتر به نوعی توازن بین فرآیند استخراج^۱ و اکتشاف^۲ را برقرار می‌سازد.

موقعیت‌های جدید اجسام با توجه به سرعت آنها پس از برخورد و همچنین موقعیت جسم‌های ثابت، به روزرسانی می‌شود. موقعیت جدید هر جسم ثابت و متحرک به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) می‌باشد.

$$X_{Si}^{new} = X_{Si} + rand \cdot v'_{Si}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \quad (10)$$

$$X_{Mi}^{new} = X_{Mi-\frac{n}{2}} + rand \cdot v'_{Mi}, \quad (11)$$

$$i = \frac{N}{2} + 1, \frac{N}{2} + 2, \dots, N$$

در روابط فوق پارامتر rand یک بردار تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده [۱-۱] است. علامت "0" نشان‌دهنده ضرب درایه به درایه بردارها است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی برخورد دینامیکی اجسام با ژنتیک

در این بخش به توضیح الگوریتم بهینه‌سازی ترکیب برخورد دینامیکی اجسام با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای متغیرهای گسسته پرداخته شده است. ژنتیک یکی از اولین الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری است که دارای نقاط قوت زیادی برای حل مسائل مهندسی به‌ویژه مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته است. در ادامه گام‌های الگوریتم پیشنهادی به شرح زیر است.

- ۱- وارد کردن لیست مقادیر گسسته مجاز برای انتخاب متغیرهای طراحی مسئله
- ۲- تشکیل جمعیت اولیه به صورت تصادفی در فضای امکان‌پذیر
- ۳- اختصاص جرم به اجسام بر مبنای تابع هدف با رابطه (۵)
- ۴- نخبه‌گرایی و ذخیره‌سازی اجسام دارای بهترین موقعیت: در این مرحله با توجه به مفهوم نخبه‌گرایی در الگوریتم ژنتیک بین ۵ تا ۱۰ درصد از جمعیت نخبه در هر تکرار عیناً

در رابطه فوق m_i مقدار جرم ذره i ام، N تعداد کل اجسام و $fit(k)$ نشان‌دهنده مقدار تابع هدف برای جسم k ام است. بر این اساس مقدار جرم هر جسم متناسب با عکس تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم باید تعداد اجسام در نظر گرفته شده به صورت زوج باشد. به منظور انتخاب یک جفت جسم جهت برخورد به یکدیگر، جسم‌ها با توجه به جرمی که دارند، از بیشترین به کمترین مقدار مرتب‌شده و سپس به دو گروه مساوی اجسام ثابت و متحرک تقسیم می‌گردند. اجسامی که دارای جرم بیشتری هستند، در دسته اجسام ثابت و بقیه در دسته اجسام متحرک قرار می‌گیرند.

اجسام متحرک برای بهبود موقعیت خود به اجسام ثابت برخورد می‌کنند و پس از برخورد به سمت موقعیت جدید حرکت داده می‌شوند. سرعت اجسام ثابت قبل از برخورد صفر است. سرعت هر جسم متحرک قبل از برخورد از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. سرعت هر جسم ثابت و متحرک بعد از برخورد به ترتیب به صورت روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌گردد.

$$v_{Mi} = X_{i-\frac{N}{2}} - X_i, \quad (6)$$

$$i = \frac{N}{2} + 1, \frac{N}{2} + 2, \dots, N$$

$$v'_{Si} = \frac{\left(m_{i+\frac{N}{2}} + e m_{i-\frac{N}{2}} \right) v_{Si+\frac{N}{2}}}{m_i + m_{i+\frac{N}{2}}}, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$$

$$v'_{Mi} = \frac{\left(m_i - e m_{i-\frac{N}{2}} \right) v_{Mi}}{m_i + m_{i-\frac{N}{2}}}, \quad (8)$$

$$i = \frac{N}{2} + 1, \frac{N}{2} + 2, \dots, N$$

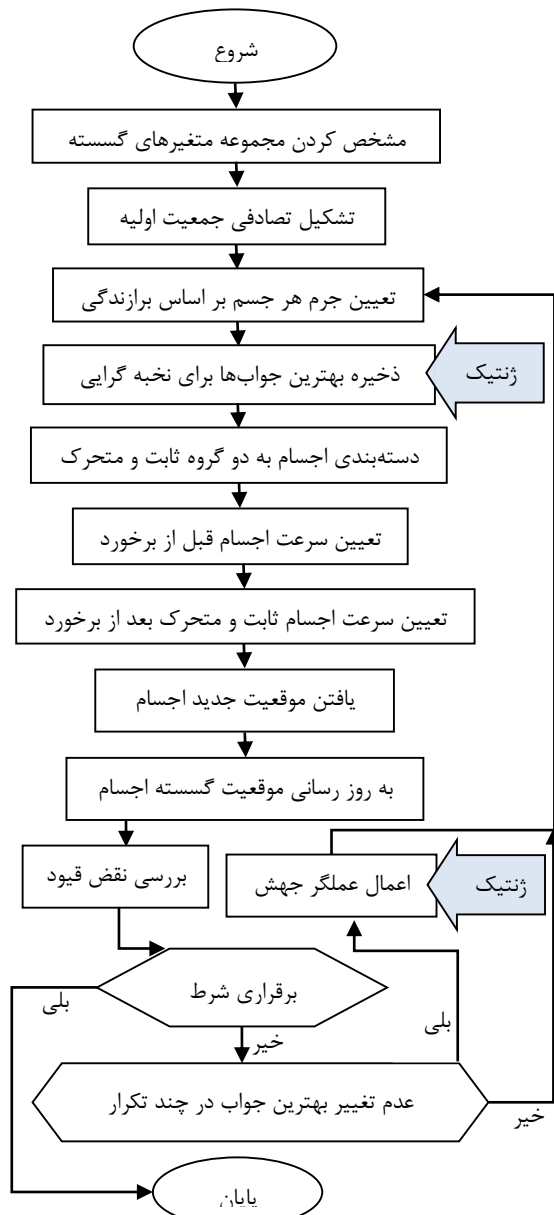
در روابط فوق اندیس‌های M و S به ترتیب مربوط به مشخصات اجسام متحرک و ثابت، X_i موقعیت جرم i ام، v_i و v'_i به ترتیب سرعت جسم i ام قبل و بعد از برخورد و e ضریب استرداد است. در این مقاله ضریب استرداد در حین فرآیند بهینه‌سازی به صورت رابطه (۹) کاهش می‌یابد [۳۱].

$$e = 1 - \frac{iter}{iter_{max}} \quad (9)$$

در رابطه فوق $iter$ تعداد تکرار فعلی و $iter_{max}$ تعداد کل تکرار در حین فرآیند بهینه‌سازی است. با توجه به اینکه با گذشت

² Exploration

¹ Exploitation



شکل (۱) فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی برخورد دینامیکی اجسام با ژنتیک.

۴- طراحی سازه‌ها با متغیرهای طراحی گسسته

در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مهندسی متغیرهای طراحی مسئله باید از یک مجموعه مقادیر گسسته انتخاب گردند. روش‌های بهینه‌سازی سعی در طراحی سازه‌ها با کمترین وزن ممکن بدون نقض قیود مهم طراحی مهندسی نظیر تنش مجاز اعضای سازه، تغییر مکان مجاز مفصل‌های آن، در نظر گرفتن معیار لاغری اعضای سازه، فرکانس طبیعی و غیره

به مرحله بعد انتقال داده می‌شوند. این مرحله در عمل استفاده از عملگر مهاجرت^۱ در الگوریتم ژنتیک است که می‌تواند باعث افزایش کارایی و سرعت الگوریتم شود [۳۲].

۵- مرتب کردن اجسام بر اساس برازندگی و دسته‌بندی آن‌ها به دو گروه مساوی اجسام ثابت و متحرک

۶- اختصاص سرعت اجسام قبل از برخورد با استفاده از رابطه (۶) برای اجسام متحرک و سرعت صفر برای اجسام ثابت.

۷- اختصاص سرعت اجسام بعد از برخورد با استفاده از رابطه (۷) برای اجسام متحرک و رابطه (۸) برای اجسام ثابت.

۸- یافتن موقعیت جدید اجسام بعد از برخورد با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب برای اجسام ثابت و متحرک.

۹- به‌روزرسانی موقعیت هر ذره بر اساس مجموعه متغیرهای گسسته.

۱۰- بررسی عدم نقض قیود: در این مرحله وضعیت قیود مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورت نقض قیود، سعی می‌شود موقعیت جسم به سمت مرز فضای امکان‌پذیر حرکت داده شود. برای این منظور مقدار عبارت دوم در سمت راست روابط (۱۰) و (۱۱) در یک ضریب کاهنده ضرب خواهد شد. این پارامتر باید طوری تنظیم شود که در صورت دور شدن جسم از منطقه امکان‌پذیر، جسم را به سمت مرزهای ناحیه سوق دهد. ضریب کاهنده در ابتدا به صورت تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شوند و در صورتی که نقض قیود کمتر نگردد، این عدد مجدد در یک عدد تصادفی دیگر ضرب خواهد شد و این پروسه تا رسیدن به عدم نقض قیود و یا کمتر شدن نقض آن ادامه پیدا خواهد کرد.

۱۱- اعمال عملگر جهش^۲ به کار گرفته‌شده در الگوریتم ژنتیک: در این مرحله در صورتی که بهترین جواب به‌دست آمده در چند تکرار متوالی تغییر نکند، برای فرار از جواب مینیمم‌های محلی، به‌صورت تصادفی یکی از متغیرهای طراحی بهترین جواب انتخاب‌شده و مقدار آن تغییر می‌کند.

۱۲- اعمال شرط توقف: مراحل فوق تا زمانی که معیار توقف ارضا نگردد، ادامه پیدا می‌کند. در این مقاله شرط توقف رسیدن به تعداد تکرار از پیش تعیین‌شده است.

در شکل (۱) فلوجارت روش الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی برخورد دینامیکی اجسام با ژنتیک ارائه شده است.

² Mutation

¹ Migration

۱۰ تجاوز نماید. در این سازه مساحت هر یک از ۱۵ عضو سازه باید از مجموعه ارائه شده در جدول (۱) انتخاب گردند. سازه تحت سه حالت بارگذاری مستقل به صورت جدول (۲) است. در شکل (۳) نمودار همگرایی به حل بهینه برای روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها نشان داده شده است. در جدول (۳) مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و روش‌های دیگر ارائه شده است. همان‌طور که از شکل (۳) مشاهده می‌گردد، الگوریتم پیشنهادی توانسته در کمتر از ۳۰ تکرار با تعداد آنالیز حدودی ۲۴۰۰ به جواب بهینه همگرا گردد. این مورد حاکی از سرعت همگرایی بالای روش پیشنهادی است.

مقادیر نتایج آماری این سازه حاصل از ۵۰ بار اجرای متوالی الگوریتم پیشنهادی برای بهترین جواب برابر با ۷۳۵۰۸ lb / ۱۰۵، میانگین جواب‌ها ۱۰۶/۸۲۵۱۲۱ lb و انحراف معیار آن‌ها برابر با ۲/۳۴۵۲۶۱ lb به دست آمد. مقادیر نتایج آماری سازه ۲۵ عضوی با الگوریتم پیشنهادی برای بهترین جواب برابر با ۵۶۰/۷۳۷۴۸۴ lb، میانگین جواب‌ها ۵۶۰/۷۳۷۴۸۴ lb و انحراف معیار آن‌ها برابر با ۰/۸۳۵۱۴۶ به دست آمده است.

جدول (۱) مقادیر مجاز برای سطح مقطع اعضای سازه خرپای ۱۵ عضوی (mm²).

ردیف	مساحت	ردیف	مساحت
۱	۱۱۳/۲	۹	۳۰۸/۶
۲	۱۴۳/۲	۱۰	۳۳۴/۳
۳	۱۴۵/۹	۱۱	۳۳۸/۲
۴	۱۷۴/۹	۱۲	۴۹۷/۸
۵	۱۸۵/۹	۱۳	۵۰۷/۶
۶	۲۳۵/۹	۱۴	۷۳۶/۷
۷	۲۶۵/۹	۱۵	۷۹۱/۲
۸	۲۹۷/۱	۱۶	۱۰۶۳/۷

جدول (۲) بارگذاری چندگانه اعمالی به سازه ۱۵ عضوی.

بارگذاری			
P ₁ (kN)	P ₂ (kN)	P ₃ (kN)	
۳۵	۳۵	۳۵	حالت اول
۳۵	۰	۳۵	حالت دوم
۳۵	۳۵	۰	حالت سوم

دارد. با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش، مسئله بهینه‌سازی سازه‌ها را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد.

$$\text{Minimize: } W(X)$$

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$$

Subject to

$$\begin{cases} g_{ij}(X) \leq 0, & \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, M \\ j = 1, 2, 3, \dots, NL \end{cases} \\ x_i \in \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_K\} \end{cases} \quad (12)$$

در رابطه فوق X بردار متغیر طراحی (مساحت مقطع تمامی اعضای سازه)، $W(X)$ وزن کل سازه، M تعداد قیود حاکم بر مسئله، NL تعداد بارگذاری‌های اعمالی، $g_{ij}(X)$ قید i ام تحت بارگذاری j ام حاکم بر مسئله، N تعداد کل اعضای سازه و x_i سطح مقطع عضو i ام سازه بوده و از لیست مجموعه گسسته K عضوی انتخاب گردد. در رابطه (۱۲) A_i ها مقادیر مجازی هستند که می‌توانند به عنوان مساحت مقطع اعضا در نظر گرفته شوند.

۵- ارائه مثال و بررسی نتایج

در این بخش برای بررسی کارایی روش ارائه شده، به طراحی سازه‌های خرپایی تحت بارگذاری چندگانه با استفاده از متغیرهای طراحی گسسته برای رسیدن به حداقل وزن سازه پرداخته شده است. برای این منظور، برنامه روش بهینه‌سازی ترکیبی بر خورد دینامیکی اجسام با ژنتیک در نرم‌افزار متلب^۱ نوشته شده و برای آنالیز سازه‌ها نیز از برنامه‌ای بر اساس روش المان محدود استفاده می‌شود. بعد از تحلیل مسئله به ازای حالت‌های مختلف بارگذاری و تعیین بارگذاری بحرانی‌تر بر اساس قیود حاکم بر سازه، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از روش ارائه شده و دیگر روش‌های بهینه‌سازی انجام می‌پذیرد.

۵-۱- سازه خرپای ۱۵ عضوی

سازه ارائه شده در شکل (۲) هندسه سازه خرپایی ۱۵ عضوی تحت بارگذاری چندگانه را نشان می‌دهد. چگالی و مدول الاستیسیته اعضای به کار رفته در این سازه به ترتیب برابر با 7800 kg/m^3 و 200 GPa است. حداکثر تنش مجاز عمودی کششی و فشاری برای تمامی اعضا 120 MPa بوده و حداکثر جابجایی مفاصل سازه در هر جهت مختصات نباید از mm

^۱ MATLAB

۲-۵- سازه خرپای ۲۵ عضوی

در این بخش خرپای ۲۵ عضوی فضایی که معمولاً جهت انتقال خطوط برق مورداستفاده قرار می‌گیرد و در شکل (۴) نشان داده شده است، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مقدار چگالی و مدول الاستیسته اعضای سازه به ترتیب برابر با 2768 kg/m^3 (0.1 lb/in^3) و 68.974 GPa (10 MSi) است. محدوده مجاز تنش نرمال اعضای سازه $275/79 \text{ MPa}$ (40 kpsi) و محدوده مجاز مقادیر جابجایی گره‌ای $8/89 \text{ mm}$ (0.35 in) می‌باشد. اعضای سازه در ۸ گروه به شرح جدول (۴) تیپ بندی شده و مقادیر مجاز برای سطح مقطع اعضای سازه باید از مجموعه ۱۶ تایی ارائه شده در رابطه (۱۳) (برحسب in^2) انتخاب گردند. در جدول (۵) نحوه بارگذاری سازه ارائه شده است.

$$A_i \in \{0.01, 0.4, 0.8, 1, 2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4.0, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6.0\} \quad (13)$$

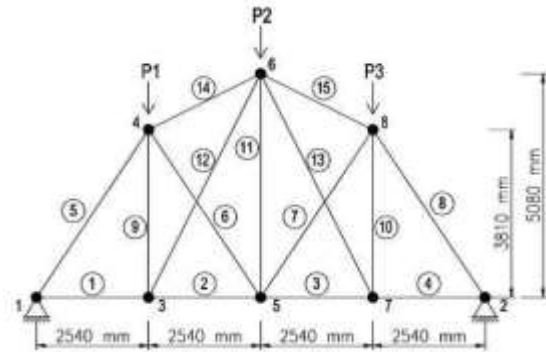
شکل (۵) مقایسه نمودار همگرایی به سازه بهینه را برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل روش DHPSACO حدود ۱۰٪ نقض قید را مجاز دانسته است و به همین دلیل توانسته به مقادیر کمتری دست پیدا کند. در جدول (۶) مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده در این مقاله و روش‌های مورداستفاده توسط سایر محققین انجام پذیرفته است.

جدول (۴) تیپ بندی اعضای سازه خرپای فضایی ۲۵ عضوی.

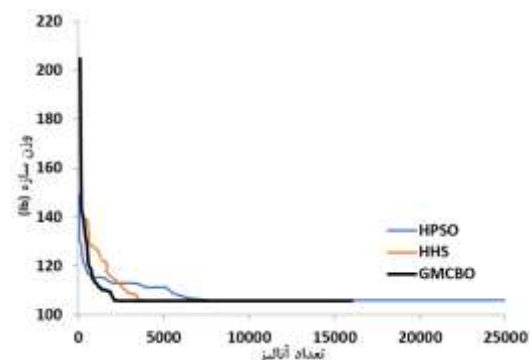
عضوی			
اعضای سازه	تیپ بندی	اعضای سازه	تیپ بندی
$A_{12} - A_{13}$	گروه ۵	A_1	گروه ۱
$A_{14} - A_{17}$	گروه ۶	$A_2 - A_5$	گروه ۲
$A_{18} - A_{21}$	گروه ۷	$A_6 - A_9$	گروه ۳
$A_{22} - A_{25}$	گروه ۸	$A_{10} - A_{11}$	گروه ۴

جدول (۵) بارگذاری چندگانه اعمالی به سازه خرپای فضایی ۲۵ عضوی.

حالت بارگذاری	شماره گره‌ها	بارگذاری		
		P_x (kips)	P_y (kips)	P_z (kips)
حالت اول	۱	۰/۰	۲۰/۰	-۵/۰
	۲	۰/۰	-۲۰/۰	-۵/۰
حالت دوم	۱	۱/۰	۱۰/۰	-۵/۰
	۲	۰/۰	۱۰/۰	-۵/۰
	۳	۰/۵	۰/۰	۰/۰
	۶	۰/۵	۰/۰	۰/۰



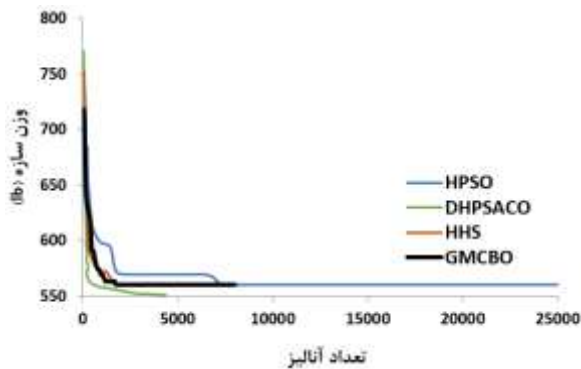
شکل (۲) شکل هندسی سازه ۱۵ خرپای عضوی.



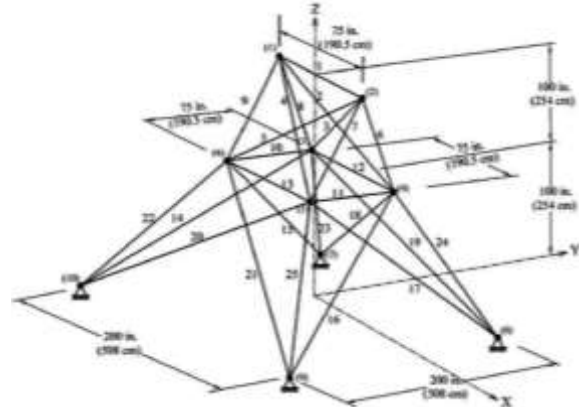
شکل (۳) مقایسه نمودارهای همگرایی به جواب بهینه برای سازه خرپای ۱۵ عضوی.

جدول (۳) مقادیر بهینه سطح مقطع اعضای سازه ۱۵ عضوی (mm^2).

متغیر	IHGA [۳۳]	HPSO [۳۴]	HHS [۷]	الگوریتم پیشنهادی
A_1	۳۰۸/۶	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_2	۱۷۴/۹	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_3	۳۳۸/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_4	۱۴۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_5	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷
A_6	۱۸۵/۹	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_7	۲۶۵/۹	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_8	۵۰۷/۶	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷	۷۳۶/۷
A_9	۱۴۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_{10}	۵۰۷/۶	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_{11}	۲۷۹/۱	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_{12}	۱۷۴/۹	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_{13}	۲۹۷/۱	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲	۱۱۳/۲
A_{14}	۲۳۵/۹	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳
A_{15}	۲۶۵/۹	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳	۳۳۴/۳
وزن	(lb)	۱۴۲/۱۱۷	۱۰۵/۷۳۵	۱۰۵/۷۳۵
	(kg)	۶۴/۴۶۴	۴۷/۹۶۱	۴۷/۹۶۱
درصد کاهش		۲۵/۶	۰/۰	۰/۰



شکل (۵) مقایسه نمودارهای همگرایی به سازه بهینه خرپای فضایی ۲۵ عضوی.



شکل (۴) شکل هندسی سازه خرپای فضایی ۲۵ عضوی.

جدول (۶) مقادیر بهینه سطح مقطع اعضای سازه ۲۵ عضوی.

تیپ بندی	[۳۵]	HS [۳۶]	HPSO [۳۴]	DHPSACO [۱۹]	HHS [۷]	الگوریتم پیشنهادی
۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
۲	۱/۶	۲/۰	۲/۰	۱/۶	۲/۰	۲/۰
۳	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۳/۲	۳/۶	۳/۶
۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
۶	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
۷	۲/۰	۱/۶	۱/۶	۲/۰	۱/۶	۱/۶
۸	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۴
وزن بهینه (lb)	۵۶۸/۶۹	۵۶۰/۵۹	۵۶۰/۵۹	۵۵۱/۶۱	۵۶۰/۵۹	۵۶۰/۵۹۱۵۹۲
درصد کاهش	۱/۴۲	۰/۰	۰/۰	* نقض قید ۱۰ درصدی	۰/۰	-

۳۲ تایی ارائه شده در رابطه (۱۴) (برحسب in^2) و در مورد دوم از جدول (۸) انتخاب می شوند.

$$A_i \in \{0.1, 0.2, 0.3, \dots, 3.0, 3.1, 3.2\} \quad (14)$$

جدول (۷) بارگذاری چندگانه اعمالی به سازه خرپای فضایی ۷۲ عضوی.

حالت بارگذاری	شماره بارگذاری	بارگذاری		
		P_x (kips)	P_y (kips)	P_z (kips)
حالت اول	۱۷	۵/۰	۵/۰	-۵/۰
	۱۷	۰/۰	۰/۰	-۵/۰
حالت دوم	۱۸	۰/۰	۰/۰	-۵/۰
	۱۹	۰/۰	۰/۰	-۵/۰
	۲۰	۰/۰	۰/۰	-۵/۰

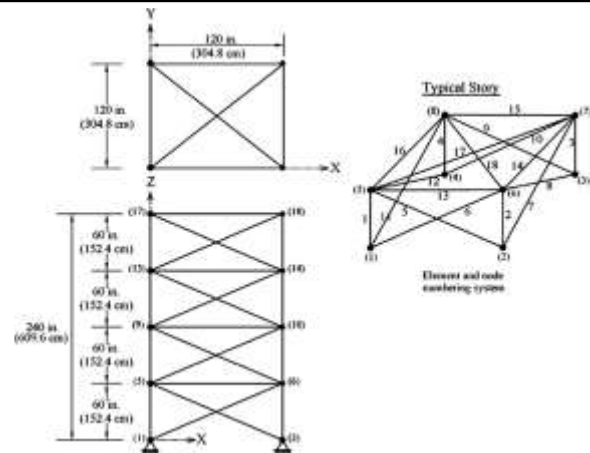
بر اساس نتایج نمودار همگرایی، الگوریتم بعد از حدود ۲۰ تکرار با تعداد ۱۶۰۰ آنالیز توانسته به جواب بهینه همگرا گردد و به نتایج مشابه دیگر محققین دست پیدا کرده است.

۳-۵- سازه خرپای ۷۲ عضوی

خرپای ۷۲ عضوی، یک سازه چهار طبقه به صورت نشان داده شده در شکل (۶) می باشد. چگالی و مدول یانگ اعضای این سازه مشابه سازه ۲۵ عضوی است. سازه تحت قید تنش نرمال فشاری و کششی برابر با $172/37 \text{ MPa}$ (25 kpsi) می باشد. جابجایی گره های بالایی سازه در هر جهت مختصات نباید از $6/35 \text{ mm}$ ($0/25 \text{ in}$) بیشتر شود. سازه تحت بارگذاری چندگانه به صورت جدول (۷) است. مقادیر گسسته مجاز سطح مقطع اعضای سازه به دو صورت یکی از مجموعه

در یافتن جواب بهینه سراسری نسبت به روش‌های به کار گرفته شده توسط دیگر محققین است. بر اساس مقادیر نتایج ارائه شده در جدول (۱۰)، سطح مقطع سازه در گروه تیپ‌بندی ۱ (A1-A4) و ۶ (A23-A30) دارای مقادیر بزرگتر نسبت به روش استاندارد برخورد دینامیکی اجسام است. این در حالی است که در سطح مقطع در گروه تیپ‌بندی ۲ (A5-A12)، ۵ (A19-A22)، ۹ (A37-A40) و ۱۳ (A59-A66) دارای مقادیر کمتر است و در مجموع مقدار وزن سازه به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. در سطر آخر جدول مقدار درصد کاهش نسبی وزن توسط الگوریتم پیشنهادی و دیگر روش‌ها آورده شده است.

مقادیر نتایج آماری سازه ۷۲ عضوی با الگوریتم پیشنهادی در مورد اول دارای بهترین جواب برابر با $385/542665 lb$ ، میانگین جواب‌ها $387/143242 lb$ و انحراف معیار برابر با $4/287143$ است. برای مورد دوم بهترین جواب برابر با $389/334170$ ، میانگین جواب‌ها $395/326271 lb$ و انحراف معیار آن‌ها برابر با $3/185259 lb$ به دست آمد. مقادیر نتایج آماری با روش الگوریتم برخورد دینامیکی اجسام در حالت اول برای میانگین و انحراف معیار جواب‌ها $401 lb$ و $16/99 lb$ و در حالت دوم به مقادیر $403/71 lb$ و $24/8 lb$ برای میانگین و انحراف از معیار رسیده است [۲۳].



شکل (۶) شکل هندسی سازه خرابی فضایی ۷۲ عضوی.

در جدول (۹) در ستون اول چگونگی تیپ‌بندی اعضای این سازه مشخص شده و همچنین مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف برای مورد اول ارائه شده است. در شکل (۷) نمودارهای همگرایی به سازه بهینه با روش‌های مختلف در مورد اول مشاهده می‌گردد.

نمودار همگرایی و مقایسه بین نتایج بهینه با روش پیشنهادی و روش‌های مختلف در مورد دوم برای سازه ۷۲ عضوی به ترتیب در شکل (۸) و جدول (۱۰) ارائه شده است. مقایسه نتایج در جدول (۱۰) حاکی از قدرت بالای روش ارائه شده

جدول (۸) مقادیر مجاز برای سطح مقطع اعضای سازه خرابی ۷۲ عضوی (mm^2).

شماره	مساحت	شماره	مساحت	شماره	مساحت	شماره	مساحت
۱	۷۱/۶۱۳	۱۷	۱۰۰۸/۳۸۵	۳۳	۲۴۷۷/۴۱۴	۴۹	۷۴۱۹/۳۴۰
۲	۹۰/۹۶۸	۱۸	۱۰۴۵/۱۵۹	۳۴	۲۴۹۶/۷۶۹	۵۰	۸۷۰۹/۶۶۰
۳	۱۲۶/۴۵۱	۱۹	۱۱۶۱/۲۸۸	۳۵	۲۵۰۳/۲۲۱	۵۱	۸۹۶۷/۷۲۴
۴	۱۶۱/۲۹۰	۲۰	۱۲۸۳/۸۶۸	۳۶	۲۶۹۶/۷۶۹	۵۲	۹۱۶۱/۲۷۲
۵	۱۹۸/۰۶۴	۲۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۳۷	۲۷۲۲/۵۷۵	۵۳	۹۹۹۹/۹۸۰
۶	۲۵۲/۲۵۸	۲۲	۱۵۳۵/۴۸۱	۳۸	۲۸۹۶/۷۶۸	۵۴	۱۰۳۲۲/۵۶۰
۷	۲۸۵/۱۶۱	۲۳	۱۶۹۰/۳۱۹	۳۹	۲۹۶۱/۲۸۴	۵۵	۱۰۹۰۳/۲۰۰
۸	۳۶۳/۲۲۵	۲۴	۱۶۹۶/۷۷۱	۴۰	۳۰۹۶/۷۶۸	۵۶	۱۲۱۲۹/۰۱۰
۹	۳۸۸/۳۸۶	۲۵	۱۸۵۸/۰۶۱	۴۱	۳۲۰۶/۴۴۵	۵۷	۱۲۸۳۸/۶۸۰
۱۰	۴۹۴/۱۹۳	۲۶	۱۸۹۰/۳۱۹	۴۲	۳۳۰۳/۲۱۹	۵۸	۱۴۱۹۳/۵۲۰
۱۱	۵۰۶/۴۵۱	۲۷	۱۹۹۳/۵۴۴	۴۳	۳۷۰۳/۲۱۸	۵۹	۱۴۷۷۴/۱۶۰
۱۲	۶۴۱/۲۸۹	۲۸	۲۰۱۹/۳۵۱	۴۴	۴۶۵۸/۰۵۵	۶۰	۱۵۸۰۶/۴۲۰
۱۳	۶۴۵/۱۶۰	۲۹	۲۱۸۰/۶۴۱	۴۵	۵۱۴۱/۹۲۵	۶۱	۱۷۰۹۶/۷۴۰
۱۴	۷۹۲/۲۵۶	۳۰	۲۲۳۸/۷۰۵	۴۶	۵۵۰۳/۲۱۵	۶۲	۱۸۰۶۴/۴۸۰
۱۵	۸۱۶/۷۷۳	۳۱	۲۲۹۰/۳۱۸	۴۷	۵۹۹۹/۹۸۸	۶۳	۱۹۳۵۴/۸۰۰
۱۶	۹۳۹/۹۹۸	۳۲	۲۳۴۱/۹۳۱	۴۸	۶۹۹۹/۹۸۶	۶۴	۲۱۶۱۲/۸۶۰

جدول (۹) مقادیر بهینه سطح مقطع اعضای سازه ۷۲ عضوی (مورد اول).

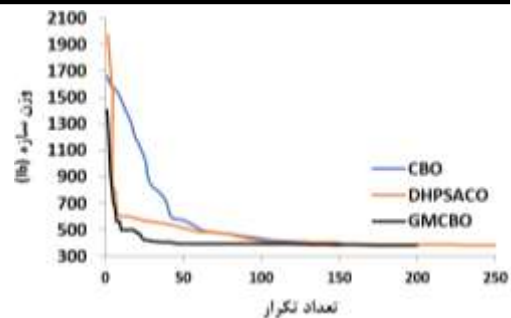
سطح مقطع	HS[۳۶]	HPSO[۳۴]	DHPSACO[۱۹]	HHS[۷]	GA [۳۷]	الگوریتم پیشنهادی
A1- A4	۱/۹	۲/۱	۱/۹	۱/۹	۱/۵	۲/۰
A5- A12	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۵
A13- A16	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
A17- A18	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
A19- A22	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۳
A23- A30	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
A31- A34	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۱
A35- A36	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
A37- A40	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
A41- A48	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
A49- A52	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
A53- A54	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۱
A55- A58	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
A59- A66	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۶
A67- A70	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۴
A71- A72	۰/۶	۰/۷	۰/۶	۰/۶	۰/۷	۰/۶
وزن بهینه (lb)	۳۸۷/۹۴	۳۸۸/۹۴	۳۸۵/۵۴	۳۸۵/۵۴	۴۰۰/۶۶	۳۸۵/۵۴۲۶۶۵
درصد کاهش	۰/۶۲	۰/۸۷	۰/۰	۰/۰	۳/۷۷	-

جدول (۱۰) مقادیر بهینه سطح مقطع اعضای سازه ۷۲ عضوی (مورد دوم).

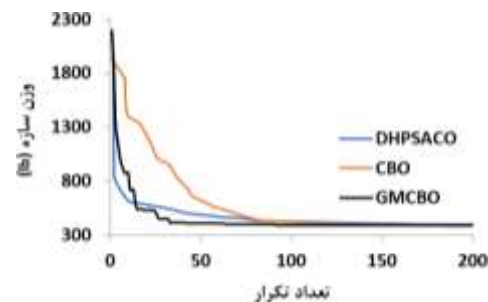
مقطع اعضا	PSO [۳۸]	PSOPC [۳۸]	HPSO [۳۸]	DHPSACO [۱۹]	GA [۳۷]	CBO [۲۷]	الگوریتم پیشنهادی
A1- A4	۷/۲۲	۴/۴۹۰	۴/۹۷۰	۱/۸	۰/۱۹۶	۱/۶۲	۱/۹۹۰
A5- A12	۱/۸۰	۱/۴۵۷	۱/۲۲۸	۰/۴۴۲	۰/۶۰۲	۰/۵۶۳	۰/۴۴۲
A13- A16	۱/۱۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۴۱	۰/۳۰۷	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱
A17- A18	۰/۱۹۶	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۷۶۶	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱
A19- A22	۳/۰۹	۲/۶۲	۲/۸۸۰	۱/۲۲۸	۰/۳۹۱	۱/۴۵۷	۱/۲۲۸
A23- A30	۰/۷۸۵	۱/۱۳۰	۱/۴۵۷	۰/۵۶۳	۰/۳۹۱	۰/۴۴۲	۰/۵۶۳
A31- A34	۰/۵۶۳	۰/۱۹۶	۰/۱۴۱	۰/۱۱۱	۰/۱۴۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱
A35- A36	۰/۷۸۵	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱
A37- A40	۳/۰۹	۱/۲۶۶	۱/۵۶۳	۰/۵۶۳	۱/۸۰۰	۰/۶۰۲	۰/۵۶۳
A41- A48	۱/۲۲۸	۱/۴۵۷	۱/۲۲۸	۰/۵۶۳	۰/۶۰۲	۰/۵۶۳	۰/۵۶۳
A49- A52	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۴۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱
A53- A54	۰/۵۶۳	۰/۱۱۱	۰/۱۹۶	۰/۲۵۰	۰/۳۰۷	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱
A55- A58	۰/۹۹۰	۰/۴۴۲	۰/۳۹۱	۰/۱۹۶	۱/۵۶۳	۰/۱۹۶	۰/۱۹۶
A59- A66	۱/۶۲۰	۱/۴۵۷	۱/۴۵۷	۰/۵۶۳	۰/۷۶۶	۰/۶۰۲	۰/۵۶۳
A67- A70	۱/۵۶۳	۱/۲۲۸	۰/۷۶۶	۰/۴۴۲	۰/۱۴۱	۰/۳۹۱	۰/۳۹۱
A71- A72	۱/۲۶۶	۱/۴۵۷	۱/۵۶۳	۰/۵۶۳	۰/۱۱۱	۰/۵۶۳	۰/۵۶۳
وزن بهینه	۱۲۰۹/۴۸	۹۴۱/۸۲	۹۳۳/۰۹	۳۹۳/۳۸۰	۴۲۷/۲۰۳	۳۹۱/۰۷۲۱	۳۸۹/۳۳۴۱۷۰
درصد کاهش	۶۷/۸۱	۵۸/۶۶	۵۸/۲۷	۱/۰۴	۸/۸۶	۰/۴۴	-

۷- مراجع

- [1] Jovašević, S., Shah Mohammadi, M.R., Rebelo, C., Pavlović, M., and Veljković, M., "New Lattice-Tubular Tower for Onshore WEC - Part 1: Structural Optimization", *Procedia Engineering* Vol.199, pp.3236-3241, 2017.
- [2] Schaffhirt, S., Zwick, D., and Muskulus, M., "Two-stage Local Optimization of Lattice Type Support Structures for Offshore Wind Turbines", *Ocean Engineering*, Vol.117, pp.163-173, 2016.
- [3] Kaveh, A., Talatahari, S., "Size Optimization of Space Trusses using Big Bang-Big Crunch Algorithm", *Computer and Structures*, Vol.87, pp.1129-40, 2009.
- [4] Sheikhi, M., Ghoddosian, A., "A Hybrid Imperialist Competitive Antcolony Algorithm for Optimum Geometry Design of Frame Structures", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.46, No.3, pp.403-416, 2013.
- [5] Rasmussen, M.H., and Stolpe, M., "Global Optimization of Discrete Truss Topology Design Problems using a Parallel Cut-and-Branch Method", *Computer and Structures*, Vol.86, pp.1527-38, 2008.
- [6] Miguel, L.F., Lopez, R.H., and Miguel, L.F. "Multimodal Size, Shape, and Topology Optimisation of Truss Structures using the Firefly Algorithm", *Advances in Engineering Software*, Vol.56, pp.23-37, 2013.
- [7] Cheng, M.Y., Prayogo, D., Wua, Y.W., and Lukito, M.M., "A Hybrid Harmony Search Algorithm for Discrete Sizing Optimization of Truss Structure", *Automation in Construction*, Vol.69, pp.21-33, 2016.
- [8] Lee, K.S., Geem, Z., Lee, W.S., and Bae, K., "The Harmony Search Heuristic Algorithm for Discrete Structural Optimization", *Journal of Engineering Optimization*, Vol.37, No.7, pp.663-684, 2005.
- [9] علی قدوسیان، مجتبی شیخی ازغندی، "روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در مهندسی"، انتشارات دانشگاه سمنان، ۱۳۹۲.
- [10] Goldberg, D.E., "Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning", Boston: Addison-Wesley, 1989.
- [11] Kirkpatrick, S., Gelatt, C., and Vecchi, M., "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol.220, No.4598, pp.671-80, 1983.
- [12] Eberhart, R. C., and Kennedy, J., "A New Optimizer using Particle Swarm Theory", *Proceedings of The 6th International symp Micromachine Hum Science*, pp.39-43, 1995.
- [13] Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colomi, A., "The ant system: Optimization by a Colony Ofcooperating Agents", *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, Vol.26, No.1, pp.29-41, 1996.
- [14] Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V., "A New Heuristic Optimization Algorithm



شکل (۷) نمودار همگرایی به سازه خرپای فضایی بهینه ۷۲ عضوی (مورد اول).



شکل (۸) مقایسه نمودار همگرایی به سازه بهینه خرپای فضایی ۷۲ عضوی (مورد دوم).

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به ارائه یک روش جدید ترکیبی متشکل از دو روش برخورد دینامیکی اجسام و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی با مقاطع گسسته پرداخته شده است. کارایی و نحوه عملکرد روش پیشنهادی توسط حل چندین مثال استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ضعف الگوریتم برخورد دینامیکی اجسام در یافتن جواب بهینه سراسری در مسائل بهینه‌سازی گسسته، مقاله حاضر توانسته با کمک مفاهیم الگوریتم ژنتیک، بهبود قابل ملاحظه‌ای را در عملکرد الگوریتم برخورد دینامیکی اجسام به وجود آورده است.

نتایج حل مثال‌های ارائه شده در مقاله حاضر نسبت به کارهای گذشته به مقادیر وزن برابر و یا کمتری بدون نقض قیود مسئله رسیده است. در مسائلی که روش حاضر به نتایج مشابه تحقیقات گذشته دست پیدا کرده است، می‌تواند نشأت گرفته از این موضوع باشد که نتایج ارائه شده در این مقالات، همان نقطه بهینه سراسری مسئله است و طرح بهتری از آن وجود ندارد. مقایسه بین نمودارهای همگرایی و نتایج ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی و دیگر روش‌های ذکر شده در مقاله، نشان دهنده سرعت همگرایی و قدرت بالای الگوریتم در یافتن جواب‌های بهینه است.

- Computers and Structures, Vol.195, pp.99-112, 2018.
- [26] Tsoulos, I.G., "Modifications of Real Code Genetic Algorithm for Global Optimization", Applied Mathematics and Computation, Vol.203, pp.598-607, 2008.
- [27] Kaveh, A., and Mahdavi, V., "Colliding Bodies Optimization Method for Optimum Discrete Design of Truss Structures", Computers and Structures, Vol.139, pp.43-53, 2014.
- [28] Das, S., Mukhopadhyay, A., Roy, A., Abraham, A., and Panigrahi, B. K., "Exploratory Power of the Harmony Search Algorithm: Analysis and Improvements for Global Numerical Optimization", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Vol.41, No.1, pp.89-106, 2011.
- [29] Gandomi, A., Yang, X. S., Yang, and Alavi, A. "Cuckoo Search Algorithm: A metaheuristic Approach to Solve Structural Optimization Problems", Engineering with Computers, Vol.29, No.1, pp.17-35, 2013.
- [30] Meriam, J.L., and Kraige, L.G., "Engineering Mechanics", Dynamics, John Wiley and Sons Publications, 2006.
- [31] Arjmand, M., and Sheikhi Azqandi, M., "Optimal Design of Truss Structure using Colliding Bodies Optimization", Proceedings of The 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, 2016.
- [32] Kaveh, A., and Talatahari, S., "A Novel Heuristic Optimization Method: Charged System Search", Acta Mechanica, Vol.213, No.3, pp.267-289, 2010.
- [33] Zhang, Y.N., Liu, J.P., Liu, B., Zhu, C.Y, and Li, Y., "Application of Improved Hybrid Genetic Algorithm to Optimized Design of Architecture Structures", Journal of Central South University of Technology, Vol.33, No.3, pp.69-72, 2003.
- [34] Li, L.J., Huang, Z.B., and Liu, F., "A Heuristic Particle Swarm Optimization Method for Truss Structures with Discrete Variables", Computer and Structures, Vol.87 No.7, pp.435-443, 2009.
- [35] Ringertz, U. L. F. T., "On Methods for Discrete Structural Optimization", Journal of Engineering Optimization, Vol.13, No.1, pp.47-64, 1988.
- [36] Lee, K.S., Geem, Z.W., Lee, S.H., and Bae, K.W., "The Harmony Search Heuristic Algorithm for Discrete Structural Optimization", Engineering Optimization, Vol.37, No.7, pp.663-684, 2005.
- [37] Wu, S.J., and Chow, P.T., "Steady-State Genetic Algorithms for Discrete Optimization of Trusses", Computer and Structures, Vol.56, pp.979-91, 1995.
- [38] Li, L.J., Huang, Z.B., and Liu, F.A., "Heuristic Particle Swarm Optimization Method for Truss Structures with Discrete Variables", Computer and Structures, Vol.87, pp.435-43, 2009.
- Harmony Search", Simulation, Vol.76, No.2, pp.60-68, 2001.
- [15] Kaveh, A., and Talatahari, S., "A Novel Heuristic Optimization Method: Charged System Search", Acta Mechanica, Vol.213, pp.267-86, 2010.
- [16] Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A., and Hamdi, M., "Water Cycle Algorithm - A Novel Metaheuristic Optimization Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems", Computers and Structures, Vol.110, pp.151-166, 2012.
- [17] Sadollah, A., Bahreininejad, A., Eskandar, H., and Hamdi, M., "Mine Blast Algorithm for Optimization of Truss Structures with Discrete Variables", Computers and Structures, Vol.102, pp.49-63, 2012.
- [18] Sheikhi Azqandi, M., Delavar, M., and Arjmand, M., "Time Evolutionary Optimization: A new Meta-Heuristic Optimization Algorithm", Proceedings of the 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Shahid Beheshti University, 2016.
- [19] Kaveh, A., and Talatahari, S., "Particle Swarm Optimizer, Ant Colony Strategy and Harmony Search Scheme Hybridized for Optimization of Truss Structures", Computer and Structures, Vol.87, pp.267-283, 2009.
- [20] Kaveh, A., and Talatahari, S., "A Hybrid CSS and PSO Algorithm for Optimal Design of Structures", Structural Engineering and Mechanics, Vol.42, No.6, pp.783-797, 2012.
- [21] Shen, Q., Shi, W.M., and Kong, W., "Hybrid Particle Swarm Optimization and Tabu Search Approach for Selecting Genes for Tumor Classification using Gene Expression Data", Computational Biology and Chemistry, Vol.32, pp.53-60, 2008.
- [22] Sadollah, A., Eskandar, H., Bahreininejad, A., and Kim, J.H., "Water Cycle, Mine Blast and Improved Mine Blast Algorithm for Discrete Sizing Optimization of Truss Structures", Computers and Structures, Vol.149, pp.1-16, 2015.
- [23] Shojaei, S., Arjomand M., and Khatibinia, M., "A Hybrid Algorithm for Sizing and Layout Optimization of Truss Structures Combining Discrete PSO and Convex Approximation", International Journal of Optimization in Civil Engineering, Vol.3, No.1, pp.57-83, 2013.
- [24] Arjmand, M., Sheikhi Azqandi, M., and Delavar, M., "Hybrid Improved Dolphin Echolocation and Ant Colony Optimization for Optimal Discrete Sizing of Truss Structures", Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, Vol.6, No.1, pp.74-89, 2018.
- [25] Qui, X., Lieu, Dieu, T., Do T., and Jaehong, L., "An Adaptive Hybrid Evolutionary Firefly Algorithm for Shape and Size Optimization of Truss Structures with Frequency Constraints",