

Optimization of structure using hybrid Harris hawks and Sine-cosine algorithm

Houshar Eimani Kalehsar*¹, Amirreza Esmacile Aghdam²

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabil, Iran

2- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

In this study, an efficient hybrid algorithm is proposed based on the Harris Hawks Optimization (HHO) algorithm and the sine cosine algorithm (SCA) for the optimal design of truss structures. Harris Hawks Optimization algorithm consists of two main phases: exploration and exploitation. Transitions between these phases are determined by the magnitude of the prey's escape energy. A key limitation of the Harris Hawks Optimization is its tendency to get stuck in local optima and its relatively slow convergence speed. The Sine Cosine Algorithm (SCA) finds the solution to an optimization problem by leveraging the behavior of sine and cosine functions. The aim of this study is to establish an effective synergy between the exploration and exploitation stages in the combined algorithm utilizing the Sine Cosine Algorithm. In the size optimization of a truss, the section area of the members is considered a decision variable. The objective function aims to minimize the weight of the truss while ensuring that member stresses and node displacements remain within specified limits. The combined Hawk-Sine-Cosine algorithm (HSCA) was implemented using the MATLAB software. To quantitatively assess the algorithm's performance, three planar trusses (10 bars, 18 bars, and 200 bars) and three space trusses (25 bars, 72 bars, and 942 bars) with multiple loading conditions and design constraints have been considered. The results indicate that the Harris-Sine Cosine algorithm is highly effective and efficient for optimizing large-scale truss structures. The Harris-Sine Cosine algorithm demonstrates a superior ability to avoid local optima when compared to HHO and most population-based algorithms.

ARTICLE INFO

Receive Date: 17 April 2024

Revise Date: 03 September 2024

Accept Date: 02 October 2024

Keywords:

Optimization

Truss

Harris Hawks algorithm

Sine cosine algorithm

Metaheuristic

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.452930.3393](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.452930.3393)

*Corresponding author: Houshyar Eimani Kalehsar.

Email address: hek@uma.ac.ir

بهینه‌سازی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم ترکیبی شاهین هریس و سینوس کسینوس

هوشیار ایمانی کله سر^۱، امیررضا اسمعیلی اقدم^۲

۱- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در این تحقیق یک الگوریتم ترکیبی موثر بر اساس الگوریتم شاهین هریس و الگوریتم سینوس کسینوس جهت طراحی بهینه سازه‌های خرپایی معرفی می‌شود. الگوریتم شاهین هریس شامل دو مرحله اصلی جستجو و بهره‌برداری بوده و انتقال بین دو مراحل فوق با توجه به شدت انرژی فرار شکار مشخص می‌شود. یکی از محدودیت‌های اصلی الگوریتم شاهین هریس، تمایل به دام افتادن آن در نقاط بهینه محلی با سرعت همگرایی نسبتاً آهسته می‌باشد. الگوریتم سینوس کسینوس پاسخ‌های بهینه مسائل بهینه‌سازی را مطابق رفتار توابع سینوس و کسینوس کشف می‌کند. هدف مطالعه حاضر ایجاد هم‌افزایی موثر بین مراحل اکتشاف و بهره‌برداری در الگوریتم ترکیب شده بر اساس الگوریتم سینوس کسینوس می‌باشد. در بهینه‌سازی اندازه یک خرپا، سطح مقطع عضوها به عنوان متغیرهای طراحی، کمینه نمودن وزن خرپا با تابع هدف مسئله بوده که تنش‌های عضوها و جابجایی‌های گره‌ها در حدود مشخصی باقی می‌مانند. پیاده‌سازی الگوریتم ترکیب شده شاهین-سینوس کسینوس در نرم افزار متلب انجام شده است. جهت ارزیابی کمی عملکرد الگوریتم، از سه نوع سازه دو بعدی (۱۰، ۱۸، ۲۰ عضو) و سه نوع سازه فضایی (۷۲، ۲۵، ۹۴ عضو) با شرایط بارگذاری مختلف و قیدهای طراحی متعدد استفاده شده است. نتایج نشان داد که الگوریتم شاهین-سینوس کسینوس جهت بهینه‌سازی سازه‌های بزرگ مقیاس بسیار موثر و کارآمد می‌باشد. الگوریتم شاهین-سینوس کسینوس از توانایی بهتری در فرار از نقاط بهینه محلی در مقایسه با الگوریتم‌های شاهین هریس و بیشتر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت برخوردار می‌باشد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، خرپا، الگوریتم شاهین هریس، الگوریتم سینوس کسینوس، فراابتکاری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.452930.3393					
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.452930.3393	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۷/۱۱	۱۴۰۳/۰۷/۱۱	۱۴۰۳/۰۶/۱۳	۱۴۰۳/۰۱/۲۹
		*نویسنده مسئول: هوشیار ایمانی کله سر hek@uma.ac.ir پست الکترونیکی:				

۱- مقدمه

الگوریتم‌های فراکاوشی به دلیل ویژگی‌های خاص خود در حل مسائل بهینه‌سازی و عدم نیاز آنها به مشتق‌پذیری تابع هدف، برای محققان حوزه بهینه‌سازی از موارد چالش برانگیز و جذاب می‌باشند. برخی از ویژگی‌های فوق شامل ساده بودن ساختار الگوریتم‌ها، عدم نیاز به تنظیم پارامترهای پیچیده متناسب با نوع مثال، پیاده‌سازی آسان در مسائل متنوع، توانایی برقراری تعادل مناسب بین دو مرحله کاوش^۱ (جستجوی کلی) و بهره‌گیری^۲ جواب‌های بهینه (جستجوی محلی) و ... می‌باشند. هدف اصلی بهینه‌سازی، کمینه نمودن تابع هدف با رعایت محدودیت‌ها و قیدهای سازه‌ای می‌باشد. تابع هدف در حوزه مهندسی عمران اغلب متناسب با کاهش هزینه ساخت و نگرش اقتصادی می‌باشد. قیدها و محدودیت‌های حاکم نیز با عوامل و مولفه‌های مرتبط با تقاضای طراحی سازه مانند تنش‌ها، جابجایی‌ها، جابجایی نسبی طبقات و... تعریف می‌شوند [۱]. هیچ الگوریتم فراکاوشی از توانایی حل تمامی مسائل بهینه‌یابی در حوزه‌های مختلف با عملکرد منحصر به فرد برخوردار نبوده ولی امکان یافتن جواب‌های مناسب (نزدیک به بهینه) با قربانی نمودن سرعت محاسبات را دارند. از چالش‌های مهم در حوزه بهینه‌سازی، حل مسائل با فضای جستجوی بزرگ همچنین مسائل با تعداد متغیرهای طراحی بیشتر و فضای پاسخ‌های بزرگ‌تر می‌باشد. در مسائل با فضای جستجوی وسیع، هزینه‌های محاسباتی زیاد و برای مسائل با فضای پاسخ زیاد احتمال به دام افتادن الگوریتم در نقاط بهینه محلی وجود دارد. لذا ضرورت بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی موجود و یا ترکیب آنها با سایر الگوریتم‌ها و متناسب با نوع مسئله مضاعف می‌گردد [۲]. مسائل بهینه‌سازی سازه‌های خرابی، در سه گروه بهینه‌سازی اندازه^۳، شکل سازه^۴ و توپولوژی^۵ مطرح می‌شوند. در بهینه‌سازی اندازه، کمینه نمودن وزن سازه خرپا با انتخاب سطح مقطع بهینه عناصر سازه‌ای از لیست مقاطع مشخص برای حالت گسسته و یا مقادیر عددی پیوسته در یک بازه‌ی خاص صورت می‌گیرد. در بهینه‌سازی شکل، یافتن مختصات بهینه برای گره‌های خرپا یا موقعیت بهینه گره‌ها (متغیرهای طراحی) هدف اصلی بوده همچنین در بهینه‌سازی توپولوژی، هدف اصلی شامل اتصال بهینه بین گره‌های سازه خرپا و در صورت ضرورت کاهش یا حذف عناصر غیر برابر با رعایت محدودیت‌های حاکم می‌باشد [۳]. پژوهش‌های مختلفی در حوزه بهینه‌سازی سازه صورت گرفته است. لی و همکاران با بهبود سرعت همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات، بهینه‌سازی وزن ۵ نوع سازه ۱۰ الی ۷۲ عضو خرپاهای مینا با متغیرهای پیوسته را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۴]. همچنین در زمینه بهبود کارایی الگوریتم‌ها در حوزه بهینه‌سازی سازه‌های خرابی به بهبود ساختار الگوریتم جستجوی گرانشی در مرحله بهره‌برداری [۵]، اصلاح الگوریتم جستجوی کلاغ با روش‌هایی مانند جایگزین نمودن متغیرهای نقص شده با متغیرهای بهترین پاسخ الگوریتم [۶]، بهینه‌سازی اندازه ۴ نوع سازه خرپایی مینا با الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته بر اساس اعمال روش جهش یکنواخت و غیریکنواخت [۷] همچنین به تلاش‌های پیرزان و همکاران در زمینه بهبود کارایی الگوریتم گرگ کایوت با روش آشوبناک جهت بهینه‌سازی ۴ نوع سازه مینا اشاره نمود [۸]. قلی‌زاده و همکاران با بهبود عملکرد الگوریتم‌های سیاه‌چاله، الگوریتم نیوتن و الگوریتم چند نظمی، بهینه‌سازی دو نمونه قاب خمشی بتنی ۶ و ۱۲ طبقه را مورد بررسی قرار داده‌اند [۹]. در ترکیب دو یا چند الگوریتم فراکاوشی، نقاط ضعف یک الگوریتم با الگوریتم دیگر پوشش داده می‌شود. امیدی نسب و همکاران با ترکیب الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، بهینه‌سازی سازه‌های خرابی را با متغیرهای گسسته برای ۴ نوع سازه مینا انجام داده‌اند [۱۰]. پاکنهاد و همکاران با استفاده از الگوریتم ذرات مرتعش خود تطبیق و بهبود متغیرهای پیش فرض مرتبط با الگوریتم فوق، روند بهینه‌سازی سازه خرپایی ۷۲ عضو را به همراه بررسی توابع ریاضی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۱]. از تحقیقات دیگر در خصوص استفاده از الگوریتم ذرات مرتعش می‌توان به بهینه‌سازی وزن گنبد خرابی بزرگ مقیاس تحت قیدهای فرکانس توسط کاوه و همکاران اشاره نمود [۱۲]. کاوه و همکاران با استفاده از مزیت‌های دو الگوریتم رقابت استعماری که قابلیت جستجوی بالایی داشته و الگوریتم جغرافیای زیستی با توانایی بالا در مرحله بهره‌برداری، ترکیب جدیدی از دو الگوریتم را جهت بهینه‌سازی سازه‌های خرابی پیشنهاد نموده‌اند [۱۳]. دگرتکین و همکاران نیز عملکرد الگوریتم مبتنی بر جستجوی ممنوعه و ژنتیک را جهت بهینه‌سازی سازه‌های قاب

¹ Exploration

² Exploitation

³ Size optimization

⁴ Shape optimization

⁵ Topology optimization

خمشی فولادی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴]. کوشک باغی و کاوه با استفاده از الگوریتم جدیدی که مبتنی بر سیستم گردش خون مصنوعی بوده روند بهینه‌سازی اندازه سازه‌های خرپایی ۱۰ تا ۲۰۰ عضوی را در ۵ نوع سازه مینا و با متغیرهای پیوسته انجام داده‌اند [۱۵]. کاوه و بخش پوری با ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم گروه پرستو با بهبود تعامل بین مرحله جستجو و بهره‌برداری و انتخاب تعداد زیرمجموعه بهینه روند بررسی ۱۱ نوع از توابع ریاضی و ۶ سازه مینای خرپایی را با متغیرهای پیوسته انجام داده‌اند [۱۶]. در کار تحقیقی دیگر با ترکیب الگوریتم رقابت استعماری در مرحله جستجو و الگوریتم شاهین هریس در مرحله بهره‌برداری، علاوه بر بررسی ۲۳ توابع مختلف ریاضی، ۵ نوع سازه مینای خرپایی نیز بررسی شده است [۱۷]. مشایخی و همکاران با ترکیب دو الگوریتم رقابت استعماری و جستجوی گرانشی و با بهبود روابط حرکت کشورها به سمت استعمارگر مطابق رابطه الگوریتم جستجوی گرانشی، بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های تخت دو لایه را بررسی نموده‌اند [۱۸]. کاوه و همکاران با ترکیب سه الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم اشعه و جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی ۴ نوع سازه خرپایی را با متغیرهای پیوسته مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۹]. از پژوهش‌های دیگر در این زمینه، ترکیب سه الگوریتم جستجوی هارمونی، ازدحام ذرات و کلونی مورچگان جهت بهینه‌سازی سازه خرپایی و قاب خمشی فولادی در دو حالت با متغیرهای پیوسته و گسسته می‌باشند [۲۰]. در خصوص تحقیقات مرتبط با بهینه‌سازی شکل و اندازه گنبد‌های خرپایی بر اساس قابلیت اطمینان سازه، می‌توان به تحقیقات حسینی واعظ و همکاران در زمینه بهینه‌سازی دو نوع گنبد ۵۲ و ۱۲۰ عضوی تحت محدودیت‌های فرکانس اشاره نمود [۲۱]. همچنین پاکنهاد و همکاران در پژوهشی دیگر، روند بهینه‌سازی سازه خرپایی ۵۸۲ عضوی را با متغیرهای گسسته و با الگوریتم خود تطبیقی سیستم ذرات مرتعش مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۲]. گوپتا و همکاران با ترکیب الگوریتم سینوس کسینوس و الگوریتم گرگ خاکستری بهینه‌سازی توابع ریاضی و مثال‌های مهندسی مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۳]. یکی دیگر از پژوهش‌ها در حوزه بهینه‌سازی سدهای بتنی، تلاش‌های شهروزی و همکاران با ترکیب سه الگوریتم تبرید شبیه‌سازی، ازدحام ذرات و الگوریتم کلونی مورچه، جهت بهینه‌سازی هندسه سد بتنی دوقوسی با ۲۲ متغیر پیوسته و لحاظ نمودن تابع هدف معادل با حجم بتن مصرفی در سازه سد می‌باشد [۲۴]. از پژوهش‌های مرتبط با بهبود عملکرد الگوریتم شاهین هریس جهت بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی، ترکیب الگوریتم شاهین هریس با الگوریتم ژنتیک جهت بهینه نمودن ۴ نوع از سازه‌های خریای مینا با متغیرهای پیوسته می‌باشد [۲۵]. همچنین تلاش‌های قلیزاده و همکاران در بهبود الگوریتم سینوس کسینوس با متغیرهای گسسته در حوزه بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی نیز قابل اشاره است [۲۶]. ایلچی و همکاران نیز با ترکیب الگوریتم برخورد اجسام و الگوریتم سینوس کسینوس، علاوه بر بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی، وزن بهینه یک نمونه قاب خمشی فولادی دو بعدی را با متغیرهای پیوسته و گسسته مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۷]. در خصوص بهبود الگوریتم‌ها، می‌توان به تلاش‌های کاوه و حسینی واعظ در بهبود عملکرد الگوریتم سیستم ذرات مرتعش جهت بهینه‌سازی وزن سازه خرپایی ۵۸۲ و ۷۲ عضوی با متغیرهای پیوسته اشاره نمود [۲۸]. در این پژوهش، از مزایای الگوریتم شاهین هریس در مرحله بهره‌برداری و الگوریتم سینوس کسینوس در مرحله جستجو و برقراری تعامل بین دو مرحله استفاده می‌شود. جهت مقایسه عملکرد الگوریتم ترکیبی شاهین-سینوس کسینوس، مسائل سازه‌های خرپایی مینا در حالت متغیرهای پیوسته، مطابق با تاریخچه مطالعات صورت گرفته در این حوزه مورد بررسی قرار می‌گیرند. سازه‌های مورد بررسی با الگوریتم‌های شاهین هریس، سینوس و کسینوس و الگوریتم ترکیب شده شامل سه نوع از سازه دو بعدی ۲۰۰، ۱۸، ۱۰ عضوی و سه نوع از سازه‌های خرپایی فضایی ۷۲، ۲۵ و ۹۴۲ عضوی که در مجموع محدوده‌ی سازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ مقیاس را جهت بررسی عملکرد الگوریتم ترکیبی پوشش می‌دهند. همچنین کارایی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مسائل شامل توابع ریاضی مبنای CEC2017 و CEC2019 نیز مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۲- فرمولبندی مسئله

در این پژوهش، حداقل نمودن وزن سازه با تعیین سطح مقطع بهینه عضوهای خرپا مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود. در روند بهینه‌سازی می‌بایست محدودیت‌های حاکم بر طراحی یا قیدهای طراحی با معادلات اصلی بهینه‌سازی ادغام گردد. قیدهای طراحی سازه-های خرپایی شامل محدودیت‌های مقادیر تنش‌های مجاز عضوهای خرپا، مقادیر مجاز جابجایی گره‌های آزاد خرپا و... می‌باشند. در بعضی از مسائل، کنترل نیروی کمانشی عضوهای فشاری نیز شامل محدودیت‌های طراحی می‌شوند. در مسائل بهینه‌سازی اندازه، سطح مقطع عناصر خرپا به عنوان متغیرهای طراحی تعریف می‌شوند.

$$\text{Minimize} \rightarrow W = \rho \cdot \sum_{i=1}^{nE} L_i A_i \quad (1)$$

متغیرهای طراحی مطابق رابطه (۲) عبارتند از:

$$X = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{nG}\} \quad (2)$$

در رابطه (۱)، W وزن کلی خرپا، nE تعداد عضوهای سازه خرپا، ρ چگالی مصالح سازه‌ای خرپا، L_i طول عضو i ام خرپا، A_i سطح مقطع عضو i ام می‌باشند. در رابطه (۲)، nG تعداد متغیرهای طراحی، X بردار مربوط به متغیرهای طراحی مساله می‌باشد. در حالت کلی معادلات بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فراکاوشی برای مسائل بدون قید استفاده می‌شوند لذا در این تحقیق جهت ادغام معادلات مربوط به مقادیر قیدهای طراحی با تابع هدف مسئله، از روش تابع جریمه استفاده می‌شود. مقادیر قیدهای طراحی با حداکثر مقادیر خود مطابق روابط (۳) الی (۵) بصورت نرمال تعریف و در معادلات اعمال می‌شوند.

$$g_i^\sigma(x) = \frac{|\sigma_i(x)| - \sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, nE \quad (3)$$

$$g_j^\delta(x) = \frac{|\delta_j(x)| - \delta_{\max}}{\delta_{\max}} \leq 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, nN \quad (4)$$

$$g_k^b(x) = \frac{|\sigma_k^b(x)| - \sigma_{\max}^b}{\sigma_{\max}^b} \leq 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, nC \quad (5)$$

در رابطه (۳)، مقادیر $g_i^\sigma(x)$ قید نرمال شده تنش هر عضو i ام، σ_{\max} حداکثر مقدار مجاز تنش‌های خرپا، و $\sigma_i(x)$ مقادیر تنش‌های ایجاد شده تحت بارگذاری مشخص در عضو خرپا و nE تعداد کل عضوهای خرپا می‌باشد. $g_j^\delta(x)$ مقادیر نسبی قید جابجایی در درجه آزادی شماره j ام خرپا که با حداکثر جابجایی مجاز در آن گره، نرمال می‌شود. در رابطه (۴)، δ_{\max} جابجایی مجاز گره‌های خرپا در درجه آزادی مربوط و $\delta_j(x)$ مقادیر جابجایی ایجاد شده در گره مشخص از درجه آزادی j ام می‌باشند. nN نیز تعداد کل درجات آزادی مربوط به سازه خرپا می‌باشد. در رابطه (۵) $g_k^b(x)$ مربوط به مقادیر نسبی قید کمانش اوپلری برای عضو فشاری k ام، σ_{\max}^b مقدار مجاز تنش-کمانشی بحرانی عضو خرپا، $\sigma_k^b(x)$ مقادیر تنش‌های فشاری ایجاد شده در عضوهای فشاری خرپا و nC تعداد عضوهای خرپا تحت تنش‌های محوری فشاری می‌باشند. نحوه اعمال تابع جریمه بر اساس مقادیر عددی قیدهای نرمال شده بصورت روابط (۶) و (۷) خواهد بود.

$$\text{if } g_i(x) > 0 \quad \text{then } C_i = g_i(x) \quad (6)$$

$$\text{elseif } g_i(x) \leq 0 \quad \text{then } C_i = 0 \quad (7)$$

مجموع مقادیر قیدهای نقض شده ناشی از محدودیت‌های طراحی شامل مقادیر تنش‌ها و جابجایی‌ها در هر آنالیز و طرح خرپا محاسبه و مجموع نسبی قیدها مطابق رابطه (۸) با مقدار عددی حاصل از تحلیل، برای تابع جریمه لحاظ می‌گردد.

$$C_i = \sum_{i=1}^m C_i \dots \quad (8)$$

$$= g_i^\sigma(x) = \frac{|\sigma_i(x)| - \sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} + g_j^\delta(x) = \frac{|\delta_j(x)| - \delta_{\max}}{\delta_{\max}} + g_k^b(x) = \frac{|\sigma_k^b(x)| - \sigma_{\max}^b}{\sigma_{\max}^b}$$

در رابطه (۸) پارامتر m اشاره به تعداد کل قیده‌های ارزیابی مسئله بهینه‌سازی دارد. ساختار اصلی الگوریتم‌های فراکاوشی برای مسائل بهینه‌سازی فاقد قید و برای مسائل مقید، یک ترکیب منطقی از وزن اولیه سازه و مجموع مقادیر قیود صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های معمول ترکیب اشاره شده استفاده از تابع جریمه مطابق رابطه (۹) می‌باشد.

$$\text{Minimize: } W_p = \left(\rho \sum_{i=1}^{nE} L_i A_i \right) \times P \times (1 + C_i)^f \quad (9)$$

متغیرهای p و ϵ مربوط به ضرائب تابع جریمه بوده و مقادیر آنها بر اساس ابعاد و پیچیدگی نوع مسئله انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، مقادیر عددی متغیرهای فوق عدد ۱ انتخاب می‌شوند. با انتخاب مقادیر کوچکتر برای ضرائب تابع جریمه، بخش اکتشافی الگوریتم فراکاوشی جهت یافتن پاسخ بهینه تقویت شده و سرعت همگرا شدن به پاسخ‌های نزدیک به بهینه سراسری نیز بیشتر می‌گردد [۲۹].

۳- الگوریتم شاهین هریس (HHO⁶)

الگوریتم شاهین هریس در سال ۲۰۱۹ بر اساس اصول شکار گروهی شاهین‌ها در به دام انداختن طعمه، معرفی و فرمولبندی شده است. هر شاهین هریس به عنوان یک راه‌حل مساله تعریف می‌شود و بهترین پاسخ در هر مرحله به عنوان موقعیت طعمه یا خرگوش شناسایی می‌گردد. عملکرد الگوریتم فوق را می‌توان در سه بخش، شامل نحوه جستجوی الگوریتم یا فاز اکتشاف، مرحله انتقال از حالت اکتشاف به بهره‌برداری و مرحله بهره‌برداری یا استخراج دسته‌بندی نمود [۳۰].

۳-۱ مرحله جستجو

در مرحله جستجو، موقعیت بعدی شاهین‌های هریس بر اساس رابطه (۱۰) با لحاظ نمودن حرکت‌های تصادفی هر شاهین، مختصات طعمه و میانگین موقعیت خانواده شاهین‌ها به روزرسانی می‌شود. اگر مقدار q بیشتر مساوی عدد 0.5 باشد در اینصورت موقعیت جدید شاهین‌ها بصورت تصادفی در فضای جستجو مشخص می‌شود. در صورتی که به q عددی کمتر از 0.5 اختصاص یابد موقعیت جدید شاهین‌ها وابسته به حدود بالا و پایین فضای جستجو، موقعیت سایر شاهین‌ها و مختصات طعمه خواهد شد.

$$X(t+1) = \begin{cases} \{X_{rand}(t) - r_1 | X_{rand}(t) - 2r_2 X(t)\} & q \geq 0.5 \\ \{(X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3(LB + r_4(UB - LB))\} & q < 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) q عدد تصادفی بین صفر و یک که موقعیت جدید شاهین‌های هریس جهت شکار با استفاده از رابطه فوق مشخص می‌شود. $X(t+1)$ بردار موقعیت شاهین‌ها در تکرار بعدی، $X_{rabbit}(t)$ موقعیت فعلی خرگوش یا طعمه، $X_{rand}(t)$ موقعیت تصادفی یکی از شاهین‌ها از بین جمعیت موجود و $X_m(t)$ موقعیت متوسط جمعیت شاهین‌های موجود می‌باشند. همچنین اعداد تصادفی r_1, r_2, r_3, r_4 در محدوده صفر و یک تولید و در هر تکرار به روزرسانی می‌شوند. UB و LB نیز حدود بالا و پایین متغیرها می‌باشند. موقعیت متوسط شاهین‌ها نیز از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) $X_i(t)$ موقعیت هر راه‌حل مربوط به شاهین هریس و N تعداد کل جمعیت شاهین‌های هریس در هر تکرار می‌باشد.

۲-۳ مرحله انتقال از جستجو به بهره‌برداری

در این مرحله، عملکرد الگوریتم بر اساس انرژی باقیمانده از شکار که به مرور زمان روند کاهشی دارد با رابطه (۱۲) تعریف می‌شود. بر اساس مقادیر عددی انرژی شکار، روند انتقال الگوریتم بین دو مرحله اصلی مشخص می‌گردد. چنانچه میزان قدر مطلق عددی انرژی شکار بیشتر مساوی یک باشد در اینصورت الگوریتم وارد مرحله اکتشاف و جستجوی نواحی مختلف می‌پردازد. برای مقادیر کمتر از عدد یک، الگوریتم در ناحیه بهره‌برداری بوده و به بررسی پاسخ‌ها در همسایگی خود می‌پردازد.

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) مقادیر E_0 انرژی اولیه که یک عدد متغیر بین حدود ۱- و ۱+ بوده و T تعداد کل تکرار الگوریتم می‌باشد.

۳-۳ مرحله بهره‌برداری

مرحله بهره‌برداری الگوریتم اشاره به رفتار حمله و یورش شاهین‌ها به طعمه بوده و شامل دو حالت محاصره نرم و سخت با توجه به مقادیر عددی انرژی فرار شکار می‌شود. همچنین بر اساس شانس فرار طعمه که بصورت عدد تصادفی r بین صفر و یک تعریف می‌گردد چنانچه مقادیر عددی شانس فرار طعمه کمتر از ۰/۵ باشد طعمه موفق به فرار شده و در صورتی که مقادیر فوق مساوی و بیشتر از عدد ۰/۵ شود امکان فرار طعمه وجود نخواهد داشت. نحوه عملکرد شاهین‌ها در شکار و نوع رفتار طعمه در فرار، ۴ حالت و موقعیت را برای شاهین‌ها مشخص نموده و بر این اساس نیز به روزرسانی می‌شوند.

$$|E| \geq 0.5 \ \& \ r \geq 0.5 \quad -1$$

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E |J \cdot X_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (13)$$

$$\Delta X(t) = X_{rabbit}(t) - X(t) \quad (14)$$

$$J = 2(1 - r_3) \quad (15)$$

در رابطه (۱۳) $\Delta X(t)$ اختلاف بردار موقعیت طعمه و شاهین هریس، J مطابق رابطه (۱۵) شبیه‌سازی حرکت طعمه حین فرار و r_3 عدد تصادفی بین صفر و یک می‌باشد.

$$|E| < 0.5 \ \& \ r \geq 0.5 \quad -2$$

$$X(t+1) = X_{rabbit}(t) - E |\Delta X(t)| \quad (16)$$

$$|E| \geq 0.5 \ \& \ r < 0.5 \quad -3$$

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (17)$$

$$Y = X_{rabbit}(t) - E |J \cdot X_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (18)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (19)$$

$$LF(X) = 0.01 \times \frac{\mu \times \sigma}{v^{\left(\frac{1}{\beta}\right)}} \quad \sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin\left(\frac{\pi \cdot \beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (20)$$

در رابطه (۱۹) مقادیر D ابعاد مسئله و S بردار تصادفی به اندازه ابعاد مسئله، μ و v اعداد تصادفی بین صفر و یک همچنین Γ مربوط به تابع گاما و مقادیر β عدد ثابت $1/5$ در نظر گرفته می‌شوند.

$$|E| < 0.5 \text{ \& } r < 0.5 \quad -4$$

این حالت شرایط محاصره سخت بوده و طعمه انرژی کافی برای فرار ندارد لذا هر شاهین سعی می‌کند فاصله متوسط خود را نسبت به موقعیت طعمه مطابق روابط زیر کاهش دهند.

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (21)$$

$$Y = X_{rabbitt}(t) - E |J \cdot X_{rabbitt}(t) - X_m(t)| \quad (22)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (23)$$

۴- الگوریتم سینوس کسینوس (SCA)

الگوریتم سینوس کسینوس در سال ۲۰۱۶ توسط میرجلیلی معرفی شده است. معادلات مراحل اکتشاف و بهره‌برداری الگوریتم فوق به صورت رابطه (۲۴) می‌باشند [۳۱].

$$X_i(t+1) = \begin{cases} \{X_i(t) + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 \times P_i(t) - X_i(t)|\} & r_4 < 0.5 \\ \{X_i(t) + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 \times P_i(t) - X_i(t)|\} & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (24)$$

در رابطه (۲۴) $X_i(t)$ موقعیت کنونی در بعد i مسئله و در تکرار t می‌باشد. همچنین اعداد تصادفی r_3, r_4 در محدوده‌ی بین صفر و یک می‌باشند. r_2 عدد تصادفی بین صفر و 2π و r_1 مطابق رابطه (۲۵) تعریف می‌شود. همچنین $P_i(t)$ بهترین پاسخ حاصل در تکرار t می‌باشد.

$$r_1 = a - t \frac{a}{T} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) a عدد ثابتی برابر ۲ و T تعداد کل تکرار الگوریتم می‌باشد.

۵- الگوریتم شاهین - سینوس کسینوس (HSCA⁸)

با توجه به ضعف الگوریتم شاهین هریس در مرحله جستجو و سرعت همگرایی پایین و لزوم برقراری تعادل قابل قبول بین مرحله جستجو و بهره‌برداری در الگوریتم پیشنهادی، روند کلی مطابق با شکل ۱ و به شرح زیر می‌باشد.

۱- در فرایند جستجوی الگوریتم شاهین هریس و در مرحله انتخاب، موقعیت تصادفی شاهین‌ها با اضافه نمودن مقادیری مطابق

رابطه (۲۶) به موقعیت فعلی آن یعنی $X_{rand}(t)$ در شرایط $q \geq 0.5$ بهبود داده می‌شود.

1 Sine Cosine Algorithm

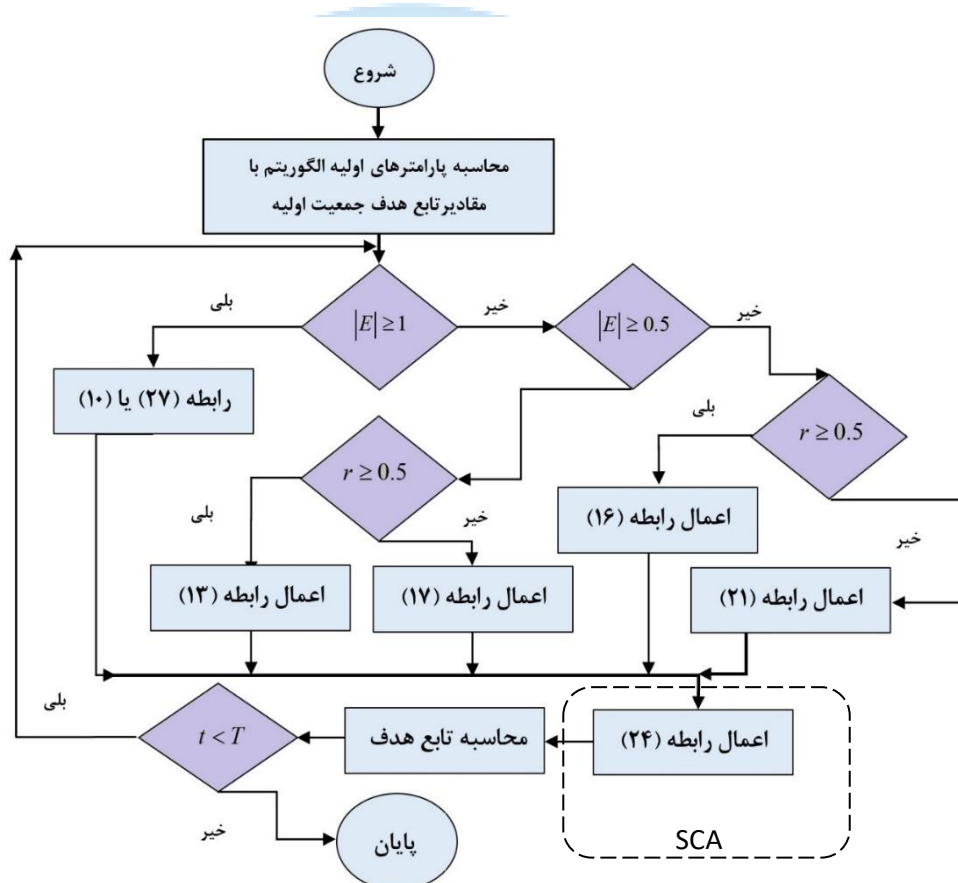
2 HSCA (Hawks-Sine Cosine Algorithm)

$$F_c = r_1 \times \cos(r_2) \times \text{abs}(r_3 \times X_{\text{rabbit}}(t) - X(t)) \quad (26)$$

$$X_{\text{rand}}(t) = X_{\text{rand}}(t) + F_c \quad (27)$$

در رابطه (۲۶) اعداد تصادفی r_3 ، در محدوده‌ی بین صفر و یک و r_2 عدد تصادفی بین صفر و 2π و r_1 مطابق رابطه (۲۵) می‌باشد.

۲- در پایان عملکرد الگوریتم شاهین هریس، پاسخ‌های هر شاهین با توجه به ابعاد متغیرهای آن، با الگوریتم سینوس کسینوس بهبود داده می‌شود. اصلاح موقعیت متغیرهای ابعادی شاهین‌ها، باعث افزایش سرعت همگرایی الگوریتم ترکیبی و ایجاد تعادل مناسب بین مرحله جستجو و بهره‌برداری می‌شود. هر پاسخ حاصل از موقعیت شاهین هریس، با استفاده از رابطه (۲۴) مربوط به الگوریتم سینوس کسینوس بهبود داده می‌شوند. مطابق با بند ۱، علاوه بر اصلاح موقعیت تصادفی شاهین‌ها در مرحله جستجوی الگوریتم یعنی رابطه (۲۶) که ممکن است مقادیری افزایشی یا کاهشی متناسب با مقادیر r_2 داشته و باعث اصلاح موقعیت تصادفی شاهین‌ها گردد. پاسخ کلی حاصل نیز در پایان مطابق رابطه (۲۴)، با بهبود متغیرهای مساله از روابط الگوریتم سینوس - کسینوس، اصلاح می‌شود.



شکل ۱: نحوه عملکرد الگوریتم ترکیبی شاهین سینوس کسینوس

۶- مثال‌های عددی

جهت بررسی کلی عملکرد الگوریتم ترکیبی، بهینه‌سازی ۶ نوع از سازه‌های دو بعدی و فضایی با تعداد متغیرهای طراحی مختلف و شرایط بارگذاری و قیدهای طراحی متنوع انتخاب می‌شوند. بر اساس تعداد عضوهای خرپا، مسئله بهینه‌سازی در دو گروه مجزا بررسی می‌شوند. گروه اول از سازه‌های کوچک و متوسط مقیاس شامل خرپای ۱۰، ۱۸، ۲۵، ۷۲ عضوی، گروه دوم شامل سازه‌های بزرگ مقیاس ۲۰۰

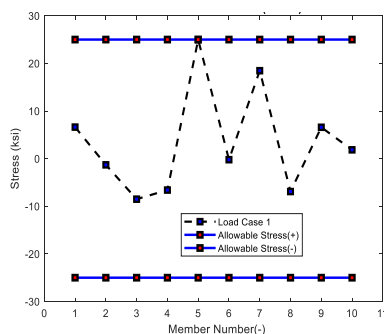
و ۹۴۲ عضوی به ترتیب با ۲۹ و ۵۹ متغیر طراحی می‌باشند. جهت آنالیز و طراحی تمامی مسائل از روش سختی مستقیم و از نرم‌افزار متلب متناسب با ماتریس سختی‌سازه‌ها و شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی هر مثال در برنامه نویسی استفاده شده است. اجرای برنامه‌ها در سیستم رایانه‌ای با مشخصات پردازنده ۴ هسته‌ای با فرکانس ۲/۵۹ گیگا هرتز و ۸ گیگا بایت حافظه دسترسی صورت گرفته است. نتایج بهینه‌سازی با نتایج تحقیقات گذشته نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در ارتباط با محاسبات آماری، برای هر سازه، ۳۰ مرتبه اجرای الگوریتم صورت می‌گیرد. مقادیر انحراف از معیار و بهترین و بدترین پاسخ‌های حاصل از الگوریتم از بین ۳۰ مرتبه اجرای آن مورد مقایسه و بهترین پاسخ انتخاب می‌شود.

۶-۱ خرابی ۱۰ عضوی

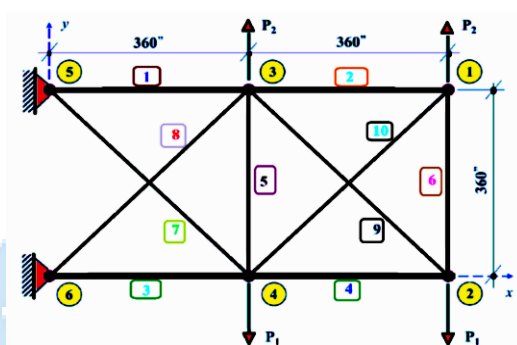
سازه خرپای ۱۰ عضوی با الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف و با متغیرهای پیوسته یا گسسته مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳ ویژگی‌های هندسی، بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی خرپای ۱۰ عضوی را نشان می‌دهد. در این تحقیق، دو حالت بارگذاری شامل حالت اول $p_1 = 100 \text{ Kips}$ و $p_2 = 0$ و حالت دوم بارگذاری $p_1 = 150 \text{ Kips}$ و $p_2 = 50 \text{ Kips}$ جهت بهینه‌سازی با الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند. مصالح خرپای فوق، با مدول الاستیسیته $E = 10000 \text{ ksi}$ و چگالی مصالح برابر $\rho = 0.1 \text{ lb/in}^3$ و هر عضو خرپا، یک متغیر طراحی مستقل تعریف می‌گردد. مقادیر حدود بالای مساحت مقاطع $A_{max} = 35 \text{ in}^2$ و پایین $A_{min} = 0.1 \text{ in}^2$ لحاظ شده است. قیدهای طراحی خرپای فوق شامل تنش‌های مجاز کششی و فشاری برابر $\pm 25 \text{ ksi}$ و جابجایی مجاز گره‌های خرپا در جهت‌های x و y برابر $\pm 2 \text{ in}$ می‌باشند. در مجموع، سازه فوق برای ۲۸ قید طراحی شامل ۲۰ قید کنترل تنش‌های کششی و فشاری عضوهای خرپا و ۸ قید کنترل جابجایی گره‌های خرپا کنترل می‌گردد. در جدول ۱ مشاهده می‌شود که الگوریتم شاهین هریس مقادیر وزن بهینه را برای حالت بارگذاری اول برابر 5085 lb و الگوریتم سینوس کسینوس مقادیر 5135 lb و الگوریتم پیشنهادی وزن بهینه را 5061 lb برآورد نموده است. الگوریتم ترکیبی هر چند در تعداد محاسبات بیشتری وزن بهینه را کشف نموده است ولی نسبت به الگوریتم شاهین هریس کاهش 24 lb در وزن سازه و نسبت به الگوریتم سینوس کسینوس کاهش 74 lb معادل $1/5$ درصد در وزن سازه را محاسبه نموده است. مطابق شکل ۴ و ۲ مقادیر قیدهای طراحی خرپای ۱۰ عضوی در حالت بارگذاری اول و دوم در محدوده‌ی مجاز و هیچ‌گونه تخطی از مقادیر مرزی قیدها صورت نگرفته است.

جدول ۱: نتایج مربوط به خرابی ۱۰ عضوی برای حالت بارگذاری اول

Design variable ()	Degertekin [31]		KBesth et al [32]	KBesth et al [33]	Javidi et al [34]		Koshkbaghi et al [35]	This study		
	(EHS)	(SAHS)			(CSA)	(ECSA)		HHO	SCA	HSCA
A_1	30.208	30.394	30.5755	30.5022	33.6116	30.5096	30.646	30.66	30.85	30.6
A_2	0.100	0.100	0.1000	0.1000	0.1478	0.1000	0.1	0.1	0.18	0.1
A_3	22.698	23.098	23.3368	23.2170	22.9345	23.2253	23.103	23.35	23.55	23.18
A_4	15.275	15.491	15.1497	15.2204	13.9637	15.2315	15.063	15.24	15.14	15.17
A_5	0.100	0.100	0.1000	0.1001	0.1050	0.1000	0.1	0.1	0.1	0.1
A_6	0.529	0.529	0.5276	0.5587	0.3611	0.5517	0.573	0.5	0.4	0.58
A_7	7.558	7.488	7.4458	7.4548	7.9202	7.4561	7.478	7.44	7.44	7.45
A_8	21.559	21.189	20.9892	21.0371	22.0883	21.0276	21.094	21.04	20.99	20.99
A_9	21.491	21.342	21.5236	21.5295	19.6785	21.5239	21.532	21.34	21.35	21.51
A_{10}	0.100	0.100	0.1000	0.1002	0.1041	0.1000	0.1	0.1	0.1	0.1
Weight (lb)	5062.39	5061.42	5060.99	5060.92	5095.40	5060.91	5061.03	5085.32	5135.62	5061.00
Mean (lb)	5063.73	5061.95	5062.09	5062.45	5290.79	5063.41	5061.07	5538.0	5223.01	5100.5
Stdev (lb)	1.98	0.71	2.05	3.77	125.89	5.43	0.09	35.2	48.31	13.4
NSA	9,791	7,081	19,540	23700	18,706	16401	12000	30000	32000	40000



شکل ۲: قیدهای جابجایی (شکل وسط)، قیدهای تنش (شکل چپ)، نمودار همگرایی الگوریتمها (راست) برای خرپای ۱۰ عضوی در حالت بارگذاری اول

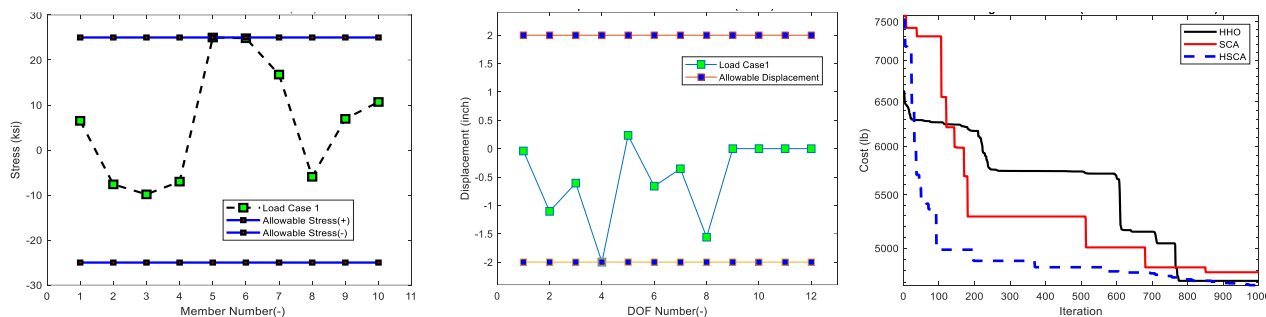


شکل ۳: خرپای ۱۰ عضوی

جدول ۲: نتایج مربوط به خرپای ۱۰ عضوی برای حالت بارگذاری دوم

Design variable ()	Li et al [36] HPSO	Degertekin [31]		KBesth et al [32] (WEO)	KBesth et al [33] (CPA)	Koshkbaghi et al [35] (ACCS)	KBesth et al [37] (PGO)	This study		
		(EHS)	(SAHS)					HHO	SCA	HSCA
A_1	23.353	23.589	23.525	23.5804	23.5515	23.522	23.5326	23.47	23.47	23.44
A_2	0.100	0.100	0.100	0.1003	0.1000	0.1	0.1000	0.1	0.1	0.1
A_3	25.502	25.422	25.429	25.1582	25.5440	25.364	25.0068	25.3	25.35	25.11
A_4	14.250	14.488	14.488	14.1801	14.1674	14.503	14.4241	14.49	14.49	14.73
A_5	0.100	0.100	0.100	0.1002	0.1000	0.1	0.1000	0.1	0.1	0.1
A_6	1.972	1.992	1.995	1.9708	1.9698	1.97	1.9721	1.97	1.9	1.97
A_7	12.363	12.352	12.334	12.4511	12.3533	12.417	12.4286	12.3	12.3	12.38
A_8	12.984	12.698	12.689	12.9349	12.8167	12.938	12.8215	12.8	12.89	12.89
A_9	20.356	20.354	20.3595	20.3595	20.3302	20.058	20.4603	20.16	20.16	20.16
A_{10}	0.1010	0.1000	0.1001	0.1001	0.1001	0.1	0.1000	0.10	0.1	0.1
Weight (lb)	4677.29	4678.31	4677.31	4677.31	4677.16	4677.267	4,677.17	4715.88	4804.49	4678.63
Mean (lb)	N/A	4680.12	4679.06	4679.06	4678.62	4677.909	4,677.88	5418.8	4929.1	434
Stdev (lb)	N/A	1.016	2.07	2.07	0.95	0.455	0.72	447	61.4	434
NSA	125000	14,857	19,890	19,890	23,640	12,000	17,580	40000	42000	45000

مطابق شکل ۲ و ۴ نمودار همگرایی الگوریتم ترکیب شده نسبت به الگوریتم شاهین هریس و سینوس کسینوس نمایش داده شده است. با مقایسه مقادیر انحراف از معیار مشخص می‌گردد که الگوریتم ترکیب شده از پایداری پاسخ‌های بهتری نسبت به الگوریتم شاهین هریس برخوردار است.



شکل ۴: قیدهای جابجایی (وسط)، تنش (چپ)، همگرایی الگوریتمها (راست) برای خرپای ۱۰ عضوی در حالت بارگذاری دوم

۶-۲ خرپای ۱۸ عضوی

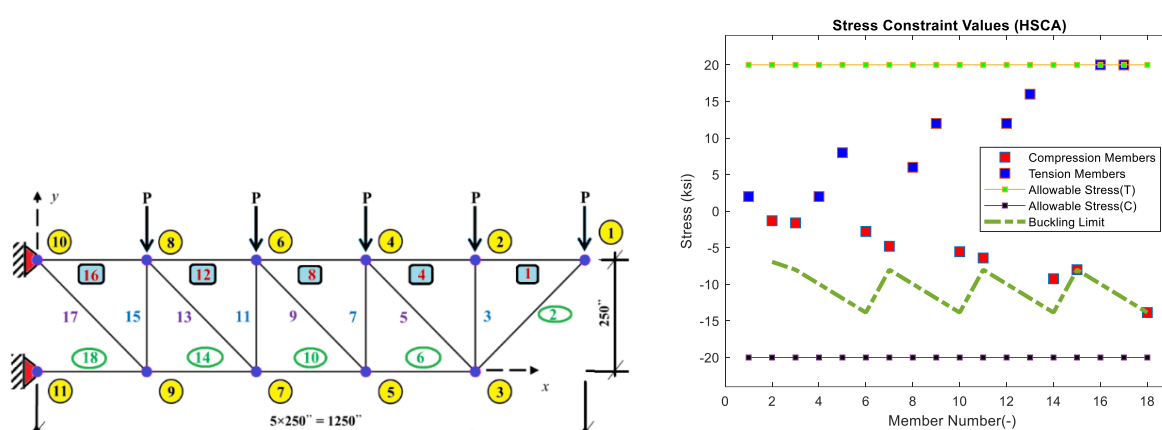
از مثال‌های دیگر در بهینه‌سازی سازه، خرپای طره‌ای با ۱۸ عضو و ۱۱ گره تحت بارهای ثقلی 20 kips بر گره‌های آزاد در بخش بال فوقانی مطابق شکل ۵ می‌باشد. اعضای سازه از جنس یکسان و مدول الاستیسیته و چگالی برابر $E = 10000 \text{ ksi}$ و $\rho = 0.1 \text{ lb/in}^3$ می‌باشند. ۱۸ عضو خرپای فوق در ۴ گروه دسته‌بندی و با ۴ متغیر طراحی تعریف می‌شوند. حدود بالای متغیرها برابر $A_{max} = 50 \text{ in}^2$ و حد پایین آن $A_{min} = 0.1 \text{ in}^2$ لحاظ شده است. قیدهای طراحی خرپای فوق شامل کنترل تنش‌های مجاز کششی و فشاری در مقادیر $\pm 20 \text{ ksi}$ و کنترلی نسبت به قید مرتبط با جابجایی گره‌های آزاد خرپا صورت نمی‌گیرد. اعضای فشاری خرپای فوق، با قید محدوده کمانشی اوپلر مطابق با رابطه (۲۸) کنترل می‌شوند.

$$\sigma_i^b = -\frac{KEA_i}{L_i^2} \quad (28)$$

متغیرهای A_i و L_i به ترتیب سطح مقطع و طول عضو تحت بار فشاری و E مدول الاستیسیته اعضای خرپا می‌باشند. ضریب K به مشخصات و ویژگی هندسی مقاطع مرتبط بوده و در این تحقیق $K = 4$ لحاظ شده است. متغیرهای اندازه سازه‌ای در ۴ گروه شامل گروه A_1 برای عضوهای شماره ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ و گروه A_2 عضوهای شماره ۲، ۴، ۱۰، ۱۴ و ۱۸، گروه A_3 مرتبط با عضوهای شماره ۳، ۷، ۱۱ و ۱۵ و گروه A_4 عضوهای شماره ۵، ۹، ۱۳ و ۱۷ را شامل می‌شوند. هیچ قیدی در ارتباط با جابجایی گره‌های خرپا تعریف نمی‌شود.

جدول ۳: نتایج مربوط به خرپای ۱۸ عضوی

Design variable ()	Imani & Schmit [38]	Lee & Geem [39] (HS)	Sonmez [40] (ABC-AP)	Khatibinia & Yazdani [41]		This study		
				(MGSA)	(AMGSA)	HHO	SCA	HSCA
A_1	9.998	9.980	10.000	10.000	10.000	10.0	10.2	10.00
A_2	21.65	21.63	21.651	21.651	21.651	21.7	22.55	21.64
A_3	12.50	12.49	12.500	12.500	12.500	12.50	12.6	12.50
A_4	7.072	7.057	7.071	7.071	7.071	7.07	7.09	7.07
Weight (lb)	6430.0	6421.88	6430.529	6430.529	6430.529	6437.7	6586.1	6431.3
Mean (lb)	N/A	N/A	N/A	6431.0	6430.529	7288.5	6805.1	6433.1
Stdev (lb)	N/A	N/A	N/A	0.0	0.0	747	113	1.15
NSA	N/A	2,000	200,000	15,000	10,500	43000	45000	61000
CV(-)	0.258 $\times 10^{-3}$	7.58×10^{-3}	None	None	None	None	None	None



شکل ۵: مقادیر قیدهای تنش محوری خرپای ۱۸ عضو (شکل سمت راست)، شکل هندس خرپای ۱۸ عضو (شکل سمت چپ)

روند بهینه‌سازی سیستم خرپایی فوق با ۳۶ قید غیرخطی شامل ۱۸ قید کنترل تنش‌های کششی و ۱۸ قید کنترل تنش‌های فشاری می‌باشد. در جدول ۳ نتایج آماری برای ۳۰ بار اجرای برنامه ارائه شده است. در پیشینه طرح‌های بهینه، الگوریتم جستجوی هارمونی، کمترین وزن سازه را با مقادیر ۶۴۲۱/۸۸ پوند با عدم رعایت مقادیر قیدها ارائه می‌دهد. مطابق جدول ۳ میزان تخطی قیدها برابر $CV(-) = 7.58 \times 10^{-3}$ بوده و در شرایط عدم تخطی از قیدهای طراحی، وزن بهینه با الگوریتم شاهین هریس برابر ۶۴۳۷/۷ پوند، با الگوریتم سینوس کسینوس برابر ۶۵۸۶/۱ پوند و الگوریتم ترکیبی شاهین سینوس کسینوس برابر ۶۴۳۱/۳ پوند می‌باشند. نتایج فوق نشان داد که وزن بهینه با الگوریتم ترکیبی نسبت به الگوریتم شاهین هریس، کاهش وزنی معادل ۶/۵ پوند را محاسبه می‌نماید. مطابق شکل ۵ مقادیر تنش‌های اعضای خرپا در حدود مقادیر مجاز قیدها و هیچ‌گونه تخطی صورت نگرفته است. همچنین مدت زمان محاسبات با الگوریتم ترکیبی جهت رسیدن به پاسخ بهینه ۳۵ ثانیه می‌باشد. در شکل ۵ نمودار مقادیر تنش‌های کمانشی اعضا ترسیم شده و نشان می‌دهد که تنش عناصر از حدود کمانش اولیه تخطی نکرده است. با مقایسه سرعت همگرایی الگوریتم‌ها، الگوریتم ترکیب شده در ۵۱۰۰۰ محاسبات سازه‌ای به پاسخ بهینه همگرا شده که نسبت به الگوریتم ترکیبی ABC-AP کاهش قابل توجه را در تکرار محاسبات نشان می‌دهد. مقادیر انحراف از معیار الگوریتم ترکیبی برابر ۱/۱۵ پوند بوده که نسبت به الگوریتم شاهین هریس با مقادیر ۷۴۷ پوند از پایداری پاسخ‌های بهتری برخوردار است.

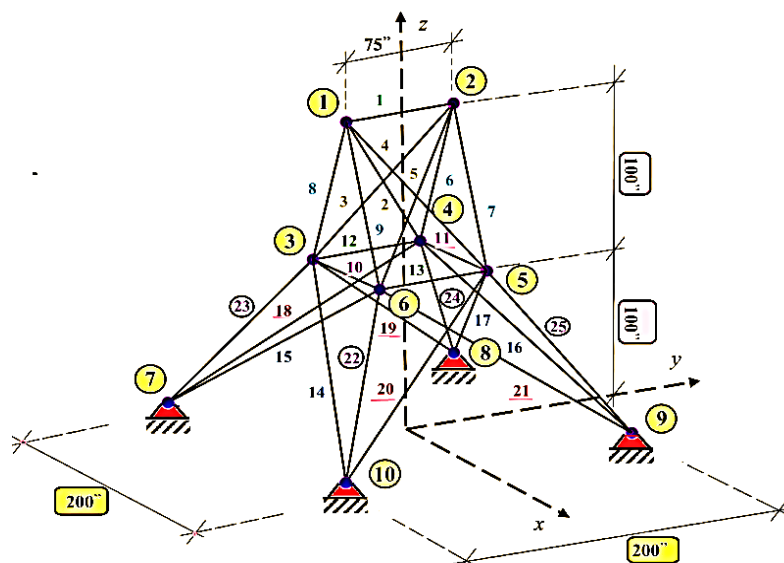
۳-۶ خرپای ۲۵ عضو

هندسه کلی خرپای ۲۵ عضو مطابق شکل ۶ و تمامی اعضای سازه خرپا از مصالح یکسان همچنین مدول الاستیسیته و چگالی به ترتیب برابر $E = 10000 \text{ ksi}$ و $\rho = 0.1 \text{ lb/in}^3$ می‌باشند. با توجه به تقارن اعضای خرپا، تعداد متغیرهای مستقل سازه‌ای در ۸ گروه دسته‌بندی شده‌اند. در جدول ۶ نحوه گروه‌بندی اعضا و مقادیر تنش‌های مجاز کششی و فشاری اعضا مشخص شده است. حداکثر و حداقل سطح مقاطع اعضا به ترتیب برابر $A_{max} = 3.4 \text{ in}^2$ و $A_{min} = 0.01 \text{ in}^2$ می‌باشند. مقادیر مجاز جابجایی گره‌های خرپا در هر جهت به $\pm 0.35 \text{ in}$ محدود می‌شود. مطابق با جدول ۴ دو حالت بارگذاری مستقل جهت بهینه نمودن وزن خرپای فوق لحاظ می‌گردد. در مجموع، خرپای فوق برای ۱۲۴ قیدهای طراحی غیرخطی کنترل و هر حالت بارگذاری شامل ۵۰ قید تنش‌های کششی و فشاری اعضا، خرپا و ۱۲ قید جابجایی می‌باشد. در جدول ۵ مقایسه نتایج بهینه حاصل از الگوریتم شاهین هریس و الگوریتم سینوس کسینوس و الگوریتم ترکیبی شاهین-سینوس کسینوس ارائه شده است. الگوریتم ترکیبی با وزن بهینه ۵۴۵/۳ پوند نسبت به الگوریتم شاهین هریس با وزن ۵۵۷/۸ پوند کاهش ۲ درصدی در وزن را محاسبه می‌نماید. همچنین مطابق شکل ۷ مقادیر قیدهای تنش‌های محوری کششی یا فشاری اعضا و جابجایی گره‌ها از حدود مرزی خود تخطی نکرده و مقادیر تنش‌های حالت بهینه اعضا و جابجایی گره‌ها در حدفاصل بین

حدود حداقل و حداکثر مجاز خود قرار دارند. مدت زمان محاسبات با الگوریتم ترکیبی برای سازه ۲۵ عضوی جهت حصول پاسخ بهینه، برابر ۵۲ ثانیه شده است.

جدول ۴: مقادیر و جهت بارگذاری خرابی ۲۵ عضوی

Node	Case 1 (kips)			Case 2 (kips)		
	x	y	z	x	y	z
1	0.0	20.0	-5.0	1.0	10.0	-5.0
2	0.0	-20.0	-5.0	0.0	10.0	-5.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



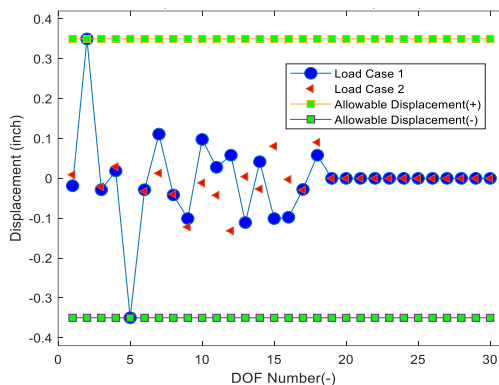
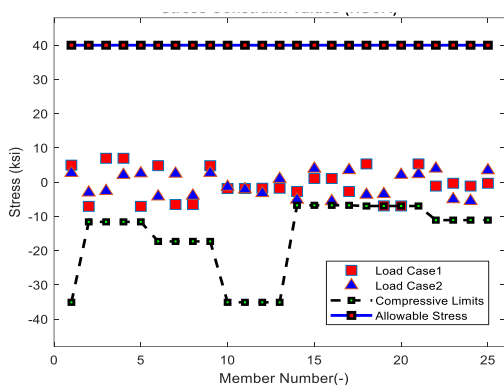
شکل ۶: خرابی فضایی ۲۵ عضوی

جدول ۵: نتایج مربوط به خرابی ۲۵ عضوی

Design variable ()	Camp & Bichon [42] (ACO)	Li et al [36] (HPSO)	Sonmez [40] (ABC-AP)	Camp et al [43] (mTLBO)	KBesth & Bakhshpori [32] (WEO)	KBesth et al [33] (CPA)	KBesth et al [37] (PGO)	This study		
								HHO	SCA	HSCA
A_1	0.0100	9.863	0.0110	0.0100	0.01	0.0100	0.0100	0.018	0.013	0.012
A_2	2.00	1.798	1.9790	1.9878	1.9814	1.9890	1.9908	1.68	2.09	1.96
A_3	2.9660	3.654	3.0030	2.9914	3.0023	2.9880	2.9872	2.83	2.68	3.01
A_4	0.0100	0.100	0.0100	0.0102	0.0100	0.0100	0.0100	0.016	0.01	0.010
A_5	0.0120	0.100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.018	0.021	0.013
A_6	0.6890	0.596	0.6900	0.6828	0.6827	0.6980	0.6824	0.851	0.705	0.66
A_7	1.6790	1.659	1.6790	1.6775	1.6778	1.6780	1.6769	2.15	1.77	1.68
A_8	2.6680	2.612	2.6520	2.6640	2.6612	2.6580	2.6658	2.44	2.68	2.64
Weight (lb)	545.530	627.08	545.19	545.175	545.166	545.18	545.172	557.8	549.89	545.30
Mean (lb)	546.340	N/A	N/A	545.483	1024.50	545.49	545.392	6161.8	557.45	546.4
Stdev (lb)	0.94	N/A	N/A	0.306	0.73	0.24	0.391	26.5	5.23	1.02
NSA	16,500	150,000	50000	12,199	19,510	22,800	17,880	40000	45000	50000

جدول ۶: حدود تنش‌های مجاز و گروه‌بندی عضوهای خرپای ۲۵ عضوی

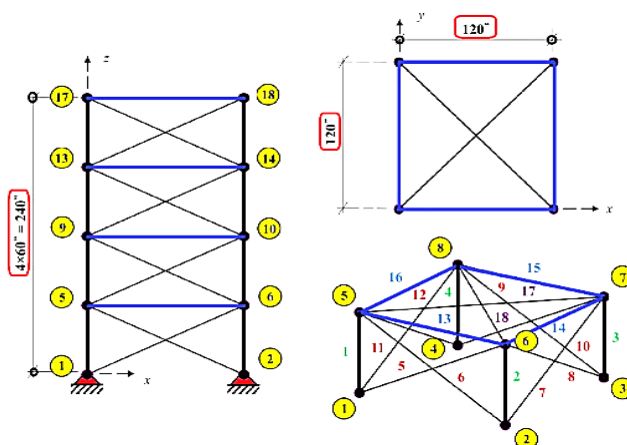
Design Variable	Member Grouping	Tensile Limit (ksi)	Compressive Limit (ksi)
A_1	1	40.0	35.092
A_2	2, 3, 4, 5	40.0	11.59
A_3	6, 7, 8, 9	40.0	17.305
A_4	10, 11	40.0	35.092
A_5	12, 13	40.0	35.092
A_6	14, 15, 16, 17	40.0	6.759
A_7	18, 19, 20, 21	40.0	6.759
A_8	22, 23, 24, 25	40.0	11.082



شکل ۷: مقادیر قیدهای جابجایی (شکل راست) و قیدهای تنش (شکل سمت چپ) خرپای ۲۵ عضوی

۴-۶ خرپای فضایی ۷۲ عضوی

سازه خرپای فضایی ۷۲ عضوی در ۱۶ گروه سطح مقطع به عنوان متغیرهای طراحی مسئله، بهینه‌سازی می‌شود. جزییات هندسی خرپای فوق و نحوه اتصال آنها مطابق شکل ۸ می‌باشد. عضوهای سازه‌ای تشکیل دهنده خرپای فضایی فوق از مصالح یکسان با مدول الاستیسیته و چگالی به ترتیب برابر $E = 10000 \text{ ksi}$ و $\rho = 0.1 \text{ lb/in}^3$ می‌باشند.



شکل ۸: خرپای فضایی ۷۲ عضوی

تنش‌های مجاز کششی و فشاری ایجاد شده در عضوهای خرپا در هر حالت بارگذاری به حداکثر میزان $\pm 20 \text{ ksi}$ محدود می‌شوند. قیدهای جابجایی در جهات x و y برای گره‌های شماره ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ اعمال و به حداکثر مقادیر $\pm 0.25 \text{ in}$ محدود می‌شوند. دو حالت بارگذاری مستقل مطابق جدول ۷ جهت بهینه‌سازی خرپای ۷۲ عضوی تعریف می‌گردد. برای هر حالت بارگذاری خرپای فوق می‌بایست به تعداد ۳۲۰ قید غیرخطی طراحی شامل ۱۴۴ قید کنترل تنش‌های فشاری و کششی اعضا و ۱۶ قید جابجایی گره‌ها کنترل گردد. مطابق تاریخچه پژوهش‌های صورت گرفته برای سازه خرپایی ۷۲ عضوی، دو حالت بهینه‌سازی با حداقل مقادیر سطح مقطع اعضای خرپا برابر $A_{min} = 0.01 \text{ in}^2$ و در حالت دوم با حداقل سطح مقطع $A_{min} = 0.1 \text{ in}^2$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای دو حالت فوق، حداکثر سطح مقطع اعضای خرپا $A_{max} = 4.0 \text{ in}^2$ می‌باشند.

جدول ۷: شرایط بارگذاری خرپای ۷۲ عضوی

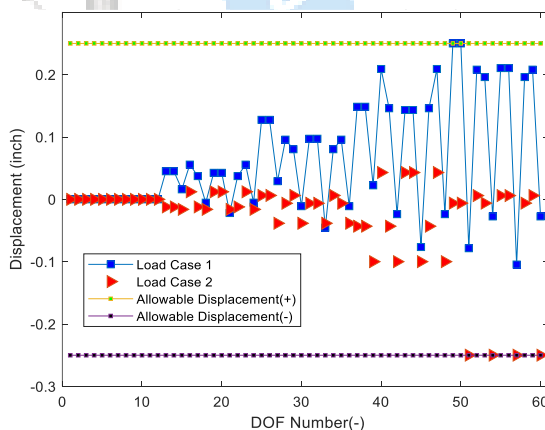
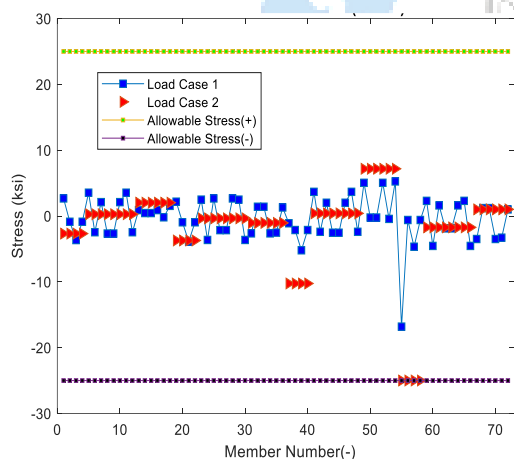
Node	Condition 1 (kips)			Condition 2 (kips)		
	x	y	z	x	y	z
17	5.0	5.0	-5.0	0.0	0.0	-5.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.0

جدول ۸: گروه‌بندی مقاطع خرپای فضایی ۷۲ عضوی

Member Group	Member
A_1	1, 2, 3, 4
A_2	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
A_3	13, 14, 15, 16
A_4	17, 18
A_5	19, 20, 21, 22
A_6	23, 24, 25, 26, 27
A_7	31, 32, 33, 34
A_8	35, 36
A_9	37, 38, 39, 40
A_{10}	41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
A_{11}	49, 50, 51, 52
A_{12}	53, 54
A_{13}	55, 56, 57, 58
A_{14}	59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66
A_{15}	67, 68, 69, 70
A_{16}	71, 72

جدول ۹: نتایج مربوط به خرپای ۷۲ عضوی (حالت اول)

Design variable ()	Lee [39] (HS)	Li et al [36]			Sonmez [40] (ABC)	Degertekin [44] (TLBO)	KBesth et al. (WEO) [36]	Kooshkba ghi [35] (ACCS)	This study		
		(PSO)	(PSOPC)	(HPSO)					HHO	SCA	HSCA
A ₁	1.963	40.053	1.652	1.907	1.8907	1.8929	1.8616	1.836	2.03	2.5	1.91
A ₂	0.481	0.237	0.547	0.524	0.5166	0.5160	0.5206	0.5059	0.516	0.4525	0.518
A ₃	0.010	21.692	0.100	0.010	0.0100	0.0100	0.0105	0.0108	0.019	0.01	0.01
A ₄	0.011	0.657	0.101	0.010	0.0100	0.0100	0.0100	0.0103	0.01	0.01	0.01
A ₅	1.233	22.144	1.102	1.288	1.2968	1.2917	1.2455	1.2836	1.21	1.07	1.3
A ₆	0.506	0.266	0.589	0.523	0.5191	0.5176	0.5177	0.5388	0.523	0.56	0.51
A ₇	0.011	1.654	0.011	0.010	0.0100	0.0100	0.0101	0.0106	0.01	0.0346	0.01
A ₈	0.012	10.284	0.010	0.010	0.0101	0.0100	0.0100	0.0108	0.01	0.0149	0.0214
A ₉	0.538	0.559	0.581	0.544	0.5208	0.5229	0.5327	0.5328	0.44	0.301	0.506
A ₁₀	0.533	12.883	0.458	0.528	0.5178	0.5193	0.5109	0.5184	0.534	0.581	0.525
A ₁₁	0.010	0.138	0.010	0.019	0.0100	0.0100	0.0100	0.0113	0.01	0.04	0.01
A ₁₂	0.167	0.188	0.152	0.020	0.1048	0.0997	0.1205	0.124	0.0255	0.082	0.112
A ₁₃	0.161	29.048	0.161	0.176	0.1675	0.1680	0.1655	0.1651	0.1788	0.1738	0.1667
A ₁₄	0.542	0.632	0.555	0.535	0.5346	0.5359	0.5397	0.5402	0.51	0.66	0.54
A ₁₅	0.478	3.045	0.514	0.426	0.4443	0.4457	0.4554	0.433	0.43	0.363	0.43
A ₁₆	0.478	1.711	0.648	0.612	0.5803	0.5818	0.5995	0.5745	0.723	0.4416	0.557
Weight (lb)	364.3	5417.0	368.45	364.86	363.8683	363.841	363.982	364.147	366.2	381.1	364.2
Mean (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	364.42	364.353	364.335	390.19	396.9	365.2
Stdev (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.49	0.2188	0.186	20.16	8.8	0.52
NSA	20,000	150,000	125,000	125,000	400,000	17,954	19,860	12,000	30000	40000	52000

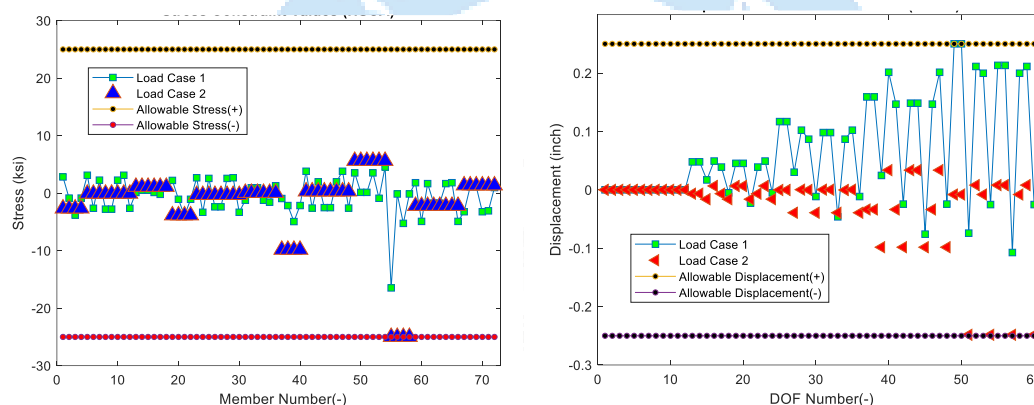


شکل ۹ مقادیر قیدهای جابجایی (شکل سمت راست) و قیدهای تنش (شکل سمت چپ) خرپای ۷۲ عضوی برای حالت اول بارگذاری

مطابق با جدول ۱۰، وزن بهینه حاصل از الگوریتم ترکیبی، اختلاف کمتری با کمترین وزن بهینه در بین سایر الگوریتم‌ها دارد. همچنین الگوریتم ترکیب شده با مقادیر انحراف از معیار ۰/۵۲ از پایداری پاسخ‌های بهتری نسبت به الگوریتم شاهین هریس با انحراف از معیار ۲۰/۱۶ پوند برخوردار می‌باشد. مطابق شکل ۹ و ۱۰ هیچ نوع تخطی از قیدهای تنش‌های محوری کششی یا فشاری و قیدهای جابجایی گره‌های خرپا از مقادیر مجاز مشاهده نمی‌شود و مقادیر تنش‌های اعضا و جابجایی گره‌ها در محدوده‌ی بین مقادیر حداقل و حداکثر مجاز قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج جدول ۱۰ وزن بهینه خرپای ۷۲ عضوی برای حالت بارگذاری اول برابر ۳۶۴/۲ پوند که نسبت به بهترین پاسخ حاصل از الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری، ۳۶۳/۸۴۱ حدود ۰/۱ درصد وزن بیشتری را و نسبت به الگوریتم شاهین هریس وزن کمتری را برآورد نموده است.

جدول ۱۰: نتایج مربوط به خرپای ۷۲ عضوی (حالت دوم)

Design variable ()	Camp ACO [43]	Camp (BB-BC) [45]	KBesth (RO) [46]	KBesth (BA) [47]	KBesth & Ilchi [48]		KBesth [49]	Koshkbaghi & kBesth [35]	This study		
					(CBO)	(ECBO)			HHO	SCA	HSCA
A ₁	1.948	1.8577	1.8365	1.85920	1.9170	1.8382	1.8585	1.8665	1.96	1.42	1.852
A ₂	0.508	0.5059	0.5021	0.49308	0.5031	0.5259	0.5021	0.5062	0.514	0.59	0.518
A ₃	0.101	0.1000	0.1000	0.10025	0.1000	0.1000	0.1002	0.1000	0.108	0.19	0.1
A ₄	0.102	0.1000	0.1004	0.10178	0.1001	14.3	0.1000	0.1002	0.1	0.1	0.1
A ₅	1.303	1.2476	1.2522	1.28534	1.2721	0.1	1.3011	1.2909	1.133	1.287	1.255
A ₆	0.511	0.5269	0.5033	0.51307	0.5050	2.0	0.5151	0.5177	0.549	0.533	0.51
A ₇	0.101	0.1000	0.1002	0.10073	0.1000	12.4	0.1000	0.1001	0.1	0.1	0.1
A ₈	0.100	0.1012	0.1002	0.10248	0.1000	12.8	0.1001	0.1008	0.1	0.1	0.1
A ₉	0.561	0.5209	0.5730	0.51214	0.5184	20.3	0.5311	0.5148	0.481	0.6	0.521
A ₁₀	0.492	0.5172	0.5499	0.52547	0.5362	0.1	0.5122	0.5196	0.459	0.475	0.513
A ₁₁	0.1	0.1004	0.1004	0.10029	0.1000	0.1000	0.1008	0.1001	0.1	0.196	0.1
A ₁₂	0.107	0.1005	0.1001	0.10297	0.1000	0.1004	0.1030	0.1014	0.1	0.192	0.1
A ₁₃	0.156	0.1565	0.1576	0.15597	0.1569	0.1577	0.1560	0.1567	0.156	0.159	0.156
A ₁₄	0.550	0.5507	0.5222	0.55473	0.5374	0.5437	0.5472	0.5447	0.53	0.425	0.552
A ₁₅	0.390	0.3922	0.4356	0.40627	0.4062	0.4038	0.4202	0.4176	0.55	0.29	0.452
A ₁₆	0.592	0.5922	0.5972	0.59617	0.5741	0.5794	0.5793	0.5601	0.66	0.52	0.585
Weight (lb)	380.24	379.85	380.458	380.058	379.75	379.84	379.76	379.7512	383.95	404.29	379.697
Mean (lb)	383.16	382.08	382.553	389.143	380.03	380.18	380.68	379.81	415.03	425.9	379.98
Stdev (lb)	3.66	1.912	N/A	N/A	0.278	0.3544	0.7315	0.148	18.45	9.84	0.25
NSA	18,500	19,621	19,084	20,000	18,000	18,000	11,960	12,000	42000	46000	56000



شکل ۱۰: مقادیر قیدهای جابجایی (شکل سمت راست) و قیدهای تنش (شکل سمت چپ) خرپای ۷۲ عضوی برای حالت دوم بارگذاری

مدت زمان محاسبات الگوریتم ترکیبی برای سازه ۷۲ عضوی در حالت اول بارگذاری برابر ۸۶ ثانیه می‌باشد. مطابق جدول ۱۰ برای حالت بارگذاری دوم وزن بهینه برابر ۳۷۹/۶۹۷ پوند که از حداقل وزن بهینه ۳۷۹/۷۵ پوند در پیشینه تحقیقات، مطابق جدول ۱۰ کمترین مقادیر وزنی می‌باشد. مدت زمان محاسبات سازه ۷۲ عضوی برای حالت دوم بارگذاری، با الگوریتم ترکیبی شاهین-سینوس کسینوس برابر ۹۳ ثانیه شده است. با مقایسه انحراف از معیار الگوریتم ترکیبی نسبت به الگوریتم شاهین هریس مشاهده می‌شود که الگوریتم شاهین-سینوس کسینوس از پایداری پاسخ‌های بهتری برخوردار می‌باشد.

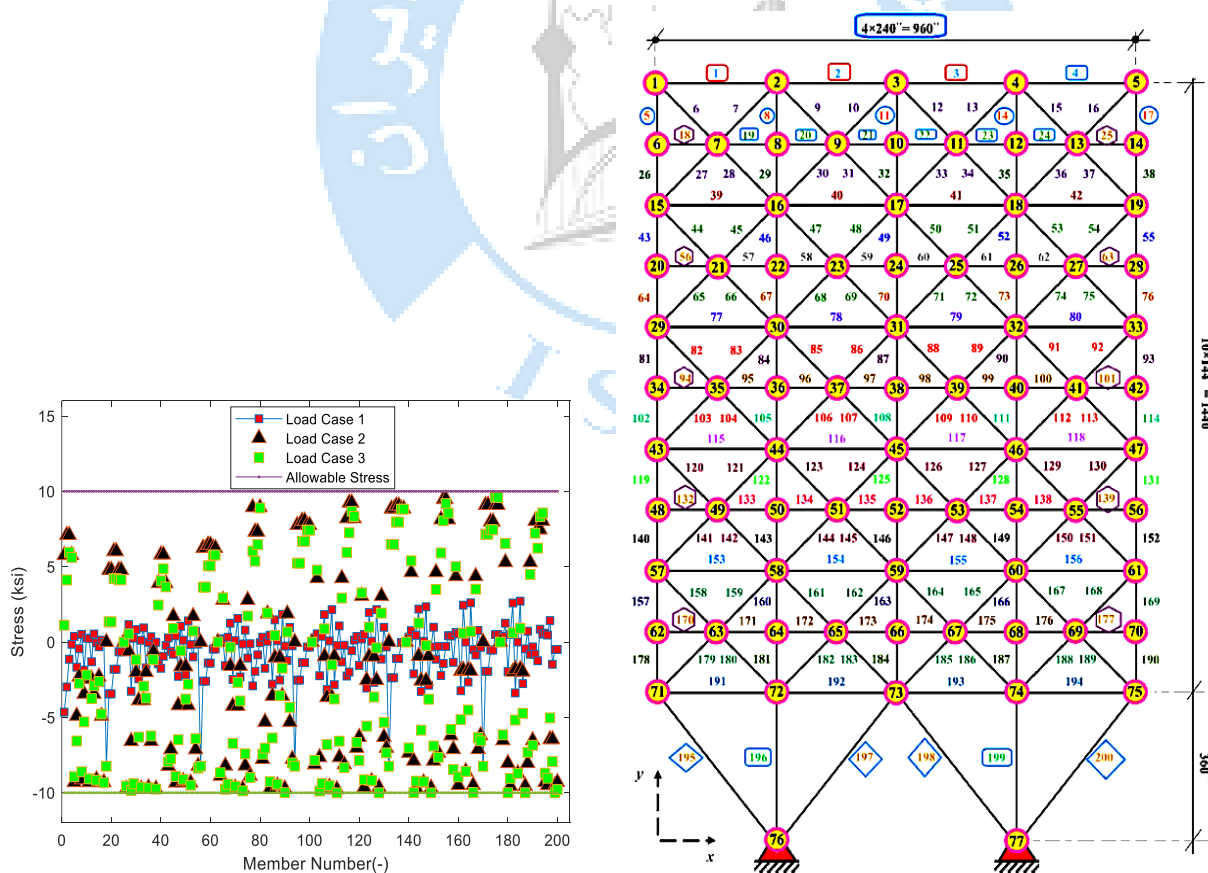
۵-۶ خرپای ۲۰۰ عضوی

جهت بررسی عملکرد الگوریتم ترکیب شده در سازه‌های بزرگ مقیاس با تعداد متغیرهای زیاد، از یک خرپای ۲۰۰ عضوی دو بعدی شناخته شده در حوزه بهینه‌سازی سازه استفاده می‌شود. هندسه سازه دو بعدی مطابق با شکل ۱۱ سمت راست و سازه فوق نیز همانند سایر سازه‌های مبنا توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با جدول ۱۱ حالت‌های بارگذاری و مطابق جدول ۱۳ نحوه گروه بندی عضوهای خرپای ۲۰۰ عضوی در ۲۹ گروه مشخص شده است. عضوهای سازه‌ای تشکیل دهنده خرپای فوق از مصالح یکسان با مدول الاستیسیته و چگالی به ترتیب برابر $E = 30000 \text{ ksi}$ و $\rho = 0.283 \text{ lb/in}^3$ می‌باشند.

جدول ۱۱: حالت‌های بارگذاری مختلف برای خرپای ۲۰۰ عضوی

حالت‌های بارگذاری	جهت بارگذاری	مقادیر نیروی متمرکز	شماره گره‌های تحت بار
حالت اول	جهت مثبت x	$F_x(+) = +1.0 \text{ kip}$	۱،۶،۱۵،۲۰،۲۹،۳۴،۴۳،۴۸،۵۷،۶۲،۷۱
حالت دوم	جهت منفی y	$F_y(-) = -10.0 \text{ kips}$	۱-۶،۸،۱۰،۱۲،۱۴-۲۰،۲۲،۲۴،۲۶،۲۸-۳۴،۳۶،۳۸،۴۰ ۴۲-۴۸،۵۰،۵۲،۵۴،۵۶-۶۲،۶۴،۶۶،۶۸،۷۰-۷۵
حالت سوم	-	-	گره‌های شماره ۱ و ۲ تحت حالت‌های بارگذاری اول و دوم بصورت همزمان

تنش‌های مجاز کششی و فشاری به حداکثر میزان $\pm 10 \text{ ksi}$ محدود می‌شوند. هیچ نوع قید جابجایی در جهات مختلف برای گره‌های خرپا لحاظ نمی‌گردد. برای هر سه حالت بارگذاری، حداقل مقادیر سطح مقطع $A_{min} = 0.1 \text{ in}^2$ و حداکثر سطح مقطع برابر $A_{max} = 20.0 \text{ in}^2$ می‌باشند. برای هر حالت بارگذاری، می‌بایست به تعداد ۴۰۰ قید غیرخطی طراحی شامل ۲۰۰ قید کنترل تنش‌های فشاری و ۲۰۰ قید کنترل تنش‌های کششی تعریف که مجموع کل قیدهای طراحی برای سه حالت بارگذاری ۱۲۰۰ قید خواهد شد. نتایج الگوریتم ترکیب شده برای خرپای ۲۰۰ عضوی مطابق جدول ۱۲ می‌باشد. با مقایسه نتایج الگوریتم فوق با سایر الگوریتم‌های فرا کاوشی مشاهده گردید که وزن بهینه حاصل از الگوریتم ترکیبی برابر ۲۱/۹۲۵ پوند که نسبت به الگوریتم‌های اشاره شده در جدول ۱۲، کمترین وزن را برآورد می‌کند.



شکل ۱۱: خرپای ۲۰۰ عضوی (سمت راست)، مقادیر تنش‌های خرپای ۲۰۰ عضوی در حالت بهینه (سمت چپ)

در یک تکرار ثابت با جمعیت یکسان، الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده نسبت به الگوریتم شاهین هریس حدود ۴۵ درصد، و نسبت به الگوریتم سینوس کسینوس حدود ۳۰ درصد کاهش وزن را برای خرپای ۲۰۰ عضوی محاسبه نموده است. همچنین الگوریتم شاهین-سینوس کسینوس نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری کاهش وزن ۲۵ درصدی و نسبت به الگوریتم ژنتیک، کاهش وزن ۱۲ درصدی را برآورد نموده است. با بررسی پایداری پاسخ‌های الگوریتم ترکیبی که برابر ۳۷۰/۵ پوند و الگوریتم شاهین هریس معادل ۷۳۴۶ پوند مطابق جدول ۱۲، مشخص می‌شود که الگوریتم ترکیب شده از سرعت همگرایی بهتری نسبت به الگوریتم اولیه شاهین هریس برخوردار است. مقایسه سه الگوریتم در ۱۰۰۰ تکرار و با تعداد جمعیت اولیه معادل ۲۰۰ صورت گرفته است. مطابق شکل ۱۱ سمت چپ، قیده‌های طراحی تنش‌های عناصر سازه‌ای که می‌بایست به مقادیر تنش‌های مجاز کششی و فشاری یعنی حداکثر میزان $\pm 10 \text{ ksi}$ محدود شوند برای هر سه حالت بارگذاری جدول ۱۱ با بارگذاری عمودی، جانبی روی گره‌های خاص و بارگذاری همزمان جانبی و عمودی در محدوده مجاز بوده و وزن بهینه حاصل نیز بدون تخطی از مقادیر مجاز می‌باشد. همچنین از روی شکل فوق قابل مشاهده است که شرایط بحرانی قیده‌های تنش سازه ۲۰۰ عضوی، مربوط به حالت بارگذاری همزمان نیروهای افقی و جانبی یعنی حالت سوم جدول ۱۱ می‌باشد. مدت زمان محاسبات سازه خرپایی ۲۰۰ عضوی با الگوریتم ترکیبی شاهین-سینوس کسینوس برابر ۱۱۳۰ ثانیه برای یک مرحله اجرا در ۱۰۰۰ تکرار می‌باشد.

جدول ۱۲: نتایج مربوط به خرپای ۲۰۰ عضوی

Design variable ()	Togan et al [50] (GA)	Sonmez [40] (ABC-AP)	Degertekin et al. [44]	KBesth et al. [32] (WEO)	KBesth et al. [33] (CPA)	KBesth et al. [49]		Koshkbaghi et al [35]	This study		
						(GWO)	(IGWO)		HHO	SCA	HSCA
A ₁	0.346	0.1039	0.146	0.1144	0.1721	1.3363	0.1024	0.127	1.124	0.273	0.151
A ₂	1.081	0.9463	0.941	0.9443	0.9553	2.7525	0.9654	0.954	5.35	2.645	0.962
A ₃	0.100	0.1037	0.100	0.1310	0.1000	0.5923	0.1391	0.122	9.018	0.462	0.125
A ₄	0.100	0.1126	0.101	0.1016	0.1004	0.5258	0.1741	0.1	2.80	0.123	0.121
A ₅	2.142	1.9520	1.941	2.0353	1.9662	5.0281	1.9613	1.968	2.818	3.875	1.945
A ₆	0.347	0.2930	0.296	0.3126	0.3055	0.4945	0.2899	0.293	2.724	0.7	0.278
A ₇	0.100	0.1064	0.100	0.1679	0.1000	1.7505	0.1294	0.115	3.251	0.118	0.682
A ₈	3.565	3.1249	3.121	3.1541	3.1618	3.3725	3.1511	3.095	3.757	8.036	3.165
A ₉	0.347	0.1077	0.100	0.1003	0.115	0.2057	0.1251	0.103	3.143	0.1038	0.1240
A ₁₀	4.805	4.1286	4.173	4.1005	4.2405	4.3035	4.0627	4.094	8.2	10.216	4.056
A ₁₁	0.440	0.4250	0.401	0.4350	0.4046	0.7077	0.4131	0.41	1.846	1.625	0.559
A ₁₂	0.440	0.1046	0.181	0.1148	0.1000	0.1212	0.4043	0.152	4.734	0.159	0.1237
A ₁₃	5.952	5.4803	5.423	5.3823	5.4132	6.6465	5.3357	5.393	4.15	6.933	5.446
A ₁₄	0.347	0.1060	0.100	0.1607	0.1545	0.1000	0.2632	0.198	5.93	0.498	0.2404
A ₁₅	6.572	6.4853	6.422	6.4152	6.3976	6.9236	6.3226	6.395	6.83	9.22	6.446
A ₁₆	0.954	0.5600	0.571	0.5629	0.5555	0.8096	0.7972	0.597	5.58	1.18	0.6201
A ₁₇	0.347	0.1825	0.156	0.4010	0.4425	0.1943	0.1791	0.106	0.226	3.036	0.1877
A ₁₈	8.525	8.0445	7.958	7.9735	8.0928	7.9800	8.1268	7.99	7.135	10.875	8.0285
A ₁₉	0.100	0.1026	0.100	0.1092	0.1004	0.9110	0.1141	0.103	0.508	0.9063	0.1815
A ₂₀	9.300	9.0334	8.958	9.0155	8.9918	10.726	9.1337	8.987	8.038	9.895	9.03
A ₂₁	0.954	0.7844	0.720	0.8628	0.8925	1.0542	0.8000	0.692	3.738	2.515	0.7978
A ₂₂	1.763	0.7506	0.478	0.2220	0.2544	0.2809	0.2487	0.142	3.972	0.411	0.2501
A ₂₃	13.30	11.3057	10.897	11.0254	11.121	15.000	11.200	10.747	12.508	19.75	11.016
A ₂₄	0.347	0.2208	0.100	0.1397	0.1000	0.1310	0.1136	0.101	2.46	0.157	0.126
A ₂₅	13.30	12.2730	11.897	12.0340	12.330	15.000	12.170	11.747	11.88	13.607	11.99

A_{26}	2.142	1.4055	1.080	1.0043	1.0110	0.9469	0.9947	0.834	3.09	1.034	0.966
A_{27}	4.805	5.1600	6.462	6.5762	6.4103	7.8886	6.3377	7.452	3.94	8.809	6.591
A_{28}	9.300	9.9930	10.799	10.7265	10.581	15.000	10.533	11.169	11.73	10.114	10.911
A_{29}	17.17	14.7014	13.922	13.9666	14.128	13.880	14.091	13.482	15.79	15.25	13.891
Weight (lb)	28,544	25,533.7	25,488.1	25,674.8	25,651.58	33,137.14	25771.7	25,481.4	46041.8	36054.1	25021.9
Mean (lb)	N/A	N/A	25,533.14	26613.4	25957.1	34,561.6	26699.19	25,527.66	61255.5	39020.6	25587.4
Stdev (lb)	N/A	N/A	27.44	702.8	254.06	991.922	410	25.49	7346	1828	370.5
NSA	51,360	1,450,000	28,059	19,410	34,560	13,200	23760	45,000	250000	170000	299000



جدول ۱۳: گروه بندی مقاطع خرابی فضایی ۲۰۰ عضوی

A_1	1,2,3,4	A_{16}	82, 83, 85, 86, 88, 89, 91, 92, 103, 104, 106, 107, 109, 110, 112, 113
-------	---------	----------	--

A_2	5,8,11,14,17	A_{17}	115, 116, 117, 118
A_3	19, 20, 21, 22, 23, 24	A_{18}	119, 122, 125, 128, 131
A_4	18, 25, 56, 63, 94, 101, 132, 139, 170, 177	A_{19}	133, 134, 135, 136, 137, 138
A_5	26, 29, 32, 35, 38	A_{20}	140, 143, 146, 149, 152
A_6	6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 36, 37	A_{21}	120, 121, 123, 124, 126, 127, 129, 130, 141, 142, 144, 145, 147, 148, 150, 151
A_7	39, 40, 41, 42	A_{22}	153, 154, 155, 156
A_8	43, 46, 49, 52, 55	A_{23}	157, 160, 163, 166, 169
A_9	57, 58, 59, 60, 61, 62	A_{24}	171, 172, 173, 174, 175, 176
A_{10}	64, 67, 70, 73, 76	A_{25}	178, 181, 184, 187, 190
A_{11}	44, 45, 47, 48, 50, 51, 53, 54, 65, 66, 68, 69, 71, 72, 74, 75	A_{26}	158, 159, 161, 162, 164, 165, 167, 168, 179, 180, 182, 183, 185, 186, 188, 189
A_{12}	77, 78, 79, 80	A_{27}	191, 192, 193, 194
A_{13}	81, 84, 87, 90, 93	A_{28}	195, 197, 198, 200
A_{14}	95, 96, 97, 98, 99, 100	A_{29}	196, 199
A_{15}	102, 105, 108, 111, 114		

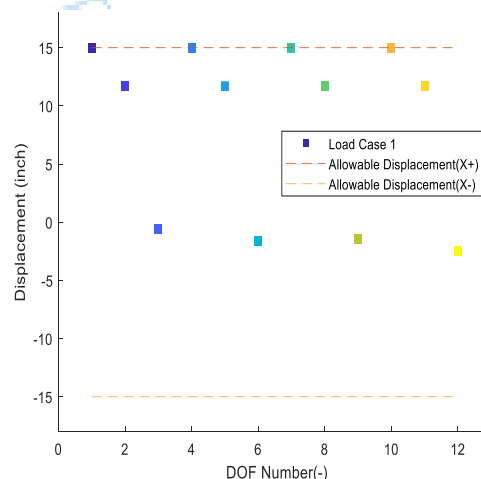
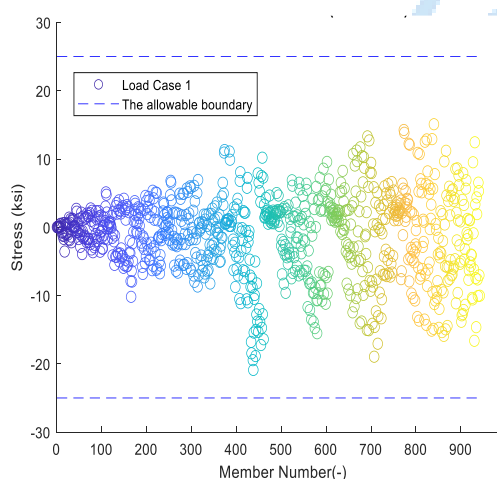
۶-۶ خرپای ۹۴۲ عضوی

آخرین مثال بهینه‌سازی سازه، یک سازه ۲۶ طبقه با ۹۴۲ عضو و ۵۹ متغیر طراحی در حوزه سازه‌های بزرگ مقیاس مطابق شکل ۱۳ می‌باشد. تاریخچه پژوهش‌های صورت گرفته برای سازه فوق در دو زمینه با متغیرهای پیوسته و گسسته بوده و در این تحقیق حالت بهینه‌سازی با متغیرهای پیوسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. حداقل مقادیر سطح مقطع $A_{min} = 0.1 \text{ in}^2$ و حداکثر سطح مقطع برابر $A_{max} = 200.0 \text{ in}^2$ و سایر جزییات گروه‌بندی و بارگذاری مطابق پیشینه تحقیقات صورت گرفته در حوزه بهینه‌سازی سازه فوق می‌باشد [۲۰]. نتایج حاصل از الگوریتم ترکیبی با سایر الگوریتم‌ها در جدول ۱۴ و نتایج مقادیر قیدهای تنش عضوها و جابجایی در شکل ۱۲ به وضوح نشان می‌دهد که هیچ کدام از قیدهای تنش و جابجایی از مقادیر مجاز خود تخطی ننموده‌اند. وزن بهینه حاصل از الگوریتم شاهین-سینوس کسینوس برابر $131503/48$ پوند که نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی سیاست با وزن بهینه $133831/96$ پوند حدود ۲ درصد و نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری ۱۱ درصد کاهش وزن را محاسبه نموده است. همچنین الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های جدول ۱۴ کمترین وزن بهینه را برآورد نموده است. در روند بهینه‌سازی، سازه خرپای ۹۴۲ عضوی می‌بایست ۱۸۹۶ قید غیرخطی طراحی شامل ۹۴۲ قید تنش‌های فشاری و ۹۴۲ قید تنش‌های کششی و ۱۲ قید جابجایی از گره‌های موجود در آخرین تراز ارتفاعی خرپا کنترل گردد. با بررسی مقادیر انحراف از معیار مطابق جدول ۱۴ مشاهده می‌شود که الگوریتم ترکیب شده نسبت به الگوریتم‌های شاهین هریس، سینوس کسینوس، بهینه‌ساز سیاست، گرگ خاکستری، جستجوی فاخته از پایداری پاسخ‌های بهتری برخوردار می‌باشد. مدت زمان محاسبات با الگوریتم شاهین-سینوس کسینوس برابر 5610 ثانیه برای یک مرحله اجرا می‌باشد.

جدول ۱۴: نتایج مربوط به خرپای ۹۴۲ عضوی

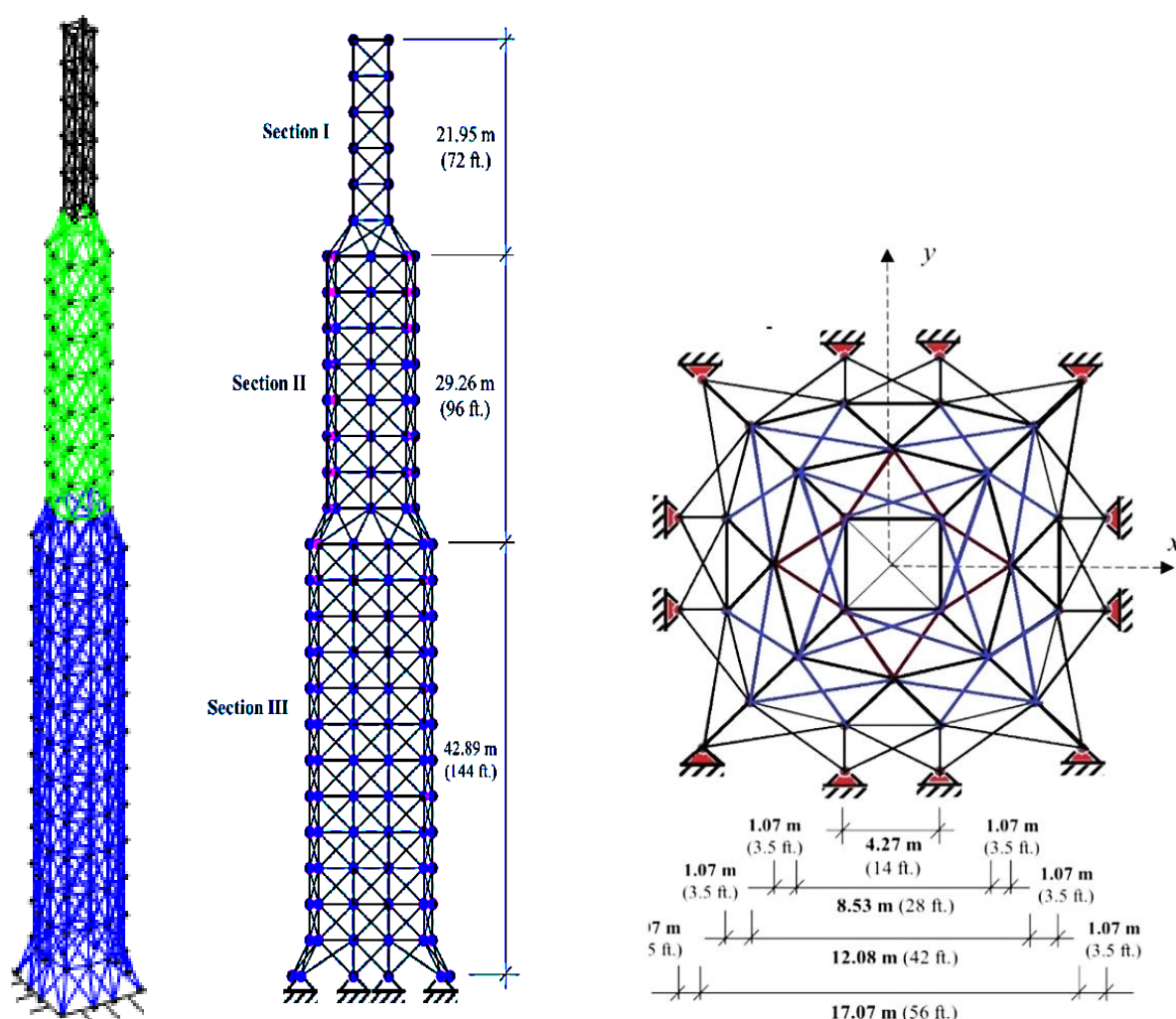
Hasançebi [51] (ES)	KBESTH [52] (GWO)	KBESTH [52] (IGWO)	Gandomi [53] (CS)	Degertekin [54] (JA)	Cao et al. [55] (JA)	Awad [56] (PO)	This study
---------------------	-------------------	--------------------	-------------------	----------------------	----------------------	----------------	------------

						(FPA)	(TLBO)		HHO	SCA	HSCA
Best (lb)	141,24 1	147841. 7	136311. 13	134120	13734 4.35	13958 9.3	781697 .1	133831. 96	316178.8	240828. 5	131503.48
variable ()	Hasançebi [51] (BS)	KBesth [52]	KBesth [52]	Gandomi [53] (CS)	Degertekin [54] (JA)	Cao et al. [55] (JA)		Awad [56] (PO)	This study		
Mean (ib)	N/A	165168. 94	137453. 66	135244. 7	13737 9.616	N/A	N/A	139794. 65	427944.3	271809. 7	132932.68
Stdev	N/A	5392.72	673.85	1497.06	38.34	N/A	N/A	5904.70	52080.7	23270.4	925.9
NSA	150,00 0	28,000	28000	75000	58274	30263	61566	24420	200000	200000	220000



شکل ۱۲: مقادیر قیدهای جابجایی (شکل سمت راست) و قیدهای تنش (شکل سمت چپ) خرابی ۹۴۲ عضوی

	(FPA) (TLBO)							HHO	SCA	HSCA	ادامه	
A ₁	1.020	1.4245	4.2489	1.00	1.0452	8	22	1	63.62	1.92	4.99	جدول ۱۴:
A ₂	1.037	2.1232	1.7702	1.00	1.001630	5	46	1.0180	12.49	8.37	2.64	نتایج
A ₃	2.943	2.1749	1.5892	3.01	3.5499	9	141	3.6539	11.73	1.22	3.40	مربوط به
A ₄	1.920	2.3746	1.5235	1.75	1.9245	3	42	1.9956	15.09	1.0	2.06	خرپای
A ₅	1.025	1.0000	1.0265	1.00	1.0000	3	31	1.1953	10.6	1.36	1.00	۹۴۲
A ₆	14.961	17.5705	15.3979	14.27	15.337079	16	32	14.3010	11.22	66.5	14.98	عضوی
A ₇	3.074	3.3655	2.8825	2.93	3.108905	4	1	2.6488	13.09	4.41	3.14	
A ₈	6.780	19.1722	6.9912	1.00	6.589077	15	40	3.2394	8.56	1.28	7.15	
A ₉	18.580	12.8837	11.2039	1.00	16.569661	20	119	5.2759	11.63	8.76	3.04	
A ₁₀	2.415	2.6161	2.7262	9.38	2.553777	4	59	7.9579	13.94	5.84	17.94	
A ₁₁	6.584	3.9268	8.1921	4.43	6.433946	5	1	7.1826	14.67	2.17	4.92	
A ₁₂	6.291	4.7984	6.2178	4.54	5.812166	6	1	7.1283	12.18	8.70	6.27	
A ₁₃	15.383	12.4939	16.5585	16.41	15.836882	19	7	16.5762	12.75	200.0	14.26	
A ₁₄	2.100	1.0000	2.3668	2.33	2.196943	2	73	2.2929	13.7	14.28	1.68	
A ₁₅	6.021	1.6022	4.1519	7.51	4.324553	9	42	4.3833	9.3	2.08	2.05	
A ₁₆	1.022	1.0000	1.2370	1.00	1.000047	2	39	1.0109	9.85	1.38	1.16	
A ₁₇	23.099	16.8974	22.3006	22.47	21.973772	13	145	20.2929	9.89	35.76	17.64	
A ₁₈	2.889	2.5670	2.9996	2.70	2.674909	2	1	2.9265	11.11	3.7	2.11	
A ₁₉	7.960	6.3981	7.7559	13.58	8.722646	14	47	8.7818	11.66	11.4	6.65	
A ₂₀	1.008	1.1522	1.1283	1.00	1.000032	1	7	1.0511	13.45	6.56	1.07	
A ₂₁	28.548	29.0131	28.2646	28.93	29.898613	18	8	28.2137	16.21	34.8	24.94	
A ₂₂	3.349	3.5656	3.1924	3.23	3.249223	3	96	3.2527	16.85	2.52	2.72	
A ₂₃	16.144	17.4563	16.3965	23.87	16.995624	19	40	14.7304	13.48	8.29	12.84	
A ₂₄	24.822	21.3364	22.6095	41.67	25.510407	23	28	27.9577	15.86	14.75	20.99	
A ₂₅	38.401	19.0983	40.0759	36.02	37.634066	55	1	38.9819	9.99	29.83	27.74	
A ₂₆	3.787	11.6687	5.3549	6.41	1.220731	1	89	1.9847	9.19	3.78	4.88	
A ₂₇	12.320	7.2854	9.2695	23.79	11.944077	14	28	12.1569	41.42	1.45	10.84	
A ₂₈	17.036	13.2728	15.0911	28.39	16.515003	16	83	16.6744	16.8	42.07	15.67	
A ₂₉	14.733	10.9616	14.0704	19.38	14.822892	17	11	14.5231	8.83	11.08	12.44	
A ₃₀	15.031	16.9994	15.1962	20.31	15.983565	14	120	14.1466	7.85	51.23	11.32	
A ₃₁	38.597	51.2551	37.1490	31.41	38.514252	29	27	33.4677	63.19	16.87	37.09	
A ₃₂	3.511	3.5553	3.1643	2.57	3.323571	4	37	3.1529	10.59	4.94	3.73	
A ₃₃	2.997	10.7749	3.4414	4.18	3.189674	5	1	2.7595	11.42	1.25	1.38	
A ₃₄	3.060	2.2552	2.2813	3.33	2.822370	5	46	2.7334	47.17	6.07	1.07	
A ₃₅	1.086	2.8847	1.0166	1.00	1.001323	1	20	1.0041	9.7	25.57	4.3	
A ₃₆	1.462	1.4999	1.4089	1.00	1.002606	3	144	1.0375	18.03	20.69	2.21	
A ₃₇	59.433	74.8387	59.6649	47.11	59.530117	44	41	57.0798	40.13	81.38	61.29	
A ₃₈	3.632	4.4502	3.3173	2.35	3.250054	3	2	2.9917	16.76	5.24	4.49	
A ₃₉	1.887	4.5565	2.0249	3.79	2.068093	5	21	2.0256	21.94	12.93	2.79	
A ₄₀	4.072	1.6472	2.3953	3.30	3.084539	3	80	2.8508	9.46	11.54	2.17	
A ₄₁	1.595	1.6962	1.0554	1.00	1.000717	8	1	1.1657	52.34	1.34	1.1	
A ₄₂	3.671	1.0000	1.2294	1.00	1.239938	5	107	1.3137	48.33	4.33	1.12	
A ₄₃	79.511	72.9916	79.5798	63.33	79.891179	9	138	72.1009	30.43	62.11	80.64	
A ₄₄	3.394	3.3433	3.2875	3.21	3.299488	3	38	3.1772	10.72	3.36	2.48	
A ₄₅	1.581	1.9913	1.9028	4.86	1.964128	3	74	1.8702	13.74	11.14	2.87	
A ₄₆	4.204	2.3226	3.2460	2.22	3.489718	16	12	3.3290	10.15	8.0	3.89	
A ₄₇	1.329	1.1452	1.0277	1.00	1.000032	4	84	1.0984	11.23	11.70	1.08	
A ₄₈	2.242	1.0000	1.0898	1.00	1.000032	15	99	1.0462	10.58	2.52	1.67	
A ₄₉	96.886	96.6037	93.8836	76.93	97.181471	20	40	92.7197	82.3	58.87	88.86	
A ₅₀	3.710	4.0309	3.0634	3.54	3.322281	4	16	3.3618	8.0	5.1	3.2	
A ₅₁	1.055	1.8735	1.7246	3.91	1.002997	6	154	1.2291	11.60	1.18	1.06	
A ₅₂	4.566	4.7339	3.9313	1.00	3.651629	5	4	3.1938	17.93	6.39	4.25	
A ₅₃	9.606	10.6370	8.1063	1.00	7.226228	26	16	11.0260	75.44	2.75	8.95	
A ₅₄	2.984	3.4612	9.8391	3.01	4.544599	38	106	8.8411	9.89	7.59	3.98	
A ₅₅	45.917	44.5447	42.7529	1.75	41.411074	53	80	40.1639	56.5	76.44	39.54	
A ₅₆	1.000	1.2428	1.1219	1.00	1.002207	1	1	1.0071	9.07	3.39	1.06	
A ₅₇	62.426	76.1124	63.0179	14.27	64.803517	35	47	61.5728	14.26	158.8	55.54	
A ₅₈	2.977	11.4119	2.6542	2.93	2.525618	13	44	3.4131	48.03	1.83	1.24	
A ₅₉	1.00	4.7082	1.6685	1.00	1.000054	4	52	1.3026	14.72	1.22	5.36	



شکل ۱۳: ساختار سازه خرپای ۹۴۲ عضوی از زوایای مختلف

۷- بررسی توابع ریاضی

جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم ترکیب شده شاهین سینوس کسینوس در توابع مینای ریاضی با استفاده از ۲۹ توابع CEC2017 و ۱۰ نوع تابع مربوط به CEC2019 روند مقایسه عملکرد الگوریتم ترکیب شده صورت می‌گیرد. در بخش ۶ از این پژوهش، کارایی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی، در سازه خرپایی کوچک و متوسط مقیاس (۲۵،۱۸،۱۰ و ۷۲ عضوی) و دو خرپای بزرگ مقیاس (۲۰۰، ۹۴۲ عضوی) با بارگذاری و قیدهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، تابع CEC2017 برای دو حالت از ابعاد ۱۰ و ۵۰ مطابق جدول‌های ۱۵ و ۱۷ مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین نتایج بررسی تابع CEC2019 نیز مطابق با جدول شماره ۱۶ می‌باشد. در هر سه الگوریتم، تعداد تکرار برابر ۱۰۰۰ و تعداد جمعیت اولیه ۳۰ و تعداد اجرای مستقل نیز ۳۰ لحاظ شده است [۵۷]. مطابق با جدول ۱۵ نتایج ارزیابی در ۲۹ تابع نشان می‌دهد که پاسخ‌های الگوریتم ترکیب شده نسبت به الگوریتم اولیه شاهین هریس بهتر و از مقادیر انحراف از معیار کمتری برخوردار می‌باشند. همچنین مطابق با جدول ۱۷ با افزایش ابعاد مسئله از ۱۰ به ۵۰، پاسخ‌های بهینه الگوریتم ترکیب شده نسبت به الگوریتم اولیه، بهبود پیدا کرده‌اند. مطابق با جدول ۱۷ نتایج الگوریتم ترکیب شده برای حالت بعد ۵۰ از توابع CEC2017 نسبت به الگوریتم شاهین هریس، بجز در توابع به شماره‌های C09 و C29، پاسخ‌های بهتری را کشف نموده است. همچنین در حالت بررسی تابع با

بعد ۱۰، مطابق با جدول ۱۵ مشاهده گردید که الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم اولیه شاهین هریس در توابع C11، C04 و C22 عملکرد بهتری نداشته است.

جدول ۱۵: نتایج مربوط به ارزیابی تابع CEC2017 برای بعد ۱۰

		HHO	SCA	HSCA			HHO	SCA	HSCA
C1	BEST	3.45E+05	2.48E+08	6.7E+04	C17	BEST	1.73E+03	1.75E+03	1.72E+03
	STD	6.7E+05	2.78E+08	7.9E+05		STD	76.16	14.29	28.05
C3	BEST	3.02E+02	8.41E+08	306.65	C18	BEST	2.98E+03	2.25E+04	2.97E+03
	STD	3.76E+02	1.15E+03	418.12		STD	11.4E+03	2.6E+05	13.7E+03
C4	BEST	400	4.22E+02	400.847	C19	BEST	2.08E+03	2052.98	1.94E+03
	STD	44	16.58	36.14		STD	23E+03	4.23E+03	3.2E+04
C5	BEST	522.8	436.4	510.38	C20	BEST	2.02E+03	2047.9	2015.2
	STD	18.86	11.41	12.97		STD	52.55	33.12	55.7
C6	BEST	605.83	612.94	603.32	C21	BEST	2.2E+03	2207.1	2.2E+03
	STD	12.45	3.39	9.43		STD	70.44	63.01	62.6
C7	BEST	734.29	767.9	724.12	C22	BEST	2.25E+03	2.29E+03	2.3E+03
	STD	18.63	9.49	20.33		STD	391.2	34.22	2.57
C8	BEST	820.21	826.67	809.15	C23	BEST	2.62E+03	2.64E+03	2.62E+03
	STD	7.35	8.49	8.15		STD	29.70	8.04	14.95
C9	BEST	1014	926.01	904.39	C24	BEST	2.71E+03	2.77E+03	2.5E+03
	STD	246	42.14	125.3		STD	46.43	8.34	122.03
C10	BEST	1645	1883.11	1156.2	C25	BEST	2.9E+03	2.93E+03	2.9E+03
	STD	262	215.68	312.3		STD	19.5	14.38	19.5
C11	BEST	1107	1162.2	1115	C26	BEST	2.61E+03	3038.4	2.61E+03
	STD	71.97	47.83	50.97		STD	642.02	42.6	197.7
C12	BEST	3.49E+04	1.98E+06	2.6E+04	C27	BEST	3.1E+03	3097.8	3.09E+03
	STD	8.6E+04	1.4E+06	1.4E+05		STD	54.38	2.27	25.72
C13	BEST	2.09E+03	9.41E+03	1967.3	C28	BEST	3.21E+03	3.22E+03	3.17E+03
	STD	1.09E+04	5.28E+04	8681.1		STD	136.42	75.9	124.46
C14	BEST	1.5E+03	1.48E+04	1.4E+03	C29	BEST	3.23E+03	3.18E+03	3.15E+03
	STD	1.09E+03	154.8	1.3E+03		STD	85.7	46.81	62.21
C15	BEST	2.16E+03	1.84E+03	1.6E+03	C30	BEST	7.63E+03	9.9E+03	5.49E+03
	STD	3.87E+03	1.14E+03	1.81E+03		STD	9.2E+06	7.3E+05	2.6E+05
C16	BEST	1.73E+03	1.65E+03	1.6E+03					
	STD	138.09	104.98	112.9					

جدول ۱۶: نتایج مربوط به ارزیابی تابع CEC2019

		HHO	SCA	HSCA			HHO	SCA	HSCA
C1	BEST	42330.5	83054.1	2.5E+07	C6	BEST	6.11	8.99	5.59
	STD	6383.84	1.27E+10	4243.236		STD	1.166	0.544	1.364
C2	BEST	17.34	17.39	17.34	C7	BEST	76.44	346.8	71.02
	STD	0.007	6.6E-05	0.0004		STD	228.7	148.44	243.37
C3	BEST	12.70	12.7	12.70	C8	BEST	4.44	4.57	3.74
	STD	6.5E-06	9.07E-05	1.04E-06		STD	0.518	0.523	0.599
C4	BEST	88.26	717.89	36.48	C9	BEST	2.598	16.73	2.96
	STD	64.73	290.2	36.47		STD	0.3442	75.911	0.675
C5	BEST	1.54	2.0	1.13	C10	BEST	20.05	13.35	4.028
	STD	0.748	0.145	0.130		STD	0.119	1.29	2.958

مطابق با جدول ۱۶، نتایج ارزیابی سه الگوریتم شاهین هریس، سینوس کسینوس و الگوریتم ترکیبی شاهین سینوس کسینوس در ۱۰ نوع توابع CEC2019 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیب شده برای اکثر توابع از جدول ۱۶، از پایداری پاسخ‌های قابل قبولی برخوردار می‌باشند. همچنین بهترین پاسخ حاصل از الگوریتم ترکیبی شاهین هریس نسبت به الگوریتم اولیه نیز برای اکثر توابع

بهینه تر بوده است. با بررسی بهترین پاسخها مشاهده می شود که الگوریتم پیشنهادی در تابع C1 از توابع CEC2019 عملکرد قابل قبولی نداشته است.

جدول ۱۷: نتایج مربوط به ارزیابی تابع CEC2017 برای بعد ۵۰

		HHO	SCA	HSCA			HHO	SCA	HSCA
C1	BEST	2.90E+09	4.17E10	8.98E+08	C16	BEST	3.11E+03	4.24E+3	2.79E+03
	STD	2.9E+08	7.6E+09	3.3E+08		STD	439.38	9.41E+09	397.46
C2	BEST	1.22E+05	1.35E+05	9.89E+04	C17	BEST	1.97E+06	9.41E+06	1.41E+06
	STD	2.71E+04	2.44E+04	1.46E+04		STD	5.44E+06	1.93E+07	7.86E+06
C3	BEST	1.28E+03	7.24E+03	1.03E+03	C18	BEST	5.15E+05	1.74E+08	5.8E+04
	STD	304.78	1.88E+03	890.06		STD	2.51E+06	6.5E+07	3.5E+06
C4	BEST	858.8	1.04E+03	850.48	C19	BEST	2.89E+03	3.74E+03	2.67E+03
	STD	32.36	24.76	38.54		STD	301.35	215.84	328.9
C5	BEST	668.83	671.02	657.33	C20	BEST	2.78E+03	2.87E+03	2.64E+03
	STD	4.96	5.71	6.83		STD	72.78	47.25	66.04
C6	BEST	1.69E+03	1.61E+03	1.31E+03	C21	BEST	9.39E+03	1.58E+4	8.36E+03
	STD	93.29	92.46	132.05		STD	859.13	439.1	1.1E+03
C7	BEST	1.15E+03	1.36E+03	1.12E+03	C22	BEST	3.81E+03	3.46E+03	3.15E+03
	STD	41.57	38.09	47.39		STD	281.8	73.32	103.56
C8	BEST	2.58E+04	2.44E+04	1.59E+04	C23	BEST	3.89E+03	3.68E+03	3.34E+03
	STD	3.18E+03	3800.63	2.89E+03		STD	279.51	74.5	116.09
C9	BEST	8.26E+03	1.35E+04	8.06E+04	C24	BEST	3.5E+03	6.38E+03	3.43E+03
	STD	1.13E+03	461.28	986.716		STD	189.53	1013.19	285.7
C10	BEST	2.07E+03	7.06E+03	1.77E+03	C25	BEST	8.22E+03	1.15E+04	7.66E+03
	STD	647.81	3351.75	1.47E+03		STD	1.29E+03	805	1.64E+03
C11	BEST	1.74E+08	9.7E+09	1.47E+08	C26	BEST	4.08E+03	4.43E+03	3.74E+03
	STD	6.88E+08	4.36E+09	1.08E+08		STD	580.48	201.13	254.61
C12	BEST	3.53E+08	2.33E+09	3.59E+06	C27	BEST	4.23E+03	7.04E+03	3.94E+03
	STD	1.86E+07	2.35E+08	1.25E+07		STD	330.65	811.25	291.66
C13	BEST	2.17E+05	1.96E+06	1.19E+05	C28	BEST	5.66E+03	6.9E+03	5.15E+03
	STD	8.05E+06	2.75E+06	1.34E+06		STD	927.04	1047.3	673.6
C14	BEST	3.95E+05	1.98E+08	7.25E+04	C29	BEST	4.9E+07	7.4E+08	1.02E+08
	STD	5.46E+06	4.32E+08	1.08E+06		STD	6.2E+07	5.8E+08	5.9E+06
C15	BEST	4.04E+03	5.29E+3	3.02E+03					
	STD	632.94	370.59	600.81					

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق، برای اولین بار ترکیب دو الگوریتم شاهین هریس و سینوس کسینوس جهت بهینه سازی سازه با متغیرهای پیوسته معرفی گردید. ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، با چهار سازه خرابایی کوچک و متوسط مقیاس (۲۵، ۱۸، ۱۰ و ۷۲ عضوی) و دو خرابای بزرگ مقیاس (۲۰۰ و ۹۴۲ عضوی) تحت بارگذاری و قیدهای طراحی مختلف صورت گرفت. با مقایسه نتایج حاصل از بهینه سازی ۶ نمونه از خراباهای مبنا مشاهده گردید که الگوریتم پیشنهادی از عملکرد بهتری در بهینه سازی سازه های متوسط و بزرگ مقیاس با تعداد متغیرهای زیاد نسبت به سازه های کوچک مقیاس برخوردار است. از معایب اصلی الگوریتم شاهین هریس، قدرت جستجوی بسیار پایین بخصوص برای سازه های بزرگ مقیاس و تحمیل هزینه های محاسباتی جهت تکرارهای محاسباتی بیشتر الگوریتم و همگرایی پاسخها می باشد. نتایج الگوریتم پیشنهادی شاهین-سینوس کسینوس به شرح زیر می باشند.

۱- برای سازه خرابای ۹۴۲ عضوی، مطابق با جدول ۱۴ بهترین پاسخ الگوریتم شاهین-سینوس کسینوس معادل ۱۳۱۵۰۳/۴۸ پوند که نسبت به کمترین وزن بهینه جدول ۱۴، کاهش وزن ۱/۷ درصدی دارد.

- ۲- کمترین وزن بهینه حاصل از الگوریتم شاهین- سینوس کسینوس در سازه خرپای ۲۰۰ عضوی، ۲۵۰۲۱/۹ پوند بوده و نسبت به کمترین وزن بهینه در جدول ۱۲، کاهش وزن ۱/۸ درصدی قابل مشاهده است.
- ۳- در سازه ۷۲ عضوی، وزن بهینه الگوریتم شاهین- سینوس کسینوس در حالت بارگذاری اول برابر ۳۶۴/۲ پوند که نسبت به کمترین وزن جدول ۹ اختلاف ناچیزی داشته و برای حالت بارگذاری دوم، وزن بهینه ۳۷۹/۶۹ پوند معادل با کمترین وزن با سایر الگوریتم‌ها مطابق جدول ۱۰ می‌باشد.
- ۴- برای سازه ۲۵ عضوی، بهترین پاسخ الگوریتم پیشنهادی برابر ۵۴۵/۳ پوند و نسبت به بهترین پاسخ جدول ۵ با وزن ۵۴۵/۱۶ پوند حدود ۰/۰۲ درصد افزایش وزن مشاهده می‌گردد.
- ۵- برای سازه خرپایی ۱۸ عضوی، وزن بهینه ۶۴۳۱/۳ پوند و با کمترین وزن بهینه در جدول ۳ با مقادیر ۶۴۳۰ پوند در شرایط عدم تخطی مقادیر قیدها، افزایش وزنی در حدود ۰/۰۲ درصد مشاهده می‌شود.
- ۶- در سازه ۱۰ عضوی برای حالت بارگذاری اول، وزن بهینه با الگوریتم شاهین- سینوس کسینوس برابر ۵۰۶۱/۰ پوند که اختلاف وزنی چندانی با بهترین نتایج موجود در جدول ۱ ندارد. برای حالت بارگذاری دوم، وزن بهینه خرپا برابر ۴۶۷۸/۶ پوند و افزایش وزن حدود ۰/۰۲ درصد مشاهده می‌شود.
- ۷- با توجه به عملکرد بهتر الگوریتم شاهین- سینوس کسینوس در سازه‌های بزرگ مقیاس، ضرورت بهینه‌سازی سازه‌های مشابه با متغیرهای زیاد و پیچیده مانند صفحات و پوسته‌ها، قاب‌های سازه‌ای بزرگ مقیاس و یا هر سازه با تعداد متغیرهای طراحی بیشتر جهت تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.
- ۸- با توجه به کارایی و توانمندی الگوریتم ترکیبی شاهین- سینوس کسینوس، در کشف پاسخ‌های بهینه سازه‌های خرپایی با متغیرهای زیاد، ضرورت بهبود و اصلاح الگوریتم شاهین هریس در مرحله جستجو و اصلاح روند انتقال از فاز جستجو به بهره‌برداری توصیه می‌گردد.
- ۹- استفاده از الگوریتم ترکیب شده در حالت بهینه‌سازی سازه با متغیرهای گسسته و مقایسه نتایج آن با سایر الگوریتم‌ها پیشنهاد می‌گردد.
- ۱۰- با استفاده از روش‌های خود تطبیقی، کارایی الگوریتم ترکیب شده بهبود و در مسائل پیوسته مورد بررسی قرار گیرد.
- ۱۱- استفاده از الگوریتم ترکیبی شاهین- سینوس کسینوس برای بررسی خرپاهای فضایی گنبدی بزرگ مقیاس تحت قیود فرکانس طبیعی، همچنین مقایسه نتایج با سایر الگوریتم‌ها جهت تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.
- ۱۲- استفاده از الگوریتم ترکیب شده جهت بهینه‌سازی همزمان شکل و اندازه خرپاهای فضایی با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها و شرایط مرتبط با قابلیت اطمینان سازه، پیشنهاد می‌گردد.
- ۱۳- با استفاده از الگوریتم ترکیبی پیشنهادی و ترکیب الگوریتم موجود با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی جدید، کارایی الگوریتم ترکیبی جدید در بهینه‌سازی سازه مورد بررسی قرار گیرد.

۱۴- به منظور استفاده از قابلیت الگوریتم ترکیب شده در سایر مسائل مرتبط با بهینه‌سازی، ضرورت کد نویسی الگوریتم پیشنهادی شاهین سینوس کسینوس با نرم افزار متلب، جهت پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] KBesth, A. (2017). Applications of metaheuristic optimization algorithms in civil engineering, Springer, Switzerland.
- [2] Talatahari, S., Goodarzimehr, V., & Taghizadieh, N. (2020). Hybrid teaching-learning-based optimization and harmony search for optimum design of space trusses. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 13(1), 177-194.
- [3] Zargham, S, Ward, T. A, Ramli, R, & Badruddin, I. A. (2016). "Topology optimization: a review for structural designs under vibration problems." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.53, pp 1157-1177.
- [4] Li, L. J., Huang, Z. B., Liu, F., & Wu, Q. H. (2007). A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures. *Computers & structures*, 85(7-8), 340-349.
- [5] Khatibinia, M., & Yazdani, H. (2018). Accelerated multi-gravitational search algorithm for size optimization of truss structures. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 109-119
- [6] Javidi, A., Salajegheh, E., & Salajegheh, J. (2019). "Enhanced crow search algorithm for optimum design of structures." *Applied Soft Computing*, Vol.77, pp. 274-289.
- [7] Alkhraisat, H., Dalbah, L. M., Al-Betar, M. A., Awadallah, M. A., Assaleh, K., & Deriche, M. (2023). Size Optimization of Truss Structures Using Improved Grey Wolf Optimizer. *IEEE Access*, 11, 13383-13397.
- [8] Pierezan, J., dos Santos Coelho, L., Mariani, V. C., de Vasconcelos Segundo, E. H., & Prayogo, D. (2021). Chaotic coyote algorithm applied to truss optimization problems. *Computers & Structures*, 242, 106353.
- [9] Omidinasab, F., & Goodarzimehr, V. (2020). A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for truss structures with discrete variables. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 6(3), 593-604.
- [10] KBesth, A., & Rajabi, F. (2022). Optimum structural design of spatial truss structures via migration-based imperialist competitive algorithm. *Scientia Iranica*, 29(6), 2995-3015.
- [11] Paknahad, M., Hosseini, P., & KBesth, A. (2023). A self-adaptive enhanced vibrating particle system algorithm for continuous optimization problems. *Int J Optim Civl Eng*, 13(1), 127-42.
- [12] KBesth, A., Hosseini, P., Hatami, N., & Hoseini Vaez, S. R. (2022). Large-scale dome truss optimization with frequency constraints using EVPS algorithm. *Int J Optim Civil Eng*, 12(1), 105-23.
- [13] Degertekin, S. O., Saka, M. P., & Hayalioglu, M. S. (2008). "Optimal load and resistance factor design of geometrically nonlinear steel space frames via tabu search and genetic algorithm." *Engineering Structures*, Vol.30(no.1), pp. 197-205.
- [14] Kooshkbaghi, M., & KBesth, A. (2020). "Sizing optimization of truss structures with continuous variables by artificial coronary circulation system algorithm." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol.44, pp.1-20.
- [15] KBesth, A., Bakhshpoori, T., & Afshari, E. (2014). An efficient hybrid particle swarm and swallow swarm optimization algorithm. *Computers & Structures*, 143, 40-59.
- [16] KBesth, A., Bakhshpoori, T., & Afshari, E. (2014). An efficient hybrid particle swarm and swallow swarm optimization algorithm. *Computers & Structures*, 143, 40-59.
- [17] KBesth, A., Rahmani, P., & Eslamlou, A. D. (2021). An efficient hybrid approach based on Harris Hawks optimization and imperialist competitive algorithm for structural optimization. *Engineering with Computers*, 1-29.
- [18] Mashayekhi, M., Salajegheh, E., & Dehghani, M. (2015). A new hybrid algorithm for topology optimization of double layer grigs. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 5(3), 353-374.
- [19] KBesth, A., & Javadi, S. M. (2014). An efficient hybrid particle swarm strategy, ray optimizer, and harmony search algorithm for optimal design of truss structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 58(2), 155-171.
- [20] KBesth, A., & Talatahari, S. (2009). "Hybrid algorithm of harmony search, particle swarm and ant colony for structural design optimization. In *Harmony search algorithms for structural design optimization*" Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp. 159-198.
- [21] Hoseini Vaez, S. R., Hosseini, P., Fathali, M. A., Asaad Samani, A., & KBesth, A. (2020). Size and shape reliability-based optimization of dome trusses. *Int. J. Optim. Civ. Eng*, 10(4), 701-714.
- [22] Paknahad, M., Hosseini, P., & Hakim, S. J. S. (2023). SA-EVPS algorithm for discrete size optimization of the 582-bar spatial truss structure. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 13(2), 207-217.
- [23] Gupta, S., Deep, K., Moayedi, H., Foong, L. K., & Assad, A. (2021). Sine cosine grey wolf optimizer to solve engineering design problems. *Engineering with Computers*, 37, 3123-3149.
- [24] Shahrouzi, M., Emamzadeh, S. S., & Naserifar, Y. (2023). A HYBRID SIMULATED ANNEALING, PARTICLE SWARM AND ANT COLONY OPTIMIZATION FOR DESIGN OF DOUBLE-CURVED DAMS. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 13(4), 413-438.
- [25] Khajeh, A., Kiani, A., Seraji, M., & Dashti, H. (2023). Optimization of structure using hybrid Harris hawks and genetic algorithm. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(1), 114-132.
- [26] Gholizadeh, S., & Sojoudizadeh, R. (2019). Modified sine-cosine algorithm for sizing optimization of truss structures with discrete design variables. *Iran Univ Sci Technol*, 9(2), 195-212.
- [27] Ghazaan, M. I., Oshnari, A. S., & Oshnari, A. S. (2023). HYBRID COLLIDING BODIES OPTIMIZATION AND SINE COSINE ALGORITHM FOR OPTIMUM DESIGN OF STRUCTURES. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 13(1), 17-38.

- [28] KBesth, A., Hoseini Vaez, S. R., & Hosseini, P. (2018). MATLAB code for an enhanced vibrating particles system algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 8(3), 401-414.
- [29] Awad, R. (2021, October). Sizing optimization of truss structures using the political optimizer (PO) algorithm. In *Structures* (Vol. 33, pp. 4871-4894). Elsevier.
- [30] Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97, 849-872.
- [31] Degertekin, S.O. (2012). "Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures." *Computers & Structures*, Vol. 92, pp. 229-241.
- [32] KBesth, A., & Zolghadr, A. (2017). "Cyclical parthenogenesis algorithm: A new meta-heuristic algorithm," pp. 673-701.
- [33] Degertekin, S. O., Minooei, M., Santoro, L., Trentadue, B., & Lamberti, L. (2021). "Large-scale truss-sizing optimization with enhanced hybrid HS algorithm." *Applied Sciences*, Vol. 11 (no. 7), p. 3270.
- [34] Javidi, A., Salajegheh, E., & Salajegheh, J. (2019). "Enhanced crow search algorithm for optimum design of structures." *Applied Soft Computing*, Vol. 77, pp. 274-289.
- [35] Kooshkbaghi, M., & KBesth, A. (2020). Sizing optimization of truss structures with continuous variables by artificial coronary circulation system algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44, 1-20.
- [36] Li, L. J., Huang, Z. B., Liu, F., & Wu, Q. H. (2007). A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures. *Computers & structures*, 85(7-8), 340-349.
- [37] KBesth, A., Akbari, H., & Hosseini, S. M. (2020). Plasma generation optimization: a new physically-based metaheuristic algorithm for solving constrained optimization problems. *Engineering Computations*, 38(4), 1554-1606.
- [38] Imai, K., & Schmit Jr, L. A. (1981). Configuration optimization of trusses. *Journal of the Structural Division*, 107(5), 745-756.
- [39] Lee, K. S., & Geem, Z. W. (2004). A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Computers & structures*, 82(9-10), 781-798.
- [40] Sonmez, M. (2011). Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm. *Structural and multidisciplinary optimization*, 43, 85-97.
- [41] Khatibinia, & Yazdani, H. (2018). Accelerated multi-gravitational search algorithm for size optimization of truss structures. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 109-119.
- [42] Camp, C.V. & Bichon, B. J. (2004). Design of space trusses using ant colony optimization. *Journal of structural engineering*, 130(5), 741-751.
- [43] Camp, C. V., & Farshchin, M. (2014). Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization. *Engineering Structures*, 62, 87-97.
- [44] Degertekin, S. O., & Hayalioğlu, M. S. (2013). Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. *Computers & Structures*, 119, 177-188.
- [45] Camp, C. V. (2007). Design of space trusses using big bang-big crunch optimization. *Journal of Structural Engineering*, 133(7), 999-1008.
- [46] KBesth, A., & Khayatizad, M. (2013). Ray optimization for size and shape optimization of truss structures. *Computers & Structures*, 117, 82-94.
- [47] KBesth, A., & Zakian, P. (2014). Enhanced bat algorithm for optimal design of skeletal structures.
- [48] KBesth, A., & Ghazaan, M. I. (2014). Enhanced colliding bodies optimization for design problems with continuous and discrete variables. *Advances in Engineering Software*, 77, 66-75.
- [49] Camp CV, Farshchin M. Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization. *Eng Struct* 2014;62-63
- [50] KBesth, A., & Zakian, P. (2018). Improved GWO algorithm for optimal design of truss structures. *Engineering with Computers*, 34, 685-707.
- [51] Hasançebi, O. (2008). Adaptive evolution strategies in structural optimization: Enhancing their computational performance with applications to large-scale structures. *Computers & structures*, 86(1-2), 119-132.
- [52] KBesth, A., & Zakian, P. (2018). Improved GWO algorithm for optimal design of truss structures. *Engineering with Computers*, 34, 685-707.
- [53] Gandomi, A. H., Talatahari, S., Yang, X.S., & Deb, S. (2013). Design optimization of truss structures using cuckoo search algorithm. *The structural design of tall and special buildings*, 22(17), 1330-1349.
- [54] Degertekin SO, Lamberti L, Ugur IB. Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Appl Soft Comput J* 2018;70:903-28.
- [55] Cao, H., Qian, X., & Zhou, Y. (2018). Large-scale structural optimization using metaheuristic algorithms with elitism and a filter strategy. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57, 799-814.
- [56] Awad, R. (2021, October). Sizing optimization of truss structures using the political optimizer (PO) algorithm. In *Structures* (Vol. 33, pp. 4871-4894). Elsevier.
- [57] Wu, G., Mallipeddi, R., & Suganthan, P. N. (2017). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2017 competition on constrained real-parameter optimization. National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, PR China and Kyungpook National University, Daegu, South Korea and Nanyang Technological University, Singapore, Technical Report.