

Optimization of structure using hybrid Harris hawks and genetic algorithm

Abbas Khajeh¹, Alireza Kiani^{2*}, Mahmood Seraji³, Hadi Dashti⁴

1- Phd student, Civil Engineering Department, Islamic Azad university, Bushehr, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Islamic Azad university, Bushehr, Iran

3- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Islamic Azad university, Bushehr, Iran

4- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Islamic Azad university, Bushehr, Iran

ABSTRACT

Today, due to existing economic issues, optimization and maximum use of materials are highly regarded. Due to the wide range of parameters, the use of mathematical methods is not logical. For this reason, meta-heuristic methods have expanded. In the field of structures, weight optimization using various methods is of great interest. Due to the importance of truss, in this paper, the optimization of truss has been done using a hybrid algorithm of harris hawks and genetics. The harris hawks algorithm is one of the newest algorithms in the field of optimization, which is derived from the natural behavior of animals. In the harris hawks algorithm, the mutation process, which belongs to the genetic algorithm, is used. The optimization is constrained; therefore the constraints of stress and displacement have been selected. Four trusses, planer 10-bar truss, spatial 25- bar truss, spatial 72- bar space truss and planner 200 bar truss have been selected for optimization. The implementation of harris hawks algorithm has been done in MATLAB software. The results obtained from harris hawks-genetic algorithm are compared with other available sources. The study shows the acceptable performance of this hybrid algorithm for truss. The harris hawks-genetic hybrid algorithm has faster convergence speed.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 April 2022

Revise Date: 18 February 2023

Accept Date: 02 July 2022

Keywords:

optimization
harris hawks
genetic algorithm
hybrid
truss

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.338161.2788>

*Corresponding author: Alireza Kiani.
Email address: a.kiani@iaubushehr.ac.ir

بهینه‌سازی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم ترکیبی شاهین هریس و ژنتیک

عباس خواجه^۱، علیرضا کیانی^{۲*}، محمود سراجی^۳، هادی دشتی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

چکیده

امروزه به دلیل مسائل اقتصادی موجود، بهینه‌سازی و استفاده حداکثری از مصالح به شدت مورد توجه می‌باشد. به دلیل گسترده بودن پارامترها استفاده از روش‌های ریاضی منطقی و عقلانی نیست. به همین دلیل روش‌های فرا ابتکاری گسترش یافته‌اند. در زمینه سازه‌ها نیز بهینه‌سازی وزن با استفاده از روش‌های گوناگون علاقه‌مندان زیادی دارد. به دلیل اهمیت سازه‌های خرپایی در این مقاله بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی شکل با استفاده از الگوریتم ترکیبی شاهین هریس و ژنتیک انجام شده است. الگوریتم شاهین هریس یکی از جدیدترین الگوریتم‌ها در زمینه بهینه‌سازی می‌باشد که برگرفته از رفتار طبیعی حیوانات می‌باشد. در الگوریتم شاهین هریس از روند جهش که متعلق به الگوریتم ژنتیک می‌باشد استفاده شده است تا از به دام افتادن جواب‌ها در بهینه محلی جلوگیری کند. بهینه‌سازی مورد نظر مقید می‌باشد به همین دلیل قیود مورد نظر تنش و جابجایی انتخاب شده است. قیدهای مورد نظر باعث می‌شوند که جواب‌های بدست آمده در محدوده مجاز قرار گیرند و در صورتی که از حد مجاز تجاوز کنند جریمه شوند. چهار سازه خرپایی شکل، ۱۰ عضوی، ۲۵ عضوی، ۷۲ عضوی و ۲۰۰ عضوی برای بهینه‌سازی انتخاب شده است. پیاده کردن الگوریتم ترکیبی شاهین-ژنتیک در نرم افزار متلب انجام و نتایج بدست آمده از الگوریتم ترکیبی شاهین با سایر منابع موجود مقایسه شده است. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی شاهین-ژنتیک دارای سرعت همگرایی بیشتر و نیز جواب‌های بهتر در مقایسه با الگوریتم شاهین می‌باشد. همچنین این ترکیب دارای جواب‌های بهتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها نیز می‌باشد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، خرپا، الگوریتم شاهین، وزن، الگوریتم ترکیبی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.338161.2788	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.338161.2788	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۱۱	۱۴۰۱/۰۴/۱۱	۱۴۰۱/۱۱/۲۹	۱۴۰۱/۰۲/۰۴
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				علیرضا کیانی		
				a.kiani@iaubushehr.ac.ir		

۱- مقدمه

در سال‌های گوناگون روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی ابداع گردیده است. روش‌های ریاضی امروزه به دلیل گسترده بودن پارامترها دیگر قابل استفاده نیستند به همین دلیل روش‌های فرا ابتکاری مورد توجه قرار گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها برای مسائل مختلف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. Pierezan با استفاده از الگوریتم گرگ کایوت بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی را انجام داد [۱]. الگوریتم کایوت بر خلاف اکثر الگوریتم‌ها دارای زیر جمعیت می‌باشد که این کار باعث بهبود عملکرد آن شده و دارای پارامترهای کمتری نیز می‌باشد. مرتضوی در تحقیق خود به بررسی بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی تحت قید فرکانس سازه پرداخته است [۲]. در این بررسی از الگوریتم تعاملی فازی بهره گرفته شده است. فرکانس طبیعی سازه به شکل و رفتار سازه بستگی دارد از این رو الگوریتم مورد استفاده نیز باید کارایی لازم را داشته باشد. با استفاده از روش مذکور سرعت بهینه‌سازی افزایش یافته و نتایج بدست آمده نیز قابل قبول می‌باشد. سنگ‌تراش با استفاده از الگوریتم ترکیبی فیزیک و انفجار بزرگ-ادغام بزرگ بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی را انجام داد [۳]. با استفاده از سازه‌های خرپایی روند بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده حاکی از خوب بودن روند اجرای بهینه‌سازی می‌باشد. Heba با استفاده از الگوریتم چرخه آب سازه‌های خرپایی را بهینه کرد [۴]. الگوریتم چرخه آب یکی از الگوریتم‌های جدید در زمینه بهینه‌سازی می‌باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های مقایسه شده دارای نتایج خوبی می‌باشد. کاوه با استفاده از الگوریتم آموزش و یادگیری کوانتوم به بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی اقدام نمود [۵]. در این بررسی تغییراتی در فرمول بندی روابط در جهت بهبود روند بهینه‌سازی و جلوگیری از به دام افتادن در بهینه محلی انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده بهبود عملکرد روش پیشنهادی است. جاویدی بهینه‌سازی وزن و انرژی تخریب سازه‌های خرپایی شکل را با استفاده از الگوریتم کلاغ انجام داد [۶]. این الگوریتم در زمینه جستجو و بهره برداری دارای نتایج قابل قبولی می‌باشد. در این بررسی سه مثال خرپایی شکل مورد بررسی قرار گرفت. Kumar بهینه‌سازی چند هدفه سازه‌های خرپایی شکل را با استفاده از الگوریتم انتقال حرارت انجام داد [۷]. وزن سازه و جابجایی نقاط به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. پنج سازه خرپایی برای انجام بهینه‌سازی انتخاب شد. Grzywiński با استفاده از الگوریتم آموزش و یادگیری، سازه را تحت قید فرکانس بهینه‌سازی کرد [۸]. تابع هدف در این بررسی وزن در نظر گرفته شد. دو سازه ۳۷ و ۷۲ عضوی برای مثال‌ها استفاده شد. Serpik الگوریتم کارایی را برای بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار تحت قیدهایی مانند جابجایی و تنش به کاربرد [۹]. در این تحقیق وزن سازه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. Jawad از الگوریتم سنجاقک برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌های خرپایی استفاده کرد [۱۰]. او در این بررسی با تغییراتی در الگوریتم آن را برای مسئله گسسته به کار برد و همچنین تغییرات در فرمول بندی باعث بهبود عملکرد این الگوریتم شد. پنج خرپا با پارامترهای گسسته در پژوهش استفاده شد. طلعت اهری الگوریتم ترکیبی آموزش - یادگیری و هارمونی را برای بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی استفاده کرد [۱۱]. این الگوریتم دارای دو بخش می‌باشد. الگوریتم آموزش و یادگیری معمولاً در بهینه محلی گیر می‌کند که برای جبران این نقیصه از ترکیب الگوریتم هارمونی استفاده شده است که در زمینه بررسی بهینه‌های محلی دارای نقطه قوت می‌باشد. همچنین از تابع جریمه نیز در فرمول بندی استفاده شده است. Yadav از الگوریتم ازدحام ذرات برای طراحی عملکردی بهینه سازه‌های خرپایی استفاده جست [۱۲]. خواص و ویژگی‌های مواد مورد استفاده به صورت نامعین در نظر گرفته شد. طراحی به صورت معین و قطعی و به صورتی عملکردی انجام گرفت. از روش مونت کارلو نیز برای بدست آوردن احتمال خرابی بهره گرفته شد. کوشبافی با استفاده از الگوریتم چرخش خون مصنوعی به بهینه‌سازی سازه‌های خرپایی مبادرت ورزید [۱۳]. این الگوریتم دارای یک نقطه مرکزی در هر تولید جمعیت می‌باشد که این کار باعث افزایش سرعت بهینه سازی می‌شود. این الگوریتم دارای حافظه می‌باشد.

احتمال به دام افتادن در بهینه محلی برای الگوریتم شاهین هریس مانند بسیاری از الگوریتم‌های دیگر وجود دارد. به همین دلیل در مطالعه پیش رو از خاصیت ادغام الگوریتم ژنتیک در لابه‌لای الگوریتم شاهین استفاده شده است و الگوریتم ترکیبی شاهین-ژنتیک جهت بهینه‌سازی سازه‌ها ارائه شد. تعداد ۴ مثال سازه‌ای جهت بررسی عملکرد این الگوریتم در نظر گرفته شد. جهت مقید بودن بهینه‌سازی تعدادی قید در نظر گرفته شد که شامل تنش و جابجایی می‌باشد. کلیه عملیات بهینه‌سازی در نرم افزار متلب انجام شده است.

۲- الگوریتم شاهین هریس (HHO)^۱

این الگوریتم بر اساس روش شکار شاهین‌ها بنا شده و یک الگوریتم با پایه جمعیت می‌باشد [۱۴]. در این الگوریتم تعدادی از شاهین‌ها با حمله به سمت طعمه او را از محل اختفای خود دور کرده و به نقطه خارج منتقل می‌کنند تا بتوانند آن را شکار کنند. در این روش شاهین‌ها به صورت تصادفی در محل‌هایی فرود می‌آیند. این محل‌ها می‌تواند در کنار شاهین‌های دیگر باشد یا بالای سر طعمه. به همین دلیل یک عدد تصادفی به نام q تعریف می‌شود. این عدد بین صفر و یک می‌باشد. شکل ۱ نشان دهنده روند کلی شکار شاهین می‌باشد.

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

در رابطه بالا $X(t+1)$ مکان شاهین در مرحله t می‌باشد. $X_{rabbit}(t)$ مکان شکار، r_1, r_2, r_3, r_4 و q اعداد تصادفی بین صفر و یک می‌باشند که در هر مرحله به روز رسانی می‌شوند. LB حد پایین و UB حد بالای متغیرها را نشان می‌دهد. $X_{rand}(t)$ یک مکان تصادفی و $X_m(t)$ متوسط مکان‌ها می‌باشد.

$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (2)$$

در رابطه بالا $X_i(t)$ مکان شاهین‌ها و N تعداد شاهین‌ها در هر مرحله را نشان می‌دهد.

شکار می‌تواند از یک مکان به یک مکان دیگر نقل مکان کند و این کار را می‌توان با انرژی نشان داد.

$$E = 2E_0(1 - \frac{t}{T}) \quad (3)$$

T تعداد کل تکرارها، E_0 یک عدد متغیر بین (-1) و (1) می‌باشد. زمانی که E_0 بین (-1) و (0) یعنی شکار خسته شده و زمانی که E_0 بین (0) و (1) یعنی شکار قدرتمند است. اگر $|E| \geq 1$ شاهین نواحی مختلف را جستجو می‌کند و اگر $|E| < 1$ نواحی اطراف را بررسی می‌کند.

یک پارامتر به نام r تعریف می‌شود. این پارامتر شانس فرار طعمه را بیان می‌کند. $r < 0.5$ موفقیت فرار و $r \geq 0.5$ عدم موفقیت فرار.

در اینجا ۴ حالت پیش می‌آید:

$$r \geq 0.5 \text{ و } |E| \geq 0.5 \quad (1)$$

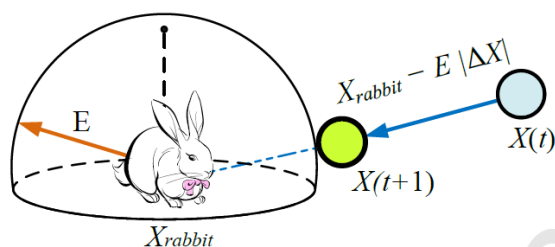
$$X(t+1) = \Delta X(t) - E |X_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (4)$$

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

$$r \geq 0.5 \text{ و } |E| < 0.5 \quad (2)$$

$$X(t+1) = X_{rabbit}(t) - E |\Delta X(t)| \quad (5)$$

¹ Harris Hawks Algorithm



شکل ۱: روند شکار شاهین

$$r < 0.5 \text{ و } |E| \geq 0.5 \quad (۳)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (۴)$$

$$Y = X_{rabbit}(t) - E|X_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (۷)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (۸)$$

$$LF(X) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\beta}}, \quad \sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (۹)$$

در رابطه بالا D بعد مسئله، S بردار تصادفی با اندازه $I * D$ ، u و v عدد تصادفی بین صفر و یک و $\beta = 1.5$ در نظر گرفته می‌شود. Γ نیز تابع گاما می‌باشد.

$$r < 0.5 \text{ و } |E| < 0.5 \quad (۴)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$Y = X_{rabbit}(t) - E|X_{rabbit}(t) - X_m(t)| \quad (۱۱)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (۱۲)$$

۳ - روش انجام الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی است برای بهینه‌سازی، که امروزه کاربرد زیادی پیدا کرده است. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، معمولاً با تولید جمعیتی از کروموزوم‌ها (جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک، معمولاً تصادفی تولید می‌شود و مقید به حد بالا و پایین متغیرهای مسأله هستند) آغاز می‌شود. در مرحله بعد، ساختارهای داده‌ای تولید شده (کروموزوم‌ها) ارزیابی می‌شوند و کروموزوم‌هایی که به شکل بهتری می‌توانند جواب بهینه مسأله مورد نظر (هدف) را نمایش دهند، شانس بیشتری برای تولید مثل نسبت به جواب‌های ضعیف‌تر پیدا می‌کنند. به عبارت دیگر، فرصت‌های تولید مثل بیشتری به این دسته از کروموزوم‌ها اختصاص داده می‌شود. میزان خوب بودن یک جواب، معمولاً نسبت به جمعیت جواب‌های کاندید فعلی سنجیده می‌شود.

اصول کاری الگوریتم ژنتیک، در ساختار الگوریتمی زیر نمایش داده شده است. مهم‌ترین گام لازم برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک عبارتند از: تولید جمعیت (اولیه) از جواب‌های یک مسأله، مشخص کردن تابع هدف و به کار گرفتن عملگرهای ژنتیک جهت ایجاد تغییرات در جمعیت جواب‌های مسأله. اصول کاری الگوریتم ژنتیک عبارتست از:

- ۱- فرموله کردن جمعیت ابتدایی متشکل از جواب‌های مسأله
- ۲- مقداردهی اولیه و تصادفی جمعیت ابتدایی متشکل از جواب‌های مسأله
- ۳- حلقه تکرار:
 - ۱-۳- ارزیابی تابع هدف مسأله
 - ۲-۳- انجام عملیات روی جمعیت متشکل از جواب‌های مسأله با استفاده از عملگرهای ژنتیک
 - ۱-۲-۳- عملگر تولید (Reproduction)
 - ۲-۲-۳- عملگر ادغام (Crossover): برای بازترکیب دو رشته یا کروموزوم استفاده می‌شود. این کار، با هدف تولید رشته‌ها یا کروموزوم‌های بهتر انجام می‌شود.
 - ۳-۲-۳- عملگر جهش (Mutation): در عملگر جهش، به شکل تصادفی، اطلاعات جدیدی به فرایند جستجو در الگوریتم ژنتیک اضافه می‌شود.
 - ۴- تا زمانی که: شرط توقف ارضا شود.

۴- روش انجام الگوریتم شاهین-ژنتیک^۲

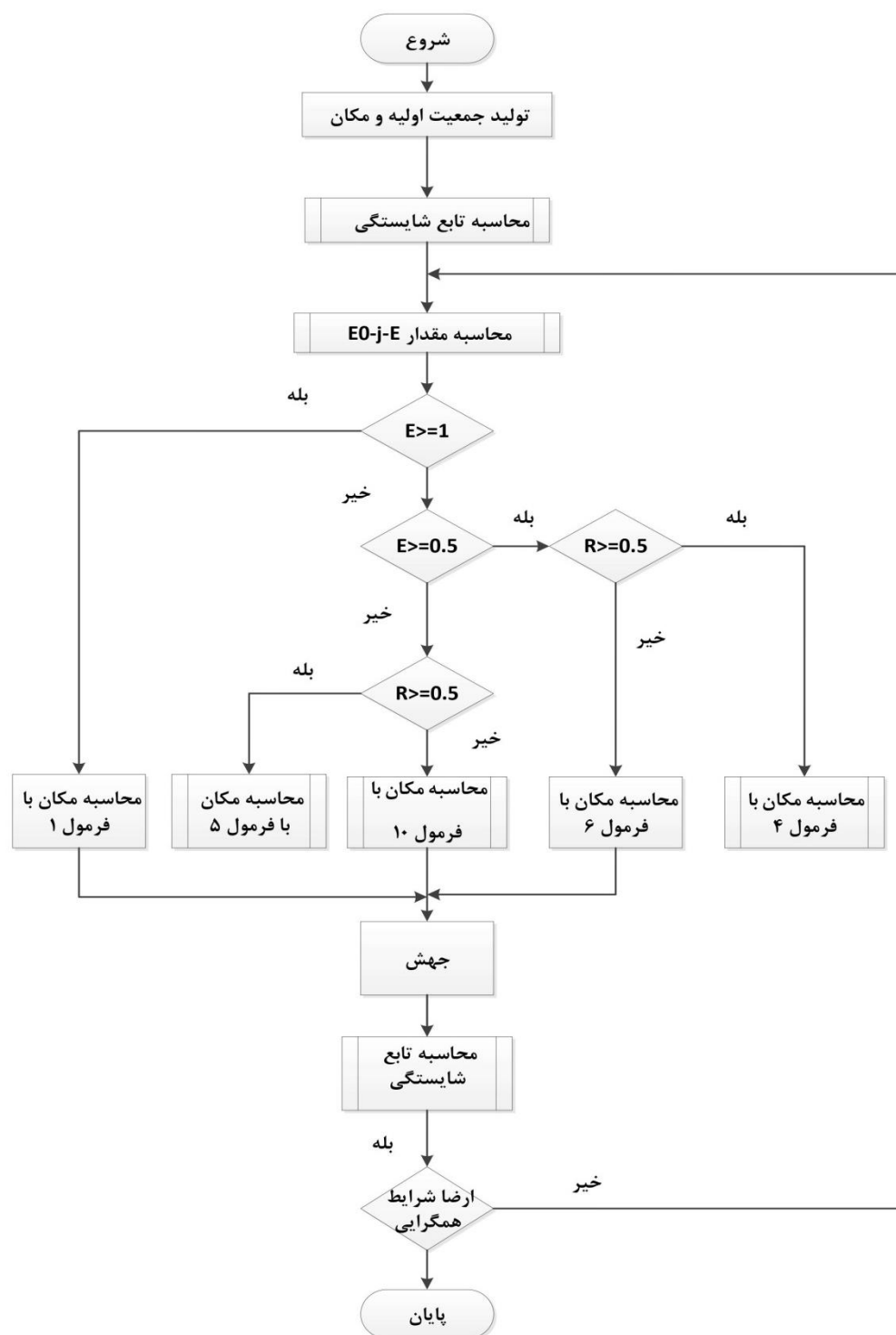
در روش ارائه شده ابتدا جمعیت اولیه تولید خواهد شد. برای جمعیت تولید شده تابع شایستگی که همان تابع هدف می‌باشد بدست می‌آید. سپس مقدار E بر اساس روابط موجود محاسبه می‌شود. در صورتی که $E > 1$ باشد از رابطه ۱ و در غیر این صورت بنا به اعداد بدست آمده یکی از چهار رابطه ۴، ۵، ۶ و ۱۰ مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل احتمال به دام افتادن در بهینه محلی از جهش در تولید مکان‌ها استفاده می‌شود تا جستجوی فضا به خوبی انجام شود و نتایج بهتری بدست آید. جهش بدین معناست که یک ردیف از ماتریس مکان تولید شده به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس یک ستون از این ردیف نیز به صورت تصادفی برگزیده شده و مقدار کمی از آن کم یا به آن اضافه شود. رابطه ۱۳ نشان دهنده جهش می‌باشد.

$$d = 0.012 \times \text{rand}(-1,1) \times (U_b_j - L_b_j) \quad j=1, \dots, \text{nvar} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، d همان مقداری است که کم یا افزوده می‌شود، rand نشان دهنده یک عدد تصادفی، nvar تعداد متغیر، U_b کرانه بالا و L_b کرانه پایین را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ روند کلی انجام این الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است.

² HHOGA (Harris Hawks Algorithm-Genetic Algorithm)



شکل ۲: روند انجام الگوریتم ترکیبی شاهین-ژنتیک

۵- مثال ها

در این بخش خرپای ۱۰ عضوی دو بعدی، ۲۵ عضوی سه بعدی، ۷۲ عضوی سه بعدی و ۲۰۰ عضوی دو بعدی مورد بررسی قرار گرفت. در کلیه مثال ها هدف کمینه کردن تابع مورد نظر با در نظر گرفتن قیدهای اشاره شده می باشد. تعداد جمعیت ۱۰۰ و تعداد تکرار الگوریتم برای هر مثال ۳۰ مرتبه می باشد.

تنش و جابجایی به عنوان قید مطرح هستند [۱۵].

$$W(A) = \rho \sum_{i=1}^{10} A_i L_i \quad (14)$$

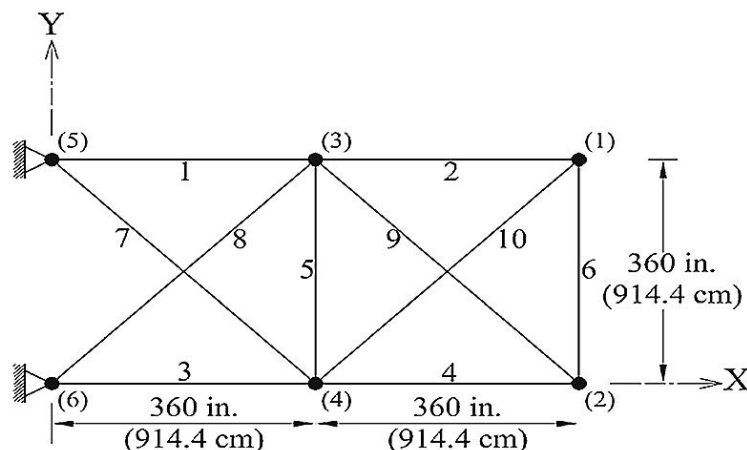
$$g_1(X) = \sigma(X) - \sigma_{allow} \leq 0 \quad (15)$$

$$g_2(X) = \delta(X) - \delta_{max} \leq 0 \quad (16)$$

در روابط بالا W تابع هدف (در اینجا وزن می باشد)، ρ وزن مخصوص، A مساحت سطح مقطع و L طول میله می باشد. $\sigma(X)$ تنش هر میله و $\delta(X)$ میزان تغییر طول می باشد.

۵-۱- خرپای ۱۰ عضوی

در این مثال یک خرپای ۱۰ عضوی مورد بررسی قرار گرفته است. دو حالت بارگذاری برای این خرپا در نظر گرفته شده است که جزئیات آن در ادامه اشاره شده است. شکل ۳ خرپای ۱۰ عضوی مورد بررسی را نشان می دهد.



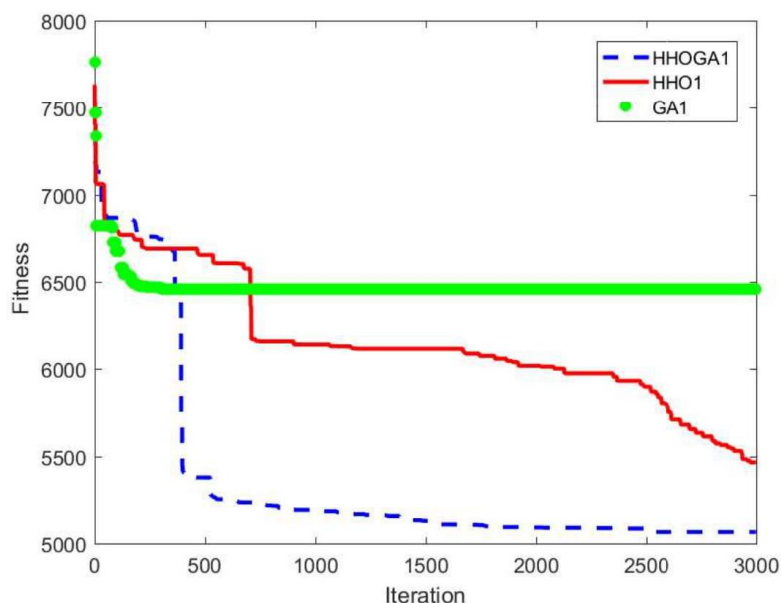
شکل ۳: خرپای ۱۰ عضوی

مدول الاستیسیته 10^7 psi و چگالی 0.1 lb/in^3 می باشد. همچنین تنش مجاز 25 ksi و حداکثر جابجایی 2 in در نظر گرفته شده است. حداقل مقدار مقطع 0.1 in^2 و حداکثر آن 35 in^2 فرض گردیده است. برای هر کدام از مدل ها ۳۰۰۰ تحلیل انجام شده است. در بارگذاری اول دو بار 100 kips در نقاط ۲ و ۴ در راستای y وارد شده است و در حالت دوم بار 150 kips در نقاط ۲ و ۴ در راستای y و دو بار 50 kips در نقاط ۱ و ۳ در راستای y بر سازه اعمال شده است.

جدول ۱: نتایج خرابی ۱۰ عضوی برای حالت بارگذاری ۱

HHOGA	HHO	GA	مساحت سطح مقطع (in ²)				متغیر
			Pouriyanezhad [19]	Adil [18]	Kaveh [17]	Varaee [16]	
30.0125	33.7108	22.9515	30.5349	30.5383	30.5755	30.5069	A ₁
0.1	0.8885	11.2260	0.1	0.1	0.1	0.1	A ₂
23.3237	28.9112	24.7580	23.1893	23.1759	23.3368	23.302	A ₃
15.2312	11.5140	11.2150	15.2035	15.2483	15.1497	15.165	A ₄
0.1	0.1	3.7269	0.1	0.1	0.1	0.1	A ₅
0.6178	0.8456	6.8478	0.5490	0.55377	0.5276	0.5436	A ₆
7.8639	13.2334	15.7344	7.4613	7.45847	7.4458	7.4612	A ₇
21.2118	17.6451	22.1557	21.0572	21.0269	20.9892	21.113	A ₈
21.2899	21.8799	18.0295	21.5170	21.5223	21.5236	21.413	A ₉
0.1	0.8601	13.8098	0.1	0.1	0.1	0.1	A ₁₀
5060.01	5463.74	6456.17	5060.85	5060.85	5060.99	5060.99	Best weight(lb)
5061.46	5464.75	6456.17	5065.41	5060.87	5062.09	N/A	Average weight(lb)
0.436	0.24	1.235	5.2797	0.0215	2.05	N/A	std

در جدول ۱ بهترین جواب الگوریتم ترکیبی شاهین-ژنتیک lb ۵۰۶۰/۰۱ بدست آمده است. که این نتیجه نشان دهنده برتری نسبی این روش در مقایسه با سایر روش‌های مقایسه شده است. این روش باعث کاهش وزن تا حدود ۰/۰۱۶ درصد در مقایسه با منبع [19] می‌باشد که این منبع در مقایسه با دیگر منابع بهترین بود. در شکل ۴ روند بهینه سازی خرابی ۱۰ عضوی برای حالت بارگذاری اول ارائه شده است. در این شکل روند بهینه سازی توسط سه الگوریتم شاهین-ژنتیک (HHOGA)، شاهین (HHO) و ژنتیک (GA) ارائه شده است. این شکل نشان از سرعت بالای همگرایی الگوریتم ترکیبی می‌باشد.

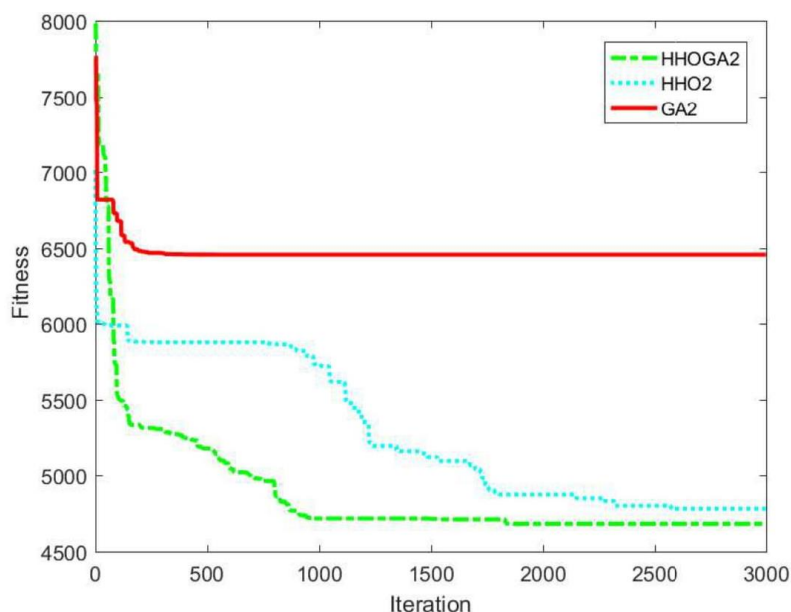


شکل ۴: روند بهینه سازی خرابی ۱۰ عضوی (حالت ۱)

جدول ۲: نتایج خرپای ۱۰ عضوی برای حالت بارگذاری ۲

مساحت سطح مقطع (in ²)							متغیر
HHOGA	HHO	GA	Jafari [21]	Kaveh [17]	Varaee [16]	Talatahari [20]	
23.5941	22.4242	22.5886	23.6319	23.5804	23.5236	23.432	A ₁
0.1	0.1	4.9043	0.1	0.1003	0.1	0.1	A ₂
23.8473	21.8809	24.3591	25.3424	25.1582	25.2852	25.3718	A ₃
14.5624	11.8222	15.0091	14.5964	14.1801	14.3716	14.1360	A ₄
0.1	0.1	7.1656	0.1	0.1002	0.1	0.1	A ₅
1.8389	2.2627	12.3783	1.97690	1.9708	1.9697	1.9699	A ₆
12.9584	13.9816	17.1848	12.3446	12.4511	12.3917	12.4335	A ₇
13.7725	16.4233	19.9064	12.6697	12.9349	12.8332	13.0173	A ₈
19.8234	21.9957	21.8539	20.2586	20.3595	20.3288	20.2717	A ₉
0.1	0.1	5.6188	0.1	0.1001	0.1	0.1	A ₁₀
4676.05	4782.15	6397.66	4676.92	4677.31	4676.92	4677.26	Best weight(lb)
4679.46	4783.14	6397.66	4680.30	4679.06	4692.71	4681.45	Average weight(lb)
1.35	0.21	3.32e-14	3.82	2.07	45.7824	2.19	std

با استفاده از جدول ۲ می‌توان دریافت که نتیجه حاصل شده از الگوریتم شاهین-ژنتیک برابر $4676 / 0.5 \text{ lb}$ می‌باشد این عدد در مقایسه با منبع [21] که کمترین وزن را دارد $0.18 / 0$ درصد کاهش را نشان می‌دهد. در شکل ۵ روند بهینه‌سازی خرپای ۱۰ عضوی برای حالت بارگذاری ۲ برای سه الگوریتم *HHOGA*، *GA* و *HHO* ارائه شده است.



شکل ۵: روند بهینه‌سازی خرپای ۱۰ عضوی (حالت ۲)

شکل ۵ نشان دهنده سرعت بالای همگرایی الگوریتم ترکیبی در مقایسه با الگوریتم شاهین می‌باشد.

۵-۲- خرپای ۲۵ عضوی سه بعدی

در شکل ۶ خرپای ۲۵ عضوی سه بعدی نمایش داده شده است. وزن مخصوص فولاد 0.1 lb/in^3 و ضریب الاستیسیته برابر 10^7 در نظر گرفته شده است. بیشترین جابجایی نقاط در هر دو راستای X و Y برابر 0.35 in فرض شده است. کل اعضای این خرپا به ۸

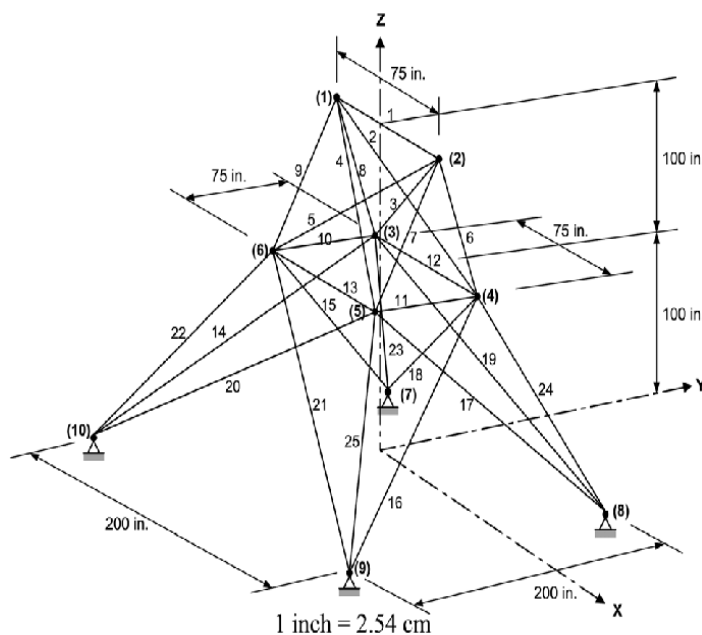
گروه تقسیم شده اند. دو نوع بارگذاری بر سازه اعمال شده است (جدول ۳). مقاطع از بازه 0.1 تا $3/4 \text{ in}^2$ انتخاب شده اند. تعداد تحلیل‌ها 3000 می‌باشد. قید تنش و جابجایی برای این خرپا در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳: بارگذاری مختلف برای خرپای ۲۵ عضوی

node	Case1			Case2		
	$F_x(\text{kips})$	$F_y(\text{kips})$	$F_z(\text{kips})$	$F_x(\text{kips})$	$F_y(\text{kips})$	$F_z(\text{kips})$
1	0	20	-5	1	10	-5
2	0	-20	-5	0	10	-5
3	0	0	0	0.5	0	0
6	0	0	0	0.5	0	0

جدول ۴: تنش مجاز برای خرپای ۲۵ عضوی

Element group	Compressive stress limitations (ksi)	Tensile stress limitations (ksi)
1	A ₁	35.092
2	A ₂ -A ₅	11.590
3	A ₆ -A ₉	17.305
4	A ₁₀ -A ₁₁	35.092
5	A ₁₂ -A ₁₃	35.092
6	A ₁₄ -A ₁₇	6.759
7	A ₁₈ -A ₂₁	6.959
8	A ₂₂ -A ₂₅	11.082

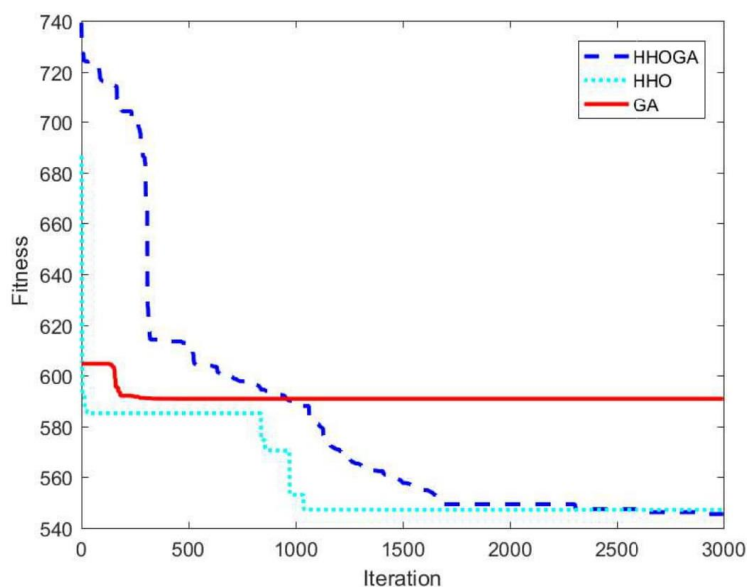


شکل ۶: خرپای ۲۵ عضوی سه بعدی

جدول ۵: نتایج خرابی ۲۵ عضوی

مساحت سطح مقطع (in ²)							متغیر
HHOGA	HHO	GA	Pouriyanezha d [19]	Adil [18]	Dhiman [23]	Kaveh [22]	
0.1	0.1	1.7516	0.0100	0.0100	0.01	0.0124	A ₁
1.8251	2.1293	1.9100	1.9903	1.9825	2.007	1.9624	A ₂ -A ₅
3.1239	2.7316	2.9020	2.9881	3.0004	3.001	3.0204	A ₆ -A ₉
0.1	0.1	0.1364	0.1	0.0100	0.01	0.0266	A ₁₀ -A ₁₁
0.1	0.1	0.3152	0.1	0.0100	0.01	0.0109	A ₁₂ -A ₁₃
0.5614	0.7082	1.0640	0.6857	0.6832	0.661	0.6841	A ₁₄ -A ₁₇
1.717	1.7095	2.0526	1.6764	1.6775	1.620	1.6862	A ₁₈ -A ₂₁
2.7643	2.6919	2.2747	2.6613	2.6610	2.668	2.6526	A ₂₂ -A ₂₅
544.13	546.16	590.85	545.163	545.163	544.92	545.481	Best weight(lb)
545.40	547.11	590.85	545.910	545.165	545.13	549.674	Average weight(lb)
0.29	0.521	2.07e-14	1.0893	0.00162	0.401	2.8113	Std

جدول ۵ نشان دهنده جواب $544/13 \text{ lb}$ برای الگوریتم ترکیبی شاهین-ژنتیک می باشد که در مقایسه با سایر روش ها کاهش وزن را نشان می دهد این کاهش در مقایسه با روش [23] $0/14$ درصد کاهش وزن را ارائه می دهد. شکل ۷ نشان دهنده روند بهینه سازی خرابی ۲۵ عضوی برای الگوریتم HHOGA، GA و HHO می باشد. با مشاهده شکل ۷ می توان دریافت که سرعت همگرایی الگوریتم شاهین ترکیبی بهبود یافته است.



شکل ۷: روند بهینه سازی خرابی ۲۵ عضوی

۵-۳- خرابی ۲۲ عضوی سه بعدی

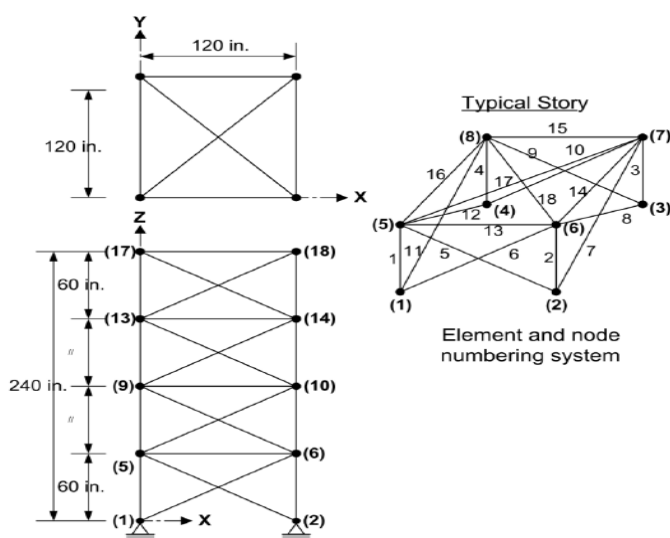
شکل این خرپا در تصویر ۸ قابل مشاهده است. وزن مخصوص فولاد 1 lb/in^3 و ضریب الاستیسیته برابر 10^7 psi در نظر گرفته شده است. حداکثر تنش مجاز 25 ksi برای کشش و فشار و جابجایی $0/25 \text{ in}$ انتخاب شده است. حداقل مساحت مقطع $0/1 \text{ in}^2$ می باشد. بارگذاری های مختلف انجام شده در جدول ۶ ارائه شده است. جدول ۷ نیز گروه بندی مقاطع را نشان می دهد. تعداد تحلیل های انجام شده برای این مثال ۲۰۰۰ می باشد.

جدول ۶: بارگذاری مختلف برای خرپای ۷۲ عضوی

node	Case1			Case2		
	F _x (kips)	F _y (kips)	F _z (kips)	F _x (kips)	F _y (kips)	F _z (kips)
17	5	5	-5	0	0	-5
18	0	0	0	0	0	-5
19	0	0	0	0	0	-5
20	0	0	0	0	0	-5

جدول ۷: گروه بندی مقاطع خرپای ۷۲ عضوی

group	element	group	element
1	A ₁ -A ₄	9	A ₃₇ -A ₄₀
2	A ₅ -A ₁₂	10	A ₄₁ -A ₄₈
3	A ₁₃ -A ₁₆	11	A ₄₉ -A ₅₂
4	A ₁₇ -A ₁₈	12	A ₅₃ -A ₅₄
5	A ₁₉ -A ₂₂	13	A ₅₅ -A ₅₈
6	A ₂₃ -A ₃₀	14	A ₅₉ -A ₆₆
7	A ₃₁ -A ₃₄	15	A ₆₇ -A ₇₀
8	A ₃₅ -A ₃₆	16	A ₇₁ -A ₇₂

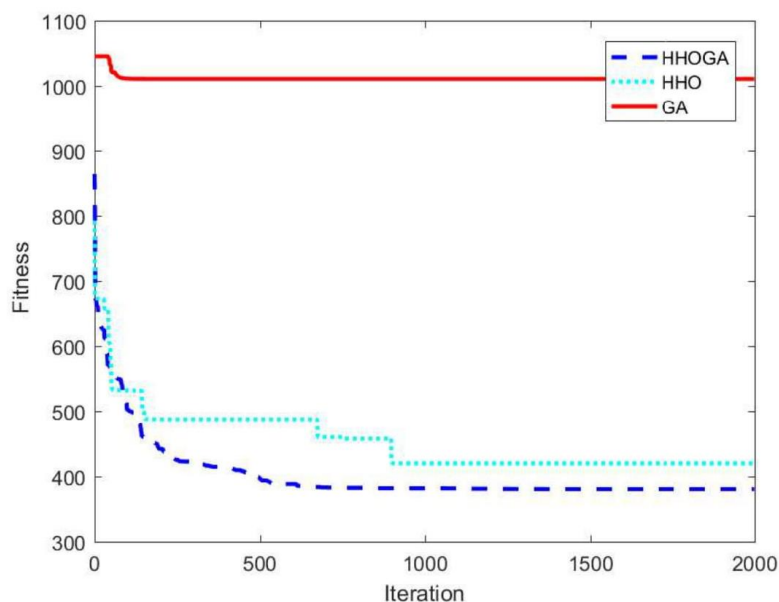


شکل ۸: خرپای ۷۲ عضوی سه بعدی

جدول ۸: نتایج خرابی ۷۲ عضوی

HHOGA	HHO	GA	مساحت سطح مقطع (in ²)				متغیر
			Pouriyanezha d [19]	Adil [18]	Kaveh [6]	Kaveh [22]	
1.7927	1.3536	3.1909	1.9297	1.88468	1.8910	1.8585	A ₁
0.5239	0.5107	0.9022	0.5089	0.51372	0.5131	0.5021	A ₂
0.1	0.1534	0.3211	0.1	0.1	0.1	0.1002	A ₃
0.1	0.1798	0.4147	0.1	0.1	0.1	0.1	A ₄
1.3307	1.9478	3.2268	1.2467	1.27107	1.2697	1.3011	A ₅
0.5217	0.5925	0.3377	0.5127	0.51080	0.5097	0.5151	A ₆
0.1	0.1	1.5613	0.1	0.1	0.1	0.1	A ₇
0.1	0.1805	0.1906	0.1	0.1	0.1	0.1001	A ₈
0.5267	0.429	1.6004	0.5297	0.52589	0.5201	0.5311	A ₉
0.5112	0.5840	0.8981	0.5172	0.51627	0.5175	0.5122	A ₁₀
0.1	0.1	1.5438	0.1	0.1	0.1	0.1008	A ₁₁
0.1	0.6109	2.2114	0.1	0.1	0.1	0.1030	A ₁₂
0.1479	0.1440	1.3315	0.1564	0.15647	0.1566	0.1560	A ₁₃
0.5524	0.6557	1.0756	0.5439	0.54479	0.5457	0.5472	A ₁₄
0.4102	0.3395	1.5627	0.4105	0.41210	0.4107	0.4202	A ₁₅
0.5204	0.2729	3.1425	0.5624	0.56840	0.5679	0.5793	A ₁₆
379.16	420.00	1011.05	379.65	379.61	379.56	379.76	Best weight(lb)
379.98	421.02	1011.05	380.29	379.62	379.67	380.68	Average weight(lb)
0.4680	0.356	2.54e-14	0.5243	0.0038	0.127	0.7315	Std

جدول ۸ نشان می‌دهد که جواب الگوریتم شاهین-ژنتیک برای خرابی ۷۲ عضوی برابر با $379/16$ lb می‌باشد که در مقایسه با سایر روش‌ها تا حدودی وزن کاهش یافته است این کاهش وزن در مقایسه با کمترین وزن $0/1$ درصد کاهش را نشان می‌دهد. شکل ۹ به خوبی نشان دهنده روند بهینه‌سازی خرابی ۷۲ عضوی برای الگوریتم *HHOGA*، *HHO* و *GA* می‌باشد. در این شکل به خوبی می‌توان مشاهده کرد که سرعت همگرایی در الگوریتم *HHOGA* نسبت به *GA* و *HHO* بالاست.



شکل ۹: روند بهینه‌سازی خرابی ۷۲ عضوی

۴-۵- خرپای ۲۰۰ عضوی دو بعدی

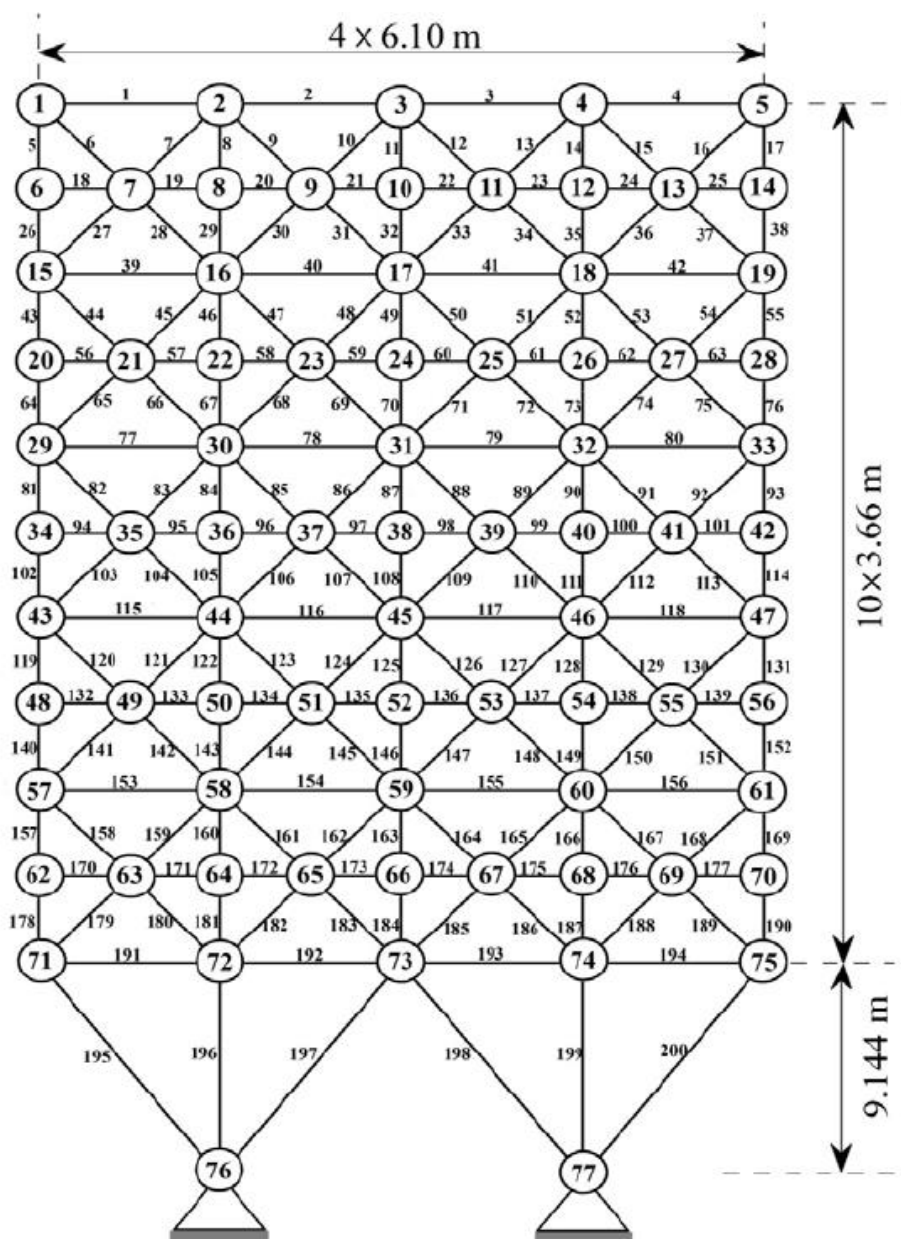
ابعاد خرپای ۲۰۰ عضوی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ضریب ارتجاعی و وزن مخصوص برای این شکل برابر 10^7 psi و 0.237 lb/in^3 می باشد. حداکثر تنش در نظر گرفته شده برابر 10 ksi و محدودیت تنش نیز در نظر گرفته نشده است. حداقل مقدار سطح مقطع نیز برابر 0.1 in^2 محاسبه شده است. مطابق با جدول ۹ سه نوع بارگذاری بر سازه اعمال شده و مقاطع به ۲۹ بخش تقسیم شده اند. تعداد ۸۰۰۰ بار تحلیل برای هر بار جواب اعمال شده است.

جدول ۹: بارهای مختلف خرپای ۲۰۰ عضوی

node	Case1	Case2	Case3
Load(lb)	1000	10000	
Direction	X	Y	
Nodes	1,6,15,20,29,34,43, 48,57,62,71	1-6,8,10,12,14-20,22,24,26, 28-34, 36,38,40, 42-48,50, 52,54,56- 62, 64,66,68,70-75	Load cases 1 and 2 acting simultaneously

جدول ۱۰: گروه بندی مقاطع خرپای ۲۰۰ عضوی

Group	Member number	Group	Member number
A1	1, 2, 3,4	A16	82, 83, 85, 86, 88, 89, 91, 92, 103,104, 106, 107, 109, 110, 112, 113
A2	5, 8, 11, 14, 17	A17	115, 116, 117, 118
A3	19, 20, 21, 22, 23, 24	A18	119, 122, 125, 128, 131
A4	25, 56, 63, 94, 101, 132, 139, 170, 177	A19	133, 134, 135, 136, 137, 138
A5	26, 29, 32, 35, 38	A20	140, 143, 146, 149, 152
A6	6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 36, 37	A21	120, 121, 123, 124, 126, 127, 129, 130, 141, 142, 144, 145, 147, 148, 150, 151
A7	39, 40, 41, 42	A22	153, 154, 155, 156
A8	43, 46, 49, 52, 55	A23	157, 160, 163, 166, 169
A9	57, 58, 59, 60, 61, 62	A24	171, 172, 173, 174, 175, 176
A10	64, 67, 70, 73, 76	A25	178, 181, 184, 187, 190
A11	44, 45, 47, 48, 50, 51, 53, 54, 65, 66, 68, 69, 71, 72, 74, 75	A26	158, 159, 161, 162, 164, 165, 167, 168, 179, 180, 182, 183, 185, 186, 188, 189
A12	77, 78, 79, 80	A27	191, 192, 193, 194
A13	81, 84, 87, 90, 93	A28	195, 197, 198, 200
A14	95, 96, 97, 98, 99, 100	A29	196,199
A15	102, 105, 108, 111, 114		



شکل ۱۰: خرابای ۲۰۰ عضوی دو بعدی

جدول ۱۱: نتایج خرابی ۲۰۰ عضوی

مقدار مساحت بهینه مقاطع (in ²)							متغیرها
HHOGA	HHO	GA	Kaveh [22]	Degertekin [24]	Adil [18]	Pouriyanezha d [19]	
0.487	11.5191	0.2451	0.1024	0.147258	0.144758	0.1471	A1
0.9224	1.4260	0.9135	0.9654	0.940434	0.943058	0.9399	A2
0.1	0.9944	0.1105	0.1391	0.100109	0.101225	0.1000	A3
0.1	4.1363	0.1243	0.1741	0.100098	0.100001	0.1	A4
1.897	3.2044	1.3610	1.9613	1.941704	1.943059	1.9399	A5
0.3884	5.9409	0.4524	0.2899	0.296783	0.296271	0.2965	A6
0.1	0.9317	0.1203	0.1294	0.100096	0.103267	0.1000	A7
3.0238	3.6499	3.5358	3.1511	3.106749	3.114355	3.1049	A8
0.1734	1.9094	0.2185	0.1251	0.100095	0.102462	0.1000	A9
4.2031	3.9358	3.8623	4.0627	4.108109	4.114354	4.1049	A10
0.4331	0.8594	0.5362	0.4131	0.403975	0.400374	0.4037	A11
0.3992	1.6149	0.3891	0.4043	0.193079	0.113995	0.1906	A12
5.5034	13.3499	5.5323	5.3357	5.434236	5.388609	5.4298	A13
0.1	2.8119	0.1350	0.2632	0.100095	0.100012	0.1006	A14
6.6031	6.3849	6.8578	6.3226	6.434203	6.388601	6.4298	A15
0.5603	1.6907	0.8587	0.7972	0.575306	0.533194	0.5739	A16
0.2531	1.4669	0.2871	0.1791	0.135485	0.394526	0.1332	A17
7.9132	5.3782	7.9687	8.1268	7.980200	7.941942	7.9744	A18
0.1982	2.2753	0.3873	0.1141	0.100157	0.100949	0.1000	A19
9.9021	6.2781	9.9240	9.1337	8.980345	8.941920	8.9744	A20
0.9624	4.2669	0.9862	0.8000	0.709002	0.834785	0.7064	A21
0.7832	9.4266	0.9677	0.2487	0.437247	0.151136	0.4339	A22
10.6972	10.1191	13.9564	11.2008	10.89123	10.94004	10.8790	A23
0.1	11.0087	0.1397	0.1136	0.100150	0.100028	0.1	A24
12.8991	14.5686	12.557	12.1703	11.89141	11.94004	11.8790	A25
1.1068	3.4915	2.9688	0.9947	1.049144	0.897270	1.0453	A26
6.8321	4.0494	7.9934	6.3377	6.610648	6.848813	6.6300	A27
10.9687	14.8294	9.9642	10.5338	10.77913	10.88481	10.7827	A28
12.9971	14.8329	15.9868	14.0917	13.87830	13.74952	13.8691	A29
25436.83	49343.06	28580/32	25771.77	25463.53	25453.77	25448.88	Best weight(lb)
25486.33	49343.11	28583/49	26699.19	25477.47	25455.67	25531.69	Average weight(lb)
17.32	20.15	4/12	410.401	24.12	2.337	42.1634	Std

مطابق با جدول ۱۱ نتیجه الگوریتم شاهین-ژنتیک برابر ۲۵۴۳۶/۸۳ lb می‌باشد. این وزن در مقایسه با کمترین وزن ۰/۰۵ درصد افزایش وزن دارد. وزن بدست آمده در این بررسی در رده اول کمترین وزن‌ها را دارد. که نشان دهنده برتری نسبی این روش در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق بهینه‌سازی سازه‌های خرابایی شکل با استفاده از الگوریتم ترکیبی شاهین هریس-ژنتیک انجام شد. الگوریتم شاهین هریس یکی از الگوریتم‌های جدید و برگرفته از رفتار طبیعی حیوانات می‌باشد. یکی از مشکلات الگوریتم شاهین هریس به دام افتادن در بهینه محلی می‌باشد. به همین دلیل در این تحقیق از بخش ادغام الگوریتم ژنتیک جهت عدم گیر کردن در بهینه محلی استفاده شد. تعداد ۴ مثال، خرابی ۱۰ عضوی دو بعدی، ۲۵ عضوی سه بعدی، ۷۲ عضوی سه بعدی و ۲۰۰ عضوی دو بعدی در این بررسی مورد توجه قرار گرفت و نتایج بدست آمد. قیدهای تنش و جابجایی برای مقید بودن مسئله مورد استفاده قرار گرفت. با انجام بهینه‌سازی خراباهای مورد نظر توسط الگوریتم شاهین هریس مشاهده شد که این الگوریتم در بهینه‌سازی این نوع سازه‌ها دچار مشکل می‌باشد. به همین دلیل با ترکیب این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک در جهت بهبود نتایج اقدام شد. نتایج بدست آمده برای الگوریتم ترکیبی ارائه شده به شرح زیر می‌باشد:

۱. بهترین جواب الگوریتم ترکیبی شاهین هریس-ژنتیک در خرابی ۱۰ عضوی (حالت ۱) ۵۰۶۰/۰۱ lb بدست آمده است. این روش باعث کاهش وزن تا ۰/۰۱۶ درصد شده است.

۲. الگوریتم ترکیبی شاهین هریس-ژنتیک در خرپای ۱۰ عضوی (حالت ۲) وزن را lb ۴۶۷۶/۰۵ ارائه کرده که کاهش وزن را ۰/۱۸ درصد نشان می‌دهد.
۳. کمترین جواب الگوریتم ترکیبی شاهین هریس-ژنتیک در خرپای ۲۵ عضوی lb ۵۴۴/۱۳ بدست آمده است. این روش باعث کاهش وزن تا ۰/۱۴ درصد شده است.
۴. بهترین جواب روش ارائه شده در خرپای ۷۲ عضوی برابر lb ۳۷۹/۱۶ می‌باشد که کاهش ۰/۱ درصد را نشان می‌دهد.
۵. کمترین وزن روش ارائه شده در خرپای ۲۰۰ عضوی lb ۲۵۴۳۶/۸۳ می‌باشد. حدود ۰/۰۵ درصد کاهش وزن را نشان می‌دهد.

با استفاده از نتایج ارائه شده می‌توان دریافت که این ترکیب باعث افزایش سرعت همگرایی و نیز بهینه‌تر شدن جواب‌های بدست آمده می‌شود.

مراجع

- [1] J. Pierezan, L. dos Santos Coelho, V. Cocco Mariani, E. Hochsteiner de Vasconcelos Segundo, and D. Prayogo, (2021) "Chaotic coyote algorithm applied to truss optimization problems," *Comput. Struct.*, vol. 242, p. 106353.
- [2] A. Mortazavi, (2021) "Size and layout optimization of truss structures with dynamic constraints using the interactive fuzzy search algorithm," *Eng. Optim.*, vol. 53, no. 3, pp. 369–391.
- [3] B. H. Sangtarash, M. R. Ghasemi, H. Ghohani Arab, and M. R. Sohrabi, (2021) "HYBRID ARTIFICIAL PHYSICS OPTIMIZATION AND BIG BANG-BIG CRUNCH ALGORITHM (HPBA) FOR SIZE OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES TT -," *IUST*, vol. 11, no. 1, pp. 55–73.
- [4] H. F. Eid, L. Garcia-Hernandez, and A. Abraham, (2021) "Spiral water cycle algorithm for solving multi-objective optimization and truss optimization problems," *Eng. Comput.*
- [5] A. Kaveh, M. Kamalinejad, K. Biabani Hamedani, and H. Arzani, (2021) "Quantum Teaching-Learning-Based Optimization algorithm for sizing optimization of skeletal structures with discrete variables," *Structures*, vol. 32, pp. 1798–1819.
- [6] A. Kaveh, R. Mahdipour Moghanni, and S. M. Javadi, (2019) "Optimum design of large steel skeletal structures using chaotic firefly optimization algorithm based on the Gaussian map," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 60, no. 3, pp. 879–894.
- [7] S. Kumar, G. G. Tejani, N. Pholdee, and S. Bureerat, (2020) "Multi-objective modified heat transfer search for truss optimization," *Eng. Comput.*
- [8] M. Grzywiński, J. Selejdak, and T. Dede, (2020) "Truss optimization with frequency constraints based on TLBO algorithm,"
- [9] I. Serpik, (2021) "Job Search Inspired Optimization of Space Steel Frames with Overall Stability Constraints," pp. 418–425.
- [10] F. K. J. Jawad, M. Mahmood, D. Wang, O. AL-Azzawi, and A. AL-JAMELY, (2021) "Heuristic dragonfly algorithm for optimal design of truss structures with discrete variables," *Structures*, vol. 29, pp. 843–862.
- [11] S. Talatahari, V. Goodarzimehr, and N. Taghizadieh, (2020) "Hybrid Teaching-Learning-Based Optimization and Harmony Search for Optimum Design of Space Trusses," *J. Optim. Ind. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 177–194.
- [12] R. Yadav and R. Ganguli, (2020), "Reliability based and robust design optimization of truss and composite plate using particle swarm optimization," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, pp. 1–11.
- [13] M. Kooshkbaghi and A. Kaveh, (2020), "Sizing Optimization of Truss Structures with Continuous Variables by Artificial Coronary Circulation System Algorithm," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 1–20.
- [14] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, (2019), "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 97, pp. 849–872.
- [15] T. Yokota, T. Taguchi, and M. Gen, (1998), "A solution method for optimal weight design problem of 10 bar truss using genetic algorithms," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 35, no. 1–2, pp. 367–372.
- [16] H. Varace and M. R. Ghasemi, (2017), "Engineering optimization based on ideal gas molecular movement algorithm," *Eng. Comput.*, vol. 33, no. 1, pp. 71–93.
- [17] A. Kaveh and T. Bakhshpoori, (2016), "A new metaheuristic for continuous structural optimization: water evaporation optimization," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 54, no. 1, pp. 23–43.

- [18] B. Adil and B. Cengiz,(2020), "Optimal design of truss structures using weighted superposition attraction algorithm," *Eng. Comput.*, vol. 36, no. 3, pp. 965–979.
- [19] E. Pouriyanezhad, H. Rahami, and S. M. Mirhosseini, (2021), "Truss optimization using eigenvectors of the covariance matrix," *Eng. Comput.*, vol. 37, no. 3, pp. 2207–2224.
- [20] S. Talatahari, M. Kheirollahi, C. Farahmandpour, and A. H. Gandomi,(2013), "A multi-stage particle swarm for optimum design of truss structures," *Neural Comput. Appl.*, vol. 23, no. 5, pp. 1297–1309.
- [21] M. Jafari, E. Salajegheh, and J. Salajegheh,(2019), "An efficient hybrid of elephant herding optimization and cultural algorithm for optimal design of trusses," *Eng. Comput.*, vol. 35, no. 3, pp. 781–801.
- [22] A. Kaveh and P. Zakian,(2018), "Improved GWO algorithm for optimal design of truss structures," *Eng. Comput.*, vol. 34, no. 4, pp. 685–707.
- [23] G. Dhiman, (2021), "ESA: a hybrid bio-inspired metaheuristic optimization approach for engineering problems," *Eng. Comput.*, vol. 37, no. 1, pp. 323–353.
- [24] S. O. Degertekin, L. Lamberti, and I. B. Ugur,(2018), "Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm," *Appl. Soft Comput.*, vol. 70, pp. 903–928.