# بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار تحت قید فرکانس و متغیرهای اندازه و شکل با الگوریتم گرگ خاکستری(GWO)

**فهمیده نادری[۱]، محمد قاسمی[۲]،**

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه غیرانتفاعی عالی هاتف، زاهدان، Pima.naderi@gmail.com
[۲]استادیار، دانشگاه ولایت ، ایرانشهر، m.ghasemi.@velayat.ac.ir

**چکیده**

در این مقاله به بهینه سازی خرپاها، شامل خرپای دو بعدی ۱۰ عضوی، ۳۷ عضوی و خرپای سه بعدی ۷۲ عضوی تحت قید فرکانس و متغیرهای اندازه و شکل با الگوریتم گرگ خاکستری GWO پرداخته شده است. در این راستا، الگوریتم گرگ خاکستری GWO بهمراه برنامه ی تحلیل ارتعاش خرپاهای دو و سه بعدی در محیط نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۹ کدنویسی گردید .در این مقاله ، یک الگوریتم جدید مبتنی بر جمعیت، با نام الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری ، معرفی شده است. سبک زندگی خاص گرگ ها و ویژگی همکاری میان آنها، انگیزه پایه‌ای برای توسعه این الگوریتم بهینه سازی بوده است. در این تحقیق به بهینه سازی خرپاهای ۲ و ۳ بعدی ۱۰، ۳۷ و ۷۲ عضوی با متغیرهای اندازه و شکل پرداخته گردید که توسط محققین بسیاری در مقالات معتبر به عنوان مسائل بنچ مارک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از بهینه سازی بیان گر مقدار وزن حاصله کمتر به روش گرگ درمورد مثال ۷۲ عضوی می باشد. در مورد مثال ۱۰ و ۳۷ عضوی نتایج حاصل از روش گرگ بسیار نزدیک و رقابتی با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین می‌باشد. در مورد خرپای ۱۰ عضوی، ۳۷ عضوی و ۷۲ عضوی روش GWO توانست به ترتیب ۸۷٪، ۲/۳ ٪ و کمتر از ۱٪ به پاسخ‌های بهتری نسبت به مقادیر گزارش شده توسط سایر محققین دست یابد. در ارتباط با سرعت همگرایی الگوریتم گرگ خاکستری آن که در هر ۳ مثال حل شده این روش توانست در تعداد آنالیز کمتری به جواب بهینه دست پیدا کند.

**واژه های کلیدی**

بهینه‌سازی، الگوریتم گرگ خاکستری، قید فرکانس، متغیر شکل و اندازه

## ۱-مقدمه

سازه‌های فضاکار یکی از رایجترین سازه‌ها برای پوشش محوطه‌های بزرگ به شمار می‌آیند. این سازه‌ها به علت داشتن ساختار اسکلتی، در عین حال که از سختی بالایی برخوردارند، وزن سازه‌ای بسیار کمی دارند. این سازه‌ها به‌خصوص در پوشش محوطه‌هایی که وجود ستون‌های میانی در آنها نامطلوب می‌باشد، کاربرد وسیعی دارند. از طرفی به علت اینکه این نوع سازه‌ها در مقیاس‌های بزرگ طراحی و ساخته می‌شوند، طراحی سنتی آنها منجر به سازه‌هایی غیر بهینه، سنگین و بسیار پرهزینه می‌شوند. به همین دلیل بهینه سازی سازه‌های فضاکار همواره یکی از حوضه‌های فعال تحقیق در زمینه بهینه‌سازی بوده است.[۱] هدف اصلی طراحان سازه، دست یابی به بهترین طرح ممکن می باشد و در طراحی، ساخت و نگهداری هر دستگاه، مهندسان باید درتصمیم‌های فنی و مدیریتی بسیار زیادی را بگیرند که هدف نهایی چنین کارهایی کاهش و حداقل کردن هزینه‌ها و یا حداکثر کردن مقاومت، ضریب اطمینان، ایمنی و سود حاصله می‌باشد.[۲] برخلاف آنچه که غالباً تصور می‌شود، بسیاری از کمیت‌ها نظیر بارگذاری و مقاومت اعضای یک سازه کمیت‌های یقین اندیشانه نبوده (یعنی کمیت‌هایی کاملا ناشناخته‌اند) که اصطلاحاً می‌توان به آن‌ها عنوان متغیرهای احتمال اندیشانه اختصاص داد. به واسطه این عدم قطعیت‌ها در پارامترهای سازه‌ای، هیچ سازه‌ای را نمی‌توان کاملا ایمن درنظر گرفت، بلکه هر سازه‌ای دارای احتمال خرابی مشخص غیرصفر می‌باشد. بنابراین در طراحی سازه‌ها باید این عدم قطعیت‌ها را منظور نموده و سازه‌ها را به گونه‌ای طراحی نماییم که احتمال خرابی آنها کاهش یابد.[۳]

جعفر کاظمی و امیدی (۱۳۹۵) در پژوهش خود به بررسی بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار با الگوریتم تلفیقی HAS-PSO پرداختند. مسأله بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های فضاکار با توجه به پرعضو بودن این سازه‌ها و پیچیدگی فضای طراحی و همچنین گسسته بودن مقادیر متغیرهای طراحی این قبیل مسائل، نیاز به الگوریتم قوی دارد که به‌صورت اکتشاف تصادفی در مسیرهایی گام بردارد که دارای کوتاه‌ترین فاصله به سمت مقدار بهینه یا همان جواب مساله باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از ترکیب روش‌های هارمونی و اجتماع ذرات به بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار تخت دولایه پرداخته می‌شود و نتایج با سایر الگوریتم‌های رایج مقایسه می‌شود.[۴]

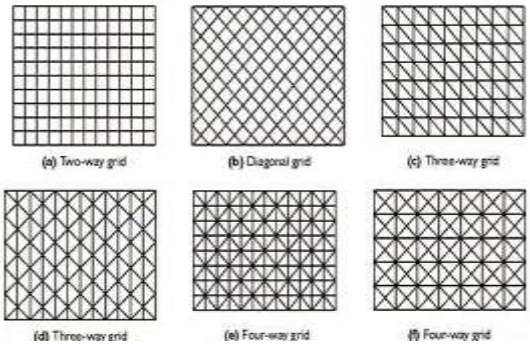
ذبیحی سامانی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهش خود به طراحی بهینه سازه‌های فضاکار با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی ارتقا یافته اجسام متصادم پرداختند. به منظور طراحی بهینه سازه‌های فضاکار، الگوریتم ECBO[1] استفاده شده است. الگوریتم ECBO، یک الگوریتم بهینه‌سازی ساده و کارآمد است که برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید و نامقید استفاده می‌شود. با استفاده از الگوریتم ECBO سه مدل سازه فضاکار طراحی بهینه شده و در نتیجه وزن حداقل با توجه به قیدهای آیین نامه به دست آورده خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ارایه شده توانایی بسیار زیادی در پیدا کردن حداقل وزن سازه‌های فضاکار دارد. در هر سه مدل الگوریتم موفق به پیدا کردن وزن بهینه شده و از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی متداول سرعت بیشتری ارایه کرده است.[۵]

در این پژوهش بهینه سازی سازه‌های فضاکار با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است که نتایج حاصله نشان می‌دهد در مقایسه با سایر روش‌ها فرکانس‌های جواب بهینه تقریباً با مقادیر مرزی قیود فرکانس یکسان به دست آمده‌اند و در مثال‌های مورد بررسی توانسته به پاسخ‌های بهتری نسبت به مقادیر گزارش شده توسط سایر محققین دست یابد.

## ۲-سازه‌های فضاکار

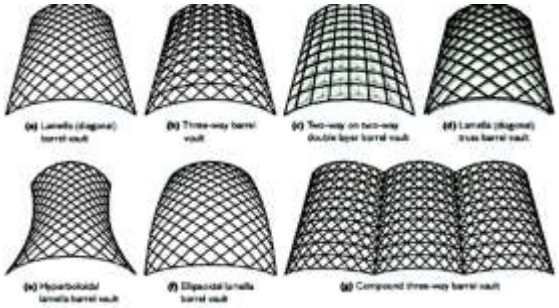
به سازه‌ای که اصولا رفتار سه‌بعدی داشته باشد، به طوری‌که به هیچ ترتیبی نتوان رفتار کلی آن را با استفاده از یک یا چند مجموعه مستقل دوبعدی تقریب زد، سازه فضاکار نامیده می‌شود. با این تعریف طیف وسیعی از سازه‌ها یعنی حتی برخی از قوس‌ها و گنبدهای آجری گذشته نیز جزو سازه‌های فضاکار محسوب می‌شوند، اما در اینجا منظور سازه‌های سه بعدی خاص هستند که معمولا دارای اعضای مستقیم با اتصالات صلب یا مفصلی می‌باشند.[۶] سازه‌های فضاکار به سه نوع تقسیم می‌شوند: ۱-شبکه‌های تخت ۲- چلیک ۳- گنبد

شبکه‌های تخت: به ترکیب یک سیستم یک یا چند وجهی با لایه‌های واحد شبکه گفته می‌شود. شبکه مسطح ترکیبی از یک دو وجهی که با تیرهای واحد متصل شده است می‌باشد. شبکه‌های تخت می‌توانند دارای یک، دو یا سه و حتی چندین لایه باشند، ولی عمدتا به‌صورت دولایه مورد استفاده قرار می‌گیرند. شبکه‌های دولایه از دو صفحه موازی که به‌وسیله عناصری به هم متصل گردیده‌اند تشکیل می‌شوند. یک نمونه استفاده از این شبکه‌ها در آشیانه هواپیماها است.[۷]

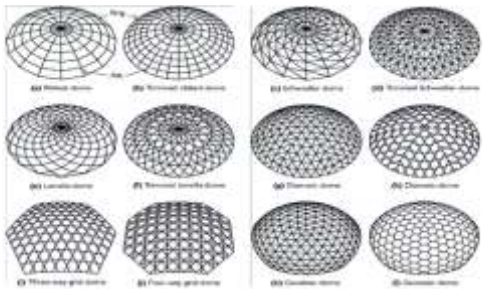


شکل ۱: نمونه‌هایی از سازه‌های فضاکار با شبکه دولایه[۶]

چلیک: به شبکه‌ای که در یک جهت دارای انحنا باشد، چلیک می‌گویند. این سازه بیشتر برای پوشش سطوح مستطیلی دالان مانند استفاده شده و بعضا فاقد ستون هستند. روی لبه‌های چلیک که به تکیه‌گاه متصل است، قرار می‌گیرند. چلیک‌ها دارای محور می‌باشند. اگر چلیک یک لایه باشد، اتصالات به شکل صلب است. این نوع سازه‌های فضاکار اغلب به شکل ترکیبی استفاده می‌شوند و تیرهای کمری نقش ترکیب کردن چلیک‌ها به یک دیگر را بازی می‌کنند.[۶]


شکل ۲: نمونه‌هایی از سازه فضاکار چلیک‌گونه[۸]

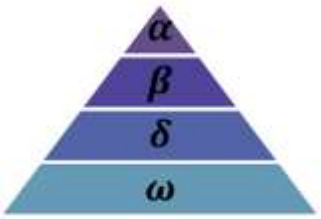
گنبد: اگر شبکه‌ای در دو جهت دارای انحنا باشد، گنبد نامیده می‌شود. شاید رویه یک گنبد بخشی از یک کره یا یک مخروط یا اتصال چندین رویه باشد. گنبدها سازه‌هایی با صلبیت بالا هستند و برای دهانه‌های بسیار بزرگ تا حدود ۲۵۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ارتفاع گنبد باید بلندتر از ۱۵ درصد قطر پایه گنبد باشد.[۶]


شکل۳: چندین نوع سازه فضاکار از نوع گنبدی شکل[۹]

[1] Enhanced Colliding Bodies Optimization

### ۳-الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (WGO)

الگوریتم گرگ خاکستری یک الگوریتم فراابتکاری است که از ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در حین شکار الهام گرفته شده است. این الگوریتم مبتنی بر جمعیت بوده، فرآیند ساده‌ای دارد و به‌سادگی قابلیت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را دارد. گرگ‌های خاکستری به عنوان شکارچیان راس در نظر گرفته می‌شوند، که در بالای هرم زنجیره غذایی هستند. گرگ‌های خاکستری ترجیح می‌دهند در یک گروه (دسته) زندگی کنند، هر گروه به طور متوسط ۵ تا ۱۲ عضو دارد. همه اعضای این گروه دارای سلسله مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیق هستند و وظایف مشخصی دارند. در هر گله از گرگ‌ها، برای شکار کردن ۴ درجه وجود دارد که مانند شکل ۴ به صورت یک ساختار هرمی مدل می‌شود.[۱۶]




شکل۴: هرم سلسله مراتب تسلط اجتماعی گله گرگ‌ها

گرگ‌های رهبر گروه Alpha نامیده می‌شوند که می‌توانند مذکر و یا مونث باشند. این گرگ‌ها بر گله تسلط دارند.

گرگ‌های Beta: کمک به گرگ‌های Alpha در فرایند تصمیم‌گیری بوده و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آن‌ها هستند.

گرگ‌هایDelta: پایین‌تر از گرگ‌هایBeta و شامل گرگ‌های پیر، شکارچی‌ها و گرگ‌های مراقبت کننده از نوزادان.

گرگ‌هایOmega: پایین‌ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب که کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند. بعد از همه غذا می‌خورند و در فرایند تصمیم‌گیری مشارکتی ندارند.

#### ۳-۱- ترتیب الگوریتم

برازندگی کلیه جواب‌ها محاسبه شده و سه جواب برتر به عنوان Alpha، Beta و Delta در پایان الگوریتم انتخاب می‌شوند.

در هر تکرار (سه جواب برتر) گرگ‌های Alpha، Beta و Delta قابلیت تخمین موقعیت شکار را داشته و این کار را در هر تکرار با استفاده از رابطه زیر انجام می‌دهند:

در هر تکرار بعد از تعیین موقعیت گرگ‌های Alpha، Beta وDelta ، آپدیت موقعیت سایر پاسخ‌ها با تبعیت از آن‌ها انجام می‌شود.

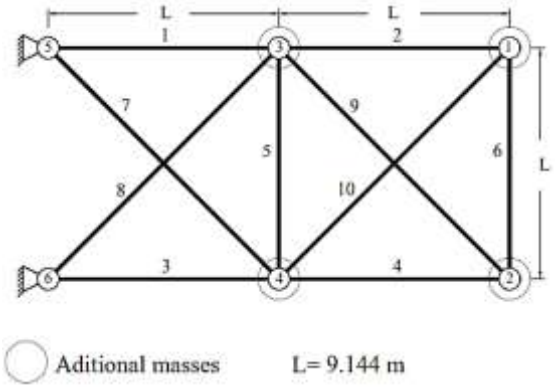
در پایان تکرارها موقعیت گرگ Alpha به عنوان نقطه بهینه معرفی می‌شود. [۱۶]

در این مقاله پس از بررسی سازه‌های فضاکار و الگوریتم گرگ خاکستری با شناخت کافی به بررسی نتایج و تفسیر انها در سه مثال می پردازیم.

### ۴-نتایج و تفسیر

#### ۴-۱- تحلیل یک خرپای ۱۰ عضوی

شکل ۵ هندسه، شمایل و جرم‌های یک خرپای ۱۰ عضوی را نشان می‌دهد. این مسأله به عنوان یک مسأله طرح نمونه با چندین قید فرکانسی بررسی می‌شود. [۱۷]




شکل ۵: هندسه و شمایل یک خرپای ۱۰ عضوی

خصوصیات مصالح، قیدهای فرکانسی و محدوده متغیرها برای این خرپای ۱۰ عضوی در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۱:مشخصات و پارامترهای طراحی خرپای ۱۰ عضوی

| پارامتر یا ویژگی | مقدار (واحد) |
|---|---|
| مدول الاستیسیته (E) | $۶.۸۹ \times ۱۰^{۱۰}\ (N.\ m^{۲})$ |
| چگالی مصالح ($\boldsymbol{\rho}$) | $۲۲۷۰\ (kg.\ m^{۳})$ |
| بار وارده به گره‌ها | $۴۵۴\ (kg)$ |
| حد پایین متغیر طراحی | $۰.۶۴۵ \times ۱۰^{-۴}\ (m^{۲})$ |
| حد بالای متغیر طراحی | $۵۰ \times ۱۰^{-۴}\ (m^{۲})$ |
| قیدهای فرکانس | $f_۱ \geq ۷, f_۲ \geq ۱۵, f_۳ \geq ۲۰\ (Hz)$ |

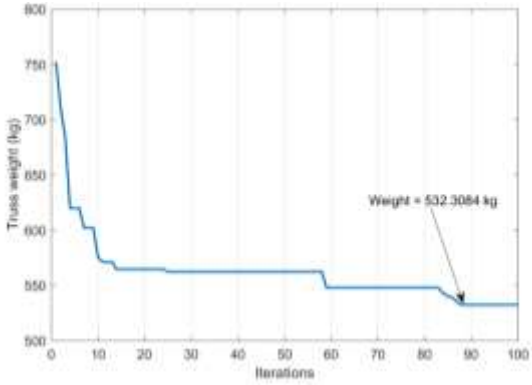
نتایج حاصله از بهینه سازی خرپای ۱۰ عضوی به روش گرگ خاکستری در مقایسه با نتایج سه روش دیگر در جدول ۲ ارائه گردیده است. بر اساس این نتایج روش گرگ خاکستری پس از ۷۸۰۰ آنالیز به پاسخ ۵۳۲.۳۰۸ کیلوگرم همگرا شده است که ملاحظه می شود نسبت به

پاسخ صداقتی و همکاران و کاوه و ذوالقدر مطلوب تر و نسبت به پاسخ ارائه شده توسط کاوه و جوادی در رتبه بعدی قرار می گیرد.

جدول ۲: پاسخ نهایی با تکنیک‌های متفاوت بهینه سازی برای خرپای ۱۰ عضوی[۱۷]

| گروه متغیرها | صداقتی و همکاران | کاوه و جوادی | کاوه و ذوالقدر | مطالعه حاضر |
|---|---|---|---|---|
| $A_1(cm^2)$ | ۳۸ .۲۴۵ | ۳۵ .۵۴ | ۳۵ .۹۴۴ | ۳۵.۵۴۴۱ |
| $A_2(cm^2)$ | ۹ .۹۱۶ | ۱۵ .۲۹۳ | ۱۵ .۵۳ | ۱۵.۱۸۵۶ |
| $A_3(cm^2)$ | ۳۸ .۶۱۹ | ۳۵ .۷۸۴ | ۳۵ .۲۸۵ | ۳۵.۳۳۰۹ |
| $A_4(cm^2)$ | ۱۸ .۲۳۲ | ۱۴ .۶۰۶ | ۱۵ .۳۸۵ | ۱۴.۹۳۷۸ |
| $A_5(cm^2)$ | ۴ .۴۱۹ | ۰ .۶۴۶ | ۰ .۶۴۸ | ۰.۶۵۵۳ |
| $A_6(cm^2)$ | ۴ .۱۹۴ | ۴ .۶۲۶ | ۴ .۵۸۳ | ۴.۶۱۹۶ |
| $A_7(cm^2)$ | ۲۰ .۰۹۷ | ۲۴ .۷۷۹ | ۲۳ .۶۱ | ۲۴.۲۱۶۰ |
| $A_8(cm^2)$ | ۲۴ .۰۹۷ | ۲۳ .۳۱ | ۲۳ .۵۹۹ | ۲۳.۶۶۷۱ |
| $A_9(cm^2)$ | ۱۳ .۸۹ | ۱۲ .۴۸۲ | ۱۳ .۱۳۵ | ۱۲.۶۵۲۳ |
| $A_{10}(cm^2)$ | ۱۱ .۴۵۱۶ | ۱۲ .۶۷۵ | ۱۲ .۳۵۷ | ۱۲.۹۲۲۴ |
| وزن ک(kg) | ۵۳۷ .۰۱ | ۵۳۲ .۱۱ | ۵۳۲ .۳۹ | ۵۳۲.۳۰۸۴ |
| تعدادآنالیزها | NA | ۲۱۰۰۰ | ۶۰۰۰ | ۷۸۰۰ |
| تعداد اجراها | NA | ۱۰ | ۲۰ | ۱۰۰ |

در شکل ۶ نمودار همگرایی وزن خرپای ۱۰ عضوی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود این نمودار حداکثر تعداد تکرار برای دست‌یابی به جواب بهینه ۱۰۰ در نظر گرفته شده است که روش گرگ خاکستری توانسته تقریباً در ۸۸ تکرار آغازین به پاسخ مطلوبی پیرامون جواب بهینه نهایی دست پیدا کند این در حالی است که پاسخ بهینه با وزن ۳۰۸۴.۵۳۲ کیلوگرم در تکرار ۸۸-ام حاصل گردید.




شکل۶: نمودار همگرایی وزن خرپای ۱۰ عضوی

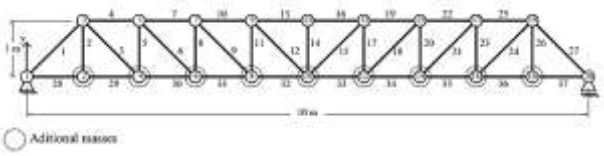
در جدول ۳ فرکانس‌های طبیعی طرح بهینه خرپای ۱۰ عضوی ارائه شده است. مطابق با اعداد مندرج در این جدول ملاحظه می‌شود اولاً، فرکانس‌های مربوط به طرح بهینه مشابه فرکانس‌های به دست آمده از سایر مطالعات است که این موضوع نشان دهنده صحت نتایج حاصله از روش گرگ خاکستری است؛ ثانیاً، در مقایسه با سایر روش‌ها فرکانس-های جواب بهینه تقریباً با مقادیر مرزی قیود فرکانس یکسان به دست آمده‌اند که نشان می‌دهد جواب بهینه حاصله یک جواب مرزی است و توانسته است قیود طراحی را فعال (active) سازد.

جدول ۳: فرکانس های طبیعی طرح بهینه خرپای ۱۰ عضوی

| شماره فرکانس | صداقتی و همکاران | کاوه و جوادی | کاوه و ذوالقدر | مطالعه حاضر |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۷ | ۹۹۹.۶ | ۷ | ۷.۰۰۰۷ |
| ۲ | ۶۲.۱۷ | ۱۷۵.۱۶ | ۱۸۷.۱۶ | ۱۶.۱۷۳۵ |
| ۳ | ۲۰ | ۹۹۹.۱۹ | ۲۰ | ۲۰.۰۰۵۸ |
| ۴ | ۲۰ | ۲۰.۰۰۶ | ۲۰.۰۲۱ | ۲۰.۰۰۸۸ |

### ۴-۲-تحلیل یک خرپای ۳۷ عضوی

شکل ۷ هندسه یک خرپای ۳۷ عضوی را نشان می‌دهد. علاوه بر مساحت اعضا، جابجایی قائم قطر بالایی گره‌ها نیز به عنوان یکی از متغیرهای طراحی لحاظ می‌شود. جهت حفظ تقارن، المان‌های این خرپای ۳۷ عضوی در گروه‌هایی دسته‌بندی می‌شوند. آن چنان که در شکل دیده می‌شود، یک جرم غیرسازه‌ای ۱۰ کیلوگرمی به هر یک از گره‌هایی آزاد اضافه می‌شود. تمامی المان‌های واقع در قطر پایینی سطح مقطع ثابتی به اندازه ۰.۰۰۴ مترمربع دارند.[۱۷]




شکل۷:هندسه خرپای ۳۷ عضوی

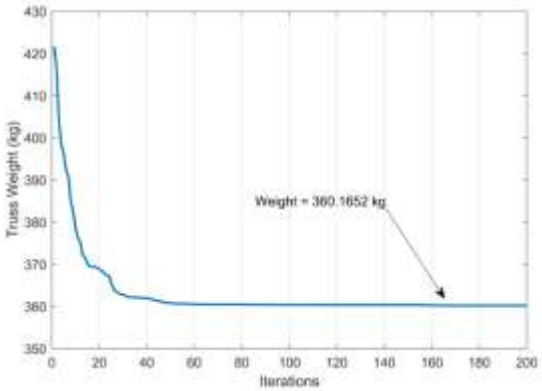
خصوصیات مصالح، قیدهای فرکانسی و محدوده متغیرها برای این خرپای ۳۷ عضوی در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

جدول۴: مشخصات و پارامترهای طراحی خرپای ۳۷ عضوی

| پارامتر یا ویژگی | مقدار (واحد) |
|---|---|
| مدول الاستیسیته (E) | $۲.۱ \times ۱۰^{۱۱}\ (N.m^{۲})$ |
| چگالی مصالح ($\boldsymbol{\rho}$) | $۷۸۰۰\ (kg.m^{۳})$ |
| بار وارده به گره‌ها | $۱۰\ (kg)$ |
| حد پایین متغیر طراحی | $۱ \times ۱۰^{-۴}\ (m^{۲})$ |
| حد بالای متغیر طراحی | $۱۰ \times ۱۰^{-۴}\ (m^{۲})$ |
| قیدهای فرکانس | $f_۱ \geq ۲۰, f_۲ \geq ۴۰, f_۳ \geq ۶۰\ (Hz)$ |

نتایج حاصله از بهینه سازی خرپای ۳۷ عضوی به روش گرگ خاکستری در مقایسه با نتایج سه روش دیگر بدین صورت است که بر اساس این نتایج روش گرگ خاکستری پس از ۱۸،۰۰۰ آنالیز به پاسخ ۱۶۵۲. ۳۶۰ کیلوگرم همگرا شده است که ملاحظه می‌شود نسبت به پاسخ وانگ و همکاران ، لینگوئن و همکاران؛ گومز و کاوه و ذوالقدر مطلوب‌تر و نسبت به پاسخ ارائه شده توسط خطیب نیا و علوی و میگوئل و فدال میگوئل در رتبه بعدی قرار می‌گیرد.

در شکل ۸ نمودار همگرایی وزن خرپای ۳۷ عضوی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود این نمودار حداکثر تعداد تکرار برای دست‌یابی به جواب بهینه ۲۰۰ در نظر گرفته شده است که روش گرگ خاکستری توانسته تقریباً در ۴۰ تکرار آغازین به پاسخ مطلوبی پیرامون جواب بهینه نهایی دست پیدا کند این در حالی است که پاسخ بهینه با وزن ۳۶۰.۱۶۵۲ کیلوگرم در تکرار ۱۶۸-ام حاصل گردید.




شکل۸: نمودار همگرایی وزن خرپای ۳۷ عضوی

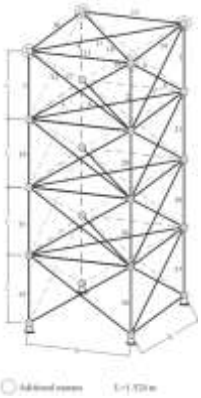
در جدول۵ فرکانس‌های طبیعی طرح بهینه خرپای ۳۷ عضوی ارائه شده است. مطابق با اعداد مندرج در این جدول ملاحظه می‌شود اولاً، فرکانس‌های مربوط به طرح بهینه مشابه فرکانس‌های به دست آمده از سایر مطالعات است که این موضوع نشان دهنده صحت نتایج حاصله از روش گرگ خاکستری است؛ ثانیاً، در مقایسه با سایر روش‌ها فرکانس-های جواب بهینه تقریباً با مقادیر مرزی قیود فرکانس یکسان به دست آمده‌اند که نشان می‌دهد جواب بهینه حاصله یک جواب مرزی است و توانسته است قیود طراحی را فعال (active) سازد.

جدول ۵: فرکانس‌های طبیعی طرح بهینه خرپای ۳۷ عضوی

| شماره فرکانس | وانگ و همکاران | لینگوئن و همکاران | خطیب‌نیا و ناصرعلوی | مطالعه حاضر |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۰.۰۸۵ | ۲۰.۰۰۱ | ۲۰.۰۲۲ | ۲۰ |
| ۲ | ۴۲.۰۷۴ | ۴۰.۰۳ | ۴۰.۰۱ | ۴۰ |
| ۳ | ۶۹.۹۳۸ | ۶۰ | ۶۰.۴۹ | ۶۰ |
| ۴ | ۷۴.۴۵۳ | ۷۳.۰۴۴ | ۷۶.۴۵۱ | ۷۷.۷۲۴ |

### ۴-۳-تحلیل یک خرپای ۷۲ عضوی

شکل ۹ هندسه هندسه یک خرپای ۷۲ عضوی را نشان می‌دهد. المان‌های این خرپا در ۶ گروه طبقه‌بندی می‌شوند تا تقارن سازه‌ای آن حفظ شود. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، ۴ جرم غیرسازه‌ای به وزن ۲۲۶۸ کیلوگرم به گره‌های ۱-۴ وارد می‌شود. این مسأله بهینه‌سازی با چندین الگوریتم متفاوت تحلیل شده است.



شکل۹:هندسه یک خرپای ۷۲ عضوی

خصوصیات مصالح، قیدهای فرکانسی و محدوده متغیرها برای این خرپای ۷۲ عضوی در جدول ۶ مشاهده می‌شود

جدول۶: مشخصات و پارامترهای طراحی خرپای ۷۲ عضوی

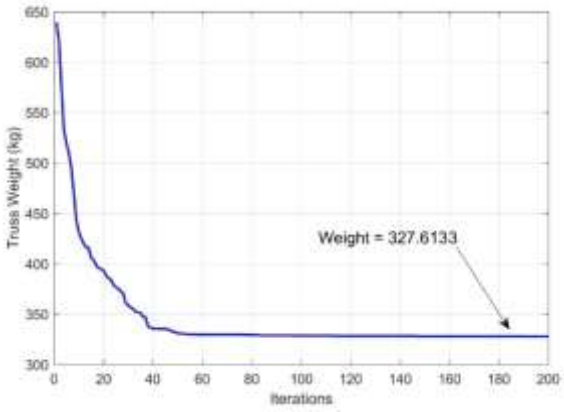
| پارامتر یا ویژگی | مقدار (واحد) |
|---|---|
| مدول الاستیسیته (E) | $۶.۸۹۵ \times ۱۰^{۱۰}\ (N.\ m^{۲})$ |
| چگالی مصالح ($\boldsymbol{\rho}$) | $۲۷۶۷.۹۹\ (kg.\ m^{۳})$ |
| بار وارده به گره‌ها | $۲۲۶۸\ (kg)$ |
| حد پایین متغیر طراحی | $۰.۶۴۵ \times ۱۰^{-۴}\ (m^{۲})$ |
| حد بالای متغیر طراحی | $۲۵ \times ۱۰^{-۴}\ (m^{۲})$ |
| قیدهای فرکانس | $f_{۱} = ۴,\ f_{۲} \geq ۶\ (Hz)$ |

نتایج حاصله از بهینه سازی خرپای ۷۲ عضوی به روش گرگ خاکستری در مقایسه با نتایج سه روش دیگر در جدول ۷ ارائه گردیده است. بر اساس این نتایج روش گرگ خاکستری پس از ۱۸،۵۰۰ آنالیز به پاسخ ۶۱۲۳. ۳۲۷ کیلوگرم همگرا شده است که ملاحظه می‌شود وزن حاصله نسبت به وزن گزارش شده توسط سایر محققین دارای اندکی بهبود می‌باشد.

جدول۷: پاسخ نهایی با تکنیک‌های متفاوت بهینه‌سازی برای خرپای ۷۲ عضوی

| گروه متغیرها | المان | میگوئل و فادل میگوئل | کاوه و ایلیچ قزان | کاوه و ایلیچ قزان | مطالعه حاضر |
|---|---|---|---|---|---|
| $A_1(cm^2)$ | ۱-۴ | ۳.۳۴۱۱ | ۳.۵۴۹۸ | ۳.۳۴۳۷ | ۲.۶۶۹۱ |
| $A_2(cm^2)$ | ۵-۱۲ | ۷.۷۵۸۷ | ۷.۸۳۵۶ | ۷.۸۶۸۸ | ۷.۹۵۵۴ |
| $A_3(cm^2)$ | ۱۳-۱۶ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰۰ |
| $A_4(cm^2)$ | ۱۷-۱۸ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰۰ |
| $A_5(cm^2)$ | ۱۹-۲۲ | ۹.۰۲۰۲ | ۸.۱۱۸۳ | ۸.۱۶۲۶ | ۷.۸۵۸۸ |
| $A_6(cm^2)$ | ۲۳-۳۰ | ۸.۲۵۶۷ | ۸.۱۳۳۸ | ۷.۹۵۰۲ | ۷.۷۱۵۴ |
| $A_7(cm^2)$ | ۳۱-۳۴ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۲ | ۰.۶۴۵۰ |
| $A_8(cm^2)$ | ۳۵-۳۶ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰۰ |
| $A_9(cm^2)$ | ۳۷-۴۰ | ۱۲.۰۴۵۰ | ۱۲.۶۲۳۱ | ۱۲.۲۶۶۸ | ۱۱.۹۴۸۶ |
| $A_{10}(cm^2)$ | ۴۱-۴۸ | ۸.۰۴۰۱ | ۸.۰۹۷۱ | ۸.۱۸۴۵ | ۷.۴۶۳۹ |
| $A_{11}(cm^2)$ | ۴۹-۵۲ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۱ | ۰.۶۴۵۰۰ |
| $A_{12}(cm^2)$ | ۵۳-۵۴ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۱ | ۱.۳۳۷۲ |
| $A_{13}(cm^2)$ | ۵۵-۵۸ | ۱۷.۳۸۰۰ | ۱۷.۳۹۰۸ | ۱۷.۹۶۳۲ | ۱۶.۴۸۴۹ |
| $A_{14}(cm^2)$ | ۵۹-۶۶ | ۸.۰۵۶۱ | ۸.۰۶۳۴ | ۸.۱۲۹۲ | ۸.۲۶۷۰ |
| $A_{15}(cm^2)$ | ۶۷-۷۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰۰ |
| $A_{16}(cm^2)$ | ۷۱-۷۲ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ | ۰.۶۴۵۰ |
| وزن کل (kg) | | ۳۲۷.۶۹۱۰ | ۳۲۷.۶۵۳۰ | ۳۲۷.۷۷۰۰ | ۳۲۷.۶۱۳۳ |
| تعداد آنالیزها | | ۱۰۰۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | ۱۸۵۰۰ |
| تعداد اجراها | | ۵ | NA* | ۳۰ | ۲۰۰ |

در شکل ۱۰ نمودار همگرایی وزن خرپای ۷۲ عضوی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود این نمودار حداکثر تعداد تکرار برای دست‌یابی به جواب بهینه ۲۰۰ در نظر گرفته شده است که روش گرگ خاکستری توانسته تقریباً در ۵۰ تکرار آغازین به پاسخ مطلوبی پیرامون جواب بهینه نهایی دست پیدا کند این در حالی است که پاسخ بهینه با وزن ۳۲۷.۶۱۳۳ کیلوگرم در تکرار ۱۸۵-ام حاصل گردید.




شکل ۱۰: نمودار همگرایی وزن خرپای ۷۲ عضوی

در جدول ۸ فرکانس‌های طبیعی طرح بهینه خرپای ۷۲ عضوی ارائه شده است. مطابق با اعداد مندرج در این جدول ملاحظه می‌شود اولاً، فرکانس‌های مربوط به طرح بهینه مشابه فرکانس‌های به دست آمده از سایر مطالعات است که این موضوع نشان دهنده صحت نتایج حاصله از روش گرگ خاکستری است؛ ثانیاً، در مقایسه با سایر روش‌ها فرکانس-های جواب بهینه تقریباً با مقادیر مرزی قیود فرکانس یکسان به دست آمده‌اند که نشان می‌دهد جواب بهینه حاصله یک جواب مرزی است و توانسته است قیود طراحی را فعال (active) سازد.

جدول۸: فرکانس های طبیعی طرح بهینه خرپای ۷۲ عضوی

| شماره فرکانس | میگوئل و فادل میگوئل | کاوه و ایلیچ قزان | کاوه و ایلیچ قزان | مطالعه حاضر |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳.۹۹۸۹ |
| ۲ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳.۹۹۸۹ |
| ۳ | ۶ | ۶ | ۶ | ۵.۹۹۸۹ |
| ۴ | ۶.۲۴۶۸ | ۶.۲۴۶۰ | ۶.۲۳۰۰ | ۶.۲۴۶۰ |

## ۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری استفاده شده است.پس از حل ۳ مثال سازه‌ای شامل ۲ خرپای صفحه‌ای دو بعدی و یک خرپای ۳ بعدی شامل متغیرهای طراحی اندازه وشکل نتایج زیر حاصل گردید.

۱-در واقع بهینه سازی خرپاهای فوق در محیط نرم افزار متلب صورت گرفت. نرم افزار متلب شامل کتابخانه‌ی بسیار جامعی از دستورات پرکاربرد به ویژه در حل مسائل مهندسی می باشد. رابط کاربری نرم افزار متلب بسیار ساده و هوشمند است به ویژه در مورد رسم نمودار و کار با ماتریس ها.

۲-کدهای آنالیز سازه‌ای در دو دسته‌ی محاسبه ی ویژگی های پایه ی سازه و محاسبه‌ی فرکانس سازه در قالب تحلیل دینامیکی انجام گرفت. این کدها از لحاظ دقت و سرعت محاسبه نتایج بسیار مطلوب ارزیابی می شود به طوری که توابع کتابخانه‌ای نرم افزار متلب در این افزایش کارایی بسیار مؤثر بوده است.

- خرپای ۱۰ عضوی یک خرپای گره‌ای صفحه ای که در محل ۴ گره آن جرم متمرکز در نظر گرفته شده است.

- این خرپا برای متغیرهای اندازه مربوط به سطح مقطع عرضی میله ها بررسی گردیده است. خرپای ۳۷عضوی یک خرپا به شکل پل با طول دهانه ۱۰متر که در محل ۹ گره آن جرم متمرکز در نظر گرفته شده است و با در نظر گرفتن متغیرهای شکل و اندازه با روش الگوریتم گرگ خاکستری حل گردید.

- در مثال ۳ و به عنوان آخرین مثال ۷۲ عضوی که به صورت یک دکل انتقال نیرو با ۴ جرم متمرکز در بخش بالایی آن و با ۱۶ متغیر طراحی مربوط به سطح مقطع میله های آن بررسی گردید.

- تمامی این مثال ها چندین سال است توسط محققین در مقالات معتبر به عنوان مسائل بنچ مارک مورد بررسی قرار گرفته اند.

۳- در مورد خرپای ۱۰ عضوی، ۳۷ عضوی و ۷۲ عضوی روش GWO توانست به ترتیب ۸۷ ٪، ۳. ۲ ٪ و کمتر از ۱٪ به پاسخ های بهتری نسبت به مقادیر گزارش شده توسط سایر محققین دست یابد.

**۶-مراجع و منابع**


[۱] حدیدی علی, & چیت ساز سیمین. طراحی بهینه سازه های فضاکار مبتنی بر نظریه قابلیت اطمینان با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

[۲] صادقی, & ارژنگ. (۲۰۱۵). بهینه سازی شبکه‌های تخت دولایه فضاکار با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *آنالیز سازه-زلزله*, *۱۲*(۱), ۵۳-۵۸.

[۳] قاسمی, حسینی, & محمدرضا مستخدمین. (۲۰۰۸). بهینه سازی سازه های فضاکار بادرنظرگرفتن احتمال خرابی اعضاء و گره ها به کمک الگوریتم وراثتی اصلاح شده. *نشریه دانشکده فنی*, ۴۲ (۴).

[۴] مهیار جعفر کاظمی، حسین امیدی، *"بهینه سازی سازه های فضاکار با الگوریتم تلفیقی"*، سومین کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی، تهران، ۱۳۹۵

[۵] ذبیحی سامانی وهمکاران، *"طراحی بهینه سازه های فضاکار با استفاده از الگوریتم بهینه یابی ارتقاء یافته اجسام متصادم"*، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز، ۱۳۹۷

[۶] تخمه‌چی، م.ا.،۱۳۹۳، آشنایی با سازه‌های فضاکار، اولین همایش ملی معماری، عمران و محیط زیست شهری، همدان.

[۷] گلابچی، محمود (۱۳۹۰). سازه‌های فضاکار، انتشارات دانشگاه تهران

[۸] Nooshin, H," Course on Space Strucures, Kerman, Iran, May ۲۰۰۳.

[۹] اسیمی, هیراد, جمالی, علی, & نریمان زاده. (۲۰۱۷). بهینه‌سازی اندازه و توپولوژی سازه‌های خرپایی فضاکار با استفاده از الگوریتم ترکیبی برنامه‌ریزی ژنتیکی و نلدر-مید. *مهندسی مکانیک مدرس*, *۱۷*(۶), ۳۲-۴۰.

[۱۰] Dorigo, M., Optimization, learning and natural algorithms. Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy, ۱۹۹۲.

[۱۱] Eberhart, R.C. and J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. in Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science. ۱۹۹۵. New York, NY.

[۱۲] Abbass, H.A., ۲۰۰۱, May. MBO: Marriage in honey bees optimization-A haplometrosis polygynous swarming approach. In *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)* (Vol. ۱, pp. ۲۰۷-۲۱٤). IEEE

[۱۳] Passino, K.M., ۲۰۰۲. Biomimicry of bacterial foraging for distributed

[۱٤] optimization and control. *IEEE control systems magazine*, *22*(۳), pp.۵۲-٦۷.

[۱۵] Chu, S.-C., P.-W. Tsai, and J.-S. Pan, Cat swarm optimization, in PRICAI ۲۰۰٦: Trends in Artificial Intelligence. ۲۰۰٦, Springer. p. ۸۵٤-۸۵۸.

[۱٦] کاوه، ع.، ثروتی، ه.، ۱۳۷۹، شبکه‌های عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی سازه‌ها، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول.

[۱۷] M. Farshchin, C.V. Camp, M. Maniat, "Multi-class teaching–learning-based optimization for truss design with frequency constraints" , Department of Civil Engineering, The University of Memphis, Memphis, TN ۳۸۱۵۲, United States. ۲۰۱٦.


تا حد امکان دو ستون موجود در صفحه آخر را تراز کنید. ↑