



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Applied Optimization of Steel Moment Frames Using Metaheuristic Algorithms

Ruholamin Chatrazar<sup>1</sup>, Hamed Ghohani Arab<sup>2\*</sup>, Mahmoud Miri<sup>3</sup>

1- Master's student, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran  
2- Associate Professor, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran  
3- Professor, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

### ABSTRACT

In recent years, metaheuristic optimization methods have attracted significant attention from researchers due to their outstanding capabilities in solving various problems, particularly in the optimization of steel frames. However, most previous studies have focused solely on evaluating the performance of these methods and their theoretical aspects, while their practical applications have been less explored. This study aims to investigate and apply the Grey Wolf Optimizer (GWO) and Whale Optimization Algorithm (WOA) in the optimization of steel structures to present a practical method for design engineers. In this research, these algorithms were automated and developed using programming in the MATLAB environment to achieve the optimal design of steel frames, considering the design constraints of the AISC-LRFD code. This method, with the help of the application programming interface of the ETABS2016 software, enables direct interaction with the program's inputs and outputs. Through this approach, frame optimization is performed while considering practical and computational constraints. This research attempts to transform metaheuristic algorithms into practical tools for structural engineers to design more economical structures that comply with design code requirements and minimize ongoing costs. The functionality of the proposed method has been evaluated on two- and four-story steel frames as well as two three-dimensional two- and three-story frames while adhering to design principles. The final results indicate that both algorithms can provide an effective computational method for the optimal design of steel frames. The findings of this study provide an efficient tool for reducing costs and accelerating the design process of steel structures.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 16 January 2025

Revise Date: 01 May 2025

Accept Date: 13 May 2025

### Keywords:

Metaheuristic Structural Optimization, Section Optimization, Discrete Optimization, Grey Wolf Optimizer, Whale Optimization Algorithm, Steel Moment Frames.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.497029.3615

\*Corresponding author: Hamed Ghohani Arab  
Email address: ghohani@eng.usb.ac.ir

## بهینه‌سازی کاربردی قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

روح الامین چترآذر<sup>۱</sup>، حامد قوهانی عرب<sup>۲\*</sup>، محمود میری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر، روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری به دلیل قابلیت‌های برجسته خود در حل مسائل متنوع، به ویژه در بهینه‌سازی قاب‌های فولادی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. با این حال، اکثر مطالعات پیشین تنها بر ارزیابی عملکرد این روش‌ها و جنبه‌های نظری آن‌ها تمرکز داشته‌اند، در حالی که کاربردهای عملی این موارد کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه بررسی و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و نهنگ در بهینه‌سازی سازه‌های فولادی به منظور ارائه روشی کاربردی برای مهندسان طراح است. در این پژوهش، این الگوریتم‌ها به صورت خودکار و با استفاده از برنامه نویسی در محیط *MATLAB* برای دستیابی به طراحی بهینه قاب‌های فولادی با رعایت قیود طراحی آیین نامی *AISC-LRFD* توسعه داده شده‌اند. این روش با کمک رابط برنامه‌نویسی نرم‌افزار *ETABS2016* امکان تعامل مستقیم با ورودی‌ها و خروجی‌های برنامه را فراهم کرده و از این طریق، بهینه‌سازی قاب را با لحاظ نمودن محدودیت‌های اجرایی و محاسباتی انجام می‌دهد. تحقیق حاضر می‌کوشد که الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان ابزاری کاربردی برای مهندسان سازه تبدیل شود تا با در نظر گرفتن الزامات آیین نامه‌های طراحی، سازه‌های اقتصادی‌تر ساخته و هزینه‌های جاری به کمترین میزان خود برسند. کارکرد طرح پیشنهادی بر روی دو قاب فولادی دو و چهار طبقه و دو قاب سه بعدی دو طبقه و سه طبقه با رعایت نکات طراحی، ارزیابی شده است. نتایج نهایی از این طریق نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم قابلیت ارائه یک روش محاسباتی موثر برای طراحی بهینه قاب‌های فولادی را دارند. یافته‌های این مطالعه، ابزاری کارآمد برای کاهش وزن و تسریع در فرآیند طراحی سازه‌های فولادی فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی فراابتکاری سازه، بهینه‌سازی مقاطع، بهینه‌سازی گسسته، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم نهنگ، قاب خمشی فولادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.497029.3615	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.497029.3615	۱۴۰۴/۱۱/۳۰	۱۴۰۴/۰۲/۲۳	۱۴۰۴/۰۲/۲۳	۱۴۰۴/۰۲/۱۱	۱۴۰۳/۱۰/۲۷
حامد قوهانی عرب ghohani@eng.usb.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

بهینه‌سازی به معنای رسیدن به بهترین نتیجه‌ی ممکن در شرایط موجود است یا به عبارتی می‌توان فرآیند بهینه‌سازی را به عنوان یافتن کمترین و بیشترین مقدار یک تابع تعریف نمود [۱].

روش‌های بهینه‌سازی در طراحی سازه‌ها به دو گروه اصلی روش‌های کلاسیک و روش‌های فراابتکاری تقسیم می‌شوند. روش‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی‌های خطی و غیرخطی به اطلاعات زیادی از گرادیان نیاز دارند و نتایج آن‌ها تحت تاثیر نقاط اولیه‌ای است که برای شروع محاسبات انتخاب می‌شوند و از طرفی هر چه سازه پیچیده‌تر باشد، محاسبات بیشتری را نیز نیاز دارند و الزاما به بهترین پاسخ ممکن نمی‌رسند. از طرفی معمولا مسائل مربوط به بهینه‌سازی سازه‌ها دارای پیچیدگی‌های زیادی هستند که روش‌های کلاسیک توان حل این مسائل را ندارند. در مقابل، روش‌های فراابتکاری نیازی به داده‌های گرادیان ندارند و در یافتن پاسخ بهینه‌ی کلی، توانایی بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک دارند. به همین علت، در دو دهه‌ی اخیر محققان توجه زیادی به این روش‌ها داشته‌اند [۲].

الگوریتم ژنتیک توسط برخی از پژوهشگران مانند راجیو و کریش نامورتی [۳]، پزشک و همکاران [۴] و کاوه و رحامی [۵] برای مسائل بهینه‌سازی قاب‌های فولادی استفاده شده است. سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مانند کلونی مورچگان بهبودیافته [۲]، رقابت استعماری [۶] و فروپاشی بیگ بنگ [۷] توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

طلاطاهری و همکاران [۸] ترکیب الگوریتم استراتژی عقاب با تکامل تفاضلی را پیشنهاد دادند که با رابط Sap2000 و نرم‌افزار ریاضی MATLAB برای یافتن طراحی بهینه‌ی قاب‌های سازه‌ای پیاده‌سازی شد. الگوریتم رقابت استعماری پیشرفته نیز برای طراحی بهینه سازه‌های اسکلتی، توسط ماهری و تاله‌زاده [۹] در سال ۲۰۱۷ پیشنهاد شد. خواجه و همکاران یک روش ترکیبی که شامل الگوریتم ازدحام ذرات و روش جستجوی شبکه‌ای بود را به منظور کاهش زمان محاسبات توسعه دادند [۱۰]. همچنین یک فرآیند بهینه‌سازی از طریق الگوریتم‌های ژنتیک با استفاده از رابط برنامه‌نویسی باز MATLAB-SAP2000 (OAPI) برای طراحی بهینه قاب‌های فضایی با اتصالات نیمه‌صلب در مقاله آرتار و دالوگلو [۱۱] ارائه شد. میرجلیلی و همکاران [۱۲] نیز در سال ۲۰۱۴ الگوریتم گرگ خاکستری و در سال ۲۰۱۶ الگوریتم نهنگ [۱۳] را معرفی کردند. این الگوریتم‌ها به علت سادگی در پیاده‌سازی و توانایی بالا در بهینه‌سازی در مسائل مختلف مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. کاوه و همکاران در سال ۲۰۱۹، طراحی بهینه‌ی قاب‌های سقف منحنی فولادی، با استفاده از الگوریتم سیستم ذرات ارتعاشی پیشرفته را معرفی کردند و اثربخشی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. در سال ۲۰۲۱، کاوه و همکاران از عملگر Modified Dolphin Monitoring (MDM) برای ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان سازه‌های فولادی استفاده کرده و به مقایسه آن با روش شبیه‌سازی مونت کارلو پرداختند [۱۵]. حاجی مزدارانی و همکاران در سال ۲۰۲۳، یک روش بهینه‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان برای تعیین چیدمان بهینه مهاربندهای هم‌محور در قاب‌های فولادی سه‌بعدی با هدف کاهش وزن سازه ارائه دادند [۱۶]. وفایی مطلق و همکاران در سال ۲۰۲۴، بهینه‌سازی وزن قاب‌های مهاربندی هم‌گرای فولادی را با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری سیستم ذرات ارتعاشی بهبودیافته و نهنگ بهبودیافته بر اساس روش طراحی مبتنی بر عملکرد مورد بررسی قرار دادند. [۱۷]. در سال ۲۰۲۴ حسینی و همکاران، الگوریتم سیستم ارتعاش ذرات پیشرفته و الگوریتم گرگ خاکستری را برای بهینه‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان در قاب‌های فولادی با هدف کاهش وزن سازه، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و رعایت قیود مقاومت، تغییر مکان جانبی و قابلیت اطمینان ارزیابی کردند [۱۸].

در دهه‌های اخیر روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری به دلیل توانایی قابل توجه در حل مسائل مختلف مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۱۹، ۲۰]. با این حال، بسیاری از تحقیقات گذشته تنها به بررسی عملکرد این روش‌ها و جنبه‌های تئوری برای پژوهشگران محدود شده و در زمینه‌ی کاربرد عملی آن‌ها در سازه‌های متداول و با هدف پاسخ مناسب به صنعت ساختمان کمتر پرداخته شده است. سازه‌ها باید دارای سختی و پایداری مطابق با معیارهای طراحی قید شده در آیین‌نامه‌ها باشند که رعایت این معیارها آسان نیست. از طرفی برای هر سازه معمولا تعداد نامحدودی پاسخ قابل قبول وجود دارد که الزاما شرایط اقتصادی و اجرایی پروژه را فراهم نمی‌کند. در نتیجه نیازمند یک پروسه‌ی

آزمایش و خطا برای رسیدن به جواب بهینه می‌باشد که زمان محاسباتی طولانی را در پی دارد و در این صورت یافتن طراحی بهینه برای هر پروژه فرآیندی بسیار مشکل خواهد بود.

هدف این مقاله ارائه‌ی راه حلی مناسب جهت بهینه‌سازی قاب‌های فولادی با استفاده از ابزارهای تحلیل سازه‌ای مورد اعتماد و تکنیک‌های بهینه‌سازی فراابتکاری است به گونه‌ای که قابل استفاده برای طراحان باشد.

این پژوهش به معرفی روشی جهت طراحی قاب‌های فولادی خمشی از طریق اتصال نرم‌افزارهای محاسباتی MATLAB و ETABS 2016 می‌پردازد که امکان استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی را فراهم می‌کند. ارتباط بین نرم‌افزارهای ETABS و MATLAB از طریق API رسمی ارائه‌شده توسط شرکت سازنده‌ی ETABS برقرار می‌شود که امکان ارسال و دریافت اطلاعات میان دو نرم‌افزار را فراهم می‌آورد. در ابتدا، MATLAB از طریق API به نرم‌افزار ETABS متصل شده و اطلاعات اولیه مانند مشخصات هندسی، مقاطع و تنظیمات تحلیل را به ETABS ارسال می‌کند. سپس، ETABS مدل سازه‌ای ایجاد شده را تحلیل و طراحی می‌کند. نتایج تحلیل شامل تنش‌ها، تغییر مکان‌ها و ظرفیت مقاطع به MATLAB باز می‌گردند. MATLAB با استفاده از این داده‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی را اجرا کرده و مقاطع سازه را اصلاح می‌کند. کنترل‌های طراحی مانند ظرفیت مقاطع و دررفت‌ها بررسی می‌شوند و در صورت لزوم، مقاطع جدید جایگزین می‌شوند. مقاطع جدید مجدداً به ETABS ارسال می‌شوند و فرآیند تحلیل و طراحی دوباره انجام می‌شود. این روند تا رسیدن به یک طرح بهینه و برآورده شدن تمامی قیود آیین‌نامه‌ای ادامه می‌یابد.

در این روش، قاب‌های خمشی فولادی که کاملاً منطبق با آیین‌نامه‌ی [۲۱] AISC-LRFD360-10 طراحی می‌شوند، در نرم‌افزار ETABS 2016 مدل‌سازی شده و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و نهنگ، فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌گردد. از آنجایی که نرم‌افزار ETABS مورد استفاده‌ی بخش بزرگی از مهندسان طراح کشور می‌باشد و همین‌طور برنامه‌ایست که استفاده از آن بسیار آسان می‌باشد و محدودیت‌های اعمال شده به سازه‌های فولادی مانند پایداری، تنش، جابجایی‌ها و کماتش فشاری را مطابق با آیین‌نامه‌های طراحی مختلف لحاظ می‌کند، مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار ETABS، قابلیت Auto Select List به منظور تعیین مقطع بهینه بر اساس نسبت تقاضا به ظرفیت طراحی شده است. با این حال، این روش معمولاً قیود سازه‌ای اساسی، از جمله محدودیت دررفت، را در فرآیند انتخاب مقاطع لحاظ نمی‌کند. در نتیجه، مقطعی که صرفاً بر مبنای معیار مقاومت انتخاب می‌شوند، ممکن است دررفت سازه‌ای نامطلوبی داشته باشند و از حدود مجاز تعیین‌شده در آیین‌نامه فراتر روند. در پژوهش حاضر، علاوه بر تأمین الزامات مقاومتی اعضا، کنترل دررفت نیز به عنوان یکی از معیارهای طراحی در نظر گرفته شده است.

نتایج این رویکرد، علاوه بر ارائه راهکاری جهت تسریع روند طراحی، نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند در بهینه‌سازی سازه‌های فولادی متداول، موثر واقع شوند و هزینه‌های کلی را به شکل مطلوبی کاهش دهند.

## ۲- محدودیت‌های بهینه‌سازی قاب

هدف طراحی بهینه‌ی سازه‌ها کاهش اندازه‌ی اعضای سازه با در نظر گرفتن باربری آن‌ها به منظور کاهش وزن و مصالح لازم برای ساخت و در نتیجه کاهش هزینه‌های کلی می‌باشد [۲۲].

در اکثر مطالعات طراحی بهینه‌ی سازه‌های قاب، تابع هدف به صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\gamma_i A)_i \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $l$  طول المان،  $A$  سطح مقطع عضو و  $\gamma$  وزن مخصوص فولاد و  $f(x)$  تابع هدف و همچنین  $n$  بیانگر تعداد اعضا و  $i$  عضو فعلی قاب می‌باشد.

جهت طراحی و کنترل ظرفیت باربری اعضا از آیین‌نامه‌ی [۲۱] AISC-LRFD استفاده شده است.

قیدهای مسئله‌ی بهینه‌سازی طراحی قاب به ترتیب در روابط ۲ و ۳، قید کنترل ظرفیت باربری ( $V_i^\sigma$ ) در المان‌ها و قید تغییر مکان نسبی طبقات (دریفت) می‌باشند.

$$V_i^\sigma = \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_a^i} \right| - 1 \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\frac{\delta_{max}}{\bar{\delta}} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

$\sigma_i$  نیروی داخلی در عضو  $i$  ام،  $\sigma_a^i$  مقدار ظرفیت باربری در عضو  $i$  ام،  $\delta_{max}$  جابجایی نسبی هر طبقه و  $\bar{\delta}$  جابجایی نسبی مجاز می‌باشد.

محدودیت‌های طراحی ( $v_i^I$ ) اعضای قاب، براساس معادلات ۴ و ۵ و ۶ می‌باشد:

$$v_i^I = \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \quad \text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 \quad (4)$$

$$v_i^I = \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \quad \text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \quad (5)$$

در رابطه ۴ و ۵،  $\phi_b$  ضریب کاهش مقاومت برای خمش به مقدار  $0.9$ ،  $\phi_c$  ضریب کاهش مقاومت در فشار برابر با  $0.9$  و در کشش برابر با  $0.85$ ،  $P_u$  نیروی فشاری موجود،  $p_n$  مقاومت کششی یا فشاری اسمی،  $M_{uy}$  گشتاور خمشی موجود (تشدید یافته) حول محور  $y$  (محور ضعیف)،  $M_{ny}$  مقاومت خمشی اسمی حول محور  $y$  (محور ضعیف)،  $M_{ux}$  گشتاور خمشی موجود (تشدید یافته) حول محور  $x$  (محور قوی) و  $M_{nx}$  مقاومت خمشی اسمی حول محور  $x$  (محور قوی) می‌باشد.

برای ظرفیت برشی محدودیت رابطه ۶ اعمال شده است:

$$\frac{V_u}{\phi_v V_n} \leq 1 \quad (6)$$

در رابطه ۶،  $V_u$  نیروی برشی موجود و  $V_n$  مقاومت برشی اسمی هر عضو و  $\phi_v$  نیز ضریب کاهش مقاومت در برش برابر با ۱ می‌باشد. پایداری اعضای قاب نیز با توجه به روابط ۷ و ۸ کنترل شده‌اند:

$$\gamma_m = \frac{K l_m}{r_m} \leq 200 \quad \text{برای اعضای فشاری} \quad (7)$$

$$\gamma_m = \frac{l_m}{r_m} \leq 300 \quad \text{برای اعضای کششی} \quad (8)$$

در رابطه ۷ و ۸،  $l_m$  طول بدون مهار عضو و  $r_m$  شعاع ژیراسیون عضو و  $K$  ضریب طول موثر هستند.

سازه‌های قاب با محدودیت جابجایی کنترل می‌شوند، این مقدار با توجه به دستورات آیین نامه ۲۸۰۰ [۲۳] تعیین می‌گردد.

برای محاسبه‌ی تنش‌های فشاری و اولر، ضریب طول موثر ( $K$ ) مورد نیاز است. مقدار  $K$  برای تیرها برابر یک بوده و برای ستون‌ها از رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_A G_B + 4G_A G_B + 7.5}{G_A + G_B + 7.5}} \geq 1 \quad (9)$$

در رابطه ۹،  $G_A$  و  $G_B$  نشان دهنده‌ی شرایط مرزی دو انتهای عضو فشاری است [۲۴].

### ۳- الگوریتم گرگ خاکستری

شکل کلی مسئله بهینه‌سازی در رابطه‌ی ۱۰ نشان داده شده است:

Minimize  $f(x)$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} h_i(x) = 0 & i = 1, 2, \dots, m_1 \\ g_j(x) < 0 & j = 1, 2, \dots, m_2 \\ L_n < x_n < U_n & n = 1, 2, \dots, m_3 \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه‌ی ۱۰،  $x$  بیانگر یک بردار از مرتبه‌ی  $n$  می‌باشد، که نشان‌دهنده‌ی متغیرهای طراحی است.  $g$  و  $h$  به ترتیب معرف قیود نامساوی و مساوی هستند.  $L$  و  $U$  نشان‌دهنده‌ی کرانه‌های پایین و بالای متغیرهای طراحی می‌باشند.  $m_1$ ،  $m_2$  و  $m_3$  به ترتیب تعداد قیود مساوی، قیود نامساوی و تعداد ابعاد فضای جستجو را مشخص می‌کنند. فضایی که تمامی قیود در آن صدق می‌کنند را فضای تصمیم می‌نامند که تعداد متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند [۲۵].

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)، در سال ۲۰۱۴ توسط آقای میرجلیلی و همکاران ارائه گردید. این الگوریتم یک روش فراابتکاری می‌باشد که از نحوه‌ی شکار گرگ خاکستری الهام گرفته شده است و در دسته‌ی الگوریتم‌های هوش جمعی و بر مبنای جمعیت قرار دارد [۱۲].

این الگوریتم براساس سلسله مراتب اجتماعی و نحوه‌ی شکار دسته جمعی گرگ‌های خاکستری، توسعه و به صورت ریاضی مدل‌سازی شده است. در الگوریتم گرگ خاکستری، طعمه به بهترین راه حل شناخته شده تا لحظه‌ی فعلی اشاره دارد که عوامل جستجو برای بهبود موقعیت خود از آن تبعیت می‌کنند. شکار بهترین پاسخ ممکن برای مسئله است که الگوریتم به دنبال یافتن آن می‌باشد. برای مدل‌سازی سلسله مراتب اجتماعی در الگوریتم گرگ خاکستری، بهترین موقعیت یا جواب را  $\alpha$  و بهترین جواب دوم را  $\beta$ ، بهترین جواب سوم را  $\delta$  و سایر جواب‌ها امگا نامیده می‌شوند. برای محاصره‌ی طعمه معادلات ۱۱ الی ۱۴ پیشنهاد شده است:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (11)$$

$$\vec{D}(t) = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (12)$$

$$\vec{A} = \vec{a}(2 \cdot \vec{r}_1 - 1) \quad (13)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (14)$$

در روابط ۱۱ الی ۱۴،  $\vec{X}(t)$  موقعیت گرگ خاکستری در تکرار  $t$  ام،  $\vec{X}_p(t)$  موقعیت طعمه (بهترین جواب شناخته شده تا آن لحظه) در تکرار  $t$  ام و  $\vec{D}(t)$  فاصله‌ی بین موقعیت گرگ خاکستری با موقعیت طعمه در تکرار  $t$  ام است. همچنین مولفه‌ی  $\vec{a}$  به صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد و مقادیر  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی بین صفر و یک می‌باشند. در الگوریتم گرگ خاکستری دو پارامتر  $\vec{C}$  و  $\vec{A}$  برای کنترل فرآیندهای اکتشاف و بهره‌برداری وجود دارند. در فرآیند جستجوی بهترین پاسخ، موقعیت واقعی شکار نامعلوم می‌باشد؛ بنابراین، بهترین موقعیت به دست آمده تا آن لحظه به عنوان موقعیت فرضی طعمه در نظر گرفته می‌شود، این موقعیت معمولاً مکان گرگ  $\alpha$  یعنی بهترین

جواب فعلی است. سپس، بهترین جواب دوم و سوم که متعلق به گرگ‌های بتا و دلتا هستند، نیز به عنوان موقعیت‌های احتمالی طعمه در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین سه تا از بهترین جواب‌های موجود، که به دست آمده‌اند، ذخیره می‌گردند و سایر عوامل جستجو (گرگ‌های امگا) ملزم هستند موقعیت خود با توجه به موقعیت‌های آلفا، بتا، دلتا بروزرسانی کنند. روابط ۱۵ الی ۱۸ بیانگر این موارد می‌باشند:

$$\vec{X}_1(t) = \vec{X}_\alpha(t) - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha(t) \quad \text{و} \quad \vec{D}_\alpha(t) = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t)| \quad (15)$$

$$\vec{X}_2(t) = \vec{X}_\beta(t) - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta(t) \quad \text{و} \quad \vec{D}_\beta(t) = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t)| \quad (16)$$

$$\vec{X}_3(t) = \vec{X}_\delta(t) - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta(t) \quad \text{و} \quad \vec{D}_\delta(t) = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t)| \quad (17)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1(t) + \vec{X}_2(t) + \vec{X}_3(t)}{3} \quad (18)$$

در بهینه‌سازی دو فرآیند متضاد اکتشاف و بهره‌برداری وجود دارد [۲۶]. در فرآیند اکتشاف هدف این است که با ایجاد تغییرات ناگهانی در پاسخ‌ها، بخش‌های جدیدی از فضای جستجو را پیدا کند تا از قرار گرفتن پاسخ‌های احتمالی در بهینه محلی جلوگیری شود. فرآیند بهره‌برداری در جهت بهبود راه‌حل‌های موجود با بررسی دقیق‌تر همسایگی آن‌ها و اعمال تغییرات تدریجی برای رسیدن به پاسخ بهینه انجام می‌شود. با توجه به این نکته که اکتشاف و بهره‌برداری دو فرآیند مخالف یکدیگر هستند بنابراین الگوریتم باید توانایی تعادل بخشیدن به این رفتار را داشته باشد. پارامتر  $C$  مقدار تصادفی بین بازه‌ی  $\{0, 2\}$  تولید می‌کند که نقش شکار در موقعیت بعدی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. زمانی که مقدار  $C < 1$  باشد، الگوریتم برای اکتشاف مناطق جدید حرکت می‌کند و تلاش دارد از موقعیت فعلی دور شود تا شاید بتواند پاسخ‌های بهتری را پیدا کند و در بهینه محلی واقع نشود. در نتیجه در این حالت فرآیند اکتشاف برجسته‌تر از فرآیند بهره‌برداری خواهد بود. زمانی که مقدار  $C$  بزرگتر از یک می‌شود با توجه به معادله‌ی ۱۲ مقدار  $\vec{D}$  به طور کلی بزرگتر می‌شود، این بدین معناست که تغییرات در موقعیت گرگ‌ها وسیع‌تر و در دامنه‌ی بزرگتری انجام می‌شود و فضای جستجو وسیع‌تر می‌گردد. در مقابل اگر مقدار  $C$  کمتر از یک باشد بیشتر به بهره‌برداری از نواحی موجود تمرکز می‌کند. متغیر دیگر، پارامتر  $\vec{A}$  می‌باشد که براساس مقدار  $\vec{a}$  در رابطه‌ی ۱۹ به طور خطی از ۲ تا ۰ کاهش می‌یابد، تعریف می‌شود.

$$\vec{a} = 2 - t \left( \frac{2}{T} \right) \quad (19)$$

زمانی که مقدار  $\vec{A}$  بزرگتر از ۱ یا کوچکتر از -۱ باشد، در واقع مقدار  $\vec{A} \cdot \vec{D}$  بزرگتر می‌گردد و تغییرات در موقعیت جدید گرگ‌ها بزرگتر و این به معنای این است که دامنه‌ی جستجو و حرکت به سمت نواحی ناشناخته و جدید بیشتر خواهد شد و فرآیند اکتشاف برجسته‌تر می‌باشد. از طرفی اگر مقدار  $\vec{A}$  در بازه‌ی  $\{-1, 1\}$  قرار گیرد تغییرات در موقعیت جدید کمتر می‌باشد و به فرآیند بهره‌برداری کمک می‌کند تا الگوریتم تمرکز بیشتری بر روی نواحی نزدیک به موقعیت فعلی خود داشته باشد [۱۲]. شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری در شکل ۱ نمایش داده شده است.

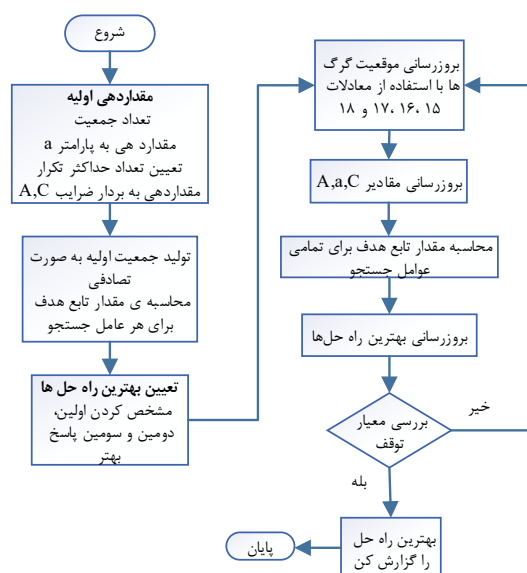
```

Initialize the grey wolf population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Initialize  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
Calculate the fitness of each search agent
 $X_\alpha$  = the best search agent
 $X_\beta$  = the second best search agent
 $X_\delta$  = the third best search agent
while ( $t < \text{Max number of iterations}$ )
  for each search agent
    Update the position of the current search agent by equation (18)
  end for
  Update  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
  Calculate the fitness of all search agents
  Update  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ , and  $X_\delta$ 
   $t = t + 1$ 
end while
return  $X_\alpha$ 

```

شکل ۱: شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری [۱۲]

شکل ۲ روند انجام الگوریتم گرگ خاکستری را نشان می‌دهد.



شکل ۲: روند انجام الگوریتم گرگ خاکستری

#### ۴- الگوریتم نهنگ

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA)، از نحوه‌ی شکار کردن گونه خاصی از این جانداران الهام گرفته شده است که در سال ۲۰۱۶ توسط آقایان میرجلیلی و لوییس ارائه گردید [۱۳]. نهنگ‌ها به عنوان بزرگترین پستانداران روی زمین شناخته می‌شوند، که از هفت گونه‌ی مهم نهنگ‌ها می‌توان به نهنگ‌های قاتل، مینک، سای، گوژپشت، صاف، باله‌ای و آبی اشاره کرد. این گونه از پستانداران ویژگی‌های منحصر به فرد مختلفی را دارند، از جمله اینکه می‌توانند فکر کنند، قضاوت کنند، ارتباط برقرار کنند و یا احساساتی شوند. یکی از انواع این نهنگ‌ها، گونه‌ی نهنگ‌های گوژپشت هستند. این نهنگ‌ها به روش متمایزی به نام تغذیه با تور حبایی به شکار می‌پردازند. روش شکار آنها بدین صورت است



که با ایجاد حباب‌هایی در یک مسیر مارپیچی، طعمه‌های خود را به دام می‌اندازند. روش شکار با تور حبابی تنها در نهنگ‌های گوژپشت مشاهده شده است، در ادامه مدل‌سازی ریاضی این رفتار تشریح گردیده است تا بهینه‌سازی با الهام گرفتن از این پدیده انجام شود [۱۳].

#### ۴-۱- محاصره ی طعمه:

در فرآیند بهینه‌سازی، همانطور که در بخش ۳ گفته شد طعمه به بهترین راه حل شناخته شده تا لحظه‌ی فعلی اشاره دارد که نهنگ‌ها (عوامل جستجو) برای بهبود موقعیت خود از آن تبعیت می‌کنند و شکار همان بهترین پاسخ ممکن برای مسئله است که الگوریتم به دنبال یافتن آن می‌باشد. نهنگ‌های گوژپشت با تشخیص محل طعمه، آن را احاطه می‌کنند. از آنجا که محل دقیق جواب بهینه مشخص نیست، الگوریتم فرض می‌کند که بهترین راه حل فعلی، به نقطه‌ی بهینه نزدیک است. سایر عوامل جستجو موقعیت خود را به گونه‌ای بروز می‌کنند که به بهترین پاسخ نزدیک‌تر شوند. معادله‌های ۲۰ و ۲۱ بیانگر این رفتار هستند.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (20)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (21)$$

در روابط ۲۰ و ۲۱،  $\vec{D}$  ضرایبی هستند که به صورت پویا تغییر می‌کنند و  $t$  بیانگر تعداد تکرار می‌باشد.  $\vec{X}^*$  نیز نشان‌دهنده‌ی بهترین پاسخ یافت شده فعلی و  $\vec{X}$  نیز موقعیت عامل جستجو را بیان می‌کند. بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  در روابط ۲۲ و ۲۳ تعریف شده‌اند.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (22)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (23)$$

در رابطه‌ی ۲۲،  $\vec{a}$  به صورت خطی از ۲ به سمت صفر کاهش پیدا می‌کند و همچنین  $\vec{r}$  بیانگر یک بردار تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. مجموع روابط ۲۰ الی ۲۳ به الگوریتم کمک می‌کنند تا فرآیند محاصره‌ی طعمه را شبیه‌سازی کنند.

#### ۴-۲- بروزسانی موقعیت با حرکت مارپیچی:

در این روش ابتدا فاصله‌ی موقعیت نهنگ با طعمه محاسبه می‌شود و سپس معادله ۲۴ برای حرکت مارپیچ نهنگ به سمت طعمه شبیه‌سازی می‌گردد.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (24)$$

مقدار  $\vec{D}$  از رابطه ۲۵ به دست می‌آید.

$$\vec{D} = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (25)$$

در رابطه‌ی ۲۴،  $b$  بیانگر یک مقدار ثابت برابر با ۱، برای شکل‌دهی حرکت مارپیچ و  $l$  یک مقدار تصادفی در بازه  $\{-1, 1\}$  می‌باشد. نهنگ‌های گوژپشت در یک مسیر دایره‌ای که به تدریج کوچک می‌شوند و به صورت مارپیچی در اطراف شکار حرکت می‌کنند. برای مدل‌سازی این رفتار دوگانه، فرض می‌شود که الگوریتم با احتمال ۵۰ درصد بین حرکت دایره‌ای کوچک شونده یا حرکت مارپیچی یکی را انتخاب و موقعیت نهنگ‌ها را بروزسانی می‌کند. مدل ریاضی این روند در روابط ۲۶ و ۲۷ می‌باشد [۱۳].

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad \text{for } p < 0.5 \quad (26)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad \text{for } p \geq 0.5 \quad (27)$$

p یک مقدار تصادفی در بازه‌ی {0,1} است.

#### ۳-۴- فاز اکتشافی:

در فاز اکتشاف، از تغییرات بردار  $\vec{A}$  استفاده می‌شود. نهنگ‌ها به صورت تصادفی و براساس موقعیت یکدیگر به جستجوی طعمه می‌پردازند. و برای آنکه نهنگ‌ها بتوانند فضای جستجو را به خوبی کاوش کنند باید مقدار  $\vec{A}$  بزرگتر از ۱ و یا کمتر از ۱- باشد. در فاز اکتشاف، موقعیت نهنگ‌ها براساس یک عامل جستجوی تصادفی انتخاب شده، بروزرسانی می‌شوند. دقیقاً برعکس فاز بهره‌برداری که از بهترین راه حل موجود برای بروزرسانی موقعیت نهنگ‌ها بهره می‌بریم. این رویکرد که  $|\vec{A}| > 1$  به کار می‌گیرد، بر فرآیند اکتشاف تمرکز دارد و به الگوریتم اجازه می‌دهد تا به صورت گسترده‌تری در فضای جستجو به دنبال پاسخ بهینه باشد. مدل ریاضی این فرآیند در روابط ۲۸ و ۲۹ مشاهده می‌شود.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \overrightarrow{X_{rand}} - \vec{X}(t)| \quad (28)$$

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_{rand}} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (29)$$

الگوریتم نهنگ از یک مجموعه تصادفی از راه حل‌ها آغاز می‌شود. در هر مرحله از تکرار، عوامل جستجو موقعیت خود را با توجه به یک عمل تصادفی یا بهترین پاسخ به دست آمده تا کنون، بروزرسانی می‌کنند. پارامتر  $\vec{a}$  به تدریج از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد تا امکان اکتشاف و بهره‌برداری فراهم شود. در شرایطی که  $|\vec{A}| > 1$  باشد، انتخاب یک عمل جستجوی تصادفی صورت می‌گیرد و زمانی که  $|\vec{A}| < 1$  برقرار باشد، بهترین راه حل برای بروزرسانی موقعیت نهنگ‌ها در نظر گرفته خواهد شد. با توجه به مقدار p الگوریتم قادر است بین حرکت به صورت دایره‌ای یا مارپیچ تغییر وضعیت دهد. شبه کد الگوریتم نهنگ در شکل ۳ ارائه شده است.

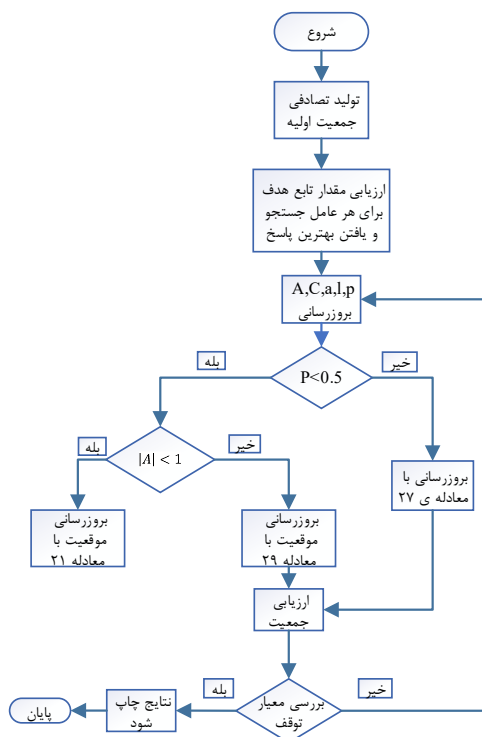
```

Initialize the whales population  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 
Calculate the fitness of each search agent
 $X^*$  = the best search agent
while (t < maximum number of iterations)
  for each search agent
    Update a, A, C, l, and p
    if1 (p < 0.5)
      if2 ( $|A| < 1$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (21)
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        Select a random search agent ( $X_{rand}$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (29)
      end if2
    else if1 (p ≥ 0.5)
      Update the position of the current search by the Eq. (27)
    end if1
  end for
  Check if any search agent goes beyond the search space and amend it
  Calculate the fitness of each search agent
  Update  $X^*$  if there is a better solution
  t = t + 1
end while
return  $X^*$ 

```

شکل ۳: شبه کد الگوریتم نهنگ [۱۳]

در شکل ۴ روند کلی انجام الگوریتم نهنگ ارائه شده است.



شکل ۴: روند انجام الگوریتم نهنگ

## ۵- نحوه‌ی مواجهه با قیود

در مسائل بهینه‌سازی مقید، رعایت قیود مسئله از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مدیریت محدودیت‌ها در الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده، از روش جریمه برای هدایت راه حل‌ها به سمت ناحیه‌ی مجاز استفاده می‌شود. در این روش، زمانی که یک راه حل از قیود مسئله تخطی کند، مقدار تابع هدف آن با افزودن یک مقدار جریمه اصلاح می‌گردد. این مقدار جریمه به طور مستقیم وابسته به میزان تخطی از قید و ضریب پنالتی می‌باشد که برای هر قید تعیین شده است. به این صورت که اگر مقدار تخطی از قید بیشتر باشد، مقدار جریمه نیز افزایش می‌یابد، که موجب می‌شود الگوریتم به سمت ناحیه‌ی مجاز هدایت شود. این مقدار جریمه به صورت حاصل ضرب ضریب پنالتی در میزان تخطی از قید محاسبه می‌گردد. فرمول آن به صورت رابطه‌ی ۳۰ است.

$$objective(i) = objective(i) + \gamma \cdot \max(0, g(x)) \quad (30)$$

در معادله ۳۰، Objective مقدار تابع هدف برای راه حل  $i$  ام است و  $\gamma$  ضریب پنالتی می‌باشد و  $g(x)$  مقدار تخطی از قید است که اگر راه حل از قید تخطی کرده باشد، مقدار آن مثبت خواهد بود. این فرمول نشان می‌دهد که اگر یک راه حل از قید تخطی کند، مقدار جریمه به تابع هدف اضافه می‌شود و به این ترتیب راه حل‌ها به سمت ناحیه‌ی مجاز هدایت می‌شوند.

## ۶- صحت سنجی الگوریتم‌ها

در این بخش یک مسئله برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ در بهینه‌سازی قاب‌ها و همچنین نمایش عملکرد نرم افزار ETABS2016 بررسی می‌شود. تابع هدف در این مسائل حداقل‌سازی وزن سازه با رعایت محدودیت‌های مربوط به ظرفیت باربری و جابجایی نسبی است.

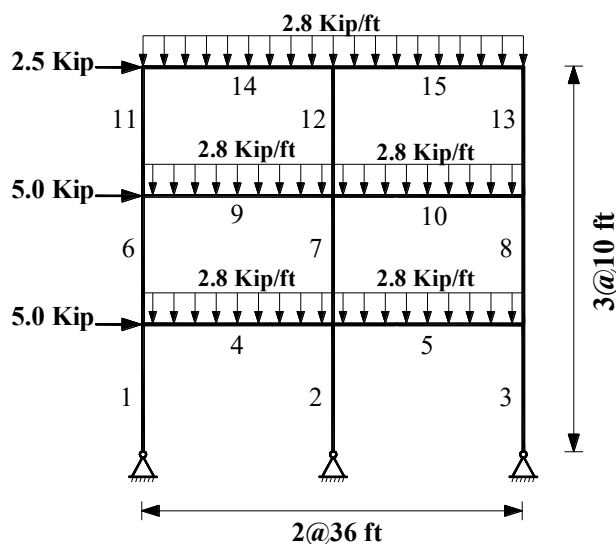
به منظور اعتبار سنجی فرآیند الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ یک مسئله قاب معروف مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی از ارائه این مثال، نمایش امکان‌پذیری برقراری ارتباط میان دو نرم‌افزار MATLAB و ETABS و اجرای موفق فرآیند بهینه‌سازی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و نهنگ بوده است. همچنین این مثال به عنوان یک گام در ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم‌ها و اطمینان از صحت تبادل اطلاعات بین نرم‌افزارها در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که هدف این پژوهش مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف و یا اثبات برتری الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ نسبت به سایر الگوریتم‌ها نمی‌باشد. در میان مجموعه‌ای از الگوریتم‌های فراابتکاری موجود، این دو الگوریتم صرفاً به‌عنوان نمونه‌هایی از این الگوریتم‌ها انتخاب شده‌اند تا از طریق آن‌ها فرآیند اتصال نرم‌افزار طراحی سازه (ETABS) به یک الگوریتم بهینه‌سازی و اجرای موفق طراحی بهینه مورد ارزیابی قرار گیرد. این انتخاب به هیچ‌وجه به معنای برترین بودن این دو الگوریتم نیست، بلکه نشان‌دهنده قابلیت کلی روش پیشنهادی در به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری در طراحی‌های آیین‌نامه‌محور است.

### ۶-۱- مثال قاب سه طبقه دو دهانه

شکل ۵ یک قاب با بارگذاری مشخص دارای سه طبقه و دو دهانه با ۱۵ عضو را نشان می‌دهد. بار ثقلی تمام طبقات ۲/۸ کیلو پوند بر فوت و بار جانبی طبقه اول و دوم برابر ۵ کیلوپوند و بار جانبی سقف برابر ۲/۵ کیلوپوند می‌باشد.

مقاطع به کار رفته در طراحی تیرها از نوع I شکل شامل ۳۰۰ مقطع W استاندارد ارائه شده در آیین‌نامه‌ی AISC ایالات متحده‌ی آمریکا می‌باشد. مقاطع به کار رفته در طراحی ستون‌ها به نوع I شکل W10، محدود شده است که شامل ۱۸ مقطع استاندارد در آیین‌نامه‌ی AISC ایالات متحده‌ی آمریکا می‌باشد. در طراحی از فولاد با تنش تسلیم ۳۶ کیلوپوند بر اینچ مربع با مدول الاستیسیته ۲۹۰۰۰ کیلوپوند بر اینچ مربع استفاده شده است. حد مجاز نسبت دررفت طبقات کوچکتر از ۰/۰۰۳۳۳ است.

ارتفاع تمامی طبقات ۱۰ فوت و عرض هر دهانه ۳۶ فوت می‌باشد. طول مهارشده‌ی تیرها نیز برابر ۰/۱۶۷ بوده و تکیه‌گاه از نوع مفصلی است. نتایج به دست آمده با الگوریتم گرگ خاکستری و نهنگ به همراه پاسخ‌های برخی دیگر از الگوریتم‌ها در جدول ۱ آمده است.

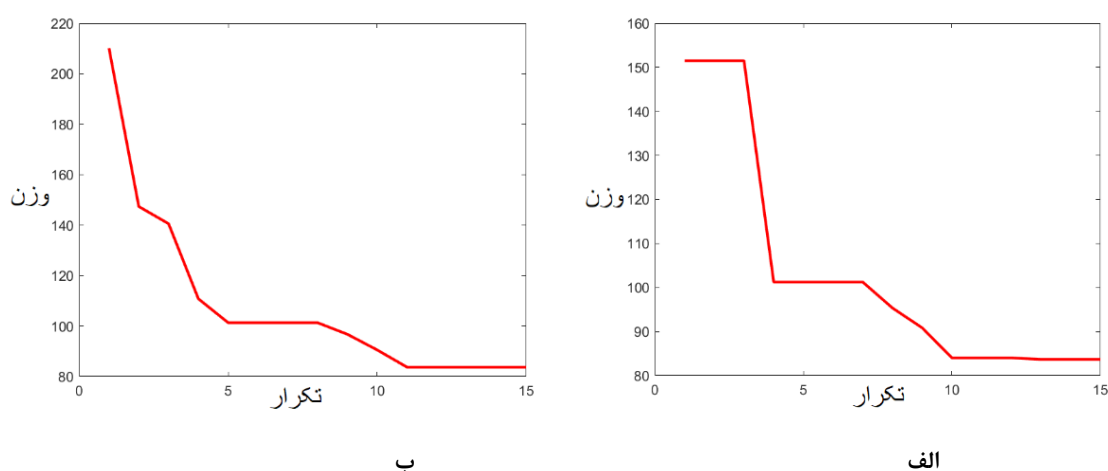


شکل ۵: قاب سه طبقه با دو دهانه

جدول ۱: نتایج آماری قاب سه طبقه با دو دهانه

شماره گروه عضو	نوع المان	GA[۴]	DDHS [۲۸]	ACO[۲۷]	GWO	WOA
۱	تیر	W24X62	W24X62	W24X62	W24X62	W24X62
۲	ستون	W10X60	W10X60	W10X60	W10X60	W10X60
وزن (کیلو نیوتن)		۸۳/۷۷۵۹	۸۳/۷۷۵۹	۸۳/۷۷۵۹	۸۳/۷۷۵۹	۸۳/۷۷۵۹
تعداد آنالیز		۱۸۰۰	۲۲۰	۳۰۰۰	۱۵۰	۱۵۰

با استفاده از جدول ۱ می‌توان دریافت که نتیجه حاصل شده از الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ برابر با ۸۳/۷۷۵۹ کیلو نیوتن می‌باشد، که قابل قبول است. شکل ۶ روند بهینه‌سازی با دو الگوریتم گرگ خاکستری و نهنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۶: روند بهینه‌سازی قاب خمشی سه طبقه دو دهانه دارای ۱۵ عضو الف) الگوریتم گرگ خاکستری ب) الگوریتم نهنگ

## ۷- مثال‌های عددی

در ادامه دو مثال قاب صفحه ای و دو مثال قاب سه بعدی با استفاده از این روش‌ها بررسی شده‌اند. برای هر چهار مثال از قسمت‌های آماده‌ی AISC موجود در پایگاه داده ETABS2016 استفاده شده و آیین‌نامه‌ی طراحی [۲۱] AISC-LRFD به کار رفته است.

خواص مواد فولادی برای هر چهار مثال ثابت است و به شرح زیر می‌باشد:

مدول الاستیسیته برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال، تنش تسلیم برابر با ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش کششی نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. بارهای ثقلی وارده به قاب شامل بار مرده ناشی از اجزا سازه مانند سقف و بار زنده به واسطه‌ی بار اشغال فضا است. بارهای اعمال شده به مثال‌های ۱-۷ و ۲-۷ مطابق با جدول ۲ و مثال‌های ۳-۷ و ۴-۷ مطابق جدول ۳ می‌باشد. بار زلزله و مقدار مجاز دررفت براساس آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ایران تعریف شده است. بر همین اساس باید نیروی زلزله‌ی وارده با توجه به معادله ۳۱ لحاظ شده و مقدار مجاز دررفت در معادله ۳۲ کنترل گردد. به منظور نشان دادن کارایی روش فوق مقدار ضریب زلزله ۰.۱۵ برای هر چهار سازه‌ی قاب فرض می‌شود.

$$V = CW$$

(۳۱)

(۳۲)

$$C_d \Delta_{eu} \leq 0.025h$$

در معادله ۳۱،  $V$  بیانگر نیروی زلزله‌ی وارده،  $C$  ضریب زلزله و  $W$  وزن سازه را نشان می‌دهد. در معادله ی ۳۲،  $C_d$  ضریب بزرگنمایی تغییر مکان جانبی سازه، برابر با مقدار ۴ برای قاب‌های خمشی فولادی متوسط تعیین شده است. حداکثر دریفت مجاز برابر با  $0.025$  ارتفاع طبقه می‌باشد.

$\Delta_{eu}$  نیز بیانگر تغییر مکان جانبی نسبی طبقه است. پس از اعمال ضرایب مربوط به اعمال بار زلزله، بارهای ثقلی به صورت بارهای معادل به گره‌ها اعمال می‌شود. جدول ۲ و ۳ مقادیر این بارها را برای دو مثال قاب صفحه‌ای و دو مثال قاب سه بعدی نمایش می‌دهد.

جدول ۲: بارهای اعمال شده به مثال‌های ۱-۷ و ۲-۷

انواع بار	محل اعمال بارها	مقادیر (KN/m)
مرده	تیر هر طبقه	۱۲
زنده	تیر هر طبقه	۸
برف	تیر بام	۲
زلزله	بار جانبی	$C=0.15, K=1$

جدول ۳: بارهای اعمال شده به مثال‌های ۳-۷ و ۴-۷

انواع بار	محل اعمال بارها	مقادیر (KN/m)
بار مرده دیوارها	تیرهای اطراف هر طبقه	۵
بار مرده سقف‌ها	سقف طبقات	۳/۶
برف	بام	۱/۵
بار زنده	سقف طبقات	۲
بار زنده بام	بام	۱/۵
زلزله	بار جانبی	$C=0.15, K=1$

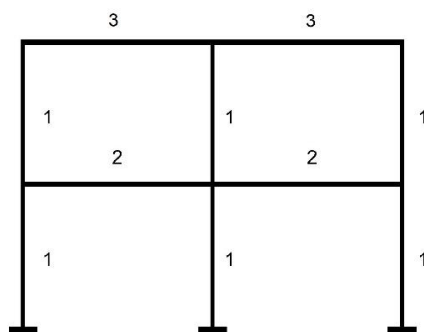
ضریب نواحی صلب انتهایی برابر با  $0.5$  در نظر گرفته می‌شود. اثر  $P-\Delta$  لحاظ و دیافراگم صلب نیز اختصاص داده شده است. ترکیبات بار مطابق با آیین نامه ی [۲۱] AISC-LRFD تعریف شده است. طول مهارشده‌ی تیرها نیز برابر با  $0.1$  در نظر گرفته شده است.

به منظور نمایش کارکرد الگوریتم‌ها برای هر مدل قاب سازه‌ای به تعداد ۱۰ بار به طور مجزا فرآیند بهینه‌سازی انجام شده است تا بتوان به نتایج قابل اعتمادی دست پیدا کرد. در این مثال‌ها، از روش توقف بر اساس تعداد تکرارها به‌عنوان معیاری برای خاتمه دادن به اجرای الگوریتم استفاده شده است. به این معنی که الگوریتم پس از انجام تعداد مشخصی از تکرارها به طور خودکار متوقف می‌شود. این تعداد تکرارها به‌طور پیش‌فرض قابل تنظیم می‌باشد. این روش به دلیل سادگی و کارایی بالا انتخاب شده است. تمامی تحلیل‌ها در این پژوهش، بر روی یک رایانه شخصی با مشخصات سخت‌افزاری شامل پردازنده‌ی Intel(R) Core(TM) i7-9700HQ با فرکانس پایه  $2.60$  گیگاهرتز و حافظه‌ی رم  $16$  گیگابایت انجام شده است.

## ۷-۱- مثال قاب خمشی دو طبقه ۱۰ عضوی

اولین مثال (شکل ۷) یک قاب فولادی دو طبقه ۱۰ عضوی را نشان می‌دهد که شامل ده عضو و نه گره است و در سه گروه متناسب با روند اجرایی تیپ بندی شده‌اند. طول هر دهانه ۴ متر و ارتفاع هر طبقه ۳ متر می‌باشد. ستون‌ها از لیست پروفیل‌های HEB شامل ۲۴ مقطع استاندارد و تیرها از لیست پروفیل‌های IPE شامل ۱۷ مقطع استاندارد، انتخاب می‌شوند. همان طور که قبلاً اشاره شد در طراحی قاب،

بارهای ثقلی و جانبی در نظر گرفته شده است. بارهای ثقلی با توجه به ملاحظات طراحی اعمال می گردند و بار جانبی زلزله طبق روش بار جانبی معادل، تحلیل استاتیکی زلزله، مطابق با آیین نامه ای استاندارد ۲۸۰۰ [۲۳]، محاسبه شده اند. محدودیت های تنش و پایداری مطابق فرمول های بخش ۲ لحاظ شده اند و جابجایی نسبی سازه با توجه به معادله ی ۳۲ به مقدار  $0/00625$  محدود شده است. شکل ۷ گروه بندی مقاطع را نشان می دهد. تعداد جمعیت برابر با ۱۰ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۲۰ تنظیم می شود، تعداد آنالیزها برابر ۲۰۰ می باشد. زمان انجام فرآیند بهینه سازی به مدت ۱۴ دقیقه به طول انجامید.



شکل ۷: قاب خمشی دو طبقه ۱۰ عضوی

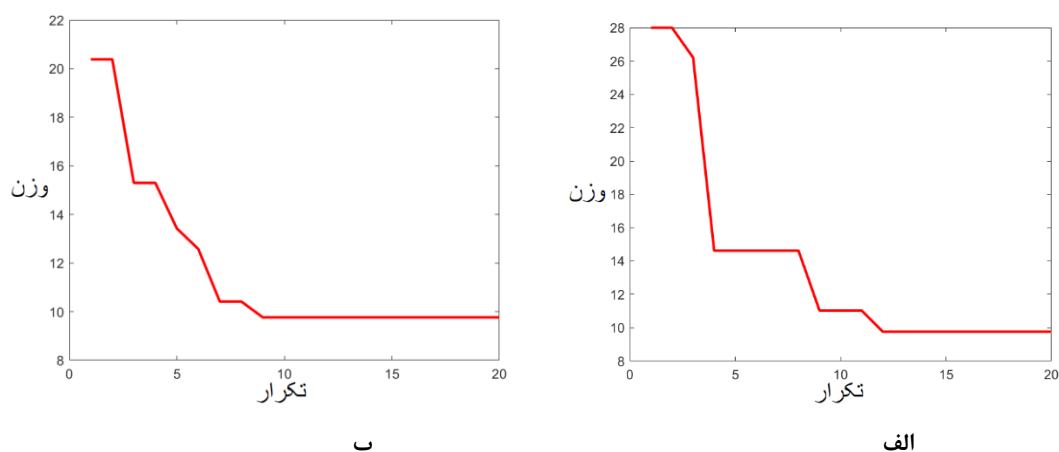
نتایج حاصل برای الگوریتم های گرگ خاکستری و نهنگ حاصل شده در مثال ۷-۱ در جداول ۴، ۵ و ۶ و شکل ۸ به شرح زیر است:

جدول ۴: نتایج آماری قاب خمشی دو طبقه ۱۰ عضوی با الگوریتم گرگ خاکستری

	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B
گروه ۲	IPE220	IPE220	IPE220	IPE240	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220
گروه ۳	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200
وزن (کیلو نیوتن)	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۱۰/۱۱۴۸	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴

جدول ۵: نتایج آماری قاب خمشی دو طبقه ۱۰ عضوی با الگوریتم نهنگ

	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B	HE140B
گروه ۲	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220	IPE220
گروه ۳	IPE200	IPE240	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200
وزن (کیلو نیوتن)	۹/۷۶۴	۱۰/۴۱۶۳	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴



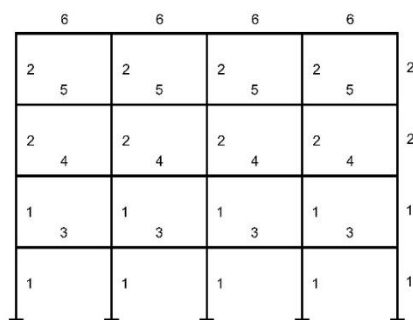
شکل ۸: روند بهینه سازی قاب خمشی دو طبقه ۱۰ عضوی (الف) الگوریتم گرگ خاکستری (ب) الگوریتم نهنگ

جدول ۶: جمع بندی نتایج حاصل شده از مثال قاب خمشی دو طبقه ۱۰ عضوی

انحراف معیار	میانگین پاسخ ها (کیلو نیوتن)	بدترین پاسخ (کیلو نیوتن)	بهترین پاسخ (کیلو نیوتن)
۰/۱۰۵	۹/۷۹۹	۱۰/۱۱۴۸	۹/۷۶۴
۰/۱۹۵	۹/۸۲۹	۱۰/۴۱۶۳	۹/۷۶۴

## ۷-۲- مثال قاب خمشی چهار طبقه ۳۶ عضوی

دومین مثال نیز یک قاب فولادی ۴ طبقه می باشد که شامل ۳۶ عضو و ۲۵ گره است که در ۶ گروه تیپ بندی شده اند. طول هر دهانه ۴ متر و ارتفاع هر طبقه ۳ متر می باشد. ستون ها از لیست پروفیل های HEB شامل ۲۴ مقطع استاندارد و تیرها از لیست پروفیل های IPE شامل ۱۷ مقطع استاندارد، انتخاب می شوند. همان طور که قبلا اشاره شد در طراحی قاب، بارهای ثقلی و جانبی در نظر گرفته شده است. بارهای ثقلی با توجه به ملاحظات طراحی اعمال می گردند و بار جانبی زلزله طبق روش بار جانبی معادل، تحلیل استاتیکی زلزله، مطابق با آیین نامه ای استاندارد ۲۸۰۰، محاسبه شده اند. محدودیت های تنش و پایداری مطابق فرمول های بخش ۲ لحاظ شده اند و جایجایی نسبی سازه با توجه به معادله ۳۲ به مقدار  $0/0625$  محدود شده است. شکل ۹ گروه بندی مقاطع را نشان می دهد. تعداد جمعیت برابر با ۵۰ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۲۰ تنظیم می شود، تعداد آنالیزها برابر با ۱۰۰۰ می باشد. زمان انجام فرآیند بهینه سازی به مدت یک ساعت و ۴۴ دقیقه به طول انجامید.



شکل ۹: قاب خمشی چهار طبقه ۳۶ عضوی



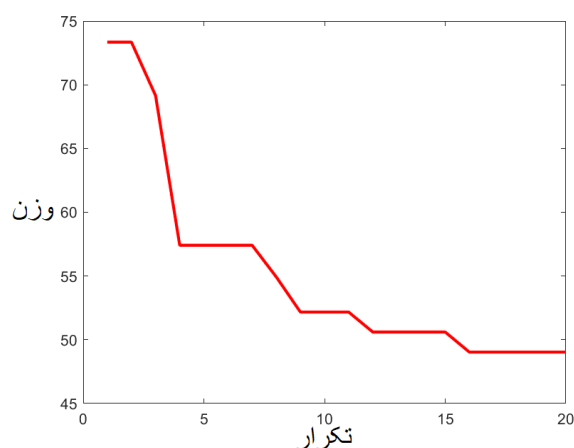
نتایج حاصل برای الگوریتم های گرگ خاکستری و نهنگ حاصل شده در مثال ۷-۲ در جداول ۷، ۸ و ۹ و شکل ۱۰ به شرح زیر است:

جدول ۷: نتایج آماری قاب خمشی چهار طبقه ۳۶ عضوی با الگوریتم گرگ خاکستری

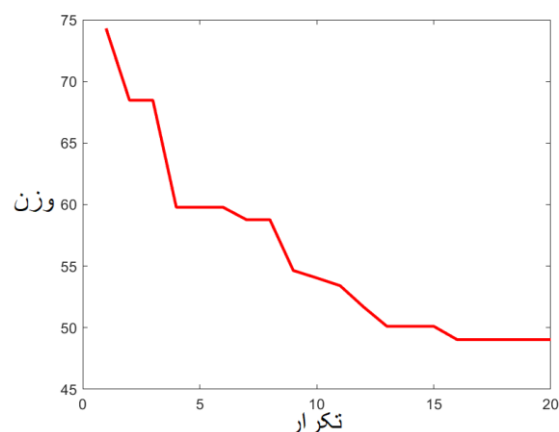
	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B
گروه ۲	HE160B	HE160B	HE160B	HE160B	HE160B	HE160B	HE160B	HE160B	HE160B	HE160B
گروه ۳	IPE270	IPE270	IPE270	IPE300	IPE270	IPE270	IPE270	IPE270	IPE270	IPE270
گروه ۴	PE300	IPE300	IPE300	IPE270	PE300	PE300	IPE300	PE300	PE300	PE300
گروه ۵	IPE270	IPE270	IPE270	IPE300	IPE270	IPE270	IPE270	IPE270	IPE270	IPE270
گروه ۶	IPE200	IPE270	IPE220	IPE200	IPE200	IPE200	IPE220	IPE200	IPE200	IPE200
وزن (کیلو نیوتن)	۴۹/۰۳۲۱	۵۱/۱۷۳۸	۴۹/۶۳۵۲	۵۰/۰۰۴۵	۴۹/۰۳۲۱	۴۹/۰۳۲۱	۴۹/۶۳۵۲	۴۹/۰۳۲۱	۴۹/۰۳۲۱	۴۹/۰۳۲۱

جدول ۸: نتایج آماری قاب خمشی چهار طبقه ۳۶ عضوی با الگوریتم نهنگ

	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE180B	HE180B	HE200B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B
گروه ۲	HE160B	HE160B	HE160B	HE140B	HE160B	HE160B	HE180B	HE180B	HE160B	HE160B
گروه ۳	IPE270	IPE270	IPE240	IPE240	IPE270	IPE240	IPE270	IPE360	IPE270	IPE270
گروه ۴	IPE300	IPE300	IPE300	IPE450	IPE300	IPE360	IPE300	IPE240	IPE300	IPE300
گروه ۵	IPE270	IPE270	IPE270	IPE450	IPE270	IPE240	IPE220	IPE270	IPE270	IPE270
گروه ۶	IPE220	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200	IPE200
وزن (کیلو نیوتن)	۴۹/۶۳۵۲	۴۹/۰۳۲۱	۵۱/۱۴۹۲	۵۷/۶۳۷۵	۴۹/۰۳۲۱	۴۹/۶۸۴۵	۵۰/۰۳۲۲	۵۳/۰۶۰۲	۴۹/۰۳۲۱	۴۹/۰۳۲۱



ب



الف

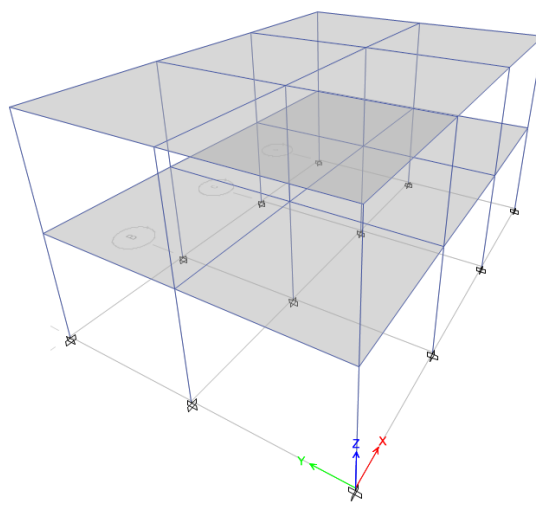
شکل ۱۰: روند بهینه سازی قاب خمشی چهار طبقه ۳۶ عضوی الف) الگوریتم گرگ خاکستری ب) الگوریتم نهنگ

جدول ۹: جمع بندی نتایج حاصل شده از مثال قاب خمشی چهار طبقه ۳۶ عضو

انحراف معیار	میانگین پاسخ ها (کیلو نیوتن)	بدترین پاسخ (کیلو نیوتن)	بهترین پاسخ (کیلو نیوتن)
۰/۶۶۲۸	۴۹/۴۶۴۱	۵۱/۱۷۳۸	۴۹/۰۳۲۱
۲/۶	۵۰/۷۳۲۷	۵۷/۶۳۷۵	۴۹/۰۳۲۱

### ۷-۳- مثال قاب خمشی سه بعدی دو طبقه ۵۸ عضوی

سومین مثال (شکل ۱۱) یک سازه فولادی سه بعدی دو طبقه ۵۸ عضوی شامل ۳۶ گره است که در ۴ گروه متناسب با روند اجرایی تیپ بندی شده‌اند. ستون‌ها از لیست پروفیل‌های HEB شامل ۲۴ مقطع استاندارد و تیرها از لیست پروفیل‌های IPE شامل ۱۷ مقطع استاندارد، انتخاب می‌شوند. بارهای ثقیلی و جانبی مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شده است. بارهای ثقیلی با توجه به ملاحظات طراحی اعمال می‌گردند و بار جانبی زلزله طبق روش بار جانبی معادل، تحلیل استاتیکی زلزله، مطابق با آیین نامه‌ی استاندارد ۲۸۰۰، محاسبه شده‌اند. محدودیت‌های تنش و پایداری مطابق فرمول‌های بخش ۲ لحاظ شده‌اند و جابجایی نسبی سازه با توجه به معادله‌ی ۳۲ به مقدار  $0/00625$  محدود شده است. گروه یک شامل ستون‌های طبقه اول، گروه دو شامل ستون‌های طبقه دوم، گروه سه شامل تیرهای طبقه اول و گروه چهار شامل تیرهای طبقه دوم می‌باشد. فاصله‌ی محور تا محور هر ستون ۴ متر و ارتفاع طبقات به ۳ متر محدود شده است. تعداد جمعیت برابر با ۱۵ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۱۵ تنظیم می‌شود، تعداد آنالیزها برابر با ۲۲۵ می‌باشد. زمان انجام فرآیند بهینه سازی به مدت ۲۸ دقیقه به طول انجامید.



شکل ۱۱: قاب خمشی سه بعدی دو طبقه ۵۸ عضوی

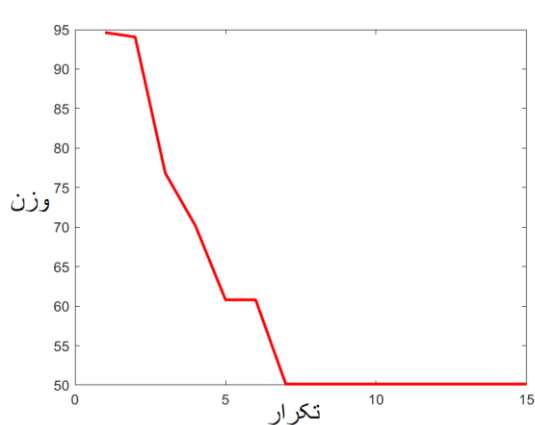
لازم به ذکر است که بار مرده ناشی از وزن اجزای سازه توسط نرم افزار ETABS به صورت خودکار اعمال می‌گردد. نتایج حاصل برای الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ حاصل شده در مثال ۷-۳ در جداول ۱۰، ۱۱ و ۱۲ و شکل ۱۲ به شرح زیر است:

جدول ۱۰: نتایج آماری قاب سه بعدی دو طبقه ۵۸ عضوی با الگوریتم گرگ خاکستری

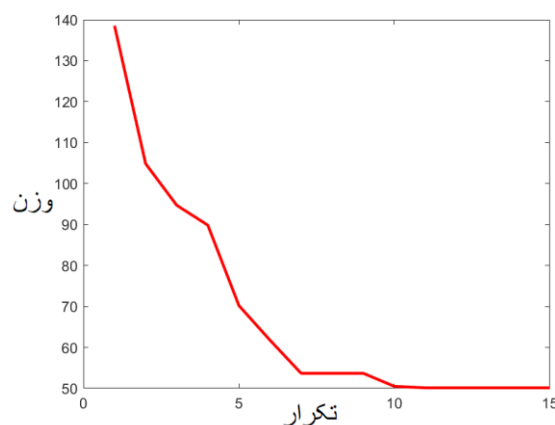
	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE180B	HE180B	HE180B	HE200B	HE180B	HE200B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B
گروه ۲	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B
گروه ۳	IPE140	IPE140	IPE140	IPE100	IPE160	IPE120	IPE160	IPE140	IPE160	IPE140
گروه ۴	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE160	IPE100	IPE120	IPE120
وزن (کیلو نیوتن)	۵۰/۱۳۶۸	۵۰/۱۳۶۸	۵۰/۱۳۶۸	۵۰/۴۹۰۷	۵۲/۰۷۲۴	۵۲/۰۰۷۸	۵۷/۱۹۹	۵۰/۱۳۶۸	۵۳/۵۸۹۴	۵۱/۶۵۳۹

جدول ۱۱: نتایج آماری قاب سه بعدی دو طبقه ۵۸ عضوی با الگوریتم نهنگ

	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE200B	HE180B	HE200B	HE200B	HE200B	HE180B	HE200B	HE200B	HE200B	HE200B
گروه ۲	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B
گروه ۳	IPE100	IPE140	IPE100	IPE100	IPE100	IPE140	IPE100	IPE100	IPE100	IPE120
گروه ۴	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100
وزن (کیلو نیوتن)	۵۰/۴۹۰۷	۵۰/۱۳۶۸	۵۰/۴۹۰۷	۵۰/۴۹۰۷	۵۰/۴۹۰۷	۵۰/۱۳۶۸	۵۰/۴۹۰۷	۵۰/۴۹۰۷	۵۰/۴۹۰۷	۵۲/۰۰۷۸



ب



الف

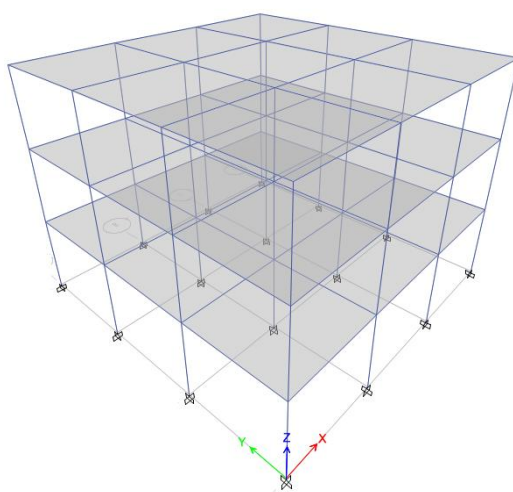
شکل ۱۲: روند بهینه سازی قاب سه بعدی دو طبقه ۵۸ عضوی الف) الگوریتم گرگ خاکستری ب) الگوریتم نهنگ

جدول ۱۲: جمع بندی نتایج حاصل شده از مثال قاب سه بعدی دو طبقه ۵۸ عضوی

	بهترین پاسخ (کیلو نیوتن)	بدترین پاسخ (کیلو نیوتن)	میانگین پاسخ ها (کیلو نیوتن)	انحراف معیار
الگوریتم گرگ خاکستری	۵۰/۱۳۶۸	۵۷/۱۹۹	۵۱/۷۵۶	۲/۰۲۸۲
الگوریتم نهنگ	۵۰/۱۳۶۸	۵۲/۰۰۷۸	۵۰/۵۷۱۶	۰/۴۷۵۴

### ۴-۷- مثال قاب خمشی سه بعدی سه طبقه ۱۲۰ عضوی

چهارمین مثال (شکل ۱۳) یک قاب سه بعدی فولادی ۳ طبقه می باشد که شامل ۱۲۰ عضو و ۶۴ گره است که در ۶ گروه تیپ بندی شده اند. ستون ها از لیست پروفیل های HEB شامل ۲۴ مقطع استاندارد و تیرها از لیست پروفیل های IPE شامل ۱۷ مقطع استاندارد می باشد، انتخاب می شوند. در طراحی قاب، بارهای ثقلی و جانبی مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است. بارهای ثقلی وارده به قاب شامل بار مرده ناشی از اجزا سازه مانند سقف و بار زنده به واسطه بار اشغال فضا است که با توجه به ملاحظات طراحی اعمال می گردند. بار جانبی زلزله طبق روش بار جانبی معادل، تحلیل استاتیکی زلزله، محاسبه شده اند. محدودیت های تنش و پایداری مطابق فرمول های بخش ۲ لحاظ شده اند و جابجایی نسبی سازه با توجه به معادله ۳۲ به مقدار  $0/00625$  محدود شده است. گروه یک شامل ستون های طبقه اول، گروه دو شامل ستون های طبقه دوم، گروه سه شامل ستون های طبقه سوم، گروه چهار شامل تیرهای طبقه اول، گروه پنج شامل تیرهای طبقه دوم و گروه شش شامل تیرهای طبقه سوم می باشد. فاصله ی محور تا محور هر ستون ۴ متر می باشد و ارتفاع طبقات به ۳ متر محدود شده است. تعداد جمعیت برابر با ۲۰ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۲۰ تنظیم می شود، تعداد آنالیزها برابر با ۴۰۰ می باشد. زمان انجام فرآیند بهینه سازی به مدت یک ساعت و ۲۵ دقیقه به طول انجامید.



شکل ۱۳: قاب خمشی سه بعدی ۳ طبقه ۱۲۰ عضوی

نتایج حاصل برای الگوریتم های گرگ خاکستری و نهنگ حاصل شده در مثال ۴-۷ در جداول ۱۳، ۱۴ و ۱۵ و شکل ۱۴ به شرح زیر است:

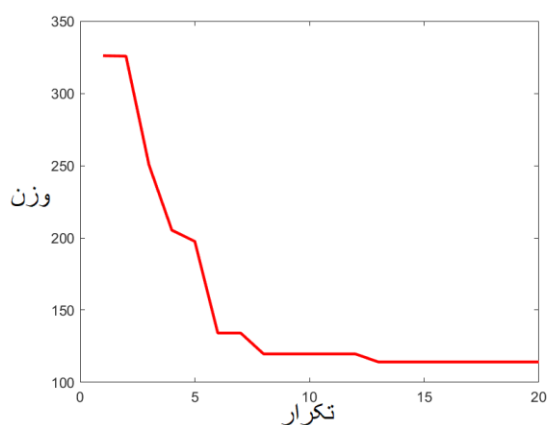
جدول ۱۳: نتایج آماری قاب خمشی سه بعدی سه طبقه ۱۲۰ عضوی با الگوریتم گرگ خاکستری

	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B
گروه ۲	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B
گروه ۳	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B
گروه ۴	IPE100	IPE120	IPE160	IPE140	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100

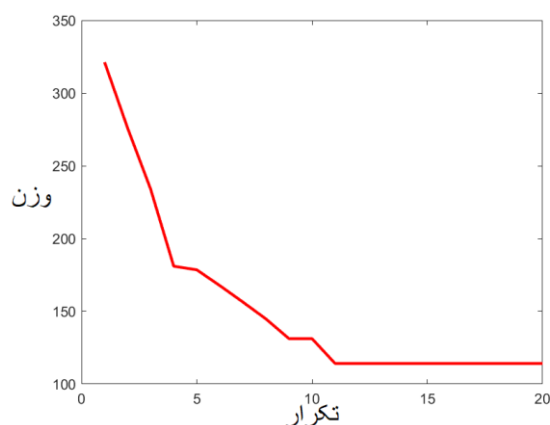
گروه ۵	IPE120	IPE100	IPE180	IPE120	IPE120	IPE120	IPE100	IPE120	IPE120	IPE120
گروه ۶	IPE100	IPE100	IPE120	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE120	IPE100	IPE100
وزن (کیلو نیوتن)	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۳۳/۵۶۲۸	۱۲۰/۷۸۶۳	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۸/۴۲۳	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۱۶/۲۸۱۲

جدول ۱۴: نتایج آماری قاب خمشی سه بعدی سه طبقه ۱۲۰ عضوی با الگوریتم نهنگ

	اجرا ۱	اجرا ۲	اجرا ۳	اجرا ۴	اجرا ۵	اجرا ۶	اجرا ۷	اجرا ۸	اجرا ۹	اجرا ۱۰
گروه ۱	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B
گروه ۲	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B	HE220B
گروه ۳	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B	HE180B
گروه ۴	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE120	IPE100	IPE120	IPE120
گروه ۵	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100
گروه ۶	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100	IPE100
وزن (کیلو نیوتن)	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۱۴/۱۳۹۵	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۱۶/۲۸۱۲



ب



الف

شکل ۱۴: روند بهینه سازی قاب خمشی سه بعدی سه طبقه ۱۲۰ عضوی الف) الگوریتم گرگ خاکستری ب) الگوریتم نهنگ

جدول ۱۵: جمع بندی نتایج حاصل شده از مثال قاب خمشی سه بعدی سه طبقه ۱۲۰ عضوی

انحراف معیار	میانگین پاسخ ها (کیلو نیوتن)	بدترین پاسخ (کیلو نیوتن)	بهترین پاسخ (کیلو نیوتن)
۵/۲۹۷	۱۱۸/۴۵۹۸	۱۳۳/۵۶۲۸	۱۱۴/۱۳۹۵
۰/۹۸۱	۱۱۴/۷۸۲	۱۱۶/۲۸۱۲	۱۱۴/۱۳۹۵

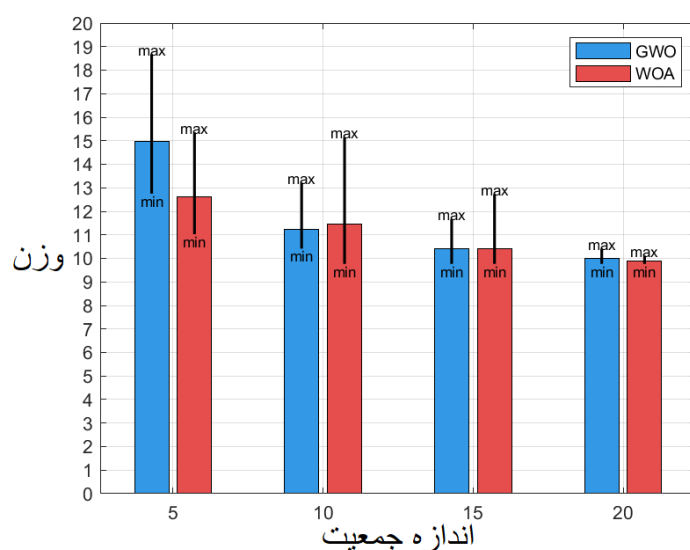
## ۸- بررسی تاثیر تعداد جمعیت الگوریتمها در مثال قاب خمشی دو طبقه ۱۰ عضوی

در این بخش، به منظور بررسی الگوریتمهای گرگ خاکستری و نهنگ نسبت به تغییرات پارامترهای الگوریتمی، آزمایشهایی با تعداد جمعیت مختلف بر روی مثال ۷-۱ از تحقیق حاضر انجام شد. برای هر یک از الگوریتمها، پنج بار اجرا با تعداد جمعیت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و تعداد تکرار ثابت ۱۰ صورت گرفت. نتایج حاصل در جدول ۱۶ و شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در این نمودار، برای هر حالت تعداد جمعیت، میانگین، بهترین و بدترین پاسخها آورده شده است. این تحلیل به منظور ارزیابی تأثیر تغییرات در تعداد جمعیت بر کیفیت و

همگرایی نتایج الگوریتم‌ها صورت گرفته است و به این امکان را می‌دهد که درک بهتری از رفتار الگوریتم‌ها در شرایط مختلف وجود داشته باشد.

جدول ۱۶: نتایج بررسی تاثیر تعداد جمعیت الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ بر پاسخ مثال ۷-۱

تعداد ذرات	۵		۱۰		۱۵		۲۰	
الگوریتم‌ها	GWO	WOA	GWO	WOA	GWO	WOA	GWO	WOA
بهترین پاسخ (کیلو نیوتن)	۱۲/۷۵۰۴	۱۱/۰۲۷۱	۱۰/۴۱۶۳	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴	۹/۷۶۴
میانگین پاسخ‌ها (کیلو نیوتن)	۱۴/۹۶۵۹	۱۲/۶۲۰۵	۱۱/۳۳۷۹	۱۱/۴۶۹۹	۱۰/۴۲۹۸	۱۰/۴۱۸۲	۱۰/۰۱۵	۹/۸۹۴۴
بدترین پاسخ (کیلو نیوتن)	۱۸/۶۷۵۵	۱۵/۳۵۳۷	۱۳/۲۱۹۷	۱۵/۱۴۹۱	۱۱/۶۷۱۸	۱۲/۷۳۳۵	۱۰/۴۱۶۳	۱۰/۱۱۴۸



شکل ۱۵: بررسی تاثیر تعداد جمعیت الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ بر پاسخ مثال ۷-۱

## ۹- نتیجه گیری:

این تحقیق تلاش دارد تا الگوریتم‌های فراابتکاری را به عنوان ابزاری عملی و موثر برای مهندسان سازه معرفی کند. عملکرد این رویکرد بر روی دو قاب صفحه‌ای دو و چهار طبقه و دو قاب سه بعدی دو و سه طبقه فولادی مورد ارزیابی قرار گرفت. روش توسعه یافته در این پژوهش، می‌تواند با قابلیت ارتباط مستقیم با نرم افزار ETABS2016، امکان طراحی قاب‌های فولادی بهینه توسط مهندسان را به صورت عملی و کاربردی فراهم کند. نتایج اصلی را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- هر دو الگوریتم گرگ خاکستری و نهنگ با بهره‌گیری از قابلیت‌های جستجو توانایی قابل قبولی در دستیابی به طراحی بهینه دارند و می‌توانند به عنوان ابزاری کارآمد در فرآیند طراحی سازه‌های فولادی استفاده شوند.

۲- با توجه به پیچیدگی‌های ذاتی مسائل طراحی سازه، از جمله تعداد اعضا، تنوع قيود طراحی و شرایط متنوع بارگذاری، فضای شدنی مسئله بهینه‌سازی از یک نمونه به نمونه دیگر متفاوت است. این تفاوت‌ها موجب تغییر در ماهیت و سطح دشواری مسئله می‌شود و بنابراین نمی‌توان به صورت قطعی یک الگوریتم را نسبت به دیگری برتر دانست. هر کدام از این الگوریتم‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص

خود هستند که بسته به ساختار مسئله ممکن است عملکرد متفاوتی داشته باشند. در نتیجه، این امکان برای طراح وجود دارد که با توجه به ویژگی‌های مسئله و اهداف پروژه، روش بهینه‌سازی مناسب خود را انتخاب کند. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نهنگ نشان داد که با وجود تفاوت‌هایی در پاسخ‌ها، میزان انحراف معیارها در محدوده‌ای قابل قبول قرار دارد و استفاده از روش‌های پیشنهادی در طراحی سازه توصیه می‌شود.

۳- استفاده از روش‌های معرفی شده در این مقاله به مهندسان سازه کمک می‌کند تا با رعایت الزامات آیین‌نامه‌ای به طراحی سازه‌های اقتصادی‌تر بپردازند و همچنین می‌تواند سهم مهمی در کاهش هزینه‌های پروژه‌های عمرانی داشته باشد.

۴- برای پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود الگوریتم‌های بروزتر و پیشرفته‌تری مورد بررسی قرار گیرند تا امکان مقایسه گسترده‌تری فراهم شود. همچنین انجام تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم‌ها، به صورت جامع‌تر می‌تواند در درک دقیق‌تر رفتار الگوریتم‌ها مفید واقع شود. افزون بر این، افزودن قیود عملیاتی نظیر محدودیت‌های اجرایی می‌تواند به نتایج واقع‌بینانه‌تری منجر شود و ارتباط نزدیک‌تری میان تحقیق و کاربردهای صنعتی برقرار سازد.

## مراجع

- [1] S. S Rao, (2009). *Engineering Optimization Theory and Practice*, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [2] A. Kaveh and S. Talatahari, (2010). "An improved ant colony optimization for the design of planar steel frames", *Engineering Structures*, vol. 32, no. 3, pp. 864-873.
- [3] S. Rajeev and C. S. Krishnamoorthy, (1992). "Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms", *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, no. 5, pp. 1233-1250.
- [4] S. Pezeshk, C. V. Camp and D. Chen, (2000). "Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization", *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, no. 3, pp. 382-388.
- [5] A. Kaveh and H. Rahami, (2006). "Nonlinear analysis and optimal design of structures via force method and genetic algorithm", *Computers & Structures*, vol. 84, no. 12, pp. :770-778.
- [6] A. Kaveh and S. Talatahari, (2010). "Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm", *Computers and Structures*, vol. 88, no. 21-22, pp. 1220 - 1229.
- [7] O. Hasançebi and S. Kazemzadeh Azad, (2012). "An exponential big bang-big crunch algorithm for discrete design optimization of steel frames", *Computers and Structures*, Vols. 110-111, pp. 167 - 179.
- [8] S. Talatahari, A. H. Gandomi, X.-S. Yang and S. Deb, (2015). "Optimum design of frame structures using the Eagle Strategy with Differential Evolution", *Engineering Structures*, vol. 91, pp. 16-25.
- [9] M. R. Maheri and M. Talezadeh, (2017). "An Enhanced Imperialist Competitive Algorithm for optimum design of skeletal structures", *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 40, pp. 24-36.
- [10] A. Khajeh, M. R. Ghasemi and H. Ghohani Arab, (2017). "HYBRID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, GRID SEARCH", *INTERNATIONAL JOURNAL OF OPTIMIZATION IN CIVIL ENGINEERING*, vol. 7, no. 2, pp. 171-189.
- [11] M. Artar and A. Daloglu, (2018). "Optimum weight design of steel space frames with semi-rigid connections using harmony search and genetic algorithms", *Neural Computing and Applications*, vol. 29, no. 11, pp. 1089 - 1100.

- [12] S. Mirjalili , S. M. Mirjalili and A. Lewis,(2014). “Grey Wolf Optimizer”, *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61.
- [13] S. Mirjalili and A. Lewis,(2016). “The Whale Optimization Algorithm”, *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51-67.
- [14] A. Kaveh, S. R. Hoseini Vaez , P. Hosseini and M. Bakhtyari ,(2019). “Optimal Design of Steel Curved Roof Frames by Enhanced Vibrating Particles System Algorithm”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 63, no. 4, p. 947-960.
- [15] A. Kaveh, S. R. Hoseini Vaez , P. Hosseini and M. A. Fathali ,(2021). “Heuristic Operator for Reliability Assessment of Frame Structures”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 65, no. 3, p. 702-716.
- [16] M. J. Haji Mazdarani, S. R. Hoseini Vaez, P. Hosseini and M. A. Fathali,(2023). “Reliability-based layout optimization of concentrically braced in 3D steel frames”, *Structures*, vol. 47, pp. 1094-1112.
- [17] M. Vafae Motlagh, S. R. Hoseini Vaez and A. Asaad Samani,(2024). “Optimum performance-based design of concentric braced steel frames”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 11, no. 9, pp. 120-142.
- [18] P. Hosseini, A. Kaveh, M. A. Fathali and S. R. Hoseini Vaez,(2024). “A two-loop RBDO approach for steel frame structures using EVPS, GWO, and Monte Carlo simulation”, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 32, no. 4, pp. 605-624.
- [19] A. Khajeh, a. k. kiani, m. seraji and H. Dasht,(2023). “Optimization of structure using hybrid Harris hawks and genetic algorithm”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 114-132.
- [20] H. Eimani kalehsar and A. Esmacile Aghdam,(2024). “Sizing optimization of truss structures using the exchange market algorithm”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 11, no. 7, pp. 99-122.
- [21] AISC,(2010). Specifications for structural steel buildings, Chicago: IL: AISC.
- [22] V. Tog'an,(2012). “Design of planar steel frames using Teaching-Learning Based Optimization”, *Engineering Structures*, vol. 34, p. 225-232.
- [23] P. c. f. R. I. C. o. P. f. S. R. D. o. Buildings,(1393). IRANIAN CODE OF PRACTICE FOR SEISMIC RESISTANT DESIGN OF BUILDINGS Standard NO.2800 (4 Edition), Tehran: Road ,Housing and Urban Development Research Center.
- [24] M. I. Salama,(2013) “New simple equations for effective length factors”, *HBRC Journal*.
- [25] A. Mahallati, H. Ghohani Arab and M. R. Ghasemi,(2018). “OPTIMIZATION OF STEEL MOMENT FRAME BY A PROPOSED EVOLUTIONARY ALGORITHM”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF OPTIMIZATION IN CIVIL ENGINEERING*, vol. 8, no. 4, pp. 511-524.
- [26] M. Črepinšek, S.-h. Liu and M. Mernik,(2013). “Exploration and Exploitation in Evolutionary Algorithms: A Survey”, *ACM Computing Surveys* , vol. 45.
- [27] C. V. Camp, B. J. Bichon and S. P. Stovall,(2005). “Design of Steel Frames Using Ant Colony Optimization”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 3, pp. 369-379.
- [28] P. Murren and K. Khandelwal,(2014). “Design-Driven Harmony Search (DDHS) in Steel Frame Optimization”, *Engineering Structures*, vol. 59, pp. 798-808.



