

## Performance-Based Optimal Design of Low-Rise Steel Moment Frames Using Enhanced Vibrating Particles System Algorithm

Arezoo Asaad Samani<sup>1</sup>, Seyed Rohollah Hoseini Vaez<sup>\*2</sup>

1- PhD. Student, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

### ABSTRACT

In the science of structural and earthquake engineering, with the emergence of performance-based design (PBD), many researchers have focused their research on this field. The aim of PBD is to enable engineers to design structures that offer predictable performance. Height set-back in structures is a particular type of irregularity that has a significant effect on the performance of the structures and is a subject that has always been investigated by researchers. In this study, the optimal performance-based design of two three-story steel moment frames is performed. For each example, the frame is analyzed with a lateral loading pattern based on the first mode shape in two independent steps. If the results of the analysis in the first step are satisfactory, the frame has been analyzed in the second step. Since the most common analysis method used in PBD is nonlinear static analysis, this method is considered as a frame analysis method using OpenSees software. In this study, the optimization process is performed using two meta-heuristic algorithms, EVPS and ECBO. The constraints of the problem are the acceptance criteria of steel moment frame according to FEMA 356, inter-story drift, slenderness ratio of columns, and design criteria of the column and beam joints. The results show that the best solution obtained by the EVPS algorithm and the EVPS has better performance than ECBO. Also, the ratio of plastic hinge rotation to the allowable values for the best solution was smaller than the unity for all plastic hinges, which indicates an acceptable amount of plastic hinge rotation.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 05 May 2023

**Revise Date:** 28 April 2024

**Accept Date:** 22 July 2023

### Keywords:

Performance-based design  
Optimization  
Meta-heuristic algorithm  
Nonlinear static analysis  
2D steel moment frame  
Height set-back

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.394748.3103>

\*Corresponding author: Seyed Rohollah Hoseini Vaez  
Email address: hoseinivaez@qom.ac.ir

## طراحی بهینه براساس عملکرد قاب‌های خمشی فولادی کوتاه مرتبه با استفاده از الگوریتم ارتعاش ذرات اصلاح شده

آرزو اسعد سامانی<sup>۱\*</sup>، سید روح الله حسینی واعظ<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

### چکیده

در علم مهندسی سازه و زلزله، با مطرح شدن طراحی لرزه‌ای براساس عملکرد، بسیاری از پژوهشگران تحقیقات خود را در این زمینه متمرکز کرده‌اند. هدف از این نوع طراحی، قادر ساختن مهندسان به طراحی سازه‌هایی است که عملکردشان قابل پیش‌بینی باشد. یک نوع خاص نامنظمی در سازه، پس‌نشستگی آن در ارتفاع می‌باشد که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سازه دارد و موضوعی است که همواره مورد بررسی پژوهشگران قرار می‌گیرد. در این مقاله، به طراحی بهینه مبتنی بر عملکرد دو مثال قاب خمشی فولادی سه طبقه پرداخته شده است. در هر دو مثال، قاب‌های فولادی در دو گام مستقل، با الگوی بارگذاری جانبی براساس شکل مود اول مورد تحلیل واقع شده‌اند. در صورت رضایت بخش بودن نتایج حاصل از تحلیل در گام اول، قاب‌ها در گام دوم نیز تحلیل شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آنجایی که رایج‌ترین روش تحلیل برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشد، این روش با استفاده از نرم‌افزار *OpenSees* به عنوان روش تحلیل قاب‌ها در نظر گرفته شده است. پروسه بهینه‌سازی در این مطالعه، با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری *EVPS* و *ECBO* انجام شده است. قیود مسئله معیارهای پذیرش قاب خمشی فولادی طبق آیین‌نامه *FEMA 356*، دریافت طبقات، ضریب لاغری ستون‌ها و ضوابط طراحی اتصالات تیر و ستون می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که بهترین پاسخ بهینه توسط الگوریتم *EVPS* یافته شده است و الگوریتم *EVPS* عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم *ECBO* داشته است. نسبت دوران پلاستیک مفاصل تشکیل شده در المان‌ها به مقادیر مجاز آن‌ها برای بهترین پاسخ کمتر از یک می‌باشد که نشان می‌دهد این مفاصل در محدوده تعریف شده مجاز برای هر سطح عملکرد قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: طراحی مبتنی بر عملکرد، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری، تحلیل استاتیکی غیرخطی، قاب خمشی فولادی دو بعدی، پس‌نشستگی در ارتفاع.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۲/۰۲/۱۵	۱۴۰۲/۰۴/۰۹	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.394748.3103">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.394748.3103</a>
*نویسنده مسئول:		سید روح الله حسینی واعظ			
پست الکترونیکی:		Hoseinivaez@qom.ac.ir			

## ۱- مقدمه

طراحی مبتنی بر عملکرد، یک رویکرد مهندسی برای طراحی المان‌های ساختمان براساس اهداف عملکردی مورد نظر، تحلیل‌های مهندسی و ارزیابی کمی گزینه‌ها در برابر اهداف طراحی با استفاده از ابزارهای مهندسی مورد قبول و معیارهای عملکردی می‌باشد. در روش طراحی سازه‌ها مبتنی بر عملکردشان، طراحان سطوح عملکردی و خسارات مختلف در برابر سطوح مختلف خطرپذیری لرزه‌ای را در نظر می‌گیرند و سازه را برای سطوح مختلف عملکرد به گونه‌ای طراحی می‌کنند که در هنگام زلزله حداکثر تغییرشکل‌ها در حدود مورد نظر باقی بماند. این امر منجر به دقیق‌تر شدن بررسی رفتار سازه پس از تجربه تغییرمکان‌های ناشی از زلزله می‌گردد؛ براساس نتایج این بررسی، می‌توان پاسخ واقعی سیستم‌های ساختمان و اثرات آن‌ها بر عملکرد ساختمان‌ها را مورد ارزیابی قرار داد و رفتار سازه را بهبود بخشید. در ادامه نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه معرفی می‌شود. قلی‌زاده و همکاران با در نظر گرفتن رابطه تغییرمکان هدف از نشریه FEMA 356 به طراحی لرزه‌ای بهینه قاب خمشی فولادی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پرداختند. در این پژوهش، قبل از طراحی سازه و بهینه‌سازی آن، کنترل سازه برای بارهای ثقیلی به‌عنوان قید پیش‌نیاز انجام شده است [۱].

کاو و همکاران طراحی براساس عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی را برای سطوح عملکرد مختلف بررسی کردند و دریافت طبقات را به عنوان معیاری برای طراحی در نظر گرفتند. آنها در این پژوهش، با استفاده از روابط اتصالات نیمه صلب تحلیل استاتیکی غیرخطی را انجام داده و معیارشان برای تعیین سطوح عملکردی، برش پایه است [۲]. قلی‌زاده برای تعیین سطوح عملکردی، ابتدا تغییرمکان هدف را مورد بررسی قرار داد که مقدار این تغییرمکان با استفاده از رابطه مطرح شده در FEMA 356 براساس دوخطی کردن منحنی پوش‌آور محاسبه شده است. کنترل‌هایی که برای ارزیابی سازه انجام گرفته است، مقاومت المان‌ها و دریافت جانبی طبقات هستند [۳]. قلی‌زاده و پورحسینی طراحی بهینه مبتنی بر عملکرد قاب‌های مهاربندی فولادی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، آنها با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به ارزیابی پاسخ‌های سازه در سطوح عملکرد مختلف بر مبنای روش ضرایب جابجایی FEMA 356 [۴] پرداخته‌اند و مطابق این روش، سازه را تحت توزیع خاصی از بارهای جانبی قرار داده‌اند تا جابجایی آن به جابجایی هدف برسد [۵]. همچنین قلی‌زاده و باغچوان، به طراحی لرزه‌ای بهینه براساس عملکرد قاب‌های خمشی فولادی پرداختند. در این پژوهش، ابتدا قیود مقاومتی و هندسی تحت بارهای ثقیلی کنترل شده، در صورت رضایت بخش بودن کنترل‌های مقاومتی و هندسی، تحلیل پوش‌آور برای ارزیابی دریافت میان طبقه حداکثر انجام شده است [۶]. در ادامه منسوری و همکاران، به طراحی لرزه‌ای بهینه براساس عملکرد قاب‌های مهاربندی همگرا در سطوح عملکرد IO و CP پرداختند. آنها به حداقل رساندن وزن سازه را به عنوان تابع هدف و نسبت‌های دریافت میان طبقه را به عنوان قیود مسئله بهینه‌سازی خود در نظر گرفته‌اند [۷]. همچنین، قلی‌زاده و فتحی در سال ۲۰۱۸، برای به حداقل رساندن هزینه کل سازه‌ها، روش طراحی براساس عملکرد بر روی قاب‌های خمشی فولادی را به کار بردند. هدف اصلی آنها، ارائه یک روش کنترل خسارت لرزه‌ای در چارچوب طراحی بهینه مبتنی بر عملکرد قاب‌های خمشی فولادی می‌باشد [۸].

در سال ۲۰۱۹ کریمی و حسینی واعظ، به بهینه‌سازی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی دوبعدی براساس عملکرد در دو مرحله پرداختند. در پژوهش ذکر شده، ابتدا روش حالات حدی بررسی شده است و سپس در صورت قابل قبول بودن نتایج این مرحله، سازه برای چهار سطح عملکرد با در نظر گرفتن چهار تغییرمکان هدف، تحت تحلیل پوش‌آور قرار گرفته است [۹]. فتحعلی و حسینی واعظ در سال ۲۰۲۰، به طراحی بهینه براساس عملکرد لرزه‌ای قاب مهاربندی واگرا پرداختند. در پژوهش آنها، ابتدا روشی برای مدل‌سازی تیر پیوند قاب مهاربندی واگرا ارائه شده است که براساس آن امکان ارزیابی عملکرد تیر پیوند وجود دارد؛ سپس مسئله بهینه‌سازی براساس معیارهای پذیرش روش طراحی مبتنی بر عملکرد تعریف شده است [۱۰]. همچنین قلی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۲۰، به طراحی بهینه مبتنی بر عملکرد قاب‌های مهاربندی همگرا پرداختند و ظرفیت فروریزش لرزه‌ای قاب‌های طراحی شده را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۱]. علاوه بر این پژوهش‌ها، چندین پژوهش دیگر نیز در زمینه طراحی بهینه براساس عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی انجام شده است [۱۲-۲۴].

در این مطالعه از معیار تغییرمکان هدف برای تعیین سطوح عملکردی استفاده شده است. از آنجایی که رایج‌ترین روش تحلیل برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، روش تحلیل پوش‌آور می‌باشد، در مقاله حاضر این روش مبنای تحلیل سازه قرار گرفته است. در مطالعات

گذشته، قاب‌های دوبعدی متقارن بودند و بر این اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی فقط در یک جهت انجام می‌شده است. اما در قاب‌های دوبعدی که به صورت نامتقارن هستند، نیاز می‌باشد که تحلیل استاتیکی غیرخطی برای آنها در هر دو جهت انجام شود. از این رو بهینه‌سازی قاب خمشی نامتقارن براساس طراحی عملکردی، موضوعی است که کمتر ارزیابی شده و در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین امروزه به علت افزایش انواع نامنظمی‌ها در سازه‌ها که ناشی از ملاحظات معماری و نوع خاص کاربری سازه می‌باشد، عملکرد لرزه‌ای این نوع سازه‌ها بیش از پیش مورد توجه مهندسين قرار گرفته است. نوع خاصی از نامنظمی در سازه، پس‌نشستگی آن در ارتفاع می‌باشد که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سازه دارد. از این رو در پژوهش حاضر، به طراحی بهینه بر مبنای عملکرد لرزه‌ای دو نمونه قاب خمشی فولادی سه طبقه نامتقارن و دارای پس‌نشستگی در ارتفاع پرداخته شده است.

در این پژوهش هدف از بهینه‌سازی، کاهش وزن سازه و دریافت جانبی طبقات با رعایت معیارهای پذیرش برای هر یک از سطوح عملکرد می‌باشد. در این مطالعه قیود مسئله بهینه‌سازی، دریافت طبقات، ضریب لاغری ستون‌ها، ضوابط طراحی اتصالات تیر و ستون می‌باشند؛ همچنین بخشی از قیود بر مبنای معیارهای پذیرش سیستم قاب خمشی و طبق آیین‌نامه FEMA 356 تعریف شده‌اند. بهینه‌سازی بر روی این قاب‌ها با استفاده از الگوریتم‌های ECBO و EVPS انجام شده است.

## ۲- طراحی براساس عملکرد

طراحی ساختمان‌ها براساس عملکرد، یعنی تعیین مشخصات اعضای ساختمان براساس عملکردی که در برابر زلزله‌های مشخص از آنها انتظار می‌رود. به منظور بیان اهداف طراحی لرزه‌ای، باید ابتدا سطح عملکرد سازه و سپس سطح خطر لرزه‌ای مربوطه تعیین شود. در این مقاله، سطوح عملکرد IO، LS و CP براساس آیین‌نامه FEMA 356 در نظر گرفته شده‌اند که بر مبنای مفهوم بهسازی ویژه، سطوح عملکرد IO، LS و CP به ترتیب به ۲۰، ۱۰ و ۲ درصد احتمال رویداد زلزله در ۵۰ سال مربوط می‌شوند.

باتوجه به اینکه در این مطالعه، از تحلیل پوش‌آور استفاده شده است، سازه تحت یک توزیع خاص بارجانبی (شکل مود اول ارتعاشی سازه) قرار گرفته است تا زمانی که تغییر مکان نقطه کنترل به تغییر مکان هدف برسد. مقدار این تغییر مکان برای هر سطح عملکرد طبق FEMA 356، از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

که در آن  $T_e$  زمان تناوب اصلی مؤثر ساختمان،  $C_0$  ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه آزادی،  $C_1$  ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکان‌های غیرارتجاعی سیستم،  $C_2$  ضریب اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه‌ای است که بر تغییر مکان‌ها به دلیل رفتار غیرارتجاعی آنها اعمال می‌شود،  $C_3$  ضریب اعمال اثرات  $P-\Delta$ ،  $g$  شتاب زمین و  $S_a$  شتاب طیفی به ازای زمان تناوب اصلی مؤثر  $T_e$  است که برای هر سه سطح عملکرد در میرایی مؤثر ۵ درصد مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$S_a = \begin{cases} S_{XS} \left[ \left( \frac{5}{B_S} - 2 \right) \frac{T}{T_S} + 0.4 \right] & 0 < T < T_0 \\ S_{XS} / B_S & T_0 < T < T_S, S_{X1} = F_v S_1, S_{XS} = F_a S_S \\ S_{X1} / B_1 T & T > T_S \end{cases} \quad (2)$$

در روابط بالا،  $S_1$  و  $S_S$  به ترتیب شتاب طیفی در زمان تناوب یک ثانیه و شتاب طیفی در زمان تناوب کوتاه (۰/۱ ثانیه) هستند؛  $F_a$  و  $F_v$  ضرایب تاثیر نوع زمین ساختگاه براساس طبقه‌بندی ساختگاه هستند؛  $T$  زمان تناوب اصلی سازه است؛ مقادیر  $T_0$  و  $T_S$  از رابطه (۳) محاسبه می‌گردند:

$$T_S = (S_{X1}B_S)/(S_{XS}B_1), T_0 = 0.2T_S \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $B_1$  و  $B_S$  ضرایب مربوط به اثر میرایی هستند که برای میرایی مؤثر ۵ درصد، برابر یک در نظر گرفته می‌شوند.

### ۳- طرح مسئله بهینه‌سازی

#### ۳-۱- فرمول‌بندی مسئله

هر مسئله بهینه‌سازی سه قسمت اصلی دارد: متغیرهای بهینه‌سازی (متغیرهای طراحی)، توابع هدف و قیدها. در این پژوهش متغیرهای طراحی از لیست مقاطع فولادی W-shaped از آیین‌نامه AISC انتخاب شده‌اند. در یک مسئله بهینه‌سازی وزن سازه، هدف کمینه کردن وزن سازه به شرط برآورده شدن قیود در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر، وزن نرمال شده سازه به صورت رابطه (۴) فرمول‌بندی شده است.

$$F_1(\mathbf{X}) = \frac{1}{W_{\max}} \sum_{i=1}^{ng} \rho_i A_i \sum_{j=1}^{nm} L_j \quad (4)$$

که در آن  $W_{\max}$  وزن بیشینه سازه است؛  $ng$  تعداد گروه‌بندی المان‌های سازه می‌باشد؛  $nm$  تعداد المان‌های سازه است،  $A_i$  و  $\rho_i$  به ترتیب، معرف وزن واحد حجم، مساحت سطح مقطع گروه  $i$ ام و  $L_j$  طول عضو  $j$ ام هستند. در این مقاله، علاوه بر کمینه کردن وزن سازه، یکنواخت‌سازی توزیع دررفت جانبی طبقات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف مربوط به توزیع دررفت جانبی طبقات به صورت رابطه (۵) تعریف شده است:

$$F_2(\mathbf{X}) = \left[ \frac{1}{n_s} \sum_{s=1}^{n_s-1} \left( \frac{v_s^{CP}(\mathbf{X})/H_S}{\Delta^{CP}(\mathbf{X})/H} - 1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

که در رابطه (۵)،  $n_s$  تعداد طبقات ساختمان،  $v_s^{CP}$  و  $\Delta^{CP}$  به ترتیب، دررفت طبقه  $S$  و دررفت سقف در سطح عملکرد CP هستند؛  $H_S$  فاصله عمودی از پای سازه تا طبقه  $S$  و  $H$  ارتفاع سازه است.

در نتیجه مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه (۶) فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Find : } \mathbf{X} &= \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{ng}\}^T, \quad \text{Subject to : } g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 0, 1, 2, \dots, nc \\ \text{To minimize : } F(\mathbf{X}) &= F_1(\mathbf{X}) + F_2(\mathbf{X}) = \frac{1}{W_{\max}} \sum_{i=1}^{ng} \rho_i A_i \sum_{j=1}^{nm} L_j + \left[ \frac{1}{n_s} \sum_{s=1}^{n_s-1} \left( \frac{v_s^{CP}(\mathbf{X})/H_S}{\Delta^{CP}(\mathbf{X})/H} - 1 \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

در این رابطه  $\mathbf{X}$  برداری شامل متغیرهای طراحی است؛  $F(\mathbf{X})$  تابع هدف،  $g_j(\mathbf{X})$  قیود طراحی و  $nc$  تعداد قیود است. در پژوهش حاضر، قیود و تابع هدف مسئله بهینه‌سازی به صورت تابع پنالتی خارجی مطابق رابطه (۷) در نظر گرفته شده‌اند.

$$\varphi(\mathbf{X}, r) = F(\mathbf{X}) \left( 1 + r \sum_{j=1}^{nc} V_j^2 \right), \quad V_j = \max\{0, g_j(\mathbf{X})\} \quad (7)$$

در رابطه (۷)،  $\varphi$  و  $r$  به ترتیب، تابع هدف با اعمال جریمه و ضریب پنالتی هستند؛ ثابت  $r$  مقداری تجربی بوده که با چندبار سعی و خطا می‌توان حدود قابل قبولی برای آن ارائه کرد.

به منظور ارضای ضوابط مربوط به طراحی اتصالات تیر-ستون و ستون-ستون در سازه‌های فولادی، قید هندسی براساس رابطه (۸) کنترل می‌شود [۶]:

$$g_{G,k} = \begin{cases} (b_B/b_C^{bot})_k - 1 \leq 0 \\ (h_C^{top}/h_C^{bot})_k - 1 \leq 0 \end{cases}, \quad k = 1, \dots, nk \quad (8)$$

که در آن،  $g_{G,k}$  قید هندسی اتصال  $k$ ام سازه است؛  $b_B$  و  $b_C^{bot}$  به ترتیب، پهنای بال تیر و پهنای بال ستون پایین اتصال  $k$ ام هستند؛  $h_C^{top}$  و  $h_C^{bot}$  به ترتیب، عمق ستون‌های بالا و پایین اتصال  $k$ ام هستند و  $nk$  تعداد اتصالات است. قید مربوط به ضریب لاغری ستون‌ها به صورت رابطه (۹) است:

$$g_j^\lambda = \frac{(K_j l_j / r_j)}{200} - 1 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, nf \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $K_j$ ،  $l_j$  و  $r_j$  به ترتیب، ضریب طول موثر، طول فاقد مهار جانبی و شعاع ژیراسیون ستون  $j$ ام می‌باشند؛  $nf$  تعداد ستون‌ها است.

دوران در مفاصل پلاستیک المان‌ها برای هر سطح عملکرد، مطابق رابطه (۱۰) کنترل شده است:

$$g_{i,d}^0 = (\theta_d^i / \theta_{all}^i) - 1 \leq 0, \quad i = IO, LS, CP, \quad d = 1, 2, \dots, nm \quad (10)$$

که در آن،  $\theta_d^i$  و  $\theta_{all}^i$  به ترتیب، دوران پلاستیک المان  $d$ ام و مقدار مجاز آن برای سطح عملکرد  $i$ ام براساس آیین‌نامه FEMA 356 هستند؛  $nm$  تعداد المان‌ها است.

قید دریافت میان طبقه در هر سطح عملکرد، مطابق رابطه (۱۱) می‌باشد:

$$g_{j,i}^\Delta = (\Delta_j^i / \Delta_{all}^i) - 1 \leq 0, \quad i = IO, LS, CP, \quad j = 1, 2, \dots, ns \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)،  $\Delta_j^i$  و  $\Delta_{all}^i$  به ترتیب، دریافت میان طبقه طبقه  $j$ ام و مقدار مجاز آن در سطح عملکرد  $i$ ام می‌باشند؛  $ns$  تعداد طبقات است. مقدار مجاز دریافت میان طبقه برای سطوح عملکرد IO، LS و CP، به ترتیب برابر ۰/۰۱۲، ۰/۰۳۱ و ۰/۰۶۱ در نظر گرفته شده است.

مطابق با آیین‌نامه FEMA 356، ستون‌های فولادی که تحت اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی قرار دارند تا زمانی که نیروی محوری ستون وارد شده کمتر از ۵۰ درصد کرانه پایین مقاومت فشاری ستون ( $P_{CL}$ ) باشد، رفتار ستون از نظر خمش کنترل شونده توسط تغییر شکل و از نظر نیروی محوری کنترل شونده توسط نیرو می‌باشد. در ستون‌های فولادی که نیروی محوری وارد شده بیش از ۵۰ درصد مقدار کرانه پایین مقاومت فشاری ستون باشد، رفتار ستون چه از نظر خمشی و چه از نظر نیروی محوری کنترل شونده توسط نیرو است. در این پژوهش، قید مربوط به مقاومت هریک از ستون‌ها به صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته شده است:

$$g_j^s = \left[ \left( P_{UF,j} / P_{CL,j} \right) + \left( M_{U,j} / M_{CL,j} \right) \right] - 1 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, ne \quad (12)$$

در رابطه بالا،  $g_j^s$  قید مقاومت ستون  $j$ ام،  $ne$  تعداد ستون‌ها،  $P_{UF,j}$  و  $M_{U,j}$  به ترتیب، نیروی محوری و لنگر خمشی ستون  $j$ ام و  $M_{CL,j}$  کرانه پایین مقاومت خمشی ستون  $j$ ام می‌باشند.

## ۳-۲- روش انجام کار

فلوچارت مراحل انجام کار در شکل ۱ نشان داده شده است. در رابطه محاسبه تغییرمکان هدف نهایی در فلوچارت، پارامترهایی وجود دارند که مقدار آن‌ها وابسته به رفتار دوخطی سازه می‌باشد. از طرفی در روند دوخطی شدن منحنی ظرفیت سازه، به فرض اولیه‌ای برای تغییرمکان هدف نیاز می‌باشد؛ بنابراین یک روند سعی و خطایی وجود دارد که برای شروع این روند سعی و خطا، سه تغییرمکان هدف اولیه برای بام برابر با ۰/۰۰۷، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ ارتفاع کلی سازه از تراز پایه، معادل با سه سطح عملکرد IO، LS و CP در نظر گرفته شده است. پس از انجام تحلیل پوش‌آور مقدار نیروهای اعضا، دوران مفاصل پلاستیک و تغییرمکان نسبی طبقات برای هر سطح عملکرد ذخیره می‌شود. پس از ثبت خروجی‌های مورد نظر از تحلیل، قیدهای مسئله طبق ضوابط FEMA 356 برای هر سطح عملکرد کنترل می‌گردد.

همان‌طور که در فلوچارت مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی از دو گام تشکیل شده است که گام اول، انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی براساس الگوی مود اول در جهت مثبت است. در صورتی که در این مرحله، قیدهای مسئله بهینه‌سازی برآورد شدند، گام دوم نیز انجام می‌شود که گام دوم، انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی براساس الگوی مود اول در جهت منفی می‌باشد. سه حالتی که در این روش احتمال وقوع دارند این است که قیود در گام اول برآورد نشوند، قیود در گام اول برآورد شده اما در گام دوم برآورد نشوند و حالت سوم اینکه قیود در هر دو گام برآورد شوند. برای ایجاد تفاوت بین این حالات، ضریبی به نام  $\beta$  تعریف شده که در مقدار جریمه تابع هدف مقید برای هریک از سه حالت تفاوت ایجاد کرده است.

## ۴- الگوریتم‌های فراابتکاری

## ۴-۱- الگوریتم سیستم ذرات ارتعاشی بهبودیافته

الگوریتم سیستم ذرات ارتعاشی بهبودیافته<sup>۱</sup> EVPS است که به دلیل افزایش سرعت همگرایی و افزایش کارایی الگوریتم VPS، به‌عنوان یک روش جایگزینی برای الگوریتم VPS به کار می‌رود.

الگوریتم سیستم ذرات ارتعاشی VPS یک الگوریتم جدید فراابتکاری است که براساس ارتعاش آزاد سیستم تک درجه آزادی با دامنه چسبندگی می‌باشد [۲۵، ۲۶]. در این الگوریتم فراابتکاری، ابتدا جمعیت اولیه در محدوده مجاز توسط رابطه (۱۳) تولید می‌شوند:

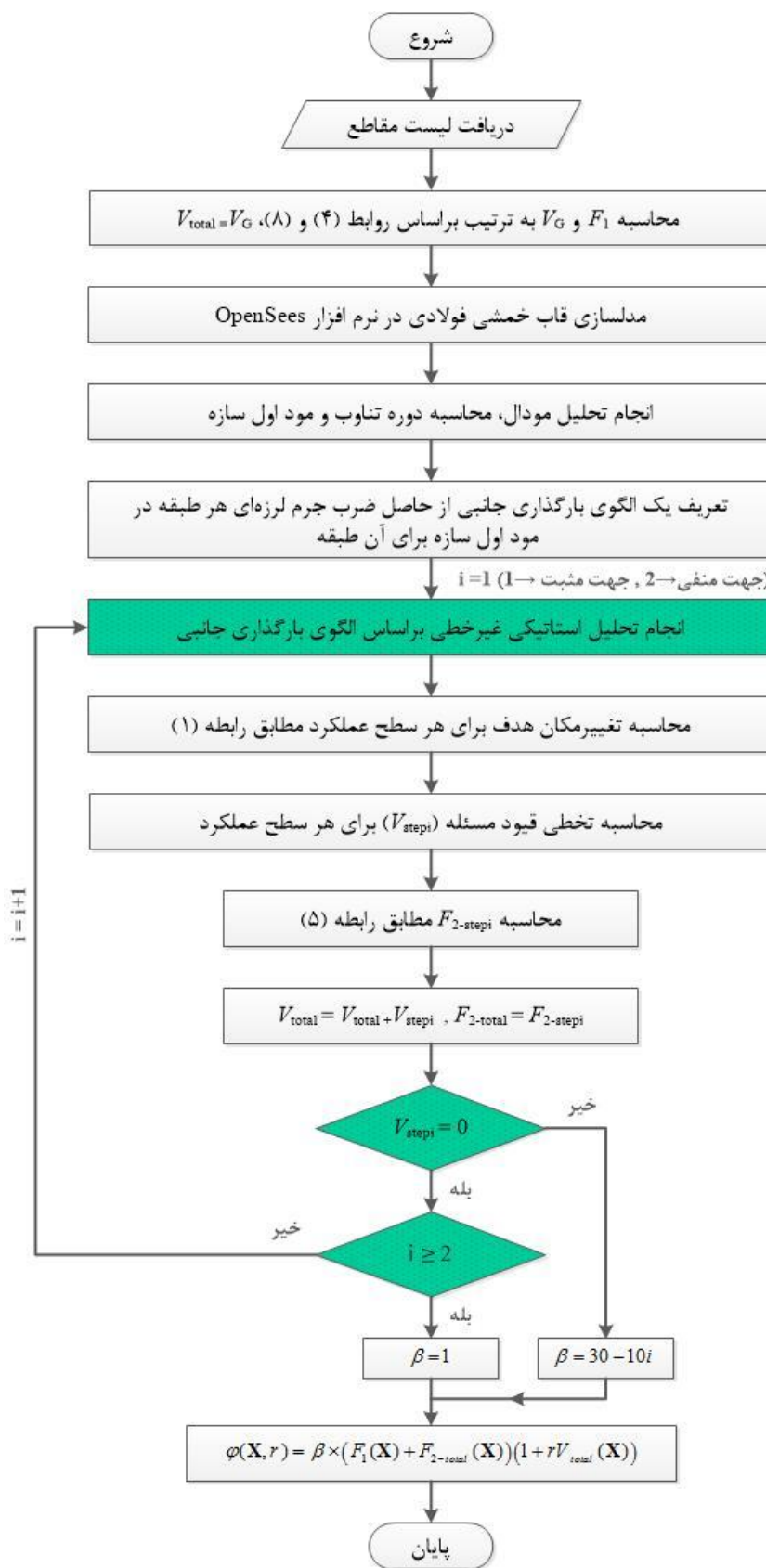
$$\mathbf{X}_j^i = \mathbf{X}_{\min} + \text{random} \cdot (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}) \quad (13)$$

در رابطه بالا،  $\mathbf{X}_j^i$  متغیر زام ذره نام است؛  $\mathbf{X}_{\min}$  و  $\mathbf{X}_{\max}$  به ترتیب، حد پایین و بالای متغیرهای طراحی در فضای جستجو هستند؛  $\text{random}$  یک عدد تصادفی در محدوده [۰ و ۱] است. در این الگوریتم، پارامتر دیگری به نام پارامتر حافظه نیز تعریف شده است که به تعداد اندازه حافظه، از بهترین موقعیت‌های به دست آمده برای جمعیت، ذخیره می‌کند. همچنین پارامتر دیگری که معرف تاثیر سطح لرزش در ارتعاش می‌باشد، مطابق رابطه (۱۴) تعریف شده است:

$$D = \left( \frac{\text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \right) - \alpha \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $\text{iter}$ ، تعداد تکرار فعلی؛  $\text{iter}_{\max}$ ، تعداد کل تکرارها و  $\alpha$ ، پارامتری با مقدار ثابت است. موقعیت‌های بعدی جمعیت در الگوریتم EVPS، توسط رابطه (۱۵) به‌روزرسانی می‌شوند:

<sup>1</sup> Enhanced Vibrating Particles System Algorithm



شکل ۱: فلوچارت مراحل انجام کار

$$x_j^i = \begin{cases} [D.A.rand1 + OHB^i] \\ [D.A.rand2 + GP^i] \\ [D.A.rand3 + BP^i] \end{cases}, \quad A = \begin{cases} (-1)^{round(rand)} (OHB^i - x_j^i) & (a) \\ (-1)^{round(rand)} (GP^i - x_j^i) & (b) \\ (-1)^{round(rand)} (BP^i - x_j^i) & (c) \end{cases} \quad (15)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$$

در رابطه (۱۵)،  $OHB$ ، یکی از بهترین موقعیت‌ها در جمعیت کلی است؛  $GP$ ، یک ذره خوب است که به‌طور تصادفی بین بهترین پاسخ‌ها در هر تکرار انتخاب شده است؛  $BP$ ، یک ذره بد است که به‌طور تصادفی بین بدترین پاسخ‌ها در هر تکرار انتخاب شده است؛ هر سه پارامتر به‌طور مستقل برای هر یک از متغیرها تعیین می‌شوند. ضرایب  $\omega_1$ ،  $\omega_2$  و  $\omega_3$  به ترتیب اهمیت نسبی برای  $OHB$ ،  $GP$  و  $BP$  هستند؛  $rand1$ ،  $rand2$  و  $rand3$ ، اعداد تصادفی هستند که به‌طور یکنواخت در بازه  $[0, 1]$  توزیع شده‌اند. پارامتر دیگری به نام  $p$  بین صفر تا یک، برای سرعت بخشیدن به همگرایی الگوریتم تعریف می‌شود که با  $rand$  مقایسه شده است؛ در صورتی که  $p$  کوچک‌تر از  $rand$  باشد، روابط  $\omega_3=0$  و  $\omega_2=1-\omega_1$  برقرار هستند. همچنین پارامتری به نام  $HMCR^2$  تعریف می‌شود؛ پارامتر  $HMCR$  تعیین می‌کند که مؤلفه تخطی، با مقدار مربوط به  $OHB$  باید تغییر کند یا باید از فضای جستجوی مجاز انتخاب شود؛ که اگر با مقدار مربوط به  $OHB$  تغییر کند، پارامتر دیگری به نام  $PAR^3$  تعریف می‌شود که تعیین می‌کند آیا این مقدار باید با مقدار مجاور تغییر کند یا نه. شکل ۲ شبه کد الگوریتم EVPS را نشان می‌دهد.

تعیین مقدار حداکثر تعداد تکرار ( $iter_{max}$ )، اندازه جمعیت ( $POP$ ) و اندازه حافظه برخورد ( $MS$ ).

تعریف مقادیر ضرایب ثابت  $\alpha^1$ ،  $HMCR^2$ ،  $PAR^3$

تعیین موقعیت‌های اولیه ذرات براساس یک روند تصادفی مطابق رابطه (۱۳).

تا زمانی که  $iter < iter_{max}$

محاسبه مقادیر تابع هدف و ایجاد حافظه.

محاسبه یک تابع کاهش مطابق رابطه (۱۴).

برای  $i=1:POP$

انتخاب  $GP$ ،  $BP$  و  $OHB$ .

اگر  $P^4 < rand$

$\omega_2=1-\omega_1$  و  $\omega_3=0$

خاتمه

به روزرسانی موقعیت جدید ذرات مطابق روابط (a)، (b) و (c) از رابطه (۱۵).

به روزرسانی مقادیر  $\omega_1$ ،  $\omega_2$  و  $\omega_3$

خاتمه

خاتمه

شکل ۲: شبه کد الگوریتم EVPS

## ۲-۴- الگوریتم برخورد اجسام بهبود یافته

در این مقاله، همچنین از الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام بهبود یافته  $ECBO^4$  استفاده شده است. کاوه و ایلچی الگوریتم CBO بهبود یافته را برای بهبود میزان همگرایی و قابلیت اطمینان CBO با افزودن یک حافظه برای ذخیره تعدادی از بهترین راه‌حل‌ها، در

<sup>2</sup> Harmony Memory Considering Rate

<sup>3</sup> Pitch Adjusting Rate

<sup>4</sup> Enhanced Colliding Bodies Optimization Algorithm

طول پروسه بهینه‌سازی پیشنهاد دادند [۲۷]. در این الگوریتم، ابتدا موقعیت‌های اولیه تمام اجسام در حال برخورد (CBs) به صورت رندومی در یک فضای جستجوی  $m$  بعدی، با استفاده از رابطه (۱۶) تعیین می‌شوند.

$$\mathbf{X}_i^0 = \mathbf{X}_{\min} + \text{random} \circ (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}), i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)،  $\mathbf{X}_i^0$  بردار موقعیت اولیه  $CB$  نام است؛  $\mathbf{X}_{\min}$  و  $\mathbf{X}_{\max}$  به ترتیب حد پایین و بالای متغیرهای طراحی هستند؛  $\text{random}$  یک بردار تصادفی در محدوده [۰، ۱] و  $n$  تعداد  $CB$ sها است. سپس مقدار جرم برای هر  $CB$  با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$m_i = \frac{1}{F(\mathbf{X}_i)} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)،  $F(\mathbf{X}_i)$  مقدار تابع هدف  $CB$  نام است. برای ذخیره تعدادی از بهترین بردارهای  $CB$  به دست آمده، مقادیر تابع هدف و جرم مربوط به آنها، از حافظه‌ای به نام حافظه برخورد استفاده می‌شود. بردارهای راه‌حل که در حافظه برخورد ذخیره شده‌اند، به جمعیت اضافه شده و به تعداد آنها، بدترین وضعیت‌های فعلی  $CB$ sها حذف می‌شوند. سرانجام  $CB$ sها براساس جرمشان به صورت کاهش مرتب می‌شوند.  $CB$ sها به دو گروه  $(a)$  و  $(b)$  تقسیم می‌شوند:

$$(a): \text{Stationary group} \rightarrow \left[ i_s = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \right] \quad (b): \text{Moving group} \rightarrow \left[ i_m = \frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 2, \dots, n \right]$$

سرعت جسم‌های ثابت و متحرک قبل از برخورد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{i_s} = 0, \quad V_{i_m} = V_{i_s} - V_{i_m} \quad (18)$$

سرعت جسم‌های ثابت و متحرک بعد از برخورد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V'_{i_s} = \left( \frac{(1+\varepsilon)m_{i_m}}{m_{i_s} + m_{i_m}} \right) V_{i_m}, \quad V'_{i_m} = \left( \frac{m_{i_m} - \varepsilon m_{i_s}}{m_{i_s} + m_{i_m}} \right) V_{i_m}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{\text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \quad (19)$$

که در رابطه (۱۹)،  $\text{iter}$  تعداد تکرار فعلی است؛  $\text{iter}_{\max}$  تعداد کل تکرارها است؛  $\varepsilon$  ضریبی است که به صورت خطی از یک تا صفر کاهش می‌یابد.

در نهایت، موقعیت جدید هر  $CB$  به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\mathbf{X}_{i_s}^{\text{new}} = \mathbf{X}_{i_s} + R_{i_s} \circ V'_{i_s}, \quad \mathbf{X}_{i_m}^{\text{new}} = \mathbf{X}_{i_m} + R_{i_m} \circ V'_{i_m} \quad (20)$$

در رابطه بالا،  $R_{i_s}$  و  $R_{i_m}$  بردارهای تصادفی هستند که به صورت یکنواخت در محدوده [۰، ۱] توزیع شده‌اند. در ECBO پارامتری مانند  $Pro$  بین محدوده بین صفر و یک معرفی شده است و مشخص می‌کند که آیا یک جز هر  $CB$  (هر متغیر) باید تغییر کند یا نه. برای هر  $CB$ ،  $Pro$  مقایسه می‌شود با  $m_i$  که  $(i=1, 2, \dots, n)$  که  $m_i$  یک عدد تصادفی است که به طور یکنواخت در محدوده [۰، ۱] توزیع شده است. اگر  $m_i < Pro$ ، یک بعد  $CB$  نام به طور تصادفی انتخاب شده و مقدار آن از رابطه (۲۱) مجدداً محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{X}_j^i = \mathbf{X}_{\min} + \text{random} \cdot (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}) \quad (21)$$

که در آن  $X_j^i$  متغیر زام برای  $CB$  نام است؛  $X_{min}$  و  $X_{max}$  به ترتیب حد پایین و بالای متغیرهای طراحی در فضای جستجو هستند. در نتیجه فرصت‌هایی برای  $CB$ ها جهت حرکت در فضای جستجو فراهم می‌شود که منجر به ارائه تنوع بهتر می‌گردد. شکل ۳ شبه کد الگوریتم ECBO را نشان می‌دهد.

تعیین مقدار حداکثر تعداد تکرار ( $iter_{max}$ )، اندازه جمعیت ( $N$ ) و اندازه حافظه برخورد ( $CM$ ).

تعریف ضریب ( $Pro$ ) در بازه (۰ و ۱).

تعیین موقعیت‌های اولیه ذرات براساس یک روند تصادفی مطابق رابطه (۱۶).

تا زمانی که  $iter < iter_{max}$

محاسبه ضریب کاهشی ( $\epsilon$ ) مطابق رابطه (۱۹).

محاسبه تابع هدف برای هر ذره.

تعریف جرم‌ها براساس رابطه (۱۷).

به روزرسانی حافظه برخورد و جمعیت.

تقسیم ذرات به گروه‌های ساکن و متحرک و محاسبه سرعت قبل و بعد از برخورد آنها به ترتیب مطابق روابط (۱۸) و (۱۹).

به روزرسانی موقعیت ذرات براساس رابطه (۲۰).

انتخاب یک عدد تصادفی ( $r_{mi}$ ) در بازه (۰ و ۱).

برای  $i=1:N$

اگر  $r_{mi} < Pro$

انتخاب یک بعد از ذره  $i$  ام به طور تصادفی و محاسبه مقدار آن مطابق رابطه (۲۱).

خاتمه

خاتمه

خاتمه

شکل ۳: شبه کد الگوریتم ECBO

## ۵- نمونه‌های مرجع برای بهینه‌سازی

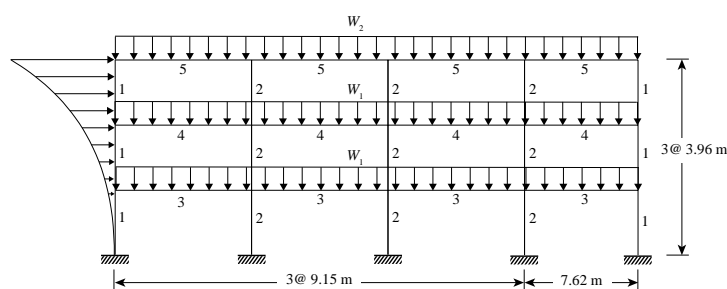
در این مقاله، دو مثال قاب خمشی فولادی سه طبقه که در چارچوب طراحی لرزه‌ای براساس عملکرد با استفاده از الگوریتم‌های EVPS و ECBO بهینه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای هر الگوریتم، تعداد جمعیت ۶۰ و حداکثر تکرار ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. به منظور حصول اطمینان در جواب‌ها، عملیات بهینه‌سازی برای هر قاب، ۳۰ مرتبه انجام شده است و از میان آن‌ها بهترین جواب به دست آمده به عنوان جواب نهایی در نظر گرفته شده است. در هر دو مثال، تنش تسلیم مورد انتظار فولاد استفاده شده برای المان‌های ستون و تیر به ترتیب، ۳۹۷ و ۳۳۹ مگاپاسکال می‌باشد و مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال است؛ بار ثقلی ثابت ۳۲ کیلو نیوتن بر متر، به طبقات اول و دوم اعمال شده و بار ثقلی ثابت ۲۸/۷ کیلو نیوتن بر متر، به تیرهای سقف اعمال شده است؛ وزن‌های لرزه‌ای برای طبقات اول و دوم، ۴۶۸۸ کیلو نیوتن و برای طبقه سقف ۵۰۷۱ کیلو نیوتن محاسبه شده است. با توجه به نوع سیستم سازه، مقدار ضریب  $C_0$  برای قاب سه طبقه برابر ۱/۳ و ضریب  $C_m$  برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده‌اند. سه تغییرمکان هدف برای بام برابر با ۰/۰۷، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ ارتفاع کلی سازه از تراز پایه، معادل با سه سطح عملکرد IO، LS و CP برای قاب‌ها در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای محاسبه شتاب طیفی مطابق جدول ۱ فرض شده‌اند.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای محاسبه شتاب طیفی

سطح عملکرد	سطح خطر لرزه‌ای	$F_v$	$F_a$	$S_1 (g)$	$S_s (g)$
IO	۲۰ درصد در ۵۰ سال	۲/۰۰	۱/۲۷	۰/۱۹۸	۰/۶۵۸
LS	۱۰ درصد در ۵۰ سال	۱/۹۲	۱/۱۸	۰/۲۳۷	۰/۷۹۴
CP	۲ درصد در ۵۰ سال	۱/۷۰	۱/۰۴	۰/۳۴۶	۱/۱۵۰

## مثال ۱: قاب خمشی فولادی سه طبقه

یکی از مثال‌های مورد بررسی در این مقاله، یک نمونه قاب خمشی فولادی سه طبقه می‌باشد که به صورت نامتقارن در نظر گرفته شده است. نامتقارن بودن قاب، به علت متفاوت بودن طول دهانه آخر نسبت به سایر دهانه‌ها است. ارتفاع هر طبقه و طول هر دهانه به جز دهانه آخر، به ترتیب ۳/۹۶ و ۹/۱۵ متر بوده و طول دهانه آخر برابر ۷/۶۲ متر است. در قاب فولادی سه طبقه شکل ۴ گروه‌بندی المان‌ها و بارهای ثقلی اعمال شده، نشان داده شده است و شکل ۵ شماره‌گذاری مفاصل پلاستیک بالقوه این قاب را نشان می‌دهد. در جدول ۲ مقاطع بهینه به دست آمده از بهینه‌سازی و مقدار وزن سازه برای بهترین، بدترین و میانگین جواب‌های هر الگوریتم نشان داده شده است. همچنین مقادیر انحراف معیار و ضریب پراکندگی وزن‌ها نیز ارائه شده است.

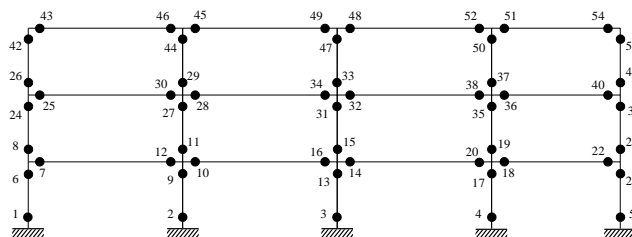


شکل ۴: قاب خمشی فولادی سه طبقه مثال ۱

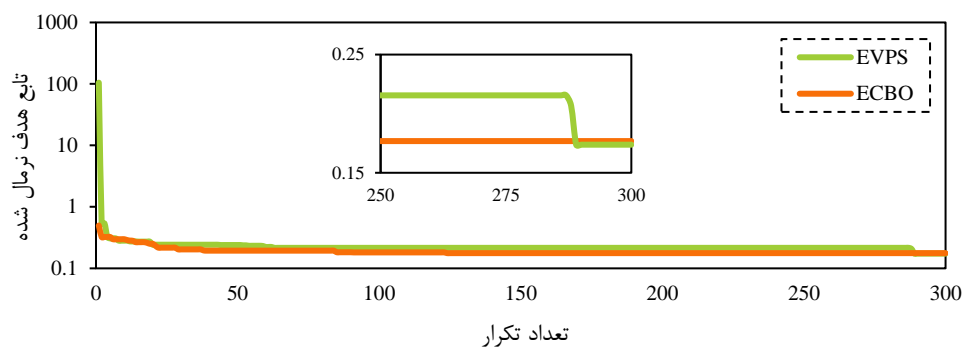
جدول ۲: مقاطع بهینه، مقادیر وزن و تابع هدف برای قاب سه طبقه مثال ۱

مقاطع جواب بهینه		گروه‌بندی المان‌ها
EVPS	ECBO	
W12 × 120	W12 × 152	۱
W14 × 233	W14 × 233	۲
W27 × 102	W21 × 111	۳
W30 × 99	W30 × 124	۴
W14 × 61	W8 × 58	۵
۲۹۷/۱۲	۳۲۴/۴۲	بهترین وزن سازه (kN)
۳۷۲/۰۵	۴۲۷/۱۴	متوسط وزن سازه (kN)
۴۵۷/۳۷	۶۴۹/۶۷	بدترین وزن سازه (kN)
۵۰/۳۲	۹۶/۵۶	انحراف معیار وزن‌ها (kN)
۱۳/۵۳	۲۲/۶۱	ضریب پراکندگی (/)

حداقل وزن قاب برای پاسخ بهینه یافته شده توسط EVPS، ۲۹۷/۱۲ کیلو نیوتن به دست آمده است. جهت مقایسه پروسه بهینه‌سازی الگوریتم‌ها، جواب‌های به دست آمده برای روند بهینه‌سازی بهترین پاسخ هر الگوریتم در شکل ۶ نشان داده شده است.

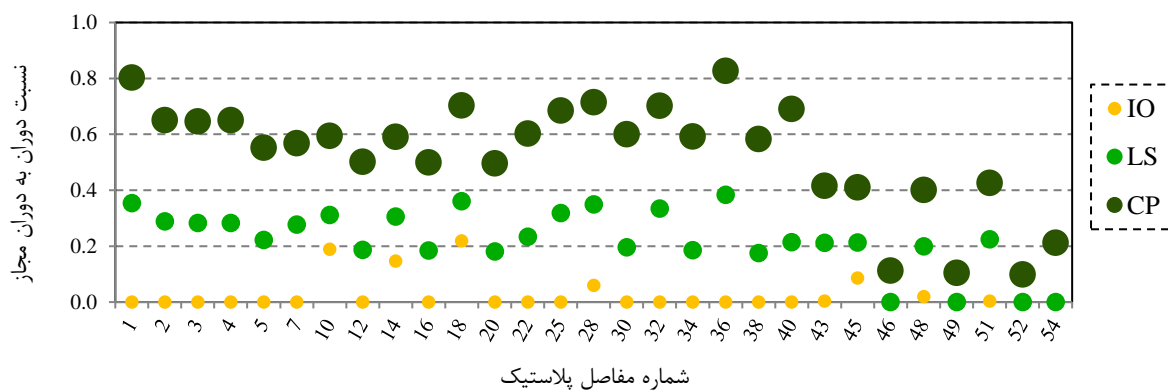


شکل ۵: شماره‌گذاری مفاصل پلاستیک بالقوه قاب سه طبقه شکل ۴

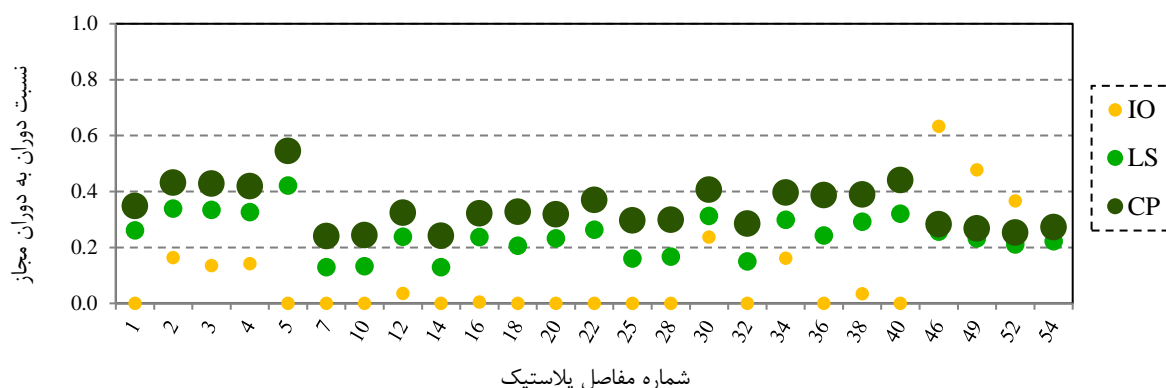


شکل ۶: تغییرات مقدار تابع هدف در برابر تکرار برای بهترین پاسخ هر الگوریتم قاب سه طبقه مثال ۱

شکل‌های ۷ و ۸، نسبت دوران پلاستیک مفاصل تشکیل شده در المان‌ها را به مقادیر مجاز آن‌ها طبق FEMA 356، برای تحلیل غیرخطی سازه با الگوی بارگذاری جانبی براساس شکل مود اول در هر دو جهت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نسبت برای تمامی مفاصل کمتر از یک است و قابل قبول بودن میزان دوران مفاصل را نشان می‌دهد.

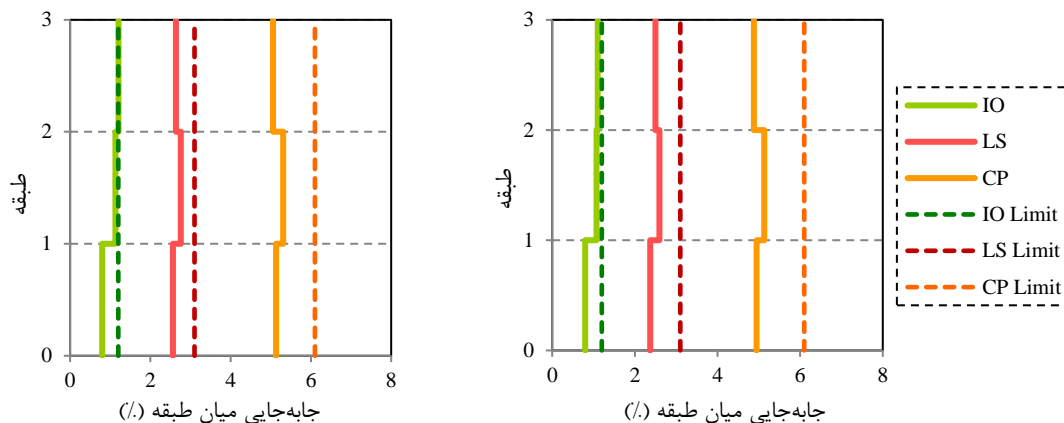


شکل ۷: نسبت دوران پلاستیک مفاصل به مقادیر مجاز آنها برای قاب سه طبقه مثال ۱ براساس الگوی مود اول در جهت مثبت



شکل ۸: نسبت دوران پلاستیک مفاصل به مقادیر مجاز آنها برای قاب سه طبقه مثال ۱ براساس الگوی مود اول در جهت منفی

شکل ۹، درصد نسبی اختلاف جابه‌جایی‌های دو طبقه به فاصله میان آن‌ها را در سطوح مختلف عملکرد برای بهترین پاسخ، برای هنگامی که سازه براساس الگوی مود اول در جهات مثبت و منفی مورد تحلیل قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. مطابق نمودارها این مقادیر همواره کمتر از مقادیر مجازشان می‌باشند.



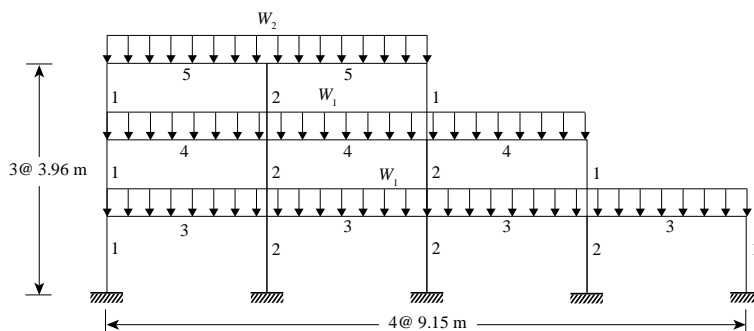
(ب): براساس الگوی مود اول در جهت منفی

(الف): براساس الگوی مود اول در جهت مثبت

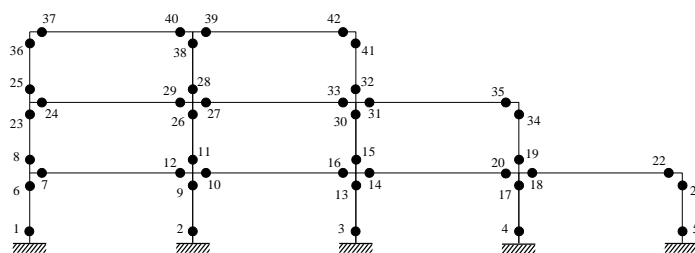
شکل ۹: مقدار دررفت میان طبقه و مقدار مجاز آن در قاب سه طبقه مثال ۱

## مثال ۲: قاب خمشی فولادی سه طبقه دارای پس نشستگی در ارتفاع

مثال دیگر بررسی شده در این مطالعه، یک نمونه قاب خمشی فولادی سه طبقه دارای پس نشستگی در ارتفاع می‌باشد. شکل ۱۰، گروه‌بندی المان‌ها و بارهای ثقلی اعمال شده به این قاب را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۰، ارتفاع هر طبقه و طول هر دهانه، به ترتیب ۳/۹۶ و ۹/۱۵ متر می‌باشد. در شکل ۱۱، شماره‌گذاری مفاصل پلاستیک بالقوه این قاب نشان داده شده است. در جدول ۳ مقاطع بهینه به دست آمده از بهینه‌سازی، مقدار وزن سازه برای بهترین، بدترین و میانگین جواب‌های هر الگوریتم، مقادیر انحراف معیار و ضریب پراکندگی وزن‌ها ارائه شده است.



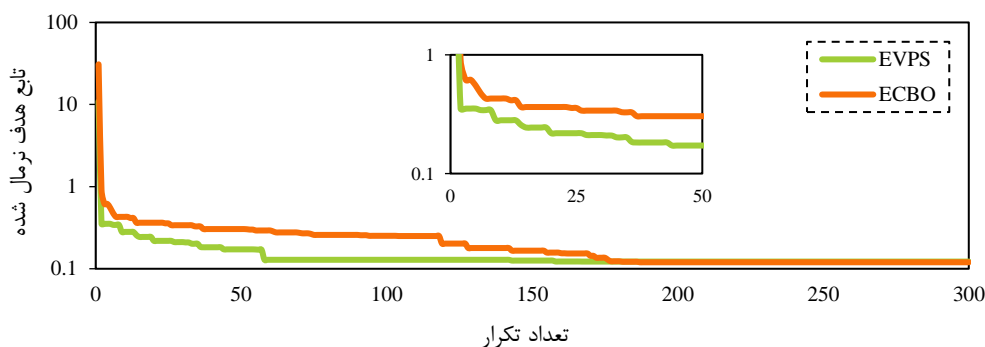
شکل ۱۰: قاب خمشی فولادی سه طبقه مثال ۲



شکل ۱۱: شماره گذاری مفاصل پلاستیک بالقوه قاب سه طبقه شکل ۱۰

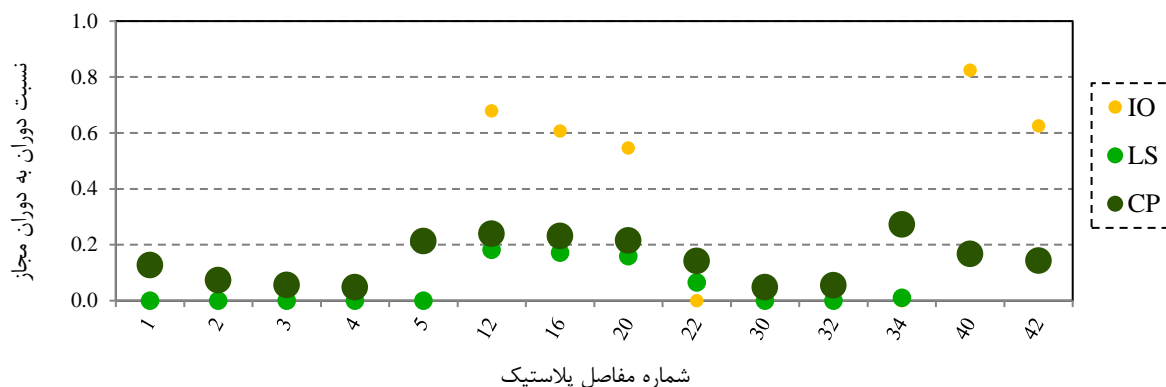
جدول ۳: مقاطع بهینه، مقادیر وزن و تابع هدف برای قاب سه طبقه مثال ۲

مقاطع جواب بهینه		گروه بندی المان ها
EVPS	ECBO	
W12 × 79	W12 × 65	۱
W12 × 120	W12 × 106	۲
W16 × 40	W18 × 40	۳
W30 × 108	W30 × 124	۴
W8 × 40	W8 × 40	۵
۱۴۴/۳۸	۱۴۱/۲۵	بهترین وزن سازه (kN)
۲۴۸/۲۵	۲۷۹/۳۳	متوسط وزن سازه (kN)
۳۵۱/۲۷	۴۴۳/۶۲	بدترین وزن سازه (kN)
۳۶/۲۴	۷۷/۲۵	انحراف معیار وزن ها (kN)
۱۰/۵۲	۱۸/۲۷	ضریب پراکندگی (/)

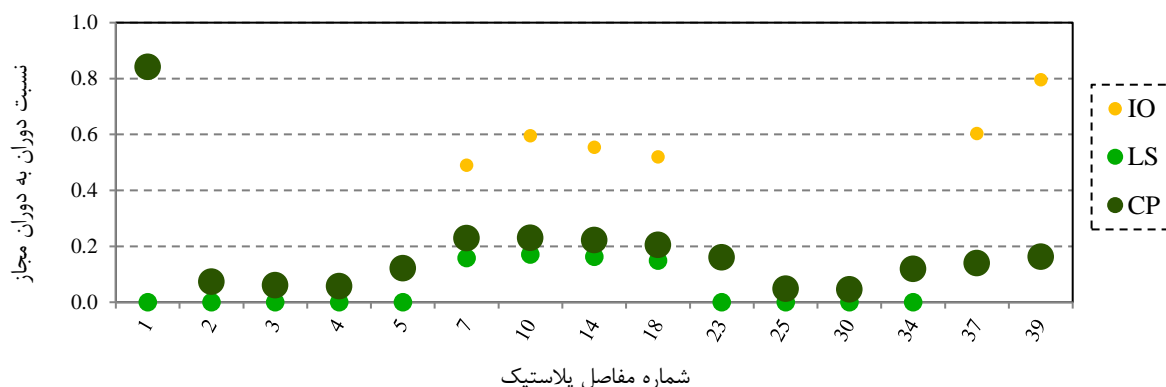


شکل ۱۲: تغییرات مقدار تابع هدف در برابر تکرار برای بهترین پاسخ هر الگوریتم قاب سه طبقه مثال ۲

مقایسه پروسه بهینه‌سازی الگوریتم‌ها، جواب‌های به‌دست آمده برای روند بهینه‌سازی بهترین پاسخ هر الگوریتم در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، الگوریتم EVPS نسبت به ECBO سریع‌تر به جواب بهینه نزدیک شده است و عملکرد مطلوبی دارد.

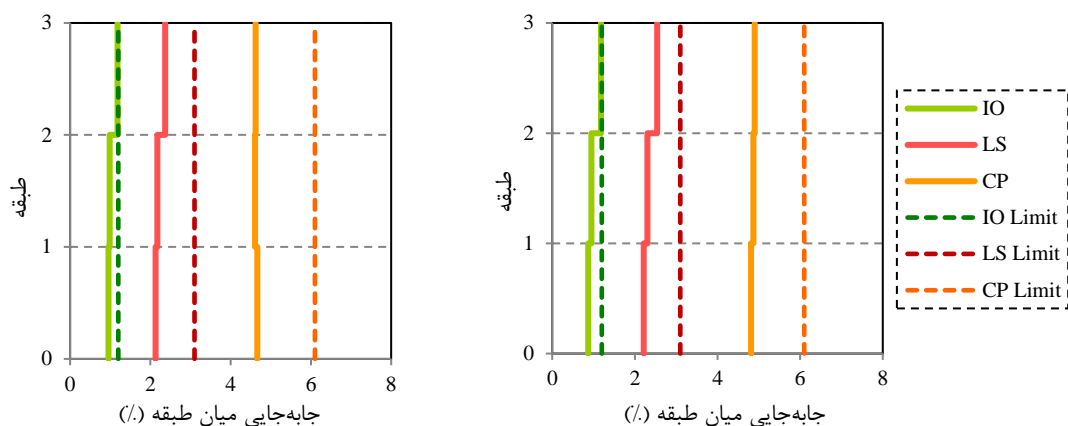


شکل ۱۳: نسبت دوران پلاستیک مفاصل به مقادیر مجاز آنها برای قاب سه طبقه مثال ۲ براساس الگوی مود اول در جهت مثبت



شکل ۱۴: نسبت دوران پلاستیک مفاصل به مقادیر مجاز آنها برای قاب سه طبقه مثال ۲ براساس الگوی مود اول در جهت منفی

شکل‌های ۱۳ و ۱۴، نسبت دوران پلاستیک مفاصل تشکیل شده در المان‌ها را به مقادیر مجاز آن‌ها طبق FEMA 356، برای تحلیل غیرخطی سازه با الگوی بارگذاری جانبی براساس شکل مود اول در هر دو جهت نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴، این نسبت برای تمامی مفاصل کمتر از یک می‌باشد که قابل قبول بودن میزان دوران مفاصل را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ نیز، درصد نسبی اختلاف جابه‌جایی‌های دو طبقه به فاصله میان آن‌ها را در سطوح مختلف عملکرد برای بهترین پاسخ، برای هنگامی که سازه براساس الگوی مود اول در جهات مثبت و منفی مورد تحلیل قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. مطابق نمودارها این مقادیر همواره کمتر از مقادیر مجازشان می‌باشند.



(ب): براساس الگوی مود اول در جهت منفی

(الف): براساس الگوی مود اول در جهت مثبت

شکل ۱۵: مقدار دررفت میان طبقه و مقدار مجاز آن در قاب سه طبقه مثال ۲

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به طراحی بهینه براساس عملکرد دو نمونه قاب خمشی فولادی سه طبقه پرداخته شده است. طراحی بهینه قاب‌ها با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری EVPS و ECBO انجام شده است. در این پژوهش هدف از بهینه‌سازی، کاهش وزن سازه و دررفت جانبی طبقات با رعایت معیارهای پذیرش برای هر یک از سطوح عملکرد می‌باشد. دررفت طبقات، ضریب لاغری ستون‌ها، ضوابط طراحی اتصالات تیر و ستون و دوران مفاصل پلاستیک به‌عنوان قیود مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. قیود مربوط به دوران مفاصل بر مبنای معیارهای پذیرش سیستم قاب خمشی مطابق آیین‌نامه FEMA 356 تعریف شده‌اند. نتایج به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

۱. نسبت دوران پلاستیک مفاصل تشکیل شده در المان‌ها به مقادیر مجاز آن‌ها برای بهترین پاسخ کمتر از یک می‌باشد که نشان می‌دهد این مفاصل در محدوده تعریف شده مجاز برای هر سطح عملکرد قرار گرفته‌اند.
۲. با توجه به نمودارهای جابه‌جایی میان طبقه مشخص می‌شود که این مقادیر همواره کمتر از مقادیر مجازشان است و در نتیجه مورد قبول می‌باشند.
۳. به طور کلی رویکرد استفاده شده قادر به یافتن طرح قابل قبول بر مبنای معیارهای پذیرش سطوح عملکردی مورد نظر می‌باشد.
۴. الگوریتم EVPS توانایی بیشتر و عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ECBO داشته است.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری تمام اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- [1] Gholizadeh, S., Kamyab, R. and Dadashi, H. (2013). Performance-based design optimization of steel moment frames. *Int J Optim Civil Eng.* 3 (2), 327-43.

- [2] Kaveh, A. and Nasrollahi, A. (2014). Performance-based seismic design of steel frames utilizing charged system search optimization. *Applied Soft Computing*. 22 213-221.
- [3] Gholizadeh, S. (2015). Performance-based optimum seismic design of steel structures by a modified firefly algorithm and a new neural network. *Advances in Engineering Software*. ۶۵-۵۰۸۱.
- [4] FEMA-356, (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. City: Federal Emergency Management Agency.
- [5] Gholizadeh, S. and Poorhoseini, H. (2016). Seismic layout optimization of steel braced frames by an improved dolphin echolocation algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 54 (4), 1011-1029.
- [6] Gholizadeh, S. and Baghchevan, A. (2017). Multi-objective seismic design optimization of steel frames by a chaotic meta-heuristic algorithm. *Engineering with Computers*. 33 (4), 1045-1060.
- [7] Mansouri, I., et al. (2018). Performance based design optimum of CBFs using bee colony algorithm. *Steel and Composite Structures*. 27 (5), 613-622.
- [8] Gholizadeh, S. and Fattahi, F. (2018). Damage-controlled performance-based design optimization of steel moment frames. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 27 (14), e1498.
- [9] Karimi, F. and Hoseini Vaez, S. R. (2019). Two-stage optimal seismic design of steel moment frames using the LRFD-PBD method. *Journal of Constructional Steel Research*. 155 77-89.
- [10] Fathali, M. A. and Hoseini Vaez, S. R. (2020). Optimum performance-based design of eccentrically braced frames. *Engineering Structures*. 202 109857.
- [11] Gholizadeh, S., et al. (2020). On the seismic collapse capacity of optimally designed steel braced frames. *Engineering with Computers*,
- [12] Asaad Samani, A., Fathali, M. A. and Hoseini Vaez, S. R. (2022). Optimal Seismic Design of 2D Steel Moment Frames with Set-back in Height Based on Structural Performance. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 10 (2), 35-55.
- [13] Badamaki, M. and Zakian, P. (2021). Performance based optimal seismic design of steel moment frame using nonlinear dynamic analysis and particle swarm optimization algorithm. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8 (Special Issue 2), 402-417.
- [14] Fathali, M. A. and Hoseini Vaez, S. R. (2023). A decoupled double-loop method with the adaptive allowable limits for probabilistic performance-based design optimization. *Engineering Structures*. 279 115634.
- [15] Fathali, M. A. and Hosseini Vaez, S. R. (2022). Evaluation of low-rise steel moment-resisting frame reliability index based on performance levels. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9 (1), 24-38.
- [16] Gholizadeh, S. and Ebadijalal, M. (2017). Seismic design optimization of steel structures by a sequential ECBO algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 7 (2), 157-171.
- [17] Gholizadeh, S. and Ebadijalal, M. (2018). Performance based discrete topology optimization of steel braced frames by a new metaheuristic. *Advances in Engineering Software*. 123 77-92.
- [18] Gholizadeh, S. and Milani, A. (2016). Optimal performance-based design of steel frames using advanced metaheuristics. *Journal of Civil Engineering*. 17 607-623.
- [19] Gholizadeh, S. and Moghadas, R. K. (2014). Performance-based optimum design of steel frames by an improved quantum particle swarm optimization. *Advances in structural Engineering*. 17. ۱۵۶-۱۴۳, (۲)
- [20] Gholizadeh, S. and Poorhoseini, H., (2016). Performance-Based Optimum Seismic Design of Steel Dual Braced Frames by Bat Algorithm. City: Springer International Publishing, 95-114.
- [21] Haji Mazdarani, M. J., et al. (2023). Reliability-based layout optimization of concentrically braced in 3D steel frames. *Structures*. 47 1094-1112.
- [22] Hoseini Vaez, S. R., Asaad Samani, A. and Fathali, M. A. (2022). Optimum performance-based design of unsymmetrical 2D steel moment frame. *Soft Computing*. 26 (12), 5637-5659.
- [23] Kaveh, A., et al. (2010). Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Constructional Steel Research*. 66 (4), 566-574.
- [24] Talatahari, S., et al. (2014). Optimum performance-based seismic design using a hybrid optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014

- [25] Kaveh, A. and Ghazaan, M. I. (2017). A new meta-heuristic algorithm: vibrating particles system. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*. ۲۴ (۲), ۵۵۱.
- [26] Kaveh, A., Hoseini Vaez, S. and Hosseini, P. (2019). Enhanced vibrating particles system algorithm for damage identification of truss structures. *Scientia Iranica*. 26 (1), 246-256.
- [27] Kaveh, A. and Ilchi Ghazaan, M. (2014). Enhanced colliding bodies optimization for design problems with continuous and discrete variables. *Advances in Engineering Software*. 77 66-75.