

Performance based optimal seismic design of steel moment frame using nonlinear dynamic analysis and particle swarm optimization algorithm

M. Badamaki¹, P. Zakian^{2*}

1- MSc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

ABSTRACT

Due to the importance of economic issues in building constructions, in recent decades, many studies have been performed on structural design optimization to reduce the constructional costs in various stages. Meanwhile, the structural weight is one of the important objective functions that is often applied to structural design optimization. In this study, a new single-objective optimization problem is proposed for performance based seismic design of two-dimensional steel moment resisting frame using nonlinear dynamic analysis based on the recent design codes. The objective function is defined as the weight of the frame, which should be minimized subject to some design constraints including section size compatibility, serviceability and performance-based limitations. As a well-known meta-heuristic method, particle swarm optimization (PSO) algorithm is utilized for solving this continuous optimization problem. Nonlinear dynamic analysis is employed for performance based seismic design based on specific seismic performance and seismic hazard levels. Since nonlinear time history analysis considers both material and geometric nonlinearities, it is the best choice to obtain accurate and realistic results among other seismic analysis methods. Also, spectral matching method is used for the scaling procedure of eleven accelerograms. Design example shows applicability and capability of the proposed optimization problem as well as the PSO algorithm.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 March 2020

Revise Date: 28 November 2021

Accept Date: 21 June 2020

Keywords:

Seismic design

Structural optimization

Nonlinear dynamics analysis

Particle swarm optimization
(PSO)

Performance-based design

Steel moment frame

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.222915.2100>

*Corresponding author: Pooya Zakian

Email address: p-zakian@araku.ac.ir

قاب خمشی فولادی با به کارگیری تحلیل طراحی لرزه‌ای بهینه برپایه عملکرد

دینامیکی غیرخطی و الگوریتم بهینه‌یابی اجتماع ذرات

مهتاب بادامکی^۱، پویا زکیان^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

چکیده

به دلیل اهمیت کاهش هزینه‌های ساخت و سازه‌های مهندسی، پژوهش‌های بسیاری در زمینه بهینه‌یابی سازه‌ها انجام می‌شود. از این رو کاهش وزن سازه‌ها می‌تواند در راستای کاهش هزینه‌ها سودمند باشد. در این پژوهش، یک مسئله نوین بهینه‌یابی تک هدفه برای طراحی برپایه عملکرد قاب خمشی فولادی دوبعدی مبتنی بر تحلیل دینامیکی غیرخطی با تکیه بر آئین‌نامه‌های جدید طراحی بر اساس عملکرد ارائه شده است. تابع هدف وزن قاب خمشی است که مقدار آن باید کمینه شود و برای حل مسئله از الگوریتم فراکاوشی بهینه‌یابی اجتماع ذرات (PSO) کمک گرفته شده است. با به کارگیری تحلیل دینامیکی غیرخطی به عنوان یک روش تحلیل لرزه‌ای که با لحاظ رفتار غیرارتجاعی مصالح و غیرخطی هندسی، ماهیت دینامیکی سازه را تحت زلزله نزدیک به واقعیت در نظر می‌گیرد، طراحی برای سطح خطر لرزه‌ای و سطح عملکردی معین صورت گرفته است. با توجه به آئین‌نامه‌های مورد استفاده در این پژوهش، نیاز به مقیاس شتاب‌نگاشت‌هایی برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است که برای این منظور از روش هم‌پایه‌سازی طیفی برای روند مقیاس یازده شتاب‌نگاشت زلزله بهره‌گیری شد. همچنین قیدهای طراحی گوناگونی از جمله قیود سازگاری ابعادی مقاطع، خدمت‌پذیری و عملکردی پیشنهاد شده است. مثال طراحی ارائه شده نمایانگر کارایی مسئله پیشنهادی و توانایی الگوریتم بهینه‌یابی اجتماع ذرات در طراحی بهینه بر پایه عملکرد است.

کلمات کلیدی: طراحی لرزه‌ای، بهینه‌یابی سازه‌ها، تحلیل دینامیکی غیرخطی، روش بهینه‌یابی اجتماع ذرات، طراحی براساس عملکرد، قاب خمشی فولادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.222915.2100	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.222915.2100	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۸/۱۲/۲۰
پویا زکیان p-zakian@araku.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه به دلیل محدودیت در منابع، نیاز به بهره‌وری بهینه، کاهش هزینه‌های پروژه تا حداقل مقدار ممکن و همچنین افزایش مقاومت سازه‌ها در برابر زلزله در پروژه‌های مهندسی، طراحی بهینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این راه، استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی برپایه‌ی رویدادهای طبیعی و قوانین فیزیکی در مسائل بهینه‌یابی مهندسی در حال افزایش است. از سوی دیگر، هنگامی که بارهای لرزه‌ای ماهیت غیرقابل پیش‌بینی دارند اگر سازه به گونه‌ای طراحی شود که تحت اثرات زلزله در حالت ارتجاعی باقی بماند منجر به افزایش وزن سازه شده و در نتیجه پروژه غیراقتصادی می‌شود، بنابراین آئین‌نامه‌های ساختمانی و روش‌های طراحی، رفتار غیرارتجاعی سازه را در یک محدوده ایمن پیشنهاد می‌کنند. در آئین‌نامه‌های موجود حداقل معیارهای لازم برای حفظ ایمنی جانی در هنگام وقوع زلزله باید تامین شود. استفاده از رفتار غیرارتجاعی سازه‌ها در طراحی براساس عملکرد سازه، یک رویکرد کارآمد برای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها است. کاربرد طراحی لرزه‌ای براساس عملکرد سازه‌ها، اعم از ساختمان‌های فولادی، بتن مسلح و مصالح بنایی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱ و ۲].

در زمینه‌ی طراحی بهینه قاب‌ها، پژوهش‌های گوناگونی انجام شده است؛ قلی‌زاده و سلاجقه [۳] مدل‌سازی بر اساس الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات را برای طراحی بهینه دو قاب برشی دوبعدی و سه‌بعدی تحت بارگذاری تاریخچه زمانی خطی انجام دادند که الگوریتم انتخابی در بهینه‌یابی وزن و دقت نتیجه مطلوبی داشت. کاوه و همکاران [۴] طراحی لرزه‌ای بر پایه‌ی عملکرد را برای دو قاب فولادی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان و روش بارافزون مورد بررسی قرار دادند. کاوه و زکیان [۵] طراحی بهینه قاب‌های برشی و خمشی فولادی تحت بارگذاری لرزه‌ای را با قیود تنشی و تغییرمکانی توسط دو الگوریتم جستجوی سیستم باردار و جستجوی هارمونی انجام داده‌اند. همچنین آن‌ها از روش تاریخچه زمانی خطی برای تحلیل دینامیکی سازه بهره گرفتند. کاوه و نصراللهی [۶] طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد را برای قاب‌های فولادی توسط تحلیل بارافزون و با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی سیستم باردار بررسی کردند که در مقایسه با نتایج پژوهش‌های گذشته، در نهایت مشخص شد که الگوریتم جستجوی سیستم باردار نسبت به روش‌های دیگر، نتایج بهتر و مناسب‌تری را از خود نشان می‌دهد. کاوه و همکاران [۷] طراحی بهینه چند هدفه براساس عملکرد را با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای قاب فولادی بررسی نمودند، که برای آن دو سطح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه^۱ و آستانه فروریزش^۲ و دو سطح خطر لرزه‌ای شامل زلزله‌هایی با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال (بیشینه زلزله‌هایی که ممکن است به وقوع بپیوندد)^۳ و زلزله‌هایی با احتمال وقوع ۵۰٪ در ۵۰ سال (زلزله‌های رایج)^۴ لحاظ شد. اهداف بهینه‌یابی شامل کمینه‌سازی هزینه‌ی اولیه و هزینه‌ی آسیب لرزه‌ای بود. قلی‌زاده [۸] طراحی لرزه‌ای بهینه براساس عملکرد^۵ قاب‌های خمشی فولادی را با الگوریتم کرم شب‌تاب بهبودیافته^۶ و یک شبکه عصبی جدید انجام داد، که در آن با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون برای سه قاب خمشی دو بعدی کوتاه، متوسط و بلند مرتبه (۳، ۶ و ۱۲ طبقه) در سطوح مختلف عملکردی بررسی و در طراحی بهینه دو مجموعه قید خدمت‌پذیری و کنترل حالت حدی برای اطمینان از عملکرد مناسب در نظر گرفته شد. برای کاهش حجم محاسبات در تحلیل غیرخطی از یک مدل جدید شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی نتایج تحلیل بارافزون غیرخطی در فرآیند بهینه‌یابی استفاده شد. کاوه و همکاران [۹] طراحی لرزه‌ای بهینه را برای قاب‌های خمشی سه بعدی با تحلیل دینامیکی طیفی و توسط ۹ الگوریتم فراکاوشی بررسی نمودند که الگوریتم جستجوی هارمونی عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها نشان داد و نتایج دست‌یافته از این الگوریتم را برای ۳ قاب خمشی با شکل‌پذیری‌های معمولی، متوسط و ویژه بکار بردند. مکرّم و بنان [۱۰] یک رویکرد بهینه‌یابی چند هدفه را برای طراحی سازه‌ها براساس عملکرد با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

¹Immediate Occupancy (IO)

²Collapse Prevention (CP)

³Maximum Considered Earthquake (MCE)

⁴Frequent Earthquake (FE)

⁵Performance-Based Optimum Seismic Design (PBOSD)

⁶Modified Firefly Algorithm (MFA)

پیشنهاد کردند. برای کاهش زمان محاسباتی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، یک روش توسعه یافته و جدید در الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌یابی چند هدفه ارائه شد. نتایج بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در مقایسه با نتایج تحلیل بار افزون نشان می‌دهند که تحلیل بار افزون به تنهایی نمی‌تواند نتایج قابل اطمینان و دقیقی داشته باشد. کریمی و حسینی‌واعظ [۱۱] طراحی لرزه‌ای بهینه‌ی دو مرحله‌ای براساس عملکرد را برای قاب‌های خمشی با استفاده از روش بار افزون برای چهار سطح عملکردی بررسی نمودند. در هر سطح عملکرد قیده‌های مرتبط با بیشینه تغییر مکان جانبی بین طبقه، دوران تیر و ستون، و نیروها (در مولفه‌های نیرو - کنترل) توسط آیین‌نامه‌ی FEMA 356 [۱۲] کنترل شدند. فرآیند بهینه‌یابی با دو الگوریتم جستجوی ازدحام ذرات^۷ و گرگ خاکستری^۸ انجام شد. منصوری و ماهری [۱۳] طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد قاب‌های فولادی را با استفاده از روش قید کنترلی^۹ مطالعه نمودند. این روش بر اساس یک مفهوم ساده در طراحی است که به طور سنتی مقاطع اولیه انتخاب می‌شوند و سپس به تدریج اندازه مقاطع به واسطه‌ی کنترل قیدها به سمت طرح بهینه کاهش می‌یابد. در این پژوهش با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به وسیله کنترل قیده‌های مرتبط با جابه‌جایی در سطوح مختلف عملکردی وزن سازه را بهینه کردند. نتایج گویای آن است که استفاده از روش قید کنترلی تعداد تحلیل‌های سازه برای رسیدن به راه‌حلی بهینه را در مقایسه با الگوریتم‌های متداول فراکاوشی کاهش می‌دهد به دلیل بالاتر بودن سرعت حل در این روش نسبت به الگوریتم‌های فراکاوشی می‌تواند یک گزینه مناسب برای بهینه‌یابی طرح‌های لرزه‌ای براساس عملکرد باشد.

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی یکی از روش‌های تحلیل برای طراحی براساس عملکرد است و در پژوهش حاضر نیز جهت تحلیل و طراحی سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. هدف اصلی در این پژوهش ارائه یک مسئله جدید بهینه‌یابی تک‌هدفه برای طراحی براساس عملکرد قاب خمشی فولادی است که در آن از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بهره گرفته شده و از آیین‌نامه بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود یعنی آیین‌نامه ASCE 41-13 [۱۴] استفاده شده است.

۲- روش بهینه‌یابی اجتماع ذرات

روش بهینه‌یابی اجتماع ذرات (PSO) یک الگوریتم فراکاوشی است که توسط کندی و ابرهات ارائه شده [۱۵ و ۱۶]. این روش از رفتار جمعی حیوانات مثل ماهی‌ها، حشرات و پرندگان الهام گرفته است. در این الگوریتم، تعدادی ذره به صورت تصادفی در فضای جستجو مقدار می‌گیرند، که به آن‌ها گروه می‌گویند. ذرات در این فضا حرکت می‌کنند و موقعیت آن‌ها براساس بهترین موقعیت فردی در هر تکرار جایگزین می‌شود. سپس تابع هدف برای هر ذره بدست می‌آید و مقادیر برازندگی ذرات محاسبه می‌شود تا بهترین موقعیت در فضای جستجو تعیین شود. در هر گام با استفاده از معادلات (۱) و (۲) به روزرسانی موقعیت ذرات تعیین می‌شود:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) \quad (1)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (2)$$

که V_i^k و X_i^k به ترتیب موقعیت و سرعت فعلی ذره‌ی i ام در تکرار k ام است. P_i بهترین موقعیت قبلی^{۱۰} ذره‌ی i ام و P_g بهترین موقعیت سراسری^{۱۱} در میان کل ذرات گروه است. r_1 و r_2 اعدادی تصادفی در بازه پیوسته‌ی [۰،۱] هستند. ω نیز شاخص وزن اینرسی است که برای کم کردن سرعت ذره استفاده می‌شود [۱۶]. c_1 و c_2 مقادیر ثابتی هستند که معمولاً برابر ۱/۵ انتخاب می‌شوند [۱۷ و ۱۸]. یکی از مزایای مهم الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات این است که در مسائل با متغیرهای پیوسته از کارایی بالاتری برخوردار بوده و به همین

⁷ Particle Swarm Optimizer (PSO)

⁸ Grey Wolf Optimizer (GWO)

⁹ Constraint Control Method (CCM)

¹⁰ pbest

¹¹ gbest

علت برای بهینه‌یابی قاب‌های خمشی با سطح مقطع پیوسته می‌تواند موفق عمل نماید. فلوجارت طراحی لرزه‌ای بهینه سازه با الگوریتم بهینه‌یابی اجتماع ذرات در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۳- فرمول بندی

در این پژوهش یک مسئله جدید بهینه‌یابی مطرح شده است. هدف از بهینه‌یابی، کمینه‌سازی وزن قاب خمشی فولادی است و برای حل این مسئله از الگوریتم فراکاوشی اجتماع ذرات استفاده شده است. تابع هدف با اعمال تابع پناستی برای اعمال قیدها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$f_{obj}(X) = W(X) \times f_{penalty}(X) \quad (3)$$

$f_{obj}(X)$ تابع هدف است که قرار است کمینه شود. $W(X)$ وزن سازه و $f_{penalty}(X)$ تابع پناستی هستند که از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند:

$$W(X) = \sum_{i=1}^{nv} \gamma_i x_i l_i \quad (4)$$

$$f_{penalty}(X) = (1 + k_1 v)^{k_2},$$

$$v = \sum_{i=1}^n \max[0, v_i] \quad (5)$$

که l_i ، γ_i و x_i به ترتیب طول، چگالی مصالح و سطح مقطع متغیر طراحی نام است. مجموع مقدار قیدهای نقض شده با v نشان داده می‌شود. k_1 در این مسئله مقدار دو در نظر گرفته شده است و k_2 تابع افزایشی در هر تکرار است [۱۹].

بررسی‌های در نظر گرفته شده در مرحله‌ی طراحی شامل موارد زیر می‌شوند:

۱- کنترل قیدهای ابعادی.

۲- کنترل سازه در برابر ترکیب بارهای غیرلرزه‌ای مانند بار ثقیلی، بارهای زنده و (مطابق با آیین‌نامه‌ی طراحی).

۳- کنترل سازه در برابر بارهای لرزه‌ای.

۳-۱- گام اول: قیدهای ابعادی

با توجه به اینکه باید در قاب‌ها ابعاد مقاطع تیر و ستون با یکدیگر سازگاری منطقی داشته باشند پس در گام نخست قیدهای ابعادی باید مطابق با روابط (۶) تا (۹) رعایت شوند.

الف) اتصالات تیر به ستون:

$$b_{f(B)} \leq b_{f(C)} \quad (6)$$

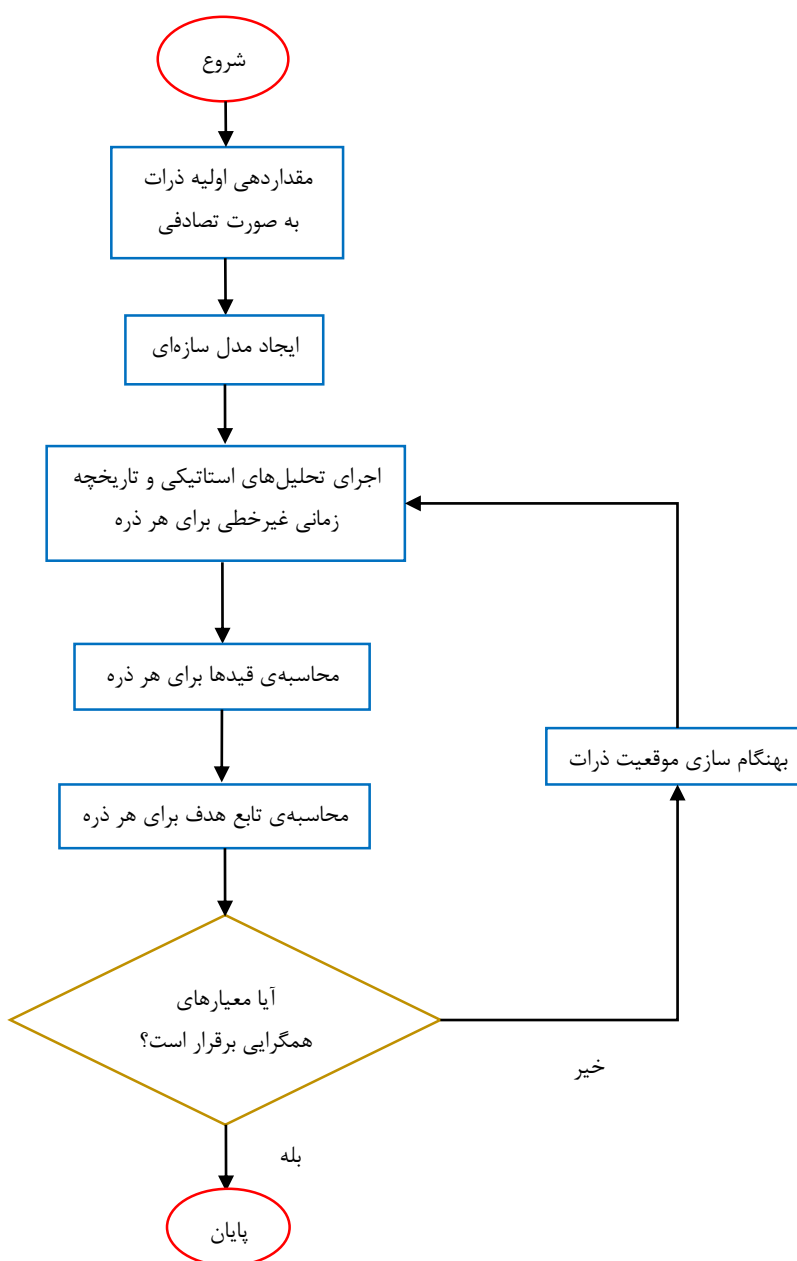
$$\frac{b_{f(B)}}{b_{f(C)}} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

ب) اتصالات ستون به ستون:

$$\frac{h_C^{up}}{h_C^{down}} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$\frac{b_{f(C)}^{up}}{b_{f(C)}^{down}} - 1 \leq 0 \quad (9)$$

که $b_{f(B)}$ و $b_{f(C)}$ به ترتیب عرض بال تیر و ستون، h_C^{up} عمق مقطع ستون طبقه بالاتر، h_C^{down} عمق مقطع ستون طبقه پایین، $b_{f(C)}^{down}$ و $b_{f(C)}^{up}$ به ترتیب عرض بال ستون در طبقه‌ی بالا و طبقه‌ی پایین‌تر هستند.



شکل ۱: فلوجارت فرآیند الگوریتم اجتماع ذرات برای طراحی لرزه‌ای بهینه

۳-۲- گام دوم: کنترل خدمت پذیری

ابتدا تحلیل استاتیکی برای سازه انجام می‌شود و تمام اعضای آن در مقابل بارهای ثقلی مورد بررسی قرار می‌گیرند. ترکیب بارها Q_G^{SC} مطابق با آئین‌نامه [۲۰] به صورت زیر است:

$$Q_G^{SC} = \begin{cases} 1.4Q_D \\ 1.2Q_D + 1.6Q_L \end{cases} \quad (10)$$

که Q_D و Q_L به ترتیب بارهای مرده و زنده هستند. با توجه به آئین‌نامه [۲۱] باید ترکیب تنش کنترل شود:

$$\text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 ;$$

$$SR = \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \quad (11)$$

$$\text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 ;$$

$$SR = \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \quad (12)$$

در فرمول‌های (۱۱) و (۱۲)، P_u مقاومت مورد نیاز (کششی یا فشاری)، P_n مقاومت اسمی محوری (کششی یا فشاری)، ϕ_c ضریب کاهش مقاومت، SR نسبت تنش موجود است که باید کم‌تر از واحد باشد، M_{ux} و M_{uy} مقاومت خمشی مورد نیاز حول محورهای x و y ، M_{nx} و M_{ny} مقاومت خمشی اسمی حول محورهای x و y و ϕ_b ضریب کاهش مقاومت خمشی هستند که البته قابل ذکر است به دلیل دو بعدی بودن قاب‌ها در این پژوهش طبیعتاً مقاومت‌های خمشی موردانتظار و اسمی در راستای محور y صفر خواهند بود و فرمول (۱۱) و (۱۲) تنها در جهت محور افقی x محاسبه می‌شوند.

برای ورود به مرحله سوم ابتدا باید نتایج با شرایط مرحله اول و دوم بررسی شوند که در صورت برقرار بودن این شرایط، ادامه کار ممکن است. در غیراین صورت باید کاندیدهای طرح توسط الگوریتم آنقدر تغییر نمایند تا بتوانند قیدهای دو مرحله‌ی ابتدایی را رعایت نمایند. با در نظر گرفتن این شرط، حجم قابل توجهی از تلاش‌های محاسباتی کاسته خواهد شد.

۳-۳- گام سوم: قیدهای عملکردی

در این مرحله بیشینه دوران پلاستیک اعضای سازه باید برای سطح عملکردی موردنظر توسط تحلیل دینامیکی غیرخطی مشخص شود که نخست نیازمند محاسبه طیف طرح برای سطح عملکرد IO است. در این پژوهش، شتاب طیف طرح برای سطح خطر لرزه‌ای با احتمال فراگذشت ۵۰٪ در ۵۰ سال در نظر گرفته شده است. مطابق با روابط (۱۳) و (۱۴)، طیف طرح برای سطح عملکرد موردنظر محاسبه و سپس رسم خواهد شد.

$$S_{XS} = F_a S_S \quad (13)$$

$$S_{X1} = F_v S_1 \quad (14)$$

$$S_a = \begin{cases} S_{XS} \left(\left(\frac{5}{B_1} - 2 \right) \frac{T}{T_S} + 0.4 \right) & 0 < T \leq T_0 \\ \frac{S_{XS}}{B_1} & T_0 < T \leq T_S \\ \frac{S_{X1}}{(B_1 T)} & T_S < T \leq T_L \\ \frac{S_{X1} T_L}{(B_1 T^2)} & T > T_L \end{cases} \quad (15)$$

$$T_S = \frac{S_{X1}}{S_{XS}} \quad (16)$$

$$T_0 = 0.2 T_S \quad (17)$$

$$B_1 = \frac{4}{[5.6 - \ln(100\beta)]} \quad (18)$$

به ترتیب پارامترهای شتاب طیف پاسخ در دوره تناوب کوتاه و دوره تناوب یک ثانیه برای سطح خطر لرزه‌ای و میرایی مشخص با توجه به نوع خاک هستند. F_v و F_a ضرایب ساختگاه هستند که از آئین‌نامه ASCE 41-13 [۱۴] براساس نوع خاک و مقادیر پارامترهای پاسخ شتاب یعنی S_S و S_1 بدست می‌آیند (جدول ۱). T دوره تناوبی اصلی سازه، T_S زمان تناوب بین دو ناحیه‌ی شتاب ثابت و سرعت ثابت در طیف پاسخ، B_1 تابعی از نسبت میرایی موثر، T_0 دوره تناوب شتاب ثابت به صورت تابعی از T_S ، T_L دوره تناوب بلند و β نسبت میرایی موثر هستند [۱۴].

قید بیشینه چرخش مفصل پلاستیک برای هر عضو در سطح عملکردی استفاده‌ی بی‌وقفه (IO) می‌تواند به صورت رابطه (۱۹) باشد:

$$\frac{\theta_k^{IO}}{\theta_{all}^{IO}} - 1 \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

که θ_k^{IO} بیشینه دوران پلاستیک عضو k ام بدست آمده در قاب خمشی با سطح عملکرد IO است. θ_{all}^{IO} بیشینه دوران پلاستیک مجاز برای هر عضو که مطابق با آئین‌نامه برای سطح عملکرد IO مقدار ۰/۲۵ در تیرها و ۰/۵ در ستون‌ها در نظر گرفته شده است. n تعداد اعضای سازه‌ای یک قاب است [۱۴].

جدول ۱: پارامترهای سطوح عملکردی ساختگاه برای خاک نوع D

سطح عملکردی	سطح خطر لرزه‌ای	$S_0(g)$	$S_1(g)$	F_a	F_v
IO	50%/50-years	0.658	0.198	1.274	2.008

۳-۴- تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی

در پژوهش حاضر مدل‌سازی با المان نیرویی^{۱۲} فایبر برای تمامی اعضا در نظر گرفته شده است. مقادیر میرایی رایلی برای تحلیل تاریخیچه زمانی محاسبه شده و توسط دستور آن در نرم‌افزار اپنسیس^{۱۳} تعریف می‌شود. ضرایب جرم و سختی با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه شده و در رابطه میرایی رایلی اعمال می‌شوند.

¹² forceBeamColumn

¹³ OpenSees

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (21)$$

که در روابط (۲۰) و (۲۱) α ضریب جرم، β ضریب سختی، ξ نسبت میرایی که مطابق با آئین‌نامه ASCE 41-13 [۱۴] برای تحلیل دینامیکی غیرخطی ۳٪ لحاظ شده است و ω_i و ω_j به ترتیب فرکانس مود نام و زام هستند که محاسبه‌ی این مقادیر به ازای موده‌های مشخص و نسبت میرایی در برنامه اعمال می‌شود [۲۲].

سطح عملکردی استفاده‌ی بی‌وقفه و سطح خطر لرزه‌ای رایج (زلزله‌هایی با احتمال وقوع ۵۰٪ در ۵۰ سال) در نظر گرفته شده است. در تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ ۱۱ شتاب‌نگاشت مقیاس شده زلزله میانگین‌گیری شده است. مدت زمان تحلیل در برنامه اپنسیس ۱۰ ثانیه بیشتر از مدت کل شتاب‌نگاشت در نظر گرفته شده تا جابه‌جایی پسماندی که در ارتعاش آزاد سازه رخ می‌دهد ثبت شود. برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از نرم‌افزارهای متلب^{۱۴} و اپنسیس همزمان استفاده شده است. به بیان دیگر، نخست داده‌های موردنیاز توسط الگوریتم بهینه‌یابی در متلب ایجاد شده و سپس این داده‌ها (متغیرهای طراحی) در اپنسیس برای تحلیل مدل سازه‌ای استفاده می‌شوند. با توجه به آنکه مشخصات ساختگاه در منبع [۲۳] با مشخصات در نظر گرفته‌شده در این پژوهش مشابه است، ۱۱ شتاب‌نگاشت معرفی شده در منبع [۲۳] تهیه و برای استفاده در تحلیل‌های تاریخچه زمانی بخش بعدی مقیاس شده‌اند (جدول ۲).

از آن جهت که قاب مورد بررسی دوبعدی در نظر گرفته شده است، از بین مولفه‌های افقی و عمودی در رکوردهای بدست آمده از سایت پیپر^{۱۵} تنها دو مولفه‌ی افقی شتاب انتخاب می‌شوند و بین این دو، مولفه‌ای که بیشینه شتاب بزرگتری را دارد با کمک گرفتن از نرم‌افزار SeismoSignal [۲۴] برگزیده شده است. با استفاده از نرم‌افزار SeismoMatch [۲۵] رکوردها با روش هم‌پایه‌سازی طیفی مقیاس می‌شوند، طیف میانگین مقیاس شده از ۱۱ رکورد در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۴- مثال طراحی

در قاب خمشی فولادی یک طبقه‌ای (شکل ۳) که مورد بررسی قرار می‌گیرد، اتصالات قاب صلب و تکیه‌گاه گیردار فرض شده است. به دلیل پیوسته بودن مسئله، متغیرها محدود به بازه‌ی مشخصی شده‌اند که عمق مقطع h ، ضخامت بال t_f ، عرض بال b_f و ضخامت جان t_w (شکل ۴) به ترتیب در محدوده‌ی کران پایین $lb = [100 \ 100 \ 10 \ 4]$ میلی‌متر و کران بالای $ub = [600 \ 300 \ 20 \ 16]$ میلی‌متر هستند. ضریب ارتجاعی $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ و تنش تسلیم $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ بوده و با فرض شیب کرنش سخت‌شوندگی معادل ۳٪ ضریب ارتجاعی، از مدل رفتاری مصالح steel01 در نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است. بار مرده $Q_D = 25 \text{ N/mm}$ و بار زنده $Q_L = 10 \text{ N/mm}$ روی تمامی تیرها وارد شده است. مطابق با آئین‌نامه ASCE 41-13 [۱۴] درصد میرایی برای تحلیل دینامیکی غیرخطی ۳٪ در نظر گرفته می‌شود و از برنامه متلب و اپنسیس برای بهینه‌یابی و تحلیل استفاده شده است. مشخصات کامپیوتر جهت اجرای برنامه بهینه‌یابی شامل یک پردازنده ۱۰ هسته‌ای با ۱۲ گیگابایت رم (Intel® Xeon® CPU E5-2620 v4 @ 2.10GHz)، با توجه به ماهیت تصادفی الگوریتم، برنامه ۲۰ بار اجرا^{۱۶} می‌شود. تعداد تکرار و تعداد ذرات برای الگوریتم PSO به ترتیب ۱۰۰ و ۴ در نظر گرفته شدند که منجر به ۴۰۰ تحلیل برای هر اجرا می‌شود.

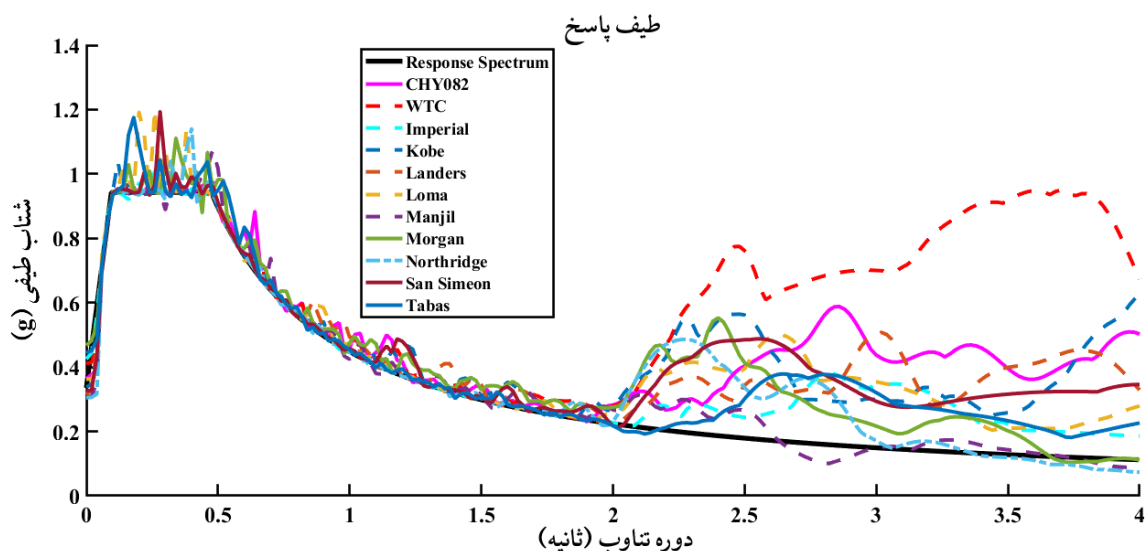
¹⁴ MATLAB

¹⁵ PEER

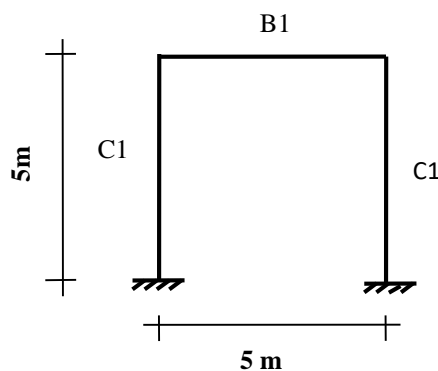
¹⁶ Run

جدول ۲: رکوردهای شتاب زمین [۲۳]

شماره	نام زلزله	سال	ایستگاه	بزرگا	عمق کانونی زلزله (km)	سرعت متوسط موج برشی (m/s)	بیشینه شتاب زمین (PGA)
1	Northridge-01	1994	Lawndale—Osage Ave	6.69	39.91	311.86	0.1475
2	Kobe_Japan	1995	Yae	6.9	27.77	256	0.1576
3	Chi-Chi_Taiwan	1999	CHY082	7.62	36.09	193.69	0.0646
4	Chi-Chi_Taiwan	1999	WTC	7.62	42.24	207.69	0.0540
5	Manjil_Iran	1990	Qazvin	7.37	49.97	302.64	0.1840
6	Imperial Valley-06	1979	Calipatria Fire Station	6.53	24.6	205.78	0.1289
7	Loma Prieta	1989	Salinas-John & Work	6.93	32.78	279.56	0.1123
8	Landers	1992	Thousand Palms Post Office	7.28	36.93	333.89	0.1164
9	San Simeon_CA	2003	San Luis Obispo-Lopez Lake Grounds	6.52	48.11	365.15	0.133
10	Morgan Hill	1984	Fremont-Mission San Jose	6.19	31.34	367.57	0.02588
11	Tabas	1978	Boshrooyeh	7.35	28.79	324.57	0.1055

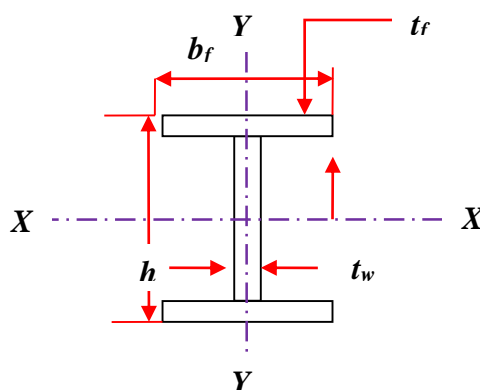


شکل ۲: طیف‌های پاسخ مقیاس شده با روش هم پایه سازی طیفی، همراه با طیف طرح



شکل ۳: هندسه و جزئیات گروه بندی اعضای قاب یک طبقه

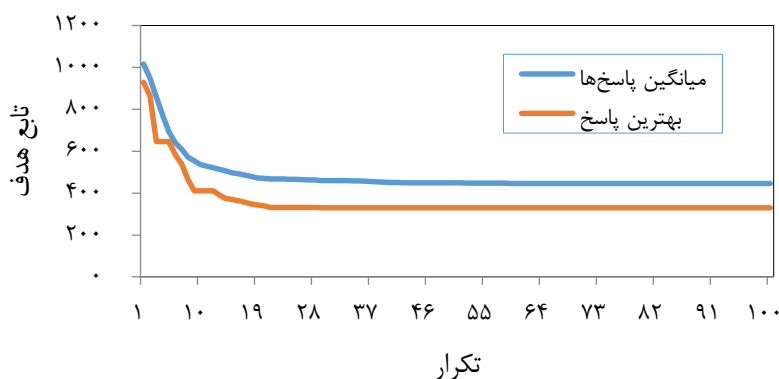
زمان کل اجرای ۲۰ برنامه ۵۱۵۱ دقیقه و زمان هر اجرا به طور میانگین ۲۵۸ دقیقه به طول انجامید. نتایج تحلیل در جدول ۳ نشان داده شده است که شامل مقادیر بهینه ابعاد مقاطع سازه، بهترین وزن، میانگین و انحراف معیار وزن‌های بدست آمده از ۲۰ اجرا است. نمودارهای همگرایی بهترین اجرا و میانگین ۲۰ اجرای برنامه در شکل ۵ مشاهده می‌شود. نسبت تنش بدست آمده برای هر عضو در مقایسه با نسبت تنش مجاز ۱ در نمودارهای شکل ۶ گویای آن است که قید نسبت تنش در گام کنترل خدمت‌پذیری برقرار بوده است. مقدار بدست آمده بیشینه دوران پلاستیک (θ) برای هر عضو در هر اجرا با مقدار مجاز آن در جدول ۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج این جدول نشان می‌دهد که مقادیر بدست آمده دوران از مقادیر مجاز کمتر شده و در نتیجه قید عملکردی نیز برقرار است.



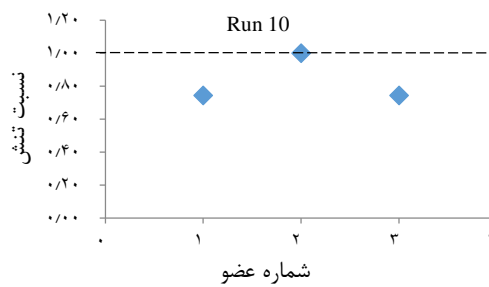
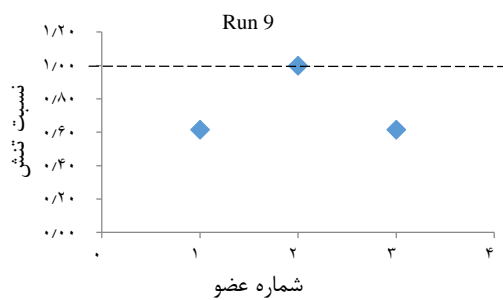
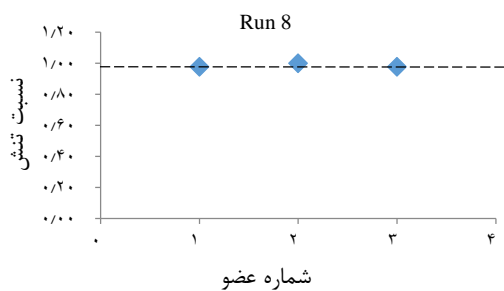
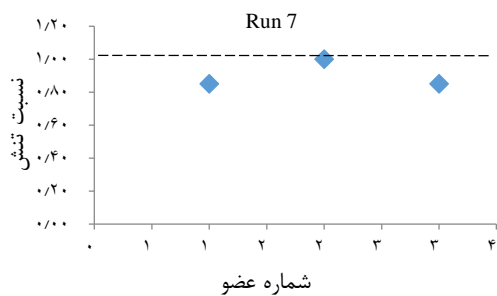
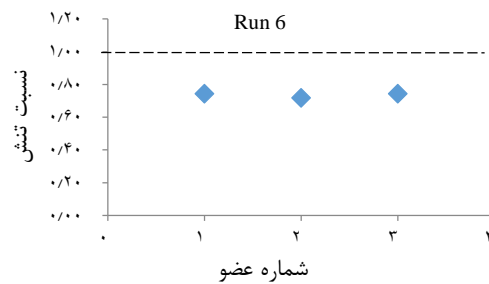
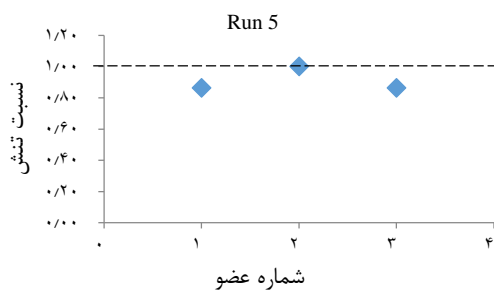
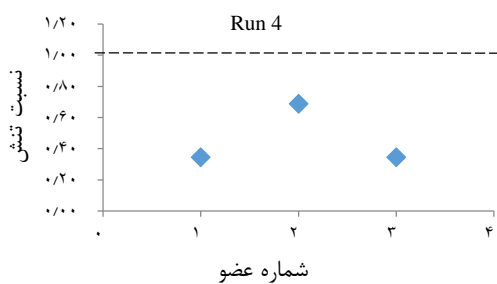
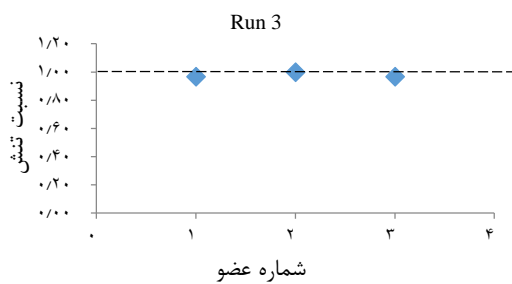
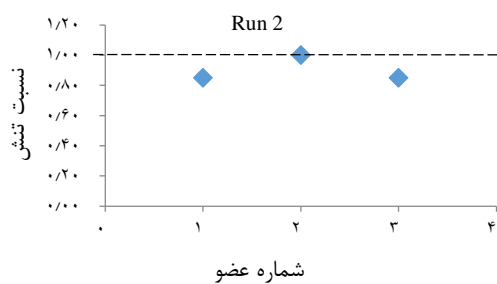
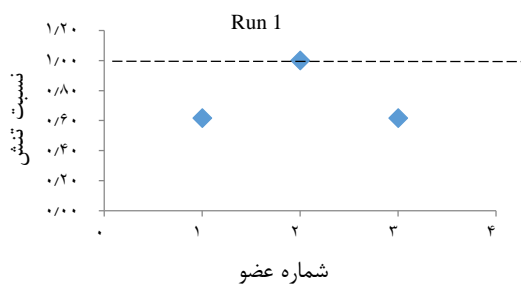
شکل ۴: شماتیک مقطع I شکل

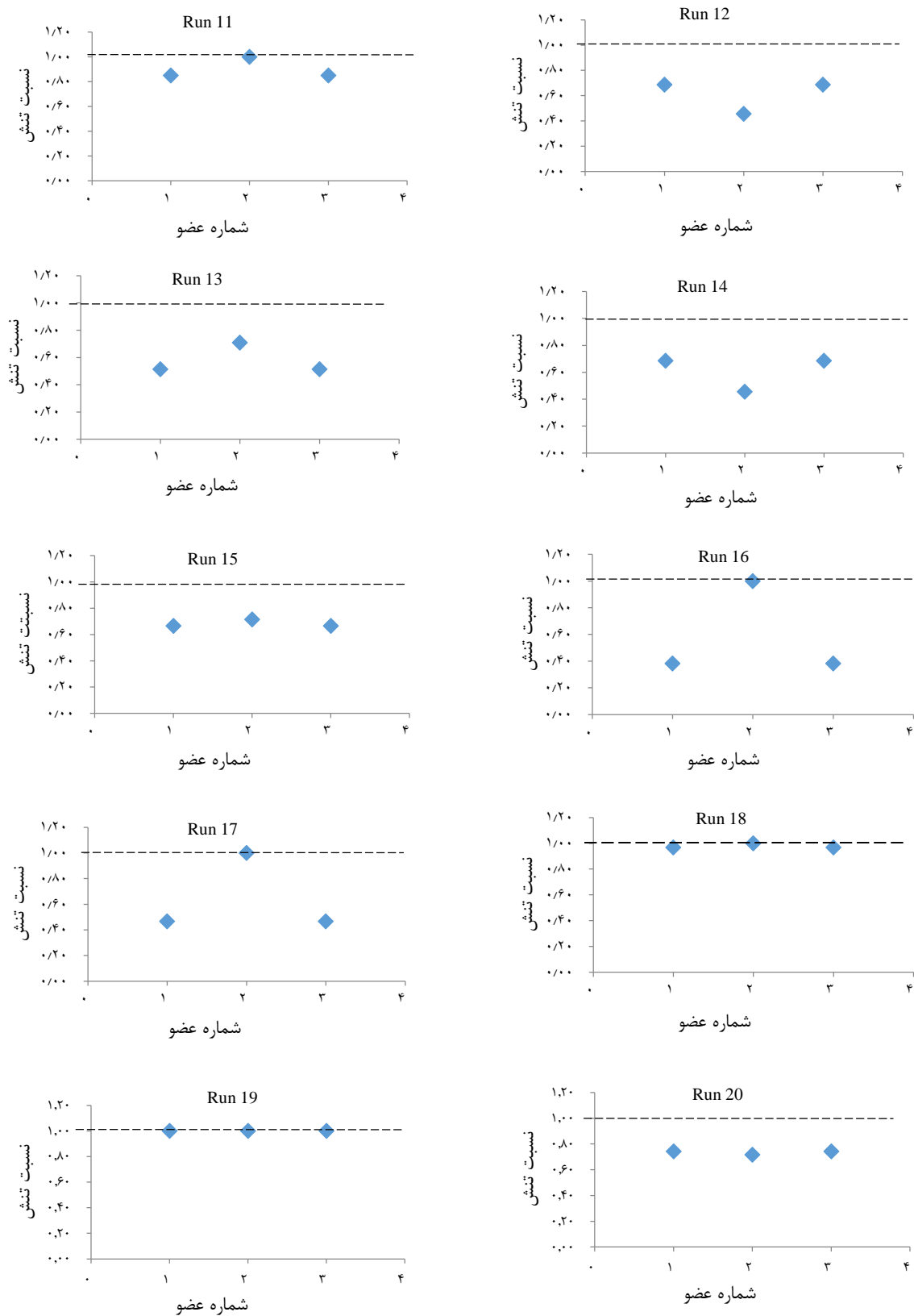
جدول ۳: نتایج طراحی بهینه قاب یک طبقه

متغیرهای طراحی	h	b_f	t_f	t_w
C1	100	100	10	4
B1	464.9708	100	10	4
بهترین وزن (kg)	330.4804			
وزن میانگین (kg)	445.9620			
انحراف استاندارد (kg)	113.1980			



شکل ۵: میانگین و بهترین نمودار همگرایی الگوریتم PSO





شکل ۶: نسبت تنش اعضای قاب برای ۲۰ اجرای طراحی بهینه

جدول ۴: بیشینه چرخش مفصل پلاستیک در هر عضو قاب برای ۲۰ اجرای طراحی بهینه

شماره عضو	θ_k^o																				θ_{all}^o
	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10	Run 11	Run 12	Run 13	Run 14	Run 15	Run 16	Run 17	Run 18	Run 19	Run 20	
1	0.0019	0.0042	0.0021	0.0010	0.0034	0.0023	0.0042	0.0028	0.0019	0.0017	0.0042	0.0008	0.0015	0.0008	0.0016	0.0012	0.0013	0.0021	0.0012	0.0023	0.5
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.25
3	0.0019	0.0032	0.0015	0.0008	0.0025	0.0018	0.0052	0.0047	0.0019	0.0021	0.0032	0.0011	0.0014	0.0011	0.0011	0.0008	0.0008	0.0015	0.0017	0.0018	0.5

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مسئله جدید بهینه یابی تک هدفه برای طراحی برپایه عملکرد قاب های خمشی فولادی دوبعدی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی براساس آئین نامه های جدید ارائه شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی یک سازه ی مدل شده در مقایسه با سایر تحلیل های موجود، منجر به رفتاری دقیق تر و نزدیک تر به سازه ی واقعی می شود. این تحلیل به دلیل استفاده از بیشترین ظرفیت سازه می تواند عملکرد بهتری نسبت به سایر روش ها داشته باشد، به همین دلیل نتایج بدست آمده از این روش علاوه بر دقت بیشتر، در اغلب موارد منجر به کاهش وزن و هزینه ها خواهد شد. استفاده از روش دینامیکی غیرخطی، برای سازه های با اهمیت زیاد به دلیل کاهش هزینه ها و افزایش استفاده از ظرفیت سازه می تواند بسیار مفید باشد. برای اعمال ضوابط طراحی براساس عملکرد، سه نوع قید در مراحل بهینه یابی برای کاهش وزن قاب در نظر گرفته شده است. در گام نخست، قیدهای ابعادی کنترل می شوند تا از جنبه های منطقی، سازگاری ابعاد مقاطع تیر و ستون در نظر گرفته شود. در گام دوم (کنترل خدمت پذیری)، تحلیل استاتیکی اجرا می شود و همه اعضای سازه برای تحمل بارهای ثقلی مطابق با آئین نامه AISC-LRFD بررسی می شوند. در گام سوم، قیدهای عملکردی تحلیل دینامیکی غیرخطی برای کنترل مقادیر دوران پلاستیک برای تمامی اعضای سازه با ترکیب بارهای لرزه ای مطابق با آئین نامه ASCE 41-13 بررسی می شوند. تحلیل تاریخیچه زمانی برای ۱۱ شتاب نگاشت مقیاس شده زلزله انجام شده است. با در نظر گرفتن این ضوابط پس از حل مسئله بهینه یابی، نتایج بدست آمده از قاب خمشی فولادی یک طبقه همراه با وضعیت قیدهای پیشنهادی حل بهینه نشان داد که تمامی قیدها برقرار شده اند و همچنین پاسخ ها منطقی و پذیرفتنی هستند. همچنین منحنی های همگرایی الگوریتم اجتماع ذرات برای ۲۰ اجرای گوناگون نشان می دهد که این الگوریتم عملکرد خوبی برای حل مسئله پیشنهادی دارد.

مراجع

- [1] Badarloo, B. and Taghi Safdari, M. (2017), Evaluation of nonlinear dynamic behaviour and determine performance level of concrete buildings with very high importance (designed based on Iranian Standard NO.2800 – 4th Edition). *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 5(3): p.172-189.
- [2] Najafgholipour, M.A., Hadinanfard, M.A., Malekjamshidi, Sh. and Dehghan, S.M. (2018), Match Compliance of Conventional Design Codes with Instructions for Seismic Rehabilitation of Buildings in Performance Evaluation of Steel Moment Frames. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 6(2): p 21-38.
- [3] Gholizadeh, S. and Salajegheh, E. (2009). Optimal design of structures subjected to time history loading by swarm intelligence and an advanced metamodel. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(37-40): p. 2936-2949.
- [4] Kaveh, A., Farahmand Azar, B., Hadidi, A., Rezazadeh Sorochi, F. and Talatahari, S. (2010). Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(4): p. 566-574.
- [5] Kaveh, A. and Zakian, P. (2013). Optimal design of steel frames under seismic loading using two meta-heuristic algorithms. *Journal of Constructional Steel Research*, 82: p. 111-130.
- [6] Kaveh, A. and Nasrollahi, A. (2014). Performance-based seismic design of steel frames utilizing charged system search optimization. *Applied Soft Computing*, 22: p. 213-221.
- [7] Kaveh, A., Fahimi-Farzam, M. and Kalateh-Ahani, M. (2015). Performance-based multi-objective optimal design of steel frame structures: Nonlinear dynamic procedure. *Scientia Iranica*, 22(2): p. 373-387.

- [8] 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*, 81: p. 50-65.
- [9] Kaveh, A., Ghafari, M. and Gholipour, Y. (2017). Optimal seismic design of 3D steel moment frames: different ductility types. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 56(6): p. 1353-1368.
- [10] Mokarram, V. and Banan, M.R. (2018). An improved multi-objective optimization approach for performance-based design of structures using nonlinear time-history analyses. *Applied Soft Computing*, 73: p. 647-665.
- [11] Karimi, F. and Hoseini Vaez, S.R. (2019). Two-stage optimal seismic design of steel moment frames using the LRFDPBD method. *Journal of Constructional Steel Research*, 155: p. 77-89.
- [12] FEMA 356, (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Prepared for FEMA.
- [13] Mansouri, S.F. and Maheri, M.R. (2019). Performance-based seismic design of steel frames using constraint control method. *Advances in Structural Engineering*.
- [14] ASCE 41-13, (2014), *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13)*. American Society of Civil Engineers.
- [15] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization (PSO). in *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia.
- [16] Shi, Y. and Eberhart, R. (1998). A modified particle swarm optimizer. in *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360). IEEE.
- [17] Kaveh, A., (2014). *Advances in metaheuristic algorithms for optimal design of structures*. Springer.
- [18] Livani, M.A., Khaji, N. and Zakian, P. (2016). Damage identification of cracks in structures via extended finite element method and particle swarm optimization. *Moades Civil Engineering Journal (MCEJ)*, 16: p. 177-189
- [19] Zakian, P. and Kaveh, A. (2018). Economic dispatch of power systems using an adaptive charged system search algorithm. *Applied Soft Computing*, 73: p. 607-622.
- [20] ASCE 7-10, (2013). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Standard ASCE/SEI 7-10*. Amer Soc Of Civil Engin.
- [21] AISC 360-16.(2016). *Specification for Structural Steel Buildings*.
- [22] Chopra, Anil K, (2016). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (5th Edition)*. Prentice HallInc., Upper Saddle River, NJ.
- [23] Shakib, H. and Homaei, F. (2017). Probabilistic seismic performance assessment of the soil-structure interaction effect on seismic response of mid-rise setback steel buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(7): p. 2827-2851.
- [24] SeismoSoft, Seismosignal., (2016). *A computer program for signal processing of strong-motion data*.
- [25] SeismoSoft, Seismomatch, (2018). *A computer program for spectrum matching of earthquake records*.