



Optimal distribution of connections with dampers to improve the performance of steel moment frames

A. M. Rabbani, S. M. Zahrai

Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

ABSTRACT: To reduce the seismic response of steel frames, energy dissipating devices can be placed at connections. These connections can be modeled as a rotational spring and damper in parallel. In this paper, an attempt is made to estimate the best distribution of the connections, by time-history analysis and optimization operation. Although in the previous studies, these connections were distributed uniformly, in this research the combination of these connections in moment frames is proposed. Two 9 and 20-story frames with sections and dimensions based on SAC benchmark structures are studied. The seismic performance of optimized structures with connections equipped with dampers and rigid connections is evaluated and compared to that of the moment frame with the uniform placement of such connections. It is observed that the performance of hybrid structures, despite having fewer dampers in connections, is much better than the structure with uniform distribution of this type of connection. On the other hand, linear and nonlinear behavior of elements and connections in structure is developed. Also, in optimal conditions, 62 and 68% of the connections in linear and 58 and 61% in nonlinear behavior have been equipped with dampers respectively for 9 and 20-story structures.

Review History:

Received: Feb. 25, 2022

Revised: Oct. 14, 2022

Accepted: Feb. 18, 2023

Available Online: Feb. 23, 2023

Keywords:

Semi-rigid connections

rigid connections

viscoelastic dampers

optimum distribution

particle swarm algorithm

1- Introduction

Different types of connections have been proposed and tested during recent years to reduce damage and structural response against earthquakes or other distractive natural disasters. Although the prequalified beam-to-column connections in codes are considered useful tools for decreasing damage in structural elements and having an appropriate behavior against cyclic loads, connections with high ductility and desirable strength are usually hard to achieve. Therefore, many researchers worked on some beam-to-column connections which are equipped with different types of dampers (connection dampers). Fig. (1a) illustrates elastomeric bolted connections by two elastomeric pads and a shear pin that is proposed by Hsu and Fafitis [1].

Some others just placed viscoelastic materials between the angle and beam flanges as revealed in Fig. (1b). Many studies in this context can be listed in references [2, 3]. However, the combination of different types of connections, especially for semi-rigid and rigid connections, is suggested as an efficient approach to reduce structural response [4]. One of the important challenges is to find the best position for distributing connections equipped with dampers on the structure. To address this problem, optimization algorithms can be utilized.

To investigate the performance of the hybrid structures whose connections are rigid and equipped with dampers, this paper employed an optimization algorithm (Particle swarm optimization, PSO) to find the best position for the connection dampers and their optimum properties to reduce structural response. The objective function is considered as a combination of the base shear of the structure and the maximum displacement of the roof. Two 9 and 20-story frames with sections and dimensions based on SAC benchmark structures are studied. The performance of structures compared to each other under three conditions with linear and nonlinear behavior: the first type is a structure with rigid connections. The second type is a structure with a distribution of connection dampers and rigid connections, and the third one is a structure in that whole connections are equipped with dampers. The results showed that the second one outperforms other types of structure in terms of the objective function.

2- Methodology

2- 1- Numerical model

The structures that are used in this paper, were designed by Brendo and Johnson [6] for the second phase of the SAC project. Beam and column elements and support conditions are considered as main models, but the connections are designed in this work. Linear and nonlinear behavior of

*Corresponding author's email: mzahrai@ut.ac.ir



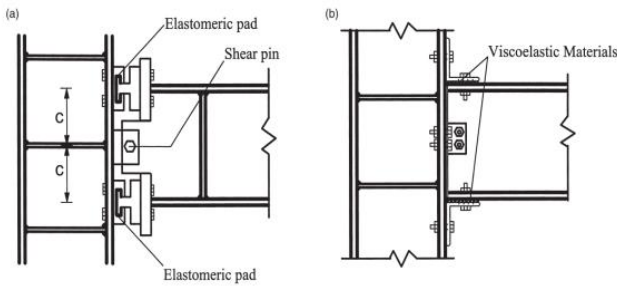


Fig. 1. Beam-to-column connection with energy dissipation devices a) Elastomeric pad b) Viscoelastic material [5]

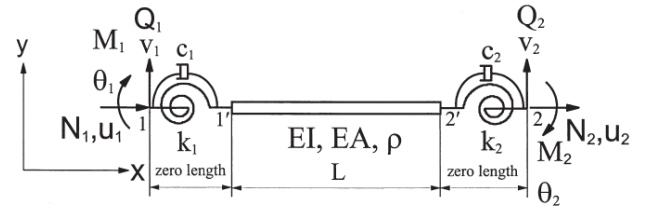


Fig. 2. Beam element with rotational spring and damper at its end [5]

elements and connections are developed. The connection behavior is modeled by a Kelvin-Voigt element, consisting of a rotational spring and a dashpot connected in parallel. Initial stiffness is derived using Eq 1. To introduce the nonlinear behavior of the connection, the suggested bilinear model in [4] is employed and the plastic stiffness is considered as a ratio of initial stiffness. Beams with connection dampers are modeled as illustrated in Fig 2.

$$K = \frac{3EI}{L} \frac{v}{1-v} \quad (1)$$

Where E, I, and L are the elasticity modulus, moment of inertia, and length of the beam. v represents the fixity of connection at the end of the beam which can be in the range of zero (for pin connections) to one (for rigid connections).

2- 2- PSO algorithm

Particle swarm optimization inspired by the communicational movement of birds is one of the popular and well-known metaheuristic optimization algorithms which was first introduced by Kennedy and Eberhart [7]. The implementation of the PSO algorithm is simple. In the first step, the objective function should be defined. The algorithm uses the particles to move in the search space and investigate the best solution. Each particle remembers its best experience and cooperates with the others to find the best experience in society. The new location of each particle is determined by a velocity term that represents the attraction of global and its own best.

2- 3- Objective function

Although for considering the structural response, features such as input energy or acceleration of each story can be utilized, in this paper two response characteristics including base shear and maximum displacement of the roof were employed to consider the influence of both criteria of strength and ductility. The objective function is defined as follows:

$$\frac{V}{V_1} + \frac{D}{D_1} \quad (2)$$

Here V_1 and D_1 represent base shear and maximum displacement of the roof in a structure with rigid connections, respectively. V and D denote base shear and maximum displacement of the roof in a structure with optimal connection in terms of position and its properties.

2- 4- Earthquake records

Three records utilized for analysis in this work, are selected among far-field records that are introduced in FEMA-P695 [8]. The used records are listed as follows: the Landers 1992, Northridge 1994, and Kobe 1995 earthquakes.

3- Conclusion

In this paper, responses of two 9 and 20-story hybrid structures under earthquake were investigated. Also, the PSO algorithm was employed to optimize the location, stiffness, and damper damping coefficient of connections equipped with dampers in each structure. The performance of hybrid structures with connection dampers and rigid connections was compared to those of structures having rigid connections and uniform distribution of connection dampers individually. The results explain as follows:

1. It was observed that the best fixity factor in connection for each structure is the less one that is considered. In this study, the less initial stiffness for connections leads to a better response.

2. In the average of three earthquake records, about 62 and 58 percent of beams in 9-story and 68 and 61 percent of beams in 20-story structure were equipped with connection dampers in two linear and nonlinear cases respectively during optimization operations while the other beams had rigid connections. Consequently, the number of beams whose connections were equipped with dampers was not significantly altered by changes in the height and spans of structures. Also considering the nonlinear behavior of elements in analysis leads to decreasing number of beams equipped with connection dampers that reduce the construction costs.

3. With the optimal distribution of connection dampers, damper damping coefficient, and fixity factor for the seismic responses, including maximum lateral displacement of roof and base shear which were investigated in this study, could considerably reduce to a level smaller than those of the frame with rigid connections and uniform distribution of optimal connection dampers.

4. For any distribution of connection dampers in the structures, there is an optimum damper damping coefficient which reduces the structural response.

5. Taking into account uncertainty in seismic records, a specific pattern in structures for the distribution of connection dampers could not be found.

References

- [1] S.-Y. Hsu, A. Fafitis, Seismic analysis design of frames with viscoelastic connections, *Journal of structural engineering*, 118(9) (1992) 2459-2474.
- [2] A. Banisheikholeslami, F. Behnamfar, M. Ghandil, A beam-to-column connection with visco-elastic and hysteretic dampers for seismic damage control, *Journal of Constructional Steel Research*, 117 (2016) 185-195.
- [3] M. Saeidzadeh, M.R. Chenaghloou, A.A. Hamed, Experimental and numerical study on the performance of a novel self-centering beam-column connection equipped with friction dampers, *Journal of Building Engineering*, 52 (2022) 104338.
- [4] M. Bayat, S.M. Zahrai, Seismic performance of mid-rise steel frames with semi-rigid connections having different moment capacity, *Steel Compos. Struct*, 25(1) (2017) 1-17.
- [5] Y.L. Xu, W. Zhang, Modal analysis and seismic response of steel frames with connection dampers, *Engineering structures*, 23(4) (2001) 385-396.
- [6] A. Gupta, Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures, Stanford University, 1999.
- [7] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in: MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, Ieee, 1995, pp. 39-43.
- [8] A.T. Council, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. M. Rabbani, S. M. Zahrai, *Optimal distribution of connections with dampers to improve the performance of steel moment frames*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(4) (2023) 171-174.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21157.7636](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21157.7636)





توزیع بهینه اتصالات دارای میراگر جهت بهبود عملکرد لرزه ای قاب‌های صلب فولادی

امیرمحمد ربانی، سید مهدی زهرائی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

کلمات کلیدی:

اتصالات نیمه صلب
اتصالات صلب
میراگر ویسکوالاستیک
توزیع بهینه
الگوریتم ازدحام ذرات

خلاصه: برای کاهش پاسخ سازه در برابر زلزله، قطعات با قابلیت اتلاف انرژی می‌توانند بر روی اتصالات فولادی جاگذاری گردند که این اتصالات با یک فنر دورانی برای تامین سختی و میرایی در سازه مدل‌سازی می‌شوند. در این پژوهش با انجام تحلیل لرزه‌ای و عملیات بهینه‌سازی تحت چند رکورد زلزله سعی بر برآورد تخمینی برای بهترین محل قرارگیری اتصالات مذکور در سازه می‌باشد. در گذشته مطالعاتی بر روی این اتصالات در مقیاس سازه انجام شده است، به طوریکه در تمامی اتصالات سازه دو فنر مزبور قرار گرفته اند، اما این مقاله ترکیبی از این نوع اتصالات و اتصالات صلب در دو سازه ۹ و ۲۰ طبقه از سازه‌های مرجع SAC را بررسی می‌کند. در نهایت، عملکرد سازه با ترکیب اتصالات مجهز به میراگر و اتصالات صلب و همینطور سازه با توزیع یکنواخت اتصالات مجهز به میراگر مقایسه و بررسی گردید و مشاهده شد که عملکرد سازه با اتصالات ترکیبی با وجود مجهز بودن تعداد کمتری از این اتصالات به میراگر، بسیار بهتر از سازه با توزیع یکنواخت این نوع اتصالات می‌باشد. از سوی دیگر، رفتار خطی و غیرخطی سازه و اتصالات، مدل‌سازی شده و تحت بررسی قرار گرفت. همچنین در حالت بهینه به طور متوسط تحت سه زلزله، در سازه ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۶۲٪ و ۶۸٪ از اتصالات در حالت خطی و ۵۸٪ و ۶۱٪ در حالت غیرخطی، مجهز به میراگر شدند.

۱- مقدمه و پیشینه تحقیق

همچنین آنها ماتریس جرم، سختی و میرایی را برای تیر با فنر دورانی برای سختی و میرایی در دو انتهای آن استخراج نمودند (شکل ۲). همینطور یک تحلیل تاریخچه‌زمانی بر روی یک قاب خمشی و همینطور قاب مجهز به مهاربند با اتصالات مورد بررسی انجام گرفت و مشاهده شد که پاسخ سازه به طرز چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. آنها همینطور روابطی را برای سختی و میرایی اتصال موجود و همچنین رابطه لنگر دوران اتصال با توجه به ابعاد پدهای الاستومری و پارامترهای مختلف دیگری معرفی و استخراج نمودند.

تا پیش از زلزله‌های گذشته همچون Northridge (1994) و Kobe (1995) عموماً اتصالات تیر به ستون به صورت تمام‌جوش یا نیمه‌جوش استفاده می‌شدند و عملکرد قابل قبولی نیز داشتند. اما در این حادثه اتصالات تیر به ستون شکست‌های تردی را تجربه کردند. مطالعات بسیاری بر روی اتصالات به همراه مواد اتلاف‌کننده انرژی بر روی آنها صورت گرفته است. سو و فافیتس^۱ 1991 [۳] طی پژوهشی اتصالی با دو پد الاستومری^۲ و همینطور یک مفصل برشی^۳ ارائه کردند. در تحقیقات دیگری تنها از مواد ویسکوالاستیک^۴ بر روی اتصالات پیچی استفاده شد، به طوریکه شکل اصلی اتصال به صورت اولیه باقی ماند (شکل ۱).

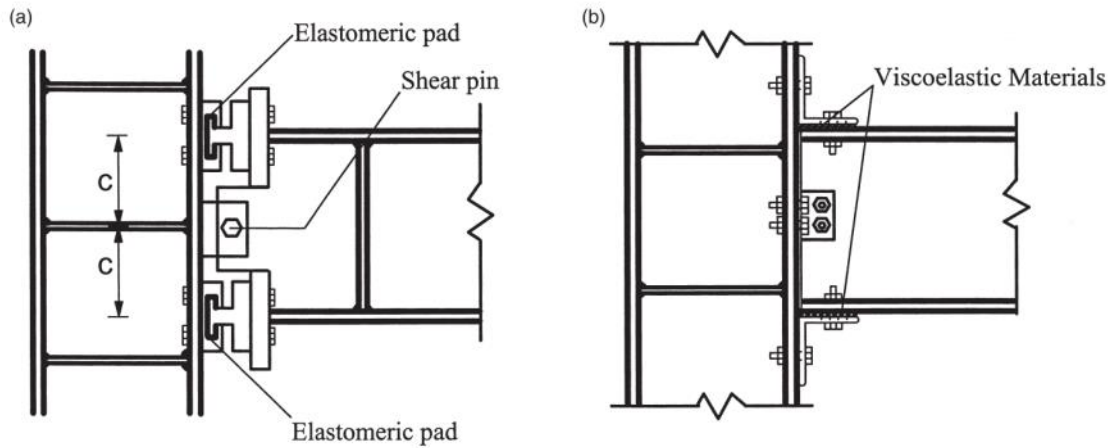
$$M = \left[E_c \frac{C\theta}{h_c} + \left(A_c \frac{C\theta}{h_c} \right) \frac{C\dot{\theta}}{h_c} \right] a_c C + \left[E_t \frac{C\theta}{h_t} + \left(A_t \frac{C\theta}{h_t} \right) \frac{C\dot{\theta}}{h_t} \right] a_t C \quad (1)$$

$$M = \left[\left(\frac{E_c a_c}{h_c} + \frac{E_t a_t}{h_t} \right) C^2 \right] \theta + \left[\left(\frac{A_c a_c}{h_c^2} + \frac{A_t a_t}{h_t^2} \right) \theta C^3 \right] \dot{\theta} \quad (2)$$

- 1 Hsu and Fafits
- 2 Elastomeric pad
- 3 Shear pin
- 4 Viscoelastic material

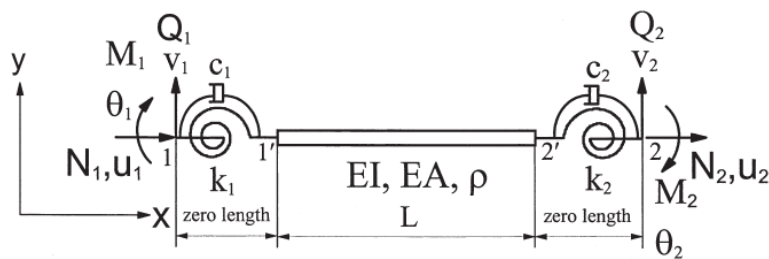
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzahrai@ut.ac.ir





شکل ۱. اتصالات تیر به ستون مجهز به وسایل مستهلک کننده انرژی [۲]

Fig. 1. Beam to column connection with energy dissipating devices [2]



شکل ۲. تیر مجهز به المان‌های فنر و میراگر [۲]

Fig. 2. Beam with rotational spring and damper [2]

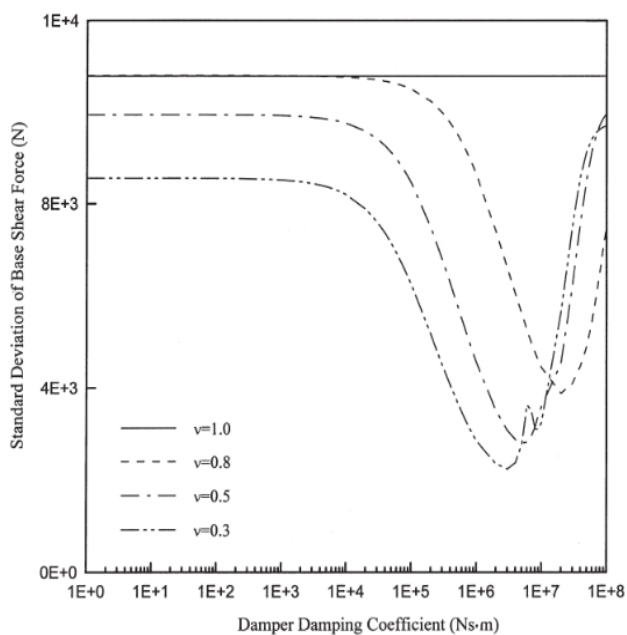
ژو و ژنگ [۲۰۰۱]، طی پژوهشی دیگر آنالیز مودال و تحلیل لرزه‌ای بر روی قاب با تیرهای مجهز شده به فنر دورانی سختی و میرایی انجام دادند و نتایج مهمی از آن تحقیق بدست آوردند. از جمله آن نتایج پیداشدن یک میرایی بهینه برای میراگرهای انتهایی تیر بود، که نشان داد با افزایش آن، پاسخ تا یک سطح بهینه از مقدار میرایی کاهش یافته و پس از آن مجدداً افزایش پیدا می‌کند. شکل ۳ نمونه ای از پاسخ سازه در این پژوهش را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است ν در شکل ۳ نشان‌دهنده صلبیت اتصال است. واضح است که کمترین ضریب صلبیت در نقطه بهینه پاسخ بهتری داده است. مشاهده می‌شود در اتصال صلب (ضریب سختی برابر ۱)

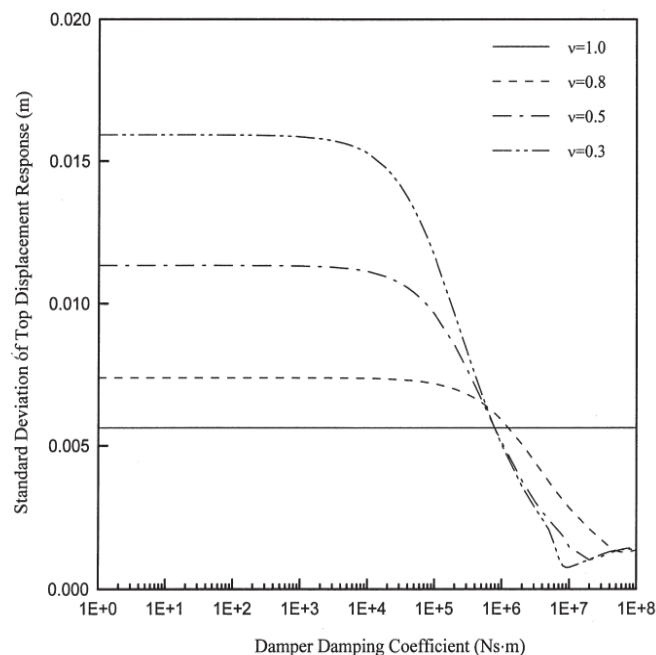
که در روابط بالا E_C و E_I به ترتیب مدول الاستیسیته پدهای اتصال در فشار و کشش، h ضخامت پدها، a مساحت مصالح الاستومری، A ضریب ویسکوزیته و C فاصله پد الاستومری تا وسط تیر مطابق شکل ۱ می‌باشند. روابط (۱) و (۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M = K_{\theta}\theta + C_{\theta}\dot{\theta} \quad (3)$$

که در آن K_{θ} معرف سختی دورانی و C_{θ} میرایی دورانی اتصال می‌باشد.



ب



الف

شکل ۳. الف) پاسخ تغییر مکان سازه با اتصالات مجهز به میراگر با میرایی‌ها و سختی‌های مختلف. ب) پاسخ برش پایه سازه با اتصالات مجهز به میراگر با میرایی‌ها و سختی‌های مختلف. [۲]

Fig. 3. a) Displacement response of frame equipped with damper having different damping coefficient and stiffness
b) Base shear response of frame equipped with damper having different damping coefficient and stiffness [2]

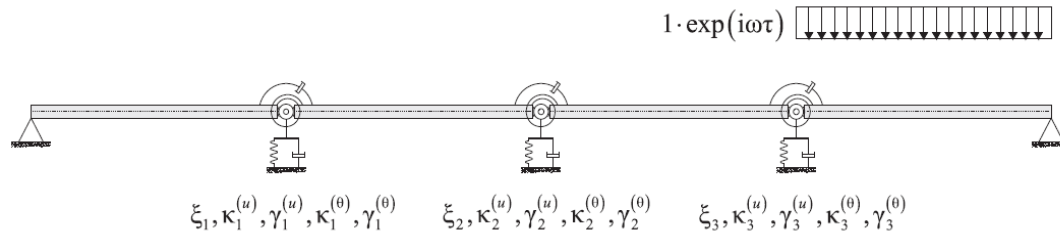
موسکلینو و همکاران^۴ ۲۰۰۴ [۴]، طی پژوهشی دیگر رفتار سازه تحت اتصالات مجهز به میراگر ویسکو الاستیک را با استفاده از فنر سختی و میرایی مدل‌سازی کردند و همینطور ماتریس سختی را برای تیر مجهز به این اتصالات استخراج نمودند. در سال ۲۰۰۵، ابراهیم و پتیت^۵ [۵]، مروری بر انواع اتصالات نیمه‌صلب از جمله اتصالات ساده و اتصالات همراه میراگر انجام دادند. فایلا^۶ [۶]، به بررسی دینامیک چند تیر با تعدادی مفصل دورانی کلون ویت، تکیه‌گاه‌های مفصلی و جرم‌های متمرکز پرداخت. وی پاسخ ارتعاش اجباری در حوزه زمان و فرکانس را به وسیله برهم نهی مودال براساس توابع ویژه محاسبه نمود.

تغییرات در میرایی، تاثیری در پاسخ سازه ندارد. در نهایت برای تیر مجهز به این نوع از اتصالات ماتریس میرایی، سختی و جرم استخراج شد. با توجه به پیچیدگی استخراج ماتریس میرایی به روش اجزا محدود، در این پژوهش ماتریس میرایی با ترکیب روش اجزا محدود^۱ و روش سختی مستقیم^۲، محاسبه گردید.

سکلوویچ و همکاران^۳ ۲۰۰۲ [۱]، بر روی پاسخ دینامیکی سازه با در نظر گرفتن اثر اتصالات نیمه‌صلب و میرایی در انتهای تیرها تحقیق نمودند و دو قاب را با این شرایط و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی اتصال مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه این پژوهش مشاهده اثر قابل ملاحظه در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری و میرایی اتصالات در سازه بود.

4 Muscelino et al.
5 Ibrahim and Pettit
6 Failla

1 Finite element method
2 Direct stiffness method
3 Seculovic et al.



شکل ۴. تیر مطالعه شده در پژوهش فایلا ۲۰۱۴ [۶]

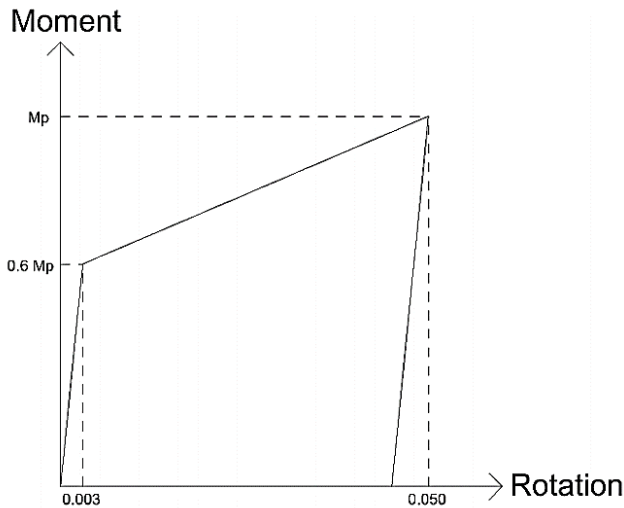
Fig. 4. Considered beam in Faila's study [6]

آزادی پرداختند. چن و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۱ [۱۲]، عملیات موقعیت‌یابی بهینه برای میراگرهای تنظیم‌شونده جرمی چندگانه و همچنین پارامترهای تنظیم‌شونده برای آن‌را انجام دادند. سینگ و مورسچی^۶ ۲۰۰۲ [۱۳]، برای دستیابی به ابعاد، مشخصات و موقعیت بهینه میراگر ویسکوز و ویسکوالاستیک در سازه، از الگوریتم ژنتیک برای این امر استفاده نمودند. وانگ و سیمان^۷ در سال ۲۰۰۴ [۱۴]، کاربرد الگوریتم ژنتیک را در توزیع میراگر در یک سازه مرجع بررسی نمودند. حیدری‌نوری و زهرائی^۸ در سال ۲۰۱۶ [۱۵]، یک روند گام به گام و تکرار شونده برای دستیابی به موقعیت و طراحی بهینه میراگر ویسکوز در سازه ارائه نمودند. بیات و زهرائی^۹ در سال ۲۰۱۷ [۱۶]، پژوهشی را بر روی عملکرد سازه‌های میان‌طبقه با چندین لگو از قرارگیری اتصالات نیمه‌صلب و همچنین ظرفیت‌های متفاوت برای هر کدام از اتصالات، انجام دادند. کاوه و همکاران^{۱۰} در سال ۲۰۱۷ [۱۷]، موقعیت اتصالات نیمه‌صلب در سازه را برای دستیابی به حداقل وزن تحت دو الگوریتم PSO و ECBO بررسی کردند و عملکرد این دو الگوریتم را در کمینه‌سازی وزن سازه ارزیابی نمودند. هوانگ^{۱۱} در سال ۲۰۱۸ [۱۸]، با اعمال ۴۴ رکورد زلزله بر دو سازه ۱۰ و ۲۰ طبقه ریسک فروریزش و پاسخ سازه را با بهینه کردن توزیع میراگرها با استفاده از الگوریتم ژنتیک^{۱۲} کاهش داد. مقدم^{۱۳} و همکاران در سال

عطارنژاد و پیرموز^۱ ۲۰۱۴ [۷]، پژوهشی بر روی رفتار غیرخطی اتصالات نیمه‌صلب با در نظرگیری برهم‌کنش اثر برش و خمش برای یک اتصال انجام دادند. مدل عددی بر روی دو سازه یک و سه طبقه با در نظر گرفتن اتصال به صورت فنر دورانی سختی و میرایی انجام گرفت. عطارنژاد و همکاران ۲۰۱۴ [۸]، طی پژوهشی دیگر سازه سه طبقه با اتصال فنر دورانی سختی و میرایی را با استفاده از آنالیزهای تاریخچه زمانی و تحلیل بار افزون، مورد بررسی قرار دادند و مجدداً یک میرایی بهینه برای رسیدن به حداقل پاسخ سازه یافتند. نتایج پاسخ سازه با اتصالات نیمه‌صلب با میرایی و بدون میرایی بررسی گردید و پاسخ کمتری در حالت اتصال با میرایی برای سازه نتیجه شد. بانی شیخ‌الاسلامی و همکاران^۲ ۲۰۱۶ [۹]، به بررسی یک اتصال با استفاده از میراگر هیستریزیس و ماده ویسکوالاستیک در آن پرداختند و شکل‌پذیری قابل توجهی برای آن بدست آوردند. همین‌طور به بررسی اثر عوامل مختلف از جمله قطر پیچ و ابعاد تیر و ستون در پاسخ اتصال پرداختند. سعیدزاده^۳ و همکاران ۲۰۲۲ [۱۰] یک اتصال مرکز‌گرای تیر به ستون مجهز به میراگراصلطکاکي ارائه نمودند. دو نمونه از این نوع اتصال مورد آزمایش و صحت‌سنجی قرار گرفت که در نهایت شکل‌پذیری و و سختی دورانی بیشتری از این اتصال نتیجه گرفته شد. همچنین تحقیقات زیادی بر بهترین موقعیت قرارگیری میراگرها در سازه انجام گرفت که در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می‌گردد. گورجز و مولر^۴ در سال ۱۹۹۲ [۱۱]، بر اساس معیار انرژی به یافتن بهترین موقعیت میراگر ویسکوز در سیستم‌های چنددرجه

5 Chen et al.
6 Singh and Moreschi
7 Wongprasert and Symans
8 Heydarinouri and Zahrai
9 Bayat and Zahrai
10 Kaveh et al.
11 Huang
12 Genetic Algorithm
13 Moghaddam

1 Attarnejad and Pirmoz
2 Banisheikhosslami et al.
3 Saeedzadeh
4 Gurgoze and Mcjller



شکل ۵. منحنی دو خطی رفتار اتصالات نیمه‌صلب [۱۶]

Fig. 5. Bilinear behavior of semi-rigid connections [16]

ضریب را می‌توان تابعی از پارامترهایی از جمله مدول الاستیسیته، ضخامت، مساحت و فاصله پدهای الاستومری در کشش و فشار از یکدیگر، دانست. همینطور یک میرایی دورانی ویسکوز برای این فنرها نیز در نرم‌افزار تعریف گردید. مقادیر میرایی نیز به صورت متغیر در اتصال به عنوان میرایی ویسکوز وارد می‌شود. این مقدار همانطور که در رابطه ۱ و ۲ دیده می‌شود به مشخصات میراگر از جمله ضخامت پدها، مساحت پدهای الاستومری، ضریب ویسکوزیته، فاصله پد از وسط تیر و همچنین میزان دوران تیر بستگی دارد. المان‌های تیر و ستون در دو حالت خطی و غیرخطی به ترتیب به صورت *elasticBeam-Column* و *nonlinearBeamColumn* به نرم‌افزار معرفی شدند. برای معرفی رفتار غیرخطی فولاد نیز، از یک منحنی دوخطی استفاده شد. به منظور مدل‌سازی غیرخطی اتصالات نیز از رفتار دو خطی پیشنهادی در مرجع [۱۶] که در شکل ۵ نمایش داده شده است استفاده می‌گردد، با این تفاوت که سختی اولیه اتصال از رابطه ۴ محاسبه شده و سختی ثانویه به صورت ضریبی از سختی اولیه مطرح می‌گردد. مطابق پیشنهاد مرجع مذکور با توجه به مقادیر لنگر تسلیم و نهایی و همینطور زاویه دوران تسلیم و نهایی در اتصالات نیمه‌صلب، نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه برابر 0.4 برآورد می‌گردد.

فنرهای تعریف‌شده به همراه میراگر می‌توانند اتصالاتی مشابه اتصال کارهای سو و فافیتس، بانی شیخ‌الاسلامی و همکاران و یا حتی اتصالات ساده نیمه‌صلب با میرایی موجود در آنها باشند و به صورت

۲۰۲۲ [۱۹] با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی به نام AOT^۱، با در نظر گرفتن سه تیپ سازه ۴، ۸ و ۱۶ طبقه بهترین طراحی نیروی لغزش میراگر و توزیع آن‌ها را بدست آوردند.

تحقیقات اندکی در عملکرد کلی سازه با اتصالات مجهز به میراگر انجام شده است. در این پژوهش با تمرکز بر توزیع بهینه این نوع اتصالات و ترکیب آنها با اتصالات صلب در سازه از طریق یک الگوریتم بهینه‌یابی، مقایسه‌ای میان عملکرد لرزه‌ای سازه در سه حالت اتصالات صلب، اتصالات مجهز به میراگر با توزیع یکنواخت و اتصالات مجهز به میراگر با توزیع بهینه انجام گرفته است. در این تحقیق ابتدا دو سازه ۹ و ۲۰ طبقه با میرایی ویسکوز ۵ درصد با اتصالات صلب مدل‌سازی شده و پاسخ حداکثر جابجایی بام و همینطور برش پایه این سازه‌ها تحت سه رکورد زلزله بررسی شده‌اند. در مرحله بعد تمامی اتصالات به دو المان فنر سختی میرایی دورانی مجهز و مجدداً پاسخ دو سازه ارزیابی شدند و در نهایت با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات، بهترین توزیع اتصالات مذکور به همراه میرایی و سختی بهینه، برآورد و نتایج با سایر حالات توزیع اتصالات مقایسه می‌گردد.

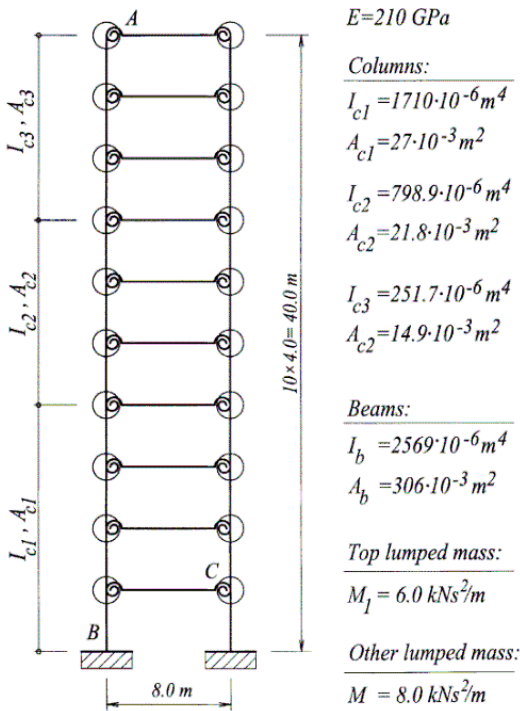
۲- فرضیات مدل‌سازی و تحلیل

در این مقاله، با در نظر گرفتن یک سازه ترکیبی متشکل از اتصالات صلب و اتصالات مجهز به میراگر، بهترین موقعیت اتصالات مجهز به میراگر در سازه بررسی گردیده و نتایج با حالات مختلف مقایسه می‌شود. ژو و ژنگ ۲۰۰۱، با مدل‌سازی یک سازه الاستیک در نرم‌افزار *Opensees V3.3* [۲۰]، سختی الاستیک فنرها را با استفاده از المان با طول صفر (*Zerolength element*) در انتهای تیر در حالت کلی به صورت زیر معرفی کردند:

$$K = \frac{3EI}{L} \frac{v}{1-v} \quad (4)$$

که E, L, I به ترتیب ممان اینرسی، طول و مدول الاستیسیته تیر بوده و v ضریبی برای معرفی میزان صلبیت اتصال می‌باشد که مقدار ۱ برای آن به معنای اتصال کاملاً صلب و مقدار ۰ به معنی اتصال کاملاً ساده می‌باشد. همچنین در پژوهش سو و فافیتس ۱۹۹۲، این

1 Adaptce optimisation technique



شکل ۶: قاب مورد مطالعه در پژوهش سکلوویچ و همکاران [۲۰۰۲]

Fig. 6. Considered frame in research of Seculovic et al. [1]

را برای این ضرایب ارائه کردند. این مقادیر بهینه به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$w = 0.7298 ; c_1 = c_2 = 1/4962 \quad (7)$$

۲-۲- صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی این مدل با توجه به مقاله سکلوویچ و همکاران انجام گرفته است. این مدل یک سازه ۸ طبقه یک دهانه مطابق شکل ۶ با مشخصات داده شده می‌باشد. به منظور صحت‌سنجی، این سازه در نرم‌افزار اپنسیس مدل‌سازی گردید. اعضا به صورت خطی، مجهز به اتصالات صلب و نیمه‌صلب، تحت شتاب دو پله‌ای با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه و دو پله با شتاب ۰/۲ و ۰/۴، به ترتیب از صفر تا ۱ ثانیه و از ۱ تا ۳ ثانیه، قرار گرفت. اتصالات در هر دو حالت رفتار خطی و غیرخطی بررسی شدند، بدین صورت که برای لحاظ کردن رفتار خطی از یک سختی الاستیک مطابق رابطه (۴) استفاده شد. برای حالت اعضا

دو فنر دورانی سختی و میرایی مدل‌سازی شوند. در این پژوهش برای معرفی سختی اولیه اتصالات از رابطه ۴ استفاده شده است و سعی بر برآورد بهترین مقدار برای ضریب سختی (V)، میرایی و همچنین بهترین موقعیت برای فنرهای مذکور می‌باشد.

۲-۱- الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

این الگوریتم که الهام‌گرفته از حرکات دسته جمعی پرندگان می‌باشد، جزو دسته‌ی الگوریتم‌ها با هوش جمعی در الگوریتم‌های فراابتکاری بهینه‌سازی قرار می‌گیرد، که توسط کندی و ابرهات^۱ در سال ۱۹۹۵ [۲۱] ارائه شد. هوش جمعی دو مولفه اساسی را در خود داراست که یکی نحوه تبادل اطلاعات^۲ و دیگری خود‌ترتیبی^۳ می‌باشند. قبل از هر چیز ابتدا تابع هدف باید مشخص گردد. سپس توده‌ای از ذرات انتخاب و پخش می‌شوند تا به دنبال جواب بهینه بگردند. هر ذره شامل متغیرهای مساله است که برای هر کدام باید تابع هدف محاسبه گردد. سرانجام سرعت و موقعیت هر ذره به روزرسانی و در ادامه ذرات به سمت جواب بهینه مطلق هدایت می‌گردند. این الگوریتم با استفاده از دو رابطه زیر موقعیت جدید یک ذره را پیدا می‌کند:

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(xlb_i^t - x_i^t) + c_2r_2(xgb_i^t - x_i^t) \quad (5)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (6)$$

که در آن i و t به ترتیب به ترتیب شماره ذره و شماره تکرار را نشان می‌دهد. پارامترهای X و V به ترتیب بردار موقعیت و سرعت هر ذره و xlb و xgb به ترتیب بهترین موقعیت محلی هر ذره و بهترین موقعیت کلی ذرات را نشان می‌دهند. مقادیر r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین ۰ تا ۱ می‌باشند.

کلرک و کندی^۴ [۲۲] در پژوهشی مقادیر ضرایب الگوریتم را با استفاده از روابط پایداری دینامیکی بهبود دادند و مقادیر بهینه‌ای

- 1 Kennedy and Eberhart
- 2 Information flow
- 3 Self organization
- 4 Clerc and Kennedy

جدول ۱. ویژگی‌های مودال ۸ طبقه مقاله مرجع و صحت سنجی

Table1. Modal properties of reference 8-story frame and its verification

| دوره تناوب سازه | | | فرکانس طبیعی | | | نوع اتصال | |
|-----------------|---------|---------|--------------|---------|---------|-----------|------------|
| مود سوم | مود دوم | مود اول | مود سوم | مود دوم | مود اول | | |
| ۰/۲۰۲ | ۰/۳۵۹ | ۰/۹۹۳ | ۳۱/۱۱۶ | ۱۷/۵۲۳ | ۶/۳۲۸ | صلب | مقاله مرجع |
| ۰/۲۰۲ | ۰/۳۵۹ | ۰/۹۹۴ | ۳۱/۱۰۹ | ۱۷/۴۸۸ | ۶/۳۲۴ | صلب | صحت سنجی |
| ۰/۲۲ | ۰/۳۹۱ | ۱/۰۹۷ | ۲۸/۶۱۱ | ۱۶/۰۸۸ | ۵/۷۲۷ | نیمه‌صلب | مقاله مرجع |
| ۰/۲۱۹ | ۰/۳۹۱ | ۱/۰۹۷ | ۲۸/۶۳ | ۱۶/۰۶۲ | ۵/۷۲۷ | نیمه‌صلب | صحت سنجی |

جدول ۲. حداکثر جابجایی نقطه A در سازه ۸ طبقه مقاله مرجع و صحت‌سنجی

Table2. Maximum displacement of node A in reference 8-story frame and its verification

| صحت‌سنجی | | | | مقاله مرجع | | | | حداکثر جابجایی نقطه A (cm) |
|-----------------|------|--------------|------|-----------------|-----|--------------|------|----------------------------|
| نیمه‌صلب غیرخطی | | نیمه‌صلب خطی | | نیمه‌صلب غیرخطی | | نیمه‌صلب خطی | | |
| C=۵۰۰۰۰ | C=۰ | C=۵۰۰۰۰ | C=۰ | C=۵۰۰۰۰ | C=۰ | C=۵۰۰۰۰ | C=۰ | |
| ۳/۰۸ | ۳/۴۱ | ۳/۰۱ | ۳/۳۴ | ۲/۹۵ | ۳ | ۳/۳۸ | ۲/۹۶ | ۳/۲۷ |
| | | | | | | | | ۲/۸۴ |

۲-۳- تابع هدف

تابع هدف نامقید برای این منظور به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{V}{V_1} + \frac{D}{D_1} \quad (8)$$

که در آن V_1 و D_1 به ترتیب برش پایه و حداکثر تغییرمکان بام سازه در اثر زلزله در حالتی که تمامی اتصالات صلب می‌باشند، است و V و D به ترتیب برش پایه و حداکثر تغییرمکان بام سازه در اثر زلزله در حالت بهینه می‌باشند. تابع هدف ترکیبی فوق، به منظور در نظر گرفتن معیارهای مقاومت و همچنین قابلیت سرویس‌دهی سازه در

خطی، تیر و ستون با استفاده از المان `elasticBeamColumn` و المان‌های فنر و میرایی چرخشی با طول صفر، به ترتیب با استفاده از مواد `Steel01` و `Viscous` مدل‌سازی گردیدند. اتصال نیمه‌صلب مورد استفاده برای صحت سنجی، اتصال مجهز به نبشی بالا، پایین و جان تیر می‌باشد. مدل‌سازی اتصال با استفاده از مدل دوخطی مذکور در بخش ۲، انجام گرفت.

در نهایت نتایج در دو جدول ۱ و ۲ به صورت خلاصه آمده‌اند. واحد میرایی‌های مذکور بر حسب کیلونیوتن مترثانیه بر رادیان است. علت تغییرات جزئی ایجاد شده در تغییرمکان تحت بار دو پله‌ای، در نظر گرفتن حدودی رفتار اتصال به صورت دو خطی به جای منحنی می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات مجموعه رکوردهای دور از گسل انتخاب شده از FEMA-P695

Table 3. Far field seismic record properties selected from FEMA-P695

| PGA (g) | فاصله از گسل (کیلومتر) | نام ایستگاه لرزه‌نگاری | بزرگا | سال وقوع | نوع خاک | نام زلزله |
|---------|------------------------|------------------------|-------|----------|---------|----------------|
| ۰/۲۴۵ | ۸۶ | Yermo Fire Station | ۷/۳ | ۱۹۹۲ | D | Landers, US |
| ۰/۵۰۹ | ۸.۷ | Nishi-Akashi | ۶/۹ | ۱۹۹۵ | C | Kobe, Japan |
| ۰/۵۱۶ | ۱۳.۳ | Beverly Hills - Mulhol | ۶/۷ | ۱۹۹۴ | D | Northridge, US |

۳- سازه‌های SAC

ساختمان‌های SAC [۲۴، ۲۵]، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، توسط برندو و جانستون، به جهت فاز دوم پروژه فولادی SAC طراحی شده‌اند. اگرچه این ساختمان‌ها واقعا ساخته نشده‌اند اما با کدهای لرزه‌ای مطابقت دارند. این پروژه شامل قاب‌های نمونه ۳، ۹ و ۱۲ طبقه واقع در لس آنجلس، سیاتل و بوستون است. کاربری ساختمان‌ها اداری و نوع سازه قاب خمشی متوسط بوده و در هر دو نوع خاک نرم و سخت طراحی شده‌اند. در این مقاله، به جهت در نظر گرفتن هر دو نوع خاک از زلزله‌هایی که در هر ایستگاه از خاک نوع C و D، که مطابق خاک نوع ۲ و ۳ در استاندارد ۲۸۰۰ زلزله می‌باشند، ثبت شده‌اند استفاده شده است. سازه‌های مورد مطالعه، شامل سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه SAC واقع در لس آنجلس می‌باشند که خاک آن از نوع خاک D است.

۴- بهینه‌یابی موقعیت و مشخصات اتصال با میراگر برای سازه ۹ طبقه

بدین منظور سازه میان‌مرتب با مشخصات سازه مرجع SAC در نرم‌افزار اپنسیس به صورت خطی و غیرخطی مدل‌سازی شد و تحلیل تاریخچه زمانی تحت سه رکورد زلزله نورثریج، کوبه و لندرز بر روی آن انجام گرفت. مشخصات سازه مدل شده پنج دهانه، هر دهانه به طول ۹/۱۵ متر مطابق جدول ۴ است. تکیه‌گاه‌های پای ستون به صورت مفصلی است و همچنین در تراز زمین دو تکیه‌گاه غلتکی مانع حرکت جانبی قاب می‌شوند.

مسئله بهینه‌سازی طراحی لحاظ شده است. بدیهی است که می‌توان عوامل دیگری را نیز به عنوان یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه در نظر گرفت، اما در این پژوهش هدف مطالعه بر روی به کارگیری ترکیب اتصالات صلب و اتصالات همراه میراگر و بهینه‌سازی آن با یک الگوریتم فراابتکاری می‌باشد، و برش پایه و حداکثر تغییر مکان بام به عنوان نماینده‌هایی برای مقاومت و سرویس‌دهی سازه در نظر گرفته شده‌اند. در این الگوریتم مقدار، در بازه ۰/۲ تا ۱ تعریف شده است که با توجه به نوع اتصال بتواند حداقل سختی را به علت سختی میراگر داشته باشد و این مقدار برای تمام اتصالات طبقات یکسان است، اما با توجه به تغییرات المان‌های تیر در ارتفاع سختی فنر در طبقات مسلما تغییر خواهد کرد. برای محاسبه سختی الاستیک فنر نیز از رابطه ۴ استفاده می‌شود. برای ضریب میرایی بازه ۱ الی ۱۰^۸ نیوتن مترثانیه بر رادیان در نظر گرفته شده است که این مقدار نیز برای همه المان‌ها یکسان لحاظ شده است. همینطور برای تمامی تیرها متغیر ۰ و ۱ تعریف شده است تا در صورتی که الگوریتم برای آنها ۱ شناسایی کند، تیر مجهز به فنر سختی و میراگر باشد و در غیر این صورت با شناسایی عدد ۰ برای تیر، دو سر تیر به صورت صلب به ستون‌ها متصل باشند. در این پژوهش تعداد ۳۰ ذره و ۱۰۰ تکرار برای هر دو سازه ۹ و ۲۰ طبقه در نظر گرفته شده است. زلزله‌های مورد استفاده از مجموعه رکوردهای حوزه دور FEMA-P695 [۲۳] برداشت شده‌اند. برای در نظر گرفتن طراحی به شیوه قابل پیش‌بینی و تمرکز بر ایده اصلی پژوهش، از زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به گسل به دلیل ایجاد پالس‌های با دوره تناوب بالا و متعاقباً احتمال ایجاد جابه‌جایی‌های زیاد و غیرقابل پیش‌بینی، استفاده نشده است.

جدول ۴. مشخصات تیر و ستون سازه ۹ طبقه SAC

Table 4. Beam and column properties in SAC 9-story frame

| طبقه | تیر | ستون | ارتفاع طبقه (متر) | جرم طبقه (کیلوگرم) |
|--------|---------|---------|-------------------|--------------------|
| Ground | W36x160 | W14x500 | 3.65 | 9.65E+05 |
| 1 | W36x160 | W14x500 | 5.49 | 1.01E+06 |
| 2 | W36x160 | W14x455 | 3.96 | 9.89E+05 |
| 3 | W36x135 | W14x455 | 3.96 | 9.89E+05 |
| 4 | W36x135 | W14x370 | 3.96 | 9.89E+05 |
| 5 | W36x135 | W14x370 | 3.96 | 9.89E+05 |
| 6 | W36x135 | W14x283 | 3.96 | 9.89E+05 |
| 7 | W30x99 | W14x283 | 3.96 | 9.89E+05 |
| 8 | W27x84 | W14x257 | 3.96 | 9.89E+05 |
| 9 | W24x68 | W14x257 | 3.96 | 1.07E+06 |

با میراگر، با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی، بهترین محل قرارگیری و بهترین ضریب میرایی و ضریب سختی این نوع از اتصالات مورد بررسی قرار می‌گیرد (حالت ۲). در نهایت مشابه مطالعات گذشته، حالت تماماً مجهز به اتصالات با میراگر بررسی می‌شود (حالت ۳)، که در این حالت برای پیدا کردن میرایی بهینه، با تغییرات آن مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ مقدار تابع هدف برآورد می‌شود.

همانطور که از نتایج جدول ۶ برمی‌آید، حالت ۲ نسبت به حالت ۱، به طور متوسط برای سه رکورد زلزله ۳۹/۹۶ و ۳۹/۵ درصد و نسبت به حالت ۳، ۱۸/۷۸ و ۲۱/۸۲ درصد بهبود به ترتیب در دو حالت خطی و غیر خطی برای تابع هدف سازه ۹ طبقه داشته است. در جدول ۸ و ۹ مقادیر بهینه برای سازه ۲۰ طبقه نیز ارائه شده است. در سازه ۲۰ طبقه نیز بهبود تابع هدف در حالت ۲، به مقدار میانگین ۳۸،۷۳ ۴۳،۸۳ درصد نسبت به حالت ۱ و مقدار ۱۵/۴۶ و ۱۹/۴۶ درصدی به ترتیب در دو حالت خطی و غیر خطی نسبت به حالت ۳ مشاهده می‌گردد. اشکال ۷ تا ۱۰ حالت بهینه قرارگیری اتصالات مجهز به میراگر را به ترتیب در سازه ۹ و ۲۰ طبقه را در دو حالت خطی و غیر خطی نشان می‌دهند و همینطور شکل ۱۱ نتایج همگرایی الگوریتم را برای دو سازه در هر دو حالت و برای هر رکورد نمایش

۵- بهینه‌یابی موقعیت و مشخصات اتصال با میراگر برای سازه ۲۰ طبقه

بدین منظور سازه ۲۰ طبقه با مشخصات سازه مرجع SAC در نرم‌افزار اپنسیس به صورت خطی و غیرخطی مدل‌سازی شد و تحلیل تاریخچه زمانی تحت سه رکورد زلزله نورث‌ریج، کوبه و لندرز بر روی آن انجام گرفت. مشخصات سازه مدل‌شده پنج دهانه، هر دهانه به طول ۶/۱ متر مطابق جدول ۵ است. ستون کناری، مقطع قوطی و ابعاد آن به اینچ است. تکیه‌گاه‌های پای ستون به صورت مفصلی است و همچنین در تراز زمین دو تکیه‌گاه غلتکی مانع حرکت جانبی قاب می‌شوند. مشخصات و محدوده‌های در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی (حدود ضریب سختی، میرایی و محل قرارگیری فنر) در دو سازه مشابه هم هستند. تنش تسلیم تیرها و ستون‌ها به ترتیب برابر ۲۴۸ و ۳۴۵ مگاپاسکال لحاظ گردیده است.

۶- نتایج عددی و بحث بر روی آنها

در ادامه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی برای هر تیپ از اتصالات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت تماماً صلب (حالت ۱)، همه اتصالات سازه از نوع صلب بوده و در حالت بهینه قرارگیری اتصالات

جدول ۵. مشخصات و ابعاد سازه ۲۰ طبقه

Table 5. Beam and column properties in SAC 20-story frame

| طبقه | تیر | ستون میانی | ستون کناری | ارتفاع طبقه (متر) | جرم طبقه (کیلوگرم) |
|--------|---------|------------|----------------|-------------------|--------------------|
| B1 | W30x99 | W24x335 | Box 15x15x2 | 3.65 | 5.32E+05 |
| Ground | W30x99 | W24x335 | Box 15x15x2 | 3.65 | 5.32E+05 |
| 1 | W30x99 | W24x335 | Box 15x15x2 | 5.49 | 5.63E+05 |
| 2 | W30x99 | W24x335 | Box 15x15x1.25 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 3 | W30x99 | W24x335 | Box 15x15x1.25 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 4 | W30x99 | W24x335 | Box 15x15x1.25 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 5 | W30X108 | W24x229 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 6 | W30X108 | W24x229 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 7 | W30X108 | W24x229 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 8 | W30X108 | W24x229 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 9 | W30X108 | W24x229 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 10 | W30X108 | W24x229 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 11 | W30x99 | W24x192 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 12 | W30x99 | W24x192 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 13 | W30x99 | W24x192 | Box 15x15x1 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 14 | W30x99 | W24x131 | Box 15x15x0.75 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 15 | W30x99 | W24x131 | Box 15x15x0.75 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 16 | W30x99 | W24x131 | Box 15x15x0.75 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 17 | W27x84 | W24x117 | Box 15x15x0.75 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 18 | W27x84 | W24x117 | Box 15x15x0.75 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 19 | W24x62 | W24x84 | Box 15x15x0.5 | 3.96 | 5.52E+05 |
| 20 | W21x50 | W24x84 | Box 15x15x0.5 | 3.96 | 5.84E+05 |

با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی اتصالات، مقدار حداکثر جابجایی بام و برش پایه نسبت به رفتار خطی در دو حالت ۱ و ۳ به ترتیب افزایش و کاهش یافت، همچنین تعداد تیرهای مجهز به این اتصال و همچنین جانمایی آن‌ها در سازه نسبت به حالت خطی، تغییر پیدا کرد که این امر با توجه به عدم قطعیت در زلزله و همین‌طور ماهیت احتمالاتی و مبتنی بر جمعیت الگوریتم PSO قابل توجیه می‌باشد. با این حال تفاوت چندانی در مقدار تابع هدف مشاهده نشد. در ادامه

می‌دهد. همچنین مطابق جداول ۷ و ۹، ۶۲ و ۵۸ درصد و ۶۸ و ۶۱ درصد تیرها به ترتیب در دو حالت خطی و غیرخطی سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه به طور میانگین برای سه رکورد زلزله، مجهز به میراگر شده‌اند.

با توجه به عدم قطعیت زلزله و همین‌طور ماهیت احتمالاتی الگوریتم PSO، الگوی خاصی برای قرار گیری این نوع از اتصالات در طول سازه دیده نمی‌شود.

جدول ۶. پاسخ سازه تحت رکوردهای لرزه‌ای مختلف سازه ۹ طبقه

Table 6. Structural response under different seismic records in 9-story frame

| مقدار تابع هدف | حداکثر جابجایی بام (m) | | حداکثر برش پایه (kN) | | حالت اتصالات سازه | رکورد زلزله | نوع سازه |
|----------------|------------------------|---------|----------------------|----------|-------------------|-------------|----------|
| | خطی | غیر خطی | خطی | غیر خطی | | | |
| ۲ | ۲ | ۰/۴۱۹ | ۰/۳۹۳ | ۱۹۲۴/۳۱ | ۲۳۴۱/۳۷۳ | حالت ۱ | |
| ۱/۴۴ | ۱/۳۸ | ۰/۲۹۹ | ۰/۲۹۳ | ۱۴۰۷/۰۱۶ | ۱۴۸۷/۳۸۹ | حالت ۲ | لندرز |
| ۱/۵۲ | ۱/۴۲۹ | ۰/۲۴۸ | ۰/۲۵۵ | ۱۷۸۹/۳۵۴ | ۱۸۲۶/۴۱۲ | حالت ۳ | |
| ۲ | ۲ | ۰/۲۵۸ | ۰/۲۵۷ | ۱۶۷۸/۸۴ | ۱۸۵۲/۳۸۳ | حالت ۱ | |
| ۱/۲۱ | ۱/۱۴ | ۰/۱۴۱ | ۰/۱۳۹ | ۱۱۰۴/۹۱ | ۱۱۱۰/۸۲۲ | حالت ۲ | کوبه |
| ۱/۴۹۲ | ۱/۴۰۶ | ۰/۱۴۳ | ۰/۱۴۲۴ | ۱۵۷۲/۸۶ | ۱۵۷۷/۵۹۱ | حالت ۳ | |
| ۲ | ۲ | ۰/۳۷۳۳ | ۰/۳۴۷۱ | ۲۳۴۷/۴۳ | ۲۴۵۳/۳۲۵ | حالت ۱ | |
| ۰/۹۸ | ۱/۰۸۲ | ۰/۱۳۳۱ | ۰/۱۲۸۷ | ۱۴۶۲/۱۷ | ۱۷۴۴/۸۹۴ | حالت ۲ | نورثریج |
| ۱/۶۷ | ۱/۶۴ | ۰/۱۶۸۹ | ۰/۱۶۰۲ | ۲۸۶۹/۶۳ | ۲۸۹۰/۰۳ | حالت ۳ | |

جدول ۷. مشخصات بهینه سازه ۹ طبقه

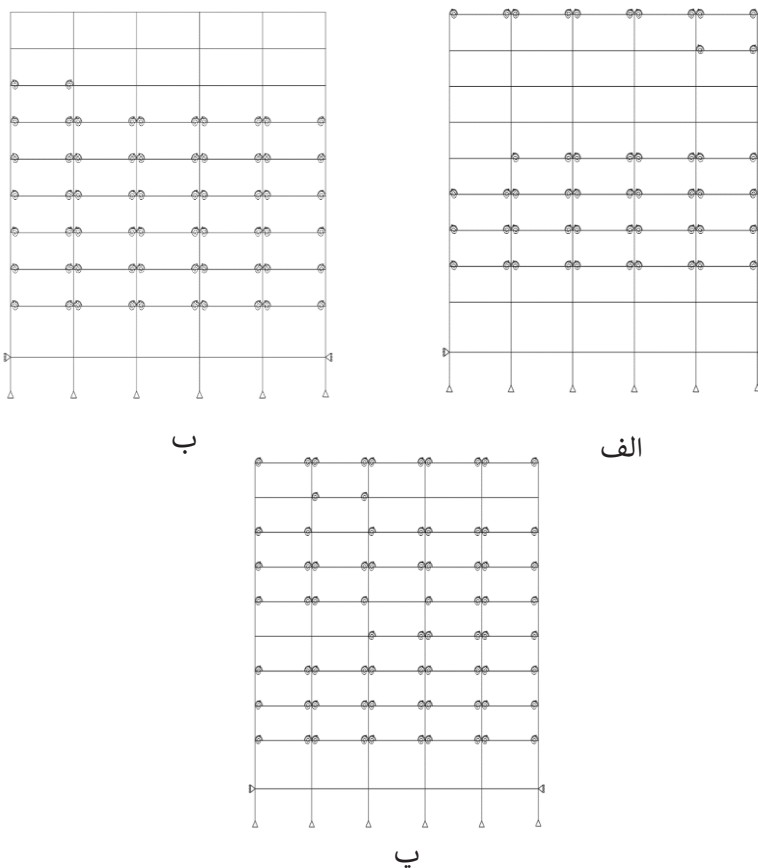
Table 7. Optimal properties of 9-story frame

| میرایی بهینه | ضریب سختی بهینه | | تعداد تیرهای مجهز به المان فنر و میراگر (از ۵۰ تیر) | | حالت اتصالات سازه | رکورد زلزله | نوع سازه |
|---------------------|---------------------|---------|---|---------|-------------------|-------------|----------|
| | خطی | غیر خطی | خطی | غیر خطی | | | |
| - | - | - | ۰ | ۰ | حالت ۱ | | |
| ۱۰ ^۷ | ۱۰ ^۸ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۲۵ | ۲۵ | حالت ۲ | لندرز |
| ۱۰ ^۹ | ۱۰ ^۹ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۵۰ | ۵۰ | حالت ۳ | |
| - | - | - | ۰ | ۰ | حالت ۱ | | |
| ۱۰ ^۸ | ۱۰ ^۸ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۳۶ | ۳۱ | حالت ۲ | کوبه |
| ۱۰ ^۸ | ۱۰ ^۸ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۵۰ | ۵۰ | حالت ۳ | |
| - | - | - | ۰ | ۰ | حالت ۱ | | |
| ۸/۴×۱۰ ^۴ | ۸/۱×۱۰ ^۶ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۲۶ | ۳۷ | حالت ۲ | نورثریج |
| ۱۰ ^۸ | ۱۰ ^۸ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۵۰ | ۵۰ | حالت ۳ | |

جدول ۸. پاسخ سازه تحت رکوردهای مختلف سازه ۲۰ طبقه

Table 8. Structural response under different seismic records in 20-story frame

| مقدار تابع هدف | حداکثر جابجایی بام (m) | | حداکثر برش پایه (kN) | | حالت اتصالات سازه | رکورد زلزله | نوع سازه |
|----------------|------------------------|---------|----------------------|---------|-------------------|-------------|----------|
| | خطی | غیر خطی | خطی | غیر خطی | | | |
| ۲ | ۲ | ۱/۰۱۰۲ | ۰/۹۶۵۹ | ۱۳۵۲ | حالت ۱ | لندرز | ۲۰ طبقه |
| ۰/۹۸ | ۱/۳۵ | ۰/۵۶۶ | ۰/۷۲۲۱ | ۶۳۷ | حالت ۲ | | |
| ۱/۴۴۱ | ۱/۵۳۲ | ۰/۷۶۵۹ | ۰/۶۷۱۹ | ۹۲۴ | حالت ۳ | | |
| ۲ | ۲ | ۰/۲۴۰۸ | ۰/۲۳۹۵ | ۱۱۱۱ | حالت ۱ | کوبه | |
| ۱/۱۳ | ۱/۲۹۴ | ۰/۱۰۱ | ۰/۱۳۰۷ | ۷۹۷ | حالت ۲ | | |
| ۱/۴۲ | ۱/۳۸۵ | ۰/۱۵۰۹ | ۰/۱۴۱۱ | ۸۸۳ | حالت ۳ | | |
| ۲ | ۲ | ۰/۲۵۲۷ | ۰/۲۰۸۷ | ۱۴۲۹ | حالت ۱ | نورثریج | |
| ۱/۲۶ | ۱/۰۳۲ | ۰/۱۴۱ | ۰/۰۹۲۴ | ۱۰۰۹ | حالت ۲ | | |
| ۱/۳۴ | ۱/۴۴ | ۰/۱۰۹۸ | ۰/۱۰۹۴ | ۱۳۰۲ | حالت ۳ | | |



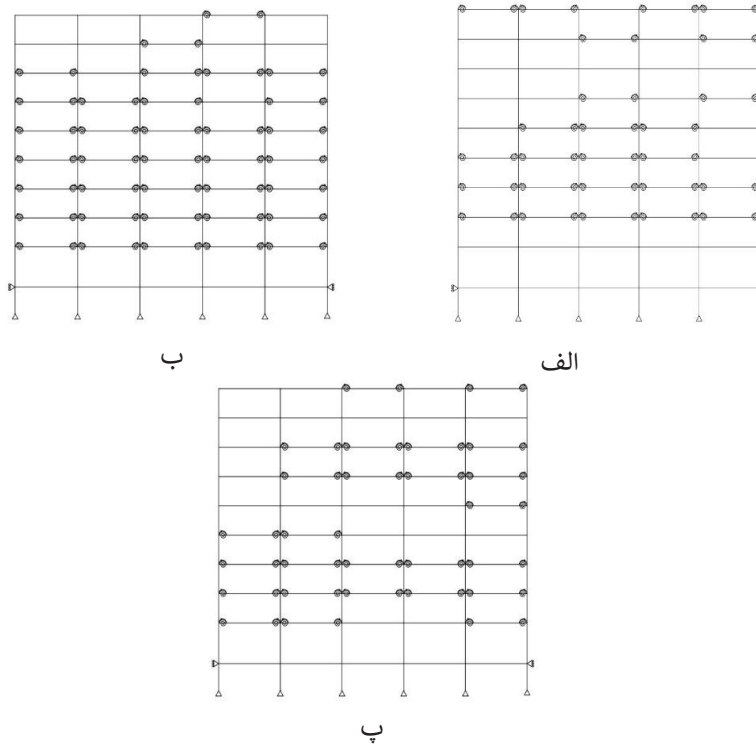
شکل ۷. توزیع بهینه اتصالات مجهز به میراگر سازه ۹ طبقه تحت رکورد (الف) لندرز، (ب) کوبه، (پ) نورثریج در حالت خطی

Fig.7. Optimal distribution of connections equipped with damper in 9-story frame under seismic records of a) Landers b) Kobe c) Northridge in linear mode

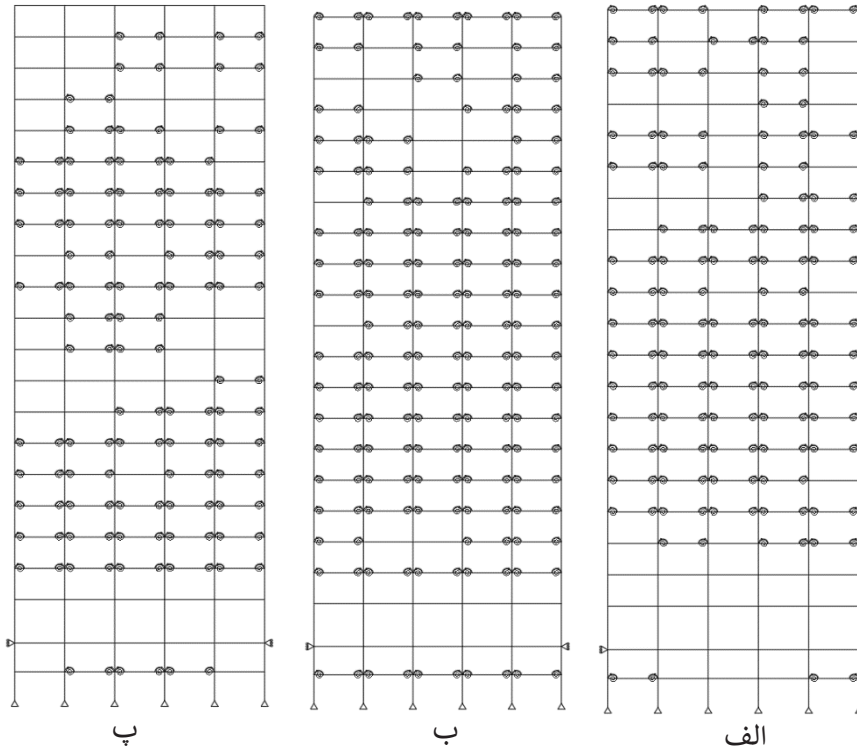
جدول ۹. مشخصات بهینه سازه ۲۰ طبقه

Table 9. Optimal properties of 20-story frame

| میرایی بهینه | تعداد تیرهای مجهز به المان فنر و میراگر (از ۱۱۰ تیر) | | | | حالت اتصالات سازه | رکورد زلزله | نوع سازه |
|--------------------|--|---------|-----|---------|-------------------|-------------|----------|
| | خطی | غیر خطی | خطی | غیر خطی | | | |
| - | - | - | - | ۰ | ۰ | حالت ۱ | |
| $3/65 \times 10^7$ | 10^8 | ۰/۲ | ۰/۲ | ۷۲ | ۷۳ | حالت ۲ | لندرز |
| 10^9 | 10^9 | ۰/۲ | ۰/۲ | ۱۱۰ | ۱۱۰ | حالت ۳ | |
| - | - | - | - | ۰ | ۰ | حالت ۱ | |
| $6/5 \times 10^7$ | 10^8 | ۰/۲ | ۰/۲ | ۷۶ | ۸۶ | حالت ۲ | کوبه |
| 10^8 | 10^8 | ۰/۲ | ۰/۲ | ۱۱۰ | ۱۱۰ | حالت ۳ | ۲۰ طبقه |
| - | - | - | - | ۰ | ۰ | حالت ۱ | |
| $1/19 \times 10^7$ | $3/25 \times 10^5$ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۵۲ | ۶۶ | حالت ۲ | نورثریج |
| 10^8 | 10^8 | ۰/۲ | ۰/۲ | ۱۱۰ | ۱۱۰ | حالت ۳ | |



شکل ۸. توزیع بهینه اتصالات مجهز به میراگر سازه ۹ طبقه تحت رکورد (الف) لندرز، (ب) کوبه، (پ) نورثریج در حالت غیر خطی
Fig. 8. Optimal distribution of connections equipped with damper in 9-story frame under seismic records of
a) Landers b) Kobe c) Northridge in non-linear mode

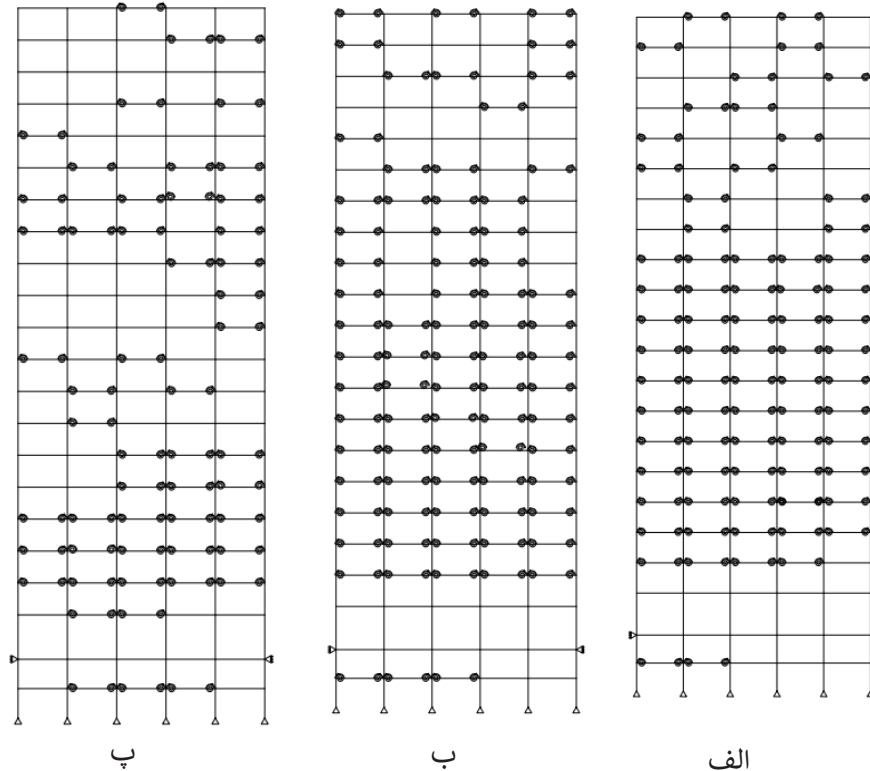


شکل ۹. توزیع بهینه اتصالات مجهز به میراگر سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد (الف) لندرز، (ب) کوبه، (پ) نورثریج در حالت خطی

Fig.9.Optimal distribution of connections equipped with damper in 20-story frame under seismic records of a) Landers b) Kobe c) Northridge in linear mode

و ۱۳ دیده می‌شود در میرایی کم تا حدود 10^4 نیوتن مترثانیه بر رادیان تغییر چندانی در تابع هدف ایجاد نمی‌شود، بنابراین مدل‌سازی فنر دورانی میرایی برای اتصالات نیمه‌صلب که میرایی آن‌ها حداکثر در حدود 10^3 نیوتن مترثانیه بر رادیان می‌باشد، الزامی ندارد. برای اطمینان از بهینه‌بودن حد پایین سختی در نظر گرفته‌شده برای پاسخ، ضرایب سختی $0/3$ و $0/4$ نیز تحت رکورد نورثریج، برای سازه ۹ طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اطمینان حاصل شود که بهترین ضریب سختی، حد پایین بازه در نظر گرفته‌شده، یعنی $0/2$ است. شکل ۱۴ مقادیر تابع هدف را با ضرایب سختی و میرایی‌های مختلف نشان

مشابه پژوهش ژو و ژنگ ۲۰۰۱، تمامی تیرها مجهز به اتصال مذکور شده و مقایسه‌ای با حالت قرارگیری بهینه انجام می‌شود. با توجه به اینکه کمترین مقدار ضریب سختی ($0/2$)، بهینه می‌باشد، با تغییر در مقادیر میرایی بهترین حالت برای تابع هدف محاسبه می‌گردد. اشکال ۱۲ و ۱۳ نشان‌دهنده تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات میرایی سازه تحت ۳ رکورد زلزله هستند. برای نمونه این تغییرات در حالت خطی نمایش داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که فرم این اشکال مشابه پژوهش ژو و ژنگ می‌باشد و در یک نقطه میرایی نسبت به سایر نقاط کاهش چشم‌گیری دارد. همان‌طور که در اشکال ۱۲

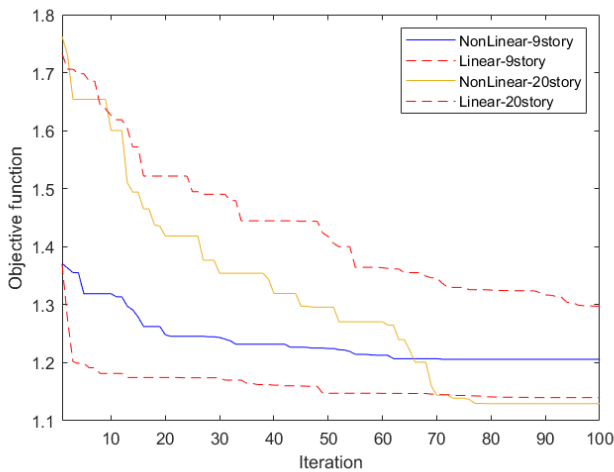


شکل ۱۰. توزیع بهینه اتصالات مجهز به میراگر سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد (الف) لندرز، (ب) کوبه، (پ) نورثریج در حالت غیرخطی

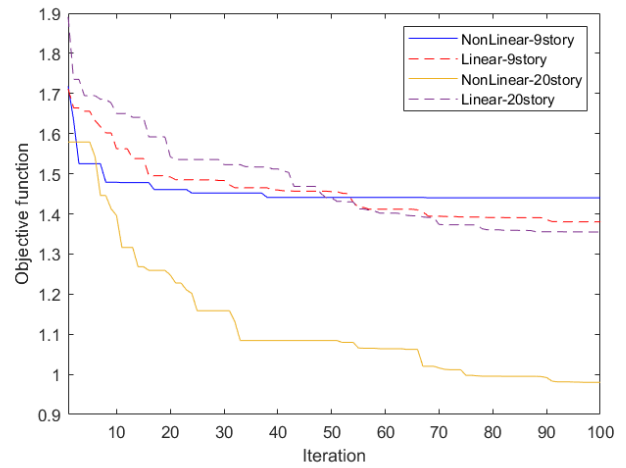
Fig.10. Optimal distribution of connections equipped with damper in 20-story frame under seismic records of a) Landers b) Kobe c) Northridge in non-linear mode

خاصی برای نحوه قرارگیری بهینه میراگرها در طول سازه پیدا نمود. به عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده، می‌توان یک زلزله طرح یا یک الگوی شتاب وارده از سوی زمین بر سازه، مشابه کارهای انجام شده در مراجع [۱، ۱۷] در نظر گرفت. از سوی دیگر می‌توان از الگوریتم‌های دیگری نیز بهره برد و عملکردشان را با یکدیگر مقایسه نمود. همچنین توابع هدف دیگری را می‌توان برای بهینه‌سازی در نظر گرفت و بنا بر نیاز طراحی با جاگذاری بهینه اتصالات مجهز به میراگر، آن‌ها را کاهش داد.

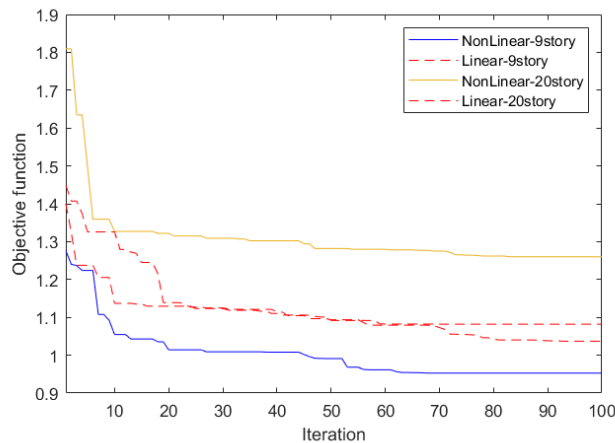
می‌دهد. در نهایت مشاهده می‌شود مقادیر بهینه برای تابع هدف در $v=0/3$ برابر $1/648$ و در $v=0/4$ برابر $1/654$ می‌باشد. در حالیکه مطابق جدول ۶، مقدار تابع هدف بهینه برای $v=0/2$ برابر $1/64$ است. بنابراین مقدار بهینه برای ضریب سختی حد پایین بازه لحاظ می‌گردد. پاسخ‌های حداکثر جابجایی بام و برش پایه سازه تحت زلزله کوبه برای نمونه، برای حالت ۲ (بهینه) و حالت ۳ (یکنواخت در تمام سازه) در اشکال ۱۵ الی ۱۸، ارائه و مقایسه شده‌اند. مطابق اشکال ۱۵ تا ۱۸ کاهش پاسخ در حالت بهینه نسبت به حالت یکنواخت حاصل شده است. همانطور که مشاهده شد، نمی‌توان الگو و دستورالعمل



ب



الف



پ

شکل ۱۱. منحنی همگرایی تابع هدف در سازه‌های مورد مطالعه در حالت خطی و غیرخطی سازه تحت رکورد (الف) لندرز (ب) کوبه (پ) نرثریج

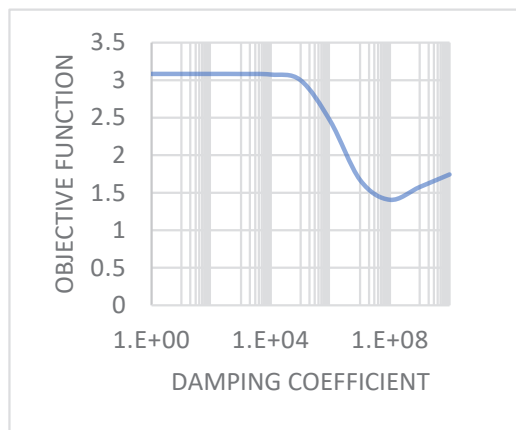
Fig. 11. (continue): Convergence curve of objective function in studied structures in linear and nonlinear mode of structures under seismic records of: a) Landers b) Kobe c) Northridge

۷- نتیجه‌گیری

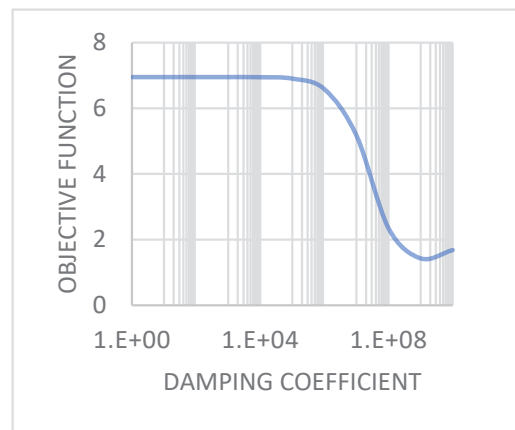
در این مقاله، یک سازه ترکیبی متشکل از اتصالات صلب و اتصالات مجهز به میراگر معرفی گردید. دو نوع سازه ۹ و ۲۰ طبقه تحت سه رکورد زلزله ارزیابی شدند. همچنین از الگوریتم ازدحام ذرات، جهت توزیع بهینه اتصالات مجهز به میراگر استفاده شد و عملکرد آن در مقایسه با سازه در حالت اتصالات صلب و همینطور توزیع یکنواخت اتصالات مجهز به میراگر در تمام سازه، مورد بررسی

قرار گرفت. در نهایت نتایج زیر از این تحقیق حاصل شد:

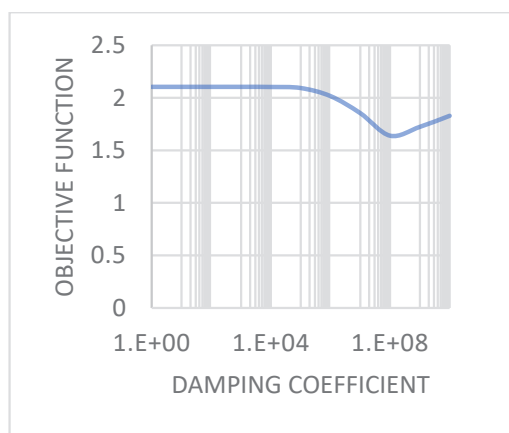
۱- مشاهده شد که با هر نحوه قرارگیری اتصالات همراه میراگر در سازه، ضریب سختی بهینه کمترین حد در نظر گرفته شده خواهد بود و سختی کمتر با میرایی بهینه نتایج بهتری خواهد داشت. در این تحقیق حد پایین ضریب سختی برابر مقدار ۰/۲ در نظر گرفته شده است و مقدار بهینه آن در تمام حالات قرارگیری اتصالات مجهز به میراگر، برابر همین عدد بدست آمده است.



ب



الف



پ

شکل ۱۲. منحنی پاسخ زلزله (تابع هدف) در حالت ۳ وضعیت قرارگیری اتصالات مجهز به میراگر سازه ۹ طبقه تحت رکورد (الف) لندرز، ب) کوبه و پ) نرتریج

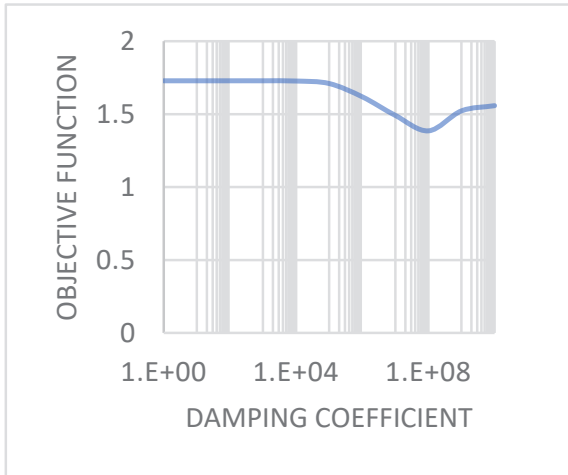
Fig.12. Structural response (objective function) curve in third mode distribution of connections equipped with damper in 9-story frame under seismic records of a) Landers b) Kobe c) Northridge

مقایسه با حالت اتصالات صلب و $18/78$ و $15/46$ درصد در مقایسه با حالت توزیع یکنواخت اتصالات مجهز به میراگر در حالت خطی و $39/5$ و $43/83$ درصد نسبت به حالت اتصالات صلب و $21/82$ و $19/46$ درصد نسبت به حالت توزیع یکنواخت، در حالت غیرخطی به ترتیب در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه کاهش داشته است. می‌توان نتیجه گرفت ترکیب اتصالات فولادی مجهز به میراگر به همراه اتصالات صلب در سازه به طوری که این اتصالات به صورت بهینه توزیع شوند، نتایج و پاسخ بهتری را نسبت به سایر حالات به همراه دارد. به طور متوسط بهبود پاسخ در حالت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی اتصالات و المان‌های سازه نسبت به حالت خطی بیشتر شده است.

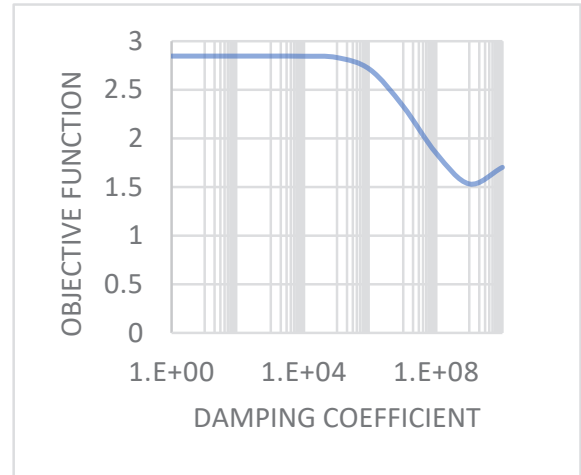
۴- طی هرگونه قرارگیری اتصالات مجهز به میراگر، به صورت توزیع بهینه یا توزیع یکنواخت، میرایی بهینه‌ای وجود دارد که در آن

۲- به طور میانگین از سه رکورد زلزله حدود ۶۲ و ۵۸ درصد تیرها در سازه ۹ طبقه و ۶۸ و ۶۱ درصد تیرها در سازه ۲۰ طبقه به ترتیب در دو حالت خطی و غیرخطی طی عملیات بهینه‌سازی مجهز به اتصالات همراه میراگر و سایر تیرها به صورت اتصال صلب به ستون‌ها متصل شدند. در نتیجه با افزایش ارتفاع و تغییر دهانه‌ها در سازه، تغییر چندانی در مجهز شدن تیرها با این اتصالات مشاهده نشد. از طرفی با غیرخطی کردن تحلیل تعداد تیرهای مجهز به این نوع اتصالات کمتر شده و در نتیجه هزینه اجرایی برای تجهیز کاهش می‌یابد.

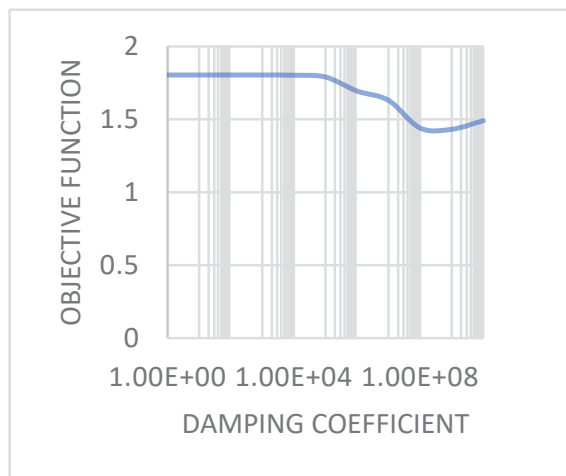
۳- پاسخ لرزه‌ای سازه در حالت توزیع بهینه نسبت به سایر حالات کاهش قابل توجهی داشته است به طوری که تابع هدف (شامل حداکثر تغییر مکان بام و برش پایه سازه) $39/96$ و $38/73$ درصد در



ب



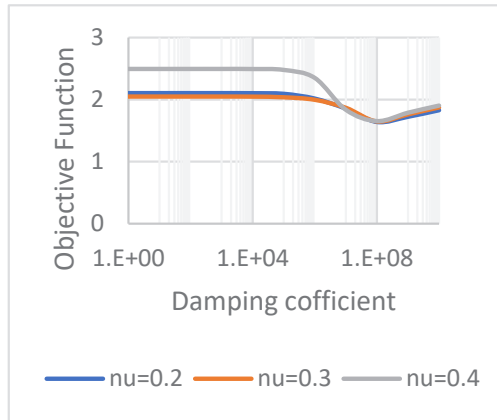
الف



پ

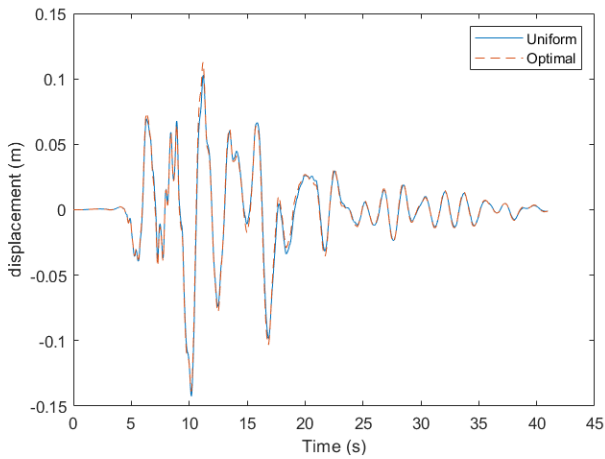
شکل ۱۳. منحنی پاسخ زلزله (تابع هدف) در حالت ۳ وضعیت قرارگیری اتصالات مجهز به میراگر سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد لندرز، کوبه و نرتریج

Fig. 13. Structural response (objective function) curve in third mode distribution of connections equipped with damper in 20-story frame under seismic records of a) Landers b) Kobe c) Northridge

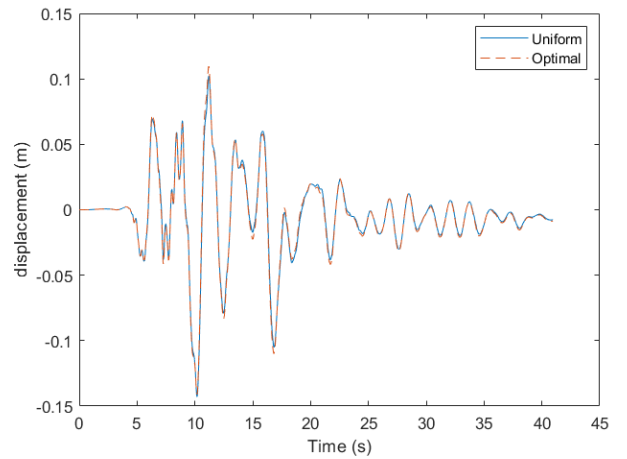


شکل ۱۴. منحنی پاسخ زلزله (تابع هدف) با سه ضریب سختی ۰٫۲، ۰٫۳ و ۰٫۴ برای سازه ۹ طبقه تحت رکورد نرتریج

Fig. 14. Structural response (objective function) curve with three stiffness factor 0.2, 0.3 and 0.4 for 9-story frame under record of the Northridge earthquake



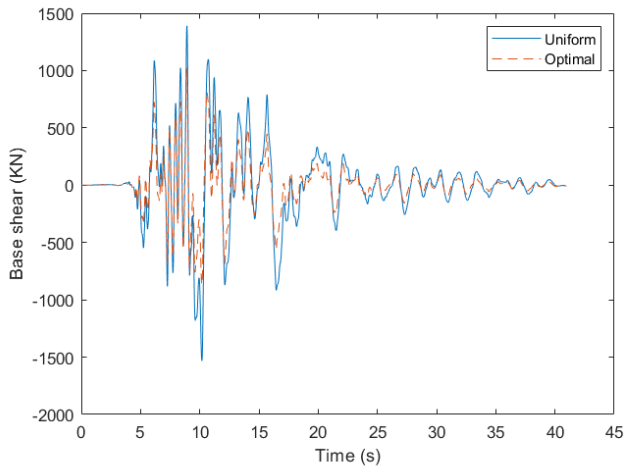
ب



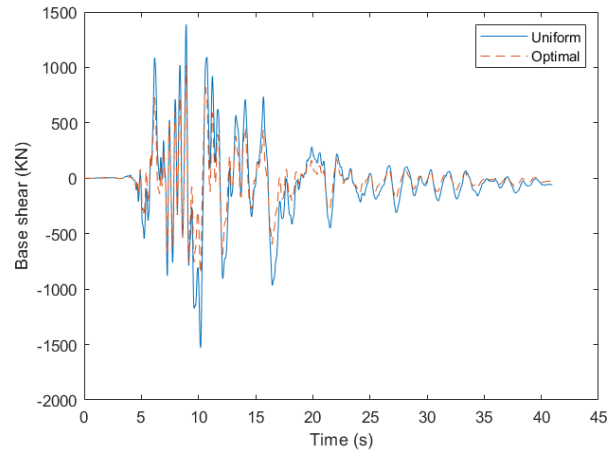
الف

شکل ۱۵. پاسخ حداکثر جابجایی سازه ۹ طبقه تحت زلزله کوبه در دو حالت الف) غیرخطی و ب) خطی

Fig. 15. Response of maximum displacement of 9-story frame under record of the Kobe earthquake in a) non-linear and b) linear mode



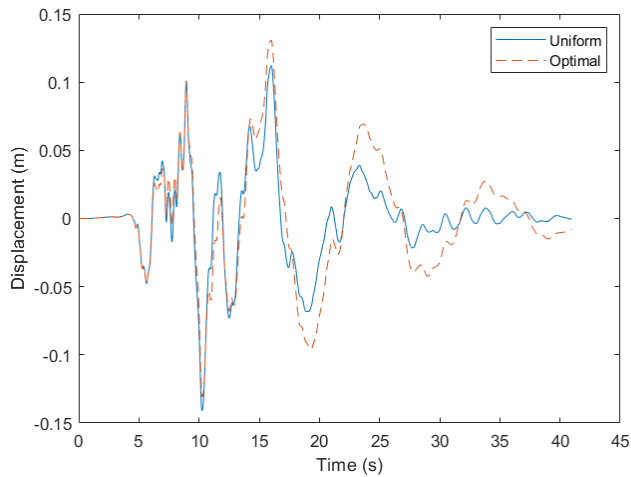
ب



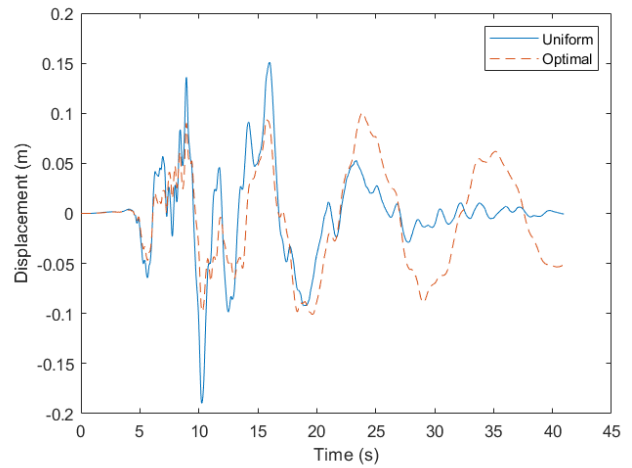
الف

شکل ۱۶. پاسخ برش پایه سازه ۹ طبقه تحت زلزله کوبه در دو حالت الف) غیرخطی و ب) خطی

Fig.16. Response of base shear of 9-story frame under record of the Kobe earthquake in a) non-linear and b) linear mode



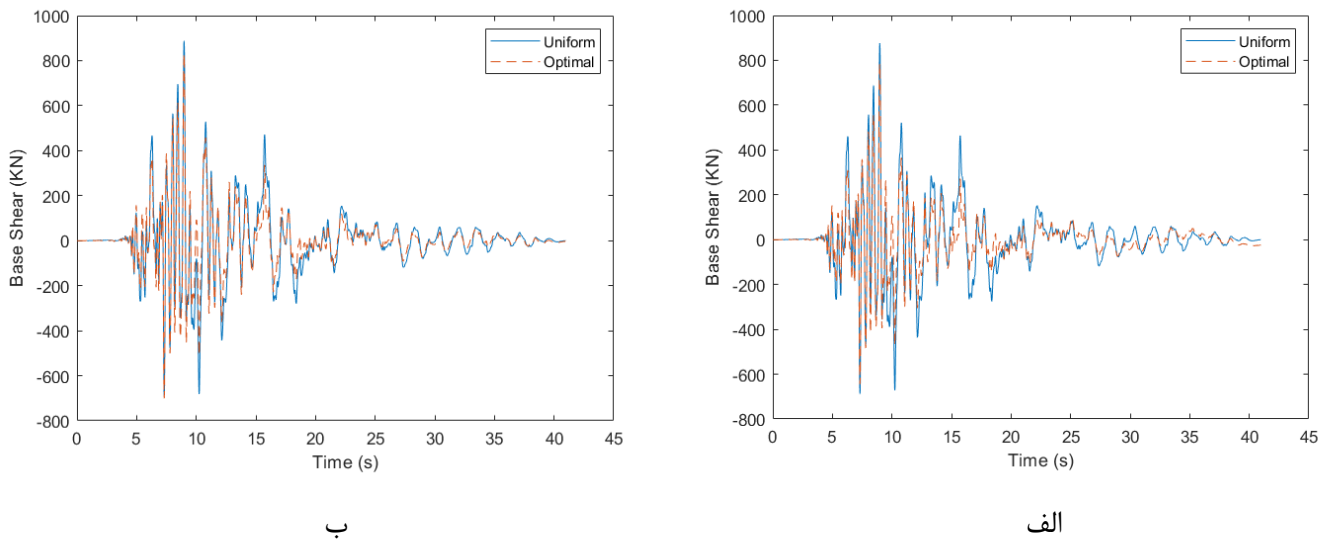
ب



الف

شکل ۱۷. پاسخ حداکثر جابجایی سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله کوبه در دو حالت الف) غیرخطی و ب) خطی

Fig. 17. Response of maximum displacement of 20-story frame under record of the Kobe earthquake in a) non-linear and b) linear mode



شکل ۱۸. پاسخ برش پایه سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله کوبه در دو حالت الف) غیرخطی و ب) خطی

Fig. 18. Response of base shear of 20-story frame under record of the Kobe earthquake in a) non-linear and b) linear mode

- [4] G. MUSCOLINO, A. PALMERI, A. RECUPERO, Seismic analysis of steel frames with a viscoelastic model of semi-rigid connections, in: 13th World Conference on Earthquake Engineering held at Vancouver, Canada, Paper, 2004.
- [5] R. Ibrahim, C. Pettit, Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners, *Journal of sound and Vibration*, 279(3-5) (2005) 857-936.
- [6] G. Failla, On the dynamics of viscoelastic discontinuous beams, *Mechanics Research Communications*, 60 (2014) 52-63.
- [7] R. Attarnejad, A. Pirmoz, Nonlinear analysis of damped semi-rigid frames considering moment–shear interaction of connections, *International Journal of Mechanical Sciences*, 81 (2014) 165-173.
- [8] R. Attarnejad, M.R. Gharehshiran, A. Pirmoz, Seismic performance of semi-rigid frames with connection dampers, (2014).
- [9] A. Banisheikholeslami, F. Behnamfar, M. Ghandil, A beam-to-column connection with visco-elastic and hysteretic dampers for seismic damage control, *Journal*

تابع هدف به کمترین مقدار خود می‌رسد، از طرفی با توجه به این که در اتصالات نیمه‌صلب ساده و بدون میراگر، میرایی اتصال در حدود میرایی بهینه نیست و کمتر از آن می‌باشد، لذا مدل‌سازی فتر دورانی میرایی برای اتصالات نیمه‌صلب تاثیر چندانی ندارد.

۵- با توجه به عدم قطعیت رکوردهای زلزله، و ماهیت احتمالاتی الگوریتم PSO با اثر دادن تاریخچه زمانی هر رکورد، نمی‌توان الگو و دستورالعمل واحدی جهت قرارگیری اتصالات مجهز به میراگر، ارائه نمود.

منابع

- [1] M. Sekulovic, R. Salatic, M. Nefovska, Dynamic analysis of steel frames with flexible connections, *Computers & structures*, 80(11) (2002) 935-955.
- [2] Y.L. Xu, W. Zhang, Modal analysis and seismic response of steel frames with connection dampers, *Engineering structures*, 23(4) (2001) 385-396.
- [3] S.-Y. Hsu, A. Fafitis, Seismic analysis design of frames with viscoelastic connections, *Journal of structural engineering*, 118(9) (1992) 2459-2474.

- Journal of Constructional Steel Research, 130 (2017) 79-87.
- [18] X. Huang, Evaluation of genetic algorithms for the optimum distribution of viscous dampers in steel frames under strong earthquakes, *Earthq. Struct.*, 14(3) (2018) 215-227.
- [19] H. Moghaddam, F. Afzalnia, I. Hajirasouliha, Optimal distribution of friction dampers to improve the seismic performance of steel moment resisting frames, in: *Structures*, Elsevier, 2022, pp. 624-644
- [20] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264(1) (2006) 137-158.
- [21] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in: *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, Ieee, 1995, pp. 39-43.
- [22] M. Clerc, J. Kennedy, The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 6(1) (2002) 58-73.
- [23] A.T. Council, *Quantification of building seismic performance factors*, US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
- [24] A. Gupta, *Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures*, Stanford University, 1999.
- [25] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 366-385.
- of Constructional Steel Research, 117 (2016) 185-195.
- [10] M. Saeidzadeh, M.R. Chenaghloou, A.A. Hamed, Experimental and numerical study on the performance of a novel self-centering beam-column connection equipped with friction dampers, *Journal of Building Engineering*, 52 (2022) 104338.
- [11] M. Gürgöze, P. Müller, Optimal positioning of dampers in multi-body systems, *Journal of sound and vibration*, 158(3) (1992) 517-530.
- [12] G. Chen, J. Wu, Optimal placement of multiple tune mass dampers for seismic structures, *Journal of Structural Engineering*, 127(9) (2001) 1054-1062.
- [13] M.P. Singh, L.M. Moreschi, Optimal placement of dampers for passive response control, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(4) (2002) 955-976.
- [14] N. Wongprasert, M. Symans, Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building, *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4) (2004) 401-406.
- [15] H. Heydarinouri, S.M. Zahrai, Iterative step-by-step procedure for optimal placement and design of viscoelastic dampers to improve damping ratio, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(9) (2017) e1361.
- [16] M. Bayat, S.M. Zahrai, Seismic performance of mid-rise steel frames with semi-rigid connections having different moment capacity, *Steel Compos. Struct*, 25(1) (2017) 1-17.
- [17] A. Kaveh, M. Ghafari, Y. Gholipour, Optimum seismic design of steel frames considering the connection types,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. M. Rabbani, S. M. Zahrai, *Optimal distribution of connections with dampers to improve the performance of steel moment frames*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(4) (2023) 811-832.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21157.7636

