



## Seismic evaluation of steel structures retrofitted with supplemental elliptical damper

S. A. Mohebi<sup>1</sup>, S. M. Zahrai<sup>2\*</sup>, R. Raoufi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

<sup>2</sup> School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

**ABSTRACT:** In the recent past, the application of various types of passive dampers (e.g., yielding metallic dampers) has become a common practice for improving seismic performance of the under-construction buildings and rehabilitation of existing constructions. In this study, a new elliptical metallic damper was introduced to improve the seismic behavior of existing steel structures. Among other parameters, geometrical characteristics are known to affect the seismic performance of the constructions rehabilitated with the proposed elliptical damper. Accordingly, the performance of the proposed damper was investigated through accurate numerical studies on various types of dampers considering various damper dimensions, ellipse major and minor axes length-to-plate thickness ratios, and placements of elliptical shear diaphragm. To study the proposed elliptical damper in terms of its effect on the seismic behavior of rehabilitated buildings, three benchmark structures with 3, 9, and 20 stories were used. Further, far-field and near-field earthquake records were used to undertake nonlinear dynamic analyses. In this work, the proposed elliptical damper was verified by the Abaqus finite-element software, and nonlinear time-history analyses were conducted in the SAP2000 software to check for seismic performance of rehabilitated structural frames with the considered damper. Results of the nonlinear dynamic analyses indicated the appropriate performance of the proposed elliptical damper in terms of reducing the seismic responses of the rehabilitated structures and suitable behavior of the proposed elliptical damper in dissipating the imposed earthquake energy to the structures. Based on these results, upon rehabilitation with the proposed damper, the 3-, 9-, and 20-story structures exhibited smaller maximum lateral roof displacements by 66, 64, and 31%, respectively.

### Review History:

Received: Aug. 24, 2022

Revised: Jun. 03, 2023

Accepted: Jun. 15, 2023

Available Online: Aug. 13, 2023

### Keywords:

yielding elliptical damper

rehabilitated existing steel structures

dynamic analysis

seismic performance improvement

lateral roof displacement.

### 1- Introduction

Passive structural control systems represent one of the best approaches to establish safety and improving seismic performance of a building. The application of energy dissipation systems is very efficient for this purpose, as is recently regarded by researchers and structural design engineers. With no need to any external source of energy or complex mechanical and/or electronic systems, passive control systems offer easy-to-implement and economically efficient solutions, making them classified as one of the top instruments for reducing adverse impacts of dynamic forces on structures. Yielding metallic dampers are among the most common passive energy dissipation systems, which have long been a hot topic to researchers in the field of structural control because of their simple design, easy construction, stable behavior against lateral loads applied to the structure, and tolerance to environmental factors. Being displacement-dependent dampers in nature, the yielding metallic dampers can desirably dissipate the input energy to the structure due to their robust yielding

character and the inelastic behavior of the metals.

Maleki and Bagheri [2, 1] studied the behavior of half-filled and concrete-filled steel pipes to investigate their applicability as a seismic hysteresis damper under shear stress. Analytical results showed that the stiffness and strength of the pipe dampers increase linearly and nonlinearly with the pipe length and thickness, respectively, and decrease with the pipe diameter nonlinearly.

Cheraghi and Zahrai presented a composite system of two independent passive control instruments with different strength and stiffness levels. This yielding damper was made up of multiple coaxial steel pipes of various diameters. The obtained hysteresis curves showed that the proposed damper behaved at multiple levels, therefore dissipating energy at different seismic levels [3]. In another piece of work, Zahrai and Cheraghi tested a multi-level pipe damper. Application of this multi-level system in steel structures showed that the seismic demand of the rehabilitated structures decreases with the help of these dampers [4].

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



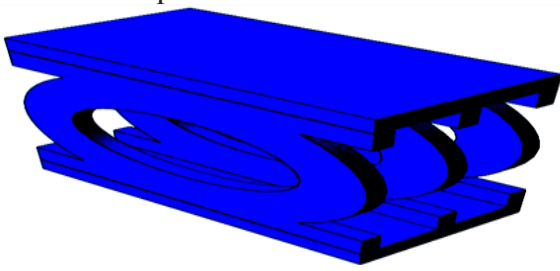


Fig. 1. Demonstration of the proposed elliptical damper.

In the present work, numerical analyses were conducted in Abaqus, and ranges were proposed for effective geometrical parameters of the yielding damper to ensure the formation of plastic hinge in the proposed elliptical damper. In addition, given the selected elliptical geometry of the proposed damper, various axis lengths (within the proposed ranges for the geometrical parameters) were considered to provide the designer with more options for seismic retrofit, as compared to other types of dampers.

To investigate the seismic behavior of the 3-, 9-, and 20-story benchmark frames, dynamic analyses were performed under far- and near-field earthquake records in different areas with different seismicity levels before and after rehabilitating the frames with the proposed elliptical yielding damper. The analyses were based on lateral roof displacement, inter-story drift, and energy dissipation capacity.

An elliptical yielding damper is composed of vertical and horizontal steel plates. The vertical plates of the proposed damper, which includes elliptical rings, yield under the effect of the lateral displacements due to the formation of plastic hinges, thereby dissipating the induced earthquake energy. The horizontal plates on the top and base of the damper, however, serve as support to the middle part (vertical plates) of the damper, not to mention their role in connecting the damper to the beam and bracing system, as observed in Fig. 1. A major advantage of elliptical dampers compared to circular plates is the variable nature of the ellipse axis lengths, which provides the structural designer with more options compared to the case with circular dampers.

## 2- Methodology and Analysis

Firstly, the model of the proposed elliptical damper was verified in the Abaqus finite-element software by comparing the numerical results to the experimental data published by Ebadi *et al.* [5], with the results successfully verifying the modeling output of the Abaqus software. The stress-strain curve of the steel material used in the modeling of the proposed elliptical damper was obtained by performing tensile tests on standard samples of the steel plate experimentally (Fig. 2).

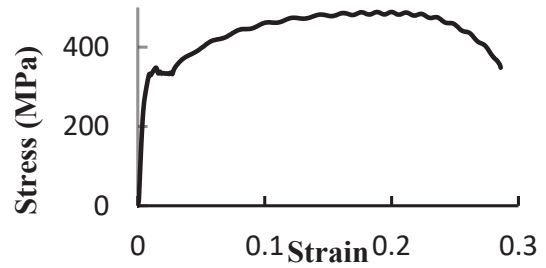


Fig. 2. Stress-strain curve of used steel

In this research, the elliptical rings of the yielding damper with different thicknesses were modeled in the Abaqus software. In this research, seismic assessment of the structures equipped with the proposed yielding dampers was performed on the three benchmark structures presented by Ohtori *et al.* with 3, 9, and 20 stories [6]. Using the link element in the SAP2000 software, characteristics of the proposed elliptical damper were applied to the structural frames, and the output hysteresis curve from the SAP2000 software for the Wen nonlinear element was compared to the curves obtained from the Abaqus software. The comparison indicated that the two software tools exhibited very close results, as observed in Fig. 3.

In this paper, optimal lateral stiffness distribution over structure height was adopted to achieve uniform relative displacement at stories. Then, nonlinear time-history analysis was performed to study the effect of the applied retrofit by the proposed elliptical damper on the structures in the SAP2000 software. The earthquake records used in the study by Ohtari *et al.* include near- and far-field accelerograms.

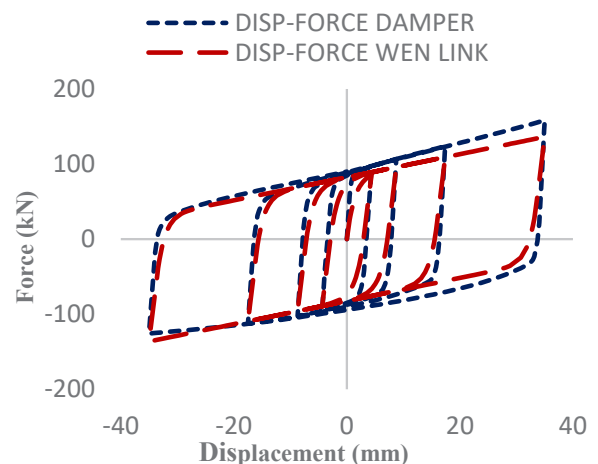


Fig. 3. Comparison of hysteresis curves from the Abaqus and SAP2000 software

### 3- Conclusion

Results of this research can be classified under two broad categories. In the first category, 16 elliptical rings were modeled in the Abaqus finite-element software and subjected to accurate numerical modeling. Outputs showed that horizontal placement of the elliptical rings (HED) with a longer width improved the damper performance in terms of lateral stiffness, yield strength, and energy dissipation capacity. In the second category, the characteristics obtained from the finite-element method, including effective stiffness and yield strength, were declared in the SAP2000 software by means of the Wen nonlinear link element. Subsequently, the 3-, 9-, and 20-story structures were compared before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper based on nonlinear analysis under near- and far-field earthquake records.

Results showed that, on average, the use of the proposed elliptical damper reduced maximum inter-story drift of the 3-, 9-, and 20-story structures by 71, 78, and 51%, respectively, while decreasing the maximum lateral roof displacement by 66, 64, and 31%, respectively, dissipating 62, 63, and 84% of the input energy to the structure.

### References

- [1] S. Maleki, S. Bagheri, Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(8-9) (2010) 1088-1095.
- [2] S. Maleki, S. Bagheri, Pipe damper, Part II: Application to bridges, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(8-9) (2010) 1096-1106.
- [3] A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 127 (2016) 120-135.
- [4] S.M. Zahrai, A. Cheraghi, Reducing seismic vibrations of typical steel buildings using new multi-level yielding pipe damper, *International Journal of Steel Structures*, 17(3) (2017) 983-998.
- [5] M. Ebadi Jamkhaneh, A.H. Ebrahimi, M. Shokri Amiri, Experimental and numerical investigation of steel moment resisting frame with U-shaped metallic yielding damper, *International Journal of Steel Structures*, 19(3) (2019) 806-818.
- [6] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, in: *Journal of engineering mechanics*, 2004, pp. 366-385.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. A. Mohebi, S. M. Zahrai, R. Raoufi, *Seismic evaluation of steel structures retrofitted with supplemental elliptical damper*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(8) (2023) 357-360.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21721.7808







## ارزیابی لرزه‌های ساختمان‌های فولادی بهسازی شده با میراگر الحاقی بیضی گون

سید افشین محبی<sup>۱</sup>، سید مهدی زهرائی<sup>۲\*</sup>، رضا رؤفی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران  
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

### کلمات کلیدی:

میراگرهای فلزی  
ساختمان‌های فولادی  
میراگر بیضی گون  
بهسازی لرزه‌ای  
تغییر مکان نسبی بین طبقات

**خلاصه:** به کارگیری کنترل غیرفعال یکی از روش‌های موثر در کاهش تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. در دهه‌های اخیر انواع مختلفی از میراگرهای غیرفعال از قبیل میراگرهای فلزی تسلیم شونده با هدف بهبود رفتار لرزه‌ای در ساخت و سازه‌های جدید یا بهسازی ساختمان‌های موجود توسعه یافته‌اند. هدف اصلی این تحقیق معرفی یک میراگر فلزی جدید بیضی گون جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی موجود می‌باشد. با توجه به تاثیر پارامترهای هندسی میراگر بیضی گون بر رفتار لرزه‌ای ساختمان بهسازی شده، بررسی دقیق عددی بر روی میراگرها با نسبت‌های مختلف قطر به ضخامت و همچنین ابعاد و نحوه استقرار دیافراگم برشی صورت گرفته است. برای ارزیابی لرزه‌ای میراگر پیشنهادی در بهسازی ساختمان‌ها با مشخصات دینامیکی متفاوت (ساختمان‌های کوتاه، میان و بلند مرتبه) از سه سازه مینای ۳، ۹ و ۲۰ طبقه استفاده شده است. همچنین جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای میراگر بیضی گون در پهنه‌های مختلف با لرزه‌خیزی متفاوت، در تحلیل‌های دینامیکی، شتاب نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک به کار گرفته شده است. در این پژوهش پس از انجام صحت‌سنجی در نرم‌افزار ABAQUS، رفتار لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار SAP2000، ارزیابی شده است. نتایج تحلیل‌های عددی بیانگر عملکرد مناسب میراگر فلزی پیشنهادی در استهلاک انرژی القایی زلزله به سازه و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های بهسازی شده می‌باشد. همچنین متوسط حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای تحت اثر ۴ شتاب نگاشت حوزه دور و نزدیک در ساختمان‌های مینای ۳، ۹ و ۲۰ طبقه، به ترتیب به میزان ۷۸، ۷۱ و ۵۱ درصد کاهش یافته است.

### ۱- مقدمه

کنترل سازه بوده‌اند. این نوع میراگرها جزو میراگرهای وابسته به تغییر مکان بوده که به دلیل قابلیت بالای تسلیم شوندگی و رفتار غیر ارتجاعی فلزات، می‌توانند انرژی ورودی از طرف بارهای جانبی وارد به سازه را به شکل مناسبی مستهلک نمایند. سوزوکی و همکاران<sup>۱</sup>، یک میراگر فلزی U شکل با چیدمان دایره‌ای را ارائه و مورد بررسی قرار دادند. ظرفیت بالای استهلاک انرژی و تحمل تغییر شکل‌های بزرگ از جمله خصوصیات میراگر مذکور در بررسی‌های آزمایشگاهی بوده است [۱]. فرانکو و همکاران<sup>۲</sup>، میراگرهای لوله‌ای تسلیم شونده را مورد مطالعه قرار دادند که مقاومت خستگی بالا و عدم کماتش در نواحی تسلیم از مزایای میراگر پیشنهادی آنها بود [۲]. ملکی و باقری<sup>۳</sup>، با مطالعه رفتار لوله‌های فولادی توخالی و نیز پر شده با بتن به بررسی امکان استفاده از این ابزارها به عنوان میراگر هیستریزیس لرزه‌ای

یکی از بهترین راهکارهای ایجاد ایمنی و بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها، کنترل غیرفعال سازه‌ها می‌باشد. به کارگیری سیستم‌های مستهلک کننده انرژی برای این منظور بسیار کارآمد بوده و در سال‌های اخیر مورد توجه محققین و مهندسين طراح سازه قرار گرفته است. سیستم‌های کنترل غیرفعال با توجه به عدم نیاز به منبع انرژی خارجی و سیستم‌های مکانیکی و الکترونیکی پیچیده علاوه بر سهولت اجرا از نظر اقتصادی نیز جزو برترین ابزارهای کاهش‌دهنده پیامدهای مخرب نیروهای دینامیکی وارد بر سازه‌ها می‌باشند. میراگرهای فلزی تسلیم شونده یکی از رایج‌ترین ابزارهای اتلاف انرژی غیرفعال هستند که به دلیل طراحی آسان، سادگی در ساخت و رفتار پایدار در مقابل بارهای جانبی وارد بر سازه‌ها و نیز عدم تاثیر عوامل محیطی بر روی آنها، همواره از موضوعات جذاب برای محققین حوزه

1 (Suzuki et al. 2005)  
2 (Franco et al. 2010)  
3 (Maleki & Bagheri, 2010)

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



همکاران<sup>۸</sup> میراگر دارای نوارهای فولادی قابل تعویض را ارائه نمودند که این نوارهای فولادی به عنوان فیوزهای مستهلک کننده انرژی به کار گرفته شده است. میراگر پیشنهادی آنها از طریق سازوکار خمشی در صفحه در تحمل بار و استهلاک انرژی شرکت می‌کند [۱۲]. پاچیده و همکاران<sup>۹</sup> با هدف افزایش شکل‌پذیری سیستم‌های مهاربندی، یک سیستم مهاربند جدید شامل یک میراگر تسلیم شونده فولادی حلقوی (دایره‌ای شکل) را بصورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این آزمایشات عملی نشان می‌دهد، با استفاده از این مهاربند جدید دارای المان حلقوی مستهلک کننده انرژی، ظرفیت سیستم تا ۷۵ درصد و ظرفیت جذب انرژی تا حدود ۴۵ درصد نسبت به مهاربند همگرا معادل، افزایش می‌یابد [۱۳] در مطالعه آزمایشگاهی و عددی دیگری پاچیده و همکاران<sup>۱۰</sup> با ارایه یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی اثرات هسته فولادی و فاصله آن از بدنه بر رفتار مهاربند کمانش‌ناپذیر را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از این مهاربند نسبت به مهاربندهای فولادی معمول، نیروی کششی و فشاری را کاهش می‌دهد [۱۴]. پاچیده و همکاران<sup>۱۱</sup> یک سیستم مهاربندی ترکیبی از مهاربند و میراگر دایره‌ای شکلی را ارایه نمودند که به صورت موازی کار می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی کاربرد و کارایی بالایی در جذب انرژی و شکل‌پذیری دارد [۱۵] در این تحقیق با انجام تحلیل‌های عددی توسط نرم افزار ABAQUS [۱۶] و با هدف تشکیل مفاصل پلاستیک در میراگر بیضی‌گون پیشنهادی، دامنه‌ای برای پارامترهای هندسی مؤثر در میراگر تسلیم شونده ارایه می‌گردد. علاوه بر این با توجه به انتخاب هندسه بیضی‌گون برای میراگر پیشنهادی، با انتخاب قطرهای مختلف (در دامنه‌های پارامترهای هندسی ارایه شده)، گزینه‌های بیشتری در بهسازی لرزه‌ای نسبت به سایر میراگرهای موجود، در اختیار طراح قرار می‌گیرد. شایان ذکر است پیکربندی پیشنهادی برای میراگر بیضی‌گون باعث افزایش سختی جانبی و نیروی تسلیم این میراگر نسبت به میراگرهای دایره‌ای شکل هم ارتفاع ارایه شده، توسط سایر محققین می‌گردد [۳، ۴، ۶، ۷].

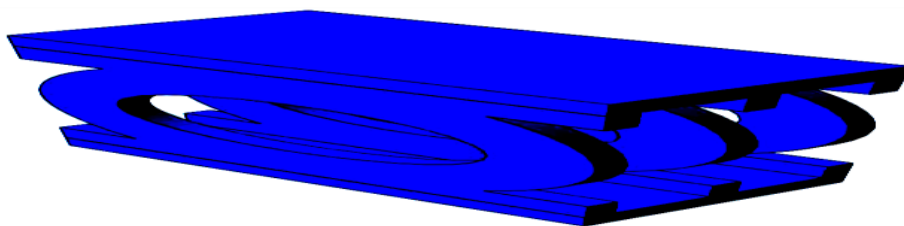
با توجه به عدم نیاز به افزایش ارتفاع ورق‌های قائم میراگر بیضی‌گون پیشنهادی، تنها با افزایش قطر افقی آنها، سختی و نیروی تسلیم بیشتر، تامین می‌شود. بدین واسطه از افزایش گشتاور خمشی متمرکز ناشی از

تحت تنش برشی پرداختند. نتایج تحلیل مذکور نشان می‌دهد که سختی و مقاومت میراگرهای لوله‌ای با افزایش طول لوله به صورت خطی و با افزایش ضخامت و کاهش قطر آن، به شکل غیرخطی افزایش خواهد یافت [۳، ۴]. زهرائی و جلالی<sup>۱</sup>، تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بر روی رفتار میراگر تسلیم شونده انجام دادند که حاکی از کاهش پاسخ سازه و افزایش استهلاک انرژی بود [۵]. چراغی و زهرائی<sup>۲</sup> سیستمی ترکیبی را که از دو ابزار کنترل غیرفعال مجزا با مقاومت و سختی متفاوت تشکیل شده بود را ارایه نمودند. این میراگر تسلیم شونده از چند لوله فولادی هم مرکز با قطرهای متفاوت تشکیل شده است. منحنی‌های هیستریزس بدست آمده نشان می‌دهد که این میراگر بصورت چند سطحی عمل می‌کند و باعث اتلاف انرژی در سطوح مختلف لرزه‌ای می‌شود [۶]. در مطالعه‌ای دیگر زهرائی و چراغی<sup>۳</sup> یک میراگر لوله‌ای چند سطحی را تحت اثر آزمایشات عملی قرار دادند. به کارگیری این سیستم چند سطحی در ساختمانهای فولادی نشان داد که تقاضای لرزه‌ای در سازه‌های بهسازی شده با این نوع میراگرها کاهش می‌یابد [۷]. آغلارا و همکاران<sup>۴</sup>، سیستم کنترل غیرفعال ارایه نمودند که با سازوکارهای خمشی و کششی، انرژی ورودی به سیستم را به وسیله میله‌های قابل تعویض، مستهلک می‌نمود. نتایج حاصل از آزمایشات عملی بر روی این دستگاه، بهبود رفتار لرزه‌ای سازه و همچنین استهلاک انرژی زلزله با به کارگیری آن در ساختمان را نشان داده است [۸]. لی<sup>۵</sup>، با ارایه یک میراگر تسلیم شونده فولادی قوسی شکل، اثربخشی و کاهش قابل توجه در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مجهز به این نوع میراگر را مورد ارزیابی قرار داد [۹]. جراح و همکاران<sup>۶</sup>، یک میراگر فلزی پیستونی ارایه نمودند که از مجموعه‌ی صفحات دایره‌ای توخالی موازی تشکیل شده است که انرژی ورودی زلزله را از طریق تسلیم در خمش مستهلک می‌کند [۱۰]. لی و همکاران<sup>۷</sup> با ارایه میراگر فلزی ترکیبی خمشی-برشی که شامل یک پانل برشی و یک سری صفحات K شکل به عنوان اجزا خمشی بود، عملکرد دوره‌ای و ظرفیت استهلاک انرژی این میراگر را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل نشان دهنده افزایش ظرفیت استهلاک انرژی ورودی لرزه‌ای توسط این میراگر بود [۱۱]. ژوآ و

- 1 (Zahrai & Jalali, 2014)
- 2 (Cheraghi & Zahrai 2016)
- 3 (Zahrai & Cheraghi 2017)
- 4 (Aghlara et al. 2018)
- 5 (Lee, 2018)
- 6 (Jarrah et al. 2019)
- 7 (Li et al. 2019)

8<sup>9</sup> (Guo et al. 2020)

10,11,12 (Pachideh et al. 2020)



شکل ۱: میراگر بیضی‌گون پیشنهادی

Fig. 1. The proposed elliptical damper.

که بر خلاف صفحات دایره‌ای که قطر ثابت دارند، صفحات بیضی دارای قطر متغییر می‌باشند. این موضوع مزیتی است که قدرت انتخاب بیشتری را در اختیار طراح سازه با بکارگیری میراگرهای بیضی‌گون، قرار می‌دهد. فرآیند ساخت این میراگر بسیار آسان است و قابلیت اجرا در محل را دارد. از نظر ابعاد، پهناي این میراگر (بعد عمود بر صفحه قاب)، در حدود عرض بال تیرها انتخاب شده تا به راحتی و بدون مشکل در ضخامت دیوارها قرار گیرد. این میراگر را می‌توان با استفاده از اتصالات پیچی به تیر و مهاربند شورون یا شورون معکوس متصل نمود. در صورت وقوع زلزله‌های شدید و ایجاد آسیب دسترسی و تعویض میراگر پیشنهادی به سادگی امکان‌پذیر است. به دلیل اینکه میراگر پیشنهادی با مهاربند متصل به آن، یک اتصال سری به وجود می‌آورند، سختی حاصل از این ترکیب، نسبت به قاب مهاربندی شده بدون میراگر، کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان جذب انرژی القایی زلزله در کل سازه کاهش یافته، اما میزان انرژی مستهلک شده توسط این مجموعه افزایش می‌یابد. بنابراین میراگر مذکور می‌تواند گزینه مناسبی برای بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فولادی باشد.

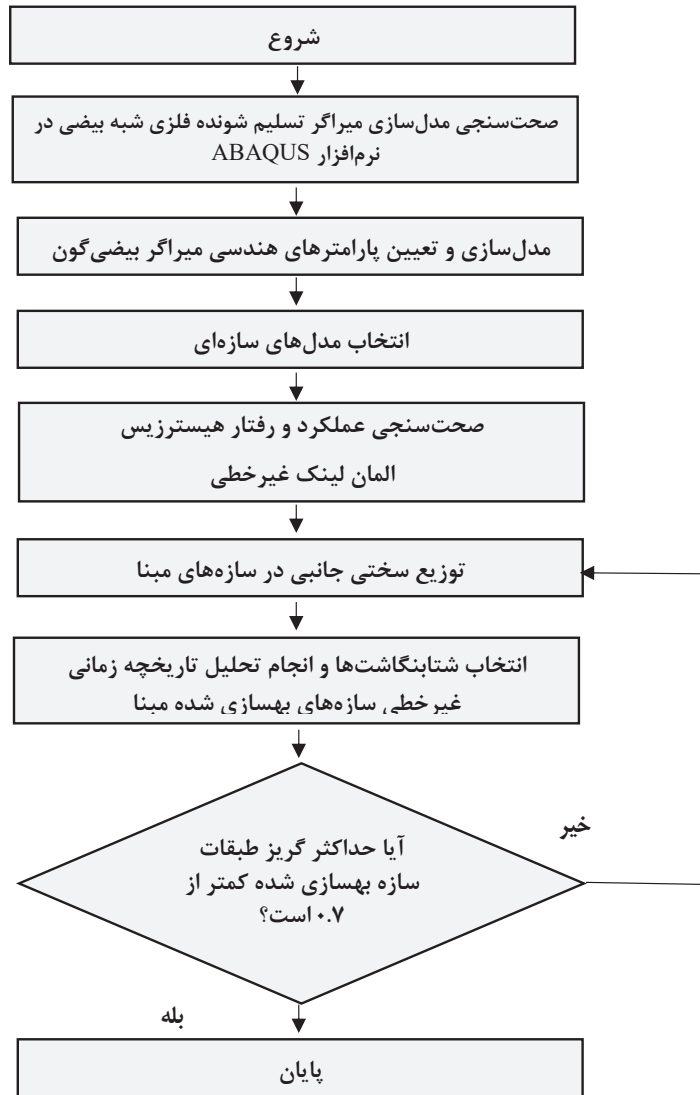
### ۳- متدولوژی:

هدف اصلی در این پژوهش ارایه یک میراگر تسلیم شونده فلزی با پیکربندی جدید است که ضمن کاهش تقاضای لرزه‌ای در ساختمانهای موجود از ایجاد مفاصل پلاستیک در اعضای اصلی سازه جلوگیری نموده و تشکیل این مفاصل پلاستیک را به محل استقرار میراگر بیضی‌گون پیشنهادی انتقال دهد. در شکل ۲، روند انجام این تحقیق که شامل بخشهای متدولوژی و نتایج می‌باشد، بیان گردیده است.

زوج نیروهای برشی در محل میراگر و نیز تشدید پدیده کمانش موضعی، در ورق‌های قائم با ارتفاع بیشتر، جلوگیری به عمل می‌آید. همچنین با به‌کارگیری ورق‌های میان تهی بیضی‌گون در پانل‌های برشی (به جای استفاده از ورق کامل) ضمن انتقال مفصل پلاستیک از اجزای سازه‌ای به میراگر فلزی از احتمال وقوع کمانش موضعی در میراگر پیشنهادی تا حد زیادی کاسته می‌شود. جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، قاب‌های ساختمانی مبنای ۳، ۹، ۲۰ طبقه به صورت قاب خمشی تنها و قاب بهسازی شده با میراگر پیشنهادی، تحت اثر شتابنگاشت‌های حوزه دور و نزدیک قرار گرفته و میزان تغییر مکان جانبی بام، حداکثر تغییر مکان جانبی بین طبقه‌ای و میزان انرژی مستهلک شده، در دو حالت قبل و بعد از بهسازی لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- معرفی میراگر پیشنهادی (میراگر تسلیم شونده بیضی‌گون):

میراگر تسلیم شونده بیضی‌گون پیشنهادی که در شکل ۱ نشان داده شده است پس از مدلسازی و تحلیل توسط نرم افزار ABAQUS از میان ۱۶ پیکربندی متفاوت با ابعاد و ضخامت‌های مختلف انتخاب شده است. ملاک انتخاب این پیکربندی روابط ۸ تا ۱۱ می‌باشد. این میراگر بیضی‌گون متشکل از صفحات قائم و افقی فولادی است. صفحات قائم بیضی شکل هستند و با رفتار برشی و خمشی و ایجاد شکل‌پذیری در هنگام تسلیم، انرژی ورودی به سازه را مستهلک می‌نمایند. صفحات افقی میراگر در قسمت بالا و پایین این مجموعه به عنوان تکیه‌گاه و دربرگیرنده صفحات قائم و همچنین به‌عنوان اجزا اتصال‌دهنده میراگر به تیر و مهاربند، ایفای نقش می‌کنند. در واقع مزیت به‌کارگیری صفحات بیضی نسبت به صفحات دایره‌ای آن است



شکل ۲. روند برآورد رفتار لرزه ای سازه با میراگر پیشنهادی

Fig. 2. Flow of assessing the seismic behavior of the structure with the proposed damper.

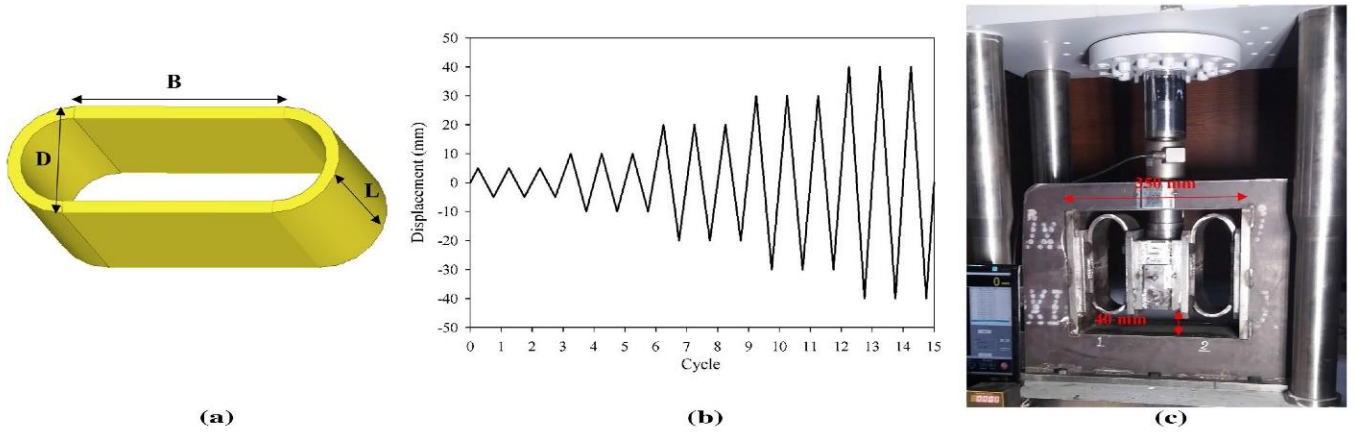
منحنی شکل،  $B$  طول بخش میانی و  $L$  پهناى نمونه و نیز مشخصات مکانیکی میراگر شامل: تنش تسلیم،  $\sigma_y$  تنش نهایی و  $E$  مدول ارتجاعی ارایه شده است [۱۷]. همانطور که در شکل ۴، قابل مشاهده است، نتایج حاصل از مدل سازی در نرم افزار ABAQUS، با نتایج کار آزمایشگاهی همخوانی کامل دارد و منحنی های هیستریزیس مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی به هم نزدیک هستند.

۳-۱- صحت سنجی مدل سازی میراگرهای شبه بیضی:

جهت صحت سنجی مدل سازی های میراگر بیضی گون پیشنهادی، ابتدا با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS، نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی عبادی و همکاران<sup>۱</sup>، با نتایج مدل سازی نمونه مشابه در نرم افزار ABAQUS مقایسه می شود. در شکل ۳، شماتیک پارامترهای هندسی میراگر شبه بیضی، پروتکل بارگذاری و شیوهی جاگذاری نمونه در دستگاه بارگذاری چرخه ای این مطالعه آزمایشگاهی، نشان داده شده است. در جدول ۱، مشخصات هندسی میراگر شامل: ضخامت ورق،  $t$ ، قطر بخش

<sup>1</sup> (Ebadi et al. 2018)





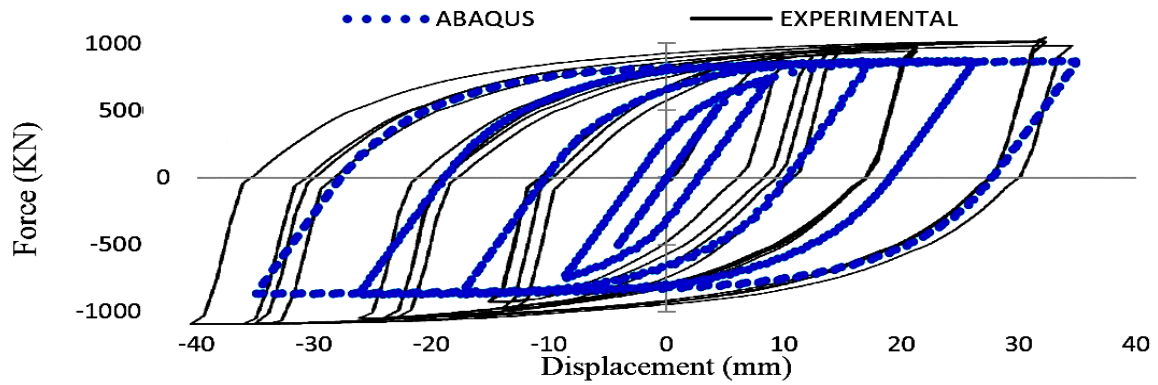
شکل ۳. میراگر آزمایش شده توسط عبادی و همکاران [۱۷]

Fig. 3. The damper examined by Ebadi et al.

جدول ۱. مشخصات هندسی و مکانیکی میراگر آزمایش شده توسط عبادی و همکاران [۱۷]

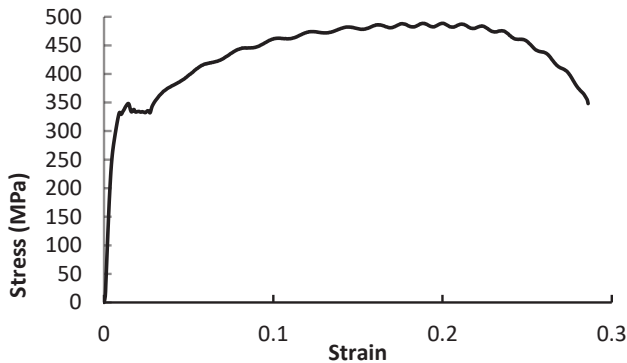
Table 1. Geometrical and mechanical properties of the damper examined by Ebadi et al.

t (mm)	D (mm)	B (mm)	L (mm)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	E (GPa)
12	113	190	150	257	389	201



شکل ۴. مقایسه منحنی هیستریزیس آزمایشگاهی و مطالعه عددی

Fig. 4. Comparison of experimental and numerical hysteresis curves.



شکل ۶. منحنی تنش- کرنش فولاد

Fig. 6. Stress – strain curve of the steel.

$$K = \frac{P}{\Delta} = \frac{2.E.I}{3.\pi.R^3} \quad (3)$$

در روابط فوق  $M$  و  $m$  به ترتیب گشتاور خمشی تحت اثر بارگذاری واقعی و بار واحد مجازی است.  $P$  نیروی وارده،  $R$  شعاع،  $E$  مدول الاستیسیته،  $I$  ممان اینرسی،  $\Delta$  تغییر مکان جانبی و  $K$  سختی جانبی میراگر می‌باشد. در این پژوهش ابتدا حلقه‌های بیضی‌گون میراگر تسلیم شونده با ضخامت‌های مختلف در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. ضخامت‌های مورد نظر برای حلقه‌های بیضی‌گون 10, 15, 20, 25 میلی‌متر می‌باشند. حلقه‌های بیضی‌گون در دو حالت عمودی و افقی در نظر گرفته شده است. میراگر با وضعیت استقرار عمودی (VED) <sup>۱</sup> و میراگر با استقرار افقی (HED) <sup>۲</sup> به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده است.

با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم افزار ABAQUS برای میراگرهای HED و VED و با مقایسه نتایج تحلیل چرخه‌ای برای میراگر با نسبت‌های مختلف قطرهای افقی داخلی و خارجی و همچنین قطرهای عمودی داخلی و خارجی، روابط ذیل جهت عملکرد بهتر و استهلاک بیشتر انرژی ناشی از شکل‌پذیری در میراگر تعیین شده است.



شکل ۵. تست کشش جهت تعیین مشخصات فولاد

Fig. 5. Tensile testing to determine the steel characteristics.

۳-۲- مدل‌سازی و تعیین پارامترهای هندسی میراگر بیضی‌گون پیشنهادی: پس از صحت‌سنجی انجام شده برای مدل‌سازی میراگر بیضی‌گون در نرم افزار آباکوس، حالات مختلف میراگر در این نرم افزار مدل‌سازی می‌شود. برای مدل‌سازی از المان Solid، از نوع C3D8R استفاده شده است. مشخصات فولاد به کار رفته در مدل‌سازی‌ها، مربوط به فولاد ST37 می‌باشد. آزمایش کشش بر روی نمونه‌های استاندارد ورق فولادی جهت استخراج منحنی تنش-کرنش در آزمایشگاه مهندسی سازه صورت گرفت، که در شکل ۵، می‌توان آن را مشاهده نمود. منحنی تنش-کرنش بدست آمده از این آزمایش در شکل ۶ قابل مشاهده است.

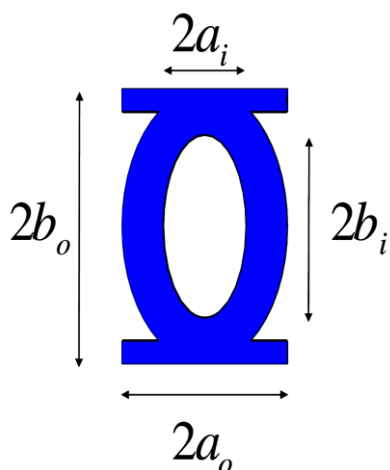
روابط ۱ تا ۳، مبانی طراحی میراگر پیشنهادی جهت تعیین سختی جانبی ورق‌های آن را با استفاده از روش کار مجازی بصورت ذیل بیان می‌دارد.

$$1 * \Delta = \int \frac{M.m}{E.I} \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{P.R^2}{E.I} \int_0^{\pi} (1 - \cos \theta)^2 . ds = \quad (2)$$

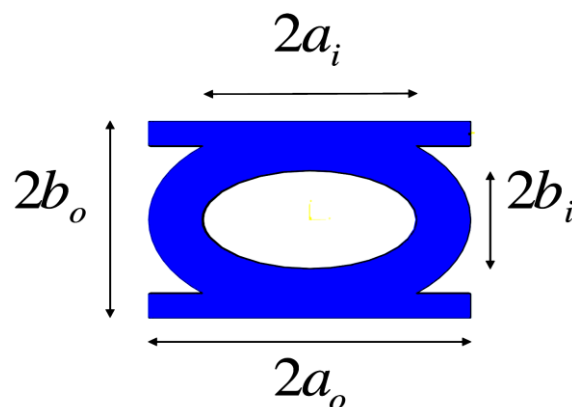
$$\frac{P.R^3}{E.I} \left[ \theta - 2.\sin \theta + \frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4} \right]_0^{\pi} = \frac{3.\pi.P.R^3}{2.E.I}$$

- 1 Vertical Elliptical Damper
- 2 Horizontal Elliptical Damper



شکل ۸. میراگر با استقرار افقی (HED)

Fig. 8. Horizontal elliptical damper (HED).



شکل ۷. میراگر با استقرار عمودی (VED)

Fig. 7. Vertical elliptical damper (VED).

$$b_i \geq \frac{b_o}{2} \quad (10)$$

$$b_o < a_o \leq 2b_o \quad (11)$$

در روابط ۴ تا ۱۱،  $2a_o$  قطر خارجی افقی،  $2a_i$  قطر داخلی افقی،  $2b_o$  قطر خارجی عمودی،  $2b_i$  قطر داخلی عمودی،  $2\Delta a$  اختلاف قطر خارجی و داخلی افقی و  $2\Delta b$  اختلاف قطر خارجی و داخلی عمودی حلقه‌های بیضی شکل میراگر پیشنهادی می باشد. هرکدام از میراگرهای بیضی گون VED و HED دارای تیپ SA<sup>۱</sup> با پهنای ۲۵ میلی متری حلقه بیضی گون و تیپ SB<sup>۲</sup> با پهنای ۵۰ میلی متری آن حلقه، با در نظر گرفتن چهار ضخامت مختلف، در نرم افزار ABAQUS، مدل سازی شده و تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای بر اساس پروتکل بارگذاری ATC-24 قرارگرفت [۱۸]. نتایج پارامترهای سختی، مقاومت تسلیم این ۱۶ نمونه در جدول ۲، ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این جدول می توان دریافت که میراگر HED در مقایسه با میراگر از نوع VED با سطح جانبی و ضخامت ورق مشابه (وزن یکسان)، از نظر سختی و مقاومت تسلیم مقادیر بیشتری را نشان می دهد.

برای میراگر بیضی شکل از نوع VED :

$$\Delta b \leq a_i \quad (4)$$

$$\Delta b = b_o - b_i \quad (5)$$

$$a_i \geq \frac{a_o}{2} \quad (6)$$

$$a_o < b_o \leq 2a_o \quad (7)$$

برای میراگر بیضی شکل HED :

$$\Delta a \leq b_i \quad (8)$$

$$\Delta a = a_o - a_i \quad (9)$$

1 Series A

2 Series B

جدول ۲. مشخصات هندسی، سختی جانبی، و مقاومت تسلیم انواع ورق‌های میراگر پیشنهادی

Table 2. Geometrical properties, lateral stiffness, and yield strength of various plates for the proposed damper.

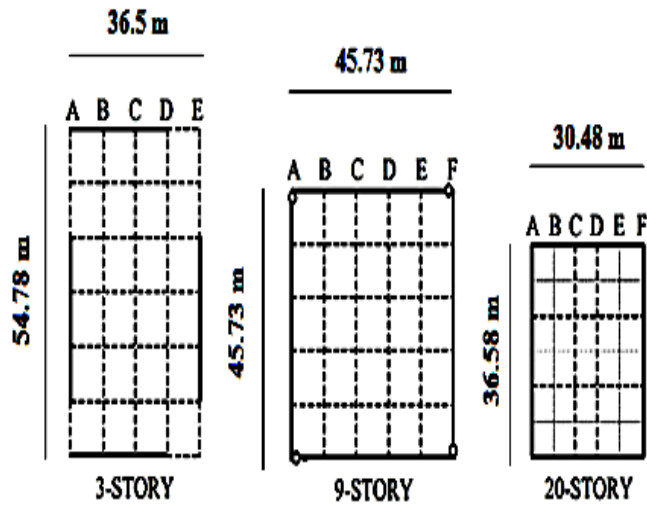
Type	ao (mm)	bo (mm)	$\Delta a = \Delta b$ (mm)	t (mm)	ai (mm)	bi (mm)	S (mm)	K (N/mm)	Py (N)
VED-SA-01	100	150	25	10	75	125	17663	2794	7567
VED-SA-02	100	150	25	15	75	125	17663	4197	11406
VED-SA-03	100	150	25	20	75	125	17663	5601	15276
VED-SA-04	100	150	25	25	75	125	17663	7038	19188
VED-SB-01	100	150	50	10	50	100	31400	15047	33028
VED-SB-02	100	150	50	15	50	100	31400	22720	49701
VED-SB-03	100	150	50	20	50	100	31400	30501	66462
VED-SB-04	100	150	50	25	50	100	31400	38445	83379
HED-SA-01	150	100	25	10	125	75	17663	5639	14967
HED-SA-02	150	100	25	15	125	75	17663	8652	22627
HED-SA-03	150	100	25	20	125	75	17663	11749	30357
HED-SA-04	150	100	25	25	125	75	17663	14968	38207
HED-SB-01	150	100	50	10	100	50	31400	53758	64357
HED-SB-02	150	100	50	15	100	50	31400	81759	97231
HED-SB-03	150	100	50	20	100	50	31400	109809	130126
HED-SB-04	150	100	50	25	100	50	31400	138280	163320

توجه به اینکه قاب‌های خمشی نقش اصلی را در تحمل بارهای زلزله ایفا می‌کنند، قاب‌های پیرامونی سازه‌های مبنا که خمشی هستند در نرم افزار SAP2000 مدل‌سازی شده‌اند [۲۰]. به استثنای یک دهانه مفصلی در سازه ۳ طبقه، این قاب‌ها در تمامی دهانه‌های خمشی ویژه هستند و اتصالات، گیردار فرض شده‌اند. در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه تکیه‌گاه‌های جانبی همان خاک اطراف سازه بوده که تراز پایه را ایجاد کرده است و در مدل‌سازی با قرار دادن قیدی که مانع حرکت در جهت افق است در نظر گرفته شده‌اند. محل قرار گیری قاب‌های خمشی ویژه پیرامونی با خطوط پر رنگ و قاب‌های ساده ساختمانی با خط چین در پلان‌های زیر نشان داده شده است. پلان و نمای سازه‌های محک به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. شرح کامل مشخصات سازه‌ها شامل ابعاد، اندازه اعضا، بارگذاری و نوع مصالح استفاده شده در مطالعه انجام شده توسط اوهتوری و همکاران موجود می باشد.

همچنین در هر دو نوع میراگر VED و HED، تیپ SB نسبت به تیپ SA، سطح جانبی بیشتری دارد و حتی در حالتی که ضخامت ورق هر دو تیپ یکسان است، مقادیر سختی، مقاومت تسلیم، تیپ SB بیشتر می باشد. به همین دلیل با مقایسه نتایج حاصل بین این ۱۶ نمونه ورق‌های بیضی شکل می توان بیان داشت که تیپ SB از میراگر HED جهت بکارگیری در سازه های فولادی از اولویت بالاتری برخوردار می باشد. در جدول ۲، t ضخامت ورق میراگرها، S سطح جانبی یک حلقه میراگر بیضی‌گون، K سختی و Py مقاومت تسلیم آن است.

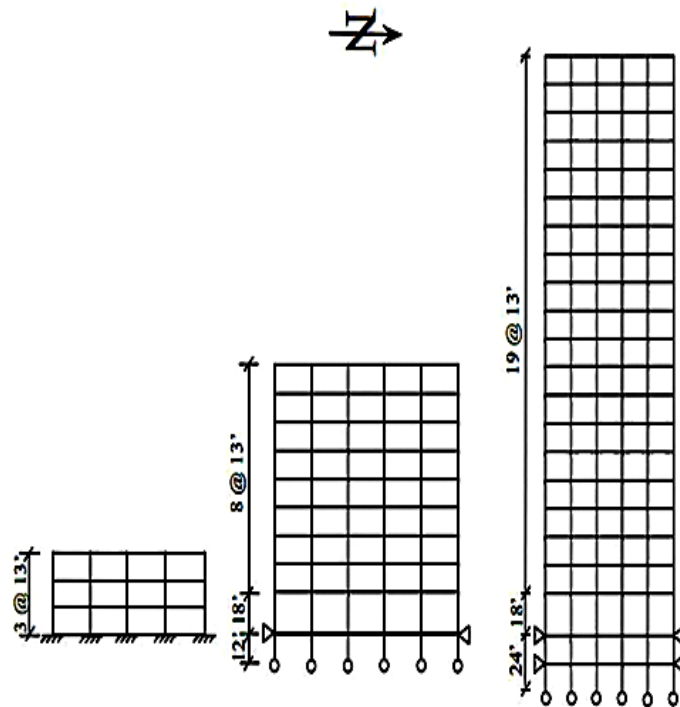
### ۳-۳- انتخاب مدل‌های سازه‌ای:

در این تحقیق برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ی مجهز به میراگر تسلیم شونده پیشنهادی، از سه سازه مبنای ۳، ۹ و ۲۰ طبقه که توسط اوهتوری و همکارانش ارائه شده است، استفاده می گردد [۱۹]. در پژوهش حاضر با



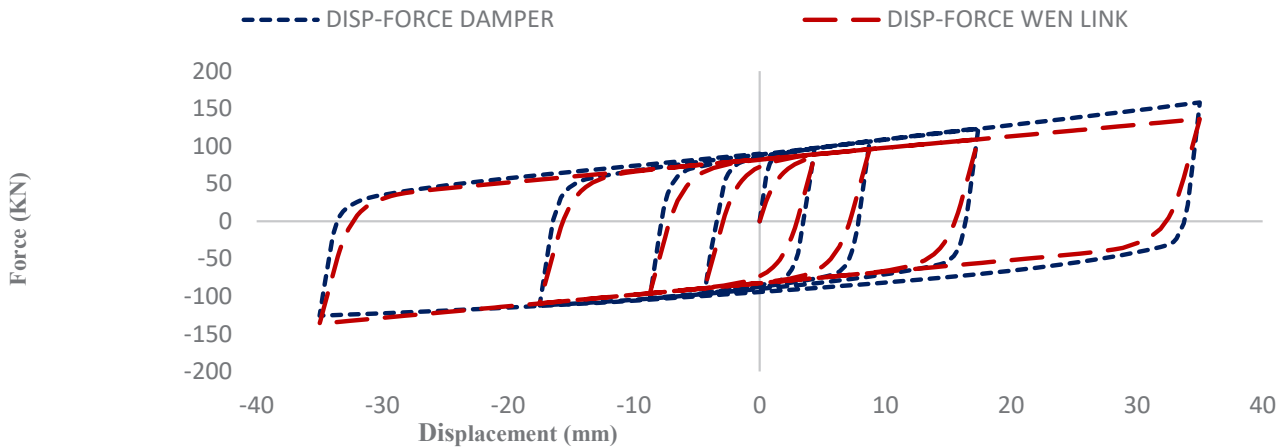
شکل ۹. پلان سازه های مبنای ۳، ۹ و ۲۰ طبقه

Fig. 9. Plans of the 3-, 9, and 20-story benchmark structures.



شکل ۱۰. نمای سازه های مبنای ۳، ۹ و ۲۰ طبقه

Fig. 10. Facade of the 3-, 9, and 20-story benchmark structures.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج منحنی هیستریزیس نرم افزار ABAQUS و SAP2000

Fig. 11. Comparison of hysteresis curves from the Abaqus and SAP2000 software.

الگوی شکل مود اول سازه)، روابط ۱۲ تا ۱۵، ارایه گردیده است [۲۱]. برای بدست آوردن سختی جانبی طبقات می توان ماتریس الگوی سختی،  $[K']$  را مطابق رابطه ۱۲، تعریف کرد.

$$[K'] = \frac{1}{\omega_1^2} [K] \quad (12)$$

با استفاده از دینامیک سازه کلاسیک، امکان دستیابی به یک سختی توزیع شده در نتیجه یک شکل مود اصلی هدف از پیش تعریف شده وجود دارد. اگر شکل مود اصلی هدف باشد و  $[M]$  و  $\omega_1$  به ترتیب ماتریس جرم و فرکانس اصلی تعریف شده باشد، آنگاه  $[K]$  ماتریس سختی مربوطه را می توان بوسیله رابطه ۱۳ بدست آورد.

$$[K] \{\phi^*\} = \omega_1^2 [M] \{\phi^*\} \quad (13)$$

با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ ماتریس الگوی سختی می تواند بصورت مستقیم تعریف گردد.

$$[K'] \{\phi^*\} = [M] \{\phi^*\} \quad (14)$$

۳-۴- صحت سنجی عملکرد و رفتار هیستریزیس المان لینک غیرخطی:

با توجه به آنکه در این مرحله با استفاده از المان لینک در نرم افزار SAP2000، مشخصات میراگر تسلیم شونده مورد نظر را در قاب ساختمان های محک اعمال شده است، جهت صحت سنجی عملکرد و رفتار هیستریزیس المان لینک غیر خطی Wen، بر اساس تحلیل های انجام شده در نرم افزار المان محدودی ABAQUS، مقادیر سختی موثر و مقاومت تسلیم میراگر را تعیین و این مشخصات را در المان لینک غیرخطی نرم افزار SAP2000، اعمال می گردد. در شکل ۱۱، منحنی هیستریزیس خروجی نرم افزار SAP2000 برای المان Wen با نتایج حاصل از تحلیل چرخه ای میراگر بیضی گون در نرم افزار ABAQUS مقایسه شده است.

بر اساس شکل ۱۱، می توان دقت و شباهت منحنی هیستریزیس نیرو-جابجایی بدست آمده از المان لینک غیرخطی در نرم افزار SAP2000 را با منحنی بدست آمده از نرم افزار ABAQUS مشاهده نمود. اکنون با توجه به صحت سنجی انجام شده، می توان با استفاده از المان لینک غیرخطی Wen، مشخصات میراگر تسلیم شونده مورد نظر را در قاب مهاربندی شده با میراگر در ساختمان های محک اعمال نموده و پاسخ لرزه ای این سازه ها را در دو حالت قاب خمشی تنها و قاب بهسازی شده، مقایسه نمود.

۳-۵- توزیع سختی جانبی در سازه های مینا:

در این پژوهش با استفاده از تکنیک توزیع سختی جانبی بهینه در ارتفاع ساختمان جهت رسیدن به تغییر مکان نسبی یکنواخت در طبقات (بر اساس

که در آن:

۳-۶- تحلیل دینامیکی سازه‌های بهسازی شده:

جهت صحت‌سنجی تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی و نشان دادن تاثیر بهسازی انجام شده در تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی توسط میراگر بیضی‌گون پیشنهادی، ساختمان‌های مینا در نرم افزار SAP2000 مدلسازی شده و از شتاب‌نگاشت‌های معرفی شده توسط اوهارتاری و همکاران استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها شامل دو شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک نورث‌ریچ و کوبه و دو شتاب‌نگاشت حوزه دور السنترو و هاجینوهه است. مقدار شتاب بیشینه برای این شتاب‌نگاشت‌ها به ترتیب ۳/۴۱۷، ۲/۲۵۰، ۸/۲۶۸، ۸/۱۷۸ متر بر مجذور ثانیه می‌باشند.

$$\{\phi^*\} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{n} \\ \frac{2}{n} \\ \vdots \\ \frac{n-1}{n} \\ 1 \end{Bmatrix}, [K'] = \begin{bmatrix} k'_1 + k'_2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k'_n \end{bmatrix}, [M] = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵،  $\Pi$  شماره طبقات می‌باشد. لازم به ذکر است، مود شکل اصلی دارای یک الگوی خطی مرتبط با توزیع یکنواخت تغییرمکان نسبی در همه طبقات می‌باشد.  $k'_i$ ، سختی جانبی توزیع شده طبقات، برای دستیابی به مود شکل اصلی خطی، از رابطه ۱۶ تعیین می‌گردد.

۴- ارزیابی نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه‌های بهسازی شده با میراگر بیضی‌گون پیشنهادی:

نتایج بدست آمده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی با یکدیگر مقایسه و میزان تاثیر به‌کارگیری میراگر تسلیم شونده پیشنهادی در کاهش تقاضای لرزه‌ای ساختمان‌های مینا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$k'_i = \frac{\sum_{q=i}^n m_q \phi_q^*}{\Delta \phi_i^*}, \Delta \phi_i^* = \phi_i^* - \phi_{i-1}^* \quad (16)$$

$\omega$ ، فرکانس طبیعی سازه از رابطه ۱۷ بدست می‌آید.

۴-۱- تاثیر استفاده از میراگر پیشنهادی در کنترل تغییرمکان جانبی بام:

پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه‌های مینا و سازه‌های بهسازی شده، با توجه به شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، می‌توان کاهش تغییرمکان جانبی بام ساختمان‌های مینای بهسازی شده را پس از به‌کارگیری میراگر تسلیم شونده پیشنهادی، مشاهده نمود.

$$\omega^2 = \frac{\phi_{roof}^* C_0 S_a}{d_{max,roof}} \quad (17)$$

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، میزان کاهش حداکثر جابجایی بام در ساختمان مینای سه طبقه پس از بهسازی توسط میراگر بیضی‌گون پیشنهادی، تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های السنترو، هاجینوهه، نورث‌ریچ و کوبه به ترتیب ۴۵، ۵۶، ۷۳ و ۸۹ درصد می‌باشد.

در رابطه فوق  $\phi_{roof}^*$  درایه شکل مود اول سازه مربوط به بام،  $C_0$  ضریب مشارکت در مود اول سازه،  $S_a$  شتاب طیفی طرح و  $d_{max,roof}$  حداکثر تغییرمکان جانبی مربوط به بام سازه است.  $k_i^*$  سختی بهینه طبقات سازه برای رسیدن به گریز طبقات یکسان در سازه از رابطه ۱۸ تعیین می‌گردد.

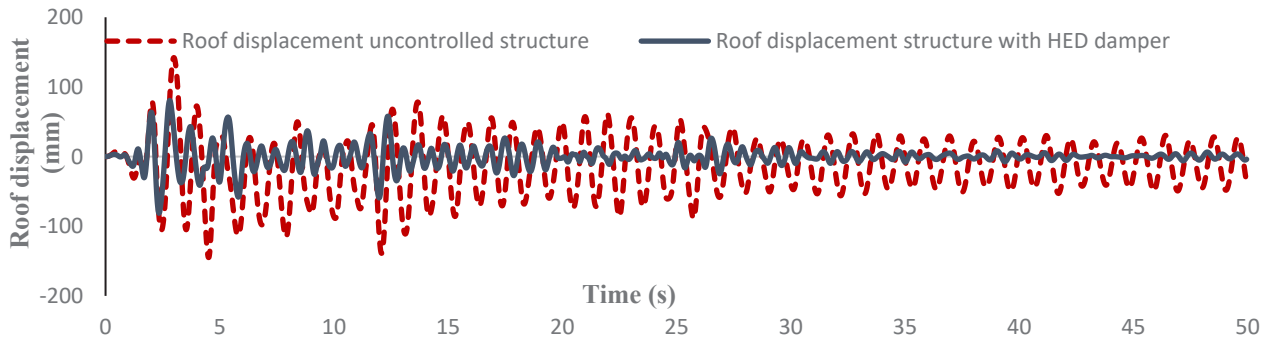
همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، میزان کاهش حداکثر جابجایی بام در ساختمان مینای نه طبقه پس از بهسازی توسط میراگر بیضی‌گون پیشنهادی، تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های ال‌سنترو، هاجینوهه، نورث‌ریچ و کوبه به ترتیب ۶۶، ۶۸، ۶۵، ۵۸ درصد می‌باشد. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که، میزان کاهش حداکثر جابجایی بام در ساختمان مینای بیست طبقه پس از بهسازی توسط میراگر بیضی‌گون پیشنهادی، تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های ال‌سنترو، هاجینوهه، نورث‌ریچ و کوبه به ترتیب ۴۴، ۳۴، ۳۵ و ۱۱ درصد می‌باشد.

$$k_i^* = \omega^2 k'_i \quad (18)$$

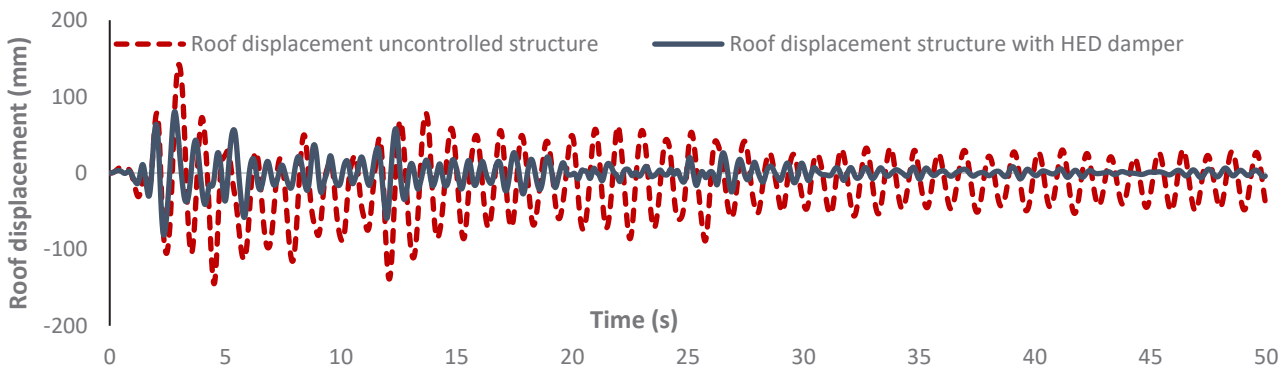
سختی جانبی میراگر مربوط به طبقات مختلف سازه بهسازی شده از رابطه ۱۹، به‌دست می‌آید.

$$k_{Damp(i)} = k_i^* - k_i \quad (19)$$

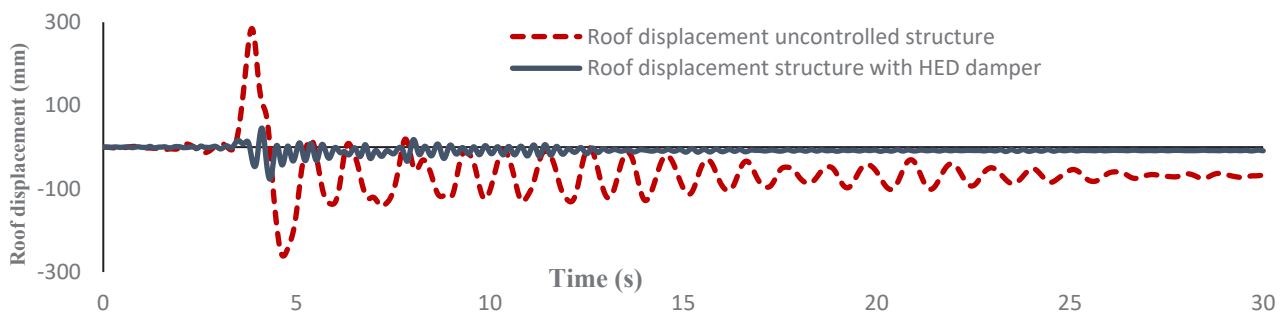
در رابطه فوق  $k_i$  سختی جانبی طبقات سازه بهسازی نشده است.



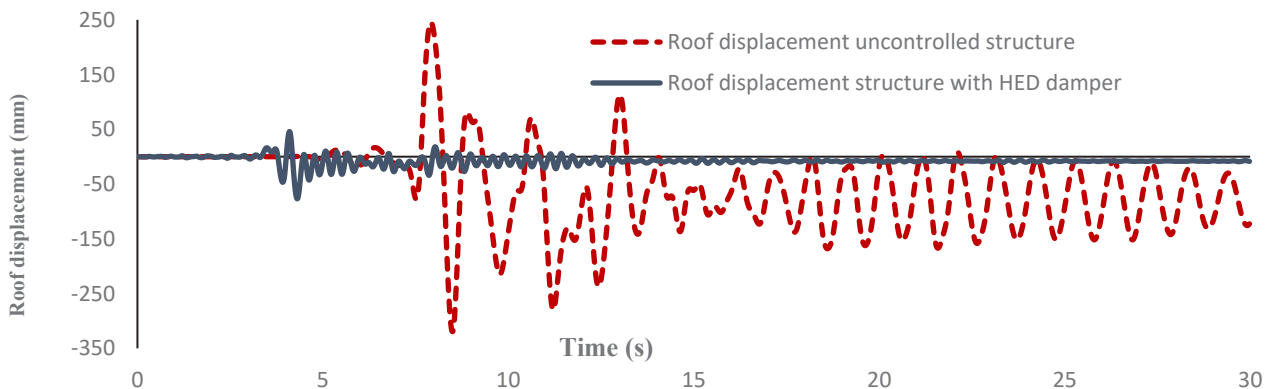
(a). El Centro



(b). Hachinohe



(c). Northridge

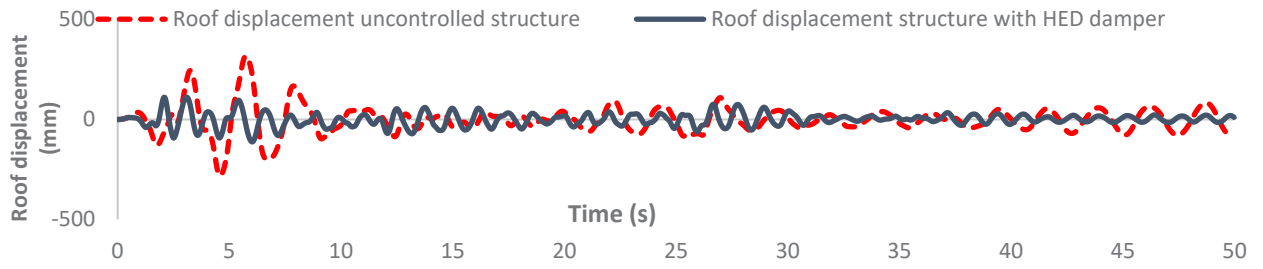


(d). Kobe

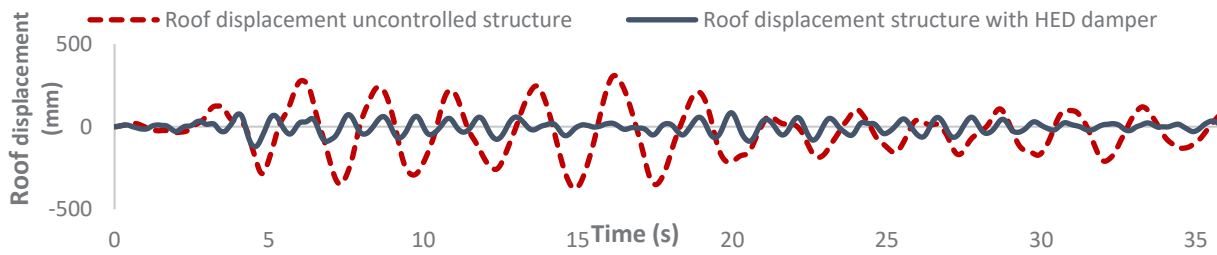
شکل ۱۲. مقایسه جابجایی بام سازه ۳ طبقه محک با سازه بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 12. Comparison of roof displacement of the 3-story benchmark structure before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper.

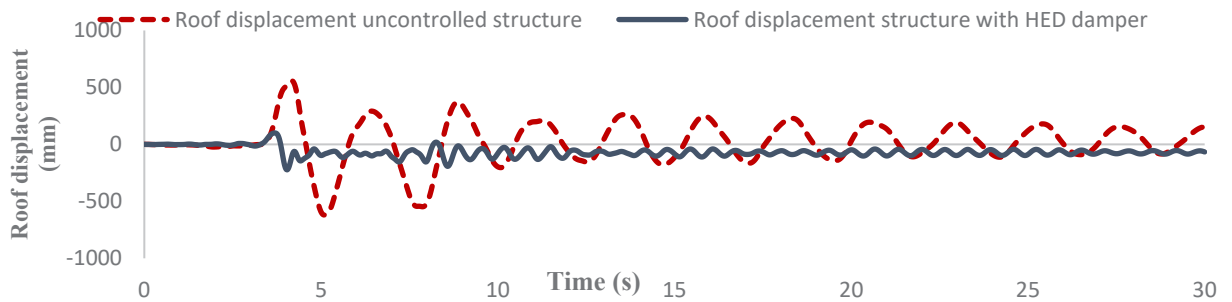




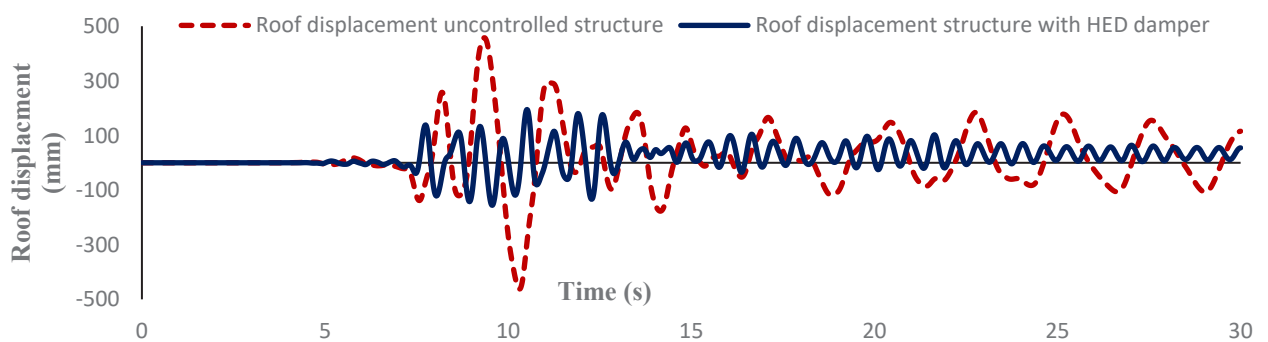
(a). El Centro



(b). Hachinohe



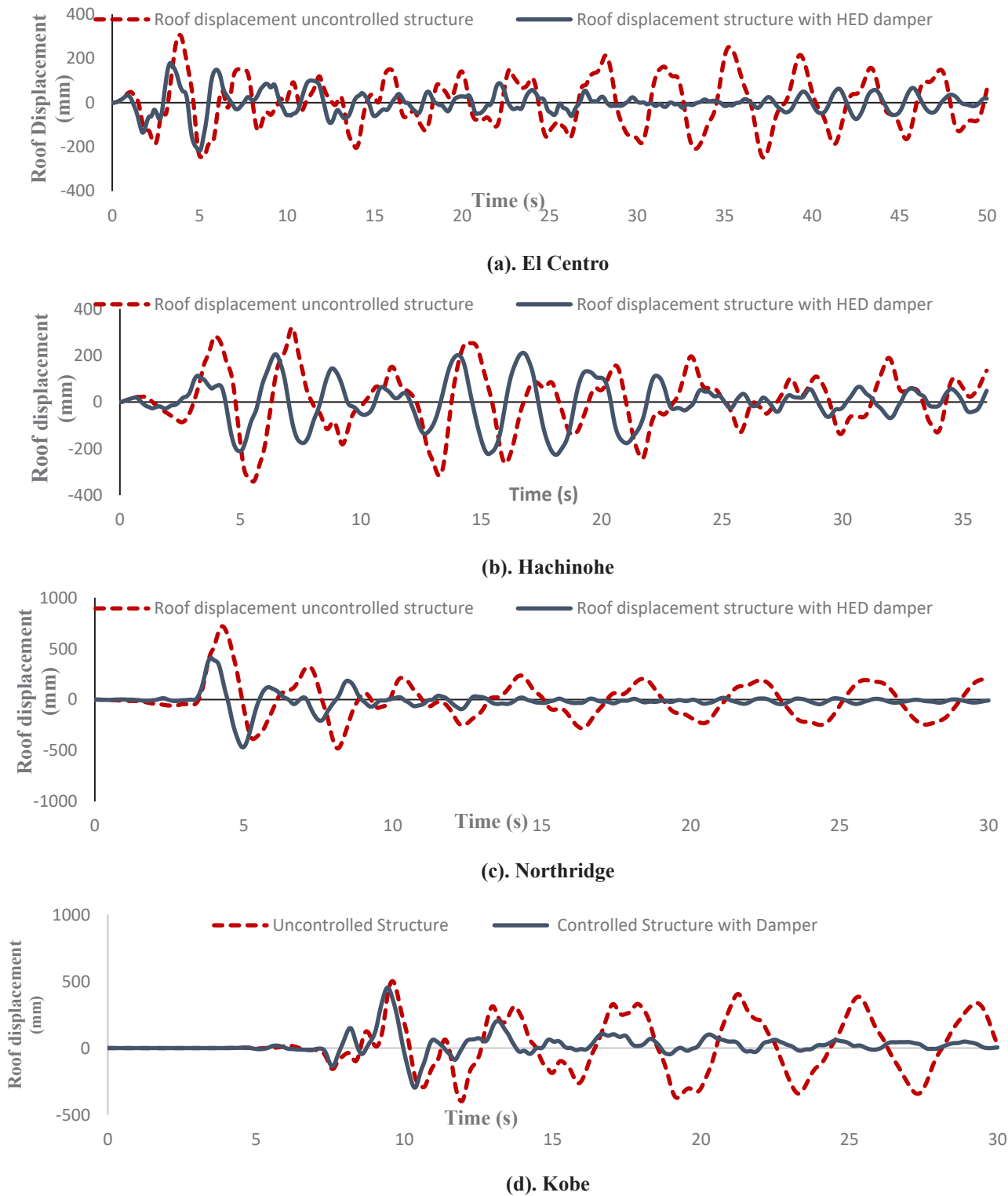
(c). Northridg



(d). Kobe

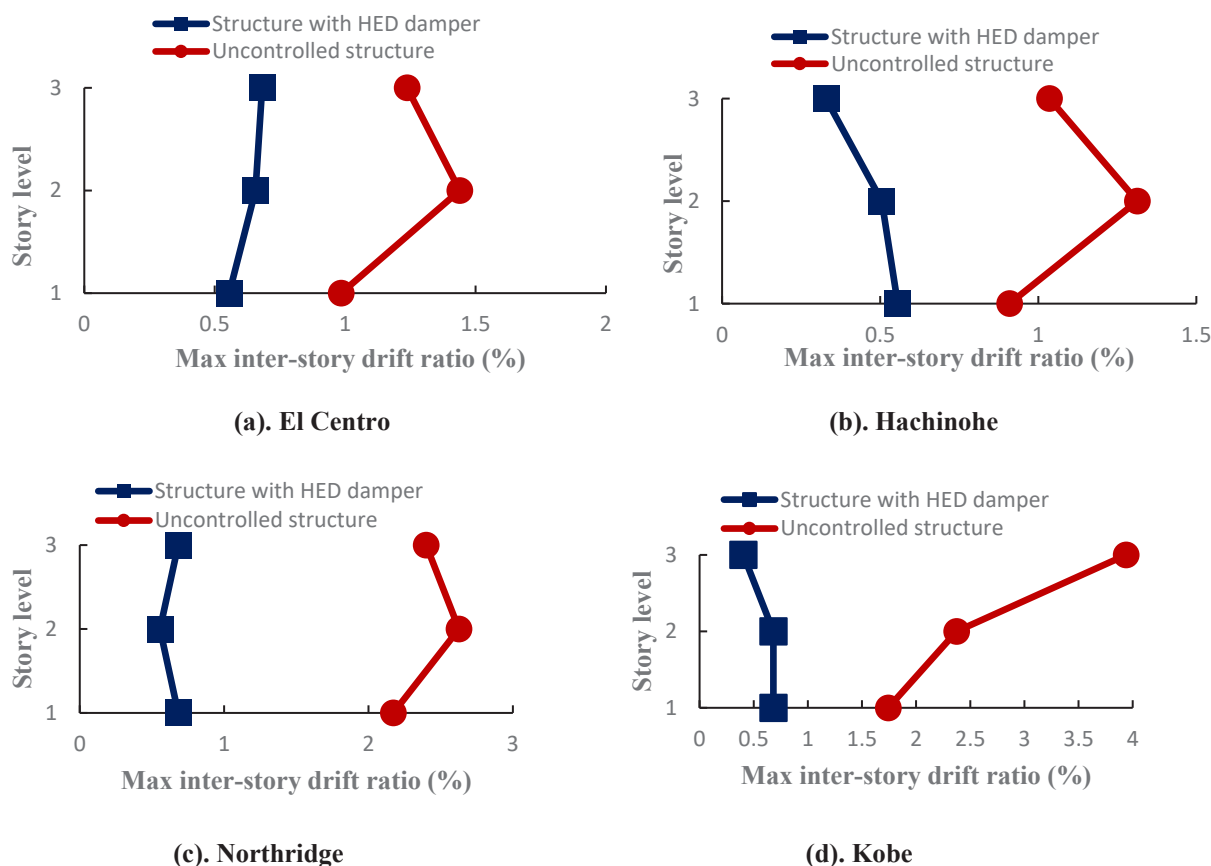
شکل ۱۳. مقایسه جابجایی بام سازه ۹ طبقه محک با سازه بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 13. Comparison of roof displacement of the 9-story benchmark structure before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper.



شکل ۱۴. مقایسه جابجایی بام سازه ۲۰ طبقه محک با سازه بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 14. Comparison of roof displacement of the 20-story benchmark structure before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper.



شکل ۱۵. مقایسه درصد نسبت گریز طبقات سازه ۳ طبقه مینا با سازه بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 15. Comparison of percent inter-story drift of the 3-story benchmark structure before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper.

شاخصی جهت تعیین سطح عملکرد سازه های مورد بررسی، استفاده شده است. حداکثر درصد نسبت گریز طبقات یک سازه با  $\Delta$  نمایش داده می شود، مقادیر کوچکتر از ۰/۷ درصد حالت حدی بهره برداری بی وقفه، بزرگتر از ۰/۷ درصد تا کوچکتر از ۲/۵ درصد سطح عملکرد ایمنی جانی و مقادیر بزرگتر از ۲/۵ درصد تا ۵ درصد، سطح عملکرد آستانه فرو ریزش تعیین می گردد [۲۲].

در شکل ۱۵ نمودارهای نسبت گریز برای سازه ۳ طبقه مینا، قبل و بعد از بهسازی ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۱۵(a)، مشاهده می شود استفاده از میراگر بیضی گون پیشنهادی در سازه بهسازی شده مینای ۳ طبقه منجر به کاهش حداکثر نسبت گریز طبقات به میزان ۵۴ درصد شده است و سطح عملکردی سازه بهسازی شده را در حد عملکرد استفاده بی وقفه ارتقا داده است. در شکل ۱۵(b)، کاهش حداکثر نسبت گریز طبقات به میزان ۶۲ درصد شده است و سطح عملکردی سازه بهسازی شده را در حد عملکرد

همانطور که در شکل های ۱۲ تا ۱۴ مشاهده می شود، میزان میانگین کاهش حداکثر جابجایی بام در ساختمان سه طبقه ۶۶٪، ساختمان نه طبقه ۶۴٪ و ساختمان بیست طبقه ۳۱٪ می باشد. کاهش مناسب حداکثر تغییرمکان بام در هر سه ساختمان مینا منجر به کاهش ریسک برخورد ساختمان های مجاور در زلزله های شدید می شود. شایان ذکر است بر مبنای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، عملکرد لرزه ای ساختمان های مینای سه طبقه و نه طبقه بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی، نسبت به ساختمان بیست طبقه مناسب تر است.

#### ۴-۲- کنترل تغییرمکان نسبی بین طبقات:

تغییرمکان جانبی نسبی طبقات یکی از مهمترین پارامترهای پاسخ سازه می باشد که ارتباط مستقیم با میزان آسیب به اجزای سازه ای ساختمان دارد. درصد نسبت گریز طبقات که از پارامترهای موثر پاسخ سازه است به عنوان

بهره‌برداری بی وقفه بهبود داده است. در شکل‌های (c)۱۵ و (d)۱۵ کاهش حداکثر نسبت گریز طبقات به ترتیب میزان ۷۹ و ۸۹ درصد رسیده و از آستانه فروریزش به سطح عملکردی بهره‌برداری بی وقفه ارتقا یافته است.

در سازه ۹ طبقه ساختمانهای مبنا که بوسیله میراگر بیضی‌گون پیشنهادی بهسازی شده است، تحت اثر زلزله حوزه دور السنترو با کاهش ۷۴ درصدی در پارامتر درصد نسبت گریز، سطح عملکردی ایمنی جانی به سطح عملکردی بی وقفه با خرابی خیلی کم ارتقا یافته است که در شکل (a)۱۶، قابل مشاهده می‌باشد. برای زلزله هاجینوهه کاهش در این پارامتر برای سازه بهسازی شده ۷۶ درصد است که در شکل (b)۱۶، قابل مشاهده می‌شود. تحت اثر زلزله حوزه نزدیک نورث‌ریچ، با کاهش ۶۹ درصدی این پارامتر برای سازه بهسازی شده، سطح عملکردی ایمنی جانی با خرابی شدید به سطح عملکردی بهره‌برداری بی وقفه با سطح خرابی کم ارتقا یافته که در شکل (c)۱۶، قابل مشاهده است و نیز تحت اثر شتابنگاشت زلزله کوبه درصد نسبت گریز طبقات سازه بهسازی شده با میراگر بیضی‌گون با کاهش ۹۱ درصد از سطح عملکردی آستانه فرو ریزش با خرابی شدید به سطح عملکردی بهره‌برداری بی وقفه با خرابی کم بهبود مناسبی داشته که در شکل (d)۱۶، قابل مشاهده است.

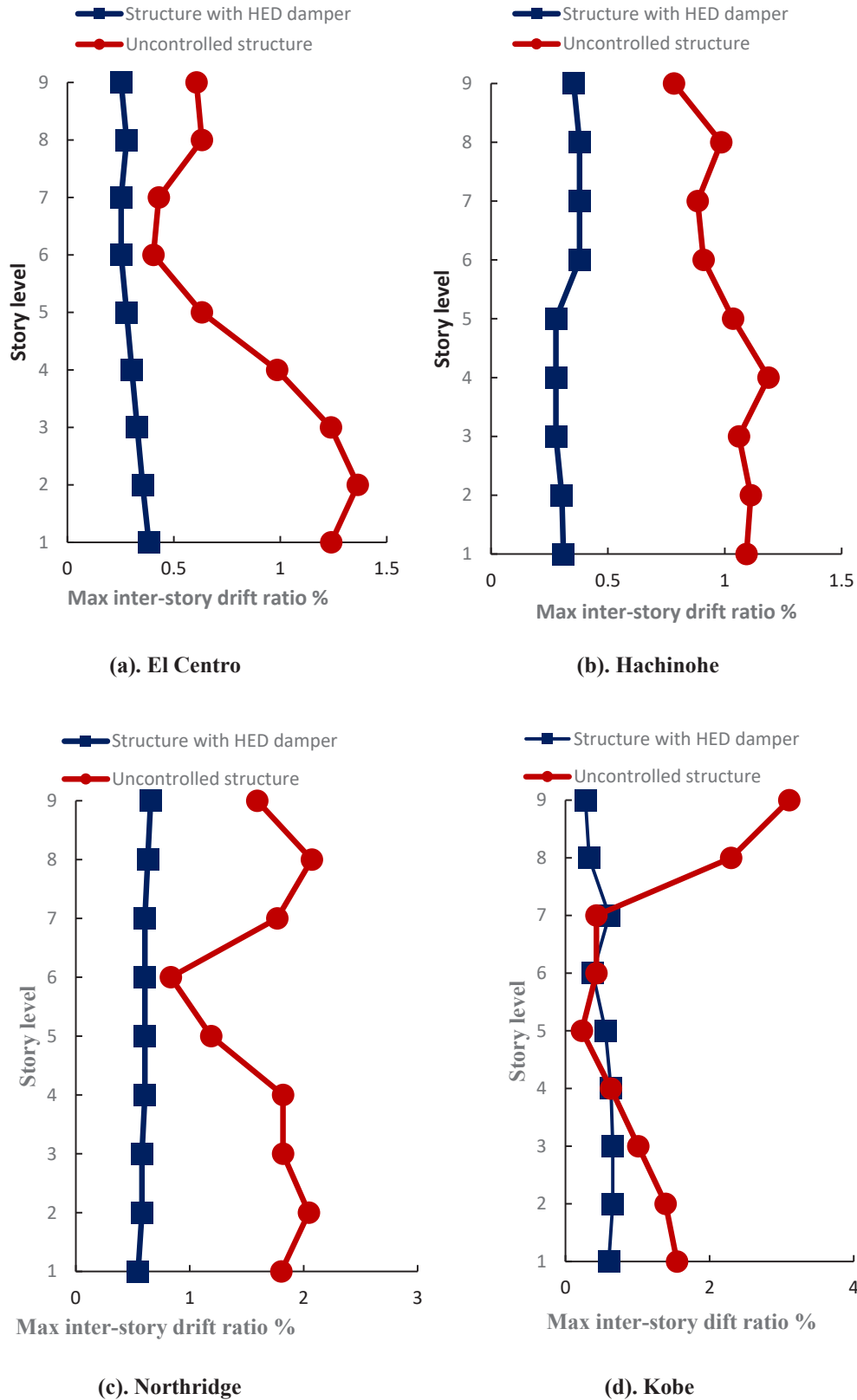
در سازه ۲۰ طبقه ساختمان‌های مبنا که تحت اثر زلزله حوزه دور ال‌سنترو قرار گرفته است. علیرغم آنکه سازه بهسازی نشده و سازه بهسازی شده با میراگر بیضی‌گون پیشنهادی، هر دو در سطح عملکردی بهره‌برداری بی وقفه هستند اما در سازه بهسازی شده با کاهش میزان ۳۸ درصد نسبت گریز حداکثر در آن سازه، خرابی همان سطح عملکردی از کم به خرابی خیلی کم تقلیل پیدا کرده که در شکل (a)۱۷، این مورد قابل مشاهده است. در سازه بهسازی شده تحت اثر زلزله هاجینوهه این پارامتر به میزان ۳۷ درصد کاهش داشته که در شکل (b)۱۷، قابل مشاهده است. در شکل (c)۱۷، می‌توان کاهش ۶۸ درصدی پارامتر درصد نسبت گریز طبقات را در این سازه ۲۰ طبقه بهسازی شده با میراگر تسلیم‌شونده بیضی‌گون مشاهده نمود که سطح عملکردی این ساختمان از ایمنی جانی با خرابی شدید به سطح عملکردی بهره‌برداری بی وقفه با خرابی کم ارتقا یافته است. مقدار این پارامتر برای همین ساختمان پس از بهسازی تحت زلزله حوزه نزدیک کوبه به میزان ۵۹ درصد کاهش یافته و سطح عملکردی ایمنی جانی با خرابی شدید به سطح عملکردی بهره‌برداری بدون وقفه با خرابی کم، بهبود یافته که در شکل (d)۱۷، این مورد قابل مشاهده است.

۴-۳- انرژی مستهلک شده توسط میراگر پیشنهادی (میراگر تسلیم‌شونده بیضی‌گون):

همانگونه که در شکل ۱۸ تا ۲۰ قابل مشاهده است، بخش عمده ای از انرژی القایی زلزله در سازه توسط عملکرد غیرخطی میراگرهای پیشنهادی مستهلک می‌شود. به عبارت دیگر با به‌کارگیری میراگرها تسلیم‌شونده بیضی‌گون پیشنهادی، محل تشکیل مفاصل پلاستیک از اجزای سازه‌ای (از قبیل ستونها، مهاربندها و تیرها) به میراگرهای تسلیم‌شونده پیشنهادی منتقل شده است.

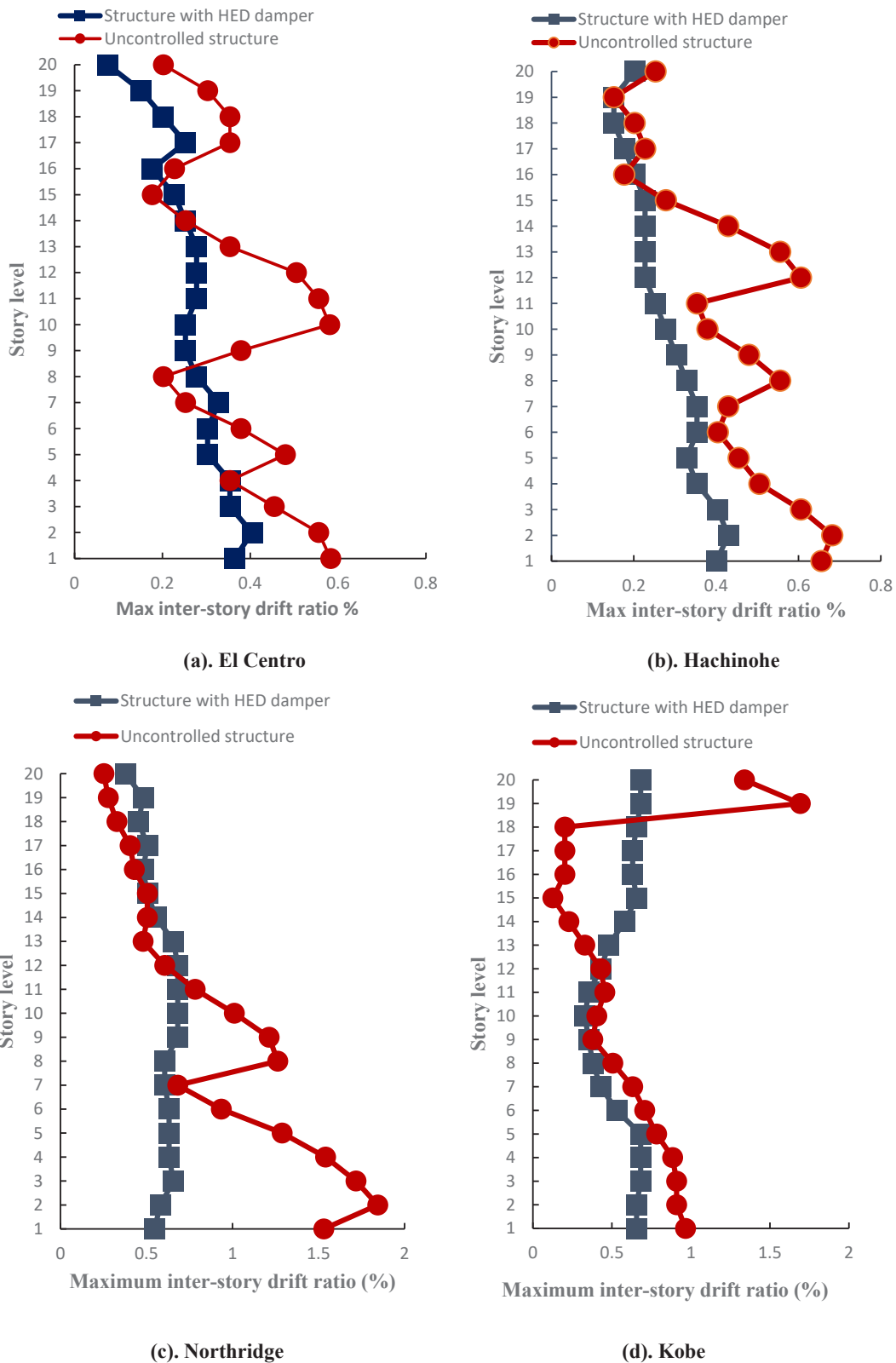
در شکل (a)۱۸، میزان انرژی ورودی به سازه بهسازی شده ساختمان ۳ طبقه مبنا و نیز انرژی مستهلک شده توسط میراگر تسلیم‌شونده پیشنهادی تحت اثر زلزله حوزه دور ال‌سنترو نشان داده شده است در این قسمت از آن شکل می‌توان مشاهده نمود که ۶۷ درصد از انرژی ورودی به سازه بهسازی شده توسط این میراگر تسلیم‌شونده بیضی‌گون مستهلک شده است. همین سازه بهسازی شده تحت اثر زلزله هاجینوهه بوسیله این میراگر تسلیم‌شونده پیشنهادی ۵۷ درصد از انرژی ورودی به این سازه را مستهلک نموده است که در شکل (b)۱۸، دیده می‌شود. میزان استهلاک انرژی ورودی به این سازه ۳ طبقه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک نورث‌ریچ به ۵۵ درصد می‌رسد که در شکل (c)۱۸، نشان داده شده است. در شکل (d)۱۸، می‌توان استهلاک ۶۹ درصدی انرژی ورودی به سازه موردنظر را توسط میراگر بیضی‌گون پیشنهادی مشاهده نمود.

در شکل ۱۹ میزان انرژی ورودی به سازه بهسازی شده ۹ طبقه و نیز میزان استهلاک این انرژی توسط میراگر تسلیم‌شونده بیضی‌گون پیشنهادی نشان داده شده است. در شکل (a)۱۹، این موارد تحت اثر زلزله حوزه دور ال‌سنترو قابل مشاهده است که نشان می‌دهد ۵۷ درصد از انرژی ورودی به این سازه توسط میراگر پیشنهادی مستهلک شده است. میزان استهلاک انرژی ورودی به سازه بهسازی شده توسط میراگر موردنظر تحت اثر زلزله هاجینوهه ۶۲ درصد است که در شکل (b)۱۹، دیده می‌شود. این سازه بهسازی شده که تحت اثر زلزله حوزه نزدیک نورث‌ریچ قرار گرفته است، بوسیله میراگر تسلیم‌شونده پیشنهادی ۶۴ درصد از انرژی ورودی به سازه را مستهلک کرده است که در شکل (c)۱۹، می‌توان این موضوع را مشاهده نمود. مقدار انرژی مستهلک شده از انرژی ورودی به سازه بهسازی شده ۹ طبقه توسط میراگر تسلیم‌شونده پیشنهادی به میزان ۶۶ درصد بوده که در شکل (d)۱۹، قابل مشاهده است.



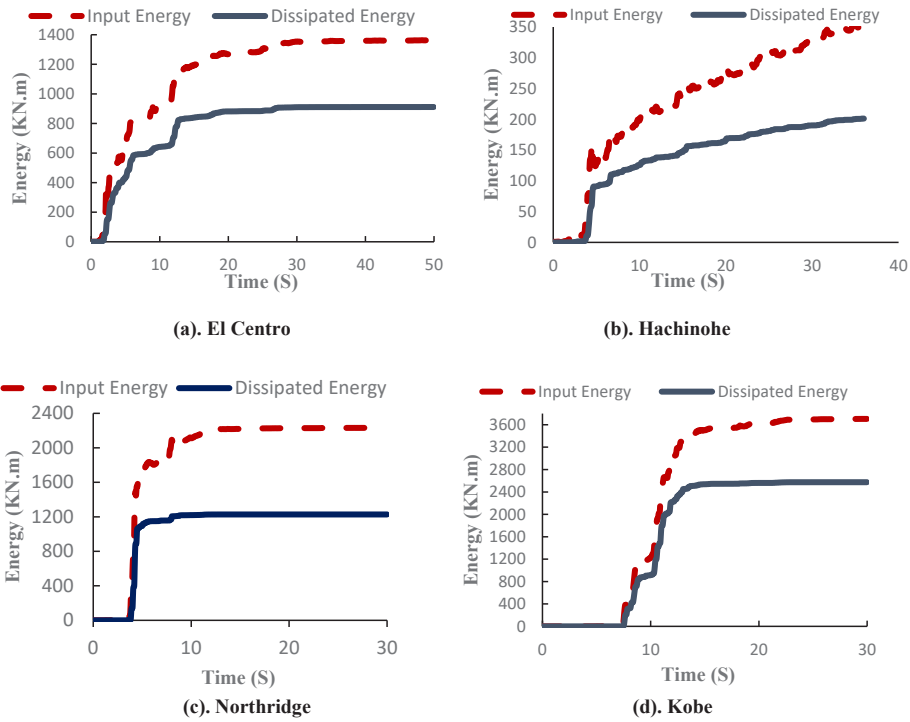
شکل ۱۶. مقایسه درصد نسبت گریز طبقات سازه ۹ طبقه مینا با سازه بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 16. Comparison of percent inter-story drift of the 9-story benchmark structure before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper.



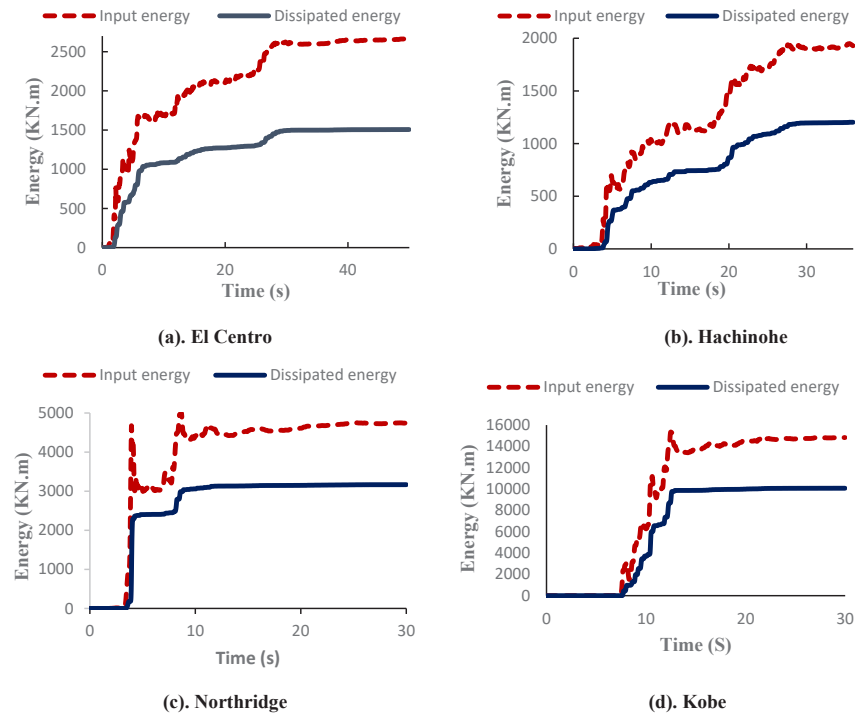
شکل ۱۷. مقایسه درصد نسبت گریز طبقات سازه ۲۰ طبقه مینا با سازه بهسازی شده با میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 17. Comparison of percent inter-story drift of the 20-story benchmark structure before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper.



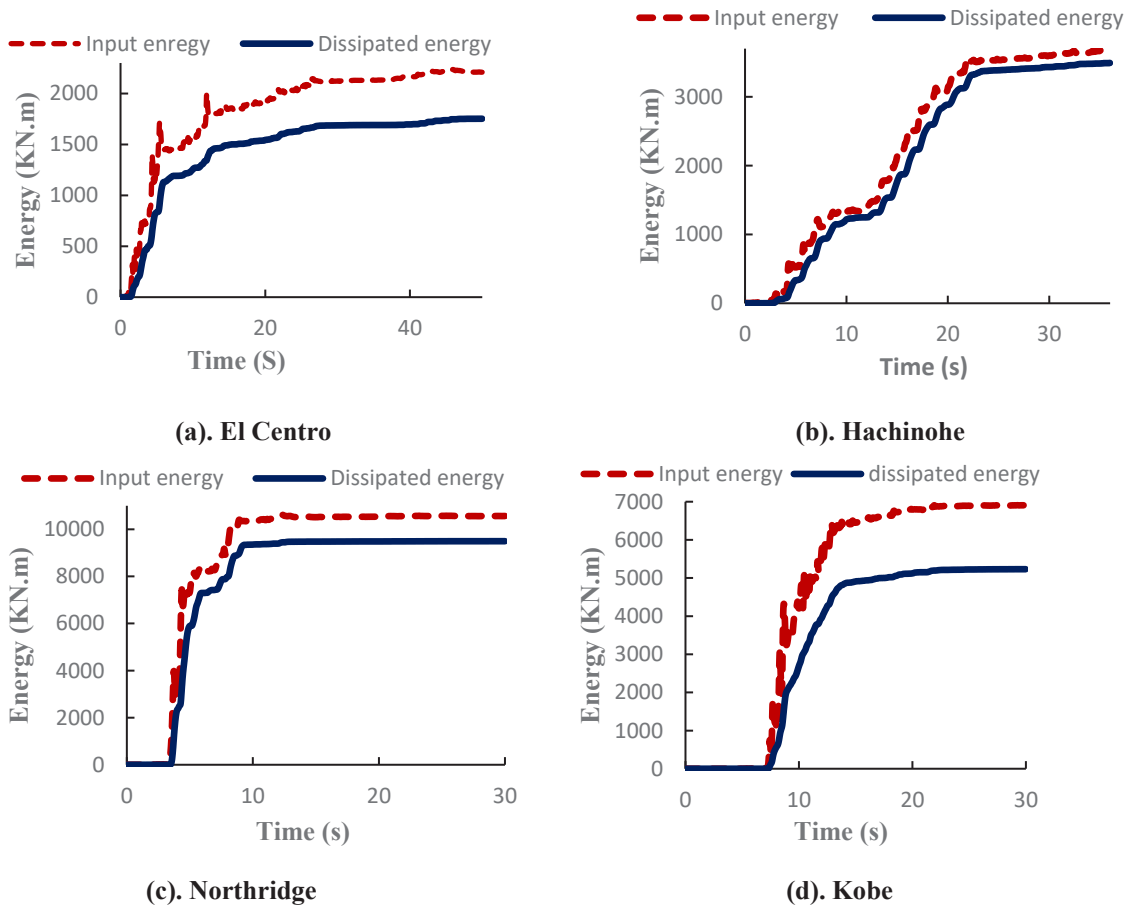
شکل ۱۸. مقایسه انرژی ورودی به سازه ۳ طبقه بهسازی شده و انرژی مستهلک شده توسط میراگر بیضی گون پیشنهادی

18. Comparison of input energy to the 3-story benchmark structure and dissipated energy by the proposed elliptical damper.



شکل ۱۹. مقایسه انرژی ورودی به سازه ۹ طبقه بهسازی شده و انرژی مستهلک شده توسط میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 19. Comparison of input energy to the 9-story benchmark structure and dissipated energy by the proposed elliptical damper.



شکل ۲۰. مقایسه انرژی ورودی به سازه ۲۰ طبقه بهسازی شده و انرژی مستهلک شده توسط میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 20. Comparison of input energy to the 20-story benchmark structure and dissipated energy by the proposed elliptical damper.

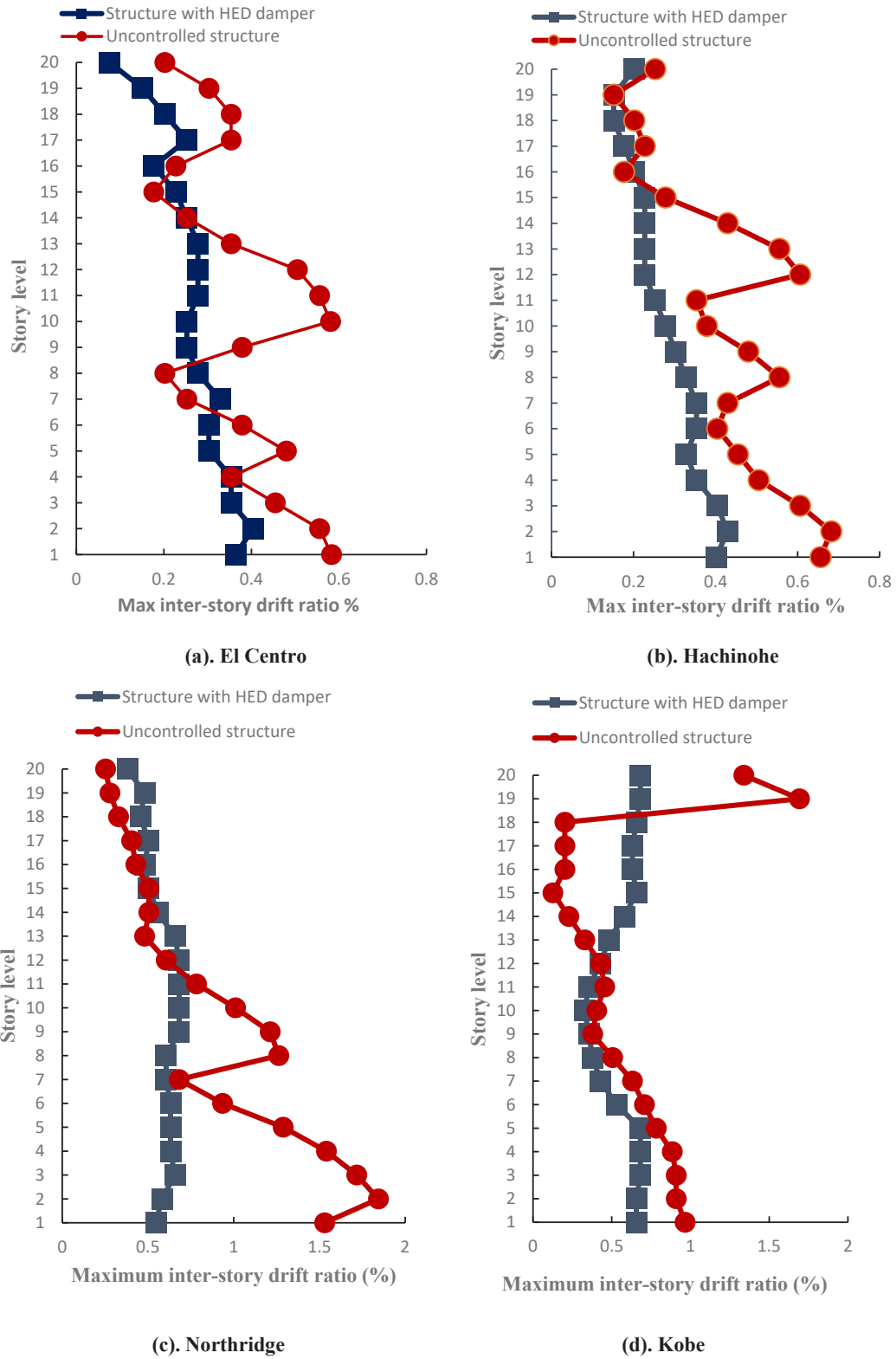
##### ۵- نتیجه گیری:

در این مطالعه با مقایسه منحنی های هیستریزس نیرو-جابجایی بدست آمده از میراگر بیضی گون مدلسازی شده در نرم افزار المان محدودی ABAQUS با نتایج بدست آمده از المان لینک غیر خطی Wen در نرم افزار SAP2000، نزدیکی این منحنی ها با یکدیگر و اطمینان لازم از بابت عملکرد مشابه و مناسب برای بکارگیری این نوع المان برای انجام تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم افزار SAP2000، را می توان مشاهده نمود.

از میان ۱۶ نمونه حلقه های بیضی شکل مدل سازی شده، نتایج نشان داد که استقرار این حلقه های بیضی گون میراگر تسلیم شونده پیشنهادی به صورت افقی و نیز استفاده از نوع SB، که از مقدار پهنای بیشتری برای

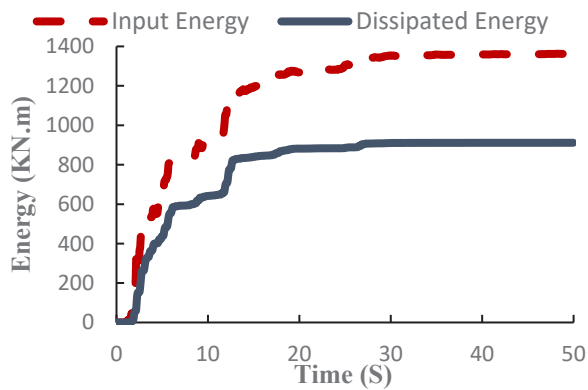
در شکل ۲۰(a)، می توان مشاهده نمود که ۷۹ درصد از انرژی ورودی به سازه ۲۰ طبقه بهسازی شده ساختمان های مینا که تحت اثر زلزله حوزه دور ال سنترو قرار گرفته توسط میراگر تسلیم شونده بیضی گون، مستهلک شده است. مقدار استهلاك انرژی در این سازه بهسازی شده توسط این میراگر پیشنهادی تحت اثر زلزله هاچینوهه به میزان ۹۴ درصد بوده که در شکل ۲۰(b)، قابل مشاهده است. تحت اثر شتابنگاشت زلزله حوزه نزدیک نورثریچ میراگرهای تسلیم شونده این سازه بهسازی شده ۸۹ درصد از انرژی ورودی را مستهلک نموده است که در شکل ۲۰(c)، می توان مشاهده نمود. در شکل ۲۰(d)، مقدار استهلاك انرژی ورودی به این سازه بهسازی شده ۲۰ طبقه، که به میزان ۷۶ درصد از انرژی ورودی به این سازه می باشد، قابل مشاهده است.



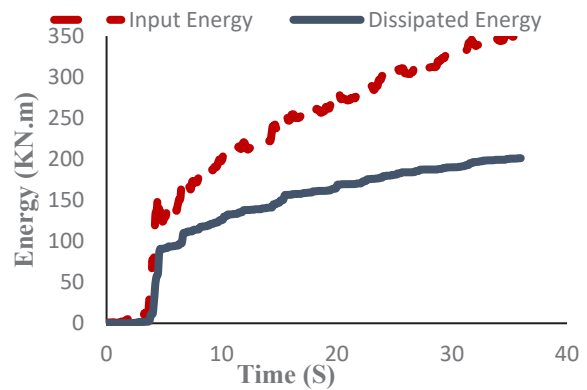


شکل ۱۷. مقایسه درصد نسبت گریز طبقات سازه ۲۰ طبقه مینا با سازه بهسازی شده با میراگر بیضی‌گون پیشنهادی

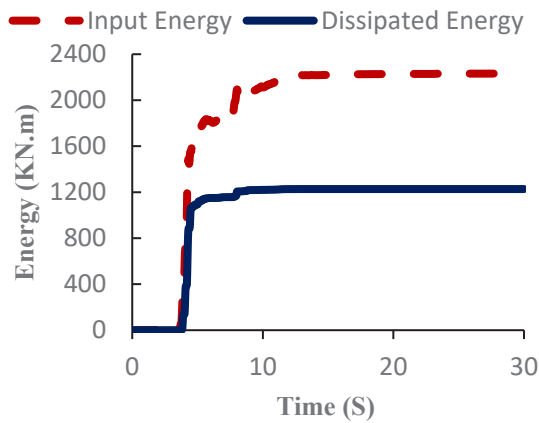
Fig. 17. Comparison of percent inter-story drift of the 20-story benchmark structure before and after rehabilitation with the proposed elliptical damper.



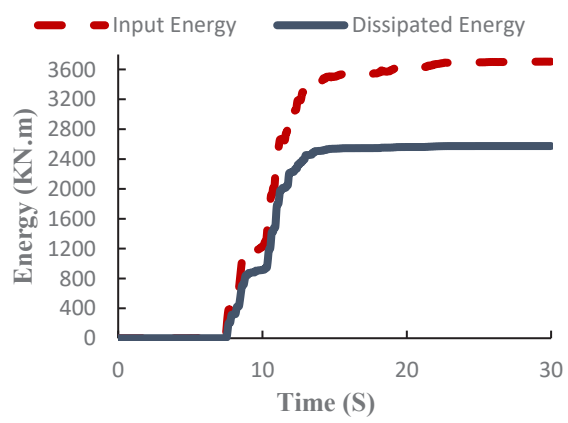
(a). El Centro



(b). Hachinohe



(c). Northridge



(d). Kobe

شکل ۱۸. مقایسه انرژی ورودی و انرژی مستهلک شده توسط میراگر بیضی گون پیشنهادی

Fig. 18. Comparison of input energy to the 3-story benchmark structure and dissipated energy by the proposed elliptical damper.

- pipe damper, International Journal of Steel Structures, 17(3) (2017) 983-998.
- [8] R. Aghlara, M.M. Tahir, A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures, Engineering structures, 159 (2018) 185-197.
- [9] C.L. Lee, Y.P. Wang, M.Y. Cai, Y.T. Kuan, G.H. Huang, An Experimental Verification of Seismic Structural Control: Using In-Plane Oval Dampers, ce/papers, 3(3-4) (2019) 469-474.
- [10] M. Jarrah, H. Khezzadeh, M. Mofid, K. Jafari, Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD), Journal of Constructional Steel Research, 154 (2019) 99-109.
- [11] Z. Li, G. Shu, Z. Huang, Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper, Journal of Constructional Steel Research, 158 (2019) 28-40.
- [12] W. Guo, C. Ma, Y. Yu, D. Bu, C. Zeng, Performance and optimum design of replaceable steel strips in an innovative metallic damper, Engineering Structures, 205 (2020) 110118.
- [13] G. Pachideh, M. Kafi, M. Gholhaki, Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, in: Structures, Elsevier, 2020, pp. 467-481.
- [14] G. Pachideh, M. Gholhaki, R. Lashkari, O. Rezayfar, Behavior of BRB Equipped with a Casing Comprised of Steel and Polyamide, Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, (2020).
- [15] G. Pachideh, M. Gholhaki, M. Kafi, Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper, Steel and Composite Structures, 36(2) (2020) 197.
- [16] Computers and Structures. Inc. CSI Analysis Reference Manual for SAP2000 Ca, Structures I, Berkley, California. 2020.
- [17] M. Ebadi Jamkhaneh, A.H. Ebrahimi, M. Shokri Amiri, Experimental and numerical investigation of steel moment resisting frame with U-shaped metallic yielding این حلقه‌ها برخوردار است، عملکرد بهتر و مقادیر بالاتری از سختی موثر و مقاومت تسلیم را برای این میراگر حاصل می‌آورد.
- با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر اساس رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک، نتایج نشان داد که به‌کارگیری میراگر تسلیم شونده بیضی‌گون پیشنهادی در قاب بهسازی شده با این میراگر، بطور میانگین، میزان حداکثر تغییرمکان جانبی بام در ساختمانهای مبنای ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۶۶، ۶۴ و ۳۱ درصد کاهش یافته است و همچنین بطور میانگین، حداکثر نسبت گریز طبقات در ساختمانهای مبنای کوتاه مرتبه (۳ طبقه)، میان مرتبه (۹ طبقه) و بلند مرتبه (۲۰ طبقه) به ترتیب ۷۱، ۷۸ و ۵۱ درصد کاهش یافته است. میزان استهلاک انرژی ورودی به سازه توسط این میراگر تسلیم شونده بیضی‌گون بطور میانگین در ساختمان‌های مبنای ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب برابر ۶۲، ۶۳، ۸۴ درصد بوده است.

## منابع

- [1] K. Suzuki, A. Watanabe, E. Saeki, Development of U-shaped steel damper for seismic isolation system, Nippon Steel Technical Report, 92 (2005) 56-61.
- [2] J. Franco, X. Cahís, L. Gracia, F. López, Experimental testing of a new anti-seismic dissipator energy device based on the plasticity of metals, Engineering structures, 32(9) (2010) 2672-2682.
- [3] S. Maleki, S. Bagheri, Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study, Journal of Constructional Steel Research, 66(8-9) (2010) 1088-1095.
- [4] S. Maleki, S. Bagheri, Pipe damper, Part II: Application to bridges, Journal of Constructional Steel Research, 66(8-9) (2010) 1096-1106.
- [5] S.M. Zahrai, M. Jalali, Experimental and analytical investigations on seismic behavior of ductile steel knee braced frames, Steel and Composite Structures, 16(1) (2014) 1-21.
- [6] A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames, Journal of Constructional Steel Research, 127 (2016) 120-135.
- [7] S.M. Zahrai, A. Cheraghi, Reducing seismic vibrations of typical steel buildings using new multi-level yielding

- Manual for SAP2000, I. Structures, Berkley, California. 2020., in.
- [21] S.A. Mousavi, S.M. Zahrai, A.A. Pasand, Drift-based seismic design procedure for Buckling Restrained Braced Frames, in: Structures, Elsevier, 2021, pp. 62-74.
- [22] M. Fragiadakis, N.D. Lagaros, M. Papadrakakis, Performance-based multiobjective optimum design of steel structures considering life-cycle cost, Structural and Multidisciplinary Optimization, 32(1) (2006) 1-11.
- damper, International Journal of Steel Structures, 19(3) (2019) 806-818.
- [18] Applied Technology Council. Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. ATC-24. 1992.
- [19] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, in: Journal of engineering mechanics, 2004, pp. 366-385.
- [20] Computers and Structures. Inc. CSI Analysis Reference

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. A. Mohebi, S. M. Zahrai, R. Raoufi, Seismic evaluation of steel structures retrofitted with supplemental elliptical damper, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1677-1700.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21721.7808](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21721.7808)

