



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>




Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Enhancing the Seismic Behavior of Concentrically Braced Frames Using an Innovative Steel Ring Damper

Research Article

Yashar Bakhshayesh¹, Fereshteh Emami² 

DOI: [10.22067/jfcei.2025.88926.1314](https://doi.org/10.22067/jfcei.2025.88926.1314)

1. Introduction

Following the Northridge earthquake (1994), many moment connections in steel structures designed according to the codes of the time suffered severe damage. Extensive studies have been performed to develop new connections with significant plastic behavior, such as: Reduced Beam Section (RBS) connections and End-Plate connections. However, the stringent design criteria for these connections have raised doubts within the engineering community regarding the widespread use of these systems. Also, since the seismic performance of these connections relies on the plastic rotation capacity of beam, repairing damaged structures requires considerable effort and cost after severe earthquakes.

To overcome these problems, energy dissipative systems have been employed to control of damage in the structures. Energy dissipative devices are installed on the structure to increase damping, stiffness and strength. In addition to desirable seismic performance of a structure, ease of implementation and economic consideration are other important parameters that that must be regarded. The primary reason for using energy-dissipating devices in a structure is to dissipate the input seismic energy, thus minimizing damage to structural members. Metallic dampers are the most widely used type of energy-dissipating devices. The energy dissipation mechanism of all metallic dampers is based on nonlinear deformations of metallic materials, and they are generally employed to improve the behavior of concentrically braced frames.

2. Finite-Element (FE) modeling

In this section, details of modeling of FE specimens in Abaqus software are presented. A 3D solid element

(C3D8R) 8-node linear brick element with reduced integration was employed for meshing of the specimens additionally, the fineness of the mesh was investigated to determine an optimal mesh that provides accurate results with reduced computational time. The steel material was modeled based on the von Mises yield criterion and kinematic hardening. Steel with a yield stress of 305 MPa and an ultimate stress of 480 MPa was used for the specimens. Furthermore, a bilinear stress-strain curve for the steel was defined with an elastic modulus of 210 GPa and a Poisson's ratio of 0.3. The specimens were analyzed using General Static Analysis.

3. Results and discussion

Fig. 1 shows the cyclic response of the numerical models. The obtained results indicate that the proposed damper exhibits a stable hysteresis curve without any strength or stiffness degradation, which it can be used as a ductile fuse. Also, Fig. 1 compares the hysteresis curves of the proposed damper with those of a conventional ring damper. As shown, the proposed damper developed fuller hysteresis loops than the traditional ring damper. It should be noted that the asymmetric behavior of the damper in tensile region is due to its difference behavior under tension and compression. The ring damper behavior can be considered similar to a column, where its tensile capacity exceeds its compressive capacity.

* Manuscript received 2024 July 14, Revised 2025 March 11, Accepted 2025 May 12.

¹ Ph. D student, Department of civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, .

² Corresponding author, Assistant Professor, Department of civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. **Email:** f-emami@srbiau.ac.ir

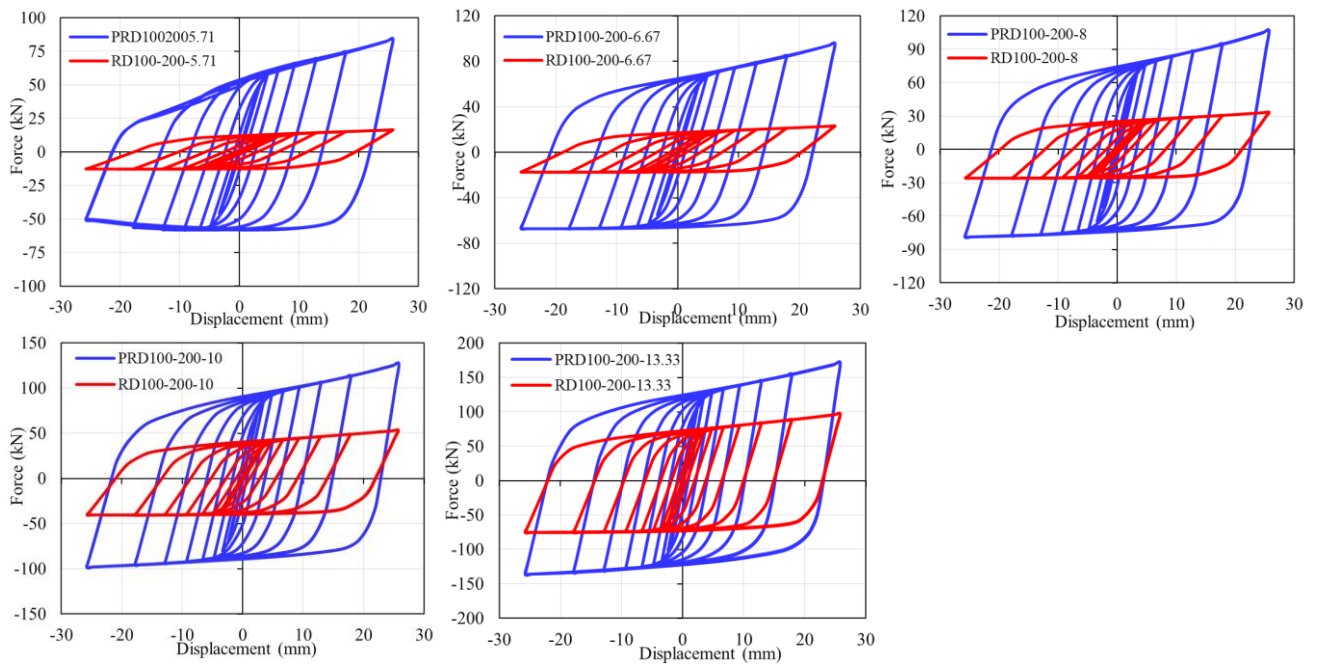


Fig. 1. Hysteresis curve of the proposed damper.

4. Conclusion

This study introduces a novel ring damper to enhance the performance of Concentrically Braced Frames (CBFs). The proposed damper offers ease of fabrication and post-earthquake replacement. First, an experimental model of the ring damper was validated in ABAQUS software to verify its numerical accuracy. Subsequently, a parametric study was conducted on the proposed damper, and its behavior was compared with that of a conventional ring damper. Finally, a numerical investigation was performed to evaluate the impact of the proposed damper on CBFs. The main conclusions are as follows:

1. The proposed damper exhibits stable hysteresis curves with no stiffness or strength degradation. Compared to the conventional ring damper, it develops fuller hysteresis loops, resulting in an average 3.7-fold increase in energy dissipation and 4.3-fold improvement in stiffness.
2. As expected, the diagonal brace model demonstrated poor performance under compressive loads due to brace buckling. In contrast, the braced frame equipped with the proposed damper exhibited symmetric tensile-compressive behavior, significantly enhancing the hysteresis response of the concentrically braced system.
3. The proposed damper improves the energy dissipation capacity of the concentrically braced frame by approximately 28%. Analysis of the Von Mises stress criterion revealed that most brace elements remained elastic, while damage was concentrated in the damper plates. This confirms that the damper acts as a structural fuse.



بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی همگرا با استفاده از یک میراگر حلقه‌ای نوین*

مقاله پژوهشی



فرشته امامی^(۲)

یاشار بخشایش^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2025.88926.1314

چکیده اگر چه مهاربندهای همگرا سختی و مقاومت بالایی دارند، به دلیل کماتش عضو مهاربندی تحت بارهای چرخه‌ای، ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری نامطلوبی دارند. یکی از راهکارهای مناسب برای بهبود رفتار مهاربندها استفاده از میراگرهای فولادی است. بنابراین، در این مقاله، یک میراگر حلقه‌ای فولادی نوین با هدف بهبود عملکرد میراگر حلقه‌ای معمول معرفی می‌شود. به منظور مطالعه رفتار میراگر پیشنهادی ابتدا صحت‌سنجی نمونه آزمایشگاهی انجام شد و سپس رفتار چرخه‌ای میراگر پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. نتایج پاسخ چرخه‌ای نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی دارای منحنی چرخه‌ای پایدار، متقارن و بدون کاهش ناگهانی سختی و مقاومت است. بنابراین می‌توان از آن به عنوان یک عضو شکل‌پذیر استفاده شود. همچنین در مقایسه با میراگر حلقه‌ای معمول، اتلاف انرژی و سختی میراگر پیشنهادی به طور میانگین به ترتیب ۳٫۷ و ۴٫۳ برابر بیشتر است. برای غلبه بر مشکلات مهاربندهای همگرا، میراگر پیشنهادی به مهاربند قطری متصل شد. نتایج نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی با داشتن رفتار چرخه‌ای پایدار و متقارن موجب بهبود منحنی چرخه‌ای مهاربند همگرا شده است و با متمرکز کردن عمده آسیب می‌تواند نقش یک فیوز سازه‌ای را ایفا کند. در نهایت یک تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی جهت مقایسه قاب مهاربندی همگرا با و بدون میراگر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد میراگر پیشنهادی می‌تواند حداکثر برش پایه را به طور میانگین در حدود ۹۴ درصد کاهش دهد. همچنین اضافه کردن میراگر پیشنهادی به قاب مهاربندی همگرا، درینفت برخی طبقات را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی قاب مهاربندی همگرا، میراگر فولادی، رفتار چرخه‌ای، تحلیل چرخه‌ای.

Enhancing The Seismic Behavior of Concentrically Braced Frames Using An Innovative Steel Ring Damper

Yashar Bakhshayesh

Fereshteh Emami

Abstract Although concentric braces have high stiffness and strength, they develop undesirable energy dissipation capacity and ductility due to the bracing member buckling under cyclic loading. Using steel dampers is one of the appropriate methods to improve the braces behavior. Therefore, in this paper, an innovative steel ring damper is introduced with the aim of improving the performance of conventional ring dampers. In order to study the behavior of the proposed damper, first the verification of the experimental specimen was performed, and then the hysteretic behavior of the proposed damper was investigated using Abaqus software. The hysteresis curve results demonstrate that the proposed damper has a stable and symmetric hysteresis curve without stiffness and strength degradation. Therefore, it can be used as a ductile member. Also, in comparison with the conventional ring damper, the energy dissipation and stiffness of the proposed damper are on average 3.7 and 4.3 times greater, respectively. To overcome the disadvantages of concentric braces, the proposed damper was installed on the diagonal brace. The results indicate that the proposed damper, with its stable and symmetric hysteretic behavior, has enhanced the hysteresis curve of the concentric braces and can play a role of a structural fuse due to the concentration of most of the damage. Finally, a nonlinear time-history analysis was conducted to compare the concentrically braced frame with and without a damper. The results show that the proposed damper can decrease the maximum base shear about 94% on average. Also, adding the proposed damper to the concentrically braced frame decreases the story drift of some stories.

Key Words Concentrically Braced Frame, Steel Damper, Hysteretic Behavior, Cyclic Analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۲/۲۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

Email: f-emami@srbiau.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه و زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

مقدمه

پس از زلزله نورث‌ریچ (۱۹۹۴) بسیاری از اتصالات خمشی سازه‌های فولادی که بر اساس آیین‌نامه‌های وقت طراحی شده بودند متحمل خسارات شدیدی شدند. مطالعات گسترده‌ای برای توسعه اتصالات جدید انجام شده است که دارای رفتار غیرارتجاعی قابل توجهی هستند؛ مانند اتصالات با مقطع تیر کاهش یافته (RBS) [1-3] و فلنجی (End-Plate) [4,5]. با این حال معیارهای طراحی سخت‌گیرانه این اتصالات تردیدهایی را برای جامعه مهندسی در مورد استفاده گسترده از این سیستم‌ها به وجود آورده است [6]. همچنین به علت اینکه عملکرد لرزه‌ای این اتصالات بر اساس ظرفیت دوران پلاستیک تیر و ستون می‌باشد، تعمیر سازه آسیب دیده پس از زلزله‌های شدید نیازمند تلاش و هزینه زیادی است [7,8].

برای غلبه بر انواع این مشکلات، سیستم‌های اتلاف کننده انرژی برای کنترل آسیب در سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [9,10]. ابزارهای اتلاف کننده انرژی به منظور افزایش میرایی، سختی و مقاومت سازه بر روی سیستم سازه نصب می‌شوند. علاوه بر عملکرد لرزه‌ای مطلوب یک سیستم در برابر بارهای اعمالی، سهولت اجرا و ملاحظات اقتصادی مسائل مهم دیگری هستند که باید برای کارایی مناسب یک سیستم در نظر گرفته شوند. دلیل اصلی برای استفاده از ابزارهای اتلاف کننده انرژی در یک سازه، اتلاف انرژی ورودی تحریک زلزله است. از این رو می‌توان آسیب وارده به اعضای سازه‌ای را به حداقل رساند. میراگرهای فلزی پرکاربردترین نوع ابزارهای اتلاف کننده انرژی هستند. مکانیزم اتلاف انرژی تمام میراگرهای فلزی بر اساس تغییر شکل‌های غیرخطی مواد فلزی می‌باشد و عمدتاً برای بهبود رفتار قاب‌های مهاربندی همگرا استفاده می‌شوند.

قاب‌های مهاربندی همگرا از جمله سیستم‌های رایج باربر جانبی در سازه‌های فولادی هستند. سختی الاستیک و مقاومت بالا یکی از مزایای قاب‌های مهاربندی همگرا است؛ با این وجود، یکی از معایب آن‌ها، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی پایین آن‌ها در اثر کماتش عضو تحت بارگذاری فشاری است [11-13]. میراگرهای فلزی متعددی برای بهبود رفتار چرخه‌ای قاب‌های مهاربندی همگرا پیشنهاد شده است. از جمله میراگرهای ADAS [14-16]، TADAS [17,18] که انرژی لرزه‌-ای را از طریق تسلیم خمشی ورق‌ها تلف می‌کنند. مهاربند‌های

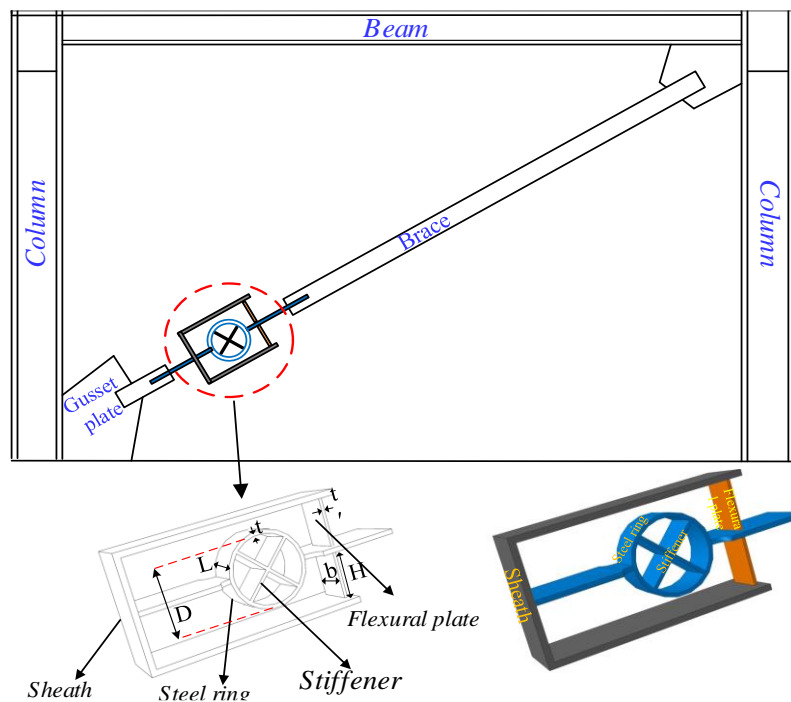
کمانش تاب (BRBs) به منظور حل مشکلات مهاربند‌های همگرا معرفی شدند [19-21]. مهاربند کمانش تاب از یک هسته مرکزی و غلاف پیرامونی تشکیل شده است. هسته مرکزی از طریق تسلیم محوری وظیفه اتلاف انرژی لرزه‌ای را بر عهده دارد و غلاف پیرامونی از کمانش هسته مرکزی جلوگیری می‌کند. اگر چه مهاربند‌های کمانش تاب رفتار چرخه‌ای پایدار و مقارنی دارند و ضعف‌های مهاربند‌های متداول را بر طرف می‌کند، با این وجود استفاده از آن‌ها در ساختمان‌های متداول به دلیل هزینه بالا و مشکلات ساخت و اجرا توجه اقتصادی ندارد. میراگر حلقه‌ای نوع دیگری از میراگرهای فلزی است که همانند میراگر ADAS از طریق تغییر شکل‌های خمشی انرژی لرزه‌ای را اتلاف می‌کند [22]. عباس‌نیا و همکاران [22] برای اولین بار میراگر حلقه‌ای را معرفی کردند. نتایج مطالعه آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که میراگر حلقه‌ای در قاب مهاربندی همگرا از کمانش مهاربند جلوگیری می‌کند و انرژی لرزه‌ای را تلف می‌کند [22]. بزاز و همکاران [23] به صورت عددی رفتار میراگر حلقه‌ای در قاب مهاربندی دروازه‌ای را بررسی کردند. آزندریانی و همکاران [24] به صورت عددی و پارامتریک رفتار میراگر حلقه‌ای را بررسی کردند و روابط لازم برای طراحی آن را ارائه کردند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، آزندریانی و همکاران [25] یک میراگر دوحلقه‌ای جدید را معرفی کردند. آن‌ها یافتند که میراگر پیشنهادی رفتار چرخه‌ای و ظرفیت اتلاف انرژی میراگر حلقه‌ای معمول را بهبود می‌بخشد. معتمدی و همکاران [26] استفاده از میراگر حلقه‌ای در قاب مهاربندی X شکل را پیشنهاد کردند [26]. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی می‌تواند شکل‌پذیری قاب مهاربندی را تقویت کند. احتشامی و همکاران [27] یک میراگر نوین را به منظور استفاده در سیستم مهاربندی معرفی کردند. سیستم پیشنهادی شامل چندین مقطع U شکل فولادی و مکعب‌های لاستیکی بود که به ترتیب نقش اتلاف کننده انرژی و فراهم کننده سختی پس از تسلیم را داشتند [27]. مطالعات متعددی با استفاده از سیستم مهاربندی شورون و میراگر برشی به منظور بهبود رفتار مهاربند‌های همگرا انجام شده است [28-32]. میراگر برشی به طور متداول از یک جان برشی (وظیفه اتلاف انرژی) و دو ورق بال (جهت حفظ پایداری ورق جان) تشکیل شده است.

عمده تفاوت میراگر پیشنهادی با میراگر حلقه‌ای معمول، وجود دو ورق خمشی است که باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای میراگر می‌شود. نمای شماتیک میراگر در قاب مهاربندی همگرا و جزئیات میراگر در شکل (۱) نشان داده شده است. جدار محاط کننده سهمی در تحمل نیروی اعمالی ندارد. با این وجود، از آنجایی که به ورق گاست متصل می‌شود، شرایط مرزی مقید در برابر جابه‌جایی را برای حلقه فولادی و ورق‌های خمشی ایجاد می‌کند. انتظار می‌رود حلقه فولادی، صفحات خمشی و سخت‌کننده‌ها در برابر بار اعمالی مقاومت نشان دهند. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، میراگر معرفی شده برای ساخت و نصب آسان است. از آنجایی که این میراگر را می‌توان در خارج از محل ساختمان بدون نیاز به متخصصان ماهر ساخت و سپس در محل نصب کرد، می‌توان جوش‌های سر بالا را حذف کرد و زمان ساخت و اجرا را کاهش داد. این مزایا باعث می‌شود این میراگر اقتصادی باشد. علاوه بر این، محدود کردن تسلیم در میراگر پیشنهادی منجر به تمرکز آسیب در میراگر می‌شود و اعضای سازه‌ای خارج از میراگر الاستیک باقی خواهند ماند. این موضوع باعث کاهش هزینه‌های تعمیر پس از زلزله‌های شدید می‌شود.

اگر چه میراگرها و مهاربندهای متنوعی به منظور رفع نواقص سیستم مهاربندی همگرا توسعه داده شده‌اند، با این حال دارای مشکلاتی همچون هزینه ساخت بالا، سختی اجرا و سختی تعویض پس از زلزله هستند. از این رو در این مقاله، یک میراگر حلقه‌ای جدید معرفی می‌شود که دارای ساختی آسان است و به راحتی پس از زلزله‌های شدید جایگزین می‌شود. همچنین میراگر پیشنهادی ویژگی‌هایی مانند رفتار پایدار و ظرفیت اتلاف انرژی مطلوب دارد. در ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد و یک مطالعه عددی بر روی میراگر پیشنهادی انجام شد. در نهایت به منظور بررسی اثر میراگر بر رفتار قاب مهاربندی همگرا، دو قاب مهاربندی همگرا با و بدون میراگر تحت تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی قرار گرفتند. در ادامه به معرفی این میراگر و ارائه نتایج به دست آمده از مطالعه عددی انجام شده در این مقاله پرداخته شده است.

معرفی میراگر پیشنهادی هندسه میراگر

اجزای میراگر پیشنهادی شامل یک حلقه فولادی با سخت کننده و دو ورق خمشی است که به وسیله یک جدار محاط می‌شود.



شکل ۱ جزئیات میراگر پیشنهادی

روش طراحی

میراگر پیشنهادی برای جذب و اتلاف انرژی هنگام ورود به منطقه غیرخطی طراحی می‌شود. از سوی دیگر، سیستم متشکل از میراگر و مهاربند قطری باید طوری باشد که تسلیم میراگر، حالت حاکم بر رفتار سیستم باشد. بنابراین میراگر باید به گونه‌ای طراحی شود که شکل‌پذیری و مقاومت خوبی داشته باشد. بر اساس مطالعه آندریانی و همکاران [24] مقاومت تسلیم حلقه فولادی برابر خواهد بود با:

$$P_{\text{Ring}} = \frac{8M_p}{D} \quad (1)$$

که در آن M_p و D به ترتیب لنگر پلاستیک و قطر حلقه فولادی می‌باشد.

با فرض آنکه مفاصل پلاستیک در دو انتهای ورق‌های خمشی تشکیل می‌شود، مقاومت ورق‌های خمشی برابر است با [33]:

$$P_{\text{Plate}} = \frac{2bt^2F_y}{2H} \quad (2)$$

که در آن b عرض ورق‌های خمشی، t ضخامت ورق، H ارتفاع ورق و F_y تنش تسلیم ورق‌ها می‌باشد.

در نهایت مقاومت نهایی میراگر پیشنهادی برابر است با:

$$P_F = P_{\text{Ring}} + P_{\text{plate}} \quad (3)$$

برای اینکه تسلیم میراگر پیشنهادی قبل از کمانش عضو مهاربندی رخ دهد، باید مهاربند بر اساس ظرفیت واقعی میراگر طراحی شود تا الاستیک باقی بماند. بدین منظور باید رابطه زیر محقق گردد:

$$P_F \leq \Phi P_n \quad (4)$$

که در آن P_F مقاومت میراگر بر اساس معادله (۳) و P_n مقاومت فشاری اسمی اعضای فشاری و Φ ضریب کاهش مقاومت فشاری مطابق با AISC360-16 [34] می‌باشد.

مطالعه عددی

مدل‌سازی المان محدود

در این بخش، جزئیات مدل‌سازی المان محدود نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس [35] ارائه شده است. به منظور مش‌بندی دقیق این نمونه‌ها، از المان Solid سه‌بعدی (C3D8R) که یک المان مکعبی هشت‌گره‌ای خطی با انتگرال کاهش یافته است، استفاده

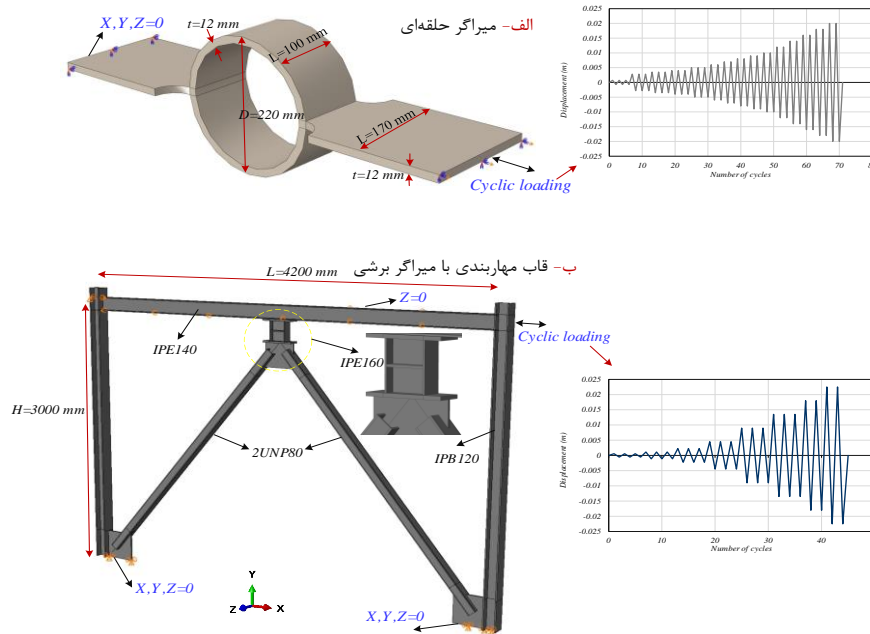
شد [35]. همچنین، میزان ریز بودن المان‌ها نیز برای تعیین یک مش بهینه که نتایج دقیق را با زمان محاسباتی کمتر فراهم می‌کند، مورد بررسی قرار گرفت. مصالح فولاد بر اساس معیار تسلیم وون مایسز و سخت‌شوندگی کینماتیک مدل‌سازی شد [35]. از فولاد با تنش تسلیم ۳۰۵ MPa و تنش نهایی ۴۸۰ MPa برای نمونه‌های مطابق با مطالعه عباس‌نیا و همکاران [22] استفاده شد. علاوه بر این، منحنی تنش - کرنش فولاد دوخطی با مدول الاستیسیته ۲۱۰ GPa و نسبت پواسن ۰/۳ تعریف شد. برای تحلیل نمونه‌ها از تحلیل استاتیک جنرال (General Static) استفاده شد [35]. همچنین به منظور در نظر گرفتن امکان رفتار غیرخطی و احتمال تغییر شکل‌های بزرگ، غیرخطی‌های هندسی در نظر گرفته شد [35]. به منظور وقوع کمانش به ویژه در مدل‌های مهاربند، نقص اولیه در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. بدین منظور، ابتدا یک تحلیل الاستیک کمانش انجام شد و سپس مود اول هر نمونه در نظر گرفته شد [35].

صحت‌سنجی مدل‌های المان محدود

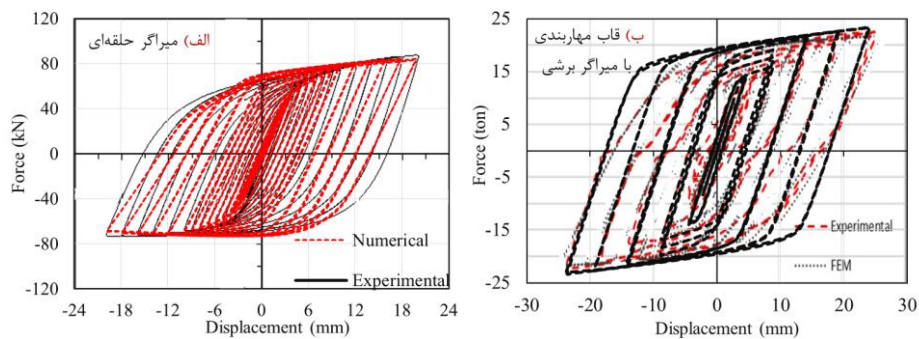
در این بخش، صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی برای ارزیابی دقت مدل‌های المان محدود میراگر پیشنهادی انجام می‌شود. نمونه CT20 از میراگرهای حلقه‌ای آزمایش شده توسط عباس‌نیا و همکاران [22] و نمونه SPS1 از قاب‌های مهاربندی با میراگر برشی مطالعه زهرایی [30] برای تأیید نتایج مدل‌سازی المان محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای انتخاب شدند. جزئیات هندسی، شرایط مرزی و پروتکل بارگذاری نمونه‌ها در شکل (۲) آورده شده‌اند. به طور مثال در نمونه میراگر حلقه‌ای، مطابق با شرایط آزمایشگاه یک انتهای میراگر در برابر جابه‌جایی مقید شد و به انتهای دیگر آن بارگذاری اعمال شد [22]. شکل (۳) پاسخ چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی را مقایسه می‌کند. همان‌طور که نشان داده شده است، نمونه عددی با دقت مناسبی رفتار نمونه آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرده است. مطالعات گذشته پیشنهاد کرده‌اند که کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) برای ارزیابی آسیب نمونه‌های آزمایشگاهی مناسب است [24,25]. از این رو در این مطالعه، کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) به منظور بررسی نواحی شکست در مدل‌های عددی استفاده شد [35]. در شکل (۴) حالت شکست مدل المان محدود و نمونه آزمایشگاهی [22] مقایسه شده است. همان

دست آمده از مدل‌سازی المان محدود با نتایج آزمایشگاهی دارای تطابق خوبی هستند. بنابراین مدل‌های المان محدود برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای میراگر پیشنهادی قابل اعتماد هستند.

طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، بیشترین کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در ناحیه‌هایی رخ داد که با نواحی شکست آزمایش سازگار است. پاسخ چرخه‌ای و تغییر شکل به



شکل ۲ جزئیات هندسی، شرایط مرزی و پروتکل بارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی: (الف) میراگر حلقه‌ای [22] و (ب) قاب مهاربندی با میراگر برشی [30]



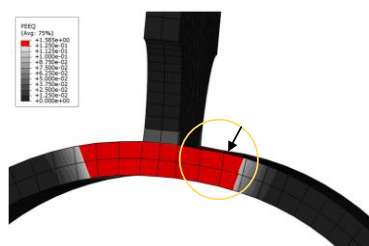
شکل ۳ مقایسه نمودار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی: (الف) میراگر حلقه‌ای [22] و (ب) قاب مهاربندی با میراگر برشی [30]

SRD

(a) Experimental result



(b) Numerical result

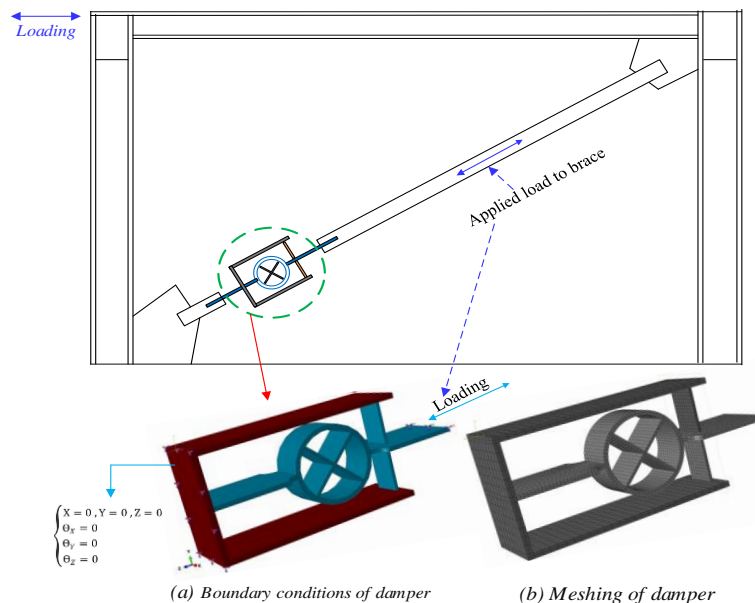


شکل ۴ مقایسه نواحی آسیب نمونه آزمایشگاهی [22] و عددی

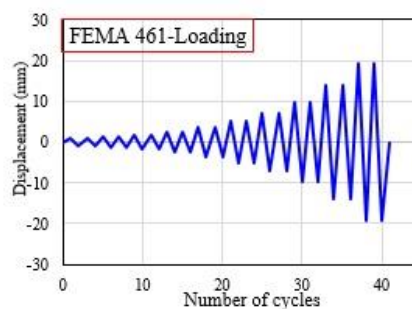
جزئیات مدل‌های عددی

میراگر حلقه‌ای معمول RD نام‌گذاری شد. همچنین اعداد آورده شده بعد از PRD و RD به ترتیب معرف طول حلقه میراگر (L)، قطر حلقه میراگر (D) و نسبت قطر به ضخامت حلقه (D/t) می‌باشد (شکل ۱). لازم به ذکر است بقیه پارامترها در بخش ۲،۲ معرفی شدند. مبنای انتخاب ابعاد حلقه فولادی بر اساس مطالعه گذشته بود [22,24]. به طور مثال، قطر و طول حلقه فولادی مشابه نمونه آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده در بخش ۳،۲ می‌باشد. همچنین به منظور ملاحظات معماری، ارتفاع ورق‌های خمشی به گونه‌ای انتخاب شدند که منجر به ارتفاع زیاد جدار نشود. بنابراین، ارتفاع جدار نباید تفاوت چندانی با قطر حلقه داشته باشد. بدین منظور جدار از هر طرف (بالا و پایین) در حدود ۳ سانتی‌متر با حلقه فولادی فاصله داشت. همچنین فرض می‌شود که عرض ورق‌های خمشی برابر طول حلقه فولادی است.

این بخش به معرفی جزئیات مدل‌سازی عددی و نمونه‌های مطالعه پارامتریک می‌پردازد. شکل (۵) مش‌بندی مدل المان محدود میراگر پیشنهادی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵) شرایط مرزی و محل بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است. شرایط مرزی برای حالتی که میراگر در قاب مهاربندی قرار دارد اعمال شد. بدین منظور صفحه جدار محاط‌کننده میراگر در برابر جابه‌جایی و دوران محدود شد. علاوه بر این، بارگذاری بر روی ورق اتصالی به مهاربند اعمال شد. بارگذاری چرخه‌ای از نوع جابه‌جایی بر اساس پروتکل بارگذاری FEMA-461 [36] به نمونه‌ها اعمال شد (شکل ۶). حداکثر جابه‌جایی اعمالی به نمونه‌ها مطابق با مطالعه آزندریانی و همکاران [24]، ۰٫۱۳D در نظر گرفته شد. مشخصات مدل‌های عددی در جدول (۱) آورده شده است. از نام‌های مخفف برای نام‌گذاری نمونه‌ها استفاده شد. به طوری که نمونه میراگر حلقه‌ای پیشنهادی PRD و



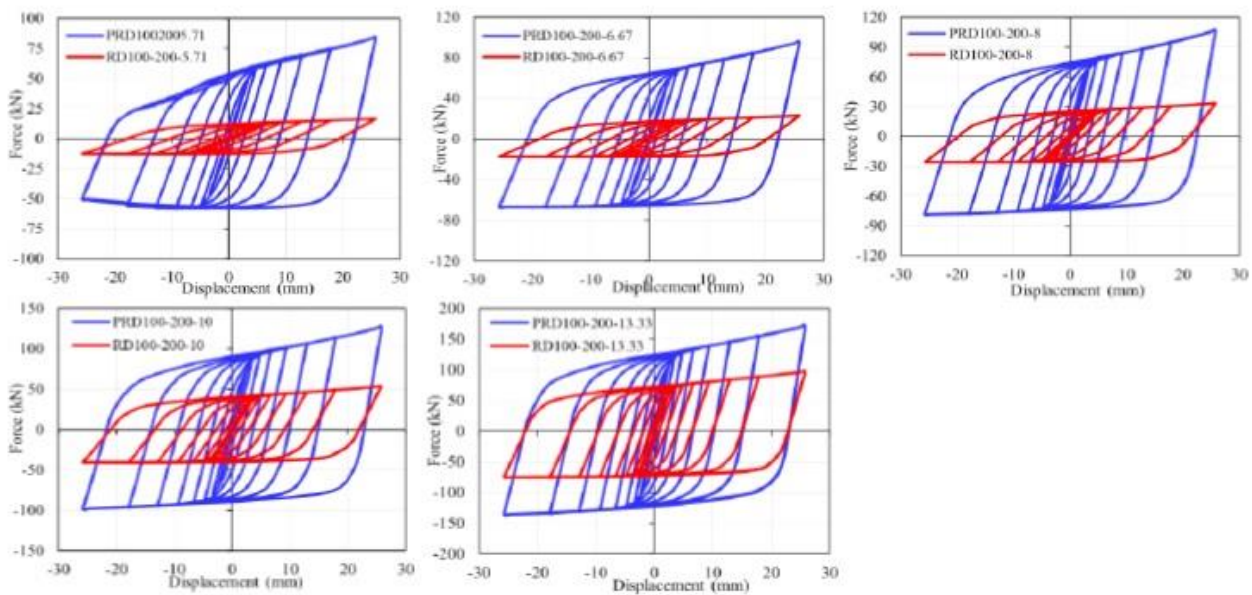
شکل ۵ مش‌بندی و شرایط مرزی مدل عددی میراگر پیشنهادی



شکل ۶ پروتکل بارگذاری FEMA-461 [36]

جدول ۱. ابعاد مدل‌های عددی

نمونه‌ها	ابعاد میراگر حلقه‌ای پیشنهادی (mm)							نمونه‌ها	ابعاد میراگر حلقه‌ای معمول (mm)			
	L	D	t	D/t	H	b	t'		L	D	t	D/t
PRD100-200-5.71	100	200	5.71	35	129	100	8	RD100-200-5.71	100	200	5.71	35
PRD100-200-6.67	100	200	6.67	30	129	100	8	RD100-200-6.67	100	200	6.67	30
PRD100-200-8	100	200	8	25	129	100	8	RD100-200-8	100	200	8	25
PRD100-200-10	100	200	10	20	129	100	8	RD100-200-10	100	200	10	20
PRD100-200-13.33	100	200	13.33	15	129	100	8	RD100-200-13.33	100	200	13.33	15

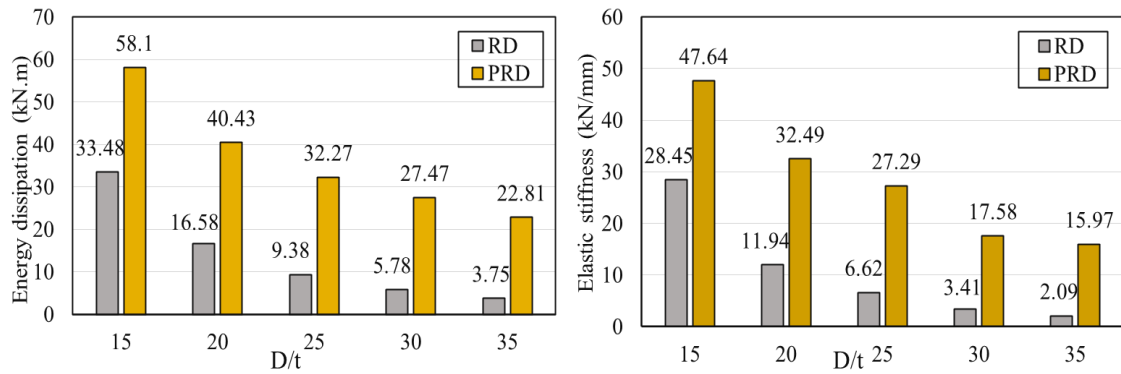


شکل ۷. منحنی چرخه‌ای میراگر پیشنهادی

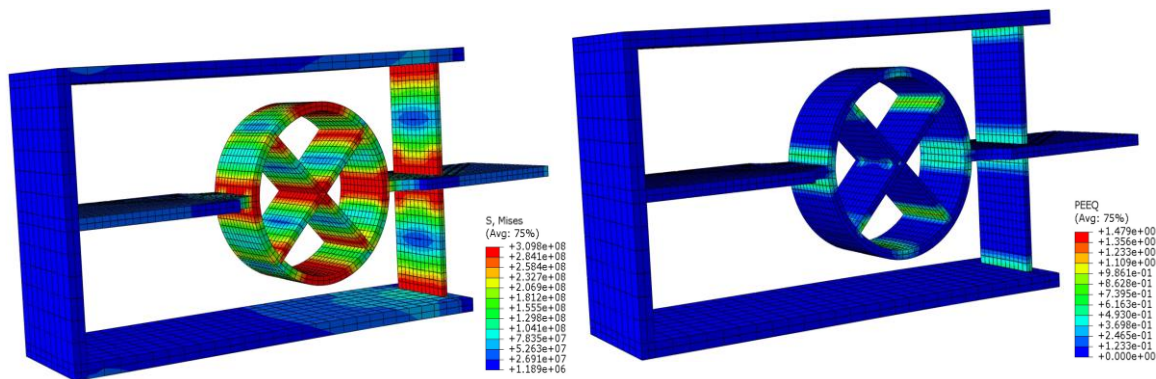
کشش و فشار است [24,25]. رفتار حلقه فولادی را می‌توان با مشابه یک ستون در نظر گرفت که ظرفیت کششی آن بیشتر از ظرفیت فشاری است [24,25]. در شکل (۸) ظرفیت اتلاف انرژی و سختی دو میراگر آورده شده است. مطابق شکل، میراگر پیشنهادی به طور میانگین باعث افزایش ۳٫۷ برابر اتلاف انرژی و ۴٫۳ برابر سختی نسبت به میراگر حلقه‌ای معمول شده است. لازم به ذکر است که در هر دو نوع میراگر، با افزایش نسبت D/t اتلاف انرژی و سختی کاهش می‌یابد. کانتور تنش ون مایسز و کرنش پلاستیک معادل PEEQ میراگر پیشنهادی در شکل (۹) نشان داده شده است. مطابق انتظار حلقه فولادی و ورق‌های خمشی وارد ناحیه پلاستیک شده‌اند و هیچ رفتار غیرخطی در جداره و ورق‌های اتصال مشاهده نشد.

تحلیل و بررسی نتایج رفتار چرخه‌ای

شکل (۷) پاسخ چرخه‌ای مدل‌های عددی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از منحنی چرخه‌ای نشان می‌دهد که میراگر پیشنهادی دارای منحنی‌های چرخه‌ای پایدار، بدون هیچ کاهش ناگهانی سختی و مقاومت هستند. بنابراین می‌توان از میراگر پیشنهادی به عنوان یک فیوز شکل‌پذیر استفاده کرد. همچنین در شکل (۷) مقایسه بین منحنی چرخه‌ای میراگر پیشنهادی و میراگر حلقه‌ای معمول آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، میراگر پیشنهادی دارای حلقه‌های چرخه‌ای چاق‌تری نسبت به میراگر معمول است و باعث افزایش سختی و مقاومت میراگر شده است. لازم به ذکر است که رفتار غیرمقارن میراگر در ناحیه کششی، به علت تفاوت رفتاری حلقه فولادی در



شکل ۸ ظرفیت اتلاف انرژی و سختی الاستیک میراگر پیشنهادی



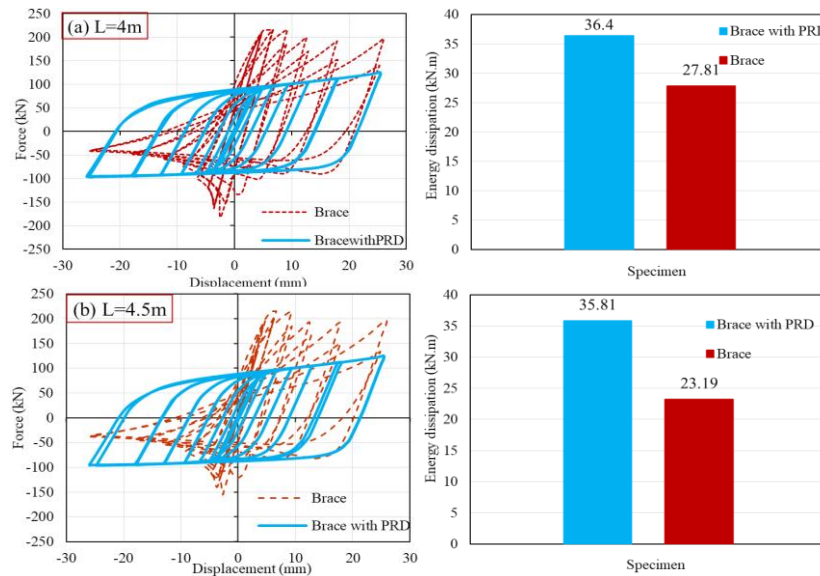
شکل ۹ کانتور تنش مایسز (Pa) میراگر پیشنهادی

غیرشکل‌پذیر مهاربند همگرا است. اما بر خلاف مهاربندهای همگرا، مهاربندهای مجهز شده به میراگر پیشنهادی با داشتن حلقه‌های چرخه‌ای پایدار و رفتار متقارن در کشش و فشار، دارای رفتاری شکل‌پذیر است.

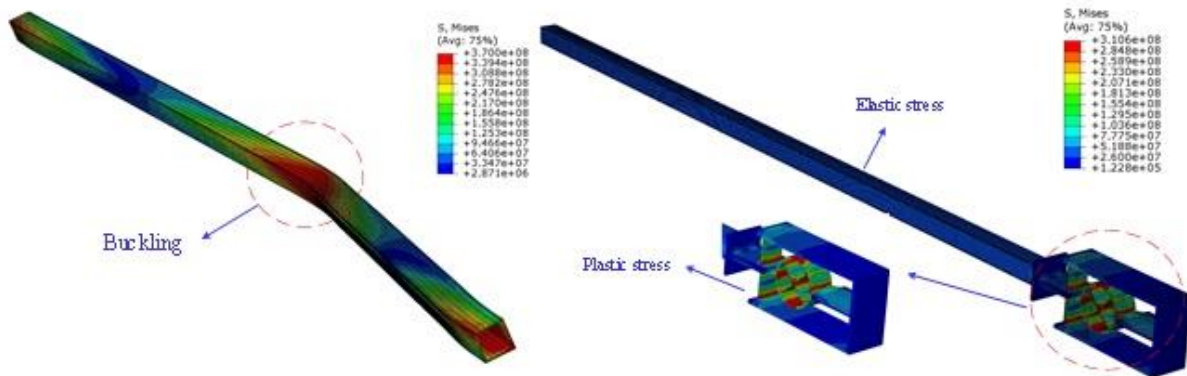
شکل (۱۱) توزیع تنش مایسز و تغییر شکل مدل‌های مهاربند در انتهای بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، در مدل مهاربند قطری اثر المان‌ها دچار تسلیم شده‌اند و تمرکز تنش در ناحیه کماتش کرده مهاربند مشاهده می‌شود. با این حال، در مدل مهاربند با میراگر، میراگر حلقه‌ای از کماتش مهاربند جلوگیری می‌کند و عمده تسلیم در ورق‌های میراگر دیده می‌شود. به عبارت دیگر مهاربند در طی بارگذاری چرخه‌ای الاستیک باقی می‌ماند و میراگر پیشنهادی با متمرکز کردن عمده آسیب می‌تواند به عنوان فیوز سازه‌ای عمل کند.

بهبود رفتار مهاربند همگرا

در این قسمت به منظور بررسی تأثیر میراگر پیشنهادی بر روی رفتار مهاربندهای همگرا یک مطالعه عددی انجام شده است. بدین منظور مدل‌های مورد مطالعه تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق با پروتکل بارگذاری ذکر شده در بخش ۳،۳ قرار گرفتند. لازم به ذکر است که جزئیات مدل‌سازی مهاربندها مطابق با بخش ۳،۱ می‌باشد. به منظور مقایسه مهاربندها، از مقطع باکس با عرض ۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر به طول‌های ۴ متر و ۴،۵ متر برای مدل‌سازی مهاربندها استفاده شد. در شکل (۱۰) منحنی چرخه‌ای نمونه مهاربند با میراگر با نمونه مهاربند قطری مقایسه شده است. مطابق شکل (۱۰) قابلیت ارزشمند میراگر پیشنهادی برای تقویت منحنی چرخه‌ای مهاربندهای همگرا نشان داده شده است. بررسی حلقه‌های پاسخ چرخه‌ای نمونه‌های مهاربند قطری نشان دهنده عدم تقارن در رفتار کششی و فشاری به علت کماتش مهاربند است که تصدیق‌کننده رفتار



شکل ۱۰ مقایسه منحنی هیستریزیس مهاربند قطری با و بدون میراگر پیشنهادی



شکل ۱۱ مقایسه تنش‌ها و تغییر شکل مهاربند قطری با و بدون میراگر پیشنهادی

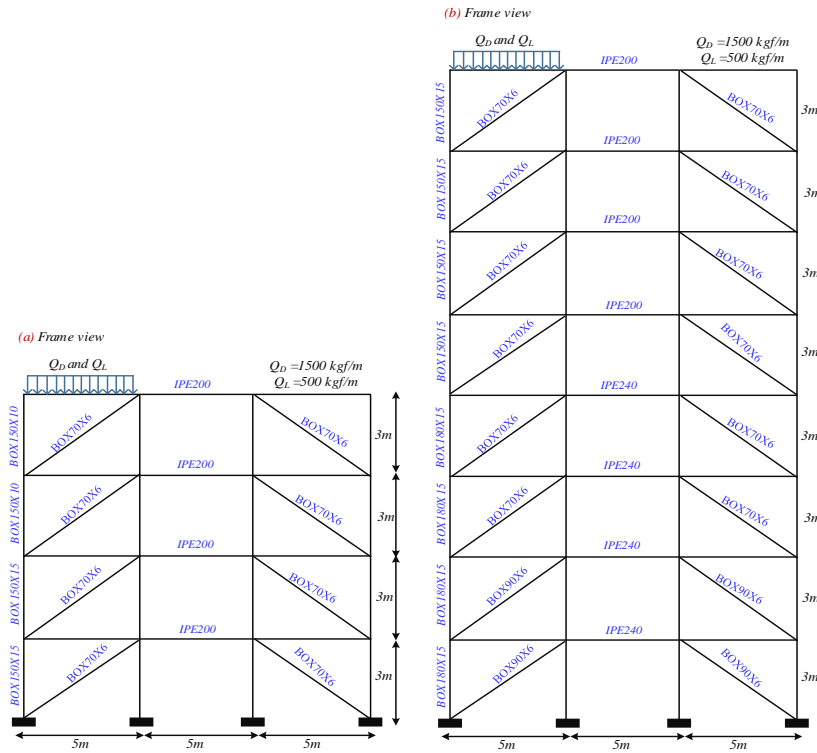
اثرات غیرخطی، از مفاصل متمرکز مطابق با نشریه FEMA-356 [39] استفاده شد. همچنین برای مدل‌سازی غیرخطی میراگر از المان غیرخطی لینک استفاده شد [38]. شکل (۱۳) قاب مدل‌سازی شده با المان لینک را نشان می‌دهد [38]. به منظور اطمینان از نتایج حاصل از نرم‌افزار SAP2000، یک مدل از میراگر در نرم‌افزار فوق مدل‌سازی گردید و نتایج آن با نرم‌افزار آباکوس مقایسه شد. شکل (۱۴) مقایسه منحنی هیستریزیس بین دو نرم‌افزار را نشان می‌دهد. مطابق شکل، دو منحنی دارای تطابق مناسبی هستند. تفاوت جزئی بین پاسخ‌ها را می‌توان به رویکرد متفاوت دو نرم‌افزار در مدل‌سازی نسبت داد. مطالعات متعددی از رکوردهای پیشنهادی FEMA-P695 به منظور انجام تحلیل‌های لرزه‌ای استفاده کرده‌اند [40-42]. از این رو، برای انتخاب رکوردهای زلزله در این مطالعه، از رکوردهای پیشنهادی حوزه دور FEMA-P695 [43] استفاده

تحلیل تاریخیچه‌زمانی غیرخطی

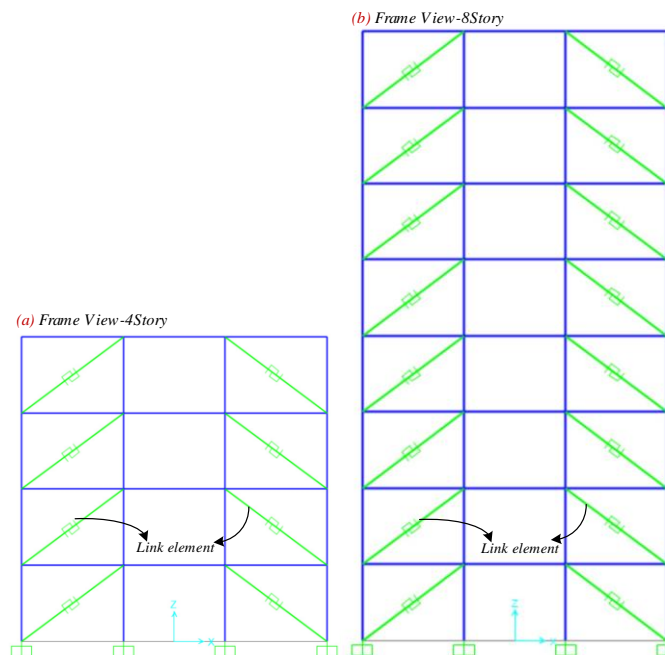
به منظور بررسی اثر میراگر پیشنهادی بر روی رفتار قاب‌های مهاربندی همگرا، دو قاب ۴ طبقه و ۸ طبقه انتخاب شدند. قاب انتخابی دارای سه دهانه به طول ۴ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر است. شکل (۱۲) قاب مهاربندی را نشان می‌دهد. فرض شده است که قاب انتخابی در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا و خاک نوع ۲ مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [37] قرار گرفته است. به منظور طراحی این قاب از آیین‌نامه AISC360-16 [34] استفاده شد. بارگذاری شامل بار مرده 1500 kgf/m و بار زنده 500 kgf/m می‌باشد. مشخصات مقاطع دو قاب در شکل (۱۲) آورده شده است. لازم به ذکر است اتصال تیر به ستون به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است. به منظور انجام تحلیل تاریخیچه‌زمانی غیرخطی از نرم‌افزار SAP2000 [38] استفاده شده است. به منظور در نظر گرفتن

طیف میانگین رکوردها با طیف طرح آیین‌نامه مقایسه گردید و ضرایب مقیاس به دست آمد. ضریب مقیاس زلزله‌ها در جدول (۳) آورده شده است. همچنین شکل (۱۵) طیف شتاب رکوردها و طیف طراحی آیین‌نامه را نشان می‌دهد.

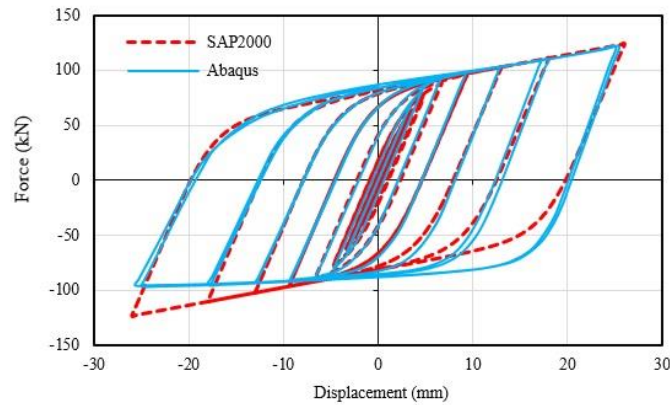
شد. مشخصات رکوردهای انتخابی در جدول (۲) آورده شده است. رکوردهای انتخابی مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [37] مقیاس شدند. به دلیل تحلیل دوبعدی قاب‌ها، در هر زلزله انتخابی از مؤلفه افقی با حداکثر شتاب بزرگ‌تر استفاده شد [37]. سپس



شکل ۱۲ نمای قاب مهاربندی همگرا و مشخصات مقاطع



شکل ۱۳ قاب مهاربندی با میراگر مدل‌سازی شده با المان لینک



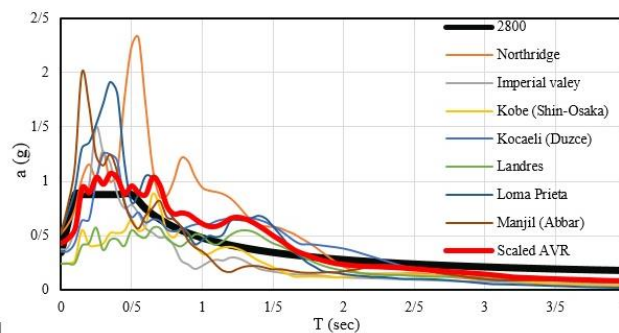
شکل ۱۴ مقایسه منحنی هیستریزس نرم افزار سپ (SAP2000) و آباکوس (Abaqus)

جدول ۲ اطلاعات رکوردهای انتخابی

نام زلزله و سال وقوع	ایستگاه	PGA (g)	بزرگا (Mw)
Imperial Valley, 1979	El Centro Array	0/38	6/7
Kobe (Japan), 1995	Shin-Osaka	0/24	6/9
Loma Prieta, 1989	Capitola	0/53	6/9
Landers, 1992	Yermo Fire Station	0/25	7/3
Kocaeli (Turkey), 1999	Duzce	0/36	7/5
Northridge, 1994	Beverly hills	0/52	6/7
Manjil, 1990	Abbar	0/51	7/4

جدول ۳ ضریب مقیاس رکوردهای زلزله

نام زلزله	ضریب مقیاس قاب ۴ طبقه	ضریب مقیاس قاب ۸ طبقه
Imperial Valley, 1979	0/69	0/58
Kobe (Japan), 1995	3/24	2/13
Loma Prieta, 1989	0/86	0/61
Landers, 1992	3/5	2/36
Kocaeli (Turkey), 1999	0/71	0/82
Northridge, 1994	0/31	0/42
Manjil, 1990	0/45	0/57

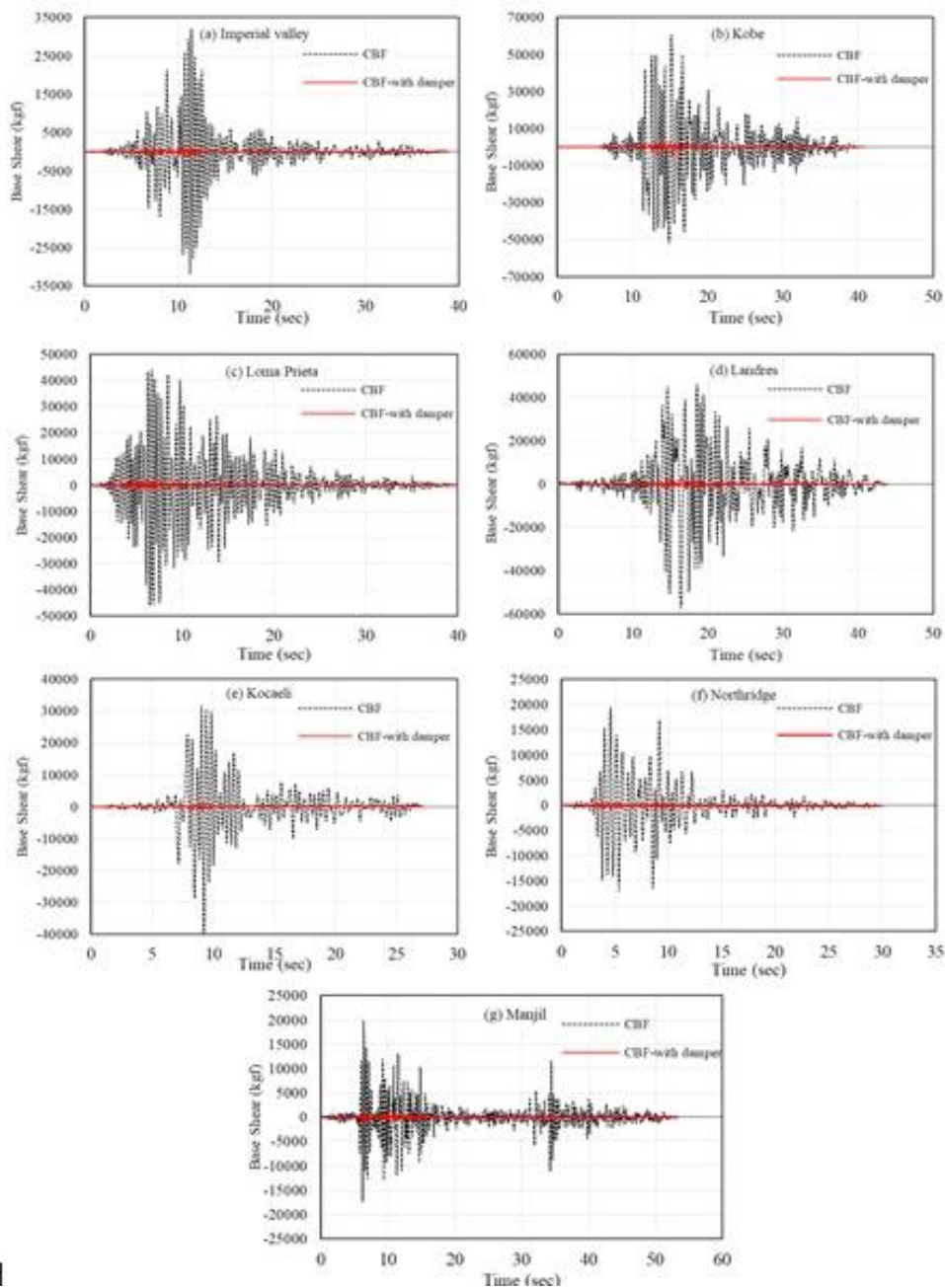


شکل ۱۵ طیف شتاب رکوردهای انتخابی و آیین نامه

نتایج تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی

مطابق جدول (۴) بیشینه برش پایه قاب ۴ طبقه در رکوردهای مختلف زلزله بین ۹۱ تا ۹۷ درصد کاهش پیدا کرده است (حدود ۹۵ درصد میانگین). همچنین مطابق جدول (۵) بیشینه برش پایه قاب ۸ طبقه در رکوردهای مختلف زلزله بین ۸۴ تا ۹۲ درصد کاهش پیدا کرده است (۸۸ درصد میانگین). می‌توان نتیجه گرفت که میراگر پیشنهادی برش پایه قاب مهاربندی ۴ طبقه را بیشتر کاهش داده است. در نهایت مجهز کردن قاب مهاربندی همگرا به میراگر پیشنهادی منجر به کاهش برش پایه و بهبود عملکرد سازه‌ای می‌شود.

پس از انجام تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی، تاریخچه برش پایه تحت زلزله‌های مختلف برای قاب مهاربندی همگرا بدون میراگر و با میراگر استخراج گردید. شکل (۱۶) مقایسه تاریخچه‌زمانی برش پایه در دو قاب مهاربندی ۴ طبقه را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با اضافه شدن میراگر به قاب مهاربندی، تاریخچه برش پایه به شکل چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. به منظور مقایسه بهتر، بیشینه برش پایه قاب مهاربندی همگرای ۴ و ۸ طبقه به ترتیب در جدول (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۶ مقایسه تاریخچه برش پایه قاب مهاربندی همگرای ۴ طبقه با و بدون میراگر

جدول ۴ بیشینه برش پایه قاب ۴ طبقه

زلزله	قاب مهاربندی همگرا (kgf)	قاب مهاربندی همگرا مجهز به میراگر پیشنهادی (kgf)	(%) کاهش
Imperial Valley	32156	1431	95/55
Kobe	60767	5012	91/75
Loma Prieta	46132	2101	95/45
Landers	57257	3665	93/59
Kocaeli	42715	1265	97/04
Northridge	19422	623	96/79
Manjil	19851	1324	94/34
Average	39757	2174	94/93

جدول ۵ بیشینه برش پایه قاب ۸ طبقه

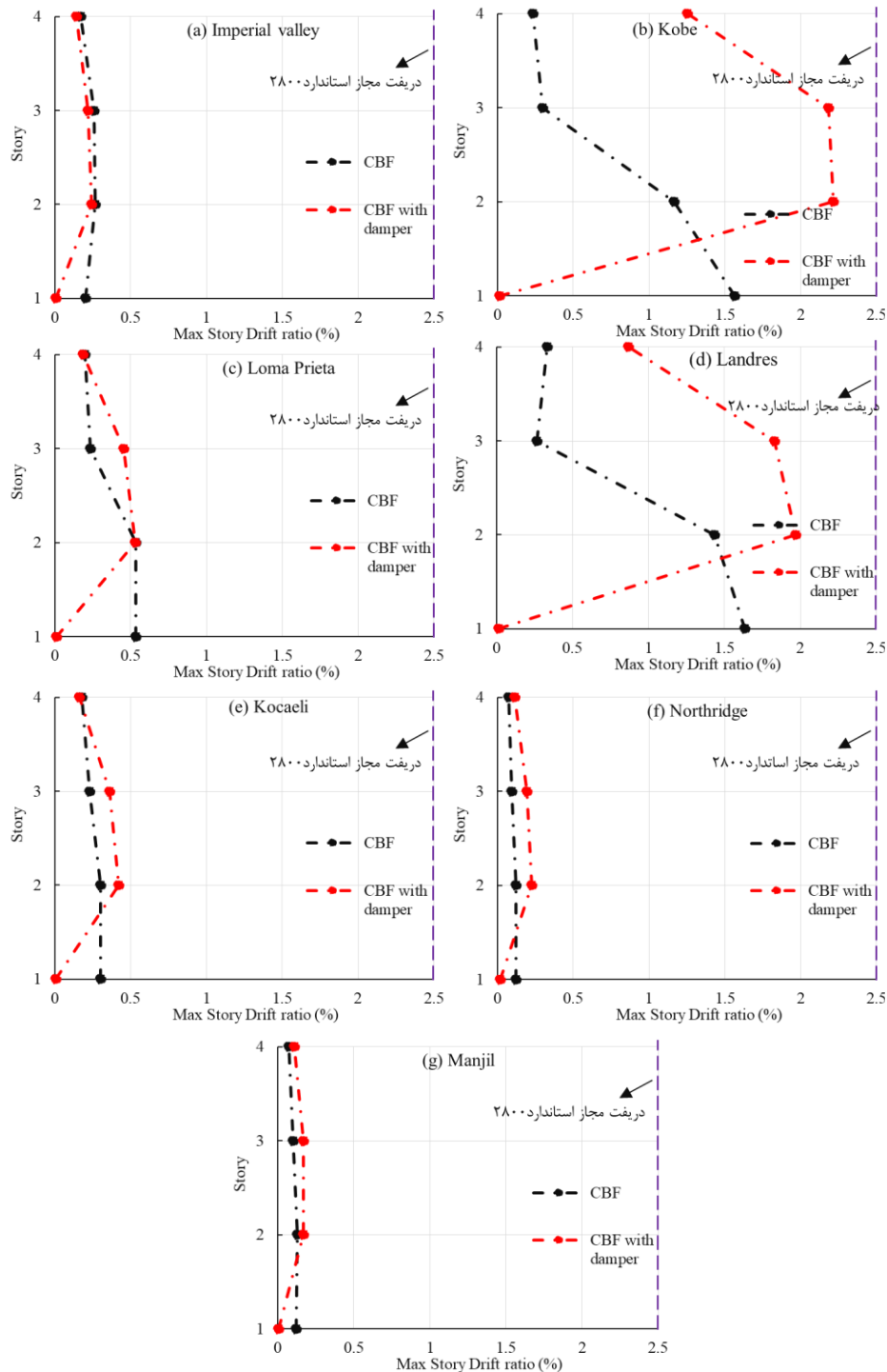
زلزله	قاب مهاربندی همگرا (kgf)	قاب مهاربندی همگرا مجهز به میراگر پیشنهادی (kgf)	(%) کاهش
Imperial Valley	35296	3282	90/70
Kobe	83646	9094	89/13
Loma Prieta	54675	4280	92/17
Landers	85231	12940	84/82
Kocaeli	49280	6159	87/50
Northridge	34033	5504	83/83
Manjil	34267	3852	88/76
Average	53775	444	88/13

جدول ۶ حداکثر تغییر مکان بام قاب ۴ طبقه

زلزله	قاب مهاربندی همگرا (m)	قاب مهاربندی همگرا مجهز به میراگر پیشنهادی (m)	(%) تغییرات
Imperial Valley	0/027	0/0184	-31/85
Kobe	0/098	0/17	+73/47
Loma Prieta	0/045	0/0355	-21/11
Landers	0/11	0/1405	+27/73
Kocaeli	0/0305	0/0286	-6/23
Northridge	0/0125	0/0166	+32/80
Manjil	0/0127	0/0137	+7/87
Average	0/048	0/0605	+11/81

جدول ۷ حداکثر تغییر مکان بام قاب ۸ طبقه

زلزله	قاب مهاربندی همگرا (m)	قاب مهاربندی همگرا مجهز به میراگر پیشنهادی (m)	(%) تغییرات
Imperial Valley	0/0408	0/0394	-3/43
Kobe	0/1995	0/1954	-2/06
Loma Prieta	0/0792	0/0603	-23/86
Landers	0/1613	0/3125	+93/74
Kocaeli	0/0729	0/1085	+48/83
Northridge	0/051	0/0923	+80/98
Manjil	0/0459	0/056	+22/01
Average	0/093	0/123	+30/89



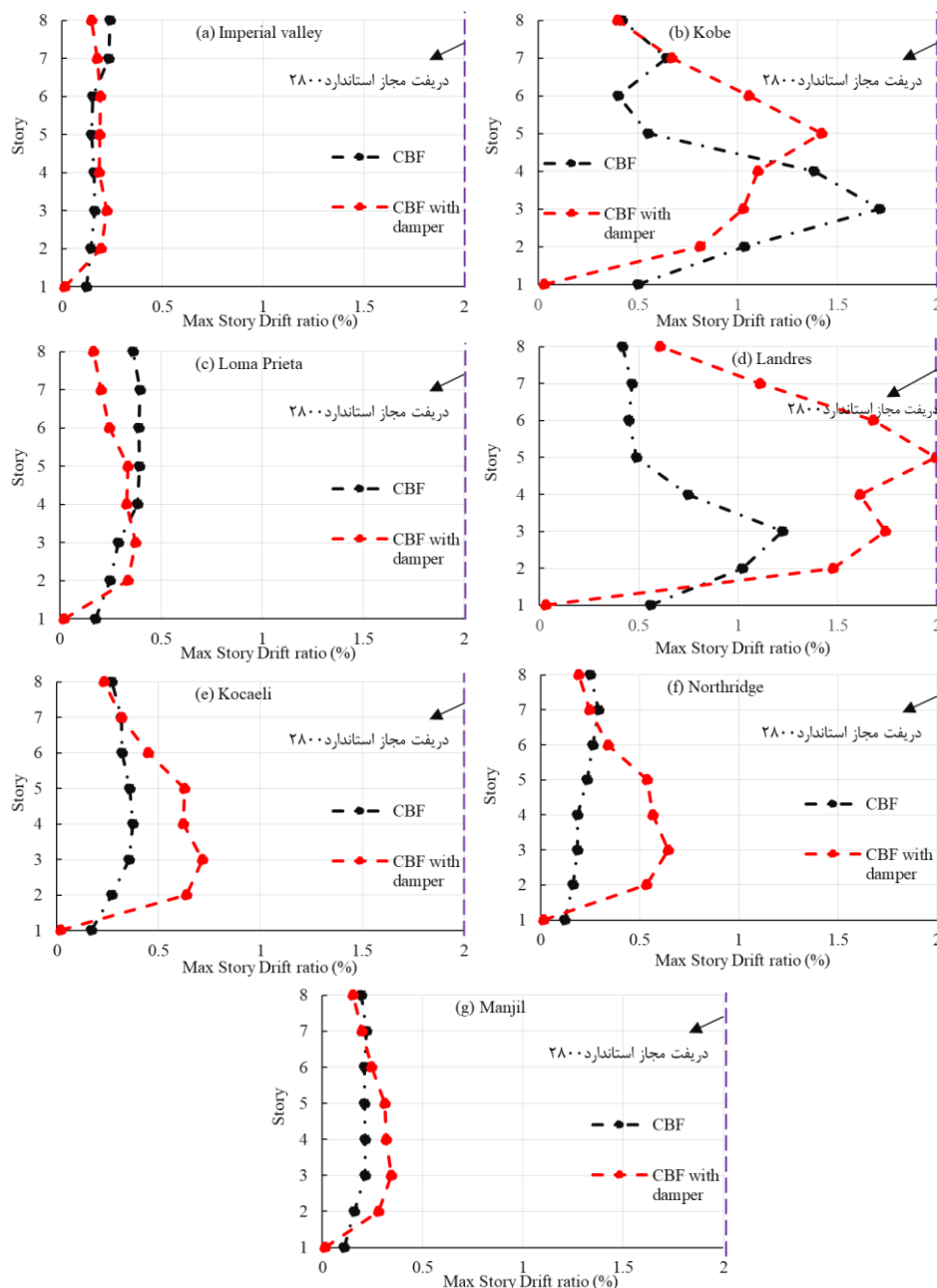
شکل ۱۷ مقایسه دریفت طبقات قاب مهاربندی همگرای ۴ طبقه با و بدون میراگر

سختی جانبی قاب مهاربندی با اضافه کردن میراگر نسبت داد. با این حال حداکثر تغییر مکان بام در برخی زلزله‌ها با اضافه کردن میراگر کاهش اندکی داشته است. با اضافه کردن میراگر پیشنهادی به قاب مهاربندی همگرا، حداکثر تغییر مکان بام به صورت میانگین در قاب ۴ طبقه ۱۱/۸۱ درصد و در قاب ۸ طبقه ۳۰/۸۹ درصد افزایش داشته است.

حداکثر تغییر مکان بام قاب مهاربندی همگرا با و بدون میراگر تحت رکوردهای زلزله استخراج گردید. جدول (۶) و (۷) به ترتیب مقادیر حداکثر تغییر مکان بام را برای قاب ۴ طبقه و ۸ طبقه نشان می‌دهند. مطابق انتظار با اضافه کردن میراگر به قاب مهاربندی، حداکثر تغییر مکان بام برای اکثر رکوردهای زلزله افزایش یافته است. علت این افزایش را می‌توان به کاهش

مقدار دریفت طبقات قاب مهاربندی همگرا با و بدون میراگر تحت رکوردهای زلزله محاسبه گردید. شکل (۱۷) و (۱۸) حداکثر دریفت هر طبقه را برای قاب ۴ طبقه و ۸ طبقه نشان می‌دهند. همان طور که نشان داده شده است، با اضافه کردن میراگر به قاب مهاربندی حداکثر دریفت در برخی طبقات کاهش و در برخی دیگر افزایش یافته است. همان طور که ذکر گردید علت این افزایش به دلیل کاهش سختی قاب مهاربندی بعد از مجهز شدن به میراگر است که منجر به افزایش جابه‌جایی می‌شود. با این حال حداکثر دریفت از مقدار مجاز آیین‌نامه

مقدار دریفت طبقات قاب مهاربندی همگرا با و بدون میراگر تحت رکوردهای زلزله محاسبه گردید. شکل (۱۷) و (۱۸) حداکثر دریفت هر طبقه را برای قاب ۴ طبقه و ۸ طبقه نشان می‌دهند. همان طور که نشان داده شده است، با اضافه کردن میراگر به قاب مهاربندی حداکثر دریفت در برخی طبقات کاهش و در برخی دیگر افزایش یافته است. همان طور که ذکر گردید علت این افزایش به دلیل کاهش سختی قاب مهاربندی بعد از مجهز شدن به میراگر است که منجر به افزایش جابه‌جایی می‌شود. با این حال حداکثر دریفت از مقدار مجاز آیین‌نامه



شکل ۱۸ مقایسه دریفت طبقات قاب مهاربندی همگرای ۸ طبقه با و بدون میراگر

نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بهبود رفتار مهاربندهای همگرا یک میراگر حلقه‌ای جدید معرفی شده است. این میراگر دارای سهولت ساخت و تعویض پس از زلزله می‌باشد. ابتدا یک مدل آزمایشگاهی از میراگر حلقه‌ای به منظور تأیید نتایج، در نرم‌افزار آباکوس صحت‌سنجی شد. سپس یک مطالعه پارامتریک بر روی میراگر پیشنهادی انجام شد و رفتار آن با میراگر حلقه‌ای معمول مقایسه شد. در نهایت به منظور بررسی تأثیر میراگر پیشنهادی بر روی رفتار مهاربندهای همگرا یک مطالعه عددی انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

۱. نمونه میراگر پیشنهادی دارای پاسخ چرخه‌ای پایدار، بدون کاهش سختی و مقاومت است. میراگر پیشنهادی نسبت به میراگر حلقه‌ای معمول دارای حلقه‌های چرخه‌ای چاق‌تری است. میراگر پیشنهادی به طور میانگین باعث افزایش $3/7$ برابر اتلاف انرژی و $4/3$ برابر سختی نسبت به میراگر حلقه‌ای معمول شده است.

۲. مطابق انتظار، منحنی چرخه‌ای مدل مهاربند قطری تحت بارهای فشاری عملکرد خوبی نداشت که علت آن کماتش مهاربند در این مدل بوده است. اما بر خلاف مدل ذکر شده، در مدل مهاربند با میراگر، میراگر پیشنهادی با رفتار متقارن در کشش و فشار، موجب تقویت منحنی چرخه‌ای مهاربندهای همگرا شده است.

۳. با استفاده از میراگر پیشنهادی، اتلاف انرژی مهاربند همگرا حدوداً 28% بهبود می‌یابد. همچنین بررسی شاخص معیار مایسز نشان داد که اکثر المان‌های مهاربند از حالت الاستیک خارج شدند. با این حال در مدل‌های مهاربند با میراگر، خسارت در ورق‌های میراگر متمرکز شده است و مهاربند الاستیک باقی مانده است. این موضوع تأیید می‌کند که میراگر پیشنهادی با متمرکز کردن عمده آسیب می‌تواند نقش فیوز سازه‌ای را ایفا کند.

مراجع

- [1] J. Jin and S. El-Tawil, "Seismic performance of steel frames with reduced beam section connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, no. 4, pp. 453–471, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.10.006>
- [2] S. M. Zahrai, S. R. Mirghaderi, and A. Saleh, "Tubular Web Reduced Beam Section (TW-RBS) connection, a numerical and experimental study and result comparison," *Steel and Composite Structures: An International Journal*, vol. 23, no. 5, pp. 571–

۴. تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی نشان می‌دهد، مجهز کردن قاب مهاربندی همگرا به میراگر پیشنهادی، بیشینه برش پایه را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. مقدار متوسط کاهش برش پایه در قاب ۴ طبقه در حدود ۹۴ درصد و در قاب ۸ طبقه در حدود ۸۸ درصد می‌باشد. بنابراین میراگر رفتار لرزه‌ای قاب مهاربندی همگرا را بهبود می‌بخشد.

۵. مطابق انتظار در قاب‌های مهاربندی مجهز به میراگر، حداکثر تغییر مکان بام برای اکثر رکوردهای زلزله افزایش یافت. علت این افزایش را می‌توان به کاهش سختی جانبی قاب مهاربندی مجهز به میراگر نسبت داد. با این حال حداکثر تغییر مکان بام در برخی زلزله‌ها با اضافه کردن میراگر کاهش اندکی داشته است. حداکثر تغییر مکان بام در قاب ۴ طبقه به طور میانگین $11/81$ درصد و در قاب ۸ طبقه $30/89$ درصد افزایش یافته است.

۶. با اضافه کردن میراگر به قاب مهاربندی همگرا حداکثر دررفت در برخی طبقات کاهش و در برخی دیگر افزایش یافته است. با این حال حداکثر دررفت از مقدار مجاز استاندارد 2800 در تمام نتایج رکوردها کمتر بوده است. اگر چه اضافه کردن میراگر پیشنهادی باعث افزایش دررفت در برخی طبقات شده است، ولی همچنان دررفت حاصله بسیار کمتر از دررفت مجاز استاندارد 2800 می‌باشد.

واژه‌نامه

Abaqus software	نرم‌افزار آباکوس
General static analyses	تحلیل استاتیکی جنرال
Kinematic hardening	سخت‌شوندگی کینماتیکی
Solid element	المان سالید

سپاسگزاری

- 583, 2017. <https://doi.org/10.12989/scs.2017.23.5.571>
- [3] A. Saleh, S. R. Mirghaderi, and S. M. Zahrai, "Cyclic testing of tubular web RBS connections in deep beams," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 117, pp. 214–226, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.020>
- [4] G. Shi, Y. Shi, Y. Wang, and M. A. Bradford, "Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details," *Engineering Structures*, vol. 30, no. 10, pp. 2677–2686, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.02.013>
- [5] A. M. G. Coelho and F. S. Bijlaard, "Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, no. 9, pp. 1228–1240, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.010>
- [6] M. Shariati, M. M. Tahir, T. C. Wee, S. N. R. Shah, A. Jalali, and M. Khorami, "Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections," *Engineering Failure Analysis*, vol. 85, pp. 149–166, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.014>
- [7] S. H. Oh, Y. J. Kim, and H. S. Ryu, "Seismic performance of steel structures with slit dampers," *Engineering Structures*, vol. 31, no. 9, pp. 1997–2008, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.003>
- [8] S. L. Mahyari, H. T. Riahi, and M. Hashemi, "Investigating the analytical and experimental performance of a pure torsional yielding damper," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 161, pp. 385–399, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.07.010>
- [9] G. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey, A. G. Chassiakos, R. O. Claus, S. F. Masri, R. E. Skelton, T. T. Soong, B. F. Spencer, and J. T. Yao, "Structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, no. 9, pp. 897–971, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:9\(897\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897))
- [10] Soong, T.T. and Dargush, G.F., 1997. *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Wiley.
- [11] R. Sabelli, S. Mahin, and C. Chang, "Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces," *Engineering Structures*, vol. 25, no. 5, pp. 655–666, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00175-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00175-X)
- [12] M. Razavi and M. Sheidaii, "A comparative study on seismic performance of zipper and special chevron braced frames," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 59–72, 2014.
- [13] A. Asghari, "Evaluating the ductility of X-braced frames which are braced in two middle adjacent spans," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 57–74, 2016.
- [14] M. Khazaei, "Investigation on dynamics nonlinear analysis of steel frames with steel dampers," *Procedia Engineering*, vol. 54, pp. 401–412, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.036>
- [15] C. Xia and R. D. Hanson, "Influence of ADAS element parameters on building seismic response," *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, no. 7, pp. 1903–1918, 1992. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:7\(1903\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:7(1903))
- [16] M. G. Gray, C. Christopoulos, and J. A. Packer, "Cast steel yielding brace system for concentrically braced frames: Concept development and experimental validations," *Journal of Structural Engineering*, vol. 140, no. 4, p. 04013095, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000910](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000910)
- [17] M. Mahmoudi and M. G. Abdi, "Evaluating response modification factors of TADAS frames," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 71, pp. 162–170, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.015>

- [18] M. TahamouliRoudsari, M. B. Eslamimanesh, A. R. Entezari, O. Noori, and M. Torkaman, "Experimental assessment of retrofitting RC moment resisting frames with ADAS and TADAS yielding dampers," *Structures*, vol. 14, pp. 75–87, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.02.005>
- [19] A. Maurya, M. R. Eatherton, R. Matsui, and S. H. Florig, "Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as structural fuses," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 127, pp. 54–65, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.019>
- [20] M. Ebadi Jamkhaneh, A. Homaioon Ebrahimi, and M. Shokri Amiri, "Seismic performance of steel-braced frames with an all-steel buckling restrained brace," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 23, no. 3, p. 04018016, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.000038](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.000038)
- [21] M. Iwata, T. Kato, and A. Wada, "Buckling-restrained braces as hysteretic dampers," in *STESSA 2000: Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, CRC Press, 2021, pp. 33–38.
- [22] R. Abbasnia, M. G. Vetr, R. Ahmadi, and M. A. Kafi, "An analytical and experimental study on the ductility of steel rings," *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 51.1, pp. 41–48, 2009.
- [23] M. Bazzaz, Z. Andalib, A. Kheyroddin, and M. A. Kafi, "Numerical comparison of the seismic performance of steel rings in off-centre bracing system and diagonal bracing system," *Journal of Steel and Composite Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 917–937, 2015. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.4.917>
- [24] M. G. Azandariani, H. Abdolmaleki, and A. G. Azandariani, "Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of steel ring dampers (SRDs)," *Thin-Walled Structures*, vol. 151, p. 106751, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106751>
- [25] M. G. Azandariani, A. M. Rousta, E. Usefvand, H. Abdolmaleki, and A. G. Azandariani, "Improved seismic behavior and performance of energy-absorbing systems constructed with steel rings," *Structures*, vol. 29, pp. 534–548, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.041>
- [26] M. Motamedi, M. Hafezi, and M. Yekrangnia, "Analytical study of steel ring connections as hysteretic metallic damper," in *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, Lisbon, Portugal, 2012.
- [27] M. E. Moeini, S. A. Razavi, M. Yekrangnia, and A. Khaloo, "Numerical study on an innovative elastomeric- steel cushion damper," *ce/papers*, vol. 4, no. 2–4, pp. 1719–1724, 2021. <https://doi.org/10.1002/cepa.1478>
- [28] M. A. Shayanfar, M. A. Barkhordari, and A. R. Rezaeian, "Experimental study of cyclic behavior of composite vertical shear link in eccentrically braced frames," *Steel & Composite Structures*, vol. 12, no. 1, pp. 13–29, 2012. <https://doi.org/10.12989/scs.2011.12.1.013>
- [29] M. A. Shayanfar, A. R. Rezaeian, and A. Zanganeh, "Seismic performance of eccentrically braced frame with vertical link using PBPD method," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 23, no. 1, pp. 1–21, 2014. <https://doi.org/10.1002/tal.1015>
- [30] S. M. Zahrai, "Cyclic testing of chevron braced steel frames with IPE shear panels," *Steel and Composite Structures*, vol. 19, no. 5, pp. 1167–1184, 2015. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.5.1167>
- [31] S. M. Zahrai and A. K. Vosooq, "Study of an innovative two-stage control system: Chevron knee bracing & shear panel in series connection," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 47, no. 6, pp. 881–898, 2013. <https://doi.org/10.12989/sem.2013.47.6.881>

- [32] S. M. Zahrai and A. Moslehi Tabar, "Analytical study on cyclic behavior of chevron braced frames with shear panel system considering post-yield deformation," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, no. 7, pp. 633–643, 2013. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0430>
- [33] A. M. Rosta, M. G. Azandariani, M. A. S. Ardakani, and S. Shoja, "Cyclic behavior of an energy dissipation system with the vertical steel panel flexural-yielding dampers," *Structures*, vol. 45, pp. 629–644, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.047>
- [34] ANSI/AISC 360–16, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2016.
- [35] Abaqus F.E.A., Analysis User's Manual 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, 2011.
- [36] Federal Emergency Management Agency, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA Report 461, Washington, DC, 2007.
- [37] Iranian Standard 2800, Regulations for the Design of Buildings Against Earthquakes, 4th edition, Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), 2014.
- [38] CSI, Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE, and CSIBridge, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, USA, 2015.
- [39] Federal Emergency Management Agency, Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356, Washington, DC, 2000.
- [40] H. Ghadimi Moghadam, F. Emami, and M. R. Mansoori, "Seismic evaluation of multi-span reinforced concrete bridges with ultra high-performance concrete piers using fragility curves," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 45–70, 2024. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.84877.1261>
- [41] E. Mohammadi Dehcheshmeh and V. Broujerdian, "Investigation of the behavior of self-centering base- and double-rocking walls subjected to far-field and near-field earthquakes," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 53–76, 2021. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2021.68094.1008>
- [42] F. Tafreshi, E. Rajabi, and Y. Golestani, "Seismic evaluation of steel frames with dual linked-column-frame under successive earthquakes," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 1–30, 2025. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2025.90190.1324>
- [43] Federal Emergency Management Agency, *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, FEMA P695, Washington, DC, 2009.

