

## ارزیابی کاربرد میراگر غلطکی بیضوی در قاب خمشی فولادی ویژه

حدیث وکیلی صادقی<sup>۱</sup>، نادر فنائی<sup>۲\*</sup>، مجید لطیفی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار گروه سازه، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- مدیر عامل، شرکت فولاد ماشین، نكاء

\*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵، fanaie@kntu.ac.ir

### چکیده

این پژوهش به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگر غلطکی بیضوی، می‌پردازد. ویژگی برجسته این میراگر، قابلیت دوگانه آن در تحمل بارهای ثقلی دائمی و استهلاک انرژی لرزه‌ای به‌طور هم‌زمان است که آن را به یک جداگر لرزه‌ای کارآمد تبدیل می‌کند. این میراگر با تلفیق هوشمندانه مکانیزم غلطکی برای کاهش اصطکاک و رفتار تسلیم میراگرهای بیضوی برای اتلاف انرژی، عملکرد سازه را بهبود می‌بخشد. به‌منظور بررسی میزان تأثیر این میراگر، این میراگر به پای ستون‌های مدل‌های دوبعدی قاب‌های دو، چهار و شش طبقه در نرم‌افزار SAP2000 افزوده شد و پارامترهای لرزه‌ای مورد تحلیل تاریخچه زمانی سه رکورد زلزله لوما پریتا، نورث‌ریج و رودبار قرار گرفت. نتایج، نشان‌دهنده بهبود چشمگیر عملکرد سازه‌ها بود؛ اضافه‌کردن میراگر موجب افزایش زمان تناوب طبیعی سازه شد که به‌دنبال آن، کاهش قابل توجهی در پارامترهای کلیدی مانند برش پایه، حداکثر شتاب بام و نسبت دررفت طبقه اول مشاهده شد. ضریب برش پایه در قاب‌های دو، چهار و شش طبقه به‌ترتیب به کم‌تر از ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ و نسبت دررفت طبقه اول در قاب‌های دو، چهار و شش طبقه به‌ترتیب به کم‌تر از ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۱۵ درصد کاهش یافت. این یافته‌ها، کارایی بالای میراگر غلطکی بیضوی را به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای جداسازی لرزه‌ای و ارتقای ایمنی سازه‌ها تأیید می‌نماید.

### واژگان کلیدی

میراگر غلطکی بیضوی، قاب خمشی فولادی ویژه، جداساز لرزه‌ای، میراگر تسلیمی، تحلیل تاریخچه زمانی

## Evaluation of the Application of Elliptical Roller Damper in Special Steel Moment Frame

H. Vakili Sadeghi, N. Fanaie, M. Latifi

### Abstract

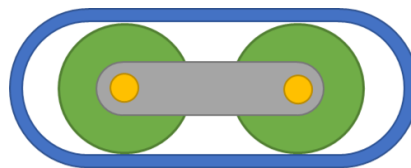
This research evaluates the seismic performance of steel moment frames equipped with the elliptical roller damper. The prominent feature of this damper is its dual capability of simultaneously carrying permanent gravity loads and dissipating seismic energy, making it an efficient seismic isolator. This device enhances structural performance by intelligently integrating a roller mechanism to reduce friction with the yielding behavior of elliptical dampers for effective energy dissipation. To assess its effectiveness, the damper was implemented at the column bases of 2D models of 2, 4, and 6-story frames in the SAP2000 software subjected to three earthquake records (Loma Prieta, Northridge and Rudbar), and their seismic parameters were analyzed. The results indicated a significant improvement in the structures' performance; the addition of the damper increased the natural period of the structure, which in turn resulted in a considerable reduction in key parameters such as base shear, peak roof acceleration, and first-story drift. The base shear coefficient in the two, four, and six-story frames was reduced to less than 0.4, 0.2, and 0.1, respectively, and the first story drift ratio in the two, four, and six-story frames was reduced to less than 0.5, 0.3, and 0.15 percent, respectively. These findings confirm the high efficiency of the elliptical roller damper as an effective solution for seismic isolation and enhancing structural safety.

### Keywords

Elliptical Roller Damper, Special Steel Moment Frame, Seismic Base Isolator, Yielding Damper, Time-History Analysis

## ۱- مقدمه

میراگر غلطکی بیضوی که توسط **ویکیلی صادقی و همکاران** معرفی شده و در شکل (۱) نشان داده شده است، از طریق اضافه کردن چندین غلطک با میراگر بیضوی معمولی به دست می‌آید. این غلطک‌ها به‌عنوان تحمل‌کننده بارهای ثقلی و لرزه‌ای قائم عمل می‌کنند؛ به این معنی که این میراگر نه تنها نیروهای دینامیکی ناشی از زلزله را مستهلک می‌کند، بلکه در تحمل بار ثقلی دائمی سازه نیز مشارکت دارد. این ویژگی، میراگرهای غلطکی بیضوی را به گزینه‌ای جذاب برای استفاده به‌عنوان جداگر لرزه‌ای تبدیل می‌نماید [۱].



شکل ۱- میراگر غلطکی بیضوی

میراگر غلطکی بیضوی به‌گونه‌ای طراحی شده است که امکان تعویض آن پس از زلزله وجود داشته باشد. این میراگرها با استفاده از اتصالات پیچ و مهره به سازه متصل شده‌اند، که این امر فرآیند جداسازی و تعویض آن‌ها را نسبتاً ساده می‌کند. با این حال، در هنگام تعویض، استفاده از جک‌های موضعی ضروری است. این جک‌ها برای پشتیبانی موقت بار سازه در طول فرآیند جداسازی و نصب مجدد میراگر به کار می‌روند. این روش باعث می‌شود که سازه اصلی در طول عملیات تعویض، پایدار و ایمن باقی بماند. از منظر هزینه، استفاده از فولاد متداول و جزئیات ساخت ساده، هزینه اولیه این سیستم را رقابتی می‌سازد. همچنین، با توجه به تمرکز آسیب در المان قابل تعویض، هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری پس از زلزله به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

این دستگاه از مزایای مکانیزم غلطکی که اصطکاک را کاهش می‌دهد و رفتار تسلیمی که از مشخصه‌های میراگرهای بیضوی است و اتلاف انرژی مؤثری را فراهم می‌کند، بهره می‌برد. این عملکرد ترکیبی می‌تواند عملکرد جداگرهای لرزه‌ای را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد و هم‌زمان مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی نیز ارائه دهد.

مکانیزم اتلاف انرژی در میراگر بیضوی بر پایه تغییر شکل‌های پلاستیک در المان‌های منحنی آن استوار است. ویژگی

منحصربه‌فرد این طراحی آن است که با اعمال بار، ناحیه تسلیم به‌جای تمرکز در یک نقطه ثابت، در امتداد مسیر منحنی حرکت کرده و جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی پیوسته ناحیه پلاستیک، از تمرکز کرنش جلوگیری کرده و منجر به توزیع یکنواخت اتلاف انرژی و در نتیجه افزایش ظرفیت هیستریتیک سیستم می‌شود. مطالعات مربوط به کاربرد جداسازها در قاب‌ها قدمتی طولانی دارد که در ادامه به چندین پژوهش از این دست پرداخته می‌شود. **لین<sup>۱</sup> و شنتون<sup>۲</sup>** در تحقیق خود در سال ۱۹۹۲ عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی مهاربندی همگرا و خمشی ویژه با پایه ثابت و با جداساز لرزه‌ای را بررسی کردند. سپس، تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی برای ۵۴ رکورد حرکت زمین انجام دادند. نتایج نشان داد قاب‌های مهاربندی شده که از جداساز لرزه‌ای استفاده می‌کنند، حتی اگر برای تحمل ۵۰٪ نیروی زلزله طراحی شده باشند، عملکردی مشابه یا بهتر از قاب‌های معمولی با پایه ثابت دارند. برای قاب‌های خمشی نیز، قاب‌های جداشده از پایه در سطوح مختلف طراحی، عملکرد بهتری از خود نشان دادند [۲].

**هو<sup>۳</sup>** به بررسی مزایای استفاده از سیستم‌های جداساز، به‌ویژه نوع تکیه‌گاه لاستیکی سربی، با انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی دینامیکی غیرخطی با رکوردهای نزدیک گسل پرداخت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که استفاده از این جداسازها به‌طور چشمگیری برش پایه و تغییر مکان نسبی طبقات را کاهش می‌دهد و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای سازه را به‌خصوص در برابر زلزله‌های قدرتمند نزدیک گسل به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد [۳].

**شکوری و همکاران**، نیز ثابت کردند که در ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای، قاب‌های با شکل‌پذیری معمولی عملکرد ضعیف‌تری داشته و جابه‌جایی نسبی بسیار بیش‌تری (تا ۸۰٪) نسبت به قاب‌های ویژه از خود نشان می‌دهند که اهمیت انتخاب صحیح این جزئیات، طراحی را برای ایمنی لرزه‌ای سازه برجسته می‌سازد [۴].

**پاناگیوتو<sup>۴</sup> و همکاران**، در مقاله خود عملکرد لرزه‌ای و تاب‌آوری دو طرح مختلف برای یک ساختمان فولادی شش طبقه در نزدیکی یک گسل را مقایسه کردند: (۱) پایه ثابت که فقط حداقل الزامات آیین‌نامه را برآورده می‌کند و (۲) با جداساز لرزه‌ای از نوع پاندول اصطکاکی سه‌گانه [۵].

محققان با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، نه تنها نیروها و جابه‌جایی‌های سازه‌ای را بررسی کرده‌اند، بلکه با استفاده از یک

1 Lin

2 Shenton

3 Hu

4 Panagiotou

پلتفرم تخصصی، خسارت‌های مالی و زمان بازیابی عملکردی (مدت‌زمان لازم برای قابل‌استفاده‌شدن مجدد ساختمان) را نیز محاسبه کرده‌اند. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که طرح با جداساز لرزه‌ای عملکرد لرزه‌ای را به‌طور چشمگیری بهبود بخشیده و زمان بازیابی عملکردی را به‌شدت کاهش می‌دهد. این مطالعه همچنین محدودیت‌های روش‌های تحلیلی حداقلی آیین‌نامه را برای ساختمان‌های با پایه ثابت در مناطق پرخطر آشکار می‌سازد.

کاربرد میراگرهای L شکل در قاب‌ها تاکنون با اضافه‌کردن آن‌ها به مهاربندهای همگرا یا به جداسازهای هسته سربی بود که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود اما استفاده از میراگر بیضوی به‌تنهایی یا همراه غلطک به‌عنوان جداساز لرزه‌ای، موضوعی بدیع بوده که در این پژوهش به بررسی آن پرداخته می‌شود.

در تحقیق **عبادی و همکاران**، رفتار دو قاب فولادی چهار و هشت طبقه با سیستم قاب خمشی تحت چهار زلزله مختلف در دو حالت با و بدون میراگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها با توجه به تغییر مکان نسبی بین طبقاتی، برش پایه قاب و برش طبقات بررسی شد. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نشان داد که قاب هشت طبقه بدون میراگر L شکل نتوانست عملکرد سازه را در سطح ایمنی حفظ نماید، درحالی‌که در تمام حالت‌های استفاده از میراگر، عملکرد سازه در چنین سطحی باقی ماند و کاهش برش و تغییر مکان نسبی بین طبقات مشاهده شد [6].

**مانچالوار<sup>۱</sup> و باکر<sup>۲</sup>** (۲۰۲۰)، به بررسی تحلیلی و مقایسه جداساز هسته سربی و جداساز مجهز به میراگر L شکل پرداختند. با اتصال آن‌ها به ساختمان پنج طبقه و اعمال چهار رکورد زلزله، تحلیل تاریخچه زمانی انجام دادند و نتیجه گرفتند مقادیر پاسخ به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است [7].

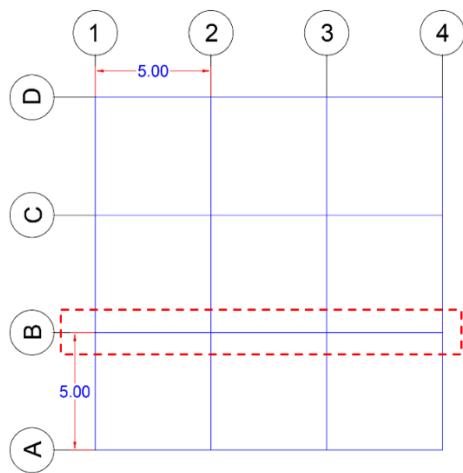
در پژوهش **وامشیشیلا<sup>۳</sup> و مانچالوار** (۲۰۲۱)، کاربرد جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر L شکل در یک ساختمان پنج طبقه تحت بارهای لرزه‌ای و انفجار، مورد تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود جداساز و میراگر L شکل باعث کاهش برش پایه، شتاب طبقه آخر و تغییر شکل‌های سازه می‌شود [8].

**گایکوآد<sup>۴</sup> و همکاران** (۲۰۲۳)، نیز با اضافه‌کردن میراگر L شکل به جداساز با هسته سربی، این سیستم هیبریدی را در یک ساختمان پنج طبقه به‌کار بردند و تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از این سیستم می‌تواند باعث کاهش پاسخ‌های سازه‌ای به زلزله شود، از جمله کاهش میزان برش پایه و انحراف طبقات که در نتیجه آن، خسارت به سازه کاهش می‌یابد [9].

در پژوهش گذشته ارائه‌شده توسط نگارندگان این مقاله، امکان استفاده از میراگر غلطکی بیضوی به‌عنوان جداساز لرزه‌ای تأیید شد اما کاربرد آن در قاب خمشی تاکنون بررسی نشده است.

## ۲- طراحی قاب‌ها

ابتدا قاب B از پلان متقارن شکل (۲) از یک ساختمان اداری واقع در تهران با خاک II انتخاب شد. سپس به‌صورت قاب خمشی فولادی ویژه دو، چهار و شش طبقه بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و استاندارد ۲۸۰۰ طراحی و در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شد [۱۰ و ۱۱]. بار زنده با توجه به جدول ۱-۵-۶ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مربع، بار بام ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار مرده بر حسب محاسبات انجام شده ۵۷۰ کیلوگرم بر متر مربع تعیین شد [۱۲]. ترکیب بارهای طراحی نیز بر اساس بند ۲-۳-۶ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان برای طراحی به‌روش ضرایب بار و مقاومت انتخاب شد.



شکل ۲- پلان سازه

مقاطع حاصل از طراحی برای تیرها شامل تیورق‌های L شکل با بال‌های 150×15mm، 200×20mm و 250×25mm و

<sup>4</sup> Gaikwad

<sup>1</sup> Manchalwar

<sup>2</sup> Bakre

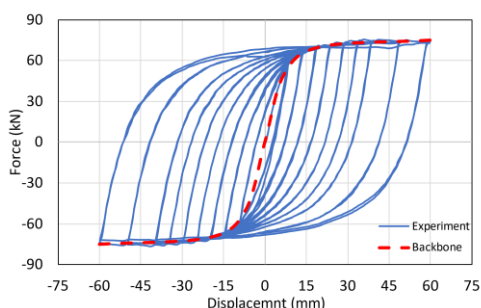
<sup>3</sup> Vamshisheela

جدول ۴- مشخصات رکوردهای زلزله

نام رکورد	بزرگا (Mw)	بیشینه شتاب زمین	فاصله (km)	سازوکار
رودبار	7.4	~0.65 g	~12.5	امتدادلغز
نورثریج	6.7	~0.35 g	~10	معکوس
لوما پریتا	6.9	~0.4 g	~4	معکوس

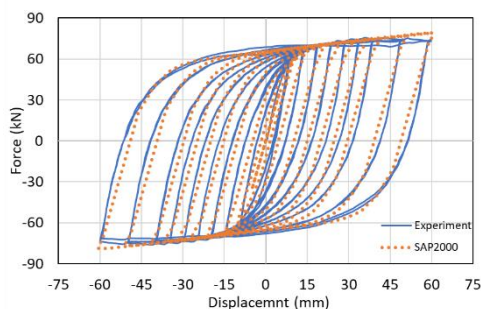
## ۴- اضافه کردن میراگر

در مرحله بعد، منحنی پوش میراگر از هیستریزس حاصل از آزمایش که در شکل (۳) با خط چین قرمز نشان داده شده است، به عنوان لینک از نوع پلاستیک چندخطی در نرم افزار تعریف شد. سختی اولیه برابر ۶ کیلونیوتن بر میلی متر و نیروی تسلیم برابر ۵۰ کیلونیوتن تعریف شد [۱۳].



شکل ۳- منحنی پوش استخراج شده از نمودار هیستریزس آزمایشگاهی

به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از نرم افزار، ابتدا لینک به تنهایی در نرم افزار، مدل و تغییر مکانی مطابق آزمایش به آن اعمال شد و هیستریزس حاصل با هیستریزس آزمایشگاهی مطابق شکل (۴) مقایسه و مطابقت قابل قبولی مشاهده شد.



شکل ۴- مقایسه منحنی هیستریزس حاصل از تحلیل نرم افزار با منحنی آزمایشگاهی

جان های 270×7 mm، 300×8 mm و 350×9 mm است. همچنین مقاطع حاصل از طراحی برای ستون ها، مقاطع قوطی 250×250×20، 300×300×25 و 350×350×30 میلی متر هستند. پس از طراحی، هر یک از سه قاب تحت تحلیل مودال قرار گرفتند که نتایج آن در جدول های (۱) الی (۳) قابل مشاهده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از تحلیل مودال قاب دو طبقه

شماره مد	زمان تناوب (S)	درصد مشارکت
۱	۰/۴۸	۸۷
۲	۰/۱۴	۱۳

جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل مودال قاب چهار طبقه

شماره مد	زمان تناوب (S)	درصد مشارکت
۱	۰/۷۷	۷۶
۲	۰/۲۶	۱۶
۳	۰/۱۴	۴/۴
۴	۰/۰۹	۳/۵

جدول ۳- نتایج حاصل از تحلیل مودال قاب شش طبقه

شماره مد	زمان تناوب (S)	درصد مشارکت
۱	۰/۹۷	۷۱
۲	۰/۳۶	۱۵
۳	۰/۱۹	۶/۷
۴	۰/۱۳	۲/۶
۵	۰/۰۹	۱/۹
۶	۰/۰۷	۰

## ۳- تحلیل تاریخیچه زمانی

پس از طراحی هر یک از سیستم ها، سه رکورد زلزله لوما پریتا، نورثریج<sup>۲</sup> و رودبار که بر خاک نوع II رخ دادند، مطابق جدول (۴) انتخاب شد. رکوردهای مقیاس نشده و واقعی به قاب ها اعمال شد. سپس برش پایه، تغییر مکان نسبی طبقات و شتاب بام هر قاب تعیین شدند.

<sup>۱</sup> Loma Prieta<sup>۲</sup> Northridge

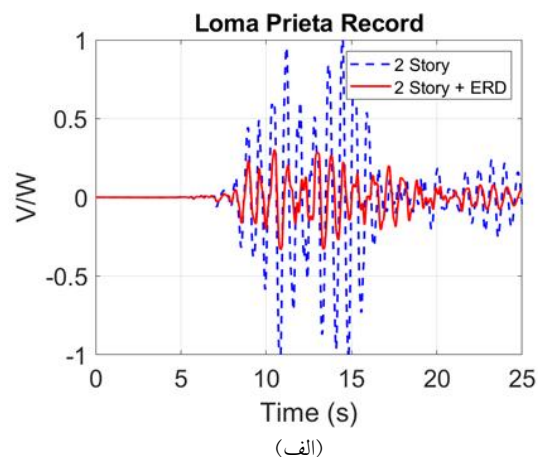
جدول ۷- نتایج حاصل از تحلیل مودال قاب شش طبقه مجهز به

میراگر		
شماره مد	زمان تناوب (S)	درصد مشارکت
۱	۱/۳۳	۹۲
۲	۰/۴۸	۷
۳	۰/۲۵	۰/۸
۴	۰/۱۵	۰/۱
۵	۰/۱۰	۰
۶	۰/۰۷	۰/۰۱

#### ۲-۴- برش پایه

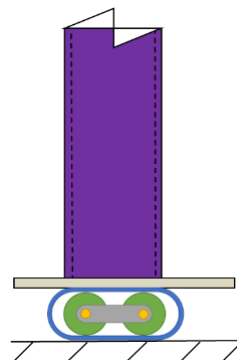
افزایش شدن میراگر، دوره تناوب سیستم را افزایش داده و شتاب طیفی متناظر پیروید جدید سازه با حضور میراگر، کوچکتر از شتاب طیفی متناظر قاب خمشی بدون میراگر می‌شود؛ لذا از آنجا که برش پایه با شتاب، رابطه مستقیم دارد، برش پایه کم می‌شود. همچنین بلافاصله پس از رسیدن نیروی جانبی به نیروی تسلیم میراگر، لینک‌ها جاری شده و برش پایه روی یک مقدار، محدود می‌ماند؛ این رفتار دلیل دوم افت برش پایه است.

در شکل (۶)، اثر اضافه کردن میراگر بر روی برش پایه V سازه دو طبقه تحت اثر سه رکورد زلزله نمایش داده شده است. وزن لرزه‌ای این سازه  $W=943.8$  کیلونیوتن محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، اضافه کردن میراگر موجب کاهش ضریب برش پایه  $V/W$  سازه به کمتر از  $0.4$  می‌شود. مقادیر حداکثر ضریب برش پایه پیش از اضافه کردن میراگر، به ترتیب برای رکوردهای لوما پریتا، نورث ریج و رودبار برابر با  $1.0$ ،  $0.58$  و  $0.53$  بوده است. به‌طور میانگین کاهش  $37$  درصدی در برش پایه وجود دارد.



شکل ۶- مقایسه ضریب برش پایه در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب دو طبقه تحت اثر رکوردهای الف) لوما پریتا

این میراگر به زیر ستون‌های طبقه همکف قاب‌ها اضافه شد. دو لینک گپ<sup>۱</sup> و هوک<sup>۲</sup> نیز برای کنترل جابه‌جایی میراگر (که با توجه به آزمایش از بازه  $-60$  تا  $+60$  میلی‌متر تجاوز نکند) موازی با لینک میراگر اضافه شد. جزئیات قرارگیری میراگر زیر ستون‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- جزئیات قرارگیری میراگر زیر ستون‌ها

در آخر سه رکورد زلزله مذکور به قاب‌ها اعمال شد و پارامترهای مورد بحث، مقایسه شدند که در ادامه به هر یک پرداخته می‌شود.

#### ۱-۴- زمان تناوب و مشارکت مدی

جدول‌های (۵) الی (۷)، نتایج حاصل از تحلیل مودال که شامل زمان تناوب و درصد مشارکت هر مد است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول‌ها آمده است، اضافه کردن میراگر باعث افزایش در زمان تناوب سازه می‌شود. همچنین درصد مشارکت مد اول با اضافه شدن میراگر به پای سازه افزایش می‌یابد. مقدار افزایش مشارکت مد اول برای قاب‌های دو، چهار و شش طبقه به ترتیب  $11$ ،  $18$  و  $21$  درصد است.

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل مودال قاب دو طبقه مجهز به میراگر

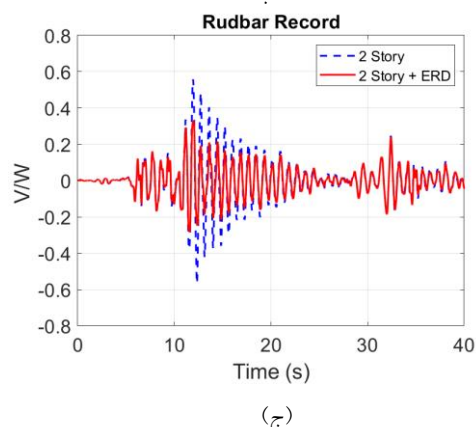
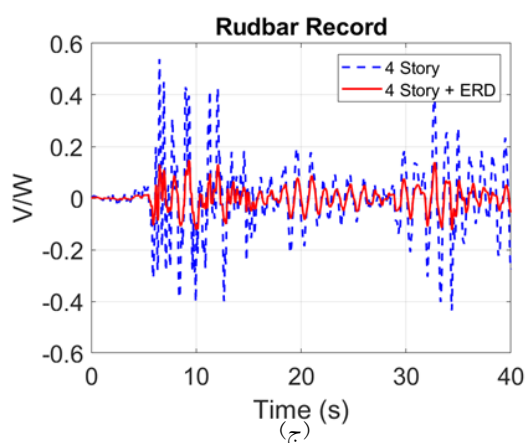
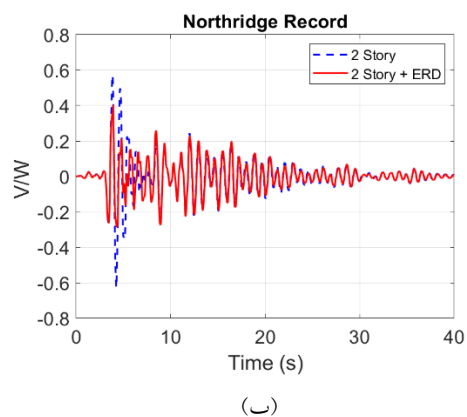
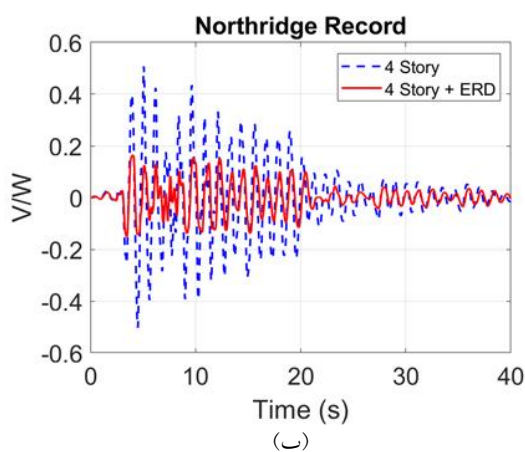
میراگر		
شماره مد	زمان تناوب (S)	درصد مشارکت
۱	۰/۷۲	۹۸
۲	۰/۱۹	۲

جدول ۶- نتایج حاصل از تحلیل مودال قاب چهار طبقه مجهز به

میراگر		
شماره مد	زمان تناوب (S)	درصد مشارکت
۱	۱/۰۷	۹۴
۲	۰/۳۵	۵/۵
۳	۰/۱۶	۰/۴
۴	۰/۱۰	۰/۶

<sup>1</sup> Gap

<sup>2</sup> Hook

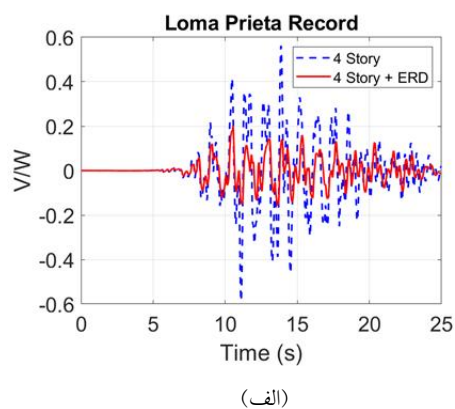


ادامه شکل ۶- مقایسه ضریب برش پایه در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب ۲ طبقه تحت اثر رکوردهای (ب) نورتریج و (ج) رودبار

در شکل (ب) اثر اضافه کردن میراگر بر روی برش پایه ۷ سازه چهار طبقه تحت اثر سه رکورد زلزله قابل مشاهده است. وزن لرزه‌ای این سازه  $W=1941.4$  کیلونیوتن محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل (ب) دیده می‌شود، اضافه کردن میراگر موجب کاهش ضریب برش پایه  $V/W$  به کم‌تر از  $0.2$  می‌شود. مقادیر حداکثر ضریب برش پایه پیش از اضافه کردن میراگر برای رکوردهای لوما پریتا، نورتریج و رودبار به ترتیب  $0.59$ ،  $0.50$  و  $0.53$  بود. به‌طور میانگین کاهش  $62$  درصدی در برش پایه وجود دارد.

ادامه شکل ۷- مقایسه ضریب برش پایه در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب ۴ طبقه تحت اثر رکوردهای (ب) نورتریج و (ج) رودبار در شکل (ا) اثر اضافه کردن میراگر بر روی برش پایه ۷ سازه شش طبقه تحت سه رکورد زلزله قابل مشاهده است. وزن لرزه‌ای این سازه  $W=2914$  کیلونیوتن محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل (ا) دیده می‌شود، اضافه کردن میراگر موجب کاهش ضریب برش پایه  $V/W$  به کم‌تر از  $0.1$  می‌شود. مقادیر حداکثر ضریب برش پایه پیش از اضافه کردن میراگر برای رکوردهای لوما پریتا، نورتریج و رودبار به ترتیب  $0.39$ ،  $0.24$  و  $0.21$  بود. به‌طور میانگین کاهش  $62$  درصدی در برش پایه وجود دارد.

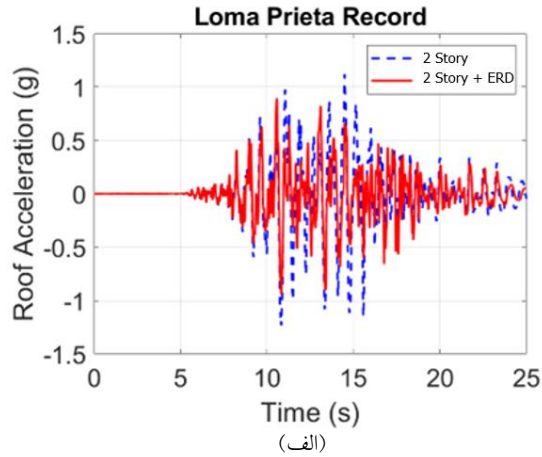
افزایش چشمگیر کارایی میراگر با افزایش ارتفاع سازه (از  $37\%$  کاهش برش پایه در قاب دو طبقه به  $62\%$  در قاب شش طبقه)، یک یافته کلیدی است که تفسیر آن در مکانیزم عملکرد دوگانه سیستم نهفته است. این پدیده که با توجه به قانون بازده نزولی در افزایش زمان تناوب، خلاف انتظار به نظر می‌رسد، عمدتاً ناشی از تفاوت در میزان فعال‌سازی مکانیزم استهلاک انرژی هیسترتیک است. در سازه کوتاه‌تر و صلب‌تر، جابجایی‌های کوچک پایه تنها قادر به فعال‌سازی جزئی میراگر هستند. در مقابل، در سازه بلندتر و انعطاف‌پذیرتر، جابجایی‌های بزرگ لرزه‌ای



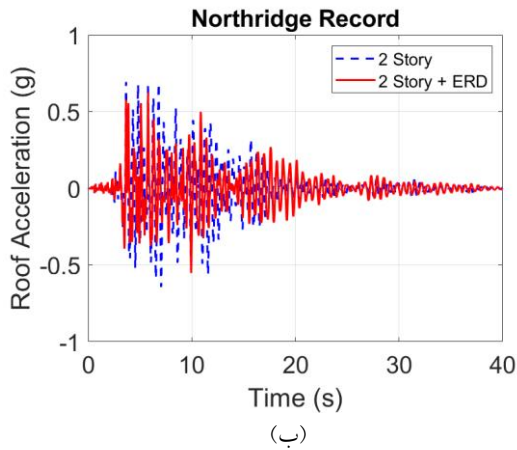
شکل ۷- مقایسه ضریب برش پایه در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب چهار طبقه تحت اثر رکوردهای (الف) لوما پریتا

#### ۳-۴- شتاب بام

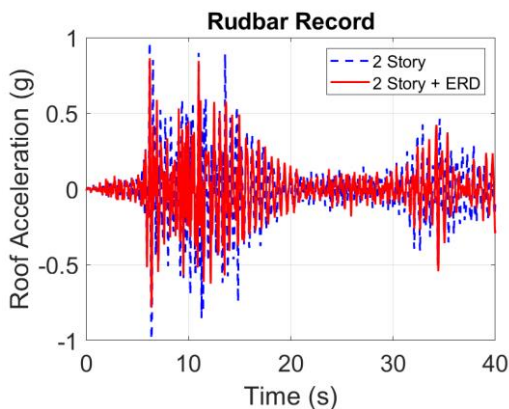
شکل (۹) تأثیر اضافه کردن میراگر بر شتاب بام در قاب دو طبقه را تحت اثر سه رکورد زلزله نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، اضافه کردن میراگرها موجب کاهش ناچیزی در مقادیر حداکثر شتاب بام شده است.



(الف)



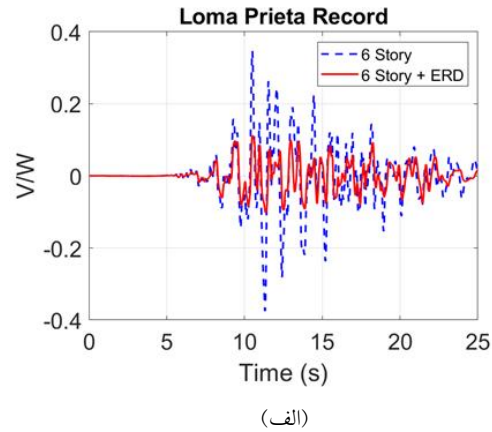
(ب)



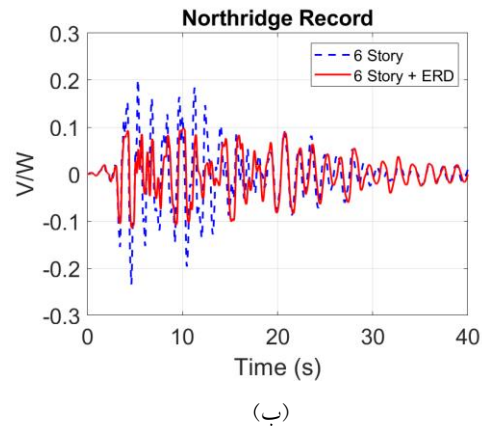
(ج)

شکل ۹- مقایسه شتاب بام در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب دو طبقه تحت اثر رکوردهای (الف) لوما پریتا، (ب) نورتریج و (ج) رودبار

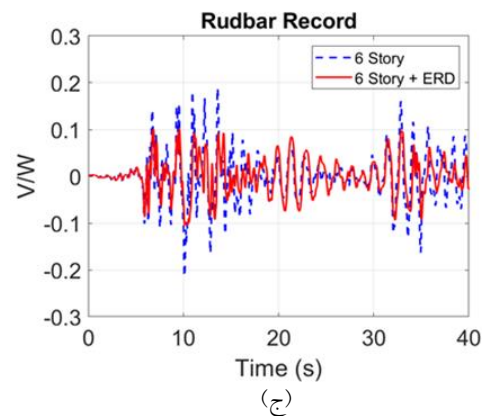
منجر به فعال‌سازی کامل میراگر، طی شدن چرخه‌های هیستریزیس وسیع و در نتیجه، استهلاک حجم عظیمی از انرژی ورودی می‌شود. بنابراین، عملکرد برتر در سازه بلندتر، نتیجه یک هم‌افزایی مطلوب است که در آن انعطاف‌پذیری ذاتی سازه به محرکی قدرتمند برای استخراج تمام پتانسیل میرایی دستگاه تبدیل می‌شود و اثر آن بر مکانیزم ساده افزایش زمان تناوب غلبه می‌کند.



(الف)



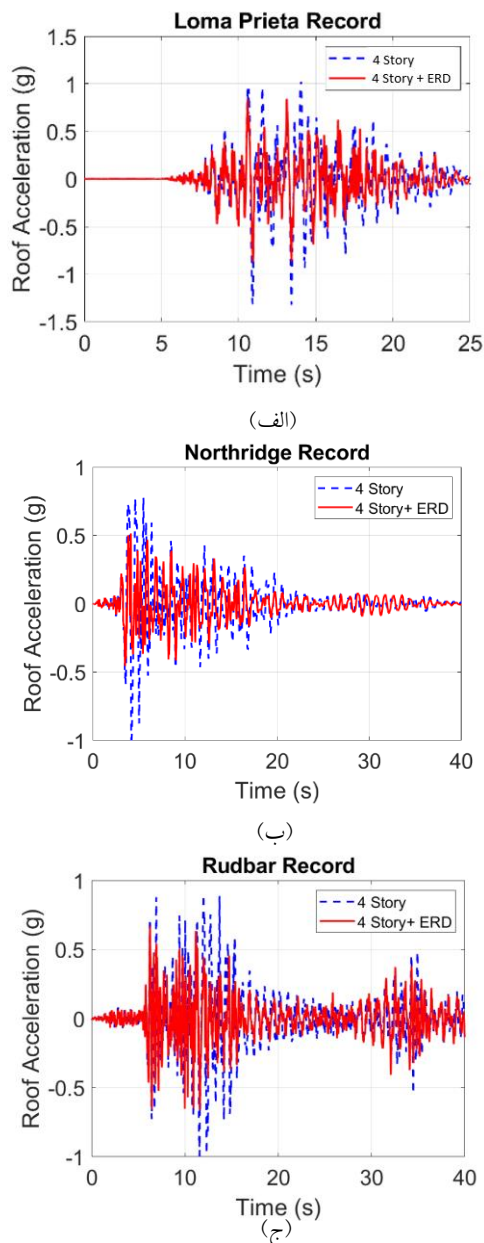
(ب)



(ج)

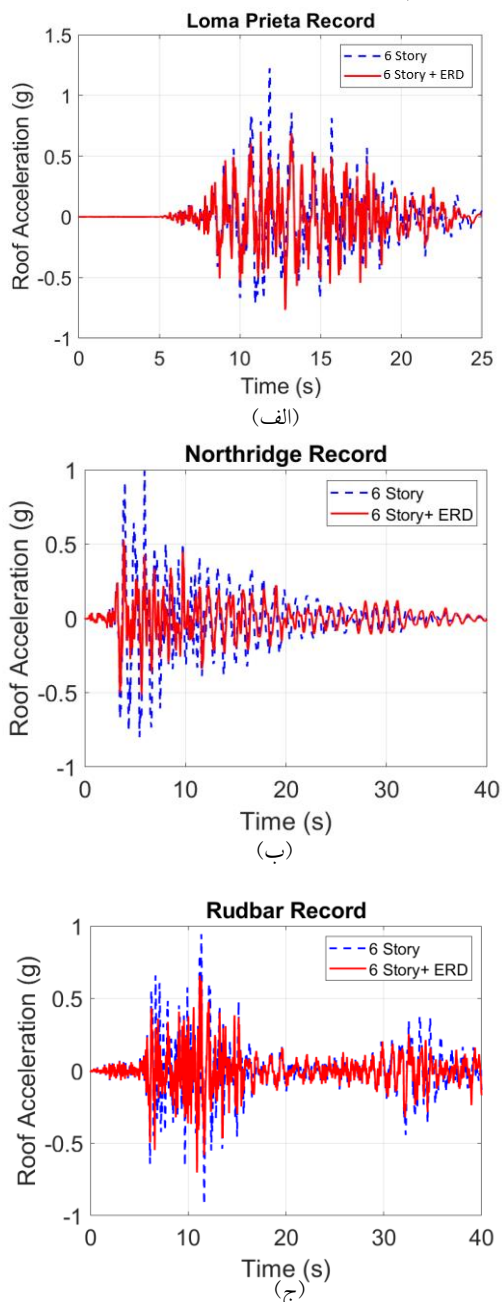
شکل ۸- مقایسه ضریب برش پایه در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب شش طبقه تحت اثر رکوردهای (الف) لوما پریتا، (ب) نورتریج و (ج) رودبار

دلیل اینکه میراگر غلطکی بیضوی نقش مهمی در کاهش شتاب بام ایفا نمی‌کند، این است که ابزارهای اتلاف انرژی عمدتاً بر مد اول ارتعاش تأثیر می‌گذارند و تأثیر کمی بر مدهای بالاتر دارند که مؤثر روی شتاب بام هستند. شکل (۱۰) تأثیر اضافه‌کردن میراگر بر شتاب بام در قاب چهار طبقه را نشان می‌دهد. در این قاب نیز همانند قاب دو طبقه، اضافه‌کردن میراگرها کاهش ناچیزی در مقادیر حداکثر شتاب بام داشته است.



شکل ۱۰- مقایسه شتاب بام در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب چهار طبقه تحت اثر رکوردهای الف) لوما پریتا، ب) نورتریج و ج) رودبار

شکل (۱۱) تأثیر اضافه‌کردن میراگر بر شتاب بام در قاب شش طبقه را نشان می‌دهد. اضافه‌کردن میراگر اثر کمی بر کاهش حداکثر شتاب بام قاب ۶ طبقه دارد.

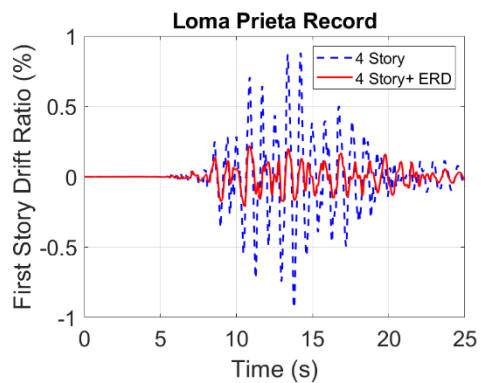


شکل ۱۱- مقایسه شتاب بام در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب شش طبقه تحت اثر رکوردهای الف) لوما پریتا، ب) نورتریج و ج) رودبار

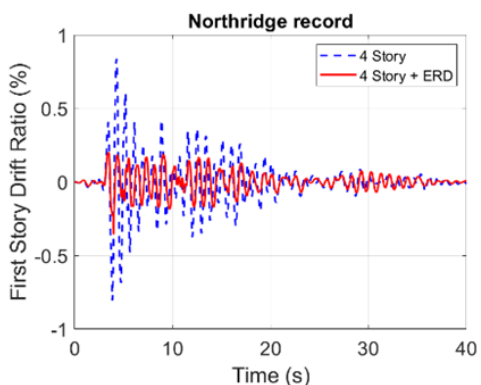
#### ۴-۴- نسبت دریافت طبقه اول

شکل (۱۲) تأثیر نصب میراگرهای غلطکی بیضوی بر تغییر مکان نسبی طبقه اول قاب دو طبقه را نشان می‌دهد. اضافه‌کردن میراگرها نسبت دریافت طبقه اول را کاهش می‌دهد. این کاهش، ناشی از توانایی میراگرهای غلطکی بیضوی در اتلاف انرژی لرزه‌ای و

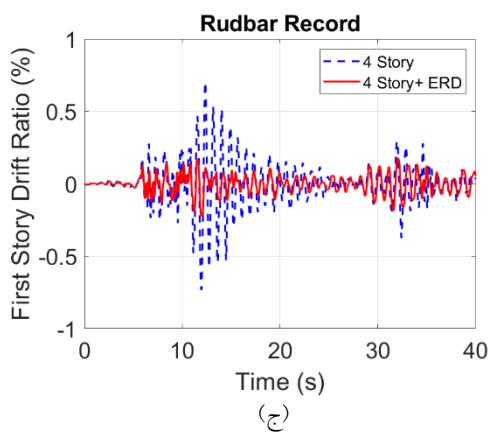
شکل (۱۳) تأثیر نصب میراگرهای غلطکی بیضوی بر نسبت دریفت طبقه اول قاب چهار طبقه را نشان می‌دهد. اضافه کردن میراگرها نسبت دریفت طبقه اول را کاهش می‌دهد. پس از اضافه کردن میراگرها، حداکثر نسبت دریفت طبقه اول ۰/۳ درصد است. مقادیر حداکثر تغییرمکان نسبی طبقه اول پیش از اضافه کردن میراگر برای رکوردهای لوما پریتا، نورثریج و رودبار به ترتیب ۰/۹، ۰/۸ و ۰/۷ درصد بود.



(الف)



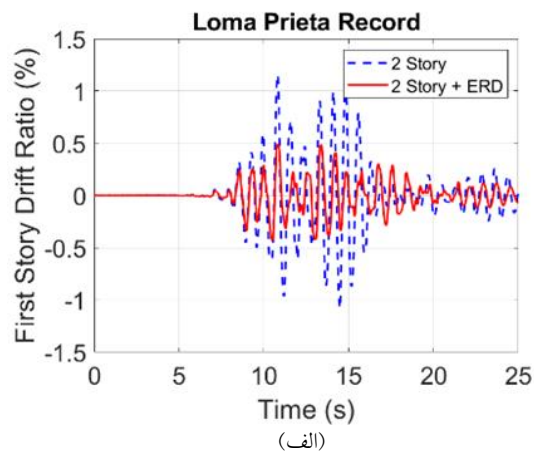
(ب)



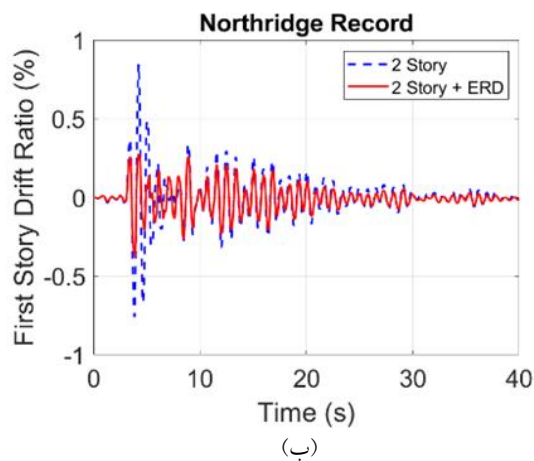
(ج)

شکل ۱۳- مقایسه نسبت دریفت طبقه اول در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب چهار طبقه تحت اثر رکوردهای الف) لوما پریتا، ب) نورثریج و ج) رودبار

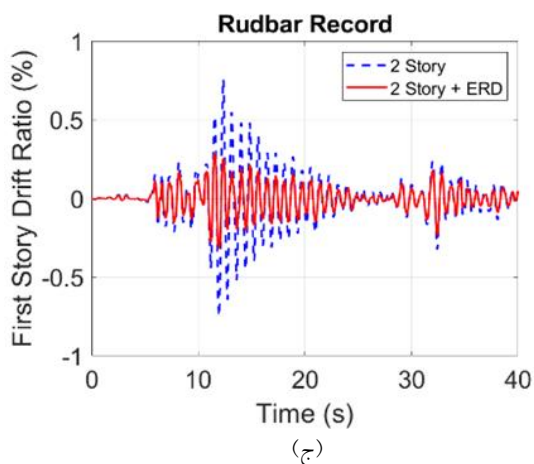
افزایش زمان تناوب سازه است. پس از اضافه کردن میراگرها، حداکثر نسبت دریفت طبقه اول ۰/۵ درصد است. مقادیر حداکثر نسبت دریفت طبقه اول پیش از اضافه کردن میراگر برای رکوردهای لوما پریتا، نورثریج و رودبار به ترتیب ۱/۱، ۰/۸ و ۰/۷۵ درصد بود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲- مقایسه نسبت دریفت طبقه اول در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب دو طبقه تحت اثر رکوردهای الف) لوما پریتا، ب) نورثریج و ج) رودبار

مطابق با بند ۳-۵-۲ استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم)، برای ساختمان‌های تا پنج طبقه، نسبت دررفت مجاز برابر با ۲/۵ درصد و برای سایر ساختمان‌ها ۲ درصد است. در قاب‌های دو، چهار و شش طبقه، اگرچه دررفت‌ها در حالت اولیه نیز از حد مجاز آیین‌نامه کم‌تر بودند، اما استفاده از میراگرها مقادیر حداکثر دررفت را به ترتیب به ۰/۵٪، ۰/۳٪ و ۰/۲٪ کاهش داده است که نشان‌دهنده بهبود چشمگیر در عملکرد لرزه‌ای و کاهش خسارات غیرسازه‌ای مورد انتظار است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر اضافه‌کردن میراگر غلطکی بیضوی به قاب خمشی فولادی ویژه پرداخته شد. این میراگر به پای ستون‌های قاب‌های دو، چهار و شش طبقه دوبعدی در نرم‌افزار SAP2000 اضافه شد و پارامترهای لرزه‌ای قاب با تحلیل تاریخیچه زمانی سه رکورد زلزله بررسی شد. نتایج مهم این تحقیق به شرح زیر است:

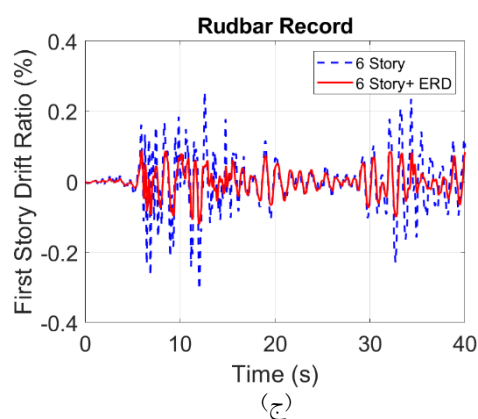
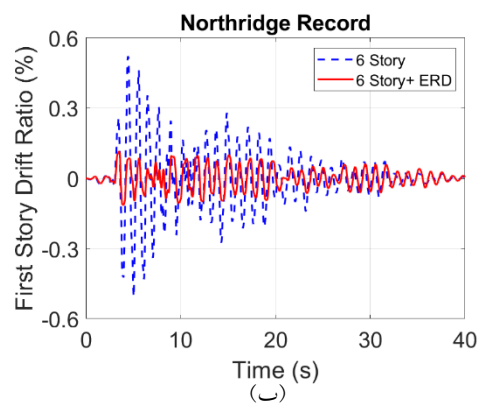
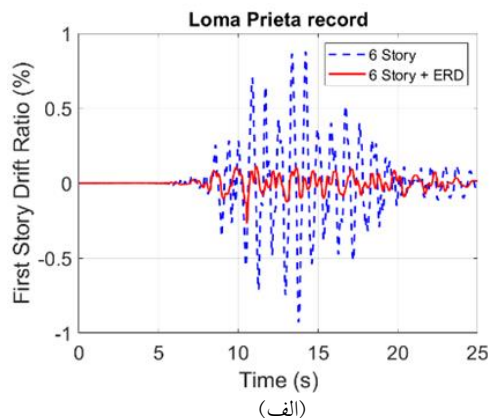
۱- افزودن میراگر، سختی جانبی سیستم را کاهش داده و آن را انعطاف‌پذیرتر می‌کند. این امر منجر به افزایش زمان تناوب و دورشدن آن از فرکانس‌های غالب زلزله می‌شود که اولین گام در کاهش نیروی ورودی به سازه است.

۲- کاهش شدید برش پایه از ۳۷٪ کاهش برش پایه در قاب دو طبقه به ۶۲٪ در قاب شش طبقه (کاهش ضریب برش پایه به ترتیب به کم‌تر از ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ در قاب‌های دو، چهار و شش طبقه) ناشی از اتلاف انرژی مؤثر در المان‌های بیضوی است. این المان‌ها بخش قابل‌توجهی از انرژی ورودی زلزله را قبل از انتقال به قاب اصلی، از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک مستهلک می‌کنند.

۳- کاهش قابل‌توجه نسبت دررفت در طبقه اول (به ترتیب به کم‌تر از ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۱۵ درصد در قاب‌های دو، چهار و شش طبقه)، مؤید این است که میراگر توانسته است تغییرشکل‌ها را در تراز پایه متمرکز کند. عملکرد روان غلطک‌ها این امکان را فراهم می‌سازد که المان‌های بیضوی بدون قید و با حداقل اصطکاک تغییرشکل داده و از انتقال تغییرمکان به طبقات بالاتر جلوگیری نمایند.

۴- کاهش ناچیز شتاب بام نشان می‌دهد که اثر میراگر بیش‌تر بر کنترل جابه‌جایی‌ها و نیروها (که به آسیب سازه‌ای مرتبط هستند) متمرکز است تا بر پاسخ شتاب در درجات آزادی بالاتر.

شکل (۱۴) تأثیر نصب میراگرهای غلطکی بیضوی بر تغییرمکان نسبی طبقه اول قاب شش طبقه را نشان می‌دهد. اضافه‌کردن میراگرها نسبت دررفت طبقه اول را کاهش می‌دهد. پس از اضافه‌کردن میراگرها، حداکثر نسبت دررفت طبقه اول ۰/۱۵ درصد است. مقادیر حداکثر نسبت دررفت طبقه اول پیش از اضافه‌کردن میراگر برای رکوردهای لوما پریتا، نورثریچ و رودبار به ترتیب ۰/۹، ۰/۵ و ۰/۳ درصد بود.



شکل ۱۴- مقایسه نسبت دررفت طبقه اول در حالت بدون میراگر و با میراگر قاب شش طبقه تحت اثر رکوردهای (الف) لوما پریتا، (ب) نورثریچ و (ج) رودبار

۵- با در نظر گرفتن تمام متغیرهای بررسی شده، افزودن میراگر غلطکی بیضوی به قاب خمشی، رفتار آن را بهبود بخشیده و هرچه تعداد طبقات افزایش یابد، رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در این پژوهش، تمرکز بر اثبات کارایی اولیه میراگر بیضوی از طریق مقایسه آن با یک قاب مبنای فاقد میراگر بوده است؛ لذا، ارزیابی عملکرد و مزیت نسبی آن در مقایسه با سایر میراگرهای متداول، به عنوان یک گام تحقیقاتی مهم، برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، تأثیر الگوهای مختلف توزیع میراگرها در ارتفاع سازه مورد مطالعه قرار گیرد تا بهینه‌ترین آرایش از منظر عملکرد لرزه‌ای و ملاحظات اقتصادی شناسایی شود. همچنین، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود یک مدل عددی با جزئیات بیشتر از اتصال میراگر به فونداسیون توسعه داده شود تا اثرات پیچیده تماس، پدیده گپ و هوک و تأثیر تغییر نیروی محوری بر سختی مؤثر اتصال به طور دقیق‌تری بررسی شود. چنین تحقیقی می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی جزئیات اتصال کمک شایانی نماید.

- [۱] وکیلی صادقی، ح.، فنائی، ن.، و لطیفی، م. (۱۴۰۳)، "مطالعه عددی پارامترهای مؤثر بر رفتار میراگر غلطکی بیضوی به منظور استفاده در جداساز لرزه‌ای"، مجله سازه و فولاد، شماره ۴۵، دوره ۱۸، ص. ۶۷-۸۰.
- [2] Lin, A.N., and Shenton III, H.W. (1992), "Seismic performance of fixed-base and base-isolated steel frames", *Journal of Engineering Mechanics*, 118(5), pp.921-941.
- [3] Hu, J.W. (2014), "Response of seismically isolated steel frame buildings with sustainable lead-rubber bearing (LRB) isolator devices subjected to near-fault (NF) ground motions", *Sustainability*, 7(1), pp.111-137.
- [4] Shakouri, A., Amiri, G.G., and Salehi, M. (2021), "Effects of ductility and connection design on seismic responses of base-isolated steel moment-resisting frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, p.106647.
- [5] Panagiotou, M., Shepherd, S., Mokha, A., Hudson, M., Acero, G., Karns, J., Canney, N., Briceno, C., Garcia, V., and Gilani, A. (2023), "Seismic performance and resilience comparison of a fixed-base versus base-isolated design of a six-story steel frame building at a near-Fault site in Los Angeles", In *World Conference on Seismic Isolation*, pp.572-586.
- [6] Ebadi Jamkhaneh, M., Ebrahimi, A.H., and Shokri Amiri, M. (2019), "Experimental and numerical investigation of steel moment resisting frame with U-shaped metallic yielding damper", *International Journal of Steel Structures*, 19(3), pp.806-818.
- [7] Manchalwar, A., and Bakre, S.V. (2020), "Seismic performance of structure with isolated foundation using u-shape steel damper as an isolator", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57(2), pp.170-177.
- [8] Vamshisheela, S., and Manchalwar, A. (2021), "Isolating system using U Shaped steel damper", In *E3S Web of Conferences*, 309, p.01136.
- [9] Gaikwad, S., Satarkar, P.R., and Manchalwar, A. (2023), "Seismic analysis of five-storied building using U-shaped hybrid isolator and lead rubber bearing isolator", In *International Conference on Interdisciplinary Approaches in Civil Engineering for Sustainable Development*, pp.477-485.
- [۱۰] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، (ویرایش ۱۴۰۱)، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان.
- [۱۱] استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۴)، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (ویرایش چهارم)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [۱۲] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۸)، بارهای وارد بر ساختمان، دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان.
- [13] Vakili Sadeghi, H., Fanaie, N., and Latifi, M. (2025), "Experimental and numerical study of an elliptical