

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی تأثیر طرح پیشنهادی برای میراگر لوله‌ای با سختی متغیر در بهبود پاسخ دینامیکی قاب‌های خمشی فولادی

یاشار هدائی‌پور

دانشجوی دکتری عمران-سازه، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد
اسلامی، تبریز، ایران

عادل فردوسی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران،
a_ferdousi@iaut.ac.ir
مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری‌های نرم، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز،
ایران

یوسف حسین‌زاده

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

لیلا حسین‌زاده

استادیار، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

کنترل غیرفعال سازه‌ها از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای متداولی هستند که توسط پژوهشگران و مهندسان همواره در حال توسعه می‌باشند. میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده که زیرمجموعه کنترل‌های غیرفعال هستند با استفاده از خواص هیسترتیک مصالح، استهلاک انرژی نیروهای وارده را به عهده دارند. میراگرهای تسلیمی چندسطحی، توسعه یافته میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده محسوب می‌شوند. در این مقاله رفتار طرح پیشنهادی میراگر لوله‌ای دو سطحی در بهبود پاسخ‌های دینامیکی قاب‌های خمشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته و سه ساختمان ۴، ۸ و ۱۲ طبقه برای بررسی تأثیرات افزودن میراگر به قاب‌های فولادی توسط نرم‌افزار SAP2000 تحلیل گردیده‌اند. با توجه به انتخاب رکوردهای مختلف زلزله از لحاظ محتوای فرکانسی و مؤلفه‌های دینامیکی، نتایج به‌دست آمده بهبود پاسخ‌های دینامیکی قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از رفتار متغیر میراگر را نشان می‌دهد به‌طوری که این بهبود با توجه به محتوای فرکانسی وارده به سازه‌ها از هر زمین لرزه متفاوت است. ملاحظه شده است که افزودن میراگر مذکور به‌طور متوسط باعث کاهش ۶۹، ۶۱ و ۴۶ درصدی مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی، کاهش برش پایه در حدود ۶۳، ۷۸ و ۸۱ درصدی و کاهش بیشینه شتاب بام در حدود ۲۴، ۱۹ و ۲۹ درصدی به ترتیب در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه بوده است.

واژگان کلیدی: تحلیل دینامیکی، استهلاک انرژی، میراگر لوله‌ای، سختی متغیر.

۱- مقدمه

خاصیت جاری شدن فلزات به هنگام تغییر شکل در ناحیه‌ی خمیری استفاده می‌شود. میراگرهای فلزی به دلیل عدم نیاز به تکنولوژی پیچیده ساخت، رفتار پایدار در برابر زلزله و دخیل نبودن عوامل محیطی (درجه حرارت، رطوبت و...)، در رفتار مکانیکی آنها اهمیت خاصی دارند. میراگرهای لوله‌ای فولادی به‌عنوان نوعی از میراگرهای غیرفعال برای استهلاک انرژی لرزه‌ای شناخته می‌شوند به‌طوری که می‌توانند مقدار قابل ملاحظه‌ای از انرژی ورودی لرزه‌ای را به‌واسطه ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در خود مستهلک نموده و در نتیجه از ایجاد آسیب و صدمات مخرب در سازه‌ها جلوگیری نمایند. می‌توان از میراگرهای لوله‌ای فولادی در اتصال اعضای سازه‌ای مورد استفاده قرار داد. در ادامه به‌منظور بررسی کامل تاریخچه تحقیق میراگرهای لوله‌ای و روند

زلزله یکی از پدیده‌های طبیعی بوده که انسان همواره با آن از گذشته در ارتباط بوده است و مطالعات گسترده‌ای بر روی این پدیده صورت گرفته است. وقوع یک زمین لرزه موجب ورود مقدار زیادی انرژی زلزله متناسب با پارامترهای دینامیکی سازه و نیز محتوای فرکانسی زمین لرزه به سازه می‌گردد. یکی از روش‌های کنترل انرژی ورودی زلزله به سازه، کنترل‌های غیرفعال است. سیستم‌های کنترل غیرفعال را می‌توان در کاهش خطر لرزه‌ای سازه‌های جدید و همچنین در مقاوم‌سازی سازه‌های قدیمی با مقاومت جانبی کم مانند قاب‌های پیش ساخته استفاده کرد. یکی از متداول‌ترین ابزارهای کنترل غیرفعال که برای کنترل و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها در اثر زمین لرزه‌ها به کار می‌روند، میراگرهای جاری شونده‌ی فلزی هستند. در این نوع از میراگرها از

قرار دادن قسمتی از لوله فولادی در سیستم مهاربندی، استهلاک انرژی مناسبی صورت پذیرفته است. محجوبی و ملکی (Mahjoubi & Maleki, 2016) مقاله‌ای با عنوان ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و طراحی سازه‌های فولادی مجهز به میراگرهای دو لوله‌ای ارائه داده‌اند. میراگر دو لوله‌ای یک میراگر تسلیم‌شونده فلزی برای کنترل غیر فعال سازه‌هاست که اخیراً توسط نویسندگان به نحو مناسب توسعه داده شده است. هدف از مطالعه فوق ارائه رهنمودهایی در جهت نحوه اجرای بهینه این نوع میراگر در ساختمان‌های فولادی و همچنین مقایسه عملکرد آن در برابر سایر میراگرهای فلزی تسلیمی است.

عندلیب و همکاران (Andalib et al., 2018) با تعیین رفتار میراگری متشکل از چندین حلقه فولادی، اثر نوع اتصال، ضخامت حلقه‌های فولادی و خواص مواد بر شکل‌پذیری و جذب انرژی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

شیخی و فتیحی (Sheikhi & Fathi, 2020) مقاله‌ای تحت عنوان جداساز لاستیکی طبیعی تقویت شده با میراگرهای حلقه‌ای فولادی را معرفی کردند. هدف مقاله بررسی رفتار جداساز لاستیکی طبیعی بوده که با میراگر حلقه‌ای فولادی ترکیب شده است. اسماعیل (Ismail, 2019) پژوهشی تحت عنوان معرفی یک سیستم مهاربندی الاستوپلاستیک برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها ارائه کرده است. این مقاله یک سیستم مهاربندی الاستوپلاستیک جدید را برای کنترل غیرفعال لرزه‌ای سازه‌ها مورد بررسی قرار داده است که شامل یک هسته فلزی الاستوپلاستیک با قابلیت تغییر شکل است و شامل چهار قوس در اطراف حلقه مرکزی می‌باشد. با بررسی نتایج به دست آمده ملاحظه گردید که این میراگر موازنه نسبتاً بهتری بین سختی جانبی و میرایی ایجاد می‌کند. مهیاری و همکاران (Mahyari et al., 2019) مقاله‌ای تحت عنوان بررسی عملکرد تحلیلی و تجربی میراگر فلزی تسلیم تحت پیچش خالص را ارائه کردند که در آن یک میراگر تسلیم‌شونده جدید با مکانیسم پیچشی خالص معرفی و بررسی گردیده است. نیروی برشی طبقات با استفاده از جزئیات خاص به دستگاه پیشنهادی منتقل می‌شود تا پیچشی

گسترش و پیشرفت آنها، گزارشی از مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته ارائه می‌گردد.

به همین منظور کاربرد میراگرهای لوله‌ای به عنوان نوعی از میراگرهای غیرفعال برای اتلاف انرژی لرزه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. ملکی و باقری (Maleki & Bagheri, 2010a) کاربرد دمپر لوله‌ای در پل‌های با دال یک‌طرفه را بررسی و جزئیات کاربردی برای نصب این نوع از دمپرهای لوله‌ای را ارائه نمودند؛ همچنین ملکی و باقری (Maleki & Bagheri, 2010b) به منظور ارزیابی امکان استفاده از لوله‌ها به عنوان میراگر لرزه‌ای، رفتار لوله‌های فولادی تو خالی و پر شده با بتن تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. ملکی و محجوبی (Maleki & Mahjoubi, 2013) ساختار جدیدی برای استهلاک غیرفعال انرژی به صورت میراگر دو لوله‌ای ارائه کردند. بهشتی‌اول و همکاران (Beheshti-Aval et al., 2013) پژوهشی در مورد ساختار جدیدی در ترکیب میراگرهای اصطکاکی و فلزی تسلیمی را ارائه کرده‌اند. این مقاله ترکیب جدیدی از میراگر اصطکاکی/هیسترتیک را که در وسط مهاربندهای متقاطع برای استهلاک انرژی لرزه‌ای نصب گردیده، معرفی کرده است. این سیستم با کارایی بالا به دلیل سادگی نسبی و کاربرد آسان، بدون نیاز به مواد و فناوری خاص، بیش از سایر دستگاه‌های استهلاک انرژی مورد توجه قرار گرفته است.

ملکی و محجوبی (Maleki & Mahjoubi, 2014) طرح جدیدی از میراگرهای لوله‌ای توپر را ارائه کرده‌اند؛ میراگر پیشنهادی از دو لوله جوش شده به یکدیگر تشکیل یافته است. در داخل هر یک از لوله‌ها یک لوله کوچک‌تر نیز قرار دارد و فضای خالی مابین لوله‌ها توسط مواد پرکننده‌ی مانند روی و سرب پر شده است. بزاز و همکاران (Bazzaz et al., 2014) در این مقاله، سیستم مهاربندی جدیدی را با استفاده از المان لوله‌ای به منظور تعویض اعضای آسیب‌دیده بدون نیاز به بازسازی یا تعمیر اساسی سیستم سازه‌ای را ارائه کرده‌اند. عندلیب و همکاران (Andalib et al., 2014) با ارزیابی تحلیلی رفتار حلقه‌های فولادی مستهلک‌کننده انرژی، به این نتیجه دست یافتند که با

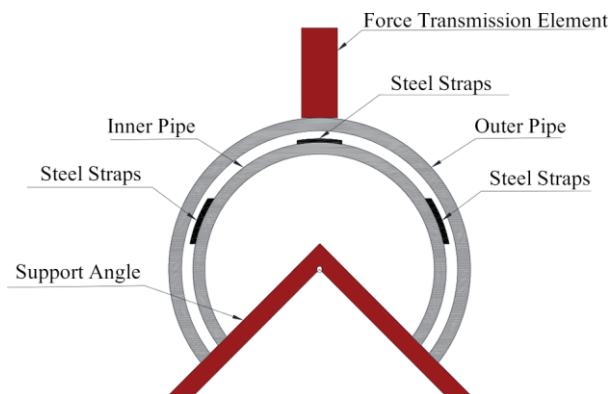
ستون مرکزی باعث ناپایداری و سقوط سازه‌های بزرگ زیرزمینی خواهد شد. استفاده از میراگرهای لوله‌ای فولادی سرب‌دار در طراحی لرزه‌ای چنین سازه‌هایی برای کاهش یا جلوگیری از چنین احتمالاتی پیشنهاد شده است. رئیسی و همکاران (Reisi et al., 2021) میراگر نوینی به نام میراگر پوسته‌ای تودرتوی ناهمراستا پیشنهاد داده‌اند. ساختمان این میراگر از یک پوسته‌ای استوانه‌ای بزرگ فلزی که سه پوسته‌ای استوانه‌ای کوچک را در بر گرفته است، ساخته شده است. گوو و همکاران (Guo et al., 2021) یک طرح اصلاح شده میراگر نیم‌لوله‌ای ارائه کردند که XPDs نام‌گذاری گردیده است. میراگر با اتصال دو حلقه فولادی که در مقابل هم قرار گرفته‌اند ساخته می‌شود و سپس به صفحات اتصال به صورت پیچی متصل می‌شوند. معصومی و پرسیادو (Masoumi & Preciado, 2021) مقاله‌ای در توسعه‌ی میراگرهای لوله‌ای ارائه کردند که هدف اصلی آن بررسی مدل‌های آزمایشگاهی و عددی اتصالات نیمه‌صلب میراگرهای دو لوله‌ای، در ساختمان‌های فولادی بوده است. ژونگ و همکاران (Zhong et al., 2023) در پژوهشی دیگر میراگر استوانه‌ای تقویت شده در محل‌های اتصال را مورد بررسی قرار داده‌اند. دلیل این تقویت، شکست زود هنگام این نوع از میراگرها در محل‌های ذکر شده می‌باشد که توسط لوله‌های با قطر و طول کوتاه‌تر تقویت گردیده‌اند. لی و همکاران (Li et al., 2024) در ادامه پژوهش میراگرهای لوله‌ای، میراگر آکاردئونی را مورد بررسی قرار داده‌اند که بر خلاف تحقیقات پیشین اساس عملکرد آن بر اساس نیروهای وارده برشی استوار بوده و در ترکیب با جداگرهای سازه‌ای به کار گرفته شده است. در راستای توسعه میراگرهای لوله‌ای، میراگرهای با رفتار چند سطحی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است که در ادامه مطالعات انجام یافته در این خصوص به صورت اجمالی ارائه می‌گردد: چراغی و زهرایی (Cheraghi & Zahrai, 2017) یک ساختار جدید از میراگرهای لوله‌ای را پیشنهاد داده‌اند. میراگر پیشنهادی شامل ترکیبی از لوله‌های تودرتو است که می‌تواند پارامترهای مختلف را برای جذب و استهلاک انرژی در سطوح

خالص بدون نیروی برشی و گشتاور خمشی در لوله‌های میراگر ایجاد کند.

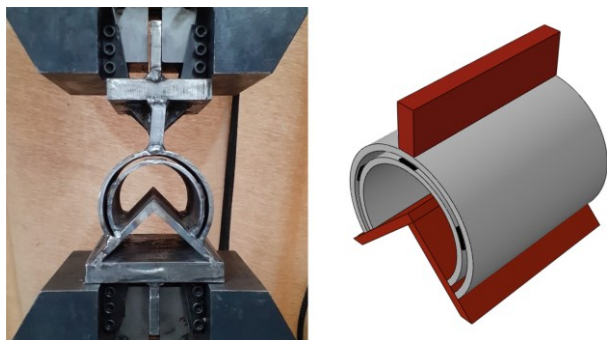
جراح و همکاران (Jarrah et al., 2019) میراگر لوله‌ای به نام میراگر فلزی پیستونی، متشکل از دو لوله فولادی موازی و هم‌محور با قطرهای متفاوت را پیشنهاد نموده‌اند. اتصال بین لوله‌ها با ورق‌های فولادی مابین آنها صورت پذیرفته است. گوو و همکاران (Guo et al., 2020) یک میراگر لوله‌ای جدید پیشنهاد کردند. این میراگر تشکیل یافته از دو عدد حلقه فولادی است که توسط اتصالات جوشی به صورت پشت‌به‌پشت به یکدیگر متصل شده‌اند و تشکیل یک هسته X را داده‌اند. گرجی و همکاران (Gorji et al., 2020a) میراگر جدیدی که ساختار آن از حلقه‌های فولادی است را مورد بررسی قرار داده‌اند. بررسی شکل‌پذیری و استهلاک انرژی و همچنین ارائه یک معادله برای برآورد ظرفیت میراگر از اهداف اصلی این مقاله بوده است. عبدالله‌پارسا و همکاران (Abdollahiparsa et al., 2020) عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی با قاب ساده در مقایسه با قاب مهاربندی مجهز به میراگر لوله‌ای تحت بارگذاری لرزه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. بهزادفر و همکاران (Behzadfar et al., 2020) مقاله‌ای تحت عنوان بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شورون با استفاده از میراگرهای جاری شونده چند لوله‌ای را ارائه کرده‌اند. هدف از این مطالعه، ارزیابی و بهبود رفتار قاب‌های دارای مهاربند شورون با استفاده از میراگرهای چند لوله‌ای بوده است. گرجی و همکاران (Gorji et al., 2020b) یک میراگر فولادی دو حلقه جدید معرفی کرده و رفتار چرخه‌ای آن را به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار داده‌اند.

لاهووتی و همکاران (Lahooti et al., 2020) مقاله‌ای با هدف بالا بردن عملکرد میراگرهای لوله‌ای ارائه کرده‌اند که لوله‌های فولادی میراگر توسط مواد کامپوزیت سیمانی تقویت شده با الیاف (HPFRCC) پر می‌شوند. هی و چن (He & Chen, 2020) مقاله‌ای تحت عنوان ارتقاء عملکرد لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی با معرفی میراگرهای لوله فولادی پر شده با سرب را ارائه کرده‌اند. ملاحظه گردیده است که در هنگام زلزله‌های شدید تخریب

استفاده شده است. در شکل (۱) نمای کلی و در شکل (۲) نمای سه بعدی میراگر پیشنهادی قابل مشاهده است.



شکل (۱): نمای کلی ساختار میراگر پیشنهادی.



شکل (۲): نمونه مرجع و نمای سه بعدی میراگر پیشنهادی به همراه تسمه های فولادی.

مشخصات هندسی صفحات و نبشی فولادی به نوعی انتخاب شده اند که در ناحیه الاستیک باقی مانده و تنها لوله های فولادی وارد ناحیه پلاستیک شوند. جزئیات هندسی میراگر پیشنهادی در شکل (۳) و جدول (۱) قابل مشاهده است. با توجه به رفتار اصلی این سیستم که مبتنی بر تماس بین دو لوله می باشد از تسمه های فولادی نیز برای رفتار متقارن تر میراگر پیشنهادی در ناحیه فشاری و کششی استفاده شده است. همچنین نحوه قرارگیری میراگر پیشنهادی در قاب سازه ای نیز در شکل (۴) قابل مشاهده است.

جدول (۱): مشخصات هندسی لوله ها.

لوله	قطر خارجی (میلی متر)	ضخامت (میلی متر)	طول (میلی متر)
Pipe 1	۱۶۸	۷٫۱۰	۲۰۰
Pipe 2	۱۴۱	۶٫۵۵	۲۰۰

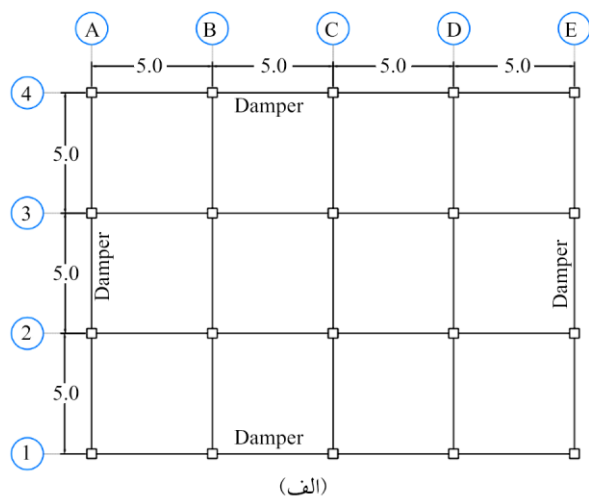
مختلف زلزله را ارائه دهد. منحنی های هیستریزس یک رفتار پایدار را نشان می دهند. همچنین با افزودن فلزاتی همچون سرب، روی و صفحات فولادی شکافدار به سیستم پیشنهادی، زهرایی و چراغی (Zahrai & Cheraghi, 2017) سعی کرده اند نسبت میرایی را افزایش داده و عملکرد چرخه ای سیستم کنترل چند سطحی که قبلاً پیشنهاد شده بود را بهبود بخشند.

چراغی و زهرایی (Cheraghi & Zahrai, 2019) در ادامه توسعه پژوهش های میراگرهای لوله ای تودرتو، در این مقاله با استفاده از تحلیل فزاینده دینامیکی (IDA) عملکرد این نوع از میراگرها را در سازه های فولادی مورد بررسی قرار داده اند. مؤدب و تیزهوش (Moaddab & Tizhoosh, 2021) به بررسی عددی و آزمایشگاهی میراگر لوله ای جدید متشکل از سه حلقه فولادی تودرتو پرداخته اند. نتایج نشان داده است که پیکربندی پیشنهادی به خوبی عملکرد متغیر میراگر را تأمین می کند. عبدالله پور و زهرایی (Abdollahpour & Zahrai, 2023) در مقاله ای دیگر با ترکیب میراگرهای اصطکاکی دورانی و میراگرهای لوله ای، سیستم استهلاک انرژی دو سطحی جدیدی را مورد مطالعه قرار داده اند به طوری که در ابتدا میراگر اصطکاکی نیروهای وارده را مستهلک نموده سپس میراگر لوله ای وارد مدار شده و انرژی ورودی را جذب می کند.

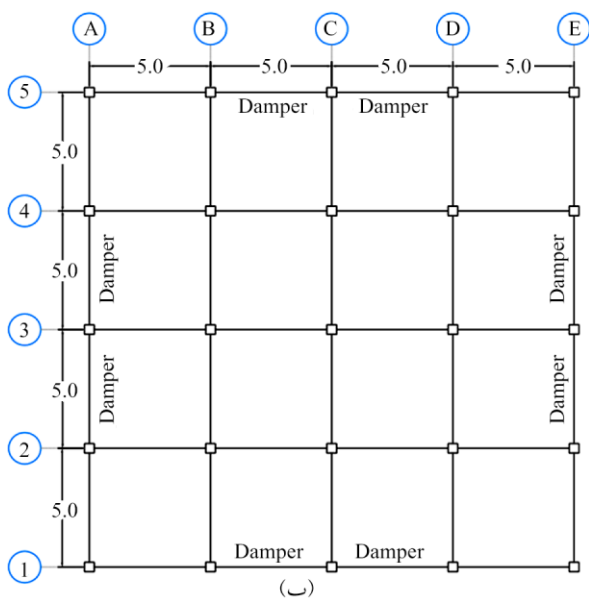
۲- معرفی میراگر لوله ای پیشنهادی

ایده اصلی میراگر پیشنهادی بر اساس ویژگی ها و مزایای لوله های فولادی طرح ریزی شده است. با استفاده از مزایای میراگرهای لوله ای، طرح جدیدی ارائه شده که دارای پیچیدگی کمتری نسبت به میراگرهای قبلی بوده و همچنین با استفاده از ویژگی برخورد تماسی بین دو لوله مجموعه ای از پارامترها همچون سختی، میرایی، مقاومت و شکل پذیری را برای سطوح مختلف زلزله در یک دستگاه واحد ارائه دهد. اجزای اصلی میراگر پیشنهادی تشکیل یافته از قطاع های دو لوله فولادی با قطرهای متفاوت می باشد که متکی بر نبشی فولادی است. از صفحه قائم فولادی در بالای لوله بیرونی به عنوان عامل انتقال نیرو

بر خاک نوع II طراحی شده‌اند. برای طراحی اعضای سازه‌های فولادی از آئین‌نامه طراحی AISC360-10 استفاده شده است. همچنین از مقاطع IPE در تیرها و از مقاطع BOX در ستون‌ها استفاده شده است. مقاطع تیرها و ستون‌ها در جدول‌های (۳) تا (۵) به تفکیک طبقات قابل مشاهده می‌باشد.



(الف)

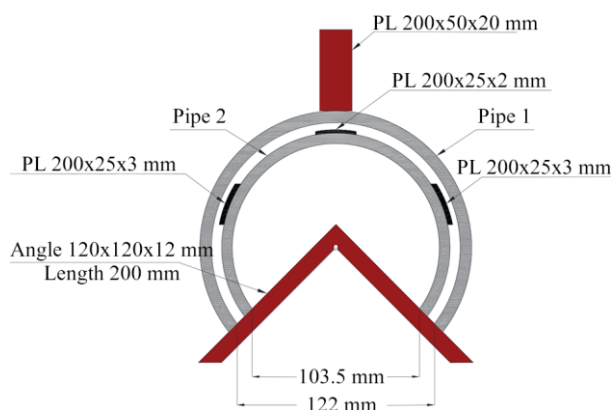


(ب)

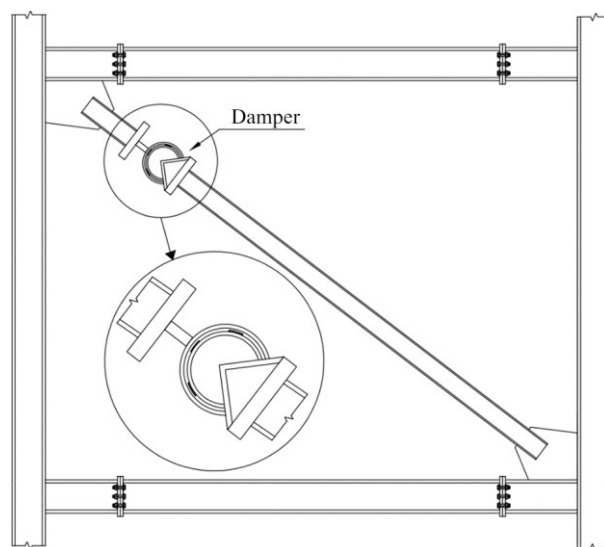
شکل (۵): پلان ساختمان‌ها: (الف) ۴ طبقه و (ب) ۸ و ۱۲ طبقه.

جدول (۲): مشخصات مصالح فولادی.

مقادیر	پارامتر
۷۸۵۰	وزن واحد حجم (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
۲۱۰۰۰۰۰	مدول ارتجاعی (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
۰٫۳	ضریب پواسون
۲۴۰۰	حداقل تنش تسلیم F_y (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
۳۷۰۰	حداقل مقاومت کششی فولاد F_u (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)



شکل (۳): جزئیات ابعاد هندسی میراگر پیشنهادی.



شکل (۴): نحوه قرارگیری میراگر پیشنهادی در قاب.

۳- معرفی مدل‌های سازه‌ای

۳-۱- فرضیات و بارگذاری

در این پژوهش، سه نوع ساختمان ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با پلان‌های نشان داده شده در شکل (۵) به ترتیب به عنوان نماینده ساختمان‌های کوتاه، متوسط و بلند مطابق با ضوابط استاندارد لرزه‌ای ۲۸۰۰ ویرایش چهارم طراحی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ارتفاع ۳ متری برای ارتفاع کلی طبقات در نظر گرفته شده است. همچنین بار مرده طبقات برابر با ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع فرض گردیده است. مشخصات فولاد مصرفی نیز در جدول (۲) آورده شده است. ساختمان‌های عنوان شده دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط با فرض کاربری مسکونی و قرارگیری در منطقه با خطرپذیری نسبی بسیار زیاد واقع

۲۸۰۰ ویرایش چهارم، شتاب‌نگاشت‌های اعمالی برای تحلیل‌های سه‌بعدی ابتدا باید با حداکثر مقدار خود مقیاس شوند، بدین معنی که حداکثر شتاب در مؤلفه‌ای که دارای بیشینه بزرگ‌تری است، برابر با شتاب ثقل g گردد. سپس طیف پاسخ شتاب هر زوج شتاب‌نگاشت مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد باید تعیین گردد. در مرحله آخر نیز باید هر زوج شتاب‌نگاشت باید طوری مقیاس گردند که برای هر زمان تناوب در محدوده ۰/۲ الی ۱/۵ برابر زمان تناوب سازه، مقادیر پاسخ‌ها بیش از ۱۰ درصد ۱/۳ برابر مقدار متناظر طیف طرح استاندارد کمتر نباشد.

جدول (۵) مقاطع مورد استفاده در ساختمان‌های ۱۲ طبقه.

طبقه	مقاطع ستون‌ها	مقاطع تیرها
۱	Box 270×20	IPE 330
۲	Box 240×20	IPE 330
۳	Box 240×20	IPE 330
۴	Box 240×15	IPE 330
۵	Box 240×15	IPE 330
۶	Box 240×15	IPE 330
۷	Box 240×15	IPE 330
۸	Box 200×15	IPE 300
۹	Box 200×15	IPE 300
۱۰	Box 150×15	IPE 300
۱۱	Box 150×15	IPE 270
۱۲	Box 150×15	IPE 240

جدول (۳): مقاطع مورد استفاده در ساختمان‌های ۴ طبقه.

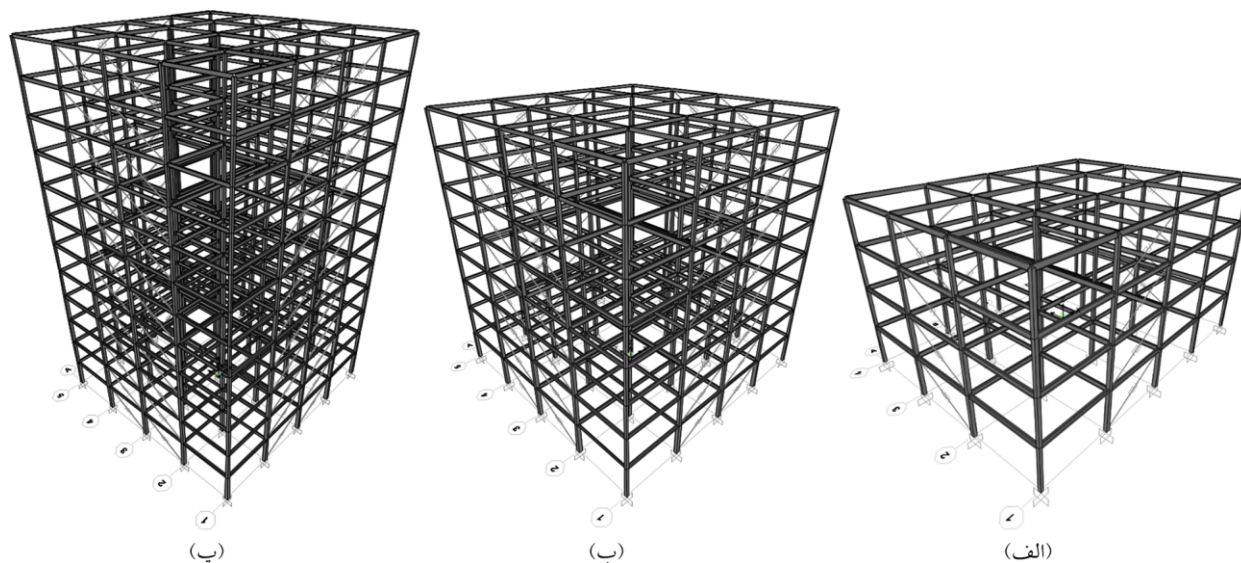
طبقه	مقاطع ستون‌ها	مقاطع تیرها
۱	Box 200×12	IPE 300
۲	Box 200×12	IPE 300
۳	Box 150×15	IPE 270
۴	Box 150×15	IPE 240

جدول (۴): مقاطع مورد استفاده در ساختمان‌های ۸ طبقه.

طبقه	مقاطع ستون‌ها	مقاطع تیرها
۱	Box 250×20	IPE 330
۲	Box 250×15	IPE 330
۳	Box 250×15	IPE 330
۴	Box 200×15	IPE 330
۵	Box 200×15	IPE 300
۶	Box 200×15	IPE 300
۷	Box 150×15	IPE 270
۸	Box 150×15	IPE 240

۳-۲- معرفی رکورد زلزله‌های اعمالی

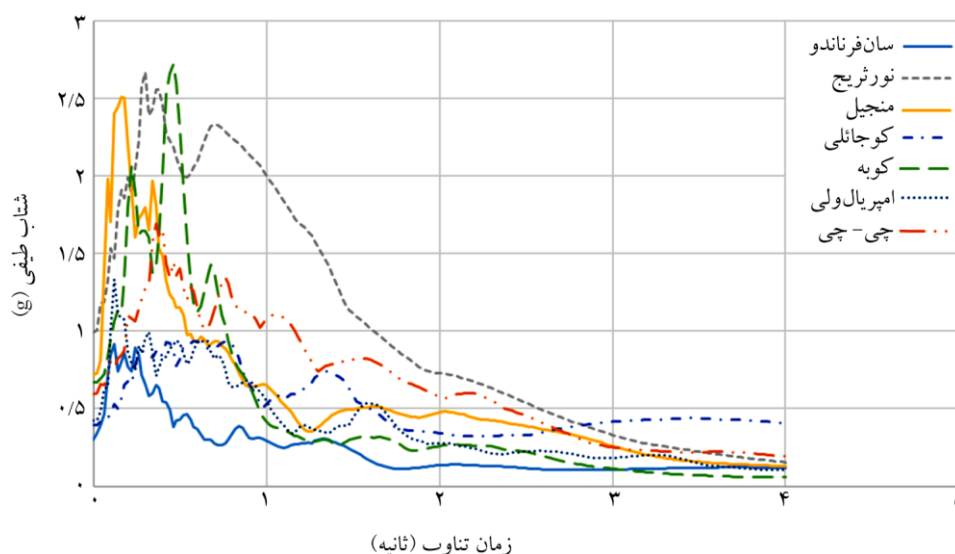
جهت بررسی عملکرد میراگر پیشنهادی طی بارگذاری لرزه‌ای از هفت شتاب‌نگاشت حوزه دور و نزدیک مطابق با دستورالعمل FEMA-P695 که با شتاب حداکثر، مدت تداوم و محتوای فرکانسی متفاوت مطابق با جدول (۶) استفاده شده است. لازم به ذکر است که طیف‌های پاسخ هریک از شتاب‌نگاشت‌های مذکور در شکل (۷) رسم گردیده است. با توجه به ضوابط استاندارد



شکل (۶): نمای سه‌بعدی ساختمان‌ها به همراه میراگر پیشنهادی: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، و (پ) ۱۲ طبقه.

جدول (۶): مشخصات رکورد زلزله‌های مورد استفاده.

زلزله	سال	ایستگاه	PGA (g)	مدت تداوم (ثانیه)	فاصله (کیلومتر)
چی چی	۱۹۹۹	TCU067	۰/۴۹	۹۰	۰/۶
امپریال ولی	۱۹۷۹	Delta	۰/۳۴	۱۰۰/۱۵	۲۲
کوبه	۱۹۹۵	Nishi Akashi	۰/۴۸	۴۰/۹۶	۲۵/۲
کوجانلی	۱۹۹۹	Yarimca	۰/۳۲	۳۵	۴/۸
منجیل	۱۹۹۰	Abbar	۰/۵۱	۵۳/۵	۱۲/۶
نورثریج	۱۹۹۴	Rinaldi Receiving Sta	۰/۸۷	۱۹/۹	۶/۵
سان فرناندو	۱۹۷۱	LA- Hollywood	۰/۲۲	۷۹/۴۵	۲۲/۸



شکل (۷): طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های اعمالی.

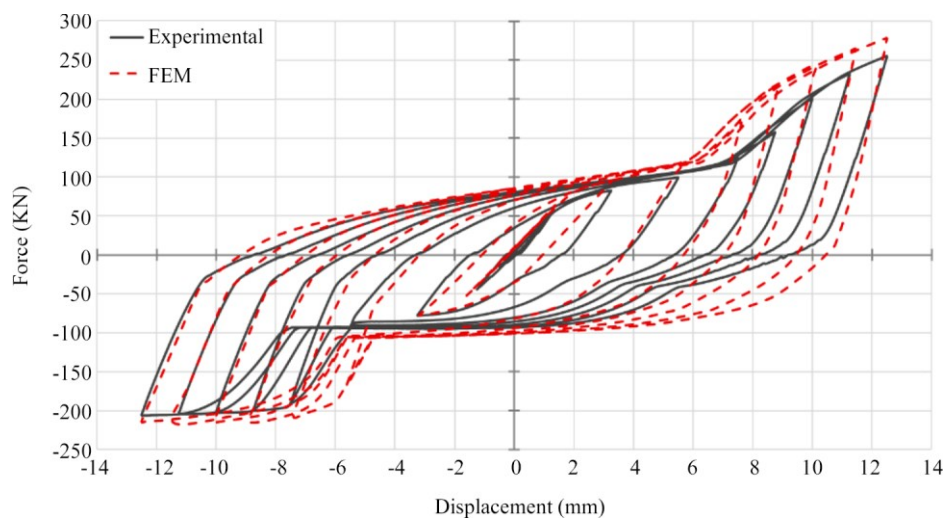
عددی (به روش اجزای محدود) می‌باشد. لازم به ذکر است بررسی آزمایشگاهی در آزمایشگاه سازه دانشگاه تبریز انجام یافته است و همچنین مدل‌سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS 2019 صورت پذیرفته است که نتایج به‌دست آمده از مطالعات مذکور در شکل (۸) قابل مشاهده است. همچنین مدل رفتار چندخطی میراگر پیشنهادی نیز در شکل (۹) آورده شده است. در جهت بررسی صحت نمودار چند خطی مستخرج شده از منحنی‌های هیستریزس، در شکل (۱۰) منحنی‌های هیستریزس به‌دست آمده از روش اجزای محدود و روش مورد استفاده در نرم‌افزار SAP2000 مورد مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده ملاحظه گردیده است که مطابقت مناسبی بین منحنی‌های هیستریزس وجود دارد.

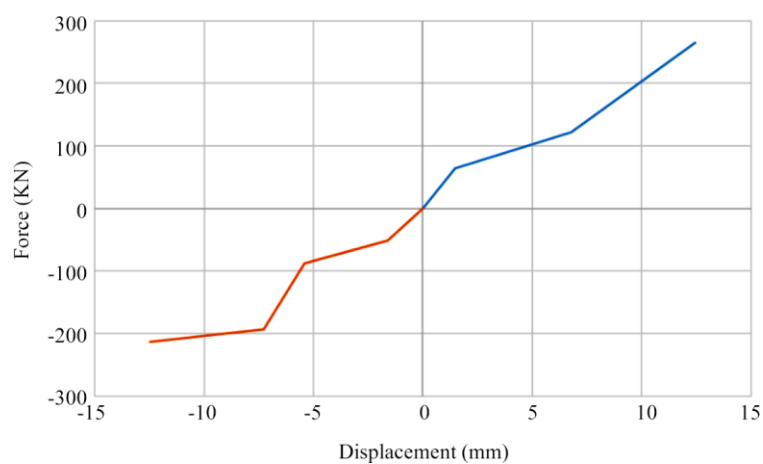
با رعایت ضوابط مطرح شده، اکنون می‌توان با ضرب ضریب مقیاس مذکور در شتاب‌نگاشت‌ها از آنها در تحلیل‌های دینامیکی استفاده نمود.

۳-۳- مشخصات میراگر لوله‌ای پیشنهادی با سختی متغیر

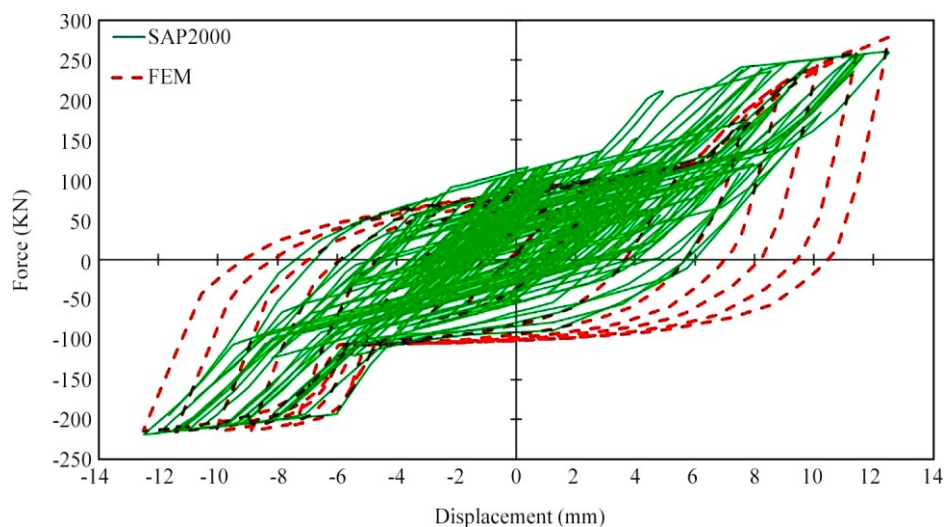
جهت بررسی تأثیرات افزودن میراگر پیشنهادی به قاب‌های خمشی فولادی از نرم‌افزار SAP 2000 V24 بهره گرفته شده است. با توجه به پیچیده بودن مدل‌سازی میراگرهای فلزی با سختی متغیر، از این‌رو با استفاده از گزینه لینک پلاستیک چندخطی که با استفاده از مدل چندخطی به‌دست آمده از نمودار هیستریزس مدل‌سازی را انجام می‌دهد رفتار میراگر پیشنهادی مدل‌سازی و بررسی گردیده است که نمودار چندخطی میراگر مذکور به‌دست آمده از منحنی‌های هیستریزس مطالعات تجربی و



شکل (۸): نمودارهای هیستریزیس به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی عددی (Hodaipour et al., 2025).



شکل (۹): مدل رفتار چندخطی میراگر پیشنهادی.



شکل (۱۰): مقایسه منحنی های هیستریزیس استخراج شده از نرم افزارهای ABAQUS و SAP2000.

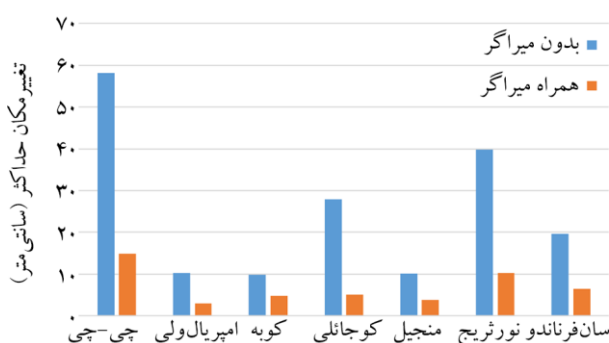
جدول (۷): بررسی تأثیر افزودن میراگر پیشنهادی بر زمان تناوب سازه.

سازه ۱۲ طبقه		سازه ۸ طبقه		سازه ۴ طبقه		زمان تناوب (ثانیه)
قاب	همراه میراگر	قاب	بدون میراگر	قاب	بدون میراگر	
۲/۰۳	۲/۶۷	۱/۵۶	۱/۹۵	۰/۹۹	۱/۱۴	مود اول
۲/۰۱	۲/۴۶	۱/۵۴	۱/۹	۰/۹	۱/۰۷	مود دوم

بیشینه شتاب بام به ترتیب در ادامه قابل مشاهده می‌باشد. مقادیر مربوط به سازه‌های بدون میراگر و همراه میراگر به صورت جداگانه طبقه‌بندی گردیده‌اند.

۴-۱- بررسی نتایج حداکثر تغییر مکان سازه‌ها

با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه شده است که کاهش حداکثر تغییر مکان سازه ۴ طبقه با استفاده از میراگر پیشنهادی در بازه ۷۴ تا ۵۱ درصدی قرار دارد. برای سازه ۸ طبقه نیز این کاهش در بازه‌ای بین ۸۴ تا ۱۵ درصدی به دست آمده است. همچنین برای سازه ۱۲ طبقه نیز این مقدار بین بازه ۶۹ تا ۱۰ درصدی قرار داشته است. در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) مقادیر تغییرات به دست آمده از افزودن میراگر پیشنهادی به قاب‌های خمشی توسط نمودارهای میله‌ای به نمایش در آمده است. با بررسی نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که افزودن میراگر پیشنهادی به قاب‌های خمشی فولادی دارای تأثیر مناسبی در کاهش حداکثر جابه‌جایی‌های به وجود آمده در اثر زمین‌لرزه‌های وارده بوده و از طرفی ملاحظه شده است که بیشترین تأثیر در سازه ۴ طبقه از لحاظ میانگین تأثیر در کاهش حداکثر تغییر مکان در اثر رکوردهای وارده را دارا می‌باشد.

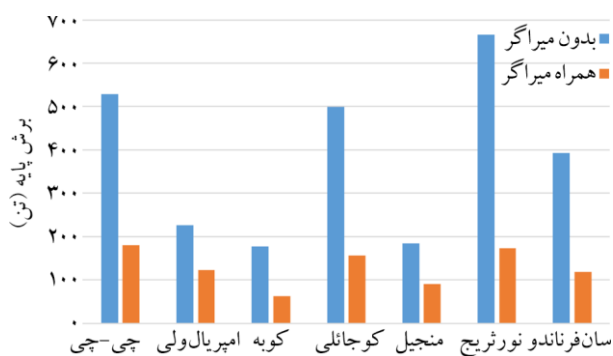


شکل (۱۱): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر تغییر مکان سازه ۴ طبقه.

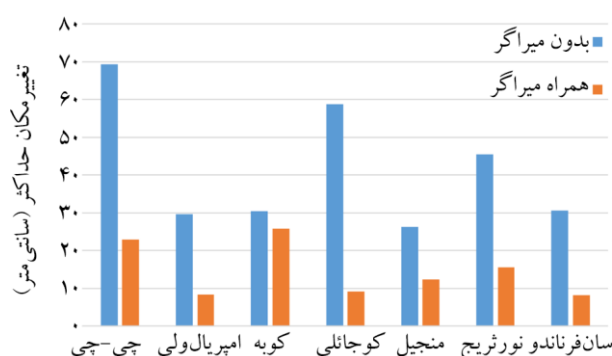
۴-۲- بررسی تأثیر افزودن میراگر لوله‌ای پیشنهادی در بهبود پاسخ‌های سازه‌ای

برای بررسی تأثیرات میراگرهای افزوده شده به قاب‌های خمشی فولادی، یک سازه بدون میراگر و یک سازه همراه با میراگر تحت تأثیر انواع رکوردهای زلزله قرار گرفته و رفتار آنها بررسی شده است. لازم به ذکر است برای هر سه ساختمان ۴، ۸ و ۱۲ طبقه، طبق روال فوق بررسی‌های لازم انجام یافته است. از مهم‌ترین موارد تأثیر گذار در رفتار سازه طی بارگذاری‌های دینامیکی، زمان تناوب سازه می‌باشد. از این رو با توجه به اهمیت موضوع، در ابتدای بررسی تأثیر گذاری میراگر پیشنهادی در مشخصات دینامیکی سازه، زمان تناوب مود اول و دوم با استفاده از تحلیل مودال به دست آمده است. طبق جدول (۷) قابل مشاهده است که افزودن میراگر به ساختمان‌های فولادی با قاب خمشی، باعث کاهش زمان تناوب سازه گردیده است که تأثیر این کاهش به عواملی همچون مشخصات فنی میراگر، تعداد و نحوه چیدمان در سازه بستگی دارد. از این رو تغییرات در زمان تناوب سازه به عنوان عامل مؤثری در نحوه عملکرد آن طی بارگذاری لرزه‌ای با توجه به طیف‌های طرح استاندارد همواره باید در طراحی و بهسازی سازه مورد توجه قرار گیرد.

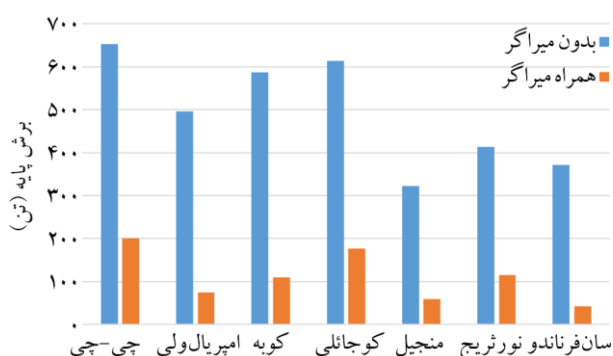
با توجه به بررسی‌های صورت گرفته روی سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مشاهده شده است که افزودن میراگر پیشنهادی به قاب‌های خمشی باعث کاهش در حداکثر تغییر مکان سازه، برش پایه، شتاب بیشینه بام و همچنین باعث کاهش تغییر مکان‌های نسبی طبقات گردیده است که مقادیر این تغییرات بسته به طبقات و محتوای فرکانسی هر رکورد زمین‌لرزه متفاوت بوده است. مقادیر مربوط به حداکثر تغییر مکان سازه، حداکثر برش پایه و



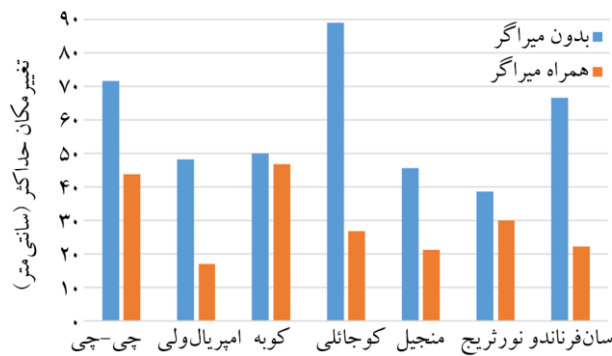
شکل (۱۴): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر برش پایه سازه ۴ طبقه.



شکل (۱۲): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر تغییر مکان سازه ۸ طبقه.



شکل (۱۵): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر برش پایه سازه ۸ طبقه.



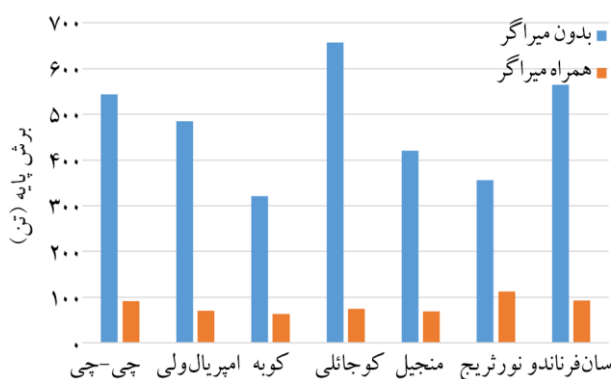
شکل (۱۳): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر تغییر مکان سازه ۱۲ طبقه.

۴-۲- بررسی نتایج برش پایه سازه‌ها

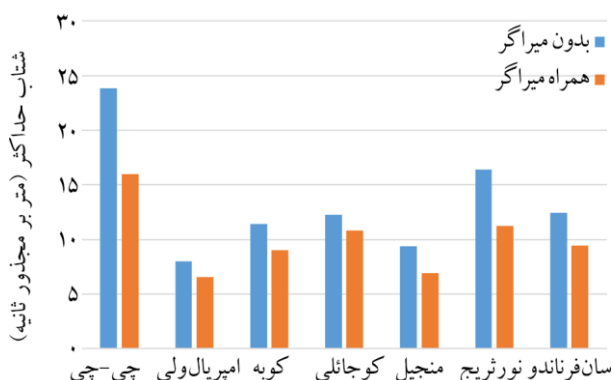
با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی تغییرات مقادیر برش پایه مطابق شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) ملاحظه گردیده است که با افزودن میراگر پیشنهادی به قاب‌های خمشی فولادی، در سازه ۴ طبقه برش پایه در بازه ۷۳ تا ۴۵ درصدی کاهش یافته است. همچنین این کاهش در سازه ۸ طبقه در بازه ۸۸ تا ۶۹ درصدی و در سازه ۱۲ طبقه در بازه ۸۸ تا ۶۸ درصدی بوده است. همچنین ملاحظه شده است که بیشترین تأثیر در سازه ۱۲ طبقه از لحاظ میانگین تأثیر در کاهش حداکثر برش پایه در اثر رکوردهای وارده به دست آمده است.

۴-۳- بررسی نتایج بیشینه شتاب بام سازه‌ها

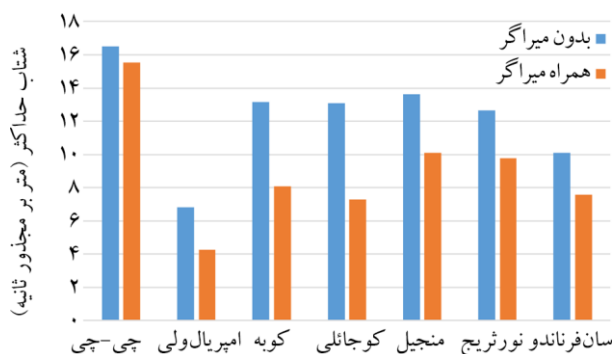
در ادامه بررسی‌های مربوط به بررسی تأثیرات افزودن میراگر پیشنهادی به قاب‌های خمشی فولادی، به بررسی تأثیرات آن در مقادیر شتاب بام پرداخته شده است. مطابق شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) ملاحظه شده است که با افزودن میراگر پیشنهادی به



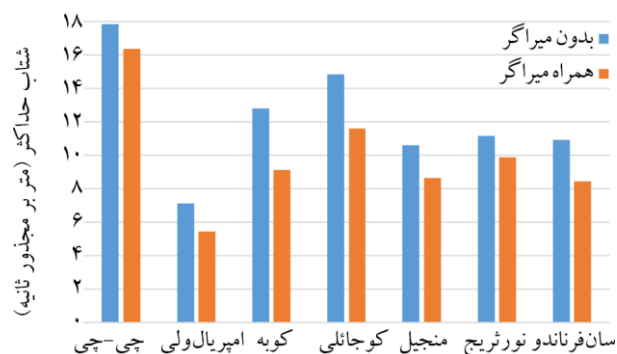
شکل (۱۶): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر برش پایه سازه ۱۲ طبقه.



شکل (۱۷): نمودار میله‌ای مقایسه شتاب بام سازه ۴ طبقه.



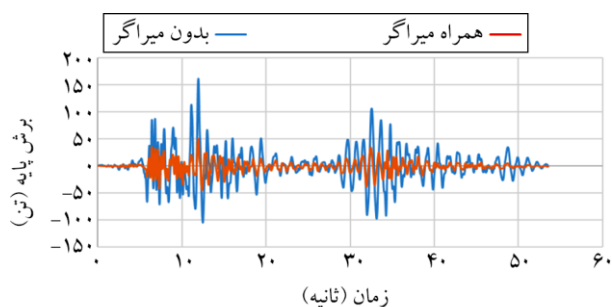
شکل (۱۹): نمودار میله‌ای مقایسه شتاب بام سازه ۱۲ طبقه.



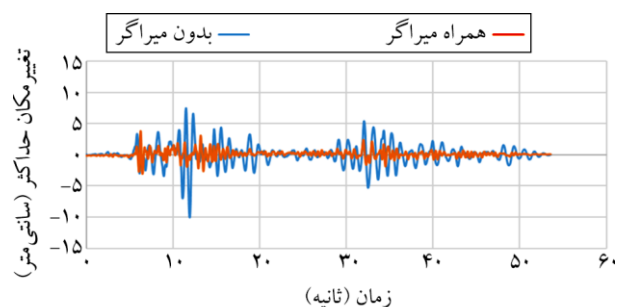
شکل (۱۸): نمودار میله‌ای مقایسه شتاب بام سازه ۸ طبقه.

در جهت نمایش هرچه بهتر مطالب عنوان شده، تاریخچه پاسخ‌های تغییر مکان حداکثر سازه، برش پایه و شتاب بام تحت رکورد زمین‌لرزه منجیل در شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) قابل مشاهده است، در هر سه مؤلفه تغییر مکان حداکثر، شتاب بام و برش پایه میراگر پیشنهادی دارای تأثیر مثبتی بوده

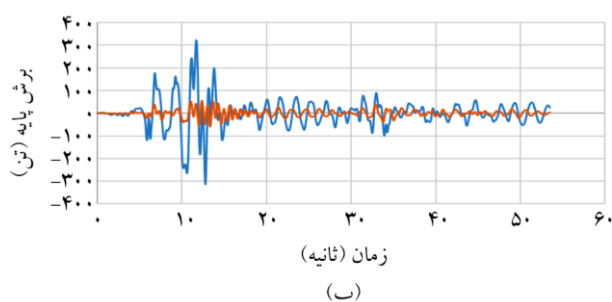
قاب‌های خمشی فولادی، در سازه ۴ طبقه شتاب بام در بازه ۳۲ تا ۱۲ درصدی کاهش داشته است. همچنین در سازه ۸ طبقه این کاهش در بازه ۲۸ تا ۹ درصدی و در سازه ۱۲ طبقه در بازه ۴۴ تا ۶ درصدی بوده است. همچنین ملاحظه شده است که بیشترین تأثیر در سازه ۱۲ طبقه از لحاظ میانگین تأثیر در کاهش شتاب بام در اثر رکوردهای وارده به دست آمده است.



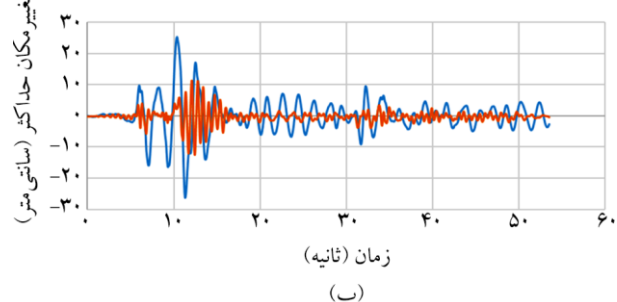
زمان (ثانیه)
(الف)



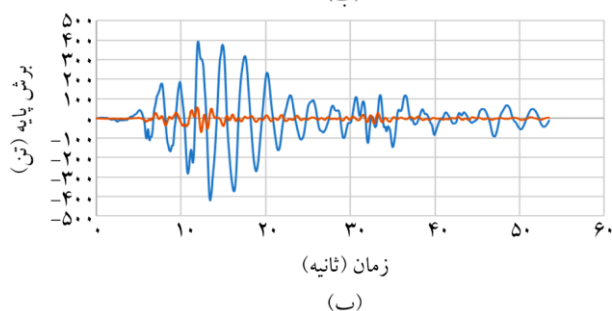
زمان (ثانیه)
(الف)



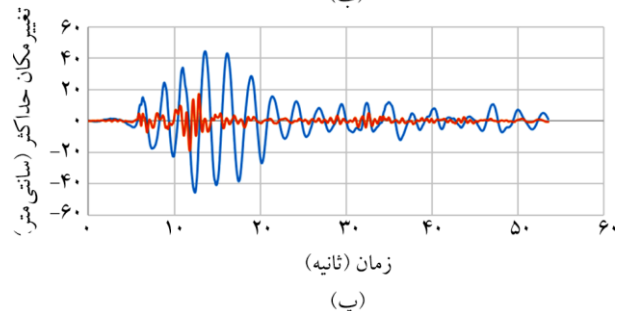
زمان (ثانیه)
(ب)



زمان (ثانیه)
(ب)



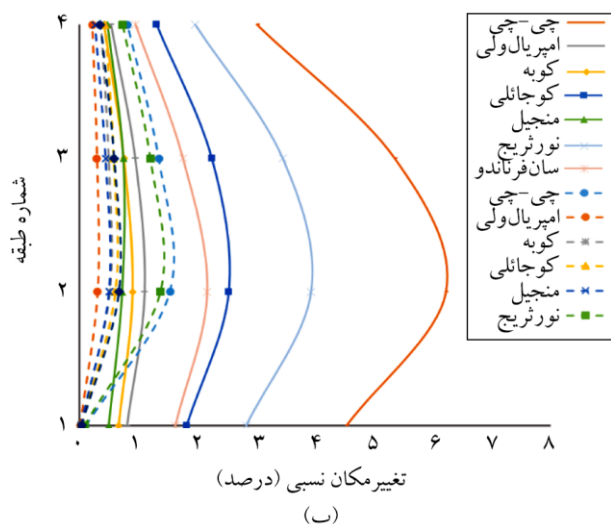
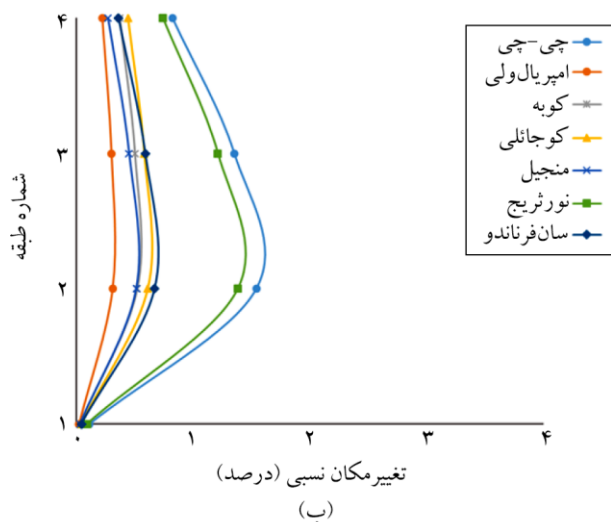
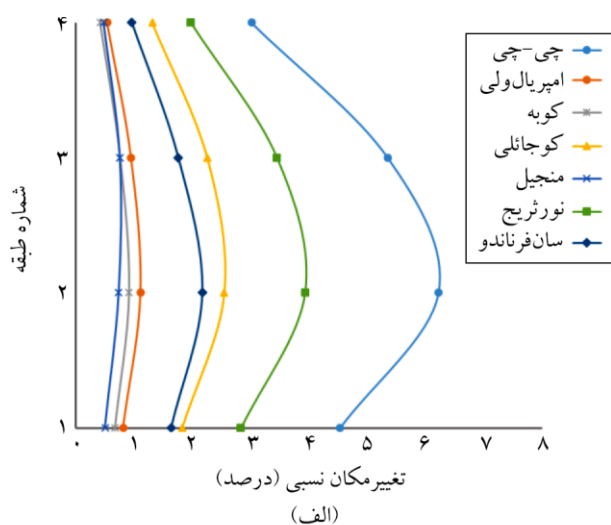
زمان (ثانیه)
(پ)



زمان (ثانیه)
(پ)

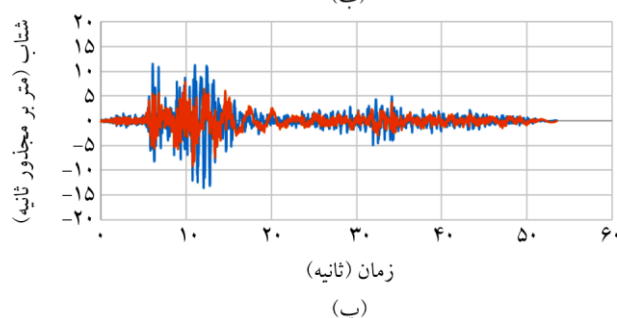
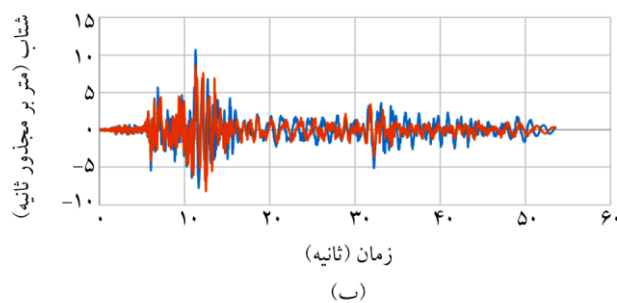
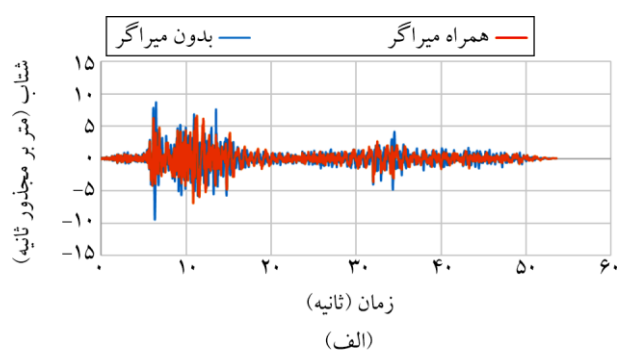
شکل (۲۱): تاریخچه زمانی برش پایه سازه تحت رکورد منجیل: (الف) سازه ۴ طبقه، (ب) سازه ۸ طبقه و (پ) سازه ۱۲ طبقه.

شکل (۲۰): تاریخچه زمانی تغییر مکان سازه تحت رکورد منجیل: (الف) سازه ۴ طبقه، (ب) سازه ۸ طبقه و (پ) سازه ۱۲ طبقه.



شکل (۲۳): مقایسه تغییر مکان‌های نسبی طبقات سازه ۴ طبقه (الف) بدون میراگر، (ب) همراه میراگر و (پ) نمودار مقایسه‌ای حالت‌های (الف) و (ب).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزودن میراگر پیشنهادی به قاب‌های خمشی فولادی باعث کاهش محسوس تغییر مکان‌های



شکل (۲۲): تاریخچه زمانی شتاب بام تحت رکورد منجیل: (الف) سازه ۴ طبقه، (ب) سازه ۸ طبقه و (پ) سازه ۱۲ طبقه.

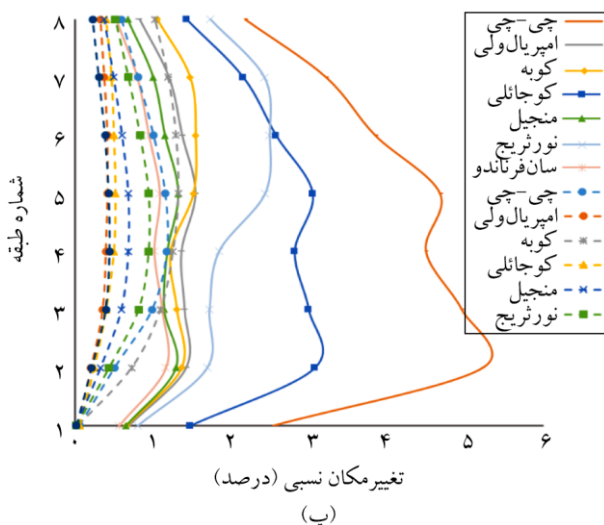
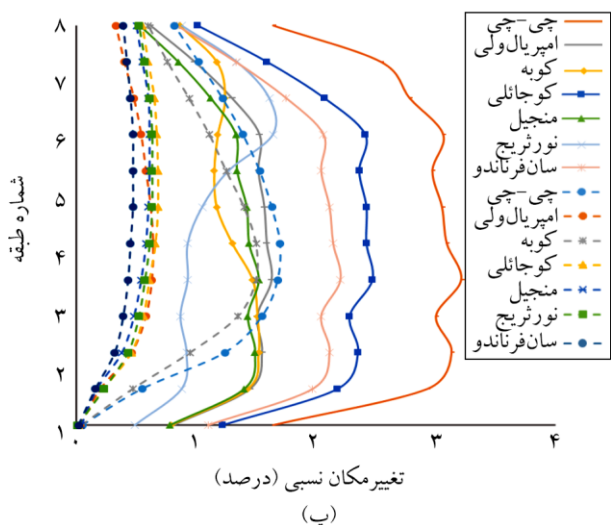
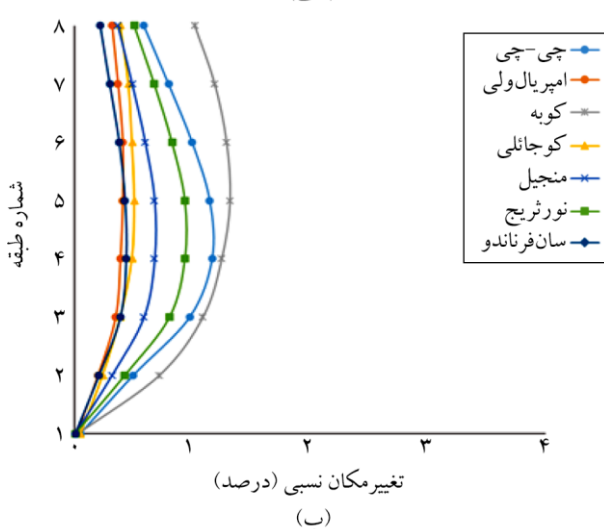
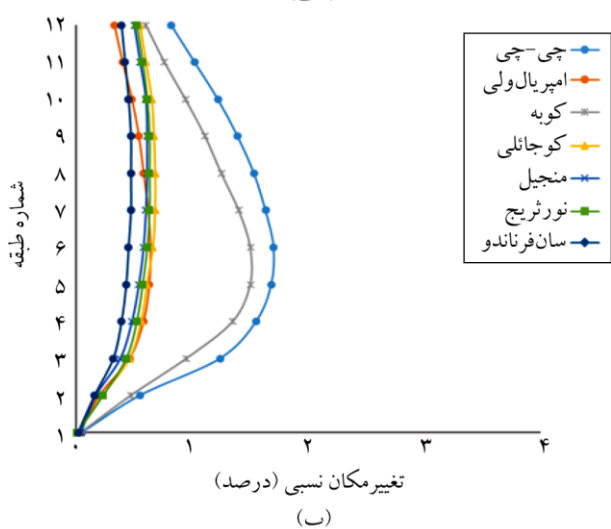
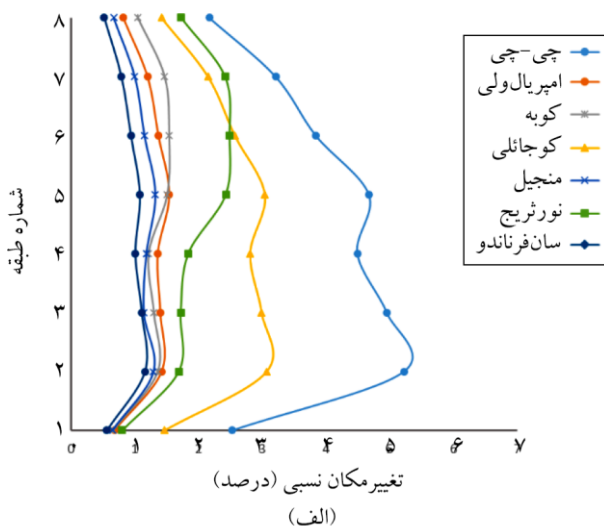
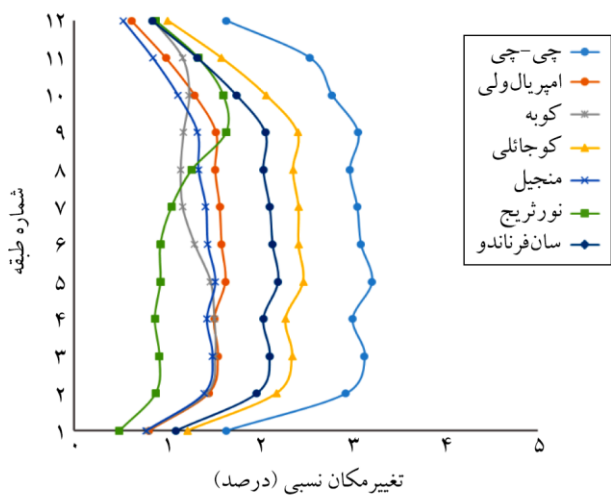
لذا این اثرات از روند ثابت برخوردار نیست. قابل ذکر است که تأثیر افزودن میراگر پیشنهادی در کاهش تغییر مکان حداکثر سازه و برش پایه نسبت به کاهش در شتاب بام، بیشتر بوده است.

۴-۴-۴ بررسی نتایج تغییر مکان نسبی طبقات سازه‌ها

در ادامه بررسی نتایج به دست آمده به بررسی میزان تأثیر گذاری میراگر پیشنهادی لوله‌ای در کاهش تغییر مکان نسبی طبقات در قاب‌های خمشی فولادی پرداخته شده است. تغییر مکان نسبی طبقات یکی از موارد تأثیر گذار در رفتار سازه‌ها می‌باشد که با کنترل و تغییر محدوده آن می‌توان از آسیب‌های وارده به سازه جلوگیری کرد. با توجه به موارد عنوان شده، تغییر مکان نسبی هر یک از طبقات تحت اثر رکورد زلزله هفتگانه به دست آمده و در شکل‌های (۲۳) تا (۲۵) قابل مشاهده است.

مکان نسبی طبقات به ترتیب ۶۲، ۶۰ و ۵۶ درصدی سازه‌های ۸، ۴ و ۱۲ طبقه می‌باشد؛ که بیشترین تأثیر را سازه ۴ طبقه دارا می‌باشد.

نسبی طبقات و در نتیجه باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه گردیده است. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بیانگر متوسط کاهش تغییر



شکل (۲۵): مقایسه تغییر مکان‌های نسبی طبقات سازه ۱۲ طبقه (الف) بدون میراگر، (ب) همراه میراگر و (پ) نمودار مقایسه‌ای حالت‌های (الف) و (ب).

شکل (۲۴): مقایسه تغییر مکان‌های نسبی طبقات سازه ۸ طبقه (الف) بدون میراگر، (ب) همراه میراگر و (پ) نمودار مقایسه‌ای حالت‌های (الف) و (ب).

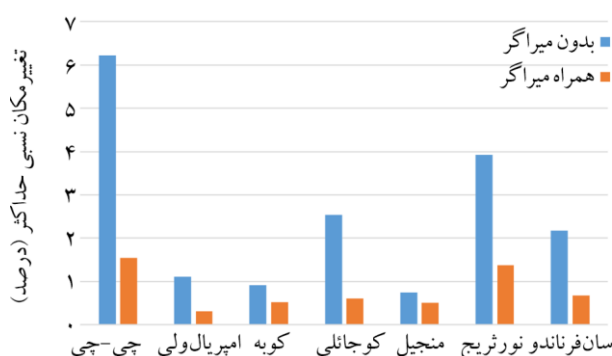
از طرفی با توجه به ارائه مقادیر متغیر از جمله سختی و مقاومت میراگر پیشنهادی در مواجهه با بارهای لرزه‌ای با محتوای فرکانسی متفاوت متأثر از رکوردهای زلزله، عملکرد و رفتار مطلوب تری را ارائه می‌دهد. موارد متغیر سختی، مقاومت و استهلاک انرژی متناسب با میزان نیروی اعمالی ناشی از بارهای لرزه‌ای از ویژگی‌های مفید و تأثیرگذار در بهبود رفتار سازه خواهند بود.

۵- نتیجه گیری

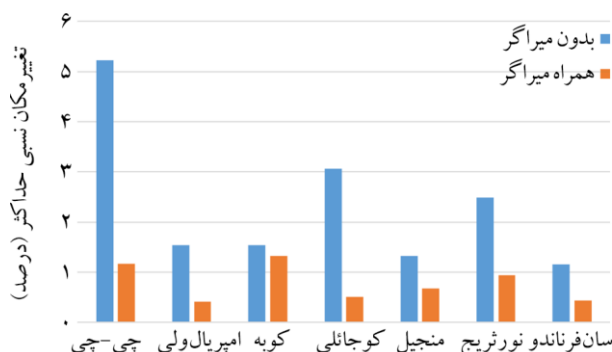
با بررسی نتایج حاصل از ارزیابی تأثیر میراگر لوله‌ای پیشنهادی در بهبود پاسخ‌های دینامیکی قاب‌های خمشی فولادی، ملاحظه شد که با توجه به متفاوت بودن ماهیت‌های لرزه‌ای رکورد زلزله‌های انتخابی همانند مدت تداوم و محتوای فرکانسی، شاهد بهبود محسوس عملکرد و رفتار سازه‌های مجهز به میراگر مذکور هستیم که دلیل این امر متأثر از رفتار و عملکرد متغیر میراگر پیشنهادی تحت زلزله‌های مختلف می‌باشد. میانگین کاهش ۶۹، ۶۱ و ۴۶ درصدی مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی به ترتیب در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر لوله‌ای پیشنهادی مؤید تأثیرگذاری بسزا در بهبود عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها می‌باشد.

کاهش در مقادیر پارامترهای دیگر همچون برش پایه که به‌طور متوسط در حدود ۶۳، ۷۸ و ۸۱ درصد و همچنین کاهش در شتاب بیشینه بام که به‌طور میانگین در حدود ۲۴، ۱۹ و ۲۹ درصدی به ترتیب در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر لوله‌ای پیشنهادی علیرغم افزایش سختی سازه و کاهش زمان تناوب سازه صورت پذیرفته است. همچنین مجهز کردن قاب‌های خمشی فولادی به میراگر مذکور باعث کاهش آسیب‌ها و خرابی‌های احتمالی به‌واسطه کاهش تغییر مکان‌های نسبی طبقات خواهد شد به‌طوری‌که هنگام استفاده از میراگر مذکور به‌طور متوسط تغییر مکان نسبی طبقات با کاهش حدود ۶۲، ۶۰ و ۵۶ درصدی به ترتیب در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ همراه بوده است. با ارائه نکات و نتایج فوق، نتیجه می‌گیریم که استفاده از

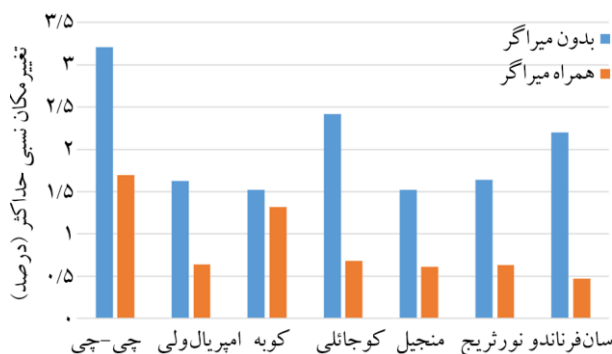
همچنین در جهت مقایسه هرچه بهتر مقادیر تغییر مکان نسبی حداکثر به‌صورت نمودارهای میله‌ای در شکل‌های (۲۶) تا (۲۸) آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده و تأثیرات میراگر پیشنهادی در پارامترهای لرزه‌ای از جمله کاهش تغییر مکان نسبی طبقات، پیشنهاد استفاده از ساختار پیشنهادی در سازه‌های جدیدالاحداث و همچنین در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های قدیمی را ارائه می‌دهد.



شکل (۲۶): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات سازه ۴ طبقه.



شکل (۲۷): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات سازه ۸ طبقه.



شکل (۲۸): نمودار میله‌ای مقایسه حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات سازه ۱۲ طبقه.

Behzadfar, Maleki, A., & Lotfollahi, M. A. (2020). Improved seismic performance of chevron brace frames using multi-pipe yield dampers. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(4), 137-155. <https://doi.org/10.22075/jrce.2020.19792.1383>

Cheraghi, A., & Zahrai, M. (2017). Cyclic testing of multi-level pipe in pipe damper. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(10), 1695-1718. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1387191>

Cheraghi, A., & Zahrai, M. (2019). Performance evaluation of yielding pipe in pipe damper by using incremental dynamic analysis. *Journal of Structural Steel*, 13(25), 5-15 (in Persian). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.1735515.1398.1398.25.2.6>

Computers and Structures, Inc. (2000). *SAP2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures-Analysis Reference*. Berkeley, CA: Computers and Structures, Inc.

Dassault Systèmes Simulia Corp. (2019). *ABAQUS/Standard User's Manual (Version 2019)*. Providence, RI: Dassault Systèmes.

Gorji, M., Abdolmaleki, H., & Gorji, A. (2020a). Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of steel ring dampers (SRDs). *Thin-Walled Structures*, 151, 106751. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106751>

Gorji, M., Gorji, A., & Abdolmaleki, H. (2020b). Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs). *Journal of Constructional Steel Research*, 172, 106145. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106145>

Guo, W., Chen, X., Yu, Y., Bu, D., Li, S., Fang, W., Wang, X., Zeng, C., & Wang, Y. (2021). Development and seismic performance of bolted steel dampers with X-shaped pipe halves. *Engineering Structures*, 239, 112327. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112327>

Guo, W., Wang, X., Yu, Y., Chen, X., Li, S., Fang, W., Zeng, C., Wang, Y., & Bu, D. (2020). Experimental study of a steel damper with X-shaped welded pipe halves. *Journal of Constructional Steel Research*, 170, 106087. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106087>

He, Z., & Chen, Q. (2020). Upgrading the seismic performance of underground structures by introducing lead-filled steel tube dampers. *Tunnelling and*

میراگر پیشنهادی در قاب‌های خمشی فولادی موجب کاهش تغییر مکان کلی سازه، کاهش تغییر مکان نسبی طبقات، کاهش برش پایه و همچنین کاهش شتاب بیشینه بام می‌گردد؛ اما میزان کارایی این روش وابسته به نوع و ماهیت رکوردهای زلزله، تعداد میراگر مورد استفاده و همچنین مشخصات سازه‌ها متفاوت است.

References

مراجع

Abdollahiparsa, H., Mahboubi, B., Zohari, A., & Abdollahiparsa, S. (2020). Seismic behavior of braced steel frames with pipe dampers. *Advances in Structural Engineering*, 24(8), 1526-1538. <https://doi.org/10.1177/1369433220981653>

Abdollahpour, A., & Zahrai, M. (2023). Two-level control system of toggle braces having pipe damper and rotational friction damper. *Structural Engineering and Mechanics*, 86(6), 739-750. <https://doi.org/10.12989/sem.2023.86.6.739>

Andalib, Z., Kafi, M., Bazzaz, M., & Momenzadeh, S. (2018). Numerical evaluation of ductility and energy absorption of steel rings constructed from plates. *Engineering Structures*, 169, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.034>

Andalib, Z., Kafi, M., Kheyroddin, A., & Bazzaz, M. (2014). Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.07.016>

Applied Technology Council. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors (FEMA P-695)*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.

Bazzaz, M., Kafi, M., Kheyroddin, A., Andalib, Z., & Esmaili, H. (2014). Evaluating the seismic performance of off-centre bracing system with circular element in optimum place. *International Journal of Steel Structures*, 14(2), 293-304. <https://doi.org/10.1007/s13296-014-2009-x>

Beheshti-Aval, B., Mahbanouei, H., & Zareian, F. (2013). A hybrid friction-yielding damper to equip concentrically braced steel frames. *International Journal of Steel Structures*, 13(4), 577-587. <https://doi.org/10.1007/s13296-013-4001-2>

- Maleki, S., & Mahjoubi, S. (2013). Dual-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 85, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.03.004>
- Maleki, S., & Mahjoubi, S. (2014). Infilled-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 98, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.015>
- Masoumi, A., & Preciado, A. (2021). Experimental and analytical investigations of enhanced semi-rigid connections with dual pipe dampers. *Structures*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.106>
- Moaddab, E., & Tizhoosh, H. (2021). Experimental and numerical evaluation of new pipe damper with two-level performance. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(40), 75-95 (in Persian). <https://doi.org/10.22065/jsce.2019.171319.1780>
- Reisi, A. R., Mirdamadi, H. R., & Rahgozar, M. A. (2021). The nested-eccentric-shells damper with an improved approach to increasing hysteresis behavior. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(1) (in Persian). <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18975.7013>
- Sheikhi, J., & Fathi, M. (2020). Natural rubber bearing incorporated with steel ring damper (NRB SRD). *International Journal of Steel Structures*, 20(1), 23-37. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00267-7>
- Zahrai, M., & Cheraghi, A. (2017). Improving cyclic behavior of multi-level pipe damper using infill or slit diaphragm inside inner pipe. *Structural Engineering and Mechanics*, 64(2), 195-204. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.64.2.195>
- Zhong, G., He, Z., Chen, H., & Zhou, Y. (2023). Seismic performance of end-reinforced steel pipe dampers: Laboratory test and numerical investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, 208, 107994. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107994>
- Underground Space Technology, 108(3), 103727. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103727>
- Hodaipour, Y., Ferdousi, A., Hosseinzadeh, Y., & Hosseinzadeh, L. (2025). Experimental and analytical investigation of cyclic behavior of an innovative multilevel control damper. *Journal of Structural Design and Construction Practice*, 30(3), 04025058. <https://doi.org/10.1061/JSDCCC.SCENG-1738>
- Ismail, M. (2019). An elastoplastic bracing system for structural vibration control. *Engineering Structures*, 200, 109671. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109671>
- Jarrah, M., Khezzadeh, H., Mofid, M., & Jafari, K. H. (2019). Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD). *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.024>
- Lahooti, A., Sayari, A., & Manie, S. (2020). Cyclic behavior of pipe dampers reinforced with high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) materials. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 14(2).
- Li, H., Du, Y., Han, J., Li, F., & Chi, P. (2024). Experimental and numerical study of low-yield-point steel corrugated pipe dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 180, 108615. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108615>
- Mahjoubi, S., & Maleki, S. (2016). Seismic performance evaluation and design of steel structures equipped with dual-pipe dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.01.023>
- Mahyari, S., Riahi, H., & Hashemi, M. (2019). Investigating the analytical and experimental performance of a pure torsional yielding damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, 385-399. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.07.010>
- Maleki, S., & Bagheri, S. (2010a). Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(8-9), 1088-1095. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.03.010>
- Maleki, S., & Bagheri, S. (2010b). Pipe damper, Part II: Application to bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(8-9), 1096-1106. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.03.011>

Evaluating the Impact of the Proposed Variable Stiffness Pipe Damper on Improving the Dynamic Response of Steel Moment Frames

Yashar Hodaipour¹, Adel Ferdousi^{2*}, Yousef Hosseinzadeh³ and Leila Hosseinzadeh⁴

1. Ph.D. Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran Robotics & Soft Technologies Research Center, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran,
*Corresponding Author, email: a_ferdousi@iau.ac.ir
3. Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Earthquakes pose a persistent and formidable natural threat, prompting decades of extensive research aimed at mitigating their destructive impact on built infrastructure. The seismic input energy transferred to a structural system is critically governed by both the dynamic properties of the structure and the frequency content of the ground motion. Among the available protective strategies, passive control systems have proven to be highly effective, offering robust solutions for both seismic design of new structures and retrofitting of existing substandard buildings, particularly those with deficient lateral load-resisting systems such as precast concrete frames. Within this category, metallic yielding dampers are widely employed to suppress structural responses by capitalizing on the post-elastic deformation capacity and stable hysteretic behavior of metals. These devices are particularly advantageous due to their ease of fabrication, stable and repeatable cyclic performance, and inherent insensitivity to environmental variations, which collectively ensure long-term operational reliability.

Steel pipe dampers, as a specific subclass, have demonstrated significant capability in dissipating seismic energy through inelastic deformations, thereby protecting primary load-bearing elements from severe damage, while also offering considerable flexibility in their integration within beam-to-column connections. As an advanced refinement of conventional metallic dampers, multi-level yielding mechanisms have been developed to provide adaptive performance under various seismic hazard intensities.

In this context, the present study investigates the efficacy of a novel dual-level steel pipe damper in enhancing the seismic behavior of steel moment-resisting frames (MRFs). To this end, three prototype structures of 4, 8, and 12 stories were analyzed using the SAP2000 software to comprehensively evaluate the influence of the proposed damper on the structural response. Numerical results reveal a marked improvement in the dynamic performance of retrofitted frames, attributable to the adaptive, multi-stage operational characteristics of the damper when subjected to ground motions with diverse frequency contents and strong-motion durations.

Quantitatively, the proposed device achieved substantial average reductions in maximum lateral displacements by 69%, 61%, and 46% for the 4-, 8-, and 12-story frames, respectively. Furthermore, significant enhancements were observed in other critical response parameters, including average base shear reductions of 63%, 78%, and 81%, and peak roof acceleration decreases of 24%, 19%, and 29% for the corresponding frames, all attained despite an inherent increase in structural stiffness and a consequent reduction in the fundamental vibration period. Additionally, the incorporation of the dampers led to a pronounced reduction in inter-story drift, averaging 62%, 60%, and 56% across the three structural configurations, effectively minimizing the potential for cumulative structural damage. In conclusion, the findings substantiate that the proposed dual-level steel pipe damper is highly effective in reducing global and inter-story drifts, base shear, and roof acceleration. Nevertheless, the ultimate efficiency of this passive control strategy remains contingent upon the intrinsic characteristics of the seismic input, the spatial distribution and number of dampers, and the specific dynamic properties of the host structure.

Keyword: Dynamic Analysis, Energy Dissipation, Pipe Damper, Variable Stiffness.