



# بررسی رفتار لرزه‌ای میراگرهای جاری شونده U شکل در قاب‌های خمشی فولادی

سامان باقری<sup>۱</sup>، مجید برقیان<sup>۲</sup>، فرهاد سایی<sup>۳</sup>  
(تاریخ دریافت: ۹۰/۱۰/۰۲، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۰۴)

## چکیده

در این مقاله عملکرد میراگرهای فلزی جاری‌شونده U شکل در قاب‌های فولادی با استفاده از روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور مدل‌های سه، پنج و ده طبقه قاب‌های ساختمانی فولادی در نظر گرفته شده، میراگرهای مذکور از طریق باندبندهای ۸ شکل به آنها افزوده شد. این مدل‌های سازه‌ای تحت تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی با استفاده از رکوردهای شتاب چهار زلزله مختلف قرار گرفتند. رفتار و پاسخ غیرخطی در تحلیل‌های انجام یافته با اعمال خصوصیات غیرخطی برای میراگرها در قاب و نیز از طریق اختصاص مفاصل پلاستیک به اعضای سازه‌ای همچون تیرها و ستون‌ها در نظر گرفته شد تا شاهد رفتار لرزه‌ای واقعی‌تر مدل‌ها باشیم. نتایج نشان می‌دهد با قرار دادن میراگرهای فولادی جاری شونده U شکل در قاب‌های خمشی، رفتار غیرخطی از اعضای سازه‌ای به قطعات میراگر منتقل می‌شود؛ بنابراین خرابی احتمالی کاهش یافته و یا از بین می‌رود. بر اساس نتایج عددی بدست آمده، افزودن این میراگرها به قاب‌ها، باعث کاهش متغیرهای پاسخ مختلف از جمله حداکثر برش پایه و تغییر مکان نسبی طبقات می‌گردد، به گونه‌ای که در متغیرهای مذکور به طور متوسط به ترتیب، حدود ۲۸٪ و ۴۸٪ کاهش مشاهده می‌شود.

## کلمات کلیدی

زلزله، تحلیل لرزه‌ای، تحلیل غیرخطی، میراگر، قاب فولادی

## Seismic Behavior of U-Shaped Metallic-Yielding Dampers in Steel Moment Resisting Frames

S. Bagheri, M. Barghian, F. Saieri

### ABSTRACT

Performance of U-shaped metallic-yielding dampers has been studied using finite element method in steel frames. Dampers were added to the 3, 5 and 10 story building frames together with inverted V-braces. Nonlinear time history analyses were applied to models under four different earthquake ground motions. Models were used considering not only dampers nonlinear properties but also steel frames components nonlinear properties such as beams and columns through assigning plastic hinges. The results show that by adding the U-shaped dampers to moment resisting frames, nonlinear behavior is transferred from frame members to the damper system. Therefore, structural damages are reduced or removed. According to numerical results obtained from analyses of the frame models, adding the U-shaped dampers decreases maximum base shear of structure and the stories maximum story drifts by cutting down about 28 percent and 48 percent respectively.

### KEYWORDS

Earthquake, Seismic analysis, Nonlinear analysis, Damper, Steel frame

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، s\_bagheri@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، barghian@tabrizu.ac.ir

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تبریز، saieri87@ms.tabrizu.ac.ir



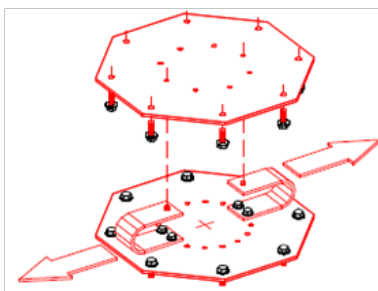
در سازه‌های ساختمانی متداول، طراحی مقاوم در برابر زلزله بر شکل‌پذیری بعد از تسلیم اعضای سازه‌ای جهت فراهم آوردن اتلاف انرژی ورودی زلزله استوار است؛ در حالیکه با استفاده از وسایل مستهلک‌کننده انرژی و یا همان میراگرها می‌توان اتلاف انرژی ورودی را در نقاط از پیش تعیین شده متمرکز نموده، از رفتار غیرخطی اعضای اصلی که در مسیر باربری ثقلی نیز قرار دارند، جلوگیری نمود. بنابراین احتمال بروز خرابی در اعضای اصلی به حداقل می‌رسد و این میراگرها هستند که انرژی ورودی را مستهلک کرده و در صورت خرابی احتمالی به سادگی قابل تعویض می‌باشند.

از جمله موثرترین مستهلک‌کننده‌های انرژی، میراگرهای فلزی جاری شونده هستند. این نوع میراگرها از اوایل دهه ۱۹۷۰ به منظور جذب انرژی ورودی به سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. اصول کار آنها معمولاً بر مبنای تسلیم شکل‌پذیر فولاد نرمه می‌باشد. ایده به کارگیری جداگانه میراگرهای هیستریزس فلزی در داخل سازه به منظور جذب انرژی لرزه‌ای، با کارهای آزمایشگاهی و مفهومی Kelly و همکارانش در سال ۱۹۷۲ [۱] و Skinner و همکارانش در سال ۱۹۷۵ [۲] شروع شد. آنها چند نوع ابزار فولادی ساده را به عنوان وسایل مستهلک‌کننده انرژی معرفی و مورد آزمایش قرار دادند. از جمله این ابزارها، ورق‌های باریک فولادی U شکل بود. نتایج آزمایش‌های رفت و برگشتی آنها نشان داد که ورق‌های فولادی U شکل می‌توانند جابجایی‌های بسیار زیادی را در حوضه غیرالاستیک تحمل نموده و از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک فولاد نرمه باعث استهلاک انرژی شوند. سایر ابزار معرفی شده توسط آنها به عنوان میراگر فلزی جاری شونده، تیر پیچشی و تیر خمشی بود. در سال‌های بعد اشکال دیگری نیز توسط سایر محققین به عنوان میراگر فلزی معرفی شد که معروفترین آنها المان‌های X شکل افزاینده میرایی و سختی (ADAS) می‌باشد که بر پایه تسلیم خمشی ورق‌های فولاد نرمه طراحی شده‌اند [۳].

بعد از وقفه‌ای چند ساله در سال ۱۹۹۲ خواص جذب و استهلاک انرژی المان‌های فولادی U شکل توسط گروهی دیگر بوسیله آزمایش‌های سیکلی مورد بررسی و تایید قرار گرفت [۴]. مطالعات تکمیلی در مورد این میراگر برای کاربرد عملی آن مربوط به کارهای ارزشمند Dolce و همکارانش می‌باشد که در سال ۱۹۹۶ این میراگر را در حالت تک محوره و دو محوره با چیدمان دایره‌ای تحت آزمایش و تحلیل‌های عددی قرار دادند [۵]. آنها همچنین پیشنهادهایی به منظور کاربرد این میراگر بر روی پایه‌های پل‌ها بیان نموده، گزارشی از کاربرد این ابزار در سال ۱۹۹۵ در حالت تک محوره بر روی یک پل در کشور ایتالیا ارائه نمودند. نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته بر روی این میراگر حاکی از رفتار مناسب آن می‌باشد؛ همچنین، از ویژگی‌های مهم این ابزار مستهلک‌کننده انرژی امکان استفاده از آن به صورت تک محوره، دو محوره و حتی به عنوان جداساز لرزه‌ای می‌باشد [۴، ۵ و ۶].

همچنان که اشاره شد، در مورد رفتار خود ابزار میراگر U شکل مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی به طور جامع صورت گرفته است. همچنین کاربرد آن در مورد پل‌ها و عموماً به جای بالشتک الاستومری تکیه‌گاهی تیرها و یا به عنوان دستگاه جداساز لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. ولی از آنجا که کاربرد المان‌های ADAS نسبت به سایر میراگرهای فلزی جاری شونده، اخیراً در ساختمان‌های فولادی بسیار متداولتر گشته است، حجم مطالعات و گزارشات از سایر انواع میراگرهای فلزی جاری شونده مخصوصاً میراگر U شکل در قاب‌های ساختمانی بسیار محدود می‌باشد [۷ و ۸]. البته از ابزار U شکل فولادی برای مقاصد دیگری استفاده گردیده است؛ مثلاً در یک دیتیل اتصال ستون بتن‌آرمه به تیر فولادی از ابزار U شکل فولادی استفاده شده و رفتار غیرخطی اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است [۹]. همچنین اخیراً یک مکانیسم با استفاده از ورق‌های U شکل در انتهای مهاربندهای ضربداری پیشنهاد گردیده است که ضمن اینکه سیستم مهاربندی فقط به کشش کار می‌کند، استهلاک انرژی از طریق خمش پلاستیک در ورق‌های U شکل در اثر حرکت





شکل (۱): میراگر جاری شونده U شکل مورد استفاده در حالت تک محوره [۵]



شکل (۲): میراگر جاری شونده U شکل با چیدمان دایره‌ای شکل [۵]

در این پژوهش، از میراگرهای جاری شونده U شکل استفاده شده است که هر ابزار از دو قطعه U شکل قرار گرفته در مقابل هم تشکیل یافته است (شکل (۱)). بر حسب نیاز و با سعی و خطا، در قاب‌های مختلف از میراگر با مشخصات متفاوت استفاده گردید. میراگر مینا 1U نام‌گذاری می‌شود که متشکل از دو قطعه خمیده می‌باشد و هر قطعه از ورق فلزی از جنس فولاد نرمه به ابعاد مقطع عرضی  $10 \times 10$  mm و شعاع انحنای 50 mm ساخته شده است [۵]. در میراگرهای مختلف به کار برده شده، کلیه مشخصات میراگر ثابت بوده و تنها با افزایش یا کاهش تعداد واحدهای میراگر، مثل این است که عرض دستگاه معادل مورد استفاده تغییر پیدا می‌کند و در نتیجه، فقط سختی و نیروی تسلیم به صورت خطی تغییر می‌یابد. به عنوان مثال، مقاومت تسلیم و سختی ابزار 2U، دو برابر مقادیر مربوط به ابزار 1U می‌باشد.

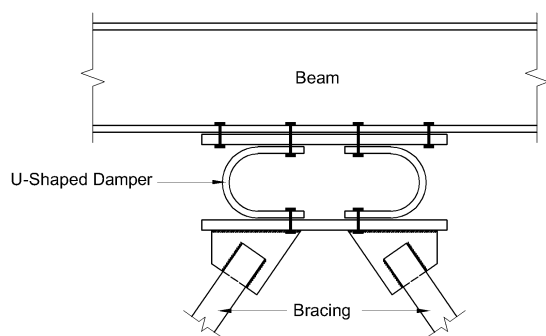
رفتار نیرو-جابجایی میراگر به صورت دو خطی مدل شده است. برای میراگر 1U با مشخصات ابعادی ذکر شده، سختی اولیه برابر  $20000 \text{ kg/cm}$  و نیروی تسلیم  $9247 \text{ kg}$

جانبی قاب می‌تواند صورت گیرد [۱۰]. در تحقیق اخیر مکانیسم رفتار پلاستیک خمشی در ورق‌های U شکل از طریق فشار و کشش دو صفحه موازی ورق خمیده صورت می‌گیرد، در حالیکه در میراگر U شکل مورد نظر در مقاله حاضر، این مکانیسم از طریق حرکت برشی نسبی دو صفحه موازی ورق خمیده شکل می‌گیرد.

هدف از این مقاله بررسی رفتار این دستگاه به عنوان میراگر فولادی جاری شونده در ساختمان‌های فولادی می‌باشد. برای این منظور، رفتار قاب‌های خمشی فولادی ساختمانی در حالت بدون میراگر و با میراگر U شکل تحلیل و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. علاوه بر رفتار غیرخطی ناشی از وجود میراگرها، در هر دو حالت امکان بروز رفتار غیرخطی اعضای قاب نیز از طریق اختصاص مفاصل پلاستیک برقرار می‌شود تا رفتار واقعی تری از مدل‌ها را شاهد باشیم.

## ۲- میراگر فولادی جاری شونده U شکل

عملکرد این ابزار بر اساس استفاده از قطعات باریک فلزی است که به صورت سرد خم شده‌اند تا اعضای U شکل ایجاد کنند. در حالت تک محوره، معمولاً تغییر شکل ایجاد شده به موازات قطعات U شکل می‌باشد (شکل (۱)). به علت حرکت طولی نسبی دو انتهای قطعات U شکل، تغییر شکل پلاستیک از طریق یک حرکت خمشی، از قسمت‌های خمیده به قسمت‌های مستقیم قطعات U شکل منتقل می‌شود و کل دستگاه می‌تواند در راستای برشی موازی با بالها فعال شود. همچنین برای استفاده از این ابزار در حالت دو محوره می‌توان از چیدمان دایره‌ای شکل قطعات مطابق شکل (۲) استفاده نمود. چیدمان دایره‌ای این امکان را ایجاد می‌کند که حداکثر ظرفیت استهلاک انرژی هر عضو به کار گرفته شود. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی، رفتار مناسبی را از این وسیله در حالت تک محوره و دو محوره نشان می‌دهد که ظرفیت استهلاک انرژی بالا و تحمل تغییر شکل‌های بزرگ از آن جمله می‌باشد [۴ و ۵].



شکل (۳): جزئیات و نحوه نصب میراگر U شکل مورد استفاده

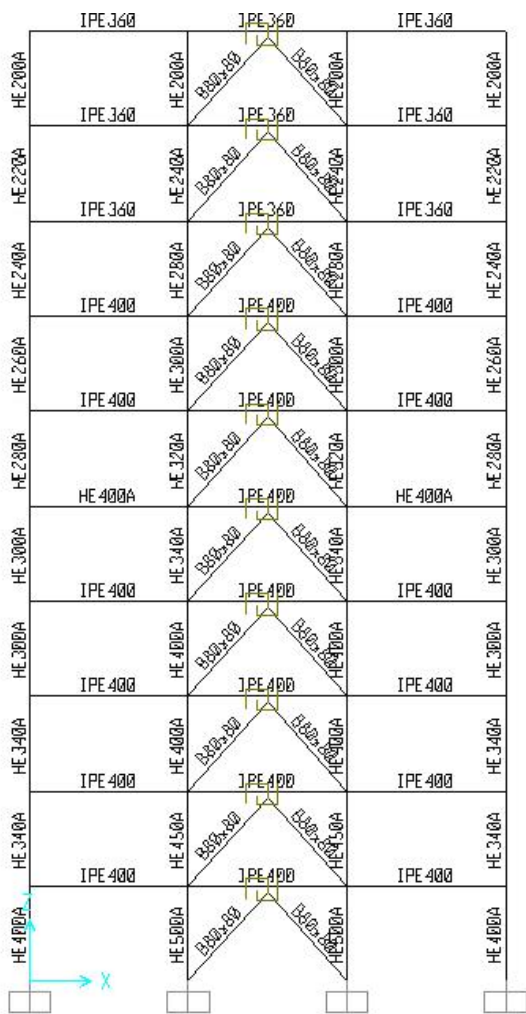
شکل ۸ و قسمت تحتانی تیر در قاب‌ها قرار داده شده‌اند. ارتفاع طبقات نیز سه متر می‌باشد و تکیه‌گاه‌ها با اتصال صلب فرض شده‌اند. مقاطع مورد استفاده در مدل‌ها برای ستون‌ها HE، تیرها IPE و بادبندی‌ها، مقطع قوطی می‌باشند. در شکل‌های (۴) تا (۶) هندسه قاب‌های مورد استفاده به همراه مقاطع اعضای آنها نشان داده شده است. در طراحی قاب‌ها بار مرده و زنده سطحی قاب‌ها به ترتیب  $700 \text{ kg/m}^2$  و  $200 \text{ kg/m}^2$  و عرض بارگیر هر تیر ۵ متر منظور شده است. بارگذاری لرزه‌ای برای تحلیل و طراحی اولیه، بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ [۱۳] انجام گرفته است. نسبت میرایی بحرانی در سازه ۵٪، خاک منطقه، خاک نوع III و ناحیه احداث سازه، منطقه با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد در نظر گرفته شده است. در سازه‌های دارای میراگرهای فلزی جاری‌شونده و اصطکاکی معمولاً طراحی اعضای قاب به نحوی است که به صورت الاستیک باقی بمانند و فقط میراگر وارد حوضه غیرخطی گردد [۱۱]. ولی با توجه به اینکه در زلزله‌های شدید حتی با رعایت این فلسفه طراحی ممکن است اعضای قاب نیز تا حدودی رفتار غیرخطی را تجربه نمایند و همچنین برای آزمودن رفتار واقعی اعضای سازه در زلزله‌های مختلف، در هر دو حالت قاب بدون میراگر و قاب مجهز به میراگر، برای اعضای اصلی قاب نیز پتانسیل رفتار غیرخطی در نظر گرفته شده است؛ بدین ترتیب که برای تیرها و ستون‌ها مفاصل پلاستیک تعریف و اختصاص داده شد.

می‌باشد که تا نقطه تسلیم به صورت الاستیک عمل کرده و پس از آن با سختی برابر با ۰/۰۱ برابر سختی ناحیه الاستیک به کار خود ادامه می‌دهد [۵]. به این ترتیب، جابجایی تسلیم ( $\Delta y$ ) این میراگر حدود  $0.46 \text{ cm}$  می‌باشد. جابجایی نهایی میراگر که عملکرد آن به طور کامل از بین می‌رود، همانند اکثر میراگرهای جاری‌شونده فلزی  $10 \Delta y$  فرض شده است.

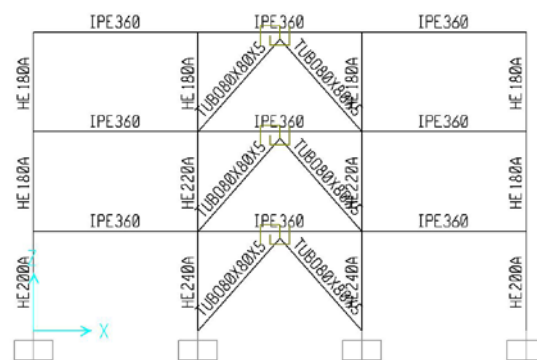
برای نصب این میراگر در قاب‌های خمشی فولادی مشابه برخی میراگرهای دیگر فولادی جاری‌شونده و یا اصطکاکی عمل گردید. همانطور که قبلاً اشاره شد، یکی از معروفترین و پرکاربردترین میراگرهای فولادی جاری‌شونده، المان‌های افزاینده میرایی و سختی (ADAS) می‌باشد که معمولاً در دهانه‌های مهاربندی شده ۸ شکل بین بال پایین تیر و انتهای مهاربند ۸ شکل نصب می‌شود [۸ و ۱۱]. برخی میراگرهای اصطکاکی نظیر میراگر اصطکاکی دورانی نیز به همین ترتیب در قاب‌های فولادی نصب می‌شود [۱۱ و ۱۲]. در اینجا نیز محل نصب میراگر U شکل مورد مطالعه مطابق شکل (۳) بین انتهای مهاربندی ۸ شکل و بال تحتانی تیر پیشنهاد می‌شود. اتصالات صفحات بالا و پایین دستگاه میراگر به تیر و مهاربند می‌تواند به صورت اتصال پیچی یا جوشی باشد که اتصال پیچی از مزیت تعویض آسانتر دستگاه پس از زلزله‌های شدید برخوردار است. در اثر تحریک جانبی قاب، تغییرمکان افقی نسبی بین دو قسمت مستقیم بالا و پایین قطعه U شکل ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های پلاستیک در قسمت خمیده گردد و بدین ترتیب انرژی ورودی از طریق رفتار شکل‌پذیر هدایت‌شده جذب و مستهلک گردد.

### ۳- فرضیات مدلسازی و تحلیل

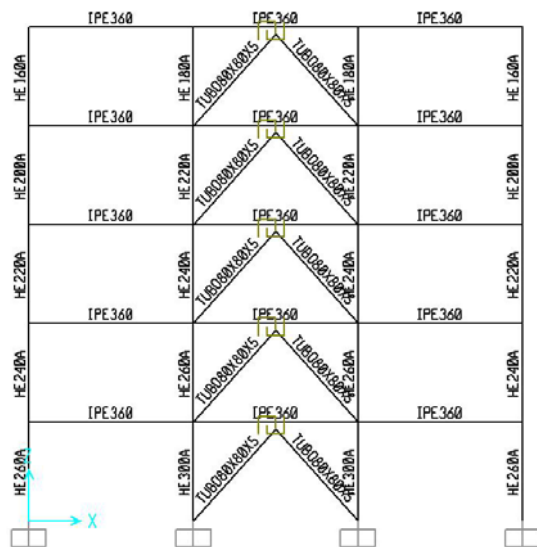
مدل‌های سازه‌ای مورد استفاده در این تحقیق، از نوع قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده‌اند. تعداد طبقات سه، پنج و ده انتخاب شده است که هر کدام دارای سه دهانه پنج متری می‌باشند و میراگرها بین انتهای فوقانی بادبندی‌های



شکل (۶): مدل قاب ده طبقه مجهز به میراگر به همراه مقاطع مورد استفاده



شکل (۴): مدل قاب سه طبقه مجهز به میراگر به همراه مقاطع مورد استفاده

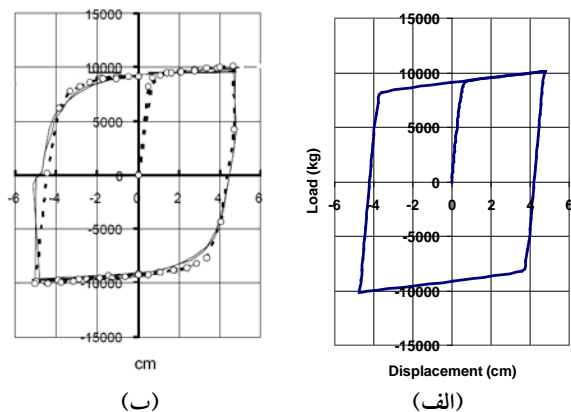


شکل (۵): مدل قاب پنج طبقه مجهز به میراگر به همراه مقاطع مورد استفاده

تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی به صورت انتگرال‌گیری مستقیم و میرایی سازه (غیر از میراگر الحاقی) به صورت میرایی متناسب با جرم و سختی (فرض رایلی) و با نسبت میرایی ۵٪ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی میراگر از المان فنر غیرخطی پلاستیک ون با مشخصات عددی ذکر شده در بند ۲ استفاده گردید. به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، یک نمونه از نتایج چرخه‌ای آزمایشگاهی و مدل‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی میراگر از مرجع [۵] استخراج و با نتایج مدل فنر غیرخطی مورد استفاده در مقاله حاضر مقایسه و صحت‌سنجی گردید. در شکل (۹) رفتار چرخه‌ای حاصل مقایسه شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، مدل‌سازی

بعد از طراحی اولیه قاب‌ها با بارگذاری یاد شده، برای بررسی چگونگی رفتار قاب‌های بدون میراگر و مجهز به میراگر حین زمین‌لرزه، تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 [۱۴] انجام شده است. برای این کار از چهار شتاب‌نگاشت در دو سطح استفاده شد که دو شتاب‌نگاشت کوبه و طیس دارای حداکثر شتاب زمین در حدود ۰/۴ برابر شتاب ثقل (سطح زلزله متوسط و طراحی) و دو شتاب‌نگاشت نورتریج و لوماپریتا نیز دارای حداکثر شتاب در حدود ۰/۶ برابر شتاب ثقل (سطح زلزله شدید) می‌باشند. رکورد شتاب این زلزله‌ها در شکل (۷) و طیف شبه شتاب آنها در شکل (۸) مشاهده می‌شود.

برای مدل‌های سازه‌ای بر اساس تحلیل‌های اولیه و با سعی و خطا میراگرهای مناسب برای قاب‌های پنج و ده طبقه به صورت 1U در تمامی طبقات انتخاب گردید. در قاب سه طبقه نیز برای زلزله سطح متوسط میراگرهای 0.5U و برای زلزله‌های شدید میراگرهای 2U نتیجه گردید.



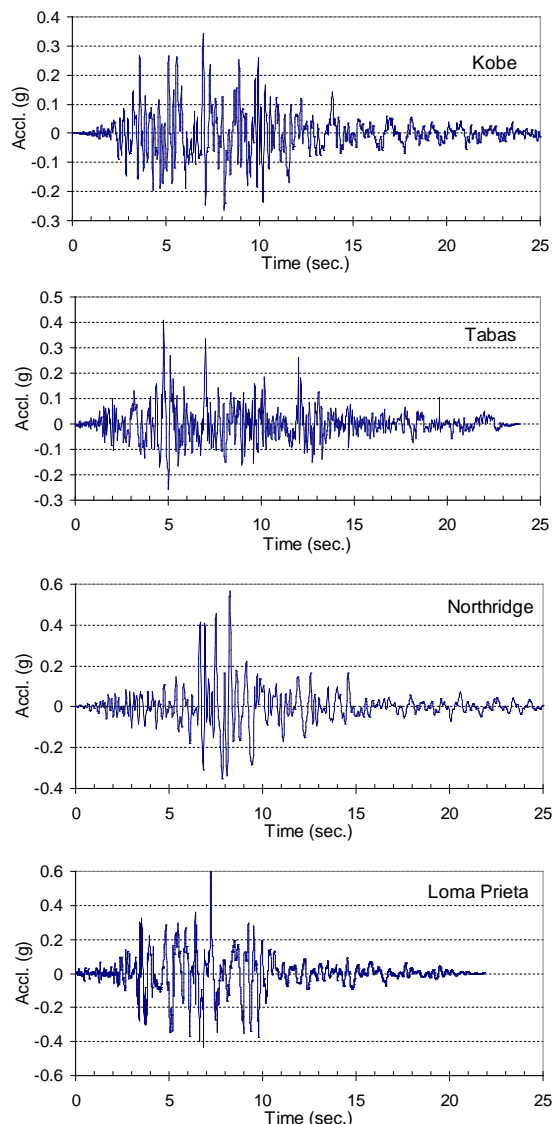
شکل (۹): رفتار چرخه‌ای میراگر: الف) مدل فنر غیر خطی مورد استفاده در این مقاله، ب) نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی اجزای محدود سه‌بعدی [۵]

#### ۴- بررسی نتایج و بحث

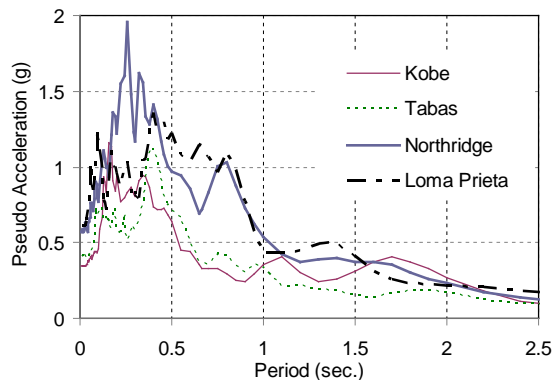
##### ۴-۱- برش پایه و برش طبقات

نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی نشان می‌دهد که قاب‌ها تحت زلزله‌های کوبه و طبرس که دارای حداکثر شتاب زمین حدود ۰/۴ برابر شتاب ثقل می‌باشند، در حالت بدون میراگر می‌توانند با وارد شدن به حوزه غیرالاستیک و ایجاد مفاصل پلاستیک، زلزله را تحمل کنند ولی در مورد زلزله‌های نورتریج و لوماپریتا که شتاب اوج آنها حدود ۰/۶g می‌باشد، قاب‌ها به خرابی می‌رسند. با اضافه کردن میراگر به این قاب‌ها، هر چهار زلزله تحمل شده و جذب انرژی از اجزای سازه‌ای به قطعات میراگر منتقل می‌گردد. در جدول (۱)، مقادیر حداکثر برش پایه در قاب‌های مختلف و زلزله‌های گوناگون در دو حالت بدون میراگر و با میراگر آورده شده است. در مواردی که قاب‌ها در حالت بدون میراگر نمی‌توانند زلزله را بطور کامل پشت سر گذارند و به خرابی می‌رسند، اعدادی برای برش پایه در جدول ذکر نشده است. ملاحظه می‌شود در تمامی قاب‌ها

میراگر در این مقاله در عین سادگی تطابق قابل قبولی با رفتار آزمایشگاهی آن دارد.



شکل (۷): رکورد شتاب زلزله‌های مورد استفاده



شکل (۸): طیف شبه‌شتاب زلزله‌های مورد استفاده

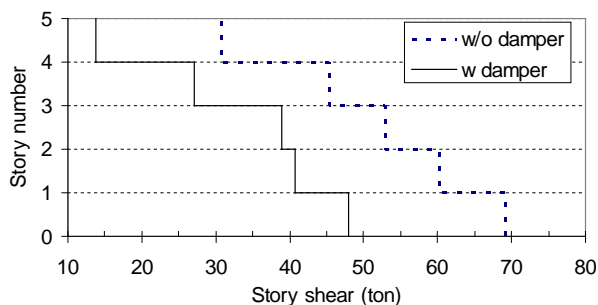


همانگونه که در شکل آشکار است، حداکثر برش موجود در طبقات نیز در حالت با میراگر نسبت به حالت بدون میراگر کاهش یافته است و میراگر عملکرد مناسبی در کاهش برش پایه و طبقات از خود نشان داده است.

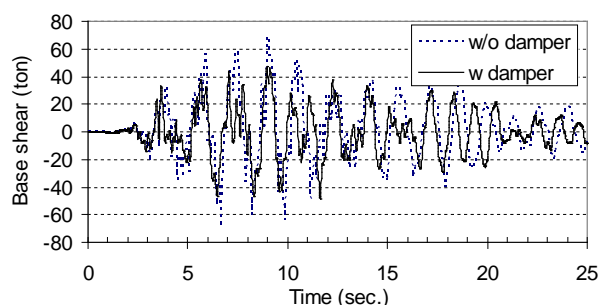
و زلزله‌ها با افزودن میراگر برش پایه کاسته می‌شود؛ به طوری که بین ۱۵٪ الی ۴۰٪ کاهش در برش پایه با افزودن میراگر رخ می‌دهد. در شکل (۱۰) به عنوان نمونه، تاریخچه زمانی برش پایه قاب پنج طبقه تحت زلزله کوبه نشان داده شده است. در شکل (۱۱) نیز، نمودار برش طبقات قاب پنج طبقه تحت زلزله کوبه مشاهده می‌شود.

جدول (۱): مقادیر حداکثر برش پایه در قاب‌ها

زلزله	قاب سه طبقه			قاب پنج طبقه			قاب ده طبقه		
	بدون میراگر (ton)	با میراگر (ton)	درصد کاهش	بدون میراگر (ton)	با میراگر (ton)	درصد کاهش	بدون میراگر (ton)	با میراگر (ton)	درصد کاهش
کوبه	۵۹,۳۱	۳۵,۴۱	۴۰٪	۶۹,۰۸	۴۷,۹۷	۳۱٪	۱۳۱,۲	۱۱۲,۱	۱۵٪
طیس	۴۳,۷۷	۳۳,۸۵	۲۳٪	۵۵,۰۴	۴۱,۶۷	۲۴٪	۱۰۸,۱	۶۶,۴۲	۳۹٪
نورث‌ریج	-	۶۴,۹۲	-	-	۸۶,۶۱	-	-	۱۱۸,۲	-
لوماپرینتا	-	۷۱,۸۹	-	-	۶۹,۶۳	-	-	۱۰۳,۴	-



شکل (۱۱): برش طبقات قاب پنج طبقه در زلزله کوبه



شکل (۱۰): برش پایه قاب پنج طبقه در زلزله کوبه

از تحلیل‌ها مشاهده شد علاوه بر اینکه با به کارگیری میراگر جابجایی بام کاسته می‌شود، جابجایی حداکثر کلیه طبقات و به تبع آن جابجایی نسبی طبقات نیز کاهش می‌یابد. این کاهش تقریباً در تمامی قاب‌ها و تحت تمامی زلزله‌ها مشاهده گردید. به عنوان مثال، در شکل (۱۳) توزیع حداکثر جابجایی جانبی طبقات قاب سه طبقه تحت زلزله کوبه در حالت بدون میراگر و با میراگر نشان داده شده است.

در جدول (۳)، مقادیر حداکثر جابجایی نسبی طبقات در قاب‌های مختلف و زلزله‌های گوناگون در دو حالت بدون میراگر و با میراگر آورده شده است. مقادیر ذکر شده در هر

#### ۴-۲- حداکثر تغییر مکان بام و طبقات

یکی از متغیرهای مهم در بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، جابجایی طبقه بام می‌باشد. این میراگر عملکرد خوبی در کاهش تغییر مکان جانبی قاب‌ها از خود نشان می‌دهد و در اثر افزودن این میراگر به قاب‌های مورد بررسی، طبق جدول ۲ در تمامی قاب‌ها و تحت تمامی زلزله‌ها، جابجایی حداکثر بام کاسته شده است؛ به طوری که بین ۳۰٪ الی ۵۷٪ کاهش در جابجایی بام با افزودن میراگر رخ می‌دهد. در شکل (۱۲) به عنوان نمونه، پاسخ تاریخچه زمانی بام قاب سه طبقه تحت زلزله کوبه در حالت بدون میراگر و با میراگر آورده شده است. از بررسی نتایج حاصل

در نمودارهای شکل‌های (۱۴) و (۱۵) میزان کاهش پاسخ سازه دارای میراگر و بدون میراگر بر حسب برش پایه و جابجایی نسبی طبقات آمده است. ملاحظه می‌شود که عملکرد میراگرها در کاهش جابجایی اندکی بهتر از برش پایه است.

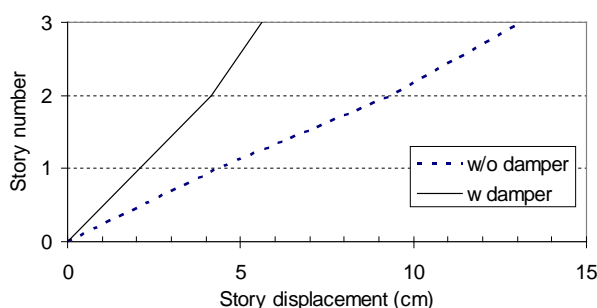
مدل مربوط به طبقه‌ای است که جابجایی نسبی بیشتری نسبت به سایر طبقات آن مدل دارد. این پارامتر در برآورد خرابی از اهمیت بیشتری برخوردار است. ملاحظه می‌شود در تمامی قاب‌ها و زلزله‌ها با افزودن میراگر حداکثر جابجایی نسبی طبقات کاسته می‌شود؛ به طوری که بین ۳۰٪ الی ۵۸٪ کاهش در این پارامتر با افزودن میراگر رخ می‌دهد.

جدول (۲): مقادیر حداکثر جابجایی افقی طبقه بام در قاب‌ها

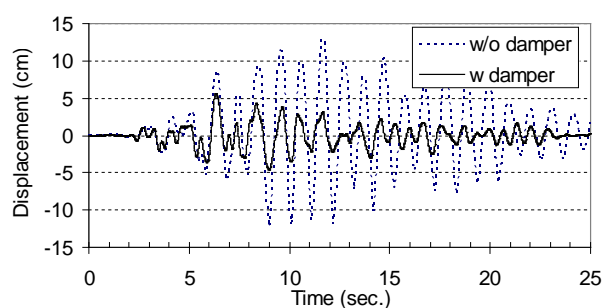
زلزله	قاب سه طبقه			قاب پنج طبقه			قاب ده طبقه		
	بدون میراگر (cm)	با میراگر (cm)	درصد کاهش	بدون میراگر (cm)	با میراگر (cm)	درصد کاهش	بدون میراگر (cm)	با میراگر (cm)	درصد کاهش
کوبه	۱۳,۱۱	۵,۵۹	۵۷٪	۱۸,۵۷	۹,۰۸	۵۱٪	۳۹,۷۳	۲۶,۰۶	۳۴٪
طیس	۱۱,۱۲	۵,۸۳	۴۸٪	۱۳,۰۸	۹,۱۷	۳۰٪	۲۶,۹۱	۱۲,۳۱	۵۴٪
نورث‌ریچ	-	۹,۵۱	-	-	۱۵,۱۴	-	-	۲۷,۸۵	-
لوماپریتا	-	۸,۷۶	-	-	۱۵,۵	-	-	۲۲,۴۶	-

جدول (۳): مقادیر حداکثر جابجایی نسبی طبقات در قاب‌ها

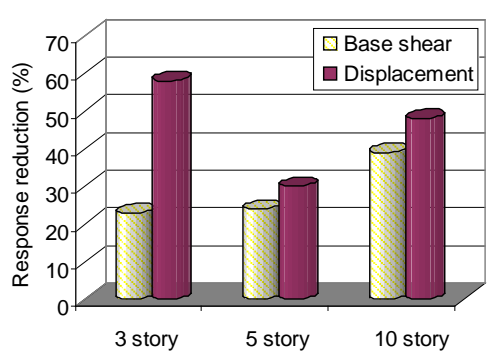
زلزله	قاب سه طبقه			قاب پنج طبقه			قاب ده طبقه		
	بدون میراگر (cm)	با میراگر (cm)	درصد کاهش	بدون میراگر (cm)	با میراگر (cm)	درصد کاهش	بدون میراگر (cm)	با میراگر (cm)	درصد کاهش
کوبه	۵,۰۰	۲,۱۰	۵۸٪	۵,۳۴	۲,۲۷	۵۷٪	۵,۳۰	۳,۲۷	۳۸٪
طیس	۵,۰۶	۲,۱۵	۵۸٪	۳,۱۱	۲,۱۸	۳۰٪	۳,۷۰	۱,۹۳	۴۸٪
نورث‌ریچ	-	۴,۱۸	-	-	۴,۳۲	-	-	۳,۶۸	-
لوماپریتا	-	۳,۵۷	-	-	۳,۷۰	-	-	۲,۸۶	-



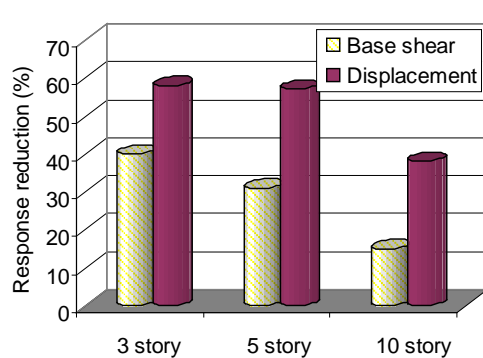
شکل (۱۳): جابجایی طبقات قاب سه طبقه در زلزله کوبه



شکل (۱۴): جابجایی بام قاب سه طبقه در زلزله کوبه

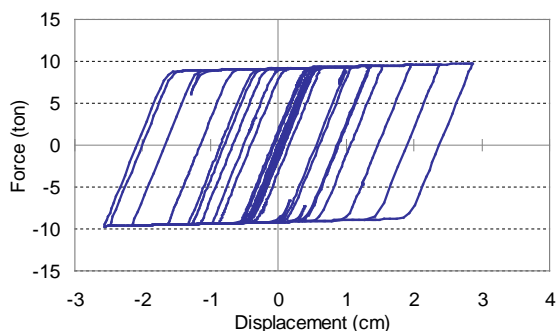


شکل (۱۵): کاهش پاسخ قاب‌های با میراگر در زلزله طبری

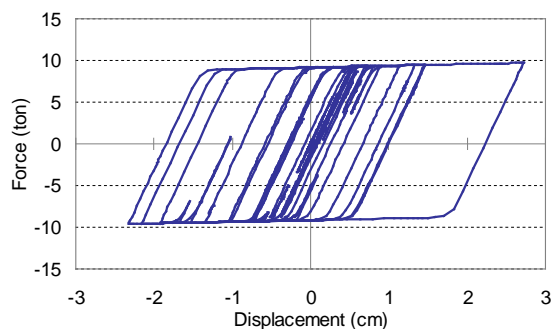


شکل (۱۴): کاهش پاسخ قاب‌های با میراگر در زلزله کوبه

بنابراین، یکی از اهداف قرار دادن میراگر در سازه، محدود کردن رفتار اعضای سازه‌ای به محدوده الاستیک می‌باشد تا بدین صورت، از تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای مهم و سازه‌ای جلوگیری شود.



شکل (۱۶): منحنی هیستریزیس میراگر طبقه دوم قاب ده طبقه تحت زلزله کوبه



شکل (۱۷): منحنی هیستریزیس میراگر طبقه هشتم قاب ده طبقه تحت زلزله کوبه

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تحت زمین‌لرزه‌های نورتریج و لوماپریتا با گسترش مفاصل پلاستیک در اعضای قاب‌ها هر سه قاب به ناپایداری و خرابی می‌رسند ولی با

#### ۴-۳- منحنی هیستریزیس ابزار میراگر

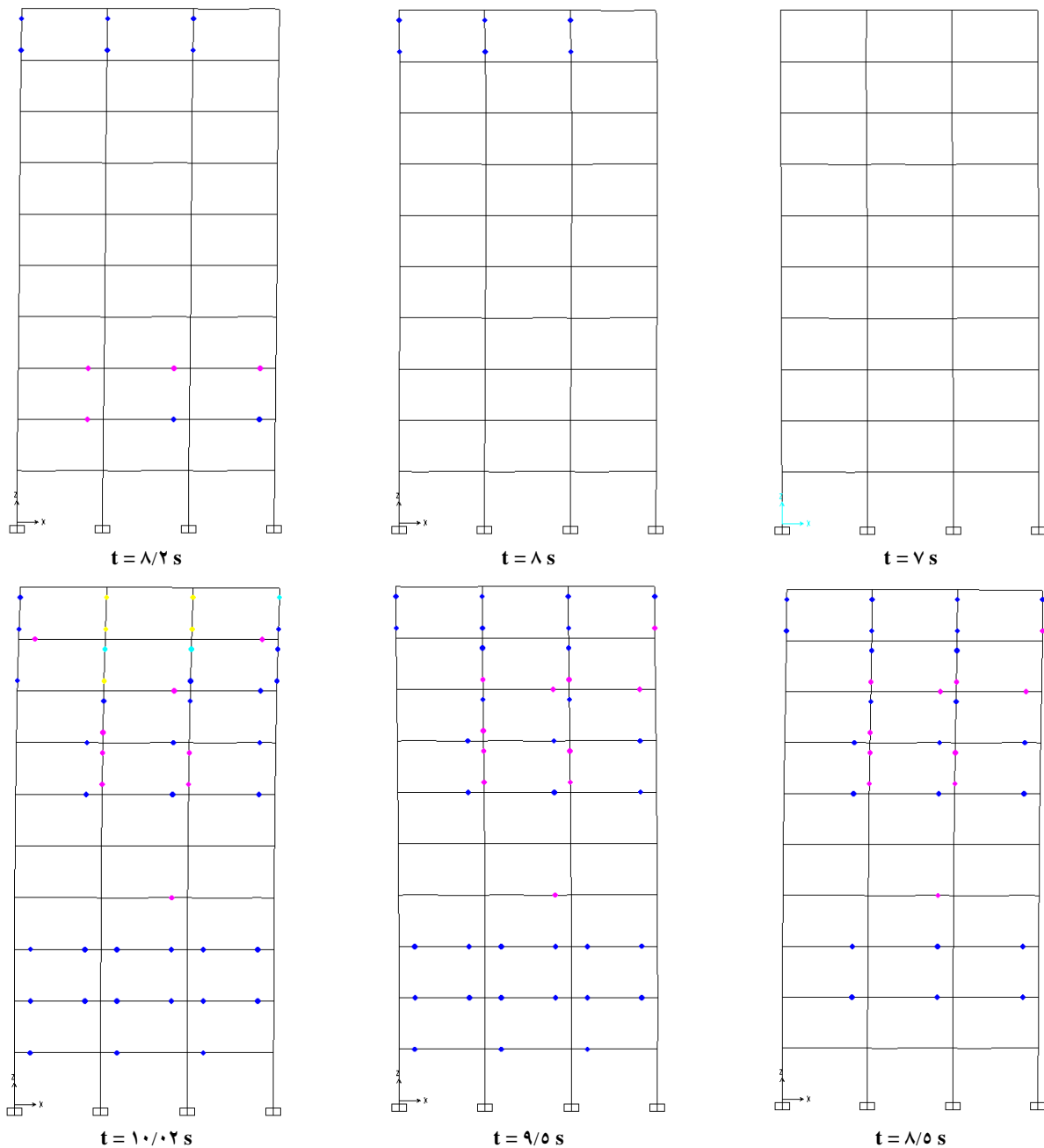
برای اینکه از خاصیت جذب و استهلاک انرژی میراگرها به خوبی استفاده شود، بایستی این میراگرها طی زلزله‌های قوی تسلیم شده ولی جابجایی پلاستیک آنها به اندازه‌ای زیاد نباشد که بلافاصله به خرابی کامل میراگر منجر شود. این حد همچنان که قبلاً ذکر شد، برای این نوع میراگر  $\Delta y$  است که  $10 \Delta y$  تغییر مکان تسلیم قطعه میراگر است. به عنوان نمونه، در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) منحنی‌های هیستریزیس قطعات میراگر در طبقات دوم و هشتم قاب ده طبقه تحت زلزله کوبه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در هر دو طبقه میراگرها تسلیم شده ولی تغییر مکان حداکثر آنها از  $10 \Delta y = 4/6 \text{ cm}$  کمتر است. سطوح محصور چاق داخل منحنی‌های هیستریزیس نشان از عملکرد مناسب قطعات میراگر در جذب و استهلاک انرژی زلزله از طریق تغییر شکل‌های پلاستیک قطعات U شکل دارد. مشابه همین رفتار در سایر قاب‌ها و تحت زلزله‌های دیگر نیز دیده می‌شود. با توجه به چرخه‌های هیستریزیس نشان داده شده در این اشکال، چنین به نظر می‌رسد که میراگرهای به کار گرفته شده در طبقات مختلف قاب، عملکرد تقریباً یکسانی در جذب انرژی زلزله دارند.

#### ۴-۴- چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک

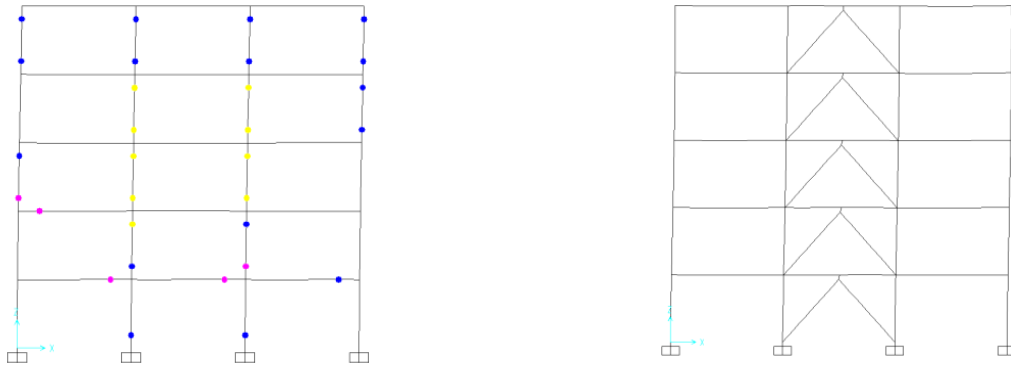
یکی از نکات مهم در بررسی رفتار سازه‌ها، مشخص کردن محل تشکیل مفاصل پلاستیک می‌باشد. زیرا این نقاط، محل بروز خرابی احتمالی در حین زمین‌لرزه بوده و ممکن است باعث گسترش یافتن روند خرابی در سازه شوند.

می‌گردد. با افزودن میراگر به این قاب‌ها، باز رفتار غیرخطی در میراگر متمرکز شده و اعضای سازه‌ای رفتار پلاستیک نشان نمی‌دهند. به عنوان نمونه در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب پنج طبقه تحت زلزله نورث‌ریچ و در قاب ده طبقه تحت زلزله کوبه در حالت بدون میراگر و با میراگر در انتهای تحلیل باهم مقایسه شده است.

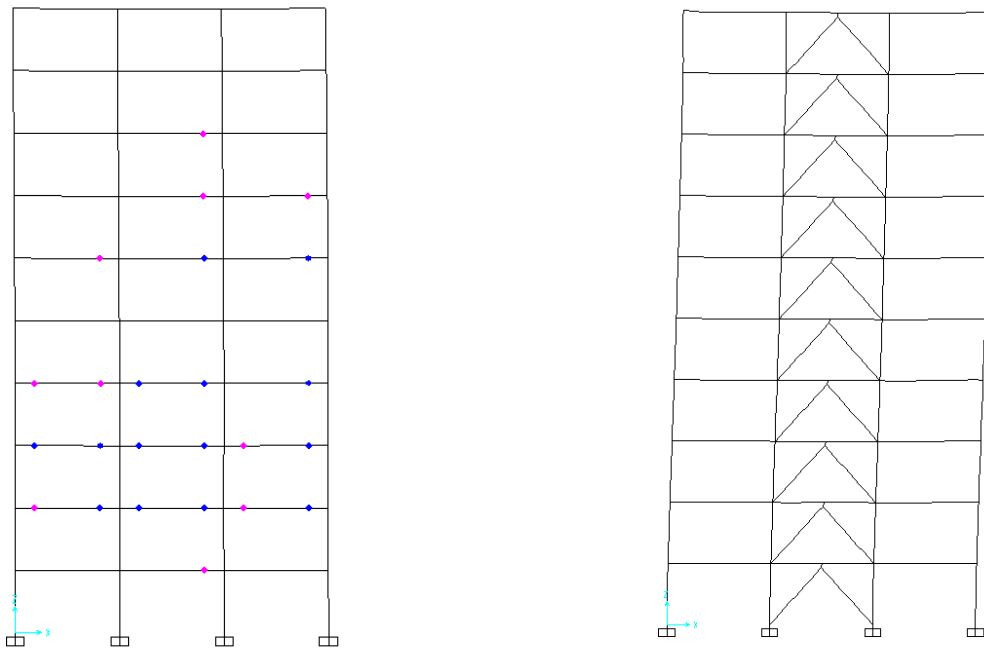
افزوده شدن میراگر، رفتار اعضای سازه‌ای عمدتاً به ناحیه خطی محدود شده و فقط تغییر شکل‌های پلاستیک در قطعات U شکل متمرکز می‌شود. در شکل (۱۸) روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب ده طبقه بدون میراگر تحت زلزله نورث‌ریچ تا مرحله خرابی نمایش داده شده است. در مورد زلزله‌های کوبه و طبس در هر کدام از قاب‌های بدون میراگر خرابی و ناپایداری کلی روی نمی‌دهد ولی مفاصل پلاستیک متعددی در تیرها و ستون‌ها پدیدار



شکل (۱۸): روند تشکیل مفاصل پلاستیک قاب ده طبقه بدون میراگر تحت زلزله نورث‌ریچ تا خرابی



شکل (۱۹): مفاصل پلاستیک قاب پنج طبقه با و بدون میراگر تحت زلزله نورث ریج



شکل (۲۰): مفاصل پلاستیک قاب ده طبقه با و بدون میراگر تحت زلزله کوبه

می شود. این کاهش بین  $0/45$  تا  $0/82$  می باشد. همچنین ملاحظه می شود که در مورد روند کاهش بر اساس طبقه و یا ستون کناری و میانی نمی توان قضاوت خاصی انجام داد. نتایج حاصل برای قابهای با تعداد طبقات متفاوت نیز مشابه همین جدول می باشد و در کل می توان گفت که کاربرد این نوع میراگر باعث کاهش نیاز لرزه ای ستون ها به میزان قابل توجهی می شود.

#### ۴-۵- نیاز لرزه ای ستون ها

با اعمال میراگر احتمالاً تغییراتی در نیاز لرزه ای ستون ها ایجاد می شود که مقایسه آن در قاب با میراگر با قاب بدون میراگر در ارزیابی عملکرد میراگرها موثر خواهد بود. فاکتور موثر در طراحی ستون ها تنش محوری ناشی از خمش و نیروی محوری می باشد. لذا نسبت تنش های ستون با اعمال ضرایب تعدیل و تشدید در حالت با میراگر به حالت بدون میراگر تحت زلزله های مختلف برای قاب پنج طبقه در جدول ۴ آورده شده است. ملاحظه می شود تمامی مقادیر این جدول کوچکتر از یک هستند و در نتیجه افزودن میراگر باعث کاهش نیاز لرزه ای ستون ها در طبقات مختلف

جدول (۴): نسبت تنش ستون‌ها در حالت با میراگر به حالت

بدون میراگر در قاب پنج طبقه

طبقه	زلزله کوبه		زلزله طبس	
	ستون کناری	ستون میانی	ستون کناری	ستون میانی
۵	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۹
۴	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۷۹	۰/۸۲
۳	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۷۷	۰/۸۱
۲	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۷۶
۱	۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۵۷	۰/۴۶

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار قاب‌های خمشی فولادی سه، پنج و ده طبقه تحت زلزله‌های مختلف در حالت بدون میراگر و با میراگرهای فلزی جاری شونده U شکل مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفت. علاوه بر رفتار غیر خطی ناشی از مدل الاستوپلاستیک قطعات میراگر، پتانسیل بروز رفتار غیرخطی اعضای قاب نیز با تعریف مفاصل پلاستیک اعمال گردید. نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان داد که تحت زلزله‌های شدید در حالت بدون میراگر، با تشکیل و توسعه مفاصل پلاستیک، قاب‌ها به ناپایداری و خرابی کلی می‌رسیدند ولی با افزودن میراگرهای U شکل، رفتار غیرخطی عمدتاً در قطعات میراگر متمرکز گردید. در زلزله‌های متوسط نیز، با افزودن میراگر کلیه مفاصل پلاستیک موجود در اعضای قاب از بین می‌روند. در تمامی مدل‌ها و تحت تمامی زلزله‌های انتخاب شده، حداکثر برش پایه، جابجایی بام و جابجایی نسبی طبقات با افزودن میراگر کاهش یافت. بطوریکه ۱۵٪ الی ۴۰٪ کاهش در برش پایه، ۳۰٪ الی ۵۷٪ کاهش در جابجایی بام و ۳۰٪ الی ۵۸٪ کاهش در جابجایی نسبی طبقات ملاحظه گردید. علاوه بر این، نیاز لرزه‌ای ستون‌ها در تمامی طبقات قاب‌های مختلف در اثر افزودن میراگر کاهش چشمگیری از خود نشان داد؛ به طوریکه نسبت تنش طراحی ستون‌ها در حالت با میراگر به حالت بدون میراگر به طور متوسط برابر ۰/۶۸ حاصل شد که بیانگر کاهش متوسط ۳۲٪ می‌باشد.

بررسی چرخه‌های هیستریزس قطعات میراگر نشان داد که عملکرد ابزار U شکل در کلیه طبقات مناسب بوده و با تسلیم و تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک مجاز باعث جذب و استهلاک مقادیر زیادی از انرژی ورودی به سازه می‌شوند؛ لذا می‌توان از این ابزار به عنوان یک میراگر مناسب در طراحی یا مقاوم‌سازی قاب‌های فولادی در مناطق زلزله‌خیز استفاده نمود.

#### ۶- مراجع

- [1] Kelly, J.M., Skinner, R.I. and Heine, A.J. (1972), "Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake-resistant Structures", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 63-88.
- [2] Skinner, R.I., Kelly, J.M. and Heine, A.J. (1974), "Hysteretic Dampers for Earthquake-resistant Structures", Earthquake Engineering and structural Dynamics, Vol. 3, No. 3, pp. 287-296.
- [3] Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Alonso, L.J. and Thompson, C.L. (1989), "Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements", Report No. UCB/EERC-89/02. Berkeley: University of California.
- [4] Aguirre, M. and Sanchez, A.R. (1992), "Structural Seismic Damper", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 5, pp. 1158-1171.
- [5] Dolce, M., Filardi, B., Marnetto, R. and Nigro, D. (1996), "Experimental Tests and Applications of a New Biaxial Elasto-plastic Device for the Passive Control of Structures", Fourth world congress on joint sealants and bearing systems for concrete structures, ACI SP-164, Sacramento, California.
- [6] Suzuki, K., Watanabe, A. and Saeki, E. (2005), "Development of U-shaped Steel Damper for Seismic Isolation System", Nippon Steel Technical Report, No. 92.
- [7] Martinez-Rueda, J.E. (2002), "On the Evolution of Energy Dissipation Devices for Seismic Design", Earthquake Spectra, Vol. 18, No. 2, pp. 309-346.
- [8] Soong, T.T. and Spencer, B.F. (2002), "Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-art and State-of-the-practice", Engineering Structures, Vol. 24, pp. 243-259.
- [9] Parra-Montesinos, G. and Wight, J.K. (2000), "Seismic Response of Exterior RC Column-to-Steel Beam Connections", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 10, pp. 1113-1121.
- [10] Tagawa, H. and Gao, J. (2012), "Evaluation of Vibration Control System with U-dampers Based on Quasi-linear Motion Mechanism", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 70, pp. 213-225.
- [11] Moreschi, L.M. and Singh, M.P. (2003), "Design of Yielding Metallic and Friction Dampers for Optimal



Seismic Performance”, Earthquake Engineering and structural Dynamics, Vol. 32, pp. 1291-1311.

[۱۲] واسقی امیری، ج. و جلالی، س. ق. (۱۳۸۸)، ”عملکرد قابهای خمشی فولادی مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی (RFD)“، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال پنجم، شماره ششم، ۹۳-۱۰۵.

[۱۳] کمیته دائمی بازنگری آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله. (۱۳۸۴)، ”آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰“، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

[14] SAP2000. (2008), “Integrated Structural Analysis and Design Software”, Version 12, Computers and Structures Inc., Berkeley (CA).