

## ارزیابی لرزه ایقاب های فولادی خمشی مجهز شده به میراگرهای فلزی جاری شونده XADAS

مر ترضی رئیسی دهکردی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

[mraissi@iust.ac.ir](mailto:mraissi@iust.ac.ir)

شاهین تقوی اکرامی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

[Sh.taghavi.iust@gmail.com](mailto:Sh.taghavi.iust@gmail.com)

مهدی اقبالی

دانشجوی دوره دکتری مهندسی عمران - سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

[m\\_eghbali@iust.ac.ir](mailto:m_eghbali@iust.ac.ir)

کلید واژه‌ها: ارزیابی لرزه ای، قاب فولادی، میراگر فلزی جاری شونده

### چکیده

زلزله پدیده ای طبیعی که از دیرباز جوامع بشری را تحت تاثیر خود قرار داده و ویرانی ها و خسارت های جانی و مالی زیادی را تحمیل نموده است. مطالعه در زمینه علم مهندسی زلزله از قرن بیستم میلادی شروع گردید و در دو دهه اخیر دستاوردهای مهمی در این زمینه بدست آمده است. روش کنترل ارتعاشات ناشی از نیروهای اعمال شده به سازه نظیر زلزله بر سازه مقوله جدیدی در فرایند بهسازی سازه‌ها و طراحی ساختمان های مقاوم در برابر بارهای دینامیکی است. این تفکر باعث کنترل پاسخ سازه ها تحت اثر بارهای دینامیکی و بدون نیاز به مقاوم سازی کلیه اجزای سازه‌ای شده است. یکی از روش های کنترل ارتعاشات سازه‌ها تحت تاثیر بارهای لرزه‌ای، استفاده از وسایل اتلاف انرژی یا میراگرها است. در این تحقیق، بر اساس تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، تاثیر کاربرد میراگر فلزی جاری شونده در قاب های خمشی ویژه فولادی ۴ و ۱۲ طبقه با میراگر و بدون وجود میراگر بر مقادیر ظرفیت تغییر مکان نسبی، شتاب و سرعت طبقات، نمودارهای هیستریزس و میزان انرژی مستهلک شده در هر قاب بررسی شده است.

نتایج بدست آمده نشان می دهد که بهسازی لرزه ای قاب خمشی ویژه با میراگر فلزی جاری شونده در مدل های ۴ و ۱۲ طبقه باعث بهبود پاسخ سازه در جابجایی نسبی طبقات، برش پایه و انرژی کرنشی شده است. همچنین کاربرد این نوع میراگرها باعث افزایش میزان شتاب سازه گردیده است. از عوامل تاثیر گذار بر کارایی سیستم کنترل سازه ها ارتفاع قاب های مورد مطالعه بوده است، بطوریکه با افزایش ارتفاع کارایی استفاده از سیستم های میراگر در کاهش تقاضای لرزه ای افزایش یافته است.

### مقدمه

مبنای طراحی لرزه ای ساختمان های موجود مطابق ضوابط آیین نامه ها عدم وجود خسارت سازه ای عمده برای زلزله های خفیف و متوسط و مقاومت در برابر فروریزش کلی در برابر زلزله های شدید است.

استفاده از قاب های فولادی در ساختمان های موجود کشور به دلیل در دسترس بودن مصالح آن و همچنین تکنولوژی ساخت این نوع قاب ها نسبت به سایر سیستم های سازه ای توسعه زیادی داشته است. در سیستم های باربر جانبی فولادی به طور عمده دو نوع سیستم سازه ای شامل قاب خمشی و مهاربندی در ضوابط آیین نامه های بارگذاری و طراحی مورد توجه قرار گرفته است. در قاب های خمشی فولادی با فراهم نمودن امکان وقوع تغییر شکل های خمشی در سازه شرایطی فراهم می شود تا سازه قادر باشد استهلاک و جذب انرژی ناشی از نیاز زلزله های مختلف را تا حدودی تامین نماید. البته وقوع این مقادیر تغییر شکل باعث ایجاد آسیب های غیرسازه ای و حتی در برخی موارد خسارت سازه ای می گردد. در سیستم های باربر جانبی مهاربندی سختی جانبی سازه افزایش قابل توجهی دارد بنابراین تقاضای لرزه ای به شدت افزایش می یابد



همچنین اعضای مهاربندی به علت رفتار نامتقارن در برابر بارهای جانبی و امکان وقوع کمانش در برابر بارهای وارده بنابراین در محدوده رفتار غیرالاستیک رفتار مناسبی از خود نشان نمی دهند. با توجه به اینکه سیستم باربر جانبی مهاربندی همگرا (CBF) نسبت به سایر سیستم های بابر جانبی بیشتر مورد توجه سازندگان و طراحان می باشد و در بین سیستم های CBF نیز مهاربندهای هشتی یا شورن به دلیل استفاده بهینه از فضا و همچنین امکان استفاده از باز شو در این قاب ها در سال های اخیر مورد توجه طراحان قرار گرفته است. بنابراین توجه به بهبود رفتار لرزه ای این سیستم های لرزه ای اجتناب ناپذیر است.

برای ارتقای رفتار لرزه ای سیستم های باربر جانبی فولادی راهکارهای مختلفی ارائه شده است. استفاده از سیستم های دو گانه قاب خمشی و مهاربندی یکی از راهکارهای مناسب و موثر در تامین تقاضای لرزه ای و ظرفیت مقاومت و سختی سازه بوده است که ضوابط آیین نامه ای طراحی این نوع سیستم های سازه ای نیز در استانداردها و آیین نامه های مختلف ارائه شده است. تجربیات بدست آمده در زلزله های مختلف نشان داده است که علاوه بر استفاده از سیستم های دوگانه در بهبود رفتار لرزه ای سازه ها لازم است روش های جدیدتری نیز ارائه شود تا فرایند استهلاک انرژی ناشی از بارهای لرزه ای در این سیستم ها بیشتر انجام گیرد.

برای این منظور سیستم های جدید مختلفی نظیر مهاربندهای کمانش ناپذیر، استفاده از انواع میراگرها یا استفاده از مصالح نوین با قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالا پیشنهاد و در تحقیقات مختلف کارایی آنها بررسی شده است.

استفاده از میراگرها به عنوان یک از روش های نوین در کنترل ارتعاشات سازه ها و سبب کاهش آسیب های ناشی از بارهای دینامیکی است. بنابراین کاربرد میراگرها باعث کنترل پاسخ سازه تحت بارهای دینامیکی می گردد و در صورت استفاده از آنها، نیاز به مقاوم سازی هر یک از اجزای سیستم باربر سازه ای وجود نخواهد داشت. کاربرد میراگرها در ساختمان ها باعث بهبود رفتار لرزه ای و نیز کاهش تقاضای لرزه ای زلزله ها نظیر تغییر مکان نسبی طبقات و برش طبقات می شود و همچنین میزان استهلاک انرژی در سازه به شدت افزایش می یابد تا از این طریق میزان خسارت وارد بر سازه به کمترین مقدار آن میرسد.

در این تحقیق اثرات ناشی از کاربرد میراگرهای فلزی جاری شونده (ADAS) در قاب های خمشی فولادی به همراه مهاربندهای همگرا در دو حالت با میراگر و بدون میراگر بررسی شده است. نتایج بدست آمده برای تغییرمکان بیشینه نسبی طبقات، شتاب و طیف سرعت طبقات مقایسه شده است. همچنین مقادیر نیروی برشی ستون ها در دو حالت با میراگر و بدون میراگر بررسی شده است. میزان انرژی هیستریزس طبقات مختلف و همچنین میزان انرژی استهلاک شده در هر دو حالت محاسبه و مقایسه شده است.

## میراگرها

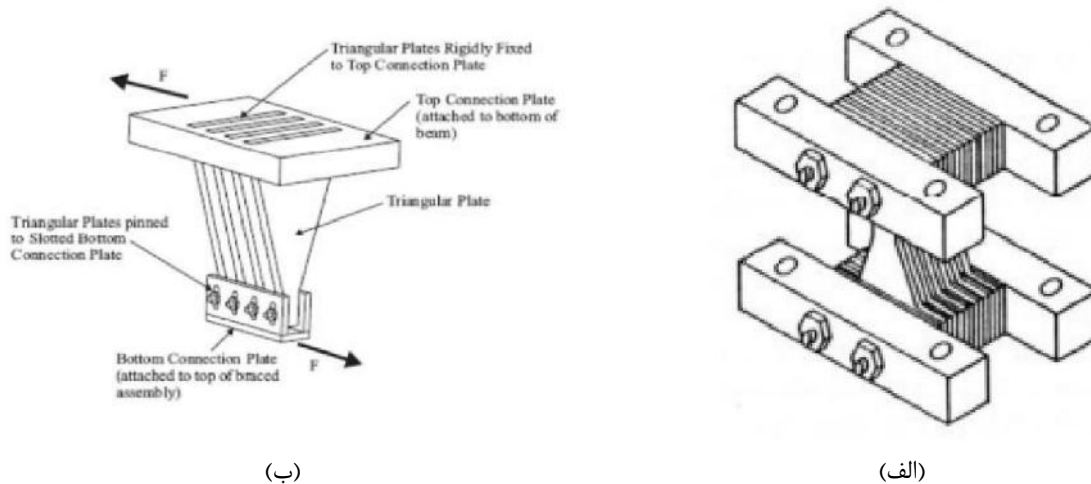
کنترل ارتعاشات بر مبنای سیستم اتلاف انرژی و مطابق نیاز سیستم سازه ای به سه نوع غیر فعال (Passive)، فعال (Active) و نیمه فعال (Semi-Active) طبقه بندی شده است. میراگرها به عنوان یک سیستم غیرفعال اتلاف انرژی کاربرد گسترده ای در سیستم های سازه ای دارند و کاربرد آنها در طراحی ساختمانهای جدید و بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود امکان پذیر است.

اولین تلاشها در زمینه استفاده از سیستم های استهلاک و اتلاف انرژی در ساختمان از اوائل دهه ۱۹۶۰ میلادی شروع شد (Fabio et al., 2013) در آن زمان، سیستمهای انتخاب شده برای جداسازی لرزه ای ساختمان ها بسیار محدود بودند این سیستمها شامل میراگرهای تیر فولادی و قطعات لاستیک لایه ای نصب شده در پی ساختمان بودند. در سال ۱۹۷۱ با تحقیق در رفتار فلزات سیستم جدیدی که بر پایه رفتار پلاستیک سرب بنا شده بود معرفی شد که آنرا سیستم میراگر سربی -تزیقینامیدند و اولین بار در پل تقاطع یکی از خیابانهای نیوزلند استفاده شد (Skinner et al., 1980). روش دیگر، استفاده از تغییر شکل پلاستیک تیرهای فولادی برای ایجاد میرایی داخلی لخت در ساختمان بود که در سال ۱۹۶۶ توسط پوپوف (Fabio et al., 2013) ارائه شد. میراگرهای فولادی جاری شونده از اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی به منظور جذب انرژی ورودی به سازه ها مورد توجه قرار گرفتند. ایده بکارگیری این نوع میراگرها، با بکارگیری میراگرهای تیری فولادی که نسبت به اعضاء فولادی دیگر مقاومت بیشتری در مقابل پدیده خستگی داشتند شروع شد. برای این منظور، کلی و همکاران در سال ۱۹۷۲ (Kelly et al., 1972) اسکینر و همکاران در سال ۱۹۷۴ (Skinner et al., 1974) تحقیقات آزمایشگاهی و مفهومی را برای استفاده از میراگرهای هیستریزس فلزی در داخل سازه با هدف جذب انرژی لرزه ای ارائه نمودند. تیلور ولی در سال ۱۹۸۹ (Taylor & Lee, 1989) تحقیقاتی را انجام دادند که نتایج آن معرفی سه نوع میراگر تیر فولادی شامل میراگرهای پپیشی، میراگرهای تیری با مقطع متغیر و میراگرهای با لنگر یکنواخت بود. در همه این میراگرها با استفاده از مصالح مناسب فولاد و شکل مطلوب تیرها و جوشکاری در محلهایی دور از ناحیه تغییر شکل پلاستیک میرایی قابل قبولی حاصل می شد. پژوهشگران ژاپنی در سالهای ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵ با انجام آزمایشات مختلف بر روی میراگرها و رسم منحنی هیستریزس آنها اقدام به پایه ریزی سیستمهای اتلاف انرژی نمودند. بر مبنای تحقیقات انجام گرفته، میراگرها بر اساس نوع رفتار خود به سه نوع کنترل کننده تغییرمکان، سرعت و ترکیبی طبقه بندی می شوند. میراگرهای کنترل کننده تغییر مکان بر مبنای تغییر مکان نسبی دو انتهای میراگر وابسته هستند و مشخصات دینامیکی سازه تأثیری در رفتار آنها ندارد، میراگرهای فلزی جاری شونده از این نوع میراگرها می باشند. در سیستم میراگرهای فلزی جاری شونده با افزودن قطعه ای به

<sup>1</sup>Chevron



سیستم سازه‌ای ساختمان انتقال نیروی مشخصی به آن باعث جاری شدن آن هنگام وقوع زلزله می‌شود و به این ترتیب، مقدار زیادی از انرژی ورودی به سازه مستهلک می‌گردد. از پرکاربردترین انواع این گروه میراگرها می‌توان به میراگرهای <sup>2</sup>ADAS و <sup>3</sup>TADAS (شکل ۱) اشاره نمود. این نوع میراگر از قرار گرفتن صفحات فلزی موازی بین دو صفحه صلب تشکیل شده اند به طوری که با حرکات نسبی این دو صفحه صلب صفحات داخلی که از آلیاژهای مخصوص Maurer ساخته شده، تغییر شکل داده و جاری می‌شوند و بدینوسیله مانع از بوجود آمدن رفتار غیر الاستیک در سایر اعضا می‌گردند. این سیستمها با جذب و استهلاک انرژی ورودی به سازه، شرایط ایمن و پایداری را نسبت به ساختمانهای مشابه فراهم می‌نمایند. مکانیزم عملکردی میراگرها بگونه ای است که با انجام تغییر شکل‌های ویژه و اعمال مکانیکی خاصی، مقدار زیادی از انرژی ورودی به سازه بر اثر بار گذاری دینامیکی را جذب و مستهلک می‌سازند. عملکرد اینگونه وسایل موجب می‌شود که انرژی خارجی وارد بر سایر اعضای سازه‌ای کاهش یافته و در نتیجه تغییر شکل زیادی در سازه ایجاد نشود.



شکل ۱: میراگرهای فلزی جاری شونده (الف) ADAS و (ب) TADAS (Christopoulos & Filiatrault, 2006)

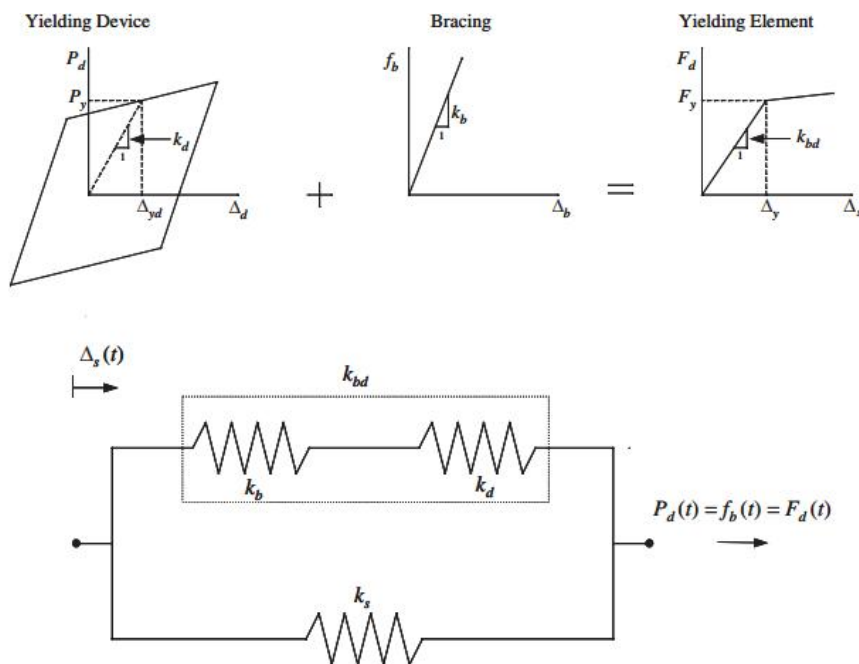
میراگرهای فلزی جاری شونده ADAS از حلقه هیستریزس کامل و پایداری برخوردار هستند و به همین دلیل میراگرهای هیستریزسینز امیدوار می‌شوند. این میراگرها همانند دو میراگر TADAS می‌باشند که از قسمت قاعده به هم متصل هستند و به علت تقارن در شکل و نحوه اتصال صفحات آن به هم، شرایط گیرداری در مرکز این صفحات بدون نیاز به جوش تامین شده است. در نتیجه برخلاف میراگرهای TADAS کیفیت جوشکاری و ساخت این میراگرها بر عملکرد لرزه ای آنها تأثیری ندارد. با توجه به ویژگی های میراگرهای فلزی جاری شونده به دلیل عدم نیاز به تکنولوژی پیچیده جهت ساخت، امکان کاربرد عملی آنها برای ساخت و بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود، رفتار پایدار در برابر زلزله و عدم تأثیر عوامل محیطی و مکانیکی در رفتار لرزه ای آنها (ADAS) بنابراین در این تحقیق تأثیر استفاده از این نوع میراگرها در سیستم های باربر جانبی دوگانه قاب خمشی و مهاربندی بررسی شده است.

## روش تحقیق

مدلسازی و تحلیل قاب های به عنوان بخش اصلی این پژوهش مورد توجه بوده است. بنابراین برای ساخت مدل قاب های مورد مطالعه از نرم افزار تحلیل غیرخطی OpenSees استفاده شده است. برای ایجاد مدل ها از نتایج طراحی اولیه مربوط به نرم افزار SAP2000 استفاده شده است. برای انتخاب مشخصات برای مهاربندها بر مبنای روش سعی و خطا نسبت سختی های متفاوت برای مهاربند نسبت به سختی طبقه در نظر گرفته شد. برای این منظور، براساس نسبت سختی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ برای سختی مهاربندی هر طبقه میزان تغییرات مربوط به مشخصات مهاربندها کنترل گردید. به دلیل اینکه با افزایش سختی، ابعاد مقطع مهاربند افزایش چشمگیری می‌یابد بنابراین نسبت سختی ۳ به عنوان مقدار بهینه انتخاب و در مدلسازی لحاظ شده است. برای انتخاب مقاومت تسلیم میراگر ( $F_y$ ) نیز از روش سعی و خطا استفاده شده است. برای مدلسازی منحنی رفتار چرخه ای میراگر از پاسخ نمودار نیرو- تغییر شکل تحت بارگذاری چرخه ای دلخواه و از مدل معادل چند خطی گسسته همانند مدل تقریبی الاستو-پلاستیک و یا مدل دو خطی استفاده می‌شود. در این پژوهش، از مدل معادل دو خطی ساده مطابق شکل (۲) استفاده شده است.

<sup>2</sup> Added Damping and Stiffness

<sup>3</sup> Triangular Added Damping and Stiffness



شکل ۲: مدل شماییک دو خطی ساده نیروی تغییر شکل میراگر و مهاربندی (Moreschi & Singh, 2003)

به دلیل اینکه تغییر مکان در قاب ها معرف میزان تخریب در اجزای سازه ای و غیر سازه ای است و همچنین معیار شتاب به عنوان متغیری جهت ارزیابی عملکرد میراگرها می باشد، بنابراین در این تحقیق، برای ارزیابی لرزه ای ظرفیت سازه ای قاب ها از دو معیار کنترل تغییر مکان نسبی طبقات و شتاب طبقات استفاده شده است. بنابراین برای طراحی سیستم کنترل بهینه در میراگر XADAS از سه شاخص عملکرد مختلف استفاده شده است. شاخص های عملکرد قاب های مورد مطالعه برای کنترل سازه بر مبنای جابجایی نسبی مطابق رابطه (۱)، شتاب مطابق رابطه (۲) و ترکیب خطی شتاب و جابه جایی نسبی مطابق رابطه (۳) در نظر گرفته شده اند. (Khansefid & Ahmadizadeh, 2015)

$$PI_1 = \frac{\{norm(D)\}_{Controlled}}{\{norm(D)\}_{Uncontrolled}} \quad (1)$$

$$PI_2 = \frac{\{norm(A)\}_{Controlled}}{\{norm(A)\}_{Uncontrolled}} \quad (2)$$

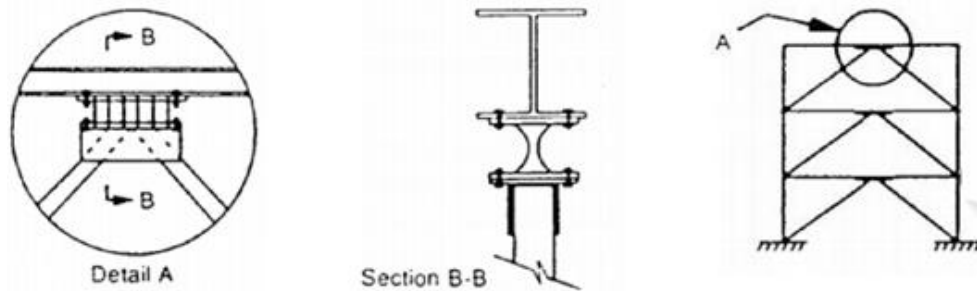
$$PI_3 = \frac{1}{2} \frac{\{norm(D)\}_{Controlled}}{\{norm(D)\}_{Uncontrolled}} + \frac{1}{2} \frac{\{norm(A)\}_{Controlled}}{\{norm(A)\}_{Uncontrolled}} \quad (3)$$

در این روابط A و D به ترتیب بردار بیشینه شتاب مطلق طبقات و بیشینه جابجایی نسبی طبقات می باشند. بنابراین شاخص  $PI_1$  مربوط به بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، شاخص  $PI_2$  بیشینه شتاب طبقات و شاخص  $PI_3$  ترکیب شاخص بیشینه تغییر مکان نسبی و شتاب طبقات است. انتخاب هر یک از شاخص های عملکرد مذکور، بر مبنای مشخصات و نیاز سازه ای انجام خواهد گرفت. برای تعیین نیروی بهینه تسلیم میراگر مقادیر بدست آمده برای هر سه شاخص عملکرد، در نظر گرفته شده است. هر چه میزان این شاخص کمتر باشد نشانگر این موضوع است که سازه کنترل شده با میراگر عملکرد بهتری نسبت به سازه کنترل نشده داشته است. چنانچه مقدار کمتر از ۱ باشد سازه کنترل شده عملکرد بهتری داشته و مقادیر بیشتر از ۱ نشان دهنده عملکرد نه چندان مناسب خواهد بود. با توجه به تعریف شاخص عملکرد سازه و با در نظر گرفتن نسبت سختی های مختلف ۱، ۲ و ۳ برابر سختی طبقه برای مهاربند همگرا که در واقع همان Ki (سختی اولیه میراگر تسلیمی) می باشد، به ازای  $F_y$  های مختلف سازه را تحلیل گردیده و نتایج بدست آمده است.

## مدل‌ها و شتابنگاشت‌ها

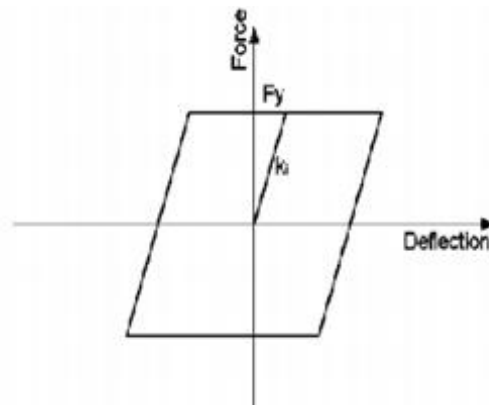
## مدلسازی میراگر فلزی جاری شونده ADAS

در این پژوهش برای ارزیابی و مقایسه رفتار قاب خمشی معمولی با قاب بهسازی شده با میراگر فلزی جاری شونده از میراگرهای XADAS استفاده شده است. معمولاً این نوع میراگرها به عنوان عضو از مهاربند همگرای شورون مورد استفاده قرار می‌گیرند و نحوه استفاده از آن در شکل (۳) ارائه شده است. عملکرد این نوع از میراگرها بر اساس تسلیم برشی اجزای تشکیل دهنده آنهاست و رابطه رفتار نیرو-تغییر مکان آن‌ها غیرخطی است.



شکل ۳: نحوه کاربرد میراگر فلزی جاری شونده XADAS در قاب (Moreschi & Singh, 2003)

هنگامی که این نوع میراگر بر روی مهاربند شورون نصب می‌گردند، به صورت یکتیر دو سر گیردار عمل می‌نماید، یعنی نیروی محوری موجود در مهاربندها باعث تولید لنگر در تمام طول میراگر می‌شود. اجزای تشکیل دهنده این نوع میراگرها، شامل یک قطعه با ظرفیت تسلیم مشخص است که در حین بارگذاری تا پیش از تسلیم فولاد میراگر، مجموعه سازه و میراگر به صورت یک سازه مهاربندی شده عمل می‌کنند ولی بعد از تسلیم فولاد میراگر، سازه از حالت مهاربندی خارج شده و میراگر فعال می‌شود. نحوه عملکرد این نوع میراگرها در طول زلزله به این صورت است که در ابتدا و تا زمانی که نیروی برشی موجود در میراگر کمتر از آن مقدار تنش برشی تسلیم است، سازه رفتاری مشابه یک سازه مهاربندی دارد ولی با افزایش نیرو، میراگر سازه تسلیم شده و رفتار سازه به صورت مهاربندی مجهز به میراگر خواهد بود. بنابراین نمودار نیرو - تغییر مکان یک میراگر XADAS به صورت شکل (۴) می‌باشد.

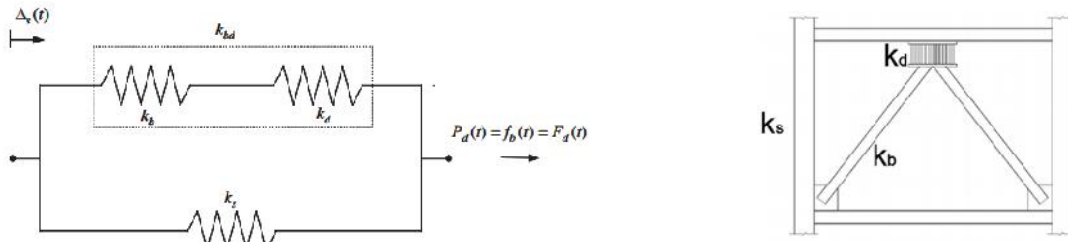


شکل ۴: مدل شماییک دو خطی ساده نیروی تغییر شکل میراگر فلزی جاری شونده (Moreschi & Singh, 2003)

همانطور که در شکل دیده می‌شود، جهت طراحی یک میراگر تسلیم شونده XADAS در زلزله به دو پارامتر اصلی یعنی نیروی تسلیم  $F_y$  و سختی اولیه  $K_1$  نیاز است. این سیستم با توجه به دارا بودن یک نمودار چرخه ای مطلوب می‌تواند بخشی از انرژی سازه را در خود جذب نماید، این جذب انرژی ورودی باعث کاهش میزان نیاز لرزه ای در سازه می‌شود، که در نهایت منجر به بهبود رفتار لرزه ای سازه می‌گردد. برای دستیابی به یک طرح مناسب باید دو پارامتر سختی اولیه  $K_1$  و نیروی تسلیم میراگر  $F_y$  مناسب با نیاز سازه تعریف شوند. اما تعیین مقدار نیروی تسلیم و مقدار سختی اولیه بستگی به نحوه تعامل میراگر و دستک‌های آن دارد. در طراحی سیستم‌های XADAS مقدار سختی اولیه دستک اتصال بسیار بیشتر از سختی خود میراگر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین سختی مجموع آن‌ها که در شکل (۵) با عنوان سختی اولیه میراگر از آن نام برده شده است به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

<sup>4</sup>Demand





شکل ۵: نحوه مدل‌سازی مجموع سختی مهاربند و میراگر فلزی جاری شونده (Moreschi & Singh, 2003)

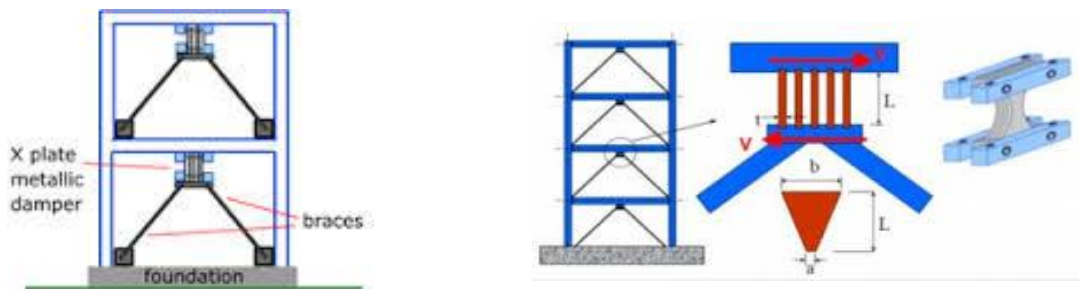
$$k_i = \frac{k_b k_d}{k_b + k_d} \xrightarrow{\frac{k_b \rightarrow \infty}{k_d}} k_i = k_b \quad (4)$$

در اثر وارد شدن نیروی ناشی از زلزله به این سیستم، تغییر شکلی در میراگر ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد نیرو در آن می‌گردد و در واقع بخشی از انرژی تحریک زلزله ورودی به سازه اینگونه جذب می‌گردد. از رابطه بالا مشاهده می‌شود که در واقع سختی اولیه  $K_i$  در میراگر برابر همان سختی مهاربند شورون در قاب می‌باشد، بنابراین برای تعیین سختی اولیه، ابتدا باید سختی مهاربند شورون تعیین گردد. برای تعیین سختی مهاربند شورون در این تحقیق از نسبت سختی یعنی ۱، ۲ و ۳ برابر سختی طبقه استفاده شده است. از بین سختی‌های در نظر گرفته شده و طرح بهینه را انتخاب گردیده است. برای انتخاب طرح بهینه از روش سعی و خطا و مفهوم شاخص عملکرد استفاده شده است. در این تحقیق سه برابر نسبت سختی طبقه به عنوان نسبت سختی مهاربند شورون (دستک‌ها) یا همان  $K_i$  انتخاب شده است.

تعیین نیروی تسلیم  $F_y$  با استفاده از نرم افزار OpenSees و روش نیومارک و بر مبنای سعی و خطا انجام شده است. روش کار به این صورت بوده که در ابتدا سازه بدون میراگر و سپس با در نظر گرفتن میراگر و تغییر مشخصات آن شامل تغییر در مقدار نیروی تسلیم  $F_y$  تحلیل شده است. در نهایت با بررسی پاسخ سازه ناشی از تغییر پارامتر نیروی تسلیم مقدار نیروی تسلیم بهینه برای آن انتخاب شده است. بنابراین برای تعیین طرح بهینه قاب ۴ طبقه با میراگر تعداد ۳۳ تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی و برای قاب ۱۲ طبقه به تعداد ۳۹ تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی تحت سه رکورد LA01، LA02 و LA03 انجام شده است. بدین ترتیب، برای نسبت سختی معین، ظرفیت‌های تسلیم مختلف انتخاب و تحلیل شده اند و سپس بر اساس شاخص‌های عملکرد مشخص شده، طرح بهینه انتخاب شده است. انتخاب پارامتر تسلیم بهینه با استفاده از هر سه شاخص عملکرد تعیین و در نتیجه برای نیروی تسلیم میراگر در مدل ۴ و ۱۲ طبقه به ترتیب مقدار 400KN و 1300KN به عنوان نیروی تسلیم بهینه میراگر در مدل‌سازی انتخاب شده است.

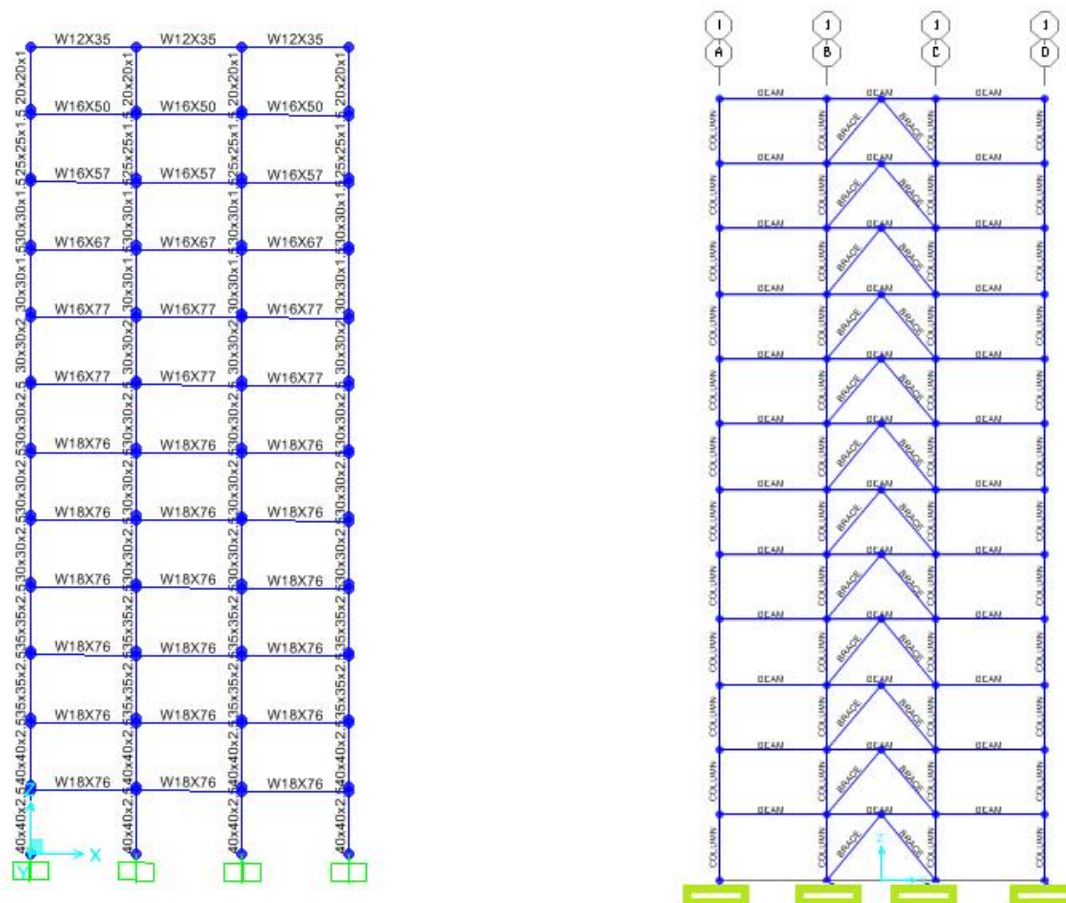
## مدلسازی قاب های مورد مطالعه

مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل دو قاب ۴ و ۱۲ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی بوده اند که در شکل (۷) برای مقایسه عملکرد میراگرهای اصطکاکی ابتدا هر دو قاب بدون میراگرها و سپس با میراگر فلزی جاری شونده ADAS همانند شکل (۶) مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. ترکیبات بارگذاری قاب‌ها بر مبنای مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (مبحث ششم، ۱۳۹۲) و برای طبقات بار مرده  $600 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده  $200 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است. بارگذاری لرزه ای قاب‌های مورد مطالعه بر اساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۸۴) انجام شده است. فولادهای مورد استفاده در قاب‌های مورد مطالعه از نوع ST37 و با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی و رفتار دو خطی بوده‌اند.



شکل ۶: مشخصات و نحوه مدل‌سازی میراگرها در مدل‌های مورد مطالعه





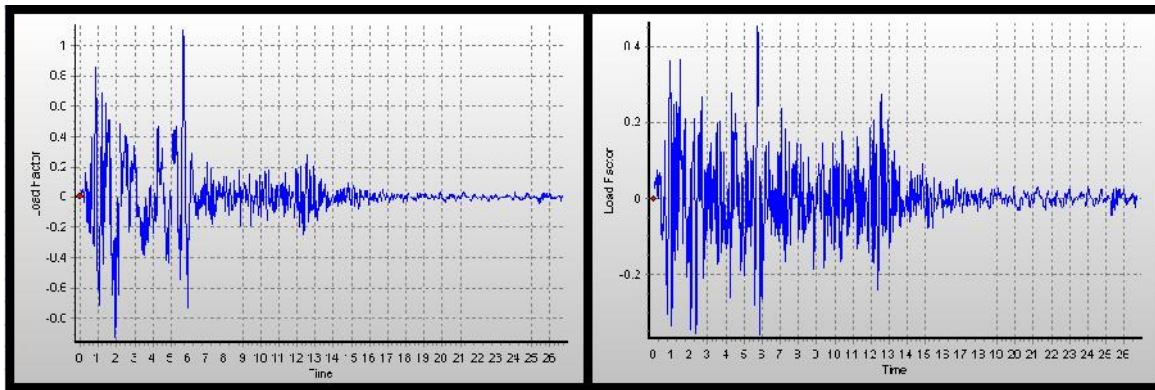
شکل ۷: نمای قاب های مورد مطالعه

### شتابنگاشت های مورد استفاده

به دلیل انجام تحلیل های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، بنابراین مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ از هفت شتابنگاشت منطبق با مشخصات ساختگاه قاب های مورد مطالعه استفاده شده است. در این پژوهش از هفت رکورد زلزله مربوط به SAC (FEMA/SAC, 1997) مطابق جدول ۱ استفاده شده است. برای انتخاب این رکوردها، از اطلاعات مربوط به ۲۰ رکورد مربوط به Los Angeles با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال منطبق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران و با رواداری ۰/۳ شتاب به طیف هدف (خاک نوع ۲ در مناطق با خطر نسبی زیاد در آیین نامه ۲۸۰۰) استفاده شده است. همچنین برای ایجاد تطابق طیف رکورد مورد استفاده با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ با روش موجک (Hancock et al., 2006) نیز استفاده شده است. یک نمونه از رکوردهای منطبق با طیف طرح ۲۸۰۰ با استفاده از روش موجک در شکل (۸) و طیف های منطبق بر استاندارد ۲۸۰۰ مربوط به ۷ رکورد مورد استفاده در شکل (۹) ارائه گردیده است.

جدول ۱: مشخصات شتابنگاشت های مورد استفاده در تحقیق

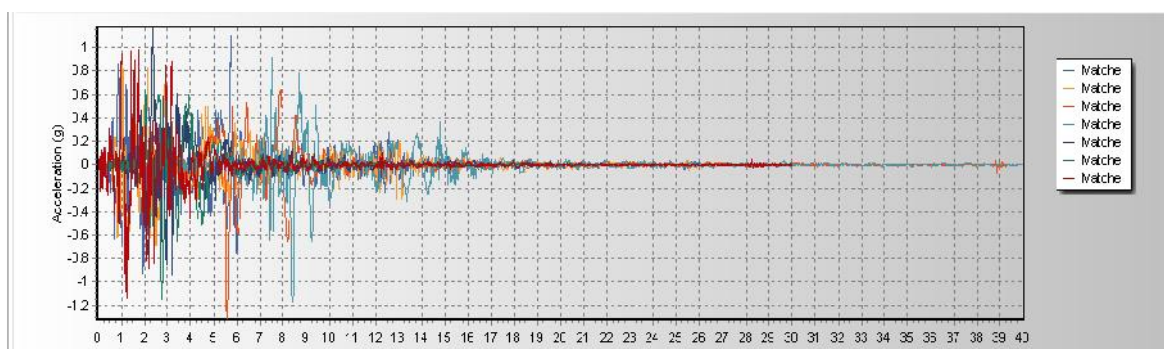
عنوان	زلزله / ایستگاه	بزرگا (MI) یا (Mw)	فاصله از گسل (کیلومتر) (Dist. Of Rupture)	بیشینه شتاب زمین (g) (PGA)	ضریب مقیاس
LA01	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	0.452	2.01
LA02	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	0.663	2.01
LA03	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	0.479	1.01
LA05	Landers, 1989, Gilroy	7	12	0.652	1.79
LA06	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	0.665	1.03
LA07	North Palm, Spring 1986	6	6.7	0.968	2.97



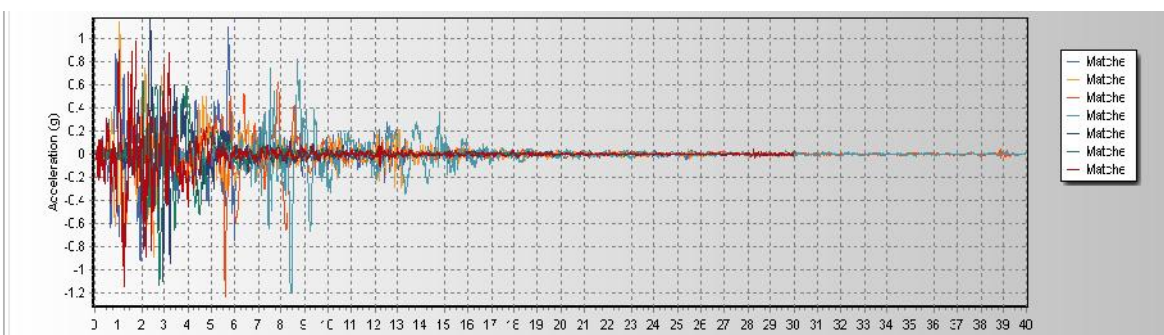
(ب) رکورد LA01 منطبق بر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰

(الف) رکورد LA01

شکل ۸: رکورد LA01 منطبق با طیف طرح ۲۸۰۰ با استفاده از روش موجک (مرجع ۷)



(الف)



(ب)

شکل ۹: رکوردهای (الف) اصلی و (ب) منطبق با طیف طرح ۲۸۰۰ با استفاده از روش موجک (مرجع ۷)

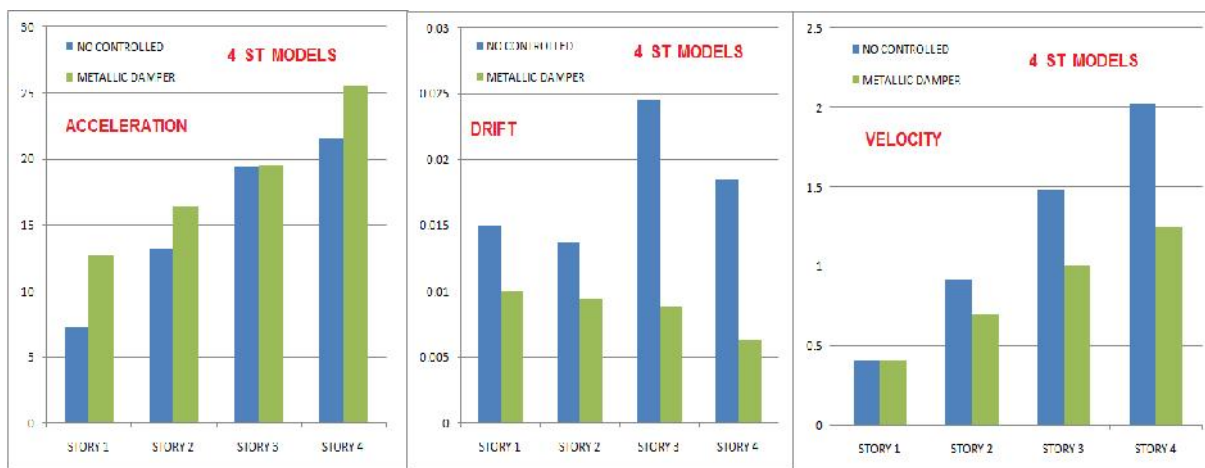
## ارائه نتایج ارزیابی

به منظور انتخاب مقدار مقاومت تسلیم میراگر، نتایج برای مدل های ۴ و ۱۲ طبقه به ازای نیروی تسلیم های مختلف صورت مطابق جدول .... محاسبه شده است. بر اساس نتایج تاثیر استفاده از میراگر در کیمنه نمودن شتاب تغییرمکان نسبی طبقات برای قاب ۴ طبقه مقاوم تسلیم  $F_y=600$  KN و برای قاب ۱۲ طبقه  $F_y=1300$  KN برای مشخصات میراگرهای مورد استفاده انتخاب شده است. با انجام تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از رکوردهای انتخاب شده برای میزان شتاب طبقات، تغییرمکان جانبی نسبی طبقات و نمودار هیستریزس قاب های مورد مطالعه نتایج ذیل بدست آمده است.

## قاب ۴ طبقه

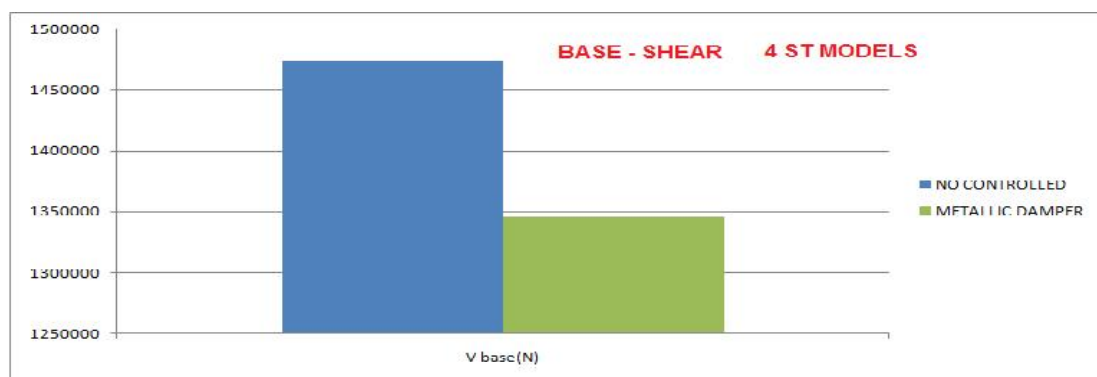
برای ارزیابی پاسخ های قاب چهار طبقه مورد مطالعه سه پارامتر بیشینه شتاب طبقات، بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات و بیشینه سرعت (جهت مقایسه انرژی جنبشی قاب ها) طبقات برای مدل ۴ طبقه، در شکل (۱۰) ارائه شده است.





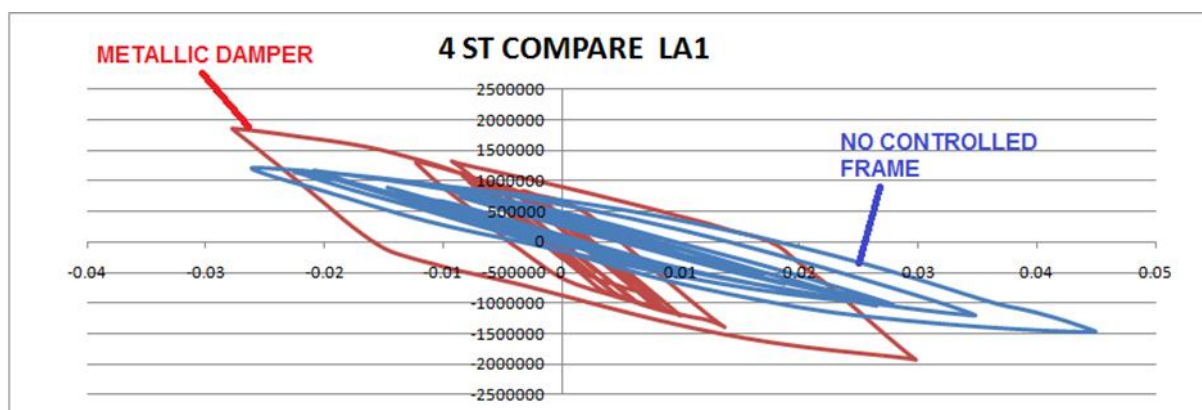
شکل ۱۰: مقایسه سه پارمتر شتاب، تغییر مکان جانبی و سرعت در دو مدل ۴ طبقه

برای ارزیابی بهتر از میزان تاثیر استفاده از میراگر در قاب ۴ طبقه، مقادیر نیروی برشی بیشینه در ستون ها و مهاربندهای طبقه اول این قاب در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در شکل (۱۱) شده است. نتایج بیانگر تاثیر مثبت استفاده از میراگر در کاهش میزان نیروی برشی پایه می باشد.



شکل ۱۱: مقایسه مقادیر نیروی برشی در ستون ها و مهاربندهای طبقه اول قاب ۴ طبقه

برای ارزیابی میزان تقاضای لرزه ای قاب های مورد مطالعه، نمودار رفتار چرخه ای قاب های مورد مطالعه به منظور محاسبه و مقایسه انرژی کرنشی ناشی از زلزله در شکل (۱۲) ارائه شده است.



شکل ۱۲: نمودار چرخه ای مقایسه ای برای دو مدل ۴ طبقه

میزان انرژی مستهلک شده در سازه در صورت استفاده از میراگر یکی از عوامل عمده بیانگر تاثیر استفاده از میراگر در سازه می باشد،

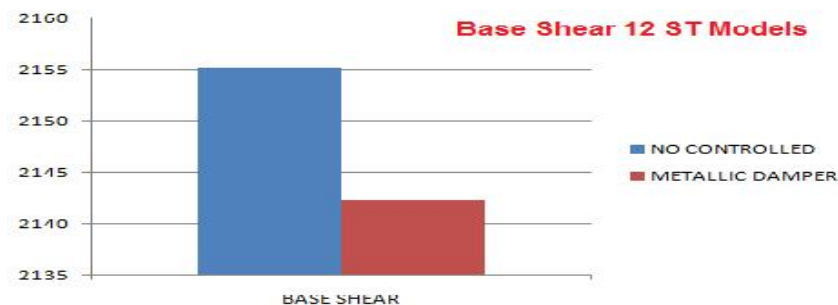
## قاب ۱۲ طبقه

به منظور ارزیابی تاثیر استفاده از میراگرهای فلزی تسلیم شونده در رفتار قاب های میان مرتبه ، دو نمونه قاب فولادی خمشی دوازده طبقه بدون میراگر و با میراگرهای فلزی تسلیم شونده مورد ارزیابی قرار گرفته اند. برای این منظور، سه پارامتر بیشینه شتاب، بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی و بیشینه سرعت طبقات همانند شکل (۱۳) در مدل های مذکور بررسی و مقایسه شده اند.



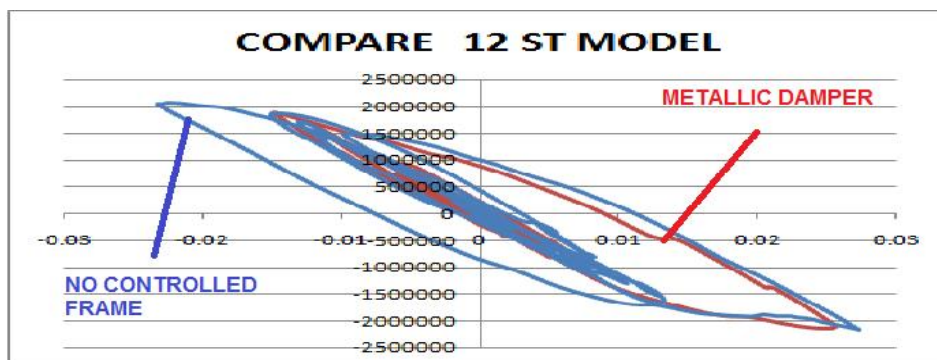
شکل ۱۳: مقایسه سه پارامتر شتاب، تغییر مکان جانبی و سرعت در دو مدل ۱۲ طبقه

برای ارزیابی بهتر از میزان تاثیر استفاده از میراگر در قاب ۱۲ طبقه، مقادیر نیروی برشی بیشینه در ستون ها و مهاربندهای طبقه اول این قاب در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در شکل (۱۴) ارائه شده است. نتایج بیانگر تاثیر مثبت استفاده از میراگر در کاهش میزان نیروی برشی پایه می باشد.



شکل ۱۴: مقایسه مقادیر نیروی برشی در ستون ها و مهاربندهای طبقه اول قاب ۱۲ طبقه

برای ارزیابی میزان تغییرات انرژی کرنشی در قاب های مورد مطالعه، نمودار رفتار چرخه ای در هر دو قاب در شکل (۱۵) ارائه شده است.



شکل ۱۵: نمودار چرخه ای مقایسه ای برای دو مدل ۱۲ طبقه

## نتیجه گیری

بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق در خصوص میزان تاثیر استفاده از میراگرهای فلزی جاری شونده، نتایج ذیل بدست آمده نشان دهنده این موضوع است که کنترل قاب های خمشی ویژه با استفاده از میراگر فلزی تسلیم شونده باعث کاهش پاسخ سازه در سرعت طبقات به عنوان پارامتر محاسبه انرژی جنبشی در سازه به میزان ۳۸.۴۷٪ در مدل ۴ طبقه و ۲۴.۹۲٪ در مدل ۱۲ طبقه شده است. همچنین کاربرد میراگر فلزی تسلیم شونده باعث کاهش پاسخ سازه در جابجایی نسبی طبقات به میزان ۵۹.۴۶٪ در مدل ۴ طبقه و ۶۷.۴۶٪ در مدل ۱۲ طبقه گردیده است. مقدار برش پایه در صورت استفاده از میراگر به اندازه ۸.۷۴٪ در مدل ۴ طبقه و ۰.۶٪ در مدل ۱۲ طبقه کاهش یافته است. انرژی کرنشی سازه در حالت استفاده از میراگر در مدل ۴ طبقه به مقدار ۱۵.۴۱٪ و در مدل ۱۲ طبقه به مقدار ۸۱.۴۸٪ کاهش یافته است. کنترل قاب خمشی ویژه با استفاده از میراگر فلزی تسلیم شونده باعث افزایش شتاب سازه به میزان ۱۷.۹۱٪ در مدل ۴ طبقه و ۵۵.۷۵٪ در مدل ۱۲ طبقه می شود. بنابراین در استفاده از سیستم کنترل میراگر فلزی جاری شونده، علاوه بر پارامتر جابجایی نسبی طبقات بایستی میزان تغییرات شتاب طبقات به عنوان پارامتر افزایش دهنده آسیب پذیری قاب ها مورد توجه قرار گیرد ولی در حالت کلی با افزایش ارتفاع قاب از مدل ۴ به ۱۲ طبقه کارایی سیستم میراگر فلزی تسلیم شونده در کنترل تقاضای لرزه ای و بهبود رفتار لرزه ای بسیار مناسب و مطلوب بوده است.

## مراجع

- کمیته بازنگری آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، آیین نامه طراحی ساختمان هادر برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم)، (۱۳۸۴)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران.
- مقررات ملی ساختمان- مبحث ششم: بارهای وارد بر ساختمان، ۱۳۹۲، وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت امور مسکن و ساختمان، دفتر امور مقررات ملی ساختمان.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A., & Bertero, V. V. (2006). *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Iuss press.
- Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project*. SAC Joint Venture, 1997.
- Fabio, M., Alfonso, V., Mirko, M., & Giuseppe, M. (2013). Modeling and Nonlinear Seismic Analysis of Framed Structures Equipped with Damped Braces. In *WSEAS International Conference. Proceedings. Recent Advances in Computer Engineering Series* (No. 9). WSEAS.
- Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R. (2006). An Improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, *Journal of Earthquake Engineering*; 10, 67-89.
- Hancock, S. S. (2006). "Multi-mode damper for an A-shaped heat exchanger." *U.S. Patent No. 6,986,387*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kelly, J. M., Skinner, R. I., & Heine, A. J. (1972). Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bulletin of NZ Society for Earthquake Engineering*, 5(3), 63-88.
- Khansefid, A., & Ahmadzadeh, M. (2015). An investigation of the effects of structural nonlinearity on the seismic performance degradation of active and passive control systems used for supplemental energy dissipation. *Journal of Vibration and Control*, 1077546314563969.
- Moreschi, L. M., & Singh, M. P. (2003). Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(8), 1291-1311.
- Skinner, R. I., Kelly, J. M., & Heine, A. J. (1974). Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(3), 287-296.
- Skinner, R. I., Tyler, R. G., Heine, A. J., & Robinson, W. H. (1980). Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes. *Bulletin, New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 13(1).
- Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243-259.

Taylor, D. P., & Lee, D. A. (1989). "Frictionless damper.", *U.S. Patent No. 4,815,574*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Yang, J. N., Wu, J. C., & Agrawal, A. K. (1995). Sliding mode control for nonlinear and hysteretic structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 121(12), 1330-1339.

Yang, J., Akbarpour, A., and Ghaemmaghami, P. (1987). New Optimal Control Algorithms for Structural Control." *J. Eng. Mech.*, 113(9), 1369–1386.

