

کاربرد میراگر جرمی چرخشی مجهز به سختی منفی انفعالی جهت کنترل لرزه‌ای تجهیزات

افشین کلانتری (نویسنده مسئول)، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،
a.kalantari@iiees.ac.ir

ریحانه شفیع‌پناه، دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

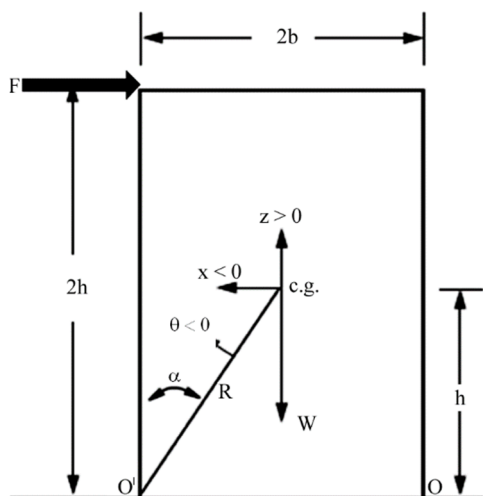
چکیده: در مطالعه‌ی حاضر، با محور قرار دادن یک سامانه‌ی نوین استهلاک انرژی برای یک بلوک صلب و در نظر گرفتن جداسازی لرزه‌ای برای آن، در کنار طرح یک روش خلاقانه در استهلاک انرژی دینامیکی سامانه‌های جداسازی لرزه‌ای، تأثیر آن در حفاظت لرزه‌ای بلوک‌های صلب به‌عنوان مدلی ساده از تجهیزات مکانیکی و الکترونیکی در ساختمان‌ها بررسی گردیده است. در مطالعه از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بهره گرفته شده است و هدف اصلی، کاهش شتاب مطلق بخش جداشده است به‌نحوی که جابه‌جایی آن نیز در حد قابل قبول محدود گردد. بررسی‌ها نشان داد که میراگر جرمی چرخشی که میراگری با عملکردی انفعالی و برخورداری از قابلیت ایجاد سختی منفی به‌وسیله‌ی اینرسی دورانی جرم محیطی خود است، اگر به سیستم جداسازی شده‌ای با زمان تناوب و جرم و سختی ثابت افزوده شود، باعث افزایش دوره‌ی تناوب سیستم، کاهش جابه‌جایی تا یک‌سوم میزان اولیه، کاهش شتاب مطلق تا یک‌چهارم میزان اولیه و کاهش شتاب نسبی تا یک‌چهارم میزان اولیه می‌شود. مقایسه میان میراگر جرمی چرخشی که جرم آن $0/04$ جرم سیستم جداسازی شده بود با میراگرهای ویسکوز با نسبت میرایی‌های مختلف تا حدود ۲۵ درصد که به همان سیستم جداسازی شده افزوده شده بودند، نشان داد که در جابه‌جایی‌های برابر ایجاد شده توسط هر دو میراگر، میراگر جرمی چرخشی با نسبت جرم $0/04$ جرم سیستم جداسازی شده عملکرد بهتری از نظر کاهش شتاب مطلق و نسبی داشته است.

کلمات کلیدی: تجهیزات بلوکی شکل، جداسازی لرزه‌ای تجهیزات، میراگر جرمی چرخشی

۱- مقدمه

یا دیوارها و ستون‌های ساختمان‌ها و سازه‌های صنعتی) متصل می‌شوند. این سیستم‌ها جزو اجزای باربر سازه محسوب نمی‌شوند اما ممکن است در هنگام زلزله تحت اثر نیروهای بزرگی قرار گیرند [۱]. تجهیزات صلب بلوکی شکل در بسیاری از مراکز خدمات‌رسانی مانند بیمارستان‌ها و اتاق‌های کنترل کاربرد فراوانی دارند. در این مطالعه یک سامانه‌ی انفعالی پیشنهاد می‌گردد که کارآمدی روش‌های هوشمند نیمه‌فعال را نیز به همراه داشته باشد. این سامانه در کنترل لرزه‌ای

از روش‌های کنترل لرزه‌ای به‌عنوان یکی از زمینه‌های اصلی در روش‌های نوین کاهش پاسخ لرزه‌ای در سازه‌ها نام برده می‌شود. خسارات وارده بر اجزای غیر سازه‌ای ساختمان‌ها با توجه به سطح سرمایه‌گذاری انجام یافته بر روی آنها (که در مقایسه با سطح سرمایه‌گذاری کل سیستم ساختمان از درصد بیشتری برخوردار می‌باشند) قابل توجه بوده است. سیستم‌های ثانویه، سیستم‌ها و اجزایی با جرم بسیار کوچک‌تر از جرم سازه‌ها هستند که به قسمتی از سازه‌ی اصلی (کف طبقات، بام



شکل (۱): بلوک صلب واقع بر بستر زمین.

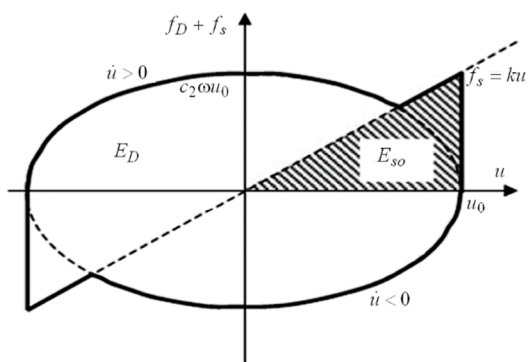
در شکل (۲) آورده شده است. مطابق شکل (۲- الف) نیروی ایجاد شده به وسیله این میراگر شیبی منفی دارد، بنابراین این میراگر قابلیت ایجاد نیرو در سازه با سختی منفی را خواهد داشت. سپس نیروی کل (میرایی + الاستیک) نیز به دست آورده شده است. این عمل موجب ایجاد مساحت بزرگتر در منحنی های چرخه ای (اتلاف انرژی بالاتر) و کاهش نیروی کل (الاستیک + میرایی) در سازه شده است.

مفهوم سختی منفی برای نخستین بار توسط مولینیوس [۲] در سال ۱۹۵۷ در چند ایده برای سیستم های جداکننده ارتعاشات مطرح شد. ایده های طراحی برای تغییر سختی سازه ها و افزودن دستگاه های میراگر با استفاده از تئوری های کنترلی توسط گلاک [۳] در سال ۱۹۹۶ برای

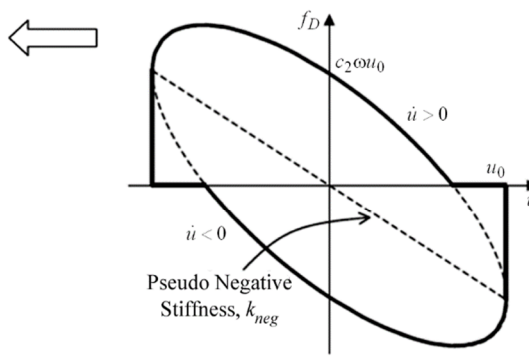
کف های جداسازی شده در ساختمان ها مورد مطالعه ی عددی قرار خواهد گرفت. سامانه ی پیشنهادی میراگر جرمی چرخشی نام گرفته که بین زمین (یا طبقه) و کف جداسازی شده قرار می گیرد. پیش زمینه ی سازوکار نیمه فعال برای پیاده سازی نیروی با سختی معادل شبه منفی، عملکرد «غیرفعال یا انفعالی» این میراگر، اجرایی بودن، امکان پذیر بودن پیاده سازی آن و وزن به نسبت کم تجهیزات بلوکی شکل، موجب ایجاد انگیزه برای انجام این مطالعه شده است.

به طور معمول در صورتی که یک جسم الاستیک تحت اثر نیرویی خارجی تغییر شکل دهد، نیروی مقاوم ایجاد شده در آن جسم در خلاف جهت تغییر شکل و نیروی وارده خواهد بود که به این مفهوم سختی مثبت گفته می شود. به این ترتیب مفهوم سختی منفی، نیرویی است که در اثر تغییر شکل جسم الاستیک در راستای تغییر شکل عمل می کند. برای بیان واضحی از سختی منفی در ابتدا مثال ساده ای آورده می شود. بلوک صلبی را در نظر بگیرید که مطابق شکل (۱) تحت نیروی F قرار دارد. وقتی بلوک شروع به دوران می کند به تدریج بازوی F زیاد و بازوی W (وزن بلوک) کم می شود، یعنی اگر با همین روند افزایش F ادامه یابد بلوک سقوط خواهد کرد.

بنابراین رابطه میان نیروی F و زاویه ی دوران باید به صورت کاهشی و با شیبی منفی (سختی منفی) باشد تا واژگونی رخ ندهد. برای معرفی سختی منفی توسط میراگرها یک منحنی چرخه ای که توسط میراگری نیمه فعال ایجاد شده،



(ب) نمودار نیرو (الاستیک + میرایی) - جابه جایی



(الف) نمودار نیرو الاستیک - جابه جایی برای میراگر نیمه فعال با سختی منفی

شکل (۲): تصویر عملکرد حلقه های چرخه ای با سختی منفی در نیروی کل وارد بر سازه [۷].

تعیین بزرگی و موقعیت اعضای سازه‌ی تغییر یافته (که اغلب احتیاج به نرم‌شدگی داشتند تا سخت‌شدگی) و افزودن میرایی مطرح شد، درحالی‌که از پایداری سازه مطمئن بودند. پلاتوس [۴] دستگاه‌های جداسازی حساس به ارتعاش دیگری را برای جداسازی سازه از ارتعاشات افقی ایجاد کرد که از فنر پیش‌فشرده در آن استفاده شده بود.

در مطالعات پیشین عملکرد دستگاه‌های سختی منفی به جداسازی تجهیزات کوچک و حساس محدود می‌شد [۵]. دلیل اینکه این فناوری به اجسام با جرم کم محدود می‌شد وابستگی آن به نیروهای بزرگ در پیش بارگذاری فنرها برای دستیابی به سختی منفی بود. این نیروهای پیش بارگذاری بیشتر تابع وزن سازه‌ی جداسازی شده هستند. عملکرد مفهوم سختی منفی برای سازه‌های سنگین‌تر، همچون پل‌ها و ساختمان‌ها، احتیاج به اصلاح مکانیسم‌های موجود برای کاهش نیاز به نیروهای پیش بارگذاری و جاگذاری دستگاه‌های سختی منفی در سازه به‌گونه‌ای بود که نیروی اضافی بر سازه وارد نشود [۶].

ایمورا و پرادونو [۷] در سال ۲۰۰۳ کاربرد سختی منفی را در کنترل پل‌های کابلی مورد بررسی قرار دادند. آنها این سختی منفی را توسط یک میراگر روغنی متغیر تولید کردند. حلقه‌های چرخه‌ای ایجاد شده به‌وسیله‌ی این میراگر همراه با سختی الاستیک سازه‌ی پل، حلقه‌های چرخه‌ای صلب پلاستیک را با میرایی بالا ایجاد کردند. آنها با مقایسه‌ی میان سیستم نیمه‌فعال سختی منفی ابداعی، میراگرهای انفعالی و میراگرهای فعال دریافتند که سیستم سختی منفی ابداعی آنها به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای عملکرد بهتری نسبت به سیستم انفعالی و سطح عملکردی در حدود میراگرهای فعال از خود نشان می‌دهد.

رینه‌ورن و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۵ و ویتا و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۶ مفهوم تضعیف ظاهری سازه (کاهش مقاومت و سختی) را معرفی نمودند و میراگر ویسکوز مکملی را هم‌زمان با آن تضعیف‌شدگی جهت

کاهش شتاب و تغییر مکان‌های طبقات در بهبود ویژگی‌های سازه به کار بردند. نتایج نشان داد که اضافه نمودن میراگر در این سازه‌های تضعیف شده (به‌ویژه در سازه‌هایی با اعضا یا پی دارای تنش اضافی و یا با اعضای ترد) موجب کاهش هم‌زمان شتاب، برش پایه و جابه‌جایی می‌گردد و افزایش جابه‌جایی ناشی از تضعیف‌شدگی را جبران خواهد کرد. رویکرد استفاده شده در آیین‌نامه‌ی آمریکا نیز برای سازه‌ها با سیستم‌های میراکننده بر پایه‌ی همین مفهوم کاهش سختی و مقاومت و افزودن میرایی برای دستیابی به اهداف مد نظر در طراحی سازه‌ها می‌باشد.

ایمورا و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۶ بر روی روشی جدید برای کنترل و ساده‌سازی الگوریتم سازه‌های جداسازی شده با جداساز نیمه‌فعال پرداختند. ایده‌ی آنها مبتنی بر تولید حلقه‌های چرخه‌ای با حداکثر جذب انرژی توسط دستگاه‌های نیمه‌فعال بود که لازمه‌ی آن داشتن اطلاعاتی از سرعت و جابه‌جایی دستگاه‌ها بود. چرخه‌های هیستریزس که توسط دستگاه‌های نیمه‌فعال موجود در این مطالعه تولید می‌شدند، ظرفیت جذب انرژی بالایی مشابه میراگرهای اصطکاکی داشتند اما نقاط ضعف آنها مانند تغییر شکل‌های ماندگار بعد از زلزله‌های شدید و تغییرات آرام نیروی میرایی در فرکانس‌های بالا در نیروهای میرایی را برطرف کرده بودند. آنها نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی قادر به کاهش پاسخ سیستم‌های جداسازی شده می‌باشد. هدف کلی آن ایجاد اصطکاک الاستیک به همراه سختی منفی بوده است. این نیروهای میرایی غیرخطی شتاب و جابه‌جایی سیستم را در زلزله‌های متوسط کنترل می‌کنند و جداساز را وادار می‌کنند تا همچون سیستم اصطکاکی لغزشی در زلزله‌های شدید عمل کند.

میراگر جرمی چرخشی به کار گرفته شده در این مقاله توسط پرادونو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۸ برای سازه‌های جداسازی شده مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه‌های جذب انرژی که عملکردی انفعالی دارند همانند

سایر اعضای سازه ایجاد خواهد کرد. سیستم پیشنهادی عملکردی انفعالی دارد. پیش از آنها جانگ و همکاران [۱۴]- [۱۵] در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ سیستمی انفعالی را بر اساس میراگرهای مغناطیسی ایجاد کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که امکان‌پذیر است که سیستم کنترلی انفعالی هوشمند دستگاه‌های الکترومغناطیسی را برای تغییر ویژگی‌های میراگرها مجهز کند. سپس هریس و همکاران [۱۳] در تحقیق خود مکانیسم ساده‌ای را برای ایجاد سختی منفی در ترکیب با میراگرهای مغناطیسی پیشنهاد کردند و آزمایش‌هایی برای بررسی عملکرد میراگر پیشنهادی انجام شد. نتایج نشان دادند که میراگر پیشنهادی نسبت به میراگر نیمه‌فعال برش پایه و حداکثر نیروهای کنترلی را به میزان بیشتری کاهش می‌دهد اما عملکرد میراگر نیمه‌فعال در کاهش جابه‌جایی دهانه‌های میانی پل بهتر بوده است.

ایمورا و پرادونو [۱۶] در سال ۲۰۰۹، از میراگرهای با سختی شبه منفی برای تولید حلقه‌های چرخه‌ای با سختی منفی استفاده کردند. میراگرهای با سختی شبه منفی توسط میراگرهای متغیر که حلقه‌های چرخه‌ای با سختی منفی ایجاد می‌کنند، کنترل می‌شوند. عملکرد این میراگر در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌هایی نظیر پل‌های کابلی، پل‌های بزرگراهی و ساختمان‌ها تحت تحریکات مختلف لرزه‌ای توسط آنها بررسی شد. تحقیقات آنها نشان داد که میراگر پیشنهادی نیروی کلی کمتری را در اثر تحریک لرزه‌ای به سازه وارد کرده است. همین‌طور آنها نشان دادند که میزان اعمال نیرو به سازه توسط میراگر با سختی شبه‌منفی کمتر از میراگر ویسکوز خطی معادل آن است.

رویکردی دیگر شبیه‌سازی تسلیم شونده‌گی با استفاده از سختی منفی مناسب در جابه‌جایی ایجاد شده بر مبنای مفهوم سختی منفی می‌باشد [۱۷-۱۸]. یک سیستم سختی منفی مناسب، نیروهایی که باعث حرکت می‌شوند را همچون سیستم با سختی مثبت در خلاف جهت حرکت ایجاد نمی‌کند.

میراگر ویسکوز، میراگرهای ویسکو الاستیک و... معمولاً بر اساس سرعت و جابه‌جایی نسبی کار می‌کنند اما این میراگر بر اساس شتاب نسبی میان دو نقطه عمل می‌کند. این میراگر چرخشی است که جرم در قسمت محیطی آن متمرکز شده است و اینرسی دورانی این چرخ قادر به میرا کردن شتاب نسبی بین دو نقطه خواهد بود. چون عملکرد جرم دورانی است، بنابراین تأثیری در افزایش نیروهای انتقالی در اثر زلزله نخواهد داشت. در این سیستم از ایده‌ی به‌کارگیری سختی منفی نیز استفاده شده است و حلقه‌های چرخه‌ای میراگر جهت ارزیابی عملکرد آن در استهلاک انرژی به‌دست‌آمده است. میراگر جرمی چرخشی که توسط روابط تحلیلی معرفی شد قابلیت کاهش شتاب و جابه‌جایی را در مورد ساختمان‌ها از خود به نمایش گذاشت.

ایمورا و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۸ به مطالعه پیرامون کنترل لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از سختی منفی پرداختند. در مطالعه‌ی آنها سازه بر روی پایه‌های محدب شکل قرار گرفته بود. آنها در مطالعات خود یک میراگر جدید با سختی منفی و قابلیت استهلاک انرژی به‌صورت پایدار در حالت انفعالی را معرفی کردند و عملکرد آن را با آزمایش‌هایی بر روی میز لرزان کنترل کردند. نتایج نشان داد میراگر پیشنهادی شتاب مطلق و جابه‌جایی نسبی را در پلی که به همراه آن مدل شده بود تا حد زیادی کاهش داد. نتایج نشان داد که حداکثر نیروی اینرسی سیستم با میراگر پیشنهادی حدود ۴۰٪ نسبت به زمانی که از میراگر اصطکاکی استفاده شود، کاهش یافته است. علاوه بر آن کاهش میزان جابه‌جایی مطلق و نسبی نیز با میراگر فوق مشاهده شد.

هریس و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۹ رویکرد کنترلی ساده‌ای را برای تولید حلقه‌های چرخه‌ای با سختی منفی برای کنترل پاسخ لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده ارائه کردند. ترکیب این حلقه‌های چرخه‌ای با تکیه‌گاه‌های آنها باعث ایجاد ویژگی نیرو تغییر مکان صلب پلاستیک شده و نسبت‌های میرایی بزرگی را بدون ارسال نیروهای اضافی به

پاسالا و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۵ سازه‌ای سه طبقه با تکیه‌گاه گیردار که در دو طبقه‌ی بالایی مهاربندی شده بود و دو دستگاه سختی منفی و یک میراگر ویسکوز در طبقه‌ی اول آن نصب شده بود را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌های پیشین آنها بر روی سازه‌های در محدوده‌ی الاستیک خطی انجام شده بود اما این دستگاه سختی منفی مورد مطالعه، رفتاری الاستیک - غیرخطی از خود نشان می‌داد. آنها نشان دادند که شتاب، برش پایه و تغییر شکل سازه غیر الاستیک دو خطی همراه با دستگاه سختی منفی، در زمین‌لرزه‌های متوسط بیش از ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت و در زمین‌لرزه‌های شدید از فروریزش سازه جلوگیری خواهد کرد. گیشا و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۵ بر روی عملکرد مناسب سیستم سختی منفی و یک سیستم سختی منفی تطبیقی بر روی یک سازه‌ی برشی با پنج درجه آزادی پرداختند. مقدار بهینه‌ی پارامترها و تعداد میراگرها از طریق کنترل پارامترهایی نظیر تغییر شکل میان‌طبقه‌ای، شتاب‌ها، جابه‌جایی و برش پایه از طریق تحلیل با برنامه‌ی متلب ارزیابی شد و نتایج قابل قبولی را در کاهش پاسخ‌ها بالای قسمت نصب شده دستگاه از خود نشان داد.

عطاری و همکاران [۲۴] یک سیستم کنترل انفعالی که قادر به ایجاد سختی منفی بود را در مدل یک پل بزرگراهی با مقیاس یک‌چهارم توسط میز لرزه مورد آزمایش قرار دادند. آنها نشان دادند که استفاده از این دستگاه سختی منفی در پل‌های جداسازی شده می‌تواند مقدار برش پایه‌ی حداکثر را به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش دهد، اگرچه میزان تغییر شکل‌ها در تراز جداسازی شده افزایش خواهد یافت که این افزایش جابه‌جایی را می‌توان با استفاده از میراگرها کنترل کرد. نیروها و تغییر مکان‌های اندازه‌گیری شده عملکرد مناسبی را در ترکیب سختی منفی و اصطکاک در این دستگاه سختی منفی نشان دادند.

ایده‌ی سختی منفی یا شبه منفی در مطالعات پیشین امکان ایجاد کاهش هم‌زمان شتاب و تغییر شکل را در قالب

پاسالا و همکاران [۱۹] در ادامه‌ی ایده‌ی سارلیس و همکارانش [۲۱] روشی نوین را برای حفاظت لرزه‌ای سازه با استفاده از سیستم سختی منفی تطبیقی ارائه دادند. سیستم‌های تطبیقی در گروه سیستم‌های انفعالی قرار می‌گیرند اما از پیچیدگی بیشتری نسبت به سیستم‌های انفعالی مرسوم برخوردار هستند. این دستگاه سختی منفی تطبیقی ترکیبی از یک دستگاه سختی منفی و یک میراگر تشکیل شده که به وسیله آن می‌توان تضعیف‌شدگی ظاهری را در سازه با کاهش سختی در سازه پایه ایجاد کرد و از تغییر شکل‌های غیر الاستیک در سازه اصلی کاست. دستگاه سختی منفی دارای یک سیستم بازگرداننده است که از ایجاد تغییر شکل‌های دائمی در سازه جلوگیری می‌کند مگر اینکه خود سازه‌ی اصلی تسلیم شود که این امر موجب کاهش شتاب، جابه‌جایی و برش پایه در سازه می‌شود و توسط دستگاه سختی منفی جذب می‌شود.

پاسالا و همکاران [۲۰] مطالعات تحلیلی را بر روی سازه‌های برشی چند طبقه غیر الاستیک برای نشان دادن تأثیر استفاده از دستگاه سختی منفی و میراگر در ارتفاع‌های بالاتر سازه انجام دادند. مطالعات آنها نشان داد که با جای‌گذاری دستگاه سختی منفی در تمام طبقات پایینی سازه، بدون تأثیر در میزان جابه‌جایی، شتاب و برش پایه‌ی طبقات بالایی کاهش خواهد یافت و در نتیجه معضل افزایش جابه‌جایی در اثر جداسازی سازه نیز وجود نخواهد داشت.

سارلیس و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۳ به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی در جهت برطرف کردن نواقصی که در استفاده از سختی منفی در بسط ویژگی‌های غیر الاستیک و تغییر شکل‌های غیرخطی سازه بود برآمدند. دستگاه سختی منفی ابداعی آنها را از یک فنر پیش‌فشرده با مکانیسم سختی منفی دوجانبه و یک فنر دیگر جهت به تأخیر انداختن درگیری میان دستگاه سختی منفی و سازه بود تا سازه به تغییر شکل‌های پیش‌بینی شده برای آن برسد و مکانیسم سختی منفی به‌خوبی پیش رود.

با توجه به ممان اینرسی دورانی میراگر به میزان I ، لنگر مقاوم در برابر حرکت از سوی جرم دوار برابر است با:

$$\tau = I\ddot{\theta} \quad (3)$$

به این ترتیب نیروی مقاوم اعمالی ناشی از دوران میراگر چرخشی که با F_d نشان داده شده به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$F_d = \frac{\tau}{r_i} = \frac{mr_e^2 \ddot{u}}{r_i^2} = m \frac{r_e^2}{r_i^2} \ddot{u} = m_{eq} \times \ddot{u} \quad (4)$$

که در آن:

$$m_{eq} = m \frac{r_e^2}{r_i^2} \quad (5)$$

جرم معادل میراگر نامیده می‌شود. حال با در نظر گرفتن یک سازه با جرم M ، میرایی ذاتی C و سختی K ، با تغییر مکان نسبی u و تغییر مکان زمین ug که میراگر جرمی چرخشی همراه با جداساز لرزه‌ای به آن افزوده شده است، معادله‌ی حاکم بر این سامانه‌ی یک درجه آزادی در زمان تحریک لرزه‌ای عبارت خواهد بود از [۱۱]:

$$(M + m_{eq})\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g \quad (6)$$

به این ترتیب، دوره‌ی تناوب طبیعی معادل این سیستم، برابر خواهد بود با:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{(M + m_{eq})}{K}} \quad (7)$$

همان‌طور که از روابط به دست آمده ملاحظه می‌شود، میراگر جرمی چرخشی قابلیت افزایش دوره تناوب طبیعی سیستم را بدون نیاز به تغییر سختی آن خواهد داشت. به منظور بررسی تأثیر به کارگیری میراگر پیشنهادی در مشخصات دینامیکی یک سیستم یک درجه آزادی، یک مدل عددی در محیط متلب ایجاد گردید.

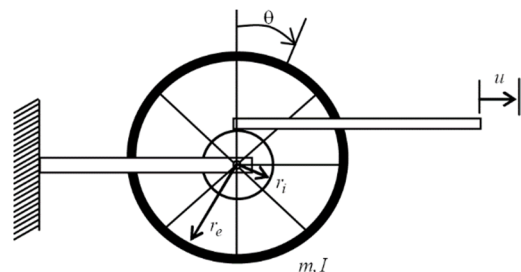
۳- انجام تحلیل‌ها و بررسی نتایج

برای بررسی سامانه‌ی جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی چرخشی برنامه‌ی عددی تحلیل سیستم یک درجه

سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال محقق کرده است که به دلیل وابستگی این سیستم‌ها به بازخورد سازه و انرژی ورودی، در مطالعه‌ی حاضر ابزاری برای ایجاد این ویژگی در سازه به صورت انفعالی و بدون نیاز به انرژی خارجی مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه‌ی مقاله ضمن بررسی عملکرد میراگر جرمی چرخشی معرفی شده در یک سامانه‌ی یک درجه آزاد جداسازی شده، عملکرد این میراگر با میراگر ویسکوزی مقایسه خواهد شد که در این سامانه جداسازی شده نیز قرار می‌گیرد.

۲- روابط حاکم بر میراگر جرمی چرخشی

همان‌طور که ذکر شد، در این مطالعه، کارایی میراگرهای جرمی چرخشی به همراه جداسازی لرزه‌ای در کاهش پاسخ لرزه‌ای تجهیزات مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور هدف اصلی کنترل، کاهش شتاب مطلق بخش جدا شده است به نحوی که جابه‌جایی آن نیز در حد قابل قبول محدود گردد.



شکل (۳): تصویر شماتیک میراگر جرم چرخشی [۱۱].

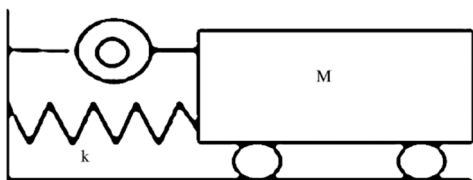
در این میراگر شعاع داخلی با r_i و شعاع خارجی مطابق شکل با r_e و جرم محیطی با m نشان داده شده است. اگر جرم میراگر m در نظر گرفته شود، ممان اینرسی چرخشی برای میراگر مورد نظر عبارت است از:

$$I = mr_e^2 \quad (1)$$

همچنین شتاب انتقالی و زاویه‌ای برای میراگر با شعاع

داخلی r_i برابر است با:

$$u = r_i\theta \Rightarrow \ddot{u} = r_i\ddot{\theta} \Rightarrow \ddot{\theta} = \frac{\ddot{u}}{r_i} \quad (2)$$

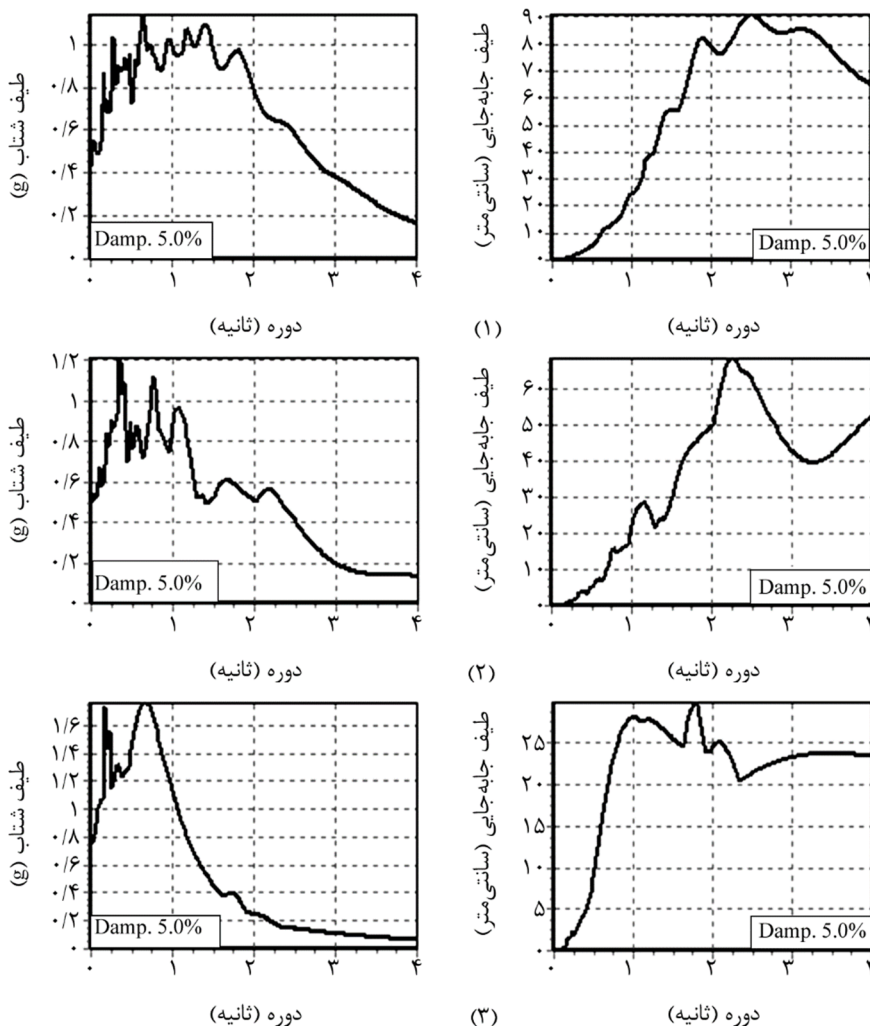


شکل (۴): تصویر شماتیک مدل جرم-فنر-میراگر جرمی چرخشی مورد مطالعه.

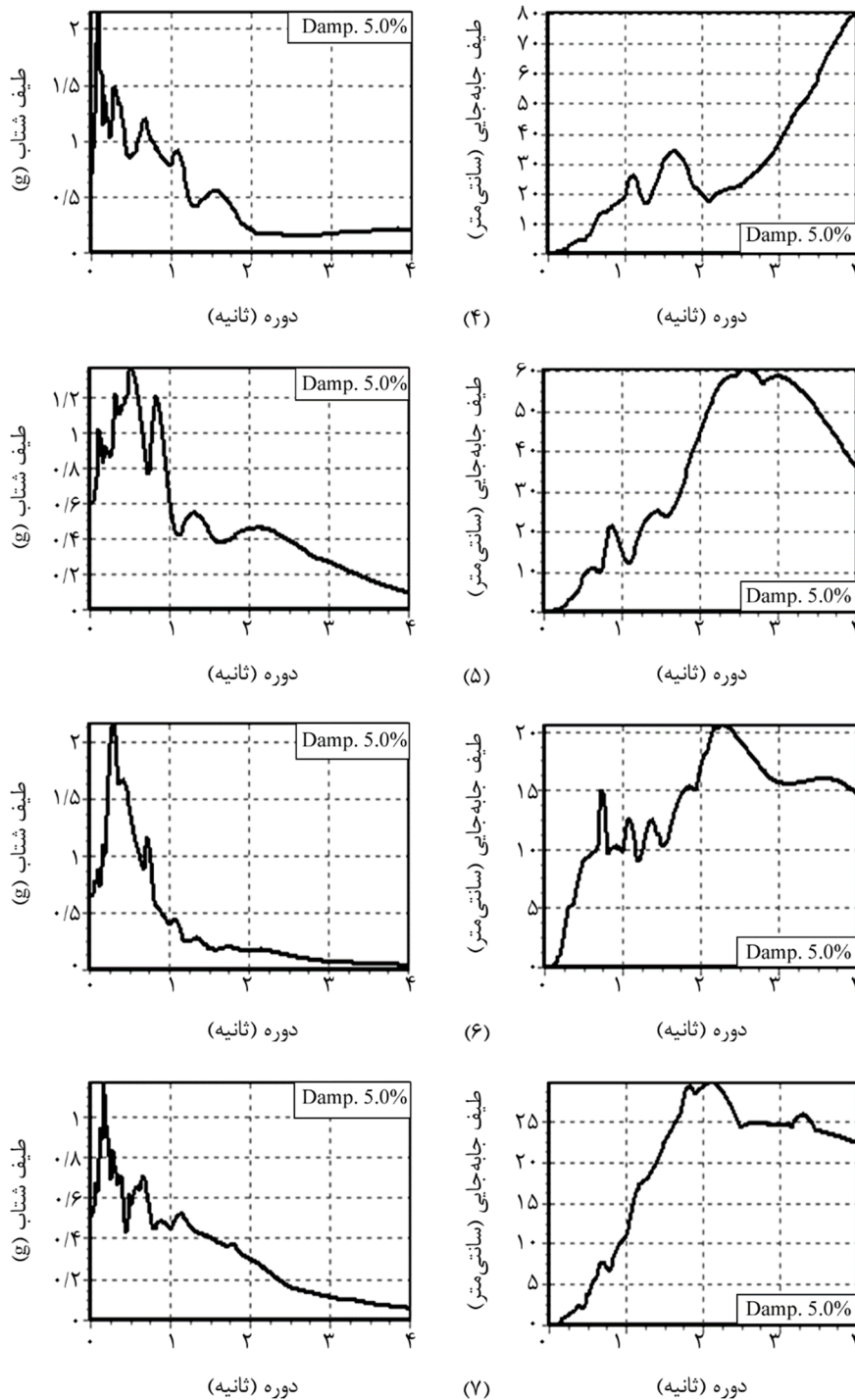
آزاد که تصویر شماتیک آن در شکل (۴) آورده شده است، با متلب نوشته شده است. برای ارزیابی نتایج از هفت رکورد لرزه‌ای استفاده می‌شود که مشخصات آنها در جدول (۱) و طیف‌های شتاب و جابه‌جایی آنها در شکل (۵) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات رکوردهای استفاده شده در تحلیل.

ردیف	شماره رکورد	نام زلزله	نام ایستگاه	بزرگی زلزله	فاصله از گسل (کیلومتر)	PGA (g)
۱	۱۵۰۴	Chi-Chi, Taiwan	TCU067	۷/۶۲	۲۸/۷	۰/۴۰۶۸
۲	۷۲۳	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	۶/۵۴	۱۵/۹۹	۰/۴۵۰۹
۳	۱۰۰۴	Northridge-01	LA - Sepulveda VA Hospital	۶/۶۹	۸/۴۸	۰/۸۰۲۶
۴	۱۲۶	Gazli, USSR	Karakyr	۶/۱۸	۱۲/۸۲	۰/۶۴۳۸
۵	۱۰۸۶	Northridge-01	Sylmar - Olive View Med FF	۶/۶۹	۱۶/۷۷	۰/۷۰۰۷
۶	۷۵۳	Loma Prieta	Corralitos	۶/۹۳	۷/۱۷	۰/۴۹۷۵
۷	۸۰۲	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	۶/۹۳	۲۷/۲۳	۰/۳۸۲۱



شکل (۵): طیف‌های جابه‌جایی (سمت راست) و طیف‌های شتاب (سمت چپ) رکوردهای مورد استفاده جهت تحلیل. (۱) رکورد ۷۲۳، (۲) رکورد ۱۵۰۴، (۳) رکورد ۱۰۰۴، (۴) رکورد ۱۲۶، (۵) رکورد ۱۰۸۶، (۶) رکورد ۷۵۳، (۷) رکورد ۸۰۲



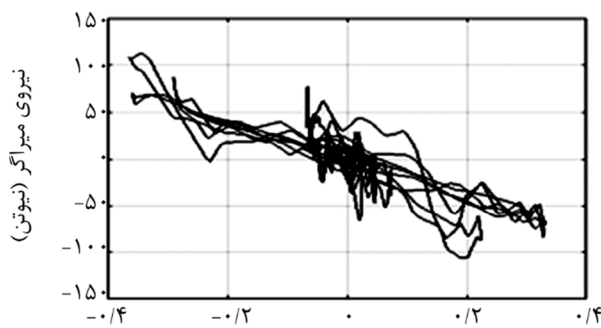
ادامه شکل (۵)

و ۰/۰۴ جرم سیستم یک درجه آزاد جداسازی شده است را نیز به سیستم می‌افزاییم. نمونه‌ای از نمودارهای حاصل از تحلیل در شکل (۶) آورده شده است. همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است منحنی نیروی میراگر پیشنهادی برحسب جابه‌جایی یک منحنی

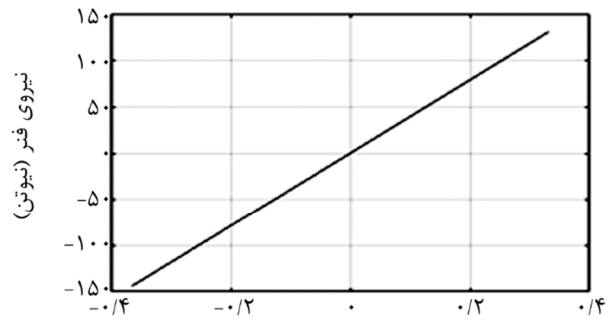
برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل، رکوردهای فوق را برای $PGA = 0.35g$ مقیاس می‌کنیم. سپس سیستم یک درجه آزادی به جرم ۴۰ کیلوگرم را با دوره تناوب ۲ ثانیه مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. میراگر جرمی چرخشی نیز با جرم معادل ۴۰ کیلوگرم که جرم محیطی آن ۱/۷ کیلوگرم

همان‌طور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود افزودن میراگر جرمی چرخشی به سیستم جداسازی شده‌ای با زمان تناوب ثابت ۲ ثانیه و جرم و سختی ثابت، باعث کاهش جابه‌جایی تا یک‌سوم میزان اولیه، شتاب مطلق تا یک‌چهارم میزان اولیه و شتاب نسبی تا یک‌چهارم میزان اولیه شده است. افزودن میراگرهای ویسکوزی با نسبت میرایی‌های مختلف تا حدود ۲۵ درصد به همان سیستم جداسازی شده با دوره تناوب ثابت ۲ ثانیه، جابه‌جایی‌های برابری با میراگر جرمی چرخشی با جرم معادل ۴۰ کیلوگرم ایجاد کرده است اما عملکرد میراگر جرمی چرخشی در این حالت از نظر کاهش شتاب مطلق و نسبی بهتر از میراگر ویسکوز معادل با آن بوده است.

هیستریزیس با سختی منفی است و سطح داخلی آن نیز نشانگر میزان اتلاف انرژی این میراگر است. سختی منفی ایجاد شده به وسیله‌ی این میراگر باعث کاهش جابه‌جایی و همین‌طور شتاب در سیستم بررسی شده می‌گردد. ضمناً برای نمایش سختی مثبت سیستم نیز نیروی ناشی از فنر بر حسب جابه‌جایی ترسیم شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد این میراگر با میراگر ویسکوز، سیستم یک درجه آزاد معرفی شده یک‌بار دیگر با میراگر ویسکوز تحلیل شده است و میزان میرایی ویسکوز معادل با میراگر جرمی چرخشی به گونه‌ای که جابه‌جایی برابری با میراگر جرمی چرخشی در سیستم ایجاد کند به دست آمده است.



(ب) نمودار نیروی میراگر - جابه‌جایی



(الف) نمودار نیرو - جابه‌جایی

شکل (۶): نمودارهای سیستم یک درجه آزاد همراه با میراگری با جرم معادل ۴۰ کیلوگرم تحت رکورد شماره ۷۲۳.

جدول (۲): مقایسه‌ی نتایج میراگر جرمی چرخشی با حالت‌های بدون میراگر و وجود میراگر ویسکوز.

رکورد	میراگر جرمی چرخشی			میراگر ویسکوز معادل			وجود جداساز بدون میراگر			
	جابه‌جایی (متر)	شتاب مطلق (متر بر مجذور ثانیه)	شتاب نسبی (متر بر مجذور ثانیه)	نسبت میرایی (درصد)	جابه‌جایی (متر)	شتاب مطلق (متر بر مجذور ثانیه)	شتاب نسبی (متر بر مجذور ثانیه)	جابه‌جایی (متر)	شتاب مطلق (متر بر مجذور ثانیه)	شتاب نسبی (متر بر مجذور ثانیه)
۷۲۳	۰/۳۶	۲/۴۷	۲/۸	۲۳	۰/۹۱	۹/۹	۹/۸۵	۰/۹۱	۹/۹	۹/۸۵
۱۰۸۶	۰/۲۱	۱/۶	۲/۱۷	۸	۰/۴۱	۴/۱۵	۴/۶۷	۰/۴۱	۴/۱۵	۴/۶۷
۸۰۲	۰/۱	۱/۵	۱/۹۶	۲۵	۰/۳۵	۳/۵	۵/۷۷	۰/۳۵	۳/۵	۵/۷۷
۱۲۶	۰/۰۹	۲/۷	۱/۹۶	۹	۰/۱۲	۲/۴۴	۳/۸۲	۰/۱۲	۲/۴۴	۳/۸۲
۱۰۰۴	۰/۰۷	۱/۴	۱/۹۹	۲۵	۰/۱۷	۲/۲۳	۴/۲	۰/۱۷	۲/۲۳	۴/۲
۱۵۰۴	۰/۲	۱/۳۴	۲	۲۵	۰/۶۲	۶/۲	۷/۱	۰/۶۲	۶/۲	۷/۱
۷۵۳	۰/۰۴۹	۱/۶	۱/۸	۲۰	۰/۲۰۲	۲	۳/۸۵	۰/۲۰۲	۲	۳/۸۵

Engineering, ASCE, **122**(12), 1394-1399.

4. Platus, D.L. (2004) Vibration isolation system. URL: <http://www.google.at/patents/US6676101>. U.S. Classification: 248/603, International Classification: F16F/1300.
5. Lee, C.M., Goverdovskiy, V., and Temnikov, A. (2007) Design of springs with 'negative' stiffness to improve vehicle driver vibration isolation. *Journal of Sound and Vibration*, **302**(4-5), 865-874.
6. Sarlis, A.A., Pasala, D.T.R., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., Nagarajaiah, S., and Taylor, D.P. (2013) *Negative Stiffness Device for Seismic Protection of Structures*. Technical Report MCEER-13-0005.
7. Iemura, H. and Pradono, M.H.Y. (2003) Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge. *J. Struct. Control*, **10**, 187-203 (DOI: 10.1002/stc.25).
8. Reinhorn, A.M., Viti, S., and Cimellaro, G.P. (2005) Retrofit of structures: strength reduction with damping enhancement. *37th Technical Panel Meeting on Wind and Seismic Effects UJNR*, Tsukuba, Japan.
9. Viti, S., Cimellaro, G.P. and Reinhorn, A.M. (2006) Retrofit of a hospital through strength reduction and enhanced damping. *Smart Structures and Systems*, **2**(4), 339-355.
10. Iemura, H.Z., Igarashi, A., and Kalantari, A. (2006) Experimental verification and numerical studies of an autonomous semi-active seismic control strategy. *Struct. Control Health Monit.*, **13**, 301-323
11. Pradono, M.H., Iemura, H., Igarashi, A., and Kalantari, A. (2008) Application of angular-mass dampers to base-isolated benchmark building. *Struct. Control Health Monit.*, **15**, 737-745.
12. Iemura, H., Kouchiyama, O., Toyooka, A., and Shimoda, I. (2008) Development of the friction-based passive negative stiffness damper and its verification tests using shaking table. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر به‌کارگیری میراگر جرمی چرخشی در کف جداسازی شده در کاهش پاسخ سیستم یک درجه آزاد هم از نظر جابه‌جایی و هم از جنبه‌ی شتاب مطلق مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت پاسخ سیستم همراه با میراگر ویسکوز برای مقایسه عملکرد دو میراگر به‌دست آمد. نتایج تحت رکوردهای مختلف قابلیت ایجاد نیروی میرایی با سختی منفی در سیستم‌های یک درجه آزادی که میراگر جرمی چرخشی به آنها افزوده شده بود را نشان دادند. همچنین بررسی‌ها نشان داد افزودن میراگر جرمی چرخشی معرفی شده به سیستم جداسازی شده‌ای با زمان تناوب ثابت ۲ ثانیه و جرم و سختی ثابت، باعث کاهش جابه‌جایی تا یک‌سوم میزان اولیه، شتاب مطلق تا یک‌چهارم میزان اولیه و شتاب نسبی تا یک‌چهارم میزان اولیه شده است. مقایسه میان میراگر جرمی چرخشی که جرم آن ۰/۰۴ جرم سیستم جداسازی شده بود و میراگرهای ویسکوز با نسبت میرایی‌های مختلف تا حدود ۲۵ درصد که به همان سیستم جداسازی شده با دوره تناوب ثابت ۲ ثانیه افزوده شده بودند، نشان داد که در جابه‌جایی‌های برابر ایجاد شده توسط هر دو میراگر، میراگر جرمی چرخشی با جرم ۰/۰۴ جرم سیستم جداسازی شده، عملکرد بهتری از نظر کاهش شتاب مطلق و نسبی داشته است.

مراجع

1. Soong, T.T. and Lopez Garcia, D. (2003) *Seismic Vulnerability and Protection of Non-structural Component*. Joint NCREE/JRC Workshop International Collaboration on Earthquake Disaster Mitigation Research, 73-82, National Center.
2. Molyneaux, W.G. (1957) *Supports for Vibration Isolation*. ARC/CP-322, Aeronautical Research Council, Great Britain.
3. Gluck, N., Reinhorn, A.M., Gluck, J., and Levy, R. (1996) Design of supplemental dampers for control of structures. *Journal of Structural*

- Conference © 2012 ASCE.
21. Sarlis, A.A., Pasala, D.T.R., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., Nagarajaiah, S., and Taylor, D.P. (2013) Negative Stiffness Device for Seismic Protection of Structures. *Journal of Structural Engineering*, **139**(7).
 22. Pasala, D.T.R., Sarlis, A.A., Reinhorn, A.M., Nagarajaiah, S., Constantinou, M.C., and Taylor, D. (2015) Apparent-weakening in SDOF yielding structure using negative stiffness device: experimental and analytical study. *J. Strut. Eng.*, **141**(4), 04014130.
 23. Gisha Mary Mathew, Qureshi, A., and Jangid, R.S. (2015) *Optimal Placement of Negative Stiffness Damping System*. Colorado Springs, CO, USA.
 24. Attary, N., Symans, M., Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M., Constantinou, M.C., Sarlis, A.A., Pasala, D.T.R., and Taylor, D. (2015) Performance evaluation of negative stiffness devices for seismic response control of bridge structures via experimental shake table tests. *Journal of Earthquake Engineering*, **19**, 249-276.
 13. Harris, M.P., Iemura, H., Igarashi, A., Toyooka, A., and Kalantari, A. (2009) Passively controlled MR damper in the benchmark structural control problem for seismically excited highway bridge. *Struct. Control Health Monit.*, **16**, 626-638.
 14. Jung, H.-J., Choi, K.-M., Spencer Jr, B.F., Lee, I-W. (2006) Application of some semiactive control algorithms to a smart base isolated building employing MR dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), 693-704.
 15. Jung, H.-J., Choi, K.-M., Park, K-S, Cho, S.-W. (2007) Seismic protection of base isolated structures using smart passive control system. *Smart Structures and Systems*, **3**(3), 385-403.
 16. Iemura, H. and Pradono, M.H. (2009) Advances in the development of pseudo-negative-stiffness dampers for seismic response control. *Struct. Control Health Monit.*, **16**, 784-799
 17. Reinhorn, A.M., Soong, T.T., Lin, R.C., Yang, Y.P., Fukao, Y., Abe, H., and Nakai, M. (1989) *1:4 Scale Model Studies of Active Tendon Systems and Active Mass Dampers for Aseismic Protection*. Technical Report NCEER-89-0026, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.
 18. Reinhorn, A.M., Viti, S., and Cimellaro, G.P. (2005) Retrofit of structures: strength reduction with damping enhancement. *Proceeding of the 37th UJNR Panel Meeting on Wind and Seismic Effects*, Tsukuba, Japan
 19. Pasala, D.T.R., Sarlis, A.A.S., Nagarajaiah S., Reinhorn, A.M., Constantinou, M.C., and Taylor, D. (2011) *A New Structural Modification Approach for Seismic Protection Based on Adaptive Negative Stiffness Device: Conceptual Analysis*. Structures Congress 2011 © ASCE 2011.
 20. Pasala, D.T.R., Sarlis, A.A., Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M., Constantinou, M.C., and Taylor, D. (2012) Negative stiffness device for seismic response control of multistory buildings. *20th Analysis and Computation Specialty*