

بررسی آماری عملکرد کنترل نیمه فعال مدل برشی ساختمان ۱۰ طبقه خطی با میراگر سیال مغناطیسی تحت رکوردهای حوزه نزدیک و دور

مازیار فهیمی فرزام*، بابک علی نژاد، سید علی موسوی گاوگانی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

کنترل نیمه فعال
میراگر سیال مغناطیسی
الگوریتم قطع و وصل بهینه
زلزله‌های حوزه نزدیک
زلزله‌های حوزه دور

خلاصه: به دلیل مزایای روش‌های کنترل نیمه فعال نسبت به روش‌های غیرفعال و فعال، توسعه و بررسی عملکرد این روش‌ها در کنترل پاسخ سازه تحت بارهای جانبی دینامیکی به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. یکی از توسعه یافته‌ترین ابزارهای کنترل نیمه فعال میراگر سیال مغناطیسی می‌باشد که مدل‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی آن ارائه شده است. در این مقاله مدل خطی یک ساختمان ده طبقه برشی در محیط متلب تحت تحریک ۲۸ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته و به منظور کنترل ارتعاش آن از میراگر سیال مغناطیسی همراه با الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ بهره برده شده است. در شبیه‌سازی انجام شده علاوه بر در نظر گرفتن اثر اشباع عملگر، دینامیک عملگر نیز با استفاده از مدل بوک-ون اصلاح شده در نظر گرفته شده است. همچنین در این مطالعه اثر موقعیت قرارگیری این میراگر برای سه حالت مختلف (طبقات پایینی، میانی و بالایی) مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از نتایج بدست آمده از این الگوریتم، تحت انواع مختلف رکوردهای حوزه نزدیک و دور عملکرد آماری این کنترل کننده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که قرارگیری میراگر سیال مغناطیسی در طبقه اول بهترین عملکرد را دارد. همچنین این سیستم کنترلی بهترین عملکرد را تحت رکوردهای حوزه نزدیک بدون ضربه دارا است و پاسخ سازه را تحت این مجموعه رکورد به مقدار متوسط ۲۱ درصد کاهش می‌دهد.

۱- مقدمه

رویکردهای مختلف کنترل است و مطالعات زیادی نیز در این زمینه انجام شده است. با وجود گستردگی کاربرد این روش کنترل به دلیل عدم قابلیت انطباق و همچنین کارایی آن تنها تحت تحریک با باند فرکانسی محدود، عملکرد آن لازم است بهبود یابد [۱]. از آنجا که رکوردهای زلزله دارای خاصیت تصادفی و با باند فرکانسی گسترده هستند، این دسته از ابزارهای کنترلی توانایی محدودی در استهلاک تحریک ورودی داشته و حتی در بعضی موارد میراگرهای غیرفعال نمی‌توانند نیروی دینامیکی مورد نظر را کنترل نمایند. بنابراین محققان به دنبال روش‌های جدیدی برای حل این مسئله بودند و در نهایت ایده کنترل فعال در اوایل دهه ۱۹۶۰ پدیدار شد.

کاهش ارتعاش ساختمان‌ها تحت بارهای جانبی دینامیکی به منظور تامین ایمنی و آسایش ساکنان همواره مورد توجه مهندسی سازه و زلزله قرار داشته است. به همین منظور محققان از رویکردهای مختلفی برای مواجهه با این مسئله استفاده کرده‌اند که یکی از این ایده‌ها استفاده از روش‌های کنترل سازه با ابزارهای مختلف می‌باشد. به طور کلی روش‌های کنترل سازه‌ها به ۴ دسته کنترل غیرفعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی طبقه بندی می‌شوند.

استفاده از ابزارهای کنترل غیرفعال یک روش مرسوم در بین

*نویسنده عهده دار مکاتبات: m.farzam@maragheh.ac.ir



میراگر به دلیل دارا بودن مزایای بسیار، یکی از میراگرهای پرکاربرد در روش‌های کنترل نیمه‌فعال است. کاربرد اولیه مایع مغناطیسی را می‌توان در دهه ۱۹۴۰ به ژاکوب رابینو^۷ نسبت داد که در سال ۱۹۵۱ به بررسی نیروی این مایع و ابزارهای انتقال آن پرداخت [۷]. نخستین تحقیقات در مورد ارزیابی لرزه‌ای این میراگر در مهندسی عمران توسط اسپنسر^۸ و همکاران [۸، ۹] و همچنین دایک^۹ و همکاران صورت پذیرفت [۱۰-۱۲]. یکی از اولین ساختمان‌های کنترل شده با میراگر سیال مغناطیسی موزه ملی علوم نوآوری^{۱۰} در توکیو است که در سال ۲۰۰۱ ساخته شده است [۱۳]. همچنین در حوزه مهندسی پل نیز برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ از این میراگر در پل دریاچه دونگ تینگ^{۱۱} واقع در چین برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد و باران استفاده شد [۱۴].

در سالیان اخیر نیز میراگرهای مغناطیسی به منظور کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بیطرف^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۰ دو روش برای کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها با میراگر سیال مغناطیسی ارائه دادند که نتایج حاکی از عملکرد بهتر روش‌های پیشنهادی در کاهش جابه‌جایی و شتاب سازه است [۱۵]. الملیگی و حسن^{۱۳} به بررسی تعداد بهینه میراگر سیال مغناطیسی در سازه معیار ۳ طبقه پرداختند و با مطالعه جابه‌جایی و شتاب سازه به این نتیجه رسیدند که قرارگیری تنها یک میراگر منجر به بهبود رفتار سازه در حد قابل قبول می‌شود و افزایش تعداد میراگرها منجر به بهبود عملکرد بیشتری نشده است [۱۶].

بایی^{۱۴} و همکاران عملکرد میراگرهای مغناطیسی را تحت دو نوع زمین لرزه حوزه نزدیک (با جهت‌پذیری رو به جلو و با اثر پرتابی) و با جایگذاری این میراگرها در سه طبقه از ساختمان مورد مطالعه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که کنترل نیمه‌فعال سازه با میراگرهای مغناطیسی برای ساختمان‌های در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک با اثر پرتابی مناسب نیست [۱۷]. از این میراگر در سایر سیستم‌های کنترلی نیز به منظور بهبود رفتار آن‌ها استفاده می‌شود

مفاهیم اولیه کنترل فعال سازه‌ها شامل تحقیقات زوک^۱ در زمینه سازه‌های جنبشی^۲ بود [۲] و در ادامه اجزای سیستم‌های کنترل فعال در سال ۱۹۷۲ توسط یائو^۳ معرفی گردید [۳]. کنترل فعال نیز به دلیل معایب آن توسط برخی محققان رد شد. مهمترین کاستی این سیستم‌ها، مصرف انرژی زیاد آن‌ها، مشکلات احتمالی عملکرد سیستم کنترل در هنگام وقوع زلزله و قطع منبع انرژی و همچنین امکان ناپایدار نمودن سازه به دلیل اعمال انرژی خارجی است [۴]. در دهه ۱۹۷۰ ایده استفاده از میراگرهای نیمه‌فعال برای سیستم‌های تعلیق در خودرو مطرح شد [۵]. در حقیقت سیستم کنترل نیمه‌فعال توسعه‌ای از یک سیستم کنترل غیرفعال می‌باشد، با این تفاوت که قادر است پارامترهای خود را بر اساس تحریک ورودی تنظیم کند. البته لازم به ذکر است که رویکردهای کنترل فعال برای کنترل سیستم نیازمند منبع انرژی بزرگی (از ده‌ها کیلو وات تا چندین مگا وات) می‌باشند در حالی که روش‌های کنترل نیمه‌فعال به مقدار بسیار کمی انرژی (حداکثر در حدود چند وات و در حد یک باتری معمولی) نیاز دارند [۶].

در سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال اجزای مختلفی وجود دارد که می‌توان از سنسور، کنترل‌کننده و عملگر نام برد. وظیفه کنترل‌کننده محاسبه نیروی کنترل با استفاده از الگوریتم‌های کنترل می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای بر روی انواع مختلف الگوریتم‌های کنترل مانند لیاپانوف، کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ (COC)^۴، بنگ بنگ، اسکای هوک و غیره انجام شده است. همچنین در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال می‌توان از عملگرهای مختلفی از قبیل میراگر مایع تنظیم شده نیمه‌فعال، میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال، میراگر با سختی متغیر نیمه‌فعال، میراگر سیال الکتریکی^۵ (ER)، میراگر سیال مغناطیسی (MR) و غیره استفاده نمود.

میراگر سیال مغناطیسی^۶ محتوی نوعی مایع مغناطیسی می‌باشد که از ذرات ریز محلول در مایع (با اندازه میکرون) تشکیل شده است و هنگامی که مایع داخل میراگر تحت اثر میدان مغناطیسی قرار گیرد، می‌توان ویسکوزیته سیال مغناطیسی را کنترل کرد. این

7 Rabinow
8 Spencer
9 Dyke
10 National Museum of Emerging Science and Innovation
11 Dongting Lake Bridge
12 Bitaraf
13 Elmeligy and Hassan
14 Bhaiya

1 Zuk
2 Kinetic structures
3 Yao
4 Clipped Optimal Control Algorithm
5 Electro-Rheological (ER) damper
6 Magneto-Rheological (MR) Damper

باعث حذف ویژگی اثر پرتابی می‌شود، از رکوردهایی بدون پردازش استفاده شده‌است. (۳) در انجام تحقیق حاضر دینامیک عملگر لحاظ گردیده است. (۴) یکی از محدودیت‌های اجرایی در سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال یعنی اشباع^۲ نیروی کنترل در نظر گرفته شده‌است. (۵) در این مطالعه سه حالت مختلف برای قرارگیری میراگر سیال مغناطیسی در ارتفاع ساختمان بررسی شده‌است تا تأثیر محل میراگر در کارایی آن مشخص گردد. (۶) همچنین سعی شده‌است پاسخ‌های ارائه شده در حالتی بی‌بعد ارائه شوند تا قابل تعمیم به حالت‌های مختلف باشند.

در ادامه ابتدا توضیحاتی در خصوص معادلات حرکت به فرم دیفرانسیلی و فضای حالت ارائه شده و تأثیر تغییر موقعیت قرارگیری میراگر نشان داده شده‌است. سپس به معرفی الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ پرداخته شده و انواع مدل‌های موجود جهت مدل‌سازی رفتار میراگر سیال مغناطیسی بررسی شده‌است. همچنین در این بخش روابط مورد استفاده جهت محاسبه نیروی کنترل ارائه شده‌است. در قسمت بعدی به تفاوت بین رکوردهای حوزه نزدیک و دور پرداخته شده و به ویژگی‌های منحصر بفرد هر کدام اشاره شده‌است. قبل از انجام مطالعه عددی، نتایج مربوط به صحت‌سنجی صورت گرفته جهت اطمینان از روند مدل‌سازی آورده شده‌است. در بخش مطالعه عددی مدل خطی یک ساختمان ۱۰ طبقه برشی تحت ۲۸ رکورد زلزله (۴ گروه ۷ تایی از انواع مختلف رکوردها) به صورت نیمه‌فعال با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی و با الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ همراه با الگوریتم بهینه خطی کلاسیک کنترل گردیده است. در انتها پاسخ‌های مربوط به این سازه در حالات کنترل نشده و کنترل شده به صورت نیمه‌فعال ارائه شده و سپس مقایسه‌ای آماری بین پاسخ سازه‌ها تحت تحریک زلزله‌های حوزه نزدیک (بدون ضربه، با اثر پرتابی و جهت‌پذیری رو به جلو) و حوزه دور صورت گرفته است.

۲- معادلات حرکت

در این پژوهش برای مدل‌سازی سازه مذکور از معادلات فضای حالت استفاده شده‌است. برای دستیابی به معادلات فضای حالت، معادله دیفرانسیل حرکت سازه خطی Π درجه آزادی را می‌توان به

که از آن جمله می‌توان به کاربرد این میراگر در مهاربندهای فعال [۱۸] و جداسازهای پایه [۱۹] اشاره کرد.

از سال ۱۹۵۵ زمین‌لرزه‌ها بر اساس فاصله ایستگاه ثبت رکورد تا گسل به دو دسته حوزه نزدیک (کمتر از ۱۰ کیلومتر) و دور (بیشتر از ۲۰ کیلومتر) تقسیم شدند [۲۰] و بعد از وقوع زلزله‌های نورث‌ریج، کوبه و چی‌چی در طول سال‌های ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۹، موضوع زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد توجه محققین قرار گرفت [۲۱، ۲۲]. در سال ۲۰۰۶ کالکان^۱ به بررسی عملکرد دو سازه ۴ و ۶ طبقه فولادی تحت ۷ رکورد حوزه دور، ۷ رکورد حوزه نزدیک با جهت‌پذیری رو به جلو و ۷ رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی پرداخته است و نتایج بیانگر این است که رکوردهای حوزه نزدیک با جهت‌پذیری رو به جلو دارای قدرت تخریب بالایی می‌باشند [۲۳]. در ادامه غفارزاده و همکاران در سال ۲۰۱۲ به مطالعه عملکرد سازه ۱۰ درجه آزادی با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی و تحت ۹ رکورد زلزله حوزه نزدیک شامل رکوردهایی با جهت‌پذیری رو به جلو، اثر پرتابی و بدون ضربه پرداختند و نشان دادند که رکوردهای حوزه نزدیک (بخصوص رکوردهایی با جهت‌پذیری رو به جلو) در مقایسه با رکوردهای حوزه دور نیازمند نیروی کنترلی بیشتری هستند [۲۴].

در طی چند سال اخیر نیز تحقیقات کاملی و به صورت موازی در حوزه کنترل نیمه فعال سازه‌ها با میراگر سیال مغناطیسی در حال انجام می‌باشد که از آن جمله می‌توان به استفاده از الگوریتم‌های هوشمندی نظیر فازی نوع ۱ و ۲ [۲۵، ۲۶] و عصبی- فازی [۲۷] در تعیین ولتاژ اشاره نمود. همچنین در این راستا مطالعاتی جهت در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و سازه نیز انجام پذیرفته که می‌توان به تحقیقات یانیک^۲ در این خصوص اشاره کرد [۲۸].

در این پژوهش به صورت مشخص و متفاوت از مطالعات قبلی بررسی آماری عملکرد میراگر تحت رکوردهای واقعی مورد توجه قرار گرفته است. مواردی که در نظر گرفتن همزمان آنها این پژوهش را از سایر مطالعات قبلی در این زمینه متمایز می‌سازد، عبارت‌اند از: (۱) استفاده از تعداد مناسبی از رکوردهایی با مشخصات مختلف (۲۸ رکورد با ۴ ویژگی متفاوت) برای بررسی آماری و مطالعه تأثیر آنها بر پاسخ‌های مختلف سازه. (۲) با توجه به اینکه روش‌های متداول پردازش حرکات شدید زمین (فیلتر نمودن رکوردها و اصلاح تراز پایه)

1 Kalkan

2 Yanik

۳- الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ

الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ ابتدا توسط هروات^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۸ [۲۹] و سپس بوتسوئن^۲ در سال ۱۹۸۹ [۳۰] برای کنترل نیمه فعال سیستم تعلیق خودرو استفاده شد. سپس این الگوریتم توسط دایک و همکاران در سال ۱۹۹۶ بر مبنای پسخوراند شتاب و برای کاربردهای سازه‌ای معرفی گردید [۱۲]، در حالی که اکثر الگوریتم‌های کنترل تا سال ۱۹۹۶ بر مبنای پسخوراند کامل حالت (همه جابه‌جایی‌ها یا سرعت‌ها) و یا سرعت بودند. اندازه‌گیری دقیق جابه‌جایی و سرعت در سازه‌های با مقیاس کامل و تحت بارهای دینامیکی دشوار است. بنابراین به عنوان یک راهکار جایگزین می‌توان از شتاب‌سنج‌ها و الگوریتم‌هایی بر مبنای پسخوراند شتاب استفاده نمود [۱۲]. مزیت این الگوریتم امکان اندازه‌گیری دقیق‌تر شتاب نسبت به سرعت و جابه‌جایی است. مطالعات بسیاری اثربخشی الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ را همراه با میراگر سیال مغناطیسی در مهندسی سازه مورد بررسی قرار داده‌اند که مطابق نظر آن‌ها این الگوریتم جزء مؤثرترین و بهترین الگوریتم‌ها در کاهش پاسخ‌های سازه می‌باشد [۳۱، ۳۲].

این الگوریتم کنترل‌کننده‌ای بهینه و خطی طراحی می‌کند که بردار نیروهای کنترل را بر اساس پاسخ‌های اندازه‌گیری شده سازه در معادله دوم فضای حالت (۷) و نیروی اندازه‌گیری شده اعمالی به سازه (F) محاسبه می‌نماید. این نیروی کنترل بهینه مطابق رابطه‌ی

$$F_C = \lambda^{-1} \left\{ -K_C(s) \lambda \begin{bmatrix} y \\ F \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

۵ محاسبه می‌شود.

که در رابطه فوق $\lambda(0)$ و $K_C(s)$ به ترتیب معرف تبدیل لاپلاس و نیروی کنترل‌کننده بهینه خطی می‌باشند. البته لازم به ذکر است که متغیر y از رابطه دوم فضای حالت به دست می‌آید. با

$$F_C(s) = \left\{ -K_C(s) \begin{bmatrix} y(s) \\ F(s) \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

لاپلاس‌گیری از طرفین رابطه‌ی ۵ می‌توان به رابطه‌ی ۶ رسید.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Af - M\Gamma\ddot{x}g \quad (1)$$

صورت رابطه‌ی ۱ بیان کرد.

که M و C و K به ترتیب ماتریس‌های $n \times n$ جرم، میرایی و سختی می‌باشند. همچنین x بردار جابه‌جایی n بعدی، f بردار m بعدی نیروی کنترل و $\ddot{x}g$ شتاب زمین می‌باشند. ماتریس‌های موقعیت \dot{E} و A نیز به ترتیب دارای ابعاد $n \times m$ و $n \times 1$ بوده و نشانگر موقعیت اعمال نیروی کنترل و تحریک خارجی می‌باشند. معادله فوق برای سیستم‌های خطی و تغییر ناپذیر با زمان می‌تواند

$$\dot{Z} = AZ + Bf + E\ddot{x}g \quad (2)$$

به فرم فضای حالت ارائه شده در رابطه‌ی ۲ نوشته شود.

که در رابطه فوق Z بردار حالت $2n$ بعدی است که به صورت

$$Z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود.

همچنین A ماتریس سیستم با ابعاد $2n \times 2n$ و B و E نیز ماتریس‌های موقعیت نیروی کنترل و تحریک خارجی هستند و به ترتیب دارای ابعاد $2n \times m$ و $2n \times 1$ می‌باشند که به صورت رابطه

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}A \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\Gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

(۴) تعریف می‌شوند.

در عبارات فوق 0 و I به ترتیب ماتریس صفر و همانی با ابعاد مناسب را نشان می‌دهند. همچنین در این مطالعه مقادیر n ، m برای حالت بدون کنترل به ترتیب برابر با 10 و 0 و برای حالت با کنترل برابر با 10 و 1 می‌باشد و تمام درایه‌های بردار موقعیت A برابر 1 می‌باشد.

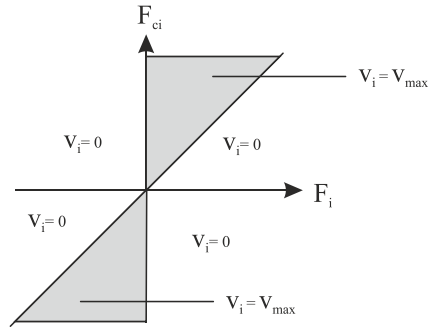
با توجه به اینکه پاسخ حاصل از معادله فضای حالت به فرم بسته بوده و نمایشی سیستماتیک از سیستم را ارائه می‌دهد و همچنین این معادله دارای مشتق درجه 1 می‌باشد، لذا استفاده از این معادله نسبت به معادله دیفرانسیل مورد اقبال عمومی پژوهشگران در زمینه کنترل می‌باشد.

1 Hrovat

2 Butsuen

۴- مدل سازی رفتار میراگر سیال مغناطیسی

در حالت کلی برای مدل سازی رفتار میراگر سیال مغناطیسی دو نوع مدل شبه استاتیکی و دینامیکی موجود می باشد. مدل های شبه استاتیکی با استفاده از دانش مکانیک سیالات، معادلاتی برای نمایش رفتار این میراگر تعیین می کند در صورتی که در مدل های دینامیکی این روابط بر اساس رفتار تجربی میراگر سیال مغناطیسی ارائه می شود. در ادامه هر یک از این مدل ها به صورت مختصر بررسی می شوند.



شکل ۱. نمایشی شماتیک از عملکرد الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ [12]
Fig. 1. Graphical representation of COC algorithm [12]

۴-۱- مدل های شبه استاتیکی

از مشهورترین مدل های شبه استاتیکی می توان به مدل متقارن محوری و مدل صفحات موازی اشاره نمود. مدل های متقارن محوری رفتار نیرو- جابه جایی میراگر سیال را به خوبی بیان می کنند، در صورتی که برای بیان رفتار غیرخطی نیرو- سرعت مناسب نیست [۳۳]. مدل صفحات موازی به دلیل سادگی در طراحی و اجرا به نسبت مدل متقارن محوری مورد اقبال بیشتری قرار گرفته است و عملکردی بهتر دارد اما همچنان این مدل نیز تقریب مناسبی از رفتار میراگر ارائه نمی دهد [۳۳].

۴-۲- مدل های دینامیکی

از اولین مدل های دینامیکی برای شبیه سازی دینامیک عملگر میراگر سیال مغناطیسی می توان به مدل بینگهام اشاره نمود که در سال ۱۹۸۵ توسط استنوی^۲ و همکاران معرفی گردید [۳۴]. عدم توانایی این مدل در بیان رفتار میراگر در سرعت های نزدیک به صفر باعث شد تا گاموتی و فیلیسکو^۳ در سال ۱۹۹۱ مدل تعمیم یافته ای از بینگهام را معرفی کنند [۳۵]. سخت بودن روابط ارائه شده توسط این مدل و نیاز به انتگرال گیری باعث شد تا محققین به دنبال روش های دیگری برای مدل سازی رفتار این نوع از میراگرها باشند. بنابراین در سال ۱۹۹۷ اسپنسر و همکاران از مدلی به نام بوک - ون^۴ برای شبیه سازی رفتار میراگر سیال مغناطیسی استفاده کردند [۳۶]. البته این مدل ابتدا در سال ۱۹۶۷ توسط بوک^۴ برای مدل سازی رفتار غیرخطی یک سیستم تک درجه آزادی تحت ارتعاشات اجباری

که در رابطه فوق $F_c(s)$ نیروی کنترل بهینه در فضای لاپلاس می باشد. به دلیل اینکه نیروی تولیدی توسط میراگر سیال مغناطیسی وابسته به پاسخ های سیستم سازه ای می باشد، نیروی کنترل بهینه مطلوب (F_c) نمی تواند همواره توسط این میراگر تولید گردد و تنها ولتاژ کنترل (V) می تواند به طور مستقیم کنترل گردد تا توسط آن امکان تغییر در نیروی کنترل تولیدی وجود داشته باشد. پس یک حلقه پسخوراند نیرو برای وادار کردن میراگر سیال مغناطیسی به تولید نیروی کنترل بهینه (F_c) در نظر گرفته می شود. برای این منظور ولتاژ کنترل (V) مطابق رابطه ی V انتخاب می شود.

$$v_i = V_{max} H((F_{ci} - F_i)F_i) \quad (7)$$

به عبارت بهتر همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هنگامی که i امین میراگر نیرویی برابر نیروی کنترل مورد نظر تولید کند ($F_i = F_{ci}$)، ولتاژ اعمال شده به میراگر در همان سطح باقی می ماند. اگر نیروی ایجاد شده توسط میراگر کوچکتر از نیروی بهینه مورد نظر باشد ($F_i < F_{ci}$) و دو نیرو دارای علامت مشابهی باشند، ولتاژ اعمالی به عملگر تا مقدار ماکزیمم افزایش می یابد. همچنین اگر نیروی ایجاد شده توسط میراگر بزرگتر از نیروی بهینه مورد نظر باشد ($F_i > F_{ci}$)، ولتاژ اعمالی صفر می شود.

روش های مختلفی برای تعیین نیروی کنترل بهینه وجود دارد که از آن جمله می توان به $H2/LQG$ ، LQR و غیره اشاره نمود که در این مطالعه از الگوریتم کنترل بهینه خطی کلاسیک^۱ استفاده شده است.

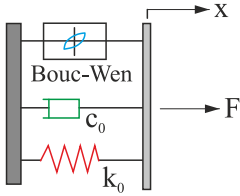
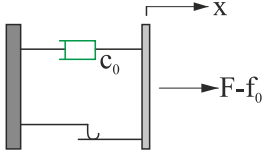
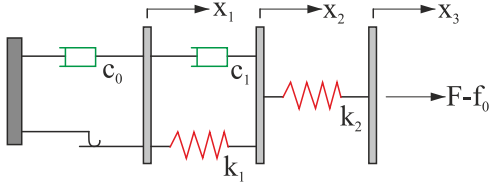
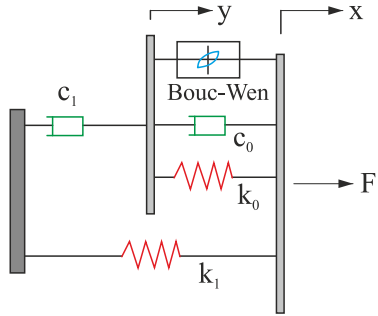
2 Stanway

3 Gamota and Filisko

4 Bouc

1 Linear Quadratic Regulator

جدول ۱ مدل‌های پیشنهادی برای مدل‌سازی رفتار میراگر سیال مغناطیسی
Table 1. Mechanical models of the MR damper

ردیف	نام مدل	پیشنهاد دهنده	سال	مدل ارائه شده
۱	بوک - ون	Bouc	۱۹۶۷	
۲	بینگهام	Stanway, Sproston & Stevens	۱۹۸۵	
۳	بینگهام اصلاح شده	Gamota & Filisko	۱۹۹۱	
۴	بوک - ون اصلاح شده	Spencer, Dyke, Sain & Carlson	۱۹۹۷	

قابلیت این مدل برای پیش‌بینی دقیق رفتار میراگر سیال مغناطیسی در شرایط مختلف دارد. در تحقیقات گذشته برای مدل‌سازی رفتار میراگر سیال مغناطیسی از مدل بوک - ون اصلاح شده به صورت گسترده استفاده شده است [۳۹، ۴۰].

معادله حاکم بر نیروی کنترل پیش‌بینی شده توسط این مدل مطابق رابطه (۸) می‌باشد [۱۱].

$$f = c_1 \dot{y} + k_1(x_d - x_0) \quad (8)$$

که در رابطه‌ی ۸ به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف می‌شود.

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ az + c_0 \dot{x}_d + k_0(x_d - y) \} \quad (9)$$

و همچنین تغییرشکل هیستریزیس z نیز از رابطه (۱۰) حاصل

معرفی گردید و سپس توسط ون^۱ در سال ۱۹۷۶ برای ارتعاشات تصادفی تعمیم داده شد [۳۷، ۳۸]. خلاصه‌ای از معرفی انواع مدل‌های موجود در جدول ۱ ارائه شده است. علیرغم پاسخ بهتر مدل بوک - ون نسبت به روش‌های قبلی، اما همچون مدل بینگهام، این مدل نیز نتوانست رفتار میراگر را در سرعت‌های پایین به خوبی مدل نماید. به همین دلیل اسپنسر و همکاران در سال ۱۹۹۷ مدلی بهبود یافته از بوک - ون را ارائه دادند [۹، ۳۶] تا بتواند در سرعت‌های پایین نیز دینامیک عملگر را به درستی مدل نماید که این مدل در ردیف ۴ از جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ هر کدام از پارامترهای موجود در مدل بوک - ون اصلاح شده معرفی شده و دلیل استفاده از این المان در مدل اصلاح شده ذکر گردیده است. بررسی‌های مختلفی که توسط محققان صورت گرفته است حکایت از

1 Wen

جدول ۲. معرفی پارامترهای مدل بوک - ون اصلاح شده
Table 2. Modified Bouc-Wen model parameters

معرفی و کاربرد	پارامتر مدل	ردیف
کنترل سختی در سرعت‌های بالا	k_0	۱
به منظور مدل‌سازی سختی انباشتگر موجود در میراگر می‌باشد که به منظور تطابق تغییر حجم ناشی از میله پیستون بکار می‌رود.	k_1	۲
معرف میرایی ویسکوز در سرعت‌های بالا	c_0	۳
برای ایجاد افت غیرخطی ^۱ نیرو در سرعت‌های پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد که تأثیر این پارامتر را می‌توان در نمودار سرعت - نیرو مشاهده کرد.	c_1	۴

می‌شود.

در روابط فوق k_1 سختی اضافه شده به سیستم توسط انباشتگر، میرایی ویسکوز در سرعت‌های بالا، c_1 میرایی جهت مدل کردن منحنی نیرو-سرعت در سرعت‌های پایین، k_0 سختی در سرعت‌های بالا، x_0 تغییر مکان اولیه فنر k_1 و X تغییر مکان میراگر و γ تغییر مکان داخلی میراگر می‌باشد.

در این مطالعه میراگر مورد استفاده از نوع ۳ هزار نیوتنی بوده و از مدل رفتاری بوک - ون اصلاح شده برای مدل‌سازی میراگر سیال مغناطیسی استفاده شده است که مقادیر بهینه پارامترها برای میراگر با حداکثر ولتاژ ۲/۲۵ ولت محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است [۱۲].

۵- زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، زمین‌لرزه‌ها به دو دسته

$$\dot{z} = -\gamma |x_d - y| |z|^{n-1} - \beta (x_d - y) |z|^n + A(x_d - y) \quad (10)$$

سایر پارامترهای مورد نیاز نیز به صورت توابعی خطی از ولتاژ موثر، u ، همانند رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آیند.

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u, \quad c_1 = c_{1a} + c_{1b} u, \quad c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (11)$$

در این روابط u به منظور مدل‌سازی دینامیک موجود در سیال MR برای رسیدن به تعادل رئولوژیکی از طریق رابطه‌ی ۱۲ و بر اساس یک فیلتر درجه اول محاسبه می‌شود که در این رابطه v ولتاژ مورد استفاده جهت تولید جریان است.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (12)$$

جدول ۳. پارامترهای مدل بوک - ون اصلاح شده برای میراگر سیال مغناطیسی ۳ هزار نیوتنی [۱۲]
Table 3. Parameters of modified Bouc-Wen model for the 3kN MR damper

Parameter	Value	Parameter	Value
c_{0a}	21.0 N.sec / cm	α_a	140 N / cm
c_{0b}	3.50 N.sec / cm.V	α_b	695 N / cm.V
k_0	46.9 N / cm	γ	363 cm^{-2}
c_{1a}	283 N.sec / cm	β	363 cm^{-2}
c_{1b}	2.95 N.sec / cm.V	A	301
k_1	5.00 N / cm	n	2
x_0	14.3 cm	η	190 sec^{-1}

منحنی‌های مربوط به جابه‌جایی می‌توان به این نکته پی برد که رکوردهای حوزه نزدیک با جهت‌پذیری رو به جلو در انتها به مقدار صفر همگرا می‌شوند درحالی‌که رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی در انتهای تاریخچه زمانی خود به مقداری غیر صفر می‌رسند که نشان از ایجاد جابه‌جایی ماندگار و غیر الاستیک در رکوردهای دارای اثر پرتابی است.

۶- صحت سنجی و مطالعه عددی

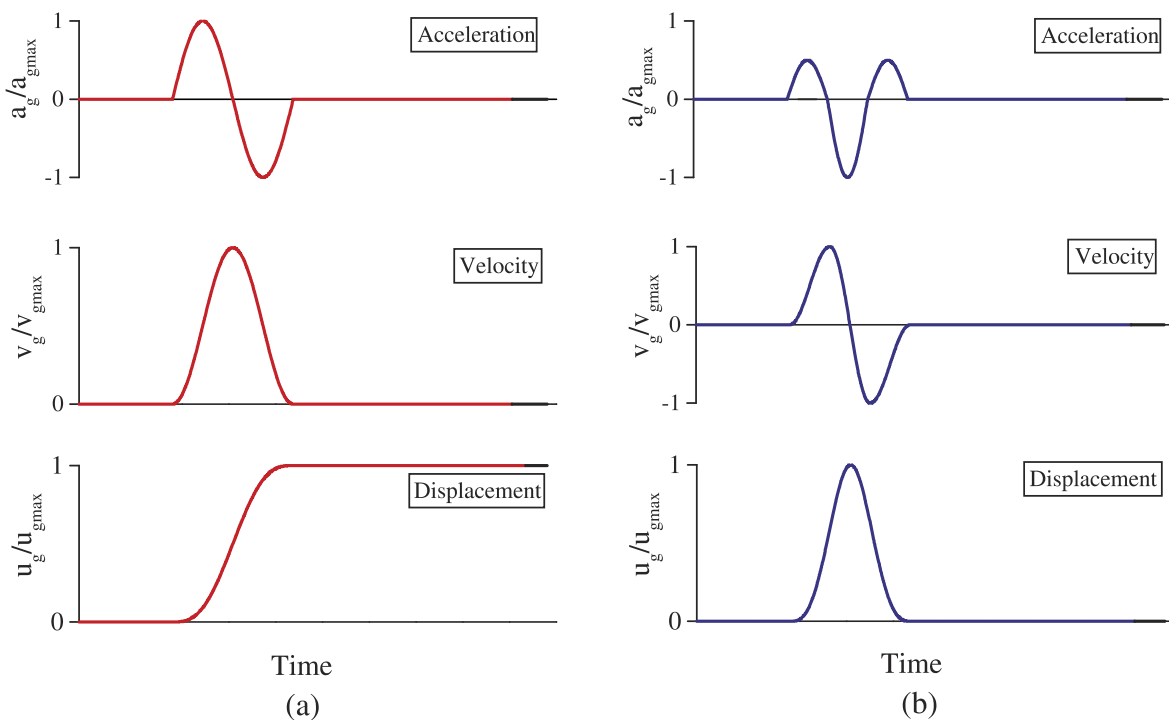
در این بخش به منظور اطمینان از روند حل مساله، ابتدا به صحت سنجی مدل‌سازی و روش تحلیل پرداخته خواهد شد و در ادامه مدل‌سازی صورت گرفته در این مطالعه شرح داده خواهد شد.

۶-۱- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی روش‌های مدل‌سازی و تحلیل، سازه ۳ طبقه موجود در مقاله دایک و اسپنسر مورد بررسی قرار گرفته است [۳۱]. این سازه ۳ طبقه همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، مدلی مقیاس شده می‌باشد که در مطالعات مربوط به سیستم‌های

کلی نزدیک و دور از گسل تقسیم‌بندی می‌شوند و زلزله‌های حوزه نزدیک خود به سه دسته دارای اثر پرتابی، دارای جهت‌پذیری رو به جلو و بدون ضربه تقسیم می‌شوند. از آنجایی که رکوردهای حوزه دور در ایستگاه اندازه‌گیری دور از گسل ثبت می‌شوند، لذا شتاب زمین لرزه فرصت بیشتری برای فیلتر شدن در خاک دارد. به همین دلیل رکوردهای حوزه دور محتوای فرکانسی محدودتری نسبت به رکوردهای حوزه نزدیک دارند.

در شکل ۲ پالس‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی دو رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی (a) و حوزه نزدیک با جهت‌پذیری رو به جلو (b) ارائه شده‌است. منحنی‌های مورد نظر به مقادیر ماکزیمم شتاب، سرعت و جابه‌جایی بی‌بعد شده‌اند. با مشاهده شکل ۲ می‌توان به اصلی‌ترین تفاوت بین این دو نوع رکورد که در منحنی‌های سرعت و جابه‌جایی قابل مشاهده است، پی برد. رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی دارای پالسی با سطح زیر منحنی بزرگی در یک‌طرف بخش مثبت یا منفی محور سرعت هستند درحالی‌که رکوردهایی با جهت‌پذیری رو به جلو دارای توزیعی یکسان از پالس در دو طرف بخش مثبت و منفی محور سرعت می‌باشند. همچنین با توجه به



شکل ۲. نمایی از پالس‌های سینوسی بی‌بعد شده (a) رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی، (b) رکورد حوزه نزدیک با جهت‌پذیری رو به جلو [۳۱]

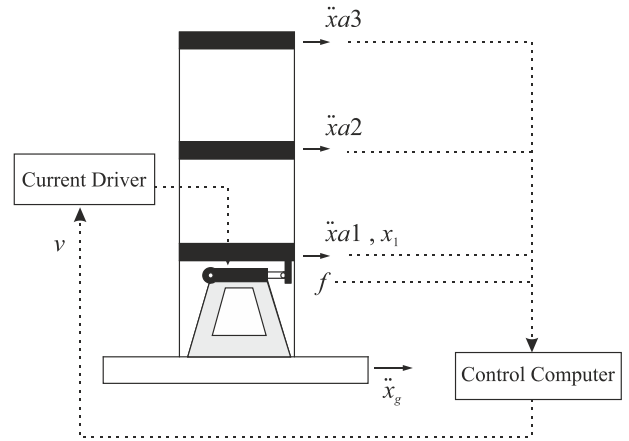
Fig. 2. Idealized sinusoidal pulses: (a) fling-step (Type A), (b) forward-directivity (Type B) (Note: curves are normalized by maximum acceleration, velocity, and displacement.)

شده‌است.

این سازه تحت زلزله ال سنترو ۱۹۴۰ قرار گرفته و از آن جایی که سازه‌ای مقیاس شده می‌باشد، گام زمانی رکورد زلزله به یک پنجم مقدار واقعی مقیاس شده‌است. در این مطالعه از الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ برای محاسبه ولتاژ استفاده گردیده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به همراه پاسخ‌های ارائه شده در مقاله که شامل پاسخ سازه در حالات کنترل نشده، کنترل شده با ولتاژ ثابت حداکثر (Passive-On)، کنترل شده با ولتاژ ثابت حداقل (Passive-Off) و با کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ می‌باشد، در جدول ۴ ارائه شده‌است. در نهایت با توجه به جدول ۴ می‌توان به این نتیجه رسید که نتایج حاصل از مدل‌سازی تطابق خوبی با نتایج ارائه شده در مقاله دارد.

۲-۶- مدل‌سازی عددی

در این مقاله به مطالعه یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه معیار با جرم، سختی و میرایی یکسان برای همه طبقات پرداخته شده‌است که پارامترهای مذکور به ترتیب برابر با ۳۶۰ ton، ۶۵۰۰۰۰ kN/m و ۶۲۰۰ kN.s/m می‌باشند [۴۱] و فرکانس اصلی سازه مورد مطالعه نیز برابر با ۱/۰۲ هرتز است که نمایی شماتیک از سازه مورد نظر در شکل ۴ نشان داده شده‌است. اگرچه ساختمان‌های متداول معمولاً تحت زلزله طرح وارد محدوده غیرخطی می‌شوند و مدل‌سازی دقیق آن‌ها پیچیده است، اما برای بررسی کارایی سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال در این ساختمان‌ها معمولاً سازه به صورت خطی مدل



شکل ۳. نمایی شماتیک از سازه مورد مطالعه توسط دایک و اسپنسر [۳۱]

Fig. 3. Schematic illustration of the studied structure by Dyke and Spencer [31]

کنترل فعال سازه‌ها در دانشگاه نوتردام استفاده شده و بسیاری از بررسی‌های انجام شده در خصوص میراگرهای مغناطیسی بر روی این سازه مورد بررسی قرار گرفته است. این سازه در طبقه اول خود دارای میراگر سیال مغناطیسی بوده و مطابق رابطه‌ی ۱ ماتریس‌های مدل ریاضی مساله به صورت زیر می‌باشند.

در مقاله مذکور برای مدل‌سازی رفتار این میراگر از مدل بوک - ون اصلاح شده استفاده شده‌است که پارامترهای آن در جدول ۳ ارائه

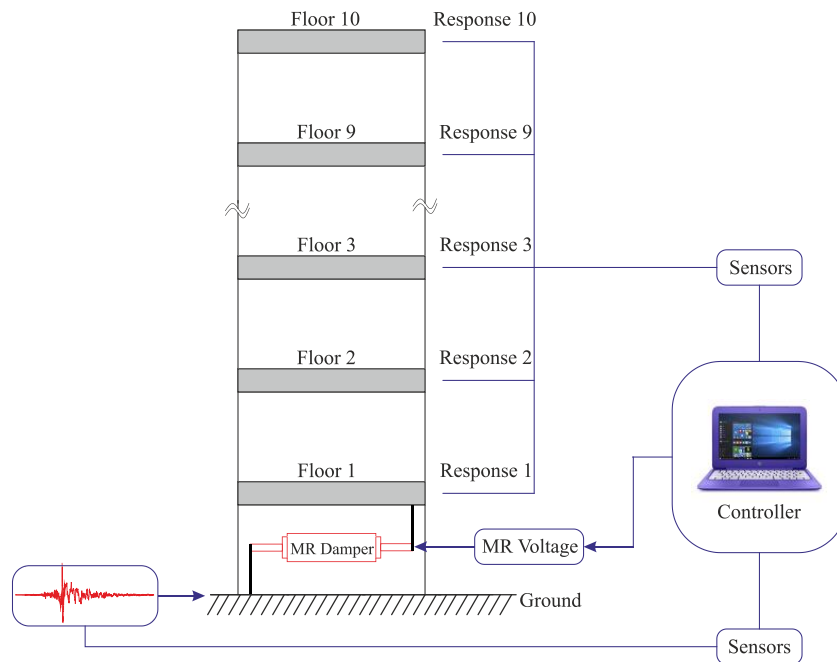
$$M = \begin{bmatrix} 98.3 & 0 & 0 \\ 0 & 98.3 & 0 \\ 0 & 0 & 98.3 \end{bmatrix} \text{ kg}, \quad C = \begin{bmatrix} 175 & -50 & 0 \\ -50 & 100 & -50 \\ 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \frac{\text{N}\cdot\text{sec}}{\text{m}} \quad (13)$$

$$K = 10^5 \begin{bmatrix} 12 & -6.84 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix} \frac{\text{N}}{\text{m}}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

جدول ۴. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی و مقاله مورد نظر

Table 4. Comparison of the results of this study and the benchmark study

Control Strategy	Response Type	Data Source	Value
Uncontrolled	Roof Displacement (cm)	Dyke & Spencer Calculated	0.962
		Calculated	0.945
		Error (%)	1.76
Passive-OFF	Roof Displacement (cm)	Dyke & Spencer Calculated	0.455
		Calculated	0.461
		Error (%)	1.31
Passive-ON	Roof Displacement (cm)	Dyke & Spencer Calculated	0.306
		Calculated	0.285
		Error (%)	6.86
Clipped Optimal	Roof Displacement (cm)	Dyke & Spencer Calculated	0.219
		Calculated	0.218
		Error (%)	0.45



شکل ۴. نمایی از سازه مورد مطالعه در حالت اول

Fig. 4. Schematic illustration for the studied 10-story linear shear building in the first configuration case

دسته ۷ تایی از رکوردهای زلزله حوزه دور، حوزه نزدیک با اثر پرتابی، جهت‌پذیری رو به جلو و بدون ضربه [۲۳] مورد بررسی قرار گرفته است که اطلاعات مربوط به شتاب نگاشت‌ها در جدول ۵ خلاصه شده‌است. مطابق مقاله حیدری [۴۳]، همه رکوردها به مقدار حداکثر $0.3g$ مقیاس شده‌اند. هدف از یکسان سازی ماکزیمم شتاب رکوردها، حذف اثر ماکزیمم شتاب زمین هر زلزله در مقایسات صورت گرفته می‌باشد.

مطابق با آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی، اگر در بررسی عملکرد لرزه‌ای با استفاده از روش تاریخچه پاسخ، حداقل از ۷ رکورد زلزله استفاده شود، میانگین پاسخ تحت این رکوردها می‌تواند جهت بررسی عملکرد سازه در نظر گرفته شود [۴۴]. به منظور مطالعه آماری پاسخ سازه تحت حالت‌های مورد بررسی علاوه بر مقدار میانگین در هر حالت مقادیر میانگین \pm انحراف معیار نیز گزارش شده‌است.

برای انجام مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب^۱ و سیمولینک^۲، در ابتدا ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه تعریف شده و سپس ماتریس‌های فضای حالت سیستم کنترل نشده تشکیل می‌شود و در ادامه با تعبیه بلوک‌های مناسب در نرم‌افزار سیمولینک، پاسخ سازه کنترل نشده تحت رکوردهای ارائه شده در جدول ۵ حاصل می‌گردد.

می‌گردد [۴۲].

برای کنترل نیمه‌فعال سازه فوق از میراگر سیال مغناطیسی استفاده شده‌است و همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید، برای مدل‌سازی رفتار میراگر مذکور از مدل بوک - ون اصلاح شده استفاده گردیده است که مشخصات میراگر ۳ هزار نیوتنی در جدول ۳ ارائه شده‌است. در این پژوهش از الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ که جزو بهترین الگوریتم‌ها در کنترل نیمه‌فعال می‌باشد، برای محاسبه ولتاژ مورد نیاز استفاده شده‌است و پاسخ‌های حاصل با حالات کنترل نشده و کنترل شده به صورت Passive-Off (P - OFF) و Passive-On (P - ON) مقایسه گردیده است. همچنین سه حالت مختلف برای بررسی اثر موقعیت قرارگیری میراگر سیال مغناطیسی در ارتفاع ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است که شامل موارد زیر می‌باشد:

حالت اول: میراگر سیال مغناطیسی در طبقه اول قرار گرفته باشد. (طبقات ابتدایی)

حالت دوم: میراگر سیال مغناطیسی در طبقه پنجم قرار گرفته باشد. (طبقات میانی)

حالت سوم: میراگر سیال مغناطیسی در طبقه دهم قرار گرفته باشد. (طبقات انتهایی)

در این مطالعه از تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده‌است و ۴

1 MATLAB
2 SIMULINK

جدول ۵. مشخصات رکوردهای مورد استفاده
Table 5. Ground motion database

No	year	Earthquake	Mw	Mech ^a	Station	Comp	Source ^b	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)	Fling Disp.
(a) Near-Fault Records (Fling-Step)											
1	1999	Kocaeli	7.4	SS	Yarimca(YPT)	EW	3	0.23	88.83	184.84	145.79
2	1999	Chi-Chi	7.6	TH	TCU052	NS	4	0.44	216.00	709.09	697.12
3	1999	Chi-Chi	7.6	TH	TCU068	EW	4	0.50	277.56	715.82	601.84
4	1999	Chi-Chi	7.6	TH	TCU074	EW	4	0.59	68.90	193.22	174.56
5	1999	Chi-Chi	7.6	TH	TCU084	EW	4	0.98	140.43	204.59	161.82
6	1999	Chi-Chi	7.6	TH	TCU102	EW	4	0.29	84.52	153.88	73.66
7	1999	Chi-Chi	7.6	TH	TCU128	EW	4	0.14	59.42	91.05	49.88
(b) Near-Fault Records (Forward-Rupture Directivity)											
8	1992	Cape Mendocino	7.1	TH	Petrolia	90	1	0.66	90.16	28.89	—
9	1994	Northridge	6.7	TH	Olive View	360	1	0.84	130.37	31.72	—
10	1992	Erzincan	6.7	SS	Erzincan	EW	1	0.50	64.32	21.93	—
11	2004	Parkfield	6.4	SS	Fault Zone 1	FN	5	0.50	64.15	12.64	—
12	1984	Morgan Hill	6.1	SS	Anderson Dam	340	2	0.29	28.00	12.19	—
13	1987	Superstition Hills	6.4	SS	Parachute Test Site	315	1	0.45	112.00	52.46	—
14	1979	Imperial-Valley	6.5	SS	Brawley Airport	225	1	0.16	35.85	22.39	—
(c) Far-Fault Records											
15	1952	Kern County	7.5	TH/REV	Taft	111	1	0.18	17.50	8.79	—
16	1979	Imperial Valley	6.5	SS	Calexico	225	1	0.27	21.24	9.03	—
17	1989	Loma Prieta	7.0	OB	Presidio	00	1	0.10	12.91	4.32	—
18	1994	Northridge	6.7	TH	Century CCC	90	2	0.26	21.19	7.85	—
19	1994	Northridge	6.7	TH	Moorpark	180	2	0.29	20.97	5.48	—
20	1994	Northridge	6.7	TH	Montebello	206	1	0.18	9.41	1.51	—
21	1971	San Fernando	6.6	REV	Castaic	291	1	0.27	25.90	4.87	—
(d) Near-Fault Records (Without Pulse)											
22	1979	Imperial Valley-06	6.5	SS	Bonds Corner	140	1	0.59	46.75	20.21	—
23	1979	Imperial Valley-06	6.5	SS	chihuahua	12	1	0.26	24.80	9.29	—
24	1994	Northridge-01	6.7	REV	Saticoy	90	1	0.34	31.43	8.95	—
25	1989	Loma Prieta	7.0	OB/REV	Capitola	00	1	0.51	38.02	7.06	—
26	1966	Parkfield	6.2	SS	Array #8	50	1	0.24	11.30	5.07	—
27	1987	Superstition Hills	6.4	SS	Superstition Mtn	45	1	0.58	24.41	2.29	—
28	1994	Northridge-01	6.7	REV	Rinaldi	228	1	0.87	150.86	42.68	—

^a Faulting Mechanism = TH: Thrust; REV: Reverse; SS: Strike-slip; OB: Oblique

^b Data Source = 1: PEER (<http://peer.berkeley.edu/smcat>)

2: COSMOS (<http://db.cosmos-eq.org>)

3: ERD (<http://angora.deprem.gov.tr/>)

4: (<http://scman.cwb.gov.tw/eqv5/special/19990921/pgadata-ascii0704.htm>)

5: CSMIP (http://www.quake.ca.gov/cisn-edc/idr/parkfield_28Sep2004/idr_dist.htm)

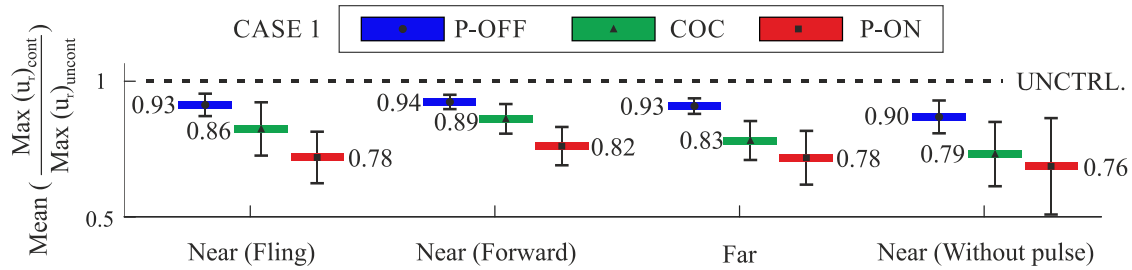
کنترل نشده بام سازه با قرارگیری میراگر در سه طبقه مختلف مقایسه شده و سپس به مقایسه پاسخ سازه در طبقات ساختمان پرداخته می‌شود. علاوه بر مطالعه ماکزیمم پاسخ سازه در طول زمان، در ادامه به منظور بررسی جامع سیستم کنترلی، ریشه میانگین مربعات^۱ پاسخ‌ها نیز مقایسه شده و با رسم نمودارهای چرخه‌ای میراگر سیال مغناطیسی به بررسی رفتار این میراگر پرداخته شده‌است. عبارات P-ON، P-OFF و COC در تمام نمودارهای این قسمت به ترتیب معرف سه حالت کنترل Clipped Optimal Control هستند که به ترتیب با سه رنگ

در مرحله بعد ماتریس‌های فضای حالت مربوط به سازه کنترل شده با در نظر گرفتن موقعیت میراگر سیال مغناطیسی تشکیل می‌گردد. سپس با استفاده از الگوریتم کنترل بهینه خطی کلاسیک مقدار نیروی بهینه تعیین شده و با نیروی ایجاد شده توسط میراگر مقایسه می‌گردند و بدین ترتیب در هر لحظه میزان ولتاژ لازم برای میراگر سیال مغناطیسی جهت کنترل سازه محاسبه می‌گردد. در ادامه با ورود جابه‌جایی و سرعت تراز مورد نظر و ولتاژ لازم به میراگر، نیروی لازم ایجاد شده و به سازه اعمال می‌گردد.

۷- ارزیابی نتایج

در این بخش میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های کنترل شده به

1 Root Mean Square (RMS)



شکل ۵. مقایسه میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های کنترل شده به کنترل نشده با قرارگیری میراگر در طبقه اول

Fig. 5. Mean and standard deviation of normalized maximum roof displacement for the 1st alternative of the controlled structure (i.e., damper at the first floor)

قرمز، آبی و سبز نمایش داده شده‌اند.

اشاره کرد.

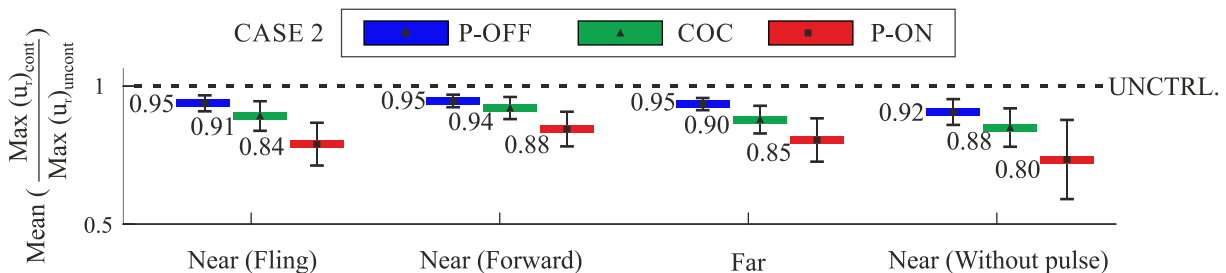
همان‌طور که انتظار می‌رفت بهترین عملکرد کنترلی از بین حالات مورد بررسی و نشان داده شده در شکل ۵ برای حالتی است که میراگر سیال مغناطیسی با حداکثر ولتاژ اعمالی کار کند و کمترین بازده نیز برای حالت Passive-Off می‌باشد. در خصوص انحراف معیار پاسخ‌های بی‌بعد شده نیز می‌توان گفت که در تمام دسته رکوردها و بین حالات کنترل شده، کنترل Passive-Off کمترین پراکندگی و عدم قطعیت را در بین پاسخ‌ها داراست و بیشترین نیز مربوط به کنترل Passive-On می‌باشد.

۱-۷- حالت اول: قرارگیری میراگر در طبقه اول

با قرار گرفتن میراگر در طبقه اول نتایج نشان داده شده در شکل ۵ حاصل می‌شود. شکل ۵ نشان دهنده میانگین و انحراف معیار حداکثر تغییر مکان بام سازه در حالت کنترل شده به کنترل نشده تحت ۷ رکورد در دسته مورد نظر می‌باشد که بیشترین کاهش پاسخ سازه مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک بدون ضربه می‌باشد. تحت این مجموعه رکوردها و نسبت به حالت کنترل نشده، کنترل شده به صورت Passive-Off، ۱۰ درصد، حالت کنترل شده با الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ، ۲۱ درصد و حالت کنترل شده به صورت Passive-On، ۲۴ درصد مقادیر حداکثر جابه‌جایی بام را کاهش داده است. در عوض کمترین کاهش پاسخ نیز مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک با جهت‌پذیری رو به جلو می‌باشد که برای حالات کنترلی ذکر شده به ترتیب ۶، ۱۱ و ۱۸ درصد کاهش در پاسخ حاصل گردیده است. از نکات مهم شکل ۵ می‌توان به کاهش مناسب پاسخ سازه تحت هر کدام از رکوردها با هر سه روش کنترلی

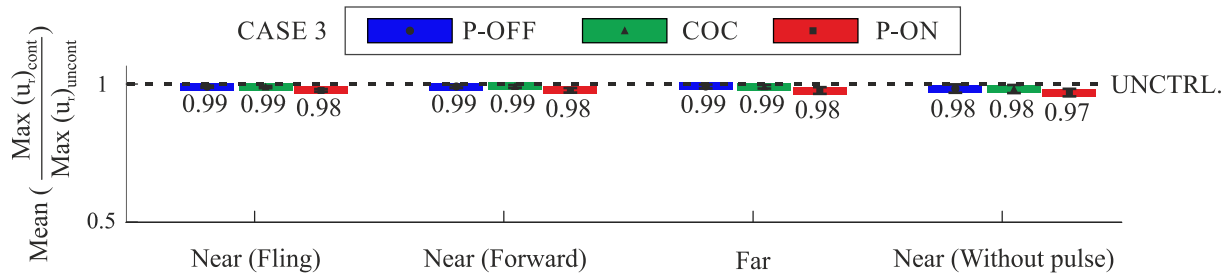
۲-۷- حالت دوم: قرارگیری میراگر در طبقه پنجم

همان‌طور که در شکل ۶ برای حالت دوم موقعیت قرارگیری میراگر سیال مغناطیسی در ارتفاع ساختمان نشان داده شده‌است، روش‌های کنترلی Passive-Off دارای بیشترین و Passive-On کمترین پراکندگی پاسخ همانند قبل می‌باشند. اما نکته حائز اهمیت در این حالت، کاهش عملکرد میراگر سیال مغناطیسی با همه روش‌ها نسبت به قرارگیری میراگر در طبقه اول می‌باشد. به عنوان مثال در



شکل ۶. مقایسه میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های کنترل شده به کنترل نشده با قرارگیری میراگر در طبقه پنجم

Fig. 6. Mean and standard deviation of normalized maximum roof displacement for the 2nd alternative of the controlled structure (i.e., damper at the fifth floor)



شکل ۷. مقایسه میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های کنترل شده به کنترل نشده با قرارگیری میراگر در طبقه دهم

Fig. 7. Mean and standard deviation of normalized maximum roof displacement for the 3rd alternative of the controlled structure (i.e., damper at the last floor)

قرارگیری میراگر بسیار کم می‌باشد.

رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی و در روش کنترل شده با الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ، کاهش پاسخ ۹ درصد بوده که برای حالت قرارگیری میراگر در طبقه اول این کاهش پاسخ ۱۴ درصد می‌باشد. همچنین در این حالت نیز بیشترین و کمترین کاهش پاسخ نیز همانند حالت اول می‌باشد.

۷-۴- مقایسه جابه‌جایی کل طبقات در هر سه حالت مورد بررسی

از نکات مهمی که در مقایسات قبلی به آن توجهی نشد، تغییرات پاسخ در ارتفاع سازه می‌باشد. بدین منظور از شکل ۸ برای این مقایسه استفاده شده‌است که هر نقطه در روی نمودار معرف میانگین حداکثر جابه‌جایی سازه در طبقه مورد نظر تحت ۷ رکورد می‌باشد. همچنین در این شکل با بزرگنمایی جابه‌جایی ۳ طبقه نهایی و مشخص کردن نمودار مربوط به هر کدام از حالات مورد بررسی، سعی شده‌است تفاوت موجود نمایان گردد. از روی شکل مورد نظر می‌توان به این نکته پی برد که

بیشترین جابه‌جایی در سازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی ایجاد می‌گردد و کمترین نیز تحت رکوردهای حوزه نزدیک بدون ضربه بوجود می‌آید. در بین همه حالات مورد بررسی که شامل ۹ حالت می‌باشد (بررسی سه حالت قرارگیری میراگر تحت سه نوع ولتاژ)، تحت همه رکوردها حالت Passive-On و با قرارگیری میراگر در طبقه اول بهترین عملکرد را داراست و از همان طبقه اول خود را از بقیه نمودارها جدا کرده‌است، اما در مقابل بدترین عملکرد نیز در حالت Passive-Off و با قرارگیری میراگر در طبقه دهم به وقوع می‌پیوندد.

وقتی میراگر در طبقه دهم قرار می‌گیرد، با توجه به شکل ۸ می‌توان به این نتیجه رسید که در هر سه روش کنترلی تنها جابه‌جایی طبقه بام کاهش یافته و طبقات پایین‌تر رفتاری مشابه حالت کنترل نشده از خود نشان می‌دهند.

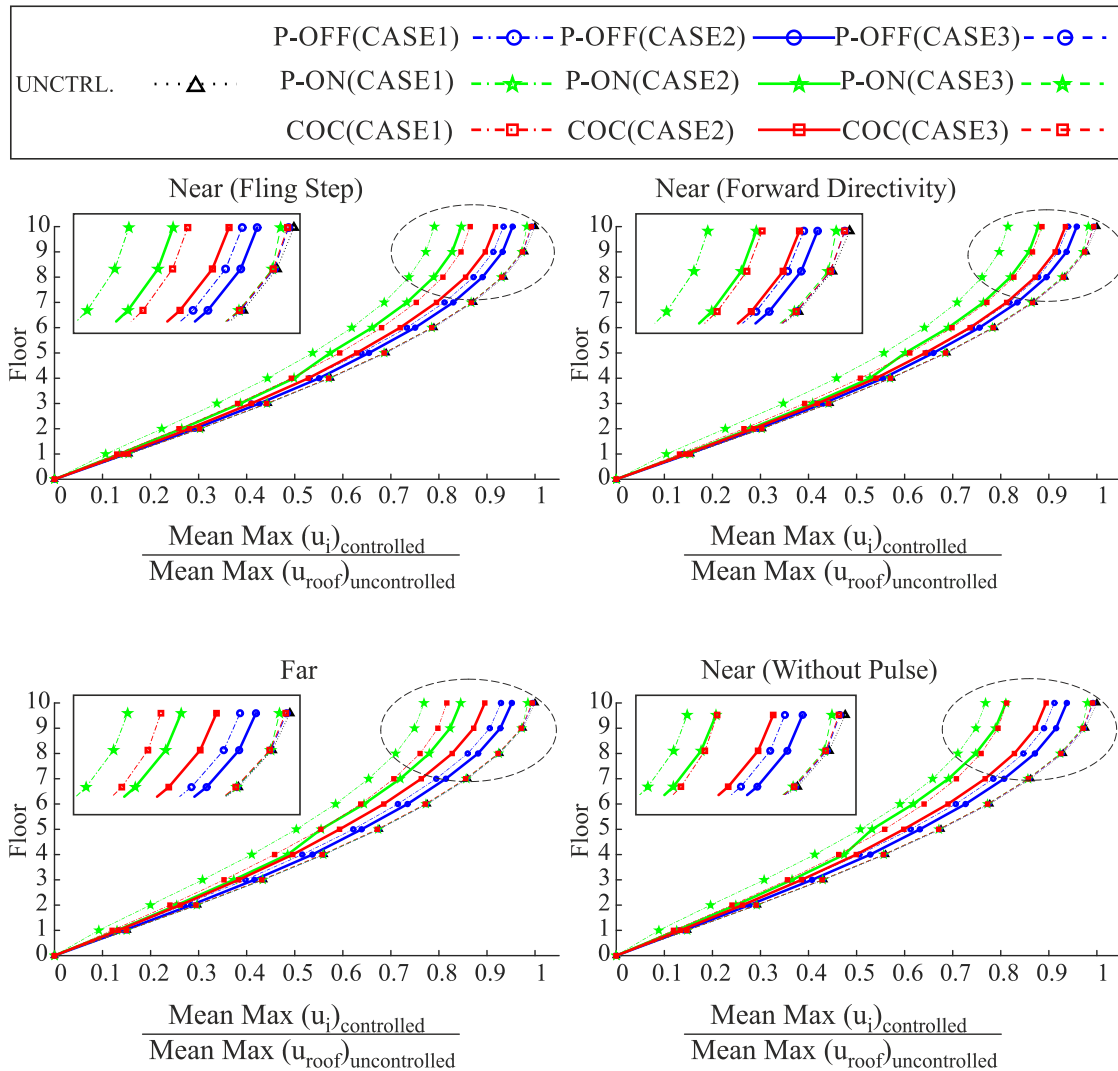
در شکل ۹ نیز تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی طبقه بام سازه

۷-۳- حالت سوم: قرارگیری میراگر در طبقه دهم

نتایج ارائه شده در شکل ۷ برای حالتی است که میراگر در طبقه آخر سازه قرار گرفته باشد. مهمترین نکته در این شکل کاهش بسیار زیاد عملکرد میراگر سیال مغناطیسی نسبت به دو حالت قبلی می‌باشد و عملاً بیانگر این است که وجود سیستم کنترلی تأثیری نداشته‌است. برای مثال در روش کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ و تحت زلزله حوزه دور، میانگین کاهش پاسخ تحت ۷ رکورد مربوطه تنها ۱ درصد بوده و این در حالی است که همین مورد برای حالت‌های اول و دوم قرارگیری میراگر به

ترتیب برابر با ۱۷ و ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین در این حالت پراکندگی و عدم قطعیت پاسخ‌ها تحت همه رکوردها بسیار کم می‌باشد

از نکات برجسته دیگر در این حالت می‌توان به عملکرد مشابه روش Passive-Off و کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ اشاره کرد که تفاوت آن‌ها در کاهش پاسخ کمتر از ۱ درصد می‌باشد. همچنین عملکرد سیستم کنترلی برای هر سه رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی و جهت‌پذیری رو به جلو و حوزه دور مشابه هم می‌باشد. بیشترین تأثیر گذاری سیستم کنترلی نیز همانند حالات قبل بر روی رکوردهای حوزه نزدیک بدون ضربه است. لازم به ذکر است همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده‌است، پراکندگی پاسخ در حالت سوم



شکل ۸. مقایسه میانگین حداکثر تغییر مکان طبقات ساختمان تحت رکوردهای مختلف و ۹ حالت مورد بررسی

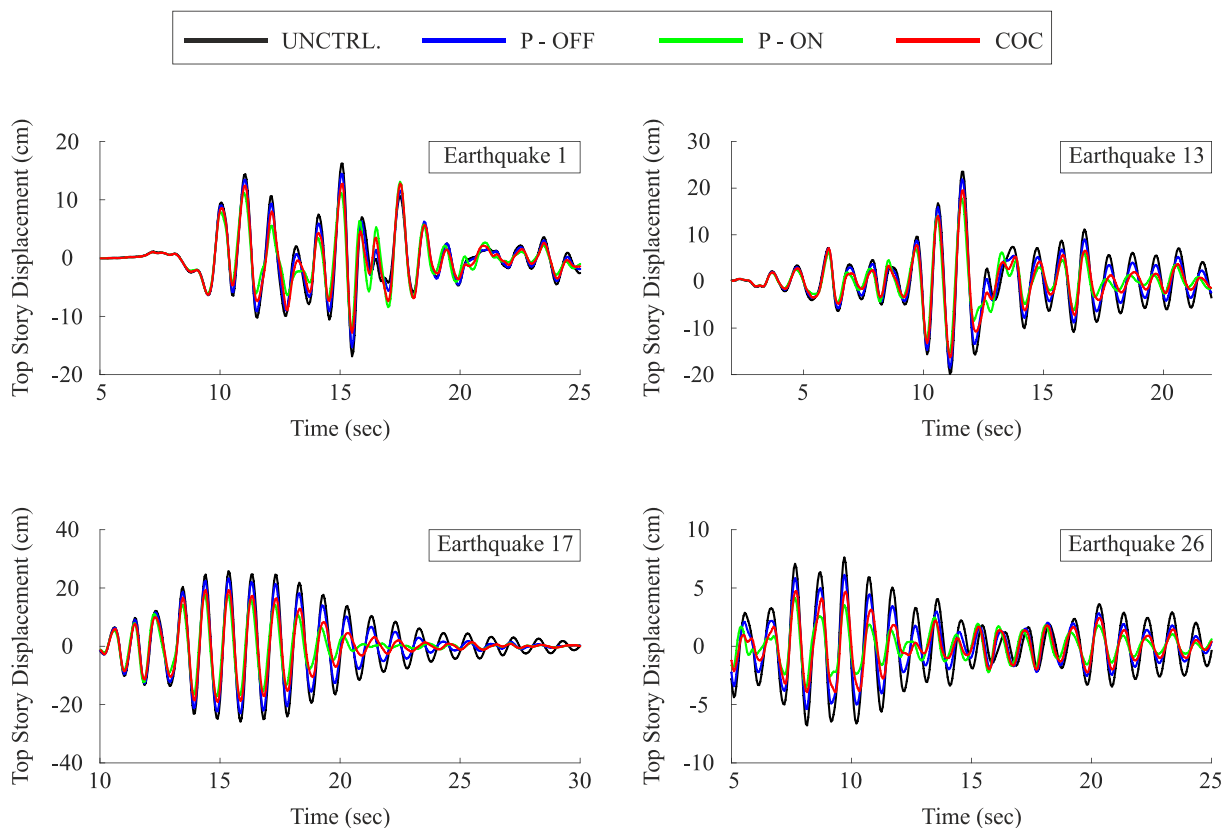
Fig. 8. Mean of normalized maximum displacement of building floors under different record sets and 9 different cases

کنترل نشده مربوطه می‌باشند. به عنوان مثال تحت رکورد شماره ۱، ماکزیمم جابه‌جایی سازه در حالت کنترلی P-OFF، P-ON و COC به ترتیب ۱۰، ۲۳ و ۲۴ درصد کاهش نسبت به حالت کنترلی نشده داشته است، در صورتی که ریشه میانگین مربعات جابه‌جایی سازه به ترتیب ۱۳، ۵۸ و ۴۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد که نشان از عملکرد مثبت سیستم کنترلی در طول زمان تحریک نیز می‌باشد. این ترتیب کاهش اعداد تحت حالات کنترلی مختلف، تقریباً در همه رکوردهای مورد بررسی مشابه می‌باشد. کمترین کاهش در میانگین مربعات پاسخ‌ها نیز مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک با جهت پذیری رو به جلو است. همچنین در بین ریشه میانگین مربعات پاسخ‌های مورد بررسی (جابه‌جایی، سرعت، شتاب و برش پایه) و تحت رکوردهای حوزه نزدیک (با جهت‌پذیری رو به جلو، دارای اثر

در حالات کنترل نشده و کنترل شده تحت رکوردهایی که در هر دسته بیشترین کاهش پاسخ را با الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه داشته‌اند (رکوردهای ۱، ۱۳، ۱۷ و ۲۶)، نشان داده شده است. در شکل ۹ به عنوان نمونه حالت قرارگیری میراگر در طبقه اول لحاظ گردیده است. البته لازم به ذکر است که در هر رکورد پاسخ سازه در مدت زمان حرکت شدید زلزله ترسیم شده و نتایج گویای کاهش پاسخ سازه در حالات کنترل شده نسبت به کنترل نشده می‌باشد.

۷-۵- مقایسه ریشه میانگین مربعات پاسخ‌ها

جدول ۶ ماکزیمم و میانگین مربعات پاسخ‌ها (RMS) با قرارگیری میراگر در طبقه اول و به عنوان نمونه تحت ۴ رکورد انتخابی در بخش ۷-۴ ارائه شده است. ارقام موجود نسبت پاسخ‌های کنترل شده به



شکل ۹. مقایسه تاریخچه زمانی پاسخ تغییرمکان سازه برای طبقه بام

Fig. 9. Time history of roof displacement for uncontrolled and controlled structures with different control methods

به عنوان نمونه برای حالت اول قرارگیری میراگر (طبقه اول) تحت ۴ رکورد انتخاب شده در بخش ۷-۴ و برای سه حالت P-OFF، P-ON و COC در شکل ۱۰ نشان داده شده است. اندازه تمام محورها برای راحتی مقایسه بین حالات مختلف یکسان انتخاب

پرتابی و بدون ضربه) الگوریتم‌های COC و P-ON بیشترین تاثیر را به ترتیب بر روی کاهش پاسخ سرعت و برش پایه داشته‌اند.

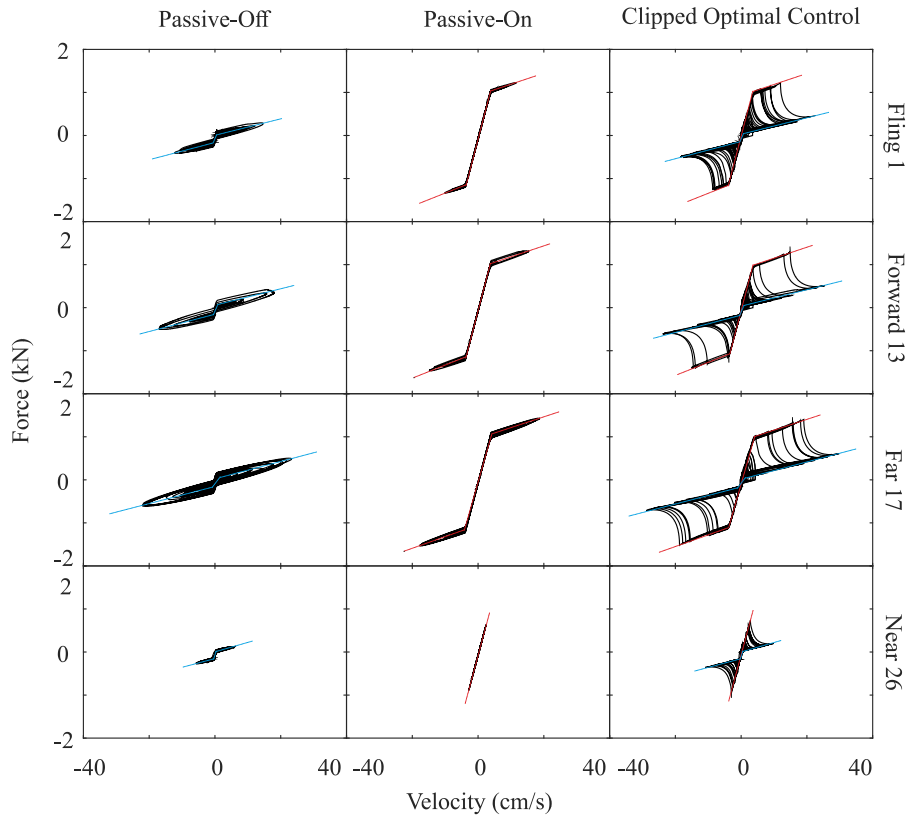
۷-۶- بررسی رفتار چرخه‌ای میراگر سیال مغناطیسی

نمودارهای چرخه‌ای میراگر سیال مغناطیسی (نیرو - سرعت)

جدول ۶. میانگین مربعات پاسخ‌های کنترل شده به کنترل نشده سازه با قرارگیری میراگر در طبقه اول

Table 6. Normalized criteria for the 1st alternative of the controlled structure (i.e., damper at the first floor)

Record	Normalized parameter	P-OFF	P-ON	COC	Record	Normalized parameter	P-OFF	P-ON	COC
FS 1	Max Disp.	0.90	0.77	0.76	Far 17	Max Disp.	0.89	0.68	0.74
	Max Vel.	0.90	0.73	0.81		Max Vel.	0.88	0.67	0.75
	Max Acc.	0.91	0.73	0.74		Max Acc.	0.91	0.73	0.78
	Max Base Shear	0.84	0.67	0.76		Max Base Shear	0.84	0.57	0.73
	RMS Disp.	0.87	0.42	0.52		RMS Disp.	0.87	0.47	0.44
	RMS Vel.	0.89	0.35	0.41		RMS Vel.	0.90	0.52	0.47
	RMS Acc.	0.87	0.46	0.55		RMS Acc.	0.88	0.51	0.46
RMS Base Shear.	0.85	0.35	0.53	RMS Base Shear.	0.85	0.41	0.45		
Record	Normalized parameter	P-OFF	P-ON	COC	Record	Normalized parameter	P-OFF	P-ON	COC
FD 13	Max Disp.	0.92	0.74	0.82	Near 26	Max Disp.	0.80	0.54	0.62
	Max Vel.	0.92	0.76	0.83		Max Vel.	0.82	0.53	0.72
	Max Acc.	0.92	0.76	0.95		Max Acc.	0.81	0.53	0.61
	Max Base Shear	0.90	0.66	0.81		Max Base Shear	0.79	0.44	0.69
	RMS Disp.	0.92	0.65	0.66		RMS Disp.	0.77	0.47	0.55
	RMS Vel.	0.94	0.66	0.64		RMS Vel.	0.80	0.36	0.32
	RMS Acc.	0.93	0.69	0.68		RMS Acc.	0.80	0.54	0.54
RMS Base Shear.	0.90	0.57	0.69	RMS Base Shear.	0.75	0.35	0.56		



شکل ۱۰. نمودارهای چرخه‌ای میراگر سیال مغناطیسی تحت ۴ رکورد منتخب با قرارگیری میراگر در طبقه اول

Fig. 10. Hysteresis curves of MR damper under 4 selected records by placing the damper on the first floor

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا به بررسی عملکرد سه حالت مختلف قرارگیری میراگر سیال مغناطیسی در کاهش حداکثر جابه‌جایی طبقه بام پرداخته شده‌است و برای کنترل نیمه‌فعال نیز از سه مکانیزم مختلف در تعیین ولتاژ استفاده گردیده‌است. همچنین در ادامه به مطالعه آماری تحت ۴ دسته مختلف از رکوردهای حوزه نزدیک (با اثر پرتابی، جهت‌پذیری رو به جلو، بدون ضربه) و رکوردهای حوزه دور پرداخته شده‌است.

با ارزیابی نتایج به دست آمده می‌توان به صورت خلاصه به موارد زیر اشاره نمود:

* میراگر سیال مغناطیسی توانایی قابل ملاحظه‌ای در کنترل رفتار سازه‌ها داشته و علاوه بر کاهش حداکثر پاسخ جابه‌جایی طبقات، در کاهش پاسخ سازه در کل طول تحریک نیز موثر می‌باشد. شاید میزان کاهش پاسخ سازه در این حالت نسبت به کنترل فعال کمتر باشد اما بایستی به این نکته توجه کرد که این میراگر با منبع

شده‌است. به عنوان نمونه برای رکورد شماره ۱ ماکزیمم مقدار سرعت در حالات P-OFF برابر ۱۴/۶۶ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. نمودار مربوط به این حالت نشان دهنده یک رفتار ویسکوز خطی است که همراه با یک نیروی اصطکاک اولیه اندک می‌باشد [۴۵]. در نمودارهای P-OFF و P-ON به ترتیب خطی آبی و قرمز رنگ از مرکز چرخه‌ها رسم شده‌است و عیناً همین خط‌ها بر روی نمودارهای COC انتقال داده شده‌است. بدین ترتیب از نمودارهای COC مشخص می‌شود که تغییرات نیروی میراگر سیال مغناطیسی در این حالت بین تراز نیروهای P-OFF و P-ON می‌باشد. ماکزیمم نیروی حالت P-OFF و P-ON برای رکورد شماره ۱ به ترتیب برابر ۴۱۳ و ۱۳۴۰ نیوتن است و در نتیجه یک محدوده عملکردی تقریباً ۳ برابری حاصل شده‌است. همچنین ماکزیمم مقدار سرعت در حالت P-ON و COC به ترتیب ۱۱/۶۴ و ۲۱/۱۱ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. لذا با مقایسه سایر حالات نیز همان‌طور که از شکل ۱۰ پیداست می‌توان نتیجه گرفت میزان سرعت دو سر میراگر به ترتیب در کنترل‌های P-OFF، COC و P-ON بیشترین مقدار را داراست.

مراجع

- [1] G. Warburton, E. Ayorinde, Optimum absorber parameters for simple systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(3) (1980) 197-217.
- [2] M. Morales-Beltran, P. Teuffel, Towards smart building structures: adaptive structures in earthquake and wind loading control response—a review, *Intelligent Buildings International*, 5(2) (2013) 83-100.
- [3] A. Yanik, U. Aldemir, A Short Review on the Active Control Approaches in Earthquake Engineering at the Last 10 Years (2008-2018), *International Journal of Engineering and Technology*, 11(2) (2019) 111-118.
- [4] F. Casciati, J. Rodellar, U. Yildirim, Active and semi-active control of structures—theory and applications: A review of recent advances, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(11) (2012) 1181-1195.
- [5] J. Xu, X. Yang, W. Li, J. Zheng, Y. Wang, M. Fan, Research on semi-active vibration isolation system based on electromagnetic spring, *Mechanics & Industry*, 21(1) (2020).
- [6] S.-G. Luca, F. Chira, V. Rosca, Passive, active and semi-active control systems in civil engineering, *Constructil Arhitectura*, 3 (2005).
- [7] P.P. Phule, Magnetorheological (MR) fluids: principles and applications, *Smart Materials Bulletin*, 2001(2) (2001) 7-10.
- [8] B. Spencer Jr, S. Dyke, M.K. Sain, Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures, in: *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, (1996) 676-681.
- [9] B. Spencer, J.D. Carlson, M. Sain, G. Yang, On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures, in: *Proceedings of the American Control Conference*, IEEE, (1997) 458-462.
- [10] S. Dyke, B. Spencer Jr, M. Sain, J. Carlson, Seismic response reduction using magnetorheological dampers, *IFAC Proceedings Volumes*, 29(1) (1996) 5530-5535.
- [11] S. Dyke, B. Spencer Jr, M. Sain, J. Carlson, Experimental verification of semi-active structural control strategies

انرژی بسیار پایینی قادر به کنترل سازه بوده و توان بالایی از خود نشان می‌دهد.

* قرارگیری میراگر در پایین‌ترین طبقه سازه (اول) بهترین عملکرد را داشته و بیشترین کاهش در پاسخ سازه را ایجاد می‌کند.

* بهترین روش در تعیین ولتاژ کنترلی تحت همه رکوردها حالت Passive-On بوده و سپس به ترتیب الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ و Passive-Off می‌باشد.

* بهترین عملکرد سیستم کنترلی با هر روشی در تعیین ولتاژ و با هر موقعیت قرارگیری میراگر تحت رکوردهای حوزه نزدیک بدون ضربه می‌باشد و بدترین عملکرد نیز تحت رکوردهای حوزه نزدیک با جهت‌پذیری رو به جلو رخ می‌دهد.

* به صورت کلی می‌توان به این نکته اشاره کرد که میراگر در هر طبقه‌ای که قرار گیرد، از آن طبقه و به بعد تاثیر میراگر در کاهش پاسخ سازه ملموس می‌باشد.

* از آنجایی که روش Passive-On با ولتاژ حداکثر به صورت مستمر کار می‌کند، لذا عملکرد بهتر آن قابل پیش‌بینی بوده اما نکته مهم توجه به این موضوع است که روش کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ با وجود انتخاب ولتاژ بهینه در هر لحظه، عملکردی قابل قبول در کاهش پاسخ سازه داشته که بدلیل عدم استفاده از ولتاژ یکنواخت حداکثری می‌تواند در افزایش عمر میراگر موثر باشد.

* با بررسی نتایج ارائه شده از ریشه میانگین مربعات پاسخ‌ها می‌توان به این نکته پی برد که اگرچه حالت Passive-On در کاهش ماکزیمم پاسخ‌ها بهتر عمل می‌کند، اما از نظر کارایی در طول کل زمان زلزله تقریباً عملکردی مشابه الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ دارد. البته همچنان الگوریتم Passive-On در کاهش ریشه میانگین مربعات برش پایه بهتر از تمام الگوریتم‌های مورد بررسی عمل کرده است.

از آنجایی که در مطالعات سازه‌ای کاهش پاسخ جابه‌جایی و شتاب به ترتیب بیشترین تاثیر را بر روی کنترل خرابی اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای دارند، با استفاده از الگوریتم کنترل قطع و وصل بهینه ولتاژ و در صورتی که میراگر در طبقه مناسب قرار داشته باشد تقریباً می‌توان مقادیر این دو پاسخ را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد تحت همه رکوردها کاهش داد.

- Forward-Directivity Characteristics on Seismic Response of Base-Isolated Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, (2018) 1-20.
- [22] M. Mastali, A. Kheyroddin, B. Samali, R. Vahdani, Optimal placement of active braces by using PSO algorithm in near-and far-field earthquakes, *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 8(1) (2016) 29-44.
- [23] E. Kalkan, S.K. Kunnath, Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, *Earthquake spectra*, 22(2) (2006) 367-390.
- [24] H. Ghaffarzadeh, E.A. Dehrod, N. Talebian, Semi-active fuzzy control for seismic response reduction of building frames using variable orifice dampers subjected to near-fault earthquakes, *Journal of Vibration and Control*, 19(13) (2013) 1980-1998.
- [25] A. Bathaei, S.M. Zahrai, M. Ramezani, Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms, *Journal of Vibration and Control*, 24(13) (2018) 2938-2953.
- [26] A. Bathaei, M. Ramezani, A.K. Ghorbani-Tanha, Type-1 and Type-2 fuzzy logic control algorithms for semi-active seismic vibration control of the college urban bridge using MR dampers, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 50(2) (2017) 333-351.
- [27] M. Bozorgvar, S.M. Zahrai, Semi-active seismic control of buildings using MR damper and adaptive neural-fuzzy intelligent controller optimized with genetic algorithm, *Journal of Vibration and Control*, 25(2) (2019) 273-285.
- [28] A. Yanik, Seismic control performance indices for magneto-rheological dampers considering simple soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129 (2020).
- [29] D. Hrovat, D. Margolis, M. Hubbard, An approach toward the optimal semi-active suspension, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 110(3) (1988) 288-296.
- [30] T. Butsuen, The design of semi-active suspensions for automotive vehicles, *Massachusetts Institute of* using acceleration feedback, in: *Proc. of the 3rd Intl. Conf. on Motion and Vibr. Control*, (1996) 291-296.
- [12] S. Dyke, B. Spencer Jr, M. Sain, J. Carlson, Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction, *Smart materials and structures*, 5(5) (1996).
- [13] H.-J. Jung, I.W. Lee, B.F. Spencer Jr, State-of-the-art of MR damper-based control systems in civil engineering applications, in: *Proceedings of US-Korea Workshop on Smart Infra-Structural Systems*, (2002) 23-24.
- [14] B. Spencer Jr, S. Nagarajaiah, State of the art of structural control, *Journal of structural engineering*, 129(7) (2003) 845-856.
- [15] M. Bitaraf, O.E. Ozbulut, S. Hurlbaas, L. Barroso, Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers, *Engineering Structures*, 32(10) (2010) 3040-3047.
- [16] O.M. Elmeligy, M. Hassan, Optimum Allocation of MR Dampers within Semi-Active Control Strategies of Three-Degree-of-Freedom Systems, *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (IJES)*, 4(4) (2016) 45-49.
- [17] V. Bhaiya, S. Bharti, M. Shrimali, T. Datta, Performance of Semi-actively Controlled Building Frame Using MR Damper for Near-Field Earthquakes, in: *Recent Advances in Structural Engineering*, (2)(2019) 397-407.
- [18] G.J. Hiemenz, Y.T. Choi, N.M. Wereley, Seismic control of civil structures utilizing semi-active MR braces, *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(1) (2003) 31-44.
- [19] X.B. Nguyen, T. Komatsuzaki, Y. Iwata, H. Asanuma, Robust adaptive controller for semi-active control of uncertain structures using a magnetorheological elastomer-based isolator, *Journal of Sound and Vibration*, 434 (2018) 192-212.
- [20] H. Benioff, Mechanism and strain characteristics of the White Wolf fault as indicated by the aftershock sequence, *Bull., Calif. Div. Mines*, 171 (1955) 199-202.
- [21] S. Bhagat, A.C. Wijeyewickrema, N. Subedi, Influence of Near-Fault Ground Motions with Fling-Step and

- using multiple MR dampers, in: Proceedings of the 2nd international workshop on structural control, (1996) 163-173.
- [40] S.J. Dyke, Acceleration feedback control strategies for active and semi-active control systems: Modeling, algorithm development, and experimental verification, (1997).
- [41] A. Kaveh, S. Mohammadi, O.K. Hosseini, A. Keyhani, V. Kalatjari, Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search, Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering, 39(C1) (2015).
- [42] C.-W. Lim, Active vibration control of the linear structure with an active mass damper applying robust saturation controller, Mechatronics, 18(8) (2008) 391-399.
- [43] A.H. Heidari, S. Etedali, M.R. Javaheri-Tafti, A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD, Frontiers of Structural and Civil Engineering, 12(1) (2018) 44-57.
- [44] American Society of Civil Engineers, ASCE 7-10 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures), Reston, Virginia, (2010).
- [45] R. Zemp, J.C. de la Llera, H. Saldias, F. Weber, Development of a long-stroke MR damper for a building with tuned masses, Smart Materials and Structures, 25(10) (2016).
- Technology, (1989).
- [31] S. Dyke, B. Spencer Jr, A comparison of semi-active control strategies for the MR damper, in: Proceedings Intelligent Information Systems. IIS'97, IEEE, (1997) 580-584.
- [32] L.M. Jansen, S.J. Dyke, Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study, Journal of Engineering Mechanics, 126(8) (2000) 795-803.
- [33] G. Yang, B. Spencer Jr, J. Carlson, M. Sain, Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, Engineering structures, 24(3) (2002) 309-323.
- [34] R. Stanway, J. Sproston, N. Stevens, Non-linear identification of an electro-rheological vibration damper, IFAC Proceedings Volumes, 18(5) (1985) 195-200.
- [35] D. Gamota, F. Filisko, Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: moderate frequencies, Journal of rheology, 35(3) (1991) 399-425.
- [36] B. Spencer Jr, S. Dyke, M. Sain, J. Carlson, Phenomenological model for magnetorheological dampers, Journal of engineering mechanics, 123(3) (1997) 230-238.
- [37] G.C. Foliente, Hysteresis modeling of wood joints and structural systems, Journal of Structural Engineering, 121(6) (1995) 1013-1022.
- [38] F. Ikhouane, J. Rodellar, Systems with hysteresis: analysis, identification and control using the Bouc-Wen model, John Wiley & Sons, (2007).
- [39] S. Dyke, B. Spencer Jr, Seismic response control

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, S. A. Mousavi Gavvani, *Statistical Performance of Semi-Active Controlled 10-Storey Linear Building using MR Damper under Earthquake Motions*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(4) (2021): 1571-1590.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17037.6437](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17037.6437)



