

کنترل نیمه فعال فازای سازه‌های مجاور متصل شده با میراگر سیال مغناطیسی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

محسن بهمنی^۱، سید مهدی زهرایی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران

mzahrai@ut.ac.ir*

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۳

چکیده

خرابی‌های ناشی از برخورد سازه‌های مجاور در زلزله‌های بزرگ گذشته، اهمیت سیستم‌های کنترل سازه را برای کاهش خطر لرزه‌ای ناشی از برخورد سازه‌ها نشان داده است. اتصال ساختمان‌های مجاور با دستگاه‌های اتلاف انرژی، یک رویکرد عملی و موثر برای جلوگیری از برخورد و همچنین کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها است و این موضوع در سال‌های اخیر، یک زمینه تحقیقاتی مدنظر بوده است. در این مطالعه، برای شناخت عملکرد میراگر سیال مغناطیسی با استفاده از سیستم کنترل فازای، سازه‌های معیار سه و نه طبقه تحت تحریک لرزه‌ای دو زلزله حوزه نزدیک و دو زلزله حوزه دور با بیشینه شتاب‌های $0.1g$ تا $1g$ بررسی می‌شود. میراگر سیال مغناطیسی در تراز طبقه سوم دو سازه متصل شده است و ظرفیت تولید نیروی کنترلی معادل 1000 کیلونیوتن را دارد. سیستم فازای بر اساس جابه‌جایی طبقه سوم دو سازه با هدف کاهش خطر برخورد سازه‌ها و همچنین کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای طراحی شده است. به صورت کلی سیستم کنترلی طراحی شده تحت زلزله‌های حوزه دور در مقایسه با زلزله‌های حوزه نزدیک، عملکرد مناسب‌تری در کاهش پاسخ‌های دو سازه از خود نشان داده است و از دیدگاه کاهش احتمال برخورد سازه‌ها، سیستم فازای مورد استفاده تحت زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک، $9/71$ درصد عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

واژگان کلیدی: کنترل ارتعاشات، کنترل نیمه فعال، میراگر سیال مغناطیسی، سیستم کنترل فازای، سازه‌های مجاور

۱- مقدمه

کاهش فرکانس‌های طبیعی آنها می‌شود. در ساختمان‌های انعطاف‌پذیر با میرایی کم، پاسخ‌های دینامیکی به راحتی تحت تحریک شدید زمین و بار باد تقویت می‌شوند و به دلیل

با پیشرفت در فن‌آوری ساخت و ساز، سازه‌ها در اندازه‌های بزرگتر و با ارتفاع بیشتر ساخته می‌شوند که این امر موجب

حرکات خارج از فاز دو ساختمان، ممکن است ساختمان‌های مجاور به همدیگر برخورد کنند. بنابراین برای جلوگیری از این اتفاق، باید فاصله‌ای را بین دو سازه در نظر گرفت. ارتعاشات بیش از حد علاوه بر افزایش پاسخ‌ها، منجر به کاهش سرویس‌پذیری ساختمان شود که این موارد تلاش پژوهشگران برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها، زمینه‌های مطالعاتی زیادی برای کنترل ارتعاشات ساختمان‌ها به وجود آورده است. روش‌های کنترل ارتعاشات را می‌توان به سیستم کنترل غیرفعال، فعال و نیمه فعال طبقه‌بندی کرد. سیستم کنترل فعال ویژگی‌های سیستم غیرفعال را با ویژگی‌های سیستم کنترل فعال ترکیب می‌کند و مطالعات فراوانی اثبات کرده‌اند که سیستم کنترل نیمه فعال در کنترل ارتعاشات بزرگ ناشی از زلزله یا باد موثر است.

پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های مجاور را می‌توان با اتصال سازه‌ها به یکدیگر با استفاده از میراگر کنترل کرد. این میراگرها از نیروی تعاملی بین دو سازه مجاور استفاده می‌کنند و نیازی به جرم یا انرژی اضافی همچون میراگر جرمی تنظیم شده ندارند. علاوه بر این، در مجاورت تجهیزات کنترل می‌توان از فضای موجود به عنوان یک راه ارتباطی برای اتصال ساختمان‌ها استفاده کرد. در این تحقیق، از میراگر سیال مغناطیسی به عنوان وسیله کنترلی استفاده می‌شود. میراگرهای MR با منابع تغذیه‌ای کوچک قابل استفاده هستند و نیروی میرایی بسیار زیاد را تامین می‌کنند.

کیو^۱ و ژو^۲ [1] در سال ۲۰۰۱ امکان استفاده از میراگرهای MR^۳ و ER^۴ برای اتصال یک برج به سازه جانبی برای مقابله با آثار ضربه شلاقی ناشی از تغییر ناگهانی سختی جانبی سازه در محل اتصال دو سازه و همچنین کاهش پاسخ لرزه‌ای دو سازه را بررسی کردند. برای این کار یک الگوریتم کنترل جابه‌جایی بهینه را ارائه دادند و برای درستی آزمایشی یک برج بیست طبقه با سازه مجاور پنج طبقه را مورد بررسی قرار دادند. لازم به ذکر است که در این تحقیق سختی عضوی که میراگر را به

سازه‌ها وصل می‌کند نیز در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میراگرهای MR و ER بطور موثری اثر ضربه شلاقی را کاهش داده و باعث کاهش پاسخ لرزه‌ای هر دو سازه می‌شوند.

نی^۵ و همکاران [2] در سال ۲۰۰۲ با یک تحقیق آزمایشگاهی تاثیر کنترل نیمه فعال با میراگر MR در سازه‌های مجاور را بررسی کردند. در این بررسی مدل دو سازه مجاور با تعداد طبقات هشت و دوازده و با مقیاس ۱:۱۵ مورد بررسی قرار گرفت و برای اعمال تحریک زلزله از میز لرزان استفاده شد. در این تحقیق، استراتژی کنترل بهینه تصادفی پیش گرفته شد و تاثیر استفاده از میراگر در طبقات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این کار آزمایشگاهی نشان داد که برای همه آزمایش‌ها استفاده از کنترل نیمه فعال بسیار موثرتر از کنترل غیرفعال بوده که نشان از موثر بودن کنترل نیمه فعال با میراگر MR برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مجاور دارد. همچنین نتایج نشان داد که قابلیت کاهش پاسخ لرزه‌ای وقتی میراگر در بالاترین طبقه سازه با تعداد طبقه کمتر قرار می‌گیرد، بهترین کارایی را دارد و هرچه محل قرارگیری میراگر در طبقات پایین‌تر باشد، کارایی کنترل نیمه فعال کمتر می‌شود.

بارتی^۶ و همکاران [3] در سال ۲۰۱۰ موثر بودن میراگر MR برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های چندطبقه مجاور را تحت استراتژی‌های مختلف از قبیل کنترل نیمه فعال، غیرفعال با ولتاژ صفر و غیرفعال با ولتاژ غیر صفر ثابت اعمالی بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که از بین سه استراتژی بررسی شده، استراتژی کنترل نیمه فعال از همه موثرتر بوده و در کل هر سه استراتژی در کنترل پاسخ موثر هستند که قابلیت میراگر MR در کاهش پاسخ لرزه‌ای را نشان می‌دهد حتی وقتی که الگوریتم کنترلی به کار گرفته نمی‌شود.

شهیدزاده و همکاران [4] در سال ۲۰۱۱ استفاده از میراگر MR برای اتصال دو سازه مجاور را در حالتی که به صورت همزمان سازه بلندتر خود به میراگر MR مجهز است، بررسی

کردند. کنترل کننده مورد استفاده در این تحقیق، کنترل کننده فازی بوده و نتایج تحقیق نشان داد که کنترل بکار گرفته شده در کاهش پاسخ ها موثر بوده و باعث کاهش قابل توجه بیشترین جابه جایی و شتاب به صورت همزمان می شود.

کیم^۱ و کنگ^۲ [5] در سال ۲۰۱۱ در تحقیق خود، یک مدل کنترل هیبرید میراگر MR را برای کاهش پاسخ لرزه ای سازه های مجاور بکار بردند. این مدل در واقع ترکیبی از مدل های کنترل Groundhook و Skyhook بود و نتایج تحقیق نشان از موثر بودن این کنترل در کاهش پاسخ های لرزه ای دو سازه مجاور داشت.

مرتآ^۳ و همکاران [6] در سال ۲۰۱۱ در تحقیق خود، استفاده از کنترل کننده LQR^۴ برای کاهش پاسخ سازه های مجاور که با میراگر MR به هم متصل شده اند و تحت تحریک لرزه ای قرار دارند، بررسی کردند. در این تحقیق برای درستی آزمایی از مدل دو سازه پنج و سه طبقه استفاده شد و نتایج تحقیق نشان داد که اتصال سازه های مجاور با میراگر MR که با کنترل کننده LQR کنترل می شود، یک روش قابل اتکا برای کاهش پاسخ لرزه ای است.

مهمت^۵ و هادی^۶ [7] در سال ۲۰۱۴ یک استراتژی طراحی بهینه را بر پایه الگوریتم ژنتیک برای جلوگیری از خطر برخورد دو سازه مجاور و همچنین کاهش پاسخ لرزه ای دو سازه ارائه دادند. در این تحقیق از کنترل کننده فازی برای محاسبه ولتاژ اعمالی به میراگر استفاده شد و علاوه بر این از کنترل کننده های LQR و LQG^۷ برپایه CVL^۸ برای مقایسه نتایج بدست آمده استفاده شد. این تحقیق اهداف اصلی طراحی بهینه را اعمال می کند به صورتی که نه تنها کاهش پاسخ لرزه ای را مدنظر قرار می دهد بلکه هزینه های کلی سیستم میراگر را کاهش می دهد. برای درستی آزمایی از مدل سازه های ده و بیست طبقه متصل شده با میراگر MR استفاده شد و نتایج تحقیق موثر بودن استفاده از

این کنترل کننده را نشان داد که باعث بهبود عملکرد لرزه ای و همچنین کاهش هزینه ها و اقتصادی تر شدن طرح شد. به عنوان یک نتیجه دیگر کاهش تعداد میراگر مورد استفاده منجر به کارایی بیشتر سیستم شد و اینگونه می توان نتیجه گرفت که برای پاسخ دینامیکی سیستم، کاهش تعداد میراگرها می تواند به صورت موثرتری نسبت به افزایش تعداد میراگر مورد بررسی قرار گیرد. شریمالی^۹ و همکاران [8] در سال ۲۰۱۵ مقایسه ای بین عملکرد سیستم کنترل نیمه فعال و هیبرید برای کنترل پاسخ سازه های مجاور انجام دادند. در این تحقیق از میراگر MR و جداگر لرزه ای الاستومتریک استفاده شد و نتایج تحقیق نشان داد که استراتژی کنترل هیبرید ارائه شده نسبت به کنترل نیمه فعال در کاهش پاسخ های لرزه ای موثر بوده و همچنین در مقابله با برخورد دو سازه موثرتر است.

عبدالدایم^{۱۰} و همکاران [9] در سال ۲۰۱۷ امکان مقاوم سازی یک سازه ضعیف تر با اتصال آن به سازه قوی تر را بررسی نمودند. در این تحقیق یک سازه ده طبقه ضعیف تر به سازه مجاور قوی تر که از طریق میراگر MR متصل شده و کنترل ارتعاشات با استفاده از کنترل کننده فازی انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که این استراتژی در مقاوم سازی سازه ضعیف از نظر تغییر مکان، برش پایه و گریز سازه بسیار موثرتر است و همچنین در کاهش احتمال برخورد دو سازه نیز بسیار موثر است. الفهداوی^{۱۱} و همکاران [10] در سال ۲۰۱۸ کاهش پاسخ های لرزه ای سازه های مجاور چند طبقه که از طریق میراگر MR به هم متصل شده اند را با استفاده از روش کنترل سازگار ساده (SAC^{۱۲}) بررسی کردند. در این بررسی، کاهش جرم و سختی به عنوان نتیجه ای از خرابی در سیستم سازه ای در نظر گرفته شد و کارایی این کنترل کننده در حالت وجود خرابی و همچنین حالتی که هنوز سالم است، بررسی شد. نتایج این تحقیق، موثر بودن استفاده از این کنترل کننده را نشان داد و

8. Clipped Voltage Law

9. Shrimali

10. Abdeddaim

11. Al-Fahdawi

12. Simple Adaptive Control

1. Kim

2. Kang

3. Morta

4. Linear Quadratic Regulator

5. Mehmet

6. Hadi

7. Linear Quadratic Gaussian

همچنین نشان داد که کاهش پاسخ ها در سازه بزرگ تر به نسبت سازه کوچک تر بیشتر است.

عظیمی و مولایی [11] در سال ۲۰۲۰ با الهام گرفتن از پدیده هوش جمعی در طبیعت، یک روش کنترل جدید، معروف به کنترل موازی مبتنی بر ازدحام (SPC^1)، برای بهبود عملکرد لرزه ای و به کمتر رساندن خطرات برخورد سازه های مجاور با به اشتراک گذاری داده های پاسخ در بین سطوح مختلف ساختمان های مجاور به وسیله یک شبکه از حسگرهای بی سیم (WSN^2)، را ارائه کردند. برای تایید موثر بودن سیستم پیشنهادی، یک مدل عددی از سازه سه بعدی ۱۵ طبقه تحت رکوردهای زلزله مختلف و همچنین سیستم های کنترلی مانند کنترل غیرفعال، کنترل فازای، LQR و سیستم کنترل پیشنهادی بحث و بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت شکست در سیستم کنترل، و همچنین خرابی در عناصر سازه ای، روش پیشنهادی می تواند خرابی موجود در ساختمان را تشخیص داده و با استفاده از سیستم کنترل فازای اصلاح شده، نیروهای کنترل در ساختمان های مجاور دیگر را به روزرسانی کند و با به حداقل رساندن پاسخ ها از برخورد سازه ها جلوگیری کند.

در این تحقیق، استفاده از میراگر سیال مغناطیسی برای کاهش احتمال برخورد دو سازه و همچنین بهبود پاسخ های لرزه ای دو سازه تحت زلزله های حوزه دور و حوزه نزدیک، مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. مقدار ولتاژ اعمالی به میراگر در هر لحظه توسط یک سیستم کنترل فازای طراحی شده متناسب با موضوع مورد بحث محاسبه می شود. در سال های اخیر مطالعات زیادی در زمینه استفاده از سیستم های هوشمند همچون سیستم کنترل فازای در بهبود عملکرد لرزه ای سازه های مجاور صورت گرفته است ولی بررسی مشخصی روی چگونگی و تفاوت عملکرد این سیستم های کنترل تحت زلزله های حوزه دور و نزدیک انجام نشده است. در این مطالعه، این امر به طور خاص و با در نظر گرفتن دو سازه مجاور تحت

تحریک چهار زلزله متفاوت در بیشینه شتاب های مختلف مورد بررسی و بحث قرار می گیرد. الگوریتم فازای یک چهارچوب ساده و در عین حال قدرتمند را برای پیاده سازی سیستم کنترل ارتعاش سازه ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و پیچیدگی های موضوع مورد بحث ارائه می کند که در تحقیق جاری، از قابلیت های منحصربه فرد سیستم فازای برای کنترل ارتعاشات دو سازه تحت زلزله های مختلف با محتوای فرکانسی متفاوت استفاده می شود.

۲- مدل سازی عددی و رفتار دینامیکی میراگر

در این مطالعه از سازه های معیار طراحی شده برای پروژه SAC^3 در منطقه کالیفرنیا و لس آنجلس استفاده شده است. همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می شود، دو سازه معیار سه و نه طبقه در تراز طبقه سوم از طریق میراگر سیال مغناطیسی به یکدیگر متصل شده اند. این سازه ها در نرم افزار اجزا محدود $OpenSees$ مدل شده اند و رفتار سازه ای حین انجام تحلیل های دینامیکی، خطی فرض می شود. دوره تناوب مود غالب در سازه سه طبقه برابر $1/01$ و در سازه نه طبقه برابر $2/27$ ثانیه است [12].

از آنجایی که در این مطالعه علت اصلی استفاده از میراگر برای اتصال دو سازه، کاهش خطر برخورد دو سازه حین وقوع زلزله است و بیشترین جابه جایی ها در طبقه آخر سازه کوتاه مرتبه اتفاق می افتد، موقعیت میراگر سیال مغناطیسی در تراز طبقه آخر سازه سه طبقه در نظر گرفته شده است. ویژگی اصلی مایعات MR توانایی تغییر برگشت پذیر آنها از حالت سیال ویسکوز روان به ماده نیمه جامد با مقاومت تسلیم قابل کنترل در چند میلی ثانیه است. این تغییر که با افزایش یا کاهش در شدت میدان مغناطیسی صورت می گیرد، آنها را تبدیل به میراگرهایی قابل کنترل نموده است. یکی از مزایای این نوع از میراگرها در مقابل سایر کاهنده های ارتعاشی نیمه فعال در این است که هیچ قسمت متحرکی به جز پیستون ها نداشته و به همین علت بسیار ساده و قابل اعتماد

برای بیشترین استفاده از ویژگی‌های منحصربه‌فرد میراگرهای سیال مغناطیسی، بسیار مهم است که از مدلی استفاده کنیم که خاصیت رفتار ذاتی غیرخطی آن را بطور مناسب توصیف کند. تا به امروز مدل‌های زیادی ارائه شده است که در این تحقیق از مدل بوک-ون^۱ به دلیل سادگی و قدرت بالا در توصیف رفتار میراگر استفاده شده است. یک مدل ساده مکانیکی متشکل از یک المان بوک-ون به موازات یک میراگر ویسکوز که در شکل (۲) نمایش داده شده است، بر اساس مطالعات و آزمایشات بسیاری نشان داده شده است که قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار یک میراگر MR اولیه را در طیف وسیعی از ورودی‌ها دارد. همچنین نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی مختلف نشان می‌دهد که این مدل برای شبیه‌سازی میراگر MR در مقیاس واقعی نیز عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد.

شکل ۲. مدل بوک-ون برای میراگر سیال مغناطیسی [۱۳]

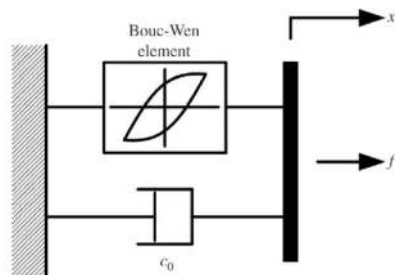


Fig. 2. Bouc-Wen model for MR damper

نیروی f تولید شده توسط میراگر MR بر اساس مدل بوک-ون از روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌شود.

$$f = c_0 \dot{x} + a z \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |\dot{z}|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (2)$$

در روابط بالا، x و $\dot{x}$ به ترتیب جابه‌جایی و سرعت میراگر MR و z متغیر تکاملی^۲ است که وابستگی تاریخیچه پاسخ‌ها را در نظر می‌گیرد. با افزودن پارامترهای γ ، β ، n و A به مدل، می‌توان رفتار خطی باربرداری و انتقال از ناحیه تسلیم‌نشده به تسلیم‌شده را در نظر گرفت. وابستگی عملکردی پارامترهای میراگر به ولتاژ موثر u در روابط (۳ و ۴) مدل شده

هستند. از ویژگی‌های خوب میراگر MR می‌توان به قابلیت استهلاك بالای انرژی، عملکرد پایدار در شرایط دمایی مختلف، نیاز به جریان و ولتاژ پایین به گونه‌ای که با یک باتری قابل تامین است و پاسخ سریع در چند میلی‌ثانیه اشاره کرد.

شکل ۱. مدل سازه‌های مجاور متصل شده با میراگر سیال مغناطیسی

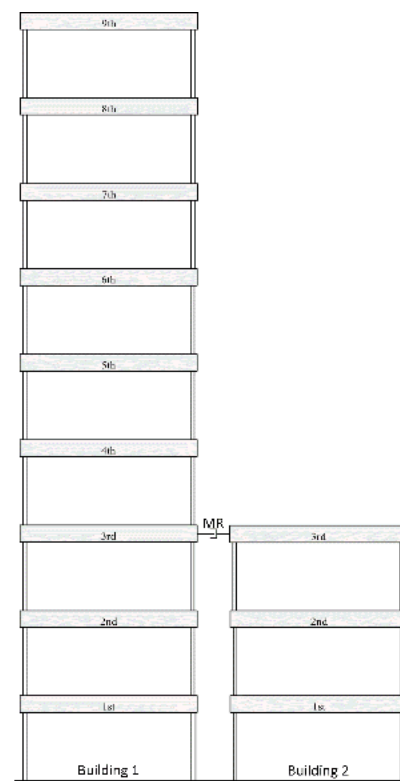


Fig. 1. Adjacent buildings structural model

در چند دهه اخیر مطالعات زیادی در مورد طراحی سیستم‌های حاوی مایعات مغناطیسی بیشتر برای کنترل ارتعاش و همچنین برای کاربردهای دیگر انجام شده است. با این حال، آماده سازی و نگهداری سیالات مغناطیسی با چالش‌های متعددی همراه است. رسوب گذاری یک چالش بزرگ است حتی وقتی که برای دوره‌های زمانی متوسط استفاده شود. تراکم ذرات پلازیده شده حین استفاده، زنگ‌زدگی و پوسته شدن، سایر مشکلات احتمالی در استفاده از این میراگرها هستند.

است.

۳- سیستم کنترل نیمه فعال

هنگامی که از یک روش کنترل مبتنی بر تئوری مجموعه های فازی برای کنترل ارتعاش یک میراگر استفاده می شود، سیستم استفاده شده دارای یک قدرت ذاتی است و مواجهه با عدم قطعیت داده های ورودی از حسگرها را بهبود می بخشد. علاوه بر این، سیستم فازی، توانایی در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه را دارد زیرا در این حالت به یک مدل ریاضی دقیق از سازه مورد بررسی نیازی نیست. ایده اصلی سیستم استنتاج کنترل فازی مبتنی بر سه بخش اساسی است: فازی سازی^۲، استنتاج قاعده فازی متشکل از قوانین اگر-آنگاه^۳ فازی و تفکیک فازی^۴ مرحله اول فازی سازی نامیده می شود که شامل تبدیل مقادیر واضح ورودی به مقادیر زبانی فازی از طریق توابع عضویت^۵ اختصاص یافته به هر ورودی و خروجی است. قدم بعدی در طراحی سیستم فازی، اعمال مجموعه ای از قوانین اگر-آنگاه می باشد. در این بخش، پایگاه قوانین فازی به منظور ایجاد رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد می شود و با استفاده از سازوکار استنتاج فازی، قوانین فازی به منظور ایجاد یک خروجی بر اساس مقادیر ورودی ارزیابی می شوند. در مرحله آخر، خارج کردن از زبان فازی، با هدف تبدیل متغیرهای خروجی فازی به مقادیر واضح انجام می گیرد. عملکرد یک کنترل کننده فازی بستگی به پارامترهای مختلف طراحی مانند تعریف توابع عضویت و قوانین فازی دارد. علاوه بر این، تدوین قوانین فازی مؤثر و قابل اعتماد یکی دیگر از عوامل مهم برای دستیابی به عملکرد مطلوب است.

علت اصلی برخورد ساختمان های مجاور، ارتعاشات ناهمبند سازه ها در زمان وقوع زلزله است. برای جلوگیری از ارتعاشات غیرهمسو سازه ها حین وقوع زلزله، قوانین فازی مورد استفاده در این تحقیق به گونه ای تعریف شده اند که سازه ها در هر لحظه در یک جهت یکسان حرکت کنند. به عنوان نمونه، اگر مقدار تغییر مکان ساختمان (۱)، مثبت بزرگ باشد و تغییر مکان ساختمان (۲) منفی بزرگ باشد که شامل یک لرزش

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (4)$$

علاوه بر این، به علت عدم توانایی میراگر در هماهنگی آنی با ولتاژ اعمالی، برای محاسبه تاخیر زمانی در پاسخ میراگر به تغییرات ورودی، رابطه (۵) در نظر گرفته می شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (5)$$

در رابطه بالا، v و η به ترتیب ولتاژ اعمالی به سیستم کنترلی و ثابت زمانی هستند. پارامترهای میراگر مورد استفاده در این تحقیق به گونه ای انتخاب شده اند که میراگر ظرفیت تولید نیروی ۱۰۰۰ کیلو نیوتن را دارد و ولتاژ اعمالی به میراگر می تواند مقادیری بین ۰ و ۱۰ ولت را داشته باشد.

برای درستی آزمایشی مدل بوک-ون استفاده شده برای شبیه سازی رفتار دینامیکی میراگر MR از نتایج رفتار میراگر مدل سازی شده در مطالعه اک^۱ و همکاران [13] استفاده شده است. نمودار رفتار چرخه ای میراگر برای ولتاژهای اعمالی صفر، ۵ و ۱۰ ولت در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل ۳. نمودار رفتار چرخه ای میراگر سیال مغناطیسی

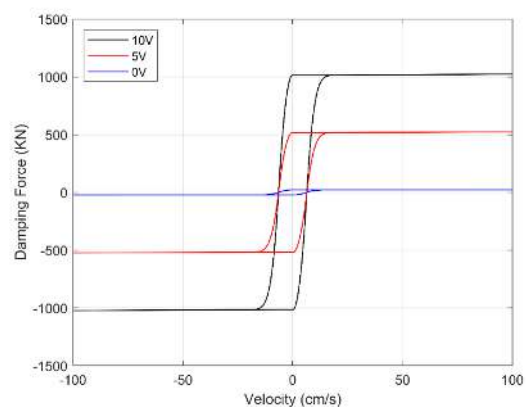


Fig. 3. The control force - velocity hysteresis loops of MR damper

اقتباس شده است. لازم به ذکر است که تعداد و شکل توابع عضویت با انجام سعی و خطاهای زیاد و مقایسه با دیگر حالت‌ها انتخاب شده‌اند.

غیرهمبستگی و خطر بالای برخورد ساختمان‌ها است، در این حالت برای تولید نیروی بیشتر در میراگر، مقدار ولتاژ اعمالی بزرگ خواهد بود. مجموعه قوانین فازی مورد استفاده در این تحقیق از مطالعه عبدالیم^۱ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۶

شکل ۴. روند کلی انجام تحلیل دینامیکی

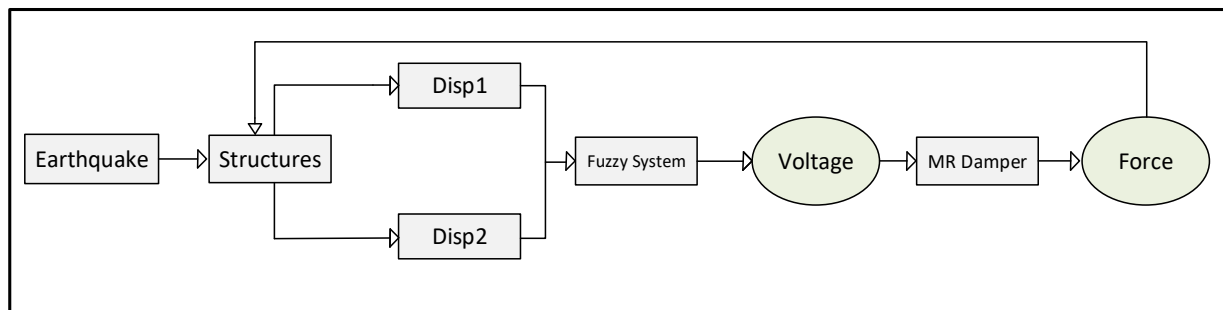


Fig. 4. Procedure of dynamic analysis

فازی با نام FIS هفت مجموعه فازی برای پارامترهای ورودی با نام‌های PL, PM, PS, ZE, NM, NS, NL و شش مجموعه فازی برای پارامترهای خروجی با نام‌های VL, M, L, S, ZE, VS در نظر گرفته شده است که متغیرهای زبانی مربوط به مجموعه‌های ورودی و خروجی به ترتیب در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. برای تغییر مکان به عنوان یک متغیر ورودی، P و N از مقادیر مثبت و منفی استفاده می‌کنند.

شکل ۵. روند کلی سیستم فازی نوع-۱

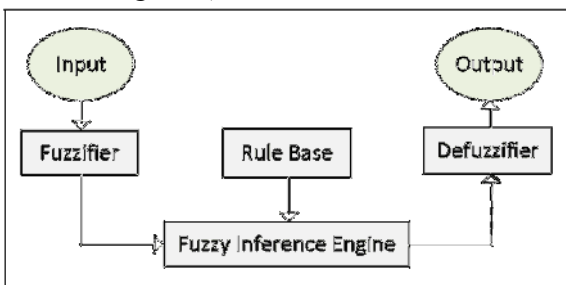


Fig. 5. Overall layout of fuzzy system

به دلیل سادگی ایجاد ارتباط بین دو نرم افزار MATLAB و OpenSees، برای پیاده‌سازی الگوریتم منطق فازی و محاسبه نیروی کنترلی از نرم افزار MATLAB بطور موازی با نرم‌افزار OpenSees و به صورت لینک شده استفاده شده است. همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، در فرایند اعمال سیستم کنترلی روی سازه‌های مجاور، با استفاده از داده‌های جابه جایی سازه‌ها در تراز طبقه بام سازه کوچک‌تر به عنوان ورودی سیستم فازی، ولتاژ اعمالی به میراگر محاسبه می‌شود. نیروی کنترلی محاسبه شده در نرم افزار MATLAB، به سازه‌ها اعمال می‌شود و تحلیل یک گام به جلو برده می‌شود. مراحل ذکر شده به این صورت در یک حلقه و تا پایان اعمال گام‌های تحلیل تکرار می‌شوند.

توابع عضویت و همچنین قوانین فازی از عوامل تاثیرگذار در عملکرد سیستم فازی هستند. در این مطالعه از یک سیستم فازی با نام FIS استفاده شده که قوانین فازی تعریف شده برای سیستم کنترلی در جدول (۱) نمایش داده شده است. مقادیر ورودی برای سیستم های FIS، جابه‌جایی طبقه سوم سازه سه طبقه و نه طبقه هستند که با DISP1 و DISP2 در جداول مربوط به قوانین فازی سیستم نشان داده شده‌اند. در الگوریتم

شکل ۷. توابع عضویت برای متغیر خروجی ولتاژ

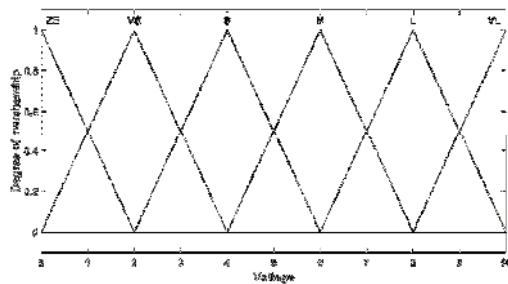


Fig. 7. Membership functions of voltage

۴- بررسی نتایج عددی

برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی، سازه ها تحت اثر تحریک لرزه ای زلزله های نشان داده شده در جدول (۴) قرار گرفته اند و برای بررسی رفتاری سیستم کنترلی در مقادیر مختلف بیشینه شتاب^۱ رکوردهای زلزله، آنالیز تاریخیچه زمانی فزاینده^۲ در نظر گرفته شده است. در شکل (۸ و ۹) رفتار هیستریزس میراگر با توجه به جابه جایی و سرعت میراگر تحت زلزله کرن کانتی نشان داده شده است. همچنین برای ارزیابی تاثیر استفاده از میراگر سیال مغناطیسی به عنوان یک وسیله کنترلی، معیارهای ارزیابی مربوط به بیشترین جابه جایی، شتاب، برش پایه، تغییر مکان جانبی و همچنین خطر برخورد دو سازه با یکدیگر همان گونه که در جدول (۵) نشان داده شده است، مورد بررسی قرار می گیرند. معیارهای ارزیابی معرفی شده در واقع نسبت پاسخ های سازه ها در حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده هستند.

جدول ۴. جزئیات رکورد زلزله های استفاده شده در تحلیل های تاریخیچه زمانی

Earthquake	Type	Station	PGA(g)
El Centro	Far-field	El Centro Array #9	0.28
Kern County	Far-field	Taft Lincoln School	0.18
kobe	Near-field	KJMA	0.83
Northridge	Near-field	Sylmar - Olive	0.84

Table 4. Details for earthquake records used for time-history analysis

جدول ۱. قوانین استنتاجی فازی برای سیستم فازی

		DISP2						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
DISP1	NL	ZE	VS	S	M	L	VL	VL
	NM	VS	S	S	M	L	L	VL
	NS	S	S	S	M	M	M	L
	ZE	M	M	M	ZE	M	M	M
	PS	L	M	M	M	S	S	S
	PM	VL	L	L	M	S	S	VS
	PL	VL	VL	L	M	S	VS	ZE

Table 1. Fuzzy rule base for fuzzy system

جدول ۲. توصیف متغیرهای زبانی برای جابه جایی

Linguistic variable	Definition
NL	Negative large
NM	Negative medium
NS	Negative small
ZE	Zero
PS	Positive small
PM	Positive medium
PL	Positive large

Table 2. Description of fuzzy variables for displacement

جدول ۳. توصیف متغیرهای زبانی برای ولتاژ

Linguistic variable	Definition
ZE	Zero
S	Small
M	Medium
L	Large
VL	Very Large

Table 3. Description of fuzzy variables for voltage

در شکل های (۶ و ۷)، جزئیات مربوط به متغیرهای ورودی و خروجی سیستم کنترلی FIS با تابع عضویت مثلثی به ترتیب نشان داده شده است.

شکل ۶. توابع عضویت برای متغیر ورودی جابه جایی

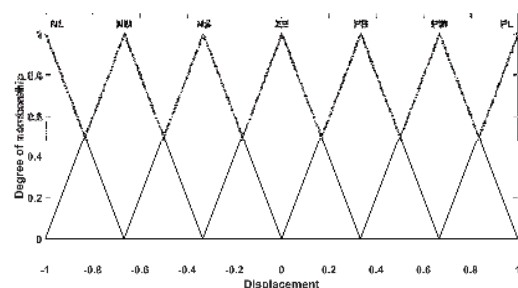


Fig. 6. Membership functions of displacement

کلی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم کنترلی طراحی شده تحت زلزله‌های حوزه دور در مقایسه با زلزله‌های حوزه نزدیک، عملکرد مناسب‌تری در کاهش پاسخ‌های دو سازه از خود نشان داده است. همانطور که در شکل (۲۵) مشاهده می‌شود، سیستم فازی مورد استفاده تحت زلزله‌های حوزه دور نسبت به زلزله های حوزه نزدیک و بر اساس معیارهای ارزیابی J1، J2، J3 و J4 به ترتیب در سازه سه طبقه ۱۷/۳۵، ۴/۹۴، ۳/۵۸، ۱۲/۱۷ درصد و در سازه نه طبقه ۷/۹۳، ۷/۰۵، ۰/۶۷، ۹/۱۳ درصد عملکرد بهتری از خود نشان داده است. همچنین بر اساس معیار ارزیابی J5، سیستم فازی مورد استفاده تحت زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک، ۹/۷۱ درصد احتمال برخورد دو سازه با یکدیگر را کاهش داده است. علت این اتفاق، محتوای فرکانسی متفاوت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک و وجود پالس های شدید در ابتدای رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک است

شکل ۸. رفتار هیستریزیس میراگر تحت زلزله کرن‌کانتی (نیرو-جابجایی)

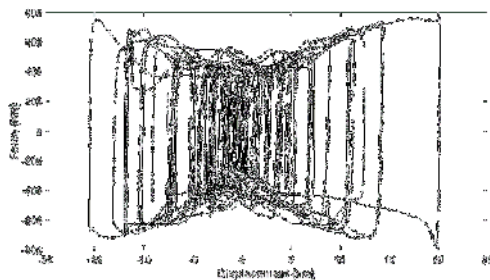


Fig. 8. Hysteresis behavior of the damper under Kern-County earthquake (Force-Displacement)

شکل ۹. رفتار هیستریزیس میراگر تحت زلزله کرن‌کانتی (نیرو-سرعت)

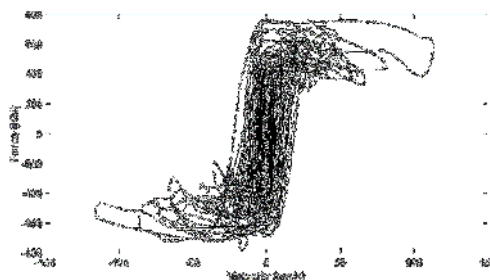


Fig. 9. Hysteresis behavior of the damper under Kern-County earthquake (Force-Velocity)

جدول ۵. معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی

title	equation	criterion
Displacement of roof story	$\frac{\max x_c(t) }{\max x_{un}(t) }$	J_1
Acceleration of 9th story	$\frac{\max \ddot{x}_c(t) }{\max \ddot{x}_{un}(t) }$	J_2
Base shear of structure	$\frac{\max V_c(t) }{\max V_{un}(t) }$	J_3
Relative displacement of structure	$\frac{\max d_c(t) }{\max d_{un}(t) }$	J_4
Minimum required gap	$\frac{\max \Delta_c(t)}{\max \Delta_{un}(t)}$	J_5

Table 5. The performance criteria as ratio of maximum responses of controlled system to that of uncontrolled system

میانگین مقادیر معیارهای ارزیابی معرفی شده تحت چهار زلزله و در بیشینه‌شتاب‌های مختلف برای سازه‌های سه و نه طبقه در شکل (۱۰ تا ۱۴) نشان داده شده‌اند. با بررسی و مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترل مختلف می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی سیستم کنترلی فازی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها حین اعمال رکورد زلزله و همچنین کاهش خطر برخورد دو سازه با یکدیگر موثر واقع شده است که این موضوع در بیشینه شتاب‌های مختلف قابل مشاهده است. بنابراین و با توجه به تحلیل‌های دینامیکی انجام‌شده در بیشینه شتاب‌های مختلف به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم کنترل توانسته است در بیشینه‌شتاب‌های مختلف عملکرد مناسبی از خود نشان دهد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که نیروی کنترلی به دست آمده از سیستم فازی معرفی شده، در کاهش پاسخ‌های سازه سه طبقه نسبت به سازه نه طبقه، موثرتر بوده است.

به طور متوسط، معیار ارزیابی J1 با استفاده از سیستم کنترل فازی برای سازه سه طبقه تحت زلزله های حوزه دور، ۳۱/۳ درصد و تحت زلزله های حوزه نزدیک ۱۳/۹۵ درصد کاهش یافته است درحالی‌که این مقدار برای سازه نه طبقه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به ترتیب ۱۵/۰۲ و ۷/۰۸ درصد است که نشانگر تاثیرپذیری بیشتر سازه سه طبقه نسبت به سازه نه طبقه از سیستم کنترلی مورد استفاده است. مقایسه سایر معیارهای ارزیابی و همچنین سیستم‌های کنترل نسبت به یکدیگر برای دو سازه در شکل (۲۵) نشان داده شده است. به صورت

شکل ۱۴. مقادیر میانگین معیار ارزیابی J_5 برای چهار زلزله

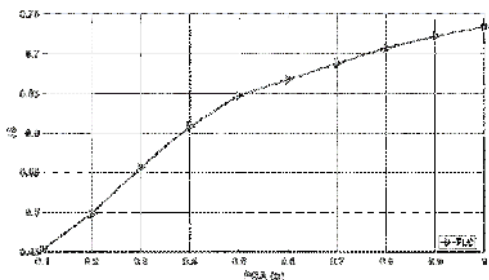


Fig. 14. Mean values of performance criteria of J_5 for four earthquakes

در شکل های (۱۵ تا ۱۸)، مقادیر بیشینه جابه جایی طبقات دو سازه تحت بیشینه شتاب $0.5g$ زلزله های مورد استفاده در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده، نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، سیستم کنترل فازای به خوبی توانسته است مقادیر حداکثر جابه جایی تمامی طبقات سازه ها را در مقایسه با حالت کنترل نشده کاهش دهد که این موضوع در زلزله های حوزه دور و به ویژه در سازه سه طبقه مشهودتر است.

شکل ۱۵. بیشترین جابه جایی طبقات دو سازه تحت زلزله السترو در بیشینه شتاب $0.5g$

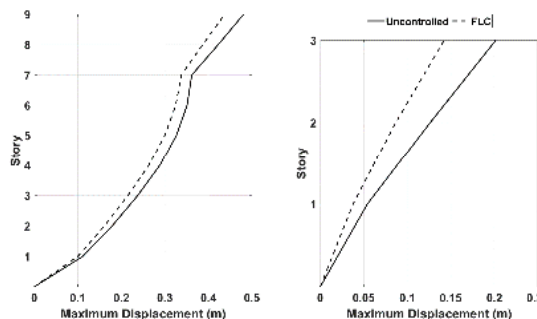


Fig. 15. Distribution of maximum floor displacement, El Centro, PGA=0.5g

شکل ۱۶. بیشترین جابه جایی طبقات دو سازه تحت زلزله کرن کانتی در بیشینه شتاب $0.5g$

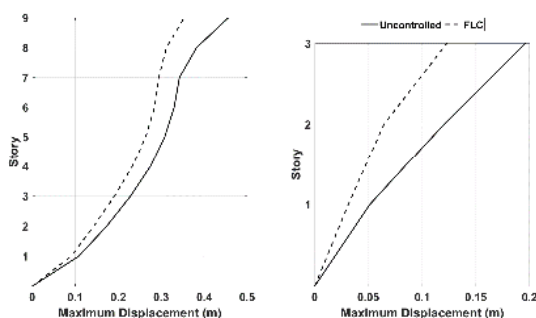


Fig. 16. Distribution of maximum floor displacement, Kern County, PGA=0.5g

شکل ۱۰. مقادیر میانگین معیار ارزیابی J_1 برای چهار زلزله

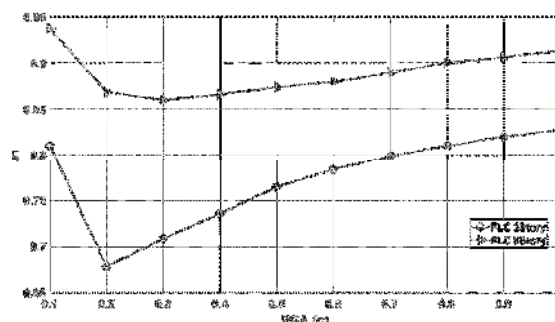


Fig. 10. Mean values of performance criteria of J_1 for four earthquakes

شکل ۱۱. مقادیر میانگین معیار ارزیابی J_2 برای چهار زلزله

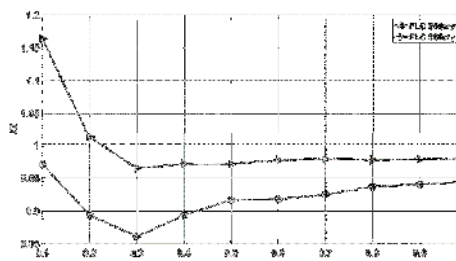


Fig. 11. Mean values of performance criteria of J_2 for four earthquakes

شکل ۱۲. مقادیر میانگین معیار ارزیابی J_3 برای چهار زلزله

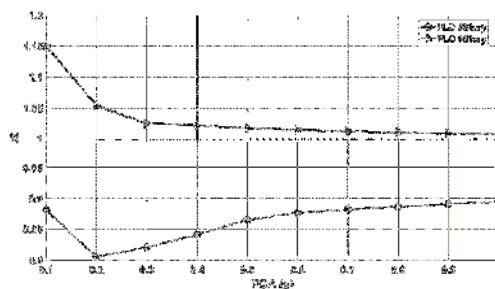


Fig. 12. Mean values of performance criteria of J_3 for four earthquakes

شکل ۱۳. مقادیر میانگین معیار ارزیابی J_4 برای چهار زلزله

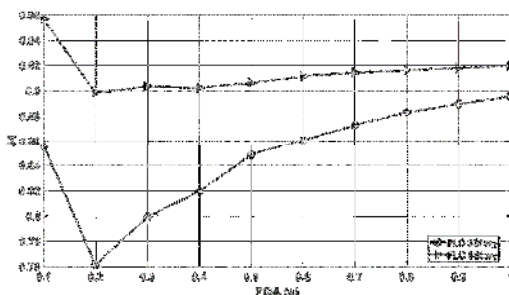


Fig. 13. Mean values of performance criteria of J_4 for four earthquakes

محل اتصال میراگر کاهش پاسخ‌ها مشهودتر است که این عامل خود در کاهش احتمال برخورد دو سازه تأثیرگذار است.

علاوه بر این در شکل (۲۵) نموداری مقایسه‌ای از میانگین بهبود پاسخ‌های دو سازه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک و همچنین تفاوت عملکرد سیستم کنترلی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک ارائه شده است. با توجه به این شکل نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که از دیدگاه کاهش احتمال برخورد سازه‌ها (معیار J5)، سیستم کنترل فازی مورد استفاده در این تحقیق، تحت زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک، ۹/۷۱ درصد عملکرد بهتری از خود نشان داده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل دینامیکی، سیستم فازی مورد استفاده تحت زلزله‌های حوزه دور در مقایسه با زلزله‌های حوزه نزدیک و بر اساس معیارهای ارزیابی J1 (بیشترین تغییر مکان طبقه بام)، J2 (بیشترین شتاب طبقه بام)، J3 (بیشترین برش پایه) و J4 (بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقات) در ساختمان سه طبقه به ترتیب ۱۷/۳۵، ۴/۹۴، ۳/۵۸، ۱۲/۱۷ درصد و در ساختمان نه طبقه ۷/۹۳، ۷/۰۵، ۰/۶۷، ۹/۱۳ درصد عملکرد بهتری را نشان داده است.

شکل ۱۹. تغییر مکان طبقه آخر سازه سه طبقه تحت زلزله السنترو در بیشینه شتاب 0.5g

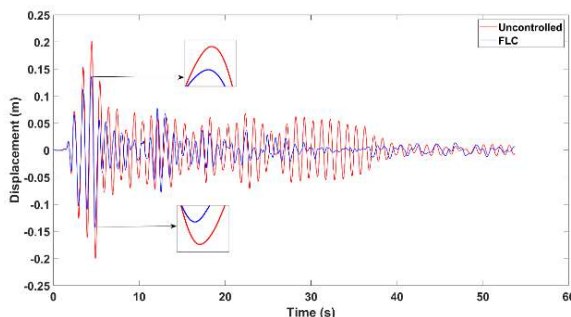


Fig. 19. The roof displacement for the 3-story structure under the El Centro earthquake, PGA = 0.5g

شکل ۱۷. بیشترین جابه‌جایی طبقات دو سازه تحت زلزله کوبه در بیشینه شتاب 0.5g

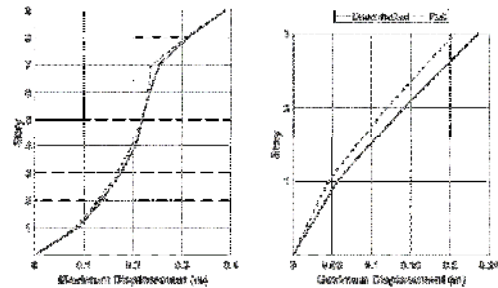


Fig. 17. Distribution of maximum floor displacement, Kobe, PGA=0.5g

شکل ۱۸. بیشترین جابه‌جایی طبقات دو سازه تحت زلزله نورثریج در بیشینه شتاب 0.5g

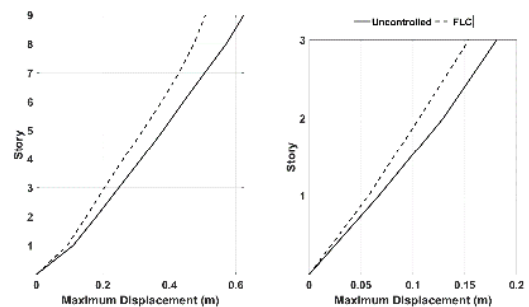


Fig. 18. Distribution of maximum floor displacement, Northridge, PGA=0.5g

همچنین در شکل (۱۹ تا ۲۲)، تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقه بام دو سازه تحت زلزله السنترو (حوزه دور) و زلزله کوبه (حوزه نزدیک) در بیشینه شتاب 0.5g نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص شده است، سیستم‌های کنترلی به خوبی توانسته‌اند مقادیر بیشترین جابه‌جایی طبقه بام سازه سه و نه طبقه را کاهش دهند که این موضوع تحت زلزله‌های حوزه دور مشهودتر است.

در شکل‌های (۲۳ و ۲۴) تاریخچه زمانی جابه‌جایی تمامی طبقات دو سازه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک نشان داده شده است که می‌توان نتیجه گرفت که اتصال دو سازه با میراگر سیال مغناطیسی و کنترل نیروی میراگر توسط الگوریتم فازی اشاره‌شده باعث بهبود پاسخ دو سازه در تمامی طبقات شده است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که تحت زلزله‌های حوزه دور، یکنواختی بیشتری در عملکرد سیستم کنترلی در کاهش جابه‌جایی طبقات وجود دارد. همچنین در طبقات نزدیک به

شکل ۲۳. درصد بهبود جابه جایی طبقات تحت زلزله های حوزه دور و نزدیک در سازه سه طبقه

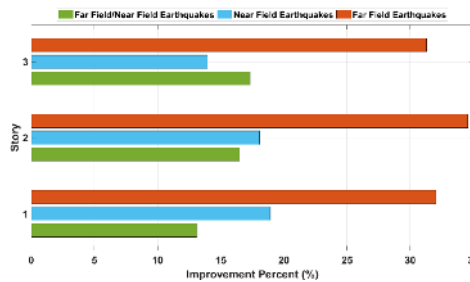


Fig. 23. The improvement percentages of displacements for the 3-story structure under far and near-field earthquakes

شکل ۲۴. درصد بهبود جابه جایی طبقات تحت زلزله های حوزه دور و نزدیک در سازه نه طبقه

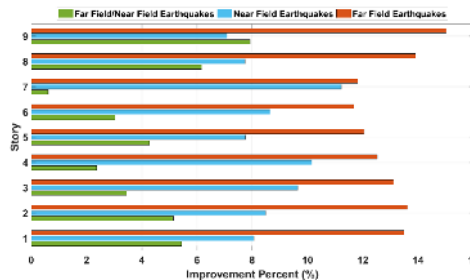


Fig. 24. The improvement percentages of displacements for the 9-story structure under far and near-field earthquakes

شکل ۲۵. درصد بهبود معیارهای ارزیابی تحت زلزله های حوزه دور و نزدیک

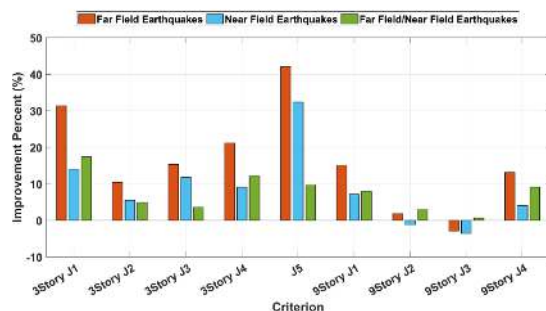


Fig. 25. The improvement percentages of proposed fuzzy system under far and near-field earthquakes

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، برای بررسی عملکرد میراگر سیال مغناطیسی با استفاده از سیستم کنترل فازی، سازه های معیار سه و نه طبقه تحت تحریک لرزه ای دو زلزله حوزه نزدیک و دو زلزله حوزه دور با بیشینه شتاب های 0.1g تا 1g مورد بررسی قرار گرفته اند. میراگر سیال مغناطیسی در تراز طبقه سوم دو سازه متصل

شکل ۲۰. تغییر مکان طبقه آخر سازه سه طبقه تحت زلزله کوبه در بیشینه شتاب 0.5g

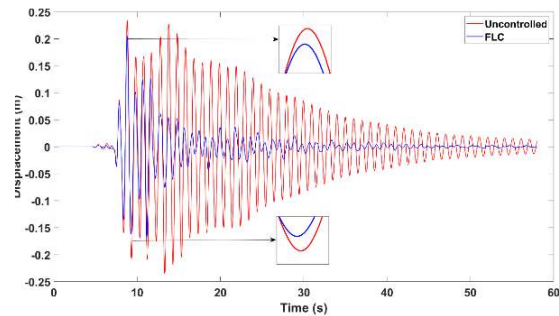


Fig. 20. The roof displacement for the 3-story structure under the Kobe earthquake, PGA = 0.5g

شکل ۲۱. تغییر مکان طبقه آخر سازه نه طبقه تحت زلزله السترو در بیشینه شتاب 0.5g

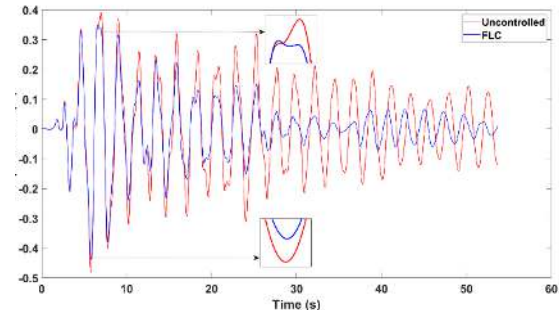


Fig. 21. The roof displacement for the 9-story structure under the El Centro earthquake, PGA = 0.5g

شکل ۲۲. تغییر مکان طبقه آخر سازه نه طبقه تحت زلزله کوبه در بیشینه شتاب 0.5g

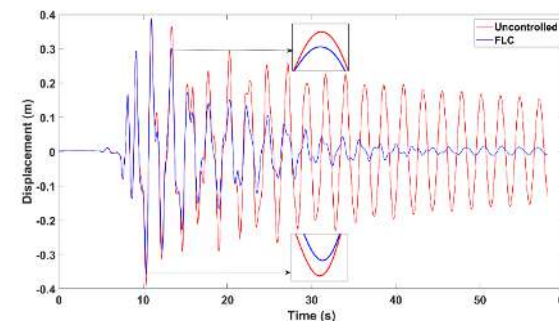


Fig. 22. The roof displacement for the 9-story structure under the El Centro earthquake, PGA = 0.5g

- no. 16, pp. 1811–1827, 2011.
- [7] M. E. Uz and M. N. S. Hadi, "Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm," *Eng. Struct.*, vol. 69, pp. 135–148, Jun. 2014.
- [8] M. K. Shrimali, S. D. Bharti, and S. M. Dumne, "Seismic response analysis of coupled building involving MR damper and elastomeric base isolation," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 457–470, Jun. 2015.
- [9] M. Abdeddaim, A. Ounis, S. D. Bharti, and M. K. Shrimali, "Seismic retrofitting using the concept of coupling two adjacent buildings," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 12, Springer, 2019, pp. 355–363.
- [10] O. A. S. Al-Fahdawi, L. R. Barroso, and R. W. Soares, "Utilizing the Adaptive Control in Mitigating the Seismic Response of Adjacent Buildings Connected with MR Dampers," in *Proceedings of the American Control Conference*, 2018, vol. 2018-June, pp. 912–917.
- [11] M. Azimi and A. M. Yeznabad, "Swarm-based parallel control of adjacent irregular buildings considering soil-structure interaction," *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 9, no. 2, Jun. 2020.
- [12] O. Yoshida and S. J. Dyke, "Seismic Control of a Nonlinear Benchmark Building Using Smart Dampers," *J. Eng. Mech.*, vol. 130, no. 4, pp. 386–392, 2004.
- [13] S. Y. Ok, D. S. Kim, K. S. Park, and H. M. Koh, "Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 5, pp. 776–788, 2007.
- [14] M. Abdeddaim, A. Ounis, N. Djedoui, and M. K. Shrimali, "Reduction of pounding between buildings using fuzzy controller," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 7, pp. 985–1005, 2016.

شده است و ظرفیت تولید نیروی کنترلی معادل ۱۰۰۰ کیلونیوتن را دارد. سیستم فازی بر اساس جابه‌جایی طبقه سوم دو سازه با هدف کاهش خطر برخورد سازه‌ها و همچنین کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای طراحی شده است. به صورت کلی سیستم کنترلی طراحی‌شده تحت زلزله‌های حوزه دور در مقایسه با زلزله‌های حوزه نزدیک، عملکرد مناسب‌تری در کاهش پاسخ‌های دو سازه از خود نشان داده است. با توجه به نتایج بدست‌آمده از تحلیل‌های دینامیکی، سیستم فازی مورد استفاده تحت زلزله‌های حوزه دور نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک و بر اساس معیارهای ارزیابی J1 (بیشینه جابه‌جایی طبقه بام)، J2 (بیشینه شتاب طبقه بام)، J3 (بیشینه برش پایه) و J4 (بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقات) به ترتیب در سازه سه طبقه ۱۷/۳۵، ۴/۹۴، ۳/۵۸، ۱۲/۱۷ درصد و در سازه نه طبقه ۷/۹۳، ۷/۰۵، ۰/۶۷، ۹/۱۳ درصد عملکرد بهتری از خود نشان داده است. همچنین بر اساس معیار ارزیابی J5 که مربوط به کمترین فاصله موردنیاز بین دو سازه است، سیستم فازی مورد استفاده تحت زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک، ۹/۷۱ درصد عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

مراجع

- [1] W. L. Qu and Y. L. Xu, "Semi-active control of seismic response of tall buildings with podium structure using ER/MR dampers," *Wiley Online Libr.*, vol. 10, no. 3, pp. 179–192, Sep. 2001.
- [2] Y. Ni, H. Liu, J. K. M. 2002, "Experimental investigation on seismic response control of adjacent buildings using semi-active MR dampers," *spiedigitallibrary.org*.
- [3] S. Bharti, S. Dumne, M. Shrimali. 2010, "Seismic response analysis of adjacent buildings connected with MR dampers," *Elsevier*.
- [4] M. Shahidzade, H. Tarzi. 2011, "Takagi-Sugeno fuzzy control of adjacent structures using MR dampers," *ui.adsabs.harvard.edu*.
- [5] G. C. Kim and J. W. Kang, "Seismic response control of adjacent building by using hybrid control algorithm of MR damper," *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 1013–1020, 2011.
- [6] G. B. Motra, W. Mallik, and N. K. Chandiramani, "Semi-active vibration control of connected buildings using magnetorheological dampers," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 22,

Fuzzy semi-active control of adjacent buildings connected with MR dampers under far and near-field earthquakes

Mohsen Bahmaei¹, Seyed Mehdi Zahrai^{2*}

1. M.Sc. of Structural Engineering, University of Tehran.

2. Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran.

mzahrai@ut.ac.ir

Abstract

Damages caused by the impact of adjacent structures in past major earthquakes have shown the importance of structural control systems to reduce the seismic risk of the impact of structures. Connecting energy dissipation devices to adjacent buildings is a practical and effective approach to prevent collisions as well as reduce the seismic responses of structures, and this issue has been an active research field in recent years. One of the semi-active control methods is the use of MR dampers. These dampers use a magnetic fluid that produces large damping forces in a piston-cylinder system that can be controlled instantly by changing the applied voltage to the damper. The Bouc-wen model has been used to take advantage of the unique properties of MR damper as well as to consider its inherent nonlinear behavior. In this study, to evaluate the performance of MR dampers using a fuzzy control system, three- and nine-story standard structures under seismic excitation of two near-field earthquakes including the Kobe (1995) and Northridge (1994) and two far-field earthquakes including the El Centro (1940) and Kern County (1952) with maximum accelerations of 0.1g to 1g are investigated.

The MR damper is connected to the third floor of those two structures and can produce a controlled force equivalent to 1000 kN. The fuzzy system is designed based on the displacement of the third floor of two structures to reduce the risk of collision of structures as well as reduce seismic responses. The benchmark buildings have been modeled in OpenSees and the fuzzy control system was implemented in MATLAB software. The displacement responses of the third floor of structures are considered as the input value of the fuzzy system and the required voltage of MR damper is considered as the output value of the fuzzy system. In addition, triangular membership functions have been used to determine the degree of membership of input values.

In general, the control system designed under far-field earthquakes has shown better performance in reducing the responses of two structures compared to near-field earthquakes. According to the results obtained from the dynamical analysis, the fuzzy system used under far-field earthquakes compared to near-field earthquakes and based on evaluation criteria of J1 (maximum roof displacement), J2 (maximum roof acceleration), J3 (maximum Base shear) and J4 (maximum relative displacement of floors) in three-story building 17.35, 4.94, 3.58, 12.17% and in nine-story building 7.93, 7.05, 0.67, 9.13% showed better performance, respectively. Also, according to the evaluation criterion of J5, which is related to the minimum required gap between two buildings, the fuzzy system used under far-field earthquakes has shown 9.71% better performance than near-field earthquakes.

Keywords: Vibration Control, Semi-active Control, MR Damper, Fuzzy Control Systems, Adjacent Buildings