

کنترل نیمه فعال فازي سازه نه طبقه غير خطي با استفاده از تركيب سري ميراگر جرمي تنظيم شونده و ميراگر سيال مغناطيسي

سپیده هاشمی^۱، سیدمهدی زهرائی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی زلزله، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

* mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۸/۲۳]

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

چکیده

در این مطالعه برای بررسی اثربخشی ميراگر جرمي تنظيم شونده نیمه فعال با الگوریتم کنترلي فازي، سازه معیار نه طبقه تحت تحریک زلزله قرار گرفته است. به همین منظور تحلیل دینامیکی فزاینده برای دو زلزله حوزه دور السترو و هاپینوه و دو زلزله حوزه نزدیک کوبه و نورتریج برای ارزیابی عملکرد سیستم مورد نظر در بیشینه شتاب‌های مختلف انجام شده است. ميراگر سيال مغناطيسي موجود در ميراگر جرمي تنظيم شونده دارای ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن نیرو بوده و نیروی میرایی آن توسط الگوریتم فازي کنترل می‌شود. در این مطالعه برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای ميراگر جرمي نصب شده روی سازه غیرخطی از روش جستجوی عددی با هدف کمینه کردن تغییر مکان طبقه نهم سازه استفاده شده است. مقادیر بهینه نسبت جرمي، میرایی و فرکانس به دست آمده برای سازه نه طبقه به ترتیب برابر ۳/۵٪، ۱۰٪ و ۲ رادیان بر ثانیه است. برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل نیمه فعال ميراگر جرمي تنظيم شونده با الگوریتم فازي، نتایج به دست آمده، با سیستم کنترل غیرفعال مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج معیارهای ارزیابی نشان دهنده این است که میانگین درصد بهبود نتایج سیستم فازي برای معیار بیشینه جابه جایی طبقه نهم، بیشینه جابه جایی نسبی سازه و بیشینه برش پایه به ترتیب برابر ۱۷/۷۵، ۱۵/۸۸ و ۱۶/۸۵ درصد بوده و ۳/۶۲، ۱/۱۷ و ۱۵/۷۶ درصد بیشتر از حالت غیرفعال است. این در حالی است که سیستم فازي مورد نظر عملکرد موثری در بهبود کاهش پاسخ شتاب طبقه نهم سازه نداشته است. همچنین سیستم کنترل فازي نسبت به سیستم کنترل غیرفعال عملکرد بهتری در کاهش بیشینه جابه جایی طبقات و همچنین جابه جایی پسماند سازه داشته است.

واژگان کلیدی: کنترل نیمه فعال، ميراگر جرمي تنظيم شونده، ميراگر سيال مغناطيسي، سیستم کنترلي فازي

۱- مقدمه

کاهش خسارات مالی و جانی است. در دهه‌های اخیر، از میان

ابزارهای کنترل ارتعاشات، ميراگر جرمي تنظيم شونده بسیار مورد استفاده قرار گرفته و اثربخشی قابل توجهی برای کنترل

یکی از دغدغه‌های چالش برانگیز مهندسين عمران، کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌های تحت تحریک زلزله، به منظور

ارتعاشات لرزه ای سازه ها داشته است. میراگر جرمی تنظیم شونده غیرفعال به انرژی خارجی برای کنترل ارتعاشات نیازی نداشته و تا حدی قابل اعتماد است. از طرفی این میراگر در محدوده فرکانسی بسیار کوچکی به طور موثر عمل کرده و در صورت بهینه نبودن پارامترهای آن عملکرد مطلوبی ارائه نمی دهد و همچنین این میراگر دارای مشکل عدم انطباق پذیری در برابر بارهای مختلف است. از طرفی میراگر جرمی تنظیم شونده فعال نیز منجر به ناپایداری سازه شده و مشکل اعتمادپذیری و تامین انرژی مورد نیاز برای کنترل ارتعاشات را داشته، در حالی که دارای انطباق پذیری خوبی در برابر بارهای مختلف است. در این میان میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال، هم دارای مزیت اعتمادپذیری روش غیرفعال و هم دارای خاصیت انطباق پذیری روش کنترل فعال است. همچنین این میراگر با انرژی خارجی کمتری ارتعاشات نامطلوب سازه را کاهش می دهد [1].

میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال (MR-STMD) از ترکیب سری میراگر جرمی تنظیم شونده و میراگر سیال مغناطیسی تشکیل شده است، که در واقع میراگر سیال مغناطیسی در هر لحظه بر اساس پاسخ سازه نیروی میرایی میراگر جرمی را تامین می کند. یکی از چالش ها در استفاده از این میراگر، انتخاب الگوریتم مناسب برای تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر سیال مغناطیسی برای تامین نیروی میرایی است، به طوری که میراگر جرمی تنظیم شونده بیشینه عملکرد خود را داشته باشد. در سال های اخیر از الگوریتم های کنترلی مختلفی مانند الگوریتم های اسکای-هوک^۱، بنگ-بنگ^۲، لایانف^۳ برای تنظیم ولتاژ میراگر^۴ MR استفاده شده است که یکی از مهمترین محدودیت های این الگوریتم ها، در نظر گرفتن تنها دو سطح کمینه و بیشینه برای ولتاژ میراگر MR است. به منظور فائق آمدن بر این محدودیت، در سال های اخیر سیستم های استنتاجی فازای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. همچنین در مطالعات

مربوط به میراگر جرمی تنظیم شونده، از الگوریتم های متنوعی برای بهینه سازی پارامترهای ورودی میراگر جرمی تنظیم شونده استفاده شده است. محبی و همکاران [2] در سال ۲۰۱۲، به بررسی اثربخشی میراگر جرمی تنظیم شونده برای کاهش پاسخ سازه ها با رفتار غیرخطی، تحت نیروهای زلزله پرداختند. آن ها پارامترهای بهینه میراگر جرمی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک توزیع شده به دست آوردند و نتایج به دست آمده برای میراگر جرمی را، در یک سازه هشت طبقه برشی با رفتار غیرخطی آزمایش نمودند. داس^۵ و همکاران [3] در سال ۲۰۱۲ از میراگر MR و روش کنترل نیمه فعال برای کاهش ارتعاشات نامطلوب دو سازه سه و ده طبقه استفاده نمودند. به منظور تنظیم ولتاژ میراگر MR، این پژوهشگران از سیستم کنترل فازای بهره جستند. همچنین این پژوهشگران نتایج به دست آمده را با نتایج الگوریتم Clipped-optimal مقایسه نمودند و دریافتند که سیستم فازای پیشنهاد شده عملکرد مشابهی را با الگوریتم مقایسه ای با ولتاژ کمتر داشته است. کیم^۶ و کانگ^۷ [1] در سال ۲۰۱۲ به کنترل نیمه فعال ارتعاشات سازه معیار ۷۶ طبقه تحت تحریک باد با استفاده از سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال و سیستم کنترل بهینه فازای چندهدفه پرداختند. این پژوهشگران از کنترل کننده های فازای برای تنظیم مشخصات میراگر MR و از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک برای طراحی بهینه سیستم کنترل کننده فازای استفاده نمودند. کیم و کانگ به این نتیجه رسیدند که استفاده از کنترل کننده فازای بهینه شده به طور مؤثرتری پاسخ سازه مجهز شده به سیستم MR-STMD را کاهش می دهد که این کاهش در مقایسه با سیستم کنترل غیرفعال بیشتر است. زهرائی و صالحی [4] در سال ۲۰۱۴ کنترل ارتعاشات لرزه ای دو سازه نه و بیست طبقه را مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهشگران از الگوریتم Clipped-Optimal به عنوان الگوریتم کنترلی و روش کنترل بهینه خطی کلاسیک به منظور تعیین نیروی کنترل استفاده کردند. این پژوهشگران نشان دادند که استفاده از میراگر MR به منظور

1 Sky-hook

2 Bang-Bang

3 Lyapunov

4 Magnetorheological Damper

5 Das

6 Kim

7 Kang

کمینه کردن پارامترهای سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شونده اثربخشی آن در کاهش جابه‌جایی نسبی و شتاب مطلق افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر مطالعات انجام شده روی سیستم میراگر MR-STMD بسیار محدود بوده و بیشتر مطالعات صورت گرفته، برای کنترل ارتعاشات سازه پل و یا سازه‌های تحت تحریک باد بوده است. در این مطالعه از میراگر MR-STMD به منظور کاهش پاسخ و جابه‌جایی پسماند سازه تحت تحریک زلزله، بهره گرفته شده است. برای دستیابی به پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده در این مطالعه از روش جستجوی عددی استفاده شده و ولتاژ مورد نیاز میراگر MR موجود در سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده در هر لحظه توسط الگوریتم کنترل فازی تصمیم‌گیری می‌شود. این الگوریتم یک چهارچوب ساده و قدرتمندی را برای قوانین کنترل غیرخطی ارائه داده و می‌تواند خود را با عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌ها وفق دهد و در شتاب‌های مختلف زلزله‌ها به خوبی رفتار لرزه‌ای سازه را کنترل کند.

۲- مدل‌سازی سازه و سیستم‌های کنترلی غیرفعال و نیمه فعال

در این مطالعه از سازه معیار نه طبقه که توسط براندا^۵ و جانسون^۶ برای پروژه SAC طراحی شده، استفاده شده است. زمان تناوب سازه مورد نظر برای سه مود اول برابر ۰/۸۵، ۰/۲۶ و ۰/۴۹ ثانیه و میرایی سازه برای هر مود ۵٪ است [8]. مشخصات هندسی و مصالح این سازه به صورت غیرخطی و تمام مقیاس^۷ در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شده است. نرم‌افزار OpenSees شامل کتابخانه‌ای از انواع مصالح، المان‌ها و دستورات آنالیز است، که سبب می‌شود این نرم‌افزار یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی سیستم‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی و همچنین کاربردها در مهندسی زلزله با استفاده از روش‌های المان محدود به خصوص برای تحلیل غیرخطی ماکرو و میکرو

کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات و شتاب مطلق موثر بوده است. لوو^۱ و همکاران [5] در سال ۲۰۱۴ از ترکیب میراگرهای MR و جرمی تنظیم شونده برای کاهش پاسخ رزونانسی یک پل راه‌آهن استفاده کردند. این پژوهشگران از الگوریتم H_{∞} برای پیدا کردن نیروی میرایی میراگر MR و از الگوریتم فازی - عصبی برای بهبود قابلیت‌های آن استفاده نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که میراگر MR-STMD علاوه بر اینکه عملکرد مطلوبی در کاهش پاسخ رزونانسی سازه پل نسبت به میراگر جرمی تنظیم شونده دارد، بلکه بسیاری از معایب آن را هم ندارد. کاوه و همکاران [6] در سال ۲۰۱۵ از سیستم میراگر MR-STMD و الگوریتم منطق فازی برای کنترل ارتعاشات یک سازه ده طبقه استفاده نمودند. این پژوهشگران از الگوریتم بهینه‌سازی CSS^۲ به منظور بهینه‌سازی ورودی‌های الگوریتم فازی و افزایش عملکرد میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که در حالت استفاده از الگوریتم فازی بهینه شده عملکرد سیستم کنترل نسبت به حالت استفاده از الگوریتم فازی کنترل نشده بهتر است. همچنین این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که در حالت استفاده از الگوریتم فازی بهینه شده میزان ولتاژ اعمالی بیشتر از حالت الگوریتم فازی بهینه نشده است. میرزایی و همکاران [7] در سال ۲۰۱۷ از الگوریتم GSA^۳ و PSO^۴ برای تعیین پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده که روی سازه معیار ده و چهل طبقه قرار داده شده بود، با هدف کاهش جابه‌جایی نسبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که در سازه چهل طبقه الگوریتم GSA جابه‌جایی نسبی و شتاب مطلق را به ترتیب بالای ۴۳ و ۲۱ درصد کاهش می‌دهد، در حالی که الگوریتم PSO به ترتیب این معیارها را تا ۵۰ و ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. از طرفی در سازه ده طبقه هر دو الگوریتم مورد نظر جابه‌جایی نسبی و شتاب مطلق را به ترتیب ۴۷ و ۶۳ درصد کاهش می‌دهند. همچنین آن‌ها نشان دادند که با

1 Luu

2 Charged System Search

3 Gravity Search Algorithm

4 Particle Swarm Optimization

5 Brandow

6 Johnston

7 Full-Scaled

است که بدون اعمال میدان مغناطیسی، تغییری در مشخصات آن ایجاد نشده و به صورت غیرفعال عمل می کند. در این پژوهش برای شبیه سازی رفتار دینامیکی میراگر MR، از مدل رفتاری بوک-ون^۲ استفاده شده است. مدل رفتاری بوک - ون برای میراگر MR، شامل یک المان بوک - ون و یک میراگر ویسکوز است، که به صورت موازی با هم عمل می کنند [10]. شمای کلی این مدل رفتاری در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. مدل رفتاری بوک-ون برای میراگر MR

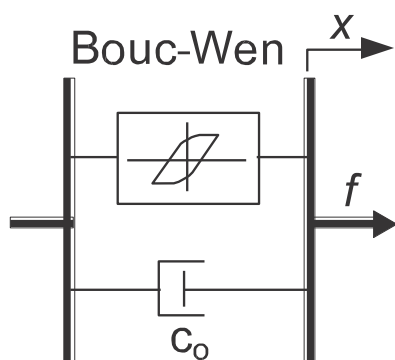


Fig. 1. Bouc-Wen model for dynamic behavior of MR damper

نیروی f که توسط میراگر MR تولید می شود، با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می شود.

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

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

در روابط (۱) و (۲)، پارامتر $\dot{x}$ و c_0 مقادیر سرعت، میرایی میراگر MR و z متغیر تحولی^۳ است. علاوه بر این پارامترهای γ ، β و n پارامترهای مربوط به رفتار چرخه ای المان جاری شونده میراگر MR هستند که به ترتیب دارای مقادیر ثابت 300 m^{-1} ، 300 m^{-1} ، 1 و همچنین A_m برابر با $1/2$ است. پارامترهای مدلی میراگر، α و c_0 ، که به برابرولتاژ کنترل اعمالی وابسته اند، با استفاده از روابط (۳ تا ۴) بیان می شوند.

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

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

در روابط (۳ تا ۴)، u ولتاژ کنترل اعمالی^۴ و پارامترهای α_a ، α_b ،

سازه ها به شمار آید [9]. زمان تناوب به دست آمده برای مدل سازه نه طبقه در نرم افزار OpenSees برای سه مود اول برابر 2.24 ، 0.84 و 0.48 ثانیه است. همانطور که ذکر شد، یکی از ابزارهای کنترل نیمه فعال سازه ها، استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال است. در این روش یک میراگر با میرایی متغیر با زمان، مانند میراگر MR به سیستم^۱ TMD متصل شده و مشخصات میرایی آن را به صورت تابعی از زمان بر اساس پاسخ سازه تنظیم می کند.

سیستم کنترلی TMD یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال سازه ها است که معمولاً آن را روی فرکانس اصلی ارتعاشی سازه، تنظیم می کنند. هنگامی که این فرکانس تحریک می شود، حرکت میراگر جرمی در فازی خارج از حرکت سازه تشدید شده و انرژی از طریق نیروی اینرسی حاصل از میراگر جرمی تنظیم شونده مستهلک می شود. در واقع عملکرد میراگر جرمی بر مبنای استهلاک انرژی ارتعاشی سازه به صورت حرکت نوسانی جرم آن است. همچنین ذکر این نکته نیز بسیار مهم است که، هنگامی می توان از بیشینه ظرفیت میراگر جرمی تنظیم شونده استفاده نمود که پارامترهای جرم، فرکانس و میرایی آن بهینه باشند. در این پژوهش از روش جستجوی عددی، برای یافتن پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده با هدف کمینه کردن تغییر مکان بام سازه، استفاده شده است. به همین منظور سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده در حالت غیرفعال در نرم افزار OpenSees مدل سازی شده و با توجه به نتایج، نسبت جرمی $3/5$ درصد، فرکانس 2 رادیان بر ثانیه و میرایی 10 درصد به عنوان پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده به دست آمده است.

میراگر MR یکی از روش های کنترل نیمه فعال سازه ها بوده که در آن از سیال MR که باعث ایجاد نیروی زیادی می شود، استفاده شده است. این نیرو توسط سیستم پیستون و سیلندر ایجاد شده و دارای بیشترین پایداری و اطمینان پذیری است. مشخصات مکانیکی سیال مورد استفاده در این میراگر به سرعت با تغییر ولتاژ ورودی که توسط منبع انرژی کوچکی تامین می شود، تغییر می کند. عملکرد این میراگر به گونه ای

1 Tuned Mass Damper

2 Bouc-Wen

3 Evolutionary Variable

4 Applied Control Voltage

طبق اصول علم دینامیک سازه‌ها، معادله حرکت سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال و سیستم سازه‌ای مجهز به این میراگر به ترتیب به صورت روابط (۶ و ۷) هست. در شکل (۴) شمای کلی از سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال نشان داده شده است.

$$m_{tmd} \ddot{x}_{tmd} + c_{tmd} \dot{x}_{tmd} + k_{tmd} x_{tmd} = -m_{tmd} \ddot{x}_g + c_{tmd} \dot{x}_{st} + k_{tmd} x_{st} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{st} \ddot{\mathbf{x}}_{st} + \mathbf{C}_{st} \dot{\mathbf{x}}_{st} + \mathbf{K}_{st} \mathbf{x}_{st} = -m_{st} \ddot{x}_g + c_{tmd} (\dot{x}_{tmd} - \dot{x}_{st}) + k_{tmd} (x_{tmd} - x_{st}) \quad (7)$$

شکل ۴. سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شونده

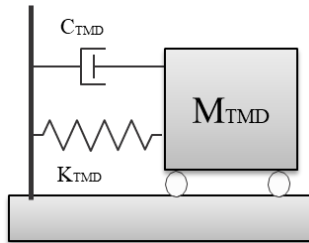


Fig. 4. TMD system

در روابط فوق، m_{tmd} ، c_{tmd} ، k_{tmd} و $\ddot{x}_{tmd}$ به ترتیب جرم، میرایی، سختی و شتاب میراگر جرمی تنظیم‌شونده و m_{st} ، k_{st} ، c_{st} و $\ddot{x}_{st}$ به ترتیب جرم، میرایی، سختی و شتاب سازه و شتاب زمین است.

برای حل رابطه (۶) روش‌های عددی مختلفی در نرم‌افزار MATLAB وجود دارد، که از این میان جعبه ابزار سیمولینک^۳ امکان شبیه‌سازی سیستم‌های خطی و غیرخطی را به صورت ساده فراهم می‌کند. در واقع در این روش حل معادلات دیفرانسیل با سرعت و دقت بالایی انجام می‌شود. همچنین این روش نیاز به کدنویسی خاصی ندارد و شبیه‌سازی معادلات دیفرانسیل توسط بلوک‌های پیش‌فرض صورت می‌گیرد. به منظور مدل‌سازی رفتار دینامیکی میراگر جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال توسط بلوک‌های سیمولینک، رابطه (۶) به صورت

c_{0b} و c_{0a} به ترتیب دارای مقادیر ثابت $1/0.875 \times 10^7$ N/m/v و 440 Ns/m، $4/9616 \times 10^7$ N/m/v می‌باشند. سازوکار داخلی میراگر MR به صورتی است که نمی‌تواند به طور آنی با ولتاژ دستوری^۱ هماهنگی پیدا کند، بنابراین همواره مدت زمان ناچیزی طول می‌کشد تا ولتاژ اعمالی به سیستم با ولتاژ دستوری برابر شود، پس برای مدل‌سازی این تاخیر زمانی ناچیز در سیستم، از رابطه (۵) استفاده می‌شود [11].

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

که در رابطه فوق v ولتاژ دستوری بوده که به مدار کنترلی اعمال می‌شود و η ثابت زمانی با مقدار 50 s^{-1} می‌باشد. نمودار رفتار چرخه‌ای میراگر MR برای ولتاژهای ورودی صفر و ۱۰ ولت که مطابق با نمودارهای موجود در مطالعه اک^۲ و همکاران است، به ترتیب در شکل‌های (۲ و ۳) نشان داده شده است.

شکل ۲. نمودار رفتار چرخه‌ای میراگر MR برای ولتاژ ورودی صفر ولت

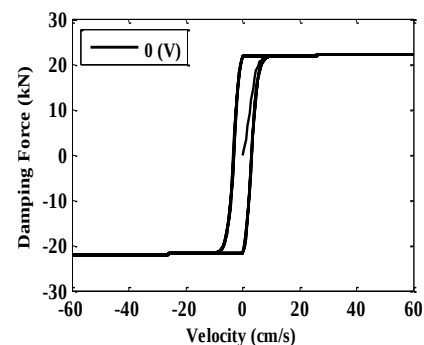


Fig. 2. The control force-velocity hysteresis loops of MR damper for command voltage of 0 V

شکل ۳. نمودار رفتار چرخه‌ای میراگر MR برای ولتاژ ورودی ۱۰ ولت

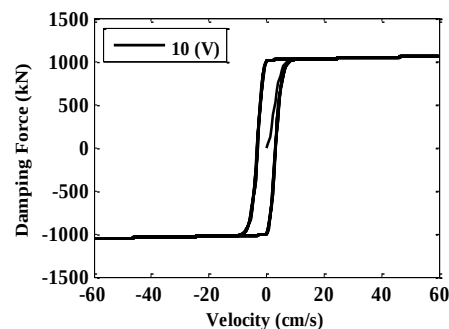


Fig. 3. The control force-velocity hysteresis loops of MR damper for command voltage of 10 V

شده است. در این حالت، میرایی میراگر جرمی نیمه فعال به صورت تابعی از زمان، توسط میراگر MR که ولتاژ ورودی به آن از الگوریتم کنترلی بهره می گیرد، تامین می شود. در شکل (۶) پیکره بندی میراگر MR-STMD در سازه نشان داده شده است.

طبق اصول علم دینامیک سازه ها و با توجه به معادله موجود در مطالعه کاوه و همکاران، معادله حرکت سیستم میراگر MR-STMD و نیروی f_{MR} که توسط میراگر MR تولید می شود، به ترتیب به صورت رابطه های (۹ و ۱۰) است [6].

$$m_{tmd} \ddot{x}_{tmd} + f_{MR} + k_{tmd} x_{tmd} = -m_{tmd} \ddot{x}_g + k_{tmd} x_{st} \quad (9)$$

$$f_{MR} = c_0(t) \times (\dot{x}_{tmd} - \dot{x}_{st}) + \alpha z \quad (10)$$

در روابط (۹ و ۱۰)، m_{tmd} ، $c_0(t)$ ، k_{tmd} و $\ddot{x}_{tmd}$ به ترتیب میرایی میراگر MR، جرم، سختی و شتاب میراگر جرمی تنظیم شونده و $\dot{x}_{st}$ سرعت سازه و $\ddot{x}_g$ شتاب زمین است. همانطور که در رابطه (۱۰) مشاهده می شود، $c_0(t)$ به صورت تابعی از زمان بوده و بر خلاف روش غیرفعال، با ولتاژ ورودی میراگر MR که توسط الگوریتم کنترلی در هر گام زمانی تصمیم گیری می شود، تغییر می کند. همچنین با توجه به رابطه (۱۰)، در هر گام زمانی، متغیر تحولی z که تابع سرعت میراگر MR-STMD است، تعیین شده و به صورت پارامتر αz وارد معادلات می شود.

با جایگزینی رابطه (۱۰) در رابطه (۹)، معادله حرکت سیستم میراگر MR-STMD به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی می شود.

$$m_{tmd} \ddot{x}_{tmd} + c_0(t) \dot{x}_{tmd} + k_{tmd} x_{tmd} = -m_{tmd} \ddot{x}_g + k_{tmd} x_{st} + c_0(t) \dot{x}_{st} - \alpha z \quad (11)$$

به منظور مدل سازی رفتار دینامیکی میراگر MR-STMD توسط بلوک های سیمولینک، رابطه (۱۱) به صورت رابطه (۱۲) بازنویسی می شود.

$$\ddot{x}_{tmd} = -\frac{c_0(t)}{m_{tmd}} \dot{x}_{tmd} - \frac{k_{tmd}}{m_{tmd}} x_{tmd} + cte \quad (12)$$

$$cte = -\ddot{x}_g + \frac{c_0(t)}{m_{tmd}} \dot{x}_{st} + \frac{k_{tmd}}{m_{tmd}} x_{st} - \frac{\alpha z}{m_{tmd}}$$

رابطه (۸) بازنویسی می شود.

$$\ddot{x}_{tmd} = -\frac{c_{tmd}}{m_{tmd}} \dot{x}_{tmd} - \frac{k_{tmd}}{m_{tmd}} x_{tmd} + cte \quad (8)$$

$$cte = -\ddot{x}_g + \frac{c_{tmd}}{m_{tmd}} \dot{x}_{st} + \frac{k_{tmd}}{m_{tmd}} x_{st}$$

در رابطه فوق cte ، پارامتر ثابتی برای ورودی محیط سیمولینک است که در هر گام زمانی بر اساس پاسخ سرعت و جابه جایی سازه و شتاب زلزله مورد نظر محاسبه می شود. در شکل (۵) شبیه سازی رفتار دینامیکی میراگر جرمی در جعبه ابزار سیمولینک نشان داده شده است.

شکل ۵. شبیه سازی رفتار دینامیکی میراگر جرمی تنظیم شونده در جعبه ابزار سیمولینک

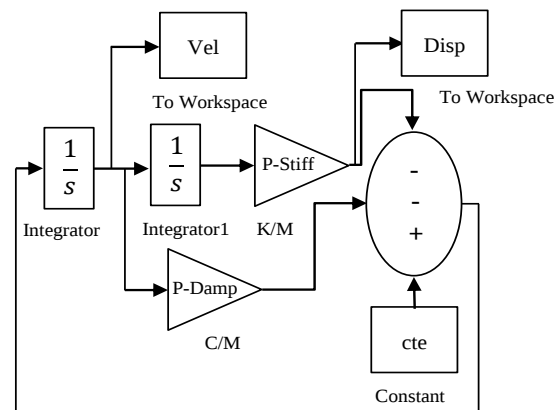


Fig. 5. Simulation diagram of TMD in Simulink

شکل ۶. پیکره بندی میراگر MR-STMD در سازه

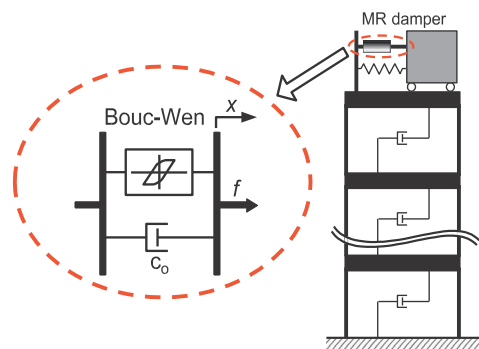


Fig. 6. Configuration of semi-active MR-STMD

برای مدل سازی رفتار دینامیکی میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال در این مطالعه نیز از نرم افزار MATLAB بهره گرفته

دهد. رویکرد مورد نظر برای دستیابی به این معیارها، استفاده از کنترل‌کننده‌های فازی است که یک چهارچوب ساده و قدرتمندی را برای قوانین کنترل غیرخطی ارائه داده و می‌توانند خود را با عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌ها وفق دهند. در این مطالعه از الگوریتم کنترل منطق فازی برای تنظیم ولتاژ مورد نیاز میراگر MR موجود در سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شونده استفاده شده است. ساختار کلی یک کنترل‌کننده فازی در شکل (۷) نشان داده شده است.

شکل ۷. ساختار کلی سیستم استنتاجی کنترل فازی

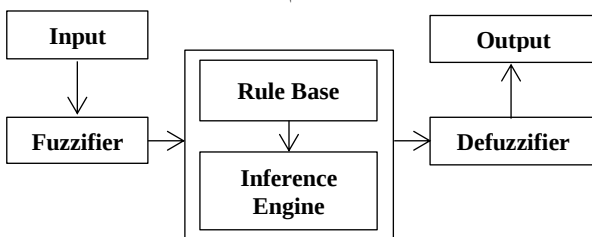


Fig. 7. The process of fuzzy inference system

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در مرحله فازی‌سازی ابتدا مقادیر عددی ورودی به مقادیر زبانی فازی تبدیل می‌شوند، که این امر از طریق اختصاص توابع عضویت به هر ورودی و خروجی امکان‌پذیر است. در مرحله قوانین فازی، ارتباط بین مقادیر ورودی و خروجی از طریق تعدادی قواعد اگر - آنگاه فازی، برقرار می‌شود. سپس موتور استنتاج فازی، قوانین فازی را به منظور ایجاد یک خروجی بر اساس مقادیر ورودی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. سپس در مرحله غیرفازی‌سازی، مقدار زبانی خروجی فازی به مقدار عددی خروجی تبدیل می‌شود [12]. برای تعریف و پیاده‌سازی سیستم کنترل فازی، از جعبه ابزار فازی موجود در نرم‌افزار MATLAB بهره گرفته شده است. در این مطالعه دو حس‌گر برای ثبت جابه‌جایی و سرعت سازه، روی طبقه نهم که مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شونده است، نصب شده‌اند. که در واقع این سرعت و جابه‌جایی مقادیر ورودی سیستم فازی است. همچنین نیروی میراگر MR که در ترکیب سری با TMD است، نیز از طریق همان نقاط به میراگر جرمی اعمال می‌شود. در این مطالعه ظرفیت میراگر MR ۱۰۰۰ کیلو نیوتن است و ولتاژ

شبیه‌سازی رفتار دینامیکی میراگر MR-STMD در جعبه ابزار سیمولینک مانند ۰ (۵) برای میراگر جرمی غیرفعال بوده با این تفاوت که پارامتر ثابت c_{te} آن‌ها متفاوت است. با توجه به توضیحات ذکر شده و اثردهی ترکیب سری میراگر MR با میراگر جرمی تنظیم‌شونده روی سازه، معادله سیستم سازه ای به صورت رابطه (۱۳) است.

$$\mathbf{M}_{st} \ddot{\mathbf{x}}_{st} + \mathbf{C}_{st} \dot{\mathbf{x}}_{st} + \mathbf{K}_{st} \mathbf{x}_{st} = -m_{st} \ddot{\mathbf{x}}_g + k_{tmd} (\mathbf{x}_{tmd} - \mathbf{x}_{st}) + c_0 (t) (\dot{\mathbf{x}}_{tmd} - \dot{\mathbf{x}}_{st}) + \alpha \mathbf{z} \quad (13)$$

در رابطه فوق، m_{st} ، c_{st} ، k_{st} و $\ddot{\mathbf{x}}_{st}$ به ترتیب جرم، میرایی، سختی و شتاب سازه است.

در مدل‌سازی رفتار دینامیکی میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای هر دو روش غیرفعال و نیمه‌فعال در نرم‌افزار MATLAB، در هرگام زمانی، مقادیر جابه‌جایی و سرعت طبقه بام، از طریق روش TCP-IP که در ادامه به آن پرداخته می‌شود، توسط نرم‌افزار OpenSees گزارش می‌شود. سپس پاسخ هر یک از سیستم‌های میراگر جرمی غیرفعال و نیمه‌فعال از طریق جعبه ابزار سیمولینک به دست آمده و به ترتیب در روابط (۷ و ۱۳) اثردهی می‌شوند، سپس نیروی کنترلی به دست آمده در جهت مخالف حرکت سازه و به علت حرکت غیرهم‌فاز میراگر جرمی به سازه وارد می‌شود.

در مدل‌سازی میراگر جرمی غیرفعال و نیمه‌فعال در MATLAB، جابه‌جایی و سرعت اولیه برای حل معادله دیفرانسیل صفر بوده و پاسخ میراگر در گام زمانی $n+1$ بر حسب کلیه اطلاعات داده‌شده در گام زمانی n و نیز شتاب زمین در گام زمانی $n+1$ محاسبه می‌شود.

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، الگوریتم‌های کلاسیک تنها مقادیر ولتاژ صفر و یا بیشینه را به سیستم کنترلی اعمال می‌کنند و سطح متوسطی را بین این دو در نظر نمی‌گیرند. از طرفی تغییرات سریع ولتاژ در برابر بارهای لحظه‌ای و با مدت زمان کم، باعث افزایش پاسخ سازه و احتمال ایجاد خرابی موضعی در بخش‌هایی از سازه می‌شود [1]. بنابراین نیاز به یک الگوریتم کنترلی است که بتواند ولتاژی مابین سطح صفر و بیشینه در نظر گرفته و به طور تدریجی ولتاژ مورد نیاز را تغییر

جدول ۱. متغیرهای زبانی اختصاص داده شده به مقادیر تغییر مکان

Input displacement	Definition
LN	Large negative
MN	Medium negative
SN	Small negative
SP	Small positive
MP	Medium positive
LP	Large positive

Table 1 Description of fuzzy variables for displacement

جدول ۲. متغیرهای زبانی اختصاص داده شده به مقادیر سرعت

Input velocity	Definition
N	Negative
ZN	Small negative
ZP	Small positive
P	Positive

Table 2 Description of fuzzy variables for velocity

جدول ۳. متغیرهای زبانی اختصاص داده شده به مقادیر ولتاژ

Output voltage	Definition
VS	Very small
S	Small
M	Medium
L	Large
VL	Very large
EL	Extremely large

Table 3 Description of fuzzy variables for voltage

جدول ۴. قوانین فازی مورد استفاده در مطالعه حاضر

Displacement \ Velocity	Velocity			
	N	ZN	ZP	P
LN	EL	VL	M	M
MN	VL	L	S	S
SN	L	M	VS	VS
SP	VS	VS	M	L
MP	S	S	L	VL
LP	M	M	VL	EL

Table 4 Fuzzy rules in this study

در بیشتر مطالعات و مقالات موجود در زمینه کنترل فعال، از نرم افزار MATLAB برای ایجاد حلقه های بسته و الگوریتم های کنترل استفاده می شود. از آنجایی که سازه نه طبقه در نرم افزار OpenSees مدل سازی شده، بنابراین باید یک پل ارتباطی بین این دو نرم افزار برای انجام روند کنترل ایجاد شود. از میان

ورودی آن به عنوان خروجی سیستم فازی از صفر تا ۱۰ ولت تغییر می نماید.

توابع عضویت مقادیر ورودی و خروجی برای سیستم فازی به شکل مثلثی و دوزنقه ای بوده که در شکل های (۸ تا ۱۰) نشان داده شده است. همچنین متغیرهای زبانی استفاده شده برای توابع عضویت ورودی و خروجی سیستم فازی به ترتیب در جداول (۱ تا ۳) و همچنین قوانین فازی مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است. این مجموعه قوانین، از فعالیت های پژوهشی زهرائی و همکاران [13] در سال ۲۰۱۳ اقتباس شده اند و در این مطالعه برای اعمال روی سازه معیار نه طبقه مورد استفاده قرار گرفته اند.

شکل ۸. توابع عضویت برای متغیر جابه جایی ورودی

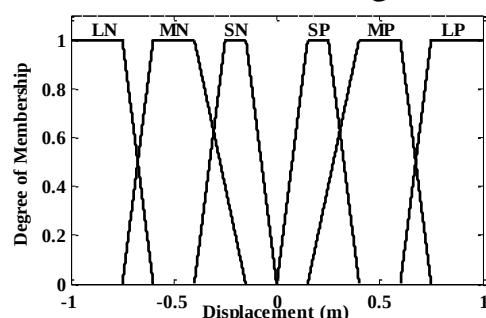


Fig. 8. Membership functions of displacement

شکل ۹. توابع عضویت برای متغیر سرعت ورودی

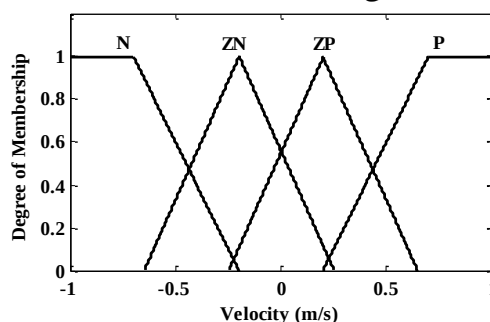


Fig. 9. Membership functions of velocity

شکل ۱۰. توابع عضویت برای متغیر ولتاژ خروجی

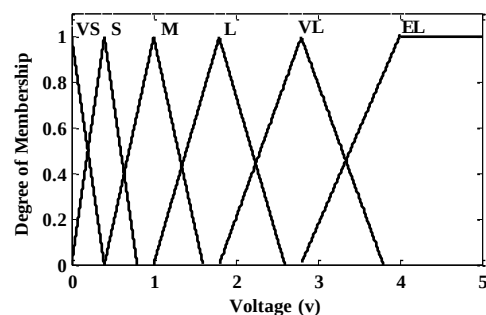


Fig. 10. Membership functions of voltage

سرعت و جابه‌جایی هستند.

۴ - ارائه و تفسیر نتایج

به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل فازی، مدل غیرخطی سازه نه طبقه تحت تحریک زلزله‌های مورد نظر قرار گرفته است. همچنین برای اینکه اثر بیشینه‌شتاب^۱ رکوردهای زلزله نیز، بر کارایی سیستم کنترل پیشنهادی در این مطالعه سنجیده شود، آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی فزاینده^۲ در نظر گرفته می‌شود.

پس از انجام تحلیل روی سازه معیار در این مطالعه، برای تسهیل در امر قضاوت در مورد کارایی سیستم کنترل فازی و همچنین عملکرد میراگر جرمی تنظیم‌شونده نیمه‌فعال، معیارهایی برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه در نظر گرفته شده است. این معیارها از جنس بیشینه پاسخ‌ها است که مشخصات آن‌ها در جدول (۶) ارائه شده است. در جدول (۶) اندیس c بیانگر حالت کنترل‌شده و اندیس u بیانگر حالت کنترل‌نشده است.

جدول ۶. معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی

Criterion	Equation	Title
J_1	$\frac{\max x_c(t) }{\max x_u(t) }$	Displacement of 9th story
J_2	$\frac{\max \ddot{x}_c(t) }{\max \ddot{x}_u(t) }$	Acceleration of 9th story
J_3	$\frac{\max d_c(t) }{\max d_u(t) }$	Relative displacement of structure
J_4	$\frac{\max V_c(t) }{\max V_u(t) }$	Base shear of structure

Table 6 Performance criteria as ratio of maximum responses of controlled system to those of uncontrolled system

نتایج میانگین مقادیر به‌دست‌آمده برای معیارهای ارزیابی ذکرشده، تحت اثر چهار زلزله موردنظر و همچنین برای سطوح مختلف بیشینه شتاب زمین در شکل‌های (۱۱ تا ۱۴) نشان داده شده است.

می‌توان به روش TCP-IP اشاره کرد، که در آن یک ارتباط شبکه‌ای، از طریق کانال‌های خاصی که می‌توانند اطلاعات را منتقل کنند، ایجاد می‌شود [14].

در واقع روند انجام آنالیز به این صورت است که در خلال انجام تحلیل تاریخیچه زمانی، پس از هر گام آنالیز، نرم‌افزار OpenSees متوقف شده و اطلاعات برداشت‌شده از سازه را به نرم‌افزار MATLAB ارسال می‌کند؛ سپس اطلاعات ورودی به MATLAB با توجه به الگوریتم فازی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نیروی کنترل بر اساس آن‌ها حاصل می‌شود. در مرحله بعد، نیروی کنترل از MATLAB به OpenSees ارسال شده و OpenSees پس از اعمال نیروی کنترل به مدل، آنالیز را یک گام جلو برده و این فرآیند تا انجام همه گام‌های آنالیز ادامه می‌یابد.

۳ - زلزله‌های اعمال‌شده به مدل برای آنالیز دینامیکی سازه

برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی و بررسی رفتار لرزه‌ای سازه نه طبقه در این مطالعه، سازه مورد نظر تحت تحریک چهار زلزله قرار گرفته است. مشخصات این چهار زلزله که توسط انجمن بین‌المللی کنترل پیشنهاد شده، در جدول (۵) ارائه شده است [15].

جدول ۵. مشخصات رکورد زلزله‌های اعمالی برای تحلیل تاریخیچه زمانی سازه

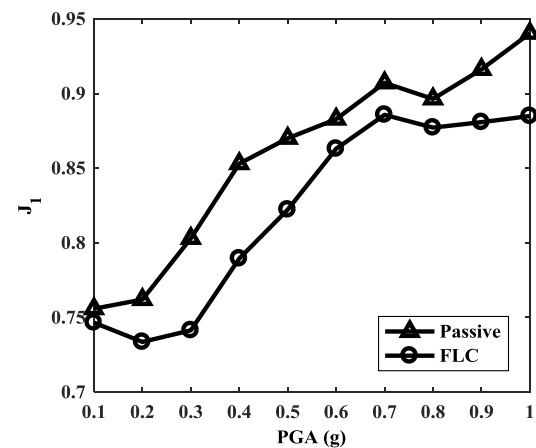
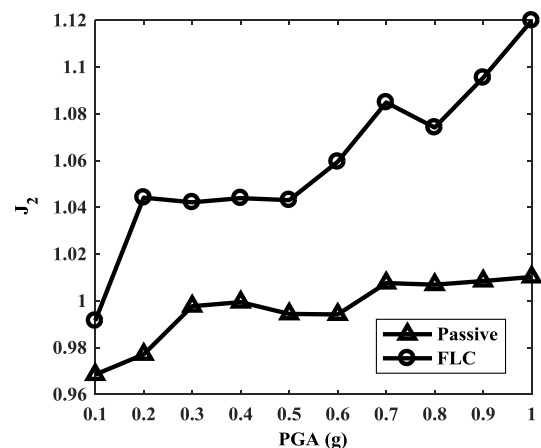
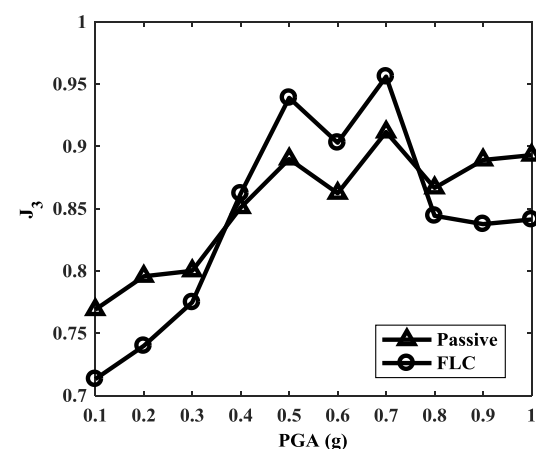
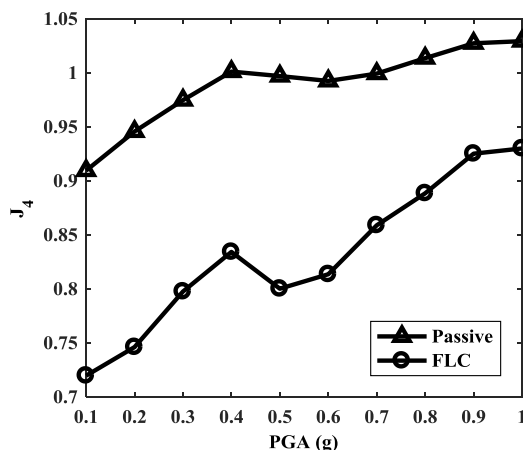
Earthquake	Country	Type	PGA (g)	Year
El Centro	USA	far-field	0.349	1940
Hachinohe	Japan	far-field	0.229	1968
Kobe	Japan	near-field	0.833	1995
Northridge	USA	near-field	0.843	1994

Table 5 Specifications of earthquake records used for time-history analysis

بررسی ویژگی‌های کلی نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک نشان می‌دهد که رکوردهای ثبت شده، عموماً دارای یک پالس شدید و غالب با پیروید بلند در نگاشت تاریخیچه زمانی

1 Peak Ground Acceleration

2 Incremental non-linear dynamic analysis

شکل ۱۱. میانگین نتایج چهار زلزله مربوط به معیار J_1 Fig. 11. Average values of four earthquakes for performance index of J_1 شکل ۱۲. میانگین نتایج چهار زلزله مربوط به معیار J_2 Fig. 12. Average values of four earthquakes for performance index of J_2 شکل ۱۳. میانگین نتایج چهار زلزله مربوط به معیار J_3 Fig. 13. Average values of four earthquakes for performance index of J_3 شکل ۱۴. میانگین نتایج چهار زلزله مربوط به معیار J_4 Fig. 14. Average values of four earthquakes for performance index of J_4

همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می شود سیستم کنترل فازي عملکرد بسیار مطلوبی را نسبت به حالت کنترل غیرفعال داشته است. این عملکرد مطلوب برای معیارهای ارزیابی J_1 و J_4 در تمامی بیشینه شتابها مشهود بوده و با افزایش بیشینه شتاب زمین، عملکرد هر دو سیستم کنترل غیرفعال و نیمه فعال کاهش می یابد. با توجه به شکل (۱۲) برای معیار بیشینه شتاب، سیستم کنترل فازي نسبت به حالت غیرفعال عملکرد مطلوبی نداشته و پاسخ سازه را افزایش داده است. به دلیل اینکه در سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال، ولتاژ میراگر MR در هر لحظه از زمان توسط کنترل کننده فازي، بر اساس پاسخ سازه تامین شده و به دنبال آن میرایی سیستم مورد نظر تغییر می کند، در نتیجه در برخی از زمانها ممکن است به دلیل افزایش میرایی، نیروی ضربه ای به سازه وارد شده که این امر سبب افزایش شتاب سازه می گردد. همچنین عملکرد سیستم کنترلی نسبت به حالت غیرفعال، برای کاهش جابه جایی نسبی طبقات در بیشینه شتابهای میانی مطلوب بوده و در سایر بیشینه شتابها سیستم فازي عملکرد مناسبی نداشته است. نمودار میله ای درصد بهبود نتایج برای حالت کنترل نیمه فعال میراگر جرمی تنظیم شونده با استفاده از سیستم فازي (FLC) و حالت غیرفعال میراگر جرمی تنظیم شونده (Passive) در شکل (۱۵)، برای مقایسه بین دو حالت ذکر شده برای تمام معیارهای ارزیابی نشان داده شده است.

نیمه‌فعال بر اساس پاسخ سازه در هر لحظه از زمان، توسط الگوریتم منطق فازی است.

در شکل (۱۶) بیشینه جابه‌جایی طبقات تحت تحریک چهار زلزله مورد نظر با بیشینه شتاب $0.5g$ برای دو حالت سازه کنترل‌نشده و سازه کنترل‌شده توسط میراگر جرمی تنظیم‌شونده نیمه‌فعال نشان داده شده است. در واقع، سیستم فازی عملکرد مطلوبی در کاهش ارتعاشات بیشینه پاسخ طبقات داشته است. این عملکرد را می‌توان به تصمیم‌گیری مناسب سیستم کنترل فازی در تنظیم ولتاژ مورد نیاز میراگر MR موجود در سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شونده نصب‌شده در طبقه بام نسبت داد که آثار مثبت آن در سایر طبقات نیز مشاهده می‌شود. همچنین در زلزله‌های حوزه نزدیک نرثریج و کوبه کاهش پاسخ نسبت به زلزله‌های حوزه دور السنترو و هاجینوه کمتر است، که می‌توان به ماهیت زلزله‌های حوزه نزدیک اشاره کرد.

شکل ۱۵ میانگین درصد بهبود نتایج معیارهای ارزیابی

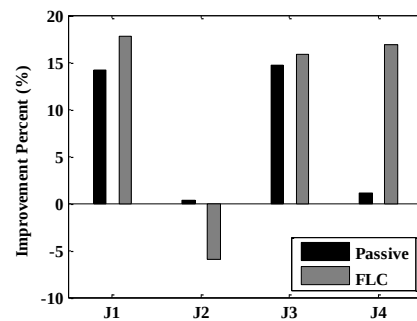


Fig. 15. Average improvement percent of four earthquakes and ten PGAs for performance indices

همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود نتایج میانگین درصد بهبود معیار عملکردی J_1 ، J_3 و J_4 برای سیستم کنترل فازی به ترتیب $3/62$ درصد، $1/17$ درصد و $15/76$ درصد بهتر از سیستم غیرفعال میراگر جرمی تنظیم‌شونده بوده است. در واقع این عملکرد به دلیل تنظیم مناسب ولتاژ مورد نیاز دو سر میراگر MR و به تبع آن تامین میرایی میراگر جرمی تنظیم‌شونده

شکل ۱۶. جابه‌جایی بیشینه طبقات در بیشینه شتاب $0.5g$

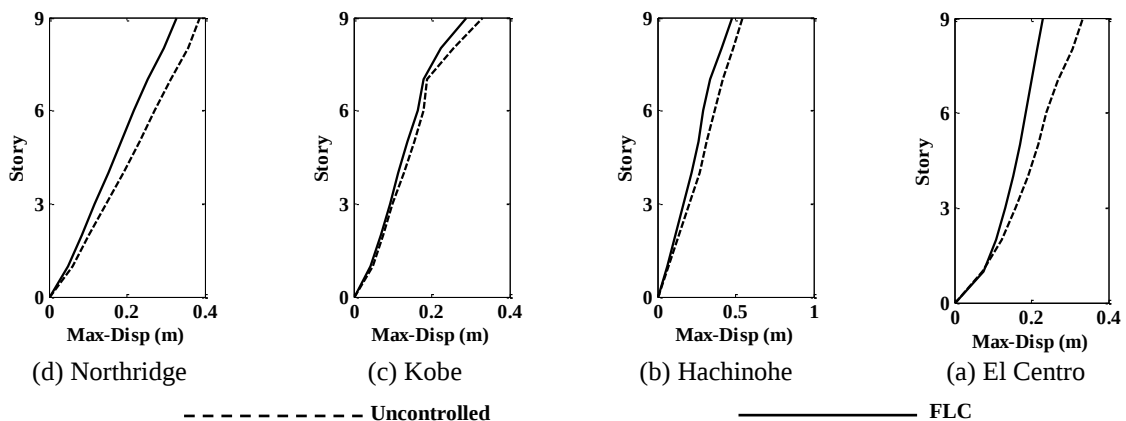


Fig. 16. Distributions of maximum floor displacements, PGA = 0.5g

شکل ۱۷. جابه‌جایی پسماند طبقات در بیشینه شتاب $0.5g$

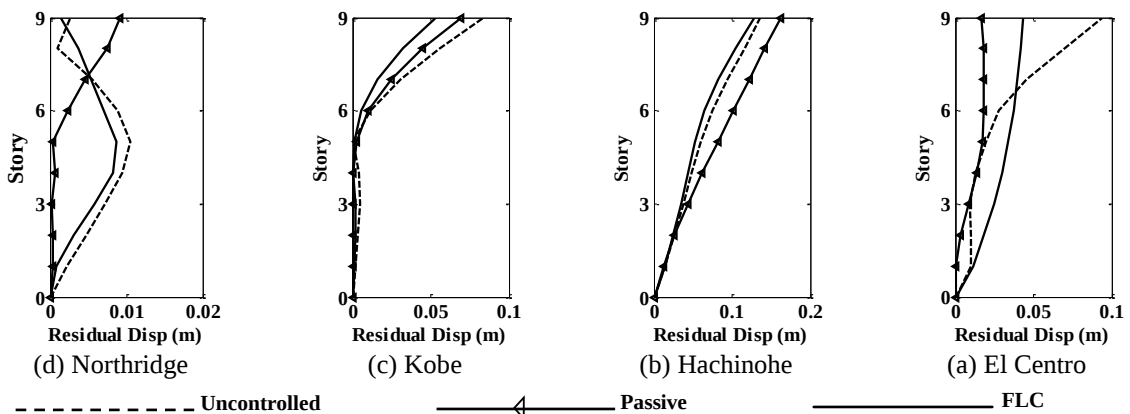


Fig. 17. Distributions of residual floor displacements, PGA = 0.5g

عملکرد سیستم غیرفعال میراگر جرمی تنظیم شونده در کاهش جابه جایی پسماند، کاهش یافته در حالی که سیستم کنترل فازي عملکرد تقریباً یکنواختی را با افزایش بیشینه شتاب زمین از خود نشان داده است.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه کنترل نیمه فعال ارتعاشات سازه معیار نه طبقه با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال و غیرفعال مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ایجاد سهولت در امر پیاده سازی الگوریتم کنترل فازي، همچنین مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال و غیرفعال، از نرم افزار MATLAB در کنار مدل اجزاء محدود ایجاد شده در OpenSees، استفاده شده است. ارتباط بین دو نرم افزار MATLAB و OpenSees برای انجام تحلیل دینامیکی افزاینده و کنترل نیمه فعال، به روش TCP-IP برقرار شده است. نتایج نشان می دهند که برای معیار ارزیابی J_1 که مربوط به نسبت بیشینه جابه جایی طبقه نهم سازه است، میانگین درصد بهبود نتایج برای کنترل نیمه فعال با استفاده از الگوریتم فازي نسبت به حالت کنترل نشده ۱۷/۷۵ درصد می باشد. از طرفی عملکرد هر دو میراگر جرمی تنظیم شونده غیرفعال و نیمه فعال برای زلزله های حوزه دور بهتر از زلزله های حوزه نزدیک بوده است. همچنین برای معیارهای ارزیابی J_3 و J_4 میانگین درصد بهبود نتایج برای کنترل نیمه فعال با استفاده از الگوریتم فازي نسبت به حالت کنترل نشده به ترتیب برابر ۱۵/۸۸ و ۱۶/۸۵ درصد است. این در حالی است که برای معیار ارزیابی J_2 که مربوط به بیشینه شتاب طبقه نهم سازه است، عملکرد سیستم کنترل فازي مطلوب نبوده است. بر اساس میانگین نتایج به دست آمده، سیستم کنترل فازي نسبت به سیستم کنترل غیرفعال عملکرد بهتری در کاهش جابه جایی پسماند سازه داشته است. علاوه بر این عملکرد سیستم کنترل فازي نسبت به سیستم کنترل غیرفعال برای کاهش بیشینه جابه جایی طبقات بهتر بوده است. به طور کلی نتایج نشان می دهند که استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال با الگوریتم فازي عملکرد مطلوبی را در کاهش پاسخ و جابه جایی پسماند سازه نه طبقه تحت تحریک

در شکل (۱۷) جابه جایی پسماند طبقات تحت تحریک چهار زلزله مورد نظر با بیشینه شتاب $0.5g$ برای سازه کنترل نشده و سازه کنترل شده توسط میراگر جرمی تنظیم شونده غیرفعال و نیمه فعال نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، سیستم کنترل فازي با توجه به ماهیت زلزله ها عملکرد متفاوتی در کاهش جابه جایی پسماند طبقات داشته است. به طور نمونه در زلزله هاچینوهه و کوبه سیستم کنترل فازي نسبت به حالت غیرفعال و کنترل نشده عملکرد مطلوبی در کاهش جابه جایی پسماند تمامی طبقات داشته است. این در حالی است که در زلزله السترو و نرثریج این عملکرد مطلوب مشاهده نشده و حتی در برخی از طبقات جابه جایی پسماند نسبت به حالت کنترل نشده نیز بیشتر است.

شکل ۱۸. میانگین درصد بهبود نتایج چهار زلزله مورد نظر برای جابه جایی پسماند

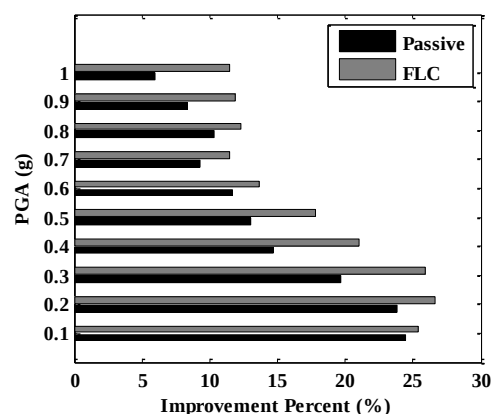


Fig. 18. Average improvement percent ratio of four earthquakes for residual displacement

همچنین برای ارزیابی بهتر عملکرد سیستم کنترل فازي، در شکل (۱۸) میانگین درصد بهبود سیستم کنترل فازي و حالت غیرفعال در کاهش بیشینه جابه جایی پسماند، برای چهار زلزله مورد نظر در بیشینه شتاب های مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، در تمامی بیشینه شتاب ها، درصد بهبود جابه جایی پسماند در سیستم فازي نسبت به حالت غیرفعال میراگر جرمی تنظیم شونده بیشتر بوده است که نشان از عملکرد مطلوب سیستم فازي دارد. همچنین همان طور که در شکل (۱۸) مشاهده می شود با افزایش بیشینه شتاب زمین،

زلزله داشته است.

۷- مراجع

References

8. Ohtori Y., Christenson R. E., Spencer Jr B. F. & Dyke S. J. 2004 Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 366-385.
9. Mazzoni S., McKenna F., Scott M. H. & Fenves G. L. 2006 OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, 264.
10. Ok S. Y., Kim D. S., Park K. S. & Koh H. M. 2007 Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers. *Engineering structures*, 29(5), 776-788.
11. Jung H. J., Spencer Jr B. F. & Lee I. W. 2003 Control of seismically excited cable-stayed bridge employing magnetorheological fluid dampers. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 873-883.
12. Ozbulut O. E. & Hurlbauss S. 2010 Fuzzy control of piezoelectric friction dampers for seismic protection of smart base isolated buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(6), 1435-1455.
13. Zahrai S. M., Zare A., Khalili M. K. & Asnafi A. 2013 Seismic design of fuzzy controller for semi active tuned mass dampers using top stories as the mass. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 14(3), 383-396.
14. Bathaei A., Zahrai S. M. & Ramezani M. 2018 Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and type-2 fuzzy algorithms. *J. Vib. Control*, 24(13), 2938-2953.
15. Tabatabaiefar H. R., Fatahi B. & Samali B. 2013 Lateral seismic response of building frames considering dynamic soil-structure interaction effects. *J. Eng. Mech.*, 45(3), 311-321.
1. Kim H. S. & Kang J. W. 2012 Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm. *Eng. Struct.*, 41, 242-257.
2. Mohebbi M. & Joghataie A. 2012 Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(1), 57-76.
3. Das D., Datta T. & Madan A. 2012 Semiactive fuzzy control of the seismic response of building frames with MR dampers. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 41(1), 99-118.
4. Zahrai S. M. & Salehi H. S. 2014 Semi-active seismic control of mid-rise structures using magneto-rheological dampers and two proposed improving mechanisms. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 38(C1), 21.
5. Luu M., Martinez-Rodrigo M. D., Zabel V. & Könke C. 2014 Semi-active magnetorheological dampers for reducing response of high-speed railway bridges. *Control Engineering Practice*, 32, 147-160.
6. Kaveh A., Pirgholizadeh S. & Khadem H. O. 2015 Semi-active tuned mass damper performance with optimized fuzzy controller using CSS algorithm. *Asian Journal Of Civil Engineering (BHRC)*, 16(5), 587-606.
7. Mirzai N. M., Zahrai S. M. & Bozorgi F. 2017 Proposing optimum parameters of TMDs using GSA and PSO algorithm for drift reduction and uniformity. *Structural Engineering and Mechanics*, 63(2), 147-160.

Semi-Active Fuzzy Control of Nine-Story Nonlinear Building With Combination of TMD & MR Damper in Series

Sepideh Hashemi¹, Seyed Mehdi Zahrai^{2*}

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

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

mzahrai@ut.ac.ir

Abstract:

One of the challenges in the field of civil engineering is to mitigate the seismic vibration of structures induced by dynamic loads, such as earthquake and strong wind in order to prevent undesirable damages causing human discomfort and economic consequence. The vibration control systems can be categorized as passive, active and semi-active. In recent years, semi-active control systems demonstrate better control effects than both passive and active systems. Semi-active control devices can behave as passive devices in the event of a power loss, and are therefore more reliable and consume less power than the active systems. In this study, to evaluate the effectiveness of the semi-active tuned mass damper using MR damper and a fuzzy logic controller, the nonlinear model of the nine-story benchmark structure is subjected to earthquake excitation. The semi-active tuned mass damper consists of a 1000 kN magnetorheological damper and the damping force of the MR damper is controlled by the fuzzy logic controller. The Bouc–Wen model is utilized to model the dynamic behavior of the MR damper. For this purpose, the incremental dynamic analysis (IDA) is conducted to consider the effectiveness of the maximum acceleration of two near- and far-field acceleration records on the performance of the control systems. Two near-field earthquake acceleration records including the Kobe (1995) and Northridge (1994) and two far-field earthquake acceleration records including the El Centro (1940) and Hachinohe (1968) are used in this study.

To achieve the optimum parameters of tuned mass damper, a numerical search method is used to reduce the displacement of the top floor of the structure. The optimal mass ratio, damping and the frequency of the tuned mass damper of these analysis for this structure are 3.5%, 10% and 2 rad/s. Also, this benchmark structure is modeled in OpenSees and the fuzzy inference system was implemented in MATLAB. In order to implement the semi-active control system, it's necessary to communicate between OpenSees and MATLAB. For this purpose TCP-IP method is used. The displacement and velocity responses of the top floor of structure equipped with tuned mass damper are considered as the input values for the fuzzy inference system. Furthermore, the required voltage of MR damper in this floor is defined as the output parameter of the fuzzy system. Moreover, the membership functions of fuzzy control are triangle and trapezoidal functions.

The obtained results of the FLC are compared to those of passive controlled structure. Therefore, absolute displacement and acceleration values of the top floor of the structure, the maximum relative displacement and the base shear values are investigate. The results showed that the FLC reduces the maximum top floor displacement, the maximum relative displacement and the maximum base shear by 17.75%, 15.88% and 16.85% as compared to the uncontrolled structure, respectively and also, it reduces those responses by 3.62%, 1.17% and 15.76% as compared to the passive response, respectively. Furthermore, the fuzzy control system has effective performance than the passive system to decrease the maximum and residual displacement of the stories. On the other hand, the fuzzy control system has a low performance in reducing the maximum top floor accelerations.

Keywords: semi-active control, MR-STMD, tuned mass damper, MR damper, fuzzy logic controller.