

## کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه با رفتار غیرخطی به کمک میراگر جرمی و

## مغناطیسی با الگوریتم منطق فازی براساس سرعت و تغییر مکان

سید مهدی زهرانی*	اکبر بطهائی	ساسان مستقیم‌پهرانی
استاد دانشکده مهندسی عمران	دکتری مهندسی زلزله	کارشناس ارشد مهندسی زلزله
دانشگاه تهران	دانشگاه تهران	دانشگاه علم و صنعت ایران
mzahrai@ut.ac.ir	a.bathaei@ut.ac.ir	Sasan_mostaghimi@alumni.iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵

## چکیده

در این پژوهش تأثیر بکارگیری میراگرهای جرمی تنظیم‌شده بهینه غیرفعال و میراگر مغناطیسی نیمه‌فعال به صورت جداگانه و نیز با استفاده همزمان از میراگرها در کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سیستم یک سازه ۱۲ طبقه فولادی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی سازه فولادی و میراگر جرمی تنظیم‌شده از نرم‌افزار اپنسیس<sup>۱</sup> و جهت مدل‌سازی اثر میراگر مغناطیسی از نرم‌افزار متلب<sup>۲</sup> استفاده شده است. در نرم‌افزار متلب، ولتاژ مناسب کنترلی برای میراگر مغناطیسی با پیاده‌سازی منطق فازی با تصمیم‌گیری بر اساس سرعت و تغییر مکان تعیین می‌شود؛ سپس با حل معادله دینامیکی میراگر، نیروی آن محاسبه و اثر این نیرو روی مدل سازه ۱۲ طبقه در نرم‌افزار اپنسیس وارد می‌شود. برای اتصال بین دو نرم‌افزار از شبکه TCP/IP به عنوان پل ارتباطی استفاده شده است. تحلیل‌های دینامیکی افزایشی با استفاده از ۷ رکورد زمین‌لرزه با بیشینه شتاب‌های ۰/۱g تا ۱g با گام افزایشی ۰/۱g انجام شده است. براساس نتایج، الگوریتم منطق فازی با تولید ولتاژ مناسب کنترلی و ارسال آن به میراگر مغناطیسی موجب تطبیق بیشتر سیستم کنترلی ترکیبی میراگر جرمی و مغناطیسی با رفتار سازه شده است. در واقع سیستم کنترلی ترکیبی علاوه بر کاهش حداکثر پاسخ سازه در پالس اصلی زلزله توانایی بیشتری برای کاهش پاسخ سازه تحت اثر پالس‌های ضعیف‌تر و در مجموع کاهش انرژی وارد شده به سازه در طول مدت زمان زمین‌لرزه دارد. سیستم کنترل ترکیبی میراگر جرمی و مغناطیسی پاسخ حداکثر تغییر مکان بام سازه را نسبت به حالت سیستم کنترلی غیرفعال با میراگر جرمی تنظیم‌شده ۲۳ درصد بهبود داده است. این نتایج برای حداکثر برش پایه سازه برابر ۲۷/۹ می‌باشد. درصد بهبود مقادیر پراکندگی پاسخ تغییر مکان بام و برش پایه در سیستم‌های مذکور به ترتیب برابر ۲۲/۱ و ۲۵/۹ درصد می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** سازه فولادی، میراگر جرمی تنظیم‌شده، میراگر سیال مغناطیسی، الگوریتم منطق فازی، تحلیل دینامیکی افزایشی.

## ۱. مقدمه

ایده استفاده از میراگرهای انرژی در سازه‌ها به منظور کاهش ارتعاشات لرزه‌ای با مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی کلی<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۷۲) مطرح شد [۱]. امروزه کنترل ارتعاش در سازه‌ها به کمک سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی صورت می‌گیرد. این امر به کاهش پاسخ تغییرمکان، برش پایه و نیز شتاب سازه در برابر نیروهای جانبی زلزله منجر می‌شود. در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با میراگرهای جذب انرژی، هم باید نیازهای مقاومتی آن‌ها تأمین شده و هم محدودیت تغییرمکان جانبی رعایت گردد. تفکر کنترل ارتعاش ورودی به سازه و پاسخ آن، تغییرات اساسی را در روند معمول مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله ایجاد کرده است. در این تفکر به جای مقاوم‌سازی سازه به عنوان تنها راه، تجهیزات جانبی نظیر میراگرها نصب می‌شوند تا همراه با سازه و به صورت یک مجموعه در برابر زلزله مقاومت کنند. این تجهیزات با رفتار خاص خود باعث بهبود پاسخ سازه به هنگام زمین‌لرزه می‌شوند. مطالعه این تجهیزات باعث ایجاد فلسفه طراحی جدیدی می‌شود که روی افزایش ظرفیت استهلاک انرژی در سازه تأکید دارد و سازه به جای مقاومت در برابر زلزله، در مقابل آن کنترل می‌شود [۲ و ۳].

میراگر جرمی تنظیم‌شده از سیستم‌های کنترل غیرفعال است که برای اولین بار در سال ۱۹۰۹ توسط فرام<sup>۴</sup> برای کاهش ارتعاش کشتی‌ها بر اثر امواج دریا در ایالات متحده مطرح شد [۴]. این میراگر شامل یک سیستم «جرم، فنر و میراگر» است که در ارتفاعی از سازه قرار داده می‌شود تا پاسخ آن را کاهش دهد. برای این کار یک جرم اضافی در حدود ۱ تا ۲ درصد جرم مؤثر مودی اولین مود ارتعاشی سازه در ارتفاع مناسبی

از سازه نصب شده و فرکانس زاویه‌ای ارتعاش آن با فرکانس زاویه‌ای مود اول سازه تنظیم می‌شود تا ارتعاشات سازه را کنترل نماید؛ هنگامی که این فرکانس تحریک می‌شود، میراگر جرمی با حرکت غیرهم‌فاز خود نسبت به سازه، انرژی زلزله را جذب و مستهلک می‌کند [۵]. ذکر این نکته بسیار مهم است که هنگامی می‌توان از حداکثر ظرفیت میراگرهای جرمی تنظیم‌شده غیرفعال استفاده نمود که پارامترهای آن‌ها بهینه باشند [۶].

گائو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲) یک روش بهینه‌سازی را برای یک میراگر جرمی غیرخطی ارائه نمودند. آن‌ها میراگر جرمی غیرخطی را بر روی یک سازه یک درجه آزادی که تحت ارتعاش نویز سفید گاوسی قرار گرفته بود گذاشتند. آن‌ها تأثیرپذیری میراگر جرمی غیرخطی را برای نسبت‌های مختلف میرایی سازه و تحریک‌های با شدت متفاوت بررسی نمودند [۷]. تابش‌پور و اخوات (۲۰۱۴) به بررسی دقت سیستم یک درجه آزادی معادل برای تحلیل دینامیکی سکوه‌های ثابت دریایی مجهز به میراگر جرمی پرداختند. نتایج نشان داد روش یک درجه آزادی معادل دارای خطای بسیار کمی در محاسبه پاسخ سازه بدون میرایی طبیعی و میراگر جرمی است [۸]. مینائی و قربانی‌تنها (۲۰۱۴) روش تنظیم گام‌به‌گام برای تنظیم میراگر جرمی نیمه‌فعال با سختی متغیر را ارائه دادند که در این روش سختی مورد نظر به صورت گام‌به‌گام تعیین می‌شود [۹]. سالوی و ریزی<sup>۶</sup> (۲۰۱۷) به بهینه‌سازی میراگرهای جرمی که با استفاده از تعادل جرم‌های مؤثر مودی سازه تنظیم شده‌اند و نیز تأثیر این میراگر بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی با رفتار خطی پرداختند. نتایج نشان دادند که یک تقسیم متعادل از جرم‌های مؤثر مودی

در حالت تنظیم شده یک جزء ضروری برای اثربخشی بالای میراگر جرمی در کنترل ارتعاشات سازه است [۱۰]. بوی و ترن<sup>۷</sup> (۲۰۲۲) به طراحی بهینه و چند هدفه میراگر جرمی تنظیم شده برای کنترل لرزش پل‌ها در مقابل سرعت بالای باد پرداختند. آن‌ها تأثیر میراگرهای جرمی تنظیم شده بر بهبود لرزش پل‌های با دهانه بزرگ را به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار داده و رویکرد جدیدی را در بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده نصب شده روی پل‌های با دهانه بزرگ براساس یک روش بهینه‌سازی چند هدفه معرفی نمودند. نتایج نشان دادند که استفاده از روش پیشنهادی هنگام طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شده بهینه و نصب آن‌ها روی پل‌های دارای دهانه‌های بزرگ، سرعت باد بحرانی سیستم برای شروع ارتعاش را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۱].

گائو<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۳) به طراحی پارامترها و ارزیابی عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده برای کنترل لرزه‌ای سازه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه پرداختند. آن‌ها ابتدا یک مدل اندرکنش خاک و سازه که خاک توسط مدل‌های پارامتری توده‌ای دقیق<sup>۹</sup> شبیه‌سازی شده بود ساختند؛ سپس یک روش ساده و کاربردی برای شناسایی ویژگی دینامیکی ساختاری مدل اندرکنش خاک و سازه ارائه نمودند. نتایج نشان دادند که میراگر جرمی تنظیم شده طراحی شده با روش پیشنهادی می‌تواند عملکرد و ثبات خوبی را از خود نشان دهد [۱۲]. شمس‌الدین‌لو و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی یک روش طراحی کارآمد با استفاده از دو استراتژی «مبتنی بر بهینه‌سازی فراابتکاری» و «روش بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان» جهت طراحی بهینه میراگر جرمی تنظیم شده و میراگر جرمی

تنظیم شده چندگانه در سازه‌های غیرخطی تحت عدم قطعیت در پارامترهای مکانیکی سیستم کنترلی پرداختند. نتایج نشان دادند که استراتژی «بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان» توانایی بسیار خوبی در طراحی بهینه میراگر جرمی تنظیم شده و میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه با عملکرد مناسب جهت کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه غیرخطی دارد [۱۳].

میراگر با سیال کنترل شونده توسط میدان مغناطیسی یا همان میراگر سیال مغناطیسی از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال است. با کمک سیال مغناطیسی موجود در این نوع میراگرها، نیروی زیادی توسط سیستم پیستون و سیلندر ایجاد می‌شود. سیستم کنترل نیمه‌فعال این میراگرها با تنظیم یک منبع انرژی کوچک که معمولاً یک جریان الکتریکی با ولتاژ ۱۲ تا ۲۴ ولت است، تأمین می‌شود. مشخصات مکانیکی سیال مورد استفاده در این میراگرها به سرعت با تغییر ولتاژ ورودی تغییر می‌کند. بدون اعمال یک منبع انرژی خارجی در میراگر و تغییر مشخصات آن، این میراگر به صورت غیرفعال عمل می‌کند [۱۴].

اوز و هادی<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۴) به طراحی بهینه سیستم کنترل نیمه‌فعال برای ساختمان‌های مجاور متصل به میراگر مغناطیسی بر اساس منطق فازی یکپارچه و الگوریتم ژنتیک چندهدفه پرداختند. آن‌ها در اهداف اصلی خود از طراحی بهینه استفاده نمودند که نه تنها کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای، بلکه به حداقل رساندن هزینه کل سیستم میراگر را نیز در نظر بگیرد. نتایج نشان دادند که کاهش تعداد میراگرها کارایی سیستم را افزایش می‌دهد؛ به عبارت دیگر کاهش تعداد میراگرها برای کنترل پاسخ دینامیکی سیستم، می‌تواند بیشتر از افزایش تعداد میراگرها در کنترل معقولانه پاسخ لرزه‌ای

و هم‌زمان کاهش هزینه کمک کند [۱۵]. بوی<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل دینامیکی پارامتریک جدید را مبتنی بر مدل شبه‌استاتیکی و یک ضریب هیستریزیس برای پیش‌بینی دقیق و معنادارتر رفتار هیستریزیس میراگرهای مغناطیسی ارائه نمودند که نتایج نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل ارائه شده در پیش‌بینی رفتار هیستریزیس میراگرهای مغناطیسی است [۱۶]. بطهایی و همکاران از میراگرهای مغناطیسی در کنترل ارتعاشات پل شهری کالج تهران به همراه الگوریتم منطبق فازی استفاده کردند [۱۷]. رضانی و همکاران از الگوریتم منطبق فازی برای بهینه نمودن پارامترهای میراگرهای جرمی در کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند مرتبه بهره بردند [۱۸]. ترکیب میراگر جرمی و مغناطیسی در بام سازه توسط بطهایی و همکاران بر روی سازه ۱۱ درجه آزادی با استفاده از الگوریتم منطبق فازی نوع ۱ و ۲ مورد بررسی قرار گرفت که عملکرد مناسب آن اثبات شد [۱۹]. رضانی و همکاران به بررسی سیستم‌های فازی نوع ۱ و ۲ در کنترل نیمه‌فعال میراگر جرمی به همراه عدم قطعیت‌های ناشی از سیستم کنترلی مورد مطالعه پرداختند [۲۰]. هاشمی و زهرانی (۲۰۱۹) به کنترل نیمه‌فعال فازی سازه ۹ طبقه غیرخطی با استفاده از ترکیب سری میراگرهای جرمی تنظیم‌شده و سیال مغناطیسی که در بام سازه قرار داده شده است، پرداختند. آن‌ها از تحلیل دینامیکی افزایشی<sup>۱۲</sup> (IDA) استفاده نمودند [۲۱]. بطهایی و زهرانی (۲۰۲۲) به تأثیر تأخیر زمانی در کنترل نیمه‌فعال فازی سازه یک درجه آزادی مجهز به میراگر سیال مغناطیسی و غلبه بر آن با استفاده از سیستم کنترل پیش‌بین پرداختند. میزان تأخیر زمانی اعمال شده به سیستم کنترلی برابر

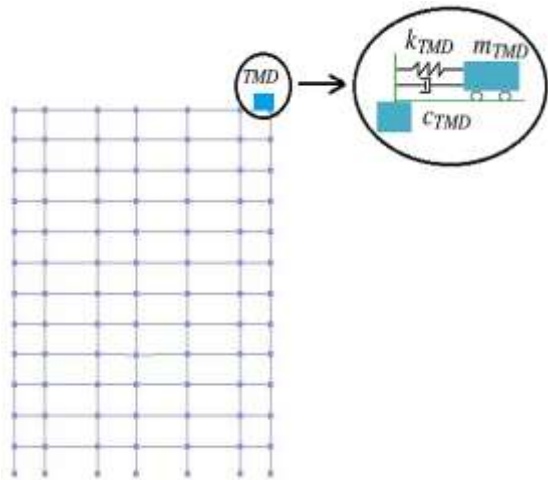
۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شد [۲۲]. بهمنی و زهرانی (۲۰۲۲) از الگوریتم‌های فازی نوع ۱ و ۲ با هدف کاهش احتمال برخورد دو سازه سه و نه طبقه مجاور هم و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای دو سازه به کمک میراگر مغناطیسی استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند عملکرد کنترل فازی نوع ۲ در کاهش خطر برخورد دو سازه در مقایسه با فازی نوع ۱ بهتر بوده است [۲۳]. تانگ<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۲۳) به کنترل ارتعاش پل‌های کامپوزیت فولادی-بتنی راه‌آهن (محل عبور قطار) با در نظر گرفتن اثرات لغزش و تأخیر برشی با ارائه یک مدل ترکیبی از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده و سیال مغناطیسی پرداختند [۲۴]. بطهایی و زهرانی به مطالعه تأخیر زمانی در سیستم کنترل نیمه‌فعال با استفاده از میراگر مغناطیسی به همراه الگوریتم منطبق فازی شناور و کنترل پیش‌بین پرداختند. ایشان همچنین به استفاده از الگوریتم کنترلی مک<sup>۱۴</sup> به جبران تاخیرهای زمانی ایجاد شده در سیستم کنترلی پرداختند [۲۵-۲۷]. نجفی و مطلبی (۲۰۲۴) به مروری بر پارامترهای عملکردی میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی پرداختند [۲۸].

در رابطه با سیستم‌های کنترل سازه به صورت فعال، غیرفعال، نیمه‌فعال و ترکیبی ایده‌های متعددی پیشنهاد شده است که عمدتاً بر روی سازه‌ها با رفتار خطی مطالعه شده است. در این مقاله، تأثیر به کارگیری میراگرهای جرمی تنظیم‌شده بهینه غیرفعال و سیال مغناطیسی نیمه‌فعال به صورت جداگانه و هم‌زمان (ترکیبی) در کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه ۱۲ طبقه فولادی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه ارزیابی شده است. بدین منظور به بررسی و مقایسه پاسخ لرزه‌ای سه مدل شامل: مدل بدون میراگر، مدل

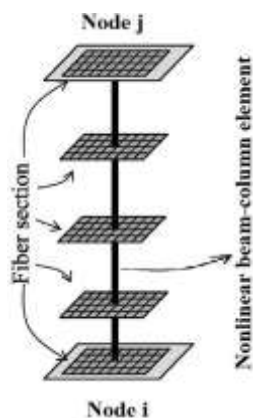
مجهاز به میراگر جرمی تنظیم شده بهینه (TMD<sup>15</sup>) و مدل مجهز به هر دو میراگر جرمی و مغناطیسی<sup>16</sup> (MR+TMD) تحت تحلیل دینامیکی افزایشی پرداخته شده است. برای تطابق بیشتر سیستم کنترلی فازی با رفتار سازه از سیستم تصمیم‌گیری فازی بر اساس سرعت و تغییر مکان استفاده شده تا ولتاژ مناسب کنترلی و در نتیجه نیروی مناسب کنترلی تعیین گردد. سازه مورد نظر تحت تاثیر ۷ زلزله با بیشینه شتاب‌های ۰/۱g تا ۱g قرار می‌گیرد. میراگر مغناطیسی در طبقه اول به منظور کاهش نیروی برش پایه و میراگر جرمی در بام سازه جهت کاهش تغییر مکان سازه نصب گردیده است. با وجود این ایده، سازه دیرتر وارد ناحیه غیرخطی شده و میراگر جرمی برای بیشینه شتاب‌های بالاتر از حالت تنظیم بهینه خارج نمی‌گردد. با عنایت به اینکه بیشتر مطالعات پیشین انجام شده در بخش خطی سازه‌ها متمرکز بوده و از رفتار غیرخطی سازه چشم‌پوشی گردیده است، در مطالعه حاضر، سازه ۱۲ طبقه فولادی با رفتار غیرخطی (رفتار واقعی سازه) مدل‌سازی گردیده است تا سیستم کنترلی مورد بررسی تا حد زیادی با رفتار واقعی سازه سنجیده شود. در تحقیقات قبلی میراگر جرمی و میراگر مغناطیسی در کنار یکدیگر و یا توأم در یک محل نصب گردیده بودند، لیکن در مطالعه حاضر میراگر جرمی در بام سازه و میراگر مغناطیسی در طبقه اول سازه نصب گردیده است. علاوه بر این استفاده از سیستم تصمیم‌گیری فازی بر مبنای سرعت و تغییر مکان سازه موجب عدم واگرایی سیستم نیمه‌فعال (میراگر مغناطیسی به همراه کنترل فازی) شده و انطباق‌پذیری بیشتری با رفتار سازه در راستای کاهش پاسخ‌های آن دارد.

## ۲. مدل‌سازی سازه فولادی ۱۲ طبقه

به منظور مدل‌سازی سازه ۱۲ طبقه از نرم‌افزار اپنسیس استفاده شده است. به منظور در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه از مصالح Steel02 برای مدل‌سازی مصالح فولادی بهره گرفته شده است. شکل ۱ و ۲ نمودار رفتار مصالح فولادی و نمودار هیستریزس آن می‌باشد. مقاطع تیرها و ستون‌ها با دستور فایبر<sup>۱۷</sup> مش‌بندی شده است و از المان‌های تیرستون غیرخطی نیز برای مدل‌سازی اعضای سازه‌ای استفاده شده است. سازه دوازده طبقه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اپنسیس در شکل ۳ نمایش داده شده که دارای دوره تناوب مود اول ۲/۰۹ ثانیه است. شکل ۴ مش‌بندی مقطع المان تیر و ستون در سازه را نمایش می‌دهد که از ۵ نقطه انتگرال‌گیر بهره گرفته شده است. سازه‌های ساخته شده دارای ارتفاع طبقه اول ۳ متر و برای سایر طبقات ۳/۳ متر می‌باشد. همچنین طول دهانه سازه‌ها در شکل ۳ به ترتیب از چپ به راست برابر ۳، ۵/۱، ۳/۷، ۵، ۵/۱ و ۳ متر می‌باشد. رفتار فولاد در نرم‌افزار با استفاده از uniaxialMaterial Steel02 تعریف شده است. این دستور برای ساخت ماده فولاد Giuffre-Menegotto-Pinto با سخت‌شوندگی کرنش ایزوتروپیک به کار می‌رود. المان تیر ستون غیرخطی توزیع گسترده‌ی پلاستیسیته در طول المان را در نظر می‌گیرد. مقطع تیر و ستون با استفاده از دستور section fiber ایجاد شده است. نواحی نام برده اصطلاحاً پیچ<sup>۱۸</sup> نامیده می‌شوند. در روند ساخت مقطع فایبر از مصالح تک محوری استفاده می‌شود که فرضیه‌های تیر برنولی را تحمیل می‌کنند. به منظور در نظر گرفتن اثر P-Delta از دستور تبدیل



شکل ۳. سازه دوازده طبقه مدل سازی شده در نرم افزار اپنسیس

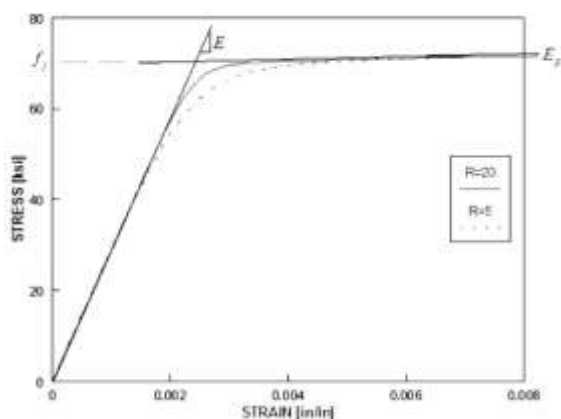


شکل ۴. المان تیرستون غیرخطی و مش بندی مقطع آن [۲۹]

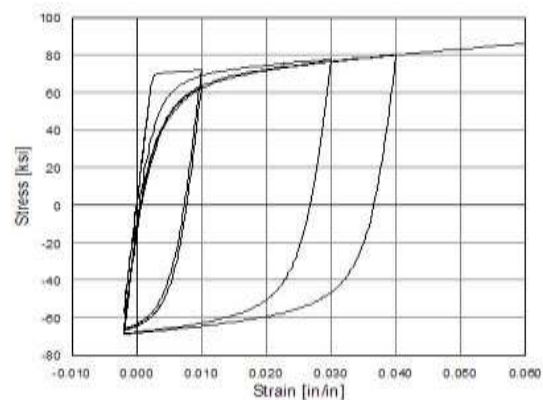
### ۳. مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده

یکی از موثرترین روش های کنترل غیرفعال سازه ها، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده می باشد. این میراگرها دارای جرمی در حدود ۱ تا ۵ درصد وزن کل سازه بوده، به وسیله یک فنر و میراگر به محلی از سازه، که معمولاً دارای بیشترین تغییر مکان می باشد متصل می گردند. میراگرهای جرمی را معمولاً روی فرکانس اصلی ارتعاشی سازه تنظیم می کنند. هنگامی که این

مختصات geomTransf PDelta استفاده شده است. میرایی ذاتی سازه برابر ۲ درصد انتخاب شده است. برای در نظر گرفتن و اعمال میرایی ذاتی سازه از روش رایلی استفاده شده است.



شکل ۱. نمودار رفتار مصالح فولادی Steel02 [۲۹]

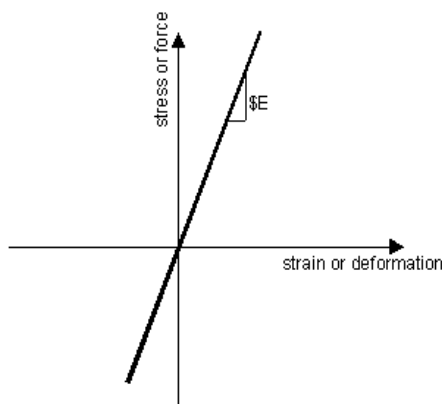


شکل ۲. نمودار هیستریزس مصالح فولادی Steel02 [۲۹]

جدول ۱. پارامترهای سیستم یک درجه آزادی و میراگر جرمی تنظیم شده بهینه

Structure	TMD
$m = 959967 \text{ kg}$	$m_d = 19199 \text{ kg}$
$f_i = 0.4784 \text{ Hz}$	$f_{TMD} = 0.4694 \text{ Hz}$

به منظور مدل سازی سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال به ترتیب از مصالح الاستیک (ارتجاعی) و ویسکوز تک محوری در نرم افزار اپنسیس استفاده شده است؛ بدین منظور برای سختی سیستم یک درجه آزادی و سختی میراگر جرمی از مصالح uniaxialMaterial Elastic و برای میرایی سیستم یک درجه آزادی و میراگر جرمی از مصالح uniaxialMaterial Viscous استفاده شده است. همچنین برای مدل سازی المان های سیستم یک درجه آزادی و میراگر جرمی تنظیم شده از المان با طول صفر (element zeroLength) بهره گرفته شده است [۲۹]. در شکل ۵ نمودار رفتار مصالح الاستیک تک محوری مورد استفاده در مدل سازی نرم افزار اپنسیس نشان داده شده است.



شکل ۵. رفتار مصالح uniaxialMaterial Elastic در نرم افزار اپنسیس [۲۹]

فرکانس تحریک می شود، میراگر جرمی با حرکت غیرهم فاز خود نسبت به سازه، انرژی زلزله را جذب و میرا می کند. میراگر جرمی را می توان بسیار ساده نصب و اجرا نمود. حتی می توان از تجهیزات درون سازه مانند دستگاه های تاسیساتی به عنوان میراگر جرمی استفاده نمود. بر خلاف سایر ابزارهای کنترل سازه نظیر کنترل فعال، نگهداری میراگرهای جرمی هزینه زیادی ندارد. ذکر این نکته بسیار مهم است که هنگامی می توان از حداکثر ظرفیت میراگرهای جرمی فعال و غیرفعال استفاده نمود که پارامترهای آن ها بهینه باشند. در این مقاله نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شده  $0.02$  درصد جرم سازه می باشد و فرکانس و درصد میرایی میراگر جرمی از رابطه ارائه شده توسط پاستیا<sup>۱۹</sup> و لوکا<sup>۲۰</sup> استفاده شده است [۳۰].

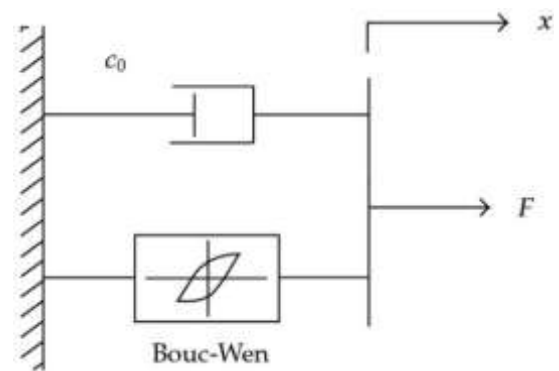
$$f_{TMD} = \frac{f_1}{1+\mu} \quad (1)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (2)$$

$f_i$  و  $f_{TMD}$  به ترتیب فرکانس میراگر جرمی و سازه می باشد.  $\mu$  نسبت جرمی و  $\xi_{opt}$  درصد میرایی بهینه میراگر جرمی است. جرم کل سازه برابر  $959967$  و جرم میراگر برابر  $19199$  کیلوگرم است که در بام سازه نصب گردیده است. فرکانس سازه برابر  $0.4784$  هرتز و فرکانس میراگر جرمی  $0.4694$  هرتز می باشد. درصد میرایی بهینه میراگر نیز  $1/4$  درصد است. به منظور مدل سازی سختی و میرایی میراگر جرمی به ترتیب از مصالح الاستیک و ویسکوز در نرم افزار اپنسیس استفاده شده است.

#### ۴. مدل سازی میراگر مغناطیسی

به منظور کاهش ارتعاشات و مقابله با برش پایه فزاینده در سازه، میراگر مغناطیسی با ظرفیت تولید نیروی ۱۰۰ ton بین سقف طبقه اول و پی سازه اضافه شده است. برای مدل سازی رفتار میراگر مغناطیسی از مدل رفتاری بوک-ون<sup>۲۱</sup> استفاده شده است. از آنجا که مصالحی با این مدل رفتاری در نرم افزار اپنسیس وجود ندارد به جای مدل کردن خود میراگر مغناطیسی از نیروی تولید شده توسط میراگر استفاده شده و به مدل وارد می گردد. مدل رفتاری بوک-ون برای میراگرهای مغناطیسی شامل یک المان بوک-ون و یک میراگر خطی می شود، که به طور موازی با هم عمل می کنند. با انجام آزمایشات تمام مقیاس بر روی میراگرهای مغناطیسی نشان داده شده که این مدل با دقت بالایی می تواند رفتار واقعی این میراگرها را شبیه سازی کند [۳۱]. شمای کلی این مدل رفتاری در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. مدل رفتاری بوک-ون برای میراگر مغناطیسی

[۳۱]

نیروی تولید شده توسط میراگر در این مدل از طریق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$F = C_0 \dot{x} + \alpha z \quad (۳)$$

$$\dot{z} = -\gamma |x| |z| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_m \dot{x} \quad (۴)$$

که در رابطه‌ی بالا  $F$  نیروی میراگر،  $x$  جابجایی میراگر،  $z$  متغیر تحولی و پارامترهای  $n$ ،  $\gamma$ ،  $\beta$  و  $A_m$  مقادیر ثابتی می باشند که با آزمایش روی هر میراگر تهیه می شوند. پارامترهای  $C_0$  و  $\alpha$  با استفاده از روابطی که در ادامه می آیند تعیین می گردند:

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (۵)$$

$$C_0 = C_0(u) = C_{0a} + C_{0b} u \quad (۶)$$

که در این روابط  $u$  ولتاژ کنترل اعمالی<sup>۲۲</sup> و پارامترهای  $\alpha_a$ ،  $\alpha_b$ ،  $C_{0a}$  و  $C_{0b}$  مقادیر ثابت می باشند.

با توجه به مکانیسم داخلی میراگرهای مغناطیسی، این میراگرها نمی توانند ولتاژ دستوری به آن ها را به طور آنی اعمال کنند. بنابراین همواره مدت ناچیزی طول می کشد تا ولتاژ اعمالی به سیستم با ولتاژ دستوری برابر شود. لذا برای مدل سازی این تاخیر زمانی ناچیز در سیستم از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (۷)$$

که در این رابطه  $v$  ولتاژ دستوری و  $\eta$  مقدار ثابت می باشد. بنابراین با دانستن ۹ پارامتر ثابت در مورد میراگر می توان مدل رفتاری بوک-ون را برای آن ایجاد کرد [۳۱].

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در مدل میراگر مغناطیسی

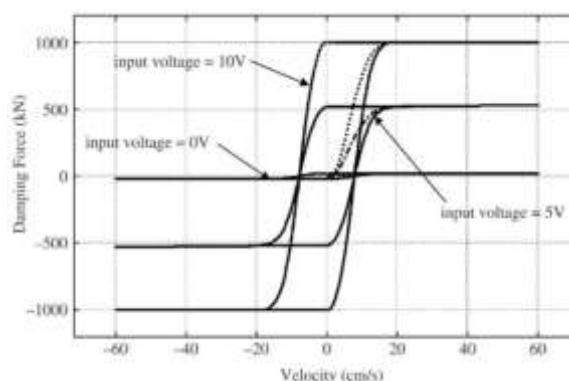
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\alpha_a$	$1.0872 \times 10^5$ (N/cm)	$C_{0_b}$	$44.0 \times 10^5$ (Ns/cm/V)	$\beta$	$3.0$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
$\alpha_b$	$4.9616 \times 10^5$ (N/cm/V)	$A_m$	1.2	$\gamma$	$3.0$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
$C_{0_a}$	4.40 (Ns/cm)	$n$	1	$\eta$	$50$ ( $\text{s}^{-1}$ )

## ۵. صحت‌سنجی ارتباط بین نرم‌افزارهای اپنسیس و متلب

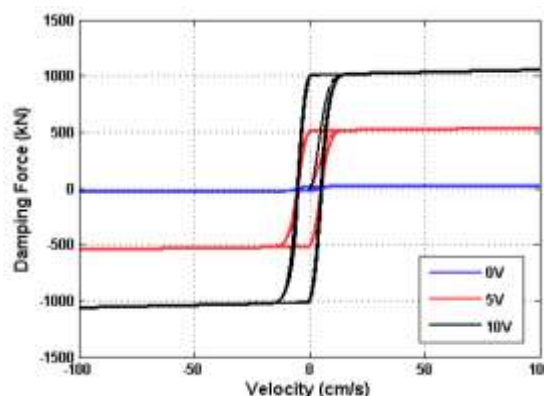
برای مدل‌سازی اثر میراگر سیال مغناطیسی از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در واقع المان میراگر سیال مغناطیسی در اپنسیس وجود ندارد؛ لذا با استفاده از نرم‌افزار متلب ولتاژ مناسب برای میراگر مغناطیسی در حین تحلیل دینامیکی افزایش یافته با پیاده‌سازی منطق فازی یافت شده و از حل معادله دینامیکی میراگر مغناطیسی، نیروی آن محاسبه و اثر این نیرو بر روی مدل سازه در نرم‌افزار اپنسیس وارد شده است. برای اتصال بین دو نرم‌افزار از شبکه TCP/IP به عنوان پل ارتباطی استفاده شده است.

برای حصول اطمینان از اینکه ارتباط بین دو نرم‌افزار اپنسیس و متلب به درستی برقرار شده است، مدل سازه دوازده طبقه تحت اثر زلزله السنترو ایستگاه السنترو با بیشینه شتاب  $0.35$  مورد تحلیل قرار گرفته است. سازه ابتدا فقط توسط نرم‌افزار اپنسیس تحلیل شده و بار دیگر این آنالیز توسط ارتباط بین اپنسیس و متلب انجام شده است و نمودار تغییر مکان بام آن در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۹، واضح است که ارتباط دو نرم‌افزار بدون هیچ مشکلی و با دقت بسیار بالا برقرار شده است.

در شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب نمودارهای ارائه شده توسط اک و همکاران و نمودارهای به دست آمده در تحقیق حاضر مشاهده می‌گردد. شکل ۷. نمودار رفتاری میراگر مغناطیسی، ارائه شده

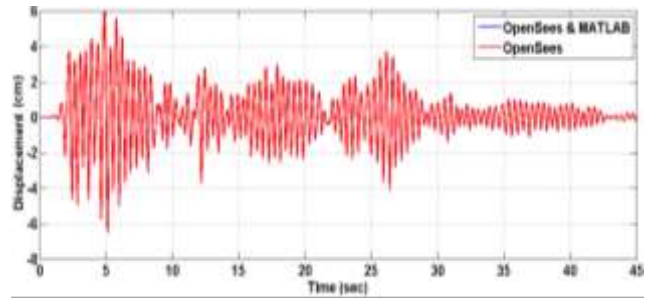


توسط اک و همکاران [۳۱]



شکل ۸. نمودار رفتاری تولید شده برای میراگر مغناطیسی در مطالعه حاضر

با مقایسه‌ی نمودارهای رسم شده برای هر سه ولتاژ صفر، ۵ و ۱۰ ولت در مطالعه حاضر می‌توان اظهار داشت که رفتار میراگر مغناطیسی به خوبی و نزدیک به واقعیت مدل‌سازی شده است.



شکل ۹. صحت‌سنجی ارتباط بین نرم‌افزارهای متلب- اپنسیس و اپنسیس برای زلزله السنترو

## ۶. الگوریتم منطق فازی در سیستم کنترلی مورد استفاده

همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره گردید، المان میراگر سیال مغناطیسی در نرم‌افزار اپنسیس وجود ندارد؛ لذا به منظور مدل‌سازی اثر میراگر مغناطیسی از نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار، ولتاژ مناسب برای میراگر مغناطیسی در حین تحلیل دینامیکی (تاریخچه زمانی) با پیاده‌سازی منطق فازی یافت شده و از حل معادله دینامیکی میراگر مغناطیسی، نیروی آن محاسبه و اثر نیروی یافت شده بر روی مدل سازه در نرم‌افزار اپنسیس وارد می‌گردد. در الگوریتم فازی مورد استفاده در این مطالعه برای پارامترهای ورودی به سیستم، یازده مجموعه فازی

مختلف در نظر گرفته شده است. این مجموعه‌ها با نام‌های NVL، NL، NVL، NM، NS، NVS، ZO، PS، PM، PL و PVL نام‌گذاری شده‌اند. در جدول ۳، هر یک از این یازده مجموعه فازی معرفی شده‌اند. در کلیه سیستم‌های فازی مورد استفاده در این پژوهش، پارامتر خروجی همان ولتاژ اعمالی به میراگرهای مغناطیسی می‌باشد. برای پارامتر خروجی، شش مجموعه فازی مختلف در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ نیز، هر یک از این شش مجموعه فازی معرفی شده‌اند.

همان‌گونه که قبل‌تر نیز اشاره شد، مدل‌سازی سازه دوازده طبقه و المان میراگر جرمی تنظیم‌شده در نرم‌افزار اپنسیس و مدل‌سازی اثر میراگر مغناطیسی و محاسبه نیروی آن با پیاده‌سازی منطق فازی در نرم‌افزار متلب انجام شد. به منظور اتصال بین دو نرم‌افزار از شبکه TCP/IP به عنوان پل ارتباطی استفاده شد. نرم‌افزار اپنسیس از زبان برنامه‌نویسی (کُد نویسی) TCL استفاده می‌کند. برای استفاده از شبکه TCP/IP از امکان ایجاد ارتباط شبکه‌ای بین سرویس‌دهنده<sup>۲۳</sup> و سرویس‌گیرنده<sup>۲۴</sup> که از امکانات زبان برنامه‌نویسی TCL است، استفاده شد.

جدول ۳. توصیف مجموعه‌های فازی در نظر گرفته‌شده برای پارامترهای ورودی

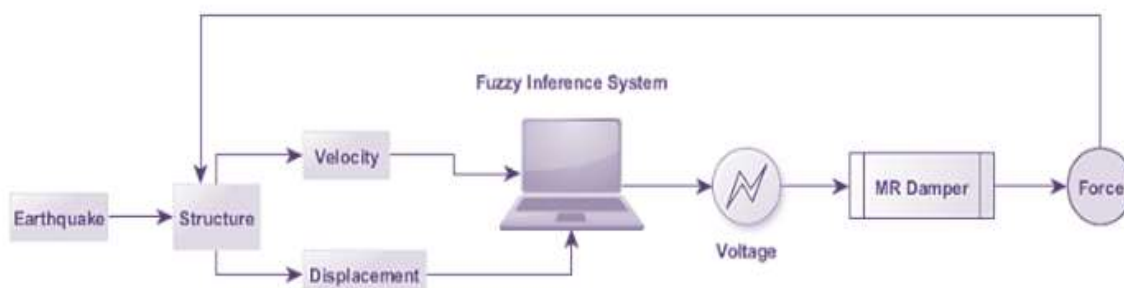
NVL	NL	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PL	PVL	نام مجموعه فازی
مقادیر منفی بسیار بزرگ	مقادیر منفی بزرگ	مقادیر منفی متوسط	مقادیر منفی کوچک	مقادیر منفی بسیار کوچک	مقادیر نزدیک به صفر	مقادیر مثبت بسیار کوچک	مقادیر مثبت کوچک	مقادیر مثبت متوسط	مقادیر مثبت بزرگ	مقادیر مثبت بسیار بزرگ	مقادیر مورد نظر

جدول ۴. توصیف مجموعه‌های فازی در نظر گرفته شده برای پارامترهای خروجی

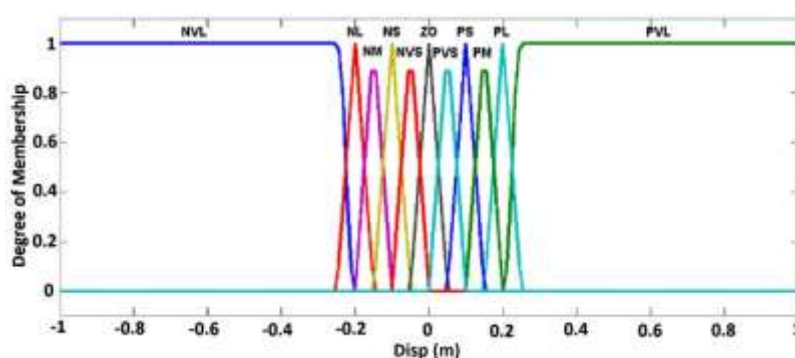
نام مجموعه فازی	ZO	VS	S	M	L	VL
مقادیر مورد نظر	مقادیر نزدیک به صفر	مقادیر بسیار کوچک	مقادیر کوچک	مقادیر متوسط	مقادیر بزرگ	مقادیر بسیار بزرگ

جزئیات مربوط به این ورودی‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند. برای سیستم‌های فازی<sup>۲۵</sup> (FIS) مجموعه قوانین<sup>۲۶</sup> (RB) مطابق جدول ۵ بکار گرفته شده است. فرم ترسیمی این مجموعه قوانین در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

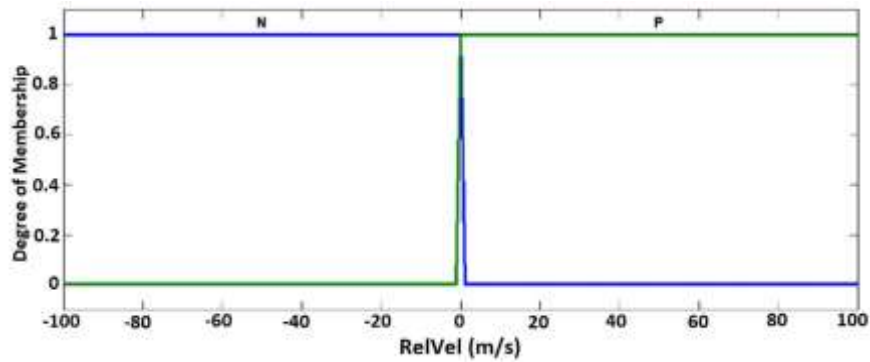
چرخه انجام تحلیل‌های سیستم فازی و کنترل نیمه‌فعال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. متغیرهای ورودی در این سیستم شامل جابجایی و سرعت نسبی دو سر میراگر مغناطیسی می‌باشند، که به ترتیب با  $ReI_{Vel}$  و  $Disp$  نشان داده می‌شوند.



شکل ۱۰. چرخه انجام تحلیل‌های کنترل نیمه‌فعال



شکل ۱۱. جزئیات مربوط به متغیر ورودی جابجایی دو سر میراگر در FIS



شکل ۱۲. جزئیات مربوط به متغیر ورودی سرعت نسبی دو سر میراگر در FIS

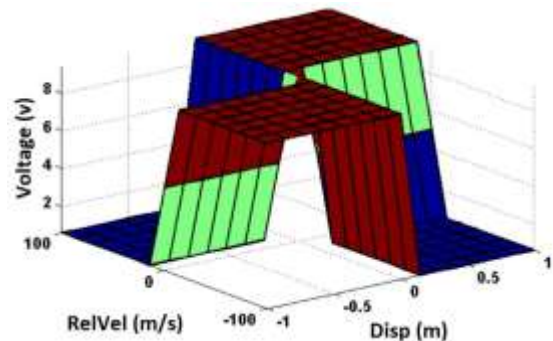
جدول ۵. نمایش ماتریسی RB

		جابجایی نسبی دو سر میراگر (Disp)										
		NVL	NL	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PL	PVL
میراگر نسبی دوسر (RelVel)	P	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	VL	VL	VL	VL	VL	VL
	N	VL	VL	VL	VL	VL	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO

[۳۲] انتخاب شده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۶. زلزله‌های اعمال شده به مدل‌های مورد مطالعه [۳۲]

شماره	زلزله	ایستگاه	بزرگا	سال	بیشینه شتاب (g)
۱	Northridge	Beverly Hills	۶/۷	۱۹۹۴	۰/۵۲
۲	Northridge	Canyon Country-WLC	۶/۷	۱۹۹۴	۰/۴۸
۳	Duzce, turkey	Bolu	۷/۱	۱۹۹۹	۰/۸۲
۴	Hector Mine	Hector	۷/۱	۱۹۹۹	۰/۳۴
۵	Imperial Valley	Delta	۶/۵	۱۹۷۹	۰/۳۵



شکل ۱۳. فرم ترسیمی سه‌بعدی RB

## ۷. معرفی شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

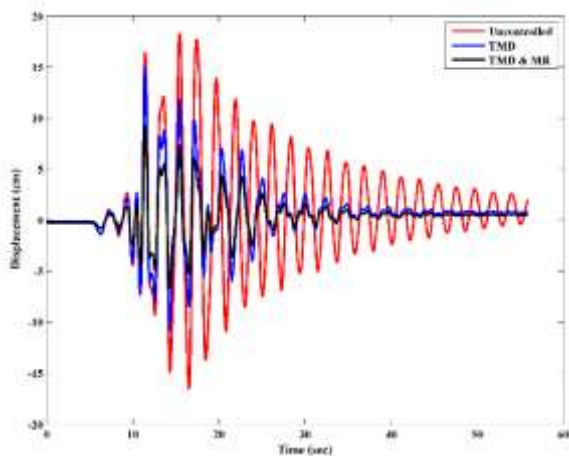
در این مقاله به منظور انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر روی مدل‌های مورد مطالعه از ۷ شتاب‌نگاشت مربوط به زمین‌لرزه‌های گذشته استفاده شده است. زمین‌لرزه‌ها براساس دستورالعمل FEMA P-695

$$RMS(x) = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^n x_l^2}{n}} \quad (8)$$

## ۹. بررسی نتایج تحلیل‌های دینامیکی

### افزاینده

تحلیل دینامیکی افزایشی تحت اثر ۷ زلزله با بیشینه شتاب‌های ۰/۱g تا ۱g به سازه و سیستم‌های کنترلی مورد مطالعه اعمال شده است. به عنوان نمونه در شکل ۱۴ پاسخ تغییرمکان بام سازه تحت اثر زلزله دوزسو ترکیه<sup>۲۸</sup> با بیشینه شتاب ۰/۳g نشان داده شده است که با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده پاسخ سازه کاهش یافته است و با افزودن میراگر مغناطیسی در طبقه اول سازه، پاسخ تغییرمکان بام سازه بیشترین کاهش را داشته است. نتایج متوسط حداکثر تغییرمکان‌های بام سازه تحت اثر زلزله‌های اعمالی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۴. پاسخ تغییرمکان بام سازه تحت زلزله دوزسو ترکیه با بیشینه شتاب ۰/۳g

براساس نمودار شکل ۱۵، با افزایش بیشینه شتاب اعمالی پاسخ تغییرمکان سازه افزایش یافته است. این روند نتایج در پراکندگی پاسخ تغییرمکان نیز مشهود می‌باشد. نمودارهای شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب

## ۸. تحلیل‌های دینامیکی افزاینده

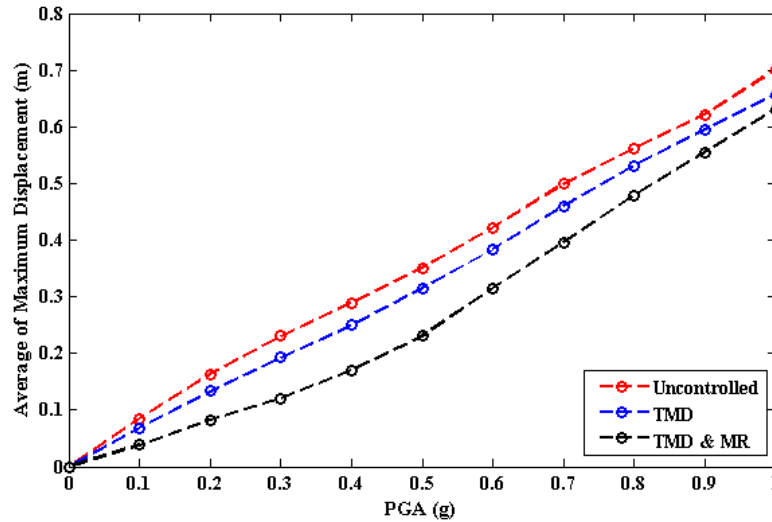
تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA)، یک روش تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد که رفتار سازه را در طیف وسیعی از شدت‌های مختلف زلزله بیان می‌کند. در این روش رفتار سازه تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف از بیشینه شتاب کم تا مقادیر زیاد بیشینه شتاب با گام‌های افزایشی منظم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه بر روی هر یک از سازه‌ها «سازه بدون میراگر کنترلی»، «سازه مجهز به میراگر جرمی بهینه» و «سازه مجهز به میراگرهای جرمی و مغناطیسی» تحت اثر ۷ زلزله که در جدول ۶ به آن‌ها اشاره گردید با بیشینه شتاب‌های ۰/۱g تا ۱g با گام افزایشی ۰/۱g تحلیل IDA انجام گرفت.

پس از انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی به بررسی پاسخ‌های تغییرمکان و برش پایه مدل‌های مورد مطالعه و همچنین  $RMS^{27}$  پاسخ‌ها پرداخته شده است. یکی از خروجی‌های مهم و پرکاربردی که از تحلیل تاریخچه زمانی بدست می‌آید و از آن می‌توان در تفسیر نتایج تحلیل استفاده‌های فراوانی نمود، محاسبه  $RMS$  خروجی‌های خام تحلیل دینامیکی است. مفهوم  $RMS$  یا همان «جذر میانگین مربعات» نشان‌دهنده پراکندگی پاسخ‌ها نسبت به حالت سکون در طول زمان زلزله است. مقدار  $RMS$  با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌گردد که در آن  $x_i$  پاسخ مورد نظر و  $n$  تعداد آن پاسخ است.

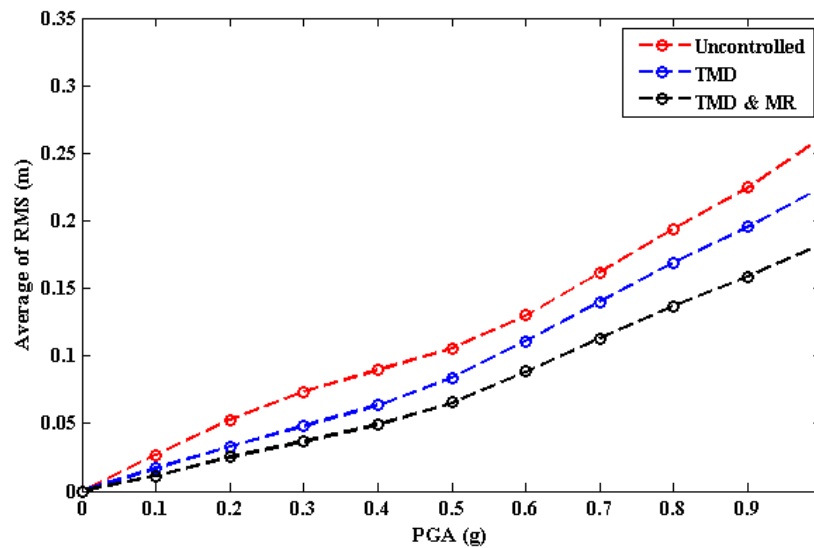
۶	Imperial Valley	El Centro Array #11	۶/۵	۱۹۷۹	۰/۳۸
۷	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	۶/۹	۱۹۹۵	۰/۵۱

کاهش بیشتری داشته است. میراگر جرمی در بام سازه تغییرمکان بام سازه را کاهش می‌دهد و در تراز طبقه اول میراگر مغناطیسی علاوه بر مقاومت در برابر تغییرمکان جانبی سازه، برش پایه سازه را کاهش می‌دهد.

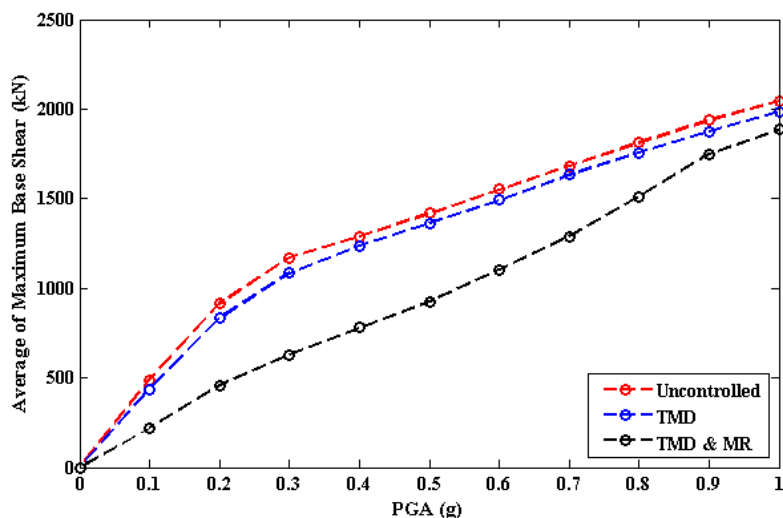
متوسط حداکثر برش پایه سازه و تغییرات پراکندگی پاسخ برش پایه سازه را نمایش می‌دهند. برش پایه سازه مجهز به میراگر جرمی با کاهش میزان برش پایه نموداری شبیه حالت سازه بدون میراگر می‌باشد اما با افزودن میراگر مغناطیسی در طبقه اول برش پایه



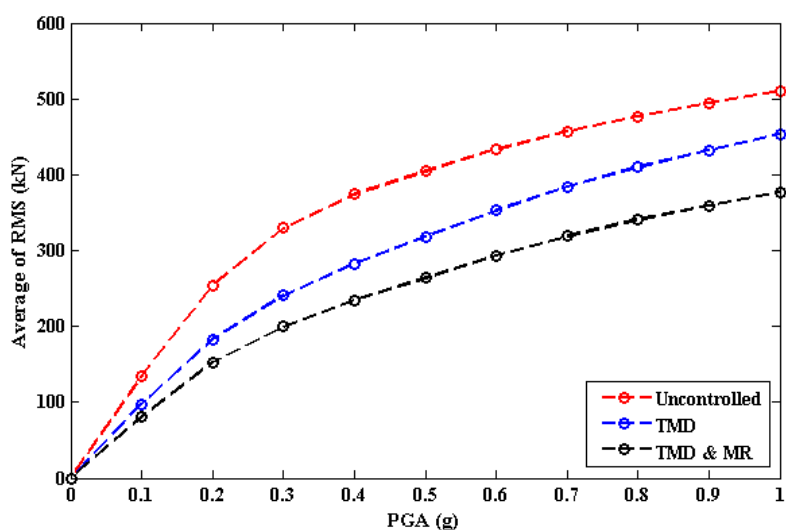
شکل ۱۵. متوسط حداکثر تغییرمکان بام سازه تحت زلزله‌های اعمالی



شکل ۱۶. متوسط RMS تغییرمکان بام سازه تحت زلزله‌های اعمالی



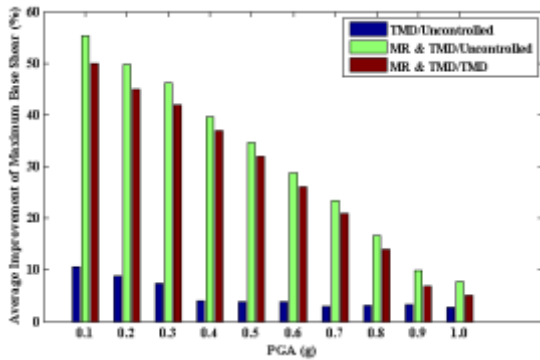
شکل ۱۷. متوسط پاسخ حداکثر برش پایه سازه تحت زلزله‌های اعمالی



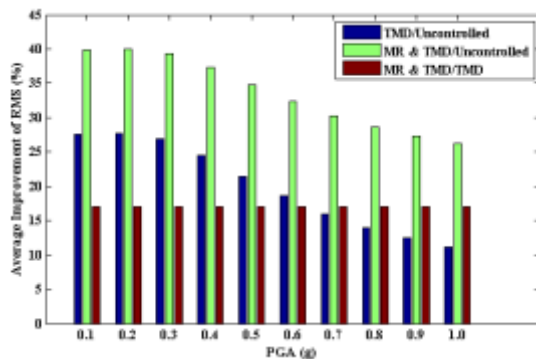
شکل ۱۸. متوسط RMS برش پایه سازه تحت زلزله‌های اعمالی

بام و برش پایه در سازه می‌شود. از طرفی با توجه به ثابت بودن حداکثر ظرفیت میراگر مغناطیسی و خارج شدن میراگر جرمی از حالت تنظیم و همچنین ایجاد مفصل پلاستیک در سازه درصد بهبود پاسخ‌ها کاهش می‌یابد. طبق نمودارهای ارائه شده بیشترین میزان بهبود در حالت استفاده همزمان میراگر جرمی و مغناطیسی نسبت به حالت سازه بدون سیستم کنترلی می‌باشد. افزودن میراگر مغناطیسی به سیستم کنترلی

نمودارهای میله‌ای شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ به ترتیب درصدهای بهبود متوسط حداکثر تغییرمکان بام سازه، تغییرات پراکندگی پاسخ تغییرمکان بام، متوسط حداکثر برش پایه سازه و تغییرات پراکندگی پاسخ برش پایه را نمایش می‌دهند. با افزایش بیشینه شتاب زلزله‌های اعمالی درصد بهبود پاسخ‌ها کاهش یافته است. با افزایش بیشینه شتاب زلزله نیروی بیشتری به سازه وارد می‌گردد که باعث افزایش پاسخ تغییرمکان



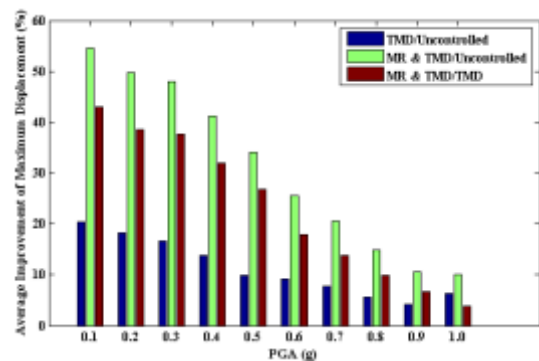
شکل ۲۱. متوسط مقادیر بهبود حداکثر برش پایه سازه تحت زلزله‌های اعمالی



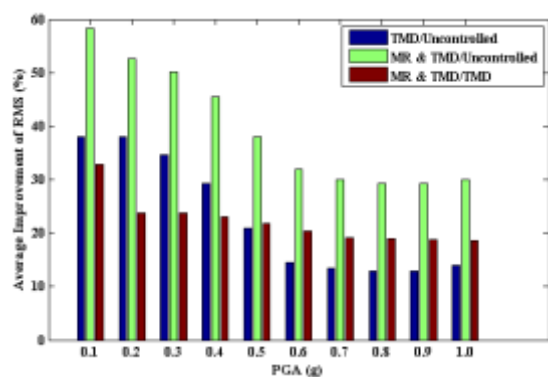
شکل ۲۲. متوسط مقادیر بهبود RMS برش پایه سازه تحت زلزله‌های اعمالی

جداول ۷ تا ۱۰ به ترتیب نتایج متوسط پاسخ تغییرمکان بام سازه، پراکندگی پاسخ تغییرمکان بام، برش پایه سازه و پراکندگی آن به همراه درصد بهبود سیستم‌های کنترلی مورد مطالعه را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده، درصد بهبود نتایج متوسط حداکثر تغییرمکان بام سازه در حالت استفاده از میراگر مغناطیسی و جرمی به صورت همزمان نسبت به حالت سازه کنترل نشده ۳۰/۹۴ درصد می‌باشد که بیشترین کاهش پاسخ‌ها مربوط به این نوع سیستم کنترلی است. درصد بهبود نتایج متوسط حداکثر تغییرمکان بام سازه در حالت کنترل غیرفعال با میراگر جرمی نسبت به حالت کنترل نشده برابر ۱۱/۲۱ درصد می‌باشد و درصد بهبود نتایج مذکور در حالت استفاده از میراگر جرمی و

میراگر جرمی باعث افزایش عملکرد سیستم کنترلی میراگر جرمی نیز شده است؛ چرا که با افزودن میراگر مغناطیسی، سازه در مقابل بار جانبی زلزله مقاومت کرده و تا حد زیادی از خارج شدن سیستم کنترل میراگر جرمی از حالت بهینه جلوگیری می‌کند. علاوه بر این سیستم کنترلی فازی نیز عملکرد غیرخطی داشته و در حین اعمال نیروی زلزله، خود را با رفتار سازه تطبیق می‌دهد و در نتیجه عملکرد سیستم کنترلی ترکیبی میراگر جرمی به همراه میراگر مغناطیسی را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۹. متوسط مقادیر بهبود حداکثر تغییرمکان بام سازه تحت زلزله‌های اعمالی



شکل ۲۰. متوسط مقادیر بهبود RMS تغییرمکان بام سازه تحت زلزله‌های اعمالی

چندان میسر نیست؛ اما در طول بازه زمانی اعمال نیروی زلزله، این میراگرها تا حد زیادی توانایی کاهش پاسخها را دارند. این امر در مقایسه نتایج جدول ۷ با جدول ۸ قابل درک می‌باشد.

مغناطیسی نسبت به حالت میراگر جرمی نیز برابر ۲۳/۰۳ درصد است. با توجه به اینکه حداکثر تغییرمکان در یک لحظه از زمان تداوم زلزله رخ می‌دهد، توانایی کاهش آن برای میراگرهای جرمی

جدول ۷. متوسط پاسخهای حداکثر تغییرمکان و درصد بهبود سیستم‌های کنترلی تحت اثر تحلیل دینامیکی افزایشده

PGA (g)	Maximum Displacement (m)			Improvement Percentage (%)		
	Uncontrolled	TMD	MR+TMD	TMD/Uncontrolled	MR+TMD/ Uncontrolled	MR+TMD/TMD
0.1	0.09	0.07	0.04	20.35	54.62	43.02
0.2	0.16	0.13	0.08	18.30	49.81	38.57
0.3	0.23	0.19	0.12	16.60	48.01	37.66
0.4	0.29	0.25	0.17	13.74	41.25	31.89
0.5	0.35	0.32	0.23	9.95	34.15	26.86
0.6	0.42	0.38	0.31	9.25	25.49	17.89
0.7	0.50	0.46	0.40	7.78	20.58	13.88
0.8	0.56	0.53	0.48	5.60	14.95	9.91
0.9	0.62	0.60	0.56	4.22	10.64	6.71
1	0.70	0.66	0.63	6.32	9.99	3.91
Average	0.392	0.359	0.302	11.211	30.949	23.03

جدول ۸. متوسط RMS پاسخهای تغییرمکان و درصد بهبود آن تحت اثر تحلیل دینامیکی افزایشده

PGA (g)	RMS Displacement (m)			Improvement Percentage (%)		
	Uncontrolled	TMD	MR+TMD	TMD/Uncontrolled	MR+TMD/ Uncontrolled	MR+TMD/TMD
0.1	0.03	0.02	0.01	37.94	58.27	32.76
0.2	0.05	0.03	0.03	37.95	52.68	23.74
0.3	0.07	0.05	0.04	34.64	50.15	23.72
0.4	0.09	0.06	0.05	29.20	45.48	22.99
0.5	0.11	0.08	0.07	20.84	38.05	21.74
0.6	0.13	0.11	0.09	14.57	31.94	20.33
0.7	0.16	0.14	0.11	13.48	30.08	19.18
0.8	0.19	0.17	0.14	12.88	29.33	18.88
0.9	0.22	0.20	0.16	12.94	29.25	18.73
1	0.26	0.22	0.18	14.00	30.03	18.65
Average	0.131	0.108	0.088	22.84268	39.5245	22.0731

همزمان نسبت به حالت سازه کنترل نشده ۳۱/۱۹ درصد می‌باشد که بیشترین کاهش پاسخها مربوط به این نوع سیستم کنترلی است. درصد بهبود نتایج

با توجه به نتایج بدست آمده برای پاسخ برش پایه سازه، درصد بهبود نتایج متوسط حداکثر برش پایه سازه در حالت استفاده از میراگر مغناطیسی و جرمی به صورت

متوسط حداکثر برش پایه سازه در حالت کنترل غیرفعال با میراگر جرمی نسبت به حالت کنترل نشده برابر ۵/۰۶ درصد بوده و درصد بهبود نتایج مذکور در حالت استفاده از میراگر جرمی و مغناطیسی نسبت به حالت میراگر جرمی نیز برابر ۲۷/۸۸ درصد می‌باشد.

میراگرهای جرمی توانایی کاهش حداکثر برش پایه سازه را ندارند اما پراکندگی پاسخ سازه را در بازه زمانی اعمال زلزله به سازه به خوبی کاهش می‌دهد. این امر در مقایسه نتایج جدول ۹ با ۱۰ قابل درک می‌باشد.

جدول ۹. متوسط پاسخ‌های حداکثر برش پایه سازه و درصد بهبود آن تحت اثر تحلیل دینامیکی افزایشی

PGA (g)	Maximum Base Shear (kN)			Improvement Percentage (%)		
	Uncontrolled	TMD	MR+TMD	TMD/Uncontrolled	MR+TMD/Uncontrolled	MR+TMD/TMD
0.1	489.58	437.46	218.73	10.65	55.32	50.00
0.2	913.82	833.56	458.46	8.78	49.83	45.00
0.3	1170.46	1084.76	629.16	7.32	46.25	42.00
0.4	1289.65	1237.21	779.44	4.07	39.56	37.00
0.5	1417.98	1362.61	926.57	3.90	34.66	32.00
0.6	1552.20	1493.32	1105.06	3.79	28.81	26.00
0.7	1683.12	1633.59	1290.54	2.94	23.32	21.00
0.8	1812.03	1755.69	1509.90	3.11	16.67	14.00
0.9	1937.54	1875.05	1747.55	3.23	9.81	6.80
1	2043.70	1985.90	1886.60	2.83	7.69	5.00
Average	1431.008	1369.915	1055.201	5.062	31.192	27.88

جدول ۱۰. متوسط RMS پاسخ‌های برش پایه سازه و درصد بهبود آن تحت اثر تحلیل دینامیکی افزایشی

PGA (g)	Maximum Base Shear (kN)			Improvement Percentage (%)		
	Uncontrolled	TMD	MR+TMD	TMD/Uncontrolled	MR+TMD/Uncontrolled	MR+TMD/TMD
0.1	133.99	97.12	80.61	27.52	39.84	32.04
0.2	253.65	183.35	152.18	27.71	40.00	33.76
0.3	329.73	241.00	200.03	26.91	39.34	32.00
0.4	374.63	282.76	234.69	24.52	37.35	31.17
0.5	404.79	318.16	264.08	21.40	34.76	27.66
0.6	433.50	352.96	292.96	18.58	32.42	24.58
0.7	456.75	384.03	318.75	15.92	30.21	21.89
0.8	476.86	410.19	340.45	13.98	28.60	20.04
0.9	494.08	432.58	359.04	12.45	27.33	18.13
1	510.85	453.82	376.67	11.16	26.27	17.30
Average	386.883	315.597	261.946	20.015	33.612	25.861

### ۱۰. نتیجه‌گیری

در این مطالعه سازه دوازده طبقه فولادی با در نظر گیری

رفتار غیرخطی آن با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده در حالت بهینه و میراگر مغناطیسی با

در واقع سیستم‌های کنترلی علاوه بر کاهش حداکثر پاسخ سازه در پالس اصلی زلزله، توانایی بیشتری برای کاهش پاسخ سازه تحت اثر پالس‌های ضعیف‌تر و در مجموع کاهش انرژی وارد شده به سازه در طول مدت زمان زمین‌لرزه دارد. سیستم کنترل ترکیبی میراگر جرمی و مغناطیسی پاسخ حداکثر تغییرمکان بام سازه را نسبت به حالت سیستم کنترلی غیرفعال با میراگر جرمی تنظیم شده ۲۳/۰۳ درصد بهبود داده است. این نتایج برای حداکثر برش پایه سازه برابر ۲۷/۸۸ درصد می‌باشد. درصد بهبود مقادیر پراکندگی پاسخ تغییرمکان بام و برش پایه در سیستم‌های مذکور به ترتیب برابر ۲۲/۰۷ و ۲۵/۸۶ درصد می‌باشد.

سیستم کنترلی فازی تحت تاثیر زلزله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزاینده ملاحظه شد که مدل‌های مجهز به هر دو میراگر جرمی و مغناطیسی نسبت به حالت میراگر جرمی منفرد در بام سازه بیشترین میزان کاهش پاسخ سازه را به همراه داشته است. سیستم کنترلی غیرفعال با میراگر جرمی منفرد در بام سازه، توانایی کاهش مقادیر حداکثر پاسخ‌ها را در تغییرمکان و برش پایه ندارد که این موضوع با افزودن میراگر مغناطیسی به همراه الگوریتم منطق فازی برطرف شده است. الگوریتم منطق فازی با تولید ولتاژ مناسب کنترلی و ارسال آن به میراگر مغناطیسی موجب تطبیق بیشتر سیستم کنترلی با رفتار سازه شده است.

## ۱۱. منابع

- [1] Kelly, James M., R. I. Skinner, and A. J. Heine. "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures." *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 5, no. 3 (1972): 63-88.
- [2] Soleimanpour, R., Mahmoud Yahyaei, and M. Barghi. "Retrofitting of existing steel buildings using ADAS dampers." (2006): 89-98.
- [3] Zahrai, S.M, Sadeghazar, M, Zeinali, R. "Investigating the performance of three methods of passive control to improving the seismic response of steel moment frames." *Civil Engineering Infrastructures Journal*. Faculty of Engineering, University of Tehran. 45(4): 429-436, In Persian.
- [4] Frahm, Hermann. "Device for damping vibrations of bodies." *US patent* 89958 (1911).
- [5] Iranian Code No. 766. "Manual for structural damping systems in design and retrofitting of buildings." Road and housing and urban development research center. Tehran 2018, In Persian.
- [6] Meshkat Razavi H, Shariatmadar H. "Fuzzy algorithms in structure control for tuned mass dampers considering soil-structure interaction." Ph.D. Dissertation, Ferdowsi University of Mashhad 2014, In Persian.
- [7] Guo, Wei, Hong-Nan Li, Guo-Huan Liu, and Zhi-Wu Yu. "A simplified optimization strategy for nonlinear tuned mass damper in structural vibration control." *Asian Journal of*

*Control* 14, no. 4 (2012): 1059-1069.

[۸] محمدرضا تابش پور و مصطفی اخوات، "بررسی دقت سیستم یک درجه آزادی معادل برای تحلیل دینامیکی سکوه‌های ثابت دریایی مجهز به میراگر جرمی." *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۲, ۴ (۱۳۹۲): ۵۸-۵۲.

[۹] علی مینائی و سید امیر کیوان قربانی تنها، "تنظیم بهینه میراگر جرمی نیمه فعال با سختی متغیر،" *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۳, ۵ (۱۳۹۳): ۲۷-۱۹.

[10] Salvi, Jonathan, and Egidio Rizzi. "Optimum earthquake-tuned TMDs: seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 101 (2017): 67-80.

[11] Bui, Hai-Le, and Ngoc-An Tran. "Multi-objective optimal design of TMDs for increasing critical flutter wind speed of bridges." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 225 (2022): 104992.

[12] Gao, Zhidong, Mi Zhao, Yangzhou Wu, Meng Wang, and Xiuli Du. "Parameter design and performance evaluation of tuned mass damper (TMD) for seismic control of structure considering soil-structure interaction (SSI)." In *Structures*, vol. 52, pp. 1116-1129. Elsevier, 2023.

[13] Shamsaddinlou, Amir, Sina Shirgir, Ali Hadidi, and Bahman Farahmand Azar. "An efficient reliability-based design of TMD & MTMD in nonlinear structures under uncertainty." In *Structures*, vol. 51, pp. 258-274. Elsevier, 2023.

[14] Bitaraf, Maryam, Osman E. Ozbulut, Stefan Hurlebaus, and Luciana Barroso. "Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers." *Engineering Structures* 32, no. 10 (2010): 3040-3047.

[15] Uz, Mehmet E., and Muhammad NS Hadi. "Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm." *Engineering structures* 69 (2014): 135-148.

[16] Bui, Quoc-Duy, Xian-Xu Bai, and Quoc Hung Nguyen. "Dynamic modeling of MR dampers based on quasi-static model and Magic Formula hysteresis multiplier." *Engineering Structures* 245 (2021): 112855.

[17] Bathaei, A., Ramezani, M. and Ghorbani-Tanha, A.K. "Seismic Vibration Control of College Bridge Using Genetic Algorithm and Multiple Tuned Mass Dampers." *Modares Technical and Engineering Journal*. no. 5 (2016): 32, In Persian.

[18] Ramezani, Meysam, Akbar Bathaei, and Seyed Mehdi Zahrai. "Designing fuzzy systems for optimal parameters of TMDs to reduce seismic response of tall buildings." *Smart Structures and Systems* 20, no. 1 (2017): 61-74.

[19] Bathaei, Akbar, Seyed Mehdi Zahrai, and Meysam 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, no. 13 (2018): 2938-2953.

- [20] Ramezani, Meysam, A. Bathaei, and Seyed Mehdi Zahrai. "Comparing fuzzy type-1 and-2 in semi-active control with TMD considering uncertainties." *Smart Struct Systems* 23, no. 2 (2019): 155-171.
- [21] Hashemi S., Zahrai S.M. "Fuzzy semi-active control of nonlinear nine-story structure using series combination of tuned mass damper and magneto rheological damper." *Modares Technical and Engineering Journal*. 2019: 1(2): 209-222, In Persian.
- [22] Bathaei, Akbar, and Seyed Mehdi Zahrai. "Compensating time delay in semi-active control of a SDOF structure with MR damper using predictive control." *Structural Engineering and Mechanics* 82, no. 4 (2022): 445-458.
- [23] Bahmaei, Mohsen, and Seyed Mehdi Zahrai. "Semi-active control of adjacent 3-and 9-story structures using type-1 and type-2 fuzzy algorithms." *Journal of Vibration and Sound* 11, no. 21 (2022): 30-45.
- [24] Tang, Qing-Chen, Li Zhu, and Jian-Zhi Li. "Hybrid control of steel-concrete composite girder bridges considering the slip and shear-lag effects with MR-TMD based on train-bridge interactions." In *Structures*, vol. 47, pp. 2300-2318. Elsevier, 2023.
- [25] Bathaei, Akbar, and Seyed Mehdi Zahrai. "Improving semi-active vibration control of an 11-story structure with non-linear behavior and floating fuzzy logic algorithm." In *Structures*, vol. 39, pp. 132-146. Elsevier, 2022.
- [26] Bathaei, Akbar, and Seyed Mehdi Zahrai. "Vibration control of an eleven-story structure with MR and TMD dampers using MAC predictive control, considering nonlinear behavior and time delay in the control system." In *Structures*, vol. 60, p. 105853. Elsevier, 2024.
- [27] Bathaei, Akbar, and Seyed Mehdi Zahrai. "Effect of Time Delay on Semi-Active Seismic Control of a Nonlinear 11-Story Building Using Floating and Predictive Fuzzy Logic Algorithm." *Journal of Civil Engineering and Construction* 13, no. 3 (2024): 110-133.
- [28] Najafi, Mohammad Reza, and Abbas Motalebi. "A review of the performance parameters of magnetorheological vibration dampers." *Journal of Vibration and Sound* 12, no. 24 (2024): 86-105.
- [29] Mazzoni, Silvia, Frank McKenna, Michael H. Scott, and Gregory L. Fenves. "OpenSees command language manual." *Pacific earthquake engineering research (PEER) center* 264, no. 1 (2006): 137-158.
- [30] Pastia, Cristian, and Septimiu-George Luca. "Vibration control of a frame structure using semi-active tuned mass damper." *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura* 59, no. 4 (2013): 31.
- [31] Ok, Seung-Yong, Dong-Seok Kim, Kwan-Soon Park, and Hyun-Moo Koh. "Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers." *Engineering structures* 29, no. 5 (2007): 776-788.
- [32] FEMA, P. 695. "Quantification of building seismic performance factors." (2009).

- 
- 1 OpenSEES
  - 2 MATLAB
  - 3 Kelly
  - 4 Frahm
  - 5 Guo
  - 6 Salvi and Rizzi
  - 7 Bui and Tran
  - 8 Gao
  - 9 Lumped Parameter Models, LPMs
  - 10 Uz and Hadi
  - 11 Bui
  - 12 Incremental Dynamic Analysis, IDA
  - 13 Tang
  - 14 Model Algorithmic Control
  - 15 Tuned Mass Damper, TMD
  - 16 Magnetorheological damper, MR
  - 17 Fiber
  - 18 Patch
  - 19 Pastia
  - 20 Luca
  - 21 Bouc- Wen
  - 22 Applied Control Voltage
  - 23 Server
  - 24 Client
  - 25 Fuzzy Inference System, FIS
  - 26 Rule Base, RB
  - 27 Root Mean Squared, RMS
  - 28 Duzce, Turkey