



کنترل غیرفعال و نیمه‌فعال ارتعاشات سازه جداسازی شده تحت بارگذاری انفجار در فواصل متوسط تا دور

میثم رمضانی، محمد صالح لباف‌زاده*

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴

کلمات کلیدی:

بارگذاری انفجار

میراگرهای مغناطیسی

الگوریتم کنترل فازی نوع ۲-

میراگر جرمی تنظیم شده

سیستم جداساز

خلاصه: با پیشرفت روزافزون تسلیحات نظامی و تنوع مواد منفجره در کشورهای دنیا، حملات تروریستی یک تهدید رو به افزایش محسوب می‌شود. علم کنترل ارتعاشات در برابر بارهای طبیعی به خوبی توسعه یافته است. گرچه بار انفجار دارای ماهیت متفاوتی نسبت به بارهای طبیعی است، اما از این علم می‌توان برای کاهش پاسخهای بارهای انفجاری نیز بهره برد. برای این منظور از دو روش غیرفعال و نیمه‌فعال که شامل میراگر جرمی تنظیم شده و میراگر مغناطیسی است، به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از بار انفجار در سازه جداسازی شده استفاده شده است. در این مطالعه از سیستم فازی نوع ۲- برای تعیین ولتاژ مناسب میراگر مغناطیسی استفاده شده است تا عدم قطعیت‌های موجود باعث تأثیر سوء بر عملکرد آن نگردد. شبیه‌سازی عددی دو بار انفجار در فاصله ۱۵ متری از یک سازه ۵ درجه آزادی، توسط روابط تجربی و عددی انجام شد. استفاده از ابزارهای کنترل پیشنهادی در کنار سیستم جداساز نشان داد که این روش‌ها می‌تواند علاوه بر حفظ عملکرد مناسب جداساز، در تحریک‌های بزرگ‌تر، جابجایی‌ها و آسیب‌های احتمالی جداساز را محدود کنند. نتایج مقایسه نشان داد که استفاده از میراگر مغناطیسی در کنار جداساز می‌تواند بهترین عملکرد را در برابر بارهای انفجار و بارهای لرزه‌ای داشته باشد. استفاده از این سیستم به طور میانگین موجب کاهش حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات تا حدود ۳۶٪ در بارهای انفجار، ۶۸٪ در بارهای لرزه‌ای حوزه دور و ۴۶٪ در بارهای لرزه‌ای حوزه نزدیک گردید در حالی که جابجایی نسبی جداساز به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سیستم جداساز به همراه میراگر جرمی تنظیم شده محدود شده بود.

۱- مقدمه

موج که جبهه شوک نیز نامیده می‌شود دارای فشاری بسیار بیشتر از فشار جوی است که پشت آن قرار دارد، به همین دلیل این فشار محلی ایجاد شده با پیشرفت موج به سمت جلو، به سرعت کاهش می‌یابد [۴]. امواج شوک از طریق سطوحی که در مسیر خود وجود دارد می‌تواند موج شوک منعکس شده را در فشار و سرعت بالاتر ایجاد کند.

معمولاً سازه‌ها اثرات بار انفجار را در چندین مرحله تجربه می‌کنند. موج شوک اولیه معمولاً موجب خرد شدن شیشه‌ها و آسیب به نمای خارجی سازه می‌شود. در مرحله دوم، موج شوک وارد ساختمان می‌شود و سازه آن را تحت فشار قرار می‌دهد. این فشار می‌تواند موجب آسیب به سقف و ستون‌های داخلی و همچنین ساکنان ساختمان شود، در حالی که حتی پتانسیل تشدید به وسیله موج انعکاسی نیز وجود دارد. در مرحله آخر سراسر اسکلت سازه تحت بار انفجار قرار می‌گیرد و شرایطی مانند بارگذاری لرزه‌ای کوتاه مدت با شدت بسیار زیاد ایجاد می‌کند [۱].

بارگذاری انفجار تفاوت‌های عمده‌ای از نظر اثرات مختلف بر سازه و

انفجار فرآیند آزاد شدن انرژی به وسیله یک محرک در مقیاس بزرگ است که می‌تواند به صورت سریع و ناگهانی رخ دهد. مواد منفجره را می‌توان به صورت جامد، مایع و گاز طبقه‌بندی نمود. اکثر مواد منفجره با تحریک کافی، منفجر شده و تبدیل به گاز بسیار متراکم، به شدت داغ و پرفشار می‌شوند و منبعی از موج انفجار قدرتمندی تولید می‌کنند. این انفجار می‌تواند فشاری در حدود ۱۰ تا ۳۰ گیگاپاسکال و دمایی در حدود ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تولید کند. تنها حدود یک سوم از کل انرژی شیمیایی به وسیله انفجار آزاد می‌شود و دو سوم باقی‌مانده به عنوان محصول انفجار با هوای اطراف ترکیب شده و به آرامی می‌سوزد. اثرات انفجار به صورت موجی با شدت بالا از منبع به سمت هوای اطراف پخش می‌شود [۲ و ۱]. عمده اثر مخرب انفجار ناشی از موج شوک است، چرا که جو احاطه کننده اطراف انفجار به دلیل ضربه فشاری به سمت بیرون رانده می‌شود [۳]. جبهه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: labaf@ihu.ac.ir



ماهیت بارگذاری با بارهای معمول زلزله و باد دارند. این تفاوت‌ها شامل بزرگی شدت فشار وارده بر سازه، آسیب وجوه جانبی سازه، منبع انفجار و مدت زمان کوتاه و ... می‌باشد. بار انفجاری می‌تواند به شکل‌های گوناگون از جمله بمب‌گذاری وسایل نقلیه، انفجار ناشی از مهمات انباشته شده و ... صورت پذیرد؛ اما دو پارامتر مهم جرم خرج انفجاری و فاصله آن از هدف، کنترل کننده نوع و شدت خسارت است. این پارامترها همچنین بر ویژگی‌های مقاوم در برابر انفجار که باید برای کاهش خسارات تأمین شوند تأثیر خواهند گذاشت. به عنوان مثال یک ماده منفجره کوچک ولی با فاصله کم از اعضای باربر، می‌تواند شروع کننده فروریزش پیش‌رونده باشد. مواد منفجره بزرگ‌تر در فواصل بیشتر نیز می‌توانند در سراسر سازه بار وارد کنند و منجر به وقوع آسیب‌های محلی و کلی شوند. بسیاری از محققان راهکارهایی همچون پوشش‌های محافظ قربانی شونده [۵] و انواع فوم‌ها [۶] را برای محافظت موضعی در برابر بارگذاری انفجار ارائه داده‌اند که هم می‌توانند مقدار آوار را کاهش دهند و هم آسیب در اعضای سازه‌ای را محدود کنند. با وجود حفاظت موضعی کامل، رفتار کلی سازه بسیار مهم است و باید در نظر گرفته شود. در این مقاله به انفجار در مسافت‌های متوسط تا دور که در آن جذب و اتلاف انرژی نقش مؤثری در حفاظت از سازه ایفا می‌کند، پرداخته خواهد شد.

بارهای انفجاری برخلاف بارهای لرزه‌ای، ارتباطی با جرم سازه ندارند، بنابراین ممکن است به صورت کاملاً متفاوتی به اسکلت سازه اعمال گردند. همچنین جزئیات طراحی لرزه‌ای سازه‌ها شامل تشکیل مفاصل پلاستیک ممکن است تحت چنین بارگذاری‌های غیر قابل پیش‌بینی مؤثر نباشد. با توجه به این نکته، ژانگ و فلیس^۱ [۷] از سیستم جداساز پی به همراه ضربه‌گیر به منظور کاهش پاسخ ناشی از بارگذاری انفجار استفاده کردند. آن‌ها این سیستم جداساز را برای بارگذاری زلزله‌های حوزه نزدیک نیز بررسی کردند تا اطمینان حاصل کنند که بهبود عملکرد در برابر انفجار، موجب به خطر افتادن اهداف طراحی لرزه‌ای نشود. میرزا گلتهار روشن و همکاران [۸] به بررسی اثرات بار انفجار بر روی قاب‌های فولادی و کنترل پاسخ‌های آن پرداختند. آن‌ها از دو قاب یک و چهار طبقه که دارای یک دهانه بودند و تحت بارگذاری انفجار مختلف قرار داشتند به عنوان سازه مرجع استفاده نمودند. در این مطالعه از میراگر فلزی آکاردئونی برای کاهش پاسخ‌های سازه استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از این میراگر در انفجارهای بزرگ تا حد زیادی جابجایی کلی قاب را کاهش می‌دهد.

کانگدا و باکر^۲ [۹] اثر بخشی سیستم جداساز پی در کاهش پاسخ سازه تحت بارگذاری انفجار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سه وزن متفاوت مواد منفجره را که در فاصله مشخصی از یک سیستم پنج درجه آزادی قرار داشتند مدل‌سازی کردند و به بررسی جداساز LRB در کاهش فاز مثبت و منفی بار انفجار پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سیستم جداساز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش پاسخ‌هایی همچون جابجایی حداکثر، جابجایی نسبی و جذر میانگین مربعات شتاب طبقات در مرحله پس از بارگذاری دارد. میراگر جرمی تنظیم شده^۳ (TMD) یک سیستم ارتعاشی متشکل از جرم، فنر و کمک فنر است که معمولاً در بالاترین تراز سازه نصب می‌شود. در صورتی که این میراگر به درستی به فرکانس‌های اصلی سازه تنظیم شده باشد، با تحریک سازه، مرتعش می‌شود و بخشی از انرژی ورودی به سازه را توسط نیروی اینرسی اعمالی به سازه مستهلک می‌نماید. ایده کاربرد میراگر جرمی تنظیم شده برای نخستین بار توسط فرام^۴ [۱۰] در سال ۱۹۰۹ به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از امواج دریا بر بدنه کشتی مطرح گردید. کاربرد این میراگر برای سازه‌های بلندمرتبه که تحت بارهای تکرار شونده همچون بارگذاری باد یا حتی بارگذاری‌های لرزه‌ای حوزه دور قرار داشتند موفقیت‌آمیز بود و می‌توانست پاسخ سازه‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد [۱۱-۱۴]. در این مطالعه TMD در تراز جداساز نصب می‌شود، زیرا تراز پایه در اولین فرکانس طبیعی سازه جابجایی قابل توجهی از خود نشان می‌دهد.

میراگرهای مغناطیسی^۵ با سیال قابل کنترل، از سیال‌هایی بهره می‌برند که قابلیت اساسی آن‌ها تبدیل شدن به یک شبه‌جامد با مقاومت قابل کنترل بر اثر قرارگیری در معرض میدان الکتریکی یا مغناطیسی می‌باشد. این تبدیل با سرعت بسیار زیاد و در مدت زمان کوتاه (در مرتبه میلی‌ثانیه) صورت می‌پذیرد و باعث می‌شود در بارگذاری‌های لحظه‌ای عملکرد مناسبی داشته باشند. هنگامی که جداسازهای رایج لاستیکی در معرض زلزله‌های شدید قرار می‌گیرند، ساختار آن‌ها دچار تغییر شکل‌های بزرگی می‌شود که می‌تواند باعث گسیختگی لایه‌های آن گردد. اگر چه استفاده از میراگرهای غیرفعال می‌تواند جابجایی‌های لایه‌های جداسازها را کاهش دهد اما در برخی از زلزله‌های نادر می‌تواند باعث افزایش تغییر شکل لایه‌ها و شتاب سازه‌ها گردد. علاوه بر خطرات جانی، جابجایی بیش از حد می‌تواند منجر به

2 Kangda and Bakre
3 Tuned mass damper
4 Frahm
5 Magnetorheological Fluid Damper

کننده‌های فازی نوع-۱ و نوع-۲ تعیین می‌شد. نتایج تحقیق نشان داد که کنترل کننده فازی نوع-۲ عملکرد بهتری نسبت به فازی نوع-۱ در صورت وجود تأخیر زمانی^۵ دارد.

سیستم کنترلی که مختص به یک نوع بارگذاری خاص نباشد و بتواند در بارگذاری‌های مختلف گوناگون عملکرد مناسبی داشته باشد و تحت تاثیر عدم قطعیت‌های موجود قرار نگیرد، سیستم مورد اطمینانی خواهد بود. در مطالعات پیشین به تاثیر مثبت استفاده از جداسازهای لرزه‌ای در برابر بارگذاری‌های انفجار پرداخته شد. در ادامه با استفاده از میراگرهای غیرفعال و نیمه‌فعال مختلفی سعی در پوشش نقاط ضعف این سیستم شد. پرداختن به ابزار و سیستم کنترلی با کمترین تاثیرپذیری از عدم قطعیت که توانایی کاهش موثر پاسخ سازه را داشته باشد، امری ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعه حاضر به بررسی و مقایسه عملکرد دو استراتژی مختلف کنترلی در کاهش پاسخ یک سیستم پنج درجه آزادی که تحت بار انفجار قرار دارد پرداخته خواهد شد. استراتژی کنترلی اول شامل سیستم جداسازی است که برای ارتقاء عملکرد این سیستم از میراگر TMD در تراز پایه استفاده خواهد شد. در استراتژی دوم برای بهبود عملکرد سیستم جداسازی پی از میراگر MR استفاده می‌شود. با توجه به عدم قطعیت‌های مربوط به نوبه موجود در حسگرها و تأخیر زمانی، برای تعیین ولتاژ کنترلی میراگر MR از کنترل کننده فازی نوع-۲ استفاده خواهد شد. استفاده از روش‌های کنترل در برابر بار انفجار نباید منجر به نادیده گرفتن بارگذاری‌های مهم دیگر همچون زلزله گردد؛ به همین دلیل عملکرد روش‌های ارائه شده در برابر بارهای لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- معرفی بارگذاری انفجار

به منظور بررسی و مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترلی تحت بارگذاری انفجار، از روابط تئوری و تجربی که برای ایجاد تاریخچه زمانی فشار انفجار ایجاد شده‌اند استفاده خواهد شد. استفاده از ماده منفجره TNT به عنوان ماده منفجره پایه برای تعیین فاصله مقیاس شده مرسوم است. از آنجایی که هر ماده منفجره انرژی جرمی مشخصی دارد، می‌توان با تقسیم انرژی مخصوص جرمی هر ماده بر انرژی مخصوص جرمی TNT ضریب معادل‌سازی ماده منفجره را برحسب TNT محاسبه کرد. در این مطالعه برای شبیه‌سازی بار انفجار از مواد منفجره‌ای با وزن ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT که در فاصله ۱۵ متری از سازه قرار دارند، استفاده شده است.

آسیب‌های جدی به تجهیزات موجود در سازه‌ها شود. ترکیب سیستم جداساز پی و میراگر MR اخیراً توسط برخی از محققین مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶ و ۱۵]. برای غلبه بر این کاستی‌ها فو و همکاران^۱ [۶] از ترکیب سیستم جداساز پی و میراگرهای MR با یک الگوریتم کنترل کننده جدید برای کنترل ارتعاشات بارهای لرزه‌ای استفاده کردند. محبی و دادخواه [۱۷] برای کاهش پاسخ سازه از یک سیستم کنترل ترکیبی متشکل از سیستم جداساز پی با میرایی کم و میراگر MR استفاده کردند. سیستم جداساز پی با شیفت پرید سازه می‌تواند منجر به کاهش حداکثر پاسخ سازه شود. آن‌ها دریافتند که استفاده از میراگر MR با کنترل جابجایی نسبی پایه می‌تواند عملکرد سیستم جداساز را ارتقاء دهد. ولتاژ میراگر MR در این مطالعه از طریق الگوریتم‌های LQG^۲ و کلیپت اوپتیمال^۳ تعیین می‌شد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که سیستم کنترل ترکیبی علاوه بر کاهش حداکثر پاسخ سازه می‌تواند جذر میانگین مربعات جابجایی نسبی تراز پایه را نیز هم‌زمان کاهش دهد. نتایج مقایسه سیستم کنترل ترکیبی با سیستم جداسازی پی با میرایی بالا نشان داد عملکرد سیستم ترکیبی بهتر است.

در سال‌های اخیر رشد و کاربرد منطق فازی به دلیل رفتار منعطف و حفظ پایداری در سیستم‌های غیرخطی حتی در صورت بروز آشفتگی یا عدم قطعیت و استفاده از دانش افراد متخصص در طرح کنترل این سیستم‌ها افزایش یافته است [۱۹ و ۱۸]. مطالعات متعددی در مورد سیستم‌های فازی اولیه که در دسته فازی نوع-۱ قرار می‌گیرند در حوزه زمان انجام پذیرفته است [۲۰-۲۲]. اخیراً توجهات در حال افزایشی به نوع پیشرفته‌تر سیستم‌های فازی اولیه یعنی سیستم‌های فازی نوع-۲ شده است [۲۴ و ۲۳]. انتقال از فازی نوع-۱ به فازی نوع-۲ با این واقعیت توجیه شد که مجموعه‌های فازی نوع-۱ تنها قادر به مقابله مؤثر با سطح محدودی از عدم قطعیت‌ها هستند، در حالی که در کاربردهای عملی در دنیای واقعی غالباً با مقادیر زیاد و منابع متعددی از عدم قطعیت‌ها مواجه هستند [۲۶ و ۲۵]. برای کنترل بهتر عدم قطعیت‌ها مثل نوبه‌های اندازه‌گیری، سیستم فازی نوع-۲ که دارای درجات آزادی اضافی در توابع عضویت است به وجود آمد [۲۸ و ۲۷]. بطهایی و همکاران^۴ [۲۹] از میراگر TMD که توسط یک میراگر MR کنترل می‌شد برای کاهش پاسخ سازه در برابر بارهای لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک استفاده کردند. ولتاژ مورد نیاز برای میراگر MR توسط کنترل

- 1 Fu et al.
- 2 Linear Quadratic Gaussian
- 3 Clippedoptimal
- 4 Bathaei et al.

$$Z_h = R_h / W^{1/3} \quad (2)$$

گام ۴: محاسبه حداکثر اضافه فشار منعکس شده P_r ، حداکثر اضافه فشار انفجار P_{so} ، زمان رسیدن t_A ، مدت زمان مثبت t_0 و سرعت موج طبق روابط (۳) تا (۸). اضافه فشار انفجار را می‌توان طبق رابطه (۳) که توسط میلز^۳ [۳۳] ارائه شده است به دست آورد.

$$P_{so} = \frac{1772}{Z_h^3} - \frac{114}{Z_h^2} + \frac{108}{Z_h} \quad (3)$$

مدت زمان مثبت که توسط لام و همکاران^۴ [۳۲] ارائه شده است را می‌توان طبق رابطه (۴) محاسبه نمود.

$$t_0 = W^{1/3} 10^{[-2.75 + 0.271 \log(Z_h)]} \quad (4)$$

رانکین^۵ [۳۷] سرعت جبهه موج انفجار را طبق رابطه زیر تعریف نمود.

$$U = a_0 \sqrt{\frac{6P_{so} + 7P_0}{7P_0}} \quad (5)$$

که در آن P_0 فشار هوای محیط (معمولاً ۱۰۱ kPa) و a_0 سرعت صوت در هوا است که ۳۳۵ m/s در نظر گرفته می‌شود. زمان رسیدن موج انفجار برای هر نقطه دلخواه را نیز می‌توان طبق رابطه (۶) تعیین نمود [۳۰].

$$t_A = \frac{R_h}{U} \quad (6)$$

اضافه فشار منعکس شده نیز طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۳۲]:

رویکردهای مبتنی بر معادلات تجربی و تئوری روش‌های تقریبی برای تعیین فشار یا بار وارد بر سازه را ارائه می‌کند. روابط تجربی و تئوری بسیاری برای پیش‌بینی برخی مشخصات انفجار مانند حداکثر اضافه فشار انفجار، حداکثر اضافه فشار منعکس شده و سایر پارامترهای دیگر توسعه یافته است [۳۰-۳۵]. اکثر این دیدگاه‌ها بر پایه رابطه میان ریشه سوم وزن و فاصله که به قانون هاپکینسون^۱ معروف است، استوار می‌باشد [۳۶]. این قانون بیان می‌کند که دو وزن متفاوت از یک ماده منفجره دارای خصوصیات انفجاری مشابهی در برخی از مسافت‌های مقیاس شده در شرایط جوی مشابه هستند. دراگانیک و سیگموند^۲ [۲] به بررسی و تشریح شبیه‌سازی بار انفجار به صورت تاریخچه زمانی پرداختند. آن‌ها از یک سازه فرضی که تحت بار انفجار قرار داشت برای بررسی این روش استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از نرم‌افزارهایی که قابلیت شبیه‌سازی تخصصی بار انفجار را ندارند نیز می‌توان از طریق این روش اثرات انفجار را مورد ارزیابی قرار داد. به دلیل سادگی شبیه‌سازی، تکرارپذیر بودن نتایج و قابل استفاده بودن پاسخ تاریخچه زمانی تولید شده توسط این روش در نرم‌افزارهای تخصصی مدل‌سازی سازه و کنترل ارتعاشات، از این روش در مطالعه حاضر استفاده خواهد شد.

در ادامه فرآیند تعیین پارامترهای انفجار در سطح زمین شرح داده شده است تا در نهایت طی شش گام مختلف تاریخچه زمانی بارگذاری انفجار به دست آید. واحدهای طول، جرم فشار و زمان به ترتیب، kg، m، kPa و sec. در نظر گرفته شده است.

گام ۱: تعیین وزن خرج انفجار W برای TNT معادل.

گام ۲: تعیین فاصله هر نقطه مورد نظر از نقطه انفجار بر اساس فواصل

افقی و قائم طبق رابطه زیر [۳۰]:

$$R_h = (R_G^2 + h^2)^{1/2} \quad (1)$$

که در آن R_h نزدیک‌ترین فاصله، R_G فاصله افقی و h فاصله قائم نقطه‌ای که بار انفجار در آن محاسبه خواهد شد تا نقطه انفجار می‌باشد.

گام ۳: محاسبه فاصله مقیاس شده Z_h طبق رابطه زیر [۳۰]:

3 Mills
4 Lam et al.
5 Rankine

1 Hopkinson
2 Draganić and Sigmund

و ارتفاع این تئوپن‌ها یکسان و برابر ۵/۵ اینچ است که شامل ۴۴ لایه الاستومر می‌باشد. این مدل را می‌توان به عنوان بخشی از قاب‌های فولادی معمول با مقیاس تقریباً یک به سه در نظر گرفت. در این قاب بار مرده توسط بلوک‌های بتنی که به کف طبقات متصل شده، شبیه سازی شده است [۳۹]. سیستم جداساز مانند تکیه‌گاه‌های لاستیکی چند لایه که طبق دسته بندی اسکینز و همکاران^۲ [۴۰] در رده سه قرار می‌گیرد (میرایی کم، سیستم جداساز خطی) در نظر گرفته شده است. بعدها این سازه به صورت جرم، فنر و کمک فنر مدل سازی شد و توسط محققین برای ارزیابی سیستم‌های کنترلی مختلف مورد استفاده قرار گرفت [۴۱-۴۳]. مشخصات سازه مورد بررسی در جدول ۱ نمایش داده شده است. مشخصات این مدل به دلیل تمرکز بر روی سیستم‌های کاهش ارتعاشات، به صورت خطی فرض می‌شود. این فرض با اعضای سازه‌ای بزرگی که عملکرد خود را پس از بارگذاری حفظ می‌کنند در حالی که ممکن است اعضای غیرسازه‌ای آسیب ببینند سازگار است. سازه با پایه ثابت دارای پی‌ریود مود اول ۰٫۵۴ ثانیه و نسبت میرایی ۲٪ در مود اول است. سختی جانبی جداساز، در سازه جداسازی شده طوری در نظر گرفته شده است که پی‌ریود مود اصلی سازه برابر ۲٫۵ ثانیه و نسبت میرایی برابر ۴٪ گردد [۴۱].

۳-۲- مدل سازی بار انفجار

به منظور محاسبه بار انفجار ارتفاع طبقات ۳ متر، عرض بارگیر سازه برابر ۵ متر و انفجار رو زمینی فرض شده است. تصویر شماتیک موقعیت مواد منفجره و سازه مورد ارزیابی در شکل ۲ نمایش داده شده است. مقدار بار انفجار ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT بر سازه ۵ طبقه مورد بررسی که در فاصله ۱۵ متری از سازه منفجر شده، در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است. در این تصاویر منحنی‌های F_{Bb} معرف نیروی انفجار وارد بر تراز جداسازی شده و F_{B1} تا F_{B5} نیروی وارد بر تراز طبقات ۱ تا ۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این تصاویر مشاهده می‌گردد به ترتیب موج انفجار تراز جداسازی شده و پس از آن طبقات ۱ تا ۵ به سازه می‌رسند که آن به دلیل افزایش فاصله نقطه انفجار تا نقاط محاسبه بار انفجار است. از سوی دیگر مشاهده می‌گردد که بار انفجار وارد بر طبقه اول به دلیل فاصله کمتر از سایر طبقات و همچنین سطح بارگیر مؤثر کامل، از سایر طبقات بزرگ‌تر است و بار انفجار وارد بر طبقه پنجم به دلیل بیشترین فاصله از نقطه انفجار و سطح بارگیر مؤثر کمتر، از سایر طبقات کوچک‌تر است. با توجه به اینکه

$$P_r = C_r \cdot P_{so} \quad (7)$$

ضریب C_r را می‌توان توسط رابطه زیر که لام و همکاران [۳۲] ارائه کردند، محاسبه نمود.

$$C_r = 3 \left(\sqrt[4]{\frac{P_s}{101}} \right) \quad (8)$$

گام ۵: محاسبه تاریخچه زمانی فشار در نقاط مورد نظر بر اساس روابط (۹) و (۱۰). تاریخچه زمانی فشار موج انفجار معمولاً با استفاده از توابع نمایی مانند معادله فریلاندر^۱ [۳۸] قابل بیان هستند.

$$P(t) = P_0 + P_r \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) \exp \left(-\gamma \frac{t}{t_0} \right) \quad (9)$$

که در آن $P(t)$ فشار در واحد زمان، و γ پارامتر کنترل کننده نسبت زوال دامنه موج است که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

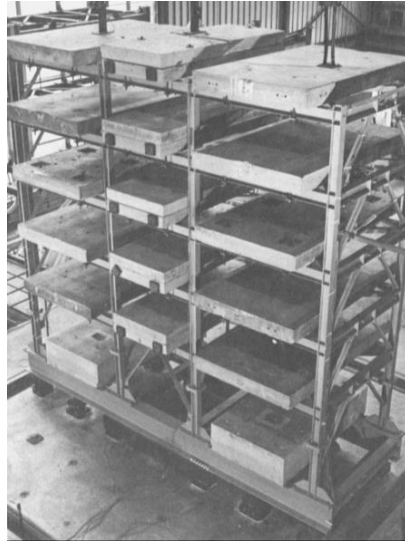
$$\gamma = Z_h^2 - 3.7Z_h + 4.2 \quad (10)$$

گام ۶: با ضرب سطح مؤثر هر نقطه مورد نظر در تاریخچه زمانی فشار محاسبه شده در آن نقطه بار انفجار محاسبه می‌گردد.

۳- شبیه سازی عددی

۳-۱- مدل سازی سازه

در این مطالعه به منظور بررسی و عملکرد سیستم‌های کنترلی مختلف تحت بارگذاری انفجار از مدل ساده شده یک قاب آزمایشگاهی فولادی ۵ طبقه استفاده شد که تصویر آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. این قاب روی شاه‌تیرهای سنگینی سوار شده است و این شاه‌تیرها نیز روی ۴ جداساز لاستیکی که توسط صفحات فولادی تقویت شده است، قرار گرفته‌اند. قطر



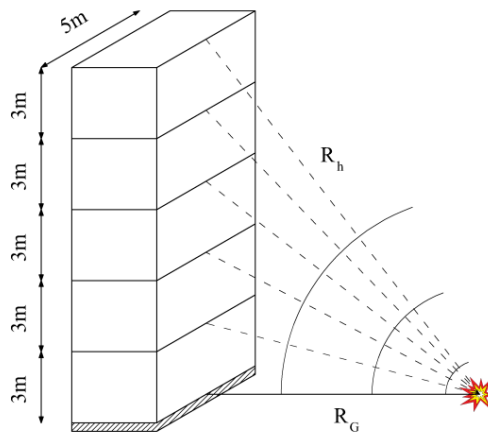
شکل ۱. مدل آزمایشگاهی قاب فولادی پنج طبقه [۴۳]

Fig. 1. Experimental model of the 5-story frame structure

جدول ۱. مشخصات مدل پنج درجه آزادی

Table 1. The structural properties of the 5-DOF model

ضریب میرایی (kg/s)	سختی (kN/m)	جرم (kg)	طبقات
$c_0 = 69938$	$k_0 = 2129.8$	$m_0 = 61200$	کف
$c_1 = 348140$	$k_1 = 101196$	$m_1 = 53073$	۱
$c_2 = 301380$	$k_2 = 87279$	$m_2 = 53073$	۲
$c_3 = 296180$	$k_3 = 85863$	$m_3 = 53073$	۳
$c_4 = 259810$	$k_4 = 74862$	$m_4 = 53073$	۴
$c_5 = 197450$	$k_5 = 57177$	$m_5 = 53073$	۵



شکل ۲. موقعیت مکانی انفجار نسبت به سازه پنج درجه آزادی

Fig. 2. The location of the explosion relative to the structure with five DOFs

حوزه نزدیک که این میراگر فرصت فعال شدن را پیدا نمی‌کند، نیروی زلزله را به دلیل افزایش جرم سازه، بالاتر ببرد. نزدیک بودن فرکانس TMD به فرکانس بارگذاری می‌تواند تأثیر مثبتی در کنترل ارتعاشات سازه‌ها داشته باشد. به همین دلیل در تحقیقات بسیاری به مسئله یافتن پارامترهای بهینه TMD پرداخته شده است [۴۵ و ۴۴ و ۲۹]. تانیگوچی و همکاران [۴۶] به بررسی اثربخشی میراگر TMD در کاهش جابجایی تراز جداساز پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش جرم TMD اثربخشی این میراگر در کاهش جابجایی تراز پایه افزایش می‌یابد. در کاربردهای واقعی، جرم این میراگر می‌تواند در حدود ۱ تا ۱۰ درصد از جرم کل سازه در نظر گرفته شود که در این مطالعه از ۶٪ جرم کل سازه به عنوان جرم TMD استفاده می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که فرکانس بهینه TMD باید مقدار کمتری از فرکانس اصلی سازه داشته باشد که این مقدار را می‌توان طبق رابطه (۱۱) تعیین کرد [۴۶].

$$\omega_{TMD} = \frac{2 - \beta}{2 + \beta} \omega_p \quad (11)$$

که در آن ω_p فرکانس اصلی سازه جداسازی شده و β پارامتر تنظیم

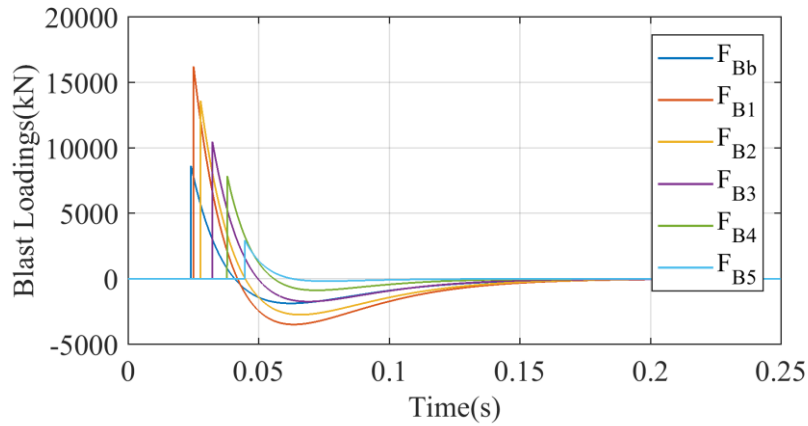
سازه مورد بررسی به صورت ۵ درجه آزادی با جرم متمرکز مدل‌سازی شده است، بارگذاری‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۳ و ۴ از F_{B1} تا F_{B5} به این نقاط در هر درجه آزادی وارد می‌شوند و تحلیل دینامیکی انجام می‌گردد، لازم به ذکر است که در صورت مدل‌سازی جداساز لرزه‌ای یک درجه آزادی به این مدل اضافه شده، که نیروی متناظر با F_{B6} به آن اعمال می‌گردد.

۳-۳- مدل سازی استراتژی‌های مختلف کنترل

در این مطالعه به منظور کاهش پاسخ‌های سازه تحت بارگذاری انفجار که در فاصله متوسط تا دور رخ داده است، از دو سیستم مختلف کنترلی استفاده می‌شود. عملکرد استراتژی‌های مختلف در مرحله بارگذاری و ارتعاشات پس از بارگذاری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در سیستم کنترل اول، سازه از پایه ثابت توسط جداساز جدا شده و به وسیله میراگر TMD جابجایی‌ها و ارتعاشات جداساز کنترل می‌گردد. در سیستم کنترلی دوم به جای TMD از میراگر MR که ولتاژ آن توسط الگوریتم استنتاج فازی نوع-۲ تعیین می‌شود، برای کنترل جابجایی‌های جداساز استفاده می‌شود. در شکل ۵ تصویر سازه کنترل شده توسط استراتژی‌های مختلف نمایش داده شده است.

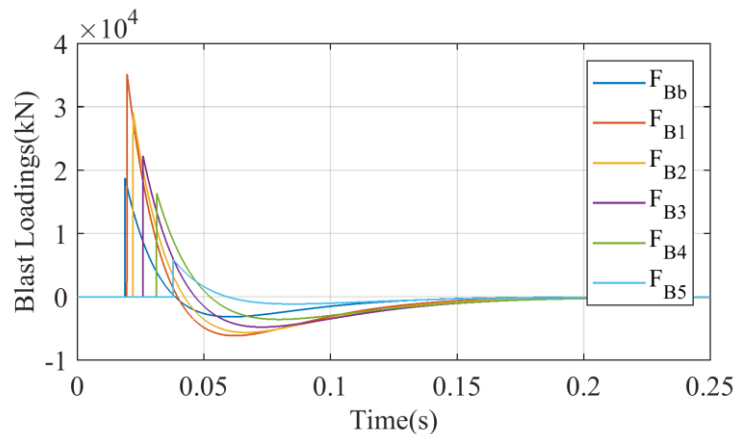
۳-۳-۱- مدل سازی میراگر TMD

به دلیل اینکه سطح پایه در اولین فرکانس طبیعی سازه، جابجایی قابل توجهی از خود نشان می‌دهد، میراگر TMD در تراز پایه جداساز نصب می‌گردد. از سوی دیگر کاربرد این میراگر به دلیل جرم قابل توجه آن در طبقات بالاتر با دشواری‌هایی همراه خواهد بود و حتی می‌تواند در زلزله‌های



شکل ۳. بار انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT بروی عرض ۵ متر از قاب

Fig. 3. The blast load of 500 kg TNT acting on 5 m width of the frame



شکل ۴. بار انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT بروی عرض ۵ متر از قاب

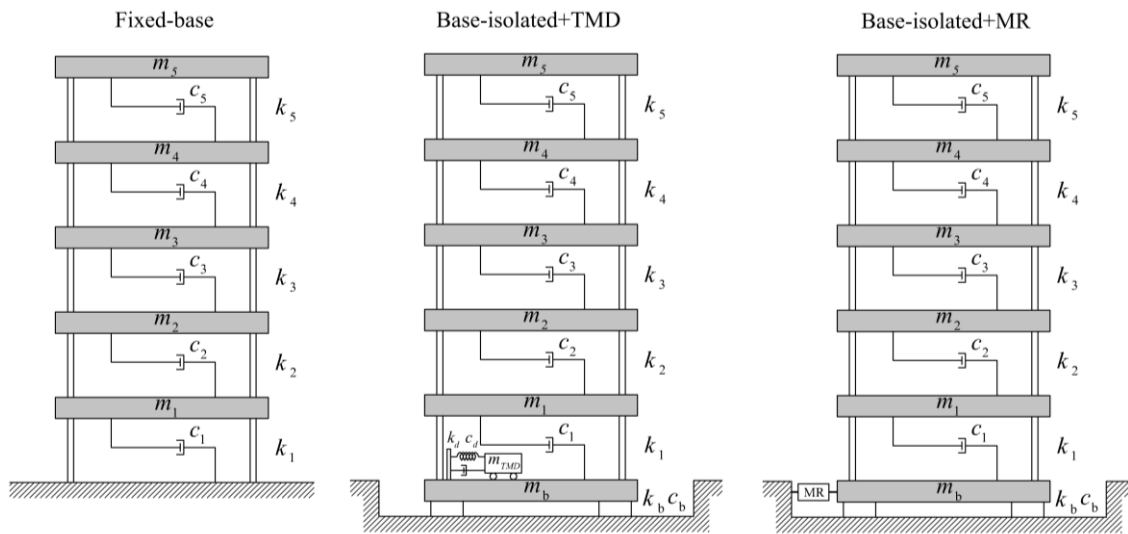
Fig. 4. The blast load of 1000 kg TNT acting on 5 m width of the frame

محاسبه شده و به ترازى که میراگر در آن قرار دارد وارد می‌شود. مدل‌سازی میراگر MR با استفاده از مدل بوک-ون [۴۷] متشکل از یک المان بوک-ون و یک میراگر ویسکوز که به صورت موازی عمل می‌کنند انجام می‌شود. با انجام یک گام تحلیل سازه و به دست آمدن پاسخ سازه، نیروی میراگر MR مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{MRD} = C_0 \dot{x} + \alpha z \quad (۱۲)$$

است که با فرض مقدار ۰٫۱۵ می‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد. نسبت میرایی TMD نیز با توجه به مطالعه تانیگوچی و همکاران [۴۶] مقدار ۱۰٪ در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-۲- مدل‌سازی میراگر MR و سیستم استنتاج فازى نوع-۲
میراگر MR از یک سیستم سیلندر و پیستون تشکیل شده است که نیروی آن از طریق تغییر فاز سیال بر اثر قرارگیری در میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. این نیرو در هر لحظه بر اساس پاسخ سازه از طریق معادلات موجود



شکل ۵. سیستم پنج درجه آزادی و استراتژی‌های مختلف کنترل

Fig. 5. The 5-DOF system and control systems proposed in the current study

شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در صورتی که ولتاژ ورودی به میراگر ۰ باشد، عملکرد آن مشابه میراگرهای غیرفعال خواهد بود.

در این مطالعه از سیستم کنترلی فازی نوع-۲ برای تعیین ولتاژ مناسب برای میراگر MR استفاده خواهد شد. برای طراحی میراگر MR لازم است در گام نخست، سازه جداسازی شده بدون وجود میراگر تحلیل شود. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل سازه تحت بارگذاری انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT محدوده پاسخ‌های سازه به دست خواهد آمد. از این نتایج می‌توان علاوه بر طراحی میراگر MR برای طراحی توابع عضویت ورودی و خروجی در سیستم استنتاج فازی نیز استفاده نمود. همان‌طور که در شکل ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، حداکثر سرعتی که سازه تجربه می‌کند حدود ۳.۰۰۳ m/s و برش پایه حداکثر 1.528×10^6 N خواهد بود.

با توجه به اینکه حداکثر سرعتی که سازه در تراز میراگر تجربه می‌کند برابر ۳.۰۰۳ m/s است؛ بنابراین سرعت هارمونیک با حداکثر دامنه ۳.۰۰۳ m/s شبیه‌سازی می‌شود تا ولتاژی که حداکثر نیرویی برابر حداکثر برش پایه (1.528×10^6 N) تولید می‌کند به دست آید. با انجام چند سعی و خطا مشاهده گردید که به ازای ۱۰ ولت ورودی، مقدار نیروی خروجی در محدوده برش پایه قرار می‌گیرد.

$$\dot{z} = -\gamma|x|z|\dot{z}|^{s-1} - \beta\dot{x}|z|^s + A_m\dot{x} \quad (13)$$

که در آن F_{MRD} نیروی معادل میراگر MR، x جابجایی میراگر، متغیر تحولی^۱ و پارامترهای s ، γ ، β و A_m مقادیر ثابتی هستند که در جدول ۲ ارائه شده‌اند. پارامترهای C_0 و α نیز طبق روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (14)$$

$$C_0 = C_0(u) = C_{0a} + C_{0b} u \quad (15)$$

که در آن u ولتاژ کنترل اعمالی^۲ و پارامترهای α_a ، α_b ، C_{0a} و C_{0b} مقادیر ثابت هستند که در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

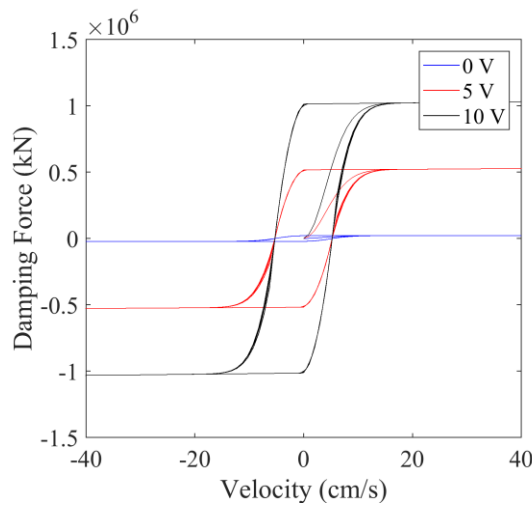
صحت سنجی مدل‌سازی این میراگر برای ولتاژهای ۰، ۵ و ۱۰ ولت در

-
- 1 Evolutionary Variable
 - 2 Applied Control Voltage

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی میراگر MR

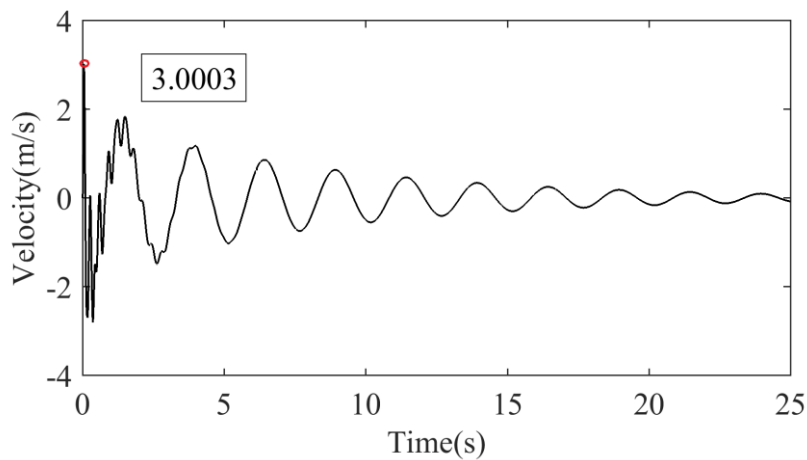
Table 2. Parameters used for simulating the MR damper

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
α_a	1.0872×10^7 (N/m)	C_{ob}	4400 (Ns/m/V)	β	300 (m^{-1})
α_b	4.9616×10^7 (N/m/V)	A_m	1.2	γ	300 (m^{-1})
C_{0a}	440 (Ns/m)	s	1	η	50 (s^{-1})



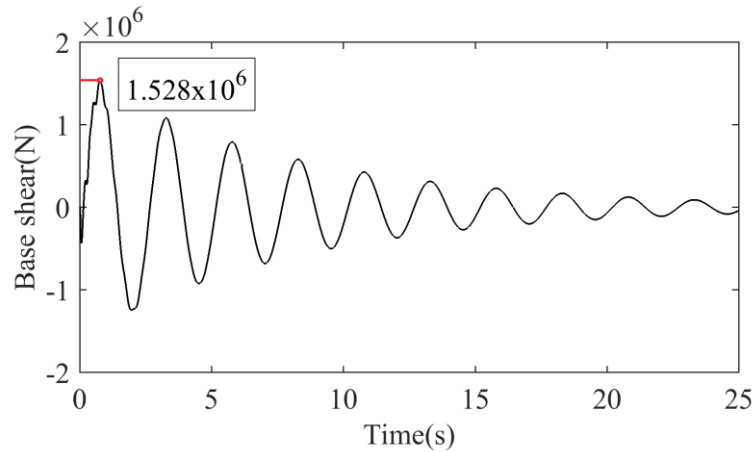
شکل ۶. نمودار رفتاری میراگر MR به دست آمده از مطالعه حاضر

Fig. 6. Mechanical behavior of MR damper obtained from the present study



شکل ۷. پاسخ تاریخچه زمانی سرعت تراز پایه

Fig. 7. Time history of the velocity at the base level



شکل ۸. پاسخ تاریخیچه زمانی برش پایه

Fig. 8. Time history of the base shear

جدول ۳. متغیرهای زبانی تعریف شده برای ورودی جابجایی

Table 3. Linguistic variables defined for displacement input

متغیر زبانی	جابجایی
N/P VL	منفی یا مثبت خیلی بزرگ
N/P L	منفی یا مثبت بزرگ
N/P M	منفی یا مثبت متوسط
N/P S	منفی یا مثبت کوچک

جدول ۴. متغیرهای زبانی تعریف شده برای ورودی سرعت نسبی

Table 4. Linguistic variables defined for relative velocity input

متغیر زبانی	سرعت نسبی
N	منفی
P	مثبت

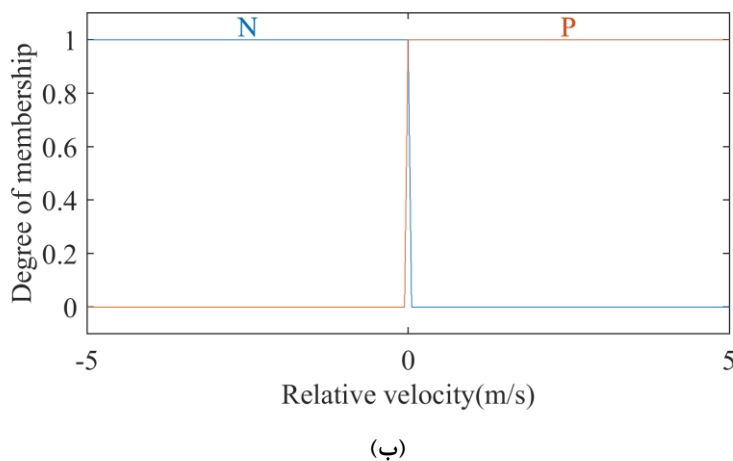
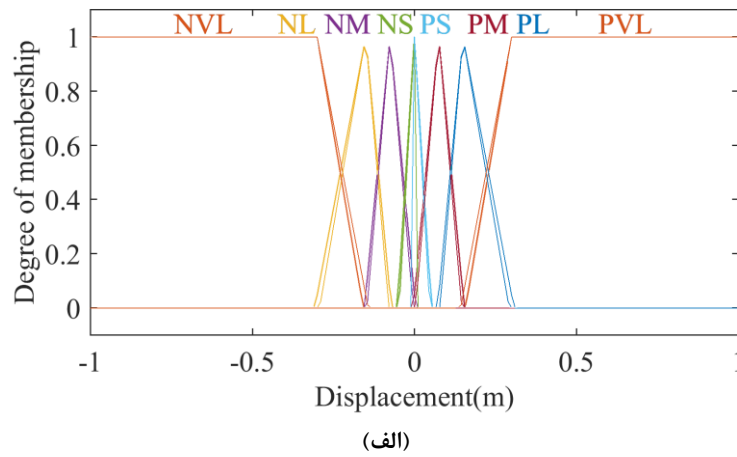
در شکل ۹ توابع عضویت متغیرهای ورودی جابجایی و سرعت نسبی و در شکل ۱۰ متغیر خروجی ولتاژ در سیستم فازی نوع-۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیر ورودی جابجایی به صورت دو بعدی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها طراحی شده است. بازه متغیرهای ورودی با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل سازه جداسازی شده در

در این مطالعه سیستم فازی طوری طراحی شده است که با افزایش فاصله تراز جداساز از حالت تعادل، نیروی میراگر MR افزایش یابد تا آن را به حالت تعادل بازگرداند. این سیستم از ۱۰ مجموعه فازی در متغیر ورودی و ۵ مجموعه فازی در متغیر خروجی تشکیل شده است. متغیرهای زبانی اختصاص یافته به این مجموعه‌ها در جداول ۳ تا ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. متغیرهای زبانی تعریف شده برای متغیر خروجی

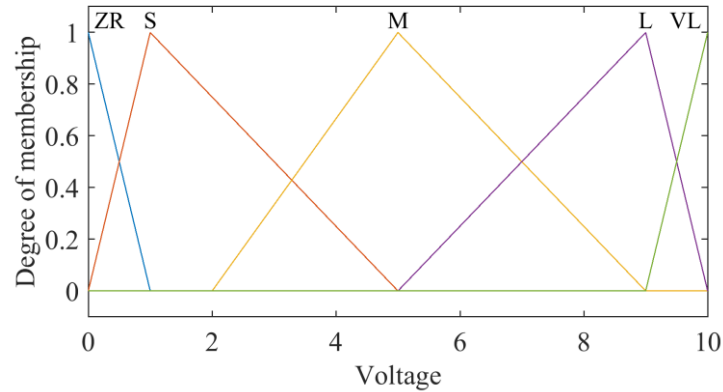
Table 5. Linguistic variables defined for output variable

متغیر زبانی	ولتاژ
VL	خیلی بزرگ
L	بزرگ
M	متوسط
S	کوچک
ZO	صفر



شکل ۹. توابع عضویت ورودی سیستم فازی نوع-۲. الف) جابجایی؛ ب) سرعت نسبی دو سر میراگر

Fig. 9. Membership functions for input variables in type-2 fuzzy system, a) displacement, b) relative velocity across the damper



شکل ۱۰. توابع عضویت خروجی (ولتاژ) سیستم فازی نوع-۲

Fig. 10. Membership functions for output variable (voltage) in type-2 fuzzy system

جدول ۶. مجموعه قواعد فازی

Table 6. Fuzzy rule tables

		جابجایی							
		NVL	NL	NM	NS	PS	PM	PL	PVL
سرعت نسبی	N	VL	L	M	S	ZR	ZR	ZR	ZR
	P	ZR	ZR	ZR	ZR	S	M	L	VL

در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، ۱۰٪ از طول کل بازه تعریف شده برای هر تابع عضویت، به عدم قطعیت اختصاص داده می‌شود؛ هر چقدر این مقدار به صفر نزدیک شود، نتایج فازی نوع-۲ به فازی نوع-۱ شبیه‌تر می‌شود و انتخاب عدد بزرگ برای این مقدار باعث افزایش ناحیه عدم قطعیت و تداخل توابع عضویت با یکدیگر و در نتیجه مختل شدن فرآیند تصمیم‌گیری بر اساس قواعد برنامه‌ریزی شده می‌شود. در سیستم فازی نوع-۲ با توجه به اینکه محدوده‌ای برای توابع عضویت ورودی در نظر گرفته می‌شود، می‌تواند برای عدم قطعیت‌های ایجاد شده در سیستم کنترلی تصمیم‌گیری نماید. عدم قطعیت‌های مدل‌سازی شده در این مطالعه شامل نوفه موجود در داده‌های برداشت شده توسط حسگرها و تأخیر زمانی می‌باشد.

حالت بدون میراگر تعیین می‌گردد؛ این مقدار برای متغیر سرعت نسبی بین -5m/s تا 5m/s و برای متغیر جابجایی بین -1m تا 1m در نظر گرفته می‌شود. بازه متغیر خروجی نیز با توجه به مقدار برش پایه بین 0 تا 10V تنظیم می‌گردد. افزایش بی‌رویه ولتاژ می‌تواند باعث افزایش نیروی میراگر MR و در نتیجه ناپایداری گردد.

استنتاج سیستم فازی بر اساس مجموعه‌ای از قواعد که ارتباط بین متغیر ورودی و خروجی را بیان می‌کند انجام می‌شود. منطق به کار رفته برای ارائه این قواعد، بازگرداندن سیستم سازه به حالت تعادل و جلوگیری از گذر سریع از حالت تعادل است. در جدول ۶ مجموعه قوانین سیستم فازی نمایش داده شده است.

وجود عدم قطعیت امری اجتناب‌ناپذیر است به همین دلیل از سیستم فازی نوع-۲ برای لحاظ نمودن این مسئله استفاده می‌شود. همان‌طور که

جدول ۷. معیارهای ارزیابی سیستم‌های کنترلی

Table 7. Performance criteria employed to evaluate the control systems

Criteria		
$J_1 = \max x_o(t) $	$J_2 = \sum_{i=1}^{NS} \max d_i(t) $	$J_3 = \max \dot{x}_0(t) $
$J_4 = \sum_{i=1}^{NS} \max \ddot{x}_i(t) $	$J_5 = \max V_0(t) $	$J_6 = \max \ x_o(t)\ $
$J_7 = \sum_{i=1}^{NS} \max \ d_i(t)\ $	$J_8 = \max \ \ddot{x}_0(t)\ $	$J_9 = \sum_{i=1}^{NS} \max \ \ddot{x}_i(t)\ $

ثبت می‌نمایند و پس از ثبت اطلاعات، آن را به سیستم استنتاج فازی ارسال می‌کنند. مدت زمان انجام این فرآیند ۰٫۰۲ ثانیه فرض شده است [۲۹]. بخش دیگری از تأخیر زمانی می‌تواند از محاسبه سیستم استنتاج فازی و تعیین ولتاژ میراگر MR و تولید نیروهای کنترلی اعمالی به سازه ایجاد گردد که در این مطالعه مدت زمان این فرآیند ۰٫۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است [۲۹]. آخرین بخش ایجاد کننده تأخیر زمانی ناشی از میراگر MR است. آنجا که میراگرهای مورد استفاده در سیستم‌های کنترل توانایی اعمال نیروی خواسته شده را به طور آنی ندارند همواره در اعمال نیروی کنترل بسته به نوع میراگر، تأخیری در حدود ۰٫۰۲ الی ۰٫۱ ثانیه ایجاد می‌گردد [۴۸] که در این مطالعه مقدار ۰٫۰۲ ثانیه برای آن فرض شده است.

۴- تحلیل‌ها

به منظور سهولت در مقایسه عملکرد استراتژی‌های مختلف کنترل از ۹ معیار ارزیابی مطابق جدول ۷ استفاده می‌شود. در این معیارها x معرف جابجایی، d معرف جابجایی نسبی، \ddot{x} شتاب، V برش پایه، NS تعداد طبقات و پایین نویس این متغیرها معرف تراز سازه می‌باشد که تراز ۰ معرف تراز جداساز و ترازهای ۱ تا NS معرف تراز طبقات است. در معیارهای J_6 تا J_9 ، $\|\cdot\|$ معرف نرم پاسخ‌های سازه است که مطابق رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$\|\cdot\| = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} (\cdot)^2 dt} \quad (17)$$

۳-۴ مدل‌سازی عدم قطعیت

۳-۴-۱ عدم قطعیت به دلیل وجود نوفه

کنترل نیمه‌فعال و فعال ارتعاشات بر اساس اطلاعاتی که توسط حسگرها برداشت می‌شوند انجام می‌گیرند. وجود نوفه در این اطلاعات حتی در شرایط آزمایشگاهی امری اجتناب‌ناپذیر است. به منظور شبیه‌سازی نوفه موجود در اطلاعات برداشت شده توسط حسگرها طبق رابطه زیر اطلاعات به نوفه آلوده می‌گردند:

$$\bar{I} = I(1 + \gamma\rho) \quad (16)$$

که در آن \bar{I} و I به ترتیب اطلاعات آلوده شده به نوفه و اطلاعات بدون نوفه است؛ γ عدد تصادفی گوسی با میانگین صفر و واریانس ۱ و ρ سطح آلودگی به نوفه است. در این مطالعه پاسخ سرعت نسبی و جابجایی تراز پایه با سطح آلودگی ۲٫۵٪ به نوفه آلوده شده و سپس در اختیار سیستم فازی قرار می‌گیرند [۱۲]. با توجه به اینکه میراگر TMD از نوع غیرفعال است و نیاز به حسگری برای برداشت اطلاعات ندارد، این نوع عدم قطعیت شامل این میراگر نمی‌شود.

۳-۴-۲ عدم قطعیت به دلیل تأخیر زمانی

بخشی از تأخیر زمانی ناشی از ثبت اطلاعات لرزه‌ای سازه و ارسال آن به سیستم استنتاجی فازی است. در واقع پس از وارد شدن نیروی زلزله به سازه حسگرهای نصب شده بر روی آن، سرعت و جابجایی را در نقطه مورد نظر

جدول ۸. مشخصات زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

Table 8. Characteristics of the near- and far-filed earthquakes

No.	Name	Station	Type	Duration (s)	Mag	PGA(g)
1	Northridge	Beverly Hill	Far Field	23.95	6.69	0.62
2	Imperial Valley	Delta	Far Field	100.10	6.50	0.35
3	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	Far Field	40.95	6.90	0.48
4	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	Near Field	39.08	6.50	0.44
5	Irpinia, Italy-01	Sturno	Near Field	39.34	6.90	0.31
6	Loma Prieta	Saratoga-Aloha	Near Field	39.98	6.90	0.38

نرمال شده به حداکثر مقدار نمایش داده شده است. معیار J_1 نشان دهنده کنترل جابجایی تراز پایه است. کاهش مؤثر این معیار بیانگر کاهش احتمال آسیب به جداساز در تحریک‌های ورودی قوی می‌باشد. با مقایسه معیار J_1 مشاهده می‌شود که سیستم کنترلی جداساز به همراه میراگر MR توانسته است برای هر دو بارگذاری انفجار و بار لرزه‌ای جابجایی جداساز را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که سیستم کنترلی جداساز به همراه میراگر MR توانسته است معیار J_1 را به طور میانگین برای بارگذاری انفجار تا ۲۸/۹۵٪ برای بارگذاری زلزله‌های حوزه دور تا ۱۵/۳۶٪ و برای بارگذاری زلزله‌های حوزه نزدیک تا ۳۷/۳۴٪ برساند، در حالی که سیستم کنترلی جداساز به همراه میراگر TMD توانسته است این معیار را به طور میانگین برای بارگذاری انفجار تا ۴۷/۵۱٪ و برای بارگذاری زلزله‌های حوزه دور تا ۳۸/۰۷٪ و برای بارگذاری زلزله‌های حوزه نزدیک به مقدار ۱۰۳/۱۸٪ برساند. با مقایسه این نتایج می‌توان دریافت که سیستم کنترلی جداساز به همراه میراگر MR نسبت به سیستم کنترلی جداساز به همراه TMD توانست این معیار را به ترتیب ۳۹/۰۸٪ برای بار انفجار، ۵۹/۶۶٪ برای بار زلزله‌های حوزه دور و ۶۳/۸۱٪ برای بار زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش دهد. با بررسی معیار J_5 نیز می‌توان دریافت که در سازه با اتصال گیردار به زمین، برش پایه در بارگذاری انفجار، زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به طور میانگین برابر خواهد بود با ۱۳۷۲۰/۹۷ kN، ۴۷۷۸/۸۲ kN و ۳۹۰۳/۸۲ kN در حالی که با استفاده از سیستم جداساز به همراه میراگر MR می‌توان این برش پایه را به ترتیب در بارگذاری‌های انفجار، زلزله‌های حوزه

که در آن t_f مدت زمان تحلیل است. همانطور که در بخش مدل‌سازی بار انفجار شرح داده شد، بار انفجار ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۱۵ متری از سازه شبیه‌سازی شد. همچنین در این مطالعه از ۳ شتاب‌نگاشت حوزه دور و ۳ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک نیز برای مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترلی در بارهای لرزه‌ای استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۸ ارائه شده است. شتاب‌نگاشت‌ها به بیشینه شتاب مقیاس شده‌اند و سپس تحلیل دینامیکی انجام گرفته است.

مدل‌سازی سازه به صورت جرم متمرکز، فنر و کمک فنر به صورت ماتریسی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. برای اعمال اثر میراگرهای TMD و MR، نیروی متناظر با این میراگرها در هر لحظه محاسبه و به تراز می‌شود که میراگر در آن قرار دارد وارد خواهد شد. تحلیل‌ها بر اساس روش رانگ کوتا با مرتبه چهارم انجام می‌شود.

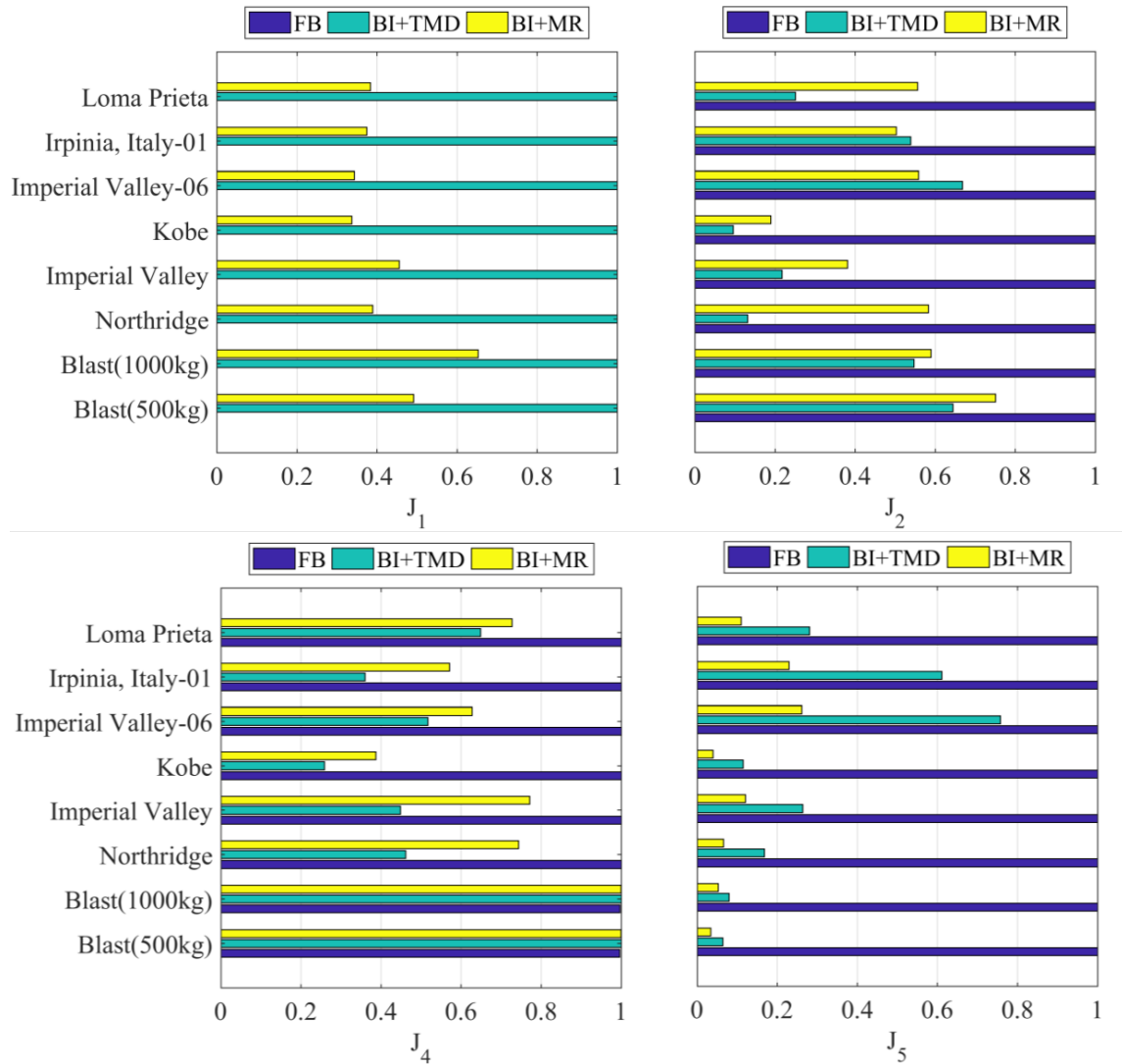
۵- تفسیر نتایج

در این بخش عملکرد استراتژی‌های کنترل ارائه شده تحت دو بار انفجار و بارگذاری‌های لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۹ خلاصه نتایج معیارهای ارزیابی، تحت بارگذاری‌های انفجار و زلزله ارائه شده است. به منظور مقایسه بهتر نتایج، در شکل ۱۱ برخی از معیارها به صورت

جدول ۹. پاسخ سیستم‌های کنترلی به بارگذاری‌های انفجار و زلزله

Table 9. The response of the controlled structures to the blast and seismic loadings

معیارهای ارزیابی	سیستم کنترلی	500 kg (TNT)	1000 kg (TNT)	Northridge	Imperial Valley	Kobe	Imperial Valley-06	Irpinia, Italy-01	Loma Prieta
J_1 (m)	FB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	BI+TMD	0.2547	0.6956	0.1789	0.5602	0.4029	1.3940	1.2556	0.4459
	BI+MR	0.1251	0.4538	0.0697	0.2552	0.1358	0.4792	0.4699	0.1711
J_2 (m)	FB	0.0658	0.1616	0.0259	0.0451	0.0754	0.0340	0.0390	0.0311
	BI+TMD	0.0424	0.0884	0.0034	0.0098	0.0072	0.0227	0.0210	0.0078
	BI+MR	0.0494	0.0953	0.0151	0.0172	0.0143	0.0190	0.0196	0.0173
J_3 (m/s ²)	FB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	BI+TMD	141.13	307.105	9.6881	9.9757	10.7660	10.5871	9.9840	12.3769
	BI+MR	141.13	307.105	12.0166	16.6198	13.6774	11.3634	11.5575	12.0200
J_4 (m/s ²)	FB	305.94	663.262	21.3618	22.8849	44.5286	21.0479	30.5325	19.7281
	BI+TMD	307.00	665.110	9.8545	10.2582	11.5218	10.8792	10.9928	12.7963
	BI+MR	306.94	665.063	15.8833	17.6633	17.2502	13.2055	17.4507	14.3444
J_5 (kN)	FB	8640.44	18801.50	2295.20	4538.37	7502.88	3925.05	4384.17	3402.23
	BI+TMD	554.48	1498.06	386.15	1198.51	861.43	2974.76	2680.67	956.93
	BI+MR	289.76	986.59	150.55	548.35	295.27	1025.44	1004.49	373.79
J_6 (m)	FB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	BI+TMD	0.0605	0.1764	0.0161	0.1500	0.0747	0.1997	0.2113	0.0558
	BI+MR	0.0151	0.0746	0.0061	0.0327	0.0109	0.0577	0.0536	0.0164
J_7 (m)	FB	0.0055	0.0166	0.0026	0.0100	0.0102	0.0042	0.0051	0.0034
	BI+TMD	0.0036	0.0063	0.0003	0.0027	0.0014	0.0033	0.0038	0.0010
	BI+MR	0.0033	0.0064	0.0013	0.0036	0.0018	0.0020	0.0023	0.0015
J_8 (m/s ²)	FB	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	BI+TMD	3.9588	8.0147	0.06471	1.5610	1.0164	1.1519	1.5228	0.6871
	BI+MR	3.3770	7.4190	1.5784	3.1201	1.7971	1.5599	2.0441	1.6008
J_9 (m/s ²)	FB	6.8654	16.2082	2.0439	5.3496	5.8730	2.3741	3.0456	1.9097
	BI+TMD	5.3284	11.2713	0.6811	1.6669	1.0908	1.2165	1.6215	0.7276
	BI+MR	5.3995	11.4311	1.5019	2.8516	1.8498	1.4017	1.8286	1.3773



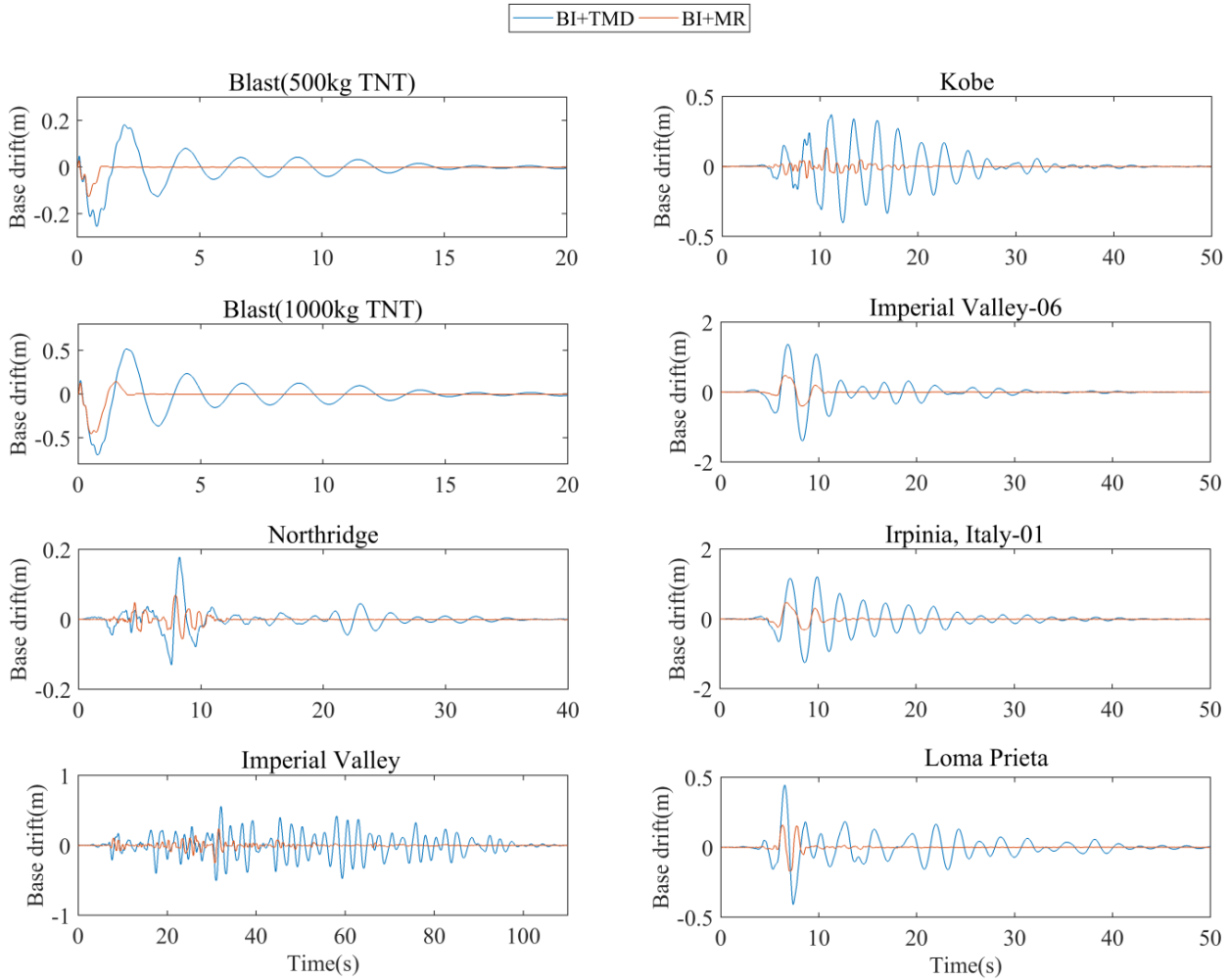
شکل ۱۱. مقایسه معیارهای ارزیابی برای استراتژی‌های مختلف کنترل تحت بارگذاری انفجار و بارهای لرزه‌ای

Fig. 11. The comparison of performance criteria for different control strategies subjected to blast and seismic loadings

دیگر بیشتر به مود اول سازه منتقل می‌کند. در معیار J_2 ، سیستم جداساز به همراه TMD به طور میانگین برای ایجاد برتری $5/6$ میلی‌متری نسبت به سیستم جداساز به همراه MR، جابجایی تراز پایه را 378 میلی‌متر بیشتر کرده که این نسبت به هیچ عنوان قابل توجه نیست.

معیار J_3 و J_4 به ترتیب بیانگر حداکثر شتاب در تراز پایه و طبقات بالاتر است. بهبود نتایج در این معیارها می‌تواند راحتی کاربران را به دنبال داشته باشد. سیستم‌های کنترلی معمولاً در معیار جابجایی و شتاب همسو با یکدیگر عمل نمی‌کنند، به عبارت دیگر کاهش جابجایی معمولاً منجر به افزایش شتاب و بالعکس خواهد شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که سیستم

دور و نزدیک به مقدار $638/18$ kN، $331/39$ kN و $801/24$ kN رساند. در واقع می‌توان ادعا کرد که این سیستم کنترلی توانسته است برش پایه را در بارگذاری‌های انفجار، زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به ترتیب تا $95/35\%$ ، $93/07\%$ و $79/48\%$ کاهش دهد. از آنجایی که معیار J_2 معرف حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات است، کاهش مؤثر این معیار می‌تواند وضعیت تنش ایجاد شده در اعضا را نیز کاهش دهد. با مقایسه این معیار مشاهده می‌گردد که سیستم کنترلی جداساز به همراه میراگر TMD موجب ایجاد جابجایی نسبی طبقات کمتری نسبت به سازه جداسازی شده به همراه میراگر MR و سازه با پایه ثابت می‌شود. در واقع این میراگر انرژی ورودی را نسبت به موارد



شکل ۱۲. پاسخ تاریخیچه زمانی جابجایی تراز پایه تحت بارهای انفجار و زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

Fig. 12. Time history of the base displacement due to blast and seismic loadings

TMD در زلزله‌های حوزه نزدیک فرصت کافی برای ایجاد نیروی اینرسی را پیدا نمی‌کنند، همین عامل باعث می‌گردد که وجود این میراگر در زلزله‌های حوزه نزدیک تأثیر کمتری داشته باشد.

معیارهای J_6 ، J_7 ، J_8 و J_9 نیز مشابه معیارهای J_1 ، J_2 ، J_3 و J_4 بیان‌گر کارایی سیستم‌های کنترل برای کاهش جابجایی و شتاب تراز پایه و طبقات بالاتر هستند، با این تفاوت که نرم پاسخ‌ها را معیار سنجش قرار می‌دهد. کاهش مؤثر این معیارها می‌تواند موجب کاهش میزان خستگی در اعضای سازه‌ای شود.

در شکل ۱۲ تأثیر اضافه نمودن میراگر MR به سیستم جداساز، برای بارگذاری‌های انفجار و زلزله‌های حوزه دور و نزدیک نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر می‌توان دریافت که سیستم جداساز به همراه میراگر

کنترلی جداساز به همراه TMD در معیار J_3 و J_4 به طور میانگین نسبت به میراگر جداساز به همراه MR، $1/735 \text{ m/s}^2$ و $3/673 \text{ m/s}^2$ بهتر عمل می‌کند. معیار J_5 بیان‌گر میزان کارآمدی سیستم کنترل برای کاهش برش پایه می‌باشد. کاهش مؤثر این معیار می‌تواند موجب کاهش میزان برش پایه و نیروهای ایجاد شده بر اثر بارگذاری انفجار و بارهای لرزه‌ای در اعضای سازه شود. با دقت در شکل ۱۱ می‌توان به عملکرد قابل توجه سیستم‌های جداساز و میراگرهای TMD و MR پی برد. سیستم جداساز به همراه میراگر MR همواره برای بارگذاری‌های انفجار و بارهای لرزه‌ای عملکرد بهتری نسبت به میراگر دیگر داشته است. در زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل وجود شوک‌های قوی در لحظات ابتدایی رکورد زلزله، بهبود عملکرد سیستم جداساز به همراه TMD اندکی کاهش می‌یابد. در واقع میراگرهای

سیستم کنترلی جداساز به همراه میراگر مغناطیسی توانایی عملکرد بسیار مناسبی را دارد. این سیستم کنترلی توانست معیار مربوط به جابجایی نسبی جداساز را نسبت به سیستم کنترلی دیگر به ترتیب $0.8/39\%$ برای بار انفجار، $0.66/59\%$ برای بار زلزله‌های حوزه دور و $0.81/63\%$ برای بار زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش دهد. همچنین سیستم کنترلی جداساز به همراه میراگر MR توانست برش پایه را نسبت به سازه با تکیه‌گاه ثابت به ترتیب $0.35/95\%$ برای بار انفجار، $0.07/93\%$ برای بار زلزله‌های حوزه دور و $0.48/79\%$ برای زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش دهد.

منابع

- [1] N.R. Council, ISC security design criteria for new federal office buildings and major modernization projects: A review and commentary, National Academies Press, 2003.
- [2] H. Draganić, V. Sigmund, Blast loading on structures, Technical Gazette, 19(3) (2012) 643-652.
- [3] K.G.G. KJ, Explosive shocks in air, in, Springer-Verlag, New York, 1985.
- [4] F. Beshara, Modelling of blast loading on aboveground structures—I. General phenomenology and external blast, Computers & Structures, 51(5) (1994) 585-596.
- [5] R. Codina, D. Ambrosini, F. de Borbón, New sacrificial cladding system for the reduction of blast damage in reinforced concrete structures, International Journal of Protective Structures, 8(2) (2017) 221-236.
- [6] S.P. Santosa, F. Arifurrahman, M.H. Izzudin, D. Widagdo, L. Gunawan, Response Analysis of Blast Impact Loading of Metal-foam Sandwich Panels, Procedia engineering, 173 (2017) 495-502.
- [7] R. Zhang, B.M. Phillips, Performance and protection of base-isolated structures under blast loading, Journal of Engineering Mechanics, 142(1) (2016) 04015063.
- [8] ع. میرزا گلنبار روشن، ع. ناصری، ج. نصیری لاریمی، بررسی اثر میراگرهای جدارنازک آکاردئونی در کاهش پاسخ قاب‌ها تحت بار انفجاری. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۹(۴) (۲۰۱۸) ۷۰۷-۷۲۲. ۱۳۹۳.
- [9] M.Z. Kangda, S. Bakre, Positive-phase blast effects on

MR توانایی کاهش حداکثر جابجایی تراز پایه و همچنین نرم این پاسخ را دارد که در میرایی سریع جابجایی نمود پیدا می‌کند. مقادیر نرم جابجایی تراز پایه در جدول ۹ نیز این مشاهدات را تصدیق می‌کند. اگر در بارگذاری‌های انفجار، نیروی اتمام مدت زمان بارگذاری $0.1/0$ حداکثر نیروی وارد شده لحاظ شود، مدت زمان بارگذاری 0.500 و 1000 کیلوگرم TNT به ترتیب برابر 0.14 و 0.18 ثانیه خواهد بود که از 0.25 دوره تناوب سازه کوچک‌تر است و بارگذاری انفجار همانند بار ضربه به سیستم وارد خواهند شد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در بارگذاری‌های انفجار حداکثر پاسخ جابجایی‌ها پس از اتمام بارگذاری رخ داده است و به همین دلیل میراگر MR توانسته است عملکرد مناسبی از خود نشان دهد؛ این در حالی است که در مدت زمان اعمال بار، استراتژی‌های کنترل تقریباً مشابه یکدیگر عمل کرده‌اند و اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند.

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به کاهش ارتعاشات سازه تحت بار انفجار در فاصله متوسط تا دور، از طریق سیستم جداساز و دو ابزار جانبی برای کاهش ارتعاشات تراز پایه پرداخته شده است. در این مطالعه به منظور ارزیابی استراتژی‌های مختلف کنترل از یک سازه ۵ درجه آزادی به عنوان سازه معیار استفاده شده است. از آنجایی که از سیستم جداساز موجب افزایش دوره تناوب سازه نسبت به مدت زمان بار انفجار می‌گردد، این سیستم کنترلی انتخاب مناسبی برای کاهش پاسخ سازه می‌باشد. به منظور جبران ضعف‌های جداساز از یک سیستم غیرفعال شامل میراگر جرمی تنظیم شده و یک سیستم نیمه‌فعال شامل میراگر مغناطیسی استفاده شد. از آنجایی که کاربرد میراگر جرمی در طبقات بالای سازه با دشواری‌هایی همراه است و عمده جابجایی سازه در تراز پایه جداساز رخ می‌دهد، این میراگر در تراز جداساز نصب شده است. میراگر نیمه‌فعال MR نیز برای کاهش جابجایی‌های نسبی جداساز در تراز پایه نصب شده است. برای غلبه بر عدم قطعیت‌های موجود که شامل تأخیر زمانی و نوفه می‌شود، از الگوریتم فازی نوع-۲ برای تعیین ولتاژ مناسب میراگر MR استفاده گردید. این الگوریتم از پاسخ‌های سرعت و جابجایی تراز جداساز برای تعیین خروجی استفاده می‌کند. به منظور اطمینان از عملکرد سیستم‌های کنترل پیشنهادی، این سازه تحت بارهای لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک نیز قرار گرفت. مقایسه معیارهای تعریف شده بر اساس حداکثر جابجایی و شتاب تراز پایه و طبقات بالاتر و همچنین برش پایه سازه، نشان داد که

- fuzzy logic, *Studies in fuzziness and soft computing*, 240 (2009) 149-215.
- [19] R.-E. Precup, H. Hellendoorn, A survey on industrial applications of fuzzy control, *Computers in industry*, 62(3) (2011) 213-226.
- [20] M. Prasad, C.-T. Lin, D.-L. Li, C.-T. Hong, W.-P. Ding, J.-Y. Chang, Soft-boosted self-constructing neural fuzzy inference network, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(3) (2015) 584-588.
- [21] A. Sarabakha, N. Imanberdiyev, E. Kayacan, M.A. Khanesar, H. Hagrass, Novel Levenberg–Marquardt based learning algorithm for unmanned aerial vehicles, *Information Sciences*, 417 (2017) 361-380.
- [22] S.J. Hormozabad, A.K. Ghorbani-Tanha, Semi-active fuzzy control of Lali Cable-Stayed Bridge using MR dampers under seismic excitation, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(3) (2020) 706-721.
- [23] P. Melin, O. Castillo, A review on type-2 fuzzy logic applications in clustering, classification and pattern recognition, *Applied soft computing*, 21 (2014) 568-577.
- [24] E. Ontiveros, P. Melin, O. Castillo, High order α -planes integration: a new approach to computational cost reduction of general type-2 fuzzy systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 74 (2018) 186-197.
- [25] E. Ontiveros-Robles, P. Melin, O. Castillo, Comparative analysis of noise robustness of type 2 fuzzy logic controllers, *Kybernetika*, 54(1) (2018) 175-201.
- [26] A.K. Ravandi, E. Khanmirza, K. Daneshjou, Hybrid force/position control of robotic arms manipulating in uncertain environments based on adaptive fuzzy sliding mode control, *Applied Soft Computing*, 70 (2018) 864-874.
- [27] E. Kayacan, A. Sarabakha, S. Coupland, R. John, M.A. Khanesar, Type-2 fuzzy elliptic membership functions for modeling uncertainty, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 70 (2018) 170-183.
- base-isolated structures, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(5) (2019) 4971-4992.
- [10] H. Frahm, Device for damping vibrations of bodies, in, *Google Patents*, 1911.
- [11] M. Ramezani, A. Bathaei, A.K. Ghorbani-Tanha, Application of artificial neural networks in optimal tuning of tuned mass dampers implemented in high-rise buildings subjected to wind load, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17(4) (2018) 903-915.
- [12] M. Ramezani, A. Bathaei, S.M. Zahrai, Comparing fuzzy type-1 and-2 in semi-active control with TMD considering uncertainties, (2019).
- [13] M. Ramezani, A. Bathaei, S.M. Zahrai, Designing fuzzy systems for optimal parameters of TMDs to reduce seismic response of tall buildings, *Smart Structures and Systems*, 20(1) (2017) 61-74.
- [14] S. Salari, S.J. Hormozabad, A.K. Ghorbani-Tanha, M. Rahimian, Innovative Mobile TMD system for semi-active vibration control of inclined sagged cables, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2) (2019) 641-653.
- [15] S.J. Hormozabad, M.G. Soto, Load balancing and neural dynamic model to optimize replicator dynamics controllers for vibration reduction of highway bridge structures, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 99 (2021) 104138.
- [16] S.J. Hormozabad, M.G. Soto, Optimal Replicator Dynamic Controller via Load Balancing and Neural Dynamics for Semi-Active Vibration Control of Isolated Highway Bridge Structures, in: *Sensors and Instrumentation, Aircraft/Aerospace, Energy Harvesting & Dynamic Environments Testing*, Volume 7, Springer, 2021, pp. 241-244.
- [17] M. Mohebbi, H. Dadkhah, Performance of semi-active base isolation systems under external explosion, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17(10) (2017) 1750112.
- [18] A. Celikyilmaz, I.B. Turksen, Modeling uncertainty with

- [40] R.I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. McVerry, An introduction to seismic isolation, John Wiley & Sons, 1993.
- [41] E.A. Johnson, J.C. Ramallo, B.F. Spencer Jr, M.K. Sain, Intelligent base isolation systems, in: Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, 1998, pp. 367-376.
- [42] J. Kelly, G. Leitmann, A. Soldatos, Robust control of base-isolated structures under earthquake excitation, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 53(2) (1987) 159-180.
- [43] J.M. Kelly, H.C. Tsai, Seismic response of light internal equipment in base-isolated structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 13(6) (1985) 711-732.
- [44] S. Bakre, R. Jangid, Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system, *Structural Control and Health Monitoring: the Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 14(3) (2007) 448-470.
- [45] A. Leung, H. Zhang, Particle swarm optimization of tuned mass dampers, *Engineering Structures*, 31(3) (2009) 715-728.
- [46] T. Taniguchi, A. Der Kiureghian, M. Melkumyan, Effect of tuned mass damper on displacement demand of base-isolated structures, *Engineering Structures*, 30(12) (2008) 3478-3488.
- [47] S.-Y. Ok, D.-S. Kim, K.-S. Park, H.-M. Koh, Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers, *Engineering structures*, 29(5) (2007) 776-788.
- [48] P. Harvey Jr, H. Gavin, J. Scruggs, J. Rinker, Determining the physical limits on semi-active control performance: a tutorial, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(5) (2014) 803-816.
- [28] M.A. Khanesar, E. Kayacan, M. Teshnehlab, O. Kaynak, Analysis of the noise reduction property of type-2 fuzzy logic systems using a novel type-2 membership function, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 41(5) (2011) 1395-1406.
- [29] A. Bathaei, S.M. Zahrai, M. Ramezani, Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms, *Journal of Vibration and Control*, 24(13) (2018) 2938-2953.
- [30] Unified Facilities Criteria (UFC), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, U. S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, UFC 3-340-02, 5 December 2008.
- [31] H.L. Brode, Numerical solutions of spherical blast waves, *Journal of Applied physics*, 26(6) (1955) 766-775.
- [32] N. Lam, P. Mendis, T. Ngo, Response spectrum solutions for blast loading, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4(4) (2004) 28-44.
- [33] C. Mills, The design of concrete structures to resist explosions and weapon effects, (1988).
- [34] N. Newmark, R. Hansen, Design of blast resistant structures, *Shock and vibration handbook*, 3 (1961).
- [35] P. Smith, J. Hetherington, Blast and ballistic loading of structures. Laxtons, in, Oxford, 1994.
- [36] W.E. Baker, Explosions in air, University of Texas press, 1973.
- [37] W.J.M. Rankine, XV. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (160) (1870) 277-288.
- [38] P.S. Bulson, Explosive loading of engineering structures, CRC Press, London, 2002.
- [39] S.B. Hodder, A STUDY OF ENERGY ABSORBING ASEISMIC BASE ISOLATION SYSTEMS, (1983).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ramezani, M. S. Labafzadeh, Passive and semi-active vibration control of base-isolated structure under blast loading at medium to long distances, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 435-456.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18874.6991](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18874.6991)

