

بررسی رویکرد مبتنی بر مفاهیم انرژی در بهینه سازی میراگرهای ویسکوز

حسین جراحی^۱، شیما بیجاری^{۲*}، سید جواد وزیری^۳

^۱گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۳دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

[*shbijari@birjand.ac.ir](mailto:shbijari@birjand.ac.ir)

چکیده

در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی، رویکردی مبتنی بر مفاهیم انرژی برای بهینه‌سازی هم‌زمان موقعیت و پارامترهای میراگرهای ویسکوز ارائه شده است. بدین منظور از الگوریتم ازدحام ذرات گسسته-پیوسته اصلاح‌شده (BRPSO) استفاده گردید تا ضمن تعیین توزیع بهینه میراگرها در طبقات، مقادیر بهینه ضریب میرایی و توان سرعت آن‌ها نیز حاصل شود. تابع هدف بر اساس بیشینه کردن سهم انرژی مستهلک‌شده توسط میراگر نسبت به انرژی ورودی لرزه‌ای تعریف شد و قیود سازه‌ای شامل حد مجاز دریافت بین‌طبقه‌ای در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ گردید. قاب‌های خمشی فولادی ویژه‌ی ۶ و ۱۰ طبقه در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی و تحت تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید فیلترشده با مدل کانای-تاجیمی تحلیل شدند. نتایج نشان می‌دهد که به کارگیری میراگرهای ویسکوز با چیدمان و پارامترهای بهینه می‌تواند تا بیش از ۹۹/۱۱٪ انرژی هیستریزیس و حدود ۱۲/۱۲٪ از انرژی ورودی را در قاب ۶ طبقه و تا ۱۰۰٪ انرژی هیستریزیس و حدود ۳۴/۹۳٪ از انرژی ورودی را در قاب ۱۰ طبقه کاهش دهد. همچنین مشاهده شد که افزایش تعداد میراگرها بیش از مقدار بهینه، تأثیر محسوسی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای ندارد و تنها موجب افزایش هزینه اجرایی می‌شود. در مجموع، روش پیشنهادی قادر است با کارایی بالا، موقعیت و پارامترهای بهینه میراگرهای ویسکوز را تعیین کرده و عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی را به شکل قابل توجهی بهبود بخشد.

کلمات کلیدی

میراگر ویسکوز، تحلیل دینامیکی، بهینه‌سازی پارامتر و موقعیت، رویکرد مبتنی بر انرژی، قاب خمشی فولادی.

کنترل لرزه‌ای سازه‌ها طی چند دهه اخیر به یکی از رویکردهای بنیادین در مهندسی زلزله و طراحی لرزه‌ای تبدیل شده است. هدف اصلی این رویکرد، کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه در برابر تحریکات لرزه‌ای و سایر بارهای دینامیکی است، به گونه‌ای که عملکرد سازه در طول و پس از رویداد لرزه‌ای حفظ شود و آسیب‌های احتمالی به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای به حداقل برسد [۱]. توسعه فناوری‌های کنترل، همگام با پیشرفت‌های قابل توجه در تحلیل دینامیکی سازه، طراحی اجزای مستهلک‌کننده انرژی و بهره‌گیری از مصالح نوین، موجب شده است که امروزه طیف گسترده‌ای از روش‌های کنترلی در ساختمان‌ها، پل‌ها و سازه‌های خاص مورد استفاده قرار گیرد. سیستم‌های کنترل لرزه‌ای به طور کلی در سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند. در روش‌های غیرفعال، تجهیزات مستهلک‌کننده انرژی بدون نیاز به منبع انرژی خارجی وارد عمل می‌شوند و انرژی ورودی را از طریق تغییر شکل یا اصطکاک به گرما یا دیگر اشکال انرژی غیرقابل استفاده تبدیل می‌کنند. میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای ویسکوز، میراگرهای تسلیم‌شونده و جداسازهای لرزه‌ای پایه از نمونه‌های متداول این گروه هستند. این سیستم‌ها به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان بالا و هزینه کم، کاربرد فراوانی دارند، هرچند که میزان سازگاری آن‌ها با تغییرات ناگهانی مشخصات زلزله محدود است. در مقابل، سیستم‌های نیمه‌فعال با بهره‌گیری از اجزای مکانیکی که ویژگی‌های آن‌ها توسط سیگنال‌های کنترلی قابل تنظیم است، امکان واکنش‌پذیری بالاتری را فراهم می‌آورند و می‌توانند کارایی سیستم‌های غیرفعال را بهبود دهند، در حالی که همچنان انرژی اصلی مستهلک‌سازی از حرکت سازه تأمین می‌شود. در نهایت، سیستم‌های فعال به کمک سنسورها، کنترل‌کننده‌ها و عملگرها، به صورت مستقیم بر پاسخ سازه اثر می‌گذارند و نیازمند تأمین انرژی و الگوریتم‌های کنترلی پیچیده هستند که این امر هزینه و حساسیت عملکرد آن‌ها را افزایش می‌دهد [۲]. در میان تمام این روش‌ها، میراگرهای ویسکوز (Fluid Viscous Dampers – FVD) جایگاه ویژه‌ای در کاهش پاسخ لرزه‌ای پیدا کرده‌اند. مطالعات عددی و آزمایشگاهی گوناگون نشان داده‌اند که به‌کارگیری میراگرهای ویسکوز می‌تواند به طور قابل توجهی شتاب طبقات، تغییرمکان جانبی و نیروهای داخلی اعضای سازه را کاهش دهد [۳-۵]. این ویژگی به ویژه در سازه‌های بلندمرتبه، پل‌های کابلی و سازه‌های با اهمیت ویژه حائز اهمیت است، چرا که امکان دستیابی به عملکرد مطلوب لرزه‌ای را بدون ایجاد تغییرات عمده در طراحی اولیه سازه فراهم می‌آورد [۶]. نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که این نوع میراگر علاوه بر کارایی بالا در کاهش پاسخ لرزه‌ای، قابلیت ترکیب با سایر فناوری‌های کنترل را نیز دارد که این امر می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر کارایی سیستم کنترل در کاهش ارتعاشات شود [۷]. در ادامه تعدادی از این مطالعات بررسی می‌شود. هو^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۴] به مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار غیرخطی میراگر ویسکوز پرداختند و نشان دادند که در بارگذاری‌های شدید، انتخاب توان سرعت غیرخطی تأثیر چشمگیری بر کارایی میراگر دارد. کرمی و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۸] با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای غیرخطی میراگر ویسکوز را با هدف کمینه‌سازی هزینه چرخه عمر بهینه کردند و نشان دادند استفاده از میراگرهای غیرخطی می‌تواند خسارت‌های اقتصادی را تا حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش دهد و مقدار بهینه پارامتر میراگر، نمای سرعت، به ویژگی‌های هندسی سازه و شرایط لرزه‌ای بستگی دارد. زوکولینی^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۳] عملکرد میراگرهای ویسکوز را در حفاظت لرزه‌ای پل‌ها بررسی کردند. نتایج این مطالعه عددی و آزمایشگاهی نشان داد که انتخاب صحیح پارامترهای میرایی می‌تواند

^۱ Hu^۲ Zoccolini

تا بیش از ۵۰ درصد تغییر مکان‌های نسبی عرشه را کاهش دهد. لن^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۹] روش‌های آماری مانند روش سطح پاسخ (Response Surface Method – RSM) را برای یافتن رابطه مستقیم بین پارامترهای میراگر ویسکوز و شاخص‌های عملکرد، مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها با استفاده از RSM و تحلیل حساسیت، تابع هدفی ایجاد کردند که دقت بالایی در مقایسه با نتایج تحلیل غیرخطی داشت و امکان تعیین سریع بازه بهینه پارامترهای میراگر را فراهم کرد. نگوین-تای^۲ و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۲۴ [۱۰] به موضوع بهینه‌سازی مکان و تعداد میراگرها پرداختند. آن‌ها بر روی ساختمان‌های چندطبقه، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، توزیع و اندازه بهینه میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک را به‌گونه‌ای تعیین کردند که معیارهای تغییر مکان بین طبقه و شتاب ارضا شود. چن^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۱۱] طراحی و تحلیل یک نوع خاص میراگر ویسکوز را ارائه کردند که قابلیت عملکرد در فضاهای محدود را داشت. این نوآوری امکان استفاده از میراگر در ساختمان‌های موجود با محدودیت‌های معماری را فراهم می‌کرد. بای^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۵] عملکرد لرزه‌ای یک قاب بتنی پیش‌ساخته مجهز به FVD را تحت آزمایش‌های لرزه‌ای تمام‌مقیاس ارزیابی کرده و بهبود قابل توجه در ظرفیت جذب انرژی و کاهش تغییر مکان جانبی را گزارش دادند. لیو^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۵ [۱۲] در یک مطالعه موردی بر روی پل کابلی نشان دادند که ترکیب شبکه عصبی به‌عنوان مدل جایگزین با الگوریتم NSGA-II، توانایی یافتن نقاط بهینه پارتو برای پارامترهای میراگر ویسکوز را دارد و در عین حال تعداد تحلیل‌های پرهزینه طیف‌زمانی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. دانگ^۶ و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۲۵ [۱۳]، با استفاده از روش طراحی مبتنی بر جابه‌جایی برای سازه‌های مجهز به میراگرهای ویسکوز، یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه برای تعیین هم‌زمان پارامترها و موقعیت قرارگیری میراگرهای ویسکوز ارائه دادند که به کاهش تغییر مکان بین طبقه، شتاب و هزینه‌ها به‌طور هم‌زمان منجر می‌شد.

در راستای توسعه روش‌های بهینه‌سازی، باقرنیا و همکاران [۱۴] یک چارچوب طراحی مبتنی بر عملکرد را برای قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگرهای ویسکوز و میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده ارائه کردند و با استفاده از الگوریتم فراابتکاری، وزن سازه و شاخص‌های آسیب را به‌صورت هم‌زمان مورد بهینه‌سازی قرار دادند. بابایی و مرادی [۱۵] نیز با توسعه الگوریتم رقابت استعماری، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای ویسکوز را با در نظر گرفتن تعداد و موقعیت میراگرها بررسی کردند و کاهش هم‌زمان جابه‌جایی بام، دریافت بین طبقه‌ای و شتاب طبقات را نشان دادند. همچنین، هی و همکاران [۱۶] یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای قاب‌های فولادی نیمه‌صلب مجهز به سیستم میراگر ویسکوز-مهاربند ارائه کردند که در آن مشخصات اعضای سازه‌ای، نوع اتصال، مشخصات مکانیکی و محل قرارگیری میراگرها به‌صورت هم‌زمان بهینه شدند و عملکرد لرزه‌ای و هزینه سازه به‌عنوان معیارهای اصلی در نظر گرفته شد. صادقی و همکاران [۱۷] نیز کاربرد الگوریتم‌های تک‌هدفه و چندهدفه را در طراحی

¹ Lan

² Nguyen-Thai

³ Chen

⁴ Bai

⁵ Liu

⁶ Dong

بهینه قاب‌های خمشی فولادی تحت بارگذاری ضربه‌ای بررسی کرده و بر قابلیت روش‌های فراابتکاری در دستیابی به طرح‌های اقتصادی و با عملکرد مناسب تأکید کردند. از سوی دیگر، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که رویکردهای مبتنی بر انرژی می‌توانند معیار مناسبی برای ارزیابی و انتخاب پارامترهای میراگرهای ویسکوز فراهم کنند. لین و همکاران [۱۸] با ارائه یک مدل تحلیلی برای نسبت اتلاف انرژی در میراگرهای ویسکوز غیرخطی، اثر شدت تحریک لرزه‌ای و پارامترهای میراگر، شامل ضریب میرایی و نمای سرعت را بر میزان اتلاف انرژی بررسی کردند و نسبت اتلاف انرژی را به‌عنوان یک شاخص مؤثر در انتخاب پارامترهای میراگر معرفی نمودند. همچنین، از کایا و گورباز [۱۹] با بررسی آرایش‌های مختلف میراگرهای ویسکوز در یک ساختمان کامپوزیتی نامنظم ۲۰ طبقه، نشان دادند که اثربخشی میراگرها به‌شدت به نحوه جانمایی آن‌ها وابسته است و می‌توان با تمرکز میراگرها در نواحی بحرانی، ضمن حفظ بخش قابل توجهی از بهبود عملکرد لرزه‌ای، تعداد تجهیزات مورد نیاز را کاهش داد.

با وجود این پیشرفت‌ها، بخش عمده مطالعات موجود بر بهینه‌سازی پاسخ‌های سازه‌ای نظیر دریافت، شتاب، جابه‌جایی، هزینه یا وزن سازه متمرکز بوده‌اند و در بسیاری از موارد، تعیین محل میراگر و تعیین پارامترهای مکانیکی آن به‌صورت جداگانه یا با معیارهای عملکردی متعارف انجام شده است. از این رو، هنوز نیاز به چارچوبی وجود دارد که بتواند توزیع ارتفاعی و پارامترهای میراگرهای ویسکوز را به‌صورت هم‌زمان و بر مبنای یک معیار انرژی‌محور بهینه کند. پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأ، بهینه‌سازی هم‌زمان موقعیت و پارامترهای میراگرهای ویسکوز را در قاب‌های خمشی فولادی ویژه ۶ و ۱۰ طبقه با استفاده از الگوریتم BRPSO دنبال می‌کند.

با وجود مطالعات گسترده انجام‌شده در زمینه طراحی، تعیین پارامترها و جانمایی میراگرهای ویسکوز، همچنان چالش‌هایی در انتخاب هم‌زمان محل نصب و مشخصات میراگر با هدف دستیابی به یک معیار عملکردی جامع وجود دارد. دومینیکو و همکاران [۲۰] در یک مطالعه مروری جامع، روش‌های مختلف طراحی و جانمایی میراگرهای ویسکوز را بررسی کرده و نشان دادند که بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین بر معیارهایی نظیر کاهش پاسخ سازه، نسبت میرایی هدف یا هزینه تمرکز داشته‌اند؛ در حالی که رویکردهای مبتنی بر انرژی نیز می‌توانند دیدگاه مناسبی برای ارزیابی عملکرد میراگرها فراهم کنند. همچنین، چانگ و همکاران [۲۱] با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی مدل مقیاس‌شده یک سازه بتن‌آرمه، اثر ضرایب مختلف میراگر ویسکوز را تحت سطوح مختلف بارگذاری لرزه‌ای به‌صورت تجربی ارزیابی کردند. با این حال، در مطالعات پیشین کمتر به بهینه‌سازی هم‌زمان توزیع ارتفاعی و پارامترهای میراگرهای ویسکوز با استفاده از یک تابع هدف مبتنی بر انرژی و با در نظر گرفتن قاب‌های خمشی فولادی ویژه در مقیاس‌های مختلف ارتفاعی پرداخته شده است. از این رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأ، یک چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر انرژی و الگوریتم BRPSO را برای تعیین هم‌زمان موقعیت و پارامترهای میراگرهای ویسکوز ارائه می‌دهد.

ایجاد خسارت و خرابی در سازه‌ها با مقدار انرژی هیستریزیس در سازه‌ها نسبت مستقیم دارد. ضمن اینکه توابعی مثل دریافت به‌صورت پرتکرار در پژوهش‌های مشابه استفاده می‌شوند. با استفاده از تابع هدف مبتنی بر انرژی، می‌توان انرژی ورودی و انرژی هیستریزیس وارده به سازه را کاهش داد و از ایجاد خسارت جلوگیری کرد و هم‌زمان عواملی مانند دریافت و شتاب را نیز بررسی و کنترل کرد و از کاهش مؤثر آنها نیز مطمئن شد. در این مطالعه به بررسی بهینه‌سازی هم‌زمان توزیع و پارامترهای میراگرهای ویسکوز در قاب‌های خمشی فولادی ویژه ۶ و ۱۰ طبقه با استفاده از الگوریتم BRPSO (binary-real particle swarm optimization) پرداخته می‌شود. تابع هدف انتخابی مبتنی بر مفاهیم انرژی می‌باشد و به گونه‌ای تعیین می‌شود که سهم

میراگرهای ویسکوز از انرژی ورودی، حداکثر و انرژی هیستریزس حداقل شود. سازه ها تحت تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید فیلترشده با مدل کانای-تاجیمی تحلیل شدند. تاثیر قابل توجه به کارگیری میراگرهای ویسکوز با موقعیت بهینه و مقادیر بهینه پارامترهای آنها بر روی عملکرد سازه ها با مقایسه مقادیر انرژی و نسبت دریافت بین طبقه ای نمایش داده شده است. بنابراین نوآوری های عمده این پژوهش بهینه سازی مبتنی بر مفاهیم انرژی و همچنین بهینه سازی همزمان توزیع در ارتفاع و پارامترهای میراگرهای ویسکوز می باشد که باعث شده است از استفاده از میراگرها به تعداد حداکثری (در همه طبقات) جلوگیری شود و منجر به کاهش هزینه شود.

در ادامه، ساختار مقاله به صورت زیر سازمان دهی شده است: در بخش دوم، اصول عملکرد میراگرهای ویسکوز و رفتار مکانیکی آنها مورد بررسی قرار می گیرد. مبانی نظری و مراحل اجرای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در بخش سوم تشریح می شود. بخش چهارم به فرضیات مدل سازی و فرآیند صحت سنجی میراگر ویسکوز در نرم افزار OpenSees اختصاص دارد. مدل سازی قاب های خمشی فولادی ویژه ی ۶ و ۱۰ طبقه و اعتبارسنجی نتایج عددی در بخش پنجم ارائه شده است. در بخش ششم، تعریف مسئله بهینه سازی موقعیت و پارامترهای میراگر ویسکوز با بهره گیری از الگوریتم ترکیبی BRPSO بیان می شود. بخش هفتم شامل نتایج بهینه سازی برای هر دو قاب مورد مطالعه است. در نهایت، بخش هشتم به جمع بندی یافته ها و ارائه ی نتیجه گیری کلی اختصاص دارد.

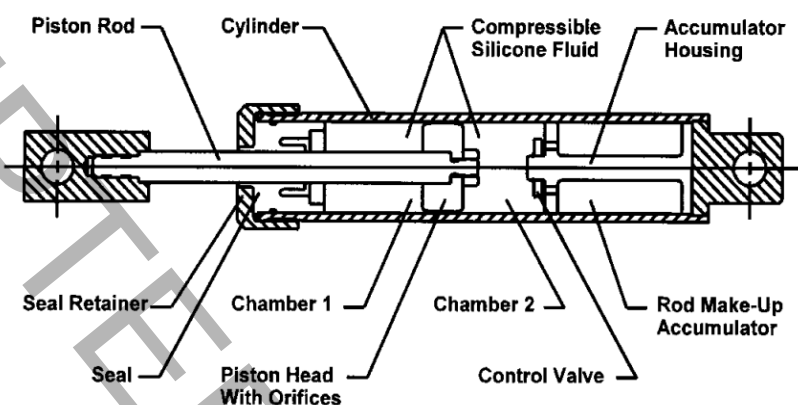
۲- میراگر ویسکوز

میراگرهای ویسکوز از جمله دستگاه های مؤثر در کنترل لرزه ای هستند که به طور گسترده در مهندسی سازه برای کنترل ارتعاشات مورد استفاده قرار می گیرند. این میراگرها با استفاده از پیستونی درون سیال (سیلیکون یا ویسکوزیته بالا) عمل می کنند. وقتی سازه متأثر از تحریک های دینامیکی مانند زلزله یا باد باشد، حرکت نسبی بین دو نقطه اتصال، پیستون را درون سیال به جلو و عقب حرکت می دهد. این حرکت سبب جریان سیال از طریق دهانه های اطراف و از طریق سر پیستون شده و نیروی مقاومی تولید می کند که در راستای سرعت نسبی سازه است. این نیروی میرایی، انرژی جنبشی را به گرما تبدیل کرده و اثر میرایی را فراهم می آورد [۲۲]. نمای شماتیک میراگر ویسکوز در «شکل ۱» نشان داده شده است. عملکرد میراگر ویسکوز در قالب معادله ۱ بیان می شود:

$$F = C v^{\alpha} \quad (1)$$

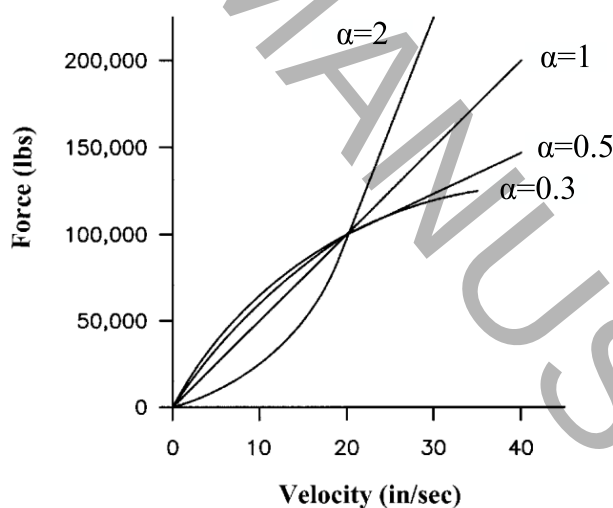
که در آن F نیروی میرایی تولید شده است؛ C ضریب میرایی (damping coefficient) است که نقش اساسی در میزان میرا کردن دارد؛ v سرعت نسبی دو انتهای میراگر است؛ α توان سرعت (velocity exponent) است که رفتار خطی یا غیر خطی را مشخص می کند و مقدار آن به طور معمول بین حدود ۰/۳ تا ۱/۹۵ است. «شکل ۲» نمودار نیروی میرایی در مقابل سرعت را برای چند مقدار α نشان می دهد. مقدار $\alpha = 1$ منحنی میرایی خطی را نشان می دهد که نقطه آغاز خوبی برای طراحی یک سیستم میراگر است. حلقه هیستریزس یک میراگر خطی یک بیضی خالص است، همان گونه که در شکل «شکل ۳» نشان داده شده است. $\alpha = 0.3$ کمترین مقدار ممکن از α است که به طور معمول قابل دستیابی است. «شکل ۲» نشان می دهد که این مقدار در سرعت های پایین

تر، نیروی بیشتری نسبت به یک میراگر خطی فراهم می‌کند. «شکل ۳» شکل مستطیلی حلقه هیستریزیس را برای این مقدار α نشان می‌دهد. میراگرهای ساختاری همیشه از مقادیر α بین $0/3$ و 1 استفاده می‌کنند، زیرا هر مقداری بالاتر از 1 عملکرد بسیار نامطلوبی ایجاد می‌کند [۱۴]. این ویژگی‌ها به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که با تنظیم دقیق پارامترهای C و α ، میراگری طراحی کنند که در محدوده سرعت مشخصی بیشترین کاهش پاسخ را ایجاد کند، بدون آنکه استحکام یا پایداری سازه به خطر بیفتد.



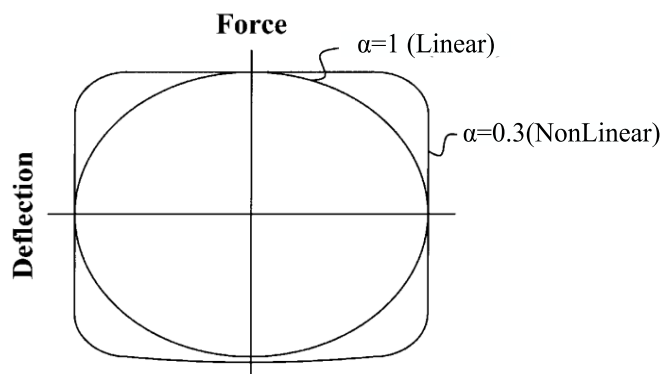
شکل ۱: نمای شماتیک میراگر ویسکوز [۱۴]

Fig. 1. Schematic view of a viscous damper [14]



شکل ۲: نمودار تغییرات نیروی میرایی نسبت به سرعت برای مقادیر مشخص توان سرعت [۱۴]

Fig. 2. Variation of damping force with velocity for different velocity exponents [14]



شکل ۳: حلقه هیستریزیس به ازای دو مقدار α برای میراگرهای ویسکوز خطی و غیر خطی [۱۴]

Fig. 3. Hysteresis loops for linear and nonlinear viscous dampers with two different values of α [14]

۳- الگوریتم بهینه سازی PSO

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان (PSO) توسط جمیز کندی (روانشناس) و راسل ابرهارت (مهندس کامپیوتر) در سال ۱۹۹۵ میلادی پیشنهاد شده و جهت بهینه‌سازی توابع غیرخطی پیوسته ارائه شده است [۲۳]. PSO الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی برپایه جمعیت است که از شبیه‌سازی رفتار اجتماعی گروه پرندگان الهام گرفته شده است. الگوریتم PSO در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری به دلیل سادگی، سهولت پیاده‌سازی، سازگاری با متغیرهای پیوسته و گسسته، کارایی بالا و پارامترهای کمی که باید تنظیم شوند، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴]. از آنجا که سرعت همگرایی PSO به سمت بهینه سراسری بسیار کند است و در دام کمینه‌های محلی ضعیف گرفتار می‌شود، از این رو، انواع متنوعی از الگوریتم PSO برای غلبه بر معایب آن توسعه داده شده‌اند. در PSO، هر عضو جامعه موقعیت خود را با توجه به تجربیات شخصی و تجربیات کل جامعه تغییر می‌دهد و به طور تکراری راه‌حل‌های کاندید را اصلاح می‌کند تا زمانی که معیارهای همگرایی برآورده شوند و این رفتار را در مسائل بهینه‌سازی شبیه‌سازی می‌کند [۲۵]. انواع PSO با کد حقیقی ($RPSO^1$) و PSO با کد دودویی ($BPSO^2$) رویکردهای متناسبی را برای فرمول‌بندی‌های مختلف مسئله ارائه می‌دهند و از به‌روزرسانی‌های سرعت و موقعیت برای پیمایش فضای راه‌حل استفاده می‌کنند. برای افزایش همگرایی و کاهش به تله افتادن در بهینه محلی، PSO اصلاح‌شده (MPSO) یک عامل اختلال تصادفی اضافی را در خود جای داده است. مبانی ریاضی و جزئیات پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها به طور گسترده در مطالعه [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است که اساس کاربرد آن در تحقیق حاضر را تشکیل می‌دهد.

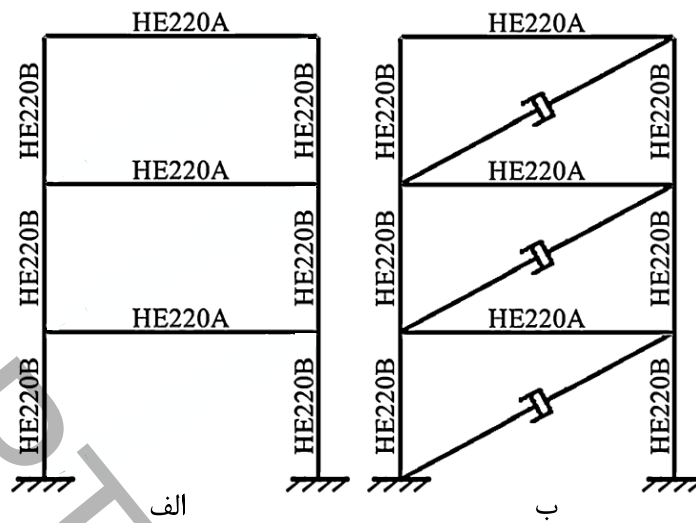
۴- فرضیات مدل‌سازی و صحت سنجی میراگر ویسکوز

در این مطالعه جهت ارزیابی دقت مدل‌سازی و صحت سنجی میراگر ویسکوز مدل‌سازی شده در نرم افزار OpenSees، مطابق با پژوهش [۲۷] دو قاب خمشی فولادی سه طبقه یک دهانه با و بدون میراگر ویسکوز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هندسه این مدل‌ها

¹ Real-Coded PSO

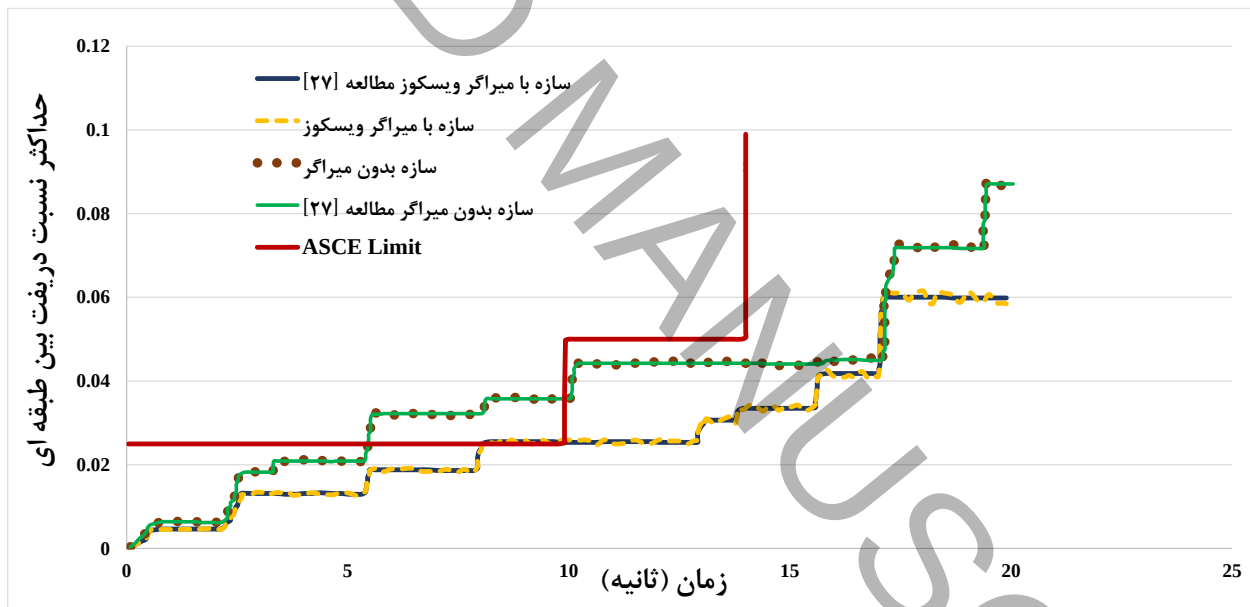
² Binary-Coded PSO

در «شکل ۴» نشان داده شده است. براساس مطالعه [۲۷] طراحی این سازه‌ها برای بارهای ثقلی مطابق با روش تنش مجاز بر اساس آیین‌نامه (AISC-ASD89 (AISC 1989) انجام شده است. ارتفاع طبقات برابر $3/2$ متر و طول هر دهانه ۶ متر در نظر گرفته شده است. کلیه تکیه‌گاه‌ها گیردار فرض شده‌اند و تمام اتصالات صلب هستند. برای تیرها از مقاطع HE220A و برای ستون‌ها از مقاطع E220B استفاده شده است. بارگذاری سازه‌ها بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران انجام شده است. رفتار مصالح فولادی به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است، به طوری که تنش تسلیم و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر با $F_y=235.44$ MPa و $E=206$ GPa و سختی پس از تسلیم معادل ۳ درصد سختی اولیه لحاظ شده است. تحلیل‌ها با استفاده از المان‌های تیر-ستون غیرخطی با پلاستیسیته توزیع شده در نرم‌افزار OpenSees انجام شده‌اند. همچنین میراگر ویسکوز به صورت مهاربند قطری مدل شده و از المان‌های viscous damper در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. پارامتر اصلی این میراگر، ضریب میرایی C است که بر اساس مقادیر بهینه به دست آمده در مطالعه [۲۷]، برای طبقات اول تا سوم به ترتیب برابر با 73.53 kN.s/m، 632.35 kN.s/m و 29.41 kN.s/m انتخاب شده است. برای تحلیل دینامیکی غیرخطی، از رکوردهای زمان‌دوام سری ETA20e که به اختصار سری e نامیده می‌شوند، به عنوان توابع شتاب روش زمان‌دوام (ET) استفاده شده است. این سری از رکوردها بر پایه طیف الگو (Template Spectrum) تولید شده‌اند که میانگین طیف پاسخ هفت رکورد زلزله واقعی انتخاب شده از مجموعه ۲۰ رکورد معرفی شده در مستند FEMA440 و ثبت شده بر روی خاک نوع C را بازتاب می‌دهد. رکورد زلزله به کار رفته در تحلیل‌ها، همان رکورد مورد استفاده در مطالعه مرجع [۲۷] است تا شرایط تحلیلی یکسان حفظ شده و مقایسه نتایج به صورت منصفانه انجام پذیرد. مدل عددی در دو حالت مختلف، یکی حالت بدون میراگر ویسکوز و دیگری با در نظر گرفتن میراگر ویسکوز نصب شده در سازه شبیه‌سازی شده است. هر دو حالت با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا بتوان تاثیر میراگر در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای به خصوص جابه‌جایی و نسبت دررفت بین طبقه‌ای بررسی شود. نسبت دررفت بین طبقه‌ای، به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه شناخته می‌شود و نشان‌دهنده میزان تغییر مکان نسبی بین دو طبقه متوالی نسبت به ارتفاع همان طبقه است. این شاخص، اهمیت ویژه‌ای در طراحی و ارزیابی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله دارد و کنترل آن به طور مستقیم با حفظ ایمنی سازه و کاهش خسارات ناشی از زلزله مرتبط است. برای صحت‌سنجی مدل، مقادیر حداکثر نسبت دررفت بین طبقه‌ای به دست آمده از مدل عددی با داده‌های منتشر شده در مطالعه مرجع در هر دو حالت دارای میراگر و بدون میراگر مقایسه شده است. علاوه بر این، حد مجاز آیین‌نامه ASCE به عنوان کنترل در نمودارهای نتایج «شکل ۵» درج گردیده است تا صحت و ایمنی پاسخ‌های مدل به صورت دقیق ارزیابی شود. نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که تطابق بسیار مناسبی بین نتایج مدل عددی و داده‌های مرجع وجود دارد. این تطابق، بیانگر دقت قابل قبول فرآیند مدل‌سازی و اعتبار بالای شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده است.



شکل ۴: (الف) سازه بدون میراگر (ب) سازه با میراگر ویسکوز قطری [۲۷]

Fig. 4. (a) Structure without dampers; (b) structure with diagonal viscous dampers [27]



شکل ۵: مقایسه حداکثر نسبت دررفت بین طبقه ای بین مطالعه [۲۷] و مطالعه حاضر در سازه سه طبقه با و بدون میراگر ویسکوز

Fig. 5. Comparison of the maximum interstory drift ratios obtained in Ref. [27] and the present study for a three-story structure with and without viscous dampers

۵- مدل‌سازی قاب های خمشی

تحلیل‌های محاسباتی انجام‌شده در این پژوهش بر روی سازه‌های قاب خمشی ویژه فولادی با ۶ و ۱۰ طبقه انجام شده‌اند. در این بخش در مورد نحوه‌ی مدل‌سازی قاب خمشی در نرم‌افزار OpenSees توضیح داده شده است. جرم کل مرتبط با هر طبقه، به همراه بار توزیع‌شده یکنواخت وارد بر تیرهای قاب خمشی ۶ طبقه، با دقت زیاد، مقدار قابل توجه ۲۹۴۲ کیلونیوتن در نظر گرفته شد، در حالی که بار توزیع‌شده یکنواخت ۲۱/۸۹ کیلونیوتن بر متر مربع تعیین شد و بدین ترتیب یک پارامتر اساسی برای تحلیل سازه ایجاد گردید. به طور موازی، هنگام بررسی قاب خمشی ۱۰ طبقه، این پارامترهای مهم به ترتیب به عنوان جرم کل ۲۱۴۷ کیلونیوتن و بار توزیع‌شده یکنواخت ۲۱/۸۹ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شدند تا از ثبات در چارچوب مدل‌سازی اطمینان حاصل شود. علاوه بر این، نسبت میرایی ۳٪ به طور یکنواخت برای هر دو مدل سازه‌ای اتخاذ شد که نشان دهنده یک رویه رایج در دینامیک سازه برای در نظر گرفتن مکانیسم‌های اتلاف انرژی است. علاوه بر این، تنش تسلیم (F_y) فولاد سازه‌ای به طور دقیق با مقدار ۲۴۸/۲ مگاپاسکال تعریف شد، در حالی که مدول الاستیسیته (E) برای فولاد با مقدار 2×10^5 مگاپاسکال تعیین شد، که هر دو پارامترهای حیاتی در تعیین رفتار ماده تحت شرایط بارگذاری مختلف هستند. در اینجا اعضای سازه با استفاده از المان خطی تیر-ستون^۱ مدل شده‌اند. در حالی که برای لحاظ کردن رفتار شکل‌پذیر سازه در دو انتهای هر المان لولای خمیری در نظر گرفته شده و برای مدل‌سازی لولای خمیری از المان با طول صفر^۲ استفاده شده است. در واقع می‌توان گفت که یک فنر پیچشی که رفتار ممان-چرخش آن مشابه رفتار لولای خمیری است نقش آن را در مدل ایفا می‌کند. در یک ستون از قاب خمشی، لنگر بیشینه در دو انتهای ستون رخ می‌دهد. در نتیجه تنش در این نواحی زودتر به حد جاری شدن می‌رسد. بر این اساس منطقی است که در مدل‌سازی ستون‌ها لولای خمیری در ابتدا و انتهای هر المان خطی تیر-ستون در نظر گرفته شود. در سازه‌های مقاوم لرزه‌ای، اعضای فیوز با ورود به ناحیه خمیری مقادیر زیادی از انرژی زمین‌لرزه را جذب می‌کنند. در قاب خمشی تیرها به‌عنوان عضو فیوز طراحی می‌شوند، بنابراین مدل تیر نیز از المان تیر-ستون الاستیک و دو لولای خمیری در ابتدا و انتهای هر المان تشکیل شده است. همچنین، جرم سازه به صورت متمرکز در گره‌های آن در نظر گرفته شده است، به طوری که نیمی از جرم دهانه‌های مجاور هر گره به آن منتقل می‌شود. مدل پلاستیسیته متمرکز با استفاده از لولاهای پلاستیکی با طول صفر که به طور استراتژیک در انتهای عناصر تیر-ستون الاستیک قرار گرفته‌اند، به طور دقیق در «شکل ۶» نشان داده شده است و به طور مؤثر در چارچوب تحلیل پیاده‌سازی شد. در مدل ایجاد شده، برای ثبت دقیق مشخصه پاسخ هیستریک دوخطی این عناصر سازه‌ای و نمایش رفتار غیرخطی مصالح از فرم‌های خمشی مدل ایبارا-کراوینکлер^۴ اصلاح شده توسط لیگنوس^۵ بهره جسته شده است. منحنی پوش مدل ممان-چرخش استفاده شده، به‌عنوان مدل اصلاح شده ایبارا-کراوینکлер [۲۸]، در «شکل ۷» نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هر دو چارچوب فوق‌الذکر در تحقیقات قبلی انجام شده در مطالعه [۲۶]، اعتبارسنجی دقیقی را پشت سر گذاشته‌اند.

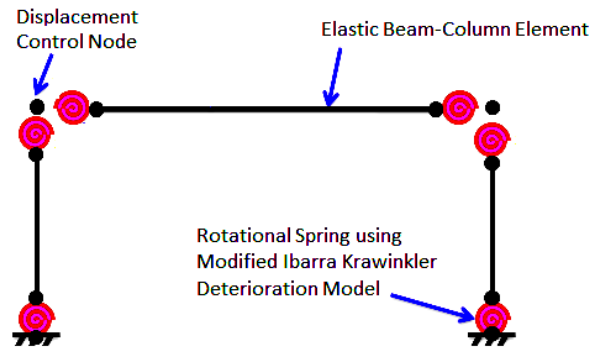
¹ Elastic Beam Column Element

² Zero Length Element

³ Node

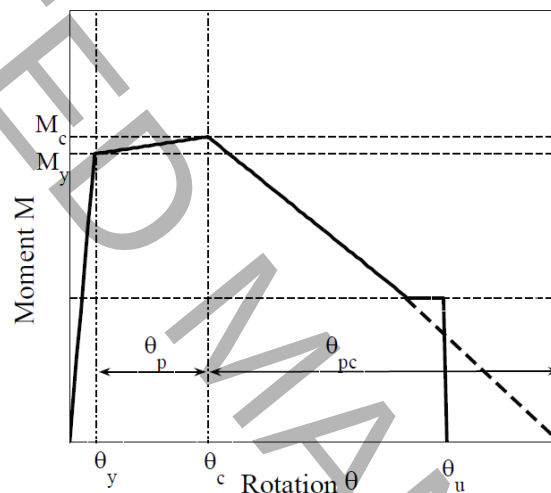
⁴ Ibarra-Krawinkler

⁵ Lignos



شکل ۶: مدل قاب خمشی با پلاستیسیته متمرکز [۲۶]

Fig. 6. Concentrated plasticity model of a moment-resisting frame [26]



شکل ۷: منحنی پوش ممان-چرخش مدل اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر [۲۸]

Fig. 7. Moment-rotation backbone curve of the modified Ibarra-Krawinkler model [28]

۵-۱- اصلاح مشخصات المان تیر-ستون و فنرهای پیچشی دو انتهای آن

از آنجایی که هر یک از اعضای تیر و ستون به صورت مجموعه‌ای سری از یک المان ارتجاعی و دو فنر پیچشی مدل شده است، سختی این اعضا باید به نحوی اصلاح گردد تا سختی این مجموعه با سختی واقعی عضو برابر باشد. از طرفی فنرهای پیچشی n برابر سخت‌تر از سختی پیچشی المان ارتجاعی ساخته می‌شود تا از مشکلات عددی جلوگیری گردد و اینکه اجازه داده شود تا تمام میرایی به المان ارتجاعی اختصاص یابد. برای اطمینان از اینکه سختی معادل مجموعه برابر با سختی واقعی باشد، سختی المان ارتجاعی و سختی فنر پیچشی باید به صورت زیر تعریف گردد:

$$K_{bc} = \frac{n+1}{n} K_{mem} \quad (۲)$$

$$K_s = (n+1) K_{mem}$$

که در آن K_{mem} سختی عضو واقعی، K_s سختی فنر پیچشی، K_{bc} سختی المان تیر-ستون است. همچنین برای اینکه رفتار غیرخطی مجموعه‌ی المان‌ها با رفتار عضو واقعی مطابقت داشته باشد، ضریب سخت‌شدگی کرنشی (نسبت سختی نهایی به سختی اولیه) مفصل پلاستیک باید اصلاح گردد. در نتیجه نسبت سخت‌شدگی کرنشی فنر پیچشی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

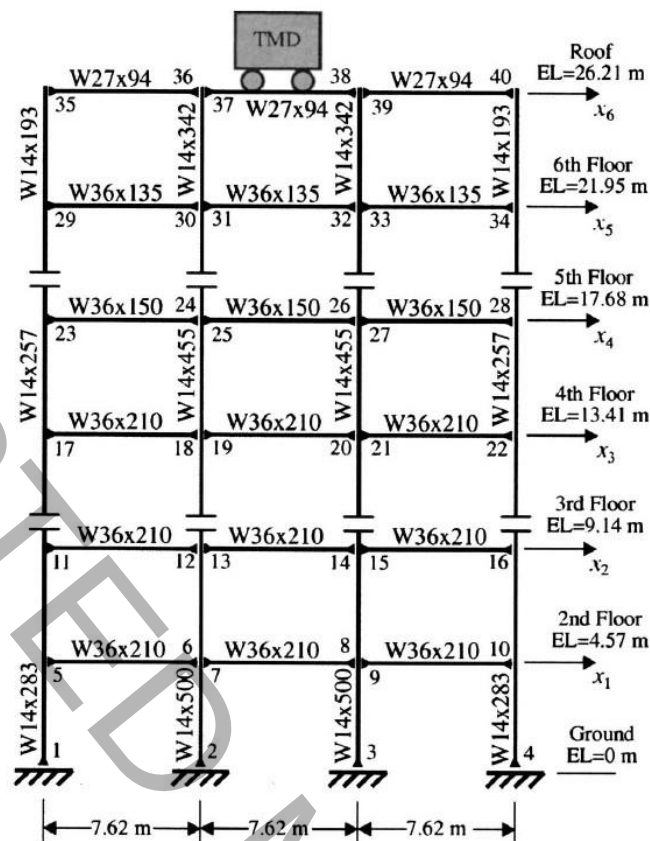
$$\alpha_{s,spring} = \frac{\alpha_{s,mem}}{(1 + n \times (1 - \alpha_{s,mem}))} \quad (3)$$

که $\alpha_{s,spring}$ نسبت سخت‌شدگی کرنشی فنر پیچشی و $\alpha_{s,mem}$ نسبت سخت‌شدگی کرنشی عضو واقعی می‌باشد. در مدل ایبارا-کراوینکلر اصلاح‌شده برای تعیین رابطه ممان-چرخش لولای خمیری از نسب $\frac{M_c}{M_y} = 1.10$ برای تعیین اثر سخت‌شدگی کرنشی استفاده شده است [۲۸].

۵-۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی قاب‌های خمشی

سازه اول، یک ساختمان قاب خمشی شش طبقه دو بعدی واقع در وودلند هیلز، کالیفرنیا^۱ می‌باشد که مدل‌سازی آن جهت صحت‌سنجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این که مدل ساختمان بیمارستان می‌باشد، با استانداردهای بالاتر از سطح معمول طراحی شده است. سازه قاب خمشی فوق بر اساس مرجع [۲۹] انتخاب شده است. مشخصات سازه طبق مرجع [۲۹]، مطابق با «شکل ۸» می‌باشد. جرم اختصاص داده شده به هر طبقه برای تحلیل تاریخیچه زمانی معادل ۳۰۰۰۰ kg و میرایی سازه ۳٪ در نظر گرفته شده است. در این مدل مفاصل پلاستیک در ابتدا و انتهای تیرها و فقط در پای ستون‌های طبقه اول در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در اینجا با توجه به هدف مورد نظر، فقط نمودارهای حالت سازه بدون میراگر جرمی (No TMD) مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است.

^۱ Woodland Hills, Calif.



شکل ۸: مدل قاب خمشی ۶ طبقه [۲۹]

Fig. 8. Six-story moment-resisting frame model [29]

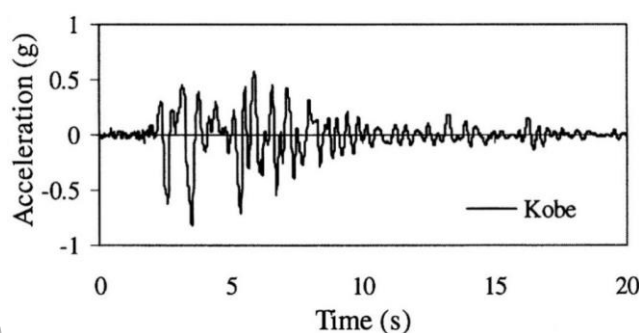
مقادیر تنش تسلیم فولاد (f_y)، مدول الاستیسیته فولاد (E_s) و بارهای ثقلی یکنواخت (q) استفاده شده در «جدول ۱» آورده شده است.

جدول ۱ مقادیر تنش تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد و بارهای ثقلی یکنواخت

Table 1. Steel yield stresses, elastic moduli, and uniform gravity loads

f_y (MPa)	E_s (MPa)	q (kN/m)
۲۴۸/۲	۲×۱۰^۵	۲۱/۸۹

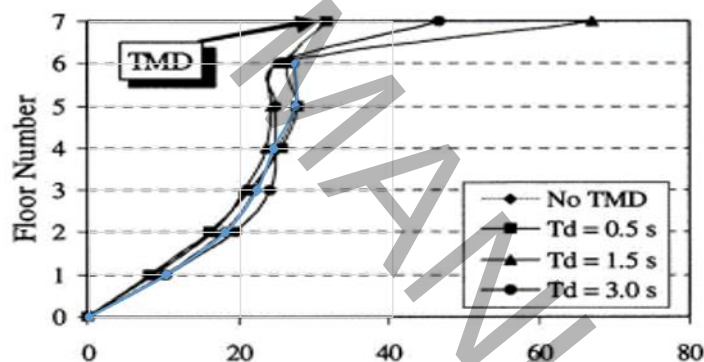
در مطالعه مرجع [۲۹]، مدل قاب خمشی ۶ طبقه انتخاب شده در حالت بدون TMD تحت زلزله کوبه (۱۹۹۵) با شتابنگاشت «شکل ۹» تحلیل و ارزیابی شده است.



شکل ۹: شتاب‌نگاشت تاریخچه زمانی زلزله کوبه [۲۹]

Fig. 9. Acceleration time history of the Kobe earthquake record [29]

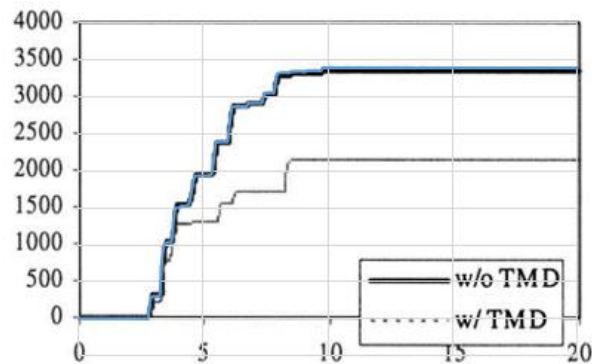
نمودار بیشینه جابه‌جایی طبقات در قاب خمشی ۶ طبقه در حالت بدون TMD تحت زلزله کوبه در مرجع [۲۹] و همچنین برای مدل‌سازی ارائه شده در این مطالعه، در «شکل ۱۰» بر روی هم قرار گرفته‌اند. «شکل ۱۰» نشان می‌دهد که مدل‌سازی فوق در نرم‌افزار OpenSees از دقت بسیار قابل قبولی برخوردار می‌باشد که از آن می‌توان در فرایند بهینه‌سازی استفاده نمود.



شکل ۱۰: مقایسه بیشینه جابجایی طبقات بین مطالعه ونگ و مطالعه حاضر در قاب خمشی ۶ طبقه

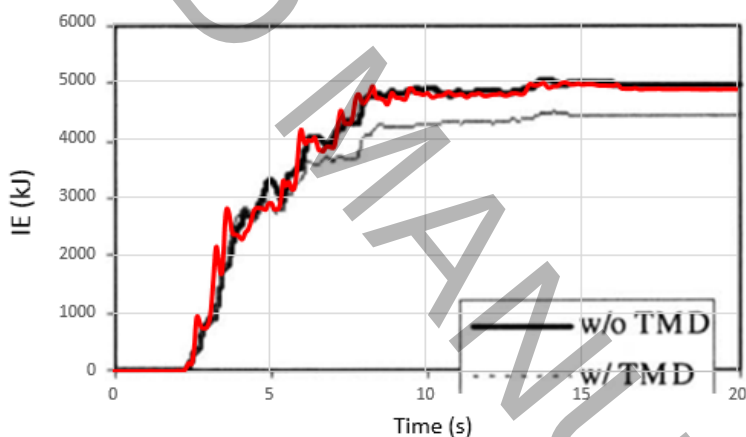
Fig. 10. Comparison of the maximum story displacements obtained in Wang's study and the present study for the six-story moment-resisting frame

نمودار مقادیر انرژی هیستریزیس به دست آمده در قاب خمشی ۶ طبقه توسط ونگ در مرجع [۲۹] و نمودار مطالعه حاضر در «شکل ۱۱» بر روی هم قرار داده شده‌اند.



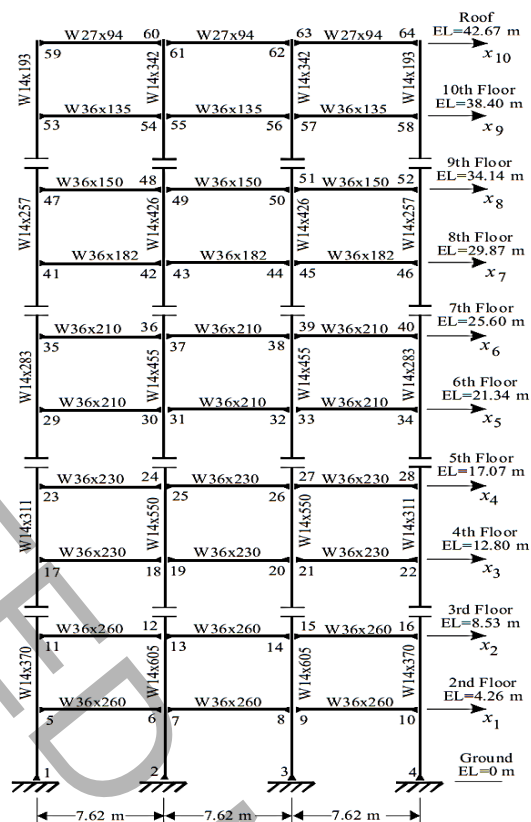
شکل ۱۱: مقایسه انرژی هیستریزیس محاسبه شده تحت زلزله کوبه در مرجع [۲۹] و مطالعه حاضر در قاب خمشی ۶ طبقه
 Fig. 11. Comparison of the hysteretic energy calculated under the Kobe earthquake in Ref. [29] and the present study for the six-story moment-resisting frame

نمودار مقادیر انرژی ورودی به دست آمده در قاب خمشی ۶ طبقه توسط ونگ در مرجع [۲۹] و نمودار مطالعه حاضر در «شکل ۱۲» بر روی هم قرار داده شده اند.



شکل ۱۲: مقایسه انرژی ورودی محاسبه شده تحت زلزله کوبه در مرجع [۲۹] و مطالعه حاضر در قاب خمشی ۶ طبقه
 Fig. 12. Comparison of the input energy calculated under the Kobe earthquake in Ref. [29] and the present study for the six-story moment-resisting frame

سازه دوم مورد بررسی یک قاب خمشی ۱۰ طبقه دو بعدی مشابه با قاب ۶ طبقه قبلی می باشد که اطلاعات دقیق آن در مرجع [۳۰] ذکر شده و نمای کلی آن در «شکل ۱۳» آمده است.



شکل ۱۳: سازه ۱۰ طبقه مورد بررسی مطابق مرجع [۳۰]

Fig. 13. Ten-story structure considered in Ref. [30]

موارد مدل سازی برای این قاب نیز مشابه آنچه که برای قاب ۶ طبقه گفته شد، انجام شده است. نمودار حداکثر جابجایی تحت زلزله نورتریج در مرجع [۳۰] و نمودار حاصل از این مطالعه در «شکل ۱۴» بر روی هم قرار گرفته اند که باز هم می توان با توجه به تطابق خوب نتایج، دقت مدل سازی را قابل قبول دانست.

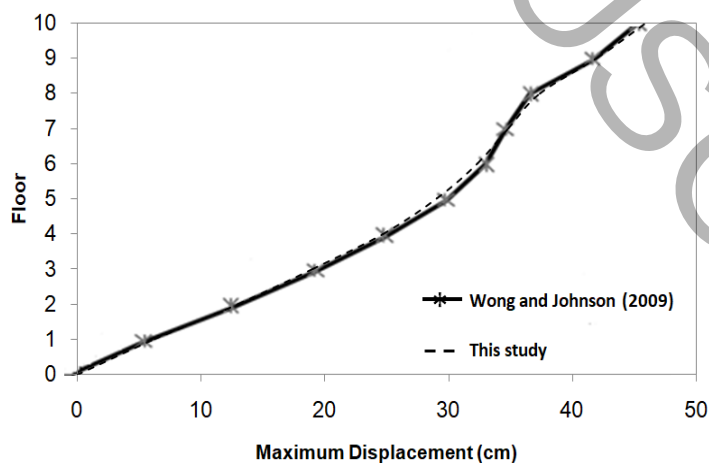


Fig. 14. Comparison of the maximum displacement of the ten-story structure obtained in Wang's study [30] and the present study

۶- بهینه سازی موقعیت و پارامترهای بهینه میراگر ویسکوز

در این پژوهش فرایند بهینه سازی با هدف بهبود عملکرد لرزه ای قاب های خمشی فولادی ۶ طبقه و ۱۰ طبقه که مشخصات آن در قسمت قبل تشریح شد انجام می شود. بدین صورت که برای یک تعداد مشخص میراگر، هدف یافتن همزمان توزیع بهینه میراگرهای ویسکوز در طبقات و پارامترهای بهینه هریک از این میراگرها می باشد.

۶-۱- مسئله بهینه سازی

در فرایند بهینه سازی با استفاده از الگوریتم BRPSO ابتدا به تعریف مسئله بهینه سازی پرداخته می شود. در این مسئله بهینه سازی که مطابق با رابطه ۴ تعریف می گردد، X بردار متغیرهای طراحی، $X = \{P, C, \alpha\}$ ، شامل بردار موقعیت میراگرهای ویسکوز، P و بردار پارامترهای طراحی میراگرها، C و α ، است. بردار P ، موقعیت های ممکن برای قرارگیری میراگر ویسکوز در طبقات سازه را نشان می دهد. با انتخاب تعداد میراگرها در سازه به مقدار N_d ، بردار موقعیت آن ها به صورت تصادفی ایجاد می شود که یک بردار باینری با بعد N_p (تعداد طبقات) می باشد و درایه های آن یک یا صفر هستند که به ترتیب به معنای وجود یا عدم وجود میراگر ویسکوز در آن طبقه می باشد. بردار پارامترهای طراحی میراگرها، یک بردار با متغیرهای پیوسته و با بعد $N_d \times 2$ می باشد و مقادیر C ، ضریب میرایی، و مقادیر α ، توان سرعت، را برای تعداد N_d میراگر ویسکوز نشان می دهد. تابع هدف به صورت کمینه کردن نسبت انرژی ورودی (E_i) به انرژی مستهلک شده توسط میراگر (E_{VDS}) در نظر گرفته شده است. در واقع می توان گفت تابع هدف، بیشینه کردن مقدار انرژی تلف شده در میراگر به انرژی ورودی است. هرچه این نسبت بزرگتر باشد، سهم بیشتری از انرژی ورودی در میراگر مستهلک می شود و انرژی هیستریزیس (E_h) کمتر می شود. بنابراین مسئله بهینه سازی به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} & \text{Find : } X = \{P, C, \alpha\} \\ & \text{Minimize : } f(X) = \frac{E_i(X)}{E_{VDS}(X)} \\ & \text{subject to : } \delta(X) \leq \delta_{all} \\ & \alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max} \\ & C_{min} < C < C_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

پارامترهای C_{min} و C_{max} به ترتیب کران پایین و بالای متغیر C و α_{min} و α_{max} به ترتیب کران پایین و بالای متغیر α می باشند. همچنین به منظور جلوگیری از غیراقتصادی شدن طرح و با در نظر گرفتن سطح عملکرد ایمنی جانی، حداکثر دررفت بین طبقه ای در سازه (δ) به حد مجاز دررفت بین طبقه ای (δ_{all}) محدود شده است که قید مسئله بهینه سازی می باشد. برای گنجاندن قیود در فرایند بهینه سازی، کوئلو [۳۱] پژوهش های گسترده ای در این زمینه انجام داد و تابع جریمه خارجی به عنوان یکی از رایج ترین

رویکردها در بهینه‌سازی سازه‌ای شناخته شده است [۳۲-۳۴]. با به‌کارگیری این استراتژی، مسئله بهینه‌سازی مقید را می‌توان به مسئله‌ای نامقید بازنویسی کرد. این تکنیک، تابع هدف جریمه‌شده را به‌صورت زیر بیان می‌کند:

$$\tilde{f}(C, \alpha) = f(C, \alpha)(1 + r_p P_f) \quad (5)$$

که پارامتر P_f جریمه کل است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_f = \frac{Drift}{0.025} - 1; Drift > 0.025$$

$$P_f = 1 - \frac{Drift}{0.015}; Drift < 0.015 \quad (6)$$

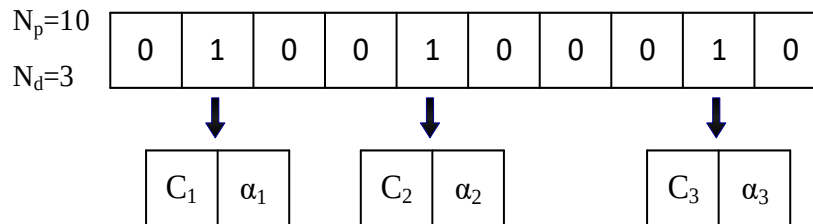
و پارامتر r_p ضریب تنظیم است و به صورت زیر فرمول بندی می‌شود [۳۲]:

$$r_p = r_{p1}[1 + 0.2(l - 1)] \leq 4r_{p1} \quad (7)$$

که در این رابطه l شمارنده نسل و r_{p1} مقدار تنظیم اولیه در تکرار اول می‌باشد. شایان ذکر است که دلیل انتخاب ضریب جریمه و حساسیت آن نسبت به عملکرد بهینه‌سازی، در مطالعات پیشین [۳۵] مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۶- بهینه‌سازی BRPSO

در چارچوب این تحقیق، یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی جدید به کار گرفته شده است که بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح‌شده با کد باینری و کد حقیقی را ادغام می‌کند. این رویکرد نوآورانه که به عنوان BRPSO شناخته می‌شود، نه تنها برای بهینه‌سازی همزمان موقعیت یابی، بلکه برای بهینه‌سازی پارامترهای میراگرهای ویسکوز (VD) مورد استفاده در قاب‌های خمشی ۶ و ۱۰ طبقه طراحی شده است. در این فرآیند بهینه‌سازی، حداکثر مقدار مجاز VD که می‌تواند در طراحی سازه گنجانده شود، با نماد N_d نشان داده شده است. برای تعیین مناسب‌ترین موقعیت یابی VD ها، به هر ذره در الگوریتم BRPSO یک رشته باینری، که P نامیده می‌شود و شامل N_d درایه است، اختصاص داده شده است. قابل ذکر است که در این فرمول‌بندی، N_p برابر با ۶ یا ۱۰ تعیین شده است که با تعداد کل طبقات موجود در پیکربندی سازه موردنظر مرتبط است. در این سیستم نمایش باینری، مقدار ۱ واقع در موقعیت- i ام بردار باینری P ، نشان‌دهنده وجود VD در طبقه- i ام است و مقدار ۰ به معنای عدم وجود VD در آن طبقه است. در مرحله بعدی فرایند بهینه‌سازی، به هر ذره یک بردار $2 \times N_d$ اختصاص داده شده است که هدف آن در برگیری پارامترهای مرتبط با VDs است. لازم به ذکر است که این پارامترها با موقعیت‌های داخل رشته باینری P مربوط می‌شوند که مقدار آن به عنوان ۱ شناسایی شده است، بدین معنی که یک همبستگی مستقیم بین نمایش باینری و پارامترهای میراگرها وجود دارد. فرایند بهینه‌سازی، همراه با استراتژی رمزگذاری به کار رفته در چارچوب BRPSO، به صورت شماتیک در «شکل ۱۵» نمایش داده شده است.



شکل ۱۵: چارچوب BRPSO

Fig. 15. BRPSO framework

مراحل انجام پژوهش به شرح زیر می‌باشد: الف) تعریف قاب‌های خمشی ۶ طبقه و ۱۰ طبقه و مدل‌سازی در opensees، ب) صحت سنجی مدل میراگر و مدل قاب با نتایج مراجع، ج) تعریف متغیرهای طراحی، تابع هدف انرژی و قیود دریافت، د) اجرای الگوریتم BRPSO برای تعدادهای مختلف میراگر، ه) تحلیل تاریخچه زمانی و محاسبه انرژی ورودی، هیستریزیس و انرژی میراگر و و) مقایسه پاسخ‌ها، انتخاب پیکربندی مناسب و استخراج نتیجه‌گیری.

۷- نتایج بهینه سازی

در این بخش موقعیت های بهینه میراگرها همراه با مقادیر پارامترهای مرتبط با توزیع‌های مربوطه با استفاده از الگوریتم BRPSO برای قاب های خمشی ۶ و ۱۰ طبقه به دست می آید. پارامترهای میراگرها شامل ضریب میرایی و توان سرعت، دو متغیر طراحی دارای محدودیت‌های بالایی و پایینی در فرآیند بهینه سازی می باشند. مقادیر کران پایین و بالای C ، ضریب میرایی، به ترتیب برابر ۱ و ۱۲ کیلونیوتن ثانیه بر متر و مقادیر کران پایین و بالای α ، توان سرعت، به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است که به عنوان حدود اعمال شده بر فرایند طراحی به کار می‌رود. همچنین مقادیر پارامترهای الگوریتم BRPSO مطابق با مطالعه [۳۶] لحاظ شده و در «جدول ۲» ارائه می‌شود.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی

Table 2. Optimization algorithm parameter values

مقدار	پارامتر
۳۰	اندازه جمعیت N
۱۰۰	حداکثر تعداد تکرار l_{max}
۰/۴	بیشینه ضرایب وزن ω_{max}
۰/۱	کمینه ضرایب وزن ω_{min}
۲۵	مقدار تنظیم اولیه در تکرار اول r_{p1}

پیکربندی بهینه میراگرهای ویسکوز همراه با مقادیر بهینه پارامترهای مربوطه در قاب های خمشی تحت یک رویداد زلزله شبیه سازی شده به طور اولیه محاسبه می شود. در صورتی که موقعیت و پارامترها برای یک زلزله ی خاص تعیین شود، ممکن است این سیستم در مقابل زلزله های دیگر مؤثر نباشد. برای رفع این ایراد، در این مطالعه، سازه در مقابل تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید (W.N)^۱ قرار گرفته و به طراحی میراگرهای ویسکوز بهینه پرداخته شده است. با توجه به این که W.N ایجاد شده خالص است؛ برای استفاده از این اغتشاش به عنوان تحریک پایه برای یک سازه، استفاده از فیلتری که بتواند خاصیت عبور امواج از خاک را روی آن مدل سازی کند ضروری است. فیلتر کانای-تاجیمی^۲، یکی از فیلترهای مناسب در این زمینه است. مدل فرآیند تصادفی برای شبیه سازی زمین لرزه اولین بار توسط هوسنر در سال ۱۹۴۷ پیشنهاد شد [۳۷]. فیلتر اغتشاش سفید ثابت به وسیله کانای در سال ۱۹۵۷ [۳۸] و تاجیمی در سال ۱۹۶۰ [۳۹] ارائه شده است که مورد علاقه محققین و مهندسين در زمینه مهندسی زلزله می باشد و به طور گسترده در این زمینه مورد استفاده قرار می گیرد. این تکنیک تشویش لرزه ای را به عنوان یک فرآیند ایستا مفهوم سازی می کند، به طوری که حرکت ورودی به عنوان یک سیگنال نویز سفید نمایش داده می شود. در مدل طیفی کانای-تاجیمی شتاب سنگ بستر به عنوان فرآیند اغتشاش سفید فرض شده است و رسوبات خاک به صورت سیستم تک درجه آزادی شبیه سازی گردیده است [۴۰] که تابع چگالی توان طیفی (PSD) تحریک به صورت زیر تعریف می شود:

$$S_{K,T}(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \quad (۸)$$

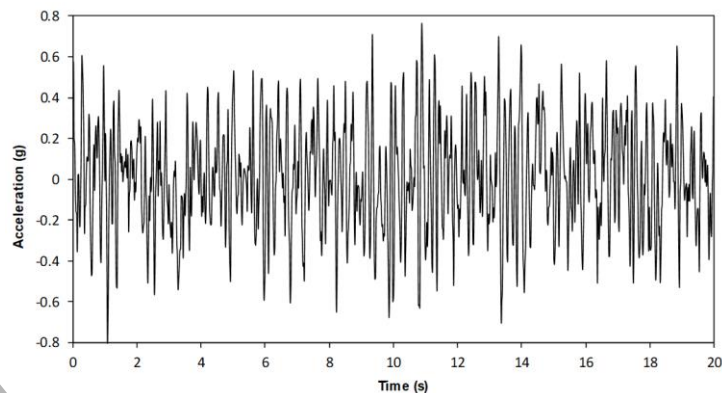
که در آن فرکانس ω_g فرکانس غالب تحریک زمین و ξ_g میرایی زمین می باشد که نمایانگر تیزی شکل تابع چگالی طیفی است و دارای مقادیر متفاوتی است. S_0 پارامتر ثابت چگالی طیفی می باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_0 = \frac{0.03\xi_g}{\pi\omega_g(4\xi_g^2 + 1)} \quad (۹)$$

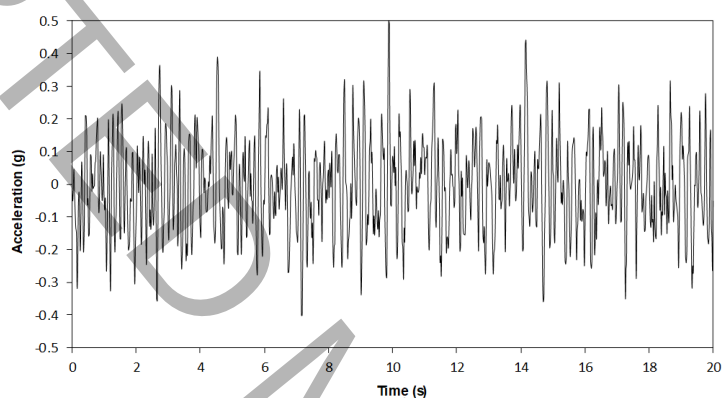
در این پژوهش مطابق با یافته های مطالعه [۴۱]، با در نظر گرفتن نوع خاک C، $\xi_g = 0.8$ و $\omega_g = 25.13 \text{ rad/s}$ (معادل با ۴Hz) در نظر گرفته شده است که منطبق بر آیین نامه ASCE 7-16 می باشد. رکورد زلزله مصنوعی تولید شده با فیلتر کانای-تاجیمی با حداکثر شتاب 0.8g برای سازه ۶ طبقه و 0.5g برای سازه ۱۰ طبقه مطابق «شکل ۱۶» می باشد.

^۱White Noise (W.N)

^۲Kanai-Tajimi



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: رکورد زلزله مصنوعی تولید شده با حداکثر شتاب الف) ۰.۸g برای سازه ۶ طبقه و ب) ۰.۵g برای سازه ۱۰ طبقه
Fig. 16. Artificially generated earthquake acceleration records with peak ground accelerations (PGAs) of (a) 0.8g for the six-story structure and (b) 0.5g for the ten-story structure.

این مطالعه به بررسی و تعیین پیکربندی مطلوب میراگرهای ویسکوز به همراه مقادیر پارامترهای مرتبط برای N_d های مختلف در هر دو قاب سازه‌ای با ۶ و ۱۰ طبقه پرداخت. در مجموع پنج اجرای مستقل بهینه‌سازی انجام شد که منجر به شناسایی حل بهینه با کمترین مقدار تابع هدف گردید. ترتیب بهینه میراگرها، همراه با مقادیر متناظر تابع هدف، در «جدول ۳» ارائه شده است.

جدول ۳: موقعیت های بهینه میراگرها به ازای تعداد مختلف میراگرها و مقادیر تابع هدف نظیر آن

Table 3. Optimal damper locations and corresponding objective function values for different numbers of dampers

N_d	۶ طبقه		۱۰ طبقه	
	بهترین موقعیت	تابع هدف	بهترین موقعیت	تابع هدف
1	[0,0,0,0,0,1]	2.387	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]	3.446

2	[0,0,0,0,1,1]	1.913	[0,0,0,0,0,0,1,0,1]	2.781
3	[0,1,0,1,0,1]	1.684	[0,0,1,0,0,0,1,0,0,1]	2.313
4	[1,0,1,0,1,1]	1.496	[0,1,0,1,0,1,0,0,0,1]	2.009
5	[1,1,0,1,1,1]	1.321	[1,0,0,1,0,1,0,0,1,1]	1.803
6	[1,1,1,1,1,1]	1.292	[1,0,1,0,1,1,0,0,1,1]	1.646
7			[1,0,0,1,0,1,1,1,1,1]	1.530
8			[1,1,0,1,1,1,1,1,0,1]	1.449
9			[1,1,1,0,1,1,1,1,1,1]	1.457
10			[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]	1.431

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم BRPSO برای قاب‌های خمشی فولادی ۶ و ۱۰ طبقه نشان می‌دهد که انتخاب موقعیت و پارامترهای میراگرها تأثیر چشمگیری بر توزیع انرژی و کاهش پاسخهای لرزه‌ای دارد. تحلیل داده‌های «جدول ۳» بیان می‌کند که با افزایش تعداد میراگرها، مقدار تابع هدف (نسبت انرژی ورودی به انرژی مستهلک‌شده) به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد تا جایی که در قاب ۶ طبقه از مقدار ۲/۳۸۷ برای یک میراگر به ۱/۳۲۱ در حالت پنج میراگر کاهش یافته و در حالت شش میراگر به مقدار ۱/۲۹۲ می‌رسد. روند مشابهی در قاب ۱۰ طبقه مشاهده شد، به‌طوری که مقدار تابع هدف از ۳/۴۴۶ برای یک میراگر به حدود ۱/۴۴۹ در حالت هشت میراگر و حدود ۱/۴۳۱ در حالت ده میراگر کاهش یافت. این نتایج حاکی از آن است که افزایش تعداد میراگرهای ویسکوز بهینه در قاب‌های خمشی تا حد معینی مؤثر است و منجر به کاهش تابع هدف می‌شود و پس از آن، کاهش تابع هدف ناچیز می‌شود. برای قاب ۶ طبقه، وقتی تعداد میراگرهای ویسکوز از ۵ به ۶ و در قاب ۱۰ طبقه، وقتی تعداد میراگرهای ویسکوز از ۸ به ۱۰ افزایش یابد، تفاوت ناچیزی حاصل می‌شود. مقادیر بهینه پارامترهای میراگرهای مربوط به هر دو قاب ۶ طبقه و ۱۰ طبقه در جداول ۴ و ۵ به ترتیب ارائه شده‌اند.

جدول ۴: مقادیر بهینه پارامترهای میراگرها به ازای تعداد مختلف میراگرها در قاب ۶ طبقه

Table 4. Optimal damper parameter values for different numbers of dampers in the six-story frame

طبقه	تعداد میراگر ویسکوز					
	1	2	3	4	5	6
6	10.53 ^a	8.39	5.49	10.84	5.27	5.49
	0.37 ^b	0.51	0.27	0.44	0.12	0.40
5		7.55		4.33	7.22	11.42
		0.19		0.26	0.50	0.58
4			9.61		5.46	4.62
			0.41		0.33	0.35

3		3.29 0.18		5.31 0.47
2	11.18 0.36		2.89 0.25	9.52 0.17
1		6.11 0.37	8.75 0.43	3.63 0.24

$a: C, b: \alpha$

جدول ۵: مقادیر بهینه پارامترهای میراگرها به ازای تعداد مختلف میراگرها در قاب ۱۰ طبقه

Table 5. Optimal damper parameter values for different numbers of dampers in the ten-story frame

طبقه	تعداد میراگر ویسکوز									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	10.29 ^a 0.17 ^b	7.85 0.28	11.42 0.57	7.25 0.22	5.83 0.41	4.79 0.57	8.86 0.45	10.19 0.32	4.73 0.39	6.76 0.19
9					3.82 0.14	6.97 0.26	11.64 0.30		5.52 0.41	6.18 0.48
8		10.54 0.43					2.99 0.25	6.49 0.10	7.03 0.19	6.24 0.36
7			6.31 0.37				11.39 0.45	7.45 0.22	6.93 0.41	3.74 0.28
6				10.13 0.16	5.62 0.29	7.31 0.54	8.18 0.58	4.73 0.31	5.88 0.42	11.50 0.49
5						7.19 0.15		8.53 0.55	6.11 0.47	10.21 0.35
4				11.57 0.32	4.96 0.22		8.49 0.48	9.37 0.51		5.77 0.52
3			9.16 0.55			3.70 0.20			4.24 0.13	5.18 0.43
2				7.63 0.18				5.40 0.47	10.02 0.56	4.85 0.24
1					8.47 0.32	10.32 0.17	6.09 0.48	10.71 0.12	6.33 0.52	4.75 0.26

$a: C, b: \alpha$

در «جدول ۶»، می‌توان مقایسه مقادیر حداکثر انرژی ورودی، انرژی هیستریزیس و انرژی مستهلک شده توسط میراگرها، برای قاب سازه ۶ طبقه با تعداد مختلف میراگرهای ویسکوز بهینه‌شده و درصد کاهش آن‌ها نسبت به انرژی سازه بدون میراگر را مشاهده کرد.

جدول ۶: مقایسه حداکثر انرژی ورودی، انرژی مستهلک شده توسط میراگرها و انرژی هیستریزیس در قاب ۶ طبقه با پیکربندی‌های بهینه

مختلف میراگر ویسکوز

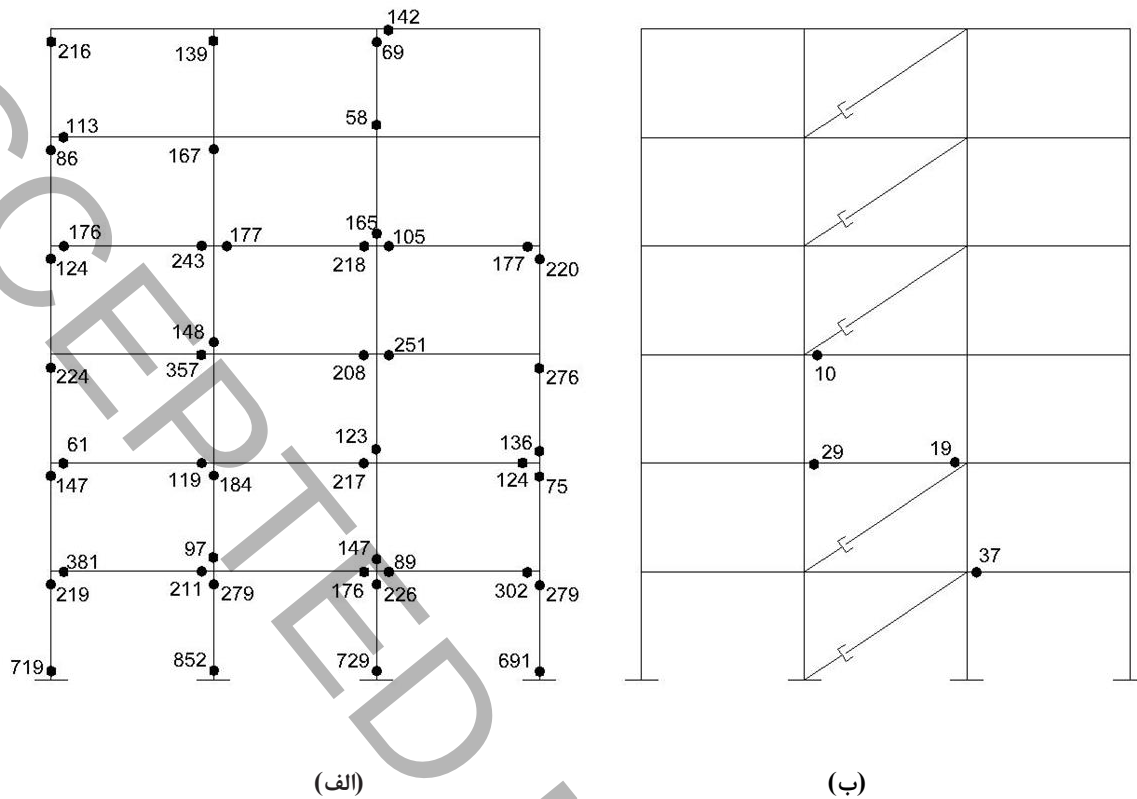
Table 6. Comparison of the maximum input energy, energy dissipated by the dampers, and hysteretic energy in the six-story frame for different optimal viscous damper configurations

انرژی	تعداد میراگر ویسکوز						
	0	1	2	3	4	5	6
$E_i(\text{Kips.in})$	19355	18951 (2.09)*	18536 (4.23)	18109 (6.44)	17687 (8.62)	17009 (12.12)	16744 (13.49)
$E_{VDs}(\text{Kips.in})$	-	7939	9689	10754	11823	12876	12959
$E_h(\text{Kips.in})$	10642	4157 (60.94)*	3269 (69.28)	2055 (80.69)	918 (91.37)	95 (99.11)	39 (99.63)

* درصد کاهش

از «جدول ۶» مشخص است که افزایش تعداد میراگرها در قاب ۶ طبقه منجر به کاهش انرژی ورودی می‌شود، در حالی که انرژی مستهلک شده توسط میراگرها روند صعودی نشان می‌دهد. نتایج روشن می‌کند که بهینه‌سازی موقعیت و پارامتر میراگرهای ویسکوز به طور قابل توجهی کل انرژی هیستریزیس را کاهش می‌دهد و بدین ترتیب به کاهش آسیب لرزه‌ای سازه منجر می‌شود. نتایج «جدول ۶» نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از انرژی ورودی توسط میراگرهای ویسکوز بهینه جذب می‌شود، به طوری که فقط بخش بسیار ناچیز از انرژی ورودی لرزه‌ای به اعضای سازه منتقل می‌شود و در نتیجه در حوادث زلزله‌ای منجر به آسیب کمتر سازه می‌شود. همان‌طور که در «جدول ۶» نشان داده شده است، افزایش تعداد میراگرهای ویسکوز از ۵ به ۶ به ترتیب منجر به کاهش انرژی هیستریزیس تجمعی به میزان ۹۹/۱۱٪ و ۹۹/۶۳٪ می‌شود. این الگو همچنین در کاهش انرژی ورودی برای قاب‌های خمشی مجهز به ۵ و ۶ میراگر ویسکوز به ترتیب ۱۲/۱۲٪ و ۱۳/۴۹٪ مشاهده می‌شود. مقادیر انرژی مستهلک شده توسط میراگر برای پیکربندی‌های بهینه با تعداد ۵ و ۶ میراگر به ترتیب برابر با ۱۲۸۷۶ و ۱۲۹۵۹ کیپس اینچ می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که تغییر قابل توجه انرژی مستهلک شده توسط میراگر هنگام افزایش تعداد میراگرهای ویسکوز از ۵ به ۶ آشکار نیست. بنابراین، تعداد بهینه میراگرها را می‌توان ۵ در نظر گرفت و هرگونه افزایش بیشتر در تعداد میراگرها ممکن است به هزینه‌های قابل توجهی منجر شود بدون اینکه پاسخ‌های سازه‌ای لرزه‌ای به طور قابل توجهی کاهش یابد.

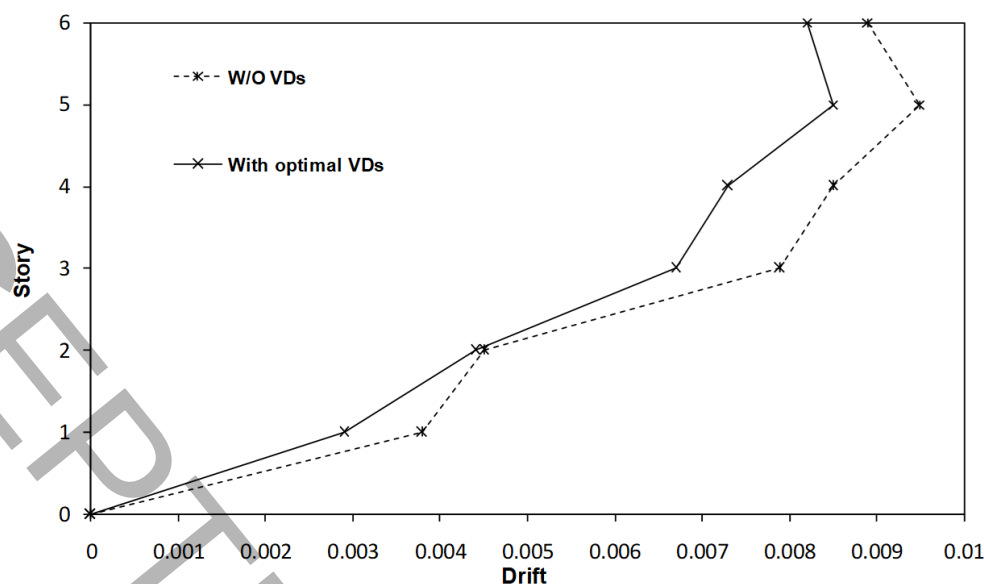
یافته‌ها نشان می‌دهد که انرژی هیستریزیس قاب خمشی ۶ طبقه هنگامی که با میراگرهای ویسکوز بهینه مجهز می‌شود، در طول زمین لرزه شبیه‌سازی شده، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. «شکل ۱۷» تحلیل مقایسه‌ای از اتلاف انرژی هیستریزیس در مفصل‌های پلاستیک سازه مجهز به ۵ میراگر بهینه، در برابر سازه‌ای که میراگر ویسکوز ندارد، ارائه می‌دهد. آشکار است که بخش قابل توجهی از المان‌های سازه در سیستم مجهز به ۵ میراگر بهینه در محدوده‌های الاستیک باقی می‌ماند و بدین ترتیب از آسیب شدید قاب سازه محافظت می‌کند.



شکل ۱۷: مقایسه اتلاف انرژی هیستریزیس در هر مفصل پلاستیک قاب ۶ طبقه (الف) بدون میراگر ویسکوز (ب) با میراگرهای ویسکوز بهینه (واحد: Kips.in)

Fig. 17. Comparison of hysteretic energy dissipation at each plastic hinge in the six-story frame: (a) without viscous dampers; (b) with optimally configured viscous dampers (unit: kip·in)

«شکل ۱۸» حداکثر نسبت دریافت بین طبقه‌ای برای قاب خمشی ۶ طبقه را برای سازه بدون میراگر ویسکوز و سازه با ۵ میراگر ویسکوز بهینه‌شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از «شکل ۱۸» مشاهده می‌شود، به‌کارگیری میراگرهای ویسکوز به‌طور قابل‌توجهی نسبت دریافت بین طبقه‌ای را کاهش می‌دهد و عملکرد موثر آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: مقایسه حداکثر نسبت دررفت بین طبقه‌ای با و بدون میراگرهای ویسکوز بهینه در قاب ۶ طبقه

Fig. 18. Comparison of the maximum interstory drift ratios in the six-story frame with and without optimally configured viscous dampers

در «جدول ۷»، امکان مقایسه دقیق حداکثر انرژی ورودی، انرژی هیستریزیس و انرژی مستهلک شده توسط میراگرهای ویسکوز بهینه برای یک قاب ۱۰ طبقه فراهم است. این مقایسه با در نظر گرفتن پیکربندی‌های بهینه مختلف از میراگرها انجام شده است و همچنین درصد کاهش انرژی نسبت به سازه بدون میراگر محاسبه شده است.

جدول ۷: مقایسه حداکثر انرژی ورودی، انرژی مستهلک شده توسط میراگرها و انرژی هیستریزیس در قاب ۱۰ طبقه با پیکربندی‌های بهینه مختلف میراگر ویسکوز

Table 7. Comparison of the maximum input energy, energy dissipated by the dampers, and hysteretic energy in the ten-story frame for different optimal viscous damper configurations

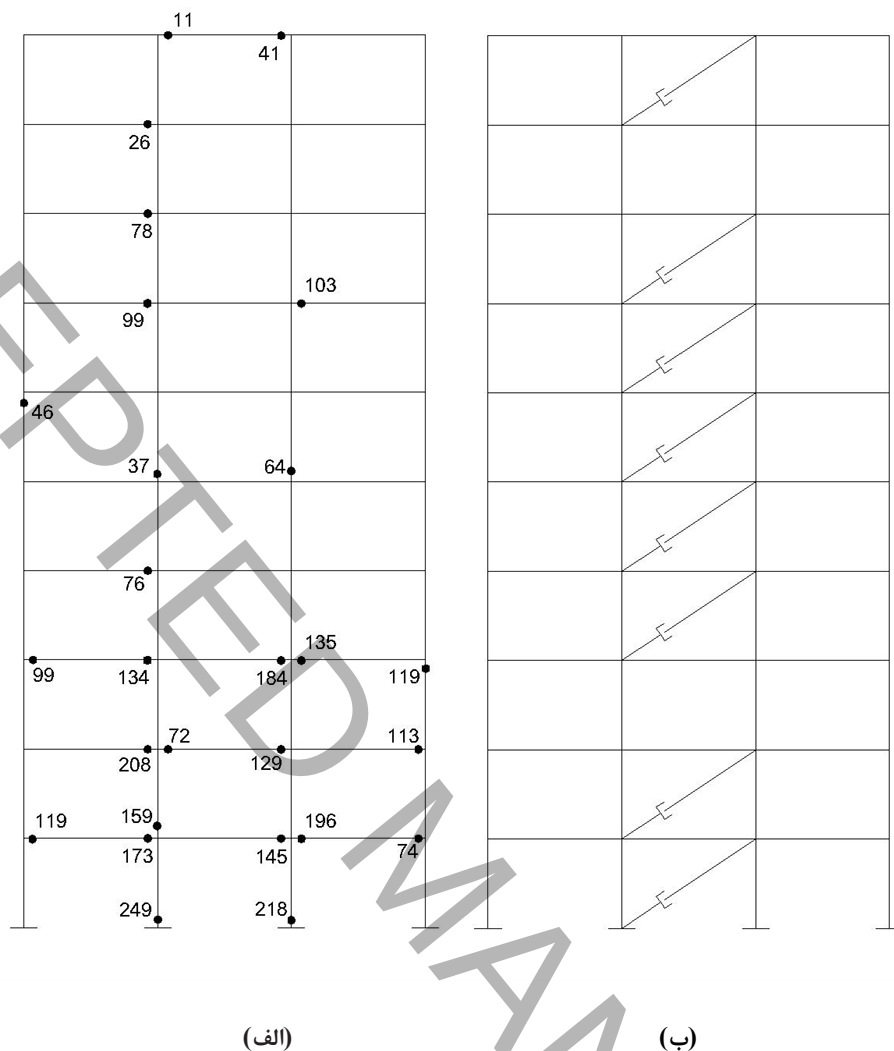
انرژی	تعداد میراگر ویسکوز										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_i (Kips.in)	11923	11357 (4.75)*	10949 (8.17)	10265 (13.91)	9550 (19.90)	8914 (25.24)	8437 (29.24)	7841 (34.24)	7758 (34.93)	7719 (35.26)	7766 (34.87)
E_{VDs} (Kips.in)	---	3459	3937	4438	4754	4943	5126	5192	5354	5298	5389
E_h (Kips.in)	3107	2816 (9.37)*	2493 (19.76)	1972 (36.53)	1267 (59.22)	515 (83.42)	183 (94.11)	39 (98.74)	0 (100)	0 (100)	0 (100)

*درصد کاهش

همانطور که در «جدول ۷» نشان داده شده است، افزایش تعداد میراگرها در قاب خمشی ۱۰ طبقه منجر به کاهش انرژی ورودی می‌شود، در حالی که انرژی مستهلک شده در میراگرهای ویسکوز نمایانگر افزایش پیوسته‌ای است. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی

موقعیت و پارامتر میراگرهای ویسکوز به‌طور معنی‌داری انرژی هیستریزیس کل را کاهش می‌دهد و به این وسیله به کاهش آسیب لرزه ای سازه کمک می‌کند. نتایج بهینه ارائه‌شده در «جدول ۷» نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از انرژی ورودی توسط میراگرهای ویسکوز با موقعیت بهینه جذب می‌شود و فقط مقدار کمی از انرژی ورودی زلزله به اعضای سازه منتقل می‌شود، که به تبع آن آسیب سازه‌ای در طول فعالیت‌های زلزله کاهش می‌یابد. از «جدول ۷» مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد میراگرهای ویسکوز از ۸ به ۱۰، مقدار کاهش انرژی هیستریزیس تجمعی تغییری نمی‌یابد و برابر با ۱۰۰٪ می‌باشد. در انرژی ورودی نیز برای قاب خمشی مجهز به ۸ و ۱۰ میراگر ویسکوز، انرژی ورودی با درصد کاهش به ترتیب ۳۴/۹۳٪ و ۳۴/۸۷٪ مشاهده می‌شود. مقادیر انرژی تلف‌شده برای پیکربندی‌های بهینه ۸ و ۱۰ میراگر ویسکوز به ترتیب برابر با ۵۳۵۴ و ۵۳۸۹ کیپس اینچ به دست آمده است. از آنجا که تغییر قابل‌توجه در انرژی تلف‌شده با افزایش میراگرهای ویسکوز از ۸ به ۱۰ ناچیز است. بنابراین، شمار بهینه میراگرها می‌تواند ۸ در نظر گرفته شود، زیرا هر گونه افزایش بیشتر در تعداد میراگرها هزینه‌های ساخت قابل ملاحظه‌ای به همراه دارد، بدون اینکه پاسخ‌های سازه‌ای در برابر زلزله به‌طور معنی‌داری کاهش یابد.

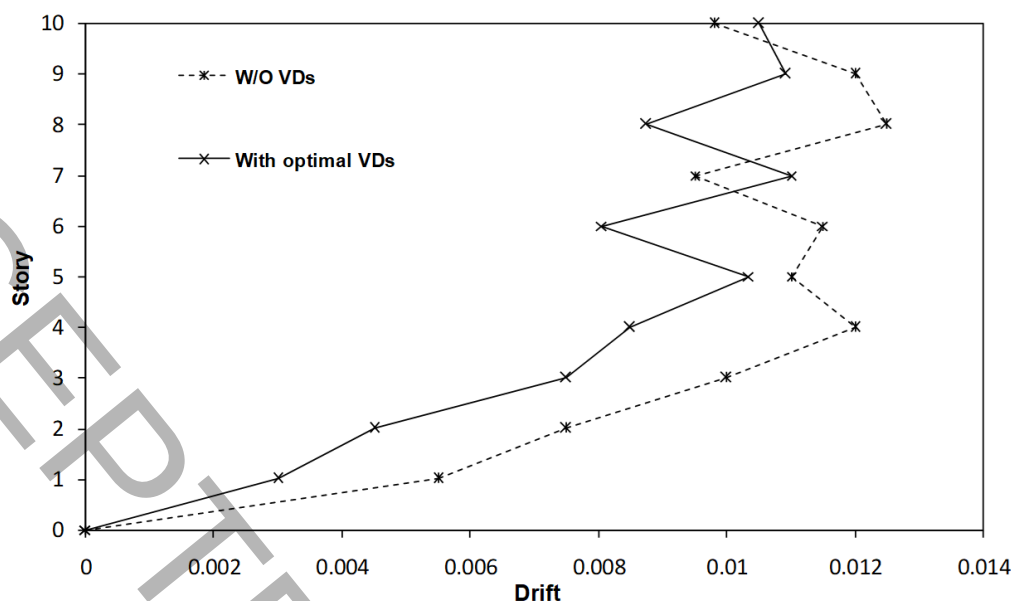
یافته‌ها نشان می‌دهد که انرژی هیستریزیس قاب خمشی ۱۰ طبقه مجهز به میراگرهای ویسکوز بهینه در طول زلزله شبیه‌سازی‌شده، به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. «شکل ۱۹» مقایسه‌ای از اتلاف انرژی هیستریزیس در مفصل‌های پلاستیک سازه قاب خمشی ۱۰ طبقه که مجهز به ۸ میراگر بهینه شده است را در برابر سازه بدون میراگر ویسکوز ارائه می‌دهد. بخش قابل توجهی از اجزای سازه در پیکربندی با ۸ میراگر بهینه در محدوده الاستیک باقی می‌مانند و بدین ترتیب قاب را از آسیب شدید محافظت می‌کنند.



شکل ۱۹: مقایسه اتلاف انرژی هیستریزیس در هر مفصل پلاستیک قاب ۱۰ طبقه (الف) بدون میراگر ویسکوز (ب) با میراگرهای ویسکوز بهینه (واحد : Kips.in)

Fig. 19. Comparison of hysteretic energy dissipation at each plastic hinge in the ten-story frame: (a) without viscous dampers; (b) with optimally configured viscous dampers (unit: kip·in)

«شکل ۲۰» حداکثر نسبت دریافت بین طبقه‌ای را برای سازه‌ی قاب خمشی ۱۰ طبقه برای دو حالت بدون میراگر ویسکوز و با ۸ میراگر ویسکوز بهینه نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که به کارگیری میراگرهای ویسکوز منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در نسبت دریافت بین طبقه‌ای می‌شود. با این حال، در طبقات بالایی، به‌ویژه طبقه هفتم و طبقه دهم، نسبت دریافت بین طبقه‌ای قاب با میراگرهای ویسکوز از قاب بدون میراگرهای ویسکوز فراتر می‌رود. این تفاوت به این دلیل است که فرایند بهینه‌سازی بر پایه تابع هدف انرژی انجام می‌گیرد و نشان دهنده مبادله عملکردی بین کنترل انرژی و تغییر مکان در سطوح بالاتر می‌شود.



شکل ۲۰: مقایسه حداکثر نسبت دریفت بین طبقه‌ای با و بدون میراگرهای ویسکوز بهینه در قاب ۱۰ طبقه

Fig. 20. Comparison of the maximum interstory drift ratios in the ten-story frame with and without optimally configured viscous dampers

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش، با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی، یک چارچوب بهینه‌سازی نوین مبتنی بر مفاهیم انرژی برای طراحی هم‌زمان پارامترها و موقعیت بهینه‌ی میراگرهای ویسکوز ارائه شد. این چارچوب از الگوریتم ازدحام ذرات ترکیبی گسسته-پیوسته (BRPSO) بهره گرفت تا با حداقل‌سازی نسبت انرژی ورودی به انرژی مستهلک‌شده توسط میراگرها، کارایی لرزه‌ای سازه را به حداکثر برساند. نتایج تحلیل‌های عددی روی قاب‌های خمشی فولادی ویژه ۶ و ۱۰ طبقه نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قادر است توزیع و پارامترهای بهینه‌ی میراگرها را به گونه‌ای تعیین کند که عملکرد لرزه‌ای به‌طور قابل توجهی بهبود یابد. برای قاب ۶ طبقه، به کارگیری پنج میراگر ویسکوز بهینه منجر به کاهش محسوس انرژی هیستریزیس و نسبت دریفت بین‌طبقه‌ای در تمامی طبقات شد، به گونه‌ای که بخش عمده‌ای از مفاصل پلاستیک در محدوده‌ی الاستیک باقی ماندند. در قاب ۱۰ طبقه نیز به کارگیری هشت میراگر ویسکوز بهینه، کاهش کامل انرژی هیستریزیس حاصل گردید که بیانگر جذب بخش عمده انرژی لرزه‌ای توسط میراگرها است. بررسی‌های پارامتریک نشان داد افزایش تعداد میراگرها بیش از مقادیر بهینه تأثیر محسوسی بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ندارد و تنها هزینه‌ی اجرایی را افزایش می‌دهد. بنابراین، طراحی مبتنی بر عملکرد با تعداد بهینه میراگرها، ضمن حفظ ایمنی سازه، از نظر اقتصادی نیز کارآمدتر است. در مجموع، نتایج عددی و تحلیلی این مطالعه نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی مبتنی بر انرژی و الگوریتم BRPSO می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر و دقیق در طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی مجهز به میراگرهای ویسکوز مورد استفاده قرار گیرد. این روش علاوه بر دقت بالا و همگرایی سریع، قابلیت تعمیم به سایر انواع سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی و سازه‌های پیچیده‌تر را نیز داراست.

نتایج این پژوهش باید با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی و دامنه تحلیل تفسیر شوند. بررسی‌ها به دو قاب خمشی فولادی دوبعدی با ارتفاع ۶ و ۱۰ طبقه محدود بوده و تعمیم نتایج به سازه‌های سه‌بعدی، نامنظم یا دارای ارتفاع‌های دیگر نیازمند بررسی مستقل است. همچنین تحریک لرزه‌ای مورد استفاده، رکورد مصنوعی مبتنی بر فیلتر کانای-تاجیمی است؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد پیکربندی‌های بهینه تحت مجموعه‌ای از رکوردهای واقعی، شامل زلزله‌های دور از گسل و نزدیک گسل، برای سنجش پایداری نتایج ضروری است. افزون بر این، تابع هدف مبتنی بر انرژی و قیود دریافت، همه شاخص‌های عملکرد لرزه‌ای را پوشش نمی‌دهند؛ از این رو، پیش از تعمیم نتایج به طراحی عملی، بررسی شاخص‌هایی مانند شتاب طبقات، تغییر مکان ماندگار، هزینه چرخه عمر و عدم قطعیت پارامترها پیشنهاد می‌شود.

به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، می‌توان طراحی سازه را از ابتدا بر اساس وجود میراگرها انجام داد. همچنین می‌توان پژوهش را برای قاب سه‌بعدی انجام داد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی را نیز می‌توان تحت زلزله‌های واقعی دور از گسل و نزدیک گسل ارزیابی کرد.

مراجع

- [1] N.B. Dharmajan, M. AlHamaydeh, State-of-the-Art Review of Structural Vibration Control: Overview and Research Gaps, *Applied Sciences*, 15(14) (2025) 7966.
- [2] B.F. Spencer Jr, S. Nagarajaiah, State of the art of structural control, *Journal of structural engineering*, 129(7) (2003) 845–856.
- [3] L. Zoccolini, E. Bruschi, C. Pettoroso, D. Rossi, V. Quaglini, Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art, *Procedia Structural Integrity*, 62 (2024) 669–676.
- [4] S. Hu, R. Hu, M. Yang, D. Meng, A. Igarashi, Numerical and experimental study on the damping performance of the fluid viscous damper considering the gap effect, *Journal of Vibration and Control*, 30(21-22) (2024) 4946–4963.
- [5] M. Bai, L. Shi, Y. Zhao, Experimental study on seismic performance of precast concrete frame with viscous damper, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, (2025) 1–19.
- [6] M. Marra, M. Palermo, S. Silvestri, The “direct five-step procedure” for the design of added viscous dampers to be inserted into existing buildings: formulation and case study, *Frontiers in Built Environment*, 9 (2023) 1289851.
- [7] L. Zoccolini, E. Bruschi, S. Cattaneo, V. Quaglini, Current trends in fluid viscous dampers with semi-active and adaptive behavior, *Applied Sciences*, 13(18) (2023) 10358.
- [8] M. Karami, H.E. Estekanchi, I. Hajirasouliha, S.A. Mirfarhadi, Optimal properties of nonlinear viscous dampers in steel structures considering the life cycle cost, *Journal of Earthquake Engineering*, 28(6) (2024) 1685–1708.

- [9] X. Lan, G. Wei, X. Zhang, Study on the influence and optimization design of viscous damper parameters on the damping efficiency of frame shear wall structure, *Buildings*, 14(2) (2024) 497.
- [10] V. Nguyen-Thai, D.-K. Ly, T. Nguyen, T. Nguyen-Thoi, An effective optimum design for passive viscous damping control using FVDs/VWDs in multi-story buildings, in, Elsevier, 2024, pp. 107004.
- [11] Y. Chen, C. Qin, H. Zhou, Z. Xu, A. Xu, H. Li, Damping characteristics of a novel bellows viscous damper, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(19) (2024) 6265.
- [12] Q. Liu, Z. Liu, J. Zhao, Y. Lei, S. Zhu, X. Wu, Seismic Optimization of Fluid Viscous Dampers in Cable-Stayed Bridges: A Case Study Using Surrogate Models and NSGA-II, *Buildings*, 15(9) (2025) 1446.
- [13] S. Dong, W. Pan, L. Ye, J. Wang, Design of displacement-based viscous damper damping structures, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 11742.
- [14] A. Baghernia, S.A.M. Ghasemi, Y. Zandi, Performance Based Design of Steel Moment Frame with Viscous and Tuned Mass Damper Using Center of Mass Metaheuristic Algorithm, *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 10(2) (2026) e2048.
- [15] M. Babaei, M. Moradi, Multi-objective Optimization of Steel Frames with Added Viscous Dampers using Imperialist Competitive Algorithm, *Computational Engineering and Physical Modeling*, 5(1) (2022) 69–88.
- [16] H. He, J. Pan, B. Deng, Multi-objective optimization of viscous damper-braced semi-rigid steel frames, *Structures*, 90 (2026) 112464.
- [17] A. Sadeghi, H. Kazemi, M. Samadi, Single and multi-objective optimization of steel moment-resisting frame buildings under vehicle impact using evolutionary algorithms, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1) (2021) 21.
- [18] X. Lan, X. Zhang, W. Xu, An Analytical Model and Parameter Sensitivity Analysis of the Energy Dissipation Ratio for Nonlinear Viscous Dampers Under Seismic Excitation, *Buildings*, 16(5) (2026) 1020.
- [19] Ö.F. Özkaya, M. Gürbüz, Efficacy of fluid viscous damper placement strategies on the seismic response of an irregular high-rise composite building, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 24(6) (2026) 4377–4407.
- [20] D. De Domenico, G. Ricciardi, I. Takewaki, Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 118 (2019) 144–165.
- [21] W.K. Chong, J.Y. Wong, C.C. Yip, L. Ling, M. Amran, Evaluating viscous damping for seismic energy dissipation in downscaled concrete structures under consistent earthquake loadings, in: *Structures*, Elsevier, 2025, pp. 109313.
- [22] D. Lee, D.P. Taylor, Viscous damper development and future trends, *The structural design of tall buildings*, 10(5) (2001) 311–320.
- [23] R. Poli, J. Kennedy, T. Blackwell, Particle swarm optimization: An overview, *Swarm intelligence*, 1(1) (2007) 33–57.

- [24] A.G. Gad, Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review, *Archives of computational methods in engineering*, 29(5) (2022).
- [25] B. Alatas, E. Akin, A.B. Ozer, Chaos embedded particle swarm optimization algorithms, *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(4) (2009) 1715–1734.
- [26] H. Jarrahi, A. Asadi, M. Khatibinia, S. Etedali, A. Samadi, Simultaneous optimization of placement and parameters of rotational friction dampers for seismic-excited steel moment-resisting frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136 (2020) 106193.
- [27] H.E. Estekanchi, M.C. Basim, Optimal damper placement in steel frames by the Endurance Time method, *The structural design of tall and special buildings*, 20(5) (2011) 612–630.
- [28] D.G. Lignos, H. Krawinkler, Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading, *Journal of Structural Engineering*, 137(11) (2011) 1291–1302.
- [29] K.K. Wong, Seismic energy dissipation of inelastic structures with tuned mass dampers, *Journal of engineering mechanics*, 134(2) (2008) 163–172.
- [30] K.K. Wong, J. Johnson, Seismic energy dissipation of inelastic structures with multiple tuned mass dampers, *Journal of engineering mechanics*, 135(4) (2009) 265–275.
- [31] C.A.C. Coello, Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 191(11-12) (2002) 1245–1287.
- [32] T.Y. Chen, C.J. Chen, Improvements of simple genetic algorithm in structural design, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40(7) (1997) 1323–1334.
- [33] H. Yazdani, M. Khatibinia, S. Gharehbaghi, K. Hatami, Probabilistic performance-based optimum seismic design of RC structures considering soil–structure interaction effects, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 3(2) (2017) G4016004.
- [34] M. Khatibinia, H. Yazdani, Accelerated multi-gravitational search algorithm for size optimization of truss structures, *Swarm and Evolutionary Computation*, 38 (2018) 109–119.
- [35] S. Rajeev, C.S. Krishnamoorthy, Discrete optimization of structures using genetic algorithms, *Journal of structural engineering*, 118(5) (1992) 1233–1250.
- [36] S. Gharehbaghi, M. Khatibinia, Optimal seismic design of reinforced concrete structures under time-history earthquake loads using an intelligent hybrid algorithm, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(1) (2015) 97–109.
- [37] G.W. Housner, Characteristics of strong-motion earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 37(1) (1947) 19–31.
- [38] K. Kanai, Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *地震研彙報*, 35 (1957) 309–325.

[39] H. Tajimi, A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake, in, 1960, pp. 781–797.

[40] H. Li, G. Sun, Y. Ren, A note on the stationary model of earthquake induced ground motion with a Hu spectrum, Proceedings of the 14WCEE. Beijing, China, (2008).

[41] J. Wu, G. Chen, M. Lou, Seismic effectiveness of tuned mass dampers considering soil–structure interaction, Earthquake engineering & structural dynamics, 28(11) (1999) 1219–1233.

Investigation of the energy-based approach in the optimization of viscous dampers

Hossein Jarrahi¹, Shima Bijari^{2*}, S .Javad Vaziri³

^{1,2} Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

³ Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

[*shbijari@birjand.ac.ir](mailto:shbijari@birjand.ac.ir)

Abstract

This study introduces an energy-based optimization framework to enhance the seismic performance of steel moment-resisting frames (SMRFs) through the strategic placement and parameter tuning of viscous dampers. A modified binary-real particle swarm optimization (BRPSO) algorithm is utilized to simultaneously determine the optimal distribution of dampers across building stories and to identify their corresponding damping coefficients and velocity exponents. The optimization objective focuses on maximizing the ratio of energy dissipated by the dampers to the total input seismic energy, while strictly adhering to structural constraints, such as permissible interstory drift limits. The proposed methodology is validated through nonlinear time-history analyses of six- and ten-story SMRFs modeled in OpenSees, subjected to Kanai–Tajimi filtered white noise excitations. Numerical results demonstrate that the optimized damping system significantly mitigates seismic demand; specifically, it reduces hysteretic energy by over 99.11% and input energy by approximately 12.12% in the six-story frame, with even more pronounced improvements (up to 100% reduction in hysteretic energy and 34.93% in input energy) observed in the ten-story structure. Furthermore, the analysis reveals a threshold effect where exceeding the optimal number of dampers yields diminishing returns on seismic performance while increasing construction costs. The findings confirm that the proposed method provides an efficient and robust solution for optimizing viscous damping systems in steel structures.

Keywords: Fluid viscous damper, Dynamic analysis, Optimization of parameters and placement, Energy-based approach, Steel Moment-Resisting Frame.