



www.journaliss.com

تحلیل عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با استفاده

از میراگرهای ویسکوز: رویکردی ترکیبی با تحلیل

دینامیکی افزایشی (IDA)

اشکان خدابخندهلو*

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه ایران

*ارومیه، صندوق پستی ۹۶۹، a.Khodabandehlou@iau.ac.ir

چکیده

این پژوهش به ارزیابی جامع رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با شکل‌پذیری ویژه، در دو حالت با و بدون میراگرهای ویسکوز می‌پردازد. برای دستیابی به درکی واقع‌نما و وابسته به شدت زلزله، افزون بر روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)، از تحلیل دینامیکی افزایشی به‌عنوان معیار در ارزیابی مبتنی بر شکست استفاده شده است. متغیرهای کلیدی از قبیل تغییر مکان هدف، تغییر مکان‌های جانبی مطلق و نسبی طبقات، برش پایه و دوره تناوب مؤثر در دو سازه سه‌بعدی ۱۲ و ۱۶ طبقه مورد سنجش قرار گرفتند. برای هر سازه، هشت مدل (چهار مدل بدون میراگر و چهار مدل مجهز به میراگر ویسکوز) تحت مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله مقیاس‌شده در تحلیل IDA قرار گرفتند. تمامی مدل‌ها برای شرایط لرزه‌خیزی زیاد و خاک نوع ۳ طراحی و با نرم‌افزار SAP2000-V19 مدل‌سازی و تحلیل شدند. نتایج حاصل از هر دو روش Pushover و IDA هم‌سو بوده و نشان می‌دهد تغییر مقاطع از مربع به مستطیل، منجر به افزایش آسیب‌پذیری سازه و افزایش تغییر مکان نسبی طبقات می‌شود. همچنین، افزایش تعداد و طول دهانه‌ها در راستای Y موجب کاهش تغییر مکان جانبی مطلق می‌شود. نقطه اوج یافته‌ها، تأیید کارایی چشمگیر میراگرهای ویسکوز در کاهش قابل‌توجه پراکندگی نتایج IDA، افزایش ظرفیت جذب انرژی و کاهش تغییر مکان‌های مطلق و نسبی در سطوح مختلف شدت زلزله (از سطح بهره‌برداری تا سطح فروپاشی) است. تحلیل IDA به‌وضوح نشان داد که استفاده از میراگر، حداکثر شتاب قابل تحمل سازه را پیش از رسیدن به آستانه‌های بحرانی شکست، افزایش داده و منحنی‌های ظرفیت سازه را به سطوح ایمن‌تری جابه‌جا می‌کند.

واژگان کلیدی

قاب خمشی فولادی، میراگر ویسکوز، انرژی کرنشی مودال، تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی افزایشی

Seismic Performance Assessment of Steel Moment Frames Using Viscous Dampers: A Hybrid Approach with Incremental Dynamic Analysis (IDA)

A. KhodaBandehLou

Abstract

This research evaluates the seismic performance of special moment-resisting steel frames (SMRSFs), both with and without viscous dampers, using nonlinear static (Pushover) analysis per Standard 2800 and Incremental Dynamic Analysis (IDA) as a benchmark for collapse assessment. The study examines 3D 12- and 16-story structures, with eight models each (four bare, four with dampers), designed for high seismicity and soil type III, using SAP2000-V19. Key findings indicate that changing columns from square to rectangular sections increases vulnerability and story drift ratios, while increasing the number and length of spans in the Y-direction reduces absolute lateral displacement. Results from both Pushover and IDA methods are consistent and confirm that viscous dampers significantly reduce the dispersion of IDA results, enhance energy dissipation, and decrease both absolute and relative displacements across all seismic intensities. Furthermore, the IDA clearly demonstrated that dampers increase the structure's maximum tolerable acceleration before reaching critical collapse thresholds, effectively shifting structural capacity curves to safer levels and confirming their effectiveness in improving seismic safety.

Keywords

Steel Moment Frame, Viscous Damper, Modal Strain Energy, Nonlinear Static Analysis, IDA Analysis



۱- مقدمه

ارتعاشات زمین در هنگام وقوع زلزله می‌تواند آسیب‌های شدید و گسترده‌ای به ساختمان‌ها و تجهیزات داخلی آن‌ها وارد نماید. به همین دلیل، توسعه روش‌های نوآورانه برای افزایش کارایی و ایمنی سازه‌ها در برابر مخاطرات طبیعی از جمله زلزله، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱]. از دیدگاه انرژی، برای طراحی لرزه‌ای مناسب باید میزان انرژی هیسترتیک مستهلک‌شده توسط سازه کاهش یابد. این هدف از طریق سیستم‌های کنترلی و با دو رویکرد اساسی دنبال می‌شود:

- کاهش انرژی ورودی به سازه

- افزودن مکانیزم‌های اتلاف انرژی به‌گونه‌ای که بخش عمده انرژی ورودی را جذب کرده و در نتیجه تنش‌های هیسترتیک اعضای اصلی سازه کاهش یابد [۲].

کاربرد سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال به دلیل مزایای متعدد، تحول بزرگی در مهندسی سازه ایجاد کرده است [۳]. یکی از مهم‌ترین این سیستم‌ها میراگرهای ویسکوز مایع هستند که در صنایع مختلف از جمله هوافضا، پل‌ها، سازه‌های نظامی و ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴]. این میراگرها به دلیل قابلیت بالای اتلاف انرژی، نگهداری کم‌هزینه و عدم ایجاد تنش اضافی در اعضای سازه‌ای، گزینه‌ای مؤثر برای کنترل ارتعاشات جانبی قاب‌های خمشی فولادی محسوب می‌شوند [۵ و ۶]. اگرچه میراگرهای ویسکوز در تمامی شرایط زلزله‌های نزدیک گسل که معمولاً دارای شتاب‌های بالا و مدت‌زمان کوتاه هستند عملکرد کاملاً ایده‌آلی ندارند، اما مزایای آن‌ها در کاهش جابه‌جایی و شتاب باعث می‌شود گزینه‌ای مناسب برای کاهش پاسخ لرزه‌ای در زلزله‌های با شدت کم تا متوسط باشند. همچنین می‌توانند به محدودسازی تغییرشکل‌های بزرگ در زلزله‌های شدید کمک کنند [۶]. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی رفتار لرزه‌ای غیرخطی قاب‌های خمشی فولادی با شکل‌پذیری ویژه، در حالت با و بدون استفاده از میراگرهای ویسکوز در تراز طبقات انجام شده است [۷]. امروزه مشخص شده است که رفتار هر سیستم سازه‌ای در هنگام وقوع زلزله تا حد زیادی به ظرفیت آن در استهلاک انرژی از طریق رفتار شکل‌پذیر وابسته است و این رفتار شکل‌پذیر نیز می‌تواند تحت تأثیر شکست‌های موضعی ناگهانی و ناپایداری‌های دینامیکی قرار گیرد [۸]. از آنجاکه در یک زلزله شدید، انرژی قابل‌توجهی به سازه وارد می‌شود، طراحی سازه‌ای که بتواند این انرژی عظیم را تنها در محدوده تغییرشکل‌های الاستیک جذب و مستهلک کند،

نه منطقی است و نه اقتصادی. علاوه بر این، چنین طرحی غالباً با الزامات معماری سازگار نیست و از نظر اجرایی نیز عملی نخواهد بود. به همین دلیل همواره تلاش مهندسان سازه و زلزله بر طراحی سازه‌هایی متمرکز بوده که قادر به استهلاک انرژی در ناحیه غیرالاستیک باشند [۹].

در سازه‌های فولادی، قاب خمشی فولادی ویژه یکی از مهم‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر نیروی جانبی است که توان تحمل تغییرشکل‌های فرارترجعی قابل‌توجهی را دارد. در طراحی اعضا و اتصالات این قاب‌ها باید به‌گونه‌ای عمل شود که مفاصل پلاستیک در نزدیکی انتهای تیرها تشکیل شده و ظرفیت دورانی آن‌ها به حدی باشد که دوران مرتبط با تغییرمکان جانبی نسبی طبقه حداقل به $0/04$ رادیان برسد که حدود $0/03$ رادیان آن در ناحیه فرارترجعی رخ می‌دهد [۱۰].

هم‌زمان با پیشرفت مهندسی سازه، روش‌ها و فناوری‌های نوینی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها پیشنهاد شده است که از مهم‌ترین آن‌ها استفاده از سیستم‌های کنترلی است [۹]. در میان انواع روش‌های کنترل سازه، سیستم‌های اتلاف انرژی به دلیل کارایی بالا و هزینه مناسب، به یکی از متداول‌ترین روش‌ها تبدیل شده‌اند. این سیستم‌ها علاوه بر بهبود عملکرد لرزه‌ای، می‌توانند آسیب‌های سازه در زلزله‌های شدید را نیز کاهش دهند. از آنجاکه هزینه ساخت، یکی از عوامل تعیین‌کننده در طراحی است، سیستم‌های کنترلی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که با هزینه‌ای مشابه طرح‌های متداول، عملکرد لرزه‌ای بهتری ارائه دهند [۱۱].

هدف اصلی سیستم‌های کنترلی، کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه از طریق جذب بخشی از انرژی ورودی یا تغییر ویژگی‌های دینامیکی سازه است. سیستم‌های کنترل غیرفعال، بدون نیاز به منبع انرژی خارجی عمل می‌کنند و تنها هنگام تحریک سازه فعال شده و پس از پایان زلزله دوباره غیرفعال می‌شوند. این سیستم‌ها با اصلاح ویژگی‌هایی مانند شکل‌پذیری و مقاومت یا با افزایش اتلاف انرژی، ارتعاشات سازه را کاهش می‌دهند [۲]. در میان سیستم‌های غیرفعال، سیستم‌های اتلاف انرژی بیش‌ترین کاربرد را دارند و هدف اصلی آن‌ها کاهش جابه‌جایی سازه در برابر نیروهای لرزه‌ای است. اتلاف انرژی، رویکردی کارآمدتر نسبت به افزایش سختی و مقاومت محسوب می‌شود و می‌تواند سازه را به سطوح عملکردی مشابه یا بهتر برساند [۱۲ و ۱۳].

از میان میراگرهای متداول، میراگرهای ویسکوالاستیک و ویسکوز نقش مهمی در افزایش میرایی و کاهش پاسخ سازه دارند. میراگر ویسکوز مایع که به سرعت وابسته است، بخش زیادی از انرژی ورودی لرزه‌ای را از طریق پاسخ سرعت سازه مستهلک

می‌نماید. این نوع میراگرها به دلیل محدوده وسیع فرکانس مؤثر، هزینه پایین و نگهداری ساده کاربرد بسیار گسترده‌ای یافته‌اند [۱۴]. میراگرهای ویسکوز امروزی، از مزایایی همچون عدم حساسیت به دما، وابستگی به سرعت، سختی ذخیره‌شده کم در فرکانس‌های پایین و عملکرد مناسب در جابه‌جایی‌های کوچک برخوردارند [۱۵ و ۱۶]. در دهه‌های اخیر، رویکردهای تحلیل لرزه‌ای از روش‌های ساده‌شده مبتنی بر نیرو، به سمت روش‌های پیشرفته‌تر مبتنی بر جابه‌جایی و عملکرد حرکت کرده‌اند. در این میان، تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) به دلیل کارایی و سهولت نسبی، به‌عنوان روشی متداول در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نظیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) برای ارزیابی تقریبی ظرفیت سازه‌ها پذیرفته شده است [۱۷]. با این حال، محدودیت‌های ذاتی این روش از جمله ناتوانی در شبیه‌سازی اثرات دینامیکی، وابستگی پاسخ به الگوی بارگذاری فرضی و عدم امکان بررسی پراکندگی ناشی از عدم قطعیت در مشخصات حرکت زمین، لزوم به‌کارگیری روش‌های تحلیلی جامع‌تر را پررنگ ساخته است.

به‌عنوان رویکردی تکامل‌یافته، تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) به‌عنوان یک روش قدرتمند و واقع‌نما در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها ظهور یافته است. اساس این روش، اعمال تدریجی و افزایش‌یابنده مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله واقعی (معمولاً مقیاس شده بر اساس شتاب اوج زمین یا سایر پارامترهای شدت) بر مدل غیرخطی سازه است. فرآیند آن تا رسیدن به سطوح مختلف آسیب، از جمله حالت حدی فروپاشی ادامه می‌یابد. خروجی این تحلیل، منحنی‌های جامعی است که رابطه بین پارامتر شدت زلزله (IM) و پارامتر آسیب‌پذیری سازه (DM) را نشان می‌دهد. از مزایای بارز IDA می‌توان به مقیاس‌پذیری برای سطوح مختلف عملکرد لرزه‌ای، قابلیت لحاظ‌نمودن عدم قطعیت‌های حرکت زمین، امکان محاسبه احتمال فروریزش و ارائه دیدگاهی جامع از تاب‌آوری سازه تحت سناریوهای زلزله‌ای متفاوت اشاره کرد.

در پژوهش حاضر، با هدف دستیابی به ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با شکل‌پذیری ویژه، روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) به‌عنوان مکملی بر تحلیل استاتیکی غیرخطی به‌کار گرفته شده است. تمرکز اصلی، بر ارزیابی تأثیر میراگرهای ویسکوز نصب‌شده در تراز طبقات بر بهبود شاخص‌های عملکردی سازه تحت اثر زلزله‌های با شدت‌های متفاوت است. استفاده هم‌زمان از این دو روش تحلیلی Pushover و IDA این امکان را فراهم می‌سازد تا از سویی،

ارزیابی اولیه و مقایسه‌ای سریع مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ای انجام پذیرد و از سوی دیگر، قابلیت اطمینان، ظرفیت نهایی و پراکندگی پاسخ سیستم‌های مورد مطالعه تحت اثر مستقیم تاریخچه‌های زمانی واقعی زلزله، به‌طور کمی مورد سنجش قرار گیرد. این رویکرد ترکیبی، کمکی اساسی به درک عمیق‌تر از مکانیزم‌های اتلاف انرژی، تغییر در دوره تناوب مؤثر و کنترل تغییر مکان‌ها در سیستم‌های سازه‌ای دوگانه (قاب خمشی همراه با میراگر) خواهد نمود.

بدین ترتیب، نوآوری این تحقیق نه تنها در بررسی سیستم سازه‌ای ترکیبی قاب فولادی و میراگر ویسکوز، بلکه در ادغام روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) به‌عنوان چارچوبی جامع برای سنجش تاب‌آوری آن نمایان می‌شود. انتظار می‌رود یافته‌های حاصل از این تحلیل دوگانه، مبنای محکم‌تری را برای قضاوت در مورد کارایی میراگرهای ویسکوز فراهم کرده و راه را برای طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان و تاب‌آوری در سازه‌های بلندمرتبه فولادی هموار سازد.

۱-۱- میراگر ویسکوز

میراگر ویسکوز مایع با وجود ابعاد فیزیکی نسبتاً کوچک خود، توانایی بالایی در جذب انرژی دارد (شکل ۱). به همین دلیل این نوع میراگرها گزینه‌ای مناسب برای استهلاک انرژی لرزه‌ای و کاهش پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله محسوب می‌شوند [۹]. استفاده از میراگرهای ویسکوز در سازه‌های بلند به‌ویژه در نواحی با لرزه‌خیزی زیاد بسیار متداول است [۱۲]. در بسیاری از ساختمان‌های مرتفع، برخی از اعضا تحت زلزله شدید وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند؛ درحالی‌که سایر اعضا همچنان در محدوده الاستیک باقی می‌مانند. بنابراین استفاده از سیستم میراگر ویسکوز مایع می‌تواند میزان خسارت سازه را از طریق جذب بخشی از انرژی ورودی ناشی از زلزله به‌طور مؤثری کاهش دهد [۳].

میراگرهای ویسکوز مایع معمولاً از یک سرپیستون مجهز به دریچه‌هایی تشکیل شده‌اند که درون استوانه‌ای پر شده از مایع بسیار چسبناک، مانند روغن سیلیکون، حرکت می‌کنند. هنگامی که پیستون درون استوانه جابه‌جا می‌شود، انرژی از طریق عبور و تغییر مکان مایع در محفظه میراگر مستهلک می‌شود. مایع موجود در استوانه تقریباً تراکم‌ناپذیر است و زمانی که میراگر تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرد، حجم مایع کاهش یافته و موجب حرکت میله پیستون می‌شود. این کاهش حجم منجر به ایجاد نیروی مقاوم ناخواسته‌ای می‌شود که معمولاً با عبور دادن میله پیستون از یک

¹ Incremental Dynamic Analysis



طرف دیگر میراگر و یا اعمال اصلاحات ساختاری قابل کنترل است. یکی دیگر از روش‌های معمول برای حذف این نیروی مقاوم، استفاده از یک مخزن جانبی است؛ این مخزن، حجم مایع جابه‌جاشده توسط میله را جمع‌آوری کرده و با برگشت میله، دوباره آن را به استوانه بازمی‌گرداند (شکل ۲). به این ترتیب فضای خالی ایجادشده در زمان عقب‌رفتگی میله، به وسیله مایع ذخیره‌شده پر می‌شود و عملکرد میراگر پایدار باقی می‌ماند [۱۳]. این میراگر برای تأمین نیروی لازم به منظور کنترل ارتعاش‌سازه، به سیستم خارجی نیاز ندارد [۳]. همچنین می‌تواند ارتعاشات ناشی از باد شدید و زمین‌لرزه را کاهش دهد و با حرکت مایع درون خود، انرژی لرزه‌ای ورودی را توزیع کرده و اثر آن را بر سازه کاهش می‌دهد. این سیستم‌ها برای ایجاد میرایی کنترل‌شده در سازه، به‌ویژه در برابر حرکات جانبی باد یا رویدادهای لرزه‌ای از قبل مشخص‌شده، طراحی شده‌اند [۱۲]. میراگر ویسکوز مایع انرژی وارد شده به سازه را هنگام وقوع باد یا زلزله مستهلک می‌کند و به سازه امکان می‌دهد در مقابل انرژی ورودی شدید مقاومت کرده و پیچش‌های مخرب، نیروها و شتاب‌های وارد شده را کاهش دهد [۱۸].

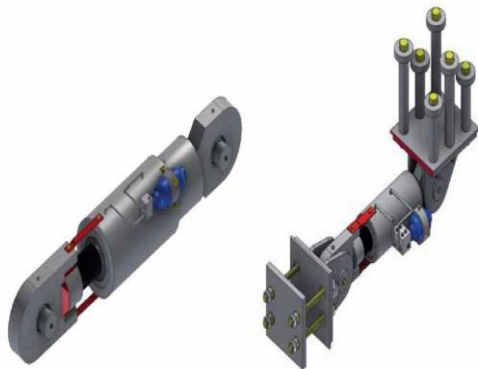
در طول رخداد لرزه‌ای، مقدار زیادی انرژی به سازه وارد می‌شود. اگر سازه فاقد میرایی کافی باشد، سختی آن کاهش یافته و ارتعاش افزایش می‌یابد؛ اما با وجود میرایی ویسکوز، سختی مؤثر سازه افزایش یافته و لرزش کاهش می‌یابد [۱۸]. نیروی میرایی تولیدشده توسط میراگرهای ویسکوز مایع به خصوصیات فیزیکی مایع مورد استفاده بستگی دارد [۱۵]. این میراگرها معمولاً نیروهای میرایی را با عبور مایع از روزنه یا دهانه حلقوی ایجاد می‌کنند. در صورت کوتاه‌بودن طول روزنه، اثر ورودی آن باید در طراحی در نظر گرفته شود [۱۹].

در طراحی سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز مایع، بررسی رفتار میراگر و توزیع آن در ارتفاع سازه از نظر پاسخ لرزه‌ای و هزینه سیستم اهمیت ویژه‌ای دارد [۲۰]. هدف اصلی طراحی سازه‌ها در مناطق لرزه‌ای، حفاظت از جان انسان‌ها و جلوگیری از فروریزش سازه است؛ حتی اگر سازه پس از زلزله دچار آسیب‌های شدید شود. این امر در سازه‌های حیاتی نظیر فرودگاه‌ها، بیمارستان‌ها، نیروگاه‌ها و مراکز امدادی اهمیت ویژه‌ای دارد. مقاوم‌سازی سازه‌های آسیب‌دیده ممکن است پیچیده یا حتی غیرممکن باشد.

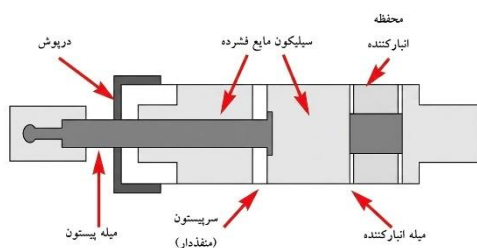
به‌منظور کاهش اثرات مخرب زلزله، استفاده از فناوری‌های نوین مانند میراگر ویسکوز ضروری است. این میراگرها با کاهش نیروهای داخلی اعضا، امکان استفاده از مقاطع سبک‌تر و

مقرون‌به‌صرفه‌تر را فراهم می‌کنند و پاسخ سازه به لرزش را کاهش می‌دهند [۱۳]. همچنین میراگرهای ویسکوز مایع بدون افزایش محسوس نیروهای لرزه‌ای، میرایی اضافی ایجاد کرده و به‌عنوان روشی مؤثر برای بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جدید شناخته می‌شوند [۱۵].

با توجه به افزایش تغییرمکان جانبی بیش از حد مجاز آیین‌نامه‌های قاب‌های خمشی در ساختمان‌های بلند و آسیب‌پذیری اعضا در زلزله‌های شدید، استفاده از یک سیستم سازه‌ای ترکیبی شامل قاب خمشی فولادی و سیستم کنترل غیرفعال نیروی جانبی لرزه‌ای (میراگر ویسکوز) ضروری است. به‌کارگیری این سیستم در ساختمان‌های بلند موجب افزایش شکل‌پذیری قاب‌ها، اتلاف انرژی بیشتر، کاهش تغییرمکان‌های جانبی و دریافت طبقات، کاهش برش پایه، کاهش ابعاد و وزن اعضا و کاهش آسیب‌های لرزه‌ای سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌شود.



شکل ۱- میراگر ویسکوز مایع [۱۵]



شکل ۲- اجزای اصلی میراگر ویسکوز مایع

۲- معرفی مدل‌های مورد بررسی و تحلیل دینامیکی فزاینده

در تحقیق حاضر، دو قاب ساختمانی بلندمرتبه فولادی سه‌بعدی با ۱۶ و ۱۲ طبقه در نظر گرفته شده است. هر یک از این قاب‌ها با هشت مدل شبیه‌سازی شده‌اند که شامل چهار مدل با سیستم سازه‌ای قاب خمشی ویژه و چهار مدل با سیستم سازه‌ای قاب

خمش و ویژه مجهزه میراگر و اسکوز است. موقعیت قرارگیری میراگرهای و اسکوز در دهانه‌های کناری قاب‌های پیرامونی و در دو جهت X و Y قرار داده شده است. این قاب‌ها در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی زیاد و خاک نوع ۳ در نظر گرفته شده که جزئیات آن در جدول (۱) ارائه شده است.

برای تعیین مشخصات مصالح فولادی در محدوده‌های خطی و غیرخطی، از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود طبق جدول (۲) استفاده شده است [۲۱ و ۲۲]. بارگذاری ثقلی قاب‌ها بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان اعمال شده است [۲۳]. شکل (۳) منحنی‌های تنش-کرنش فولاد مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهند. تحلیل خطی لرزه‌ای برای قاب‌های ۱۲ طبقه با استفاده از روش استاتیکی و برای قاب‌های ۱۶ طبقه با استفاده از روش دینامیکی طیفی طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران (ویرایش چهارم) انجام شده است [۱۷]. ابعاد اولیه المان‌های سازه‌ای و ضخامت دال‌های سقف در نرم‌افزارهای ETABS-V15 و SAFE2014 تعیین شده است. همچنین در شکل (۴) نحوه قرارگیری میراگرها در ارتفاع طبقات سازه ۱۶ طبقه نشان داده شده است.

۲-۱- تحلیل IDA

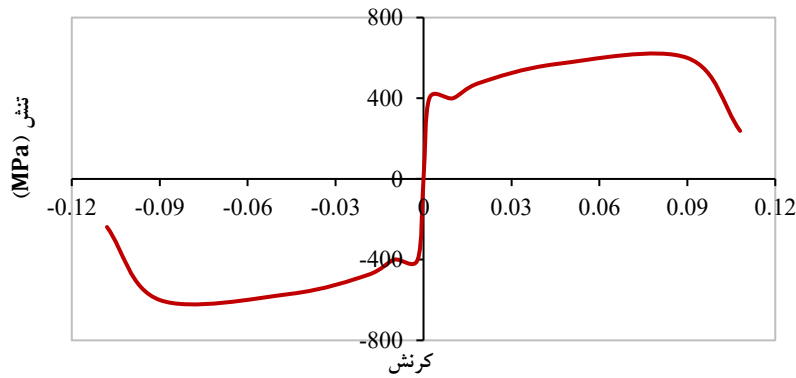
تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) به‌عنوان یک روش قدرتمند و پیشرفته در این پژوهش به‌کار گرفته شد تا ارزیابی وابسته به شدت و مبتنی بر احتمال از رفتار لرزه‌ای سازه‌ها ارائه دهد. در این روش، با اعمال تدریجی و افزایش‌یابنده مجموعی از رکوردهای زلزله واقعی مقیاس‌شده بر روی مدل غیرخطی سازه، پاسخ سازه از

محدوده خطی تا حد فروپاشی کامل ردیابی می‌شود. برای انجام این تحلیل، ابتدا هفت رکورد زلزله واقعی با ویژگی‌های لرزه‌ای متنوع از پایگاه‌های معتبر بین‌المللی انتخاب شد که با شرایط ژئوتکنیکی سایت مورد مطالعه (خاک نوع III و لرزه‌خیزی زیاد) سازگاری داشتند. هر رکورد به‌صورت سیستماتیک و افزایشی از شدت ۰/۱g تا ۱/۲g (بر اساس شتاب اوج زمین PGA) در گام‌های ۰/۱g مقیاس شد تا طیف گسترده‌ای از سطوح شدت زلزله را پوشش دهد. در هر سطح شدت، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی برای تمامی مدل‌های مورد مطالعه (شامل حالت‌های با و بدون میراگر) انجام و پارامترهای پاسخ کلیدی شامل تغییر مکان نسبی حداکثر طبقه، تغییر مکان بام و برش پایه ثبت شد. خروجی اصلی این فرآیند، منحنی‌های IDA است که رابطه بین پارامتر شدت زلزله (IM) و پارامتر خسارت (DM) را برای هر مدل ترسیم می‌کند. از طریق این منحنی‌ها، شاخص‌های کمی مهمی همچون ظرفیت بیشینه سازه (حداکثر شدتی که سازه قبل از فروپاشی تحمل می‌کند)، پراکندگی پاسخ (معیاری از عدم قطعیت ناشی از ویژگی‌های رکورد) و احتمال رسیدن به سطوح مختلف خسارت استخراج شد. این رویکرد امکان مقایسه مستقیم عملکرد مدل‌های مختلف تحت تأثیر مستقیم تاریخیچه زمانی زلزله‌های واقعی را فراهم کرده و درک عمیق‌تری از مزایای سیستم‌های مجهزه میراگر و اسکوز در افزایش ظرفیت لرزه‌ای، کاهش حساسیت به مشخصات رکورد و ارتقای کلی تاب‌آوری سازه ارائه می‌دهد. در این مطالعه ابتدا دو قاب نشان داده‌شده در شکل (۴) مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفتند.

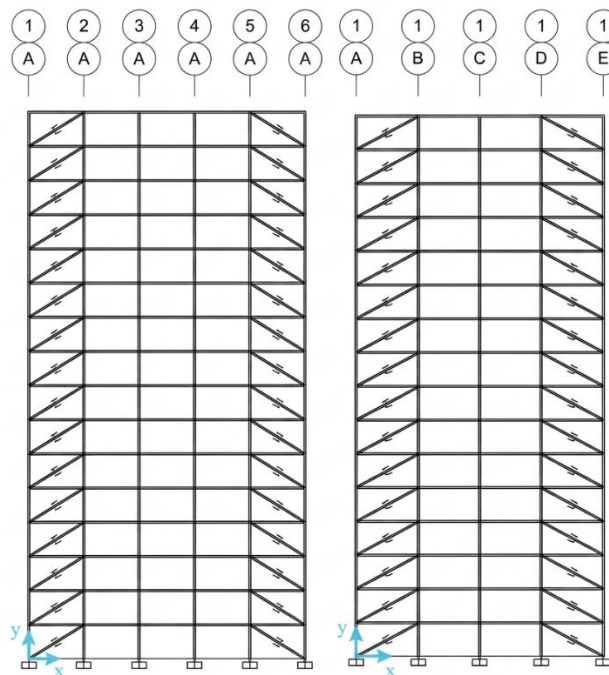
جدول ۱- مشخصات قاب‌های مورد بررسی

شکل المان‌های سازه‌ای قاب‌ها (تیرها و ستون‌ها)	ارتفاع طبقات قاب‌ها با و بدون میراگر	طول دهانه قاب‌ها در امتداد (X-Y) بدون و با میراگر	تعداد دهانه قاب‌ها در امتداد (X-Y) بدون و با میراگر	قاب‌ها			
				مدل‌های بدون میراگر		مدل‌های با میراگر	
				۱۲ طبقه	۱۶ طبقه	۱۲ طبقه	۱۶ طبقه
مربعی	۳/۲	۵-۵	۴-۴	۱	۱	۱	۱
مستطیلی	۳/۲	۵-۵	۴-۴	۲	۲	۲	۲
مربعی	۳/۲	۵-۵	۴-۵	۳	۳	۳	۳
مربعی	۳/۲	۵-۶	۴-۴	۴	۴	۴	۴





شکل ۳- تنش-کرنش مصالح فولادی در محدوده غیرخطی (Park)



شکل ۴- نحوه قرارگیری میراگر در قاب‌های ۱۶ طبقه مورد مطالعه در این تحقیق

۳- تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در این مطالعه، از آنجاکه قاب‌های ۱۲ طبقه طبق قسمت الف بند ۲-۲-۳ آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران (ویرایش چهارم) جزء ساختمان‌های منظم با ارتفاع کم‌تر از ۵۰ متر از تراز پایه هستند، از روش تحلیل استاتیکی معادل برای اعمال نیروی جانبی زلزله استفاده شده است. همچنین برای قاب‌های ۱۶ طبقه، به دلیل همپایه‌سازی برش‌های پایه استاتیکی نسبت به دینامیکی، نیروی جانبی زلزله به صورت استاتیکی در امتداد و جهات مختلف مطابق با بند ۳-۳ آیین‌نامه مذکور به سازه اعمال شده است.

در جدول (۲)، دوره تناوب تجربی قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه فولادی با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی نشان داده شده است. جدول (۲) نیز زمان تناوب مود اول (T1) قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه مجهز به میراگرهای ویسکوز غیرخطی را ارائه می‌دهد. میزان تغییر مکان هدف مدل‌های ۱ تا ۴ قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه در مرحله اول تحلیل در جدول (۳) ارائه شده است. شکل‌های (۵) الی (۱۲) نمودار جابه‌جایی نسبی طبقات برای حالت‌های با و بدون میراگر در سازه‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه، مربوط به مدل‌های ۱ تا ۴ را نشان می‌دهند و امکان مقایسه اثر استفاده از میراگرهای ویسکوز بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی را فراهم می‌آورند. در

جدول ۲- دوره تناوب تجربی قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی

نوع قاب	مدل	ارتفاع طبقات (متر)	ارتفاع قاب	دوره تناوب (ثانیه)
۱۲ طبقه	الی ۴	۳/۴	۳۸/۴	۱/۳۳۳
۱۶ طبقه	الی ۴	۳/۴	۵۱/۲	۱/۷۲۷

جدول (۴) نیز رکوردهای توصیه شده در FEMA P695 برای انجام تحلیل IDA نشان داده شده است [۲۴]. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نمودار IDA برای قاب ۱۲ طبقه با و بدون میراگر و در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نمودار IDA برای قاب ۱۶ طبقه با و بدون میراگر نشان داده شده است. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نیز نمودار شکنندگی قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه نشان داده شده است. در جدول‌های (۵) و (۶) نیز مقادیر CMR و ACMR قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه با و بدون میراگر نیز نشان داده شده است.

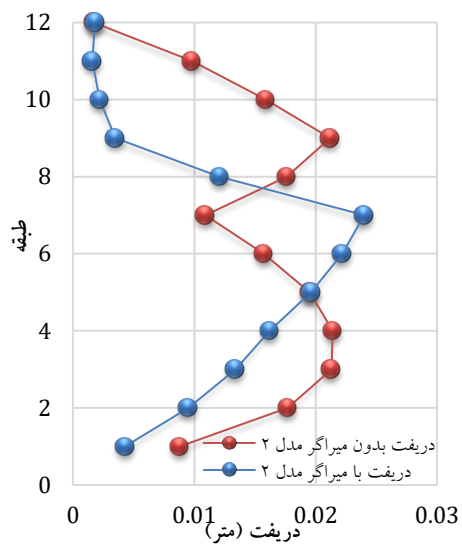
جدول ۳- دوره تناوب تحلیلی (TA) قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی در امتداد (X,Y)

قاب	مدل	TA (S)				۱/۲۵ TE (S)			
		بدون میراگر		با میراگر		بدون میراگر		با میراگر	
		امتداد X	امتداد Y	امتداد X	امتداد Y	امتداد X	امتداد Y	امتداد X	امتداد Y
۱۲ طبقه	۱	۱/۴۰۳۸	۱/۴۰۳۸	۰/۹۰۲	۰/۹۰۲	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳
	۲	۱/۳۷۰۸	۱/۳۸۸۶	۰/۸۸۷۸	۰/۹	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳
	۳	۱/۴۲۵	۰/۹۵۷۵	۱/۳۶۷	۰/۹۳۲۲	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳
	۴	۱/۴۴۸۹	۰/۹۶۱۲	۱/۵۴۸۵	۰/۸۸۹۷	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳	۱/۶۶۶۳
۱۶ طبقه	۱	۱/۷۴۷	۱/۷۵۴۳	۱/۰۵۹۷	۱/۰۶۱۴	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸
	۲	۱/۹۷۰۹	۱/۹۷۹۱	۱/۳۴۰۸	۱/۳۳۸۶	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸
	۳	۱/۸۶۷۶	۱/۸۲	۱/۳۹۴۷	۱/۳۷۵۵	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸
	۴	۱/۹۱۸۱	۲/۰۳۹۵	۱/۴۰۹۸	۱/۳۲۹	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸	۲/۱۵۸۸

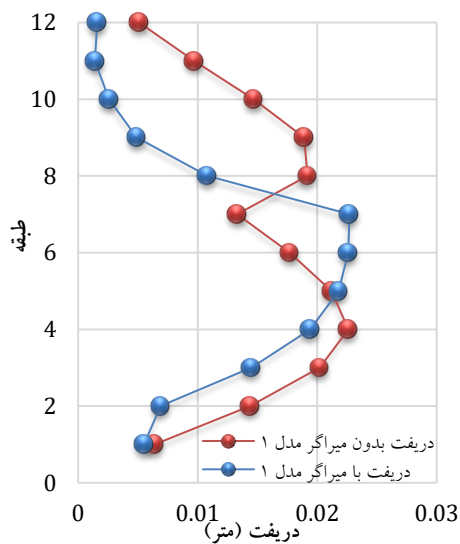
جدول ۴- رکوردهای دور گسل مورد استفاده در تحلیل دینامیکی افزایشی

No.	Earthquake			Record motion		
	M	Year	Name	Record station	PGA _{max}	PGV _{max}
1	6.7	1994	Northridge	BeverlyHills-Mulhol	0.52	63
2	6.7	1994	Northridge	CanyonCountry-WLC	0.48	45
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	0.82	62
4	7.1	1999	Hector Mine	Hector	0.34	42
5	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	0.35	33
6	6.5	1979	Imperial Valley	ElCentroArray#11	0.38	42
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	0.51	37
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	0.24	38
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	0.36	59
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	0.22	40
11	7.3	1992	Landers	YermoFireStation	0.24	52
12	7.3	1992	Landers	Coolwater	0.42	42
13	6.9	1989	Loma Prieta	Capitola	0.53	35
14	6.9	1989	Loma Prieta	GilroyArray#3	0.56	45
15	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	0.51	54
16	6.5	1987	Superstition Hills	ElCentroImp.Co.	0.36	46
17	6.5	1987	Superstition	HillsPoeRoad(temp)	0.45	36
18	7	1992	Cape Mendocino	RioDellOverpass	0.55	44
19	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY011	0.44	115
20	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	0.51	39
21	6.6	1971	San Fernando	LA-HollywoodStor	0.21	19
22	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	0.35	31

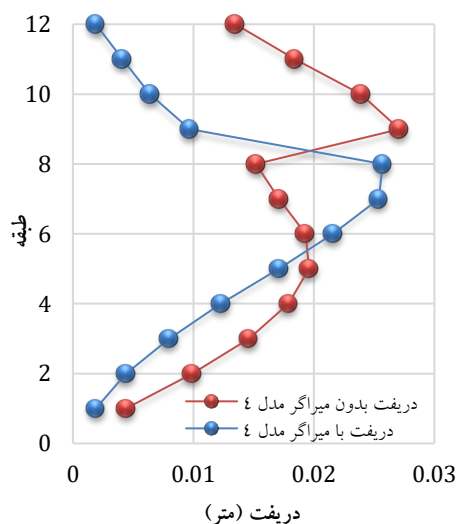




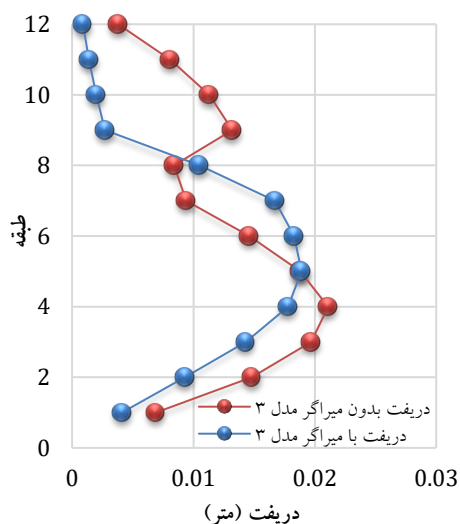
شکل ۵- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مدل ۱ قاب ۱۲ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



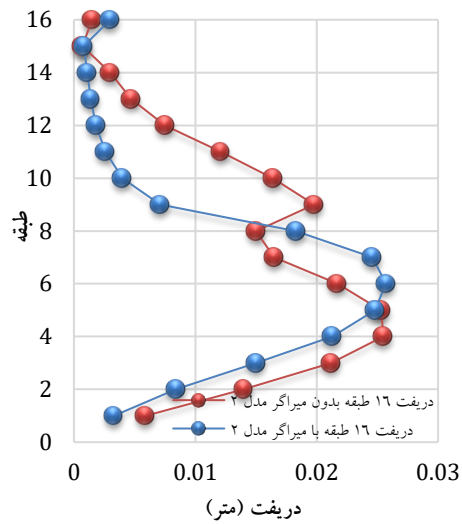
شکل ۶- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مدل ۲ قاب ۱۲ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



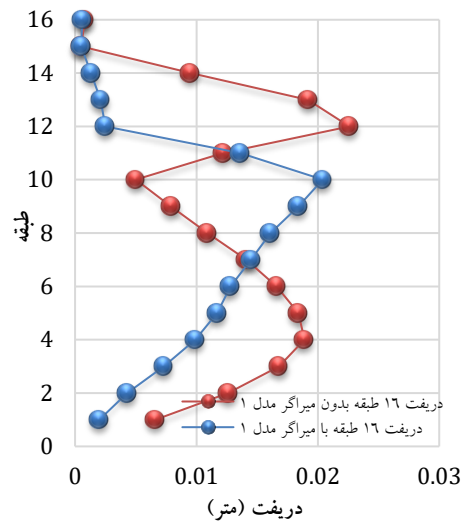
شکل ۷- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مدل ۳ قاب ۱۲ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



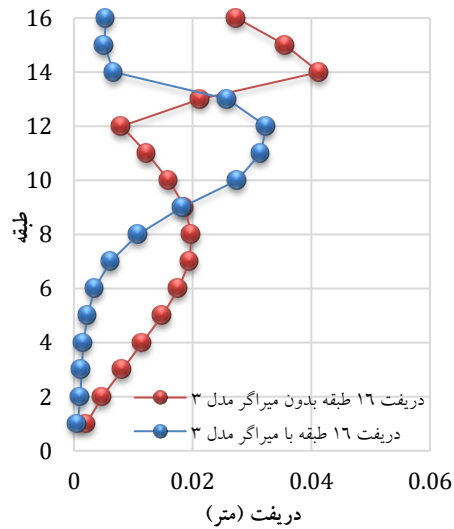
شکل ۸- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مدل ۴ قاب ۱۲ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



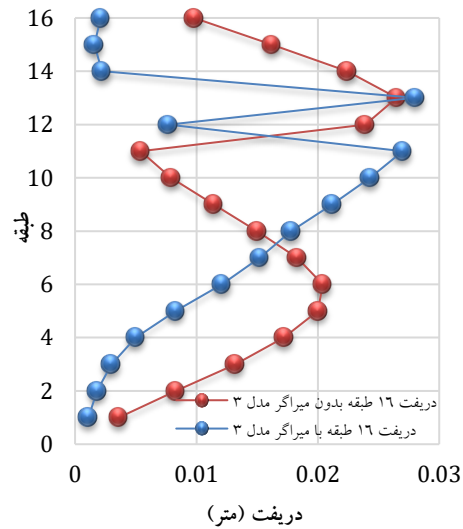
شکل ۹- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبتی طبقات مدل ۱ قاب ۱۶ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



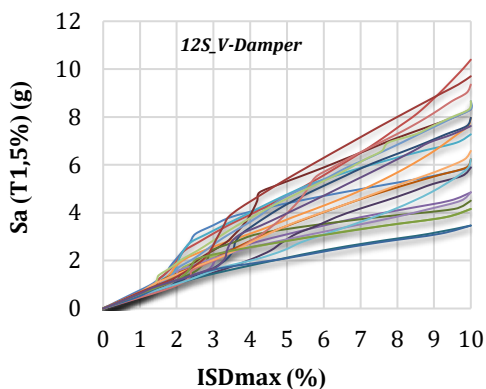
شکل ۱۰- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبتی طبقات مدل ۲ قاب ۱۷ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



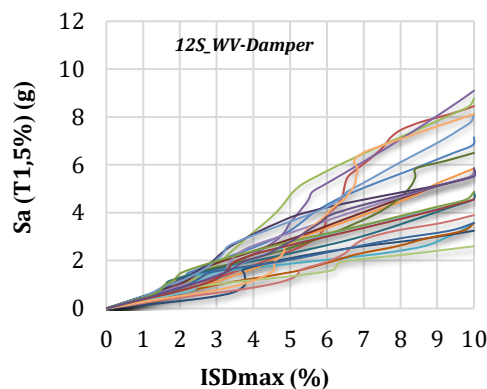
شکل ۱۱- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبتی طبقات مدل ۳ قاب ۱۶ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



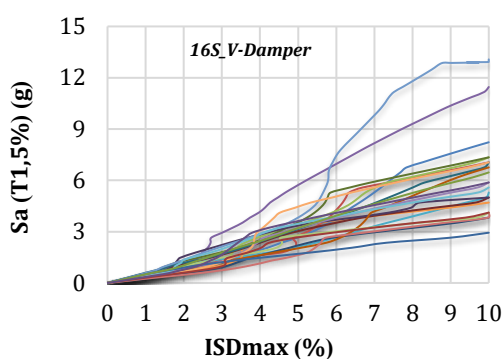
شکل ۱۲- نمودار مقایسه تغییر مکان جانبی نسبتی طبقات مدل ۴ قاب ۱۶ طبقه با و بدون میراگرهای ویسکوز غیرخطی



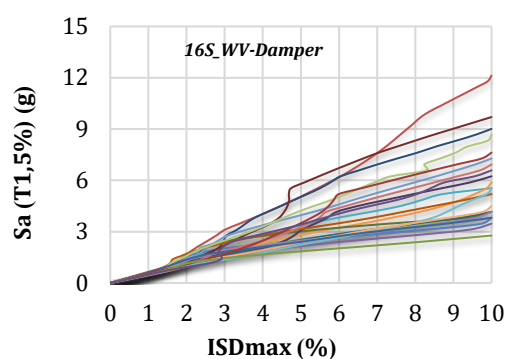
شکل ۱۳- نمودار IDA مدل ۱ قاب ۱۲ طبقه بدون میراگر ویسکوز غیرخطی



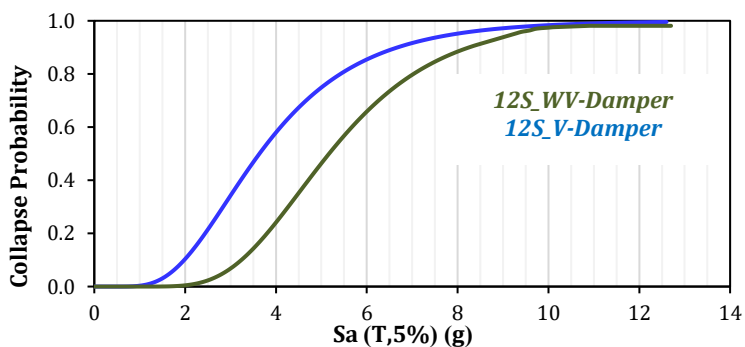
شکل ۱۴- نمودار IDA مدل ۱ قاب ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوز غیرخطی



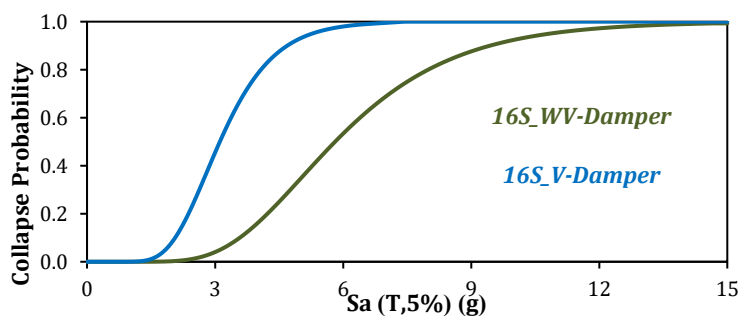
شکل ۱۵- نمودار IDA مدل ۱ قاب ۱۶ طبقه بدون میراگر ویسکوز غیرخطی



شکل ۱۶- نمودار IDA مدل ۱ قاب ۱۶ طبقه با میراگر ویسکوز غیرخطی



شکل ۱۷- منحنی شکنندگی قاب ۱۲ طبقه با و بدون میراگر ویسکوز غیرخطی



شکل ۱۸- منحنی شکنندگی قاب ۱۶ طبقه با و بدون میراگر ویسکوز غیرخطی

جدول ۵- مقادیر نسبت فروریزش قاب ۱۲ طبقه با و بدون میراگر

مشخصات رفتاری		
سازه	ACMR	ACMR Accept
CMR	3.01	1.92
CMR_V	3.88	1.92
	ACMR_V	ACMR Accept
	4.74	1.92

جدول ۶- مقادیر نسبت فروریزش قاب ۱۶ طبقه با و بدون میراگر

مشخصات رفتاری		
سازه	ACMR	ACMR Accept
CMR	2.13	1.92
CMR_V	2.35	1.92
	ACMR_V	ACMR Accept
	3.04	1.92

۴- نتیجه گیری

در این بخش، نتایج کلی حاصل از مطالعه و تحلیل قاب‌های فولادی بلندمرتبه با و بدون میراگر ویسکوز ارائه شده و محدودیت‌های موجود در پژوهش، مورد بحث قرار می‌گیرد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از میراگر ویسکوز و تغییر مشخصات هندسی قاب‌ها، اثر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای سازه دارد.

- افزایش تعداد دهانه در امتداد محور Y (مدل ۱ نسبت به مدل ۳) در قاب ۱۲ طبقه فولادی بدون میراگر ویسکوز، در تراز طبقات و در امتدادهای X و Y، سبب کاهش حدود ۵۰٪ در تغییرمکان جانبی نسبی طبقات می‌شود. این کاهش نشان‌دهنده توزیع بهتر نیروهای جانبی و افزایش سختی مؤثر قاب در جهت افزایش دهانه‌ها است.

- افزایش تعداد دهانه در امتداد محور Y (مدل ۱ نسبت به مدل ۳) در قاب ۱۲ طبقه فولادی با میراگر ویسکوز، در تراز طبقات و در هر دو امتداد X و Y، سبب کاهش حدود ۴۵٪ در تغییرمکان جانبی نسبی می‌شود. این کاهش کم‌تر نسبت به حالت بدون میراگر، بیانگر اثر ترکیبی افزایش دهانه و حضور سیستم اتلاف انرژی است.

- در مدل ۳ قاب ۱۲ طبقه با میراگر ویسکوز، نسبت به حالت بدون میراگر، تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در دو امتداد X و Y حدود ۸۴٪ کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده توانایی بالای میراگرهای ویسکوز در کاهش جابه‌جایی‌های غیرخطی و کنترل دررفت طبقات است.

- در قاب ۱۶ طبقه فولادی بدون میراگر ویسکوز، افزایش تعداد دهانه در امتداد محور Y (مدل ۱ نسبت به مدل ۳) سبب افزایش حدود ۹۷٪ در تغییرمکان جانبی نسبی طبقات می‌شود. این افزایش قابل توجه نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع و تعداد

دهانه‌ها، قاب‌های بلند بدون سیستم کنترل لرزه‌ای بیش‌ترین حساسیت را به تغییرمکان‌های جانبی نشان می‌دهند.

- برای قاب ۱۶ طبقه فولادی با میراگر ویسکوز، افزایش دهانه در امتداد محور Y (مدل ۱ نسبت به مدل ۳) سبب افزایش حدود ۸۸٪ در تغییرمکان جانبی نسبی طبقات می‌شود. این نشان می‌دهد که میراگرهای ویسکوز توانسته‌اند تا حدی اثر افزایش دهانه را کاهش دهند، اما در سازه‌های بلند، اثر هندسی قاب هنوز اهمیت زیادی دارد.

- در مدل ۳ قاب ۱۶ طبقه با میراگر ویسکوز، نسبت به حالت بدون میراگر، تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در دو امتداد X و Y حدود ۹۱٪ کاهش یافته است. این کاهش چشم‌گیر، مؤید اثر مثبت حضور میراگر در کنترل پاسخ غیرخطی و افزایش ایمنی سازه در برابر زلزله است.

بر اساس نتایج فوق، می‌توان بیان کرد که افزایش تعداد دهانه در امتداد محور Y در قاب‌های فولادی بلند، چه بدون و چه با میراگر ویسکوز، تأثیر قابل توجهی بر تغییرمکان جانبی نسبی طبقات دارد. همچنین حضور میراگر ویسکوز در مدل‌های ۱ و ۳ قاب‌های ۱۲ و ۱۶ طبقه، کاهش قابل توجه تغییرمکان‌های جانبی، دریافت طبقات و نیروهای جانبی وارده بر سازه را به دنبال دارد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم ترکیبی قاب خمشی فولادی و میراگر ویسکوز، ضمن افزایش شکل‌پذیری قاب‌ها، می‌تواند اتلاف انرژی بیش‌تری ایجاد کند و اثرات مخرب ناشی از زمین‌لرزه‌های شدید را به میزان چشم‌گیری کاهش دهد.

همچنین با توجه به نتایج تحلیل دینامیکی افزایشنده (IDA)، می‌توان استدلال کرد که این رویکرد تحلیلی، امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از عملکرد سازه تحت سناریوهای مختلف زلزله را فراهم می‌سازد. یافته‌های این تحلیل نشان داد که استفاده از میراگرهای ویسکوز نه تنها باعث کاهش مقادیر میانگین پاسخ‌های



لرزه‌ای (نظیر تغییر مکان‌ها) می‌شود، بلکه پراکندگی^۱ این پاسخ‌ها را در برابر رکوردهای مختلف زلزله به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. این کاهش پراکندگی به معنای افزایش قابلیت اطمینان^۲ و پیش‌بینی‌پذیری بهتر رفتار سازه است. همچنین، منحنی‌های IDA به‌وضوح نشان‌دهندهٔ افزایش ظرفیت لرزه‌ای^۳ مدل‌های مجهز به میراگر هستند، به‌طوری‌که آستانه‌های مربوط به سطوح خسارت مختلف (از سطح بهره‌برداری تا فروریزش) در شدت‌های بالاتری از زلزله رخ می‌دهند. این موضوع حاکی از افزایش ذخیره مقاومت و تاب‌آوری^۴ بالاتر این سیستم‌ها است. بنابراین، ادغام روش IDA در فرآیند طراحی و ارزیابی می‌تواند به‌عنوان یک ضرورت برای دستیابی به ساختمان‌های امن‌تر و کارتر در مناطق لرزه‌خیز مورد توجه قرار گیرد.

به‌طور کلی، تحلیل‌ها نشان می‌دهند که:

قاب‌های فولادی بلندمرتبه بدون میراگر تحت زلزله‌های شدید دچار تغییر مکان‌های جانبی قابل توجه و آسیب‌های احتمالی در المان‌ها می‌شوند.

حضور میراگرهای ویسکوز، علاوه بر کاهش تغییر مکان‌های جانبی و دریفت طبقات، موجب کاهش برش پایه، کاهش ابعاد و وزن اعضای سازه‌ای و کاهش آسیب‌های لرزه‌ای در سازه و اجزای غیرسازه‌ای می‌شود.

ترکیب هندسهٔ بهینهٔ قاب‌ها (تعداد دهانه‌ها و طول دهانه‌ها) با میراگر ویسکوز، بهترین عملکرد لرزه‌ای را برای ساختمان‌های بلند ارائه می‌دهد.

¹ Dispersion

² Reliability

³ Seismic Capacity

⁴ Resiliency

- [1] آندرسن، جیمز، آرنولد، کریستوفر، و همکاران. (۱۳۸۸)، "طراحی سازه‌های ضد زلزله"، (ترجمه علی شریفی، رسول میرقادر). تهران: مرکز نشر دانشگاهی، ص ۳۹.
- [2] دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها (ضابطه شماره ۷۶۶)، معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی، امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، معاونت تحقیقات، سازمان مجری ساختمان‌ها و تأسیسات دولتی و عمومی معاونت برنامه‌ریزی و مهندسی، ۱۳۹۷، ص ۱۱۳-۱۱۵.
- [3] Shariati, A., Kamgar, R., and Rahgozar, R. (2020), "Optimum layout of nonlinear fluid viscous damper for improvement the responses of tall buildings", *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 10(3), pp.411-431.
- [4] Huergo, I.F., Hernández-Barrios, H., and Patlán, C.M. (2020), "A continuous-discrete approach for pre-design of flexible-base tall buildings with fluid viscous dampers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, pp.106042.
- [5] Milanchian, R., and Hosseini, M. (2019), "Study of vertical seismic isolation technique with nonlinear viscous dampers for lateral response reduction", *Journal of Building Engineering*, 23, pp.144-154.
- [6] De Domenico, D., and Ricciardi, G. (2018), "Improved stochastic linearization technique for structures with nonlinear viscous dampers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, pp.415-419.
- [7] Akehashi, H., and Takewaki, I. (2020), "Comparative investigation on optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures: transfer function amplitude or double impulse", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130, pp.105987.
- [8] برگی، خسرو. (۱۳۹۴)، "اصول مهندسی زلزله"، تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران، ص ۴۱۶-۴۱۷.
- [9] بابائی، م.، مرادی، م. (۱۳۹۸)، "بهبودسازی چندهدفه کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها با استفاده از میراگرهای ویسکوز به کمک الگوریتم رقابت استعماری"، نشریه علمی-پژوهشی سازه و فولاد، سال ۱۸، شماره ۲۵، ص ۴۵-۵۵.
- [۱۰] مقررات ملی ساختمان ایران مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، ویرایش چهارم، ۱۳۹۲، ص ۲۲۰.
- [11] Hashemi, M.R., Vahdani, R., Gerami, M., and Kheyroodin, A. (2020), "Viscous damper placement optimization in concrete structures using colliding bodies algorithm and story damage index", *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 10(1), pp.57-70.
- [12] Sudheer kumar, K., and Vinod, Y. (2019), "Seismic Response Analysis of Rc Framed Structure Using Dampers", *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6c2), pp.377.
- [13] Zolekar, MissShital, Sagade, Prof. A.V. (2019), "Effect of Viscous Dampers on Response Reduction Factor for Rc Frame Using Response Spectrum Analysis", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(7), pp.3597-3598.
- [14] Hu, G., Wang, Y., Huang, W., Li, B., and Luo, B. (2020), "Seismic mitigation performance of structures with viscous dampers under near-fault pulse-type earthquakes", *Engineering Structures*, 203, pp.109878.
- [15] Kookalani, S., and Shen, D. (2020), "Effect of Fluid Viscous Damper parameters on the seismic performance", *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 4(3), pp.141-153.
- [16] Shen, H., Zhang, R., Weng, D., Ge, Q., Wang, C., and Islam, M.M. (2020), "Design method of structural retrofitting using viscous dampers based on elastic-plastic response reduction curve", *Engineering Structures*, 208, pp.109917.
- [۱۷] استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۴)، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (ویرایش چهارم)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [18] lakshmishireenbanu, S., Ushasri, P. (2019), "Study of Seismic Energy Dissipation and Effect in Multistory RC Building with and without Fluid Viscous Dampers.", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(7), pp.2482-2485.
- [19] Jiao, X., Zhao, Y., and Ma, W. (2018), "Nonlinear dynamic characteristics of a micro-vibration fluid viscous damper", *Nonlinear Dynamics*, 92(3), pp.1167-1184.
- [20] Moradpour, S., and Dehestani, M. (2019), "Optimal DDBD procedure for designing steel structures with nonlinear fluid viscous dampers", *In Structures*, 22, pp.154-174.
- [۲۱] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، ویرایش پنجم، ۱۳۹۹، ص ۳۵۰-۳۵۱.
- [۲۲] دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه شماره ۳۶۰)، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۹۲.
- [۲۳] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بارهای وارد بر ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی، ویرایش چهارم، ۱۳۹۸.
- [24] FEMA P-695, (2009), Quantification of building seismic performance factors, Washington (DC): Federal Emergency Management Agency.

