

Seismic performance design of steel moment frames equipped with self-centering viscous dampers by considering life cycle cost

Shaghayegh Nazari¹, Abbas Ghasemi^{2*}, Iman Rafsanjani Asl³

1- MSc., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- MSc., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Earthquakes, as natural phenomena, can cause significant damage to structures and infrastructure, a longstanding concern in civil engineering. Engineers continually strive to improve methods for identifying vulnerable buildings and, when necessary, repairing or retrofitting them. Recent devastating seismic events worldwide have highlighted that insufficient structural performance can lead to excessive structural damage. This research aims to optimize the performance-based seismic design of steel moment-resisting frames equipped with self-centering viscous dampers. To achieve this, 3, 6, and 15-story frames, both retrofitted with and without viscous dampers, were designed. The seismic performance of these six two-dimensional frames was analyzed using OpenSees software, including pushover static analysis, time-history dynamic analysis, and incremental dynamic analysis, resulting in fragility curves for each frame. The study found that frames with dampers outperformed those without significantly. Additionally, life-cycle costs over 50 and 90 years at various performance levels Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP) were calculated. For the 3-story frame, maintenance costs increased by 10.90%, 18.42%, and 13.12%, respectively. For the 6-story frame, costs rose by 19.50%, 10.90%, and 1.05%. For the 15-story frame, the increases were 12.53%, 26.83%, and 7.41%. In conclusion, structures with viscous dampers demonstrate better performance at a higher cost, justifying their inclusion in seismic design for enhanced structural resilience and longevity.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 June 2024

Revise Date: 21 August 2024

Accept Date: 14 September 2024

Keywords:

Seismic Design
Steel Moment Frame
Performance-Based Design
Viscous Damper
Self-Centering
Life Cycle Cost Analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.462924.3442](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.462924.3442)

*Corresponding author: Abbas Ghasemi.
Email address: abb.ghasemi@iauctb.ac.ir

طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد بهینه قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگرهای

ویسکوز خودمرکزگرا با در نظر گرفتن هزینه چرخه عمر

شقایق نظری^۱، عباس قاسمی^{۲*}، ایمان رفسنجانی اصل^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد، دانشکده عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

چکیده

زمین‌لرزه‌ها از جمله حوادث طبیعی هستند که می‌توانند به سازه‌ها و زیرساخت‌ها خسارت‌های جدی وارد کنند و این مسئله از دیرباز یکی از دغدغه‌های اصلی در حوزه مهندسی عمران بوده است. مهندسان به طور مستمر در تلاش‌اند تا روش‌های شناسایی ساختمان‌های آسیب‌پذیر را بهبود بخشیده و در صورت لزوم آن‌ها را تعمیر یا بازسازی کنند. خطرات لرزه‌ای ویرانگر اخیر در سراسر جهان، نشان داده‌اند که عملکرد ساختاری ناکافی ساختمان‌ها ممکن است منجر به میزان بیش از حد آسیب سازه شود. هدف این پژوهش، طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد بهینه قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگرهای لزج خودمرکزگرا بوده که به این منظور، قاب‌های ۳ و ۶ و ۱۵ طبقه مقاوم‌سازی شده با میراگر ویسکوز و بدون میراگر طراحی و سپس با استفاده از نرم‌افزار *OpenSees*، بررسی عملکرد لرزه‌ای این ۶ قاب دوبعدی با انجام تحلیل استاتیکی بار افزون و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی و تحلیل دینامیکی فزاینده انجام شده و منحنی شکنندگی هر قاب به دست آمد. در نهایت هزینه چرخه عمر قاب‌های دارای میراگر در دوره ۵۰ و ۹۰ ساله در سطوح مختلف عملکردی محاسبه شد. بررسی انجام شده نشان داد سازه‌های دارای میراگر در مقایسه با سازه‌های فاقد چنین سیستم‌هایی، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. همچنین برآورد شد که هزینه‌های تعمیر و نگهداری برای دوره‌های ۵۰ و ۹۰ ساله در سطح قابلیت استفاده بی‌وقفه (*IO*)، ایمنی جانی (*LS*)، و آستانه فروریزش (*CP*) به ترتیب در قاب ۳ طبقه برابر ۱۰/۹۰، ۱۸/۴۲ و ۱۳/۱۲ درصد، ۶ طبقه برابر ۱۹/۵۰، ۱۰/۹۰ و ۱/۰۵ درصد و در قاب ۱۵ طبقه برابر ۱۲/۵۳، ۲۶/۸۳ و ۷/۴۱ درصد افزایش داشته است.

کلمات کلیدی: طراحی لرزه‌ای، قاب خمشی فولادی، طراحی بر اساس عملکرد، میراگر ویسکوز، خودمرکزگرایی، تحلیل هزینه چرخه عمر.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2024.462924.3442	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۲۴	۱۴۰۳/۰۶/۲۴	۱۴۰۳/۰۵/۳۱	۱۴۰۳/۰۳/۳۱
			عباس قاسمی		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:
			abb.ghasemi@iauctb.ac.ir		

۱- مقدمه

امروزه، اهمیت طراحی ساختمان‌ها و سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به یکی از دغدغه‌های اصلی در حوزه مهندسی عمران بدل شده است. در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، هدف اصلی این است که ساختمان‌ها به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند در برابر لرزش‌های ناشی از زلزله مقاومت کنند و عملکرد مناسبی داشته باشند. این قوانین با تعیین پارامترهای خاص، می‌کوشند تا ساختمان‌ها را به گونه‌ای بسازند که حتی در طول دوران بهره‌برداری خود، در مقابل زلزله‌های احتمالی مقاوم باشند. در سال‌های اخیر، توجه زیادی به روش‌های طراحی مبتنی بر عملکرد شده است که هدف آن بهبود کارایی ساختمان‌های جدید و به‌روزرسانی سیستم‌های قدیمی است. این روش‌ها نه تنها بر اساس هزینه‌های اولیه ساخت‌وساز، بلکه با در نظر گرفتن خسارات احتمالی در آینده، اقتصادی بودن ساختمان‌ها را نیز ارزیابی می‌کنند. در مهندسی زلزله، طراحی بر اساس عملکرد نقش مهمی در ارزیابی خسارت‌های وارده به سازه‌ها دارد. این ارزیابی می‌تواند با استفاده از نتایج تحلیل‌های لرزه‌ای و احتمالاتی انجام شود که بر اساس دستورالعمل‌های FEMA p-58 تدوین شده‌اند [۱].

شولینگ^۱ و سایر پژوهشگران، به بررسی جامع مزایای چرخه عمری سیستم‌های سازه‌ای خودمرکزگرا با استفاده از روش ارزیابی هزینه چرخه عمری پرداختند. آن‌ها به بررسی عوامل مختلفی چون هزینه‌های اولیه مصالح جدید با قابلیت خودمرکزگرایی، ارزش دارایی‌های موجود در ساختمان، نرخ تخفیف در برآورد هزینه‌ها و میزان تغییر شکل باقی‌مانده در ساختمان پس از زلزله اشاره کردند. آن‌ها سه نوع ساختمان را با استفاده از فلزات مقاوم در برابر تغییرات حرارتی و سیستم‌های خودمرکزگرا طراحی کرده و به کمک مدل‌سازی خسارت هازوس^۲ که برای پیش‌بینی خسارات ناشی از زلزله به‌روز شده بود، به ارزیابی آن‌ها پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از سیستم‌های خودمرکزگرا به‌صورت جزئی، به‌جای استفاده کامل از آن‌ها، می‌تواند در طولانی‌مدت منجر به صرفه‌جویی بیشتر و فواید عملکردی بهتر شود. همچنین تأکید شده است که کاهش هزینه‌های اولیه مصالح و بهبود کنترل نوسانات ساختمان می‌تواند در بهبود عملکرد چرخه عمر سازه‌های خودمرکزگرا و گسترش استفاده عملی از آن‌ها نقش مؤثری داشته باشد [۲-۵].

یان^۳ در ۲۰۲۴، روش جدیدی برای طراحی نوعی میراگر ویسکوز که قابلیت بازگشت به حالت اولیه را دارند، ارائه شده است. این فناوری بر اساس اصول طراحی مدرن که تمرکز بر عملکرد پلاستیک دارد، پایه‌گذاری شده و هدف از آن، افزایش مقاومت ساختمان‌ها در برابر زلزله‌ها است. بر اساس مطالعات صورت‌گرفته، استفاده از این میراگرها می‌تواند به کاهش چشمگیر تغییرات شکل دائم و موقت در ساختمان‌ها کمک کند و همچنین باعث کاهش شدید شتاب‌های وارده به ساختمان در زمان وقوع زلزله شود [۶]. علاوه بر این یک مدل جدید از دمپرهای لغزشی معرفی شده است که قابلیت بازگشت به حالت اولیه را دارا است. این فناوری پیشرفته می‌تواند به چالش‌های رایج در سیستم‌های ضد زلزله کنونی پاسخ دهد و مقاومت و انعطاف‌پذیری بناها را در برابر نیروهای ناشی از زمین‌لرزه‌ها تقویت کند. به‌کارگیری این نوع دمپرها در طراحی ساختمان‌ها، کارآمدی آن‌ها را افزایش داده و به مهندسين کمک می‌کند تا نتایج مطلوب‌تری در فرایند طراحی به دست آورند [۷].

در تحقیقاتی که محمدی و سایر همکاران انجام داده‌اند، روشی نوآورانه برای کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌های فولادی چندطبقه در برابر زلزله ارائه شده است. این روش بر پایه توزیع مناسب و هوشمندانه میراگرها در سازه استوار است تا باعث شود تغییر شکل‌های وارده بر ساختمان به‌صورت یکنواخت پخش شود و در نتیجه، کمترین آسیب را به سازه وارد کند. این کار باهدف دستیابی به بهترین عملکرد ممکن در حین وقوع زلزله و کاهش وزن کلی ساختمان انجام‌گرفته است. مطالعات نشان داده‌اند که سازه‌های طراحی شده با این روش، مقاومت بالاتری در برابر لرزش‌های زمین دارند و به نحو اثربخشی از تمام توان مقاومتی خود استفاده می‌کنند. همچنین، این پژوهش به بررسی این موضوع پرداخته است که آیا استفاده از این روش جدید می‌تواند به طور قابل‌توجهی به کاهش خسارات ناشی از زلزله و افزایش کارایی ساختمان‌ها کمک کند یا خیر [۸-۱۲].

¹ Shuling

² HAZUS

³ Yan

در سال ۲۰۲۱، خلیلیان و همکارانش مطالعه‌ای را انجام دادند که در آن به دنبال تعیین یک سطح استاندارد برای خطرپذیری در طراحی ساختمان‌ها اداری تجاری بودند که باهدف کاهش هزینه‌های کلی زندگی چرخه‌ای ساختمان مطابقت داشت. آن‌ها در این پژوهش، عوامل مختلفی مانند فرسودگی ساختمان باگذشت زمان، طول عمر مفید ساختمان و تأثیر نرخ تنزیل اقتصادی را بر سطح بهینه خطرات ناشی از زلزله مورد بررسی قرار دادند. همچنین، در این تحقیق به بررسی عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی خسارات ناشی از زلزله با استفاده از روش FEMA-P-58 پرداخته شده است [۱۳].

موسلم^۴ و دیگر همکارانش، در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله، یک روش نوین در زمینه مهندسی زلزله با تمرکز بر عملکرد سازه‌ها پایه‌گذاری کردند. این روش جدید که با در نظر گرفتن احتمالات و عدم قطعیت‌های موجود در حرکات زمین و پاسخ‌های سازه‌ای به زلزله‌ها، آسیب‌ها و خسارات احتمالی را پیش‌بینی می‌کند، به تدریج جایگاه خود را در بین روش‌های طراحی سازه‌ها باز کرده است. به همین دلیل، فدراسیون بین‌المللی بتن سازه‌ای تصمیم به تشکیل گروه کاری برای گسترش استفاده از این روش‌ها گرفت. مقاله‌ای که موسلم و همکاران منتشر کرده‌اند، به این گروه کاری کمک می‌کند تا روش توسعه‌یافته توسط مهندسی زلزله مبتنی بر عملکرد^۵ را به شکلی قابل فهم و کاربردی برای مهندسان عملیاتی تبیین نمایند [۱۴-۱۷].

در سایر تحقیق‌ها، زو^۶ و همکاران یک نوع جدید میراگر ویسکوز با قابلیت خودمركزگرایی، معرفی کرده‌اند. این میراگر دارای بخشی است که از قبل فشار داده شده تا توانایی بازگشت به حالت اولیه را داشته باشد و همچنین بخش دیگری برای جذب انرژی در آن تعبیه شده است. آزمایش‌های متعددی روی نمونه‌های واقعی این میراگر انجام شده که شامل بارگذاری‌های معکوس و تکراری بوده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که این میراگر علاوه بر توانایی بازگشت به مرکز، واکنش‌های وابسته به جابه‌جایی و سرعت را نیز از خود نشان می‌دهد و در برابر فرسودگی مقاوم است. برای درک بهتر عملکرد آن، مدل‌های تحلیلی و عددی توسعه‌یافته و مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی داشته و صحت آن‌ها را تأیید می‌کند. [۱۸-۲۲].

همچنین زو در این مقاله به معرفی یک سیستم نوآورانه برای تقویت سازه‌های فلزی در برابر زلزله می‌پردازد که با استفاده از عناصر دمپینگ اصطکاکی خودمركزگرا^۷ مجهز شده‌اند. این سیستم، از مواد پیشرفته‌ای چون سیم‌های نیتی نول فوق الاستیک بهره می‌برد تا انرژی حاصل از زلزله را به شکل مؤثرتری جذب کند. همچنین در مقایسه با روش‌های سنتی، قابلیت‌های برجسته‌ای دارد، از جمله توانایی کاهش قابل توجه آسیب‌های دائمی پس از زلزله و استقامت در برابر چندین لرزه بدون نیاز به تعمیر یا تعویض. این مطالعه، ابتدا به تشریح ویژگی‌های فنی پرداخته است و سپس با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی غیرخطی، عملکرد آن در مقایسه با سیستم‌های تقویت شده با مقاومت به انبساط^۸ بررسی شده است. این بررسی بر روی دو نمونه ساختمان فلزی با تعداد طبقات مختلف و با در نظر گرفتن دو نوع حرکت زمین ناشی از زلزله که برای منطقه لس‌آنجلس شناخته شده هستند، صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که این سیستم می‌تواند عملکرد مشابهی به سیستم تقویت شده با مقاومت به انبساط داشته باشد، با این تفاوت که آسیب‌های باقی‌مانده به شدت کمتر است؛ بنابراین، این سیستم جدید می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای بهبود قابلیت خود مرکز شدن سازه‌ها در نظر گرفته شود [۲۳].

در دیگر پژوهش‌های انجام شده، به بررسی سیستم جدید بریسینگ الماسی با استفاده از دمپر فشاری دایره‌ای پرداخته شده است که به منظور بهبود انعطاف‌پذیری، جذب انرژی و پوشش نقاط ضعف سیستم‌های معمولی طراحی شده است. یک نمونه آزمایشی با اتصالات محوری و زاویه ۱۵.۶ درجه تهیه شده و به پروتکل بارگذاری ATC-24 تحت آزمایش قرار گرفت که نتایج تجربی آن با شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS تطابق خوبی داشت. این سیستم با استفاده از حلقه فولادی به عنوان دمپر، ظرفیت جذب انرژی بیشتری نسبت به بریسینگ‌های هم‌محور دارد و می‌تواند بارهای تولید شده را به طور متوازن در تمام اجزای آن توزیع کند. همچنین، با

⁴ Mosalam

⁵ PEER

⁶ Zhu

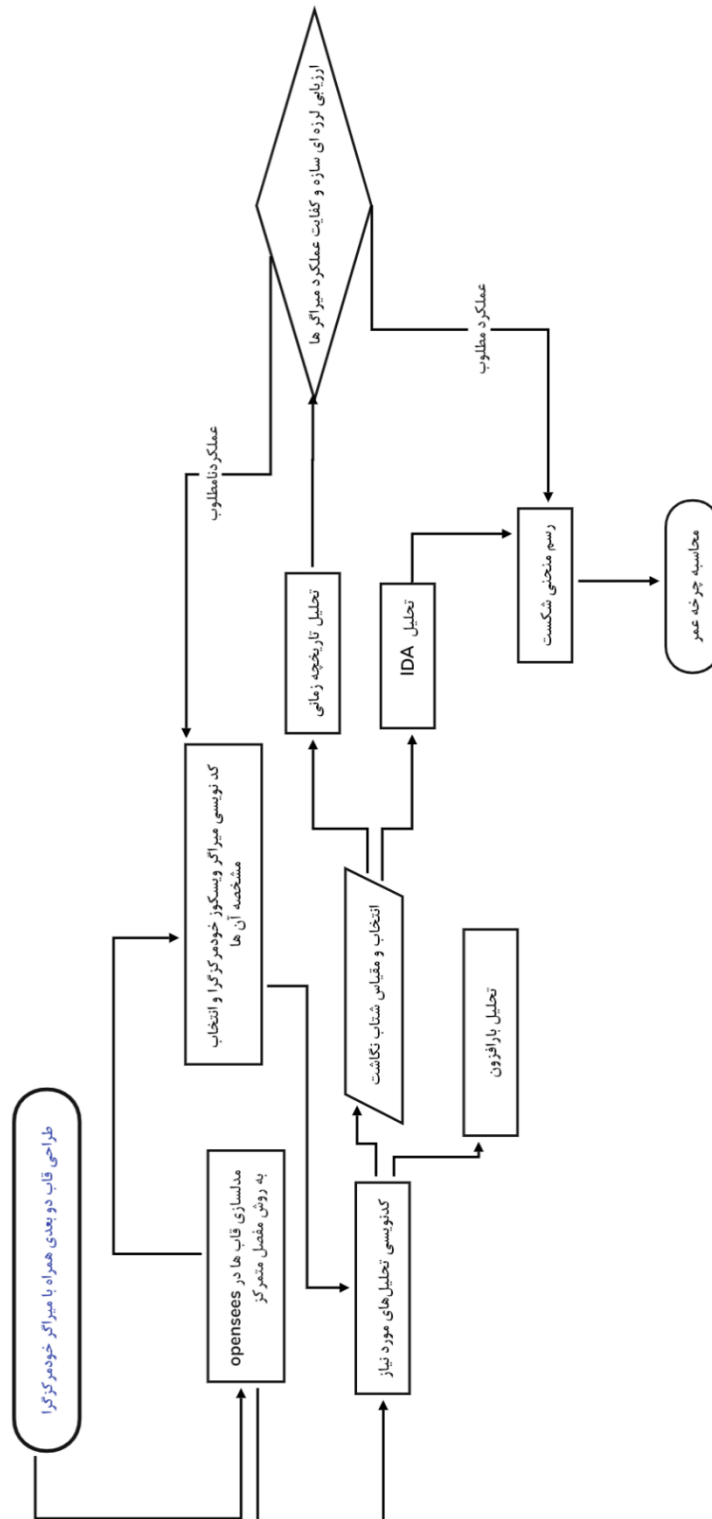
⁷ SFDB

⁸ BRB

افزایش ضخامت حلقه، ظرفیت سیستم به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و ظرفیت جذب انرژی آن نسبت به بریسینگ های معمولی به میزان ۴۵٪ بیشتر است [۲۴-۲۶].

در مطالعه حاضر، سعی می‌گردد روشی برای طراحی بهینه‌سازی لرزه‌ای قاب‌های فولادی خمشی که به میراگرهای ویسکوز خودمركزگرا مجهز شده‌اند، به منظور کاهش حداقلی آسیب‌ها و هزینه‌های چرخه عمر ارائه گردد که اثربخشی آن در رسیدن به بهترین راهکار طراحی با استفاده از تعداد محدودی تحلیل، با طراحی بهینه‌سازی شده قاب‌های ۳، ۶ و ۱۵ طبقه مورد اثبات قرار می‌گیرد. روند انجام کار در قالب یک فوجارت در شکل ۱ نشان داده شده است.





شکل ۱: روند انجام کار پژوهش

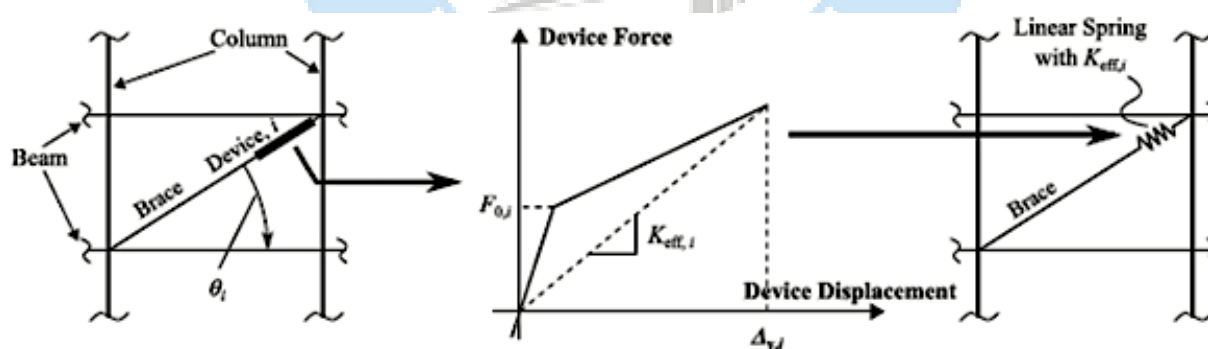
۲- میراگر ویسکوز خودمرکزگرا

در قرن نوزدهم، برای اولین بار میراگرهای ویسکوز به کار گرفته شدند تا تأثیر ضربات وارده به کشتی‌ها را کاهش دهند. با گذشت زمان وارد حوزه‌های مختلف دیگری نیز شد. به عنوان مثال، در صنعت هوافضا برای کمک به پایداری موشک‌ها هنگام پرتاب و همچنین در کاربردهای نظامی به کار رفت. با آغاز قرن بیستم، صنعت خودرو نیز از این تکنولوژی برای بهبود عملکرد خودروها استفاده کرد. در نهایت، پژوهش‌هایی که در دانشگاه بوفالو صورت گرفت، زمینه‌ساز استفاده از میراگرهای ویسکوز در مقاوم‌سازی ساختمان‌ها شد [۲۷]. جزئیات یک میراگر ویسکوز در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: جزئیات و بخش‌های یک میراگر ویسکوز

در تحقیقی که دانشگاه بوفالو^۹ انجام داده، اثربخشی میراگرهای ویسکوز دارای خاصیت خودمرکزگرایی^{۱۰} در سازه‌های ساختمانی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه نشان داد که استفاده از این فناوری در ساختمان‌سازی می‌تواند به شکل چشمگیری از میزان جابه‌جایی‌های دائمی ناشی از نیروهای جانبی بکاهد و همچنین باعث کاهش انحرافات، شتاب‌های زلزله و نیروهای خمشی در ساختمان شود. در نتیجه، ساختمان‌های مجهز به این میراگرها عملکرد بهتری در برابر نیروهای لرزه‌ای دارند و مقاومت بیشتری در برابر آسیب‌های احتمالی نشان می‌دهند. در این مطالعه المان قطری ترکیبی از مهاربند و میراگر در نظر گرفته شده که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایش گرافیکی نحوه مدلسازی میراگرها

در تحقیقاتی که توسط MCEER انجام شده است، برای بررسی سیستم‌های تک درجه آزادی که از دستگاه‌های خودمرکزگرایی سیال استفاده می‌کنند، از روش‌های ساده‌سازی شده‌ای بهره گرفته شده است. این روش‌ها بر اساس استاندارد ASCE 7-2010 و مشابه با روش‌هایی که برای سیستم‌های دارای میراگر به کار می‌رود، طراحی شده‌اند. روش‌ها و تحلیل‌های بررسی سیستم‌های خمشی که میراگرهای ویسکوز به آن‌ها افزوده شده‌اند، بر پایه تحقیقات انجام شده توسط رامیرز^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۰۱، مورد تجزیه و تحلیل قرار

⁹ University at Buffalo (North Campus) - MCEER

¹⁰ Self Centering

¹¹ Ramirez

می‌گیرد. رامیرز یک ضریب اصلاح سرعت (CFV) برای سیستم‌های خمشی با میراگرهای لزج معرفی کرده که به منظور محاسبه سرعت مؤثر استفاده می‌شود. این ضریب برای نسبت‌های مختلف میرایی و دوره‌های زمانی متفاوت تعیین شده است. او معادلاتی برای محاسبه ضریب اصلاح سرعت و حداکثر شتاب ارائه داده که شامل عواملی مانند دوره مؤثر و نسبت میرایی مؤثر است و در رابطه (۱) و (۲) آمده است. همچنین، پارامتر B برای محاسبه نسبت میرایی مؤثر به کار می‌رود و مقادیر مختلف آن برای نسبت‌های مختلف میرایی بحرانی تعیین شده است [۲۸].

$$T_{eff} = 2\pi \left(\frac{D}{A + A_{min} + A_0 + \frac{K_0 D}{m}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\beta_{eff} = \beta_i \left(\frac{A}{A + A_{min} + A_0 + \frac{K_0 D}{m}} \right)^{\frac{1}{2}} + \beta_v \left(\frac{T_{eff}}{T_e} \right)^{2-a} + \frac{2q_H (A_y D - A D_y) + 2A_{min} (D - Y)}{\pi (A + A_{min} + A_0 + \frac{K_0 D}{m}) D} \quad (2)$$

نکته قابل توجه این است که در لحظه‌ای که سیستم (شامل سیستم اصلی و دستگاه خودمرکزگرا سیال اضافه شده) به بیشترین میزان جابه‌جایی D می‌رسد، مقدار $A + A_{min} + A_0 + \frac{K_0 D}{m}$ شتاب آن سیستم است. همچنین، m نشان‌دهنده جرم است و مقدار A از رابطه (۳) و (۴) محاسبه می‌شود.

$$A = \begin{cases} A_y \times \frac{D}{D_y} & (D \leq D_y) \\ A_y + \alpha \frac{A_y}{D_y} (D - D_y) & (D \geq D_y) \end{cases} \quad (3)$$

$$D_y = \frac{S_{ae} T_e^2}{4\pi^2 R_\mu} \quad (4)$$

در رابطه (۲)، β_i نسبت میرایی ذاتی سیستم سازه اولیه است که در شرایط الاستیک یا غیرالاستیک برابر با ۰.۰۵ قرار گرفته است. و β_v که از رابطه (۵) محاسبه می‌شود؛ نسبت میرایی ویسکوز افزوده شده (خطی وقتی که $a = 1$ باشد) است. همچنین میرایی ذاتی در سیستم ترکیبی (عبارت اول در رابطه ۲) به دلیل افزایش سختی تحت شرایط الاستیک کاهش یافته است. در رابطه (۲)، بخش سوم شامل تأثیرات سیستم سازه‌ای اولیه که تحت تسلیم قرار گرفته و همچنین اثرات اصطکاک سیل از دستگاه سیالیک است. وقتی سیستم دارای رفتار هیستریزیس دوخطی کامل باشد، فاکتور q_H برابر با ۱.۰ می‌شود. این فاکتور که به عنوان فاکتور تنظیم حلقه هیستریزیس شناخته می‌شود، برای کاهش مساحت زیر منحنی هیستریزیس دوخطی کامل به منظور نمایش بهتر رفتار واقعی سیستم‌های سازه‌ای استفاده می‌شود. T_s دوره‌ای است که در آن نواحی طیف پاسخ با شتاب ثابت و سرعت ثابت تلاقی می‌کنند و به صورت نسبت $\frac{SM1}{SM2}$ به ثانیه بیان می‌شود.

بر اساس استاندارد ASCE 7-2010، مقدار q_H که در رابطه (۶) آمده است؛ نباید بیشتر از ۱.۰ و کمتر از ۰.۵ باشد. در این مطالعه، به دلیل اینکه سیستم مورد بررسی دارای هیستریزیس دوخطی کامل است، مقدار q_H برابر با ۱.۰ در نظر گرفته شده است.

$$\beta_V = \frac{C_D T_e}{4\pi m} \quad (5)$$

$$q_H = 0.67 \frac{T_s}{T_e} \quad (6)$$

برای محاسبه شتاب طیفی در شرایطی که میرایی مؤثر با ۵ درصد تفاوت دارد، نیاز به یک پارامتر اضافی است. این پارامتر طبق روش استاندارد ASCE 7-2010 تعیین می‌شود. در این روش، شتاب طیفی با میرایی ۵ درصد بر پارامتر میرایی B تقسیم می‌شود که در رابطه (۷) آورده شده است. همچنین پارامتر B در جدول ۲ ارائه شده است. علاوه بر این، در تحلیل باید مقادیر حداکثر سرعت و شتاب مشخص شوند. برای محاسبه حداکثر سرعت، از شبه‌سرعت استفاده می‌شود که با ضرب در ضریب تصحیح CFV طبق رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$S_{ae}(T_{eff}, \beta_{eff}) = \frac{S_{ae}(T_{eff}, \beta = 0.05)}{B} \quad (7)$$

$$V_{max} = \frac{2\pi}{T_{eff}} \times D \times CFV \quad (8)$$

جدول ۱: ضریب تصحیح سرعت CFV به ازای رامیرز [۲۵]

دوره تناوب مؤثر (S)	نسبت میرایی مؤثر									
	۱	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱
۰/۳	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۶	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷	۰/۷۲
۰/۵	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۵
۱	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۸۲
۱/۵	۱/۲	۱/۱۷	۱/۱۴	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۰۵	۱/۰۴	۱	۰/۹۸	۰/۹۵
۲	۱/۴۱	۱/۳۸	۱/۳۴	۱/۳	۱/۲۷	۱/۲۳	۱/۱۹	۱/۱۶	۱/۱۲	۱/۰۸
۲/۵	۱/۵۹	۱/۵۴	۱/۴۸	۱/۴۲	۱/۳۶	۱/۳	۱/۲۴	۱/۱۷	۱/۱۱	۱/۰۵
۳	۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۵۸	۱/۵	۱/۴۲	۱/۳۳	۱/۲۵	۱/۱۷	۱/۰۸	۱
۳/۵	۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۶	۱/۵۲	۱/۴۵	۱/۳۷	۱/۳	۱/۲۲	۱/۱۵	۱/۰۹
۴	۱/۸۱	۱/۸۱	۱/۷	۱/۶	۱/۴۹	۱/۳۸	۱/۲۴	۱/۱۵	۱/۰۵	۰/۹۵

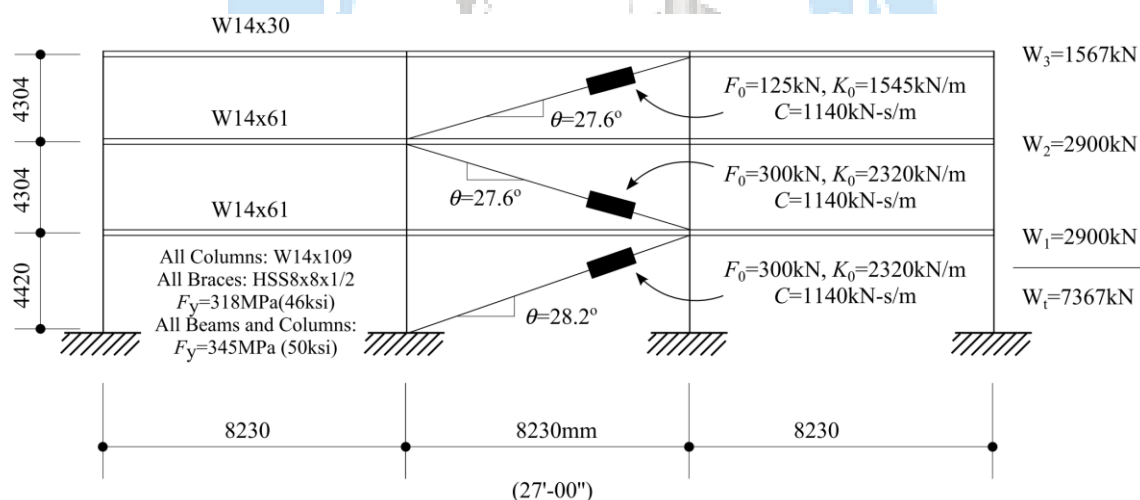
جدول ۲: پارامتر میرایی B

میرایی مؤثر (% بحرانی)	B
۲ یا کمتر	۰/۸

۵	۱
۱۰	۱/۲
۲۰	۱/۵
۳۰	۱/۸
۴۰	۲/۱
۵۰	۲/۴
۶۰	۲/۷
۷۰	۳
۸۰	۳/۳
۹۰	۳/۶
۱۰۰ یا بیشتر	۴

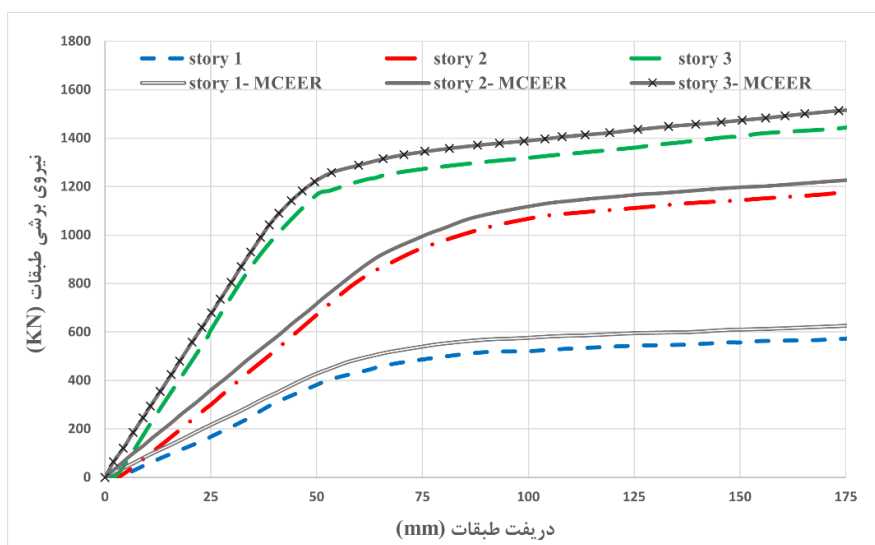
۲- صحت سنجی

اهمیت دادن به صحت و دقت کدهای نرم‌افزاری، مانند OpenSees، بسیار ضروری است. وقتی که یک کد نرم‌افزاری قابل اعتماد و دقیق طراحی شود، می‌توان با اطمینان بیشتری به نتایج حاصل از آن تکیه کرد. برای انجام این کار از گزارش توسعه و ارزیابی روش‌های تحلیل و طراحی ساختمان‌ها با سیستم‌های ویسکوز خودمرکزی^{۱۲} [۲۷] استفاده گردید. یک قاب ۳ طبقه دارای میراگر در دهانه وسط از این گزارش مطابق شکل ۴ انتخاب و مدل‌سازی شد و نمودار پوش‌آور هر طبقه ترسیم شد. در شکل ۵ و جدول ۳، نمودار پوش‌آور هر طبقه (دریفت طبقات) با نمودار گزارش MCEER مقایسه شده است. این مقایسه نشان داد که تفاوت‌های بسیار کمی بین آنها وجود دارد که به دلیل جزئیات متعدد در مدل‌سازی، طبیعی است؛ بنابراین، می‌توان گفت نتایج حاصل از نمودارهای پوش‌آور، دلالت بر صحت و عدم وجود خطا در اساس مدل‌سازی دارد.



شکل ۴: مقاطع و مشخصات مدل استفاده شده در صحت‌سنجی

¹² Development and Evaluation of Procedures for Analysis and Design of Buildings with Fluidic Self-Centering Systems



شکل ۵: مقایسه دررفت هر طبقه حاصل از مدلسازی با نمودار گزارش

جدول ۱: مقایسه دررفت هر طبقه حاصل از مدلسازی با گزارش MCEER

عملکرد قاب	شماره طبقه	نیروی برشی (KN)	دررفت طبقه (mm)	نیروی برشی (KN)	دررفت طبقه (mm)	نیروی برشی (KN)	دررفت طبقه (mm)
مدلسازی شده	۱	۲۶۰	۳۶	۵۶۰	۱۵۵	۵۸۲	۱۸۸
MCEER			۳۱		۸۹		۱۰۶
مدلسازی شده	۲	۴۲۰	۳۳	۱۱۵۰	۱۵۵	۱۲۰۰	۲۰۰
MCEER			۲۹		۱۱۵		۱۵۶
مدلسازی شده	۳	۹۹۰	۴۰	۱۱۸۰	۱۸۸	۱۴۰۵	۱۴۷
MCEER			۳۷		۱۳۷		۱۰۸

۳- عدم قطعیت

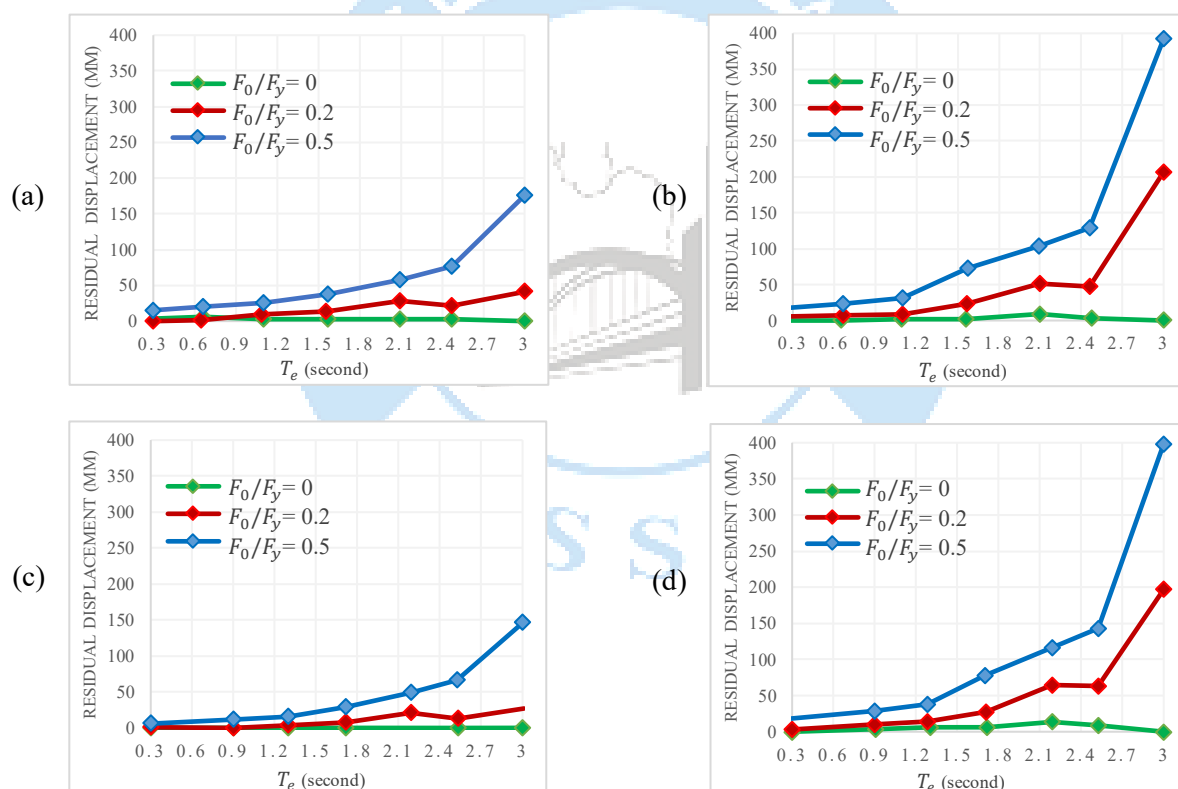
برای بررسی عدم قطعیت‌های موجود از پارامترهای مهمی چون نیروی پیش بارگذاری که قبل از اعمال بارهای خارجی به سازه وارد می‌شود (F_0) و نیروی مقاومت نهایی سازه هنگام رسیدن به حالت تسلیم (F_y) استفاده شده است. همچنین سطوح مختلفی از زلزله از جمله سطح زلزله طراحی^{۱۳} و سطح زلزله بیشینه^{۱۴} در این بحث در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی عدم قطعیت‌ها در این پژوهش،

¹³ Design Earthquake Level (DE)

¹⁴ Maximum Considered Earthquake Level (MCE)

در سطوح مختلف زلزله و رفتار خطی^{۱۵} و غیرخطی^{۱۶} به بررسی نسبت‌های عدم قطعیت‌های نیروی اولیه (پیش بارگذاری) و مقاوت نهایی سازه پرداخته شده و نسبت پاسخ‌های ماندگار نسبت به پیوندهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

با توجه به اینکه مبنای اصلی در این پژوهش پاسخ‌های ماندگار هستند؛ حالت خطی برای ما اهمیت دارد. همانطور که در شکل ۶ مشخص است؛ برای نسبت F_0/F_y سه حالت در شرایط زلزله‌های پالس‌مانند و نزدیک به گسل، دوره بازگشت^{۱۷} ۲ سال و سه نوع میرایی مفید با $\beta_v = 0.1$ مقایسه شده است. در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که نسبت $F_0/F_y = 0$ منجر به تغییر شکل‌های باقی‌مانده نزدیک به صفر می‌شود که به معنای بازگشت کامل سازه به حالت اولیه پس از زلزله است. این نسبت مناسب برای سازه‌هایی است که نیاز به حداقل تغییر شکل دائمی دارند. نسبت $F_0/F_y = 0.2$ تعادلی میان کاهش تغییر شکل‌های باقی‌مانده و کنترل هزینه‌های پیش‌بارگذاری برقرار می‌کند. این نسبت، تغییر شکل‌های باقی‌مانده کم در سطح DE و تغییر شکل‌های قابل قبول در سطح MCE ایجاد می‌کند. نسبت $F_0/F_y = 0.5$ بیشترین تغییر شکل‌های باقی‌مانده را ایجاد می‌کند و نشان می‌دهد که عدم وجود پیش‌بارگذاری می‌تواند به تغییر شکل‌های دائمی بیشتری در سازه منجر شود. نتایج انتخاب شده در این بخش حالتی با نسبت پیش‌بارگذاری به مقاومت ۰.۲ است. این انتخاب بر اساس قابل قبول بودن مقدار پیش‌بارگذاری منجر به تغییر شکل‌های باقی‌مانده است.



شکل ۶: اثر پیش‌بارگذاری بر تغییر شکل باقی‌مانده در حرکت‌های پالس‌مانند و نزدیک به گسل برای نسبت پیش‌بارگذاری $RP = 2$ و سه نوع میرایی مفید با $\beta_v = 0.1$ در حالت (a) خطی در سطح زلزله طراحی (b) خطی در سطح زلزله بیشینه (c) غیرخطی در سطح زلزله طراحی (d) غیرخطی در سطح زلزله بیشینه

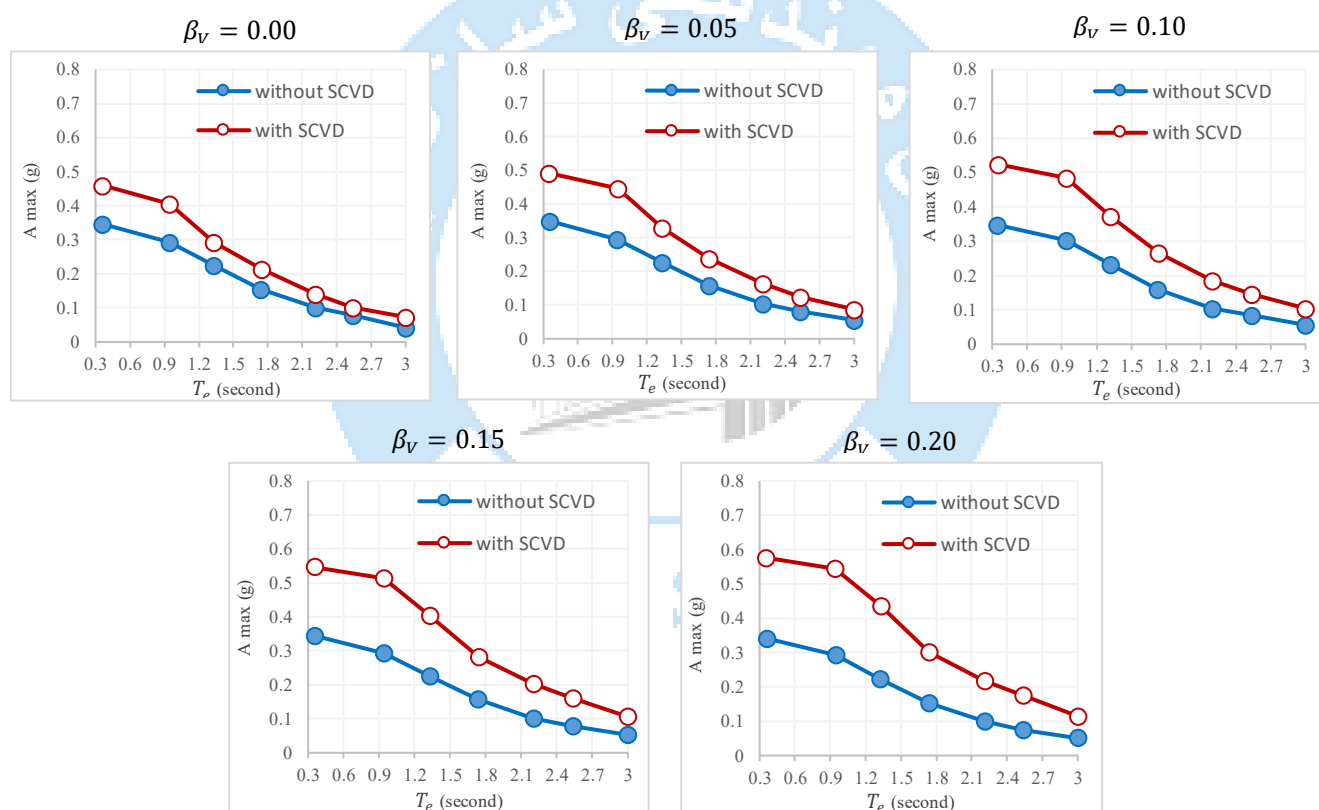
¹⁵ Linear

¹⁶ Non-linear

¹⁷ Return Period (RP)

۴- آنالیز حساسیت

برای انجام آنالیز حساسیت که شامل تغییر دادن پارامترهای کلیدی و مشاهده تأثیرات حاصل بر شاخص‌های عملکرد سازه است؛ بر اساس رابطه شماره (۵) مقاله که پارامتر β_V که نسبت میرایی ویسکوز افزوده شده (خطی وقتی که $a = 1$ باشد) است و در به دست آوردن نسبت میرایی مؤثر (β_{eff}) در رابطه (۲) کاربرد دارد، به عنوان پارامتر انتخابی برای آنالیز حساسیت در نظر گرفته شده است. به این منظور در یک سیستم تک درجه آزادی (SDOF) با مشخصات با $F_0/F_V = 0.5$ ، $R_\mu = 5$ و $K_0 = 0$ دارای حرکات پالس مانند نزدیک به گسل، به ازای β_V و T_e های مختلف و در نظر گرفتن دو حالت دارای سیستم خودمرکزگرایی^{۱۸} و فاقد سیستم خودمرکزگرایی^{۱۹}، مقدار شتاب حداکثری محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۷ ارائه شده است در حالتی که β_V برابر ۵ یا ۱۰ درصد می‌باشد تفاوت چشمگیری در حالت سیستم سازه‌ای دارای SCVD و فاقد SCVD مشاهده نمی‌شود اما در صورت افزایش مقدار β_V تا ۲ درصد، تفاوت بیشتری در این دو حالت دیده می‌شود. با توجه به اینکه در محاسبات انجام شده مقدار β_V برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده و همچنین با توجه به نتایج آنالیز حساسیت، نتایج نهایی پژوهش تغییرات چندانی ندارد.



شکل ۷: شتاب در سطح زلزله طراحی (DE)، حرکات پالس مانند نزدیک گسل، میرایی ویسکوز خطی و سختی $K_0 = 0$

¹⁸ With Self-Centering Viscous Damper (SCVD)

¹⁹ Without Self-Centering Viscous Damper (SCVD)

۵- روش تحقیق

در تحقیق انجام شده، سه قاب فولادی با ارتفاعات مختلف توسط نرم افزار ایتبس طراحی و مورد بررسی قرار گرفته اند و عملکرد آنها در هنگام وقوع زلزله ها مشخص شد. این سازه ها که به صورت قاب های خمشی فولادی مقاوم در برابر زلزله طراحی گردیده اند، دارای سه دهانه مساوی با طول ۸ متر بود. همچنین، تعداد طبقات در هر قاب به ترتیب ۳، ۶ و ۱۵ طبقه بود که به ترتیب ساختمان های کوتاه، میان و بلندمرتبه را نشان می داد. ارتفاع طبقه اول هر ساختمان ۴.۵ متر و بقیه طبقات ۳.۵ متر در نظر گرفته شد که در نهایت به ارتفاع های کلی ۱۱.۵، ۲۲ و ۵۳.۵ متر منجر شدند. برای تیرها و ستون ها از مقاطع فولادی پهن استفاده شده است. علاوه بر این، این سازه ها به منظور بهبود عملکرد لرزه ای خود، با میراگرهای ویسکوز خودمركزگرا در دهانه های میانی تجهیز شده بودند. مدل ها و جزئیات مقاطع در جدول ۴ و شکل ۸ ارائه شده است.

پارامترهای سازه ها شامل مدول الاستیک (E_s) و تنش تسلیم (F_y) به ترتیب برابر 2 N/m^2 و 354 N/m^2 در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب پواسون برابر ۰.۳ و ضریب میرایی برابر ۰.۰۵ تعیین گردیده بود. بارهای اعمال شده به طبقات شامل بار مرده 20 و بار زنده 21 برای طبقات و بام متفاوت در نظر گرفته شد. بار مرده بام و بار مرده طبقات به ترتیب برابر 4000 N و 5000 N ، و بار زنده بام و بار زنده طبقات برابر 3500 N در نظر گرفته شده بود. برای نصب میراگرهای ویسکوز در قاب ها، ابتدا در دهانه های وسط المان قطری قرار داده و بعد به دو قسمت مساوی تقسیم شدند و سپس میراگر در یک چهارم انتهایی هر بخش قرار گرفت. به طور معمول، دهانه های وسطی برای نصب این میراگرها انتخاب می شوند تا کارایی بیشتری داشته باشند. سختی سیستم موردنظر که در اصل سختی مهاربند بود که محاسبات آن بر اساس استانداردهای مطالعات انجام شده توسط دانشگاه بوفالو انجام شده است.

پس از آن، چارچوب دوبعدی هر سه قاب در حالات با و بدون استفاده از میراگرهای ویسکوز خودمركزگرا در محیط نرم افزار تحلیل سازه OpenSees تحت تأثیر زلزله های مختلف قرار گرفتند. هدف از این تحلیل، درک بهتر از نحوه عملکرد سازه ها با و بدون استفاده از این نوع میراگرها در هنگام وقوع زمین لرزه بود. در این پژوهش، روش مفصل متمرکز برای مدل سازی به کاررفته است. ابتدا یک فرایند دقیق برای مشخص کردن ویژگی های هندسی سازه ها طراحی شد. این فرایند شامل تعیین پارامترهای متعددی مانند درجات آزادی، محل اتصالات و گره ها، نوع مواد به کاررفته، اجزای سازه و نحوه توزیع بار بوده است. علاوه بر این، در ساختارهای مورد بررسی از فولاد Steel02 استفاده شد. برای مدل سازی میراگر ویسکوز خودمركزگرا، از عنصری با دو گره استفاده شده که در آن دو نوع متریال یک محوری به کاررفته است. به عبارت دیگر، متریال ویسکوز 22 و متریال خودمركزگرا 23 ، ترکیب شده اند. پس از انجام مدل سازی، خروجی هایی شامل ثبت کننده های دریافت، گره برای تعیین میزان برش پایه و المان که نیروها و تغییر شکل های المانی را ثبت می کند، تعریف شد؛ در نهایت تنظیمات مربوط به خروجی ها اعمال شد. در ادامه، به بررسی روش های تحلیلی مورد استفاده برای ارزیابی پایداری و عملکرد سازه ها در شرایط خاص، مانند زلزله، پرداخته شد. این تحلیل ها شامل روش بار افزون 24 و تحلیل های دینامیکی تاریخچه زمانی 25 و فزاینده 26 است که به منظور شبیه سازی واکنش سازه در برابر بارهای متغیر با زمان انجام می گیرد. در روش بار افزون که یک تحلیل استاتیکی است، از ضریب مقیاس استفاده شد تا بارهای جانبی به تدریج افزایش یابند و به این ترتیب، تغییر مکان موردنظر در سازه ایجاد شد. مقدار این تغییر مکان هدف برابر 0.1 متر در نظر گرفته شد و همچنین تحلیل سازه با گام های 0.01 افزایش می یافت.

20 Dead Load

21 Live Load

22 Viscous Material

23 Self Centering Material

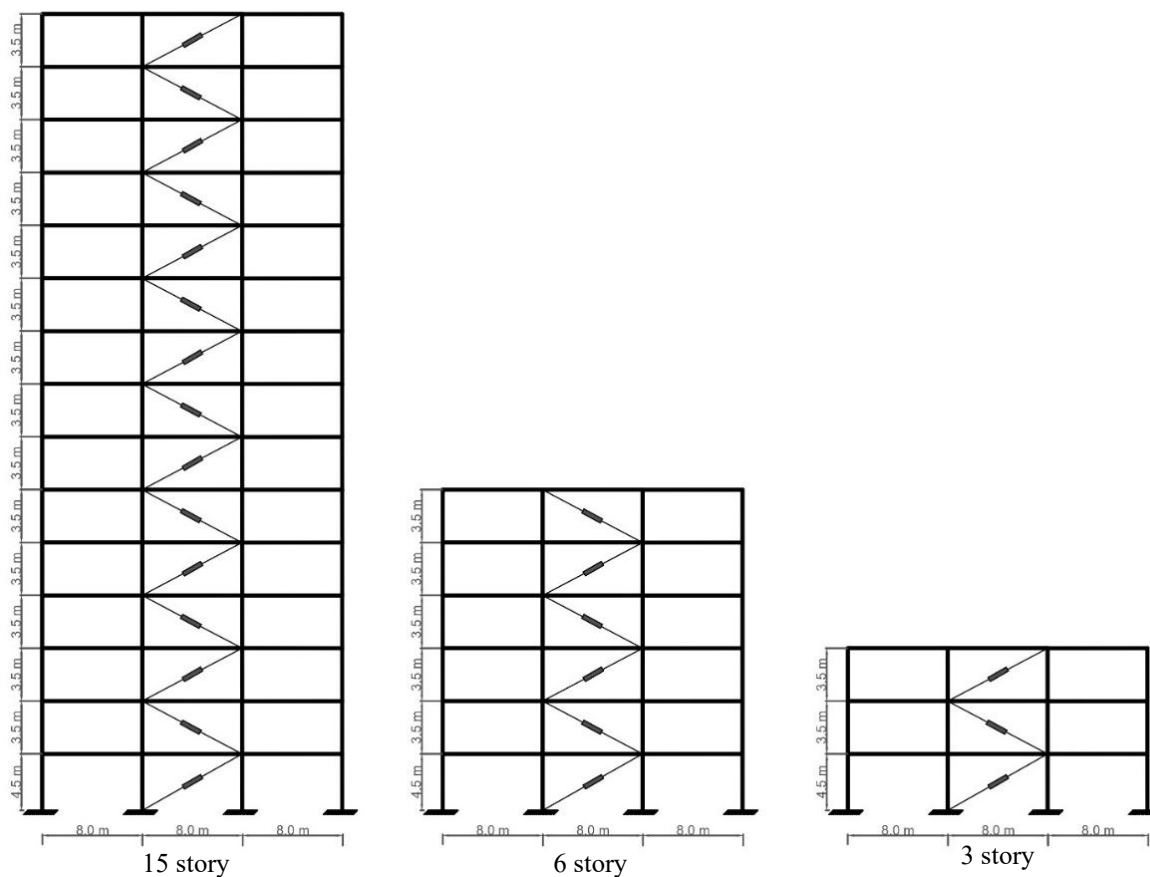
24 Pushover

25 Time history analysis

26 Incremental dynamic analysis

جدول ۴: مقاطع هر سه قاب مدلسازی شده

شماره طبقه	طبقه ۱۵		طبقه ۶		طبقه ۳	
	مقطع تیر (Beam)	مقطع ستون (Column)	مقطع تیر (Beam)	مقطع ستون (Column)	مقطع تیر (Beam)	مقطع ستون (Column)
اول	W27×94	W14×398	W24×68	W14×176	W14×61	W14×109
دوم	W27×94	W14×398	W24×68	W14×176	W14×61	W14×109
سوم	W27×94	W14×398	W21×68	W14×132	W14×30	W14×109
چهارم	W27×94	W14×342	W21×62	W14×132		
پنجم	W27×94	W14×342	W21×44	W14×90		
ششم	W27×94	W14×342	W16×31	W14×90		
هفتم	W27×94	W14×257				
هشتم	W27×94	W14×257				
نهم	W27×94	W14×257				
دهم	W27×94	W14×211				
یازدهم	W27×94	W14×211				
دوازدهم	W27×94	W14×211				
سیزدهم	W27×94	W14×109				
چهاردهم	W27×94	W14×109				
پانزدهم	W27×94	W14×109				



شکل ۸: مشخصات هندسی و نحوه قرارگیری میراگرهای ویسکوز در قابها

برای درک بهتر و دقیق تر از تأثیر زلزله‌ها بر سازه‌ها در تحلیل‌های دینامیکی، ۱۱ نمونه شتاب‌نگاشت مختلف استفاده شد. این کار به دلیل وجود تفاوت‌های بین هر زلزله و ناشناخته‌های موجود در رکوردهای زلزله صورت گرفت. در دنیای واقعی، هر زلزله منحصر به فرد بوده و می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر ساختار سازه‌ها داشته باشد؛ بنابراین، با اعمال چندین رکورد زلزله به مدل‌های سازه‌ای و تحلیل میانگین نتایج حاصل، می‌توان ارزیابی دقیق‌تری از توانایی واقعی ساختمان‌ها در مقابله با زلزله‌ها به دست آورد. در نهایت شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده توسط نرم‌افزار Seismomatch با انتخاب خاک نوع سوم اسکیل شدند. شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای تحلیل‌های دینامیکی

شماره شتاب‌نگاشت	نام شتاب‌نگاشت	PGA (g)	PGV (m/s)	Mw	R (km)
۱	RSN181_IMPVAL.L.H_H-E06140	۰/۴۴۷	۰/۶۷۰	۶/۷	۲۹
۲	RSN182_IMPVAL.L.H_H-E07140	۰/۳۴۰	۰/۵۱۷	۶/۷	۵۵
۳	RSN292_ITALY_A-STU000	۰/۲۲۶	۰/۳۷۰	۶	۱۳/۶
۵	RSN802_LOMAP_STG000	۰/۵۱۴	۰/۴۱۶	۶/۹	۱۴
۶	RSN821_ERZINCAN_ERZ-EW	۰/۴۹۶	۰/۷۸۱	۶/۷	۴/۳۸
۷	RSN828_CAPEMEND_PET000	۰/۵۹۱	۰/۴۹۳	۷/۲	۱۸/۷
۸	RSN879_LANDERS_LCN260	۰/۷۲۵	۱/۳۳۴	۷/۳	۱۵
۱۱	RSN1165_KOCAELI_IKT090	۰/۲۳۰	۰/۳۸۳	۷/۶	۹۰
۱۲	RSN1086_NORTHR_SYL090	۰/۶۰۵	۰/۷۷۵	۶/۷	۱۰
۱۳	RSN1605_DUZCE_DZC180	۰/۴۰۴	۰/۷۱۱	۷/۱	۳۰
۱۴	RSN1086_NORTHR_SYL360	۰/۸۴۳	۱/۲۹۳	۶/۷	۱۰

برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی از روش نیومارک^{۲۷} و برای تحلیل دینامیکی فراینده از روش هانت - فیل^{۲۸} استفاده شد که هر دو توسط نرم‌افزار OpenSees پشتیبانی می‌شوند. روش هانت فیل شامل سه مرحله Hunt، Bracket و Fill بود. در این روش، ابتدا یک شتاب (Sa) انتخاب و سپس Sa بعدی با گام‌های تصاعدی انتخاب شد. هدف مرحله Hunt یافتن سریع نقطه فروریزش است که از ۱۰٪ دریافت عبور کرده باشد. در این مرحله، دونقطه به دست آمد: یکی قبل از نقطه فروریزش (IMNonCollapse) و دیگری بعد از آن (IMCollapse). سپس مرحله Bracket آغاز شد که در آن یک سوم فاصله بین IMNonCollapse و IMCollapse در نظر گرفته شد و اگر قبل از نقطه فروریزش بود، به‌عنوان IMNonCollapse جدید در نظر گرفته شد. این فرایند تا رسیدن به نقطه فروریزش ادامه یافت و میزان ادامه آن به خطای مجازی (tolerance) بستگی داشت که از رابطه (۹) محاسبه و برابر ۵٪ در نظر گرفته شد. در نهایت، برای تکمیل نمودار IDA، مرحله Fill انجام شد که نقاط خالی بین نقاط قبلی پر شد.

$$IMCollapseTol = (IMCollapse - IMNonCollapse) / IMNonCollapse \quad (9)$$

به جز نمودارهای حاصل از انجام تحلیل‌های دینامیکی، از نتایج تحلیل IDA نمودار منحنی شکنندگی^{۲۹} نیز رسم شد. ابتدا شتاب‌های فروریزش (Sa) که منجر به فروپاشی سازه شدند، استخراج گردیدند. سپس با محاسبه لگاریتم طبیعی آنها، میانگین و انحراف معیار محاسبه شد و منحنی‌های شکست بر اساس توزیع لگاریتمی نرمال ترسیم شدند. این منحنی‌ها نشان‌دهنده احتمال فروپاشی سازه در شتاب‌های مختلف بودند.

27 Newmark Method

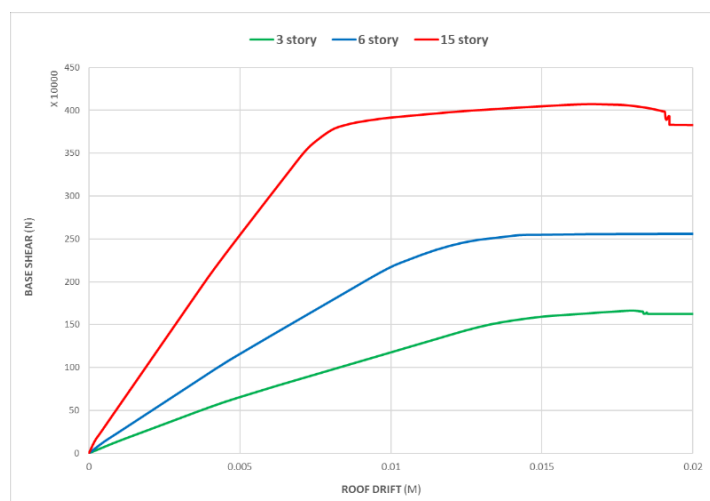
28 Hunt-Fill

29 Fragility Curve

۶- نتایج

۶-۱- نتایج تحلیل بار افزون

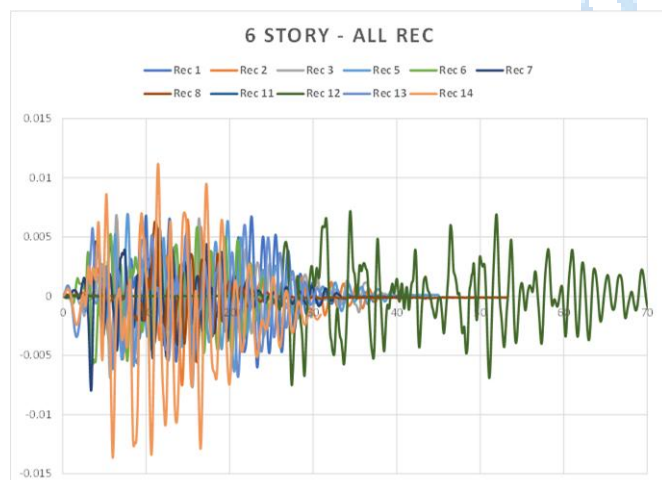
تحلیل بار افزون (Pushover) عمدتاً برای ارزیابی کلی عملکرد ساختارها به کار می‌رود تا مشخص شود آیا سازه به طور طبیعی عمل می‌کند یا نیازمند تغییرات است. بر اساس داده‌های حاصل از تحلیل استاتیکی Pushover، مشخص شد که قاب‌ها به صورت صحیح مدل‌سازی شدند و عملکرد آن‌ها کاملاً طبیعی بود. شکل ۹ نشان‌دهنده برش پایه 30° در سه سازه مختلف بر اساس تغییر مکان بام 31 است. همانطور که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش ارتفاع، تأثیرات ناشی از زلزله نیز شدیدتر شدند؛ که این امر منجر به افزایش تغییر شکل و جابجایی در سازه گردید.



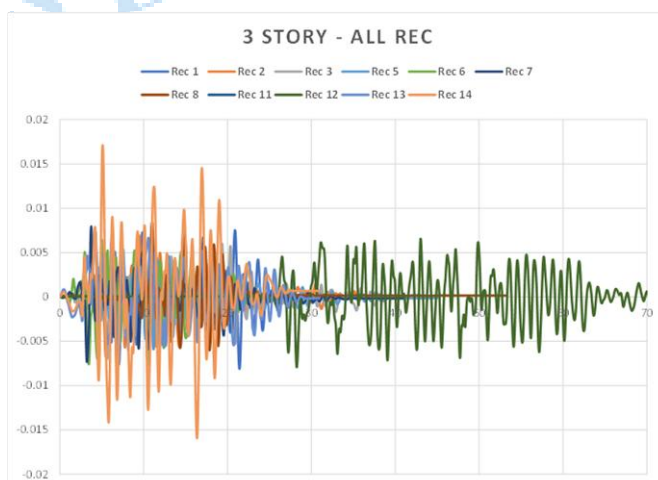
شکل ۹: نتایج حاصل از تحلیل Pushover برای قاب‌های ۳، ۶ و ۱۵ طبقه

۶-۲- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی

رکورد استفاده شده در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، بر روی هر سه قاب ۳، ۶ و ۱۵ طبقه به ترتیب در شکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ ارائه شده است. این نمودارها به بررسی و مقایسه تغییر مکان طبقه بام (Roof Drift) در زمان‌های مختلف (t) ثبت شده در رکوردها پرداخته است. زمانی که زلزله رخ می‌دهد، نیروهای ناشی از آن به صورت متفاوتی بر ساختمان‌های با ارتفاعات مختلف وارد می‌شوند. همانطور که در شکل ۱۳ نتیجه اعمال یکی از ۱۱ رکورد به نام IMPVALL، بر روی هر سه قاب نشان داده شده است؛ این تفاوت در توزیع نیروها و لحظات وارده، تأثیر قابل توجهی بر حرکت و پایداری قاب‌ها دارد.



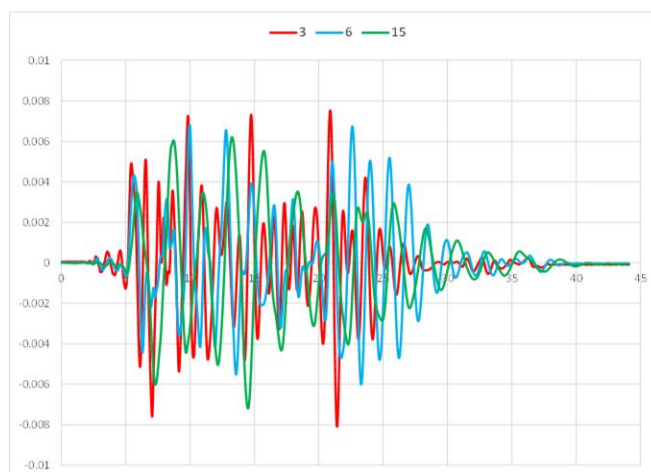
شکل ۱۱: یازده شتاب‌نگاشت اعمال شده به قاب ۶ طبقه



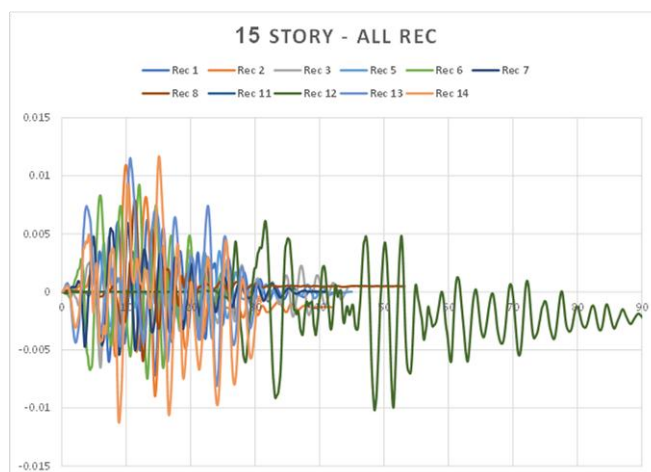
شکل ۱۰: یازده شتاب‌نگاشت اعمال شده به قاب ۳

30 Base Shear

31 Roof Drift



شکل ۱۳: نتایج حاصل از اعمال رکورد IMPVALL بر روی هر سه قاب

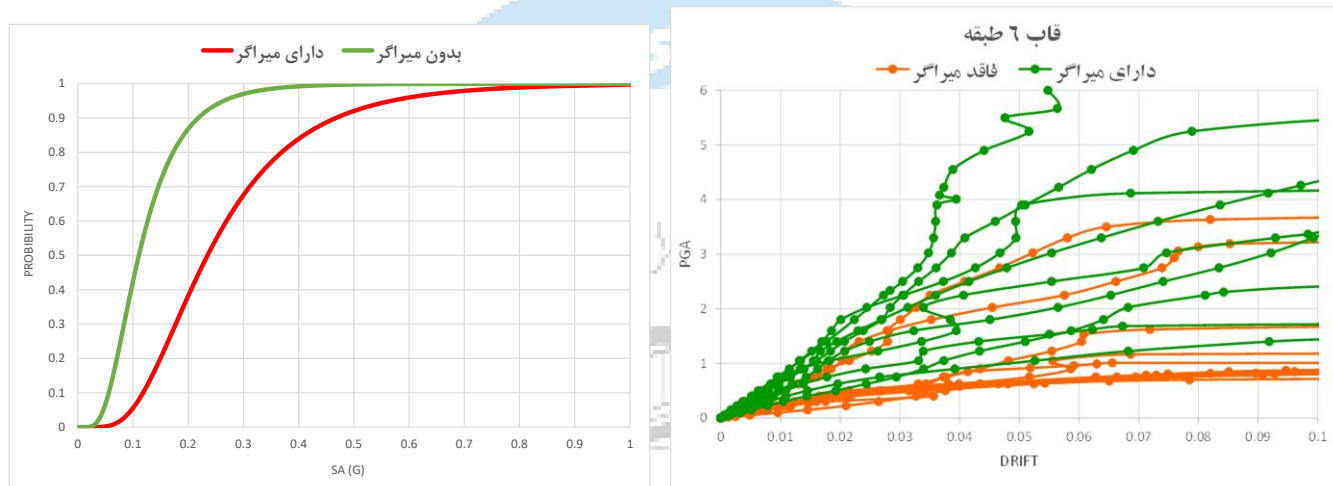


شکل ۱۴: یازده شتابنگاشت اعمال شده به قاب ۱۵ طبقه

۳-۶- نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده

بررسی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده که در شکل ۱۴، شکل ۱۶ و شکل ۱۸ ارائه شده است؛ نشان داد که این سیستم سازه‌ای به طور مؤثری در کاهش خسارات ناشی از زلزله به ساختمان‌ها کمک کرده است. استفاده از میراگرهای ویسکوز، که حرکت‌های جانبی ساختمان‌ها را در هنگام وقوع زلزله محدود می‌کنند، به افزایش استحکام و پایداری سازه‌ها منجر شد. در نتیجه، ساختمان‌های مجهز به این سیستم‌ها نسبت به سایر ساختمان‌ها در برابر زلزله‌ها مقاومت بالاتری دارند و خسارات کمتری متحمل می‌شوند. این یافته‌ها تأکید کرد که ساختمان‌های دارای میراگر ویسکوز در شرایط بحرانی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

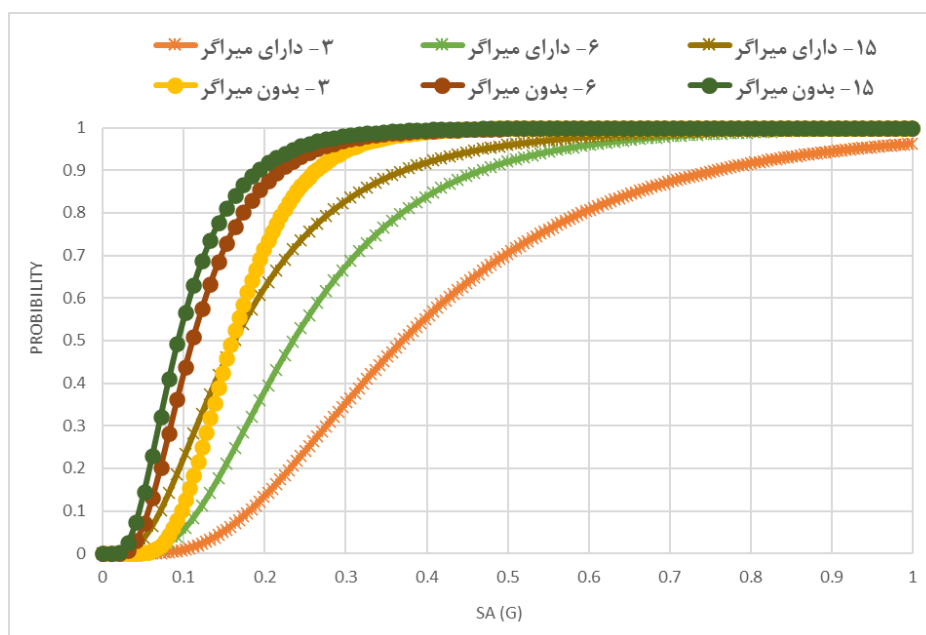
با مقایسه منحنی شکست قاب‌های دارای میراگر و بدون میراگر که در شکل‌های ۱۵، ۱۷ و ۱۹ نشان داده شده است، نتایج مهمی ارائه گردید که تأثیر مثبت میراگرهای ویسکوز در کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ها را نشان داد. این منحنی‌ها نشان‌دهنده احتمال وقوع خرابی است. با مقایسه نتایج قاب‌های دارای میراگر و بدون میراگر، این نتیجه به دست آمد که در حالتی که قاب‌ها با استفاده از میراگرهای ویسکوز مقاوم‌سازی شده‌اند، منحنی شکنندگی آنها نسبت به قاب‌های بدون میراگر دارای شیب کمتری بود و احتمال وقوع خرابی در آنها نیز کمتر بود. این موضوع نشان‌دهنده کارایی بالای میراگرهای ویسکوز در کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر نیروهای دینامیکی مانند زلزله است. در قاب‌های بدون میراگر، هنگامی که نیروی زلزله به سازه وارد می‌شود، ارتعاشات و نیروهای جانبی به طور مستقیم به اعضای سازه‌ای منتقل می‌شوند. این امر باعث افزایش احتمال خرابی و آسیب در سازه می‌شود. اما در قاب‌هایی که با میراگرهای ویسکوز تجهیز شده‌اند، میراگرها نقش مهمی در جذب و دفع انرژی دارند. میراگرهای ویسکوز با ایجاد مقاومت در برابر حرکت‌های نسبی بین اعضای سازه‌ای، انرژی زلزله را به گرما تبدیل کرده و از انتقال مستقیم آن به سازه جلوگیری می‌کنند. نتیجه‌ی این فرآیند، کاهش چشمگیر ارتعاشات و نیروهای جانبی در سازه است که منجر به کاهش شیب منحنی شکنندگی و کاهش احتمال وقوع خرابی شده است. شکل ۲۰



شکل ۱۷: مقایسه منحنی شکست قاب ۶ طبقه دارا و فاقد SCVD

شکل ۱۶: مقایسه عملکرد قاب ۶ طبقه دارای میراگر و فاقد میراگر

منحنی شکست هر ۶ قاب دارای میراگر و بدون میراگر ویسکوز خودمركزگرا را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰: منحنی شکست هر ۶ قاب مدل شده

۷- برآورد هزینه چرخه عمر

به این منظور لازم است به بررسی دقیق تحلیل هزینه چرخه عمر پرداخته شود. این روش در چارچوب دستورالعمل FEMA P-58 توسعه یافته است که در این روش، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از زلزله، همراه با هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری، در طول عمر مفید سازه محاسبه و ارزیابی می‌شوند. جزئیات مربوط به این روش و پارامترهای مورد استفاده در آن در رابطه (۱۰) تا رابطه (۱۴) ارائه شده است.

هزینه‌های مستقیم ۳۲: این هزینه‌ها شامل هزینه‌های مربوط به تعمیرات و جایگزینی عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای ساختمان است.

$$LCC_{DIRECT} = \sum_{i=1}^n (C_{i,ND}, P_{i,ND}) \quad (10)$$

که در آن $C_{i,ND}$ هزینه‌های غیرمستقیم مربوط به عنصر i و $P_{i,ND}$ احتمال وقوع خسارت غیرمستقیم ناشی از آسیب به عنصر i است.

هزینه‌های غیرمستقیم ۳۳: این هزینه‌ها شامل هزینه‌های وقفه در کسب و کار، اسکان موقت، هزینه‌های ناشی از عدم دسترسی به ساختمان، و دیگر هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی است.

$$LCC_{INDIRECT} = \sum_{i=1}^n (C_{i,ND}, P_{i,ND}) \quad (11)$$

هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری ۳۴: این هزینه‌ها شامل هزینه‌های دوره‌ای تعمیرات، نگهداری و حتی صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌باشد.

³² Direct Costs

³³ Indirect Costs

³⁴ Operation and Maintenance Costs

$$LCC_{O\&M} = \sum_{i=1}^m (C_{O\&M,j}, P_{O\&M,j}) \quad (12)$$

که در آن $C_{O\&M,j}$ هزینه‌های مربوط به نگهداری و بهره‌برداری برای مورد j و $P_{O\&M,j}$ احتمال وقوع نیاز به تعمیرات و نگهداری دوره‌ای j است. سپس هزینه کل محاسبه می‌شود:

$$LCC_{DIRECT} + LCC_{INDIRECT} + LCC_{O\&M} = LCC_{TOTAL} \quad (13)$$

در شرایطی که هزینه‌ها در سال‌های مختلفی رخ دهند، می‌توان با استفاده از نرخ تنزیل، آن‌ها را به یک ارزش فعلی مشترک تبدیل کرد:

$$LCC_{TOTAL} = \sum_{t=0}^T \frac{LCC_t}{(1+r)^t} \quad (14)$$

نتایج بررسی‌ها نشان داد که عمر سازه‌ها تأثیر قابل توجهی بر سطح خطر لرزه‌ای بهینه دارد. در این بررسی، منحنی‌های زبان لرزه‌ای برای قاب‌های با ارتفاع ۳، ۶ و ۱۵ طبقه را در دوره‌های زمانی ۵۰ و ۹۰ ساله و در سطوح مختلف عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)^{۳۵}، ایمنی جانی (LS)^{۳۶} و آستانه فروریزش (CP)^{۳۷} مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش عمر سازه‌ها، تعداد رویدادهای لرزه‌ای نیز بیشتر شد و به تبع آن، میزان زبان لرزه‌ای افزایش یافت. به‌ویژه، هزینه‌های تعمیرات ناشی از زلزله در یک دوره ۹۰ ساله نسبت به دوره ۵۰ ساله برای هر سه نوع سازه به طور چشمگیری افزایش پیدا کرد. همچنین، با افزایش احتمال وقوع رویدادهای لرزه‌ای، هزینه‌های مربوط به تعمیر و بازسازی نیز بالا رفت؛ بنابراین، احتمال فراگذشت (Probability of Exceedance) با هزینه (Repair Cost) رابطه مستقیم دارند. شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ به ترتیب تأثیر بازه‌های زمانی مختلف در منحنی‌های خسارت برای قاب‌های ۳، ۶ و ۱۵ طبقه را نشان می‌دهد. همچنین احتمال رخداد و خسارت در سطوح عملکردی هر یک از قاب‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

در نمودار قاب ۳ طبقه مشخص است که احتمال اینکه یک سازه سه طبقه در طول ۵۰ سال به هزینه‌ای معادل ۲۵۰ هزار دلار نیاز داشته باشد، کمتر از ۱۰ درصد است. این احتمال در طول ۹۰ سال به ۳۰ درصد می‌رسد. همچنین، بیشترین هزینه‌ای که ممکن است برای تعمیرات این سازه پیش‌بینی شود، حدود ۱۹۰ هزار دلار برآورد شده است. در یک بازه زمانی ۵۰ ساله، احتمال وقوع زلزله‌ای که باعث نیاز به بازسازی قاب ۶ طبقه در سطح عملکردی DS2 شود، ۲ درصد است و هزینه بازسازی آن حدود ۴۵۸ هزار دلار خواهد بود. در حالی که در یک دوره ۹۰ ساله، این احتمال به ۶ درصد افزایش می‌یابد و هزینه بازسازی نیز به ۵۴۷ هزار دلار می‌رسد. این ارقام نشان‌دهنده افزایش زبان‌های ناشی از زلزله با افزایش طول عمر ساختمان هستند. در قاب ۱۵ طبقه‌ای، مشاهده می‌شود که با افزایش احتمال وقوع حادثه، میزان خسارت نیز افزایش می‌یابد. در سطح عملکردی DS2، این قاب در دوره‌های ۵۰ و ۹۰ ساله به ترتیب دارای احتمال وقوع ۱ و ۳ درصد است. هزینه خسارت برای دوره ۵۰ ساله حدود دو میلیون دلار و برای دوره ۹۰ ساله حدود دو میلیون و ششصد هزار دلار برآورد شده است.

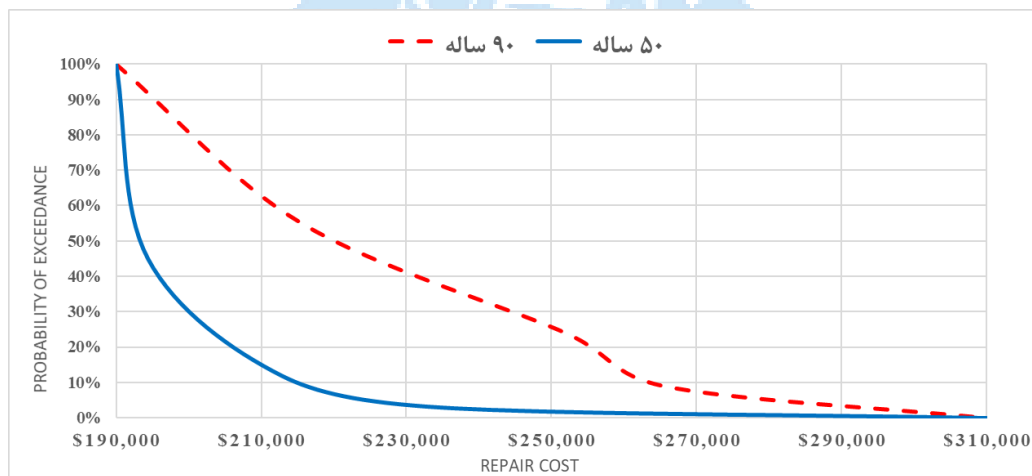
³⁵ Immediate Occupancy

³⁶ Life Safety

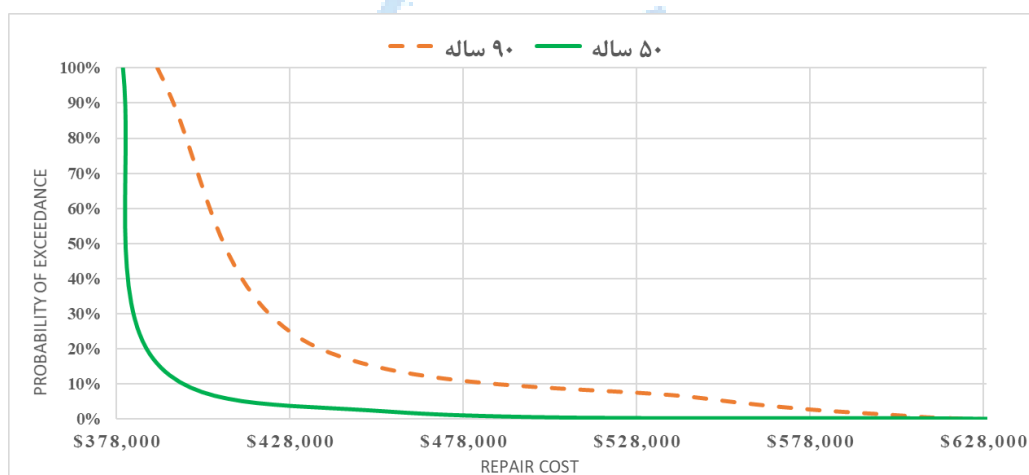
³⁷ Collapse Prevention

جدول ۶: احتمال رخداد و خسارت در سطوح عملکردی در قابها

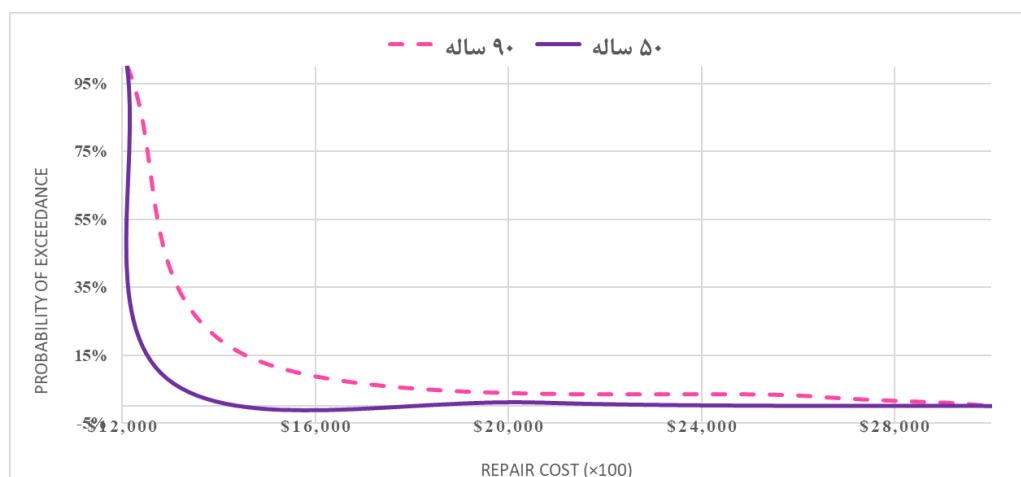
قاب	سطوح عملکردی	دوره ۵۰ ساله		دوره ۹۰ ساله	
		احتمال وقوع	هزینه تعمیرات	احتمال وقوع	هزینه تعمیرات
طبقه ۳	DS1 (IO)	۴۵٪	\$ ۱۹۴,۴۰۰	۵۵٪	\$ ۲۱۵,۶۰۰
	DS2 (LS)	۱۲٪	\$ ۲۱۲,۸۰۰	۲۴٪	\$ ۲۵۲,۰۰۰
	DS3 (CP)	۳٪	\$ ۲۳۴,۸۰۰	۹٪	\$ ۲۶۵,۶۰۰
طبقه ۶	DS1 (IO)	۱۷٪	\$ ۳۸۸,۸۰۰	۲۳٪	\$ ۴۳۱,۲۰۰
	DS2 (LS)	۲٪	\$ ۴۵۷,۶۰۰	۶٪	\$ ۵۴۷,۲۰۰
	DS3 (CP)	۰٪	\$ ۶۲۹,۰۰۰	۱٪	\$ ۶۳۵,۶۰۰
طبقه ۱۵	DS1 (IO)	۸٪	\$ ۱,۲۹۳,۲۰۰	۱۵٪	\$ ۱,۴۵۵,۲۰۰
	DS2 (LS)	۱٪	\$ ۲,۰۶۸,۰۰۰	۳٪	\$ ۲,۶۲۳,۰۰۰
	DS3 (CP)	۰٪	\$ ۳,۰۰۰,۰۰۰	۱٪	\$ ۳,۲۲۲,۴۰۰



شکل ۱۹: تأثیر بازه‌های زمانی مختلف در منحنی‌های خسارت برای قاب ۳ طبقه



شکل ۲۰: تأثیر بازه‌های زمانی مختلف در منحنی‌های خسارت برای قاب ۶ طبقه



شکل ۲۱: تأثیر بازه‌های زمانی مختلف در منحنی‌های خسارت برای قاب ۱۵ طبقه

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از روش ارزیابی FEMA-P-58 برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌ها باهدف کاهش هزینه‌های اولیه و هزینه‌های چرخه عمر ناشی از زلزله استفاده شده است. در این راستا، سه نوع قاب خمشی فولادی با ارتفاعات مختلف (۳، ۶ و ۱۵ طبقه) و یک نمای متقارن مورد بررسی قرار گرفتند. این سازه‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که سطح ایمنی مطلوب را با استفاده از میراگرهای ویسکوز خودمركزگرا تأمین کنند. سپس هزینه‌های احتمالی مرتبط با چرخه عمر آنها ارزیابی شد. نتایج مهم به دست آمده به شرح زیر است:

(۱) قاب‌های ۳ و ۶ و ۱۵ طبقه به ترتیب کاهش ۶۲، ۵۱/۲۵ و ۵۲/۸۳ درصدی زمان تناوب را در صورت استفاده از میراگر ویسکوز خودمركزگرا نشان می‌دهند. بنابراین استفاده از میراگرهای ویسکوز خودمركزگرا، تا حدود ۵۰٪ در کاهش دریافت و جابجایی سازه‌ها مؤثر است.

(۲) با برآورد هزینه‌های تعمیر و نگهداری (LCC) برای دوره‌های ۵۰ و ۹۰ ساله در سطح قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS)، و آستانه فروریزش (CP) به ترتیب در قاب ۳ طبقه برابر ۱۰/۹۰، ۱۸/۴۲ و ۱۳/۱۲ درصد، ۶ طبقه برابر ۱۹/۵۰، ۱۰/۹۰ و ۱/۰۵ درصد و در قاب ۱۵ طبقه برابر ۱۲/۵۳، ۲۶/۸۳ و ۷/۴۱ درصد افزایش داشته است.

(۳) تأثیر استفاده از میراگرهای ویسکوز در ساختمان‌های بلندمرتبه نسبت به ساختمان‌های کوتاه و میان مرتبه، بیشتر است.

(۴) افزایش کارایی اهداف عملکردی در فرایند طراحی، توانایی مقابله با بارها را بالا برده و میزان دریافت بین طبقات را کاهش می‌دهد.

(۵) به دلیل آنکه قطعات حساس به دریافت منبع اصلی هزینه‌های نگهداری در طول عمر محسوب می‌شوند، با مدیریت نسبت دریافت در طبقات سازه‌های فولادی، می‌توان هزینه‌های نگهداری طولانی‌مدت را کاهش داد.

مراجع

- [1] Hamburger, R. O., Rojahn, C., Heintz, J., & Mahoney, M. (2012, September). FEMA P58: Next-generation building seismic performance assessment methodology. In *15th world conference on earthquake engineering* (Vol. 10, No. 10).
- [2] Hu, S., Wang, W., Alam, M. S., & Ke, K. (2023). Life-cycle benefits estimation of self-centering building structures. *Engineering Structures*, 284, 115982.
- [3] Zhang, R., Wang, W., & Alam, M. S. (2022). Seismic evaluation of friction spring-based self-centering braced frames based on life-cycle cost. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(14), 3393-3415.
- [4] Xia, Y., Guo, T., Zhu, R., & Li, X. (2023). Seismic behavior and life-cycle cost effectiveness of steel moment resisting frame structures with self-centering friction-viscous dampers. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02588.

- [5] Huang, Q., Dyanati, M., Roke, D. A., Chandra, A., & Sett, K. (2018). Economic feasibility study of self-centering concentrically braced frame systems. *Journal of Structural Engineering*, 144(8), 04018101.
- [6] Yan, X., Alam, M. S., Rahgozar, N., & Shu, G. (2024). Performance-based seismic design method for disc spring-based self-centering viscous dissipative braced steel frame. *Journal of Building Engineering*, 84, 108493.
- [7] Yan, X., Shu, G., Zhang, R., Alam, M. S., & Qin, Y. (2024). Hysteretic and seismic performance of disc spring-based self-centering viscous dampers for improved seismic resilience. *Engineering Structures*, 300, 117161.
- [8] Mohammadi, R. K., Garoosi, M. R., & Hajirasouliha, I. (2019). Practical method for optimal rehabilitation of steel frame buildings using buckling restrained brace dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123, 242-251.
- [9] Moradpour, S., & Dehestani, M. (2019, December). Optimal DDBD procedure for designing steel structures with nonlinear fluid viscous dampers. In *Structures* (Vol. 22, pp. 154-174). Elsevier.
- [10] Ras, A., & Boumechra, N. (2014). Study of nonlinear fluid viscous dampers behaviour in seismic steel structures design. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 8635-8648.
- [11] Abdi, H., Hejazi, F., Saifulnaz, R., Karim, I. A., & Jaafar, M. S. (2015). Response modification factor for steel structure equipped with viscous damper device. *International Journal of Steel Structures*, 15, 605-622.
- [12] Kaleybar, R. S., & Tehrani, P. (2021, October). Effects of using different arrangements and types of viscous dampers on seismic performance of intermediate steel moment frames in comparison with different passive dampers. In *Structures* (Vol. 33, pp. 3382-3396). Elsevier.
- [13] Khalilian, M., Shakib, H., & Basim, M. C. (2021). On the optimal performance-based seismic design objective for steel moment resisting frames based on life cycle cost. *Journal of Building Engineering*, 44, 103091.
- [14] Günay, S., & Mosalam, K. M. (2013). PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(6), 829-858.
- [15] Aydogdu, H. H., & Ilki, A. (2024). Case study for a performance based rapid seismic assessment methodology (PERA2019) based on actual earthquake damages. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-35.
- [16] Krawinkler, H. (1999, November). Challenges and progress in performance-based earthquake engineering. In *International Seminar on Seismic Engineering for Tomorrow-In Honor of Professor Hiroshi Akiyama* (Vol. 26). Citeseer.
- [17] Ghahari, F., Sargsyan, K., Parker, G. A., Swensen, D., Çelebi, M., Haddadi, H., & Taciroglu, E. (2024). Performance-based earthquake early warning for tall buildings. *Earthquake Spectra*, 40(2), 1425-1451.
- [18] Zhu, R., Guo, T., & Mwangilwa, F. (2020). Development and test of a self-centering fluidic viscous damper. *Advances in Structural Engineering*, 23(13), 2835-2849.
- [19] Kitayama, S., & Constantinou, M. C. (2017). Fluidic self-centering devices as elements of seismically resistant structures: description, testing, modeling, and model validation. *Journal of Structural Engineering*, 143(7), 04017050.
- [20] Kitayama, S., & Constantinou, M. C. (2016). Design and analysis of buildings with fluidic self-centering systems. *Journal of Structural Engineering*, 142(11), 04016105.
- [21] Xu, G., Guo, T., Li, A., Wang, S., Zhang, R., Zhu, R., & Xu, J. (2023, August). Review on self-centering damper for seismic resilient building structures. In *Structures* (Vol. 54, pp. 58-77). Elsevier.
- [22] Hazaveh, N. K., Chase, J. G., Rodgers, G. W., Pampanin, S., & Kordani, R. (2020). Seismic behavior of a self-centering system with 2-4 viscous damper. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(3), 470-484.
- [23] Zhu, S., & Zhang, Y. (2008). Seismic analysis of concentrically braced frame systems with self-centering friction damping braces. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 121-131.
- [24] Pachideh, G., Kafi, M., & Gholhaki, M. (2020, December). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. In *Structures* (Vol. 28, pp. 467-481). Elsevier.
- [25] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Kafi, M. (2020). Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper. *Steel and Composite Structures*, 36(2), 197-211.
- [26] Gholhaki, M., Pachideh, G., Lashkari, R., Rezayfar, O. (2021, August). Behaviour of buckling-restrained brace equipped with steel and polyamide casing. *Structures and Buildings* (Vol. 174, pp. 1751-7702).
- [27] Kitayama, S. (2017). Development and evaluation of procedures for analysis and design of buildings with fluidic self-centering systems. *Journal of Structural Engineering*, 142(11).
- [28] American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures* (ASCE/SEI 7-10). Reston, VA: Author.