

Developing a method to reduce impacts on adjacent buildings during earthquakes using viscous dampers

Mazan Masir¹, Alireza Mirzagoltabar Roshan^{2*}, Javad Vaseghi Amiri³

1- PhD student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani university of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani university of Technology, Babol, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani university of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

During severe earthquakes, displacements generated in a structure transfer from the ground to the upper parts of the foundation, creating distinct structural dynamic responses and out-of-phase lateral oscillations. Due to the absence of separation joints between adjacent structures, they cannot oscillate freely, leading to impact phenomena. The out-of-phase oscillation of these structures causes collisions, potentially resulting in severe structural damage, human casualties, and economic losses. Therefore, this study examines the earthquake impact on the drift behavior of 4-, 7-, and 10-story steel structures using numerical modeling in the OpenSees software. The studied structures have identical floor plans (15×15 meters) with a floor height of 3.3 meters, are located on soft soil, and lie within high seismic risk zones. Models were subjected to various acceleration levels from notable historical earthquakes, including the Northridge, Kobe, and Chi-Chi earthquakes. The data obtained show that 4-story structures generally experience more drift than 7- and 10-story structures. In high-acceleration, high-frequency earthquakes, shorter structures (4 and 7 stories) show greater vulnerability and experience more drift. Additionally, the proximity of structures significantly affects the drift of shorter buildings. Notably, the drift of the 4-story structure significantly increases when adjacent to a 10-story structure. This study also investigates the effect of dampers on the drift of 4- and 10-story structures and 7- and 10-story structures. Results indicate that the use of dampers significantly reduces structural drift and enhances stability against earthquakes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 December 2024

Revise Date: 06 February 2025

Accept Date: 10 March 2025

Keywords:

Damper
Structural drift
Structure
Earthquake
Soil-structure interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.490914.3585

*Corresponding author: Alireza Mirzagoltabar Roshan

Email address: ar-goltabar@nit.ac.ir

بررسی اثر میراگر ویسکوز در کنترل لرزه‌ای و اثر آن بر دریافت و ضربه سازه‌های مسکونی مجاور در مواجهه با زلزله

مازن مسیر^۱، علیرضا میرزاگل‌تبار روشن^{۲*}، جواد واثقی‌امیری^۳

۱-دانشجو مقطع دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲-دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳-استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

در هنگام زمین‌لرزه‌های سنگین، جابه‌جایی‌های ایجادشده در سازه از زمین به سازه‌ی بالایی پی انتقال پیدا کرده که سبب ایجاد واکنش‌هایی دینامیکی سازه‌های متفاوت و نوسان‌های جانبی برون از فاز گردیده است. به دلیل نبود درز انقطاع میان سازه‌های مجاور، سازه‌ها نمی‌توانند به‌صورت آزاد نوسان کنند که سبب ایجاد پدیده‌ی ضربه می‌شود. نوسان سازه‌ها برون از فاز موجب برخورد آن‌ها شده که ممکن است آسیب‌های شدید سازه‌ای و تلفات انسانی و اقتصادی را به بار آورد. به همین علت، در این تحقیق تأثیر زلزله بر رفتار دریافت سازه‌های فولادی ۴، ۷ و ۱۰ طبقه با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار *OPENSEES* بررسی شده است. سازه‌های مورد مطالعه دارای پلان یکسان با ابعاد ۱۵×۱۵ متر و ارتفاع طبقات ۳.۳ متر بوده و در شرایط خاک نرم و منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بسیار بالا قرار دارند. مدل‌ها تحت تأثیر شتاب‌های مختلف ناشی از زلزله‌های معتبر تاریخی (مانند زلزله نورث‌ریج، کوبه و چی‌چی) قرار گرفته‌اند. همچنین جهت کنترل ارتعاش و ضربه سازه‌های مجاور به یکدیگر از میراگر ویسکوز در تراز بام به کار گرفته شده است. داده‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که سازه‌های ۴ طبقه به‌طور کلی دریافت بیشتری نسبت به سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه تجربه کرده‌اند. زلزله‌هایی با شتاب و فرکانس بالا، سازه‌های کوتاه‌تر (۴ و ۷ طبقه) آسیب‌پذیری بیشتری نشان داده و دریافت بیشتری را تجربه کرده‌اند. همچنین، مجاورت سازه‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر دریافت سازه‌های کوتاه‌تر دارد. به‌ویژه، دریافت سازه ۴ طبقه در مجاورت سازه ۱۰ طبقه به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. همچنین در این تحقیق، به بررسی تأثیر میراگرها بر روی دریافت سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه و ۷ و ۱۰ طبقه پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از میراگرها به‌طور قابل‌توجهی دریافت سازه‌ها را کاهش داده و پایداری آن‌ها را در برابر زلزله‌ها افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: میراگر، دریافت سازه، سازه، زلزله، اندرکنش خاک-سازه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.490914.3585	10.22065/jsce.2025.490914.3585	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۲/۲۰	۱۴۰۳/۱۲/۲۰	۱۴۰۳/۱۱/۱۸	۱۴۰۳/۱۰/۰۱
			علیرضا میرزاگل‌تبار روشن ar-goltabar@nit.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

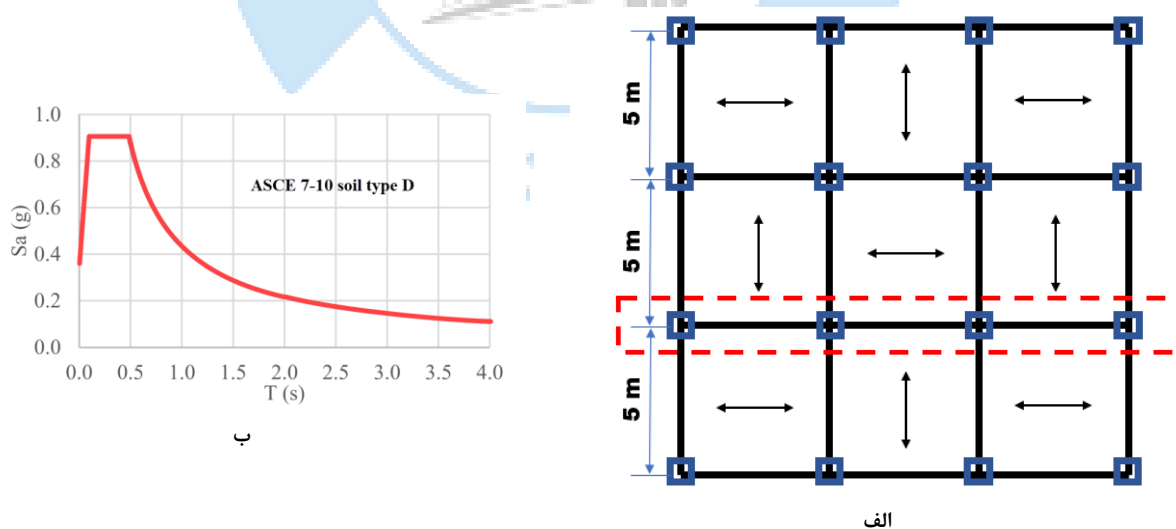
۱- مقدمه

برخورد ساختمان‌ها به دلیل ضربه می‌تواند نیروهای قوی و موقتی به سازه‌ها منتقل کند. این نیروها ممکن است موجب برخورد بخش‌های مختلف سازه شوند. این تأثیرات شامل شتاب موضعی و کاهش مقاومت هستند و می‌توانند تغییراتی در پاسخ‌های دینامیکی ایجاد کنند. همچنین، ضربه دوگانه بین طبقات و پی دو سازه مجاور ممکن است رخ دهد و تأثیرات آن به نوع تحریکات زمین‌لرزه وابسته است. وجود سازه‌های دیگر ممکن است باعث بروز واکنش‌های خاصی شود. همچنین، پاسخ‌های سازه بدون در نظر گرفتن پی و خاک زیر آن متفاوت خواهد بود. با افزایش گرایش به زندگی در شهرها، ساختمان‌ها به صورت نزدیک به هم ساخته شده‌اند. در زمان زمین‌لرزه‌های شدید، جابه‌جایی‌های ایجاد شده در سازه‌ها به یکدیگر منتقل شده و موجب نوسانات جانبی می‌گردند. این نوسانات باعث برخورد سازه‌ها می‌شود که می‌تواند آسیب‌های شدید و تلفات انسانی و اقتصادی به همراه داشته باشد. خاک زیر سازه‌ها ویژگی‌های حرکتی زمین‌لرزه را تغییر می‌دهند؛ بنابراین بررسی اندرکنش میان سازه‌ها و خاک بسیار مهم است. این پژوهش به بررسی اثرات این اندرکنش بر پدیده ضربه در ساختمان‌های مجاور پرداخته است. استفاده از میراگرهای ویسکوز مایع به منظور جلوگیری از ضربه ساختمان‌ها سبب کاهش نیروهای محوری، برشی، و لنگر خمشی می‌شود [۱]. میراگرهای ویسکوز مایع کاربردهای گسترده‌ای در مهار نوسانات سازه‌های مختلف و دستگاه‌های مکانیکی دارند [۲]. یافته‌های گذشته نشان می‌دهد که اندرکنش سینماتیکی برای سازه‌های ساخته شده بر روی پی‌های بزرگ و سخت مهم است [۳]. علاوه بر این، در نظر نگرفتن اندرکنش خاک و سازه باعث پاسخ‌های محافظه‌کارانه می‌شود که در برخی موارد زیان‌بار است [۴]. به دلیل حرکت نسبی میان ستون‌ها و طبقه، آسیب‌های حاصل از ضربه ساختمان‌ها با بازشوهای گسترده، ضربه به انتهای سازه، و تخریب کامل طبقه بام به دلیل ضربه ساختمان مجاور مشاهده شده است [۵]. با ایجاد میرایی در موج توزیع، این نتیجه به دست آمد که اهمیت اندرکنش خاک و سازه از زمین‌لرزه بیشتر است [۶]. بررسی رفتار متداول و انعطاف‌پذیری خاک نشان داده است که پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن خاک انعطاف‌پذیر افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش دوره تناوب ساختمان مجاور است. برای کاهش ضربه، باید از میراگرها بهره برد [۷]. استفاده از میراگرهای ویسکوز، ویسکوالاستیک و اصطکاکی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها نشان داده است که اتصال ساختمان‌های مجاور با فرکانس اصلی توسط میراگرهای غیرفعال می‌تواند پاسخ لرزه‌ای را کاهش دهد [۸]. همچنین، با بررسی کاربرد میراگر اصطکاکی در سازه مجاور با استفاده از معادلات چند درجه آزادی، نتیجه‌گیری شد که میراگرهای اصطکاکی تأثیر موثری بر روی پاسخ ناشی از زلزله دارند [۹]. در پژوهشی دیگر، دو سازه مجاور که ارتفاع متفاوتی داشتند با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 برای مدل‌سازی سازه و خاک بستر مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه‌گیری شد که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، نیروهای ضربه، جابه‌جایی و برش درون طبقه کاهش می‌یابند [۱۰]. در تحقیق دیگری مشخص شد که ضربه باعث جابه‌جایی اندک اما برش‌های درون طبقه شدیدی می‌شود که چشم‌پوشی از آثار اندرکنش منجر به طراحی غیرواقعی می‌گردد [۱۱]. چشم‌پوشی از اندرکنش خاک و سازه موجب به دست آمدن اطلاعات نادرست در زمینه ضربه ساختمان‌ها می‌شود [۱۲]. درز انقطاع میان سازه‌ها نیز اثر چشمگیری بر ضربه ساختمان‌ها به یکدیگر دارد و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، آسیب به سازه کاهش می‌یابد [۱۳، ۹]. در زمین‌لرزه لوماپریتا، مدارکی برای اثرات منفی و زیان‌بار چشم‌پوشی از اندرکنش خاک و سازه در شرایط مختلف ارائه شده است [۱۴]. در نظر نگرفتن انعطاف‌پذیری خاک و اثر دیوارهای میان‌قابی بر واکنش سازه‌ها بسیار مهم است [۱۵]. ترکیب اثر اندرکنش خاک و سازه، پیچش تصادفی و ضربه باعث ایجاد واکنش‌های غیرخطی شدید در ساختمان‌ها می‌شود [۱۶]. پژوهش‌های متعددی به شناخت و بررسی این موضوع پرداخته‌اند [۱۷-۲۲]. در بررسی ضربه ساختمان‌ها، یافته‌ها نشان دادند که تغییری چشمگیر در ورودی کلی و انرژی پسماند مشاهده نمی‌شود، اما توزیع آنها در طبقات به صورت چشمگیری در هنگام برخورد سازه‌ها تغییر کرده است [۲۳]. در بخش جابه‌جایی، تقاضای دررفت درون طبقه‌ای بیشینه اغلب به دلیل آثار ضربه ساختمان افزایش می‌یابد [۲۴]. در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه سبب افزایش جابه‌جایی‌های جانبی در سازه‌ها بر روی خاک نرم می‌شود [۲۵]. در یک پژوهش، از میراگر مغناطیسی به عنوان یک دستگاه اتلاف هوشمند استفاده شد. نتایج نشان داد که سیستم کنترل نیمه‌فعال بهینه می‌تواند از ضربه ساختمان جلوگیری کرده و رفتار سازه را به میزان زیادی بهبود ببخشد [۲۶]. سازه ممکن است تحت زلزله با دوره بازگشت بلندمدت فرو بریزد و این موضوع تحت تأثیر مجاورت دو سازه جدا از هم و شدت زلزله به ارتفاع سازه‌ها و ظرفیت جابه‌جایی جداکننده‌ها وابسته است؛ به طوری که سازه بلند و جدا شده عملکرد سازه مجاور جدا شده

کوتاه‌تر را کاهش می‌دهد [۲۷]. تعامل خاک و سازه طیف ورودی واقعی لرزه‌ای را تغییر می‌دهد و این اثرات می‌تواند پاسخ سازه را افزایش دهد [۲۸]. با توجه به مرور ادبیات فنی، مطالعات گذشته نشان داده‌اند که اندرکنش خاک و سازه تأثیر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های مجاور دارد و عدم در نظر گرفتن این اثرات می‌تواند منجر به طراحی یا حتی برآوردهای نامناسب از پاسخ سازه‌ها شود. استفاده از کنترل‌های غیرفعال به ویژه در این پژوهش میراگرهای ویسکوز، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش ضربه و دررفت سازه‌های مجاور تحت زلزله مطرح شده است. پژوهش موجود به کنترل دررفت سازه‌ها با میراگرهای ویسکوز با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه پرداخته است. با توجه به زلزله‌های مختلف بررسی شده، میزان کاهش پاسخ دررفت سازه به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش خسارت پرداخته شده است.

۲- مدل سازی

مدل بررسی شده در این پژوهش، سه سازه‌ی قاب خمشی ویژه‌ی فولادی ۴، ۷ و ۱۰ طبقه دارای پلان یکسان با ابعاد ۱۵×۱۵ متر با ارتفاع طبقات برابر ۳/۳ متر برگرفته شده از پژوهش فراهانی و همکاران [۱۶] است. شکل ۱ نمایش سازه استفاده شده در پژوهش و طیف پاسخ طراحی (برای خاک نوع D آیین‌نامه ASCE_7) به کار گرفته شده را نمایش می‌دهد. خاک بستر نرم فرض شده و برابر با نوع خاک D بر اساس معیارهای آیین‌نامه‌ی ASCE_10 است [۲۹]. میزان چسبندگی خاک برابر با 3 kN/m^2 ، زاویه‌ی اصطکاک ۳۵ درجه، وزن مخصوص 19 kN/m^3 ، سرعت موج برشی 200 m/s و نسبت میرایی 0.05 است. سازه‌ها در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد ساخته شده، نوع کاربری مسکونی است و تنش باربری مجاز پی $1/8 \text{ kgf/cm}^2$ است. برون‌مرکزیت کمیته پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه در مرحله‌ی طراحی لحاظ شد. جدول ۱ و جدول ۲ نمایش اعضای سازه‌ای و پی‌ها بر اساس به ترتیب آیین‌نامه‌ی ANSI/AISC 360-10 و ACI 318-14 طراحی شدند [۳۰-۳۱] و خصوصیات پی سازه را نمایش می‌دهد. جدول ۳ نمایش دوره تناوب سازه‌های مورد بررسی را نمایش می‌دهد. در این جدول مقایسه صحت سنجی بین سازه‌های مدل شده انجام گرفت که در ستون میزان اختلاف نتایج صحت سنجی آورده شده است (اختلاف کمتر از ۵ درصد). در این پژوهش، ۲ جفت از سازه‌های مجاور دربرگیرنده‌ی ترکیب ۴ با ۱۰ و ۷ با ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفتند. جدول ۴ درز انقطاع برای سازه‌ی دارای درز انقطاع و با اندرکنش خاک و سازه را نشان می‌دهد. مقادیر دوره‌ی تناوب به‌عنوان معیاری برای راستی آزمایشی پژوهش استفاده می‌شود.



شکل ۱: الف: نمایش پلان طراحی شده ب: طیف پاسخ طراحی استفاده شده

جدول ۱: مقاطع اعضای سازه‌ای

مقطع تیر	مقطع ستون	ساختمان
IPE 300 و 330	۲۶۰×۱۷/۵ و ۲۰۰×۱۷/۵	۴ طبقه
IPE 270,300 و 360	۲۶۰×۱۷/۵ و ۲۴۰×۱۷/۵، ۲۲۰×۱۷/۵، ۱۸۰×۱۷/۵	۷ طبقه
IPE 330,360 و 400	۳۴۰×۱۷/۵ و ۳۰۰×۱۷/۵، ۲۸۰×۱۷/۵، ۲۴۰×۱۷/۵	۱۰ طبقه

جدول ۲: ابعاد پی

ساختمان	نوع فونداسیون	طول (متر)	عرض (متر)	ضخامت (متر)
۴ طبقه	نواری	۱۵	۰/۹	۰/۷
۷ طبقه	نواری	۱۵	۰/۹	۱/۳
۱۰ طبقه	یکپارچه	۱۵	۱۵	۱

جدول ۳: دوره‌ی تناوب اصلی مدل‌های سازه‌ای با پای گیردار

ساختمان	دوره‌ی تناوب اصلی (ثانیه)	دوره‌ی تناوب اصلی (ثانیه) مدل صحت سنجی شده	میزان اختلاف
۴ طبقه	۱/۱	۱/۱۶	٪۵
۷ طبقه	۱/۹۶	۱/۹	٪۳
۱۰ طبقه	۲/۳۳	۲/۲۳	٪۴

جدول ۴: درز انقطاع محاسبه شده برای سازه‌های مجاور

درز انقطاع (متر)	سازه‌های مجاور
۰/۱۸	۴ تا ۱۰
۰/۳۳	۷ تا ۱۰

حالت‌های مختلف مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. مدل‌سازی رفتار غیرخطی به صورت مفصل فایبر با مصالح فولادی (Steel 02) در OPENSEES مدل‌سازی گردید. جزئیات رفتار غیرخطی و مدل‌سازی خاک در شکل ۳ ارائه شده است.

همچنین میراگر ویسکوز که در تراز بام سازه کوتاه‌تر به تراز معادل خود در سازه بلندتر وصل می‌شود به صورت زیر است. مشخصات میراگر ویسکوز به صورت ضریب میرایی ($C=22930 \text{ N.s/m}$) و نوع رفتار خطی ($\alpha=1$) فرض گردیده است. روش اجرای این نوع کنترل به این صورت است که اگر بخواهیم از روش کنترل ارتعاش برای جلوگیری از ضربه دو سازه به یکدیگر استفاده کنیم باید اتصال مفصلی در بام سازه کوتاه‌تر با سازه بلندتر ایجاد شود و در بین این دو اتصال مفصلی میراگر ویسکوز قرار گیرد.

میراگرهای ویسکوز دستگاه‌های جذب انرژی منفعل وابسته به سرعت هستند که دارای سختی ذاتی نیستند. در این نوع میراگرها پیستون با حرکت سازه در حین زلزله حرکت کرده و سیال ویسکوز داخل سیلندر را مجبور می‌کند که از طریق روزنه‌های روی سر پیستون عبور کند. جذب انرژی زلزله با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی حرارتی انجام می‌شود. کنترل پاسخ جابجایی این دستگاه‌ها به محدوده حرکتی میراگر بستگی دارد. در محدوده حرکت، میراگر ویسکوز هیچ سختی ذاتی ندارد. نیروی تولید شده میراگر F_d که در معادله (۱-۲) آمده است، به سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر وابسته است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_d = cd(\alpha) |\dot{X}|^\alpha \text{sgn}(\dot{X}) \quad (1-2) \quad (1-1)$$

که در آن $cd(\alpha)$ ضریب میرایی است که به توان سرعت α وابسته است، \dot{X} سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر و sgn تابع علامت است. توان سرعت مقداری بین ۰ و ۱ می‌گیرد. این مقدار ثابت نوع میراگر را مشخص می‌کند. دستگاه به ترتیب برای $\alpha = 0$ از نوع اصطکاکی، برای $\alpha = 1$ از نوع ویسکوز خطی و برای $0 < \alpha < 1$ از نوع ویسکوز غیرخطی است. شایان ذکر است که نیروی میراگر NVD برای همان پاسخ سرعت نسبی، کمتر از نیروی میراگر LVD است، زیرا توان سرعت کمتر از یک است. این ویژگی دستگاه را از نیروهای بیش از حد در زمان پاسخ‌های با سرعت بالا محافظت می‌کند. معادله حرکت یک سیستم با یک درجه آزادی با میراگر ویسکوز تحت تاثیر حرکت زمین به صورت معادله (۲-۲) نوشته می‌شود:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + cd(\alpha)\dot{x}(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (2-2) \quad (2-1)$$

در اینجا، m جرم، k سختی، c ضریب میرایی ذاتی و \ddot{x}_g شتاب حرکت زمین است، $x(t)$ پاسخ جابجایی در زمان t است و نقطه‌های بالای متغیرها نشان دهنده مشتق‌گیری نسبت به زمان هستند. ضریب میرایی افزوده شده به سیستم توسط میراگر ویسکوز خطی (LVDs) با استفاده از رابطه‌ی (۲-۳) محاسبه می‌شود. [31,32]

$$\xi_d = \frac{T_1 \sum jcd(\alpha)_j \cos^2(\theta_j) (\phi_j - \phi_{j-1})^2}{4\pi \sum im_i \phi_i^2} \quad (3-2) \quad (3-1)$$

که در آن T_1 دوره طبیعی اصلی، θ_j زاویه تمایل میراگر، ϕ جابجایی افقی مد اول، و m جرم یک طبقه است. اندیس i برای شماره‌گذاری طبقات استفاده می‌شود و j طبقه‌ای را نشان می‌دهد که میراگر در آن نصب شده‌اند. در این مطالعه، میراگر ویسکوز بین طبقات مجاور دو ساختمان نصب شده‌اند، بنابراین، رابطه (۲-۴) به شکل زیر اصلاح می‌شود.

$$\xi_d = \frac{(\max\{T_{1,1}, T_{1,2}\}) \sum jcd(\alpha)_j (\phi_{j,1} - \phi_{j,2})^2}{4\pi \sum im_i \phi_i^2} \quad (4-2) \quad (4-1)$$

که در آن $\max\{T_{1,1}, T_{1,2}\}$ نشان دهنده بزرگ‌ترین دوره میان دوره‌های طبیعی اول دو ساختمان است و اندیس‌ها بعد از ویرگول نشان دهنده شماره ساختمان هستند. از آنجاکه فرض شده میراگر به صورت افقی در همان شماره طبقه از دو ساختمان قرار دارند، زاویه θ در معادله (۲-۴) صفر است. عبارت $(\phi_{j,1} - \phi_{j,2})$ نشان دهنده جابجایی مد افقی نسبی بین طبقات مجاور دو ساختمان است.

با فرض معادل بودن میزان اتلاف انرژی میراگر ویسکوز خطی (LVD) با دمپر ویسکوز غیرخطی (NVD) در یک چرخه از نمودار نیرو-جابجایی، ظرفیت میراگر ویسکوز غیرخطی (NVD) به راحتی قابل محاسبه است. رابطه بین ضریب میراگر ویسکوز غیرخطی (NVD) و ضریب میراگر ویسکوز خطی (LVD) به صورت زیر بیان می‌شود:

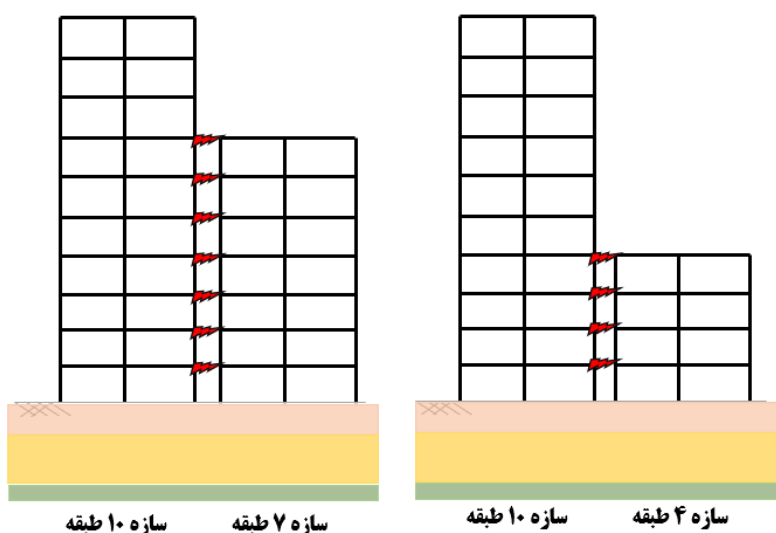
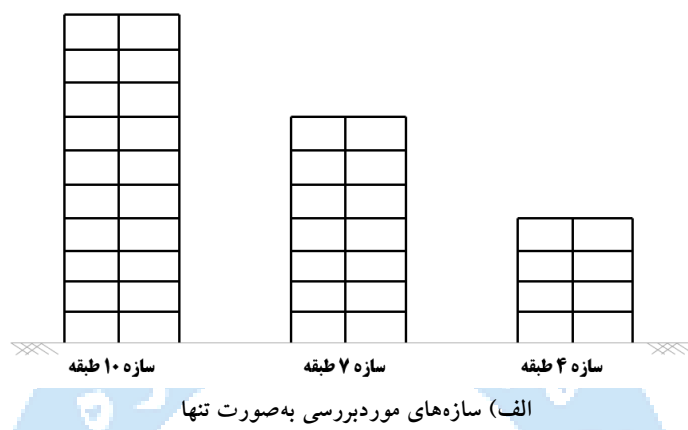
$$cd(\alpha) = \frac{cd(1) \left((\min\{\omega_{1,1}, \omega_{1,2}\}) \cdot x_0 \right)^{1-\alpha}}{\beta} \quad (5-2) \quad (5-1)$$

که در آن $cd(1)$ ضریب میرایی ویسکوز خطی (LVD) است، $\min\{\omega_{1,1}, \omega_{1,2}\}$ کوچک‌ترین فرکانس طبیعی میان فرکانس‌های طبیعی اول دو ساختمان است، x_0 حداکثر پاسخ جابجایی نسبی بین طبقات مجاور می‌باشد و ثابت β به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\beta = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1+\alpha/2)}{\pi \Gamma(2+\alpha)}$$

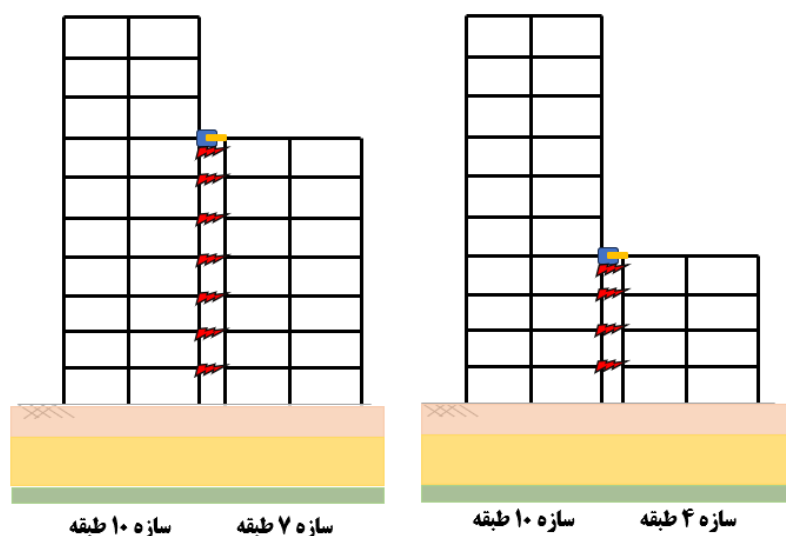
(۶-۲)

(۶-۱)

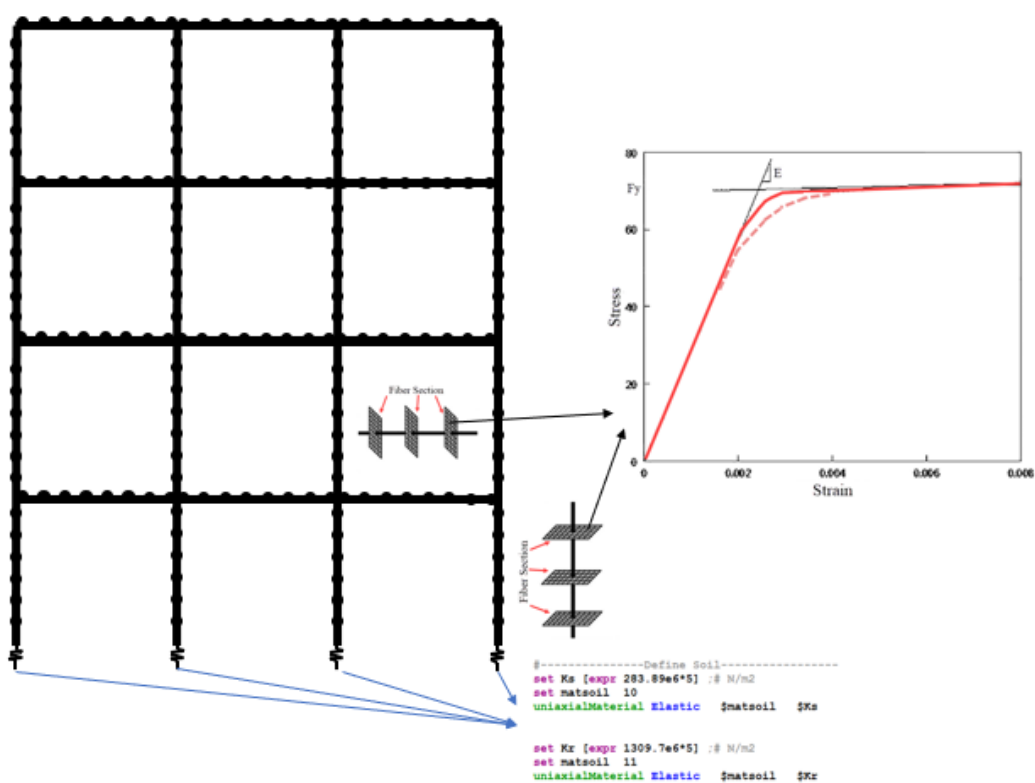
که Γ تابع گاما است.

سازه ۱۰ طبقه سازه ۷ طبقه سازه ۱۰ طبقه سازه ۴ طبقه

ب) مدل‌های مورد بررسی به صورت در نظر گرفتن المان ضربه در صورت برخورد



ج) مدل‌های مورد بررسی به صورت در نظر گرفتن المان ضربه در صورت برخورد و وجود میراگر پيسکوز در تراز بام
شکل ۲: مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش



شکل ۳: روش مدل‌سازی غیرخطی سازه ۴ طبقه

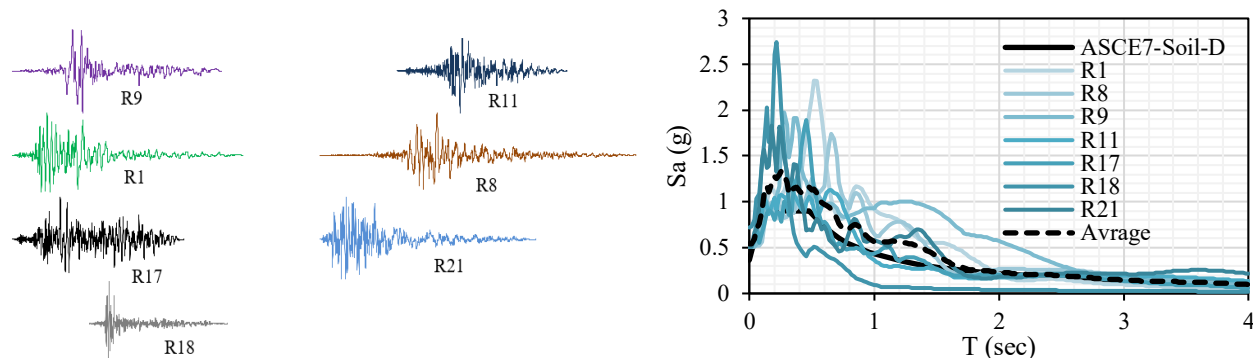
در این پژوهش، شتاب‌نگاشت‌ها به گونه‌ای مقیاس‌بندی می‌شوند که مقدار متوسط طیف پاسخ میرایی ۵ درصد برای مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت طبق ASCE7 کمتر از طیف پاسخ طراحی برای ساختگاه برای دوره‌های بین $0.2T_1$ تا $1.5T_2$ نباشد که در آن T_1 و T_2

کوتاه‌ترین و طولانی‌ترین دوره‌ی تناوب اصلی ساختمان‌های مجاور در حالت ارتعاش اساسی برای جهت پاسخ مورد تجزیه و تحلیل هستند. چندین رکورد زلزله معتبر و مهم از زلزله‌های بررسی شده است که از پایگاه اطلاعاتی PEER برای تحلیل غیرخطی سازه‌ها استخراج شدند. زلزله نورث‌ریج (R1 - 1994) یکی از مهم‌ترین زلزله‌های تاریخی است که با شتاب زمین بالا حداکثر $0.52g$ و فرکانس پایین همراه بوده است. این زلزله در جنوب کالیفرنیا رخ داد و به دلیل قدرت تخریبی زیاد، خسارات زیادی به بار آورد. این رکورد به دلیل شتاب بالای خود برای تحلیل‌های لرزه‌ای و بررسی رفتار سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید به کار گرفته می‌شود. زلزله کوبه (R8-R9 - 1995) نیز در ژاپن رخ داد و دو رکورد مختلف از آن ثبت شده است. رکورد R8 دارای شتاب بالا ($0.51g$) و فرکانس متوسط است، در حالی که رکورد R9 شتاب ($0.24g$) و سرعت پایین‌تری دارد. این زلزله به دلیل شرایط خاص خاک ژاپن و ویژگی‌های لرزه‌ای منطقه، تأثیرات بسیاری بر روش‌های طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله داشته است. زلزله لندرز (R11 - 1992) یکی از زلزله‌هایی است که با فرکانس پایین و شتاب متوسط همراه بوده حداکثر شتاب $0.42g$ و در کالیفرنیا رخ داد. این زلزله به‌عنوان یک رکورد دوردست ثبت شده و برای بررسی اثرات لرزه‌ای در مناطق دور از کانون زلزله مناسب است. زلزله سوپرستیشن هیلز (R17-R18 - 1987) با شتاب متوسط و فرکانس پایین رخ داده است. حداکثر شتاب در رکورد R17 برابر با $0.45g$ و در رکورد R18 برابر با $0.35g$ است. این رکوردها برای تحلیل رفتار سازه‌ها تحت تأثیر زلزله‌هایی با شدت متوسط و بررسی تنوع لرزش‌های زمین مفید هستند. زلزله چی‌چی (R21 - 1999) در تایوان رخ داد و یکی از ویژگی‌های بارز آن، فرکانس پایین و سرعت بالای زمین بود (حداکثر سرعت 115 سانتی‌متر بر ثانیه). این زلزله به دلیل اثرات طولانی‌مدت لرزش زمین و تأثیرات خاص خود بر سازه‌ها، برای مطالعه رفتار سازه‌های بلند و ارزیابی اثرات فرکانس پایین مناسب است. جدول 5 مشخصه‌های زلزله بررسی شده در پژوهش را نمایش می‌دهد.

جدول 5: مشخصه زلزله‌های مورد بررسی در این پژوهش

شناسه رکورد	رویداد	کمترین فرکانس (Hz)	حداکثر شتاب زمین (g)	حداکثر سرعت زمین (cm/s)	توضیحات
R1	نورث‌ریج-01، ۱۹۹۴	۰/۲۵	۰/۵۲	۵۶	زلزله نورث‌ریج با رکورد دوردست قابل توجه و مقادیر نسبتاً بالای شتاب و سرعت زمین.
R8	کوبه، ۱۹۹۵	۰/۱۳	۰/۵۱	۳۷	زلزله کوبه با شتاب متوسط و سرعت پایین‌تر، نشان‌دهنده شرایط خاک سفت.
R9	کوبه، ۱۹۹۵	۰/۱۳	۰/۲۴	۳۵	رکورد دیگر از زلزله کوبه با شتاب و سرعت پایین‌تر، نشان‌دهنده شدت کمتر لرزش.
R11	لندرز، ۱۹۹۲	۰/۰۷	۰/۴۲	۲۵	زلزله لندرز با فرکانس پایین، شتاب متوسط و سرعت پایین‌تر، نشان‌دهنده رکورد دوردست.
R17	سوپرستیشن هیلز، ۱۹۸۷	۰/۲۵	۰/۴۵	۴۲	رویداد سوپرستیشن هیلز با حرکت متوسط زمین، مناسب برای تحلیل با شدت متوسط.
R18	سوپرستیشن هیلز، ۱۹۸۷	۰/۲	۰/۳۵	۴۰	رکورد دیگر از سوپرستیشن هیلز با شتاب و سرعت کمی پایین‌تر، نشان‌دهنده تنوع مکانی لرزش.
R21	چی‌چی، ۱۹۹۹	۰/۰۵	۰/۴۴	۱۱۵	زلزله چی‌چی با فرکانس پایین و سرعت بالا، مناسب برای مطالعه اثرات طولانی‌مدت لرزش.

به طور خلاصه در این پژوهش، رکوردهای زلزله نورث‌ریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، لندرز (۱۹۹۲)، سوپرستیشن هیلز (۱۹۸۷)، و چی‌چی (۱۹۹۹) از پایگاه PEER انتخاب و طبق ASCE7 مقیاس‌بندی شده‌اند. این رکوردها طیف متنوعی از شتاب حداکثر، فرکانس، و اثرات لرزه‌ای را پوشش می‌دهند. انتخاب این زلزله‌ها شامل زلزله‌های با شتاب بالا (نورث‌ریج و کوبه)، زلزله‌های حوزه دور از گسل (لندرز)، و زلزله‌های با اثرات طولانی‌مدت ارتعاش (چی‌چی) است. این تنوع امکان تحلیل دقیق‌تر اندرکنش خاک و سازه و بررسی عملکرد میراگرهای ویسکوز در کاهش ضربه و دریافت ساختمان‌های مجاور را فراهم می‌کند. شکل ۴ طیف و شتاب نگاشت رکوردها را نمایش می‌دهد.

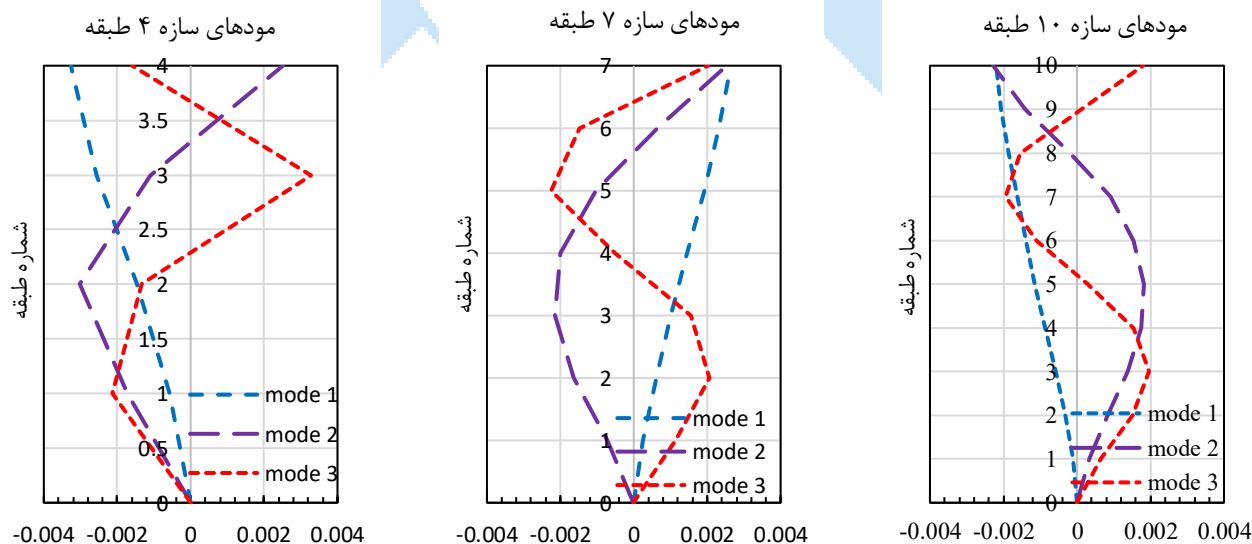


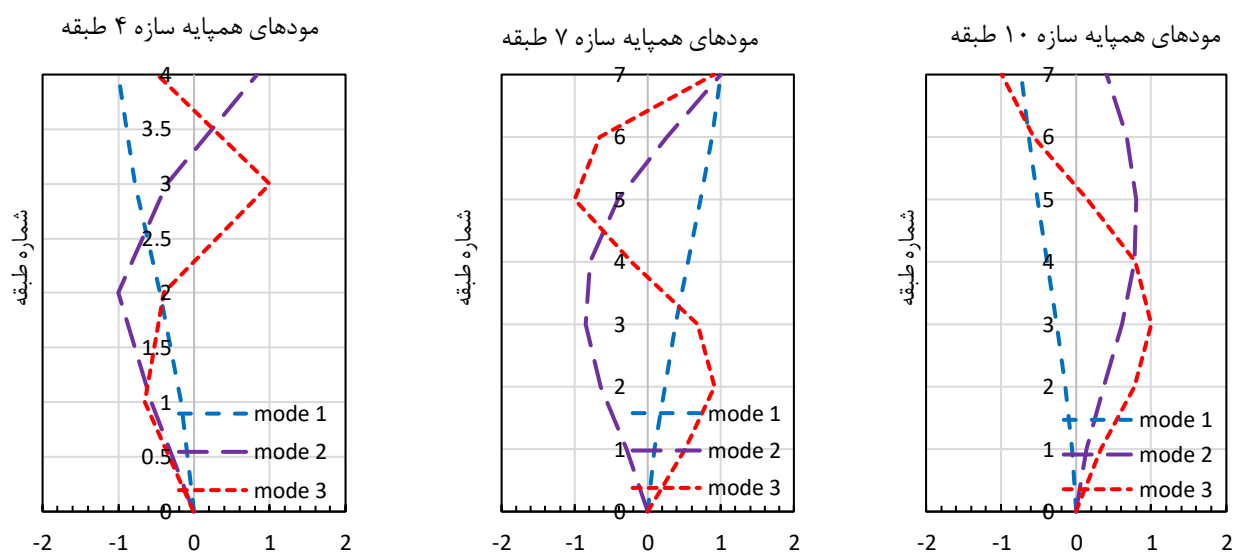
شکل ۴: طیف و شتاب نگاشت رکوردها

۳- تحلیل نتایج

۳-۱ تحلیل مودها

شکل ۵، ۶ و ۷ نمایش دهنده مود ارتعاشی و مود ارتعاشی همپایه شده سازه‌های ۱۰، ۷ و ۴ طبقه به ترتیب می‌باشد. در این شکل‌ها به بررسی تغییر شکل‌های مدهای اول تا سوم پرداخته شده تا صحت رفتار سازه در رفتارهای دینامیکی صحت سنجی شود. در جدول ۳ به بررسی تفاوت زمان تناوب سازه‌ها با مدل سازه‌های فراهانی پرداخته شد. تفاوت‌ها در زمان تناوب مد اول در سازه ۱۰ طبقه ۵ درصد و در سازه ۷ طبقه ۳ درصد و در سازه ۴ طبقه ۴ درصد می‌باشد که نشان دهنده دقت و صحت رفتار دینامیکی سازه می‌باشد.





شکل ۷: مود بررسی شده در سازه ۴ طبقه

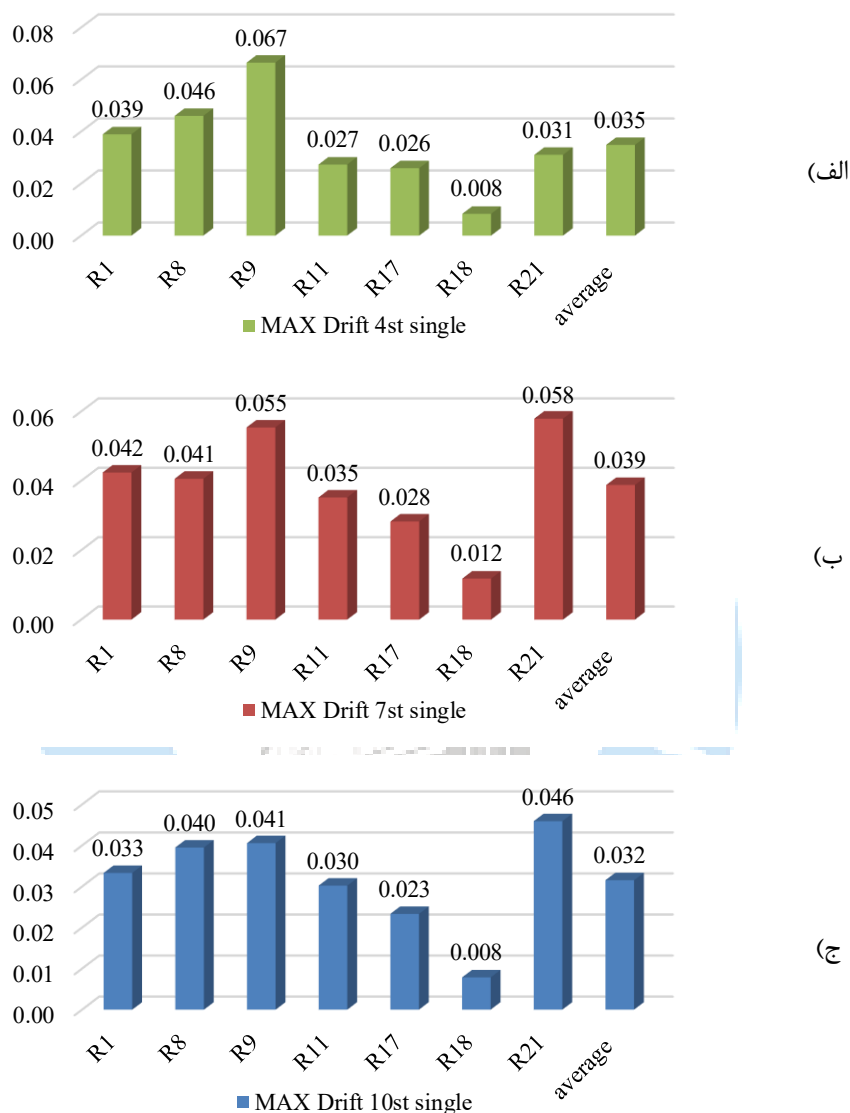
شکل ۶: مود بررسی شده در سازه ۱۰ طبقه

شکل ۵: مود بررسی شده در سازه ۱۰ طبقه

۲-۳ تحلیل دررفت سازه

شکل ۸ نمای تحلیل دررفت سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش را نمایش می‌دهد. سازه‌های در سه سطح ارتفاعی ۴، ۷ و ۱۰ طبقه و تحت رکوردهای زلزله متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. در زلزله نورتریج (R1 (1994)، دررفت سازه ۷ طبقه با مقدار ۰/۰۴۲۴ بیشترین مقدار را داشته است، در حالی که سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه به ترتیب دررفت‌های ۰/۰۳۸۹ و ۰/۰۳۳۳ را تجربه کرده‌اند. این نشان می‌دهد که سازه‌های میان طبقه (۷ طبقه) در زلزله‌های با این مشخصات بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در زلزله کوبه (R8 (1995) -، سازه ۴ طبقه با دررفت ۰/۰۴۶۰ بیشترین دررفت را داشته، در حالی که سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه دررفت‌های کمتری به ترتیب ۰/۰۴۰۶ و ۰/۰۳۹۵ را نشان داده‌اند. این اختلاف به دلیل شتاب بالای زلزله و انعطاف‌پذیری کمتر سازه‌های کوتاه‌تر می‌تواند باشد. در زلزله کوبه (R9 (1995) -، دررفت سازه ۴ طبقه به مقدار ۰/۰۶۶۵ رسیده که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیاد سازه‌های کوتاه‌تر در برابر این نوع زلزله‌هاست. در مقابل، سازه ۷ طبقه دررفت ۰/۰۵۵۴ و سازه ۱۰ طبقه دررفت ۰/۰۴۰۶ داشته‌اند که این مقادیر نسبت به سازه ۴ طبقه کمتر است. در زلزله لندرز (R11 - (1992)، دررفت سازه ۷ طبقه (۰/۰۳۵۲) بیشتر از سازه‌های ۴ طبقه (۰/۰۲۷۳) و ۱۰ طبقه (۰/۰۳۰۲) بوده است. این نشان‌دهنده آسیب‌پذیری سازه‌های میان طبقه در برابر زلزله‌های با مشخصات خاص مانند فرکانس پایین است. در زلزله سوپر استیشن هیلز (R17 - (1987)، دررفت‌ها برای هر سه سازه نزدیک به هم بوده، اما سازه ۷ طبقه با مقدار ۰/۰۲۸۳ دررفت بیشتری نسبت به سازه ۴ طبقه (۰/۰۲۵۹) و ۱۰ طبقه (۰/۰۲۳۳) داشته است. در زلزله سوپر استیشن هیلز (R18 (1987) -، دررفت‌ها به طور کلی کمتر بوده و برای سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه به ترتیب ۰/۰۰۸۴، ۰/۰۱۱۸ و ۰/۰۰۷۹ ثبت شده است. این کاهش در دررفت نشان‌دهنده شتاب و سرعت پایین‌تر زلزله است. با این حال، سازه ۷ طبقه همچنان بیشترین دررفت را داشته که نیاز به بهبود طراحی این نوع سازه‌ها را در مناطق زلزله‌خیز بیان می‌کند. در زلزله چی چی (R21 (1999) -، دررفت سازه ۷ طبقه با مقدار ۰/۰۷۵۹ بیشترین مقدار را داشته است. در حالی که دررفت سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه به ترتیب ۰/۰۳۱۰ و ۰/۰۴۵۹ بوده‌اند. این زلزله با فرکانس پایین و سرعت بالا نشان می‌دهد که سازه‌های میان طبقه بیشتر در معرض خطر قرار دارند. با بررسی نتایج این زلزله‌ها، مشخص می‌شود که سازه‌های میان طبقه (۷ طبقه) در بسیاری از موارد بیشترین دررفت را تجربه کرده‌اند. این ممکن است به دلیل ویژگی‌های دینامیکی سازه‌های میان طبقه باشد که باعث می‌شود تحت تأثیر نیروی لرزه‌ای بیشتری قرار گیرند. همچنین، دررفت سازه‌های کوتاه‌تر (۴ طبقه) در برخی زلزله‌ها بیشتر از سازه‌های بلندتر (۱۰

طبقه) بوده که این می‌تواند به دلیل انعطاف‌پذیری کمتر سازه‌های کوتاه و واکنش تندتر آن‌ها به نیروهای جانبی باشد. در مقابل، سازه‌های بلندتر (۱۰ طبقه) معمولاً دررفت کمتری را تجربه کرده‌اند که این به دلیل سختی بیشتر آن‌هاست. با این حال، در برخی زلزله‌های خاص (مانند R21) حتی سازه‌های بلندتر نیز دررفت قابل توجهی داشته‌اند، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری آن‌ها در زلزله‌های با فرکانس پایین و سرعت بالا است.

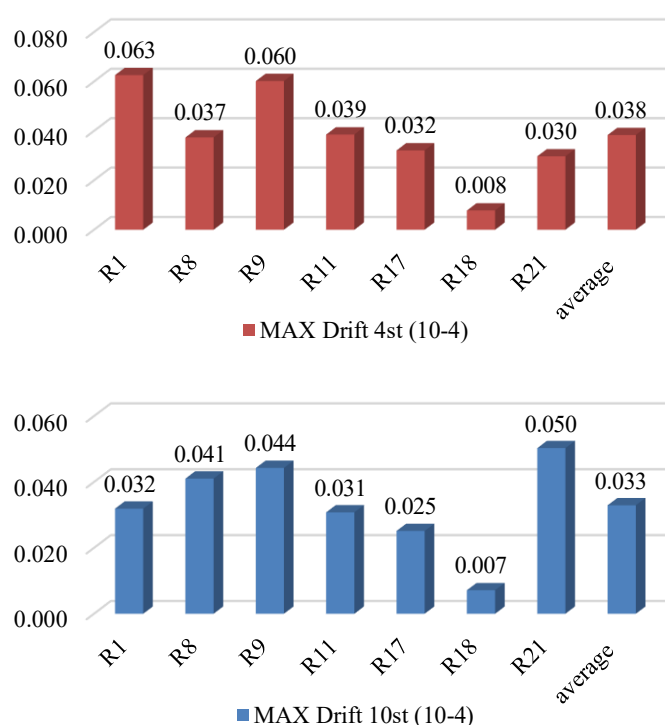


شکل ۸: دررفت حداکثر در سازه‌های مورد بررسی: الف) ۴ طبقه ب) ۷ طبقه ج) ۱۰ طبقه

۳-۳ تحلیل دررفت سازه‌های مجاور

شکل ۹ نمای تحلیل دررفت سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه در مجاورت با یکدیگر را نمایش می‌دهد. در زلزله نورث‌ریج (1994) R1، دررفت حداکثر برای سازه ۴ طبقه در مجاورت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۶۲۶۰۸۴ و برای سازه ۱۰ طبقه ۰/۰۳۱۹۱۳۲ ثبت شده است. این رکورد، دررفت سازه ۴ طبقه در مجاورت سازه بلندتر به میزان قابل توجهی بیشتر از سازه ۱۰ طبقه است. این نشان‌دهنده این است که سازه ۴ طبقه تحت تأثیر نیروهای لرزه‌ای منتقل شده از سازه ۱۰ طبقه قرار گرفته و دررفت بیشتری تجربه کرده است. در زلزله کوبه R8

(1995)، دریفت سازه ۴ طبقه در مجاورت سازه ۱۰ طبقه برابر با 0.0373801 و دریفت سازه ۱۰ طبقه برابر با 0.0410436 بوده است. در این زلزله، دریفت سازه ۴ طبقه کمی کمتر از سازه ۱۰ طبقه بوده است، که نشان می‌دهد در شرایط خاص این زلزله، سازه کوتاه‌تر تحت تأثیر کمتری قرار گرفته است. این اختلاف ممکن است به دلیل ویژگی‌های خاص خاک، ساختار، و شتاب این زلزله باشد. در زلزله کوبه R9 (1995)، دریفت سازه ۴ طبقه برابر با 0.0602119 و دریفت سازه ۱۰ طبقه برابر با 0.0442864 بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که سازه ۴ طبقه همچنان تحت تأثیر سازه ۱۰ طبقه قرار دارد و دریفت بیشتری نسبت به سازه ۱۰ طبقه دارد. همچنین، این زلزله دارای شتاب و شدت قابل توجهی بوده است که باعث افزایش دریفت سازه‌ها شده است. در زلزله لندرز (1992) R11، دریفت سازه ۴ طبقه برابر با 0.0385661 و دریفت سازه ۱۰ طبقه برابر با 0.0307823 بوده است. این رکورد نشان می‌دهد که سازه ۴ طبقه در مجاورت سازه ۱۰ طبقه همچنان دریفت بیشتری تجربه کرده است. این نتیجه نیز مانند رکوردهای قبلی نشان‌دهنده انتقال نیروهای لرزه‌ای از سازه بلندتر به سازه کوتاه‌تر است. در زلزله سوپرستیشن هیلز (1987) R17، دریفت سازه ۴ طبقه برابر با 0.0321118 و دریفت سازه ۱۰ طبقه برابر با 0.025144 بوده است. این رکورد نیز نشان می‌دهد که سازه ۴ طبقه در مجاورت سازه بلندتر دریفت بیشتری دارد، اما مقدار این دریفت در مقایسه با زلزله‌های قبلی کمتر است. این موضوع ممکن است به دلیل شتاب و فرکانس لرزه‌ای پایین‌تر این زلزله باشد. در زلزله سوپرستیشن هیلز (1987) R18، دریفت سازه ۴ طبقه برابر با 0.00781623 و دریفت سازه ۱۰ طبقه برابر با 0.00714625 بوده است. در این رکورد، دریفت هر دو سازه به شدت کاهش یافته است و مقادیر بسیار نزدیک به هم دارند. این امر به دلیل شتاب کمتر زلزله و خصوصیات لرزه‌ای ضعیف‌تر این رکورد می‌باشد. در زلزله چی‌چی (1999) R21، دریفت سازه ۴ طبقه برابر با 0.0297307 و دریفت سازه ۱۰ طبقه برابر با 0.0503031 ثبت شده است. در این رکورد، سازه ۱۰ طبقه دریفت بیشتری نسبت به سازه ۴ طبقه داشته است که ممکن است به دلیل شدت و ویژگی‌های خاص این زلزله و شرایط خاک باشد. با بررسی نتایج دریفت سازه‌های ۴ طبقه در مجاورت سازه‌های ۱۰ طبقه، مشاهده می‌شود که سازه ۴ طبقه در بیشتر موارد دریفت بیشتری نسبت به سازه ۱۰ طبقه تجربه کرده است.

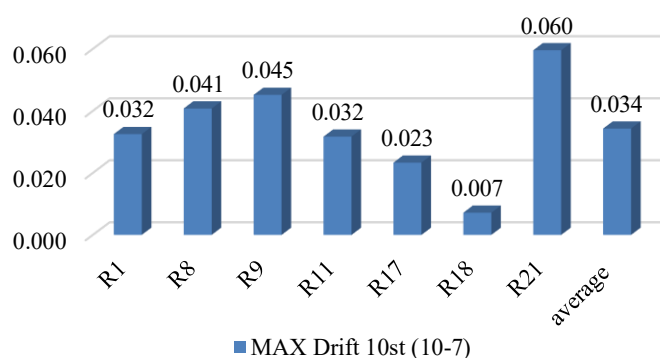
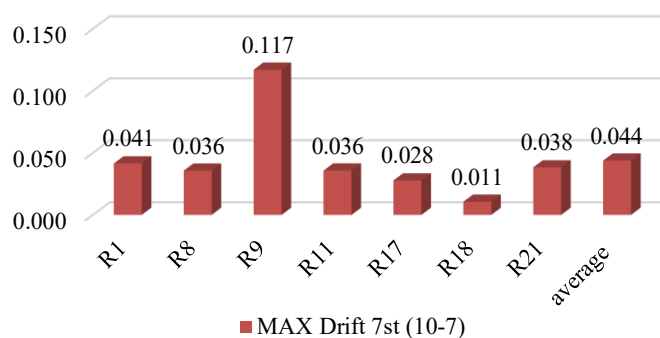


شکل ۹: دریفت حداکثر در سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه مجاور

این نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه سازه بلندتر بر سازه کوتاه‌تر است، به این صورت که نیروهای جانبی زلزله از طریق سازه بلندتر به سازه کوتاه‌تر منتقل می‌شوند و باعث افزایش حرکت جانبی و دریفت سازه کوتاه‌تر می‌شوند. در برخی رکوردهای زلزله، دریفت سازه ۴

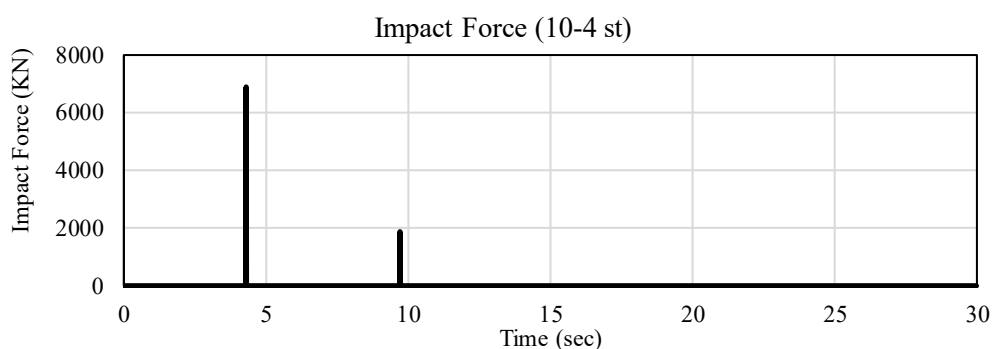
طبقه کاهش یافته است، که نشان می‌دهد ویژگی‌های خاص زلزله مانند شتاب، فرکانس و شرایط خاک می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها داشته باشد. همچنین، در زلزله‌هایی با شتاب کمتر یا فرکانس پایین‌تر و دررفت سازه‌ها به‌طور کلی کاهش یافته است و اختلاف دررفت بین سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه کمتر شده است. این موضوع نشان‌دهنده این است که در زلزله‌های با شدت کمتر، تأثیر سازه بلندتر بر سازه کوتاه‌تر کاهش می‌یابد.

شکل ۱۰ نمای تحلیل دررفت سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه در مجاورت با یکدیگر را نمایش می‌دهد. در زلزله نورث ریج - R1 (۱۹۹۴)، دررفت حداکثر سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۴۱۵ و دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۳۲۵ ثبت شده است. در این رکورد، دررفت سازه ۷ طبقه در مجاورت سازه بلندتر (۱۰ طبقه) بیشتر از دررفت سازه ۱۰ طبقه است. این موضوع به این نکته اشاره دارد که سازه‌های میان طبقه (۷ طبقه) ممکن است به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، تحت تأثیر نیروهای لرزه‌ای بیشتری قرار گیرند و در نتیجه دررفت بیشتری نسبت به سازه‌های بلندتر تجربه کنند. در زلزله کوبه - R8 (۱۹۹۵)، دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۳۵۶ و دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۴۰۸ بوده است. در این رکورد، دررفت سازه ۱۰ طبقه بیشتر از سازه ۷ طبقه بوده است، که ممکن است به دلیل ویژگی‌های خاص این زلزله و شرایط خاک باشد. شتاب و سرعت زلزله نیز می‌تواند بر این اختلاف تأثیرگذار باشد، زیرا زلزله‌هایی با شتاب و سرعت بالاتر معمولاً باعث افزایش دررفت در سازه‌های بلندتر می‌شوند. در زلزله کوبه - R9 (۱۹۹۵)، دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۱۱۷۱ و دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۴۵۲ بوده است. این اختلاف بسیار بزرگ نشان می‌دهد که سازه ۷ طبقه به‌شدت تحت تأثیر این زلزله قرار گرفته است و دررفت بسیار بیشتری نسبت به سازه ۱۰ طبقه داشته است. این تفاوت می‌تواند به دلیل شرایط لرزه‌ای زلزله R9 باشد که سازه‌های میان طبقه را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در زلزله لندرز - R11 (۱۹۹۲)، دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۳۵۸ و دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۳۱۷ بوده است. در این رکورد، تفاوت دررفت بین سازه ۷ طبقه و ۱۰ طبقه کم است، اما همچنان سازه ۷ طبقه دررفت بیشتری دارد. این نشان می‌دهد که در برخی زلزله‌ها، سازه‌های میان طبقه تحت تأثیر بیشتری از لرزه‌های زمین قرار می‌گیرند و ممکن است دررفت بیشتری نسبت به سازه‌های بلندتر تجربه کنند. در زلزله سوپر استیشن هیلز - R17 (۱۹۸۷)، دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۲۷۷ و دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۲۳۳ بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که سازه ۷ طبقه همچنان دررفت بیشتری دارد، هرچند که در این رکورد تفاوت دررفت بین دو سازه چندان بزرگ نیست. این کاهش دررفت می‌تواند به دلیل شتاب پایین‌تر و فرکانس خاص این زلزله باشد. در زلزله سوپر استیشن هیلز - R18 (۱۹۸۷)، دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۱۰۶ و دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۰۷۱ بوده است. هر دو سازه دررفت بسیار کمی تجربه کرده‌اند، که نشان‌دهنده تأثیر کم این زلزله با شتاب و سرعت پایین است. با این حال، سازه ۷ طبقه همچنان دررفت بیشتری دارد، که ممکن است ناشی از انعطاف‌پذیری بیشتر آن باشد. در زلزله چی چی - R21 (۱۹۹۹)، دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۳۸۳ و دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۵۹۶ بوده است. در این رکورد، دررفت سازه ۱۰ طبقه به‌طور قابل توجهی بیشتر از سازه ۷ طبقه بوده است. این زلزله با فرکانس پایین و سرعت بالا ممکن است تأثیر بیشتری بر سازه‌های بلندتر داشته باشد و دررفت بیشتری در آن‌ها ایجاد کند. تحلیل نتایج دررفت سازه ۷ طبقه در مجاورت سازه ۱۰ طبقه نشان می‌دهد که این موضوع نشان می‌دهد که بسیاری از رکوردهای زلزله (مانند R1، R9، R11 و R17)، دررفت سازه ۷ طبقه بیشتر از سازه ۱۰ طبقه بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که سازه‌های میان طبقه (۷ طبقه) به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، تحت تأثیر نیروهای جانبی زلزله بیشتر قرار گرفته و دررفت بیشتری را تجربه می‌کنند. همچنین، در زلزله‌های خاصی مانند R9، دررفت سازه ۷ طبقه به‌طور قابل توجهی بیشتر از سازه ۱۰ طبقه بوده است، که نشان می‌دهد برخی زلزله‌ها با ویژگی‌هایی مانند شتاب و سرعت بالا تأثیرات شدیدتری بر سازه‌های میان طبقه دارند. از سوی دیگر، در برخی رکوردها (مانند R8 و R21)، سازه ۱۰ طبقه دررفت بیشتری نسبت به سازه ۷ طبقه داشته است که نشان می‌دهد سازه‌های بلندتر در زلزله‌هایی با فرکانس پایین و سرعت بالا ممکن است دررفت بیشتری تجربه کنند. به‌طور کلی، سازه‌های میان طبقه به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، در برابر نیروهای لرزه‌ای حساس‌تر هستند و دررفت بیشتری در آن‌ها ایجاد می‌شود؛ به همین دلیل، آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به سازه‌های بلندتر و کوتاه‌تر دارند. برای کاهش دررفت در سازه‌های ۷ طبقه که در مجاورت سازه‌های بلندتر (۱۰ طبقه) قرار دارند، استفاده از میراگرها یا درز انقطاع مناسب می‌تواند مؤثر باشد. این روش‌ها می‌توانند انتقال نیروهای جانبی از سازه بلندتر به سازه میان طبقه را کاهش دهد.



شکل ۱۰: دریفت حداکثر در سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه مجاور

به‌عنوان نمونه در سازه‌هایی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند احتمال ضربه زدن به یکدیگر وجود دارد. در شکل ۱۱ نمودار نیروی ضربه برحسب زمان رکورد R1 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو بار سازه‌ها به یکدیگر ضربه زدند که مقدار نیروی ضربه آنها در شکل مشخص می‌باشد.

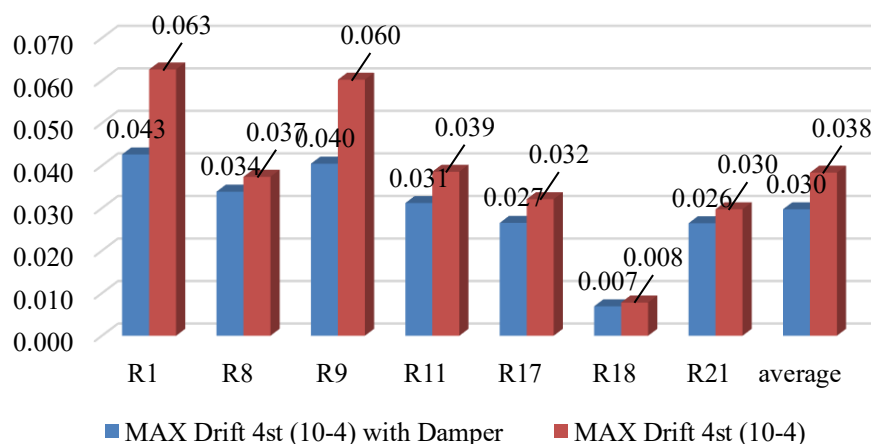


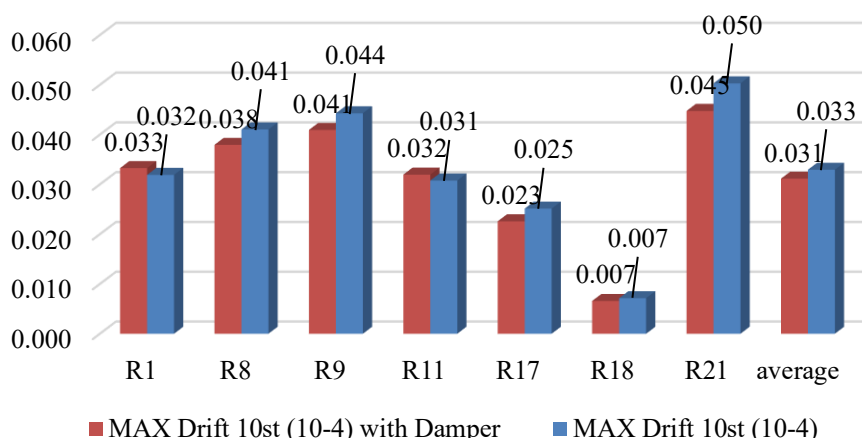
شکل ۱۱: مقدار نیروی ضربه دو سازه مجاور هم ۴ و ۱۰ طبقه در تراز بام تحت رکورد R1

۳-۴ تحلیل دریفت سازه با استفاده از میراگر

شکل ۱۲ نمای تحلیل دریفت سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه در مجاورت با یکدیگر با استفاده از میراگر را نمایش می‌دهد. در زلزله نورث‌ریج - R1 (۱۹۹۴)، دریفت سازه ۴ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۴۲۶ و دریفت سازه ۱۰ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۳۳۳ ثبت شده است. در این رکورد، سازه ۴ طبقه با میراگر دریفت کمتری نسبت به وضعیت بدون میراگر تجربه کرده است. میراگرها به کاهش تأثیرات نیروهای

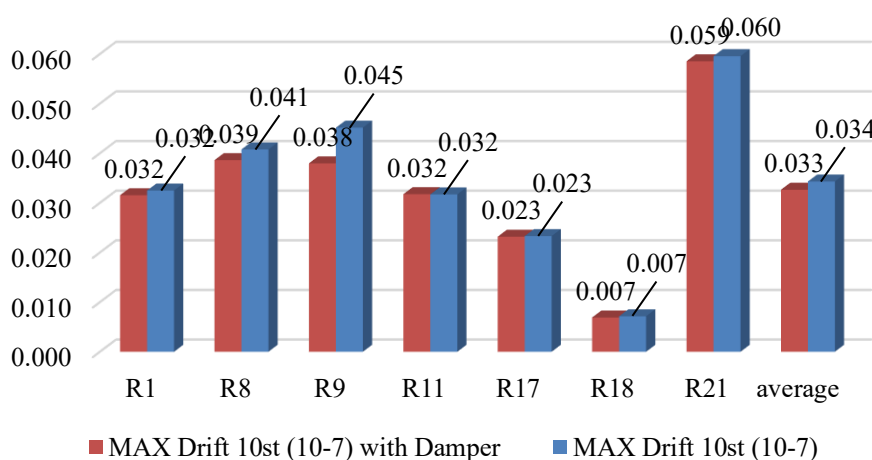
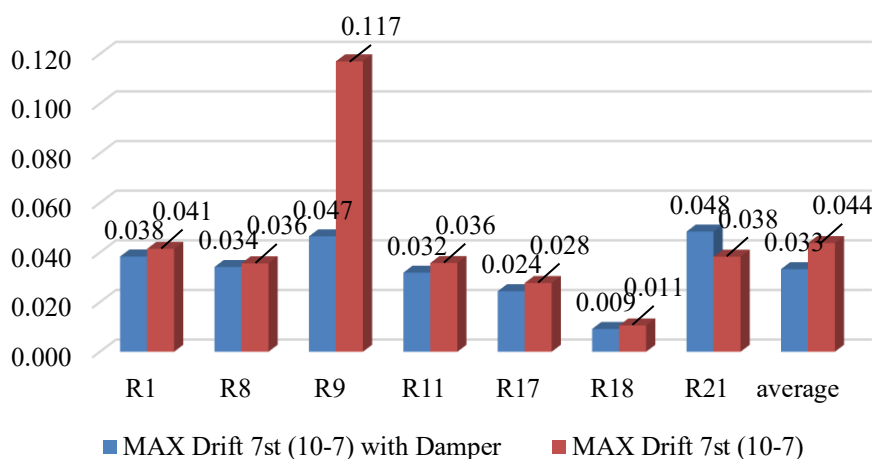
جانبی کمک کرده و اثرات لرزه‌ای را کنترل می‌کنند. با این حال، دریفت سازه ۴ طبقه هنوز بیشتر از دریفت سازه ۱۰ طبقه است که نشان می‌دهد سازه‌های کوتاه‌تر همچنان تحت تأثیر قرار دارند. در زلزله کوبه - R8 (۱۹۹۵)، دریفت سازه ۴ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۳۳۹ و دریفت سازه ۱۰ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۳۷۹ بوده است. در این رکورد، دریفت سازه ۱۰ طبقه کمی بیشتر از سازه ۴ طبقه با میراگر بوده است که این امر نشان می‌دهد که در شرایط خاص زلزله، تأثیرات نیروهای جانبی می‌تواند باعث افزایش دریفت در سازه‌های بلندتر شود، حتی با وجود میراگر. در زلزله کوبه - R9 (۱۹۹۵)، دریفت سازه ۴ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۴۰۵ و دریفت سازه ۱۰ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۴۰۹ بوده است. دریفت هر دو سازه در این زلزله بسیار نزدیک به هم است و هر دو به‌طور تقریبی دریفت مشابهی را نشان می‌دهند. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر میراگرها در کاهش نیروهای لرزه‌ای و کاهش اختلاف دریفت بین سازه‌ها است. در زلزله لندرز - R11 (۱۹۹۲)، دریفت سازه ۴ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۳۱۲ و دریفت سازه ۱۰ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۳۲۰ بوده است. در این رکورد، دریفت هر دو سازه با میراگر در مقایسه با رکوردهای قبلی کاهش یافته است. این کاهش در دریفت نشان می‌دهد که میراگرها به‌طور مؤثری در کنترل حرکت جانبی سازه‌ها در برابر زلزله‌ها عمل می‌کنند. در زلزله سوپرستیشن هیلز - R17 (۱۹۸۷)، دریفت سازه ۴ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۲۶۵ و دریفت سازه ۱۰ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۲۲۶ بوده است. هر دو سازه با میراگر دریفت کمتری نسبت به رکوردهای قبلی نشان می‌دهند. به‌ویژه، سازه ۱۰ طبقه دریفت کمتری دارد که نشان می‌دهد میراگرها می‌توانند تأثیرات منفی ناشی از نیروهای جانبی را به‌خوبی کاهش دهند. در زلزله سوپرستیشن هیلز - R18 (۱۹۸۷)، دریفت سازه ۴ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۰۶۹ و دریفت سازه ۱۰ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۰۶۶ بوده است. در این رکورد، دریفت هر دو سازه به‌شدت کاهش یافته است. میراگرها در اینجا به‌طور مؤثری حرکت جانبی را کنترل کرده‌اند و دریفت‌ها در هر دو سازه به مقادیر بسیار کمی رسیده‌اند. در زلزله چی چی - R21 (۱۹۹۹)، دریفت سازه ۴ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۲۶۴ و دریفت سازه ۱۰ طبقه با میراگر برابر با ۰/۰۴۴۸ ثبت شده است. در این رکورد، دریفت سازه ۱۰ طبقه به‌طور قابل توجهی بیشتر از سازه ۴ طبقه است. این ممکن است به تأثیرات خاص زلزله و شرایط زمین‌شناسی مربوط باشد. با این حال، سازه ۴ طبقه هنوز تحت تأثیر میراگرها، دریفت کمتری دارد. استفاده از میراگرها در هر دو سازه باعث کاهش قابل توجهی در دریفت‌ها شده است. این نشان می‌دهد که میراگرها به‌طور مؤثری می‌توانند نیروهای جانبی ناشی از زلزله را کاهش دهند و پایداری سازه‌ها را افزایش دهند. در برخی زلزله‌ها، دریفت سازه ۱۰ طبقه بیشتر از سازه ۴ طبقه است که ممکن است به دلیل ویژگی‌های خاص زلزله و پاسخ دینامیکی سازه‌ها باشد. با این حال، به‌طور کلی میراگرها در هر دو سازه تأثیر مثبت داشته‌اند. در زلزله‌های خاصی مانند R9، تأثیرات نیروهای جانبی بر سازه‌ها متفاوت است و ممکن است باعث افزایش دریفت در سازه‌های بلندتر شود، حتی با وجود میراگرها. این نکته نشان‌دهنده اهمیت بررسی شرایط خاص هر زلزله و طراحی متناسب با آن است. سازه‌های ۴ طبقه با میراگرها به‌وضوح در برابر زلزله‌های شدید عملکرد بهتری دارند و دریفت کمتری را تجربه می‌کنند. این نشان می‌دهد که طراحی مناسب و استفاده از فناوری‌های نوین مانند میراگرها می‌تواند به بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر زلزله‌ها کمک کند.





شکل ۱۲: مقایسه دررفت حداکثر در سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه مجاور با میراگر و بدون میراگر

شکل ۱۳ نمای تحلیل دررفت سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه در مجاورت با یکدیگر با استفاده از میراگر را نمایش می‌دهد. در زلزله نورث‌ریج - R1 (۱۹۹۴)، دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۳۲ و دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۳۸ بوده است. در این رکورد، سازه ۷ طبقه دررفت بیشتری نسبت به سازه ۱۰ طبقه داشته است که ممکن است به تأثیرات خاص دینامیکی یا توزیع نیروهای جانبی مربوط باشد. در زلزله کوبه - R8 (۱۹۹۵)، دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۳۹ و دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۳۴ بوده است. این نشان می‌دهد که سازه ۱۰ طبقه در این زلزله دررفت بیشتری تجربه کرده است، اما این اختلاف نسبتاً کوچک است و می‌تواند به پاسخ دینامیکی خاص سازه‌های بلندتر مرتبط باشد. در زلزله کوبه - R9 (۱۹۹۵)، دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۳۸ و دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۴۷ بوده است. در این رکورد، دررفت سازه ۷ طبقه به‌طور قابل توجهی بیشتر است، که نشان می‌دهد در برخی شرایط زلزله، سازه‌های کوتاه‌تر ممکن است تحت تأثیر نیروهای جانبی بیشتری قرار گیرند. در زلزله لندرز - R11 (۱۹۹۲)، دررفت هر دو سازه ۷ و ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۳۲ بوده است، که نشان‌دهنده تأثیرات مشابه نیروهای جانبی بر هر دو سازه است. این مشابه برخی از رکوردهای قبلی است که دررفت سازه‌ها نزدیک به هم بوده و نشان می‌دهد که میراگرها به‌خوبی در کنترل نیروهای لرزه‌ای عمل کرده‌اند. در زلزله سوپرستیشن هیلز - R17 (۱۹۸۷)، دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۲۳ و دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۲۴ بوده است. این مقادیر کم نشان‌دهنده کنترل خوب نیروهای جانبی توسط میراگرها است. در زلزله سوپرستیشن هیلز - R18 (۱۹۸۷)، دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۰۷ و دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۰۹ بوده است. در این رکورد، هر دو سازه دررفت بسیار کمی تجربه کرده‌اند که نشان‌دهنده اثربخشی بالای میراگرها است. در زلزله چی - R21 (۱۹۹۹)، دررفت سازه ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۵۹ و دررفت سازه ۷ طبقه برابر با ۰/۰۴۸ بوده است. در این رکورد، دررفت سازه ۱۰ طبقه به‌طور قابل توجهی بیشتر از سازه ۷ طبقه بوده که ممکن است به ویژگی‌های خاص زلزله و شرایط زمین‌شناسی مرتبط باشد. به‌طور کلی، میانگین دررفت‌ها برای هر دو سازه ۷ و ۱۰ طبقه برابر با ۰/۰۳۳ بوده است که نشان می‌دهد در مجموع، تأثیر نیروهای جانبی بر هر دو سازه مشابه بوده است. مقایسه با سازه‌ی ۴ طبقه و ۱۰ طبقه مجاور با میراگر نشان می‌دهد که در هر دو حالت، میراگرها تأثیر مثبتی در کاهش دررفت سازه‌ها داشته‌اند و تفاوت دررفت بین سازه‌های کوتاه‌تر و بلندتر به شرایط خاص هر زلزله بستگی دارد. همچنین، در تحلیل قبلی و این تحلیل، سازه‌های کوتاه‌تر در برخی موارد دررفت بیشتری نسبت به سازه‌های بلندتر تجربه کرده‌اند، اما میانگین کلی دررفت‌ها نشان‌دهنده کنترل مؤثر نیروهای جانبی توسط میراگرها است.



شکل ۱۳: مقایسه دریفت حداکثر در سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه مجاور با میراگر و بدون میراگر

۴- نتیجه‌گیری

با بررسی سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه در این پژوهش مشاهده شد که:

۱- در این پژوهش نتایج تحلیل دریفت سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه نشان می‌دهد که دریفت حداکثر سازه‌های منفرد (بدون میراگر) در سازه ۴ طبقه معمولاً در اکثر زلزله‌ها بیشتر از سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه بوده است، به‌ویژه در زلزله‌هایی با شتاب بالا. سازه ۷ طبقه دریفتی بین دریفت‌های سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه دارد و در زلزله‌های مختلف دریفت بیشتری نسبت به سازه ۱۰ طبقه داشته است. سازه ۱۰ طبقه به‌طور کلی دریفت کمتری نسبت به دو سازه دیگر دارد، به‌خصوص در زلزله‌هایی با شدت بالا، و به دلیل سختی بیشتر، آسیب‌پذیری کمتری نشان داده است.

۲- تأثیر مجاورت سازه‌ها نیز قابل توجه است؛ به‌طوری‌که در زلزله‌های مختلف، سازه ۴ طبقه معمولاً دریفت بیشتری نسبت به سازه ۱۰ طبقه در مجاورت هم داشته است که نشان می‌دهد مجاورت با سازه‌های بلندتر می‌تواند باعث افزایش دریفت سازه‌های کوتاه‌تر شود. همچنین، دریفت سازه ۷ طبقه در مجاورت سازه ۱۰ طبقه نیز بیشتر بوده و نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالاتر سازه‌های میان‌طبقه در برابر نیروهای لرزه‌ای است.

۳- استفاده از میراگرها به طور کلی باعث کاهش قابل توجه دررفت سازه‌ها شده است؛ در بیشتر رکوردها، دررفت سازه ۴ طبقه با میراگر نسبت به حالت بدون میراگر کاهش یافته است و در زلزله‌های شدید میراگرها به کاهش اثرات لرزه‌ای کمک کرده‌اند. مقایسه دررفت با و بدون میراگر نیز نشان می‌دهد که سازه‌های با میراگر نسبت به سازه‌های بدون میراگر عملکرد بهتری داشته‌اند و در زلزله‌هایی با شدت بالا، میراگرها باعث کاهش تأثیرات منفی نیروهای جانبی شده و پایداری سازه‌ها را افزایش داده‌اند.

۴- از نکات کلیدی دیگر این است که در زلزله‌هایی با فرکانس بالا و شتاب زیاد، سازه‌های کوتاه‌تر (۴ و ۷ طبقه) بیشتر آسیب‌پذیر هستند و دررفت بیشتری را تجربه می‌کنند، درحالی‌که در زلزله‌هایی با فرکانس پایین، سازه‌های بلندتر (۱۰ طبقه) ممکن است بیشتر تحت تأثیر قرار گیرند.

۵- با توجه با این نتایج، استفاده از میراگرها به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش دررفت و بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر زلزله‌ها به شدت توصیه می‌شود، چراکه این تکنولوژی‌ها می‌توانند تأثیرات منفی نیروهای جانبی را کاهش داده و خطر آسیب‌پذیری را کاهش دهند. به طور کلی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سازه‌های ۴ و ۷ طبقه به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، در برابر زلزله‌ها آسیب‌پذیرتر هستند و معمولاً دررفت بیشتری را تجربه می‌کنند، درحالی‌که سازه ۱۰ طبقه به دلیل سختی بیشتر، دررفت کمتری دارد. استفاده از میراگرها در هر دو سازه ۴ و ۱۰ طبقه به کاهش قابل توجه دررفت‌ها و افزایش مقاومت سازه‌ها کمک کرده است و طراحی مناسب و استفاده از میراگر بین دو سازه مجاور به عنوان یکی از فناوری‌های کنترل لرزه‌ای می‌تواند به کاهش خطرات ناشی از زلزله و بهبود عملکرد سازه‌ها کمک کند.

مراجع

- [1] Miari, M., Choong, K.K., & Jankowski, R. (2019). *Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, pp. 135–150.
- [2] Ras, A., & Boumechra, N. (2016). *Seismic energy dissipation study of linear fluid viscous dampers in steel structure design*. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), pp. 2821–2832.
- [3] Froehlich, A. (2019). *Embedding space in African society: The United Nations sustainable development goals 2030 supported by space applications*. Springer.
- [4] Anand, V., & Kumar, S.S. (2018). *Seismic soil-structure interaction: A state-of-the-art review*. In *Structures*. Elsevier.
- [5] Chinmayi, H. (2019). *Study on pounding of structures with soil-structure interaction effects: A review*. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 100, pp. 199–204.
- [6] Hao, H., Liu, X.Y., & Shen, J. (2000). *Pounding response of adjacent buildings subjected to spatial earthquake ground excitations*. *Advances in Structural Engineering*, 3(2), pp. 145–162.
- [7] Rahman, A., Carr, A., & Moss, P. (2001). *Seismic pounding of a case of adjacent multiple-storey buildings of differing total heights considering soil flexibility effects*. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 34(1), pp. 40–59.
- [8] Bhaskararao, A., & Jangid, R. (2004). *Seismic response of adjacent buildings connected with dampers*. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [9] Bhaskararao, A., & Jangid, R. (2006). *Seismic response of adjacent buildings connected with friction dampers*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, pp. 43–64.

- [10] Shakya, K., & Wijeyewickrema, A.C. (2009). *Mid-column pounding of multi-story reinforced concrete buildings considering soil effects*. *Advances in Structural Engineering*, 12(1), pp. 71–85.
- [11] Naserkhaki, S., & Pourmohammad, H. (2012). *SSI and SSSI effects in seismic analysis of twin buildings: Discrete model concept*. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(6), pp. 890–898.
- [12] Pawar, P., & Murnal, P. (2014). *Effect of seismic pounding on adjacent blocks of unsymmetrical buildings considering soil-structure interaction*. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(7), pp. 391–395.
- [13] Farghaly, A.A. (2017). *Seismic analysis of adjacent buildings subjected to double pounding considering soil-structure interaction*. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 9, pp. 51–62.
- [14] Warnotte, V., et al. (2007). *State of the art in the pounding mitigation techniques*. *INTERSECTII/INTERSECTIONS*, 4(3).
- [15] Elwardany, H., et al. (2019). *Influence of soil-structure interaction on seismic pounding between steel frame buildings considering the effect of infill panels*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, pp. 6165–6202.
- [16] Farahani, D., Behnamfar, F., & Sayyadpour, H. (2019). *Effect of pounding on nonlinear seismic response of torsionally coupled steel structures resting on flexible soil*. *Engineering Structures*, 195, pp. 243–262.
- [17] Haseli, B., Homami, P., & Nouri, G. (2023). *Soil-structure interaction effects on optimal characteristics of tuned mass dampers in suspension bridges against near-field earthquakes*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(3). DOI: 10.22065/jsce.2023.400751.3137.
- [18] Alizadeh, H., & Hosseini Lavassani, S.H. (2022). *The effect of soil-structure interaction on longitudinal seismic responses of suspension bridges controlled by optimal TMD*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 4), pp. 439–458. DOI: 10.22065/jsce.2021.259712.2303.
- [19] Ganjavi, B. (2020). *Optimum seismic design of structures with hysteretic damper considering soil flexibility*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(Special Issue 2), pp. 124–141. DOI: 10.22065/jsce.2018.139987.1604.
- [20] Hoveidae, N., Mirzapoor, M., & Kardan, N. (2021). *Evaluation of effect of tuned liquid dampers and modified tuned liquid dampers on seismic response of steel moment resisting frames*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), pp. 87–105. DOI: 10.22065/jsce.2019.165876.1756.
- [21] Beheshti, M., & Asadi, P. (2021). *Seismic vulnerability assessment of retrofitted steel structures with fractional viscoelastic dampers considering uncertainty variables*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(1), pp. 271–285. DOI: 10.22065/jsce.2019.171919.1785.
- [22] Arkavazi, F., Ghasemi, A., & Shakib, H. (2023). *Seismic vulnerability assessment of steel special moment frames having superelastic viscous damper*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(4), pp. 174–197. DOI: 10.22065/jsce.2022.339015.2795.
- [23] Kharazian, A., López Almansa, F., & Benavent Climent, A. (2019). *Consideration of pounding and SSI in energy-based seismic design of buildings*. In *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Crete, Greece: Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research School of Civil.
- [24] Cayci, B.T., & Akpınar, M. (2021). *Seismic pounding effects on typical building structures considering soil-structure interaction*. In *Structures*. Elsevier.

- [25] Sobhi, P., & Far, H. (2022). *Impact of structural pounding on structural behaviour of adjacent buildings considering dynamic soil-structure interaction*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(7), pp. 3515–3547.
- [26] Rayegani, A., & Nouri, G. (2022). *Application of smart dampers for prevention of seismic pounding in isolated structures subjected to near-fault earthquakes*. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(8), pp. 4069–4084.
- [27] Majdi, A., et al. (2023). *On the influence of unexpected earthquake severity and dampers placement on isolated structures subjected to pounding using the modified endurance time method*. *Buildings*, 13(5), p. 1278.
- [28] Liu, Y., Li, J., & Lin, G. (2024). *Dynamic soil-structure interaction analysis for base-isolated nuclear island building based on the method of external source wave motion*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 177, p. 108422.
- [29] ASCE/SEI 7-10. (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [30] ANSI. (2010). *AISC 360-10: Specification for structural steel buildings*. Chicago, IL: AISC.
- [31] FEMA. (2000). *Commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA-356. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.

