

Assessment of Impacts Between Adjacent Buildings with Torsional Irregularity During Seismic Events

Nasrin al-nawashef¹, Javad Vaseghi Amiri^{2*}, Alireza Mirzagoltabar Roshan³

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

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

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

ABSTRACT

In adjacent buildings during moderate and severe earthquakes, displacements are transferred from the ground to the structures, leading to different dynamic responses and out-of-phase lateral oscillations. Due to the absence or inadequacy of separation gaps between adjacent buildings, the structures cannot oscillate freely, resulting in a phenomenon known as pounding. Out-of-phase oscillations of adjacent structures cause collisions that may exacerbate structural damage and lead to human and economic losses. This study investigates the effects of pounding, responses, and deformations of adjacent buildings under seismic influence. The studied structures have identical plans with dimensions of 15×15 meters, torsional irregularities, floor heights of 3.3 meters, and are located on soft soil in a highly seismically active region. Nonlinear time-history analysis of the structures was conducted using the OpenSees software. To control vibrations and pounding, a viscous damper was designed and nonlinearly modeled at the roof level of the shorter structure. Analysis of the maximum inter-story drift of the structures under different earthquake records indicates that, generally, in the case of pounding between adjacent buildings, the drift of the shorter structure decreases due to collision with the taller structure, whereas this value increases in the taller structure. Additionally, the base shear of each structure increases due to the pounding, with the shorter structure experiencing a greater increase compared to the taller one. Examination of the pounding force between the structures, with and without the viscous damper, reveals that the presence of a viscous damper in adjacent buildings plays a key role in reducing the pounding force and preventing potential damage caused by structural collisions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 March 2025

Revise Date: 29 June 2025

Accept Date: 26 July 2025

Keywords:

Viscous Damper

Structural Drift

Torsionally Irregular Structure

Impact

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.501237.3640

*Corresponding author: Javad Vaseghi Amiri

Email address: vaseghi@nit.ac.ir

ارزیابی ضربات ساختمان‌های مجاور با نامنظمی پیچشی در رخدادهای لرزه‌ای

نسرین النواشف^۱، جواد واثقی‌امیری^{۲*}، علیرضا میرزا گل تبار روشن^۳

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

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

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

چکیده

در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های متوسط تا شدید، دو ساختمان مجاور ممکن است جابه‌جایی‌هایی را از زمین دریافت کنند که به طبقات بالایی منتقل می‌شود. این انتقال باعث بروز پاسخ‌های دینامیکی متفاوت و نوسانات جانبی ناهماهنگ در ساختمان‌ها می‌شود. به دلیل نبود یا ناکافی بودن درز انقطاع میان سازه‌های مجاور، امکان نوسان آزادانه برای آن‌ها فراهم نیست و در نتیجه برخورد میان آن‌ها روی می‌دهد؛ پدیده‌ای که به آن ضربه بین‌سازه‌ای گفته می‌شود. نوسان سازه‌هایی غیرهم‌فاز موجب برخورد آن‌ها شده که ممکن است آسیب‌های سازه‌ای و تلفات انسانی و اقتصادی را تشدید کند. در این پژوهش به بررسی اثرات ضربه، پاسخ و تغییر شکل سازه‌های مجاور تحت تأثیر زلزله پرداخته شده است. سازه‌های مفروض مورد مطالعه دارای پلان یکسان با ابعاد 15×15 متر با نامنظمی پیچشی و ارتفاع طبقات ۳.۳ متر و در نوع خاک نرم و منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بسیار بالا قرار دارند. تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی سازه‌ها توسط نرم‌افزار این‌سیس انجام شده است. جهت کنترل ارتعاش و ضربه سازه‌ها، میراگر ویسکوز در تراز بام سازه کوتاه‌تر طراحی و مدل‌سازی غیرخطی شده است. بررسی پیشینه دریافت بین طبقات سازه تحت رکورد زلزله‌های مختلف نشان می‌دهد که به‌طور کلی، در حالت ضربه بین سازه‌های مجاور، دریافت سازه کوتاه‌تر در اثر برخورد با سازه بلندتر کاهش می‌یابد؛ ولی در سازه بلندتر این مقدار افزایش خواهد یافت. همچنین در اثر برخورد سازه‌ها به هم مقدار برش پایه هر یک از سازه‌ها افزایش می‌یابد؛ ولی این افزایش برش پایه در سازه‌های کوتاه‌تر بیشتر بوده و در سازه‌های بلندتر افزایش کمتری مشاهده شده است. با بررسی‌های انجام‌شده روی نیروی ضربه بین سازه‌ها با و بدون حضور میراگر ویسکوز، حضور میراگر ویسکوز در سازه‌های مجاور نقش کلیدی در کاهش نیروی ضربه و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از برخورد سازه‌ها دارد.

کلمات کلیدی: میراگر ویسکوز، دریافت سازه، سازه نامنظمی پیچشی، ضربه.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2025.501237.3640	۱۴۰۳/۱۲/۱۲	۱۴۰۴/۰۴/۰۸	۱۴۰۴/۰۵/۰۴	۱۴۰۴/۰۵/۰۴	۱۴۰۴/۰۷/۳۰
doi: 10.22065/jsce.2025.501237.3640					
*نویسنده مسئول: جواد واثقی‌امیری vaseghi@nit.ac.ir پست الکترونیکی:					

۱- مقدمه

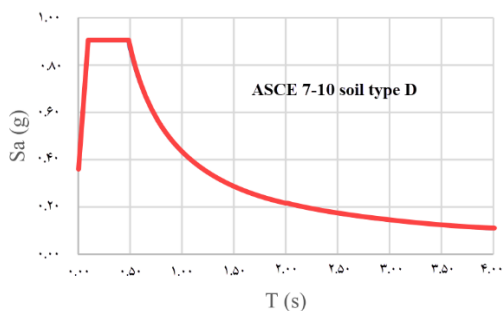
در مناطق شهری با تراکم بالای ساختمان‌ها، هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های متوسط و شدید، ممکن است ساختمان‌های مجاور به دلیل جابجایی‌های طبقات در جهت مختلف با یکدیگر برخورد کنند. این پدیده که به عنوان "ضربه ساختمان‌ها" شناخته می‌شود، می‌تواند از آسیب‌های جزئی تا فروریزش کامل ساختمان‌ها منجر شود. حتی در ساختمان‌های جدا شده با درزهای انقطاع کوچک و پل‌ها نیز این مشکل رخ می‌دهد. پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی نشان داده‌اند که در صورت وقوع ضربه، شتاب‌ها و دریف‌های درون‌طبقاتی به شدت افزایش یافته و عملکرد سازه و تجهیزات حساس آسیب می‌بیند. این مسئله به‌ویژه در تراز طبقات و مناطقی که برخورد رخ می‌دهد مشاهده شده است. به منظور کاهش یا جلوگیری از این ضربات، روش‌هایی نظیر ایجاد درزهای انقطاع لرزه‌ای بین ساختمان‌ها، استفاده از ضربه‌گیرهای لاستیکی و میراگرها پیشنهاد شده است [۱]. ضربه‌گیرها مانند لاستیک‌های استفاده‌شده در باراندازها، انرژی ضربه را جذب کرده و مانع از برخورد مستقیم می‌شوند. همچنین، استفاده از میراگرهای ویسکوز که انرژی لرزه‌ای را بدون تغییر در سختی سازه جذب می‌کنند، مؤثر بوده و به کاهش اثر ضربه بین ساختمان‌های مجاور کمک می‌کند. مطالعات نشان داده که میراگرهای ویسکوز به‌ویژه در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه نسبت به بلندمرتبه موفق‌تر عمل می‌کنند [۲]. همچنین، تحلیل‌ها بر روی سازه‌های مجاور تحت زمین‌لرزه‌های نزدیک و دور، نشان داده‌اند که استفاده از ضربه‌گیرها و میراگرها می‌تواند تأثیرات مخرب ناشی از این پدیده را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. در هنگام زمین‌لرزه‌های متوسط و شدید، ساختمان‌های مجاور ممکن است پدیده ضربه لرزه‌ای را تجربه کنند که باعث ایجاد نیروهای اضافی در سازه‌ها می‌شود. این نیروهای اضافی می‌توانند نیروهای طراحی و سطح عملکرد سازه‌ها را تغییر دهند. با وجود پیچیدگی این پدیده، برخی آیین‌نامه‌ها ضوابط درز انقطاع لرزه‌ای خاصی را برای جلوگیری از آن پیشنهاد داده‌اند، اما همچنان کاستی‌هایی در این ضوابط وجود دارد. پژوهش‌های زیادی برای درک جنبه‌های مختلف ضربه ساختمان‌ها در زمین‌لرزه انجام شده و مدل‌های خطی و غیرخطی برای شبیه‌سازی این پدیده توسعه یافته‌اند [۳]. با بررسی‌های صورت گرفته روی خاک انعطاف‌پذیر و پاسخ قاب‌های خمشی نشان داد که شدت برخورد به‌طور چشمگیری به انعطاف‌پذیری خاک نیز وابسته است [۴]. با این حال، زوایای پنهان این موضوع نشان‌دهنده نیاز به تحقیقات بیشتر است. به دلیل اهمیت کاهش اثرات منفی نیروهای ناشی از ضربه میان ساختمان‌ها، این پژوهش به بررسی استفاده از میراگر ویسکوز به عنوان راهکاری برای جلوگیری از این پدیده می‌پردازد. استفاده از میراگرهای ویسکوز به دلیل ابعاد و اندازه‌ی آنها فقط در تراز بام قابلیت استفاده دارد و در فاصله اندک بین سازه‌ها نمی‌توان از این میراگرها استفاده نمود، از این رو این میراگرها در تراز بام جانمایی شده‌اند. به‌طور کلی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از میراگرهای تأثیرات به‌سزایی در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها دارند [۵-۱۱]. همچنین، طبق بررسی‌ها، توزیع مناسب میراگرها بر کاهش تغییر مکان، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی پسماند در سازه‌های دارای میراگر تأثیرگذار است [۱۲]. چیدمان میراگرها با توجه به وضعیت پیچشی می‌تواند چرخش بیشینه دیافراگم و تغییر مکان جانبی را به کمترین مقدار برساند [۱۳]. در پژوهشی دیگر، استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه به بهینه‌سازی پاسخ‌های لرزه‌ای و هزینه میراگر منجر شد [۱۴]. توزیع ساختمان نقش بسزایی داشته است [۱۶]. همچنین مشخص شده که افزایش تعداد میراگرها لزوماً کارایی سیستم را افزایش نمی‌دهد، بلکه در برخی موارد می‌تواند پاسخ دینامیکی سیستم را نیز تشدید کند [۱۷]. افزودن اثر اندرکنش خاک و سازه سبب افزایش تعداد ضربه‌ها و جابه‌جایی‌ها در دو سازه شده اما نیروی ضربه و برش درون‌طبقه‌ای را کاهش می‌دهد [۱۸]. یافته‌های یک بررسی دیگر نشان داد که انعطاف‌پذیری خاک نحوه توزیع پاسخ سازه را تغییر داده، به گونه‌ای که نیروی ضربه و پاسخ غیرخطی در طبقات دیگر افزایش می‌یابد [۱۹]. نیروهای برآمده از ضربه ساختمان‌ها تحت زمین‌لرزه‌های نزدیک به‌طور چشمگیری بیشتر از زمین‌لرزه‌های دور است. همچنین، سازه‌ها با نامنظمی در پلان در معرض نیروهای ضربه‌ای بیشتری قرار دارند [۲۰]. بررسی‌های آیین‌نامه‌ای نشان داد که فاصله لازم برای جلوگیری از ضربه ساختمان‌ها در صورت در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه سه برابر مقدار پیشنهاد شده در آیین‌نامه ۲۰۰۹-IBC است [۲۱]. در همین زمینه پژوهشی دیگر نشان داد که ضربه باعث افزایش نیروی برشی طبقات شده است [۲۲]. برای جلوگیری از ضربه ساختمان‌ها به یکدیگر نیاز به فضای بیشتر برای میراگرها و تقویت دیوارهای برشی است [۲۳]. آثار ضربه لرزه‌ای بین ساختمان‌های مجاور، نیروی برشی و پاسخ شتاب بیشتری را در سطوح مختلف طبقات ساختمان‌های مرتفع ایجاد می‌کند، در حالی که پاسخ لرزه‌ای در ساختمان‌های

کوتاه مرتبه در مقایسه با حالت بدون ضربه کاهش می‌یابد [۲۴]. براساس بررسی‌های صورت گرفته، قاب‌های پیرامونی بیشترین آسیب را از پدیده ضربه تجربه کرده‌اند. ترکیب اثر اندرکنش خاک و سازه، پیچش تصادفی، و ضربه سبب ایجاد پاسخ‌های غیرخطی شدید در ساختمان‌ها در برخی موارد می‌شود [۳]. به همین دلیل، طراحان باید توجه ویژه‌ای در طراحی المان‌های سازه‌ای پیرامون میراگرها داشته باشند، زیرا نیروی وارده از ضربه به میراگرها در سطح بیشینه جابجایی سازه رخ می‌دهد. استفاده از میراگرهای خطی و غیرخطی توانسته است پاسخ ساختمان‌های مجاور را به‌طور چشمگیری کاهش داده و بهبود چشمگیری در عملکرد سازه‌ها ایجاد کند [۲]. در پژوهشی دیگر، بیشینه جابجایی جانبی طبقات و تناوب اصلی ساختمان‌های مجاور با و بدون اثر اندرکنش خاک و سازه مقایسه شد که نتایج نشان داد جابجایی جانبی، درز انقطاع و تناوب اصلی ساختمان‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش افزایش یافته است [۲۵]. همچنین، اندرکنش خاک و سازه سبب افزایش جابجایی جانبی در ساختمان‌های ساخته شده روی خاک نرم می‌شود و به افزایش دررفت، رفتار غیرالاستیک و آسیب‌های شدیدی در سازه‌ها منجر می‌شود [۲۶]. بررسی‌های انجام شده در مورد اندرکنش خاک و سازه نشان داد که جابجایی‌های موجود در سازه‌ها در راستای برخورد کاهش یافته اما در راستای آزاد افزایش یافته است. همچنین، افزایش دررفت بین‌طبقه‌ای به دلیل ضربه میان ساختمان‌ها تشدید می‌شود [۲۷]. خاک نرم در پاسخ سیستم بسیار مهم است و ارتباط میان سختی سازه و تغییرشکل خاک به‌طور قابل توجهی در واکنش سیستم به ضربه تأثیرگذار است [۲۸]. در این پژوهش به بررسی سازه‌های قاب خمشی ویژه‌ی فولادی ۴، ۷ و ۱۰ تحت رکوردهای زلزله پرداخته شده است. سازه‌ها در حالت فاصله زیاد بدون ضربه مورد بررسی قرار گرفتند و سپس سازه‌ها به صورت دوه‌دو در کنار یکدیگر مدل‌سازی غیرخطی شده‌اند. با توجه به مدل‌سازی غیرخطی اعضا به روش مقطع فایبر^۱ پاسخ‌های سازه در حالت‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در حالت‌های دیگر در تراز بام سازه کوتاه‌تر میراگر ویسکوز قرار گرفت و نتایج و نیروهای ضربه و پاسخ‌های سازه در رکوردهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در حالی که مطالعات متعددی به بررسی پدیده ضربه میان سازه‌های مجاور، اثر پیچش و نیز عملکرد میراگرها پرداخته‌اند، اما کمتر پژوهشی به‌صورت هم‌زمان ترکیب نامنظمی پیچشی، اثر ضربه، اندرکنش دینامیکی بین دو سازه با ارتفاع متفاوت، و نیز نقش میراگر ویسکوز در مهار نیروی ضربه در چنین شرایطی را بررسی کرده است. نوآوری این پژوهش در تحلیل عددی غیرخطی سازه‌های دارای نامنظمی پیچشی، با استفاده از مدل‌سازی دقیق فایبر سکشن در نرم‌افزار OpenSees، ارزیابی هم‌زمان تأثیر میراگر ویسکوز در سازه‌های مجاور با ارتفاع متفاوت، و بررسی نحوه تغییر دررفت، برش پایه و نیروی ضربه در حضور یا عدم حضور میراگر می‌باشد. پاسخ سازه‌ها با توجه به نامنظمی پیچشی و تأثیر نامنظمی با و بدون میراگر ویسکوز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، که در ادامه به آنها به صورت دقیق‌تر پرداخته خواهد شد.

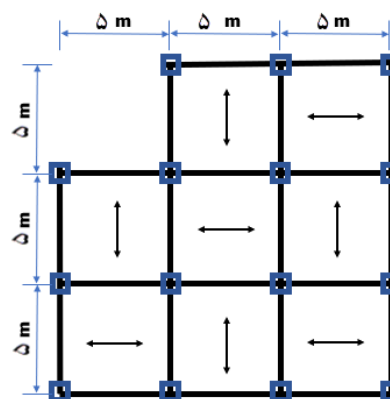
۲- مدل سازی

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 است. به‌منظور ایجاد نامنظمی پیچشی، اگر یکی از دهانه‌ها به طول ۵ متر از گوشه‌ی سازه برداشته شود، پلان دچار نامنظمی هندسی شده است. با ایجاد چنین تغییری در مدل، از آنجایی که سازه یک قاب خمشی است، فاصله‌ی بین مرکز جرم و مرکز سختی در طبقات ساختمان افزایش یافته و در طبقات لنگر پیچشی ایجاد می‌شود و از این‌روی سازه از نوع نامنظمی پیچشی نیز خواهد بود. براین‌اساس، بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی در یک انتهای ساختمان از ۱۲۰ درصد میانگین تغییر مکان نسبی در دو انتهای ساختمان بزرگ‌تر است. شکل ۱ پلان سازه استفاده شده در پژوهش را نمایش می‌دهد. خاک بستر نرم فرض شده و برابر با نوع خاک D بر اساس معیارهای آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 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 ۰/۰۵ فرض شده است. سازه‌ها در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد ساخته شده، نوع کاربری مسکونی است و تنش باربری مجاز پی $1/8 \text{ kg/cm}^2$ است. جدول ۱ نمایش اعضای سازه‌ای که بر اساس AISC 360-10 طراحی شدند [۳۰-۳۱] را نمایش می‌دهد.

¹ Fiber section



ب



الف

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

جدول ۱: مقاطع اعضای سازه‌ای

مقطع ستون	مقطع تیر	ساختمان
۲۶۰×۱۷/۵ و ۲۰۰×۱۷/۵	IPE ۳۰۰ و ۳۳۰	طبقه ۴
۲۶۰×۱۷/۵ و ۲۴۰×۱۷/۵، ۲۲۰×۱۷/۵، ۱۸۰×۱۷/۵	IPE ۲۷۰ و ۳۰۰ و ۳۶۰	طبقه ۷
۳۴۰×۱۷/۵ و ۳۰۰×۱۷/۵، ۲۸۰×۱۷/۵، ۲۴۰×۱۷/۵	IPE ۳۳۰ و ۳۶۰ و ۴۰۰	طبقه ۱۰

شکل ۲ سازه‌های مورد بررسی و حالت‌های مختلف مدل‌سازی سازه را در طبقات نشان می‌دهد. شکل ۳ موقعیت قرارگیری المان‌های گپ در تراز طبقات و همچنین قرارگیری المان میراگر در تراز بام را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، ۲ جفت از سازه‌های مجاور دربرگیرنده‌ی ترکیب ۴ با ۷ و ۴ با ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۴ نمای مدل‌سازی سازه‌های مجاور در نرم‌افزار اپن‌سیس^۲، نقاط و المان‌های تیر و ستون را نمایش می‌دهد. روش مدل‌سازی غیرخطی در نرم‌افزار اپن‌سیس و به‌صورت رفتار غیرخطی مصالح و روش فایبر سکشن مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۵ رفتار و نحوه مدل‌سازی المان‌ها، نقاط انتگرال‌گیری جهت حل عددی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و کدهای میراگر به‌صورت نمونه نشان داده شده است.

میراگرهای ویسکوز دستگاه‌های جذب انرژی و سیستم غیرفعال 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 جابه‌جایی 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) آمده است، به سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر وابسته است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_d = cd(\alpha)|\dot{x}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (1) \quad (1-1)$$

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^۳ و برای $\alpha > 1$ از نوع ویسکوز غیرخطی^۴ است. شکل ۶ ویژگی‌های نیروی جابجایی سه نوع میراگر را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نیروی میراگر NVD برای همان پاسخ سرعت نسبی، کمتر از نیروی میراگر LVD است، زیرا

² Opensees

³ Linear Viscous Damper (LVD)

⁴ Nonlinear Viscous Damper (NVD)

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) نوشته می‌شود:

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

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 نشان‌دهنده مشتق‌گیری نسبت به زمان هستند. ضریب میرایی افزوده‌شده به سیستم توسط میراگر ویسکوز خطی (LVD) با استفاده از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود [۳۱-۳۲].

$$\xi_d = \frac{T_1 \sum_j cd(\alpha)_j \cos^2(\theta_j) (\phi_j - \phi_{j-1})^2}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (3) \quad (3-1)$$

که در آن T_1 دوره طبیعی اصلی، θ_j زاویه میراگر با محور افقی، 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 (۴) به شکل زیر اصلاح می‌شود.

$$\xi_d = \frac{(\max\{T_{1,1}, T_{1,2}\}) \sum_j cd(\alpha)_j (\phi_{j,1} - \phi_{j,2})^2}{4\pi \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4) \quad (4-1)$$

که در آن $\max\{T_{1,1}, T_{1,2}\}$ نشان‌دهنده بزرگ‌ترین زمان تناوب میان زمان تناوب‌های طبیعی اول دو ساختمان است و اندیس‌ها بعد از ویرگول نشان‌دهنده شماره ساختمان هستند. از آنجا که فرض شده میراگر به صورت افقی در همان شماره طبقه از دو ساختمان قرار دارند، زاویه θ در معادله (۴) صفر است. عبارت $(\phi_{j,1} - \phi_{j,2})$ نشان‌دهنده 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 - جابه‌جایی، 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:

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

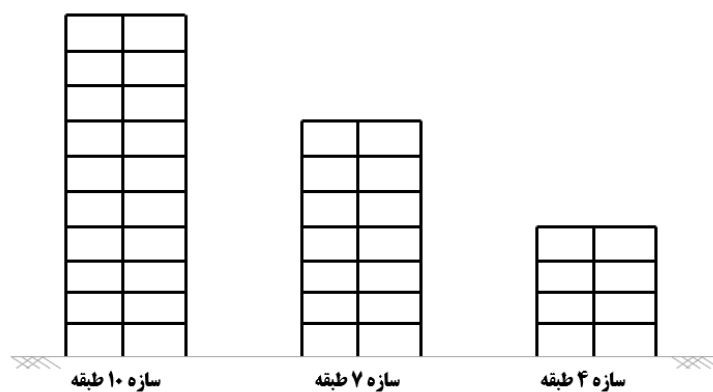
که در آن $cd(1)$ ضریب میرایی ویسکوز خطی (LVD) است، $\min\{\omega_{1,1}, \omega_{1,2}\}$ کوچک‌ترین فرکانس طبیعی میان فرکانس‌های طبیعی اول دو ساختمان است، x_0 حداکثر پاسخ جابجایی نسبی بین طبقات مجاور می‌باشد و ثابت β به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\beta = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1 + \alpha/2)}{\pi(2 + \alpha)} \quad (6) \quad (6-1)$$

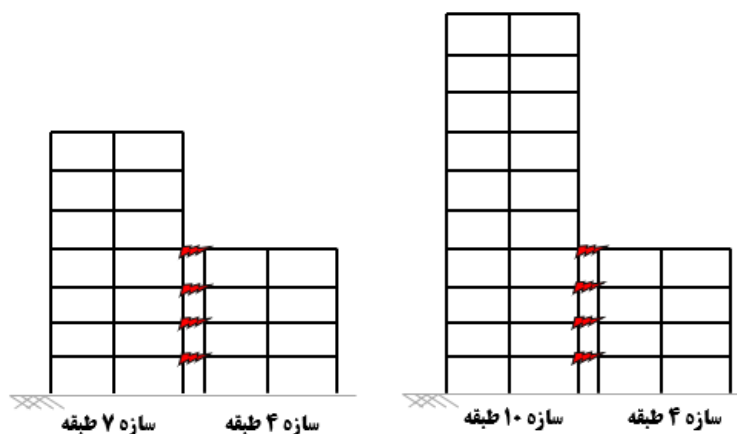
که Γ تابع گاما است.

مطالعاتی بر روی بهینه‌سازی میراگرها انجام شده، چنین ساختارهای کنترلی را می‌توان با رویکردهای بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، مشابه روش‌های به کار رفته در طراحی مهاربندها در قاب‌های سه‌بعدی، توسعه داد [36]. استفاده از روش‌های هوشمند مانند

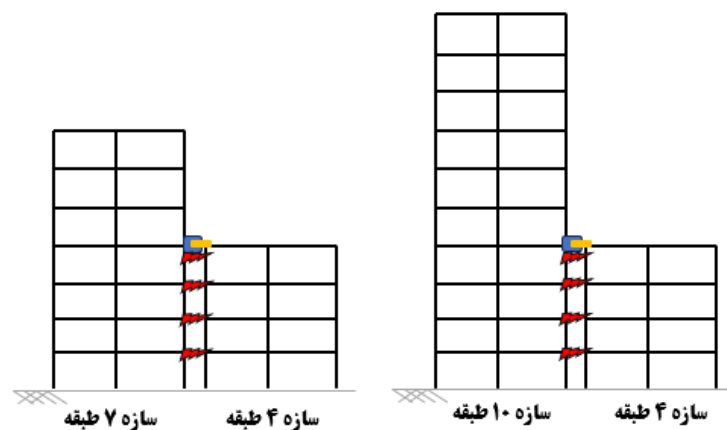
برنامه‌نویسی ژنتیکی در طراحی بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده (TMD) نشان داده است که می‌تواند منجر به استخراج روابط تحلیلی جدید و مؤثر برای طراحی کنترل ارتعاشات شود [37].



الف) سازه ۴-۷-۱۰ طبقه به صورت تنها

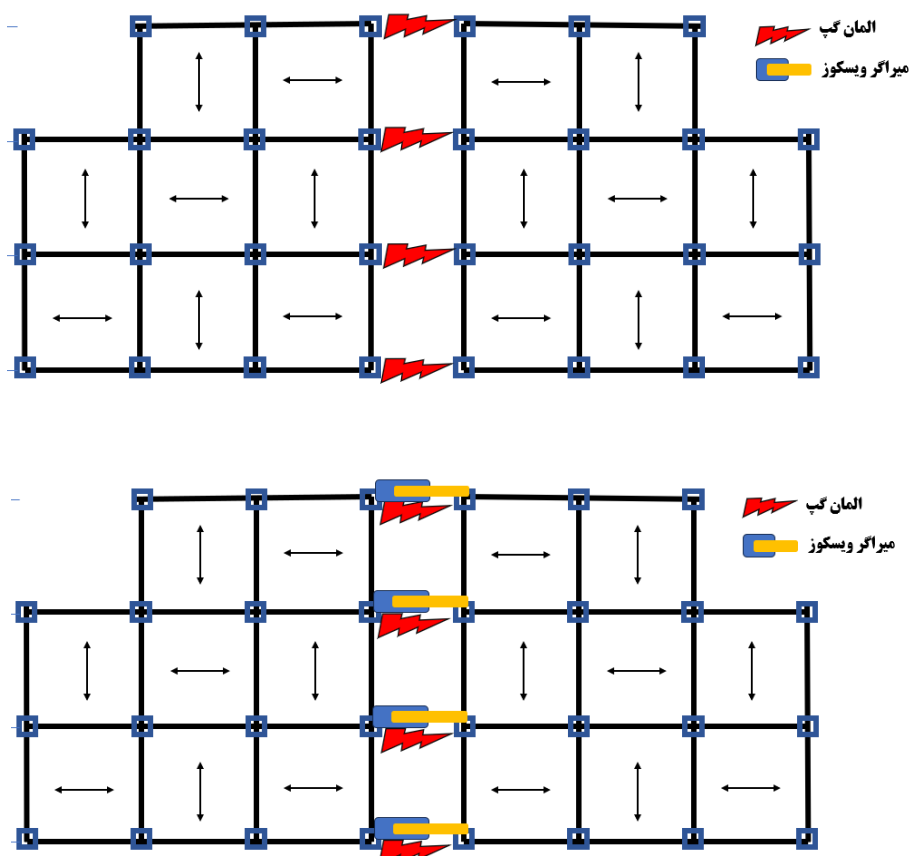


ب) سازه‌ها به صورت دوبه‌دو مجاور هم با المان گپ

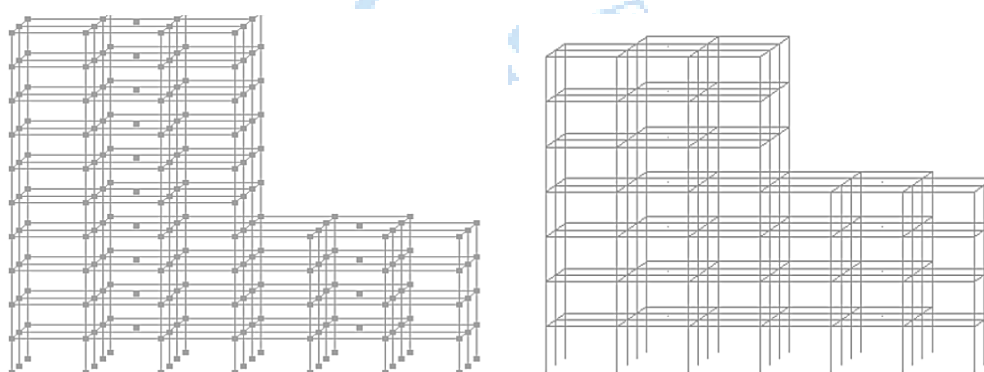


ج) سازه‌ها به صورت دوبه‌دو مجاور هم با المان گپ و در تراز بام سازه کوتاه‌تر میراگر ویسکوز

شکل ۲: حالت‌های مختلف سازه مورد بررسی



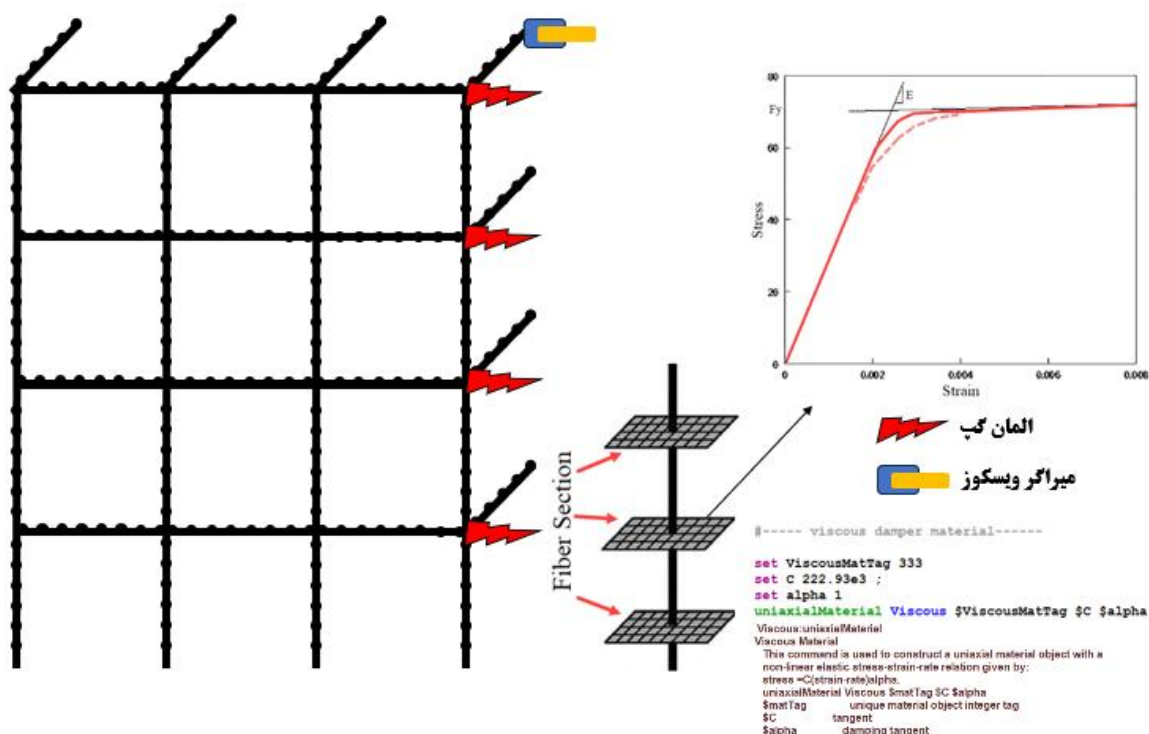
شکل ۳: موقعیت قرارگیری المان گپ در طبقات و همچنین میراگر ویسکوز در تراز بام



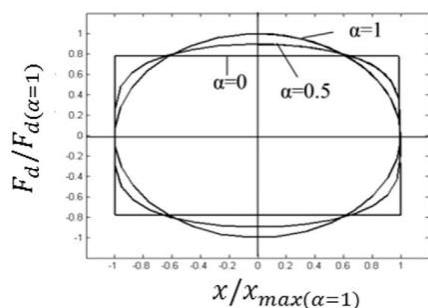
(ب) سازه ۴ و ۱۰ طبقه

(الف) سازه ۴ و ۷ طبقه

شکل ۴: نمای مدل سازی سازه های مجاور در نرم افزار اپن سیس



شکل ۵: نحوه مدل‌سازی غیرخطی و المان میراگر



شکل ۶: رابطه نیرو-جابجایی برای دمپ‌های اصطکاکی، ویسکوز خطی و ویسکوز غیرخطی [۳۳]

در این پژوهش، طراحی میراگرهای ویسکوز سیالی (FVD) بر مبنای روابط معتبر برگرفته از مرجع [۳۴] و متناسب با مشخصات دینامیکی سازه کوتاه‌تر انجام شده است. نحوه تعیین ضریب میرایی (cd) میراگرها در روابط (۷) آورده شده است. تنها یک میراگر بین بام سازه کوتاه‌تر و سازه بلندتر در محل حداکثر سرعت نسبی نصب شده و ضریب میرایی مطابق با رابطه (۷) تعیین شده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای cd پس از محاسبه ضریب میرایی (C=22930 N.s/m)، در مدل عددی با استفاده از المان‌های Link در نرم‌افزار OpenSees پیاده‌سازی شده‌اند. مقدار α برای میراگرها در این مطالعه برابر ۱ در نظر گرفته شده تا رفتار ویسکوز خطی (LVD) مدنظر قرار گیرد.

$$C_{d0,j} = \frac{2m_B \omega_B \zeta_{add}}{\varphi_{B,j}^2} \quad (7) \quad (7-1)$$

در روابط بالا m_B ، ω_B و $\varphi_{B,j}^2$ به ترتیب جرم طبقه مورد نظر در تراز j که میراگر قرار دارد برای سازه کوتاه تر، فرکانس طبیعی سازه کوتاه تر و جابجایی تراز طبقه مورد نظر سازه کوتاه تر که میراگر در آن قرار گرفته است.

در این پژوهش، تمامی اعضای سازه‌ای از جمله تیرها و ستون‌ها به صورت المان‌های غیرخطی فایبر (Fiber Section) مدل‌سازی شده‌اند. برای این منظور، از دستورات section Fiber, uniaxialMaterial Steel02 در نرم‌افزار OpenSees استفاده شد تا رفتار مصالح با سخت‌شوندگی کششی و تسلیم غیرخطی لحاظ گردد. پیکربندی و تقسیم بندی های مقاطع فولادی مطابق با جدول (۱) بوده است. برای مدل‌سازی المان گپ (Gap Element)، از المان دوگره‌ای با رفتار تماسی (zeroLength) همراه با مدل مصالح ElasticPPGap استفاده شد. این مدل قابلیت تعریف فاصله اولیه (Gap) بین سازه‌ها را دارد و فقط در صورت عبور از آستانه مشخص، نیروی فشاری انتقال می‌دهد. مقدار این فاصله بر اساس مجموع دریافت طراحی دو سازه بدون ضربه تعیین شد و در تمامی مدل‌ها ثابت فرض گردید. در خصوص میراگرهای ویسکوز، از المان twoNodeLink با درجه آزادی در راستای افقی و مدل viscousDamper بهره گرفته شد. ضرایب میرایی به صورت عددی محاسبه شده و سپس با دستور uniaxialMaterial ViscousDamper در مدل اعمال گردید. مقدار α برای میراگرها برابر ۱ در نظر گرفته شده تا رفتار خطی ویسکوز (LVD) شبیه‌سازی شود. موقعیت قرارگیری میراگرها در تراز بام سازه کوتاه‌تر بوده که در شکل (۳) نمایش داده شده است. رفتار غیرخطی کل سازه از طریق اعمال بارهای زلزله در قالب تحلیل تاریخچه زمانی (nonlinear time history) و روش نیومارک-بتا با $\beta=0.25$ و $\gamma=0.5$ شبیه‌سازی شده است. تحلیل‌ها تا زمان همگرایی انرژی ادامه داشته و معیارهای قطع بر اساس تغییرات نسبی انرژی داخلی تنظیم شده‌اند.

در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار سازه‌ها در برابر زلزله، شتاب‌نگاشت‌ها به گونه‌ای مقیاس‌بندی می‌شوند که مقدار متوسط طیف پاسخ با میرایی ۵ درصد، مطابق با استاندارد ASCEY، برای دوره‌های بین T_1 ۰.۲ تا T_2 ۱.۵ کمتر از طیف پاسخ طراحی برای ساختگاه نباشد. در اینجا، T_1 و T_2 به ترتیب کوتاه‌ترین و بلندترین دوره تناوب اصلی ساختمان‌های مجاور در حالت ارتعاش اساسی هستند. برای انجام این تحلیل‌ها، چندین رکورد معتبر از زلزله‌های تاریخی، که از پایگاه اطلاعاتی PEER استخراج شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در انتخاب رکوردها به شرایط بیان شد در آیین‌نامه و نوع خاک رکورد ثبت شده توجه شده است. این رکوردهای زلزله با تنوع در شتاب، فرکانس و سرعت، به منظور تحلیل غیرخطی رفتار سازه‌ها و بررسی اثرات مختلف زلزله بر آن‌ها در شرایط گوناگون انتخاب شده‌اند. خصوصیات دینامیکی خاک نرم نوع D در تحلیل پاسخ سازه‌ها (مثلاً در انتخاب رکوردها و طیف پاسخ) در نظر گرفته شده است. جدول ۲ و شکل ۷ رکوردهای مورد بررسی در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۲: 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-۰۱-۱۹۹۴	۰.۲۵	۰.۵۲	۵۶	زلزله نورث‌ریج با رکورد دوردست قابل توجه و مقادیر نسبتاً بالای شتاب و سرعت زمین.
R2	کوبه، ۱۹۹۵	۰.۱۳	۰.۵۱	۳۷	زلزله کوبه با شتاب متوسط و سرعت پایین‌تر، نشان‌دهنده شرایط خاک سفت.
R3	کوبه، ۱۹۹۵	۰.۱۳	۰.۲۴	۳۵	رکورد دیگر از زلزله کوبه با شتاب و سرعت پایین‌تر، نشان‌دهنده شدت کمتر لرزش.
R4	لندرز، ۱۹۹۲	۰.۰۷	۰.۴۲	۲۵	زلزله لندرز با فرکانس پایین، شتاب متوسط و سرعت پایین‌تر، نشان‌دهنده رکورد دوردست.
R5	سوپراستیشن هیلز، ۱۹۸۷	۰.۲۵	۰.۴۵	۴۲	رویداد سوپراستیشن هیلز با حرکت متوسط زمین، مناسب برای تحلیل با شدت متوسط.
R6	سوپراستیشن هیلز، ۱۹۸۷	۰.۲	۰.۳۵	۴۰	رکورد دیگر از سوپراستیشن هیلز با شتاب و سرعت کمی پایین‌تر، نشان‌دهنده تنوع مکانی لرزش.

زلزله چی-چی با فرکانس پایین و سرعت بالا، مناسب برای مطالعه اثرات طولانی مدت لرزش.

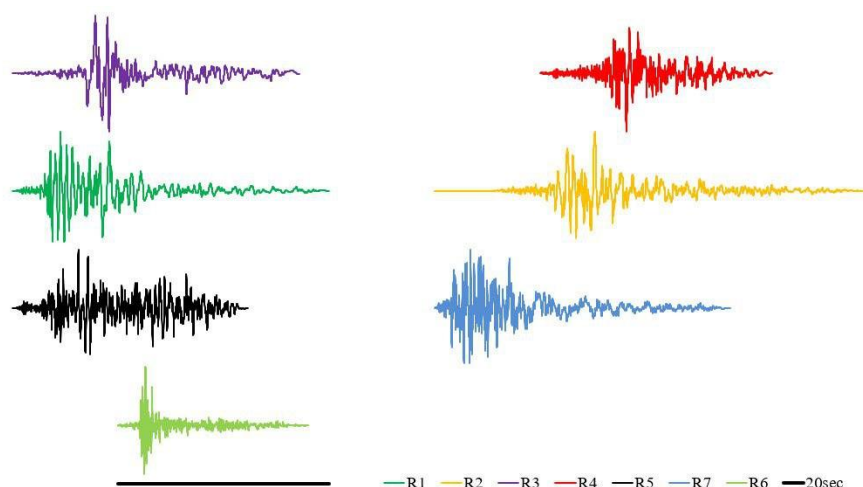
۱۱۵

۰.۴۴

۰.۰۵

چی-چی، ۱۹۹۹

R7



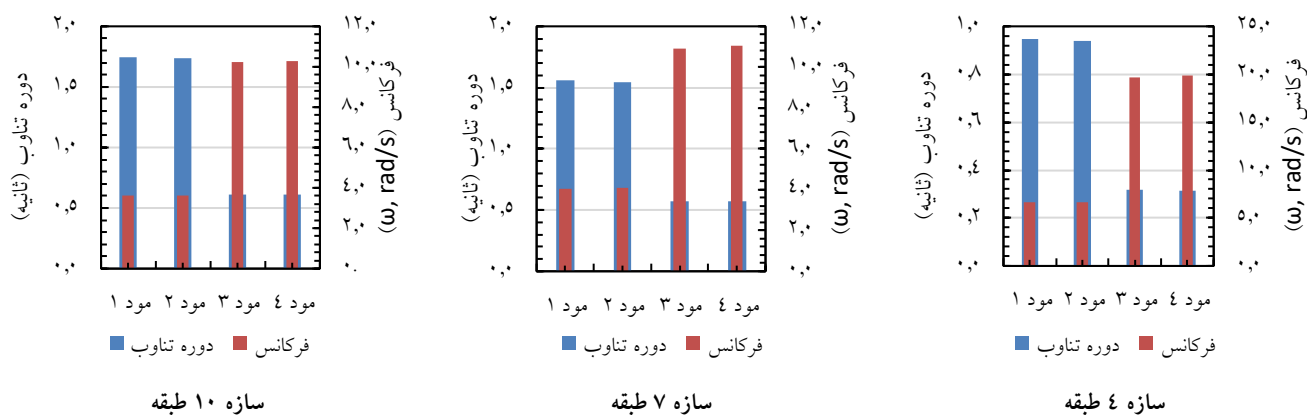
شکل ۷: رکوردهای مورد بررسی در این پژوهش

۳- تحلیل نتایج

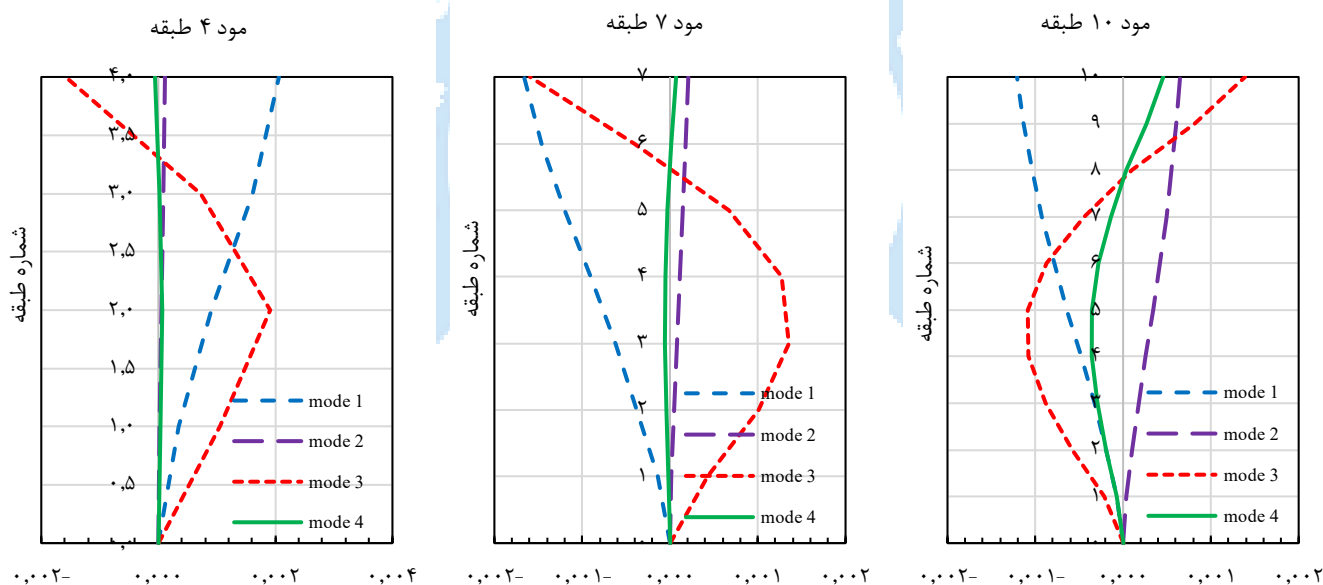
۳-۱ تحلیل مودها

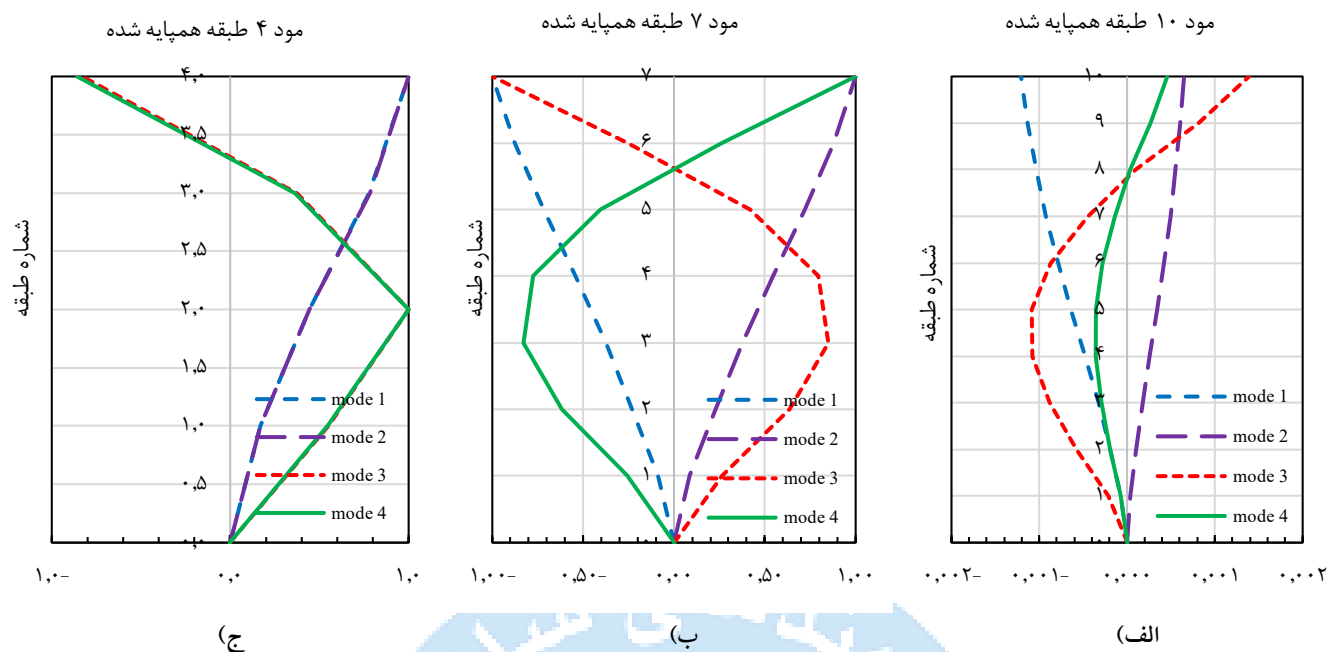
پس از تحلیل مودال سازه‌های این پژوهش، شکل ۸ رابطه میان نسبت دوره تناوب به فرکانس سازه‌های مورد بررسی را نمایش می‌دهد. شکل ۹ الف نمایش‌دهنده مود ارتعاشی سازه ۱۰ طبقه است. مود اول، دوره تناوب ۱.۷۴۴۸ ثانیه و فرکانس زاویه‌ای ۳.۶۰۱ رادیان بر ثانیه است، که نشان‌دهنده حرکت خمشی کلی سازه است. با افزایش شماره مود، دوره تناوب کاهش و فرکانس زاویه‌ای افزایش می‌یابد. به طوری که برای مود چهارم، دوره تناوب به ۰.۶۱۱ ثانیه و فرکانس زاویه‌ای به ۱۰.۲۹۲ رادیان بر ثانیه می‌رسد، که بیانگر ارتعاشات سریع‌تر و پیچیده‌تر است. شکل‌های مودال جابجایی نرمال شده طبقات در هر مود را نشان می‌دهند. در مود اول، تغییر شکل خمشی تقریباً خطی در تمام طبقات دیده می‌شود. مود سوم دارای سه نقطه عطف است و تغییر شکل پیچیده‌تری دارد، به نحوی که طبقات به طور متفاوتی و غیر هم‌سوئی حرکت می‌کنند. در مود چهارم نیز تغییر شکل‌ها پیچیده‌تر شده و الگوهای پیچشی بیشتری مشاهده می‌شود. این تحلیل نشان می‌دهد که مود اول مهم‌ترین مود ارتعاشی برای درک حرکت کلی سازه است و بیشترین مشارکت جرمی را دارد. مودهای بالاتر، حرکت‌های پیچیده‌تری را شامل می‌شوند و مشارکت جرمی کمتری نسبت به مود اول دارند از این رو در سازه‌های بلندتر تاثیر بیشتری در رفتار سازه خواهند داشت. شکل ۹ (ب و ج) نمای مود ارتعاشی سازه ۷ طبقه و ۴ طبقه را نمایش می‌دهد. در تحلیل مودال سازه ۷ طبقه، دوره تناوب T و فرکانس زاویه‌ای ω برای چهار مود محاسبه شده است. در مود اول، دوره تناوب ۱.۵۵۵ ثانیه و فرکانس زاویه‌ای ۴.۰۳۷ رادیان بر ثانیه به دست آمده است که بیانگر تغییر شکل خمشی کلی سازه است. با افزایش شماره مود، فرکانس زاویه‌ای افزایش یافته و دوره تناوب کاهش می‌یابد؛ به طوری که در مود چهارم، دوره تناوب به ۰.۵۶۸ ثانیه و فرکانس زاویه‌ای به ۱۱.۰۴۶ رادیان بر ثانیه می‌رسد. در تحلیل سازه ۴ طبقه، دوره تناوب T و فرکانس زاویه‌ای ω نیز برای چهار مود به دست آمده است. در مود اول، دوره تناوب ۰.۹۴۹ ثانیه و فرکانس زاویه‌ای ۶.۶۲۴ رادیان بر ثانیه محاسبه شده است. با افزایش شماره مود، فرکانس‌ها افزایش یافته و دوره تناوب کاهش می‌یابد، به طوری که در مود چهارم، دوره تناوب به ۰.۳۱۵ ثانیه و فرکانس زاویه‌ای به ۱۹.۹۱۴ رادیان بر ثانیه می‌رسد. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در هر دو سازه ۷ طبقه و ۴ طبقه، مود اول نمایانگر حرکت خمشی کلی است و مودهای بالاتر با فرکانس‌های بیشتر، الگوهای پیچیده‌تری از تغییر

شکل را شامل می‌شوند. از آنجا که پاسخ دینامیکی سازه‌ها با افزایش ارتفاع پیچیده‌تر می‌شود، استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در چنین شرایطی ضروری است، چرا که تحلیل استاتیکی در سازه‌های مرتفع دقت کمتری دارد [35].



شکل ۸: نسبت فرکانس به دوره تناوب سازه‌های مورد بررسی در مدهای متفاوت



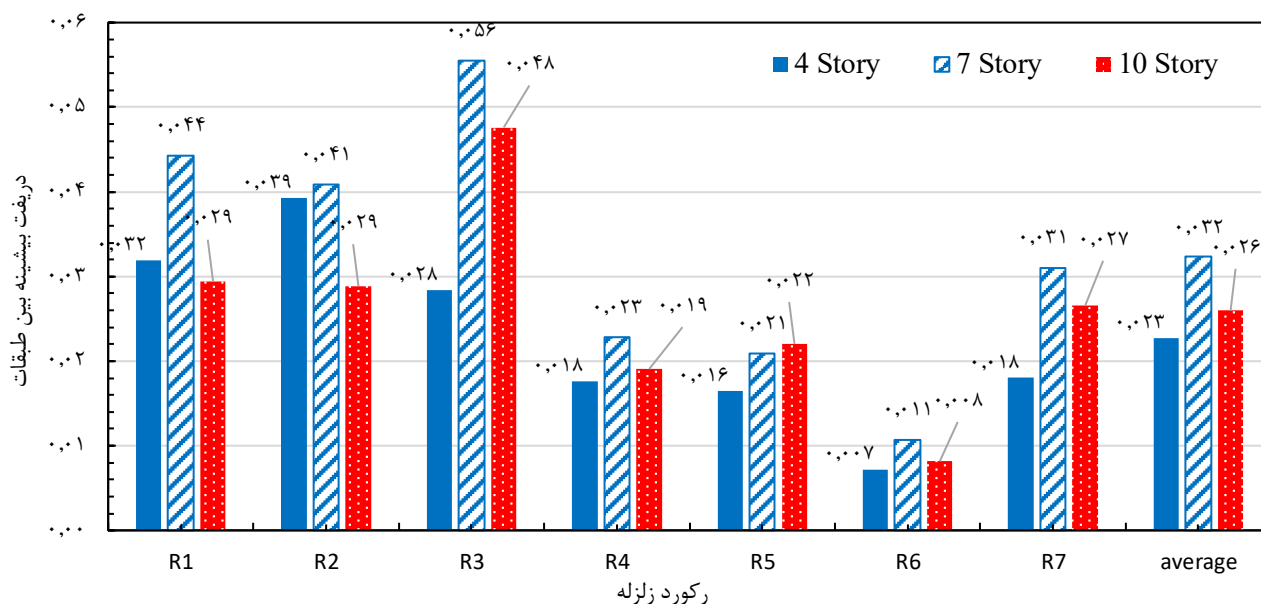


شکل ۹: مود بررسی شده در سازه ۱۰-۷-۴ طبقه

۲-۳ تحلیل دررفت سازه

شکل ۱۰ نمودار مقایسه دررفت بین طبقاتی سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه را به صورت مستقل و بدون ضربه تحت تأثیر رکوردهای مختلف زلزله نمایش می‌دهد. این داده‌ها براساس رکوردهای زلزله از R1 تا R7، که هر کدام شرایط مختلف لرزه‌ای و محتوای فرکانسی مختلفی را دارند، ثبت شده‌اند. سازه ۷ طبقه در اکثر رکوردها بیشترین میزان دررفت را نسبت به سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در رکورد R1 (زلزله نورث ریج ۱۹۹۴)، نسبت دررفت پیشینه سازه ۷ طبقه مقدار ۰.۰۴۴۳ (۴.۴۳٪) است که نسبت به سازه ۴ طبقه با دررفت ۰.۰۳۱۹ و سازه ۱۰ طبقه با دررفت ۰.۰۲۹۴ بالاتر است. این روند در رکورد R3 (زلزله کوبه ۱۹۹۵) نیز مشاهده می‌شود، که سازه ۷ طبقه دررفت ۰.۰۵۵۶ دارد که به‌طور قابل توجهی بیشتر از سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه است. این افزایش دررفت در سازه ۷ طبقه می‌تواند به دلیل محتوای فرکانسی رکورد زلزله و همچنین تأثیر تفاوت زمان تناوب سازه‌ها روی طیف شتاب حاصل از رکورد زلزله، نسبت به سازه‌های ۴ طبقه باشد، در حالی که در سازه ۱۰ طبقه نیروهای لرزه‌ای به شکل متفاوتی در ارتفاعات بالاتر با توجه به اثرات موده‌ای بالاتر توزیع می‌شوند. در رکوردهای R5 و R6 (زلزله سوپرستیشن هیلز ۱۹۸۷)، سازه ۴ طبقه کمترین دررفت را نشان داده است و سازه ۱۰ طبقه بیشترین دررفت را دارد. بررسی میانگین کلی دررفت‌ها نشان می‌دهد که سازه‌های ۷ طبقه با میانگین دررفت ۰.۰۳۲۳ بیشترین میزان دررفت را در رکوردهای بررسی شده داشته‌اند. این نتیجه نشان‌دهنده این است که سازه ۷ طبقه به دلیل زمان تناوب سازه و رفتار غیرخطی اعضای خود نسبت به سازه‌های ۴ طبقه و ۱۰ طبقه، بیشتر در محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک ناشی از زلزله قرار گرفته است. سازه‌های ۴ طبقه با میانگین ۰.۰۲۲۷ و سازه‌های ۱۰ طبقه با میانگین ۰.۰۲۶۰ نیز مقادیر نسبتاً کمتری از دررفت را نشان می‌دهند. در نتیجه، سازه‌های ۷ طبقه به‌طور میانگین بیشترین دررفت را در مقایسه با سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه تجربه کرده‌اند که این موضوع می‌تواند به دلیل پیچیدگی‌های محتوای زلزله، رفتار غیرخطی سازه‌ها و همچنین زمان تناوب‌های مختلف آن‌ها باشد. از سوی دیگر، سازه‌های ۴ طبقه به دلیل ارتفاع کمتر و سختی بیشتر، کمتر وارد محدوده پلاستیک شده، معمولاً کمترین میزان دررفت را در رکوردهای مختلف ثبت کرده‌اند. در نهایت، سازه‌های ۱۰ طبقه نیز به دلیل اثرات زمان تناوب بیشتر و تأثیر موده‌ای بالاتر و نیروهای پیچشی خاص ناشی از زلزله، در بیشتر رکوردها دررفت بیشتری نسبت به سازه‌های ۴ طبقه داشته‌اند، اما همچنان دررفت کمتری نسبت به سازه‌های ۷ طبقه دارند.

مقایسه دررفت بیشینه بین طبقات سازه‌های ۷، ۴ و ۱۰ طبقه (بدون اعمال ضربه)

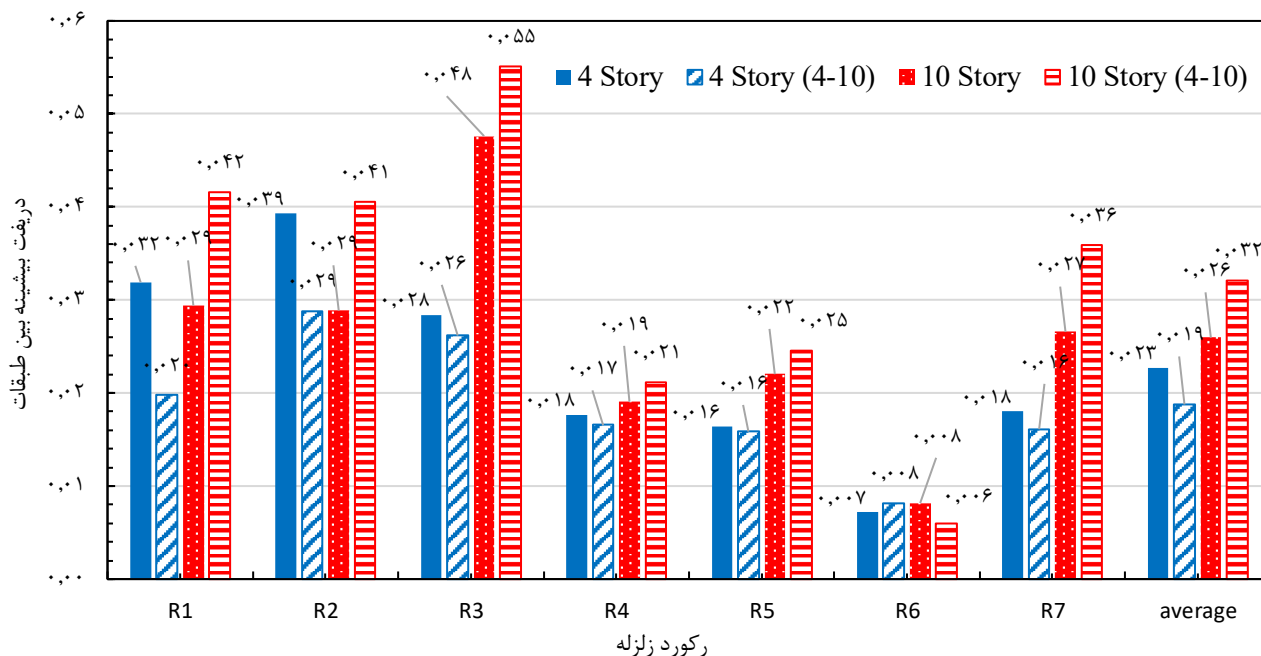


شکل ۱۰: نمودار مقایسه دررفت بین طبقاتی سازه‌های ۷، ۴ و ۱۰ طبقه

شکل ۱۱ نمودار مقایسه دررفت بین طبقاتی سازه‌های ۷، ۴ و ۱۰ طبقه را به مجاورت یکدیگر و با در نظر گرفتن اثر ضربه تحت تأثیر رکوردهای مختلف زلزله نشان می‌دهد. در رکورد زلزله نورث ریج (R1)، دررفت سازه ۱۰ طبقه بدون ضربه به میزان کمی از سازه ۴ طبقه کمتر است. نکته قابل توجه این است که با اعمال اثر ضربه بین سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه، دررفت سازه ۴ طبقه کاهش می‌یابد و به کمتر از حالت بدون ضربه می‌رسد. از سوی دیگر، دررفت سازه ۱۰ طبقه با اعمال ضربه افزایش پیدا می‌کند. در رکورد کوبه (R2)، دررفت سازه ۱۰ طبقه کمتر از سازه ۴ طبقه است، اما اثر ضربه بین سازه‌ها در این رکورد متفاوت عمل می‌کند. دررفت سازه ۴ طبقه با اثر ضربه بین سازه‌ها کاهش یافته است، که نشان می‌دهد در برخی موارد، تعامل بین سازه‌های کوتاه‌تر و بلندتر می‌تواند موجب کاهش نسبت دررفت در سازه کوتاه‌تر شود. در این رکورد، دررفت سازه ۱۰ طبقه نیز با اثر ضربه اندکی افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد تأثیرات ضربه در این حالت باعث افزایش نیروهای جانبی شده است. رکورد کوبه دیگر (R3) یکی از برجسته‌ترین نتایج را نشان می‌دهد. دررفت سازه ۱۰ طبقه در این رکورد بسیار بالاست و با اثر ضربه بین سازه‌ها به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. این موضوع بیانگر آن است که در برخی شرایط زلزله، تعامل بین سازه‌های مجاور، به ویژه در سازه‌های بلند، می‌تواند اثرات مخربی داشته باشد و نسبت دررفت‌ها را تشدید کند. این در حالی است که در سازه ۴ طبقه، دررفت با اثر ضربه افزایش چندانی نداشته و نسبتاً ثابت باقی مانده است. این موضوع می‌تواند نشان دهد که سازه‌های کوتاه‌تر تحت تأثیر ضربه کمتر از سازه‌های بلند قرار می‌گیرند. در رکورد زلزله لندرز (R4)، رفتار هر دو سازه ۴ و ۱۰ طبقه با اثر ضربه نسبتاً نزدیک به حالت بدون ضربه است. در این رکورد، دررفت‌های حداکثر هر دو سازه نزدیک به هم بوده و نشان‌دهنده آن است که اثر ضربه بین سازه‌ها در کنترل نسبت دررفت تأثیر چندانی نداشته است. به عبارت دیگر، در برخی شرایط زلزله، اثرات اندرکنش ضربه بین سازه‌ها ممکن است چندان برجسته نباشند و نیروهای لرزه‌ای به طور مستقل بر هر سازه اعمال شوند. در رکورد سوپر استیشن هیلز (R5)، رفتار هر دو سازه ۴ و ۱۰ طبقه با اثر ضربه نسبتاً نزدیک به حالت بدون ضربه است. در رکورد زلزله سوپر استیشن هیلز دیگر (R6)، دررفت‌ها بسیار کم هستند و نشان‌دهنده کنترل مناسب دررفت در هر دو سازه ۴ و ۱۰ طبقه است. اثر ضربه بین سازه‌ها در این رکورد باعث کاهش اندک دررفت در سازه‌های ۴ طبقه شده، اما در سازه‌های ۱۰ طبقه تفاوت زیادی ایجاد نکرده است. این کاهش نشان می‌دهد که سازه‌های کوتاه‌تر ممکن است از سازه‌های بلندتر در شرایطی که ضربه بین سازه‌ها اعمال می‌شود، محافظت شوند و دررفت کمتری را تجربه کنند. در نهایت، رکورد چی چی (R7) که یکی از شدیدترین رکوردها به شمار می‌رود، نشان می‌دهد که دررفت سازه‌های ۱۰ طبقه با اثر ضربه به طور قابل توجهی بالاست. اما با اعمال اثر ضربه، دررفت در هر سازه ۴ کاهش یافته است. این کاهش در سازه ۴ طبقه

نشان‌دهنده آن است که سازه‌های مجاور می‌توانند در این حالت نقش محافظتی داشته باشند. به طور کلی، این رکورد تأیید می‌کند که سازه‌های بلندتر بیشتر از سازه‌های کوتاه تحت تأثیر سازه‌های مجاور قرار گرفته و نسبت دریافت بیشتری را تجربه می‌کنند.

مقایسه دریافت بیشینه بین طبقات سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه (با اعمال ضربه)

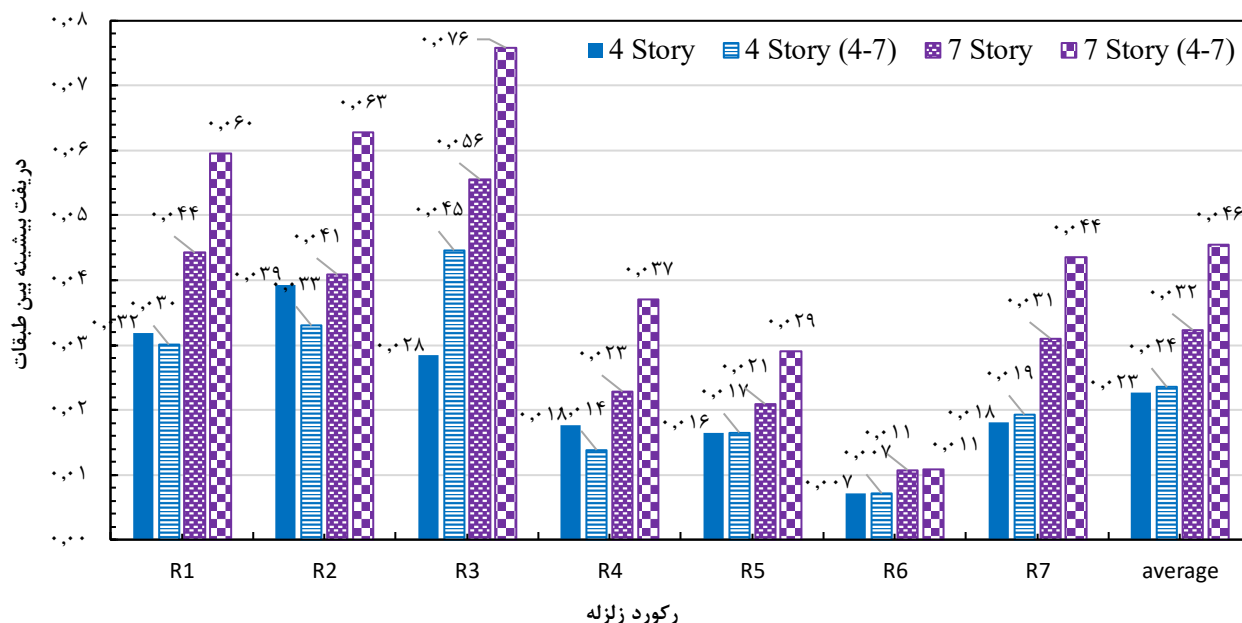


شکل ۱۱: نمودار مقایسه دریافت بین طبقاتی سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه را به مجاورت یکدیگر و با در نظر گرفتن اثر ضربه تحت تأثیر

به‌طور کلی، مقایسه رکوردها نشان می‌دهد که اثر ضربه بین سازه‌ها به طور متغیری عمل می‌کند. در برخی رکوردها باعث کاهش دریافت و در برخی دیگر منجر به افزایش آن می‌شود. به نظر می‌رسد سازه‌های کوتاه‌تر معمولاً از وجود سازه‌های مجاور بلندتر بهره‌مند می‌شوند و دریافت کمتری را تجربه می‌کنند، در حالی که سازه‌های بلندتر در برخی موارد ممکن است تحت تأثیر این تعاملات دچار افزایش نسبت دریافت و به تبع آن افزایش خسارت شوند.

شکل ۱۲ نمودار مقایسه دریافت بین طبقاتی سازه‌های ۴ و ۷ طبقه را که در مجاورت یکدیگر و با در نظر گرفتن اثر ضربه تحت تأثیر رکوردهای زلزله مختلف نمایش می‌دهد. در رکورد زلزله نورث‌ریج (R1)، دریافت سازه ۷ طبقه بدون اثر ضربه به طور قابل توجهی بیشتر از سازه ۴ طبقه است. این روند مشابه رفتار سازه‌های بلندتر در مقابل سازه‌های کوتاه‌تر در حالت زلزله‌های شدید است. همچنین، با اعمال اثر ضربه، دریافت سازه ۴ طبقه کاهش یافته و در سازه ۷ طبقه افزایش دریافت مشاهده می‌شود. در رکورد کوبه (R2)، رفتار مشابهی مشاهده می‌شود. رکورد کوبه دیگر (R3) دریافت بسیار بالاتری را برای سازه ۷ طبقه اثر ضربه نشان می‌دهد. با اعمال ضربه بین سازه‌ها، دریافت سازه ۴ طبقه و دریافت سازه ۷ طبقه نیز افزایش چشمگیری داشت. این رفتار نشان می‌دهد که در رکوردهای شدید، اثر ضربه می‌تواند دریافت قابل توجهی در هر دو سازه (کوتاه و بلند) ایجاد کند. در رکورد زلزله لندرز (R4)، دریافت سازه‌های ۴ طبقه تحت اثر ضربه کاهش یافته ولی دریافت سازه ۷ طبقه تحت اثر ضربه افزایش می‌یابد. در رکورد سوپراستیشن هیلز (R5)، دریافت سازه‌های ۴ و ۷ طبقه بدون اثر ضربه تفاوت چندانی ندارند. با اعمال اثر ضربه، دریافت سازه ۷ طبقه نیز اندکی افزایش پیدا می‌کند. این نشان می‌دهد که در این رکورد، اثر ضربه می‌تواند به افزایش نسبت دریافت سازه بلندتر (۷ طبقه) شود. در رکورد سوپراستیشن هیلز دیگر (R6)، دریافت سازه‌ها بسیار کم است و ضربه ای بین سازه‌ها رخ نمی‌دهد و این امر باعث می‌شود نتایج دریافت تغییرات محسوسی ایجاد نشود. در رکورد چی چی (R7)، دریافت سازه‌های ۷ طبقه با و بدون اثر ضربه به مقدار قابل توجهی بالاست. اما با اعمال اثر ضربه، دریافت سازه ۴ تغییر محسوسی نمی‌کند. این افزایش در سازه‌های ۷ طبقه نشان می‌دهد که تعامل بین سازه‌ها می‌تواند در افزایش قابل توجهی در نسبت دریافت ایجاد نماید.

مقایسه دررفت بیشینه بین طبقات سازه‌های ۴ و ۷ طبقه (با اعمال ضربه)



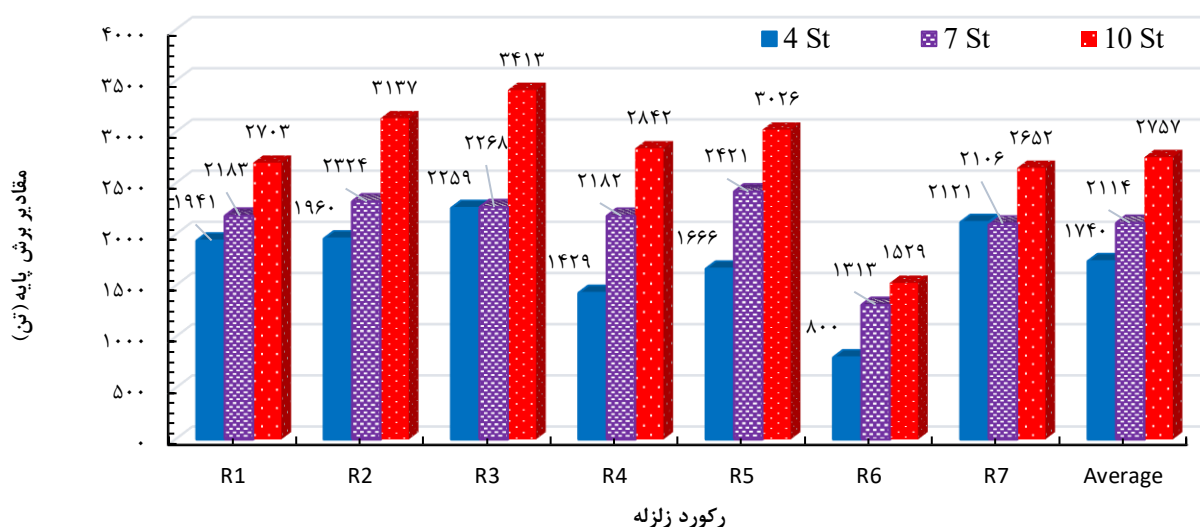
شکل ۱۲: نمودار مقایسه دررفت بین طبقاتی سازه‌های ۴ و ۷ طبقه را به مجاورت یکدیگر و با در نظر گرفتن اثر ضربه تحت تأثیر

به‌طور کلی، مقایسه این رکوردها نشان می‌دهد که سازه‌های ۷ طبقه در اکثر رکوردها دررفت بیشتری نسبت به سازه‌های ۴ طبقه تجربه می‌کنند. اثر ضربه معمولاً باعث کاهش دررفت سازه‌های کوتاه‌تر می‌شود، در حالی که در برخی موارد، اثر آن بر سازه‌های بلندتر نیز محسوس است. همچنین، در رکوردهای با شدت کمتر، اثر ضربه تأثیر قابل توجهی بر کاهش دررفت سازه‌ها ندارد و سازه‌ها به طور مستقل نیروهای لرزه‌ای را تجربه می‌کنند.

۳-۳ مقایسه برش پایه سازه‌ها

در این پژوهش، برش پایه سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه تحت رکوردهای مختلف زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۳ نمودار برش پایه برای این سازه‌ها تحت تأثیر رکوردهای زلزله‌ای با کدهای R1، R2، R3، R4، R5، R6 و R7 است. براساس داده‌های این نمودار، سازه‌های ۱۰ طبقه در تمامی رکوردهای زلزله بیشترین میزان برش پایه را تجربه کرده‌اند، در حالی که سازه‌های ۴ طبقه کمترین مقدار را نشان داده‌اند و سازه‌های ۷ طبقه در میان این دو قرار دارند. برش پایه، که به نیروی جانبی وارد بر سازه‌ها در هنگام زلزله مربوط می‌شود، به وضوح با افزایش تعداد طبقات افزایش می‌یابد زیرا متاثر از وزن سازه‌ها نیز می‌باشد. سازه‌های بلندتر (مانند سازه‌های ۱۰ طبقه) به دلیل ارتفاع و وزن بیشتر، برش پایه بیشتری را تجربه می‌کنند. در این رکوردها، برش پایه برای سازه‌های ۱۰ طبقه نزدیک به ۳۰۰۰ تن است و این مقدار برای سازه‌های ۷ و ۴ طبقه به ترتیب حدود ۲۱۰۰ و ۱۸۰۰ تن می‌باشد. این کاهش و افزایش نسبی در نیروی برش پایه در رکوردهای مختلف می‌تواند به محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله و شرایط دینامیکی سازه‌ها مرتبط باشد.

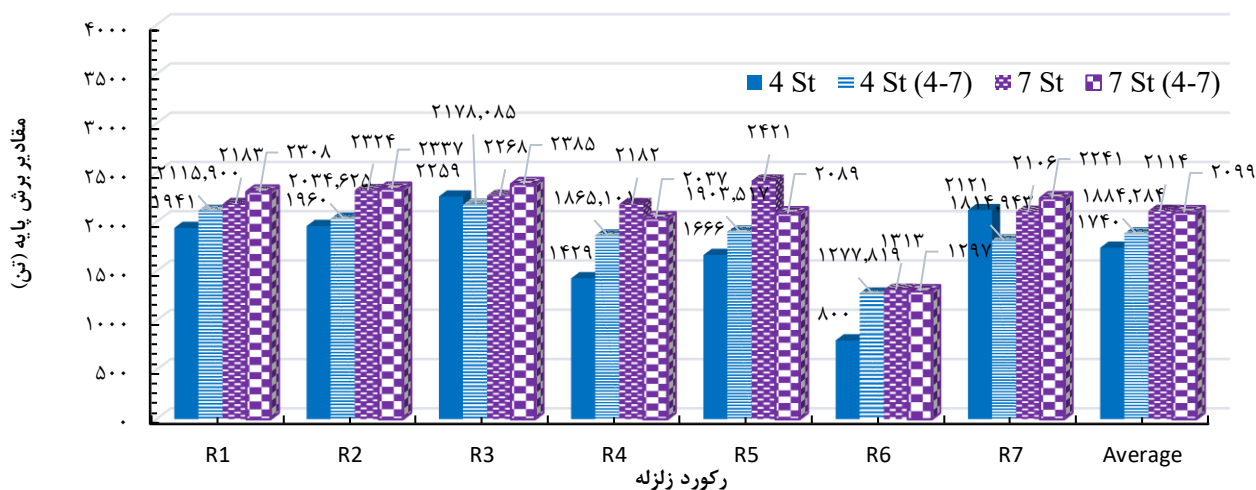
مقادیر برش پایه برای سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه بدون اعمال اثر ضربه



شکل ۱۳: نمودار مقایسه برش پایه سازه‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه

در شکل ۱۴ تأثیرات برش پایه سازه‌های ۴ و ۷ طبقه در دو حالت مختلف، یکی به صورت تکی و دیگری تحت اثر ضربه بین سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. این نمودار به خوبی نشان می‌دهد که تأثیر ضربه بین سازه‌ها چگونه می‌تواند بر مقادیر بیشینه برش پایه آنها تأثیر بگذارد و باعث تغییرات قابل توجهی شود. در حالتی که سازه‌ی ۴ طبقه در مجاورت سازه‌ی ۷ طبقه قرار می‌گیرد و ضربه بین آنها رخ می‌دهد، برش پایه به طور کلی افزایش می‌یابد ولی خلاف این موضوع نیز مشاهده شده است. به عنوان مثال، در رکورد زلزله R4، برش پایه سازه‌ی ۴ طبقه بدون ضربه ۱۴۲۹ تن است، در حالی که تحت اثر ضربه بین سازه‌ها، این مقدار به ۱۸۶۵ تن افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده انتقال نیروی بیشتر از سازه‌ی بلندتر به سازه‌ی کوتاه‌تر است که باعث می‌شود سازه‌ی ۴ طبقه تحت نیروی برشی بیشتری در تراز پایه قرار گیرد. از سوی دیگر، سازه‌های ۷ طبقه نیز رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. برای مثال، در رکورد زلزله R2، که مربوط به زلزله کوبه است، برش پایه‌ی سازه‌ی ۷ طبقه بدون ضربه ۲۳۲۴ تن است. اما در حالتی که این سازه در مجاورت سازه‌ی ۴ طبقه قرار می‌گیرد، برش پایه به حدود ۲۳۳۷ تن افزایش می‌یابد. این افزایش نشان‌دهنده تأثیر ضربه در میزان برش پایه است. در این حالت، سازه‌ی ۷ طبقه نیز تحت نیروی بیشتری قرار می‌گیرد و این نیرو از طریق اثر ضربه به سازه‌ی مجاور منتقل می‌شود. رکوردهای R5 و R6 که مربوط به زلزله سوپرستیشن هیلز هستند، برش پایه سازه بلندتر (۷ طبقه) تحت اثر برخورد کاهش می‌یابد. در رکوردهایی مانند R7 که مربوط به زلزله چی چی است، تأثیر ضربه به وضوح قابل مشاهده است. در این رکورد، برش پایه‌ی سازه ۷ طبقه اندکی افزایش می‌یابد، به طوری که در حالت ضربه، برش پایه‌ی سازه‌ی ۷ طبقه به بیش از ۲۲۴۱ تن می‌رسد که این مقدار در حالت بدون ضربه کمتر است ولی سازه ۴ طبقه تحت اثر ضربه برش پایه بیشینه کمتری را نشان می‌دهد. در نهایت، می‌توان گفت که تأثیر ضربه بین سازه‌ها یک اثر مهم در طراحی سازه‌های می‌تواند داشته باشد و خسارت و فروریزش سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

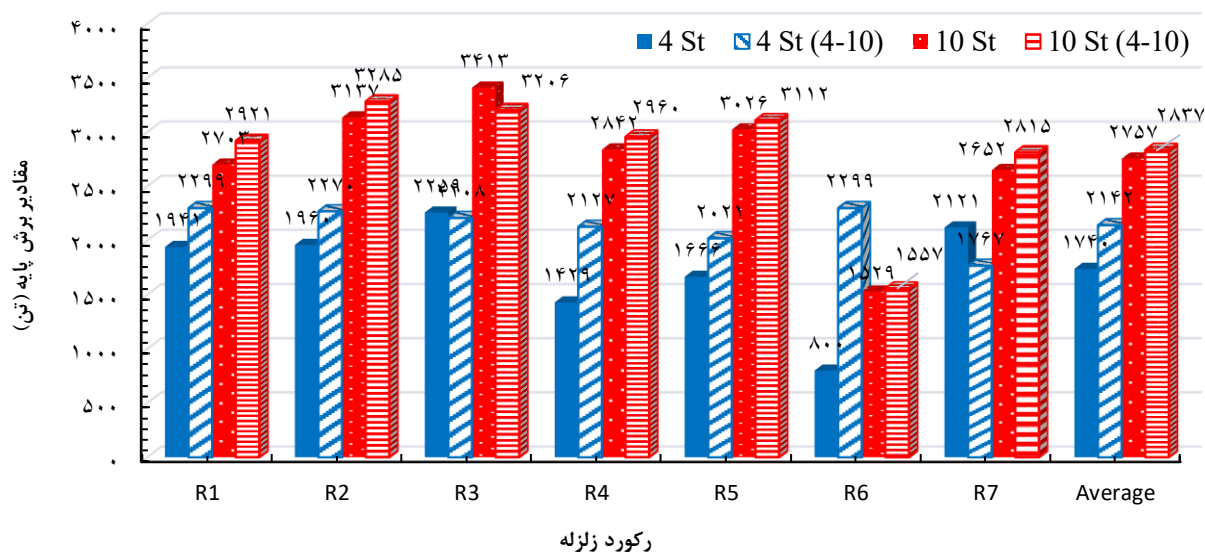
مقادیر برش پایه برای سازه‌های ۴ و ۷ مجاور



شکل ۱۴: نمودار مقایسه برش پایه سازه‌های ۴ و ۷ طبقه مجاور

در شکل ۱۵ نمودار تأثیرات برش پایه سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه در دو حالت مختلف، به صورت تکی و تحت اثر ضربه بین سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، مقایسه نیروهای برشی سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه در حالت منفرد نشان می‌دهد که در اکثر رکوردهای زلزله، نیروی برشی سازه ۱۰ طبقه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سازه ۴ طبقه است. این امر به دلیل ارتفاع بیشتر و جرم کل بیشتر سازه ۱۰ طبقه است که منجر به افزایش نیروهای اینرسی در طبقات می‌شود. وقتی که سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه در مجاورت هم قرار می‌گیرند و اثر ضربه بین آن‌ها لحاظ می‌شود، مشاهده می‌شود به‌صورت کلی نیروی برشی هر دو سازه افزایش می‌یابد. البته در برخی از موارد خلاف این موضوع نیز مشاهده شده است ولی میزان کاهش برش پایه در اثر ضربه سازه‌ها بسیار اندک می‌باشد. این رفتار در برخی از زلزله‌ها می‌تواند ناشی از آن باشد که، انتقال انرژی بین سازه‌ها به اندازه‌ای نیست که به افزایش نیروی برشی منجر شود و یا تأثیر زیادی روی آن بگذارد. میانگین نیروی برش پایه برای سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه، چه در حالت منفرد و چه در حالت مجاور برای سازه ۱۰ طبقه بیشتر از سازه ۴ طبقه است. این افزایش بیشتر در سازه ۴ طبقه می‌تواند ناشی از ویژگی‌های دینامیکی سازه کوتاه‌تر و نیروی اعمالی ضربه از سازه بلندتر به سازه کوتاه‌تر باشد.

مقادیر برش پایه برای سازه‌های ۴ و ۱۰ مجاور

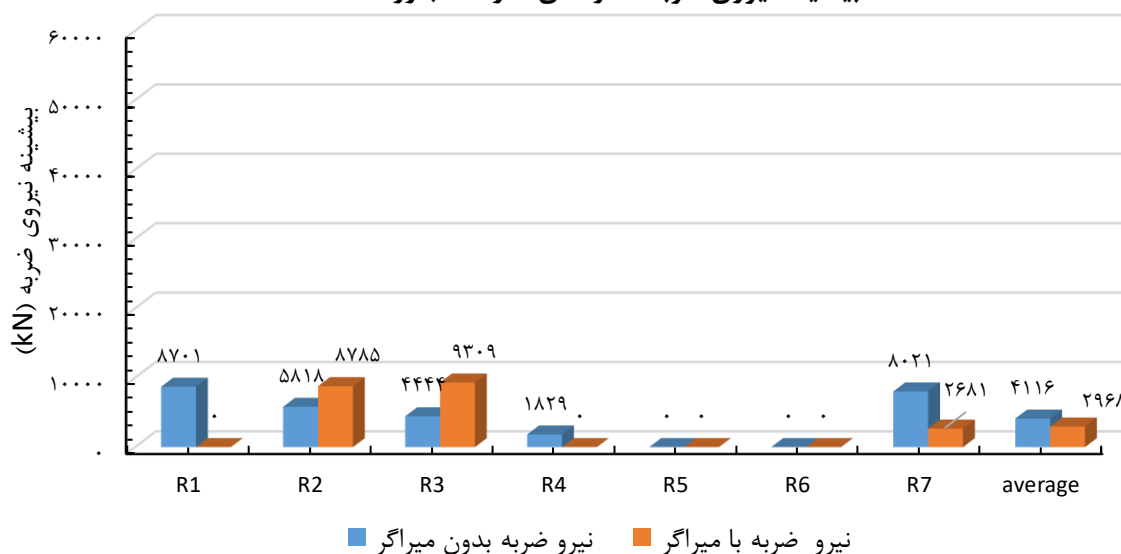


شکل ۱۵: نمودار مقایسه برش پایه سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه مجاور

۳-۴ تأثیر میراگر بر پاسخ سازه

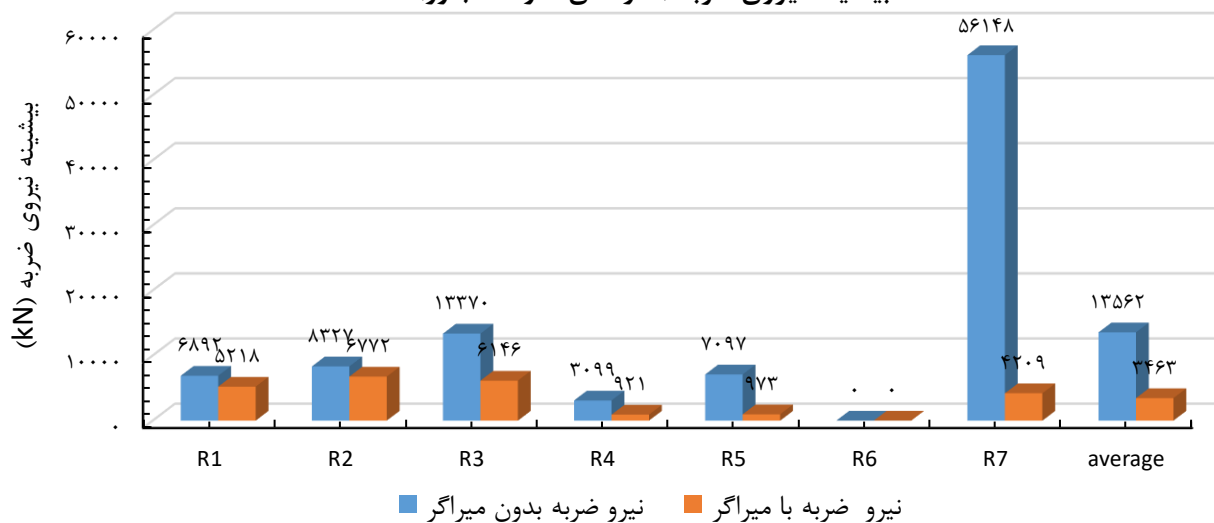
شکل ۱۶ و ۱۷ مقایسه بیشینه نیروی ضربه بین سازه‌های مجاور ۷-۱۰ طبقه و ۴-۱۰ طبقه را نمایش می‌دهد. در بررسی حداکثر نیروی ضربه بین سازه‌ها، نمودارهای مربوط به نیروی ضربه بین سازه‌های ۱۰ و ۷ طبقه و همچنین نیروی ضربه بین سازه‌های ۱۰ و ۴ طبقه، هم در حالت حضور میراگر و هم در حالت عدم حضور میراگر، مقایسه شده‌اند. این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از میراگر چه تأثیراتی بر کاهش نیروی ضربه در هر دو نوع مقایسه سازه‌ها داشته است. در نمودار مربوط به نیروی ضربه بین سازه‌های ۱۰ و ۷ طبقه، مشاهده می‌شود که در رکوردهای زلزله R1، R2، R3، و R7 نیروی ضربه بدون حضور میراگر به طور قابل توجهی بالا است. به عنوان مثال، در رکورد R1، حداکثر نیروی ضربه حدود ۸۷۰۰ کیلونیوتن است. همچنین در رکورد R3 این مقدار به حدود ۴۴۴۳ کیلونیوتن می‌رسد. به طور کلی، میانگین نیروی ضربه بدون میراگر حدود ۴۱۱۶ کیلونیوتن است، در حالی که با حضور میراگر این مقدار به ۲۹۶۷ کیلونیوتن کاهش یافته است، که کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. همچنین در برخی از رکوردهای زلزله افزایش نیروی ضربه در اثر حضور میراگر و اسکوز نیز مشاهده شده است. در نمودار مربوط به نیروی ضربه بین سازه‌های ۱۰ و ۴ طبقه، می‌بینیم که در برخی رکوردها، به‌ویژه رکورد R7، نیروی ضربه بدون میراگر به مقدار بسیار بالایی رسیده است. این میزان نیروی ضربه بسیار بالاتر از رکوردهای مشابه برای سازه‌های ۱۰ و ۷ طبقه است. رکوردهای دیگر مانند R3 نیز نشان‌دهنده نیروی ضربه بالایی بدون حضور میراگر هستند (حدود ۱۳۰۰۰ کیلو نیوتن). در این حالت نیز، حضور میراگر باعث کاهش قابل توجه نیروی ضربه شده است؛ به‌عنوان مثال، در رکورد R7 نیروی ضربه از ۵۶۰۰۰ کیلونیوتن به کمتر از ۴۰۰۰ کیلونیوتن کاهش یافته است. میانگین نیروی ضربه بدون میراگر در این حالت ۱۳۵۶۲ کیلونیوتن است، در حالی که با حضور میراگر این مقدار به ۳۴۶۳ کیلونیوتن کاهش یافته است. با مقایسه دو نوع سازه ۷-۱۰ و ۴-۱۰ طبقه می‌توان گفت که نیروی ضربه بدون میراگر در سازه‌های ۱۰ و ۴ طبقه به‌ویژه در رکورد R7 بسیار بیشتر از نیروی ضربه در سازه‌های ۱۰ و ۷ طبقه است. این نشان می‌دهد که سازه‌های با تفاوت ارتفاع بیشتر (مانند ۱۰ و ۴ طبقه) نیروی ضربه بیشتری را تجربه می‌کنند در هر دو نوع مقایسه، حضور میراگرها تأثیر بسیار مثبتی بر کاهش نیروی ضربه دارد، اما در سازه‌های ۱۰ و ۴ طبقه، نیروی ضربه بدون میراگر به‌ویژه در رکوردی مانند R7 بسیار بیشتر از سازه‌های ۱۰ و ۷ طبقه است. این امر نشان می‌دهد که در سازه‌هایی با تفاوت ارتفاع زیاد، نیاز به حضور میراگرها برای کاهش نیروی ضربه بسیار ضروری‌تر است.

بیشینه نیروی ضربه (سازه‌های ۷ و ۱۰ مجاور)



شکل ۱۶: نمودار مقایسه بیشینه نیروی ضربه سازه‌های ۷ و ۱۰ طبقه مجاور در صورت استفاده از میراگر

بیشینه نیروی ضربه (سازه‌های ۴ و ۱۰ مجاور)



شکل ۱۷: نمودار مقایسه بیشینه نیروی ضربه سازه‌های ۴ و ۱۰ طبقه مجاور در صورت استفاده از میراگر

۴- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اثر ضربه بین سازه‌های مجاور نقش مهمی در افزایش جابه‌جایی‌های نسبی و نیروهای داخلی دارد. بررسی بیشینه دررفت بین طبقات سازه تحت رکورد زلزله‌های مختلف نشان می‌دهد که به‌طور کلی، در حالت ضربه بین سازه‌های مجاور، دررفت سازه کوتاه‌تر در اثر برخورد با سازه بلندتر کاهش می‌یابد؛ ولی در سازه بلندتر این مقدار افزایش خواهد یافت. از نتایج مهم دیگر استخراج شده از این پژوهش می‌توان به بررسی بیشینه برش پایه سازه‌ها اشاره کرد که در اثر برخورد سازه‌ها به هم مقدار برش پایه هر یک از سازه‌ها افزایش می‌یابد؛ ولی این افزایش برش پایه در سازه‌های کوتاه‌تر بیشتر بوده و در سازه‌های بلندتر افزایش کمتری مشاهده شده است. شایان ذکر است که این نتایج به‌صورت کلی به‌دست‌آمده و موارد ناقص این نتیجه در برخی از موارد مشاهده شده است.

به جهت کاهش دامنه ارتعاشات سازه‌ها و جلوگیری از نیروهای ضربه زیاد در سازه‌ها، از میراگرهای ویسکوز در تراز بام سازه کوتاه‌تر استفاده شده است. این میراگرها باتوجه به پیشینه پژوهش طراحی و مدل‌سازی گردید. از نتایج قابل توجه استفاده از میراگرهای ویسکوز می‌توان به کاهش قابل توجه نیروی ضربه بین سازه‌ها اشاره کرد. این میزان کاهش باتوجه به رفتار دینامیکی سازه‌ها و محتوای فرکانسی رکوردها متغیر بود است. شایان ذکر است در برخی از موارد میزان نیروی ضربه مقداری افزایش یافته است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حضور میراگر ویسکوز در سازه‌های مجاور نقش کلیدی در کاهش نیروی ضربه و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از برخورد سازه‌ها دارد. برای تصمیم‌گیری نهایی در پروژه‌های اجرایی، مقایسه فنی-اقتصادی بین استفاده از میراگرها، افزایش درز انقطاع، یا به‌کارگیری سیستم‌های جداساز لرزه‌ای، ضروری است و می‌تواند در قالب مطالعات آینده و با در نظر گرفتن هزینه ساخت، نگهداری، و عملکرد لرزه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

اهم نتایج این پژوهش به صورت موردی در این قسمت بیان شده است:

۱- افزایش یا کاهش دریفت بین طبقات:

در اثر ضربه بین سازه‌های مجاور، دریفت سازه کوتاه‌تر کاهش می‌یابد. در مقابل، دریفت سازه بلندتر افزایش پیدا می‌کند.

۲- افزایش برش پایه سازه‌ها:

برخورد سازه‌ها با یکدیگر باعث افزایش برش پایه در هر دو سازه می‌شود. این افزایش در سازه‌های کوتاه‌تر بیشتر بوده و در سازه‌های بلندتر کمتر مشاهده شده است.

۳- کاربرد میراگر ویسکوز در کاهش نیروی ضربه:

استفاده از میراگر ویسکوز در تراز بام سازه کوتاه‌تر، موجب کاهش نیروی ضربه بین سازه‌ها شده است. تأثیر میراگر به رفتار دینامیکی سازه‌ها و محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله بستگی دارد.

۴- موارد استثناء در تأثیر میراگر ویسکوز:

در برخی موارد خاص، نیروی ضربه با وجود میراگر ویسکوز اندکی افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که عملکرد میراگر باید با در نظر گرفتن شرایط خاص هر سازه و نوع زلزله مورد بررسی قرار گیرد. حضور میراگر ویسکوز در سازه‌های مجاور، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش نیروی ضربه و جلوگیری از آسیب‌های ناشی از برخورد سازه‌ها عمل می‌کند.

مراجع

- [1] Polycarpou, P.C., P. Komodromos, and A.C. Polycarpou, (2013). A nonlinear impact model for simulating the use of rubber shock absorbers for mitigating the effects of structural pounding during earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013. Engineering, 2019. 121: p. 135-150.
- [2] Elwardany, H., R. Jankowski, and A. (2021). Seleemah, Mitigating the seismic pounding of multi-story buildings in series using linear and nonlinear fluid viscous dampers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021. 21(4): p. 137..
- [3] Farahani, D., F. Behnamfar, and H. Sayyadpour. (2019). Effect of pounding on nonlinear seismic response of torsionally coupled steel structures resting on flexible soil. *Engineering Structures*, 2019. 195: p. 243-262.
- [4] Rahman, A.M., A.J. Carr, and P.J. Moss. (2000). Structural pounding of adjacent multi-storey structures considering soil flexibility effects. in *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand. 2000.
- [5] Dehshiri, D., Tajammolian, H., & Mirjalili, M. R. (2024). Investigation on the seismic fragility of steel eccentrically braced frames with vertical link using slotted bolt connection. *Journal of Structural and Construction Engineering*- doi: 10.22065/jsce.2024.422638.3253
- [6] Youssef, A., Esfahani, M. R., & zareian, M. (2024). Analytical verification of the behavior of TADAS metal dampers in a self-centered coupled shear wall system. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 11(3). doi:10.22065/jsce.2023.407319.3171
- [7] Akrami, V., & Norouzi, M. (2023). A numerical study on the cyclic behavior of special truss moment frames with X-shaped pipe damper. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(10), 204-221. doi: 10.22065/jsce.2023.377263.3000

- [8] Jalacefar, A., & Kiani, M. (2021). Assessing the Efficiency of an Active Viscous Damper in Near-Field and Far-Field Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(6), 280-300. doi: 10.22065/jsce.2020.197694.1927
- [9] Shariatmadar, H., & RAHIMZADEH, N. (2022). Behavioral factor of Pall and Rotational dampers under far field and near field records. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 4), 212-231. doi: 10.22065/jsce.2021.281093.2420
- [10] Khanlari, K., Gharra, K., & Asgari Marnani, J. (2023). Designing Passive Control System in Friction-Damped Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, . doi: 10.22065/jsce.2021.236501.2173
- [11] Mirtaheri, M., Farhoudi, N., & Nazeryan, M. (2018). Case study and Evaluation of two steel bracing systems in the Bam earthquake and methods of retrofitting. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(Special Issue 3), 120-138. doi: 10.22065/jsce.2017.88069.1220
- [12] Goel, R.K. and C.A. Booker.(2001). Effects of supplemental viscous damping on inelastic seismic response of asymmetric systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2001. 30(3): p. 411-430
- [13] Vial, I.J., et al., .(2006). Torsional balance of plan-asymmetric structures with frictional dampers: experimental results. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2006. 35(15): p. 1875-1898
- [14] Ok, S.-Y., J. Song, and K.-S. Park, .(2008). Optimal design of hysteretic dampers connecting adjacent structures using multi-objective genetic algorithm and stochastic linearization method. *Engineering structures*, 2008. 30(5): p. 1240-1249.
- [15] Mansoori, M. and A. Moghadam, .(2009). Using viscous damper distribution to reduce multiple seismic responses of asymmetric structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009. 65(12): p. 2176-2185.
- [16] Bharti ,S., S. Dumne, and M. Shrimali, .(2010). Seismic response analysis of adjacent buildings connected with MR dampers. *Engineering Structures*, 2010. 32(8): p. 2122-2133.
- [17] S Bigdeli, K., W. Hare, and S. Tesfamariam, .(2012). Configuration optimization of dampers for adjacent buildings under seismic excitations. *Engineering Optimization*, 2012. 44(12): p. 1491-1509..
- [18] Pawar, P. and P. Murnal. (2014). Effect of seismic pounding on adjacent blocks of unsymmetrical buildings considering soil-structure interaction. *Int J Emerg Technol Adv Eng*, 2014. 4(7): p. 391-395.
- [19] Madani, B., F. Behnamfar, and H.T. Riahi, .(2015). Dynamic response of structures subjected to pounding and structure–soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015. 78: p. 46-60.
- [20] Akköse, M. and F .Sunca, .(2016). Effects of near-fault ground motions on earthquake-induced pounding response of RC buildings with plan irregularity, in *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. 2016, CRC Press. p. 320-325.
- [21] Ghandil, M. and H. Aldaikh, .(2017). Damage-based seismic planar pounding analysis of adjacent symmetric buildings considering inelastic structure–soil–structure interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017. 46(7): p. 1141-1159.
- [22] Kontoni, D.-P.N. and A.A. Farghaly, .(2018). Seismic response of adjacent unequal buildings subjected to double pounding considering soil-structure interaction. *Computation*, 2018. 6(1): p. 10.
- [23] Miari, M., K.K. Choong, and R. Jankowski, .(2019). Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019. 121: p. 135-150.
- [24] Abdel Raheem, S.E., et al., .(2019). Numerical simulation of potential seismic pounding among adjacent buildings in series . *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019. 17: p. 439-471.
- [25] Awchat, G., et al., .(2022). Seismic pounding response of neighboring structure using various codes with soil-structure interaction effects: Focus on separation gap. *Civ Eng J*, 2022. 8(2): p. 308-18.
- [26] Sobhi, P. and H. Far, .(2022). Impact of structural pounding on structural behaviour of adjacent buildings considering dynamic soil-structure interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2022. 20(7): p. 3515-3547.
- [27] Cayci, B.T. and M. Akpinar. .(2021). Seismic pounding effects on typical building structures considering soil-structure interaction. in *Structures*. 2021. Elsevier.
- [28] Ebadi-Jamkhaneh, M., .(2024). Pounding Risk Assessment through Soil–Structure Interaction Analysis in Adjacent High-Rise RC Structures. *Buildings*, 2024. 14(9): p. 2779.
- [29] ASCE/SEI7-10. (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*, ASCE/SEI 7-10. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers
- [30] ANSI, B. (2010). *AISC 360-10-Specification for Structural Steel Buildings* [J]. Chicago AISC
- [31] FEMA, P. (2000). *Commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC
- [32] McKenna F, Fenves GL, Scott MH, Jeremic B. *Open system for earthquake engineering simulation (2000)*. Web page. <http://OpenSees.berkeley.edu>.
- [33] M.D. Symans, M.C. Constantinou, .(1998). Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation, *J. Earthq. Technol. ISET* 35 (4) (1998) 185–206
- [34] Tubaldi E, Gioiella L, Scozzese F, Ragni L, Dall'Asta A.(2020). A Design Method for Viscous Dampers Connecting Adjacent Structures. *Front Built Environ* 2020;6:1–14. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00025>.
- [35] Hosseini P, Hosseini M, Omranizadeh S, .(2019). The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Nonlinear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators, *Civil Infrastructure Researches*, 2019, https://cer.qom.ac.ir/article_1445_6c389e2b0d8d67c972e5bfd49045e0eb.pdf.
- [36] Haji Mazdarani M, Hoseini Vaez S, Hosseini P, Fathali M, .(2023). Reliability-based layout optimization of concentrically braced in 3D steel frames. *Structures* . <https://doi.org/10.1016/j.iistruc.2022.11.130>

- [37] Zamani A, Etedali S, (2023). New formulas for optimal design of TMD using genetic programming method and their application to control of seismic-excited structures, Journal of Structural and Construction Engineering, https://www.jsce.ir/article_157613_a009af19c1cb3f2c3abc2ed34396056c.pdf.

