

The Effect of Using Passive Energy Dissipating System on Base Isolated Concrete Structures

Mohsen Rahimzadeh Oskui¹, Ahmad Maleki^{2*}, Kiomars Roshangar³

1- PhD Student in civil-structural engineering, Civil Engineering dept., Islamic Azad University, Maragheh, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering dept., Islamic Azad University, Maragheh, Iran

3- Professor, Civil Engineering dept., University Of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Considering the increasing use of seismic isolators in the country, which reduce the force on structural members and increase the overall displacement of the structure during an earthquake, it is necessary to create an optimal method for using this system along with reducing the overall displacement of the structure. Also, the use of damper systems reduces the overall and inter-floor movement of the structure during an earthquake. Therefore, it is essential to investigate the effect of using damping systems to optimize seismic isolators. On the other hand, the optimal use of the combination of two damper and isolator systems can be effective in reducing construction costs and repair costs resulting from earthquakes and provides structures with optimal performance. Therefore, in this article, two viscous and frictional dampers as well as isolator were used in high-rise concrete structures with 15 and 20 floors and the combination of these two systems was evaluated in the behavior of the structure. The structures are separated by lead core rubber isolators. The results were studied under three earthquake records of the nearby area. The results showed the positive effect of dampers and separators on the behavior of the structure, and reasonable results were obtained depending on the seismic records used in the article. also, showed the positive effect of the combination of separators and dampers in reducing the amount of relative displacement, roof displacement and base shear. The simultaneous use of damper and isolator in the structures caused a 35% reduction in the base shear of the structures, 47% in the maximum relative displacement and 29% in the displacement of the roof point.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 September 2022

Revise Date: 18 April 2023

Accept Date: 08 May 2023

Keywords:

Optimization

Isolator

Viscous Damper

Friction Damper

Seismic Record

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.360106.2922>

*Corresponding author: Ahmad Maleki

Email address: a.maleki@iau-maragheh.ac.ir

تاثیر استفاده از سیستم میراگر غیرفعال بر روی پاسخ لرزه ای سازه های بتنی بلند

مرتب جاسازی شده توسط جداساز لاستیکی هسته سربی در پی

محسن رحیم زاده اسکویی^۱، احمد ملکی^{۲*}، کیومرث روشنگر^۳

۱- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران

۳- استاد تمام، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از جداسازهای لرزه ای در کشور که باعث کاهش نیروی وارده بر اعضای سازه و افزایش کلی جابجایی سازه در هنگام وقوع زلزله می شوند، ایجاد روشی بهینه برای استفاده از این سیستم همراه با کاهش جابجایی کلی سازه امری ضروری است. همچنین استفاده از سیستم های میراگر باعث کاهش جابجایی کلی و بین طبقاتی سازه در هنگام وقوع زلزله می شوند. بنابراین بررسی اثر استفاده از سیستم های میراگر جهت بهینه سازی جداسازهای لرزه ای امری ضروری است. از طرفی استفاده بهینه از ترکیب دو سیستم میراگر و جداگر می تواند در کاهش هزینه ساخت و هزینه های تعمیر حاصل از وقوع زلزله موثر بوده و سازه های با عملکرد مطلوب را فراهم می آورد. بنابراین در این مقاله برای بررسی این مهم از دو میراگر ویسکوز و اصطکاکی و همچنین جداکننده در سازه های ۱۵ و ۲۰ طبقه بتنی بلند مرتبه استفاده شد و ترکیب این دو سیستم ها در رفتار سازه مورد ارزیابی قرار گرفت. سازه ها توسط جداساز لاستیکی هسته سربی جاسازی شده اند. نتایج تحت سه رکورد زلزله حوزه نزدیک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده تاثیر مثبت میراگرها و جداکننده در رفتار سازه بودند که بسته به رکوردهای لرزه ای مورد استفاده در مقاله، نتایج معقوله به دست آمد. این نتایج نشان دهنده تاثیر مثبت ترکیب میراگرها با جداکننده در کاهش میزان جابجایی نسبی، جابجایی بام و برش پایه بودند. استفاده همزمان میراگر و جداساز در سازه ها باعث کاهش ۳۵ درصدی برش پایه سازه ها، ۴۷ درصدی ماکزیمم جابجایی نسبی و ۲۹ درصد جابجایی نقطه بام شد.

کلمات کلیدی: بهینه سازی، جداساز، میراگر ویسکوز، میراگر اصطکاکی، تحلیل دینامیکی غیر خطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۱/۰۹/۱۰	۱۴۰۲/۰۱/۲۹	۱۴۰۲/۰۲/۱۸	۱۴۰۲/۰۲/۱۸	۱۴۰۲/۱۱/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.360106.2922
*نویسنده مسئول:		احمد ملکی			
پست الکترونیکی:		a.maleki@iau-maragheh.ac.ir			

۱- مقدمه

عبارت جداسازی در مفهوم خویش به معنای جداسازی از پایه است و همانطور که مشخص است سازه از پی خود جدا می‌شود. به طور منطقی جداسازی سازه از زمین برای جلوگیری از صدمات ناشی از زلزله امری بسیار بخردانه است. در حالت کلی برای سازه‌های معمول، استفاده از جداسازهای لرزه‌ای از نوع لاستیکی با هسته سربی باعث افزایش تغییر مکان کلی سازه می‌شود و همچنین هنگام استفاده بر روی سازه‌های بلند نتیجه معکوس از خود نشان می‌دهند. از روش‌های نوین که امروزه جهت به حداقل رساندن صدمات ناشی از زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده از جداسازهای لرزه‌ای و میراگرها می‌باشند. از طرفی استفاده از میراگرها باعث کاهش تغییر مکان کلی سازه شده و نیز نقشی مهم را در استهلاک انرژی وارده بر سازه دارند.

از جمله سیستم‌های دیگر جداسازها می‌توان به سیستم لغزنده و پاندولی اشاره کرد. عموم استفاده از جداسازهای لرزه‌ای در ساختمان‌های ۳ الی ۱۵ طبقه می‌باشد. با توجه به استفاده روزمره از این سیستم‌ها و نیز لرزه خیزی کشور ایران، ضرورت بررسی تاثیر جداسازهای لرزه‌ای در رفتار سازه‌های بتنی آشکار است. میراگرها یک سیستم مهاربند لرزه‌ای در ساختمان‌ها و پل‌ها می‌باشند که فقط در مقابل ارتعاشات مختلف ناشی از زلزله عمل نموده و در تحمل بارهای استاتیکی هیچ نقشی ندارند، که این مسئله باعث ساده‌سازی پیش-بینی رفتار سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای می‌شود. در حالی که معمولاً مصالح می‌تواند در حدود ۵۰٪ میرایی بحرانی را تامین نماید. با استفاده از میراگرهای لرزه‌ای در کنار المان‌های باربر جانبی و یا اتصالات سازه‌ای، می‌توان میرایی سازه را تا بیش از ۵۰ درصد افزایش داد که این به معنای استهلاک قابل توجه انرژی ارتعاشی زلزله است. اضافه کردن میراگرها همانند جداسازهای لرزه‌ای راهبرد نسبتاً غیرمعمولی برای بهسازی لرزه‌ای تلقی می‌شود. اضافه شدن میراگرها باعث کاهش جابجایی کلی سازه و شتاب پاسخ و تغییر مکان جانبی طبقات داخلی می‌شود که کاهش خسارات سازه‌ای و غیر سازه‌ای را در پی خواهد داشت. همچنین هزینه اجرای سازه بدلیل استفاده از مقاطع با ظرفیت کمتر کاهش می‌یابد.

همچنین با توجه به گسترش ساخت و سازه‌های بلند مرتبه، استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی در سازه‌ها جهت به حداقل رساندن خسارات وارده در هنگام زلزله جزء روش‌های جدید در ساختمان سازی می‌باشد. در این مقاله نیز به بررسی تاثیر استفاده از سیستم‌های ترکیبی میراگر و جداساز بر روی سازه‌های بلند پرداخته شده است، با توجه به این نکته که جداسازها به تنهایی برای سازه‌های بلند توصیه نمی‌شوند زیرا باعث افزایش جابجایی کلی سازه می‌شوند. همچنین تاثیر استفاده همزمان از جداگر و میراگر مختلف نیز در این مقاله ارزیابی خواهد شد که این بررسی جزء نوآوری‌های این مقاله به شمار می‌رود.

۲- مروری بر مطالعات گذشته

در مطالعه‌ای که توسط ژوو و چن^۱ در سال ۲۰۱۷ [۱] انجام گرفته شده، اثر میراگرهای ویسکوز بر روی ساختمان بتنی جداسازی شده، با استفاده از میز لرزان مورد بررسی قرار گرفته است. سازه مورد مطالعه در این تحقیق، یک قاب بتنی ۱۶ طبقه با هشت میراگر ویسکوز خطی و ۳۰ پاندول اصطکاکی^۲ در لایه جداسازی، جداسازی شده است. نتایج نشان می‌دهد اثر کنترل جابجایی برای یک سیستم جداسازی با میراگر ویسکوز برای زلزله‌های با شدت پایین قابل ملاحظه نمی‌باشد. با این وجود این اثر می‌تواند برای زلزله‌های بالا قابل توجه باشد. همچنین اثر میراگرها بر روی روسازه به تحریک ورودی بستگی دارد. زمانیکه تحریک لرزه‌ای نسبتاً پایین می‌باشد اضافه کردن میراگر در لایه جداسازی شده پاسخ لرزه‌ای را کاهش می‌دهد. اگر تحریک لرزه‌ای بالاتر رود میراگرها می‌توانند اثر منفی بر روی روسازه ایجاد کنند.

در مطالعه‌ای که توسط لندی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲] انجام گرفته شده، مقایسه مدل‌های مختلف جداگرهای پاندولی اصطکاکی در سازه‌های در معرض حرکات لرزه‌ای افقی و قائم انجام گرفته شده است. بدین منظور در این مطالعه یک سیستم دو درجه

¹ Zhou-chen

² Friction pendulum system (FPB)

³ Landi

آزادی با جداساز پاندولی اصطکاک‌ی در پایه با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف جداسازها از نظر ضریب اصطکاک و نیروی محوری مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم‌های مختلف با تغییر دادن پارامترهای مختلف از جمله: جرم سازه، سختی افقی و قائم سازه و سیستم جداساز مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های با ضریب اصطکاک ثابت نتایج مشابهی را تعیین می‌کنند. در مقایسه با مدل‌های با ضریب اصطکاک متغیر مقادیر بزرگتر جابجایی و کوچکتر نیرو را ارائه می‌دهند. مدل‌های با ضریب اصطکاک متغیر نتایج مشابه نیرو و جابجایی را نشان می‌دهند. مدل با نیروی نرمال متغیر در مقایسه با مدل‌های با نیروی نرمال ثابت مقادیر جابجایی مشابه ولی نیروهای بالاتری را نشان می‌دهند.

در مطالعه‌ای که توسط دومنیکو^۴ و ریچارد^۵ در سال ۲۰۱۸ [۳] انجام گرفته شده، به بررسی سازه جداسازی شده به همراه میراگر جرمی تنظیم شونده^۶ پرداخته شده است. بدین منظور در این مطالعه یک قاب بتنی مورد بررسی قرار گرفته که جداساز پایه لرزه‌ای به همراه جداسازهای لاستیکی که عمدتاً در سرتاسر محیط ساختمان قرار گرفته‌اند، در زیر طبقه اول بکار گرفته شده است. همچنین در مرکز ساختمان یک میراگر جرمی تنظیم شونده بزرگ قرار داده شده که شامل باکس بتنی با سنگدانه‌های بزرگ می‌باشد. باکس بتنی در پایه قرار گرفته و توسط یکسری جداسازهای لاستیکی جانبی به جداساز پایه وصل شده است که نقش میراگر و المان‌های فنر میراگر جرمی تنظیم شونده را ایفا می‌کنند. بر اساس نتایج می‌توان فهمید که بهبود عملکرد لرزه‌ای قابل ملاحظه با اضافه کردن میراگر جرمی تنظیم شونده بدست می‌آید. بعنوان مثال لنگرهای خمشی و نیروهای برشی ستون‌های روسازه در مقایسه با سیستم جداساز سنتی کاهش یافته است. همچنین دریفت و جابجایی طبقه آخر نیز کاهش یافته است.

در مطالعه‌ای که توسط وولف^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۴] انجام گرفته شده، اثر میراگر ویسکوز بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه نتایج آزمایشگاهی بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با جداسازهای الاستومتری با میرایی پایین^۸ و پاندول اصطکاک‌ی تک^۹، با و بدون میراگرهای ویسکوز خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم‌های جداسازی شده بر روی سازه شش طبقه به صورت قاب خمشی و قاب مهاربندی شده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. اضافه کردن میراگرها منجر به کاهش جابجایی جداسازها می‌شود. این کاهش در آزمایش‌ها با جداسازهای الاستومتری به دلیل کمبود ظرفیت میرایی آن‌ها مشهود می‌باشد. بعلاوه در رابطه با سیستم الاستومتری اضافه کردن میراگرها منجر به کاهش دریفت و برش پایه می‌شود. کاهش این مقادیر در حالت میراگر خطی مشخص‌تر می‌باشد. در حالت سیستم پاندول اصطکاک‌ی که به خودی خود بسیار میراکننده می‌باشد (میرایی موثر حدود ۲۰ تا ۳۰٪)، اضافه کردن میراگر منجر به افزایش کلی در دریفت و نیروی برش پایه می‌شود. افزایش در مورد میراگرهای غیرخطی مشخص‌تر می‌باشد.

در مطالعه‌ای که توسط اووه^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۵] انجام گرفته شده، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های جداسازی شده با دستگاه‌های اتلاف انرژی هیستریزیس U شکل مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه بررسی آزمایشگاهی مدل‌ها بر روی میز لرزان انجام شده است. سیستم جداساز پایه‌ای مورد استفاده در این مطالعه شامل یاتاقان‌های پلاستیکی لمینتی و دستگاه‌های استهلاک انرژی هیستریزیس U شکل که میراگرهای U شکل هیستریزیس^{۱۱} نامیده می‌شوند، می‌باشد. مطالعه برای بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده به همراه میراگر U شکل هیستریزیس سه حالت مختلف سازه با پایه ثابت، سازه جداسازی شده به همراه میراگر U شکل هیستریزیس ساخته شده از فولاد مقاوم در برابر کشش^{۱۲} و سازه جداسازی شده به همراه میراگر ساخته شده با فولاد ضد زنگ^{۱۳} در نظر گرفته شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده است. برای سازه با پایه ثابت، دریفت طبقه اول بیشتر از طبقه دوم می‌باشد. به همین دلیل خرابی سازه‌ای

4 Domenico

5 Ricciardi

6 Tuned mass damper (TMD)

7 Wolff

8 Low damping elastometric bearing (LDE)

9 Friction pendulum system (FPS)

10 Oh

11 U-shaped hysteretic (UH)

12 High tensile steel (HTS)

13 Stainless steel (SS)

در طبقه اول دیده می‌شود. برای سازه‌های دارای جداساز، بیشتر جابجایی‌ها در طبقه جداسازی شده متمرکز شده است و بیشتر آسیب‌ها در ستون‌های طبقه اول مشاهده می‌شود. از طرف دیگر هیچ آسیب سازه‌ای قابل ملاحظه در روسازه مربوط به نمونه‌های دارای جداساز ملاحظه نشده و آسیب‌ها در میراگرها متمرکز شده است. همچنین دریافت طبقات در سازه با میراگر فولاد ضد زنگ کمتر از میراگر فولادی مقاوم در برابر کشش می‌باشد و این نشان می‌دهد که میراگرهای U شکل هیستریزس می‌توانند از فولاد معمولی نیز ساخته شوند.

در مطالعه‌ای که توسط والش^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۶] انجام گرفته، پاسخ لرزه‌ای سازه غیرخطی مجهز به جداساز هیبرید و میراگر غیرفعال با سختی متغیر^{۱۵} تحت زلزله‌های نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد میراگر غیرفعال با سختی متغیر برای محافظت لرزه‌ای، سازه پنج طبقه جداسازی شده این سیستم، با سیستم‌های دیگر فعال، نیمه فعال و سیستم‌های کنترلی هیبرید مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میراگر غیرفعال با سختی متغیر قادر به کاهش قابل ملاحظه دریافت پایه جداساز در مقایسه با حالت کنترل نشده می‌باشد با این وجود بیشینه شتاب مطلق پایه و بیشینه دریافت طبقات در مقایسه با حالت کنترل نشده نسبتاً افزایش یافته است.

در مطالعه‌ای که توسط فورتمولر^{۱۶} و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۷] انجام گرفته شده، پاسخ سازه‌های جداسازی شده به همراه میراگرهای ستون مایع تنظیم شونده^{۱۷} مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه سه تنظیم مختلف با جرم آب برای میراگرهای ستون مایع تنظیم شونده در نظر گرفته شده است. ملاحظه می‌شود که هر سه حالت میراگرهای ستون مایع تنظیم شونده بیشینه جابجایی پایه را کاهش می‌دهد و میراگرهای ستون مایع تنظیم شونده با جرم تنظیم شده بیشتر، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که روش کنترلی ارائه شده نسبت به تنظیم جرم حساس می‌باشد. همچنین از نتایج ارائه شده می‌توان فهمید که استفاده از میراگرهای ستون مایع تنظیم شونده عملکرد را حداقل به اندازه ۴۰ درصد نسبت در مقایسه با سیستم جداسازی شده بدون میراگر بهبود می‌بخشد.

در مطالعه‌ای که توسط یزدانی و همکاران در سال ۱۳۹۶ [۸] انجام گرفته شده، پاسخ غیرخطی سازه فولادی مجهز به جداساز پایه و میراگر جرمی تنظیم شده مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه یک سازه ۲۰ طبقه مجهز به جداساز پایه، مدلسازی شده است و جهت بهبود عملکرد سازه از میراگر جرمی تنظیم شده استفاده شده است. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت ۷ شتاب نگاشت حوزه دور در سازه انجام شده است. تاثیر نصب میراگر جرمی به سازه مجهز به جداساز لاستیکی با هسته سربی بررسی شده است. با بررسی نتایج ارائه شده می‌توان فهمید که با ترکیب میراگر جرمی و جداساز پایه شده، پاسخ سازه به خصوص در طبقات بالایی آن بهبود یافته است.

در مطالعه‌ای که توسط زکوی و رهگذر در سال ۱۳۹۸ [۹] انجام گرفته شده، اثر توام جداساز لرزه‌ای LRB و میراگر ویسکوز در سازه‌های فولادی کوتاه مرتبه تحت اثر موج انفجار مورد مطالعه گرفته شده است. با توجه به افزایش حملات تروریستی نسبت به سازه‌های با اهمیت، توجه به پاسخ سازه‌های جداسازی شده در برابر انفجار از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این مطالعه، سازه کوتاه مرتبه ۵ طبقه به صورت گیردار، با جداگرهای لرزه‌ای LRB، با میراگر ویسکوز و جداگر همراه با میراگر تحت بار انفجاری قرار گرفته‌اند. بار انفجاری استفاده شده ناشی از انفجار سطحی ۲۶۴ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۵ و ۲۰ متری از سازه می‌باشد. فشار انفجار به صورت تاریخچه زمانی در ۲۵ نقطه مختلف با فرض وجود سازه‌های مجاور، در قاب جلویی سازه به دست آمده است. با بررسی نتایج می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سیستم ترکیبی جداگر و میراگر می‌تواند برای طراحی ایمن‌تر و اقتصادی‌تر در سازه‌های فولادی مورد استفاده قرار گیرد.

در مطالعه‌ای که توسط بابایی و حسین زاده در سال ۱۳۹۵ [۱۰] صورت گرفته شده، بررسی استفاده هم زمان میراگر و جداساز در رفتار لرزه‌ای پل‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی این مهم یک پل بتنی مدلسازی شده و تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است. با اضافه کردن میراگر فلزی آکاردیونی و سیستم جداساز لاستیکی سربی به صورت تکی و ترکیبی در پل، نتایج مورد

¹⁴ Walsh

¹⁵ Resetting passive damper (RPSD)

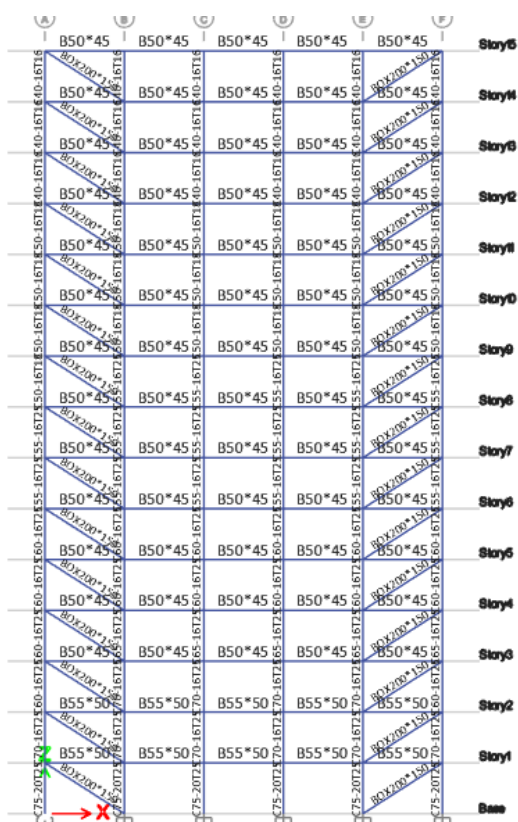
¹⁶ Furtmuller

¹⁷ Tuned liquid column damper (TLCD)

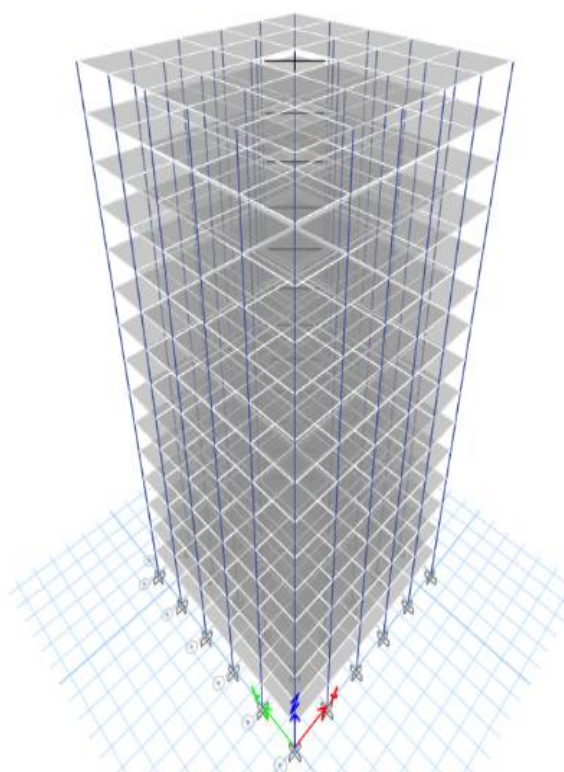
ارزیابی فرار گرفته است و پاسخ‌ها با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان دهنده کاهش پاسخ لرزه‌ای در هر سه حالت تکی و ترکیبی می‌باشد ولی در عین حال تغییر مکان نسبی عرشه نسبت به حالت پل ساده افزایش یافته است که می‌تواند منجر به افزایش احتمال سقوط عرشه از پایه شود.

۳- روش تحقیق

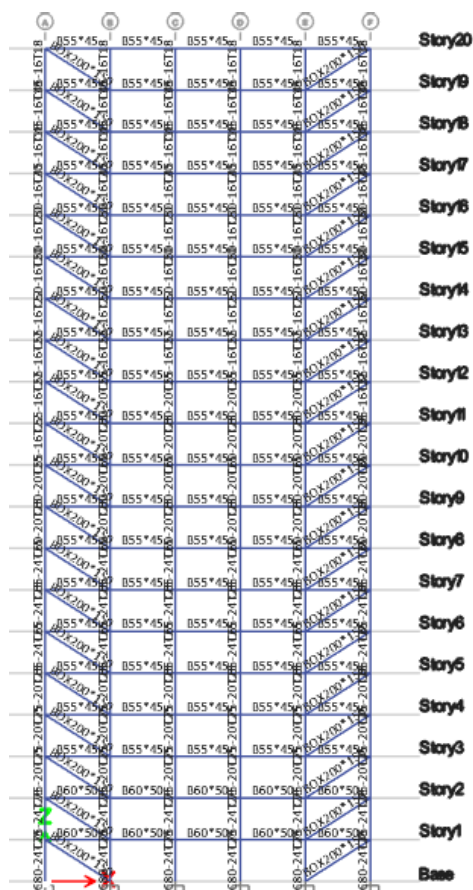
در این مقاله دو سازه بتن آرمه ۱۵ و ۲۰ طبقه ابتدا به صورت سه بعدی در نرم افزار ایتبس و مطابق ضوابط ACI-2014 طراحی شده و سپس یکی از قابهای میانی به منظور بررسی انتخاب و به صورت دوبعدی در نرم افزار اوپن‌سیس مدلسازی شده‌اند. استفاده از سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه سلیقه‌ای و حاصل تحلیل و طراحی شخصی صورت گرفته است. تعداد دهانه‌ها در هر امتداد ۵، طول هر یک از دهانه‌ها ۵ متر و ارتفاع طبقات برابر ۳٫۲ متر در نظر گرفته شده است. در این بررسی بار مرده سازه برابر 2500 Kg/m و بار زنده برابر 1000 Kg/m در نظر گرفته شده است. مدل‌های بررسی شده در ایتبس همراه با مقاطع تیر و ستون در اشکال ۱ الی ۴ ارائه شده است.



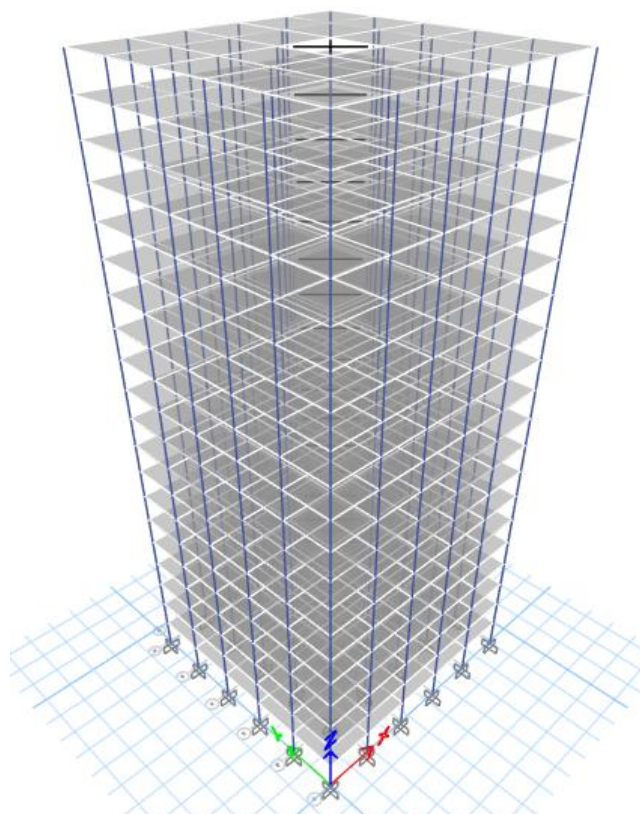
شکل ۲: سازه ۱۵ طبقه مدلسازی شده در ایتبس- دو بعدی



شکل ۱: سازه ۱۵ طبقه مدلسازی شده در ایتبس- سه بعدی



شکل ۴: سازه ۲۰ طبقه مدلسازی شده در ایتبس- دو بعدی



شکل ۳: سازه ۲۰ طبقه مدلسازی شده در ایتبس- سه بعدی

هر یک از این سازه ها با انواع ترکیب سیستم های جداگر و میراگر مورد بررسی قرار گرفته است. میراگرها از نوع ویسکوز و اصطکاکی انتخاب شده اند. در سازه های مجهز به میراگرهای ویسکوز و اصطکاکی، میراگرها در دهانه های اول و پنجم مدل شده اند. ترکیبات مختلفی که در این مقاله در نظر گرفته شده است به شرح زیر می باشد:

- سازه بدون میراگر و جداکننده
- سازه بدون میراگر، با جداکننده
- سازه با میراگر اصطکاکی، بدون جداکننده
- سازه با میراگر ویسکوز، بدون جدا کننده
- سازه با میراگر اصطکاکی و جداکننده
- سازه با میراگر ویسکوز و جداکننده

هر کدام از سازه ها تحت سه رکورد زلزله که در جدول ۱ ارائه شده است با استفاده از برنامه اوپن سیس مدل سازی و با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی تحلیل شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول ۱: مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده

No	Earthquake	Year	M_w	Station	PGA (g)	Type
1	Loma, Prieta	10/18/1989	6/93	Cliff House	0/109	Near
2	Erzican, Turkey	3/13/1992	6/69	Erzincan	0/496	Near

رکوردهای زلزله برای منطقه با خطر لرزه خیزی بسیار زیاد و خاک نوع ۳ مقیاس شده اند. پیش از مقیاس نمودن رکوردها اصلاحات لازم از نوع اصلاح خط مبنا و فیلتر نمودن فرکانس (برای حداکثر فرکانس ۲۰ هرتز) اعمال شده است. مصالح مورد استفاده در مقاطع به شرح جداول ۲ و ۳ می باشد (kg-m):

جدول ۲: مشخصات بتن هسته و پوشش مصالح از نوع 02 concrete (Linear Tension Softening):

	مقاومت فشاری (Kg/m ²)	کرنش در حداکثر مقاومت	مقاومت خرد شدگی بتن	کرنش مقاومت خرد شدگی بتن	مقاومت کششی	سختی نرم شوندگی کششی
هسته	۳۲۵۰۰۰۰	۰,۰۰۳	۶۵۰۰۰۰	۰,۰۵	۴۵۵۰۰۰	۲۲۷۰۰۰۰۰۰
پوشه	۳۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۳	۶۰۰۰۰۰	۰,۰۴	۳۵۰۰۰۰	۱۷۵۰۰۰۰۰۰

جدول ۳: مشخصات آرماتورها از نوع 02 steel (Giuffrè-Menegotto-Pinto Model with Isotropic Strain Hardening):

	نسبت سخت شدگی کرنشی (Kg/m ²)	مدول الاستیسیته اولیه	مقاومت خرد شدگی بتن
آرماتور	۴۰۰۰۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰۰۰۰	۰,۰۱

عوامل غیرخطی به دو صورت در نظر گرفته شده است:

- ۱- استفاده از مقاطع فیبر برای المان‌ها. به دلیل استفاده از مدل دو بعدی درجات آزادی برای این مقاطع P و Mz (محوری و لنگر حول محور محلی ۳) خواهند بود. سختی برشی در این مقاطع به صورت معمولی الاستیک در نظر گرفته می‌شوند.
- ۲- تاثیر p-delta

المان‌های مورد استفاده در تیر و ستون از نوع nonlinear beam column می‌باشند. برای طبقات نیز دیافراگم صلب تعریف و جرم طبقات برابر ۱۴۵۱۰ کیلوگرم به صورت متمرکز در مرکز جرم هر طبقه اعمال شده است. نسبت میرایی ایجاد شده در سازه توسط میراگر ویسکوز با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد. [۱۱] [۱۲]

$$\zeta_d = \zeta_{target} - \zeta_s = \frac{T \sum C_j \phi_j^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum m_i \phi_i^2} \quad (1)$$

که در این فرمول ζ_d میرایی لازم، ζ_{target} میرایی هدف (۰/۱۵)، ζ_s میرایی سازه (۰/۲)، T زمان تناوب مود اول سازه، C_j ضریب میرایی طبقه j، ϕ_j جابجایی افقی نسبی دو انتهای میراگر در تغییر شکل سازه در مود اول، θ_j زاویه میراگر با راستای افق در طبقه j، m_i جرم لرزه‌ای طبقه i، ϕ_i تغییر مکان طبقه i در تغییر شکل مود اول سازه می‌باشد.

به منظور مدل سازی میراگر ویسکوز در اوپنسیس از مصالح میراگر ویسکوز^{۱۸} استفاده شده است. این مصالح ارائه دهنده مکسول^{۱۹} در اوپنسیس می‌باشد. المان در نظر گرفته شده برای این شبیه سازی المان لینک^{۲۰} با تعریف رفتار مصالح ویسکوز در جهت ۱ المان می‌باشد. در این شبیه سازی سختی میراگر برابر رابطه (۲) در نظر گرفته شده است. [۱۱] [۱۲]

$$K = \frac{C}{(0.1:0.01) dt} \quad (2)$$

¹⁸ Viscous damper

¹⁹ Maxwell

²⁰ Two Node Link

که در این رابطه c مقدار میرایی، dt فاصله زمانی ثبت رکورد زلزله می باشد و با فرض $dt = 0.01$ (ثابت برای همه رکوردها) سختی میراگر به صورت رابطه (۳) محاسبه می شود. [۱۱] [۱۲]

$$K_d = C_d \times 10000 \quad (3)$$

در این مدل ها فرض شده است دو میراگر در هر طبقه و با میرایی یکسان برای کلیه میراگرها در طبقات استفاده شده است. مقادیر میرایی و سختی برای هر دو سازه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات میراگر ویسکوز

	میرایی (N/M/S) (CD)	سختی (N) (KD)
۱۵ طبقه	۶۶۸۱۸۲/۸۲۲۱	۶۶۸۱۸۲۸۲۲۱
۲۰ طبقه	۶۶۴۹۲۰/۳۸۹۶	۶۶۴۹۲۰۳۸۹۶

برای مدل سازی میراگر اصطکاکی (پال) از مصالح BoucWen استفاده شده است. در این مدل فرضیات زیر برای پارامترهای مختلف این مدل بر اساس توصیه های مقالات مختلف [۱۱] [۱۲] در نظر گرفته شده است.

$$n = 10, \quad A = A_0 = 1, \quad \gamma = \beta$$

با این فرضیات داریم:

$$u_y = \frac{1}{A_0} \left[\frac{A_0}{\gamma + \beta} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

در این فرمول A_0 ، γ ، β و n کمیت های بی بعد هستند که رفتار مدل را کنترل می کنند. ضریب A_0 کنترل کننده سختی می باشد. ضرایب γ و β شکل و اندازه حلقه هیستریک را کنترل می کنند. اما این پارامترها تفسیر فیزیکی ندارند و به صورت غیرمستقیم و نامشخص بر کل پاسخ تاثیر می گذارند. پارامتر n بر انتقال ناگهانی بین شاخه الاستیک و پس الاستیک حاکم است. در این روش ابتدا با استفاده از پارامترهای سازه و بادبند (سختی بادبند) و میراگر، جابجایی تسلیم میراگر (u_y) محاسبه شده و با استفاده از آن ضرایب γ و β بدست می آیند. لازم به ذکر است، استفاده از واحد kg-m باعث به دست آمدن این ضرایب در حد 10^{-30} می شود که احتمال ایجاد مسائل محاسباتی بیشتر می شود. بنابراین در استفاده از این نوع مصالح توصیه می شود از واحد N-mm در مدل سازی استفاده شود. نتایج مربوط به این محاسبات در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات میراگر اصطکاکی (پال)

ROW	RECORD	PGA(G)	M	$\gamma = \beta$
15-ST				
1	Loma_Far	0/109	6/93	3/17
2	Erzican_Near	0/496	6/69	0/79
3	Northridge	0/87	6/69	0/045
20-ST				
1	Loma_Far	0/109	6/93	4/6
2	Erzican_Near	0/496	6/69	0/43
3	Northridge	0/87	6/69	0/66

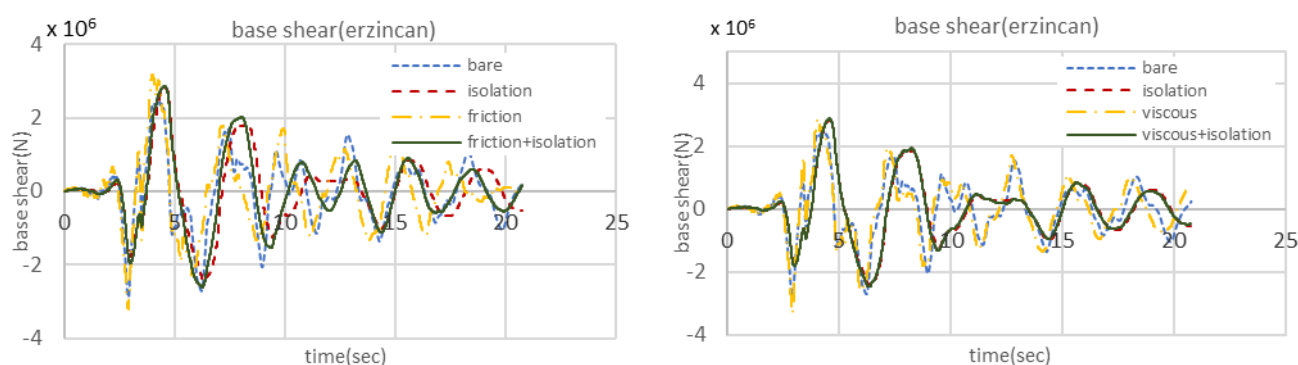
در این پژوهش از جداگرهای لاستیکی با هسته سربی^{۲۱} استفاده شده است. سختی قائم این جداگرها نسبت به سختی افقی آنها خیلی زیاد می‌باشد. در مقاله فوق با توجه به اینکه سازه در یک راستا تحت تحلیل قرار گرفته است، لذا مشخصات مربوط به راستای قائم و راستای افقی x مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه مشخصات جداگرها بر اساس وزن موجود در روی آنها تعیین می‌شود، لذا در این پروژه یک نوع جداگر برای ستون‌های گوشه، یک نوع دیگر برای ستون‌های کناری و یک نوع دیگر برای ستون‌های میانی در نظر گرفته شده و بر اساس وزن اعمال شده که بر اساس سطح بارگیر هر کدام از ستون‌ها تعیین شده است، مشخصات هر کدام بدست آمده است. جزئیات و مقادیر مربوط به مشخصات جداگرها در جدول ۴ آورده شده است. به منظور مدل‌سازی جداگر از المان ZeroLength اوپنسیس استفاده شده است. بدین منظور دو نوع مصالح الاستیک برای سختی افقی، عمودی و ویسکوز برای اعمال میرایی در جهت افقی استفاده شده است.

جدول ۴: مشخصات جداگر لاستیکی با هسته سربی

MODEL	WEIGHT_SIDE COLUMN (N)	WEIGHT_MIDDLE COLUMN(N)	TD (SEC)	K _{EFF_SIDE} (N/MM)	C _{EFF_SIDE} (N.SEC/MM)	K _{EFF_MIDDLE} (N/MM)	C _{EFF_MIDDLE} (N.SEC/MM)	EC (N/MM ²)
15 STORY	2145108	3299458	2/2	1797	178	3050	302	7106862
20 STORY	3157809	4467084	3/5	1037	173	1467	245	7106862

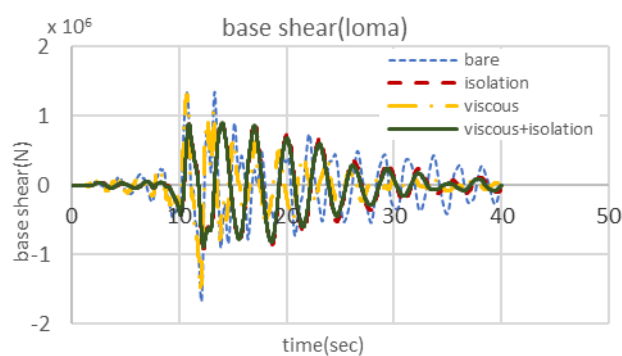
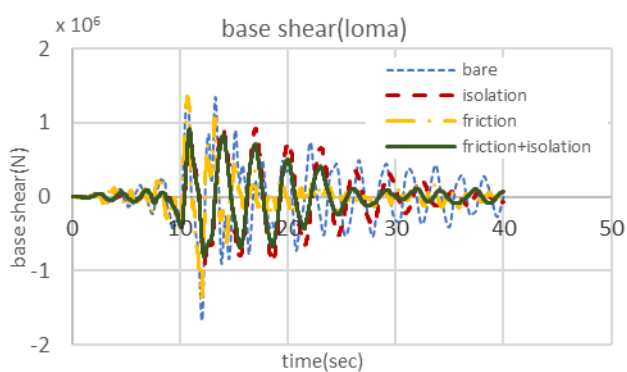
۴- بررسی نتایج

نتایج که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: برش پایه، بیشترین جابجایی نسبی سازه، جابجایی بام، نتایج برای هر یک از حالات مورد بررسی تحت هر سه رکورد زلزله مورد بررسی قرار گرفته و در صورت لزوم نتایج به صورت عددی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. اولین نتایجی که مورد بررسی قرار گرفته است، مربوط به برش پایه می‌باشد که برای هر شش حالت مورد بررسی تحت سه رکورد زلزله در اشکال ۵ الی ۱۰ ارائه شده است. برش پایه مفهومی برای محاسبه میزان نیروی برشی ناشی از زلزله است. این مهم، پایه و اساس محاسبات لرزه‌خیزی استاتیک و دینامیک را مشخص می‌کند و در اصطلاحات اساسی محاسبه نیروی زلزله و میزان ارتعاش آن قرار می‌گیرد. در مناطق لرزه‌خیز استفاده از برش پایه اساس محاسبات را تشکیل می‌دهد. در ضمن تفسیر کلی نتایج در بخش نتیجه‌گیری ارائه شده است.

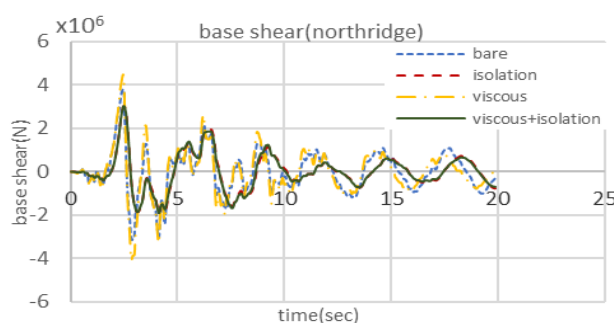
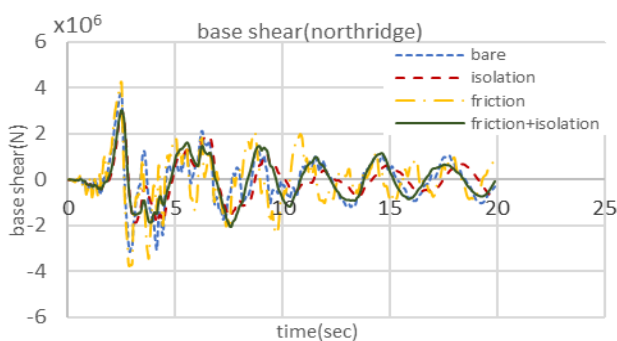


شکل ۵: برش پایه سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد ارزینجان

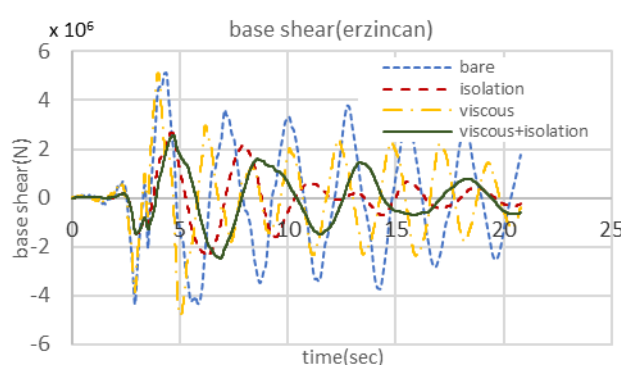
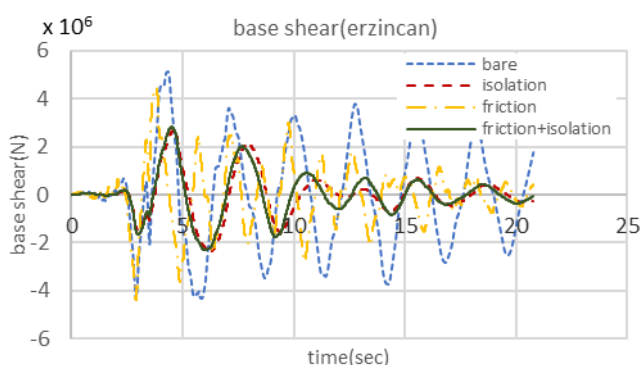
21 LRB



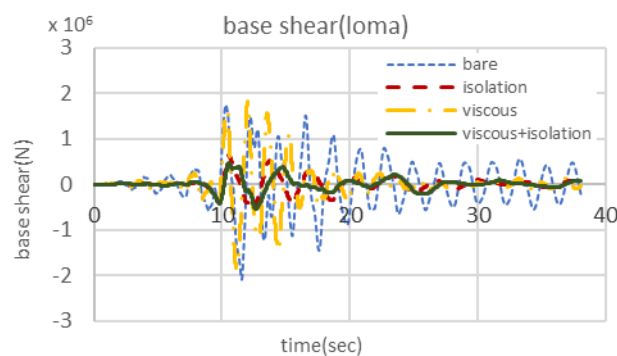
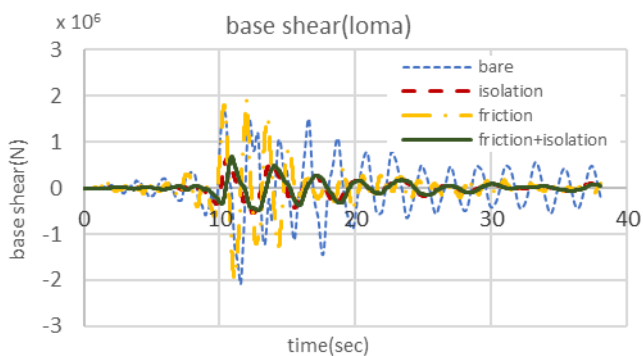
شکل ۶: برش پایه سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد لوما



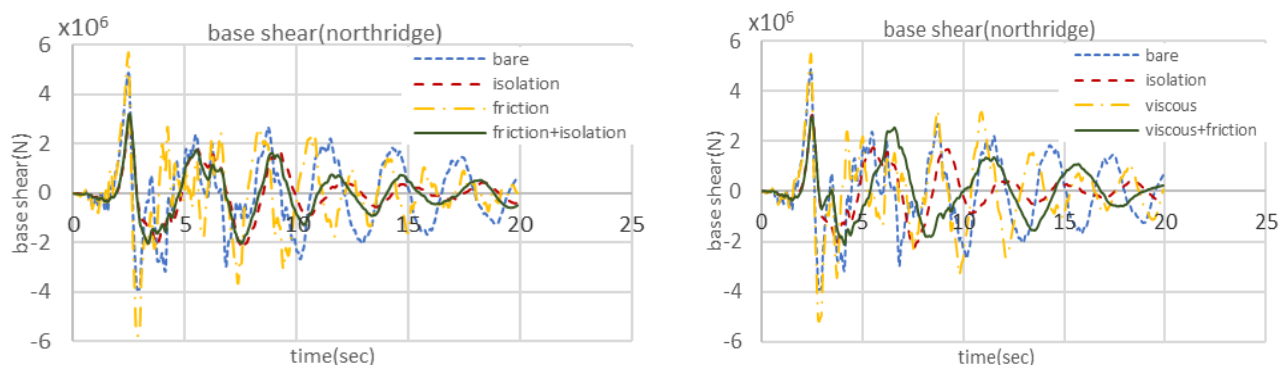
شکل ۷: برش پایه سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد نورثریدج



شکل ۸: برش پایه سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد ارزینجان

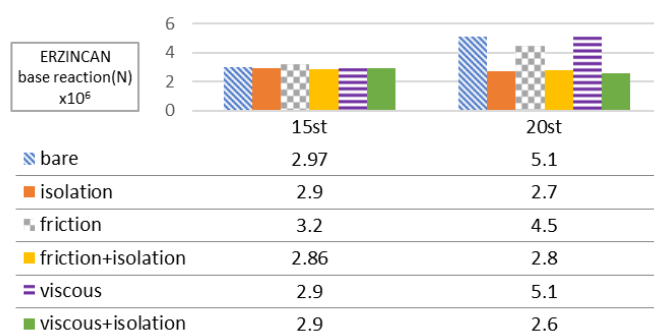


شکل ۹: برش پایه سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد لوما

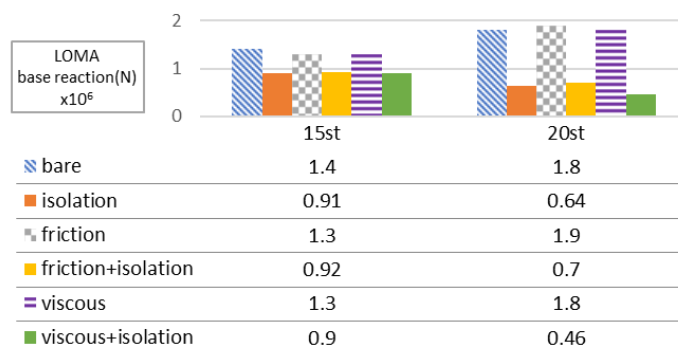


شکل ۱۰: برش پایه سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد نورثریدج

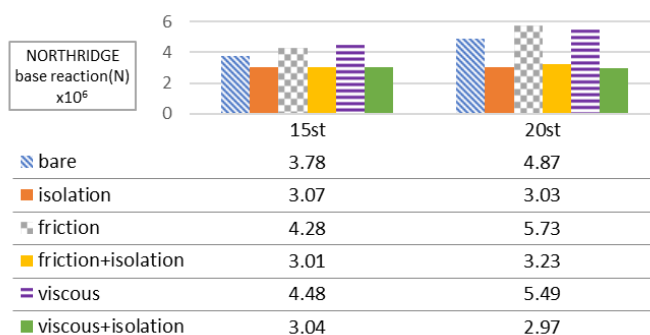
با توجه به نتایج به دست آمده در رابطه با برش پایه می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر برش پایه ایجاد شده در هر رکورد زلزله متفاوت می‌باشد که به دلیل مشخصات فرکانسی هر یک از رکوردها می‌باشد که نسبت به یکدیگر متفاوت هستند. برش پایه سازه‌ها در حضور جداکننده که به تنهایی در سازه مورد استفاده قرار گرفته است، کاهش یافته است. در حالی که استفاده از میراگر اصطکاکی و ویسکوز به تنهایی در سازه نه تنها باعث کاهش برش پایه نشده است، بلکه در برخی مواقع میزان برش پایه سازه را افزایش نیز داده است. با توجه به اشکال ۱۱ الی ۱۳ که نشان دهنده ماکزیمم برش پایه سازه‌ها در حالت‌های مختلف می‌باشد، می‌توان مشاهده کرد که حضور همزمان جداکننده و میراگر (ویسکوز یا اصطکاکی) در سازه تاثیر مثبتی در سازه داشته و باعث کاهش قابل توجه برش پایه نسبت به حالت بدون جداگر و بدون میراگر شده است.



شکل ۱۱: مقادیر ماکزیمم برش پایه سازه‌ها تحت رکورد ارزینجان

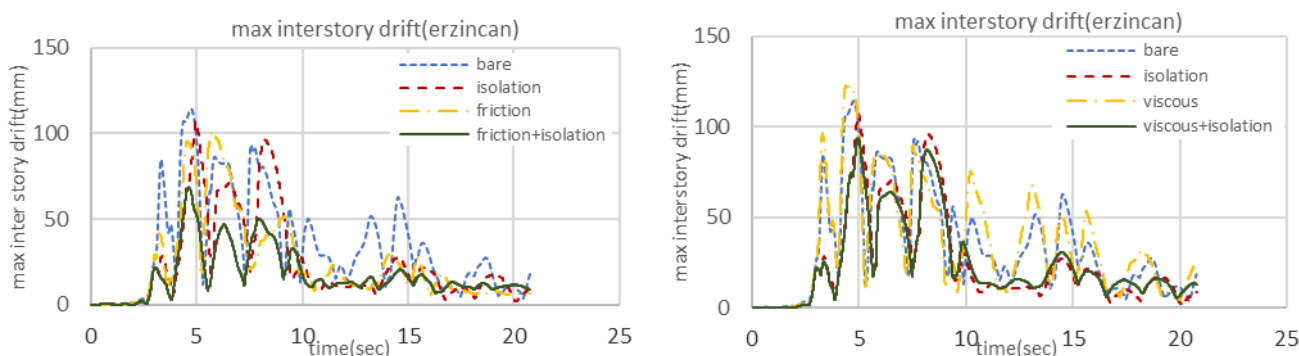


شکل ۱۲: مقادیر ماکزیمم برش پایه سازه‌ها تحت رکورد لوما

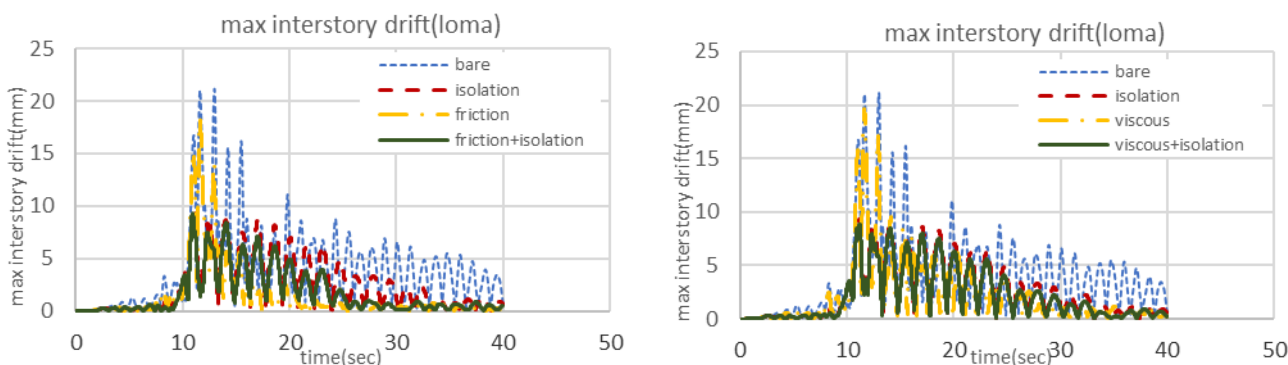


شکل ۱۳: مقادیر ماکزیمم برش پایه سازه‌ها تحت رکورد نورث‌ریدج

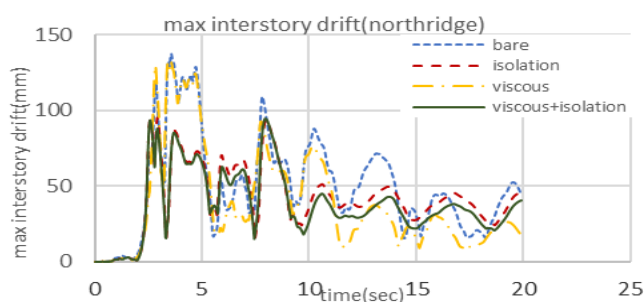
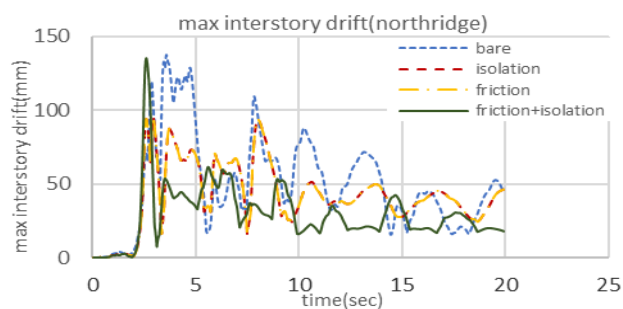
دومین بررسی انجام گرفته در رابطه با تاثیر میراگر و جداکننده در سازه، بررسی میزان جابجایی نسبی سازه‌ها تحت شش حالت مختلف می‌باشد. جابجایی نسبی برای محدود کردن خسارات دیوارهای داخلی، باکس راه‌پله و آسانسور، پنجره‌ها و شیشه‌های طبقات و ... کنترل می‌شود. به عبارت دیگر هدف از کنترل جابجایی نسبی، تامین سختی جانبی مناسب برای سازه می‌باشد تا اثرات پی‌دلتا در زمان ارتعاش سازه در هنگام وقوع زلزله بتوان آسیب‌های وارده به ساختمان را به نحوی کنترل کرد. نتایج مربوط به ارزیابی جابجایی نسبی سازه‌ها در اشکال ۱۴ الی ۱۹ ارائه شده است.



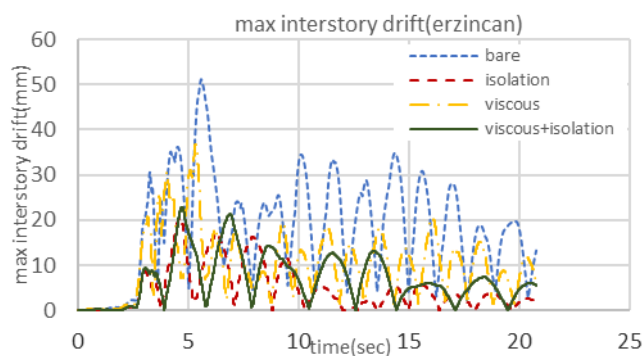
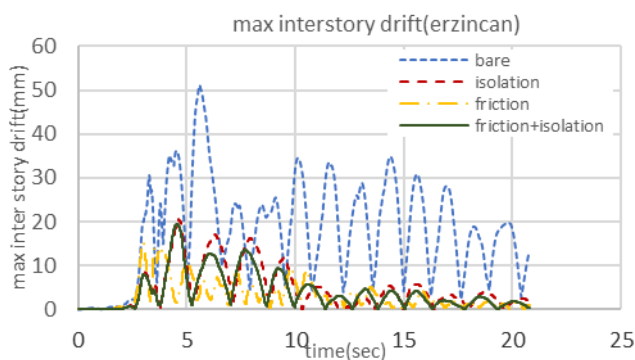
شکل ۱۴: ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد ارزینجان



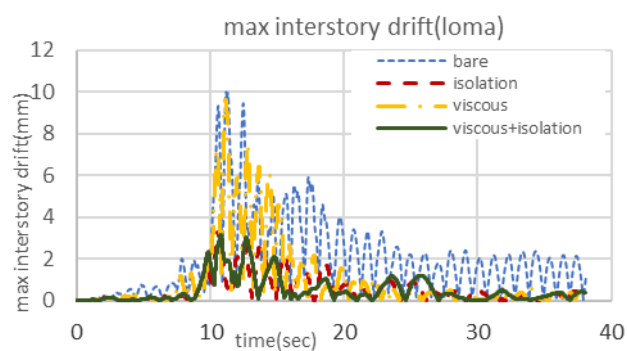
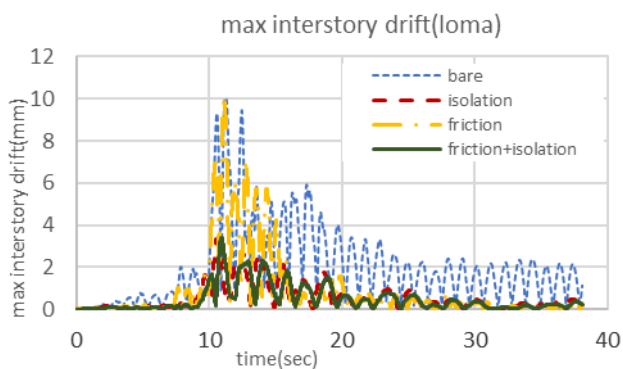
شکل ۱۵: ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد لوما



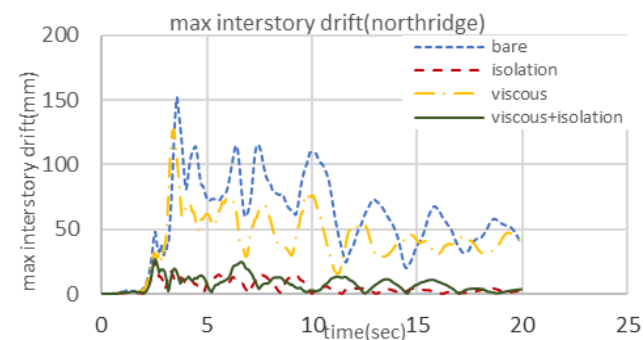
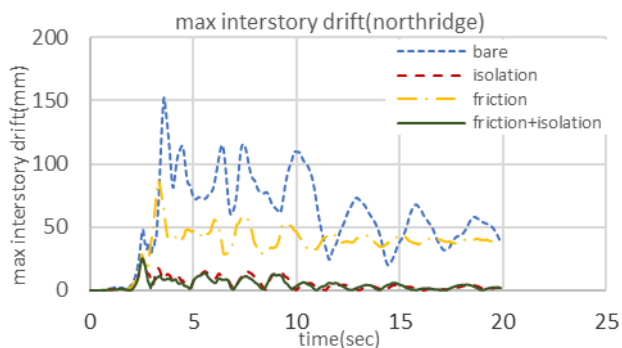
شکل ۱۶: ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد نورثریج



شکل ۱۷: ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد ارزینجان

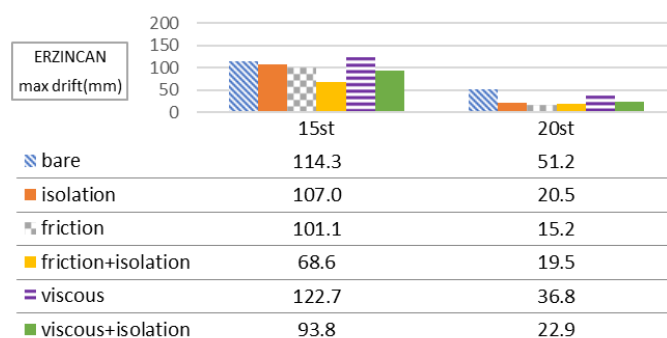


شکل ۱۸: ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد لوما

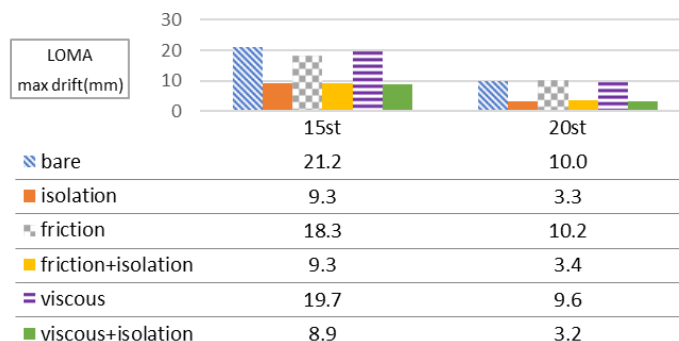


شکل ۱۹: ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد نورثریج

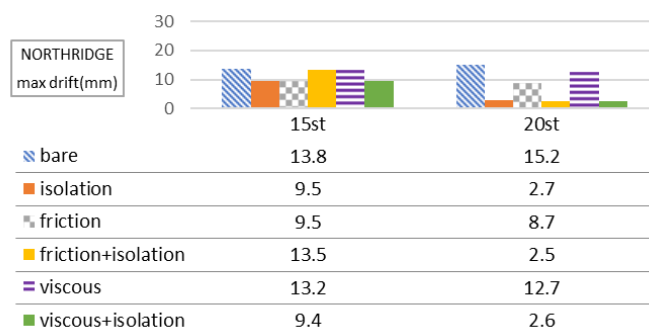
با توجه به نتایج به دست آمده در رابطه با جابجایی نسبی سازه می توان نتیجه گرفت که مقادیر جابجایی نسبی ایجاد شده همانند نتایج مربوط به برش پایه سازه ها در هر رکورد زلزله متفاوت می باشد که به دلیل مشخصات فرکانسی هر یک از رکوردها می باشد که نسبت به یکدیگر متفاوت هستند. ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ها تقریباً در اکثر حالات مورد بررسی از جمله وجود جداکننده و میراگر ویسکوز و اصطکاکی، به تنهایی و همچنین ترکیب میراگرها با جداکننده نسبت به سازه مینا کاهش یافته است. حال با بررسی عددی ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ها که در اشکال ۲۰ الی ۲۲ ارائه شده است، می توان مشاهده کرد که ماکزیمم جابجایی نسبی سازه تحت سه رکورد زلزله لوما و ارزینجان و نورثریدج زمانی که در حضور ترکیبی میراگرها و جداکننده بوده است، بیشترین میزان کاهش جابجایی نسبی را تجربه کرده است. این در حالی است که تاثیر میراگر ویسکوز در کاهش جابجایی نسبی سازه بیشتر از میراگر اصطکاکی می باشد. برای نمونه در سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد لوما میزان ماکزیمم جابجایی نسبی در سازه مینا برابر با ۲۱ میلی متر می باشد. وجود ترکیبی میراگر ویسکوز و جداکننده در سازه این مقدار جابجایی نسبی را به عدد ۸/۹ میلی متر کاهش داده است. این میزان برای ترکیب میراگر اصطکاکی همراه با جداکننده در سازه برابر ۹/۳ میلی متر می باشد.



شکل ۲۰: مقادیر ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ها تحت رکورد ارزینجان

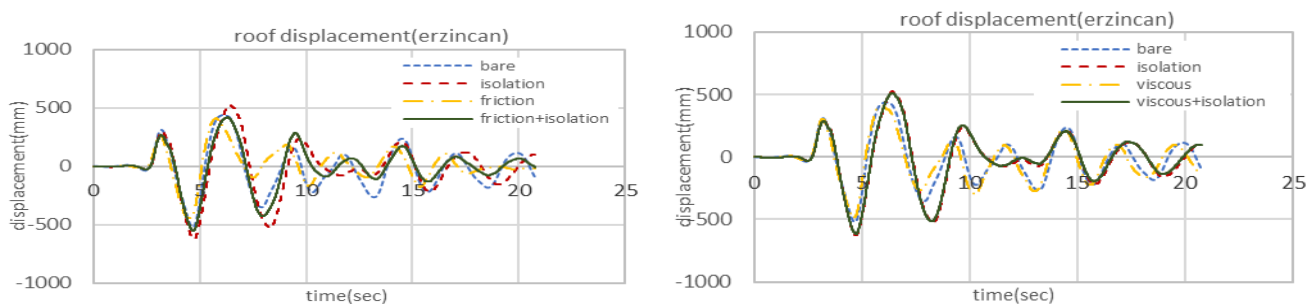


شکل ۲۱: مقادیر ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ها تحت رکورد لوما

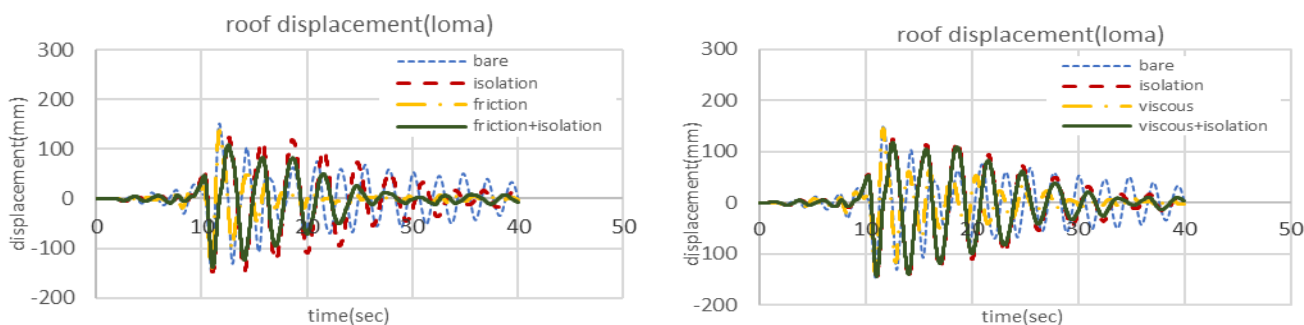


شکل ۲۲: مقادیر ماکزیمم جابجایی نسبی سازه ها تحت رکورد نورثریدج

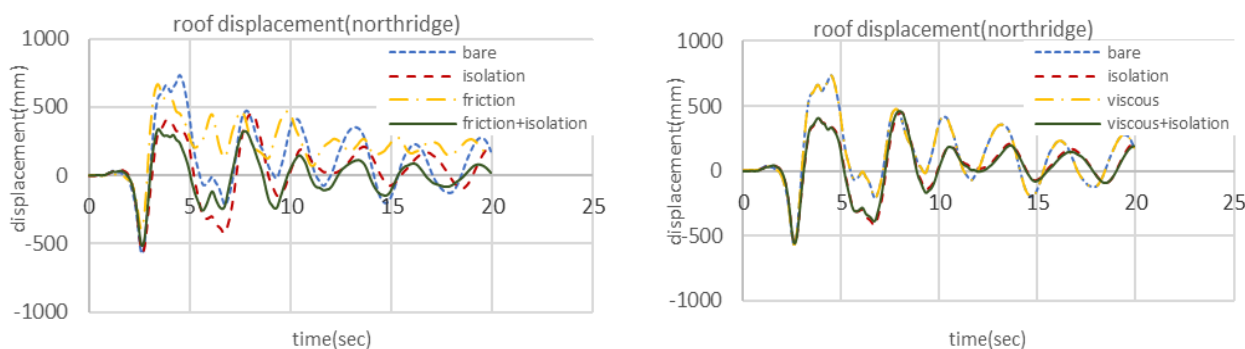
در نهایت برای نتیجه گیری بهتر و ارزیابی دقیق تر نتایج، جایجایی بام سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی جایجایی بام همانند برش پایه و جایجایی نسبی سازه‌ها، نتایج سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه تحت سه رکورد لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج در اشکال ۲۳ الی ۲۸ ائه شده است.



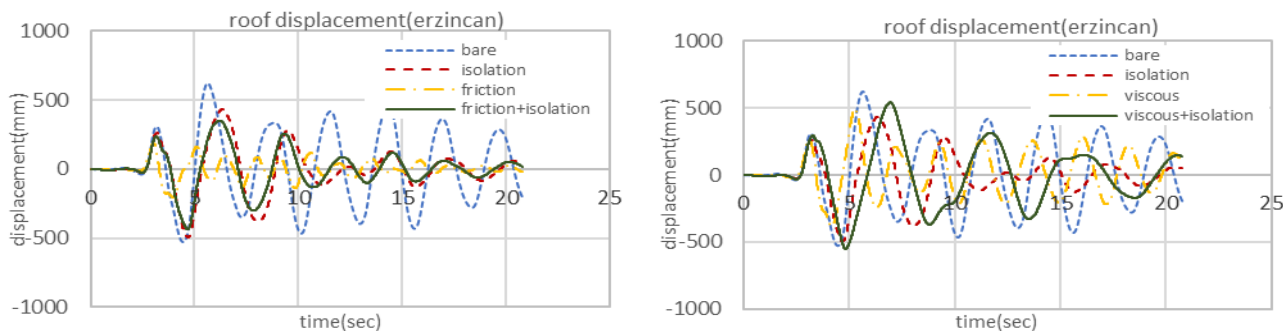
شکل ۲۳: ماکزیمم جایجایی بام سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد ارزینجان



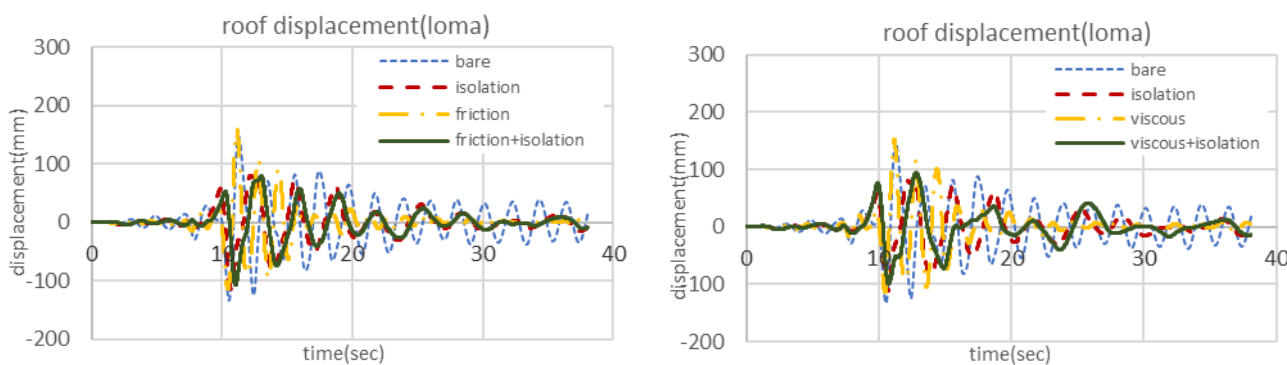
شکل ۲۴: ماکزیمم جایجایی بام سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد لوما



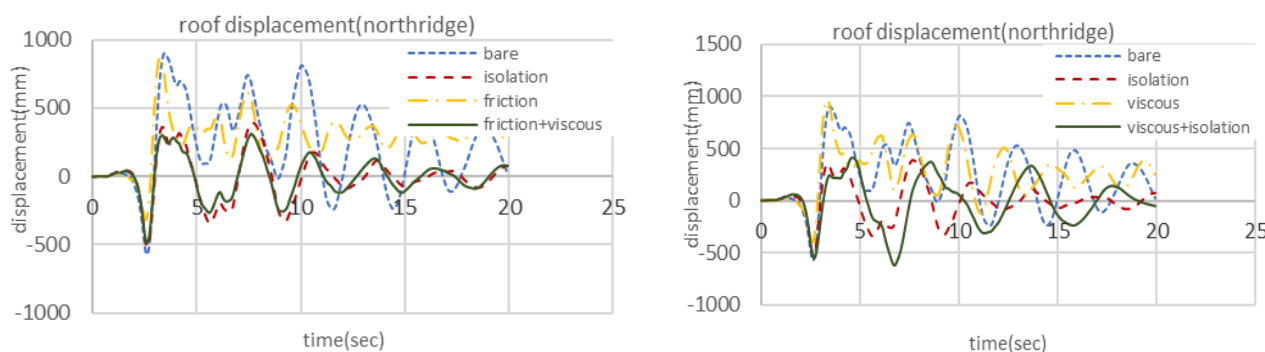
شکل ۲۵: ماکزیمم جایجایی بام سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد نورثریج



شکل ۲۶: ماکزیمم جایجایی بام سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد ارزینجان

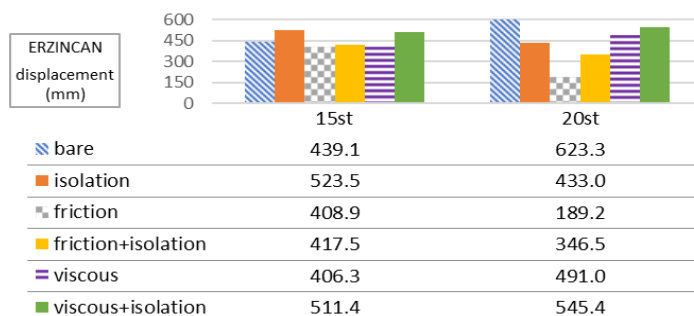


شکل ۲۷: ماکزیمم جابجایی بام سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد لوما

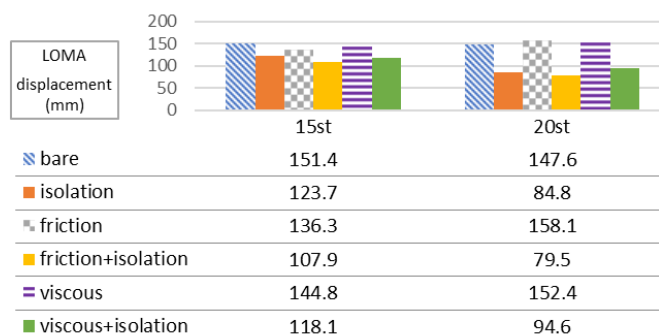


شکل ۲۸: ماکزیمم جابجایی بام سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد نورثریج

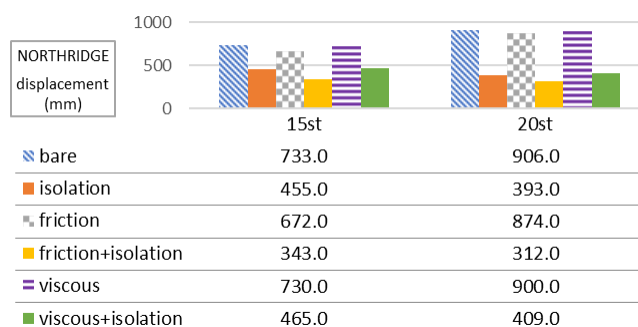
با توجه به نتایج به دست آمده در رابطه با جابجایی بام سازه می توان نتیجه گرفت که مقادیر جابجایی بام ایجاد شده تحت رکوردهای مختلف، متفاوت می باشد. ماکزیمم جابجایی بام سازه ها تقریباً در اکثر حالات مورد بررسی از جمله وجود جداکننده و میراگر ویسکوز و اصطکاکی به تنهایی و همچنین ترکیب میراگرها با جداکننده نسبت به سازه مبنا کاهش یافته است. حال با بررسی عددی ماکزیمم جابجایی بام سازه ها که در اشکال ۲۹ الی ۳۱ بر اساس سه رکورد متفاوت ارائه شده است، می توان مشاهده کرد که ماکزیمم جابجایی بام سازه تحت سه رکورد زلزله زمانی که در حضور میراگرها بوده است، بیشترین میزان کاهش جابجایی بام را تجربه کرده است. این در حالی است که تاثیر میراگر ویسکوز در کاهش جابجایی بام سازه بیشتر از میراگر اصطکاکی می باشد. همچنین در برخی سازه ها علی الخصوص تحت رکورد لوما، حضور ترکیبی میراگر اصطکاکی و جداکننده نسبت به سایر حالات در کاهش جابجایی بام موثر بوده است. برای نمونه در سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد ارزینجان میزان ماکزیمم جابجایی بام در سازه مبنا برابر با ۴۳۹ میلی متر می باشد. وجود میراگر ویسکوز در سازه این مقدار جابجایی بام را به عدد ۴۰۶ میلی متر کاهش داده است. این میزان برای میراگر اصطکاکی در سازه برابر ۴۰۸ میلی متر می باشد.



شکل ۲۹: مقادیر ماکزیمم جابجایی بام سازه ها تحت رکورد ارزینجان



شکل ۳۰: مقادیر ماکزیمم جابجایی بام سازه‌ها تحت رکورد لوما



شکل ۳۱: مقادیر ماکزیمم جابجایی بام سازه‌ها تحت رکورد نورث ریج

۵- نتیجه گیری

هدف این مقاله بررسی بهترین روش ممکن بین میراگرها و جداکننده‌ها برای به دست آوردن بهترین سازه تحت زلزله‌های مختلف می‌باشد. با طراحی دو نوع میراگر اصطکاکی و ویسکوز و همچنین یک نوع جداکننده در سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه و در نهایت ترکیب میراگرها با جداکننده نتایج اساسی برای یافتن سازه بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج اساسی به دست آمده از تحقیقات ارائه شده حاکی از این است که وجود میراگرها به صورت تکی در سازه اثرات مطلوبی نداشته و باعث افزایش برش پایه در سازه‌ها شده است. همچنین تاثیر بسیار ناچیزی در کاهش جابجایی نسبی و جابجایی بام سازه‌ها داشته است. اما وجود جداکننده در حالت کلی باعث بهتر شدن رفتار سازه نسبت به سازه مینا می‌شود. ترکیب انواع میراگر با جداساز روند بهینه‌سازی و بهبود رفتار سازه را تسریع بخشیده و تاثیر مثبت و بسزایی در رفتار سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه داشته است. برای درک بهتر، می‌توان گفت وجود میراگر اصطکاکی در سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد زلزله نورث ریج، میزان برش پایه را به اندازه ۱۷ درصد افزایش داده است. این میزان افزایش برای سازه با میراگر ویسکوز برابر ۱۵ درصد می‌باشد. اما در سازه دارای جداگر میزان برش پایه به اندازه ۳۷ درصد کاهش یافته است. این میزان کاهش برای ترکیب میراگر اصطکاکی با جداگر برابر ۳۲ درصد و برای میراگر ویسکوز و جداگر برابر ۴۱ درصد می‌باشد. میزان کاهش ماکزیمم جابجایی نسبی سازه دارای جداکننده نسبت به سازه مینا در سازه ۱۵ طبقه تحت رکورد لوما برابر ۵۶ درصد می‌باشد. این میزان کاهش برای میراگر اصطکاکی برابر ۱۳ درصد، برای میراگر ویسکوز برابر ۷ درصد، برای ترکیب میراگر اصطکاکی و جداکننده برابر ۵۶ درصد و برای ترکیب میراگر ویسکوز و جداکننده برابر ۵۸ درصد می‌باشد. در نهایت با بررسی عددی ماکزیمم جابجایی بام سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد ارزینجان، می‌توان نتیجه گرفت که میزان کاهش جابجایی برای سازه با جداکننده نسبت به سازه مینا برابر ۳۰ درصد می‌باشد. این میزان کاهش برای سازه با میراگر اصطکاکی برابر ۶۹ درصد و برای سازه با میراگر ویسکوز برابر ۲۱ درصد می‌باشد. همچنین سازه با ترکیب میراگر اصطکاکی و جداکننده میزان ماکزیمم جابجایی بام را تا ۴۴ درصد کاهش داده است که با تغییر این میراگر به میراگر ویسکوز میزان ماکزیمم جابجایی نسبت به سازه مینا حدود ۱۲ درصد می‌باشد.

۶-مراجع

- [1] Ying Zhou, Peng Chen. (2017). Shaking table tests and numerical studies on the effect of viscous dampers on an isolated RC building by friction pendulum bearings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 330–344.
- [2] Landi L, Grazi G, Diotallevi PP. (2016). Comparison of different models for friction pendulum isolators in structures subjected to horizontal and vertical ground motions. *Soil Dyn Earthq Eng*, 81:75–83.
- [3] Dario De Domenico, Giuseppe Ricciardi. (2018). Earthquake-resilient design of base isolated buildings with TMD at basement: Application to a case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 503–521.
- [4] Wolff ED, Ipek C, Constantinou MC. (2015). Effect of viscous damping devices on the response of seismically isolated structures. *Earthq Eng Struct Dyn*, 44:185–98.
- [5] Sang-Hoon Oh, Sung-Hoon Song, Sang-Ho Lee, Hyung-Joon Kim. (2013). Experimental study of seismic performance of base-isolated frames with U-shaped hysteretic energy-dissipating devices. *Engineering Structures*.
- [6] Kenneth K. Walsh, Grace Sallar, Eric P. Steinberg. (2019). Hybrid base-isolation of a nonlinear building using a passive resettable stiffness damper. *Engineering Structures*, 206–211.
- [7] Furtmüller, T., Matteo, A, D., Adam, CH., Pirrotta, A. (2019). Base-isolated structure equipped with tuned liquid column damper: An experimental study. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 816–83.
- [8] Yazdani, Armin, Monajeminejad, Soheil, Asgari, Jafar. (1396). Investigating the nonlinear response of the structure equipped with a base isolator and adjusted mass damper. *The 4th International Conference on Structural Engineering*. Tehran, Iran.
- [9] Zakavi, Roham, Rahgozar, Reza. (1398). Combined effect of LRB seismic isolator and viscous damper in short floor steel structures under blast wave effect. *The second international conference on civil engineering, architecture and urban development management in Iran*, Tehran, Iran.
- [10] Babayi, Ashkan, Hosseinzadeh, Seyed AliAsghar. (1395). Investigating the simultaneous use of damper and isolator in the seismic behavior of bridges. *The first national conference of applied research in civil engineering (structural engineering and construction management)*. Tehran, Iran.
- [11] Charalampakis, Aristotelis E, koumouisis, Vlasis K. (2010). Parameters of Bouc-Wen model revisited. *The nine HSTAM international congress on mechanics*. Limassol, Cyprus
- [12] Ramirez, J.D. Morales, Tirca, L. (2012). Numerical simulation and design of friction-damped steel frame structures.. *15 WCEE*. Lisboa