

## تأثیر میراگر جرمی تنظیم‌شونده با نسبت‌های جرمی مختلف بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن آرمه جداسازی شده

مهدی کوهدرق

استادیار، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان، ایران

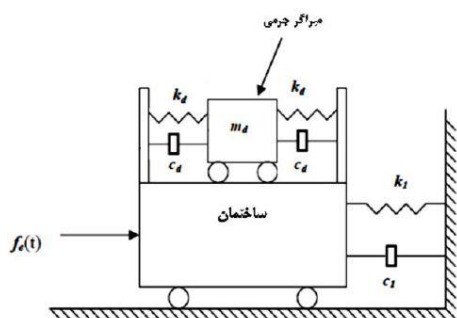
Mehdi\_k550@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۱۹ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۰۶/۰۱

### چکیده

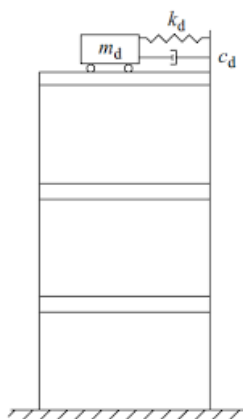
میراگرها و جداسازها، ابزار اتلاف انرژی برای کنترل و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها تحت زمین لرزه‌های شدید محسوب می‌شوند. یکی از پرکاربردترین این وسایل نوع خاصی از میراگرها تحت عنوان میراگرهای جرمی TMD و جداسازهای هسته سربی LRB می‌باشند. مطالعه خواص لرزه‌ای و رفتار غیر خطی سیستم‌های سازه‌ای مجهز به این نوع میراگرها و جداسازها می‌تواند کمک قابل توجهی به درک رفتار این سیستم‌ها در برابر نیروهای جانبی ناشی از زمین لرزه‌های بزرگ نماید. در این پژوهش سازه بتنی ۱۲ طبقه دارای میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف، بدون جداساز و جداساز هسته سربی طراحی شده، سپس با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی در نرم‌افزار SAP2000 در حالت‌های ایزوله شده بدون میراگر و با میراگر با نسبت‌های جرمی مختلف پاسخ‌های سازه‌ها در برابر زلزله‌های ذکر شده بدست آمده است. نتایج تحلیل‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که به دلیل افزایش جابه جایی در تراز جداسازی شده، وجود میراگر جرمی بسیار موثر می‌باشد. که با افزایش نسبت جرمی میراگر، این اثر بیشتر می‌گردد. از طرفی جداساز لرزه‌ای بطور متوسط باعث کاهش ۲۰ الی ۳۰ درصدی جابه جایی نسبی طبقات می‌شود. میراگر جرمی، جابه جایی‌های زیاد جداساز را کنترل می‌نماید. نتایج حاصل نشان می‌دهد در سازه مورد نظر برای بهره‌مندی هرچه بیشتر از قابلیت‌های جداساز، ترکیب آن با میراگرهای جرمی مطلوب می‌باشد.

**کلید واژگان:** جدا ساز هسته سربی، میراگر جرمی، تحلیل دینامیکی، سیستم لرزه‌ای، سازه های بتنی



شکل ۱- نمایش ساده شماتیک از نحوه عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده [۱]

معمولاً این نوع از میراگرهای جرمی در طبقات بالایی سازه به کار گرفته می‌شوند و در صورتیکه سازه تحت اعمال بار قرار گیرد، با تعریف شتاب مشخص بسته به طراحی میراگر، به طور اتوماتیک سیستم شروع به فعالیت نموده و اثر ارتعاش نیروی زلزله را از بین می‌برد. معمولاً جنس جرم این سیستم از بتن، سرب یا فولاد است و به صورت مربع یا مستطیل و به صورت تک یا مجموعه به ابعاد ۵ تا ۱۰ متر ساخته و در طبقات بالایی سازه نصب می‌گردد [۱].



شکل ۲- استفاده از میراگرهای جرمی در طبقات بالایی سازه [۱]

در طراحی سیستم میراگرهای جرمی جهت محاسبات باید با تعیین جرم، سختی و ضریب میرایی، مناسبتری سیستم میراگر را با توجه به وزن کل سازه طراحی نمود تا با یک نسبت ساده بتوان به میزان تأثیر سیستم میراگر طراحی شده پی برد. با فرض برابر بودن فرکانس سازه در راستای نزدیکی مقدار بهینه برای فرکانس میراگر، این کار پریرود میراگر را با پریرود غالب سازه برابر می‌کند. افزایش نسبت جرم، افزایش میرایی را به دنبال دارد، اما باید توجه نمود که یک حد عملی برای افزایش جرم وجود دارد، همچنین با کاهش ضریب میرایی نیز می‌توان میرایی را افزایش داد که برای این

## ۱- مقدمه

به طور کلی اعمال نیرو به یک سازه سبب ایجاد ارتعاش در آن می‌گردد و طراحی سازه در برابر بارهای وارده به آن باید به نحوی صورت پذیرد که ارتعاشات و نیروهای ایجاد شده ناشی از آن در اعضای سازه‌ای، با تأمین ایمنی کافی صورت گیرد. چنانچه بتوان انرژی ورودی به سازه را به نحوی کاهش داد که حداقل تغییر مکان نسبی در طبقات سازه حاصل شود نیاز مقاومت در اعضا کاهش می‌یابد. کنترل ارتعاش سازه در اصل به تعدیل خصوصیات لرزه‌ای سازه اطلاق می‌گردد، تا پاسخ سازه تحت تأثیر بارهای وارده کنترل شود و به سازه‌ای که ارتعاش آن کنترل گردد، سازه کنترل شده گفته می‌شود. روش‌های کنترل ارتعاش سازه‌ها، شامل روش کنترل فعال، غیر فعال، نیمه فعال و ترکیبی می‌شود. در روش‌های کنترل غیر فعال عامل کنترل کننده ارتعاش در محل مناسبی از سازه تعبیه می‌گردد و عملاً تا قبل از تحریک سازه، به صورت غیر فعال است. با شروع تحریک (زلزله)، سیستم کنترل به کار افتاده و عملکرد کنترلی خود را در حین تحریک انجام می‌دهد و پس از خاتمه تحریک مجدداً به حالت غیر فعال باز می‌گردد که به دلیل جذب بخشی از انرژی ورودی به سازه احتمالاً شاهد خرابی جزئی در آن خواهیم بود. تکنیک‌هایی نظیر تکنیک جداسازی پایه، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای ویسکوالاستیک و میراگرهای جرمی تنظیم شده از جمله سیستم‌های کنترل غیر فعال محسوب می‌شوند.

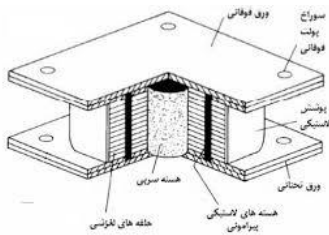
## ۲- مبانی میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMD)

یک سیستم میراگر جرمی فعال (TMD) وسیله‌ای متشکل از یک جرم، فنر و یک میراگر است که به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه، به آن متصل می‌گردد. فرکانس میراگر با میزان فرکانس سازه تنظیم می‌گردد تا هنگامی که این فرکانس تحریک گردد، میراگر در فاز مقابل (مخالف) حرکت سازه مرتعش شود. انرژی توسط نیروی اینرسی میراگر که بر روی سازه اعمال می‌گردد، تلف می‌شود. در این نوع از میراگرها جرم بر روی تکیه‌گاه‌های غلطکی قرار می‌گیرد و می‌تواند نسبت به طبقه جابه جایی انجام دهد، فنرها و میراگرها بین جرم و تکیه‌گاه‌های ثابت عمودی قرار می‌گیرد، نیروی فاز مخالف میراگر را به تراز طبقه و در نتیجه به قاب سازه‌ای منتقل می‌کند [۱-۴].

<sup>5</sup> tuned mass dampers

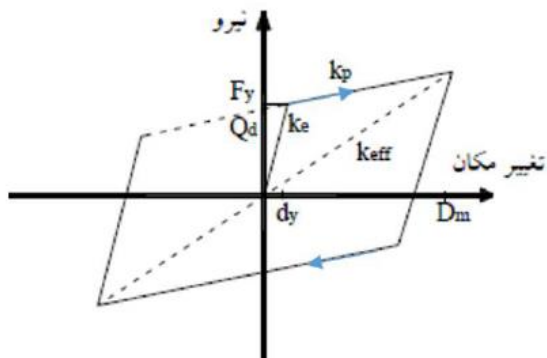
<sup>3</sup> Response controlled structure

<sup>4</sup> Passive control



شکل ۳- عملکرد لرزه‌ای سازه جداسازی شده [۲]

تکیه‌گاه‌های لاستیکی با هسته سربی با نمایش رفتاری دو خطی با نرم شدگی تحت بارهای نسبتاً شدید لرزه‌ای، عملکرد مطلوبی در زمینه کنترل توأم لرزه‌های خفیف و شدید از خود نشان داده‌اند. هسته سربی این تکیه به همراه سختی بخش لاستیکی که در مقایسه با سختی بخش سربی بسیار اندک است، تأمین‌کننده سختی اولیه مورد نیاز در نمودار نیرو - تغییر مکان این تکیه‌گاه‌ها است. با افزایش میزان بارگذاری، این بخش به حد تسلیم رسیده و سختی بسیار کمی را در مقابل بار جانبی از خود نشان می‌دهد. این سختی به همراه سختی بخش لاستیکی تکیه‌گاه، سختی ثانویه را در نمودار نیرو تغییر مکان از خود نشان می‌دهد [۷-۵].



شکل ۴- رفتار غیر خطی جداساز لاستیکی با هسته سربی [۲]

در سال ۱۳۹۶ آقای ملکی [۳] به بررسی بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های بلند مرتبه با الحاق میراگر جرمی تنظیم شده در برابر زلزله‌های حوزه دور گسل پرداخت. هدف بررسی نحوه مدل‌سازی TMD بر روی سازه‌های خطی و ارزیابی تاثیر آن در بهبود رفتار لرزه‌ای ساختمان‌هایی با اسکلت قاب خمشی با در نظر گرفتن صلبیت کف‌ها می‌باشد. بدین منظور سازه ۱۸ طبقه مجهز به TMD، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و تحت اثر زلزله‌های دور از گسل قرار گرفته‌اند و نتایج نشان می‌دهد که عملکرد TMD در کاهش پاسخ سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور بر اساس خاک نوع یک و نسبت به خاک نوع سه و چهار عملکرد مناسبی داشته است. در مطالعه‌ای که توسط اسماعیل آبادی [۴] صورت گرفت به بررسی عملکرد لرزه‌ای میراگر جرمی تنظیم شده در سازه‌های بلند پرداخت این پژوهش با مدل‌سازی سازه ۱۵ طبقه با قاب خمشی فولادی ویژه که در تراز بالای آن بام (TMD)

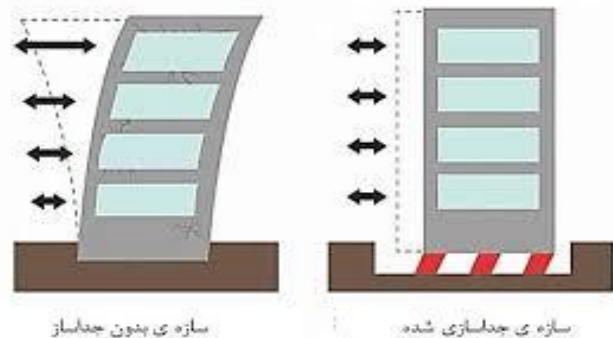
پارامتر نیز محدودیت وجود دارد. طرح نهایی با توجه به ترکیب این دو مقدار با توجه به اعمال محدودیتها صورت می‌گیرد. همچنین باید به محل قرارگیری میراگر و فنر در تکیه‌گاه ثابت در سازه و مکانیسم دوجهته بودن سیستم نیز توجه نمود [۱].

### ۳- مبانی سیستم‌های جداساز لرزه‌ای

استفاده از جداساز لرزه‌ای برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به یکی از موثرترین روش‌های طراحی لرزه‌ای بدل شده است سیستم جداساز لرزه‌ای با بوجود آوردن تغییر مکان زیاد در خود باعث افزایش زمان تناوب کلی سازه شده که این امر موجب کاهش نیروهای زلزله وارد بر اجزای سازه می‌شود که در نتیجه نیروهای اعضا و نیز تغییر مکان نسبی سازه کاهش می‌یابد در جداسازهای لرزه‌ای افزایش پیروی سازه، موجب کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در هنگام زلزله می‌شود. این رویکرد باعث به وجود آمدن تغییر شکل‌های بزرگ در تراز جداسازی می‌شود. از طرفی وجود میرایی لازم در این سیستم‌ها، باعث می‌شود نه تنها ظرفیت سازه افزایش یابد بلکه نیاز سازه نیز کم گردد. در عین حال باید توجه نمود که میرایی زیاد در جداساز، خود موجب افزایش نیروی منتقل شده به سازه می‌گردد، از این سو باید در طراحی این سیستم‌ها، ملاحظات همه جانبه رعایت شود.

### ۳-۱- جداساز لاستیکی با هسته سربی

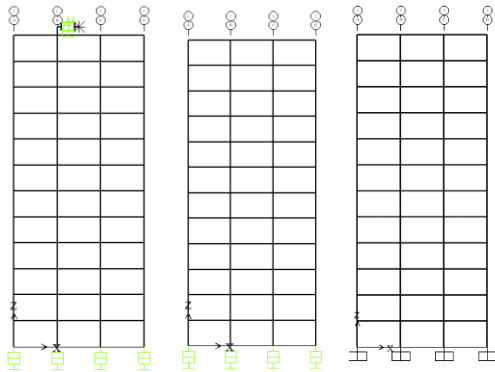
متداولترین سیستم جداسازی، نشیمن‌های لاستیکی با هسته سربی می‌باشند. این نشیمن‌ها، بصورت چندلایه ورقه‌ای بوده و دارای یک یا چند سوراخ دایره‌ای شکل می‌باشند. هسته‌های سربی برای افزایش میرایی سیستم جداساز در داخل این سوراخ‌ها قرار می‌گیرند. دلیل انتخاب سرب برای این جداساز این است که فلز سرب دارای ساختمانی کریستالی است. ساختار کریستالی سرب با تغییر مکان تغییر می‌کند اما بلافاصله با برگشت تغییر مکان به حالت اولیه بازگشته و به این ترتیب تسلیم‌های متوالی تحت بارهای ارتعاشی دینامیکی جانبی باعث به وجود آمدن پدیده‌ی خستگی در آن نمی‌شود [۲].



6 Base isolation LRB

## ۴- سازه‌های مورد مطالعه

سازه مورد استفاده در این مقاله به صورت دو بعدی با سیستم قاب خمشی بتنی متوسط بوده که شامل سازه ۱۲ طبقه و دارای ۳ دهانه ۵ متری در راستای X می‌باشد. هر یک از این سازه‌ها با چهار نسبت جرمی ۳،۵، ۹ و ۱۵ درصد میراگر جرمی تنظیم شونده مدل شده است. ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳ متر است. کلیه ضوابط طراحی مربوط به این نوع سیستم طبق استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۷]، رعایت شده است. در محاسبه جرم طبقات، از بار مرده  $DL=600 \frac{kg}{m^2}$ ،  $LL=200 \frac{kg}{m^2}$  که هر کدام در سطح بارگیر که برابر ۵ متر می‌باشد ضرب شده‌اند. کلیه سیستم‌ها مطابق محبت ششم [۸]، بارهای وارد بر ساختمان ویرایش ۱۳۹۲ و آیین‌نامه ۲۸۰۰ بارگذاری ویرایش ۴ و آیین‌نامه بتن آمریکا ACI318-14 و مبحث نهم [۹] مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۲ طراحی شده‌اند. در طراحی سازه‌ها خاک محل احداث سازه‌ها، خاک نوع ۳، منطقه با خطر پذیری بسیار زیاد و نوع کاربری مسکونی با درجه اهمیت متوسط در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از شتاب نگاشت زلزله‌های انتخاب شده جدول ( ) این ساختمان به صورت بدون جداساز، جداسازی LRB، جداساز LRB بعلاوه TMD با نسبت جرمی ۳٪، جداساز LRB بعلاوه TMD با نسبت جرمی ۵٪، جداساز LRB بعلاوه TMD با نسبت جرمی ۹٪، جداساز LRB بعلاوه TMD با نسبت جرمی ۱۵٪ مدل سازی شده و تحت اثر زلزله‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفتند. ضریب مقیاس مورد استفاده برای رکوردهای لرزه‌ای از مقایسه طیف طرح استاندارد و طیف میانگین مطابق شکل برابر با ۱،۰۶۶ بدست می‌آید.



الف) سازه ۱۲ طبقه مجهز به TMD و LRB (ب) سازه ۱۲ طبقه مجهز به LRB (ج) سازه بدون جداساز

شکل ۵- شکل سازه‌های شبیه‌سازی شده الف) سازه ۱۲ طبقه مجهز به TMD و LRB (ب) سازه ۱۲ طبقه مجهز به LRB (ج) سازه بدون جداساز

طراحی شده، تحت رکورد زلزله طیس قرار گرفته و در نرم افزار اجزای محدود آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است و نتایج مدل سازی با حالت سازه بدون (TMD) مقایسه شده است. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه، به ویژه جابجایی مطلق و نسبی سازه با وجود میراگر جرمی تنظیم شده می‌باشد. مشاهدات نشان می‌دهد حرکت لرزه‌ای سازه با وجود میراگر جرمی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و طراحی این سازه باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌شود آقای مرتضوی [۵]. به بررسی عملکرد سیستم میراگر تنظیم شده جرمی TMD، جهت ارزیابی نسبت میرایی میراگر پرداخت. سازه‌هایی با تعداد طبقات ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ طبقه تحت دو نوع زلزله میدان دور و میدان نزدیک مدل سازی شد نتایج بدست آمده نشان داد که انتخاب یک نسبت میرایی به عنوان نسبت میرایی بهینه، برای تمامی سازه‌ها نمی‌تواند مناسب باشد چرا که مقدار آن با توجه به تعداد طبقات، نوع زلزله و هدف طراحی میراگر، که می‌تواند براساس جابجایی بیشینه و یا شتاب باشد متفاوت خواهد بود آقای یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، در یک تحقیق با در نظر گرفتن اثر نسبت جرم متفاوت برای میراگر TMD و نسبت‌های عمق مایع متفاوت برای میراگر TLD و ترکیب این دو میراگر در کنترل حرکات سازه پرداختند؛ از بررسی مدلها این نتایج حاصل گردید که برای سیستم TLD نسبت عمق مایع به عرض مخزن باید کوچکتر از ۰،۴ کاهش و برای سیستم TMD، نسبت جرم TMD باید بزرگتر از ۱۰٪ باشد تا کاهش پاسخ قابل توجهی داشته باشد. علاوه بر این، اضافه شدن TMD به TLD و سیستم جداساز پایه می‌تواند لایه‌های پرتلاطم مایع در مخزن را آرام کرده و باعث افزایش عملکرد کنترل حرکت سازه گردند [۶]. هدف از انجام این مطالعه مقایسه پاسخ لرزه‌ای سازه بتنی و روش نوین جداساز لرزه‌ای LRB بعلاوه میراگر جرمی تنظیم شونده TMD که بر مبنای کاهش تقاضا است با توجه به اهمیت جداسازها و مشکل عمده‌ی این سیستم‌های مبنی بر جابه جایی بسیار بزرگ در تراز جداسازی شده تحت زلزله‌های نزدیک گسل ضرورت استفاده از ترکیب انواع میراگرها جهت تعدیل این اثرات ضروری می‌باشد. دستیابی به سازه‌ای شکل پذیرتر، دارای مقاومت بیشتر در برابر بارهای جانبی از جمله زلزله، شکل پذیری و تاب‌آوری و دوام بیشتر در طی کردن و از سر گذراندن زلزله و همچنین طراحی بهینه‌تر سازه و مصالح مقاومتر از ضروریات خاص انجام این تحقیق خواهد بود. در این مقاله ساختمان ۱۲ طبقه با سیستم قاب خمشی بتنی متوسط بدون جداساز و جداسازی شده و سیستم‌های جداسازی شده با میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده با نسبت‌های جرمی مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی مدل سازی شده و پاسخ‌های حاصل از تحلیل ارائه شده است. پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله برش پایه ساختمان، جابه جایی، دریف و شتاب طبقات جابه جایی نقطه کنترلی سازه‌ها بدست آورده شده و مقایسه‌های لازم از لحاظ فنی صورت پذیرفته است [۸-۱۵]

۵- مشخصات مصالح

فولاد مصرفی برای آرماتورهای تیر و ستون از نوع ST37 و بتن مصرفی در اسکلت سازه، بتن رده ۲۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح بتن

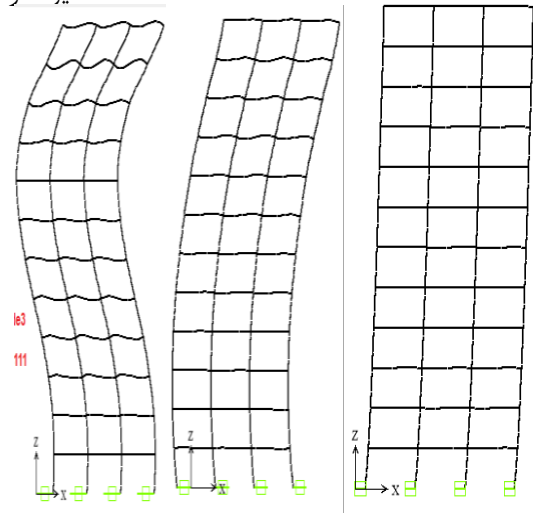
مشخصات بتن رده C25		
وزن واحد حجم	$2500 \frac{kg}{m^3}$	وزن واحد حجم، $W$
مدول الاستیسیته	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ $4700\sqrt{25} = 23500 \text{ Mpa}$	مدول الاستیسیته، $E$
ضریب پواسون	0.15	ضریب پواسون
مقاومت فشاری	25 Mpa	مقاومت فشاری، $f'_c$
حداقل تنش تسلیم فولاد	$F_y = 400 \text{ Mpa}$	مشخصات میلگرد AIII
حداقل مقاومت کششی فولاد	$F_u = 600 \text{ Mpa}$	
تنش تسلیم موثر (مورد انتظار)	$F_{ye} = 1.25 F_y$ $1.25 \times 400 = 500 \text{ Mpa}$	مشخصات میلگرد AII
حداقل تنش تسلیم فولاد	$F_y = 300 \text{ Mpa}$	
حداقل مقاومت کششی فولاد	$F_u = 500 \text{ Mpa}$	
تنش تسلیم موثر (مورد انتظار)	$F_{ye} = 1.25 F_y$ $1.25 \times 300 = 375 \text{ Mpa}$	

۶- مقاطع سازه:

مقاطع تیر و ستون ها در جدول زیر نشان داده شده است.

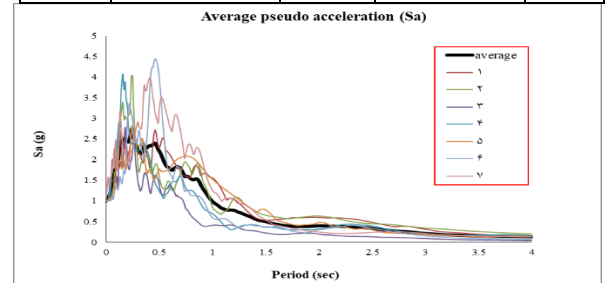
جدول ۳- مشخصات مقاطع تیر و ستون در سازه ۱۲ طبقه

مشخصات مقاطع تیر و ستون در سازه ۱۲ طبقه			
ابعاد تیر (سانتیمتر)	طبقات	ابعاد ستون (سانتیمتر)	طبقات
B65X40	۵ تا ۱	C70X70-24-20	۴ تا ۱
B65X35	۷ تا ۶	C60X60-20-20	۸ تا ۵
B55X35	۱۰ تا ۸	C50X50-16-20	۹ تا ۱۰
B45X35	۱۱ تا ۱۲	C40X40-12-20	۱۱ تا ۱۲

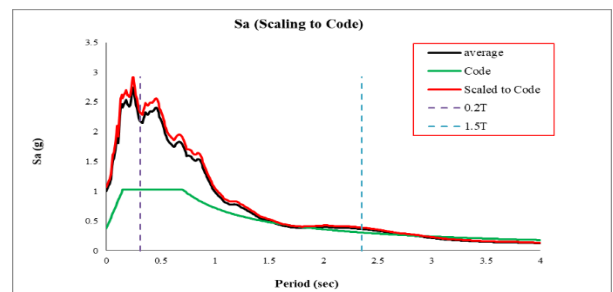


شکل ۶- مدهای ارتعاشی سازه  
جدول ۱- رکوردهای لرزه ای انتخابی

مجموعه رکوردهای لرزه ای				
ROW	Earthquake	year	station	M
1	Elcentro	1938	Elcentro array	5
2	TABAS	1987	TABAS	7.35
3	Superstition hills	1987	El Centro Imp. Co.	6.5
4	Manjil	1990	Abbar	7.4
5	Northridge	1994	Beverly Hills - Mulhol	6.7
6	Kobe	1995	Takatori	6.9
7	Loma	1989	LGPC	6.93

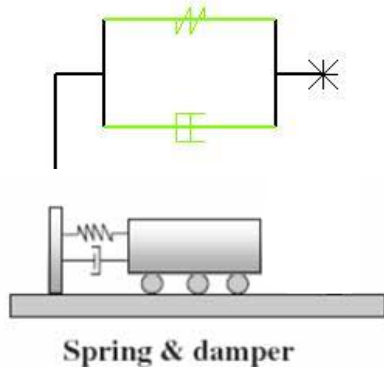


شکل ۷- طیف میانگین رکوردهای لرزه ای



T	0.2T	1.5T	Scaled Factor
1.570	0.314	2.355	1.066

شکل ۸- مقایسه طیف طرح استاندارد با طیف میانگین رکوردهای لرزه ای



Spring & damper

شکل ۹- جزئیات مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده

برای مدل کردن میراگر جرمی تنظیم شونده از المان link استفاده شده است و به دلیل عمل کردن فنر و میراگر، از المان لینک استفاده شده از نوع Linear می باشد. لینک خطی مورد نظر از یک طرف به یک جرم متمرکز و انتقالی و از طرف دیگر به سازه متصل شده است.

جدول ۴- مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده

موقعیت قرار گیری میراگر	$(\%) \mu$	$K_d (\frac{kg}{s^2})$	$c_d (\frac{kg}{s})$
طبقه ۱۲	۳	۱۹۹۰۴۵,۱۹	۴۱۴۳۶
	۵	۳۲۵۱۲۱	۶۹۰۶۰
	۹	۵۸۵۱۹۲	۱۲۴۳۰۸
	۱۵	۹۷۵۳۲۱	۲۰۷۱۸۰

### ۲-۷- طراحی جداسازهای لاستیکی با هسته سربی:

مشخصات زیر برای سامانه‌ی جداسازی با جداساز لاستیکی دارای هسته سربی فرض می شوند.

برای سازه ۱۲ طبقه خواهیم داشت.

۱- دوره‌ی تناوب طبیعی هدف  $T_D=2.5$  s در نظر گرفته می شود.

۲- نسبت میرایی موثر  $\xi_e=0.2$  است.

۳- ضریب BD برای سامانه جداسازی با  $\xi_e=0.2$  بر اساس مفاد دستور العمل برابر است با ۱,۵

### ۷- طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده و جداسازهای

لاستیکی با هسته سربی:

#### ۷-۱- طراحی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)

برای طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده در مدل سازه‌ای یکی از اصلی ترین پارمترها جرم میراگر می باشد معمولاً جرم میراگر را به صورت درصدی از جرم کل سازه بیان می کنند:

$$(1) \quad m_d = \mu \times m_s$$

که در آن  $\mu$  نسبت جرمی، فرکانسی  $f$  و  $m_s$  جرم کل سازه برای پروژه حاضر این عدد ۸۱۵ تن می باشد.

نسبت جرمی  $\mu$  بین ۱۱ الی ۲۰ درصد متغیر است، و مقدار سختی کل سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده از رابطه زیر به دست می آید [۱].

$$(2) \quad k_d = 4\pi^2 \mu f^2 \frac{m_s}{T_s^2}$$

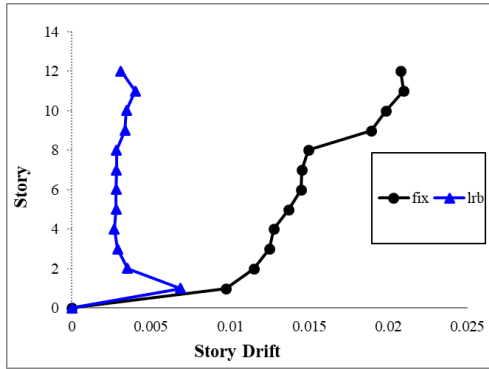
که در آن  $T_s$  زمان تناوب اصلی مد اول سازه است که برای پروژه حاضر ۲,۱۸ ثانیه و  $f$  نسبت فرکانسی TMD می باشد نسبت فرکانس میراگر به فرکانس مود تنظیم شونده بین ۰,۹ الی ۱ متغیر است که در پروژه حاضر این مقدار برای تمامی مدل ها ۰,۹۸ در نظر می گیریم.

ضریب میرایی کل سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده از رابطه زیر بدست می آید:

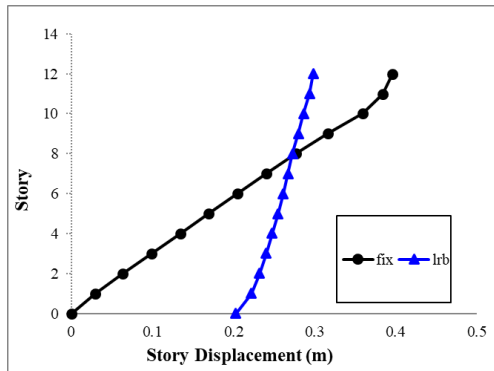
$$(3)$$

$$c_d = 4\pi\mu f \xi \frac{m_s}{T_s}$$

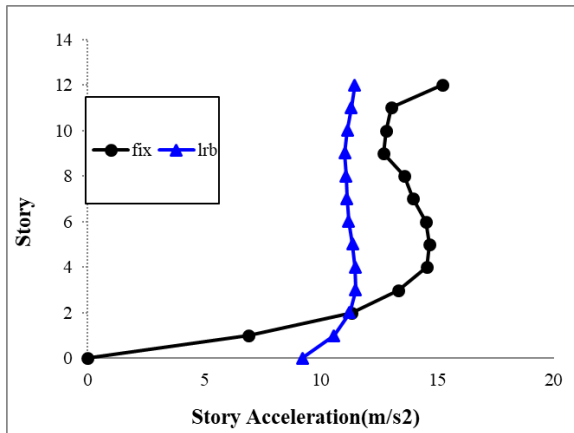
که در آن  $\xi$  نسبت میرایی TMD می باشد. اغلب نتایج حاصل از صحت سنجی حاکی از این هستند که مناسبترین نسبت میرایی میراگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد می باشد که در پروژه حاضر ۳۰ درصد در نظر می گیریم. در این تحقیق، چهار نسبت جرمی (۵,۳، ۹، ۱۵ و ۲۰ درصد) برای میراگر جرمی تنظیم شونده استفاده کردیم و با قرارگیری میراگرها بر روی طبقه آخر، چهار مدل سازه‌ای ساختمان با میراگر جرمی تنظیم شونده تحلیل می گردند [۱۱].



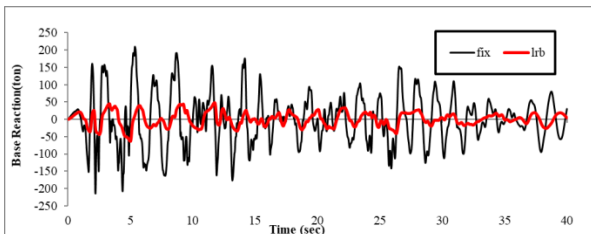
شکل ۱۰- مقایسه دررفت سازه با جداساز و بدون جداساز



شکل ۱۱- مقایسه جابه جایی سازه با جداساز و بدون جداساز



شکل ۱۲- مقایسه شتاب طبقات سازه با جداساز و بدون جداساز



شکل ۱۳- مقایسه برش پایه سازه با جداساز و بدون جداساز

۴- منطقه‌ی محل احداث سازه با خطر نسبی بسیار زیاد ارزیابی شده و نوع زمین III است. از این رو مطابق استاندارد ۲۸۰۰، نسبت شتاب مبنای طرح  $S=1.75$ ،  $T_s=0.7$ ،  $T_0=0.15s$ ،  $A=0.35$  [۲].

-سختی موثر افقی،  $K_e$  برای جداسازی عبارت خواهد بود از:

$$K_e = \frac{W}{g} \left( \frac{2\pi}{T_D} \right)^2 = \frac{815}{9.81} \left( \frac{2 \times 3.14}{2.5} \right)^2 = 524.23 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$$

مطابق دستورالعمل مقدار تغییر مکان طرح عبارت خواهد بود با:

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{A(S+1)T_s^3 T_D^2}{B_D} = 0.47$$

-نیروی تسلیم اولیه  $Q_d$  برابر خواهد بود با:

$$Q_d = \frac{\pi}{2} \times 131 \times 0.2 \times 0.47 = 19.34$$

$$Q_d = \frac{W_D}{4D_D} \frac{\pi}{2} K_e \xi_e$$

-سختی ثانویه برابر است با:

$$K_2 = k_e - \frac{Q_d}{D_D} = 131 - \frac{19.34}{0.47}$$

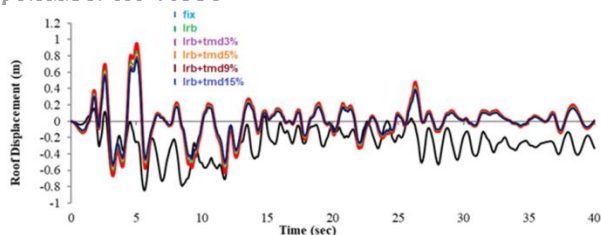
$$K_1 = 10k_2 = 10 \times 89.85 = 898.5 \text{ ton}$$

$$D_y = \frac{Q_d}{k_1 - k_2} = 0.024$$

$$F_y = k_1 D_y = 400 \times 0.024 = 21.56$$

## ۸- آنالیز سازه‌های ۱۲ طبقه با و بدون جداساز تحت بارگذاری تاریخیچه زمانی

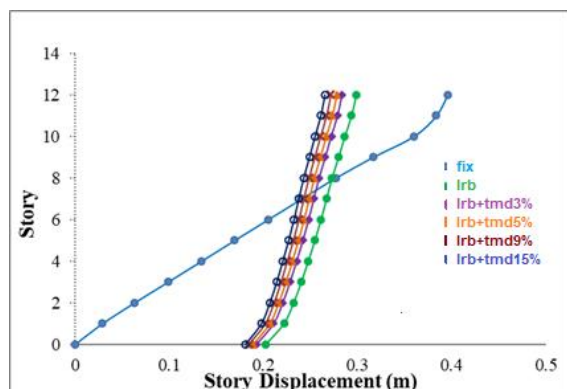
در این مرحله ساختمان مذکور در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و با اعمال شتابنگاشت‌های مقیاس شده، به صورت تحلیل تاریخیچه زمانی آنالیز شده است. جابه جایی، دررفت، برش پایه و شتاب طبقات سازه‌ها در حالت بدون جداساز، در اثر اعمال هر یک از زلزله‌ها به ساختمان، محاسبه و برداشت شده‌اند که در ادامه، این مقادیر با مقادیر به دست آمده از آنالیز ساختمان که جداساز هسته سربی مورد نظر به آن اعمال شده است، مقایسه می‌شوند. جداساز لرزه‌ای با افزایش دوره تناوب، و افزایش جابجایی نسبی در تراز جداسازی شده، روسازه را در حالت صلب قرار می‌دهد. به عبارتی با حضور جداساز، جابه جایی، شتاب طبقات، برش پایه و دررفت طبقات بسیار کاهش می‌یابد. بنابراین به منظور بررسی صحت عملکرد مدلسازی‌ها، مقایسه‌های انجام شده برای جابه جایی، شتاب طبقات، برش پایه و دررفت طبقات در سازه مذکور، تحت رکوردهای بیان شده، در نرم‌افزار SAP2000 انجام گردیده است نتایج زلزله‌های ذکر شده برای سازه‌های ۱۲ طبقه ارائه شده است.



شکل ۱۵- بررسی جایجایی نقطه کنترلی سازه ۱۲ طبقه با جداساز و میراگر با نسبت‌های جرمی مختلف تحت رکوردهای زلزله

#### ۱۰- بررسی جایجایی طبقات در سازه‌های ایزوله شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف:

جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه‌های ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش در پاسخ‌های شتاب طبقات می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد.



شکل ۱۶- بررسی جایجایی طبقات در سازه‌های ایزوله شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

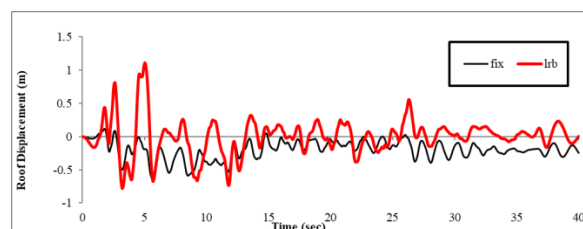
#### ۱۱- بررسی شتاب طبقات در سازه‌های ایزوله شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

شتاب طبقات در سازه‌های ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد. استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده باعث کاهش در پاسخ‌های شتاب طبقات می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد.

تطابق نمودارهای سازه‌ها با تراز جداساز با توجه به اشکال (۱۳ تا ۱۰) نشان می‌دهد، استفاده از جداساز باعث کاهش دررفت، شتاب، برش پایه و جابه‌جایی نسبی طبقات می‌گردد که تطابق هر یک از دو گراف (حالت جداسازی شده و بدون جداساز) موجود در اشکال بالا (۱۰ تا ۱۳) صحت مدل‌سازی جداسازهای هسته سربی را نشان می‌دهد.

#### ۹- بررسی جابه‌جایی نقطه کنترلی سازه‌ها در سازه‌های ایزوله شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف:

جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه‌های ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد. وجود جداسازها در سازه باعث می‌شود روسازه در برابر زلزله رفتار صلبی از خودش نشان دهد، از طرفی از جداساز هسته سربی بر اساس نوع عملکردش، می‌توان انتظار داشت باعث افزایش جابه‌جایی در تراز بام (نقطه کنترلی) گردد، که این امر در نتایج حاصل از مدل‌ها نیز بسیار مشهود می‌باشد.



شکل ۱۴- بررسی جابه‌جایی نقطه کنترلی سازه‌ها در سازه‌های ایزوله شده

همانگونه که در (شکل ۱۴) مشاهده می‌شود، جابه‌جایی بام در سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های پایه ثابت، بیشتر شده است. این افزایش بسته به ویژگی‌ها و محتوای فرکانسی رکورد می‌تواند در دامنه و پالس‌های مختلف در حین اعمال زلزله، شدت یا کاهش یابد. اما نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های مذکور، نشان می‌دهد در همه زلزله‌ها، جابه‌جایی تراز بام در سازه‌ی جداسازی شده بیشتر از حالت پایه ثابت می‌باشد. همین امر باعث افزایش دوره تناوب سازه‌های ایزوله شده نسبت به سازه‌های پایه ثابت می‌شود. جهت کاهش اثرات نامطلوب این جابه‌جایی زیاد مخصوصاً در مناطق نزدیک گسل<sup>۷</sup> در این مقاله از میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف ۳،۵،۹،۱۵ درصد استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد حضور میراگر جرمی، جابه‌جایی زیاد ناشی از جداسازهای لرزه‌ای را، به میزان بیشتری کاهش می‌دهد که این مقدار کاهش با افزایش درصد جرمی میراگر بیشتری باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده و ترکیب این سیستم‌ها در سازه‌های بتنی مفید می‌باشد [12].

<sup>7</sup> near-fault motions

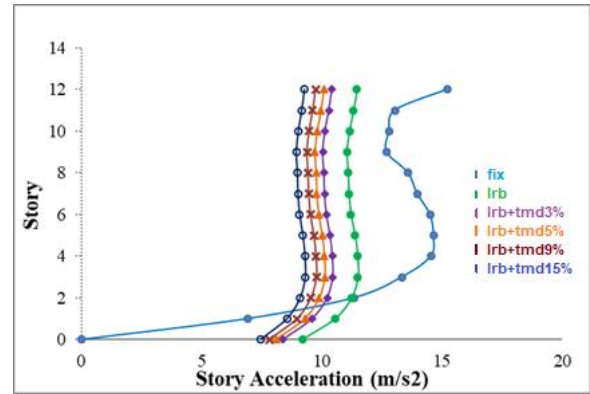


- استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش نسبی در پاسخ‌های جابه جایی طبقات سازه ایزوله شده می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد.

- استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده باعث افزایش شکل پذیری سازه می‌گردد و با افزایش نسبت جرمی میراگر عملکرد لرزه‌ای سازه ایزوله شده بهبود می‌یابد.

#### منابع:

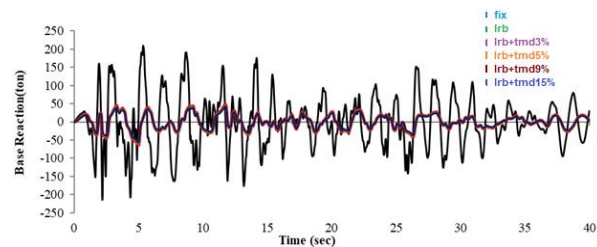
- ۱- معاونت فنی، امور زیر بنایی و تولیدی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، (۱۳۹۷)، " دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها " تهران، ضابطه شماره ۷۶۶.
- ۲- معاونت نظارت راهبردی، دفتر نظام فنی اجرایی، (۱۳۸۹)، " راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها " تهران، نشریه شماره ۵۲۳.
- ۳- مجتبی ملکی، (۱۳۹۶)، بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های بلند مرتبه با الحاق میراگر جرمی تنظیم شده در برابر زلزله‌های حوزه دور گسل، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر.
- ۴- مرتضوی، س، (۱۳۹۶)، بررسی عملکرد سیستم میراگر تنظیم شده جرمی TMD، جهت ارزیابی نسبت میرایی میراگر، کنفرانس بین‌المللی زلزله، مدیریت بحران، احیا و بازسازی.
- ۵- اسماعیل آبادی، ر، (۱۳۹۵)، بررسی عملکرد لرزه‌ای میراگر جرمی تنظیم شده در سازه‌های بلند، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و منظر شهری.
- [6] Bang-Fuh, Chen., Bing-Han, Y., Experimental study of a hybrid TMD and TLD on structure motion reduction, Ocean Engineering., vol. 165, no. 3, 2018, pp 538-549.
- [7] Elias, S., Matsagar, V., Datta, T.K., Distributed tuned mass dampers for multi-mode control of benchmark building under seismic excitations, Journal of Earthquake Engineering, vol 12, 2017, pp 123-133.
- [8] Trisnanto, S.R., Ayu, M.A., and Tamarany, R., Theoretical investigation of multiple tuned mass damper configurations subjected to step and periodic excitation., 3rd International Conference on Computing, Engineering, and Design, ICCED, 2017, pp. 1-6.
- [9] Salvi, J., Rizzi, E., Optimum earthquake-tuned TMDs: Seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 101, 2017, pp 67-80.
- [10] Bayat, A., Beiranvand, P., and Ashrafi, H.R., Vibration control of structures by multiple mass dampers, Jordan Journal of Civil Engineering, vol. 12, no. 3, 2018, pp 461-471.
- [11] Kim, S.Y., Latin. C.H., Optimum design of linear multiple tuned mass dampers subjected to white noise base acceleration considering practical configurations, Engineering Structures, vol. 171 2018, pp 516-528.
- [12] Hussan, M., Rahman, M.S., Sharmin, F., Kim, D. and Do, J., Multiple tuned mass damper for multi-mode vibration reduction of offshore wind turbine under



شکل ۱۷- بررسی شتاب طبقات در سازه‌های ایزوله شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

#### ۱۲- بررسی برش پایه در سازه‌های ایزوله شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

برش پایه طبقات در سازه‌های ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد. استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش در پاسخ‌های برش پایه می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد.



شکل ۱۸- بررسی برش پایه در سازه‌های ایزوله شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

#### نتایج:

افزایش جابه جایی تراز جداسازی شده در سازه‌هایی که دوره تناوب آنها بیشتر می‌باشد، امکان وقوع پدیده برخورد سازه‌های ایزوله شده را به سازه‌های کناری محتمل می‌کند، بنابراین برای رفع این اثر، استفاده از میراگر جرمی در تراز بام مطلوب می‌باشد. با توجه به خروجی نرم‌افزار و مقایسه نتایج تحلیل سیستم ترکیبی میراگر جرمی تنظیم‌شونده و جداساز پایه، اثرات نامطلوب جابه جایی زیاد تر از جداسازی شده را بهبود بخشیده، و در مجموع با کاهش نیاز (Demand) سازه و افزایش ظرفیت آن، در مقابل حرکت‌های زمین عملکرد مطلوبی داشته باشد. که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد.

- استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش چشم‌گیر در پاسخ‌های شتاب طبقات سازه ایزوله شده می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد.

seismic excitation, Ocean Engineering, vol 160, 2018, pp 449-460

[13] Marano, G.C., Rita, G., Bernardino, C. (2010). A Comparison between Different Optimization Criteria for Tuned Mass Dampers Design. Journal of Sound and Vibration, Vol. 329 (23), 4880-4890.

[13] Li, S.J., Li, G.Q., Tang, J., Li, Q.S. (2014). Shallow Rectangular TLD for Structural Control Implementation. Journal of Applied Acoustics, Vol. 63, 1125-1135.

[14] Fujino, Y., Sun, L., Chaiseri, P. (2019). Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures. Engineering Mechanics, Vol. 118(10), 2017-2030.

[15] Sun, L.M., Fujino, Y., Pacheco, B.M. (2018). Modeling of Tuned Liquid Damper (TLD). Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 41(44), 1883-1894.

# Effect of Tuned Mass Damper with Various Mass Fractions on the Seismic Performance of Isolated Reinforced Concrete Structures

Mehdi Kouhdaragh

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

## Abstract:

Dampers and isolators are energy dissipating devices to control and reduce the seismic responses of structures under strong earthquakes. One of the most widely used of these devices is a special type of damper called TMD mass dampers and LRB lead core separators. Tuned Mass dampers (TMD) and Lead Rubber Bearings (LRB) are of the most widely used types of these devices. The scientific study of the seismic characteristics and nonlinear behavior of structural systems equipped with this type of dampers and isolators can significantly help to understand the behavior of these systems against the lateral forces imposed by strong earthquakes. In this research, a 12-story concrete structure with mass damper with various mass fractions, without isolator and with lead core isolator is designed. Then, applying time history analysis in SAP2000 software in isolated states without damper and with damper with different mass fractions, the responses of the structures against the mentioned earthquakes are obtained. The results of the analysis presented that the presence of mass damper is very effective due to the increased displacement in the isolated level. This effect is increased by increasing the mass fraction of the damper. The seismic isolator, on the other hand, can reduce the relative displacements of stories by 20 to 30% on average. The mass damper controls the large displacements of the isolator. The results in the studied structure revealed that in order to utilize the maximum capabilities of the isolator, it should be combined with mass damper.

**Keywords:** Lead Rubber Bearing, Mass damper, Dynamic analysis, Seismic system, Concrete structures