

مقایسه کارایی میراگرهای جرمی و سیال تنظیم شونده در سازه‌های بلند تحت زلزله حوزه نزدیک و دور

حامد رحمن شکرگزار^{۱*}، کبری نعیم^۲، هوشیار ایمانی کله‌سر^۳

۱-استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳-استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده و میراگرهای سیال تنظیم‌شونده از انواع سیستم‌های کنترل غیرفعال در سازه می‌باشند که به منظور کاهش پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان‌ها در برابر زلزله استفاده می‌شوند. در این تحقیق عملکرد ساختمان‌های بلند مجهز به این دو نوع از میراگرها در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند. بدین منظور یک ساختمان بیست و چهار طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه در نظر گرفته شده و تحلیل‌های دینامیکی در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده با استفاده از هفت رکورد زلزله حوزه نزدیک و حوزه دور انجام یافته است. همچنین این ساختمان در پنج حالت و با درصدهای جرمی، سختی و میرایی مختلف مدلسازی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که کاهش پاسخ سازه در ساختمان‌های بلند، به علت تأثیر بیشتر موده‌های بالاتر در زلزله حوزه نزدیک از زلزله حوزه دور بیشتر است؛ همچنین میراگر جرمی عملکرد بهتری در مقایسه با میراگر سیال در کاهش پاسخ‌ها دارد.

کلمات کلیدی: میراگر جرمی تنظیم‌شونده، میراگر سیال تنظیم‌شونده، زلزله حوزه نزدیک و دور، ساختمان‌های بلند.

*نویسنده مسئول: حامد رحمن شکرگزار

پست الکترونیکی: h_rshokrgozar@uma.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2016.41242
شناسه دیجیتال
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.41242

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

در تئوری مدرن کنترل سازه‌ها، روش‌های کنترل ارتعاشات در چهار گروه غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و مرکب طبقه‌بندی می‌شوند [۱]. سیستم‌های کنترل غیرفعال سیستم‌هایی هستند که بدون نیاز به هیچ‌گونه منبع انرژی، ارتعاشات ناشی از زلزله و یا باد را مستهلک می‌کنند. میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD) و میراگر سیال تنظیم‌شونده (TLD) از جمله سیستم‌های کنترل غیرفعال می‌باشند که به منظور کاهش پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان‌ها در برابر زلزله و باد استفاده می‌شوند [۲]. فرضیه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای اولین بار در سال ۱۹۰۹ توسط فرامبرای کاهش حرکات سالن کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۳]. در همین راستا، این مفهوم مورد توجه ویژه‌ی محققان بسیاری قرار گرفت و آن‌ها این سیستم را جهت کنترل ارتعاشات، تحت بارهای متعددی مورد بررسی قرار دادند [۴]. اولین نظریه درباره‌ی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده در سال ۱۹۲۸ توسط ارموندرویدو دن هارتگراکه گردید؛ این تئوری اولیه برای یک سیستم یک درجه آزادی نامیرا، تحت اثر بارهای هارمونیک مطرح گردید [۵]. در سال ۲۰۰۴ وونگ و چی، میراگر جرمی را به عنوان یک سیستم اتلاف انرژی زلزله در سازه‌ها مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که این میراگر در کاهش پاسخ انرژی سازه‌هایی با دوره تناوب متوسط تا زیاد بسیار مؤثرتر از سازه‌هایی با دوره تناوب کوتاه می‌باشد. همچنین نتیجه گرفتند که میراگر جرمی در کاهش حداکثر انرژی جنبشی و انرژی کرنشی بسیار مؤثر است [۶]. زهرایی و قنادی اصل با تحقیقاتی که بر روی میراگر جرمی نصب شده بر روی ساختمان‌های میان‌مرتبه انجام دادند، نشان دادند که مشخصات زلزله تأثیر بسزایی بر راندمان آن‌ها دارد [۷]. تا سال ۲۰۱۰ سختی و میرایی میراگر، دو پارامتر اصلی و مهم در اغلب معیارهای طراحی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده بود و جرم میراگر در این معیارها، یک مقدار از پیش تعیین شده‌ای داشت. اما در همین سال، مارانو و همکارانش روش طراحی کامل تری را پیشنهاد دادند که در آن، جرم سیستم نیز به عنوان یکی از پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده است [۸].

اما اصول کلی عملکرد میراگرهای سیال تنظیم‌شونده همانند میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده است و این میراگر توسط حرکات لمبری مایع درون مخازن، انرژی ارتعاشی وارده به سازه را مستهلک می‌کند. مشخصات میراگر سیال به گونه‌ای تنظیم و انتخاب می‌شود که فرکانس تلاطم مایع درون میراگر با فرکانس ارتعاش سازه هماهنگ شود. از سیستم میراگر سیال تنظیم‌شونده برای اولین بار در اوایل قرن بیستم برای کنترل ارتعاشات ناشی از امواج دریا در کشتی‌های اقیانوس‌پیما استفاده شد و در نیمه‌ی دوم قرن بیستم برای کنترل نوسانات و جنبش‌های آزاد با دوره تناوب بالا در ماهواره‌ها به کار رفت. با توجه به اینکه میراگر سیال تنظیم‌شونده به گونه‌ای طراحی می‌شود که فرکانس اصلی آن با فرکانس ارتعاشات سازه برابر باشد و تحریک آن در واقع همان تغییر مکان‌های سازه است، در مخازن با عمق زیاد، قسمت پایین آب نوسان نمی‌کند و تحرک نمی‌پذیرد. اما در مخازن کم عمق به دلیل اینکه تقریباً تمامی جرم مایع در نوسانات شرکت می‌کند، میرایی و استهلاک انرژی بیشتر است؛ به همین دلیل با اینکه پدیده شکست امواج در مخازن با عمق زیاد در تحریک‌های شدیدتری اتفاق می‌افتد، برای دستیابی به استهلاک بیشتر، از مخازن کم عمق به عنوان میراگر سیال تنظیم‌شونده استفاده می‌شود [۹]. بنابراین مهم‌ترین مسئله در خلال تحریکات دینامیکی شدید، نحوه‌ی مدل کردن امواج غیرخطی آب در مخزن است. در سال ۱۹۹۲ فوجینو و همکارانش مدل غیرخطی دو بعدی را برای حرکت مایع با عمق کم در مخازن چهار ضلعی بسط دادند. نتایج بارگذاری هارمونیک سازه‌ی دارای میراگر سیال سازگاری خوبی با این مدل دو خطی نشان داد [۱۰]. بانرجی و همکارانش در سال ۲۰۰۰ از طریق مطالعات عددی نشان دادند که اگر پارامترهای طراحی یک میراگر سیال به درستی انتخاب شود این سیستم می‌تواند در کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها بسیار مؤثر باشد. مدل عددی میراگر استفاده شده در این مطالعه مدل تئوری آب کم عمق سان و همکارانش بود [۱۱]. در گذشته اغلب مطالعات آزمایشگاهی، در خصوص میراگرهای سیال تنظیم‌شونده تحت حرکات پایه با دامنه کوچک بودند [۹] و [۱۲]. اما در سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ لی و همکارانش به منظور کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند، تحقیقاتی در خصوص میراگرهای مایع چندگانه انجام دادند. در مدلسازی آن‌ها فشار دینامیکی مایع درون مخزن در حال نوسان با استفاده از روش حجم سیال و پاسخ سازه براساس حل معادلات حالت به دست می‌آید. مدل عددی و همچنین آزمایشگاهی آن‌ها کاهش پاسخ به میزان ۴۰ درصد تغییر مکان سازه را نشان داد [۱۳]. بانرجی در سال ۲۰۰۴ با انجام یک سری آزمایشات بر روی یک سازه یک درجه آزادی مجهز به میراگر سیال نشان داد که این میراگر در کنترل پاسخ سازه تحت حرکات زمین‌لرزه با باند پهن مؤثر است. همچنین در این آزمایش‌ها نشان داده شد که نسبت عمق و جرم، پارامترهای بسیار مؤثر در میراگر سیال است [۱۴].

در اغلب تحقیقات گذشته از سیستم‌های کنترلی TMD و TLD به طور مجزا بر روی سازه‌های مختلف استفاده شده و تنها به بررسی اثر هر کدام از این سیستم‌ها تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک یا دور پرداخته شده است و تاکنون تحقیقی در خصوص مقایسه اثر این دو میراگر بر روی یک سازه با مشخصات ثابت انجام نشده است، همچنین در این تحقیق اثر نوع بارگذاری زلزله (حوزه نزدیک و دور) و تغییر محتوای فرکانسی نیروی زلزله و همچنین اثر متفاوت برای جرم میراگرها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- طراحی بهینه میراگرها

هدف اصلی در طراحی میراگرهای جرمی و سیال تنظیم‌شونده تعیین پارامترهای متناسب با سازه برای جرم، میرایی و سختی این میراگرها می‌باشد. عملکرد این میراگرها علاوه بر پارامترهای آن‌ها به نوع بارگذاری وارده نیز بستگی دارد. در نتیجه بایستی با توجه به اهداف مورد انتظار، مقادیر متناسب و بهینه برای این پارامترها تعیین گردد. روش‌ها و روابط متفاوتی برای طراحی بهینه‌ی این میراگرها در سازه‌های با رفتار خطی ارائه شده است، که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات دن هارتوگ، تسای و لین، ویلاورد، سان و فوجینو اشاره کرد. در این تحقیق جهت محاسبه پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی از روش صادق و همکارانش و برای محاسبه پارامترهای میراگر سیال از روش ناوو و همکارانش استفاده شده است.

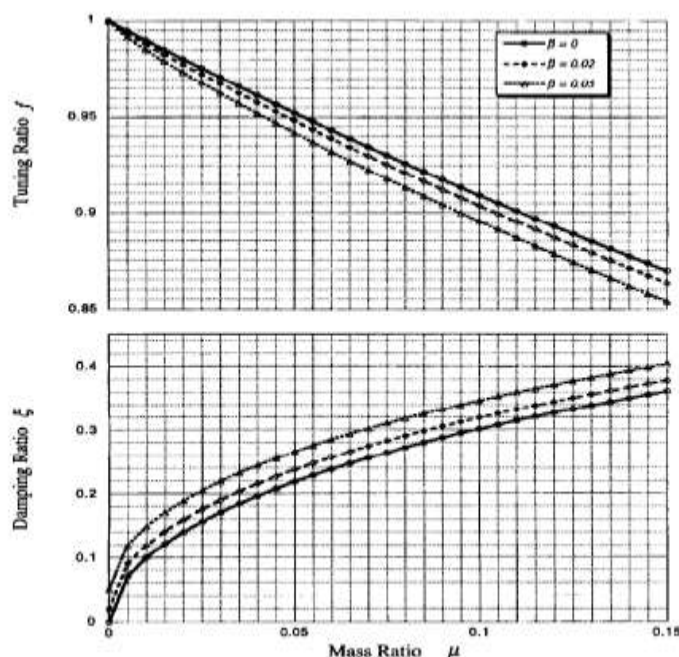
۲-۱- روابط میراگر جرمی تنظیم‌شونده

در سال ۱۹۹۷، صادق و همکارانش با اصلاح روش پیشنهادی ویلاورد، روابطی را برای پارامترهای بهینه TMD تحت تحریک زلزله پیشنهاد کردند. بررسی روش ویلاورد نشان داد که در نسبت‌های جرمی بیش از ۰/۰۵ نسبت میرایی دو مود اول سازه و میراگر جرمی یکسان نمی‌شود، لذا مقادیر بهینه نسبت فرکانسی و میرایی میراگر را به گونه‌ای به دست آوردند که اختلاف بین میرایی دو مود اولیه سازه و میراگر به حداقل برسد [۱۵]. آن‌ها نسبت‌های بهینه را برای سیستم‌های با میرایی ۰/۰۲ و ۰/۰۵ و نسبت‌های جرمی میراگر ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ به دست آوردند و سپس روابط زیر را برای سیستم یک درجه آزادی پیشنهاد کردند:

$$f = \frac{1}{1+\mu} \left[1 - \beta \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right] \quad (1)$$

$$\xi = \frac{\beta}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (2)$$

در روابط فوق، f نسبت فرکانسی، ξ نسبت میرایی میراگر، β میرایی سازه و μ نسبت جرم میراگر می‌باشد. خطای روابط فوق به ترتیب ۰/۲ و ۰/۴ درصد می‌باشد. نمودار مربوط به روابط (۱) و (۲) در شکل ۱ آورده شده است. با توجه به شکل‌های زیر مشاهده می‌شود که هر چه میرایی سازه بیشتر می‌شود، نسبت فرکانسی نیز با واحد فاصله بیشتری می‌گیرد و همچنین نسبت میرایی بهینه میراگر افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص می‌شود که با افزایش نسبت جرمی میراگر فاصله نسبت فرکانسی از واحد افزایش می‌یابد و نسبت میرایی بهینه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱: پارامترهای بهینه پیشنهادی صادق و همکاران برای میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی و میرایی متفاوت [۱۵].

صادق و همکارانش جهت بررسی میزان مؤثر بودن روش پیشنهادیشان، سی سازه یک درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی و بدون آن را با زمان تناوب‌های بین ۰/۱ تا ۳ ثانیه را با نسبت‌های میرایی دو و پنج درصد تحت پنجاه و دو رکورد زلزله بررسی کردند و به نتایج زیر دست یافتند:

- سازه مجهز به میراگر جرمی می‌تواند پاسخ تغییرمکان و شتاب سازه را کاهش دهد، این کاهش در میراگری با نسبت میرایی دو درصد چشمگیر است.
 - افزایش نسبت جرمی پاسخ سازه را کاهش می‌دهد.
 - میراگر جرمی برای سازه‌های با نسبت میرایی کم، اثر بیشتری دارد.
 - هنگامی که میرایی میراگر کم باشد، حرکت آن نسبت به سازه زیاد است و این مسئله در طراحی‌ها باید مدنظر قرار گیرد.
- صادق و همکارانش همچنین روابطی برای پارامترهای بهینه میراگر در سازه‌های چند درجه آزادی ارائه کردند، به این ترتیب که برای این سازه‌ها نسبت جرمی (رابطه (۳)) به صورت نسبت جرم میراگر به جرم اصلی در نظر گرفته می‌شود.

$$\mu = \frac{M}{\phi_1^T [M] \phi_1} \quad (3)$$

که در آن، $[M]$ ماتریس جرم و ϕ_1 شکل‌های مودی اصلی هستند.

بررسی‌های عددی انجام شده بر روی سازه سه طبقه با نسبت میرایی صفر، سازه شش طبقه با نسبت میرایی پنج درصد و سازه ده طبقه با نسبت میرایی دو درصد نشان داد که نسبت فرکانسی بهینه برای یک سازه چند درجه آزادی با نسبت جرمی μ ، برابر با نسبت فرکانسی بهینه یک سازه یک درجه آزادی با نسبت جرمی $\mu \phi$ (دامنه‌ی شکل مود ارتعاشی سازه در محل نصب میراگر) می‌باشد.

$$f = \frac{1}{1+\mu\phi} \left[1 - \beta \sqrt{\frac{\mu\phi}{1+\mu\phi}} \right] \quad (4)$$

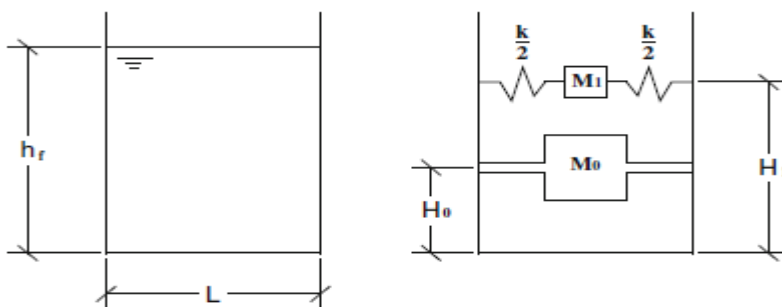
و نسبت بهینه میرایی سیستم چند درجه آزادی برابر با نسبت میرایی سیستم یک درجه آزادی ضربدر ϕ می‌باشد. یعنی:

$$\xi = \varphi \left[\frac{\beta}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right] \quad (5)$$

در این روابط، نسبت فرکانسی میراگر جرمی؛ ξ نسبت میرایی میراگر، β نسبت میرایی سازه؛ μ نسبت جرم میراگر به جرم سازه و φ دامنه‌ی مود اول ارتعاش با توجه به ضریب مشارکت مودال در محل نصب میراگر است.

۲-۲- روابط میراگر سیال تنظیم‌شونده

برای شبیه‌سازی کردن TLDها روش‌های مختلفی ارائه شده است که از جمله آن می‌توان به روش جرم توده‌ای و تئوری موج خطی اشاره کرد. روش جرم توده‌ای که در این مقاله نیز از آن استفاده شده است، در سال ۱۹۶۳ توسط هوسنر پیشنهاد شد. در این روش، جداره میراگر سیال تنظیم‌شونده، صلب فرض شده است. فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده توسط لزجت سیال داخل تانک به علت بارگذاری دینامیکی به صورت جداگانه به صورت فشار آنی و فشار لزجی لحاظ شده است. فشار آنی متناسب با شتاب تانک اما در جهت مثبت است. فشار لزجی به ارتفاع موج و فرکانس لزجی سیال بستگی دارد. بنابراین، هر دوی فشارهای هیدرولیکی می‌توانند توسط دو جرم معادل پیوسته به تانک شبیه‌سازی شوند. شکل ۲، یک بیان شماتیکی از مدل جرم توده‌ای را نشان می‌دهد، که M_0 جرم صلب متصل شده به تانک در ارتفاع H_0 و M_1 جرم آنی (ضربه‌ای) متصل شده با فنرهای با سختی $k/2$ در ارتفاع H_1 است.



شکل ۲: مدل جرم توده‌ای برای یک TLD مستطیلی [۱۶].

در سال ۱۹۷۱ نیومارک و روسن بلوس و همچنین در سال ۲۰۰۷ جین و همکارانش برای تانک‌های مستطیلی، روابطی تخمینی برای این پارامترها ارائه کردند [۱۶]:

$$M_0 = \frac{\tanh(1.7 * (\frac{L}{2}) / h_f)}{1.7 * (\frac{L}{2}) / h_f} m_f \quad (6)$$

$$M_1 = \frac{0.83 * \tanh(1.6 * h_f / (\frac{L}{2}))}{1.6 * h_f / (\frac{L}{2})} m_f \quad (7)$$

$$H_0 = 0.38 * h_f * \left[1 + \alpha \left(\frac{m_f}{M_0} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

$$H_1 = h_f * \left[1 - 0.33 * \frac{m_f}{M_1} * \left(\frac{L/2}{H_f} \right)^2 + 0.63 * \beta * \frac{(\frac{L}{2})}{h_f} * \sqrt{0.28 * \left(\frac{m_f * L/2}{M_1 * h_f} \right)^2} \right] \quad (9)$$

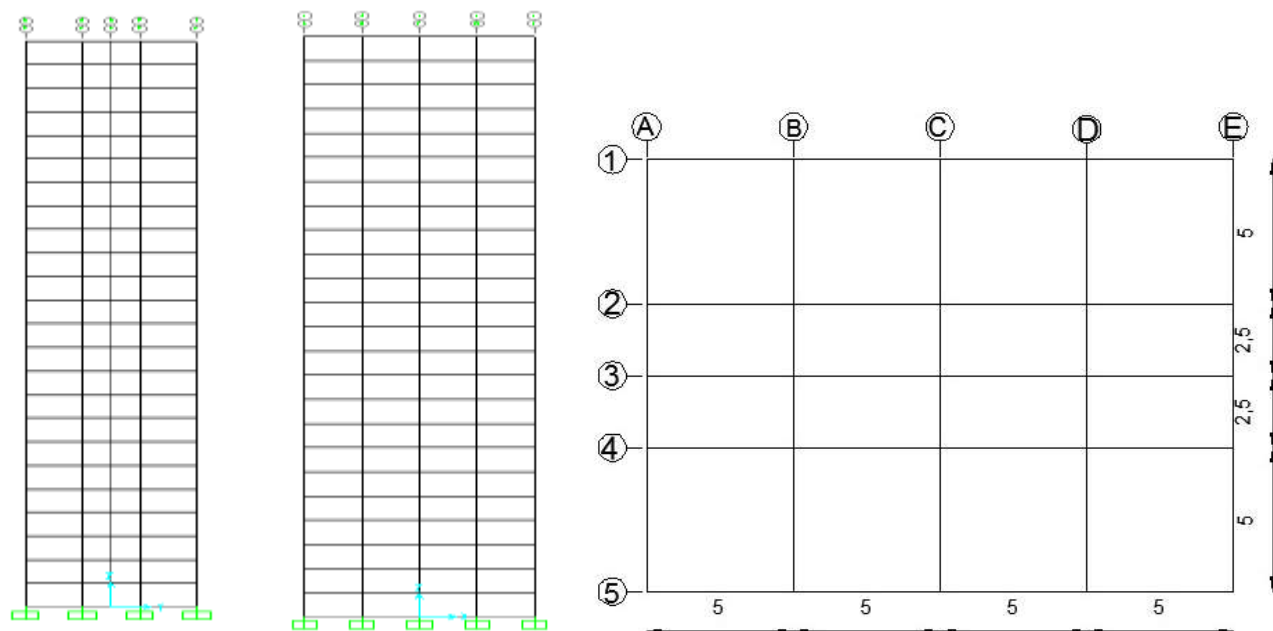
در این روابط، m_f جرم سیال داخل هر تانک، $\beta = 2$ و $\alpha = 1.33$ پارامترهای به علت لنگر هیدرودینامیکی روی پایه‌ی تانک، h_f ارتفاع سیال، b و L ابعاد تانک است.

۳- معرفی مدل سازه‌ای

مدل سازه‌ای در نظر گرفته شده در این مقاله، یک ساختمان فلزی بیست و چهار طبقه با کاربری مسکونی است، که در یک منطقه با خطر نسبی زلزله خیلی زیاد واقع است. ابعاد پلان ساختمان ۲۰ متر در ۱۵ متر و ارتفاع طبقات آن ۳/۳ متر در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌ای مقاوم در مقابل زلزله این ساختمان، قاب خمشی ویژه می‌باشد. شکل ۳، پلان و نماهای سازه در نظر گرفته شده را ارائه کرده است. جهت بارگذاری ثقلی سازه مذکور از آیین‌نامه بارگذاری ایران (مبحث ششم مقررات ملی ساختمان) استفاده شده است، که در آن بار مرده و زنده طبقات به ترتیب ۶۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. این مقادیر برای طبقه بام به ترتیب ۶۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشند. بارگذاری لرزه‌ای نیز مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران انجام شده است. برای طراحی سازه نیز آیین‌نامه AISC-2010 و نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. جدول ۱، مقاطع نهایی تیرها و ستون‌ها را ارائه نموده است.

جدول ۱: مشخصات سازه

شماره طبقات	مقاطع ستون‌ها	مقاطع تیرها
۱-۶	TUBO 440X440X40	IPE 600
۷-۱۲	TUBO 440X440X35	IPE 600
۱۳ و ۱۴	TUBO 440X440X35	IPE 550
۱۵-۱۸	TUBO 440X440X30	IPE 550
۱۹-۲۴	TUBO 440X440X25	IPE 500



شکل ۳: پلان و نماهای ساختمان ۲۴ طبقه.

براساس نتایج تحلیل مودال این ساختمان، زمان تناوب مود اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۲/۹۵، ۱/۰۳ و ۰/۵۸ ثانیه به دست آمده است. همچنین جرم کل سازه برابر با ۱۳۳۹/۳ تن می‌باشد.

۳- طراحی و مدلسازی میراگرها

۳-۱- میراگر جرمی تنظیم‌شونده

برای طراحی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده در مدل سازه‌ای فوق، یکی از اصلی‌ترین پارامترها، جرم میراگر می‌باشد. معمولاً جرم میراگر را به صورت درصدی از جرم کل سازه بیان می‌کنند:

$$m_d = \mu \times m_s \quad (10)$$

که در آن، μ نسبت جرمی و m_s نیز نشان‌دهنده جرم کل سازه می‌باشد.

از پارامترهای مؤثر دیگر جهت مدلسازی، سختی میراگر می‌باشد که رابطه زیر توسط زهرایی و قنادی اصل برای آن پیشنهاد شده است [۷]:

$$k_d = 4\pi^2 \mu f^2 \frac{m_s}{T_s^2} \quad (11)$$

که در آن، T_s زمان تناوب اصلی سازه و f نسبت فرکانسی TMD می‌باشد.

آخرین پارامتر تأثیرگذار بر رفتار این نوع از میراگرها ضریب میرایی است. رابطه زیر توسط زهرایی و قنادی اصل برای ضریب میرایی پیشنهاد شده است [۷]:

$$c_d = 4\pi \mu f \xi \frac{m_s}{T_s} \quad (12)$$

که در آن، ξ نسبت میرایی TMD نامیده می‌شود.

در این مقاله، پنج نسبت جرمی (یک، سه، پنج، هفت و نه درصد) برای میراگر جرمی تنظیم‌شونده استفاده شده و با قرارگیری میراگرها بر روی طبقه آخر، پنج مدل سازه‌ای ساختمان بیست چهار طبقه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده تحلیل می‌گردد. مشخصات میراگرهای جرمی برای نسبت‌های جرمی مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده

c_d (kg/s)	k_d (kg/s ²)	μ	موقعیت قرارگیری میراگر
۷۲۷۲/۷۶	۵۹۱۴۲/۹	۰/۰۱	طبقه بیست و چهارم
۳۳۰۱۱/۳۶	۱۶۹۸۷۵/۳۵	۰/۰۳	
۶۶۵۷۱/۶	۲۷۱۶۶۱/۷۹	۰/۰۵	
۱۰۵۰۵۹/۱۵	۳۶۵۴۱۱/۳۱	۰/۰۷	
۱۴۶۹۶۸/۰۲	۴۵۱۸۶۷/۹۴	۰/۰۹	

۳-۲- میراگر سیال تنظیم‌شونده

یکی از پارامترهای بسیار مؤثر در عملکرد میراگرهای سیال تنظیم‌شونده، فرکانس لزجی سیال است که می‌توان آن را از رابطه زیر به دست آورد [۱۶]:

$$f_f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{\pi L} \tanh\left(\frac{\pi h_f}{L}\right)} \quad (13)$$

در این مقاله، فرکانس لزجی سیال با فرکانس طبیعی اولیه ساختمان برابر در نظر گرفته می‌شود. فرکانس طبیعی اولیه ساختمان مورد مطالعه برابر ۰/۳۳۸ هرتز (۲/۹۵ ثانیه) می‌باشد. میرایی سطح موج در یک تانک مستطیلی (ζ_f) دومین پارامتر مؤثر بر پاسخ سیستم سازه-میراگر سیال تنظیم‌شونده است که می‌توان آن را از طریق رابطه ارائه شده توسط سان محاسبه نمود [۱۶]:

$$\zeta_f = \sqrt{\frac{v_f \omega_f}{2}} \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h_f}{b} \right) + S \right] \cdot \frac{L}{h_f \sqrt{g \cdot h_f}} \quad (14)$$

که در آن، v_f لزجت سینماتیکی سیال و S ضریب ناخالصی سطح است که این ضریب عددی مابین صفر و ۲ می‌باشد.

بنابراین ضریب میرایی و سختی معادل هر میراگر سیال تنظیم‌شونده را می‌توان از روابط زیر به دست آورد [۱۶]:

$$C = 2m_f \omega_f \zeta_f \quad (15)$$

$$k = \frac{3 \cdot g \cdot M_1^2 h_f}{m_f L^2} \quad (16)$$

تعداد تانک‌های مورد نیاز (N) نیز طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$N = \frac{\mu \cdot m_s}{m_f} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، m_s جرم کل سازه در مود ارتعاش و m_f جرم مایع داخل هر تانک می‌باشد که m_f به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$m_f = \rho \cdot h_f \cdot b \cdot L \quad (18)$$

که در آن، ρ چگالی آب (۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مربع)، h_f عمق سیال، b و L عرض و طول تانک می‌باشد.

مشخصات میراگرهای سیال تنظیم‌شونده و تعداد تانک‌های مورد نیاز برای پنج درصد جرمی مختلف (یک، سه، پنج، هفت و نه درصد) برای ساختمان بیست و چهار طبقه این تحقیق در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات TLDها برای ساختمان مورد مطالعه

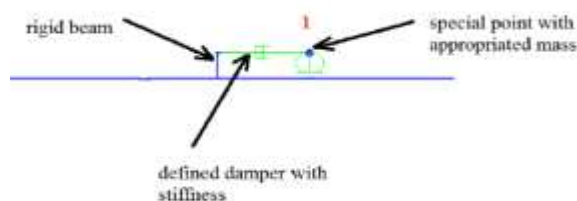
ساختمان	m_f (kg)	ζ_f	M_0 (kg)	M_1 (kg)	k (kg/s ²)	C (kg/s)
۲۴ طبقه	۱۳۵۰	۰/۰۰۹۴۷	۲۳۳/۸۴	۱۰۴۱/۷	۱۱۸۲/۸	۵۴/۲۵

جدول ۴: تعداد تانک‌های تخمین زده شده برای نسبت‌های جرمی مختلف

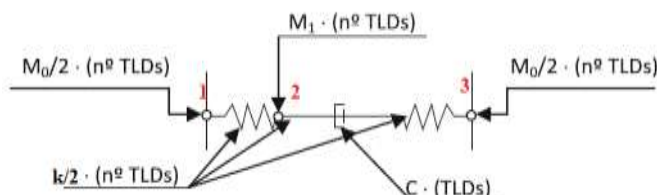
ساختمان ۲۴ طبقه	μ (%)	۱	۳	۵	۷	۹
	N	۱۰	۳۰	۵۰	۷۰	۹۰

۳-۳- نحوه‌ی مدل‌سازی میراگرها

در این مقاله از نرم افزار SAP2000 برای مدل‌سازی میراگرها استفاده شده است. در شکل ۴ نحوه مدل‌سازی میراگر جرمی و در شکل ۵ نحوه مدل‌سازی میراگر سیال با استفاده از المان link نشان داده شده است. جرم میراگر جرمی تنظیم‌شونده به صورت جرم متمرکز در گره ۱ به مدل اختصاص داده شده است و در میراگر سیال تنظیم‌شونده جرم استاتیکی در گره‌های ۱ و ۳ و جرم دینامیکی در گره ۲ به مدل اختصاص داده شده است.



شکل ۴: جزئیات مدلسازی میراگر جرمی تنظیم شونده



شکل ۵: جزئیات مدلسازی میراگر سیال تنظیم شونده.

۴- انتخاب رکوردهای زلزله

در این مقاله، برای بررسی پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان کنترل نشده و کنترل شده توسط میراگرهای TMD و TLD از تحلیل تاریخیچه زمانی خطی استفاده شده است. در این تحلیل با اثر دادن شتاب زمین، به صورت تابعی از زمان، در تراز پایه ساختمان و به کارگیری معادلات متعارف دینامیکی پاسخ‌های سازه‌ها به دست می‌آید. اساس تحلیل تاریخیچه زمانی استوار بر اعمال رکورد حرکت زمین بر سازه است. بنابراین انتخاب و مقیاس نمودن رکورد زلزله یکی از مهم‌ترین مسائل در این نوع تحلیل‌ها است. شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به فاصله‌ای که از گسل دارند به دو دسته نزدیک به گسل و دور از گسل تقسیم می‌شوند. چنانچه شتاب‌نگاشت توسط ایستگاهی ثبت شود که فاصله آن ایستگاه از مرکز گسل کمتر از ۲۰ کیلومتر باشد به آن شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل و اگر فاصله ایستگاه از مرکز گسل بیشتر از ۲۰ کیلومتر باشد به آن شتاب‌نگاشت دور از گسل می‌گویند. فاصله از گسل موضوع بسیار مهمی در انتخاب شتاب‌نگاشت می‌باشد چون می‌تواند پاسخ‌های بسیار متفاوتی بر روی سازه داشته باشد [۱۷].

رکوردهای ثبت شده از زمین‌لرزه‌های اخیر نشان می‌دهد که زلزله‌های حوزه نزدیک دارای ویژگی‌های متفاوتی نسبت به زلزله‌های حوزه دور می‌باشند. در مجموع بیشتر این ویژگی‌ها، در اثر پدیده مهم جهت‌پذیری پیشرونده در زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد. نگاشت‌های حاصل از حوزه نزدیک، دارای یک پالس شدید و غالب سرعت در فرکانس‌های کوچک هستند و این درحالی است که چنین ویژگی در رکوردهای حوزه دور دیده نمی‌شود [۱۸]. در این تحقیق از هر دو نوع شتاب‌نگاشت زلزله برای ارزیابی مدل‌های توصیف شده در بخش ۳ استفاده شده است. بدین منظور از چهارده شتاب‌نگاشت مطابق جدول ۵ استفاده شده است. لازم به ذکر است که تمامی این شتاب‌نگاشت‌ها مطابق با آیین‌نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) مقیاس گردیده‌اند.

۵- ارزیابی نتایج تحلیل دینامیکی

از آنجایی که بیشینه‌ی مطلق پاسخ سازه تنها در یک لحظه اتفاق می‌افتد، جهت ارزیابی مقایسه پاسخ‌ها، علاوه بر بیشینه‌ی مطلق پاسخ‌ها از روش جذر میانگین مربعات (RMS) پاسخ سازه در طول مدت تحلیل نیز استفاده می‌گردد که معادله آن طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۲۰]:

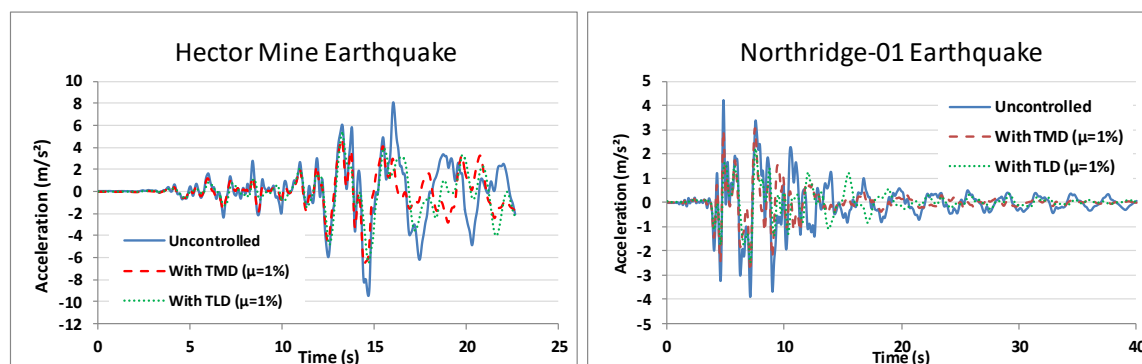
$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2}{n}} \quad (19)$$

در این رابطه، y_i نشان دهنده‌ی پاسخ سازه در زمان t_i و n بیانگر تعداد گام‌های زمانی است که پاسخ سازه در آن محدوده سنجیده می‌شود.

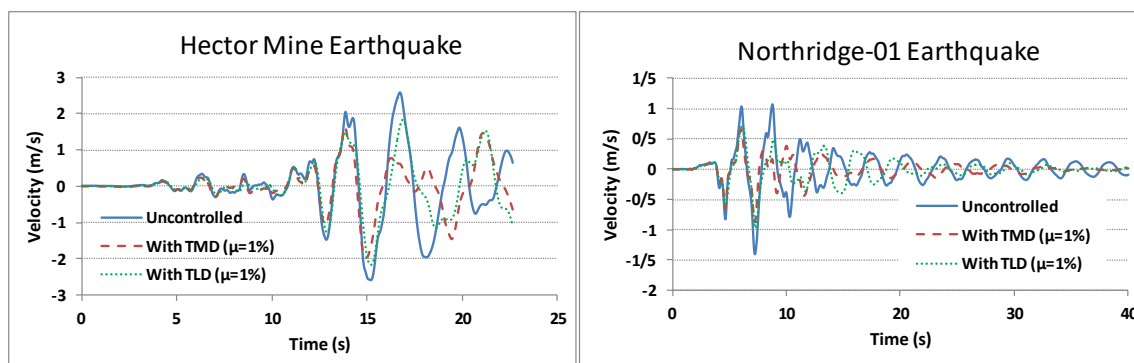
جدول ۵: مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها [۱۹]

فاصله از گسل (کیلومتر)	بزرگا (ریشتر)	سال وقوع	ایستگاه	نام شتاب‌نگاشت	نوع شتاب‌نگاشت
۲۸/۷	۶/۹	۱۹۹۵	Nishi-Akashi	Kobe, Japan	حوزه دور
۳۵/۸	۶/۵	۱۹۸۷	EL Centro Imp.Co.	Superstition Hills	
۲۶/۵	۷/۱	۱۹۹۹	Hector	Hector Mine	
۳۹/۵	۶/۶	۱۹۷۱	LA - Hollywood Stor	San Fernando	
۲۰/۲	۶/۵	۱۹۷۶	Tolmezzo	Friuli, Italy	
۴۰/۴	۷/۴	۱۹۹۰	Abbar	Manjil, Iran	
۲۳/۶	۷/۳	۱۹۹۲	Yermo Fire Station	Landers	حوزه نزدیک
۱۷/۲	۶/۹	۱۹۸۹	Saratoga-Aloha	Loma Prieta	
۴/۵	۷	۱۹۹۲	Petrolia	Cape Mendocino	
۱۶/۸	۶/۷	۱۹۹۴	Sylmar-Olive View	Northridge-01	
۵/۳	۷/۵	۱۹۹۹	Izmit	Kocaeli, Turkey	
۱۲/۸	۶/۸	۱۹۷۶	Karakyr	Gazli, USSR	
۸/۹	۷/۶	۱۹۹۹	TCU084	Chi-Chi, Taiwan	
۶/۵	۶/۸	۱۹۸۵	Site2	Nahanni, Canada	

به منظور مقایسه عملکرد میراگرهای جرمی و سیال تنظیم‌شونده، از نتایج پاسخ‌های شتاب، سرعت، تغییرمکان و برش پایه مدل سازه‌ای استفاده می‌گردد. شکل‌های ۶ و ۷، نمودار تاریخچه زمانی شتاب و سرعت ساختمان بیست و چهارطبقه را تحت زلزله حوزه دور Hector Mine و زلزله حوزه نزدیک Northridge-01 در حالت کنترل نشده و حالت کنترل شده برای میراگرهای جرمی و سیال تنظیم‌شونده با نسبت جرمی یک درصد ارائه نموده است.



شکل ۶: نمودار تاریخچه زمانی شتاب طبقه ۲۴م در حالت کنترل نشده و کنترل شده با TMD و TLD تحت زلزله Northridge-01 و Hector Mine.

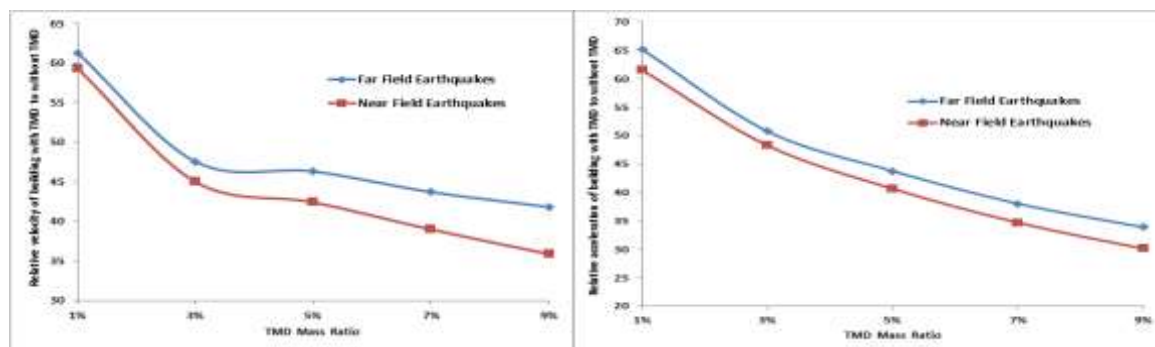


شکل ۷: نمودار تاریخچه زمانی سرعت طبقه ۲۴ام در حالت کنترل نشده و کنترل شده با TMD و TLD تحت زلزله Hector Mine و Northridge-01.

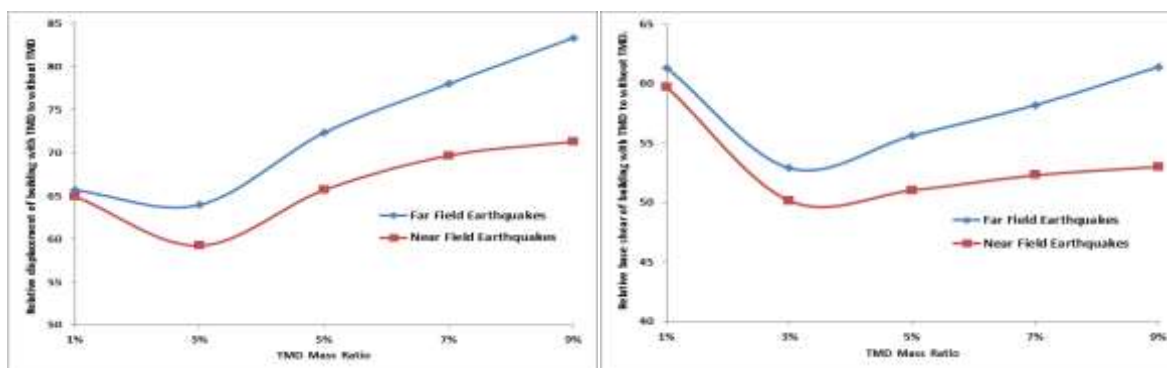
با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که عملکرد هر دو میراگر جرمی و سیال تنظیم‌شونده در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان بیست و چهار طبقه مناسب و قابل توجه است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که میراگر جرمی تا حدودی عملکرد بهتری نسبت به میراگر سیال دارد. جهت ارزیابی میزان تأثیر میراگر جرمی و سیال تنظیم‌شونده تحت این زلزله‌ها، نسبت RMS پاسخ سازه با میراگر به RMS پاسخ سازه بدون میراگر در سازه ۲۴ طبقه محاسبه شده است. تابع Ψ برای بیان نسبت RMS پاسخ سازه دارای TMD یا TLD به RMS پاسخ سازه بدون TMD یا TLD مورد استفاده قرار می‌گیرد که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$(X) = \frac{X_{with\ TMD,TLD}}{X_{without\ TMD,TLD}} \times 100\Psi \quad (20)$$

در شکل‌های ۸ و ۹، نسبت پاسخ‌های ساختمان ۲۴ طبقه در حالت کنترل شده با TMD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در درصد جرم‌های مختلف نشان داده شده است.



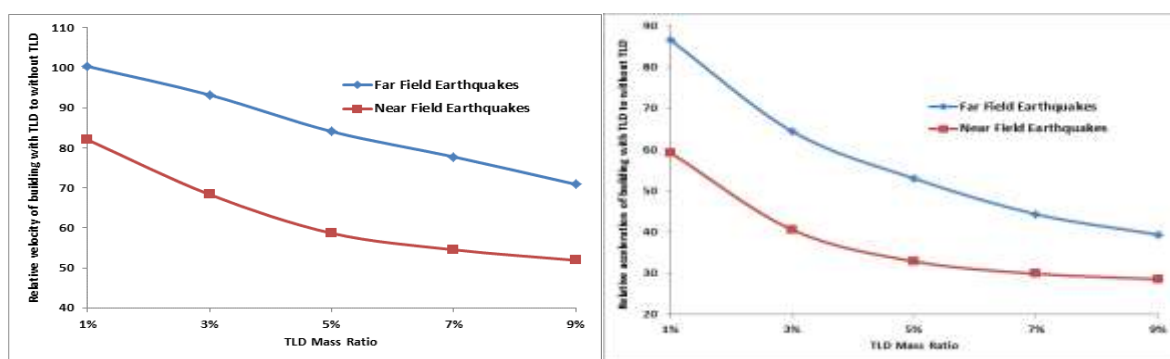
شکل ۸: نسبت سرعت (سمت راست) و شتاب (سمت چپ) در حالت کنترل شده با TMD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک.



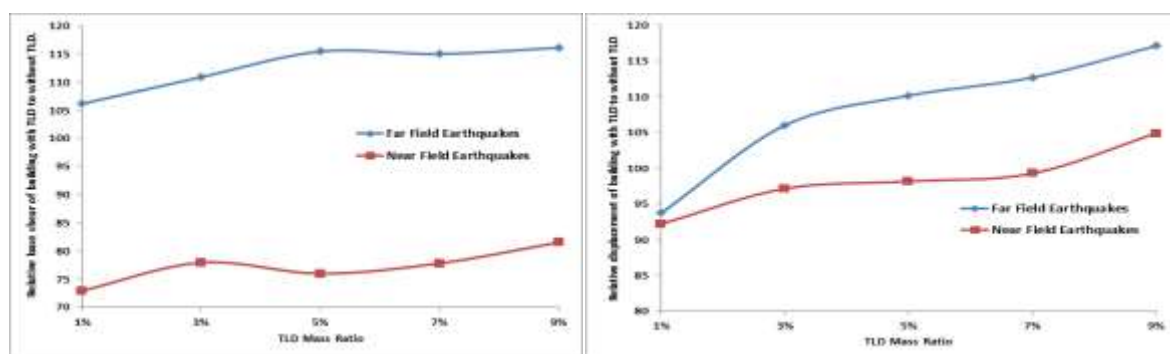
شکل ۹: نسبت تغییر مکان (سمت راست) و برش پایه (سمت چپ) در حالت کنترل شده با TMD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک.

با توجه به شکل ۸ ملاحظه می‌شود که بیشترین کاهش پاسخ شتاب تحت زلزله حوزه دور و نزدیک در نسبت جرمی نه درصد و به ترتیب به میزان ۶۶،۱۴ و ۶۹،۹۱ درصد می‌باشد. همچنین بیشترین کاهش پاسخ سرعت نیز در زلزله حوزه دور و نزدیک در نسبت جرمی نه درصد و به ترتیب به میزان ۵۸،۱۹ و ۶۴،۱۴ درصد می‌باشد. با توجه به شکل ۹ ملاحظه می‌شود که بیشترین کاهش پاسخ تغییرمکان نیز تحت زلزله حوزه دور و نزدیک در نسبت جرمی سه درصد و به ترتیب به میزان ۳۶،۰۹ و ۴۰،۸۱ درصد حاصل شده است. این مقادیر برای پاسخ برش پایه در زلزله حوزه دور و نزدیک به ترتیب ۴۷،۱۳ و ۴۹،۸۷ درصد است. بنابراین به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که میراگر جرمی در زلزله حوزه نزدیک تا حدودی عملکرد بهتری نسبت به زلزله حوزه دور دارد.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نسبت پاسخ‌های ساختمان ۲۴ طبقه در حالت کنترل شده با TLD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در درصد جرم‌های مختلف نشان داده شده است.



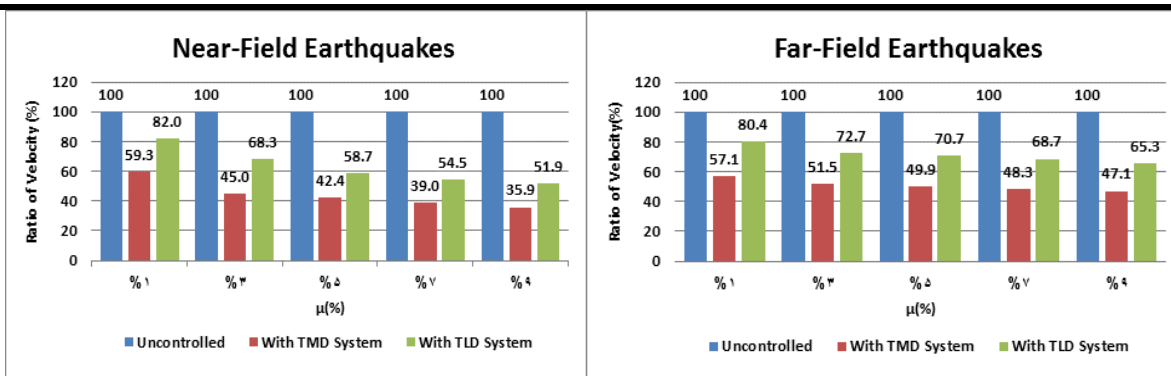
شکل ۱۰: نسبت سرعت (سمت راست) و شتاب (سمت چپ) در حالت کنترل شده با TLD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک.



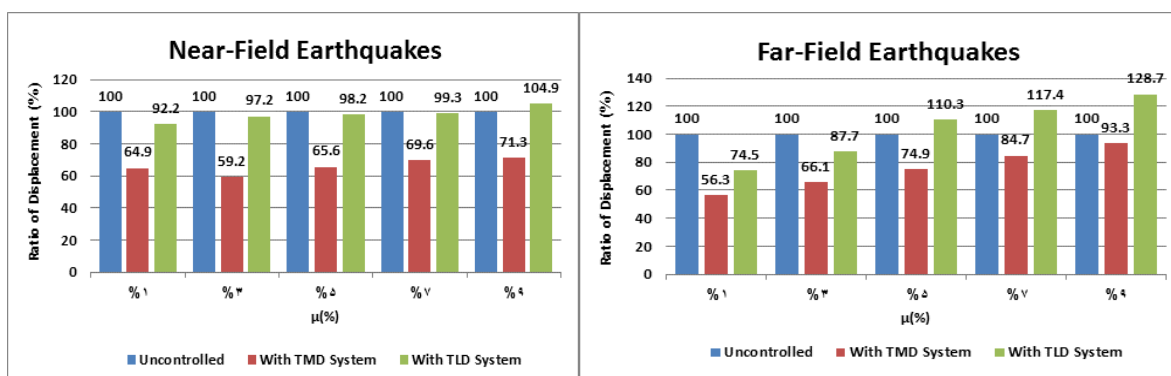
شکل ۱۱: نسبت تغییرمکان (سمت راست) و برش پایه (سمت چپ) در حالت کنترل شده با TLD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک.

با توجه به شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که بیشترین کاهش پاسخ شتاب تحت زلزله حوزه دور و نزدیک در نسبت جرمی نه درصد و به ترتیب به میزان ۶۰،۷ و ۷۱،۵۱ درصد می‌باشد. این نسبت برای کاهش پاسخ سرعت تحت زلزله حوزه دور و نزدیک در نسبت جرمی نه درصد و به ترتیب به میزان ۲۹،۱۱ و ۴۸،۱۱ درصد حاصل شده است. با توجه به شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که بیشترین کاهش پاسخ تغییرمکان تحت زلزله حوزه دور و نزدیک در نسبت جرمی یک درصد و به ترتیب به میزان ۶،۲۶ و ۷،۷۸ درصد می‌باشد. این میزان برای پاسخ برش پایه تحت زلزله حوزه دور و نزدیک نیز در نسبت جرمی یک درصد و به ترتیب به میزان ۶،۱۴ و ۲۷،۰۸ درصد حاصل شده است. همانند نتیجه‌ای که برای میراگر جرمی حاصل شد می‌توان گفت که میراگر سیال نیز در زلزله‌های حوزه نزدیک عملکرد بهتری نسبت به زلزله حوزه دور داشته است.

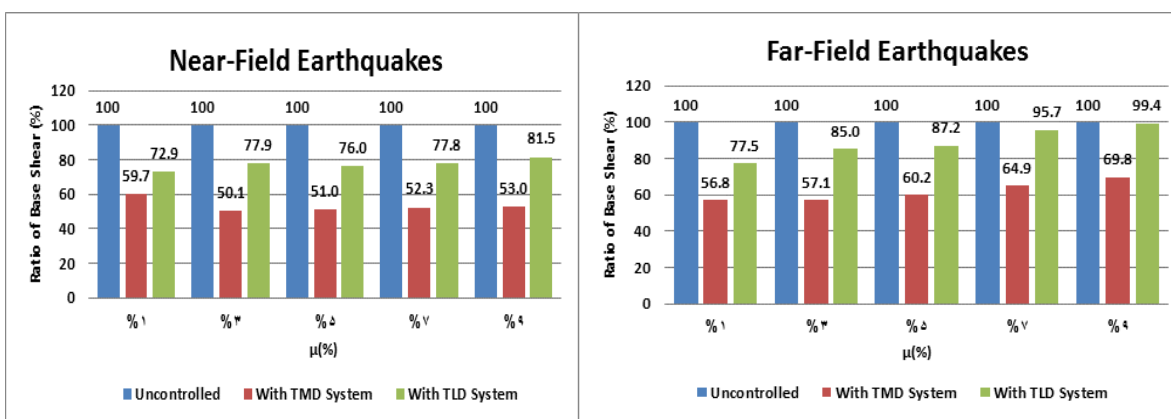
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ میزان کاهش پاسخ سرعت، تغییرمکان و برش پایه سازه ۲۴ طبقه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در حالت کنترل شده با سیستم‌های TMD و TLD به ازای نسبت‌های جرمی مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نسبت سرعت طبقه ۲۴م در حالت کنترل شده با TMD و TLD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به ازای نسبت‌های جرمی مختلف.



شکل ۱۳: نسبت تغییر مکان طبقه ۲۴م در حالت کنترل شده با TMD و TLD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به ازای نسبت‌های جرمی مختلف.



شکل ۱۴: نسبت برش پایه سازه ۲۴ طبقه در حالت کنترل شده با TMD و TLD به حالت کنترل نشده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به ازای نسبت‌های جرمی مختلف.

از شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ملاحظه می‌شود که کاهش پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان مورد مطالعه در حالت کنترل شده با سیستم TMD بیشتر از حالت کنترل شده با سیستم TLD است. همچنین ساختمان ۲۴ طبقه تحت زلزله حوزه نزدیک در حالت کنترل شده با هر کدام از سیستم‌های TMD یا TLD عملکرد بهتری دارند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، به مقایسه‌ی رفتار یک ساختمان ۲۴ طبقه دارای میراگر جرمی تنظیم‌شونده و میراگر سیال تنظیم‌شونده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک پرداخته شد. همچنین مقادیر شتاب، سرعت، تغییرمکان و برش پایه این سازه تحت این زلزله‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- با مقایسه رفتار ساختمان ۲۴ طبقه دارای میراگر جرمی تنظیم‌شونده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک مشاهده شد که استفاده از میراگرهای جرمی و سیال تنظیم‌شونده، پاسخ‌های سازه‌ای را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند که این کاهش تحت زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از زلزله‌های حوزه دور است.
- نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که میراگرهای جرمی و سیال تنظیم‌شونده به یک میزان، پاسخ‌ها (شتاب، سرعت، تغییرمکان و برش پایه) را کاهش نمی‌دهند و در هر یک از آن‌ها درصدهای کاهش متفاوت است به طوری که میزان کاهش پاسخ‌ها توسط میراگر جرمی بیشتر از میراگر سیال است.
- بررسی نسبت‌های جرمی مختلف برای هر دو میراگر در نظر گرفته شده نشان می‌دهد که پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان مورد مطالعه در یک درصد جرمی یکسان به یک مقدار بهینه نمی‌رسند به گونه‌ای که هرکدام از پاسخ‌ها در یک نسبت جرمی متفاوت به مقدار بهینه خود می‌رسند. همچنین شتاب و سرعت در نسبت‌های جرمی بالاتر و تغییرمکان و برش پایه در نسبت‌های جرمی پایین‌تر کاهش بیشتری دارند.
- بررسی‌ها نشان داد که استفاده از میراگرهای جرمی و سیال تنظیم‌شونده باعث کاهش چشمگیری در پاسخ‌های شتاب و سرعت می‌شود و پاسخ‌های تغییرمکان و برش پایه را به مقدار خیلی کمی کاهش می‌دهند.
- نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بهتر میراگر جرمی تنظیم‌شونده نسبت به میراگر سیال تنظیم‌شونده می‌باشد.

مراجع

- [1] Soong, T.T. and Dargush; G.F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. London: John Wiley & Sons, Ltd. (UK).
- [2] Muligan, K. (2007). *Experimental and Analytical Studies of Semi-active and Passive Structural Control of Buildings*. A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [3] Frahm; H. (1909). *Devices for Damping Vibrations of Bodies*. U.S. Patent, No. 989985.
- [4] Mahendra, P.S. and Sarbjeet; S. and Luis; M.M. (2002). *Tuned Mass Dampers for Response Control of Torsional Building*. Vol. 31, 749-769.
- [5] Den Hartog, J.P. (1940). *Mechanical Vibration*. 1st Edition. New York: Mcgraw-HiLL.
- [6] Wong, K.K.F. and Chee; A.L. (2004). Energy Dissipation of Tuned Mass Dampers during Earthquake Excitations. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 13, 105-121..
- [7] Zahrai, S.M. and Ghannadi-Asl; A. (2008). *Seismic Performance of TMDs in Improving the Response of MRF Buildings*. Scientia Iranica, Vol. 15 (1), 21-33.
- [8] 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.
- [9] Li, S.J., Li, G.Q., Tang, J., Li, Q.S. (2002). *Shallow Rectangular TLD for Structural Control Implementation*. Journal of Applied Acoustics, Vol. 63, 1125-1135.
- [10] Fujino, Y., Sun, L., Chaiseri, P. (1992). *Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures*. Engineering Mechanics, Vol. 118 (10), 2017-2030.
- [11] Sun, L.M., Fujino, Y., Pacheco, B.M. (1992). *Modeling of Tuned Liquid Damper (TLD)*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 41 (44), 1883-1894.
- [12] Koh, C.G., Mahatma, S., Wang, C.M. (1994). *Theoretical and Experimental Studies on Rectangular Liquid Dampers under Arbitrary Excitations*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, 17-31.
- [13] Li, H.N., Jia, Y., Wang, S.Y. (2004). *Theoretical and Experimental Studies on Reduction of Multi-Modal Seismic Response of High-Rise Structures by Tuned Liquid Dampers*. Journal of Vibration and Control, Vol. 10, 1041-1056.

[14] Banerji, P. (2004). *Tuned Liquid Dampers for Control of Earthquake Response*. 13th Conference on Earthquake Engineering, No. 1666, 1-12.

[15] Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., Chung, R.M. (1997). *A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Damper for Seismic Applications*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 617-635.

[16] Novo, T. (2014). *Tuned Liquid Dampers Simulation for Earthquake Response Control of Buildings*. Bull Earthquake Eng, Vol. 12, 1007-1024.

[۱۷] ضیائی فر، فرهاد؛ وفا، حامد رضا؛ غفارزاده، حسین. (۱۳۹۳). *ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم شونده در زلزله‌های نزدیک گسل*. اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه‌های عمرانی، گرگان، صفحه ۱ تا ۱۰.

[۱۸] هوشمندان، حسن؛ قدیمی عروس محله، فریدون. (۱۳۹۰). *تأثیر زلزله‌های دور و نزدیک گسل بر رفتار دینامیکی یک سد CFR*. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.

[19] Mahoney, M., Hanson, Robert D. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Federal Emergency Management Agency (FEMA) P695, Washington, D.C.

[۲۰] حق‌اللهی، عباس؛ عباسی طرئی، مرضیه؛ بشارت فردوسی، محسن. (۱۳۹۱). *تعیین پارامترهای بهینه میراگر کنترل جرمی در ساختمان‌های بلند مرتبه*. دومین کنفرانس ملی سازه-زلزله-ژئوتکنیک، مازندران، ایران، صفحه ۱ تا ۸.

[۲۱] ترکی، مهدی؛ حلبیان، امیر مهدی. (۱۳۸۸). *بررسی اثرات میراگرهای مایع هماهنگ شده در کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های برشی*. استقلال، سال ۲۸، شماره ۲، ایران، صفحه ۱ تا ۲۰.