

مقایسه عملکرد میراگرهای جرمی منفرد و چندگانه توزیع شده در ارتفاع برای کنترل لرزه ای چند مودی سازه بلند

علی اخلاق پسند^۱، امیرحسین فتح الله پور^۲، سید مهدی زهرائی^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۱۶

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۱۰

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۱۳

کلمات کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم شده منفرد (STMD)

میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD)، کنترل غیرفعال

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی آنالیز مودال

خلاصه: امروزه از کنترل ارتعاشات در مسائل مهندسی عمران به طور معمول استفاده می شود. میراگر جرمی تنظیم شونده یکی از ساده ترین و قابل اعتمادترین ابزار کنترلی محسوب می شود؛ که ترکیبی از جرم، فنر و میراگر را تشکیل می دهد. میراگرهای جرمی معمولاً بر مبنای فرکانس مود اول سازه تنظیم می گردند. حساسیت میراگر جرمی تنظیم شونده به تغییرات فرکانس سازه، از نقاط ضعف این سیستم کنترلی محسوب شده و عدم تنظیم بهینه پارامترهای این سیستم و یا تغییر فرکانس سازه منجر به کاهش بازدهی این سیستم می شود. در این پژوهش به منظور بررسی و مقایسه عملکرد میراگر جرمی منفرد واقع در محل بیشینه جابجایی مودی (بام سازه) و میراگرهای جرمی چندگانه توزیع شده در ارتفاع سازه بر اساس تحلیل مودال، از یک سازه ۴۰ طبقه در دو حالت خطی و غیرخطی بهره گرفته شده است. مدل سازی سازه به همراه هفت شتاب نگاشت زلزله های اعمالی با بیشینه شتاب معادل $0.1g$ در نرم افزار OpenSees انجام شده است. نتایج تحلیل های صورت گرفته نشان می دهد که کنترل سازه در حالت خطی توسط میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده بر اساس مودهای اول-دوم رفتار مناسب تری نسبت به سایر حالت ها دارد و متوسط کاهش بیشینه جابه جایی بام سازه با استفاده از این نوع از میراگرها $14/5\%$ درصد می باشد که حدود ۲ برابر بیشتر از کاهش ناشی از حالت های استفاده از میراگرهای منفرد تنظیم شده، بر اساس مود اول و میراگر جرمی چندگانه ی تنظیم شده بر اساس مود اول یا دوم، می باشد. این در حالی است که با توجه به فرض تنظیم مقادیر طراحی میراگرها متناظر با رفتار ارتجاعی آن ها، در مدل غیرخطی سازه عملکرد میراگرهای جرمی منفرد و چندگانه ضمن کنترل پاسخ های سازه، اندکی کاهش می یابد. خطای ۱۰ درصدی به منظور پوشش عدم قطعیت های موجود در میراگر های جرمی و سازه ناشی از تغییرات فرکانس، در تنظیم فرکانس طراحی میراگر ها در نظر گرفته شده است که در این حالت نیز رفتار میراگر های جرمی چندگانه مناسب تر بوده است.

۱-مقدمه

نسبت به فرکانس طبیعی سازه یا درصد میرایی میراگر بسیار حساس است که مشکلاتی نظیر ضعف تنظیم فرکانس یا بهینه نبودن میرایی را به همراه دارد. تغییر فرکانس طبیعی سازه که در ادامه به تفصیل بیان می شود منجر به کاهش اثرات کنترلی سامانه می شود. از طرفی دیگر در سازه های بلند با توجه به وزن زیاد سازه، جرم موردنیاز برای میراگر بسیار زیاد می شود و برای جانمایی در سازه نیاز به فضای زیادی خواهد بود که گاه تا چند طبقه نیز به منظور قرار گرفتن جرم

میراگر جرمی تنظیم شونده^۱ یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال است که از یک جرم، فنر و میراگر تشکیل شده است. این ساز و کار انرژی را از سازه اصلی به خود انتقال داده و زمینه اتلاف انرژی را فراهم می سازد. کارایی ساز و کار میراگر جرمی تنظیم شونده منفرد

1 Tuned mass damper (TMD)

*نویسنده عهده دار مکاتبات: mzhairai@ut.ac.ir



دانشمندان به این نتیجه رسیده اند که استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده، پاسخ‌های سازه را در برابر ارتعاشات باد و زلزله کاهش می‌دهد. این در حالی است که قراردادن جرمی زیاد و منفرد در یک مکان از سازه، نه تنها از منظر سازه‌ای بلکه از جنبه کاهش فضای سازه‌ای، کاربردی نیست. بنابراین محققان درصدد رفع این مشکل برآمدند و توزیع میراگرهای جرمی تنظیم شونده را در مکان‌های مختلف پیشنهاد و بررسی کرده‌اند. برگ من^۴ و همکاران [۲] در سال ۱۹۸۹ اثرات توزیع ارتفاعی میراگرهای جرمی تنظیم شونده را در یک تیر طره به عنوان مدل ساختمانی ارائه کردند. محققانی همچون وو^۵ و چن^۶ [۳] در سال ۲۰۰۰ و چن و وو [۴] در سال ۲۰۰۱ اثرات میراگرهای جرمی تنظیم شونده توزیع شده براساس شتاب سازه اصلی در پاسخ مودال سازه ۶ طبقه را به منظور نشان دادن عملکرد میراگرها تحت بار زلزله، بررسی و گزارش کردند که میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه در کاهش شتاب‌ها در طبقات پایینی سازه نقش مؤثرتری به نسبت طبقات بالایی سازه دارند. پتیت^۷ و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۹ مناسب‌ترین مکان بر اساس بیش‌ترین انتقال در فرکانس سازه را از فرکانس نیروی زلزله‌نمایی به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند که با قرارگیری مؤثر میراگرهای جرمی در مکان مناسب کارایی جاذب‌های انرژی به طور ویژه بهبود می‌یابد. مون^۸ [۶] در سال ۲۰۱۰ به این نتیجه رسید که میراگر جرمی در صورت توزیع در ارتفاع سازه و بر اساس اشکال مدی عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. فو^۹ و جانسون^{۱۰} در سال ۲۰۰۹ [۷] و [۲۰۱۱] از تیغه‌های خارجی به عنوان میراگرهای جرمی استفاده کردند و نشان دادند که میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه تحت زلزله‌های تاریخی عملکرد بهتری نسبت به میراگر جرمی تنظیم شونده منفرد دارند. نیگدلی^{۱۱} و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۱، از الگوریتم‌های جستجوی هم‌ساز^{۱۲} (HS)، برای یافتن پارامترهای بهینه میراگر جرمی برای یک سازه ۱۰ طبقه که تحت شتاب پایه‌ی هارمونیک قرار گرفته بود، استفاده نمودند. آن‌ها پارامترهای بهینه‌ی به دست آمده‌ی میراگر

مورد نیاز برای میراگر اختصاص داده‌می‌شود. برای برطرف کردن این اشکالات، به کار گرفتن میراگر جرمی تنظیم شونده چندگانه^۱ پیشنهاد شده است. میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه از چندین میراگر جرمی تنظیم شونده منفرد^۲ تشکیل شده که این میراگرها می‌توانند به دو شکل موازی و سری طراحی و به دو صورت توزیع در ارتفاع و توزیع در یک تراز از سازه جایگذاری شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که کارکرد میراگر جرمی تنظیم شونده چندگانه به مقدار جرم، تعداد جرم‌ها و دامنه فرکانس طراحی و نحوه توزیع آن‌ها بستگی دارد. میراگر جرمی تنظیم شونده چندگانه برای مد‌های مختلف قابل تنظیم است که برای افزایش کارایی لرزه‌ای، می‌توان میراگرها را در موقعیت‌های مختلفی از سازه اصلی کار گذاشت که در این پژوهش میراگرهای جرمی چندگانه در ارتفاع سازه توزیع می‌شوند. چنین سامانه‌هایی علاوه بر بهبود کارایی، اغلب نیازمند یک فضای اختصاص داده شده برای قرار دادن میراگر نیستند. با توجه به سبکی وزن میراگرها در این سامانه، استفاده‌ی نادرست از هر میراگر جرمی تنظیم شده سبب ایجاد آثار مخرب در پاسخ سازه‌ای نخواهد شد.

اکثر تحقیقاتی که بر روی میراگر جرمی انجام شده است، سعی در یافتن پارامترهای بهینه میراگر، نظیر سختی، میرایی و گاهی جرم، برای بارگذاری‌های مختلف، که به شکل‌های مختلف مدل می‌شوند، داشته‌اند. در تحقیقات انجام‌شده از معیارهای متفاوتی از جمله حداقل نمودن حداکثر تغییرمکان، شتاب، سرعت سازه و غیره برای یافتن پارامترهای بهینه میراگر جرمی استفاده شده است.

مفهوم میراگر جرمی برای نخستین بار توسط فرام^۳ [۱] در سال ۱۹۰۹ برای کاهش ارتعاشات ناشی از امواج دریا بر بدنه کشتی مطرح گردید. در تحقیقات اولیه که بر روی میراگر جرمی انجام شده بود، تاثیر مثبت میراگر جرمی را با فرض عدم وجود میرایی آن، برای حالتی یافتند که فرکانس بارگذاری به فرکانس میراگر جرمی بسیار نزدیک باشد. لازم به ذکر است که طراحی پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه و میراگرهای جرمی تنظیم شونده منفرد مشابه یکدیگر است؛ این در حالی است که محل قرارگیری آن‌ها به منظور دستیابی به بهینه‌ترین حالت این سیستم برای کاهش پاسخ سازه متفاوت بوده و نیاز به بررسی جنبه‌های گوناگون آن‌ها دارد.

4 Bergman
5 Wu
6 Chen
7 Petit
8 Moon
9 Fu
10 Johnson
11 Nigdeli
12 Harmony search algorithms

1 Multiple tuned mass damper (MTMD)
2 Single tuned mass damper (STMD)
3 Frahm

جرمی را برای زلزله‌های مختلف در سازه ۱۰ طبقه آزمایش نمودند. فرشیدیانفر^۱ و سهیلی^۲ [۱۰] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش کلونی مورچه‌ها^۳، پارامترهای بهینه برای میراگر جرمی تنظیم‌شونده را در ساختمان‌های بلند مرتبه و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به منظور کاهش حداکثر جابه‌جایی و شتاب طبقات یافتند. به منظور بررسی نتایج رکوردهای مربوط به زلزله‌های کوبه^۴ و طبس^۵ را به یک سازه‌ی ۴۰ طبقه اعمال و نحوه‌ی عملکرد میراگرهای بهینه‌شده در کاهش پاسخ‌ها و نیز تاثیر نوع خاک بر عملکرد آن‌ها را مشخص نمودند. شانگ^۶ و نیشیتانی^۷ [۱۱] در سال ۲۰۱۴ گزارش کردند که میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده‌ی چندگانه برای کنترل چندحالتی سازه‌های کوتاه مرتبه با فرکانس‌های نزدیک تحت رکورد های زلزله عملکرد مؤثری دارند. تاثیرات میراگر جرمی تنظیم‌شونده چندگانه توزیع شده در ارتفاع سازه به منظور کنترل ارتعاشات سازه مرجع ۷۶ طبقه در برابر باد توسط الیاس^۸ و ماتساگار^۹ [۱۲] در سال ۲۰۱۴، تحت عنوان تکنیک کنترل پاسخ چندحالتی، بررسی گردید. نتایج ناشی از جابه‌جایی‌ها و شتاب‌های طبقات نشان داد که توزیع میراگرهای جرمی چندگانه بر اساس شکل‌های مودی در کنترل ارتعاشات ناشی از باد نسبت به استفاده از میراگرهای جرمی منفرد و نیز میراگرهای جرمی چندگانه توزیع شده در طبقه‌ی بام مناسب‌تر است. رحمان^{۱۰} و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۶، به ارزیابی کارایی میراگر جرمی چندگانه که بر اساس اشکال مودی غالب در طبقات مختلف یک مدل جرم و فنر از سازه‌ی ۱۰ طبقه توزیع شده بودند، پرداختند. نتایج کار آن‌ها، توانایی قابل توجه این نوع از میراگرها را در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه تحت شتاب‌نگاشت‌های سه زلزله‌ی واقعی به عنوان جایگزینی برای میراگر جرمی منفرد و میراگر جرمی چندگانه در طبقه‌ی بام نشان داد. کیم^{۱۱} و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۶، کنترل یک ساختمان بلند در مقابل بار باد را که به صورت سازه‌ی تک درجه آزادی و با استفاده از جرم و فنر مدل شده بود، با

استفاده از میراگر جرمی چندگانه توزیع شده در طبقه‌ی بام بررسی نمودند. نتایج کار این مطالعه حاکی از عملکرد بهتر میراگرهای جرمی چندگانه نسبت به میراگرهای جرمی منفرد بود. الیاس و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۵] اثرات کنترل پاسخ چندحالتی یک دودکش را تحت اثر زلزله تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند که میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه که پاسخ‌های مودال متفاوتی را کنترل می‌کنند، عملکرد بهتری در برابر میراگرهای جرمی که فقط مد غالب پاسخ را کنترل می‌کنند، از خود نشان می‌دهند. الیاس و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷، کنترل لرزه‌ای چند مودی سازه‌ی مرجع ۲۰ طبقه را با استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه که بر اساس اشکال مودی در طبقات توزیع شده بودند، مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نیز گواهی بر عملکرد مناسب این روش کنترلی در مقایسه با میراگر جرمی منفرد و میراگرهای جرمی چندگانه توزیع شده در طبقه‌ی بام و نیز توزیع اتفاقی آن‌ها بود. ترینانتو^{۱۲} و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۷، عملکرد میراگرهای جرمی چندگانه را با ۲ و ۳ میراگر جرمی که به صورت سری و موازی کنار هم قرار گرفته بودند، در سیستم تک درجه آزادی جرم و فنر به صورت سری و موازی تحت تحریک‌های پله‌ای و متناوب تحلیل و بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که به طور کلی افزایش تعداد میراگرهای جرمی چندگانه، سبب کاهش زمان خرابی و نرم‌تر شدن جابه‌جایی‌ها می‌گردد. سالوی^{۱۳} و ریزی^{۱۴} [۱۸] در سال ۲۰۱۷، مشخصات بهینه‌ی مربوط به یک میراگر جرمی تنظیم‌شونده را برای ۱۶ سازه تحت ۱۸ زلزله یافتند. سپس روابط بین مشخصات بهینه و مشخصات مودال را برای یک قاب ده طبقه تحت تعدادی زلزله‌ی معیار بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند روش ارائه شده برای تنظیم این نوع میراگر بهترین عملکرد را داشته است. در سال ۲۰۱۸، بیات^{۱۵} و همکاران [۱۹] عملکرد میراگر جرمی چندگانه توزیع شده در ارتفاع را در یک مدل جرم و فنر سازه‌ی ۴ طبقه تحت شتاب‌نگاشت‌های سه زلزله‌ی واقعی بررسی نمودند. با استناد به نتایج، آن‌ها گزارش کردند که عملکرد میراگر جرمی چندگانه در کنترل لرزه‌ای سازه مناسب‌تر از میراگرهای جرمی منفرد می‌باشد. در سال ۲۰۱۸، کیم^{۱۶} و لی^{۱۷} [۲۰] میراگرهای جرمی چندگانه‌ی تنظیم‌شونده‌ی خطی را تحت شتاب

- 1 Farshidianfar
- 2 Soheili
- 3 Ant Colony Optimization (ACO)
- 4 Kobe
- 5 Tabas
- 6 Xiang
- 7 Nishitani
- 8 Elias
- 9 Matsagar
- 10 Rahman
- 11 Kim

- 12 Trisnanto
- 13 Salvi
- 14 Rizzi
- 15 Bayat
- 16 Kim
- 17 Lee

مختلف با بیشینه شتابی معادل $g/1$ استفاده شده است.

۲- سازه مورد مطالعه

۲-۱- مشخصات سازه

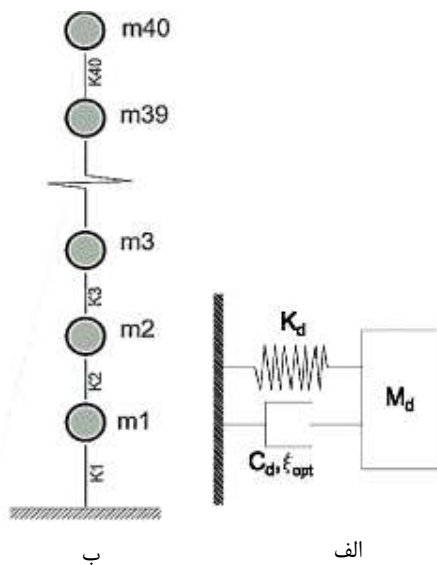
سازه‌ی بررسی شده در این مطالعه مربوط به یک سازه‌ی ۴۰ طبقه نمونه تحقیقات قبلی [۱۰ و ۲۳] می‌باشد که به صورت جرم و فنر به صورت دو بعدی و با در نظر گرفتن رفتار الاستیک مدل شده است. عرض، عمق و ارتفاع این ساختمان به ترتیب ۴۰، ۴۰ و ۱۶۰ متر است. ارتفاع هر طبقه ۴ متر در نظر گرفته شده است. جرم هر طبقه $9/8 \times 10^5$ کیلوگرم و ممان اینرسی مربوط به آن $1/31 \times 10^8$ کیلوگرم در مترمربع می‌باشند. سختی طبقات (K_i) با افزایش ارتفاع طبقه (Z_i) به صورت خطی کاهش می‌یابد. سختی طبقه اول (K_1) و سختی طبقه چهل ام (K_{40}) به ترتیب برابر با $2/13 \times 10^9$ و $9/98 \times 10^8$ نیوتن بر متر می‌باشند [۲۳].

در این پژوهش از میرایی نسبی رایله استفاده شده است که مطابق آن، ماتریس میرایی سازه N-طبقه می‌تواند به صورت زیر از ترکیب خطی از ماتریس‌های جرم و سختی ساختمان به دست بیاید.

$$[C]_{N \times N} = A_0[M]_{N \times N} + A_1[K]_{N \times N} \quad (1)$$

در این رابطه A_0 و A_1 ضرایب میرایی رایله می‌باشند که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰ و ۰/۰۲ در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۲- صحت سنجی مدل ساخته شده



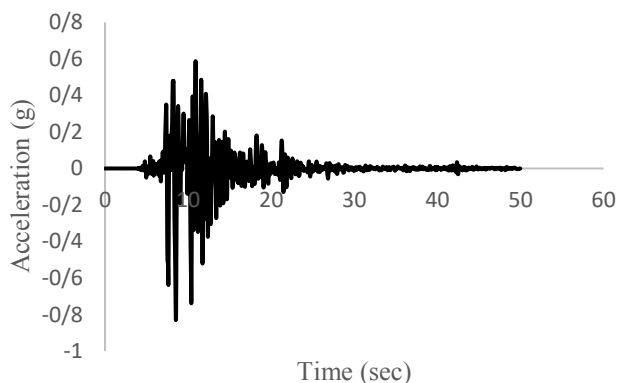
شکل ۱. طرح شماتیک (الف) میراگر (ب) سازه

Fig. 1. Schematic diagram of: (a) damper (b) structure

پایه‌ای نوین سفید با پیکربندی‌های متفاوت در یک سازه با یک درجه‌ی آزادی به صورت بهینه طراحی کردند. آن‌ها دریافتند که پهنای باند فرکانس بهینه برای این نوع میراگر بیش‌تر از میراگرهای جرمی منفرد و عملکرد آن‌ها در کنترل سازه بهتر است. در سال ۲۰۱۸، هسان^۱ و همکاران [۲۱] به مطالعه‌ی عملکرد میراگر جرمی چندگانه توزیع شده در بالا و پایه‌ی برج توربین با پارامترهای بهینه بر اساس روش سطح پاسخ^۲ در کنترل لرزه‌ای چند مودی مربوط به توربین بادی ساحلی^۳ قرار گرفته روی زیرسازه‌ی عظیم پرداختند. نتایج مشخص کردند که عملکرد این نوع از میراگر با استفاده از روش ارائه شده در دو مود اول ارتعاش مناسب بوده است. استنیکزای^۴ و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۹، کنترل لرزه‌ای پاسخ در ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای تحت تحریک‌های زلزله‌های مختلف را با استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه در یک طبقه و نیز توزیع این نوع از میراگرها در ارتفاع به صورت پارامتری بررسی کردند. نتایج نشان دادند که میراگرهای جرمی چندگانه‌ی توزیع شده در ارتفاع بیش‌ترین کاهش را در مقایسه با روش‌های کنترلی دیگر داشتند.

این مقاله برخلاف اغلب پژوهش‌های انجام شده در تحقیقات پیشین که به بررسی توزیع این میراگر در یک طبقه (معمولاً بام) یا توزیع آن در ارتفاع بر اساس بیشینه جابه‌جایی هر مود و در مقابل بار باد پرداخته‌اند، اثر استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده‌ی چندگانه توزیع شده در ارتفاع سازه‌ی بلند در برابر بار زلزله را مطالعه می‌کند؛ که به منظور تعیین مکان قرارگیری میراگرها از آنالیز مودال سازه استفاده گردیده است. بدین صورت که بعد از تحلیل مودال، برای تعیین مکان میراگرهای جرمی، برای طبقاتی با بیش از نصف بیشینه جابه‌جایی مودی، نیاز به نصب میراگر جرمی می‌باشد و این ایده به دلیل بالا بودن مقادیر شتاب در این طبقات می‌باشد. به منظور بهبود کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ی بلند، برای تعیین پارامترهای طراحی میراگر جرمی از روابط بهینه استفاده گردیده است. همچنین در ادامه به منظور پوشش عدم قطعیت‌های موجود در میراگرهای جرمی و سازه، به علت عدم تنظیم مناسب میراگرها ناشی از تغییر فرکانس طبیعی سازه یا میراگر، از خطای معادل ۱۰ درصد در تنظیم فرکانس میراگر بهره گرفته شده است. برای نیل به اهداف تحقیق از هفت زلزله

- 1 Hussan
- 2 Response Surface Methodology (RSM)
- 3 Offshore Wind Turbine (OWT)
- 4 Stanikzai



شکل ۲. نمودار شتاب- زمان زلزله‌ی کوبه

Fig. 2. Acceleration-time graph for the Kobe earthquake

مربوط به اشکال مودی سازه در مودهای اول و دوم در جدول (۳) نشان داده شده است. در هر دو مود اول و دوم، حداکثر جابه‌جایی مودی در بالاترین طبقه می‌باشد.

به منظور بررسی تاثیرگذاری مودها بر رفتار سازه، مقادیر درصد مشارکت وزنی لرزه‌ای آن‌ها با توجه به نتایج آنالیز مودال از طریق رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید. همانطور که نتایج موجود در جدول (۴) نشان می‌دهد مودهای اول و دوم در مجموع حدود ۸۹ درصد در جرم لرزه‌ای سازه مشارکت می‌نمایند و مشارکت وزنی ۳ مود اول بیش از ۹۰ درصد می‌باشد که می‌توان گفت در این تحقیق، مودهای اول و دوم به درستی به عنوان مودهای غالب به منظور طراحی میراگرهای جرمی در نظر گرفته شده‌اند.

$$W_i = \frac{[\sum_{j=1}^n (W_j \varphi_{ji})]^2}{\sum_{j=1}^n (W_j \varphi_{ji}^2)} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، W_i نشان‌دهنده‌ی وزن مربوط به جرم متمرکز طبقه‌ی i ام سازه و φ_{ji} درایه‌های مربوط به بردارهای شکل مودی

جدول ۲. زمان تناوب سازه مدلسازی شده در این تحقیق و سازه مرجع مطالعه فرشیدیانفر و سهیلی [۱۰]

Table 2. Periods of modeled structure in this study and benchmark structure in Farshidianfar and Soheili study [10]

مود	زمان تناوب مدل [۱۰] (ثانیه)	زمان تناوب مدل حاضر (ثانیه)	درصد خطا
اول	۳/۸۰۸	۳/۸۳	۰/۶
دوم	۱/۳۶۶	۱/۳۶۸	۰/۱
سوم	۰/۸۲۷	۰/۸۲۷	۰

جدول ۱. مشخصات سازه

Table 1. Properties of structure

تعداد طبقات	۴۰
ارتفاع طبقه (m)	۴
جرم طبقه (kg)	$9/8 \times 10^5$
ممان اینرسی طبقه (kgm^2)	$1/31 \times 10^8$
سختی طبقه (N/m)	$K_1 = 2/13 \times 10^9$ $K_{i+1} \leq K_i \leq K_1$

مدل سازه با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود OpenSEES

مدل سازی شده است. برای صحت‌سنجی مدل ایجاد شده، زمان‌های تناوب سه مود اول سازه و نیز حداکثر جابه‌جایی بام سازه تحت اثر زلزله کوبه در ایستگاه کوبه با بیشینه شتاب $0/83 \text{ g}$ مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته است. نمودار زلزله اعمالی کوبه در شکل (۲) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه جابه‌جایی سازه در مدل حاضر برابر با $1/03453$ متر و در مدل مرجع [۱۰] برابر با $1/049$ متر می‌باشد که دارای $1/4$ درصد خطا می‌باشد. نتایج صحت‌سنجی زمان تناوب سازه در جدول (۲) ارائه گردیده است. نتایج صحت‌سنجی زمان تناوب سازه در جدول (۲) ارائه گردیده است. اختلاف مشاهده شده در نتایج مدل سازی این پژوهش در مقایسه با مدل ساخته شده در مطالعه‌ی فرشیدیانفر و سهیلی [۱۰] می‌تواند به دلیل صرف نظر کردن از اینرسی دورانی و نیز مدل سازی در نرم‌افزارهای مختلف باشد.

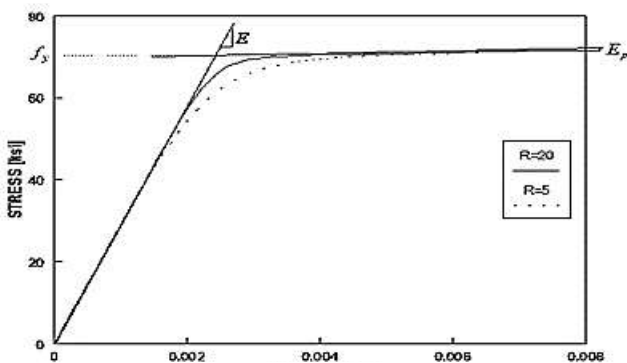
۳- آنالیز مودال سازه و تعیین وزن موثر مودی

به منظور طراحی میراگرها بر اساس روابط ذکر شده ابتدا تحلیل مودال سازه انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج

جدول ۳. جابه‌جایی‌های مودی سازه در مدهای اول و دوم

Table 3. Modal displacements of the structure in 1st and 2nd modes

مدهای اول	مدهای دوم	طبقه	مدهای اول	مدهای دوم	طبقه	مدهای اول	مدهای دوم	طبقه	مدهای اول	مدهای دوم
۱	۰/۰۸۱	۱۱	۰/۳۴۱	۰/۷۶۷	۲۱	۰/۶۴۹	۰/۶۹۸	۳۱	۰/۸۹۸	۰/۲۹۳
۲	۰/۱۶۲	۱۲	۰/۳۷۳	۰/۸۰۵	۲۲	۰/۶۷۷	۰/۶۳۳	۳۲	۰/۹۱۷	۰/۴۰۹
۳	۰/۲۴۲	۱۳	۰/۴۰۵	۰/۸۳۴	۲۳	۰/۷۰۵	۰/۵۵۹	۳۳	۰/۹۳۴	۰/۵۲۱
۴	۰/۳۲۲	۱۴	۰/۴۳۷	۰/۸۵۴	۲۴	۰/۷۳۲	۰/۴۷۵	۳۴	۰/۹۴۹	۰/۶۲۷
۵	۰/۳۹۹	۱۵	۰/۴۶۸	۰/۸۶۴	۲۵	۰/۷۵۹	۰/۳۸۲	۳۵	۰/۹۶۳	۰/۷۲۳
۶	۰/۴۷۳	۱۶	۰/۴۹۹	۰/۸۶۳	۲۶	۰/۷۸۴	۰/۲۸۲	۳۶	۰/۹۷۵	۰/۸۰۹
۷	۰/۵۴۳	۱۷	۰/۵۳	۰/۸۵۲	۲۷	۰/۸۰۹	۰/۱۷۴	۳۷	۰/۹۸۵	۰/۸۸۲
۸	۰/۶۰۸	۱۸	۰/۵۶	۰/۸۳	۲۸	۰/۸۳۳	۰/۰۶۱	۳۸	۰/۹۹۲	۰/۹۳۹
۹	۰/۶۶۸	۱۹	۰/۵۹	۰/۷۹۷	۲۹	۰/۸۵۶	۰/۰۵۶	۳۹	۰/۹۹۷	۰/۹۷۹
۱۰	۰/۷۲۱	۲۰	۰/۶۲	۰/۷۵۳	۳۰	۰/۸۷۸	۰/۱۷۴	۴۰	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰



شکل ۳. رفتار مصالح Steel02

Fig. 3. Behavior of Steel02 material

جدول ۴. نسبت مشارکت وزنی مدهای سازه

Table 4. Weight participation ratio of mode shapes of the structure

نسبت مشارکت وزنی	مود
۰/۷۸۷۸۲۵	۱
۰/۱۰۴۶۸	۲
۰/۰۳۸۷۸۴	۳
۰/۰۱۹۶۷۸	۴
۰/۰۱۱۸۲۱	۵
۰/۰۰۷۸۹۱	۶
۰/۰۰۵۶۰۵	۷
۰/۰۰۴۱۴۸	۸
۰/۰۰۳۱۸	۹
۰/۰۰۲۵۴۳	۱۰

می‌باشند.

۴- مدل سازی

۴-۱- مدل سازی سازه

به منظور مدل سازی خطی سازه به صورت جرم و فنر از نرم‌افزار OpenSEES بهره گرفته می‌شود. بدین منظور از ۴۰ فنر با سختی معادل با سختی طبقات و ۴۰ جرم متمرکز معادل با جرم آن‌ها استفاده می‌شود. برای تخصیص سختی طبقات سازه، از المان element zeroLength استفاده می‌شود؛ که به صورت سری سختی طبقات سازه را به یکدیگر متصل کرده است.

به منظور مدل سازی غیرخطی سازه فولادی در این نرم‌افزار از المان‌های معادل از نوع element nonlinearBeamColumn که توزیع گسترده پلاستیسیته را در نظر می‌گیرند، استفاده می‌گردد. رفتار مصالح فولادی با استفاده از دستور uniaxialMaterial Steel02 تعریف می‌گردد. این دستور برای ساخت مصالح فولادی گیوفر و منگتو و پینتو (Giuffre-Menegotto-Pinto) با سخت شوندهگی ایزوتروپیک به کار می‌رود. مدل رفتاری این مصالح در شکل (۳) نشان داده شده است. مقطع معادل مربعی با استفاده از دستور section fiber ایجاد شده است. این مقطع یک شکل هندسی عمومی دارد؛ که از نواحی با اشکال ساده‌تر و منظم‌تر مانند نواحی مستطیلی، دایروی و مثلثی تشکیل شده است. نواحی نام برده اصطلاحاً پچ^۱ نامیده می‌شود.

۴-۲- مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده

¹ Patch

جدول ۵. مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده‌ی منفرد طراحی شده

Table 5. Properties of designed single TMDs

تعداد میراگرها	c_d (kN.s/m)	k_d (kN/m)	ω_d (rad/s)	m_d (ton)	T (s)	طراحی شده بر اساس
۱	۱۳۹۶/۲۴	۱۸۵۸۹/۲۸	۱/۶۲	۷۰۴۶	۳/۳۸	مود اول
۱	۳۵۷۵/۶۵	۱۳۳۵۳۴/۶۵	۴/۵۵	۶۴۳۲/۷۵	۱/۳۶	مود دوم

$$\bar{m} = \frac{m_d}{\tilde{m}_{ie}} \quad (۴)$$

$$\tilde{m}_{ie} = \left[\frac{1}{\varphi_{ij}^2} \right] \tilde{m}_j \quad (۵)$$

$$\tilde{m}_j = \sum m_j \varphi_{ji}^2 \quad (۶)$$

که در آن \bar{m} نسبت جرم بوده که نتایج بیش‌تر مطالعات نشان می‌دهد که مقدار مناسب آن بین ۱ تا ۵ درصد می‌باشد، که در این پژوهش مقدار آن ۱ درصد در نظر گرفته شده است. m_d جرم میراگر، \tilde{m}_{ie} جرم سیستم یک درجه آزادی معادل برای ترکیب مد i و گره j که میراگر جرمی تنظیم شده به آن متصل می‌شود، \tilde{m}_j حداکثر مد i ، \tilde{m}_j جرم معادل سیستم یک درجه آزادی تنظیم شده برای مد j سازه، m_j جرم طبقه j سازه و \tilde{m}_{ie} دامنه زام مد i سازه می‌باشد [۲۴]. جرم سیستم یک درجه آزادی معادل با در نظر گرفتن مد اول و دوم سازه به ترتیب برابر با $۷۰۴۶۰/۸۹$ و $۶۴۳۲۷۵/۲$ تن و m_d جرم میراگر با در نظر گرفتن درصد جرمی معادل یک درصد به دست می‌آید (جدول ۵). مقادیر بهینه نسبت میرایی و فرکانس میراگر از روابط ارائه شده توسط پاستیا^۱ و لوکا^۲ [۲۵] بدست آمده‌اند که در حقیقت روابطی هستند که به منظور بهینه کردن میراگر جرمی منفرد در مقابل بار هارمونیک و برای میراگرهای جرمی منفرد به کار گرفته می‌شود. با استفاده از این روابط، مقادیر طراحی مورد نظر میراگرها شامل جرم، سختی و میرایی آن‌ها با فرض رفتار ارتجاعی، تعیین می‌شوند:

$$f_{TMD} = \frac{f_1}{1 + \mu} \quad (۷)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (۸)$$

به منظور مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده در نرم افزار OpenSEES از یک جرم متمرکز که در موقعیت معینی از سازه در تراز مدنظر قرار دارد، استفاده می‌شود. میراگر جرمی به وسیله‌ی فنر از یک طرف به سازه و از طرف دیگر به جرم متمرکز متصل می‌شود. به منظور مدل سازی میرایی میراگر جرمی تنظیم شونده در نرم افزار OpenSEES، از المان میرایی ویسکوز و برای مدل سازی سختی آن از یک المان با سختی الاستیک استفاده شده است؛ که این مقادیر طی فرآیند تحلیل ثابت می‌باشند. در شکل (۱-الف) شمایی از یک میراگر جرمی نشان داده شده است. در مدل سازی نیروی میرایی ویسکوز از رابطه (۳) بهره گرفته می‌شود:

$$F = CV^\alpha \quad (۳)$$

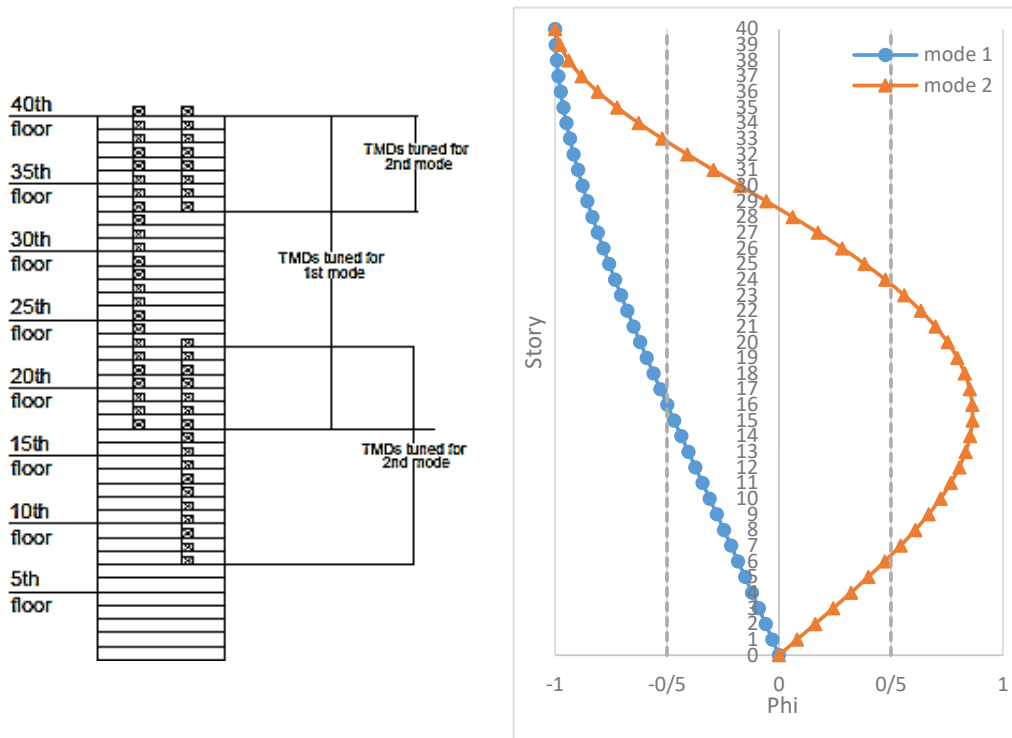
که C ضریب میرایی و V سرعت نسبی دو سر میراگر ویسکوز می‌باشد همچنین مقدار α نیز یک انتخاب شده است. در نرم افزار OpenSEES از دستور uniaxialMaterial Viscous برای مدل سازی میرایی میراگر جرمی و از دستور uniaxialMaterial Elastic برای سختی میراگر جرمی استفاده شده است.

برای تخصیص میرایی و سختی میراگر جرمی در بام سازه، از المان element zeroLength استفاده می‌شود؛ که به صورت موازی سختی و میرایی میراگر جرمی را بین طبقه مورد نظر از سازه و جرم میراگر جرمی متصل کرده است.

طراحی یک میراگر جرمی مشتمل بر تعیین جرم میراگر، سختی و ضریب میرایی آن می‌باشد. تعیین مقادیر فوق در قالب تعیین نسبت جرم میراگر به جرم سازه و تعیین نسبت فرکانس بهینه و نسبت میرایی بهینه‌ی میراگر تعریف می‌شود.

به جهت تعیین مقادیر فوق با فرض رفتار ارتجاعی میراگرها از روابط زیر استفاده شده است:

1 Pastia
2 Luca



شکل ۴. تعیین تعداد و محل قرار گیری میراگرهای جرمی با توجه به اشکال مودی

Fig. 4. Determination of the number and location of TMDs based on modal shapes

منظور طراحی میراگرها استفاده شده است. محل قرار گیری میراگر بر اساس تحلیل مودال تعیین می‌گردد. بدین صورت که ترازوی که بیش‌ترین جابه‌جایی مودال را دارد، محل قرارگیری میراگر خواهد بود. اطلاعات مربوط به میراگرهای جرمی تنظیم شونده‌ی منفرد بر اساس مود موردنظر برای طراحی در جدول (۵) گزارش شده است. به منظور طراحی میراگرهای جرمی چندگانه از تعدادی میراگر جرمی با مشخصات یکسان استفاده شده است؛ لذا به منظور محاسبه‌ی پارامترهای طراحی در آن‌ها ابتدا محل قرارگیری و در نتیجه تعداد آن‌ها مشخص می‌گردد و سپس با توجه به مود یا مودهای موردنظر برای طراحی میراگرها، اطلاعات مربوط به طراحی آن‌ها از روابط ذکر شده در قبل و با در نظر گرفتن نسبت جرمی ۱ درصدی به دست می‌آیند.

تعیین محل میراگرها و تعداد آن‌ها براساس آنالیز مودال سازه و مطابق با شکل (۴) انجام شده است. در این روش، در طبقاتی که جابه‌جایی مودی از مقدار ۰/۵ واحد فراتر رفته، میراگر قرار گرفته است.

با توجه به این شکل می‌توان بیان کرد که برای مود اول، ۲۴

که f_{TMD} فرکانس میراگر، f_1 فرکانس اصلی سازه است که برای مد اول و دوم به ترتیب برابر ۰/۲۶۱ و ۰/۷۳۲ هرتز، \bar{m} همان \bar{m} نسبت جرمی و معادل با یک درصد جرم مودال سازه و \hat{I}_{opt} نسبت میرایی بهینه میراگر می‌باشد. لازم به ذکر است که روابط بهینه‌ی ذکر شده مربوط به میراگر جرمی تحت بار هارمونیک می‌باشد که این پژوهش نیز از روابط مذکور برای بار زلزله وارده به سازه بهره برده است.

سختی و میرایی میراگر نیز از روابط روبرو قابل محاسبه اند:

$$K_d = m_d \omega_d^2 \quad (9)$$

$$C_d = 2\xi_{opt} m_d \omega_d \quad (10)$$

که در آن k_d سختی میراگر، \hat{u}_d فرکانس میراگر و c_d میرایی میراگر است.

پس از انتخاب مود موردنظر برای طراحی و تنظیم میراگر جرمی، جرم آن از روابط (۴) تا (۶) و فرکانس و نسبت میرایی بهینه آن از روابط (۷) و (۸) و سختی و میرایی آن به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) به دست آمده‌اند. در این پژوهش از مودهای اول و دوم سازه به

جدول ۶. مشخصات میراگر جرمی تنظیم شونده‌ی چندگانه بر اساس دو مود اول

Table 6. Properties of MTMDs based on the first two modes

	MTMD	m_d (ton)	k_d ($\frac{kN}{m}$)	c_d ($kN \cdot \frac{s}{m}$)	ξ	Location	Number Of TMDs
تنظیم شده بر اساس مود اول	مود اول	۲۹۳/۵۸	۷۷۴/۵۵	۵۸/۱۷	۰/۰۶۱	۱۷-۴۰	۲۴
تنظیم شده بر اساس مود دوم	مود دوم	۲۵۷/۳۱	۵۳۴۱/۳۸	۱۴۳/۰۲	۰/۰۶۱	۷-۲۳ و ۳۳-۴۰	۲۵
تنظیم شده بر اساس مود اول-دوم	مود اول	۱۴۳/۷۹	۳۸۳/۲۳	۲۰/۰۷	۰/۰۴۲	۱۷-۴۰	۲۴
	مود دوم	۱۳۱/۲۸	۲۷۵۱/۸۲	۵۲/۴۴	۰/۰۴۳	۷-۲۳ و ۳۳-۴۰	۲۵

جدول ۷: مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل

Table 7. Properties of earthquakes used for analysis

شماره	نام زلزله	ایستگاه	PGA
۱	Northridge	Beverley Hill	۰/۵۲g
۲	Northridge	Canyon Country-WLC	۰/۴۸g
۳	Duzce, Turkey	Bolu	۰/۸۲g
۴	Hector Mine	Hector	۰/۳۴g
۵	Bam	Bam	۰/۷۸۶g
۶	Tabas	Tabas	۰/۸۲۶g
۷	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	۰/۵۱g

موردنظر ابتدا تمامی زلزله‌ها برای رسیدن به حداکثر شتاب g_1 مقیاس شده‌اند. پس از آن سازه تحت این زلزله‌های مقیاس شده قرار می‌گیرد تا نتایج مربوط به بیشینه‌ی جابه‌جایی و هم‌چنین برش پایه‌ی آن استخراج گردد. در شکل (۵) نمودارهای پاسخ طیف شتاب مربوط به هفت زلزله که بر اساس حداکثر شتاب g مقیاس شده‌اند، نشان داده شده است.

عدد میراگر از طبقه‌ی ۱۷ تا ۴۰ و برای مود دوم نیز ۲۵ عدد میراگر از طبقه‌ی ۷ تا ۲۳ و نیز از طبقه‌ی ۳۳ تا ۴۰ مورد نیاز است که مطابق با همین شکل در سازه قرار می‌گیرند. در حالت ترکیبی نیز میراگرهای هر دو حالت در سازه جاگذاری می‌شوند. مشخصات هر یک از میراگرهای مورد استفاده در جدول (۶) آمده است.

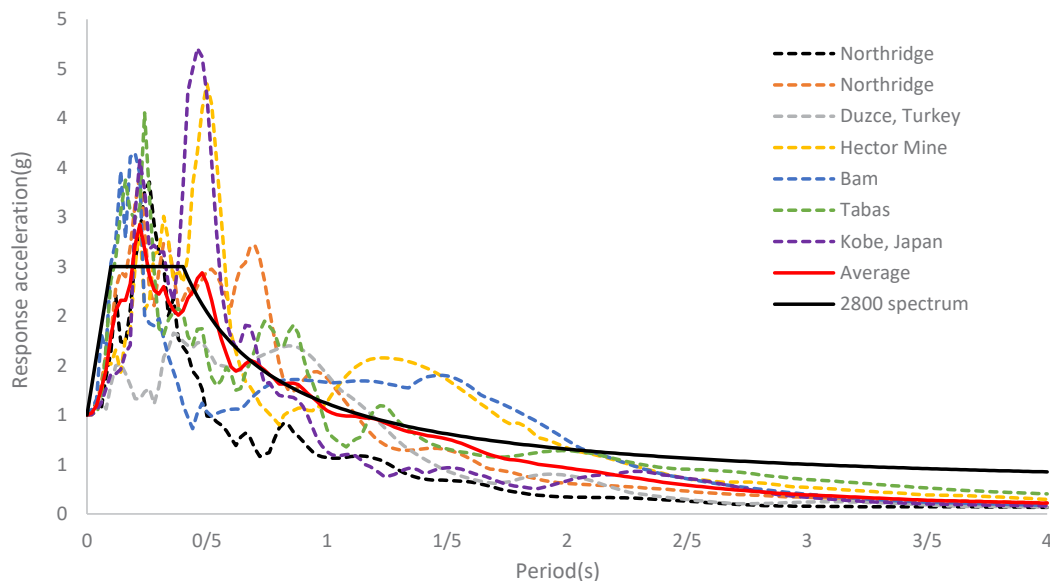
۵- فرآیند تحلیل

به منظور به دست آوردن نتایج مورد نیاز در این مطالعه از تحلیل تاریخی‌ی زمانی^۱ و برای این منظور از ۷ رکورد شتاب زلزله که در جدول (۷) بیان شده، استفاده گردیده است. به منظور انجام تحلیل

۶- تفسیر تحلیل‌های انجام شده

به منظور مقایسه و نتیجه‌گیری از نتایج به دست آمده از تحلیل، میانگین حداکثر جابه‌جایی مدل‌های خطی و غیرخطی سازه (جابه‌جایی بام) در حالت کنترل نشده و حالت‌های مختلف کنترل

1 Time history Analysis



شکل ۵. طیف پاسخ شتاب زلزله های اعمال شده به سازه

Fig. 5. Acceleration response spectra of earthquakes applied to the structure

جدول ۸. میانگین بیشینه‌ی جابه‌جایی سازه در تحلیل تاریخچه‌زمانی بر حسب متر

Table 8. Mean of maximum displacement [m] of the structure in Time-history analysis

	PGA	Uncontrolled	STMD 1 st mode	STMD 2 nd mode	MTMD 1 st mode	MTMD 2 nd mode	MTMD 1 st & 2 nd mode
پاسخ خطی	۱g	۰/۷۵۲	۰/۷۰۲	۰/۶۶۵	۰/۷۰۳	۰/۷۰۶	۰/۶۴۳
	مقدار کاهش	-	۰/۰۶۶	۰/۱۱۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶	۰/۱۴۵
پاسخ غیرخطی	۱g	۰/۵۳۴۸	۰/۴۸۹۷	۰/۴۸۷۳	۰/۴۹۳۸	۰/۵۰۳	۰/۴۹۱۵
	مقدار کاهش	-	۰/۰۸۴۴	۰/۰۸۸۸	۰/۰۷۶۷	۰/۰۵۹۵	۰/۰۸۱

خطی و غیرخطی سازه (جابه‌جایی بام) برای ۷ زلزله‌ی مورد بررسی و برای حداکثر شتاب ۱g بر حسب متر در جدول (۸) گزارش شده است.

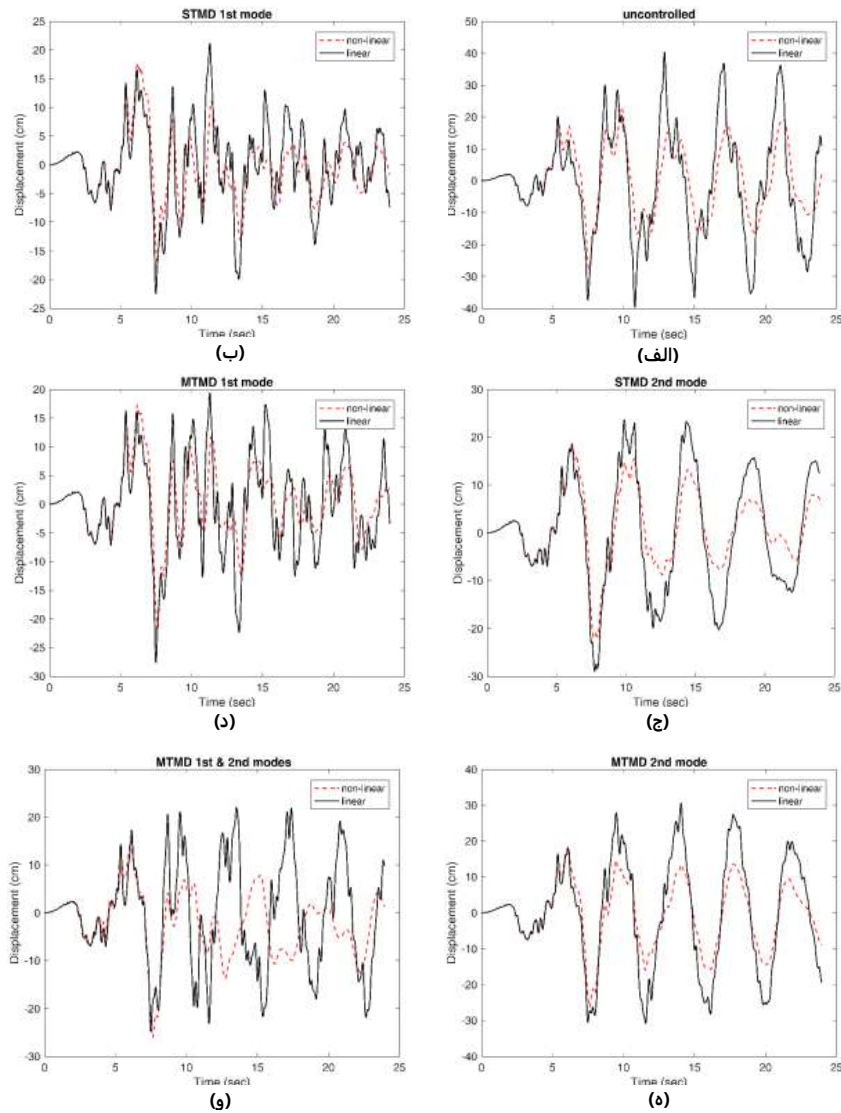
نتایج نشان می‌دهند که سامانه‌های کنترلی مدنظر این پژوهش تاثیر قابل قبولی در کنترل ارتعاشات سازه تحت تاثیر زلزله دارند؛ به طوری که در مدل خطی سازه، میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول ۶/۶ درصد، میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود دوم ۱۱/۶ درصد، میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول ۶/۵ درصد، میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود دوم ۶ درصد و میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول-دوم ۱۴/۵ درصد از میانگین ارتعاشات سازه تحت ۷ رکورد زلزله کاسته‌اند. همان‌طور که مشهود است، میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده بر

شده و میانگین برش پایه‌ی آن‌ها برای ۷ زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی دیگر نتایج مربوط به زلزله‌ی نرثریج ایستگاه بورلی هیل به عنوان نمونه به طور جداگانه برای حالت‌های مختلف به منظور مشاهده‌ی عملکرد آن‌ها در یک زلزله‌ی مجزا نیز با هم مقایسه شده‌اند. همچنین مقادیر جذر متوسط مربع^۱ برای داده‌ها به منظور تعیین میزان پراکندگی نتایج و نوع رفتار در هر حالت برای حداکثر جابه‌جایی و برش پایه به طور جداگانه محاسبه شده است؛ که هرچه مقدار آن کوچک‌تر باشد، رفتار سازه در آن حالت مناسب‌تر است.

۱-۶-متوسط حداکثر جابه‌جایی سازه (جابه‌جایی بام)

مقادیر مربوط به میانگین مقادیر حداکثر جابه‌جایی مدل‌های

1 Root Mean Square (RMS)



شکل ۶. جابه‌جایی بام مدل خطی و غیرخطی سازه در طول زلزله‌ی نرتریج ایستگاه بوری هیل در حالت‌های مختلف: (الف) کنترل نشده (ب) میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول (ج) میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود دوم (د) میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول (ه) میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود دوم (و) میراگر جرمی تنظیم شونده برای مودهای اول-دوم

Fig. 6. Roof displacement in linear and nonlinear models of structure during the Northridge earthquake at Beverly Hills station in different conditions: (a) Uncontrolled (b) STMD designed based on 1st mode (c) STMD designed based on 2nd mode (d) MTMD designed based on 1st mode (e) MTMD designed based on 2nd mode (f) MTMD designed based on 1st & 2nd modes

می‌تواند نمایانگر رفتار مناسب‌تر میراگر چندگانه تنظیم شده بر اساس مود اول-دوم در کاهش پاسخ جابه‌جایی سازه باشد.

همانطور که انتظار می‌رفت پاسخ‌های مدل غیرخطی سازه به طور کلی نسبت به پاسخ‌های مدل خطی سازه کاهش یافته است (شکل ۶). دلیل این امر در نظر گرفتن رفتار غیرارتجاعی مصالح سازه می‌باشد که پس از رسیدن به حد تسلیم با مستهلک کردن انرژی ورودی به سازه دیگر اجازه افزایش نیروها را نمی‌دهد. عملکرد

اساس مودهای اول و دوم عملکرد بهتری نسبت به سایر سامانه‌های کنترلی داشته است؛ این در حالی است که میراگر جرمی منفرد تنظیم شده بر اساس مود دوم نیز به مقدار قابل توجهی جابه‌جایی متوسط سازه را کاهش داده است. لذا می‌توان بیان کرد که عملکرد میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده بر اساس مود اول-دوم علی‌رغم این‌که از روابط مربوط به میراگرهای منفرد برای بهینه‌سازی آن استفاده شده است؛ در متوسط پاسخ جابه‌جایی سازه بهتر بوده است. این مقایسه

جدول ۹. حداکثر جابه‌جایی در زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل برای میراگرهای جرمی منفرد بر حسب متر
Table 9. Maximum displacement in the Northridge earthquake at Beverly Hills station for STMDs

	PGA	Uncontrolled	RMS	STMD	RMS	STMD	RMS
				1 st mode		2 nd mode	
پاسخ خطی	۱g	۰/۴۰۴	۰/۱۶۶	۰/۲۲۴	۰/۰۷۲	۰/۲۹	۰/۱۲۱
	مقدار کاهش	-	-	۰/۴۴۴	۰/۵۷	۰/۲۸۲	۰/۲۷
پاسخ غیرخطی	۱g	۰/۲۹۰۸	۰/۱۰۶۱	۰/۱۷۷۸	۰/۰۵۵۸	۰/۲۲۱۲	۰/۰۷۸۴
	مقدار کاهش	-	-	۰/۳۸۸	۰/۴۷	۰/۲۳۹	۰/۲۶

جدول ۱۰. حداکثر جابه‌جایی در زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل برای میراگرهای جرمی چندگانه بر حسب متر
Table 10. Maximum displacement in the Northridge earthquake at Beverly Hills station for MTMDs

	PGA	Uncontrolled	RMS	MTMD	RMS	MTMD	RMS	MTMD	RMS
				1 st mode		2 nd mode		1 st & 2 nd mode	
پاسخ خطی	۱g	۰/۴۰۴	۰/۱۶۶	۰/۲۷۶	۰/۰۸۲	۰/۳۰۷	۰/۱۵	۰/۲۴۸	۰/۱۰۸
	مقدار کاهش	-	-	۰/۳۱۶	۰/۵۱	۰/۲۳۹	۰/۰۹۶	۰/۳۸	۰/۳۵
پاسخ غیرخطی	۱g	۰/۲۹۰۸	۰/۱۰۶۱	۰/۲۲۱۷	۰/۰۶۱۱	۰/۲۶۳۱	۰/۰۹۱۶	۰/۲۶۰۷	۰/۰۷۰۹
	مقدار کاهش	-	-	۰/۲۳۸	۰/۴۲	۰/۰۹۵	۰/۱۴	۰/۱۰۳	۰/۳۳

منفرد و چندگانه ارائه شده است. هم‌چنین در شکل (۷) مقادیر جابه‌جایی بام مدل خطی و غیرخطی سازه برای حداکثر شتاب g_1 در طول زمان وقوع زلزله نشان داده شده است.

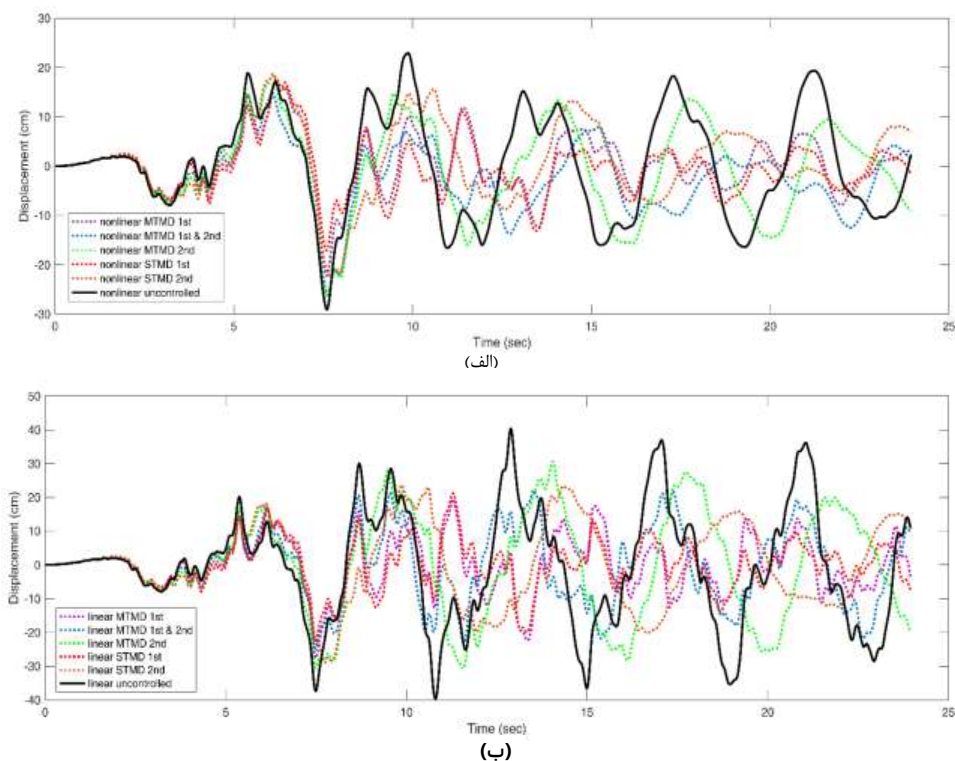
مطابق با شکل (۶) همان‌طور که پیشتر ذکر شد پاسخ‌های مدل غیرخطی سازه به‌طور کلی نسبت به پاسخ‌های مدل خطی سازه کاهش می‌یابد. در مدل خطی سازه تحت زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول بهترین عملکرد را داشته است. هم‌چنین مقدار RMS مربوط به استفاده از این نوع میراگر کم‌ترین مقدار را نسبت به سایر حالات دارد که نشان می‌دهد سازه به‌صورت یکپارچه‌تر عمل می‌نماید و پراکندگی نتایج کم‌تر است. پس از این میراگر، میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده بر اساس مود اول-دوم و تنظیم شده بر اساس مود اول عملکرد بهتری را دارند. این درحالی است که در مدل غیرخطی سازه میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول به‌همراه میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود دوم و میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول بهترین عملکرد و میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول-دوم و مود دوم بدترین عملکرد را در کاهش پاسخ‌های سازه تحت این رکورد زلزله داشته‌اند. هم‌چنین مقدار کمتر RMS

سیستم‌های کنترلی مورد بحث در مدل غیرخطی سازه با توجه به تنظیم مقادیر طراحی میراگرها متناسب با رفتار ارتجاعی آن‌ها، ضمن کنترل پاسخ‌های سازه اندکی تغییر می‌یابد. در این حالت میراگرهای جرمی منفرد تنظیم شده برای مود دوم، اول و میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول-دوم به ترتیب با $۸/۸$ ، $۸/۴$ و $۸/۱$ درصد کاهش میانگین پاسخ‌های سازه تحت ۷ رکورد زلزله بهترین عملکرد و میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود دوم و اول به ترتیب با $۵/۹$ و $۷/۶$ درصد کاهش میانگین پاسخ‌های سازه بدترین عملکرد را داشته‌اند.

۱-۱-۶- حداکثر جابه‌جایی سازه برای زلزله نثریج ایستگاه بورلی هیل^۱

با توجه به متفاوت بودن محتوای فرکانسی رکورد زلزله‌های اعمالی به منظور ارائه‌ی نحوه‌ی عملکرد هر یک از حالت‌های استفاده از میراگر جرمی، به‌عنوان نمونه مقادیر بیشینه جابه‌جایی مدل‌های خطی و غیرخطی سازه مربوط به زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل بر حسب متر در جداول (۹) و (۱۰) به ترتیب برای میراگرهای جرمی

1 Northridge, Beverley Hill



شکل ۷. جابه‌جایی بام سازه در طول زلزله‌ی نرثریج ایستگاه بوری هیل برای حالت‌های مختلف (الف) حالت غیرخطی (ب) حالت خطی

Fig. 7. Roof displacement during the Northridge earthquake at Beverly Hills station in (a) Nonlinear model (b) linear model

کیلونیوتن در جدول (۱۱) گزارش شده است. افزودن میراگر جرمی تنظیم شونده به سازه می‌تواند منجر به کاهش برش پایه سازه شود؛ بدین صورت که این میراگر در حین زلزله نیرویی در فاز مخالف با حرکت سازه به سازه وارد می‌کند که در بهبود برش پایه نقش موثری دارد. در مدل خطی سازه میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول ۱۷/۲۵ درصد، میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود دوم ۱۸/۴ درصد، میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول ۱۴/۲۶ درصد، میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود دوم ۴/۱ درصد و میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول-دوم

مربوط به میراگر جرمی منفرد نسبت به سایر حالت‌ها گواه عملکرد بهتر این میراگر می‌باشد. در تفسیر این تغییر عملکرد میراگرهای جرمی می‌توان گفت که با توجه به تنظیم مقادیر طراحی میراگرها متناظر با فرض رفتار ارتجاعی آن‌ها، با ورود سازه به ناحیه غیرخطی و تغییر فرکانس طبیعی آن، میراگرهای جرمی از تنظیم خارج شده و عملکردشان تغییر می‌یابد.

۲-۶- متوسط برش پایه‌ی سازه

مقادیر مربوط به میانگین مقادیر برش پایه مدل خطی و غیرخطی سازه برای ۷ زلزله‌ی مورد بررسی و برای حداکثر شتاب g بر حسب

جدول ۱۱. میانگین برش پایه‌ی سازه در تحلیل تاریخچه‌زمانی بر حسب کیلونیوتن

Table 11. Mean base shear [kN] of the structure in time-history analysis

	PGA	Uncontrolled	STMD 1 st mode	STMD 2 nd mode	MTMD 1 st mode	MTMD 2 nd mode	MTMD 1 st &2 nd mode
پاسخ خطی	۱g	۷۹۵۴۵/۴۷	۶۵۸۲۴/۱	۶۴۹۱۶/۳	۹۰۸۸۵/۶۵	۷۶۲۶۹/۴۴	۷۹۲۰۱/۴۲
	مقدار کاهش	-	۰/۱۷۲۵	۰/۱۸۴	۰/۱۴۲۶	۰/۰۴۱۲	۰/۰۰۴۳۲۵
پاسخ غیرخطی	۱g	۲۵۴۵۰/۵۶	۲۵۰۷۶/۲۲	۲۵۵۷۴/۳	۲۵۳۲۳/۳۲	۲۵۳۲۴/۴۵	۲۵۲۳۴/۲۱
	مقدار کاهش	-	۰/۰۱۴۷	-۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸۵

جدول ۱۲. برش پایه برای زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل برای میراگر جرمی منفرد بر حسب کیلونیوتن

Table 12. Base shear [kN] for STMS under the Northridge earthquake at Beverly Hills station

	PGA	Uncontrolled	RMS	STMD 1 st mode	RMS	STMD 2 nd mode	RMS
پاسخ خطی	۱g	۶۰۷۴۳/۵	۱۹۳۳۰/۱	۵۱۴۹۳/۸	۱۳۴۴۱/۷	۴۲۳۰۹/۸	۱۰۱۷۳/۹
	مقدار کاهش	-	-	۰/۱۵	۰/۳	۰/۳	۰/۴۷
پاسخ غیرخطی	۱g	۲۲۳۸۵/۶	۸۲۷۰/۱۲	۲۱۳۵۱/۸	۶۵۱۸/۶۶	۲۱۲۱۳/۱	۵۸۶۴/۳۴
	مقدار کاهش	-	-	۰/۰۴۶۲	۰/۲۱	۰/۰۵۲۴	۰/۲۹

جدول ۱۳. برش پایه برای زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل برای میراگر جرمی چندگانه بر حسب کیلونیوتن

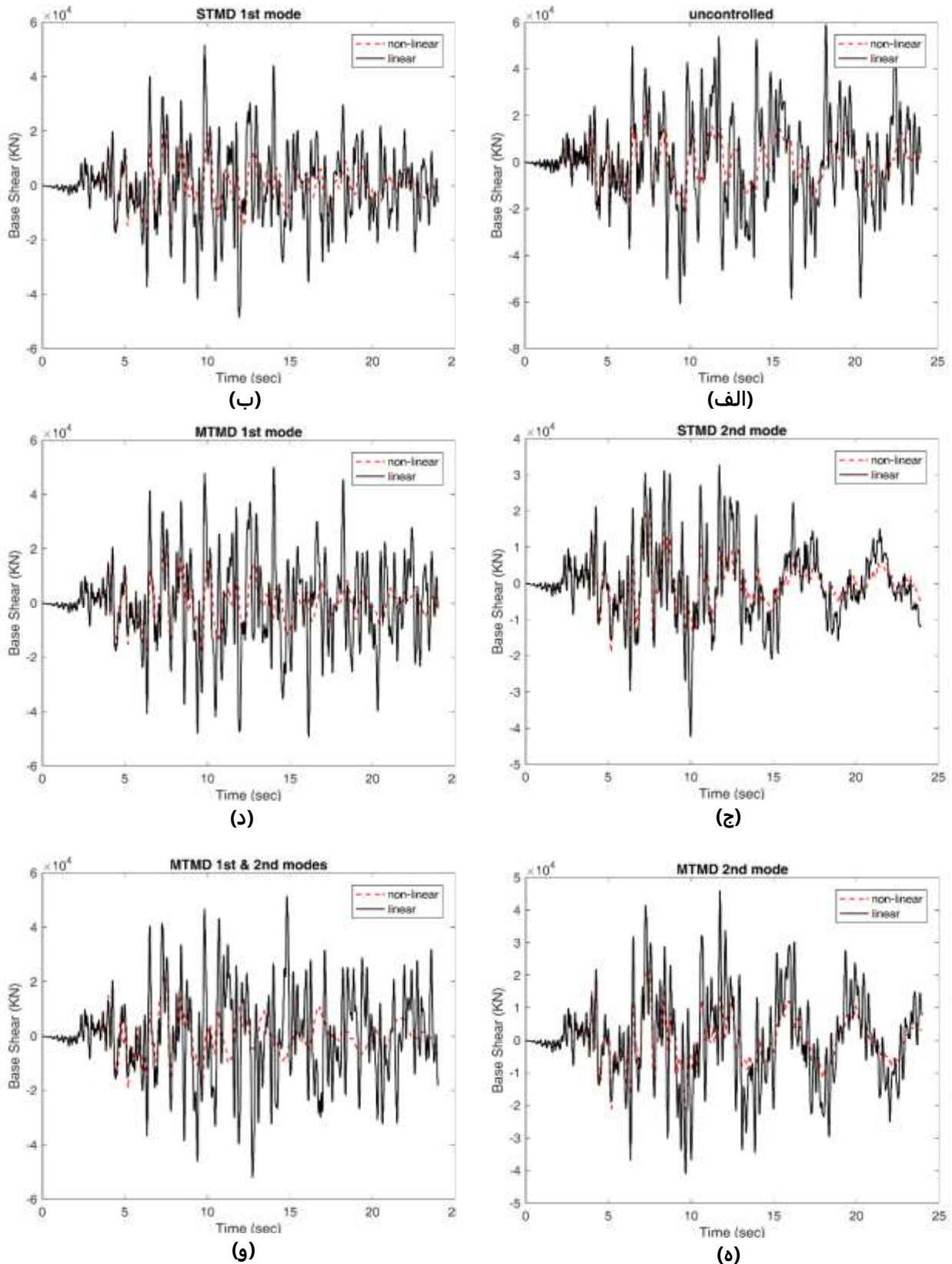
Table 13. Base shear [kN] for MTMDs under the Northridge earthquake at Beverly Hills station

	PGA	Uncontrolled	RMS	MTM D 1 st Mode	RMS	MTM D 2 nd mode	RMS	MTMD 1 st & 2 nd mode	RMS
پاسخ خطی	۱g	۶۰۷۴۳/۵	۱۹۳۳/۱	۵۰۰۸۶/۸	۱۵۶۴/۸	۴۵۹۵۴/۴	۱۳۴۴/۵	۴۳۹۴۶/۸	۱۳۲۰/۱
	مقدار کاهش	-	-	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۳	۰/۲۸	۰/۳۱
پاسخ غیرخطی	۱g	۲۲۳۸۵/۶	۸۲۷/۱۲	۲۱۴۹۰/۷	۶۷۰/۳۲	۲۲۴۴۲/۶	۶۸۹/۵۷	۲۲۴۴۷/۷	۶۲۵۱/۲۶
	مقدار کاهش	-	-	۰/۰۴	۰/۱۸	-۰/۰۰۲۵	۰/۱۶	-۰/۰۰۲۸	۰/۲۴

توجهی در برش پایه سازه می‌گردد. در این حالت با ورود به ناحیه غیرخطی و از تنظیم خارج شدن میراگرهای جرمی، میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول و میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول-دوم به ترتیب با ۱/۴ و ۰/۸ درصد کاهش متوسط برش پایه سازه بهترین عملکرد را داشته‌اند.

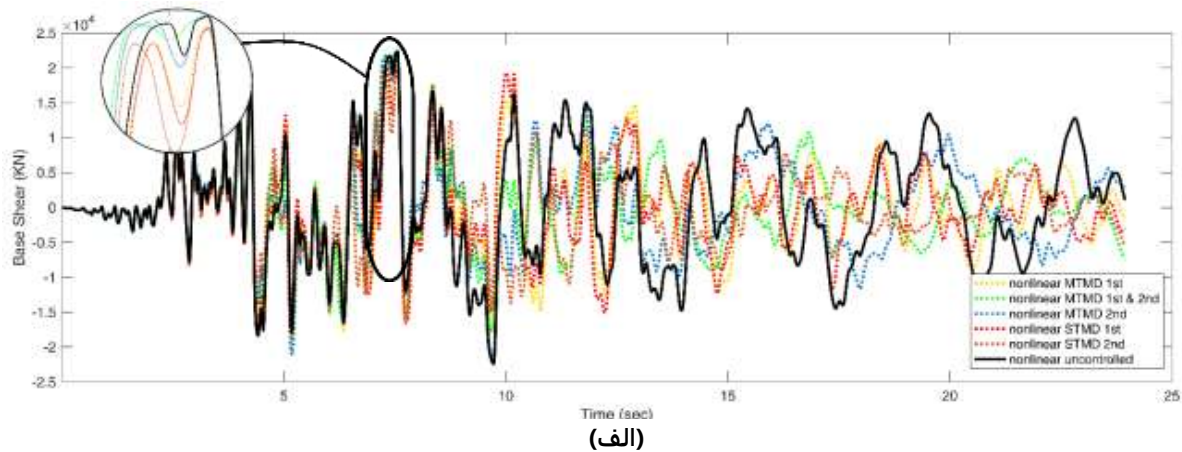
۱-۲-۶- برش پایه‌ی سازه برای زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل
با توجه به متفاوت بودن محتوای فرکانسی رکورد زلزله‌های اعمالی به منظور ارائه‌ی نحوه‌ی عملکرد هر یک از حالت‌های استفاده از میراگر جرمی به عنوان نمونه، مقادیر برش پایه مدل‌های خطی و غیرخطی سازه تحت زلزله‌ی نثریج ایستگاه بورلی هیل در حالت استفاده از میراگرهای تنظیم شونده‌ی منفرد و چندگانه به ترتیب در جداول (۱۲) و (۱۳) بر حسب کیلونیوتن گزارش شده است. در شکل (۹) نیز نمودارهای برش پایه‌ی مدل خطی و غیرخطی سازه در طول زلزله نثریج ایستگاه بورلی هیل برای حداکثر شتاب ۱g برای تمامی حالت‌ها در کنار هم رسم شده است. همانطور که مشخص است میراگر جرمی تنظیم شونده حداکثر ۳۰ درصد برش پایه را تحت این

۰/۴ درصد از میانگین برش پایه سازه تحت ۷ رکورد زلزله کاسته‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میراگر جرمی منفرد همانگونه که انتظار می‌رفت عملکرد بهتری نسبت به میراگر جرمی چندگانه در کاهش برش پایه سازه از خود نشان داده چرا که در حالت استفاده از میراگر جرمی منفرد از جرمی معادل یک درصد جرم سازه در بام سازه استفاده می‌شود که به هنگام قرار گرفتن تحت بار زلزله شتاب سازه، که در بام سازه بیشترین است، در جرم میراگر ضرب می‌شود و نیرویی در فاز مخالف حرکت سازه ایجاد می‌شود این در حالی است که وقتی از میراگر جرمی چندگانه استفاده می‌شود جرم کمتری در بام سازه، جایی که شتاب وارده به سازه بیشینه است، قرار دارد و جرم معادل یک درصد سازه در طبقات سازه توزیع شده است، لذا نیرویی به مراتب کمتر در فاز مخالف حرکت سازه ایجاد و اعمال می‌شود. الیاس و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ نیز نتایج مشابهی گرفتند هر چند که نحوه توزیع و پارامترهای طراحی آنها با کار این مقاله متفاوت است. از طرفی دیگر در مدل غیرخطی سازه با ورود آن به ناحیه غیرخطی و با در نظر گرفتن رفتار غیرارتجاعی مصالح، نیروی ورودی به سازه نمی‌تواند از حد تسلیم تجاوز نماید که منجر به کاهش قابل

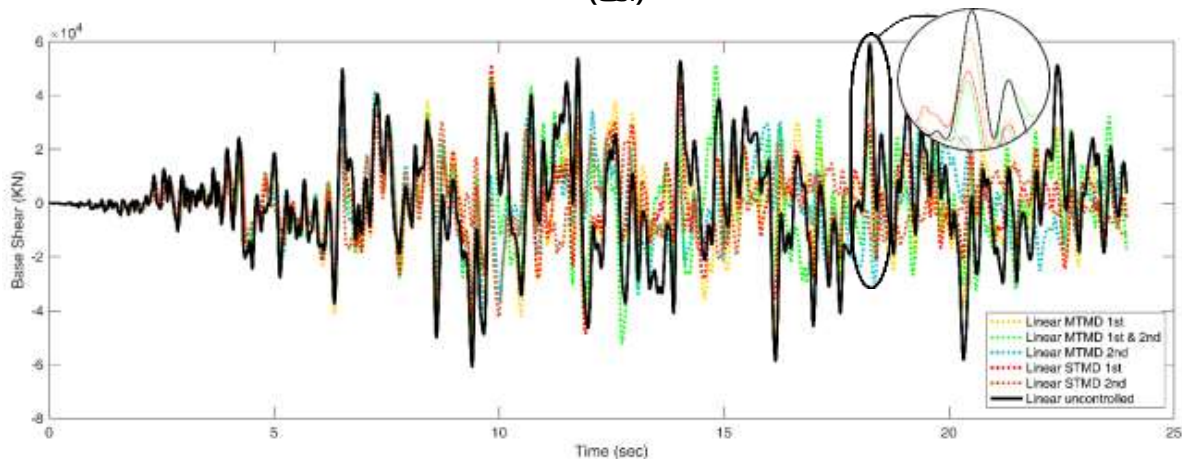


شکل ۸: برش پایه مدل خطی و غیرخطی سازه در طول زلزلهی نرتریج ایستگاه بورلی هیل در حالت‌های مختلف (الف) کنترل نشده (ب) میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول (ج) میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود دوم (د) میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول (ه) میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود دوم (و) میراگر جرمی تنظیم شونده برای مودهای اول-دوم

Fig. 8. Base shear in linear and nonlinear model of structure during the Northridge earthquake at Beverly Hills station in different conditions: (a) Uncontrolled (b) STMD designed based on 1st mode (c) STMD designed based on 2nd mode (d) MTMD designed based on 1st mode (e) MTMD designed based on 2nd mode (f) MTMD designed based on 1st & 2nd modes



(الف)



(ب)

شکل ۹. برش پایه‌ی سازه در طول زلزله‌ی نرتریج ایستگاه بوری هیل برای حداکثر شتاب (g) برای حالت‌های مختلف (الف) حالت غیرخطی (ب) حالت خطی

Fig. 9. Base shear during the Northridge earthquake at Beverly Hills station in (a) Nonlinear model (b) linear model

فرکانس تنظیم‌شده‌ی میراگر شود می‌تواند عملکرد آن را تحت تاثیر خود قرار بدهد. به طور کلی مواردی که منجر به خارج از تنظیم قرار گرفتن میراگر می‌شود به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- ۱- مواردی که فرکانس سازه را تغییر می‌دهد نظیر خطای ساخت سازه، غیرخطی شدن سازه حین زلزله و غیره.
- ۲- مواردی که فرکانس طراحی میراگر را تغییر می‌دهد نظیر خطای ساخت میراگر، مشکلاتی که به هنگام نصب میراگر به سازه ایجاد می‌شود و غیره.

از این رو در این مطالعه به منظور بررسی اثرات این تغییرات در سازه و میراگر، میراگرهای پیشین این بار با فرکانس‌هایی با مقادیر ۱۰ درصد کم‌تر و بیش‌تر از فرکانسی که ابتدا برای آن طراحی شده بودند؛ مجدد طراحی و تنظیم شدند. در جداول (۱۴) و (۱۵) نتایج مربوط به در نظر گرفتن این تغییرات و مقایسه‌ی آن‌ها با حالتی که

زلزله کاهش داده است. کاهش مقادیر RMS برش پایه در حین زلزله نیز گواهی افزایش پایداری سازه و کاهش تغییرات شدید برش پایه در حین زلزله می‌باشد.

مطابق با شکل (۸) همانطور که در بخش ۶-۲ نیز بیان گردید مقادیر برش پایه مدل غیرخطی سازه نسبت به مدل خطی آن کاهش می‌یابد. در این حالت نیز میراگر جرمی منفرد عملکرد بهتری در کاهش برش پایه سازه داشته است.

۷- نتایج اثر تغییرات فرکانس در عملکرد میراگرهای جرمی منفرد و چندگانه

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد؛ عملکرد و اثرگذاری میراگرهای جرمی در کنترل سازه‌ها به فرکانسی که برای آن تنظیم می‌شود، وابسته است. از این رو هر عاملی که سبب ایجاد تغییرات در

جدول ۱۴: مقایسه‌ی متوسط بیشینه‌ی جابه‌جایی به ازای بیشینه شتاب $1g$ با در نظر گرفتن اثر تغییر فرکانس برای میراگر جرمی منفرد

Table 14. Comparison of mean of the maximum displacement in $1g$ acceleration considering the frequency change effect for STMD

	Uncontrolled	STMD 1st mode			STMD 2nd mode		
	With out error	With out error	With 10% error	With -10% error	With out error	With 10% error	With -10% error
میانگین بیشینه جابه‌جایی (متر)	۰/۷۵۲	۰/۷۰۲	۰/۷۱۶	۰/۶۷۲	۰/۶۶۵	۰/۶۶۲	۰/۶۸
میانه بیشینه جابه‌جایی (متر)	۰/۶۹۴	۰/۶۲۸	۰/۶۱۴	۰/۶۱۵	۰/۴۵	۰/۴۳۶	۰/۴۶۲
کاهش میانگین	-	۰/۰۴۹	۰/۰۳۶	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸۹	۰/۰۷۲
کاهش میانه	-	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۳

جدول ۱۵: مقایسه‌ی متوسط بیشینه‌ی جابه‌جایی به ازای بیشینه شتاب $1g$ با در نظر گرفتن اثرات تغییر فرکانس برای میراگر جرمی چندگانه

Table 15. Comparison of mean of the maximum displacement in $1g$ acceleration considering the frequency change effect for MTMD

	Uncontrolled	MTMD 1st mode			MTMD 2nd mode			MTMD 1st & 2nd mode		
	With out error	With out error	with 10% Error	with -10% error	With out error	With 10% error	with -10% error	With out error	with 10% error	with -10% error
میانگین بیشینه جابه‌جایی (متر)	۰/۷۵۲	۰/۷۰۳	۰/۷۴۳	۰/۷۴۷	۰/۷۰۶	۰/۹۱۴	۰/۹۳۸	۰/۶۴۳	۰/۶۲۵	۰/۷۶۸
میانه بیشینه جابه‌جایی (متر)	۰/۶۹۴	۰/۶۶۳	۰/۶۰	۰/۴۹۵	۰/۴۹۷	۰/۷۱۳	۰/۷۴۹	۰/۵۸۱	۰/۳۹	۰/۶۲۱
کاهش میانگین	-	۰/۰۴۹	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۴۵	-۰/۱۶۲	-۰/۱۸۶	۰/۱۰۹	۰/۱۲۶	-۰/۰۱۶
کاهش میانه	-	۰/۰۳۱	۰/۰۹۴	۰/۱۹۹	۰/۱۹۶	-۰/۰۱۹	-۰/۰۵۴	۰/۱۱۳	۰/۲۹۶	۰/۰۷۲

میانگین برش پایه‌ی سازه‌ها در حالات مختلف برای ۷ زلزله با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

خطایی وجود ندارد، آورده شده است.

با استفاده از این نتایج میانگین جابه‌جایی‌های بام برای ۷ زلزله‌ی موجود می‌توان گفت که در مدل خطی سازه میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده بر اساس مود اول-دوم نسبت به سایر حالت‌ها رفتار مناسب‌تری از خود نشان داده‌اند و متوسط جابه‌جایی سازه با استفاده از این نوع از میراگرها ۱۴/۵ درصد کاهش یافته که حدود ۲ برابر کاهش ناشی از حالت‌های استفاده از میراگرهای منفرد تنظیم‌شده بر اساس مود اول و میراگر جرمی چندگانه‌ی تنظیم شده بر اساس مود اول یا دوم بوده است. هم‌چنین نتایج مربوط

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، کنترل ارتعاشات سازه‌ی ۴۰ طبقه تحت اثر ۷ رکورد زلزله با حداکثر شتاب $1g$ با استفاده از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی بررسی شده و میزان اثربخشی میراگرهای جرمی تنظیم‌شده منفرد و چندگانه در کاهش پاسخ سازه در برابر این زلزله‌ها به دست آمده است. مقادیر طراحی مورد نظر میراگرها شامل جرم، سختی و میرایی آن‌ها با توجه به روابط پاستیا و لوکا و با فرض رفتار ارتجاعی به دست آمده‌اند. به منظور بررسی نتایج، میانگین جابه‌جایی بام و

در میانگین و میانه بیشینه جابجایی سازه بهترین عملکرد را داشته است. پس از آن میراگر جرمی منفرد تنظیم شده براساس مود دوم با $۸/۹$ و ۲۵ درصد کاهش در میانگین و میانه بیشینه جابجایی سازه بهترین عملکرد و میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده براساس مود دوم با $۱۸/۶$ و $۵/۴$ درصد افزایش در میانگین و میانه بیشینه جابجایی سازه بدترین عملکرد را داشته اند.

مراجع

- [1] H. Frahm, Device for damping vibrations of bodies, US989958A Patent, 1911.
- [2] L.A. Bergman, D.M. McFarland, J.K. Hall, E.A. Johnson, A. Kareem, Optimal distribution of tuned mass dampers in wind sensitive structures, Structural safety and reliability: proceedings of ICOSSAR'89, the 5th international conference on structural safety and reliability, New York (NY), USA 1989, pp. 95-102.
- [3] J. Wu, G. Chen, Optimization of multiple tuned mass dampers for seismic response reduction, The American control conference, Chicago, Illinois (IL), USA 2000, pp. 519-523.
- [4] G. Chen, J. Wu, Optimal placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), 127(9) (2001) 1054-1062.
- [5] F. Petit, M. Loccufer, D. Aeyels, On the attachment location of dynamic vibration absorbers, Journal of Vibration and Acoustics, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 131(3) (2009) 1-8.
- [6] K.S. Moon, Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: Performance analysis and preliminary design, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19(3) (2010) 347-366.
- [7] T.S. Fu, E.A. Johnson, Control strategies for a distributed mass damper system, American control conference (ACC2009), Saint Louis, Missouri (MO), USA, 2009.
- [8] T.S. Fu, E.A. Johnson, Distributed mass damper system for integrating structural and environmental controls in buildings, Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers (ASCE), 137(3) (2011) 205-213.

به بیشینه‌ی جابه‌جایی در زلزله‌ی نثریج ایستگاه بوری هیل نشان می‌دهد که با توجه به کاهش مقادیر RMS، وجود میراگرهای جرمی سبب ایجاد ثبات در عملکرد سازه شده است. در این زلزله نیز میراگر جرمی چندگانه تنظیم‌شده بر اساس مود اول-دوم بیش‌ترین کاهش بیشینه‌ی جابه‌جایی و RMS را داشته است. این نوع از میراگرها تغییر چندانی در برش پایه‌ی سازه به وجود نیاورده‌اند لیکن میراگرهای جرمی منفرد تنظیم شده بر اساس مود دوم با حدود ۱۸% و میراگر جرمی چندگانه‌ی تنظیم‌شده بر اساس مود اول-دوم بهترین عملکرد را داشته‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت با توجه به رفتار غیرخطی مصالح، تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی تحت ۷ رکورد زلزله بر روی مدل غیرخطی سازه موردنظر نیز موجب کاهش پاسخ شد. در این حالت با تشکیل مفاصل پلاستیک و ورود سازه به ناحیه رفتار غیرخطی، سطح نیرو در اجزای سازه از حد تسلیم فراتر نمی‌رود لذا منجر به کاهش پاسخ‌های سازه و مقادیر برش پایه نسبت به پاسخ‌های مدل خطی می‌گردد. علاوه بر این عملکرد میراگرها در کاهش پاسخ‌های مدل غیرخطی سازه، با توجه به فرض رفتار ارتجاعی در تنظیم مقادیر طراحی آن‌ها، به طور متوسط ۲۲ درصد تغییر یافته است؛ به طوری که میراگرهای جرمی منفرد تنظیم شده برای مود دوم، اول و میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول-دوم به ترتیب با $۸/۸$ ، $۸/۴$ و $۸/۱$ درصد کاهش میانگین پاسخ‌های سازه تحت ۷ رکورد زلزله بهترین عملکرد و میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود دوم و اول به ترتیب با $۵/۹$ و $۷/۶$ درصد کاهش میانگین پاسخ‌های سازه بدترین عملکرد را داشته‌اند. میراگر جرمی منفرد تنظیم شده برای مود اول و میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده برای مود اول-دوم با ورود سازه به ناحیه غیرخطی و از تنظیم خارج شدن میراگرهای جرمی، به ترتیب با $۱/۴$ و $۰/۸$ درصد کاهش متوسط برش پایه سازه بهترین عملکرد را داشته‌اند.

از سوی دیگر به منظور بررسی اثرات تغییرات فرکانس تنظیم‌شده‌ی میراگر، میراگرها با استفاده از روابط ارائه شده در این مقاله مجدداً برای فرکانس ۱۰ درصد کم‌تر و بیش‌تر از فرکانس اصلی طراحی آن‌ها، تنظیم و طراحی شده‌اند. بررسی نتایج مربوط به میانگین و میانه جابه‌جایی‌ها در این حالت نشان می‌دهد که با تغییرات فرکانس طراحی میراگرها میراگر جرمی چندگانه تنظیم شده براساس مود اول-دوم با $۱۲/۶$ و $۲۹/۶$ درصد کاهش به ترتیب

- 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.
- [18] J. Salvi, E. Rizzi, Optimum earthquake-tuned TMDs: Seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101 (2017) 67-80.
- [19] A. Bayat, Beiranvand, P. and Ashrafi, H.R., Vibration control of structures by multiple mass dampers, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 12(3) (2018) 461-471.
- [20] S.Y. Kim, L. C.H., Optimum design of linear multiple tuned mass dampers subjected to white noise base acceleration considering practical configurations, *Engineering Structures*, 171 (2018) 516-528.
- [21] M. Hussan, Rahman, M.S., Sharmin, F., Kim, D. and Do, J., Multiple tuned mass damper for multi-mode vibration reduction of offshore wind turbine under seismic excitation, *Ocean Engineering*, 160 (2018) 449-460.
- [22] M.H. Stanikzai, Elias, S., Matsagar, V.A. and Jain, A.K., Seismic response control of base-isolated buildings using multiple tuned mass dampers, *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(3) (2019)
- [23] M.Y. Liu, Chiang, W.L., Chu, C.R., Lin, S.S., Analytical and experimental research on wind-induced vibration in high-rise buildings with tuned liquid column dampers, *Wind and Structures*, 6(1) (2003) 71-90.
- [24] J.J. Connor, An introduction to structural motion control, Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall Pearson Education, 2001.
- [25] C. Pastia, S.G. Luca, Vibration control of a frame structure using semi-active tuned mass damper, *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 59(4) (2013) 31.
- [9] G. Bekdaş, S.M. Nigdeli, Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search, *Engineering Structures*, 33(9) (2011) 2716-2723.
- [10] A. Farshidianfar, S. Soheili, Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 51 (2013) 14-22.
- [11] P. Xiang, A. Nishitani, Seismic vibration control of building structures with multiple tuned mass damper floors integrated, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(6) (2014) 909-925.
- [12] S. Elias, V. Matsagar, Wind response control of a 76-storey benchmark building installed with distributed multiple tuned mass dampers, *Journal of Wind and Engineering*, 11(2) (2014) 37-49.
- [13] M.S. Rahman, Hassan, M.K., Chang, S. and Kim, D., Adaptive multiple tuned mass dampers based on modal parameters for earthquake onset reduction in multi-story buildings, *Advances in Structural Engineering*, 20(9) (2016) 1375-1389.
- [14] Y.M. Kim, You, K.P., Paek, S.Y. and Nam, B.H., Multiple tuned mass dampers for wind-excited tall building, *International Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*, CRC Press., Incheon, South Korea, 2016, pp. 69-74.
- [15] S. Elias, V. Matsagar, T.K. Datta, Effectiveness of distributed tuned mass dampers for multi-mode control of chimney under earthquakes, *Engineering Structures*, 124 (2016) 1-16.
- [16] S. Elias, V. Matsagar, T.K. Datta, Distributed tuned mass dampers for multi-mode control of benchmark building under seismic excitations, *Journal of Earthquake Engineering*, (2017).
- [17] S.R. Trisnanto, Ayu, M.A. and Tamarany, R.,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Akhlagh Pasand, A.H. Fatollah Pour, S.M. Zahrai, Comparing performance of TMD and MTMD vertically distributed in height for multi-modal seismic control of tall buildings, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) (2021) 2563-2582.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15584.5959](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15584.5959)



