

بررسی مقایسه‌ای استفاده از TMD و FTMD در سازه‌های برشی

جهت کاهش دامنه ارتعاشات جانبی

مسعود محمودآبادی^{۱*}، حسین حسینی^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم

خلاصه:

در این مقاله عملکرد سازه‌های برشی مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم شده و میراگرهای جرمی اصطکاکی تنظیم شده در برابر زلزله های حوزه نزدیک و دور و همچنین تحت موج سینوسی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بدین منظور چهار ساختمان برشی در نظر گرفته شدند و تحلیل‌های دینامیکی در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده با استفاده از بیست رکورد زلزله حوزه دور و بیست رکورد زلزله حوزه نزدیک و همچنین تحت رکورد سینوسی بر روی آنها انجام گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که کاهش پاسخ در ساختمانهای بلند، در زلزله حوز دور از زلزله حوزه نزدیک بیشتر است. همچنین میراگر جرمی تنظیم شده عملکرد بهتری در مقایسه با میراگر جرمی اصطکاکی تنظیم شده در کاهش پاسخ ها دارد.

کلمات کلیدی: سازه های برشی، میراگر جرمی تنظیم شده، میراگر جرمی اصطکاکی تنظیم شده

Comparative Study of the Use of TMD and FTMD in Multi-story Shear Structures to Reduce the Amplitude of Vibrations Caused by Sinusoidal and Earthquake Loading

Abstract:

In this paper, the performance of shear structures equipped with tuned mass dampers and tuned friction mass dampers against near-field and far-field earthquakes as well as under sine wave has been evaluated and compared. For this purpose, four shear buildings were considered and dynamic analyses were performed on them in two controlled and uncontrolled modes using twenty far-field earthquake records and twenty near-field earthquake records as well as under sine wave records. The results showed that the response reduction in tall buildings is greater in far-field earthquakes than in near-field earthquakes. Also, the tuned mass damper has a better performance compared to the tuned friction mass damper in reducing responses.

Keywords: Shear building , Tuned mass damper , Friction tuned mass damper

۱- مقدمه:

از جمله ملاک‌های پیشرفت و ترقی در هرکشوری می‌توان به سازه‌ها و ساختمان‌های آن اشاره کرد که جلوه آن را می‌توان در برج‌ها و آسمان‌خراش‌ها یافت. این سازه‌ها، ممکن است بنا به ضرورت‌های خاص فنی و مهندسی و یا به دلایل دیگر همچون: تبدیل شدن به نماد شهر، هویت بخشیدن به یک منطقه، جذب گردشگر و یا نمودی از قدرت نمایی پدید آمده باشند. این سازه‌ها همواره در معرض زلزله و یا نیروی باد قرار داشته و برای پایداری در برابر بارهای دینامیکی باید به دنبال راه حل بود. مدل کردن این سازه‌ها به صورت یک سازه برشی^۱ گرچه با ساده سازی‌هایی همراه است و به نوعی یک سازه ایده آل تلقی می‌شود، ولی برای درک بهتر رفتار سازه و تعیین پارامترهای لازم برای اهداف مقاوم سازی و بهسازی سودمند بوده و در پایان نیز نتایج بدست آمده قابل استفاده هستند.

یکی از راهکارهای پیشنهادی که مفید واقع شده استفاده از ابزارهایی است که نیروی جانبی را مستهلک کرده و بدین ترتیب سازه شرایط بهتری را در طی این رخدادها تجربه می‌کند. میراگر جرمی تنظیم شده^۲ (TMD) و میراگر جرمی اصطکاکی تنظیم شده^۳ (FTMD) از این دست ابزارها هستند که به سازه متصل شده و در خلال رویدادهای ارتعاشی، ایمنی و آرامش را برای سازه و ساکنین به ارمغان می‌آورد. ارتعاشات ایجاد شده در سازه‌ها که به سبب زلزله یا نیروی باد اتفاق می‌افتد را می‌توان با روشهای گوناگونی از جمله تغییرات در سختی، جرم، میرایی و شکل سازه و یا به وسیله فراهم کردن نیروهای مخالف فعال و یا غیرفعال کنترل کرد. رویکرد سنتی و قدیمی، افزایش مقاومت سازه و بالا بردن ظرفیت اعضا می‌باشد که این کار در سازه‌های بلند کارگر نیست. در نتیجه مهندسان برای کاستن اثرات زلزله و بهبود پایداری سازه‌ها در برابر عوامل تحریک، به گسترش سیستم‌هایی به عنوان سیستم ثانویه که به سیستم اصلی متصل می‌گردد، علاقه‌مند شدند. اگرچه استفاده از ابزارهای کنترل سازه پرهزینه است و نیازمند دانش بالایی بوده، اما باید به مزایای آن که شامل: بهینه تر شدن مقاطع و کاهش هزینه‌های ساخت در سیستم اصلی و همچنین استفاده بی وقفه و عدم تعطیلی سازه בעلت تعمیرات پس از واقعه می‌باشد، اشاره کرد. یک مسئله مهم و قابل ملاحظه

در طراحی سازه‌های مهندسی عمران، کاهش کمیت‌های پاسخ سازه همانند سرعت، تغییرمکان و شتاب تحت تاثیر بارهای دینامیکی خصوصاً زلزله و بارگذاری باد است. روش‌های کنترل سازه جزء استراتژی‌هایی برای رسیدن به هدف مذکور می‌باشد که در قالب کنترل فعال^۴، کنترل غیرفعال^۵، کنترل نیمه فعال^۶ و کنترل مرکب یا هیبرید^۷ خودنمایی می‌کند. در سه دهه اخیر مسئله کنترل سازه‌ها در مقابل بارهای محیطی مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) جزء قدیمی ترین وسیله کاهش ارتعاش سازه در مقابل بارهای دینامیکی محیطی هستند. علاوه بر این نیز، میراگرهای اصطکاکی جرمی (FTMD) نیز رقیبی برای میراگرهای جرمی محسوب می‌شوند.

به طور کلی دستگاه‌های کنترل غیرفعال انرژی ورودی به یک سازه را تلف کرده یا جذب می‌کنند که آنها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: دستگاه‌های اتلاف انرژی، که مستقل از فرکانس‌های طبیعی سازه بوده و، دستگاه‌های تنظیم شده یا رزونانسی که وابسته به فرکانس‌های طبیعی هستند. اکثر دستگاه‌های اتلاف انرژی معروف مانند: میراگر اصطکاکی، میراگر هیستریزس، میراگر ویسکوالاستیک بر اساس اصولی مانند لغزش اصطکاکی، تبدیل فاز در فلزات، تغییر شکل جامدات ویسکوالاستیک عمل می‌کنند. دسته دوم شامل میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)، میراگر اصطکاکی جرمی (FTMD) میراگر مایع تنظیم شده^۸ (TLD)، میراگر ستون‌های مایع تنظیم شده^۹ (TLCD)، میراگر جرمی آونگی معلق و غیره است که سیستم‌های TMD و TLD از نظر تئوری، عددی و تجربی عمدتاً برای کنترل ارتعاشات ورودی باد به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از جمله مزایای کنترل سازه به روش غیرفعال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

-سادگی: کنترل غیرفعال معمولاً ساده تر از کنترل فعال است و روش‌های طراحی ساده تری دارد.

-هزینه: کنترل غیرفعال معمولاً هزینه کمتری نسبت به کنترل فعال دارد. (هزینه طراحی، ساخت و نگهداری)

-عدم نیاز به انرژی خارجی مثل برق (منبع تغذیه)

⁶ Semi-active Control

⁷ Hybrid Control

⁸ Tuned Liquid Damper

⁹ Tuned Liquid Column Damper

¹ Shear structure

² Tuned Mass Damper

³ Friction Tuned Mass Damper

⁴ Active Control

⁵ Passive Control

۲- تاریخچه و سوابق پژوهش :

از زمان کار فرام [1] در سال ۱۹۰۹، که سیستم TMD را بعنوان جاذب ارتعاش معرفی کرد، محققان بسیاری مسئله طراحی بهینه سیستم TMD را مورد مطالعه قرار داده‌اند [2-4]. ایده اصلی فرام، افزودن یک جرم اضافی با دوره تناوب یکسان به جرم اصلی بود که با آن در شرایط تشدید به صورت ناهمافز ارتعاش می‌کند و بدین صورت، از حرکت سازه اصلی کاسته می‌شود. در سال ۱۹۴۰، دن هارتوگ [5] سیستم کامل‌تری که از جرم، فنر و میرایی تشکیل شده بود، برای جرم ثانویه در نظر گرفت که به سازه اولیه بدون میرایی متصل شده بود. راه حل کامل ریاضی برای تنظیم بهینه پارامترهای دخیل توسط تسای و لین [6] ارائه شد که به صورت یک سیستم اصلی جرم-فنر-میراگر به همراه یک سیستم ثانویه جرم-فنر-میراگر را شامل می‌شد. روش دیگری توسط ویلاورد و کویاما آغاز شد [7] که از نظریه میرایی غیر کلاسیک برای محاسبه میرایی کلی استفاده می‌کرد. چند سال بعد، ویلاورد و همکارانش [7-8] این نظریه را در یک آزمایش با استفاده از یک سیستم جداسازی سقف برای ساختن نمونه‌ای از یک TMD به کار بردند. مطالعه آزمایشگاهی شامل یک سازه قابی بر روی میز لرزان به همراه صفحه فوقانی بعنوان سقف بود که بر فنرها و یاتاقان‌های لاستیکی چندلایه متکی بود. صادق و همکارانش [9] نیز از همین استراتژی برای دستیابی به پارامترهای طراحی بهینه استفاده کردند. علاوه بر این، آنها تجزیه و تحلیل‌هایی را برای اثبات اثربخشی لرزه‌ای در کاهش جابجایی و شتاب انجام دادند که مدعی شدند نتایج خوبی را به دنبال داشته است. در سال ۱۹۹۸، رانا و سونگ [10] یک مطالعه پارامتری با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های هارمونیک و تاریخچه زمانی برای درک اثر ناهماهنگی فرکانس انجام دادند. نوع متفاوتی از طراحی بهینه توسط ستین و آیدین [11] ارائه شد که از رویکرد تابع انتقال و برخی الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌کرد. جانگید و داتا [12] و آلمان و همکاران [13]، استفاده از TMD را برای تعادل پیچشی یک سازه نامتقارن مطالعه کردند. سوتو-بریتو و رویز [14]، پاسخ غیرخطی یک ساختمان بتن مسلح ۲۲ طبقه مجهز به TMD را مورد بررسی قرار دادند. لوکوناپراسیت و وائیکورکول [15]، عملکرد TMD را بر روی ساختمانی که در معرض حرکات زمین ناشی از زلزله‌های با فاصله کانونی زیاد بود و محتوای فرکانسی‌ای نزدیک به فرکانس سازه اصلی داشت را مورد مطالعه قرار دادند. پینکائو و همکاران [16] شبیه‌سازی‌های عددی را بر روی یک ساختمان بتن مسلح ۲۲ طبقه تحت رکورد زلزله مکزیکوسیتی ۱۹۸۵ انجام دادند. این ساختمان با یک سیستم یک درجه آزاد غیرالاستیک معادل مدل‌سازی شده بود. مطالعه

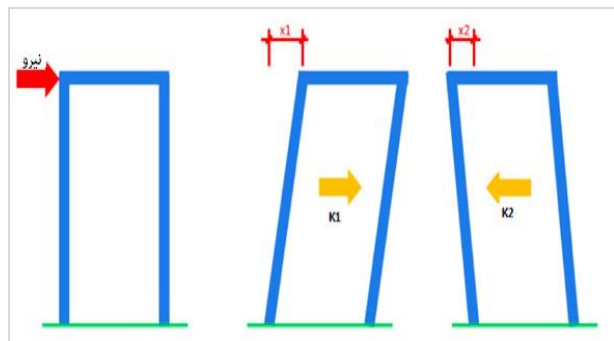
مشابه‌ای توسط اسگوبا و مارانو [17] انجام شد که یک سیستم یک درجه آزاد را که توسط مدل هیستریک بوک-ون توصیف شده بود را مورد بررسی قرار می‌داد. در حالی که تحقیقات گسترده‌ای در مورد طراحی بهینه TMD های مرسوم انجام شده است، لازم به ذکر است که تعداد فزاینده‌ای از مقالات با تمرکز بر میراگرهای جرمی تنظیم‌شده با نسبت جرمی بزرگ وجود دارد. از جمله کارهای قابل توجه در این زمینه می‌توان به هاشیموتو و همکاران (۲۰۱۵) در مورد ساختمان‌هایی با جداسازی پایه مجهز به TMD های با نسبت جرمی بزرگ [18]، یین و همکاران (۲۰۱۹) در مورد حذف ارتعاش با استفاده از TMD های ضربه‌ای چندگانه [19]، کاوه و همکاران (۲۰۲۰) در مورد مقایسه الگوریتم‌های H₂ و H_∞ برای طراحی TMD تحت حرکات زلزله نزدیک گسل و دور از گسل اشاره کرد [20]. علاوه بر این، چارالامپاکیس و همکاران [21] مفهوم جدیدی از کاهش جرم برای کاهش خطر لرزه‌ای با استفاده از «دال‌های شناور» که از نظر لرزه‌ای از سیستم سازه‌ای اصلی ساختمان جدا شده‌اند، بررسی کردند. این دال‌ها دو هدف را دنبال می‌کنند: عمل به عنوان یک سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شده برای پاسخ کلی سازه و ارائه حفاظت لرزه‌ای برای اجزای خود؛ در نتیجه به طور مؤثری سبب کاهش جرم لرزه‌ای سازه خواهد شد. وانگ و جانسون [22] اثربخشی چندین میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) را در افزایش عملکرد سازه‌ای غیرالاستیک تحت شرایط لرزه‌ای بررسی کردند که نتیجه این مطالعه، بدست آوردن دوره‌های تناوب تنظیم بهینه و محل قرارگیری TMD برای به حداقل رساندن اتلاف انرژی پلاستیک بود.

در یکی از ابتدایی‌ترین مطالعات بر روی FTMD ها، اینائودی و کلای [23]، یک ابزار اصطکاکی مکانیکی را که به یک سیستم میراگر جرم-فنر متصل شده بود، مورد بررسی قرار دادند. به دنبال آن، ریکاردلی و ویکری [24] پاسخ حالت پایدار TMD ها را بر روی سازه‌های SDOF با شرایط سختی خطی و اصطکاک خشک با استفاده از بارهای هارمونیک مطالعه کردند. آنها همچنین به معرفی عباراتی به صورت فرم بسته برای تعیین پارامترهای بهینه FTMD به منظور به حداقل رساندن جابجایی‌های سازه‌ای سیستم‌های تحت نیروهای هارمونیک پرداختند. به طور مشابه، لی و همکارانش [25] یک میراگر با اجزای اصطکاکی پیشنهاد کردند. این میراگر شامل یک میراگر اصطکاکی بود که در آن استهلاک انرژی از طریق اصطکاک لغزشی فراهم می‌گشت و نیز یک میراگر جرم-فنر که انرژی را با حرکت خارج از فاز خود اتلاف می‌کرد. FTMD های نیمه فعال نیز با استفاده از آزمایش‌های میز لرزان [26] مورد مطالعه قرار گرفتند که اثربخشی FTMD ها را در کاهش ارتعاشات سازه‌های

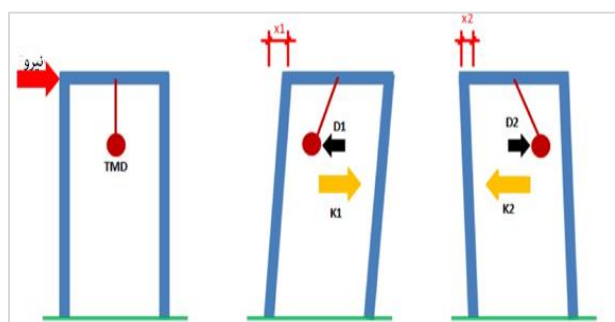
افزون بر این، تحقیقات محدودی سیستم‌های MDOF را با رکوردهای حرکت زمین متعدد بررسی کرده‌اند. در این پژوهش ۴ سازه‌ی برشی با تعداد طبقات ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه در نظر گرفته خواهد شد. دوره تناوب اصلی ارتعاش این سازه‌ها با استفاده از رابطه $T_n = \frac{N}{10}$ محاسبه گردید. سیستم‌های MDOF در نرم‌افزار OpenSees شبیه‌سازی می‌شوند و در ادامه ۲۰ رکورد حوزه دور و ۲۰ رکورد حوزه نزدیک و همچنین یک رکورد سینوسی منطبق بر فرکانس اصلی سازه اعمال گردید و پاسخ آنها در برابر این رکوردها محاسبه شد. در گام بعدی حداکثر مقدار تغییر مکان نسبی طبقات، حداکثر شتاب طبقات، حداکثر تغییر مکان طبقه بام و نیز حداکثر برش پایه بعنوان پارامترهای کلیدی و مهم محاسبه گردید. سپس در تراز بام این سازه‌ها یکبار TMD و بار دیگر FTMD نصب گردید و این رکوردها دوباره به آن اعمال گردید. پارامترهای TMD شامل: نسبت فرکانسی، نسبت جرمی و ضریب میرایی بوده که بازه‌ی گسترده‌ای برای آنها در نظر گرفته شد. همچنین پارامترهای های مهم FTMD نیز شامل: نسبت فرکانسی، نسبت جرمی و ضریب اصطکاک می‌باشد که برای این ۳ پارامتر نیز محدوده وسیعی لحاظ شده است. در نهایت ۵۴۰ مجموعه تحلیل با تجهیز TMD و ۸۱۰ مجموعه تحلیل با تجهیز FTMD انجام گردید و نتایج: حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات، حداکثر شتاب، حداکثر برش پایه و حداکثر تغییر مکان طبقه بام محاسبه گردید و در مجموع ۱۲۹۰ نمودار بر اساس پارامترهای ابزار به کار رفته در TMD و FTMD برای آنها حاصل شد. با توجه به مقالات بررسی شده در این زمینه، این چنین کاری به این جامعیت و گستردگی انجام نشده که این موضوع می‌تواند نوآوری و خلاقیت این پژوهش قلمداد شود. در هر دو بخش مقاله، اثربخشی TMD و FTMD در کنترل مقادیر حداکثر برای: جابجایی نسبی طبقات، برش پایه، شتاب طبقات و جابجایی طبقه بام برای سیستم قاب برشی مطالعه و مقایسه می‌شود. از آنجا که خروجی های بدست آمده بصورت تصویری (گراف و نمودار) بوده، این امکان را میسر می‌سازد که نتایج به صورت تحلیلی و تفسیری به صورت همه جانبه، و بررسی از چند جهت گوناگون (مشابه با دستورالعمل ونشریه ها) مهیا شود که به نوبه خود می‌تواند منجر به روش‌های طراحی کارآمدتر و گسترده‌تر TMD و FTMD به منظور کنترل سازه‌ها گردد.

SDOF نشان می‌داد. گیوی و واسو [27] یک راه حل دوره‌ای با استفاده از تعادل هارمونی برای سازه‌هایی مجهز به FTMD که تحت تحریکات هارمونیک قرار داشتند، پیشنهاد کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که یک ضریب اصطکاک بهینه وجود دارد که با جذر میانگین مربعات پاسخ جابجایی سازه اصلی مرتبط است. آنها همچنین دریافتند که شدت تحریکات بر اثربخشی FTMD ها تأثیر می‌گذارد و در نتیجه، ضریب اصطکاک FTMD ها باید تغییر کند تا به طور مؤثر به عنوان یک سیستم کنترل نیمه فعال استفاده شوند. پیسال و جانگید [28] معادلات حرکت را استخراج و آنها را با روش حالت پایدار حل کردند. همچنین آنها به صورت پارامتری اثرات FTMD ها را بر روی سازه‌های SDOF که در معرض رکوردهای هارمونیک و حرکت زمین قرار دارند، بررسی کردند. در مطالعه بعدی، پیسال و جانگید [29] یک تحلیل پارامتری بر روی یک ساختمان برشی پنج طبقه متصل به FTMD های تکی و چندگانه انجام دادند. در مقایسه با FTMD های تکی با جرم یکسان، FTMD های چندگانه در کنترل پاسخ سازه مؤثرتر بودند. ماتا [30] همچنین از یک مکانیزم اصطکاکی بر روی یک میراگر جرمی پاندول دو جهته استفاده کرد. نشان داده شد که چنین سیستمی یک مزیت اساسی (نسبت به سیستم‌های اصطکاکی مرسوم) ایجاد می‌کند، زیرا نسبت میرایی معادل آن مستقل از دامنه نوسانات باقی می‌ماند. کارمونا و همکارانش [31] یک میراگر جرمی تنظیم‌شده با میرایی اصطکاکی را برای کنترل ارتعاشات بیش از حد سیستم کف پیشنهاد کردند. کیم و لی [32] با اتخاذ یک تکنیک خطی‌سازی آماری، پاسخ تصادفی سیستم‌های SDOF با چندین FTMD را تحت شتاب‌های نویز سفید بررسی کردند. به همین ترتیب، سلیمی و همکارانش [33] نشان دادند که FTMD ها در کاهش جابجایی‌های سقف نسبت به TMD ها مادامی که نسبت جرمی کمتر از ۰/۳ بود، مؤثرتر هستند. اخیراً، بشارتیان و همکارانش رویکرد جدیدی را برای تخمین پارامترهای بهینه FTMD ها با استفاده از الگوریتم PSO ارائه کردند که در کنترل جابجایی‌های سیستم‌های SDOF تحت رکوردهای لرزه‌ای زمین بسیار مؤثر بوده است. در مقایسه با روش‌های قبلی، الگوریتم جدید PSO جابجایی سیستم‌های SDOF را به طور متوسط ۲۱٪ کاهش داد. با این حال، بشارتیان و همکارانش [34] به اثبات رسانیدند که سیستم‌های SDOF ساده نمی‌توانند به طور کامل سازه‌های قابی را نمایش دهند، زیرا اثرات مود بالاتر می‌تواند به طور قابل توجهی بر پاسخ آنها تأثیر بگذارد، به خصوص اگر از زلزله‌های واقعی در تحلیل و یا طراحی استفاده شوند.

۳- میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)



شکل (۱): ارتعاش آزاد یک ساختمان در اثر بار ضربه‌ای به صورت شماتیک



شکل (۲): ارتعاش آزاد یک ساختمان با TMD در اثر بار ضربه‌ای به صورت شماتیک

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) یکی از متداول ترین و گسترده ترین ابزار استفاده شده به منظور کنترل ارتعاش در مهندسی عمران و مکانیک بوده که دامنه کاربرد آن از ماشین های دورانی کوچک تا سازه های بلند توسعه یافته است. (TMD) دستگاهی متشکل از جرم، فنر و میراگر است که به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه به سازه متصل می شود. هدف اصلی این میراگر کاهش پاسخ اصلی سازه از طریق تنظیم کردن یک جرم ارتعاشی اضافی به منظور نزدیک کردن فرکانس به فرکانس تشدید سازه اصلی می باشد. بدین صورت که ارتعاش سازه اصلی سبب ارتعاش میراگر به صورت ناهم فاز و در خلاف جهت با حرکت سازه در شرایط تشدید میگردد و بدین گونه ارتعاش از طریق میرایی میراگر مستهلک شده و انرژی وارد شده از طریق نیروی اینرسی میراگر به سازه تلف می شود. این میراگرها در محلی از سازه، که معمولاً دارای بیشترین تغییر مکان می باشد (نظیر بام سازه)، قرار می گیرند. با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده می توان آسایش ساکنین را در برابر ارتعاشات لرزه ای تامین و از خسارات یا گسیختگی سازه ای جلوگیری کرد.

۳-۱ مکانیزم TMD

در تئوری، هدف اصلی یک TMD این است که به عنوان یک "ضد عامل تحریک" عمل کند و انرژی جنبشی ایجاد شده در طول تحریک ساختمان را جذب کند. هنگامی که سازه شروع به نوسان می کند، به سبب آن انرژی جنبشی $K1$ تولید می شود و TMD ای که در شکل (۲) به صورت آونگ در نظر گرفته شده است به حرکت درمی آید و با نیروی متقابل ($D1$) ساختمان را به سمت مخالف سوق میدهد. سناریوی مشابه زمانی اتفاق می افتد که ساختمان در جهت دیگر تاب بخورد ($K2$ در مقابل $D2$). در نتیجه، با مقایسه دو شکل بالا می توان مشاهده کرد که جابجایی های $x1$ و $x2$ برای شکل شماتیک دوم کوچکتر از شکل شماتیک اول است. این نتیجه به دلیل نیروی متقابل بوجود آمده توسط TMD است. اگر دوره تناوب ارتعاش آزاد آونگ با دوره تناوب ارتعاش آزاد سازه یکسان باشد، تجربه نشان داده است که بهترین کارایی را TMD خواهد داشت و باعث می شود نوسان سازه در یک بازه زمانی کوتاه تری متوقف شده و سریع تر به حالت تعادل استاتیکی خود بازگردد.

شکل (۱) یک سازه معمولی بدون TMD را نشان می دهد. هنگامی که یک نیروی جانبی به صورت ضربه ای به سازه اعمال می شود، ساختمان دچار تحریک شده و به اندازه $x1$ به سمت راست جابجا می شود. نیروی ضربه ای به نیرویی اطلاق می شود که مدت زمان اعمال آن به سازه در مقایسه با دوره تناوب ارتعاش طبیعی سازه اندک (کمتر یا مساوی با یک دهم دوره تناوب سازه) باشد. پس از بازگشت به وضعیت اولیه، سازه یک جابجایی دیگر ($x2$) در سمت چپ را تجربه میکند. در تئوری، $x1$ بزرگتر از $x2$ و $x2$ بزرگتر از جابجایی بعدی نوسان بعدی ($x3$) خواهد بود. این موضوع به دلیل وجود میرایی ذاتی در ساختمان است. مدت زمانی که طول می کشد تا ساختمان یک دور نوسان را کامل کند (از چپ به راست و سپس از راست به چپ) به اصطلاح "دوره تناوب" سازه است. این بدان معناست که هر چه دوره تناوب بیشتر باشد، مدت زمان بیشتری طول می کشد تا ساختمان به موقعیت اولیه خود بازگردد. اینجاست که احساس ناراحتی بوجود می آید؛ چرا که ساکنان ساختمان به دلیل زمان قابل توجه نوسان ساختمان، حرکت ساختمان را احساس می کنند. حال اگر یک TMD را به همان سازه اضافه کنیم نمودار شماتیک جدید به صورت شکل (۲) خواهد بود:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_s + \mathbf{M}_d \quad (2)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_s + \mathbf{C}_d \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_d \quad (4)$$

که اندیس S نشان دهنده مقادیر برای سازه اصلی و اندیس d نشان دهنده مقادیر برای TMD بوده و در روابط بالا $\mathbf{M}_s$ ، $\mathbf{K}_s$ و $\mathbf{C}_s$ ؛ $\mathbf{M}_d$ ، $\mathbf{K}_d$ و $\mathbf{C}_d$ به ترتیب نشان دهنده ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی برای سازه اصلی و TMD می‌باشد.

$$\mathbf{M} = \text{diag} [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_N \ m_d] \quad (5)$$

در معادله (5)، برای یک سازه N طبقه؛ مقادیر m_i جرم طبقه i ام در معادله (5)، برای یک سازه N طبقه؛ مقادیر m_i جرم طبقه i ام ($i = 1, 2, \dots, N$) است.

۲-۳- معادلات حاکم و پارامترهای TMD

یک سازه چند درجه آزادی (MDOF) را با TMD متصل به یک طبقه خاص (بطور مثال بام) در نظر بگیرید. با فرض اینکه این سازه به عنوان یک ساختمان برشی با جرم متمرکز در هر تراز طبقه فرض شود، معادله حرکت دینامیکی سازه مدل شده را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (1)$$

که در آن $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه با در نظر گرفتن اثر TMD هستند؛ این ماتریس‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

همچنین در فرمول (6)، K_i سختی مربوط به طبقه i ام است.

$$\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_{i-1} + k_i & -k_i & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_{i+1} & k_{i+1} + k_{i+2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{N-1} + k_N & -k_N \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -k_N & k_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

در ادامه با جای گذاری‌های زیر ماتریس کلی سازه تجهیز شده به TMD پدید می‌آید:

$$k_{s+d(N+1,N+1)} = k_d \quad (8)$$

$$k_{s+d(N+1,N)} = -k_d \quad (9)$$

$$k_{s+d(N,N+1)} = -k_d \quad (10)$$

$$k_{s+d(N,N)} = k_N + k_d \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_s = \alpha_1 \mathbf{M}_s + \alpha_2 \mathbf{M}_d \quad (7)$$

که مقادیر α_1 و α_2 ثابت‌هایی هستند که با استفاده از نسبت‌های میرایی دوره تناوب اصلی برای دو مود اول استخراج شده است. از آنجایی که در این مقاله ابزار TMD در تراز بام نصب گردیده است برای در نظر گرفتن این موضوع، تغییرات زیر باید در ماتریس سختی $\mathbf{K}_{s+d}$ در نظر گرفته شود. این ماتریس تلفیقی از ماتریس سختی سازه و ماتریس سختی TMD است که با اضافه شدن یک سطر و ستون صفر به ماتریس سختی سازه $\mathbf{K}_{s(N,N)}$ ، بوجود می‌آید و

۴-۱- مکانیزم FTMD

هنگامی که سازه اولیه ارتعاشاتی را تجربه می کند (به دلیل باد، زلزله یا اختلالات دیگر)، جرم FTMD در پاسخ به این نوسانات شروع به حرکت می کند. از یک سو فنر برای مقابله با این حرکت عمل می کند و سعی دارد جرم را به حالت اولیه برگرداند و از سوی دیگر این حرکت سبب شده که جرم نیروهای اصطکاکی ای را تجربه کند که باعث اتلاف انرژی می شود. این نیروها انرژی جنبشی را به گرما تبدیل می کنند و در نتیجه دامنه ارتعاشات در سازه اولیه را کاهش می دهند. به طور کلی حرکت جرم به گونه ای طراحی شده است که با ارتعاشات سازه اصلی در فرکانس طبیعی خود ناهم فاز باشد که منجر به کاهش حرکت کلی می شود. میزان اصطکاک را می توان با تنظیم فشار روی اجزای اصطکاکی کنترل کرد و امکان کنترل دینامیکی روی خواص میرایی را فراهم کرد که می تواند در شرایط مختلف محیطی یا سناریوهای خاص مفید باشد. از آنجایی که اتلاف انرژی میراگر اصطکاکی به جابجایی نسبی داخل دستگاه بستگی دارد و به سرعت نسبی حساس نیست، به عنوان دستگاه هیستریزس در نظر گرفته می شود. ترکیب جرم، فنر و اصطکاک به FTMD اجازه می دهد تا به طور موثر انرژی حاصل از ارتعاشات سازه را جذب کند و آن را از بین ببرد و منجر به کاهش جابجایی و شتاب سازه شود. این مکانیزم در نهایت ایمنی و راحتی سازه را برای ساکنان ساختمان ها، پل ها یا دیگر انواع سازه ها افزایش می دهد. از جمله موارد استفاده از آن: در ساختمان های بلند مرتبه برای کاهش اثرات ناشی از باد و بارهای لرزه ای، در پل ها برای تثبیت حرکت و کاهش ارتعاشات ناشی از ترافیک یا زلزله و در تجهیزات صنعتی برای محافظت از ماشین آلات حساس در برابر ارتعاشاتی که ممکن است باعث آسیب یا نقص شوند، میتوان اشاره نمود.

۴-۲- معادلات حاکم و پارامترهای FTMD

برای یک سیستم MDOF به همراه FTMD معادله حرکت به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = E\ddot{x}_g(t) + B\dot{F}_s(t) \quad (16)$$

که در آن M ، C و K به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی برای سازه اصلی هستند و E و B ماتریس های جایگذاری برای نیروی تحریک و نیروی اصطکاک هستند و $X(t)$ و $\dot{X}(t)$ و $\ddot{X}(t)$ به ترتیب مربوط به جابجایی نسبی، سرعت و شتاب برای سیستم پیکربندی شده

در معادله (۱)، F بردار نیروی دینامیکی در نظر گرفته می شود که اگر این نیرو به صورت رکورد شتاب زمین اعمال گردد آنگاه خواهیم داشت:

$$F_Q = -M\ddot{x}_g(t) \quad (12)$$

که در آن $\ddot{x}_g(t)$ شتاب زمین لرزه و I بعنوان بردار تاثیر بوده که برداری ستونی با درایه های برابر با یک است. به طور کلی سه پارامتر برای TMD وجود دارد که عبارتند از: نسبت فرکانسی f ، نسبت جرمی μ و نسبت میرایی ξ_d که به شکل زیر تعریف می گردد:

$$\mu = \frac{m_d}{m_s} \quad (13)$$

$$f = \omega_d / \omega_{n1} \quad (14)$$

$$\xi_d = \frac{c_d}{2m_d\omega_d} \quad (15)$$

در رابطه (۱۴) $\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}$ بوده و ω_{n1} برابر با فرکانس زاویه ای اصلی سازه بدون TMD است.

۴-۲- میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی (Friction Tuned Mass Damper)

میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی FTMD نوعی خاص از دستگاه کنترل ارتعاش است که برای کاهش نوسانات در سازه هایی مانند ساختمان و پل طراحی شده است که از یک میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) با سختی خطی و میراگر اصطکاکی خالص تشکیل شده و رفتار غیر خطی از خود نشان می دهد. این ابزار در اصل میراگرهای جرمی تنظیم شده را با عناصر اضافی ترکیب می کند که اصطکاک را برای بهبود رفتار کلی سازه به کار بگیرد. به طور کلی اجزای تشکیل دهنده آن شامل جرم، که بر سازه اصلی قرار گرفته است؛ فنر، که نوعی مکانیزم ارتجاعی ایجاد می کند و یک مکانیزم اصطکاکی که نوعی نیروی اصطکاکی را به وجود می آورد که می تواند برای تغییر ویژگی های میرایی تنظیم شود. مشابه با TMD جرم و فنر به گونه ای کالیبره می شود که با فرکانس طبیعی سازه اصلی مطابقت داشته باشد که این هماهنگی در نهایت منجر به جذب ارتعاش و استهلاک آن می گردد.

که در آن f_s نیروی اصطکاک ایجاد شده بین سازه و میراگر و sgn نشان دهنده تابع علامت، $\dot{x}_d$ بیانگر سرعت میراگر و $\dot{x}_p$ نشان دهنده سرعت سازه اصلی می‌باشد.

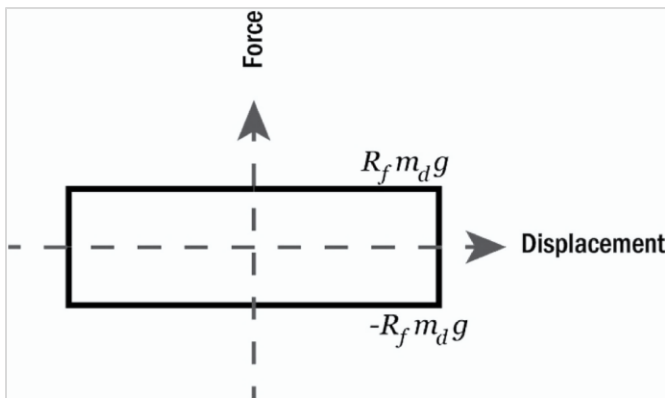
در این مقاله، پارامترهای FTMD شامل نسبت جرمی μ ، نسبت فرکانسی f و ضریب اصطکاک R_f بوده که به صورت زیر تعریف میشوند:

$$\mu = \frac{m_d}{m_s} \quad \text{مکرر} \quad (۱۳)$$

$$f = \frac{\omega_d}{\omega_{n1}} \quad \text{مکرر} \quad (۱۴)$$

$$R_f = \frac{f_s}{M_d g} \quad (۲۵)$$

شکل زیر رابطه بین نیروی اصطکاک FTMD به ازای جابجایی نسبی میراگر نسبت به سازه اصلی در حالت ایده‌آل را نشان میدهد.



شکل (۴): رابطه بین نیروی اصطکاک و تغییر مکان در ابزار FTMD [۲۵]

بوده و $\dot{x}_g$ بیانگر شتاب زمین لرزه و $F_s(t)$ بردار اصطکاک است که به واسطه FTMD فراهم میگردد. در ادامه متغیرهای موجود در معادلات به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند.

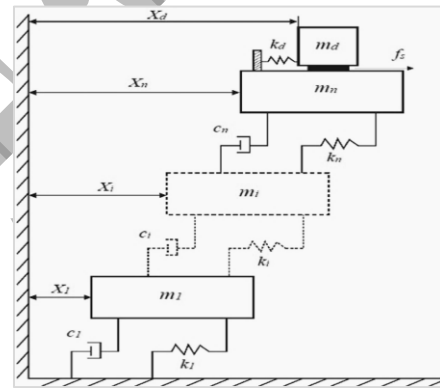
$$X(t) = \begin{Bmatrix} x_p(t) \\ x_d(t) \end{Bmatrix} \quad (۱۷)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۱۹)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_s + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

$$M_s = \text{diag} [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_N] \quad (۲۱)$$



شکل (۳): مدل شماتیک یک سیستم چند درجه آزاد مجهز به FTMD [۲۵]

پرو واضح است که در معادلات بالا k_s و c_s به ترتیب مربوط به سختی و میرایی برای سازه اصلی بوده؛ همچنین m_d نشانگر جرم میراگر و M_s بیانگر جرم سازه اصلی میباشد.

$$E = \begin{bmatrix} -M_{s(N \times 1)} \\ -M_d \end{bmatrix} \quad (۲۲)$$

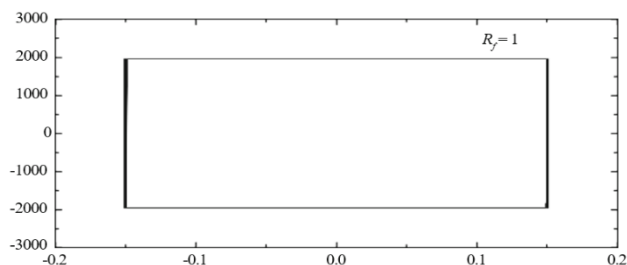
$$B = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T_{((N+1) \times 1)} \quad (۲۳)$$

و $F_s(t)$ نیروی اصطکاک فراهم شده توسط FTMD را نشان میدهد.

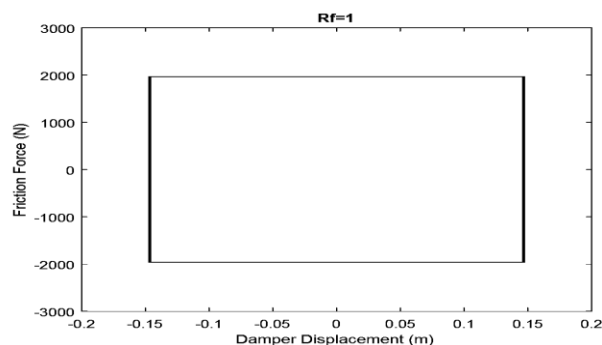
$$F_s(t) = f_s sgn(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_p(t)) \quad (۲۴)$$

۵- صحت سنجی و اعتبار سنجی

به طور کلی برای تصدیق در حوزه مطالعات پژوهشی می‌توان دو روش را پیش گرفت: حالت اول، مدلسازی و مقایسه آن با تحقیقات گذشته است؛ بدین صورت که با حاصل شدن مشابهت بالای نتایج می‌توان از درستی مدل اطمینان حاصل کرد (صحت سنجی). حالت دوم اینکه می‌توان مدلسازی را در دو محیط مجزا به صورت موازی پیش برد و در پایان به قیاس نتایج نشست (اعتبارسنجی). در این پژوهش از هر روش استفاده خواهد شد.



شکل (۷): رابطه بین نیروی اصطکاک و تغییر مکان برای $R_f = 1$ در مرجع [28]



شکل (۸): حلقه هیستریزیس برای سازه مجهز شده به FTMD با $R_f = 1$ در این پژوهش

همان طور که پیداست و با توجه به شکل ها و نمودارهای بدست آمده نتایج از تطبیق بالای بین سازه مدل شده در این تحقیق و مدل مرجع حکایت دارد که درواقع خبر از صحت مدلسازی می‌دهد.

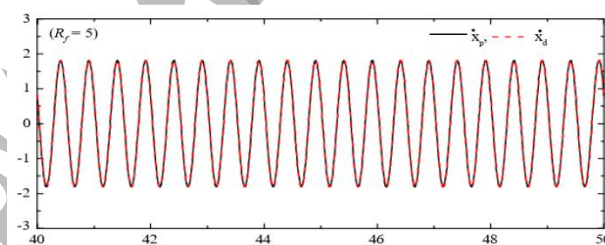
۵-۲- اعتبار سنجی TMD

برای اعتبارسنجی مدلسازی TMD، یک سازه مفروض در OpenSees مدلسازی شده و تحلیل مودال برای آن به اجرا در آمده است. در ادامه نتایج حاصل شده با Etabs مورد بررسی قرار گرفته است.

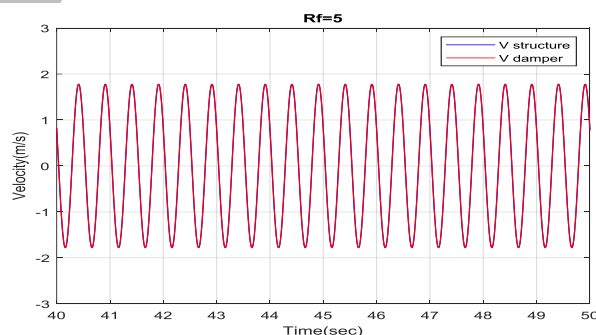
سازه مفروض، یک سازه برشی ۱۰ طبقه با رفتار خطی و میرایی ۵ درصد میباشد که به صورت یک قاب برشی ۲ بعدی مدل شده است. سختی طبقات به صورت تیپ در نظر گرفته شده و جرم طبقات بجز جرم بام یکسان فرض شده است. ابعاد المان های سازه ای (تیر و ستون مربعی شکل) هر طبقه مثل هم بوده با این تفاوت که برای تحقق رفتار برشی، مدول الاستیسیته تیر، ۱۰۰ برابر ستون در نظر گرفته شده که این مقدار با آزمون و خطا بدست آمده است. مشخصات مفروض طی جدول (۱) ارائه شده است.

۵-۱- صحت سنجی FTMD

به سال ۲۰۱۶ میلادی، پیسال و جانگید کارکرد لرزه ای استفاده از FTMD را برای سازه یک درجه آزاد (SDOF)^{۱۰} مورد بررسی قرار دادند. مشخصات مدل بدین صورت بود که جرم سازه ۱۰ تن، دوره تناوب ۰/۵ ثانیه و نسبت میرایی ۲٪ بوده و تحت بارگذاری هارمونیک به معادله $\ddot{x}_g(t) = 0.1g \sin(4\pi t)$ و چند بار لرزه ای قرار داده شد. در این پژوهش رفتار مورد نظر برای FTMD در OpenSees مدل شد. بدین صورت که با فرض سیستم TMD بدون میرایی و در نظر گرفتن اصطکاک نسبت به سطح تماس برای آن و اتصال این پیکربندی از طریق المان طول صفر^{۱۱} به سازه اصلی، مدل مرجع، بازیابی و بازسازی شد و در ادامه نتایج بدست آمده از هر دو پژوهش آورده شده و مقایسه ای بین آنها انجام گردیده است.



شکل (۵): پاسخ سرعت سازه مدل شده مجهز به FTMD با $R_f = 5$ در مرجع [28]



شکل (۶): پاسخ سرعت سازه مدل شده مجهز به FTMD با $R_f = 5$ در این پژوهش

¹¹ Zero length element

¹⁰ Single Degree Of Freedom

جدول (۴): نتایج تحلیل مودال قاب برشی ۱۰ طبقه با تجهیز TMD در Opensees

#	MODE	LAMBDA	OMEGA	FREQUENCY	PERIOD
#					
1	30.5047	5.52311	0.87903	1.13762	
2	50.8592	7.13156	1.13502	0.881039	
3	778.471	27.9011	4.4406	0.225195	
4	3202.94	56.5946	9.0073	0.111021	
5	7365.58	85.823	13.6591	0.073211	
6	12349	111.126	17.6863	0.056541	
7	16509.1	128.488	20.4494	0.0489011	
8	22407.8	149.692	23.8243	0.041974	
9	29384.2	171.418	27.282	0.0366541	
10	33596	183.292	29.1718	0.0342796	

جدول (۱): خصوصیات سختی و جرم و سایر مشخصات سازه برشی ۱۰ طبقه

طبقه	[۱، ۴]	[۵، ۸]	۹	۱۰
سختی (N/m)	۵۴۳۹۰۰۰۰	۳۹۸۸۶۰۰۰۰	۲۵۳۸۲۰۰۰۰	۲۵۳۸۲۰۰۰۰
جرم (Kg)	۴۵۰۰۰۰	۴۵۰۰۰۰	۴۵۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰
مدول الاستیسیته (N/m ²)	۲۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰
بعد مقطع (cm)	۱۳۰/۹۱۱۶۲	۱۳۱/۱۴۴۴	۱۰۸/۲۰۰۶	۱۰۸/۲۰۰۶
طول تیر (m)	۵	۵	۵	۵
ارتفاع ستون (m)	۳	۳	۳	۳

جدول (۲): نتایج تحلیل مودال قاب برشی ۱۰ طبقه بدون تجهیز در Opensees

#	MODE	LAMBDA	OMEGA	FREQUENCY	PERIOD
#					
1	39.4269	6.27908	0.999347	1.00065	
2	776.523	27.8662	4.43504	0.225477	
3	3201.42	56.5811	9.00516	0.111047	
4	7364.44	85.8163	13.6581	0.0732167	
5	12347.9	111.121	17.6855	0.0565435	
6	16508.5	128.485	20.4491	0.048902	
7	22407.7	149.692	23.8242	0.0419741	
8	29384.2	171.418	27.282	0.0366541	
9	33596	183.292	29.1718	0.0342796	
10	43403.3	208.334	33.1575	0.0301591	

جدول (۵): نتایج تحلیل مودال قاب برشی ۱۰ طبقه با تجهیز TMD در Et abs

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad/sec ²
Modal	1	1.138	0.879	5.5208	30.4795
Modal	2	0.881	1.135	7.1288	50.8198
Modal	3	0.226	4.429	27.8299	774.5019
Modal	4	0.111	8.979	56.4159	3182.7512
Modal	5	0.073	13.612	85.528	7315.0416
Modal	6	0.057	17.629	110.7635	12268.5546
Modal	7	0.049	20.391	128.1181	16414.2483
Modal	8	0.042	23.754	149.2488	22275.2047
Modal	9	0.037	27.202	170.9167	29212.5189
Modal	10	0.034	29.094	182.8028	33416.8478

جدول (۳): نتایج تحلیل مودال قاب برشی ۱۰ طبقه بدون تجهیز در Et abs

Case	Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad/sec ²
Modal	1	1.001	0.999	6.2741	39.3644
Modal	2	0.226	4.424	27.7949	772.5555
Modal	3	0.111	8.977	56.4024	3181.2255
Modal	4	0.073	13.611	85.5214	7313.9069
Modal	5	0.057	17.628	110.7587	12267.4829
Modal	6	0.049	20.39	128.1158	16413.8668
Modal	7	0.042	23.754	149.2486	22275.1421
Modal	8	0.037	27.202	170.9167	29212.5143
Modal	9	0.034	29.094	182.8028	33416.8475
Modal	10	0.03	33.064	207.7448	43157.9111

همان طور که از نتایج برمی‌آید، خروجی‌های حاصل شده از همخوانی بالایی برخوردار بوده و اختلاف جزئی در رقم‌های اعشار به دلیل رند شدن اعداد در Etabs اتفاق می‌افتد. حال می‌توان از صحت مدل‌سازی اطمینان حاصل کرد و در ادامه سازه‌های برشی مورد نظر را به TMD و FTMD تجهیز کرد.

۶-۱- مشخصات سازه‌های مورد استفاده در این مقاله

سازه‌های مورد استفاده برای این پژوهش دارای پلان مربعی شکل به بعد ۳۰ متر، ارتفاع هر طبقه ۳ متر و سیستم باربر جانبی در هر دو جهت از نوع قاب برشی و از نظر هندسی متقارن است. جرم در نظر گرفته شده (به صورت یکنواخت) برای طبقات ۴۵۰ تن و برای طبقه بام ۴۰۰ تن لحاظ شده است. رفتار سازه‌ها در محدوده خطی بررسی می‌شود. سختی طبقات به صورت پله‌ای (تیپ) از پایین به بالا کاهش می‌یابد. دوره تناوب برای هر سازه برابر ۰/۱ تعداد طبقات فرض شده است و در نهایت سازه تحت ۲۰ رکورد حوزه نزدیک و دور و همچنین تحت بارگذاری هارمونیک سینوسی قرار گرفته و تحلیل تاریخچه زمانی برای آنها برای وضعیت با میراگر و بدون میراگر به اجرا درمی‌آید.

درگام بعدی سازه همراه با TMD مدل‌سازی شده است. جرم TMD بعنوان پیش فرض ۲ درصد جرم کل سازه در نظر گرفته شده و سایر پارامترهای لازم طی مراحل زیر بدست آمده است:

$$\mu = \frac{m_d}{m_p}, \mu = 0.02; m_p = 4450000 \text{ kg} \gg m_d = 89000 \text{ kg}$$

میزان سختی TMD را می‌توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد [36]:

$$k_d = 4\pi^2 \mu f^2 \frac{m_p}{T_p^2} \quad (26)$$

با فرض اینکه نسبت فرکانسی $f = 1$ ، بهینه‌ترین حالت خواهد بود و انتخاب $T = 1 \text{ sec}$ ، همان تناوب اصلی سازه، 3513579.167 N/m بدست می‌آید. بعنوان یک انتخاب با فرض این که $\xi = 0.019$ ، نهایت ضریب میرایی TMD، $c_d = 21249.732 \text{ N.s/m}$ بدست می‌آید [36]:

$$c_d = 4\pi \mu f \xi \frac{m_p}{T_p} \quad (27)$$

جدول (۹): مشخصات مدل برشی ۵۰ طبقه

مدل برشی ۵۰ طبقه با دوره تناوب ۵ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۱، ۴]	۴۵۰	۱۲۱/۲۸×۱۰ ^{۱۰}	[۲۹، ۳۲]	۴۵۰	۷۹/۶۹×۱۰ ^{۱۰}
[۵، ۸]	۴۵۰	۱۱۵/۳۴×۱۰ ^{۱۰}	[۳۳، ۳۶]	۴۵۰	۷۳/۷۵×۱۰ ^{۱۰}
[۹، ۱۲]	۴۵۰	۱۰۹/۴۳×۱۰ ^{۱۰}	[۳۷، ۴۰]	۴۵۰	۶۷/۸۲×۱۰ ^{۱۰}
[۱۳، ۱۶]	۴۵۰	۱۰۳/۴۵×۱۰ ^{۱۰}	[۴۱، ۴۴]	۴۵۰	۶۱/۸۷×۱۰ ^{۱۰}
[۱۷، ۲۰]	۴۵۰	۹۷/۵۲×۱۰ ^{۱۰}	[۴۵، ۴۸]	۴۵۰	۵۵/۹۳×۱۰ ^{۱۰}
[۲۱، ۲۴]	۴۵۰	۹۱/۵۷×۱۰ ^{۱۰}	۴۹	۴۵۰	۴۹/۹۸×۱۰ ^{۱۰}
[۲۵، ۲۸]	۴۵۰	۸۵/۶۳×۱۰ ^{۱۰}	۵۰	۴۰۰	۴۹/۹۸×۱۰ ^{۱۰}

همان طور که پیداست، سختی طبقات به صورت یکسان، برای هر چهار طبقه از پایین به بالا یکسان در نظر گرفته شده است که با لحاظ کردن مسائل اجرایی امری معقول و منطقی به نظر می‌رسد.

۲-۷- رکوردهای مورد استفاده

در مهندسی زلزله، اصطلاحات رکورد «حوزه دور»^{۱۲} و «حوزه نزدیک»^{۱۳} به انواع مختلف داده‌های حرکت زمین که در طول رویدادهای لرزه‌ای جمع‌آوری می‌شوند، به ویژه در رابطه با فاصله از منشأ زلزله اشاره دارد. این تمایز می‌تواند به طور قابل توجهی بر تجزیه و تحلیل و طراحی سازه‌ها برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای تأثیر بگذارد. از این رو به منظور مطالعه بهتر رفتار سازه‌های مورد نظر و تعیین کارایی و بهبود اثرگذاری این میراگرها بر پاسخ‌های سازه، بسیار مناسب است که رکورد‌های مورد استفاده را از یکدیگر تفکیک کرد. از این رو مدل‌های برشی تحت سه دسته رکورد: ۲۰ رکورد حوزه نزدیک، ۲۰ رکورد حوزه دور و رکورد سینوسی‌ای که فرکانس آن بر فرکانس اصلی مدل سازه منطبق بود، تحلیل گردیدند. جزئیات رکورد‌های مورد نظر در جدول آورده شده است. در مراجع [38-41]، معیار رکورد حوزه نزدیک فاصله ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر تا کانون زلزله در نظر گرفته شده است. در این مقاله، فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر به عنوان رکورد حوزه نزدیک در نظر گرفته شده است و بیشتر از آن به عنوان رکورد حوزه دور لحاظ گردیده است.

۲-۶- مدل برشی

برای دست یافتن به یک سازه چند درجه آزاد با یک دوره تناوب مخصوص، با داشتن جرم طبقات، و پیش فرض اینکه سختی طبقات به صورت تیپ (پله‌ای: به نحوی که هر ۴ طبقه از پایین به بالا دارای سختی یکسان) باشد، ابتدا یک مقدار اولیه سختی طبقه در نظر گرفته شد و سازه با چنین سختی‌ای مدل‌سازی شد. بر اساس دوره تناوب مدل محاسبه شده برای مدل توسط OpenSees، مجموع سختی در سرتاسر طبقات سازه $(\sum_{j=1}^N K_j)_{i+1}$ ، به طور پیوسته با استفاده از معادله زیر به هنگام شد [35]:

$$(\sum_{j=1}^N K_j)_{i+1} = \left(\frac{T_i}{T_{target}} \right)^2 \cdot (\sum_{j=1}^N K_j)_i$$

که در رابطه بالا T_i نشانگر دوره تناوب منطبق با سختی اولیه سازه، طبقه، T_{target} بیانگر دوره تناوب هدف (۱۰٪ تعداد طبقات N) و $(\sum_{j=1}^N K_j)_i$ مجموع سختی اولیه و i تعداد گام می‌باشد. در مرحله بعدی، دوره تناوب منطبق بر مدل با $(\sum_{j=1}^N K_j)_{i+1}$ استخراج شد و معادله دوباره در یک حلقه اجرا شد تا $(\sum_{j=1}^N K_j)_{i+1}$ همگرا شود و در نهایت سختی طبقات سازگار با دوره تناوب هدف تعیین بشود [35]. در این پژوهش سازه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است که مشخصات سختی و جرم آن به شرح زیر است:

جدول (۶): مشخصات مدل برشی ۱۰ طبقه

مدل برشی ۱۰ طبقه با دوره تناوب ۱ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۱، ۴]	۴۵۰	۵/۴۳×۱۰ ^{-۹}	۹	۴۵۰	۷/۵۲۸×۱۰ ^{-۹}
[۵، ۸]	۴۵۰	۷/۹۸۹×۱۰ ^{-۹}	۱۰	۴۰۰	۷/۵۲۸×۱۰ ^{-۹}

جدول (۷): مشخصات مدل برشی ۲۰ طبقه

مدل برشی ۲۰ طبقه با دوره تناوب ۲ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۱، ۴]	۴۵۰	۵/۲۳×۱۰ ^{-۱۰}	[۱۳، ۱۶]	۴۵۰	۷/۲۴۸×۱۰ ^{-۱۰}
[۵، ۸]	۴۵۰	۴/۵۴۹×۱۰ ^{-۱۰}	[۱۷، ۱۹]	۴۵۰	۷/۵۸۷×۱۰ ^{-۱۰}
[۹، ۱۲]	۴۵۰	۷/۹۰۸×۱۰ ^{-۱۰}	۲۰	۴۰۰	۷/۵۸۷×۱۰ ^{-۱۰}

جدول (۸): مشخصات مدل برشی ۳۵ طبقه

مدل برشی ۳۵ طبقه با دوره تناوب ۳/۵ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۱، ۴]	۴۵۰	۷/۷۳۷×۱۰ ^{-۱۰}	[۲۱، ۲۴]	۴۵۰	۷/۴۱۸×۱۰ ^{-۱۰}
[۵، ۸]	۴۵۰	۷/۴۷۴×۱۰ ^{-۱۰}	[۲۵، ۲۸]	۴۵۰	۷/۱۵۴×۱۰ ^{-۱۰}
[۹، ۱۲]	۴۵۰	۷/۲۰۹×۱۰ ^{-۱۰}	[۲۹، ۳۲]	۴۵۰	۱/۸۹×۱۰ ^{-۱۰}
[۱۳، ۱۶]	۴۵۰	۷/۹۴۵×۱۰ ^{-۱۰}	[۳۳، ۳۴]	۴۵۰	۱/۶۲۷×۱۰ ^{-۱۰}
[۱۷، ۲۰]	۴۵۰	۷/۶۸۲×۱۰ ^{-۱۰}	۳۵	۴۰۰	۱/۶۲۷×۱۰ ^{-۱۰}

13 Near field

12 Far field

مدل های ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه تحت رکورد های دور و نزدیک و همچنین تحت رکورد سینوسی با فرکانسی منطبق بر سازه مورد نظر، تحلیل شدند و مقادیر حداکثر پاسخ‌ها به ازای هر رکورد استخراج شد. نتایج حاصله در جداول (۱۳) تا (۲۴) آورده شده است.

جدول (۱۳): پاسخ های سازه ۱۰ طبقه تحت رکورد های حوزه دور

شماره	حداکثر شتاب	شماره	حداکثر دررفت	نسبت چابایی نام به ارتفاع سازه (D)	چابایی حداکثر	ضریب واژه	حداکثر برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm)	(C)	پایه (KN)	رکورد
۱	۱۵/۴۶	۹	۱/۶۸۰	-۰/۱۶۸	-۰/۳۷۵	-۰/۳۱۵	۱۴۰۲۱/۹	۱
۲	۱۵/۵۵	۹	۱/۵۱۷	-۰/۱۵۱	-۰/۳۴۲	-۰/۳۲۵	۱۴۵۰۵/۵	۲
۳	۱۰/۶۳	۹	۰/۷۳۰	-۰/۰۷۳	-۰/۲۸۰	-۰/۱۶۷	۷۲۶۱/۸۴	۳
۴	۱۲/۹۰	۹	۱/۲۹۰	-۰/۱۰۴	-۰/۲۷۷	-۰/۱۹۳	۸۵۹۶/۲۲	۴
۵	۱۶/۷۷	۹	۱/۲۲۲	-۰/۱۳۳	-۰/۲۷۱	-۰/۲۷۷	۱۲۴۴/۴	۵
۶	۱۸/۴۴	۹	۱/۸۹۸	-۰/۱۸۹	-۰/۲۴۴	-۰/۲۹۴	۱۷۵۵۰/۹	۶
۷	۵/۸۵	۹	۰/۴۴۴	-۰/۲۲۵	-۰/۲۹۷	-۰/۲۹۰	۴۰۵۰۲/۹	۷
۸	۱۲/۳۷	۹	۰/۸۰۷	-۰/۰۸۰	-۰/۲۵۲	-۰/۱۷۱	۷۶۱۰/۶۹	۸
۹	۱۱/۳۳	۹	۰/۴۶۱	-۰/۲۰۷	-۰/۲۴۲	-۰/۱۸۴	۸۲۵۰۰/۸	۹
۱۰	۷/۷۶	۹	۰/۳۸۸	-۰/۰۳۹	-۰/۲۷۵	-۰/۱۵۰	۶۶۹۵/۲۹	۱۰
۱۱	۱۲/۸۵	۹	۰/۶۱۱	-۰/۰۶۱	-۰/۲۷۶	-۰/۱۱۲	۸۹۱۷/۸۵	۱۱
۱۲	۸/۴۸	۹	۰/۵۵۵	-۰/۰۵۵	-۰/۲۶۸	-۰/۱۲۱	۵۵۲۰/۳	۱۲
۱۳	۵/۶۸	۹	۰/۵۶۷	-۰/۰۵۷	-۰/۲۶۱	-۰/۱۲۳	۴۲۵۸/۶	۱۳
۱۴	۹/۷۹	۹	۰/۳۷۷	-۰/۰۳۷	-۰/۲۷۸	-۰/۰۸۳	۸۵۵۰/۲	۱۴
۱۵	۹/۴۴	۹	۰/۲۸۸	-۰/۰۲۸	-۰/۲۵۶	-۰/۱۴۰	۶۲۹۶/۸	۱۵
۱۶	۱۲/۷۱	۹	۱/۰۵۸	-۰/۰۱۵	-۰/۲۵۱	-۰/۲۲۰	۹۰۰۶/۸	۱۶
۱۷	۲/۷۲	۹	۰/۲۱۱	-۰/۰۲۱	-۰/۲۳۸	-۰/۰۵۱	۲۲۷۱/۸۲	۱۷
۱۸	۲/۷۲	۹	۰/۱۸۷	-۰/۰۱۸	-۰/۲۳۳	-۰/۰۴۴	۱۹۲۶/۸	۱۸
۱۹	۷/۰۸	۹	۰/۸۱۴	-۰/۰۸۱	-۰/۲۱۰	-۰/۱۵۱	۶۷۲۳/۳	۱۹
۲۰	۹/۶۸	۹	۰/۵۴۸	-۰/۰۵۴	-۰/۲۹۷	-۰/۱۶۹	۶۶۳۸/۵۸	۲۰
حداکثر	۱۸/۴۴		۱/۸۹۸	-۰/۱۸۹	-۰/۲۴۴	-۰/۳۱۵	۱۷۵۵۰/۹	
میانگین	۱۰/۶۳		۰/۷۳۰	-۰/۰۷۳	-۰/۲۸۰	-۰/۱۶۷	۷۲۶۱/۸۴	
حداقل	۲/۷۹		۰/۱۸۷	-۰/۰۱۸	-۰/۲۳۳	-۰/۰۴۴	۱۹۲۶/۸	

جدول (۱۴): پاسخ های سازه ۱۰ طبقه تحت رکوردهای حوزه نزدیک

شماره	حداکثر شتاب	شماره	حداکثر دررفت	نسبت چابایی نام به ارتفاع سازه (D)	چابایی حداکثر	ضریب واژه	حداکثر برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm)	(C)	پایه (KN)	رکورد
۱	۴/۵۱	۹	۰/۲۵۸	-۰/۰۲۵	-۰/۱۷۳	-۰/۰۶۸۸	۳۰۶۵/۹۸	۲۱
۲	۵/۸۰	۹	۰/۲۷۰	-۰/۰۲۷	-۰/۲۲۹	-۰/۰۸۵۰	۳۷۱/۷۳	۲۲
۳	۱۲/۶۶	۹	۱/۰۸۶	-۰/۰۸۶	-۰/۲۷۲	-۰/۱۱۹	۹۷۸۱/۷۷	۲۳
۴	۱۰/۲۰	۹	۰/۷۲۲	-۰/۰۷۲	-۰/۲۸۸	-۰/۱۶۳	۷۲۸۸/۱۴	۲۴
۵	۱۴/۱۳	۹	۰/۸۵۸	-۰/۰۸۵	-۰/۲۵۲	-۰/۱۶۴	۹۵۲۲/۲	۲۵
۶	۱۱/۸۹	۹	۰/۶۶۸	-۰/۰۶۶	-۰/۲۶۵	-۰/۲۰۷	۹۲۱۸/۰۷	۲۶
۷	۲۱/۴۴	۹	۱/۶۲۳	-۰/۱۶۳	-۰/۲۹۱	-۰/۲۵۲	۲۵۰۱/۵	۲۷
۸	۱۴/۸۸	۹	۰/۷۲۷	-۰/۰۷۲	-۰/۲۴۳	-۰/۱۷۵	۷۸۲۰/۲۵	۲۸
۹	۲۳/۷۷	۹	۱/۹۱۸	-۰/۰۹۱	-۰/۲۸۵	-۰/۲۱۶	۱۸۵۳۳/۲	۲۹
۱۰	۱۹/۳۳	۹	۱/۰۶۰	-۰/۰۶۰	-۰/۲۶۴	-۰/۲۶۸	۱۱۹۴۰/۹	۳۰
۱۱	۷/۰۹	۹	۰/۵۴۸	-۰/۰۵۴	-۰/۲۸۵	-۰/۱۵۴	۶۸۸۱/۷	۳۱
۱۲	۱۳/۶۱	۹	۱/۲۹۱	-۰/۰۲۹	-۰/۲۱۰	-۰/۲۳۹	۱۰۶۷۸/۱	۳۲
۱۳	۹/۲۵	۹	۰/۵۶۶	-۰/۰۵۶	-۰/۲۰۷	-۰/۱۲۵	۶۰۴۵/۲۴	۳۳
۱۴	۷/۴۵	۹	۰/۴۰۲	-۰/۰۴۰	-۰/۲۰۷	-۰/۱۱۶	۵۲۰۱/۵	۳۴
۱۵	۱۶/۰۰	۹	۱/۵۲۶	-۰/۱۵۲	-۰/۰۹۷	-۰/۲۰۷	۱۳۶۷/۲	۳۵
۱۶	۱۰/۳۹	۹	۱/۰۰۶	-۰/۰۰۶	-۰/۲۴۴	-۰/۲۳۴	۱۰۵۸۱/۴	۳۶
۱۷	۴۰/۲۳	۹	۴/۰۲۰	-۰/۰۴۰	-۰/۲۸۰	-۰/۲۰۷	۲۵۱۱/۲	۳۷
۱۸	۱۵/۲۱	۹	۱/۳۴۷	-۰/۱۳۴	-۰/۰۸۵	-۰/۲۸۰	۱۲۴۸۹/۹	۳۸
۱۹	۱۳/۹۳	۹	۱/۵۷۴	-۰/۱۵۷	-۰/۱۸۰	-۰/۲۱۶	۹۷۸۵/۱۴	۳۹
۲۰	۱۲/۸	۹	۰/۹۰۴	-۰/۰۹۰	-۰/۲۷۴	-۰/۱۹۰	۸۹۴۲/۲	۴۰
حداکثر	۴۰/۲۳		۴/۰۲۰	-۰/۰۴۰	-۰/۲۸۰	-۰/۲۰۷	۲۵۱۱/۲	
میانگین	۱۴/۲۸		۱/۱۷۸	-۰/۰۱۱	-۰/۲۵۰	-۰/۲۵۴	۱۱۲۸۲/۰۲	
حداقل	۲/۵۱		۰/۲۵۸	-۰/۰۲۵	-۰/۱۷۳	-۰/۰۶۷	۳۰۶۵/۹۸	

جدول (۱۵): پاسخ سازه ۱۰ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره	حداکثر شتاب	شماره	حداکثر دررفت	نسبت چابایی نام به ارتفاع سازه (D)	چابایی حداکثر	ضریب واژه	حداکثر برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm)	(C)	پایه (KN)	رکورد
S	۵۰/۱۵	۹	۵/۷۶	-۰/۰۷۶	-۰/۱۲۴	-۰/۱۲۴	۵۱۰۱/۲	S

جدول (۱۰): مشخصات رکورد حوزه دور

حداکثر شتاب (g)	گام زمانی (s)	تعداد نقاط	فاصله (km)	Mw	شرح رکورد	حوزه دور
۰/۴۱۶	۰/۰۱	۲۹۹۹	۱۷/۱۵	۶/۶۱	Northridge-01/ Beverly Hills - 14145 Mulhol/009	۱
۰/۵۱۶	۰/۰۱	۲۹۹۹	۱۷/۱۵	۶/۶۱	Northridge-01/ Beverly Hills - 14145 Mulhol/279	۲
۰/۴۱	۰/۰۱	۲۹۹۹	۲۲/۲۱	۶/۶۱	Northridge-01/Castaic - Old Ridge Route/GLP177	۳
۰/۴۸۲	۰/۰۱	۲۹۹۹	۲۲/۲۱	۶/۶۱	Northridge-01/ Castaic - Old Ridge Route/ GLP267	۴
۰/۷۲۷	۰/۰۱	۵۵۰۰	۲۵/۱۶	۷/۱۴	Duzce_Turkey/Sakarya/DUZCE_SKR180	۵
۰/۸۲۲	۰/۰۱	۵۵۰۰	۲۵/۱۶	۷/۱۴	Duzce_Turkey/Sakarya/DUZCE_SKR180	۶
۰/۲۲۷	۰/۰۱	۹۹۹۲	۲۲/۰۳	۶/۵۳	Imperial Valley-06/ Delta/DLT262	۷
۰/۲۵۱	۰/۰۱	۹۹۹۲	۲۲/۰۳	۶/۵۳	Imperial Valley-06/ Delta/DL352	۸
۰/۳۶۱	۰/۰۵	۷۸۰۸	۲۱/۸	۶/۵۳	Imperial Valley-06/EI Centro Array #13/H-E13140	۹
۰/۶۷۷	۰/۰۵	۷۸۰۸	۲۱/۸	۶/۵۳	Imperial Valley-06/EI Centro Array #13/H-E13230	۱۰
۰/۵۰۹	۰/۰۱	۴۰۰۶	۲۸/۰۸	۶/۹	Kobe_Japan/Sakai/KOBE_SKI000	۱۱
۰/۵۰۳	۰/۰۱	۴۰۰۶	۲۸/۰۸	۶/۹	Kobe_Japan/Sakai/KOBE_SKI090	۱۲
۰/۲۳۳	۰/۰۱	۴۰۰۶	۱۹/۱۵	۶/۹	Kobe_Japan/Shin-Osaka/KOBE_SHI000	۱۳
۰/۱۱۱	۰/۰۱	۴۰۰۶	۱۹/۱۵	۶/۹	Kobe_Japan/Shin-Osaka/KOBE_SHI090	۱۴
۰/۸۱۲	۰/۰۵	۵۳۴۷	۱۵/۲۷	۷/۵۱	Kocaeli_Turkey/Duzce/KOCAELI_DZC180	۱۵
۰/۲۵۲	۰/۰۵	۵۳۴۷	۱۵/۲۷	۷/۵۱	Kocaeli_Turkey/Duzce/KOCAELI_DZC270	۱۶
۰/۱۸۸	۰/۰۵	۶۰۰۰	۲۵/۵۳	۷/۵۱	Kocaeli_Turkey/Bursa Sivil/KOCAELI_BSIO90	۱۷
۰/۲۴۴	۰/۰۵	۶۰۰۰	۲۵/۵۳	۷/۵۱	Kocaeli_Turkey/Bursa Sivil/KOCAELI_BSIO90	۱۸
۰/۲۴۴	۰/۰۲	۲۲۰۰	۲۲/۲۳	۷/۲۸	Landers/LANDERS_YER270	۱۹
۰/۵۱	۰/۰۲	۲۲۰۰	۲۲/۲۳	۷/۲۸	Landers/LANDERS_YER360	۲۰

جدول (۱۱): مشخصات رکورد حوزه نزدیک

حداکثر شتاب (g)	گام زمانی (s)	تعداد نقاط	فاصله (km)	Mw	شرح رکورد	حوزه نزدیک
۰/۵۱۹	۰/۰۰۲۵	۳۹۹۱	۴/۹۳	۶/۶۶	Nahanni_Canada/ Site 2/NAHANNI_S2240	۲۱
۰/۳۵۵	۰/۰۰۲۵	۳۹۹۱	۴/۹۳	۶/۶۶	Nahanni_Canada/ Site 2/NAHANNI_S2330	۲۲
۰/۲۵۷	۰/۰۰۵	۵۰۰۱	۱۰/۷۲	۶/۹۳	Loma Prieta/BRAN/LOMAP_BRN000	۲۳
۰/۵۰۲	۰/۰۰۵	۵۰۰۱	۱۰/۷۲	۶/۹۳	Loma Prieta/BRAN/LOMAP_BRN090	۲۴
۰/۶۴۴	۰/۰۰۵	۷۹۹۷	۳/۸۵	۶/۹۳	Loma Prieta/Corralitos/LOMAP_CLS000	۲۵
۰/۴۸۲	۰/۰۰۵	۷۹۹۹	۳/۸۵	۶/۹۳	Loma Prieta/Corralitos/LOMAP_CLS090	۲۶
۱/۴۹۳	۰/۰۲	۱۵۰۰	۶/۶۶	۷/۰۱	Cape Mendocino/Cape Mendocino/CPM000	۲۷
۱/۰۳۸	۰/۰۲	۱۵۰۰	۶/۶۶	۷/۰۱	Cape Mendocino/Cape Mendocino/CPM090	۲۸
۰/۷۵۲	۰/۰۰۵	۵۵۵۷	۸/۴۴	۶/۶۹	Northridge-01/LA - VA Hospital/NWH270	۲۹
۰/۳۲۰	۰/۰۰۵	۵۵۵۷	۸/۴۴	۶/۶۹	Northridge-01/LA - VA Hospital/NWH360	۳۰
۰/۳۴۱	۰/۰۱	۲۹۹۹	۵/۹۳	۶/۶۹	Northridge-01/Newhall - Fire Sta/NWH090	۳۱
۰/۵۵۱	۰/۰۱	۲۹۹۹	۵/۹۳	۶/۶۹	Northridge-01/Newhall - Fire Sta/NWH360	۳۲
۰/۲۶۶	۰/۰۰۵	۷۰۰۰	۲/۸۳	۷/۵۱	Kocaeli_Turkey/Yarimca/KOCAELI_YPT060	۳۳
۰/۲۲۱	۰/۰۰۵	۷۰۰۰	۲/۸۳	۷/۵۱	Kocaeli_Turkey/Yarimca/KOCAELI_YPT150	۳۴
۰/۴۹۸	۰/۰۰۵	۱۸۰۰۰	۳/۱۲	۷/۶۲	Chi-Chi_Taiwan/ CHY028/CHICHI_CHY028-E	۳۵
۰/۶۱۹	۰/۰۰۵	۱۸۰۰۰	۳/۱۲	۷/۶۲	Chi-Chi_Taiwan/ CHY028/CHICHI_CHY028-N	۳۶
۱/۰۰۸	۰/۰۰۵	۱۸۰۰۰	۲/۶	۷/۶۲	Chi-Chi_Taiwan/ CHY080/CHICHI_CHY080-N	۳۷
۰/۴۴۱	۰/۰۰۵	۱۸۰۰۰	۲/۶	۷/۶۲	Chi-Chi_Taiwan/ CHY080/CHICHI_CHY080-N	۳۸
۰/۳۳۲	۰/۰۰۵	۱۸۴۱۹	۲/۴۴	۷/۹	Denali_Alaska/TAPS Pump Station #10/PS10-047	۳۹
۰/۲۹۷	۰/۰۰۵	۱۸۴۱۹	۲/۴۴	۷/۹	Denali_Alaska/TAPS Pump Station #10/PS10-317	۴۰

جدول (۱۲): مشخصات رکورد سینوسی

حداکثر شتاب (g)	گام زمانی (s)	تعداد نقاط	فرکانس تحریک منطبق بر فرکانس سازه	رکورد سینوسی
۰/۲۵	۰/۰۱	۳۰۰۰	$0.35g \sin(2\pi ft)$	S

۷-۲- تحلیل مدل های برشی تحت رکورد های

موردنظر

در این بخش مدل های برشی تحت سه حالت: بدون میراگر، با میراگر TMD و با میراگر FTMD تحت رکورد های مطرح شده مورد تحلیل قرار گرفتند و در انتها پاسخ ها (برش پایه، دررفت طبقات، شتاب طبقات و جابجایی نام) با یکدیگر قیاس شدند.

برای اینکه میراگرها چقدر می توانند در بهینه کردن پاسخ های سازه‌ای موثر واقع شوند، در ابتدا لازم است مدل های برشی با رکورد های پیش فرض تحت تحلیل تاریخیچه زمانی قرار گرفته و پاسخ های سازه تعیین شود. لازم به ذکر است میرایی در نظر گرفته شده برای تمامی مدل ها، میرایی رایلی (۰/۵٪) در نظر گرفته شده است [37]. بدین منظور

جدول (۱۶): پاسخ های سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد های حوزه دور

شماره	حاکمیت شتاب	شماره	حاکمیت درجه	نسبت جابجایی نام به	جابجایی حاکمیت	شربت زلزله	حاکمیت برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	ارتفاع سازه (D)	نام (mm)	(C)	پایه (KCN)	رکورد
۲۰	۶/۵۳	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۸۷۰/۶۳۸	۱
۲۰	۹/۰۲	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۰۶۵۵/۵	۲
۲۰	۸/۹۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۹۹۳/۶	۳
۲۰	۱۰/۷۰	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۹۷۶۱/۸۷	۴
۲۰	۱/۵۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۲۰/۶۷	۵
۲۰	۱/۲۰۴	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۵۵/۶	۶
۲۰	۵/۱۳	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۶۸۸۹/۳	۷
۲۰	۵/۴۸	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۷۶۹۱/۰۸	۸
۲۰	۱۰/۷۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۲۳۸/۳	۹
۲۰	۸/۹۳	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۳۳۸/۱	۱۰
۲۰	۹/۱۵	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۹۵۱۷/۳۲	۱۱
۲۰	۸/۵۵	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۷۶۲۷/۲۳	۱۲
۲۰	۳/۷۶	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۵۱۰/۳۹۵	۱۳
۲۰	۸/۹۸	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۶۸۷۸/۳۲	۱۴
۲۰	۸/۷۸	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۲۲۳۶/۲	۱۵
۲۰	۱۲/۶۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۲۳۶۸/۱۲	۱۶
۲۰	۲/۴۱	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۲۷۸/۱۹	۱۷
۲۰	۲/۲۳	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۳۸۹/۶۴	۱۸
۲۰	۵/۷۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۴۳۵۳/۱	۱۹
۲۰	۲/۹۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۴۵۶۹/۱۲	۲۰
حاکمیت								۱۲/۶۷
میانگین								۷/۰۴
حاصل								۱/۵۷

جدول (۱۷): پاسخ های سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد های حوزه نزدیک

شماره	حاکمیت شتاب	شماره	حاکمیت درجه	نسبت جابجایی نام به	جابجایی حاکمیت	شربت زلزله	حاکمیت برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	ارتفاع سازه (D)	نام (mm)	(C)	پایه (KCN)	رکورد
۲۰	۲/۹۸	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۵۱۹۳/۳۱	۲۱
۲۰	۴/۷۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۵۵۹۳/۲۷	۲۲
۲۰	۱۲/۵۲	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۴۰۱۴/۲	۲۳
۲۰	۱۰/۹۸	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۲۹۲۹/۵	۲۴
۲۰	۱۱/۹۰	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۶۲۷/۱	۲۵
۲۰	۸/۶۰	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۷۹۴۱/۹۹	۲۶
۲۰	۲/۶۸	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۳۵۷/۱	۲۷
۲۰	۱۳/۹۶	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۰۶۶/۳	۲۸
۲۰	۱۱/۱۰	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۰۲۶۱/۴	۲۹
۲۰	۱۶/۶۲	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۵۲۴۶	۳۰
۲۰	۱۰/۵۱	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۷۹۶۹/۰۸	۳۱
۲۰	۱۲/۰۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۰۱۰/۲	۳۲
۲۰	۵/۱۰	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۲۵۳/۷	۳۳
۲۰	۷/۲۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۸۳۶۰/۵۱	۳۴
۲۰	۱۵/۵۳	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۸۱۹۷/۹	۳۵
۲۰	۹/۵۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۰۴۱۲/۸	۳۶
۲۰	۲۴/۴۴	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۴۱۲۹۵/۵	۳۷
۲۰	۸/۸۶/۵	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۰۲۲۱/۳	۳۸
۲۰	۱۰/۵۰	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۸۰۱۰/۸	۳۹
۲۰	۷/۱۷	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۹۹۰۷۰/۲	۴۰
حاکمیت								۲۳/۴۸
میانگین								۱۱/۴۴
حاصل								۲/۷۷

جدول (۱۸): پاسخ های سازه ۲۰ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره	حاکمیت شتاب	شماره	حاکمیت درجه	نسبت جابجایی نام به	جابجایی حاکمیت	شربت زلزله	حاکمیت برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	ارتفاع سازه (D)	نام (mm)	(C)	پایه (KCN)	رکورد
۲۰	۵/۱۴	۱۹	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۹۵۰۵/۲	S

جدول (۱۹): پاسخ های سازه ۳۵ طبقه تحت رکورد های حوزه دور

شماره	حاکمیت شتاب	شماره	حاکمیت درجه	نسبت جابجایی نام به	جابجایی حاکمیت	شربت زلزله	حاکمیت برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	ارتفاع سازه (D)	نام (mm)	(C)	پایه (KCN)	رکورد
۳۵	۸/۲۸	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۲۳۳۹/۸	۱
۳۵	۱۵/۰۶	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۷۶۶۹/۹	۲
۳۵	۱۲/۰۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۹۰۵۵/۲	۳
۳۵	۱۰/۱۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۰۴۱	۴
۳۵	۱۵/۷۰	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۲۴۴۹/۸	۵
۳۵	۱۰/۳۶	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۸۳۰۳۵	۶
۳۵	۴/۶۴	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۸۶۱۳/۹۴	۷
۳۵	۶/۲۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۲۰۵۴	۸
۳۵	۷/۱۸	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۶۰۰/۲	۹
۳۵	۶/۱۸	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۳۱۴۱/۷	۱۰
۳۵	۹/۰۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۳۱۴۹/۶	۱۱
۳۵	۷/۷۷	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۳۶۵۰/۳	۱۲
۳۵	۶/۱۶	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۹۳۷۸/۵۵	۱۳
۳۵	۴/۲۵	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۶۹۰/۷	۱۴
۳۵	۷/۱۰	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۳۵۵۱/۴	۱۵
۳۵	۶/۳۸	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۰۴۰۸۳	۱۶
۳۵	۲/۴۴	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۳۴۹/۵	۱۷
۳۵	۱/۱۹	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۸۲۹۱/۱۴	۱۸
۳۵	۴/۱۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۵۵۱۱/۸۱	۱۹
۳۵	۲/۷۹	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۵۲۲۵/۵	۲۰
حاکمیت								۱۵/۷۰
میانگین								۷/۵۱
حاصل								۱/۹۹

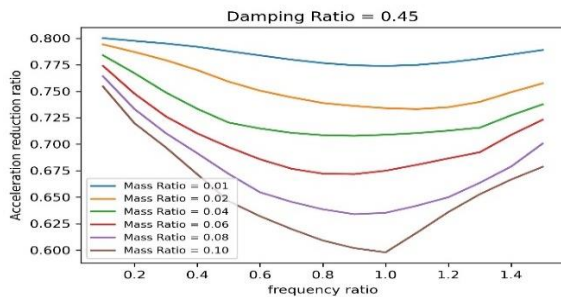
جدول (۲۰): پاسخ های سازه ۳۵ طبقه تحت رکورد های حوزه نزدیک

شماره	حاکمیت شتاب	شماره	حاکمیت درجه	نسبت جابجایی نام به	جابجایی حاکمیت	شربت زلزله	حاکمیت برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	ارتفاع سازه (D)	نام (mm)	(C)	پایه (KCN)	رکورد
۳۵	۵/۱۳	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۸۴۹۸/۸۷	۳۱
۳۵	۶/۰۶	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۰۱۱/۶	۳۲
۳۵	۱۱/۶۱	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۲۴۸۱/۳	۳۳
۳۵	۹/۸۸	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۴۴۳۰/۲	۳۴
۳۵	۱۲/۵۹	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۶۶۶/۳	۳۵
۳۵	۱۳/۷۷	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۴۵۵۶/۴	۳۶
۳۵	۲۲/۸۷	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۴۵۵۶/۷	۳۷
۳۵	۱۰/۰۹	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۸۷۱۶/۶	۳۸
۳۵	۱۶/۰۶	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۷۲۳۸/۷	۳۹
۳۵	۱۳/۸۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۴۶۶۸/۹	۴۰
۳۵	۵/۷۷	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۶۶۴	۴۱
۳۵	۱۳/۲۷	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۰۱۶۱/۶	۴۲
۳۵	۸/۴۸	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۹۱۷۸/۲	۴۳
۳۵	۸/۴۴	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۶۶۸/۸	۴۴
۳۵	۸/۶۶	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۶۶۹/۵	۴۵
۳۵	۹/۸۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۰۸۱۵/۵	۴۶
۳۵	۱۵/۱۶	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۲۳۸۷۳/۹	۴۷
۳۵	۸/۰۲	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۹۰۶۷/۲	۴۸
۳۵	۷/۹۰	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۳۵۷۸/۲	۴۹
۳۵	۴/۶۴	۳۵	۱/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۲۴	۱۱۲۵۷/۵	۵۰
حاکمیت								۲۳/۴۸
میانگین								۱۱/۴۴
حاصل								۲/۶۹

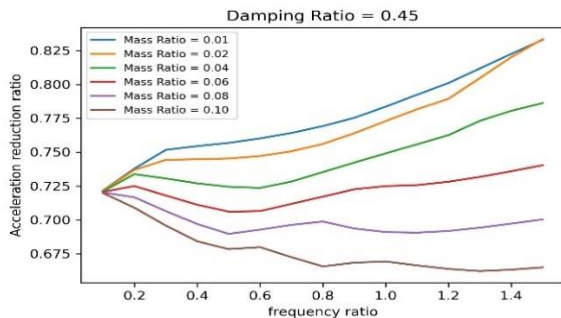
جدول (۲۱): پاسخ های سازه ۳۵ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره	حاکمیت شتاب	شماره	حاکمیت درجه	نسبت جابجایی نام به	جابجایی حاکمیت	شربت زلزله	حاکمیت برش	شماره
طبقه	(mm/s²)	طبقه	(mm/s²)	ارتفاع سازه (D)	نام (mm)	(C)	پایه (KCN)	رکورد
۳۵	۴۹/۵۱	۳۵	۲۰/۷۶	-۰/۲۴۳	۱۵۳۶۶	-۰/۹۸۶	۱۵۴۸۲۰	S

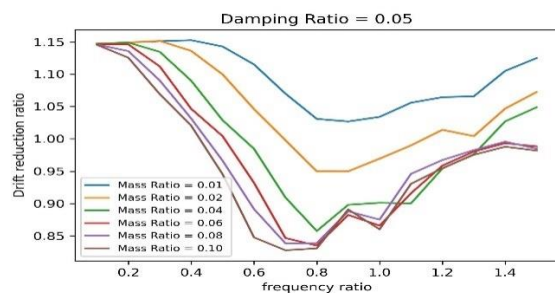
است [36]. نسبت جرمی (جرم تجهیز به مجموع جرم طبقات را نسبت جرمی گویند) برای میراگرها مقادیر $\{0.1, 0.2, 0.4, 0.6\}$ ، $\{0.1, 0.8\}$ در نظر گرفته شده است [42]. محدوده نسبت فرکانسی $[1/5 - 1]$ با گام 0.1 لحاظ شده است [43] به نحوی که تمامی حالات و شرایط ممکن را پوشش دهد. برای میراگر TMD ، مقادیر $\{0.5, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55\}$ برای نسبت میرایی میراگر انتخاب شد [42] و برای میراگر $FTMD$ نیز ضرایب اصطکاک شامل $\{0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0\}$ می‌باشد [33]. واضح است که به ازای هر سازه معلوم تحت یک رکورد مشخص، با توجه به مقادیر بالا، $540 = 6 \times 15 \times 6$ نوع مدل سازه‌ای گوناگون مجهز به TMD ؛ و برای $FTMD$ نیز $810 = 6 \times 15 \times 9$ مدل سازه‌ای متفاوت وجود خواهد داشت و در نهایت نمودارهای پیش رو بر اساس میانگین ماکزیمم‌ها نسبت به حالت بدون تجهیز ترسیم شده است.



شکل (۹): پاسخ شتاب برای مدل ۱۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



شکل (۱۰): پاسخ شتاب برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



شکل (۱۱): پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به FTMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور

جدول (۲۲): پاسخ های سازه ۵۰ طبقه تحت رکورد های حوزه دور

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقه (mm/s²)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقه (mm)	نسبت جابجایی بام به طبقه	نسبت جابجایی بام به ارتفاع سازه (mm)	جابجایی حداکثر بام (mm)	ضریب واژه (C)	حداکثر برش رکورد پایه (kN)	شماره رکورد
۵۰	۱۱/۵۲	۲۵	۰/۰۹۷	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۰	۳۰۵۵/۱	۰۱
۵۰	۹/۶۱	۵۰	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۶۸۴/۶	۰۲
۵۰	۹/۰۷	۵۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۱۹۲۳/۵	۰۳
۵۰	۷/۴۴	۵۰	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۸۵۵/۵	۰۴
۵۰	۱۱/۱۳	۵۰	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۲۷۵۲/۳	۰۵
۵۰	۱۲/۱۵	۵۰	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۳۸۱۲/۲	۰۶
۵۰	۱۲/۱۵	۵۰	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۰۹۷۰/۲	۰۷
۵۰	۵/۵۵	۵۰	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۱۹۶۵/۵	۰۸
۵۰	۴/۵۶	۵۰	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۳۳۵/۷	۰۹
۵۰	۶/۶۴	۵۰	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۳۷۶/۱	۱۰
۵۰	۶/۷۷	۵۰	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۶۱۷/۱	۱۱
۵۰	۵/۶۴	۵۰	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۸۵۶/۸	۱۲
۵۰	۵/۲۳	۵۰	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۶۱۱/۹	۱۳
۵۰	۴/۱۷	۵۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۶۷۲۱۶/۵	۱۴
۵۰	۶/۰۰	۵۰	۱/۱/۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۵۵۲/۳	۱۵
۵۰	۶/۶۳	۵۰	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۵۱۵۲/۷	۱۶
۰۱	۲/۱۴	۵۰	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۴۱۹۶/۴	۱۷
۲۵	۱/۵۳	۵۰	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۵۸۷۷۹/۴	۱۸
۲۵	۴/۴۱	۵۰	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۰۵۱۲/۲	۱۹
۲۵	۲/۹۹	۵۰	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۷۶۹۲/۲	۲۰
۲۲/۱۵	۱/۱/۲	۱/۱/۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۳۰۵۵/۱	حداکثر
۶/۴۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۶۱۷/۱	میانگین
۲/۱۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۱۶۶/۹	حداقل

جدول (۲۳): پاسخ های سازه ۵۰ طبقه تحت رکورد های حوزه نزدیک

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقه (mm/s²)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقه (mm)	نسبت جابجایی بام به طبقه	نسبت جابجایی بام به ارتفاع سازه (mm)	جابجایی حداکثر بام (mm)	ضریب واژه (C)	حداکثر برش رکورد پایه (kN)	شماره رکورد
۰۱	۴/۹۸	۵۰	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۴۲۲۰/۵۶	۲۱
۵۰	۴/۸۰	۵۰	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۸۶۰۴/۳۱	۲۲
۵۰	۹/۵۸	۵۰	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۱۹۱۹/۷	۲۳
۵۰	۹/۵۷	۵۰	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۹۹۲۶/۷	۲۴
۵۰	۹/۲۸	۵۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۲۲۳۶/۸	۲۵
۵۰	۱۱/۹۱	۵۰	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۷۸۲۰/۷	۲۶
۵۰	۱۹/۵۲	۵۰	۱/۱/۶	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۴۱۲۷/۱	۲۷
۰۱	۱۰/۰۲	۵۰	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۷۹۷/۷	۲۸
۵۰	۱۳/۱۵	۵۰	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۸۲۱۴/۴	۲۹
۵۰	۱۸/۱۹	۵۰	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۱۲۳۶/۳	۳۰
۵۰	۴/۴۷	۵۰	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۹۱۵۶۲/۶	۳۱
۵۰	۹/۲۸	۵۰	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۸۵۶۱/۲	۳۲
۵۰	۷/۱۷	۵۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۴۸۸۲/۴	۳۳
۵۰	۵/۲۳	۵۰	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۹۰۷۲/۶	۳۴
۵۰	۹/۲۳	۵۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۴۷۱۰/۳	۳۵
۵۰	۷/۴۶	۵۰	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۹۵۶۳/۸	۳۶
۵۰	۲۹/۲۲	۵۰	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۷۲۴۴/۷	۳۷
۵۰	۸/۱۱	۵۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۰۷۲۵/۵	۳۸
۵۰	۸/۱۹	۵۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۸۲۰۷/۵	۳۹
۵۰	۴/۴۳	۵۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۱۲۷۲۳/۶	۴۰
۲۲/۲۲	۱/۰/۱۸	۱/۰/۱۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۷۲۴۴/۷	حداکثر
۹/۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۱۵۷/۱۵	میانگین
۲/۲۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۱۲۰/۵۶	حداقل

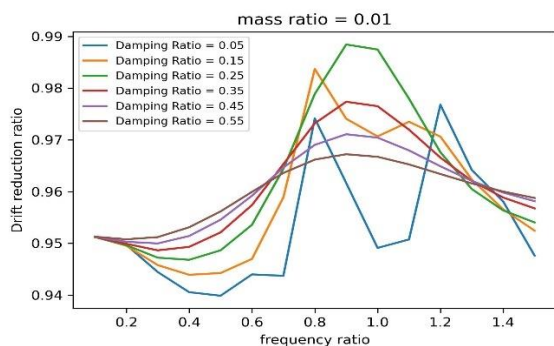
جدول (۲۴): پاسخ سازه ۵۰ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقه (mm/s²)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقه (mm)	نسبت جابجایی بام به طبقه	نسبت جابجایی بام به ارتفاع سازه (mm)	جابجایی حداکثر بام (mm)	ضریب واژه (C)	حداکثر برش رکورد پایه (kN)	شماره رکورد
۵۰	۲۵/۲۱	۵۰	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۲۸/۲۲	S

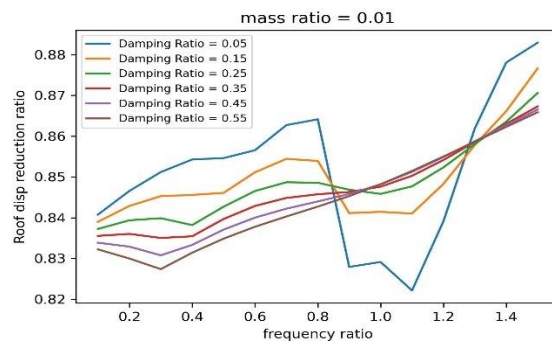
۳-۷- تاثیر TMD و FTMD بر پاسخ های

سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه

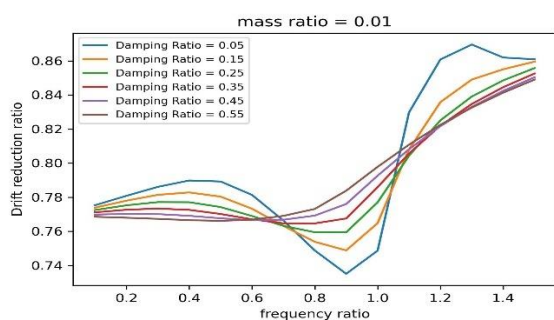
در این بخش نتایج تحلیل مدل های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه که تحت رکوردهای دور و نزدیک و سینوسی قرار گرفتند در قالب نمودار هایی ارائه شده است. همان طور که پیشتر نیز بیان شد، اثرپذیری میراگرها در گرو انتخاب درست مقادیر و پارامترهای مربوط به آن است. برای تحلیل مدل های برشی، جانمایی میراگرها در طبقه بام فرض شده



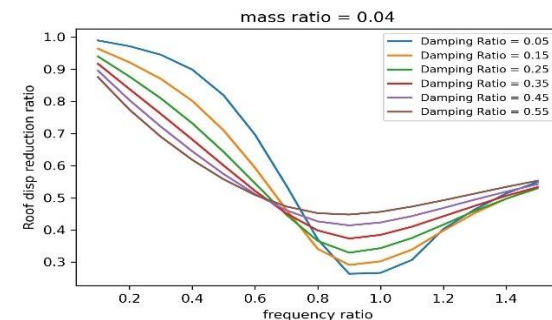
شکل (۱۶): پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۱۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



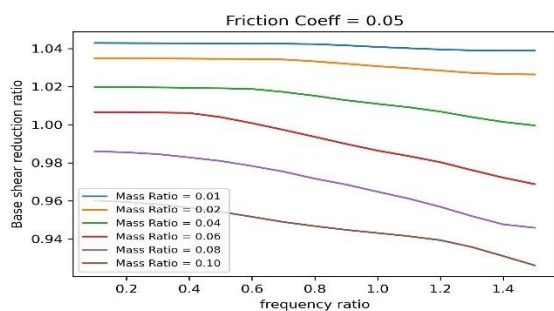
شکل (۱۲): پاسخ جابجایی حداکثری برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



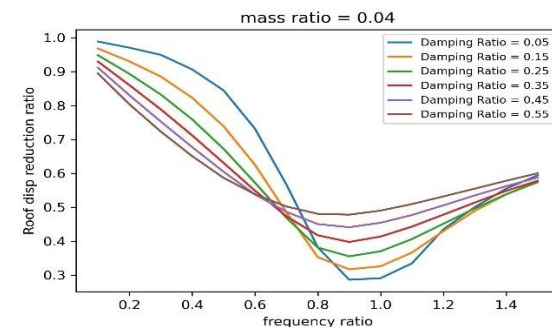
شکل (۱۷): پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



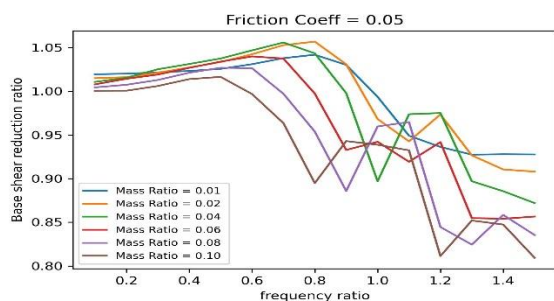
شکل (۱۳): پاسخ جابجایی حداکثری برای مدل ۱۰ طبقه مجهز به TMD تحت رکورد سینوسی



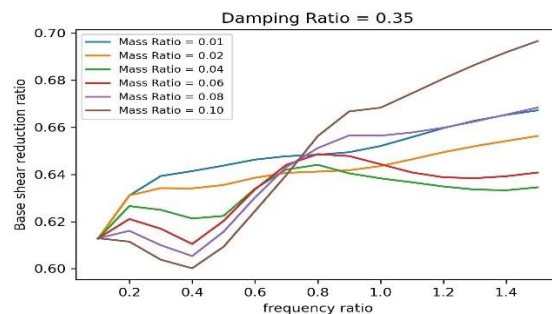
شکل (۱۸): پاسخ برش پایه برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به FMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



شکل (۱۴): پاسخ جابجایی حداکثری برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به TMD تحت رکورد سینوسی



شکل (۱۹): پاسخ برش پایه برای مدل ۱۰ طبقه مجهز به FMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



شکل (۱۵): پاسخ برش پایه برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک

آنکه برای سازه ۵۰ طبقه این اتفاق تحت رکوردهای حوزه نزدیک رخ میدهد.

۴. مادامی که سازه تحت تحریک سینوسی واقع می‌شود، افزایش نسبت میرایی تاثیر منفی بر کاهش پاسخ ها خواهد گذاشت که با افزایش ارتفاع سازه بیشتر هم می‌شود.

۵. زمانی که سازه تحت تحریک های لرزه‌ای حوزه نزدیک قرار می‌گیرد، ابزار *TMD* در بهبود پاسخ برش پایه (کاهش پاسخ) موثرتر واقع می‌شود.

۶. در بین سازه های موجود، بیشترین کاهش پاسخ برش پایه برای سازه ۲۰ طبقه تحت رکورد حوزه نزدیک به وقوع می‌پیوندد.

۷. با افزایش ارتفاع سازه، *TMD* ابزار کارآمدتری برای بهبود (کاهش) پاسخ جابجایی طبقات به حساب می‌آید. همچنین تاثیر آن در زلزله های حوزه نزدیک بیشتر است.

۸. اثر مثبت *TMD* در کاهش پاسخ جابجایی بام برای زلزله های حوزه دور بیشتر در سازه های ۳۵ و ۵۰ طبقه، و برای زلزله های حوزه نزدیک در سازه های ۱۰ و ۲۰ طبقه، از یکدیگر بیشتر است.

۹. در تمامی پاسخ ها، ابزار *TMD* بازخورد موثرتری در برابر بارگذاری سینوسی نسبت به بار لرزه‌ای از خود نشان می‌دهد.

۱۰. برای سازه مجهز به *FTMD*، به طور کلی افزایش نسبت جرمی موجب بهبود پاسخ ها میگردد.

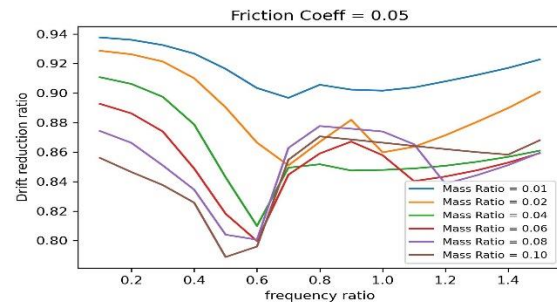
۱۱. بیشترین کاهش پاسخ به ازای ضریب اصطکاک ۰ تا ۰/۰۵ اتفاق می‌افتد.

۱۲. با توجه به تعداد طبقات سازه؛ ضرایب اصطکاک و نسبت های میرایی برای رسیدن به بهترین پاسخ همواره در حال تغییر هستند و نمی‌توان قاعده‌ای برای رفتار آن وضع کرد.

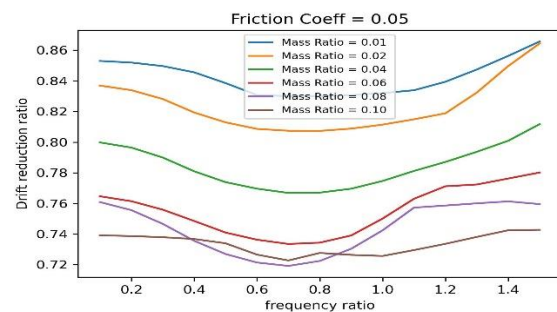
۱۳. برای رسیدن به یک سطح مشخص از پاسخ می‌توان از چندین ضریب اصطکاک به طور دلخواه استفاده کرد. همچنین به ازای یک ضریب اصطکاک معین، این امکان وجود دارد که از چند نسبت جرمی برای رسیدن به پاسخ دلخواه استفاده کرد که این انعطاف پذیری در انتخاب ها به واسطه تغییر در ضریب اصطکاک به وجود می‌آید.

۱۴. انتظار می‌رود سازه مجهز به *FTMD* در برابر تحریکات ناشی از زلزله های حوزه دور عملکرد بهتری از خود به نمایش بگذارد گرچه برای برخی پاسخ ها برای برخی از سازه ها این اتفاق نمی‌افتد.

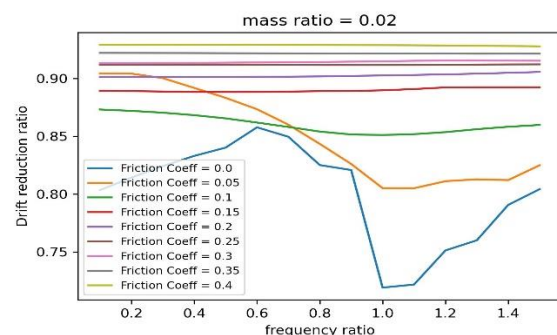
۱۵. در سازه دلخواه تحت رکورد سینوسی، می‌توان تاثیر اصطکاک را به مثابه میرایی قلمداد کرد که افزایش ضریب اصطکاک تاثیر منفی بر کاهش تمامی پاسخ ها خواهد داشت اگرچه در برخی موارد نوساناتی در این روند مشاهده میشود.



شکل (۲۰): پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به *FTMD* تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



شکل (۲۱): پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به *FTMD* تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور

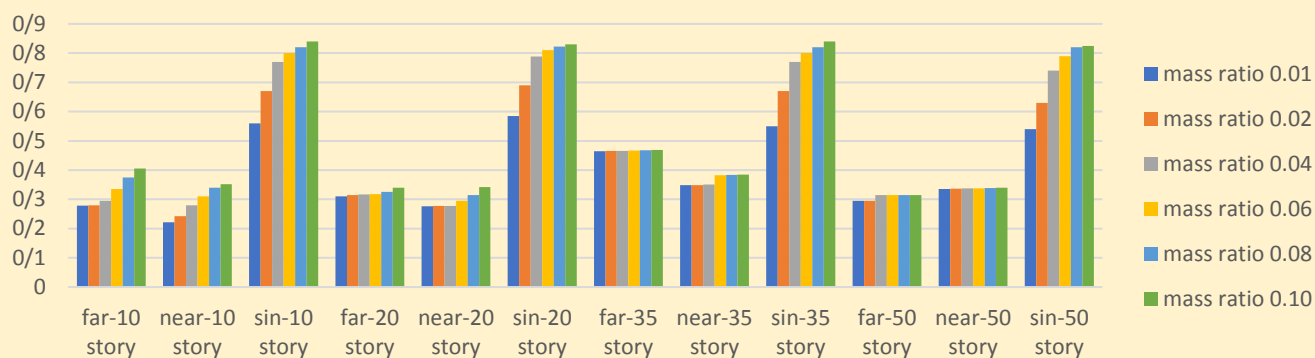


شکل (۲۲): پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۳۵ طبقه مجهز به *FTMD* تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور

با توجه به نمودار های بدست آمده برای سازه های برشی مجهز به *TMD* و *FTMD* می‌توان به برخی نتایج به شرح زیر اشاره کرد:

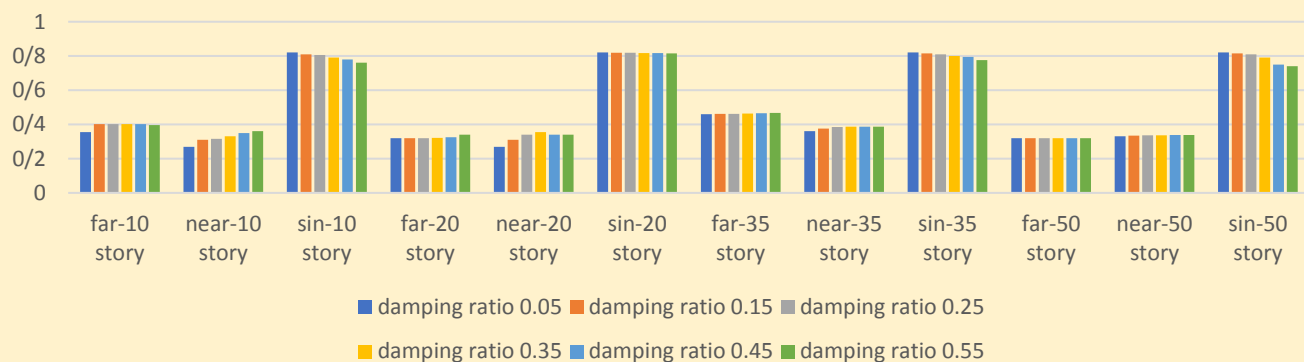
۱. به طور کلی افزایش نسبت جرمی سبب بهبود (کاهش) تمامی پاسخ ها می‌گردد، هر چند ممکن است استثنائاتی داشته باشد.
۲. در سازه های ۱۰ و ۲۰ طبقه در نسبت میرایی پایین (کمتر از ۵٪) می‌توان از هم پوشانی نسبت جرمی به منظور رسیدن به یک سطح از کاهش پاسخ سود جست.
۳. در سازه های ۱۰، ۲۰ و ۳۵ طبقه تحت رکوردهای حوزه دور کاهش بیشتری در پاسخ سازه (شتاب حداکثر) دیده می‌شود حال

Performance of TMD based on mass ratio for Acceleration Response



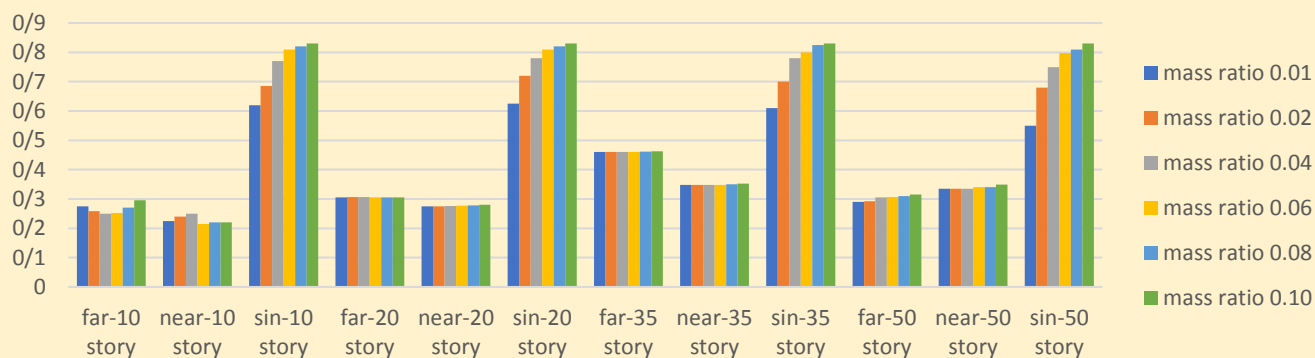
شکل (۲۳): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ شتاب

Performance of TMD based on damping ratio for Acceleration Response



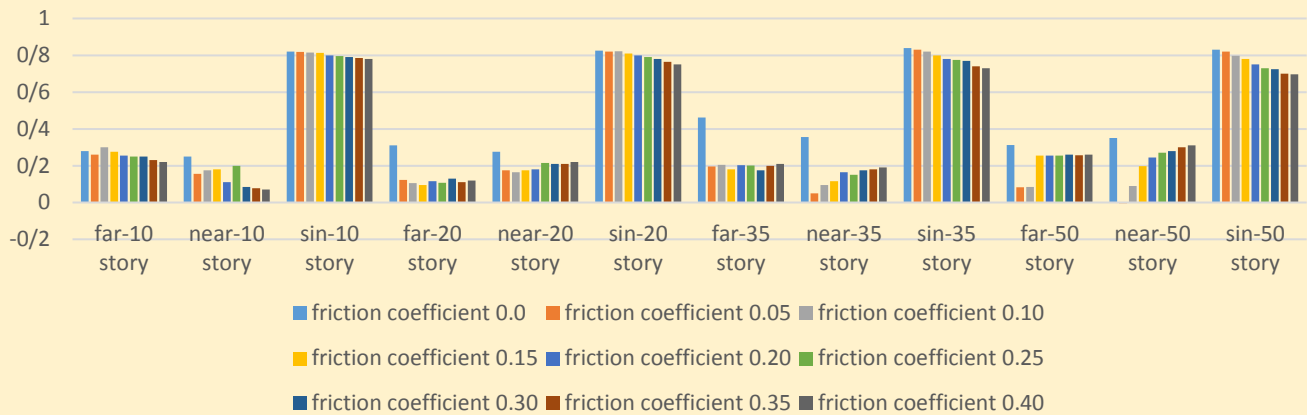
شکل (۲۴): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت میرایی برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ شتاب

Performance of FTMD based on mass ratio for Acceleration Response



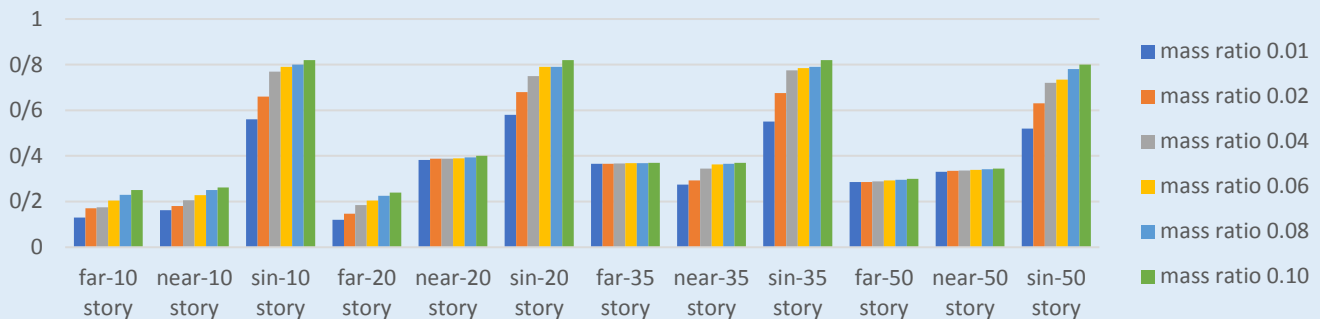
شکل (۲۵): عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ شتاب

Performance of FTMD based on friction coefficient for Acceleration Response



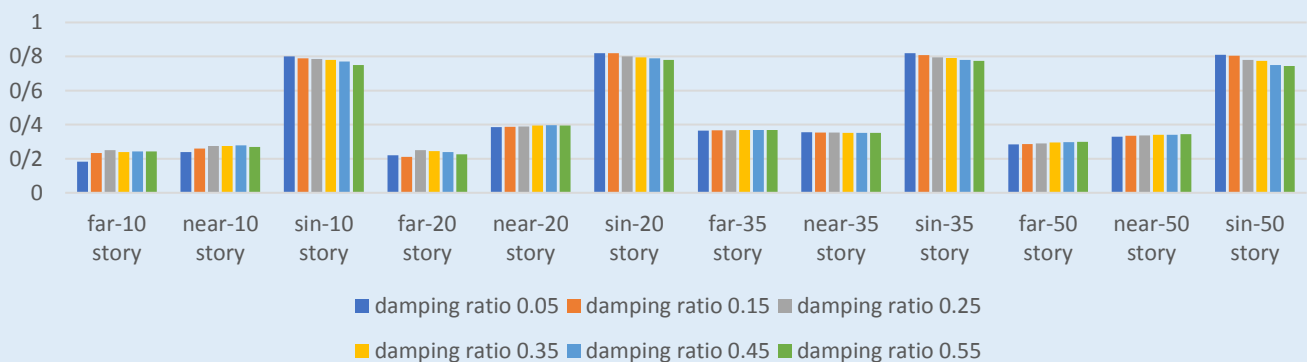
شکل (۲۶): عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ شتاب

Performance of TMD based on mass ratio for Base shear Response



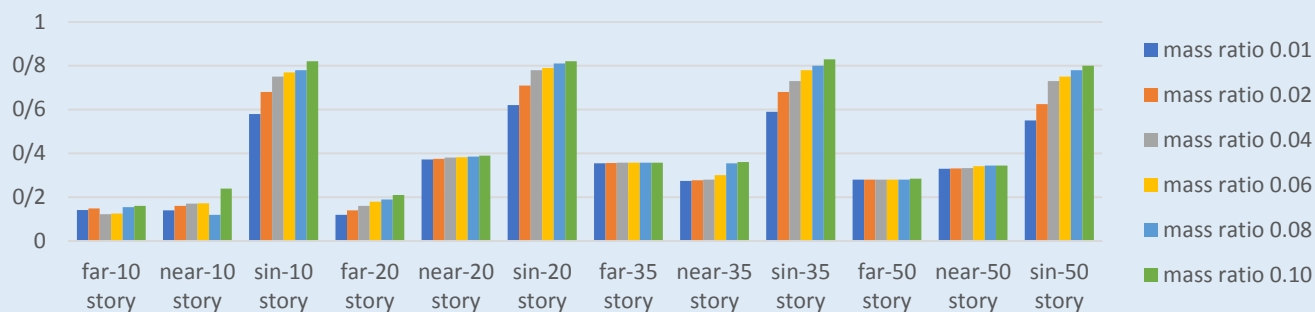
شکل (۲۷): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ برش پایه

Performance of TMD based on damping ratio for Base shear Response



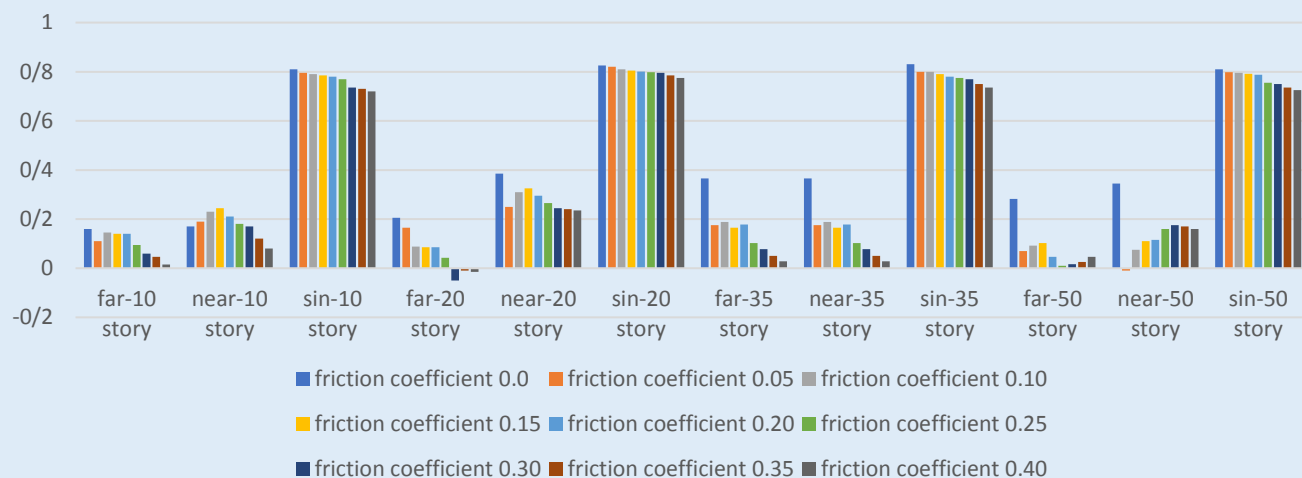
شکل (۲۸): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت میرایی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ برش پایه

Performance of FTMD based on mass ratio for Base shear Response



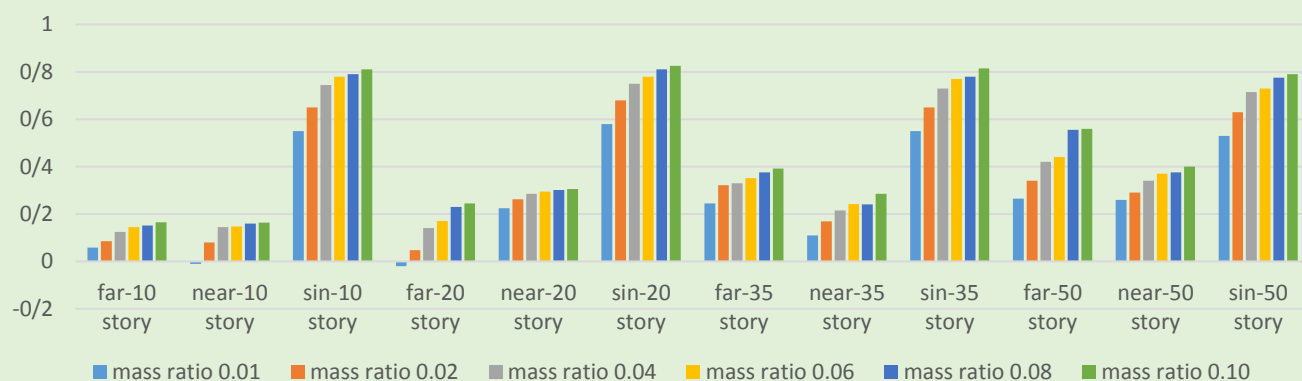
شکل (۲۹): عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ برش پایه

Performance of FTMD based on friction coefficient for Base shear Response



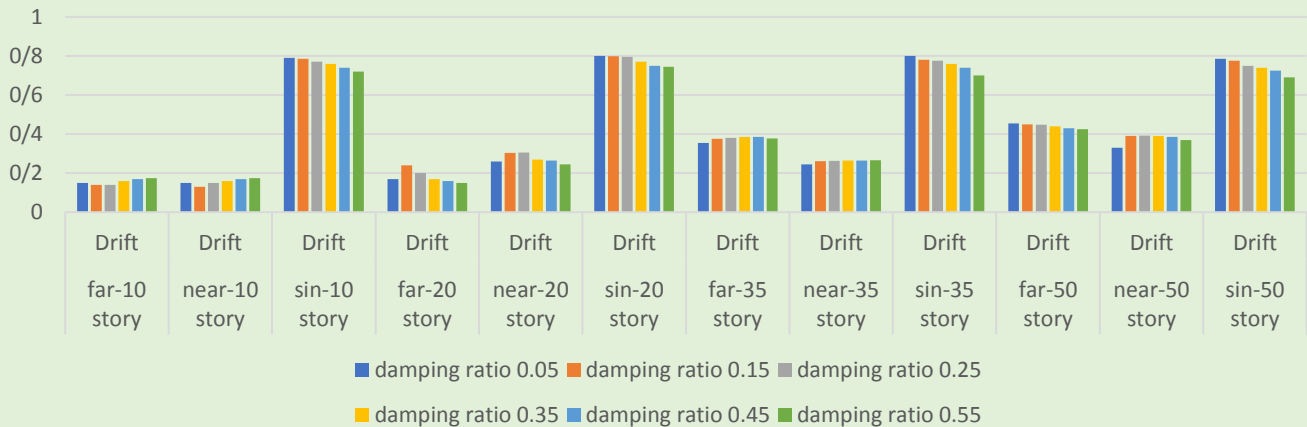
شکل (۳۰): عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ برش پایه

Performance of TMD based on mass ratio for Drift story Response



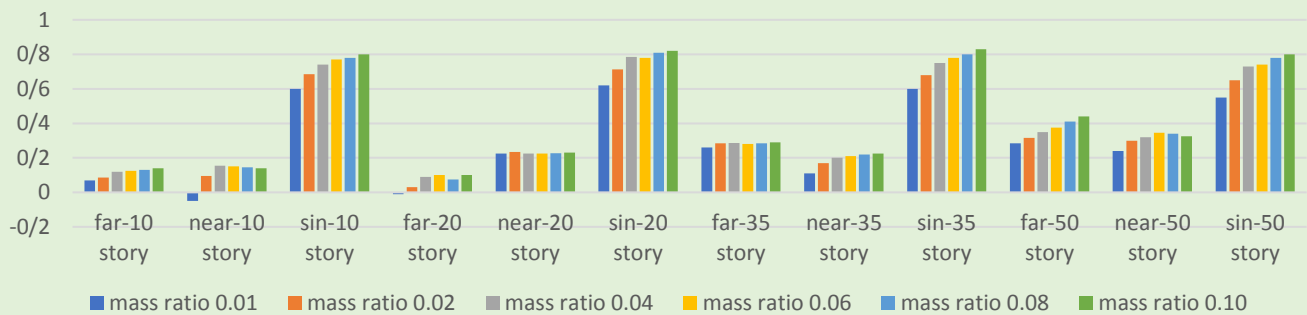
شکل (۳۱): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات

Performance of TMD based on damping ratio for Drift story Response



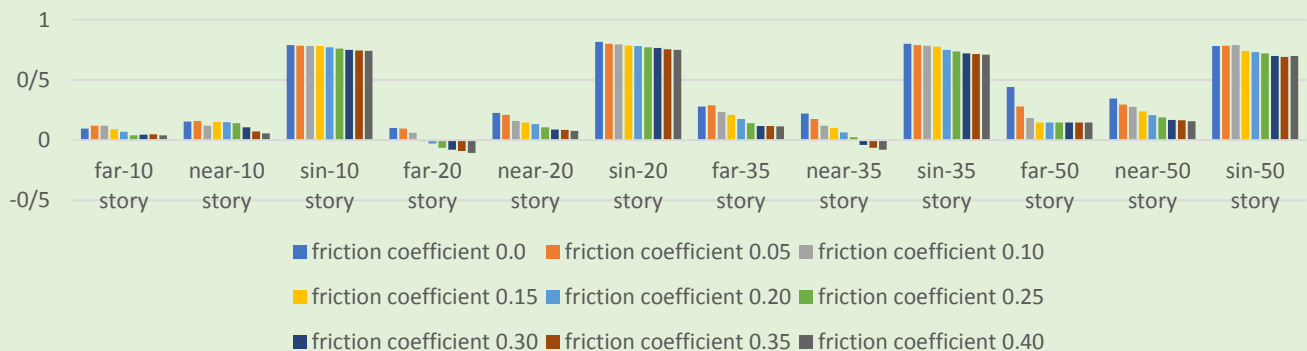
شکل (۳۲): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت میرایی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات

Performance Of FTMD based on mass ratio for Drift story Response



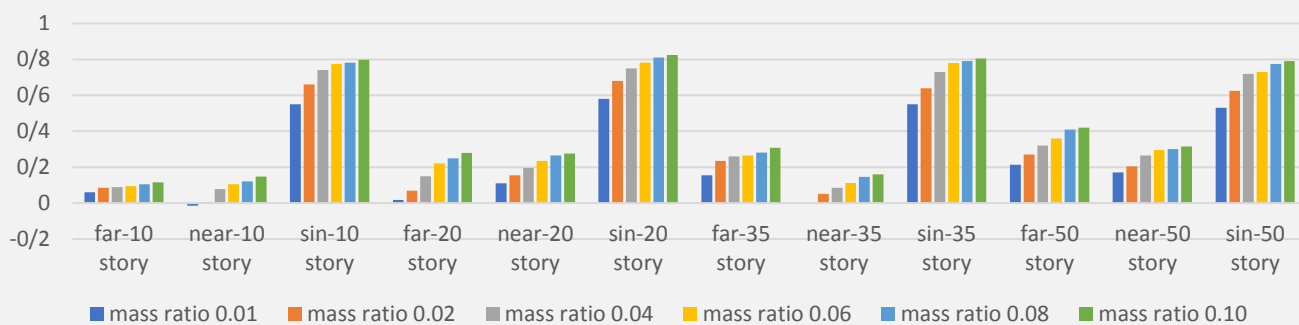
شکل (۳۳): عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات

Performance of FTMD based on friction coefficient for Drift story Response



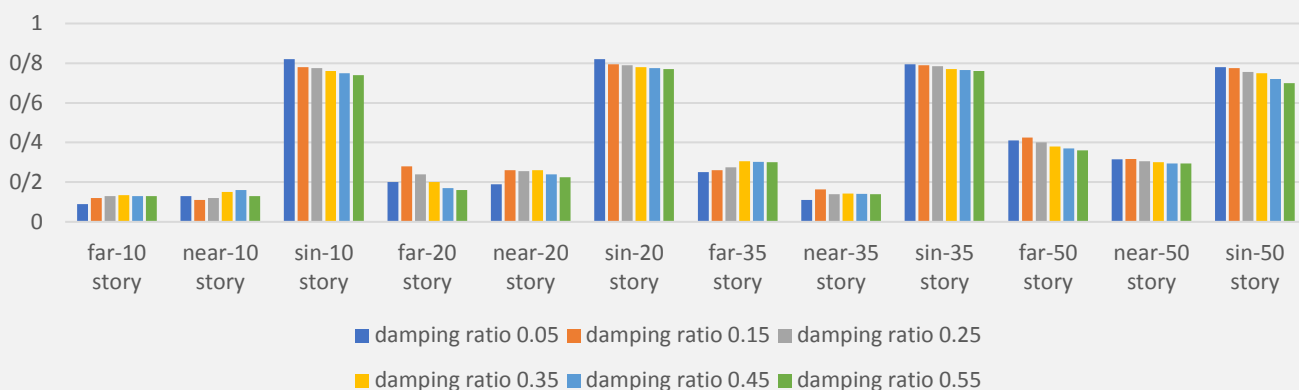
شکل (۳۴): عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات

Performance of TMD based on mass ratio for Roof displacement Response



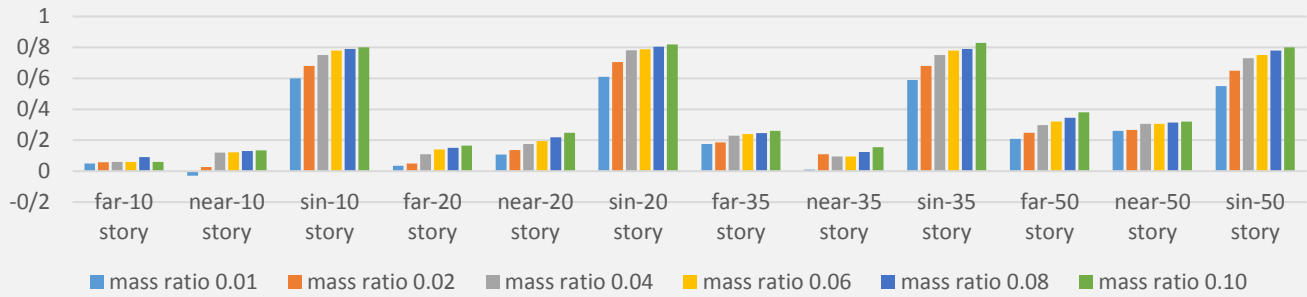
شکل (۲۵): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثر بام

Performance of TMD based on damping ratio for Roof displacement Response



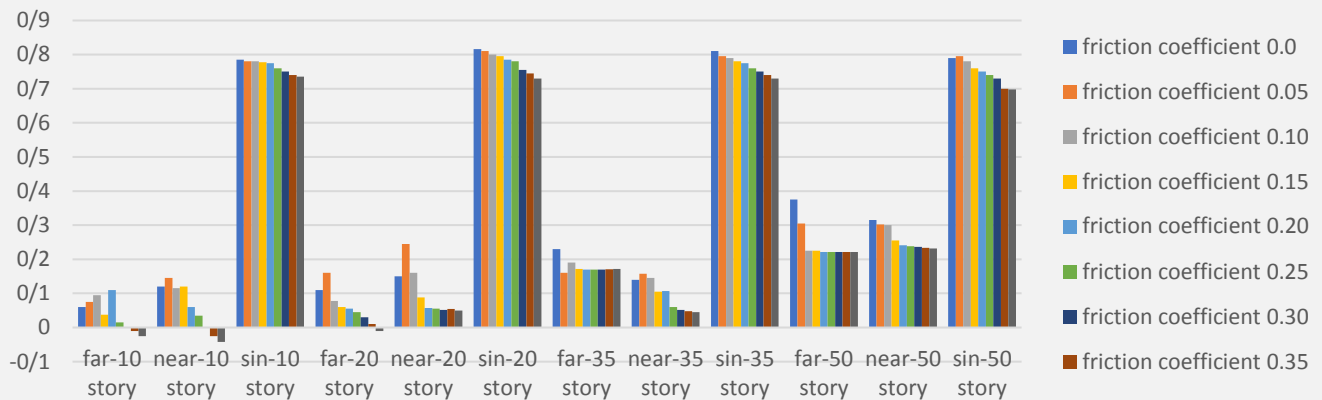
شکل (۲۶): عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثر بام

Performance of FTMD based on mass ratio for Roof displacement Response



شکل (۳۷): عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثر بام

Performance of FTMD based on friction coefficient for Roof displacement Response



شکل (۳۸): عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکورد های حوزه دور، نزدیک و سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثر بام

با توجه به نمودار های بدست آمده برای سازه های برشی مجهز به **TMD** می توان چنین نتیجه گیری کرد که:

الف) مادامی که پاسخ شتاب طبقات مدنظر باشد:

۱. افزایش نسبت جرمی در تمامی سازه ها و در تمامی رکوردها سبب بهبود پاسخ خواهد شد.
۲. در رکوردهای حوزه ی دور و نزدیک با در نظر گرفتن تغییرات ارتفاع سازه، بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات نسبت جرمی برای سازه ۱۰ طبقه اتفاق می افتد درحالی که بیشترین بهبود پاسخ را در سازه ۳۵ طبقه شاهد هستیم.
۳. برای رکورد سینوسی، افزایش ارتفاع سازه تغییر محسوسی بر بهبود پاسخ ندارد.
۴. مادامی که رکورد سینوسی مورد نظر باشد، با افزایش میرایی از بهبود پاسخ ها کاسته می شود.
۵. تغییرات نسبت میرایی بر بهبود پاسخ در رکوردهای حوزه دور مشهودتر است درحالی که میزان حساسیت آن در رکوردهای حوزه نزدیک بیشتر است.

ب) مادامی که پاسخ برش پایه مدنظر باشد:

۱. به صورت کلی افزایش نسبت جرمی سبب بهبود پاسخ در تمامی رکوردها و مدل ها میگردد.
۲. حساسیت پاسخ به تغییرات نسبت جرمی برای حوزه دور بیشتر از حوزه نزدیک است اما بیشترین بهبود پاسخ در رکورد حوزه نزدیک رخ می دهد.
۳. تغییرات ارتفاع سازه در مورد رکورد سینوسی تغییری در افزایش و یا کاهش پاسخ ایجاد نکرده و روند تغییرات آن به ازای سازه های مختلف یکسان است.
۶. افزایش میرایی در سازه ها تحت تحریک سینوسی، تاثیر منفی بر کاهش پاسخ دارد.

ج) مادامی که پاسخ جابجایی نسبی طبقات مدنظر باشد:

۱. با افزایش نسبت جرمی برای تمامی سازه در تمامی رکوردها بهبود پاسخ رخ می دهد.
۲. برای سازه های ۱۰ و ۲۰ طبقه در رکوردهای حوزه ی نزدیک و برای سازه های ۳۵ و ۵۰ طبقه در رکورد های حوزه ی دور شاهد عملکرد بهتری هستیم.
۳. در رکوردهای حوزه ی دور با افزایش تعداد طبقات، پاسخ سازه بهبود می یابد.

۴. افزایش میرایی در بارگذاری سینوسی تاثیر منفی بر بهبود پاسخ داشته است.

د) مادامی که پاسخ جابجایی بام مدنظر باشد:

۱. افزایش نسبت جرمی سبب بهبود پاسخ می گردد.
۲. در سازه های ۵۰ و ۳۵ طبقه عملکرد ابزار **TMD** در حوزه ی دور بهتر از حوزه ی نزدیک است.
۵. در بارگذاری سینوسی افزایش میرایی اثر منفی بر کاهش پاسخ سازه ها دارد.
۳. در رکورد سینوسی برای سازه های گوناگون روند تغییرات به ازای نسبت جرم های مختلف یکسان است.

با توجه به نمودار های بدست آمده برای سازه های برشی مجهز به **FTMD** می توان چنین نتیجه گیری کرد که:

الف) مادامی که پاسخ شتاب طبقات مدنظر باشد:

۱. برای نسبت جرم های مختلف، برای رکوردهای حوزه دور شاهد عملکرد بهتری در بهبود پاسخ هستیم.
۲. مادامی که تحریک از نوع سینوسی باشد، عملکرد ابزار برای تعداد طبقات مختلف به ازای نسبت جرم های گوناگون روندی مشابه و یکسانی دارد.
۳. بهترین پاسخ ها در ضرایب اصطکاک کوچکتر از ۰/۰۵ اتفاق می افتد.
۴. برای تحریک سینوسی، با افزایش ضریب اصطکاک از اثرگذاری ابزار بر کاهش پاسخ کاسته می شود.
۵. در ضرایب اصطکاک مختلف، برای رکوردهای حوزه دور در قیاس با رکوردهای حوزه نزدیک، شاهد عملکرد بهتری در بهبود پاسخ هستیم.

ب) مادامی که پاسخ برش پایه مدنظر باشد:

۱. به ازای نسبت جرم های گوناگون، برای سازه های ۵۰ و ۲۰ طبقه در رکوردهای حوزه نزدیک و برای سازه های ۱۰ و ۳۵ طبقه عملکرد بهتری در بهبود پاسخ شاهد هستیم.
۲. در تحریک سینوسی به ازای نسبت جرم های مختلف، عملکرد ابزار برای سازه های مختلف روندی مشابه و یکسان دارد.

جنبه اقتصادی نداشته و از لحاظ اجرایی چالش‌های جدیدی را پدید می‌آورد. در ادامه جزئیات بیشتر و مقادیر کرانی مربوط به هر پارامتر به اختصار در جداول (۲۵-۲۸) پیش رو آورده شده است.

جدول (۲۵): مقادیر کرانی پارامترهای TMD برای سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه

بهبود پاسخ	نسبت میرایی	نسبت جرمی	نسبت فرکانسی	نوع پاسخ	نوع رکورد	تعداد طبقات	نوع میراگر
Z19	٪۲۵	٪۱۰	۱	شتاب	حوزه دور	سازه ۱۰ طبقه	TMD
Z25	٪۲۵	٪۱۰	۰/۷	برش پایه			
Z17	٪۴۵	٪۱۰	۰/۵	دریفت			
Z12	٪۲۵	٪۱۰	۰/۵	جابجایی بام			
Z36	٪۵۵	٪۱۰	۰/۸	شتاب			
Z37	٪۴۵	٪۱۰	۰/۸	برش پایه			
Z17	٪۵۵	٪۱۰	۰/۷	دریفت			
Z15	٪۲۵	٪۱۰	۰/۸	جابجایی بام			
Z82	٪۵	٪۱۰	۱/۱	شتاب			
Z87	٪۵	٪۱۰	۱/۲	برش پایه			
Z87	٪۵	٪۱۰	۰/۸	دریفت			
Z81	٪۵	٪۱۰	۰/۸	جابجایی بام			
Z34	٪۵۵	٪۱۰	۰/۸	شتاب	حوزه نزدیک	سازه ۲۰ طبقه	TMD
Z33	٪۲۵	٪۱۰	۰/۷	برش پایه			
Z25	٪۱۵	٪۱۰	۰/۹	دریفت			
Z28	٪۱۵	٪۱۰	۰/۷	جابجایی بام			
Z34	٪۵۵	٪۱۰	۱/۴	شتاب			
Z40	٪۲۵	٪۱۰	۰/۴	برش پایه			
Z30	٪۱۵	٪۱۰	۰/۵	دریفت			
Z31	٪۱۵	٪۱۰	۰/۶	جابجایی بام			
Z87	٪۵	٪۱۰	۱/۱	شتاب			
Z87	٪۵	٪۱۰	۱/۲	برش پایه			
Z87	٪۵	٪۱۰	۰/۸	دریفت			
Z87	٪۵	٪۱۰	۰/۸	جابجایی بام			

به عنوان مثال، از جدول ۲۵ میتوان دریافت که پارامترهای TMD استفاده شده و پاسخ موردنظر دریافت طبقات باشد برای سازه ۲۰ طبقه تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور حداکثر بهبود پاسخ ۲۵ درصد بوده که این مقدار هنگامی محقق میگردد که نسبت میرایی ۱۵ درصد، نسبت جرمی ۱۰ درصد و نسبت فرکانسی ۰/۹ باشد.

۳. با افزایش ضریب اصطکاک برای بارگذاری سینوسی در سازه‌های مختلف، از اثرگذاری FTMD در کاهش پاسخ کاسته می‌شود.
۴. بهترین عملکرد ابزار در کمترین ضریب اصطکاک (کوچکتر از ۰/۰۵) رخ میدهد.

ج) مادامی که پاسخ جابجایی نسبی طبقات مدنظر باشد:

۱. به طور کلی با افزایش نسبت جرمی پاسخ بهبود می‌یابد.
۲. افزایش ارتفاع سازه مادامی که سازه تحت تحریک سینوسی باشد، تغییری بر روند پاسخ ایجاد نکرده و نتایج با یکدیگر مشابه هستند.
۳. به طور کلی افزایش ضریب اصطکاک تاثیر مثبت بر عملکرد ابزار نخواهد گذاشت.
۴. برای ضرایب اصطکاک مختلف، در سازه‌های ۵۰ و ۳۵ طبقه در رکوردهای حوزه دور و در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه در رکوردهای حوزه نزدیک ابزار عملکرد بهتری در بهبود پاسخ از خود نشان میدهد.

د) مادامی که پاسخ جابجایی نسبی طبقات مدنظر باشد:

۱. افزایش نسبت جرمی سبب بهبود پاسخ می‌گردد.
۲. افزایش ضریب اصطکاک اثر مثبتی بر بهبود پاسخ نخواهد گذاشت.
۳. افزایش نسبت جرمی در سازه‌های ۵۰ و ۳۵ طبقه در رکوردهای حوزه دور و در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه در رکوردهای حوزه نزدیک اثرگذاری بهتری در بهبود پاسخ خواهد داشت.
۴. در بارگذاری سینوسی با افزایش ضریب اصطکاک، از عملکرد ابزار در بهبود پاسخ کاسته می‌شود.

همان طور که انتظار می‌رفت تفاوت در نوع موج تحریک منجر به مقادیر پهنه مختلفی می‌شود که با توجه به اینکه کدام پاسخ سازه‌ای مد نظر است، می‌توان مقدار مشخصی را به پارامترهای مورد نظر تخصیص داد. پاسخ‌های بدست آمده در سازه مجهز به TMD و FTMD تحت رکورد های حوزه دور با افزایش تعداد طبقات بهتر می‌شود. با توجه به وجود متغیرها، پارامترها و پاسخ‌های گوناگون بدیهی است که با در نظر گرفتن شرایط و موقعیت سازه، باید از نمودارهای منطبق با آن شرایط برای به حداقل رساندن (بهبود) پاسخ‌ها استفاده کرد. در مجموع جواب‌های متفاوت و گوناگونی به ازای پاسخ‌های ناهمگون وجود خواهد داشت که ممکن است نسبت به یکدیگر همپوشانی نداشته و یا در تضاد با یکدیگر باشند و گاهی ممکن است برای مواردی برای مساله مورد نظر، چند جواب بدست آمده باشد. افزایش نسبت جرمی در هر دو میراگر سبب بهبود کارایی آنها میشود که افزایش این نسبت از یک مقدار مشخص،

جدول (۲۶) : مقادیر کرانی پارامترهای TMD برای سازه های ۳۵ و ۵۰ طبقه

نوع میراگر	تعداد طبقات	نوع رکورد	نوع پاسخ	نسبت فرکانسی	نسبت جرمی	نسبت میرایی	نسبت پاسخ
TMD	سازه ۳۵ طبقه	حوزه نور	شتاب	۱	٪۱۰	٪۵۵	٪۴۶
			برش پایه	۰/۱	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۷
			دریخت	۰/۷	٪۱۰	٪۳۵	٪۳۹
		حوزه نزدیک	جلیجایی بام	۰/۶	٪۱۰	٪۳۵	٪۳۰
			شتاب	۰/۳	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۸
			برش پایه	۰/۸	٪۱۰	٪۰۵	٪۳۶
		سینوسی	دریخت	۰/۵	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۷
			جلیجایی بام	۱/۱	٪۱۰	٪۱۵	٪۱۶
			شتاب	۱/۱	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۲
		حوزه نور	برش پایه	۱/۲	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۲
			دریخت	۱/۸	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۰
			جلیجایی بام	۰/۸	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۰
	سازه ۵۰ طبقه	حوزه نور	شتاب	۰/۸	٪۴	٪۳۵	٪۳۲
			برش پایه	۰/۳	٪۱۰	٪۳۵	٪۲۸
			دریخت	۰/۹	٪۱۰	٪۰۵	٪۴۵
		حوزه نزدیک	جلیجایی بام	۰/۹	٪۱۰	٪۱۵	٪۴۱
			شتاب	۰/۳	٪۱۰	٪۳۵	٪۳۸
			برش پایه	۰/۲	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۴
		سینوسی	دریخت	۰/۹	٪۱۰	٪۱۵	٪۳۹
			جلیجایی بام	۰/۸	٪۸	٪۰۵	٪۳۲
			شتاب	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
		حوزه نور	برش پایه	۱/۲	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			دریخت	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			جلیجایی بام	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲

جدول (۲۷) : مقادیر کرانی پارامترهای FTMD برای سازه های ۱۰ و ۲۰ طبقه

نوع میراگر	تعداد طبقات	نوع رکورد	نوع پاسخ	نسبت فرکانسی	نسبت جرمی	نسبت میرایی	نسبت پاسخ
FTMD	سازه ۱۰ طبقه	حوزه نور	شتاب	۱	٪۱۰	۰/۱	٪۳۰
			برش پایه	۱/۱	٪۱۰	۰/۱	٪۱۵
			دریخت	۱	٪۶	۰/۰۵	٪۱۲
		حوزه نزدیک	جلیجایی بام	۰/۸	٪۴	۰/۰۵	٪۷
			شتاب	۱/۴	٪۴	-	٪۲۵
			برش پایه	۱/۳	٪۱۰	۰/۱۵	٪۲۴
		سینوسی	دریخت	۱/۳	٪۴	۰/۰۵	٪۱۶
			جلیجایی بام	۰/۹	٪۱۰	۰/۰۵	٪۱۴
			شتاب	۱/۱	٪۱۰	-	٪۸۲
		حوزه نور	برش پایه	۱/۱	٪۱۰	-	٪۸۱
			دریخت	۰/۸	٪۱۰	-	٪۸۰
			جلیجایی بام	۰/۹	٪۱۰	-	٪۸۱
	سازه ۲۰ طبقه	حوزه نور	شتاب	۱/۱	٪۱	-	٪۳۱
			برش پایه	۱/۱	٪۱۰	-	٪۱۰
			دریخت	۰/۸	٪۱۰	-	٪۱۱
		حوزه نزدیک	جلیجایی بام	۰/۷	٪۱۰	۰/۰۵	٪۱۶
			شتاب	۰/۱	٪۱	-	٪۲۸
			برش پایه	۰/۴	٪۶	-	٪۳۷
		سینوسی	دریخت	۰/۷	٪۲	-	٪۲۲
			جلیجایی بام	۰/۷	٪۱۰	۰/۰۵	٪۲۵
			شتاب	۱/۱	٪۱۰	-	٪۸۲
		حوزه نور	برش پایه	۱/۳	٪۱۰	-	٪۸۲
			دریخت	۰/۸	٪۱۰	-	٪۸۰
			جلیجایی بام	۰/۹	٪۱۰	-	٪۸۲

جدول (۲۸) : مقادیر کرانی پارامترهای FTMD برای سازه های ۳۵ و ۵۰ طبقه

نوع میراگر	تعداد طبقات	نوع رکورد	نوع پاسخ	نسبت فرکانسی	نسبت جرمی	نسبت میرایی	نسبت پاسخ
FTMD	سازه ۳۵ طبقه	حوزه نور	شتاب	۱	٪۱	-	٪۲۶
			برش پایه	۰/۳	٪۱	-	٪۲۵
			دریخت	۰/۸	٪۱۰	۰/۰۵	٪۲۹
		حوزه نزدیک	جلیجایی بام	۰/۸	٪۱۰	۰/۰۵	٪۲۶
			شتاب	۰/۵	٪۶	-	٪۲۶
			برش پایه	۰/۸	٪۸	-	٪۲۶
		سینوسی	دریخت	۰/۶	٪۱۰	-	٪۲۲
			جلیجایی بام	۱	٪۱۰	۰/۰۵	٪۱۶
			شتاب	۱/۱	٪۱۰	-	٪۸۲
		حوزه نور	برش پایه	۱/۳	٪۱۰	-	٪۸۱
			دریخت	۰/۸	٪۱۰	-	٪۸۰
			جلیجایی بام	۰/۹	٪۱۰	-	٪۸۱
	سازه ۵۰ طبقه	حوزه نور	شتاب	۰/۷	٪۴	-	٪۳۱
			برش پایه	۰/۱	٪۱	-	٪۲۸
			دریخت	۰/۹	٪۱۰	-	٪۴۳
		حوزه نزدیک	جلیجایی بام	۱	٪۱۰	-	٪۳۷
			شتاب	۰/۱	٪۱	-	٪۲۵
			برش پایه	۰/۱	٪۱	-	٪۲۵
		سینوسی	دریخت	۰/۸	٪۶	-	٪۲۴
			جلیجایی بام	۰/۷	٪۱۰	-	٪۳۱
			شتاب	۱/۱	٪۱۰	-	٪۸۲
		حوزه نور	برش پایه	۱/۳	٪۱۰	-	٪۸۲
			دریخت	۰/۸	٪۱۰	-	٪۸۰
			جلیجایی بام	۰/۹	٪۱۰	-	٪۸۲

از انجام مجموعه تحلیل های صورت گرفته برای ۴ نمونه سازه برشی به ازای مقادیر مختلف نسبت میرایی، نسبت جرمی، نسبت فرکانسی و ضرایب اصطکاک گوناگون؛ نتایج زیر حاصل شد:

۱- با کاهش نسبت میرایی می توان به نسبت جرم های گوناگون و نزدیک به یکدیگر برای یک سطح از کاهش پاسخ رسید.

۲- برای یک نسبت فرکانس مشخص، افزایش نسبت میرایی در نسبت جرم های بزرگتر، تأثیر بیشتری بر کاهش پاسخ ها دارد.

۳- در فرکانس های نزدیک به فرکانس اصلی سازه، با افزایش نسبت میرایی برای نسبت جرمی معلوم باعث افزایش پاسخ ها (تأثیر منفی بر بهبود پاسخ ها) خواهد داشت.

۴- به طور کلی افزایش نسبت جرمی باعث کاهش تمامی پاسخ ها می گردد. اما این افزایش بیشتر از یک مقدار مشخص، علاوه بر اینکه اجرایی و مقرون به صرفه نیست، تأثیر چشمگیری در کاهش میزان پاسخهای سازه نخواهد داشت.

۵- در فرکانس هایی نزدیک به فرکانس اصلی سازه (۰/۹ تا ۱/۱) و همچنین فرکانس های کران بالا و پایین محدوده مورد نظر، می توان از چندین نسبت میرایی برای رسیدن به یک سطح مشخص از پاسخ بهره برد.

۶- با افزایش نسبت میرایی، از تأثیر یک نسبت جرمی خاص بر کاهش پاسخ ها کاسته می شود.

۷- با افزایش نسبت جرمی می‌توان از تعداد نسبت میرایی های بیشتری به منظور کاهش پاسخ سازه استفاده کرد.

۸- برای یک نسبت میرایی مشخص، با افزایش نسبت جرمی پاسخ ها بهبود پیدا می‌کند.

۹- در فرکانس هایی به دور از فرکانس سازه (کران بالا و پایین محدوده فرکانس)، می‌توان از چند نسبت جرمی برای رسیدن به سطحی مشخص از کاهش در پاسخ ها دست یافت.

۱۰- تاثیر تغییرات نسبت جرمی نسبت به نسبت میرایی بر تغییرات کاهش پاسخ سازه بیشتر است.

۱۱- ضرایب اصطکاک پایین (۰ تا ۰/۰۵) اثر بهتر و بیشتری بر کاهش پاسخ ها دارد.

۱۲- با افزایش نسبت جرمی می‌توان از ضرایب اصطکاک متفاوتی برای رسیدن به یک سطح معلوم از کاهش پاسخ ها سود جست.

۱۳- برای یک مقدار مشخص از ضریب اصطکاک، افزایش نسبت جرمی سبب بهبود پاسخ ها می‌گردد.

۱۴- انتخاب نوع پاسخ های مورد نظر در بدست آوردن بهترین مقادیر برای پارامترهای میراگر بسیار اهمیت دارد؛ چرا که می‌تواند نتایج متفاوتی را در هر حالت نتیجه دهد.

۱۵- با افزایش تعداد طبقات، اثرگذاری میراگرها در کاهش پاسخ ها افزایش میابد.

۱۶- سازه های مجهز به این میراگر ها برای بارگذاری لرزه‌ای، تحت رکورد های حوزه دور عملکرد بهتری از خود نشان می دهند.

۱۷- تحت بارگذاری ناشی از تحریک های سینوسی، استفاده از این میراگرها کاهش چشمگیر پاسخ ها را به دنبال دارد.

۱۸- با لحاظ کردن شرایط یکسان ، TMD نسبت به $FTMD$ اثر بیشتری در کاهش پاسخ ها دارد.

References

- [1] Frahm H. Device for damped vibrations of bodies. U.S Pat No 1909;989(958).
- [2] Xu T, Li Y, Lai T, Zheng J. A simplified design method of tuned inerter damper for damped civil structures: theory, validation, and application. *Structural Control and Health Monitoring*; 2021.
- [3] Hu JW, Naeim K, Mansouri I, Shokrgozar HR. Efficiency of tmds and tlds for lowrise and mid-rise buildings subjected to near-field and far-field earthquakes. *Ingegneria Sismica* 2019;36(4):1–32.
- [4] Gorini DN, Chisari C. Effect of soil-structure interaction on seismic performance of tuned mass dampers in buildings. 2019. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*; 2019.p. 2690–7.
- [5] Den Hartog JP. *Mechanical vibrations*. 1940.
- [6] Tsai H-C, Lin G-C. Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems. *Earthq Eng Struct Dynam* 1993;22(11):957–73. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290221104>.
- [7] Villaverde R, Koyama LA. Damped resonant appendages to increase inherent damping in buildings. *Earthq Eng Struct Dynam* 1993;22:491–507.
- [8] Villaverde R, Aguirre M, Hamilton C. Aseismic roof isolation system built with steel oval elements: exploratory study. *Earthq Spectra* 2005;21(1):225–41. <https://doi.org/10.1193/1.1850528>.
- [9] Sadek F, Mohraz B, Taylor AW, Chung RM. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthq Eng Struct Dynam* 1997;26:617–35. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.1-2.173>.
- [10] Rana R, Soong TT. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Eng Struct* 1998;20(3):193–204. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00078-3).
- [11] Cetin H, Aydin E. A new tuned mass damper design method based on transfer functions. *KSCE J Civ Eng* 2019;23(10):4463–80. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0305-x>.
- [12] Jangid RS, Datta TK. Performance of Multiple Tuned Mass dampers for torsionally coupled system. *Earthq Eng Struct Dynam* 1997;26(3):307–17. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199703\)26:3<307::AID-EQE639>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199703)26:3<307::AID-EQE639>3.0.CO;2-8).
- [13] Almaz'an JL, Espinoza G, Aguirre JJ. Torsional balance of asymmetric structures by means of tuned mass dampers. *Eng Struct* 2012;42:308–28. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.034>.
- [14] Soto-Brito R, Ruiz SE. Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers. *Earthq Eng Struct Dynam* 1999;28(11):1255–71. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199911\)28:11<1255::AID-EQE865>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199911)28:11<1255::AID-EQE865>3.0.CO;2-C).
- [15] Lukkunaprasit P, Wanitkorkul A. Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes. *Earthq Eng Struct Dynam* 2001;30(4):537–51. <https://doi.org/10.1002/eqe.22>.
- [16] Pinkaew T, Lukkunaprasit P, Chatupote P. Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures. *Eng Struct* 2003;25(1):39–46. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00115-3).
- [17] Sgobba S, Marano GC. Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behavior. *Mech Syst Signal Process* 2010;24(6):1739–55. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.01.009>.
- [18] Hashimoto T, Fujita K, Tsuji M, Takewaki I. Innovative base-isolated building with large mass-ratio TMD at basement for greater earthquake resilience. 2015. <https://doi.org/10.1186/S40984-015-0007-6>.PDF.

- [19] Yin X, Song G, Liu Y. Vibration suppression of wind/traffic/bridge coupled system using multiple pounding tuned mass dampers (MPTMD). 2019. <https://doi.org/10.3390/s19051133>.
- [20] Kaveh A, Fahimi Fazam M, Maroofiazar R. Comparing H2 and H ∞ algorithms for optimum design of tuned mass dampers under near-fault and far-fault earthquake motions. 2020. <https://doi.org/10.3311/ppci.16389>.
- [21] Charalampakis AE, Tsiatas GC, Tsopelas P. A mass-reduction design concept for seismic hazard mitigation. *Earthq Eng Struct Dynam* 2019;49:301–14. 2020.
- [22] Wong KKF, Johnson J. Seismic energy dissipation of inelastic structures with multiple tuned mass dampers. *J Eng Mech* 2008;134(2):163–72.
- [23] Inaudi JA, Kelly JM. Mass damper using friction-dissipating devices. *J Eng Mech* 1995;121(1):142–9.
- [24] Ricciardelli F, Vickery BJ. Tuned vibration absorbers with dry friction. *Earthq Eng Struct Dynam* 1999;723(July 1998):707–23.
- [25] Lin GL, Lin CC, Lu LY, Ho YB. Experimental verification of seismic vibration control using a semi-active friction tuned mass damper. *Earthq Eng Struct Dynam* 2012;41(4):813–30.
- [26] Lin CC, Lin GL, Wang JF. Protection of seismic structures using semi-active friction TMD. *Earthq Eng Struct Dynam* 2010;39(6):635–59.
- [27] Gewei Z, Basu B. A study on friction-tuned mass damper: harmonic solution and statistical linearization. *J Vib Control* 2011;17(September 2010):721–31. <https://doi.org/10.1177/1077546309354967>.
- [28] Pisal AY, Jangid RS. Dynamic response of structure with tuned mass friction damper. *Int. J. Adv. Struct. Eng.* 2016;8(4):363–77.
- [29] Pisal AY, Jangid RS. Seismic response of multi-story structure with multiple tuned mass friction dampers. *Int. J. Adv. Struct. Eng.* 2014;6(1). <https://doi.org/10.1007/s40091-014-0046-5>.
- [30] Matta E. Bidirectional pendulum vibration absorbers with homogeneous variable tangential friction: modelling and design. *Int. J. Struct. Constr. Eng.* 2018;12(11):1074–82.
- [31] Carmona JEC, Avila SM, Doz G. Proposal of a tuned mass damper with friction damping to control excessive floor vibrations. *Eng Struct* 2017;148:81–100.
- [32] Kim SY, Lee CH. Analysis and optimization of multiple tuned mass dampers with coulomb dry friction. *Eng Struct* 2020;209(November):110011. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110011>.
- [33] Salimi M, Kamgar R R, Heidarzadeh H. An evaluation of the advantages of friction TMD over conventional TMD. *Innov Infrastruct Solut* 2021;6(95).
- [34] Besharatian B, Tajmir Riahi H, Garcia R, Hajirasouliha I. Particle swarm optimization of friction tuned mass dampers subjected to ground motion records. *Soil Dynam Earthq Eng* 2023;172.
- [35] Besharatian.B , Tajmir Riahi.H, Garcia b.R, Hajirasouliha.I (2024) A practical optimisation method for friction tuned mass dampers in multi-storey buildings subjected to earthquake excitations , *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*
- [36] Zahrai.S.M , Ghannadi-Asl1 ; (2008) Seismic Performance of TMDs in Improving the Response of MRF Buildings , *Scientia Iranica*, Vol. 15, No. 1, pp 21-33
- [37] Chopra, A. (2022). *“Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering”*, 5rd ed, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey

- [38] Chopra, A.K. and C. Chintanapakdee, "Comparing response of SDF systems to near- fault and far- fault earthquake motions in the context of spectral regions", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(12), 1769-1789, 2001.
- [39] Alavi, B. and H. Krawinkler, *Effects of near-fault ground motions on frame structures*. John A. Blume Earthquake Engineering Center, 2001.
- [40] Ambraseys, N. and J. Douglas, "Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions", *Soil dynamics and earthquake engineering*, 23(1), 1-18, 2003.
- [41] Bray, J.D. and A. Rodriguez-Marek, "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 815-828, 2004.
- [42] Kim SY, Lee CH. Analysis and optimization of multiple tuned mass dampers with coulomb dry friction. *Eng Struct* 2020;209(November):110011
- [43] Kaveh.A, Ardebili.S.R ; (2021) A Comparative Study of the Optimum Tuned Mass Damper for High-rise Structures Considering Soil-structure Interaction , *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(4), pp. 1036–1049