



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>
Iranian
Concrete
InstitutePavement
Engineering
Association of
Iran

Comparative Study of the Use of Tuned Mass Damper and Frictional Mass Damper in Shear Structures to Reduce the Amplitude of Lateral Vibrations

Research Article

Masoud MahmoodAbadi¹ , Hossein Hasani²DOI: [10.22067/jfpei.2025.94637.1367](https://doi.org/10.22067/jfpei.2025.94637.1367)

1- Introduction

Tuned Mass Dampers (TMD) and Tuned Friction Mass Dampers (FTMD) are devices attached to structures to provide safety and comfort for both the structure and its occupants during vibration events. The traditional approach of increasing structural strength and member capacity is often ineffective for tall structures. A crucial issue in tall building design is reducing structural response quantities—such as velocity, displacement, and acceleration—under dynamic loads, particularly from earthquakes and wind. Tuned Mass Dampers (TMDs) are among the oldest devices used to mitigate vibrations caused by dynamic environmental loads. Furthermore, Friction-Tuned Mass Dampers (FTMD) are considered a competitive alternative. A Tuned Mass Damper (TMD) consists of a mass, spring, and damper attached to the structure to reduce its dynamic response. The primary purpose of this damper is to reduce the response of the main structure by tuning an additional vibrational mass to bring its frequency closer to the resonant frequency of the main structure. In this manner, the vibration of the main structure causes the damper to vibrate out of phase and in the opposite direction to the structure's motion under resonant conditions, thereby damping the vibration through the damper's energy dissipation mechanism. These dampers are typically placed at the part of the structure with the largest displacement, such as the roof. Generally, three parameters define a TMD: the frequency ratio $f = \omega_d / \omega_{n1}$, the mass ratio $\mu = \frac{m_d}{m_s}$, and the damping ratio $\xi_d = \frac{c_d}{2m_d \omega_d}$ where $\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}$ and ω_{n1} is the fundamental angular frequency of the structure without the TMD. The Friction-Tuned Mass Damper (FTMD) is a special type of vibration control device. It consists of a TMD with linear stiffness, a pure friction damper, and exhibits nonlinear behavior. A spring creates an elastic mechanism, while a friction mechanism generates an adjustable friction force that alters the damping characteristics. Similar to the TMD, the mass and spring are calibrated to match the natural frequency of the main

structure, leading to vibration absorption and damping. FTMD parameters include the frequency ratio $f = \omega_d / \omega_{n1}$, the mass ratio $\mu = \frac{m_d}{m_s}$, and the friction coefficient $R_f = \frac{f_s}{m_d g}$.

2- Modeling

In this study, the desired behavior for FTMD and TMD was modeled in OpenSees. This was achieved by assuming a TMD system without damping, considering friction relative to the contact surface, and connecting this configuration to the main structure via a zero-length element. Four shear structures with 10, 20, 35, and 50 stories were considered. The fundamental vibration period of these structures was calculated using the formula $T_n = \frac{N}{10}$, where N is the number of stories. Subsequently, 20 far-field and 20 near-field earthquake records, along with a sinusoidal wave consistent with the structures' fundamental frequency, were applied, and their responses to these records were calculated. The TMD was then installed at the roof level of these structures, followed by the installation of the FTMD, and the records were applied again. Finally, 540 analysis cases were performed with TMD and 810 with FTMD, and the results—including maximum relative floor displacement, maximum floor acceleration, maximum base shear, and maximum roof displacement—were calculated.

According to the literature reviewed in this field, such a comprehensive and extensive study has not been conducted previously, which constitutes the innovation and creativity of this research. The mass considered was 450 tons uniformly for the floors and 400 tons for the roof. The behavior of the structures was examined in the linear range, and the stiffness of the floors was decreased stepwise from the bottom to the top (such that the roof stiffness was assumed to be 0.4 times that of the first floor).

3- Dynamic Analysis of Shear Structures

This section presents the results of analyzing 10, 20, 35, and 50-story shear models subjected to near-field, far-

* Manuscript received July 26, 2025, Revised August 16, 2025, Accepted October 04, 2025.

¹ Corresponding author: Assistant Professor, Faculty of Engineering, Qom University. **Email:** m.mahmoudabadi@qom.ac.ir

² Senior Student of Structural Engineering, Qom University.

field, and sinusoidal excitations in graphical form. The effectiveness of dampers depends on the correct selection of their values and parameters. For the shear models, the damper location was assumed to be at the roof. The mass ratio for the dampers was considered as {0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10}. The frequency ratio range [0.1 - 1.5] with a step of 0.1 was considered to cover all possible states and conditions. For the TMD, the values {0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55} were selected for the damping ratio, and for the FTMD, the friction coefficients included {0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40}.

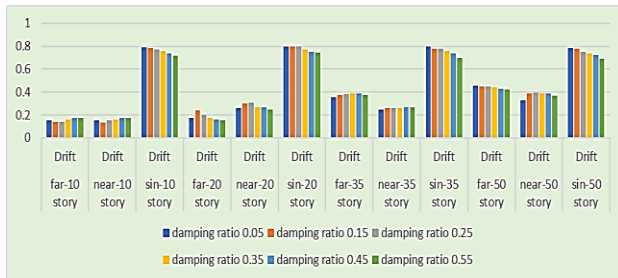


Figure 1: TMD tool performance based on damping ratio for drift story response

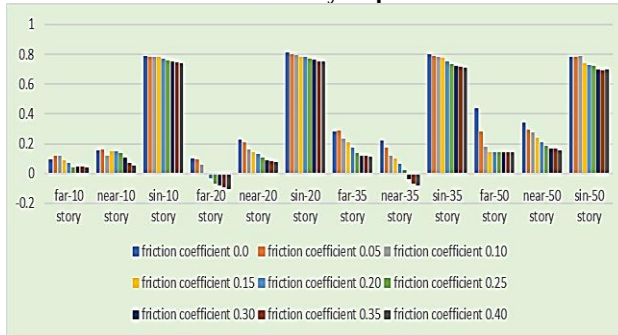


Figure 2: Performance of FTMD tool based on friction coefficient for drift story response

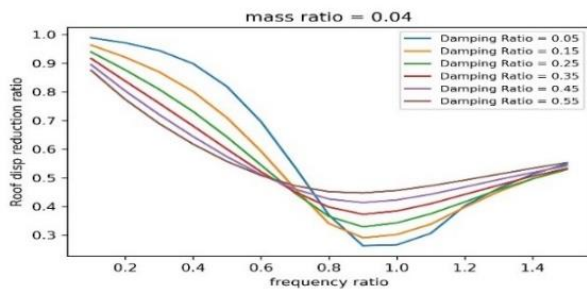


Figure 3: Maximum roof displacement response for a 10-story model equipped with TMD under sinusoidal wave

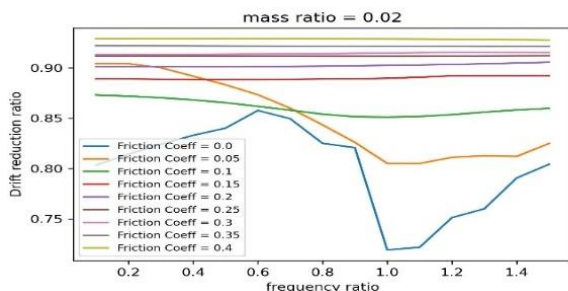


Figure 4: Drift story response for a 35-story model equipped with FTMD under a set of far-field records

4- Conclusion

Based on the analyses conducted for four types of shear

structures with varying damping ratios, mass ratios, frequency ratios, and friction coefficients, and according to the resulting diagrams and graphs, the following results were obtained:

1. By reducing the damping ratio, it is possible to achieve different yet close mass ratios for a given level of response reduction.
2. For a given frequency ratio, increasing the damping ratio at larger mass ratios has a greater effect on reducing responses.
3. At frequencies close to the structure's fundamental frequency, increasing the damping ratio for a known mass ratio leads to an increase in responses (a negative effect on response improvement).
4. In general, increasing the mass ratio reduces all responses. However, beyond a certain value, this increase becomes impractical and uneconomical, with no significant effect on further response reduction.
5. At frequencies close to the structure's fundamental frequency (0.9 to 1.1) as well as the upper and lower bounds of the desired range, several damping ratios and mass ratios can be used to achieve a specific response level.
6. Increasing the damping ratio reduces the effect of a specific mass ratio on response reduction.
7. Increasing the mass ratio allows for the use of a wider range of damping ratios to reduce the structure's response.
8. For a given damping ratio, responses improve as the mass ratio increases.
9. The effect of changes in the mass ratio on response reduction is greater than that of the damping ratio.
10. Low friction coefficients (0 to 0.05) have a better and greater effect on reducing responses.
11. Selecting the type of desired responses is crucial for determining the optimal damper parameters, as it can yield different results in each case.
12. Under sinusoidal excitations, the use of these dampers leads to a significant reduction in responses.
13. Under the same conditions, TMD has a greater effect on reducing responses.
14. For structures under sinusoidal waves, increasing the damping ratio has a negative effect on response reduction, which becomes more pronounced as the structure's height increases.
15. Depending on the number of stories, the optimal friction coefficients and damping ratios vary continuously to achieve the best response, and no fixed rule can be established for their behavior.
16. In all responses, the TMD exhibits more effective performance under sinusoidal waves compared to seismic loading.
17. For an arbitrary structure under sinusoidal excitation, friction can be considered as damping, and increasing the friction coefficient negatively affects the reduction of all responses, although fluctuations are observed in some cases.



بررسی مقایسه‌ای استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده و میراگر جرمی اصطکاکی تنظیم شده در سازه‌های برشیه منظور کاهش دامنه ارتعاشات جانبی*

مقاله پژوهشی

حسین حسینی^(۲)

مسعود محمودآبادی^(۱)

DOI: 10.22067/jfcei.2025.94637.1367

چکیده در این مقاله عملکرد سازه‌های برشی مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم شده و میراگرهای جرمی اصطکاکی تنظیم شده در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک، دور و همچنین تحت نگاشت 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، بیست رکورد زلزله حوزه نزدیک و همچنین تحت نگاشت 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 پاسخ‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های برشی، میراگر جرمی تنظیم شده، میراگر جرمی اصطکاکی تنظیم شده، زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، بارگذاری سینوسی.

Comparative Study of the Use of Tuned Mass Damper and Friction Tuned Mass Damper in Multi-story Shear Structures to Reduce the Amplitude of Lateral Vibrations

Masoud Mahmoudabadi

Hossein Hasani

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, farfield and near field earthquake, Sinusoidal loading.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۵/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۷/۱۲ می‌باشد.

Email: m.mahmoudabadi@qom.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم.

(۲) کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم.

مقدمه و سوابق پژوهش

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 همواره در معرض زلزله و یا نیروی باد قرار دارند و برای پایداری در برابر بارهای دینامیکی باید به دنبال راه حل بود. مدل‌کردن این سازه‌ها به صورت یک سازه برشی (Shear structure) گرچه با ساده‌سازی‌هایی همراه است و به نوعی یک سازه ایدئال تلقی می‌شود، ولی برای درک بهتر رفتار سازه و تعیین پارامترهای لازم برای اهداف مقاوم‌سازی و بهسازی سودمند است و در پایان نیز نتایج به دست آمده قابل استفاده هستند.

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) (Tuned Mass Damper) و میراگر جرمی اصطکاکی تنظیم شده (Friction Tuned Mass Damper) (FTMD) از این دست ابزارها هستند که به سازه متصل می‌شوند و در خلال رویدادهای ارتعاشی، ایمنی و آرامش را برای سازه و ساکنان به ارمغان می‌آورند. ارتعاشات ایجاد شده در سازه‌ها را که به سبب زلزله یا نیروی باد اتفاق می‌افتد 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 قدیمی، افزایش مقاومت سازه و بالا بردن ظرفیت اعضا می‌باشد که این کار در سازه‌های بلند کارساز نیست. یک مسئله مهم و قابل ملاحظه در طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه، کاهش کمیت‌های پاسخ سازه همانند سرعت، تغییر مکان و شتاب تحت تأثیر بارهای دینامیکی خصوصاً زلزله و بارگذاری باد است. روش‌های کنترل سازه جزء استراتژی‌هایی برای رسیدن به هدف مذکور می‌باشد که در قالب کنترل فعال (Active Control)، کنترل غیرفعال (Passive Control)، کنترل نیمه فعال (Semi-active Control) و کنترل مرکب یا هیبرید (Hybrid Control) خودنمایی می‌کند. در سه دهه اخیر مسئله کنترل سازه‌ها در مقابل بارهای محیطی مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) جزء قدیمی‌ترین 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 یا جذب می‌کنند که آن‌ها را می‌توان به دو دسته

تقسیم کرد: ۱. دستگاه‌های اتلاف انرژی که مستقل از فرکانس‌های طبیعی سازه هستند و ۲. 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 (TLD) (Tuned Liquid Damper)، میراگر ستون‌های مایع تنظیم شده (TLCD) (Tuned Liquid Column Damper)، 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:

۱. سادگی: کنترل غیرفعال معمولاً ساده‌تر از کنترل فعال است و روش‌های طراحی ساده‌تری دارد.

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

۳. عدم نیاز به انرژی خارجی مثل برق (منبع تغذیه).

از زمان کار فرام [1] در سال ۱۹۰۹، که سیستم TMD را به عنوان 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 ناهمفاز ارتعاش می‌کند و بدین صورت، از حرکت سازه اصلی کاسته می‌شود. در سال ۱۹۴۰، دن هارتوگ [5] سیستم کامل‌تری که از جرم، فنر و میراگر 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 شامل یک سیستم اصلی جرم - فنر - میراگر به همراه یک سیستم ثانویه جرم - فنر - میراگر می‌شد. روش دیگری توسط ویلاورد و کویاما ارائه شد [7] که از نظریه میرایی غیرکلاسیک برای محاسبه میرایی کلی استفاده می‌کرد. چند سال بعد، ویلاورد و همکارانش [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 به عنوان سقف بود که بر فنرها و پاتاقان‌های لاستیکی چند لایه متکی بود. صادق و همکارانش [9] نیز از همین

بر روی سازه‌های SDOF با شرایط سختی خطی و اصطکاک خشک با استفاده از بارهای هارمونیک مطالعه کردند. به طور مشابه، لین و همکارانش [26] 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 [27] مورد مطالعه قرار گرفتند که اثربخشی FTMD ها را در کاهش ارتعاشات سازه‌های SDOF نشان می‌داد. گیوی و باسو [28] یک راه حل دوره‌ای با استفاده از تعادل هارمونی برای سازه‌هایی مجهز به FTMD که تحت تحریکات هارمونیک قرار داشتند، پیشنهاد کردند. پیسال و جانگید [29] 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 [30] یک تحلیل پارامتری بر روی یک ساختمان برشی پنج طبقه متصل به FTMD های تکی و چندگانه انجام دادند. ماتا [31] همچنین از یک مکانیزم اصطکاکی بر روی یک میراگر جرمی پاندول دوجهته استفاده کرد. کارمونا و همکارانش [32] یک میراگر جرمی تنظیم‌شده با میرایی اصطکاکی را برای کنترل ارتعاشات بیش از حد سیستم کف پیشنهاد کردند. کیم و لی [33] 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 [34] نشان دادند که FTMD ها در کاهش جابه‌جایی‌های سقف نسبت به TMD ها مادامی که نسبت جرمی کمتر از $0.3/0$ بود، مؤثرتر هستند. به تازگی بشارتیان و همکارانش رویکرد جدیدی را برای تخمین پارامترهای بهینه FTMD ها با استفاده از الگوریتم PSO ارائه کرده‌اند که در کنترل جابه‌جایی‌های سیستم‌های SDOF تحت رکوردها یلرزه‌ای زمین بسیار مؤثر بوده است. باین حال، بشارتیان و همکارانش [35] 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.

در این پژوهش ۴ سازه برشی با تعداد طبقات ۱۰، ۳۵، ۲۰ و ۵۰ طبقه در نظر گرفته شده است. دوره تناوب اصلی ارتعاش این

استراتژی برای دستیابی به پارامترهای بهینه طراحی استفاده کردند. در سال ۱۹۹۸، رانا و سونگ [10] و سونگ [11] 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 [12] ارائه شد که از رویکرد تابع انتقال و برخی الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌کرد. جانگید و داتا [13] و آلمان و همکاران [14]، استفاده از TMD را برای تعادل پیچشی یک سازه نامتقارن مطالعه کردند. سوتو - بریتو و رویو [15]، پاسخ غیرخطی یک ساختمان بتن مسلح ۲۲ طبقه مجهز به TMD را مورد بررسی قرار دادند. لوکوناپراسیت و وایتکورکول [16]، 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، مورد مطالعه قرار دادند. پینکائو و همکاران [17] شبیه‌سازی‌های عددی را بر روی یک ساختمان بتن مسلح ۲۲ طبقه تحت رکورد زلزله مکزیکوسیتی ۱۹۸۵ انجام دادند. مطالعه مشابهی توسط اسگوبا و مارانو [18] انجام شد که یک سیستم یک درجه آزاد را که توسط مدل هیسترتیک بوک - ون توصیف شده بود، مورد بررسی قرار می‌داد. 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 [19]، بین و همکاران (۲۰۱۹) در مورد حذف ارتعاش با استفاده از TMD های ضربه‌ای چندگانه [20]، 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 [21]. علاوه بر این، چارالامپاکیس و همکاران [22] مفهوم جدیدی از کاهش جرم برای کاهش خطر لرزه‌ای با استفاده از «دال‌های جداسازی شده» که از نظر لرزه‌ای از سیستم سازه‌ای اصلی ساختمان جدا شده‌اند، بررسی کردند. وانگ و جانشون [23] اثربخشی چندین میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) را در افزایش عملکرد سازه‌ای غیرالاستیک تحت شرایط لرزه‌ای بررسی کردند که نتیجه این مطالعه، به دست آوردن دوره‌های تناوب بهینه تنظیم شده و محل قرارگیری TMD برای به حداقل رساندن اتلاف انرژی پلاستیک بود.

در یکی از ابتدایی‌ترین مطالعات بر روی FTMD ها، اینانودی و کلای [24]، 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 [25] پاسخ حالت پایدار TMD ها را

طبقه فرض شود، معادله حرکت دینامیکی سازه مدل شده را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (۱)$$

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

$$M = M_s + M_d \quad (۲)$$

$$C = C_s + C_d \quad (۳)$$

$$K = K_s + K_d \quad (۴)$$

که اندیس s نشان دهنده مقادیر برای سازه اصلی و اندیس d نشان دهنده مقادیر برای TMD است و در روابط بالا M_s ، K_s و M_d ، C_d و K_d به ترتیب نشان دهنده ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی برای سازه اصلی و TMD می‌باشد.

$$M = \text{diag} [m_1 m_2 \dots m_N m_d] \quad (۵)$$

در معادله (۵) برای یک سازه N طبقه، مقادیر m_i جرم طبقه i ام ($i = 1, 2, \dots, N$) است.

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_{i-1} + k_i & -k_i \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_i & k_i + k_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_{i+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \\ -k_{i+1} & \dots & 0 & 0 & 0 & \\ k_{i+1} + k_{i+2} & \dots & 0 & 0 & 0 & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 0 & \dots & k_{N-1} + k_N & -k_N & 0 & \\ 0 & \dots & -k_N & k_N & 0 & \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$C_s = \alpha_1 M_s + \alpha_2 M_d \quad (۷)$$

که مقادیر α_1 و α_2 ثابت‌هایی هستند که با استفاده از نسبت‌های میرایی دوره تناوب‌های مود اول و دوم بدست می-

سازها با استفاده از رابطه $T_n = \frac{N}{10}$ محاسبه گردید. این سیستم‌های MDOF در نرم‌افزار OpenSees شبیه‌سازی شدند و در ادامه ۲۰ رکورد حوزه دور و ۲۰ رکورد حوزه نزدیک و همچنین یک نگاشت سینوسی با فرکانسی برابر با فرکانس اصلی سازه به آنها اعمال گردید و پاسخ سازه‌های مذکور در برابر این رکوردها محاسبه شد. سپس در تراز بام این سازه‌ها یکبار TMD و بار دیگر FTMD نصب گردید و این رکوردها دوباره به آن اعمال گردید. در نهایت ۵۴۰ مجموعه تحلیل با تجهیز TMD و ۸۱۰ مجموعه تحلیل با تجهیز FTMD انجام گردید و حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات، حداکثر شتاب، حداکثر برش پایه و حداکثر تغییر مکان طبقه بام محاسبه گردید. با توجه به مقالات بررسی شده در این زمینه، این چنین کاری تاکنون به این جامعیت و گستردگی انجام نشده است که این موضوع می‌تواند نوآوری و خلاقیت این پژوهش قلمداد شود.

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) یکی از متداول‌ترین و گسترده‌ترین ابزار استفاده شده به منظور کنترل ارتعاش در مهندسی عمران و مکانیک بوده که دامنه کاربرد آن از ماشین‌های دورانی کوچک تا سازه‌های بلند توسعه یافته است. (TMD) دستگاهی متشکل از جرم، فنر و میراگر است که به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه به سازه متصل می‌شود. 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 می‌باشد. بدین صورت که ارتعاش سازه اصلی سبب ارتعاش میراگر به صورت ناهم‌فاز و در خلاف جهت با حرکت سازه در شرایط تشدید می‌گردد و بدین گونه ارتعاش از طریق میرایی میراگر مستهلک می‌شود و انرژی وارد شده از طریق نیروی اینرسی میراگر به سازه تلف می‌شود. این میراگرها در محلی از سازه، که معمولاً دارای بیشترین تغییر مکان می‌باشد (نظیر بام سازه)، قرار می‌گیرند. با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده می‌توان آسایش ساکنان را در برابر ارتعاشات لرزه‌ای تأمین و از خسارات یا گسیختگی سازه‌ای جلوگیری کرد.

معادلات حاکم و پارامترهای TMD

یک سازه چند درجه آزادی (MDOF) را با TMD متصل به یک طبقه خاص (به طور مثال بام) در نظر بگیرید. با فرض اینکه این سازه به عنوان یک ساختمان برشی با جرم متمرکز در هر تراز

مکانیزم اصطکاکی که نوعی نیروی اصطکاکی را به وجود می‌آورد که می‌تواند برای تغییر ویژگی‌های میرایی تنظیم شود. مشابه با TMD جرم و فنر به گونه‌ای کالیبره می‌شود که با فرکانس طبیعی سازه اصلی مطابقت داشته باشد که این هماهنگی در نهایت منجر به جذب ارتعاش و استهلاک آن می‌گردد. در شکل (۱) یک سازه برشی n درجه آزاد که در تراز بام آن ابزار FTMD نصب گردیده است نشان داده شده است.

مکانیزم FTMD

هنگامی که سازه اولیه ارتعاشاتی را تجربه می‌کند (به دلیل باد، زلزله یا اختلالات دیگر)، جرم FTMD در پاسخ به این نوسانات شروع به حرکت می‌کند. از یک سو فنر برای مقابله با این حرکت عمل می‌کند و سعی دارد جرم را به حالت اولیه برگرداند و از سوی دیگر این حرکت سبب می‌شود که جرم‌نیروهای اصطکاکی را تجربه کند که باعث اتلاف انرژی می‌شود. این نیروها انرژی جنبشی را به گرما تبدیلی می‌کنند و در نتیجه دامنه ارتعاشات را در سازه اولیه کاهش می‌دهند. به طور کلی حرکت جرم به گونه‌ای طراحی شده است که با ارتعاشات سازه اصلی در فرکانس طبیعی خود ناهم‌فاز باشد که منجر به کاهش حرکت کلی می‌شود. ترکیب جرم، فنر و اصطکاک به FTMD اجازه می‌دهد تا به طور مؤثر انرژی حاصل از ارتعاشات سازه را جذب کند و آن را از بین ببرد و منجر به کاهش جابه‌جایی و شتاب سازه شود. این مکانیزم در نهایت ایمنی و راحتی سازه را برای ساکنان ساختمان‌ها، پل‌ها یا دیگر انواع سازه‌ها افزایش می‌دهد.

معادلات حاکم و پارامترهای FTMD

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

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

که در آن C, M و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی برای سازه اصلی هستند و E و B ماتریس‌های جای‌گذاری برای نیروی تحریک و نیروی اصطکاک هستند و $X(t)$ و $\dot{X}(t)$ به ترتیب مربوط به جابه‌جایی نسبی، سرعت و شتاب برای سیستم پیکربندی شده بوده و $\ddot{x}_g$ بیانگر شتاب زمین‌لرزه و $F_s(t)$ بردار اصطکاک است که به واسطه FTMD فراهم می‌گردد. در ادامه متغیرهای موجود در معادلات به صورت شماتیک نشان

آیند. 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 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 $K_{s(N,N)}$ به وجود می‌آید و در ادامه با جایگذاری‌های زیر ماتریس کلی سازه تجهیز شده به TMD پدید می‌آید:

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

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

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

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

جزئیات بیشتر روابط (۱) الی (۱۱) در مراجع [36] و [29] آمده است. در معادله (۱)، F بردار نیروی دینامیکی است. اگر این نیرو بارگذاری زلزله باشد، آنگاه خواهیم داشت:

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

که در آن $\ddot{x}_g(t)$ شتاب زمین لرزه و I به عنوان بردار تأثیر است که برداری ستونی با درایه‌های 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 می‌گردد:

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

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

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

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

میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی (Friction Tuned Mass Damper)

میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی FTMD نوعی خاص از دستگاه کنترل ارتعاش است. این ابزار از یک میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) با سختی خطی و میراگر اصطکاکی خالص تشکیل شده و رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد. به طور کلی اجزای تشکیل دهنده آن عبارتند از: ۱) جرم که بر سازه اصلی قرار گرفته است، ۲) فنر که نوعی مکانیزم ارتجاعی ایجاد می‌کند و ۳) یک

داده شده‌اند.

$$X(t) = \begin{Bmatrix} x_p(t) \\ x_d(t) \end{Bmatrix} \quad (17)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_s + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (20)$$

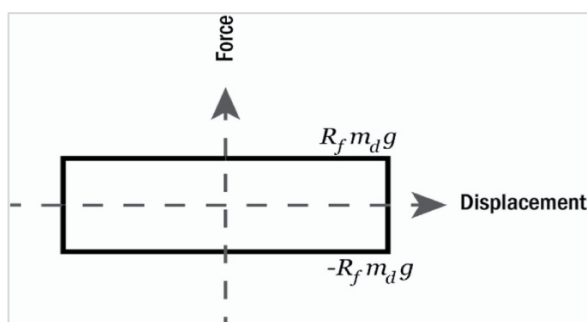
$$M_s = \text{diag} [m_1 m_2 \dots \dots m_N] \quad (21)$$

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

$$f = \frac{\omega_d}{\omega_{n1}} \quad (14) \text{ مکرر}$$

$$R_f = \frac{f_s}{M_d g} \quad (25)$$

در شکل (۲) رابطه بین نیروی اصطکاک FTMD به ازای جابه‌جایی نسبی میراگر نسبت به سازه اصلی در حالت ایدئال نشان داده شده است.



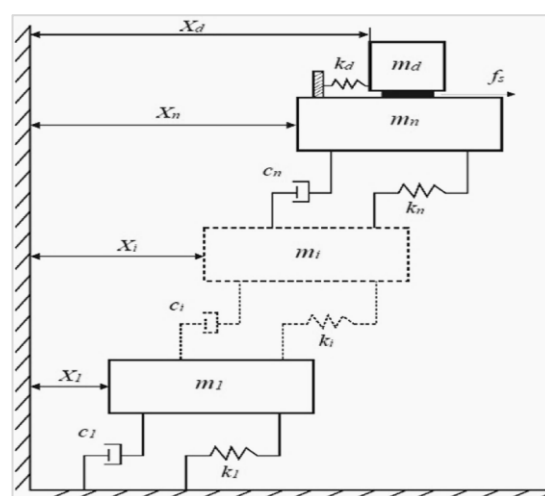
شکل (۲) رابطه بین نیروی اصطکاک و تغییر مکان در ابزار FTMD[36]

صحت‌سنجی و اعتبارسنجی

به طور کلی برای تصدیق در حوزه مطالعات پژوهشی می‌توان دو روش را پیش گرفت: ۱. مدل‌سازی و مقایسه آن با تحقیقات گذشته بدین صورت که با حاصل شدن مشابهت بالای نتایج می‌توان از درستی مدل اطمینان پیدا کرد (صحت‌سنجی). ۲. 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 دو روش استفاده خواهد شد.

صحت‌سنجی FTMD

به سال ۲۰۱۶ میلادی، پیسال و جانگید [29] کارکرد لرزه‌ای استفاده از FTMD را برای سازه یک درجه آزاد (SDOF) (Single Degree of Freedom) مورد بررسی قرار دادند. مشخصات مدل بدین صورت بود که جرم سازه ۱۰ تن، دوره تناوب ۰/۵ ثانیه، نسبت میرایی ۲٪، نسبت جرمی ۲٪ نبود و تحت بارگذاری هارمونیک به معادله $\ddot{x}_g(t) = 0.1g \sin(4\pi t)$ و چند بار لرزه‌ای



شکل (۱) مدل شماتیک یک سیستم چند درجه آزاد مجهز به FTMD[36] پر واضح است که در معادلات بالا k_s و c_s به ترتیب مربوط به سختی و میرایی برای سازه اصلی هستند؛ همچنین m_d نشانگر جرم میراگر و M_s بیانگر جرم سازه اصلی است.

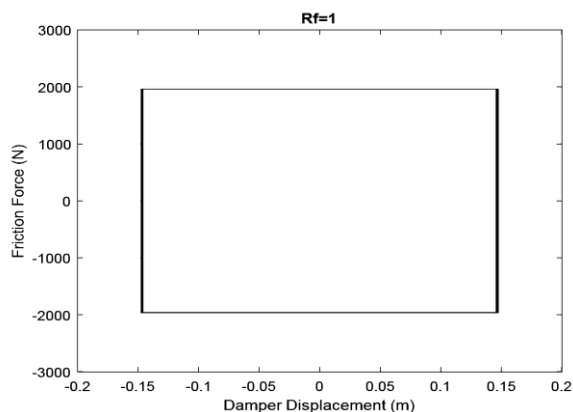
$$E = \begin{bmatrix} -M_s(N \times 1) \\ -M_d \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$B = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1]^T_{((N+1) \times 1)} \quad (23)$$

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

$$F_s(t) = f_s \text{sgn}(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_p(t)) \quad (24)$$

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 هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:



شکل (۴) حلقه هیستریزیس برای سازه مجهز شده به FTMD با $R_f=1$ در این پژوهش

اعتبارسنجی TMD

برای اعتبارسنجی مدل سازی TMD، یک سازه مفروض در *opensees* مدل سازی شده و تحلیل مودال برای آن به اجرا در آمده است. در ادامه نتایج حاصل شده با *Etabs* مورد بررسی قرار گرفته است [38].

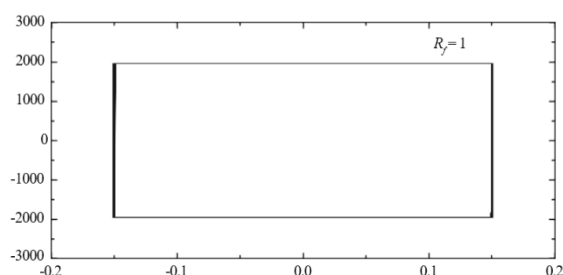
سازه مفروض، یک سازه برشی ۱۰ طبقه با رفتار خطی و میرایی ۵ درصد می باشد که به صورت یک قاب برشی ۲ بعدی مدل شده است. سختی طبقات به صورت تیپ در نظر گرفته شده و جرم طبقات به جز جرم بام یکسان فرض شده است. ابعاد المان های سازه ای (تیر و ستون مربعی شکل) هر طبقه مثل هم بوده با این تفاوت که برای تحقق رفتار برشی،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

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

طبقه	[۴،۱]	[۸،۵]	۹	۱۰
سختی (N/m)	۵۴۳۹۰۰۰۰۰	۳۹۸۸۶۰۰۰۰	۲۵۳۸۲۰۰۰۰	۲۵۳۸۲۰۰۰۰
جرم (Kg)	۴۵۰۰۰۰	۴۵۰۰۰۰	۴۵۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰
مدول الاستیسیته (N/m ²)	۲۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰
بعد مقطع (cm)	۱۳۰/۹۱۱۶۲	۱۲۱/۱۴۴۴	۱۰۸/۲۰۰۶	۱۰۸/۲۰۰۶
طول تیر (m)	۵	۵	۵	۵
ارتفاع ستون (m)	۳	۳	۳	۳

قرار داده شد. در این پژوهش رفتار مورد نظر برای FTMD با توجه به مدل معرفی شده در مرجع [29] در نرم افزار *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 (Zero length element) به سازه اصلی، مدل مرجع [29]، بازیابی و بازسازی شد. در ادامه نتایج به دست آمده از هر دو پژوهش آورده شده و مقایسه ای بین آن ها انجام گردیده است.

با توجه به شکل های (۳) و (۴) نتایج از تطبیق بالای بین سازه مدل شده در این تحقیق و مدل مرجع حکایت دارد که در واقع خبر از صحت مدل سازی می دهد. با توجه به این اشکال، کران بالا و پایین نیروی اصطکاک برابر با $\pm R_f mg$ است و کران چپ و راست آن با فرض اینکه بارگذاری سینوسی باشد وابسته به ضریب اصطکاک R_f است به نحوی که با افزایش ضریب اصطکاک کران چپ و راست کاهش می یابد.



شکل (۳) رابطه بین نیروی اصطکاک و تغییر مکان برای $R_f = 1$ در مرجع [29]

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

شماره مد ارتعاشی	LAMBDA(ω_n^2)	فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)	فرکانس (هرتز)	دوره تناوب ارتعاش (ثانیه)
۱	۳۹/۴۲۶۹	۶/۲۷۹۰۸	۰/۹۹۹۳۴۷	۱/۰۰۰۶۵
۲	۷۷۶/۵۲۳	۲۷/۸۶۶۲	۴/۴۳۵۰۴	۰/۲۲۵۴۷۷
۳	۳۲۰/۱/۴۲	۵۶/۵۸۱۱	۹/۰۰۵۱۶	۰/۱۱۱۰۴۷
۴	۷۳۶۴/۴۴	۸۵/۸۱۶۳	۱۳/۶۵۸۱	۰/۰۷۳۲۱۶۷
۵	۱۲۳۴۷/۹	۱۱۱/۱۲۱	۱۷/۶۸۵۵	۰/۰۵۶۵۴۳۵
۶	۱۶۵۰۸/۵	۱۲۸/۴۸۵	۲۰/۴۴۹۱	۰/۰۴۸۹۰۲
۷	۲۲۴۰۷/۷	۱۴۹/۶۹۲	۲۳/۸۲۴۲	۰/۰۴۱۹۷۴۱
۸	۲۹۳۸۴/۲	۱۷۱/۴۱۸	۲۷/۲۸۲	۰/۰۳۶۶۵۴۱
۹	۳۳۵۹۶/۰	۱۸۳/۲۹۲	۲۹/۱۷۱۸	۰/۰۳۴۲۷۹۶
۱۰	۴۳۴۰۳/۳	۲۰۸/۳۳۴	۳۳/۱۵۷۵	۰/۰۳۰۱۵۹۱

جدول (۳) نتایج تحلیل مودال قاب برشی ۱۰ طبقه بدون تجهیز در Etabs

شماره مد ارتعاشی	دوره تناوب ارتعاش (ثانیه)	فرکانس (هرتز)	فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)	مقدار ویژه (رادیان بر ثانیه) ^۲
۱	۱/۰۰۱	۰/۹۹۹	۶/۲۷۴۱	۳۹/۳۶۴۴
۲	۰/۲۲۶	۴/۴۲۴	۲۷/۷۹۴۹	۷۷۲/۵۵۵۵
۳	۰/۱۱۱	۸/۹۷۷	۵۶/۴۰۲۴	۳۱۸۱/۲۲۵۵
۴	۰/۰۷۳	۱۳/۶۱۱	۸۵/۵۲۱۴	۷۳۱۳/۹۰۶۹
۵	۰/۰۵۷	۱۷/۶۲۸	۱۱۰/۷۵۸۷	۱۲۲۶۷/۴۸۲۹
۶	۰/۰۴۹	۲۰/۳۹	۱۲۸/۱۱۵۸	۱۶۴۱۳/۶۶۶۸
۷	۰/۰۴۲	۲۳/۷۵۴	۱۴۹/۲۴۸۶	۲۲۲۷۵/۱۴۲۱
۸	۰/۰۳۷	۲۷/۲۰۲	۱۷۰/۹۱۶۷	۲۹۲۱۲/۵۱۴۳
۹	۰/۰۳۴	۲۹/۰۹۴	۱۸۲/۸۰۲۸	۳۳۴۱۶/۸۴۷۵
۱۰	۰/۰۳۰	۳۳/۰۶۴	۲۰۷/۷۴۴۸	۴۳۱۵۷/۹۱۱۱

= 89000 kg

میزان سختی TMD را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد [39]:

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

با فرض اینکه نسبت فرکانسی $f=1$ ، بهینه‌ترین حالت خواهد بود و انتخاب $T_p = 1 \text{ sec}$ به عنوان زمان تناوب اصلی سازه، $k_d = 3513579.167 \text{ N/m}$ به دست می‌آید. به عنوان یک انتخاب با فرض اینکه $\xi = 0.019$ باشد، در نهایت ضریب میرایی $c_d = 21249.732 \text{ N.s/m}$ ، TMD به دست می‌آید [36]:

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

با مقایسه مقادیر فرکانس‌ها و دوره تناوب‌های بدست آمده از نرم افزارهای Opensees و Etabs که به ترتیب در جداول (۲) و (۳) درج گردیده‌اند، مشخص می‌گردد مقادیر فرکانسها و دوره تناوب‌های بدست آمده از دو نرم افزار مذکور برای مدل برشی ده درجه آزاد مورد بحث، تطابق خیلی خوبی با یکدیگر دارند و در نتیجه، مدل‌سازی صحیح انجام شده است.

درگام بعدی سازه مورد بحث همراه با TMD مدل‌سازی شد. جرم TMD به عنوان پیش فرض ۲ درصد جرم کل سازه در نظر گرفته شده و سایر پارامترهای لازم طی مراحل زیر به دست آمده است:

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

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

شماره مد ارتعاشی	LAMBDA(ω_n^2)	فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)	فرکانس (هرتز)	دوره تناوب ارتعاش (ثانیه)
۱	۳۰/۵۰۴۷	۵/۵۲۳۱۱	۰/۸۷۹۰۳	۱/۱۳۷۶۲
۲	۵۰/۸۵۹۲	۷/۱۳۱۵۶	۱/۱۳۵۰۲	۰/۸۸۱۰۳۹
۳	۷۷۸/۴۷۱	۲۷/۹۰۱۱	۴/۴۴۰۶	۰/۲۲۵۱۹۵
۴	۳۲۰۲/۹۴	۵۶/۵۹۴۶	۹/۰۰۷۳	۰/۱۱۱۰۲۱
۵	۷۳۶۵/۵۸	۸۵/۸۲۳	۱۳/۶۵۹۱	۰/۰۷۳۲۱۱
۶	۱۲۳۴۹/۰	۱۱۱/۱۲۶	۱۷/۶۸۶۳	۰/۰۵۶۵۴۱
۷	۱۶۵۰۹/۱	۱۲۸/۴۸۸	۲۰/۴۴۹۴	۰/۰۴۸۹۰۱۱
۸	۲۲۴۰۷/۸	۱۴۹/۶۹۲	۲۳/۸۲۴۳	۰/۰۴۱۹۷۴
۹	۲۹۳۸۴/۲	۱۷۱/۴۱۸	۲۷/۲۸۲	۰/۰۳۶۵۴۱
۱۰	۳۳۵۹۶/۰	۱۸۳/۲۹۲	۲۹/۱۷۱۸	۰/۰۳۴۲۷۹۶

جدول (۵) نتایج تحلیل مودال قاب برشی ۱۰ طبقه با تجهیز TMD در Etabs

شماره مد ارتعاشی	دوره تناوب ارتعاش (ثانیه)	فرکانس (هرتز)	فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)	مقدار ویژه (رادیان بر ثانیه) ^۲
۱	۱/۱۳۸	۰/۸۷۹	۵/۵۲۰۸	۳۰/۴۷۹۵
۲	۰/۸۸۱	۱/۱۳۵	۷/۱۲۸۸	۵۰/۸۱۹۸
۳	۰/۲۲۶	۴/۴۲۹	۲۷/۸۲۹۹	۷۷۴/۵۰۱۹
۴	۰/۱۱۱	۸/۹۷۹	۵۶/۴۱۵۹	۳۱۸۲/۷۵۱۲
۵	۰/۰۷۳	۱۳/۶۱۲	۸۵/۵۲۸	۷۳۱۵/۰۴۱۶
۶	۰/۰۵۷	۱۷/۶۲۹	۱۱۰/۷۶۳۵	۱۲۲۶۸/۵۵۴۶
۷	۰/۰۴۹	۲۰/۳۹۱	۱۲۸/۱۱۸۱	۱۶۴۱۴/۲۴۸۸
۸	۰/۰۴۲	۲۳/۷۵۴	۱۴۹/۲۴۸۸	۲۲۲۷۵/۲۰۴۷
۹	۰/۰۳۷	۲۷/۲۰۲	۱۷۰/۹۱۶۷	۲۹۲۱۲/۵۱۸۹
۱۰	۰/۰۳۴	۲۹/۰۹۴	۱۸۲/۸۰۲۸	۳۳۴۱۶/۸۴۷۸

با مقایسه، مقادیر فرکانسها و دوره تناوبهای متناظر درج شده در جداول (۴) و (۵) که به ترتیب از تحلیل مودال سازه برشی ۱۰ درجه آزاد با تجهیز TMD با نرم‌افزارهای Opensees و Etabs بدست آمده‌اند، مشخص گردید تطابق خیلی خوبی بین این مقادیر وجود دارد. حال، می‌توان از صحت مدل‌سازی اطمینان حاصل کرد و در ادامه سازه‌های برشی مورد نظر را به TMD و FTMD تجهیز کرد.

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 تاریخیچه زمانی برای آنها برای وضعیت با میراگر و بدون میراگر به اجرا در آمده است.

مدل برشی

در ساختمان‌های برشی، سختی هر طبقه برابر با سختی جانبی ستون‌های آن طبقه است. زیرا سختی خمشی تیرها در این مدل از سازه‌ها بی‌نهایت فرض می‌شود. به عنوان مثال اگر طبقه بام

جدول (۷) مشخصات مدل برشی ۲۰ طبقه

مدل برشی ۲۰ طبقه با دوره تناوب اصلی ۲ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۴،۱]	۴۵۰	$5/23 \times 10^{10}$	[۱۳،۱۶]	۴۵۰	$3/24 \times 10^{10}$
[۸،۵]	۴۵۰	$4/5694 \times 10^{10}$	[۱۷،۱۹]	۴۵۰	$2/092 \times 10^{10}$
[۱۲،۹]	۴۵۰	$3/9087 \times 10^{10}$	۲۰	۴۰۰	$2/092 \times 10^{10}$

جدول (۸) مشخصات مدل برشی ۳۵ طبقه

مدل برشی ۳۵ طبقه با دوره تناوب اصلی ۳/۵ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۴،۱]	۴۵۰	$3/737 \times 10^{10}$	[۲۴،۲۱]	۴۵۰	$2/418 \times 10^{10}$
[۸،۵]	۴۵۰	$3/474 \times 10^{10}$	[۲۸،۲۵]	۴۵۰	$2b/154 \times 10^{10}$
[۱۲،۹]	۴۵۰	$3/209 \times 10^{10}$	[۳۲،۲۹]	۴۵۰	$1/890 \times 10^{10}$
[۱۶،۱۳]	۴۵۰	$2/945 \times 10^{10}$	[۳۴،۳۳]	۴۵۰	$1/4948 \times 10^{10}$
[۲۰،۱۷]	۴۵۰	$2/682 \times 10^{10}$	۳۵	۴۰۰	$1/4948 \times 10^{10}$

رکوردهای مورد استفاده

در مهندسی زلزله، اصطلاحات رکورد «حوزه دور» (Far field) و «حوزه نزدیک» (Near field) به انواع مختلف داده‌های حرکت زمین که در طول رویدادهای لرزه‌ای، به ویژه در رابطه با فاصله از صفحه گسیختگی گسل جمع‌آوری می‌شوند، 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 تحلیل شدند: (۱) ۲۰ رکورد حوزه نزدیک، (۲) ۲۰ رکورد حوزه دور و (۳) نگاهی سینیوسی که فرکانس آن بر فرکانس اصلی مدل سازه منطبق بود. جزئیات رکوردهای مورد نظر در جدول (۱۰) آورده شده است. در مراجع [40-44] معیار رکورد حوزه نزدیک فاصله ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر تا کانون زلزله در نظر گرفته شده است. در این مقاله، با استناد به مراجع فوق الذکر، فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر

یک ساختمان برشی دارای دو ستون یکسان به ارتفاع h_i و سختی خمشی EI باشد، سختی جانبی طبقه i ام برابر با $\frac{24EI}{(h_i)^3}$ می‌گردد. لازم به ذکر است در این تحقیق تغییرات سختی طبقات به صورت پله‌ای (هر چهار طبقه یکسان) در نظر گرفته شده است به نحوی که سختی طبقه i ام معادل $0/4$ سختی طبقه اول فرض شده است. برابری یافتن به یک سازه چند درجه آزاد با یک دوره تناوب به خصوص، 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 است) باشد، ابتدا یک مقدار اولیه سختی طبقه در نظر گرفته شد و سازه با این سختی، 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 [36]:

$$(\sum_{j=1}^N K_j)_{i+1} = \left(\frac{T_i}{T_{\text{target}}}\right)^2 \cdot (\sum_{j=1}^N K_j)_i \quad (28)$$

که در رابطه بالا T_i نشانگر دوره تناوب منطبق با سختی اولیه سازه، 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 [36].

در این پژوهش سازه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مشخصات سختی و جرم آنها به ترتیب در جداول (۶) تا (۹) آورده شده است. همان‌طور 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.

جدول (۶) مشخصات مدل برشی ۱۰ طبقه

مدل برشی ۱۰ طبقه با دوره تناوب اصلی ۱ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۴،۱]	۴۵۰	$5/439 \times 10^9$	۹	۴۵۰	$2/1786 \times 10^9$
[۸،۵]	۴۵۰	$3/989 \times 10^9$	۱۰	۴۰۰	$2/1786 \times 10^9$

به عنوان رکورد حوزه نزدیک در نظر گرفته شده است و بیشتر از آن به عنوان رکورد حوزه دور لحاظ گردیده است. ۲۰ رکورد اول درج شده در جدول (۱۰) مربوط به زلزله‌های حوزه دور و ۲۰ رکورد بعدی مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک است. این

جدول (۹) مشخصات مدل برشی ۵۰ طبقه

مدل برشی ۵۰ طبقه با دوره تناوب اصلی ۵ ثانیه					
شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)	شماره طبقه	جرم طبقه (ton)	سختی طبقه (KN/m)
[۴،۱]	۴۵۰	$۱۲۱/۲۸ \times ۱۰^{۱۰}$	[۳۲،۲۹]	۴۵۰	$۷۹/۶۹ \times ۱۰^{۱۰}$
[۸،۵]	۴۵۰	$۱۱۵/۳۴ \times ۱۰^{۱۰}$	[۳۶،۳۳]	۴۵۰	$۷۳/۷۵ \times ۱۰^{۱۰}$
[۱۲،۹]	۴۵۰	$۱۰۹/۴۳ \times ۱۰^{۱۰}$	[۴۰،۳۷]	۴۵۰	$۶۷/۸۲ \times ۱۰^{۱۰}$
[۱۶،۱۳]	۴۵۰	$۱۰۳/۴۵ \times ۱۰^{۱۰}$	[۴۴،۴۱]	۴۵۰	$۶۱/۸۷ \times ۱۰^{۱۰}$
[۲۰،۱۷]	۴۵۰	$۹۷/۵۲ \times ۱۰^{۱۰}$	[۴۸،۴۵]	۴۵۰	$۵۵/۹۳۷۵ \times ۱۰^{۱۰}$
[۲۴،۲۱]	۴۵۰	$۹۱/۵۷ \times ۱۰^{۱۰}$	۴۹	۴۵۰	$۴۸/۵۱۲ \times ۱۰^{۱۰}$
[۲۸،۲۵]	۴۵۰	$۸۵/۶۳ \times ۱۰^{۱۰}$	۵۰	۴۰۰	$۴۸/۵۱۲ \times ۱۰^{۱۰}$

جدول (۱۰) مشخصات رکوردهای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک و نگاشت سینوسی

شماره رکورد	شرح رکورد	M _w	فاصله (km)	تعداد نقاط	گام زمانی (s)	حداکثر شتاب (g)
۱	Beverly Hills - 14145 Mulhol/009/Northridge-01	۶/۶۹	۱۷/۱۵	۲۹۹۹	۰/۰۱	۰/۴۱۶
۲	Northridge-01/ Beverly Hills - 14145 Mulhol/279	۶/۶۹	۱۷/۱۵	۲۹۹۹	۰/۰۱	۰/۵۱۶
۳	Northridge-01/Castaic - Old Ridge Route/GLP177	۶/۶۹	۲۲/۲۱	۱۹۹۹	۰/۰۱	۰/۴۱
۴	Northridge-01/ Castaic - Old Ridge Route/ GLP267	۶/۶۹	۲۲/۲۱	۱۹۹۹	۰/۰۱	۰/۴۸۲
۵	Duzce_ Turkey/Sakarya/DUZCE_SKR180	۷/۱۴	۴۵/۱۶	۵۵۹۰	۰/۰۱	۰/۷۲۷
۶	Duzce_ Turkey/Sakarya/DUZCE_SKR180	۷/۱۴	۴۵/۱۶	۵۵۹۰	۰/۰۱	۰/۸۲۲
۷	Imperial Valley-06/ Delta/ DLT262	۶/۵۳	۲۲/۰۳	۹۹۹۲	۰/۰۱	۰/۲۳۷
۸	Imperial Valley-06/ Delta/ DL352	۶/۵۳	۲۲/۰۳	۹۹۹۲	۰/۰۱	۰/۳۵۱
۹	Imperial Valley-06/El Centro Array #13/H-E13140	۶/۵۳	۲۱/۹۸	۷۸۰۸	۰/۰۰۵	۰/۳۶۱
۱۰	Imperial Valley-06/El Centro Array #13/H-E13230	۶/۵۳	۲۱/۹۸	۷۸۰۸	۰/۰۰۵	۰/۳۹۷
۱۱	Kobe_ Japan/Sakai/KOBE_SKI000	۶/۹	۲۸/۰۸	۴۰۹۶	۰/۰۱	۰/۵۰۹
۱۲	Kobe_ Japan/Sakai/KOBE_SKI090	۶/۹	۲۸/۰۸	۴۰۹۶	۰/۰۱	۰/۵۰۲
۱۳	Kobe_ Japan/Shin-Osaka/KOBE_SHI000	۶/۹	۱۹/۱۵	۴۰۹۶	۰/۰۱	۰/۲۴۳
۱۴	Kobe_ Japan/Shin-Osaka/KOBE_SHI090	۶/۹	۱۹/۱۵	۴۰۹۶	۰/۰۱	۰/۲۱۱
۱۵	Kocaeli_ Turkey/Duzce/KOCAELI_DZC180	۷/۵۱	۱۵/۳۷	۵۴۳۷	۰/۰۰۵	۰/۳۱۲
۱۶	Kocaeli_ Turkey/Duzce/KOCAELI_DZC270	۷/۵۱	۱۵/۳۷	۵۴۳۷	۰/۰۰۵	۰/۳۵۷
۱۷	Kocaeli_ Turkey/Bursa Sivil/KOCAELI_BSI090	۷/۵۱	۶۵/۵۳	۶۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۲۱۸
۱۸	Kocaeli_ Turkey/Bursa Sivil/KOCAELI_BSI090	۷/۵۱	۶۵/۵۳	۶۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۱۴۹
۱۹	Landers/LANDERS_YER270	۷/۲۸	۲۳/۶۲	۲۲۰۰	۰/۰۲	۰/۲۴۴

ادامه جدول (۱۰) مشخصات رکوردهای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک و نگاشت سینوسی

شماره رکورد	شرح رکورد	M_w	فاصله (km)	تعداد نقاط	گام زمانی (s)	حداکثر شتاب (g)
۲۰	Landers/LANDERS_YER360	۷/۲۸	۲۳/۶۲	۲۲۰۰	۰/۰۲	۰/۱۵۱
۲۱	NAHANNI_S2240/ Site 2/Nahanni_ Canada	۶/۷۶	۴/۹۳	۳۹۹۱	۰/۰۰۲۵	۰/۵۱۹
۲۲	Nahanni_ Canada/ Site 2/NAHANNI_S2330	۶/۷۶	۴/۹۳	۳۹۹۱	۰/۰۰۲۵	۰/۳۵۵
۲۳	Loma Prieta/BRAN/LOMAP_BRN000	۶/۹۳	۱۰/۷۲	۵۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۳۵۷
۲۴	Loma Prieta/BRAN/LOMAP_BRN090	۶/۹۳	۱۰/۷۲	۵۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۵۰۲
۲۵	Loma Prieta/Corralitos/LOMAP_CLS000	۶/۹۳	۳/۸۵	۷۹۹۷	۰/۰۰۵	۰/۶۴۴
۲۶	Loma Prieta/Corralitos/LOMAP_CLS090	۶/۹۳	۳/۸۵	۷۹۹۹	۰/۰۰۵	۰/۴۸۲
۲۷	Cape Mendocino/Cape Mendocino/CPM000	۷/۰۱	۶/۹۶	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱/۴۹۳
۲۸	Cape Mendocino/Cape Mendocino/CPM090	۷/۰۱	۶/۹۶	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱/۰۳۸
۲۹	Northridge-01/LA -VA Hospital/NWH270	۶/۶۹	۸/۴۴	۹۵۵۷	۰/۰۰۵	۰/۷۵۲
۳۰	Northridge-01/LA -VA Hospital/NWH360	۶/۶۹	۸/۴۴	۹۵۵۹	۰/۰۰۵	۰/۹۳۲
۳۱	Northridge-01/Newhall - Fire Sta/NWH090	۶/۶۹	۵/۹۲	۲۹۹۹	۰/۰۱	۰/۳۴۱
۳۲	Northridge-01/Newhall - Fire Sta/NWH360	۶/۶۹	۵/۹۲	۲۹۹۹	۰/۰۱	۰/۴۵۹
۳۳	Kocaeli_ Turkey/Yarimca/KOCAELI_YPT060	۷/۵۱	۴/۸۳	۷۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۲۲۶
۳۴	Kocaeli_ Turkey/Yarimca/KOCAELI_YPT150	۷/۵۱	۴/۸۳	۷۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۳۲۱
۳۵	Chi-Chi_ Taiwan/ CHY028/CHICHI_CHY028-E	۷/۶۲	۳/۱۲	۱۸۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۴۹۸
۳۶	Chi-Chi_ Taiwan/ CHY028/CHICHI_CHY028-N	۷/۶۲	۳/۱۲	۱۸۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۳۱۹
۳۷	Chi-Chi_ Taiwan/ CHY080/CHICHI_CHY080-N	۷/۶۲	۲/۶۹	۱۸۰۰۰	۰/۰۰۵	۱/۰۰۸
۳۸	Chi-Chi_ Taiwan/ CHY080/CHICHI_CHY080-N	۷/۶۲	۲/۶۹	۱۸۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۴۳۱
۳۹	Denali_ Alaska/TAPS Pump Station #10/PS10-047	۷/۹	۲/۷۴	۱۸۴۱۹	۰/۰۰۵	۰/۳۳۲
۴۰	Denali_ Alaska/TAPS Pump Station #10/PS10-317	۷/۹	۲/۷۴	۱۸۴۱۹	۰/۰۰۵	۰/۲۹۷
S	0.35g sin(2 π t)			۳۰۰۰	۰/۰۱	۰/۳۵

تحلیل مدل‌های برشی تحت رکوردهای موردنظر

در این بخش مدل‌های برشی تحت سه حالت بدون میراگر، با میراگر TMD و با میراگر FTMD تحت رکوردهای مطرح شده مورد تحلیل قرار گرفتند و در انتها پاسخ‌ها (برش پایه، تغییر مکان نسبی طبقات، شتاب طبقات و جابه‌جایی بام) با یکدیگر قیاس شدند.

برای دانستن اینکه میراگرها چقدر می‌توانند در بهینه کردن پاسخ‌های سازه‌ای مؤثر واقع شوند، در ابتدا لازم است مدل‌های

برشی با رکوردهای پیش‌فرض تحت تحلیل تاریخیچه زمانی قرار بگیرند و پاسخ‌های سازه تعیین شود. لازم به ذکر است میرایی در نظر گرفته شده برای تمامی مدل‌ها، میرایی رایلی (۵٪) در نظر گرفته شده است [40]. بدین منظور مدل‌های ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه تحت رکوردهای دور و نزدیک و همچنین تحت نگاشت سینوسی با فرکانسی منطبق بر سازه مورد نظر، تحلیل شدند و مقادیر حداکثر پاسخ‌ها به ازای هر رکورد استخراج شد. نتایج به دست آمده در جداول (۱۱) تا (۲۲) آورده شده است.

جدول (۱۱) پاسخ‌های سازه ۱۰ طبقه تحت رکوردهای حوزه دور

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبیقات (m/s ²)	شماره طبقه	حداکثر درزیت طبیقات (")	حداکثر درزیت طبیقات	نسبت جابه‌جایی به ارتفاع سازه (")	جابه‌جایی حداکثر نام (mm)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۱۰	۱۵/۶۴	۹	۱/۶۸۰	۰/۰۱۶۸	۱/۲۵۰	۰/۳۷۵	۰/۳۱۵	۱۴۰۳۱/۹	۱
۱۰	۱۵/۲۵	۹	۱/۵۱۷	۰/۰۱۵۱	۱/۱۴۶	۰/۳۴۳	۰/۳۲۵	۱۴۵۰۵/۵	۲
۱۰	۱۰/۶۳	۹	۰/۷۳۰	۰/۰۰۷۳	۰/۴۸۰	۰/۱۴۴	۰/۱۶۷	۷۴۶۲/۸۴	۳
۱۰	۱۳/۹۰	۹	۱/۰۴۷	۰/۰۱۰۴	۰/۷۷۷	۰/۲۳۳	۰/۱۹۳	۸۵۹۶/۳۲	۴
۱۰	۱۶/۷۷	۹	۱/۳۲۲	۰/۰۱۳۲	۰/۹۰۴	۰/۲۷۱	۰/۲۷۷	۱۲۳۴۷/۴	۵
۱۰	۱۸/۴۴	۹	۱/۸۹۸	۰/۰۱۸۹	۱/۴۱۶	۰/۴۲۴	۰/۳۹۴	۱۷۵۵۰/۹	۶
۱۰	۵/۸۵	۹	۰/۴۶۴	۰/۰۰۴۶	۰/۳۲۵	۰/۰۹۷	۰/۰۹۰	۴۰۰۵/۲۹	۷
۱۰	۱۲/۳۷	۹	۰/۸۰۷	۰/۰۰۸۰	۰/۵۹۳	۰/۱۷۷	۰/۱۷۱	۷۶۲۰/۶۹	۸
۱۰	۱۱/۳۳	۹	۰/۴۶۱	۰/۰۰۴۶	۰/۳۰۷	۰/۰۹۲	۰/۱۸۴	۸۲۲۵/۰۸	۹
۱۰	۷/۷۶	۹	۰/۳۹۸	۰/۰۰۳۹	۰/۲۷۵	۰/۰۸۲	۰/۱۵۰	۶۶۹۵/۲۹	۱۰
۱۰	۱۲/۸۵	۹	۰/۶۱۱	۰/۰۰۶۱	۰/۳۷۶	۰/۱۱۲	۰/۲۰۰	۸۹۱۷/۸۵	۱۱
۱۰	۸/۴۸	۹	۰/۵۶۵	۰/۰۰۵۶	۰/۳۶۸	۰/۱۱۰	۰/۱۲۱	۵۴۲۲/۰۳	۱۲
۱۰	۵/۶۸	۹	۰/۵۶۷	۰/۰۰۵۷	۰/۴۱۱	۰/۱۲۳	۰/۰۹۵	۴۲۵۹/۹۶	۱۳
۱۰	۴/۷۹	۹	۰/۳۷۷	۰/۰۰۳۷	۰/۲۷۸	۰/۰۸۳	۰/۰۸۶	۳۸۵۳/۰۸	۱۴
۱۰	۹/۷۴	۹	۰/۷۸۹	۰/۰۰۷۸	۰/۵۴۶	۰/۱۶۴	۰/۱۴۰	۶۲۳۹/۴۸	۱۵
۱۰	۱۲/۷۱	۹	۱/۰۵۸	۰/۰۱۰۵	۰/۷۵۱	۰/۲۲۵	۰/۲۲۰	۹۸۰۶/۸	۱۶
۱۰	۳/۳۷	۹	۰/۲۱۱	۰/۰۰۲۱	۰/۱۳۸	۰/۰۴۱	۰/۰۵۱	۲۲۷۱/۸۲	۱۷
۱۰	۲/۷۹	۹	۰/۱۸۷	۰/۰۰۱۸	۰/۱۳۳	۰/۰۴۰	۰/۰۴۳	۱۹۳۶/۹۸	۱۸
۱۰	۷/۰۸	۹	۰/۸۱۴	۰/۰۰۸۱	۰/۶۱۰	۰/۱۸۳	۰/۱۵۱	۶۷۴۳/۱۳	۱۹
۱۰	۶/۴۸	۹	۰/۵۴۸	۰/۰۰۵۴	۰/۳۹۷	۰/۱۱۹	۰/۱۴۸	۶۶۲۸/۵۸	۲۰
	۱۸/۴۴		۱/۸۹۸	۰/۰۱۸۹	۱/۴۱۶	۰/۴۲۴	۰/۳۹۴	۱۷۵۵۰/۹	حداکثر
	۱۰/۱۰		۰/۸۰۲	۰/۰۰۸	۰/۵۷۴	۰/۱۷۲	۰/۱۷۶	۷۸۵۶/۰۴۶	میانگین
	۲/۷۹		۰/۱۸۷	۰/۰۰۱۸	۰/۱۳۳	۰/۰۴۰	۰/۰۴۳	۱۹۳۶/۹۸	حداقل

جدول (۱۲) پاسخ‌های سازه ۱۰ طبقه تحت رکودهای حوزه نزدیک

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقات (m/s^2)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	حداکثر دررفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (mm)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۱۰	۴/۵۱	۹	۰/۲۵۸	۰/۰۰۲۵	۰/۱۷۳	۰/۰۵۲	۰/۰۶۸۸	۳۰۶۵/۹۸	۲۱
۱۰	۵/۹۸	۹	۰/۴۷۰	۰/۰۰۴۷	۰/۳۳۹	۰/۱۰۱	۰/۰۸۳۵	۳۷۱/۷۳	۲۲
۱۰	۱۲/۶۶	۹	۱/۰۸۶	۰/۰۱۰۸	۰/۷۷۲	۰/۲۳۱	۰/۲۱۹	۹۷۸۱/۷۷	۲۳
۱۰	۱۰/۲۰	۹	۰/۷۳۲	۰/۰۰۷۳	۰/۴۸۹	۰/۱۴۶	۰/۱۶۳	۷۲۸۸/۱۴	۲۴
۱۰	۱۴/۱۳	۹	۰/۸۵۸	۰/۰۰۸۵	۰/۵۲۳	۰/۱۵۷	۰/۲۱۴	۹۵۳۳/۳۲	۲۵
۱۰	۱۱/۸۹	۹	۰/۹۶۸	۰/۰۰۹۶	۰/۶۸۵	۰/۲۰۵	۰/۲۰۷	۹۲۱۸/۰۷	۲۶
۱۰	۳۱/۴۴	۹	۱/۶۲۳	۰/۰۱۶۲	۰/۹۷۰	۰/۲۹۱	۰/۵۶۲	۲۵۰۱۱/۵	۲۷
۱۰	۱۴/۸۸	۹	۰/۷۲۷	۰/۰۰۷۲	۰/۴۳۳	۰/۱۲۹	۰/۱۷۵	۷۸۲۰/۲۵	۲۸
۱۰	۲۳/۷۷	۹	۱/۹۱۸	۰/۰۱۹۱	۱/۳۸۵	۰/۴۱۵	۰/۴۱۶	۱۸۵۳۳/۲	۲۹
۱۰	۱۹/۳۳	۹	۱/۰۶۰	۰/۰۱۰۶	۰/۷۶۴	۰/۲۲۹	۰/۲۶۸	۱۱۹۴۰/۹	۳۰
۱۰	۷/۰۹	۹	۰/۵۴۸	۰/۰۰۵۴	۰/۳۸۵	۰/۱۱۵	۰/۱۵۴	۶۸۸۱/۱۷	۳۱
۱۰	۱۳/۹۱	۹	۱/۳۹۱	۰/۰۱۳۹	۱/۰۱۰	۰/۳۰۳	۰/۲۳۹	۱۰۶۷۸/۱	۳۲
۱۰	۶/۳۵	۹	۰/۵۶۶	۰/۰۰۵۶	۰/۴۰۷	۰/۱۲۲	۰/۱۳۵	۶۰۴۵/۲۴	۳۳
۱۰	۷/۴۵	۹	۰/۷۰۲	۰/۰۰۷۰	۰/۵۰۶	۰/۱۵۲	۰/۱۱۶	۵۲۰۱/۵۷	۳۴
۱۰	۱۶/۰۰	۹	۱/۵۲۶	۰/۰۱۵۲	۱/۰۹۷	۰/۳۲۹	۰/۳۰۷	۱۳۶۷۹/۲	۳۵
۱۰	۱۰/۳۹	۹	۱/۰۰۶	۰/۰۱۰۰	۰/۷۴۵	۰/۲۲۳	۰/۲۳۷	۱۰۵۸۱/۴	۳۶
۱۰	۴۰/۳۲	۹	۴/۳۰۲	۰/۰۴۳۰	۳/۱۸۰	۰/۹۵۴	۰/۸۰۷	۳۵۹۱۴/۲	۳۷
۱۰	۱۵/۲۱	۹	۱/۳۴۷	۰/۰۱۳۴	۰/۹۸۵	۰/۲۹۵	۰/۲۸۰	۱۲۴۸۹/۹	۳۸
۱۰	۱۳/۹۳	۹	۱/۵۷۴	۰/۰۱۵۷	۱/۱۸۰	۰/۳۵۴	۰/۲۱۹	۹۷۸۵/۱۴	۳۹
۱۰	۱۲/۸	۹	۰/۹۰۴	۰/۰۰۹۰	۰/۶۷۴	۰/۲۰۲	۰/۱۹۰۸	۸۴۹۴/۱۳	۴۰
	۴۰/۳۲		۴/۳۰	۰/۰۴۳	۳/۱۸۰	۰/۹۵۴	۰/۸۰۷	۳۵۹۱۴/۲	حداکثر
	۱۴/۳۸		۱/۱۷۸	۰/۰۱۱	۰/۸۳۵	۰/۲۵۰	۰/۲۵۳	۱۱۲۸۳/۰۲	میانگین
	۴/۵۱		۰/۲۵۸	۰/۰۰۲	۰/۱۷۳	۰/۰۵۲	۰/۰۶۷	۳۰۶۵/۹۸	حداقل

جدول (۱۳) پاسخ سازه ۱۰ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقات (m/s^2)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	حداکثر دررفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۱۰	۵۰/۹۵	۹	۵/۷۶	۰/۰۵۷۶	۴/۲۹۴	۱/۲۸۸	۱/۱۴۶	۵۱۰۱۷/۲	S

جدول (۱۴) پاسخهای سازه ۲۰ طبقه تحت رکوردهای حوزه دور

شماره طبقه	شماره حداکثر شتاب طبقات (m/s ²)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	حداکثر دررفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۲۰	۶/۵۳	۱۹	۰/۷۴۴	۰/۰۷۴	۰/۴۹۴	۰/۲۹۶	۰/۰۹۷	۸۷۰۶/۳۸	۱
۲۰	۹/۰۲	۱۹	۰/۸۹۶	۰/۰۰۸۹	۰/۵۶۴	۰/۳۳۸	۰/۱۱۹	۱۰۶۸۵/۵	۲
۲۰	۸/۹۷	۱۹	۱/۰۹۳	۰/۰۱۰۹	۰/۷۶۳	۰/۴۵۸	۰/۱۳۴	۱۱۹۹۳/۶	۳
۲۰	۱۰/۷۰	۱۹	۰/۵۸۲	۰/۰۰۵۸	۰/۳۹۴	۰/۲۳۶	۰/۱۰۹	۹۷۶۱/۸۷	۴
۲۰	۱/۵۷	۱۹	۰/۱۲۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۷۴	۰/۰۴۴	۰/۰۱۸	۱۶۲۰/۶۷	۵
۲۰	۱۲/۰۴	۱۹	۱/۱۳۸	۰/۰۱۱۳	۰/۷۹۴	۰/۴۷۶	۰/۱۸۵	۱۶۵۹۶	۶
۲۰	۵/۱۳	۱۹	۰/۵۷۵	۰/۰۰۵۷	۰/۴۰۰	۰/۲۴۰	۰/۰۷۶	۶۸۴۸/۹۳	۷
۲۰	۵/۴۸	۱۹	۰/۷۸۷	۰/۰۰۷۸	۰/۵۶۲	۰/۳۳۷	۰/۰۸۵	۷۶۹۱/۰۸	۸
۲۰	۱۰/۷۷	۱۹	۰/۹۹۱	۰/۰۰۹۹	۰/۶۳۸	۰/۳۸۳	۰/۱۲۵	۱۱۲۳۸/۳	۹
۲۰	۸/۹۲	۱۹	۰/۴۷۹	۰/۰۰۴۷	۰/۳۰۱	۰/۱۸۱	۰/۱۲۶	۱۱۳۳۸/۱	۱۰
۲۰	۹/۱۵	۱۹	۰/۵۹۵	۰/۰۰۵۹	۰/۳۹۶	۰/۲۳۷	۰/۱۰۶	۹۵۱۷/۲۳	۱۱
۲۰	۸/۷۵	۱۹	۰/۶۹۸	۰/۰۰۶۹	۰/۴۳۰	۰/۲۵۸	۰/۰۸۵	۷۶۲۷/۷۲	۱۲
۲۰	۳/۷۶	۱۹	۰/۴۴۳	۰/۰۰۴۴	۰/۳۰۸	۰/۱۸۵	۰/۰۵۷	۵۱۰۲/۹۵	۱۳
۲۰	۸/۷۸	۱۹	۰/۴۵۸	۰/۰۰۴۵	۰/۳۰۴	۰/۱۸۲	۰/۰۷۶	۶۸۷۸/۳۲	۱۴
۲۰	۸/۵۹	۱۹	۱/۰۹۱	۰/۰۱۰۹	۰/۷۷۷	۰/۴۶۶	۰/۱۳۶	۱۲۲۳۶/۲	۱۵
۲۰	۱۲/۶۷	۱۹	۱/۳۷۴	۰/۰۱۳۷	۰/۹۵۳	۰/۵۷۱	۰/۱۵۳	۱۳۷۶۴/۲	۱۶
۲۰	۲/۴۱	۱۹	۰/۱۷۵	۰/۰۰۱۷	۰/۱۱۲	۰/۰۶۷	۰/۰۲۵	۲۲۷۸/۱۹	۱۷
۲۰	۲/۲۲	۱۹	۰/۲۸۶	۰/۰۰۲۸	۰/۱۹۲	۰/۱۱۵	۰/۰۴۱	۳۶۸۸/۶۴	۱۸
۲۰	۵/۴۵	۱۹	۰/۷۱۷	۰/۰۰۷۱	۰/۴۶۸	۰/۲۸۱	۰/۰۴۹	۴۳۹۵/۲۱	۱۹
۲۰	۳/۹۷	۱۹	۰/۴۱۸	۰/۰۰۴۱	۰/۲۸۲	۰/۱۶۹	۰/۰۵۰	۴۵۳۶/۱۹	۲۰
	۱۲/۶۷		۱/۳۷۴	۰/۰۱۳۷	۰/۹۵۳	۰/۵۷۱	۰/۱۸۵	۱۶۵۹۶	حداکثر
	۷/۰۴		۰/۶۸۳	۰/۰۰۶۸	۰/۴۶۰	۰/۲۷۶	۰/۰۹۳	۸۳۲۵/۲۶۴	میانگین
	۱/۵۷		۰/۱۲۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۷۴	۰/۰۴۴	۰/۰۱۸	۱۶۲۰/۶۷۰	حداقل

جدول (۱۵) پاسخ‌های سازه ۲۰ طبقه تحت رکوردهای حوزه نزدیک

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقات (m/s^2)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۲۰	۴/۹۸	۱۹	۰/۳۳۹	۰/۰۳۳	۰/۲۲۴	۰/۰۶۴	۵۷۹۳/۳۱	۲۱
۲۰	۴/۷۷	۱۹	۰/۴۷۲	۰/۰۰۴۷	۰/۳۰۶	۰/۰۶۲	۵۵۹۳/۲۷	۲۲
۲۰	۱۳/۵۲	۱۹	۱/۷۶۰	۰/۰۰۷۶	۰/۳۸۲	۰/۱۵۶	۱۴۰۱۴/۲	۲۳
۲۰	۱۰/۹۸	۱۹	۰/۴۶۳	۰/۰۰۴۶	۰/۱۸۱	۰/۱۴۴	۱۲۹۲۹/۵	۲۴
۲۰	۱۴/۹۰	۱۹	۰/۶۶۰	۰/۰۰۶۶	۰/۴۳۶	۰/۱۸۵	۱۶۶۳۷/۱	۲۵
۲۰	۸/۶۰	۱۹	۰/۵۰۰	۰/۰۰۵۰	۰/۳۲۲	۰/۰۸۸	۷۹۴۱/۹۹	۲۶
۲۰	۲۶/۴۸	۱۹	۱/۲۰۸	۰/۰۱۲۰	۰/۶۲۶	۰/۱۵۱	۱۳۵۷۷/۱	۲۷
۲۰	۱۳/۹۶	۱۹	۱/۰۸۵	۰/۰۱۰۸	۰/۶۶۷	۰/۱۷۹	۱۶۰۶۴/۳	۲۸
۲۰	۱۱/۱۰	۱۹	۰/۹۱۵	۰/۰۰۹۱	۰/۶۲۳	۰/۱۱۴	۱۰۲۶۱/۴	۲۹
۲۰	۱۶/۶۳	۱۹	۰/۹۰۷	۰/۰۰۹۰	۰/۵۴۷	۰/۱۷۰	۱۵۲۴۶	۳۰
۲۰	۱۰/۵۱	۱۹	۰/۶۴۶	۰/۰۰۶۴	۰/۴۵۹	۰/۰۸۸	۷۹۶۴/۰۸	۳۱
۲۰	۱۳/۰۷	۱۹	۱/۷۸۱	۰/۰۱۷۸	۱/۲۴۰	۰/۲۲۴	۲۰۱۰/۲	۳۲
۲۰	۵/۹۰	۱۹	۰/۸۷۱	۰/۰۰۸۷	۰/۶۱۱	۰/۱۲۶	۱۱۳۵۳/۷	۳۳
۲۰	۷/۳۷	۱۹	۰/۸۶۸	۰/۰۰۸۶	۰/۶۰۵	۰/۰۹۳	۸۳۶۰/۵۱	۳۴
۲۰	۱۵/۵۳	۱۹	۱/۸۶۳	۰/۰۱۸۶	۱/۲۷۱	۰/۲۰۳	۱۸۱۹۷/۹	۳۵
۲۰	۹/۵۷	۱۹	۱/۰۸۶	۰/۰۱۰۸	۰/۷۰۰	۰/۱۱۶	۱۰۴۱۲/۸	۳۶
۲۰	۲۴/۴۴	۱۹	۴/۱۷۳	۰/۰۴۱۷	۱/۸۰۶	۰/۴۶۱	۴۱۲۹۵/۵	۳۷
۲۰	۸/۸۶/۵	۱۹	۰/۸۵۷	۰/۰۰۸۵	۰/۵۲۸	۰/۱۲۲	۱۰۹۲۱/۳	۳۸
۲۰	۱۰/۵۰	۱۹	۱/۹۷۴	۰/۰۱۹۷	۱/۴۱۰	۰/۲۰۱	۱۸۰۱۰/۸	۳۹
۲۰	۷/۱۷	۱۹	۱/۳۸۰	۰/۰۱۳۸	۰/۹۵۷	۰/۱۱۰	۹۹۰۷/۰۲	۴۰
	۲۶/۴۸		۴/۱۷۳	۰/۰۴۱۷	۳/۰۱۱	۰/۴۶۱	۴۱۲۹۵/۵	حداکثر
	۱۱/۹۴		۱/۱۴۰	۰/۰۱۱۴	۰/۷۵۵	۰/۱۵۳	۱۳۷۲۹/۳۴	میانگین
	۴/۷۷		۰/۳۳۹	۰/۰۰۳۳	۰/۱۸۱	۰/۰۶۲	۵۵۹۳/۲۷	حداقل

جدول (۱۶) پاسخ سازه ۲۰ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقات (m/s^2)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	حداکثر دررفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۲۰	۵۲/۱۴	۱۹	۱۲/۳۶	۰/۱۲۳۶	۸/۷۸۸	۵/۲۷۳	۱/۰۶۳	۹۵۲۰۶/۲	S

جدول (۱۷) پاسخ‌های سازه ۳۵ طبقه تحت رکوردهای حوزه دور

شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه
شماره رکورد	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه
۱	۱۷۳۲۹/۸	۰/۱۱۰	۰/۲۸۳	۰/۲۶۹	۰/۰۰۵۸	۰/۵۸	۳۵	۸/۴۸	۳۵
۲	۲۷۶۶۳/۹	۰/۱۷۶	۰/۲۸۰	۰/۲۶۶	۰/۰۰۶۹	۰/۶۹	۳۵	۱۵/۶۰	۳۵
۳	۱۹۰۹۵/۲	۰/۱۲۱	۰/۳۹۲	۰/۳۷۳	۰/۰۰۸۵	۰/۸۵	۳۵	۱۳/۰۳	۳۵
۴	۱۶۰۴۱	۰/۱۰۲	۰/۳۰۹	۰/۲۹۵	۰/۰۰۵۳	۰/۵۳	۳۵	۱۰/۱۲	۳۵
۵	۲۲۴۴۲/۸	۰/۱۴۲	۰/۵۷۹	۰/۵۵۲	۰/۰۱۰۱	۱/۰۱	۳۵	۱۵/۷۰	۳۵
۶	۱۸۳۰۳/۵	۰/۱۱۶	۰/۳۵۵	۰/۳۳۸	۰/۰۰۷۱	۰/۷۱	۳۵	۱۰/۳۶	۳۵
۷	۸۶۹۳/۹۴	۰/۰۵۵	۰/۴۹۸	۰/۴۷۵	۰/۰۰۷۰	۰/۷۰	۳۵	۴/۶۴	۳۵
۸	۱۲۰۵۴	۰/۰۷۶	۰/۴۹۳	۰/۴۶۹	۰/۰۰۷۴	۰/۷۴	۳۵	۶/۲۲	۳۵
۹	۱۱۶۰۰/۲	۰/۰۷۳	۰/۵۲۵	۰/۵۰۰	۰/۰۰۷۵	۰/۷۵	۳۵	۷/۱۸	۳۵
۱۰	۱۳۱۴۱/۷	۰/۰۸۳	۰/۳۶۱	۰/۳۴۴	۰/۰۰۶۲	۰/۶۲	۳۵	۶/۱۸	۳۵
۱۱	۱۳۱۲۹/۶	۰/۰۸۳	۰/۲۳۴	۰/۲۲۳	۰/۰۰۵۳	۰/۵۳	۳۵	۹/۰۲	۳۵
۱۲	۱۳۶۵۰/۳	۰/۰۸۶	۰/۲۶۰	۰/۲۴۸	۰/۰۰۵۱	۰/۵۱	۳۵	۷/۷۷	۳۵
۱۳	۹۳۷۸/۵۵	۰/۰۵۹	۰/۲۹۷	۰/۲۸۳	۰/۰۰۴۹	۰/۴۹	۳۵	۶/۱۶	۳۵
۱۴	۱۱۲۹۰/۷	۰/۰۷۱	۰/۱۷۱	۰/۱۶۳	۰/۰۰۳۹	۰/۳۹	۳۵	۶/۴۵	۳۵
۱۵	۱۳۹۵۴/۱	۰/۰۸۸	۱/۱۰۵	۱/۰۵۳	۰/۰۱۴۸	۱/۴۸	۳۵	۷/۱۰	۳۵
۱۶	۱۰۴۰۸/۳	۰/۰۶۶	۰/۴۲۱	۰/۴۰۰	۰/۰۰۵۸	۰/۵۸	۳۵	۶/۳۸	۳۵
۱۷	۳۲۴۱/۶۵	۰/۰۲۰	۰/۲۱۰	۰/۲۰۰	۰/۰۰۳۲	۰/۳۲	۳۵	۲/۴۲	۳۵
۱۸	۴۸۲۹/۱۴	۰/۰۳۰	۰/۳۰۴	۰/۲۹۰	۰/۰۰۴۱	۰/۴۱	۳۵	۱/۹۹	۳۵
۱۹	۶۵۱۱/۹۱	۰/۰۴۱	۰/۴۴۴	۱/۴۲۳	۰/۰۰۶۱	۰/۶۱	۳۵	۴/۱۲	۳۵
۲۰	۵۲۳۵/۶۵	۰/۰۳۳	۰/۳۵۱	۰/۳۳۴	۰/۰۰۵۱	۰/۵۱	۳۵	۲/۷۹	۳۵
حداکثر	۲۷۶۶۳/۹	۰/۱۷۶	۱/۱۷۶	۱/۱۰۵	۰/۰۱۴	۱/۴۸		۱۵/۷۰	
میانگین	۱۲۸۹۹/۷۹	۰/۰۸۲	۰/۳۹۴	۰/۳۷۵	۰/۰۰۶۵	۰/۶۵		۷/۵۹	
حداقل	۳۲۴۱/۶۵	۰/۰۲۰	۰/۱۷۱	۰/۱۶۳	۰/۰۰۳۲	۰/۳۲		۱/۹۹	

جدول (۱۸) پاسخ‌های سازه ۳۵ طبقه تحت رکوردهای حوزه نزدیک

شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه
حداکثر شتاب (m/s ²)	حداکثر دریفت طبقات (%)	حداکثر دریفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	پایه (KN)	حداکثر برش	شماره رکورد	شماره طبقه
۵/۱۳	۰/۳۶	۰/۰۳۶	۰/۱۴۹	۰/۱۵۷	۰/۰۵۴	۸۴۷۹/۸۷	۲۱	۲۱	۳۵
۶/۰۶	۰/۳۴	۰/۰۳۴	۰/۱۳۶	۰/۱۴۳	۰/۰۷۰	۱۱۰۱۱/۶	۲۲	۲۲	۳۵
۱۱/۶۱	۰/۹۱	۰/۰۹۱	۰/۴۲۹	۰/۴۵۰	۰/۱۴۲	۲۲۳۹۸/۳	۲۳	۲۳	۳۵
۹/۸۸	۰/۴۸	۰/۰۴۸	۰/۱۹۸	۰/۲۰۸	۰/۰۹۳	۱۴۶۳۰/۷	۲۴	۲۴	۳۵
۱۲/۵۹	۰/۵۵	۰/۰۵۵	۰/۲۳۹	۰/۲۵۱	۰/۱۰۷	۱۶۸۶۶/۳	۲۵	۲۵	۳۵
۱۳/۷۷	۰/۷۹	۰/۰۷۹	۰/۳۶۰	۰/۳۷۸	۰/۱۵۷	۲۴۶۵۶/۴	۲۶	۲۶	۳۵
۲۲/۸۷	۱/۳۲	۰/۱۳۲	۰/۹۰۸	۰/۹۵۳	۰/۱۵۸	۲۴۸۵۶/۷	۲۷	۲۷	۳۵
۱۰/۰۹	۰/۶۵	۰/۰۶۵	۰/۳۸۲	۰/۴۰۱	۰/۰۵۵	۸۷۱۶/۶	۲۸	۲۸	۰۱
۱۶/۰۶	۰/۸۹	۰/۰۸۹	۰/۴۰۳	۰/۴۲۴	۰/۱۷۳	۲۷۲۳۸/۷	۲۹	۲۹	۳۵
۱۳/۸۲	۱/۲۱	۰/۱۲۱	۰/۶۹۳	۰/۷۲۷	۰/۱۵۷	۲۴۶۶۸/۹	۳۰	۳۰	۳۵
۵/۷۷	۰/۶۲	۰/۰۶۲	۰/۳۴۶	۰/۳۶۴	۰/۰۷۴	۱۱۶۷۴	۳۱	۳۱	۳۵
۱۳/۷۲	۱/۰۶	۰/۱۰۶	۰/۵۲۴	۰/۵۵۱	۰/۱۲۸	۲۰۱۶۱/۶	۳۲	۳۲	۳۵
۸/۴۸	۱/۹۴	۰/۱۹۴	۱/۳۵۸	۱/۴۲۶	۰/۱۲۲	۱۹۱۷۸/۲	۳۳	۳۳	۳۵
۸/۴۴	۲/۰۸	۰/۲۰۸	۱/۴۲۸	۱/۵۰	۰/۱۰۶	۱۶۶۴۶/۸	۳۴	۳۴	۳۵
۸/۷۶	۱/۱۳	۰/۱۱۳	۰/۶۶۹	۰/۷۰۲	۰/۱۰۷	۱۶۷۹۵	۳۵	۳۵	۳۵
۹/۸۲	۱/۱۸	۰/۱۱۸	۰/۷۳۸	۰/۷۷۵	۰/۰۶۸	۱۰۸۱۵/۵	۳۶	۳۶	۳۵
۱۵/۱۶	۱/۸۷	۰/۱۸۷	۱/۱۳۷	۱/۱۹۴	۰/۲۰۹	۳۲۸۷۲/۹	۳۷	۳۷	۳۵
۸/۰۲	۱/۰۶	۰/۱۰۶	۰/۶۶۱	۰/۶۹۴	۰/۱۲۱	۱۹۰۹۶/۷	۳۸	۳۸	۳۵
۷/۹۰	۱/۷۹	۰/۱۷۹	۱/۲۶۷	۱/۳۳۰	۰/۰۸۶	۱۳۵۷۸/۲	۳۹	۳۹	۳۵
۴/۶۹	۱/۳۷	۰/۱۳۷	۰/۹۳۶	۰/۹۸۲	۰/۰۷۱	۱۱۲۵۷/۵	۴۰	۴۰	۳۵
۲۲/۸۷	۲/۰۸	۰/۲۰۸	۱/۴۲۸	۱/۵	۰/۲۰۹	۳۲۸۷۲/۹	حداکثر		
۱۰/۶۳	۱/۰۸	۰/۱۰۸	۰/۶۴۸	۰/۶۸۰	۰/۱۱۳	۱۷۷۸۰/۰۲	میانگین		
۴/۶۹	۰/۳۴	۰/۰۳۴	۰/۱۳۶	۰/۱۴۳	۰/۰۵۴	۸۴۷۹/۸۷	حداقل		

جدول (۱۹) پاسخ سازه ۳۵ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه	شماره طبقه
حداکثر شتاب (m/s ²)	حداکثر دریفت طبقات (%)	حداکثر دریفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	پایه (KN)	حداکثر برش	شماره رکورد	شماره طبقه
۴۹/۵۹	۲۰/۷۶	۰/۲۰۷۶	۱۴/۶۳۳	۱۵/۳۶۶	۰/۹۸۶	۱۵۴۸۲۰	S	S	۳۵

جدول (۲۰) پاسخ‌های سازه ۵۰ طبقه تحت رکوردهای حوزه دور

شماره طبقه	حداکثر شتاب طبقات (m/s ²)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۵۰	۱۱/۵۳	۳۵	۰/۹۷	۰/۰۰۹۷	۰/۳۴۰	۰/۱۳۶	۳۰۵۶۵/۱	۰۱
۵۰	۹/۶۱	۵۰	۰/۷۳	۰/۰۰۷۳	۰/۲۱۷	۰/۱۲۳	۲۷۶۴۰/۶	۰۲
۵۰	۶/۰۷	۵۰	۰/۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۱۷۷	۰/۰۵۳	۱۱۹۲۳/۵	۰۳
۵۰	۷/۴۴	۵۰	۰/۴۷	۰/۰۰۴۷	۰/۱۹۰	۰/۰۵۷	۱۲۸۵۵/۵	۰۴
۵۰	۱۱/۱۳	۵۰	۰/۶۹	۰/۰۰۶۹	۰/۴۵۰	۰/۱۰۱	۲۲۷۵۲/۲	۰۵
۵۰	۱۴/۱۵	۵۰	۰/۷۷	۰/۰۰۷۷	۰/۲۸۶	۰/۱۰۶	۲۳۸۱۲/۲	۰۶
۵۰	۴/۹۵	۵۰	۰/۶۷	۰/۰۰۶۷	۰/۴۶۶	۰/۰۴۸	۱۰۹۷۰/۲	۰۷
۵۰	۵/۴۵	۵۰	۰/۷۹	۰/۰۰۷۹	۰/۵۷۰	۰/۰۵۳	۱۱۹۶۴/۵	۰۸
۵۰	۴/۵۶	۵۰	۰/۴۲	۰/۰۰۴۲	۰/۲۸۹	۰/۰۵۴	۱۲۳۳۵/۷	۰۹
۵۰	۶/۶۴	۵۰	۰/۶۲	۰/۰۰۶۲	۰/۳۸۲	۰/۰۵۸	۱۳۰۷۶/۱	۱۰
۵۰	۶/۷۷	۵۰	۰/۳۴	۰/۰۰۳۴	۰/۱۴۷	۰/۰۵۶	۱۲۶۱۷/۱	۱۱
۵۰	۵/۶۴	۵۰	۰/۴۷	۰/۰۰۴۷	۰/۳۱۶	۰/۰۳۸	۸۶۸۷/۶۸	۱۲
۵۰	۵/۲۳	۵۰	۰/۳۷	۰/۰۰۳۷	۰/۱۷۲	۰/۰۵۶	۱۲۶۱۱/۹	۱۳
۵۰	۴/۱۷	۵۰	۰/۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۱۸۲	۰/۰۲۹	۶۷۲۲/۶۵	۱۴
۵۰	۶/۰۰	۵۰	۱/۱۲	۰/۰۱۱۲	۰/۷۰۶	۰/۰۶۴	۱۴۴۵۷/۳	۱۵
۵۰	۶/۶۳	۵۰	۰/۷۲	۰/۰۰۷۲	۰/۴۸۸	۰/۰۶۷	۱۵۱۶۳/۷	۱۶
۰۱	۲/۱۴	۵۰	۰/۲۷	۰/۰۰۲۷	۰/۱۵۳	۰/۰۱۸	۴۱۶۴/۹	۱۷
۳۵	۲/۵۳	۵۰	۰/۹۶	۰/۰۰۹۶	۰/۶۷۸	۰/۰۳۸	۸۵۷۷/۹۴	۱۸
۳۵	۴/۴۱	۵۰	۰/۸۵	۰/۰۰۸۵	۰/۵۸۵	۰/۰۴۶	۱۰۵۱۳/۲	۱۹
۳۵	۲/۹۹	۵۰	۰/۶۸	۰/۰۰۶۸	۰/۴۸۲	۰/۰۳۴	۷۶۹۲/۲	۲۰
	۱۴/۱۵		۱/۱۲	۰/۰۱۱۲	۰/۷۰۶	۰/۱۳۶	۳۰۵۶۵/۱	حداکثر
	۶/۴۰		۰/۶۳	۰/۰۰۶۳	۰/۳۶۴	۰/۰۶۲	۱۳۹۵۵/۰۲	میانگین
	۲/۱۴		۰/۲۶	۰/۰۰۲۶	۰/۱۴۷	۰/۰۱۸	۴۱۶۴/۹	حداقل

جدول (۲۱) پاسخ‌های سازه ۵۰ طبقه تحت رکوردهای حوزه نزدیک

شماره طبقه	شماره حداکثر شتاب طبقات (m/s ²)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	حداکثر دررفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۰۱	۴/۹۸	۵۰	۰/۱۹	۰/۰۰۱۹	۰/۰۸۶	۰/۱۳۰	۰/۰۱۸	۴۲۴۰/۵۶	۲۱
۵۰	۴/۸۰	۵۰	۰/۲۹	۰/۰۰۲۹	۰/۰۹۳	۰/۱۳۹	۰/۰۳۸	۸۶۰۴/۳۱	۲۲
۵۰	۹/۵۸	۵۰	۰/۵۸	۰/۰۰۵۸	۰/۱۷۵	۰/۲۶۳	۰/۰۹۷	۲۱۹۱۹/۷	۲۳
۵۰	۷/۴۷	۵۰	۰/۴۴	۰/۰۰۴۴	۰/۱۲۳	۰/۱۸۵	۰/۰۸۷	۱۹۷۴۶/۷	۲۴
۵۰	۹/۲۸	۵۰	۰/۳۲	۰/۰۰۳۲	۰/۱۵۳	۰/۲۳۰	۰/۰۹۹	۲۲۲۳۶/۸	۲۵
۵۰	۱۱/۹۱	۵۰	۰/۷۶	۰/۰۰۷۶	۰/۲۳۶	۰/۳۵۴	۰/۰۷۹	۱۷۸۲۰/۷	۲۶
۵۰	۱۹/۵۳	۵۰	۱/۱۶	۰/۰۱۱۶	۰/۷۳۱	۱/۰۹۷	۰/۱۰۷	۲۴۱۲۷/۱	۲۷
۰۱	۱۰/۰۳	۵۰	۰/۵۴	۰/۰۰۵۴	۰/۳۸۰	۰/۵۷۰	۰/۰۵۷	۱۲۷۹۷	۲۸
۵۰	۱۳/۲۵	۵۰	۰/۸۰	۰/۰۰۸۰	۰/۲۷۰	۰/۴۰۵	۰/۱۲۶	۲۸۴۱۴/۴	۲۹
۵۰	۱۸/۱۹	۵۰	۰/۸۲	۰/۰۰۸۲	۰/۳۵۳	۰/۵۲۹	۰/۱۳۹	۳۱۳۳۶	۳۰
۵۰	۴/۴۷	۵۰	۰/۴۵	۰/۰۰۴۵	۰/۳۰۱	۰/۴۵۱	۰/۰۴۰	۹۱۵۶/۳۶	۳۱
۵۰	۹/۲۸	۵۰	۰/۹۰	۰/۰۰۹۰	۰/۴۷۰	۰/۷۰۶	۰/۰۸۲	۱۸۵۶۱/۲	۳۲
۵۰	۷/۱۷	۵۰	۲/۲۰	۰/۰۲۲۰	۱/۵۰۸	۲/۲۶۲	۰/۱۱۱	۲۴۸۸۲/۴	۳۳
۵۰	۵/۷۳	۵۰	۱/۴۷	۰/۰۱۴۷	۱/۰۰۲	۱/۵۰۳	۰/۰۸۴	۱۹۰۷۲/۶	۳۴
۵۰	۹/۴۳	۵۰	۱/۲۴	۰/۰۱۲۴	۰/۶۹۳	۱/۰۳۹	۰/۱۱۰	۲۴۷۱۰/۳	۳۵
۵۰	۷/۴۶	۵۰	۱/۱۴	۰/۰۱۱۴	۰/۷۵۸	۱/۱۳۷	۰/۰۸۷	۱۹۵۶۳/۸	۳۶
۵۰	۲۹/۷۲	۵۰	۱/۸۴	۰/۰۱۸۴	۰/۷۰۰	۱/۰۵۱	۰/۳۲۲	۷۲۴۴۷	۳۷
۵۰	۸/۱۱	۵۰	۱/۰۰	۰/۰۱۰۰	۰/۵۳۶	۰/۸۰۵	۰/۰۹۲	۲۰۷۲۵	۳۸
۵۰	۸/۷۹	۵۰	۱/۴۳	۰/۰۱۴۳	۰/۹۹۸	۱/۴۹۷	۰/۰۸۱	۱۸۳۰۷/۵	۳۹
۵۰	۴/۴۳	۵۰	۱/۱۷	۰/۰۱۱۷	۰/۷۷۳	۱/۱۶۰	۰/۰۵۶	۱۲۷۳۳/۶	۴۰
	۲۹/۷۲		۲/۲	۰/۰۲۲۰	۱/۵۰۸	۲/۲۶۲	۰/۳۲۲	۷۲۴۴۷	حداکثر
	۱۰/۱۸		۰/۹۴	۰/۰۰۹۴	۰/۵۱۷	۰/۷۷۶	۰/۰۹۶	۲۱۵۷۰/۱۵	میانگین
	۴/۴۳		۰/۱۹	۰/۰۰۱۹	۰/۰۸۶	۰/۱۳۰	۰/۰۱۸	۴۲۴۰/۵۶	حداقل

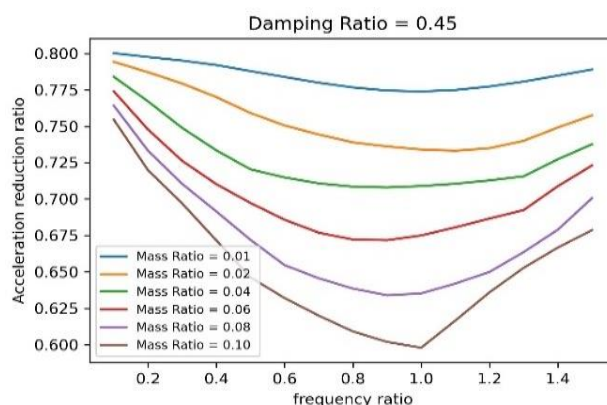
جدول (۲۲) پاسخ سازه ۵۰ طبقه تحت بارگذاری سینوسی

شماره طبقه	شماره حداکثر شتاب طبقات (m/s ²)	شماره طبقه	حداکثر دررفت طبقات (%)	حداکثر دررفت طبقات	نسبت جابه‌جایی بام به ارتفاع سازه (%)	جابه‌جایی حداکثر بام (m)	ضریب زلزله (C)	حداکثر برش پایه (KN)	شماره رکورد
۵۰	۴۵/۴۱	۵۰	۲۷/۲۲	۰/۲۷۲۲	۱۹/۱۵۶	۲۸/۷۳	۰/۸۶۷	۱۹۴۷۱۶	S

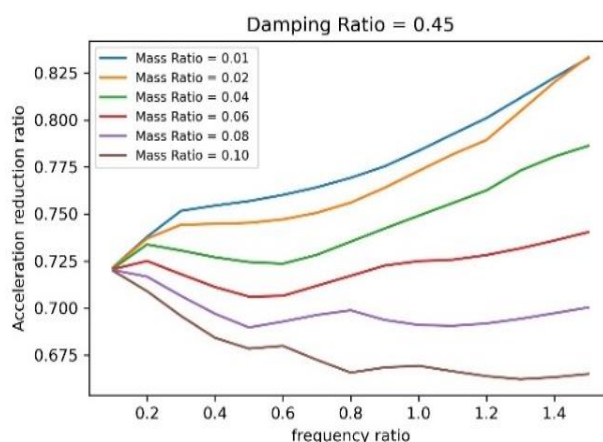
تأثیر TMD و FTMD بر پاسخ‌های سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه

{۰/۰۵، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۴۵، ۰/۵۵} برای نسبت میرایی میراگر انتخاب شد [46] و برای میراگر FTMD نیز ضرایب اصطکاکی شامل {۰، ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵، ۰/۳۰، ۰/۳۵، ۰/۴۰} است [36]. واضح است که به ازای هر سازه معلوم تحت یک رکورد مشخص، با توجه به مقادیر بالا، $6 \times 15 \times 6 = 540$ 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. در اشکال (۵) تا (۱۸) تعدادی نمودار پاسخ شتاب، جابجایی نسبی و تغییر مکان بام مدل‌های ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه مجهز به TMD و FTMD نشان داده شده است.

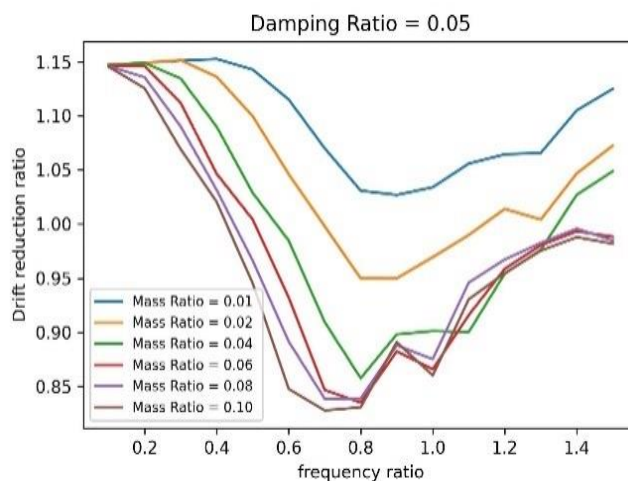
در این بخش نتایج تحلیل مدل‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه که تحت رکوردهای دور و نزدیک و نگاشت سینوسی قرار گرفتند در قالب نمودارهایی ارائه شده است. همان طور که پیشتر نیز بیان شد، اثرپذیری میراگرها در گرو انتخاب درست مقادیر و پارامترهای مربوط به آن است. برای تحلیل مدل‌های برشی، جانمایی میراگرها در طبقه بام فرض شده است [39]. نسبت جرمی (جرم تجهیز به مجموع جرم طبقات را نسبت جرمی گویند) برای میراگرها مقادیر {۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۱۰} در نظر گرفته شده است [46]. محدوده نسبت فرکانسی [۰/۱ - ۱/۵] با گام ۰/۱ لحاظ شده است [47] به نحوی که تمامی حالات و شرایط ممکن را پوشش دهد. برای میراگر TMD مقادیر



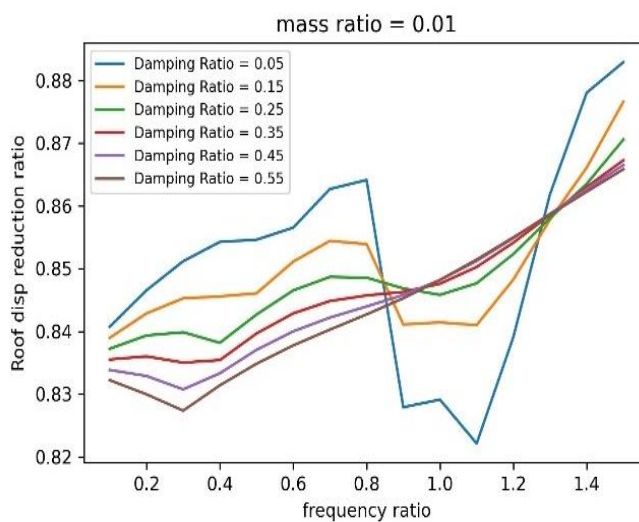
شکل (۵) پاسخ شتاب برای مدل ۱۰ طبقه تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



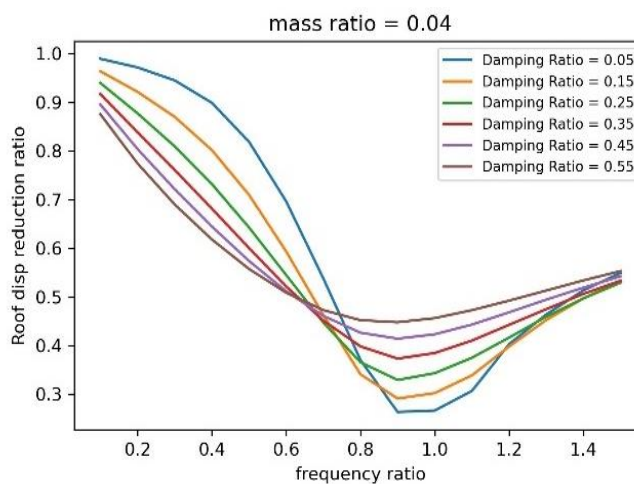
شکل (۶) پاسخ شتاب برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



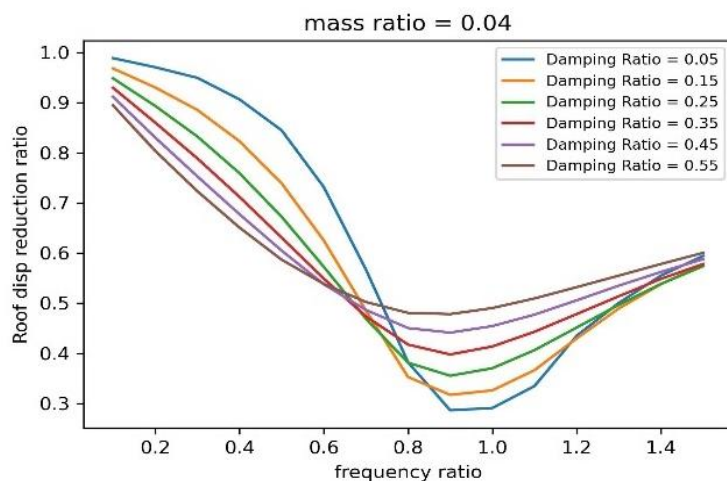
شکل (۷) پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



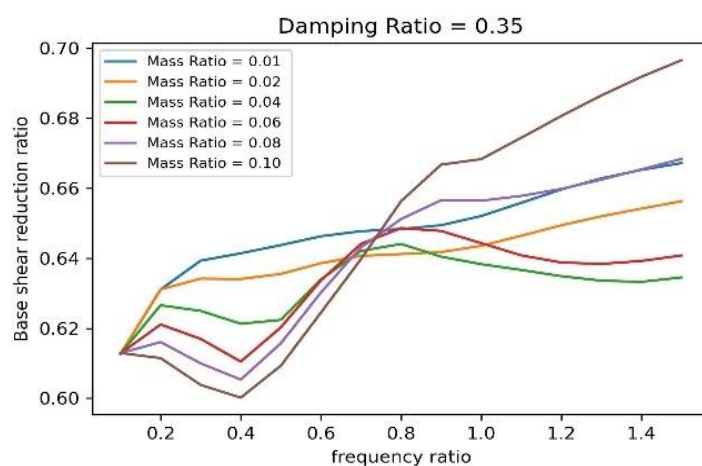
شکل (۸) پاسخ جابجایی حداکثر بام برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



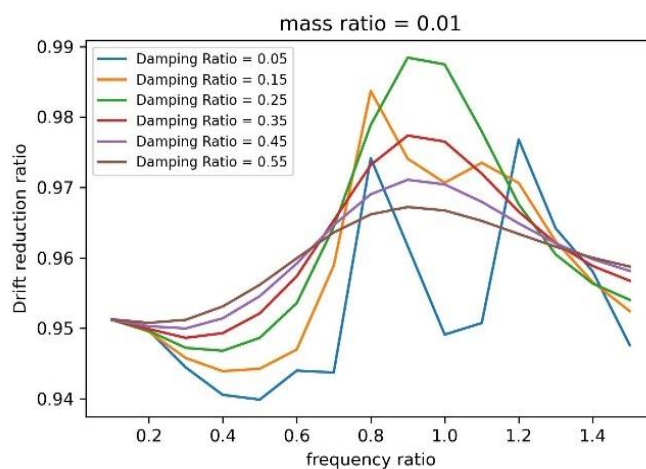
شکل (۹) پاسخ جابجایی حداکثر بام برای مدل ۱۰ طبقه مجهز به TMD تحت نگاشت سینوسی



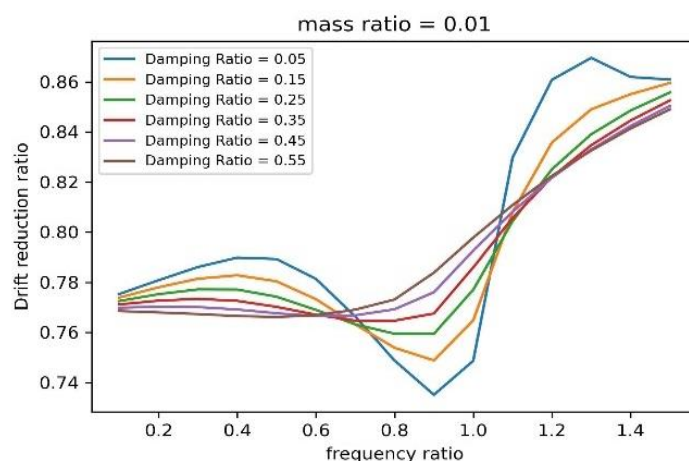
شکل (۱۰) پاسخ جابجایی حداکثر بام برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به TMD تحت نگاشت سینوسی



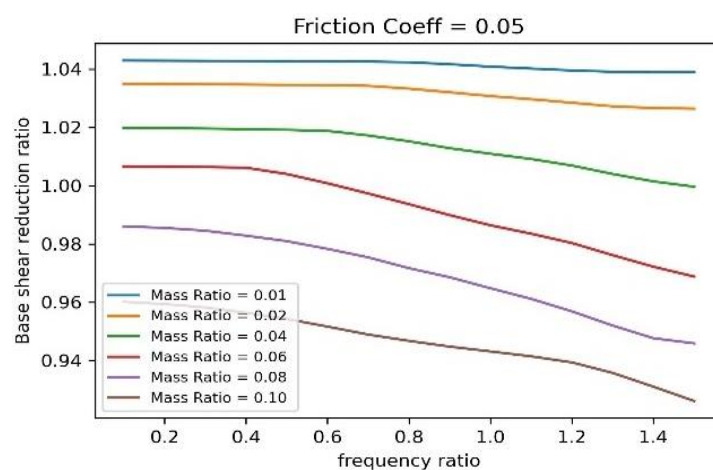
شکل (۱۱) پاسخ برش پایه برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



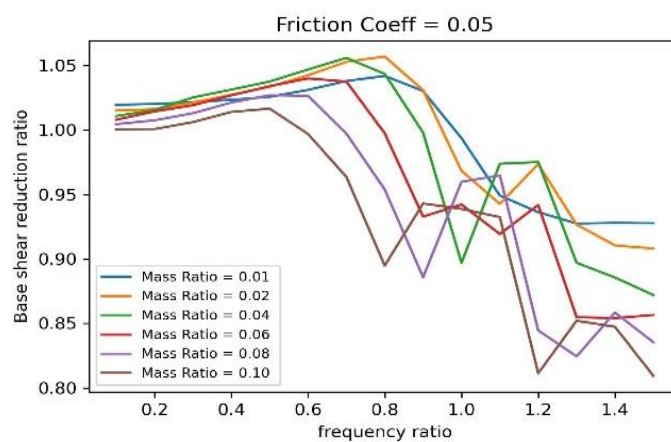
شکل (۱۲) پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۱۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



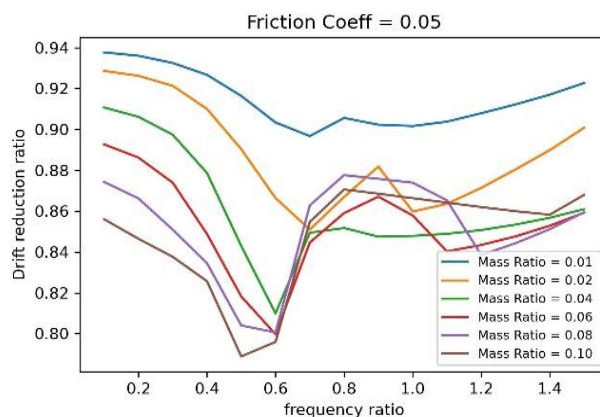
شکل (۱۳) پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به TMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



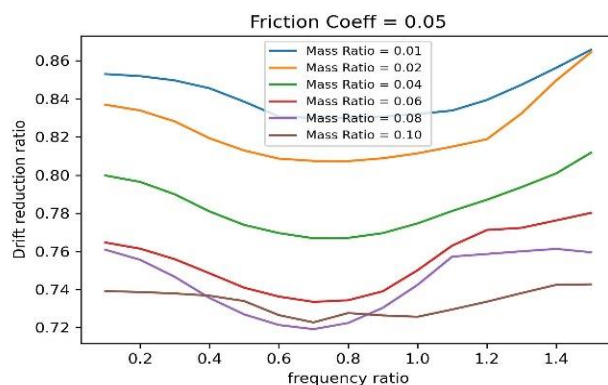
شکل (۱۴) پاسخ برش پایه برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به FTMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



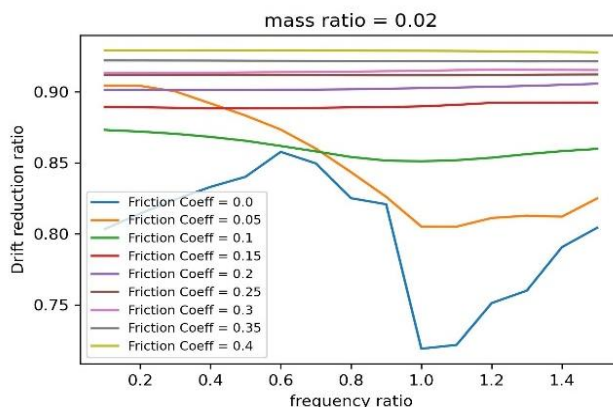
شکل (۱۵) پاسخ برش پایه برای مدل ۱۰ طبقه مجهز به FTMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



شکل (۱۶) پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۲۰ طبقه مجهز به FTMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک



شکل (۱۷) پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۵۰ طبقه مجهز به FTMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور



شکل (۱۸) پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای مدل ۳۵ طبقه مجهز به FTMD تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های (۵) تا (۱۸) برای سازه‌های 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 پاسخ‌ها می‌گردد، هر چند ممکن است

استثنائاتی داشته باشد.

۲. در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه در نسبت میرایی پایین (کمتر از ۵٪) می‌توان از همپوشانی نسبت جرمی به منظور رسیدن به یک سطح از کاهش پاسخ سود جست. ۳. در سازه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۵ طبقه تحت رکوردهای حوزه دور کاهش بیشتری در پاسخ سازه

در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) عملکرد ابزار TMD را برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه را به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و نسبت میرایی برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ شتاب به صورت نمودار میله‌ای را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) عملکرد ابزار FTMD را برای سازه‌های برشی مذکور به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و ضریب اصطکاک برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ شتاب را نشان می‌دهد.

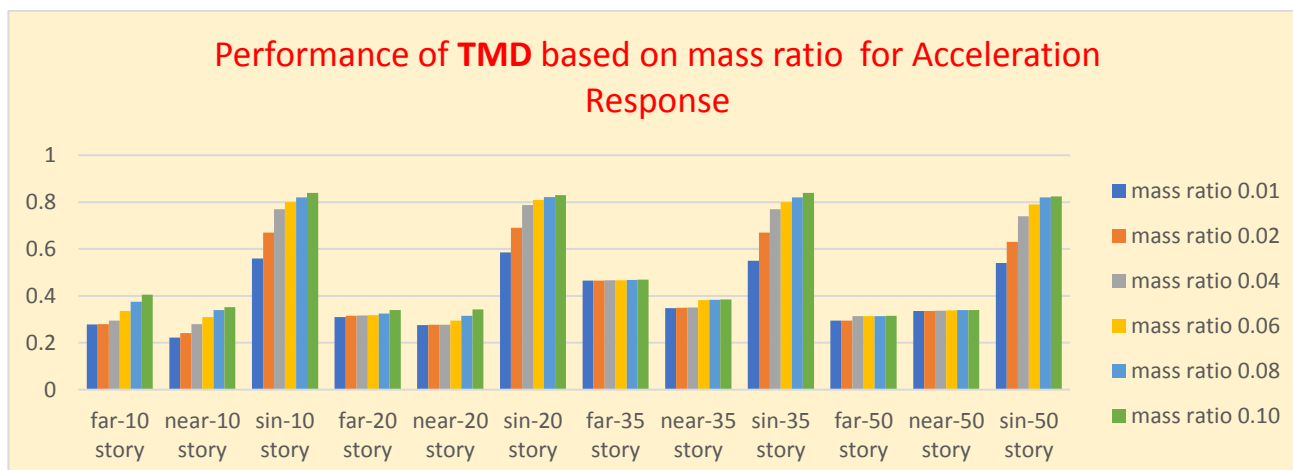
در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) عملکرد ابزار TMD را برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه را به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و نسبت میرایی برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ برش پایه به صورت نمودار میله‌ای را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) عملکرد ابزار FTMD را برای سازه‌های برشی مذکور به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و ضریب اصطکاک برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ برش پایه را نشان می‌دهد.

در شکل‌های (۲۷) و (۲۸) عملکرد ابزار TMD را برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه را به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و نسبت میرایی برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییرمکان نسبی طبقات به صورت نمودار میله‌ای را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۲۹) و (۳۰) عملکرد ابزار FTMD را برای سازه‌های برشی مذکور به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و ضریب اصطکاک برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییرمکان نسبی طبقات را نشان می‌دهد.

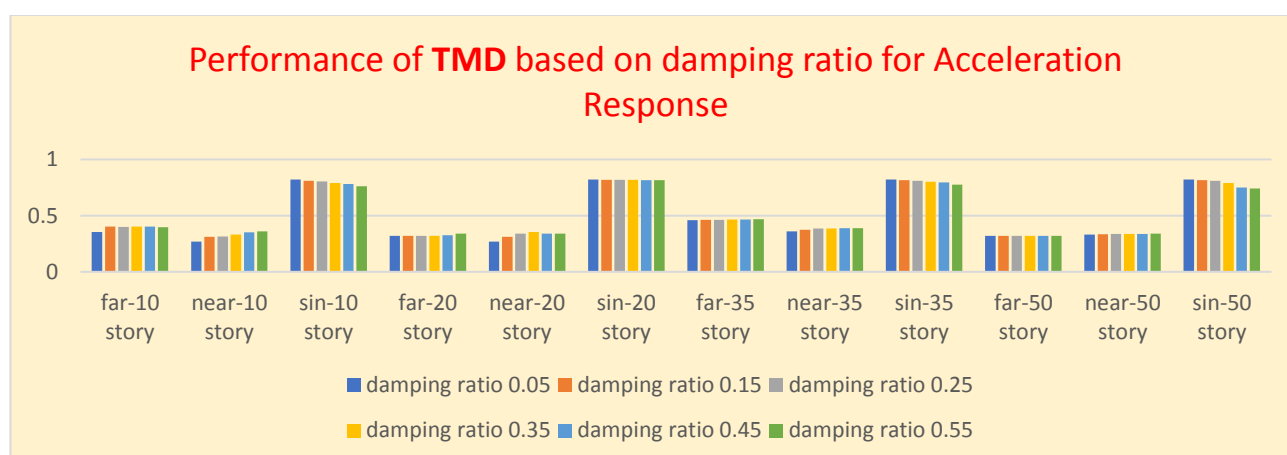
در شکل‌های (۳۱) و (۳۲) عملکرد ابزار TMD را برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه را به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و نسبت میرایی برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییرمکان حداکثر بام به صورت نمودار میله‌ای را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۳۳) و (۳۴) عملکرد ابزار FTMD را برای سازه‌های برشی مذکور به ترتیب بر اساس نسبت جرمی و ضریب اصطکاک برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییرمکان حداکثر بام را نشان می‌دهد.

(شتاب حداکثر) دیده می‌شود حال آنکه برای سازه ۵۰ طبقه این اتفاق تحت رکوردهای حوزه نزدیک رخ می‌دهد. ۴. مادامی که سازه تحت نگاشت سینوسی واقع می‌شود، افزایش نسبت میرایی تأثیر منفی بر کاهش پاسخ‌ها خواهد گذاشت که با افزایش ارتفاع سازه بیشتر هم می‌شود. ۵. زمانی که سازه تحت تحریک‌های لرزه‌ای حوزه نزدیک قرار می‌گیرد، ابزار TMD در بهبود پاسخ برش پایه (کاهش پاسخ) مؤثرتر واقع می‌شود. ۶. در بین سازه‌های 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 جابه‌جایی طبقات به حساب می‌آید. همچنین تأثیر آن در زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر است. ۸. اثر مثبت TMD در کاهش پاسخ جابه‌جایی بام برای زلزله‌های حوزه دور بیشتر در سازه‌های ۳۵ و ۵۰ طبقه، و برای زلزله‌های حوزه نزدیک در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه، از یکدیگر بیشتر است. ۹. در تمامی پاسخ‌ها، ابزار TMD بازخورد مؤثرتری 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 پاسخ‌ها می‌گردد.

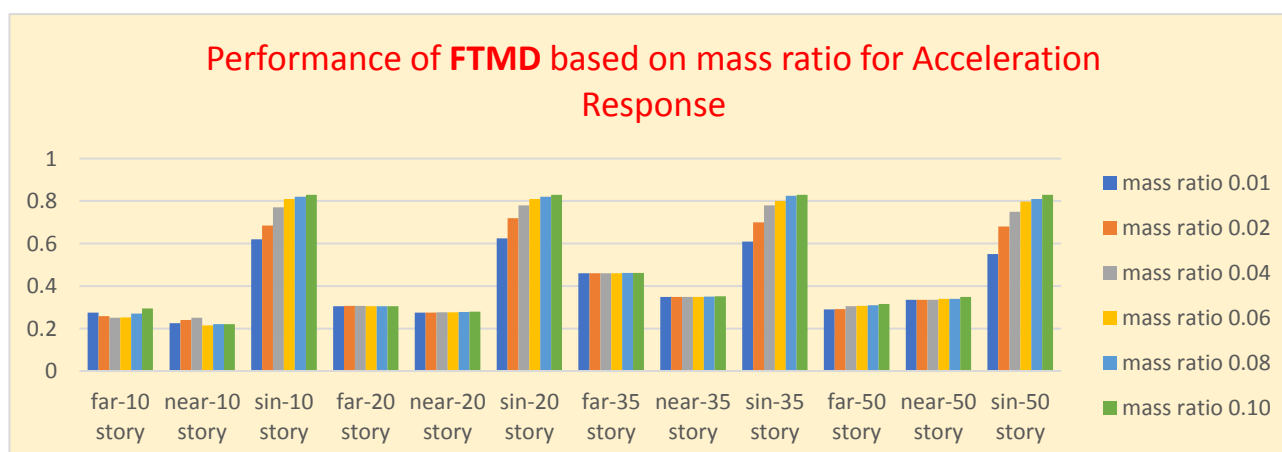
۱۱. بیشترین کاهش پاسخ به ازای ضریب اصطکاک ۰ تا ۰/۰۵ اتفاق می‌افتد. ۱۲. با توجه به تعداد طبقات سازه؛ ضرایب اصطکاک و نسبت‌های میرایی برای رسیدن به بهترین پاسخ همواره در حال تغییر هستند و نمی‌توان قاعده‌ای برای رفتار آن وضع کرد. ۱۳. برای رسیدن به یک سطح مشخص از پاسخ می‌توان از چندین ضریب اصطکاک به طور دلخواه 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 انعطاف‌پذیری در انتخاب‌ها به واسطه تغییر در ضریب اصطکاک به وجود می‌آید. ۱۴. انتظار می‌رود سازه مجهز به FTMD در برابر تحریکات ناشی از زلزله‌های حوزه دور عملکرد بهتری از خود به نمایش بگذارد گرچه برای برخی پاسخ‌ها برای برخی از سازه‌ها این اتفاق نمی‌افتد. ۱۵. در سازه دلخواه تحت نگاشت سینوسی، می‌توان تأثیر اصطکاک را به مثابه میرایی قلمداد کرد که افزایش ضریب اصطکاک تأثیر منفی بر کاهش تمامی پاسخ‌ها خواهد داشت اگرچه در برخی موارد نوساناتی در این روند مشاهده می‌شود.



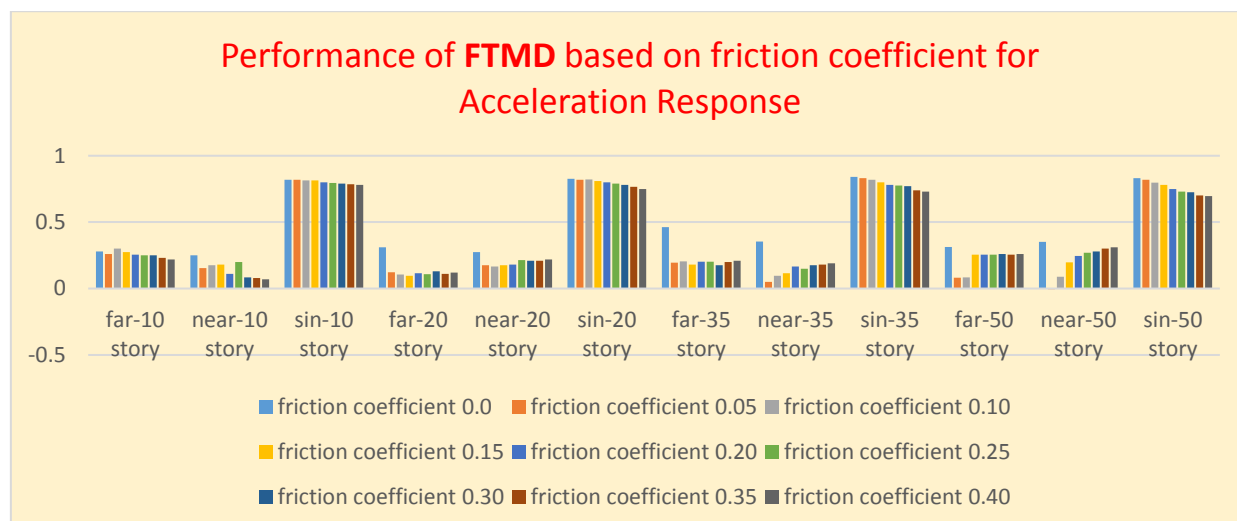
شکل (۱۹) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ شتاب



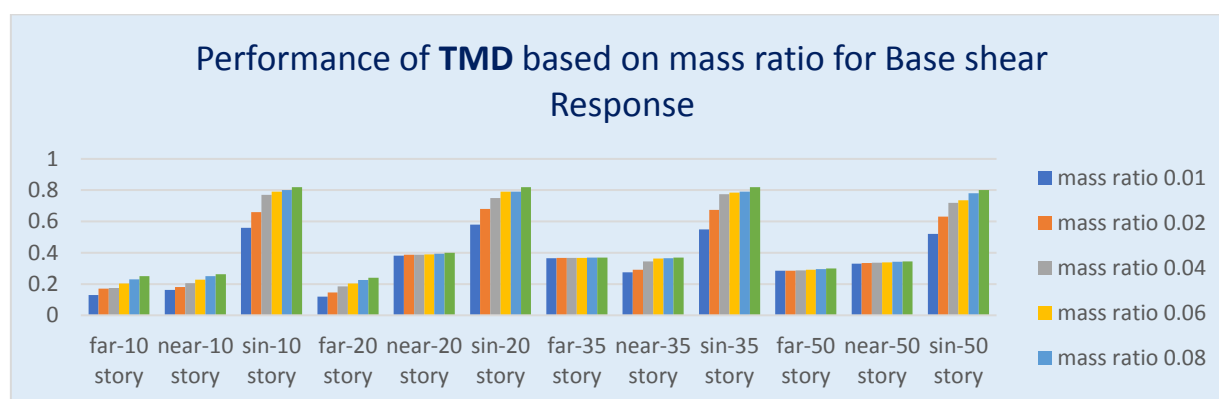
شکل (۲۰) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت میرایی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ شتاب



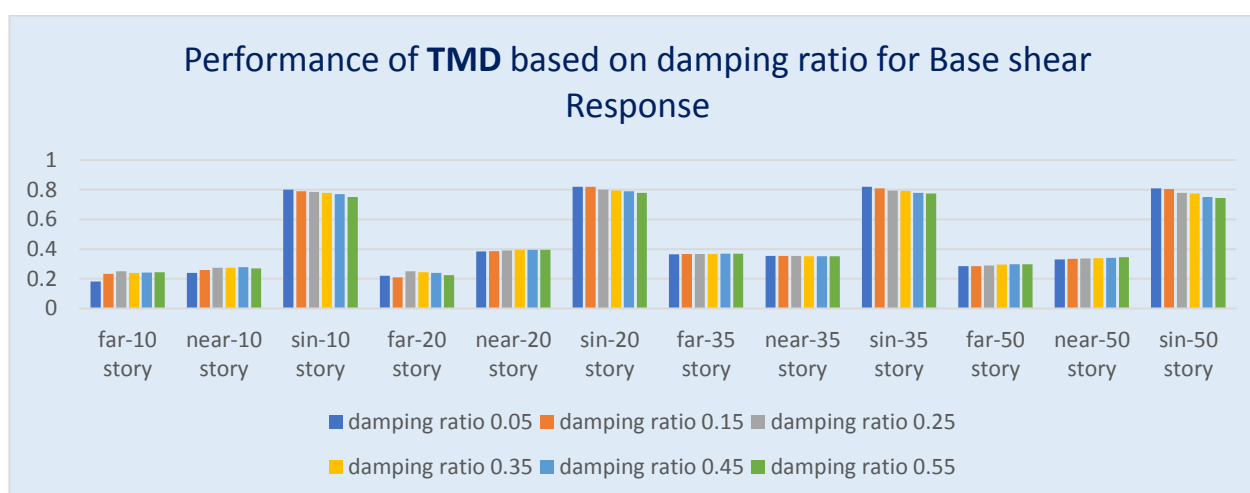
شکل (۲۱) عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ شتاب



شکل (۲۲) عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ شتاب

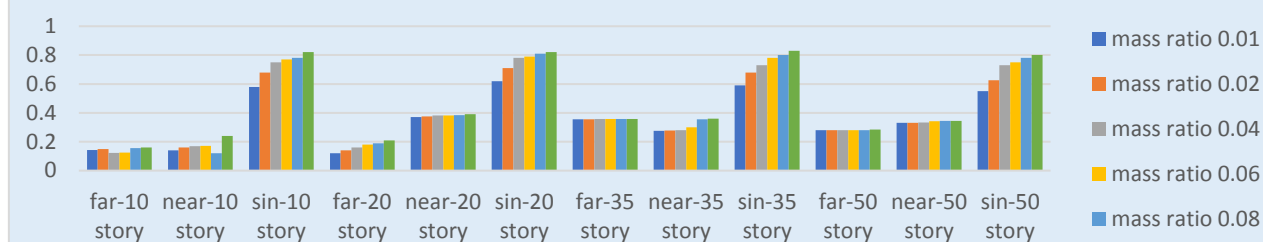


شکل (۲۳) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ برش پایه



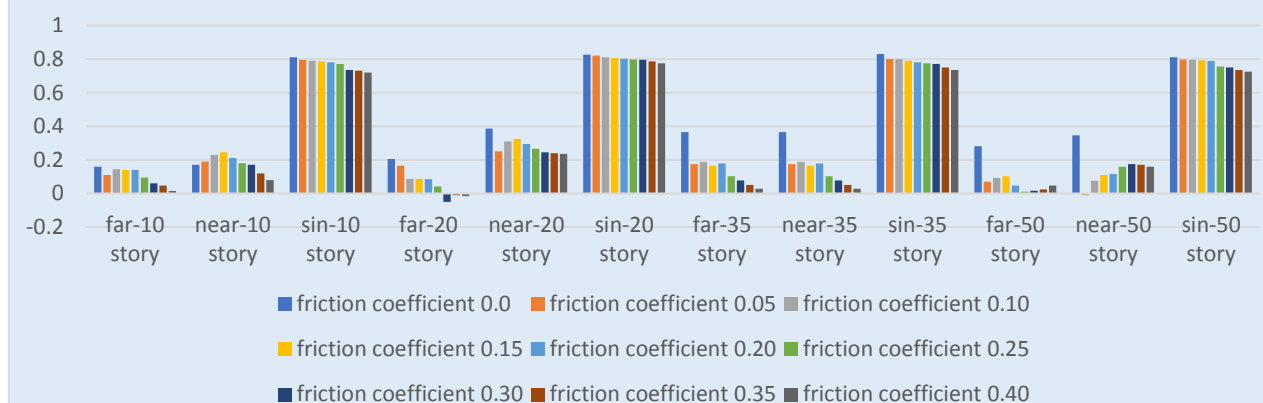
شکل (۲۴) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت میرایی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ برش پایه

Performance of FTMD based on mass ratio for Base shear Response



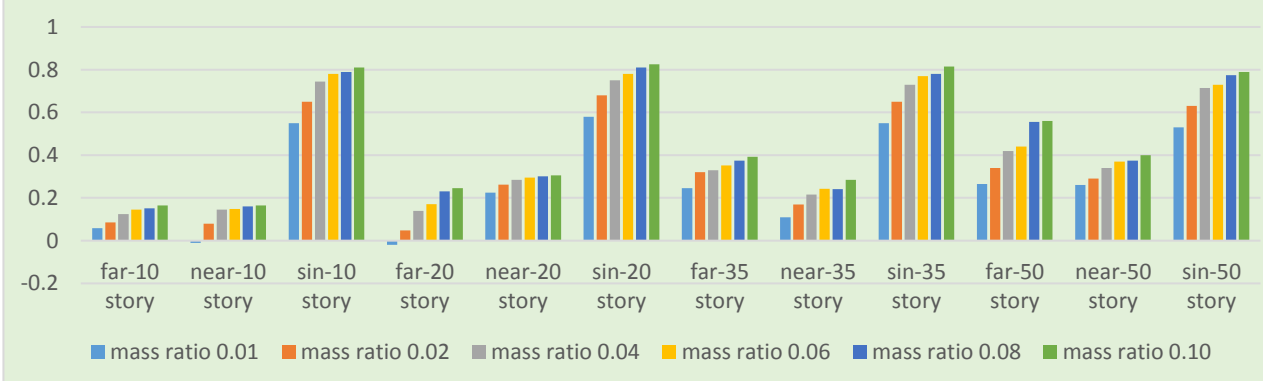
شکل (۲۵) عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ برش پایه

Performance of FTMD based on friction coefficient for Base shear Response



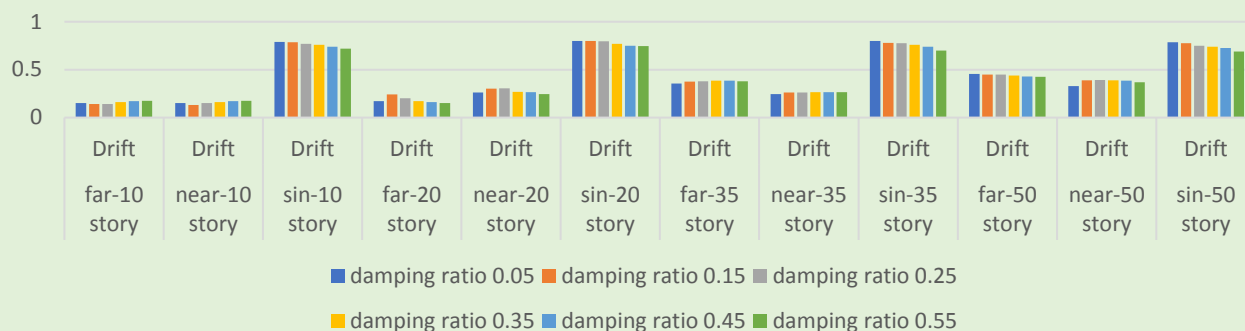
شکل (۲۶) عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ برش پایه

Performance of TMD based on mass ratio for Drift story Response



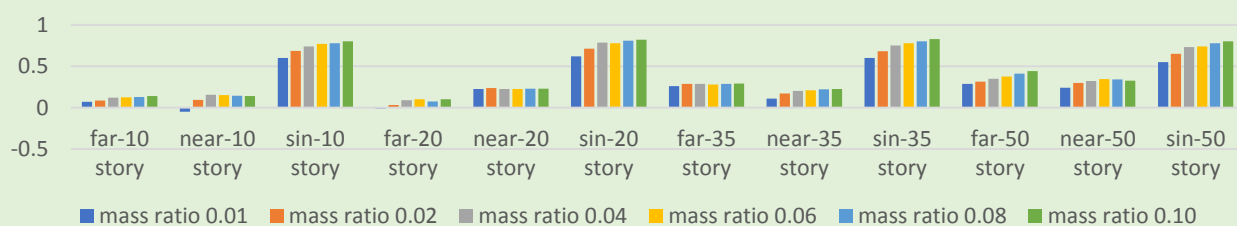
شکل (۲۷) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات

Performance of TMD based on damping ratio for Drift story Response



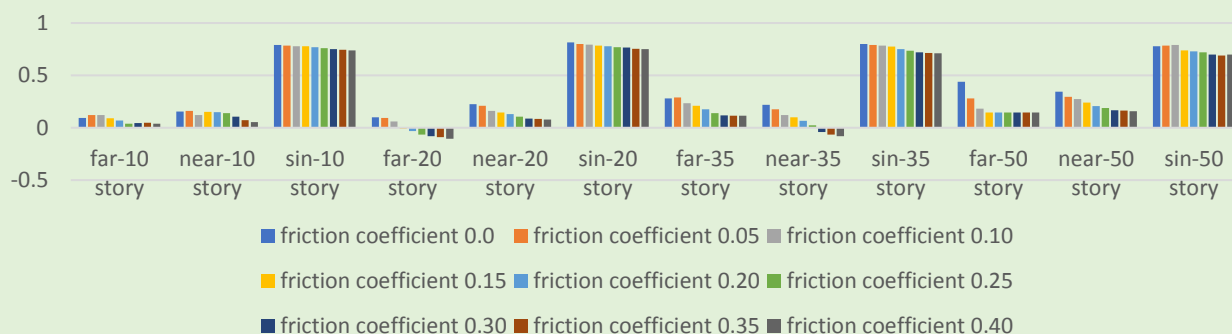
شکل (۲۸) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت میرایی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات

Performance Of FTMD based on mass ratio for Drift story Response

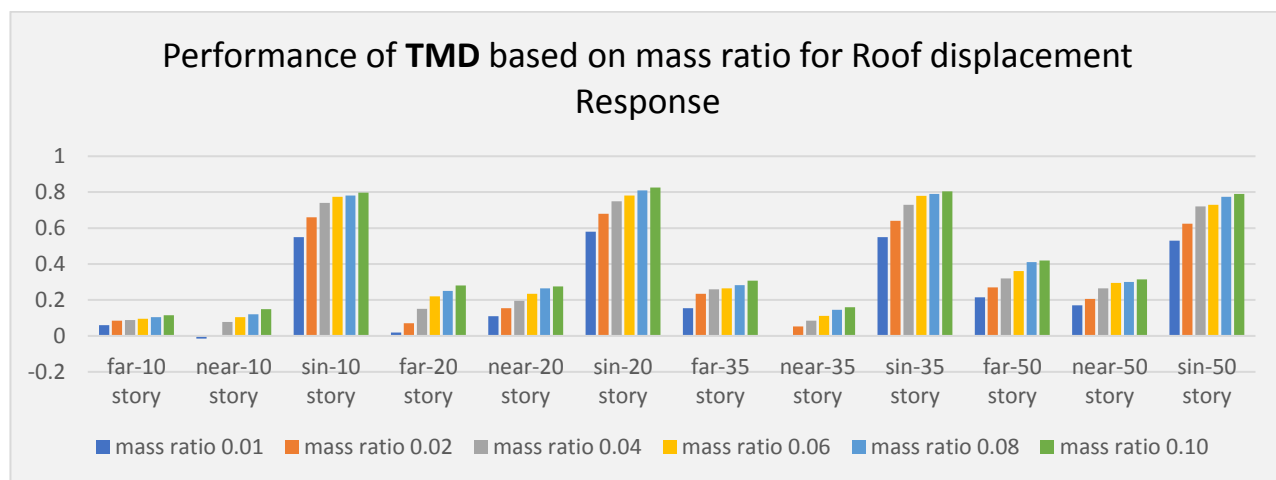


شکل (۲۹) عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات

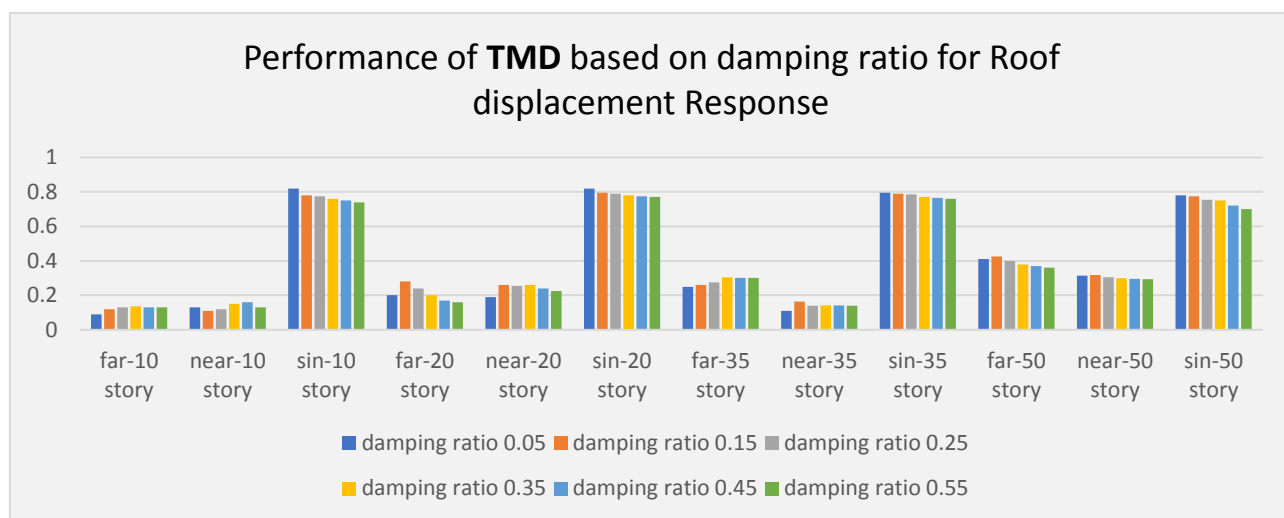
Performance of FTMD based on friction coefficient for Drift story Response



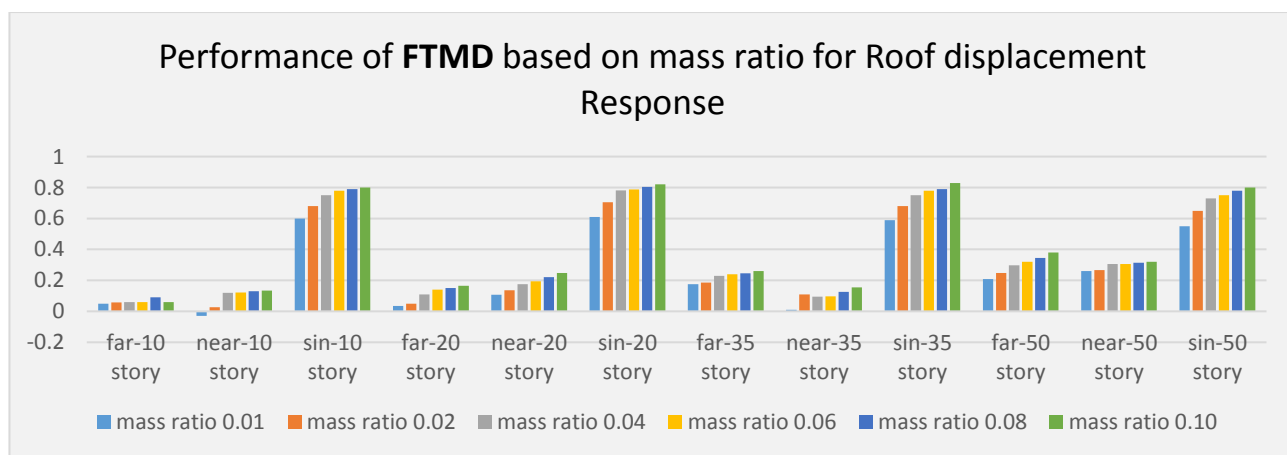
شکل (۳۰) عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات



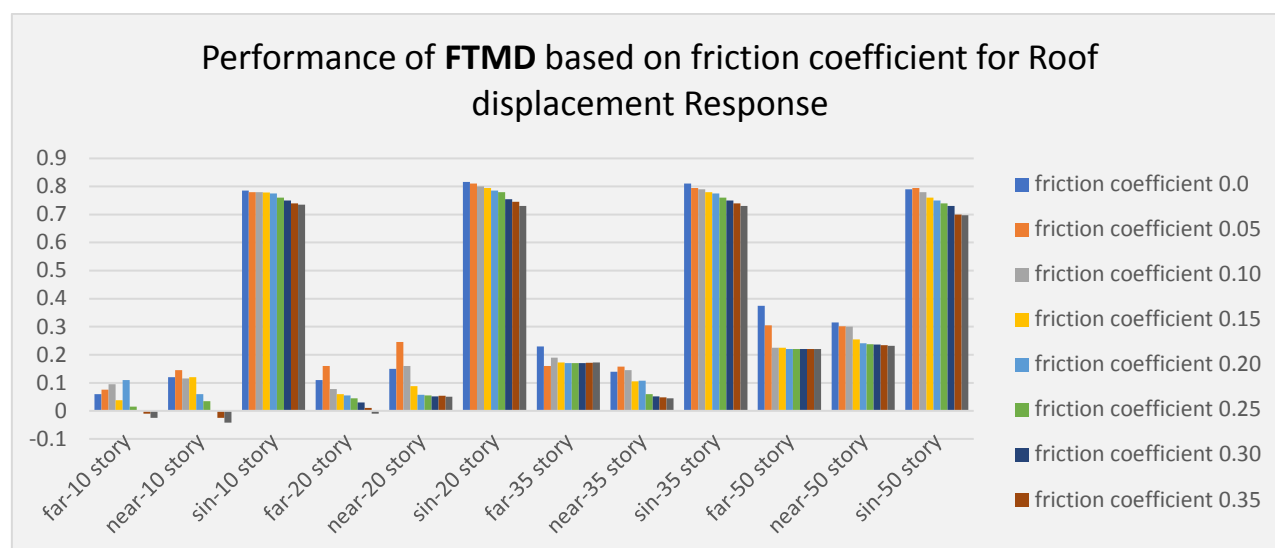
شکل (۳۱) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثری



شکل (۳۲) عملکرد ابزار TMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثری



شکل (۳۳) عملکرد ابزار FTMD بر اساس نسبت جرمی برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثری



شکل (۳۴) عملکرد ابزار FTMD بر اساس ضریب اصطکاک برای سازه‌های برشی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ طبقه برای رکوردهای حوزه دور، نزدیک و نگاشت سینوسی برای پاسخ تغییر مکان حداکثریام

از بهبود پاسخ‌ها کاسته می‌شود.

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: به صورت کلی افزایش نسبت جرمی سبب بهبود پاسخ در تمامی رکوردها و مدل‌ها می‌گردد.

حساسیت پاسخ به تغییرات نسبت جرمی برای حوزه دور بیشتر از حوزه نزدیک است اما بیشترین بهبود پاسخ در رکورد حوزه نزدیک رخ می‌دهد.

تغییرات ارتفاع سازه در مورد نگاشت سینوسی تغییری در افزایش و یا کاهش پاسخ ایجاد نکرده و روند تغییرات آن به ازای سازه‌های مختلف یکسان است.

افزایش میرایی در سازه‌ها تحت نگاشت سینوسی، تأثیر منفی بر کاهش پاسخ دارد.

ج) مادامی که پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات مدنظر باشد: با افزایش نسبت جرمی برای تمامی سازه در تمامی رکوردها بهبود پاسخ رخ می‌دهد. برای سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه در رکوردهای حوزه نزدیک و برای سازه‌های ۳۵ و ۵۰ طبقه در رکوردهای حوزه دور شاهد عملکرد بهتری هستیم.

لازم به ذکر است در نمودارهای میله‌ای ارائه شده در شکل‌های (۱۹) تا (۳۴)، درصد کاهش نسبت به حالت بدون ابزار آمده است. به عبارت دیگر در حالت بدون ابزار عدد صفر است و مادامی که سازه به ابزار تجهیز می‌گردد آنگاه نمودارها میزان اثرپذیری این ابزار را در بهبود پاسخ‌ها که همان کاهش پاسخ‌ها هست، نشان می‌دهد؛ به طور مثال اگر عدد مربوط به حالتی که ابزار به سازه افزوده شده است $0/8$ باشد یعنی ۸۰ درصد کاهش در پاسخ نسبت به حالت بدون ابزار داشته‌ایم.

با توجه به نمودارهای میله‌ای به دست آمده برای سازه‌های برشی مجهز به TMD می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که: الف) مادامی که پاسخ شتاب طبقات مدنظر باشد: افزایش نسبت جرمی در تمامی سازه‌ها و در تمامی رکوردها سبب بهبود پاسخ خواهد شد. در رکوردهای حوزه دور و نزدیک با در نظر گرفتن تغییرات ارتفاع سازه، بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات نسبت جرمی برای سازه ۱۰ طبقه اتفاق می‌افتد درحالی که بیشترین بهبود پاسخ را در سازه ۳۵ طبقه شاهد هستیم.

برای نگاشت سینوسی، افزایش ارتفاع سازه تغییر محسوسی بر بهبود پاسخ ندارد.

مادامی که نگاشت سینوسی مورد نظر باشد، با افزایش میرایی

در رکوردهای حوزه دور با افزایش تعداد طبقات، پاسخ سازه بهبود می‌یابد.

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

(د) مادامی که پاسخ جابه‌جایی بام مدنظر باشد:

افزایش نسبت جرمی سبب بهبود پاسخ می‌گردد.

در سازه‌های ۵۰ و ۳۵ طبقه عملکرد ابزار TMD در حوزه دور بهتر از حوزه نزدیک است.

در بارگذاری سینوسی افزایش میرایی اثر منفی بر کاهش پاسخ سازه‌ها دارد.

در نگاشت سینوسی برای سازه‌های گوناگون روند تغییرات به ازای نسبت جرم‌های مختلف یکسان است.

با توجه به نمودارهای به دست آمده برای سازه‌های برشی مجهز به FTMD می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که:

(الف) مادامی که پاسخ شتاب طبقات مدنظر باشد:

برای نسبت جرم‌های مختلف، برای رکوردهای حوزه دور شاهد عملکرد بهتری در بهبود پاسخ هستیم.

مادامی که تحریک از نوع سینوسی باشد، عملکرد ابزار برای تعداد طبقات مختلف به ازای نسبت جرم‌های گوناگون روندی مشابه و یکسان دارد.

بهترین پاسخ‌ها در ضرایب اصطکاک کوچک‌تر از ۰/۰۵ اتفاق می‌افتد.

برای تحریک سینوسی، با افزایش ضریب اصطکاک از اثرگذاری ابزار بر کاهش پاسخ کاسته می‌شود.

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 جرم‌های گوناگون، برای سازه‌های ۵۰ و ۲۰ طبقه در رکوردهای حوزه نزدیک و برای سازه‌های ۱۰ و ۳۵ طبقه عملکرد بهتری در بهبود پاسخ شاهد هستیم. ۲. در تحریک سینوسی به ازای نسبت جرم‌های مختلف، عملکرد ابزار برای سازه‌های مختلف روندی مشابه و یکسان دارد. 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 جابه‌جایی 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 نمی‌کند و نتایج با یکدیگر مشابه هستند.

۳. به طور کلی افزایش ضریب اصطکاک تأثیر 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 جابه‌جایی 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 بهینه مختلفی می‌شود که با توجه به اینکه کدام پاسخ سازه‌ای مدنظر است، می‌توان مقدار مشخصی را به پارامترهای مورد نظر تخصیص داد. پاسخ‌های به دست آمده در سازه مجهز به TMD و FTMD تحت رکوردهای 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 باشند و یا در تضاد با یکدیگر باشند و گاه ممکن است برای مواردی برای مسئله مورد نظر، چند جواب به دست آمده باشد. افزایش نسبت جرمی در هر دو میراگر سبب بهبود کارایی آن‌ها می‌شود که افزایش این نسبت از یک مقدار مشخص، جنبه

برای سازه ۲۰ طبقه تحت مجموعه رکوردهای حوزه دور حداکثر بهبود پاسخ ۲۵ درصد است که این مقدار هنگامی محقق می‌گردد که نسبت میرایی ۱۵ درصد، نسبت جرمی ۱۰ درصد و نسبت فرکانسی ۰/۹ باشد.

اقتصادی ندارد و از لحاظ اجرایی چالش‌های جدیدی را پدید می‌آورد. در ادامه جزئیات بیشتر و مقادیر کرانی مربوط به هر پارامتر به اختصار در جداول (۲۳) تا (۲۶) آورده شده است. به عنوان مثال، از جدول (۲۳) می‌توان دریافت مادامی که ابزار مورد استفاده TMD باشد و پاسخ مورد نظر دریافت طبقات باشد

جدول (۲۳) مقادیر کرانی پارامترهای TMD برای سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه

نوع میراگر	تعداد طبقات	نوع رکورد	نوع پاسخ	نسبت فرکانسی	نسبت جرمی	نسبت میرایی	بهبود پاسخ
TMD	سازه ۱۰ طبقه	حوزه دور	شتاب	۱	٪۱۰	٪۳۵	٪۴۱
			برش پایه	۰/۷	٪۱۰	٪۲۵	٪۲۵
			دریفت	۰/۵	٪۱۰	٪۴۵	٪۱۷
			جابه‌جایی بام	۰/۵	٪۱۰	٪۳۵	٪۱۲
		حوزه نزدیک	شتاب	۰/۸	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۶
			برش پایه	۰/۸	٪۱۰	٪۴۵	٪۲۷
			دریفت	۰/۷	٪۱۰	٪۵۵	٪۱۷
			جابه‌جایی بام	۰/۸	٪۱۰	٪۳۵	٪۱۵
		سینوسی	شتاب	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			برش پایه	۱/۲	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			دریفت	۰/۸	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			جابه‌جایی بام	۰/۸	٪۱۰	٪۵	٪۸۱
	سازه ۲۰ طبقه	حوزه دور	شتاب	۰/۸	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۴
			برش پایه	۰/۷	٪۱۰	٪۲۵	٪۲۳
			دریفت	۰/۹	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۵
			جابه‌جایی بام	۰/۷	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۸
		حوزه نزدیک	شتاب	۱/۴	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۴
			برش پایه	۰/۴	٪۱۰	٪۳۵	٪۴۰
			دریفت	۰/۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۳۰
			جابه‌جایی بام	۰/۶	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۱
		سینوسی	شتاب	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			برش پایه	۱/۲	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			دریفت	۰/۸	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			جابه‌جایی بام	۰/۸	٪۱۰	٪۵	٪۸۲

جدول (۲۴) مقادیر کرانی پارامترهای TMD برای سازه‌های ۳۵ و ۵۰ طبقه

نوع میراگر	تعداد طبقات	نوع رکورد	نوع پاسخ	نسبت فرکانسی	نسبت جرمی	نسبت میرایی	بهبود پاسخ
TMD	سازه ۳۵ طبقه	حوزه دور	شتاب	۱	٪۱۰	٪۵۵	٪۴۶
			برش پایه	۰/۱	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۷
			دریفت	۰/۷	٪۱۰	٪۳۵	٪۳۹
			جابه‌جایی بام	۰/۶	٪۱۰	٪۳۵	٪۳۰
		حوزه نزدیک	شتاب	۰/۳	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۸
			برش پایه	۰/۸	٪۱۰	٪۰۵	٪۳۶
			دریفت	۰/۵	٪۱۰	٪۵۵	٪۲۷
			جابه‌جایی بام	۱/۱	٪۱۰	٪۱۵	٪۱۶
		سینوسی	شتاب	۱/۱	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۲
			برش پایه	۱/۲	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۲
			دریفت	۰/۸	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۰
			جابه‌جایی بام	۰/۸	٪۱۰	٪۰۵	٪۸۰
	سازه ۵۰ طبقه	حوزه دور	شتاب	۰/۸	٪۴	٪۳۵	٪۳۲
			برش پایه	۰/۲	٪۱۰	٪۳۵	٪۲۸
			دریفت	۰/۹	٪۱۰	٪۰۵	٪۴۵
			جابه‌جایی بام	۰/۹	٪۱۰	٪۱۵	٪۴۱
		حوزه نزدیک	شتاب	۰/۲	٪۱۰	٪۳۵	٪۳۸
			برش پایه	۰/۲	٪۱۰	٪۵۵	٪۳۴
			دریفت	۰/۹	٪۱۰	٪۱۵	٪۳۹
			جابه‌جایی بام	۰/۸	٪۸	٪۰۵	٪۳۲
		سینوسی	شتاب	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			برش پایه	۱/۲	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			دریفت	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲
			جابه‌جایی بام	۱/۱	٪۱۰	٪۵	٪۸۲

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

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

جدول (۲۶) مقادیر کرانی پارامترهای FTMD برای سازه‌های ۳۵ و ۵۰ طبقه

نوع میراگر	تعداد طبقات	نوع رکورد	نوع پاسخ	نسبت فرکانسی	نسبت جرمی	ضریب اصطکاک	بهبود پاسخ
FTMD	سازه ۳۵ طبقه	حوزه دور	شتاب	۱	٪۱	۰	٪۴۶
			برش پایه	۰/۲	٪۱	۰	٪۳۵
			دریفت	۰/۸	٪۱۰	۰/۰۵	٪۲۹
			جاب‌جایی بام	۰/۸	٪۱۰	۰/۰۵	٪۲۶
		حوزه نزدیک	شتاب	۰/۵	٪۶	۰	٪۴۶
			برش پایه	۰/۸	٪۸	۰	٪۳۶
			دریفت	۰/۶	٪۱۰	۰	٪۲۲
			جاب‌جایی بام	۱	٪۱۰	۰/۰۵	٪۱۶
		سینوسی	شتاب	۱/۱	٪۱۰	۰	٪۸۲
			برش پایه	۱/۲	٪۱۰	۰	٪۸۱
			دریفت	۰/۸	٪۱۰	۰	٪۸۰
			جاب‌جایی بام	۰/۹	٪۱۰	۰	٪۸۱
	سازه ۵۰ طبقه	حوزه دور	شتاب	۰/۷	٪۴	۰	٪۳۱
			برش پایه	۰/۱	٪۱	۰	٪۲۸
			دریفت	۰/۹	٪۱۰	۰	٪۴۳
			جاب‌جایی بام	۱	٪۱۰	۰	٪۳۷
		حوزه نزدیک	شتاب	۰/۱	٪۱	۰	٪۳۵
			برش پایه	۰/۱	٪۱	۰	٪۳۵
			دریفت	۰/۸	٪۶	۰	٪۳۴
			جاب‌جایی بام	۰/۷	٪۱۰	۰	٪۳۱
		سینوسی	شتاب	۱/۱	٪۱۰	۰	٪۸۲
			برش پایه	۱/۲	٪۱۰	۰	٪۸۲
			دریفت	۰/۸	٪۱۰	۰	٪۸۰
			جاب‌جایی بام	۰/۹	٪۱۰	۰	٪۸۲

از انجام مجموعه تحلیل‌های 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 می‌توان به نسبت جرم‌های گوناگون و نزدیک به یکدیگر برای یک سطح از کاهش پاسخ رسید.

۲. برای یک نسبت فرکانس مشخص، افزایش نسبت میرایی در نسبت جرم‌های بزرگ‌تر، تأثیر بیشتری بر کاهش پاسخ‌ها دارد.

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

۴. به طور کلی افزایش نسبت جرمی باعث کاهش تمامی پاسخ‌ها

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

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

۱۴. انتخاب نوع پاسخ‌های مورد نظر در به دست 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 پاسخ‌ها افزایش می‌یابد.

۱۶. سازه‌های مجهز به این میراگرها برای بارگذاری لرزه‌ای، تحت رکوردهای حوزه دور عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

۱۷. تحت بارگذاری ناشی از تحریک‌های سینوسی، استفاده از این میراگرها کاهش چشمگیر پاسخ‌ها را به دنبال دارد.

۱۸. با لحاظ کردن شرایط یکسان، TMD نسبت به FTMD اثر بیشتری در کاهش پاسخ‌ها دارد.

تقدیر و تشکر

می‌گردد. 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 فرکانس‌هایی نزدیک به فرکانس اصلی سازه (۰/۹ تا ۱/۱) و همچنین فرکانس‌های کران بالا و پایین محدوده مورد نظر، می‌توان 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 پاسخ‌ها کاسته می‌شود.

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

۸. برای یک نسبت میرایی مشخص، با افزایش نسبت جرمی پاسخ‌ها بهبود پیدا می‌کند.

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

۱۰. تأثیر 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 پاسخ‌ها دارد.

مراجع

- [1] H. Frahm, "Device for damping vibrations of bodies," U.S. Patent 989,958, Nov. 1909.
- [2] T. Xu, Y. Li, T. Lai, and J. Zheng, "A simplified design method of tuned inerter damper for damped civil structures: Theory, validation, and application," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 28, no. 9, p. e2798, 2021. <https://doi.org/10.1002/stc.2798>
- [3] J. W. Hu, K. Naeim, I. Mansouri, and H. R. Shokrgozar, "Efficiency of TMDs and TLDs for low-rise and mid-rise buildings subjected to near-field and far-field earthquakes," *International Journal*, vol. 36, no. 4, 2019.
- [4] D. N. Gorini and C. Chisari, "Effect of soil-structure interaction on seismic performance of tuned mass dampers in buildings," in *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, CRC Press, 2019, pp. 2690–2697.
- [5] J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, Courier Corporation, 1985.
- [6] H. C. Tsai and G. C. Lin, "Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 22, no. 11, pp. 957–973, 1993. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290221104>

- [7] R. Villaverde and L. A. Koyama, "Damped resonant appendages to increase inherent damping in buildings," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 22, no. 6, pp. 491–507, 1993. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290220603>
- [8] R. Villaverde, M. Aguirre, and C. Hamilton, "Aseismic roof isolation system built with steel oval elements: exploratory study," *Earthquake Spectra*, vol. 21, no. 1, pp. 225–241, 2005. <https://doi.org/10.1193/1.1850528>
- [9] F. Sadek, B. Mohraz, A. W. Taylor, and R. M. Chung, "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 26, no. 6, pp. 617–635, 1997. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.1-2.173>
- [10] R. Rana and T. T. Soong, "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers," *Engineering Structures*, vol. 20, no. 3, pp. 193–204, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00078-3)
- [11] T. T. Soong, *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, 1997
- [12] H. Cetin and E. Aydin, "A new tuned mass damper design method based on transfer functions," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 10, pp. 4463–4480, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0305-x>
- [13] R. S. Jangid and T. K. Datta, "Performance of multiple tuned mass dampers for torsionally coupled system," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 26, no. 3, pp. 307–317, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199703\)26:3%3C307::AID-EQE639%3E3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199703)26:3%3C307::AID-EQE639%3E3.0.CO;2-8)
- [14] J. L. Almazán, G. Espinoza, and J. J. Aguirre, "Torsional balance of asymmetric structures by means of tuned mass dampers," *Engineering Structures*, vol. 42, pp. 308–328, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.034>
- [15] R. Soto-Brito and S. E. Ruiz, "Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 28, no. 11, pp. 1255–1271, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199911\)28:11%3C1255::AID-EQE865%3E3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199911)28:11%3C1255::AID-EQE865%3E3.0.CO;2-C)
- [16] P. Lukkunaprasit and A. Wanitkorkul, "Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 30, no. 4, pp. 537–551, 2001. <https://doi.org/10.1002/eqe.22>
- [17] T. Pinkaew, P. Lukkunaprasit, and P. J. E. S. Chatupote, "Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures," *Engineering Structures*, vol. 25, no. 1, pp. 39–46, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00115-3)
- [18] S. Sgobba and G. C. Marano, "Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behaviour," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, no. 6, pp. 1739–1755, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.01.009>
- [19] T. Hashimoto, K. Fujita, M. Tsuji, and I. Takewaki, "Innovative base-isolated building with large mass-ratio TMD at basement for greater earthquake resilience," *Future Cities and Environment*, vol. 1, no. 1, p. 9, 2015. <https://doi.org/10.1186/s40984-015-0007-6>
- [20] X. Yin, G. Song, and Y. Liu, "Vibration suppression of wind/traffic/bridge coupled system using multiple pounding tuned mass dampers (MPTMD)," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1133, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19051133>

- [21] A. Kaveh, M. F. Farzam, and R. Maroofiazar, "Comparing H2 and H ∞ algorithms for optimum design of tuned mass dampers under near-fault and far-fault earthquake motions," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 64, no. 3, pp. 828–844, 2020. <https://doi.org/10.3311/ppci.16389>.
- [22] A. E. Charalampakis, G. C. Tsiatas, and P. Tsopelas, "A mass-reduction design concept for seismic hazard mitigation," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 49, no. 3, pp. 301–314, 2020. <https://doi.org/10.1002/eqe.3239>
- [23] K. K. Wong and J. Johnson, "Seismic energy dissipation of inelastic structures with multiple tuned mass dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 135, no. 4, pp. 265–275, 2009.
- [24] J. A. Inaudi and J. M. Kelly, "Mass damper using friction-dissipating devices," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 121, no. 1, pp. 142–149, 1995. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1995\)121:1\(142\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:1(142))
- [25] F. Ricciardelli and B. J. Vickery, "Tuned vibration absorbers with dry friction damping," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 28, no. 7, pp. 707–723, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199907\)28:7%3C707::AID-EQE836%3E3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199907)28:7%3C707::AID-EQE836%3E3.0.CO;2-C)
- [26] G. L. Lin, C. C. Lin, L. Y. Lu, and Y. B. Ho, "Experimental verification of seismic vibration control using a semi-active friction tuned mass damper," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 41, no. 4, pp. 813–830, 2012. <https://doi.org/10.1002/eqe.1162>
- [27] C. C. Lin, G. L. Lin, and J. F. Wang, "Protection of seismic structures using semi-active friction TMD," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 39, no. 6, pp. 635–659, 2010. <https://doi.org/10.1002/eqe.961>
- [28] Z. Gewei and B. Basu, "A study on friction-tuned mass damper: harmonic solution and statistical linearization," *Journal of Vibration and Control*, vol. 17, no. 5, pp. 721–731, 2011. <https://doi.org/10.1177/1077546309354967>
- [29] A. Y. Pisal and R. S. Jangid, "Dynamic response of structure with tuned mass friction damper," *International Journal of Advanced Structural Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 363–377, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40091-016-0136-7>
- [30] A. Y. Pisal and R. S. Jangid, "Seismic response of multi-story structure with multiple tuned mass friction dampers," *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, vol. 6, no. 1, p. 46, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40091-014-0046-5>
- [31] E. Matta, "Bidirectional pendulum vibration absorbers with homogeneous variable tangential friction: modelling and design," *Journal of Structural Construction Engineering*, vol. 12, no. 11, pp. 1074–1082, 2018. <https://doi.org/10.7712/120119.7267.19743>
- [32] J. E. C. Carmona, S. M. Avila, and G. Doz, "Proposal of a tuned mass damper with friction damping to control excessive floor vibrations," *Engineering Structures*, vol. 148, pp. 81–100, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.022>
- [33] S. Y. Kim and C. H. Lee, "Analysis and optimization of multiple tuned mass dampers with coulomb dry friction," *Engineering Structures*, vol. 209, p. 110011, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110011>
- [34] M. Salimi, R. Kamgar, and H. Heidarzadeh, "An evaluation of the advantages of friction TMD over conventional TMD," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 6, no. 2, p. 95, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00473-5>

- [35] B. Besharatian, H. T. Riahi, R. Garcia, and I. Hajirasouliha, "Particle swarm optimization of friction tuned mass dampers subjected to ground motion records," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 172, p. 107995, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107995>
- [36] B. Besharatian, H. T. Riahi, R. Garcia, and I. Hajirasouliha, "A practical optimisation method for friction tuned mass dampers in multi-storey buildings subjected to earthquake excitations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 184, p. 108857, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108857>
- [37] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *Open system for earthquake engineering simulation user command-language manual*.
- [38] CSI Analysis Reference Manual, *ETABS version 21.1.0 User Manual*.
- [39] S.M Zahrai, M.Ghannadi-Asl, "Seismic Performance of TMDs in Improving the Response of MRF Buildings," *Scientia Iranica*, vol. 15, no. 1, pp 21-33, 2008.
- [40] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures*, Pearson Education India, 2007.
- [41] A. K. Chopra 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*, vol. 30, no. 12, pp. 1769–1789, 2001. <https://doi.org/10.1002/eqe.92>
- [42] B. Alavi and H. Krawinkler, *Effects of Near-Fault Ground Motions on Frame Structures*, Stanford: John A. Blume Earthquake Engineering Center, 2001, p. 301.
- [43] N. N. Ambraseys and J. Douglas, "Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 1–18, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00153-7](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00153-7)
- [44] J. D. Bray and A. Rodriguez-Marek, "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 24, no. 11, pp. 815–828, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.05.001>
- [45] PEER Ground Motion Database, <http://peer.berkeley.edu>
- [46] S. Y. Kim and C. H. Lee, "Analysis and optimization of multiple tuned mass dampers with coulomb dry friction," *Engineering Structures*, vol. 209, p. 110011, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110011>
- [47] A. Kaveh and S. R. Ardebili, "A comparative study of the optimum tuned mass damper for high-rise structures considering soil-structure interaction," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 65, no. 4, pp. 1036–1049, 2021.

