

چکیده

از جمله به روزترین وسایل کنترل لرزه‌ای، میراگرهای جرمی تنظیم شده اصطکاکی (FTMD)^۱ هستند. این نوع میراگر، ترکیبی از میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)^۲ با سختی خطی و یک میراگر اصطکاکی خالص با رفتار غیرخطی است. در این مقاله، ابتدا به تحلیل حساسیت پاسخ‌های سازه مجهز به این میراگر در اثر تغییر در نسبت فرکانس، ضریب اصطکاک و نسبت جرمی میراگر پرداخته شده است؛ سپس به کمک این نتایج، پاسخ‌های لرزه‌ای برای سه سازه‌ی برشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در سه حالت سازه بدون میراگر، با FTMD و با TMD مورد بررسی قرار گرفته و در دو سطح خطر لرزه‌ای مقایسه شده است. تحلیل‌های انجام شده در نرم‌افزار OpenSEES و تحت ۴۰ شتاب‌نگاشت پروژه SAC، در دو سطح خطر لرزه‌ای ۱ و ۲ است. نتایج به دست آمده حاکی از حساسیت بالاتر پاسخ‌ها به نسبت فرکانس، در مقایسه با ضریب اصطکاک و نسبت جرمی است. بهترین مقدار برای ضریب اصطکاک در سطح خطر یک عددی بین ۰/۱ تا ۰/۳ و در سطح خطر دو، ۰/۲ تا ۰/۴ است. همچنین رفتار سازه با به کار بردن FTMD در هر سه سازه‌ی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه بهتر از TMD است؛ لیکن با افزایش زمان تناوب سازه تأثیر FTMD به TMD نزدیک می‌شود.

واژگان کلیدی: کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی، میراگر جرمی، پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، سطوح خطر لرزه‌ای.

تحلیل حساسیت میراگر FTMD و بررسی عملکرد آن در مقایسه با TMD در سطوح مختلف خطر لرزه‌ای

حسین تاجمیر ریاحی (نویسنده مسئول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، tajmir@eng.ui.ac.ir

راحله شمس فلاورجانی

کارشناس ارشد زلزله، مؤسسه آموزش عالی دانش‌پژوهان

۱- مقدمه

مفهوم میراگرهای جرمی که به طور گسترده در زمینه کنترل سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد، اولین بار توسط فراهم در سال ۱۹۰۹ به منظور کاهش حرکت ارتعاشی کشتی‌ها به کار گرفته شد که در ساده‌ترین حالت از یک جرم، فنر و میراگر تشکیل شده است. تاکنون مطالعات زیادی در بررسی رفتار میراگرهای جرمی و نحوه‌ی عملکرد آنها بر روی ساختمان‌ها جهت کنترل ارتعاشات ناشی از بارهای جانبی نظیر باد و زلزله انجام شده است. در سال ۱۹۵۶ دن‌هارتوگک [۱] تصحیحات و مباحث تکمیلی بر کار فراهم را انجام داده و پس از آن سیستم‌های جذب‌کننده دینامیکی میرا و نامیرا را با وجود میرایی سیستم اصلی مورد بررسی قرار داد. در صدد بالایی از مطالعات طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۸ برای کاهش اثرات باد بر انواع سازه‌ها

در کنترل غیرفعال سازه‌ها برای به حداقل رساندن آسیب وارده به اعضای سازه‌ای و کاهش مؤثر پاسخ‌های لرزه‌ای لازم است انرژی ورودی به سازه کاهش داده شده، یا ظرفیت اتلاف انرژی در عناصری خاص افزایش یابد. دو نوع از رایج‌ترین انواع روش‌های کنترل غیرفعال، میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) و میراگرهای اصطکاکی هستند که تاکنون مورد توجه بسیاری از محققان و سازندگان بوده‌اند. در حال حاضر نمونه‌های متعددی از کاربرد هر دو نوع میراگر در ساخت سازه‌های جدید و یا مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در سراسر دنیا وجود دارد؛ از جمله سازه‌هایی که در طراحی آنها از میراگرهای جرمی استفاده شده است می‌توان به برج سیتی کورپ در شهر نیویورک، برج جان هانکوک در بوستون، برج چیپا در ژاپن و برج ملی کانادا در تورنتو اشاره داشت.

حال TMD های غیرخطی هنوز در حال توسعه هستند. استفاده از TMD در ترکیب با مکانیسم اصطکاک راهکاری است که در برخی از مطالعات به منظور دست‌یابی به یک سیستم TMD غیرخطی پیشنهاد شده است [۱۳-۱۴].

به‌طور کلی بهره‌گیری از مکانیسم اتلاف انرژی از طریق اصطکاک در سازه‌ها مورد توجه بسیاری از محققان است؛ برای مثال، اصطکاک در ترمز اتومبیل‌ها به‌عنوان عاملی برای تلف نمودن انرژی جنبشی حرکتی استفاده می‌شود. بر اساس شبیه‌سازی ترمز ماشین، در سال ۱۹۸۰ پال و همکاران [۱۵] شروع به توسعه میراگرهای اصطکاکی منفعل جهت بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها نمودند. موآلا [۱۶] در سال ۲۰۰۰ نوع دورانی میراگرهای اصطکاکی غیرفعال را با هدف استهلاک انرژی ورودی و محافظت از سازه در برابر آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در اثر زلزله‌های متوسط و شدید، معرفی نمود. میرزا باقری و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵ طی یک مطالعه آزمایشگاهی یک قاب یک طبقه را ابتدا با یک واحد میراگر اصطکاکی دورانی و سپس با چند واحد میراگر اصطکاکی تحت بارگذاری هارمونیک با فرکانس بالا مورد بررسی قرار داده و انرژی مستهلک شده را محاسبه نمودند. نتایج حاصل شده نشان داد عملکرد قاب به کمک این میراگر بهبود یافته و با افزایش تعداد میراگرهای مورد استفاده، انرژی مستهلک شده نیز افزایش خواهد یافت.

با گذشت زمان و در راستای ارتقای میراگرهای جرمی، ترکیب این دو نوع میراگر نوع دیگری از میراگرهای غیرفعال را، به نام میراگر جرمی تنظیم‌شده اصطکاکی (FTMD) به‌عرصه‌ی کنترل غیرفعال سازه‌ها ارائه نمود. این میراگر می‌تواند علاوه بر برخورداری از مزایای هر یک، معایب کم‌رنگ‌تری از آنها را شامل شود. از اهداف پایه‌ی طراحی میراگرهای جرمی اصطکاکی گسترش کاربری میراگرهای جرمی از سازه‌های بلندمرتبه به سازه‌های کوتاه‌مرتبه و همین‌طور استفاده از مکانیسم اصطکاک برای ایجاد یک سیستم غیرخطی است. از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ی گوی و باسو [۱۸] در سال ۲۰۱۰ اشاره

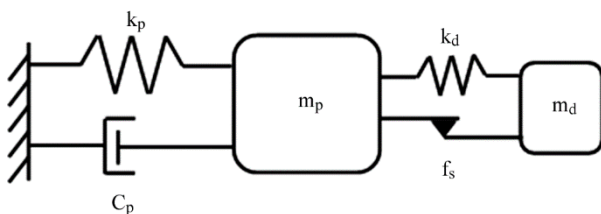
انجام گرفته است [۲-۴]. باکر و جانگید [۵] در سال ۲۰۰۷ روابط ریاضی مشخصی را برای طراحی بهینه میراگرهای جرمی، با به‌کارگیری روش‌های جست‌وجوی عددی ارائه نمودند. در ایران نیز زهرایی و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۷ بر روی معیاری برای پایداری تأثیر عملکرد بهینه میراگرهای جرمی چندگانه کار کردند. لونگ و ژنگ [۷] در سال ۲۰۰۹ با بهره‌گیری از الگوریتم اجتماع ذرات تحت تحریکات مختلف، پارامترهای بهینه‌ی میراگرهای جرمی را به دست آوردند. استفاده از طبقات آخر ساختمان به‌عنوان میراگر جرمی نیمه‌فعال، به‌صورت پارامتری، توسط مندر و همکاران [۸-۹] در سال ۲۰۱۰ بررسی شد. ارفیادی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از یک برنامه الگوریتم ژنتیک ترکیبی^۳، بهینه‌یابی پارامترها و موقعیت میراگر جرمی تنظیم شده را به‌صورت هم‌زمان پیشنهاد دادند. گرکو و مارانو [۱۱] نیز در سال ۲۰۱۳ روشی برای طراحی بهینه پایدار TMD ارائه نموده و عملکرد TMD بهینه را از دو منظر جابه‌جایی و انرژی مورد بررسی قرار دادند، آنان با قرار دادن TMD بهینه در سازه تک‌درجه آزادی و محاسبه میزان کاهش انرژی تلف شده در سیستم اصلی و حداکثر جابه‌جایی سازه‌ای، نشان دادند که می‌توان با استفاده از سیستم TMD مناسب دو معیار مذکور را به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید. کارمونا و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۷ مطالعه عددی و تجربی بر روی میراگرهای جرمی جهت کنترل لرزش‌های بیش از اندازه در کف طبقات انجام دادند. آنها به منظور بررسی عملکرد میراگر جرمی آن را بر روی یک پلتفرم قرار داده و تحت ارتعاشات آزاد و اجباری مورد آزمایش‌های دینامیکی قرار دادند. میراگر و پلتفرم مورد نظر قبل از انجام آزمایش‌ها به روش المان محدود در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و تحت تحریکات هارمونیک و گذرا طراحی شدند. نتایج آزمایش‌ها ضمن مطابقت با نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، کاهش پاسخ شتاب سازه را با نصب TMD بر روی آن تأیید کرد. گرچه در حال حاضر طراحی و کاربرد میراگرهای جرمی اولیه که عملکرد خطی داشتند به‌خوبی توسعه یافته است؛ با این

کردند که در آن نیروهای غیرخطی با معادل خطی آن به لحاظ آماری جایگزین می‌شود.

در پژوهش حاضر پس از معرفی و بیان معادلات حاکم، ابتدا به تحلیل حساسیت سازه‌ی تک‌درجه آزاد همراه با FTMD تحت ۴۰ رکورد از مجموعه رکورد‌های پروژه‌ی SAC، در دو سطح خطر لرزه‌ای یک (احتمال وقوع ۱۰ درصد در ۵۰ سال) و دو (احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال) پرداخته شده است. سپس به کمک نتایج حاصل از تحلیل حساسیت صورت گرفته، عملکرد این میراگر بر روی سازه‌های چند درجه آزاد برشی تحت شتاب‌نگاشت‌های مذکور در دو سطح خطر، بررسی و در سه حالت مورد مقایسه قرار گرفته است. حالت‌های مذکور عبارت است از سازه بدون میراگر، با FTMD و در نهایت با TMD.

۲- معادلات حاکم

در این بخش به اختصار، به معرفی و حل معادلات حاکم بر یک سازه تک‌درجه آزاد به همراه FTMD پرداخته شده است.



شکل (۱): تصویر شماتیک از مدل سیستم سازه‌ی FTMD.

شکل (۱) مدل سیستم سازه‌ی FTMD را نشان می‌دهد که در آن k_p ، m_p و c_p به ترتیب جرم، سختی و میرایی سازه پایه و m_d و k_d ، جرم و سختی میراگر می‌باشند؛ f_s نیز نیروی لغزش میراگر است. با نوشتن معادلات حرکت سیستم تحت بارگذاری دینامیکی می‌توان نوشت:

$$m_p \ddot{x}_p + c_p \dot{x}_p + k_p x_p + k_d (x_p - x_d) = -p \ddot{x}_g(t) + f_s \operatorname{sgn}(\dot{x}_d - \dot{x}_p) \quad (1)$$

$$m_d \ddot{x}_d - k_d (x_p - x_d) = -m_d \ddot{x}_g(t) - f_s \operatorname{sgn}(\dot{x}_d - \dot{x}_p) \quad (2)$$

داشت. آنها در مطالعه‌ی خود به بررسی یک راه‌حل هارمونیک و آماری خطی برای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده اصطکاکی پرداختند و معتقد بودند با حذف میرایی TMD و جایگزینی اصطکاک بین سازه و TMD در واقع یک میراگر جرمی تنظیم‌شده غیرخطی را توسعه خواهند داد. پس از آن در سال ۲۰۱۲ لین و همکاران [۱۹] در قالب یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، بر روی نوعی میراگر نیمه‌فعال جرمی اصطکاکی کار کردند که در آن اثر پیزوالکتریک و یک میله‌ی فلزی برای ایجاد اصطکاک استفاده شده است. آنها در این پژوهش یک نمونه‌ی اولیه را ساخته و به کمک میز لرزان مورد آزمایش‌های دینامیکی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که در شرایط مشخص میراگر جرمی تنظیم‌شده اصطکاکی نیمه‌فعال SAF-TMD^۴ بهتر از میراگر جرمی تنظیم‌شده اصطکاکی غیرفعال PF-TMD^۵ عمل می‌کند.

در سال ۲۰۱۴ پیسال و جانگید [۲۰] به بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه مجهز به میراگر چندگانه جرمی تنظیم‌شده اصطکاکی (MFTMD)^۶ پرداختند. آنها با استفاده از حل معادلات حرکت دیفرانسیل حاکم بر سازه پنج طبقه مجهز به MFTMD از طریق روش فضای حالت و مقایسه آن با میراگر جرمی تنظیم‌شده اصطکاکی تک (SFTMD)^۷ پاسخ سازه در معرض چهار زلزله را به دست آوردند. پیسال و جانگید [۲۱] همچنین در سال ۲۰۱۶ به مطالعه پارامتریک میراگر FTMD تحت بارگذاری هارمونیک و سپس شتاب‌نگاشت سه رکورد زلزله بر روی یک سیستم تک‌درجه آزاد پرداخته و تأثیر پارامترهایی همچون نسبت جرمی، نسبت فرکانس و نیروی اصطکاک در این میراگر را مورد بررسی قرار دادند، آنها در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافتند که یک مقدار بهینه برای نیروی اصطکاک وجود دارد که در آن پاسخ سیستم به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و در این مقدار مشخص، میراگر می‌تواند در کنترل پاسخ‌های سیستم سازه‌ی پایه بسیار مؤثر عمل کند. کیم و لی [۲۲] در سال ۲۰۱۹ به انجام مطالعاتی بر روی ویژگی‌های پاسخ تصادفی یک سیستم به همراه FTMD که تحت بارگذاری نوفه سفید بر پایه‌ی شتاب بهینه‌یابی و طراحی شده است، پرداختند. آنها در پژوهش خود با هدف دستیابی به پارامترهای مطلوب از یک روش آماری خطی‌سازی استفاده

به نام R_f به صورت زیر نشان داده می شود:

$$R_f = \frac{f_s}{m_d \cdot g} \quad (7)$$

از آنجا که روش محاسبه‌ی R_f همان محاسبه‌ی ضریب اصطکاک است، این پارامتر را می توان به صورت اسمی به نام «ضریب اصطکاک» نام گذاری نمود. همچنین در رابطه (7)، g شتاب گرانش زمین است. حل معادله (3) به روش فضای حالت به صورت زیر خواهد بود، که در آن $Z(t)$ بردار حالت سیستم است.

$$\dot{Z}(t+1) = AZ(t+1) + E\ddot{x}_g(t+1) + BF_s(t+1) \quad (8)$$

$$Z(t) = \begin{Bmatrix} x_p(t) \\ x_d(t) \\ \dot{x}_p(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M^{-1}K & M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (10)$$

معادله (8) در حوزه زمان در نظر گرفته شده است و نیروهای تحریک و کنترل در هر بازه‌ی زمانی ثابت هستند. در نهایت راه حل را می توان در یک فرم افزاینده به شکل زیر نوشت که در آن شماره گام زمانی است [21]:

$$Z(j+1) = A_d Z(j) + E_d \ddot{x}_g(j) + B_d F_s(j) \quad (11)$$

$$B_d = A^{-1}(A_d - I)B \quad (12)$$

$$E_d = A^{-1}(A_d - D)E \quad (13)$$

$$A_d = e^{A\Delta t} \quad (14)$$

حال که به بیان معادلات حاکم بر این سیستم و حل آنها پرداخته شد، در ادامه به مدل سازی این میراگر به همراه یک سازه تک درجه آزاد پرداخته و عملکرد آن مورد تحلیل حساسیت قرار خواهد گرفت.

۳- تحلیل حساسیت FTMD

ساختار میراگر FTMD شامل پارامترهای تأثیر گذار متعدد در

می توان روابط (1) و (2) را به فرم ماتریسی در قالب روابط (3) و (4) بازنویسی کرد.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = E\ddot{X}_g(t) + BF_s(t) \quad (3)$$

$$X(t) = \begin{Bmatrix} x_p(t) \\ x_d(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

در روابط (3) و (4)، $x_p(t)$ و $x_d(t)$ مربوط به تغییر مکان نسبی سیستم و C ، M و K به ترتیب مربوط به جرم، میرایی و سختی می باشند. همچنین $X(t)$ ، $\dot{X}(t)$ و $\ddot{X}(t)$ به ترتیب مربوط به بردارهای جابه جایی، سرعت و شتاب سیستم هستند و $\ddot{x}_g(t)$ نیز به شتاب گرانش زمین اشاره دارد. در نهایت $F_s(t)$ نیز مربوط به نیروی اصطکاک میراگر است که می تواند با استفاده از مدل هیستریک کانستنتینو و به کمک معادله ون به صورت زیر بیان شود [23]:

$$F_s = f_s Z_h \quad (5)$$

که در آن f_s نیروی لغزش میراگر و Z_h مؤلفه‌ی بدون بعد هیستریک است که معادله مرتبه اول غیرخطی زیر را اقلع می کند.

$$qh \frac{dZ_h}{dt} = A_h(\dot{x}_d - \dot{x}_p) - \beta_h |(\dot{x}_d - \dot{x}_p)| Z_h |Z_h|^{n_h-1} - \tau_h (\dot{x}_d - \dot{x}_p) |Z_h|^{n_h} \quad (6)$$

در رابطه (6)، qh جابه جایی تسلیم در یک حلقه نیروی اصطکاک و A_h ، β_h و τ_h پارامترهای بدون بعد حلقه هیستریک می باشند که کنترل کننده شکل حلقه هستند و معمولاً به گونه‌ای انتخاب می شوند که اصطکاک کولمب را تأمین نمایند. مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای نام برده شده، در جدول (1) آورده شده است.

جدول (1): مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای معادله (8) [24].

qh	A_h	β_h	τ_h	n_h
۰/۰۰۰۱	۱	۰/۵	۰/۰۵	۲

Z_h نیز مقداری بین ۱ و -۱ انتخاب می شود (برای شرایط لغزش و فازهای غیرلغزشی). همچنین نیروی اصطکاک میراگر و به عبارتی نیروی لغزش انتخابی در قالب یک پارامتر نرمالایز شده

پارامترهای متغیر، که بر حسب مطالعات پیشین انتخاب شده است، در جدول (۲) مشاهده می‌شود. روابط (۱۵) و (۱۶) نیز به ترتیب، نسبت جرمی میراگر به جرم سازه‌ی پایه (Q) و نسبت فرکانس میراگر به فرکانس سازه پایه (F) را نشان می‌دهند.

$$Q = m_d / m_p \quad (15)$$

$$F = \omega_d / \omega_p \quad (16)$$

جدول (۲): مشخصات سازه‌ی پایه به همراه طیف مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای متغیر.

مشخصات سازه پایه		بازه‌های انتخابی برای متغیرها	
جرم (m _p)	۱۰ ton	نسبت جرمی	(با گام ۰/۱) ۰/۲-۰/۵
سختی (k _p)	۱۵۷۹/۱۴ kN/m	نسبت فرکانس	(با گام ۰/۱) ۰/۷-۱/۱
میرایی (ξ _p)	۰/۲	ضریب اصطکاک	۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵
زمان تناوب (T _n)	۰/۵ Sec	-	-

۵- صحت‌سنجی

در سال ۲۰۱۶ میلادی، پیسال و جانگید [۲۱] عملکرد لرزه‌ای کاربرد FTMD بر روی یک سیستم تک‌درجه آزاد را مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این منظور یک سازه‌ی تک‌درجه آزاد به جرم ۱۰ تن، زمان تناوب ۰/۵ ثانیه و ضریب میرایی ۲ درصد را تحت بارگذاری هارمونیک قرار داده و نتایج آن را منتشر نمودند. در مطالعه‌ی پیسال و جانگید پاسخ سرعت سازه و میراگر با در نظر گرفتن سه مقدار مختلف برای R_f ارائه شد و نتایج نشان داد که در حالت R_f برابر با ۵، سرعت میراگر و سازه منطبق بر روی هم بوده و در حقیقت میراگر و سازه به علت بالا بودن ضریب اصطکاک به صورت یک جرم واحد عمل می‌نمایند. این نتایج برای R_f برابر با ۱/۰ و ۰/۰۱ نیز ارائه شد؛ که در R_f برابر با ۰/۰۱ پاسخ سرعت سازه به طرز چشمگیری کاهش یافته است. این موضوع اهمیت بالای انتخاب درست مقدار R_f را در طراحی این میراگر نشان می‌دهد.

در این پژوهش به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی، نتایج

طراحی است که با تغییر در آنها می‌توان تأثیر بسزایی در کارایی استفاده از این میراگر بر روی پاسخ‌های سازه پایه مشاهده نمود. از جمله این پارامترها، نسبت جرم میراگر به جرم کل سازه پایه، نسبت فرکانس میراگر به فرکانس سازه پایه و مقدار R_f به کار برده شده در طراحی آن، است. همچنین از آنجا که جابه‌جایی، تعیین‌کننده‌ی امنیت و یکپارچگی سازه در اثر تحریکات خارجی است، در راستای مطالعه عملکرد این میراگر در سازه، می‌تواند معیار خوبی برای مقایسه‌ی رفتار میراگر با مشخصات مختلف در طراحی باشد؛ به همین علت در این پژوهش، کاهش ماکزیمم جابه‌جایی سازه پایه به‌عنوان هدف تحلیل‌ها، مد نظر قرار داده شد.

۴- مدل‌سازی

سازه پایه در این بخش، سازه‌ای تک‌درجه آزاد با رفتار خطی است که در نرم‌افزار OpenSEES مدل‌سازی شده است. دلیل انتخاب این نرم‌افزار کدباز بودن آن و سهولت در ایجاد انواع مصالح جدید است. در این پژوهش برای مدل‌سازی میراگر از ترکیب موازی مصالح الاستیک و نوعی از مصالح فولادی (Steel01) استفاده شده است؛ این ترکیب نوعی رفتار صلب پلاستیک ایجاد می‌کند که رفتار مورد نظر برای میراگر است. سختی میراگر به ماده‌ی الاستیک تخصیص داده شده و اصطکاک به کمک ماده‌ی Steel01 تأمین می‌شود. المان در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی میراگر نیز، المان طول صفر (ZeroLength) است. از آنجا که تحلیل‌های صورت گرفته بر روی سازه‌های تک‌درجه آزاد و برشی است، برای مدل‌سازی سازه‌ی پایه از مصالح الاستیک و المان‌های با طول صفر که نوعی سیستم جرم و فنر را ایجاد می‌کند، استفاده شده است. دلیل این رویکرد در مدل‌سازی‌ها، حجم بالای تحلیل‌ها با توجه به هدف‌گذاری‌های انجام شده در ابتدای پژوهش است؛ زیرا با مدل‌سازی سازه‌ها به صورت برشی سرعت انجام تحلیل بسیار کاهش یافته و در شرایطی که تعداد تحلیل‌ها بالا باشد کمک شایانی در سهولت برای انجام تحلیل‌ها خواهد داشت. مشخصات این سازه به همراه طیف مقادیر در نظر گرفته شده برای

۶- تحلیل‌ها و نتایج به دست آمده

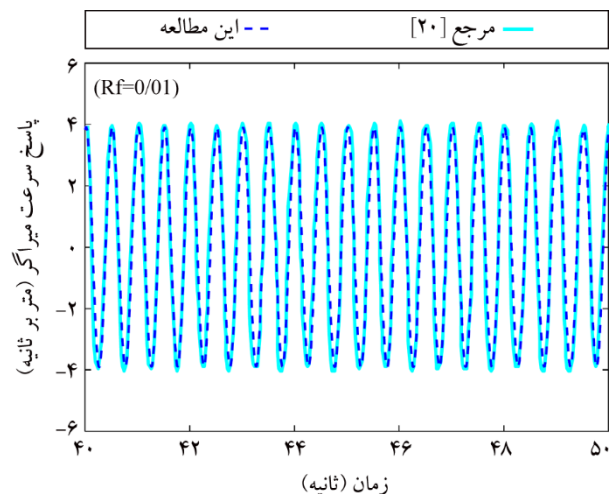
جهت بررسی رفتار سازه در سطوح مختلف خطر لرزه‌ای، یکی از مجموعه رکوردهای یازده گانه پروژه SAC در بارگذاری مورد استفاده قرار گرفت. این رکوردها بر اساس حوزه نزدیک گسل^۱ و حوزه دور از گسل^۹ و همچنین بر اساس سطوح مختلف خطر زلزله (DBE و MCE) طبقه‌بندی شده‌اند. به علاوه PGA این رکوردها نیز به گونه‌ای مقیاس شده است که طیف شتاب آنها با طیف طرح هدف آئین نامه ASCE هم‌خوانی دارد [۲۵]. رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش شامل رکوردهای شهر لس آنجلس برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ ساله (۲۰ رکورد La01 تا La20) و ۲۴۷۵ ساله (۲۰ رکورد La 21 تا La40) می‌باشند.

در این پژوهش تحلیل‌های مورد نظر در دو قسمت تحت شتاب‌نگاشت‌های معرفی شده صورت گرفته است. در بخش اول مقدار ضریب اصطکاک (R_f) ثابت و برابر با ۰/۰۱ و مقادیر نسبت جرمی (Q) و نسبت فرکانس (F) نیز در محدوده‌های بیان شده در جدول (۲) به صورت متغیر در نظر گرفته شد؛ و در بخش دوم، مقدار نسبت فرکانس ثابت و برابر یک و مقادیر R_f و Q در هر بار تحلیل به طور هم‌زمان در بازه‌های مذکور تغییر داده شده‌اند. حاصل کار، ۳۲۰ نمودار از رفتار میراگر در شرایط مختلف است که در اینجا میانگین این نمودارها استخراج و در قالب شکل‌های (۴) تا (۷) آورده شده است.

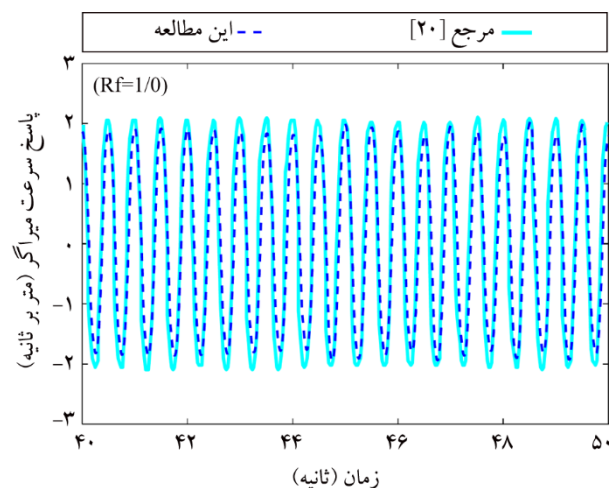
میانگین ماکزیمم تغییر مکان حاصل از تحلیل‌های بخش اول در قالب شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، در سطح خطر ۱، می‌توان به این نتیجه رسید که با بالاتر رفتن نسبت جرمی پاسخ سازه روندی کاهشی پیدا خواهد کرد؛ همچنین بهترین بازه‌ی عددی برای ضریب اصطکاک، ۰/۱ تا ۰/۳ به دست آمده است. به طور کلی می‌توان گفت که رفتار سازه در تمام طول بازه‌ی در نظر گرفته شده روندی مشابه دارد؛ لیکن در سطح خطر ۲، در صورتی که ضریب اصطکاک کمتر از ۰/۱۵ در نظر گرفته شود، در نسبت‌های جرمی کمتر، و با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک بالاتر از ۰/۱۵ در نسبت‌های جرمی بیشتر، بهترین پاسخ‌ها به دست خواهد آمد؛ گرچه به طور کلی بهترین بازه برای ضریب اصطکاک در سطح خطر ۲، عددی میان ۰/۲ تا ۰/۴ است.

کاربرد این میراگر تحت بارگذاری هارمونیک به معادله ۱۷ با نتایج منتشر شده در منبع [۲۱] مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب پاسخ سرعت میراگر مدل‌سازی شده را در هردو پژوهش با R_f برابر با ۰/۰۱ و ۱/۰ نشان می‌دهند.

$$\ddot{x}_g(t) = 0.1g \sin(4\pi t) \quad (17)$$

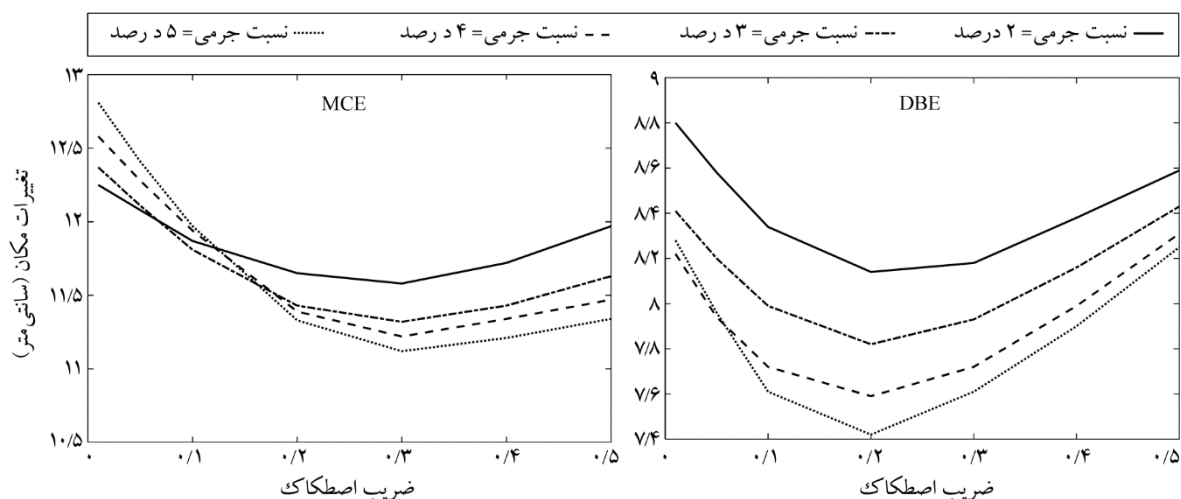


شکل (۲): مقایسه‌ی پاسخ سرعت میراگر در مطالعه‌ی مرجع [۲۱] و این پژوهش در $R_f=0.01$.

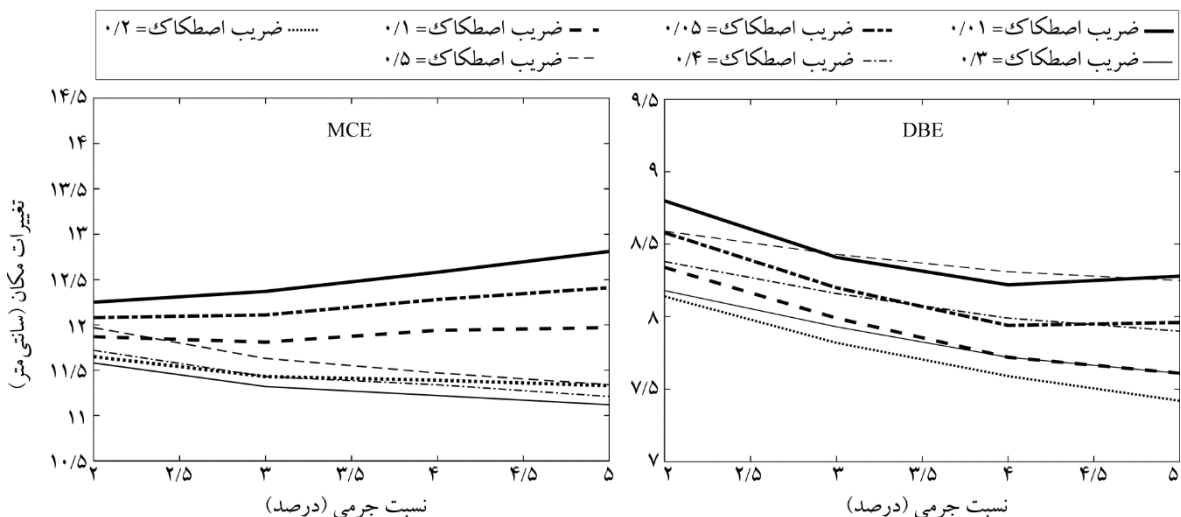


شکل (۳): مقایسه‌ی پاسخ سرعت سازه مدل شده در مطالعه‌ی مرجع [۲۱] و این پژوهش در $R_f=1.0$.

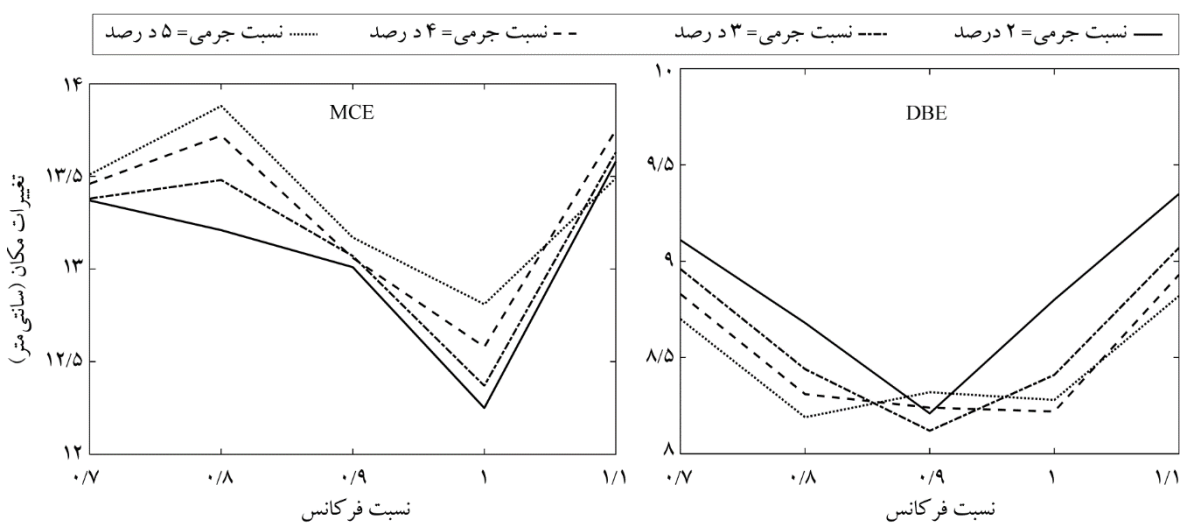
همان‌طور که در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود، تطابق قابل‌قبولی بین پاسخ‌های برداشت شده از مدل‌سازی و پاسخ‌های ارائه شده در مقاله مرجع می‌توان دید که نشان از صحت مدل‌سازی دارد.



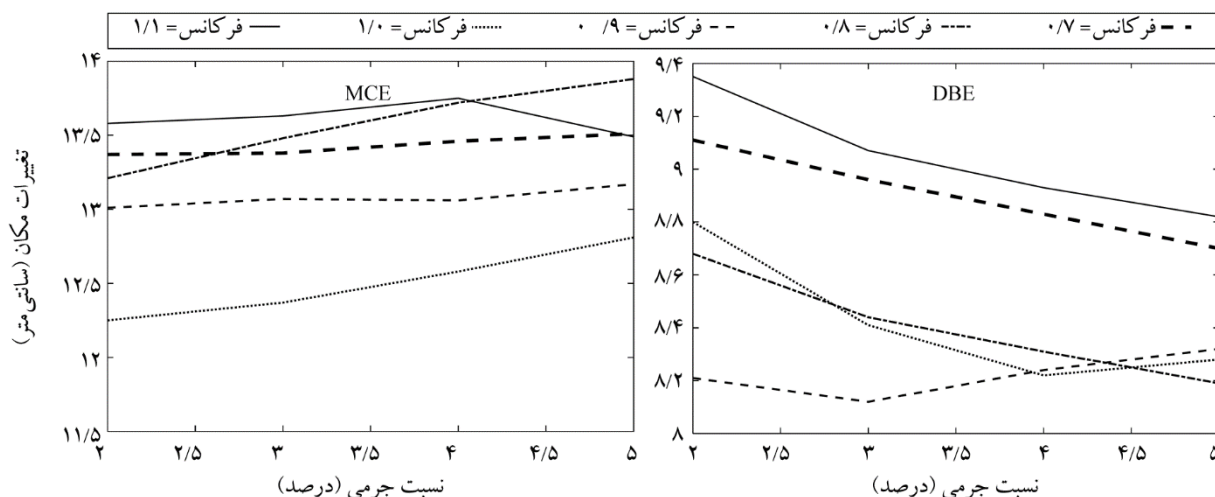
شکل (۴): میانگین ماکزیمم تغییر مکان سازه بر حسب ضریب اصطکاک در نسبت جرمی‌های مختلف تحت رکوردهای دو سطح خطر ۱ و ۲.



شکل (۵): میانگین ماکزیمم تغییر مکان سازه بر حسب نسبت جرمی در ضریب اصطکاک‌های مختلف تحت رکوردهای دو سطح خطر ۱ و ۲.



شکل (۶): میانگین ماکزیمم تغییر مکان سازه بر حسب نسبت فرکانس در نسبت جرمی‌های مختلف تحت رکوردهای دو سطح خطر ۱ و ۲.



شکل (۷): میانگین ماکزیمم تغییر مکان سازه بر حسب نسبت جرمی در نسبت فرکانس‌های مختلف تحت رکوردهای دو سطح خطر ۱ و ۲.

اصطکاک‌کی گسترش کاربری میراگرهای جرمی برای استفاده در سازه‌های با زمان تناوب پایین، به کمک ترکیب آن با مکانیسم اصطکاک است؛ در این بخش از مطالعه‌ی صورت گرفته، سه سازه‌ی برشی با رفتار خطی در زمان تناوب‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۱ ثانیه انتخاب شده و عملکرد لرزه‌ای میراگر بر روی این سه سازه مورد بررسی و مقایسه با میراگرهای جرمی قرار گرفته است.

لازم به ذکر است مدل‌سازی‌های انجام شده به کمک نرم‌افزار OpenSEES صورت گرفته و نتایج مورد نظر برای هر سازه، در سه حالت (سازه بدون میراگر، سازه با میراگر جرمی تنظیم شده و نهایتاً سازه با میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاک‌کی) ارائه شده است. در مدل‌سازی‌های صورت گرفته جرم طبقات از یک الگوی یکنواخت برای توزیع در طبقات پیروی کرده و مقدار آن در هر طبقه برابر با ۱۰ تن در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب میرایی برای سازه‌ی اصلی در تمام مدل‌ها برابر با ۲ درصد است. در نهایت سختی طبقات نیز به کمک یک الگوی مثلثی، در ارتفاع به صورت خطی افزایش یافته است. لیکن مبنای سختی، عدد در نظر گرفته شده برای طبقه آخر است که این عدد طی دو مرحله‌ی زیر به دست آمده است:

- ۱- ابتدا یک مقدار اولیه برای سختی در طبقه آخر لحاظ شده است.
- ۲- سپس با توجه به الگوی مثلثی در نظر گرفته شده و مطابق با رابطه (۱۸)، سختی سازه به نحوی مقیاس می‌شود که دوره

نتایج حاصل از تحلیل‌های بخش دوم در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که رفتار سازه در سطح خطر ۱ و تحت اثر نسبت فرکانس به دو بخش قابل تقسیم است؛ در نسبت‌های جرمی کمتر، بهترین مقدار برای نسبت فرکانس در حدود ۰/۹ و در نسبت‌های جرمی بالاتر بهترین عدد برای نسبت فرکانس بازه‌ای میان ۰/۸ تا ۱/۰ است. گرچه در سطح خطر ۲ مشاهده می‌شود که بهترین مقدار نسبت فرکانس در تمام بازه‌ی نسبت جرمی، برابر با عدد ۱ است و این بدان معناست که در طراحی FTMD برای سازه‌ای با این مشخصات دینامیکی تحت رکوردهای مربوط به سطح خطر ۲ بهترین حالت برای طراحی میراگر، در نظر گرفتن فرکانسی برابر با فرکانس سازه‌ی پایه است؛ لیکن در این حالت حساسیت چندانی برای نسبت جرمی وجود ندارد؛ چرا که با توجه به نتایج به دست آمده پاسخ‌های سازه در نسبت جرمی‌های مختلف نزدیکی زیادی به یکدیگر دارند. در ادامه به کمک نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، به بررسی عملکرد FTMD بر روی سازه‌های چند درجه آزاد و مقایسه‌ی آن با TMD پرداخته خواهد شد.

۲- بررسی عملکرد میراگر بر روی سازه‌های با چند درجه آزادی و مقایسه‌ی آن با TMD
از آنجا که یکی از اهداف اصلی میراگرهای جرمی

تناوب سازه برابر با تناوب مورد نظر باشد.

۰/۱ تعداد طبقات فرض شده است.

$$\left(\sum_{j=1}^n K_j\right)_{i+1} = \left(\frac{T_i}{T_{\text{target}}}\right)^2 \left(\sum_{j=1}^n K_j\right)_i \quad (18)$$

در این بخش نیز رکورد های مورد استفاده در تحلیل ها، رکوردهای مذکور در قسمت قبل است و نتایج حاصل شده، میانگین ماکزیمم جا به جایی نسبی طبقات تحت مجموعه رکوردهای سطح خطر ۱ و همچنین سطح خطر ۲، در حالت های بدون میراگر، با FTMD و با TMD است. در ادامه این نتایج در قالب شکل های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است.

که در آن K سختی طبقات، T تناوب سازه، i شماره گام و j شماره طبقات است. همچنین در این رابطه الگوی توزیع سختی طبقات ثابت مانده و تنها مقادیر سختی مقیاس می گردد. جدول (۳) مشخصات سازه‌ی اصلی و جدول (۴) مشخصات میراگرها را در هر مورد نشان می دهد؛ لازم به ذکر است که دوره تناوب سازه‌های در نظر گرفته شده متناسب با تعداد طبقات و برابر با

همان طور که در شکل (۸) دیده می شود، در سطح خطر یک، رفتار FTMD بسیار نزدیک به TMD است در حالی که در

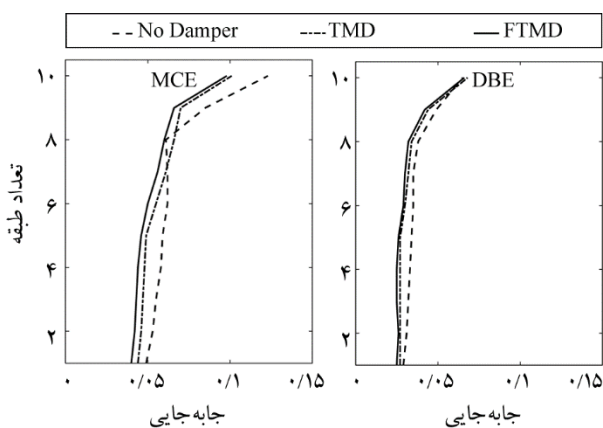
جدول (۳): مشخصات مدل های سازه‌ی برشی پایه در هر مورد.

مشخصه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	۳ طبقه
جرم هر طبقه	۱۰ ton	۱۰ ton	۱۰ ton
زمان تناوب	۱/۰ sec	۰/۵ sec	۰/۳ sec
میرایی	٪۲	٪۲	٪۲
سختی طبقه ۱	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۱۰	۵۹۸۵/۴۸۵ kN/m×۵	۱۰۵۳۹/۲۷۳ kN/m×۳
سختی طبقه ۲	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۹	۵۹۸۵/۴۸۵ kN/m×۴	۱۰۵۳۹/۲۷۳ kN/m×۲
سختی طبقه ۳	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۸	۵۹۸۵/۴۸۵ kN/m×۳	۱۰۵۳۹/۲۷۳ kN/m×۱
سختی طبقه ۴	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۷	۵۹۸۵/۴۸۵ kN/m×۲	-
سختی طبقه ۵	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۶	۵۹۸۵/۴۸۵ kN/m×۱	-
سختی طبقه ۶	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۵	-	-
سختی طبقه ۷	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۴	-	-
سختی طبقه ۸	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۳	-	-
سختی طبقه ۹	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۲	-	-
سختی طبقه ۱۰	۲۸۶۲/۱۳۸ kN/m×۱	-	-

جدول (۴): خصوصیات TMD و FTMD به کار رفته.

تعداد طبقات	TMD			FTMD		
	سطح خطر ۱	سطح خطر ۲	متغیر	سطح خطر ۱	سطح خطر ۲	متغیر
۳	۰/۰۵	۰/۰۵	نسبت جرمی	۰/۰۵	۰/۰۵	نسبت جرمی
	۰/۰۹	۱/۰	نسبت فرکانس	۰/۰۹	۱/۰	نسبت فرکانس
	۰/۰۲	۰/۰۲	نسبت میرایی	۰/۰۵	۰/۱۸	ضریب اصطکاک
۵	۰/۰۵	۰/۰۵	نسبت جرمی	۰/۰۵	۰/۰۵	نسبت جرمی
	۱/۰	۰/۰۹	نسبت فرکانس	۱/۰	۰/۰۹	نسبت فرکانس
	۰/۰۲	۰/۰۲	نسبت میرایی	۰/۰۳	۰/۰۲	ضریب اصطکاک
۱۰	۰/۰۵	۰/۰۵	نسبت جرمی	۰/۰۵	۰/۰۵	نسبت جرمی
	۱/۱	۱/۱	نسبت فرکانس	۱/۱	۱/۱	نسبت فرکانس
	۰/۰۲	۰/۰۲	نسبت میرایی	۰/۰۲	۰/۰۸	ضریب اصطکاک

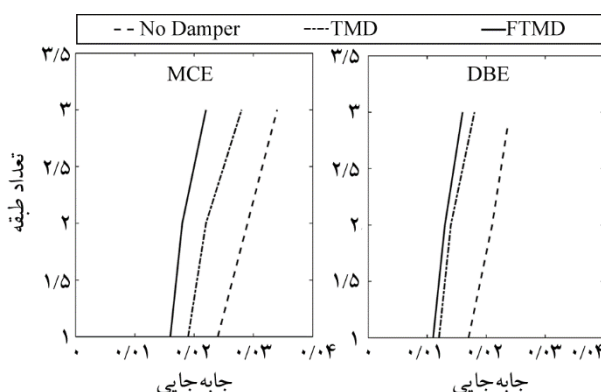
در ادامه، در شکل (۱۰) میانگین جابه‌جایی نسبی طبقات برای سازه‌ی ده طبقه در تمام حالات نشان داده شده است. می‌توان مشاهده نمود که در این حالت اثر FTMD به نسبت سازه‌های سه و پنج طبقه، کاهش یافته است؛ گرچه استفاده از این میراگر باعث کاهش پاسخ‌ها نسبت به TMD شده است، لیکن این کاهش پاسخ در مقایسه با سازه‌های سه و پنج طبقه کمتر است. برای سازه‌ی ده طبقه، در تحلیل‌های مربوط به سطح خطر یک می‌توان بیشترین تأثیر استفاده از FTMD و TMD را در طبقات ۴ و ۵ (طبقات میانی سازه) و در سطح خطر دو علاوه بر طبقات ۴ و ۵، در طبقات ۹ و ۱۰ (طبقات بالایی سازه) مشاهده نمود. برخلاف سازه‌های سه و پنج طبقه، در هر دو سطح خطر یک نقطه استثنا دیده می‌شود که در آن تأثیر میراگر بسیار کاهش یافته است؛ در سطح خطر یک، این نقطه در طبقه آخر و در سطح خطر دو این نقطه مربوط به طبقه هشتم است.



شکل (۱۰): میانگین جابه‌جایی نسبی طبقات تحت رکوردهای سطح خطر ۱ و ۲ در سه حالت برای سازه‌ی ۱۰ طبقه.

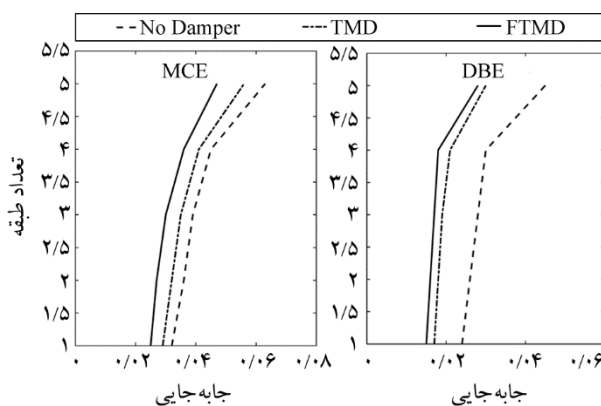
در جدول‌های (۵) تا (۷) ماکزیمم پاسخ جابه‌جایی تمامی طبقات در هر سه سازه‌ی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه برای هر سه حالت، به صورت عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود در سازه‌های با ارتفاع کمتر و زمان تناوب پایین‌تر عملکرد FTMD بهتر از TMD است؛ به طوری که این کارایی برای سازه تحت رکوردهای مربوط به سطح خطر ۱ مناسب‌تر از رکوردهای مربوط به سطح خطر ۲ است؛ لیکن در سازه‌های با زمان تناوب بالاتر می‌توان گفت عملکرد FTMD به

سطح خطر دو عملکرد بسیار مناسب‌تری را در FTMD، نسبت به TMD می‌توان مشاهده نمود. روند تغییرات پاسخ‌ها به طور کلی در هر دو حالت یکسان است. بیشترین کاهش پاسخ در اثر استفاده از FTMD در هر دو سطح خطر برای طبقه‌ی سوم؛ و در TMD برای طبقه دوم سازه رخ داده است.



شکل (۸): میانگین جابه‌جایی نسبی طبقات تحت رکوردهای سطح خطر ۱ و ۲ در سه حالت برای سازه‌ی ۳ طبقه.

در شکل (۹) نتایج پژوهش را می‌توان برای سازه‌ی ۵ طبقه مشاهده نمود. همان‌طور که دیده می‌شود، به طور کلی استفاده از میراگر، تحت رکوردهای مربوط به سطح خطر یک بسیار مؤثرتر از سطح خطر دو است؛ گرچه این کاهش پاسخ در FTMD بیشتر از TMD به دست آمده و عملکرد مفیدتری داشته است. همچنین مشابه با سازه‌ی ۳ طبقه روند کلی نتایج در هر دو حالت مشابه با هم است؛ بیشترین کاهش پاسخ نیز نسبت به حالت بدون میراگر، برای هر دو سطح خطر در طبقه آخر سازه دیده می‌شود.



شکل (۹): میانگین جابه‌جایی نسبی طبقات تحت رکوردهای سطح خطر ۱ و ۲ در سه حالت برای سازه‌ی ۵ طبقه.

جدول (۵): مقایسه‌ی عددی ماکزیمم پاسخ جابه‌جایی طبقات در مدل ۳ طبقه.

سطح خطر	طبقه	TMD		FTMD		ماکزیمم جابه‌جایی طبقات بدون میراگر (متر)
		درصد کاهش پاسخ	ماکزیمم جابه‌جایی (متر)	درصد کاهش پاسخ	ماکزیمم جابه‌جایی (متر)	
یک	۳	٪۲۹	۰/۰۴۴	٪۳۶	۰/۰۴	۰/۰۶۲
	۲	٪۳۱	۰/۰۲۶	٪۳۸	۰/۰۲۴	۰/۰۳۸
	۱	٪۳۱	۰/۰۱۲	٪۳۷	۰/۰۱۱	۰/۰۱۷
دو	۳	٪۲۱	۰/۰۶۹	٪۳۵	۰/۰۵۶	۰/۰۸۷
	۲	٪۲۲	۰/۰۴۱	٪۳۵	۰/۰۳۴	۰/۰۵۳
	۱	٪۲۰	۰/۰۱۹	٪۳۴	۰/۰۱۶	۰/۰۲۴

جدول (۶): مقایسه‌ی عددی ماکزیمم پاسخ جابه‌جایی طبقات در سازه‌ی ۵ طبقه.

سطح خطر	طبقه	TMD		FTMD		ماکزیمم جابه‌جایی طبقات بدون میراگر (متر)
		درصد کاهش پاسخ	ماکزیمم جابه‌جایی طبقات (متر)	درصد کاهش پاسخ	ماکزیمم جابه‌جایی طبقات (متر)	
یک	۵	٪۳۱	۰/۱۰۶	٪۳۸	۰/۰۹۵	۰/۱۵۴
	۴	٪۳۰	۰/۰۷۶	٪۳۹	۰/۰۶۷	۰/۱۰۹
	۳	٪۳۰	۰/۰۵۵	٪۳۹	۰/۰۴۸	۰/۰۷۹
	۲	٪۲۹	۰/۰۳۶	٪۳۸	۰/۰۳۲	۰/۰۵
	۱	٪۲۸	۰/۰۱۷	٪۳۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲۴
دو	۵	٪۱۰	۰/۱۹۳	٪۲۴	۰/۱۶۵	۰/۲۱۶
	۴	٪۱۰	۰/۱۳۷	٪۲۳	۰/۱۱۸	۰/۱۵۳
	۳	٪۱۱	۰/۰۹۶	٪۲۳	۰/۰۸۲	۰/۱۰۷
	۲	٪۱۱	۰/۰۶	٪۲۳	۰/۰۵۲	۰/۰۶۸
	۱	٪۱۰	۰/۰۲۹	٪۲۳	۰/۰۲۵	۰/۰۳۲

جدول (۷): مقایسه‌ی عددی ماکزیمم پاسخ جابه‌جایی طبقات در مدل ۱۰ طبقه.

سطح خطر	طبقه	TMD		FTMD		ماکزیمم جابه‌جایی طبقات بدون میراگر (متر)
		درصد کاهش پاسخ	ماکزیمم جابه‌جایی طبقات (متر)	درصد کاهش پاسخ	ماکزیمم جابه‌جایی طبقات (متر)	
یک	۱۰	٪۱۰	۰/۳۴۲	٪۱۴	۰/۳۲۶	۰/۳۸۱
	۹	٪۱۳	۰/۲۷۴	٪۱۸	۰/۲۶۰	۰/۳۱۶
	۸	٪۱۴	۰/۲۳۱	٪۱۹	۰/۲۱۸	۰/۲۶۸
	۷	٪۱۴	۰/۱۹۷	٪۱۹	۰/۱۸۵	۰/۲۲۹
	۶	٪۱۵	۰/۱۶۵	٪۲۰	۰/۱۵۵	۰/۱۹۵
	۵	٪۱۵	۰/۱۳۵	٪۲۱	۰/۱۲۶	۰/۱۵۹
	۴	٪۱۴	۰/۱۰۸	٪۲۰	۰/۱۰۱	۰/۱۲۵
	۳	٪۱۲	۰/۰۸۱	٪۱۸	۰/۰۷۶	۰/۰۹۲
	۲	٪۱۰	۰/۰۵۴	٪۱۶	۰/۰۵۱	۰/۰۶
	۱	٪۹	۰/۰۲۷	٪۱۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹
دو	۱۰	٪۱۲	۰/۵۸۸	٪۱۸	۰/۵۴۶	۰/۶۶۷
	۹	٪۱۰	۰/۴۸۷	٪۱۸	۰/۴۴۸	۰/۵۴۴
	۸	٪۹	۰/۴۱۷	٪۱۷	۰/۳۸۲	۰/۴۵۹
	۷	٪۱۲	۰/۳۵۱	٪۱۹	۰/۳۲۱	۰/۳۹۸
	۶	٪۱۴	۰/۲۹	٪۲۱	۰/۲۶۵	۰/۳۳۶
	۵	٪۱۴	۰/۲۳۵	٪۲۲	۰/۲۱۵	۰/۲۷۴
	۴	٪۱۳	۰/۱۸۶	٪۲۲	۰/۱۶۹	۰/۲۱۵
	۳	٪۱۲	۰/۱۳۸	٪۲۱	۰/۱۲۴	۰/۱۵۷
	۲	٪۱۱	۰/۰۹۱	٪۲۰	۰/۰۸۱	۰/۱۰۲
	۱	٪۱۰	۰/۰۴۵	٪۱۹	۰/۰۴	۰/۰۴۹

- رفتار FTMD در سازه‌های ۳ و ۵ طبقه تحت رکورد های مربوط به سطح خطر ۱ و در سازه‌ی ۱۰ طبقه تحت رکوردهای مربوط به سطح خطر ۲ کارآمدتر است.

- رفتار اصلی FTMD نیز همچون TMD به واسطه‌ی تنظیم شدگی جرمی شکل می‌گیرد، بنا بر همین اصل نتایج رفتاری این میراگر مشابه با TMD به نسبت فرکانس حساسیت بالاتری نسبت به سایر پارامترهای طراحی همچون نسبت جرمی و ضریب اصطکاک دارد.

مراجع

1. Den Hartog, J.P. (1956) *Mechanical Vibrations*. McGraw-Hill, New York.
2. Kwok, K. and Samali, B. (1995) Performance of tuned mass dampers under wind loads. *Engineering Structures*, **17**(9), 655-667.
3. Rana, R. and Soong, T. (1998) Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, **20**(3), 193-204.
4. Cao, H., Reinhorn, A., and Soong, T. (1998) Design of an active mass damper for a tall TV tower in Nanjing, China. *Engineering Structures*, **20**(3), 134-143.
5. Bakre, S. and Jangid, R. (2007) Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system. *Structural Control and Health Monitoring*, **14**(3), 448-470.
6. Zahrai, S., Dehghan-Niri, E., and Mohtat, A. (2007) Design methodology for MTMD performance optimization using a new criterion for robustness. In: *Company European Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. City: Rethymno, Greece.
7. Leung, A. and Zhang, H. (2009) Particle swarm optimization of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, **31**(3), 715-728.
8. Mander, J.B., Chey, M., Carr, A., and Chase, J.G. (2010) Semi-active tuned mass damper building systems: Application. *Earthquake Engineering and*

TMD نزدیک‌تر شده و به‌طور کلی FTMD در این سازه‌ها تحت رکوردهای مربوط به سطح خطر ۲، با اختلاف پایین عملکرد بهتری نسبت به سطح خطر ۱ دارد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا به تحلیل حساسیت کاربرد FTMD بر روی سازه‌ی تک‌درجه آزاد تحت رکوردهای سطح خطر ۱ و ۲ منطقه لس‌آنجلس پروژه‌ی SAC پرداخته شد و میانگین نتایج حاصل شده آن در قالب شکل‌های مختلف ارائه گردید، سپس به کمک نتایج حاصل شده از تحلیل حساسیت به بررسی عملکرد لرزه‌ای این میراگر بر روی سازه‌های ۳، ۵ و ۱۰ طبقه و مقایسه‌ی آن با TMD در سطوح خطر لرزه‌ای ۱ و ۲ پرداخته شد. از مهم‌ترین نتایج به دست آمده در طی این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- به‌طور کلی در تحلیل‌های صورت گرفته تحت رکوردهای مربوط به هر دو سطح خطر در نسبت فرکانس ثابت، هر چه نسبت جرمی بالاتر باشد، کاهش جابه‌جایی نسبی بیشتری در پاسخ سازه مشاهده می‌شود؛ گرچه این موضوع برای تحلیل‌های صورت گرفته تحت رکوردهای مربوط به سطح خطر ۲ برای ضرایب اصطکاک پایین، با تأثیر بسیار ضعیف معکوس است.

- با توجه به نتایج به دست آمده از سازه تک‌درجه آزاد، بهترین مقدار برای ضریب اصطکاک در سطح خطر یک عددی بین ۰/۱ تا ۰/۳ و در سطح خطر دو، ۰/۲ تا ۰/۴ است.

- رفتار سازه با به‌کار بردن FTMD در هر سه سازه‌ی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه بهتر از TMD است؛ لیکن با افزایش زمان تناوب سازه تأثیر FTMD به TMD نزدیک می‌شود.

- بر اساس نتایج حاصل شده؛ با افزایش زمان تناوب سازه از ۰/۳ ثانیه به ۱ ثانیه، عملکرد FTMD کاهش یافته است. به‌عبارت‌دیگر بنا به هدف‌گذاری‌های ابتدایی برای این میراگر می‌توان بیان نمود که در سازه‌های بلندمرتبه، TMD و در سازه‌های کوتاه‌مرتبه FTMD گزینه‌های مناسبی جهت طراحی سازه‌ها به کمک سیستم‌های کنترل غیرفعال به‌شمار می‌روند.

- control using a semi-active friction tuned mass damper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**(4), 813-830.
20. Pisal, A.Y. and Jangid, R.S. (2014) Seismic response of multi-story structure with multiple tuned mass friction dampers. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, **6**, 46.
21. Pisal, A.Y. and Jangid, R.S. (2016) Dynamic response of structure with tuned mass friction damper. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, **8**(4), 1-15.
22. Kim, S.Y. and Lee, C.H. (2019) Peak response of frictional tuned mass dampers optimally designed to white noise base acceleration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **117**, 319-332.
23. Wen, Y.K. (1976) Method for random vibration of hysteretic systems. *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, **102**(2), 249-263.
24. Bhaskararao, A.V. and Jangid, R.S. (2006a) Seismic analysis of structures connected with friction dampers. *Eng Struct.*, **28**, 690-703.
25. <http://people.duke.edu/~hpgavin/cee541/quakeGMS.html>.
- Structural Dynamics*, **39**(1), 69-89.
9. Mander, J.B., Chey, M., Carr, A., and Chase, J.G. (2010) *Semi-Active Tuned Mass Damper Building Systems: Design*.
10. Arfiadi, Y. and Hadi, M. (2011) Optimum placement and properties of tuned mass dampers using hybrid genetic algorithms. *Iran University of Science and Technology*, **1**(1), 167-187.
11. Greco, R. and Marano, G.C. (2013) Optimum design of Tuned Mass Dampers by displacement and energy perspectives. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **49**, 243-253.
12. Carmona, J.E.C., Avila, S.M., and Doz, G. (2017) Proposal of a tuned mass damper with friction damping to control excessive floor vibrations. *Engineering Structures*, **148**, 81-100.
13. Ricciardelli F. and Vickery BJ. (1999) Tuned vibration absorbers with dry friction damping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**(7), 707-723.
14. Almazan, J.L., De la Llera, J.C., Inaudi, J.A., Lopez-Garcia, D., and Izquierdo, LE. (2007) A bidirectional and homogeneous tuned mass damper: A new device for passive control of vibrations. *Engineering Structures*, **29**(7), 1548-1560.
15. Pall, A.S., Marsh, C., and Fazio, P. (1980) Friction joints for seismic control of large panel structures. *PCI Journal*, **26**(6), 38-61.
16. Mualla, I.H. (2000) Parameters influencing the behavior of a new friction damper device. *SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics.
17. Mirzabagheri, S., Sanati, M., Aghakouchak, A.A., and Khadem, S.E. (2015) Experimental and numerical investigation of rotational friction dampers with multi units in steel frames subjected to lateral excitation. *Civil and Mechanical Engineering*, **15**(2), 479-491.
18. Gewei, Z. and Basu, B. (2010) A study on friction-tuned mass damper: harmonic solution and statistical linearization. *Journal of Vibration and Control*, **17**(5), 721-731.
19. Lin, G.L., Lin, C.C., Lu, L.Y., and Ho, Y.B. (2012) Experimental verification of seismic vibration

واژه‌نامه

Friction Tuned Mass Damper (FTMD)	۱- میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی
Tuned Mass Damper (TMD)	۲- میراگر جرمی تنظیم شده
Hybrid Coded Genetic Algorithm	۳- الگوریتم ژنتیک ترکیبی
Semi-Active Friction Tuned Mass Damper (SAF-TMD)	۴- میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی نیمه فعال
Passive Friction Tuned Mass Damper (PF-TMD)	۵- میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی غیرفعال
Multiple Friction Tuned Mass Dampers (MFTMD)	۶- میراگر چندگانه جرمی تنظیم شده اصطکاکی
Solo Friction Tuned Mass Dampers (SFTMD)	۷- میراگر جرمی تنظیم شده اصطکاکی تک
Near Fault	۸- نزدیک گسل
Far Fault	۹- دور از گسل

Sensitivity Analysis of Friction Tuned Mass Damper and its Performance Compared to Tuned Mass Damper at Different Seismic Hazard Levels

Hossein Tajmir Riahi^{1*} and Raheleh Shams Falavarjani²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran,
*Corresponding Author, email: tajmir@eng.ui.ac.ir

2. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Daneshpajooan Higher Education Institute, Isfahan, Iran

One of the most up-to-date seismic control devices are friction tuned mass damper (FTMD). This type of damper is a combination of a tuned mass damper (TMD) and a nonlinear frictional damper. In this paper, the governing equations for a single-degree-of-freedom (SDOF) structure equipped with a FTMD and effective parameters on these systems performance are expressed first. Then, SDOF structures with linear behavior equipped with a FTMD are modeled and validated in OpenSEES software. Finally, the sensitivity analysis of these models to their effective parameters is performed. The structures mass is assumed to be 10 tons, their period is 0.5 second and their damping ratio is assumed to be 2%. Nonlinear time history analyses are done for these structures using 40 strong ground motions from the SAC project. These ground motions consist of 20 records (La01-La20) at design basis earthquake (DBE) level and 20 records (La21-La40) at maximum considered earthquake (MCE) level for the Los Angeles area. Effective parameters on the performance of FTMD assumed in this study are the friction coefficient of the damper, the mass ratio of the damper to the structure and the frequency ratio of the damper to the structure. Average of the structures' maximum displacement is determined for two ground motion records sets and effects of the mentioned parameters on the structural performance are discussed. Results show that the responses are more sensitive to frequency ratio rather than friction coefficient and mass ratio. The best value for the friction coefficient varies between 0.1 and 0.3 at DBE level, and varies between 0.2 and 0.4 for MCE level.

Based on the results obtained for SDOF structures, application of FTMD on multi-degree-of-freedom (MDOF) is discussed in the next step. This is done for short period structures because this type of damper is more effective on these structures. Three MDOF structures with linear behavior and period of 0.3, 0.5 and 1 second are selected and the seismic performance of these structures equipped with FTMD is investigated and compared with the same structures equipped with tuned mass damper (TMD). The mass of stories is uniformly distributed among structure and the mass of each story is 10 ton. In addition, the damping ratio for the main structure in all models is assumed to be 2% and the stiffness of the stories is decreased linearly with the triangular pattern. Same ground motion records are used for the nonlinear time history analysis of MDOF structures and the results for the mean maximum relative displacement of the stories under DBE and MCE levels are compared for structures with FTMD and TMD. Results show that the structures equipped with FTMD have better performance than the structures equipped with TMD, but with increasing structures period, performance of two systems approach each other. In addition, 3 and 5 story structures equipped with FTMD have better performance at DBE level while a 10-story structure equipped with this damper has better performance at DBE level.

Keywords: Passive Control, Friction Tuned Mass Damper, Tuned Mass Damper, Seismic Performance of Structures, Seismic Hazard Level.