



بررسی کارایی میراگر جرمی تنظیم شده در بهبود رفتار

لرزه‌های سازه‌های فلزی غیرخطی

محتشم محبی^۱، سولماز مرادپور^۲، کاظم شاکری^۳
(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۶/۳۰)

چکیده

در چند دهه‌ی اخیر تحقیقات زیادی در مورد کاربرد میراگر جرمی تنظیم شده (Tuned mass damper-MD) بر روی سازه‌های خطی انجام گرفته است، لیکن در مورد کاربرد TMD بر روی سازه‌های غیرخطی مطالعات محدود و به همراه تعدادی فرضیات ساده کننده در خصوص رفتار واقعی سازه و همچنین طراحی TMD بوده است. در این مقاله، هدف بررسی نحوه‌ی مدل‌سازی TMD بر روی سازه‌های فلزی غیرخطی با رفتار واقعی و ارزیابی تاثیر آن در بهبود رفتار لرزه‌ای این سازه ها می‌باشد. بدین منظور سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه‌ی دو بعدی مجهز شده به TMD که تحت اثر زلزله‌های نزدیک‌گسل و دورگسل قرار گرفته‌اند، با استفاده از نرم افزار OpenSees مدل‌سازی شده و به ازای درصد جرم‌های مختلف TMD، میزان کاهش در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فلزی غیرخطی نظیر حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی، جذر میانگین مربعات تغییر مکان جانبی نسبی و انرژی هیسترسیس تعیین گردیده است. نتایج نشان دهنده‌ی قابلیت نرم‌افزار OpenSees برای مدل‌سازی سازه‌های کنترل شده با TMD می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که کارایی TMD در کاهش خرابی سازه‌های فلزی غیرخطی وابستگی زیادی به نوع زلزله‌ی ورودی، حداکثر شتاب زلزله و جرم میراگر دارد، بطوریکه با افزایش جرم میراگر عموماً کارایی این مکانیزم افزایش می‌یابد. هم چنین در این مقاله روشی مبتنی بر آنالیز حساسیت برای تعیین پارامترهای TMD به جهت افزایش کارایی این سیستم بر روی سازه‌های با رفتار غیر خطی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی

کنترل سازه، میراگر جرمی تنظیم شده، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، انرژی هیسترسیس، سازه‌ی غیرخطی

Assessment of Tuned Mass Damper (TMD) Effectiveness in Improving the Seismic Response of Nonlinear Steel Structures

M. Mohebbi, S. Moradpoor, K. Shakeri

ABSTRACT

About application of Tuned mass dampers (TMDs) on linear structures extensive researches have been done, while studies about TMD application on nonlinear structures are limited and have been based on some simplified assumptions on structure behavior or TMD design procedure. Hence, in this paper it has been decided to study the modeling of TMD on nonlinear structures using the real behavior for structure, and also to assess its effectiveness in improving the seismic behavior of structures. To this end, 3, 9 and 20 stories two dimensional steel frames equipped with TMD have been analyzed using OpenSees software under both near-field and far-field earthquakes. For different values of TMD mass ratio, the reduction in controlled structures response such as maximum drift, root-mean-square (RMS) of drift and hysteretic energy has been determined. Results show OpenSees software high ability in modeling the nonlinear structure-TMD system. Based on numerical simulations, it has been found that the effectiveness of TMD in reducing the damage of nonlinear steel frames depends on earthquake characteristics such as frequency content and peak ground acceleration (PGA) as well as TMD mass ratio. Also in this paper a method based on sensitivity analysis has been proposed to determine the parameters of TMD to achieve the better performance in utilizing TMDs on nonlinear structures.

KEYWORDS

Structural control, Tuned mass damper (TMD), Nonlinear dynamic analysis, Hysteretic energy, Nonlinear structure

۱- استادیار دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، mohebbi@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه محقق اردبیلی، solmaz_moradpoor@yahoo.com

۳- استادیار دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، shakeri@uma.ac.ir



علیرغم تحقیقات زیاد در زمینه‌ی پدیده‌ی زلزله، هنوز امکان پیش بینی دقیق زمان و مکان وقوع آن وجود ندارد و از طرف دیگر خسارت اقتصادی-اجتماعی یک زلزله بسیار زیان بار می‌باشد. بنابراین یافتن ابزاری برای مقابله با خرابی‌های ناشی از آن از مهمترین چالش‌های مهندسان سازه و زلزله در چند دهه‌ی اخیر بوده است. یک ایده برای طراحی سازه‌های مقاوم در مقابل زلزله، روش‌هایی نظیر افزایش سختی، مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌ها می‌باشد تا بر توانایی سازه‌ها در برابر ارتعاش‌های دینامیکی ناشی از زلزله افزوده شود. ایده‌ی دیگر برای مقابله با نیروهای زلزله کاربرد سیستم‌های کنترل سازه‌ها جهت بالا بردن ایمنی سازه می‌باشد. این سیستم‌ها که یکی از فن‌آوری‌های نسبتاً جدید در زمینه‌ی طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشند به چهار دسته‌ی عمده‌ی سیستم کنترل غیر فعال، کنترل فعال، کنترل نیمه فعال و کنترل دوگان تقسیم می‌شوند. از بین سیستم‌های مذکور، مکانیزم‌های کنترل غیرفعال بدلیل عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، سهولت نصب و نگهداری و همچنین ساده بودن مکانیزم آن، نسبت به سایر روش‌های کنترل از کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشند. در بین ابزارهای کنترل غیرفعال می‌توان به میراگر جرمی تنظیم شده TMD اشاره کرد. این سیستم از قدیمی‌ترین سیستم‌های کنترل ارتعاش سازه می‌باشد [۱] که به عنوان مکانیزمی برای کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی ناشی از زلزله و عموماً باد استفاده گردیده است. تاثیر TMD در کاهش پاسخ سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی، وابسته به مشخصات آن (جرم، سختی و میرایی) بوده و روش‌های مختلفی برای طراحی بهینه‌ی TMD بر روی سازه‌های خطی ارائه شده است. این روش‌ها بر اساس مینیمم سازی یک تابع هدف نظیر جذر میانگین مربعات تغییر مکان سازه اصلی تحت اغتشاش سفید [۲]، اختلاف بین میرایی دو مد اولیه سیستم سازه-TMD [۳] و نرم H_2 پاسخ سازه با استفاده از الگوریتم ژنتیک [۴] یا افزایش میرایی موثر سیستم سازه-TMD [۵] می‌باشد. کاربرد مکانیزم میراگر جرمی در کاهش پاسخ

سازه‌های دریایی در مقابل امواج دریا [۶]، تاثیر TMD در کنترل تغییر مکان سازه‌های خمشی تحت اثر زلزله و تاثیر تغییر پارامترهای میراگر جرمی و زلزله‌ی ورودی در عملکرد این سیستم [۷]، مقایسه عملکرد سیستم کنترلی TMD با مکانیزم‌های دیگر نظیر میراگر ویسکوزالاستیک و جداگر سازه‌ای [۸] و ارائه چهار چوب کلی برای طراحی مقاوم مکانیزم میراگر جرمی در سازه‌های با پارامترهای غیر قطعی [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این نکته مهم که احتمال ورود سازه‌ها در مقابل تکان‌های شدید زمین لرزه به ناحیه غیر خطی زیاد است، ضرورت طراحی میراگر جرمی تنظیم شده با فرض رفتار غیر خطی سازه و ارزیابی عملکرد آن در این سازه‌ها مطرح می‌شود. زمانی که سازه وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌گردد مشخصات دینامیکی سازه دچار تغییر شده و همین امر باعث خارج شدن TMD از حالت تنظیم و در نتیجه تغییر در کارایی آن می‌گردد. به همین دلیل سودمندی میراگر جرمی در کنترل حرکت سازه زمانی که تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی تحت اثر ارتعاش زلزله اتفاق می‌افتد تاکنون مورد تایید قرار نگرفته است. علیرغم مطالعات زیاد در رابطه با طراحی TMD بر روی سازه‌های خطی، بررسی‌ها در مورد کاربرد این مکانیزم در سازه‌های غیر خطی محدود می‌باشد. در سال ۱۹۸۱ کی‌نیا و همکارانش [۱۰] یک بررسی مقدماتی بر روی تاثیر لرزه‌ای TMD در سازه‌های یک درجه آزادی با رفتار الاستو-پلاستیک تحت یک مجموعه از زلزله‌های ثبت شده در ناحیه‌ی غربی ایالات متحده انجام دادند که نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی کاهش اندکی در ماکزیمم جابجایی جانبی سازه می‌باشد. برنال در سال ۱۹۹۶ [۱۱] رفتار سازه‌های یک درجه آزادی غیر ارتجاعی مجهز به جرم میراگر هماهنگ شده را تحت زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی که از نوع زلزله‌های باند باریک با طول مدت بلند است، مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسید که کاهش در جابجایی ماکزیمم سازه با افزایش شدت زلزله و در نتیجه افزایش رفتار غیر ارتجاعی سازه کاهش می‌یابد. ساتو-بریتو و رویز [۱۲] تاثیر TMD در یک ساختمان ۲۲ طبقه بتنی تحت حرکت‌های شدید و متوسط زمین را مورد



بررسی قراردادند. این بررسی نشان داد که TMD می‌تواند در کاهش تغییر مکان‌های جانبی نسبی سازه‌ی تحت زلزله‌های متوسط مؤثر باشد اما عملکرد آن در زلزله‌های شدید به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. ونگ به بررسی عملکرد TMD در کاهش پاسخ‌های انرژی سازه برای سطوح مختلف تسلیم با استفاده از طیف انرژی پلاستیک پرداخت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با کاربرد TMD مقداری از انرژی وارد به سازه توسط TMD جذب و سپس به صورت انرژی میرایی در زمانی که پاسخ سازه از حالت بحرانی خارج می‌شود رها می‌گردد. بدین ترتیب با افزایش اتلاف انرژی میرایی، اتلاف انرژی به صورت انرژی پلاستیک کاهش می‌یابد که همین امر باعث کاهش خرابی سازه می‌گردد [۱۳]. در مطالعات فوق عموماً کارایی TMD با انتخاب مقادیر مشخص برای پارامترهای TMD بررسی شده و مقدار بهینه‌ای برای آن در نظر گرفته نشده است. جغتایی و مجبی [۱۴] عملکرد TMD را در بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارهای آجری محصور شده با رفتار غیر خطی و قابهای برشی غیرخطی هیسترسس [۱۵] مورد بررسی قرار دادند. با طراحی بهینه‌ی TMD با استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت حداقل سازی ماکزیمم پاسخ‌های سازه، اثر محتوای فرکانسی زلزله و شدت آن بر عملکرد TMD و همچنین میزان تاثیر نسبت جرمی که یکی از پارامترهای مهم در عملکرد TMD محسوب می‌شود، در بهبود پاسخ دیوار آجری محصور شده و قابهای برشی مورد بررسی قرار گرفت. در اکثر تحقیقات انجام شده در مورد کاربرد TMD بر روی سازه‌های غیرخطی مطالعات بصورت موردی به همراه تعدادی فرضیات ساده کننده در خصوص رفتار واقعی سازه و همچنین طراحی TMD بوده است. لذا نتایج حاصل از پژوهش‌های قبلی در محدوده فرضیات پژوهش قابل استناد می‌باشد. در این مقاله هدف آن است که به بررسی قابلیت استفاده از TMD بر روی سازه‌های فلزی غیرخطی که با رفتار واقعی مدل‌سازی می‌شوند، پرداخته شده و پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد TMD روی سازه‌های غیرخطی شناسایی شود. نوآوری این مقاله نسبت به پژوهش‌های قبلی شامل موارد زیر می‌باشد.

(۱) استفاده از TMD بر روی سازه‌های فلزی غیرخطی که این سازه‌ها با رفتار واقعی و بدون فرضیات ساده کننده در مورد رفتار آن مدل‌سازی می‌شوند بنابراین از نتایج پژوهش می‌توان در کاربردهای عملی این سیستم در سازه‌های فلزی و بهسازی این سازه‌ها استفاده کرد. (۲) ارائه روشی برای طراحی بهینه‌ی TMD برای سازه‌های غیرخطی نظیر سازه‌های فلزی با استفاده از آنالیز حساسیت. در پژوهش‌های قبلی بر روی سازه‌های غیر خطی اکثراً بهینه‌سازی صورت نگرفته است و روش‌های طراحی مبتنی بر بهینه‌سازی برای سازه‌های با رفتار خطی بوده است. (۳) امکان سنجی مدل‌سازی سازه‌های کنترل شده با TMD در نرم افزارهای تحلیلی نظیر OpenSees که در پژوهش‌های تکمیلی و همچنین بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فلزی غیرخطی می‌توان از نتایج بدست آمده استفاده نمود. برای آنالیز عددی جهت بررسی موضوع مقاله، سازه‌های فلزی غیرخطی ۳، ۹ و ۲۰ طبقه بصورت قاب خمشی دو بعدی در نرم افزار OpenSees مدل‌سازی شده و به طراحی TMD و آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای موثر در عملکرد آن تحت اثر زلزله‌های مختلف پرداخته می‌شود.

۲- مشخصه‌های جرم میراگر

در سازه‌های با رفتار غیرخطی با ورود سازه به ناحیه‌ی غیرخطی و تغییرسختی سازه در گام‌های زمانی، TMD بهینه‌ی طراحی شده طبق روش‌های ارائه شده برای سازه‌های خطی بر اساس یک فرکانس مشخص سازه، از حالت تنظیم و در نتیجه حالت بهینگی خارج می‌شود. همچنین برای طراحی میراگر جرمی تنظیم شده‌ی بهینه بر روی سازه‌های با رفتار غیرخطی که بصورت واقعی مدل‌سازی شوند روش مشخصی ارائه نشده است. بنابراین در این مقاله در بخش اول برای ارزیابی عملکرد TMD بر روی سازه‌های غیرخطی فلزی، جهت تعیین پارامترهای TMD از روش سادک و همکارانش [۳] که برای سازه‌های با چند درجه آزادی خطی ارائه شده، به عنوان مقادیر اولیه و نمونه استفاده می‌گردد. در این روش، درصد میرایی بهینه (ب) و نسبت فرکانس بهینه (f) برای مقادیر مختلف درصد

پاسخ نیز استفاده شود که طبق رابطه (۷) می توان مقدار آن را برای هر پاسخ اختیاری نظیر y_i بدست آورد.

$$RMS(y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2}{n}} \quad (۷)$$

که y_i نمایانگر پاسخ سازه در زمان t_i بوده و n بیانگر تعداد گام های زمانی که پاسخ سازه در آن محدوده سنجیده خواهد شد.

(ج) کاهش در میزان انرژی هیستریسیس جذب شده: در بررسی اثر TMD بر سازه هایی غیر خطی، قضاوت تنها بر مبنای ماکزیمم و RMS تغییر مکان جانبی نسبی نمی تواند در ارزیابی میزان خسارتی که تحت بارگذاری سیکلی رخ می دهد، موثر باشد. بنابراین علاوه بر آنها، میزان انرژی هیستریسیس انباشته شده که به عنوان شاخصی جهت خرابی سازه پیشنهاد می شود نیز استفاده شده است [۱۶ و ۱۷]. طبق این معیار هر چه تعداد حلقه های منحنی هیستریسیس کاهش یابد انرژی هیستریسیس انباشته شده و در نتیجه خرابی در سازه کاهش می یابد.

۴- مثال عددی

برای بررسی اثر TMD بر پاسخ لرزه ای سازه های فلزی غیرخطی از قاب های دو بعدی پیرامونی ساختمان های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه که در سال ۱۹۹۶ برای فاز ۲ پروژه ی SAC طراحی شده اند، استفاده می گردد. مشخصات کلی نظیر دوره ی تناوب مطابق جدول (۱) بوده و مشخصات کامل قاب ها را می توان در مرجع [۱۸] ملاحظه کرد.

جدول (۱): دوره تناوب قاب های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه

سازه	دوره تناوب مد اول (ثانیه)
۳ طبقه	۰/۹۹
۹ طبقه	۲/۱۶
۲۰ طبقه	۳/۸۱

جرمی TMD بر اساس سختی اولیه سازه غیرخطی فلزی محاسبه می شود. برای یک درصد جرم مشخص TMD، مقادیر بهینه ی ξ و f از معادلات زیر تعیین می شود.

$$f = \frac{1}{1 + \mu \Phi} \left[1 - \beta \sqrt{\frac{\mu \Phi}{1 + \mu \Phi}} \right] \quad (۱)$$

$$\xi = \Phi \left[\frac{\beta}{1 + \mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}} \right] \quad (۲)$$

$$M_n = \frac{\left(\sum_i^n m_i \phi_{i,n} \right)^2}{\sum_i^n m_i \phi_{i,n}^2} \quad (۳)$$

$$m_{TMD} = \mu \times M_n \quad (۴)$$

$$k_{TMD} = \omega_0^2 f^2 m_{TMD} \quad (۵)$$

$$c_{TMD} = 2\xi \omega_0 f m_{TMD} \quad (۶)$$

جائیکه:

μ : نسبت جرم TMD

Φ : دامنه شکل مود در مکان قرار گیری TMD بطوریکه ضریب سهم مدی برابر واحد باشد.

M_n : جرم موثر مود اول یا هر مودی که میراگر برای کنترل آن تنظیم شده است.

c_{TMD} , k_{TMD} و m_{TMD} : جرم، سختی و میرایی TMD

۳- معرفی معیارهای ارزیابی کارایی جرم میراگر

در این تحقیق معیارهای زیر جهت بررسی کارایی TMD بر روی سازه های غیرخطی فلزی در نظر گرفته شده است: (الف) کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه (ب) کاهش جذر میانگین مربعات (RMS) تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه:

با توجه به اینکه ماکزیمم پاسخ تنها در یک لحظه اتفاق می افتد و بررسی اثر TMD صرفاً از دیدگاه میزان تاثیر آن در کاهش ماکزیمم پاسخ کافی نیست، پیشنهاد می شود علاوه بر ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه برای بررسی چگونگی عملکرد میراگر در طول زمان از RMS



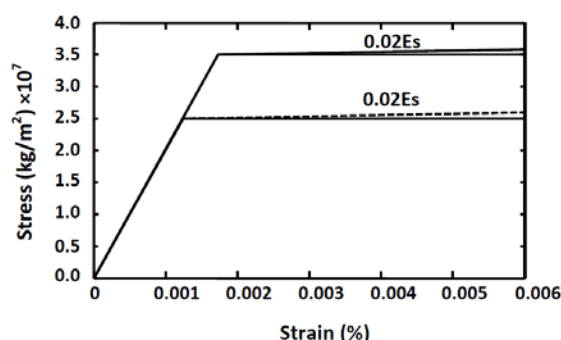
- تعریف مصالح

در این پژوهش مصالح مورد استفاده برای سازه‌ی فلزی به صورت تک‌محوری تعریف شده‌اند. جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی فولاد از مدل دوخطی با شیب ثانویه‌ی ۰.۲٪ شیب اولیه برای نمودار تنش- کرنش مطابق شکل (۱) استفاده شده است که:

$$E_s = 210 \times 10^3 \text{ kg/m}^2 \quad \text{مدول الاستیسیته فولاد}$$

$$F_{yc} = 240 \text{ kg/m}^2 \quad \text{تنش تسلیم فولادستون}$$

$$F_{yb} = 350 \text{ kg/m}^2 \quad \text{تنش تسلیم فولادتیر}$$



شکل (۱): مدل غیرخطی فولاد مورد استفاده

هر یک از قاب‌های مذکور تحت اثر رکوردهای مقیاس شده زلزله‌های دورگسل السنترو و هاچینوهه و نزدیک گسل طبس و کوبه که مشخصات آنها در جدول (۲) آورده است قرار گرفته و تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی آنها انجام شده است.

جدول (۲): مشخصات زلزله‌های ورودی

زلزله	سال	PGA (g)	PGV(cm/sec)
السنترو	۱۹۴۰	۰/۳۴۸	۳۸/۸
هاچینوهه	۱۹۶۸	۰/۲۲۹	۳۹/۱۵
کوبه	۱۹۹۵	۰/۸۲۱	۸۱/۳
طبس	۱۹۷۸	۰/۸۵۱	۹۷/۸

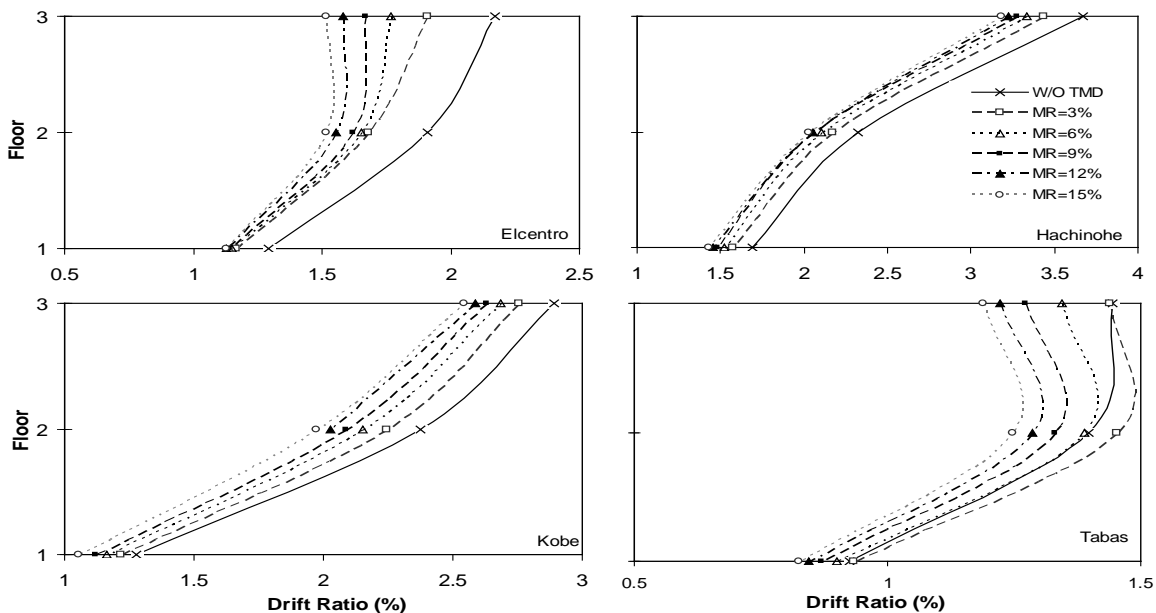
۴-۱- طراحی TMD تحت زلزله‌های مختلف

جهت تمرکز بر روی بررسی اثر محتوای فرکانسی زلزله‌ها، در طراحی و عملکرد TMD، کلیه زلزله‌ها به حداکثر شتاب زمین (PGA) برابر ۰/۶g مقیاس شده‌اند. انتخاب

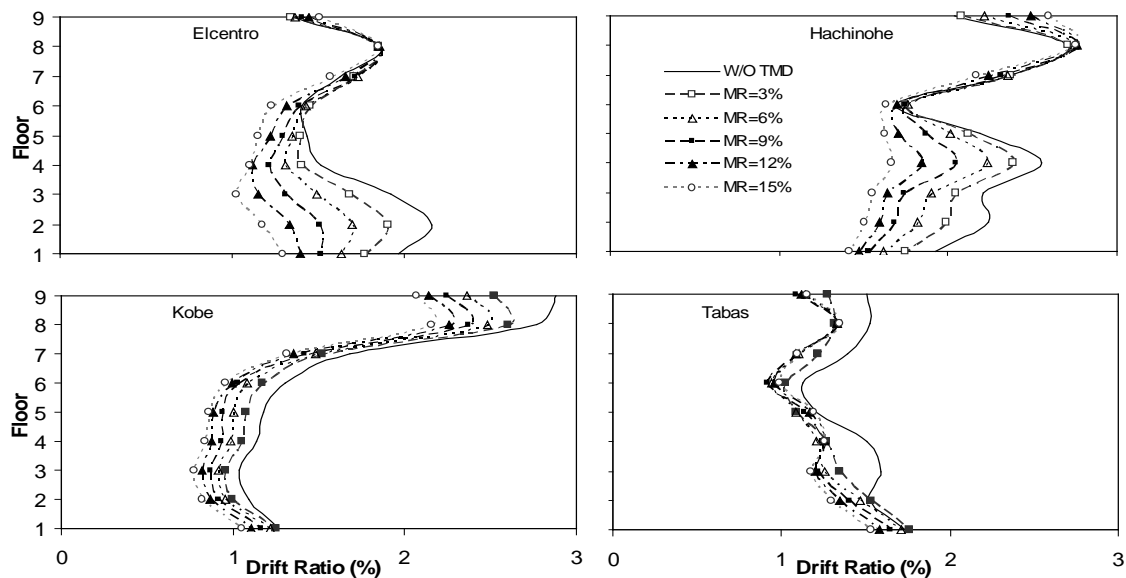
به عنوان نمونه برای مطالعات عددی انتخاب شده است که سازه‌های مورد مطالعه تحت این PGA وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند. برای زلزله‌های مقیاس نشده مطابق جدول (۲) هم مطالعات صورت گرفته است که روند نتیجه‌گیری مشابهی همین قسمت می‌باشد. به علت حجم مقاله نتایج حاصل از آنالیز عددی آورده نشده است. برای درصدهای جرمی مختلف TMD با استفاده از روابط (۱) و (۲) مقادیر سختی و میرایی بر اساس سختی اولیه سازه تعیین گردیده است. سازه‌های کنترل نشده و کنترل شده با TMD در حالیکه TMD در طبقه آخر قرار گرفته است، تحت اثر رکوردهای مقیاس شده تحلیل تاریخیچه زمانی گردیده‌اند. شکل‌های (۲) تا (۴) ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات (برابر است با حاصل تقسیم تغییر مکان جانبی نسبی به ارتفاع طبقه) را نشان می‌دهد. همچنین درصد کاهش RMS نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی کنترل شده تحت اثر زلزله‌های مذکور به ازای مقادیر مختلف درصد جرمی در شکل‌های (۵) تا (۷) آورده شده است. از شکل‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که (۱): به ازای مقادیر مختلف درصد جرمی عموماً با افزایش درصد جرم TMD، کارایی این مکانیزم در کاهش پاسخ سازه تحت اثر هر چهار زلزله افزایش می‌یابد. لذا برای طراحی TMD جهت دستیابی به حداکثر کارایی بایستی با لحاظ محدودیت‌های کاربرد عملی تا حد امکان درصد جرم مناسبتری را انتخاب نمود. (۲): هم چنین نتایج حاصله از شکل (۲) تا (۴) نشان می‌دهد که توانایی TMD در کاهش تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه وابسته به مشخصات زلزله ورودی و هم چنین سازه مورد مطالعه می‌باشد. به عنوان مثال در سازه‌ی ۳ طبقه بهترین و بدترین عملکرد به لحاظ کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی به ترتیب تحت اثر زلزله السنترو و طبس اتفاق می‌افتد. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که برای طراحی TMD در سازه‌های غیرخطی فلزی، جهت دستیابی به بهترین عملکرد در هر منطقه بایستی رکورد زلزله مناسبی بر اساس مشخصات زلزله‌های منطقه یا ترکیبی از چندین زلزله را استفاده نمود. (۳): بررسی میزان کاهش در نسبت ماکزیمم

TMD در کاهش پاسخ در طول زمان تحلیل بیشتر از کاهش در ماکزیمم پاسخ می‌باشد.

تغییر مکان جانبی نسبی و RMS نسبت تغییر مکان جانبی نسبی نشان می‌دهد که درصد کاهش RMS تغییر مکان جانبی نسبی تحت هر زلزله بیشتر از ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی می‌باشد. لذا در مثال‌های مورد بررسی، توانایی

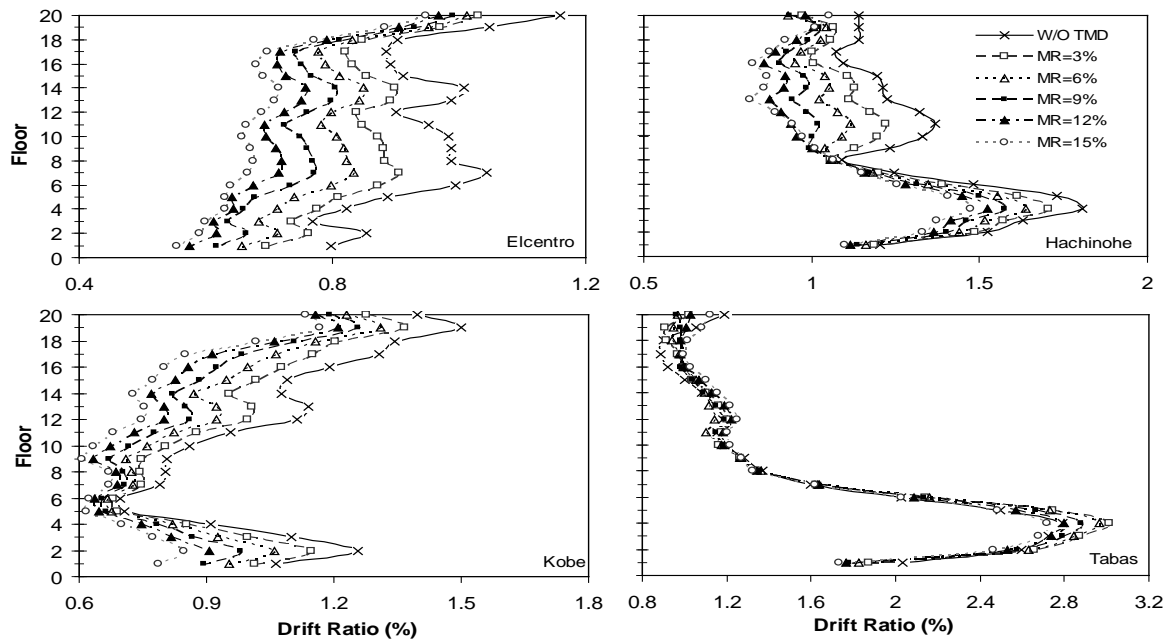


شکل (۲): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۳ طبقه‌ی کنترل نشده و کنترل شده تحت اثر زلزله‌های مختلف با یکسان PGA

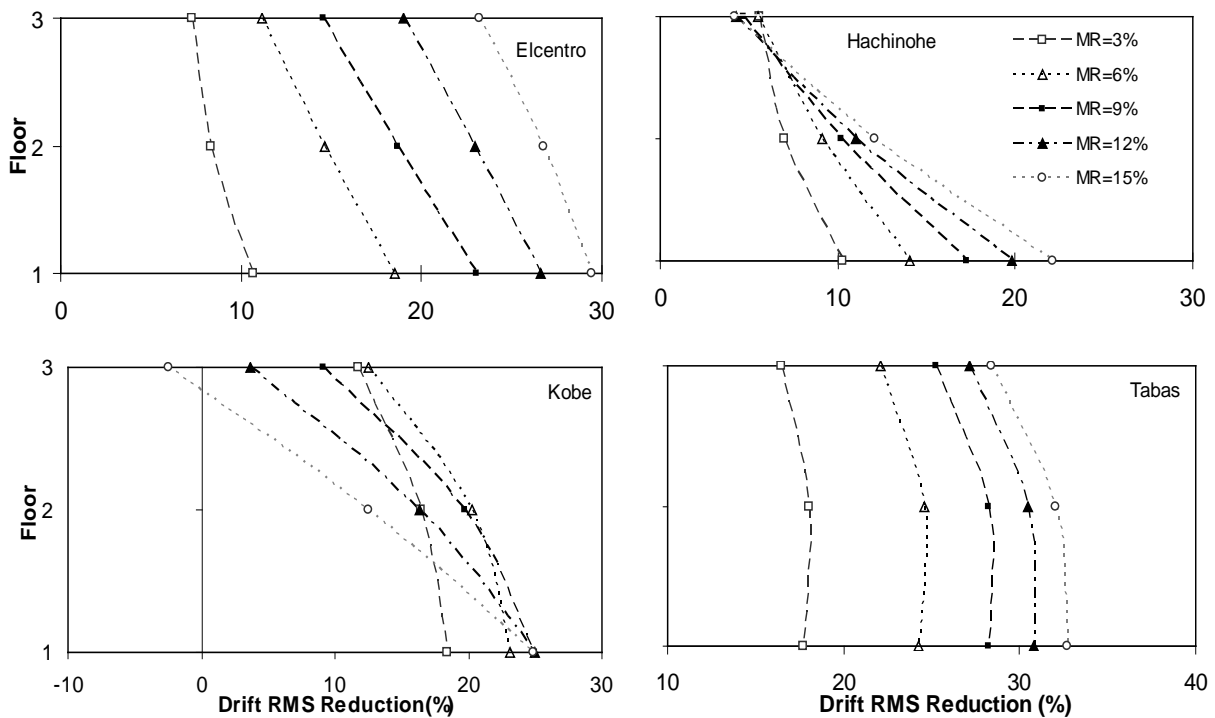


شکل (۳): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۹ طبقه‌ی کنترل نشده و کنترل شده تحت اثر زلزله‌های مختلف با یکسان PGA

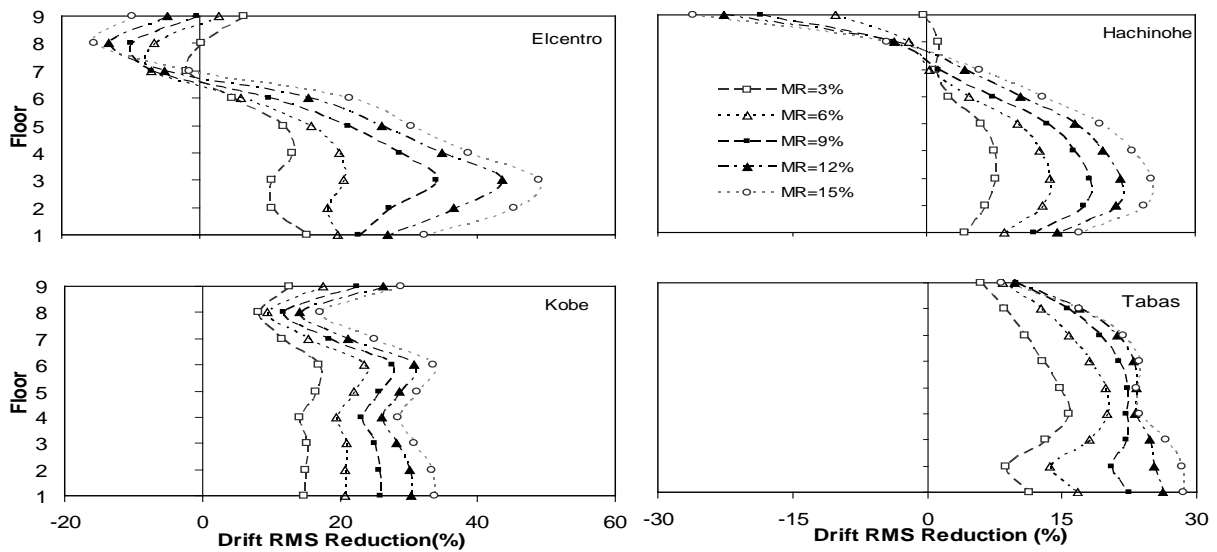




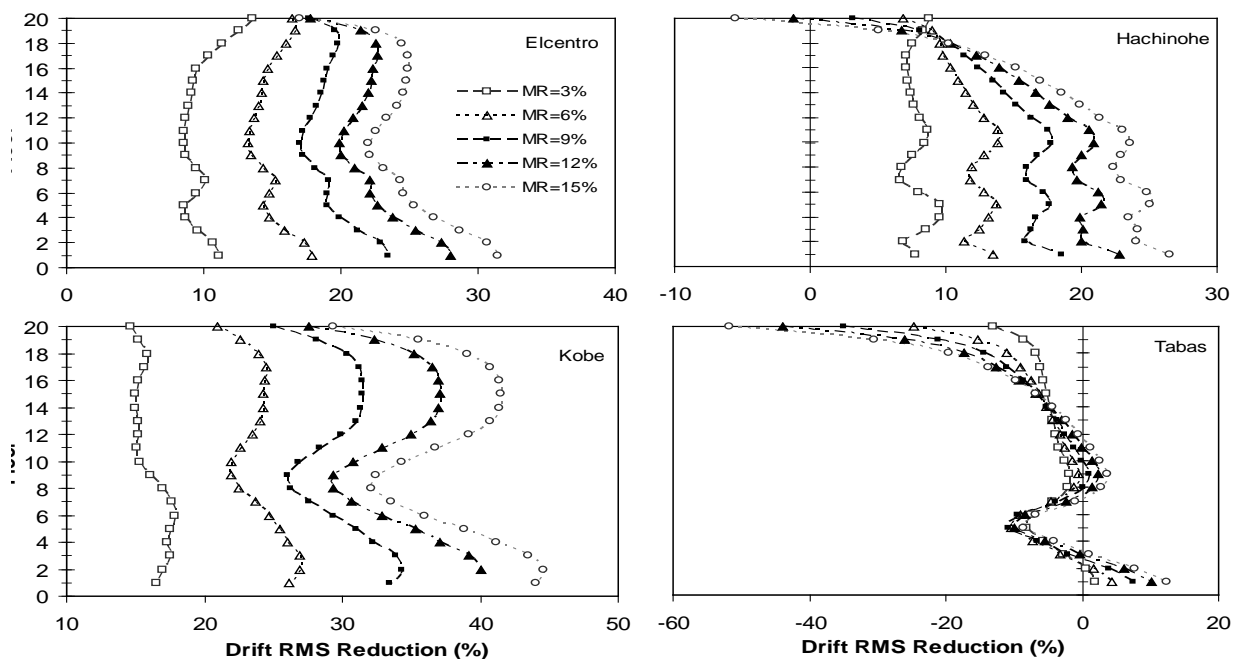
شکل (۴): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی کنترل نشده و کنترل شده تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان



شکل (۵): درصد کاهش RMS نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۳ طبقه‌ی کنترل شده تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان



شکل (۶): درصد کاهش RMS نسبت تغییرمکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۹ طبقه‌ی کنترل شده تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان



شکل (۷): درصد کاهش RMS نسبت تغییرمکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی کنترل شده تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان

تنش-کرنش) یکی از ستون‌های طبقه‌ی اول را به ازای درصد جرمی ۱۲٪ برای TMD نشان می‌دهد. همان طوریکه از شکل‌های فوق معلوم می‌شود منحنی تنش-کرنش ستون‌ها از همان مدلی تبعیت می‌کند که برای

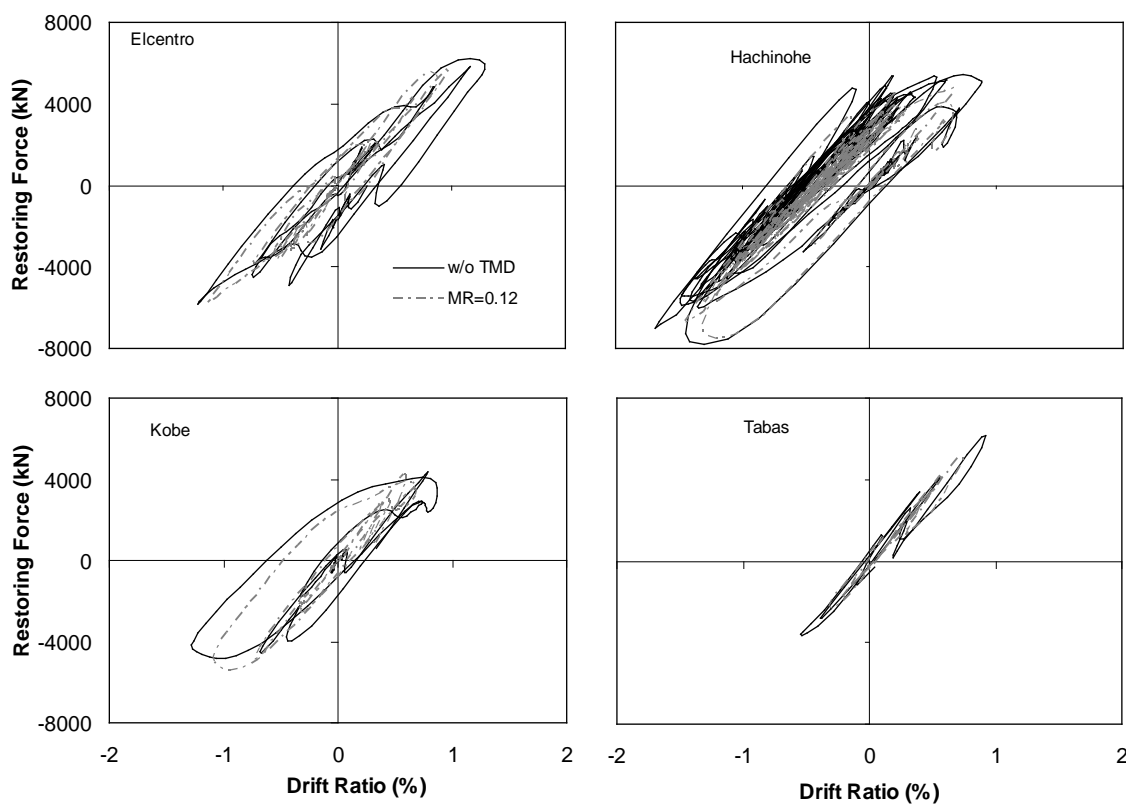
شکل‌های (۸) تا (۱۰) منحنی هیستریسیس (منحنی نیرو- تغییرمکان جانبی نسبی) طبقه‌ی اول سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه و شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) منحنی هیستریسیس (منحنی



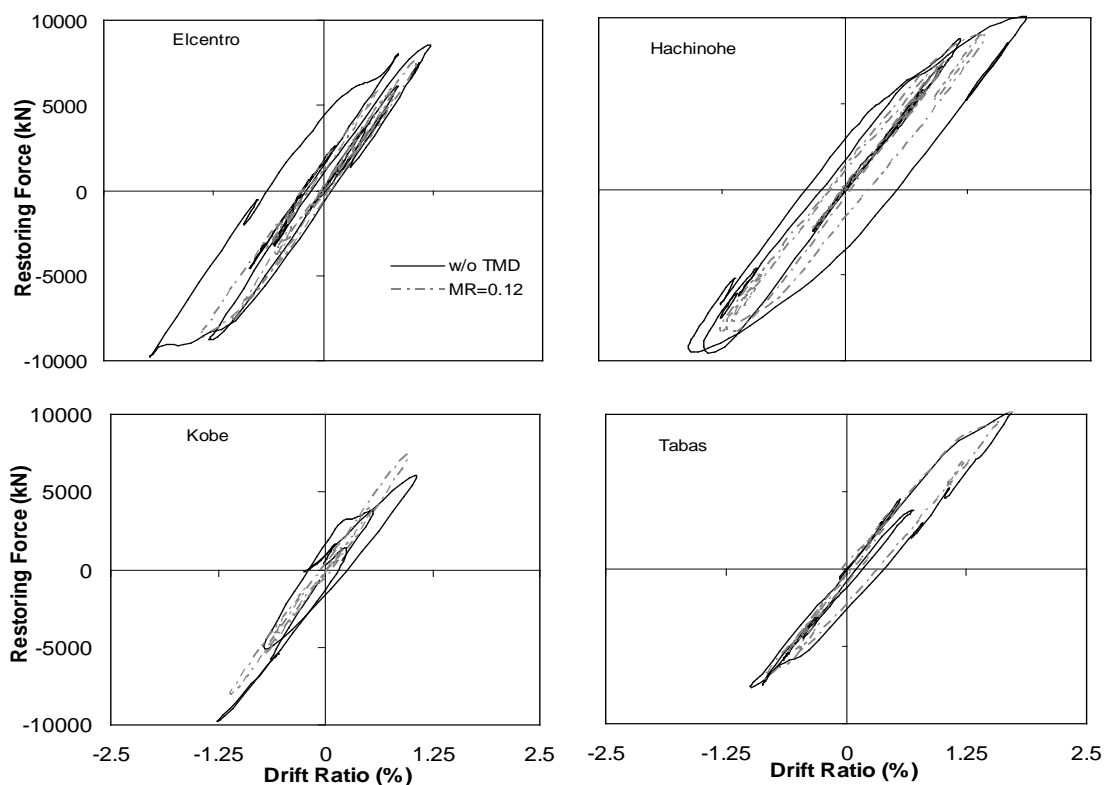
تنش- کرنش مصالح غیرخطی فولاد در مدل‌سازی نظر گرفته شده بود.

از شکل‌های فوق مشخص است که میزان کاهش در تعداد حلقه‌های منحنی هیسترسیس تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان متفاوت می‌باشد. با این حال با کاربرد TMD تعدادی از حلقه‌های هیسترسیس سازه‌ها و برش طبقه تحت هر چهار رکورد مورد بررسی کاهش یافته است که کاهش تعداد حلقه‌های هیسترسیس و میزان غیرخطی شدن رفتار سازه منجر به کاهش میزان انرژی هیسترسیس انباشته شده و در نتیجه خرابی سازه می‌گردد.

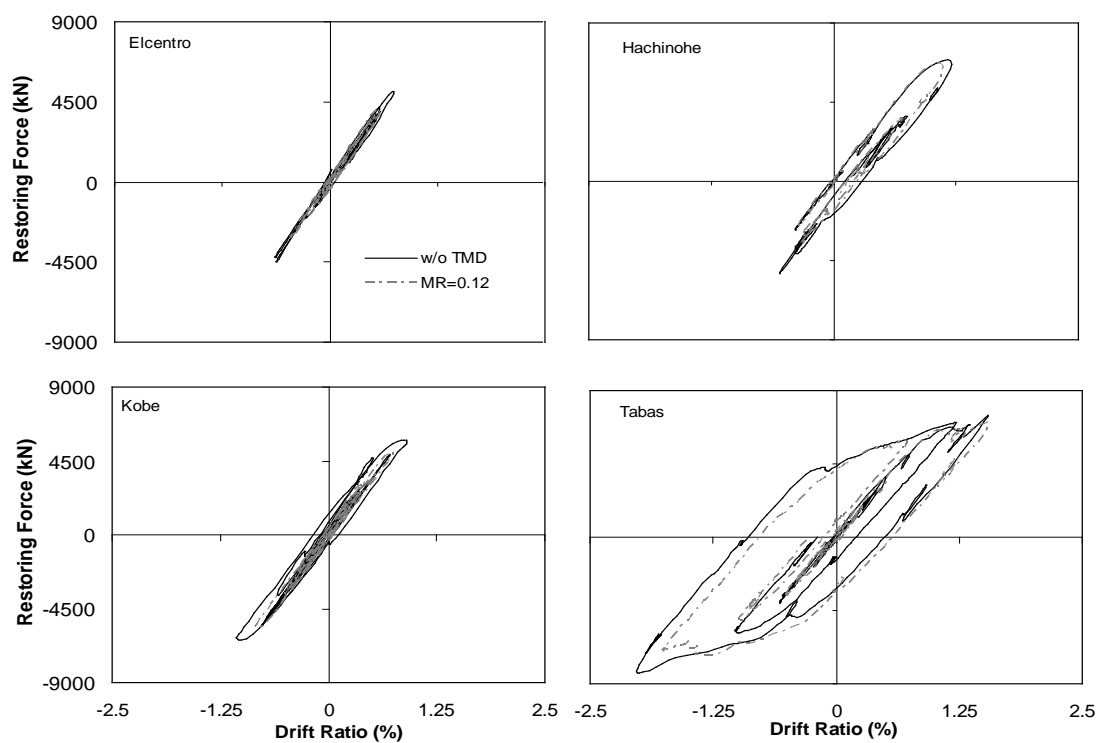
در شکل (۱۳) که نمایانگر منحنی هیسترسیس سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله‌های مختلف می‌باشد، ستون مورد بررسی در دو زلزله دورگسل دارای رفتار خطی بوده اما در دو زلزله نزدیک گسل بخصوص زلزله طبس تغییرشکل‌های پلاستیک زیادی را متحمل شده است. بررسی‌های عددی به ازای سایر مقادیر جرمی نشان می‌دهد که با افزایش جرم میراگر، میزان کارایی آن در کاهش حلقه‌های هیسترسیس و میزان انرژی هیسترسیس انباشته شده افزایش می‌یابد که به خاطر حجم مقاله در این قسمت آورده نشده است.



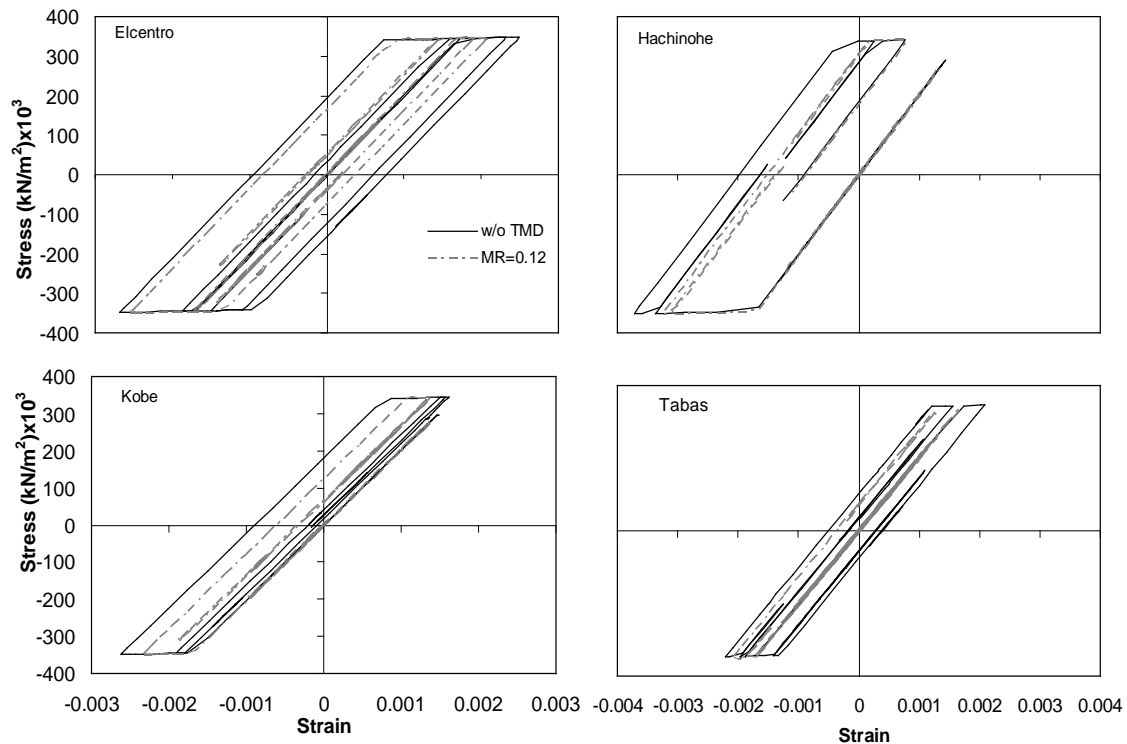
شکل (۸): منحنی هیسترسیس طبقه اول سازه‌ی ۳ طبقه تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان به ازای نسبت جرم ۱۲ درصد برای TMD



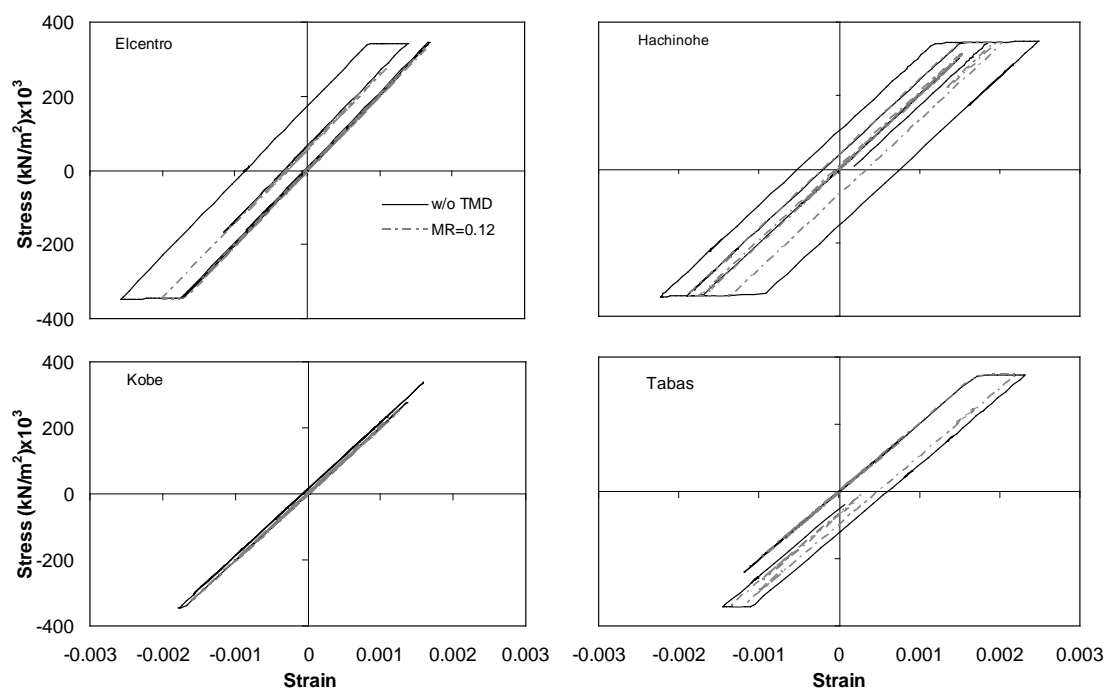
شکل (۹): منحنی هیستریسیس طبقه اول سازه‌ی ۹ طبقه تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان به ازای نسبت جرم ۱۲ درصد برای TMD



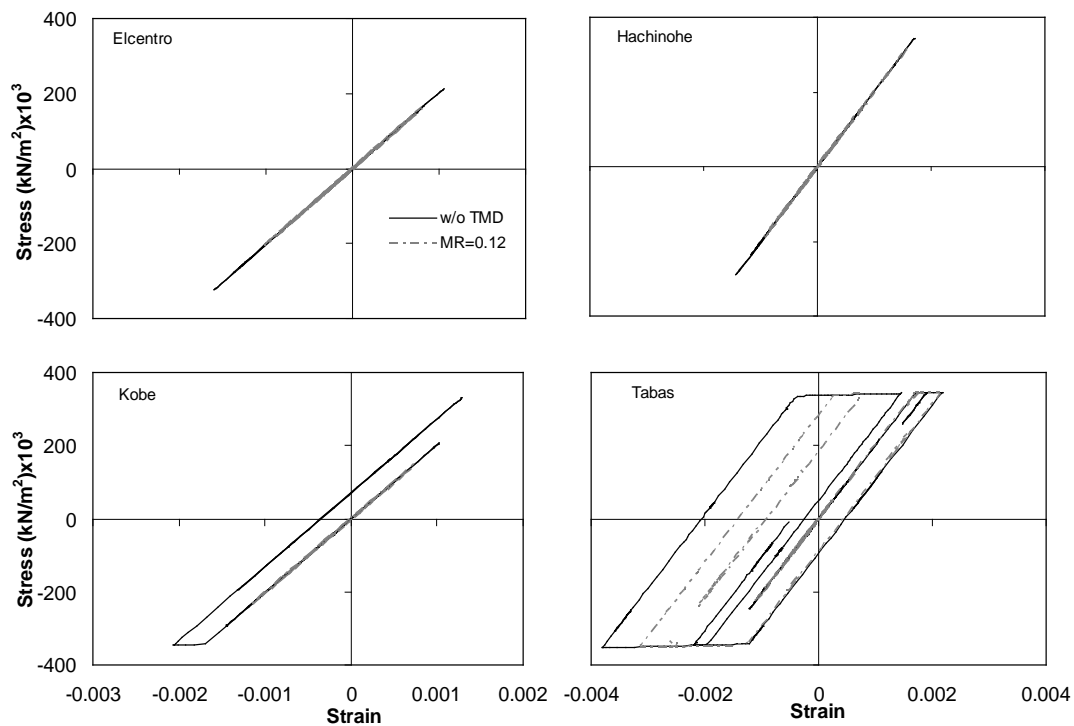
شکل (۱۰): منحنی هیستریسیس طبقه اول سازه‌ی ۲۰ طبقه تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان به ازای نسبت جرم ۱۲ درصد برای TMD



شکل (۱۱): منحنی هیسترسیس یکی از ستون‌های طبقه اول سازه‌ی ۳ طبقه تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان



شکل (۱۲): منحنی هیسترسیس یکی از ستون‌های طبقه اول سازه‌ی ۹ طبقه تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان



شکل (۱۳): منحنی هیستریسیس یکی از ستونهای طبقه اول سازه‌ی ۲۰ طبقه تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA یکسان

۴-۲- بررسی اثر شدت زلزله در عملکرد TMD:

در سازه‌های با رفتار خطی در صورتیکه TMD برای یک زلزله مشخص بصورت بهینه طراحی شود افزایش یا کاهش شتاب ماکزیمم زلزله تاثیری در مقدار پارامترهای بهینه‌ی آن نخواهد داشت. به عنوان مثال در صورت استفاده از روش سادک و همکاران، با دقت در معادلات (۱) و (۲) که مقدار پارامترهای بهینه‌ی TMD را نتیجه می‌دهند معلوم می‌شود که مقدار شتاب ماکزیمم زلزله در معادلات فوق وارد نمی‌شود. این نتیجه گیری برای سایر روشها نظیر روش هادی و ارفیادی [۴] هم صادق است که با آنالیز عددی می‌توان به این نتیجه رسید که به خاطر حجم مقاله نتایج مثال عددی آورده نشده است. جهت بررسی اثر حداکثر شتاب زلزله در طراحی TMD روی سازه‌های با رفتار غیرخطی، در این بخش کارایی TMD بر روی سازه‌های غیرخطی فلزی تحت اثر یک زلزله مشخص با شتاب‌های ماکزیمم مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه تحت اثر زلزله‌ی السترو با ضرایب مقیاس متفاوت (Ω) قرار گرفته است بطوریکه برای زلزله السترو با شتاب ماکزیمم

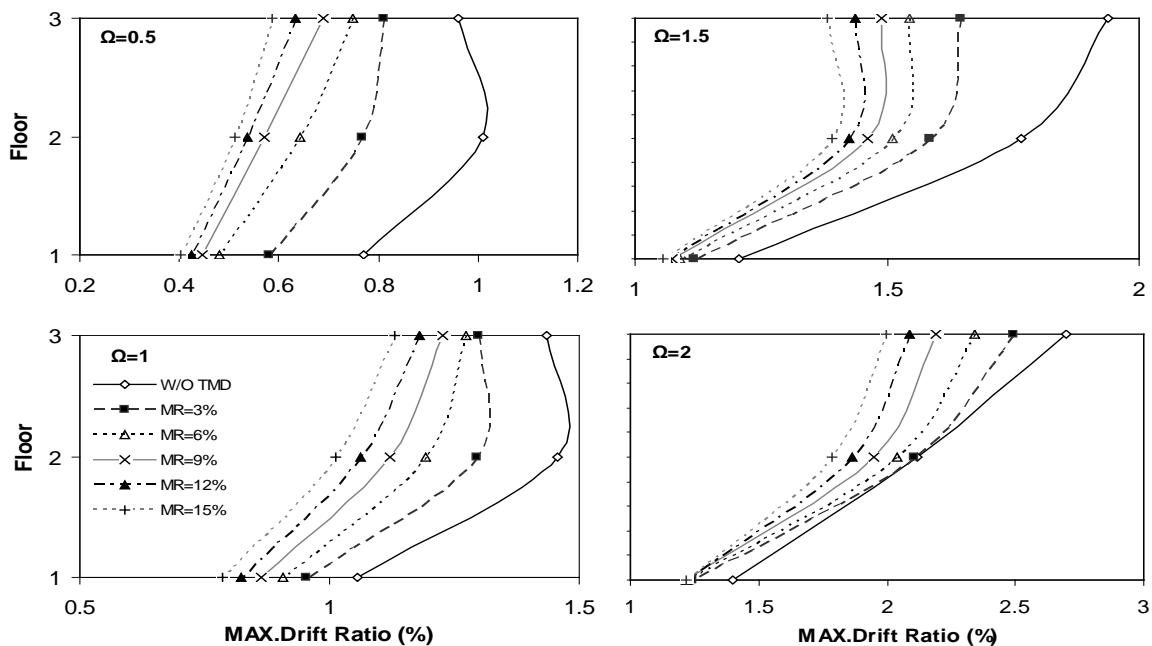
$PGA = 0.348g$ ، شتاب ماکزیمم (PGA_{max}) زلزله مقیاس شده برابر است با:

$$PGA_{max} = \Omega PGA \quad (۸)$$

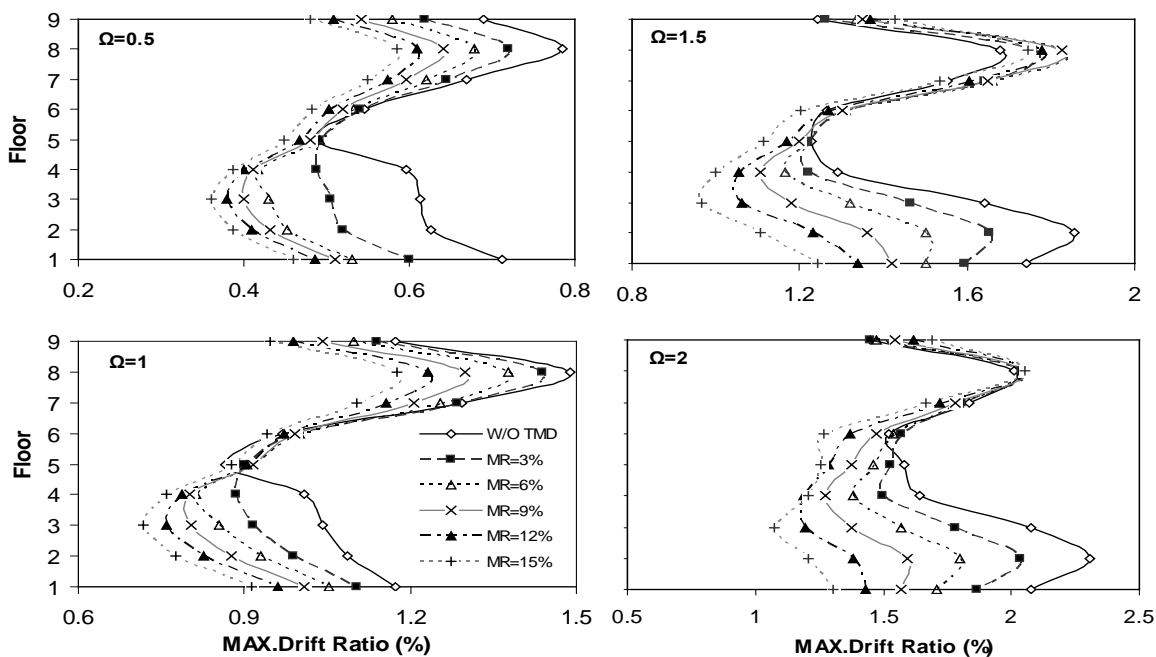
به ازای درصد جرمی و ضرایب مقیاس مختلف، ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌های کنترل شده و کنترل نشده تحت اثر زلزله‌ی السترو در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) و میزان کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی در شکل (۱۷) آورده شده است.

نتایج بررسی فوق نشان می‌دهد که برای یک درصد جرم مشخص، کارایی TMD وابسته به حداکثر شتاب زلزله ورودی می‌باشد که این نتیجه گیری در سازه‌های با رفتار خطی اتفاق نمی‌افتد. بطوریکه در مثال مورد بررسی برای سازه‌ی ۳ طبقه تحت اثر زلزله‌ی السترو با افزایش حداکثر شتاب زلزله عملکرد آن بدتر شده است. در حالیکه در سازه ۲۰ طبقه برعکس آن اتفاق می‌افتد. بنابراین در طراحی مکانیزم TMD در کاربردهای عملی در یک منطقه، بایستی شتاب ماکزیمم مناسبی برای زلزله‌ی طراحی بر اساس مشخصات زلزله‌های آن منطقه انتخاب نمود.

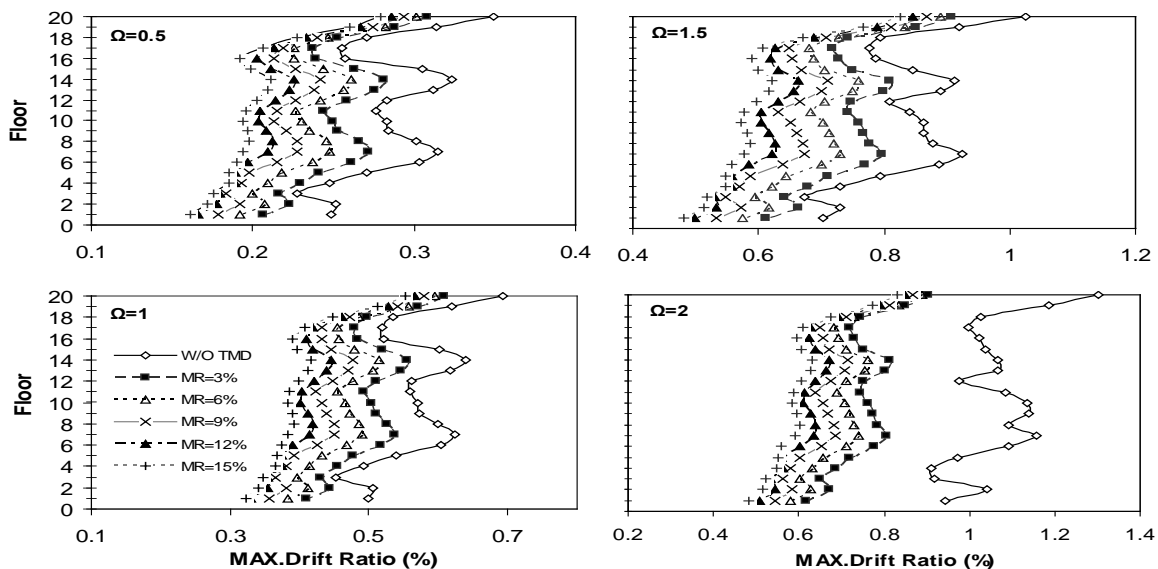




شکل (۱۴): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۳ طبقه تحت اثر شتاب‌های ماکزیمم مختلف زلزله‌ی السسترو



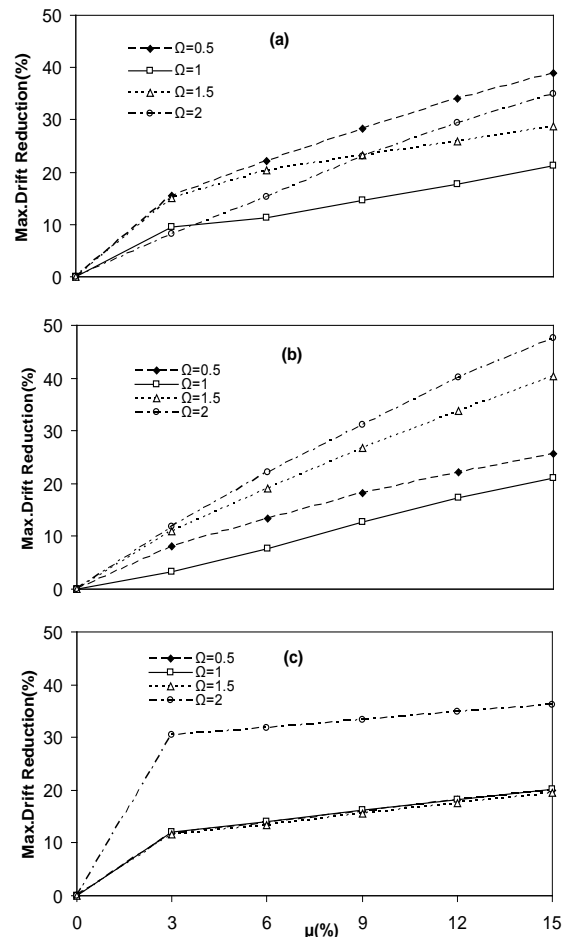
شکل (۱۵): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۹ طبقه تحت اثر شتاب‌های ماکزیمم مختلف زلزله‌ی السسترو



شکل (۱۶): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی ۲۰ طبقه تحت اثر شتاب‌های ماکزیمم مختلف زلزله‌ی السترو

۳-۴- طراحی بهینه‌ی سیستم TMD

همانطوریکه اشاره گردید در مطالعات مربوط به کاربرد TMD در سازه‌های غیرخطی با رفتار واقعی، روش مشخصی برای تعیین پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده ارائه نگردیده است. بطوریکه در پژوهش‌های قبلی در بررسی عملکرد TMD روی سازه‌های غیرخطی، TMD بر اساس روابط ارائه شده برای سازه‌های با رفتار خطی طراحی شده است [۱۶]. در صورتیکه سازه‌ها تحت اثر زلزله وارد ناحیه‌ی غیرخطی شوند TMD از حالت تنظیم خارج شده و کارایی آن کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج بدست آمده از قسمت‌های قبلی بیانگر وابسته بودن عملکرد TMD به زلزله ورودی و مشخصات سازه مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین در این بخش به طراحی بهینه‌ی مکانیزم TMD بر روی سازه‌های فلزی غیرخطی بر مبنای آنالیز حساسیت انجام می‌شود. برای این منظور به ازای جرم مشخصی برای TMD، با انجام آنالیز حساسیت به بررسی اثر تغییرات سختی و میرایی TMD در عملکرد این مکانیزم تحت اثر یک زلزله‌ی مشخص پرداخته می‌شود. برای این منظور سازه‌ی ۲۰ طبقه تحت زلزله‌ی السترو قرار گرفته و برای TMD با نسبت جرم ۶ درصد مقادیر سختی و میرایی مطابق با روش سادک و همکارانش [۳] تعیین



شکل (۱۷): درصد کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه‌ی (a) ۳ طبقه (b) ۹ طبقه (c) ۲۰ طبقه تحت اثر شتاب‌های ماکزیمم مختلف زلزله‌ی السترو

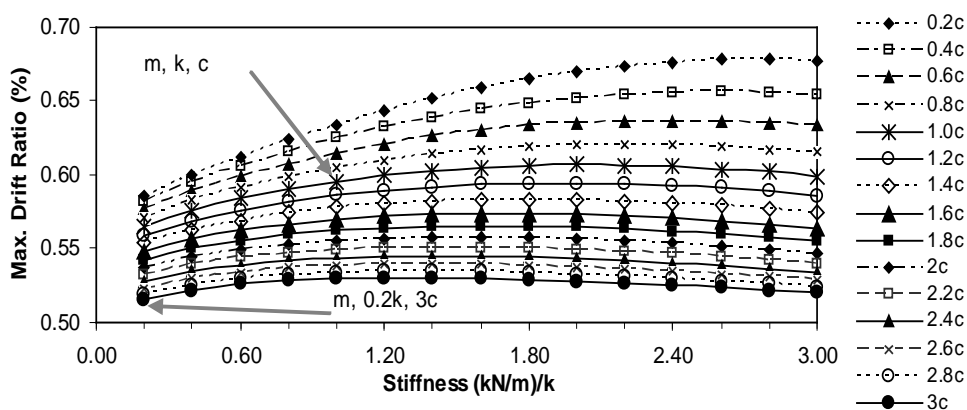


بر سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی غیرخطی تحت زلزله‌ی السترو انتخاب می‌گردد.

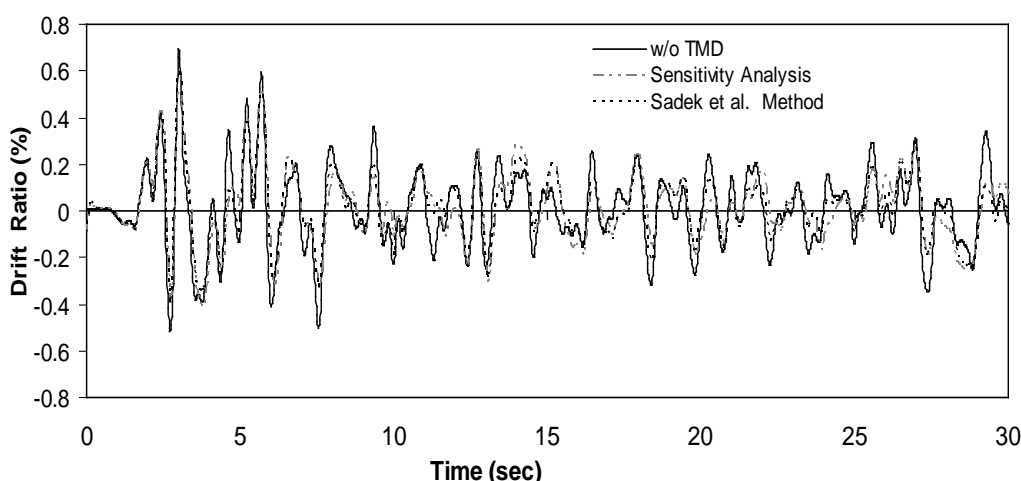
در دامنه در نظر گرفته شده برای تغییرات k و c ، مقدار بهینه‌ی پارامترهای TMD بصورت $(m, 0.2k, 3c)$ تعیین می‌گردد که با مقدار اولیه (m, k, c) بدست آمده با روش سادک و همکارانش که برای سازه با رفتار خطی ارائه شده است متفاوت می‌باشد. شکل (۱۹) تغییرات نسبت ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه کنترل نشده و کنترل شده را با روش آنالیز حساسیت و روش سادک و همکارانش نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۲۰) ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات برای سازه‌های کنترل نشده و کنترل شده آورده شده است.

می‌شود که مقادیر بدست آمده برای c_{TMD} ، k_{TMD} و m_{TMD} به عنوان مقدار اولیه جهت انجام ترکیبات مختلف از پارامترهای TMD استفاده می‌شود. بازه‌ی تغییرات دو پارامتر سختی و میرایی به ترتیب بین $(0.2k$ و $3k)$ و $(0.2c$ و $3c)$ و گام تغییرات 0.2 بوده است. برای مقادیر مختلف پارامترهای میرایی و سختی میراگر جرمی تنظیم شده، مقدار ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه ۲۰ طبقه‌ی کنترل شده با TMD محاسبه و در شکل (۱۸) آورده شده است.

پارامترهای میراگر جرمی که بهترین کارایی را در کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه داشته به عنوان پارامترهای بهینه‌ی TMD در نسبت جرم ۶ درصد



شکل (۱۸): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی سازه‌ی ۲۰ طبقه تحت زلزله‌ی السترو به ازای پارامترهای مختلف میرایی و سختی TMD



شکل (۱۹): تاریخچه زمانی نسبت تغییر مکان جانبی نسبی ماکزیمم سازه‌ی ۲۰ طبقه‌ی کنترل نشده و کنترل شده با TMD

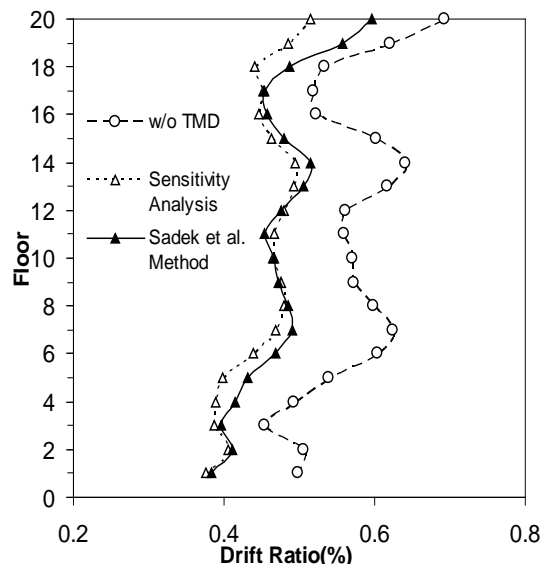
نرم افزار OpenSees مدل سازی شده و به ازای درصد جرم های مختلف TMD، کارایی این مکانیزم بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز عددی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- برای مدل سازی رفتار واقعی سازه های فلزی غیرخطی مجهز شده به میراگر جرمی تنظیم شده، نرم افزار OpenSees قابلیت خوبی به لحاظ دقت و امکانات مدل سازی دارا می باشد.

۲- به ازای افزایش درصد جرمی از ۳ تا ۱۵ درصد، افزایش جرم میراگر عموماً باعث افزایش کارایی این مکانیزم تحت اثر زلزله های نزدیک گسل و دور گسل می گردد (مگر در موارد خاصی که با افزایش جرم کارایی آن کاهش یابد). بررسی انجام گرفته روی تاثیر محتوای فرکانسی زلزله ها بر عملکرد TMD نشان می دهد که به ازای مقادیر مختلف درصد جرمی، عملکرد TMD در سازه های با رفتار غیرخطی وابسته به محتوای فرکانسی زلزله های ورودی می باشد. بطوریکه در مثال مورد بررسی بهترین کارایی تحت اثر زلزله ی السنترو در سازه ی ۳ طبقه بوده است.

۳- بر اساس نتایج حاصله از مطالعه اثر حداکثر شتاب یک زلزله مشخص در کارائی TMD می توان گفت که در یک زلزله با محتوای فرکانسی مشخص، عملکرد TMD وابسته به حداکثر شتاب زمین می باشد. بطوریکه در مثال های مورد بررسی برای سازه ۳ طبقه تحت اثر زلزله ی السنترو با افزایش حداکثر شتاب زلزله عملکرد آن بدتر شده است. در حالیکه در سازه ی ۲۰ طبقه برعکس آن اتفاق می افتد. بنابراین ضروری است که در طراحی TMD برای سازه های غیرخطی در یک منطقه مشخص، از رکورد زلزله ی مناسب که بر اساس اطلاعات زلزله ی منطقه انتخاب می شود، با حداکثر شتاب زمین مناسب استفاده شود.

۴- بر اساس نتایج حاصله که نشان می دهد عملکرد TMD بر روی یک سازه غیرخطی فلزی وابسته به مشخصات سازه و هم چنین زلزله ورودی می باشد، استفاده از روش های ارائه شده برای طراحی TMD در سازه های با رفتار خطی که مستقل از زلزله ی ورودی می باشند،



شکل (۲۰): ماکزیمم نسبت تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه ی ۲۰ طبقه ی کنترل نشده و کنترل شده با TMD

نتایج بدست آمده نشان می دهد که برای مطالعه موردی حاضر، استفاده از روش آنالیز حساسیت برای طراحی TMD باعث کاهش حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی در حدود ۲۵/۵٪ می گردد در حالیکه در روش سادک و همکارانش درصد کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی در حدود ۱۴٪ بوده است. بنابراین می توان گفت که برای طراحی TMD در سازه های با رفتار غیر خطی استفاده از روش های ارائه شده برای سازه های خطی کارایی زیادی نداشته و در این سازه ها جهت بالا بردن کارایی TMD بایستی مقادیر پارامترهای آن به نحو مناسبی نظیر روش آنالیز حساسیت یا روش های بهینه سازی جهت پایین آوردن حجم محاسبات تعیین شود که مقادیر بهینه ی بدست آمده وابسته به مشخصات رکورد زلزله و سازه ی مورد نظر خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به ارزیابی تاثیر میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) در بهبود رفتار لرزه ای سازه های فلزی غیرخطی که با رفتار خمشی مدل سازی می شوند، پرداخته می شود. بدین منظور سازه های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه دو بعدی مجهز شده به TMD تحت اثر زلزله های نزدیک گسل و دورگسل در



[10] Kaynia, N.M., Veneziano, D. and Biggs, J.M. (1981), "Seismic effectiveness of tuned mass dampers", Journal of Structural Division, Vol. 107, No. 8, pp. 1465-1484.

[11] Bernal, R. (1996), "Influence of Ground Motion Characteristics on the Effectiveness of Tuned Mass Dampers", Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, Paper No.1455.

[12] Soto-Brito, R. and Ruiz, S.E. (1999), "Influence of Ground Motion Intensity on the Effectiveness of Tuned Mass Dampers", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 28, pp.1255-1271.

[13] Wong, K.K.F. (2008), "Seismic Energy Dissipation of Inelastic Structures with Tuned Mass Dampers", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 134, No. 2, pp.163-172.

[14] Joghataie, A. and Mohebbi, M. (2010), "Confined Masonry Walls Seismic Response Mitigation using TMDs", 5th Word Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), 12-15July, Tokyo, Japan, No. 245.

[15] Mohebbi, M. and Joghataie, A. (2012), "Designing Optimal Tuned Mass Dampers for Nonlinear Frames by Distributed Genetic Algorithms", Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 21, pp. 57-76.

[16] Lukkunaprasit, P. and Wanitkorkul, A. (2001), "Inelastic Buildings with Tuned Mass Dampers under Moderate Ground Motions from Distant Earthquakes", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 30, pp. 537-551.

[17] Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P. and Chatupote, P. (2003), "Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures", Engineering Structures, Vol. 25, pp. 39-46.

[18] Gupta, A. and Krawinkler, H. (2000), "Estimation of Seismic Drift Demands for Frame Structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, No. 9, pp. 1287-1305.

نمی‌تواند روش مناسبی برای طراحی TMD در سازه‌های غیر خطی باشد. بطوریکه در مثال ۲۰ طبقه‌ی مورد بررسی مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش سادک و همکارانش که روش موثری برای سازه‌های خطی می‌باشد در سازه‌های غیرخطی زیاد موثر نبوده است.

۵- برای افزایش کارایی TMD بر روی سازه‌های فلزی غیر خطی تحت اثر یک زلزله مشخص، مقادیر بهینه‌ی سختی و میرایی TMD بایستی برای سازه و زلزله‌ی مورد نظر تعیین شود که می‌توان از روش آنالیز حساسیت جهت بالا بردن کارایی TMD یا روش‌های بهینه سازی استفاده نمود.

۶- مراجع

[1] Frahm, H. (1909), "Device for Damping Vibrations of Bodies", US patent #989958.

[2] Warburton, G.B. (1982), "Optimal Absorber Parameters for various Combinations of Response and Excitation Parameters", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 8, pp. 197-217.

[3] Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M. (1997), "A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications", Earthquake Engineering & Structural Dynamic, Vol. 26, pp. 617-635.

[4] Hadi, N. S. and Arfiadi, Y. (1998), "Optimum Design of Absorber for MDOF Structures", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 11, pp. 1272-1280.

[5] Luft, R.W. (1979), "Optimal Tuned Mass Dampers for Buildings", Journal of Structural Division, ASCE Vol. 105, No. 12, pp. 2766-2772.

[6] Golafshani, A.A. and Gholozad A. (2009), "Passive Devices for Wave Induced Vibration Control in Offshore Platforms", Scientica Iranica, Vol. 16, No. 6, pp. 443-456.

[7] Zahrai, S.M. and Ghannadi-Asl, A. (2008), "Seismic Performance of TMDs in Improving the Response of MRF Buildings", Scientica Iranica, Vol. 15, No. 1, pp. 21-33.

[۸] زهرایی، س.م.، صادق آذر ح. و زینالی، ر. (۱۳۹۰)، "بررسی عملکرد سه روش کنترل غیرفعال در بهبود پاسخ لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحات ۴۳۶-۴۲۹.

[9] Mohtat, A. and Dehghan-Niri, E. (2011), "Generalized Frame Work for Robust Design of Tuned Mass Damper System", Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, No. 5, pp. 902-922.