

کنترل همزمان شتاب و تغییر مکان لرزه ای سازه های نامتقارن خطی و غیر خطی با استفاده از میراگرهای جرمی

حسین جدیدیانⁱ; عبدالرضا سروقد مقدمⁱⁱ

چکیده

آسیب پذیری سازه های نامتقارن در اثر زلزله ناشی از تغییر شکلهای پیچشی اضافی است که به علت نامتقارنی ایجاد می گردد. تحقیقات اخیر نشان داده است که میراگر جرمی تنظیم شده می تواند پاسخ تغییر مکان حداکثر این سازه ها را به طور مناسبی کاهش دهد. ولی در اکثر سازه ها کاهش همزمان شتاب و تغییر مکان دو لبه از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین کنترل پیچش در این سازه ها با نزدیک نمودن تغییر مکان دو لبه پلان به هم و نزدیک نمودن شتاب دو لبه پلان به هم امکان پذیر می باشد. در این مقاله کنترل رفتار سازه های خطی و غیر خطی با خصوصیات مختلف پیچشی با استفاده از این میراگر با مشخصات و موقعیتهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور کاهش حداکثر پاسخهای شتاب و تغییر مکان دو لبه سخت و نرم سازه و نسبت پاسخهای دولبه تحت تاثیر نگاشتهای تک مولفه ای حوزه دور محاسبه شدند. نتایج نشان داد که سیستم میراگر کارایی بالایی در کنترل همزمان شتاب و تغییر مکان دو لبه و کنترل پیچش سازه های خطی داشته و با افزایش نسبت جرم، کارایی افزایش می یابد. برای سازه های با خصوصیت پیچشی نرم، نصب میراگر در لبه سخت و هر دولبه مناسب ترین حالت می باشد. در سازه های غیر خطی عملکرد سیستم در کنترل همزمان شتاب و تغییر مکان موفقیت آمیز نیست.

کلمات کلیدی: سازه های نامتقارن، پیچش، میراگر جرمی تنظیم شده، کنترل همزمان.

// :

// :

ⁱ دانشجوی دکترای سازه و زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران: h_jadidian@yahoo.com

ⁱⁱ استادیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله: moghadam@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

وسایل میراگر مکانیکی و استهلاک انرژی زلزله بدون ایجاد آسیب قابل توجه در اجزای سازه ای. در طراحی نوع دوم به جای اینکه انرژی در اثر جاری شدن و صدمه دیدن یک عضو مستهلک شود در اثر تغییرشکلهای و ارتعاش میراگر مستهلک می شود. استفاده از میراگرها علاوه بر افزایش قابلیت استهلاک انرژی باعث کاهش پاسخ سازه در برابر زلزله نیز می شود و از این طریق

دو نوع فلسفه متفاوت برای طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله وجود دارد: الف) طراحی شکل پذیر به طوریکه تحت زلزله های شدید سازه تغییرشکلهای قابل توجهی را تحمل نموده و از طریق رفتار غیر خطی انرژی زلزله را مستهلک نماید و ب) افزایش میرایی سازه با استفاده از

صدمه به اجزای غیر سازه ای نیز کاهش می یابد. از بررسی عملکرد ساختمانها در زلزله های گذشته دیده می شود که عموماً ساختمانهای نامتقارن نسبت به ساختمانهای متقارن در اثر زلزله دچار آسیبهای بیشتری شده و احتمال فروریزش آنها بیشتر است. آسیب پذیری این نوع ساختمانها در نتیجه لنگرهای پیچشی و تغییرمکانهای دورانی اضافی است که در اثر نامتقارنی در پلان ساختمان ایجاد شده و سبب افزایش تغییرمکان به ویژه در وجوه بیرونی ساختمان می گردند. عدم تقارن در ساختمان می تواند ناشی از توزیع نامتقارن جرم در دیافراگمهای ساختمان و یا در اثر توزیع نامتقارن سختی در المانهای مقاوم جانبی باشد. عدم توزیع یکنواخت جرم یا سختی باعث اختلاف در نقطه اثر برآیند نیروهای ناشی از زلزله و نیروهای المانهای مقاوم جانبی شده و این خروج از مرکزیت باعث ایجاد لنگرهای پیچشی در دیافراگمهای صلب ساختمان می گردد.

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) یکی از ساده ترین و قابل اعتماد ترین ابزارهای کنترل می باشد که شامل یک جرم، یک فنر و یک میراگر ویسکوز است که به سازه متصل می گردد. مکانیزم کاهش ارتعاش این سیستم، انتقال انرژی ارتعاش سازه به TMD و استهلاك آن توسط میرایی TMD می باشد.

در این تحقیق مدل‌های یک طبقه نیم متقارن (عدم تقارن در یک جهت) با المانهای مقاوم در دو جهت با خروج از مرکزیت های مختلف جرم و مشخصات پیچشی متفاوت و دارای یک یا دو TMD با مشخصات مختلف نصب شده در موقعیتهای متعدد در پلان تحت تاثیر زلزله های تک مولفه ای مورد بررسی قرار گرفته اند. هدف از انجام تحقیق کنترل همزمان تغییرمکان و شتاب لرزه ای وجوه بیرونی و کنترل شتاب و تغییرمکان دورانی و نزدیک کردن شتاب و تغییر مکان دو وجه پلان به یکدیگر در سازه های خطی و غیر خطی می باشد.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

اخیراً تحقیقات زیادی بر روی کنترل سازه ها توسط TMD انجام شده است که می توان این تحقیقات را به چند بخش تقسیم نمود.

- تحقیقات انجام شده بر روی کنترل سازه های متقارن توسط یک و چند TMD
- تحقیقات انجام شده بر روی کنترل سازه های نامتقارن با یک و چند TMD
- تحقیقات انجام شده بر روی کنترل سازه های نامتقارن با استفاده از انواع میراگرها.

فرمولهای طراحی برای دستیابی به کنترل بهینه TMD توسط مرجع [۱] ارائه شده است. در مرجع [۱۹] برای یافتن پارامترهای بهینه TMD روش Villaverde [۲۱] با یکسان نمودن میرایی دو مود اول ارتعاش برای کاهش پاسخ لرزه ای توسعه داده شد. مطالعه پارامتریک و طراحی ساده شده TMD نیز توسط مرجع [۱۸] با استفاده از پاسخ حالت ماندگار تحریک هارمونیک و تحلیل تاریخی زمانی انجام گردید. به علاوه مطالعه ای بر روی امکان کنترل چندین مود توسط TMD چند مودی با تنظیم هر TMD به مود کنترلی مربوطه صورت گرفت. معایب اصلی TMD تکی، حساسیت کارایی آن به نوسان تنظیم فرکانس طبیعی سازه و نسبت میرایی TMD می باشد. خصوصیات دینامیکی سازه تحت زلزله های شدید در اثر کاهش سختی سازه تغییر می کند. این تغییر، کارایی TMD تکی را به طور قابل ملاحظه ای به علت به هم ریختن تنظیم فرکانس و نسبت میرایی کاهش می دهد. در نتیجه به کارگیری چند TMD با مشخصات دینامیکی متفاوت به منظور بهبود کارایی و هوشمندی TMD تکی پیشنهاد شده است. در مرجع [۸] نوعی TMD دوگانه با نام ۲TMD ارائه داده شد و تحقیقی بر روی طراحی بهینه این نوع TMD برای ارتعاش اجباری هارمونیک سازه انجام گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که هرچند ۲TMD کارا تر از TMD تکی بوده ولی این افزایش کارایی قابل توجه نیست. استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD) با فرکانس گسترده توسط Igusa & Xu [۷] پیشنهاد گردید و فرمول ساده ای برای میرایی اضافی معادل ارائه شد. میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD) با فرکانس طبیعی گسترده در مرجع [۲۳] مطالعه گردیده است. نشان داده شد MTMD در کاهش ارتعاشات سازه در مقایسه با TMD تکی بسیار کارا تر است. یافته های این مطالعه عملکرد مناسب MTMD در

سیستم ایده آل دو درجه آزادی به عنوان سیستم دو درجه آزادی تعمیم یافته نامتقارن با پاسخ غالب جانبی و پیچشی تحت تحریک زلزله در نظر گرفته می شود. در چنین حالتی به جای استفاده از جرم واقعی، جرم های تعمیم یافته جانبی و پیچشی معرفی می گردند ([۵]).

MTMD برای کنترل پاسخ های جانبی و پیچشی چنین سیستم دو درجه آزادی تعمیم یافته ای مورد استفاده قرار می گیرد. این مفهوم به سادگی توسط روش کاهش درجه مودی قابل تعمیم به سازه های چند طبقه نامتقارن می باشد. به علاوه کارایی و هوشمندی استراتژی MTMD با جایگذاریهای متفاوت برای حالت کاهش پاسخ پیچشی سازه های نامتقارن تحقیق و بررسی شده است که راهنمایی خوبی در طراحی MTMD فراهم می کند. ([۵]).

۳- سیستم یک طبقه

۳-۱- سیستم خطی

برای انجام مطالعات بایستی مدلی که در عین سادگی توانایی بیان خصوصیات سیستمهای پیچیده را داشته باشد انتخاب گردد. لذا مدل یک طبقه نیم مقارنی که دارای درجات مختلف خروج از مرکزیت بوده و خصوصیات پیچشی متفاوتی را بتوان با آن بیان نمود انتخاب گردید. در این مدل مرکز سختی بر روی مرکز سطح منطبق بوده و مرکز جرم نسبت به مرکز سختی خروج از مرکزیت دارد. این سیستم دارای دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی می باشد. در شکل (۱) مشخصات مدل انتخابی و حالت های مختلف نصب نمایش داده شده است.

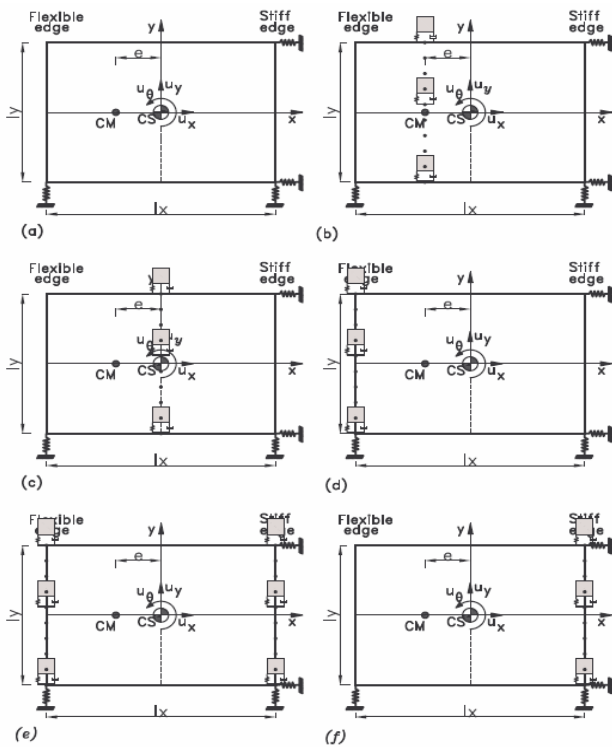
۳-۲- سیستم غیرخطی

مدلهای نامتقارن غیر خطی که در این بخش استفاده گردید در محدوده الاستیک دارای خصوصیتی مشابه سیستمهای خطی استفاده شده در بخش قبل می باشند ولی اعضای سازه ای توانایی تحمل تغییرشکلهای غیر خطی را نیز دارا می باشند. به خاطر کاهش سختی و فرکانس سیستم در اثر رفتار غیر خطی، استفاده از یک یا دو میراگر با نسبت فرکانس برابر یک، برای کنترل شتاب

کاربرد لرزه ای را تایید نمود. MTMD شامل میراگرهای گسترده با جرم کوچک بوده و نیاز به فضای اضافی برای نصب ندارند. مزیت دیگر MTMD این است که به علت جرم کم عملکرد بد یکی از میراگرها باعث اثرات منفی روی پاسخ سازه نمی گردد و لذا راهبرد استفاده از MTMD هوشمند و کارآمد است. اخیرا بر پایه ترکیبات مختلف سختی، جرم و ضریب میرایی در MTMD، پنج مدل MTMD توسط [۱۳] ارائه شده است. مراجع [۱۰] و [۱۴] سعی در تعیین پارامترهای بهینه MTMD برای کاهش پاسخ سازه ها تحت شتاب زلزله نمودند. [۴] Chen & Wu مطالعه ای آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر MTMD روی پاسخ سازه ۳ طبقه انجام دادند. در مطالعه [۱۲] پیشنهادات جدیدی در انتخاب نسبت جرم کل و تعداد کل MTMD با سختی مشخص و ضریب میرایی مشخص اما با نسبت میرایی و جرم متفاوت ارائه شده است. در سالهای اخیر پیشرفتهای زیادی در مطالعه MTMD در کاهش ارتعاشات سازه انجام شده است ولی در بیشتر مطالعات هم در TMD و هم در MTMD فرض شده سازه تنها در یک جهت یا جهت های با خصوصیات مودی غیر وابسته ارتعاش می کند. این فرض تحلیل سیستم را ساده می کند ولی در سازه های واقعی، این فرض همیشه مناسب نیست چون سازه عموماً ارتعاش چند جهته درگیر دارد و لذا کارایی سیستم کنترلی به علت تغییر پارامترها و پراکندگی ایجاد شده به علت درگیری سیستم کاهش می یابد. به علاوه در سازه های واقعی ارتعاشات پیچشی نیز وجود دارد. یعنی یک سازه واقعی، حتی اگر اسما در پلان متقارن باشد واقعا در بعضی از درجات آزادی نامتقارن بوده و ارتعاشات جانبی و پیچشی را به طور همزمان تحت تحریک های جانبی ضعیف تحمل می کند. لذا سیستم کنترلی در چنین حالاتی بایستی با در نظر گرفتن اثرات ارتعاشات درگیر پیچشی-جانبی طراحی گردد. بررسی TMD و MTMD برای سازه های با مودهای ارتعاشی درگیر پیچشی-جانبی توسط [۲]، [۳]، [۹]، [۱۱]، [۱۵]، [۱۷]، [۲۰] و [۲۲] انجام شده است. نظر به کاربردهای عملی MTMD، در نظر گرفتن اثرات درگیری پیچشی در تخمین پارامترهای MTMD ضروری و از نظر عملی جالب است. برای اهداف طراحی،

- خروج از مرکزیت نرمال شده جرم e_x ،
 - نسبت فرکانس پیچشی به انتقالی (Ω_θ) ،
 - نسبت طول به عرض پلان l_x/l_y
- همچنین TMD نیز پارامترهای موثری به صورت زیر دارد:
- جرم که درصدی از جرم سیستم است.
 - موقعیت TMD
 - نسبت فرکانس طبیعی میراگر به فرکانس مود اول سیستم

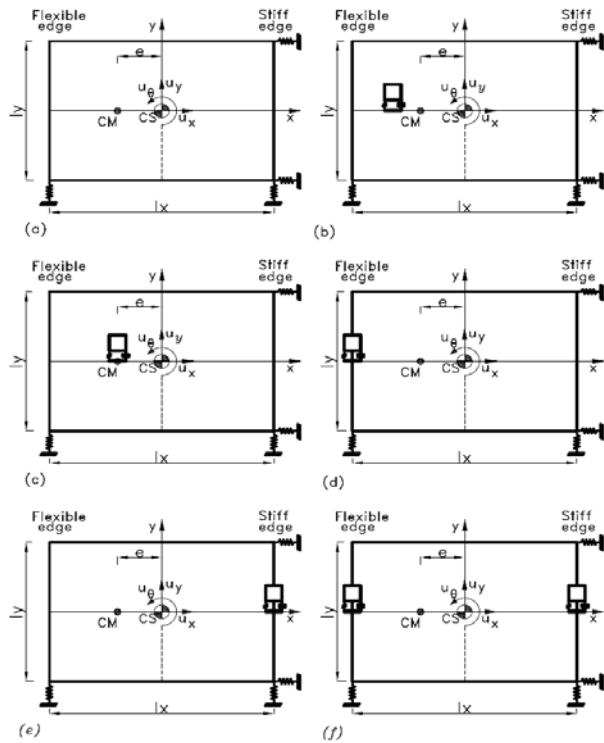
- سختی فنر TMD
- نسبت میرایی میراگر
- تعداد TMD نصب شده.



شکل (۲): مدل‌های مختلف غیر خطی در نظر گرفته شده برای تحلیل (a): مدل نامتقارن غیر خطی بدون MTMD (b): مدل نامتقارن غیر خطی با MTMD (c): مدل نامتقارن غیر خطی با MTMD نصب شده در بین مرکز جرم و لبه نرم (d): مدل نامتقارن غیر خطی با MTMD نصب شده در مرکز جرم (e): مدل نامتقارن غیر خطی با MTMD نصب شده در لبه نرم (f): مدل نامتقارن غیر خطی با MTMD نصب شده در لبه سخت و هر دو لبه نرم و سخت

با توجه به نیم متقارن بودن پلان انتخاب شده سختی فنرهای نصب شده در دو جهت با هم یکسان در نظر گرفته شد. سختی فنرها طوری انتخاب گردیدند که پرید

و تغییر مکان مناسب نیست. بنابراین میراگر جرمی تنظیم شده چند گانه (MTMD) با یک توزیع فرکانس طبیعی استفاده گردید. توزیع فرکانسهای میراگرها را می توان با تغییر سختی و یا با تغییر جرم هر میراگر ایجاد کرد. ولی ساختن میراگرها با سختی و میرایی یکنواخت آسانتر از ساختن میراگرها با سختی و میرایی متغیر می باشد. بنابراین سختی و میرایی هر TMD ثابت در نظر گرفته شد. در شکل (۲) سیستم نامتقارن غیر خطی با موقعیتهای مختلف MTMD نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل‌های مختلف در نظر گرفته شده برای تحلیل (a): مدل نامتقارن بدون TMD (b): مدل نامتقارن با TMD نصب شده در بین مرکز جرم و لبه نرم (c): مدل نامتقارن با TMD نصب شده در مرکز جرم (d): مدل نامتقارن با TMD نصب شده در لبه نرم (e): مدل نامتقارن با TMD نصب شده در لبه سخت (f): مدل نامتقارن با TMD نصب شده در هر دو لبه نرم و سخت

۴- پارامترهای سیستم

۴-۱- سیستم خطی

پارامترهای مهمی که در رفتار مدل مؤثرند عبارتند از:

- سختی فنرهای نصب شده در دو جهت x و y در شکل (۱)
- جرم کل طبقه
- پرید طبیعی مود اول

باشند که برابر ۵ در هر دو جهت X و Y در نظر گرفته شدند. A_x و A_y شبه شتابها برای پریدهای ارتعاش به ترتیب T_x و T_y می باشند که از طیف طرح استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ برای میرایی ۵٪ انتخاب شده اند.

۲-۲-۴ - مقاومت تسلیم اعضاء

برای سادگی مقاومت تسلیم اعضاء مختلف متناسب با سختی آنها در نظر گرفته شد. بنابراین مقاومت اُامین المان در جهت‌های X و Y به صورت زیر محاسبه گردید:

$$f_x^i = \frac{F_x}{K_x} k_x^i \quad f_y^i = \frac{F_y}{K_y} k_y^i \quad (2)$$

که F_x و F_y مقاومت تسلیم کل سیستم است که از رابطه (۱) برای جهت‌های X و Y محاسبه می گردند. k_x^i و k_y^i سختی اُامین المان به ترتیب در جهت‌های X و Y می باشند و K_x و K_y سختی کل سیستم به ترتیب در جهت‌های X و Y می باشند. رفتار نیرو- تغییرمکان برای هر المان مقاوم به صورت الاستیک- پلاستیک با ۱۰٪ سخت شدگی کرنشی پس از تسلیم در نظر گرفته شد.

۳-۲-۴ - پارامترهای MTMD

اگر w_T فرکانس میانگین MTMD ها و $(w_T = \frac{1}{n} \sum_j w_j)$ و n تعداد کل MTMD ها باشند آنگاه فرکانس طبیعی اُامین TMD از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$w_j = w_T \left[1 + \left(j - \frac{n+1}{2} \right) \frac{\beta}{n-1} \right] \quad (3)$$

که پارامتر β پارامتر بدون بعدی است که مشخص کننده باند فرکانسی MTMD می باشد و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\beta = \frac{w_n - w_1}{w_T} \quad (4)$$

اگر k_T و ζ_T به ترتیب سختی و میرایی ثابت هر TMD باشند آنگاه جرم و ضریب میرایی اُامین TMD به صورت زیر بیان می گردد:

$$m_j = \frac{k_T}{w_j^2} \quad c_j = 2\zeta_T m_j w_j \quad (5)$$

نسبت جرم کل MTMD ها (m_T) به جرم کل سیستم به صورت نسبت جرم تعریف شده است، یعنی:

مود اول سیستم برابر ۵/۰ ثانیه گردد. خروج از مرکزیت های نرمال برابر ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ در نظر گرفته شد. موقعیت فنرهای تامین کننده سختی جانبی طوری تعیین گردید که نسبت فرکانس پیچشی به فرکانس انتقالی سیستم برابر مقادیر ۵/۰ (سازه نرم پیچشی)، ۱ (سازه درگیر پیچشی) و ۲ (سازه سخت پیچشی) گردد. نسبت طول به عرض پلان برابر ۱/۵ در نظر گرفته شد.

برای TMD نیز پارامترهای مهم انتخاب شده و بقیه پارامترها فرض گردیدند، لذا درصد جرم و موقعیت TMD به عنوان پارامترهای اصلی انتخاب شده و نسبت فرکانس میراگر به فرکانس مود اول سیستم برابر ۱ در نظر گرفته شد. سختی فنر TMD نیز بر اساس نسبت فرکانس و جرم TMD محاسبه گردید. با توجه به تحلیل‌های اولیه انجام شده نسبت میرایی در TMD نیز تاثیر زیادی در کارایی آن نداشته و از لیست متغیرها حذف گردید و برابر ۲۰٪ در نظر گرفته شد. با توجه به توضیحات فوق، حالت‌های انتخاب شده به صورت زیر می باشند:

- حالت‌های e_x : (۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)
- حالت‌های Ω_θ : (۱، ۰/۵ و ۲) که به ترتیب با نام‌های *Soft*، *Couple* و *Stiff* نامگذاری شده اند.
- حالت‌های درصد جرم میراگر (M): (۱/۵٪، ۳٪، ۶٪ و ۱۲٪)

و برای موقعیت‌های نصب:

- نصب در بین مرکز جرم و لبه نرم با نام *tmd*
- نصب در لبه نرم با نام *tmdfedge*
- نصب در لبه سخت با نام *tmdsedge*
- نصب در مرکز جرم با نام *tmdcm* و
- نصب در هر دو لبه نرم و سخت با نام *tmdfsedge*

۲-۴ - سیستم غیر خطی

۱-۲-۴ مقاومت تسلیم

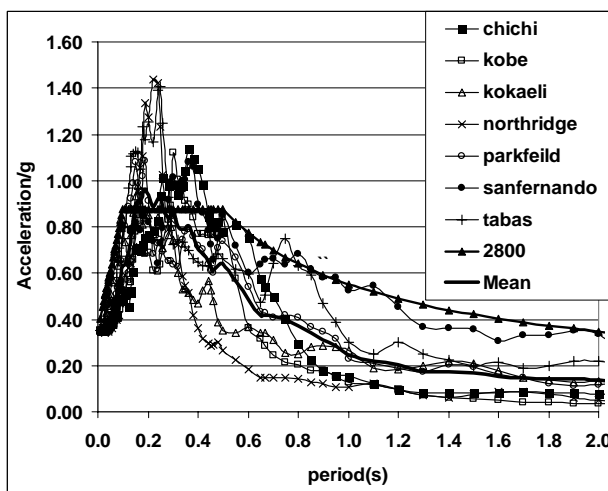
مقاومت کلی تسلیم در هر دو جهت X و Y به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$F_x = \frac{MA_x}{R_x} \quad F_y = \frac{MA_y}{R_y} \quad (1)$$

که M جرم سیستم، R_x و R_y فاکتورهای کاهش می

جدول (۱): مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده

| فاصله از گسل | ایستگاه | PGA (g) | شدت R | تاریخ وقوع | نام |
|--------------|-----------|---------|-------|------------|-------------|
| 3 | Tabas | 0/836 | 7/4 | 1978 | Tabas |
| 182/8 | KAU052 | 0/005 | 7/6 | 1999 | Chi-Chi |
| 89/3 | Kobe/Ok | 0/081 | 6/9 | 1995 | Kobe |
| 62/3 | Mecidiye | 0/054 | 7/4 | 1999 | Kokaeli |
| 101/3 | Riverside | 0/059 | 6/7 | 1994 | Northridge |
| 60 | San Luis | 0/014 | 6/1 | 1966 | Parkfield |
| 122 | San Onof. | 0/016 | 6/6 | 1971 | Sanfernando |



شکل (۳): طیف پاسخ زلزله های انتخاب شده و طیف میانگین آنها

۶- بررسی نتایج

۶-۱- سیستم خطی

یکی از معیارهای بررسی کارایی سیستم میراگر، درصد کاهش حداکثر پاسخهای شتاب و تغییر مکان در لبه های نرم و سخت نسبت به این پاسخها در سازه نامتقارن بدون TMD می باشد. این درصدهای کاهش برای میانگین ۷ رکورد زلزله محاسبه شده است. با مقایسه میزان کاهش همزمان شتاب و تغییر مکان که از میانگین گیری وزنی از نتایج کاهش پاسخ برای شتاب و تغییر مکان به دست می آید کارایی سیستم میراگر در کنترل همزمان شتاب و تغییر مکان مشخص شده است. همچنین کارایی سیستم در نزدیک نمودن شتاب و تغییر مکان دلبه نرم و سخت به یکدیگر نیز در نمودارهایی آمده است. در این نمودارها FA به معنی شتاب لبه نرم، SA معرف شتاب

$$\gamma = \frac{m_T}{M_{sys}} \quad (6)$$

سختی ثابتی که برای هر TMD مورد نیاز است به صورت زیر به دست می یابد:

$$k_T = \frac{m_T}{\sum_j \frac{1}{w_j^2}} \quad (7)$$

همه پارامترهای مشابه در سیستمهای خطی و غیر خطی یکسان فرض شده است. فقط تعداد TMDها برابر ۱۰ در نظر گرفته شد، باند فرکانسی β به مقدار ۰/۴ در نظر گرفته شد و نسبت جرم نیز برابر ۰/۱۲ فرض گردید.

حالتهای e: ۰٪ و ۱۰٪ و ۲۰٪

حالتهای Ω_0 : ۱ و ۰/۵ و ۲ به ترتیب برای سیستمهای

درگیر پیچشی، نرم پیچشی و سخت پیچشی

حالتهای موقعیت MTMD:

- روی مرکز جرم با نام (MTMDCM).

- روی مرکز سختی با نام (MTMDCS).

- روی لبه نرم با نام (MTMDF).

- روی لبه سخت با نام (MTMDS).

- روی هر دو لبه نرم و لبه سخت با نام (MTMDFS).

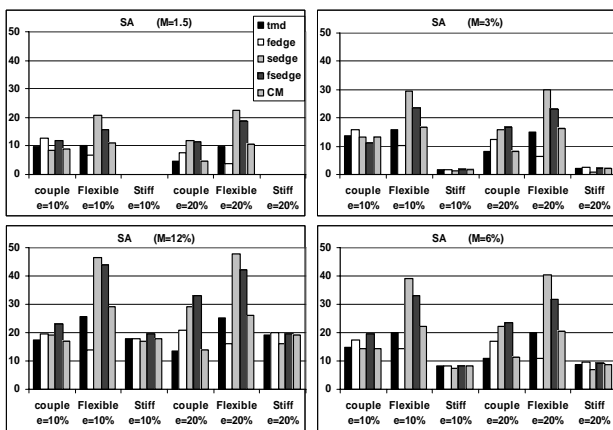
۵- نگاشتهای انتخاب شده

زلزله ها همگی در جهت Y به سیستم اعمال شده و باعث ایجاد تغییر مکان در جهت Y و دوران حول محور Z (عمود بر پلان) می گردند. نگاشتهای زلزله مربوط به شتابهای زمین برای زلزله های مختلف می باشند که از پایگاه داده های Pacific Earthquake Engineering Research [16] گرفته شده اند. تعداد ۷ رکورد شتاب زلزله در حوزه دور و در خاک نوع II که خلاصه مشخصات آنها در جدول (۲) آمده است برای تحقیق انتخاب گردید.

بزرگی زلزله ها بین ۶/۱ و ۷/۶ انتخاب شده و PGA آنها همگی به ۰/۳۵g همپایه شدند.

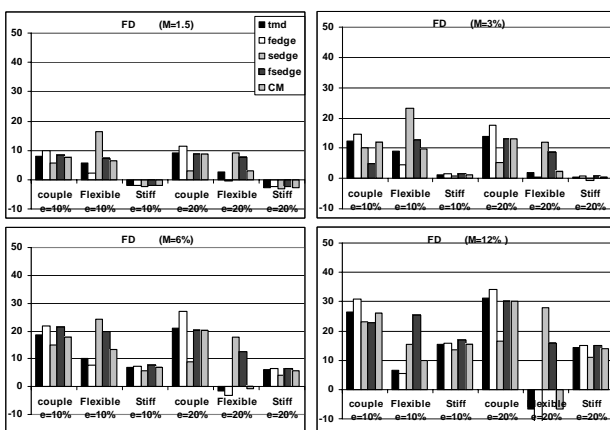
در شکل (۲) طیف پاسخ زلزله های انتخاب شده و طیف میانگین آنها به همراه طیف طرح استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ نشان داده شده است.

این رفتار برعکس بوده و کاهش حداکثر شتاب در لبه نرم بیشتر از لبه سخت است.



شکل (۵): میزان کاهش حداکثر شتاب لبه سخت

شکل (۶) درصد کاهش حداکثر تغییرمکان لبه نرم را نسبت به حداکثر تغییرمکان لبه نرم در سازه بدون TMD نشان می دهد. میزان کاهش تغییرمکان در سازه نرم و درگیر پیچشی قابل توجه بوده و افزایش خروج از مرکزیت اندکی کارایی میراگر را افزایش می دهد. همچنین در سازه های نرم پیچشی نصب TMD در لبه سخت و هر دو لبه بیشترین کارایی و نصب آن در لبه نرم کمترین کارایی را نسبت به موقعیتهای دیگر نشان می دهد.

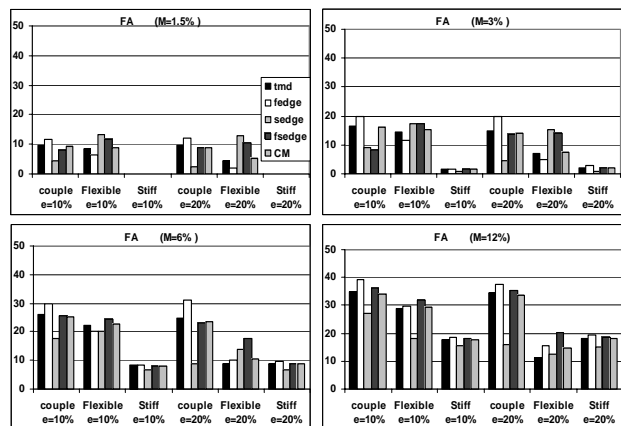


شکل (۶): میزان کاهش حداکثر تغییرمکان لبه نرم

شکل (۷) درصد کاهش حداکثر تغییرمکان لبه سخت را نسبت به حداکثر تغییرمکان لبه سخت در سازه بدون TMD نشان می دهد. میزان کاهش تغییرمکان در سازه نرم پیچشی بیش از دیگر سازه ها می باشد. همچنین در سازه های نرم پیچشی نصب TMD در لبه سخت و هر دو لبه بیشترین کارایی و نصب آن در لبه نرم کمترین کارایی را نشان می دهد. در سازه های درگیر پیچشی

لبه سخت، FD به معنی تغییرمکان لبه نرم و SD نشان دهنده تغییرمکان لبه سخت می باشد. M درصد جرم TMD نسبت به جرم سیستم را نشان می دهد.

شکل (۸) درصد کاهش حداکثر شتاب لبه نرم را نسبت به حداکثر شتاب لبه نرم در سازه بدون TMD نشان می دهد. با افزایش جرم TMD، شتاب لبه نرم در همه انواع سازه ها کاهش می یابد. میزان کاهش شتاب در سازه درگیر پیچشی بیش از دیگر سازه ها بوده و افزایش خروج از مرکزیت تاثیر زیادی بر کارایی میراگر ندارد. همچنین نصب TMD در لبه سخت کمترین کارایی و نصب آن در لبه نرم بیشترین کارایی را نسبت به موقعیتهای دیگر نشان می دهد. در سازه های نرم پیچشی موقعیت نصب مناسب، نصب در هر دو لبه می باشد.

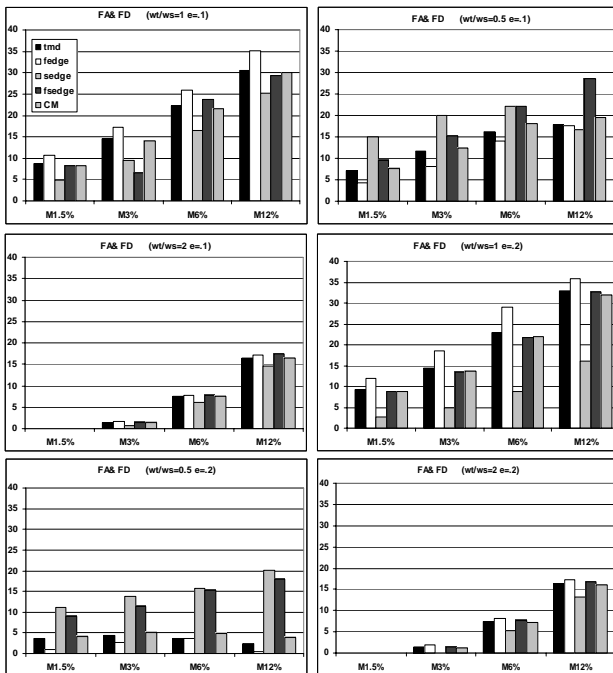


شکل (۴): میزان کاهش حداکثر شتاب لبه نرم

شکل (۵) درصد کاهش حداکثر شتاب لبه سخت را نسبت به حداکثر شتاب لبه سخت در سازه بدون TMD نشان می دهد. میزان کاهش شتاب در سازه نرم پیچشی بیش از دیگر سازه ها بوده و افزایش خروج از مرکزیت اندکی کارایی سیستم میراگر را افزایش می دهد. در سازه های نرم پیچشی نصب TMD در لبه سخت و هر دو لبه نرم و سخت بیشترین کارایی و نصب آن در لبه نرم کمترین کارایی را نشان می دهد. در سازه های درگیر و سخت پیچشی موقعیت میراگر تاثیر چندانی در کارایی سیستم ندارد.

از مقایسه شکل (۴) و (۵) می توان نتیجه گرفت که کاهش شتاب لبه سخت در سازه های نرم پیچشی بیش از کاهش شتاب لبه نرم است. همچنین در سازه های درگیر پیچشی

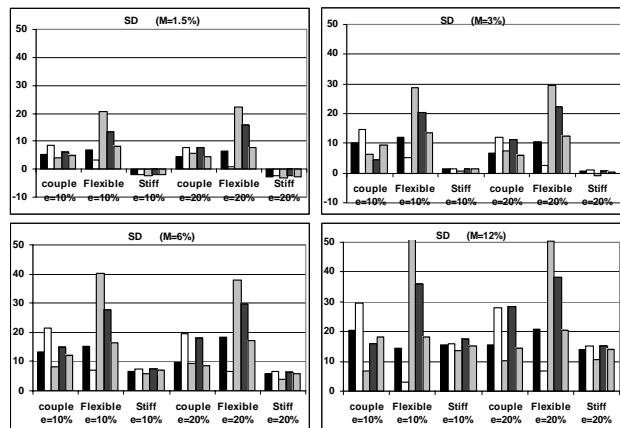
این نمودارها می توان کارایی هر حالت را با معیار کاهش همزمان شتاب و تغییرمکان لبه نرم در هر نوع سازه با هم مقایسه نمود. میزان کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه نرم در سازه درگیر پیچشی بیش از سازه نرم پیچشی می باشد. همچنین در سازه های نرم پیچشی نصب TMD در لبه سخت و هر دو لبه بیشترین کارایی را داشته و با افزایش خروج از مرکزیت اختلاف کارایی با موقعیتهای دیگر افزایش می یابد.



شکل (۸): میزان کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه نرم

شکل (۹) درصد کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه سخت را نسبت به سازه بدون TMD نشان می دهد. میزان کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه سخت در سازه نرم پیچشی بیش از سیستم درگیر پیچشی بوده و افزایش خروج از مرکزیت تاثیر قابل توجهی در افزایش کارایی ندارد. همچنین در سازه های نرم پیچشی نصب TMD در لبه سخت و هر دو لبه بیشترین کارایی را داشته و نصب در لبه نرم کمترین کارایی را دارد. در سازه های درگیر پیچشی نصب TMD در مرکز جرم و بین مرکز جرم و لبه نرم نسبت به موقعیتهای دیگر کارایی کمتری دارد و نصب در دو لبه بیشترین کارایی را دارد.

نصب TMD در لبه نرم بیشترین کاهش و نصب در لبه سخت کمترین کاهش پاسخ را داراست.



شکل (۷): میزان کاهش حداکثر تغییرمکان لبه سخت

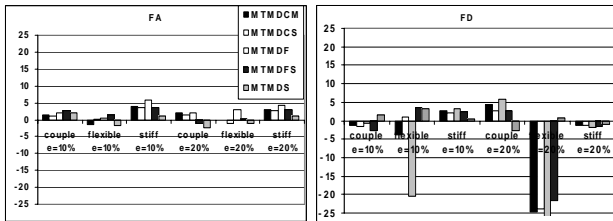
از مقایسه شکلهای (۶) و (۷) می توان نتیجه گرفت که در کاهش تغییرمکان لبه نرم در سازه های درگیر پیچشی اکثر موقعیتهای نصب موفق عمل کرده و کارایی خوبی دارند ولی در سازه های نرم پیچشی تنها موقعیت نصب لبه سخت و هر دو لبه موفق هستند. در کنترل تغییرمکان لبه سخت در سازه های نرم پیچشی میراگر بسیار موفق عمل نموده و تا ۵۰٪ کاهش پاسخ نشان می دهد ولی در سازه های درگیر پیچشی حداکثر کنترل حدود ۳۰٪ مشاهده می گردد.

پس از بررسی میزان کاهش حداکثر پاسخهای شتاب و تغییرمکان لبه های نرم و سخت، برای بررسی کارایی سیستم در کاهش همزمان شتاب و تغییرمکان هر لبه بهتر است نمودارهای میانگین کاهش شتاب و تغییرمکان نیز ترسیم گردد. این نمودارها را می توان از میانگین گیری وزنی از نمودارهای کاهش شتاب و تغییرمکان با هر وزن دلخواه بسته به اهمیت هر یک به دست آورد. در این مقاله با فرض وزن یکسان برای کنترل شتاب و تغییرمکان، از نمودارهای شتاب و تغییرمکان متوسط گیری شده است. در این نمودارها محور افقی درصد جرم TMD، و هر نمودار برای مشخصات مختلف پیچشی سازه و خروج از مرکزیتهای متفاوت می باشند.

شکل (۸) درصد کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه نرم را نسبت به حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه نرم در سازه بدون TMD نشان می دهد. با استفاده از

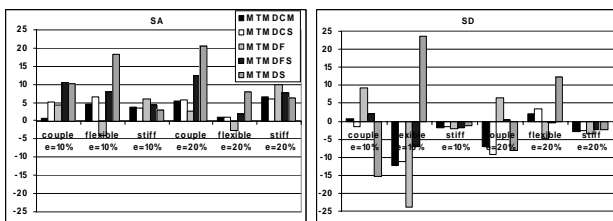
۶-۲- سیستم غیر خطی

کاهش در حداکثر شتاب و تغییر مکان لبه نرم در سازه های غیر خطی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. کاهش شتاب لبه نرم در همه حالات ناچیز می باشد. به علاوه موقعیت میراگر نیز تاثیری بر کارایی ندارد. در سازه های نرم پیچشی سیستم MTMD حداکثر تغییر مکان لبه نرم را افزایش می دهد.



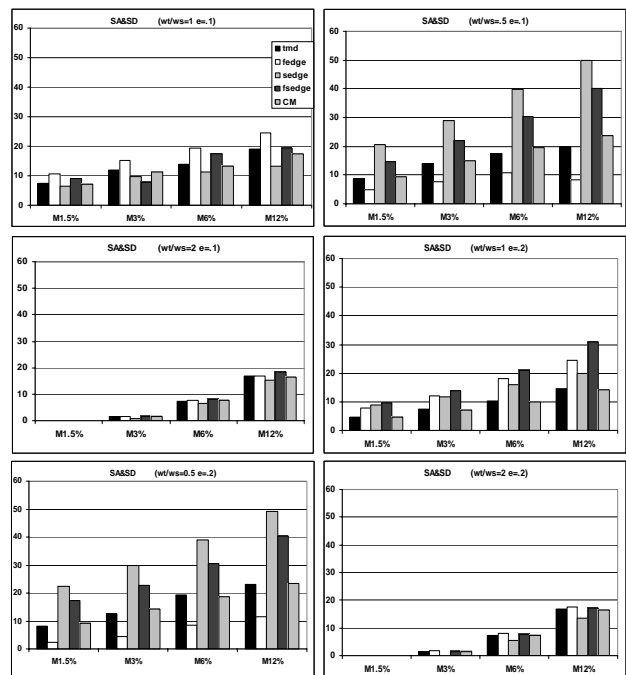
شکل (۱۱): کاهش حداکثر شتاب و تغییر مکان لبه نرم در سازه غیرخطی

کاهش حداکثر شتاب و تغییر مکان لبه سخت در سازه غیر خطی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بیشترین کاهش شتاب لبه سخت برای حالت MTMD روی لبه سخت می باشد و این کاهش در سازه نرم پیچشی بیشتر از سازه های دیگر است. کاهش در حداکثر تغییر مکان لبه سخت تنها در سازه نرم پیچشی و فقط برای MTMD نصب شده در لبه سخت قابل ملاحظه است.



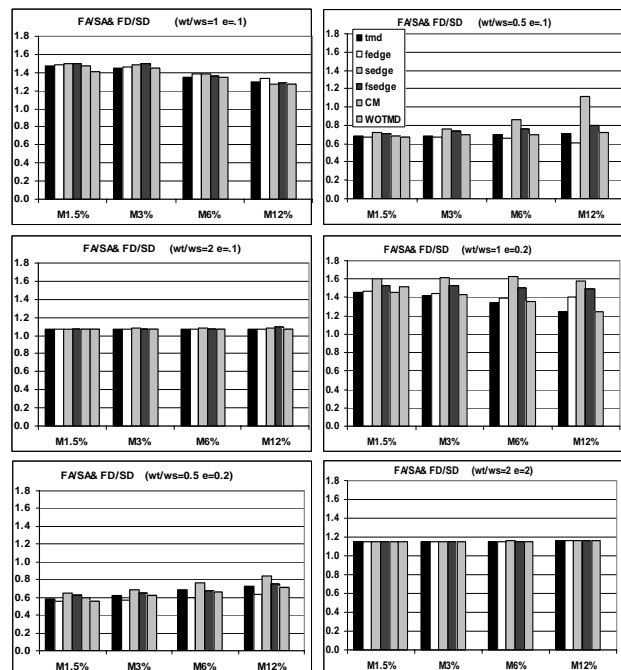
شکل (۱۲): کاهش حداکثر شتاب و تغییر مکان لبه سخت در سازه غیرخطی

کاهش در حداکثر شتاب و تغییر مکان دورانی غیرخطی در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. کاهش در حداکثر شتاب دورانی در حالات نصب MTMD در لبه سخت و هر دو لبه بیشتر است و این کاهش در سازه های درگیر پیچشی بیش از دیگر سازه هاست. حداکثر دوران در حالتی که MTMD بر روی لبه سخت نصب گردد بیشترین کاهش را در همه انواع سازه ها نشان می دهد. در بعضی حالات MTMD باعث افزایش شتاب و تغییر مکان دورانی می گردد.



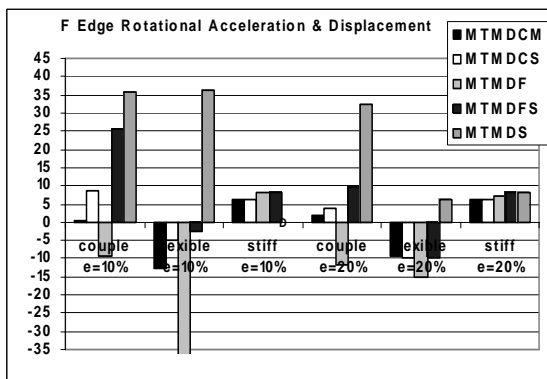
شکل (۹): میزان کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییر مکان لبه سخت

شکل (۱۰) میزان نزدیک شدن همزمان شتاب و تغییر مکان دولبه به هم را نشان می دهد. در این نمودارها هرچه مقدار به یک نزدیکتر باشد به این معنی است که به طور همزمان شتاب و تغییر مکان دو لبه به هم نزدیک شده است. بر روی این نمودارها حالتی به عنوان WOTMD اضافه شده است که نشان دهنده این نسبت در سازه بدون TMD می باشد.



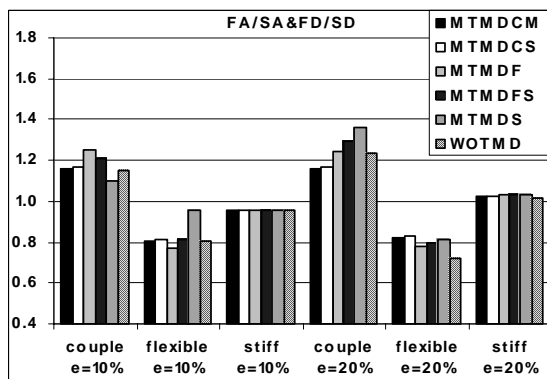
شکل (۱۰): میزان کاهش همزمان نسبت شتاب دو لبه و نسبت تغییر مکان دو لبه

است که در سازه های درگیر پیچشی این کنترل بیش از سایر سازه هاست.



شکل (۱۶): کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان دورانی در سازه غیرخطی

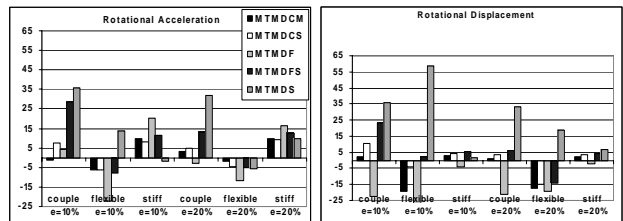
کنترل همزمان نسبت شتاب لبه ها و نسبت تغییرمکان لبه ها در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. در این شکل مقادیر نزدیک به یک نشان می دهد شتاب و تغییر مکان دو لبه به طور همزمان کنترل شده است.



شکل (۱۷): کاهش همزمان نسبت شتاب و نسبت تغییرمکان دو لبه در سازه غیرخطی

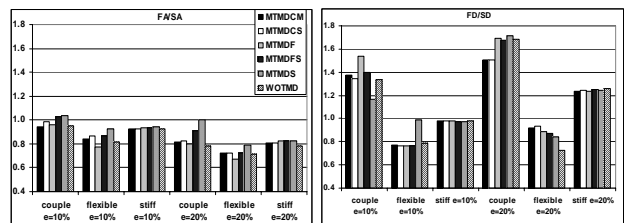
۷- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق کنترل همزمان شتاب و تغییرمکان در سازه های نامتقارن و نزدیک کردن شتاب و تغییرمکان دو لبه به هم با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) می باشد. برای بررسی کارایی TMD در دستیابی به اهداف فوق از معیار کاهش حداکثر شتاب و تغییرمکان نسبت به سازه بدون TMD استفاده شده است. برای اهداف طراحی می توان از حالت های بهینه به دست آمده برای کنترل همزمان شتاب و تغییرمکان هر لبه، نزدیک کردن شتاب دو لبه به هم، نزدیک نمودن تغییرمکان دو لبه به هم و نزدیک نمودن شتاب و تغییرمکان دو لبه به هم



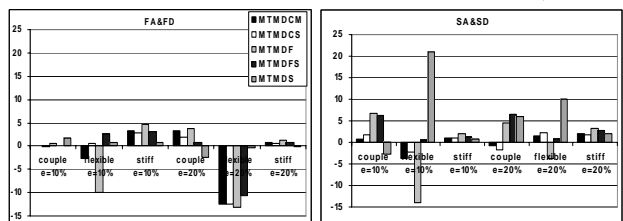
شکل (۱۳): کاهش حداکثر شتاب و تغییرمکان دورانی در سازه غیرخطی

کنترل حداکثر نسبت شتاب لبه ها و حداکثر نسبت تغییرمکان لبه ها در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. در این شکل مقادیر نزدیک به یک نشان می دهد که شتاب دو لبه به یکدیگر و تغییرمکان دو لبه نیز به یکدیگر نزدیک شده اند. در این شکل حالتی با نام WOTMD اضافه شده که نشان دهنده این نسبت در حالت سازه بدون MTMD می باشد.



شکل (۱۴): کاهش حداکثر نسبت شتاب و نسبت تغییرمکان دو لبه در سازه غیرخطی

کاهش همزمان شتاب و تغییرمکان حداکثر لبه نرم و لبه سخت در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. کاهش همزمان در حداکثر شتاب و تغییرمکان غیر خطی لبه نرم در همه سازه ها ناچیز است. کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه سخت در سازه غیر خطی تنها در حالتی که MTMD روی لبه سخت نصب گردد قابل توجه است و افزایش خروج از مرکزیت تاثیر چندانی بر کارایی سیستم ندارد.



شکل (۱۵): کاهش همزمان حداکثر شتاب و تغییرمکان لبه نرم و لبه سخت در سازه غیرخطی

کاهش همزمان حداکثر شتاب دورانی غیر خطی و حداکثر تغییرمکان دورانی غیر خطی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در حالتی که MTMD روی لبه سخت و هر دو لبه نصب گردد کاهش همزمان شتاب دورانی بیشترین

برای انواع سازه ها از نظر نوع رفتار پیچشی و میزان خروج از مرکزیت استفاده نمود. نتایج به دست آمده از مطالعه پارامتریک به صورت زیر خلاصه می شود:

- در همه حالات با افزایش درصد جرم میراگر، میزان کنترل شتاب و تغییرمکان افزایش یافته و نسبت شتاب دو لبه و تغییرمکان دو لبه بیشتر به یک نزدیک می شود. لذا نسبت جرم میراگر پارامتری است که همیشه افزایش آن تاثیر مثبت داشته و میزان بهینه آن بایستی با توجه به محدودیتهای اجرایی و اهداف کنترل تعیین گردد.

- در سازه های با رفتار سخت پیچشی سیستم میراگر کارایی چندانی در کاهش شتاب و تغییرمکان و همچنین نزدیک نمودن شتاب و تغییرمکان دو لبه به هم ندارد.

- افزایش خروج از مرکزیت تاثیر چندانی در کارایی سیستم در کنترل شتاب و تغییرمکان و همچنین کنترل همزمان شتاب و تغییرمکان ندارد.

- حالت بهینه در سازه های نرم پیچشی در کنترل شتاب لبه نرم نصب در هر دو لبه است. در سازه درگیر پیچشی موقعیت نصب مناسب، نصب در لبه نرم است.

- در کنترل شتاب لبه سخت برای سازه های نرم پیچشی نصب در لبه سخت و هر دو لبه و در سازه های درگیر پیچشی نصب در دو لبه مناسبترین حالت است.

- در کنترل تغییرمکان لبه نرم برای سازه های نرم پیچشی نصب در لبه سخت و هر دو لبه مناسب ترین حالت و در سازه های درگیر پیچشی نصب در لبه نرم نسبت به موقعیتهای دیگر اندکی مناسب تر است.

- در کنترل تغییرمکان لبه سخت در سازه های نرم پیچشی نصب در لبه سخت و هر دو لبه و برای سازه های درگیر پیچشی نصب در لبه نرم بیشترین کارایی و نصب در لبه سخت کمترین کارایی را دارد.

- در کنترل همزمان شتاب و تغییرمکان لبه نرم حالت نصب بهینه در سازه های نرم پیچشی نصب در لبه سخت و هر دو لبه و در سازه های درگیر پیچشی نصب در لبه سخت کمترین کارایی و بقیه حالتها کارایی یکسانی دارند.

- در کنترل همزمان شتاب و تغییر مکان لبه سخت در سازه های نرم پیچشی نصب در لبه سخت و هر دو لبه بیشترین کارایی و در سازه های درگیر پیچشی بهترین حالت نصب در هر دو لبه است .

- سیستم میراگر در سازه های نرم پیچشی شتاب و تغییرمکان لبه سخت را همزمان تا ۵۰٪ کاهش داده و در سازه های درگیر پیچشی شتاب و تغییرمکان لبه نرم را تا ۳۵٪ کاهش می دهد.

- سیستم میراگر در نزدیک نمودن همزمان شتاب و تغییرمکان دو لبه به هم بسیار موفق عمل نموده و در سازه های نرم پیچشی حالت نصب در لبه سخت نسبت پاسخ را برای دو لبه از ۰/۵۵ تا ۰/۸۵ افزایش می دهد. در سازه های درگیر پیچشی نسبت فوق از ۱/۵۵ به ۱/۲ کاهش می یابد و به یک نزدیک می شود. در سازه های درگیر پیچشی همه موقعیتهای نصب رفتار یکسانی دارند.

- فقط MTMD نصب شده در لبه سخت اثر قابل توجهی بر کاهش حداکثر شتاب و تغییرمکان در سازه های نامتقارن غیرخطی دارد. موقعیتهای دیگر نصب حداکثر شتاب و تغییر مکان را کاهش ندادند.

- این سیستم در کنترل همزمان شتاب و تغییرمکان سازه های نامتقارن غیر خطی زیاد موفقیت آمیز نیست.

- سیستم MTMD در کنترل شتاب و تغییرمکان دورانی در سازه های غیرخطی نسبت به کنترل حداکثر شتاب و تغییرمکان مناسب تر است.

- اگرچه برای حذف اثرات نانتظیمی از چندین TMD با یک باند فرکانسی استفاده گردید ولی نتایج نشان داد که این سیستم برای سازه های با رفتار غیرخطی مناسب نیست.

۸- مراجع

- [۱] Abe M., Fujino Y., "Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 23(8), 813-835, 1994.
- [۲] Ahlawat AS., Ramaswamy A., "Multi objective optimal absorber system for torsionally coupled seismically excited structures", Eng. Struct., vol. 25(7), 941-950, 2003.
- [۳] Arfiadi Y., Hadi MNS., "Passive and active control of three-dimensional buildings. Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 29(3), 377-396, 2000.
- [۴] Chen G., Wu J., "Experimental study on multiple tuned mass dampers to reduce seismic responses of a three-storey building structure", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 32(5), 793-810, 2003.

- Lin YY., Cheng CM., Lee CH., "A tuned mass damper for suppressing the coupled flexural and torsional buffeting response of long-span bridges", Eng. Struct., vol. 22, 1195–1204, 2000.
Pacific Earthquake Engineering Research, <http://peer.berkeley.edu/>.
- Pansare AP., Jangid RS., "Tuned mass dampers for torsionally coupled systems", Wind Struct. Vol. 6(1), 23–40, 2003.
- Rana R., Soong TT., "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", Eng. Struct. vol. 20(3), 193–204, 1998.
- Sadek F., Mohraz B., Taylor AW., Chung RM., "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 26, 617–635, 1997.
- Singh MP., Singh S., Moreschi LM., "Tuned mass dampers for response control of torsional buildings", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 31(4):749–769, 2002.
- Villaverde R., "Reduction in seismic response with heavily-damped vibration absorber", Earthq. Eng. Struct. Dyn. vol. 13, 33–42. 1985.
- Wang JF., Lin CC., "Seismic performance of multiple tuned mass dampers for soil-irregular building interaction systems", Int. J. Solids Struct. vol. 42(20), 5536–5554, 2005.
- Yamaguchi H., Harnpornchai N., "Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillations", Earthq. Eng. Struct. Dyn. vol. 22(1), 51–62, 1993.
- [۱۵] Chunxiang Lia, Weilian Qub., "Optimum properties of multiple tuned mass dampers for reduction of translational and torsional response of structures subject to ground acceleration", Engineering Structures, vol. 28, 472–494, 2006. [۵]
- [۱۶] Den Hartog JP., *Mechanical vibrations*. 4th ed., New York, McGraw-Hill, 1956. [۶]
- [۱۷] Igusa T., Xu K., "Vibration control using multiple tuned mass dampers", J. Sound Vib., 175(4), 491–503, 1994. [۷]
- [۱۸] Iwanami K., Seto K., "Optimum design of dual tuned mass dampers and their effectiveness", Proc JSME(C), 50(449), 44–52, 1884. [۸]
- [۱۹] Jangid RS., Datta TK., "Performance of multiple tuned mass dampers for torsionally coupled system", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol., 26, 307–317, 1997. [۹]
- [۲۰] Jangid RS., "Optimum multiple tuned mass dampers for base-excited undamped system", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol., 28(9), 1041–1049, 1999. [۱۰]
- [۲۱] Lin CC., Ueng JM., Huang TC., "Seismic response reduction of irregular buildings using passive tuned mass dampers", Eng. Struct. Vol. 21, 513–524, 1999. [۱۱]
- [۲۲] Li C., Liu Y., "Further characteristics for multiple tuned mass dampers", J. Struct. Eng. ASCE vol. 128(10), 1362–5, 2002. [۱۲]
- [۲۳] Li C., "Optimum multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 31, 897–919, 2002. [۱۳]
- Li C., "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration", Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 29(9), 1405–1421, 2000. [۱۴]