



مقایسه پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شده منفرد (TMD) با میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD) با استفاده از شاخص خرابی

امین اسدی زیدآبادی¹، احمد اسدی زیدآبادی²، اسماعیل امیری³ سعید شجاعی باغینی²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی دانشگاه آزاد واحد کرمان، کرمان، ایران

amin_asadiz@yahoo.com

2- دانشجوی کارشناسی دانشگاه آزاد واحد کرمان، کرمان، ایران

ahmad_asadi@yahoo.com

3- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی دانشگاه آزاد واحد کرمان، کرمان، ایران

esmail_soheil@yahoo.com

4- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران

Saeed.shojaee@gmail.com

چکیده

یکی از نمونه های سیستمهای کنترل غیر فعال سیستم میراگر جرمی تنظیم شده منفرد می باشد. برای به حداکثر رساندن کارایی این سیستم پارامترهای بهینه آن با توجه به معیارهایی از جمله دررفت، حداکثر شتاب و... بدست آمده است، ولی تحقیقات نشان می دهد که در برخی موارد نه تنها این سیستم به کاهش خسارت کمک نکرده است بلکه با افزایش پاسخ باعث افزایش خرابی شده است. یکی از دلایل مهم پیشنهاد میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه همین موضوع می باشد در این مقاله پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه بدست می آیند و با پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شده منفرد مقایسه می شوند.

کلمات کلیدی: شاخص خرابی، کنترل غیر فعال، میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه، بهینه سازی

1. مقدمه

موضوع کاهش پاسخ سازه تحت اثر بارهای دینامیک در چند دهه ی اخیر مورد توجه شدید محققان قرار گرفته است. در این زمینه ایده های متعددی در رابطه با کنترل سازه به صورت کنترل غیر فعال، نیمه فعال، فعال و دو گانه ابداع و برخی از آنها نیز در عمل مورد استفاده قرار گرفته است. ایده استفاده از میراگرهای انرژی در سازه به منظور کنترل ارتعاشات لرزه ای در سال 1972 با مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی آقای کلی و همکارانش مطرح شد [1]. از میان سیستم های کنترل که نام برده شد، دسته اول به لحاظ هزینه اقتصادی پایین، قابلیت اعتماد بالا و اجرای آسانتر، در عمل بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مهمترین مزیت های سیستم های کنترل غیر فعال نسبت به سایر سیستم های کنترل، عدم نیاز آن ها به منبع انرژی خارجی جهت کنترل سازه می باشد. بعضی از سیستم

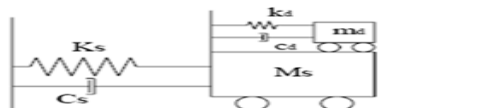
های کنترل غیرفعال مانند سیستم جداسازی پایه¹ ای و میراگر جرمی تنظیم شده² (TMD) با تغییر فرکانس ارتعاشی سازه و با محدود ساختن شتاب انتقالی به سازه مانع نفوذ انرژی زلزله به سازه می شوند درحالیکه در نوعی دیگر تحت عنوان میراگرهای انرژی، انرژی زلزله پس از ورود به سازه جذب می شود که از جمله آنها می توان به میراگرهای تسلیم فلزی، میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای ویسکو الاستیک و میراگرهای سیال ویسکوز اشاره کرد.

میراگرهای جرمی تنظیم شده به دلیل عدم نیاز به منبع انرژی خارجی و قابلیت بهره برداری دائمی کاربرد وسیعی در کاهش پاسخ دینامیکی سازه های بلند در مقابل باد و زلزله، سکوهای دریایی در مقابل موج و باد و کاهش دامنه ارتعاشات پل های راه آهن دارند ساختار یک میراگر جرمی شامل یک جرم، سختی و میراگر ویسکوز می باشد و به نظر می رسد یک وسیله ساده موثر و ارزان و مطمئن در کاهش ارتعاشات نامطلوب سازه تحت اثر بارهای هارمونیک و باد است [2].

هدف اصلی طراحان سازه از بهینه سازی دستیابی به بهترین طرح ممکن است، با توجه به اینکه در طراحی، ساخت و نگهداری هر دستگاه مهندسین باید تصمیمات فنی و مدیریتی بسیار زیادی بگیرند که هدف چنین کارهایی کاهش هزینه ها و حداکثر کردن مقاومت، ضریب اطمینان ایمنی و سود حاصله هست، می توان بهینه سازی را بعنوان فرایند یافتن شرایطی دانست که مقدار حداقل و حداکثر یک تابع را ایجاد می کند. سیستم میراگر جرمی تنظیم شده نیز مانند هر سیستم سازه ای دیگر نیاز به بهینه سازی دارد، در این تحقیق مقادیر پارامترهای بهینه میراگر چندگانه³ (MTMD) با استفاده از شاخص خرابی بدست می آید و با مقادیر بهینه پارامترهای میراگر منفرد مقایسه می شوند.

2. میراگر جرمی تنظیم شده منفرد و چندگانه

جرم میراگر تنظیم شده یکی از ابزارهای کنترل غیر فعال است که در سازه های عمرانی از آن استفاده می شود شکل (1) به صورت شماتیک میراگر جرمی تنظیم شده به جرم m_d و سختی k_d و میرایی c_d که به جرم اصلی M_s ، و فنری به سختی K_s و میرایی C_s متصل شده است را نشان می دهد. در حالت ایده ال این جرم با 90° اختلاف فاز نسبت به نوسانات سازه اصلی ارتعاش کرده و موجب افزایش میرایی سازه، در نتیجه کاهش پاسخ های آن می شود. در صورتی که TMD بدرستی تنظیم شود می تواند بطور قابل ملاحظه ای ارتعاشات لرزه ای را کاهش دهد. با توجه به حساس بودن این سیستم به تنظیم نشدن فرکانسها و یا تفاوت نسبت میرایی، میراگر ممکن است در عمل بطور قابل ملاحظه ای کارایی خود را از دست بدهد و حتی ممکن است پاسخ مودهای بالاتر در اثر کوپلینگ (همزمانی) مود اصلی و مودهای بالاتر تقویت شود [3].



شکل (1): نمودار شماتیک میراگر جرمی منفرد متصل به سازه اصلی

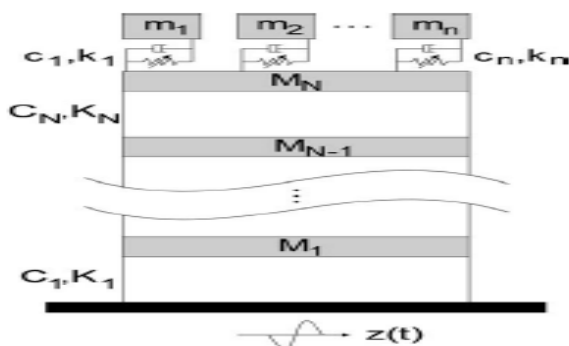
¹ -Base Isolation

² -Tuned Mass Damper

³ -Multiple Tuned Mass Damper

تحقیقات نشان می دهد یک میراگر تنظیم شده منفرد تاثیر چندانی در کاهش پاسخ لرزه ای ندارد. علت این امر ماهیت ضربه ای بودن بارهای زلزله می باشد به این معنی که به سرعت به مقدار ماکزیمم می رسند و میراگر جرمی منفرد معمولاً در یک چنین زمان کوتاهی عملکرد مهمی انجام نمی دهد و با توجه به اینکه بارهای لرزه ای در سازه های بلند ارتعاش قابل توجهی در مودهای بالاتر ایجاد می کنند، یک میراگر جرمی منفرد قادر به کاهش ارتعاش مودهای بالاتر در سازه های بلند نمی شود. از آنجا که TMD منفرد اساساً برای کنترل غیرفعال ارتعاشات باندباریک مناسب است، بکارگیری بیش از یک TMD با مشخصات دینامیکی مختلف منجر به بهبود کارایی و توانایی TMD منفرد خواهد شد که در نتیجه قادر به متوقف کردن ارتعاشات باندپهن نیز می شود لذا MTMD کارایی موثرتری را در برابر تحریک فرکانسهای توزیع شده در محدوده باندپهن تضمین کرده و کارایی بهتری نسبت به TMD منفرد با همان جرم از خود نشان می دهد [4].

میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه متشکل از چندین جرم میراگر تنظیم شده منفرد با توزیع یکنواخت فرکانسهای طبیعی می باشند و به دوصورت موازی و سری و یا به هر دوصورت سری و موازی در سازه جاگذاری می شوند شکل (2) توزیع میراگرها در طبقه بام یک سازه نشان می دهند.



شکل (2): میراگر جرمی چندگانه در طبقه بام

3. شاخص خرابی رافاییل و میر (Roufaiel & Meyer)

کمی نمودن میزان خسارت وارد بر سازه ها از مقوله هایی است که در چند سال اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. هر یک از شاخص¹ های معرفی شده به گونه ای میزان خسارت وارد بر سازه را تخمین می زند. خرابی سازه به دوصورت محلی و کلی مورد بررسی می باشد. شاخص های محلی مبین میزان خرابی در اعضای گوناگون بوده و شاخص های کلی وضعیت کل یا بخش بزرگی از سازه را بیان می کنند [5]. گروهی از شاخصها تغییر شکل حداکثر در طول بارگذاری را ملاک خرابی قرار می دهند، گروهی براساس خسارت تجمعی عمل می کنند و دسته ای از شاخصها که در واقع دقیقترین شاخصها محسوب می شوند ترکیبی از ماکزیمم تغییر شکل و خسارت تجمعی را ملاک عمل قرار می دهند. از بین شاخصهای ارائه شده توسط محققین، شاخصهایی که بر مبنای جابجایی عمل می کنند به علت سادگی و سهولت تفسیر هنوز هم مورد استفاده قرار می گیرند [6]. یکی از این شاخصها، شاخص رافاییل

¹ -Damage Index

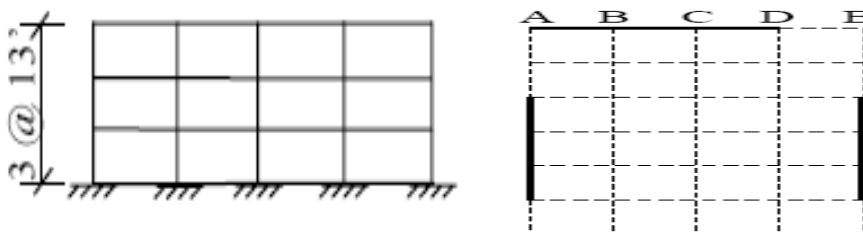
و میر می باشد. در این تحقیق مقادیر پارامترهای MTMD با استفاده از این شاخص بدست آورده می شود. این شاخص بصورت رابطه (1) تعریف می شود [7]:

$$GDP = \frac{\delta_R - \delta_Y}{\delta_F - \delta_Y} \quad (1)$$

که در آن GDP و δ_R و δ_Y و δ_F به ترتیب شاخص خرابی، حداکثر تغییر مکان تحت اثر زلزله، تغییر مکانی که با ازای آن اولین مفصل تشکیل می شود (با این فرض که سازه در مود اول تغییر شکل می دهد) و حداکثر تغییر مکانی که سازه فرو میریزد، می باشند. δ_R با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی، δ_Y با استفاده از تحلیل پوش اورمودال (MPA)¹ بدست می آیند. حد خرابی سازه مقدار تقریبی (0/06 H) در نظر گرفته می شود که در آن H ارتفاع ساختمان می باشد [8].

4. نحوه مدلسازی

سازه مدل سازی شده در این تحقیق ساختمان 3 طبقه فاز 2 پروژه SAC در منطقه لوس آنجلس می باشد [9]. شکل (3) قاب دویبعدی مدلسازی شده از این سازه را به همراه پلان قرارگیری آن را نشان می دهد. در این تحقیق به منظور تعیین پارامترهای بهینه سیستم جرم میراگر تنظیم شده در سازه های فولادی با رفتار غیر خطی از قابلیت تحلیل غیر خطی سازه ها در نرم افزار OpenSees² استفاده شده است و به علت کم بودن تعداد متغیرها از آنالیز حساسیت برای تعیین پارامترهای بهینه TMD و MTMD استفاده شده است. برای این منظور از برنامه Matlab³ نیز استفاده شده است و با لینک کردن این برنامه با برنامه openses مراحل تحلیل در هر گام انجام شده است. رکورد زلزله مورد استفاده زلزله السترومی باشد، نوع المانهای سازه از آنجا که هدف بررسی رفتار غیرخطی می باشد از نوع المان های تیر یا ستون غیر خطی (NonLinearBeamColumn) می باشد. برای بدست آوردن مقدار جابجایی نهایی ساختمان تحت اثر زلزله از تحلیل تاریخچه زمانی و برای بدست آوردن مقدار جابجایی متناظر با اولین تسلیم از تحلیل پوش آور مودال (MPA) استفاده شده است. در تحلیل MPA سازه تحت الگوهای بار متناسب با جرم هر طبقه و شکل مودی قرار می گیرد و یکی از روشهای دقیق تحلیل پوش آور محسوب می شود [10].



شکل (3): قاب دویبعدی مدلسازی شده از ساختمان SAC3 و پلان موقعیت

¹- Modal Pushover Analysis

²- Open System for Earthquake Engineering Simulation

³-Matrix Laboratory

5. تحلیل

برای محاسبه شاخص ابتدا در هر گام تحلیلی تاریخچه زمانی انجام شده است، هر المان برای تحلیل غیر خطی به 5 قسمت تقسیم شده است، نوع مقاطع و جنس فولاد مورد استفاده مطابق با مرجع [9] می باشد. بعد از اینکه جابجایی تحت اثر زلزله و شکل‌های مودی بدست آمد تحلیلی MPA انجام می شود و بدنبال آن جابجایی متناظر با اولین تسلیم بدست می آید و با لحاظ حد خرابی مقدار شاخص در هر گام بدست می آید، شاخص در هر گام برای سیستم مجهز به TMD و MTMD محاسبه می شود و مقادیر بهینه در هر حالت با توجه به کمترین مقدار شاخص بدست می آید. برای شروع مراحل بهینه سازی برای درصدجرمهای مختلف (μ) از مقادیر اولیه بهینه شده نسبت به شاخص دریفت استفاده شده است [11]، درصد جرم بصورت نسبت جرم میراگر به جرم کل سازه تعریف می شود. این مقادیر در جدول (1) نشان داده شده اند. در اولین گام با استفاده از این مقادیر اولیه، پارامترهای بهینه TMD محاسبه می شود و در مرحله بعد با تغییر در این مقادیر، با نسبتهای مشخص برای دو و سه TMD در نظر گرفته می شوند. مقادیر اولیه ای که برای بهینه سازی MTMD2 و MTMD3 در نظر گرفته شده است در جدول (2) نشان داده شده اند. MTMD2 و MTMD3 به ترتیب معرف میراگر جرمی چندگانه دوتایی و سه تایی می باشند. جرم در هر دو حالت به تعداد میراگرها تقسیم شده است. در MTMD2 سختی و میرایی نیز به طور مساوی بین میراگرها تقسیم شده است و در MTMD3 سختی و میرایی برای دو TMD سی دزد صد مقادیر اولیه و برای میراگر سوم چهل درصد مقادیر اولیه در نظر گرفته شده است و در تمامی مراحل میراگرها در طبقه بام جایگذاری می شوند.

جدول (1): پارامترهای بهینه شده TMD با استفاده از شاخص دریفت [14]

| رکورد زلزله | μ , % | m , kg | C_{TMD} , kgs/m | k_{TMD} , kg/m |
|-------------|-----------|--------|-------------------|------------------|
| السترو | 3 | 36028 | 12782/87462 | 3049/174 |
| | 6 | 72056 | 364291/5392 | 30342/51 |
| | 9 | 108084 | 366660/5505 | 23034/66 |
| | 12 | 144112 | 275366/9725 | 40319/06 |
| | 15 | 180141 | 408461/7737 | 101264 |

مقادیری که برای MTMD2 و MTMD3 در نظر گرفته شده است در جدول (2) و جدول (3) نشان داده شده اند

جدول (2): مقادیر اولیه برای بهینه سازی پارامترهای MTMD3

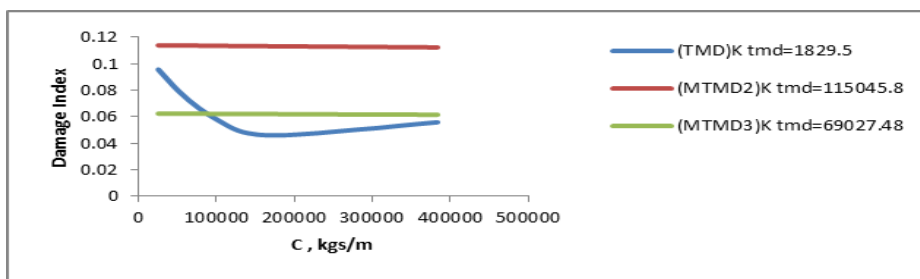
| μ , % | شماره میراگر | m , kg | C_{TMD} , kgs/m | k_{TMD} , kg/m |
|-----------|--------------|---------|-------------------|------------------|
| 3 | 1 | 12009/3 | 304/92 | 38348/6 |
| | 2 | 12009/3 | 304/92 | 38348/6 |
| | 3 | 12009/3 | 406/55 | 51131/5 |
| 6 | 1 | 24018/6 | 3034/25 | 84067/28 |

| | | | | |
|----|---|---------|----------|----------|
| | 2 | 24018/6 | 3034/25 | 84067/28 |
| | 3 | 24018/6 | 4045/67 | 112089/7 |
| 9 | 1 | 36028 | 6910/4 | 84067/28 |
| | 2 | 36028 | 6910/4 | 84067/28 |
| | 3 | 36028 | 9213/9 | 112089/7 |
| 12 | 1 | 48037/3 | 12095/72 | 165220/2 |
| | 2 | 48037/3 | 12095/72 | 165220/2 |
| | 3 | 48037/3 | 79106 | 220293/6 |
| 15 | 1 | 60047 | 15189/6 | 175055 |
| | 2 | 60047 | 15189/6 | 175055 |
| | 3 | 60047 | 20252/8 | 233406/7 |

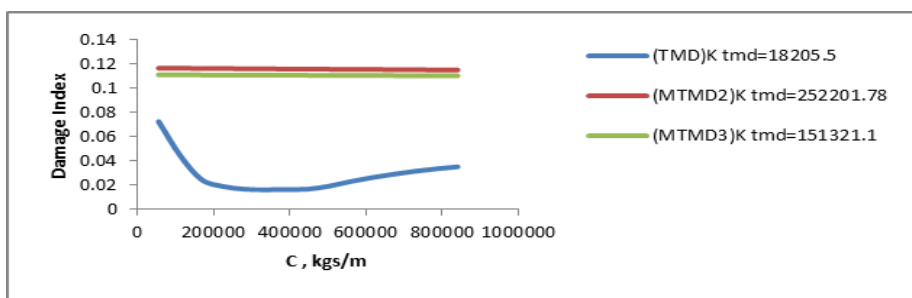
جدول (3): مقادیر اولیه برای بهینه سازی پارامترهای MTMD2

| $\mu, \%$ | شماره میراگر | m , kg | $C_{TMD}, \text{kgs/m}$ | $k_{TMD}, \text{kg/m}$ |
|-----------|-----------------|---------|-------------------------|------------------------|
| 3 | 1 | 18014 | 508/2 | 63914/37 |
| | 2 | 18014 | 508/2 | 63914/37 |
| 6 | 1 | 36028 | 5057/08 | 140112/1 |
| | 2 | 36028 | 5057/08 | 140112/1 |
| 9 | 1 | 54042 | 11517/3 | 203700/3 |
| | 2 | 54042 | 11517/3 | 203700/3 |
| 12 | 1 | 72056 | 20159/5 | 275367 |
| | 2 | 72056 | 20159/5 | 275367 |
| 15 | 1 | 90070/5 | 25316 | 291758/4 |
| | 2 | 90070/5 | 25316 | 291758/4 |

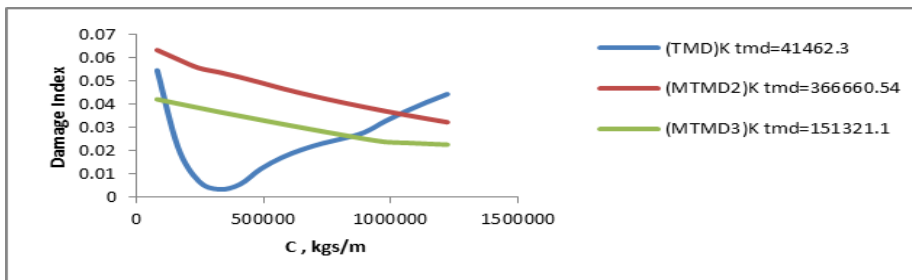
هر کدام از مقادیر جداول یک تا سه با گامهای 0/2 و تا سه برابر این مقادیر به میراگرهای جرمی نسبت داده می شود و شکلهای مودی و جابجایی حداکثر تحت رکورد زلزله السنتر و بدست می آید و بدنبال آن جابجایی تسلیم و شاخص خرابی در هر گام محاسبه می شود و در نهایت با توجه به کمترین مقدار شاخص و مقادیر سختی و میرایی متناظر با آن، مقادیر بهینه بدست می آیند. به عنوان نمونه نمودار شاخص در مقابل میرایی برای k_{TMD} 1/8 برای سازه SAC3 مجهز به TMD و MTMD2 و MTMD3 ترسیم می شود و با هم مقایسه می شوند.



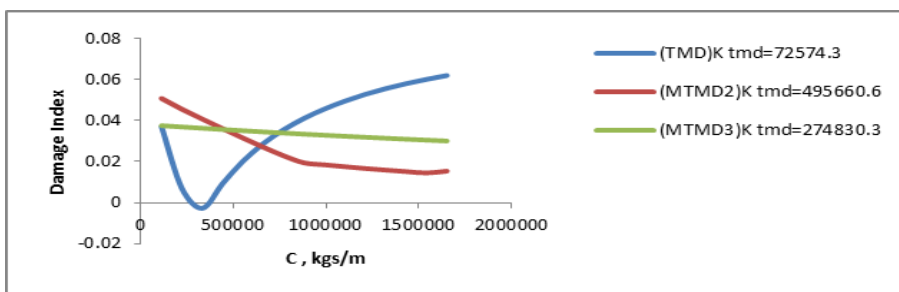
شکل (4): شاخص در مقابل C_{TMD} ، برای سختی های مختلف، درصد جرم 3



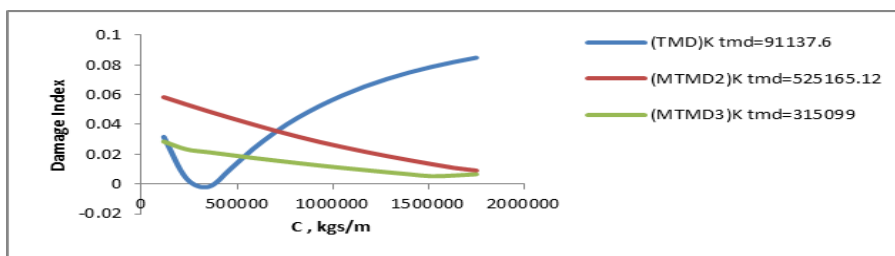
شکل (5): شاخص در مقابل C_{TMD} ، برای سختی های مختلف، درصد جرم 6



شکل (6): شاخص در مقابل C_{TMD} ، برای سختی های مختلف، درصد جرم 9



شکل (7): شاخص در مقابل C_{TMD} ، برای سختی های مختلف، درصد جرم 12



شکل (8): شاخص در مقابل C_{TMD} ، برای سختی های مختلف، درصد جرم 15

همانطور که در اشکال بالا مشاهده می شود نمودارهای مربوط به MTMD2 و MTMD3 نسبت به نمودار TMD منظم تر است و برای میرایی و سختی یکسان تغییرات شاخص کمتری نشان می دهند. نمودار مربوط به MTMD2 و MTMD3 برای درصد جرمهای 3 و 6 تقریباً موازی هم هستند و تغییرات کمتری نسبت به درصد جرمهای 9 و 12 و 15 دارند. نمودار مربوط به TMD مربوط به درصد جرمهای 12 و 15 در دو نقطه محور X را قطع می کنند که به احتمال زیاد مقادیر متناظر با این نقاط مقادیر بهینه می باشند. برای مشخص شدن این موضوع مقادیر میرایی و سختی، در بازه های دیگر نیز در نظر گرفته می شوند و مقدار شاخص محاسبه می شود و با توجه به کمترین شاخص مقادیر بهینه بدست می آیند. در انتخاب مقادیر بهینه باید دقت کرد که مقدار نسبت میرایی میراگر جرمی برای مقادیر در نظر گرفته شده، تفاوت زیادی با مقدار نسبت میرایی مربوط به مقادیر اولیه برای بهینه سازی نداشته باشد. در مراحل بعد مقدار میرایی $C_{TMD}(0/1-3)$ و مقدار سختی $K_{TMD}(0/1-3)$ در نظر گرفته می شود، با توجه به مقادیر بدست آمده برای شاخص و مقادیر میرایی و سختی متناظر با آنها، مقادیر بهینه پارامترهای MTMD2 و MTMD3 بدست می آیند. مقادیر بهینه برای هر کدام از سیستمها در جداول زیر آورده شده است. در جدول (4) مقادیر بهینه شده با استفاده از شاخص رافاییل و میر برای TMD نشان داده شده است.

جدول (4): مقادیر بهینه پارامترهای TMD با استفاده از شاخص رافاییل و میر

| رکورد زلزله | $\mu, \%$ | m, kg | $C_{TMD}, kgs/m$ | $K_{TMD}, kg/m$ |
|-------------|-----------|--------|------------------|-----------------|
| السترو | 3 | 36028 | 12782/87462 | 3049/174 |
| | 6 | 72056 | 364291/5392 | 30342/51 |
| | 9 | 108084 | 366660/5505 | 23034/66 |
| | 12 | 144112 | 275366/9725 | 40319/06 |
| | 15 | 180141 | 408461/7737 | 101264 |

در جدول 5 و 6 مقادیر بهینه شده با استفاده از شاخص رافاییل و میر برای MTMD2 و MTMD3 نشان داده شده اند.

جدول (5): مقادیر بهینه پارامترهای MTMD3 با استفاده از شاخص رافاییل و میر

| رکورد زلزله | $\mu, \%$ | شماره میراگر | m , kg | $C_{TMD}, \text{kgs/m}$ | $k_{TMD}, \text{kg/m}$ |
|-------------|-----------|-----------------|---------|-------------------------|------------------------|
| السترو | 3 | 1 | 12009/3 | 914/76 | 7669/72 |
| | | 2 | 12009/3 | 914/76 | 7669/72 |
| | | 3 | 12009/3 | 1219/65 | 10226/3 |
| | 6 | 1 | 24018/6 | 3034/25 | 126100/9 |
| | | 2 | 24018/6 | 3034/25 | 126100/9 |
| | | 3 | 24018/6 | 4045/67 | 168134/6 |
| | 9 | 1 | 36028 | 20731/2 | 16813/46 |
| | | 2 | 36028 | 20731/2 | 16813/46 |
| | | 3 | 36028 | 27641/7 | 22417/94 |
| | 12 | 1 | 48037/3 | 2419/144 | 198264/2 |
| | | 2 | 48037/3 | 2419/144 | 198264/2 |
| | | 3 | 48037/3 | 15821/2 | 264352/3 |
| | 15 | 1 | 60047 | 3037/92 | 60047 |
| | | 2 | 60047 | 3037/92 | 60047 |
| | | 3 | 60047 | 4050.56 | 140044 |

جدول 6-مقادیر بهینه پارامترهای MTMD2 با استفاده از شاخص رافائیل و میر

| رکورد زلزله | $\mu, \%$ | شماره میراگر | m , kg | $C_{TMD}, \text{kgs/m}$ | $k_{TMD}, \text{kg/m}$ |
|-------------|-----------|-----------------|---------|-------------------------|------------------------|
| السترو | 3 | 1 | 18014 | 1524/6 | 51131/5 |
| | | 2 | 18014 | 1524/6 | 51131/5 |
| | 6 | 1 | 36028 | 10114/16 | 84067/28 |
| | | 2 | 36028 | 10114/16 | 84067/28 |
| | 9 | 1 | 54042 | 23034/6 | 285180/4 |
| | | 2 | 54042 | 23034/6 | 285180/4 |
| | 12 | 1 | 72056 | 60478/5 | 330440/4 |
| | | 2 | 72056 | 60478/5 | 330440/4 |
| | 15 | 1 | 90070/5 | 30379/2 | 175055 |
| | | 2 | 90070/5 | 30379/2 | 175055 |

6. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از شاخص رافاییل و میر که یک شاخص بر مبنای جابجایی می باشد، مقادیر پارامترهای بهینه میراگر جرمی چندگانه و میراگر منفرد تحت اثر زلزله السترو بدست آورده شد. با توجه به مقادیر بدست آمده، مقدار میرایی بهینه بدست آمده برای MTMD3 با میرایی بهینه TMD برابر می باشد و در موارد دیگر میرایی و سختی بهینه با مقادیر اولیه تفاوت دارند. همانطور که نمودار k_{TMD} 1/8 نشان می دهد مقادیر شاخص برای درصد جرم، در TMD منفرد، تغییرات بیشتری نسبت به دو سیستم دیگر دارد و نمودار MTMD2 و MTMD3 منظم تر از TMD می باشند. در سیستمهای MTMD2 و MTMD3 با افزایش مقدار k_{TMD} تا k_{TMD} 3، نمودارها تقریباً بصورت موازی هم قرار می گیرند.

7. مراجع

- [1] Kelly, J.M., Skinner, R.I. and Heine, A.J. "Mechanism of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures," Bull. New Zealand Soc. Earthq. Eng., **5**, 63-88,1972.
- [2] Pinkaew, T., L Lukkunaprasit, p., Chatupote, p. "Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers for Damage Reduction of Structures," Jurnal of Engineering Structure, vol 25, pp.39-46,2002.
- [3] Chen, G. and Wu, J. "Optimal of Multiple Tuned Mass Damper for Seismic Structure," Jurnal of Structural Engineering, ASCE, vol 127, pp.1054-1062,2002.
- [4] Li, C. and Liu, Y. "Further Characteristics for Multiple Tuned Mass Damper," Jurnal of Structural Engineering, ASCE, vol 128, pp. 1362-1365,2002.
- [5] تابش پور، م. و بخشی، ع، "تحلیل مود شکست و شاخص خرابی سازه های بتنی در زلزله،" مجله مدل سازی در مهندسی، سال ششم، شماره پانزدهم، دانشگاه صنعتی شریف، 1387.
- [6] تابش پور، م. و بخشی، ع، (1383)، "مروری بر انواع شاخص های خرابی،" مجله بنا، شماره بیستم.
- [7] Roufaiel, M.S.L., and Meyer, C. "Reliability of Concrete Frames Damaged by Earthquake," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. ST3, pp. 445-457,1987.
- [8] Roufaiel, M.S.L., and Meyer, C. "Analysis of Damaged Concrete Frame Buildings," Deptment of Civil Engineering, Columbia University,1983.
- [9] Gupta, A., and Krawinkler, H., "Seismic Demands for Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame Structures," Deptment of Civil and Environmental Engineering, Report No. 132, Stanford University,1999.
- [10] Chopra, A.K., and Goel, R.K., "A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 31, pp. 561-582,2002.
- [11] عزیزی، ح، "طراحی بهینه ی پارامترهای TMD در کاهش پاسخ لرزه ای سازه های فلزی غیر خطی با استفاده از الگوریتم ژنتیک،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردیبهشت، ایران، 1390.