

Determination of Optimum Location of Multiple Tuned Mass Dampers in Regular and Irregular Steel Buildings in Plan under Near and Far-Fault Earthquakes

Mohsen Khazaei¹, Reza Vahdani^{2*}, Ali Kheyroddin³

1- Phd student, Department of Civil engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Using Tuned Mass Dampers (TMD) is one of the common methods for the passive control of structures subjected to earthquake. The structure of these dampers consists of three main parameters: mass, damping and stiffness. Multiple Tuned Mass Dampers (MTMD) reduce the amplitude of the responses by affecting over the modal properties of the structures. In the most cases, the installation of only a single TMD on the roof of the buildings or several dampers at the several points of the roof of the buildings requires considerable mass and space. In this study, the performance of MTMD in regular and irregular L- and U-shaped ten-story steel building is investigated under the near and far-field records. Nonlinear time history analysis is also applied in this paper. The SAP2000 software API function and MATLAB Genetic Algorithm (GA) is also utilized to determine the optimal locations of the MTMD in the roof plan. The results demonstrate the efficiency of MTMD on reducing the seismic responses of the building including acceleration, displacement and base shear such that on average, the roof displacement, acceleration, and the base shear are reduced 50,40 and 40% respectively. The optimal locations of MTMD in the ten-story model also indicate the importance of the symmetrical positioning of the dampers relative to the center of mass of building.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 November 2019

Revise Date: 02 April 2020

Accept Date: 19 April 2020

Keywords:

Multiple Tuned Mass Damper
Near and Far-Fault
Earthquakes
Irregularity on plan
Nonlinear Dynamic Analysis
Optimum Location

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.207567.1995>

*Corresponding author: Reza Vahdani
Email address: Rvahdani@Semnan.ac.ir

تعیین موقعیت بهینه میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در ساختمان های فولادی

منظم و نامنظم در پلان تحت زلزله های دور و نزدیک گسل

محسن خزائی^۱، رضا وهدانی^{۲*}، علی خیرالدین^۳

۱- دانشجوی دکتری زلزله دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

یکی از شیوه های معمول کنترل غیرفعال سازه ها در برابر زمین لرزه بهره گیری از سیستم میراگرهای جرمی تنظیم شده است. ساختار این میراگرها متشکل از سه پارامتر اصلی یعنی جرم، میرایی و سختی می باشد. میراگرهای جرمی تنظیم شده غالباً با اثرگذاری روی یک مود سبب کاهش دامنه پاسخ ها می گردند. تاکنون در بیشتر موارد تنها یک میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) در بام ساختمان و یا چند میراگر محدود در چندین نقطه در ارتفاع ساختمان نصب می شد که این مستلزم در نظر گرفتن جرم و فضای قابل توجه در تقاطعی از سازه به عنوان سربار و از آن مهمتر پیش بینی جسمی که جرم مورد نیاز را تامین کند می باشد. در این تحقیق کارایی میراگر جرمی تنظیم شده توزیعی چندگانه (MTMD) در ساختمان ده طبقه فولادی منظم و نامنظم L و U شکل، تحت رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل مورد بررسی قرار گرفته و با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تاثیرات میراگرهای جرمی چندگانه در پاسخ های لرزه ای ارزیابی شده است. همچنین برای تعیین موقعیت بهینه MTMD در پلان طبقه بام از توابع API نرم افزار SAP2000 و الگوریتم ژنتیک برنامه MATLAB استفاده شده است. بررسی نتایج نشان دهنده ای تاثیرات میراگرهای چندگانه جرمی در کاهش پاسخ لرزه ای شتاب، جابجایی و برش پایه در سازه ها است؛ بطوری که بطور میانگین مقدار جابجایی بام در حدود ۵۰ درصد، شتاب طبقه بام و برش پایه در حدود ۴۰ درصد کاهش یافته اند. همچنین نتایج حاصل از تعیین موقعیت بهینه برای MTMD در مدل ۱۰ طبقه نشان دهنده ای اهمیت قرارگیری میراگرها بصورت متقارن نسبت به مرکز جرم ساختمان است.

کلمات کلیدی: میراگر جرمی چندگانه، رکورد حوزه دور و نزدیک گسل، نامنظمی در پلان، تحلیل دینامیکی غیرخطی، موقعیت بهینه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.207567.1995	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.207567.1995	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۳۹۹/۰۱/۳۱	۱۳۹۹/۰۱/۳۱	۱۳۹۹/۰۱/۱۴	۱۳۹۸/۰۸/۱۳
			رضا وهدانی		*نویسنده مسئول:	
			Rvahdani@semnan.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در طی رخداد زلزله مقدار قابل توجهی انرژی به سازه اعمال می‌گردد که اگر به طریقی جذب یا مستهلک نشود باعث ویرانی می‌شود که در پی آن خسارات مالی و جانی زیادی وارد خواهد شد. در روش‌های مرسوم، ساختمان با استفاده از ترکیب سختی، قابلیت شکل‌پذیری، استهلاک انرژی و همچنین اینرسی در برابر نیروهای دینامیکی (نظیر باد، زلزله، ارتعاش ماشین‌آلات، امواج دریا و ...) از خود مقاومت نشان می‌دهد. مقدار میرایی در این سازه‌ها بسیار کم است و از این‌رو انرژی مستهلک‌شده در محدوده رفتار الاستیک سازه ناچیز است. این ساختمان‌ها تحت تأثیر نیروهای دینامیکی قوی نظیر زلزله با گذر از محدوده الاستیک، تغییرمکانهای زیادی را تجربه می‌کنند. تغییرمکانهای غیر الاستیک موجب به وجود آمدن مفاصل پلاستیک به صورت موضعی در نقاطی از سازه می‌شود که خود افزایش شکل‌پذیری و در نتیجه مقدار زیادی از انرژی زلزله به واسطه تخریب‌های موضعی در سیستم مقاوم جانبی سازه مستهلک می‌شود. در سالهای اخیر تلاش‌های فراوانی به منظور کاربرد دستگاه‌های کنترل مدرن در سازه‌های در معرض زلزله انجام شده است، این دستگاه‌ها با جذب مقداری از انرژی ورودی به سازه از تخریب در اعضا حین وقوع زلزله جلوگیری می‌نماید [1]. روش‌های کنترل ارتعاش مختلف شامل غیرفعال، نیمه فعال، فعال و هیبرید می‌باشد و فاکتورهای مختلفی از قبیل کارایی، وزن، هزینه وسیله و هزینه اجرا، نگهداری و ایمنی روی انتخاب نوع خاص وسیله کنترل ارتعاش اثر می‌گذارد. میراگر جرمی (TMD) یک نوع سیستم میرایی غیرفعال است که به‌عنوان یک جرم ثانویه به سازه اصلی وصل می‌شود و از طریق فنر و میرایی متصل باعث کاهش پاسخ دینامیکی سازه می‌شود که به‌طور گسترده برای کنترل سیستم‌های مهندسی و سایر سازه‌های عمران استفاده می‌شود [2,3]. میراگر جرمی دارای جرمی در حدود ۱ تا ۵ درصد جرم کل سازه است که به وسیله یک فنر و میراگر به محلی از سازه که معمولاً دارای بیشترین تغییر مکان است، متصل می‌شود. میراگرهای جرمی را معمولاً با فرکانس مود اصلی سازه تنظیم می‌کنند، هنگامی که این مود سازه تحریک می‌شود، میراگر جرمی با حرکت غیر هم فاز خود نسبت به سازه انرژی زلزله را جذب و میرا می‌کند. قابلیت نصب و اجرای ساده از مزایای آن است. میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) از چندین میراگر جرمی منفرد تشکیل شده است که این میراگرها می‌توانند به دو شکل موازی و سری طراحی و در سازه نصب شوند و به صورت مجتمع یا توزیع شده در سازه به کار می‌روند. در این تحقیق مواردی شامل مروری بر تحقیقات مرتبط با موضوع، روابط حاکم بر میراگر جرمی توزیعی چندگانه، معرفی مدل‌های سازه‌ای بکار رفته در تحقیق، معرفی رکوردهای بکار رفته در تحلیل، صحت سنجی مدل و نرم افزار، بررسی نتایج قرارگیری میراگرهای جرمی چندگانه در مدل ده طبقه در طبقات نهم و دهم، تعیین موقعیت بهینه میراگرهای جرمی در پلان مدل‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

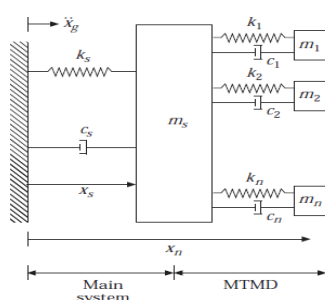
۲- تاریخچه تحقیقات

در سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شده وزنه‌ای به جرم مشخص در محل مشخصی از سازه نصب گردیده و توسط یک فنر و یک میراگر با ضرایب سختی و میرایی مشخص، دامنه ارتعاشات سازه در مود اول کنترل می‌گردد، البته هرگاه تحریک خارجی به نحوی باشد که سهم مودهای بالاتر در پاسخ سازه بیشتر از مود اول باشد ممکن است سیستم جرم میراگر تنظیم‌شده اثر معکوس داشته و دامنه ارتعاشات را افزایش دهد. ایده اولیه TMD اولین بار توسط فرام [4] در سال ۱۹۰۹ ارائه و سپس توسط ارموندروید و دن هارتوک [5] در سال ۱۹۵۶ مطالعه شد. برای کاربردهای لرزه‌ای، تعدادی از محققین چن و کلارک [6,7] نشان دادند که سیستم TMD انفرادی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مؤثر نیستند. دو علت برای این مورد وجود دارد: اولاً، بارهای زلزله به‌نوعی ضربه‌ای هستند و به‌سرعت به مقادیر ماکزیمم می‌رسند. ثانیاً، تکانهای زلزله شامل طیف گسترده‌ای از مؤلفه‌های فرکانسی است و اغلب شامل ارتعاشات مشخصی در هر دو مود اساسی و مودهای بالاتر سازه‌های ساختمانی بلند می‌باشد. میراگر تک جرمی برای فرکانس‌های اساسی تنظیم‌شده است و قادر به کنترل مودهای بالاتر ارتعاشی نیست. در گزارش‌ها اشاره شده است که میراگر جرمی تک می‌تواند پاسخ‌های مودهای بالاتر را به علت کوپل بین مودهای اساسی و بالاتر تقویت کند. با توجه به عیوب استفاده از میراگر جرمی تک، محققین زیادی سیستم MTMD یعنی میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه را پیشنهاد داده‌اند که مودهای مختلف را تنظیم و هدایت می‌کند و در جاهای مختلف سازه قرار می‌گیرد. مک نامارا [8] در سال ۱۹۷۷ تأثیر جداسازی ارتعاش TMD تحت نویز سفید و کاربرد این روش تحت ارتعاشات ناشی از باد ساختمان را بررسی کرد. کار بر روی

¹ Tuned Mass Damper

² Multi Tuned Mass Damper

TMD توسط واربرتون و آیورنید [9] در سال ۱۹۸۰ برای تعیین مقادیر بهینه مشخصات TMD که به سازه‌های الاستیک، صفحات راست گوشه و پوسته‌های استوانه‌ای که تحت بارهای تناوبی قرار داشتند متصل شده بود، گسترش یافت. واربرتون ویژگی‌های بهینه میراگر برای یکسری از تحریکات و پارامترهای پاسخ را محاسبه کرد. ویلاورده و کویاما [10] در سال ۱۹۹۴ برای بررسی TMD سه سازه مختلف شامل یک قاب دوبعدی ۱۰ طبقه برشی و یک قاب سه طبقه و یک پل سه بعدی را تحت ۹ نوع زلزله مختلف مورد آزمایش قرار داد. ویرشینگ و کمپبل [11] در سال ۱۹۷۴ مشکل بهینه‌سازی مشخصات TMD و نسبت میرایی و فرکانس طبیعی که به ساختمان چندطبقه متصل شده است را حل کرد و پاسخ اولین مود سازه اصلی مجهز به یک TMD را تحت ارتعاش جانبی زمین نوپز سفید گاوسن تحلیل کرد. آبه و ایگوشا [12] و جانگید [13] تأثیر میراگر تنظیم شده چندگانه را مطابق با مدل سازه ای شکل ۱ روی سازه اصلی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها با استفاده از تحلیل مجانب برای مقاومت ظاهری دستگاه‌های الحاقی به این نتیجه رسیدند که چندین زیر میراگر با فرکانس‌های طبیعی نزدیک به هم که به اندازه کافی محدوده فرکانس وسیعی را پوشش می‌دهند را می‌توان با یک میرایی معادل که متناسب با جرم‌های میراگرها است نشان داد.



شکل ۱: مدل سازه‌ای میراگر جرمی چندگانه [13]

لی [14] در سال ۲۰۰۲ تأثیر ارتعاشات زمین پهن باند را بر روی انواع مختلف طرح‌های MTMD خطی بررسی کرد و با استفاده از فاکتور بزرگنمایی دینامیکی تغییر مکان و همچنین فاکتور بزرگنمایی دینامیکی شتاب، به‌عنوان ملاک طراحی بهینه با ۵ مدل میراگرهای MTMD با ترکیبات مختلف سختی، جرم و ضریب میرایی و نسبت میرایی مقایسه شدند. کریم و کلین [15] در سال ۱۹۹۵ روش کنترل به کمک MTMD ها را که به یک سازه مرتعش متصل شده بودند را در مقیاس حقیقی مورد بررسی قراردادند. آنها نتایج و مطالعات قبلی را تأیید کرده و نشان دادند که کارایی MTMD در محدوده فرکانس‌های طبیعی، بیشتر از پارامتر نسبت میرایی به تعداد میراگرهای جرمی وابسته است. عبدالله و ریچاردسون [16] در مورد سازه‌های مجاور با استفاده از STMD^۳ یا سیستم میرایی جرمی تنظیم شده مشترک برای کاهش ارتعاش سازه‌ها و کاهش اثرات POUNDING را بررسی کردند. با توجه به اتصال STMD به هر دو سازه، مشکل تنظیم سختی و میرایی حل خواهد شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد بهتر سیستم STMD نسبت به TMD است و روش مؤثری برای کاهش اثرات ضربه به ساختمان‌های مجاور و کاهش ارتعاشات می‌باشد. زهرایی و قنادی [17] اثر میراگرهای جرمی تنظیمی در کنترل ساختمان‌های تحت زلزله از طریق مطالعه اثر کنترل ارتعاش میراگر جرمی روی ساختمان‌های ۵، ۸، ۱۰ و ۱۵ طبقه قاب خمشی ویژه در هر دو راستا را بررسی کردند. توآن و شانگ [18] روی کاهش اثرات میراگر جرمی روی پاسخ دینامیکی برج تایپه ۱۰۱ تحقیق کردند با این توضیح که برج تحت بار باد و تحریک زلزله قرار دارد. نتایج شبیه‌سازی شده با آزمون تونل باد و رکوردهای مورد نظر مقایسه شد. نتایج حاکی از تأثیر میراگر در کاهش ارتعاش باد بود، اگرچه خیلی تأثیر زیادی در کاهش ارتعاش نیروی زلزله نداشت. هیرد و اهر [19] به بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمان بتنی با پلان نامنظم تحت نیروی زلزله با تحلیل پوش آور پرداختند. مدل‌ها با پلان نامنظم و شکل L تحلیل و با پلان نامنظم با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ مقایسه شده است. سوتو و عادل [20] در تحقیق خود از هشت سری مختلف معادلات ارائه شده برای تنظیم پارامترهای میراگر جرمی با ساختمان ۵ طبقه با پلان و ارتفاع نامنظم استفاده کرده و یک ساختمان ۱۵ طبقه و ۲۰ طبقه با پلان نامنظم را در معرض بارگذاری لرزه‌ای قرار داد. سپس عملکرد میراگر جرمی دو جهت با میراگر جرمی پاندولی با ۳ سازه مختلف با پلان و نامنظمی در ارتفاع از فرم ۵ تا ۲۰ طبقه و پیوند از محدوده ۰.۵۵ تا ۴.۲۵ ثانیه در معرض زلزله لوما پریتا قرار گرفته و مقایسه

³ Shared Tuned Mass Damper

شده‌اند. آنها همچنین به بررسی کنترل ارتعاش ساختمان‌های بلندمرتبه نامنظم با استفاده از میراگر جرمی و میراگرهای جرمی دو جهت پرداختند. واکر و همکاران [21] به بررسی پلان با نامنظمی‌های مختلف با روش‌های تحلیلی طی زلزله پرداختند. والوندسون و ناو [22] در تحقیق خود حدود جرم، مقاومت و سختی برای ساختمان‌های منظم به‌وسیله آیین‌نامه UBC را بررسی کردند. سازه‌های انتخابی دویعدی با ۵، ۱۰ و ۲۰ طبقه بوده و نامنظمی با تغییر در خواص یک طبقه یا کف ایجاد شده است. ردی و همکاران [23] به این نتیجه رسیدند که میراگر جرمی با درصد جرمی ۵ تأثیرگذارتر است و ابعاد میراگر باید متناسب با فرکانس سازه باشد. باقری و رحمانی [24] از یک میراگر ویسکوز به همراه میراگر جرمی برای کنترل ارتعاش سازه‌ها استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که میراگر جرمی به‌طور مشخص باعث کاهش پاسخ سازه می‌شود و پیشنهاد کردند میراگر جرمی بهینه (ترکیب میراگر جرمی و ویسکوز) بدون نیاز به میراگر ویسکوز با عملکرد مناسب به‌کارگیری شود. وانگ و همکاران [25] میراگر جرمی را برای کنترل ارتعاشات گردابی عرشه پل بکار گرفتند و به این نتیجه رسیدند که میراگر جرمی عملکرد خوبی در کاهش پاسخ نوسانات عرشه پل دارد. لی و پنگ [26] روش طراحی جدیدی برای میراگر جرمی غیرخطی بر اساس فرکانس پرشی ارائه کردند که بر اساس آن میراگر جرمی نسبت به روش طراحی خطی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. لو و همکاران [27] مدل‌های ۵ و ۲۰ طبقه را به‌عنوان ساختمان‌های غیرخطی مبنا جهت مقایسه میراگرهای جرمی بهینه و میراگر ذرات بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد میراگر ذرات نسبت به میراگر جرمی اثرات کنترلی بهتری از خود نشان داده که نتایجی از قبیل چرخش بیشینه مفاصل پلاستیک، جذب انرژی و همچنین جابجایی نسبی بین سازه اصلی و میراگر موردنظر می‌باشد. لین [28] یک نوع میراگر جرمی بنام TSMD* ابداع کردند که با استفاده از خواص مودال سه درجه آزادی مودهای ارتعاشی سه‌گانه در ساختمان با پلان نامتقارن دوجهته فرمول‌بندی شده است که عملکرد آن به‌وسیله تابع پاسخ فرکانس و پاسخ‌های لرزه‌ای یک سازه یک طبقه و ۲۰ طبقه با پلان نامتقارن مورد تأیید قرار گرفته است. لو و همکاران [29] بدین موضوع اشاره کردند که در سال‌های اخیر توجه زیادی به particle damper که شباهت زیادی به میراگر جرمی دارد شده است، اگرچه مکانیسم میرایی متفاوتی در آن‌ها جاری است. نتایج نشان‌دهنده این واقعیت بود که به‌طور نسبی کنترل ارتعاش با میراگر ذره‌ای عملکرد بهتری نسبت به میراگر جرمی در شاخص‌های خطی و هم شاخص‌های غیرخطی از قبیل بیشینه چرخش مفاصل پلاستیک، جذب انرژی و موارد مشابه دارد. کامگار و همکاران [30] روی طراحی بهینه میراگر جرمی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه متمرکز شده و سازه‌های بلندمرتبه را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور مدل ۴۰ طبقه برشی را انتخاب و از الگوریتم WOA برای به‌کارگیری پارامترهای بهینه TMD استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این مطلب بود که نوع خاک و تابع انتخاب‌شده در طراحی بهینه سیستم میراگر جرمی در پاسخ‌ها تأثیرگذارند. الیاس و ماتساگار [31] عملکرد جاذب ارتعاش چندگانه توزیع‌شده جرمی روی سازه غیرخطی را با جاذب ارتعاش تک مقایسه کردند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده این مطالب بود که توزیع میراگر جرمی باعث اثرات مطلوب روی سازه در معرض تحریکات زلزله خواهد شد. رحیمی و کنده [32] در مورد تعیین موقعیت بهینه و خواص میراگر جرمی در ساختمان‌های بلندمرتبه با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحقیق کردند. آنها از میراگر جرمی چندگانه توزیع شده در ارتفاع ساختمان استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که در دامنه مودهای بالا، میراگرهای توزیع شده در ارتفاع ساختمان در مقایسه با میراگرهای جرمی موثرتر هستند و موقعیت بهینه میراگرها به فرکانس تحریک زلزله وابستگی زیادی دارد. حال با توجه به بررسی تاریخچه تحقیقات محققین در مورد میراگرهای جرمی و تمرکز آنها بر روی استفاده از میراگر تک در طبقه بام یا توزیع میراگرها در طبقات ساختمان، در این تحقیق به بررسی موقعیت بهینه میراگرهای جرمی توزیع شده چندگانه در پلان طبقه بام بخصوص در ساختمان‌های دارای نامنظمی در پلان پرداخته شده و تغییرات پارامترهای لرزه‌ای با تغییر موقعیت میراگر در پلان بام بررسی شده است.

۳- روابط حاکم بر میراگر جرمی تنظیم‌شده

جهت تعیین پارامترهای MTMD از روش سادک و همکاران [33] (طبق روابط که در روابط ۱ تا ۳ به آن‌ها اشاره شده است) که برای سازه‌های چند درجه آزادی ارائه شده، به‌عنوان مقادیر اولیه و نمونه استفاده می‌گردد.

⁴ Top-Story Mass Damper

$$\mathcal{F} = \frac{1}{1+\mu\phi} \left[1 - \beta \sqrt{\frac{\mu\phi}{1+\mu\phi}} \right] \quad (1)$$

$$\xi = \phi \left[\frac{\beta}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right] \quad (2)$$

$$\begin{cases} m_{TMD} = \mu \cdot M_n \\ K_{TMD} = \omega_0^2 \mathcal{F}^2 m_{TMD} \\ C_{TMD} = 2\xi \omega_0 \mathcal{F} m_{TMD} \end{cases} \quad (3)$$

که در روابط فوق f فرکانس بهینه که نسبت فرکانس میراگر به فرکانس سازه است، ξ درصد میرایی بهینه، μ نسبت جرمی که نسبت جرم میراگر به جرم سازه است، β درصد میرایی سازه، ϕ دامنه شکل مود در مکان قرارگیری TMD بطوریکه ضریب سهم مؤدی برابر واحد باشد، M_n جرم مؤثر مود اول یا هر مود که میراگر برای کنترل آن تنظیم شده و C_{TMD} ، k_{TMD} ، m_{TMD} به ترتیب میرایی، سختی و جرم میراگر TMD است.

۴- معرفی مدل‌های سازه‌ای

۴-۱. فرضیات و بارگذاری

مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی ST37 به صورت جدول ۱ است:

جدول ۱. مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی

تنش تسلیم (F_y)	تنش نهایی (F_u)	ضریب پواسون (ν)	تنش تسلیم مورد انتظار (F_{ye})	تنش نهایی مورد انتظار (F_{ue})
۲۴۰۰ kg/cm ²	۳۷۰۰ kg/cm ²	۰/۳	۲۶۴۰ kg/cm ²	۴۰۷۰ kg/cm ²

سازه‌ها جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی بصورت سه بعدی مدل سازی و تحلیل شده‌اند. سازه‌ها بصورت ساختمان فولادی با شکل پذیری ویژه طراحی شده، بار مرده طبقات برابر 500 kgf/m^2 و بار زنده طبقات 200 kgf/m^2 ، ارتفاع طبقات $3/2$ متر در نظر گرفته شده دهانه‌های ۶ متری با ۵ دهنه در پلان منظم می‌باشد. با توجه به تحقیقات سوتو و عادل [20] که در تاریخچه تحقیقات اشاره شده است، نسبت جرمی ۳ درصد برای طراحی میراگرها و نسبت میرایی ۵ درصد برای سازه‌ها براساس ASCE2010 در نظر گرفته شده است. در طراحی مدل‌ها، منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد و خاک در نظر گرفته شده برای طراحی ساختمانها تپ سه فرض شده است. برای مشارکت نکردن جرم المان‌ها در تعیین مرکز جرم سازه‌ها و توزیع جرمی یکنواخت و تطابق مرکز هندسی و مرکز جرم، جرم مصالح در نرم‌افزار صفر وارد شده و با اعمال دیافراگم صلب در طبقات، حرکت گره‌های هر طبقه در جهت افقی نسبت به هم مقید شده است، بنابراین تیرها تحت بارگذاری، تغییر طول محوری ندارند. ۵۰٪ ناحیه اتصال به صورت ناحیه صلب انتهایی برای تیرها و ستون‌ها در نظر گرفته شده‌اند. متغیرهای مؤثر در ضریب زلزله به صورت جدول ۲ در نظر گرفته شده است. جرم مؤثر لرزه‌ای در سازه‌های مورد بررسی جهت محاسبه برش پایه استاتیکی، ناشی از بارهای ثقلی شامل تمام بار مرده به اضافه ۲۰٪ بار زنده می‌باشد.

جدول ۲: پارامترهای مدل ۱۰ طبقه

R _u	T	T.	T _s	K	B	C
7.5	1.07	0.15	0.7	1.42	1.632	0.076

۴-۲- طراحی اعضای سازه‌ها

بعد از تحلیل طیفی، المان‌های سازه‌ها در نرم‌افزار Sap2000.v.19.2 طراحی شدند. برای طراحی اعضا، از آیین‌نامه AISC360-10 استفاده شده و در طراحی اعضا، ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه اعمال شده است. مقاطع مورد استفاده برای تیرها HEB و برای ستون‌ها BOX است.

۵- زمین لرزه‌های انتخابی

برای تعیین میزان تأثیر سیستم کنترلی ۷ شتاب‌نگاشت مربوط به ۷ زمین‌لرزه مختلف حوزه نزدیک گسل و ۷ زمین‌لرزه مربوط به حوزه دور از گسل انتخاب شده است. مشخصات رکوردهای انتخابی در جدول ۳ و ۴ آورده شده است. در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها سعی شده است از شتاب‌نگاشت‌های متنوع استفاده شود، بطوریکه زلزله‌های با PGA زیاد و کم و همچنین زلزله‌های نزدیک و دور از گسل در شتاب‌نگاشت‌های انتخابی وجود داشته باشد تا تأثیرات محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله نیز در نظر گرفته شوند.

جدول ۳: مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

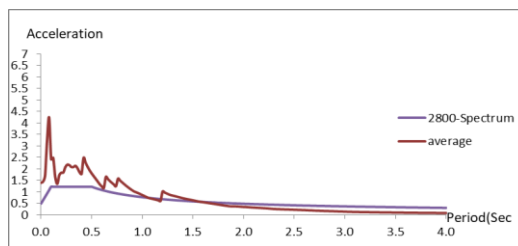
ردیف	رکورد	Station	Year	Dis(km)	Mag	PGA	PGV(cm/s)	Ts(sec)	Duration(sec)
1	Alaska-Denali	Pump	2002	2.74	7.9	0.32	424.9	3.48	86
2	Bam	Bam	2003	1.7	6.6	0.59	417	0.78	37.36
3	Chi-Chi	Thy101	1999	9.94	7.62	0.44	261.38	0.9	26.48
4	Chi-Chi	Tcu 68	1999	0.32	7.62	0.56	312	0.42	12.48
5	Imperial-Valley	El centro Array	1979	1.35	6.53	0.43	250.12	0.24	8.49
6	Kobe	Takatori	1995	1.47	6.9	0.61	206	1.22	11.34
7	Borujerd	Silakhor	1909	12	7.3	0.44	321	1.52	56.34

جدول ۴: مشخصات زلزله‌های حوزه دور از گسل

ردیف	رکورد	Station	Year	Dis(km)	Mag	PGA	PGV(cm/s)	Ts(sec)	Duration(sec)
1	Chi-Chi	Chy 065	1999	83	7.62	0.6	130.79	0.62	28.515
2	Chi-Chi	Tap95	1999	109	7.62	0.15	178.062	0.98	15.8
3	Imperial-Valley	Oak-2	1979	18.87	5.01	0.24	148.23	0.32	12.515
4	Imperial-Valley	Outers	1979	24.23	6.53	0.26	38.78	0.16	1.75
5	Kobe	Hik	1995	95	6.9	0.14	110.64	0.6	17.04
6	Loma Perieta	Halls Valley	1989	30.25	6.93	0.23	107.85	0.3	10.78
7	Manjil	Qazvin	1990	49.97	7.37	0.13	83.79	0.16	25.71

۵-۱- هم‌پایه نمودن شتاب‌نگاشت‌ها

طبق آئین‌نامه ۲۸۰۰، شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده برای تحلیل سازه باید هم‌پایه شوند. برای هم‌پایه سازی شتاب‌نگاشت‌ها، بعد از مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها نسبت به حداکثر مقدار خود (PGA)، طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها برای میرایی ۵ درصد تهیه می‌شود. سپس از طیف‌های به دست آمده شتاب‌نگاشت‌ها، متوسط گیری شده و در محدوده زمان تناوب‌های 0.2T و 1.5T مقایسه می‌شود، به طوری که طبق آئین‌نامه ۲۸۰۰، طیف متوسط باید ۱/۴ برابر بیشتر از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ قرار گیرد. بعد از آنکه طیف پاسخ رکوردهای زلزله تهیه شدند، متوسط آن‌ها با طیف استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده و مقیاس گشته است که نتیجه آن در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: مقایسه متوسط طیف پاسخ رکوردهای زلزله با طیف استاندارد ۲۸۰۰

۶- مشخصات میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD)

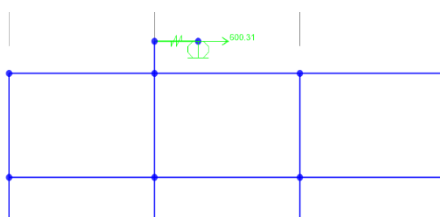
در این مقاله با توجه به تحقیق سوتو و عادل [20] و بررسی کامل در مورد روابط محققین مختلف و پارامترهای طراحی میراگر جرمی و تعیین درصد بهینه ۳ درصد برای درصد جرمی میراگر و پیشنهاد کونور [34]، از درصد جرمی ۳ درصد برای میراگر جرمی مدل های موجود در این تحقیق استفاده شده است و فرکانس میراگر جرمی به سازه اصلی ۱/۲۵ در نظر گرفته شده و با استفاده از روابط حاکم بر میراگر جرمی پارامترهای مرتبط با میراگر جرمی محاسبه و برای مدل ۱۰ طبقه منظم و نامنظم در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: پارامترهای طراحی میراگر جرمی در مدل ۱۰ طبقه منظم و نامنظم

مدل	μ	m_d (kg)	k_d (ton/m)	C_c (ton/sec)	C_d (ton/sec)
۱۰ طبقه منظم	۰/۰۳	22779	496.65	212.3	22.07
۱۰ طبقه L شکل	۰/۰۳	16297	311.93	142.59	14.83
۱۰ طبقه U شکل	۰/۰۳	17531	227.2	126.22	13.12

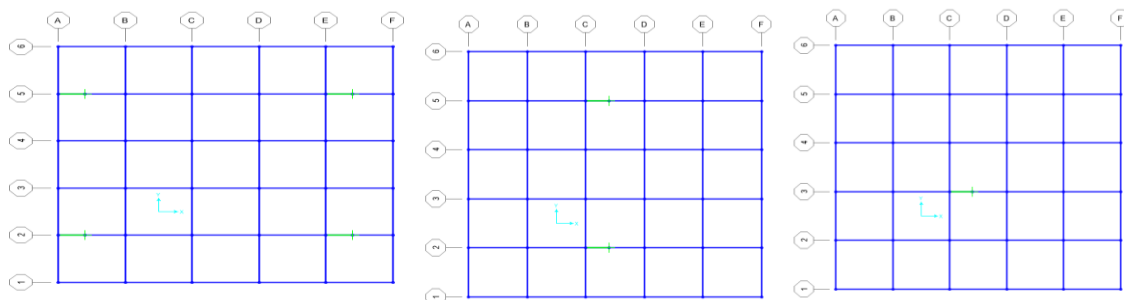
۷- مشخصات هندسی مدل ها و جانمایی میراگرها

پلان بکار رفته در مدل ها به صورت مربعی منظم و نامنظم که دهانه های ۵ متری به تعداد ۵ دهانه برای مدل های منظم در نظر گرفته شده است. پلان های نامنظم با توجه به تعریفی که از نامنظمی هندسی در پلان در آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش ۴ اشاره شده است، تهیه و برای تحلیل در نرم افزار SAP2000 تعریف شده اند. میراگر جرمی در مدل های بکار رفته همانند شکل ۳ تعریف شده است.

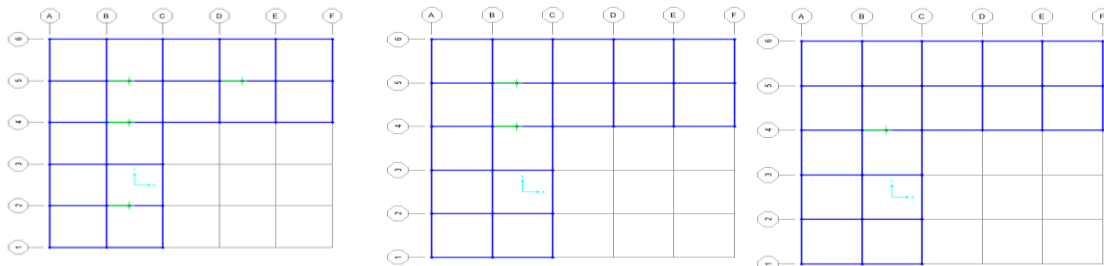


شکل ۳: اعمال جرم در مدل میراگر جرمی تنظیم شونده

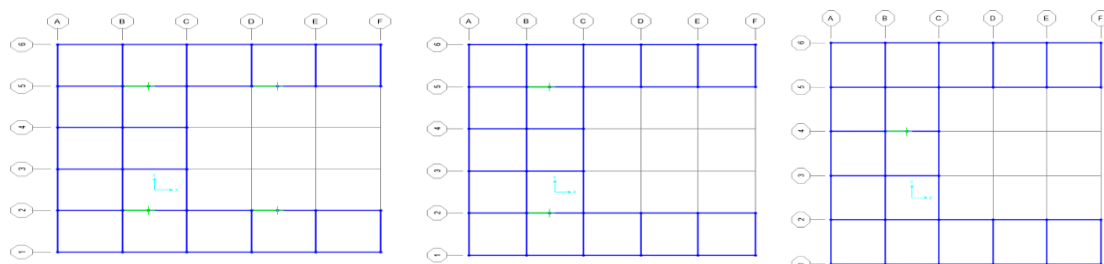
در این تحقیق، میراگرها در سه حالت استفاده شده است. ابتدا میراگرها در یک نقطه از بام، در حالت دوم در دونقطه از بام و در حالت سوم در چهار نقطه از بام قرار گرفته اند. نحوه قرارگیری میراگرها در شکل های ۴ تا ۶ آورده شده است.



شکل ۴. میراگر در یک نقطه (سمت راست) و دونقطه (وسط) و در چهار نقطه از مدل منظم (سمت چپ)



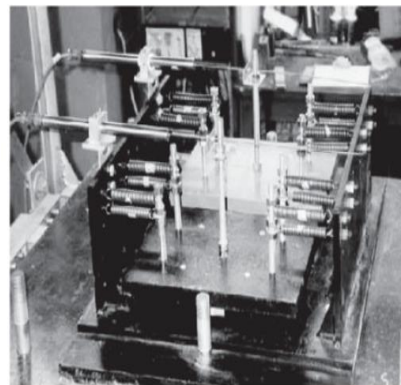
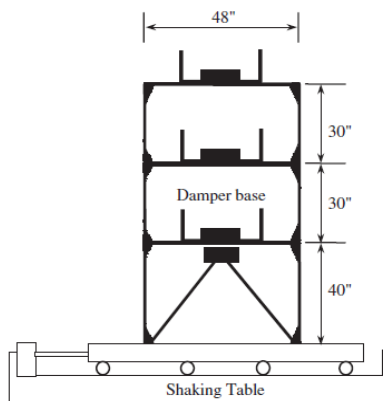
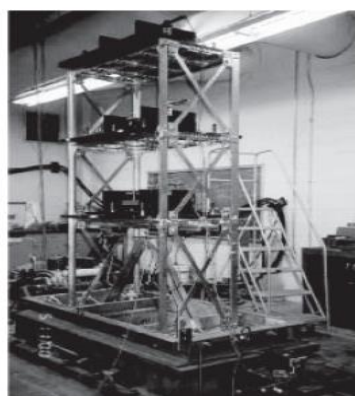
شکل ۵. میراگر در یک نقطه (سمت راست) و دونقطه (وسط) و چهار نقطه از مدل L شکل (سمت چپ)



شکل ۶. میراگر در یک نقطه (سمت راست) و دونقطه (وسط) و چهار نقطه از مدل U شکل (سمت چپ)

۸- صحت سنجی

در این تحقیق جهت صحت سنجی، اثرات میراگرهای چندگانه جرمی در رفتار لرزه‌ای سازه‌ای سه طبقه به صورت آزمایشگاهی که توسط چن و وو [35] انجام شده، مورد بررسی قرار گرفته است. سازه بررسی شده در تحقیق چن و همکاران با مقیاس یک چهارم به صورت قاب خمشی فولادی در روی میز لرزه دانشگاه میسوری- رولا مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد سازه ۴۸ اینچ طول، ۲۴ اینچ عرض و ۱۰۰ اینچ ارتفاع و سازه مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: نمای سازه و میراگر جرمی آزمایش شده روی میز لرزان [35]

این سازه طراحی شده برای آزمایش کنترل سازه ای که به یک محرک هیدرولیک نصب شده در سقف اول متصل شده است. مدل با مهاربند فولادی در سه طبقه مهار شده و با جک هیدرولیکی تحت تحریک لرزه ای قرار گرفته است. مهار سازه با مهاربند فولادی صرفاً به جهت ارزیابی عملکرد میراگر جرمی هیچ نقشی در رفتار سازه ندارد. هر میراگر جرمی از یک بلوک جرمی، مجموعه ای از فنرهای ممتد و بلبرینگ شفت کشویی تشکیل شده است. بلوک جرم از طریق فنرهای پسوند به دیواره پایه میراگر وصل می شود و می تواند فقط در امتداد شفت های دوتایی حرکت کند. فرکانس طبیعی میراگر را می توان با استفاده از انواع مختلف فنر تنظیم کرد. از آنجاکه هیچ عنصر میرایی به عمد به سیستم میراگر اضافه نشده است، عمل اصطکاک بین یاتاقان و شفت ها قسمت اصلی میرایی سیستم را تشکیل می دهد. آزمایش دینامیکی MTS توسط میز لرزان که می تواند ارتعاش به اندازه ۲۰ تن در مسیر طولی و فرکانس موثر در محدوده ۰/۰۱ تا ۱۰ هرتز و بیشینه ضربه با جابجایی ۱ فوت ایجاد کند، انجام می شود.

۸-۱- مشخصات سازه ای مدل

جرم های متمرکز شده در طبقه اول، دوم و بام به ترتیب برابر ۴۴۵، ۳۹۴ و ۳۸۸ کیلوگرم هستند. آزمایش تحریک اجباری برای شناسایی پارامترهای سازه برای هر سه مود انجام شده است. اول از همه، چندین آزمایش سینوس جارو انجام شد تا تقریباً فرکانس های طبیعی سازه را شناسایی کنند. سپس مجموعه ای از تست های هماهنگ با فرکانس تحریک متفاوت در حدود فرکانس های طبیعی ساختار آزمایش شده انجام شد. مشخصات مؤدی حاصل از آزمایش در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: مشخصات مؤدی سازه [35]

Mode no. i	1	2	3
Frequency f_i (Hz)	2.743	9.45	18.84
Normalized mode shape ϕ_i	$\begin{Bmatrix} 0.0186 \\ 0.0299 \\ 0.0356 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.0352 \\ 0.0123 \\ -0.0316 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} -0.0268 \\ 0.0385 \\ -0.0158 \end{Bmatrix}$
Damping ratio ξ_i (%)	0.48	1.15	1.45
Participation factor γ_i	33.904	8.293	-2.863
Orthogonality with respect to mass matrix $\Phi^T M_S \Phi$	$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.001 & 0.013 \\ 0.001 & 1.0 & -0.039 \\ 0.013 & -0.039 & 1.0 \end{bmatrix}$		

۸-۲- مشخصات میراگرها و نیروهای اعمالی به سازه

شش نوع از فنرهای ممتد مختلف به صورت ثابت در طول آزمایش های میز لرزه استفاده شده است. سه نمونه از آن ها به صورت تصادفی و با تعیین ثابت فنریت انتخاب شدند. برای حذف اثرات سستی فنرها، پیش بارگذاری در محدوده ۶ تا ۲۳ پوند به هر فنر اعمال شده است. برنامه ریزی برای آزمایش فقط برای دو مود اول سازه انجام شده است، بنابراین دو نوع میراگرها طوری ساخته شده اند که اولی با فرکانس اصلی و دومی با فرکانس طبیعی مود دوم سازه هماهنگ باشد. دو ورق و چهار فنر در میراگر مود اول و یک ورق با هشت فنر برای میراگر مود دوم استفاده شده است. مشخصات میراگرهای بکار رفته در مدل در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷: مشخصات میراگرهای بهینه بکار رفته در مدل [35]

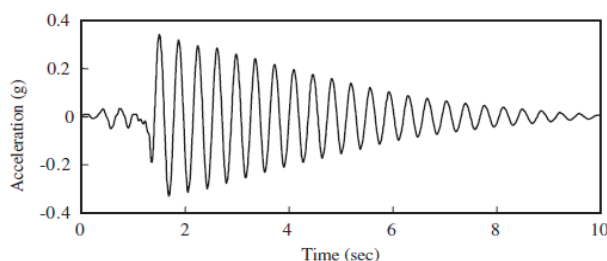
Mass M_s (kg)	Damping C_s ($\times 10^2$ N · sec/m)	Stiffness K_s ($\times 10^6$ N/m)
$\begin{bmatrix} 445 & 0 & 0 \\ 0 & 394 & 0 \\ 0 & 0 & 388 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.770 & -4.683 & 0.257 \\ -4.683 & 8.594 & -4.224 \\ 0.257 & -4.224 & 4.057 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.669 & -2.118 & 0.452 \\ -2.118 & 3.397 & -1.645 \\ 0.452 & -1.645 & 1.260 \end{bmatrix}$

1st-mode TMD $m = 39.3 \text{ kg (86.5 lbs.)}$				2nd-mode TMD $m = 20.9 \text{ kg (46.0 lbs.)}$			
Springs	Frequency ω_{TMD} (Hz)	α_1^*	ξ (%)	Springs	Frequency ω_{TMD} (Hz)	α_2^*	ξ (%)
$4 \times 9654K324$	2.55	0.93	1.5	$4 \times 9654K274 + 4 \times 9654K157$	8.3	0.88	1.7
$4 \times 94135K34$	2.72	0.99	1.4	$4 \times 9654K274 + 4 \times 9654K302$	8.8	0.93	1.6
$4 \times 9654K157$	3.0	1.09	1.1	$4 \times 9654K274 + 4 \times 9628K46$	9.5	1.01	1.6

* α_i : tuning frequency ratio = ω_{TMD}/ω_k .

Mode no.	Optimum parameters					
	Damping ratio (%)			Frequency ratio		
	60 kg	80 kg	120 kg	60 kg	80 kg	120 kg
1	13	16	18	0.97	0.94	0.91
2	8	8	11	0.97	0.96	0.95

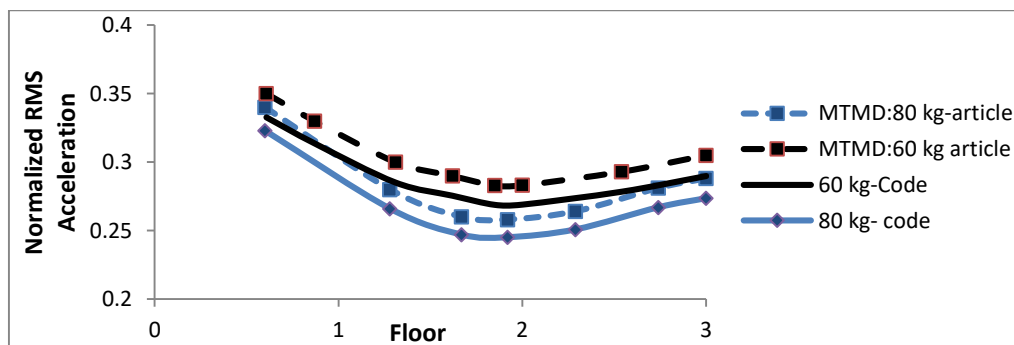
برای هر ترکیب فنر سه نوع ارتعاش آزاد انجام شده است. الگوی ارتعاش آزاد میراگر برای مود اول در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که پیک کاهش شتاب به صورت خطی در نمودار می باشد.



شکل ۸: الگوی تحریک مود اول [35]

۸-۳- نتیجه صحت سنجی

با بررسی شتاب طبقات در میراگرها با جرم ۶۰ و ۸۰ کیلوگرم نتایج زیر حاصل شده و با مقادیر مقاله مقایسه شده است. لازم به توضیح است که این مهم در برنامه OPENSEES و MATLAB همزمان تحلیل شده است. نمودار مقایسه نتایج شتاب طبقات سازه کنترل شده با میراگر در نرم افزار با نتایج مدل آزمایشگاهی در شکل ۹ آورده شده است که با اختلاف ناچیز مورد تأیید می باشد. پاسخ شتاب های نرمالیزه شده (جذر مجموع مربعات) سازه کنترل شده با میراگر جرمی در سازه در شکل ۹ ارائه شده است. در کل آزمایش مورد نظر مشاهده می شود که میراگر جرمی چندگانه پاسخ شتاب نرمال شده طبقات را بیش از ۲۰٪ می تواند کاهش دهد.



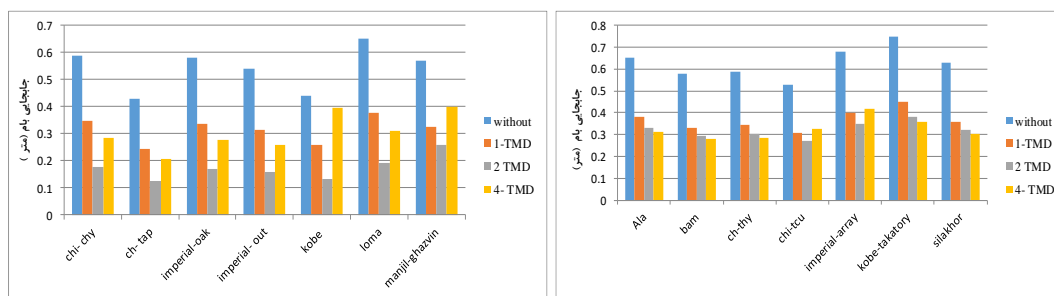
شکل ۹: نمودار مقایسه نتایج شتاب طبقات سازه کنترل شده با میراگر جرمی در تحلیل نرم افزار با نتایج مدل آزمایشگاهی

۹- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مدل ده طبقه منظم

میراگرهای جرمی با رویکرد افزایش جرم سازه و تغییر در ماتریس سختی و جرم سازه‌ها که منجر به تغییر در زمان تناوب مؤثر سازه و خارج شدن سازه از محدوده حساس به‌شتاب، باعث کاهش نیروهای وارد بر سازه می‌شود. وقتی میراگر در یک موقعیت از سازه قرار می‌گیرد، امکان کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها چندان قابل توجه نبوده و تأثیر زیادی در کنترل پاسخ سازه‌هایی که تأثیر مودهای بالاتر در آن‌ها بیشتر است ندارد. از این رو وقتی میراگر در بیش از یک نقطه قرار می‌گیرد، با کنترل تأثیر مودهای بالاتر، امکان کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها بیشتر فراهم شده و از این طریق سازه تحت کنترل درمی‌آید.

۹-۱- بررسی نتایج جابجایی بام با میراگر در طبقه دهم

برای ارزیابی تأثیر میراگرهای جرمی تنظیم شونده در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های منظم و نامنظم در حالت‌های مختلفی که برای قرارگیری میراگر در سازه در نظر گرفته شده است، ماکزیمم جابجایی جانبی بام برای رکوردهای دور و نزدیک استخراج شده است. در این تحقیق میراگرها در سه حالت، یک، دو و چهارگانه در طبقه بام قرار داده شده‌اند. رکوردهایی که در این تحقیق استفاده شده است، ۷ رکورد برای حوزه نزدیک و ۷ رکورد برای حوزه دور است. در این بخش مقدار جابجایی برای هر رکورد در حالت بدون میراگر و با میراگرهای مختلف به صورت نمودار ستونی آورده شده است. در شکل ۱۰ بیشینه جابجایی بام در مدل ده طبقه آورده شده است.

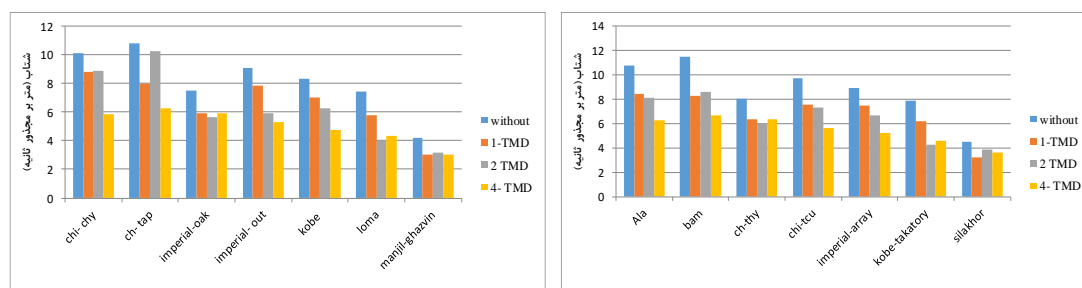


شکل ۱۰: بیشینه جابجایی بام تحت زلزله‌های حوزه دور از گسل (راست) و حوزه نزدیک گسل (چپ) در مدل ۱۰ طبقه منظم

با توجه به نتایج حاصل از جابجایی ماکزیمم بررسی شده برای سازه ۱۰ طبقه در حالت بدون میراگر جرمی و با حالت‌های مختلفی که تعداد میراگر جرمی در آن‌ها متفاوت بوده است، می‌توان مشاهده نمود که استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده در رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل مقدار جابجایی سازه ۱۰ طبقه را به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهد. آنچه مشاهده می‌شود این است که تغییر در تعداد میراگر باعث تغییر در میزان کاهش نیز شده است. بیشترین مقدار کاهش جابجایی برای رکوردهای حوزه نزدیک در حالت استفاده از یک میراگر برابر ۴۳ درصد است. این میزان جابجایی کاهش یافته نسبت به حالت بدون میراگر بررسی شده است. همچنین بیشترین مقدار کاهش جابجایی برای حالت استفاده از دو میراگر برابر ۴۹ درصد بوده و در حالت استفاده از چهار میراگر این مقدار ۵۲ درصد را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از رکوردهای حوزه دور نیز نشان‌دهنده این است که در حالت استفاده از یک میراگر مقدار میانگین جابجایی کاهش یافته نسبت به حالت بدون میراگر ۴۵ درصد، در حالت دو میراگر ۵۵ درصد و در حالت استفاده از چهار میراگر ۶۰ درصد است ولی بطور میانگین استفاده از چهار میراگر کاهش جابجایی بیشتری نسبت به استفاده از دو میراگر ایجاد کرده‌اند. همچنین در تعدادی از رکوردهای زلزله بخصوص در زلزله‌های نزدیک گسل با توجه به محتوای فرکانسی و پارامترهای زلزله، استفاده از دو میراگر اثر بهتری نسبت به چهار میراگر در نتایج دارند.

۹-۲- بررسی نتایج شتاب بام با میراگر در طبقه دهم

میراگرهای جرمی تنظیم شونده بیشترین تأثیر را در مقدار شتاب سازه‌ها داشته و با خارج کردن سازه از ناحیه حساس به‌شتاب، مقدار پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را کنترل می‌نماید. در شکل ۱۱ بیشینه شتاب بام در مدل ده طبقه آورده شده است.

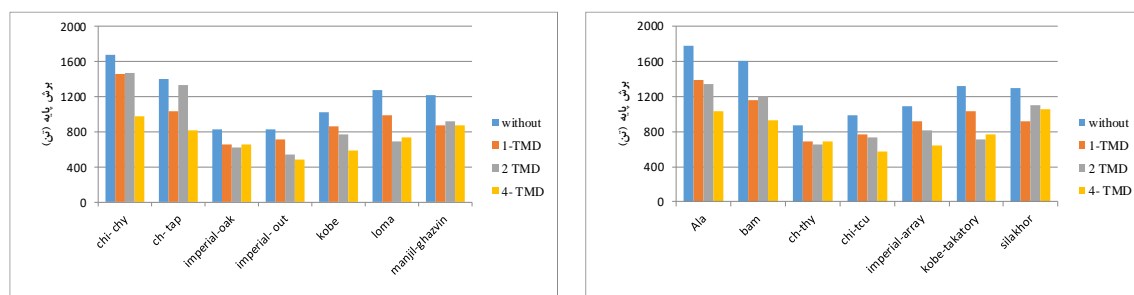


شکل ۱۱: بیشینه شتاب بام تحت زلزله‌های حوزه دور از گسل (راست) و حوزه نزدیک گسل (چپ) در مدل ۱۰ طبقه منظم

از آنجایی که شتاب طبقات یک سازه تحت تأثیر میزان شتاب انتقالی از زمین و مشخصات دینامیکی سازه می‌باشد، لذا در حالت استفاده از میراگر جرمی مقدار جرم سازه افزایش یافته و با افزایش زمان تناوب سازه، مقدار شتاب طبقات کاهش می‌یابد. این موضوع برای سازه ۱۰ طبقه در حالت استفاده از میراگرهای جرمی نسبت به حالت بدون میراگر بررسی شده که نتایج جالبی استخراج شده است. مقدار شتاب طبقات سازه ۱۰ طبقه در یک جرم ثابت تحت تأثیر موقعیت میراگر قرار گرفته و با تغییر موقعیت و تعداد میراگر مقدار کاهش در آن نیز تغییر پیدا کرده است. این مهم برای رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل و تأثیرات محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله نزدیک و دور نیز بررسی شده است. آنچه مشاهده می‌گردد این است که بیشترین مقدار کاهش شتاب برای رکوردهای حوزه نزدیک در حالت استفاده از یک، دو و چهار میراگر به ترتیب برابر ۲۸، ۴۶ و ۴۶ درصد است. همچنین نتیجه برای زلزله‌های حوزه دور به ترتیب نشان‌دهنده ۳۶، ۴۶ و ۴۴ درصد کاهش است. نتایج تأثیر تعداد میراگر در میزان کاهش شتاب سازه تحت تأثیر رکوردهای حوزه دور و نزدیک را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که تغییر در مشخصات رکوردها باعث تغییر در میزان پاسخ‌های لرزه‌ای شده بطوری که رکوردهای حوزه نزدیک گسل به دلیل داشتن پالس در محتوای فرکانسی سرعت، باعث افزایش مقادیر شتاب در حالت‌های ۱، ۲ و ۴ میراگر نسبت به رکوردهای حوزه دور از گسل شده‌اند.

۹-۳- بررسی نتایج برش پایه با میراگر در طبقه دهم

با تغییر در مقدار شتاب وارد بر سازه‌ها، مقدار برش پایه نیز در یک جرم ثابت کاهش می‌یابد. در این بخش بیشینه برش پایه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل آورده شده است. با ارزیابی برش پایه، میان تأثیرات میراگرهای جرمی تنظیم شونده در بازتاب نیروی زلزله به سازه‌ها ارزیابی شده و استهلاک نیرو در حالت‌های مختلفی که برای میراگر جرمی چندگانه در نظر گرفته شده مشخص می‌گردد. در شکل ۱۲ بیشینه برش پایه در مدل ده طبقه آورده شده است.



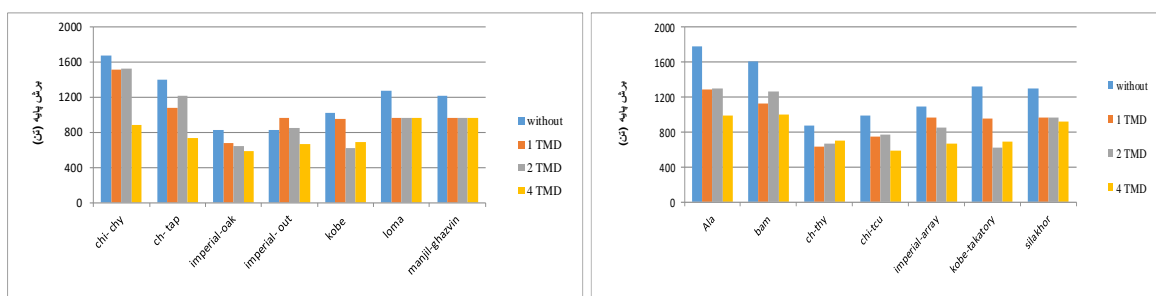
شکل ۱۲: برش پایه تحت زلزله‌های حوزه دور از گسل (راست) و حوزه نزدیک گسل (چپ) در مدل ۱۰ طبقه منظم

برش پایه سازه‌ها از آن جهت مهم است که با تغییر شتاب وارد بر سازه‌ها مقدار برش پایه نیز تغییر پیدا می‌نماید. بررسی مقدار شتاب سازه ۱۰ طبقه تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل در حالت بدون میراگر و با میراگر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده این است که به تناسب کاهش شتاب وارد بر سازه مقدار برش پایه نیز در اثر استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده کاهش پیدا کرده است. این مقدار کاهش برای میراگرهای مختلف متفاوت بوده، به طوری که در حالت استفاده از یک میراگر بیشترین مقدار کاهش

برای رکوردهای نزدیک برابر ۴۰ درصد و برای رکوردهای دور از گسل برابر ۳۶ درصد بوده است نتایج فوق برای حالت دو میراگر به ترتیب برای رکوردهای نزدیک و دور برابر ۴۶ و ۴۲ درصد بوده و در حالت استفاده از چهار میراگر برابر ۴۶ و ۴۴ درصد را نشان می‌دهد.

۹-۴- بررسی نتایج برش پایه با میراگر در طبقه نهم

در این بخش بیشینه برش پایه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل آورده شده است. در شکل ۱۳ بیشینه برش پایه در طبقه نهم مدل ده طبقه آورده شده است.

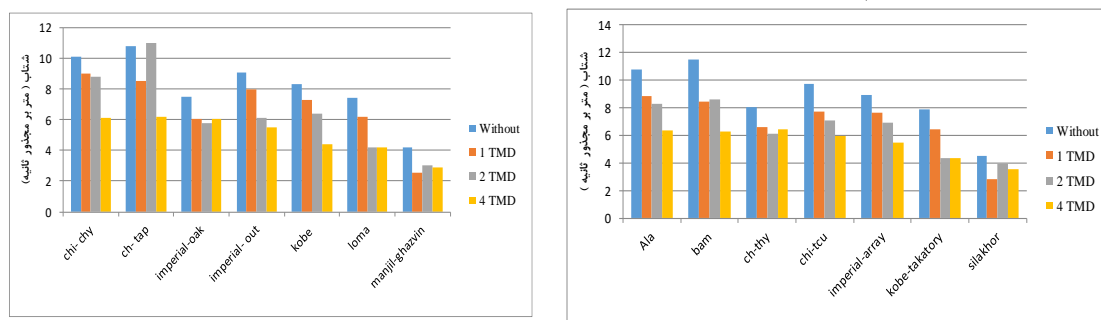


شکل ۱۳: نمودار برش پایه با اعمال میراگر در طبقه نهم تحت زلزله‌های دور از گسل (راست) و نزدیک گسل (چپ) در مدل ۱۰ طبقه منظم

بررسی نتایج حاصل از هفت رکورد نزدیک و هفت رکورد دور برای حالتی که میراگر در طبقه نهم از سازه ۱۰ طبقه قرار گرفته است، نشان می‌دهند که استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده در طبقه ماقبل آخر سازه نیز در کاهش مقدار برش پایه تأثیر قابل توجهی دارد. از طرفی مشاهده می‌گردد که با تغییر تعداد میراگر نیز مقدار کاهش برش پایه کماکان دچار تغییرات شده و در بعضی از حالات با افزایش تعداد میراگر مقدار کاهش برش پایه نیز چشمگیر می‌شود. با بررسی عددی مقادیر کاهش برش پایه برای رکوردهای حوزه نزدیک مشاهده می‌گردد که در حالت استفاده از تک میراگر، دو میراگر و چهار میراگر بیشترین مقدار کاهش به ترتیب برابر ۵۳، ۴۸ و ۴۸ درصد است. همچنین نتیجه فوق برای رکوردهای دور از گسل به ترتیب برابر ۳۹، ۳۳ و ۳۳ درصد را نشان می‌دهند.

۹-۵- بررسی نتایج شتاب با میراگر در طبقه نهم

در این بخش بیشینه شتاب حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل آورده شده است. در شکل ۱۴ بیشینه شتاب در طبقه نهم مدل ده طبقه آورده شده است.



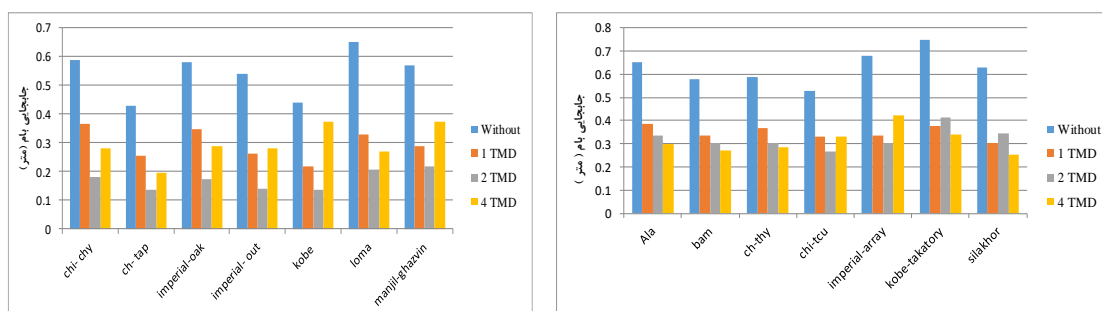
شکل ۱۴: نمودار شتاب با اعمال میراگر در طبقه نهم تحت زلزله‌های دور از گسل (راست) و نزدیک گسل (چپ) در مدل ۱۰ طبقه منظم

بررسی حداکثر شتاب طبقه بام برای حالتی که میراگر در طبقه نهم از سازه ۱۰ طبقه قرار گرفته است، نشان‌دهنده این است که میراگر جرمی تنظیم شونده در طبقه ماقبل آخر توانایی کنترل شتاب سازه را دارد. مشاهده می‌گردد که تغییر در موقعیت میراگر از نظر ارتفاعی تأثیر متفاوتی در مقادیر شتاب بام دارد. همچنین تغییر در تعداد میراگرها در پلان نیز باعث تغییر در مقدار حداکثر شتاب بام می‌گردد. بررسی عددی شتاب طبقه بام نشان‌دهنده این است که بیشترین مقدار کاهش شتاب حداکثر طبقه بام برای حالت یک، دو و

چهار میراگر تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل به ترتیب برابر ۳۶، ۴۴ و ۴۵ درصد و تحت رکوردهای دور به ترتیب برابر ۳۹، ۴۳ و ۴۷ درصد بوده است.

۹-۶- بررسی نتایج جابجایی بام با میراگر در طبقه نهم

در این بخش جابجایی حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل آورده شده است. در شکل ۱۵ بیشینه جابجایی در طبقه نهم مدل ده طبقه آورده شده است.



شکل ۱۵: نمودار جابجایی با اعمال میراگر در طبقه نهم تحت زلزله‌های دور از گسل (راست) و نزدیک گسل (چپ) در مدل ۱۰ طبقه منظم

با بررسی مقدار جابجایی جانبی حداکثر طبقه بام در حالتی که میراگر در طبقه نهم قرار داده شده است مشاهده می‌گردد که تغییر در تعداد میراگرها در طبقه نهم نیز تأثیر متفاوتی در مقدار کاهش جابجایی جانبی طبقه بام دارند و بیشترین مقدار کاهش جابجایی جانبی در حالت استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده برای زلزله‌های حوزه نزدیک در حالت یک، دو و چهار میراگر نسبت به حالت بدون میراگر به ترتیب برابر ۵۲، ۵۵ و ۵۹ درصد بوده و تحت رکوردهای حوزه نزدیک نیز به ترتیب برابر ۵۱، ۷۴ و ۵۸ درصد است. قرار گرفتن میراگر در طبقه نهم نسبت به طبقه دهم مشخصات دینامیکی سازه را تحت تأثیر قرار داده و با تغییر مشخصات فرکانسی از جمله زمان تناوب سازه، تأثیرات اعمال میراگر در کنترل پاسخ لرزه ای را تحت تأثیر قرار داده است. بطور کلی می‌توان با توجه به محل قرارگیری میراگر جرمی در طبقه دهم و طبقه نهم مدل ده طبقه منظم به این نتیجه رسید که اساساً استفاده از میراگر جرمی در مقایسه با حالت بدون میراگر تغییرات زیادی در پاسخ‌های لرزه ای دارد و بطور میانگین تا ۵۰ درصد کاهش پارامترهای جابجایی بام، شتاب و برش پایه خواهیم داشت، همچنین استفاده از ۲ یا ۴ میراگر در مقایسه با استفاده از یک میراگر جرمی کاهش قابل توجه تا محدوده ۲۵ درصد پاسخ لرزه ای را نشان می‌دهد. تغییرات کاهش پاسخ در رکوردهای حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور محسوس تر و قابل توجه می‌باشد و آن بخاطر محتوای فرکانسی و جزئیات پارامترهای زمین لرزه می‌باشد و انطباق بهتر میراگر جرمی با مدل‌های تحلیلی با رکوردهای نزدیک گسل را نشان می‌دهد. قرارگیری میراگرها در طبقات دهم نسبت به قرارگیری در طبقه نهم در مدل تحلیلی حاضر اختلاف ناچیزی در پاسخ‌های لرزه ای را نشان می‌دهد. شایان ذکر است در مورد سازه‌های نامنظم نیز بررسی‌های لازم در مورد اعمال میراگرها انجام شده و درصد بیشینه کاهش در سازه‌های منظم و نامنظم در رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل به صورت جدول‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۸. درصد بیشینه کاهش جابجایی بام در مدل‌های ده طبقه منظم و نامنظم

درصد کاهش جابجایی بام	یک میراگر		دو میراگر		چهار میراگر	
	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور
رکورد						
۱۰ طبقه منظم	43	45	49	70	52	52
۱۰ طبقه ال شکل	40.85	51.75	48.02	80.5	50.44	56.16
۱۰ طبقه یو شکل	49.45	51.75	56.35	80.5	50.44	59.8

جدول ۹. درصد بیشینه کاهش شتاب در مدل های ده طبقه منظم و نامنظم

درصد کاهش شتاب	یک میراگر		دو میراگر		چهار میراگر	
	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور
رکورد						
۱۰ طبقه منظم	28	36	46	46	46	44
۱۰ طبقه ال شکل	27.72	32.04	40.02	45.54	45.54	43.56
۱۰ طبقه یو شکل	29.96	38.52	49.22	49.22	49.22	47.08

جدول ۱۰. درصد بیشینه کاهش برش پایه در مدل های ده طبقه منظم و نامنظم

درصد کاهش برش پایه	یک میراگر		دو میراگر		چهار میراگر	
	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور
رکورد						
۱۰ طبقه منظم	40	36	46	42	46	44
۱۰ طبقه ال شکل	44.8	38.52	51.52	36.54	51.52	49.28
۱۰ طبقه یو شکل	41.6	32.04	40.94	43.68	47.84	45.76

نتایج جدول ها حاکی از تاثیر قابل ملاحظه اعمال میراگر جرمی در کاهش پارامترها و پاسخ های لرزه ای می باشد. همچنین درصد کاهش بیشتر در مدل ها با اعمال میراگر جرمی چندگانه نسبت به استفاده از تک میراگر مشهود است. در مورد پاسخ برش پایه با افزایش تعداد میراگرها از یک به چهار میراگر افزایش درصد کاهش در همه مدل ها مشاهده می شود و غالباً پاسخ ها در رکوردهای حوزه نزدیک کاهش بیشتری دارند و می توان به قابلیت کنترل مطلوب پاسخ میراگرهای جرمی در برابر جابجایی ها و شتاب های رکوردهای حوزه نزدیک اشاره کرد. در مورد جابجایی بام با افزایش تعداد میراگرها افزایش در درصد کاهش پاسخ مشاهده می شود و پاسخ جابجایی بام در رکوردهای حوزه دور کاهش بیشتری دارد بطوریکه در حالت خاص استفاده از دو میراگر تحت زلزله حوزه دور از گسل کاهش حدود ۸۰ درصد را نشان می دهد. درباره کاهش درصد شتاب نیز با افزایش تعداد میراگرها افزایش قابل ملاحظه در کاهش پاسخ شتاب مشهود می باشد.

۱۰- بهینه یابی تعداد و موقعیت میراگرهای جرمی چندگانه

در این بخش با توجه به نحوه قرارگیری میراگرهای چندگانه، تعداد و موقعیت بهینه میراگر در سازه های ده طبقه منظم و نامنظم مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نمودارهای تاریخچه جابجایی، نتایج ارائه شده است. به منظور ارزیابی رفتار سازه در صورت استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه و بررسی تأثیر تعداد و موقعیت این میراگرها در سازه از لینک API نرم افزار SAP2000 با زبان برنامه نویسی MATLAB استفاده شده است. سه نوع سازه ۱۰ طبقه با پلان نامنظم L، U و منظم در پلان (دو سازه نامنظم و یک سازه منظم) مورد بررسی قرار گرفته اند.

۱۰-۱- نحوه مدل سازی و آنالیز سازه ها

به منظور آنالیز سازه ها از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت زلزله السنترو استفاده شده است. خروجی های تحلیل که در مقایسه و بررسی تعداد و موقعیت میراگرها استفاده شده اند بیشترین تغییر مکان سازه در تراز بام می باشد. مراحل مدل سازی، آنالیز و مقایسه خروجی ها برای مدل های مختلف با استفاده از API نرم افزار SAP2000 انجام شده است.

۱۰-۲- رابط برنامه نویسی API در SAP2000

رابط برنامه نویسی کاربردی API یک ابزار ارزشمند در خدمت نرم افزارهای CSI نظیر SAP و ETABS می باشد که به مهندسين امکان بهره برداری از این نرم افزارها را با زبان و ادبیات کد نویسی مانند ویژوال بیسیک تحت اکسل (VBA)، سی شارپ، ++C، متلب، فرترن و پایتون ایجاد می نماید. به زبان ساده تر یک مهندس به واسطه API قادر می باشد از طریق کد نویسی تمام دستورات و ابزارهای نرم افزارهای ETABS و SAP را بکار بسته و اهدافی همچون مدل سازی، بارگذاری، تحلیل و طراحی و استخراج انواع نتایج را به انجام رساند. مهندسين

با به کارگیری API می‌تواند ابزارهای شخصی کار خود را بسازند و از طریق آن‌ها نرم‌افزارهای CSI را تحت کنترل قرار دهند. این ابزارها قادر خواهند بود در چند ثانیه کارهای وقت‌گیر را بارها و بارها بدون خطای انسانی به انجام برسانند.

۱۰-۳- شرح مدل و روش کار در بهینه یابی موقعیت میراگرها

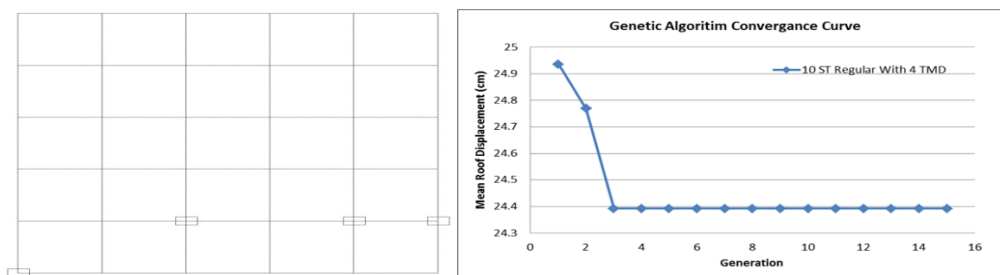
در این بخش تأثیر تعداد ۲ و ۴ میراگر در تراز بام برای سازه‌های ده طبقه بررسی شده است. بدین منظور و برای یافتن موقعیت بهینه این میراگرها برای هر تعداد میراگر از الگوریتم ژنتیک استفاده شده، بدین ترتیب که موقعیت گره‌های سازه در تراز بام (به تعداد N متغیر برابر تعداد میراگرها) به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و بهینه ترکیب این متغیرها به دست آمده است. تابع هزینه الگوریتم با استفاده از API نرم‌افزار SAP2000 تشکیل خواهد شد که برای هر کروموزوم موجود در جمعیت تشکیل شده از متغیرهای مذکور به عنوان مثال (۵، ۹، ۱۲ و ۳۲ برای حالت چهار میراگر که این اعداد شماره گره در تراز بام هستند)، سازه توسط برنامه MATLAB و با استفاده از توابع API ایجاد و آنالیز شده و بیشترین تغییر مکان بام به عنوان خروجی تابع هزینه در نظر گرفته شده است. تمام مراحل ایجاد، آنالیز و گرفتن خروجی با استفاده از کد نوشته شده در MATLAB در قسمت تابع هزینه انجام شده است. پارامترهای الگوریتم در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱: پارامترهای الگوریتم ژنتیک

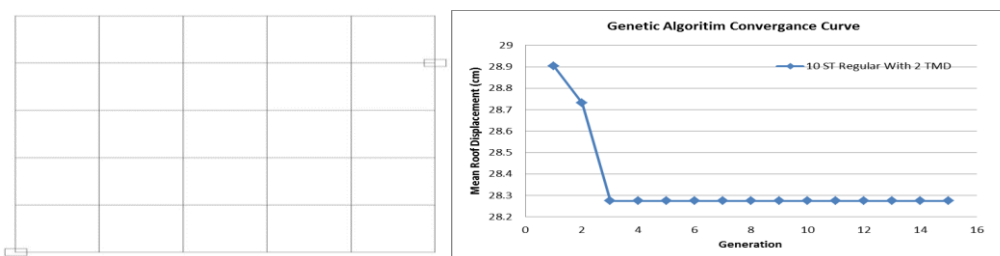
نوع الگوریتم	تعداد جمعیت	تعداد نسل	نرخ انتخاب	نرخ جهش
پیوسته	۳۰	۱۵	٪۷۰	٪۲۰

۱۰-۴- نتایج موقعیت بهینه میراگرها در سازه‌های ده طبقه منظم و نامنظم

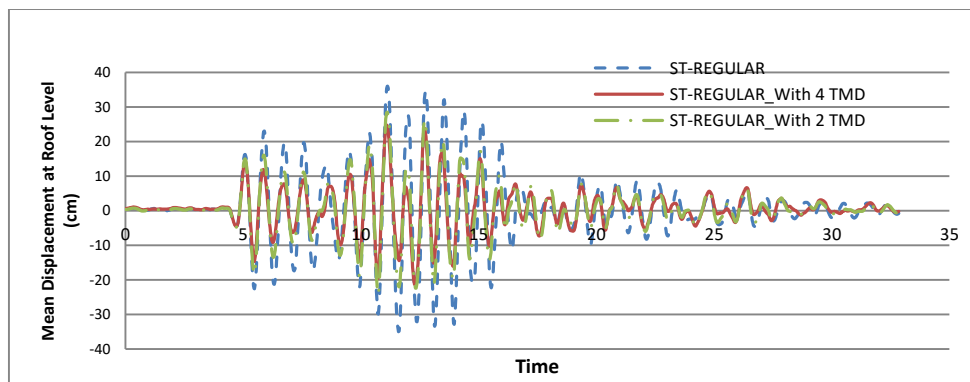
در همه مدل‌ها بعد از حداکثر ۴ نسل پاسخ به مقدار ثابت همگرا شده است ولی به منظور اطمینان از جواب مسئله تا ۸ نسل ادامه داشته است (برای هر مدل حدود ۲۴۰ ترکیب مختلف میراگر مورد بررسی قرار گرفته است). موقعیت میراگرها برای حالات ۴ تایی و ۲ تایی حاصل از الگوریتم ژنتیک، برای سازه‌های مختلف در شکل‌های ۱۶ تا ۲۴ نشان داده شده‌اند.



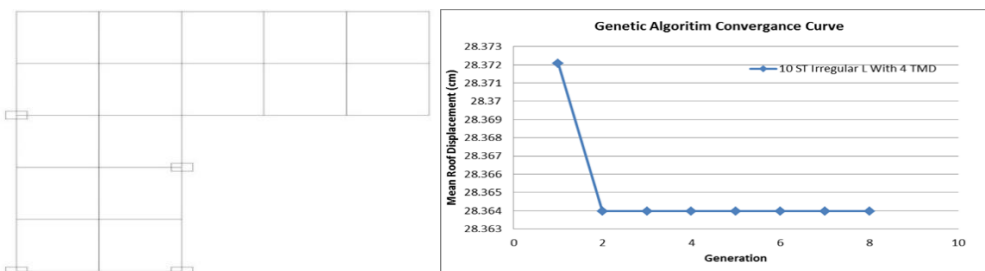
شکل ۱۶: نمودار همگرایی مدل ده طبقه با ۴ میراگر در الگوریتم ژنتیک (راست) و موقعیت بهینه میراگرها (چپ)



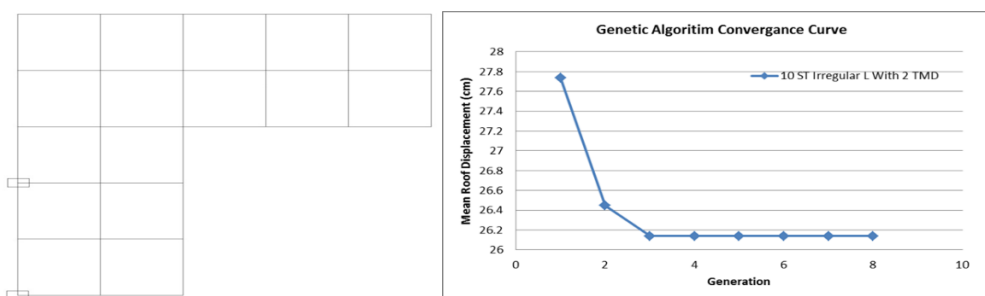
شکل ۱۷: نمودار همگرایی مدل ده طبقه با ۲ میراگر در الگوریتم ژنتیک (راست) و موقعیت بهینه میراگرها (چپ)



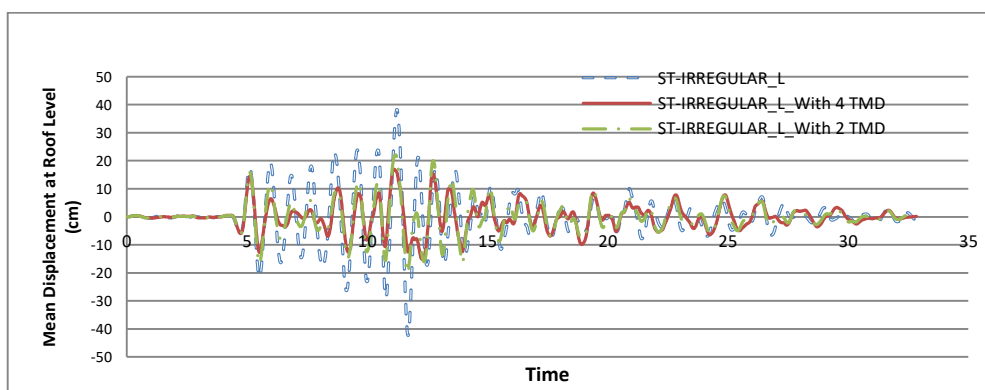
شکل ۱۸. پاسخ جابجایی مدل ده طبقه منظم با دو و چهار میراگر



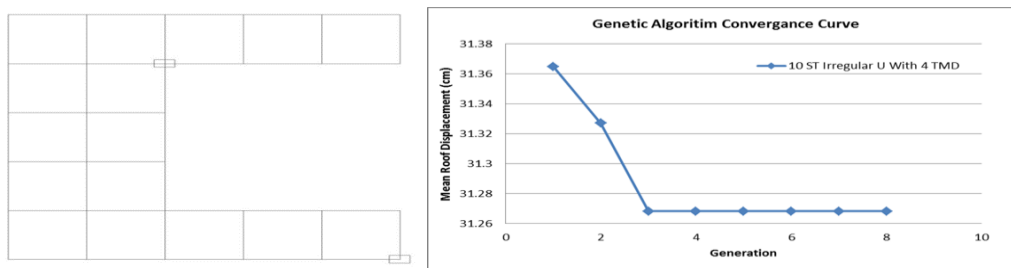
شکل ۱۹: نمودار همگرایی مدل ده طبقه با ۴ میراگر در الگوریتم ژنتیک (راست) و موقعیت بهینه میراگرها (چپ)



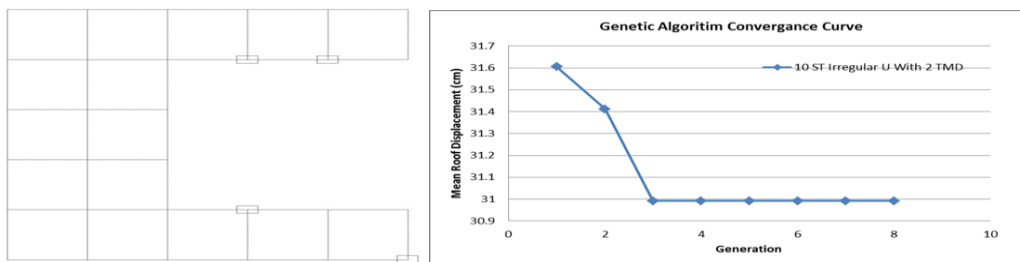
شکل ۲۰: نمودار همگرایی مدل ده طبقه با ۲ میراگر در الگوریتم ژنتیک (راست) و موقعیت بهینه میراگرها (چپ)



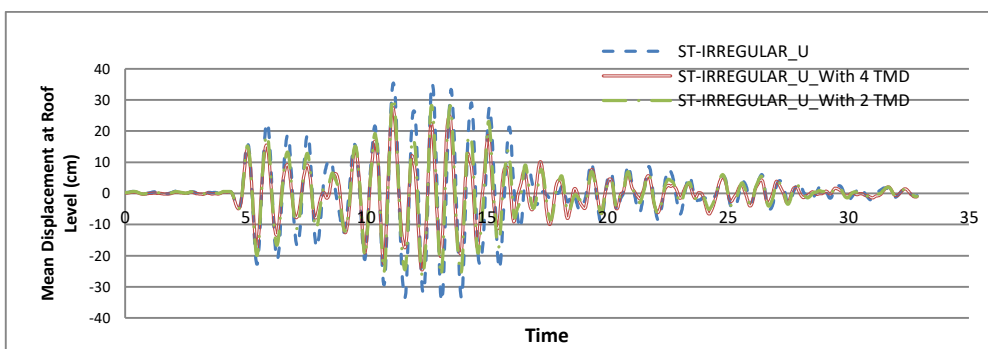
شکل ۲۱: پاسخ جابجایی مدل ده طبقه نامنظم L شکل با دو و چهار میراگر



شکل ۲۲: نمودار همگرایی مدل ده طبقه U شکل با ۴ میراگر در الگوریتم ژنتیک (راست) و موقعیت بهینه میراگرها (چپ)



شکل ۲۳: نمودار همگرایی مدل ده طبقه U شکل با ۲ میراگر در الگوریتم ژنتیک (راست) و موقعیت بهینه میراگرها (چپ)



شکل ۲۴: پاسخ جابجایی مدل ده طبقه نامنظم U شکل با دو و چهار میراگر

نتایج نشان دهنده تأثیرات حائز اهمیت میراگرهای جرمی در سازه‌ها می‌باشد. همچنین نکته‌ای که از نتایج به نظر می‌رسد آن است که قرارگیری میراگرهای چندگانه به صورت متقارن در پلان نقش مهمی در نتایج و پاسخ‌ها دارد و تغییرات موقعیت هر کدام از میراگرها در صورتی که تقارن موقعیت کلی آنها نسبت به محورهای پلان بهم نخورد در پاسخ سازه‌ها ناچیز می‌باشد، به عبارت دیگر توزیع جرمی مناسب و متقارن میراگرهای جرمی در پلان نقش مهمی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه خواهد داشت. همچنین می‌توان به این نکته اشاره کرد که میراگر جرمی با جرم و سختی که دارد باعث تغییر در مشخصات دینامیکی سازه شده و پاسخ‌های لرزه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا در صورتی که قرارگیری میراگرهای جرمی بتواند مرکز جرم را به مرکز سختی نزدیک نماید، می‌تواند از مقدار نامنظمی و تأثیرات آن کاسته و رفتار لرزه‌ای را به صورت بهینه بهبود بخشد. آنچه که در تعیین موقعیت بهینه میراگرهای جرمی مورد توجه بوده است قرار گرفتن متقارن آنها باعث بهبود پاسخ لرزه‌ای در سازه‌ها شده است. در سازه‌های نامنظم U شکل توزیع میراگرها به صورت تقریباً متقارن بوده است. آنچه که در سازه‌های نامنظم L شکل مشاهده می‌شود موقعیت میراگرها در حالت بهینه باعث نزدیک شدن مرکز جرم به مرکز سختی شده و میزان خروج از مرکزیت را کاهش داده و نتایج به صورت قابل توجهی بهبود یافته است.

۱۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیرات تعداد و موقعیت بهینه میراگر جرمی چندگانه در ساختمان‌های ده طبقه منظم و نامنظم فولادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. افزایش روزافزون اجرای ساختمان‌های بلند به دلایل اقتصادی و فنی، باعث می‌شود که تحقیق در مورد

کنترل چنین سازه‌هایی در برابر نیروهای زلزله و باد و بازدهی آن‌ها از لحاظ فنی افزایش یابد. نامنظم بودن پلان نیز از مسائلی است که مهندسان طراح و متخصصان زلزله با آن مواجه می‌شوند. در این تحقیق از گستره وسیعی از رکوردهای حوزه دور و نزدیک گسل با شدت‌ها و پارامترهای زلزله‌ای متفاوت استفاده شده است و میراگرها با توجه به روابط دینامیکی طراحی و نصب شده و مدل‌ها مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان‌دهنده تأثیرگذاری مطلوب‌تر کاربرد تعداد بیشتر میراگر در مدل‌ها نسبت به میراگر تک جرمی می‌باشد. قرار گرفتن میراگرها در بیش از یک نقطه باعث کاهش بیشتر پاسخ لرزه‌ای در سازه‌ها شده و میزان کاهش برای هر کدام از پاسخ‌ها از قبیل برش پایه، جابجایی و شتاب طبقات افزایش می‌یابد. وقتی که میراگرها در نقاط مختلفی قرار می‌گیرند، توزیع جرم در سطح طبقه افزایش یافته و از این طریق نیرویی که از طریق شتاب جرمی بر سازه وارد می‌گردد چندان قبال توجه نبوده و از این رو کاهش پاسخ‌ها نیز بیشتر می‌شود، اما زمانی که جرم متمرکز در یک نقطه از سازه قرار می‌گیرد، شتاب وارد بر آن بخش بیشتر بوده و کنترل چندان در دروی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها ایجاد نمی‌گردد. نتایج نشان‌دهنده آن است که در اکثر رکوردهای دور و نزدیک، وقتی میراگرها در چهار نقطه متقارن در پلان قرار می‌گیرند با کنترل مقدار پیچش در سازه‌های نامنظم و توزیع جرم مناسب بین المان‌های مقاوم جانبی تلاش داخلی اعضای مقاوم در یک طبقه به صورت مشترک در تحمل نیروی فزاینده ناشی از جرم متمرکز مشارکت نموده و مقدار پاسخ لرزه‌ای نیز به خاطر افزایش زمان تناوب سازه و کاهش شتاب وارد بر طبقات کاهش می‌یابد. آنچه مشاهده می‌گردد این است که تأثیر میراگرهای جرمی برای رکوردهای مختلف زلزله دارای تفاوت‌های قابل توجهی است، دلیل این موضوع آن است که مشخصات و محتوای فرکانسی رکوردها در حوزه دور و نزدیک دارای تفاوت‌هایی از قبیل حداکثر شتاب زمین (PGA)، بزرگی، فاصله از گسل، میزان انرژی آزاد شده و مدت دوام هستند، لذا اضافه نمودن میراگر جرمی باعث تغییر مشخصات دینامیکی شده و فرکانس مؤثر سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تعداد میراگرهای یکسان در حوزه دور از گسل کاهش تغییرات شتاب و در حوزه نزدیک با افزایش بیشینه شتاب مدل‌ها را مواجه هستیم. به طور کلی میراگرهای چندگانه در حوزه نزدیک گسل عملکرد بهتری در کاهش شتاب مدل‌ها داشته که این مورد در جابجایی طبقات نیز صادق است. در مورد برش طبقات بیشترین کاهش در حوزه نزدیک گسل بوده و با افزایش تعداد میراگرها مشهود است. آنچه پرواضح است تأثیر ۴۵ درصدی به طور میانگین در کاهش جابجایی، برش پایه و شتاب طبقات مدل‌ها در استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه مشخصاً مبین عملکرد بسیار مناسب این وسیله در بهبود عملکرد سازه‌ها می‌باشد. در مورد اعمال میراگر جرمی در طبقه نهم نتایج نشان می‌دهد که تغییر زیادی در نتایج پارامترهای لرزه‌ای در تغییر مکان میراگر از طبقه دهم به طبقه نهم ایجاد نشده و اختلاف ناچیزی در نتایج وجود دارد. در طبقه نهم افزایش تعداد میراگرها نشان‌دهنده توزیع جرم و مشارکت میراگرها در کنترل پاسخ و عملکرد بهینه سازه می‌باشد. در مورد موقعیت بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک نتایج نشان می‌دهد که متقارن بودن موقعیت میراگرها در پلان نقش بسزایی در نتایج و پاسخ‌ها دارد، همچنین قرارگیری میراگرهای چندگانه به صورت متقارن در پلان سازه‌های نامنظم نقش مهمی در نتایج و پاسخ‌ها دارد و تغییرات موقعیت هر کدام از میراگرها در صورتی که تقارن موقعیت کلی آنها نسبت به محورهای پلان بهم نخورد در پاسخ سازه‌ها ناچیز می‌باشد، به عبارت دیگر توزیع جرمی مناسب و متقارن میراگرهای جرمی در پلان نقش مهمی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه خواهد داشت. در سازه‌های نامنظم L شکل موقعیت میراگرها در حالت بهینه باعث نزدیک شدن مرکز جرم به مرکز سختی شده و میزان خروج از مرکزیت را کاهش داده و نتایج به صورت قابل توجهی بهبود یافته است.

مراجع

- [1] Bargi, Kh. (2007). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. First Edition. University of Tehran. p76. (In Persian)
- [2] Soto, M. (2012). *Investigation of Passive Control of Irregular Building Structures using Bidirectional Tuned Mass Damper*. MSC, The Ohio State University.
- [3] Abbasi, M. (2012). *Investigating and evaluating the performance of mass-dampers regulated in reducing the non-elastic seismic requirements of tall buildings*. MSC. University of Rajae Tehran. (In Persian)
- [4] Frahm, H. (1911). *Device for damping of bodies*. US Patent No 989,1911.
- [5] Ormondroyd, J. and Den Hartog, J. P. (1928). *The theory of dynamic vibration absorber*, Trans. ASME, APM50-7, 9-22.
- [6] Chen, G. (1996). *Multi-stage tuned mass damper*. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco, Mexico, Paper No. 1326.

- [7] Clark, A. (1988). Multiple Passive Tuned Mass Dampers for Reducing Earthquake induced Building Motion. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo-Kyoto, Japan, Vol 5, pp 779-784.
- [8] McNamara R. (1977). *Tuned Mass Dampers for Buildings*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 103(9), pp 1785-98.
- [9] Warburton, G.B. Ayorinde, O. (1982). Optimum absorber Parameters for Simple Systems. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 8(3), pp 197-217.
- [10] Villaverde, R. and Koyama, L. (1993). Damped Resonant Appendages to Increase Inherent Damping in Buildings. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 22, pp 491-507.
- [11] Wirsching, P. and Campbell, G.W. (1974). Minimal Structural Response under Random Excitation using the Vibration Absorber. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 2, pp 303-12.
- [12] Abe, M. and Igusa, T. (1995). Tuned Mass Dampers for Structures with Closely Spaced Natural Frequencies. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 24(2), pp 247-261.
- [13] Jangid, R.S. (1995). Dynamic Characteristics of Structures with Multiple Tuned Mass Dampers. *Journal of Structural Engineering and Mechanics*. Vol 28, pp 1041-1049.
- [14] Li, C. (2000). Performance of Multiple Tuned Mass Dampers for Attenuating Undesirable Oscillations of Structures under the Ground Acceleration. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 29, pp 1405-1421.
- [15] Kareem, A. and Kline, S. (1995). Performance of multiple mass dampers under random loading. *Journal of structural engineering*, 121(2), pp.348-361.
- [16] Abdullah, M. and Richardson, H. (2001). Use of a Shared Tuned Mass Damper (STMD) to Reduce Vibration and Pounding in adjacent. Structures. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 30, pp 1185-1201.
- [17] Zahrai, S.M. and Ghannadi, A. (2008). Seismic Performance of TMDs in Improving the Response of MRF Building. *Journal of Scientia Iranica*, Vol 15, No 1, pp 21-33.
- [18] Tuan, A. and Shang, G.Q. (2014). Vibration Control in a 101-Storey Building using a Tuned Mass Damper. *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol 17, No2, pp 141-156.
- [19] Hirde, S. and Aher, R. (2016). Seismic Evaluation of Irregular Structures. *International Journal of Engineering Research*, No 5, pp 750-755.
- [20] Soto, M.G. and Adeli, H. (2014). Optimum Tuning Parameters of Tuned Mass Damper for Vibration Control of Irregular High Rise Building Structures. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol 20(5), pp 609-620.
- [21] Wakchaure, M.R. and Shirish, A. and Nikam, R. (2012). Study of Plan Irregularity on High-Rise Structures. *International journal of Innovative Research & Development*, Vol 1(8), PP 269-281.
- [22] Valmundson, E. and Nau, J.M. (1997). Seismic Response of Building Frames with Vertical Structural Irregularities. *Journal of Structure Engineering*, ASCE, Vol 123 (1), pp 30-41.
- [23] Siva Konda Reddy, B. and Madhavi, L. and Srikanth, CH. (2018). Analysis of Irregular High Raised RCC Buildings by Using Tuned Mass Damping System. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, Vol 5(3),
- [24] Bagheri, S. and Rahmani-Dabbagh, V. (2018). Seismic Response Control with Inelastic Tuned Mass Damper. *Journal of Engineering Structures*, Vol 172, pp 712-722.
- [25] Wang, W. and Wang, X. and Hua, X. and Song, G. and Chen, Z. and Chen, Z. (2018). Vibration Bridge Deck by a Single-Side Pounding Tuned Mass Damper. *Journal of Engineering Structures*, Vol 173, pp 61-75.
- [26] Luya, L. and Cui, P. (2017). Novel Approach of a Nonlinear Tuned Mass Damper with Duffing Stiffness. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol 143(4), 04017004.
- [27] Zheng, L. and Li, K. and Zhou, Y. (2018). Comparative Studies on Structures with a Mass Damper and Particle Damper. *Journal of Aerospace Engineering*. 31(6), 04018090.
- [28] Jui-Liang, L. (2017) Top-Story Mass Dampers for Seismic Control of the First Triplet of Vibration Modes of Two-Way Asymmetric-Plan Buildings. *Journal of Vibration and Control*. 23(18), pp 2962-2976.
- [29] Zheng, L. and Kun, L. and Ying, Z. and Asce, M. (2018). Comparative Studies On Structures with a Tuned Mass Damper and a Particle Damper. *Journal of Aerospace Engineering (ASCE)*. 31(6).
- [30] Kamgar, R. and Khatibinia, M. and Khatibinia, M. (2019). Optimization Criteria For Design of Tuned Mass Damper Including Soil-Structure Interactive Effect. *International Journal of Optim. Civil Eng.* 9(2), 213-232.
- [31] Elias, S. and Matsagar, V. (2019). Seismic Vulnerability of a Non-Linear Building with Distributed Multiple Tuned Vibration Absorbers. *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*. 1-16.
- [32] Radmard Rahmani, H. and Könke, C., (2019). Seismic Control of Tall Buildings Using Distributed Multiple Tuned Mass Dampers. *Journal of Advances in Civil Engineering*. 12, 35-53.
- [33] Sadek, F. and Mohraz, B. and Taylor, A.W. and Chung, R.M. (1997). A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications. *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol 26, pp 617-635.

- [34] Connor, J. J. (2003). Introduction to Structural Motion Control. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall Pearson Education.
- [35] Chen.G. and Wu.N (2003), "Experimental Study Multiple Tuned Mass Dampers to Reduce Seismic Responses of a Three-Storey Building Structure", *Journal of Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 32, pp 793-810.