

Seismic Evaluation of Bridges with Multiple Tuned Mass Dampers in Parallel and Series Mode

Mohsen Ali Shayanfar¹, Masoud ZabihiSamani^{2*}, Mohammad Amin Zare³

1- Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran

3-MSc, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Bridges have a special place in transportation infrastructure due to their direct connection with other places. These structures aim to carry highway traffic loads, pass any obstacle and establish effective communication between two destinations. Damages caused by earthquakes and human factors cause very serious damage to bridges, and if even the failure of a member does not cause the structure to collapse completely, the cost of retrofitting is very high. For this purpose, researchers and engineers suggested the use of structural control systems along with accurate seismic analysis to predict the behavior of the structure. The purpose of this study is to investigate the displacement in bridges using multiple tuned mass dampers in parallel and series mode. The effects of damper modeling on Meloland overpass bridge are investigated for the first time with the help of the proposed method in this article. In this research, the bridge structure presented by Vahid Shirgir et al. is used as a sample structure to investigate the issues raised with Opensees software. This bridge is designed by taking into account the regulations, gravity and dynamic loads, and its structural specifications include dimensions, type of materials used based on the article of Vahid Shirgir et al. Finally, it was found that the multiple tuned mass damper in parallel mode has a better performance in reducing the maximum displacement than other tuned mass dampers. Also, according to the results, the response of the structure equipped with multiple tuned mass dampers decreased by 21% and improved the seismic performance level of the bridge column.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 April 2023

Revise Date: 12 June 2023

Accept Date: 03 July 2023

Keywords:

Bridge structure

Performance level

Structural control

Multiple Tuned mass damper

Displacement Control

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390067.3065>

*Corresponding author: Masoud ZabihiSamani.

Email address: mzabihi@iust.ac.ir

ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها با میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه در حالت موازی و سری

محسنعلی شایانفر^۱، مسعود ذبیحی سامانی^{۲*}، محمدامین زارع^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

۳- کارشناس ارشد عمران_سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

پل‌ها به دلیل ارتباط مستقیم با مکان‌های دیگر، جایگاه ویژه‌ای در زیرساخت‌های حمل و نقل دارند. این سازه‌ها با هدف حمل بارهای ترافیکی بزرگراه، عبور از هر مانعی و برقراری ارتباط موثر بین دو مقصد می‌باشد. خرابی‌های ناشی از زلزله و عوامل انسانی در پل‌ها آسیب‌های بسیار جدی وارد می‌کنند و در صورتی که حتی خرابی عضو باعث فرو ریختن کامل سازه نشود، هزینه مقاوم سازی بسیار بالایی را به همراه دارد. بدین منظور محققان و مهندسان استفاده از سیستم‌های کنترل سازه به همراه تحلیل لرزه ای دقیق جهت پیش بینی رفتار سازه را پیشنهاد کردند. هدف از این مطالعه بررسی تغییرمکان در پل‌ها با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در حالت موازی و سری می‌باشد. اثرات مدلسازی میراگرها بر روی پل روگذر ملولند برای اولین بار به کمک روش پیشنهادی در این مقاله بررسی می‌شود. در این تحقیق از سازه پل ارائه شده توسط وحید شیرگیر و همکاران به عنوان سازه نمونه جهت بررسی موارد مطروحه با نرم افزار اپنسیس استفاده می‌گردد. این پل با در نظر گرفتن ضوابط آیین نامه ای، بارهای ثقلی و دینامیکی طراحی شده و مشخصات سازه‌ای آن شامل ابعاد، نوع مصالح مورد استفاده بر اساس مقاله وحید شیرگیر و همکاران می‌باشد. در نهایت مشخص شد که میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت موازی عملکرد مطلوب تری در کاهش بیشینه جابجایی نسبت به سایر میراگرهای جرمی تنظیم شده دارد. همچنین با توجه به نتایج، پاسخ سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه تا ۲۱ درصد کاهش و باعث بهبود سطح عملکرد لرزه‌ای پایه پل گردید.

کلمات کلیدی: ساختار پل، سطح عملکرد، کنترل سازه، میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه، کنترل تغییر مکان.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.390067.3065	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.390067.3065	۱۴۰۲/۰۹/۳۰	۱۴۰۲/۰۴/۱۲	۱۴۰۲/۰۴/۱۲	۱۴۰۲/۰۳/۲۲	۱۴۰۲/۰۱/۱۵
مسعود ذبیحی سامانی mzabihi@iust.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه پل‌ها نقش موثری در حمل و نقل افراد، مواد و یا امداد رسانی در شرایط خاص از موانع طبیعی یا مصنوعی را دارند. عملکرد صحیح پل‌ها در شرایط اضطراری جهت حفظ خدمت رسانی امری ضروری می‌باشد [۱]. از این رو، توانایی پل‌ها برای مقاومت در برابر زلزله‌های قوی موضوعی که همواره مورد توجه مهندسان و محققان بوده است. فروریزش یا آسیب‌های جبران ناپذیر به پل‌ها در یک منطقه تحت اثر زلزله پیامدهای مختلفی از جمله اختلال در عملیات امداد رسانی، نجات، افزایش سطح هزینه‌های انتقال تجهیزات و غیره را به همراه دارد. با توجه به این که در زلزله‌های شدید انرژی بسیار زیادی به سازه‌ها وارد می‌شود، در سازه‌های معمولی این انرژی با تغییر شکل‌های غیر الاستیک در اجزا مختلف سازه مستهلک می‌گردد که این موجب خرابی عضو یا بخشی از سازه می‌شود. در صورتی که حتی خرابی عضو باعث فرو ریختن کامل سازه نشود، هزینه مقاوم سازی بسیار بالایی را به همراه دارد. بدین منظور محققان و مهندسان استفاده از سیستم‌های کنترل سازه به همراه تحلیل لرزه ای دقیق جهت پیش بینی رفتار سازه را پیشنهاد کردند [۲-۴].

کنترل سازه‌ها روشی مؤثر جهت بهبود عملکرد آن‌ها در برابر بارهای دینامیکی و تحریک‌های زمین می‌باشد [۵]. در اکثر روش‌های کنترل سازه‌ای، دستگاه‌های مربوطه را در ساختمان و سازه‌ها نصب می‌کنند تا انرژی ناشی از باد یا زلزله را مستهلک و پاسخ‌های سازه را کاهش دهد. کنترل سازه از طریق تغییر سختی، میرایی، جرم، شکل، جداسازی و یا ملحق کردن دستگاه‌هایی جهت اضافه کردن نیرو به سازه انجام می‌شود. در حالت کلی سیستم کنترل سازه‌ها به چهار دسته شامل کنترل غیرفعال^۱ [۶]، فعال^۲ [۷]، نیمه فعال^۳ [۸] و هیبریدی^۴ [۶] تقسیم می‌گردد که یکی از رایج ترین آن‌ها، کنترل غیرفعال است. در کنترل غیرفعال برخلاف کنترل فعال به منبع انرژی خارجی جهت استهلاک بارهای دینامیکی وارده نیاز نمی‌باشد. میراگر جرمی تنظیم شده^۵ یک دستگاه کنترل غیرفعال حاوی جرم می‌باشد که با فنر و میراگر به سازه متصل شده است و فرکانس‌های طبیعی میراگر جرمی تنظیم شده با یکی از فرکانس‌های طبیعی سازه اصلی تنظیم کاهش و یا از بین می‌رود. از این رو ارتعاش سازه اصلی به واسطه تشدید بر اثر ارتعاش TMD کاهش و یا از بین می‌رود [۹]. نتایج آزمایشات عددی و تجربی نشان می‌دهد که اثر بخشی میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال در کاهش پاسخ و استهلاک انرژی وارده به سازه در هنگام زلزله‌های مختلف و یا سازه‌های مختلف به طور قابل توجهی تفاوت دارد.

یکی از ساده ترین و کم هزینه ترین روش‌ها جهت کاهش پاسخ لرزه ای سازه استفاده از چندین میراگر جرمی تنظیم شده در سازه است. در مطالعات گذشته، میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه^۶ کاربردهای زیادی در کاهش بیشینه جابجایی هنگام زمین لرزه داشته است [۱۰-۱۴]. به عنوان مثال، در سال ۲۰۲۲، یک طراحی تصادفی از سیستم‌های TMD متعدد (MTMD) با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف پیشنهاد شد [۱۵]. بسط تیلور برای برهم زدن تابع هدف استفاده شد که مسئله‌ی طراحی یا بهینه سازی تصادفی را تسهیل می‌کرد. نویسندگان به کمک بسط تیلور تابع Smooth را به صورت مجموع نامتناهی از جمله‌های چند جمله‌ای بازنویسی کردند که با ایجاد آشفتگی در تابع هدف در راستای بهینه سازی تصادفی به کار گرفته شد. برای مشاهده اثر عدم قطعیت سطوح مختلف از یک امتداد بازه استفاده شد. در این مقاله، معادله لیاپانوف^۷ در طراحی سیستم‌های TMD با به حداقل رساندن پراکندگی جابجایی سیستم اولیه استفاده شد و نتایج قابل قبولی بدست آمد. در مطالعه‌ی دیگر، مفهوم جرم موثر پیچیده پیشنهاد شد که می‌تواند به طور کامل اثر دینامیکی MTMD را بر روی پل‌ها نشان دهد و یک فرآیند بهینه‌سازی MTMD مبتنی بر مشتق برای کنترل ارتعاشات ناشی از گرداب^۸ (VIV) پل‌های با دهانه طولانی را ارائه دهد [۱۶]. کاهش VIV از یک پل جعبه-تیر فولادی پیوسته شش دهانه برای تجزیه و تحلیل

¹ Passive control

² Active control

³ Semi-Active control

⁴ Hybrid control

⁵ Tuned Mass Damper (TMD)

⁶ Multiple tuned mass damper (MTMD)

⁷ Lyapunov

⁸ Vortex-induced vibration

عملکرد و مکانیسم MTMD از جنبه‌های حوزه فرکانس و حوزه زمانی استفاده می‌شود. همچنین، آراز^۹ و کاهیا^{۱۰} هدف روشی برای بهینه‌سازی میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه در کاهش ارتعاشات چند رزونانسی پل‌های پیوسته به دلیل بارهای متحرک قطار پیشنهاد دادند و نتایج قابل قبولی بدست آوردند [۱۷]. در پژوهشی دیگر، رابطه بین ضریب تقویت دینامیکی شتاب و پارامترهای مهم یک سیستم MTMD، یعنی پهنای باند فرکانس، نسبت میرایی TMD، نسبت فرکانس مرکزی، نسبت جرم و تعداد TMD بررسی شد [۱۸]. سپس فرمول‌های بهینه پهنای باند فرکانس و نسبت میرایی با توجه به مطالعه پارامتری پیشنهاد شد. در نهایت، یک پل عابر پیاده باریک ضمن خدمت به عنوان مطالعه موردی پیشنهاد شد که از طریق یک مدل المان محدود و یک آزمون درجا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین مشخص شد که نتیجه تجزیه و تحلیل به خوبی با آزمون درجا مطابقت دارد. علی‌رغم مطالعاتی که تا به حال انجام شده است، هنوز شکاف و کاستی‌های بسیاری از نظر دقت و تنظیم MTMD وجود دارد که بایستی بررسی شود.

پل‌ها جزء سازه‌های حیاتی و حساس به بارهای دینامیکی می‌باشند و به دلیل نامعینی کم در مقابل زلزله به راحتی تخریب و ریزش می‌کنند. دوره تناوب ارتعاش اصلی و بنیادی اکثر آن‌ها بین ۰/۲ الی ۱ ثانیه قرار می‌گیرد که آن‌ها را در برابر لرزش مستعدتر می‌کند. استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده یک راه حل جامع جهت کنترل ارتعاشات و انرژی حاصل از زمین‌لرزه می‌باشد در صورتی که به صورت مناسب طراحی و به سیستم سازه‌ای پل نصب گردد باعث کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ای می‌شود. در این تحقیق از سازه پل ارائه شده توسط وحید شیرگیر^{۱۱} و همکاران [۱۹] به عنوان سازه نمونه جهت بررسی موارد مطروحه با نرم افزار اپنسیس^{۱۲} استفاده می‌گردد. این پل با در نظر گرفتن ضوابط آیین‌نامه‌ای، بارهای ثقلی و دینامیکی طراحی شده و مشخصات سازه‌ای آن شامل ابعاد، نوع مصالح مورد استفاده بر اساس مقاله وحید شیرگیر و همکاران می‌باشد. نوآوری اصلی این پژوهش بررسی عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده در حالت‌های مختلف مدلسازی می‌باشد. نوآوری دیگر این مقاله این است که با توجه به تحقیقات گذشته، اثرات مدلسازی میراگرها بر روی این پل (پل روگذر ملولند) در نظر گرفته نشده است. یک TMD تنها برای کنترل بیش از یک حالت کافی نیست، به طوری که میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD) مورد نیاز است. طراحی بهینه و مکان یابی MTMD در یک سازه مسائل بسیار مهمی است که باید به منظور کنترل سایر حال‌ها انجام شود تا بتوان پاسخ سازه‌ها را کاهش داد. استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم چندگانه در حالت موازی بهترین عملکرد را در کاهش بیشینه جابجایی عرشه پل در راستای عرضی دارد. جهت صحت سنجی نتایج به دست آمده در این تحقیق از شرایط Fixed-Based مقاله مذکور استفاده و از اثرات اندرکنش خاک و شمع بر روی سازه پل صرف نظر شد. در ادامه روش تحقیق به طور کامل در بخش دوم شرح داده می‌شود. سپس نتایج بدست آمده در بخش سوم تحلیل می‌شود. نتیجه گیری کلی بر مبنای اطلاعات ارائه شده و پیشنهادات برای آینده نیز در بخش چهارم ارائه می‌گردد.

۲- روش تحقیق

در این مقاله از نرم افزار Opensees برای مدلسازی سه بعدی و غیر خطی سازه استفاده شده است [۲۰]. این نرم افزار یک نرم افزار اجزا محدود است که به طور تخصصی برای سیستم‌های عملکرد خاک و سازه تحت زلزله طراحی شده است. این نرم افزار می‌تواند با ایجاد انواع مختلفی از تحلیل‌های خطی و غیر خطی به معرفی و ساخت مصالح به کمک المان و ابزارهای تحلیل جدید بپردازد. در این پژوهش از یک پل بتنی مسلح مدرن دارای ۲ دهانه پیوسته ۳۲ متری با تکیه گاه‌های یکپارچه، یک ستون مرکزی به قطر ۱/۵۲ متر و ارتفاع ۷/۹۵ متر واقع در نزدیکی ال سنترو در جنوب شرقی کالیفرنیا استفاده شده است. با توجه به این که استفاده از این پل‌ها در ایران و کشورهایی مانند ایالات متحده آمریکا رایج می‌باشد، این پل به عنوان نمونه تحقیقاتی انتخاب گردید. جزییات مدلسازی پل مذکور مطابق

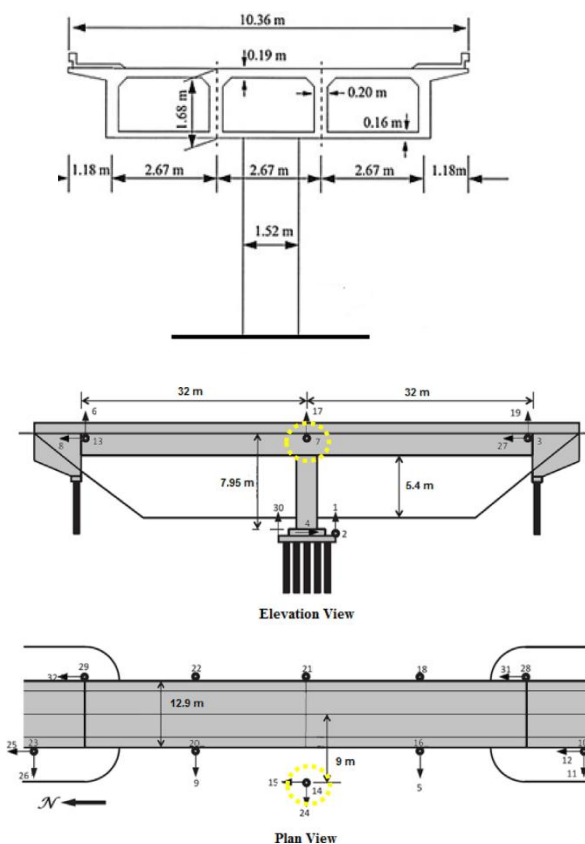
⁹ Araz

¹⁰ Kahya

¹¹ Shirgir

¹² Opensees

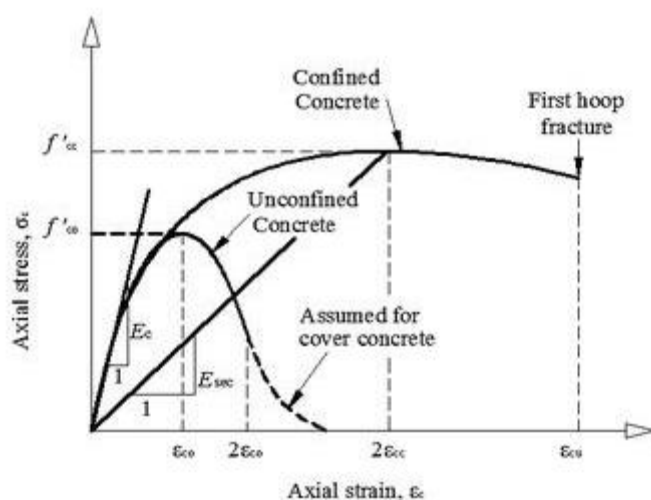
با مقاله وحید شیرگیر^{۱۳} و همکاران در نظر گرفته شده است [۱۹]. پارامترهایی که در آن مقاله اشاره نشده است، با فرض منطقی از سایر مقالات نسبت به تعیین آن اقدام می‌گردد. شماتیک پل مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: پل، مقطع عرضی عرشه، ستون، کوله و مکان شتاب نگارها [۲۱]

لازم به ذکر است که برای شبیه سازی بتن ستون از مصالح concrete01 که دارای خصوصیات سختی بارگذاری و باربرداری خطی کاهش یافته و بدون در نظرگیری مقاومت کششی بتن می باشد، استفاده شده است. برای مدلسازی آرماتورهای ستون از مصالح Steel02 برای ساخت مصالح فولادی با سخت شوندگی کرنش همگن به کار گرفته شده است. مدل رفتاری این مصالح در شکل ۲ نشان داده شده است. برای مدلسازی مقطع ستون به روش فایبر با امکان مدلسازی بتن محصور شده، محصور نشده و میلگردها استفاده شده است. شکل ۳ مقطع فایبر مدلسازی شده را نشان می‌دهد. همچنین جهت تشکیل مفاصل پلاستیک در طول ستون از المان‌های displacement-based beam column استفاده شده و برای اتصال ستون به مرکز سطح عرشه از المان elastic beam-column با سختی بالا جهت انتقال نیرو استفاده گردیده است.

با توجه به شکل ۲، محصورشدگی باعث افزایش تنش و کرنش نهایی بتن می‌گردد. دلیل اصلی استفاده از مصالح concrete01 در این پژوهش نیز نبود مشکلات همگرایی در تحلیل سازه مورد نظر می‌باشد. همانند شکل ۲، مقاومت و کرنش بتن محصور شده و بتن محصور نشده تفاوت زیادی با هم دارند و برای هر کدام مقادیر متفاوتی تعریف شده است. بر همین اساس مقادیر تعریف شده برای بتن های محصور شده و محصور نشده مطابق جدول ۱ می‌باشد.

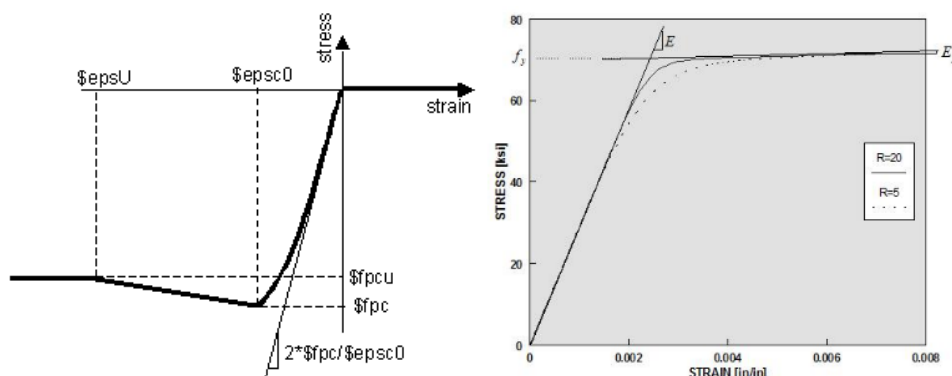


شکل ۲: توزیع تنش و کرنش بر اساس محصور شدگی [۲۲]

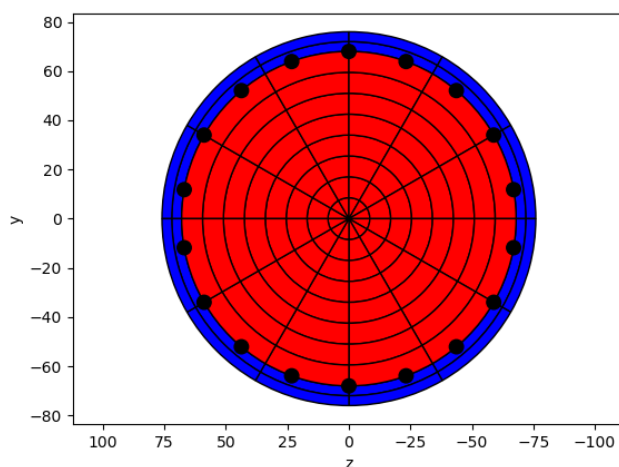
جدول ۱: مقادیر تعریف شده برای بتن های محصور شده و محصور نشده

پارامتر	محصور شده	محصور نشده
f_{pc}	۳۵۰ kg f/cm ²	۲۸۰ kg f/cm ²
ϵ_{psco}	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
f_{pcu}	۲۱۰ kg f/cm ²	۰
ϵ_{pcu}	۰/۰۱۴	۰/۰۰۸

مشخصات هندسی عرشه بر اساس اطلاعات ارائه شده در مقاله مرجع محاسبه و به المان های تیر ستونی واقع در مرکز عرشه اعمال می گردند. با توجه به این که در طراحی پل ها عرشه پل به صورت الاستیک در نظر گرفته می شود، به المان های عرشه خصوصیات هندسی و سختی های بسیار بزرگی اعمال می گردد. همچنین توزیع جرم روی المان های طولی پل انجام می شود.

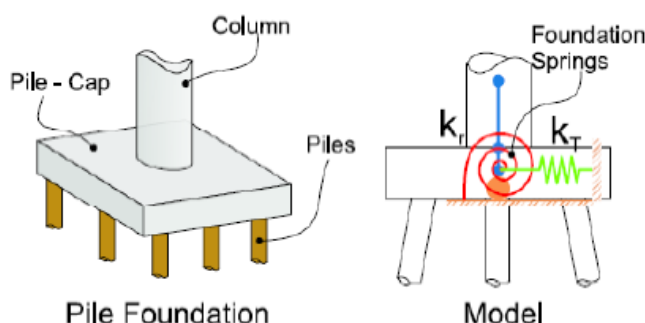


شکل ۳: رفتار مصالح concrete01 (سمت چپ) و رفتار مصالح Steel02 (سمت راست) [۲۰]



شکل ۴: جزییات مدلسازی مقطع پایه

برای مدلسازی کوله در این پژوهش از فنرهای معادل معرفی شده در مرجع [۲۳] همانند شکل ۵ استفاده شده است. مدلسازی کوله با دوگره روی هم که یکی به عنوان زمین گیردار در هر ۶ درجه آزادی و دیگری تنها در راستای عرضی آزاد می‌باشند، انجام شده است. از مصالح الاستیک^{۱۴} و المان‌های طول صفر^{۱۵} برای تعریف فنر با سختی متناظر استفاده شده است. سیستم سازه‌ای پی در این پل متشکل از ۲۵ عدد شمع قائم به طول ۱۵ متر داخل خاک‌های چند لایه رس و ماسه و نیز یک کلاهدک می‌باشد. با توجه به این که هدف پژوهش حاضر بررسی و مدلسازی اثرات اندرکنش خاک و سازه نمی‌باشد، در نتیجه از روش‌های ساده‌تری مانند روش زیر سازه جهت اعمال اثرات خاک توسط فنرهای انتقالی و دورانی استفاده می‌گردد. مقادیر فنرهای استفاده شده نیز مربوط به مرجع [۲۳] می‌باشد.



شکل ۵: روش زیرسازه [۲۴]

تحلیل تاریخچه زمانی، ارزیابی خطی یا غیرخطی پاسخ‌های دینامیکی سازه تحت بارگذاری را فراهم می‌کند که ممکن است با توجه به تابع زمانی مشخص شده متفاوت باشد. در سال‌های اخیر محققین به لزوم به کارگیری روش‌های تحلیل غیر خطی در مراحل طراحی سازه پی برده‌اند. از این رو تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تنها تحلیل غیر خطی است که می‌تواند تقاضای کلی سازه و محلی آن را به صورت دقیق پیش بینی نماید اما برای نیل به این موضوع، به تعداد بسیار زیادی تحلیل تاریخچه زمانی نیاز است. همچنین، هزینه و وقت زیادی حتی با وجود رایانه‌های پیشرفته صرف می‌شود که در مورد سازه‌های پیچیده اصلاً موضوع مطلوب و مناسبی به نظر نمی‌رسد. در این پژوهش، برای مدلسازی سه بعدی و غیرخطی سازه از نرم افزار Opensees استفاده شده است [۲۰].

¹⁴ Elastic¹⁵ Zero length element

۳- فرضیات و بارگذاری

در این پژوهش مشخصات مکانیکی فولاد و بتن مصرفی به شرح زیر فرض شده است:

تنش تسلیم فولاد (F_y)	۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع
تنش نهایی فولاد (F_u)	۶۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع
نسبت کرنش-سخت شوندگی ^{۱۶} (b)	۰/۰۲
مدول الاستیسیته فولاد (E)	۲/۱×۱۰ ^۶ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

همچنین مساحت مقطع، ممان اینرسی قطبی عرشه و پایه پل مطابق جدول زیر به المان‌های مربوطه اعمال گردید.

جدول ۲: مشخصات پایه و عرشه پل

	A (cm ²)	I _y (cm ⁴)	I _z (cm ⁴)	j (cm ⁴)
پایه	۱/۸×۱۰ ^۴	۲/۶×۱۰ ^۷	۲/۶×۱۰ ^۷	۵/۲×۱۰ ^۷
عرشه	۴/۳۸×۱۰ ^۴	۱/۸۷×۱۰ ^۸	۳/۳۴×۱۰ ^۹	۵/۴۱×۱۰ ^۸

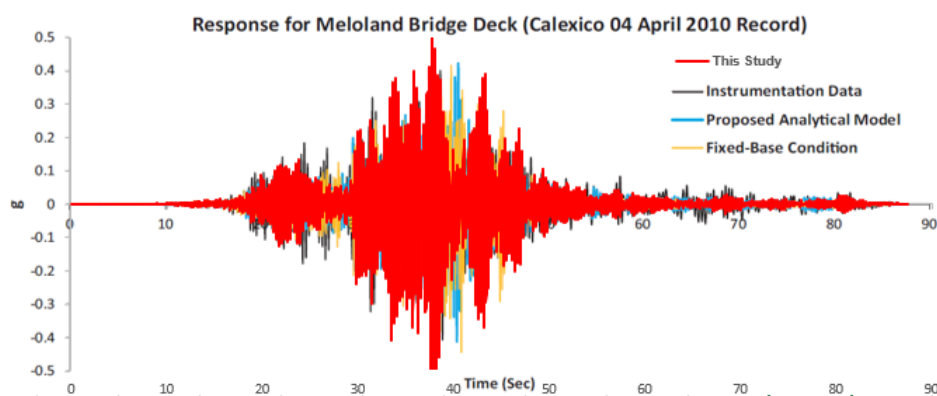
باتوجه به مقاله مرجع، وزن عرشه پل مذکور ۳۶۴ تن ارائه گردیده است. در نتیجه بارفوق به صورت بارمرده معادل ۵۶٫۵ کیلوگرم بر سانتی متر به المان‌های عرشه اعمال شده است.

بعد از مدلسازی در نرم افزار و انجام تحلیل مودال، جهت صحت سنجی مدل مذکور سازه تحت تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از شتابنگاشت Calexico 04April2010 قرار گرفت. بعد از پایان تحلیل حداکثر جابجایی عرشه پل در راستای عرضی با مقدار ارائه شده در مقاله مرجع مقایسه گردیده و نتایج در جدول ۳ بیانگر اختلاف کم و مدلسازی نسبتاً دقیق پل MRO می باشد. همچنین نمودارهای پاسخ شتاب عرشه پل در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است که تطابق نسبتاً خوبی با نمودار پاسخ شتاب مقاله مرجع [۱۹] دارند. اختلاف موجود در نتایج حاصل شده از پژوهش حاضر و مقاله مرجع ناشی از مواردی نظیر عدم معرفی روش مقیاس کردن رکوردها، کمبود اطلاعات در برخی از پارامترهای مدلسازی و عدم مدلسازی اندرکنش خاک و سازه به صورت دقیق می باشد. با توجه به این که در ادامه روند این پژوهش پایه پل به صورت گیردار فرض شده است در نتیجه در حالت گیرداری نیز صحت سنجی با مقاله مرجع انجام و جابجایی عرضی عرشه پل در این حالت تحت رکورد Calexico 04April 2010 برابر ۵/۷۴ میلی متر حاصل گردید که با مقدار متناظر آن در مقاله مرجع حدود ۴/۵ درصد اختلاف دارد. نتایج بیانگر مدلسازی نسبتاً دقیق پل مذکور می باشد.

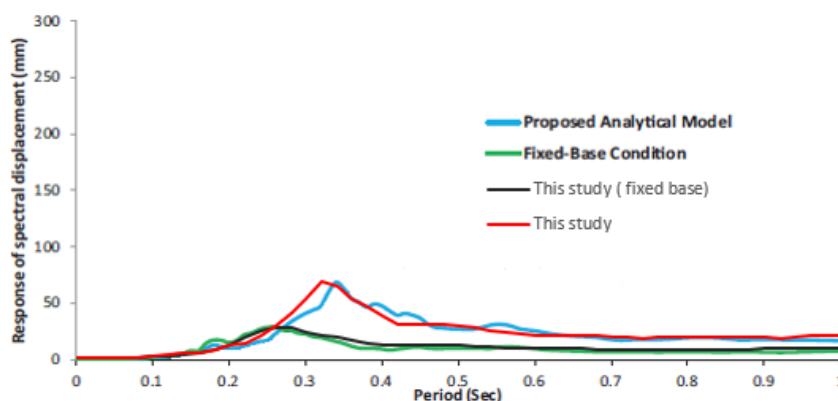
¹⁶ Strain-hardening ratio

جدول ۳: مقایسه نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی با مقاله مرجع

اختلاف (%)	مدلسازی صحت سنجی	مقاله مرجع	جابجایی عرشه پل در راستای عرضی (میلی متر)
۷/۹	۹/۹۸	۱۰/۸	در شرایط اعمال روش زیرسازه
۴/۴۳	۵/۷۴	۶/۰	در شرایط گیرداری پایه پل



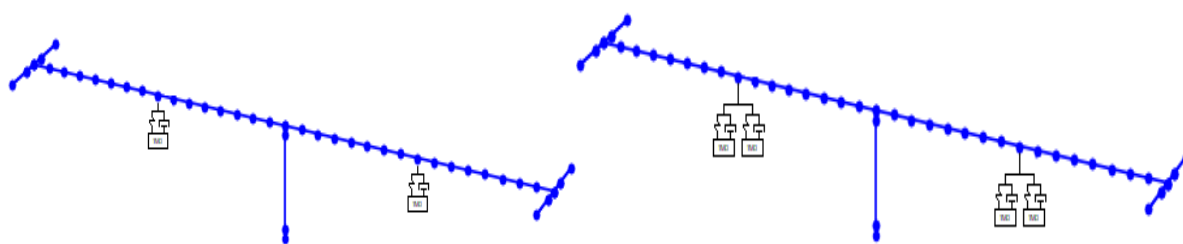
شکل ۶: مقایسه نمودار پاسخ شتاب عرشه پل تحت رکورد Calexico 04 April 2010



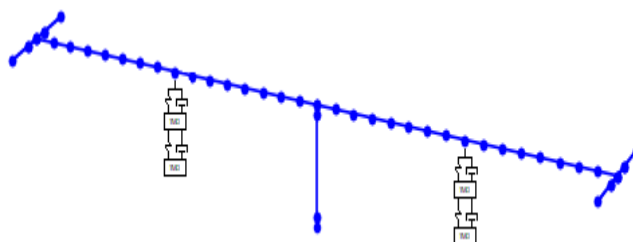
شکل ۷: مقایسه نمودارهای پاسخ جابجایی طیفی پل تحت رکورد Calexico 04 April 2010

با توجه به حساسیت زیاد آیین نامه‌های طراحی به کنترل جابجایی عرشه پل‌ها در راستای عرضی جهت کنترل مورد مذکور میراگرهای جرمی تنظیم شده در محدوده معینی از یک ناحیه پل برای مثال نواحی میانی نصب و مدلسازی می‌گردد. در این پژوهش تاثیر میراگرهای جرمی تنظیم شده در کاهش جابجایی عرشه پل در راستای عرضی در سه حالت مختلف بررسی می‌گردد. در حالت اول یک میراگر جرمی تنظیم شده با مشخصات و پارامترهای یکسان در وسط هر دهانه، در حالت دوم دو میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه با مشخصات و پارامترهای متفاوت در وسط هر دهانه که به صورت سری به عرشه متصل شده اند و برای حالت سوم نیز دو میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه با مشخصات و پارامترهای متفاوت در هر دهانه که به صورت موازی به عرشه متصل شده اند، مدلسازی و حداکثر جابجایی عرضی عرشه بررسی می‌گردد.

شکل‌های ۸ و ۹ بیانگر نحوه چیدمان میراگرهای جرمی تنظیم شده در حالات مختلف می‌باشد.



شکل ۸: میراگر جرمی تنظیم شده با مشخصات یکسان (سمت راست) و میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه سری (سمت چپ)



شکل ۹: میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه موازی

برای بررسی مکان عرشه پل در حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده، مطابق پژوهش قربانی و همکاران [۲۵]، مجموع جرم‌های انتخابی برای میراگرهای جرمی تنظیم شده از ۱ الی ۴ درصد جرم کل پل می‌باشد. مقادیر ضریب میرایی نیز مطابق پژوهش دانشجو و همکاران [۲۶] از ۵ الی ۲۰ درصد و مقادیر ضریب تنظیم فرکانس میراگر در بازه ۰/۸ الی ۱/۲ برای نزدیک بودن فرکانس حرکت میراگر به فرکانس اصلی سازه در نظر گرفته شده است. با توجه به مشخص شدن پارامترهای درصد جرم، میرایی و ضریب تنظیم فرکانس میراگرهای جرمی تنظیم شده با استفاده از روابط ۱ الی ۳ که براساس روابط دن‌هارتوگ توسعه یافته‌اند، سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده محاسبه و تعیین می‌گردد.

$$M_{TMD} = m_0 \times M_{Structure} \quad (1)$$

$$K_{TMD} = M_{TMD} \times (\beta \times \omega_1^2) \quad (2)$$

$$C_{TMD} = 2 \times \xi \times \sqrt{K_{TMD} \times M_{TMD}} \quad (3)$$

که در آن m_0 نسبت جرمی، β ضریب تنظیم فرکانس میراگرهای جرمی، ω_1 فرکانس سازه اصلی و ξ ضریب میرایی میراگرهای جرمی می‌باشند. محققین در اکثر پژوهش‌های انجام شده در این حوزه به این نتیجه رسیده‌اند که مقادیر سختی و میرایی میراگر TMD که با استفاده از روابط ۱ الی ۳ بدست آمده است، لزوماً بهینه‌ترین مقادیر نیستند. به همین دلیل در این پژوهش با استفاده از کدنویسی در نرم افزار قدرتمند پایتون بهینه‌ترین مقادیر سختی و میرایی برای هر سه حالت میراگر جرمی تنظیم شده با مشخصات یکسان و متفاوت استخراج و در مراحل بعدی به کار برده شد.

در این مدل‌سازی میراگرهای TMD در راستای عرضی آزاد و در بقیه درجات آزادی مقید هستند. در ابتدا جرم کلی پل محاسبه و پیروی غالب و فرکانس پل تعیین شد. سپس جرم میراگرها با توجه به درصد جرمی مورد نظر و سختی میراگر با توجه به تعیین جرم و ضریب تنظیم فرکانس مشخص گردید. ضریب میرایی و فرکانس تنظیمی میراگر نیز جهت مشخص شدن میرایی میراگر تعیین شدند. در این مرحله پایه پل در تمامی درجات آزادی مقید و گیردار در نظر گرفته شده و مطابق جدول ۴، مقادیر پیروی و فرکانس‌های پل بعد از انجام تحلیل آیین ارائه شده است. با توجه به نتایج زیر پیروی غالب پل در راستای عرضی می‌باشد که هدف از اضافه شدن میراگرهای جرمی به این پل، کاهش بیشینه تغییر مکان عرشه پل در این راستا می‌باشد.

جدول ۴: پیود و فرکانس پل

مد	پیود (ثانیه)	فرکانس (هرتز)	فرکانس (رادیان بر ثانیه)
۱	۰/۳۰	۳/۳۰	۲۰/۸
۲	۰/۰۲۵	۳۹/۵۳	۲۴۸/۴
۳	۰/۰۱۷	۵۸/۱۴	۳۶۵/۳۲
۴	۰/۰۱۲	۸۲/۲۳	۵۱۶/۷۲

در این پژوهش برای ارزیابی و بررسی لرزه‌ای میراگرهای جرم تنظیم شده چندگانه از هر دو حالت موازی و سری مطابق شکل ۵ با جرم‌های یکسان و سختی و میرایی متفاوت استفاده شده است. برای این منظور ضریب تنظیم فرکانس میراگر جرمی اول را همانند بخش قبل از بازه ۰/۸ الی ۱/۲ با گام ۰/۰۲ و برای میراگر جرمی دوم بازه ۰/۸ الی ۱/۲ با گام ۰/۰۴ و همچنین نسبت میرایی هر دو میراگر در بازه ۵ الی ۲۰ درصد با گام ۱ درصد در نظر گرفته شده است. همانطور که در محاسبات زیر نشان داده شده است، ۸۴ هزار مرتبه تحلیل انجام شده است:

$$n_{Analyze} = m_{TMD} \times \beta_{TMD_1} \times \beta_{TMD_2} \times \xi_{TMD} \times Rec_{Eq} = 4 \times 20 \times 10 \times 15 \times 7 = 84 \times 10^3$$

بعد از انجام حدود ۸۴ هزار مرتبه تحلیل تاریخچه زمانی برای هر حالت از میراگرها، از مقادیر بهینه حاصل شده از ۷ رکورد زلزله میانگیری شده و جهت تعریف و اعمال میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه در بخش‌های بعدی به سازه استفاده می‌گردد. با توجه به این که مقادیر بهینه β و ξ برای نسبت جرمی‌های مذکور در حالتی که هر دو میراگر جرمی تنظیم شده دارای مشخصاتی یکسان هستند در جدول ۵ نشان داده شده است. رکوردهای زمین لرزه در این مطالعه شامل لندرز^{۱۷}، لوما پریتا^{۱۸}، ایمپریال ولی^{۱۹}، نورتریج^{۲۰}، سن فرناندو^{۲۱}، مورگان هیل^{۲۲}، و پتر نروز^{۲۳} است.

جدول ۵: مقادیر بهینه ضریب تنظیم فرکانس و میرایی برای نسبت جرمی‌های مختلف

نسبت جرمی	β	ξ (%)
۰/۰۱	۱	۷
۰/۰۲	۱/۰۲	۷
۰/۰۳	۰/۹۱	۹
۰/۰۴	۱/۰۸	۶/۸۶

بر اساس بند الف ۲-۲-۲ دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و مقاوم سازی ساختمان‌ها جهت رفع بزرگترین ایراد میراگرهای TMD که حساسیت بالای آن در تغییر فرکانس سازه و کنترل پاسخ چند مود می‌باشد، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه می‌باشد. براساس پژوهش Li در سال ۲۰۰۰، به مطالعه پارامترهای بهینه MTMD در دو حالت پرداخت که این دو حالت به صورت زیر معرفی گردیده‌اند:

الف) سختی و میرایی برابر در TMDها و جرم متفاوت در آنها

ب) جرم برابر در TMDها و سختی و میرایی متفاوت در آنها

17 Landers

18 Loma Prieta

19 Imperial Valley

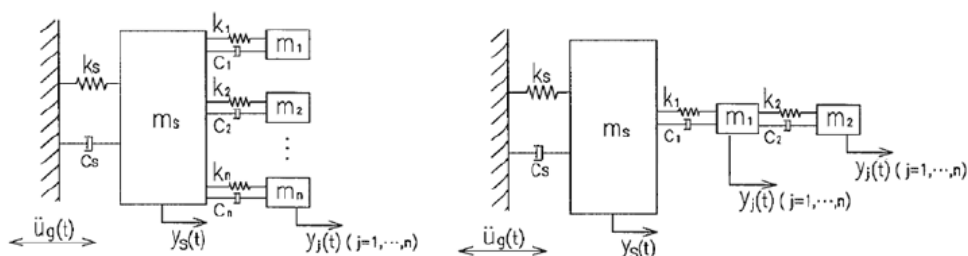
20 Northridge

21 San Fernando

22 Morgan Hill

23 Whittier Narrows

این نوع از میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه یا به اختصار MTMD می‌توانند به صورت سری یا موازی با چیدمان‌های مختلف در سازه طراحی و نصب گردند.



شکل ۱۰: نحوه قرارگیری MTMD به صورت موازی یا سری در سیستم یک درجه آزادی [۲۷]

مقادیر بهینه میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه سری و موازی مطابق جدول ۶ و ۷ ارائه شده است. نتایج بدست آمده از اعمال روش پیشنهادی بر روی رکوردهای مورد نظر در بخش بعدی ارائه می‌گردد [۲۷].

جدول ۶: مقدار بهینه ضریب تنظیم فرکانس و میرایی هر دو میراگر MTMD سری برای نسبت جرمی‌های متفاوت

نسبت جرمی	β_1	β_2	ξ (%)
۰/۰۱	۰/۸۲	۰/۸۴	۱۸/۱۴
۰/۰۲	۰/۸۷	۰/۸۵	۱۶/۲۹
۰/۰۳	۰/۸۸	۰/۹۴	۱۴/۷۱
۰/۰۴	۰/۸۷	۰/۸۹	۱۵

جدول ۷: مقدار بهینه ضریب تنظیم فرکانس و میرایی هر دو میراگر MTMD موازی برای نسبت جرمی‌های متفاوت

نسبت جرمی	β_1	β_2	ξ (%)
۰/۰۱	۰/۹۹	۱/۱۶	۹
۰/۰۲	۰/۹۶	۱/۱۴	۵/۷۱
۰/۰۳	۰/۹۸	۱/۱۴	۷/۲۹
۰/۰۴	۱	۱/۱۲	۱۱

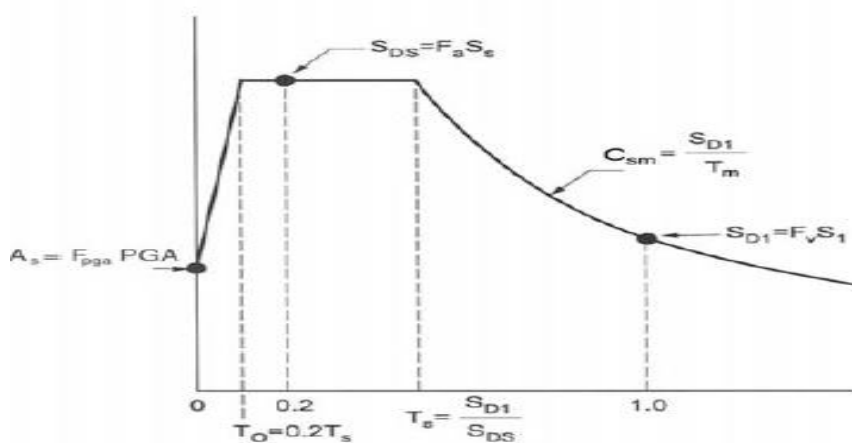
جهت بررسی رفتار میراگرها و تأثیر آن‌ها بر کنترل تغییر مکان عرشه پل، مدل مذکور تحت اثر ۷ شتابنگاشت قرار می‌گیرد. بر اساس جدول اطلاعات مقاله مرجع [۱۹]، سرعت موج برشی در خاک محل ساختگاه پل برابر ۲۴۱ متر بر ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است که بر اساس سرعت موج برشی، نوع خاک محل ساختگاه پل طبق آیین نامه ASCE07 برابر D و طبق استاندارد USGS معادل C می‌باشد. جهت ارزیابی پل ابتدا باید شتابنگاشت‌های بخش قبل بر اساس سطح خطری مشخص مقیاس شوند [۲۸]. جهت مقیاس سازی رکوردهای زلزله و ترسیم طیف آیین نامه از زلزله با سطح بالا و دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۱ الی ۱۳، جهت ترسیم طیف طرح استاندارد متناظر با آن پارامترهای شتاب طیفی در پیوند بلند ($T=1s$) و در پیوند کوتاه ($T=0/2s$) و همچنین PGA توسط ارائه مختصات محل پل به سایت USGS استخراج شد. پارامترهای s_s ، s_1 و s_0 و PGA دارای مقادیر ۰/۸۶۹، ۲/۲۹، و ۰/۹۵۴ بودند. با توجه به تعیین پارامترهای فوق، مقادیر F_v و F_a و F_{PGA} بر اساس نوع خاک D و طیف نشان داده شده در شکل ۱۱ با توجه به آیین نامه FHWA تعیین می‌گردند. در این پژوهش برای ترسیم طیف لرزه‌ای آیین نامه جهت مقیاس سازی شتاب نگاشت‌های معرفی شده از راهنمای مقاوم سازی لرزه‌ای برای سازه‌های بزرگراهی استفاده شده است. در این راهنما دو سطح لرزه‌ای با عنوان‌های زلزله‌های سطح پایین و سطح بالا معرفی شده است که زلزله سطح بالا دارای ۷ درصد احتمال تجاوز در ۷۵ سال با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال است [۲۸].

$$A_s = PGA \times F_{PGA} = 0 / 954 \quad (4)$$

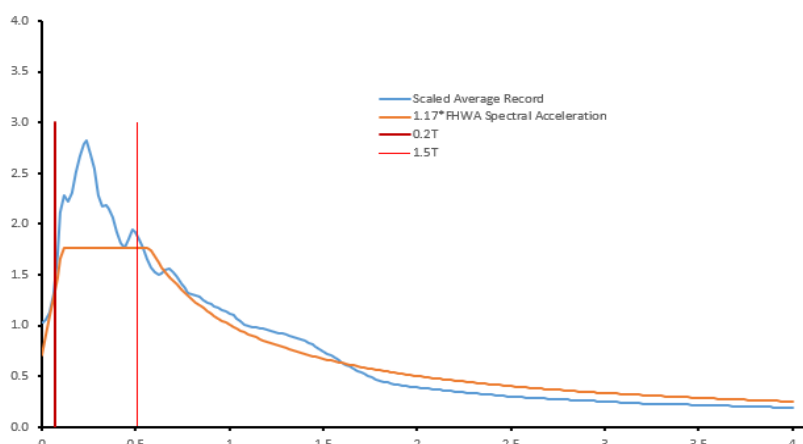
$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_s \times F_a = 1 / 5114 \quad (5)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_1 \times F_v = 0 / 8603 \quad (6)$$

در این پژوهش ۷ رکورد زلزله از بین رکوردهای معرفی شده در جدول C-3 آیین نامه FEMA 440 به گونه‌ای انتخاب گردیده‌اند تا ضوابط عنوان شده در بند ۲-۴-۱-۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم رعایت گردند. بر همین اساس اکثریت رکوردهای معرفی شده در جدول ۸ دارای بزرگای بیشتر از 6/5 ریشتر و تماماً مطابق با خاک محل ساختگاه پروژه می‌باشند. همچنین رکوردهای مذکور دارای PGA های متفاوت جهت در نظرگیری تاثیرات محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله بر سازه می‌باشند. برای اعمال آن‌ها به مدل در تحلیل های غیر خطی، ابتدا می‌بایست بدون لحاظ کردن سطح خطر، شتاب نگاشت‌ها به میزان g همپایه شوند و در نهایت در بازه 0/2 T الی 1/5 T مقدار متوسط طیف SRSS تمام زوج مؤلفه‌ها بیش از ۱۰ درصد ۱/۳ برابر مقدار طیف مربوط به زلزله با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال کمتر نشود. اطلاعات این زمین لرزه‌ها به طور کامل در جدول ۸ ارائه شده است. جابجایی این زمین لرزه‌ها در حالت بدون TMD نیز ۳/۱۱۲۴، ۴/۳۵۲۴، ۲/۹۶۱۷، ۱/۱۷۹۳، ۴/۶۹۶۳، ۲/۰۷۲۱ و ۲/۴۷۶۷ سانتی متر است. نتایج بدست آمده به طور کامل در بخش بعدی تجزیه و تحلیل می‌شوند.



شکل ۱۱: طیف شتاب آشتو [۲۹]



شکل ۱۲: مقیاس طیف میانگین شتاب نگاشت‌ها با طیف آیین نامه FHWA

جدول ۸: مشخصات شتاب نگاشت‌های مجموعه زمین لرزه‌ها [۳۰]

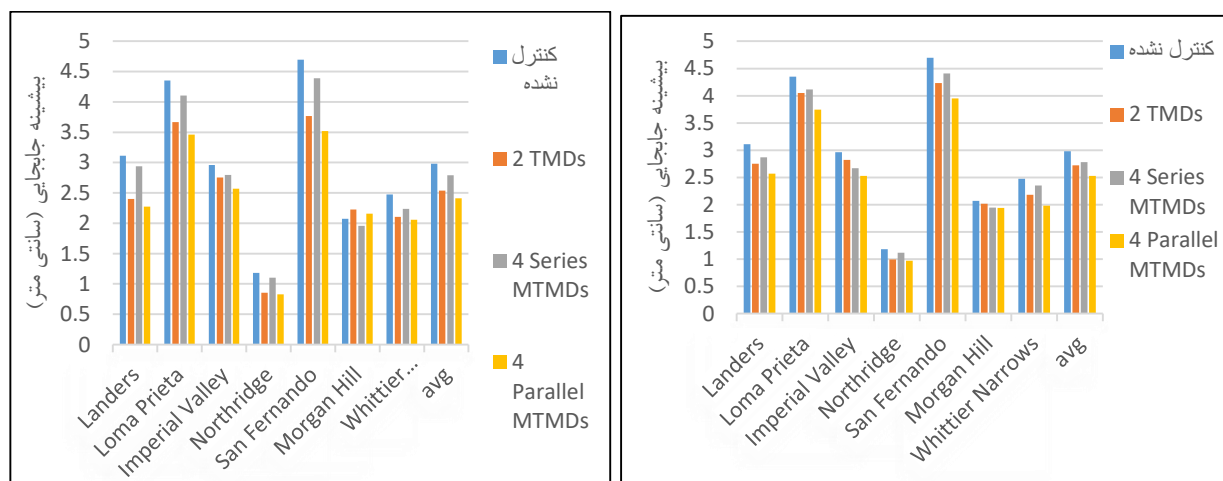
زمین لرزه	بزرگا	حداکثر شتاب زمین بر حسب g	ضرایب مقیاس اعمال شده به شتابنگاشت‌ها
Landers	۷/۵	۰/۲۴	۳/۴۶
Loma Prieta	۷/۱	۰/۵۴	۱/۵
Imperial Valley	۶/۸	۰/۲۷۵	۳/۰۵
Northridge	۶/۸	۰/۸۸	۰/۹۵
San Fernando	۶/۵	۰/۲۱	۳/۷۵
Morgan Hill	۶/۱	۰/۳۵	۲/۴۲
Whittier Narrows	۶/۱	۰/۲	۴/۱۳

۴- نتایج و بحث

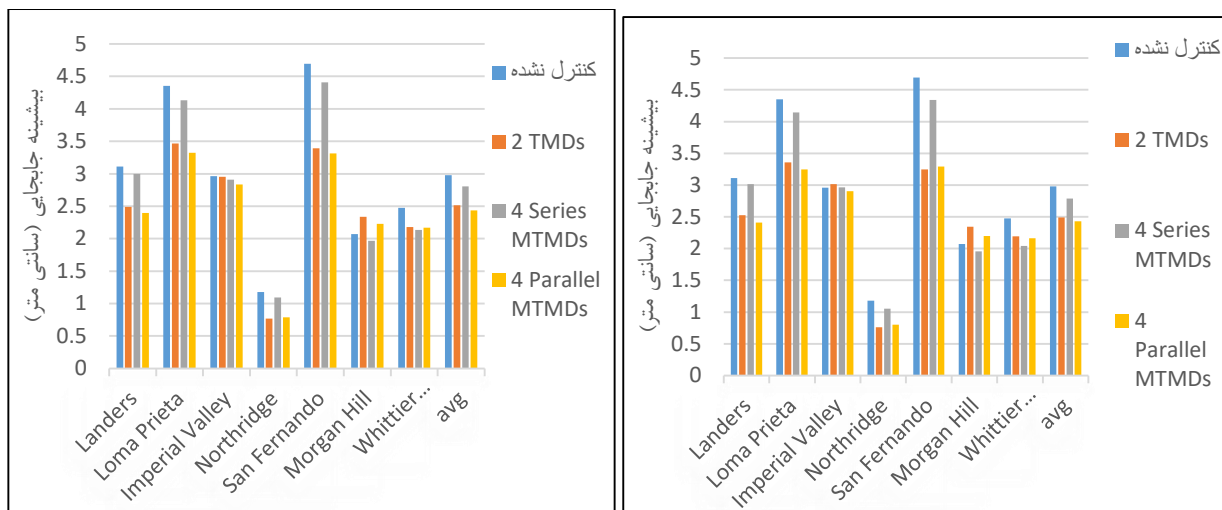
در این بخش، بعد از انجام تحلیل تاریخچه زمانی توسط شتابنگاشت‌های مقیاس شده‌ی بخش قبلی، بیشینه مقادیر جابجایی، شتاب و سرعت گره بالای ستون و همچنین برش پایه عرضی برای حالت‌های کنترل شده و نشده استخراج گردید. افزودن میراگرهای جرمی به سازه‌ها منجر به تغییر ماتریس‌های جرم و سختی و تغییر در زمان تناوب و در نهایت کنترل جابجایی سازه می‌شود. در این تحقیق هدف کنترل جابجایی عرضی عرشه پل تحت ۳ حالت از میراگرهای جرمی تنظیم شده می‌باشد.

۴-۱- بررسی جابجایی عرشه پل

تاثیر حالت‌های مختلف میراگرهای جرمی تنظیم شده در پاسخ لرزه‌ای پل مورد مطالعه در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ و همچنین مقادیر جابجایی برای هر شتابنگاشت و درصد جرمی میراگرها ارائه شده است. نحوه قرارگیری این میراگرها در بخش قبلی توضیح داده شده است.



شکل ۱۳: جابجایی عرضی پل با درصد جرمی ۰/۰۲ (سمت راست) و درصد جرمی ۰/۰۱ (سمت چپ) برای میراگر جرمی تنظیم شده

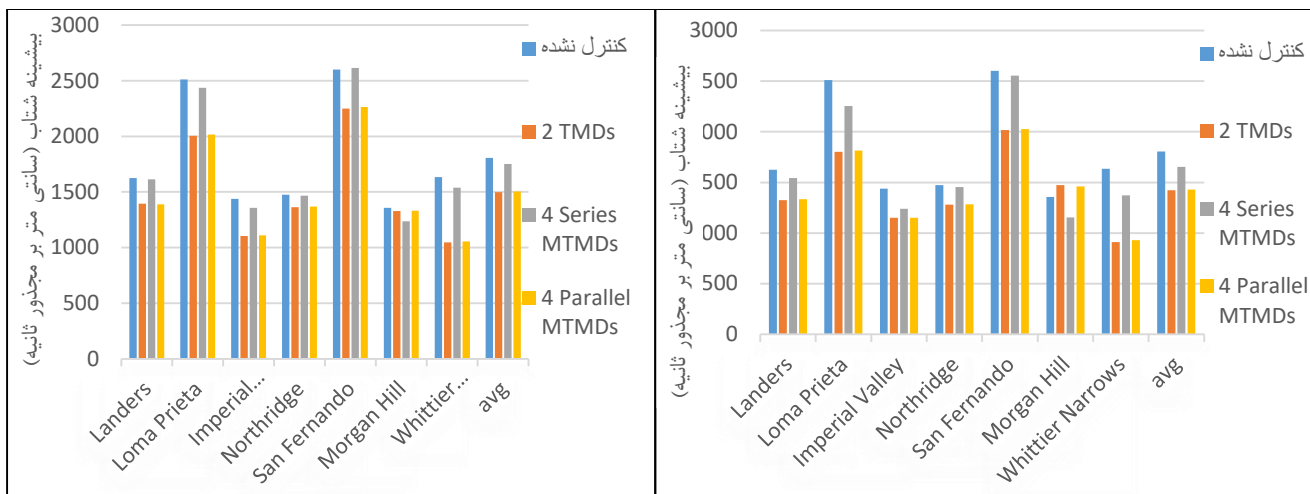


شکل ۱۴: جابجایی عرضی پل با درصد جرمی ۰/۰۳ (سمت راست) و درصد جرمی ۰/۰۴ (سمت چپ) برای میراگر جرمی تنظیم شده

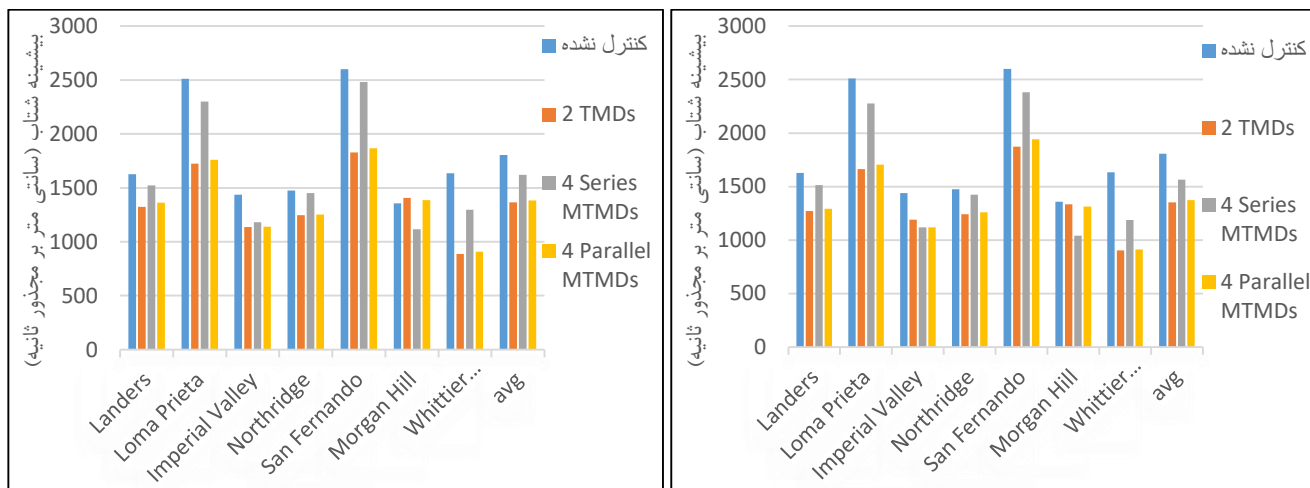
براساس نتایج حاصل شده، جابجایی بیشینه عرشه پل در حالت‌های مختلف قرارگیری میراگر جرمی تنظیم شده کاهش یافته است. جابجایی عرشه پل در راستای عرضی در حالت بدون میراگر به صورت میانگین ۲/۹۷۸ سانتی متر به دست آمد و در حالتی که ۲ میراگر جرمی تنظیم شده با مشخصات یکسان به عرشه پل متصل شده‌اند، بیشینه جابجایی آن ۱۸ درصد کاهش یافته است. طبق نمودار-های ارائه شده مشاهده می‌شود که در این حالت با افزایش جرم میراگرها، جابجایی عرشه پل نیز بیشتر کنترل می‌شود و بهینه‌ترین پارامترهای آن عبارت است از نسبت جرمی ۰/۰۴، ضریب تنظیم فرکانس ۱/۰۸ و درصد میرایی ۶/۸۶. در حالتی که ۴ میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت سری به عرشه ملحق شده‌اند، بیشینه جابجایی عرشه پل ۷ درصد کاهش یافته که مقدار قابل توجهی محسوب نمی‌شود. بهینه‌ترین پارامترهای این حالت برای نسبت جرمی ۰/۰۱، ضریب تنظیم فرکانس میراگر اول ۰/۸۲، ضریب تنظیم فرکانس میراگر دوم ۰/۸۴ و درصد میرایی ۱۸/۱۴ می‌باشند. در بررسی جابجایی عرشه پل بیشترین کاهش مربوط به حالت سوم که ۴ میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت موازی به عرشه متصل شده‌اند، می‌باشد که در این حالت بیشینه جابجایی عرشه پل در راستای عرضی ۲۱ درصد کاهش یافته است. پارامترهای بهینه این حالت عبارت است از درصد جرمی ۰/۰۲، ضریب تنظیم فرکانس میراگر اول ۰/۹۶، ضریب تنظیم فرکانس میراگر دوم ۱/۱۴ و درصد میرایی ۵/۷۱.

۲-۴- بررسی شتاب عرشه پل

براساس نظریه پژوهشگران دیگر مبنی بر تاثیر خوب میراگرهای جرمی تنظیم شده در کاهش شتاب و خارج کردن سازه از ناحیه بحرانی و حساس به شتاب، در این قسمت بیشینه شتاب وارد بر عرشه پل تحت تاثیر شتابنگاشت‌های مذکور بررسی می‌گردند. مقادیر شتاب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آورده شده است.



شکل ۱۵: شتاب عرضی پل با درصد جرمی ۰/۰۱ (سمت راست) و درصد جرمی ۰/۰۲ (سمت چپ) برای میراگر جرمی تنظیم شده

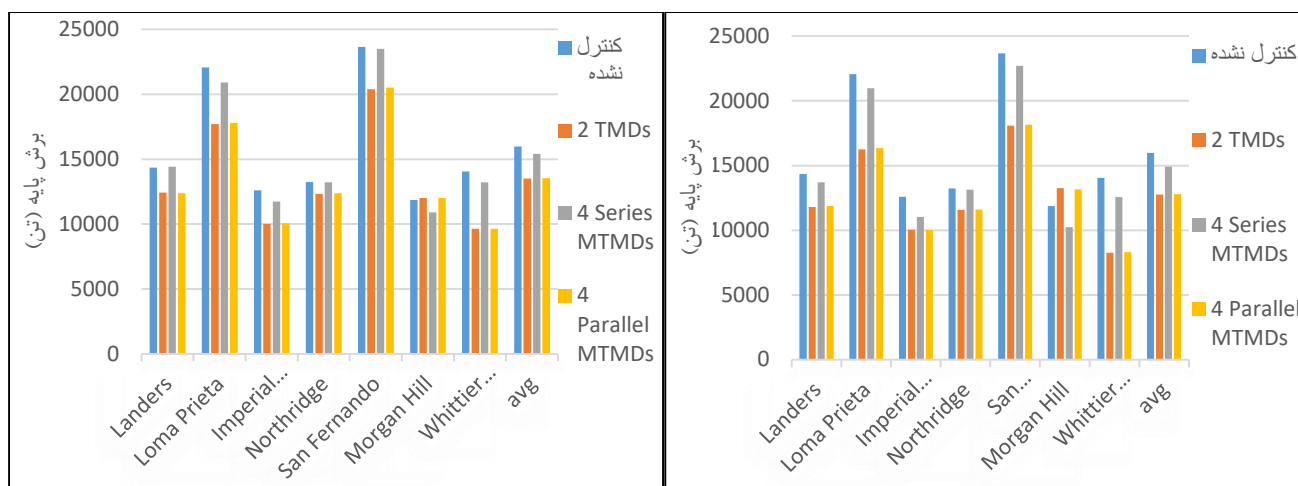


شکل ۱۶: شتاب عرضی پل با درصد جرمی ۰/۰۳ (سمت راست) و درصد جرمی ۰/۰۴ (سمت چپ) برای میراگر جرمی تنظیم شده

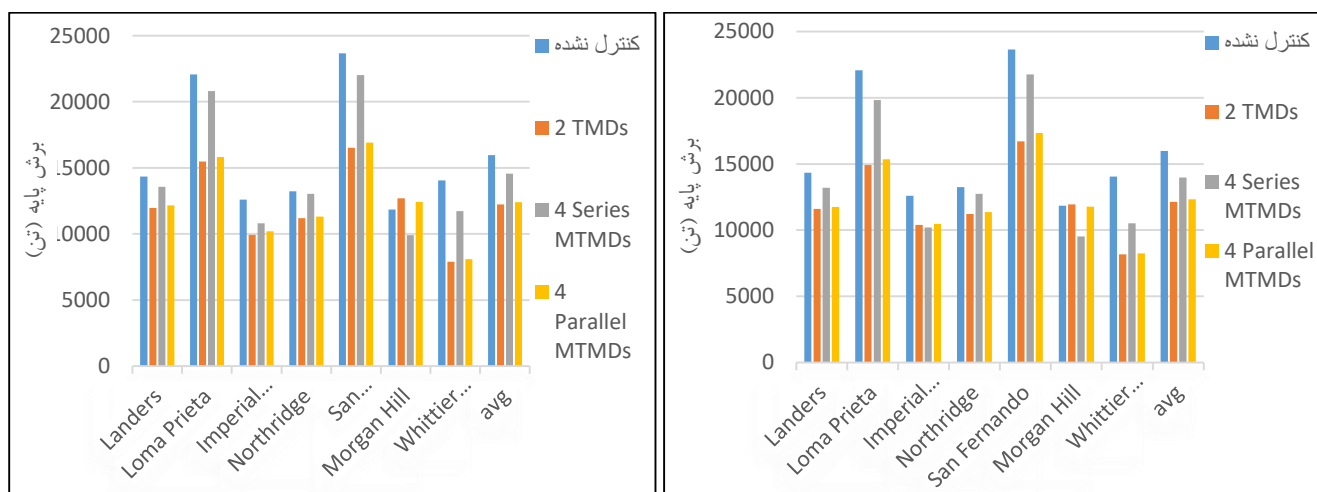
با توجه به این که شتاب وارد بر سازه تحت تاثیر مشخصات شتابنگاشت‌ها و سازه می‌باشد، با افزودن میراگر جرمی تنظیم شده زمان تناوب سازه افزایش یافته و شتاب وارد بر آن کاهش می‌یابد. شتاب میانگین وارد بر عرشه پل در راستای عرضی ۱۸۰۶ سانتی متر بر مجذور ثانیه می‌باشد که با اضافه کردن ۲ میراگر جرمی تنظیم شده یکسان مقدار شتاب از ۱۸ تا ۲۹ درصد برای نسبت جرمی‌های متفاوت کاهش یافته است و همانند بخش قبلی با افزودن میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت سری به عرشه، شتاب وارد بر آن کاهش قابل توجهی نداشته و در حدود ۳ الی ۱۵ درصد مقدار شتاب کاهش یافته است. در حالت سوم که میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت موازی به عرشه پل متصل شده‌اند، نتایج مربوط به شتاب نزدیک به حالت اول به دست آمده است. در این حالت شتاب وارد بر عرشه پل از ۱۸ الی ۲۷ درصد کاهش یافته است. بیشترین کاهش شتاب عرشه پل مربوط به نسبت جرمی ۰/۰۴ در هر ۳ حالت از میراگرهای جرمی تنظیم شده می‌باشد.

۳-۴- بررسی برش پایه پل

در این قسمت مقادیر برش پایه در جهت عرضی تحت اثر هر یک از شتابنگاشت‌ها در حالت‌های بدون سیستم کنترلی و با سه حالت از اعمال میراگرهای جرمی تنظیم شده در نمودارهای زیر ارائه گردیده است. با بررسی نمودارهای ارائه شده، تاثیر میراگرهای جرمی تنظیم شده در استهلاک نیرو ارزیابی گردیده و مقادیر مربوط در اشکال ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۷: برش پایه عرضی پل با درصد جرمی ۰/۰۱ (سمت راست) و درصد جرمی ۰/۰۲ (سمت چپ) برای میراگر جرمی تنظیم شده



شکل ۱۸: برش پایه عرضی پل با درصد جرمی ۰/۰۳ (سمت راست) و درصد جرمی ۰/۰۴ (سمت چپ) برای میراگر جرمی تنظیم شده

نتایج حاصل شده از بررسی میراگرهای جرمی تنظیم شده بیانگر عملکرد بهتر میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه موازی و میراگرهای جرمی تنظیم شده یکسان نسبت به میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه سری در کاهش برش پایه می باشد. برش پایه میانگین در راستای عرضی در حالت بدون استفاده از میراگرهای جرمی ۱۵۹۷/۶ تن می باشد و این مقدار در صورت ملحق شدن دو میراگر جرمی تنظیم شده یکسان به میزان ۱۷ الی ۲۷ درصد در نسبت های جرمی متفاوت کاهش می یابد. در حالت استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت موازی مقدار مذکور در حدود ۱۶ الی ۲۶ درصد کاهش می یابد. از این رو می توان نتیجه گرفت که عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده یکسان با میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت موازی همانند بخش قبل مشابه یکدیگر هستند.

۴-۴- نتایج تحلیل پل در حالت با میراگر جرمی و بدون میراگر جرمی

در این قسمت باتوجه به اینکه هدف پژوهش حاضر کنترل جابجایی عرضی عرشه پل باتوجه به حساسیت زیاد آیین نامه های لرزه ای پل می باشد بنابراین میانگین بیشترین مقدار کاهش یافته جابجایی مربوط به هر میراگر را تحت تاثیر شتابنگاشت های مذکور به همراه مقادیر کاهش یافته شتاب، سرعت و برش پایه پل در جدول ۹ جهت مقایسه بهتر ارائه گردیده است. براساس مقادیر ارائه شده در جدول ۹، بیشترین کاهش جابجایی عرضی عرشه پل در صورت مدلسازی دو میراگر جرمی تنظیم شده با مشخصات یکسان مربوط به نسبت جرمی ۴ درصد جرم کل پل و در صورت استفاده از ۴ میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه سری بیشترین مقدار کاهش یافته

مربوط به نسبت جرمی ۱ درصد جرم کل پل می‌باشد. در آخر بهترین عملکرد در خصوص کاهش جابجایی عرضی عرشه مدلسازی چهار میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه با اتصال به صورت موازی به عرشه می‌باشد. مقادیر مربوط به ضریب تنظیم فرکانس و نسبت میرایی میراگرها در جداول ۴ الی ۶ آورده شده است.

جدول ۹: بیشینه پاسخ جابجایی، شتاب، سرعت و برش پایه در حالت‌های مختلف کنترلی در راستای عرضی پل

سیستم کنترلی	بیشینه جابجایی (cm)			بیشینه شتاب (cm/s^2)			بیشینه سرعت (cm/s)			بیشینه برش پایه (tonf)		
	بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش	بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش	بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش	بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش
2-TMDs (m=0/04)	۲/۹۷۹	۲/۴۹۲	۱۷/۸	۱۸۰۶	۱۳۵۴	۲۸/۶	۶۴/۷۵	۵۱/۵	۲۲/۸	۱۵۹۷۵/۷	۱۲۱۳۸	۲۷/۳
Series MTMDs (m=0/01)	۲/۹۷۹	۲/۷۸۳	۶/۸	۱۸۰۶	۱۷۵۳	۳	۶۴/۷۵	۶۲/۸	۳	۱۵۹۷۵/۷	۱۵۴۱۰	۴
Parallel MTMDs (m=0/02)	۲/۹۷۹	۲/۴۱	۲۱/۱	۱۸۰۶	۱۴۲۹	۲۳/۳	۶۴/۷۵	۵۸/۳۵	۱۰	۱۵۹۷۵/۷	۱۲۷۸۱	۲۲/۳

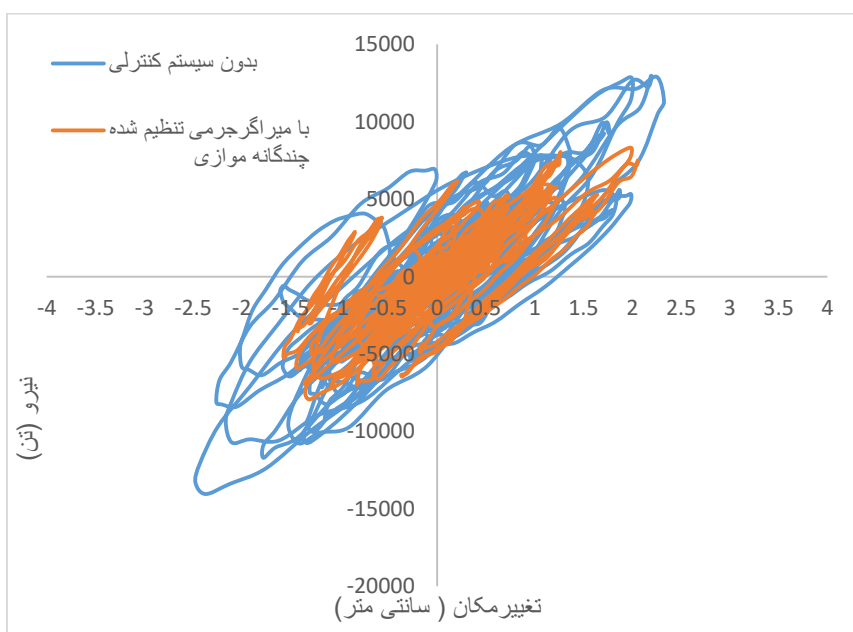
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۹ می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از چهار میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه موازی یا به اختصار حالت سوم قرارگیری میراگرها در پل، تاثیر بیشتری در کاهش جابجایی عرضی عرشه پل نسبت به حالات دیگر دارد و در رابطه با کنترل شتاب، سرعت و برش پایه وارد بر پل عملکرد دو میراگر جرمی تنظیم شده با مشخصات یکسان نسبت به بقیه میراگرها مطلوب‌تر است اما با توجه به این که عرشه پل در زمان رخداد زمین لرزه می‌بایست ترجیحاً در حالت الاستیک باقی بماند و تغییر شکل‌های زیاد در آن رخ ندهد در نتیجه استفاده از نسبت‌های جرمی کمتر در میراگرهای جرمی همواره مطلوب‌تر می‌باشد. به همین جهت عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده یکسان با میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه موازی مطابق نمودارهای ارائه شده در بخش‌های قبلی تا حدودی مشابه یکدیگر می‌باشد اما نسبت جرمی میراگر در حالت اول ۴ درصد وزن کل سازه و نسبت جرمی میراگر در حالت سوم ۲ درصد وزن کل سازه می‌باشد. در نتیجه جهت کاهش یافتن بار مرده وارد بر عرشه و بهبود عملکرد لرزه‌ای پل استفاده از چهار میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت موازی در این پل به سبب جرم کمتر مناسب‌تر می‌باشد.

۵- منحنی هیستریزس پایه پل

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ منحنی هیستریزس پایه پل تحت شتابنگاشت‌های Landers و Whittier Narrows ارائه شده است. این منحنی‌ها بیانگر عملکرد صحیح میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه موازی در استهلاک انرژی وارد بر ستون و جذب آن توسط میراگر و کاهش دامنه جابجایی می‌باشد.



شکل ۱۹: منحنی نیرو-تغییر مکان پایه پل در دو حالت کنترل نشده و مقاوم سازی شده با میراگر MTMD موازی تحت شتابنگاشت Landers



شکل ۲۰: منحنی نیرو-تغییر مکان پایه پل در دو حالت کنترل نشده و مقاوم سازی شده با میراگر MTMD موازی تحت شتابنگاشت Whittier Narrows

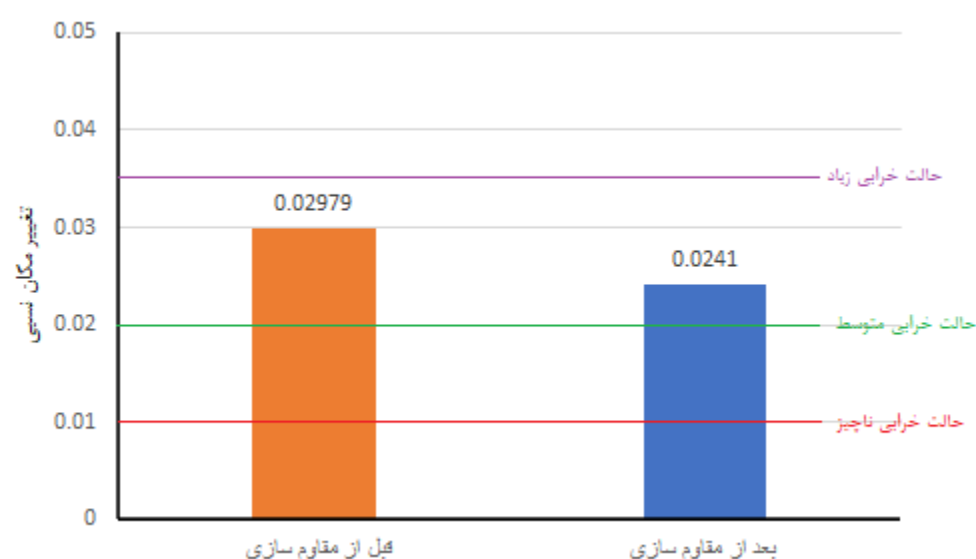
به طور کلی با بررسی منحنی های هیستریزیس، میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه موازی با مستهلک کردن انرژی زلزله از جذب آن به وسیله پایه پل جلوگیری کرده و عملکرد لرزه ای آن را بهبود بخشیده است. برای بررسی صحت عملکرد میراگرهای MTMD، منحنی نیرو-تغییر مکان پایه پل باتوجه به نقش حساس این عضو در عملکرد لرزه ای پل مذکور تحت دو شتابنگاشت رسم گردید. نیروی وارد بر پایه پل قبل و بعد از اضافه شدن میراگرها کاهش یافته و سپس محدودتر شد. به عبارت کلی سطح زیر نمودار منحنی هیستریزیس میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه کاهش یافته است. از این رو می توان گفت بخشی از نیروهای لرزه ای وارد بر پایه توسط این میراگرها مستهلک شده است.

۶- عملکرد لرزه‌ای پل

جهت تعیین سطح عملکرد پل و بررسی تاثیر میراگرهای جرمی در بهبود عملکرد آن از نشریه راهنما و فنی Hazus MR5 [۳۱] استفاده گردیده است. براساس این نشریه سازه‌ها دارای چهار سطح عملکردی خرابی ناچیز، خرابی متوسط، خرابی زیاد و خرابی کامل هستند. مقادیر متناظر با این سطوح عملکردی در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰: حالت خرابی و ظرفیت شکل پذیری ستون‌ها [۳۱]

حالت خرابی	ناچیز	متوسط	زیاد	کامل
تغییر مکان نسبی سازه	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳۵	۰/۰۵



شکل ۲۱: نمودار تغییرات سطح عملکرد پل قبل و بعد از مقاوم سازی

با مقایسه مقادیر تغییر مکان نسبی با آستانه حدود تغییر مکان در جدول ۱۰ می‌توان به این نتیجه رسید که پل قبل از مقاوم سازی سطح عملکرد خرابی متوسط را رد کرده و نزدیک سطح خرابی زیاد می‌باشد اما بعد از مدلسازی و افزودن میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه موازی از سطح عملکرد خرابی زیاد فاصله گرفته و مقدار ناچیزی از سطح عملکرد خرابی متوسط رد شده است. در حالت خرابی زیاد پوشش بتن ستون از بین رفته و خاموت‌های آن نیز به حد تسلیم رسیده‌اند.

لازم به ذکر است، پل مورد مطالعه توسط چندین محقق دیگر نیز با روش‌های گوناگون مدلسازی، بررسی و تحلیل شده است. در پژوهش ورنر و همکاران در سال ۱۹۹۳ [۳۲] برای ارزیابی مقادیر سختی فنرهای پایه و کوله پل معرفی شده از روش‌های توسعه یافته FHWA (1986) و نواک و همکاران (۱۹۹۱) استفاده شده است. همچنین در پژوهش شیرگیر و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۹]، اثرات اندرکنش خاک و سازه توسط فنرهای پیوسته با یک المان تیر پیوسته به همراه قرارگیری جرم خاک در اطراف آن در نظر گرفته شده است. زمان تناوب مود اول در پژوهش ورنر و همکاران و شیرگیر و همکاران به ترتیب ۰/۴ ثانیه و ۰/۴۰۶۸ ثانیه بود. مورد اول و دوم به میزان ۲ و ۰/۳۲ درصد با این پژوهش اختلاف داشتند. در پژوهش حاضر به دو روش صحت سنجی مدلسازی انجام گرفته است. در روش اول که پایه پل و فوندانسیون آن به روش زیرسازه مدلسازی شده است و اختلاف آن طبق جدول ۳، ۷/۹ درصد با مقاله مرجع بود که این

درصد اختلاف ناشی از روش متفاوت در مدلسازی اثرات اندرکنش خاک و سازه، عدم شفافیت سازی پارامترهای مورد نیاز در مقاله مرجع و غیره می‌باشد. اما در روش دوم پایه پل به صورت گیردار مدلسازی و نتایج با مقاله مرجع طبق جدول ۳ در حدود ۴/۴۳ درصد اختلاف داشته‌اند. در ادامه به جهت این که هدف پژوهش بررسی میراگرهای جرمی چندگانه در کاهش جابه جایی عرضی عرشه پل بوده، روش دوم به دلیل اینکه اختلاف کمتری با مقاله مرجع دارد انتخاب شد. با توجه به اینکه اکثر تحقیق‌ها اطلاعات کاملی از نحوه مدلسازی و بارگذاری و شرایط مرزی و سایر پارامترهای مورد نیاز جهت مدلسازی ذکر نمی‌شود، همواره فقدان اطلاعات کامل جهت مدلسازی دقیق وجود دارد و در نهایت با توجه به اینکه نتایج به صورت نسبی بررسی شده است، هم مقدار اولیه و هم مقدار نهایی نیز دارای خطا هستند. از آن جا که این دو مقدار در انتها از یکدیگر کسر می‌شوند، درصد خطای کلی نیز کاهش می‌یابد.

۷- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، بعد از بهینه‌یابی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده و با مدلسازی این میراگرها در عرشه پل جهت بررسی سطح عملکرد پل اقدام گردید. نوآوری اصلی این پژوهش بررسی تاثیر میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در رفتار لرزه‌ای پل مذکور می‌باشد. تاکنون اثرات مدلسازی میراگرهای جرمی بر روی این پل (پل ملولند) توسط محققین دیگر بررسی نشده است.

به طور کلی نتایج زیر از این پژوهش حاصل گردید:

- ۱- با اضافه شدن میراگرهای جرمی تنظیم شده یکسان با نسبت جرمی ۰/۰۴، جابجایی عرضی عرشه پل ۱۸ درصد کاهش و با اضافه شدن میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت موازی با نسبت جرمی ۰/۰۲ جابجایی عرضی عرشه پل ۲۱ درصد کاهش یافته است.
- ۲- در کل اثرات میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه به صورت سری بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پل چندان مطلوب نمی‌باشد.
- ۳- در این پژوهش بهترین عملکرد مربوط به میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در حالت موازی می‌باشد و با توجه به نسبت جرمی کمتر در مقابل میراگرهای جرمی تنظیم شده یکسان بار کمتری را به عرشه پل وارد می‌کند.
- ۴- میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در حالت موازی شتاب وارد بر عرشه پل را ۲۳/۳ درصد، سرعت ۱۰ درصد و برش پایه پل را ۲۲/۲ درصد کاهش داده است.
- ۵- منحنی نیرو - تغییرمکان پایه پل نشان دهنده جذب انرژی زلزله توسط میراگرهای جرمی بعد از مقاوم‌سازی می‌باشد و از وارد شدن پایه پل به ناحیه غیرخطی جلوگیری می‌کند.
- ۶- در نهایت سطح عملکرد پل بعد از مقاوم‌سازی با میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در حالت موازی بهبود یافته است.

مراجع

- [۱] S. Werner, J. Beck, and M. Levine, "Seismic response evaluation of Meloland Road Overpass using 1979 Imperial Valley earthquake records," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 15, no. 2, pp. 249-274, 1987.
- [۲] J. G. Xu, D. C. Feng, S. Mangalathu, and J. S. Jeon, "Data-driven rapid damage evaluation for life-cycle seismic assessment of regional reinforced concrete bridges," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 51, no. 11, pp. 2730-2751, 2022.
- [۳] D. Skokandić, A. Vlašić, M. Kušter Marić, M. Srbić, and A. Mandić Ivanković, "Seismic assessment and retrofitting of existing road bridges: state of the art review," *Materials*, vol. 15, no. 7, p. 2523, 2022.

- [۴] Y. Pang, L. Cai, W. He, and L. Wu, "Seismic assessment of deep water bridges in reservoir considering hydrodynamic effects using endurance time analysis," *Ocean Engineering*, vol. 198, p. 106846, 2020.
- [۵] V. Ozsarac, R. Monteiro, and G. M. Calvi, "Probabilistic seismic assessment of reinforced concrete bridges using simulated records," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 554-574, 2023.
- [۶] A. Javanmardi *et al.*, "Pounding mitigation of a short-span cable-stayed bridge using a new hybrid passive control system," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 134, pp. 625-636, 2022.
- [۷] C. Zhang *et al.*, "Seismic reliability research of continuous girder bridge considering fault-tolerant semi-active control," *Structural Safety*, vol. 102, p. 102322, 2023.
- [۸] L. Wang, S. Nagarajaiah, W. Shi, and Y. Zhou, "Semi-active control of walking-induced vibrations in bridges using adaptive tuned mass damper considering human-structure-interaction," *Engineering Structures*, vol. 244, p. 112743, 2021.
- [۹] J. Li, H. Zhang, S. Chen, and D. Zhu, "Optimization and sensitivity of TMD parameters for mitigating bridge maximum vibration response under moving forces," in *Structures*, 2020, vol. 28: Elsevier, pp. 512-520 .
- [۱۰] A. Matin, S. Elias, and V. Matsagar, "Distributed multiple tuned mass dampers for seismic response control in bridges," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, vol. 173, no. 3, pp. 217-234, 2020.
- [۱۱] S. P. Ontiveros-Perez and L. F. F. Miguel, "Reliability-based optimum design of multiple tuned mass dampers for minimization of the probability of failure of buildings under earthquakes," in *Structures*, 2022, vol. 42: Elsevier, pp. 144-159 .
- [۱۲] M. Khazaei, R. Vahdani, and A. Kheyroddin, "Optimal location of multiple tuned mass dampers in regular and irregular tall steel buildings plan," *Shock and Vibration*, vol. 2020, pp. 1-20, 2020.
- [۱۳] O. Akyürek, "Analysis of Different Placement Strategies of Multi-Tuned Mass Dampers Placed in Building Height," *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-19, 2022.
- [۱۴] L. S. Vellar, S. P. Ontiveros-Pérez, L. F. F. Miguel, and L. F. Fadel Miguel, "Robust optimum design of multiple tuned mass dampers for vibration control in buildings subjected to seismic excitation," *Shock and Vibration*, vol. 2019, pp. 1-9, 2019.
- [۱۵] K. Bhowmik and N. Debnath, "Stochastic design of multiple tuned mass damper system under seismic excitation," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 92, no. 1, pp. 383-404, 2022/01/01 2022, doi: 10.1007/s00419-021-02065-2.
- [۱۶] S. Peng, L. Zhang, Y. Liu, and S. Li, "Parameters optimization and performance evaluation of multiple tuned mass dampers to mitigate the vortex-induced vibration of a long-span bridge," *Structures*, vol. 38, pp. 1595-1606, 2022/04/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.012>.
- [۱۷] O. Araz and V. Kahya, "Optimization of multiple tuned mass dampers for a two-span continuous railway bridge via differential evolution algorithm," *Structures*, vol. 39, pp. 29-38, 2022/05/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.021>.
- [۱۸] C. Wang and W. Shi, "Optimal design and application of a multiple tuned mass damper system for an in-service footbridge," *Sustainability*, vol. 11, no. 10, p. 2801, 2019.
- [۱۹] V. Shirgir, A. Ghanbari, and A. Massumi, "Analytical model for time history analysis of single pier bridges considering soil-pile structure interaction effects," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 93, pp. 257-275, 2021.
- [۲۰] "opensees.berkeley.edu".
- [۲۱] A. Rahmani, M. Taiebat, and W. L. Finn, "Nonlinear dynamic analysis of Meloland Road Overpass using three-dimensional continuum modeling approach," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 57, pp. 121-132, 2014.
- [۲۲] J. B. Mander, M. J. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of structural engineering*, vol. 114, no. 8, pp. 1804-1826, 1988.
- [۲۳] J. Zhang and N. Makris, "Seismic response analysis of highway overcrossings including soil-structure interaction," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 31, no. 11, pp. 1.۲۰۰۲, ۱۹۹۱-۹۶۷
- [۲۴] R. DesRoches, J. Padgett, K. Ramanathan, and J. Dukes, "Feasibility studies for improving Caltrans bridge fragility relationships," 2012 .
- [۲۵] A. Bathaei, M. Ramezani, and A. K. Ghorbani-Tanha, "Vibration control of the College Bridge using tuned mass dampers," (in eng), *Modares Civil Engineering journal*, vol. 16, no. 20, pp. 21-32, 2017. [Online]. Available: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-11162-fa.html>.
- [۲۶] C. Li, "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 29, no. 9, pp. 1405-1421, 2000.

- [۲۸] I. G. Buckle, I. Friedland, J. Mander, G. Martin, R. Nutt, and M. Power, "Seismic retrofitting manual for highway structures. Part 1, Bridges," Turner-Fairbank Highway Research Center, 2006 .
- [۲۹] B. D. Swartz, A. Scanlon, and A. J. Schokker, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications provisions for loss of prestress," *PCI journal*, vol. 57, no. 4, 2012.
- [۳۰] C. D. Comartin *et al.*, "A summary of FEMA 440: Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures," in *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada*, 2004, pp. 1-14 .
- [۳۱] F. E. M. A. FEMA. (2010). HAZUS-MH MR5 .
- [۳۲] S. Werner, C. Crouse, L. Katafygiotis, and J. Beck, "Model identification and seismic analysis of Meloland Road overcrossing," *Report to California Department of Transportation*, 1993.