

Evaluation of seismic response of the straight concrete bridges with three methods of passive control (K-damper, TMD and LRB)

Milad Tayefeh¹, Fereshteh Emami^{2*}

1- MSc, Department of Civil Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

In present research, the ability and advantages of K-Damper, LRB and TMD as passive control devices in reducing or balancing the seismic forces on substructures of bridges are investigated. Regarding to the variety of bridge damages occurred in the past earthquakes mostly as a result of underestimation of the seismic forces, passive control devices can be effectively used in designing or retrofitting of bridges which are located in high seismicity zones. Contemporary Seismic isolation systems for the bridge applications provide: (a) horizontal isolation from the effects of earthquake shaking and (b) an energy dissipation mechanism to reduce displacements. Throughout the years many kinds of seismic isolation mechanisms have been developed with two concepts: the introduction of negative stiffness elements and the incorporation of an additional mass. Combining the beneficial characteristics of both concepts, a novel passive vibration isolation and damping concept has been introduced as the K-damper. In this paper, evaluation of seismic response of the straight concrete bridges with three methods of passive control (K-damper, TMD and LRB) by adding them to a typical bridge was investigated. It was concluded that these passive control devices are very effective in reducing seismic forces and displacements of the typical bridge. By absorbing most of input energy of earthquake, these devices have the ability to protect the bridge substructure from the seismic damage. A comparison with a non-isolated bridge with similar characteristics confirms that LRB can decrease the pier base shear because of high flexibility and increase the main period of the structure. Further, K-damper based seismic absorption designs can provide lower displacement at the top of the piers. Therefore, by combining K-damper and LRB can obtain the best performance in reducing the top displacement of the piers and reducing the base shear.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 April 2020

Revise Date: 26 October 2020

Accept Date: 23 January 2021

Keywords:

Bridge

Lead-Rubber Bearing (LRB)

Tuned Mass Damper (TMD)

K-Damper

Nonlinear time history analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.228042.2129>

*Corresponding author: Fereshteh Emami

Email address: f-emami@srbiau.ac.ir

ارزیابی پاسخ لرزه ای پل های بتنی مستقیم با سه روش کنترل غیر فعال: شکل، میراگر جرمی تنظیم شونده و جداساز لاستیکی با هسته سربی K میراگر

میلاذ طایفه محمدعلی^۱، فرشته امامی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، ایران

چکیده

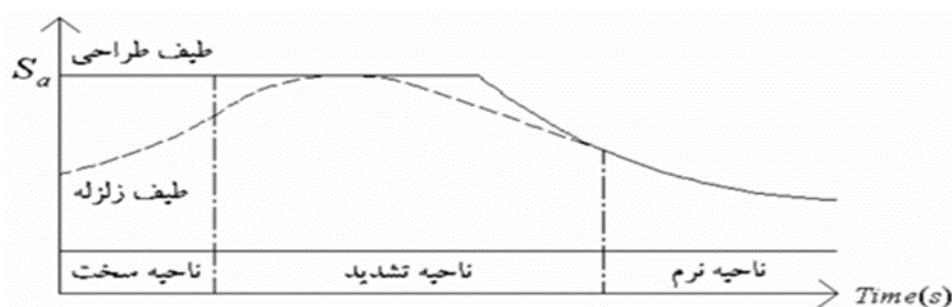
توانایی و مزایای ابزارهای کنترل غیر فعال که به طراحان اجازه می دهد نیروهای وارد بر پایه ها و کوله های پل را کاهش داده و یا متعادل کنند، به خوبی به اثبات رسیده است. با توجه به انواع خسارت های وارد بر پل ها در زلزله های گذشته که عمدتاً به واسطه ی تخمین کمتر از واقع نیروهای زلزله می باشد، از این سیستم های کنترل غیر فعال می توان به نحو موثری در مقاوم سازی پل های موجود و یا طراحی پل های جدید واقع در نواحی لرزه خیز بهره برد. در سال های اخیر، تحقیق در مورد نسل بعدی سیستم های حفاظت لرزه ای روی دو مفهوم اصلی متمرکز شده است: معرفی المان های سختی منفی و مشارکت یک جرم اضافی. با بهره گیری از ویژگی های مفید دو مفهوم اصلی مذکور، یک سیستم جدید جداسازی و میرایی، تحت عنوان میراگر K شکل معرفی شده است. در این تحقیق، ارزیابی پاسخ لرزه ای پل های بتنی مستقیم با سه روش کنترل غیرفعال (میراگر K شکل، میراگر جرمی تنظیم شونده و جداساز لاستیکی با هسته سربی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ابزارهای کنترل غیر فعال با جذب عمده انرژی ورودی زلزله، از سایر اجزای پل محافظت می کنند. بر این اساس مشاهده شد که جداساز لاستیکی با هسته سربی با انعطاف پذیری زیاد خود و با افزایش زمان تناوب اصلی سازه (از ۰/۶۷ به ۲/۲ ثانیه)، باعث کاهش چشم گیر برش پایه وارد بر سازه می شود و همچنین در زمینه کاهش جابجایی های بالای ستون ها، میراگر K شکل عملکرد مطلوب و بهتری دارد. در نتیجه با تلفیق میراگر K شکل (با در نظر گرفتن اثر سختی منفی) و سیستم LRB می توان بهترین عملکرد را از لحاظ کاهش جابجایی بالای ستون ها و کاهش برش پایه دریافت کرد.

کلمات کلیدی: پل، میراگر k شکل، جداساز لاستیکی با هسته سربی، میراگر جرمی تنظیم شونده، تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.228042.2129	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.228042.2129	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۳۹۹/۱۱/۰۴	۱۳۹۹/۱۱/۰۴	۱۳۹۹/۰۸/۰۵	۱۳۹۹/۰۲/۰۸
فرشته امامی					*نویسنده مسئول:	
f-emami@srbiau.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

ایران در منطقه ای با لرزه خیزی شدید قرار گرفته است. بنابراین استفاده از دانش روز مهندسی سازه و زلزله در طراحی سازه ها، علی الخصوص در طراحی سازه های مهم، ضروری به نظر می رسد. تا به امروز محققان بسیاری برای مقابله با اثر زمین لرزه در تلاش بوده اند تا خطرات ناشی از این پدیده طبیعی را کاهش یا خاتمه دهند. میراگرها و جداگرهای لرزه ای از ابزارهای موثر در کنترل ارتعاشات سازه ها محسوب می شوند. این سیستم ها به صورت روش کنترل غیر فعال، بطور وسیعی جهت کاهش ریسک خسارات ناشی از زمین لرزه ها در سازه های مختلفی چون پل ها، تاسیسات هسته ای و آسمان خراش ها استفاده می شوند. استفاده از این ابزارها در طراحی و بهسازی پل های آسیب دیده نیز کاربرد وسیعی دارد. مهم ترین شاخص در تعیین رفتار لرزه ای یک سازه تغییر مکان نسبی طبقات است که سایر عوامل مهم در طراحی سازه نظیر برش طبقات و نیروهای داخلی به طور مستقیم متأثر از آن می باشند؛ از این رو کنترل ارتعاشات در سازه به مفهوم ایجاد کاهش در پاسخ تغییر مکان در برابر بارهای وارده می باشد. افزایش سختی موجب کاهش زمان تناوب شده و در نتیجه برای تحریک ناشی از زلزله، اگر سازه در ناحیه نرم باشد به سمت ناحیه شدید برده می شود (مطابق شکل ۱) و شتاب پاسخ را افزایش می دهد و اگر در ناحیه شدید باشد به سمت ناحیه سخت برده می شود و شتاب پاسخ را کاهش می دهد. بنابراین افزایش سختی روی شتاب پاسخ سازه تاثیری دوگانه دارد. از آن جایی که نواحی سه گانه یاد شده برای زلزله های مختلف یکسان نیستند، نمی توان با قطعیت بیان کرد که سخت کردن به افزایش پاسخ های زلزله می انجامد یا به کاهش آن ها. بدین ترتیب تامین سختی هر چه بیشتر برای سازه ها، صرفه نظر از محدودیت های کاربردی، معماری و اقتصادی، در همه موارد مناسب ترین راه برای کاهش ارتعاشات سازه و اثرات آن ها نیست.



شکل ۱: نمودار طیف طراحی و طیف زلزله [۱].

روش های معمول استهلاک انرژی زلزله در سازه ها بر استفاده از تغییرشکل های غیرخطی مصالح به کار رفته در ساخت آن استوار می باشد؛ ولی در حال حاضر مستهلک کردن انرژی وارده به سازه در اثر زلزله به سمت استفاده از وسایل کنترل سازه ای غیر فعال، نیمه فعال و فعال سوق یافته است. امروزه به دلیل افزایش حجم ترافیک و کمبود فضا در محدوده های شهری، نیاز به احداث پل ها بیش از پیش احساس می گردد. زلزله های اتفاق افتاده در دهه های گذشته نشان داده است که پل ها یکی از آسیب پذیرترین المان ها در سیستم حمل و نقل می باشند. استفاده از سیستم های کنترل غیر فعال، راه حلی مناسب برای به حداقل رساندن خسارت در پل های آسیب پذیر در برابر زلزله هستند [۲].

در بحث مقاوم سازی و طراحی لرزه ای دو دیدگاه می تواند مد نظر باشد؛ در دیدگاه نخست افزایش مقاومت و سختی و شکل پذیری سازه و پیش بینی مفاصل پلاستیک در نقاط مناسب مد نظر می باشد. از دیدگاه دیگر، جلوگیری از انتقال کامل نیروهای دینامیکی زلزله از زمین به سازه مد نظر است. از دیدگاه علمی راه دوم مناسب تر است؛ زیرا باعث کاهش عکس العمل ها، ممان ها، نیروهای کششی و فشاری در المان های سازه ای می گردد؛ برای تحقق این امر از جداسازها و میراگرها استفاده می شود [۳].

مگنی و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک پل بتنی جدا سازی شده در شمال ایسلند را تحت تحریک های مختلف زلزله، مورد ارزیابی قرار دادند. شمال ایسلند منطقه ای زلزله خیز است و در سال ۲۰۰۸ زلزله ای با بزرگای ۶/۳ این منطقه را تحت تاثیر قرار داد. پل بتنی

Oseyrar به طول ۳۷۰ متر در مرکزیت این زمین لرزه قرار داشت. در این تحقیق یک طرح بهبود یافته برای جلوگیری از آسیب دیدگی پل بر پایه ی جایگزین کردن تکیه گاه های اصطکاکی پل با سیستم LRB در همه ی پایه ها و کوله ها ارائه شد. سختی و نیرو های تسلیم سیستم LRB متناسب با نیرو های عمودی هر پایه و کوله انتخاب شد. همچنین هزینه تعمیر و بهسازی پل حدود 1٪ هزینه ساخت مجدد پل تخمین زده شد [۴].

کارالار و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تحلیل پارامتریک مشخصات بهینه جداساز ها در پل ها، تحت زلزله حوزه نزدیک گسل پرداختند. این مطالعه به بررسی انتخاب بهینه ی پارامترهای جداساز می پردازد؛ یعنی مشخصه دوام (Q_d) و مشخصه سختی الاستیک جداساز (k_p) در پل هایی که در محدوده حوزه نزدیک گسل واقع شده اند. نخست یک آنالیز حساسیت دو فازی برای ارزیابی تاثیر پارامترهای پل، جداساز و رکورد های حوزه نزدیک گسل، روی سطوح بهینه Q_d و k_p بر پایه کمینه کردن نیرو و جابجایی حداکثر جداساز انجام شد. در فاز اول آنالیز حساسیت، یک طرح آزمایشی کلی برای سنجش آماری اهمیت پارامترهای اشاره شده، روی مشخصات بهینه جداساز ها انجام شد. فاز بعدی شامل یک تحلیل حساسیت دقیق برای سنجش روند بهینه سازی مشخصه های سختی و دوام، به عنوان یک تابع از پارامترهای رکوردهای حوزه نزدیک زلزله، پل و جداساز است. سپس تحلیل تاریخچه زمانی پل جدا شده برای یک مجموعه از رکورد های حوزه نزدیک گسل برای بسط پارامتری معادله ها به منظور کمینه کردن جابجایی ها و نیرو های جداساز انجام شد. معادله های پارامتریک با استفاده از جایگزین کردن رکورد های حوزه نزدیک، اعتبار سنجی شد. علاوه پراکندگی در مورد پیش بینی معادلات، اندازه گیری و مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که معادلات بسط داده شده، تخمین های مناسبی از مشخصات بهینه جداساز با یک پراکندگی نسبتا سازگار در بین پارامترهای مدل سازی فراهم می کند. علاوه بر این، مشاهده شد که برای زلزله های حوزه نزدیک با شدت بالا و جهت قوی، ابزارهای اتلاف انرژی الحاقی ملزم به کمینه کردن جابجایی های جداساز هستند [۵].

سایونتراکیس و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی موضوع « مفهوم میراگر K شکل در جداسازی پل های بتنی مستقیم » پرداختند. به منظور کاهش اثرات زلزله بر روی سازه ها بسیاری از نظریه ها حول محور جداسازی لرزه ای توسعه یافته است که محبوب ترین روش طراحی مقاوم در برابر زلزله است و بر پایه مفهوم کاهش تقاضای لرزه ای نسبت به افزایش ظرفیت مقاومت سازه، بنا شده است. سایونتراکیس و همکاران، یک رویکرد کلی برای پیاده سازی مفهوم میراگر K شکل برای جذب تحریک لرزه ای یک نمونه پل بتنی مستقیم در نظر گرفتند. دو نوع از این میراگر ها به صورت بهینه با توجه به موقعیتشان در پل انتخاب شد و پاسخ دینامیکی پل تحت سه نوع بارگذاری مختلف، قبل و بعد از اجرای میراگر K شکل که جایگزین تکیه گاه های معمولی شده بودند، بررسی شد. مقایسه با یک پل بدون جداساز با ویژگی های مشابه تایید کرد که طرح های جذب ارتعاشی مبتنی بر میراگر K شکل می توانند یک جایگزین امیدوار کننده برای جداساز لرزه ای معمولی ارائه دهند؛ ضمن اینکه مزایای متعددی مانند افزایش میرایی و پیاده سازی فنی ساده را نیز ارائه می کنند [۶].

مکرانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ میرایی غیر فعال در پل های معلق با به کارگیری سیستم های TMD چند درجه آزادی را مورد بررسی قرار دادند. میراگرهای جرمی تنظیم شونده راهی موثر برای کاهش پاسخ های دینامیکی سازه ها در مهندسی عمران است. طرح پیشنهاد شده پل مورد نظر، با موفقیت شبیه سازی و پیاده سازی شد. هدف از این مطالعه کاهش وزن اضافی این میراگر در پل معلق مورد نظر است. این مقاله یک روش ساده برای طراحی و پیاده سازی سیستم TMD پیشنهاد کرده است. برای کنترل میرایی، مد های خمش و پیچش پل مورد نظر هدف گیری شده است. در این مطالعه توانایی میرایی چندین مد ارتعاشی با به کارگیری سیستم TMD با جرم های نسبتا کم (نسبت به روش های طراحی کلاسیک) ثابت شد [۷].

در سال ۲۰۱۸ توبالدی و همکاران، رفتار دینامیکی و پاسخ لرزه ای پل سه دهانه بتنی مستقیم را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از جداساز های لاستیکی طبیعی با میرایی زیاد که به تازگی توسعه داده شده اند، استفاده شده است. این جداساز ها می توانند تحت تحریک مولفه قائم و افقی قرار گیرند. همچنین پاسخ برشی هیستریزس از ویژگی های این گونه جداساز هاست. نتیجه این تحقیق، نشان از اهمیت سختی قائم جداساز در چگونگی اصلاح پاسخ لرزه ای پل جداسازی شده دارد [۸].

بطحایی و همکارانش در سال ۱۳۹۵ به بررسی موضوع « کنترل ارتعاشات پل کالج با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده » پرداختند. آن ها در این تحقیق، سازه پل فلزی کالج را در نرم افزار Opensees مدل سازی نمودند و برای کاهش حجم محاسبات به منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه، از الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن تغییر مکان طولی بلند ترین پایه پل استفاده کردند. نسبت جرمی بهینه برای میراگرهای تنظیم شونده چندگانه به منظور کنترل ارتعاشات پل فلزی کالج برابر ۳ درصد جرم سازه پل انتخاب شد. براساس تحلیل های عددی انجام گرفته برای این نسبت جرمی، میزان کاهش بیشینه تغییر مکان طولی برای بلندترین پایه این پل (که توسط میراگرهای جرمی تنظیم شونده مستهلک شده) برای زلزله های السنترو، کرن کانتی، کوبه و نورثریج به ترتیب برابر ۹/۲، ۳/۴، ۵/۵ و ۷/۸ درصد می باشد [۱۰].

هوایی و همکاران ارزیابی تأثیر جداساز لرزه ای اصطکاکی_لاستیکی در خرابی پیش رونده پل ها را بررسی کردند. در این مطالعه به عملکرد دو نمونه ی پل تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی، با و بدون جداساز لرزه ای، تحت دو سناریوی آسیب ناشی از حذف ستون کناری در حالت اول و حذف ستون میانی از پایه ی پل در حالت دوم، پرداخته شد و تاریخچه زمانی بیشینه پاسخ ها مورد ارزیابی قرار گرفته شد. در این راستا با طراحی جداساز اصطکاکی_لاستیکی با روش ارائه شده در راهنمای AASHTO به مدل سازی پل ها در نرم افزار Opensees پرداخته شد و ضریب اصطکاک جداساز به صورت پارامتری متغیر نسبت به سرعت لغزشی و نیروی قائم در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که جداسازها در خرابی پیش رونده در هر دو حالت اول و دوم تسلیم نمی شوند و در نتیجه لغزش عرشه بر روی آن ها اتفاق نمی افتد اما در حالت اول جابجایی ماندگار به علت نامتعادل شدن عرشه رخ خواهد داد. با این حال نشان داده شد که استفاده از جداساز لرزه ای باعث افزایش بیشینه پاسخ ها در اکثر موارد شده است [۱۱].

شیرواند و همکاران اثر مولفه های جرم زیر سازه بر روی زمان تناوب طولی پل های دارای جداگر لرزه ای را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور مدل سازی تحلیلی سه درجه آزادی پل دارای جداگر لرزه ای انجام شد و محاسبات زمان تناوب طولی در چهار حالت دقیق، با نادیده گرفتن ممان اینرسی دورانی، با نادیده گرفتن جرم تیر سرستون و در آخر با نادیده گرفتن کل مولفه های جرم زیر سازه (مدل پیشنهادی آئین نامه آشتو) ارائه شد. صحت سنجی مدل تحلیلی ارائه شده در حالت دقیق، از طریق مقایسه با مدل اجزا محدود انجام شد. نتایج نشان داد ممان اینرسی دورانی زیر سازه تأثیری بر روی زمان تناوب طولی ندارد، در حالیکه تأثیر جرم تیر سرستون در پل های جداسازی شده با پایه های بلند قابل ملاحظه بوده و نادیده گرفتن آن منجر به ایجاد ۸٪ خطا در زمان تناوب طولی پل های نامبرده می گردد. همچنین نتایج نشان داد روش های ساده شده ای که کل جرم زیر سازه را نادیده می گیرند، مشابه روش به کار گرفته شده در آئین نامه آشتو، در برخی پل ها نتایج دقیقی ندارد و هرچه نسبت سختی جداگر لرزه ای به سختی زیر سازه افزایش می یابد، خطای این روش ها در تخمین زمان تناوب افزایش یافته و به ۱۵٪ رسیده است [۱۲].

در طراحی سازه ها اهداف مختلفی از جمله افزایش ایمنی سازه، کاهش هزینه و افزایش سرعت ساخت، افزایش بهره وری سازه و غیره در نظر گرفته می شود. یکی از مهم ترین این اهداف، افزایش ایمنی سازه و در نتیجه حذف خسارت های جانی احتمالی در حین و بعد از وقوع زلزله است. امروزه در کنار این هدف اصلی، کاهش آسیب ها و خسارت های مالی وارد بر سازه و کاهش هزینه های تعمیر یا بازسازی پس از زلزله هدفی مهم به شمار می رود. برای دستیابی به این اهداف روش های مختلفی در طول دهه های گذشته توسعه پیدا کرده است. کاهش نیرو های وارد بر سازه با استفاده از جداساز های پایه و میرا نمودن نیروی زلزله در قسمت های محدودی از سازه که به عنوان میراگر شناخته می شوند، در طول دهه های اخیر با استقبال زیادی مواجه شده است. با توجه به این موضوع، انواع مختلفی از جداسازهای پایه و میراگرها توسط محققین مختلف پیشنهاد و مورد آزمایش قرار گرفته است. با توجه به اینکه استفاده از سیستم های میراگر و جداسازها موجب کاهش آسیب ها و خسارت های مالی و نیز کاهش هزینه های تعمیر و بازسازی پل ها پس از زلزله می شود، لذا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده و تحقیق بر روی این سیستم ها دارای اهمیت زیادی می باشد. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی پاسخ لرزه ای پل های بتنی مستقیم با سه روش کنترل غیر فعال می باشد. بدین منظور یک سیستم جدید جداسازی و میرایی، تحت عنوان میراگر K شکل معرفی شده است. با مقایسه این سیستم با سایر سیستم های کنترل غیر فعال در پل مورد مطالعه، کاهش و متعادل سازی تغییر مکان ها، نیرو ها و برش پایه پل در برابر زلزله های مختلف (۱۴ زوج شتابنگاشت) هدف گیری شده است.

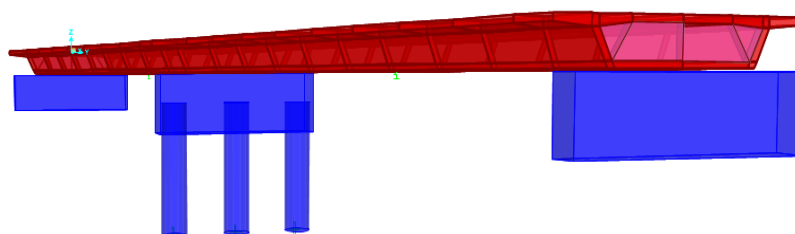
۲- مدل سازی

مدل سازی پل مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار CSi Bridge انجام شده است. مقطع عرشه، جعبه ای تک سلولی بتنی با دو دهانه می باشد. سایر مشخصات پل در جدول ۱ آورده شده است.

پایه پل شامل یک سر ستون به طول ۹/۲ متر، عمق ۳ متر، عرض ۱/۵ متر و ۳ ستون بتنی به ارتفاع ۶ متر با مقطع دایره با قطر ۱/۵ متری است. مدل سه بعدی پل و مقطع عرشه در شکل ۲ نشان داده شده است. پایه های میانی و کوله پل توسط المان Frame مدل شده اند و ستون ها در انتهای تحتانی متکی بر پی های صلب در نظر گرفته شد و از اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است.

جدول ۱: مشخصات پل مورد مطالعه.

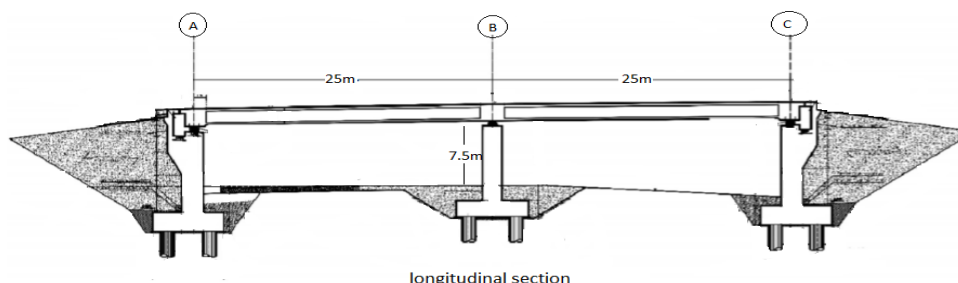
طول پل (m)	۵۰
عرض پل (m)	۹/۵
ارتفاع پایه (m)	۷/۵
تعداد دهانه	۲
قطر ستون ها (m)	۱/۵
ضخامت باکس عرشه (m)	۱/۵
مقاومت بتن (N/mm^2)	۳۰
میلگرد های طولی هر ستون	33 ϕ 25
میلگرد های عرضی هر ستون	ϕ 12@5 cm
میلگرد های تیر سرستون در بالا	8 ϕ 30
میلگرد های تیر سرستون در پایین	8 ϕ 30
ابعاد مقطع کوله (m)	۹/۲ * ۱/۳
ارتفاع کوله (m)	۱/۶
نوع کوله	بسته
اتصال کوله به عرشه	غلتکی فرض شده



شکل ۲: نمای سه بعدی پل.

۳ - صحت سنجی

جهت صحت سنجی مدل سازی و بررسی نتایج نرم افزار از مدل مورد مطالعه در مرجع [۶] با در نظر گرفتن رکورد زلزله طبس، استفاده شده است. در شکل ۳ نمای طولی پل و در جدول ۲ مشخصات رکورد زلزله طبس، مطابق با مرجع مورد نظر نمایش داده شده است.

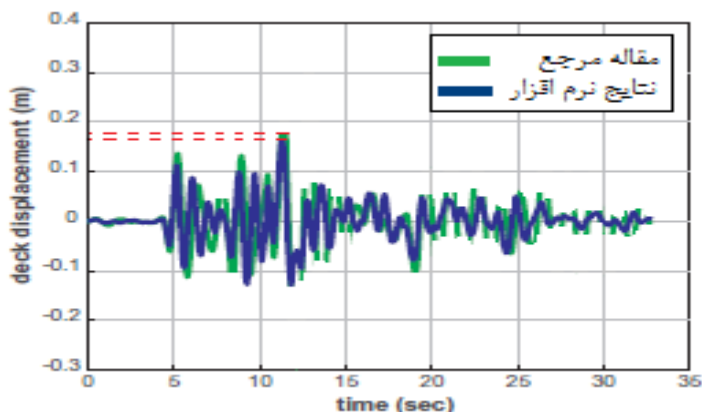


شکل ۳: نمای طولی از پل مرجع.

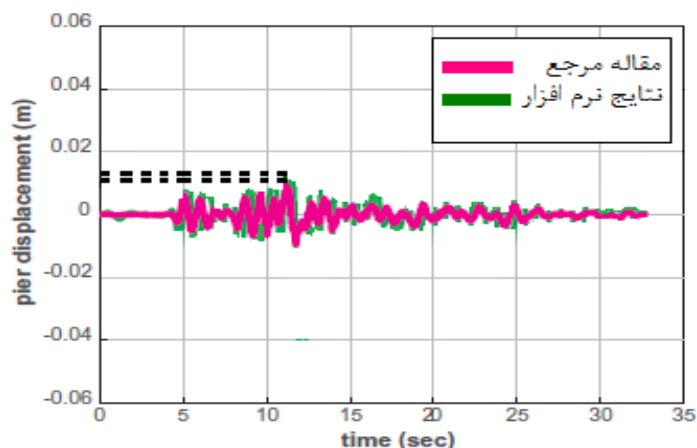
جدول ۲: مشخصات رکورد زلزله طبس [۱۷].

محل زلزله	شماره رکورد	PGA	سال	نام ایستگاه	فاصله از گسل km
Tabas-Iran	143	0/862g	1978	Tabas	۱/۷۹

نتایج حداکثر جابجایی بالای ستون‌ها و عرشه پل در مرجع مورد نظر و نرم افزار CSi Bridge در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه گردیده است. با توجه به اشکال مذکور، قدر مطلق حداکثر جابجایی عرشه پل (در راستای طولی) در مقاله مرجع برابر ۱۶/۱ سانتی متر و در صحت سنجی صورت گرفته با نرم افزار برابر ۱۶ سانتی متر است. همچنین قدر مطلق حداکثر جابجایی بالای ستون‌های پایه (در راستای طولی) در مقاله مرجع برابر ۱ سانتی متر و در صحت سنجی صورت گرفته با نرم افزار برابر ۱/۱ سانتی متر محاسبه شده است.



شکل ۴: مقایسه $|\max|$ جابجایی عرشه (در راستای طولی پل).



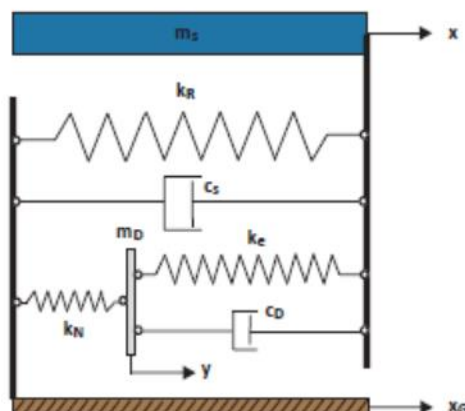
شکل ۵: مقایسه $|\max|$ جابجایی بالای ستون‌ها (در راستای طولی پل).

همانطور که ملاحظه شد، مقادیر جابجایی‌های حاصل از مدل سازی پل در نرم افزار مورد استفاده، نزدیک به نتایج حاصل از مرجع مورد نظر است و لذا این امر بیانگر تایید عملکرد نرم افزار مذکور و صحت مدل سازی انجام شده می باشد.

۴- تعیین پارامترهای سیستم‌های کنترل غیر فعال

۴-۱- طراحی بهینه پارامترهای میراگر K شکل

طراحی بهینه پارامترهای این نوع میراگر دقیقاً مراحل مربوط به مرجع [۹] را دنبال می کند. در شکل ۶ طرح کلی از مفهوم جذب ارتعاشات توسط میراگر K شکل ارائه شده است که در آن m_s برابر جرم روسازه، K_R برابر سختی روسازه و C_S برابر با میرایی روسازه است. K_e (سختی سیستم)، C_D (میرایی سیستم)، m_D (جرم اضافه شده به سیستم) و K_N (سختی منفی) هم مربوط به مشخصات میراگر مورد نظر است.



شکل ۶: طرح کلی از مفهوم جذب ارتعاشات توسط میراگر K شکل.

با توجه به طرح پیشنهاد شده برای میراگر K شکل (مطابق با شکل ۶)، از این میراگر به عنوان جداساز لرزه ای استفاده شده است. با توجه به موقعیت آن در سازه و به منظور به حداکثر رساندن اثرات جداساز روی پاسخ دینامیکی سازه، دو نوع میراگر K شکل طراحی شده است. مجموعه‌های مختلفی از مقادیر پارامترها برای این میراگر در جدول ۳ ارائه شده است [۶].

جدول ۳: پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی میراگر K شکل در نرم افزار.

محل قرارگیری میراگر K شکل	K_e (kN/m)	K_N (kN/m)	C_D (kN/m)
بالای کوله ها	۳۶۹/۷	-۲۹۵	۲۳/۴
بالای ستون ها	۱۷۰/۷	-۱۴۰	۱۱/۶

۴-۱-۱- مدل سازی میراگر K شکل در نرم افزار CSi Bridge

برای مدل سازی این میراگر از المان Link در نرم افزار استفاده شده است. این المان در نرم افزار، از نوع Damper تعریف شده و به منظور اثر دادن المان سختی منفی (K_N)، از دو المان Link برای هر نوع از میراگرها استفاده شده است. در مجموع ۶ عدد از این سیستم میراگر (۲ عدد روی پایه و ۲ عدد روی هر کوله) استفاده شده است.

۴-۲- مدل سازی جداگر لاستیکی با هسته سربی (LRB) در نرم افزار CSi Bridge

برای مدل سازی سیستم LRB از المان فنر غیر خطی Multilinear Plastic در نرم افزار استفاده شده است. در این المان برای تعریف سختی برشی، باید منحنی دو خطی جداگر رسم شود که برای رسم آن نیاز به وارد کردن مقادیر نیروی تسلیم F_y و نیروی حداکثر F_{max} و همچنین تغییر مکان های متناظر با این جداگرها می باشد؛ این مقادیر در جدول ۴ ارائه شده است [۱۳]. در مجموع ۶ عدد از این سیستم جداساز (۲ عدد روی پایه و ۲ عدد روی هر کوله) استفاده شده است.

جدول ۴: پارامترهای طراحی شده برای مدل سازی LRB.

D(cm)	T_R (cm)	d_{Lead} (cm)	d_y (mm)	F_y (kN)	d_{max} (mm)	F_{max} (KN)	G_{el} (kN/m ²)	K_{eff} (Ton/m)
50	10	11	8	106	83	162	400	۷۸/۵

D: قطر جداساز

T_R : ضخامت لایه لاستیک

d_{lead} : قطر هسته سربی

d_y : تغییر مکان جداساز در لحظه تسلیم

F_y : نیروی تسلیم هسته سربی

d_{max} : تغییر مکان جداساز بعد از تسلیم

F_{max} : نیروی حداکثر هسته سربی

G_{el} : مدول برشی جداگر

K_{eff} : سختی موثر معادل جداساز

۴-۳- مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده در نرم افزار CSi Bridge

برای مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده از المان Link استفاده شده است. این المان در نرم افزار از نوع Damper تعریف شده است. به علت اینکه TMD مورد نظر تنها در دو جهت افقی عمل می کند، لازم است TMD در جهات X و Y تعریف شود و درجات آزادی دیگر بسته شود. Link مورد نظر از یک طرف به یک جرم متمرکز و از طرف دیگر به سازه متصل شده است. برای طراحی میراگر جرمی تنظیم شده نیز ابتدا باید جرم، فرکانس و ضرایب میرایی آن را در نظر گرفت. فرکانس حرکت میراگر باید نزدیک به فرکانسی باشد که سازه برای آن طراحی می شود. انتخاب ضریب میرایی و نسبت فرکانس دلخواه است و سایر مقادیر مورد نیاز طراحی با استفاده از فرمول های ارائه شده در مرجع [۱۴] بدست می آیند.

مهم ترین پارامتر در طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شده مقدار جرم اضافه شده به سازه می باشد. در مدل های سازه ای مد غالب مد اول می باشد؛ در نتیجه مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شده مطابق با جدول ۵، بر اساس این مد تنظیم شده است [۱۵]. در مجموع دو عدد سیستم TMD برای سازه مورد نظر استفاده شده که محل قرار گیری آن ها در وسط دهانه پل است؛ تا علاوه بر جلوگیری از تمرکز جرم در سازه، ارتعاشات پایه تحت کنترل در آید و تاثیر عدم قطعیت های تنظیم میراگرها تاثیر کمتری در روند تحلیل سازه داشته باشند.

جدول ۵: پارامترهای طراحی شده برای مدل سازی TMD در نرم افزار.

مقادیر طراحی شده	پارامترهای مورد نیاز برای طراحی TMD
۷/۱٪	ξ_{opt} (نسبت میرایی)
723 Ton	m_s (جرم کل سازه)
۱۰/۱۲ Ton	m_{TMD} (جرم TMD)
۰/۹۸۲	γ_{opt} (نسبت فرکانسی بهینه)
$24/5 \frac{rad}{sec}$	ω_{TMD} (فرکانس TMD)
$352/8 \frac{kN}{m}$	C_{TMD} (میرایی TMD)
$60993/4 \frac{KN}{m}$	K_{TMD} (سختی معادل TMD)

۵- تحلیل دینامیکی پل مورد مطالعه

تحلیل پل با استفاده از نرم افزار CSi Bridge و به صورت تاریخچه زمانی غیر خطی انجام شده است که در آن اثرات حرکت زمین به صورت تاریخچه زمانی تغییرات شتاب مشخص می شود. در این روش تحلیلی، پل در تراز پایه تحت تاثیر شتاب های ناشی از زلزله که شتاب نگاشت نامیده می شود، قرار گرفته و در هر مقطع زمانی از اثر زلزله بر سازه، بازتاب های دینامیکی سازه به صورت تابع زمانی محاسبه می شود. شتاب نگاشت های انتخابی جهت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با توجه به ضوابط نشریه ۴۶۳ [۱۶] به مقیاس درآورده شده اند. در این پژوهش جهت انجام تحلیل ها از چهارده زوج شتاب نگاشت (هفت زوج شتاب نگاشت حوزه نزدیک و هفت زوج شتاب نگاشت حوزه دور) به عنوان رکوردهای زلزله مورد نیاز استفاده گردیده است. مشخصات شتاب نگاشت ها در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول ۶: مشخصات شتاب نگاشت های حوزه نزدیک [۱۷].

محل زلزله	شماره رکورد	بزرگای	سال وقوع	ایستگاه	فاصله از گسل (km)	PGA طولی	PGA عرضی
Kobe, Japan	۱۱۲۰	۶/۹	۱۹۹۵	Takatori	۱/۴۶	۰/۶۷۱	۰/۶۱۸
Kocaeli, Turkey	۱۱۷۶	۷/۵۱	۱۹۹۹	Yarimca	۱/۳۸	۰/۳۲	۰/۲۲
Izmir	۱۳۴	۵/۳	۱۹۹۷	Izmir	۰/۷۴	۰/۵۹	۰/۱۹
Victoria, Mexico	۲۶۹	۶/۳۳	۱۹۸۰	Victoria Hospital Sotano	۶/۰۷	۰/۶	۰/۴۳
Chi-Chi2, Taiwan	۱۲۲۷	۷/۶۲	۱۹۹۹	CHY074	۰/۷	۰/۶	۰/۴
Chi-Chi, Taiwan	۱۱۹۷	۷/۶۲	۱۹۹۹	CHY028	۳/۱۲	۰/۷۶	۰/۶۳۶
Tabas, Iran	۱۴۳	۷/۳۵	۱۹۷۸	Tabas	۱/۷۹	۰/۸۶۲	۰/۸۵۴

جدول ۷: مشخصات شتاب نگاشت های حوزه دور [۱۷].

محل زلزله	شماره رکورد	بزرگای	سال وقوع	ایستگاه	فاصله از گسل (km)	PGA طولی	PGA عرضی
Kobe2, Japan	۱۱۰۵	۶/۹	۱۹۹۵	Hik	۹۵/۷۲	۰/۱۴	۰/۱۵
Northridge	۹۷۲	۶/۶۹	۱۹۹۴	Las Palma	۲۱/۶۴	۰/۳۶	۰/۲
Loma Prieta	۷۹۹	۶/۹۳	۱۹۸۹	SF Intern Airpor	۵۸/۶	۰/۳۳	۰/۲۶
Manjil, Iran	۱۶۳۶	۷/۳۷	۱۹۹۰	Abbar	۱۲/۵۵	۰/۵۲	۰/۴۸
Landers	۸۳۳	۷/۲۸	۱۹۹۲	Anaheim-Ball Rd	۱۵۰	۰/۵۸	۰/۶
San Fernando	۵۸	۶/۶۱	۱۹۹۱	Cedar Springs	۹۵	۰/۵۵	۰/۵۱
Bam, Iran	۴۰۳۷	۶/۶	۲۰۰۳	Abaragh	۴۷/۱۶	۰/۶	۰/۳۸

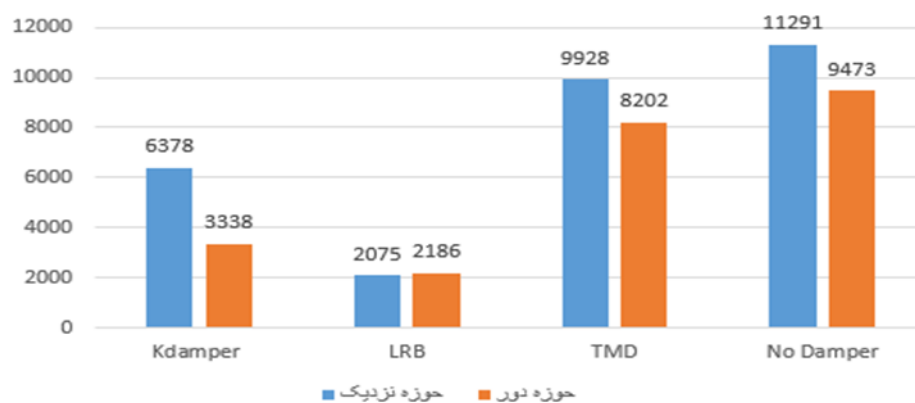
۶- پاسخ های پل در برابر زلزله

با توجه به تحلیل های صورت گرفته بر روی مدل مطالعاتی، حداکثر مقادیر خروجی شامل برش طولی پایه، برش عرضی پایه، لنگر خمشی و نیروی برشی وارد بر ستون های پایه و حداکثر جابجایی بالای ستون های پایه (در راستای طولی پل) تحت اثر زلزله های مذکور در جداول ۶ و ۷، مقایسه شده تا تاثیر سیستم های کنترل غیر فعال در سازه با توجه به شرایط مختلف مشخص گردد. از آن جایی که رکورد های زلزله انتخاب شده برای تحلیل، شامل ۷ رکورد حوزه دور و ۷ رکورد حوزه نزدیک هستند، می توان از پاسخ های بدست آمده در هر حوزه میانگین گیری کرد و یک پاسخ جامع از رکورد های مختلف بدست آورد. این پاسخ ها در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین در ادامه، نمودار های ۷ تا ۱۱ به منظور مقایسه عملکرد سیستم های کنترل غیر فعال در پل مورد مطالعه، ارائه شده است. با بررسی نمودار های ارائه شده می توان تاثیر مثبت به کارگیری جداساز و میراگرها را بر عملکرد پل مشاهده کرد. بر این اساس مشاهده شد که سیستم LRB با انعطاف پذیری زیاد خود و با افزایش زمان تناوب اصلی سازه (از ۰/۶۷ به ۲/۲ ثانیه) باعث کاهش چشم گیر برش پایه وارد بر سازه شده است؛ در صورتی که سایر سیستم ها از طریق افزایش میرایی و سختی (که باید سهم میرایی بیشتر باشد چون سختی منجر به کاهش پیوند سازه و در نتیجه افزایش برش پایه خواهد شد) اقدام به کاهش برش پایه می کنند. در بحث کاهش جابجایی های زیر سازه میراگر K شکل بیش ترین نسبت کاهش را در مقایسه با حالت معمولی پل داشته است و سیستم LRB و TMD به ترتیب در رده بعدی این نسبت کاهش قرار دارند. سیستم TMD با توجه به ویژگی های خود، در زمینه کاهش برش پایه تاثیر چشم گیری نداشته است اما در کاهش جابجایی های رو سازه مفید ظاهر شده است و می تواند در ترکیب با سایر سیستم ها عملکرد خوبی را برای حفاظت و ایمنی سازه فراهم آورد.

نوع سیستم کنترل غیر فعال								پاسخ های پل در برابر زلزله
No damper		TMD		LRB		K-Damper		
حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	
۱۳۱۲۴	۲۲۴۲۶	۷۰۱۱	۸۸۰۳	۲۵۲۶	۲۱۵۴	۳۱۴۰	5731	حداکثر برش عرضی پایه (kN)
۹۴۷۳	۱۱۲۹۱	۸۲۰۲	۹۹۲۸	۲۱۸۶	۲۰۷۵	۳۳۳۸	۶۳۷۸	حداکثر برش طولی پایه (kN)
۱۰۳۵	۱۳۴۲	۵۳۸	۶۵۳	۳۶۷	۶۶۱	۴۶۴	۷۶۸	حداکثر نیروی برشی ستون های پایه (KN)
۷۴۹۹	۱۰۳۱۴	۱۸۹۹	۲۵۱۷	۱۵۵۹	۲۵۹۲	۱۸۰۷	۲۵۵۶	حداکثر لنگر خمشی ستون های پایه (KN.m)
۷/۶۳	۱۰/۶	۱/۲۵	۱/۷	۱/۱	۱/۵۵	۰/۵۸	۰/۹۹	حداکثر جابجایی بالای ستون های پایه در راستای طولی (cm)

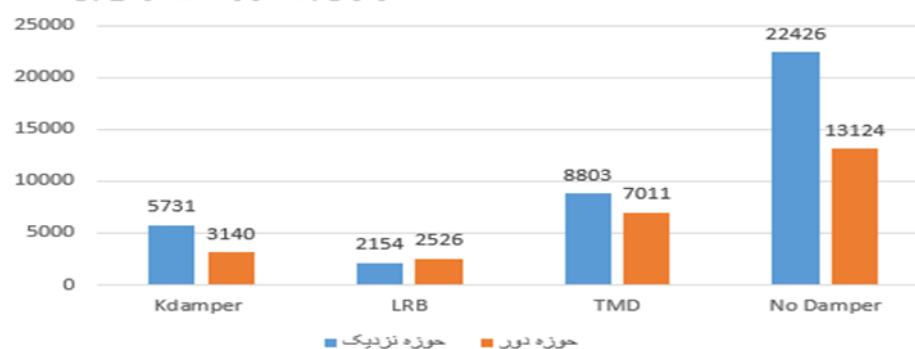
جدول ۸: میانگین پاسخ های پل تحت زلزله های مختلف (حوزه دور و نزدیک).

حداکثر برش پایه در راستای طولی پل (KN)



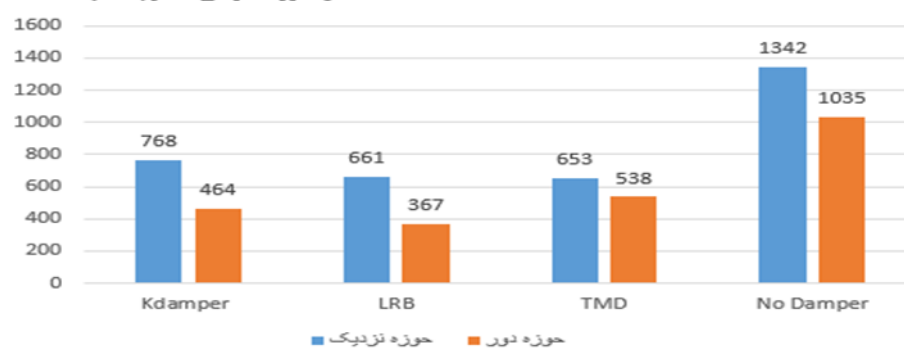
شکل (۷): مقایسه حداکثر برش طولی پایه در حالت های مختلف.

حداکثر برش پایه در راستای عرضی پل (KN)

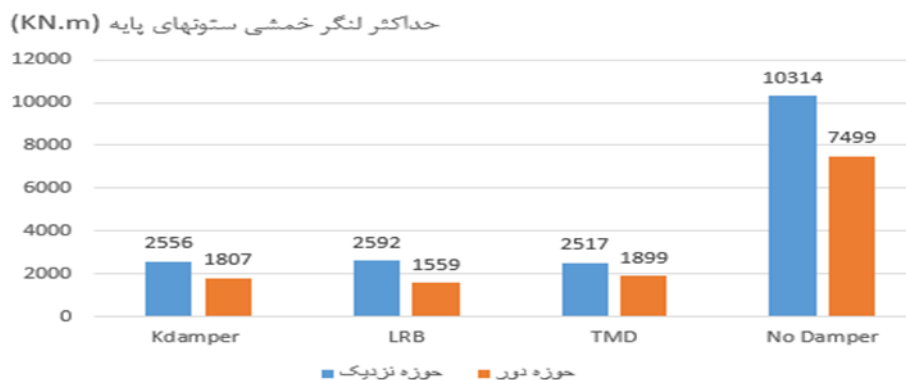


شکل (۸): مقایسه حداکثر برش عرضی پایه در حالت های مختلف.

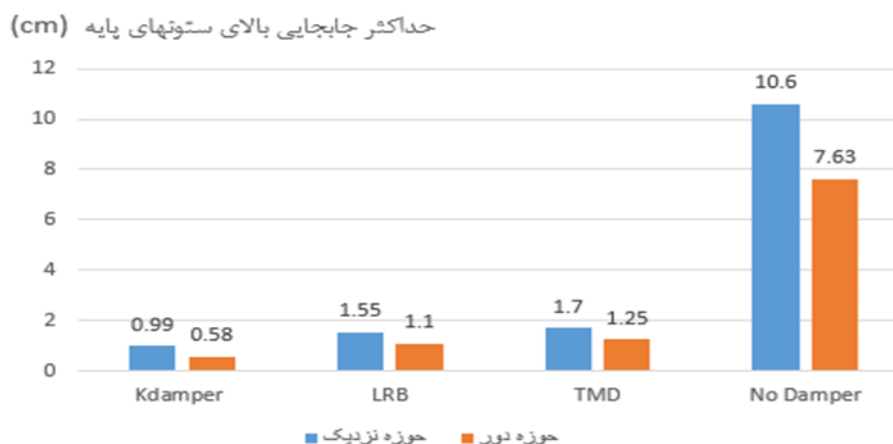
حداکثر نیروی برشی ستونهای پایه (KN)



شکل (۹): مقایسه حداکثر نیروی برشی وارد بر ستون های پایه در حالت های مختلف.



شکل (۱۰): مقایسه حداکثر لنگر خمشی وارد بر ستون های پایه در حالت های مختلف.



شکل (۱۱): مقایسه حداکثر جابجایی بالای ستون های پایه (در راستای طولی پل) در حالت های مختلف.

۷- نتیجه گیری

با توجه به بررسی های صورت گرفته بر روی مدل مورد مطالعه و با در نظر گرفتن متغیر ها و پارامتر های گوناگون و بررسی رفتار آن ها به تحریکات شتاب زمین لرزه، می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- برش پایه در حالت جداسازی شده و استفاده از میراگرها نسبت به حالت معمولی پل کاهش چشم گیری داشته است؛ البته این میزان کاهش به نوع زلزله اعمال شده نیز بستگی دارد. با توجه به نمودار های ارائه شده، بیشترین میزان درصد کاهش برش پایه در مقایسه با حالت معمولی پل، مربوط به پل جداسازی شده با سیستم LRB است. این جداساز برش طولی و عرضی پایه را در مقایسه با حالت معمولی پل به ترتیب با ۸۱/۶٪ و ۹۰/۴٪ در حوزه نزدیک و ۷۶/۹٪ و ۸۰/۸٪ در حوزه دور، کاهش داده است. میراگر K شکل و سیستم TMD به ترتیب در رده های بعدی این درصد کاهش قرار دارند.

- بر اساس تحلیل های انجام گرفته و با قرار دادن سیستم های کنترل غیر فعال در مدل مورد بررسی، نیروی برشی و لنگر خمشی وارد بر ستون ها تا اندازه ای کاهش یافته اند. بیشترین میزان درصد کاهش لنگر خمشی وارد بر ستون ها در مقایسه با حالت معمولی پل در حوزه نزدیک، مربوط به سیستم TMD و میراگر K شکل است. این سیستم ها لنگر خمشی را در مقایسه با حالت معمولی پل به ترتیب با ۷۵/۶٪ و ۷۵/۲٪ کاهش داده اند و در حوزه دور هم سیستم LRB با ۷۹/۲٪ کاهش، بهترین عملکرد را داشته است. بیشترین میزان درصد کاهش نیروی برشی وارد بر ستون ها در مقایسه با حالت معمولی پل در حوزه نزدیک، مربوط به سیستم LRB و سیستم TMD است. در این حالات نیروی برشی در مقایسه با حالت معمولی پل ۵۰٪ کاهش یافته است. در حوزه دور هم سیستم LRB با ۶۴/۵٪ کاهش، بهترین عملکرد را داشته است و میراگر K شکل و سیستم TMD به ترتیب در بعدی این درصد کاهش قرار دارند.

- بیشترین درصد کاهش جابجایی بالای ستون های پایه در راستای طولی نسبت به حالت معمولی پل، مربوط به میراگر K شکل است. در این حالت جابجایی بالای ستون ها در حوزه نزدیک و دور در مقایسه با حالت معمولی پل به ترتیب ۹۰/۷٪ و ۹۲/۴٪ کاهش یافته است. سیستم LRB و سیستم TMD به ترتیب در رده های بعدی این درصد کاهش قرار دارند. در نتیجه با تلفیق میراگر K شکل (با در نظر گرفتن اثر سختی منفی) و سیستم LRB می توان بهترین عملکرد را از لحاظ کاهش جابجایی بالای ستون ها و همچنین کاهش برش پایه دریافت کرد.

مراجع

- [1] Chopra, A. K. (2012). Dynamics of Structures. Fourth. California: Prentice Hall, 818-827.
- [۲] Housner, G. W. Bergman, L. A. Caughey, T. K. Chassiakos, A. G. Masri, S. F. Skelton, R. E. Soong, T. T. Spencer, B. F. and Yao, T. (1997). Structural Control: Past, Present and Future, Journal of Engineering Mechanics, 106, 897-933.
- [۳] Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999). Design of seismic Isolated Structure: From Theory to Practice. Proc. 6th national Earthquake Engineering, Conf, Wiley Chichester, U.K.
- [۴] Magni, H. Bjarni, B. Einar, H. (2010). Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion. Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, 30, 447-455.
- [۵] Karalar, M. Jamie, E. Murat, D. (2012). Parametric analysis of optimum isolator properties for bridges susceptible to near-fault ground motions. Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, 40, 276-287.
- [۶] Sapountzakis, E.J. Syrimi, P.G. Pantazis, I.A. Antoniadis, I.A. (2017). KDamper concept in seismic isolation of bridges with flexible piers. Engineering Structures. Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, 153, 525-539.
- [۷] Mokrani, B. Tian, Z. Alaluf, D. Meng, F. Preumont, A. (2017). Passive damping of suspension bridges using multi-degree of freedom tuned mass dampers. Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, 153, 749-756.
- [8] Tubaldi, E. Mitoulis, S.A. Ahmadi, H. (2018). Comparison of different models for high damping rubber bearings in seismically isolated bridges. Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, 104, 329-345.
- [۹] Den Hartog, J. P. (1953). Mechanical Vibrations, Mc-Graw-Hill Inc., New York, NY.
- [۱۰] بطحایی، اکبر. رضائی، میثم. قربانی تنها، کیوان. (۱۳۹۵). کنترل ارتعاشات پل کالج با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده. کنفرانس مهندسی عمران. دانشگاه تربیت مدرس. ۲۱-۳۲.
- [۱۱] هوائی، غلامرضا. مؤیدی، سید امیرحسین. ارزیابی تأثیر جداساز لرزه ای اصطکاکی-لاستیکی در خرابی پیش رونده پل ها. نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۵؛ ۳(۲): ۱۱۳-۱۳۲.
- [۱۲] شیراوند، محمودرضا. رسولی، مهسا. ارائه مدل سه درجه آزادی برای بررسی تاثیر پارامترهای جرمی بر زمان تناوب طولی پل های دارای جداگر لرزه ای. نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۷؛ ۵ (شماره ویژه ۲): ۵۳-۶۴.
- [۱۳] دهقانی، احسان. موسوی، امید. (۱۳۹۵). بررسی ضریب رفتار پلهای بتنی با جداگرهای الاستومریک (ERB) و جداگرهای هسته سربی (LRB). مجله پژوهش های عمران و محیط زیست. ۱۳-۲۵.
- [۱۴] ارزاقی، ش. (۱۳۸۴). ارزیابی عملکرد جرم میراگر تنظیم شده در کنترل رفتار لرزه ای مدل های سازه ای سه بعدی، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران.
- [۱۵] کرامتی، محسن. نیکخواه شه میرزادی، محمود. قنادیان، محمدعلی. ناجی، نغمه. (۱۳۹۲). طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شده در نرم افزار sap. مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات. ۳۱-۳۴.
- [۱۶] آیین نامه طرح پلهای راه و راه آهن در برابر زلزله، نشریه ۴۶۳، ۱۳۸۷، معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه ریزی.
- [۱۷] peer, (1998-2019). <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-database>.