

Seismic fragility analysis of multi-frame RC curved bridges with base isolation

Meysam Balou¹, Hossein Pahlavan², Ali Naseri^{*3}, Fahime Rafiee⁴

1- MSc of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

2 -Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

3 -Ph.D. of Structural Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

4 -Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Damghan University, Damghan, Iran.

ABSTRACT

Bridges are counted as one of the most important and vulnerable structures in the vital veins of every country. The abundance of the concrete box deck bridges with concrete arches on the one hand, and the complex dynamic behavior resulted from special geometric conditions of this class of bridges which have made them more vulnerable on the other hand, were aimed to be studied in this research. In this study, a model of a concrete box deck bridge with concrete arches and the appropriateness of using lead-rubber bearing system were examined, and ultimately, two states of the bridge with and without seismic isolation were assessed by fragility curves, and the amount of possible seismic damage have been obtained. The study results were analyzed by modeling the bridge in the CSI Bridge finite-element software in three dimensions and under the excitation of 100 pairs of real accelerogram and under nonlinear time-history analysis, and the responses of the elements were extracted. So that, compared to the state without seismic isolator, the maximum relative displacement in the model with seismic isolator has decreased by 55 and 28 percent in the longitudinal and transverse directions; respectively. Also, based on the result of modal analysis and comparison of the vibration period, the results show a significant increase in the first to third period of vibration of bridges in the state with seismic isolation compared to the without seismic isolation. The results of studies indicate that In this bridges with seismic isolation have reduced the drift of columns significantly so that the seismic fragility of the bridge system has been reduced at different levels of damage.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 April 2021

Revise Date: 18 May 2021

Accept Date: 29 May 2021

Keywords:

RC curved bridge

LRB base isolation

Vulnerability assessment

Fragility curve

Nonlinear time-history analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280611.2416>

*Corresponding author: Ali Naseri

Email address: Alinaseri@stu.nit.ac.ir

تحلیل شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی بتنی چند قابی جداسازی شده با جداگر لرزه‌ای

میثم بالو^۱، حسین پهلوان^۲، علی ناصری^{۳*}، فهیمه رفیعی^۴

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، شاهرود، ایران

۲- استادیار گروه سازه و زلزله، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران، شاهرود، ایران

۳- دکتری عمران سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، دانشکده مهندسی عمران، بابل، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه دامغان، دانشکده فنی و مهندسی، دامغان، ایران

چکیده

پل‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین و آسیب‌پذیرترین سازه‌ها در شریان‌های حیاتی هرکشور محسوب می‌شوند. از طرف دیگر به دلیل رفتار دینامیکی پیچیده‌ای که پل‌های قوسی ناشی از شرایط هندسی خاص در زلزله از خود نشان می‌دهند در این تحقیق مقاوم سازی اینگونه از پل‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. بنابراین دو مدل پل عرشه جعبه‌ای شکل بتن آرمه دارای قوس افقی با شعاع‌های یکسان در دو حالت با جداساز لرزه‌ای و بدون جداساز مورد ارزیابی قرار گرفت. به طوری که کفایت استفاده از جداساز لرزه‌ای هسته سربی در مقایسه با حالت بدون جداساز لرزه‌ای توسط منحنی‌های شکنندگی بررسی شد و سطوح خسارات لرزه‌ای محتمل بدست آمده‌اند. نتایج پژوهش با مدل سازی پل در نرم‌افزار المان محدود *CSi Bridge* تحت تحریک ۱۰۰ زوج شتاب نگاشت واقعی تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته و پاسخ المانها از آن استخراج شده‌است. بطوریکه متوسط حداکثر جابجایی نسبی در مدل با جداساز لرزه‌ای نسبت به حالت بدون جداساز لرزه‌ای در جهت طولی و عرضی به ترتیب ۶۷ و ۶۴ درصد کاهش یافته است. ضمناً در پی انجام تحلیل مودال و مقایسه زمان تناوب پل‌ها، مشاهده می‌شود زمان تناوب اول تا سوم ارتعاش پل‌ها در حالت با جداگر نسبت به حالت بدون جداگر با افزایش قابل توجهی مواجه بوده است. نتایج این پژوهش حکایت از آن داشته که در این دسته از پل‌ها استفاده از جداگر لرزه‌ای بطور چشم گیری موجب کاهش جابجایی نسبی ستونها شده بطوریکه شکنندگی لرزه‌ای سیستم پل در سطوح آسیب مختلف کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: پل قوس بتنی، جداگر *LRB*، ارزیابی آسیب پذیری، منحنی شکنندگی، تحلیل دینامیکی غیرخطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280611.2416	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.280611.2416	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۸	۱۴۰۰/۰۳/۰۸	۱۴۰۰/۰۲/۲۸	۱۴۰۰/۰۱/۲۲
علی ناصری Alinaseri@stu.nit.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پل‌های دارای قوس افقی و یا قائم، در مقایسه با پل‌های مستقیم با توجه به ملاحظات معماری و طرح هندسی ویژه از رایج‌ترین نوع پل در تقاطع‌های غیر هم سطح در شبکه‌های حمل و نقل بوده و از سویی دیگر از آسیب‌پذیرترین سازه‌ها در حین زمین لرزه‌های پیشین به شمار می‌آیند. علاوه بر این برای تأمین ملزومات ضروری در حین این فرآیند و تسهیل در بهره برداری از زیرساخت‌های حیاتی جهت امداد رسانی، لزوم حفظ عملکرد مناسب پل‌ها پس از وقوع زلزله را بیش از پیش اذعان می‌دارد. به همین دلیل نیاز به توسعه تحقیقات و انجام مطالعات در این دسته از پل‌ها می‌باشد. خرابی این سازه‌ها تاثیر زیادی بر وضعیت اقتصاد یک منطقه داشته و می‌تواند آسیب جدی به عملکرد زیرساخت‌های آن ناحیه وارد نموده و همچنین خدمت‌رسانی پس از وقوع زلزله را با معضلات زیادی روبرو خواهد نمود. بدین منظور جهت تسهیل در ارزیابی و به دنبال آن مقاوم‌سازی پل‌ها، اخیراً از منحنی‌های شکنندگی (*Fragility Curves*) استفاده می‌شود. بدین سبب، آنین نام‌های بهسازی لرزه‌ای معتبر دنیا توجه ویژه‌ای به استفاده از این منحنی‌ها برای کنترل عملکردی پل‌ها داشته‌اند. این منحنی‌های حالات احتمال شرطی هستند که توسط آن‌ها عملکرد لرزه‌ای مورد انتظار پل ارزیابی می‌گردد. بطوریکه علاوه بر استفاده در روند ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها، در طراحی پل‌ها نیز استفاده شده‌است. بدین صورت که طراحان با استفاده از نتایج شکنندگی‌های حاصل شده تاثیر تغییرات پارامترهای طراحی پل را در خرابی‌های مورد انتظار ناشی از رخداد زلزله مورد مطالعه قرار می‌دهند. در این پژوهش به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های عرشه باکس بتن آرمه چند قابی با قوس افقی دارای سیستم جداساز لرزه‌ای با استفاده از منحنی شکنندگی پرداخته شده‌است. با توجه به آنکه سایر روش‌های مقاوم سازی در ارزیابی لرزه‌ای این دسته از پل در تحقیقات پیشین مطالعه شده‌است، استفاده از جداساز لرزه‌ای در ارزیابی لرزه‌ای و مقایسه آن در حالت بدون استفاده از جداساز هسته سربی، نوآوری این پژوهش می‌باشد.

۲- تاریخچه تحقیقات

تلاش‌های گسترده‌تر برای پیشبرد روش‌های تحلیل خطر لرزه‌ای توسط سازمان مدیریت بحران فدرالی فما و با تشکیل کمیته‌ای از متخصصین و معرفی یک نرم‌افزار تحلیل خطر لرزه‌ای بر مبنای سامانه اطلاعات جغرافیایی به نام *HAZUS* در سال ۱۹۹۷ صورت گرفت [۱].

در سال ۲۰۰۷ خالو و کافی موسوی [۲] رفتار خمشی پل‌های جعبه‌ای پیش‌تنیده دارای قوس افقی را بوسیله مدل‌سازی و تحلیل المان محدود سه‌بعدی، مطالعه کردند. طول پل، هندسه مقطع و خصوصیات مصالح در همه مدل‌ها یکسان و مشابه بود، درحالی‌که زاویه انحنای پل از صفر تا ۹۰ درجه متغیر بود. نتایج تحلیل نشان دادند که در پل‌های قوسی، توزیع تنش بطور قابل ملاحظه‌ای درمقایسه با پل‌های مستقیم، متفاوت است. نتایج نشان داد که با توزیع مجدد مناسب و بهینه میلگردهای پیش‌تنیدگی در عرض مقطع، کاهش قابل توجه تنش برآیند ممکن خواهد بود.

توندینی و استوجادینویچ [۳] رفتار لرزه‌ای پل‌های قوسی شکل با عرشه باکس بتنی متعارف در کالیفرنیا آمریکا (بطور ویژه، یک مدل تقاضا احتمالی لرزه‌ای برای یک پل ۵ دهانه با پایه میانی تک ستون دایره‌ای) را مورد مطالعه قرار دادند. پارامتر اصلی شعاع قوس افقی پل بود. این شعاع از بینهایت تا شعاع تیز تغییر داده شد و اثر انحنای پل در پارامترهای پاسخ لرزه‌ای مشاهده گردید. نتایج به این صورت بود که با کاهش شعاع پل‌های قوسی تک ستونه، سختی جهت عرضی آنها افزایش می‌یابد. در حالی‌که سختی و زمان تناوب پل در جهت طولی وابسته به مقدار شعاع قوس عرشه نیست.

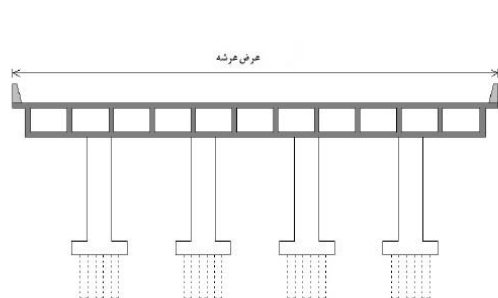
پهلوان و همکاران [۴] ارزیابی احتمالاتی پل‌های قوسی عرشه باکس بتن آرمه ۴ دهانه با ارتفاع ستون‌های منظم (با شش شعاع قوس متفاوت) را مورد بررسی قرار داده که دارای چهار دهانه و یک درز میانی بودند. با اعمال یکصد رکورد زلزله، شکنندگی را برای هر یک از اجزای پل ترسیم کرده و ارزیابی آسیب‌دیدگی احتمالاتی را برای سطوح آسیب چهارگانه بررسی کردند و به مقاوم سازی پل با روش‌های متفاوت پرداختند.

شایانفر و همکاران [۵] با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی مدل‌های با مشخصات تصادفی، مدل‌های نیاز لرزه‌ای احتمالاتی به صورت توابع نرمال لگاریتمی را تهیه نموده‌اند. با اعمال زلزله در دو حالت مجزا، یکی اعمال یکنواخت زلزله به همه پایه‌های پل و دیگری اعمال تحریکات غیر یکنواخت با لحاظ کردن اثر حرکت موج زلزله در خاک حدفاصل بین پایه‌ها، نتیجه ارزیابی بشرح زیر حاصل شد: آسیب‌پذیری اجزای مختلف نسبت به یکدیگر در سطوح آسیب چهارگانه ثابت نیست. در سطح آسیب جزئی درز آبنند آسیب‌پذیرترین عضو است و پس از آن افتادگی عرشه و کلید برشی آسیب‌پذیرترین عضو می‌باشد. در حالیکه در سطح آسیب متوسط، ستون‌ها آسیب‌پذیرتر از سایر اجزا ارزیابی شده‌اند. با افزایش انحنا عرشه، احتمال آسیب‌پذیری اجزا و سیستم بیشتر می‌شود، در حالیکه در آیین‌نامه‌ها، ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای در این دسته پل در نظر گرفته نمی‌شود. با کاهش شعاع عرشه از مقدار بینهایت تا شعاعی برابر نصف طول پل در سطح آسیب متوسط میانه شکنندگی ۴۷ درصد کاهش می‌یابد که در سطوح آسیب گسترده و کامل این عدد به ترتیب مقادیر ۴۷ و ۷۹ کاهش در میانه شکنندگی نسبت به پل مستقیم را نشان می‌دهد.

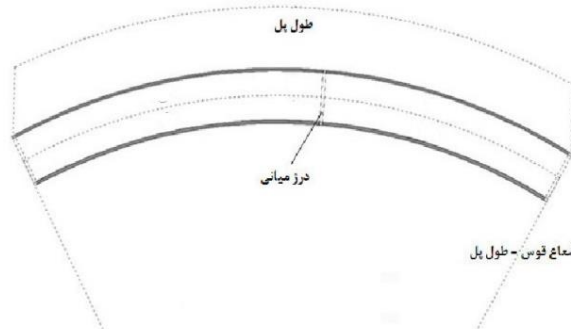
ناصری و همکاران [۶] به ارزیابی احتمالاتی پل‌های قوس عرشه باکس بتن آرمه پرداختند. در این پژوهش پل‌ها به شعاع‌های (۶۶، ۱۳۲، ۲۰۰، ۲۶۵، ۴۰۰) با در نظر گیری ۱۴ عدم قطعیت‌ها تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی در دو حالت دور و نزدیک گسل مورد ارزیابی قرار گرفتند و سپس نتایج با پل مستقیم مقایسه گردید. در این پژوهش از رکوردهای پیشنهادی دور و نزدیک بیکر استفاده شد که با استفاده از نرم افزار OpenSEES منحنی‌های شکنندگی اجزای پل‌ها و منحنی شکنندگی سیستم پل‌ها در چهار حالت خرابی (ناچیز، متوسط، زیاد و کامل) ترسیم گردید. نتایج حاکی از آن است که پل‌ها در زلزله‌های نزدیک گسل بسیار آسیب‌پذیرتر هستند به طوری که نسبت میانه شکنندگی دور از گسل به نزدیک گسل تقریباً ۱،۰۴ تا ۱،۵۱ برابر افزایش می‌یابد.

۳- مدلسازی تحلیلی

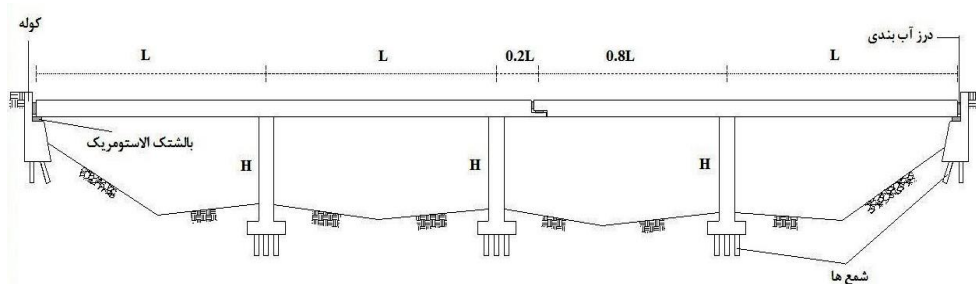
در این پژوهش، مدل پل بصورت سه‌بعدی مدلسازی گردید. دسته این پل از نوع قوس بتنی جعبه‌ای چندقابی و چند ستونه (چهار ستونه) می‌باشد. جابجایی طولی و عرضی ستون‌ها به عنوان پارامتر اصلی این پژوهش به منظور آسیب‌پذیری لرزه‌ای در دو حالت با جداساز لرزه‌ای و بدون جداساز لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود. پلان این پل و مدل مینا و مقطع عرضی آن مطابق شکل‌های ۱ و ۲ و ۳ دارای شعاع انحنای برابر با طول پل یا زاویه انحنای یک رادیان می‌باشد. مدل سازی این پل در نرم افزار *CSI Bridge 2017* انجام گردیده و تحلیل مودال صورت پذیرفت. بارگذاری وارد بر پل شامل بار مرده شامل بار مرده ناشی از وزن شاهتیرها، بار آسفالت به ضخامت ۱۰ سانتی متر و جرم مخصوص ۲،۲ تن در هر متر مکعب می‌باشد. مشخصات کامل بارهای وارده بر پل براساس پژوهش راماناتان [۱۲] اعمال گردیده است.



شکل ۳: پلان پل قوسی مورد مطالعه



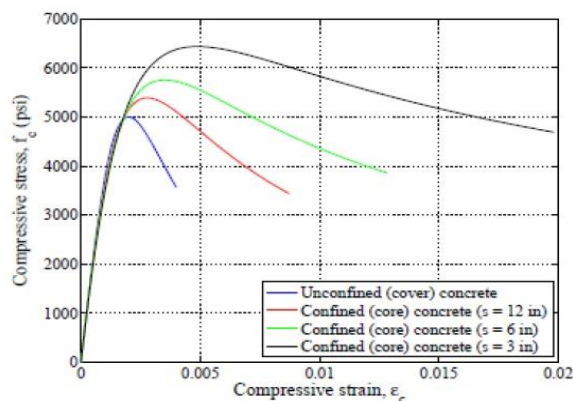
شکل ۱: مقطع عرضی پل مورد مطالعه



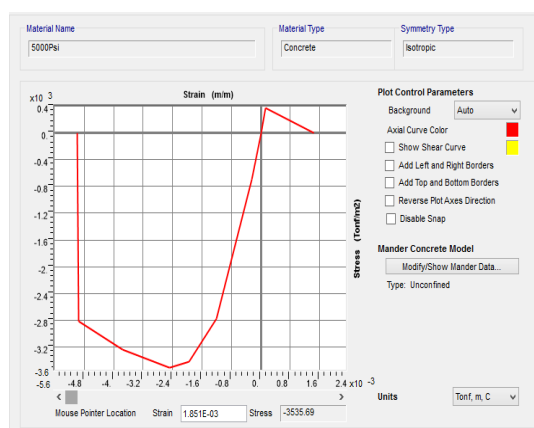
شکل ۲: مدل پل با ارتفاع ثابت [۷]

۳-۱ مدل رفتاری مصالح بتن و فولاد

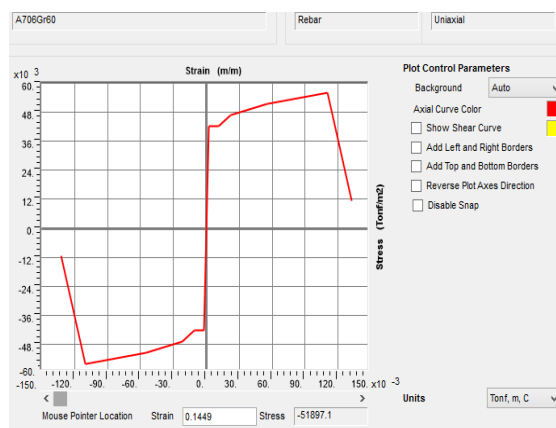
مزیت خاص مقاطع عرضی فایبر در امکان تخصیص خصوصیات مصالح مختلف در نقاط متفاوت مقطع یک عضو می باشد. بطوریکه می تواند ویژگی بتن محصور نشده به پوشش بتن و هم چنین بتن محصور شده به هسته بتن را تخصیص دهد. شکل ۴ منحنی تنش کرنش بتن در حالات و فواصل مختلف را نشان می دهد. مقاومت فشاری بتن $34.5MPa$ و مقاومت فولاد $414MPa$ می باشد که با خاموت نمبر ۴# (قطر ۱۳ میلیمتر) محصور شده است. جهت ارائه رفتار غیرخطی مصالح و اعضاء از آئین نامه لرزه ای کلترنس کالیفرنیا [۸] و مدل مندر [۹] جهت مدل سازی رفتار مصالح استفاده گردید. مشخصات رفتاری مصالح مورد استفاده در شکل ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۴: تأثیر سطوح مختلف محصورشدگی بر روی منحنی تنش-کرنش [۷]



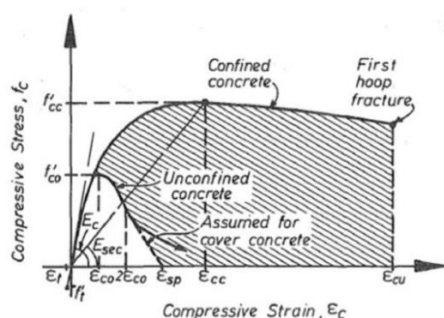
شکل ۶: مشخصات رفتاری پلاستیک فشاری و کششی بتن



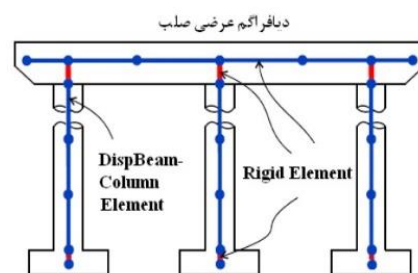
شکل ۵: مشخصات رفتاری پلاستیک فولادی

۳-۲ مقاطع عرضی ستون ها

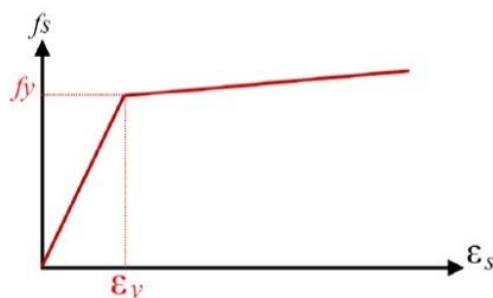
مقاطع با المان های فایبر مدل می شوند تا امکان تشکیل مفصل پلاستیک در هر قسمت باشد. ضمناً از المان های تیر ستون غیر خطی استفاده می شود. مطابق شکل ۷ مدل المان محدود گسسته پایه چند ستونه ای نشان می دهد که هر چقدر تعداد این المان ها (*Displacement-based element*) بیشتر باشد دقت محاسبات بالاتر رفته و نتایج تحلیلی و تجربی انطباق بیشتری خواهند داشت. شکل ۸ یک مقطع فایبر را برای یک ستون بتنی نشان می دهد که شامل بتن محصور شده و محصور نشده (جهت هسته داخلی بتن) می باشد. در شکل ۹ مشخصات فولاد برای مدل سازی آرماتورهای موجود در مقطع ستون را نشان می دهد.



شکل ۸: مدل المان محدود پایه چند ستونه [۱۰]



شکل ۷: تأثیر سطوح محصور شدگی منحنی تنش کرنش ستون [۷]



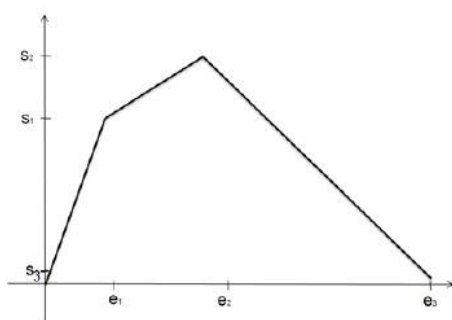
شکل ۹: منحنی تنش کرنش فولاد مورد استفاده در مدل [۴]

۳-۳ المان های عرشه

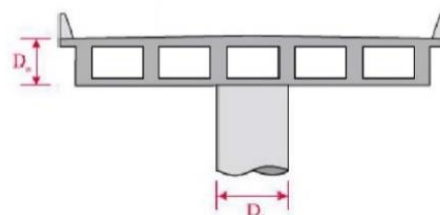
مدل سازی عرشه از نوع مقطع جعبه بتنی مطابق شکل ۱۰ در نرم افزار *CSi Bridge* انجام گردید. با توجه به آنکه روسازه (عرشه پل) در جریان زمین لرزه بصورت الاستیک و در محدوده ارتجاعی باقی می ماند، المان های عرشه با استفاده از الگوی تیر-ستون غیر خطی مدل می شوند. همچنین به المان های عرضی عرشه خصوصیات هندسی و سختی های بزرگی تخصیص داده می شود. لذا عرشه در راستای عرضی بصورت کاملاً صلب عمل می کند و نوع دیافراگم *Solid* انتخاب می گردد. [۱۰]

۳-۴ کلید برشی

کلید برشی نقش مهمی در محدود نمودن حرکت عرضی نسبی عرشه و کوله را دارد و اغلب در پل های با دهانه متوسط یا کم مورد استفاده قرار می گیرد. کلید های برشی به گونه ای طراحی می شوند که نیرویی بیشتر از ظرفیت اعضای زیرسازه را انتقال ندهند [۱۰]. با توجه به دسته پل در این پژوهش، کلید برشی تنها در محل کوله بکار می روند و ظرفیت آنها از ۷۵ درصد ظرفیت برشی شمع و کوله به اضافه یکی از دیوارهای کناری بیشتر نشود. ضمناً جهت کنترل جابجایی عرضی عرشه، به عرشه ۲۰ سانتی متر آزادی حرکت داده شد تا پس از آن حد توسط کلید برشی محدود شود. شکل ۱۱ رفتار چرخه ای یک کلید برشی را نشان می دهد که نتیجه مطالعات مگالی و همکارانش [۱۱] است.



شکل ۱۱: رفتار چرخه ای کلید برشی [۱۲]



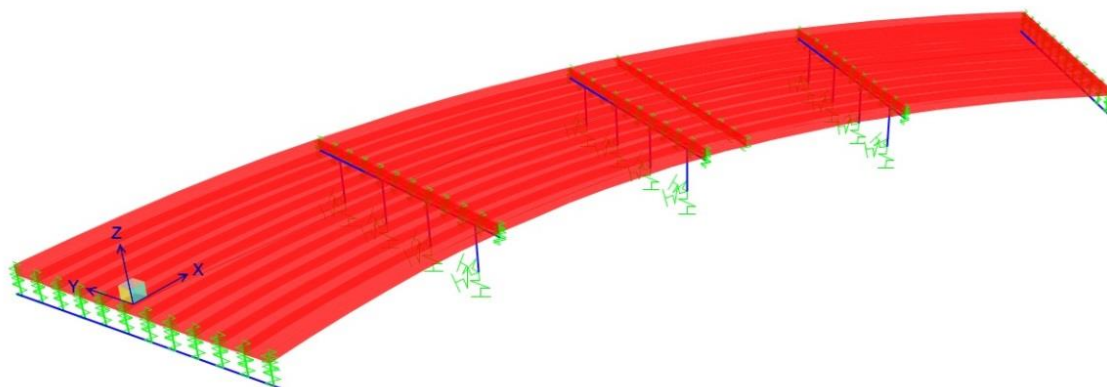
شکل ۱۰: عرض موثر عرشه [۱۰]

۵- معرفی دسته پل مورد مطالعه

پل مورد مطالعه قوسی بتنی چندقابلی چهاردهانه با عرشه جعبه‌ای و پایه‌های چهارستونه می‌باشد. مدل اصلی مطابق نمونه‌های ساخته‌شده در کالیفرنیا بوده که مشخصات آن برگرفته از پژوهش راماناتان [۱۲] و مربوط به دوره پیش از ۱۹۷۱ می‌باشد. پارامترهای هندسی تحلیل در جدول ۱ ارائه شده‌اند. سختی شمع‌ها بر اساس اطلاعات موجود و آزمایش پژوهشگران با در نظر گرفتن هندسه گروه شمع قابل انجام می‌باشد. از سختی پیچشی شمع‌ها به علت عدم تأیید قابل ملاحظه صرف‌نظر شده‌است [۱۳] و سختی قائم آن با لحاظ مقاومت انتهای شمع بر اساس مطالعات انجام شده توسط چوی [۱۴] معادل 175 kN/mm در نظر گرفته شده و سختی افقی موثر شمع مانند شمع‌های موجود در کوله معادل 7 kN/mm تعیین می‌گردد. میرایی رایلی ۵ و ۱۵ درصد به ترتیب برای پل در حالت‌های بدون جداساز و با جداساز بر مبنای توصیه ژنگ و ماکریس [۱۵] اعمال شده‌است. مدل سه‌بعدی پل مورد مطالعه در نرم‌افزار *Csi Bridge2017* مطابق شکل ۱۲ می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای هندسی توصیف کننده مدل پل

ارتفاع ستون	قطر ستون	تعداد آرماتور طولی (#11)	فاصله آرماتورهای عرضی (#4)	طول هر دهانه	عرض عرشه	تعداد جعبه مقطع عرشه	ارتفاع کلی روسازه	ضخامت بال مقطع عرشه	ضخامت جان	سختی انتقالی شالوده ستون	سختی دورانی شالوده ستون
6 m	1.5 m	42	0.3 m	33.1m	33.5m	11	1.46 m	0.3 m	0.2 m	7.06 kN/mm	صفر



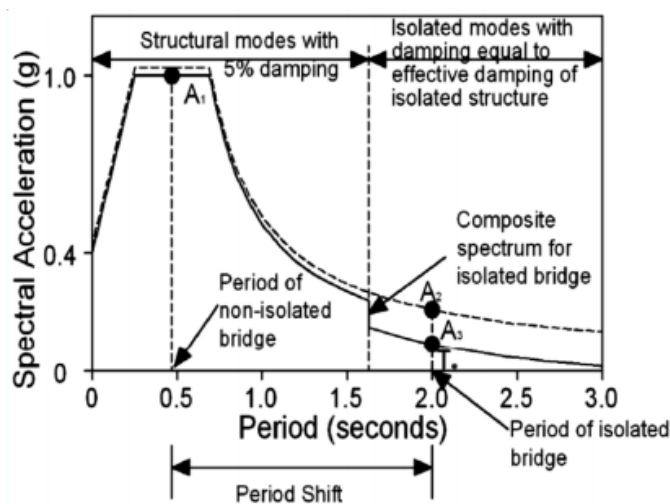
شکل ۱۲: نمای سه بعدی از سازه (R=L)

۶- جداساز لرزه‌ای

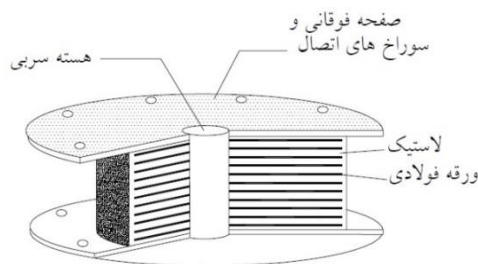
طبقه بندی جداسازهای لرزه‌ای در دو دسته می‌باشند. دسته اول که بوسیله اجزاء الاستومری ساخته می‌شوند و دسته دوم، توسط اجزاء لغزشی تولید می‌گردند. عمده سازه‌های جداسازی شده در پل‌ها از اجزای الاستومری بهره‌می‌برند که ممکن است سیستم اتلاف انرژی در آن، هسته سربی در مرکز و یا گوشه‌های آن باشد. به این جداگرها، جداگرهای سربی لاستیکی^۱ گفته می‌شود که در این مطالعه از این دسته از جداساز استفاده شده و جزئیات این نوع مطابق شکل ۱۳ بصورت شماتیک نمایش داده می‌شود. جداگرهای لغزشی نیز عمدتاً از دسته جداگرهای آونگی اصطکاکی^۲ هستند و سیستم اتلاف انرژی در آن، اصطکاک می‌باشد. سطوح عملکرد لرزه‌ای در طراحی جداسازی نیز همان سطوح عملکرد لرزه‌ای در طراحی بدون جداساز لرزه‌ای می‌باشد.

۵-۱ اصول جداسازی لرزه‌ای

اصول جداسازی لرزه‌ای در شکل ۱۴ به نمایش درآمده است. خطوط خط چین طیف طرح می‌باشد. خط پیوسته نشانگر طیف ترکیبی برای یک سازه پل جداساز شده می‌باشد. انتقال زمان تناوب و افزایش میرایی، انعطاف‌پذیری لازمه را برای سیستم جداساز به جهت کاهش شتاب طیفی فراهم آورده و منجر به کاهش جابجایی نسبی و نیروها نیز می‌شود.



شکل ۱۴: اصول طراحی جداساز [۱۷]



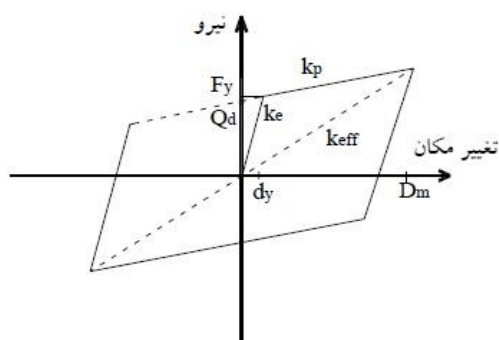
شکل ۱۳: نمونه جداساز هسته سربی [۱۶]

۵-۲ اتلاف انرژی

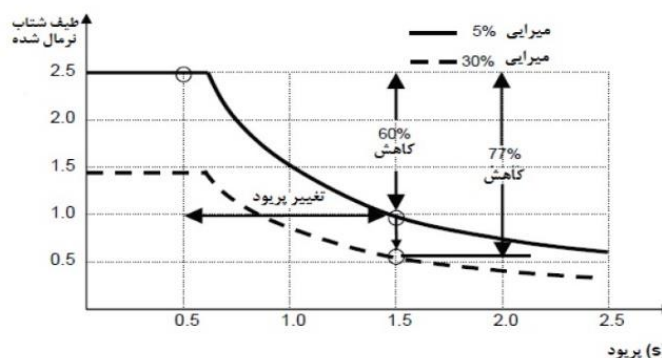
جداساز *LRB* همچون سایر جداسازها دارای مکانیسم اتلاف انرژی جهت اعمال سطح قابل توجهی از میرایی (مطابق شکل ۱۵) به سازه خواهند بود. هسته سربی به همراه لاستیک‌ها، سختی اولیه را تحت بارهای بهره‌برداری ایجاد نموده و منجر به استهلاک انرژی در اثر بارهای جانبی می‌شود. سرب تحت نیروی برشی در تنش‌های به نسبت پایین، حدود ۸ تا ۱۰ مگاپاسکال به حد تسلیم می‌رسد و تغییر شکل می‌دهد. بنابراین رفتار پایداری را تحت سیکل‌های متوالی با تشکیل حلقه‌های هیستریزس و رفتار دوخطی (مطابق شکل ۱۶) نشان داده و بدین ترتیب منجر به استهلاک سطح زیادی از انرژی در زمان وقوع زلزله می‌شود سطح هاشورخورده زیر منحنی بیانگر انرژی مستهلک‌شده طی هر سیکل از حرکت جداساز می‌باشد.

¹ Lead Rubber Bearing (LRB)

² Friction Pendulum Bearing (FPB)



شکل ۱۶: نمودار رفتاری جداساز [۱۷]



شکل ۱۵: اثر میرایی بر پاسخ سازه [۱۸]

۳-۵ ضوابط آیین نامه‌ای در مورد طراحی پل‌های جداسازی شده

مشخصات راهنمای طراحی جداسازی لرزه‌ای پل‌های بزرگراه‌ها، از انتشارات آشتو [۱۹] معرفی می‌گردد. این راهنما مکمل مشخصات ارائه شده در اینجا برای سیستم‌هایی است که فقط در صفحه افقی جداسازی ایجاد می‌کنند و فرض بر این است که در راستای قائم کاملاً صلب هستند.

۴-۵ مشخصات جداساز

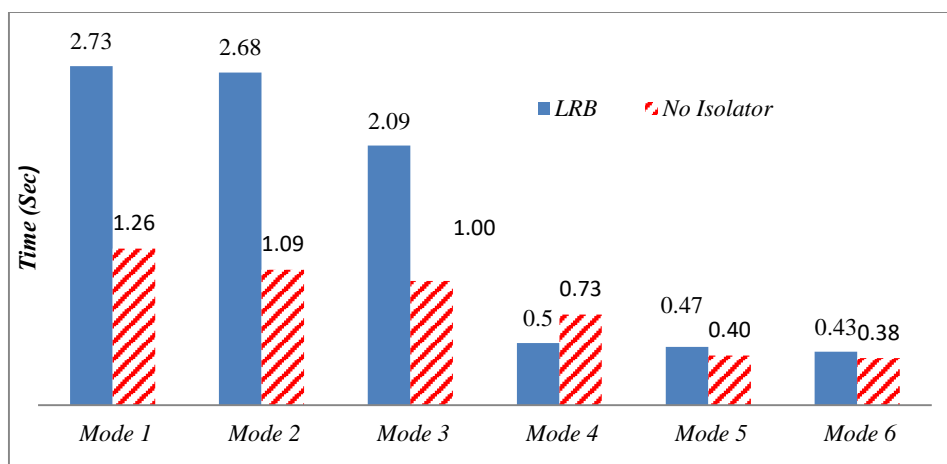
پارامترهای طراحی جداساز لرزه‌ای هسته سربی مطابق جدول ۲ می باشد :

جدول ۲: پارامترهای طراحی جداساز لرزه‌ای هسته سربی

عنوان	سختی موثر جانبی	مقاومت مشخصه	سختی ثانویه	تنش تسلیم سرب	قطر هسته سربی	قطر جداساز	ارتفاع جدا ساز	ضخامت لاستیک	تعداد لایه لاستیک	ضخامت ورق فولادی
واحد	kN/mm	T	kN/mm	kg/m^2	cm	cm	cm	mm	IRHD-60	mm
مشخصه	K_{eff}	Q_d	K_d	σ_c	D_p	D	H	T_t	N	T_s
مقدار	2.68	31.75	1.53	7.84E5	18	110	32	14	14	4

۷- تحلیل مودال

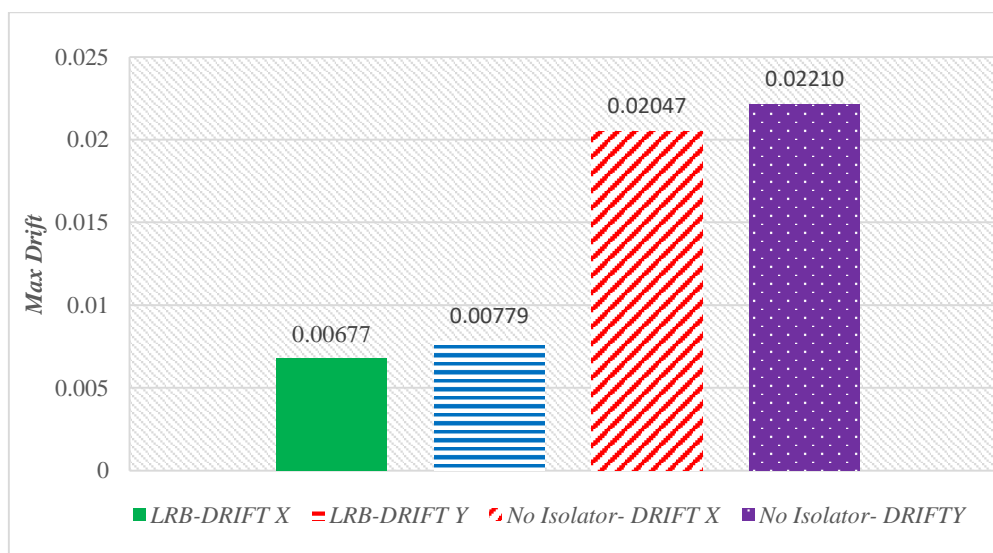
نمودار مقایسه‌ای شش مد اول در دو حالت با جداساز و بدون جداساز لرزه‌ای پل ارائه گردیده مطابق شکل ۱۷ می‌باشد.



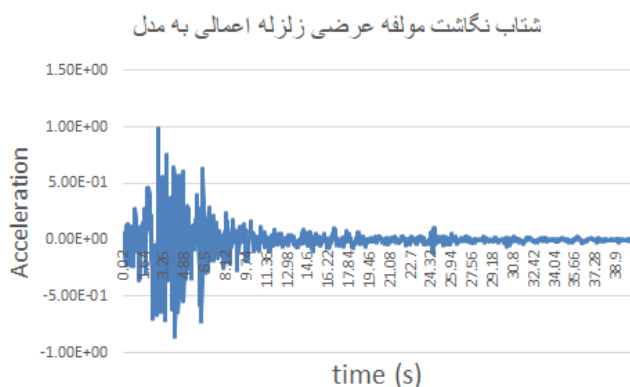
شکل ۱۷: نمودار مقایسه دوره تناوب مدها در حالت با جداساز نسبت به حالت بدون جداساز لرزه ای.

۸- تحلیل دینامیک غیر خطی (تاریخچه زمانی)

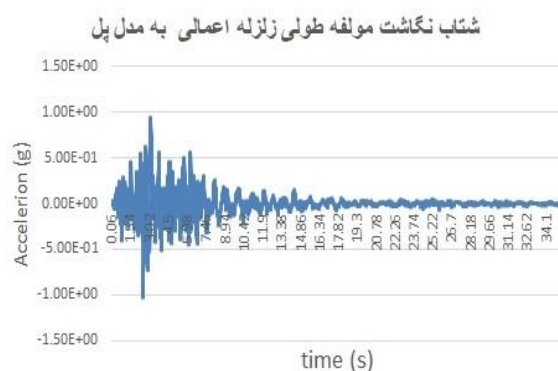
تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی تحت صد جفت رکورد *Krawinkler* [۲۰] در دو جهت متعامد انجام شد و جابجایی نسبی طولی و عرضی ستون‌ها برداشت شده است. در شکل ۱۸ نمودار میله ای مقایسه حداکثر جابجایی نسبی حالات با و بدون جداساز لرزه ای با درج مقادیر میانگین به تفکیک نشان داده شده است. متوسط حداکثر جابجایی نسبی در مدل با جداساز نسبت به حالت بدون جداساز در جهت طولی و عرضی به ترتیب ۶۷ و ۶۴ درصد کاهش یافته است. شکل های ۱۹ و ۲۰، تاریخچه زمانی شتاب مولفه های زلزله اعمال شده را نشان می دهد. به علت تعداد زیاد مولفه ها و پاسخ های مدل پل، تنها پاسخ و تعداد کمی از اجزای پل در ادامه ارائه خواهد شد.



شکل ۱۸: نمودار متوسط حداکثر جابجایی نسبی مدل ها در جهت طولی و عرضی.



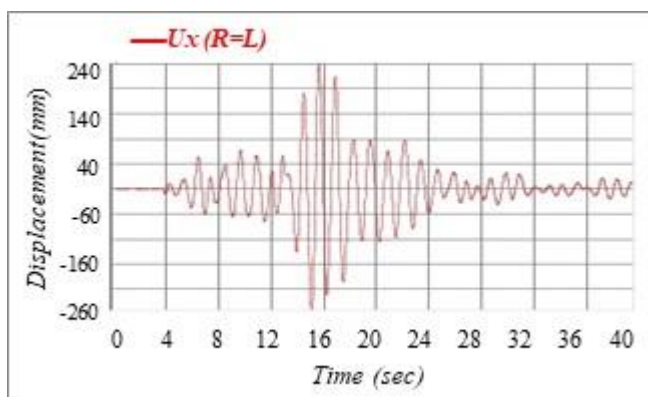
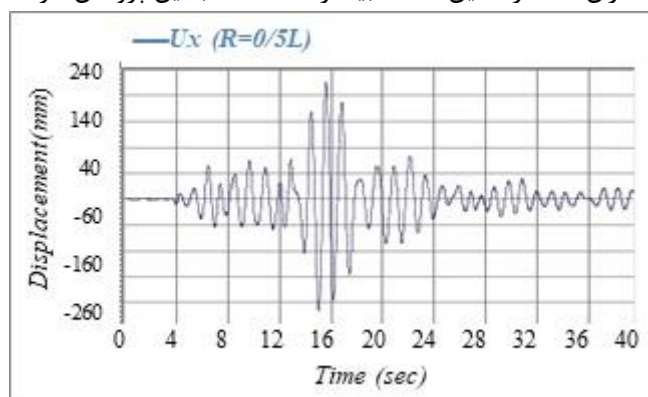
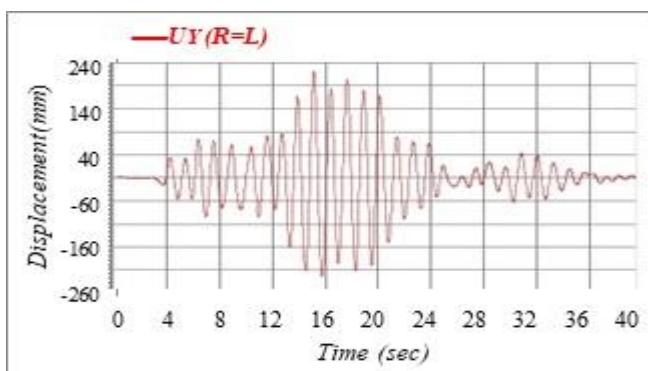
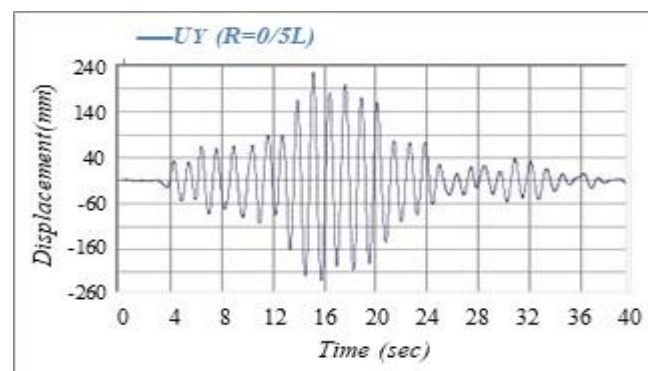
شکل ۲۰: یک نمونه شتاب نگاشت مولفه عرضی زلزله اعمالی



شکل ۱۹: یک نمونه از شتاب نگاشت مولفه طولی زلزله اعمالی

۹- صحت سنجی

به منظور انجام فرآیند صحت سنجی و کنترل نتایج حاصل شده، مقایسه نتایج حاصل شده در این پژوهش با پاسخ های استخراج شده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی این دسته از پل با شعاع ۶۶ متر ($R=0.5L$) تحت ۲۰ رکورد *Krawinkler* انجام شد. نتایج حکایت از آن دارد که در حالت استفاده از جداساز نسبت به حالت بدون جداساز لرزه ای، متوسط حداکثر جابجایی نسبی در جهت طولی و عرضی به ترتیب ۷۰ و ۷۵ درصد کاهش می یابد. با ملاحظه اشکال ۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴ می توان پاسخ تحلیلی در مدل پل ($R=L$) را با مدل پل در حالت ($R=0.5L$) مورد مقایسه قرار داد. جهت تعیین میزان دقت نتایج تحلیل پل های مورد مطالعه، به مقایسه نتایج تحلیل مودال پرداخته می شود. مطابق جدول ۳ و بررسی نتایج سه مود اول ارتعاش پل مورد مطالعه در حالت ($R=0.5L$) با نتایج پژوهش ناصری و همکاران [۶] در همین حالت، بیانگر دقت مناسب این پژوهش دارد.

شکل ۲۲: پاسخ مدل تحلیلی مورد مطالعه ($R=L$) در راستای طولیشکل ۲۱: پاسخ مدل پل در حالت ($R=0.5L$) در راستای طولیشکل ۲۴: پاسخ مدل تحلیلی مورد مطالعه ($R=L$) در راستای عرضیشکل ۲۳: پاسخ مدل پل در حالت ($R=0.5L$) در راستای عرضی

جدول ۳: مقایسه زمان تناوب مدها در حالت پل با شعاع ۶۶ متر ($R=0.5L$).

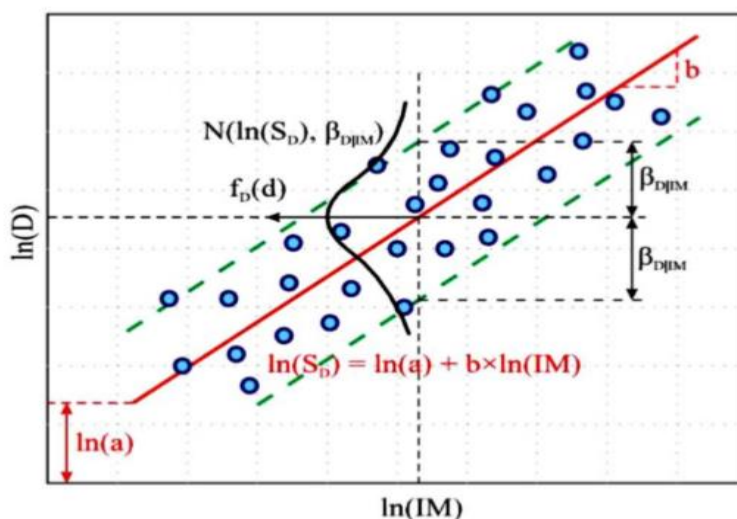
MODE	مدل پل مطالعه	مدل پژوهش ناصری و همکاران (۲۰۲۰) [۶]
1	1.28(sec)	1.4(sec)
2	1.09(sec)	1.1(sec)
3	0.99(sec)	0.98(sec)

۱۰- منحنی شکنندگی^۲

منحنی های شکنندگی لرزه‌ای حالات احتمالاتی شرطی بوده و احتمال تجاوز از یک سطح آسیب معین را مشخص می‌سازند. با اعمال زمین‌لرزه به سازه و انجام تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی در نرم‌افزار *CSi Bridge* و استخراج پاسخ حداکثر مربوط به پارامتر بحرانی (جابجایی نسبی پایه‌ها) در برابر (PGA) به کمک روابط موجود، مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای ساخته می‌شوند. بر اساس مدل پیشنهادی کرنل و همکاران [۲۱] مدل احتمالاتی نیاز لرزه‌ای بصورت رابطه ۱ بوده که نشان دهنده ارتباط خطی بین تقاضا و معیار شدت زلزله در فضای لگاریتمی است، می‌باشد. در این فضا، $\ln(a)$ عرض از مبدا و مقدار b شیب خط IM معیار شدت زلزله، S_D و S_C به ترتیب میانه شکنندگی تقاضا و ظرفیت؛ Φ تابع توزیع تجمعی نرمال و $\beta_{D|IM}$ انحراف معیار استاندارد نیاز لرزه‌ای به ازای شدت معین است که از تحلیل رگرسیون بدست می‌آید. مدل احتمالاتی شرطی تقاضای لرزه‌ای توسط رابطه ۲ بدست می‌آید. شکل ۲۵ به صورت شماتیک نحوه استخراج پارامترهای نیاز لرزه‌ای را نشان می‌دهد [۲۲-۲۴]. ضمناً، مدل نیاز لرزه‌ای پایه‌های پل چهاردهانه این مطالعه در دو حالت با و بدون جداساز مطابق شکل ۲۶ و ۲۷ ارائه شده است.

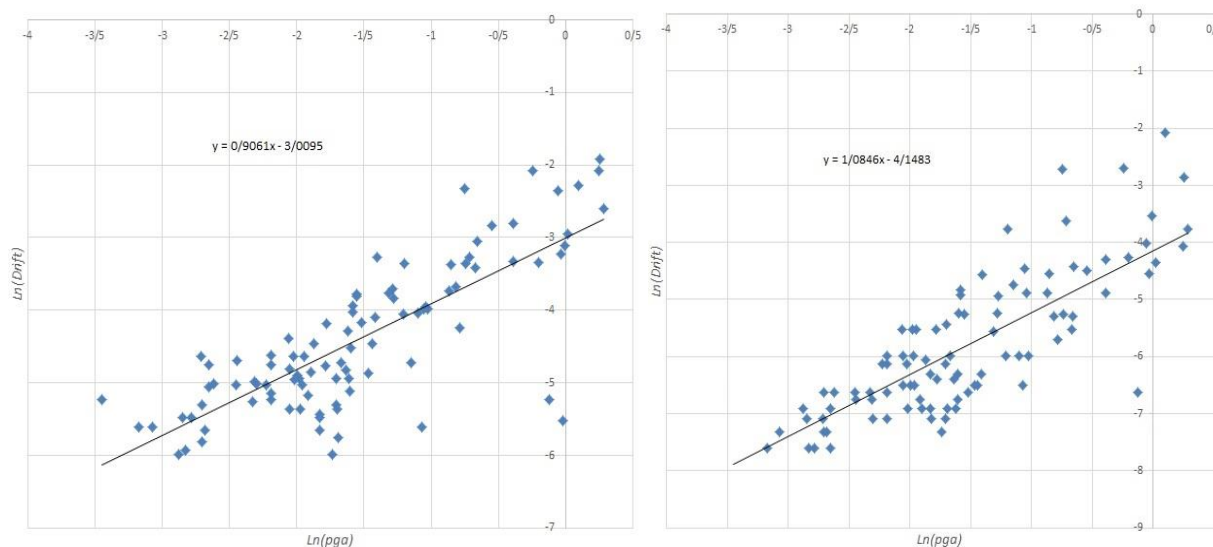
$$\ln(S_D) = \ln(a) + b \ln(IM) \quad (1)$$

$$P[D \geq d|IM] = \Phi\left(\frac{\ln(S_D) - \ln(S_C)}{\beta_{D|IM}}\right) \quad (2)$$



شکل ۲۵: مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای

² Fragility curve



شکل ۲۷: پارامترهای نیاز لرزه ای ستون پل بدون جداساز لرزه ای
($a = 0.9016$ & $b = -3.009$)

شکل ۲۶: پارامترهای نیاز لرزه ای ستون پل با جداساز لرزه ای
($a = 1.0846$ & $b = -4.1483$)

۱-۹ ظرفیت ستون‌ها در حالات حدی مختلف

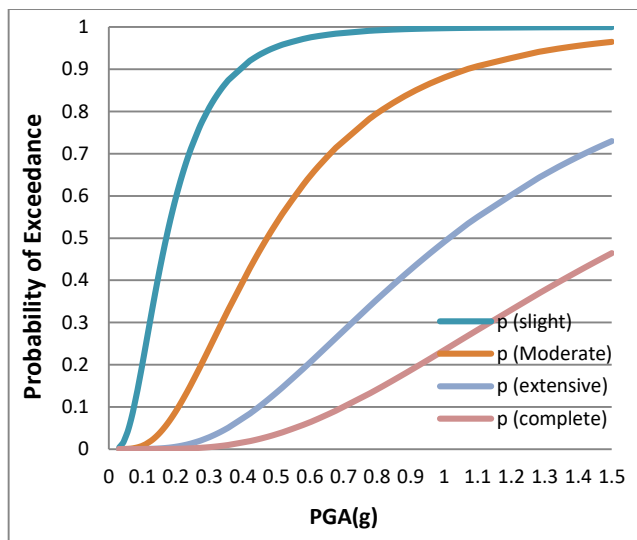
در این تحقیق میزان جابجایی نسبی پایه‌ها به عنوان پارامتر نیاز ستون در نظر گرفته شده است. این مقدار جابجایی نسبی در سطوح خرابی مختلف در جدول ۴ توضیح داده شده است.

جدول ۴: میزان ظرفیت ستون‌ها در سطوح آسیب چهارگانه [۲۵]

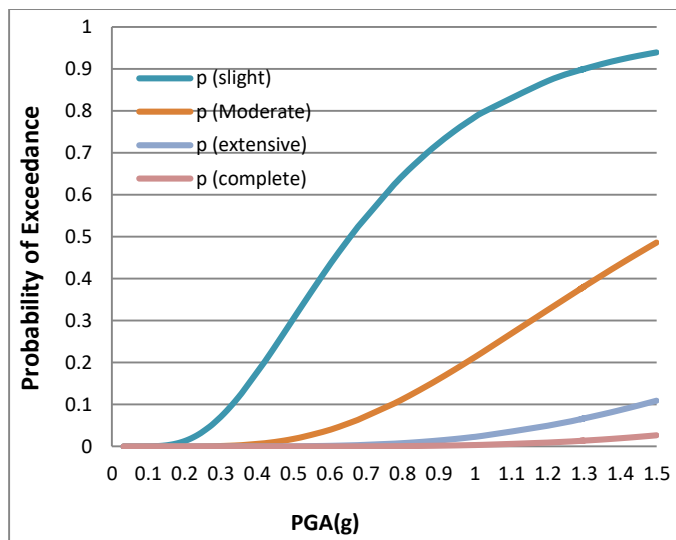
المان	واحد	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
		SC	BC	SC	BC	SC	BC	SC	BC
Column	Drift (%)	0.0141	0.22	0.0275	0.24	0.039	0.18	0.05	0.22

۲-۹ منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل مورد مطالعه

در این قسمت احتمال شکنندگی لرزه‌ای پل در سطوح آسیب چهارگانه (جزئی، متوسط، گسترده و کامل) ترسیم شده‌اند. شکل ۲۸ و ۲۹ منحنی‌های شکنندگی پل در حالت با و بدون جداساز هسته سربی می‌باشند.

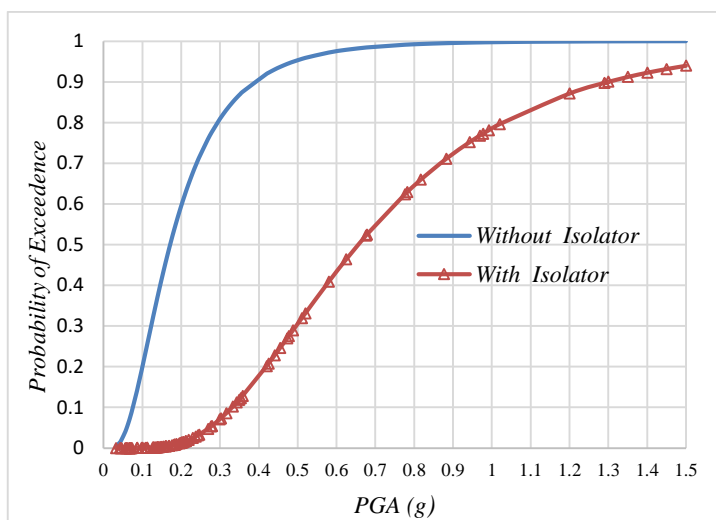


شکل ۲۹: منحنی شکنندگی حالت بدون استفاده از جدا ساز

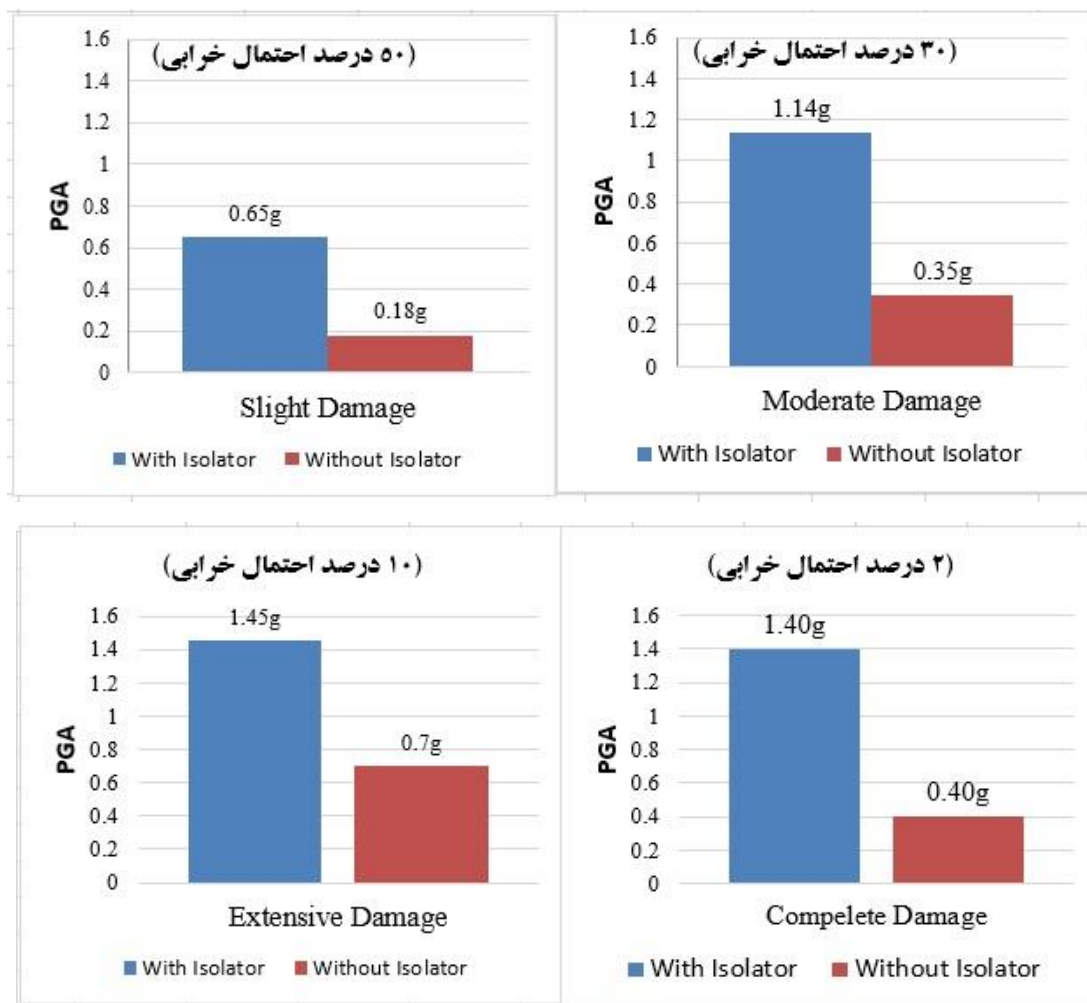


شکل ۲۸: منحنی شکنندگی حالت با استفاده از جدا ساز

محور افقی در نمودار، نشان دهنده حداکثر شتاب زلزله بر مبنای شتاب گرانش زمین و محور قائم احتمال آسیب پذیری اعضای پل را نشان می دهد. شکل ۳۰ نمودار شکنندگی در سطح آسیب جزئی را نشان می دهد. همچنین نمودار میله ای مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطوح آسیب چهارگانه مطابق شکل ۳۱ می باشد.



شکل ۳۰: منحنی شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطح آسیب جزئی



شکل ۳۱: مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطوح آسیب چهارگانه

۱۰- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای پل‌های چند قابی بتن‌آرمه جداسازی‌شده دارای قوس افقی انجام شده است. با ملاحظه به نتایج می‌توان میزان تأثیر استفاده از جداگر لرزه‌ای را در دسته پل این مطالعه مشاهده نمود. نظیر اغلب آیین‌نامه‌های معتبر ارزیابی آسیب‌پذیری دنیا همچون HAZUS، تغییر مکان نسبی ستون‌ها به عنوان معیار شکنندگی پل در نظر گرفته شده است. در این مطالعه نیز با استخراج جابجایی‌های نسبی ستون‌ها تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در دو حالت پل با و بدون جداگر لرزه‌ای، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حکایت از آن دارد که جابجایی نسبی طولی و عرضی در حالت پل جداسازی‌شده به ترتیب کاهش ۶۷ و ۶۴ درصدی داشته‌اند. با انجام تحلیل مودال، نتایج نشان می‌دهد که میانگین سه مود اول ارتعاش سازه در حالت با جداساز نسبت به حالت بدون جداساز، افزایش بیش از دو برابری داشته است. با تولید منحنی شکنندگی و مقایسه در سطح آسیب جزئی توسط معیار میانه شکنندگی، نتایج حکایت از آن دارد که پل در حالت با جداساز هسته سربی، میانه شکنندگی معادل زلزله‌ای با شتاب $0.65g$ و در حالت بدون جداساز، معادل زلزله‌ای با شتاب $0.18g$ برآورد می‌گردد. در سطح متوسط در خرابی ۳۰ درصد احتمال آسیب، حالت با جداساز، معادل زلزله‌ای با شتاب $1.14g$ و حالت بدون جداساز، معادل زلزله با شتاب $0.35g$ می‌باشد. در سطح گسترده در خرابی ۱۰ درصد احتمال آسیب، حالت با جداساز، معادل زلزله‌ای با شتاب $1.45g$ و حالت بدون جداساز، معادل زلزله با شتاب $0.70g$ می‌باشد. در سطح آسیب کامل در خرابی ۲ درصد احتمال آسیب، حالت با جداساز، معادل زلزله‌ای با شتاب $1.40g$ و حالت بدون جداساز، معادل زلزله با شتاب $0.40g$ می‌باشد.

با بررسی ارزیابی انجام شده به کمک منحنی‌های شکنندگی، استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای موجب بهبود عملکرد و کاهش احتمال آسیب‌پذیری پل‌ها می‌گردد.

مراجع

- [1] FEMA-273 (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. FEMA-273, Building Seismic Safety Council Seismic Rehabilitation Project, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC
- [2] Khaloo, A.R., Kafimosavi. M. (2007). Enhancement of flexural design of horizontally curved prestressed bridges, Journal of bridge engineering, 12(5) 585-590.
- [3] Tondini .N, Stojadinovic .B. (2012). Probabilistic seismic demand model for curved reinforced concrete bridges, Bulletin of Earthquake Engineering, 10(5) (2012) 1455-1479.
- [4] Pahlavan, H., Zakeri,B, G. Amiri, G and Shaianfar ,M. (2015). Probabilistic vulnerability assessment of horizontally curved multiframe RC box-girder highway bridges, Journal of Performance of Constructed Facilities, 30(3) 04015038.
- [5] Shaianfar, M., Abbasloo,A., Pahlavan ,H and Barkhordari,M.(2020). Probabilistic Seismic Vulnerability assessment Transport network infrastructure With emphasis on Curved and straight RC Box-Girder bridges Under multiple earthquakes.
- [6] Naseri, A., Roshan, A. M., Pahlavan, H., & Amiri, G. G. (2020). Effects of curvature radius on vulnerability of curved bridges subjected to near and far-field strong ground motions. *Structural Monitoring and Maintenance*, 7(4), 367.
- [7] Pahlavan, H., Naseri, A., Rafiei, S., & Bagheri, H. (2018). Seismic Vulnerability Assessment of Horizontally Curved Multi frame RC Box-Girder Bridges Considering the Effect of Column Heights and Span Numbers. Doi: [10.22060/CEEJ.2017.12135.5130](https://doi.org/10.22060/CEEJ.2017.12135.5130).
- [8] Caltrans (2010-2012). Personal communication with the P266 Fragility Project Advisory Panel members including Roblee, C., Yashinsky, M., Mahan, M., Shantz, T., Setberg, H., Turner, L., Sahs, S., Adams, D. T., Keever, M. (2011), California Department of Tra..
- [9] Mander, J.B., Priestley, M.J., Park .R..(1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of structural engineering, 114(8) 1804-1826.
- [10] Aviram, A., Mackie, K. and Stojadinovic, B. (2008). "Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California," Technical Report 2008/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [11] Megally, S. H., Silva, P. F., Seible, F. (2002). Seismic Response of Sacrificial Shear Keys in Bridge Abutments, Structural Systems Research Project SSRP-2001/24, University of California, San Diego, La Jolla, CA.
- [12] Ramanathan, N.K. (2012), "Next generation seismic fragility curves for California bridges incorporating the evolution in seismic design philosophy," Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- [13] Shinozuka, M. Feng, M. Dong, Q. X. Uzawa, T and Ueda,T.(2000). Damage assessment of a highway network under scenario earthquakes for emergency response decision support, in: Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, International Society for Optics and Photonics, pp. 264-276.
- [14] Choi, E. (2002). Seismic analysis and retrofit of mid-America bridges (Doctoral dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology).
- [15] Zhang, J., Makris, N. (2002), Seismic response analysis of highway overcrossings including soil–structure interaction, Earthquake engineering & structural dynamics, 31(11) 1967-1991.
- [16] No. 523, (2010). Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings.Tehran: Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, pp.18-39.
- [17] Highway, A.A.o.S., et al,. (2010). Guide Specifications for Seismic Isolation Design. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [18] Buckle, I.G., et al.(2006).Seismic isolation of highway bridges.
- [19] Aashto. Lrfd, (2012). Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO: Washington, DC, USA.
- [20] Mackie, K. R., & Stojadinović, B. (2005). Fragility basis for California highway overpass bridge seismic decision making. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- [21] Cornell, A. C., Jayaler, F., Hamburger, R. O., Foutch, A. D. (2002). Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines, Journal of Structural Engineering, 128(4), pp. 526-533.
- [22] Naseri, A., Roshan, A. M., Pahlavan, H., & Amiri, G. G. (2020). Probabilistic seismic assessment of RC box-girder bridges retrofitted with FRP and steel jacketing. *Coupled systems mechanics*, 9(4), 359-379.

- [23] Pahlavan, H., Mirza Goltabar Roshan, A., & Naseri, A. (2019). Analytical Fragility Curves for bridges subjected to near-fault and far-field ground motion (case study: Bell Emerson Bridge). *Journal of Structural and Construction Engineering*. Doi:[10.22065/jsce.2019.161316.1739](https://doi.org/10.22065/jsce.2019.161316.1739).
- [24] Roshan, A. M. G., Naseri, A., & Pati, Y. M. (2018). Probabilistic evaluation of seismic vulnerability of multi-span bridges in north of Iran. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(1), 36-54. Doi:[10.22065/jsce.2017.68948.1009](https://doi.org/10.22065/jsce.2017.68948.1009).
- [25] Jeon, J. S., Shafieezadeh, A., & DesRoches, R. (2015). "System fragility curves for a long multi-frame bridge under differential support motions." 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Vancouver.