

Investigation of seismic performance for arch bridges with overpass box deck with and without LRB seismic isolator

Mohsen Mohammadi¹, Hosseinali Rahdar^{2*}, Hossein Pahlavan³, Mahmood Hosseini Tabatabaei⁴

1- Msc, Department of Civil Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

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

3- Assistant Professor, Department of earthquake Engineering, Shahrood University of Technology

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

ABSTRACT

Bridges, as one of the most important infrastructures, play a vital role in transportation system of every country. Most of the bridges in the world are generally designed and built according to the old criteria and regulations, obviously, these bridges do not meet the seismic requirements of the new regulations. These bridges should be subjected to seismic improvement studies and strengthen with appropriate method if needed. One of the practical methods for assessing the performance of a structure under different levels of seismic hazard is the fragility models, which are presented as fragility curves. Fragility curves are a major component in structural damage analysis studies in earthquakes and establish the relationship between two components of earthquake risk and structural features. The fragility curve expresses the conditional probability of reaching or exceeding a limit state as a function of ground motion parameters and the probabilistic method is also used to consider the different states and uncertainties that affect structures and earthquakes. Boxed cross-section arch bridges have good mechanism for bearing vertical loads due to stability and proper distribution of gravity loads. LRB seismic isolation systems are used to improve the seismic performance of the bridge. This study investigates the seismic behavior of the Nanin Bridge Arc Case in Switzerland, which has a cross-section overpass deck with an elastomeric isolator system with a lead core (LRB) Then, by evaluating the structural response states and the capacity of the members, the predictions are made to determine the impact levels of different earthquake impact bridges. In order to dynamically analyze the bridge time history, a set of more than 100 pairs of real mapping accelerations was performed, which required detailed analysis of the bridge components, which was accomplished by developing three-dimensional models using CSI Bridge and SAP software and the results of the response of the elements were extracted. Examination of the results of the seismic response of this structure as well as the probability functions of the frailty curve in different situations showed that the use of this system resulted in a significant reduction in the amount of earthquake damage at all levels of failure in foundation. With the use of Rubber lead seismic isolator, displacement of the structural base, the likelihood of base failure and base shear has been greatly reduced and due to the use of maximum member capacity and reduced member dimensions as well as a significant reduction in the amount of financial damage the system has also benefited.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 December 2021

Revise Date: 06 June 2022

Accept Date: 14 July 2022

Keywords:

Arc Bridges,
Seismic Isolation,
Box Deck,
Seismic Performance,
Lead Rubber Isolator

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.320894.2673>

*Corresponding author: HosseinAli Rahdar.

Email address: Rahdar@uoz.ac.ir

بررسی عملکرد لرزه ای پلهای قوسی با عرشه جعبه‌ای بالاگذر، با استفاده و بدون استفاده از جداگر لرزه‌ای لاستیکی - سربی (LRB)

محسن محمدی^۱، حسینعلی رهدار^{۲*}، حسین پهلوان^۳، محمودرضا حسینی طباطبایی^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران سازه، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- استادیار، گروه سازه و زلزله، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

پل‌ها به عنوان عنصری مهم در شریان‌های حیاتی از اهمیت خاصی در مواقع بحران، بخصوص وقوع زلزله برخوردار هستند. رفتار پیچیده و متفاوت پل‌ها در هنگام وقوع زلزله ضرورت بررسی رفتار آنها را دوچندان می‌کند. نظر به اینکه اخیراً آئین نامه‌های طراحی، روش‌های عملکردی را جایگزین روش‌های قدیمی تجویزی کرده‌اند، بررسی عملکرد و پیش‌بینی آسیب برای پل‌های موجود و در حین ساخت از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد که در این پژوهش به بررسی رفتار لرزه‌ای یک پل بتنی قوسی با عرشه جعبه‌ای بالاگذر واقع در کشور سوئیس پرداخته شده است. بدین منظور برای بررسی تاثیر استفاده از جداگرهای لاستیکی با هسته سربی بر رفتار لرزه‌ای این پل ابتدا با استفاده از تحلیل مدل‌های کامپیوتری و با نرم افزار *Csi Bridge* تاثیر استفاده از *LRB* بر پاسخ سازه و سطوح عملکرد پل تحت تاثیر زلزله بررسی گردید. از بررسی نتایج پاسخ لرزه‌ای و توابع احتمالاتی، منحنی‌های شکنندگی در حالات آسیب مختلف ترسیم گردید. سپس میزان آسیب پذیری لرزه‌ای این پل با مقادیر متناظر با آیین‌نامه برآورد لرزه‌ای پل‌های آمریکا (*HAZUS*) مقایسه گردید. نتایج نشان داد مقاومت سازی با استفاده از جداسازی لرزه‌ای را می‌توان به عنوان گزینه‌ای مطلوب در جهت بهبود چشمگیر رفتار لرزه‌ای که به دنبال آن کاهش خسارت را به همراه خواهد داشت، برای این کلاس از پل معرفی کرد. برای مدل پل قوسی، برای سطح آسیب جزئی *DC1* ملاحظه می‌شود با توجه به قرارگیری سازه در وضعیت الاستیک و رفتار خطی، میزان کاهش احتمال خرابی سازه با استفاده از جداسازی لرزه‌ای حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد، همچنین در سطح آسیب بالا با استفاده از جداسازی لرزه‌ای میزان احتمال خرابی تا ۵۰٪ (نصف) تقلیل یافته است.

کلمات کلیدی: پل‌های قوسی، جداگر لرزه‌ای، عرشه جعبه‌ای، عملکرد لرزه‌ای، جداسازی لاستیکی - سربی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.320894.2673	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.320894.2673	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۲۳	۱۴۰۱/۰۴/۲۳	۱۴۰۱/۰۳/۱۶	۱۴۰۰/۱۰/۰۳
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حسینعلی رهدار		
				rahdar@uoz.ac.ir		

۱- مقدمه

نظر به اینکه تاکنون در دنیا مطالعات جامعی بر روی میزان آسیب‌پذیری پل‌های عرشه جعبه‌ای بتنی قوسی مقاوم سازی شده انجام نشده است، بررسی احتمالاتی این کلاس از پل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. محققان زیادی مطالعات جامعی بر روی آسیب‌پذیری و مقاوم سازی پل‌های بتنی ساده چند دهانه پیوسته و چند دهانه ساده در ایالات مرکزی و غربی آمریکا انجام دادند لیکن مطالعات این افراد بر روی پل با ساختار قوسی (قوس قائم) نبوده است [۱-۴]. نیلسون و دسروچ [۵] در سال ۲۰۰۷ منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای را برای پل‌های موجود در آمریکا تهیه کردند. تا قبل از آن زمان روش‌های تحلیلی موجود برای تهیه منحنی‌های شکنندگی پل‌ها سهم مشارکت مؤلفه‌های مختلف پل را در روند تحلیل در نظر نمی‌گرفتند و اکثراً تک مؤلفه‌هایی مانند شکست ستون‌های یک پل را مبنا و معیار شکست پل قرار داده بودند. در تحقیقات نیلسون و دسروچ مؤلفه‌های مختلف سازه‌ای پل مانند ستون‌ها، تکیه‌گاه‌ها و کوله‌ها، تواما در تهیه منحنی شکنندگی کلی سیستم پل لحاظ گردیدند. در واقع، نتیجه تحقیقات توسعه یک روش برای تهیه منحنی‌های شکنندگی سیستم پل با در نظر گرفتن اثر مؤلفه‌های مختلف و نه یک مؤلفه بوده است. نمونه پل‌های استفاده شده در تحقیق مذکور پل‌های مستقیم با جزئیات متعارف در مناطق مرکزی و جنوب شرق آمریکا بودند. نتیجه مطالعات آنها کشف این حقیقت بود که با در نظر گرفتن یک پل بعنوان یک سازه واحد، آن پل بسیار شکننده‌تر از شکنندگی تک تک مؤلفه‌هایش است [۶].

تاواریس و همکاران در سال ۲۰۱۳ منحنی‌های شکنندگی پل‌های موجود در شرق کانادا، ایالت کبک را بدست آوردند. در این ایالت، ۲۶۷۲ پل چند دهانه وجود داشت که عمدتاً دارای جزئیات مناسبی نبودند. مطالعات ایشان نشان داد که مؤلفه‌هایی که شکنندگی یک پل تعیین می‌کنند به نوع پل و حالات حدی مورد بررسی وابسته است مثلاً پل‌های با عرشه بتن آرمه از پل‌های با عرشه تیر فولادی به مراتب آسیب پذیرتر بودند [۷].

طبق تعریف آیین‌نامه‌ها پل‌های نامنظم پل‌هایی هستند که به یکی از دلایل اختلاف ارتفاع پایه‌ها، زاویه‌دار بودن عرشه با کوله و یا قوسی بودن عرشه، تحت تحریکات ناشی از زلزله رفتار پیچیده دینامیکی دارند. شعرافیان و کرم‌الدین در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی احتمالاتی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های عرشه جعبه‌ای بتن‌آرمه مربوط به دوران میانی طراحی در کالیفرنیا (۱۹۷۱ تا ۱۹۹۰) که دارای نامنظمی اختلاف ارتفاع پایه‌ها و درز میانی بودند پرداختند [۸]. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد اصلی‌ترین آسیب مربوط به این پل‌ها در زلزله‌های شدید، شکست ستون پل بدلیل عدم محصور شدگی مناسب هسته ستون در نواحی مفصل پلاستیک و همچنین افتادگی عرشه از روی نشیمن کوله بدلیل عدم کفایت عرض نشیمن کوله است. آسیبی که در زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا و ۱۹۹۴ نورتریج به وفور در پل‌های کالیفرنیا مشاهده شد. از آن جایی که میزان و نوع آسیب‌پذیری این دسته از پل‌ها منحصر به فرد است ارزیابی آثار روش‌های مقاوم سازی مختلف که ممکن است نسبت به اثرات روش‌های متداول مقاوم سازی در پل‌های معمولی و منظم متفاوت باشد، ضروری می‌باشد [۹، ۱۰].

رضایی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثر زاویه نیروی زلزله روی پل‌های بزرگراهی با ستون‌های دارای ارتفاع متغییر که از یک مدل منظم تا نامنظم به منظور اعمال موثرترین عدم قطعیت‌ها که مربوط به مشخصات زلزله و هندسی پل در فرآیند مدلسازی می‌باشد پرداختند. با مدلسازی سه بعدی چندین پل در نرم افزار OpenSees و با انجام تحلیل تاریخچه زمانی روی آن‌ها و اعمال زوایای متفاوت رکوردها مورد استفاده قرار گرفت تا پاسخ و زاویای بحرانی پل بررسی شود و بحرانی‌ترین پارامترهای نیاز منحنی شکنندگی و مؤلفه‌های پل بدست آمده و پس از مقایسه، در نهایت یک ضریب تبدیل انحنا داده شده که پاسخ پل را برای زوایای شتاب نگاشت مختلف به بحرانی تبدیل کند [۱۱].

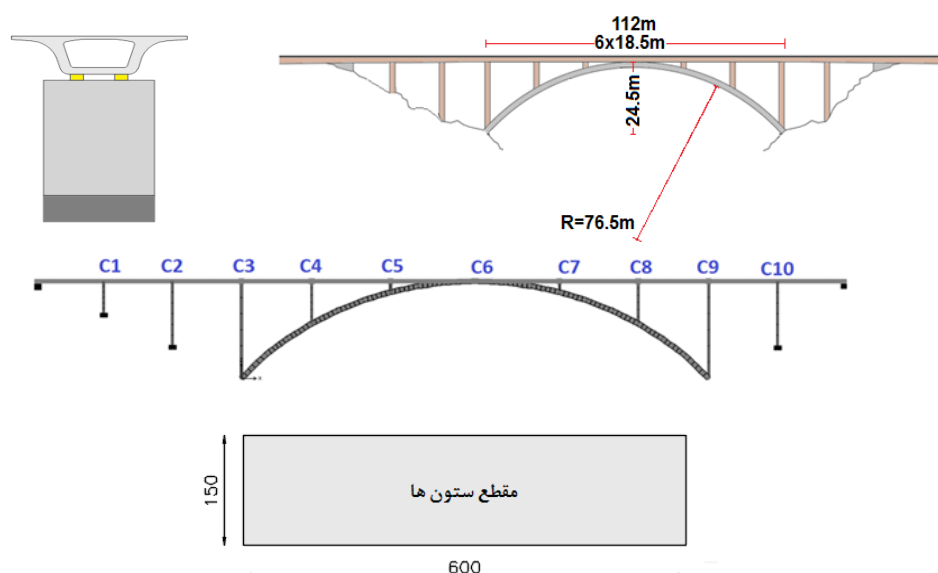
پورامینیان و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی ایمنی احتمالاتی پل قوسی تاریخی بیستون پرداخته‌اند. ارزیابی توابع ضمنی از بار و مقاومت با روش اجزا محدود انجام شد و با رویکرد مونت کارلو برای شبیه سازی و با روش نمونه برداری کیوبلاتین مورد استفاده قرار گرفت که چهار متغییر تصادفی شامل مدول الاستیسیته و وزن مخصوص آجر و ملات انجام گرفت. توزیع نرمال برای مشخصات آماری این متغییر تصادفی استفاده شده است و رفتار خطر بر روی مصالح پل فرض شده سه پارامتر خروجی از بیشترین جابجایی پل، بیشترین تنش کششی و کمترین تنش فشاری به عنوان حالات حدی پل در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد حساسیت پارامترهای خروجی به تغییرات

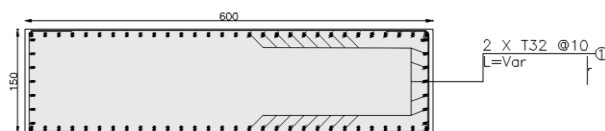
وزن مخصوص و ملات بستگی دارد. در این پژوهش مقدار شاخص ایمنی پل ($\beta=2/96$) بدست آمد که از شاخص ایمنی هدف کمتر است و پل در معرض ریسک خرابی قرار گرفت. [۱۲]

لذا در این پژوهش ابتدا به تحلیل و بررسی عملکرد لرزه‌ای یک پل قوسی بتن‌آرمه از نوع عرشه جعبه‌ای بالاگذر با اتصال صلب (بدون استفاده از جداگر) نسبت به حالت طراحی پل با استفاده از جداساز لرزه‌ای LRB پرداخته است که با تعیین سطوح عملکردی و مقادیر آسیب پذیری با استفاده از منحنی‌های شکنندگی، رفتار پل تحت تاثیر رکورد های زلزله در دو حالت مجهز به جداسازی و بدون جداسازی لرزه‌ای مطابق با معیار های آئین نامه لرزه‌ای پل‌های آمریکا (HAZUS) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

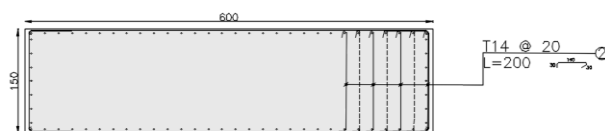
۲- معرفی پل مورد مطالعه

پل‌های بتن‌آرمه با عرشه جعبه‌ای بسیار رایج هستند. در این پل‌ها، عرشه از یک سطح مقطع جعبه‌ای با تعدادی سلول با فواصل مشخص تشکیل شده است. ستون‌ها و عرشه به صورت پیوسته اجرا شده و در نتیجه پل دارای عملکرد قابی است. براساس مطالعات آماری رامناتان پل‌های چند دهانه پیوسته با عرشه جعبه‌ای بتنی حدود ۲۱٪ از پل‌های ایالت کالیفرنیا را تشکیل داده و دارای بیشترین فراوانی هستند [۱۳]. پل بتنی ناین واقع در کشور سوئیس طبق ضوابط آئین نامه آشتو ۲۰۱۲ باز طراحی شده است. دهانه از دو بخش منظم (زیر قوس) که شامل شش دهانه می‌باشد و پنج دهانه در قسمت ابتدا و انتهایی دره تشکیل شده است. این پل از نوع قوسی با جان باز و عرشه آن از نوع جعبه‌ای تک سلولی، ساخته شده از بتن مسلح با طول دهانه ۱۱۲ متر و عرض ۹/۵ متر است که شامل دو خط تردد اتومبیل ۳/۶۵ متری و دو مسیر عابر پیاده ۱/۵ متری می‌باشد. ارتفاع این پل از کف فونداسیون تا سطح عرشه ۲۴/۵ متر است. نسبت خیز به دهانه قوس ۰/۲۱ می‌باشد، پایداری عرشه این پل با مجموع هفت عدد ستون که به فواصل حدود ۱۸/۵ متر بر روی قوس سوار شده و سه عدد با ارتفاع‌های متغیر و با سطح مقطع ثابت ۶×۱/۵ متر طرفین تامین شده است. اتصال پایه و عرشه این پل از نوع الاستومر مسلح بوده که در بالای هر ستون به تعداد یک جفت از این جداگرهای سربی لاستیکی مورد استفاده قرار گرفته است. جداگر سربی لاستیکی این پل از نوع مسلح دایروی از تولیدات شرکت گومبا به قطر ۹۰۰ میلیمتر و دارای ۶ لایه الاستومر به همراه ورقهای فولادی در نظر گرفته شده است [۱۴]. شکل ۱ نما و برش جانبی پل مورد مطالعه و جدول ۱ مشخصات هندسی و ابعاد اعضای آن را نشان می‌دهد [۱۴].

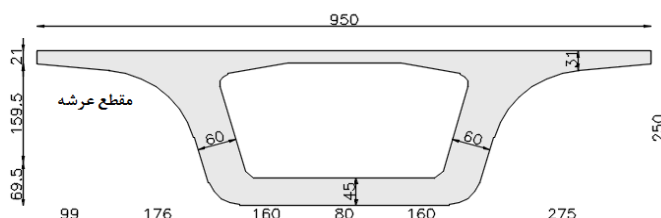




آرایش آرماتورهای طولی در ستون C6



آرایش آرماتورهای برشی در ستون C6



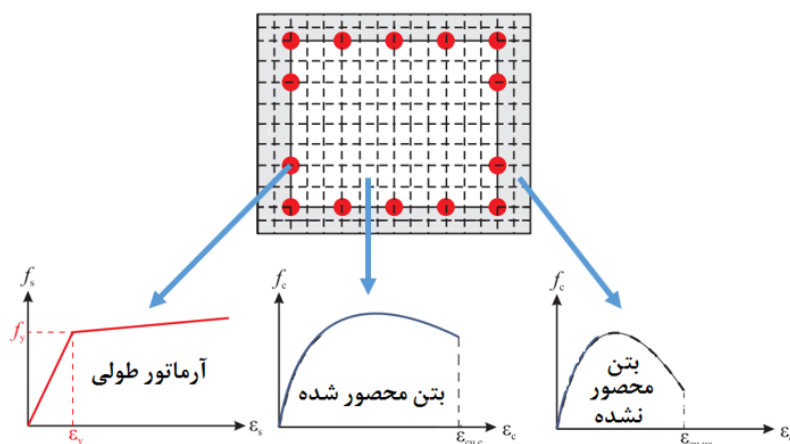
شکل ۱: نما، مقاطع ستون ها، عرشه و برش جانبی از پل ناین ۱۹۶۷ [۱۴].

جدول ۱: مشخصات هندسی و ابعاد اعضا پل ناین

عنوان ستون‌ها	طول دهانه (متر)	ارتفاع ستون (متر)	طول مقطع ستون (سانتی متر)	عرض مقطع ستون (سانتی متر)	نسبت سطح مقطع آرماتور طولی به سطح مقطع بتن	سطح مقطع موثر بتن (سانتیمتر مربع)
C1	۱۸/۵	۷	۶۰۰	۱۵۰	۲/۶۷	۸۲۶۰۰
C2	۱۸/۵	۲۱	۶۰۰	۱۵۰	۲/۷	۸۲۶۰۰
C3	۱۸/۵	۲۴	۶۰۰	۱۵۰	۲/۷۴	۸۲۶۰۰
C4	۱۸/۵	۹/۵	۶۰۰	۱۵۰	۲/۵۶	۸۲۶۰۰
C5	۱۸/۵	۲/۲۵	۶۰۰	۱۵۰	۲/۴۲	۸۲۶۰۰
C6	۱۸/۵	۰/۴	۶۰۰	۱۵۰	۲/۲۵	۸۲۶۰۰
C7	۱۸/۵	۲/۲۵	۶۰۰	۱۵۰	۲/۴۰	۸۲۶۰۰
C8	۱۸/۵	۹/۵	۶۰۰	۱۵۰	۲/۵۵	۸۲۶۰۰
C9	۱۸/۵	۲۴	۶۰۰	۱۵۰	۲/۷۳	۸۲۶۰۰
C10	۱۸/۵	۲۱	۶۰۰	۱۵۰	۲/۷۰	۸۲۶۰۰

۳- خصوصیات مدلسازی تحلیلی

با توجه به این که عموماً اینگونه پل‌ها در مناطق زلزله خیز می‌باشند بنابراین تحلیل لرزه‌ای این پل از اهمیت خاصی برخوردار است. ارتعاشات لرزه‌ای در حین وقوع زمین لرزه به سازه‌ی پل و تجهیزات می‌تواند آسیب شدیدی برساند. با در نظر گرفتن شکل هندسی و مشخصات پل، مدلسازی این پل به وسیله نرم‌افزار CSI BRIDGE و مطابق با آیین نامه آشتو ۲۰۱۲ انجام گردید [۷، ۱۵]. نرم‌افزار CSI BRIDGE یک نرم‌افزار قدرتمند جهت طراحی و تحلیل غیرخطی انواع پل‌ها بوده که می‌توان انواع مدل‌های رفتاری غیرخطی را در آن مدلسازی نمود. عرشه پل‌ها معمولاً در جریان زلزله به صورت الاستیک باقی می‌ماند [۶]. اصلی‌ترین آسیب عرشه در زلزله‌های گذشته افتادگی عرشه از روی کوله‌های نشیمن‌دار و خرد شدگی موضعی بتن عرشه در اثر ضربه‌های عرشه در محل درزها بوده است. در نتیجه در این پژوهش عرشه پل‌ها به صورت المان‌های الاستیک مدلسازی می‌شوند که مشخصات هندسی مقطع شامل سطح مقطع و ممان اینرسی در مدلسازی لحاظ می‌گردد. همچنین در این پل در حالت اتصال گیردار ستون‌ها و عرشه، المان صلب برای اتصال بالای ستون به المان عرشه استفاده شده است. ستون‌ها با استفاده از المان‌های تیر ستونی غیرخطی با رفتار خمیری گسترده مدلسازی می‌شوند که امکان ایجاد رفتار غیرخطی را در هر قسمت از ستون می‌دهد. مقطع ستون‌ها به روش فایبر مدلسازی شده است. مدل فایبر دارای مزیت منحصر به فردی است که قادر است مشخصات متفاوتی از مصالح را در موقعیت‌های متفاوتی از سطح مقطع، مدلسازی نماید. به عنوان مثال، رفتار بتن محصور نشده برای پوشش خارجی مقطع، رفتار بتن محصور شده برای هسته داخلی مقطع و رفتار فولاد برای آرماتورهای طولی هر یک در مختصات دقیق خود، همگی در مدل فایبر قابل تخصیص هستند. رفتار بتن ستون‌ها با استفاده از مدل چانگ و مندر (۱۹۹۴) به منظور تعریف منحنی‌های تنش-کرنش برای بتن محصور شده و محصور نشده تعریف شده است. شبیه‌سازی رفتار فولاد بر مبنای مدل فولادی تک محوره چانگ و مندر است [۶]. شکل ۲ نحوه مدلسازی مقطع ستون به روش فایبر را نشان داده و در جدول ۲ مشخصات مصالح فولاد و بتن مصرفی در پل ناین ارائه شده است. با توجه به واقع شدن پل مورد مطالعه بر روی دره سنگی، اتصال پای ستون‌ها به صورت گیردار فرض شده و از اثرات اندرکنشی خاک و سازه صرف نظر شده است.



شکل ۲: مدلسازی مقطع ستون بتن آرمه به روش فایبر [۶].

جدول ۲: مشخصات مصالح مصرفی در پل نائین

مشخصات	میلگرد	بتن
تنش تسلیم (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۴۰۰	---
تنش گسیختگی (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۶۰۰	---
مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	---	۲۵۰
مدول کشسانی (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۲۱۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰
وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	۷۸۰۰	۲۴۰۰

در توسعه منحنی‌های شکنندگی پل‌ها در یک محدوده جغرافیایی گسترده، جمع‌آوری یک مجموعه زمین‌لرزه مناسب به طوریکه بیانگر خطر لرزه‌ای در کل منطقه مورد بررسی باشد امری بسیار مهم است. هدف اصلی، تهیه مجموعه تاریخچه زمانی زمین‌لرزه‌هایی است که بازه وسیعی از شدت‌های مختلف مورد انتظار را در محدوده جغرافیایی مورد نظر براساس تحلیل خطر زلزله، در برگیرند. این مجموعه می‌بایست در برگیرنده عدم قطعیت در پارامترهای خطر زلزله همچون نوع خاک، بزرگا و فاصله رومرکزی باشد. یک مجموعه از ۱۰۰ زلزله توسط بیکر و همکاران برای برنامه تحقیقاتی حمل و نقل غرب آمریکا در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله PEER تهیه شده است [۶]. این زمین‌لرزه‌ها مربوط به زلزله‌های کم عمق با دامنه بزرگای ۴/۳ تا ۷/۹ ریشتر بوده و مشخصات این مجموعه به شرح زیر است:

- دسته ۱- شامل زمین‌لرزه‌های مربوط به ساختگاه خاکی:

دسته ۱a: این زیرمجموعه شامل ۳۰ عدد زمین‌لرزه مقیاس نشده است به گونه‌ای که طیف پاسخ آنها با میانگین و انحراف استاندارد لگاریتمی پیش‌بینی شده برای یک زلزله ۷ ریشتری در فاصله ۱۰ کیلومتری سازگار باشد.

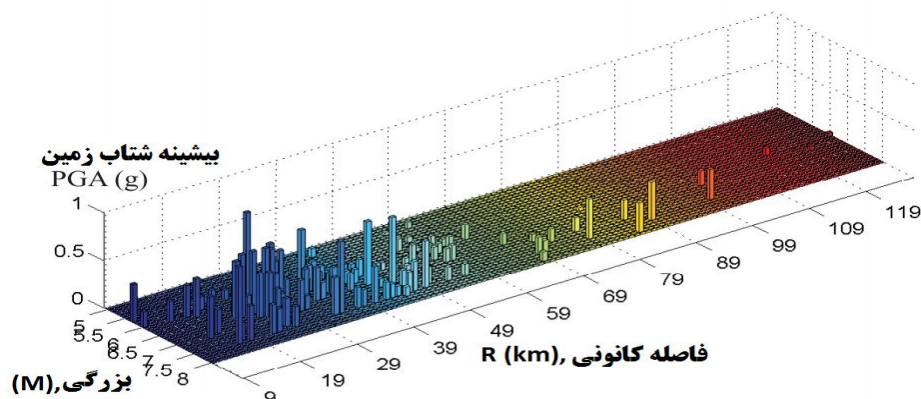
دسته ۱b: این زیرمجموعه شامل ۳۰ عدد زمین‌لرزه مقیاس نشده است به گونه‌ای که طیف پاسخ آنها با میانگین و انحراف استاندارد لگاریتمی پیش‌بینی شده برای یک زلزله ۶ ریشتری در فاصله ۲۵ کیلومتری سازگار باشد.

- دسته ۲- شامل زمین‌لرزه‌های مربوط به ساختگاه سنگی: این زیرمجموعه شامل ۲۰ عدد زمین‌لرزه مقیاس نشده است به گونه‌ای که طیف پاسخ آنها با میانگین و انحراف استاندارد لگاریتمی پیش‌بینی شده برای یک زلزله ۷ ریشتری در فاصله ۱۰ کیلومتری سازگار باشد.

- دسته ۳- شامل زمین‌لرزه‌های دارای پالس: این زیرمجموعه شامل ۲۰ عدد زمین‌لرزه مقیاس نشده است که دارای پالس سرعت قوی هستند. این زیرمجموعه برای لحاظ کردن شرایط ساختگاه نزدیک گسل مورد استفاده قرار گرفته است.

تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از این مجموعه صدتایی از زمین‌لرزه‌ها صورت پذیرفت و مبنای تهیه منحنی‌های شکنندگی پل‌ها قرار گرفته است. با توجه به اینکه این مجموعه رکورد ها طیف وسیعی از معیار شدت (PGA) را در برمی‌گیرد لذا رکوردها به صورت مقیاس نشده در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گردد. تمامی زمین‌لرزه‌ها در این مجموعه از بخش مربوط به پروژه تحقیقاتی سیستم‌های حمل و نقل غرب آمریکا در وبگاه مرکز تحقیقات مهندسی زلزله PEER قابل دستیابی است [۱۶]. در شکل ۳ بزرگا، فاصله تا مرکز سطحی و حداکثر شتاب صد زلزله مورد استفاده در تحلیل دینامیکی مشاهده می‌گردند. میرایی سازه با استفاده از روش میرایی کلاسیک رابلی در نظر گرفته شده است. در این روش ماتریس میرایی با استفاده از ضریبی از ماتریس جرم و ماتریس سختی و با استفاده از زمان تناوب ارتعاشی مود اول و دوم سازه و با فرض نسبت میرایی ۰/۰۵ تشکیل گردیده و در معادلات دینامیکی وارد می‌شود. با توجه به اینکه مجموعه

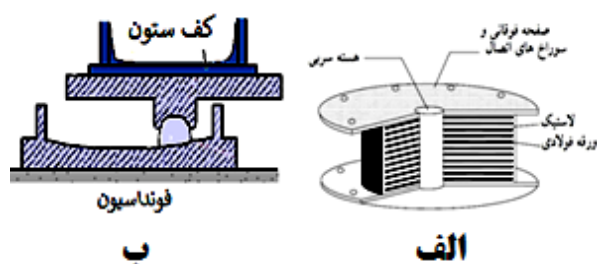
صدتایی انتخاب شده شامل طیف وسیعی از پارامترهای مختلف زلزله همچون نوع خاک، بزرگا و فاصله رومرکزی می باشد، طیف نسبتاً کاملی از محتوای فرکانسی ممکن در رکورد زلزله اعمال گردیده و لذا اثر آن در منحنی های شکنندگی لحاظ می شود.



شکل ۳: بزرگا و فاصله و شتاب مجموعه ۱۰۰ تایی زلزله های استفاده شده در تحلیل پل ناین [۶].

۴- جداگر لرزه ای

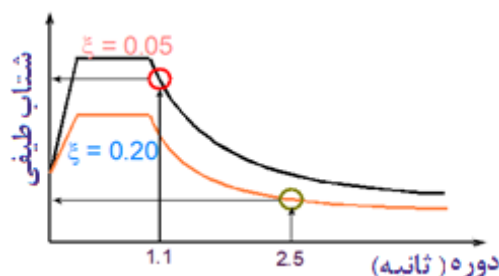
جداسازهای لرزه ای تجهیزاتی هستند که در جداسازی سازه از زمین به منظور کاهش نیروی لرزه ای وارده در زمان زلزله استفاده می گردند. طبقه بندی جداسازهای لرزه ای در دو دسته می باشد. دسته اول که بوسیله اجزاء الاستومری ساخته می شوند و دسته دوم، توسط اجزاء لغزشی تولید می گردند. عمده سازه های جداسازی شده در پل ها از اجزای الاستومری بهره می برند که ممکن است سیستم اتلاف انرژی در آن، هسته سربی در مرکز و یا گوشه های آن باشد. به این جداگرها، جداگرهای سربی لاستیکی (LRB) گفته می شود که در این مطالعه از این تیپ از جداساز استفاده شده است. جداگرهای لغزشی نیز عمدتاً از تیپ جداگرهای آونگی اصطکاکی (FPB) هستند و سیستم اتلاف انرژی در آن، اصطکاک می باشد. شکل ۴ جزئیات این جداگرها را بصورت شماتیک نشان می دهد.



شکل ۴: نمایش شماتیک جداسازهای لاستیکی سربی و اصطکاکی لغزشی. شکل الف: جداساز سربی لاستیکی. شکل ب: جداساز اصطکاکی لغزشی [۶].

جداساز LRB دارای مکانیسم اتلاف انرژی جهت اعمال سطح قابل توجهی از میرایی (مطابق شکل ۴) به سازه خواهد بود. هسته سربی به همراه لاستیک ها، سختی اولیه را تحت بارهای بهره برداری ایجاد نموده و منجر به استهلاک انرژی در اثر بارهای جانبی می شوند. سرب تحت نیروی برشی در تنش های به نسبت پایین، حدود ۸ تا ۱۰ مگاپاسکال به حد تسلیم می رسد و تغییر شکل می دهد. بنابراین رفتار

پایداری را تحت سیکل‌های متوالی با تشکیل حلقه‌های هیستریزس نشان داده و بدین ترتیب منجر به استهلاک سطح زیادی از انرژی در زمان وقوع زلزله می‌شود. در شکل ۵ تاثیر افزایش میرایی و پریرود سازه با استفاده از جداگر در پاسخ سازه به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۵: نمایش شماتیک تاثیر افزایش میرایی و پریرود با استفاده از جداگر در پاسخ سازه

مشخصات راهنمای طراحی جداسازی لرزه‌ای پل‌های بزرگراه‌ها، از انتشارات آشتو (۲۰۱۰) معرفی می‌گردد. پارامترهای طراحی جداساز لرزه‌ای هسته سربی مطابق جدول ۳ می‌باشد [۱۷].

جدول ۳: پارامترهای طراحی جداساز هسته سربی [۱۷]

سختی موثر جانبی KN/mm	مقاومت مشخصه T	سختی ثانویه KN/mm	تنش تسلیم سرب kg/m ²	قطر هسته سربی (cm)	قطر جداساز (cm)	ارتفاع جداساز (cm)	ضخامت لاستیک (mm)	تعداد لایه لاستیک IRHD-60	ضخامت ورق فولادی (mm)	
K_{eff}	Q_d	K_d	σ_c	D_p	D	H	T_i	N	T_s	مشخصه مقدار
۲/۶۸	۳۱/۷۵	۱/۵۳	۷/۸۴E۵	۱۸	۱۱۰	۳۲	۱۴	۱۴	۴	

۵- پارامترهای دینامیکی پل

یکی از روش‌های تحلیل که می‌توان پارامترهای دینامیکی پل را تخمین زد، تحلیل مودی می‌باشد که با شبیه سازی سازه پل براساس مدل اجزا محدود می‌توان پارامترهای دینامیکی را تعیین نموده و با مقایسه پارامترهای حاصل از روش‌های تجربی ارزیابی خسارت، شرایط سلامتی پل را در دراز مدت کنترل نمود. تحلیل مودی در نرم افزار CSI BRIDGE بر اساس تعیین مسئله مقادیر ویژه، فرکانس‌های طبیعی سازه را که متناظر با شکل‌های ارتعاشی سیستم می‌باشد محاسبه می‌نماید. این تحلیل بر اساس یک آنالیز فرکانسی در نرم افزار صورت می‌گیرد.

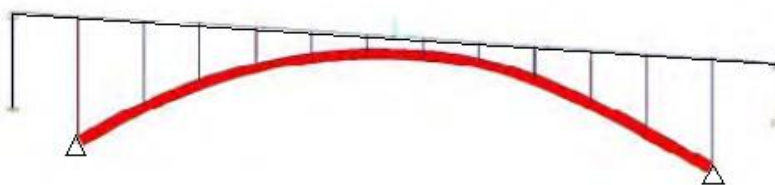
برای بدست آوردن پارامترهای دینامیکی پل ابتدا یک آنالیز استاتیکی جهت نیروهای مرده ناشی از وزن پل انجام شده و سپس با وجود نیروهای وارده بر پل تحلیل مودی صورت گرفته است. در شکل ۶، اشکال یک تا سه به ترتیب مربوط به مودهای اول، دوم و سوم جانبی و پیچشی پل و اشکال چهارم، پنجم و ششم نمونه مودهای قائم می‌باشد.

شماره	نوع مود	زمان تناوب (ثانیه)	شکل ارتعاشی	شماره	نوع مود	زمان تناوب (ثانیه)	شکل ارتعاشی
۱	پیچشی	۲.۵۲	۱	۴	قائم	۰.۳۳	۴
۲	پیچشی	۱.۶۷	۲	۵	قائم	۰.۲۵	۵
۳	پیچشی	۱.۲۵	۳	۶	قائم	۰.۰۹	۶

شکل ۶: نمونه‌ای از مودهای غالب پل حاصل از تحلیل مودال

۶- صحت سنجی

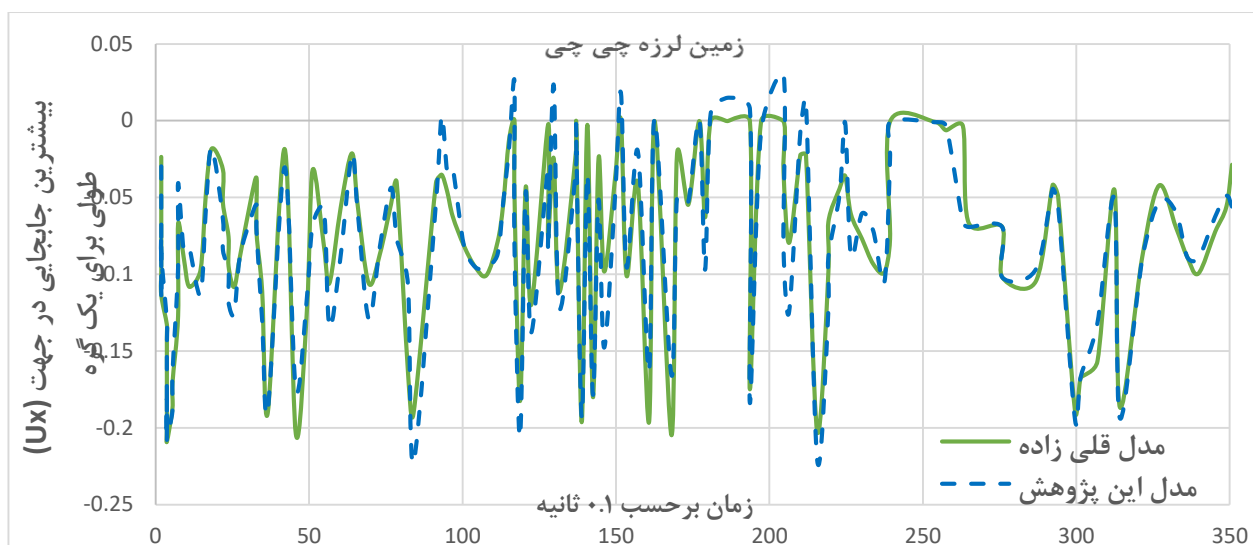
بر اساس مطالعات قلی‌زاده در کلاس پل عرشه جعبه‌ای با توجه به اینکه این پل‌ها به لحاظ طول دهانه، عرض عرشه و ارتفاع ستون‌ها وضعیت‌های متفاوتی دارند، برای امکان تعمیم دادن نتایج حاصل از پژوهش مذکور روی پل گلد اسپرینگ (یک پل قوسی فولادی با مقطع قوس جعبه‌ای احداث شده در سال ۱۹۶۳ در ایالت کالیفرنیا) به پل مورد مطالعه، لازم است جهت صحت سنجی نتایج ابتدا به بررسی و انطباق مدل پل مذکور پرداخت [۱۸]. بر اساس اطلاعات ارائه شده در مرجع مزبور اتصال دو انتهای قوس به تکیه‌گاه‌ها از نوع مفصلی در نظر گرفته شده است. طول دهانه قوس ۷۰۰ فوت معادل تقریباً ۲۱۳ متر و شیب طولی عرشه پل ۶/۶ درصد می‌باشد.



شکل ۷: نمای جانبی از پل مورد مطالعه قلی‌زاده.

تعداد ستون‌های زیرسازه و تعداد سلول‌های عرشه این پل‌ها به عرض عرشه وابسته است. ارتفاع مقطع عرشه برای عرشه باکس پیش‌تنیده، برابر ۰/۰۴ طول دهانه خواهد بود.

در شکل ۸ بیشینه تغییرمکان راستای طولی گره وسط دهانه پل تحت زلزله Chichi به ترتیب در مطالعه قلی‌زاده و در مدلسازی این پژوهش نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود خروجی نمودارهای تغییر مکان در راستای طولی با مطالعه قلی‌زاده با درصد اختلاف جزئی (حدود ۰/۸٪) منطبق بوده که حاکی از صحت مدل نرم افزاری این پژوهش می‌باشد.



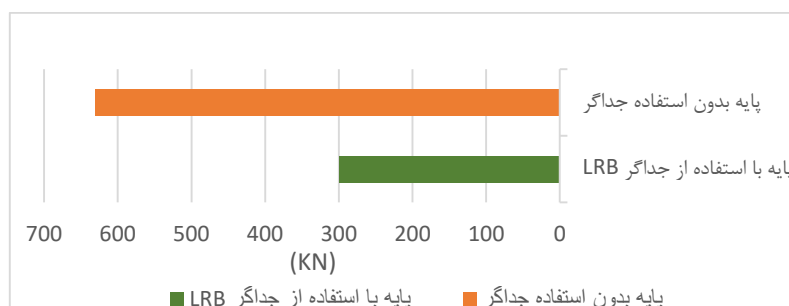
شکل ۸: مقایسه بیشینه تغییر مکان راستای طولی مورد تحلیل مطالعه قلی زاده با مدل انجام شده

۷- مقایسه و تحلیل نتایج عددی

نتایج اولیه بدست آمده پس از تحلیل دینامیکی پل مورد پژوهش تحت تاثیر کلیه رکورد های اعمال شده نشان داد که بیشترین تغییر مکان و جابجایی در بالای ستون‌ها اتفاق افتاده که از این رو می‌توان ناحیه مذکور را به عنوان قسمت بحرانی پل در نظر گرفت. با توجه به تشکیل مفاصل پلاستیک در محل، یک سازو کار ناپایدار سازه‌ای تشکیل خواهد شد که منجر به افزایش میزان آسیب پذیری شده و در نتیجه امکان فرو ریزش و انهدام سازه را فراهم می‌کند.

۷-۱- کاهش حداکثر برش پایه

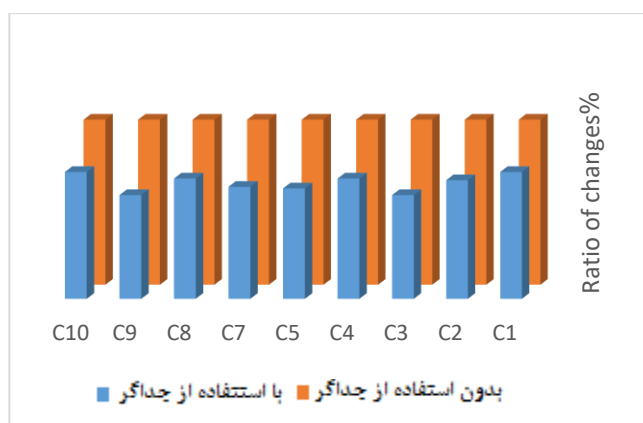
به جهت افزایش میرایی و شکل‌پذیری که در نتیجه آن افزایش میزان جذب انرژی حاصل از زلزله را به همراه دارد مقایسه‌ای در حالت پل مجهز به جداگر هسته سربی لاستیکی با حالت بدون جداسازی لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل پل ناین نموداری مطابق با شکل ۹ جهت مقایسه نتایج ترسیم گردید. در شکل ۹ میانگین بیشینه برش پایه حاصل از تحلیل‌های تاریخیچه زمانی در دو حالت مدلسازی نشان داده شده است. از بررسی نمودار ملاحظه گردید که پل مجهز به پایه جداسازی شده کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان حداکثر برش پایه نسبت به حالت بدون جداسازی پایه دارد به طوری که این میزان کاهش حدود ۵۱٪ برای این پل حاصل شد.



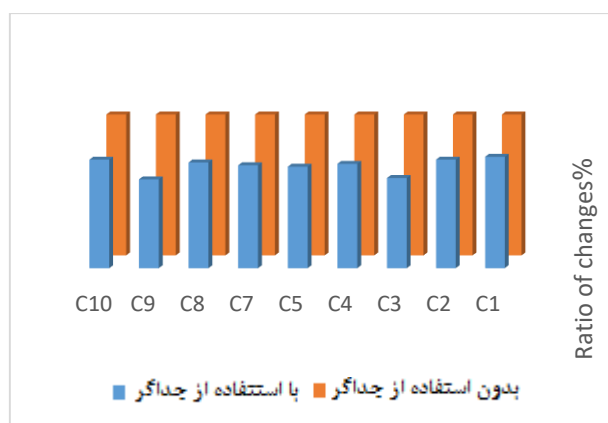
شکل ۹: جدول مقایسه میانگین حداکثر برش پایه حاصل از تحلیل‌های تاریخیچه زمانی (کوبه ۱۹۹۵، نورتریج ۱۹۹۴، شیلی ۱۹۶۰ و لوماپریتا ۱۹۸۹ در دو حالت مدلسازی پل ناین

۷-۲- کاهش نیروهای تکیه‌گاهی

با توجه به نتایج و نیروهای ارائه شده در بحث کاهش نیروهای تکیه‌گاهی در این بخش نتایج در قالب مقایسه میان نیروهای تکیه‌گاهی و کاهش نیروها در حالات مجهز به جداگر و بدون جداگر لرزه‌ای در اشکال ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. در این اشکال میانگین بیشینه نیروهای تکیه‌گاهی پایه‌ها تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی در هر دو راستای طولی و عرضی نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مقایسه میانگین بیشینه نیروی جانبی تکیه‌گاه در جهت عرضی پل



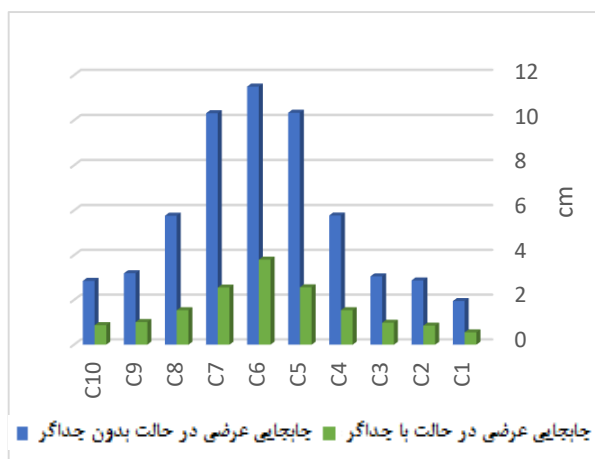
شکل ۱۰: مقایسه میانگین بیشینه نیروی جانبی تکیه‌گاه در جهت طولی پل

ملاحظه گردید در جهت طولی و عرضی پل نیروهای تکیه‌گاهی در حالت جداسازی شده (با جداگر لرزه‌ای LRB) تا حدود یک سوم کمتر از حالت جداسازی نشده می‌باشند. استفاده از جداگر، موجب کاهش نیاز لرزه‌ای شده و اتلاف انرژی بیشتر حاصل از نیروی زلزله را در پی دارد به طوری که با استفاده از جداسازی لرزه‌ای می‌توان نیروی جانبی وارد بر پل را تا حدود یک سوم تقلیل داد. در نتیجه با کاهش برش پایه طراحی پل کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان آرماتور و بتن مصرفی سازه ایجاد شده و هزینه‌های ساخت و اجرای پل کاهش می‌یابد. این مساله می‌تواند افزایش هزینه‌های ناشی از استفاده از جداساز لرزه‌ای را جبران نماید.

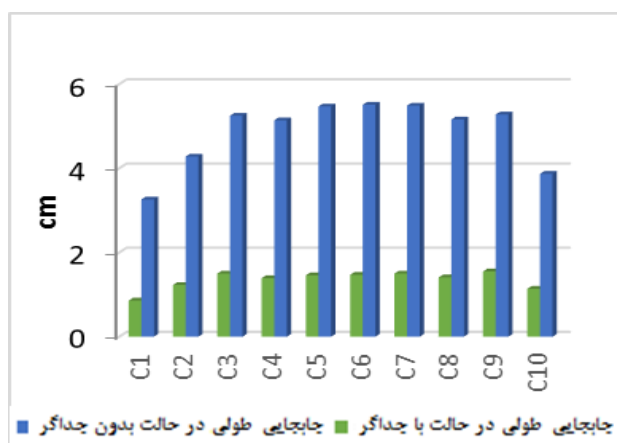
۷-۳- جابجایی سرستون‌ها در دو حالت جداسازی شده و نشده

حداکثر جابجایی سازه پل یکی از موارد مهم و تاثیرگذار در برآورد عملکرد پل‌ها می‌باشد. به همین منظور میانگین حداکثر جابجایی ستون‌های پل ناین تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی در دو جهت طولی و عرضی براساس موقعیت ستون بر روی پل به صورت نمودارهای اشکال ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.

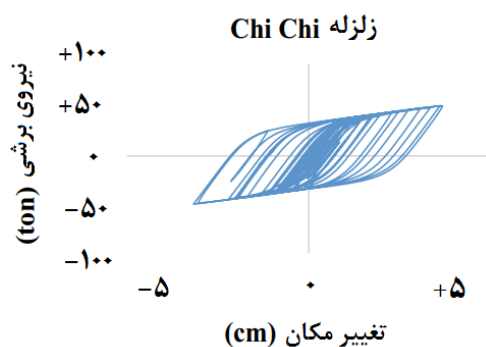
در شکل ۱۴ نمودار همبستگی جداگر لرزه‌ای LRB واقع در گره C1 تحت زلزله Chichi نشان داده شده است. از بررسی این نمودار به دست می‌آید که رفتار جداگرهای با هسته سربی به گونه‌ای خواهد بود که در اثر زلزله وارد فاز غیرخطی شوند و از این طریق میرایی لازم برای کاهش نیروهای وارده به سازه تامین شود به طوری که ملاحظه شد میانگین مقدار حداکثر جابجایی سرستون‌های پل مجهز به جداگر لرزه‌ای بیش از ۵۰٪ کاهش یافت.



شکل ۱۳: میانگین حداکثر جابجایی سرستون در راستای محور عرضی



شکل ۱۴: میانگین حداکثر جابجایی سرستون در راستای محور طولی



شکل ۱۴: نمودار پوش هیستریزس جداگر لرزه‌ای LRB واقع در گره C3 تحت زلزله Chichi

۸- استخراج منحنی‌های شکنندگی پل مورد مطالعه و کاربرد آنها در ارزیابی پل‌های مقاوم سازی شده

در سال‌های اخیر در آیین‌نامه‌های ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای پل‌ها، منحنی‌های شکنندگی به عنوان اطلاعات ورودی کلیدی در ارزیابی ریسک لرزه‌ای شبکه‌های حمل و نقل شناخته شده و بررسی عملکرد لرزه‌ای پل‌ها را امکان پذیر می‌سازد. بررسی آسیب پذیری پل‌ها در شرایط اولیه (وضع موجود) و مقاوم سازی شده از طریق مقایسه توابع آسیب پذیری آنها که به نام منحنی‌های شکنندگی شناخته می‌شود امکان پذیر می‌گردد. بطور کلی برای بدست آوردن منحنی‌های شکنندگی ۴ روش وجود دارد:

۱- روش تجربی

۲- بر اساس قضاوت مهندسی

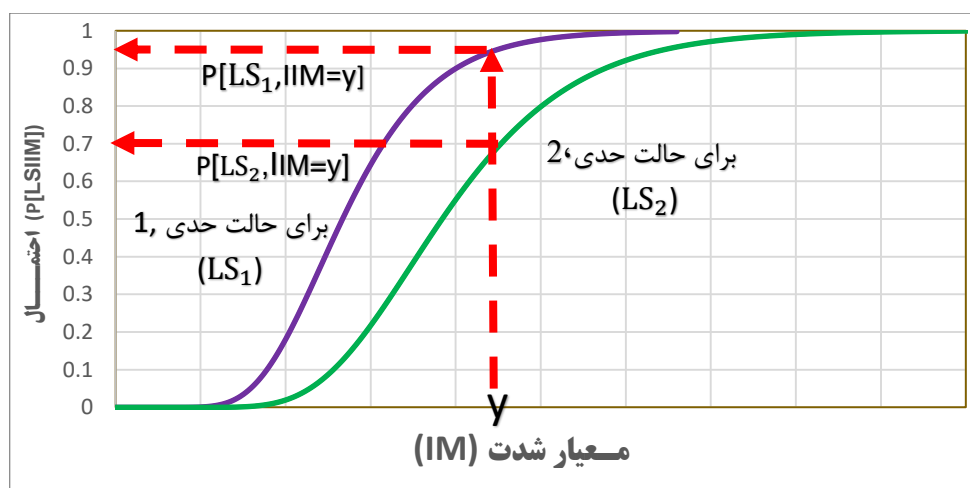
۳- روش تحلیلی

۴- روش ترکیبی

منحنی‌های شکنندگی در حقیقت بیان کننده احتمال وقوع یک آسیب مشخص تحت یک شدت زمین لرزه خاص هستند. این احتمال شرطی به صورت ریاضی زیر قابل بیان است.

$$P[LS|IM=y] = \text{شکندگی} \quad (1)$$

که LS حالت حدی و یا میزان آسیب وارد شده به عضو و یا سیستم، IM واحد شدت زمین لرزه بوده و y مقدار عددی شدت زمین لرزه است که معمولاً به صورت ماکزیمم شتاب زمین و یا شتاب طیفی در یک دوره تناوب غالب بیان می‌گردد. این تابع شکندگی بیان کننده توانایی یک عضو و یا سیستم مهندسی جهت ایستادگی در برابر یک رویداد مشخص است (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: نمونه‌ای از منحنی شکندگی

با اعمال تحریک لرزه‌ای به سازه و انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم افزار و استخراج پاسخ حداکثر مربوط به پارامتر بحرانی (تغییر مکان جانبی نسبی سرستون‌ها) در برابر PGA به کمک روابط موجود مدل‌های احتمالاتی، تقاضای لرزه‌ای ساخته می‌شود. سپس منحنی‌های شکندگی با استفاده از مدل احتمالاتی شرطی نیاز لرزه‌ای از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$P[LS|IM] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(S_D) - \ln(S_C)}{\beta_{D|IM}}\right) \quad (2)$$

در رابطه فوق LS حالت حدی و یا میزان آسیب وارد شده به عضو و یا سیستم، IM معیار شدت زلزله (که در این پژوهش PGA در نظر گرفته شده است)، S_D مقدار میانه نیاز بر حسب شدت زلزله، S_C مقدار میانه ظرفیت در هر حالت آسیب مشخص، Φ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد و $\beta_{D|IM}$ انحراف معیار استاندارد لوگ نرمال (پراکندگی) است. رابطه بین میانه و نیاز و شدت زلزله در فرم توانی رابطه (۳) قابل بیان است:

$$S_D = a(IM)^b \quad (3)$$

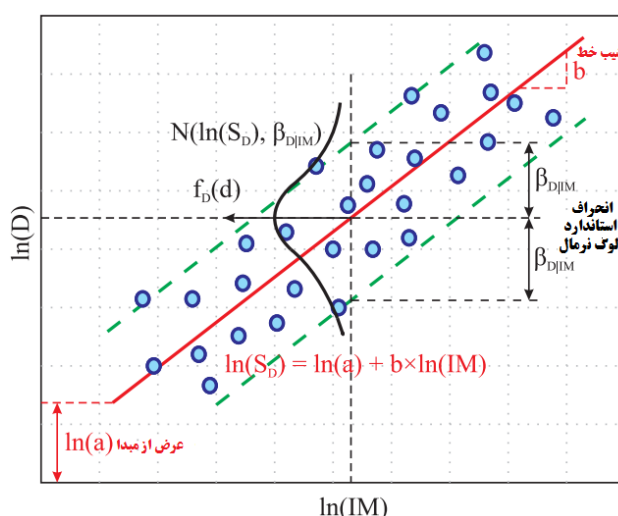
رابطه (۳) در فضای لگاریتمی نیز به شکل رابطه (۴) قابل بیان است. در این فضا $\ln(a)$ عرض از مبدا و مقدار b شیب خط می‌باشد. ضرایب مربوطه با استفاده از رگرسیون خطی قابل محاسبه هستند

$$\ln(s_D) = \ln(a) + b \ln(IM) \quad (4)$$

مقدار پراکندگی نیاز لرزه ای نیز از رابطه (۵) قابل دستیابی است.

$$\beta_{DIM} \cong \sqrt{\frac{\sum (\ln(d_i) - \ln(aIM^b))^2}{N-2}} \quad (5)$$

نحوه محاسبه پارامترهای نیاز لرزه ای از تحلیل رگرسیون خطی به صورت شماتیک در شکل ۱۶ آورده شده است.



شکل ۱۶: نحوه محاسبه پارامترهای نیاز لرزه ای [۹]

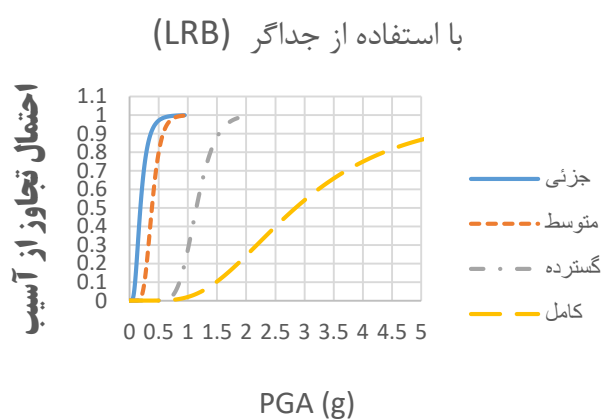
در این تحقیق میزان تغییر مکان جانبی نسبی (دریفت) سرستون‌ها به عنوان پارامتر نیاز ستون در نظر گرفته شده است. با جایگذاری نتایج جابجایی سرستون‌ها (حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی) در روابط ۴ و ۵ و با استفاده از رگرسیون‌گیری خطی، پارامترهای نیاز لرزه‌ای برای مولفه‌ی جابجایی سرستون برای پل مورد پژوهش بدست می‌آید. در ادامه با جایگذاری مقادیر حاصل در رابطه ۲، احتمال تجاوز از حالت آسیب مشخص به دست خواهد آمد. ستون‌های پل‌های ساخته شده در دوره اجرای پل ناین دارای محصور شدگی ضعیف آرماتورهای طولی به دلیل فاصله زیاد خاموت‌ها می‌باشند. اطلاعات زیادی از رفتار ستون‌هایی که دچار زوال مقاومت شده‌اند براساس مطالعات آزمایشگاهی و تجارب زلزله‌های گذشته موجود است. رامناتان با جمع‌آوری این اطلاعات، مقدار میانه تغییر مکان نسبی پایه‌ها (DRIFT) در سطوح خرابی مختلف را به همراه توصیف کیفی آسیب ارائه کرده که در جدول ۴ توضیح داده شده است [۱۳].

با هدف تعیین میزان اثر بخشی مقاوم سازی با استفاده از جداگر هسته سربی لاستیکی منحنی‌های شکنندگی برای حالت‌های مختلف پل قوسی با عرشه جعبه‌ای بالاگذر در سطوح آسیب جزئی تا کامل ترسیم گردید. در شکل ۱۷ منحنی‌های شکنندگی در ۴ سطح آسیب متفاوت (آسیب جزئی، آسیب متوسط، آسیب شدید و حالت فروپاشی) برای حالت طراحی با و بدون جداگر گزارش شده است.

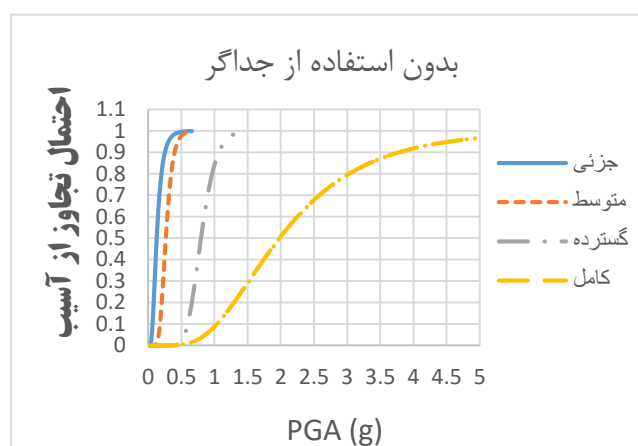
جدول ۴: میزان ظرفیت ستون‌ها در سطوح آسیب مختلف [۱۳]

تعریف کیفی آسیب	انحراف معیار استاندارد (پراکندگی) β_c	مقادیر کمی سطوح آسیب (بر مبنای جابجایی نسبی پایه‌ها، Sc (Drift)	واحد	سطوح آسیب
ترک در سطح ستون	۰/۲۲	۰/۰۱۴	Drift (%)	جزئی
ورقه ورقه شدن جزئی پوشش بتن	۰/۲۴	۰/۰۲۸	Drift (%)	متوسط
ترک‌های برشی بزرگ، ریزش کامل پوشش بتن، نمایان شدن هسته ستون، تسلیم خاموت‌ها	۰/۱۸	۰/۰۳۹	Drift (%)	گسترده
زوال محصور شدگی، کمانش یا گسیختگی آرماتورهای طولی ستون، شکست هسته ستون	۰/۲۲	۰/۰۵۰	Drift (%)	کامل

در مشخصات تحلیلی این پل با در نظر گرفتن تمامی شرایط آیین نامه‌های معتبر طراحی و فرض بر صحت اجرا مدل سازی صورت پذیرفته است تا با مقایسه این حالت و حالت مقاوم سازی شده با جداگر هسته سربی لاستیکی به میزان تأثیر گذاری نواقص سازه‌ای کلاس پل پرداخت.



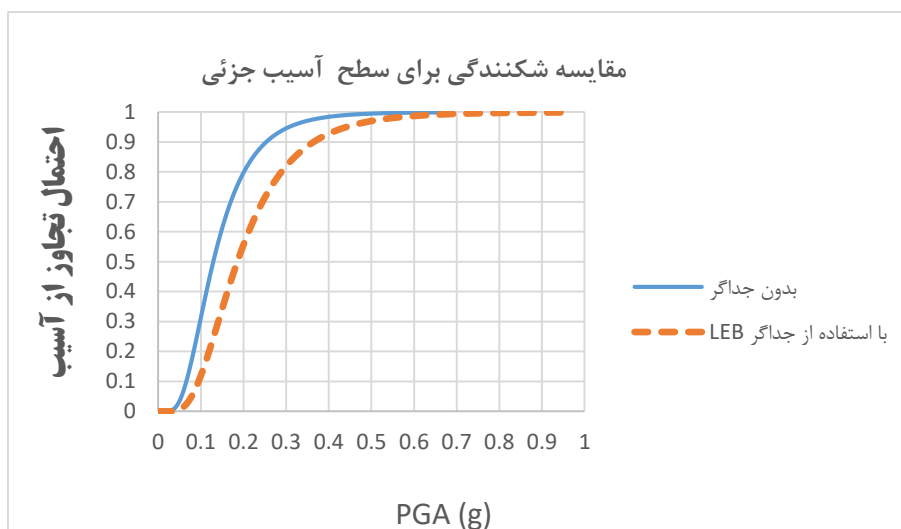
شکل ب: با استفاده از جداگر LRB



شکل الف: حالت بدون جداگر شکل

شکل ۱۷: منحنی شکنندگی پل ناین در وضعیت طراحی

با بررسی شکل ۱۸ برای مدل پل قوسی، برای سطح آسیب جزئی DC_1 ملاحظه می‌شود با توجه به فرارگیری سازه در وضعیت الاستیک و رفتار خطی، میزان کاهش احتمال خرابی سازه با استفاده از جداسازی لرزه‌ای حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد. از بررسی شکل ۱۹ برای مدل پل قوسی، ملاحظه می‌شود با وارد شدن سازه به محدوده غیرخطی و پلاستیک، با استفاده از جداسازی لرزه‌ای میزان احتمال خرابی سازه برای سطح آسیب متوسط DC_2 تا حدود ۳۵٪ کاهش را از خود نشان می‌دهد.

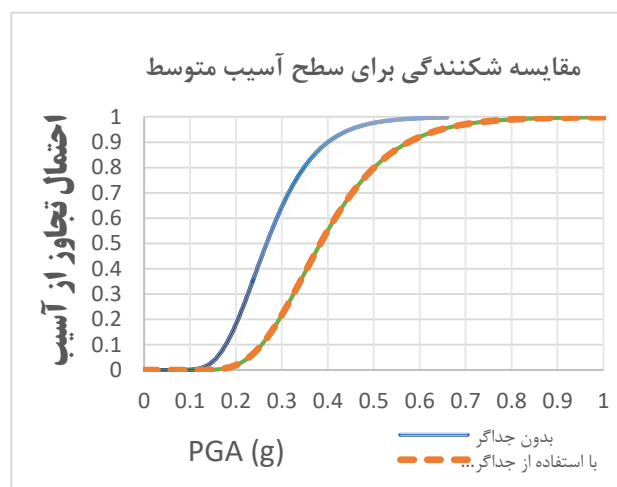


شکل ۱۸: مقایسه اثر استفاده از جداگر لرزه‌ای LRB بر روی منحنی‌های شکنندگی نمونه پل مورد مطالعه در حالت آسیب جزئی (DC1)

همچنین با بررسی مقایسه‌ای منحنی شکنندگی شکل ۱۹ و ۲۰ با توجه به قرار گرفتن سازه تحت تاثیر شتاب ورودی زلزله بیشتر نسبت به سطح آسیب DC₂ و قرارگیری در ناحیه کاملاً غیرخطی ملاحظه می‌شود در سطح آسیب بالا (گسترده و کامل) با استفاده از جداسازی لرزه‌ای میزان احتمال خرابی تا ۴۲٪ (نصف) تقلیل یافته است.

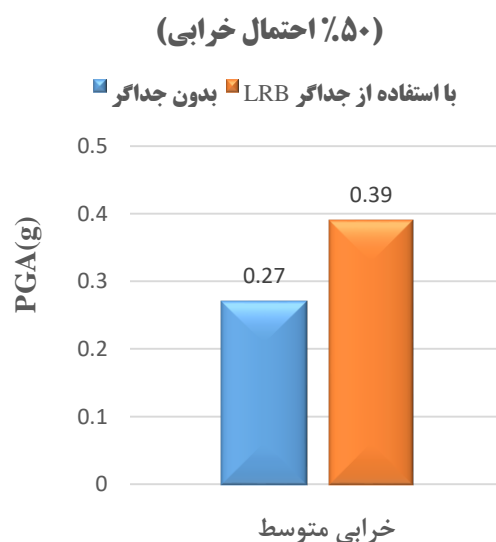
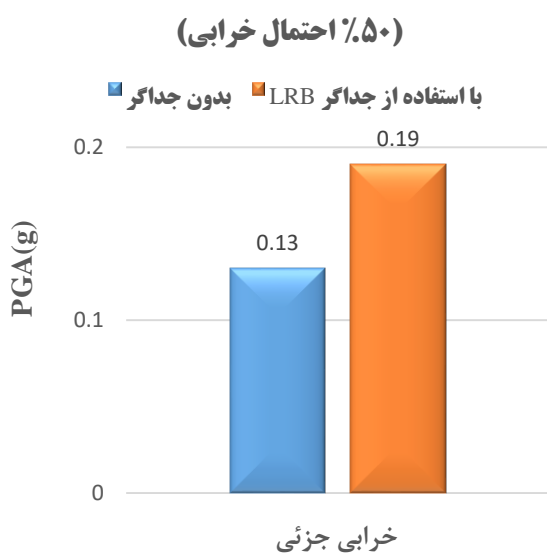
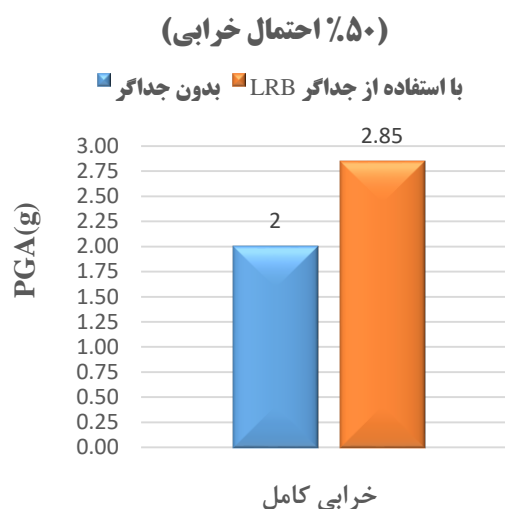
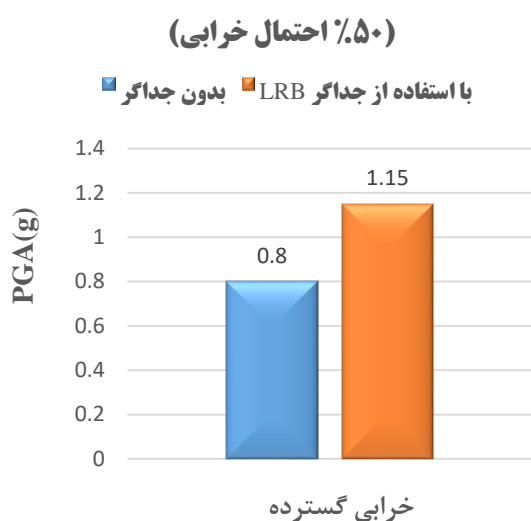


شکل ۲۰: مقایسه اثر استفاده از جداگر لرزه‌ای LRB بر روی منحنی‌های شکنندگی نمونه پل مورد مطالعه در حالت آسیب گسترده (DC3)



شکل ۱۹: مقایسه اثر استفاده از جداگر لرزه‌ای LRB بر روی منحنی‌های شکنندگی نمونه پل مورد مطالعه در حالت آسیب متوسط (DC2)

طبق تعریف شتاب متناظر با احتمال تجاوز ۵۰٪ برابر میانه شکنندگی می‌باشد. بنابراین هرچه مقدار میانه شکنندگی کمتر باشد احتمال تجاوز از یک حالت آسیب بیشتر بوده و پل آسیب پذیرتر می‌باشد. در شکل ۲۲ مقادیر میانه شکنندگی سیستم پل در چهار حالت آسیب (جزئی تا کامل) و در دو حالت با و بدون استفاده از جداگر سرب‌لاستیکی LRB نشان داده شده است.



شکل ۲۱: مقایسه شکنندگی پل بدون جداساز و با جداساز در سطوح آسیب چهارگانه

با مقایسه حاصل از اشکال ۱۷ تا ۲۰ می‌توان نتیجه گرفت که مقاوم سازی پل با استفاده از جداگر LRB تاثیر چشمگیری در سطح آسیب پذیری اولیه (جزئی) ندارد اما با افزایش شتاب ورودی زلزله به سازه و سطوح آسیب بالاتر (متوسط و کامل) تاثیر کاهش میزان آسیب با استفاده از جداگر به شکل محسوسی افزایش پیدا می‌یابد.

در جدول شماره ۵ مقادیر میانه شکنندگی حاصل از این پژوهش با مقادیر متناظرشان در آیین نامه HAZUS مقایسه شده است. همچنین مقادیر میانه شکنندگی مولفه ستون پل حاصل از پژوهش پهلوان و همکاران که برای نمونه پل های با عرشه جعبه‌ای دارای قوس در پلان (طراحی شده بین سال های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰) بدست آمده است به جهت مقایسه ارائه شده است [۱۹ و ۲۰].

جدول ۵: مقایسه مقادیر میانه شکنندگی پل حاصل از این پژوهش با مقادیر میانه شکنندگی پل‌های متناظر در آیین‌نامه HAZUS و نیز مقادیر میانه شکنندگی مولفه ستون پل قوسی بتن آرمه چندقابی [۲۰ و ۱۹].

نوع پل	سطوح آسیب			
	جزئی	متوسط	گسترده	کامل
	مقدار میانه شکنندگی			
پل قوسی بتن آرمه چندقابی	مقادیر میانه شکنندگی مولفه ستون بدست از تحقیق (برحسب g)			
با شعاع انحنای برابر نصف طول پل (۶۶ متر)	۰,۲۳	۰,۳۸	۰,۵۵	۰,۶۹
پل مدل HWB23	مقادیر میانه شکنندگی پل قرائت شده از HAZUS			
	۰,۹۱	۰,۹۱	۱,۰۵	۱,۳۸
پل قوسی با عرشه جعبه‌ای بالاگذر نانین در حالت بدون استفاده از جداگر	مقادیر میانه شکنندگی پل بدست از تحقیق (برحسب g)			
پل قوسی با عرشه جعبه‌ای بالاگذر نانین در حالت با استفاده از جداگر	۰,۱۳	۰,۲۷	۰,۸	۲
پل قوسی با عرشه جعبه‌ای بالاگذر نانین در حالت با استفاده از جداگر	۰,۱۹	۰,۳۹	۱,۱۵	۲,۸۵

۱۰- نتیجه گیری

در این پژوهش به ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای پل بتنی قوسی با عرشه جعبه‌ای بالاگذر پرداخته شد، جابجایی‌ها، نیروهای تکیه گاهی و منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در دو حالت با و بدون استفاده از جداساز سربی لاستیکی (LRB) بدست آمد بدیهی بود بهبود رفتار ناشی از بالا رفتن میرایی در سیستم پل مشاهده شود. اما تا به امروز کفایت این روش مقاوم سازی با استفاده از منحنی‌های شکنندگی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. تهیه منحنی‌های شکنندگی برای پل‌های مقاوم سازی شده این امکان را برای تصمیم سازان ایجاد می‌کند تا از اطلاعات موجود به جهت انتخاب روش بهسازی موثر، اولویت بندی پل‌ها برای مقاوم سازی و خارج کردن روش‌های غیر کارآمد قبل از فاز مطالعاتی استفاده نمایند. به همین سبب با استفاده از ورودی اطلاعات بدست آمده از منحنی‌های شکنندگی مطالعات خسارت صورت پذیرفت و کاهش چشمگیر سطوح خرابی با استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای هسته سربی، همچنین کاهش میزان خرابی مقادیر خسارت مالی ناشی از وقوع تحریک از نتایج این تحقیق بوده است. با استفاده از این سیستم جاذب انرژی در پل‌ها این نتیجه حاصل شد:

- هرچند هزینه تهیه و نصب این سیستم‌های جداسازی در نگاه اول ارزشمندی آن را دچار تردید می‌کند اما با بررسی و تحلیل دقیق مشخص شد این سیستم مقاوم سازی توانایی کاهش خسارات و اقتصادی شدن مقاطع و در نتیجه بازگشت سرمایه هزینه شده را در طول زمان بهره برداری دارا می‌باشد.
- استفاده از جداگر، موجب کاهش نیاز لرزه‌ای و اتلاف انرژی بیشتر (بدلیل تسلیم شدن هسته سربی جداگر) حاصل از نیروی زلزله بوده به طوری که با استفاده از جداسازی لرزه‌ای می‌توان نیروی جانبی وارد بر پل را تا حدود یک سوم تقلیل داد.
- ملاحظه شد میانگین مقدار حداکثر جابجایی سرستون‌های پل مجهز به جداگر لرزه‌ای بیش از ۵۰٪ کاهش یافت.
- برای مدل پل قوسی، برای سطح آسیب جزئی DC_1 ملاحظه می‌شود با توجه به قرارگیری سازه در وضعیت الاستیک و رفتار خطی، میزان کاهش احتمال خرابی سازه با استفاده از جداسازی لرزه‌ای حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد.
- با وارد شدن سازه به محدوده غیرخطی و پلاستیک، با استفاده از جداسازی لرزه‌ای میزان احتمال خرابی سازه برای سطح آسیب متوسط DC_2 تا حدود ۳۵٪ کاهش را از خود نشان می‌دهد.

- در سطح آسیب بالا با استفاده از جداسازی لرزه‌ای میزان احتمال خرابی تا ۵۰٪ (نصف) تقلیل یافته است.
- می‌توان نتیجه گرفت که مقاوم سازی پل با استفاده از جداگر LRB تاثیر چشمگیری در سطح آسیب پذیری اولیه (جزئی) ندارد اما با افزایش شتاب ورودی زلزله به سازه و سطوح آسیب بالاتر (متوسط و کامل) تاثیر کاهش میزان آسیب با استفاده از جداگر به شکل محسوسی افزایش پیدا می‌کند.

مراجع

1. Guo, J., Zhong, J., Dang, X. and Yuan, W., "Influence of multidirectional cable restrainer on seismic fragility of a curved bridge", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 24, No. 3, (2019), 04019001.
2. Jeon, J.-S., Mangalathu, S. and Lee, S.-Y., "Seismic fragility curves for california concrete bridges with flared two-column bents", *Bulletin of earthquake engineering*, Vol. 17, No. 7, (2019), 4299-4319.
3. Jeon, J.-S., Mangalathu, S., Song, J. and Desroches, R., "Parameterized seismic fragility curves for curved multi-frame concrete box-girder bridges using bayesian parameter estimation", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 23, No. 6, (2019), 954-979.
4. Sarraf Shirazi, R., Pekcan, G. and Itani, A., "Analytical fragility curves for a class of horizontally curved box-girder bridges", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 5, (2018), 881-901.
5. Nielson, B.G. and DesRoches, R., "Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 36, No. 6, 823-839.(2007)
6. Baker, J.W., Lin, T., Shahi, S.K. and Jayaram, N., "New ground motion selection procedures and selected motions for the peer transportation research program", *PEER report*, Vol. 3, No.,(2011).
7. Tavares, D., Suescun, J., Paultre, P. and Padgett, J., "Seismic fragility of a highway bridge in quebec", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 18, No. 11, 1131-1139.(2013)
8. M. Sharbafiyani and A. karamodin, "Probabilistic assessment of seismic vulnerability of reinforced concrete box deck bridges with irregularity of base height and middle seam", in 12th *National Congress on Civil Engineering*. Vol., No. Issue, (2020).
9. A. Tajmalian and Sh. Yazdiyan, "Evaluation of seismic fragility of steel structures isolated with frictional pendulum separators under remote field earthquakes", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Vol. 7, No. 295-114.
10. sh. khosravi, M. Yousefi and M. goudarzi, "Development of seismic fragility curves of cylindrical concrete tanks using nonlinear analysis", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Vol. 53, No. 15-5 (2021).
11. Rezaei, H., Arabestani, S., Akbari, R & ., Noroozinejad Farsangi, E. (The effects of earthquake incidence angle on the seismic fragility of reinforced concrete box-girder bridges of unequal pier heights. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(2), 278-293 (۲۰۲۲).
12. Pouraminian, M., Pourbakhshian, S., Farsangi, E. N., Berenji, S. ,.Borujeni, S. K., Asl, M. M & ., Hosseini, M. M Reliability-based safety evaluation of the BISTOON historic masonry arch bridge. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 30(1), 87-110 (۲۰۲۰).
13. Ramanathan, K.N., "Next generation seismic fragility curves for california bridges incorporating the evolution in seismic design philosophy", *Georgia Institute of Technology*, (2012).
14. Salonga, J.A., "Innovative systems for arch bridges using ultra high-performance fibre-reinforced concrete, *University of Toronto (Canada)*, (2010).
15. Specifications, A.L.B.D., "1st, 2nd and 3rd ed", *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.[4] AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges. 16th and 17th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC*, Vol., No., (1989).
16. *Transportation Systems, Pacific Earthquake Engineering Research Center.*" [Online]. Available: <https://peer.berkeley.edu/research/transportation-systems>. [Accessed: 04-Nov-](2019).
17. A. Naseri, Hossein. Pahlavan and Gh. Ghodrati Amiri, "Probabilistic seismic assessment of rc frame structures in north of iran using fragility curves", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Vol. 4, No. 14, (1396).
18. A. Gholizadeh, Sh. Mostajabaldahve and Malek, S., "Study of static and dynamic behavior of a sample of steel arch bridges with box cross section and high-pass deck", in *2nd International & 6th National Conference on Earthquake and Structural 1394*. Vol., No. Issue, (1394 of Conference).
19. Department of Homeland Security and Federal Emergency Management Agency, "Multi-hazard Loss Estimation Methodology *Earthquake: Hazus -MH MR5*," 2011.
20. H. Pahlavan, B. Zakeri, G. G. Amiri, and M. Shaijanfar, "Probabilistic Vulnerability Assessment of Horizontally Curved Multiframe RC Box-Girder Highway Bridges," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 30, no. 3, Jun. 2015.