

## Analytical Fragility Curves for Bridges Subjected to Near-Fault and Far-Field Ground Motion (Case Study: Bill Emerson Bridge)

Hossein Pahlavan<sup>1</sup>, Alireza Mirzagoltabar roshan\*<sup>2</sup>, Ali Naseri<sup>3</sup>

1- Assistant Professor of Earthquake Engineering, Shahrood University of Technology, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

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

### ABSTRACT

Bridges are one of the major infrastructures of a country, which, in the event of severe seismic activity and the occurrence of collapse, can cause severe damage in different regions and create a severe crisis. Bridges with very long spans have always been a great challenge for engineers throughout history. Cable-stayed types of bridges are becoming more and more popular in the construction of long span bridges due to their advantages. A great number of cable stayed bridges in the world are located in the seismic zone and also near active faults so the effect of near field excitations on the seismic vulnerability of cable stayed bridges should be investigated probabilistically in accordance with far field excitations. Generation of vulnerability functions in the form of fragility curves is a common approach for assessing bridges seismic vulnerability. In this article, a set of analytical fragility curves for a case study cable stayed bridge (the Bill Emerson Bridge) are developed based on Incremental nonlinear dynamic analysis (IDA). The findings represent the effect of near fault excitations on the vulnerability of this long span bridge model. For example, the probability of a complete and extensive damage state for the considered cable stayed bridge in 1.5g for far field is 10 and 32 percent respectively, while in the near field, this value increases to about 19 and 44 percent, that indicates increase vulnerability of bridge in near field. The median values of seismic fragility for the considered bridge model decreased significantly in near field excitation in the Extensive and Complete damage states. The results can guide future regional risk assessments regarding the importance of including or neglecting near field excitations impacts on cable stayed bridge's vulnerability.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 15 December 2018

**Revise Date:** 10 February 2019

**Accept Date:** 19 February 2019

### Keywords:

Analytical Fragility Curves;  
Near fault;  
Far field;  
Bill Emerson Bridge;  
Cable stayed bridges.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.161316.1739

\*Corresponding author: Alireza Mirzagoltabar roshan  
Email address: ar-goltabar@nit.ac.ir

## تحلیل منحنی‌های شکنندگی پل‌ها در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک و دور از گسل

### (مطالعه موردی پل بیل امرسون)

حسین پهلوان<sup>۱</sup>، علیرضا میرزا گلتبار روشن<sup>۲\*</sup>، علی ناصری<sup>۳</sup>

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

۲- دانشیار گروه سازه و زلزله دانشگاه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

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

### چکیده

با توجه به اهمیت پل‌ها در ساخت شریان‌های اساسی یک کشور، در این تحقیق به ارزیابی احتمالاتی آسیب پذیری لرزه‌ای پل‌های کابلی پرداخته شده است. از مزایای پل‌های کابلی می‌توان به استفاده آنها در ساخت پل‌های با دهانه‌های بزرگ اشاره کرد. در این مقاله با استفاده از مجموعه‌ای از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA) به بررسی اثرات متفاوت تحریکات حوزه دور و نزدیک گسل، برای پل کابلی مورد مطالعه (پل کابلی بیل امرسون) پرداخته شد. در این راستا دو مجموعه ۲۰ تایی رکورد حوزه دور و نزدیک گسل از آیین نامه FEMA P695 انتخاب گردید و هر رکورد زلزله از  $g 1/0$  تا  $g 5/1$  با گام‌های افزایشی ۰/۱ تحلیل شدند و منحنی‌های شکنندگی در هر دو حالت دور و نزدیک گسل در چهار سطح خرابی ترسیم گردید. نتایج تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل کابلی پل بیل امرسون تاثیر تحریکات نزدیک گسل بر آسیب پذیری پل‌های کابلی با دهانه‌های بزرگ را به وضوح نشان می‌دهد. برای مثال احتمال خرابی کامل و زیاد پل کابلی مورد بررسی در حالت دور از گسل در  $g 5/1$  به ترتیب برابر با ۱۰ و ۳۲ درصد می‌باشد در حالی که در حالت نزدیک گسل این مقدار به حدود ۱۹ و ۴۴ درصد افزایش می‌یابد، که نشان دهنده افزایش آسیب پذیری سازه در حالت نزدیک گسل می‌باشد. همچنین مقادیر میانه شکنندگی لرزه‌ای برای مدل پل در نظر گرفته شده، به طور قابل توجهی در تحریکات نزدیک گسل در حالت‌های خرابی زیاد و کامل کاهش می‌یابد. این نتایج می‌تواند راجع به اهمیت ارزیابی ریسک منطقه‌ای یا نادیده نگرفتن اثرات تحریکات نزدیک گسل بر روی آسیب پذیری پل‌های کابلی در آینده کمک شایانی کند.

کلمات کلیدی: تحلیل منحنی‌های شکنندگی، حوزه نزدیک گسل، حوزه دور از گسل، پل بیل امرسون، پل‌های کابلی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.161316.1739	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.161316.1739	۱۴۰۰/۰۵/۳۰	۱۳۹۷/۱۱/۳۰	۱۳۹۷/۱۱/۳۰	۱۳۹۷/۱۱/۲۱	۱۳۹۷/۰۹/۲۴
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				علیرضا میرزا گلتبار روشن		
				ar-goltabar@nit.ac.ir		

## ۱- مقدمه

پل‌ها همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سیستم‌های سازه‌ای، جایگاه ویژه‌ای در ذهن طراحان سازه داشته‌اند، به همین علت، راه‌حل‌های سازه‌ای که برای آن‌ها وضع می‌شود باید هم از لحاظ عملکرد پل و هم از جهت زیبایی تأیید شود. تحقیقات گذشته نشان داده است که پل‌ها نتوانستند تحت زلزله‌های مختلف، سطح توقع طراحان را برآورده کنند. زلزله‌های اخیر در کالیفرنیا، ژاپن و آمریکای میانه، نشان داده است که بسیاری از پل‌های طرح‌شده بر اساس ضوابط آئین‌نامه‌های زلزله، دچار خسارت‌های شدید و یا حتی واژگونی، شده‌اند و این در حالی است که شدت این زلزله‌ها کمتر از مقادیر نظیر در آئین‌نامه‌های طراحی گزارش شده است [۱]. خسارات ایجادشده توسط زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل نظیر نورتریج ۱۹۹۴، کوبه ۱۹۹۵، چی چی ۱۹۹۹ و... باعث شده است محققان بسیاری به بررسی رفتار سازه‌های مختلف در حوزه‌ی نزدیک گسل و پارامترها و شاخص‌های متمایز این لرزه‌ها بپردازند. نکته ویژه که در مورد زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل اهمیت دارد، سرعت زلزله می‌باشد. وجود سرعت‌های نموی بزرگ زمین است که در پی پالس‌های بلندمدت، شتاب ایجاد می‌شود. این اثرات به شکل ایجاد تغییر مکان‌های نوسانی بزرگ در رکورد تغییر مکان زمین نیز دیده می‌شود. وجود این مقادیر بزرگ در پارامترهای حرکات زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل، مشخصه‌ی بارز زلزله‌هایی نظیر نورتریج، کوبه، چی چی می‌باشند [۲]. با توجه به اهمیت بررسی اثرات رکورد حوزه‌ی نزدیک گسل و تأثیر پالس موجود در آن بر عملکرد پل‌های کابلی، در این پژوهش سعی بر آن است که به بررسی عملکرد لرزه‌ای پل‌های کابلی تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک و دور از گسل پرداخته شود.

## ۲- تاریخچه تحقیقات

پیش از این مطالعات متعددی در زمینه‌ی بررسی عملکرد و رفتار دینامیکی پل‌های کابلی صورت پذیرفته است که در ادامه به شرح مختصری از تحقیقات صورت گرفته پرداخته شده است، اما تحقیقات محدودی به ارزیابی احتمالاتی خسارت لرزه‌ای اینگونه پل‌ها پرداخته شده است.

لی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از میراگرهای سختی منفی، به کنترل پاسخ لرزه‌ای پل‌های کابلی پرداخته‌اند. در این پژوهش میراگرهای سختی منفی بین پایه و عرشه‌ی پل کابلی بر اساس مدل شبه ویسکوالاستیک صورت پذیرفته و رفتار لرزه‌ای پل کابلی مورد نظر و تأثیر سختی میراگر بر اساس مدل‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در شرایط بهینه‌ی سختی در میراگرهای مورد استفاده، پل کابلی بهترین عملکرد لرزه‌ای را از خود نشان می‌دهد [۳].

تاواراس و پدجت<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۲ منحنی‌های شکنندگی پل‌های موجود شرق کانادا، ایالت کبک، را بدست آوردند. در این ایالت، ۲۶۷۲ پل چند دهانه وجود داشت که عمدتاً دارای جزئیات لرزه‌ای مناسبی نبودند. ایشان برای لحاظ عدم قطعیت تحریک زلزله و مشخصات پل‌ها از روش نمونه برداری لاتین هیپریکیوب استفاده کرده و ۱۲۰ نمونه مختلف پل را با مشخصات متفاوت تحت رکوردهای مختلف تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی کرده و به روش احتمالاتی منحنی‌های شکنندگی پل‌ها را بدست آوردند [۴].

پپینتو<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی تأثیر پدیده‌ی خستگی و نحوه قرارگیری کابل‌ها بر روی پل‌های کابلی فلزی پرداختند. با توجه به اهمیت خستگی و نحوه قرارگیری کابل‌ها بر عملکرد پل‌های کابلی اثر پارامترهای مذکور با توجه به مدل‌سازی عددی و اثرگذاری بارهای متحرک ناشی از وسایل نقلیه بر روی عرشه‌ی پل بررسی شد و سپس خرابی پل کابلی در طول عمر مفید آن مورد ارزیابی قرار گرفت [۵].

کای<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های مختلف تحلیل خرابی پیش‌رونده در پل‌های کابلی پرداختند. در این پژوهش چهار روش تحلیل خرابی پیش‌رونده در قالب حذف یک یا دو کابل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد

<sup>1</sup> Li

<sup>2</sup> Tavares, D., Padgett

<sup>3</sup> Pipinato

<sup>4</sup> Cai

استفاده از ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی در مورد استفاده از تحلیل‌های استاتیکی مناسب است. همچنین حداکثر جابجایی ناشی از حذف کابل در روش‌های استاتیکی و دینامیکی یکسان ارزیابی گردید [۶].

محمد اسماعیل و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی کاربرد جداسازهای RNC بر روی پل‌های کابلی پرداختند. در این پژوهش مدل المان محدود سه‌بعدی پل کابلی با استفاده از جداسازهای RNC بکار گرفته شده و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تحت رکوردهای زلزله مختلف صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که جداساز RNC ابزاری قابل‌اتکا و مناسب به‌منظور ایجاد جداسازی ایزوتروپیک افقی بر روی پل‌های کابلی می‌باشد [۷].

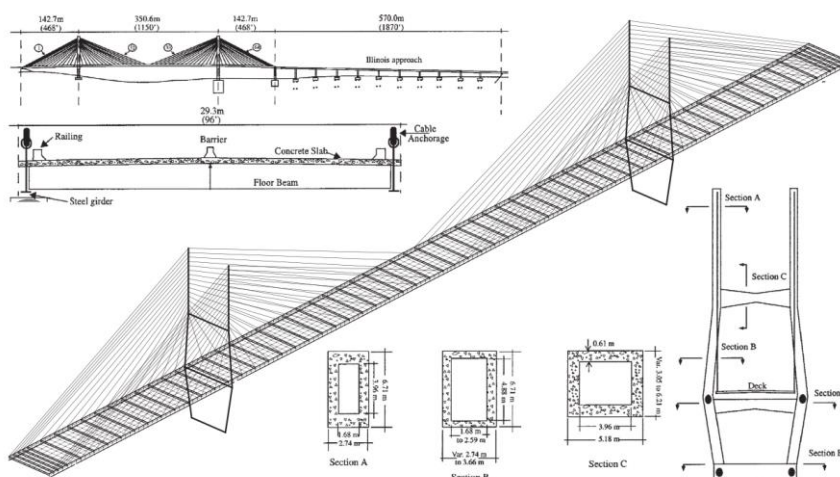
دینگ<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ به تحلیل خرابی تیر جعبه‌ای پل‌های کابلی پرداخته‌اند [۸]. سپس هان<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی توزیع تنش در طول کابل خسارت‌دیده در پل‌های کابلی پرداختند [۹]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی قابلیت اطمینان پل‌های کابلی بر اساس تکنیک‌های نظارت بر سلامت سازه پرداختند [۱۰].

شرستا<sup>۷</sup> در سال ۲۰۱۵ به ارزیابی پاسخ پل‌های کابلی با در نظرگیری مولفه قائم زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل پرداخت. در این پژوهش پاسخ پل کابلی با دهانه‌های بلند تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل در حالت‌های با و بدون تأثیر رکورد قائم زلزله مورد بررسی قرار گرفت [۱۱].

کو<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی تحلیل قابلیت اطمینان پل‌های کابلی در برابر بارهای ناشی از برخورد کشتی‌ها با پل پرداختند. در این پژوهش چارچوب طراحی پل کابلی بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان در برابر برخورد کشتی ارائه شد [۱۲].

### ۳- مدل‌سازی

سازه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش پل کابلی بیل امرسون می‌باشد. پل مذکور پل سه دهانه است که بر روی رود می‌سی‌سی‌پی واقع شده است و ایالت‌های میزوری و ایلینوی<sup>۹</sup> را مرتبط می‌کند. این پل در مجموع به طول ۱/۲ کیلومتر، عرض ۲۹ متر و ارتفاع ۱۵۰ متر است. عرشه پل از نوع شاهتیر فولادی<sup>۱۱</sup> می‌باشد و در پل ۱۲۸ کابل به کار رفته است. برای اطلاع از سایر مشخصات پل به مرجع شماره [۱۳] مراجعه شود. در شکل ۱ عرشه و مقطع عرضی پل کابلی بیل امرسون و مقاطع مورد استفاده در پایه‌های پل نشان داده شده است.



شکل ۱: پل کابلی بیل امرسون، مقطع عرضی، عرشه پل و مقاطع مورد استفاده در پایه‌های پل [۷]

<sup>5</sup> Ding

<sup>6</sup> Han,

<sup>7</sup> Shrestha

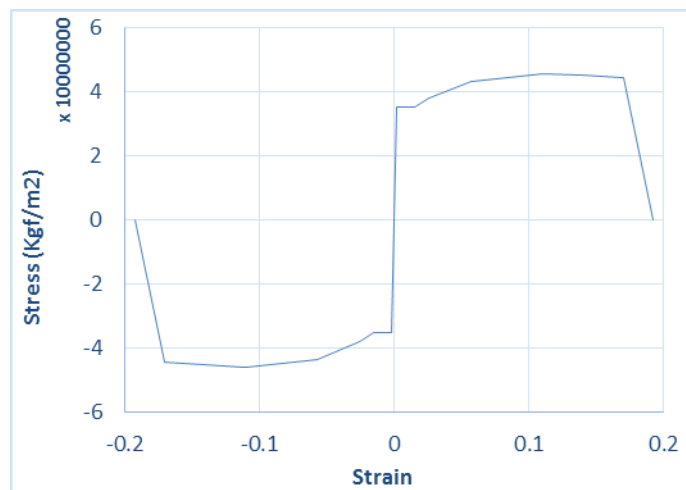
<sup>8</sup> Koh

<sup>9</sup> Mississippi River

<sup>10</sup> Missouri and Illinois

<sup>11</sup> Steel girder

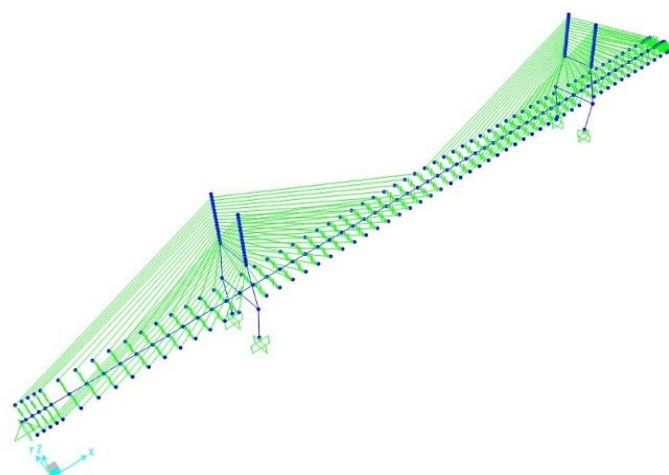
فولاد مصرفی در مدل دارای رفتار الاستو-پلاستیک بوده که به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آن برابر با ۲۰۰ گیگا پاسکال و ۰/۳ می‌باشد. تنش تسلیم فولاد برابر با ۳۵۰ مگا پاسکال و تنش نهایی ۵۰۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. رفتار فولاد مصرفی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: نمودار تنش کرنش فولاد در کشش و فشار

#### ۴- صحت سنجی مدل سازه‌ای تحت ارتعاش لرزه‌ای

در اولین گام هر مدل‌سازی صحت سنجی نتایج مدل‌سازی با نتایج تحقیقات تایید شده گذشته می‌باشد. در این تحقیق برای صحت سنجی، پل بیل امرسون در نرم‌افزار SAP [۱۴] تحت تحلیل مودال قرار گرفت و نتایج تحلیل با نتایج تحقیق محمد اسماعیل و همکاران [۷] مقایسه گردید. در معادلات ارتعاش، میرایی بر اساس ماتریس‌های میرایی متناسب با جرم و سختی در نظر گرفته شد و برای حل معادلات از الگوریتم حل نیوتون رافسون استفاده شد. در ادامه در شکل ۳ هندسه‌ی پل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار SAP نشان داده شده است.



شکل ۳: مدل‌سازی پل بیل امرسون در نرم‌افزار

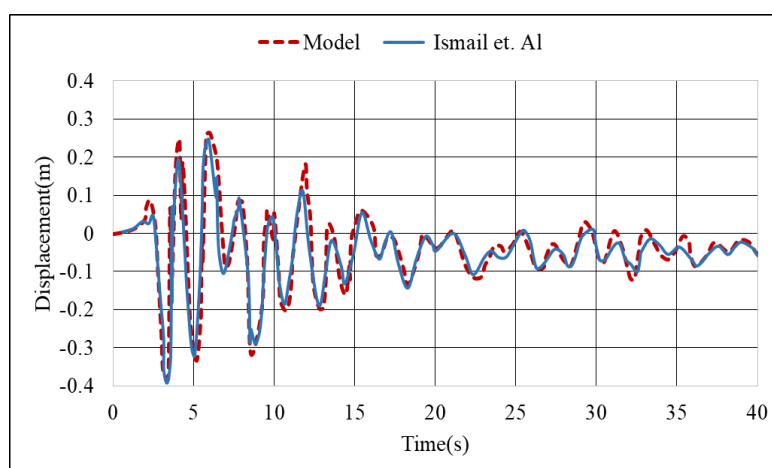
در جدول ۱ نتایج حاصل از ۶ مود ارتعاش مدل نرم‌افزاری و پژوهش محمد اسماعیل و همکاران [۷] مقایسه گردید. همانطور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود، درصد اختلاف کمتر از ۶ درصد می‌باشد که نشان دهنده دقت بالای مدل نرم‌افزاری می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه فرکانس ۶ مود ارتعاش مدل نرم افزاری و پژوهش محمد اسماعیل و همکاران (۲۰۱۳) (فرکانس برحسب Hz)

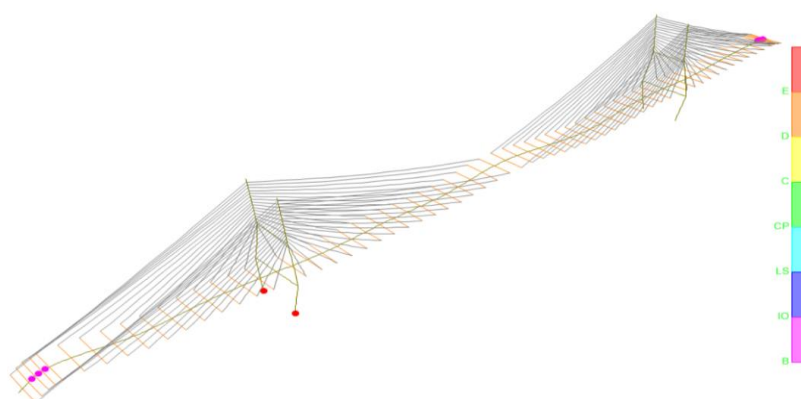
مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم	مود پنجم	مود ششم	
۰/۲۶۲۹	۰/۳۴۰۶	۰/۴۵۱۵	۰/۴۸۱۱	۰/۴۹۹۲	۰/۵۳۰۹	محمد اسماعیل و همکاران [۷] (۲۰۱۳)
۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۵۱۱	۰/۵۴	نتایج مدلسازی نرم افزاری
۲/۷	۵/۷	۰/۳	۳/۹	۲/۴	۱/۷	درصد اختلاف %

در شکل ۴ نتایج مدلسازی جابجایی عرشه‌ی پل کابلی در وسط دهانه‌ی میانی با پژوهش محمد اسماعیل و همکاران [۷] تحت زلزله‌ی سانفرناندو<sup>۱۲</sup> نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اختلاف بین پاسخ‌های به‌دست‌آمده از مدل بکار گرفته شده در این مقاله و مدل مورد استفاده در پژوهش محمد اسماعیل و همکاران در حد قابل قبولی بوده و نتایج مدل رضایت‌بخش بوده است.

برای تعریف مفصل پلاستیک در پیلون‌ها در محل اتصال پیلون با زمین و محل اتصال پیلون و عرشه و محل اتصال تیر فوقانی با پیلون مفصل خمشی و برشی تعریف گردید و همچنین برای تیرهای بین پیلون نیز مفصل خمشی و برشی در محل اتصال‌ها تعریف شد. در شکل ۵ جابجایی‌ها و مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل پل کابلی بیل امرسون تحت زلزله‌ی سانفرناندو نشان داده شده است. عرشه پل با توجه به مطالعات گذشته در زلزله نشان داده شده است که به صورت الاستیک باقی می‌ماند و وارد ناحیه غیرخطی نمی‌گردد [۱۵-۱۶] که همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است مفصل عرشه پل به سطح عملکرد IO نرسیده است که اثبات کننده این موضوع است که به صورت الاستیک باقی مانده است.



شکل ۴: صحت سنجی جابجایی عرشه‌ی پل در مدل بکار گرفته شده در پژوهش حاضر و پژوهش محمد اسماعیل و همکاران (۲۰۱۳)



شکل ۵: جابجایی و مفاصل پلاستیک تشکیل شده در مدل پل کابلی بیل امرسون تحت زلزله‌ی سانفرناندو

<sup>12</sup> San Fernando

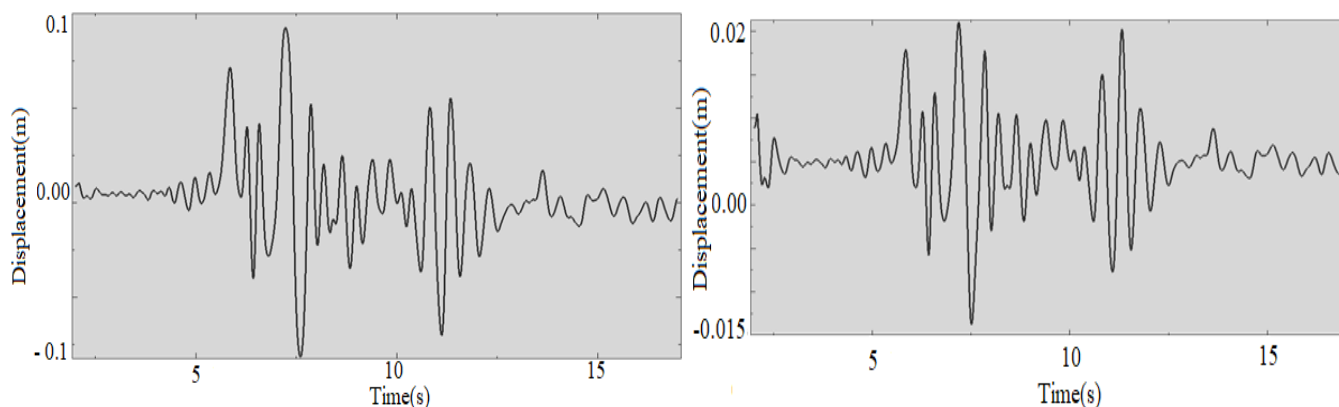
## ۵- تحلیل دینامیکی فزاینده پل کابلی

تحلیل دینامیکی فزاینده، یک تحلیل دینامیکی غیر خطی بوده که به کمک آن می‌توان مقدار خسارت وارده را برحسب شدت تحریک زلزله، مشخص ساخت. در این روش از مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های گذشته به نحوی که رفتار سازه را از حالت الاستیک خطی تا مرحله‌ی فروریزش سازه پوشش دهد، استفاده می‌گردد. هر رکورد زلزله به نحوی مقیاس می‌شود تا گستره مناسبی از شدت‌های لرزه‌ای از حد الاستیک تا خرابی کامل را پوشش دهد.

به منظور در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت ذاتی موجود در زلزله و همچنین ارزیابی پاسخ لرزه‌ای پل‌های مورد مطالعه، برای لحاظ کردن عدم قطعیت موجود در محتوای فرکانسی و شکل طیفی زلزله‌ها، می‌بایست تعداد مناسبی از رکورد‌های زلزله مورد استفاده قرار گیرد. بدین منظور مدل پل کابلی بیل امرسون تحت ۲۰ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل و ۲۰ شتاب‌نگاشت دور از گسل پیشنهادی آیین نامه FEMA P695 [17] تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده<sup>۱۳</sup> گردید. به این صورت که حداکثر شتاب زلزله‌ها به مقدار ۱g مقیاس می‌گردد و سپس مقدار PGA از ۰/۱g تا ۱/۵g با گام‌های یکسان ۰/۱ افزایش داده شد [۱۸ و ۱۹]. در اینجا برای نمونه جابجایی عرشه‌ی پل تحت یک رکورد دور از گسل لوما پریتا<sup>۱۴</sup> و یک رکورد نزدیک گسل نورتریج (جدول ۲) در شدت‌های ۰/۱g و ۰/۵g در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول ۲: دو نمونه از رکورد زلزله‌های مورد استفاده

رکورد زلزله	فاصله محل ثبت رکورد تا گسل (km)	ایستگاه ثبت رکورد	بزرگای زلزله	زاویه راستای رکورد	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PGV/PGA (s)
Northridge 1994	7.1	Newhall, CA- Los Angeles County Fire #24279	6.7	360	578.2	94.7	0.164
Loma Prieta 1989	16.9	CoyoteLakeDam, CA #57217	6.5	285	471	37.5	0.079



رکورد زلزله نورتریج با  $PGA=0.5g$

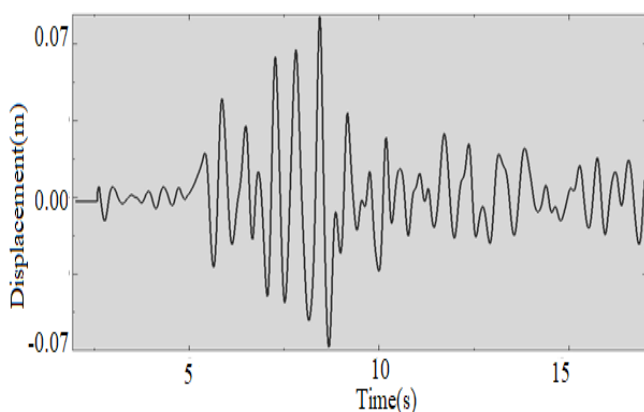
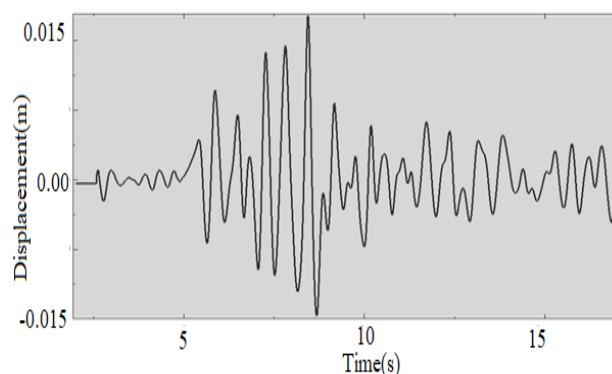
رکورد زلزله نورتریج با  $PGA=0.1g$

شکل ۶: نمودار جابجایی عرشه‌ی پل تحت زلزله نورتریج در شدت‌های ۰/۱g و ۰/۵g

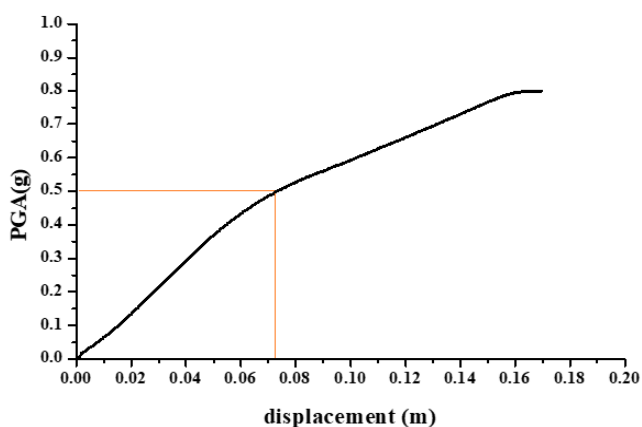
در نهایت با استخراج حداکثر پاسخ سازه در شدت‌های مختلف، منحنی دینامیکی فزاینده‌ی سازه، تحت هر رکورد زلزله ترسیم می‌گردد. در شکل‌های ۸ و ۹ منحنی دینامیکی فزاینده‌ی سازه تحت تک رکورد زلزله نورتریج و لوما پریتا ترسیم شده است.

<sup>13</sup> Incremental Dynamic Analysis

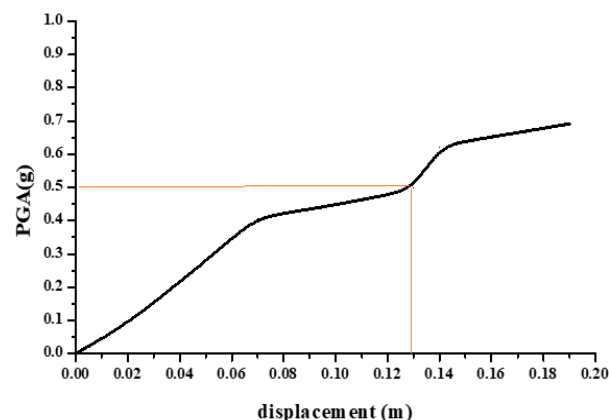
<sup>14</sup> Loma Prieta

رکورد زلزله لوما پریتا با  $PGA=0.5g$ رکورد زلزله لوما پریتا با  $PGA=0.1g$ 

شکل ۷: نمودار جابجایی عرشه‌ی پل تحت زلزله لوما پریتا در شدت‌های  $0.1g$  و  $0.5g$



شکل ۹: منحنی دینامیکی فزاینده پل کابلی بیل امرسون تحت رکورد حوزه‌ی دور از گسل لوما پریتا



شکل ۸: منحنی دینامیکی فزاینده پل کابلی بیل امرسون تحت رکورد حوزه‌ی نزدیک گسل نورث ریج

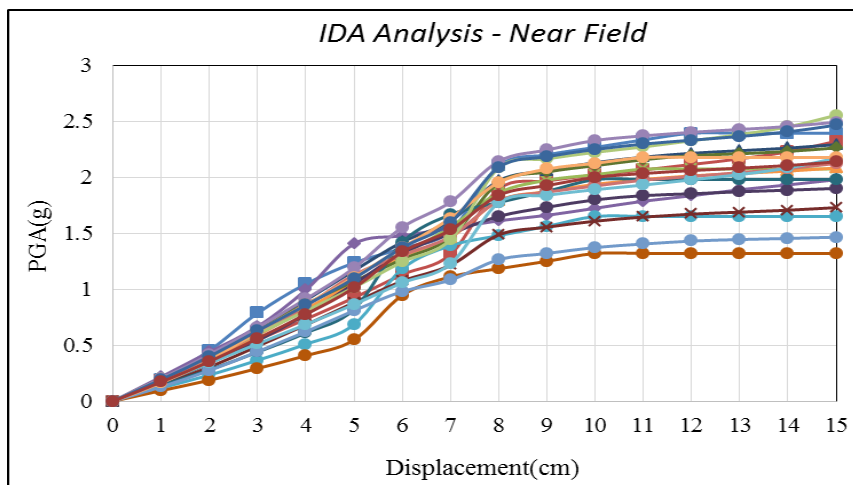
همانطور که در شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، پل کابلی بیل امرسون تحت مقدار  $PGA$  یکسان، در شرایطی که تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل قرار گرفته است، به مراتب جابجایی بیشتری نسبت به حالتی که تحت زلزله‌ی حوزه‌ی دور از گسل قرار گرفته است، تجربه کرده و در نتیجه خرابی بیشتری از خود نشان داده است. به‌عنوان مثال تحت حداکثر شتاب زمین برابر با  $0.5g$  عرشه‌ی پل کابلی بیل امرسون تحت رکورد حوزه‌ی دور از گسل لوما پریتا جابجایی برابر با  $0.072$  متر را تجربه کرده است در صورتی که تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل نورث ریج با حداکثر شتاب زمین برابر  $0.5g$ ، این جابجایی حدوداً دو برابر شده و به مقدار  $0.13$  متر می‌رسد.

با تکرار این عملیات برای هر دو مجموعه رکورد نزدیک گسل و دور از گسل منحنی‌های شکل ۱۰ و ۱۱ که موسوم به منحنی IDA می‌باشد، بدست می‌آید. سپس دسته منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده، ترسیم گردید و خلاصه‌سازی شده‌اند. درنهایت با تعیین حالت‌های حدی متناظر با سطوح عملکردی فروپاشی، ظرفیت بیشینه شتاب زمین لرزه سازه‌ی مذکور و منحنی‌های شکنندگی برای مدل ارائه شده است.

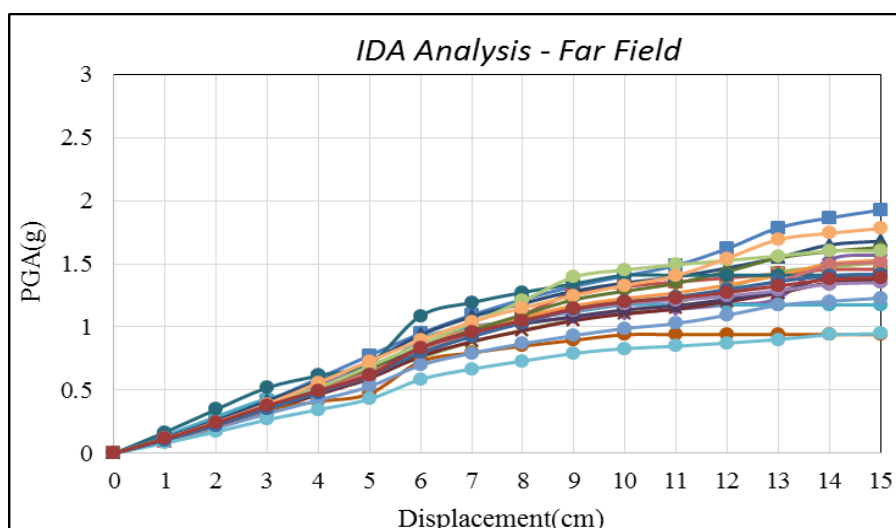
در انجام تحلیل دینامیکی فزاینده از دو کمیت اساسی تحت عنوان اندازه شدت و اندازه خسارت استفاده می‌گردد. کمیت‌های مختلفی نظیر بیشینه شتاب زمین لرزه ( $PGA$ )، بیشینه سرعت زمین ( $PGV$ )، شتاب طیفی متناظر برای مود اول ( $Sa(T1)$ ) برای بیان شدت زلزله‌های انتخابی پیشنهاد شده است؛ که در این پژوهش معیار بیشینه شتاب زمین لرزه به‌عنوان معیار شدت انتخاب شده است. اندازه



خسارت در واقع یک کمیت قابل مشاهده است که از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی به دست می آید. انتخاب یک کمیت مناسب برای اندازه خسارت با توجه به نوع کاربرد مسئله و سازه مورد نظر تعیین می گردد که در این پژوهش به دلیل تأثیر بسزای ماکزیمم جابجایی عرشه‌ی پل به عنوان معیار خرابی در نظر گرفته شده است، که از آیین نامه Hazus [۲۰] برداشت گردید.



شکل ۱۰: منحنی‌های دینامیکی فزاینده پل بیل امرسون تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل



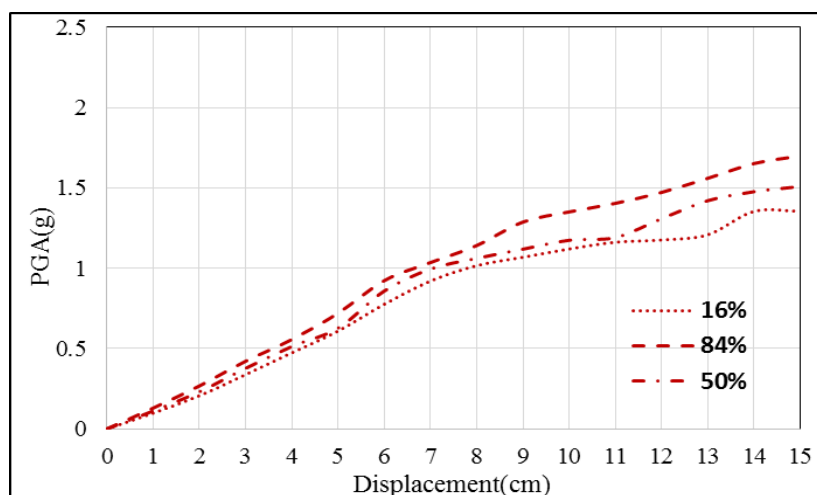
شکل ۱۱: منحنی‌های دینامیکی فزاینده پل بیل امرسون تحت رکوردهای حوزه‌ی دور از گسل

همان‌طور که در شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می گردد، در اغلب موارد رفتار منحنی تحلیل دینامیکی فزاینده سازه مورد مطالعه به گونه‌ای است که در ابتدا رفتار خطی داشته و پس از افزایش بیشینه شتاب، جابجایی منحنی فزاینده به صورت غیر خطی درآمده و در انتهای آنالیز، منحنی به صورت صاف و افقی می شود.

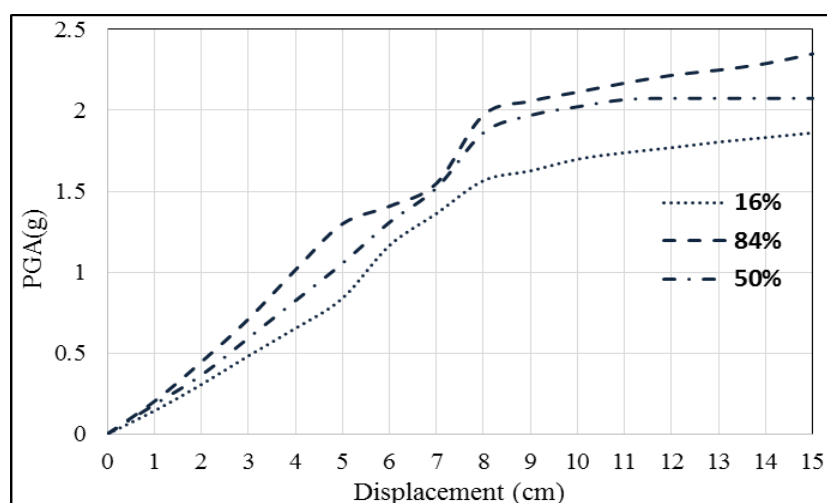
## ۶- خلاصه‌سازی دسته منحنی‌های IDA

بعد از انجام تحلیل دینامیکی فزاینده، دسته‌ای از منحنی‌های IDA به دست می آید. با توجه به تعداد زیاد نمودارها در یک دسته منحنی که هر کدام نمایانگر رفتار خاصی از سازه تحت رکورد زلزله‌ی مخصوص به خود می باشند و از طرفی یک منحنی تک رکورد نیز بیانگر عملکرد کلی سازه نمی باشد. به همین منظور برای دستیابی به یک حالت کلی از رفتار سازه و کاهش پراکندگی

اطلاعات می توان دسته منحنی های دینامیکی فزاینده را خلاصه نمود. این امر از طریق روش های آماری میسر می گردد و به این صورت می توان میزان ظرفیت پل مورد مطالعه را به طور ملموس تری ارزیابی نمود. از این رو در این بخش سه مقدار آماری صدک های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ از هر یک از دسته منحنی های دینامیکی فزاینده استخراج گردیده و از آن برای مقایسه دسته منحنی های مختلف با یکدیگر و ارزیابی احتمالاتی سازه ها استفاده شده است. منحنی های دینامیک فزاینده در حالت کلی و منحنی های خلاصه شده توسط صدک های آماری مذکور به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ برای زلزله های حوزه ی نزدیک و دور از گسل نشان داده شده است.

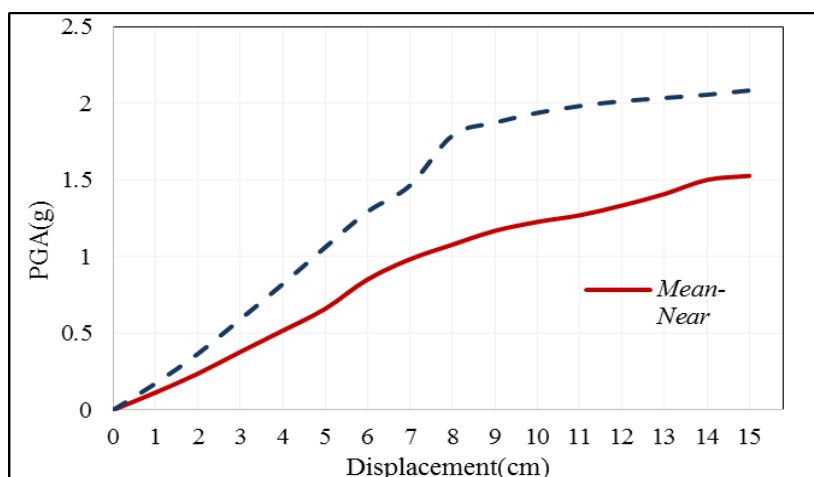


شکل ۱۲: منحنی های خلاصه سازی شده ی دینامیک فزاینده تحت رکوردهای حوزه ی نزدیک گسل



شکل ۱۳: منحنی های خلاصه سازی شده ی دینامیک فزاینده تحت رکوردهای حوزه ی دور از گسل

در شکل ۱۴ میانگین منحنی های تحلیل دینامیکی فزاینده تحت رکوردهای حوزه ی دور و نزدیک گسل ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می گردد، در یک شتاب لرزه ی ثابت، جابجایی به مراتب مقادیر بیشتری تحت رکوردهای حوزه ی نزدیک گسل نسبت به رکوردهای حوزه ی دور از گسل ایجاد می گردد. همچنین اگر یک جابجایی به عنوان پارامتر خرابی هدف انتخاب شود، پل مورد مطالعه تحت رکورد حوزه ی نزدیک گسل به مراتب با شتاب کمتری خرابی هدف را محقق می سازد.



شکل ۱۴: میانگین منحنی‌های دینامیکی فزاینده تحت حوزه‌ی دور و نزدیک گسل

## ۷- تحلیل شکنندگی

مطابق مطالعات صورت گرفته منحنی شکنندگی را می‌توان به صورت تابع توزیع تجمعی لگاریتمی نرمال مطابق رابطه (۱) نشان داد:

$$P_f = P \left[ \frac{S_d}{S_c} \geq 1 \right] \quad (1)$$

که  $P_f$  احتمال تجاوز حالت تخریب خاص،  $S_d$  نیاز سازه و  $S_c$  ظرفیت سازه است.

اگر ظرفیت سازه ای و نیاز لرزه ای توسط توزیع لگاریتمی مشخص شده باشند، احتمال رسیدن یا عبور از یک حالت تخریب خاص بصورت لگاریتمی توزیع خواهد شد که می‌تواند بوسیله تابع چگالی احتمال تجمعی لگاریتمی رابطه (۲) بدست آید: [۲۴-۲۱]

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{S_d}{S_c} \right)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right] \quad (2)$$

که  $\beta_d$  انحراف معیار استاندارد لگاریتمی برای نیاز،  $\beta_c$  انحراف معیار استاندارد لگاریتمی برای ظرفیت و  $\Phi$  تابع توزیع نرمال استاندارد است.

تقاضای لرزه ای بصورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\ln(S_d) = a * \ln(x) + b \quad (3)$$

که  $a$  و  $b$  ضرایب رگرسیون و  $x$  پارامتر شدت حرکت زمین (PGA) است.

انحراف استاندارد لگاریتمی مرکب  $\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}$  که بعنوان پراکندگی می‌باشد.

در ادامه در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ منحنی‌های شکنندگی پل کابلی مورد مطالعه به ترتیب تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک و دور از گسل در چهار سطح خرابی (ناچیز<sup>۱۵</sup>، متوسط<sup>۱۶</sup>، زیاد<sup>۱۷</sup> و کامل<sup>۱۸</sup>) مطابق با آیین نامه Hazus [۲۰] ترسیم شد. همچنین نمودار میانه‌ی شکنندگی

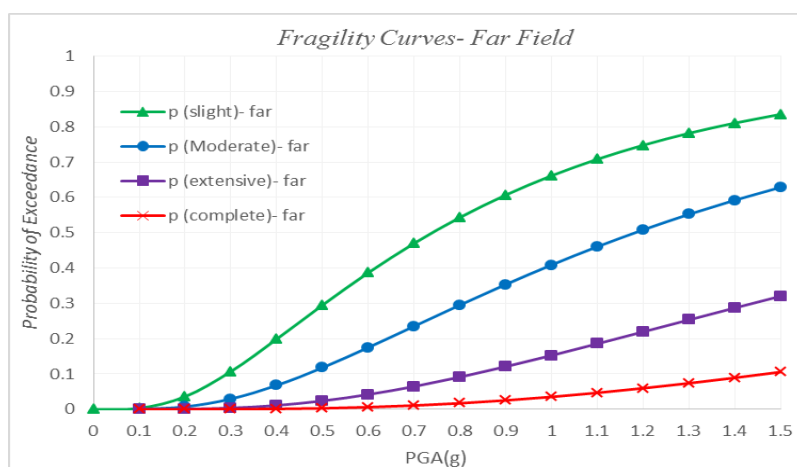
<sup>15</sup> slight

<sup>16</sup> moderate

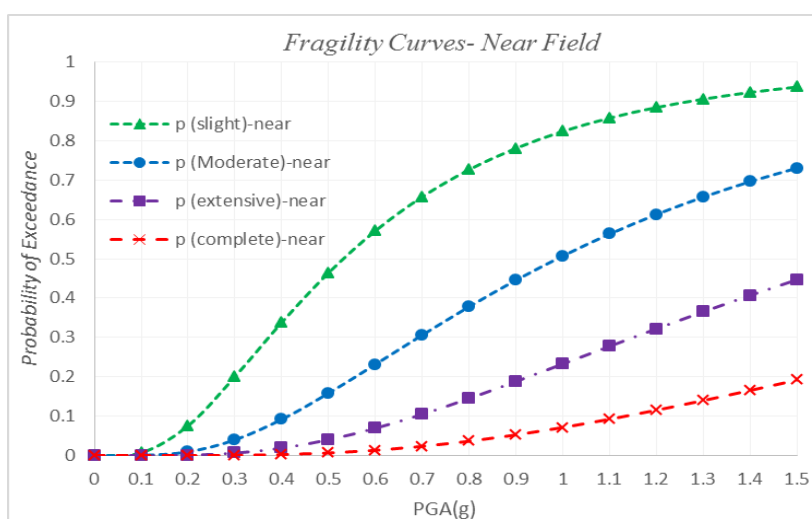
<sup>17</sup> extensive

<sup>18</sup> complete

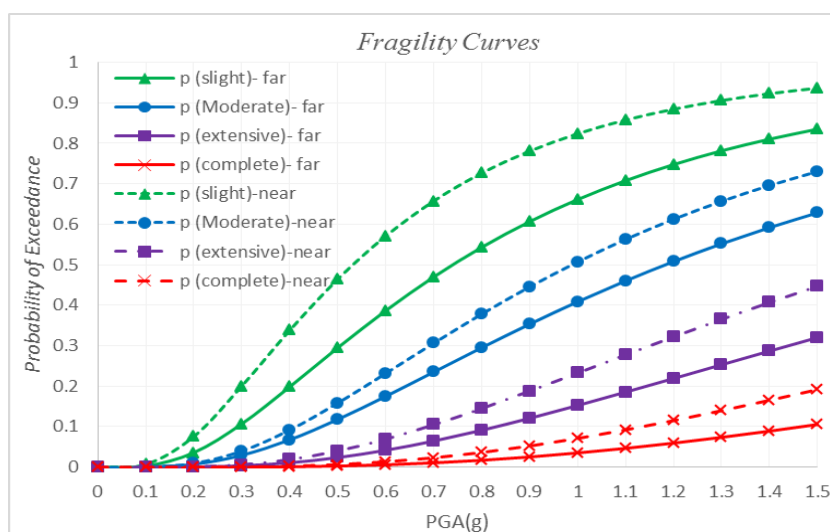
(مقدار PGA در احتمال خرابی ۵۰ درصد) که شاخص خوبی برای مقایسه منحنی‌های شکنندگی است، در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



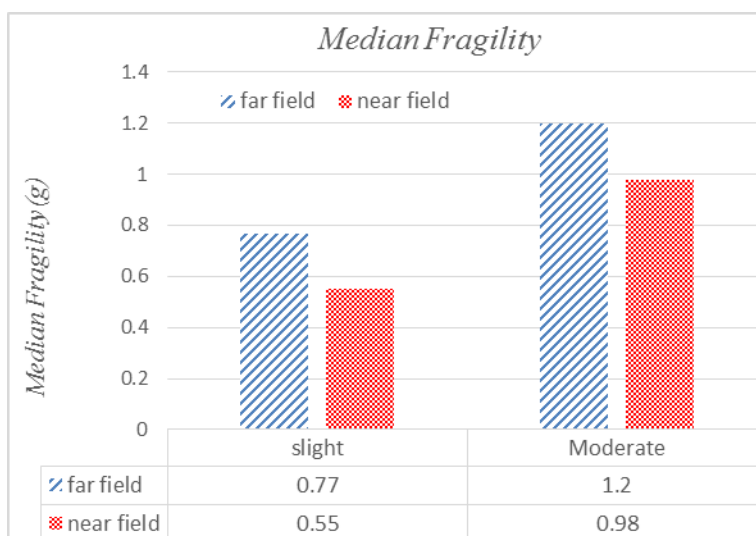
شکل ۱۵. منحنی‌های شکنندگی پل کابلی بیل امرسون تحت رکوردهای حوزه‌ی دور در چهار سطح آسیب پذیری



شکل ۱۶. منحنی‌های شکنندگی پل کابلی بیل امرسون تحت رکوردهای حوزه‌ی نزدیک گسل در چهار سطح آسیب پذیری



شکل ۱۷. منحنی‌های شکنندگی پل کابلی بیل امرسون تحت رکوردهای حوزه‌ی دور و نزدیک گسل در چهار سطح آسیب پذیری



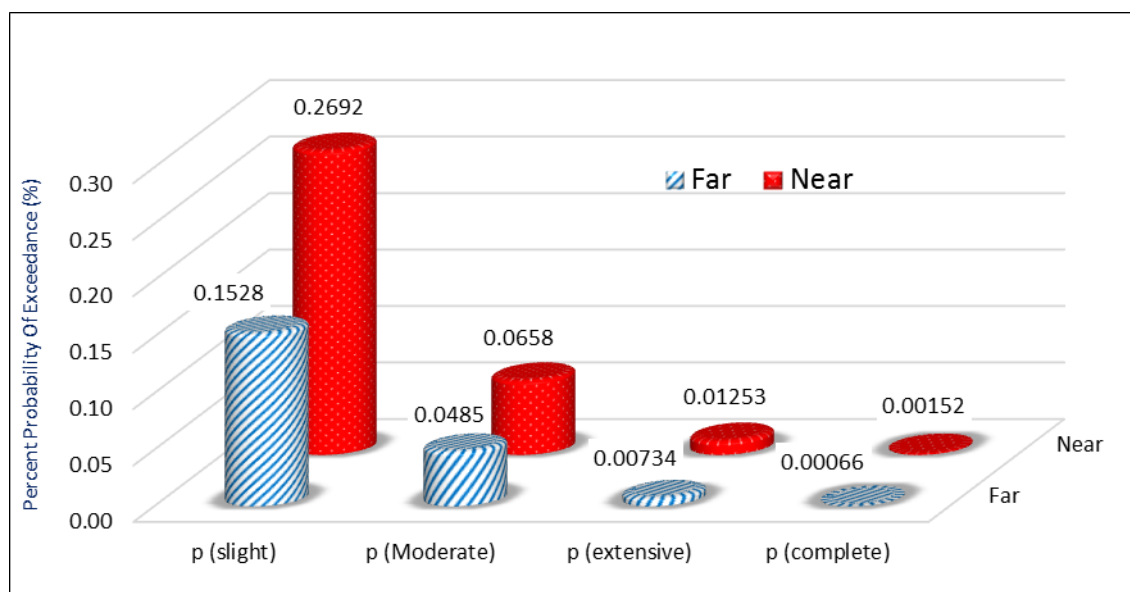
شکل ۱۸: مقادیر میانه شکنندگی زلزله حوزه دور و نزدیک گسل

### ۸- ریسک پذیری پل در زلزله

در آیین نامه ۲۸۰۰ [۲۵] برای سطح خطر ۱ «زلزله طرح»<sup>۱۹</sup> نسبت شتاب مبنای طرح (A) را در مناطق مختلف کشور، بر اساس میزان خطر لرزه خیزی آنها ارائه کرده است. این ضرایب در واقع احتمال ۱۰٪ رویداد در ۵۰ سال عمر مفید سازه معادل دوره بازگشت ۴۷۵ سال می‌باشد (رابطه (۴)).

$$APE = 1 - \exp\left(-\frac{50}{475}\right) = 10\% \quad (۴)$$

آیین نامه ۲۸۰۰ شتاب مبنای طرح را برای سطح خطر خیلی زیاد برابر ۰/۳۵ ارائه کرده است. با فرض  $PGA=0.35g$  احتمال آسیب پذیری پل در دو حالت دور و نزدیک گسل در چهار سطح خرابی در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۹: ریسک پذیری پل در سطح خطر ۱ در چهار سطح عملکرد در حالت دور و نزدیک گسل

<sup>19</sup> Design Base Earthquake

## ۹- نتیجه گیری

- پل‌ها از جمله زیرساخت‌های اساسی یک کشور به شمار می‌آیند که در صورت بروز فعالیت‌های لرزه‌ای شدید و بروز پدیده فروپاشی، می‌تواند سبب بروز بحران شدیدی در منطقه شوند. با توجه به لزوم استفاده از پل‌ها که به‌عنوان زیرساخت‌های اساسی شریان‌های نقل و انتقالات می‌باشند، لذا می‌بایست این سازه‌ها در مقابل مخاطرات طبیعی از جمله زلزله به‌طور کامل ایمن و پایدار باشند. به همین دلیل در تحقیق حاضر احتمال آسیب پذیری لرزه‌ای پل کابلی بیل امرسون تحت دو مجموعه ۲۰ تایی رکورد دور و نزدیک گسل محاسبه گردید و منحنی‌های IDA و منحنی‌های شکنندگی در هر دو حالت ترسیم گردید.
- پل کابلی بیل امرسون تحت شتاب‌های یکسان، در شرایطی که تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک گسل قرار گرفته است به مراتب جابجایی‌های بیشتری را نسبت به حالتی که تحت زلزله‌ی حوزه‌ی دور از گسل قرار گرفته، تجربه کرده و خرابی بیشتری از خود نشان داده است.
- تحت حداکثر شتاب زمین برابر با  $0.5g$  عرشه‌ی پل کابلی بیل امرسون تحت رکورد حوزه‌ی دور از گسل لوما پریتا جابجایی برابر با  $0.72$  متر را تجربه می‌نماید در صورتی که تحت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک نورث‌ریج با حداکثر شتاب زمین یکسان این جابجایی حدوداً دو برابر شده و به مقدار  $0.13$  متر می‌رسد.
- با توجه به منحنی‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA) رفتار منحنی IDA پل مورد مطالعه به‌گونه‌ای است که ابتدا رفتار خطی داشته و با افزایش بیشینه شتاب، منحنی به‌صورت غیر خطی درآمده و در انتها منحنی به سمت افقی و خرابی کامل متمایل می‌گردد. به این معنی که با افزایش ناچیز شتاب، جابجایی به شدت افزایش می‌یابد.
- اگر یک جابجایی به‌عنوان پارامتر خرابی هدف انتخاب شود، سازه‌ی مورد مطالعه تحت رکورد حوزه‌ی نزدیک گسل به‌مراتب با شتاب کمتری خرابی هدف را محقق می‌سازد.
- مقادیر میانه شکنندگی (مقدار PGA در احتمال آسیب ۵۰ درصد) پل کابلی در سطوح خرابی ناچیز و متوسط در حالت دور از گسل به ترتیب برابر با  $0.77g$  و  $1.2g$  و در حالت نزدیک گسل به ترتیب برابر با  $0.55g$  و  $0.98g$  می‌باشد، که به ترتیب نشان دهنده افزایش ۴۰ و ۲۲/۴ درصدی در مقادیر میانه شکنندگی سازه دور از گسل نسبت به نزدیک گسل می‌باشد.
- احتمال خرابی کامل و زیاد پل کابلی مورد بررسی در حالت دور از گسل در  $1.5g$  حدوداً به ترتیب برابر با ۱۰ و ۳۲ درصد می‌باشد در حالی که در حالت نزدیک گسل این مقدار به حدود ۱۹ و ۴۴ درصد افزایش می‌یابد، که نشان دهنده افزایش آسیب پذیری سازه در حالت نزدیک گسل می‌باشد.
- به علت پیوند بالا و نرم بودن سیستم‌های پل‌های کابلی آسیب پذیری ناچیزی در زلزله دارند به گونه‌ای منحنی شکنندگی پل کابلی مورد بررسی در حالت خرابی کامل و زیاد تا  $1.5g$  به مقادیر میانه شکنندگی نرسیده است.
- همانطور که نشان داده شد ریسک پذیری پل در طول ۵۰ سال در سطح خطر ۱،  $PGA=0.35g$  بسیار ناچیز می‌باشد که نشان دهنده عملکرد مناسب پل می‌باشد.

## سپاسگزاری

این تحقیق با استفاده از پژوهانه اعطایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره BNUT/370680/97 انجام گرفته است. نویسندگان مقاله از این حمایت مالی کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- ۱- نشریه ۵۱۱، (۱۳۹۰)، «راهنمای بهسازی لرزه‌ای پل‌ها» معاونت نظارت راهبردی دفتر نظام فنی اجرایی.
- 2- Galal, K. and A. Ghobarah, (2006), Effect of near-fault earthquakes on North American nuclear design spectra. Nuclear engineering and design. 236(18): p. 1928-1936

- 3- Li, H., Liu, J., & Ou, J. (2011). Seismic response control of a cable-stayed bridge using negative stiffness dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 18(3), 265-288.
- 4- Tavares, D., Padgett, J., (2012). Fragility curves of typical as-built highway bridges in eastern Canada, *Engineering Structures* 40 (2012) 107–118.
- 5- Pipinato, A., Pellegrino, C., Fregno, G., & Modena, C. (2012). Influence of fatigue on cable arrangement in cable-stayed bridges. *International Journal of Steel Structures*, 12(1), 107-123.
- 6- Cai, J. G., Xu, Y. X., Zhuang, L. P., Feng, J., & Zhang, J. (2012). Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(5), 323-334.
- 7- Ismail, M., Casas, J.R. and Rodellar, J., 2013. Near-fault isolation of cable-stayed bridges using RNC isolator. *Engineering structures*, 56, pp.327-342.
- 8- Ding, Y., Li, A., Du, D., & Liu, T. (2010). Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(6), 725-739
- 9- Han, S. H., Lee, W. S., & Bang, M. S. (2011). Probabilistic optimal safety with minimum life-cycle cost based on stochastic finite element analysis of steel cable-stayed bridges. *International Journal of Steel Structures*, 11(3), 335
- 10- Li, H., Li, S., Ou, J., & Li, H. (2014). Reliability assessment of cable-stayed bridges based on structural health monitoring techniques. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(9), 829-845.
- 11- Shrestha, B. (2015). Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 180-187.
- 12- Koh, H. M., Lim, J. H., Kim, H., Yi, J., Park, W., & Song, J. (2017). Reliability-based structural design framework against accidental loads–ship collision. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(1), 171-180
- 13- Chen, G., Yan, D., Wang, W., Zheng, M., Ge, L. and Liu, F., 2007. Assessment of the Bill Emerson memorial cable-stayed bridge based on seismic instrumentation data (No. UTC-R164). Missouri University of Science and Technology. Center for Infrastructure Engineering Studies.
- 14- CSI, SAP-2000 Manual, Static and dynamic finite element analysis of structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.
- 15- 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.
- 16- Pahlavan, H., Zakeri, B., Amiri, G. G., & Shaijanfar, M. (2015). Probabilistic vulnerability assessment of horizontally curved multiframe RC box-girder highway bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), 04015038.
- 17- FEMA. Quantification of building seismic performance factors. FEMA P695. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC; June 2009.
- 18- Pahlavan, H., Naseri, A., Einolahi, A. (2018). 'Probabilistic Seismic Vulnerability assessment of RC Frame Structures Retrofitted with Steel Jacketing', *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, doi: 10.22060/ceej.2018.13692.5459.
- 19- A. Naseri, H. Pahlavan, G. Ghodrati Amiri, Probabilistic seismic assessment of RC frame structures in North of Iran using fragility curves, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(4) (2017) 58-78.
- 20- HAZUS-MH MR5, Multi-Hazard loss Estimation Methodology: Earthquake Model. Department of Homeland security, FEMA, Washington, D.C, 2003.
- 21- Roshan, A. M. G., Naseri, A., & Pati, Y. M. (2018). Probabilistic evaluation of seismic vulnerability of multi-span bridges in northern of Iran. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(1), 36-54.
- 22- 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', *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(3), pp. 529-542. doi: 10.22060/ceej.2017.12135.5130.
- 23- Shamekhi amiri, M., Naseri, A., Messgarpour Amiri, M. (2019). 'Probabilistic Evaluation, Seismic retrofitting, Reinforced concrete structures, Vertical link Structures', *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, doi: 10.22060/ceej.2019.14313.5621
- 24- Pahlavan, H., Zakeri, B., & Ghodrati Amiri, G. (2017). Probabilistic Performance Assessment of Retrofitted Horizontally Curved Multi-Frame RC Box-Girder Bridges. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 11(04), 1750010.
- 25- Standard No. 2800, (2015). Iranian code of practice for seismic resistant design of building. Fourth ed., Building and Housing Research Center, BHRC publication, Tehran.