

## Investigating the Effect of Vertical Component of Earthquake on Variation of Axial forces in RC Bridge Pier with FPS Isolators

Golshid Shid<sup>1</sup>, Mahmoud R. Shiravand<sup>2\*</sup>, Shima Mahboubi<sup>3</sup>

- 1- Ph. D candidate, Dept. of Civil, Water and Environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
2- Associate Professor, Dept. of Civil Water and Environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
3- Assistant Professor, Dept. of Civil Water and Environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Bridges are key elements in the highway transportation system. Many bridges collapsed or were extensively damaged in past earthquakes, which highlighted the vulnerabilities of existing bridges. Therefore, different rehabilitation methods have been developed for mitigating earthquake hazards in new bridges or retrofitting existing ones. Isolation systems are one of the most commonly used devices that have been developed to dissipate earthquake energy and improve the seismic behavior of bridges. Friction pendulum System (FPS) is a sliding-based isolator, widely used in the seismic design of bridges. Recent investigations show that bridges with FPS isolators exhibit good performance against seismic forces due to the energy dissipation of the isolation device. The purpose of this study is to assess the effects of the vertical component of the earthquake on variations of axial forces of piers in a three-span continuous deck reinforced concrete (RC) bridge, seismically isolated by the FPS. To this end, incremental dynamic analyses (IDA) are conducted using a suite of 24 near-fault ground motions to evaluate the dynamic behavior of the bridge piers. IDA curves and Fragility curves are generated with peak Ground acceleration and column drift as intensity measure and Engineering Demand Parameter (EDP), respectively. The results showed that the vertical component of earthquake can increase the axial forces of piers significantly. Moreover, the damage probability of the moderate and extensive damage states showed 6% and 24% increase, respectively, And The damage probability of Isolators increased by 21% considering the vertical component of the earthquake.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 08 February 2023  
**Revise Date:** 17 April 2023  
**Accept Date:** 04 May 2023

### Keywords:

Concrete Bridge  
Vertical Component Of  
Earthquake  
Incremental Dynamic Analysis  
Friction Pendulum System  
Fragility Curve

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.383019.3022>

\*Corresponding author: Mahmoudreza Shiravand.  
Email address: m\_shiravand@sbu.ac.ir

## بررسی اثر مولفه قائم زلزله بر تغییرات نیروی محوری پایه پل بتنی با جداگر پاندولی اصطکاکی (FPS)

گلشید شیدا<sup>۱</sup>، محمودرضا شیرواندا<sup>۲\*</sup>، شیما محبوبی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

پل‌ها از جمله سازه‌های اصلی و حیاتی در هر کشور می‌باشند و لازم است امکان بهره‌وری از آن‌ها به‌ویژه در هنگام وقوع حوادثی مانند زلزله به منظور امداد رسانی فراهم باشد. وقوع خرابی زیاد و فروریزش بسیاری از پل‌ها در زلزله‌های گذشته منجر به توسعه روش‌های مقاوم سازی و بهسازی لرزه‌ای شده که یکی از این روش‌ها استفاده از انواع جداسازهای لرزه‌ای می‌باشد. همچنین با توجه به تحقیقات گسترده روی علل خرابی‌های موجود آمده در پل‌ها، مشخص شد که مولفه قائم زلزله و در پی آن تغییرات نیروی محوری ستون‌ها مساله‌ای اساسی و تاثیرگذار بر خرابی پایه‌ها بوده است. بنابراین در تحقیق پیش‌رو به بررسی تغییرات نیروی محوری و احتمال خرابی پایه‌ها و جداگرهای یک پل کوله باز سه دهانه با شاه‌تیرهای پیش‌ساخته بتنی و طول دهانه‌های متفاوت که توسط جداسازهای پاندولی اصطکاکی تک قوسی جداسازی شده است پرداخته شد. به منظور افزایش دقت پاسخ‌ها و در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی پدیده زلزله از تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شد و به کمک منحنی‌های شکنندگی احتمال خرابی پایه پل و جداگرها تحت اثر همزمان سه مولفه زلزله در مقایسه با اعمال دو مولفه بررسی شد. نتایج حاصل از مقایسه حداقل نیروی محوری فشاری و نیروی کششی ستون را افزایش داد و باعث افزایش احتمال خرابی پایه‌ها در سطح خرابی متوسط و گسترده به ترتیب به میزان شش و بیست و چهار درصد و در جداگرها به میزان بیست و یک درصد شد.

کلمات کلیدی: پل بتنی، مولفه قائم زلزله، تحلیل دینامیکی فزاینده، جداگر لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی، منحنی شکنندگی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.383019.3022">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.383019.3022</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.383019.3022">10.22065/jsce.2023.383019.3022</a>	۱۴۰۲/۱۰/۳۰	۱۴۰۲/۰۲/۱۴	۱۴۰۲/۰۲/۱۴	۱۴۰۲/۰۱/۲۸	۱۴۰۱/۱۱/۱۹
محمودرضا شیرواندا m_shiravand@sbu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

پل‌ها سازه‌های مهمی در سیستم حمل و نقل هر کشور می‌باشند که وظیفه حفظ ارتباط بین نقاط مختلف هر شهر یا کشور را برعهده دارند. در این میان خسارت زیاد پل‌ها در طی زلزله‌های گذشته همچون زلزله سن‌فرناندو ۱۹۷۱ و لوماپریتا ۱۹۸۹ نشان دهنده ضعف جدی در آیین‌نامه‌های طراحی همچون آیین‌نامه آشتو ۱۹۶۵ بود. همچنین این مساله زنگ خطری برای پل‌هایی بود که تا قبل از سال ۱۹۷۰ طراحی و ساخته شده بودند. چراکه این پل‌ها مقاومت ضعیفی در برابر بارهای لرزه‌ای داشتند [۱]. به طور کلی مرسوم است که پل‌ها را براساس تامین مقاومت کافی و همچنین تامین شکل‌پذیری به منظور برآوردن الزامات عملکرد لرزه‌ای طراحی می‌کنند. هنگامی که ستون‌های پل شکل‌پذیر طراحی شوند نیاز جابجایی‌های ناشی از زلزله را با پوسته پوسته شدن بتن و تسلیم آرماتورها پاسخ می‌دهند. پس از وقوع یک زلزله بزرگ ستون‌های آسیب دیده باید تعمیر و یا در صورت نیاز تعویض شوند که هزینه زیاد این مساله تلاش مهندسين سازه برای مقاوم‌سازی و تقویت پل‌های ساخته شده را به همراه داشت. پس از وقوع زلزله سان فرناندو ۱۹۹۱ اصلاحاتی در دستورالعمل‌های طراحی پل‌ها به منظور بهبود عملکرد آن‌ها صورت گرفت. تا اواسط سال ۱۹۸۰ میلادی، روش‌های مقاوم‌سازی به این صورت بود که عناصر پل را به صورت جزء به جزء تقویت می‌کردند به عنوان مثال، استفاده از پوشش فولادی برای ستون‌ها، اجرا و ساخت دیواری پرکننده مابین ستون‌ها، افزایش عرض مقاطع، کوله‌ها و سرستون‌ها، استفاده از کابل‌های نگهدارنده و به طور کلی تقویت موضعی پی و ستون‌ها از جمله روش‌های مقاوم‌سازی آن زمان بود. در این روش‌ها تمرکز اصلی روی افزایش مقاومت جانبی المان‌ها در برابر نیروهای اینرسی وارده ناشی از زلزله بود. غافل از اینکه در این روش‌ها اعضای تقویت شده به سبب سختی بیشتر، نیروی بزرگتری را جذب کرده و به هنگام انتقال بار جانبی به دیگر اعضای پل، آسیب جدی وارد می‌کنند [۲ و ۳]. با گذشت زمان و توسعه فناوری، امکانات و ابزارهایی به منظور برآوردن عملکرد لرزه‌ای بهتر سازه‌ها و طراحی پل‌های مقاوم در برابر زلزله شکل گرفت که جداگر لرزه‌ای از جمله آن‌ها می‌باشد که به شدت، پتانسیل بهبود عملکرد لرزه‌ای را بدون آسیب‌های عنوان شده در خصوص طراحی شکل‌پذیر ستون‌ها دارد. از آنجایی که یکی از علل اصلی خرابی‌های ناشی از زلزله، نزدیکی بین دوره تناوب اصلی ارتعاش سازه و محتوای فرکانسی ورودی لرزه‌ای است؛ جداگرها بهترین گزینه برای جلوگیری از بروز آسیب ناشی از این مساله هستند زیرا علاوه بر اینکه به سبب سختی افقی پایین خود اثر نیروهای اینرسی ناشی از مولفه‌های افقی زلزله وارده بر ستون را کاهش می‌دهند [۴]، با افزایش زمان تناوب پل باعث می‌شوند که سازه از محدوده انرژی مخرب زلزله خارج شود. همچنین جداگرها دارای قابلیت جذب انرژی هستند که به معنی افزایش میرایی و کاهش شبه شتاب متناظر در طیف طراحی می‌باشد که سبب می‌شود سازه نیروهای کمتری را جذب کند و در پی آن از تغییر مکان زیاد سیستم ناشی از انعطاف‌پذیری جانبی آن نیز جلوگیری شود. جداسازهای لرزه‌ای در پل‌ها بین پایه‌ها و عرشه قرار می‌گیرند و با افزایش انعطاف‌پذیری این ناحیه انتقال نیروها را کنترل کرده و اندرکنش نیرویی بین روسازه و زیرسازه را به حداقل می‌رسانند. جداگرهای لرزه‌ای معمولاً ترکیبی از نشیمن‌گاه‌های الاستومری، تکیه‌گاه‌های لغزنده و همچنین دستگاه‌های میرایی هستند. نشیمن‌های الاستومری از لایه‌های فولادی و لاستیک‌ها تشکیل شده‌اند که انعطاف‌پذیری جانبی را با حفظ سختی عمودی کافی فراهم می‌کنند. این جداگرها ابتدا در جداسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها در ژاپن و ایالات متحده و همچنین در چندین کشور دیگر مانند نیوزلند و ایتالیا به کار گرفته شدند و بعدها استفاده از آن‌ها گسترش یافت [۵ و ۷]. اما دیگر نوع جداگرها، جداگرهای لغزشی هستند که شامل یک سطح لغزنده‌اند که این سطح انرژی هیسترتیک را به وسیله اصطکاک مستهلک می‌کند و همچنین دارای المانی هستند که در آن نیروی بازگرداننده ایجاد شده و همین مساله باعث به حداقل رسیدن جابجایی‌های پسماند می‌شود. جداسازی لرزه‌ای پل‌ها به طور گسترده در نیوزلند و ایتالیا اجرا شده است [۸]. بیش از ۱۵۰ کیلومتر از عرشه یک پل در ایتالیا توسط جداگرهای لغزنده همراه با اشکال مختلف المان‌های بازگرداننده نیرو و المان‌های اتلاف انرژی جداسازی شده است. یکی از جداگرهای لغزشی پر کاربرد که هر دو ویژگی ذکر شده را باهم ترکیب می‌کند، جداگر پاندولی اصطکاکی (FPS<sup>۱</sup>) می‌باشد. [۹]. رویکرد استفاده از جداگرها بخش قابل توجهی از آثار مخرب ناشی از مولفه‌های افقی زلزله را حل می‌کند اما از طرفی مولفه قائم زلزله نیز می‌تواند عاملی تاثیرگذار در خرابی لرزه‌ای سازه‌ها و به‌ویژه در پل‌ها باشد، چراکه پل‌ها با عرشه پیوسته دارای درجه نامعینی به نسبت پایین‌تر و به تبع دارای پتانسیل بیشتر برای رسیدن به ناپایداری تحت بارهای لرزه‌ای هستند. مولفه قائم زلزله با تغییر در نیروی محوری ستون‌ها می‌تواند

<sup>۱</sup> Friction Pendulum System

عاملی مخرب در ایجاد شکست فشاری و یا شکست کششی در آن‌ها بوده و در واقع از اثرات آن می‌توان به دو مورد (۱) شکست برشی ستون ها به علت کاهش ظرفیت برشی و همچنین کاهش ظرفیت شکل‌پذیری در اثر تغییرات نیروی محوری و (۲) شکست فشاری آنها همچون کمانش آرماتورهای طولی و خرد شدن بتن به دلیل افزایش قابل توجه نیروی محوری و لنگرواژگونی به سبب مولفه قائم اشاره کرد [۱۰]. همچنین با ایجاد تغییرات در نیروی سطح، خصوصیات جداگر پاندولی اصطکاکی همچون ضریب اصطکاک دچار تغییرات خواهد شد. لازم به ذکر است که براساس آیین‌نامه‌های قدیمی طراحی در کالیفرنیا، تنها زمانی که پل در ساختمانی با حداکثر شتاب افقی بیش از  $0.6g$  قرار دارد می‌توان یک چهارم از بار مرده را به عنوان بار مولفه قائم زلزله به سازه اعمال کرد [۱۱]. پاپازگلو و همکارش شواهد تحلیلی و میدانی از اثرات مخرب مؤلفه قائم، هم بر روی ساختمان و هم بر روی پل‌ها را گزارش کردند. آنها ادعا کردند که نوسانات قابل توجه در نیروی محوری المان‌های قائم، منجر به کاهش ظرفیت برشی ستون‌ها می‌شود. این مشاهدات به کمک شبیه سازی عددی تأیید گردیدند [۱۲]. یو و همکاران نیز ۲۱ درصد افزایش در نیروی محوری و ۳ درصد تغییر در لنگر طولی در اثر منظور نمودن مؤلفه قائم را مشاهده نمودند. پس از آن‌ها گلوید معیاری در طراحی ۳۴ پل با شایسته‌های جعبه‌ای پیش تنیده ارائه داد که اثر مؤلفه قائم زلزله در آن منظور شده بود. مقادیر طراحی برای برش قائم عرشه و لنگر خمشی در دو دهانه سراسری پل‌ها نشان دادند که پاسخ دینامیکی حاصل از شتاب قائم می‌تواند بسیار بزرگتر از اثرات بار مرده باشد [۱۳]. گولروس و ابراهامسون یک پل بزرگراهی تک پایه و دو دهانه را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که با در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله، احتمال عبور لنگر منفی وسط دهانه از حد الاستیک درحالی که پل روی ساختمانی سنگی قرار دارد چهل درصد و در ساختمانی خاکی هفتاد درصد می‌باشد [۱۴]. ویا و همکاران اثر مؤلفه قائم زلزله را روی یک پل پیوسته راه‌آهن در نظر گرفتند و نتیجه گرفتند که با افزایش مؤلفه قائم زلزله احتمال خسارت در اعضای پل نیز افزایش می‌یابد [۱۵]. فرهمندتبار و همکاران یک پل کابلی قوسی را یکبار تحت دو مؤلفه و بار دیگر تحت سه مؤلفه زلزله قرار دادند و مشاهده کردند که مؤلفه قائم روی حداکثر پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل این نوع از پل‌ها بسیار تاثیرگذار بوده و می‌تواند پاسخ‌ها را تا چهار درصد افزایش دهد [۱۶]. وایووو و همکاران با بررسی اثر مؤلفه قائم روی پل‌های فولادی با عرشه مستقیم، اریب و خمیده دریافتند که مؤلفه قائم باعث افزایش صد درصدی لنگر در وسط دهانه و محل تکیه‌گاه‌ها می‌شود [۱۷]. همچنین سانیل تاپا و همکاران منحنی شکنندگی خرابی پایه‌ها را در جهت طولی و عرضی بصورت جداگانه با در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله برای یک پل بتن آرمه بزرگراهی توسعه دادند و دریافتند که مؤلفه قائم در جهت طولی تنها تا شتاب  $0.5g$  احتمال خرابی را افزایش می‌دهد و پس از آن احتمال خرابی کاهش می‌یابد و در جهت عرضی احتمال خرابی در تمام سطوح افزایش می‌یابد. همچنین پیشنهاد کرده‌اند که حداکثر پاسخ هر دو جهت در مطالعات پیش رو در نظر گرفته شود [۱۸].

با توجه به مطلب ارائه شده و تاثیر مؤلفه قائم زلزله بر نیروی محوری پایه پل‌ها و همچنین مشخص شدن تاثیر جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها بر بهبود عملکرد آن‌ها طی وقوع زلزله‌های گذشته، در این مقاله یک پل بتنی سه دهانه با طول دهانه‌های متفاوت و با عرشه بتنی پیوسته که به وسیله جداگرهای پاندولی اصطکاکی تک قوسی جداسازی شده، به صورت سه بعدی در نرم افزار اپنسیس<sup>۲</sup> مدل‌سازی شده است. به منظور افزایش دقت پژوهش و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی زلزله، نتایج مورد نظر توسط تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)<sup>۳</sup> با معیار شدت<sup>۴</sup> حداکثر شتاب زمین و معیار تقاضای<sup>۵</sup> در یافت پایه‌ها بدست آمده‌اند. در مجموع برای ۲۴ رکورد زلزله تحلیل انجام شده است. هدف از انجام این پژوهش در نظر گرفتن اثر نیروی قائم زلزله ناشی از شتاب مؤلفه قائم بر تغییرات نیروی محوری ستون‌های پل جداسازی شده و بررسی دقیق آن می‌باشد. همچنین احتمال خرابی پایه‌ها و جداگرها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل‌ها یک بار تنها با اعمال مؤلفه‌های افقی زلزله انجام شده و بار دیگر هر سه مؤلفه زلزله به سازه پل اعمال شده و خروجی‌های بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

<sup>2</sup> OpenSees

<sup>3</sup> Incremental Dynamic Analysis

<sup>4</sup> Intensity Measure

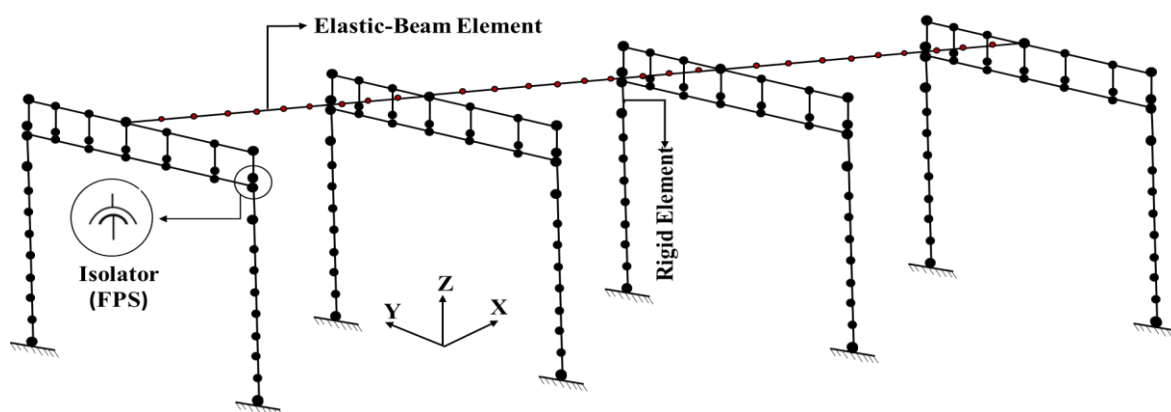
<sup>5</sup> Demand Measure

## ۲- مشخصات پل و نحوه مدل سازی

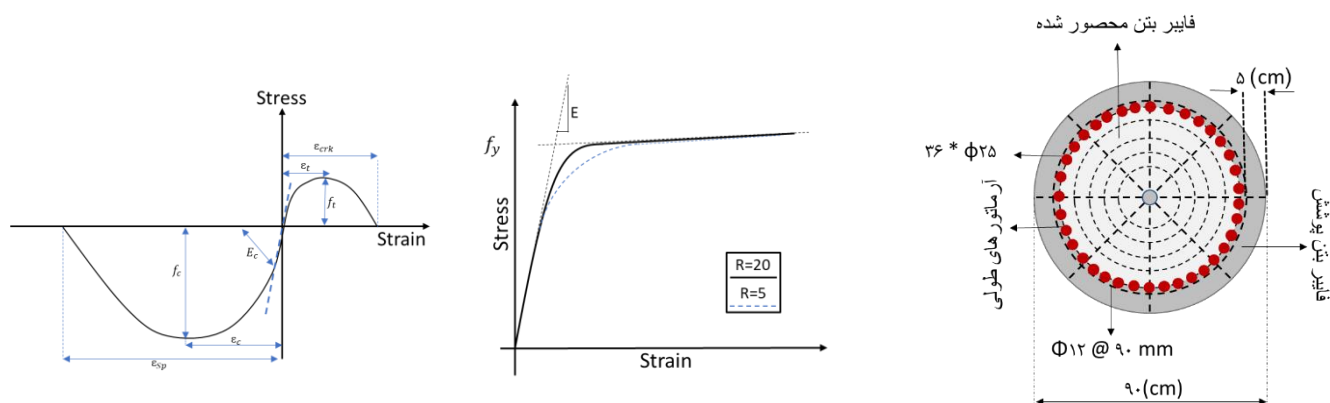
مشخصات پل مدل سازی شده در جدول ۱ قابل مشاهده است. مدل سازی عرشه به صورت تیر معادل می باشد. به این معنی که ابتدا یک تیر در نرم افزار اپنسیس مدل سازی شده و سپس مشخصات عرشه شامل ممان اینرسی در جهت طولی و عرضی، مساحت مقطع و ممان اینرسی قطبی عرشه به آن اختصاص داده شد. در شکل ۱ شمای کلی پل مدل سازی شده در نرم افزار قابل مشاهده می باشد. مدل سازی جداگرهای پاندولی اصطکاکی توسط المان Single Friction Pendulum Bearing Element به صورت طول صفر<sup>۶</sup> صورت گرفت که باتوجه به تغییرات نیروی محوری به سبب اعمال مولفه قائم زلزله به منظور افزایش دقت پاسخها از مدل اصطکاکی Velocity and Normal Force Dependent Friction که تغییرات ضریب اصطکاک را با تغییرات سرعت و نیروی سطح متغیر در نظر می گیرد، استفاده شد. هر دهانه به ده قسمت تقسیم شد و جرم متمرکز به گره های دوسر هر المان اختصاص یافت. همچنین جرم گسترده در طول پایه ها در نظر گرفته شد.

جدول ۱: مشخصات سازه ای پل بتنی.

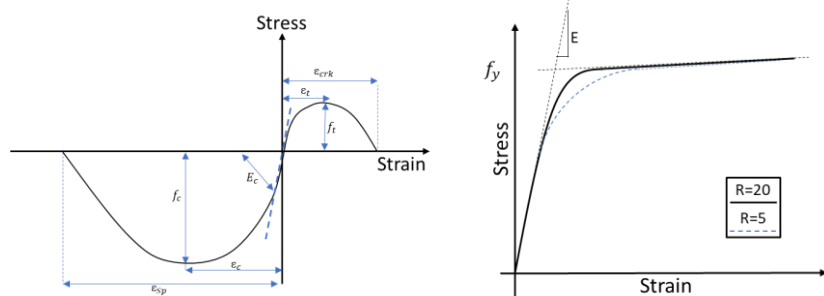
تعداد دهانه	ابعاد دهانه ها (m)		نوع عرشه	تعداد شاه تیر	ارتفاع پایه ها (m)	قطر ستون (m)
۳	۱۳/۴	۱۸/۳	پیوسته	۷ شاه تیر بتنی	۶,۷	۰/۹



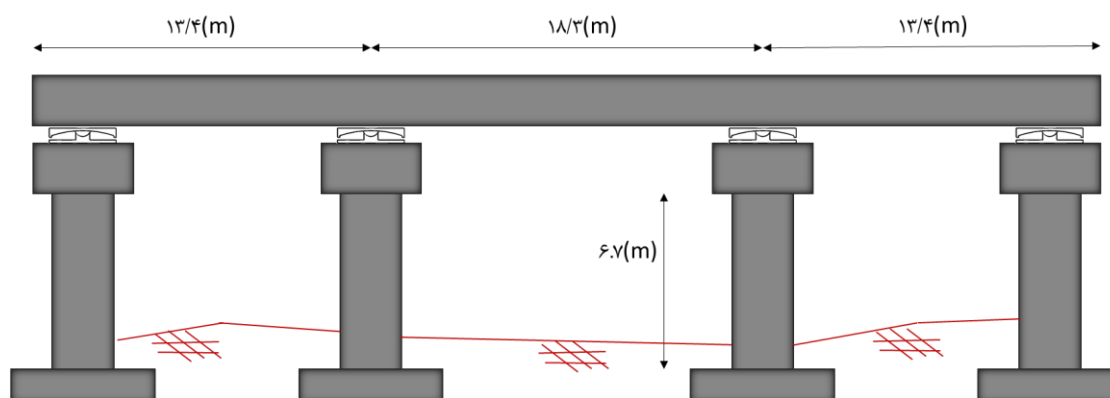
شکل ۱: مدل اجزا محدود پل مدل سازی شده.



شکل ۲: مقطع ستون با مش بندی فایبر.



شکل ۳: نمودار رفتاری مصالح فولاد و بتن استفاده شده در نرم افزار.



شکل ۴: مقطع طولی پل مدلسازی شده در نرم افزار.

### ۳- مشخصات مصالح مصرفی

به منظور اختصاص مصالح بتنی در نرم افزار از مصالح Concrete07 استفاده شده است. مزیت این مصالح نسبت به سایر مصالح موجود در نرم افزار اپنسیس دقت بالای آن می باشد. چراکه برخلاف دیگر مصالح بتنی همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، از رفتار کششی بتن صرف نظر نشده است. همچنین مقاومت افزایش یافته بتن محصور شده طبق روابط ارائه شده در مقاله مندر<sup>۷</sup> بصورت دقیق محاسبه شده و در مدلسازی در نظر گرفته شده است [۱۹]. برای مدلسازی فولاد نیز از مصالح Steel02 استفاده شده که نمودار رفتاری این مصالح نیز در شکل ۳ قابل مشاهده می باشد. مشخصات اختصاص یافته به هر دو مصالح بتنی و فولادی به ترتیب در جداول ۲ و ۳ عنوان شده است.

جدول ۲: مشخصات مصالح بتنی.

مقاومت فشاری (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	مدول برشی (GPa)	مصالح مصرفی در نرم افزار
۳۳/۸	۰/۲	۲۷/۳	$\frac{E_c}{2(1+\nu)} = ۱۱/۳۸$	Concrete07

مقاومت تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب سخت شونده گی کرنشی	مصالح مصرفی در نرم افزار
۴۶۰	۲۰۰	۰/۰۱	Steel02

جدول ۳: مشخصات مصالح فولادی.

### ۴- صحت سنجی

به منظور ارزیابی صحت عملکرد جداسازهای مدلسازی شده در مدل پل و همچنین بررسی صحت نحوه مدلسازی، یک نمونه از پژوهش های صورت گرفته در آزمایشگاه<sup>۸</sup> SRMD در دانشگاه سندیگو<sup>۹</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. این جداگر دارای شعاع موثر R ۶۰۰۰ = میلی متر و نوسان غیرمیرا T = ۴/۹۱ ثانیه می باشد که برای بار عمودی N = ۸۰۰۰ کیلونیوتن طراحی شده و جایجایی d = ۳۸۰ میلی متر به آن اعمال شده است. آزمایش در سه مرحله و با سه سطح بار محوری متفاوت N1, N2, N3 که به ترتیب بیانگر بیشترین و کمترین بار وارد شده به جداساز در شرایط زلزله و بار ثقلی طراحی است انجام می شود که در این پژوهش به منظور صحت سنجی از بار محوری N3 در

<sup>7</sup> Mander 1998

<sup>8</sup> Caltrans Seismic Response Modification Device (SRMD) Test Facility

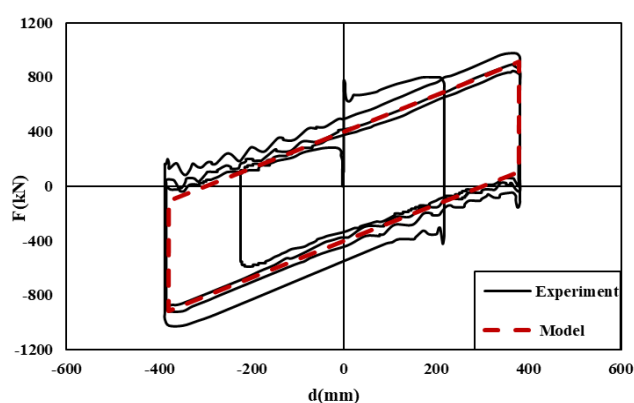
<sup>9</sup> University of California San Diego

مدلسازی استفاده شده است. نحوه بارگذاری به این صورت است که در هر آزمایش نمونه تحت سیکل‌های جابجایی یک جهته سینوسی شکل قرار می‌گیرد که دامنه آن به اندازه جابجایی طراحی جداگر  $d$  و با فرکانس ثابت  $f_0$  در هر سیکل بارگذاری می‌باشد. اطلاعات دقیق‌تر مربوط به نحوه بارگذاری و شرایط آزمایش در جدول ۴ موجود است [۲۰].

شماره	شکل بارگذاری	فرکانس بارگذاری (هرتز)	سرعت حداکثر (میلی‌متر/ثانیه)	دامنه جابجایی (میلی‌متر)	نیروی محوری (کیلو نیوتن)	تعداد سیکل بارگذاری
۱	سینوسی	۰/۲۰۳۵	۴۸۶	۳۸۰	۸۰۰۰	۳
۲	سینوسی	۰/۲۰۳۵	۴۸۶	۳۸۰	۵۰۰۰	۳
۳	سینوسی	۰/۲۰۳۵	۴۸۶	۳۸۰	۲۵۰۰	۳

جدول ۴: شرایط آزمایش برای جداگر با جابجایی طراحی ۳۸۰ میلی‌متر و دوره تناوب  $T = 4/91$  ثانیه.

نتایج حاصل از مدلسازی عددی در مقایسه با نتایج بدست آمده از آزمایش در شکل ۶ مشخص شده است که نشان دهنده انطباق مناسب پاسخ نیرو تغییر مکان جداگر با نتایج آزمایش می‌باشد.



شکل ۶: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان مدلسازی عددی و آزمایش.

## ۵- تحلیل دینامیکی فزاینده

تحلیل دینامیکی فزاینده از روش افزایش تدریجی ضریب مقیاس زلزله و تعیین پاسخ سازه در برابر زلزله در هر گام بدست می‌آید. این روش ماهیت دینامیکی داشته و رفتار مصالح را به صورت غیرخطی در نظر می‌گیرد لذا در مقایسه با روش‌های استاتیکی مانند تحلیل استاتیکی خطی بارافزون (پوش اور) و روش‌های خطی دینامیکی مانند تحلیل دینامیکی طیفی، دقیق‌ترین تخمین از رفتار سازه را به دست می‌دهد. شدت لرزه‌ای متناظر با وقوع یک حالت حدی تابعی از رکورد زلزله انتخابی است. یعنی پاسخ تحلیل‌های غیرخطی کاملاً به تعداد و مشخصات دینامیکی رکوردهای انتخابی وابسته بوده و پاسخ‌های سازه از رکوردی به رکورد دیگر کاملاً متغیر است. بنابراین به منظور دستیابی به تمام نواحی پاسخ و سطوح عملکردی، تعداد کافی از رکوردهای زلزله مورد نیاز است که در این پژوهش از ۲۴ رکورد زلزله حوزه نزدیک به گسل استفاده شده است. همچنین به منظور افزایش دقت پاسخ‌ها تحلیل دینامیکی فزاینده با گام‌های بسیار کوچک انجام شد و

در مجموع با اعمال دو مولفه و سه مولفه زلزله نزدیک به ۹۲۰ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی روی پل صورت گرفت. نمودارهای IDA در هر دو حالت با معیار شدت حداکثر شتاب زمین (PGA<sup>۱۰</sup>) و معیار تقاضای جابجایی نسبی پایه‌ها توسعه داده شدند که به ترتیب در شکل ۷ و شکل ۸ قابل مشاهده است. دریافت معادل فروریزش پل براساس سطوح خرابی ارائه شده توسط دوتا و مندر<sup>۱۱</sup> در جدول ۵ به میزان پنج درصد در نظر گرفته شد [۲۱]. همچنین به منظور دستیابی به سرعت بهینه تحلیل و افزایش دقت پاسخ‌ها در ناحیه غیرخطی، از الگوریتم Hunt&Fill که توسط وامواتسیکوس و کرنل پیشنهاد شده، در تحلیل IDA استفاده شد [۲۲]. به این صورت که تحلیل با ضریب کوچکی از شدت لرزه‌ای آغاز شده سپس گام‌ها بصورت تصاعد هندسی افزایش می‌یابند تا زمانی که سازه به شکست برسد (مرحله Hunt). سپس در دو مرحله فواصل بین گام‌های اولیه پر میشود (مرحله Fill). ابتدا نقاطی در یک سوم میانی نمودار جهت افزایش دقت فروریزش تولید می‌شوند و سپس فواصل بین نقاط ابتدایی نمودار مربوط به حدود ناحیه الاستیک پر می‌شود. لازم به ذکر است که به منظور سهولت در مقایسه منحنی‌های IDA، از صدک‌های ۱۶ درصد، ۵۰ درصد و ۸۴ درصد استفاده شد. می‌توان گفت که صدک‌ها خلاصه‌ای از نمودار IDA هستند. به طور مثال صدک ۵۰ درصد که به نوعی میانه منحنی IDA نیز می‌باشد، بیان می‌کند که در یک معیار شدت خاص پنجاه درصد از داده‌ها از یک معیار تقاضای خاص عبور می‌کنند و یا به بیان دیگر می‌توان گفت که در یک معیار شدت خاص احتمال اینکه داده‌ها از یک میزان معیار تقاضای خاص عبور کنند پنجاه درصد است.

## ۶- لیست رکوردهای زلزله

انتخاب و تعیین رکوردهای زلزله باتوجه به اهداف پژوهش صورت گرفته است. رکوردهای متنوعی با محتوای فرکانسی‌های مختلف و دارای ویژگی‌های (PGA, PGV, PGD) گوناگون موجود هستند که هر کدام نواحی متفاوتی از پاسخ سازه را بدست می‌دهند. در آیین‌نامه FEMA P695 دو دسته رکورد ارائه شده است [۲۳]. دسته اول رکوردهای زلزله حوزه دور از گسل هستند و دسته دوم رکوردهای زلزله حوزه نزدیک گسل می‌باشند که خود به دو دسته رکوردهای پالس‌گونه و رکوردهای بدون پالس تقسیم می‌شوند. حداکثر میزان شتاب مولفه قائم در رکوردهای حوزه دور از گسل چندان قابل ملاحظه نیست؛ درحالی‌که در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل شاهد میزان قابل توجه شتاب مولفه قائم تا ۱/۸۹g می‌باشیم. همچنین نسبت شتاب مولفه قائم به حداکثر شتاب مولفه‌های افقی در این رکوردها بعضاً تا ۴/۲۱ نیز می‌رسد که میزان قابل توجهی می‌باشد.

باتوجه به اینکه در این مطالعه از حداکثر شتاب زمین به عنوان معیار شدت در تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شده است و همچنین هدف اصلی از پژوهش، منظور کردن اثرات مولفه قائم زلزله می‌باشد؛ بنابراین از ۲۴ رکورد زلزله حوزه نزدیک گسل شامل رکوردهای پالس‌گونه و بدون پالس مطابق با آیین‌نامه FEMA P695 استفاده شد، که جزئیات آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: مشخصات رکوردهای زلزله.

<sup>10</sup> Peak Ground Acceleration

<sup>11</sup> Dutta and Mander



مشخصات		اطلاعات زمین لرزه		افقی		قائم
شماره رکورد	RSN <sup>12</sup>	رویداد	ایستگاه	PGA	PGA	PGA
۱	۱۸۱	Imperial Valley-06	El Centro Array#6	۰/۴۴۷	۰/۴۴۹	۱/۸۹۴
۲	۱۸۲	Imperial Valley-06	El Centro Array#7	۰/۳۴	۰/۴۶۹	۰/۵۷۷
۳	۲۹۲	Irpinia Italy-01	Sturno (STN)	۰/۲۲۶	۰/۳۲	۰/۲۳۴
۴	۸۰۲	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	۰/۵۱۴	۰/۳۲۶	۰/۳۹۵
۵	۸۲۱	Erzican Turkey	Erzincan	۰/۴۹۶	۰/۳۸۶	۰/۲۳۴
۶	۸۲۸	Cape Mendocino	Petrolia	۰/۵۹	۰/۶۶۱	۰/۱۶۵
۷	۸۷۹	Landers	Lucerne	۰/۷۲۵	۰/۷۸۸	۰/۸۲۳
۸	۱۰۶۳	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	۰/۸۷۴	۰/۴۷۲	۰/۹۵۸
۹	۱۰۸۶	Northridge-01	Sylmar - Olive View Med FF	۰/۶۰۴	۰/۸۴۳	۰/۵۳۵
۱۰	۱۱۶۵	Kocaeli Turkey	Izmit	۰/۲۳	۰/۱۶۵	۰/۱۴۴
۱۱	۱۵۰۳	Chi-Chi Taiwan	TCU065	۰/۷۸۹	۰/۵۷۵	۰/۲۶۳
۱۲	۱۵۲۹	Chi-Chi Taiwan	TCU102	۰/۳۰۳	۰/۱۷۱	۰/۱۷۶
۱۳	۱۶۰۵	Duzce Turkey	Duzce	۰/۴۰۴	۰/۵۱۴	۰/۳۴۶
۱۴	۱۲۶	Gazli USSR	Karakyr	۰/۷۰۱	۰/۸۶۳	۱/۶۹۸
۱۵	۱۶۰	Imperial Valley	Bonds Corner	۰/۵۹۸	۰/۷۷۶	۰/۵۳۱
۱۶	۱۶۵	Imperial Valley	Chihuahua	۰/۲۶۹	۰/۲۵۴	۰/۲۱۶
۱۷	۷۴۱	Loma Prieta	BRAN	۰/۴۵۶	۰/۵۰۲	۰/۵۰۵
۱۸	۷۵۳	Loma Prieta	Corralitos	۰/۶۴۴	۰/۴۸۲	۰/۴۵۷
۱۹	۸۲۵	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۱/۴۹۳	۱/۰۳۸	۰/۷۳۸
۲۰	۱۰۰۴	Northridge-01	LA - Sepulveda VA Hospital	۰/۷۵۲	۰/۹۳۲	۰/۳۱۷
۲۱	۱۱۷۶	Kocaeli Turkey	Yarimca	۰/۲۲۶	۰/۳۲۱	۰/۲۴۱
۲۲	۱۵۰۴	Chi-Chi Taiwan	TCU067	۰/۴۹۸	۰/۳۱۹	۰/۲۳۵
۲۳	۱۵۱۷	Chi-Chi Taiwan	TCU084	۱/۰۰۸	۰/۴۳۱	۰/۳۲
۲۴	۲۱۱۴	Denali Alaska	TAPS Pump Station	۰/۳۳۲	۰/۲۹۷	۰/۲۳۸

<sup>12</sup> Record Sequence Number

## ۷- منحنی‌های شکنندگی

منحنی شکنندگی (آسیب پذیری)، احتمال فراگذشت یک حالت حدی از پیش تعیین شده را به ازای یک معیار شدت لرزه‌ای ثابت، اظهار می‌کند. به بیان دیگر، منحنی شکنندگی میزان کمی آسیب‌پذیری اجزای مختلف سازه‌ای و یا غیر سازه‌ای و احتمال وقوع یا فراگذشت از یک میزان خسارت خاص را بر حسب یک ویژگی معرف زلزله نظیر  $PGA^{13}$ ،  $PGV^{14}$ ،  $PGD^{15}$  بیان می‌کند. در حال حاضر برای ساخت منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای، دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد، که برای پل‌ها این دیدگاه‌ها را می‌توان در سه گروه (۱) روش‌های مبتنی بر نظر کارشناسان پل، (۲) روش‌های تجربی و (۳) روش‌های تحلیلی طبقه بندی کرد. که در این پژوهش برای بدست آوردن منحنی‌های شکنندگی از روش تحلیلی استفاده شده است. به منظور بیان یک تعریف ریاضی برای شکنندگی یک سیستم سازه‌ای مانند پل می‌توان به کمک رابطه (۱) احتمال تجاوز نیاز سازه‌ای از ظرفیت سازه‌ای را مشخص کرد:

$$(C | IM = im) = [DC \geq 1] \quad (1)$$

که در این رابطه  $P_f$  احتمال تجاوز و یا فراگذشت از یک سطح آسیب مشخص،  $D$  نشان دهنده نیاز سازه‌ای و  $C$  بیانگر ظرفیت سازه‌ای می‌باشد و با فرض تبعیت نیاز و ظرفیت سازه از توزیع لوگ نرمال، یک فرم بسته از بیان ریاضی شکنندگی، طبق رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\ln SD/SC}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (2)$$

در این رابطه  $\Phi$  تابع احتمال نرمال استاندارد،  $SC$  میانه ظرفیت سازه،  $\beta_C$  انحراف استاندارد لگاریتمی ظرفیت سازه،  $S_D$  مقدار میانه نیاز سازه و  $\beta_D$  انحراف استاندارد لگاریتمی نیاز سازه می‌باشد.

## ۷-۱- معیار خرابی

باتوجه به اینکه احتمال خرابی ستون‌ها و جداگرها هردو در نظر گرفته شده است به معرفی معیار خرابی هرکدام از این دو مولفه به صورت جداگانه می‌پردازیم. دوتا و مندر [۲۱] پنج سطح خرابی براساس دریافت را برای پایه پل‌ها پیشنهاد دادند که شامل سطوح بدون خرابی، خرابی خفیف، خرابی متوسط، خرابی گسترده و خرابی کامل می‌باشد. در این پژوهش از این معیار خرابی به منظور ارزیابی عملکرد پایه‌های پل استفاده شده است و تحلیل دینامیکی فزاینده نیز بر پایه آن صورت گرفته است. حالات حدی خرابی طبق جدول ۵ می‌باشد.

جداگرهای FPS به اندازه مقدار طراحی شده امکان و اجازه حرکت و جابجایی دارند، در صورتی که میزان جابجایی آن‌ها از حد مجاز خود تجاوز کند جداگرها خراب شده و احتیاج به تعویض دارند. احتمال خرابی جداگر با معیار فراگذشت جابجایی جداگر از مقدار مجاز طراحی شده آن مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که اجزای پل‌ها تاثیر یکسانی روی کل سیستم ندارند بنابراین به منظور در نظر گرفتن این نکته، اعضای پل به دو گروه اجزای اولیه<sup>۱۵</sup> و اجزای ثانویه<sup>۱۶</sup> تقسیم بندی می‌شوند. اجزای اولیه آن دسته از عناصری هستند که گسترش خرابی در آنها عملکرد کل سیستم پل را تحت تاثیر قرار داده و در واقع ظرفیت و پایداری پل را کنترل می‌کنند. بدین صورت که خرابی و فروپاشی آنها منجر به فروپاشی کل سیستم می‌شود (ستون‌ها). اجزای ثانویه به عنوان اجزایی معرفی می‌شوند که نمی‌توانند عملکرد کل سیستم را تحت تاثیر قرار دهند و گسترش خرابی در آن‌ها می‌تواند تنها سبب بروز مشکلاتی همچون مشکلات ترافیکی

<sup>13</sup> Peak ground velocity

<sup>14</sup> Peak ground displacement

<sup>15</sup> Primary components

<sup>16</sup> secondary components

شود (جداگرا). بنابراین اهمیت اجزای اولیه در تعیین و تحلیل وضعیت پیش آمده بیشتر است. در این پژوهش اجزای اولیه یعنی ستون‌ها به عنوان عناصر اصلی برای ارزیابی احتمال آسیب در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۵: سطوح خرابی براساس معیار دوتا و مندر [۲۱].

نسبت دررفت	توصیف خرابی	سطح خرابی
۰/۰۰۵	اولین تسلیم	بدون خرابی
۰/۰۰۷	ترک خوردگی و پوسته پوسته شدن بتن	خرابی کم
۰/۰۱۵	گسترش ترک خوردگی	خرابی متوسط
۰/۰۲۵	کمانش آرماتورها و خرد شدن بتن پوشش	خرابی گسترده
۰/۰۵	خرد شدن بتن هسته	خرابی کامل

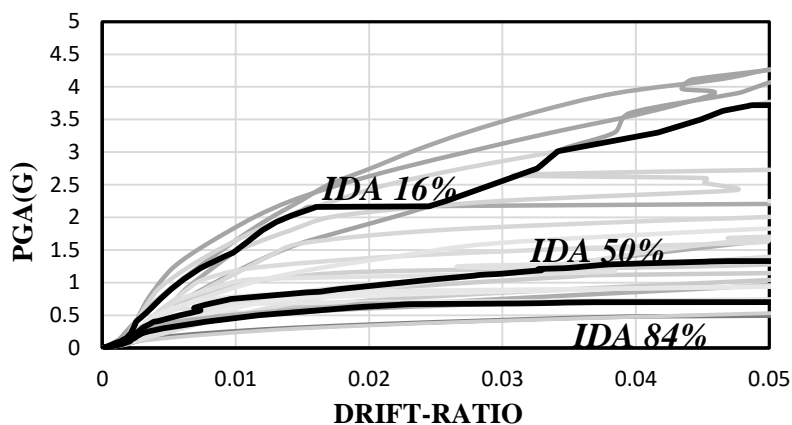
## ۸- نتایج تحلیلی

### ۸-۱ نمودار IDA

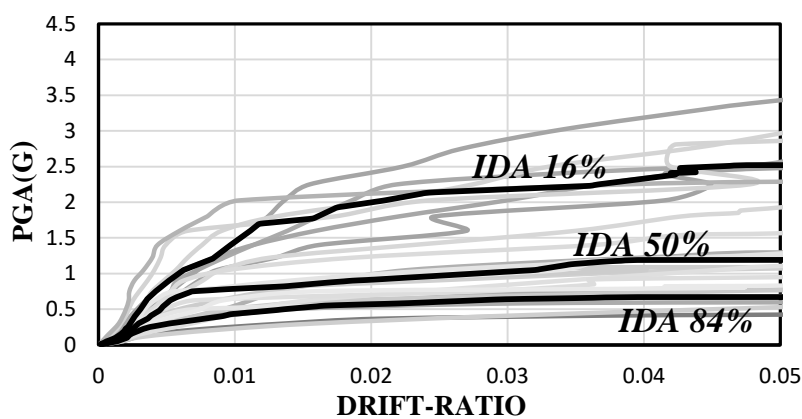
نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) تحت اثر رکوردهای زلزله حوزه نزدیک عنوان شده در جدول ۵ تحت دو مولفه از زلزله و سه مولفه از آن به ترتیب در شکل ۷ و ۸ مشخص شده است. نکته اول درخصوص نمودارها، کاهش شتاب فروریزش در صدک ۱۶ درصد از  $3/75g$  به حدود  $2/5g$  در حالت اعمال سه مولفه از زلزله و همچنین نرم شدگی نمودار پس از اعمال اثر نیروی مولفه قائم می‌باشد. بدین معنی که در این پل احتمال گذرکردن ۱۶ درصد از داده‌ها از دررفت پنج درصد با اعمال دو مولفه زلزله در شتاب  $3/75g$  امکان پذیر است ولی در صورت اعمال مولفه قائم این شتاب به میزان حدود ۳۳ درصد کاهش پیدا کرده و با رسیدن شتاب زلزله به  $2/5g$ ، ۱۶ درصد از داده‌ها از دررفت پنج درصد عبور می‌کنند. نکته دوم کاهش شتاب فروریزش در صدک ۵۰ درصد از  $1/25g$  به حدود  $1g$  و افزایش نرم شدگی منحنی در اثر اعمال سه مولفه از زلزله می‌باشد. یعنی با اعمال مولفه قائم زلزله، شتاب گذر کردن نیمی از داده‌ها از دررفت پنج درصد با ۲۰ درصد کاهش اتفاق می‌افتد و یا می‌توان ادعا کرد که در حالت دومولفه‌ای در شتاب  $1/25g$  پل تحت نیمی از رکوردها به فروریزش یعنی دررفت ۵ درصد می‌رسد؛ درحالی‌که با در نظر گرفتن اثر مولفه قائم پنجاه درصد از داده‌ها در شتاب  $1g$  فروریزش پل را نشان می‌دهند. نکته سوم ثبات نسبی صدک ۸۴ درصد با در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله می‌باشد. باتوجه به نمودار تغییر محسوسی از نظر رفتاری مشاهده نشد. می‌توان گفت که در یک جامعه آماری بزرگتر که میزان ۸۴ درصد از داده‌ها را شامل می‌شود برخلاف دو مورد قبل، مولفه قائم زلزله آنچنان تاثیری بر کاهش شتاب‌های فروریزش نداشته است.

### ۸-۲ حداقل نیروی محوری فشاری

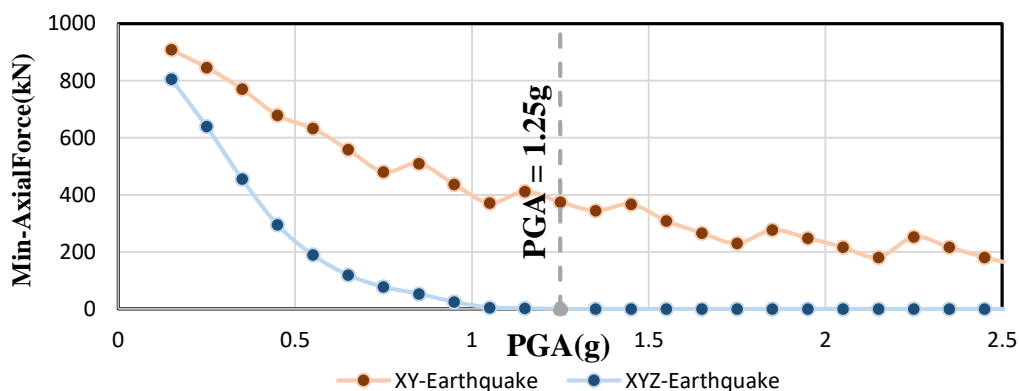
در این بخش به مقایسه تغییرات نیروی محوری فشاری حداقل پایه‌ها تحت اثر دو مولفه زلزله و سه مولفه از آن در پل جداسازی شده با FPS می‌پردازیم. باتوجه به شکل ۹ مشاهده می‌کنیم که با افزایش شتاب زلزله در هر گام از تحلیل نیروی فشاری حداقل در پایه‌ها چه تحت دومولفه و چه تحت سه مولفه از زلزله کاهش پیدا می‌کند ولی نرخ کاهش آن با اعمال مولفه قائم زلزله افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است در شتاب  $1/25g$  نیروی فشاری حداقل در حالت اعمال سه مولفه زلزله به صفر می‌رسد. صفر شدن نیروی حداقل فشاری به معنی تغییر جهت نیرو از فشار به کشش پس از شتاب  $1/25g$  در سرتاسر ستون می‌باشد.



شکل ۷: نمودار IDA پل با اعمال دو مولفه زلزله.



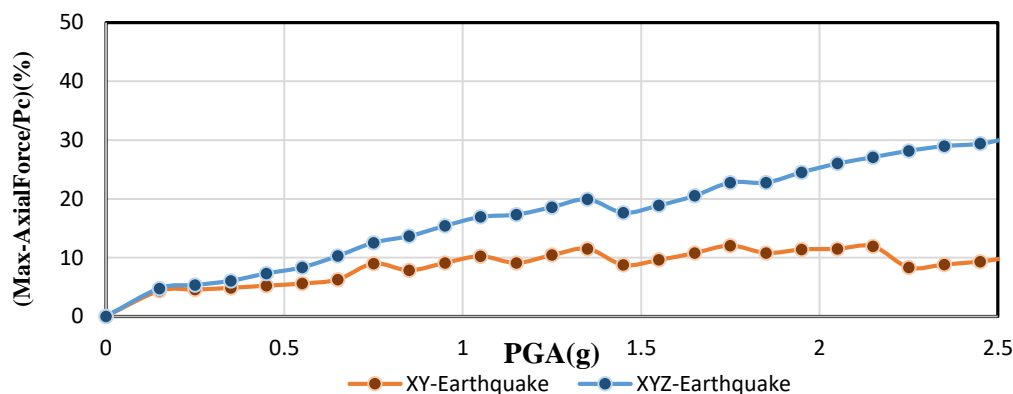
شکل ۸: نمودار IDA پل با اعمال سه مولفه زلزله.



شکل ۹: حداقل نیروی محوری فشاری پایه پل در حالت اعمال دو مولفه و سه مولفه از زلزله.

## ۳-۸- حداکثر نیروی محوری فشاری

باتوجه به جهت شتاب مولفه قائم زلزله، حداکثر نیروی فشاری ستون می‌تواند در طول زلزله، افزایش قابل توجهی پیدا کند که همین امر در صورتی که اثر مولفه قائم در تحلیل و طراحی در نظر گرفته نشود باعث خسارات جدی و خرابی‌ها و بعضاً سبب بروز شکست فشاری در آن‌ها شود. در همین راستا به مقایسه حداکثر نیروی فشاری ایجاد شده در پایه تحت دو مولفه و سه مولفه از زلزله باتوجه به شکل ۱۰ می‌پردازیم.



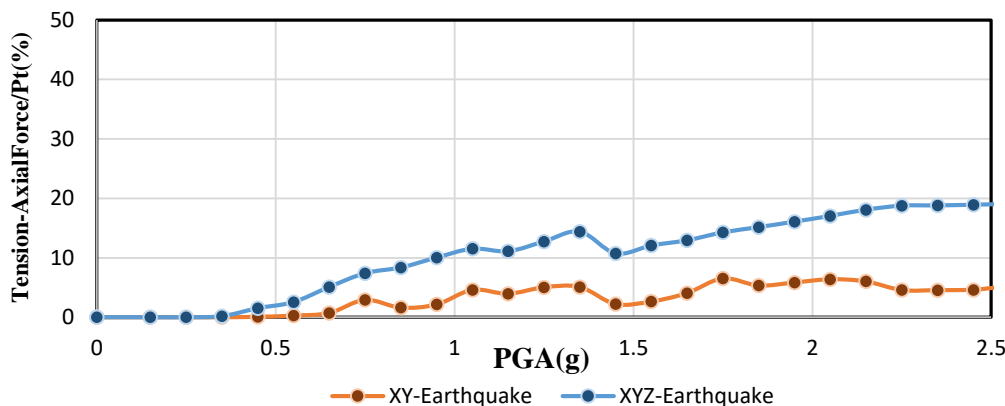
شکل ۱۰: حداکثر نیروی محوری فشاری پایه پل در حالت اعمال دو مولفه و سه مولفه از زلزله.

در نمودار نشان‌داده شده در شکل ۱۰ محور قائم نرمال شده‌ی تقاضای نیروی فشاری حداکثر به ظرفیت نیروی فشاری خالص ستون (Pc) را نشان می‌دهد. باتوجه به نمودار عنوان شده تغییرات نیروی محوری فشاری حداکثر با اعمال سه مولفه زلزله افزایشی است. به طور مثال در شتاب ۰/۳۵g تقاضای نیروی فشاری حداکثر ایجاد شده در ستون در حالت اعمال دو مولفه از زلزله به ۴/۸۶ درصد از ظرفیت نیروی فشاری خالص ستون می‌رسد درحالی‌که با اعمال مولفه قائم زلزله این تقاضا با ۲۴/۵ درصد افزایش، ۶/۰۵ درصد از ظرفیت نیروی فشاری خالص پایه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در شتاب ۰/۷۵g این افزایش از ۹/۰۱ درصد ظرفیت ستون به ۱۲/۵ درصد می‌رسد که بیانگر ۳۸/۷ درصد افزایش است و همچنین در شتاب بالای ۲/۵g در حالت اعمال سه مولفه، تقاضای نیروی فشاری به حداکثر ۳۰ درصد ظرفیت فشاری خالص ستون می‌رسد.

## ۴-۸- حداکثر نیروی محوری کششی

یکی دیگر از مواردی که در خصوص شتاب قائم زلزله اهمیت دارد، ایجاد نیروهای کششی در پایه‌ها باتوجه به جهت شتاب زمین در جهت قائم می‌باشد. در همین راستا نمودار نشان داده شده در شکل ۱۱ توسعه داده شده که بیانگر تغییرات نیروی کششی در طول زلزله و با اعمال مولفه قائم است که در آن محور عمودی بیانگر تقاضای نیروی کششی ستون می‌باشد که به ظرفیت کششی خالص آن (Pt) نرمال شده است. همانطور که در نمودار مشخص است؛ در حالت اعمال دو مولفه از زلزله تا شتاب حدود ۰/۳۵g نیروی کششی در ستون ایجاد نمی‌شود و با اعمال مولفه قائم شتاب مولد نیروی کششی به ۰/۲۵g کاهش می‌یابد. بنابراین باتوجه به ناچیز بودن نیروی کششی در ستون تحت دو مولفه از زلزله بخصوص در شتاب‌های پایین، با اعمال اثر مولفه قائم نتایج حاکی از افزایش چشمگیر نیروی کششی در ستون می‌باشد. به طور مثال در شتاب ۰/۴۵g تقاضای نیروی کششی ایجاد شده در ستون تحت دو مولفه از زلزله به اندازه ۰/۰۷۸ درصد ظرفیت نیروی کششی خالص ستون است که با اعمال مولفه قائم به ۱/۵۱ درصد می‌رسد. در شتاب ۰/۷۵g نیروی کششی ستون از ۲/۹۲ درصد ظرفیت ستون به ۴/۷ درصد افزایش می‌یابد و همچنین در شتاب بالای ۲/۵g نیز این میزان افزایش از ۴/۸ درصد ظرفیت کششی به

۱۹ درصد قابل رویت است. بنابراین می توان دریافت که با وجود افزایش چشمگیر نیروی کششی با اعمال سه مولفه از زلزله درمقایسه با در نظر گرفتن دو مولفه، ستون تحت نیروی کششی ایجاد شده در آن، به ظرفیت نهایی کششی خالص خود در این پل نمی رسد.

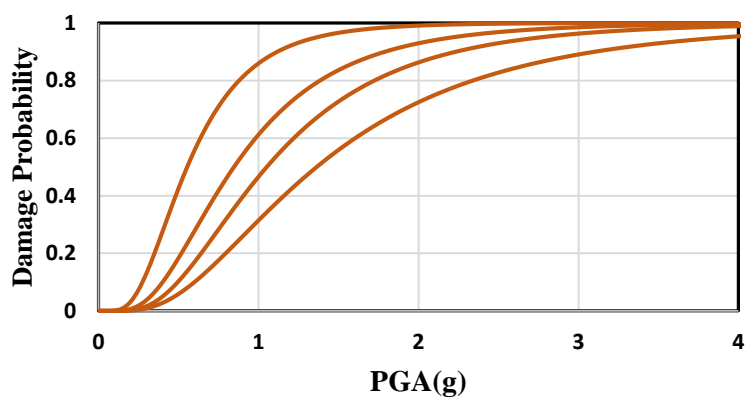


شکل ۱۱: حداکثر نیروی محوری کششی پایه پل در حالت اعمال دو مولفه و سه مولفه از زلزله.

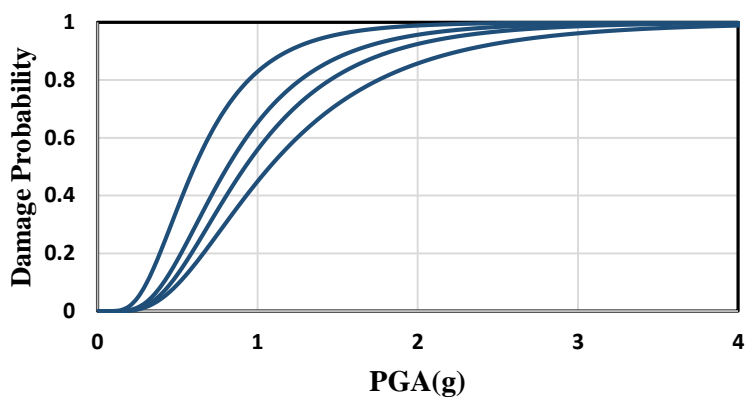
#### ۵-۸- احتمال خرابی پایه ها و جداگر پاندولی اصطکاکی (FPS)

احتمال خرابی پایه ها در چهار سطح خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل برای دو حالت اعمال دومولفه از زلزله و سه مولفه از آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. سپس هر سطح از خرابی بصورت جداگانه طبق نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۳ مورد مقایسه قرار گرفته اند. در سطح خرابی کم مشاهده می شود که مولفه قائم احتمال خرابی را کاهش داده و یا به عبارت دیگر تاثیری بر افزایش احتمال خرابی نداشته است. در سطح خرابی متوسط نیز تا حدود شتاب های کمتر از  $0.55g$  مولفه قائم زلزله تاثیر چندانی بر افزایش احتمال خرابی نداشته اما پس از آن احتمال خرابی را تا حدود شش درصد افزایش داده است. در سطح گسترده، در شتاب  $0.6g$  احتمال خرابی به میزان حداکثر بیست و چهار درصد افزایش پیدا کرده است. می توان گفت بیشترین اثر مخرب مولفه قائم در سطح خرابی کامل و یا فروریزش می باشد. همانطور که در نمودار مشخص است، احتمال خرابی پایه ها با اعمال سه مولفه از زلزله در این سطح از خرابی نسبت به سایر سطوح خرابی، افزایش قابل توجهی داشته است. به طور مثال در شتاب  $0.5g$  احتمال خرابی با اعمال مولفه قائم از  $0.059$  به  $0.093$  افزایش پیدا کرده است. در  $0.75g$  این افزایش از  $0.118$  به  $0.27$  رسیده و این روند در شتاب های بالاتر هم همچنان ادامه داشته است. همچنین همانطور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، مولفه قائم زلزله در حدود ۲۱ درصد احتمال خرابی جداگرها را افزایش داده است.

باتوجه به شکل ۱۵ قسمت الف هنگامی که دومولفه از زلزله به سازه اعمال می شود، احتمال خرابی پایه ها در سطح خرابی کم بیشتر از احتمال خرابی جداگر است و این موضوع در سطوح خرابی متوسط، کامل و گسترده برعکس است. یعنی قبل از اینکه ستون به سطح خرابی متوسط رسیده و ترک خوردگی ها در سطح بتن افزایش پیدا کنند و سپس به سطح خرابی گسترده رسیده و با کماتش آرماتورهای طولی، بتن پوشش خرد شود و با رسیدن به سطح خرابی کامل، بتن هسته خرد شده و ستون دچار فروریزش شود، این جداگرها هستند که از میزان مجاز جابجایی طراحی شده خود عبور می کنند و خراب می شوند و همانطور که انتظار می رود احتمال خرابی جداگرها بیشتر از خرابی ستون و فروریزش سازه می باشد که حالت مطلوبی است. با اعمال سه مولفه زلزله بازم با افزایش شتابها ابتدا ترک های سطحی در ستون شروع به گسترش می کنند و جداگر با حرکت خود و ایجاد اصطکاک و در نتیجه، مستهلک سازی انرژی زلزله مانع از افزایش احتمال خرابی در سطوح متوسط، گسترده و کامل می شود. تنها تفاوت، با اعمال اثر مولفه قائم زلزله، افزایش احتمال خرابی جداگر و امکان خرابی همزمان جداگر و ایجاد ترک های برشی در بتن پوشش ستون می باشد. بررسی هردو نمودار الف و ب در شکل ۱۵ نشان از طراحی مناسب جداگرها با توجه به مشخصات و سختی سازه و طیف طرح ساختمان پل مورد مطالعه دارد.

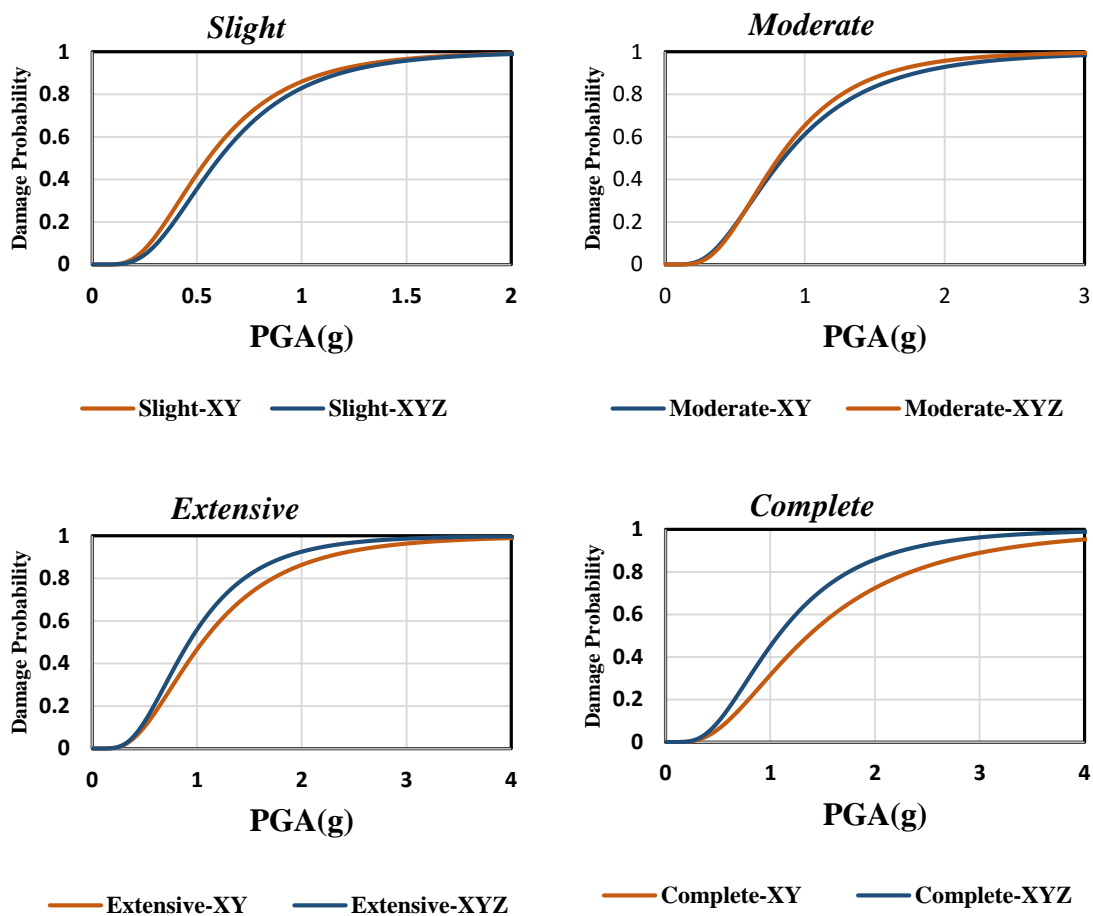


(الف)

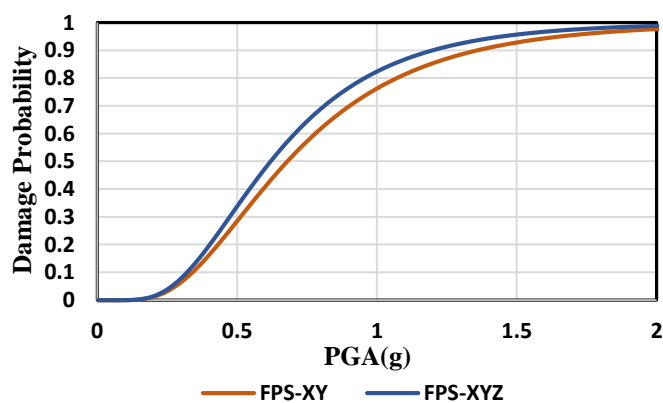


(ب)

شکل ۱۲: منحنی شکنندگی پایه‌های پل با اعمال الف) دو مولفه از زلزله و ب) سه مولفه از زلزله.

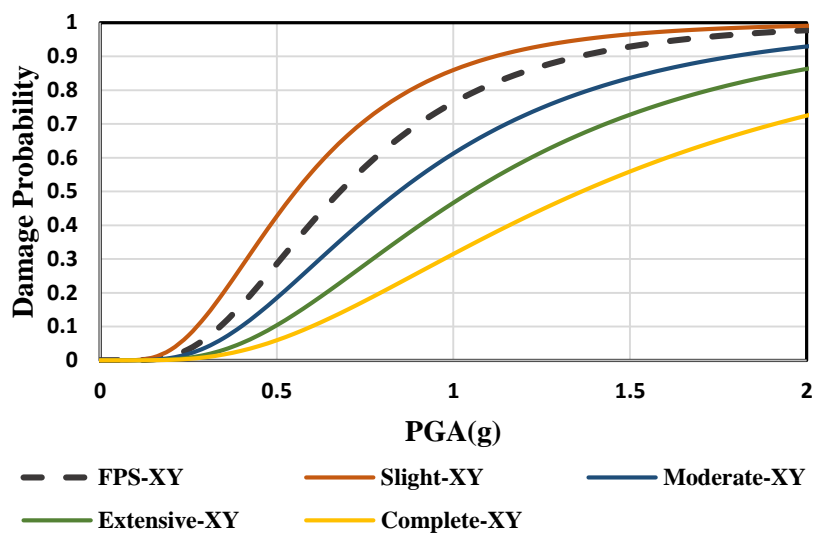


شکل ۱۳: منحنی شکنندگی پایه‌های پل با معیار خرابی در یافت پایه‌ها در چهار سطح خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل.

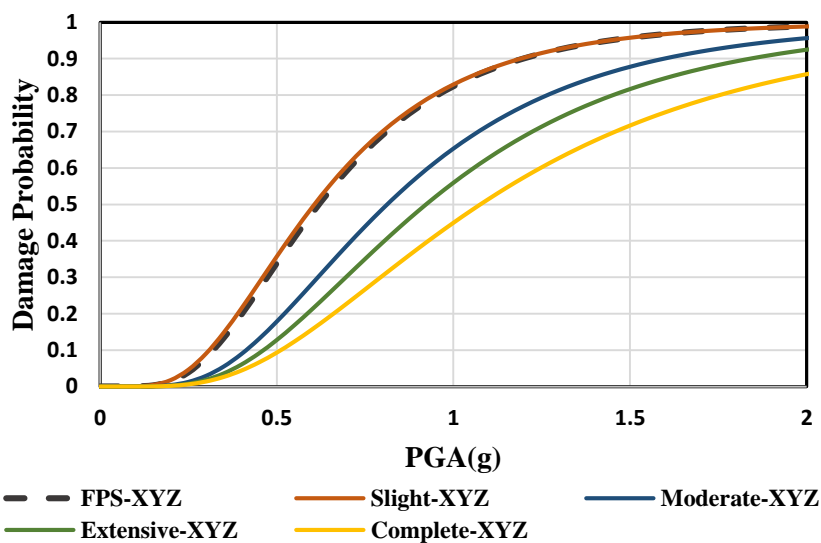


شکل ۱۴: منحنی شکنندگی جداگر پاندولی لسطک‌کای (FPS).





(الف)



(ب)

شکل ۱۵: مقایسه منحنی شکنندگی پایه پل و جداگر اصطکاکی در حالت الف) اعمال دو مولفه از زلزله و ب) اعمال سه مولفه از زلزله.

## ۹- نتیجه گیری

در این مقاله یک پل سه دهانه بتنی با طول دهانه‌های متفاوت و عرشه پیوسته که توسط جداگر پاندولی اصطکاکی تک قوسی جداسازی شده است یک بار تحت دومولفه از زلزله و باردیگر تحت سه مولفه زلزله به کمک تحلیل دینامیکی فزاینده مورد ارزیابی قرار گرفت. خروجی‌های بدست آمده از نیروهای محوری پایه پل، نمودار IDA و همچنین منحنی‌های شکنندگی پایه‌ها و جداگرها بررسی و مقایسه شدند که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

۱. باتوجه به جهت شتاب مولفه قائم زلزله هم نیروی فشاری و هم نیروی کششی در ستون افزایش پیدا می‌کنند. از آنجایی که نیروی کششی در پایه پل تحت دو مولفه زلزله ناچیز است، افزایش نیروهای محوری در کشش بیشتر نمایان خواهد شد. اما آنچه که اهمیت دارد توجه به ظرفیت نیروی فشاری خالص و ظرفیت نیروی کششی خالص در پایه بتنی می‌باشد.
۲. نتایج نشان دادند که علیرغم رشد نرخ نیروهای محوری با اعمال اثر مولفه قائم چه در حالت فشار حداکثر و چه در حالت کشش حداکثر، ستون به ظرفیت نهایی نیروی فشاری خالص و نیروی کششی خالص خود نمی‌رسد.
۳. نتایج بدست آمده از نمودار IDA در هر دو حالت بارگذاری، حاکی از کاهش شتاب‌های فروریزش در صدک ۱۶ درصد و صدک ۵۰ درصد می‌باشد. یعنی با اعمال مولفه قائم زلزله ۱۶ درصد از داده‌ها و ۵۰ درصد از داده‌ها در شتاب‌های کمتری فروریزش را نشان می‌دهند.
۴. منحنی شکنندگی پایه‌ها در سطح خرابی متوسط که بیانگر گسترش ترک‌ها در سطح بتن می‌باشد پس از حدود  $0.5g$  افزایش احتمال خرابی به میزان شش درصد را نشان داد.
۵. احتمال خرابی پایه‌ها در سطح خرابی گسترده و کامل نیز روندی افزایشی داشتند که برای مثال در سطح خرابی گسترده، احتمال خرابی با اعمال اثر مولفه قائم حداکثر ۲۴ درصد افزایش داشت.
۶. احتمال خرابی جداگرها با اعمال مولفه قائم زلزله حدود ۲۱ درصد افزایش پیدا کرد.
۷. احتمال خرابی اجزا اولیه (در این پژوهش پایه‌ها) در سطح خرابی کم، چه در حالت اعمال سه مولفه از زلزله و چه در حالت اعمال دو مولفه از آن، از احتمال خرابی اجزا ثانویه (در این پژوهش جداگرها) بیشتر است اما در حالت اعمال سه مولفه زلزله اختلاف احتمال خرابی پایه و جداگر چندان قابل ملاحظه نیست.

## مراجع

- [1] Cooper, J., & Friedland, I. (1994). The Northridge earthquake: Progress made, lessons learned. *Public Roads*, 58(1), 26-36.
- [2] Yashinsky, M. (1998). Performance of bridge seismic retrofits during Northridge earthquake. *Journal of Bridge Engineering*, 3(1), 1-14.
- [3] Yashinsky, M., & Karshenas, M. J. (2003). *Fundamentals of seismic protection for bridges*. National Information Centre of Earthquake Engineering.
- [4] Naem, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- [5] Buckle, I. G., & Mayes, R. L. (1990). Seismic isolation: history, application, and performance—a world view. *Earthquake spectra*, 6(2), 161-201.
- [6] Martelli, A., & Forni, M. (1993). Most Recent Experimental and Numerical Studies Performed in Italy on Seismic Isolation, 225-236.
- [7] Kelly, J. M. (1997). Seismic isolation for earthquake-resistant design. In *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 1-18.
- [8] Dicleli, M. U. R. A. T., & Mansour, M. Y. (2003). Seismic retrofitting of highway bridges in Illinois using friction pendulum seismic isolation bearings and modeling procedures. *Engineering Structures*, 25(9), 1139-1156.
- [9] Zayas, V. A., & Mahin, S. A. (1987). *The FPS earthquake resisting system experimental report*. Earthquake Engineering Research Center.

- [10] Kunnath, S. K., Erduran, E., Chai, Y. H., & Yashinsky, M. (2008). Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings. *Journal of Bridge Engineering*, 13(3), 282-290.
- [11] California Department of Transportation. (2004). Caltrans seismic design criteria, Version 1.3.
- [12] Papazoglou, A. J., & Elnashai, A. S. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(10), 1109-1137.
- [13] Yu, C. P., Broekhuizen, D. S., & Roesset, J. M. (1997). Effect of vertical ground motion on bridge deck response. In *Post-Earthquake reconstruction strategies: NCEER-INCEDE center-to-center project*, 249-63.
- [14] Gülerce, Z., & Abrahamson, N. A. (2010). Vector-valued probabilistic seismic hazard assessment for the effects of vertical ground motions on the seismic response of highway bridges. *Earthquake Spectra*, 26(4), 999-1016.
- [15] Wei, B., Zuo, C., He, X., Jiang, L., & Wang, T. (2018). Effects of vertical ground motions on seismic vulnerabilities of a continuous track-bridge system of high-speed railway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 281-290.
- [16] Farahmand-Tabar, S., & Barghian, M. (2021). Seismic assessment of a cable-stayed arch bridge under three-component orthotropic earthquake excitation. *Advances in Structural Engineering*, 24(2), 227-242.
- [17] Wibowo, H., & Sriharan, S. (2022). Effects of vertical ground acceleration on the seismic moment demand of bridge superstructure connections. *Engineering Structures*, 253, 113820.
- [18] Thapa, S., Shrestha, Y., & Gautam, D. (2022, March). Seismic fragility analysis of RC bridges in high seismic regions under horizontal and simultaneous horizontal and vertical excitations. In *Structures*, 37, 284-294.
- [19] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [20] Gandelli, E., Penati, M., Quaglini, V., Lomiento, G., Miglio, E., & Benzoni, G. M. (2019). A novel OpenSees element for single curved surface sliding isolators. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 433-453.
- [21] Dutta, A., & Mander, J. B. (1998, June). Seismic fragility analysis of highway bridges. In *Proceedings of the INCEDE-MCEER center-to-center project workshop on earthquake engineering Frontiers in transportation systems*, 22-23.
- [22] Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 491-514.
- [23] Federal Emergency Management Agency (FEMA), (2009), FEMA P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors (Washington, DC, USA).