



## مقایسه عملکرد سیستم‌های مختلف جداساز لرزه‌ای در پل‌های بزرگراهی شهری تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل با در نظر گرفتن مشخصه‌های اصلی رفتاری جداسازها

عباس کرامتی، غلامرضا نوری\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۱ مهر ۱۳۹۶  
بازنگری: ۱۹ آذر ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۲ بهمن ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۱۴ اسفند ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

نشیمن جداساز اصطکاکی  
نشیمن جداساز الاستومری  
پل  
زلزله‌ی حوزه نزدیک گسل

**چکیده:** پل‌ها جزء شریان‌های حیاتی شبکه حمل‌ونقل هر کشور محسوب می‌شوند که تخریب یا آسیب آن‌ها در اثر زمین‌لرزه سبب توقف عملکرد و به دلیل اختلال در خدمت‌رسانی موجب افزایش تلفات انسانی و اقتصادی می‌شود. استفاده از نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای یکی از روش‌های مؤثر جهت بهسازی و بهبود عملکرد لرزه‌ای پل‌ها است. در این مقاله عملکرد لرزه‌ای پلی با استفاده از سیستم‌های مختلف جداساز بدون ساده‌سازی در مدل‌های رفتاری جداسازها مطالعه شده است. به این منظور عملکرد یک نمونه پل بزرگراهی به صورت مدل پل جداشده لرزه‌ای با ۴ نوع سیستم نشیمن جداساز لرزه‌ای: تک پاندول اصطکاکی، سه پاندول اصطکاکی، الاستومری با هسته سربی، الاستومری با میرایی بالا و مدل پل جدا نشده لرزه‌ای مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مقایسه تأکید بر در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل‌سازی و پیچیدگی‌های رفتار غیرخطی جداسازی لرزه‌ای است. مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی با داده‌های شتاب‌نگاری ۶ زمین‌لرزه حوزه نزدیک توسط نرم‌افزار OpenSees انجام و ضمن بررسی رفتار جداسازها با ساده‌سازی در مدل‌های رفتاری و بدون آن عملکرد پایه‌ها به‌عنوان معیار مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد. نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای اصطکاکی در مقایسه با نشیمن‌های الاستومری عملکردی بسیار بهتری در کاهش تنش‌های اعمال شده به پایه پل دارد و عملکرد لرزه‌ای پل را به‌طور عمده‌ای ارتقاء می‌دهند. این درصد کاهش برای جداساز لرزه‌ای سه پاندول اصطکاکی تا ۸۹٪ می‌رسد.

### ۱- مقدمه

پل‌ها جزء شریان‌های حیاتی شبکه حمل‌ونقل هر کشور محسوب می‌شوند که تخریب آن‌ها ناشی از یک زلزله قوی منجر به توقف عملکرد این شریان‌های حیاتی در بازه‌ی زمانی بحرانی، که برای ارائه خدمت‌رسانی اورژانسی یا کمک به تخلیه یک منطقه آسیب‌زده موردنیاز هستند، می‌گردد. استفاده از نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای یکی از روش‌های مؤثر جهت بهسازی و بهبود عملکرد لرزه‌ای پل‌ها است. با استفاده از نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای شکل‌پذیری افزایش و نیروی‌های اعمال شده به سازه پل ناشی از زلزله کاهش می‌یابد. رفتار و عملکرد سیستم‌های جداساز لرزه‌ای به شدت غیرخطی و در مقایسه با سایر المان‌های سازه‌ای (مانند شاه‌تیرها، تیرها، ستون‌ها، سرستون پایه‌های پل‌ها، بادبندها و ...) پیچیده‌تر است و می‌تواند متأثر از عوامل متعددی باشد.

همان‌طور که اشاره شد، ویژگی‌های رفتاری تکیه‌گاه‌های جداساز لرزه‌ای الاستومری غیرخطی است که این ویژگی تابعی از پاسخ‌های دینامیکی نشیمن جداساز الاستومری در طی وقوع زلزله می‌باشند و

این موضوع چالش‌هایی جدی برای مدل‌سازی پاسخ این تکیه‌گاه‌های جداساز لرزه‌ای مطرح می‌سازد. از جمله این چالش‌ها برای جداساز لرزه‌ای الاستومری که به‌عنوان جنبه‌های اصلی مدل‌سازی بشمار می‌آیند عبارت‌اند از: (۱) کوپل حرکت دو جهتی در صفحه‌ی افقی، (۲) ارتباط حرکت قائم و افقی نشیمن جداساز الاستومری با یکدیگر، (۳) رفتار حفره‌زایی (Cavitation) و پساحفره‌زایی (Post-Cavitation) نشیمن جداساز الاستومری در کشش، (۴) تنزل مقاومت در بارگذاری چرخه‌ای کششی در طی رفتار حفره‌زایی نشیمن جداساز الاستومری و (۵) تغییرات در ظرفیت بار کمانشی بحرانی ناشی از جابجایی جانبی [۱]. همچنین در جداساز لرزه‌ای اصطکاکی موارد زیر می‌تواند رفتار جداساز را به شدت تحت تأثیر قرار دهد و در نظر گرفتن این موارد جز چالش‌های مدل‌سازی است که در این مقاله لحاظ شده است (۱) تغییرات نیروی نرمال (N) در تکیه‌گاه جداساز، (۲) تغییرات ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) تکیه‌گاه جداساز اصطکاکی (۳) کوپل لغزش دو جهتی در صفحه لغزندگی و (۴) اثر تغییر شکل‌های بزرگ (P) [۲].

انعطاف‌پذیری نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای الاستومری پریرود اصلی ساختمان‌ها و پل‌های همراه با جداگرهای لرزه‌ای را بلندتر

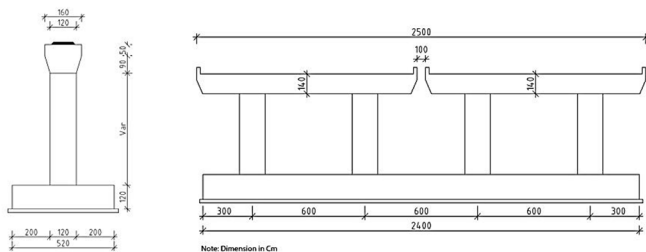
به‌عنوان نماینده جداساز اصطکاکی در یک مدل پل جداسازی شده لرزه‌ای در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی و با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی پل جداسازی شده لرزه‌ای، پاسخ‌های مختلف پل تحت حرکات قوی نزدیک گسل مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## ۲- مدل پل

به منظور انجام این مطالعه، پل درون شهری بزرگراه کردستان- خیابان ملاصدرا واقع در شهر تهران با همکاری مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهرداری شهر تهران انتخاب گردید. این پل در مجاورت گسل‌های اصلی شمال، شرق و جنوب شهر تهران قرار گرفته است.

پل دارای دو مسیر رفت و برگشت مشابه است و بین این دو مسیر هیچ‌گونه اتصالی وجود ندارد. طول کل پل با احتساب رمپ‌ها ۴۸۵/۶ متر است که ۲۲۹ متر از طول آن برای سازه پل و ۲۵۶/۶ متر دیگر آن برای رمپ‌ها است. این پل دارای ۸ دهانه است که طول دو دهانه ابتدا و انتهای آن ۲۴/۵ متر و تمام دهانه‌های میانی آن دارای طول برابر ۳۰ متر هستند. این پل روگذر دارای ۷ پایه تکیه‌گاهی بتن مسلح برای عرشه که هر پایه (برای هر یک از مسیرهای رفت یا برگشت) دارای ۲ ستون است. فاصله ستون‌های هر پایه ۶ متر است. ستون‌ها دایره‌ای شکل، با قطر ۱/۲ متر و با ضخامت پوشش آرماتور ۷/۵ سانتیمتر می‌باشند. جزئیات سرستون برای تمامی پایه‌ها یکسان و با ارتفاع ۱/۴ متر و وزن ۵۹۱/۷۱ کیلونیوتن می‌باشد.

روسازه پل برای یک مسیر، از ۶ شاه‌تیر و در مجموع از ۱۲ شاه‌تیر فولادی سرتاسری به فاصله مرکز تا مرکز ۲/۱۵ متر از یکدیگر و یک دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر تشکیل شده است. وزن کل روسازه و بار زنده بر اساس ضوابط آیین‌نامه آشتو برای هر مسیر به ترتیب برابر با ۲۵۵۰۰ (kN) و حدود ۱۲۰۰۰ (kN) برآورد شده است. از آنجایی که پل مورد مطالعه پل درون شهری می‌باشد، به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی ۵۰٪ از جرم بار زنده در مدل‌سازی پل لحاظ شده است. شکل ۱ مقطع عرضی پل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقطع عرضی پل مورد مطالعه  
Fig. 1. Cross section of the bridge

می‌کند و نیروی‌های زلزله اعمال شده به آن‌ها را کاهش می‌دهد. اگرچه، این کاهش ممکن است با جابجایی‌های افقی بزرگ جداسازها همراه باشد، انعطاف‌پذیری جانبی بعلاوه جابجایی‌های افقی منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت بار کمانشی بحرانی جداسازهای الاستومری می‌شود [۳-۶]. مطالعه آزمایشگاهی باکل (Buckle) و همکاران بر روی مجموعه‌ای از نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای نشان داد که: (۱) ظرفیت بار کمانشی بحرانی با افزایش جابجایی افقی یا کرنش برشی کاهش می‌یابد و (۲) سختی افقی با افزایش بار محوری و جابجایی افقی کاهش می‌یابد [۳]. مطالعات اخیر و تجربه زلزله‌های گذشته نشان دادند که تأثیر در نظر گرفتن مؤلفه‌ی عمودی حرکات زمین در نزدیک گسل برای تحلیل و طراحی سازه‌های با اهمیت قابل توجه است [۷]. علاوه بر این، در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل، طیف مؤلفه عمودی در پیوندهای کوچک می‌تواند به طور قابل توجهی از طیف مؤلفه افقی تجاوز کند [۸]. ایروز و دیسروچیز (Eröz & DesRochesb) [۹]، عملکرد لرزه‌ای جداساز پاندول اصطکاکی (FPS) و جداساز لاستیک سربی (LRB) را به عنوان نماینده تکیه‌گاه‌های جداساز لغزنده و الاستومری مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که جداساز پاندول اصطکاکی (FPS) قادر به انطباق با مولفه‌های عمودی حرکت قوی زمین است. در حالی که LRB ممکن است دچار یک شکست کمانشی شود. بنابراین، عدم احتساب مولفه عمودی حرکت زمین در مدل‌سازی و تحلیل رفتاری LRB ممکن است منجر به چشم‌پوشی از یک حالت شکست کمانشی شود. وارن و همکاران با انجام آزمایش میز لرزان بر روی یک نمونه پل تک دهانه جدا شده لرزه‌ای اثرات مولفه قائم زلزله را بر روی پاسخ پل با استفاده از تکیه‌گاه‌های جداساز لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه، از جداساز لاستیک سربی (LRB) و جداساز لاستیکی با میرایی کم (LDRB) استفاده کردند و بزرگنمایی قابل توجهی را در پاسخ عمودی برای هر سیستم جداساز به طور تقریبی در محدوده‌ای بین ۲ تا ۵/۵ برابر مشاهده کردند.

هدف این مقاله مقایسه عملکرد لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای متداول تحت حرکات قوی زمین نزدیک گسل است. وجه تمایز این مطالعه این است که در مدل‌سازی جداساز از ساده‌سازی‌های مرسوم استفاده نشده و در عوض جنبه‌های اصلی مدل‌سازی و عوامل مؤثر در رفتار جداسازها که توسط کومار (Kumar) و همکاران [۱] و ایروز و دیسروچیز [۲] معرفی و در ابتدای مقدمه نیز اشاره شد، به صورت کامل در مدل‌سازی‌ها لحاظ شده است. به این منظور، نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای لاستیک-سربی (LRB) و لاستیک با میرایی بالا (HD) به عنوان نماینده جداساز الاستومری و جداساز لرزه‌ای تک پاندول اصطکاکی (SFP) و سه پاندول اصطکاکی (TFP)

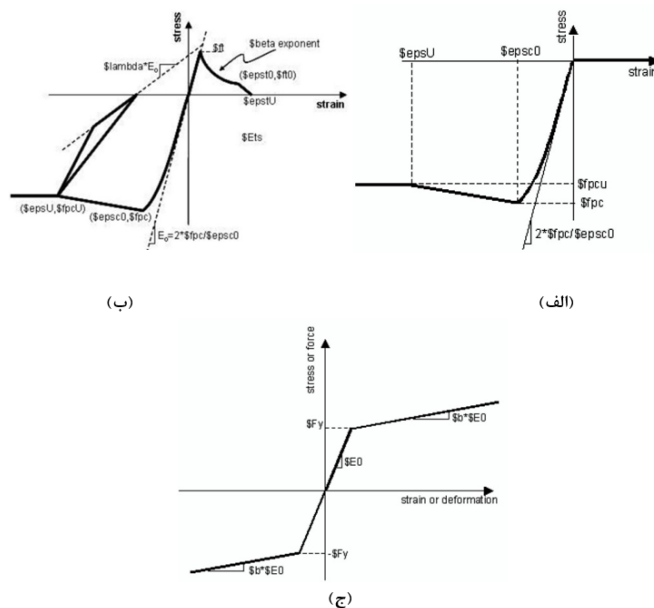
### ۳- مدل سازی پل

را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی رفتاری مواد بتنی در مدل سازی پایه‌های پل نیازی به در نظر گرفتن اثرات ترک خوردگی مقطع بتن آرمه ستون‌ها و همچنین سختی مقطع مؤثر آن‌ها نمی‌باشد. همچنین جرم سرستون بعلاوه نصف جرم ستون‌های هر پایه به منظور انجام آنالیز تاریخیچه زمانی، به‌عنوان جرم زیرسازه در مدل سازی پایه‌های پل لحاظ گردید. جهت مدل سازی شاه‌تیرهای سرتاسری طولی و دال بتن آرمه قرار گرفته بر روی آن‌ها، از یک المان طولی تیر-ستون الاستیک استفاده شد. جدول ۱ خصوصیات دو تیپ متفاوت از مقطع عرضی عرشه که در المان‌های عرشه پل مورد استفاده قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. شکل ۳ مدل پل جداسازی شده لرزه‌ای را در نرم افزار نشان می‌دهد. علاوه بر این در مدل سازی پل از درجات آزادی و سیستم مختصات پیشنهاد شده توسط آویرام (Aviram) و همکاران استفاده شد [۱۱].

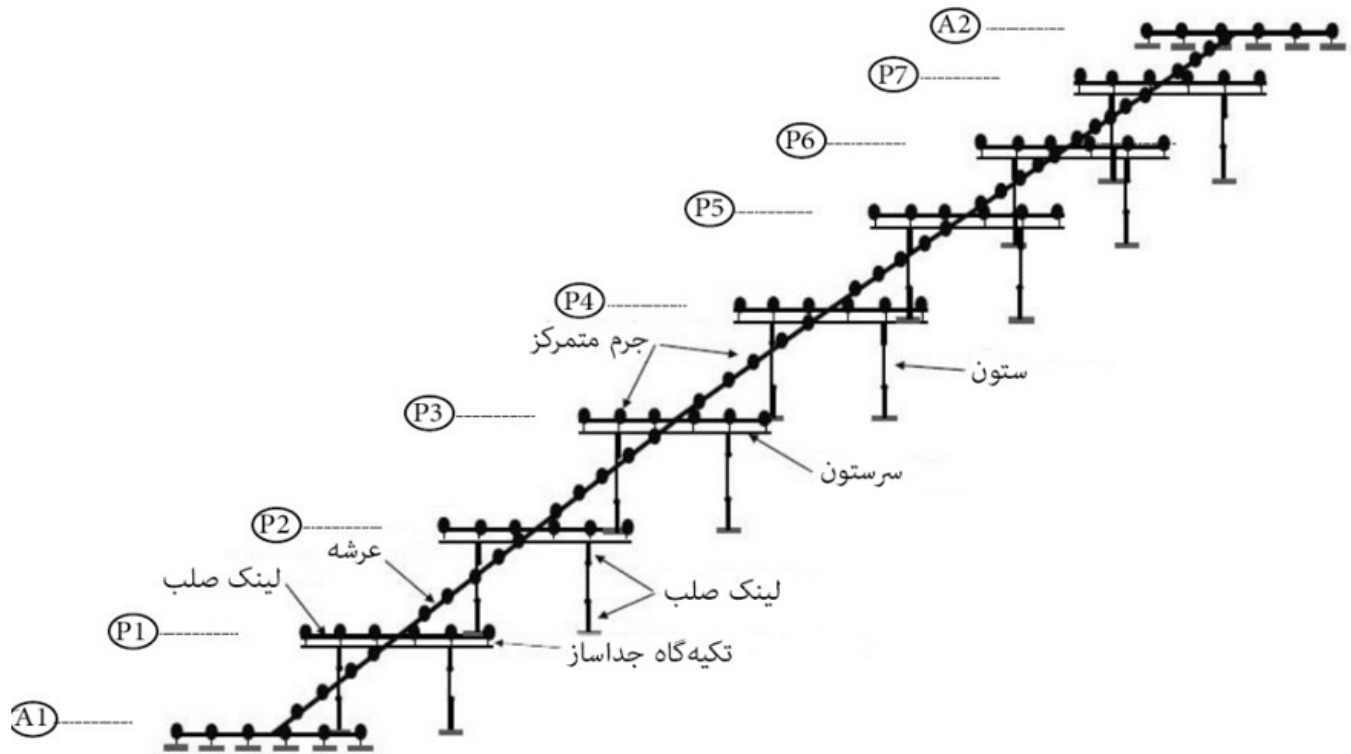
در این مطالعه مدل سازی و تحلیل پل به صورت سه بعدی در نرم افزار OpenSees و فقط برای یک مسیر انجام پذیرفته است. با توجه به سختی بالای کوله‌ها در مدل سازی به صورت صلب فرض شده‌اند. همچنین به منظور مدل سازی ستون و سرستون پایه‌های پل از المان‌های تیر-ستون غیرالاستیک با استفاده از مقاطع فایبر استفاده شد. برای مدل سازی مصالح بتن محصور نشده از مدل رفتاری کنت-اسکات-پارک با مقاومت کششی صفر (Concrete 01) که در آن سختی باربرداری/ بارگذاری به صورت خطی افت می‌کند، استفاده شد. برای مصالح بتن محصور شده، مقاومت مدل رفتاری Concrete 03 با مقاومت فشاری بتن محصور شده، مقاومت کششی و نرم شوندگی کششی غیرخطی استفاده گردید. شکل ۲ منحنی رفتاری مصالح بتنی و فولادی استفاده شده در مدل سازی پایه‌های پل

جدول ۱. خصوصیات دو تیپ متفاوت از مقطع عرضی عرشه پل  
Table 1. Characteristics of two types of bridge deck cross-section

| شرح  | خصوصیات مقطع قرار گرفته بر روی پایه | خصوصیات مقطع قرار گرفته در وسط دهانه |
|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| مساحت مقطع (m <sup>2</sup> )                       | ۹۷۱۴/۴                              | ۲۱۲۵/۴                               |
| ممان اینرسی مقطع حول محور محلی Y (m <sup>4</sup> ) | ۷۰۱۶/۶۵                             | ۴۳۶۱/۵۵                              |
| ممان اینرسی مقطع حول محور محلی Z (m <sup>4</sup> ) | ۸۳۰۳/۱                              | ۶۲۲/۱                                |
| ممان پیچشی مقطع (m <sup>4</sup> )                  | ۰/۰۳۸۵                              | ۰/۰۳۴۷                               |



شکل ۲. منحنی رفتار ماده بتنی و فولادی (الف) Concrete 01، (ب) Concrete 03 و (ج) Steel 01  
Fig. 2. Behavioral model of concrete and steel material



شکل ۳. شمای کلی مدل پل جداسازی شده لرزه‌ای در نرم‌افزار  
Fig. 3. The general scheme of the bridge model

(تیپ ۱)، پایه‌های انتهایی پل (تیپ ۲) و پایه‌های میانی پل (تیپ ۳) طراحی شدند. همچنین نشیمن‌های جداساز اصطکاکی برای کلیه موقعیت‌های قرارگیری نشیمن، به صورت یک تیپ طراحی شدند. جداول ۲ تا ۵ خلاصه نتایج به دست آمده از طراحی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای را ارائه می‌دهد.

#### ۵- مدل‌سازی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای

##### ۵-۱- مدل‌سازی و رفتار محوری نشیمن‌های جداساز الاستومری

به منظور در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی و تاثیر گذار مدل‌سازی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای الاستومری که در مقدمه به آن‌ها اشاره شد از مدل پیشنهادی کومار و همکاران [۱] در برگزیده کلیه ملاحظات ذکر شده است، استفاده شد. مدل ارائه شده توسط روش انجمن مهندسیین مکانیک آمریکا (ASME) (American Society of Mechanical Engineers) [۱۴] راستی‌آزمایی و تصدیق شده و به منظور قابلیت استفاده از آن توسط محققین و جامعه حرفه‌ای مهندسیین طراح، در نرم‌افزار OpenSees [۱۵] کد نویسی گردیده است [۱]. بنابراین برای مدل‌سازی جداساز لاستیک-سربی (LRB) از المان ElastomericX با اختصاص نیروی تسلیم هسته سربی و جداساز لرزه‌ای HDRB از المان الاستومریک HDR استفاده شد. رابطه مدل پیشنهادی نشیمن الاستومری در جهت محوری در شکل ۴

#### ۴- طراحی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای

در این مطالعه، طراحی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای اصطکاکی و الاستومری مطابق با راهنمای طراحی جداساز لرزه‌ای آیین‌نامه آشتو [۱۲] و با استفاده از روش طراحی جابجایی مستقیم ارائه شده توسط باکل باکل (Buckle) و همکاران [۱۳] انجام شد. این روش طراحی تابع سطح خطر لرزه‌ای ساختگاه (مقدار جابجایی مورد نیاز سازه)، ویژگی‌های سازه (بارهای مرده و زنده) و زمان تناوب سازه بعد از جداسازی لرزه‌ای (TSIB) است. طراحی نشیمن‌های جداساز الاستومری (LRB, HDRB) و تک پاندول اصطکاکی (SFP) بر اساس سطح خطر لرزه‌ای ۱ با دوره بازگشت زلزله ۴۷۵ سال و با استفاده از طیف طرح استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای ساختگاه پل مورد مطالعه انجام پذیرفت. برای طراحی نشیمن جداساز لرزه‌ای سه پاندول اصطکاکی (TFP) به منظور فعال شدن هر پاندول در سطح خطر لرزه‌ای مرتبط با خود، از سه سطح خطر لرزه‌ای متفاوت با به‌کارگیری طیف طرح استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ با فرض شتاب مبنای طرح  $A_{FE} = 0/175g$  برای سطح خطر لرزه‌ای غالب،  $A_{DE} = 0/35g$  برای سطح خطر لرزه‌ای طراحی و  $A_{ME} = 0/525g$  ( $A_{DE} = 1/5 A_{ME}$ ) برای سطح خطر حداکثر انجام گردید. در نهایت نشیمن‌های جداساز الاستومری (LRB, HDRB) بر اساس موقعیت قرارگیری آن‌ها بر روی کوله‌های پل

می‌شود و آن نقطه را نقطه حفره‌زایی و تغییر شکل‌های پس از آن را رفتار پس‌حفره‌زایی می‌گویند. این مدل از سه پارامتر (۱) پارامتر حفره‌زایی،  $k$ ، (۲) پارامتر تنزل مقاومت،  $a$ ، (۳) شاخص خسارت،  $\phi_{max}$ ، استفاده می‌کند. در این مطالعه مطابق با مقادیر پیشنهاد داده شده توسط کومار و همکاران و وارن و همکاران،  $k = 20$ ،  $\phi_{max} = 0.75$  و  $a = 1$  در نظر گرفته شد [۱، ۱۶، ۱۷].

ارائه شده است، که خصوصیات جهت محوری: (۱) کمانش در فشار، (۲) کوپل حرکات محوری و قائم، (۳) رفتار حفره‌زایی، (۴) رفتار پس‌حفره‌زایی، و (۵) تنزل مقاومت در طی بارگذاری کششی چرخه‌ای را در نظر می‌گیرد. در اثر وقوع تنش‌های کششی در نشیمن‌های الاستومری، لایه لاستیکی مابین صفحات فولادی تحت کشش دچار تغییر شکل حفره‌ای شکل شده که این لایه لاستیکی از یک نقطه به بعد دچار کاهش مقاومت

جدول ۲. مشخصات طراحی نشیمن جداساز لرزه‌ای LRB  
Table 2. Design specifications of LRB

| ابعاد             | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ |
|-------------------|-------|-------|-------|
| $D_{in}$ (mm)     | ۷۰    | ۱۰۰   | ۱۰۰   |
| $D_{out}$ (mm)    | ۴۱۰   | ۵۲۰   | ۵۴۰   |
| $t_{rubber}$ (mm) | ۸     | ۸     | ۸     |
| $t_{rubber}$ (mm) | ۴     | ۴     | ۴     |
| Number of Layers  | ۳۴    | ۲۴    | ۲۴    |
| $H_{total}$ (mm)  | ۵۰۶   | ۳۸۶   | ۳۸۶   |

جدول ۳. مشخصات طراحی نشیمن جداساز لرزه‌ای HDRB  
Table 3. Design specifications of HDRB

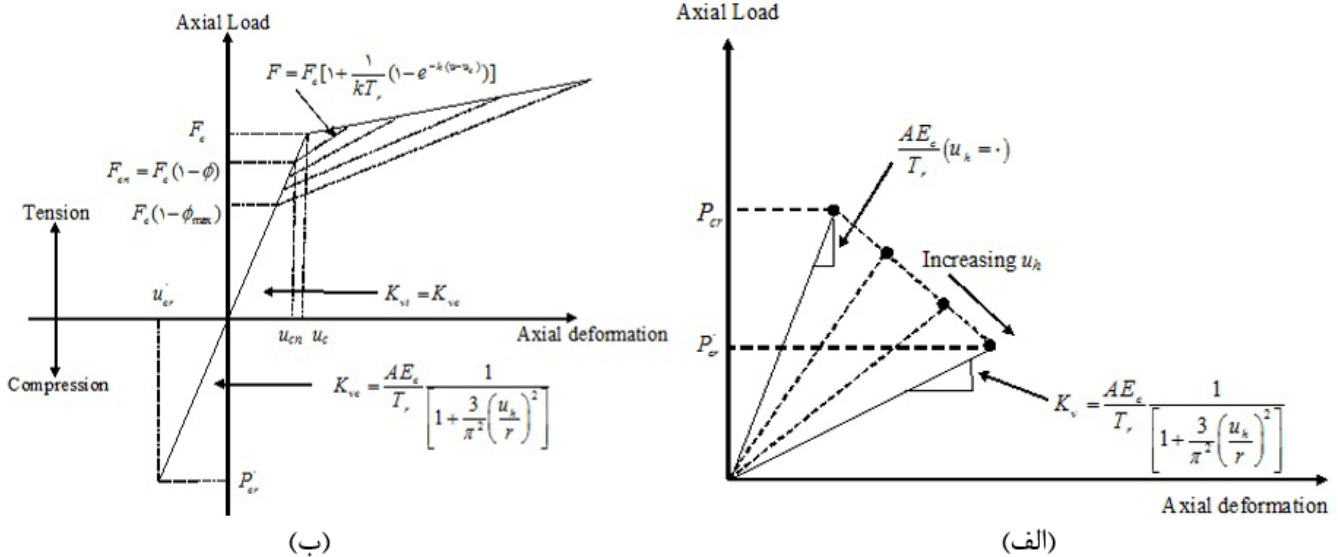
| ابعاد             | تیپ ۱ | تیپ ۲ | تیپ ۳ |
|-------------------|-------|-------|-------|
| $D_{in}$ (mm)     | ۰     | ۰     | ۰     |
| $D_{out}$ (mm)    | ۴۱۰   | ۵۱۰   | ۵۲۰   |
| $t_{rubber}$ (mm) | ۸     | ۸     | ۸     |
| $t_{rubber}$ (mm) | ۴     | ۴     | ۴     |
| Number of Layers  | ۳۵    | ۲۴    | ۲۴    |
| $H_{total}$ (mm)  | ۵۱۸   | ۳۸۶   | ۳۸۶   |

جدول ۴. خلاصه نتایج حاصل از طراحی نشیمن جداساز لرزه‌ای TFP  
Table 4. Summary specifications of designed TFP

| ابعاد               | پاندول ۱ | پاندول ۲         | پاندول ۳ |
|---------------------|----------|------------------|----------|
| $R_i$ (cm)          | ۶۵       | ۲۲۳/۵            | ۲۲۳/۵    |
| $L_i$ (cm)          | ۵۶       | ۲۰۷              | ۲۰۷      |
| $h_i$ (cm)          | ۹        | ۱۷               | ۱۷       |
| $D_{ii}$ (cm)       | ۱۴       | ۴۱               | ۴۱       |
| $D_{io}$ (cm)       | ۳۸       | ۹۳               | ۹۳       |
| $d_i$ (cm)          | ۱۲       | ۲۶               | ۲۶       |
| قطر جداساز BTFP (m) | ۹۷       | ارتفاع (HTFP (m) | ۴۸       |

جدول ۵. خلاصه نتایج حاصل از طراحی نشیمن جداساز لرزه‌ای SFP  
Table 5. Summary specifications of designed SFP

| مشخصات | پریود<br>(s) | شعاع R<br>(cm) | ضریب اصطکاک $\mu$ | MPa      | قطر لغزنده<br>(dslider cm) | پهنای جداساز<br>(cm) |
|--------|--------------|----------------|-------------------|----------|----------------------------|----------------------|
| تیپ ۱  | ۲/۲۲         | ۹۹             | ۰/۰۶۲             | ۴۴/۸۱۵۹۳ | ۱۴                         | ۱/۱۴                 |



شکل ۴. مدل رفتاری نشیمن‌های الاستومری در جهت محوری (الف) نرم‌شوندگی نیروی محوری تحت فشار (ب) رفتار تحت کشش [۱].  
Fig 4. The behavioral model of elastomeric bearing in axial direction:  
(a) axial force softening under pressure (b) tensile behavior

است که بیانگر وابستگی سختی افقی نشیمن‌های جداساز اصطکاکی به تغییرات بار محوری اعمال شده ناشی از مؤلفه قائم زلزله (P) است.

$$K_{H-Fri} = \frac{P}{R_{eff}} \quad (۲)$$

که در آن  $R_{eff}$  شعاع بشقاب کروی (R) در نشیمن جداساز SFP و در نشیمن جداساز TFP شعاع مؤثر لغزندگی در هر یک از مراحل لغزندگی می‌باشد. به منظور مدل‌سازی نشیمن جداساز لرزه‌ای SFP و نشیمن جداساز لرزه‌ای TFP در نرم‌افزار OpenSees به ترتیب المان نشیمن جداساز لرزه‌ای تک پاندول اصطکاکی (singleFPBearing) و سه پاندول اصطکاکی (TripleFrictionPendulum) برای مدل‌سازی سه بعدی بکار گرفته شد. این المان‌ها قابلیت در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری و جنبه‌های اصلی مدل‌سازی جداساز لرزه‌ای اصطکاکی که در مقدمه به آن‌ها اشاره شد، را دارند. علاوه بر این، به منظور در نظر گرفتن تغییرات ضریب اصطکاک نشیمن‌های جداساز اصطکاکی (single FP Bearing)،  $\mu$ ، از مدل رفتاری اصطکاک (Triple Friction Pendulum) وابسته به سرعت استفاده شد [۲، ۸، ۱۹].

### ۵-۲- سختی افقی نشیمن‌های جداساز الاستومری

اثر بار محوری بر روی سختی افقی یک نشیمن جداساز الاستومری زمانی مهم است که بار محوری نزدیک به ظرفیت بار کمانشی بحرانی نشیمن الاستومری باشد. کوه و کلی (Koh & Kelly) [۶] رابطه تحلیلی برای سختی افقی نشیمن‌های جداساز الاستومری به صورت تابعی از نیروی محوری و ظرفیت بار کمانشی بحرانی ( $P_{cr}$ ) ارائه کردند. این رابطه نتایج دقیق و قابل قبولی را ارائه می‌دهد [۱]:

$$K_{H-Elas} = \frac{GA}{T_r} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right] = K_{H_0} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right] \quad (۱)$$

که در آن A سطح مقطع، G مدول برشی، Tr ضخامت کل لایه‌های لاستیک نشیمن جداساز الاستومری و  $K_{H_0}$  سختی افقی نشیمن جداساز الاستومری در نیروی محوری صفر است.

### ۵-۳- رفتار برشی و مدل‌سازی نشیمن‌های جداساز اصطکاکی

سختی افقی نشیمن‌های جداساز اصطکاکی توسط رابطه ۲ ارائه شده

موج برشی متوسط در عمق ۳۰ متری و ضرایب مقیاس مؤلفه‌های افقی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده را ارائه می‌دهد. شتاب‌های انتخاب شده مطابق با خاک نوع II است. علاوه بر این، رکوردهای شتاب انتخاب شده براساس نشریه ۴۶۳ و مطابق با سطح خطر لرزه‌ای ساختگاه پیل مقیاس شده‌اند. طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مقیاس

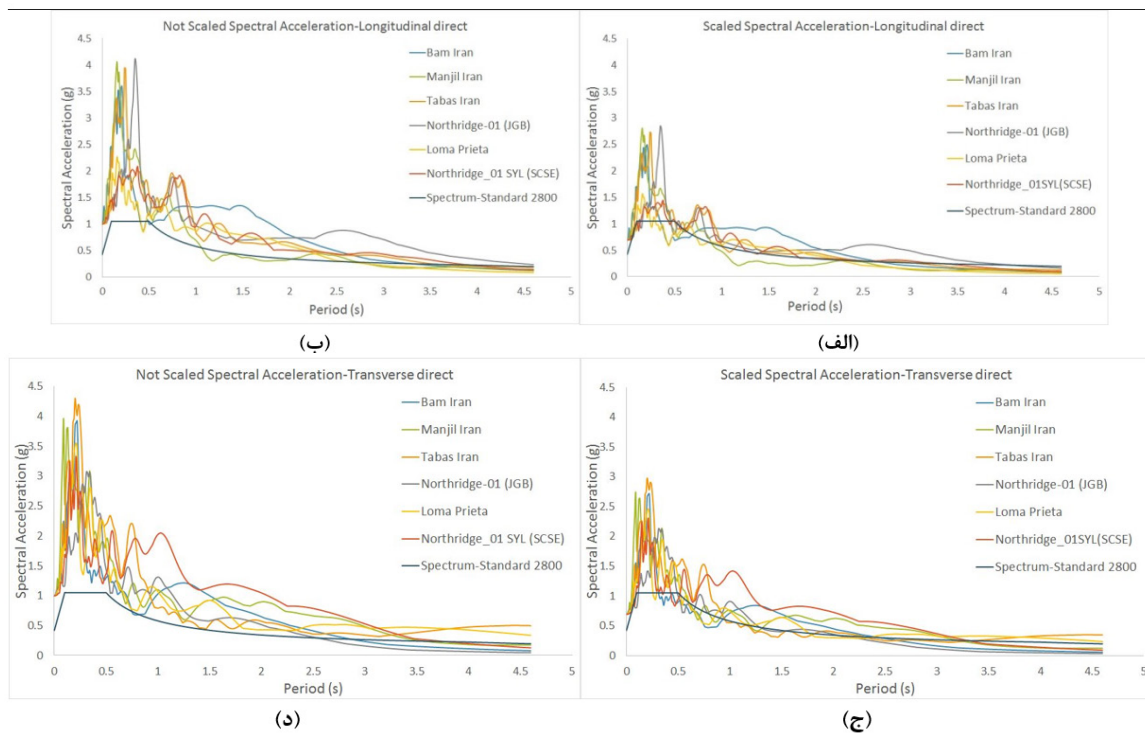
### ۶- حرکات زمین در نزدیک گسل

در این مطالعه، شش رکورد زلزله با ویژگی‌های حوزه نزدیک گسل انتخاب شد. جدول ۶ مشخصات حرکات زمین، شامل بزرگا، نزدیک‌ترین فاصله به صفحه گسل، حداکثر شتاب زمین، و سرعت نشده و مقیاس شده برای ساختگاه پیل در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۶. مشخصات زمین لرزه‌های استفاده شده

Table 6. Specifications of selected strong ground motions

| Earthquake              | Year | $V_{s,30}$<br>(m/s) | Magnitude<br>( $M_w$ ) | Station Name                                 | $R_{jb}$<br>(km) | PGA<br>(g) | Scale<br>Factor<br>(Long) | Scale<br>Factor<br>(Tran) |
|-------------------------|------|---------------------|------------------------|--|------------------|------------|---------------------------|---------------------------|
| Northridge-01<br>(JGB)  | ۱۹۹۴ | ۵۲۵/۷۹              | ۶/۶۹                   | Jensen Filter Plant<br>Generator<br>Building | ۰/۰              | ۰/۹۹۵      | ۱/۲۱                      | ۰/۶۹۶                     |
| Loma Prieta             | ۱۹۸۹ | ۳۸۰/۸۹              | ۶/۹۳                   | Saratoga - Aloha<br>Ave                      | ۷/۵۸             | ۰/۵۱۴      | ۱/۳۵                      | ۲/۱۲                      |
| Bam (Iran)              | ۲۰۰۳ | ۴۸۷/۴               | ۶/۶                    | Bam  | ۰/۰۵             | ۰/۸۰۸      | ۰/۸۵۷                     | ۱/۱۰۱                     |
| Manjil (Iran)           | ۱۹۹۰ | ۷۲۳/۹۵              | ۷/۳۷                   | Abbar  | ۱۲/۵۵            | ۰/۵۳۸      | ۱/۳۴۴                     | ۱/۳۹۳                     |
| Tabas (Iran)            | ۱۹۷۸ | ۷۶۶/۷۷              | ۷/۳۵                   | Tabas  | ۱/۷۹             | ۰/۸۶۲      | ۰/۸۱۱                     | ۰/۸۰۳                     |
| Northridge-01<br>(SCSE) | ۱۹۹۴ | ۳۷۰/۵۲              | ۶/۶۹                   | Sylmar -<br>Converter Sta East               | ۰/۰              | ۰/۸۵۳      | ۰/۸۱۲                     | ۱/۵۴۲                     |



شکل ۵. طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده (الف) مؤلفه‌های طولی و مقیاس شده (ب) مؤلفه‌های طولی و مقیاس نشده (ج) مؤلفه‌های عرضی و مقیاس شده (د) مؤلفه‌های عرضی و مقیاس نشده

Fig 5. Acceleration response spectra of ground motions: (a) scaled longitudinal component, (b) unscaled longitudinal component, (c) scaled transverse component, (d) unscaled transverse component

## ۷- مدل سازی و تحلیل

در این مطالعه، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با اعمال سه مولفه شتاب زمین لرزه (دو مولفه افقی و یک مولفه قائم) در سه جهت اصلی بر مدل پل جداشده لرزه‌ای با جداساز لرزه‌ای الاستومری (LRB, HDRB) و اصطکاکی (SFP, TFP) و همچنین سازه‌ی پل جدا نشده لرزه‌ای با استفاده از نرم افزار OpenSees انجام شد. میرایی هر یک از سیستم‌های سازه‌ای فوق برای مدل پل مورد مطالعه از نوع میرایی رایلی لحاظ شد [۲۰ و ۲۱]. جدول ۷ زمان تناوب و میرایی هر یک از مدل‌های پل را ارائه می‌دهد. به دلیل اینکه سختی افقی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای به طور قابل توجهی کمتر از سختی افقی پایه‌های پل است، پس از اضافه شدن نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای به مدل پل جداسازی نشده سختی افقی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای بر سیستم سازه‌ی جداشده‌ی

لرزه‌ای حاکم شده و زمان تناوب آن را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند.

به دلیل تعداد نشیمن‌ها، یکی از جداساز لرزه‌ای میانی قرار گرفته بر روی هر پایه و کوله پل به عنوان نماینده انتخاب و پاسخ‌های آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در این مقاله پاسخ‌های پل صرفاً برای کوله ۱ (A1)، کوتاه‌ترین پایه‌ها (P1 و P7) و بلندترین پایه‌ی پل (P4) ارائه شده است.

به منظور ارزیابی تأثیرپذیری در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل‌سازی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای الاستومری در پاسخ‌های مختلف پل و نشیمن‌های جداساز، منحنی‌های نیرو-تغییرشکل نشیمن جداساز LRB با فرض در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل‌سازی (مدل سازی ساده) ارائه می‌شود.

### جدول ۷. پریود، میرایی و رنگ اختصاص داده شده به هر یک از مدل‌های پل

Table 7. Period, damping and color dedicated to the response of each bridge model

| مشخصه                    | نوع مدل | پل جدا نشده لرزه‌ای | پل جداشده لرزه‌ای با HDRB | پل جداشده لرزه‌ای با LRB | پل جداشده لرزه‌ای با SFP | پل جداشده لرزه‌ای با TFP |
|--------------------------|---------|---------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| زمان تناوب T (s)         |         | ۰/۱۴                | ۲/۱۶۵                     | ۲/۱۹                     | ۲/۲۲                     | ۲/۳۶                     |
| میرایی                   |         | %۵                  | %۲۰                       | %۲۰                      | %۵.۵                     | %۵                       |
| رنگ منحنی‌ها پاسخ هر مدل |         | ارغوانی             | فیروزه‌ای                 | سبز                      | قرمز                     | آبی                      |

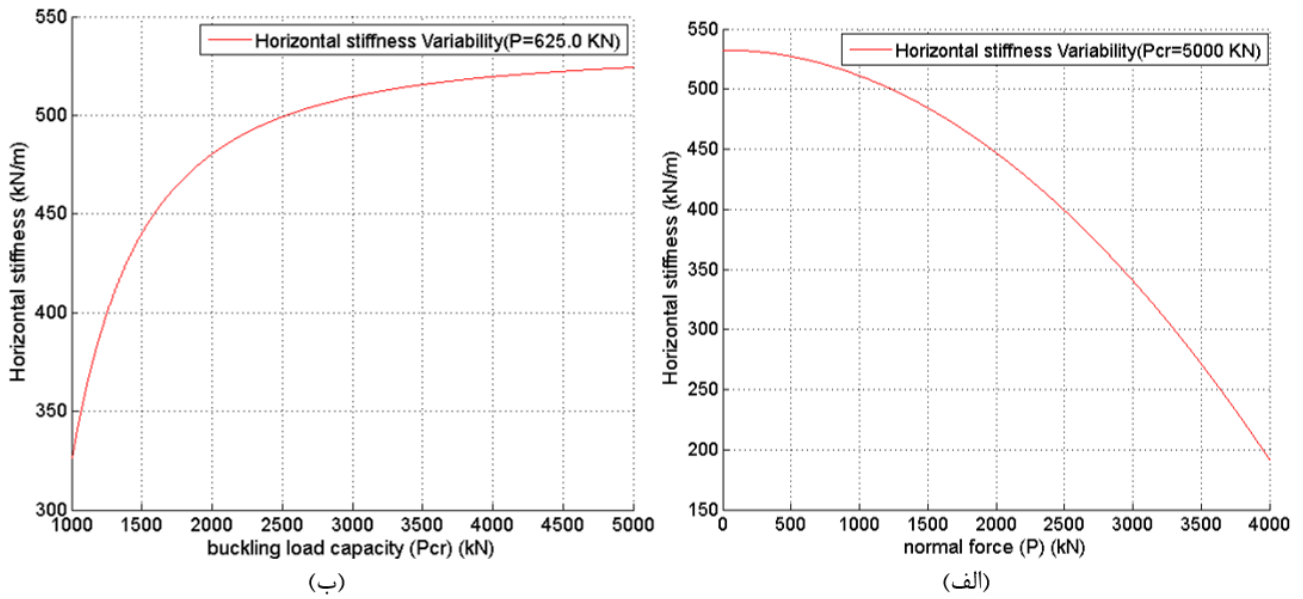
دست می‌دهند. بر اساس ارتباط حرکت افقی و قائم نشیمن الاستومری و کاهش ظرفیت بار کمانشی بحرانی ناشی از جابجایی جانبی تحمیل شده همزمان با افزایش بار محوری نشیمن جداساز الاستومری ناشی از مؤلفه قائم زلزله، نسبت  $(P/P_c)$  سهمی شکل افزایش می‌یابد و به صورت نشان داده شده در شکل ۶ منجر به کاهش سختی افقی  $(K_H)$  نشیمن جداساز لرزه‌ای الاستومری می‌شود. این سختی افقی کاهش یافته نیز منجر به افزایش جابجایی‌های افقی  $(u_h)$  و در نتیجه منجر به کاهش سختی قائم  $(K_V)$  و افزایش جابجایی‌های محوری نشیمن جداساز الاستومری می‌شود. این نوع رفتار که به نرم‌شوندگی نیروی محوری تحت فشار نیز معروف است، در منحنی‌های نیرو-تغییرشکل افقی و محوری نشیمن‌های جداساز الاستومری به وضوح قابل مشاهده خواهد بود. این چرخه در برخی از بازه‌های زمانی تحریک زلزله می‌تواند به طور مستمر تا آنجایی ادامه پیدا کند که منجر به از دست رفتن کامل مقاومت قائم نشیمن الاستومری و ناپایداری کمانشی آن شود. وقوع این پدیده در سازه پل جداشده لرزه‌ای با نشیمن‌های الاستومری تحت مؤلفه‌های رکورد زلزله‌ای که دارای پالس‌های قوی با انرژی بالا در نگاشت‌های سرعت و جابجایی خود هستند، محتمل تر است.

### ۷-۱- تأثیر تغییرات نیروی نرمال و ظرفیت بار کمانشی در پاسخ‌های نشیمن‌های جداساز الاستومری

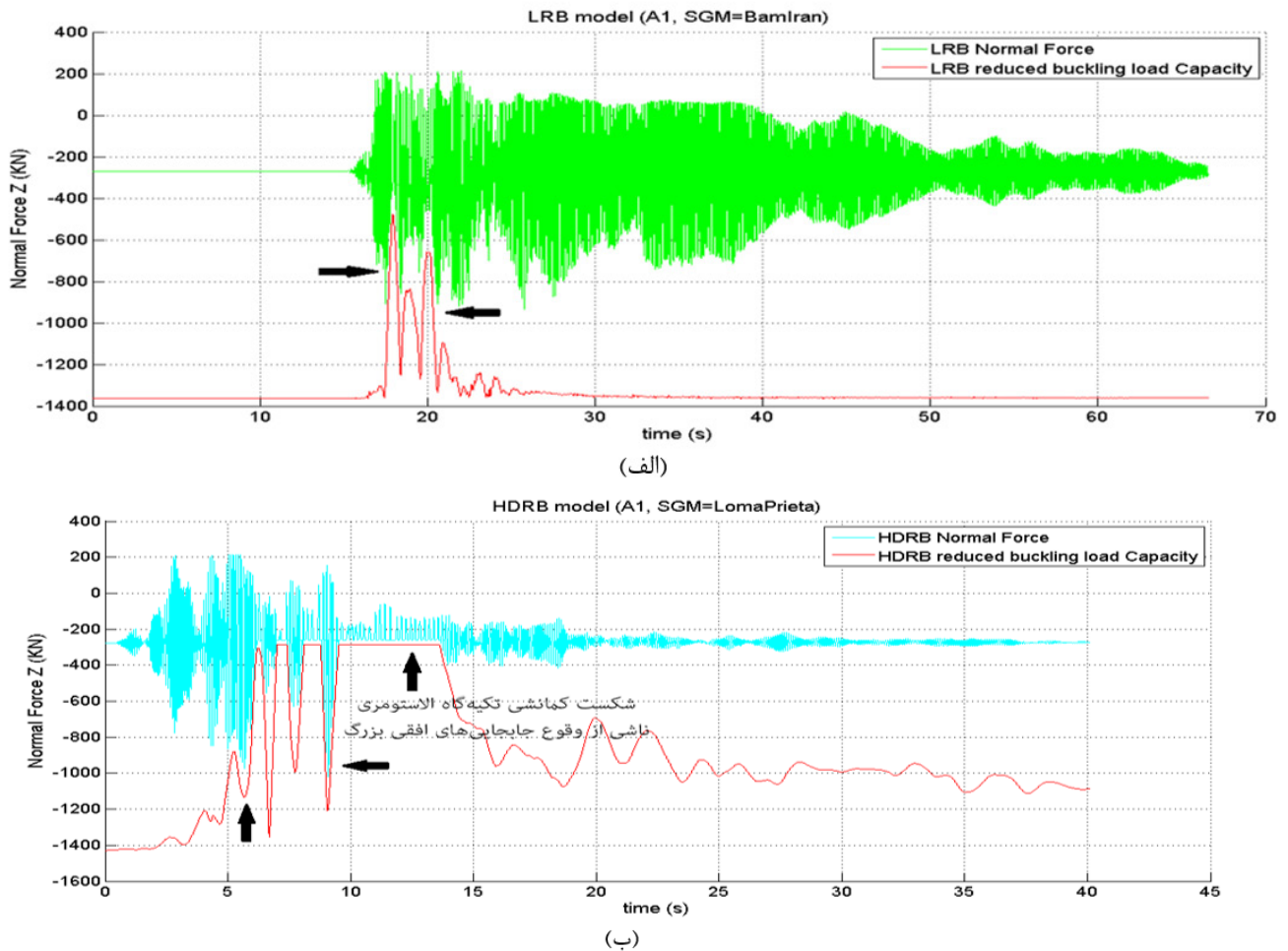
تأثیر تغییرات نیروی نرمال (P) و ظرفیت بار کمانشی (Pcr) بر رفتار جداساز لرزه‌ای الاستومری (LRB, HDRB) به صورت تغییرات سختی برشی جداساز بر اساس رابطه شماره ۱، در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس نمودارها سختی برشی نشیمن جداساز الاستومری با افزایش بار محوری (P) و کاهش ظرفیت بار کمانشی (Pcr) به صورت سهمی کاهش می‌یابد. کاهش سختی برشی نشیمن جداساز الاستومری زمانی مهم است که بار محوری نزدیک به ظرفیت بار کمانشی بحرانی نشیمن الاستومری باشد. شکل ۷ مقایسه تاریخچه زمانی بار محوری (P) با ظرفیت بار کمانشی کاهش یافته  $(P_{cr}^i)$  نشیمن‌های جداساز الاستومری را نشان می‌دهد.

با توجه به نقاط نشان داده شده توسط پیکان در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که به علت همزمانی جابجایی‌های افقی بزرگ با افزایش ناگهانی نیروهای محوری فشاری، نشیمن‌های جداساز الاستومری شرایط بسیار بحرانی را در برخی از زمان‌های تحریک زلزله تجربه می‌کنند و در بازه‌ای از زمان‌های تحریک زلزله به طور قابل توجهی مقاومت خود را از





شکل ۶. تغییرات سختی برشی نشیمن جداساز الاستومری برحسب (الف) نیروی نرمال اعمال شده (P) و (ب) ظرفیت بار کمانشی (Pcr)  
 Fig. 6. Variation of shear stiffness of elastomeric bearing according to (a) applied normal force, (b) buckling load capacity



شکل ۷. مقایسه تاریخچه زمانی بار محوری با تغییرات ظرفیت بار کمانشی کاهش یافته نشیمن جداساز الاستومری (الف) تحت زلزله بیم (۲۰۰۳) (ب) HDRB تحت زلزله لوما پریتا (۱۹۸۹)  
 Fig. 7. Axial load time history verses reduced buckling load capacity of elastomeric bearing , (a) LRB under Bam (2003), (b) HDRB under Lomaprieta (1986)

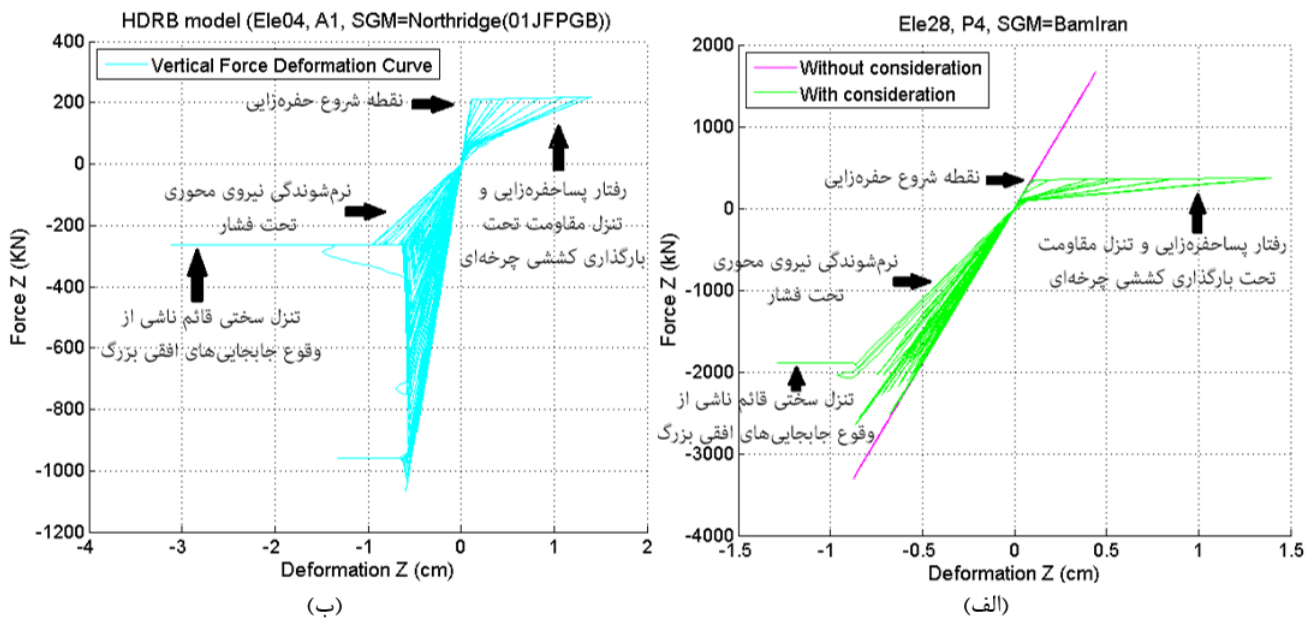
## ۷-۲- منحنی‌های نیرو-تغییرشکل محوری نشیمن جداساز الاستومری

شکل ۸- الف منحنی نیرو-تغییرشکل محوری برای دو مدل متفاوت نشیمن جداساز LRB با و بدون در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل سازی را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۸- ب منحنی نیرو-تغییرشکل محوری برای دو مدل متفاوت نشیمن جداساز LRB با و بدون در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل سازی را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۸- ب منحنی نیرو-تغییرشکل محوری نشیمن جداساز لرزه‌ای HDRB را با در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل سازی نشیمن الاستومری نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل سازی در مدل نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای الاستومری (LRB) (HDRB) نقطه شروع حفره‌زایی و رفتار پساحفره‌زایی و تنزل مقاومت تحت بارگذاری کششی چرخه‌ای، در محدوده‌ی کششی منحنی‌های نیرو-تغییرشکل محوری قابل مشاهده است (نشان داده شده توسط

پیکان). همچنین در محدوده فشاری منحنی نیرو-تغییرشکل محوری، نرم‌شوندگی نیروی محوری ناشی از افزایش جابجایی‌های جانبی و کاهش شدید مقاومت قائم ناشی از وقوع جابجایی‌های جانبی بزرگ قابل مشاهده است (نشان داده شده توسط پیکان).

از سوی دیگر، بدون در نظر گرفتن جنبه‌های اصلی مدل سازی در مدل نشیمن جداساز LRB (مدل سازی ساده)، هیچ یک از این رفتارها قبل مشاهده نبوده و منحنی نیرو-تغییرشکل محوری آن کاملاً خطی می‌باشد (خط ارغوانی رنگ). همانطور که ملاحظه می‌شود عدم در نظر گرفتن رفتار حفره‌زایی در کشش و نرم‌شوندگی نیروی محوری تحت فشار، منجر به پاسخ نیروی محوری بزرگتر و جابجایی‌های محوری کوچکتر در مقایسه با مدل نشیمن جداساز لرزه‌ای LRB با در نظر گرفتن کلیه جنبه‌های اصلی مدل سازی می‌شود. منحنی نیرو-تغییرشکل محوری نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای اصطکاکی به دلیل صلیبیت محوری بالای آن‌ها به صورت تک خطی مدل سازی شد و در هیچ مورد بالا آمدگی (Uplift) در آن‌ها مشاهده نشد.



شکل ۸. منحنی نیرو-تغییرشکل محوری نشیمن جداساز لرزه‌ای (الف) LRB تحت زلزله بم ایران (۲۰۰۳) و (ب) HDRB تحت زلزله نورث ریج جنسن (۱۹۹۴)  
**Fig. 8. Axial force-deformation curve of elastomeric bearing (a) LRB under Bam (2003), (b) HDRB under Northridge (1994)**

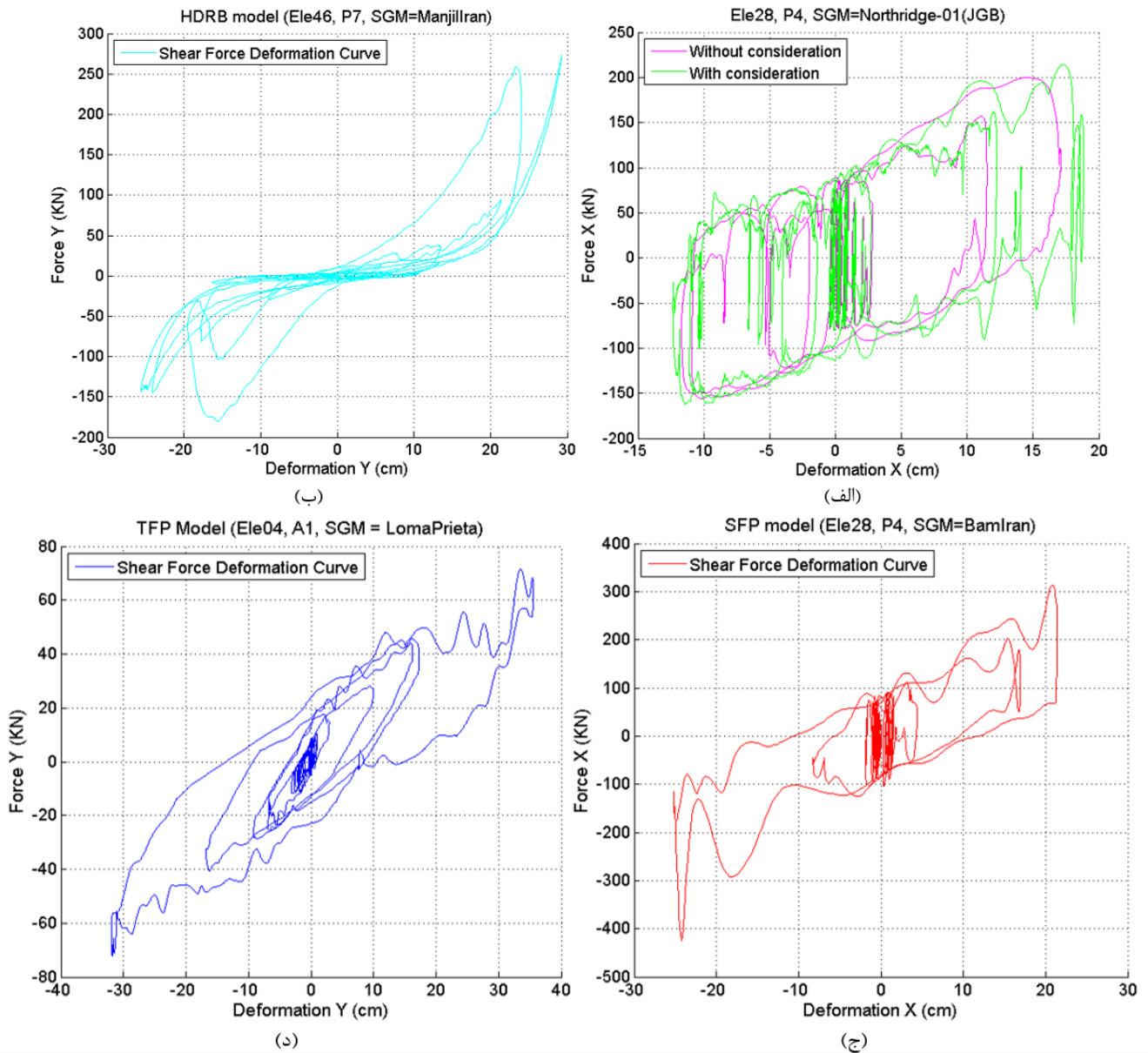
تغییرات نیروی نرمال اعمال شده توسط مؤلفه قائم حرکت قوی زمین است. این ویژگی در منحنی نیرو-تغییرشکل برشی سایر نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای نیز مشاهده می‌شود. همچنین علت نرم‌شوندگی قسمت‌های انتهایی منحنی‌های نیرو-تغییرشکل نشیمن جداساز لرزه‌ای را می‌توان به کوپل حرکت دوجبهتی در صفحه افقی ارتباط داد [۱۸]. از سوی دیگر، در نظر نگرفتن جنبه‌های اصلی مدل سازی

## ۷-۳- منحنی‌های نیرو-تغییرشکل برشی نشیمن جداساز لرزه‌ای

شکل ۹ منحنی‌های نیرو-تغییرشکل برشی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. منحنی نیرو-تغییرشکل برشی نشیمن جداساز LRB به دلیل در نظر گرفتن کلیه جنبه‌های اصلی مدل سازی دارای اعوجاج قابل ملاحظه‌ای در سختی الاستیک انتقالی خود است. این سختی الاستیک انتقالی به طور مستقیم تابعی از

نشیمن جداساز الاستومری و اصطکاکی و عدم در نظر گرفتن ظرفیت بار کمانشی (Pcr) برای نشیمن های جداساز الاستومری در مدل سازی سختی الاستیک انتقالی برشی آن ها می باشد.

منجر به ارائه سختی الاستیک انتقالی بسیار هموار و یکنواخت تری در منحنی نیرو-تغییر شکل برشی نشیمن های جداساز لرزه ای می شود. این امر به علت عدم در نظر گرفتن تغییرات نیروی نرمال (P) برای هر دو

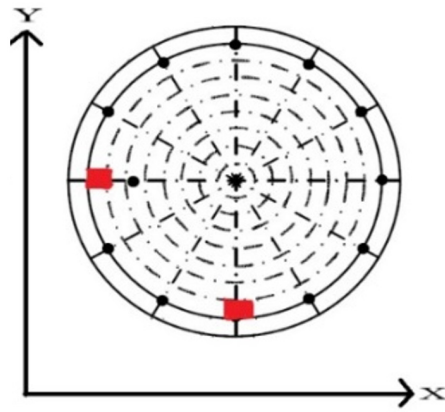


شکل ۹. منحنی نیرو-تغییر شکل برشی برای نشیمن جداساز لرزه ای (الف) LRB تحت زلزله نورث ریج جنسن (۱۹۹۴)، (ب) HDRB تحت زلزله منجیل ایران (۱۹۹۰)، (ج) SFP تحت زلزله بم ایران (۲۰۰۳) و (د) TFP تحت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹)  
 Fig. 9. Shear force versus deformation of elastomeric bearing (a) LRB under Northridge Jensen (1994), (b) HDRB under Manjil (1990), (c) SFP under Bam (2003) (d) TFP under Lomaprita (1989)

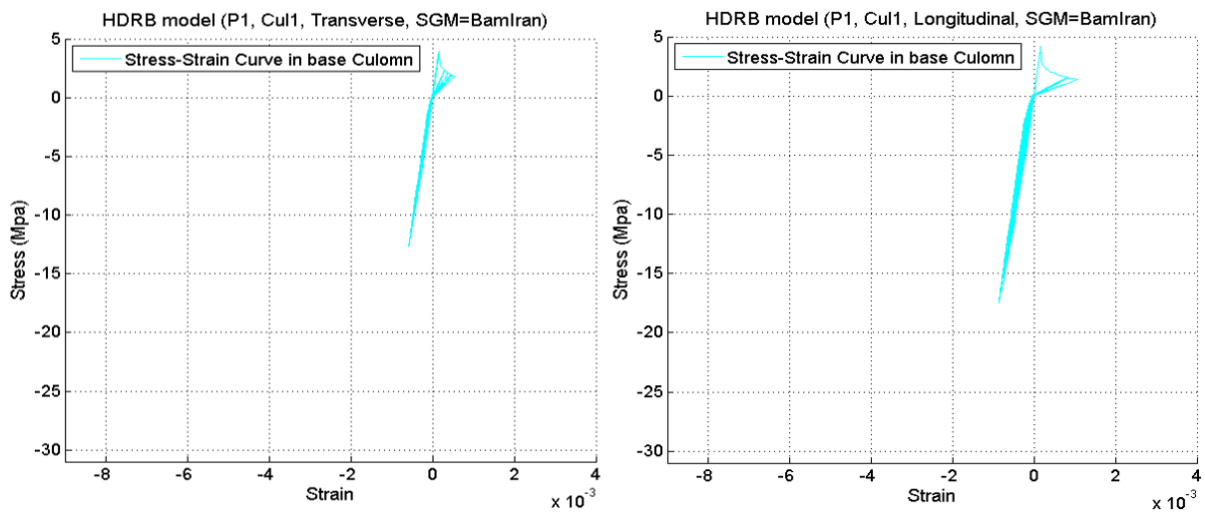
طولی (X) و عرضی (Y) برای پایه های P1، P4 و P7 محاسبه گردید. به دلیل تعدد اشکال و محدودیت تعداد صفحات در این بخش منحنی های تنش-کرنش در دو جهت طولی (X) و عرضی (Y) پل فقط برای ستون شماره ۱ پایه P1 تحت تحریک زلزله ی بم (۲۰۰۳) ارائه می شود. شکل های ۱۱ تا ۱۵ منحنی های تنش-کرنش ستون مدل های مختلف پل جدا شده و جدا شده لرزه ای را در دو جهت طولی و عرضی نشان می دهند.

#### ۴-۷- منحنی تنش-کرنش پایه ی ستون

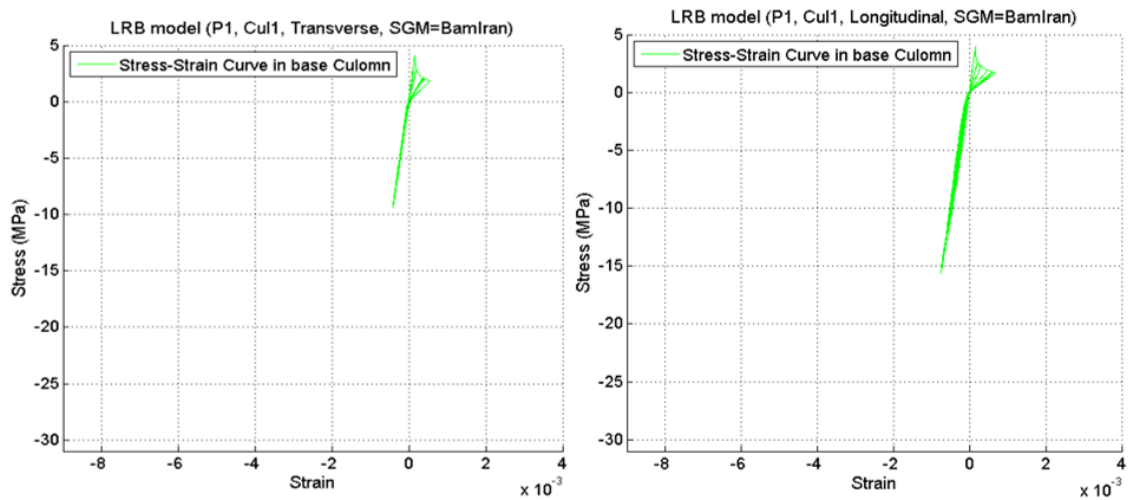
جهت مقایسه عملکرد لرزه ای پل با سیستم های مختلف جدا ساز منحنی های تنش-کرنش و مقادیر آن ها در پایه پل مورد بررسی قرار گرفت لازم به ذکر است از مقاطع فایبر برای المان های غیرخطی ستون استفاده شده است. مقادیر تنش و کرنش برای فیبرهای نشان داده شده نشان شده در شکل ۱۰ برای مدل های جدا شده و جدا نشده لرزه ای در دو جهت



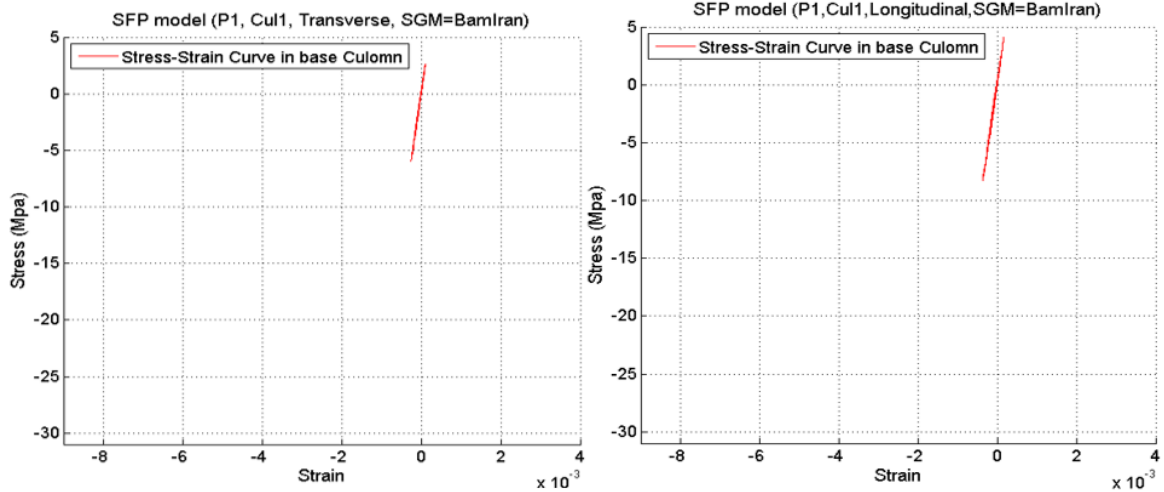
شکل ۱۰. موقعیت محلی فیبرهای مقطع پایه ستون جهت ثبت مقادیر تنش و کرنش  
 Fig10. Location of fiber cross sections to record stress and strain in the column of pier



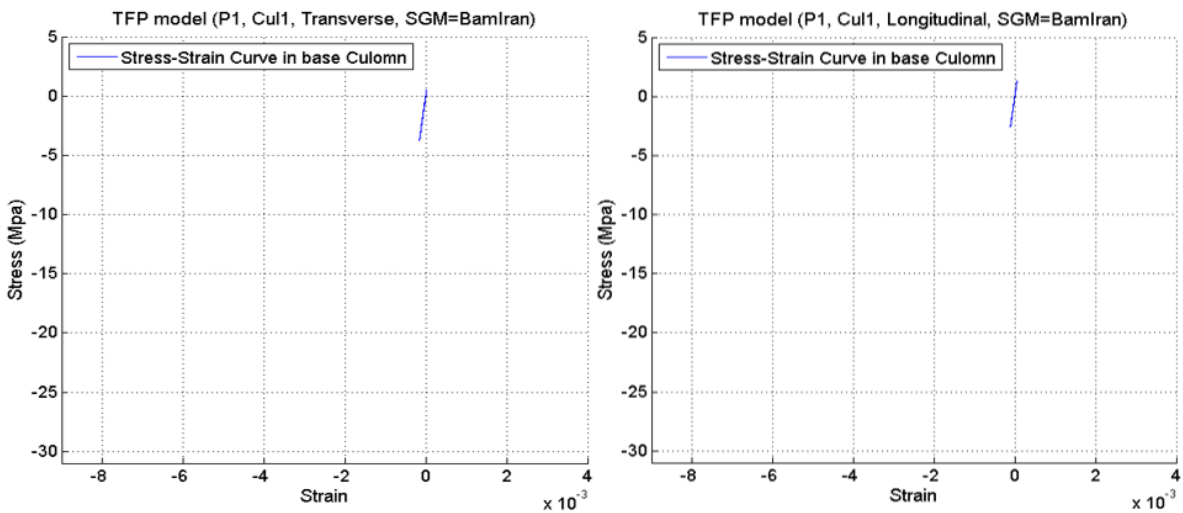
شکل ۱۱. منحنی تنش-کرنش پل جداشده لرزه‌ای HDRB برای ستون ۱ از پایه P1 در دو جهت طولی و عرضی تحت زلزله‌ی بم (۲۰۰۳)  
 Fig11. Stress versus strain of HDRB for column 1 - pier P1 in two longitudinal and transverse directions under Bam (2003)



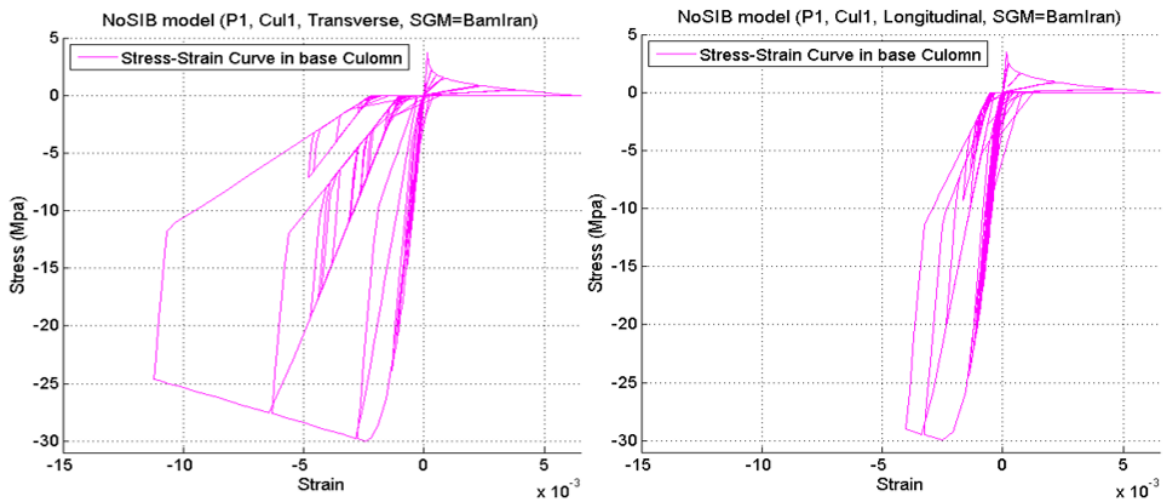
شکل ۱۲. منحنی تنش-کرنش پل جداشده لرزه‌ای LRB برای ستون ۱ از پایه P1 در دو جهت طولی و عرضی تحت زلزله‌ی بم ایران (۲۰۰۳)  
 Fig12. Stress versus strain of LRB for column 1 - pier P1 in two longitudinal and transverse directions under Bam (2003)



شکل ۱۳. منحنی تنش-کرنش پل جداشده لرزه‌ای SFP برای ستون ۱ از پایه‌ی P۱ در دو جهت طولی و عرضی تحت زلزله‌ی بام (۲۰۰۳)  
 Fig 13. Stress versus strain of SFP for column 1 - pier P1 in two longitudinal and transverse directions under Bam (2003)



شکل ۱۴. منحنی تنش-کرنش پل جداشده لرزه‌ای TFP برای ستون ۱ از پایه‌ی P۱ در دو جهت طولی و عرضی تحت زلزله‌ی بام (۲۰۰۳)  
 Fig14. Stress versus strain of TFP for column 1 - pier P1 in two longitudinal and transverse directions under Bam (2003)



شکل ۱۵. منحنی تنش-کرنش پل جداشده لرزه‌ای برای ستون ۱ از پایه‌ی P۱ در دو جهت طولی و عرضی تحت زلزله‌ی بام (۲۰۰۳)  
 Fig15. Stress versus strain of un-isolated bridge for column 1 - pier P1 in two longitudinal and transverse directions under Bam (2003)

مشاهده می شود که پایه پل علاوه بر این که بطور کامل وارد محدوده رفتار غیرخطی می شود، تنش ها و کرنش های بزرگ و قابل توجهی را تجربه می کند و حتی در برخی موارد هسته ی بتنی ستون های پل با تجربه کرنش نهایی بتن محصور شده که بطور تقریبی در حدود ۰/۰۱۲ می باشد، در آستانه ی گسیختگی قرار می گیرد.

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم های مختلف، میانگین درصد کاهش حداکثر تنش ستون پایه پل برای ۴ مدل پل جدا شده لرزه ای نسبت به مدل پل جدا نشده لرزه ای و شش رکورد زمین لرزه های منتخب بر اساس  $(R_{max,Iso} - R_{max,NoIso}) / R_{max,NoIso} \times 100$  محاسبه شد که در آن  $R_{max,Iso}$  و  $R_{max,NoIso}$  به ترتیب حداکثر تنش بوجود آمده در پایه ستون پل با و بدون جداساز لرزه ای می باشد (جدول ۸ الی ۱۰).

با توجه به منحنی های تنش-کرنش پایه مدل های مختلف پل جدا شده لرزه ای می توان مشاهده کرد که تنش های بوجود آمده در پایه پل با جداساز الاستومری HDRB و LRB منجر به رفتار غیرخطی در قسمت های حاشیه ای از ستون شده و آن را در آستانه تشکیل مفصل پلاستیک قرار می دهد. اما منحنی رفتاری پایه پل با جداساز اصطکاکی TFP و SFP بطور کامل در محدوده رفتار الاستیک قرار دارد. همچنین از مقایسه منحنی های تنش-کرنش ارائه شده مشاهده می شود که به دلیل قابلیت شکل پذیری بیشتر نشیمن جداساز TFP نسبت به سایر نشیمن های جداساز لرزه ای مورد مطالعه، تنش های بوجود آمده بطور قابل توجهی کمتر است که نشان از ارتقا سطح عملکرد لرزه ای پل با استفاده از سیستم های جداساز به خصوص جداساز اصطکاکی TFP دارد. از سوی دیگر، از منحنی های تنش-کرنش پل جدا نشده لرزه ای

**جدول ۸. میانگین درصد کاهش حداکثر تنش ستون بعد از جداسازی لرزه ای پل برای ستون ۱ در جهت عرضی**  
**Table 8. Average decrease in maximal stress of the seismic isolated bridge for column 1 in transverse direction**

| HDRB    | LRB     | TFP     | SFP     | شماره پایه پل |
|---------|---------|---------|---------|---------------|
| -۵۵/۶۵٪ | -۶۹/۹۷٪ | -۸۶/۷۶٪ | -۸۱/۵۷٪ | پایه ۱ (P۱)   |
| -۴۸/۰۴٪ | -۵۸/۱۱٪ | -۸۰/۳۱٪ | -۷۲/۱۲٪ | پایه ۴ (P۴)   |
| -۵۶/۰۹٪ | -۵۵/۲۹٪ | -۸۲/۲۲٪ | -۷۶/۴۴٪ | پایه ۷ (P۷)   |

**جدول ۹. میانگین درصد افزایش یا کاهش حداکثر تنش ستون بعد از جداسازی لرزه ای پل برای ستون ۱ در جهت طولی**  
**Table 9. Average decrease in maximal stress of the seismic isolated bridge for column 1 in longitudinal direction**

| HDRB    | LRB     | TFP     | SFP     | شماره پایه پل |
|---------|---------|---------|---------|---------------|
| -۴۳/۴۰٪ | -۵۹/۹۸٪ | -۸۹/۰۲٪ | -۷۸/۴۲٪ | پایه ۱ (P۱)   |
| -۲۵/۸۹٪ | -۴۰/۵۳٪ | -۷۹/۸۸٪ | -۵۷/۹۵٪ | پایه ۴ (P۴)   |
| -۴۶/۵۲٪ | -۵۷/۶۳٪ | -۸۷/۹۲٪ | -۸۹/۸۷٪ | پایه ۷ (P۷)   |

گسل مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی بازار این مطالعه در نظر گرفتن مدلسازی کامل کلیه عوامل موثر در رفتار لرزه ای جداسازها می باشد. نتایج تحلیلهای انجام گرفته را میتوان به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱. سختی برشی نشیمن های جداساز لرزه ای الاستومری (LRB)، HDRB) با افزایش بار محوری (P) و کاهش ظرفیت بار کمانشی (Pcr) به صورت سهمی کاهش می یابد. این کاهش سختی برشی نشیمن های جداساز الاستومری زمانی مهم است که بار محوری نزدیک به ظرفیت بار کمانشی بحرانی آنها باشد.

۲. به علت همزمانی جابجایی های افقی بزرگ با افزایش ناگهانی نیروهای محوری فشاری ناشی از تحریک مؤلفه قائم زلزله، نشیمن های

میزان کاهش حداکثر تنش برای مدل پل جدا شده لرزه ای با نشیمن های جداساز اصطکاکی (SFP, TFP) قابل توجه می باشد، به طور مثال برای پل با نشیمن جداساز TFP در پایه ی ۱ (P۱) ستون ۱ بطور میانگین تا ۸۹٪ کاهش پیدا می کند. میانگین درصد کاهش حداکثر تنش بعد از جداسازی لرزه ای پل با نشیمن جداساز الاستومری LRB و HDRB به ترتیب حدود ۷٪ و ۵۶٪ برآورده شده است.

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد لرزه ای پلهای شهری با استفاده از سیستم های جداساز لرزه ای مختلف تحت شش رکورد از زلزله های حوزه نزدیک

model bridge deck, Special Publication, 94 (1986) 247-270.

[5] I. Buckle, H. Liu, Experimental determination of critical loads of elastomeric isolators at high shear strain, NCEER Bull, 8(3) (1994) 1-5.

[6] C.G. Koh, J.M. Kelly, Effects of axial load on elastomeric isolation bearings, Earthquake Engineering Research Center, University of California: Berkeley, United States, 1987.

[7] A. Elgamal, L. He, Vertical earthquake ground motion records: an overview, Journal of Earthquake Engineering, 8(05) (2004) 663-697.

[8] W. Silva, Characteristics of vertical strong ground motions for applications to engineering design, 1088-3800, 1997.

[9] M. Eröz, R. DesRoches, A comparative assessment of sliding and elastomeric seismic isolation in a typical multi-span bridge, Journal of Earthquake Engineering, 17(5) (2013) 637-657.

[10] G.P. Warn, A.S. Whittaker, Vertical earthquake loads on seismic isolation systems in bridges, Journal of structural engineering, 134(11) (2008) 1696-1704.

[11] A. Aviram, K.R. Mackie, B. Stojadinović, Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2008.

[12] AASHTO, Guide specifications for seismic isolation design, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.

[13] I. Buckle, M. Al-Ani, E. Monzon, Seismic isolation design examples of highway bridges, NCHRP Project, (2011) 20-27.

[14] American Society of Mechanical Engineers, Guide for verification and validation in computational solid mechanics, 079183042X, ASME, 2006.

[15] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, The open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command-language manual, (2006).

[16] G.P. Warn, A.S. Whittaker, A study of the coupled horizontal-vertical behavior of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings, (2006).

[17] G.P. Warn, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, Vertical stiffness of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings, Journal of Structural Engineering, 133(9) (2007) 1227-1236.

[18] A. Mokha, M. Constantinou, A. Reinhorn, Teflon bearings in base isolation I: Testing, Journal of Structural Engineering, 116(2) (1990) 438-454.

[19] M. Constantinou, A. Mokha, A. Reinhorn, Teflon bearings in base isolation II: Modeling, Journal of Structural Engineering, 116(2) (1990) 455-474.

جداساز الاستومری شرایط بسیار بحرانی را در برخی از زمان‌های تحریک زلزله تجربه می‌کند و در بازه‌ای از زمان‌های تحریک زلزله بطور قابل توجهی مقاومت خود را از دست داده و دچار شکست کمانشی می‌شوند.

۳. عدم در نظر گرفتن رفتار حفره‌زایی در کشش و نرم‌شوندگی نیروی محوری تحت فشار، منجر به پاسخ نیروی محوری بزرگ‌تر و جابجایی‌های محوری کوچک‌تر در مقایسه با مدل نشیمن جداساز لرزه‌ای الاستومری با در نظر گرفتن کلیه جنبه‌های اصلی مدل‌سازی می‌شود.

۴. در نظر نگرفتن جنبه‌های اصلی مدل‌سازی منجر به ارائه سختی الاستیک انتقالی بسیار هموار و یکنواخت‌تری در منحنی نیرو- تغییرشکل برشی نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای می‌شود. این امر به علت در نظر نگرفتن تغییرات نیروی نرمال (P) برای هر دو نشیمن جداساز الاستومری و اصطکاکی و در نظر نگرفتن ظرفیت بار کمانشی (Pcr) برای نشیمن‌های جداساز الاستومری در مدل‌سازی سختی الاستیک انتقالی برشی آن‌ها می‌باشد.

۵. اگرچه رفتار غیرخطی در ستون‌های پل جداشده لرزه‌ای با نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای الاستومری مشاهده شد، اما کلیه نشیمن‌های جداساز لرزه‌ای مورد مطالعه بطور قابل توجهی تنش‌های بوجود آمده در ستون‌های پل را کاهش داده و منجر به ارتقاء سطح عملکرد لرزه‌ای پل شدند. این کاهش تنش و ارتقاء سطح عملکرد در پل جداشده لرزه‌ای با نشیمن‌های جداساز اصطکاکی بویژه با نشیمن‌های جداساز TFP بسیار محسوس بود.

## ۹- تقدیر و تشکر

از مرکز مطالعات و برنامه ریزی امور زیر ساخت و طرح جامع شهرداری تهران بابت قرارداد حمایتی از مطالعات حاضر تشکر بعمل می‌آید.

## مراجع

[1] M. Kumar, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43(13) (2014) 1955-1974.

[2] M. Eröz, R. DesRoches, Bridge seismic response as a function of the Friction Pendulum System (FPS) modeling assumptions, Engineering Structures, 30(11) (2008) 3204-3212.

[3] I. Buckle, S. Nagarajaiah, K. Ferrell, Stability of elastomeric isolation bearings: Experimental study, Journal of Structural Engineering, 128(1) (2002) 3-11.

[4] I.G. Buckle, J.M. Kelly, Properties of slender elastomeric isolation bearings during shake table studies of a large-scale

[21] T.A. Morgan, The use of innovative base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives, University of California, Berkeley, 2007.

[20] H. Ounis, A. Ounis, Effect Of The Damping Of The LRB System On The Dynamic Response Of A Base Isolated Building, in: Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology–TDMSK, Antakya, Hatay/Turkey, 2013.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Keramati, G.R. Nouri ,Performance of different seismic isolation systems in highway bridges subjected to near-fault earthquakes, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)437-452.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13160.5432

