

## اثر مؤلفه قائم نزدیک گسل بر پل بتنی با جداساز ترکیبی اصطکاکی-لاستیکی

افشین کلانتری

استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
[a.kalantari@iiees.ac.ir](mailto:a.kalantari@iiees.ac.ir)

سید امیرحسین مویدی

دانشجو، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
[a.moayedi@iiees.ac.ir](mailto:a.moayedi@iiees.ac.ir)

کلیدواژه‌ها: تکان‌های زمین، جداساز، مؤلفه قائم، تحلیل تاریخچه زمانی، پل بزرگراهی

### چکیده

با توجه به خطر لرزه‌های بالا در کشور ایران و وجود گسل‌های فراوان در نزدیکی بسیاری از شهرهای بزرگ، احتمال وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک با مؤلفه قائم قابل توجه در این شهرها فراوان است، آن‌چنان‌که این نوع تحریک در زلزله‌هایی مانند بم ۲۰۰۳ و طبس ۱۹۸۷ به راحتی قابل مشاهده می‌باشند. اغلب آیین‌نامه‌ها با نادیده گرفتن مؤلفه قائم و یا جایگزین کردن اثرات دینامیکی این مؤلفه با بارهای استاتیکی معادل به آن پرداخته‌اند. با این حال زلزله‌های گذشته که در مناطق نزدیک گسل رخ داده‌اند اهمیت در نظرگیری این مؤلفه را بر پاسخ پل‌ها نشان می‌دهند. در این تحقیق، برای تعیین اثرات مؤلفه قائم زلزله بر روی پل‌های بزرگراهی، یک پل طراحی شده توسط آیین‌نامه ایران انتخاب و با طراحی جداساز ترکیبی اصطکاکی-لاستیکی به مطالعه اثر مؤلفه قائم حرکت قوی زمین پرداخته شده است. به این منظور مطالعات عددی بر روی مدل پل جداسازی شده در دو حالت: تنها تحت مؤلفه‌های افقی بدون مؤلفه قائم و در حالت دوم تحت سه مؤلفه زلزله پرداخته شده است. به این منظور مدل المان محدود سازه یادشده در نرم‌افزار Opensees ایجاد و تحلیل‌های دینامیکی تحت شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در ۷ رویداد لرزه‌ای در نزدیک گسل بر روی آن صورت گرفته است. ضریب اصطکاک جداساز به صورت متغیر با سرعت مدل‌سازی شده است. مقادیر لنگر وسط دهانه، نیروی محوری ستون‌ها، نیرو و جابجایی جداسازها و همچنین جابجایی قائم وسط دهانه ثبت شد. نتایج نشان می‌دهد نیروی برشی و جابجایی نسبی جداساز مورد نظر در برخی از رویدادهای لرزه‌ای افزایش یافته است. همچنین در پارامترهای مقادیر لنگر وسط دهانه، نیروی محوری ستون‌ها و جابجایی قائم وسط دهانه در نظر گرفتن مؤلفه قائم در اغلب موارد باعث افزایش نتایج شده است.

### مقدمه

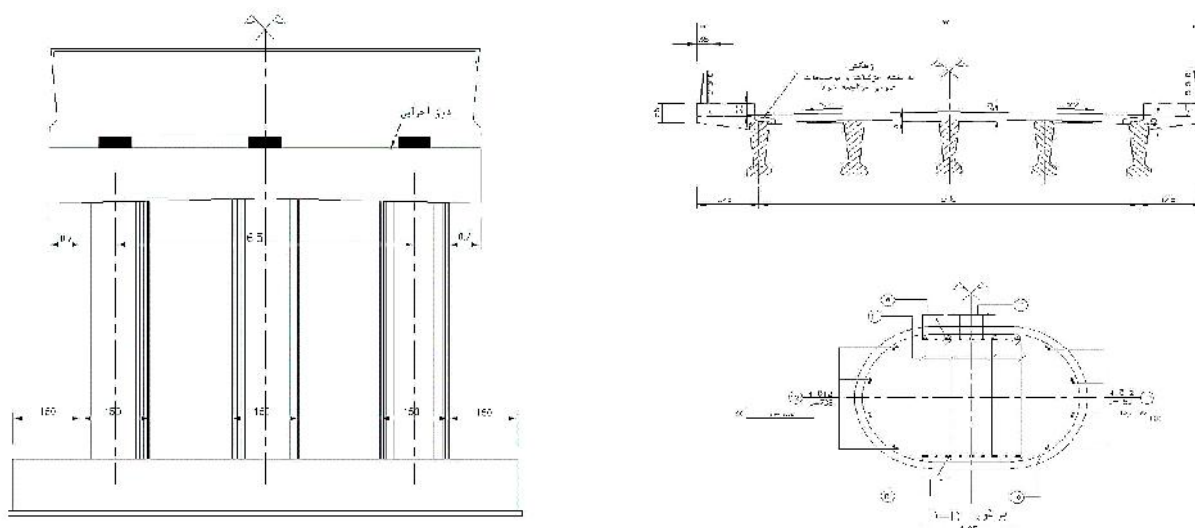
تلفات وارد بر سیستم حمل‌ونقل معمولاً به دلایل گوناگون باعث به بار آمدن خسارات مستقیم و غیرمستقیم شده و امکان استفاده از پل‌ها پس از وقوع زلزله از اهمیت بالایی برخوردار است. تعدد و پراکندگی این سازه‌ها احتمال رویداد لرزه‌ای حوزه نزدیک را برای آن‌ها بالا می‌برد. از خصوصیات زلزله‌های نزدیک گسل می‌توان به زیاد بودن مؤلفه قائم و حرکت پالس گونه آن‌ها که در تاریخچه زمانی سرعت زلزله قابل مشاهده است اشاره کرد. ضربه ثبت شده در زلزله‌ها در نزدیک گسل انرژی ورودی بالایی را به سازه ایجاد می‌کند. تحقیقات فراوانی خطرات ناشی از صرف نظر کردن این مؤلفه را در سازه‌های نزدیک گسل بیان کرده‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعه‌ی (Papazogloz and Elnashai, 1996) اشاره کرد که شواهد تحلیلی و میدانی اثرات مخرب مؤلفه قائم بر روی ساختمان و پل‌ها را نشان می‌دهد. آن‌ها ادعا کردند که نوسانات قابل توجه در نیروی محوری المان‌های قائم منجر به کاهش ظرفیت برشی ستون‌ها می‌شود. در تحقیقی دیگر (Yu et al., 1997) نیروها را در همه پایه‌های سه پل روگذر به وسیله مدل‌های خطی سه بعدی با رکورد زلزله نورتریج به عنوان تکان‌های ورودی تحلیل نمودند. نتایج ۲۱ درصد افزایش در نیروی محوری و ۷ درصد تغییر در لنگر طولی در اثر منظور نمودن مؤلفه قائم را نشان داده است. پس از آن‌ها (Gloyd S (1997) معیاری در طراحی 60 پل با شاهتیرهای جعبه‌ای پیش‌تنیده 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. (Kunnath et al., 2008) با در نظر گرفتن چندین پارامتر از پل‌های معمولی استاندارد به بررسی مؤلفه قائم زلزله پرداختند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد ضوابط آیین‌نامه Caltranse



از دقت مناسبی برخوردار نبوده است. مؤلفه قائم تغییراتی در نیروی محوری ستون‌ها و لنگر خمشی وسط دهانه ایجاد می‌کند. Rahai and Arezoumandi (2008) به بررسی اثر مؤلفه قائم بر پایه‌های پل موردنظر در دو حالت با و بدون مؤلفه قائم تحت سه زلزله طیس، نورتریج و کوبه پرداخته‌اند. بر اساس نتایج مطالعه، در نظر گرفتن مؤلفه قائم افزایش نیروی محوری، کرنش محوری و برشی را نشان داده اما می‌توان از تغییرات نیروی برشی و جابجایی طولی صرف‌نظر کرد. تحقیق Goto(2012) که به بررسی پاسخ پل طراحی شده با ضوابط آیین‌نامه‌های کشور ژاپن پرداخته نشان‌دهنده اثر مخرب‌تر مؤلفه نزدیک گسل نسبت به زلزله‌ی دور از گسل می‌باشد. در میان تحقیقات انجام‌شده بر روی جداسازها نیز Jangid and JM (2001) به بررسی جداسازها در مناطق نزدیک گسل پرداخته است. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که جداساز EDF مناسب‌ترین جداساز در مناطق نزدیک گسل می‌باشد. همچنین Mazza and Vulcano (2008) با بررسی پاسخ‌های یک ساختمان جداسازی شده با جداسازهای ترکیبی تحت هر سه مؤلفه قائم به این نتیجه دست یافتند که استفاده از سیستم اصطکاکی-لاستیکی به صورت سری برای کنترل آسیب به اعضای قاب بتن مسلح با تولید دوره تناوب مؤثر بلندتر در مقایسه با سازه‌های جداسازی شده مؤثرتر عمل می‌کند. علاوه بر این برای یک مقدار نسبتا کم برای نسبت سختی قائم به افقی، باعث رفتاری جداسازی شده در راستای قائم برای روسازه ایجاد می‌کند. در این مطالعه با مدل کردن یک پل دو دهانه طراحی شده توسط آیین‌نامه ایران در نرم‌افزار اجزا محدود *opensees* و طراحی جداساز ترکیبی اصطکاکی-لاستیکی (EDF) به بررسی اثر مؤلفه قائم در دو حالت: تنها تحت دو مؤلفه افقی و در حالت دوم تحت دو مؤلفه افقی و عمودی به همراه مؤلفه قائم پرداخته شده است.

## معرفی سازه

در سال ۱۳۸۶، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور نشریه شماره ۲۹۴ را با عنوان "نقشه‌های همسان پل‌ها و عرشه پل‌های راه دهانه‌های ۱۰ تا ۲۵ متر" منتشر نمود. این نشریه نقشه‌های جزییات اجرایی برای پل‌های بزرگراهی همسان را ارائه نموده است. با توجه به فراگیری کاربرد این نقشه‌ها در کشور، سازه‌های پل مشابه با این گروه از پل‌ها به تعداد زیاد در کشور ساخته شده یا طبق برنامه وزارت راه و ترابری ساخته خواهد شد. در این مطالعه از مدل پل شماره 294-F-G-2X 25 استفاده شده است. این پل دارای دو دهانه ۲۵ متری است که ارتفاع آن ۱۰/۱۵ متر و عرشه آن شامل ۵ شاهتیر و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد همچنین تک‌پایه آن متشکل از سه ستون لوبیایی شکل است که در بالا به تیر سرستون متصل شده است، شکل (۱). شاهتیرها بر روی تکیه‌گاه وسط و همچنین در پایه‌ها به وسیله دیوار بتنی به هم دوخته شده تا عملکرد یکپارچه داشته باشند و سه جداساز موردنظر در هر یک از پایه‌ها زیر این دیوار بتنی و روی سرستون‌ها قرار گرفته‌اند. مدل مورد مطالعه از این نشریه انتخاب شده و جداساز ترکیبی برای آن طراحی و استفاده شده است. همچنین از اثر اندرکنش خاک و سازه در فونداسیون و کوله‌ها صرف‌نظر شده است و اتصال ستون‌ها در شالوده و پایه جداسازها در کوله‌ها به صورت گیردار مدل شده است. شکل ۱ مهم‌ترین اجزای پل را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مهم‌ترین مؤلفه‌های پل تحت مطالعه

## طراحی جداساز

در این مطالعه از جداساز ترکیبی استفاده شده است. این جداساز مطابق شکل ۲ شامل تکیه‌گاه لغزشی بوده که بر روی تکیه‌گاه لاستیکی نصب می‌شود. در قسمت زیرین لاستیک و در قسمت بالایی دو صفحه فولاد زنگ نزن و PTFE قرار دارند که به صورت سری عمل می‌کنند. در اثر اعمال نیروی زلزله ابتدا لاستیک عمل کرده تا به حد جاری شدن برسد سپس دو صفحه بالایی جداساز شروع به حرکت می‌کنند و لغزش اتفاق

می‌افتد. نمودار رفتاری این جداساز، دوخطی با شیب ثانویه صفر می‌باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. این جداساز فاقد نیروی بازگرداننده می‌باشد لذا تغییر مکان دائمی در این سیستم می‌تواند حادث شود. طراحی این جداساز بر اساس آیین‌نامه (AASHTO 2010) که برای طراحی جداسازهای پل‌ها می‌باشد صورت گرفته است.



شکل ۲: شکل واقعی، نمودار رفتاری ایده آل و همچنین مدل ریاضی جداساز ترکیبی

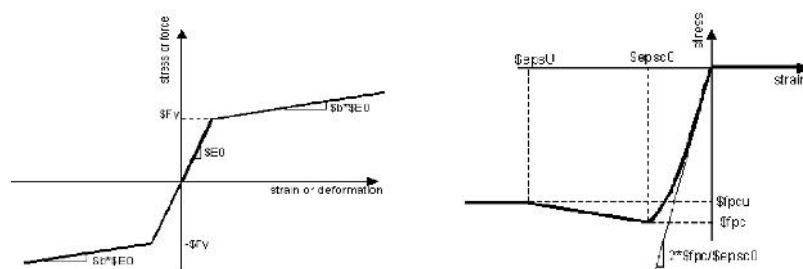
با توجه به تغییرات ناگهانی سرعت زمین در مناطق نزدیک گسل و همچنین حساس بودن ضریب اصطکاک به سرعت لغزشی (Constantinou et al., 1999) این ضریب از فرمول زیر که تغییرات ضریب اصطکاک را نسبت به سرعت لغزشی بیان می‌کند محاسبه می‌شود.

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) \times \exp^{-a|u|} \quad (1)$$

## مدل اجزا محدود

### مدل مصالح

مدل مصالح *Uniaxial material concrete01* برای بتن محصورشده (هسته بتنی) و بتن پوششی به کاررفته است. این دستور برای مصالح بتن تک‌محوری (Kent and Park (1971) با سختی باربرداری و بارگذاری که به صورت خطی کاهش یافته می‌باشد. در مدل‌سازی برای بتن محصور نشده کرنش  $0/002$  در حداکثر تنش و کرنش  $0/006$  در حد نهایی در نظر گرفته شده است. مصالح بتن محصورشده دارای حداکثر تنش  $26/5$  نیوتن بر میلی مترمربع در کرنش  $0/005$  و تنش  $25$  نیوتن بر میلی مترمربع در کرنش  $0/05$  می‌باشد. آرماتورهای طولی با مصالح *Steel01* با رابطه تنش کرنش دوخطی و بامنظور کردن سختی کرنشی مدل شدند. در آرماتور فولادی تنش جاری شدن  $400$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و شیب ناحیه سختی کرنشی  $0/01$  شیب اولیه در نظر گرفته شده است. نمودار رفتاری این دو مصالح در شکل زیر قرار داده شده است.



شکل ۳: مصالح *Uniaxial material concrete01* و *steel01*

عرشه پل شامل شاهتیرها و دال بتنی در روسازه به صورت الاستیک و مقطع ترک نخورده در نظر گرفته شده و با خصوصیات کامل مقطع مدل شده است. برای مدل‌سازی جداساز از المان *element flatSlider Bearing* استفاده شده است (Simo (1998). همچنین برای در نظرگیری تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به سرعت از مدل *frictionModel VelDependent* استفاده شده است. در این مدل ضریب اصطکاک جداساز به سرعت لغزشی وابسته بوده و تحت اثر آن تغییر می‌کند.

## تحریک ورودی زلزله

مدل مورد مطالعه تحت زلزله‌های نزدیک گسل تحلیل شده است. در این مطالعه برای بررسی اثر مولفه قائم از ۷ رکورد نزدیک گسل با مشخصات زیر استفاده شده:

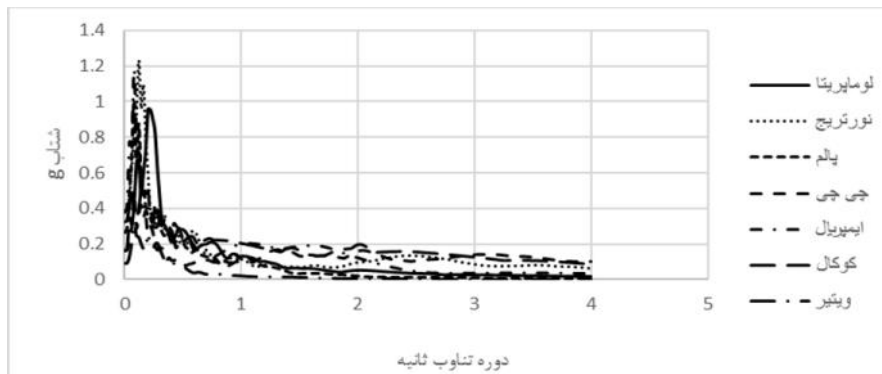
- خاک: نوع II و III



- بزرگای : بزرگتر از ۵/۵
  - فاصله از گسل : کمتر از ۱۵ کیلومتر
  - نسبت بیشترین شتاب قائم به بیشترین شتاب افقی : بزرگتر از  $\frac{2}{3}$
- با توجه به ۴ ویژگی بالا ۷ شتابنگاشت از سایت *peer* گرفته شده که مشخصات این ۷ زلزله در جدول زیر قرار داده شده است.

جدول ۱: مشخصات شتابنگاشت‌های انتخاب شده

نام زلزله	نوع خاکی	ایستگاه	مؤلفه	بیشترین شتاب	نسبت بیشترین شتاب قائم به افقی	بزرگای	فاصله (کیلومتر)
Imperial Valley		El Centro Array #7	مؤلفه قائم	۰/۵۴۴	۱/۱۷	۶/۵	۰/۶
			بزرگترین مؤلفه افقی	۰/۴۶۳			
Kocaeli, Turkey		Yarimca	مؤلفه قائم	۰/۲۴۲	۰/۶۹	۷/۴	۲/۶
			بزرگترین مؤلفه افقی	۰/۳۴۹			
Whittier Narrows		El Monte - Fairview Av	مؤلفه قائم	۰/۱۳۶	۰/۶	۶	۹/۸
			بزرگترین مؤلفه افقی	۰/۲۲۸			
N. Palm Springs	II	North Palm Springs	مؤلفه قائم	۰/۴۳۵	۰/۶	۶	۸/۲
			بزرگترین مؤلفه افقی	۰/۶۹۴			
Ioma Prieta	II	Corralitos	مؤلفه قائم	۰/۴۵۵	۰/۷	۶/۹	۵/۱
			بزرگترین مؤلفه افقی	۰/۶۴۴			
Chi-Chi, Taiwan		TCU122	مؤلفه قائم	۰/۲۴۱	۰/۹۲	۷/۶	۹
			بزرگترین مؤلفه افقی	۰/۲۶۱			
Northridge	II	Arleta - Nordhoff Fire Sta	مؤلفه قائم	۰/۵۵۲	۱/۶	۶/۷	۹/۲
			بزرگترین مؤلفه افقی	۰/۳۳۴			

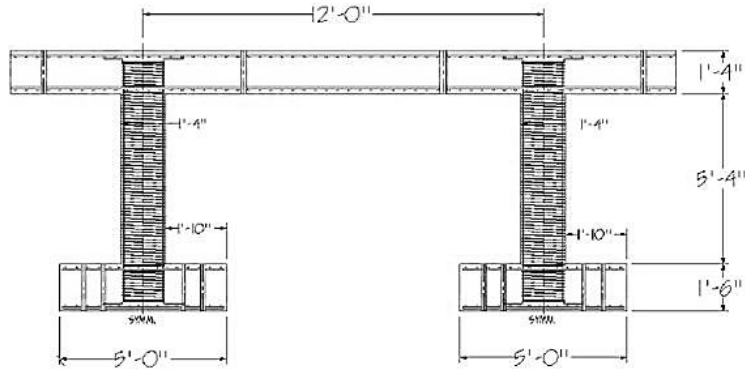


شکل ۴: طیف‌های قائم ۷ شتابنگاشت مورد نظر با ضریب مقیاس ۰/۶۹

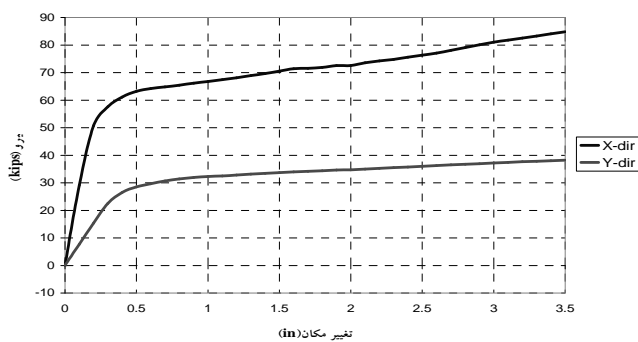
شتابنگاشت‌ها مطابق نشریه شماره ۴۶۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور مقیاس گردیده است. با توجه به این روش ضریب مقیاس برای این ۷ زلزله ۰/۶۹ برآورد شده و ۷ رکورد مورد نظر به این مقدار مقیاس می‌شوند. شتابنگاشت‌های قائم نیز به منظور حفظ نسبت  $V/H$  با نسبت مشابه مؤلفه‌های افقی مقیاس گردیدند همچنین از میان دو مؤلفه افقی مؤلفه‌ای که بیشترین مقدار شتاب را دارا می‌باشد در راستای طولی به مدل اعمال شده است.

### صحت سنجی

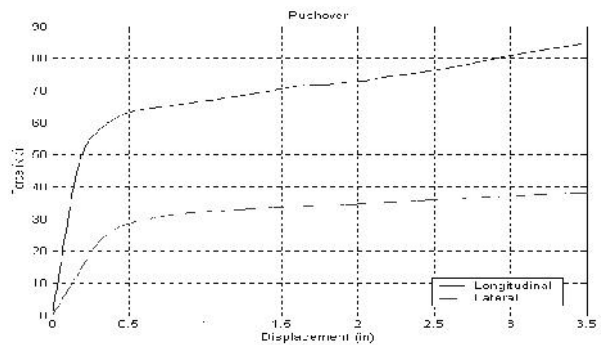
مدل سازه به کمک نتایج مطالعه (Cussen (2002) مورد صحت سنجی قرار گرفت به این منظور رفتار غیرخطی سازه نمایش داده شده در شکل ۴ تحت بارگذاری مشابه قرار گرفت و مطابق شکل‌های ۵ و ۶ یکسان بودن نتایج تایید شد.



شکل ۵: ابعاد قاب پل دو ستونی بتن مسلح و جزئیات آرماتور گذاری



شکل ۷: تحلیل پوش آور برای صحت سنجی نتایج



شکل ۸: تحلیل پوش آور تحقیق (Cussen 2002)

## نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی

با توجه به بررسی اثر مؤلفه قائم بر روی پاسخ‌های مختلف پل جداسازی شده، ۷ شتاب‌نگاشت موردنظر در دو حالت:

حالت اول: تنها تحت دو مؤلفه افقی زلزله

در حالت دوم: تحت هر سه مؤلفه زلزله

به مدل سه‌بعدی اعمال شده و اثر مؤلفه قائم بر هر یک از پاسخ به تفکیک بررسی شده است همچنین پس از انجام آنالیز مودال، زمان

تناوب مد اول تا سوم سازه به ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۰/۹۴ و ۰/۶۸ ثانیه می‌باشد. با توجه به بررسی اثر مؤلفه قائم با به محاسبه مقدار شتاب در دوره

تناوب قائم پل پرداخته شده است. مد هفتم نمونه موردنظر مد قائم نمونه پل می‌باشد که دوره تناوب این مد برابر ۰/۱۴ می‌باشد. مقادیر شتاب در

طیف‌های قائم برای زلزله‌های مختلف در جدول زیر قرار داده شده است.

جدول ۲: مقادیر لنگر وسط دهانه و مقدار درصد اختلاف در دو حالت موردنظر

دوره تناوب	مقادیر طیف قائم مقیاس شده در دوره تناوب مد هفتم
۰/۹۶	نورتریج
۰/۵۵۵	پالم
۰/۵۰۲	کوکال
۰/۴۹۹	ایمپریال
۰/۴۷۶	لوماپریتا
۰/۴۲۱	چی چی
۰/۲۰۳	ویتیر

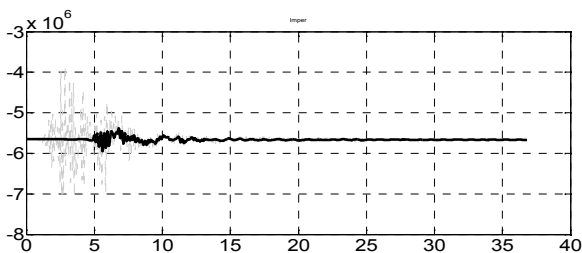
در شکل‌های زیر تاریخچه پاسخ برای دو زلزله‌ی نورتریج و ایمپریال برای نمونه قرار داده شده است و بیشترین مقادیر هر یک از پاسخ‌ها در

جدول‌های زیر بیان شده‌اند همچنین درصد اختلاف دو حالت ذکر شده برای بررسی اثرگذاری مؤلفه قائم بر هر یک از پاسخ‌ها محاسبه شده است. در

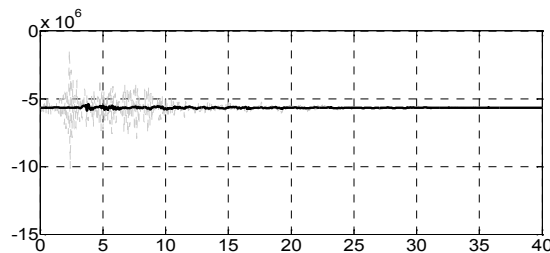


تمامی نمودارها خطوط پرننگ پاسخ موردنظر بدون مؤلفه قائم و خط کمرنگ پاسخ را در حالتی که هر سه مؤلفه زلزله اعمال می‌شوند نشان می‌دهد. واحد تمامی مقادیر در جدول‌ها و نمودارهای زیر برحسب SI می‌باشد.

### اثر مؤلفه قائم بر لنگر وسط دهانه



شکل ۹: اثر مؤلفه قائم زلزله بر لنگر وسط دهانه در زلزله ایمپریال



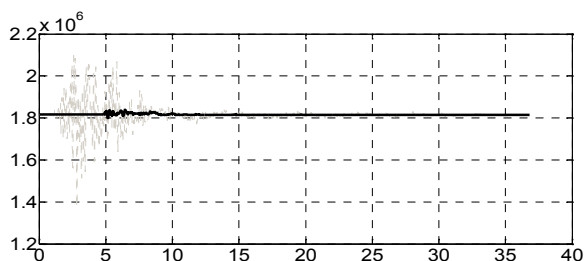
شکل ۸: اثر مؤلفه قائم زلزله بر لنگر وسط دهانه در زلزله نورتریج

جدول ۳: مقادیر لنگر وسط دهانه و مقدار درصد اختلاف در دو حالت موردنظر

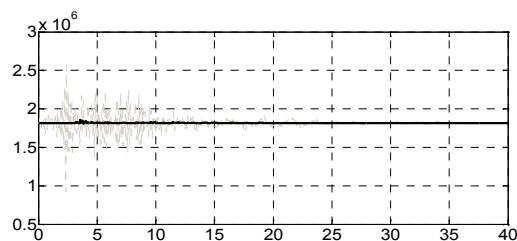
لنگر وسط دهانه			
درصد اختلاف	بیشترین پاسخ در حالت دوم	بیشترین پاسخ در حالت اول	زلزله
۱۶/۸۱	۷۰۲۰۰۰۰	۵۸۴۰۰۰۰	چی چی
۱۵/۹۳	۷۰۷۷۱۹۰	۵۹۵۰۰۰۰	ایمپریال
۲۲/۹۰	۷۵۷۴۲۳۰	۵۸۴۰۰۰۰	کوکال
۱۵/۹۴	۷۰۷۷۱۹۰	۵۹۴۹۲۸۰	لوماپریا
۴۱/۶۸	۱۰۱۰۰۰۰۰	۵۸۹۰۰۰۰	نورتریج
۱۹/۴۰	۷۲۴۷۱۸۰	۵۸۴۱۴۱۰	پالم
۹/۰۹	۶۳۴۰۵۴۰	۵۷۶۴۳۱۰	ویتیر
۲۱/۶۷	۷۴۹۰۹۰۴/۲۹	۵۸۶۷۸۵۷/۱۴	میانگین

در هر ۷ زلزله مؤلفه قائم باعث افزایش لنگر وسط دهانه می‌شود و این افزایش در زلزله‌ی نورتریج که از نسبت شتاب قائم به افقی و همچنین شتاب قائم بیشتری نسبت به زلزله‌های موردبررسی برخوردار می‌باشد بیشتر است این افزایش در این زلزله ۴۲ درصد می‌باشد که مقدار فراوانی است. کمترین تأثیر در زلزله‌ی ویتیر با ۹ درصد افزایش می‌باشد این زلزله از نسبت شتاب قائم به افقی و همچنین شتاب قائم کمتری نسبت به زلزله‌های دیگر برخوردار است. میانگین درصد اختلاف لنگر وسط دهانه در حالت قائم نسبت به افقی برابر ۲۲ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده مؤثر بودن مؤلفه قائم بر مقدار این پاسخ از پل می‌باشد. و می‌توان عنوان کرد که صرف‌نظر کردن از مؤلفه قائم می‌تواند لنگر وسط دهانه را تا میزانی برابر با ۲۲ درصد دست پایین در نظر بگیرد.

### اثر مؤلفه قائم بر نیروی محوری ستون



شکل ۱۱: اثر مؤلفه قائم بر نیروی محوری ستون در زلزله ایمپریال



شکل ۱۰: اثر مؤلفه قائم بر نیروی محوری ستون در زلزله نورتریج

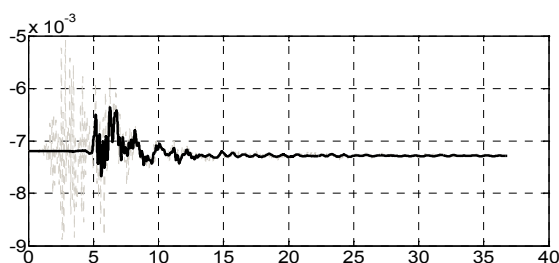
با مقایسه پاسخ‌های دو حالت موردبررسی و محاسبه درصد اختلاف پاسخ‌ها در حالت در نظرگیری مؤلفه قائم نسبت به حالتی که مؤلفه قائم در نظر گرفته نمی‌شود این نتیجه دریافت می‌شود که در تمامی زلزله‌ها مؤلفه قائم اثر مؤثری بر مقادیر نیروی محوری ستون‌ها دارد و باعث افزایش این پاسخ از پل می‌شود. این مقدار در زلزله‌ی نورتریج با ۲۸ درصد افزایش و در زلزله‌ی ویتیر با ۶ درصد افزایش بیشترین و کمترین مقدار تأثیر مؤلفه قائم زلزله را بر مقدار نیروی محوری ستون‌ها بیان می‌کند. همچنین درصد اختلاف میانگین پاسخ در این زلزله ۱۷ درصد افزایش

پاسخ‌ها را در حالت در نظرگیری مؤلفه قائم بیان می‌کند.

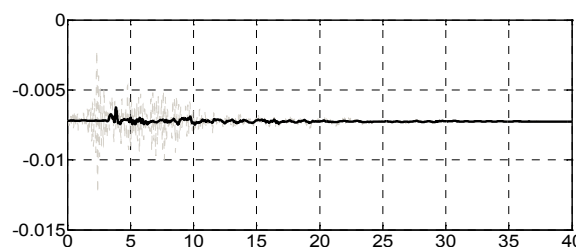
جدول ۴: مقادیر نیروی محوری ستون و مقدار درصد اختلاف در دو حالت موردنظر

نیروی محوری ستون وسط			زلزله
درصد اختلاف	بیشترین پاسخ در حالت دوم	بیشترین پاسخ در حالت اول	
۱۳/۲۱	۲۱۰۷۵۱۰	۱۸۲۹۱۸۰	چی چی
۱۲/۲۷	۲۰۹۶۷۶۰	۱۸۳۹۴۹۰	ایمپریال
۱۵/۳۳	۲۱۶۴۵۲۰	۱۸۳۳۶۸۰	کوکال
۲۵/۰۳	۲۴۶۱۱۶۰	۱۸۴۵۲۴۰	لوماپریا
۲۷/۶۴	۲۵۶۲۴۲۰	۱۸۵۴۱۶۰	نورتریج
۱۳/۷۵	۲۱۴۰۹۲۰	۱۸۴۶۵۸۰	پالم
۶/۲۴	۱۹۴۳۲۸۰	۱۸۲۲۰۴۰	ویتیر
۱۶/۸۵	۲۲۱۰۹۳۹	۱۸۳۸۴۸۱	میانگین

### اثر مؤلفه قائم بر جابجایی قائم وسط دهانه



شکل ۱۳: اثر مؤلفه قائم بر جابجایی قائم وسط دهانه زلزله ایمپریال



شکل ۱۴: اثر مؤلفه قائم بر جابجایی قائم وسط دهانه زلزله نورتریج

جدول ۵: مقادیر جابجایی قائم وسط دهانه و درصد اختلاف در دو حالت موردنظر

جابجایی قائم وسط دهانه			زلزله
درصد اختلاف	بیشترین پاسخ در حالت دوم	بیشترین پاسخ در حالت اول	
۱۵/۷۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	چی چی
۱۳/۴۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	ایمپریال
۲۰/۲۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	کوکال
۲۵/۷۴	۰/۰۱	۰/۰۰۸	لوماپریا
۳۹/۵۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	نورتریج
۱۵/۷۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	پالم
۶/۲۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	ویتیر
۲۰/۸۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸	میانگین

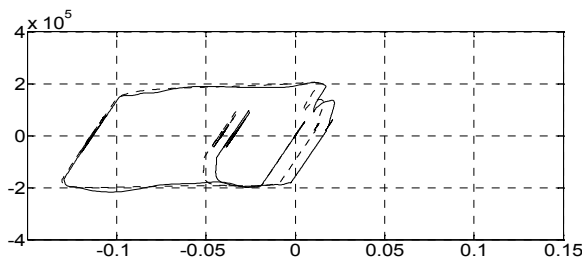
مقدار جابجایی وسط دهانه به علت وزن زیاد عرشه پل از مقادیر بسیار کمی برخوردار است این مقدار جابجایی در حالتی که از مؤلفه قائم زلزله صرف‌نظر شده است در تمامی زلزله‌های موردبررسی حدود ۸ میلی‌متر می‌باشد و اثر مؤلفه قائم باعث افزایش جابجایی قائم وسط دهانه در هر ۷ زلزله‌ی موردبررسی شده است. در این پاسخ مؤلفه قائم می‌تواند این پاسخ از پل‌ها را تا حدود ۴۰ درصد در زلزله‌ی نورتریج افزایش دهد. همچنین میانگین افزایش این پاسخ برای ۷ زلزله‌ی موردنظر ۲۱ درصد می‌باشد.

### اثر مؤلفه قائم بر بیشترین نیرو و جابجایی نسبی جداساز

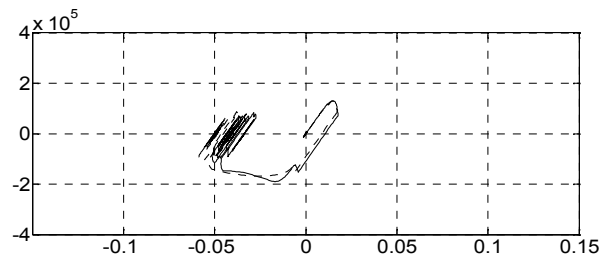
در شکل‌های زیر نمودار نیرو-تغییر مکان برای دو زلزله نورتریج و ایمپریال برای نمونه قرار داده شده است. نمودارها در حالت با مؤلفه قائم به صورت خطوط پرنگ و حالت بدون مؤلفه قائم به صورت خط چین ترسیم شده است. تمامی نمودارها برای لغزش جداسازها در راستای طولی پل که بزرگ‌ترین ورودی به آن اعمال شده محاسبه شده‌اند.







شکل ۱۵: نمودار نیرو-جابجایی جداساز پایه وسط زلزله ایمبریال



شکل ۱۴: نمودار نیرو-جابجایی جداساز پایه وسط زلزله نورتریج

جدول ۶: مقادیر جابجایی و نیروی برشی نسبی و درصد اختلاف در دو حالت موردنظر

جابجایی نسبی در جداساز پایه وسط			نیروی برشی نسبی در جداساز پایه وسط			زلزله
درصد اختلاف	بیشترین پاسخ در حالت دوم	بیشترین پاسخ در حالت اول	درصد اختلاف	بیشترین پاسخ در حالت دوم	بیشترین پاسخ در حالت اول	
۱۹/۰۵	۰/۰۳۵۷	۰/۰۲۸۹	۳/۶۳	۱۷۹۶۱۵	۱۷۳۰۹۴	چی چی
-۰/۹۳	۰/۱۲۹۴	۰/۱۳۰۶	۵/۱۵	۲۱۶۷۳۴	۲۰۵۵۶۴	ایمبریال
۷/۴۵	۰/۰۴۴۳	۰/۰۴۱	۳/۸۶	۲۰۰۲۷۷	۱۹۲۵۴۲	کوکال
-۴/۴۷	۰/۰۲۹۱	۰/۰۳۰۴	۱۴/۲۴	۲۲۶۵۶۳	۱۹۴۲۹۸	لوماپریا
-۱۳/۸۱	۰/۰۵۱۴	۰/۰۵۸۵	۱۱/۷۰	۱۸۹۹۷۶	۱۶۷۷۴۶	نورتریج
۴/۲۶	۰/۰۱۸۸	۰/۰۱۸	۱/۶۸	۱۵۳۸۰۷	۱۵۱۲۱۶	پالم
-۱/۹۸	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱۰۳	-۱/۸۲	۹۷۵۲۷	۹۹۲۹۹	ویتیر
۰/۳۵	۰/۰۴۵۵۴۲۹	۰/۰۴۵۳۸۵۷	۶/۳۹	۱۸۰۶۴۲/۷۱	۱۶۹۱۰۸/۴۳	میانگین

در جدول بالا مقادیر بیشینه نیروی برشی و جابجایی نسبی برای یکی از جداسازهای پایه وسط پل تحت زلزله‌های معرفی شده قرار داده شده است. درصد اختلاف نیروی برشی جداساز در تمام زلزله‌ها به جز زلزله ویتیر افزایش یافته است همچنین جابجایی نسبی نیز برای بعضی زلزله‌ها تا ۱۹ درصد افزایش و برای بعضی دیگر تا حدود ۱۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بالا می‌توان دریافت که تغییرات نیروی برشی نسبی و همچنین جابجایی نسبی جداساز در زلزله‌های مختلف در تعدادی از زلزله‌ها مثبت و در تعدادی از آن‌ها مقداری منفی می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده این است که صرف نظر کردن از مؤلفه قائم در بعضی از زلزله‌ها دست بالا و در بعضی دیگر دست پایین می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه با مدل‌سازی یک پل جداسازی شده با جزییات نشریه ۴۶۳ در نرم‌افزار اجزا محدود *opensees* به بررسی اثر مؤلفه قائم زلزله بر مقادیر پاسخ‌ها در دو حالت با و بدون مؤلفه قائم پرداخته شده است. در این مطالعه به اثرگذاری این مؤلفه بر لنگر وسط دهانه، نیروی محوری ستون‌ها، جابجایی قائم وسط دهانه و همچنین نیروی برشی و جابجایی نسبی جداسازها پرداخته شده است. نتایج حاصل از اعمال ۷ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل به شرح زیر می‌باشد:

- مؤلفه قائم باعث افزایش لنگر وسط دهانه در تمامی زلزله‌های موردنظر می‌شود این افزایش برای زلزله نورتریج به مقدار ۴۱ درصد می‌رسد که مقدار قابل توجهی می‌باشد.
- همچنین صرف نظر کردن از این مؤلفه می‌تواند نیروی محوری ستون را تا حدود ۲۷ درصد دست پایین محاسبه کند.
- جابجایی قائم وسط دهانه نیز در حالت در نظرگیری مؤلفه قائم باعث افزایش این پاسخ در زلزله‌های موردنظر می‌شود و این مقدار برای زلزله نورتریج به مقدار ۴۰ درصد می‌رسد.
- صرف نظر کردن از مؤلفه قائم، نیروی برشی و جابجایی نسبی برای جداساز موردنظر را در مواردی افزایش و در موارد دیگری کاهش می‌دهد در نتیجه الگوی مناسبی برای این دو پاسخ از جداساز با توجه به ۷ شتاب‌نگاشت موردنظر یافت نشده است.
- با توجه به اینکه مقدار شتاب در دوره تناوب قائم زلزله نورتریج از همه بیشتر است، مقادیر پاسخ‌های مختلف در زلزله‌ی نورتریج نیز از همه بیشتر می‌باشد همچنین مقدار شتاب در دوره تناوب قائم زلزله ویتیر از همه کمتر می‌باشد که این موضوع باعث کمترین پاسخ در موارد مختلف شده است.



## مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری زلزله (۱۳۸۶) نقشه‌های همسان پل‌ها و عرشه پل‌های راه (دهانه ۱۰ تا ۲۵ متر)، نشریه شماره ۲۹۴

- معاونت برنامه‌ریزی و راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۸۷)، آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله، نشریه ۴۶۳

American Association of State Highway and Transportation Officials (2010) Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Washington, D.C

Constantinou MC, Tsopelas P, Kasalanati A and Wolff, E.D (1999) Property modification factors for seismic isolation bearings, Report MCEER-99-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York

Cussen R (2002) Analytical modeling of a Reinforced Concrete Bridge Assembly Using Opensees, *Proceedings of the Earthquake Engineering Symposium for Young Researchers : Keystone Colorado Resort and Conference center, August 8-11, 2002*

Gloyd S (1997) Design of ordinary bridges for vertical seismic acceleration, Proc., FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities, Tech. Rep. No. NCEER-97-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, N.Y., 277-290

Jangid, RS and Kelly JM (2001) Base isolation for near-fault motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, USA, Vol. 30, pp. 691-707

Kent DC and Park R (1971) Flexural members with confined concrete, *J. Struct. Div., ASCE*, 97(7), pp.1969-1990.

Kunnath S, Abrahamson N, Chai YH, Erduran E and Yilmaz Z (2008) Development of Guidelines for Incorporation of Vertical Ground Motion Effects in Seismic Design of Highway Bridges, A Technical Report Submitted to the California Department of Transportation under Contract 59A0434

Mazza F and Vulcano (2008) Effects of Horizontal and Vertical Near-Fault Ground Motions on The Nonlinear Dynamic Response of RC Buildings with Different Base-Isolation System. *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China

Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, and Fenves GL (2006) OpenSees command language manual, open system for earthquake engineering simulation (OpenSees), 207-211

Papazoglou AJ and Elnashai AS (1996) Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 25 pp 1109-1137

Rahai A and Arezoumandi M (2008) Effect of Vertical Motion of Earthquake on RC Bridge Pier, *The 14 Th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China

Simo JC and HughesTJR (1998) Computational inelasticity. New York, NY, Springer