

## اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی پلهای بزرگراهی بتن آرمه

افشین کلانتری، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
نیما لطفی کامران، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران- مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات

### چکیده

مؤلفه قائم زلزله و اثرات آن بر سازه شده است. نتایج کار بسیاری از پژوهشگران روند فعلی آیین‌نامه‌ها را نقد نموده و آن را غیرمحافظة کارانه می‌داند. مطالعات صورت گرفته در این مبحث را می‌توان به دو دسته کلی مشخصات مؤلفه قائم و اثرات مؤلفه قائم بر روی پلهای بزرگراهی تقسیم نمود.

### ۲- مطالعات انجام شده در ارتباط با خصوصیات مؤلفه قائم

بزرگ‌نیا و نیازی [۱] طی پژوهشی تغییرات نسبت شتاب قائم به افقی طیفی ( $VH$ ) را بررسی کردند و دریافتند که این نسبت برای دوره تناوبهای بلند، از مقادیر متناظر کوتاه کوچکتر است. سیلوا [۲] با ارائه مجموعه‌ای از رکوردها، خصوصیات عمومی نوسانات قائم نسبت به نوسانات افقی را در زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد مطالعه قرار داد. وی در این تحقیق اظهار داشت که تاریخچه نوسانات قائم الگویی را نشان می‌دهد که در آن نوسانات قائم با دوره تناوبهای کوتاه زودتر از نوسانات افقی اصلی به محل می‌رسند، این در حالی است که نوسانات با دوره تناوب بلندتر برای هر سه مؤلفه عمود دارای زمان سیر حدوداً یکسان می‌باشند. بزرگ‌نیا و کمپبل [۳] خصوصیات طیف پاسخ حرکات قائم ثبت شده در طی زلزله نورتریج را بررسی کرده، دریافتند که نسبت پاسخ طیفی قائم به افقی ( $VH$ ) به شدت، زمان تناوب و همچنین فاصله سایت از منبع ارتعاش بستگی دارد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که نسبت  $VH$  برابر با (که به تازگی در آیین‌نامه‌ها معمول گردیده) برای سازه‌های با دوره تناوب طبیعی کم، دست پایین و برای سازه‌های با دوره تناوب بالا، محافظه‌کارانه است. این امر به ویژه برای سازه‌هایی مانند پلهای بزرگراهی که اغلب دارای دوره تناوب طبیعی کوتاه هستند حائز اهمیت می‌باشد.

با توجه به خطر لرزه‌ای بالا در کشور ما و وجود گسل‌های فراوان در نزدیکی بسیاری از شهرهای ایران، احتمال وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک با مؤلفه قائم قابل توجه فراوان است، آنچنان که این نوع تحریک در زلزله‌هایی مانند بم ۲۰۰۳ و طیس ۱۹۷۸ به راحتی قابل مشاهده می‌باشند. بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی پل مانند آیین‌نامه ایران یا از اثرات مؤلفه قائم صرف‌نظر کرده و یا استفاده از روشهایی مانند ساختن طیف طراحی قائم از طیف افقی با نسبتهایی مانند  $\frac{2}{3}$  را توصیه می‌کنند. این در حالی است که تحقیقات و مطالعات جدید، شدت قابل توجه مؤلفه قائم زلزله را در نزدیکی گسلها یادآور می‌شوند. در این تحقیق، برای تعیین اثرات مؤلفه قائم زلزله بر روی پلهای بزرگراهی، یک پل طراحی شده توسط آیین‌نامه ایران را تحت زلزله‌های نزدیک گسل تحلیل نموده و به بررسی تغییرات پاسخهای نیروی محوری ستونها، لنگر قائم عرشه در روی پایه و لنگر قائم پایه در وسط دهانه پرداخته شد. به این منظور مدل المان محدود سازه یاد شده در نرم‌افزار  $SAP2000$  ایجاد و تحلیل‌های دینامیکی بر روی آن صورت گرفت. نتایج این تحلیل‌ها تغییرات چشمگیری را در پاسخهای مورد مطالعه نشان داد.

**کلیدواژه‌ها:** مؤلفه قائم، تکانهای زمین، پل بزرگراهی، تحلیل تاریخچه زمانی، طیف پاسخ شتاب

### ۱- مقدمه

بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی یا اثرات مؤلفه قائم زلزله را ناچیز و قابل چشم‌پوشی می‌دانند و یا آنها را دست کم می‌گیرند. گسترش امکانات ثبت حرکات زلزله و شبکه‌های لرزه‌نگاری از یک سو و توانمندی متخصصان در تحلیل دینامیکی دقیق سازه‌ها از سوی دیگر موجب جلب توجه بسیاری از محققین به

### ۳- مطالعات تحلیلی انجام شده در ارتباط با اثر مؤلفه قائم بر روی پلها

باتن و همکاران [۱۱] بر اساس نتایج حاصل از تحلیل-های خطی و غیرخطی، پیشنهادهایی برای موقعیتی که بایستی اثر مؤلفه قائم منظور شود و همچنین نحوه وارد کردن اثر مؤلفه قائم زلزله در ترکیبهای بارگذاری ارائه نمودند. اگرچه بیشتر این مطالعات به تحلیل‌های خطی طیفی و دینامیکی محدود شده است. ولتسوس و همکارانش [۱۲] یک تحقیق مرکب از تحلیل و آزمایش روی پاسخ لرزه‌ای روسازه‌های قطعه‌ای پیش‌تنیده انجام دادند. در مطالعه یاد شده در کنار سایر بحث‌های مطرح شده، اثر مؤلفه قائم نیز بررسی گردید. نتایج تحلیل نشان داد که تاندون‌های پیش‌تنیده در بالای پایه‌های یکی از پلها تحت خمش مثبت تسلیم می‌شود. لنگر خمشی مثبت میانی نیز به علت حضور مؤلفه قائم ۴۰۰ درصد افزایش نشان داد. به تازگی کانات و همکاران [۱۳] با در نظر گرفتن پارامترهایی از پلهای معمولی استاندارد از قبیل طول دهانه‌ها و دوره تناوب طبیعی سازه و به وسیله تحلیل تاریخچه زمانی اثر مؤلفه قائم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحلیل‌های غیرخطی نشان داد که بسیاری از آیین‌نامه‌ها و به طور ویژه آیین‌نامه مورد بحث تحقیق یاد شده (Caltarns2006) در این زمینه دارای کفایت لازم نیستند.

هدف از انجام این مطالعه، بررسی میزان دقت ضوابط آیین‌نامه ایران در زمینه مؤلفه قائم می‌باشد. برای این امر مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحریکات صرفاً افقی و تحریکات توأم قائم و افقی صورت پذیرفت. از آنجا که هدف مطالعه، صرفاً بررسی احتمال آسیب‌پذیری پلهای بزرگراهی در اثر نادیده گرفتن مؤلفه قائم در طراحی آنها می‌باشد، با وجود تفاوت میان رفتارهای غیرخطی و خطی سازه‌ها، به نتایج حاصل از رفتار خطی اکتفا شده است.

### ۴- مدلسازی

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. مدل مورد استفاده در این مطالعه پل قابی با دو دهانه ۲۵ متری می‌باشد که در این نشریه ارائه گردیده است. همان طور که

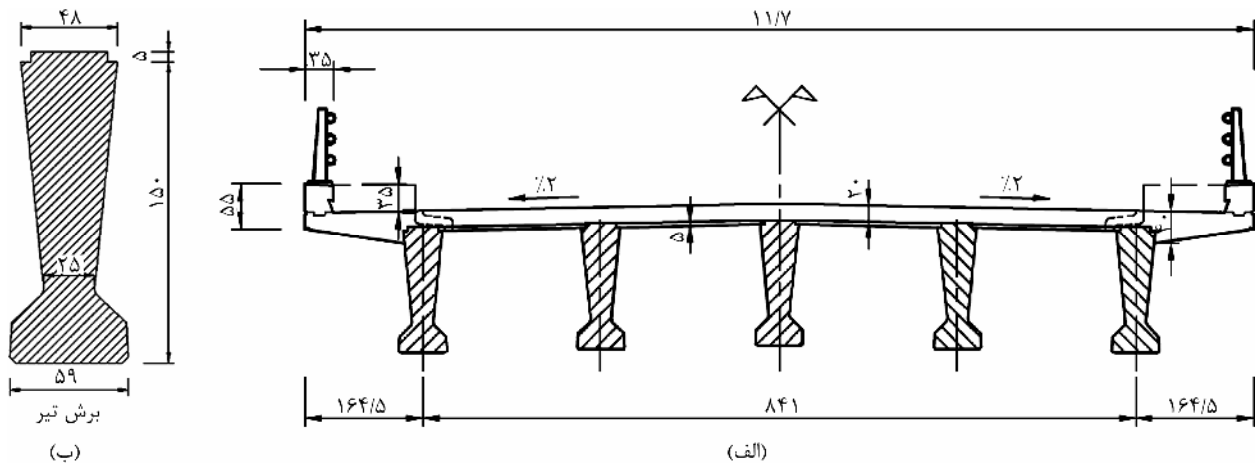
از اولین مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیق صادق‌وزیری و فوج [۴] اشاره نمود. محققان نشان دادند تغییرات نیروی محوری پایه ناشی از تحریکات قائم می‌تواند ظرفیت اتلاف انرژی ستونها را کاهش دهد. این تغییرات همچنین بر روی ظرفیت برشی مقطع نیز تأثیر می‌گذارند. بورخویزن [۵] اثرات شتاب قائم را بر روی عرشه پل‌های بتنی پیش‌تنیده بررسی نمود و مشاهده کرد که با توجه به مؤلفه قائم تحریک لرزه‌ای، تنش کششی در عرشه می‌تواند از تنش کششی مجاز بیشتر شود. یو و همکاران [۶] نیز ۲۱ درصد افزایش در نیروی محوری و ۷ درصد تغییر در ممان طولی در اثر منظور نمودن مؤلفه قائم را مشاهده نمودند. پس از آنها گلوید [۷] معیاری در طراحی ۶۰ 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.

پاپازگلو و الناشای [۸] 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 شبیه‌سازی عددی تأیید گردیدند. الناشای و پاپازگلو [۹] و کولیر و الناشای [۱۰] با در نظر گرفتن زلزله‌های نزدیک گسلی که در ۱۵ کیلومتری گسل مسبب ضبط شده بودند، بر روی روشهای ساده‌ای که بتواند اثر مؤلفه قائم و افقی را ترکیب کند، کار کردند. در نتیجه این تحقیق، به دلایل زیر توصیه شد که نسبت میرایی به ۲ درصد محدود شود:

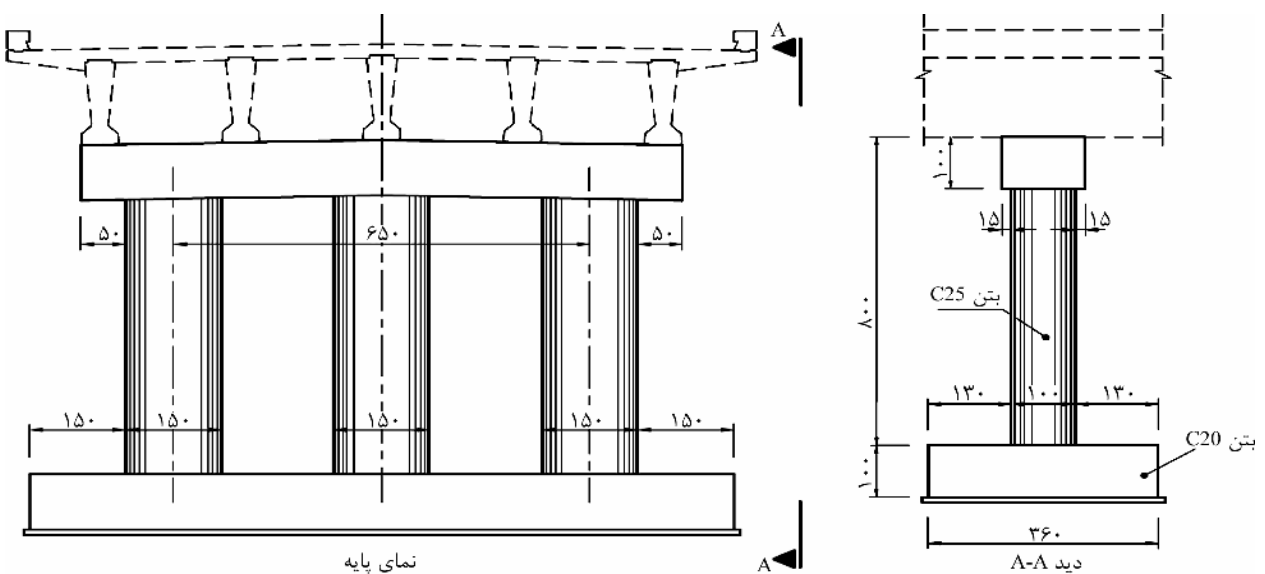
۱. مؤلفه‌های قائم با نوسانات با فرکانسهای بالا و در نتیجه میرایی کمتر در ارتباط هستند.
۲. اتلاف انرژی هیستریزس کمتری برای مؤلفه قائم نسبت به مؤلفه افقی به دست می‌آید.

نتیجه کاهش زمان اجرای برنامه، از مدل ساده شده پل که در آن عرشه با استفاده از المان خطی مدل شده، استفاده گردید. مشخصات مقطع مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است. شکل (۳-الف) مدل ایجاد شده با المان خطی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مذکور نشان داده شده، اتصال عرشه به کوله‌ها به صورت مفصلی و اتصال پایه به پی به صورت گیردار فرض شده است. برای اطمینان از صحت نحوه ساده‌سازی عرشه، مدل دیگری با استفاده از المانهای پوسته‌ای تشکیل شده که مراحل تشکیل این مدل به طور مختصر در زیر شرح داده شده است. شکل (۳-ب) مدل تولید شده با المانهای پوسته‌ای را نشان می‌دهد که پس از وارد نمودن جزئیات بیشتر به دست آمده است.

در شکل (۱) نمایش داده شده است عرشه این پل، دو عنصری بوده و شامل دال بتن مسلح و پنج شاهتیر پیش‌ساخته است. همچنین تک پایه آن متشکل از سه ستون لوبیایی شکل است که در بالا به تیر سر ستون متصل شده است، شکل (۲). در دو انتهای پل نیز کوله‌ها از نوع دیافراگم می‌باشند. اتصال ستونها در شالوده به صورت گیردار و اتصال کوله‌ها به روساز به صورت مفصل مدل شده است. همچنین اتصال تیر سرستون به عرشه به صورت گیردار می‌باشد. جزئیات بیشتر پل مدل شده در جدول (۱) آورده شده است. همچنین میرایی منظور شده در این تحقیق برای موده‌های اول و دوم ۵ درصد می‌باشد. در این تحقیق، به منظور کاهش حجم محاسبات و در



شکل (۱): (الف) روسازه پل مدل شده، (ب) ابعاد شاهتیرهای پیش ساخته پل انتخابی.

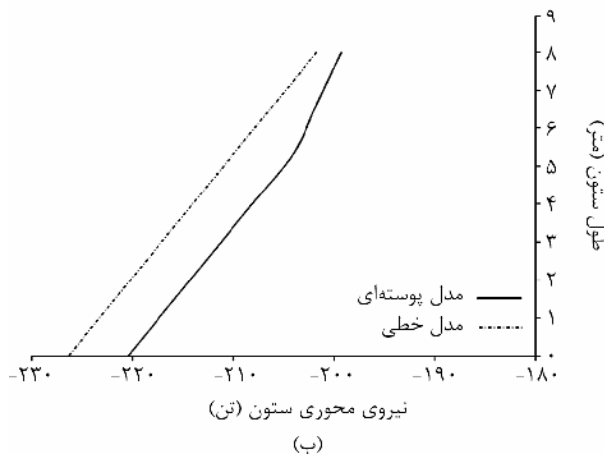
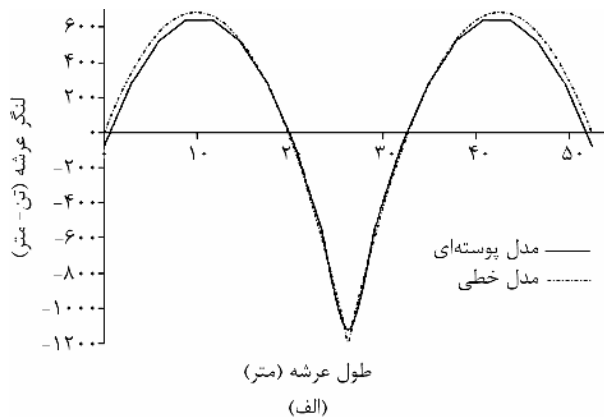


شکل (۲): جزئیات پایه پل مدلسازی شده.

جدول (۱): مشخصات پل مورد مطالعه.

پارامتر	مقدار/ جزئیات
مشخصات کلی پل	پل معمولی دو دهانه با پایه‌های چند ستونه
طول کل پل	۵۲/۴ متر
تعداد دهانه‌ها و طول هر یک از قسمتهای عرشه	دو دهانه: هر دو ۲۶/۲ متر
عرض عرشه	۱۱/۷ متر
عمق دال بتنی	۲۵ سانتیمتر
عمق تیرهای پیش‌ساخته بتنی	۱۵۵ سانتیمتر
تعداد و عمق آزاد هر یک از ستونهای پایه	سه ستون: هر یک به ارتفاع ۸ متر
ابعاد و مشخصات ستونها	ستونهای بیضوی با شعاعهای ۱/۵ و ۱ متر
طول تیر سر ستون	۹ متر
ابعاد مقطع تیر سر ستون	۱/۳۵ متر در جهت ستون و ۲/۲۵ متر ارتفاع
جزئیات تکیه‌گاهها در محل فونداسیون ستونها	شرایط گیرداری فرض شده است
مشخصات مصالح بتنی در روسازه	۲۵۰، به جزء شاهتیرها
مشخصات مصالح بتنی شاهتیرها	۳۰۰
مشخصات مصالح بتنی در زیرسازه	۲۵۰
مشخصات آرماتورهای فولادی	۴۰۰۰، AIII
اتصال عرشه به کوله‌ها	به صورت مفصلی مدل شده است
اتصال عرشه به پایه‌ها	به صورت گیردار مدل گردیده است

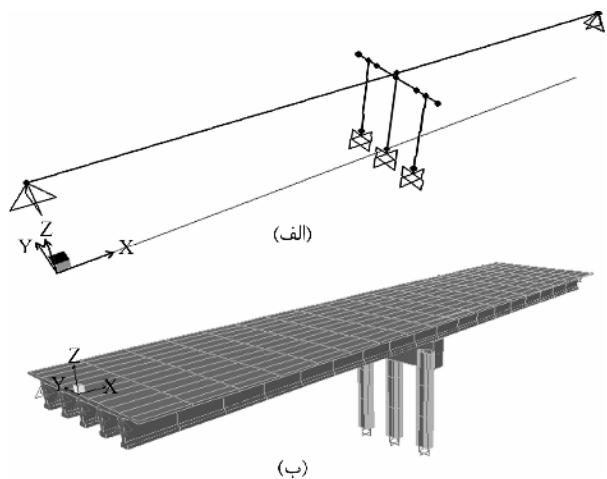
پس از تشکیل این دو مدل به مقایسه پاسخهای آنها تحت بار مرده پرداخته می‌شود. شکل (۴-الف) و (۴-ب) به ترتیب مقایسه بین لنگر قائم عرشه در کل طول پل و مقایسه بین نیروی محوری در طول ستون کناری دو مدل را نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌های مذکور، مشاهده می‌شود که مطابقت مطلوبی بین مدل ایجاد شده با المانهای پوسته‌ای و مدل ایجاد شده با المانهای خطی وجود دارد. همچنین برای مقایسه بین رفتارهای دینامیکی آنها چنان که در جدول (۳) نشان داده شده است، اشکال مودی و دوره تناوب پنج مود اول مدل خطی با مودهای متناظر مدل پوسته‌ای مقایسه شده است. در این مورد نیز می‌توان مطابقت مطلوبی را مشاهده نمود. از این رو می‌توان با دقت بالایی نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی را با استفاده از مدل با المانهای خطی به دست آورد. همچنین در جدول (۴) پیروید سازه در راستاهای اصلی ارائه شده است.



شکل (۴): مقایسه بین دو مدل خطی و پوسته‌ای در (الف) لنگر قائم عرشه در کل طول پل (تن-متر) (ب) نیروی محوری در طول ستون کناری پل (تن).

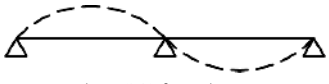
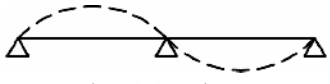
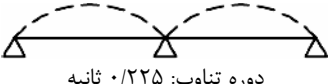
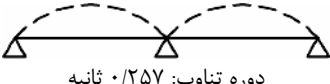
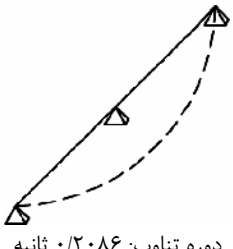
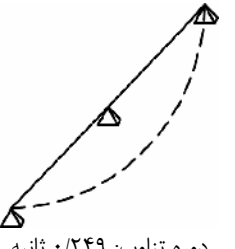
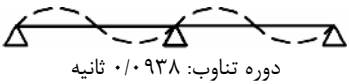
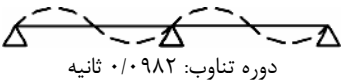
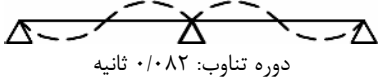
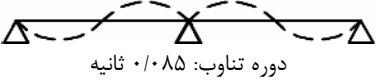
جدول (۲): مشخصات عرشه خطی.

پارامتر	مقدار
سطح مقطع	$5/8613m^2$
$I_x$	$1/9071m^4$
$I_y$	$55/0108m^4$
$J$	$3/517m^4$



شکل (۳): (الف) مدل خطی مورد استفاده در تحقیق، (ب) مدل تولید شده با المانهای پوسته‌ای.

جدول (۳): مقایسه رفتار دینامیکی مدل المان خطی و پوسته‌ای: مقایسه اشکال مودی پنج مود اول المان خطی و دوره تناوب آنها با اشکال و مقادیر نظیر در مدل با المان پوسته‌ای.

مدل پوسته‌ای		مدل خطی	
 دوره تناوب: ۰/۳۲۵۴ ثانیه	مود اول	 دوره تناوب: ۰/۳۵۸ ثانیه	مود اول
 دوره تناوب: ۰/۲۲۵ ثانیه	مود دوم	 دوره تناوب: ۰/۲۵۷ ثانیه	مود دوم
 دوره تناوب: ۰/۲۰۸۶ ثانیه	مود سوم	 دوره تناوب: ۰/۲۴۹ ثانیه	مود سوم
 دوره تناوب: ۰/۰۹۳۸ ثانیه	مود چهارم	 دوره تناوب: ۰/۰۹۸۲ ثانیه	مود چهارم
 دوره تناوب: ۰/۰۸۲ ثانیه	مود پنجم	 دوره تناوب: ۰/۰۸۵ ثانیه	مود پنجم

منظور چهار رکورد با نسبت  $V/H$  بالاتر از  $\frac{2}{3}$  و فاصله از گسل کمتر از ۲۵ کیلومتر انتخاب شد که شرح جزئیات آنها در جدول (۵) آورده شده است.

برای مقیاس نمودن رکوردهای افقی از روش ارائه شده توسط نشریه ۲۸۰۰ استفاده شد. شتابنگاشت‌های قائم نیز به منظور حفظ نسبت  $V/H$ ، با نسبت مشابه مؤلفه‌های افقی مقیاس گردیدند. پس از انجام مراحل فوق شتابنگاشت‌های حاصل برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گرفتند. طیف پاسخ شتاب حاصل از هر یک از رکوردها پس از مقیاس شدن در شکل (۵) نشان داده شده است. با بررسی مختصر طیف‌ها می‌توان به راحتی مشاهده نمود که در

جدول (۴): دوره تناوب سازه مورد استفاده در راستاهای اصلی.

مود	دوره تناوب (ثانیه)
طولی	۰/۳۵۸
عرضی	۰/۲۴۹
قائم	۰/۲۵۸

## ۵- زمین لرزه انتخابی

معیار انتخاب رکورد برای این مطالعه، استفاده از رکوردهای نزدیک گسلی است که از نسبت پاسخ طیفی قائم به افقی ( $V/H$ ) بالایی برخوردار هستند، چرا که این نوع رکوردها شامل مؤلفه‌های قائم قابل توجه بوده و با وضوح بیشتری می‌تواند اثرات این نوع تکانها را نمایش دهد. به این

جدول (۵): جزئیات زمین لرزه‌های انتخابی.

نسبت $V/H$	مدت زمان (ثانیه)	بیشینه شتاب			فاصله از گسل (کیلومتر)	ایستگاه	رکورد انتخابی
		قائم	عرضی	طولی			
۱/۲۳۷	۱۱۵	۱/۰۰۸	۰/۶۴۹	۰/۸۱۵	کمتر از یک	Bam	بم
۰/۸۰۷	۳۲/۸	۰/۶۸۸	۰/۸۳۶	۰/۸۵۲	۳	9101 Tabas	طبس
۱/۶۰۵	۳۹/۹۶	۰/۵۲۲	۰/۳۰۸	۰/۳۴۴	۹/۲	Arleta - Nordhoff Fire	نورتریچ
۰/۷۰۴	۵۰	۰/۷۲۴	۰/۹۰۲	۰/۹۶۸	۶/۹۵	CHY080	چی چی

## ۶- نتایج شبیه سازی عددی

پس از انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی به بررسی نتایج حاصل از آن می‌پردازیم. شایان ذکر است که در این بخش تقاضاهایی بررسی گردید که طی مطالعات گذشته اثرات قابل توجه مؤلفه قائم در آنها مشاهده شده است. موارد مذکور به شرح زیر می‌باشند.

۱. نیروی محوری در ستونهای پایه؛
۲. لنگر قائم عرشه در روی پایه؛
۳. لنگر قائم عرشه در وسط دهانه.

لازم به ذکر است که منظور از لنگر قائم عرشه در مطالعه لنگر عرشه در راستای عمود بر مقطع می‌باشد به طوری که تارهای بالا و پایین مقطع تحت کشش و فشار قرار گیرند.

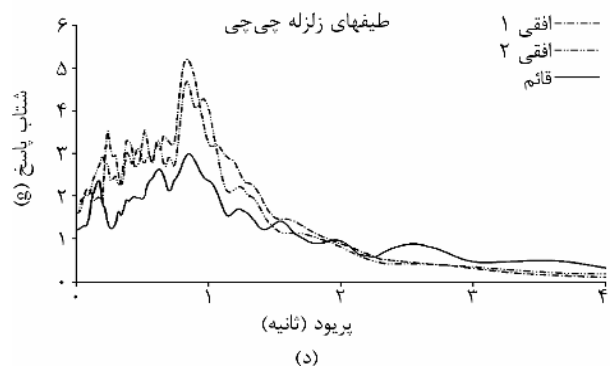
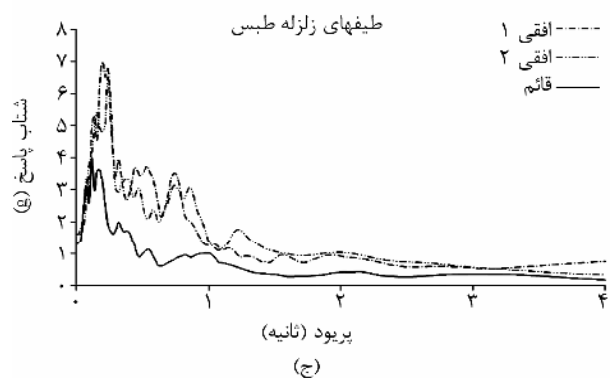
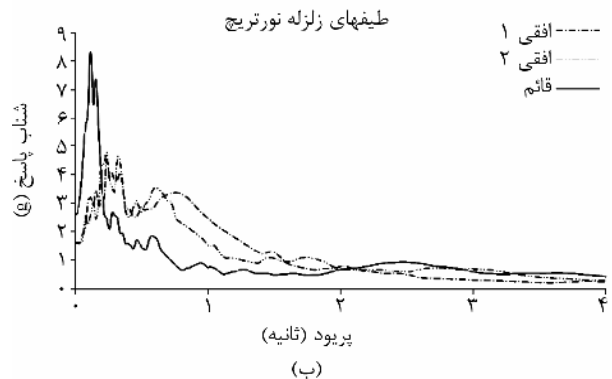
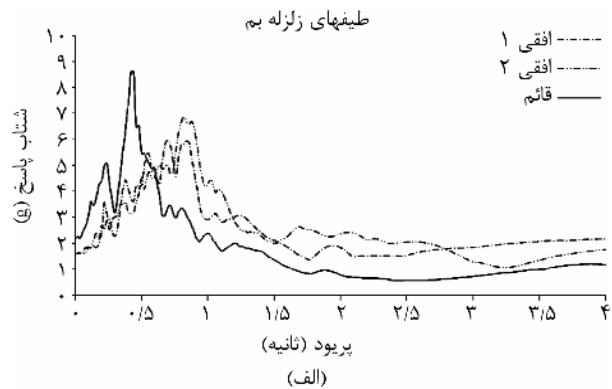
همچنین به منظور تعیین معیار مناسبتر برای مقایسه پاسخها در حالت‌های مختلف تقاضاهای حاصل از هر دو حالت، دو مؤلفه افقی و سه مؤلفه‌ای به پاسخ حاصل از بار مرده تنها تقسیم گردیدند. به این ترتیب نسبت پاسخهای هر یک از حالات مذکور به بار مرده تنها به دست آورده شد که بیانگر میزان تغییرات در هر یک از تقاضاها نسبت به حالت قبل از زلزله می‌باشد.

نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی تغییرات قابل توجه پاسخها را در اثر مؤلفه قائم نشان می‌دهد. شکل (۶) تقاضاهای لنگر قائم در روی پایه و همچنین تغییرات لنگر وسط دهانه عرشه را در پل تحت اثر اعمال رکورد زلزله بم نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۶-الف) و (۶-ب) مشخص گردیده است، لنگر قائم در روی پایه و همچنین لنگر قائم عرشه در وسط دهانه در حالتی که مؤلفه قائم منظور شده افزایش چشمگیری یافته است، به طوری که این افزایش برای لنگر در روی پایه به میزان ۶۰۰ درصد بار مرده عرشه می‌باشد. این در حالی است که دو پاسخ یاد شده تحت اثر دو مؤلفه افقی تغییرات چندانی نداشتند که بیانگر اهمیت اثرات تکانه‌های قائم در برخی از پاسخهای سازه می‌باشد.

## ۷- ظرفیت خمشی عرشه

با توجه به این امر که در طراحی عرشه پلهای بزرگراهی عرشه عنصری الاستیک فرض می‌شود و همواره سعی بر آن است که مفصل پلاستیک در ستونها تشکیل گردد، لذا در این

هر چهار مورد، دوره تناوب حاکم در طیف قائم کمتر از مقادیر متناظر در سایر مؤلفه‌ها است. بر این اساس می‌توان گفت سازه‌های سخت و با دوره تناوب طبیعی قائم کوتاه بیشتر تحت تأثیر مؤلفه قائم قرار می‌گیرند.



شکل (۵): طیف پاسخ شتاب حاصل در سه راستا برای زلزله‌های بم، نورتریج، طبس و چی‌چی.

قابلیت تحمل آن را دارد و از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$M = \frac{f_t I}{C} \quad (1)$$

$f_t$  = تنش کششی نهایی بتن عرشه  $(0.2\sqrt{f'_c})$ ؛

$I$  = ممان اینرسی مقطع عرشه؛

$C$  = دورترین نقطه تا تار خنثی.

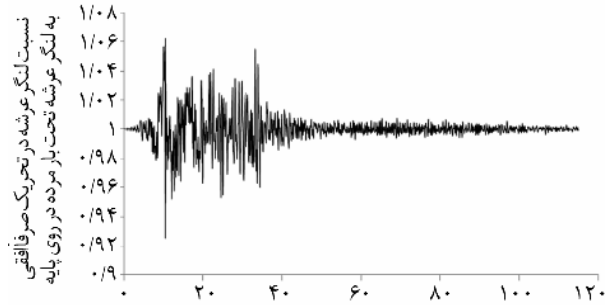
## ۸- تغییرات لنگر قائم عرشه روی پایه و در وسط دهانه عرشه

جداول (۶) و (۷) به ترتیب تغییرات لنگر قائم روی پایه و در وسط دهانه عرشه را در دو حالت تحریکات صرفاً افقی و تحریک سه بعدی نشان می‌دهند. با توجه به تغییرات قابل-ملاحظه این تقاضا تحت سه مؤلفه زلزله و تغییرات نه چندان زیاد آن در حالت فقط مؤلفه‌های افقی، می‌توان به سادگی تأثیر قابل ملاحظه مؤلفه قائم در پاسخ یاد شده را مشاهده نمود.

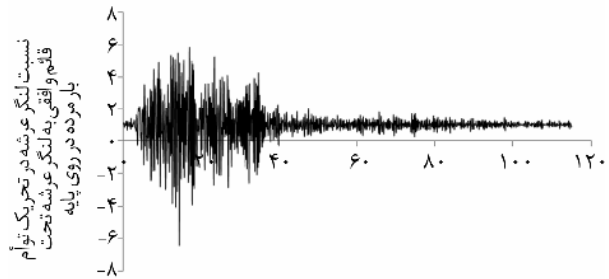
جدول (۶): لنگر قائم روی پایه در دو حالت مؤلفه‌های افقی و حالت تحریک مؤلفه‌های افقی توأم با قائم.

پاسخ مورد نظر	رکورد انتخابی	ماده / لنگر (حداقل)		حداقل (تن - متر)		ماده / ظرفیت
		ماده / ظرفیت	ماده / لنگر (حداکثر)	ماده / ظرفیت	حداقل (تن - متر)	
فقط مؤلفه افقی	بم	۱/۰۶	۱/۵۵	-۱۱۰۳/۲۶	۰/۹۳	۱/۵۵
	نورتریچ	۱/۰۷	۱/۵۵	-۱۰۹۲/۸۴	۰/۹۲	۱/۵۵
	طیس	۱/۱۲	۱/۵۵	-۱۰۴۹/۳۷	۰/۸۸	۱/۵۵
	چی چی	۱/۰۴	۱/۵۵	-۱۱۰۲/۹۹	۰/۹۳	۱/۵۵
مؤلفه افقی و قائم توأم	بم	۵/۸۴	۱/۵۵	۷۶۷۹/۸۳	-۶/۴۴	-۰/۹۲
	نورتریچ	۴/۵۲	۱/۵۵	۳۰۶۹/۶۳	-۲/۵۷	-۰/۹۲
	طیس	۴/۱۱	۱/۵۵	۲۲۵۰/۴۲	-۱/۸۹	-۰/۹۲
	چی چی	۲/۸۵	۱/۵۵	۱۶۱۰/۵۲	-۱/۳۵	-۰/۹۲

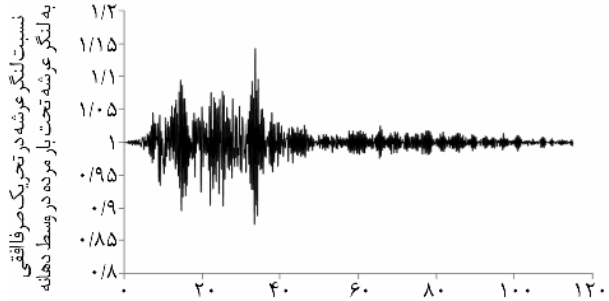
تحقیق منظور از ظرفیت خمشی عرشه، مقدار لنگری است که عرشه در حالت الاستیک و قبل از رخ دادن ترکهای کششی



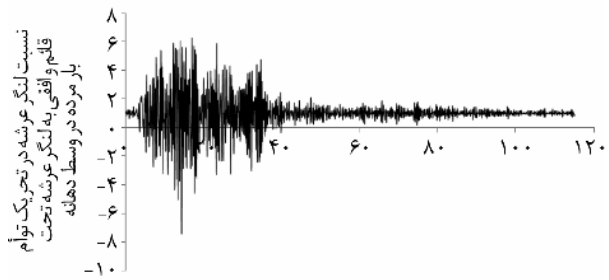
زمان (ثانیه)  
(الف)



زمان (ثانیه)  
(ب)



زمان (ثانیه)  
(ج)



زمان (ثانیه)  
(د)

شکل (۶): نتایج تحلیل تاریخچه زمانی برای رکورد زلزله بم: تغییرات لنگر قائم در روی پایه در اثر تکانهای افقی تنها، (ب) تغییرات لنگر قائم در روی پایه در اثر تکانهای توأم قائم و افقی، (ج) تغییرات لنگر وسط دهانه عرشه در اثر تکانهای افقی تنها، و (د) تغییرات لنگر وسط دهانه عرشه در اثر تکانهای توأم قائم و افقی.

**جدول (۷):** لنگر قائم عرشه در وسط دهانه در دو حالت مؤلفه‌های افقی و حالت تحریک مؤلفه‌های افقی توأم با قائم.

پاسخ مورد نظر	رکورد انتخابی	مده / لنگر (تق - متر)	مده / ظرفیت (متر)	مده / لنگر (تق - متر)	مده / ظرفیت (متر)
فقط مؤلفه افقی	یح	۵۹۶/۶۹	۰/۱۸۷	۷۸۰/۶۴	۱/۶۱
	نورتریج	۵۸۶/۶۹	۰/۱۸۶	۷۸۴/۶۳	۱/۶۱
	طیس	۵۸۲/۱۷	۰/۱۸۵	۷۸۲/۴۴	۱/۶۱
	چی چی	۷۴۲/۴۵	۱/۰۹	۷۴۲/۴۵	۱/۶۱
مؤلفه افقی و قائم توأم	یح	۵۰۹۶/۰۴	-۷/۴۶	۴۲۸۷/۱۷	-۲/۷۰
	نورتریج	۲۲۰۹/۶۰	-۳/۲۳	۳۴۱۵/۸۳	-۲/۷۰
	طیس	۱۶۹۵/۱۰	-۲/۴۸	۳۱۲۹/۷۶	-۲/۷۰
	چی چی	۱۰۵۰/۰۵	-۱/۵۴	۲۱۷۴/۲۸	-۲/۷۰

جدول ملاحظه می‌شود، نیروی محوری ستون تغییرات قابل ملاحظه‌ای نسبت به بار مرده تنها داشته و در تمامی زلزله‌ها با افزایش و کاهش شدید نیروی محوری، ستونها تحت فشار و کشش قابل ملاحظه‌ای قرار می‌گیرند. این تغییرات می‌تواند به دلایل زیر برای ستونها خطر آفرین باشد:

**جدول (۸):** نیروی محوری ستون تحت تأثیر تحریک مؤلفه‌های افقی توأم با قائم.

پاسخ مورد نظر	رکورد انتخابی	مده / نیروی محوری (متر)	مده / لنگر (تق)	نیروی مده / محوری (متر)
فقط مؤلفه افقی	یح	-۶۷۹/۱۸	۴/۷۱	۵۴۰/۶۹
	نورتریج	-۵۷۵/۰۳	۳/۹۸	۲۲۴/۷۴
	طیس	-۴۷۸/۶۳	۳/۳۲	۹۵/۷۹
	چی چی	-۴۲۹/۰۹	۲/۹۷	۱۲۳/۴۷

### ۹-۱- تغییرات در ظرفیت برشی

یکی از عوامل مهمی که تحت تأثیر تغییرات نیروی محوری قرار می‌گیرد، ظرفیت برشی ستونها است. کاهش/افزایش نیروی محوری می‌تواند منجر به کاهش/افزایش ظرفیت برشی گردد. بنابراین کاهش شدید نیروی محوری و یا نیروی کششی پدید آمده در ستون سبب کاهش قابل-ملاحظه ظرفیت برشی شده که می‌تواند شکست برشی را در پی داشته باشد. شکل (۷) تغییرات ظرفیت برشی پایه پل مورد بررسی را در نزدیکی تکیه‌گاه، در اثر تغییرات نیروی محوری تحت زلزله بم را نشان می‌دهد. این مقادیر با استفاده از رابطه (۲) که توسط آیین‌نامه آبا [۱۴] برای تعیین ظرفیت برشی اعضای تحت برش، خمش و نیروی محوری ارائه شده، برای تنها یکی از شتابنگاشت‌ها (شتابنگاشت زلزله بم) محاسبه گردیده است. همچنین در شکل مذکور نیروی برشی ستون در نزدیکی تکیه‌گاه نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد،

این تغییرات می‌تواند سبب افزایش لنگر قائم در روی پایه تا ۶/۵ برابر لنگر ناشی از بار مرده و افزایش لنگر تا ۷/۵ برابر لنگر ناشی از بار مرده در وسط دهانه شود. با توجه به نسبت ظرفیت لنگر به لنگر ناشی از بار مرده ارائه شده در جدول، مشاهده می‌گردد که در زلزله‌های مورد مطالعه، تحت مؤلفه افقی تنها، میزان تقاضای لنگر از ظرفیت آن کمتر می‌باشد. این در حالی است که در صورت منظور نمودن اثرات مؤلفه قائم زمین‌لرزه، تقاضا از ظرفیت فزونی یافته است. این امر به معنی تسلیم عرشه و عبور آن از محدوده الاستیک است که با توجه به فلسفه طراحی آن مطلوب نمی‌باشد.

### ۹- تغییرات نیروی محوری

جدول (۸) نیروی محوری ستون میانی را تحت اثر تحریک سه بعدی و نسبت این نیروها را به نیروهای ایجاد شده توسط بار مرده تنها نشان می‌دهد. همان‌طور که در این



هر دو حالت امکان افزایش آسیب پذیری سازه را به دنبال خواهد داشت.

کاهش ظرفیت خمشی می تواند سبب شکست خمشی گردد که مطلوب نیست. از طرف دیگر افزایش ظرفیت خمشی ستون نیز سبب تغییر محل شکل گیری مفصل پلاستیک شده و آنها را به سمت تیر سرستون و عرشه هدایت می کند. این امر همان طور که قبلاً نیز عنوان شد مطلوب نمی باشد؛ بنابراین اثرات مؤلفه قائم بر ظرفیت خمشی ستونها در اثر تغییرات نیروی محوری ستون از مباحث قابل اهمیت بوده و نیاز به مطالعات بیشتر دارد.

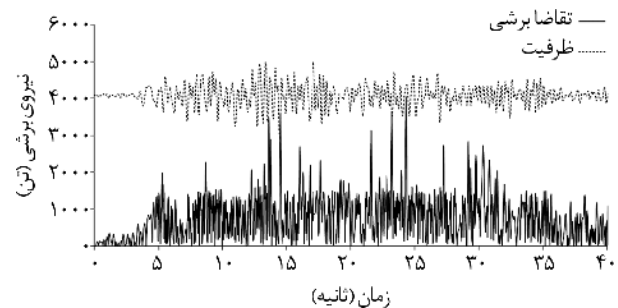
### ۱۰- ارتباط نتایج با طیف قائم

با توجه به طیف های ارائه شده در شکل (۵) می توان مشاهده نمود که نتایج حاصل از تحلیل های انجام شده به طیف قائم زلزله وابسته است، آن چنان که ترتیب پاسخها مشابه ترتیب مقادیر طیف پاسخ شتاب در پیوند اول قائم سازه می باشد. به این ترتیب می توان گفت که هر چه پیوند قائم سازه بیشتر در محدوده بیشینه طیف قائم قرار داشته باشد، مقادیر پاسخهای حاصل بیشتر شده و در نتیجه اثرات مؤلفه قائم بیشتر خواهد بود. مقادیر طیف پاسخ شتاب در پیوند اول قائم سازه در جدول (۹) آورده شده است. شکل (۸) نیز نسبت پاسخهای لنگر قائم عرشه روی پایه و وسط دهانه را تحت حالت سه مؤلفه ای به بار مرده تنها نشان می دهد. بر اساس این شکل می توان مشاهده نمود که پاسخها به طیف پاسخ شتاب بستگی دارد. شایان ذکر است که خط چینهای نشان داده شده در این شکل نمایانگر ظرفیت عرشه در لنگر مثبت و منفی می باشد. لذا در این شکل فزونی یافتن میزان تقاضا از ظرفیت برای تقریباً تمامی حالات مدنظر را می توان مشاهده نمود.

جدول (۹): مقادیر طیف پاسخ شتاب متناظر با دوره تناوب طبیعی سازه.

رکورد انتخابی	طیف طولی	طیف عرضی	طیف قائم
بم	۴/۰۶	۲/۸۰	۴/۳۳
نورتریج	۳/۵۵	۴/۲۹	۲/۰۹
طبس	۲/۹۱	۵/۸۶	۱/۷۲
چی چی	۲/۵۰	۲/۵۶	۱/۲۴

میزان تقاضای نیروی برشی از ظرفیت آن برای شتابنگاشت انتخابی فزونی یافته که این امر بیانگر شکست برشی در ستون می باشد.



شکل (۷): تغییرات ظرفیت برشی در اثر تغییرات نیروی محوری ستون و نیروی برشی ستون در نزدیکی تکیه گاه تحت زلزله بم.

$$V_C + V_S = \text{ظرفیت برشی} \quad (۲)$$

$$V_C = v_c \left(1 + \frac{N_u}{12A_g}\right) b_w d \quad (۳)$$

$$v_c = 0.2 \times \phi_c \sqrt{f_c} \quad (۴)$$

$$V_S = \phi_s A_v f_y \frac{d}{s} \quad (۵)$$

که در آن:  $V_C$ : ظرفیت برشی بتن تنها بر حسب نیوتن،  $V_S$ : ظرفیت برشی تنگهای برشی ستون بر حسب نیوتن،  $N_u$ : نیروی محوری که همزمان با  $V_u$  در مقطع رخ می دهد بر حسب نیوتن،  $A_g$ : مساحت کل مقطع ستون بر حسب میلیمتر مربع،  $b_w$ : پهناي جان ستون بر حسب میلیمتر،  $d$ : عمق مقطع ستون،  $\phi_c$ : جزء ایمنی بتن ( $0/۶۵$ )،  $f_c$ : مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن ۲۸ روزه بر حسب کیلو نیوتن بر میلیمتر مربع،  $\phi_s$ : جزء ایمنی بتن ( $0/۸۵$ )،  $A_v$ : سطح مقطع تنگ برشی بر حسب میلیمتر  $f_y$ : تنش تسلیم تنگهای برشی روزه بر حسب کیلونیوتن بر میلیمتر مربع و  $s$ : فاصله تنگها برشی از یکدیگر بر حسب میلیمتر می باشد.

### ۹-۲- تغییرات در ظرفیت خمشی

تغییرات نیروی محوری می تواند بسته به میزان افزایش و کاهش آن و منحنی اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی سبب افزایش و یا کاهش ظرفیت خمشی مقطع شود و در

۱. مؤلفه قائم زلزله موجب افزایش تغییرات لنگر قائم عرشه در وسط دهانه و همچنین بر روی پایه‌ها می‌گردد. این تغییرات هم در موقعیت لنگر منفی و هم در موقعیت لنگر مثبت مشاهده شد. این در حالی است که افزایش مقدار لنگر در این دو حالت می‌تواند سبب فزونی یافتن تقاضا از ظرفیت شود که بیانگر تسلیم عرشه در این نقاط بوده و با توجه به فلسفه طراحی عرشه (عرشه الاستیک)، این امر به هیچ وجه مطلوب نمی‌باشد.

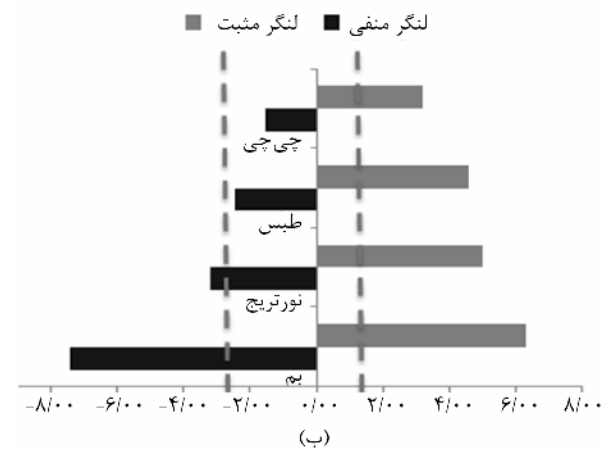
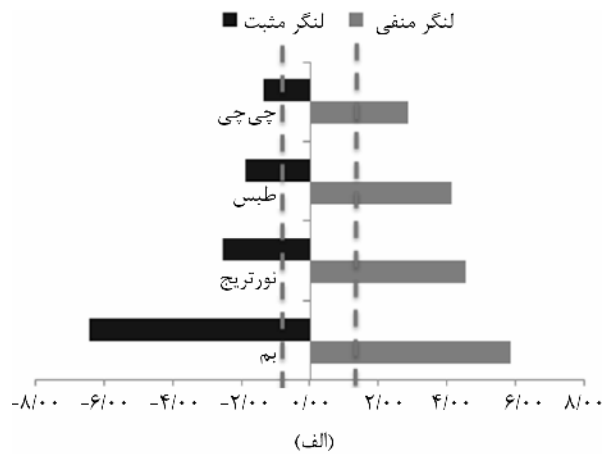
۲. مؤلفه قائم زلزله توانایی ایجاد تغییرات قابل توجه در نیروی محوری ستون را دارد که این تغییرات نیز با توجه به منحنی اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی مقطع می‌تواند تأثیرات سوء بر عملکرد خمشی ستونها بگذارد. همچنین این تغییرات می‌تواند موجب کاهش ظرفیت برشی ستون گردد که این امر نیز به نوبه خود احتمال خرابی مقطع را افزایش می‌دهد. لذا مطالعه تکمیلی بر روی این اثرات ضروری به نظر می‌رسد.

۳. همچنین با توجه به افزایش احتمال وقوع شکست با منظور شدن مؤلفه قائم، فرض عدم در نظرگیری تکانهای قائم در طراحی پلها که توسط آیین‌نامه ایران نیز مطرح شده است باید به ویژه برای سازه‌هایی که در نزدیکی گسله‌های لرزه-خیز واقع هستند، تغییر یابد و این اثرات برای پلها می‌بایست پس از انجام مطالعات بیشتر با استفاده از راهکاری مناسب منظور گردد.

۴. پس از بررسی و مقایسه نتایج حاصله با مقادیر طیف پاسخ قائم رکوردها در پرپود قائم نظیر سازه مشاهده شد که سازه‌های سخت با دوره تناوب طبیعی قائم کوتاه بیشتر تحت تأثیر مؤلفه قائم قرار می‌گیرند. همچنین هر چه پرپود قائم سازه بیشتر در محدوده بیشینه طیف قائم قرار داشته باشد، مقادیر پاسخهای حاصل افزایش یافته و در نتیجه اثرات مؤلفه قائم بیشتر خواهد بود.

## ۱۲- منابع

1. Bozorgnia, Y. and Niazi, M. (1993). Distance scaling of vertical and horizontal response spectra of the Loma Prieta earthquake, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **22**, 695-707.



شکل (۸): نسبت پاسخهای تحت حالت سه مؤلفه‌ای به بار مرده تنها (الف) لنگر قائم عرشه روی پایه (ب) لنگر قائم عرشه در وسط دهانه (خط‌چینهای ارائه شده بیانگر نسبت ظرفیت عرشه در لنگر مثبت و منفی به لنگر ناشی از بار مرده در مقطع مورد نظر می‌باشد).

## ۱۱- نتیجه‌گیری

اثرات مؤلفه قائم بر روی پل بزرگراهی طراحی شده توسط آیین‌نامه ایران با استفاده از انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر روی یکی از این پلها بررسی گردید. برای بررسی میزان اثرگذاری تکانهای قائم تحلیل‌هایی در دو حالت دو مؤلفه افقی (بدون مؤلفه قائم) و تحلیل با سه مؤلفه زلزله (با مؤلفه قائم) صورت پذیرفت. لازم به ذکر است این مطالعه تنها با توجه به رفتار الاستیک سازه صورت گرفته و برای اخذ نتایج دقیق‌تر به مدلسازی دقیق‌تر رفتار سازه نیاز می‌باشد.

یافته‌های حاصل برای تقاضاهایی که بیشترین تأثیرپذیری را از تکانهای قائم دارند، بررسی شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- 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.
8. Papazoglou, A.J. and Elnashai, A.S. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **25**, 1109-1137.
  9. Elnashai, A.S. and Papazoglou, A.J. (1997). Procedure and spectra for analysis of RC structures subjected to strong vertical earthquake load, *J. Earthquake Eng.*, **1**(1), 121-155.
  10. Collier, C.J. and Elnashai, A.S. (2001). A procedure or combining vertical and horizontal seismic action effects, *J. Earthquake Eng.*, **5**(4), 521-539.
  11. Button, M.R., Cronin, C.J., and Mayes, R.L. (2002). Effect of vertical motions on seismic response of bridges, *J. Struct. Eng.*, **128**(12), 1551-1564.
  12. Veletzos, M.J., Restrepo, J.I., and Seible, F. (2006). Seismic response of precast segmental bridge superstructures, Rep. Submitted to Caltrans-SSRP-06/18, Univ. of California, San Diego, San Diego, Calif.
  13. Kunnath, S.K., Erduran, E., Chai, Y.H., and Yashinsky, M. (2008). Effect of near-fault vertical ground motions on seismic response of highway overcrossings, *J. Bridge Engineering*, **13**(3), 282-290.
  14. آیین‌نامه بتن ایران - آبا (۱۳۸۲). نشریه ۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
  2. Silva, W.J. (1997). Characteristics of vertical ground motions for applications to engineering design, *Proc., FHWA/NCEER Workshop on the National Presentation 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., 205-252.
  3. Bozorgnia, Y.M. and Campbell, K.W. (2004). The vertical-to horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra, *J. Earthquake Eng.*, **8**, 175-207.
  4. Saadeghvaziri, M.A. and Foutch, D.A. (1991). Dynamic behavior of R/C highway bridges under the combined effect of vertical and horizontal earthquake motions, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **20**, 535-549.
  5. Broekhuizen, D.S. (1996). "Effects of vertical acceleration on prestressed concrete bridges, MSc. thesis, Univ. of Texas at Austin, Austin, Texas.
  6. Yu, C.-P., Broekhuizen, D.S., Roesset, J.M., Breen, J.E., and Kreger, M.E. (1997). Effect of vertical ground motion on bridge deck response, *Proc., Workshop on Earthquake Engineering Frontiers in Transportation Facilities*, Tech. Rep. No. NCEER-97-2005, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, N.Y., 249-263.
  7. 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*