

چکیده

در آیین‌نامه‌های طراحی پل نظیر آشتو رابطه مستقیم و صریحی برای لحاظ نمودن اثرات مؤلفه قائم زلزله در طراحی تکیه‌گاه‌های الاستومری ارائه نشده است. در عوض آشتو در راهنمای طراحی جداگرهای لرزه‌ای خود برای لحاظ نمودن مؤلفه قائم زلزله بدون در نظر گرفتن شتاب مؤلفه قائم، نوع خاک، فاصله تا گسل و...، افزایش و کاهش مقدار بار مرده به میزان ۲۰ درصد را پیشنهاد می‌کند. در صورتی که در نواحی نزدیک گسل، مؤلفه قائم زلزله شدید بوده و باعث افزایش قابل توجه پاسخ‌ها در پل می‌شود. در این مطالعه به صورت موردی پل طبقاتی صدر تحت اثر مؤلفه قائم تعدادی شتاب نگاشت زلزله دارای خصوصیات نزدیک گسل قرار گرفته است و تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی برای هر یک از آنها انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد مؤلفه قائم زلزله در نواحی نزدیک گسل باعث افزایش قابل توجه پاسخ اعضای پل نظیر افزایش حداکثر نیروی محوری پایه‌های پل، شتاب عرشه، برش و لنگر خمشی در مقطع عرضی عرشه می‌شود و بیشتر از مقدار افزایش یا کاهش ۲۰ درصدی بار مرده مد نظر آیین‌نامه است. برای بررسی رفتار جداسازهای لرزه‌ای ناشی از ازدیاد نیروی فشاری تحت اثر مؤلفه قائم زلزله، مدلی ساده از جداسازها که قابلیت لحاظ نمودن تغییرات سختی در راستای قائم و افقی و انجام تحلیل پایداری کمانشی را دارا می‌باشد تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد افزایش نیروی محوری فشاری باعث کاهش سختی جانبی جداسازها می‌شود و افزایش جابه‌جایی جانبی باعث افزایش تغییر شکل محوری جداساز شده و همچنین منحنی چرخه‌ای نیرو-جابه‌جایی جداسازها دچار کاهش سختی و مقاومت جانبی می‌شود. علاوه بر آن، روابط معمول در محاسبه ظرفیت کمانشی جداگرها تا حدودی دست‌بالاست و استفاده از مدل‌های تحلیل کمانشی ارجحیت دارد. برای کاهش اثرات مؤلفه قائم زلزله در سازه‌های جداسازی شده، جداسازی سه‌بعدی از طریق ایجاد هم‌زمان انعطاف‌پذیری قائم و افقی در جداسازها پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد کاهش پاسخ پل نظیر شتاب قائم وسط دهانه، برش و لنگر خمشی عرشه با کاهش سختی قائم جداسازها روند نزولی دارد.

کلمات کلیدی: مؤلفه قائم زلزله، پل جداسازی شده، زلزله حوزه نزدیک، کمانش جداساز، جداسازی سه‌بعدی.

بررسی اثر مؤلفه قائم زلزله حوزه نزدیک بر رفتار لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده

محمود میناوند

گروه مهندسی سازه، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محسن غفوری آشتیانی (نویسنده مسئول)

استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران
ashtiany@iies.ac.ir

منصور ضیائی‌فر

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۱- مقدمه

کردن مؤلفه قائم تأثیر قابل توجهی بر رفتار سازه ندارد. در مقابل شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در حوزه نزدیک گسل دارای شتاب حداکثر بزرگی در مؤلفه قائم نسبت به مؤلفه افقی می‌باشند.

مؤلفه قائم زمین‌لرزه‌های ثبت شده در مناطق دور از گسل عموماً دارای شتاب حداکثر کمتری نسبت به مؤلفه افقی خود می‌باشند و عموماً در ساختمان‌های با دهانه‌های معمول لحاظ

قابل توجهی در پاسخ سازه جداسازی شده دارد [۵]. یکی دیگر از پارامترهای مهم در پاسخ جداساز نسبت PGA مؤلفه قائم به PGA مؤلفه افقی است، با افزایش این نسبت تغییرات نیروی محوری در جداگرها کاملاً قابل ملاحظه بوده و مقدار تغییرات نیروی محوری برای جداگرهایی که دارای سختی قائم بیشتری هستند بزرگ تر می باشد [۶]. زمانی که پیودر سازه کم باشد، خطای ناشی از لحاظ نکردن مؤلفه قائم زلزله در تعیین برش پایه حداکثر سازه جداسازی شده افزایش می یابد [۷]. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی روی جداسازهای الاستومری و سربی نشان می دهد سختی قائم و جانبی به یکدیگر هم بسته هستند و سختی قائم با افزایش تغییر مکان جانبی کاهش می یابد و کاهش سختی برای جداگرهایی که دارای ضریب شکل کوچک تری هستند بیشتر است. در ضمن مدل های معمول غیر خطی، همبستگی نیروی محوری با سختی جانبی را لحاظ نمی کنند [۸]. برای کاهش اثرات مؤلفه قائم در ساختمان های جداسازی شده، استفاده توأم از میراگر و ایجاد انعطاف پذیری بیشتر در راستای قائم در ستون های خارجی در ارتفاع طبقات ساختمان جداسازی شده به طور عمده ای می تواند تقاضای شتاب قائم در طبقات بالاتر از جداسازها را نسبت به سیستم های جداسازی معمول کاهش دهد [۹].

در این تحقیق رفتار دینامیکی پل صدر که عرشه آن توسط جداگرهای الاستومری با میرایی کم از روی پایه ها جداسازی شده است تحت اثر مؤلفه قائم و افقی زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا یک دسته شتاب نگاشت واقع در حوزه نزدیک انتخاب شده اند. سپس برای این پل تحت اثر مؤلفه های افقی و قائم شتاب نگاشت های انتخابی نزدیک گسل تحلیل دینامیکی غیر خطی انجام شده است. در این مطالعه اثر مؤلفه قائم از دو جنبه مورد بررسی قرار گرفته است، جنبه اول شامل تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر پاسخ اعضای پل نظیر نیروی محوری پایه ها، شتاب عرشه، نیروی برشی و لنگر خمشی عرشه است؛ و جنبه دوم تأثیر افزایش نیروی محوری ناشی از مؤلفه قائم بر رفتار دینامیکی جداسازهای لرزه ای است. برای این منظور پاسخ دینامیکی جداسازها در حالت با و بدون

مؤلفه قائم زلزله در حوزه نزدیک در پیوندهای کوتاه غالب هستند و ممکن است بسیار شدیدتر از مؤلفه افقی باشند. در ستون های ساختمان یا پایه های پل در طول رخداد زلزله شتاب روبه بالای مؤلفه قائم زلزله از یک طرف باعث کاهش نیروی فشاری در پایه ها می شود [۱] و از طرف دیگر شتاب رو به پایین مؤلفه قائم زلزله باعث افزایش نیروی محوری ستون ها از ۲۰ الی ۸۰ درصد نسبت به حالتی می گردد که تنها مؤلفه افقی اعمال می شود. مشخصات خاک نیز بر پاسخ روسازه تحت مؤلفه قائم تأثیرگذار است. زمانی که روسازه بر روی خاک سخت قرار گیرد در اثر مؤلفه قائم نیروی محوری بزرگ تری در ستون های ساختمان به وجود می آید. همچنین تغییر مکان قائم وسط دهانه تیرها ناشی از مؤلفه قائم زلزله برای ساختمان های واقع بر روی خاک های نرم کمتر از ساختمان های واقع بر روی خاک های سخت می باشد [۲]. نیروی قائم زلزله باعث ازدیاد لنگر خمشی حداکثر و نیروی برشی حداکثر پایه های پل به ترتیب به میزان ۱۰٪ و ۱۵٪ می شود. عرض ترک ها به واسطه مؤلفه قائم حدود ۶۰ درصد بیشتر شده و الگوی ترک ها از ترک خمشی به ترک برشی قطری تغییر می یابد [۳]. مقادیر حداکثر شتاب مؤلفه قائم و افقی لزوماً در یک لحظه اتفاق نمی افتد ولی در برخی موارد ممکن است مقادیر حداکثر آنها به طور هم زمان یا نزدیک به هم رخ دهد. مطالعات روی اثر هم زمانی حداکثر شتاب مؤلفه قائم و افقی روی پل های کابلی انجام شده و مشاهده شد که این موضوع لزوماً باعث افزایش میزان تغییر مکان جانبی عرشه نمی شود. همچنین مؤلفه قائم باعث افزایش تقاضای نیروی محوری در کابل های پل می شود و هم زمانی حداکثر شتاب مؤلفه قائم و افقی اثر کمی روی مقدار نیروی محوری کابل ها دارد [۴].

اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی ساختمان ها و پل های جداسازی شده توسط برخی از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. با مقایسه رفتار سازه ای پل های جداسازی شده و جداسازی نشده نتیجه می شود که انعطاف پذیری قائم در پل های جداسازی شده نباید در طراحی چشم پوشی شود و استفاده از مشخصات واقعی جداسازها تأثیر

است که در این مطالعه از دهانه‌های ۴۴ متری استفاده شده است. عرشه پل در هر دهانه به صورت مجزا از دهانه‌های مجاور اجرا شده است ولی دال رویه آن در هر چهار دهانه متوالی به صورت پیوسته اجرا شده است و در انتهای هر چهار دهانه یک درز انبساط قرار دارد. در شکل (۲-الف) نمای طولی از یک مازول ۴ دهانه‌ای از پل مشاهده می‌شود. سر پایه و عرشه پل از نوع بتن پیش ساخته پیش تنیده می‌باشد. عرشه شامل دو صندوقه بتنی کنار هم با عرض ۱۰/۸۵ متر و ارتفاع ۲/۵ متر می‌باشد که به فاصله یک متری در لبه‌ها از هم قرار گرفته‌اند [۱۰]. مقطع سر پایه دارای عرضی برابر ۴/۹۰ متر و ارتفاع آن به طور متوسط حدود ۳ متر می‌باشد. هر صندوقه عرشه پل در محل پایه‌ها بر روی چهار جداساز لاستیکی با میرایی کم قرار داده شده است. در شکل (۲-ب) مقطع عرضی از پل و نحوه قرارگیری عرشه روی سر پایه مشاهده می‌شود. الاستومرهای به کار رفته دارای قطری برابر ۷۵ سانتی‌متر و ضخامت کل (شامل ارتفاع لاستیک‌ها و ورق‌های فولادی) ۳۱ سانتی‌متر می‌باشند. بارهای جانبی زلزله وارد بر عرشه از طریق جداگرهای الاستومری به پایه‌های پل منتقل می‌شود. قسمت عمده‌ای از سیستم زیرسازه این پل شامل پایه‌های تک بتنی با مقطع تقریباً دایره‌ای به قطر ۳/۲ متر و دارای ارتفاعی عمدتاً حدود ۷ الی ۸ متر می‌باشد. پلان سر پایه در شکل (۲-ج) نشان داده شده است. بتن به کار رفته در ساخت پل از نوع خود متراکم بوده و مقاومت فشاری بتن به کار رفته در عرشه، پایه‌های بتنی و سر ستون پل به ترتیب برابر ۴۵۰، ۴۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.



اثرات همبستگی سختی قائم و افقی برای سه نوع بارگذاری متفاوت شامل اعمال جابه‌جایی یک طرفه، بارگذاری سیکلیک (رفت و برگشتی) و بارهای ناشی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های حوزه نزدیک انتخابی مورد بررسی قرار گرفت. افزایش نیروی محوری در جداساز ناشی از اعمال مؤلفه قائم زلزله، احتمال کماتش در جداساز را افزایش می‌دهد، لذا ظرفیت کماتشی جداگرها حاصل از مدل‌های تحلیلی (با قابلیت انجام تحلیل‌های کماتشی) با روابط معمول برای محاسبه ظرفیت کماتشی مورد مقایسه قرار گرفته است. برای کاهش اثرات مؤلفه قائم در حوزه نزدیک استفاده از جداسازی سه‌بعدی از طریق کاهش سختی قائم سیستم جداسازی معمول پیشنهاد شده است و مؤثر واقع شدن این نوع جداسازی در کاهش پاسخ سیستم نظیر شتاب وسط دهانه، نیروی فشاری پایه‌ها، برش و خمش عرشه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها روند تغییرات پاسخ پل در برابر مقادیر مختلف سختی قائم جداسازها مورد بررسی قرار گرفته است.

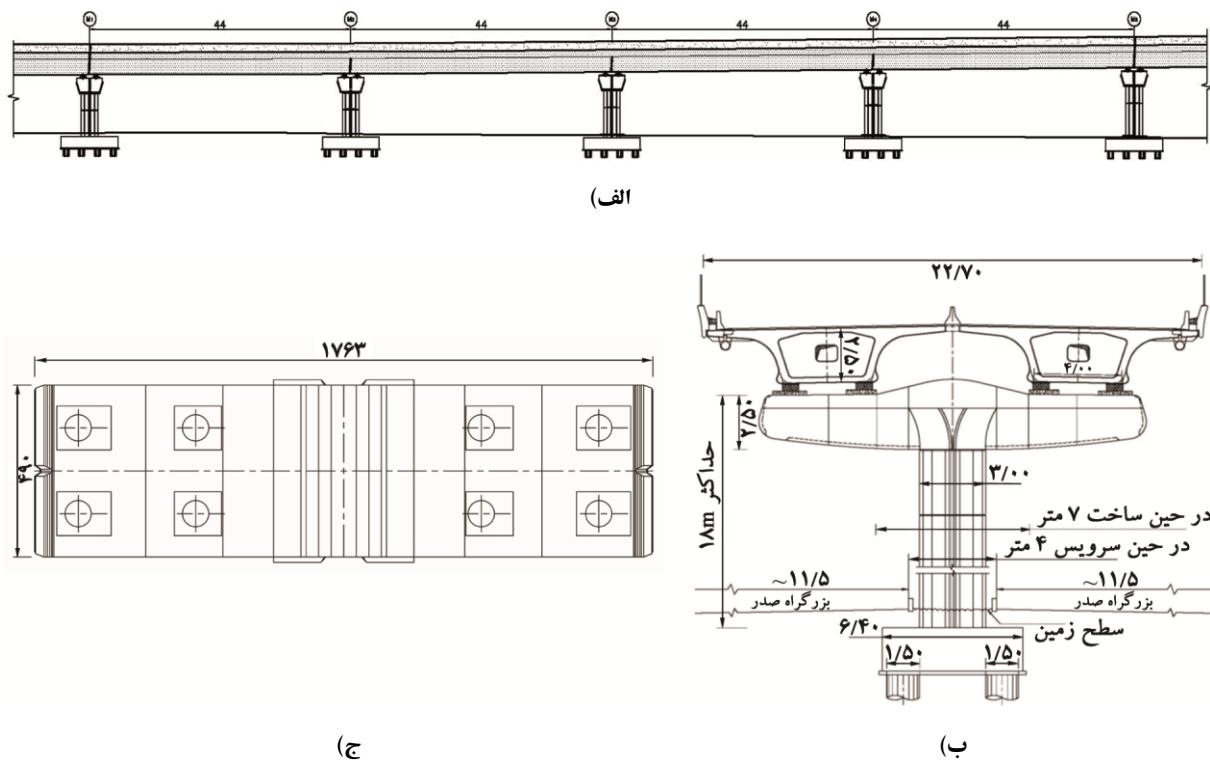
۲- معرفی و مدل‌سازی پل

۲-۱- مشخصات پل

در این مطالعه از مدل پل طبقاتی صدر واقع در شمال شرق شهر تهران استفاده شده است که اولین پل طبقاتی کشور می‌باشد. طول کل این پل ۶/۶ کیلومتر است که حدود ۵ کیلومتر آن را پل اصلی تشکیل می‌دهد و مابقی آن شامل رمپ‌های دسترسی است. تصاویری از این پل در شکل (۱) ملاحظه می‌شود. این پل دارای دهانه‌های ۴۷، ۵۰، ۴۴ و ۴۱ متری



شکل (۱): تصاویری از پل صدر.

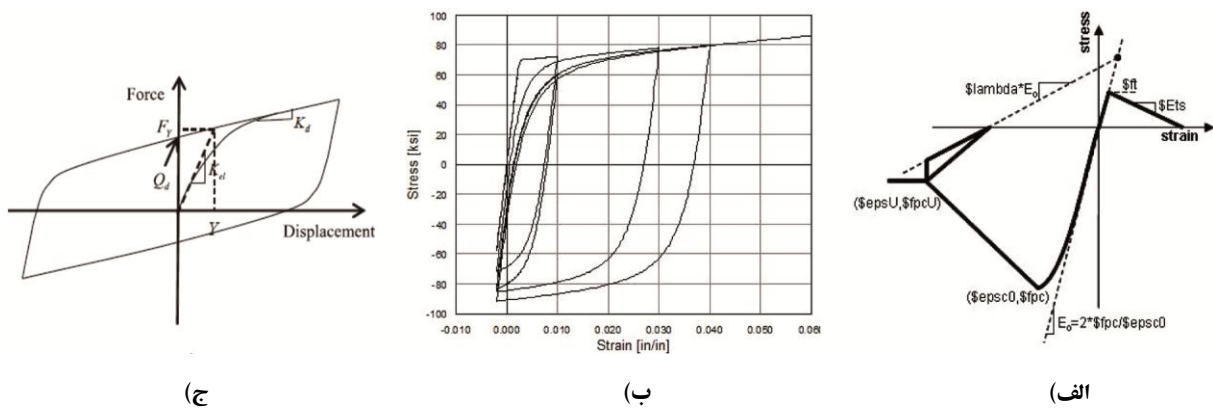


شکل (۲): جزئیات پل مورد مطالعه: الف) نمای طولی پل، ب) مقطع عرضی پل، ج) نمای از بالای سر پایه.

۲-۲- مدل سازه‌ای پل

برای مدل‌سازی رفتار تک‌محوره مصالح بتن محصور در هسته بتنی و بتن غیر محصور واقع در پوشش بتنی از مدل Kent-Scott-Park استفاده شده که در OpenSees با مصالح Concrete02 تعریف شده است. مدل مزبور دارای رفتار خطی در ناحیه نزولی منحنی تنش-کرنش فشاری و رفتار خطی در مقاومت کششی و نرم‌شدگی خطی در کشش می‌باشد. مدل رفتاری بتن در شکل (۳-الف) نشان داده شده است.

مدل‌سازی سه‌بعدی پل توسط نرم‌افزار OpenSees انجام شده [۱۱] و توسط نرم‌افزار Seismostruct صحت‌سنجی شده است [۱۲]. برای انجام تحلیل غیرخطی اعضا از پلاستیسیتیه گسترده با مقاطع فایبر در طول قطعات استفاده شده است. با توجه به استفاده از جداگرهای لرزه‌ای عرشه پل با رفتار خطی در نظر گرفته شده است و از مدل‌سازی پیش‌تنیدگی عرشه صرف‌نظر شده است.



شکل (۳): مدل رفتاری نیرو-تغییر مکان: الف) بتن پایه‌ها [۱۳]، ب) آرماتورها [۱۳]، ج) تیپ جداگرها [۱۴].

لازم به ذکر است در سازه‌های جداسازی شده، به‌جای استفاده از میرایی رایلی از میرایی متناسب با سختی در مدل‌سازی استفاده می‌شود [۱۵-۱۶].

در این تحقیق از اثر $P.\Delta$ و اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است و تکیه‌گاه همه پایه‌ها به صورت گیردار مدل شده‌اند. از آنجایی که هدف بررسی لرزه‌ای پل بوده و همچنین برای جلوگیری از پیچیدگی مدل، از اعمال بار زنده کامیون ۴۰ تنی به صورت متحرک صرف نظر شده است و تنها بار گسترده یکنواخت با شدت ۱/۵ تن بر متر برای هر خط عبور که در بارگذاری نوع اول پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اعمال شده است.

۳- مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

زمانی که جهت پاره شدن گسل به سمت سایت مورد نظر باشد و سرعت توزیع پاره شدن گسل به سرعت موج برشی نزدیک باشد، پالس‌های سرعت با پیروید بلند در ابتدای رکورد زلزله مشاهده می‌شود که به این پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده گفته می‌شود [۱۷] که شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در نزدیک گسل دارای چنین خصوصیتی هستند. از دیگر مشخصه‌های زلزله‌های حوزه نزدیک، داشتن PGA بزرگ با پیرودهای کم در مؤلفه قائم زلزله نسبت به مؤلفه افقی می‌باشد. در این تحقیق به منظور مطالعه اثر مؤلفه قائم زلزله، تعداد ۸ رکورد زلزله که همگی در نزدیک گسل (در فاصله‌ای کمتر از ۴ کیلومتر) ثبت شده‌اند و دارای بزرگای بیشتر از ۶/۵ هستند انتخاب شده‌اند. مشخصات زلزله‌های انتخابی در جدول (۲) آورده شده است.

آرماچورهای موجود در مقطع بتنی پایه‌ها و عرشه پل با استفاده از مدل مصالح فولادی Giuffre-Menegotto-Pinto با سخت‌شدگی Isotropic صورت گرفته که در OpenSees با مصالح Steel02 تعریف شده است. مدل رفتاری آرماچورها در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. برای مدل‌سازی جداگرهای لرزه‌ای با میرایی کم در مدل‌های سه‌بعدی، المان Elastomeric X مورد استفاده قرار گرفته است. المان مزبور مدل گسترش یافته تکیه‌گاه‌های الاستومری Bouc-Wen می‌باشد. در مدل‌های سه‌بعدی تکیه‌گاه‌های الاستومری به صورت دو نقطه با ۱۲ درجه آزادی لحاظ می‌شود. مدل رفتاری جداگرهای لرزه‌ای در شکل (۳-ج) آورده شده است.

سختی قائم K_v و سختی ثانویه افقی K_h جداگرهای لاستیکی از روابط (۱) تعیین می‌شود. در این روابط E_c مدول الاستیسیته قائم لاستیک، G مدول برشی لاستیک، A_b مساحت مقطع عرضی لاستیک جداگر، T_r ضخامت کل لاستیک جداگر، K مدول حجمی، S ضریب شکل، ϕ قطر جداگر دایره‌ای و t_r ضخامت هر لایه لاستیک می‌باشد.

$$K_h = \frac{GA_b}{T_r}; E_c = 6GS^2 \left[\frac{1}{1 + \frac{6GS^2}{K}} \right]; S = \frac{\phi}{4t_r} \quad (1)$$

$$K_v = \frac{E_c A_b}{T_r}$$

جداگرهای لاستیکی با میرایی کم دارای میرایی در حدود ۲ الی ۳ درصد بوده و دارای رفتار عمدتاً خطی هستند و از استهلاک انرژی کمی نسبت به سایر جداگرهای لرزه‌ای برخوردار می‌باشند. مشخصات جداگر به کار رفته در پل با استفاده از روابط (۱) تعیین شده و در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات جداگرهای به کار رفته در پل.

	A_b (cm^2)	t_r (cm)	T_r (cm)	G ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	K ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	S	E_c ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	K_v ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}}$)	K_h ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}}$)
750x310 ϕ	4417.8	1.5	23	7	20000	12.5	1532.8	138198	1344.5

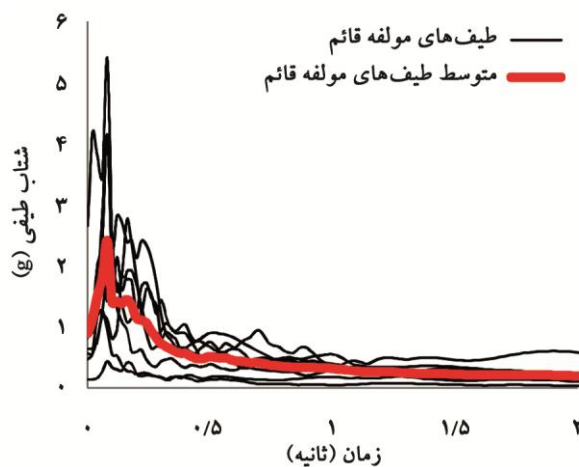
جدول (۲): مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک.

EQ Event	M_w	Station Name	R_{jb} (km)	PGA_V (g)	$\frac{PGA_V}{PGA_H}$
Imperial Valley	6.53	Agrarias	0	0.472	1.64
Kobe	6.9	Port Island (0 m)	3.31	0.567	1.63
Landers	7.28	Lucerne	2.19	0.823	1.044
Loma Prieta-1	6.93	LGPC	0	0.896	1.47
Loma Prieta-2	6.93	Los Gatos – Lexington Dam	3.22	0.143	0.32
Nahanni	6.76	Nahanni_ Canada	2.48	2.28	1.9
Northridge	6.69	Rinaldi Receiving Sta	0	0.958	1.096
Tabas	7.35	Tabas	1.79	0.641	0.744

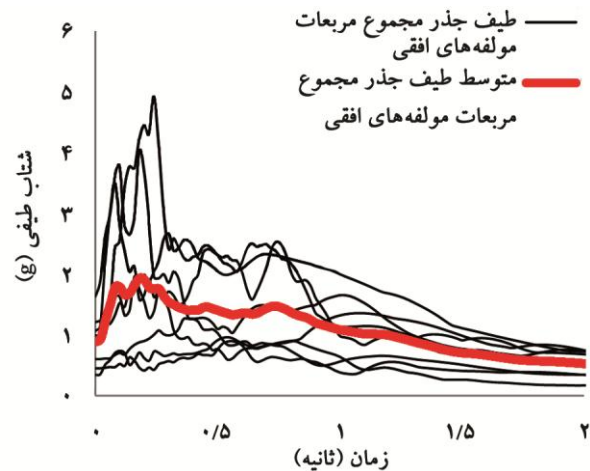
طیف‌های جذر مجموع مربعات مؤلفه‌های افقی به همراه متوسط آنها و در شکل (۴-ب) طیف مؤلفه قائم به همراه متوسط آنها برای میرایی ۵ درصد آورده شده است. همان‌طور که از مقایسه شکل‌های (۴-الف و ب) مشاهده می‌شود مقادیر حداکثر طیف مؤلفه قائم در پریود کوتاه قرار دارند و در زلزله‌های حوزه نزدیک حداکثر متوسط طیف شتاب مؤلفه قائم در اکثر موارد بیشتر از حداکثر متوسط طیف شتاب مؤلفه افقی می‌باشند.

شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های انتخابی همگی از پایگاه داده‌های NGA WEST2 برداشت شده است [۱۸]. زلزله‌های انتخابی دارای نسبت‌های متفاوت PGA_V/PGA_H هستند که در آن PGA_V حداکثر شتاب قائم و PGA_H حداکثر شتاب افقی زلزله می‌باشند. این زلزله‌ها دارای مقدار شتاب قائم از $g/0.143$ الی $g/2.28$ هستند.

برای مقایسه طیف‌های مؤلفه قائم و افقی، در شکل (۴-الف)



(ب)

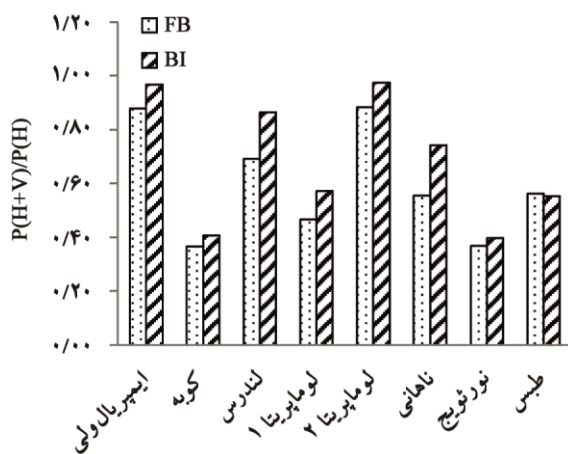


(الف)

شکل (۴): طیف پاسخ شتاب زلزله‌های حوزه نزدیک به همراه متوسط آنها: (الف) طیف پاسخ مؤلفه افقی، (ب) طیف پاسخ مؤلفه قائم.

نمایش داده می‌شود.

نتایج تحلیل در حالت $H+V$ و H نظیر نسبت حداکثر نیروی محوری فشاری پایه‌ها در شکل (۵-الف)، نسبت حداقل نیروی محوری فشاری در پایه‌ها در شکل (۵-ب)، نسبت حداکثر برش و لنگر خمشی در مقطع عرضی عرشه در شکل (۶-الف) و میزان افزایش شتاب در گره وسط دهانه عرشه در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌های مذکور مشخص است مؤلفه قائم زلزله باعث افزایش نسبت حداکثر نیروی محوری، کاهش حداقل نیروی محوری در پایه‌های پل، افزایش نسبت حداکثر میزان لنگر خمشی و نیروی برشی در مقطع عرضی عرشه و افزایش مقدار شتاب عرشه پل در راستای قائم شده است. مقادیر بیشترین نسبت حداکثر و کمترین نسبت حداقل نیروی محوری، بیشترین نسبت حداکثر نیروی برشی و لنگر خمشی در مقطع عرضی عرشه و بیشترین مقدار افزایش به همراه متوسط افزایش آنها در حالت $H+V$ به H در جدول (۳) آورده شده است. در این جدول بیشترین نسبت حداکثر نیروی محوری پایه‌ها، لنگر خمشی و حداکثر نیروی برشی مقطع عرضی عرشه بیش از دو برابر افزایش دارد (مربوط به زلزله نورث‌ریج)؛ بنابراین افزایش نیروهای فشاری پایه‌ها قابل توجه بوده و ممکن است باعث ناپایداری آنها شده و نباید از آن چشم‌پوشی نمود.

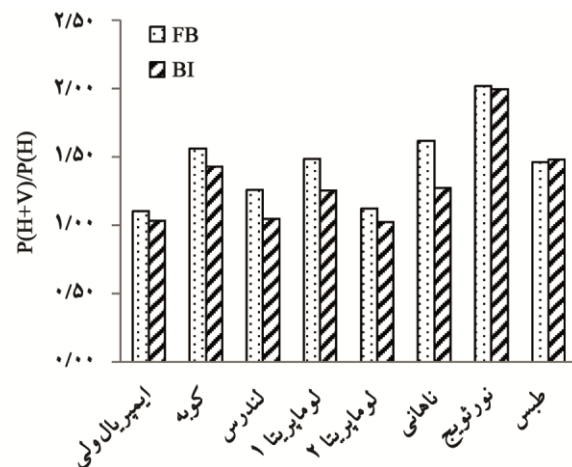


(ب)

مقیاس شتاب نگاشت‌ها با استفاده از الگوریتم تبدیل موجک و توسط نرم‌افزار SeismoMatch به روش انطباق به طیف طراحی (استاندارد ۲۸۰۰) انجام شده است [۱۹-۲۰]. مطابق آیین‌نامه ASCE-07 برای سازه‌های جداسازی شده به جای انطباق در محدوده پریودی T_D ۰/۲ الی T_M ۱/۵، انطباق به طیف طرح در محدوده پریودی T_D ۰/۵ الی T_M ۱/۲۵ انجام می‌شود که در آن T_D پریود سازه جداسازی شده در تغییر مکان طراحی و T_M پریود سازه جداسازی شده در تغییر مکان حداکثر می‌باشد [۲۱]. از طرفی با توجه به اینکه مؤلفه قائم در محدوده پریودی کوتاه غالب است عمل انطباق برای مؤلفه قائم در محدوده پریودی کوتاه انجام شده است [۲۲-۲۴].

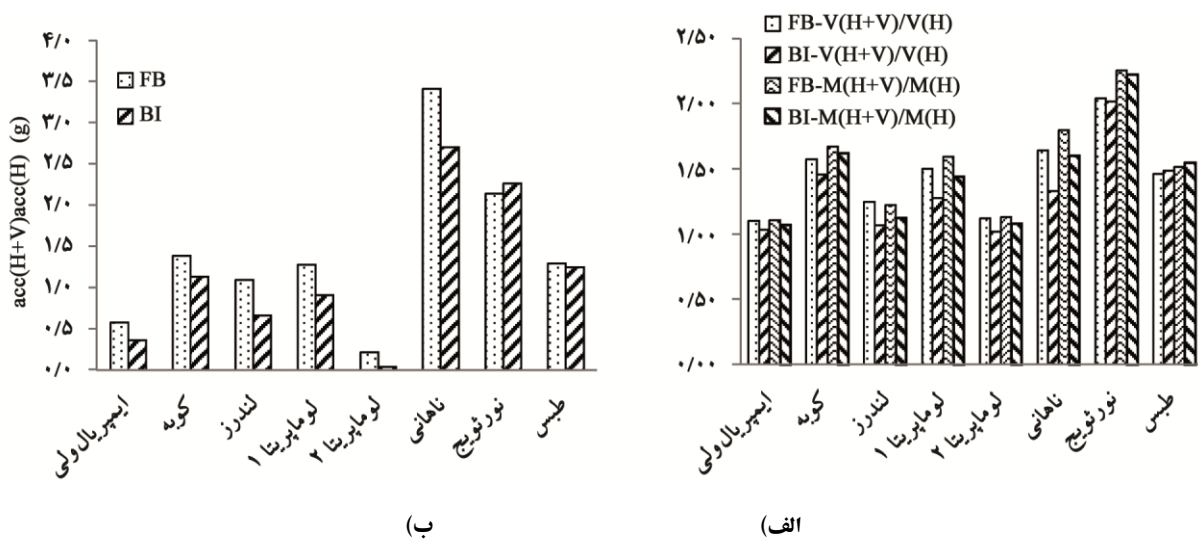
۴- بررسی اثر مؤلفه قائم بر اعضای پل

در این بخش اثر مؤلفه قائم زلزله حوزه نزدیک بر اعضای پل نظیر پایه‌ها و عرشه بر روی پل جداسازی شده که با نماد BI و با فرض پل جداسازی نشده که با نماد FB نام‌گذاری شده است مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور تحلیل‌ها در دو حالت بارگذاری انجام شده است. حالت اول، شامل اعمال تنها مؤلفه‌های افقی که از این پس با نماد H و حالت دوم، شامل اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم که از این پس با نماد $H+V$



(الف)

شکل (۵): نسبت نیروی محوری فشاری $H+V$ به H پایه‌ها: (الف) نسبت حداکثر نیروی محوری پایه‌ها، (ب) نسبت حداقل نیروی محوری پایه‌ها.



شکل (۶): (الف) نسبت برش و لنگر خمشی در مقطع عرضی عرشه در حالت H+V به H (ب) میزان افزایش شتاب قائم وسط دهانه عرشه در حالت H+V به H.

جدول (۳): مقادیر بیشترین نسبت حداکثر نیرو و متوسط آنها در پایه‌ها و میزان افزایش شتاب عرشه در حالت H+V به H.

BI	FB	H+V/H	BI	FB	H+V/H
۲/۰۲	۲/۰۵	بیشترین نسبت حداکثر برش	۱/۹۹	۲/۰۲	بیشترین نسبت حداکثر نیروی محوری
۱/۳۴	۱/۴۶	متوسط نسبت‌های حداکثر برش	۰/۴	۰/۳۷	کمترین نسبت حداقل نیروی محوری
۲/۲۳	۲/۲۶	بیشترین نسبت حداکثر خمش	۱/۳۲	۱/۴۵	متوسط نسبت حداکثر نیروی محوری
۱/۴۷	۱/۵۴	متوسط نسبت‌های حداکثر خمش	۰/۶۹	۰/۶	متوسط نسبت حداقل نیروی محوری
۱/۱۶	۱/۴۳	متوسط مقدار افزایش شتاب (g)	۲/۷	۳/۴۲	حداکثر مقدار افزایش شتاب (g)

شتاب‌نگاشت‌ها و محتوای فرکانسی آنها بستگی داشته و برای برخی از شتاب‌نگاشت‌ها به دلیل نزدیکی فرکانس غالب قائم آنها با فرکانس قائم سیستم جداسازی باعث افزایش پاسخ آنها شده است.

۵- بررسی اثر مؤلفه قائم بر رفتار جداسازها

مشخصات دینامیکی جداسازها در اثر جابه‌جایی جانبی و تغییرات نیروی محوری دچار تغییرات می‌شود. افزایش نیروی محوری باعث افزایش جابه‌جایی جانبی و کاهش ظرفیت کمانشی P_{cr} می‌شود. در ضمن با افزایش جابه‌جایی جانبی، جابه‌جایی قائم نیز افزایش می‌یابد [۸]. به منظور بررسی رفتار دینامیکی جداسازها تحت اثر ازدیاد نیروی محوری ناشی از

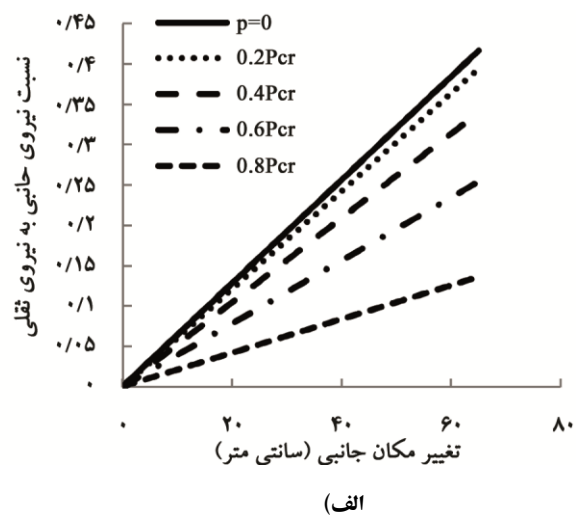
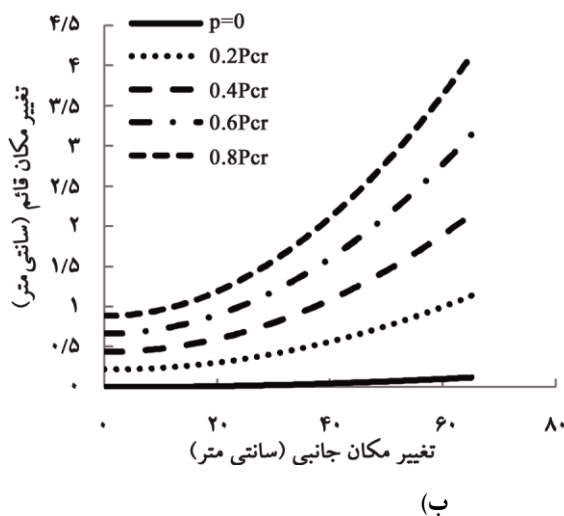
با توجه به سختی بالای جداسازها در راستای قائم اختلاف قابل توجهی بین نتایج سازه جداسازی شده و جداسازی نشده وجود ندارد، ولی در کل مقادیر پاسخ در سازه‌های جداسازی نشده بیشتر از سازه‌های جداسازی شده است. از آنجایی که ظرفیت برشی پایه‌های بتنی با نیروی فشاری وارد بر آنها نسبت مستقیم دارد، در اثر مؤلفه قائم زلزله کاهش در لحظاتی نیروی محوری پایه‌ها باعث کاهش ظرفیت برشی پایه‌های پل می‌شود که باید در طراحی برشی آنها لحاظ شود [۲۵]. بیشترین کاهش نیروی محوری مربوط به زلزله‌های کوبه و نورث ریج بوده که حدود ۶۰ درصد کاهش در نیروهای فشاری پایه‌ها را در پی دارد. مقادیر پاسخ (شامل نیروی محوری پایه‌ها، شتاب، برش و لنگر خمشی عرشه) پل به مقدار شتاب قائم هر یک از

راستای افقی (Horizontal Stiffness Variation) HSV و تغییرات سختی در راستای قائم Vertical Stiffness (Variation) VSV در اثر جابه‌جایی جانبی و بار محوری را دارا می‌باشد و هر دو مؤلفه قائم و افقی به آن اعمال شده است و با نماد $H+V$ (VSV, HSV) نشان داده شده‌اند. جداساز به کار رفته در پل برای سه نوع بارگذاری متفاوت شامل اعمال جابه‌جایی جانبی یک طرفه، بارگذاری سیکلیک و بارگذاری لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

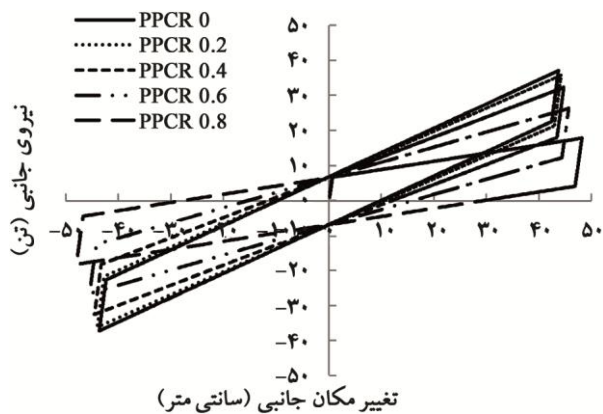
۵-۱- رفتار جداسازها در جابه‌جایی جانبی

برای بررسی رفتار جداسازها در برابر تغییر مکان جانبی از مدل $H+V$ (VSV, HSV) استفاده شده است و در مقادیر مختلف نیروی محوری فشاری، گره فوقانی با گام‌های متوالی در راستای افقی برای مقادیر مختلف از نیرو فشاری $(P=0, 0.2P_{cr}, 0.4P_{cr}, 0.6P_{cr}, 0.8P_{cr})$ نمودار نسبت نیروی جانبی به نیروی فشاری جداساز ناشی از بارهای ثقلی در برابر تغییر مکان جانبی جداساز مورد بررسی به دست آمد و در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با نزدیک شدن نیروی محوری فشاری جداساز به ظرفیت کمانشی جداساز، سختی جانبی جداسازها کاهش می‌یابد.

مؤلفه قائم زلزله حوزه نزدیک، مدلی ساده که در آن دو نقطه بالا و پایین جداساز به وسیله ۶ فنر که بیان‌کننده رفتار دینامیکی جداساز در شش راستای اصلی تکیه‌گاه است تهیه شد. این فنرها شامل دو فنر برشی (در راستای جانبی جداساز)، یک فنر محوری، دو فنر دورانی و یک فنر پیچشی است. فنرهای برشی دارای رفتار دو خطی (شامل سختی اولیه، سختی ثانویه و مقاومت تسلیم) بوده و به صورت مستقیم به هم هم‌بسته هستند. فنرهای قائم و افقی به طور غیر مستقیم با استفاده از روابط دینامیکی ارائه شده توسط کوه و کلی [۲۶] به یکدیگر هم‌بسته شده‌اند. فنرهای دورانی و پیچشی نیز به صورت خطی و غیر هم‌بسته در نظر گرفته شده‌اند [۱۴]. مدل مورد نظر قابلیت در نظر گرفتن تغییرات ظرفیت بار کمانشی در جابه‌جایی جانبی، تغییرات سختی برشی افقی با نیروی محوری جداساز و تغییرات سختی محوری با جابه‌جایی جانبی را دارا می‌باشد (شکل ۱۰-ب). در این بخش از مطالعه سه مدل مجزا تهیه شد. مدل اول تنها مؤلفه افقی به جداساز اعمال شده است و در مدل دوم مؤلفه قائم و افقی به طور هم‌زمان به جداساز اعمال شده است که به ترتیب با نماد $H+V$ و H نمایش داده شده‌اند. در دو مدل مذکور همبستگی فنرهای برشی و فنر قائم جداساز لحاظ نشده است. مدل سوم مدلی است که قابلیت لحاظ نمودن تغییرات سختی در



شکل (۷): الف) نمودار نسبت نیروی جانبی به نیروی ثقلی در برابر جابه‌جایی جانبی جداساز، ب) نمودار تغییرات جابه‌جایی افقی در برابر جابه‌جایی قائم جداسازها.



شکل (۸): منحنی چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان جانبی جداسازهای لرزه‌ای تحت بارهای سیکلیک.

محوری و جابه‌جایی جانبی لحاظ نشود در نظر گرفتن مؤلفه قائم تأثیر قابل توجهی در پاسخ جانبی ایجاد نکرده است و نتایج مدل $H+V$ بر هم منطبق هستند؛ ولی مؤلفه قائم زلزله در مدل $H+V$ (VSV, HSV) در شکل (۹-الف) افزایش جابه‌جایی جانبی و اختلاف فاز در جابه‌جایی جانبی جداساز ایجاد می‌کند. مطابق شکل (۹-ب) مؤلفه قائم زلزله در مدل $H+V$ (VSV, HSV) هم باعث کاهش ظرفیت جانبی و هم باعث کاهش سختی جانبی در منحنی هیستریزس جانبی در مقایسه با مدل H و $H+V$ می‌شود. در شکل (۹-پ) زمانی که مؤلفه قائم زلزله به تنهایی اعمال می‌شود (مدل H)، نیروی محوری فقط ناشی از بارهای ثقیلی است و تقریباً ثابت است. در ضمن در نیروها و جابه‌جایی‌های جانبی کوچک تفاوت چندانی بین مدل $H+V$ و $H+V$ (VSV, HSV) وجود ندارد. در حالی که در طول زلزله با افزایش نیرو و جابه‌جایی جانبی، تغییر مکان قائم در مدل $H+V$ (VSV, HSV) افزایش قابل توجهی نسبت به مدل $H+V$ دارد. در شکل (۹-ت) نیروی محوری و جابه‌جایی قائم در مدل H مقدار ثابتی است در حالی که در حالت $H+V$ به دلیل اعمال مؤلفه قائم، جابه‌جایی محوری و نیروی محوری افزایش قابل توجهی دارد. علاوه بر آن رفتار خطی منحنی هیستریزس در مدل $H+V$ در راستای قائم به رفتار غیر خطی در مدل $H+V$ (VSV, HSV) تبدیل می‌شود. علاوه بر آن در مدل $H+V$ (VSV, HSV) جداساز، جابه‌جایی قائم افزایش یافته و سختی قائم و ظرفیت فشاری کاهش می‌یابد.

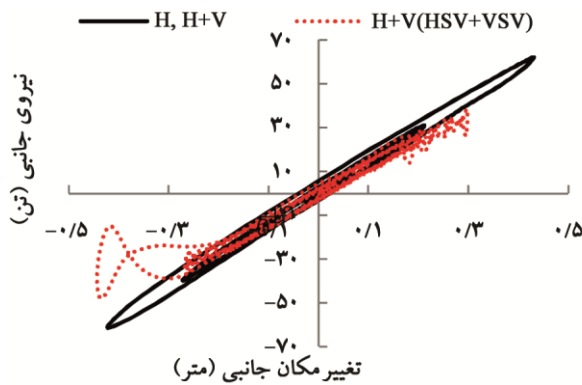
این کاهش سختی برای مقدار نیروی فشاری کوچک‌تر از P_{cr} تقریباً ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. نمودار جابه‌جایی افقی در برابر جابه‌جایی قائم جداسازها در شکل (۷-ب) تهیه شده است. با توجه به همبستگی معادلات تغییر مکان افقی و قائم، با افزایش تغییر مکان افقی جداسازها، تغییر مکان محوری جداساز نیز افزایش می‌یابد. این موضوع در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از حدود یک سوم جابه‌جایی حداکثر با نرخ بیشتری تغییر می‌کند. نکته دیگر آنکه برای یک تغییر مکان جانبی مشخص با افزایش نیروی محوری و نزدیک شدن نیروی محوری به ظرفیت کمانشی، جابه‌جایی قائم بزرگ‌تری ایجاد می‌شود.

۲-۵- رفتار جداساز در بارگذاری هارمونیک

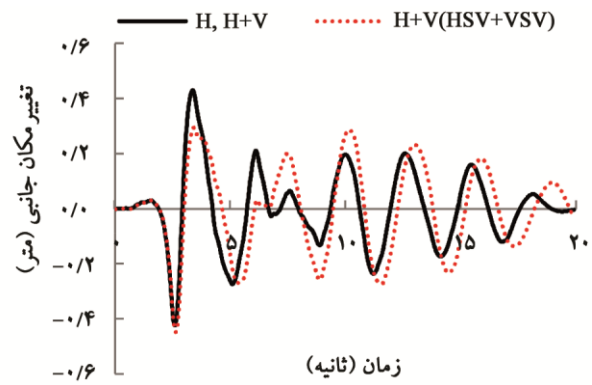
برای بررسی رفتار چرخه‌ای جداسازها، در ترازهای مختلف بار فشاری، بار هارمونیک سینوسی در راستای افقی در مدل $H+V$ (VSV, HSV) به سیستم جداسازی اعمال شد. برای این منظور جداساز تحت بار سینوسی با دامنه جابه‌جایی تغییر مکان زلزله طرح DBE (حدود ۴۳ سانتی‌متر) برای نسبت نیروی محوری به ظرفیت بحرانی کمانشی مختلف $(P=0, 0.2P_{cr}, 0.4P_{cr}, 0.6P_{cr}, 0.8P_{cr})$ قرار گرفته و منحنی چرخه‌ای آنها به دست آمده و در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت نیروی محوری فشاری به ظرفیت کمانشی جداسازها (PPcR) تحت بارهای سیکلیک جانبی هم سختی ثانویه و هم مقاومت جانبی جداسازها کاهش قابل توجهی می‌یابد.

۳-۵- رفتار جداساز در بارگذاری لرزه‌ای

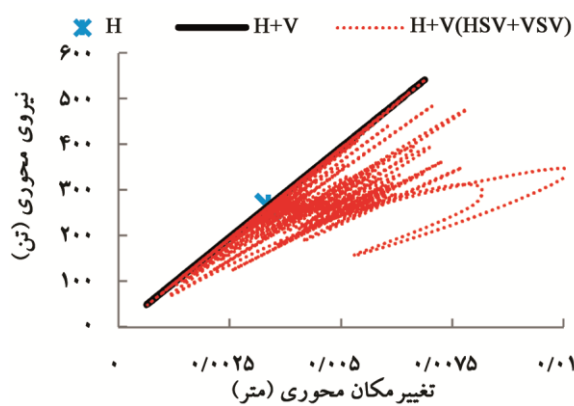
برای بررسی رفتار لرزه‌ای جداسازها به کار رفته در پل تحت اثر توأم شتاب‌نگاشت مؤلفه‌های افقی و قائم، هشت شتاب‌نگاشت انتخابی در حوزه نزدیک قرار گرفت. در شکل (۹) نتایج تحلیل زلزله نورتریج (به‌عنوان نمونه) برای هر یک از مدل‌ها آورده شده است. در شکل (۹-الف و ب) با مقایسه پاسخ مدل H و $H+V$ نشان می‌دهد در صورتی که همبستگی نیروی



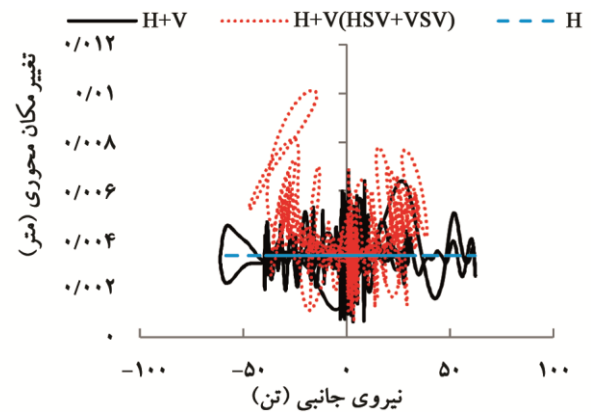
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

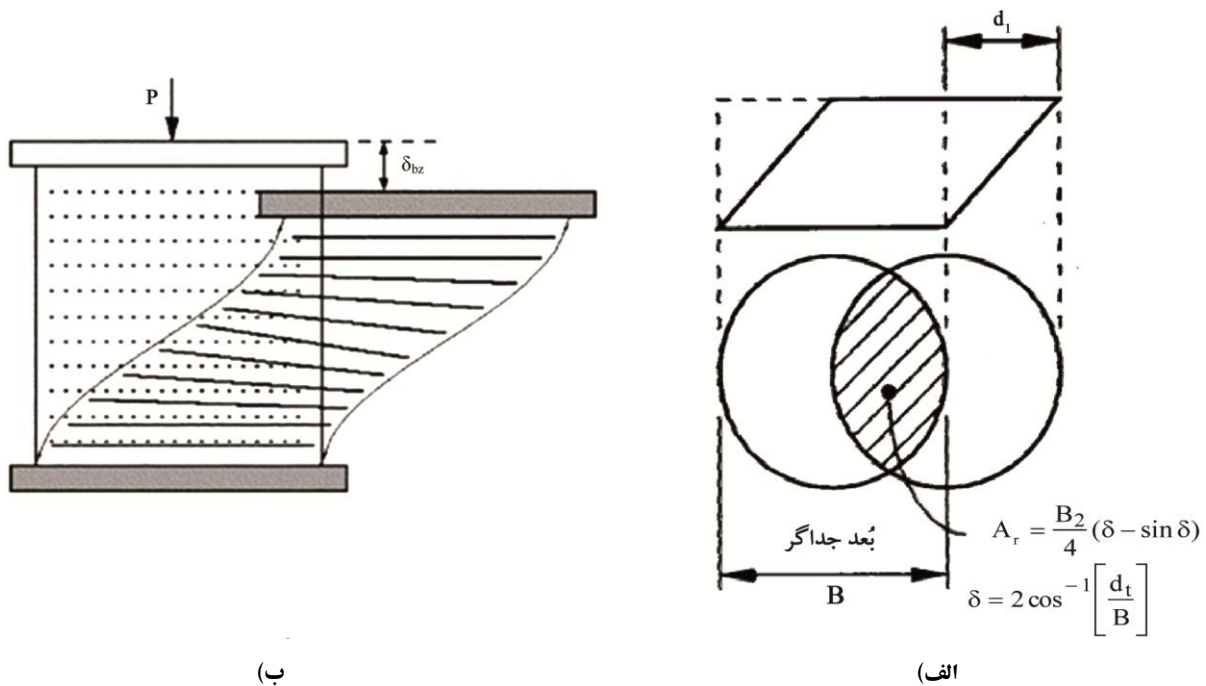
شکل (۹): رفتار لرزه‌ای جداساز در زلزله نورث ریج: (الف) نمودار جابه‌جایی جانبی- زمان، (ب) نمودار جابه‌جایی جانبی- نیروی جانبی، (پ) نمودار جابه‌جایی قائم- نیروی جانبی، (ت) نمودار جابه‌جایی قائم- نیروی محوری.

۴-۵- تحلیل کمانشی جداسازها

که در آن P_{DL} ، P_{SL} و P_{OT} به ترتیب نیروی محوری در جداساز در اثر بار مرده، بار زنده لرزه‌ای و نیروهای واژگونی می‌باشد. ضریب $1/2$ در بار مرده برای در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله است. $P'_{cr}(\Delta)$ ظرفیت بار بحرانی تکیه‌گاه در جابه‌جایی حداکثر زلزله است. هر چند که برای محاسبه $P'_{cr}(\Delta)$ رابطه صریحی در آیین‌نامه‌ها داده نشده است، ولی روش معمول برای محاسبه $P'_{cr}(\Delta)$ ، استفاده از حاصل ضرب یک ضریب کاهش در بار بحرانی $P'_{cr}(\Delta = 0)$ است. ضریب کاهش برابر نسبت مساحت همپوشانی ورق انتهایی بالا و پایین تکیه‌گاه (A_T) به مساحت کل لاستیک (A_{gross}) می‌باشد که در شکل (۱۰) - الف نشان داده شده است. $P'_{cr}(\Delta = 0)$ بار بحرانی تحت تغییر مکان جانبی صفر است [۲۸-۲۹]؛ بنابراین داریم:

همان‌طور که در بخش ۴ مشاهده شد، مؤلفه قائم زلزله باعث افزایش نیروی محوری در پایه‌ها و جداسازها می‌شود. این موضوع ممکن است پاسخ دینامیکی و پایداری جداسازها را به لحاظ کمانشی که یکی از پارامترهای اصلی در طراحی جداسازهاست را تحت تأثیر خود قرار دهد. در طراحی برای کمانش جداگر مطابق آیین‌نامه‌ها (نظیر AASHTO)، هر یک از تکیه‌گاه‌ها تحت بارهای سرویس و جابه‌جایی حداکثر زلزله، باید پایدار باقی بمانند. این موضوع از طریق برقراری رابطه (۲) محقق می‌شود [۲۷].

$$P'_{cr}(\Delta) \geq P_u = 1.2P_{DL} + P_{SL} + P_{OT} \quad (2)$$



شکل (۱۰): الف) تغییر شکل جانبی جداگر در اثر بارهای جانبی و نمایش سطح هم‌پوشانی ورق بالایی و پایینی [۲۹]؛ ب) جداساز در حالت تغییر شکل یافته در راستای جانبی و قائم [۸].

در این بخش هدف کنترل میزان صحت روابط معمول برای محاسبه ظرفیت کمانشی جداسازها با استفاده از مقایسه با مدل تحلیلی است. برای این منظور دو مدل از جداساز تهیه شده است که یکی دارای قابلیت انجام تحلیل‌های کمانشی است که با نماد $(H+V)(B)$ و دیگری فاقد قابلیت انجام تحلیل‌های کمانشی است که با نماد $H+V$ نام گذاری شده است. در هر دو مدل بار مرده و زنده بدون ضریب در نظر گرفته شده است و مؤلفه‌های افقی و قائم شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده به‌طور هم‌زمان به جداساز اعمال می‌شود. ظرفیت کمانشی جداساز P_{cr} در مدل $(H+V)(B)$ به صورت تحلیلی (با تشکیل تغییر شکل‌های بزرگ در جداساز در لحظه کمانش) توسط مدل تعیین می‌شود ولی ظرفیت کمانشی جداگر در مدل $H+V$ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. با بررسی نتایج تحلیل نتیجه‌گیری شد که چنانچه جداساز کمانش نماید تفاوتی در پاسخ بین مدل $H+V$ و $(H+V)(B)$ وجود ندارد.

از آنجایی که در اکثر زلزله‌ها، تغییر مکان حداکثر جانبی زلزله مؤلفه افقی به‌طور هم‌زمان با حداکثر شتاب مؤلفه قائم رخ نمی‌دهد،

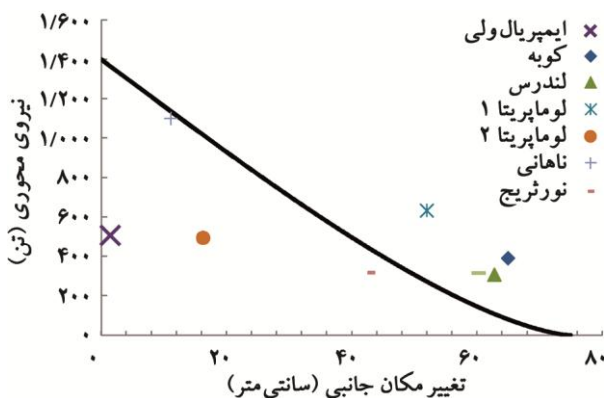
$$P'_{cr}(\Delta) = \frac{A_r}{A_{gross}} P_{cr}(\Delta = 0) \quad (3)$$

کوه و کلی [۲۶] برای تکیه‌گاه‌هایی با ضریب شکل S بزرگ‌تر از ۵، رابطه ساده شده (۴) را برای محاسبه $P_{cr}(\Delta = 0)$ ارائه نموده است.

$$P_{cr}(\Delta = 0) = \sqrt{P_E \times P_S} = \sqrt{P_E \times GA_s} \quad (4)$$

P_E نیروی کمانشی برابر $P_E = \pi^2 E_r I_s / h_b^2$ است و P_S نیروی برشی است که از ضرب G مدول برشی لاستیک در مساحت مقطع عرضی به دست می‌آید. E_r مدول خمشی (یا دورانی) که معادل مدول فشاری لاستیک تقسیم بر ۳ ($E_c / 3$) است [۲۹]. در ضمن $A_s = A_b (h / T_r)$ و $I_s = I (h / T_r)$ که در آن I ممان اینرسی خمشی، A_b سطح مقطع است. $I = \pi D^4 / 64$ و $T_b = D / 4$ شعاع ژیراسیون خمشی تکیه‌گاه با قطر D است. h_b ارتفاع کل جداگر که شامل مجموع ضخامت لایه‌های لاستیک و ورق‌های فولادی میانی آنهاست [۳۰].

دچار کمانش نمی‌شوند عملاً نتایج پاسخ مدل H+V و (H+V)(B) یکسان بوده و در جدول (۴) این مقایسه غیر قابل کاربرد (NA) درج شده است. در مورد چهار شتاب‌نگاشتی که سبب کمانش در جداساز می‌شوند، همان‌طور که در جدول (۴) ملاحظه می‌شود تمام مقادیر نسبت‌های ظرفیت کمانشی مدل (H+V)(B) به H+V کوچک‌تر از یک می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی آن است که روابط معمول محاسبه ظرفیت کمانشی جداساز (رابطه ۳)، ظرفیت کمانشی را دست‌بالا تخمین می‌زند (برای شتاب‌نگاشت‌های انتخابی به‌طور متوسط حدود ۱۸ درصد)، ولی در مورد تخمین جابه‌جایی جانبی کمانشی هر دو مدل تقریباً بر هم منطبق هستند. لذا توصیه می‌شود برای کنترل پایداری کمانشی جداساز برای دستیابی به نتایج واقعی‌تر از مدل‌های با قابلیت لحاظ نمودن تحلیل‌های کمانشی استفاده شود.



شکل (۱۱): نمودار ظرفیت کمانشی جداساز به همراه مقادیر نیروی فشاری و جابه‌جایی جانبی بحرانی برای شتاب‌نگاشت‌ها در مدل H+V.

بنابراین ممکن است در مدل H+V لزوماً لحظه تغییر مکان جانبی حداکثر، بحرانی‌ترین حالت برای کمانش جداگر نباشد. به منظور تعیین بحرانی‌ترین ترکیب نیروی محوری و جابه‌جایی جانبی جداساز، در هر لحظه از زمان زلزله برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها، مقدار P_{cr} متناظر جابه‌جایی جانبی همان لحظه تعیین شده و مقادیر P_{II}/P_{cr} برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها محاسبه شده و مقدار نیروی فشاری و جابه‌جایی مربوط به حداکثر این نسبت به عنوان بحرانی‌ترین وضعیت به لحاظ کمانشی در نظر گرفته شده است. منحنی ظرفیت کمانشی حاصل از رابطه (۳) که با خط منحنی توپر نشان داده شده است، به همراه بحرانی‌ترین ترکیب جابه‌جایی جانبی و نیروی محوری برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌های انتخابی در مدل H+V در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در چهار مورد از شتاب‌نگاشت‌ها نسبت P_{II}/P_{cr} بیش از ۱ است و در خارج از محدوده زیر منحنی قرار گرفته است که بیان‌کننده آن است که جداسازها دچار کمانش شده‌اند.

برای مقایسه نتایج ظرفیت کمانشی حاصل از رابطه (۳) و مدل تحلیلی با قابلیت تحلیل کمانشی، ابتدا در مدل H+V نیروی کمانشی و تغییر مکان جانبی در لحظه $P_{II}/P_{cr}=1$ از رابطه (۳) به دست می‌آید (تعیین می‌شود). سپس در مدل (H+V)(B) نیروی کمانشی و تغییر مکان جانبی مربوط به آن از نتایج تحلیل تعیین می‌شود. نیروی محوری کمانشی، جابه‌جایی جانبی و نسبت آنها برای شتاب‌نگاشت‌های مختلف، در حالات H+V و (H+V)(B) در جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد در مورد شتاب‌نگاشت‌هایی که در آنها جداسازها

جدول (۴): مقادیر نیروی محوری و تغییر مکان جانبی در لحظه کمانش جداساز برای مدل‌های H+V و (H+V)(B).

	Imperial Valley	Kobe	Landers	Loma Prieta-1	Loma Prieta-2	Nahanni	Northridge	Tabas
Situation	NB	B	B	B	NB	NB	NB	B
P(H+V) (ton)	NA	292.5	287	255	NA	NA	NA	310
Δ (H+V) (cm)	NA	50.8	51.3	53	NA	NA	NA	49.8
P(H+V)(B) (ton)	NA	231.6	231.6	231.6	NA	NA	NA	246
Δ (H+V)(B) (cm)	NA	52.4	51.18	51.38	NA	NA	NA	50
P(H+V)(B) / P(H+V)	NA	0.79	0.807	0.908	NA	NA	NA	0.793
Δ (H+V)(B) / Δ (H+V)	NA	1.03	0.99	0.97	NA	NA	NA	1.0

Buckled= B, No Buckling =NB, Not Applicable = NA



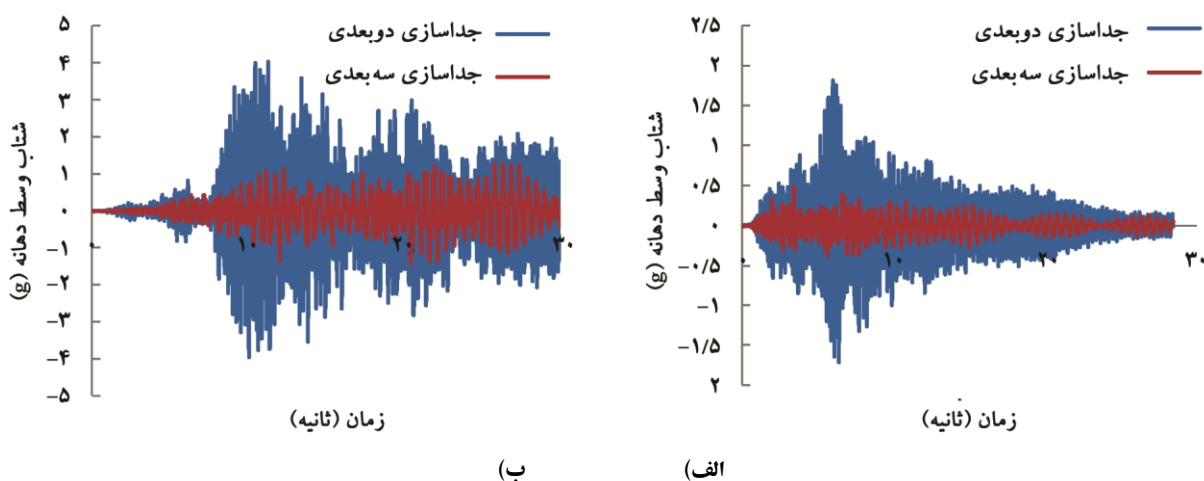
شکل (۱۲): تکیه‌گاه فنی برای ایجاد جداسازی در راستای قائم و افقی (جداسازی سه‌بعدی).

بودن ارتعاشات گهواره‌ای و در نتیجه ناپایداری جانبی سیستم به دلیل قرار گرفتن مرکز جرم در تراز بالتر از تراز جداسازها می‌باشد. ولی در پل‌ها با توجه به اینکه در اغلب موارد کل جرم پل در تراز جداساز قرار می‌گیرد مسئله حرکت گهواره‌ای حاکم نیست. برای مطالعه تأثیر جداسازی سه‌بعدی، تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی برای دو حالت جداسازی دو بعدی (با در نظر گرفتن صد درصد سختی قائم جداساز لاستیکی معمول) و جداسازی سه‌بعدی با در نظر گرفتن ۵ درصد سختی قائم جداساز لاستیکی معمول برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها انجام شد. به عنوان نمونه مقادیر تاریخچه شتاب وسط دهانه برای دو شتاب‌نگاشت زلزله ایمپریال ولی و طبس در شکل (۱۳) آورده

۶- کاهش اثرات مؤلفه قائم

همان‌طور که در بخش ۴ و ۵ مشاهده شد مؤلفه قائم زلزله حوزه نزدیک باعث افزایش نیروی محوری در پایه‌ها در نتیجه امکان ناپایداری پایه‌ها، افزایش امکان ناپایداری جانبی جداسازها، افزایش شتاب راستای قائم عرشه، افزایش نیروی برشی، لنگر خمشی در عرشه و ... می‌شود. برای کاهش اثرات مؤلفه قائم زلزله، استفاده از جداسازی قائم علاوه بر جداسازی افقی که اصطلاحاً جداسازی سه‌بعدی نامیده می‌شود می‌تواند کارساز باشد. جداسازی در راستای قائم با ایجاد تکیه‌گاه‌های انعطاف‌پذیر در راستای قائم میسر است. همچنین جهت افزایش میرایی سیستم در راستای قائم و کاهش جابه‌جایی‌ها برای سازه‌های با جرم زیاد، می‌توان از میراگرهای ویسکوز در حد فاصل بین عرشه و سر پایه استفاده نمود [۹]. ساختمان‌ها در همه شکل‌ها و اندازه‌ها می‌توان از طریق استفاده از فنرهای حلزونی شکل با تغییر شکل‌های مجاز بزرگ و میراگرهای ویسکوز جداسازی سه‌بعدی نمود. ظرفیت این جداسازها از ۱۰ تا ۳۰۰ تن می‌باشند. نمونه‌ای از جداسازی سه‌بعدی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در دهه‌های اخیر، سیستم‌های الاستیک سه‌بعدی ساختمان‌ها، پل‌ها و همچنین ارتعاشات ناشی از مترو، تراموا و راه‌آهن را محافظت کرده‌اند. این سیستم برای مقابله بارها در راستای افقی و قائم مؤثر هستند.

یکی از چالش‌های سیستم جداسازی در راستای قائم، غالب

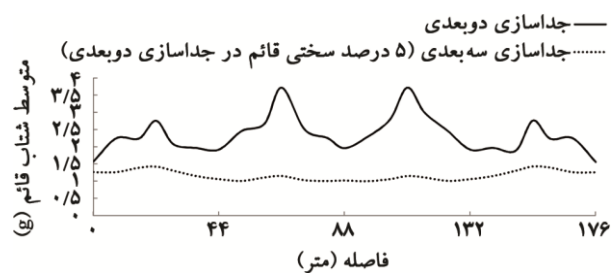


شکل (۱۳): مقایسه شتاب قائم وسط دهانه در جداسازی دو و سه‌بعدی: الف) زلزله ایمپریال ولی، ب) زلزله طبس.

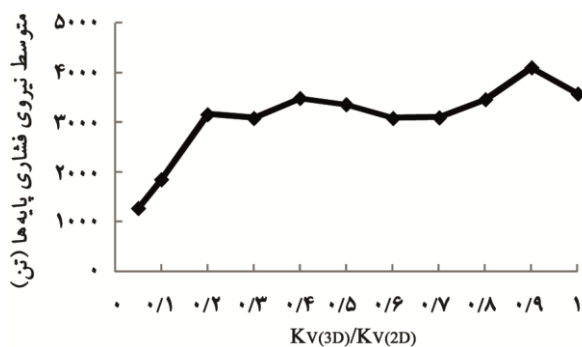
چالشی که برای جداسازی سه‌بعدی مطرح است تعیین میزان سختی قائم مناسب برای جداسازی در راستای قائم می‌باشد. برای بررسی این موضوع نسبت‌های مختلف سختی قائم جداسازی سه‌بعدی به سختی قائم جداسازی دو بعدی ($K_{V(3D)}/K_{V(2D)}$) از ۰/۵ الی ۱/۱۰۰٪ متغیر در نظر گرفته شده است و برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی صورت گرفته و مقدار متوسط شتاب قائم وسط دهانه پل، متوسط نیروی محوری پایه، متوسط نیروی برشی عرشه و متوسط لنگر خمشی عرشه به دست آمده و در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با کاهش سختی قائم جداساز همه پاسخ‌ها روند نزولی داشته ولی این کاهش سختی برای نسبت‌های سختی بین ۰/۲ تا ۱ محسوس نیست. با توجه به شکل (۱۵) مقادیر پاسخ برای نسبت‌های سختی قائم کمتر از ۰/۲ کاهش قابل توجهی داشته به طوری که در نسبت سختی قائم برابر ۰/۰۵ کمترین پاسخ‌ها به دست آمده است.

شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود شتاب وسط دهانه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

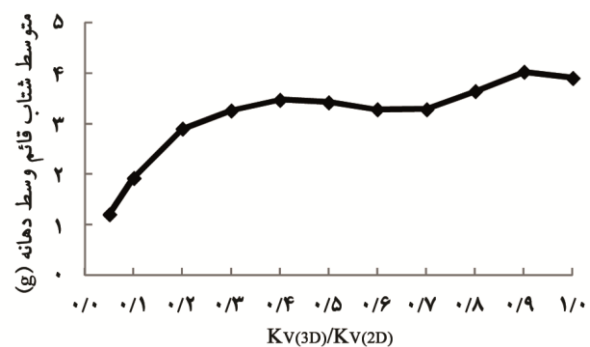
در شکل (۱۴) متوسط حداکثر شتاب قائم عرشه برای همه هشت شتاب‌نگاشت مورد بررسی برای دو حالت جداسازی دو بعدی و سه‌بعدی در طول دهانه‌های ۴۴ متری عرشه پل نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در نتیجه جداسازی سه‌بعدی شتاب عرشه در نتیجه مؤلفه قائم زلزله در طول پل کاهش چشمگیری دارد.



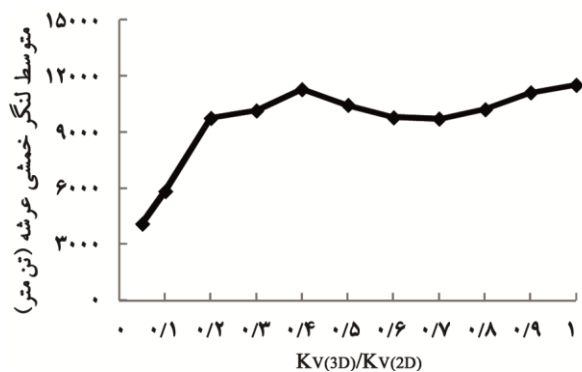
شکل (۱۴): متوسط حداکثر شتاب قائم عرشه در طول پل جداسازی شده.



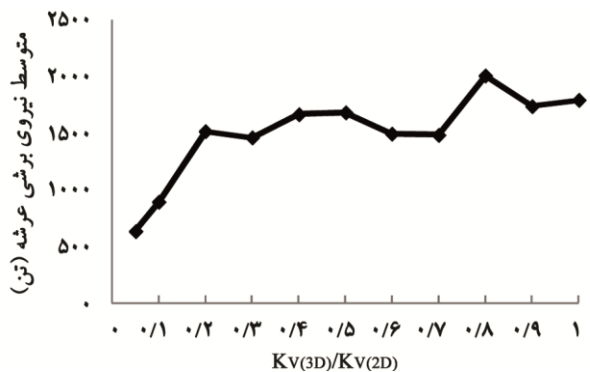
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل (۱۵): تغییرات پاسخ پل در برابر نسبت‌های مختلف سختی قائم جداسازی سه‌بعدی ($K_{V(3D)}$) به سختی قائم جداسازی دو بعدی ($K_{V(2D)}$) (الف) متوسط شتاب قائم وسط دهانه عرشه، (ب) متوسط نیروی محوری پایه‌ها، (پ) متوسط نیروی برشی عرشه، (ت) متوسط لنگر خمشی عرشه.

۸- نتیجه گیری

این مطالعه بر روی اثر مؤلفه قائم زلزله بر رفتار دینامیکی پل‌های جداسازی شده واقع در نزدیک گسل صورت گرفته است، برای این منظور از مشخصات سازه و جداسازهای پل صدر واقع در شمال شرق تهران استفاده شد. اثر هم‌زمان مؤلفه‌های قائم و افقی پل‌های جداسازی شده بر روی تغییرات نیروی محوری پایه‌ها، شتاب قائم عرشه، نیروی برشی و لنگر خمشی عرشه بررسی شد. رفتار جداسازها تحت تأثیر جابه‌جایی جانبی و نیروی محوری در حالات مختلف نظیر جابه‌جایی جانبی، بارگذاری رفت و برگشتی و بارهای لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر آن ظرفیت کمانشی جداسازها تحت تأثیر اثر مؤلفه قائم توسط مدل‌های با قابلیت تحلیل کمانشی و روابط معمول مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه سیستم جداسازی سه‌بعدی برای کنترل شتاب عرشه در اثر مؤلفه قائم زلزله ارائه شد و به بررسی تغییرات مشخصات آنها بر روی پاسخ سیستم برای شتاب‌نگاشت‌های مختلف پرداخته شد (لازم به ذکر است از آنجایی که نگارندگان به نتایج آزمایشگاهی مربوط به آزمایش جداسازها دسترسی نداشته‌اند، لذا مشخصات مکانیکی آنها نظیر سختی و مقاومت و ... بر اساس روابط ارائه شده برای جداسازها و برخی فرضیات منطقی به دست آمده است). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد:

۱- در سازه‌های همچون پل که دارای دهانه‌های بلند می‌باشند مؤلفه قائم زلزله به خصوص در حوزه نزدیک باید حتماً لحاظ شود و قابل صرف نظر کردن نیست. در نظر گرفتن مؤلفه قائم به همراه مؤلفه افقی بر آورد صحیح‌تری از آسیب‌پذیری پل‌ها ارائه می‌کند.

۲- شتاب رو به پایین مؤلفه قائم زلزله باعث افزایش نیروی فشاری و شتاب رو به بالای آن باعث کاهش حداقل نیروی محوری پایه‌ها در سازه‌های جداسازی می‌شود. علاوه بر آن مؤلفه قائم باعث افزایش نیروی برشی، لنگر خمشی و شتاب عرشه می‌شود که باید در طراحی آنها لحاظ شود.

به‌عنوان مثال در این تحقیق مقدار متوسط نیروی محوری، متوسط نیروی برشی و متوسط لنگر خمشی با در نظر گرفتن اثر مؤلفه قائم برای پل جداسازی نشده به ترتیب ۱/۴۵، ۱/۴۶ و ۱/۵۴ برابر و برای پل جداسازی شده به ترتیب ۱/۳۲، ۱/۳۴ و ۱/۴۷ برابر پل بدون در نظر گرفتن اثر مؤلفه قائم می‌باشد.

۳- افزایش نیروی محوری ناشی از مؤلفه قائم زلزله حوزه نزدیک باعث افزایش امکان ناپایداری جانبی جداسازها می‌شود. با افزایش نیروی محوری فشاری جداگرها و نزدیک شدن آن به ظرفیت کمانشی جداساز، سختی جانبی جداسازها کاهش می‌یابد. این کاهش سختی برای مقدار نیروی فشاری کوچک‌تر از $0.2 P_{cr}$ تقریباً ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است.

۴- جابه‌جایی‌های جانبی بزرگ باعث افزایش جابه‌جایی قائم جداگرها می‌شود. این موضوع در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از حدود یک سوم حداکثر جابه‌جایی تشدید می‌شود. همچنین برای یک تغییر مکان جانبی مشخص با افزایش نیروی محوری و نزدیک شدن نیروی محوری به ظرفیت کمانشی، جابه‌جایی قائم بزرگ‌تری ایجاد می‌شود.

۵- در بارگذاری لرزه‌ای لحاظ کردن مؤلفه قائم تغییرات عمده‌ای نظیر کاهش مقاومت جانبی و سختی جانبی هم در منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی افقی و هم در منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی قائم ایجاد می‌نماید.

۶- روابط معمول برای محاسبه ظرفیت کمانشی جداگر، مقادیر ظرفیت کمانشی را به طور غیر واقعی دست بالا تخمین می‌زند (در این مطالعه به طور متوسط ۱۸ درصد) و پیشنهاد می‌شود از مدل‌های مبتنی بر واقعیت که قابلیت تحلیل کمانشی جداسازها را دارند استفاده شود.

۷- استفاده از جداسازی سه‌بعدی، می‌تواند باعث کاهش پاسخ سیستم جداسازی نظیر شتاب قائم عرشه، برش و لنگر خمشی عرشه، نیروی محوری پایه‌ها شود. روند تغییرات همه پاسخ‌ها در برابر کاهش سختی قائم جداساز سیر نزولی

9. Vu, B., Unal, M., Warn, G.P., and Memari, A.M. (2014) A distributed flexibility and damping strategy to control vertical accelerations in base-isolated buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, **21**(4), 503-521.
10. Pacific Earthquake Engineering Research Center (2013) *Urban Earthquake Engineering*. PEER Reports. Proceedings of the U.S. - Iran Seismic Workshop, Tehran, Iran, 383-398.
11. Pacific Earthquake Engineering Research Center (2016) *OpenSees Software, the Open System for Earthquake Engineering Simulation*. <http://OpenSees.Berkeley.edu>.
12. SeismoStruct (2016) Earthquake Engineering Software Solution, <http://www.seismosoft.com/seismostruct>.
13. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2006) *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, <http://OpenSees.Berkeley.edu>.
14. Kumar, M., Whittaker, A.S., and Constantinou, M.C. (2014) An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **43**(13), 1955-1974.
15. Pant, D.R., Wijeyewickrema, A.C., and ElGawady, M.A. (2013) Appropriate viscous damping for nonlinear time-history analysis of base-isolated reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **42**(15), 2321-2339.
16. Ryan, K.L. and Polanco, J. (2008) Problems with Rayleigh damping in base-isolated buildings. *Journal of Structural Engineering*, **134**(11), 1780-1784.
17. Somerville, P.G. (1998) Development of an improved representation of near fault ground motions. *SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data* (Vol. 15).
18. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) (2013) *Next Generation Attenuation (NGA) Database*. <http://ngawest2.berkeley.edu/site>.

داشته ولی کاهش پاسخ‌ها برای نسبت‌های سختی قائم جداساز سه بعدی به سختی قائم جداساز دو بعدی کمتر از ۰/۲ قابل توجه می‌باشد.

مراجع

1. Papazoglou, A.J. and Elnashai, A.S. (1996) Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**(10), 1109-1138.
2. Abdollahiparsa, H., Homami, P., and Khoshnoudian, F. (2016) Effect of vertical component of an earthquake on steel frames considering soil-structure interaction. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**(7), 2790-2801.
3. Hosseinzadeh, N. (2008) Vertical component effect of earthquake in seismic performance of reinforced concrete bridge piers. *Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (06-0050).
4. Shrestha, B. (2015) Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **19**(1), 180-187.
5. Warn, G.P. and Whittaker, A.S. (2008) Vertical earthquake loads on seismic isolation systems in bridges. *Journal of Structural Engineering*, **134**(11), 1696-1704.
6. Mazza, F. and Vulcano, A. (2004) Effects of vertical acceleration on the response of base-isolated structures subjected to near-fault ground motions. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
7. Loghman, V., Khoshnoudian, F., and Banazadeh, M. (2015) Effect of vertical component of earthquake on seismic responses of triple concave friction pendulum base-isolated structures. *Journal of Vibration and Control*, **21**(11), 2099-2113.
8. Ryan, K.L., Kelly, J.M., and Chopra, A.K. (2005) Nonlinear model for lead-rubber bearings including axial-load effects. *Journal of Engineering Mechanics*, **131**(12), 1270-1278.

- Specifications for Seismic Isolation Design*. AASHTO, Washington, DC.
29. Buckle, I.G., Constantinou, M.C., Diceli, M., and Ghasemi, H. (2006) *Seismic Isolation of Highway Bridges* (No. MCEER-06-SP07).
30. Weisman, J. and Warn, G.P. (2011) Stability of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings. *Journal of Structural Engineering*, **138**(2), 215-223.
19. Road, Housing and Urban Development Research Center (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No 2800), 4th Edition*, Tehran, 13-20.
20. SeismoMatch (2016) *Earthquake Engineering Software Solution*. <http://www.seismosoft.com/seismomatch>.
21. American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE SEI 7-10)*, Virginia.
22. Abrahamson, N.A. (1992) Non-stationary spectral matching. *Seismological Research Letters*, **63**(1), 30.
23. Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N.A., Bommer, J.J., Markatis, A., McCoy, E.M.M.A., and Mendis, R. (2006) An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, **10**(spec01), 67-89.
24. National Earthquake Hazards Reduction Program NEHRP, Consultants Joint Venture A partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, NIST GCR 11-917-15 (November 2011) *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses*, California, 3-22 to 3-23.
25. Lee, H. and Mosalam, K. (2014) Effect of Vertical Acceleration on Shear Strength of Reinforced Concrete Columns (No. PEER 2014/04).
26. Koh, C.-G. and Kelly, J.M. (1987) *Effects of Axial Load on Elastomeric Isolation Bearings*. Rep. No. UCB/EERC-86/12. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
27. American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) (2012) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 6th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC.
28. American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) (2010) *Guide*

Investigation of Near-Fault Earthquake Vertical Component Effect on the Seismic Behavior of Isolated Bridges

Mahmood Minavand¹, Mohsen Ghafory-Ashtiany^{2*} and Mansour Ziyaeifar³

1. Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, e-mail: ashtiany@iiees.ac.ir
3. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

In bridge design codes such as AASHTO, there is not a direct and explicit relation for considering the effects of the earthquake vertical component in the design of elastomeric supports. In lieu, AASHTO recommends a 20% reduction or increase of the dead load amount in its seismic isolators design guide for considering the earthquake vertical component without taking into account the acceleration vertical component, soil type, distance to fault, etc. While the earthquake vertical component in near-fault areas are strong and significantly increase responses in the bridge. In this study, Sadr bridge located in northeast of Tehran in which low damping rubber seismic isolators are used, is investigated under the effect of the vertical component of some earthquake accelerograms with near-fault properties. Besides, the non-linear time history analysis is performed for each of them. Results show that the earthquake vertical component in near-fault areas will significantly increase the response of bridge members such as the increase of the maximum axial force of the bridge piers, deck acceleration, shear and bending moment in the deck cross section and is much higher than the 20% increase or decrease of the dead load given in the code. In order to investigate the seismic isolators behavior due to the increase of the axial compressive force under the effect of the earthquake vertical component, a simple model of isolators with the capability of considering the stiffness variations in the vertical and horizontal directions and performing the buckling stability analysis was prepared, and the isolators responses for three different lateral loadings including the application of monotonic transverse displacement, cyclic loading and earthquake loading were obtained. For all three lateral loadings, the results show that the increase of the compressive axial force decrease the isolators' lateral stiffness and increasing the lateral displacement will increase the isolators' axial deformation. Besides, the hysteresis curve of the isolators will experience a reduction in the stiffness and lateral strength. In the following, the buckling capacity amount obtained from the isolation model with the capability of buckling analysis is compared with the buckling capacity amount obtained from the conventional recommended relations. The results show that the conventional relations slightly overestimate the buckling capacity and the use of buckling analysis models is preferable. In order to decrease the effects of the earthquake vertical component in the isolated structures, three-dimensional isolation is recommended through simultaneous application of vertical and horizontal flexibility in the isolators. The results show that the decrease in bridge response such as the midspan vertical acceleration, deck shear and bending moment has a descending trend with the isolators' vertical stiffness reduction.

Keywords: Vertical Component of Earthquake, Base Isolated Bridge, Near-Fault Earthquake, Buckling of Base Isolator, 3D Isolation.