

شناسایی رفتار دینامیک پل‌های جداسازی شده تحت زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه

امید رضایی فر*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان
میثم مهرپویا، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

E-mail: orezayfar@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۸ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۰

چکیده

پل‌ها به عنوان یکی از سازه‌های بسیار حساس و همچنین به عنوان یکی از زیرساخت‌ها در آبادانی و شاه‌رگ حیاتی هر کشور در امور مربوط به حمل و نقل شناخته می‌شوند. تخریب بسیاری از پل‌ها بعد از زلزله‌های ۱۹۷۱ (سان فرناندو)^۱، ۱۹۹۴ (نورت‌ریج)^۲، ۱۹۹۵ (هانشین)^۳ ژاپن و ۱۹۹۹ (چی-چی)^۴ تایوان نشان داد که هنوز هم در مورد طراحی لرزه‌ای پل‌ها مسائل ناشناخته زیادی وجود دارد. در این پژوهش، یک پل روگذر موجود در شهر ارومیه مورد تحلیل دینامیک غیرخطی توسط نرم-افزار SAP2000 قرار گرفته است و پاسخ دینامیک آن با دو نوع سیستم جداسازی لرزه‌ای نئوپرن لاستیکی و جداساز LRB و همچنین در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، که شامل اندرکنش خاک و شمع و اندرکنش خاک و دیوار کوله می‌شود، بررسی شده است. از نکات قابل اهمیت در این پروژه، مدل کردن توده خاکریز پشت کوله پل می‌باشد که بسته به نوع جداسازی پل می‌تواند پاسخ آن را تحت تأثیر قرار دهد. جهت انجام تحلیل دینامیک تاریخچه زمانی در این پژوهش از رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور برای مقایسه پاسخ این پل تحت اثر این زلزله‌ها استفاده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که جداسازهای LRB باعث افزایش جابجایی نسبی روسازه و کاهش جابجایی نسبی زیرسازه نسبت به جداساز الاستومری شده و تأثیر اندرکنش خاک و کوله را کم می‌کنند. از طرف دیگر، جداسازی پل سبب کاهش نیروها و توزیع بهتر نیروی برشی بین کوله و پایه‌های میانی می‌گردد. همچنین، خاکریز پشت دیوار کوله سبب اتلاف بخشی از انرژی زلزله شده، که میزان کاهش نیروی برشی زلزله در مدل‌های جداسازی نشده بیشتر از مدل‌های جداسازی شده می‌باشد. از طرفی، از مقایسه زمان تناوب‌ها، در صورت عدم وجود فاصله مناسب بین روسازه و زیرسازه در محل درز انبساط، نتیجه می‌شود که این میزان در مدل E، ۰/۵۲ و در مدل E-S حدود ۰/۳۶ است. در صورت وجود فاصله مناسب بین روسازه و زیرسازه در محل درز انبساط، این مقادیر به ترتیب به ۰/۸۹ و ۰/۸۷ افزایش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: پل، تحلیل دینامیک، اندرکنش خاک و سازه، زمین‌لرزه حوزه نزدیک.

¹ - San Fernando

² - Northridge

³ - Hanshin

⁴ - Chi-Chi

۱. مقدمه

در میان انواع سازه‌ها، پل‌ها به عنوان یکی از ارکان شریان‌های حیاتی که لازم است بعد از زلزله به عنوان راه دسترسی به بیمارستان‌ها، ایستگاه‌های آتش‌نشانی و سایر ارگان‌های خدماتی در مواقع بحرانی مورد استفاده قرار گیرند، بی‌تردید جایگاه ویژه‌ای دارند. پل‌ها عناصر کلیدی راه‌ها و بزرگراه‌ها تلقی می‌شوند و احداث آنها نسبت به سایر اجزای راه بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. علیرغم سادگی سازه‌ای پل‌ها، بخصوص آنهایی که از بتن مسلح یا بتن پیش‌تنیده ساخته شده‌اند، تحت زلزله‌های مختلف نتوانسته‌اند در سطح توقع طراحان عمل کنند. زلزله‌های اخیر در کالیفرنیا، ژاپن و آمریکای میانه و جنوبی نشان داد که بسیاری از پل‌های طرح شده براساس ضوابط آیین‌نامه‌های زلزله، دچار خسارت‌های شدید و یا حتی واژگونی شدند. این در حالیست که شدت این زلزله‌ها کمتر از مقادیر نظیر در آیین‌نامه‌های طراحی گزارش شده است.

این ضعف عملکرد پل‌ها در بیشتر موارد به علت فلسفه طراحی ارتجاعی است که با معضل عدم توجه به جزئیات طراحی در اجرا نیز بحرانی‌تر می‌شود. پل‌ها، بر خلاف ساختمان‌ها، دارای درجه نامعینی اندکی می‌باشند؛ یا این که به کلی معین‌اند. بنابراین، زوال یک عضو سازه‌ای یا اتصال بین اعضا، با احتمال بیشتری به خرابی یا فروپاشی پل می‌انجامد. پس باید خاطر نشان کرد که اگرچه ساختار ساده پل‌ها منجر به درجه اطمینان بیشتر در پیش‌بینی پاسخ‌های لرزه‌ای آنها می‌شود ولی در عین حال باید حساسیت بیشتری نسبت به خطاهای طراحی اعمال گردد.

در کشور ایران، به دلیل عدم وجود یک آیین‌نامه مشخص برای طراحی لرزه‌ای پل‌ها، مشکلات زیادی در پل‌ها مشاهده می‌شود. با مقایسه آیین‌نامه‌های معتبر دنیا مانند آشتو (AASHTO، ۲۰۰۱) و کالترنس (۲۰۰۸)،

ضوابط لرزه‌ای موجود در این آیین‌نامه و مقایسه این آیین‌نامه‌ها با آیین‌نامه ایران که تنها به استفاده از فرمول‌های آیین‌نامه ۲۸۰۰ کفایت می‌کند، به راحتی می‌توان به مشکلات لرزه‌ای موجود در پل‌های ایران پی برد. با توجه به اینکه بیشتر پل‌های موجود در ایران دارای ستون‌های بتنی می‌باشند، در این پژوهش چنین پلی مد نظر قرار گرفته است.

۲. اهداف تحقیق

یکی از اهداف این مقاله، بررسی اثر زلزله‌های نزدیک گسل بر پل‌ها می‌باشد. زلزله‌های حوزه نزدیک به نقطه‌ای از زمین اطلاق می‌شود که فاصله آنها از مرکز سطحی زلزله کمتر از یک حد معین است. بعضی از محققین، از جمله اکی، این فاصله را ۵۰ کیلومتر می‌دانند و برخی دیگر این فاصله را ۱۵ کیلومتر در نظر می‌گیرند (جمارانیان، ۱۳۷۴). برخی از مطالعات نشان می‌دهد که رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک را می‌توان به دو بخش، با ضربان و بدون ضربان، تقسیم‌بندی کرد. ضربان در زمین لرزه به صورت ضربان شتاب، ضربان سرعت و ضربان جابجایی می‌باشد که می‌توان آنها را به تغییرات بزرگ در تاریخچه‌های شتاب، سرعت و جابجایی تعریف کرد. نکته ویژه در رکوردهای سرعت زلزله‌های نزدیک گسل، وجود سرعت‌های نموی بزرگ زمین است که در پی پالس‌های بلندمدت شتاب ایجاد می‌شود.

در زمین لرزه‌های حوزه نزدیک، به جهت فاصله کوتاه بین محل شکست (منبع تولید موج) و محل دریافت آن، فرصتی جهت میرا شدن فرکانس‌های بالا نبوده، و بر همین اساس، تاریخچه زمانی شتاب آنها محتوای فرکانسی بالایی دارد. ملاحظه شده است که پارامترهای PGA و PGV مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک به‌طور نسبی بزرگتر از پارامترهای متناظر در

جانبی پل که نیروها را کاهش داده، ولی تغییر مکان‌ها را افزایش می‌دهد و یا افزایش میرایی که تغییر مکان‌ها را کاهش می‌دهد و ممکن است نیروها را نیز کاهش دهد و در انتها به وسیله توزیع و پخش نیروهای زلزله در همه تکیه‌گاه‌ها، اتفاق افتد.

زهرایی (۱۳۸۵) جداکننده‌های الاستومری مسلح را به تکیه‌گاه الاستومریک چندلایه لاستیکی با میرایی کم، تکیه‌گاه‌های لاستیکی- سربی و تکیه‌گاه الاستومریک چندلایه لاستیکی با میرایی زیاد (HDRB) تقسیم‌بندی نمود.

در این مقاله، اثر دو نوع تکیه‌گاه لرزه‌ای چندلایه لاستیکی با میرایی کم (نئوپرن) و تکیه‌گاه‌های لاستیکی- سربی (LRB) به تفکیک روی پاسخ پل مورد نظر بررسی می‌شود.

یکی دیگر از اهداف این پژوهش، بررسی اثر اندرکنش بین خاک و دیوار کوله و همچنین اندرکنش بین خاک و شمع و سر شمع می‌باشد. اثر اندرکنش خاک و سازه بسیار مهم ارزیابی شده و در حالت کلی قابل صرف‌نظر کردن نمی‌باشد. تا آنجا که بعضی از آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای که در مورد سازه‌های معمولی به کار می‌روند، کاهش معینی را در بار استاتیک معادل برای منظور کردن اثر کنش در حالتی که پی سازه صلب در نظر گرفته می‌شود، مجاز می‌دانند.

۳. مدل‌سازی پل و فرضیات مورد استفاده

برای انجام این پژوهش، یک پل موجود در شهر ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات این پل به قرار زیر می‌باشد:

طول کل پل ۶۳ متر، عرض پل ۱۲/۸ متر، ۳ دهانه ۲۱ متری، ارتفاع دهانه‌ها ۶/۵ متر، قطر هر ستون پایه‌های میانی ۱/۲ متر، تعداد ستون در هر پایه ۳ عدد، سیستم عرشه تیر و دال بتن‌آرمه، ضخامت دال عرشه ۲۰ سانتی‌متر است که به صورت یکسره اجرا می‌گردد،

رکوردهای حوزه دور می‌باشند. این پدیده بر اساس تفاوت ناچیز میان سرعت فرایند شکست در مکانیزم گسل و سرعت انتشار موج برشی زلزله به وقوع می‌پیوندد. زمین لرزه حوزه دور از گسل فاقد پالس بزرگ ناشی از جهت‌پذیری یا تغییر شکل ماندگار در تاریخچه سرعت است و دیگر ویژگی‌های آن عبارت است از: تغییر شکل‌های کوچک به علت عدم ورود همزمان کل انرژی به سازه، نسبت مؤلفه قائم به افقی کم، توزیع انرژی در یک مدت زمان نسبتاً طولانی در مقایسه با حوزه نزدیک گسل و حاکم بودن مودهای پایین (مود اول) نسبت به سایر مودها.

از دیگر اهداف مورد بررسی در این مقاله، آشنایی با سیستم جداسازی لرزه‌ای، انواع جداگرها و کاربرد آنها در پل‌ها برای کاهش اثر نیروهای جانبی زلزله می‌باشد. مفهوم جداسازی لرزه‌ای به معنای جدا کردن سازه و یا قسمتی از آن از زمین می‌باشد به نحوی که از صدمات زمین‌لرزه روی سازه جلوگیری نماید، که می‌توان این نسبت نیاز انتقال لرزه از فونداسیون به کل سازه را نیز اصلاح و تنظیم نمود. در این روش، مقادیر زیادی از انرژی زلزله مستهلک و نابود می‌گردد و سختی سازه در حد قابل قبولی باقی خواهد ماند.

توانایی و مزایای تکیه‌گاه‌های جداگر به عنوان ابزار کنترل نیروهای جانبی، که به طراحان اجازه می‌دهد نیروهای زلزله وارد بر پایه‌ها و کوله‌های پل را کاهش داده و یا منحرف کنند، به خوبی به اثبات رسیده است. از این تکیه‌گاه‌ها می‌توان به نحو مؤثری در مقاوم‌سازی پل‌های موجود و یا طراحی سازه پل‌های جدید واقع در نواحی لرزه‌خیز بهره برد. تکیه‌گاه‌های جداگر مورد استفاده در جداسازی لرزه‌ای پل‌ها معمولاً در زیر عرشه پل و روی پایه‌ها و کوله‌ها قرار می‌گیرند. مکانیزم کاهش نیروی زلزله در یک پل دارای تکیه‌گاه‌های جداکننده می‌تواند به وسیله افزایش پریرود اصلی سازه پل (اثر تغییر پریرود در طیف پاسخ) در اثر کاهش سختی

شناسایی رفتار دینامیک پل‌های جداسازی شده تحت زمین لرزه های حوزه نزدیک با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه

Shell و Link و همچنین در مدل‌سازی پل مورد بحث از المان‌های پیوند Gap, Multilinear Plastic, Rubber Isolator و Plastic (Wen) استفاده شده است. در مدل ساخته شده دال، کوله و سرشمع توسط المان Shell, جداساز لاستیکی (نئوپرن) توسط المان پیوند Rubber Isolator, جداساز LRB توسط المان پیوند Plastic (Wen) و خاکریز پشت کوله توسط المان‌های پیوند Gap و Multilinear Plastic مدل شده‌اند. در جدول ۱، مشخصات جداساز LRB آورده شده است.

تعداد تیرهای پیش‌ساخته در هر دهانه ۷ تیر I شکل که به صورت ساده روی نشیمنگاه‌های لرزه‌ای قرار می‌گیرد، ضخامت دیوار کوله ۱/۱ متر و ضخامت سرشمع ۱/۲ متر که به وسیله شمع‌هایی به طول ۳۰ متر و به قطر ۱ متر پشتیبانی می‌گردد. جهت مدل‌سازی و تحلیل مدل‌های ساخته شده در این پژوهش، از برنامه SAP2000 نسخه 14.1.0 استفاده شده است. المان‌های مورد استفاده در برنامه SAP2000 جهت مدل‌سازی پل مورد نظر عبارتند از: Frame،

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای جداساز LRB

درجه آزادی	سختی مؤثر خطی (kN/m)	سختی اولیه در حالت غیرخطی (kN/m)	مقاومت جاری شدن (kN)	نسبت سختی پس از جاری شدن
U1	۲۰,۰۰۰	-	-	-
U2	۸۰۰	۸۰۰	۴۰	۰/۱
U3	۸۰۰	۸۰۰	۴۰	۰/۱
R1	۲۰,۰۰۰	-	-	-
R2	۲,۰۰۰	-	-	-
R3	۲,۰۰۰	-	-	-

داده و فرایندی را برای ساخت المان‌های Contact با استفاده از روش Stereomechanical ارائه داده‌اند. با توجه به انرژی مستهلک شده در حین برخورد، پارامترهای مدل خطی به گونه‌ای تنظیم می‌گردند تا چنین استهلاک انرژی در هنگام تسلیم حاصل شود. اولین مرحله، محدود کردن نفوذ عرشه‌ها در داخل یکدیگر به میزان δ_m می‌باشد. در این پژوهش، حداکثر تغییرشکل یا نفوذ عرشه‌ها در داخل یکدیگر (δ_m) به میزان ۲/۵۴ سانتی‌متر فرض شده است. بنابراین، K_{eff} محاسبه شده ۱۸۶/۳ kN/m حاصل می‌شود. همچنین، جهت تکمیل پارامترهای لازم برای معرفی این المان به برنامه می‌بایست میزان شکاف بین کوله و تیر را طبق نقشه‌ها برای این المان مشخص نمود.

مشخصات و پارامترهای مربوط به جداسازهای چندلایه لاستیکی با میرایی کم (نئوپرن) با استفاده از ضوابط آئین‌نامه آشتو محاسبه گردید و مقدار سختی افقی آن برابر ۲۰۰۰ کیلونیوتن بر متر به دست آمد. همچنین، سختی قائم نئوپرن تقریباً ۱۰۰۰ برابر سختی افقی آن در نظر گرفته می‌شود و سختی فنر چرخشی و خمشی برابر صفر فرض شده است.

مطابق تحقیق آویرام و همکاران (۲۰۰۸) برای مدل کردن برخورد احتمالی بین عرشه و کوله پل از المان Contact استفاده شده که از یک المان پیوند Gap تشکیل شده است. تعیین مشخصه‌های یک المان Contact ممکن است بسیار سخت و طاقت‌فرسا باشد. موتوکومار (۲۰۰۳) و موتوکومار و دروشه (۲۰۰۵) مطالعه جامعی روی ضربه زدن عرشه در پل‌ها انجام

مختلفی، از جمله ATC32 (۱۹۹۶) و SDC2004^۱ تعیین کرد. در فصل پنجم ATC32 (۱۹۹۶) و بخش-های ۱، ۷ و ۸ آئین‌نامه SDC2004 روش محاسبه این منحنی برای انواع مختلف کوله شرح داده شده است. المان Gap در نظر گرفته شده به عنوان یک المان غیرخطی با طول محدود (دو گرهی) تعریف می‌شود. برای آنالیز غیرخطی، مقدار Open که فاصله خالی بین دیوار و خاک است (این فاصله برابر صفر فرض شده) و همچنین سختی را می‌بایست برای این المان تعریف کرد. آئین‌نامه SDC2004 توصیه می‌کند که مقدار سختی المان Gap در حدود ۱۰ برابر سختی دیوار فرض شود تا مشکلات مربوط به عدم همگرایی ظاهر نشود. بعد از بسته شدن فاصله تعریفی، رفتار طولی به وسیله منحنی Backbone که به وسیله یک المان غیرخطی با طول صفر معرفی شده، حاصل می‌شود. این المان غیرخطی با طول صفر (یک گرهی) در انتهای المان Gap تعریف می‌شود تا به وسیله آن منحنی Backbone که مربوط به رفتار ارتجاعی و خمیری کامل (EPP) خاک می‌باشد، معرفی گردد. بعد از محاسبه مشخصه‌های این منحنی از المان Multilinear Plastic و با معرفی نقاط این منحنی برای المان مورد بحث در برنامه SAP2000، برای مدل‌سازی رفتار خاک استفاده می‌شود.

در آئین‌نامه SDC2004 به شرح یک آزمایش بزرگ‌مقیاس که به منظور بررسی فشار مقاوم خاک روی کوله و همچنین بررسی نتایج نیرو-تغییر مکان خاک انجام شده، پرداخته شده است. بر اساس نتایج این آزمایش، که در دانشگاه کالیفرنیا (مرکز دیویس) توسط کاتر و همکاران (۲۰۰۳) انجام شده، سختی اولیه توده خاکریز را می‌توان در حدود 0.47 mPa/mm در نظر گرفت. خاک، فشار مقاوم ماکزیمم خود را در زمانی که مقاومت نهایی آن بعد از جابجایی‌های بزرگ دیوار به وجود می‌آید، به دست می‌آورد که مقدار

طبق ضوابط آئین‌نامه ATC32 (۱۹۹۶)، بررسی-های فنوس و الری (۱۹۹۸)، رفتار کوله، اندرکنش خاک و سازه و انعطاف‌پذیری خاکریز پشت کوله به وسیله گزارش‌های شناسایی از زلزله‌های گذشته مشخص شده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر مهم و عمده آنها بر پاسخ یک پل تحت زمین لرزه‌هایی با شدت متوسط تا زیاد می‌باشند، به ویژه برای پل‌های استاندارد معمولی که دارای دهانه‌های کوتاه، ستون‌هایی با ارتفاع متوسط و سختی نسبتاً زیاد روسازه می‌باشند. به حرکت در آمدن خاکریز پشت کوله و رفتار غیر الاستیک مصالح تشکیل دهنده خاک تحت تغییر شکل‌های برشی زیاد، پاسخ پل را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطابق مطالعات صورت گرفته توسط ال-گوادی و همکاران (۲۰۰۹)، انتخاب مدل کوله تأثیر عمیقی بر پاسخ دینامیک یک پل، به ویژه در دهانه‌های انتهایی که نزدیک به کوله قرار گرفته‌اند، دارد. فصل پنجم ATC32 (۱۹۹۶) چندین حالت مختلف برای مدل‌سازی انواع فونداسیون‌ها که کوله‌های پل را نیز شامل می‌شود و نیز شالوده‌های شمعی و پی‌های گسترده را نشان می‌دهد. مدل استفاده شده برای این پژوهش، مدل ساده شده کوله می‌باشد.

در این نوع مدل‌سازی، از یک مجموعه از المان‌های پیوند که متشکل است از یک المان (Gap) و یک فنر غیرخطی برای نشان دادن رفتار غیرخطی خاک با طول صفر استفاده می‌شود. تحت اثر تحریکات ناشی از زلزله، اندرکنش خاک و کوله پل به شکل فشار مقاومی است که از طرف کوله بر دیوار وارد می‌شود. در این حالت (ایجاد فشار مقاوم در خاک) خاک دارای رفتاری غیرخطی می‌باشد که برای نشان دادن این رفتار خاک از منحنی‌های Backbone استفاده می‌شود که بیانگر رفتار الاستوپلاستیک کامل (EPP) خاک تحت این بارگذاری می‌باشد و در حقیقت همان منحنی نیرو-تغییر مکان برای خاک تحت بارگذاری مذکور است. مشخصات این منحنی را می‌توان بر اساس آئین‌نامه‌های

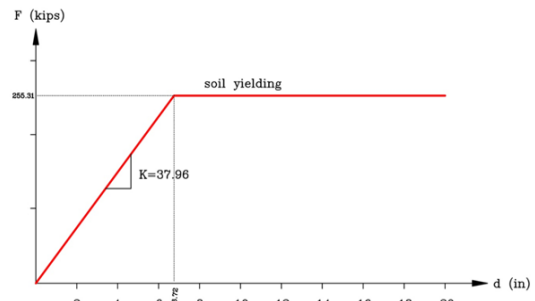
^۱ - Caltrans Seismic Design Criteria

شناسایی رفتار دینامیک پل‌های جداسازی شده تحت لرزه‌های حوزه نزدیک با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه

مدل وینکلر، یک محیط الاستیک (که در این حالت، خاک اطراف شمع است) را می‌توان به وسیله یک سری فنر الاستیک نزدیک به هم جانشین نمود. برای مدل کردن شمع و سر شمع و اندرکنش آنها با خاک، از المان‌های Frame و Shell و یک سری فنرهای افقی در دو جهت عمود بر هم برای نشان دادن خاک استفاده می‌شود. همانطور که گفته شد، اثر واکنش خاک با توجه به مشخصات آن به صورت فنرهایی در نظر گرفته می‌شود که ضریب فنریت اعمال شده در ورودی برنامه SAP2000 در واقع همان ضریب واکنش خاک می‌باشد که در ابعاد (طول و عرض) آن ضرب شده است. با توجه به نتایج آزمایش مکانیک خاک و روابط ژئوتکنیک، می‌توان ضریب فنریت فنرها را در لایه‌های مختلف، با توجه به عمق لایه و جنس خاک آن، تعیین نمود.

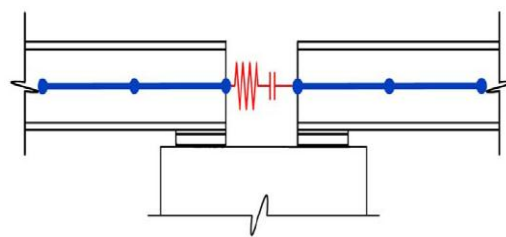
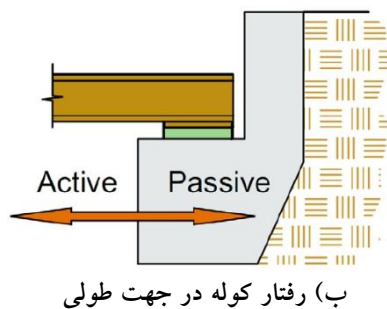
نمای کلی پل مورد نظر در شکل ۲ ارائه شده است.

ماکزیمم آن برابر 239 kPa (5 ksf) می‌باشد و مقدار آن برای جابجایی‌های بزرگتر خاک ثابت می‌ماند (کالترنس، ۲۰۰۸). منحنی پوش حاصله برای یکی از ۱۰۴ فنر غیرخطی قرار گرفته روی گره‌های پشت دیوار کوله مطابق شکل ۱ می‌باشد.

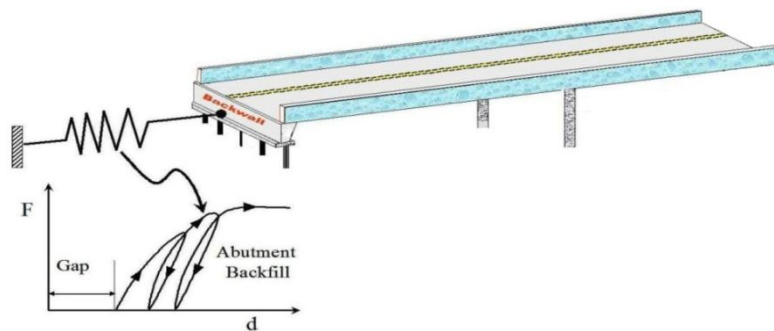


شکل ۱. منحنی نیرو- تغییر مکان خاک با استفاده از ضوابط آئین‌نامه SDC2004

بخش دیگر در ارتباط با اندرکنش خاک و سازه در این پل مربوط به اندرکنش خاک و شمع می‌باشد. حل عمومی روابط لنگر و تغییر مکان یک شمع قائم که تحت بار جانبی و لنگر متمرکز در سطح زمین است، توسط متلوک و ریس (۱۹۶۰) ارائه شده است. طبق



الف) مدل ساده برخورد بین عرشه‌ها



ج) مدل شماتیک پل و منحنی پوش

شکل ۲. نمای کلی پل مورد مطالعه و جزئیات آن

۴. تحلیل‌های انجام شده روی مدل‌های مورد

بررسی

جهت بررسی و حصول اهداف ذکر شده در این مقاله، تحلیل‌های مودال و تاریخچه زمانی غیرخطی مودال روی مدل‌های ساخته شده انجام شده است. تحلیل مودال به روش تحلیل بردارهای ریتز، که مدهای ارتعاشی تحریک شده با یک بارگذاری خاص را می‌یابد، انجام شده است. بردارهای ریتز برای استفاده در روش مودال تحلیل تاریخچه زمانی و تحلیل طیف پاسخ، پایه‌ای بهتر از بردارهای ویژه ایجاد می‌کنند و نتایج دقیق‌تری را سبب می‌شوند.

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مودالی که در برنامه SAP2000 انجام می‌شود در حقیقت توسعه یافته روش سریع ویلسون می‌باشد و برای سیستم‌های سازه‌ای که اساساً رفتار خطی داشته و دارای تعداد محدودی عضو با رفتار غیرخطی می‌باشند طراحی شده است. در تحلیل به روش FNA غیرخطی بودن سازه فقط در اعضای پیوند خلاصه شده است. چون فرض بر این است (طبق توصیه آیین‌نامه‌ها) که المان‌های روسازه و

زیرسازه در پل‌های جداسازی شده در محدوده خطی باقی می‌مانند، بنابراین همانطور که ذکر شد، در تحلیل‌ها، المان‌های زیرسازه یعنی پایه‌ها با استفاده از المان Frame که دارای رفتار خطی می‌باشند و المان‌های روسازه یعنی شاه‌تیرهای طولی و دیافراگم‌های عرضی عرشه نیز توسط المان Frame که دارای رفتار خطی می‌باشد و المان‌های عرشه پل نیز توسط المان Shell که دارای رفتار خطی می‌باشد، مدل شده‌اند و تنها برای مدل‌سازی المان‌های جداگر و المان‌های خاک از المان‌های غیرخطی Nllink استفاده شده است که این المان‌ها در حین یک آنالیز تاریخچه زمانی قادر به ارائه رفتار غیرخطی از خود می‌باشند.

در این تحقیق، شش زلزله مختلف برای ارزیابی لرزه‌ای پل مورد نظر انتخاب شده‌اند که سه رکورد اول مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک و سه رکورد باقیمانده مربوط به رکوردهای حوزه دور می‌باشند. مشخصات این زمین‌لرزه‌ها را می‌توان در جداول ۲ و ۳ مشاهده کرد.

جدول ۲. مشخصات زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل

Earthquake	Station	Magnitude	Distance to the fault (km)	PGA (g)	PGV (Cm/s)	PGV/PGA (s)
Chi-Chi, Taiwan	TCU075	۷/۶	۱/۴۹	۰/۳۳۳	۸۸/۳	۰/۲۷۱
Imperial Valley	412 El Centro	۶/۵	۸/۶	۰/۱۷۱	۴۷/۵	۰/۲۸۴
Northridge	0655 Jensen	۶/۷	۶/۲	۰/۴۲۴	۱۰۶/۲	۰/۲۵۶

جدول ۳. مشخصات زمین‌لرزه‌های دور از گسل

Earthquake	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV / PGA (s)
El Centro 1940	۰/۳۱۹	۳۶/۱۵۴	۰/۱۱۶
Naghan 1977	۰/۷۲۵	۸۷/۵۰۸	۰/۱۲۳
Kobe 1995	۰/۴۳۳	۳۴/۸۴۶	۰/۰۸۲

بررسی قرار گرفته، که در هر حالت یکبار با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه و بار دیگر بدون در نظر گرفتن آن، مدل‌سازی شده است. در حقیقت، برای انجام این پژوهش در کل شش مدل مختلف از پل مورد تحلیل قرار گرفته است که جزئیات آنها مطابق جدول ۴ می‌باشد.

با استفاده از برنامه Seismo Signal می‌توان طیف هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها را به دست آورد و با مقایسه با طیف طرح استاندارد، ضریب مقیاس همپایگی را محاسبه نمود. پل مورد تحلیل در سه حالت (در دو حالت جداسازی شده و در یک حالت جداسازی نشده) مورد

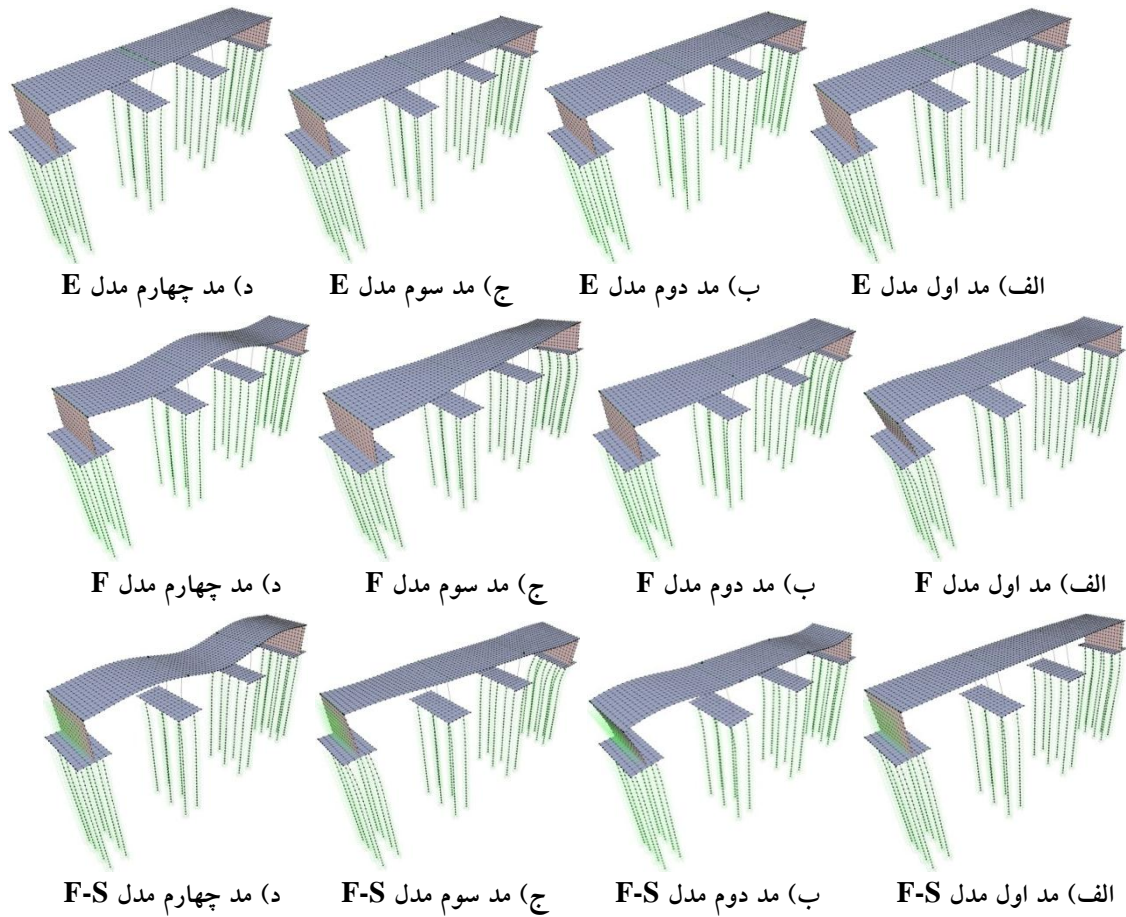
جدول ۴. مشخصات مدل‌های ساخته شده از پل

نام مدل	توضیحات
E	جداگر از نوع الاستومری (نئوپرن) و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه
E-S	جداگر از نوع الاستومری (نئوپرن) و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه
L	جداگر از نوع LRB و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه
L-S	جداگر از نوع LRB و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه
F	جداسازی نشده و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه
F-S	جداسازی نشده و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه

را می‌توان در شکل ۳ و جداول ۵ و ۶ مشاهده نمود. استفاده از جداسازهای لرزه‌ای در پل مورد بحث سبب شده که زمان تناوب اصلی سازه به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد و شکل مدهای نوسانی پل نسبت به حالت جداسازی نشده تغییر کند. در حالتی که برخوردی بین کوله و عرشه پل اتفاق نمی‌افتد، استفاده از جداگرهای LRB باعث افزایش بیشتر زمان تناوب سازه نسبت به جداگرهای الاستومری می‌شود و این در حالیست که عدم استفاده از جداساز سبب کاهش قابل ملاحظه زمان تناوب سازه و به تبع آن افزایش نیروهای داخلی می‌گردد.

۵. بررسی نتایج حاصل از تحلیل

تحلیل مودال به روش بردارهای ریتز روی مدل‌ها در دو حالت مختلف انجام شده است. در حالت اول فرض شده که فاصله کافی بین روسازه (عرشه) و کوله در نظر گرفته شده است. لذا، در هنگام وقوع زمین‌لرزه، برخوردی بین عرشه و کوله پل اتفاق نمی‌افتد و در حالت بعدی فاصله بین روسازه و کوله در محل درز انبساط پل برابر ۲ اینچ فرض شده که در هنگام وقوع زمین‌لرزه، در صورت بسته شدن این فاصله، عرشه به پیشانی کوله برخورد کرده و پاسخ دینامیک پل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل مودال مدل‌ها



شکل ۳. تحلیل‌های مودی پل برای مدل‌های E، F و F-S

جدول ۵. مقایسه زمان تناوب‌ها در صورت وجود فاصله مناسب بین روسازه و زیرسازه در محل درز انبساط

F-S	F	L-S	L	E-S	E	مدل پل
۰/۳۳	۰/۳۹	۱/۲۱	۱/۲۲	۰/۸۷	۰/۸۹	دوره تناوب اساسی (ثانیه)

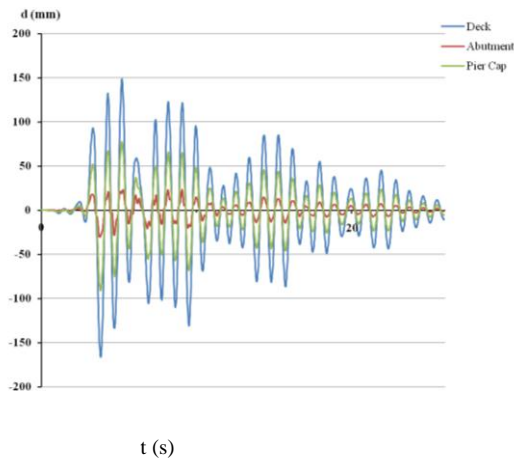
جدول ۶. مقایسه زمان تناوب‌ها در صورت عدم وجود فاصله مناسب بین روسازه و زیرسازه در محل درز انبساط

F-S	F	L-S	L	E-S	E	مدل پل
۰/۳۳	۰/۳۹	۰/۳۲	۰/۵۲	۰/۳۶	۰/۵۲	دوره تناوب اساسی (ثانیه)

زلزله به کوله برخورد کرده و پاسخ پل را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار داده است. در این حالت، به دلیل محدود شدن حرکت جانبی عرشه و محدود شدن سختی جداسازها، زمان تناوب دو سازه در هنگام استفاده از دو نوع متفاوت از جداساز به هم نزدیک می-

می‌توان دید در حالتی که امکان برخورد بین عرشه و کوله وجود دارد دوره تناوب اساسی نسبت به حالت دیگر کاهش ملموسی داشته و این موضوع بیانگر آن است که فاصله در نظر گرفته شده کافی نبوده و عرشه پل مورد بحث تحت حرکات رفت و برگشتی

شناسایی رفتار دینامیک پل‌های جداسازی شده تحت زمین لرزه های حوزه نزدیک با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه



شکل ۴. جابجایی نسبی عرشه، کوله و سرستون پل مدل E تحت زلزله نورتریج در جهت طولی

استفاده از جداسازهای لرزه‌ای سبب افزایش جابجایی‌های نسبی در روسازه و عرشه می‌گردد. ولی میزان جابجایی نسبی را در کوله و پایه‌های میانی کاهش می‌دهد و بدین ترتیب نیروها و مخصوصاً نیروی برشی را در زیر سازه کاهش می‌دهد. در حقیقت، نقش و مزیت سیستم جداسازی این است که توزیع یکنواختی بین برش در پایه‌ها و کوله‌ها ایجاد می‌کند. به نحوی که سهم نیروی برش در پایه‌ها نسبت به حالت جداسازی نشده افزایش می‌یابد. ولی نیروی برشی در کوله‌ها کاهش می‌یابد و به این ترتیب توازن بهتری بین نیروی برشی در پایه‌ها و کوله‌ها به وجود می‌آید و سطح نیروها در هر کدام در حد قابل قبول قرار می‌گیرد. پس تأثیر جداسازی لرزه‌ای در حالتی است که اختلاف سختی بین کوله‌ها و پایه‌ها و حتی اختلاف سختی بین پایه‌ها زیاد باشد که در این حالت، جداگرها نقش توزیع یکنواخت نیروی زلزله بین پایه‌ها و کوله‌ها را بر عهده گرفته و نیروها را در سطح قابل قبول قرار می‌دهند.

استفاده از جداسازهای LRB موجب افزایش بیشتر زمان تناوب و جابجایی‌های نسبی در روسازه پل مورد بحث نسبت به جداسازهای الاستومری گردیده است. از این طریق، انرژی بیشتری را از زلزله مستهلک می‌کنند و سبب کاهش بیشتر نیروهای برشی ناشی از

شود و باعث کاهش اثر نوع جداساز در پاسخ این پل می‌گردد.

در نظر گرفتن اثر اندرکنشی بین خاک پشت کوله پل مورد بحث و کوله باعث کاهش زمان تناوب در این پل می‌گردد. در صورت استفاده از جداگرهای LRB کاهش زمان تناوب ناچیز بوده ولی در حالت استفاده از جداگرهای الاستومری کاهش زمان تناوب بیشتر می‌باشد و این در حالیست که در صورت عدم جداسازی پل، اثر اندرکنش خاک و سازه بیشتر بوده و باعث کاهش زیادی در زمان تناوب پل مورد بحث گردیده است.

در ادامه مطلب، فرض شده که فاصله کافی بین عرشه این پل و پیشانی کوله در نظر گرفته شده و برخوردی بین این دو صورت نمی‌گیرد. لذا، کلیه نتایج بر اساس این فرض ذکر شده است. نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به شرح زیر می‌باشد.

الف) اثر جداسازی بر پاسخ پل

جداسازی در پل‌ها تأثیر به‌سزایی بر پاسخ دینامیک آنها داشته و می‌تواند پاسخ پل را در اثر تحریکات لرزه‌ای به طور کامل تحت تأثیر قرار دهد. استفاده از جداسازهای لرزه‌ای سبب شده که جابجایی‌های اجزای سازه‌ای پل از جمله کوله، عرشه و پایه‌های میانی از یکدیگر مستقل شده (شکل ۴) که این امر، با توجه به سختی‌های متفاوت این اجزا، سبب توزیع بهتر و مناسب نیروهای داخلی ناشی از حرکات زمین لرزه در پل می‌شود. در پل‌های جداسازی شده، به دلیل امکان جابجایی مجزای عرشه نسبت به زیر سازه، امکان برخورد بین عرشه و پیشانی کوله و یا برخورد بین عرشه‌های مجاور پیش می‌آید که در صورت برخورد بین این اجزا، پاسخ دینامیک پل به شکل عمده‌ای تغییر می‌کند.

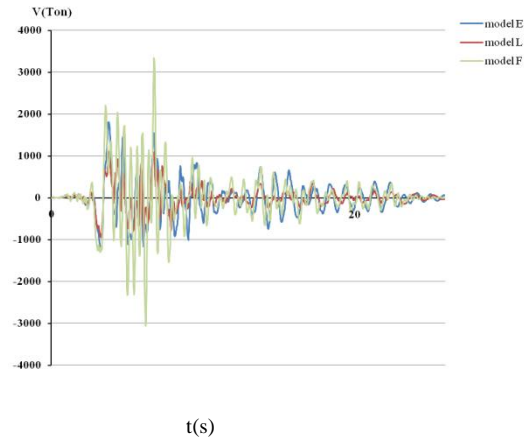
جداسازهای پایه‌های میانی از خود نشان دادند. لذا، در طراحی جداسازهای الاستومری می‌بایست این موضوع را در نظر داشت.

ب) اثر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ پل

توده خاکریز در پشت کوله پل مورد بحث سبب می‌گردد تا بخشی از انرژی که زلزله به سازه وارد می‌کند توسط خاک جذب شود. بنابراین، انرژی کمتری به سازه وارد می‌شود که موجب کاهش نیروهای ناشی از زمین لرزه در پل مورد بحث گردیده و این موضوع در حالیکه زمان تناوب اصلی سازه بر اثر خاکریز کم شده است (جدول ۷).

در مدل‌هایی که سختی بیشتری دارند (جداسازی نشده)، میزان تأثیر اندرکنش خاک و سازه بیشتر از مدل‌هایی است که سختی کمتری دارند (جداسازهای LRB). اندرکنش خاک و کوله سبب می‌شود که هر دو کوله پل مورد بحث جابجایی‌های متفاوتی داشته باشند و این موضوع امکان برخورد و ضربه بین عرشه در دهانه‌ها و یا بین عرشه و کوله را افزایش می‌دهد و در پل‌های بیه به دلیل متفاوت بودن جابجایی نسبی دو کوله نسبت به هم، پیش‌بینی می‌شود که دوران زیادی در عرشه رخ دهد.

زلزله در پل مورد بحث می‌گردند (شکل ۵). جداسازهای LRB در زلزله‌های نزدیک گسل کارایی بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه دور از خود نشان می‌دهند لذا، استفاده از این جداسازها در محل‌هایی که نزدیک گسل می‌باشند توجیه بیشتری دارد. از طرف دیگر، استفاده از جداسازهای LRB اثر اندرکنش خاک و کوله را در پل مورد نظر کاهش داده است.



شکل ۵. برش پایه در مدل‌های E و L و F تحت زلزله نورتریج در جهت طولی

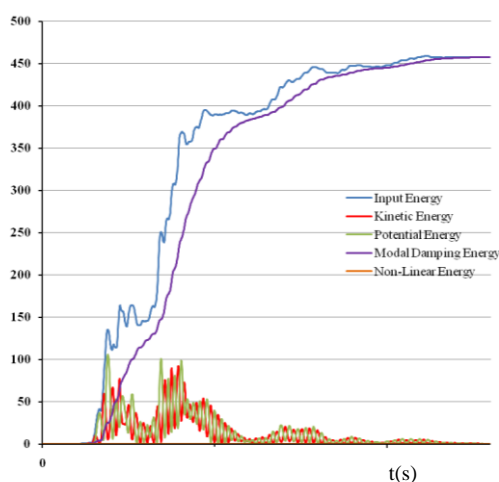
همچنین، در هنگام استفاده از جداسازهای LRB، به دلیل افزایش جابجایی نسبی عرشه، امکان برخورد بین عرشه در دهانه‌های مجاور و یا برخورد بین عرشه و پیشانی کوله افزایش می‌یابد. جداسازهای قرار گرفته روی کوله در پل مورد بحث، جابجایی و برش‌های بیشتری را نسبت به

جدول ۷. نسبت انرژی‌های تلف شده تحت زلزله نورتریج

Model	Input Energy	Kinetic Energy		Potential Energy		Modal Damping Energy		Non-Linear Energy	
	Value (kJ)	Value (kJ)	(%)	Value (kJ)	(%)	Value (kJ)	(%)	Value (kJ)	(%)
E	۸۵۶۶/۴۰	۲۹۶/۶	۳/۵	۳۲۶/۰	۳/۸	۷۹۴۳/۸	۹۲/۷	۰	۰
E-S	۸۲۹۴/۰۳	۲۷۹/۹	۳/۴	۳۰۷/۹	۳/۷	۷۷۰۴/۵	۹۲/۹	۰	۰
L	۶۴۶۳/۸۰	۹۵/۸	۱/۵	۷۲/۲	۱/۲	۱۹۵۴/۳	۳۰/۲	۴۳۳۹/۹	۶۷/۱
L-S	۶۳۹۴/۱۰	۹۴/۹	۱/۵	۷۰/۹	۱/۱	۱۹۲۶/۴	۳۰/۱	۴۳۰۰/۰	۶۷/۳

نیروها و تشدید پاسخ پل مورد بحث گردیده‌اند (شکل ۶).

با توجه به افزایش جابجایی‌ها تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل، می‌بایست برای جلوگیری از برخورد روسازه به کوله فاصله بیشتری را در محل درزها در نظر گرفت



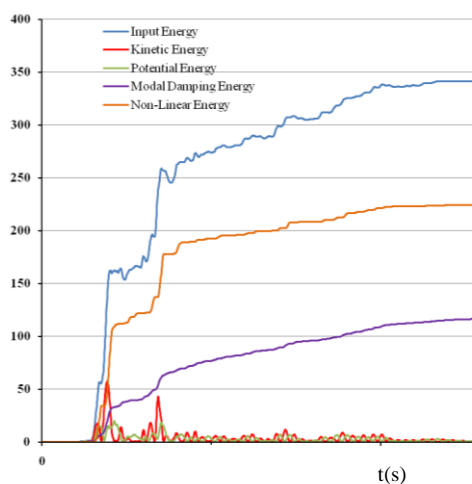
مدل L (راست) و مدل E (چپ)

خاک جذب شود. بنابراین، انرژی کمتری به سازه وارد می‌شود که موجب کاهش نیروهای ناشی از زمین‌لرزه در پل مورد بحث گردیده است و این موضوع در حالیهست که زمان تناوب اصلی سازه بر اثر خاکریز کم شده است.

با توجه به افزایش جابجایی‌ها تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل، باید برای جلوگیری از برخورد روسازه به کوله فاصله بیشتری را در محل درزها در نظر گرفت.

ج) اثر زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک بر پاسخ پل

زلزله‌های نزدیک گسل انرژی بیشتری را به پل وارد می‌کنند. بنابراین، زلزله‌های نزدیک گسل باعث افزایش



شکل ۶. مقایسه انرژی‌ها در پل مورد بحث تحت اثر زلزله نورتریج در

۶. نتیجه‌گیری

استفاده از جداسازهای لرزه‌ای سبب شده که جابجایی‌های اجزای سازه‌ای پل، از جمله کوله، عرشه و پایه‌های میانی، از یکدیگر مستقل شده که این امر با توجه به سختی‌های متفاوت این اجزا سبب توزیع بهتر و مناسب نیروهای داخلی ناشی از حرکات زمین‌لرزه در این پل می‌شود.

توده خاکریز در پشت کوله پل سبب می‌گردد تا بخشی از انرژی که زلزله به سازه وارد می‌کند توسط

۷. مراجع

زهرائی، م. ۱۳۸۵. "آشنایی با جداسازهای لرزه‌ای و تأثیر آنها بر عملکرد پل‌ها". پژوهشکده حمل و نقل، وزارت راه و ترابری.

جمارانیان، م. ۱۳۷۴. "بررسی اثرات شرایط ساختگاهی بر بیشینه شتاب سطح زمین در حوزه نزدیک". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش خاک و پی، دانشگاه تهران.

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2001. "Guide Specifications for Seismic Isolation Design". Washington, DC.
- ATC32. 1996. "Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations". Applied Technology Council (ATC), Redwood City, CA.
- Aviram, A., Mackie, K. R. and Stojadinovic, B. 2008. "Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California". Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley.
- Caltrans. 2008. "Seismic Design Criteria". California Department of Transportation., California Caltrans, Sacramento, CA.
- ElGawady, M., Cofer, W. F. and Shafiei-Tehrany, R. 2009. "Seismic Assessment of WSDOT Bridges with Prestressed Hollow Core Piles- part II". Washington State Department of Transportation (WSDOT) Research Report, 187 p.
- Fenves, G. L. and Ellery, M. 1998. "Behavior and Failure Analysis of a Multiple-Frame Highway Bridge in the 1994 Northridge Earthquake". Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley.
- Kutter, B. L., Malvick, E. J., Kulasingam, R. and Boulanger, R. W. 2003. "Interpretation and Visualization of Model Test Data for Slope Failure in Liquefying Soil". Proc. of the 8th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, MCEER-03-0003: 359-370.
- Matlock, H. and Reese, L. C. 1960. "Generalized solutions for laterally loaded piles". ASCE, J. Soil Mech. Found. Div., 86(5): 63-91.
- Muthukumar, S. 2003. "A Contact Element Approach with Hysteresis Damping for the Analysis and Design of Pounding in Bridge". PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Muthukumar, S. and DesRoches, R. 2005. "Effect of frame-restoring force characteristics on the pounding response of multiple-frame bridges". Earthq. Spectra, 21(4): 1113-1135.
- SDC: California Department of Transportation. 2004. "Seismic Design Criteria". (SDC2004), California Caltrans, Sacramento, CA.

