

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پل‌ها با تکیه‌گاه‌های موجود انبساط حرارتی

Archive of SID

سید مهدی زهرانی، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

حبیب سامی، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: mzahrai@ut.ac.ir

چکیده

اگرچه تنها بیش از دو دهه از کاربرد جداسازی لرزه‌ای در پل‌ها می‌گذرد، اما مطالعات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته است که همگی کارآیی آنها در پل‌ها را تأیید می‌کنند. در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای پل‌های موجود با تکیه‌گاه‌های نئوپرن انبساط حرارتی و امکان کاربری جزئی و محدود آنها برای جداسازی لرزه‌ای پل‌ها، به صورت تحلیلی بررسی می‌شود. بنابراین ابتدا کارآیی جداسازی لرزه‌ای را با تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی دو نمونه پل متداول بزرگراهی که توسط چهار نمونه جداگر الاستومریک جداسازی شده است، اثبات کرده و نتیجه گرفته می‌شود که جداسازی لرزه‌ای ضمن کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای، نیروی زلزله را بین کوله‌ها و پایه‌ها به صورت متعادل توزیع می‌کند. پل‌های مورد بررسی در حالت معمولی (با تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی و بدون تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی) نیز مدلسازی و تحلیل شده‌اند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که کارآیی تکیه‌گاه‌های موجود انبساط حرارتی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مناسب نبوده و حتی در صورت امکان لغزش لازم و تحمل کرنش‌های برشی بزرگ در آنها به هنگام زلزله، به علت الاستیک خطی بودن رفتار نیرو- تغییر مکان، میرایی و استهلاک انرژی چندانی نداشته و نمی‌توانند از سطح انرژی زلزله و نیروهای برشی وارد بر زیرسازه پل‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای بکاهند، در صورتی که سهم جداگرها در جذب و استهلاک انرژی ورودی زلزله بیشتر از ۵۰٪ است. بر اساس نتایج این تحقیق، نسبت کارآیی این تکیه‌گاه‌ها به جداگرهای لرزه‌ای برای کاهش نیروی برشی ناشی از زلزله، بین ۳۰ تا ۵۰٪ تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی لرزه‌ای، تکیه‌گاه انبساط حرارتی، استهلاک انرژی، جداگر الاستومری، تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی

۱. مقدمه

پژوهشگران مختلف، پارامترها و خصوصیات مختلف انواع جداگرهای لرزه‌ای در پل‌های مختلف را مورد تحلیل و آزمایش قرار داده‌اند که همگی نقش مؤثر جداگرهای لرزه‌ای را در بهبود رفتار پل تأیید کرده‌اند [۱ و ۲].

در این قسمت، کارهای انجام شده در زمینه جداسازی لرزه‌ای در پل‌ها به ترتیب زمانی، ارایه می‌شود. شایان ذکر است که در ایران از جداگرهای لرزه‌ای استفاده نشده است و همه موارد موجود در پل‌ها، نئوپرن‌های انبساط حرارتی هستند و بنابراین در این تحقیق بیشتر مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی سیستم جداسازی لرزه‌ای در کشورهای خارجی مورد توجه قرار گرفته است.

روش جداسازی پایه‌های سازه‌ها به عنوان یک روش کنترل غیرفعال سازه‌ها در برابر زلزله است که برای طراحی پل‌های جدید و بهسازی پل‌های موجود نیز استفاده می‌شود. بر اساس این روش، پاسخ سازه در هنگام زلزله به وسیله ایجاد یک سطح انعطاف‌پذیر در تراز پایه آن از ارتعاشات زمین مجزا می‌شود و در نتیجه از نیازهای لرزه‌ای آن به مقدار زیادی کاسته می‌گردد و سازه جداشده از رفتار لرزه‌ای بهتری نسبت به سازه‌هایی با پایه ثابت برخوردار خواهد گردید. ساز و کار کاهش نیروی زلزله در یک پل دارای تکیه‌گاه‌های جداکننده، با افزایش پیوند اصلی سازه پل، افزایش میرایی، توزیع نیروهای زلزله در همه تکیه‌گاه‌ها و یا ترکیبی از عوامل مذکور وجود می‌آید [۱ و ۲ و ۳].

مؤثرند. به علاوه، کارایی بالشتک‌های الاستومری عمدتاً تحت تأثیر خصوصیات سختی و میرایی قرار دارند [۱۰].

Park و همکاران (۲۰۰۲) یک مطالعه مقایسه‌ای بر روی کارایی ضد زلزله انواع جداگرهای لرزه‌ای در یک پل پیوسته چند دهانه به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام دادند. در آن تأثیر نسبی جداگرهای لرزه‌ای مختلف را بر حسب تغییرات پارامترهای طراحی، مورد بررسی قرار داده‌اند. ضمناً نشان داده‌اند که مهم‌ترین پارامترهایی که کارایی جداگرها را کنترل می‌کنند دوره تناوب طبیعی سازه جداسازی شده و ضریب اصطکاک آن هستند. علاوه بر این، عملکرد جداگرها تحت تأثیر دامنه فرکانسی و بیشینه شتاب زلزله ورودی نیز قرار می‌گیرد [۱۱].

Kaplan و Seireg (۲۰۰۲) امکان بکارگیری یک سیستم جداگر لرزه‌ای فعال را برای محافظت پل‌های در معرض زلزله بررسی کرده و نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی قابل اجراست و می‌تواند تنش‌های بیشینه پل را در جهات طولی و جانبی کاهش دهد [۱۲].

زهرایی و محمدی (۱۳۸۴) با بررسی پاسخ لرزه‌ای پنج پل با جداگرهای الاستومری به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نشان دادند که پس از فرض سختی اولیه و سختی ثانویه و نیروی تسلیم جداگرها، عاملی که طراحی را کنترل می‌کند، جابجایی طرح یا همان جابجایی حداکثر جداگر است. نیروی تسلیم جداگر اساساً در میرایی آن تأثیر می‌گذارد به گونه‌ای که هر چه نیروی تسلیم جداگر افزایش یابد، این میرایی زیاده‌تر می‌شود. به علاوه هر چه سختی اولیه جداگر کمتر و سختی جانبی پل بیشتر باشد، تأثیر جداگرهای الاستومری در کاهش نیروها و جابجایی‌های نسبی بیشتر خواهد بود، اما جابجایی‌های مطلق پل را با افزایش سختی اولیه جداگر می‌توان بیشتر کاهش داد، پس باید با بررسی عددی، حالت بهینه‌ای بین آنها پیدا شود [۲].

همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد جداگرهای لرزه‌ای نباید با تکیه‌گاه‌های نئوپرن انبساط حرارتی در پل‌ها که قابلیت عملکرد مناسب جداسازی ندارند اشتباه شوند. تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی نیز همانند جداگرهای الاستومریک شامل لایه‌های لاستیک و صفحات فلزی هستند. این تکیه‌گاه‌ها در اصل برای تحمل نیروهای درون عرشه پل مثل نیروهای ناشی از تغییرات حرارت و ترمز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای مطالعه کارایی غالب تکیه‌گاه‌های معمول مورد استفاده در پل‌ها در مقایسه با جداگرهای لرزه‌ای، باید رفتار آنها را در زلزله

Ghobarah (۱۹۸۸) با بررسی پاسخ لرزه‌ای پل‌های یک و دو دهانه مجهز به جداگرهای لاستیکی - سربی به صورت فنر دوخطی چنین بیان کرد که هرچه سختی و خروج از مرکزیت پایه‌ها از جداگرها افزایش یابد، کارایی جداگرهای لرزه‌ای بیشتر شده و تأثیر آنها در بهبود رفتار پل‌ها نمایان‌تر می‌شود؛ از سوی دیگر با افزایش سختی جداگر، کارایی آنها تا حدی کاهش می‌یابد [۴].

در تحقیقی مشابه Ghobarah و Ali (۱۹۸۸) پاسخ یک پل سه دهانه جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی - سربی را در برابر زلزله بررسی کرده و نتیجه گرفتند که پل‌های بزرگراهی با دو یا سه دهانه معمولی، با فرض عرشه صلب در جهت افقی برای جداسازی لرزه‌ای مناسبند [۵]. همچنین Turkington و همکاران (۱۹۸۹) بیان می‌کنند که جداگرهای لاستیکی - سربی در ترکیب با بالشتک‌های الاستومری ابزار مؤثری برای توزیع نیروی زلزله بین پایه‌ها و کوله‌ها هستند [۶].

Li (۱۹۸۹) پاسخ یک پل سه دهانه با سیستم جداگر لرزه‌ای که شامل بالشتک‌های لاستیکی و مستهلک‌کننده‌های هیسترتیک در جهت طولی بود، بررسی کرد. نتیجه‌گیری شده است که اگر میراگر هیسترتیک بر روی یک سازه نگهدارنده سخت قرار گیرد بیشترین تأثیر را خواهد داشت ولی بازده آنها با افزایش انعطاف‌پذیری سازه نگهدارنده کاهش می‌یابد [۷].

Saiidi و همکاران (۱۹۹۹) با مدلسازی غیر خطی پل‌های جداسازی شده با عایق‌های الاستومریک و لاستیکی - سربی نشان دادند که برخلاف پیش‌بینی‌های تئوری خطی، استفاده از جداگرها لزوماً جابجایی رو سازه را افزایش نمی‌دهد. علاوه بر این عایق‌های با طرح مناسب می‌توانند نیاز شکل‌پذیری ستون‌های پل بتن مسلح را بسیار کاهش دهند [۸].

Abe و همکاران (۲۰۰۰) با بررسی پاسخ لرزه‌ای سه پل با جداگرهای لاستیکی - سربی و بالشتک‌های الاستومری، کارایی لرزه‌ای آنها را با مقایسه بین سختی شناسایی شده از شتابنگاشت زلزله و مقادیر میرایی پیش‌بینی شده حاصل از آزمایش بارگذاری ارزیابی کرده‌اند. این تحلیل مشخص می‌کند که جداسازی لرزه‌ای در تمام پل‌ها مؤثر است [۹].

Jangid و Tongaonkar (۲۰۰۰) با انجام یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثرات پارامترهای جداگر مثل خصوصیات سختی و میرایی در بازده جداسازی سیستم پل، نشان می‌دهند که بالشتک‌های الاستومری در کاهش پاسخ لرزه‌ای پل‌ها بسیار

جدول ۱. مشخصات پل‌های مورد مطالعه [۲]

پل دوم	پل اول	
میان‌دورود	سید آباد	نام پل
مسیر لنگرود- رامسر	راه رودهن- فیروزکوه	موقعیت پل
دهانه ساده	دهانه ساده	نوع پل
۳ دهانه	۲ دهانه	تعداد دهانه‌ها
۲۰	۳۶	طول دهانه‌ها (m)
۱۱/۸	۱۱/۸	عرض پل (m)
تیر- دال	تیر- دال	نوع عرشه
۲۰	۲۰	ضخامت دال (cm)
تیر پیش ساخته بتن مسلح	تیر پیش ساخته بتن مسلح	نوع شاهتیرها
۸ عدد	۸ عدد	تعداد شاهتیرها
۱/۴ متر	۱/۴۵ متر	فواصل شاهتیرها
۰/۲ * ۱/۴ متر	۰/۲ * ۱/۴ متر	ابعاد جان شاهتیرها
۰/۱۵ * ۰/۶ متر	۰/۲ * ۰/۶ متر	ابعاد بال شاهتیرها
چند ستونی	چند ستونی	نوع پایه‌های میانی
۳ عدد	۲ عدد	تعداد ستون‌های هرپایه
۵/۱ متر	۱۱/۳ متر	ارتفاع پایه‌ها
دایره به قطر ۱/۲	دایره به قطر ۱/۵	ابعاد مقطع هر ستون (m)
۱/۱۵ متر	۲/۵ متر	ارتفاع تیر سرستون
۲ متر	۲ متر	عرض تیر سرستون
به فواصل ۱۰ متری	به فواصل ۱۲ متری	دیافراگم عرضی

میانی و کوله‌ها، جابجایی نسبی جانبی سرستون‌های پایه‌های میانی، شتاب مطلق وسط عرشه و انرژی ورودی زلزله و نحوه اتلاف آن بررسی می‌شود.

۲. مدل‌سازی سیستم پل جداسازی شده و پل با

تکیه‌گاه انبساطی

پل‌های مورد مطالعه به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده و در حالت جداسازی شده و همچنین در حالت استفاده از تکیه‌گاه‌های نوپرن انبساط حرارتی با استفاده از نرم‌افزار *SAP2000 Nonlinear* [۱۴] به صورت تاریخچه زمانی غیرخطی مودال تحلیل شده‌اند. الگوریتم بکار رفته در این برنامه برای حل معادلات حرکت، بسط روش (*FNA*)^۱ است. چون فرض این تحقیق بر این است که المان‌های روسازه و زیرسازه در محدوده خطی باقی می‌مانند، بنابراین در تحلیل‌ها، زیرسازه پل یعنی پایه‌های میانی و اجزاء روسازه پل یعنی شاهتیرهای طولی و دیافراگم‌های عرضی عرشه توسط المان *Frame* و دال عرشه پل توسط المان *Shell* که هر دو دارای رفتار خطی هستند،

بررسی کرد. به این منظور آزمایش برش و فشار طبق استاندارد ملی ایران (استاندارد ۶۵۸۳) [۱۳] بر روی تعدادی از تکیه‌گاه‌های موجود پل‌ها انجام گرفته که نتایج آنها در جدول (۳) ارایه شده است. در این جدول مشخصات نمونه *E.B1* (Expansion Bearing) مربوط به نتایج آزمایشگاه دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و مشخصات نمونه *E.B2* از نتایج آزمایشگاه بخش سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به دست آمده است. در ضمن نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که میرایی نوپرن‌ها (که به عنوان تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی پل‌ها استفاده می‌شوند) بسیار کم است، بنابراین امکان استهلاک انرژی در آنها قابل توجه نیست.

در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای پل‌های جداسازی شده و پل‌های معمولی که عرشه آنها به صورت ثابت یا بر روی تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی قرار دارند، بررسی و مقایسه شده و به مزایا و معایب هر کدام اشاره می‌شود. به این منظور نتایج تحلیل‌ها شامل حداکثر پاسخ جداگرها و تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی، برش پایه درجهات عرضی و طولی پل، نیروی برشی در ستون‌های پایه‌های

در جداول (۲ و ۳)، E.b1 تکیه‌گاه اتساع حرارتی نوع اول (Expansion Bearing-1)، E.b2 تکیه‌گاه اتساع حرارتی نوع دوم (Expansion Bearing-2)، K_{H} سختی افقی اولیه جداگر، $K_{\text{H}}/K_{\text{V}}$ نسبت سختی اولیه به تانویه جداگر، K_{H} سختی قائم، G مادل برشی، E مادل الاستیک و ν ضریب انقباضی تکیه‌گاه اتساع حرارتی است.

می‌توان به اختصار فرضیات صورت گرفته در تحلیل دینامیکی پل‌ها را در این موارد خلاصه کرد:

- ۱- پل‌ها به صورت سه بعدی مدل شده و همچنین پایه‌ها گیردار و کوله‌ها صلب فرض می‌شوند.
- ۲- در حالت جداسازی شده و در حالت استفاده از تکیه‌گاه‌های اتساع حرارتی، روماره پل و پایه‌ها در حین زلزله در محدوده الاستیک باقی می‌مانند.

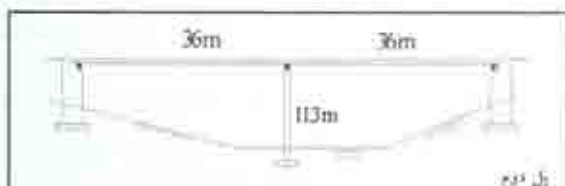
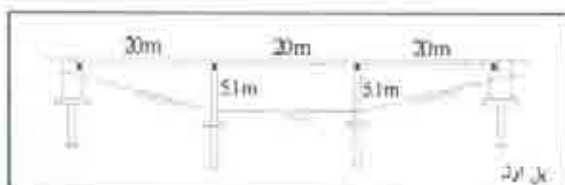
- ۳- بار مرده آسفالت $1/54 \text{ KN/m}^2$ در نظر گرفته شده است.
- ۴- خصوصیات سستم جداسازی و تکیه‌گاه‌های اتساع حرارتی، ایزوتروپیک است و در دو جهت افقی و همچنین در روی پایه‌ها و کوله‌ها دارای خصوصیات دینامیکی یکسان هستند.
- ۵- جداگرها در تراز روی تیر سرستون و روی کوله و زیر هرته و به تعداد تکیه‌گاه‌های اتساع حرارتی در نظر گرفته شده‌اند.
- ۶- پل در معرض زلزله‌های افقی طولی و عرضی به صورت مستقل قرار داده شده است.

۳. مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها

در برخی آیین‌نامه‌ها تاریخچه زمانی شتاب با روش ساده (Simple Scaling) طوری مقیاس می‌شود که طبقه پاسخ حاصلی از آن در محدوده فرکانس مهم برای پاسخ سازه مورد نظر با طیف طراحی هماهنگ شود. مزیت روش فوق این است که تاریخچه زمانی تقریباً دست نخورده و طبعی باقی می‌ماند. از طرفی در روش‌های تولید تاریخچه زمانی سازگار با طیف (Spectrum Matching)، تاریخچه زمانی مورد نظر به نحوی تعبیر می‌یابد که طبق پاسخ آن به طور کلی با طیف طراحی کاملاً هماهنگ شود و دارای این مزیت است که تعداد کمتری تاریخچه زمانی برای انجام آنالیز مورد نیاز است [۱۵ و ۱۶].

شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این تحقیق مربوط به دو زلزله طیس و ناغان هستند که با روش تنظیم در حوزه فرکانس مقیاس شده‌اند. نحوه مقیاس کردن به این صورت است که برای هر

مدل شده‌اند. نمودار شتابیک دو بعدی پل‌های مورد بررسی در شکل ۱ و مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است [۲].



شکل ۱. نمودار شتابیک دو بعدی پل‌های مورد بررسی [۲]

برای مدل کردن جداگرها و تکیه‌گاه‌های اتساع حرارتی از المانهای غیرخطی Nllink و از نوع Rubber Isolator استفاده شده که مشخصات و پارامترهای مرتبط با آنها از مراجع [۲] و [۱۳] برای پل‌های مورد مطالعه استخراج شده و در جداول ۲ و ۳ آمده است. المان‌های تکیه‌گاه‌های اتساع حرارتی به صورت خطی مدل شده‌اند. برای مدل کردن جداگرهای الاستومری، رفتار آنها به صورت مادل ایندئال هیستریتیک دوخطی در نظر گرفته می‌شود که دارای خصوصیات غیرخطی در درجات آزادی برشی افقی (جهت طولی و عرضی پل) و خصوصیات خطی در سایر درجات آزادی هستند.

جدول ۲. مشخصات تحلیلی تخریب جداگرهای مورد استفاده

در پل‌ها [۲]

نوع جداگر	G (KN/m^2)	K_{H} (KN/m)	F_{c} (KN)	K_{H1} (KN)	K_{H2} (KN/m)
a.	۷۰۰	۱۰۰۰	۱۰	۰.۳	۱۰۰۰۰۰۰
b.	۷۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۰.۳	۱۰۰۰۰۰۰
c.	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۲۰	۰.۱۵	۲۰۰۰۰۰۰
d.	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۱۰	۰.۱۵	۲۰۰۰۰۰۰

جدول ۳. مشخصات تکیه‌گاه‌های اتساع حرارتی مورد استفاده

در پل‌ها [۱۳]

تکیه‌گاه	G (KN/m^2)	K_{H} (KN/m)	K_{H1} (KN/m)	K_{H2} (KN/m)
E.b1	۹۰۰	۱۰۷۰۰۰	۱۹۳۰۰۰	۱۷۱۰
E.b2	۹۷۲	۲۲۵۰۰۰	۳۵۷۷۰۰	۲۵۰۰

در حالت جداسازی نشده، در دو انتهای ستونها مفصل پلاستیک تعریف شده که می‌تواند رفتار غیرخطی موضعی ستون را مدل کند. با اعمال شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده به پل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که همه پل‌ها در حالت جداسازی نشده، در پای ستون‌های خود تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای ستون‌ها کرده‌اند. جدول‌های ۷ و ۸ برای پل‌های جداسازی نشده آورده شده است، مربوط به تحلیل پل با تعریف مفصل پلاستیک در دو انتهای ستون‌های پل است. در حالت‌های جداسازی شده و اکثر حالات با تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی، سازه پل به صورت الاستیک باقی می‌ماند.

۵. نتایج حاصل از تحلیل پل‌ها

۱-۵ کلیات

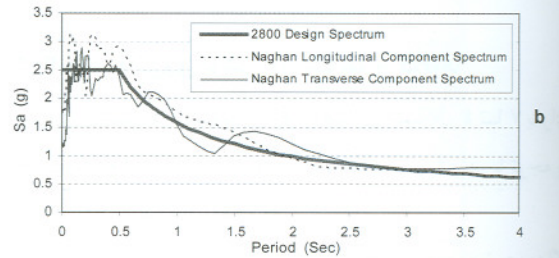
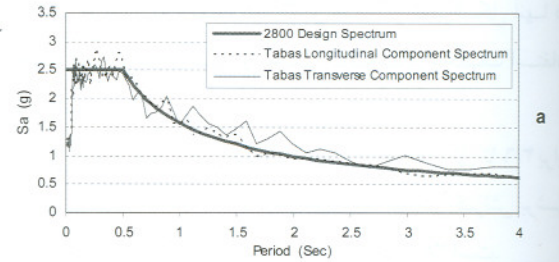
همان‌طور که می‌دانیم کارآیی جداگرها به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر سختی و میرایی آنها قرار دارد. در سیستم جداسازی شده نیروی جانبی زلزله کاهش یافته و بین همه تکیه‌گاه‌ها، تقریباً به نسبت سطح بارگیرشان پخش می‌شود. در پل‌های جداسازی شده و پل با تکیه‌گاه انبساط حرارتی هر چه سختی اولیه جداگر و تکیه‌گاه انبساط حرارتی افزایش می‌یابد، سختی مؤثر کل سازه افزایش یافته و دوره تناوب مؤثر پل کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از تحلیل پل‌ها در حالت‌های مختلف در جداول ۵ تا ۸ آورده شده‌اند. جداول ۵ و ۶ حداکثر پاسخ جداگرها و تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی در پل‌های جداسازی شده مختلف را نشان می‌دهد و در جداول ۷ و ۸ نتایج پاسخ‌های نیرویی و تغییر مکانی حاصل از تحلیل پل‌ها در حالت‌های مختلف بر اساس جداگرهای طرح شده و تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی ارائه می‌شود. نکته دیگری که باید اشاره شود این است که همان‌طور که قبلاً هم بیان شد، با قرار دادن جداگر در سیستم پل، دوره تناوب آن افزایش می‌یابد که در جداول آورده شده است. منظور از دوره تناوب، همان دوره تناوب مؤثر مربوط به شکل مود انتقال جانبی پل است.

۲-۵ مقایسه برش پایه

برش پایه در حالت جداسازی شده نسبت به حالت معمولی کاهش چشمگیری داشته و در حالت با تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی، برش پایه بین حالت جداسازی شده و حالت تکیه‌گاه

زلزله، طیف پاسخ با ۵ درصد میرایی هر دو مؤلفه افقی آن تهیه و به گونه‌ای مقیاس می‌شود که به طور کلی با طیف پایه طرح با میرایی ۵ درصد (شتاب مؤثر ۰/۳۵ g و خاک نوع دو) کاملاً هماهنگ شود. [۱۵]، [۱۶]. هر دو مؤلفه مستقل از هم مقیاس می‌شوند.



شکل ۲. نمودارهای مقیاس شده طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های طیس و ناغان: (a) زلزله طیس (b) زلزله ناغان

جدول ۴. مشخصات زوج شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

PGA مقیاس نشده (g)		شتاب‌نگاشت
مؤلفه جانبی	مؤلفه طولی	
۰/۸۵۲	۰/۸۳۶	طیس
۰/۷۳۰	۰/۴۶۸	ناغان

۴. مدل‌سازی سیستم پل جداسازی نشده

به منظور مقایسه نتایج پاسخ‌های نیرو و تغییر مکان در پل‌های جداسازی شده نسبت به حالت معمولی (جداسازی نشده)، پل معمولی نیز به صورت سه بعدی با استفاده از همان المان‌های سازه‌ای مدل شده و با نرم‌افزار *SAP2000 Nonlinear* تحلیل تاریخچه زمانی انتگرال‌گیری مستقیم (*Direct Integration*) شده است. چون در اینجا هدف مقایسه نتایج بوده و قصد طراحی پل نداشته‌ایم، همان شتاب‌نگاشت‌های حالت جداسازی شده به پل‌های جداسازی نشده اعمال شده است.

در پل اول نيروي برشي تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي تا ۴/۱ برابر بيشتر از نيروي برشي جداگرها بوده و حداكثر كرنش برشي جداگرها ۱۳۹٪ و تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي ۷۰٪ است و دور از انتظار است كه تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي بتوانند اين كرنش برشي بالا را در سيكل‌هاي زياد زلزله تحمل كنند. لازم به ذكر است كه در محاسبه حداكثر كرنش برشي جداگرها و تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي به ارتفاع ۳۰ cm، از حداكثر تغييرشكل آنها در جهت طولی يا عرضی و تحت زلزله‌هاي مختلف استفاده شده است.

در پل دوم نيروي برشي تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي تا ۳/۶ برابر بيشتر از نيروي برشي جداگرها بوده و حداكثر كرنش برشي جداگرها ۸۱٪ و تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي ۳۸٪ است.

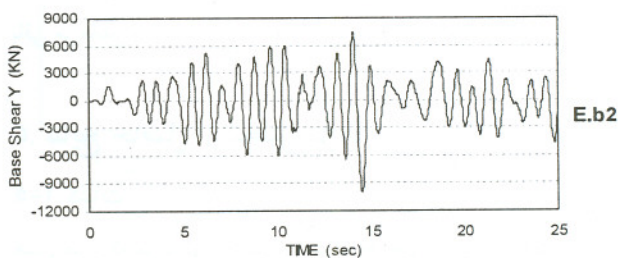
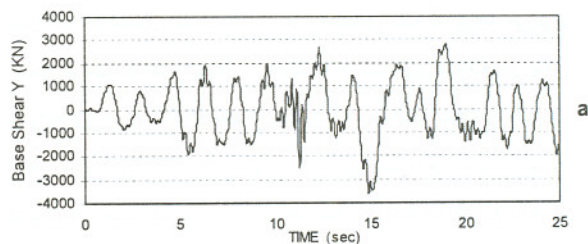
۳-۵ مقایسه نيروي برشي در ستونها و كوله‌ها

نيروي برشي در ستونها و كوله‌ها در اشكال ۴ تا ۷ برای حالت‌هاي مختلف ارايه شده و با هم مقايسه مي‌شوند. با توجه به اشكال مذکور مي‌توان گفت كه:

در پل اول، نيروي برشي عرضی در كوله‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بين ۶ تا ۱۴ برابر، و درحالت تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي ۲/۷ تا ۵/۵ برابر کاهش داشته است. نيروي برشي عرضی در پايه‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بين ۱/۲ تا ۱/۶ برابر کاهش داشته و درحالت تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي نيروي برشي عرضی در پايه‌ها نه تنها کاهش نيافته، بلکه تا ۵۰٪ نیز افزایش مي‌يابد.

در پل دوم، نيروي برشي عرضی در كوله‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بين ۵ تا ۱۱ برابر، و درحالت تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي ۳ تا ۵ برابر کاهش داشته است. نيروي برشي عرضی در پايه‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بين ۲/۲ تا ۴/۷ برابر و درحالت تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي بين ۱/۵ تا ۲/۳ برابر کاهش یافته است. در اين پل به دليل کوتاه بودن پايه‌ها و رفتار صلب نسبت به پل اول، جداسازی نيروي برشي عرضی پايه‌ها را بيشتر کاهش داده است. نکته ديگري كه بايد اشاره شود اين است كه در انجام مقايسه حالت‌هاي مختلف در اين بخش، نيروي برشي عرضی منتقله از اجزای روسازه (عرشه) به اجزای زیرسازه (كوله‌ها و پايه‌ها) در نظر گرفته شده است.

ثابت است. برش پايه‌ها در جداول ۷ و ۸ و تاريخچه زمانی برش پايه جاني پل اول در شكل ۳ ارايه مي‌شود.



شكل ۳. نمودار تاريخچه زمانی برش پايه جاني در پل اول در دو حالت مختلف تحت زلزله طيس

(a) جداگر نوع a (E.b2) تكيه‌گاه انبساطی نوع ۲

با توجه به جداول و اشكال مذکور مي‌توان نتيجه‌گيري كرد كه: در پل اول برش پايه عرضی در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر، ۷۹٪ تا ۸۹٪ و درحالت استفاده از تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي ۵۰٪ تا ۷۵٪ کاهش یافته؛ برش پايه طولی تحت زلزله‌هاي مذکور در حالت جداسازی شده و با توجه به نوع جداگر، ۷۷٪ تا ۸۵٪ و درحالت استفاده از تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي، ۵۳٪ تا ۶۰٪ کاهش یافته است. جداگر نوع a نسبت به بقيه جداگرها در کاهش نيروي برش پايه بيشتر مؤثر بوده است. در پل دوم برش پايه عرضی در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر، ۷۱٪ تا ۸۱٪ و درحالت استفاده از تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي ۵۵٪ تا ۶۳٪ کاهش یافته؛ برش پايه طولی در حالت جداسازی شده ۵۷٪ تا ۸۵٪ و درحالت استفاده از تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي ۳۰٪ تا ۶۳٪ کاهش یافته است. جداگر نوع a نسبت به بقيه جداگرها در کاهش نيروي برش پايه بيشتر مؤثر بوده است.

جداول ۵ و ۶ حداكثر پاسخ جداگرها و تكيه‌گاه‌هاي انبساط حرارتي در پل‌هاي جداسازی شده مختلف را نشان مي‌دهند.

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پل‌ها با تکیه‌گاه‌های موجود انبساط حرارتی

جدول ۵. حداکثر پاسخ جداگرهای استفاده شده در پل اول

پل اول						پل اول	
جداسازی شده با تکیه‌گاه انبساط حرارتی		جداسازی شده با جداگر				پاسخ جداگر در برابر	
E.b2	E.b1	d	c	b	a		
۳۷۸	۲۸۰	۱۳۳	۱۴۱	۱۱۹	۹۳	طیس	حداکثر نیروی جداگرها در جهت عرضی (KN)
۳۹۶	۳۵۱	۱۵۲	۱۴۳	۱۱۸	۹۶	طیس	
۴۲۸	۳۶۱	۲۰۷	۱۹۶	۱۳۳	۱۰۵	ناغان	حداکثر نیروی جداگرها در جهت طولی (KN)
۵۳٪	۶۸٪	۳۸٪	۴۸٪	۹۲٪	۱۳۹٪	طیس	حداکثر تغییر شکل برشی جداگرها
۵۷٪	۷۰٪	۶۲٪	۷۲٪	۱۱۵٪	۱۲۶٪	ناغان	

جدول ۶. حداکثر پاسخ جداگرهای استفاده شده در پل دوم

حالت‌های مختلف پل						پل دوم	
جداسازی شده با تکیه‌گاه انبساط حرارتی		جداسازی شده با جداگر				پاسخ جداگر در برابر	
E.b2	E.b1	d	c	b	a		
۱۸۸	۱۶۱	۹۳	۶۵	۹۶	۶۲	طیس	حداکثر نیروی جداگرها در جهت عرضی (KN)
۱۷۹	۱۵۵	۱۰۹	۷۸	۸۹	۶۲	ناغان	
۲۲۲	۱۸۶	۱۰۵	۷۵	۸۴	۶۱	طیس	حداکثر نیروی جداگرها در جهت طولی (KN)
۲۴۰	۱۹۴	۱۳۵	۱۲۰	۱۰۳	۸۰	ناغان	
۳۰٪	۳۶٪	۱۷٪	۱۸٪	۵۷٪	۵۱٪	طیس	حداکثر تغییر شکل برشی جداگرها
۳۲٪	۳۸٪	۳۰٪	۳۸٪	۶۶٪	۸۱٪	ناغان	

جدول ۷. نتایج تحلیل پل اول (در حالت جداسازی شده تعداد کل جداگرها = ۳۲)

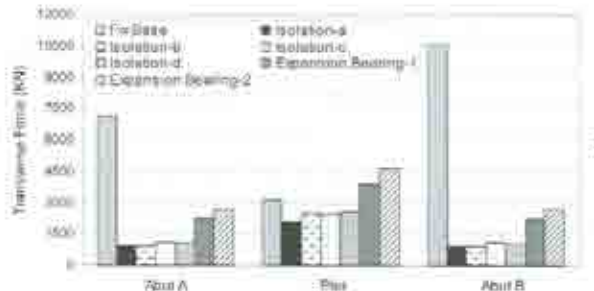
حالت‌های مختلف پل							پل اول	
جداسازی شده با تکیه‌گاه انبساط حرارتی		جداسازی شده با جداگر				جداسازی نشده	پاسخهای پل در برابر زلزله	
E.b2	E.b1	d	c	b	a			
۰/۹۲	۱/۰۸	۰/۷۰	۰/۷۰	۱/۳۴	۱/۳۴	۰/۲۵	دوره تناوب مؤثر (ثانیه)	
۹۹۸۷	۸۲۶۳	۴۴۹۶	۴۲۸۶	۴۳۳۴	۳۵۸۹	۳۳۱۶۸	طیس	حداکثر برش پایه عرضی (KN)
۱۱۷۳۱	۸۶۶۰	۴۹۵۸	۴۶۳۹	۴۶۳۴	۴۰۸۶	۲۳۵۷۴	ناغان	
۹۶۲۲	۸۸۵۳	۴۲۶۵	۳۵۲۶	۴۱۳۰	۳۳۰۳	۲۰۳۷۸	طیس	حداکثر برش پایه طولی (KN)
۱۰۶۸۴	۹۴۹۳	۵۵۲۱	۴۸۹۵	۴۲۳۳	۳۵۹۹	۲۳۶۸۷	ناغان	
۴/۶	۳/۹	۲/۶	۲/۷	۲/۵	۲/۲	۳/۴	طیس	حداکثر جابجایی جانبی عرضی سر ستونهای پایه‌های میانی (cm)
۵/۶	۴/۳	۳	۳	۲/۹	۲/۶	۳/۹	ناغان	
۹/۶	۱۰/۵	۵/۷	۵/۲	۷/۱	۶/۱	۰/۷	طیس	حداکثر جابجایی جانبی طولی سر ستونهای پایه‌های میانی (cm)
۱۰/۹	۱۱/۷	۷/۸	۷/۵	۷/۳	۶/۶	۰/۵	ناغان	
۳۰٪	۲۵٪	۱۴٪	۱۳٪	۱۳٪	۱۱٪	۱۰۰٪	طیس	نسبت برش پایه عرضی جدا شده به برش پایه عرضی جدا نشده
۵۰٪	۳۷٪	۲۱٪	۲۰٪	۲۰٪	۱۷٪	۱۰۰٪	ناغان	
۴۷٪	۴۳٪	۲۱٪	۱۷٪	۲۰٪	۱۶٪	۱۰۰٪	طیس	نسبت برش پایه طولی جدا شده به برش پایه طولی جدا نشده
۴۵٪	۴۰٪	۲۳٪	۲۱٪	۱۸٪	۱۵٪	۱۰۰٪	ناغان	

جدول ۸. نتايج تحليل پل دوم (در حالت جدا سازي شده تعداد گل جدا گر ها = ۴۸)

حالت های مختلف پل						پل دوم	
جدا سازي شده با تکیه گاه انبساط حرارتي		جدا سازي شده با حفاظگر				جدا سازي شده	پاسخ های پل در برابر زلزله
E.h2	E.h1	d	c	b	a		
۰.۲۹	۰.۳۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۳۱	۰.۳۱	۰.۱۱	دوره نوار مولد (اناب)
۸۳۷۱	۷۵۲۱	۴۷۰۹	۴۱۲۳	۵۵۸۸	۴۱۲۳	۲۰۳۲۴	طنین
۸۷۹۹	۸۳۶۶	۵۵۴۷	۴۱۵۹	۴۵۳۳	۳۶۰۴	۱۹۵۴۲	ناغان
۹۴۴۱	۸۵۴۳	۵۰۹۳	۳۵۹۰	۴۹۸۸	۳۷۳۵	۳۳۲۲۶	طنین
۱۱۶۸۴	۹۴۹۷	۷۱۹۴	۴۹۸۵	۶۰۳۷	۴۹۱۲	۱۶۶۱۸	ناغان
۰.۴۹	۰.۴۱	۰.۲۸	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۲۴	۰.۱۰	طنین
۰.۷۰	۰.۴۷	۰.۳۱	۰.۲۴	۰.۲۸	۰.۲۱	۱.۱۷	ناغان
۱.۲۸	۱.۳۷	۰.۷۷	۰.۵۸	۰.۸۴	۰.۶۷	۰.۴۲	طنین
۱.۷۴	۱.۵۷	۱.۱۶	۱.۰۴	۱.۴۳	۰.۸۹	۱.۳۷	ناغان
۴.۱۷	۳.۷۱	۲.۳۱	۲.۰۷	۲.۷۱	۲.۰۷	۱۰.۴۱	طنین
۴.۵۰	۴.۳۱	۲.۹۱	۲.۸۱	۲.۵۰	۲.۹۱	۱۰.۰۱	ناغان
۴.۱۷	۳.۷۱	۲.۳۱	۲.۰۷	۲.۷۱	۲.۰۷	۱۰.۰۱	طنین
۹.۰۱	۵.۷۱	۴.۳۱	۳.۶۱	۳.۷۱	۳.۰۱	۱۰.۰۱	ناغان

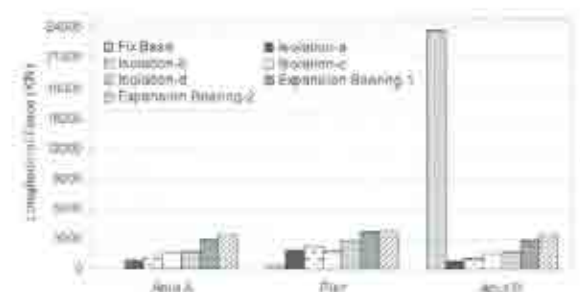


شکل ۴. برش عرضی کوله ها و پایه پل اول تحت زلزله ناغان (a)



شکل ۴. برش عرضی کوله ها و پایه پل اول تحت زلزله طیس (b)

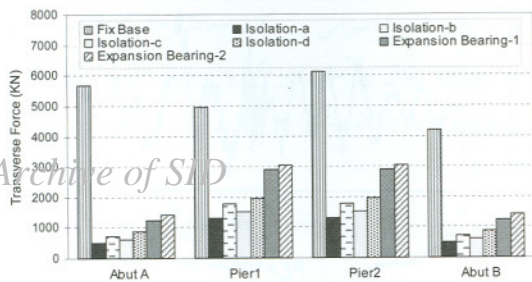
شکل ۴. برش عرضی کوله ها و پایه پل اول



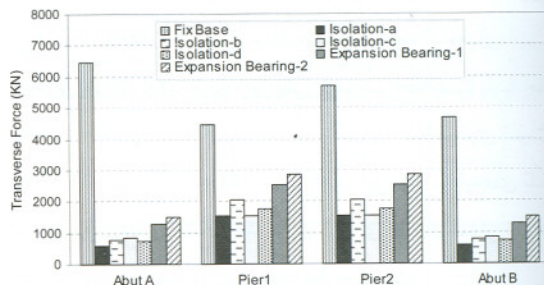
شکل ۵. برش طولی کوله ها و پایه پل اول تحت زلزله ناغان (a)



شکل ۵. برش طولی کوله ها و پایه پل اول تحت زلزله طیس (b)

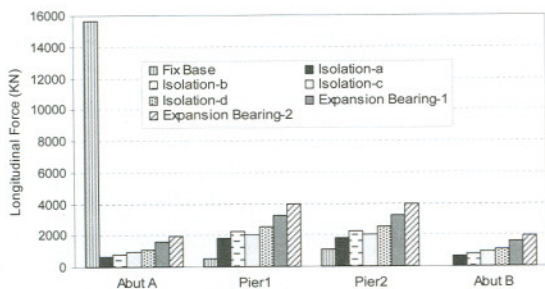


(b) تحت زلزله ناغان

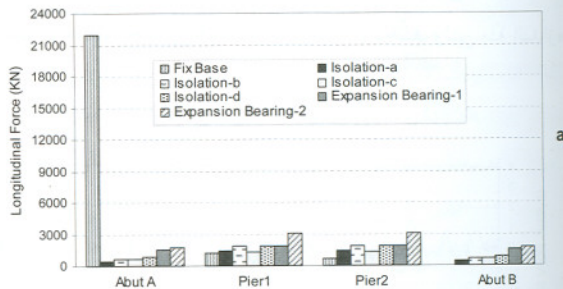


(a) تحت زلزله طیس

شکل ۶. برش عرضی کوله‌ها و ستون‌های پل دوم



(b) تحت زلزله ناغان



(a) تحت زلزله طیس

شکل ۷. برش طولی کوله‌ها و ستون‌های پل دوم

۵-۴ مقایسه بین جابجایی‌های سرستون‌ها

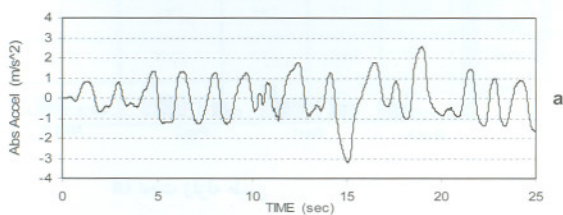
سرستون‌های پل افزایش می‌یابد که این مشکل را می‌توان با تفاوت در سختی جداگرهای لرزه‌ای بین کوله‌ها و پایه‌های میانی تا حدودی رفع کرد. اما در پل‌هایی که رفتار صلب‌تری دارند در حالت جداسازی شده برش پایه‌ها تقلیل و جابجایی سرستون‌ها کاهش می‌یابد.

در شکل‌های ۸ و ۹، جابجایی سرستون‌های پل‌های اول و دوم ارایه می‌شوند که این پل‌ها نسبتاً صلب بوده و کارایی جداگرها در کاهش جابجایی سرستون‌ها را به روشنی نشان می‌دهند. بنابراین با جداسازی، به ترتیب پل‌های دوم و اول، جابجایی نسبی سرستون‌هایشان با توجه به میزان صلیبیت آنها کاهش یافته و هر اندازه که پل صلب‌تر باشد، جداسازی کارایی خود را بهتر نشان می‌دهد. تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی در پل اول که نسبت به پل دوم نرم‌تر است، جابجایی سرستون‌ها را اصلاً کاهش نداده‌اند، ولی در پل دوم تقریباً ۷۰٪ تا ۹۰٪ جداگر، کارایی دارند.

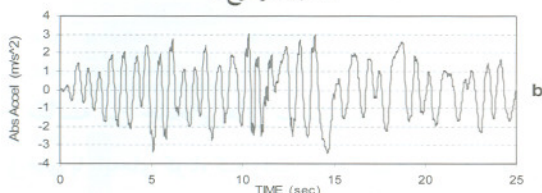
در پل‌های با پایه‌های کوتاه که رفتار صلب‌تری دارند، وقتی جداسازی شوند انتظار می‌رود که جابجایی‌های سرستون‌ها به خوبی کاهش یافته و ضریب حفاظت پایه افزایش یابد. روند کاهش جابجایی‌های سرستون‌های پل با پایه‌های کوتاه به این صورت است که قبل از این که پل جداسازی شود نیروی جانبی زلزله به دلیل صلیبیت نسبی پایه‌ها، تقریباً بین کوله‌ها و پایه‌ها به طور مساوی و به نسبت سطح بارگیریشان تقسیم می‌شوند و بعد از جداسازی این نیروها کاهش یافته و بنابراین جابجایی سرستون‌ها نیز کاهش می‌یابد. ولی در پل با پایه‌های بلند و لاغر که رفتار نرمی دارند، قبل از جداسازی، اکثر نیروی جانبی زلزله به کوله‌ها منتقل شده و سهم خیلی اندکی به پایه‌ها می‌رسد. اما همین پل نرم بعد اینکه جداسازی شد، به دلیل پخش نیروی به صورت مساوی و به نسبت سطح بارگیر بین پایه‌ها و کوله‌ها، علیرغم کاهش کل نیروی جانبی زلزله، برش پایه‌ها در حالت جداسازی بیشتر از حالت معمولی پل شده و در نتیجه جابجایی

سخت تر است، بزرگتر بوده و کارایی مطلوب جداسازی در پل های با پایه های کوتاه را نشان می دهد. تکیه گاه های انبساط حرارتی در پل اول برای افزایش ضریب حفاظت پایه اصلا عملکرد مطلوبی نداشته و در پل دوم کارایی ضعیف تری نسبت به جداگرها دارند. لازم به ذکر است **SID** در پل های با پایه های بلند و لاغر بدلیل رفتار نرمشان جداسازی لرزه ای چندان مؤثر نبوده و ضریب حفاظت پایه در این پل ها مطرح نیست.

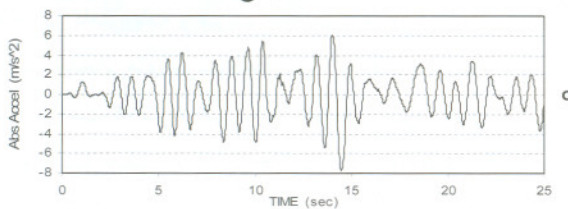
در شکل ۱۰ نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب مطلق جانبی پل اول تحت مولفه عرضی زلزله طیس ارایه می شود. همان طور که نمودارها نشان می دهند، تکیه گاه های انبساط حرارتی تا حدودی شتاب مطلق جانبی عرشه را کاهش داده اند ولی به اندازه جداگرها مؤثر نیستند.



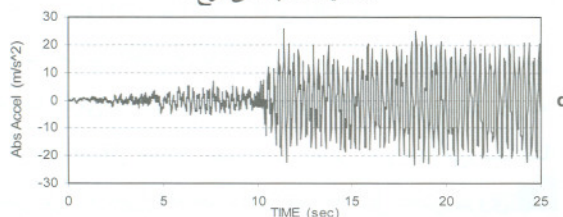
جداگر نوع a



جداگر نوع d

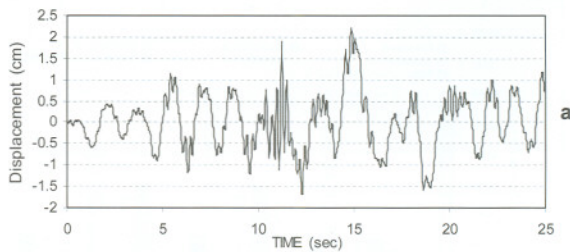


تکیه گاه انبساطی نوع ۲ (c)

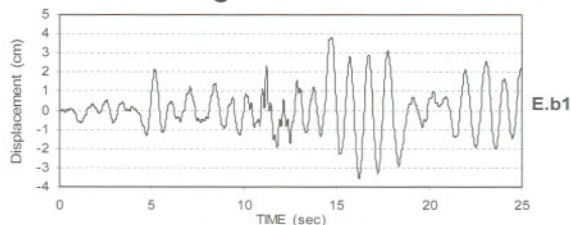


جداسازی نشده (d)

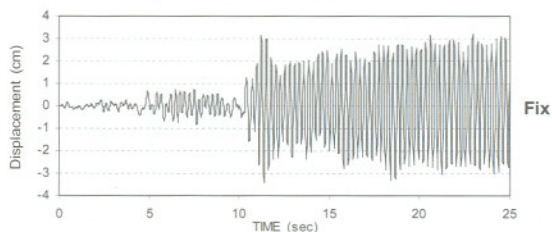
شکل ۱۰. نمودار تاریخچه زمانی شتاب مطلق جانبی در پل اول تحت زلزله طیس



جداگر نوع a



تکیه گاه انبساطی نوع ۱ (E.b1)



جداسازی نشده (Fix)

شکل ۸. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی جانبی سرستون پل اول در حالت های مختلف تحت زلزله طیس

۵-۵ مقایسه ضریب حفاظت پایه و شتاب مطلق جانبی پل های مورد مطالعه

همان طور که اشاره شد، در پل های با پایه های کوتاه انتظار می رود که با جداسازی جابجایی های سرستون ها به خوبی کاهش یافته و ضریب حفاظت پایه افزایش یابد. ضریب حفاظت پایه طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$pp = \frac{(d_{ni} - d_i)}{d_{ni}}$$

که در آن:

pp : ضریب حفاظت پایه که عددی بین ۰ و ۱ است،

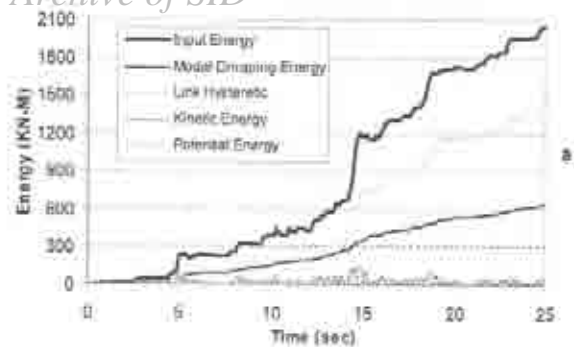
d_{ni} : جابجایی سرستون قبل از جداسازی

d_i : جابجایی سرستون بعد از جداسازی

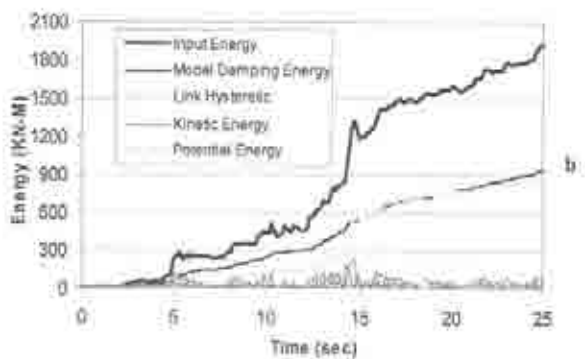
ضریب حفاظت پایه پل های مورد مطالعه تحت مؤلفه عرضی زلزله ها در جدول ۹ ارایه می شود. همان طور که دیده می شود، ضریب حفاظت پایه های پل دوم به دلیل اینکه از پل اول

الزایش یابد، سختی مؤثر کل پل افزایش یافته ولی دوره تناوب مؤثر پل و نسبت میرایی و سیگور معادل جداگر کاهش می‌یابد پس هرچه رفتار دوخطی جداگر به سمت حالت الاستوپلاستیک کامل برود، بازه آن بیشتر خواهد بود.

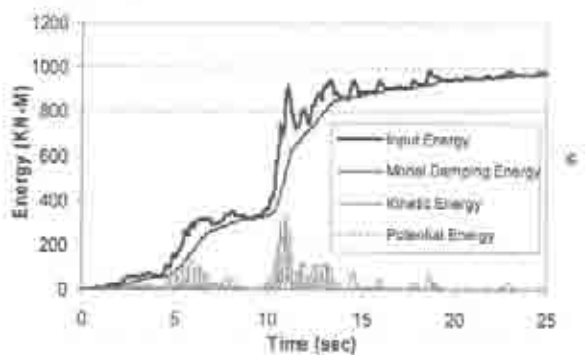
Archive of SID



الف جداگر نوع ۱



ب جداگر نوع ۲



ج تکیه‌گاه انبساطی نوع ۳

شکل ۱۱. نمودار تاریخچه زمانی انرژی در پل دروم تحت مولفه عرضی زلزله طیس

جدول ۹. ضریب حفاظت پایه پل‌ها (تحت مولفه عرضی زلزله‌ها)

پل		ضریب حفاظت پایه پل‌ها در حالت‌های مختلف				
		E.b2	E.b1	d	c	h
۶۵٪ ماتی پل اول	طیس	-	-	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲۶
	تغاب	-	-	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۶
۸۰٪ سایر	طیس	۱/۵۸	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۸۷	۰/۷۶
	تغاب	۰/۵۷	۰/۶۰	۰/۷۱	۰/۷۸	۰/۷۶

۶-۵ مقایسه انرژی ورودی و نحوه جذب و اتلاف آن در پل‌های مورد مطالعه

همان‌طور که اشاره شد، کارایی جداگرها به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر سختی و میرایی آنهاست، بنابراین باید این پارامترها را به دقت در نظر گرفت و مرصع‌وارد کرد. میرایی جداگر جانبی را کنترل کرده و قسمتی از انرژی ورودی زلزله را جذب و اتلاف می‌کند. در شکل ۱۱، تاریخچه تجمعی انرژی ورودی مولفه عرضی زلزله طیس و نحوه جذب و اتلاف آن برای پل دروم در حالت جداسازی شده با انواع جداگر و در حالت پل با تکیه‌گاه انبساط حرارتی ارائه می‌شود. انرژی ورودی زلزله در پل‌های جداسازی شده به صورت چهار انرژی Kinetic, Modal Damping, Link Hysteretic Potential جذب شده و اتلاف می‌شود. نمودارهای ارائه شده نشان می‌دهند که ۱۵٪ تا ۶۵٪ انرژی ورودی زلزله توسط جداگرها جذب می‌شود در حالی که در پل‌های با تکیه‌گاه انبساط حرارتی به دلیل اینکه میرایی ندارند، نرم چهارم جذب و اتلاف انرژی (Link Hysteretic) وجود نداشته و پل‌ها با جانبایی و تغییر شکل‌های بزرگ، انرژی ورودی زلزله را عمدتاً به صورت میرایی ذاتی خود جذب و اتلاف می‌کنند و البته سهم انرژی جنبشی و پتانسیل نیز تا حدودی بیشتر شده است.

در شکل ۱۲، منحنی‌های هیستریزس نیرو-جابجایی دو نوع جداگر برای پل اول تحت مولفه عرضی زلزله طیس ارائه می‌شود که سطح داخلی منحنی‌ها مقدار انرژی اتلاف شده توسط جداگرها را نشان می‌دهد. هر چقدر سختی اولیه و به خصوص لیسروی تسلیم جداگر افزایش می‌یابد، سطح داخلی منحنی‌ها کوچک شده و در نتیجه از مقدار انرژی اتلاف شده توسط جداگرها کاسته می‌شود. همچنین هر چه سختی پس از جاری شدن یک جداگر

ملاحظه‌ای بکاهند. به عبارت دیگر تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی میرایی لازم برای جذب و اتلاف انرژی ورودی زلزله را ندارند. بنابراین پل‌ها با جابجایی و تغییر شکل‌های بزرگ، انرژی ورودی زلزله را عمدتاً به صورت میرایی ذاتی خود جذب و اتلاف می‌کنند، در صورتی که برای جداسازی لرزه‌ای تکیه‌گاه‌ها در جذب و اتلاف انرژی ورودی زلزله بیش از ۵۰٪ است.

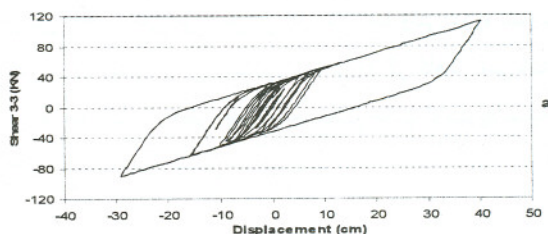
تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی هر چند نیروهای زلزله را بین کوله‌ها و پایه‌ها توزیع می‌کنند، ولی پاسخ‌های لرزه‌ای (نیروی زلزله، جابجایی‌های اجزای سازه، شتاب مطلق عرشه و ...) پل را به خوبی جداگرها کاهش نمی‌دهند. در پل‌های مورد بررسی و در حالت استفاده از این تکیه‌گاه‌ها، برش پایه عرضی بین ۵۰٪ تا ۷۵٪ و برش پایه طولی تقریباً بین ۳۰٪ تا ۶۰٪ کاهش یافته و البته برای چنین کاهش نسبی پاسخ‌های لرزه‌ای، تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی باید کرنشهای برشی بزرگی را بدون ایجاد اختلال در کارایی‌شان به عنوان جداگر، تحمل نمایند که با توجه به مشخصات فیزیکی آنها، دور از انتظار می‌باشد که این کرنش‌ها را در مدت وقوع زلزله و به تعداد سیکل‌های زیاد بتوانند تحمل کنند. علاوه بر مشخصات فیزیکی این تکیه‌گاه‌ها، محل مناسب و نحوه صحیح نصب آنها برای تحمل و امکان ایجاد تغییرشکل‌های برشی بالا به هنگام وقوع زلزله لازم است. نتایج تحلیل‌های پل‌های مورد بررسی در این تحقیق نشان می‌دهند که کارایی تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی نسبت به جداگرها، برای کاهش نیروی برشی عرضی در کوله‌ها تقریباً ۴۵٪ و برای کاهش نیروی برشی عرضی در پایه‌ها کمتر از ۵۵٪ بوده است. لازم به ذکر است که در پل اول و در حالت تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی نیروی برشی عرضی در پایه‌ها نه تنها کاهش نیافته، بلکه تا ۵۰٪ نیز افزایش می‌یابد. این تکیه‌گاه‌ها تا حدودی شتاب مطلق جانبی عرشه را کاهش داده و به اندازه ۴۰٪ کارایی جداگرها، موثر هستند.

۷. سپاس

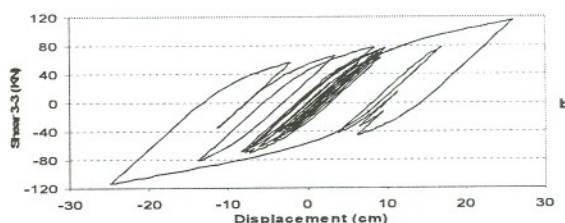
از معاونت تحقیقات و آموزش وزارت راه و ترابری، برای حمایت از پروژه تحقیقاتی "طرح و توسعه جداساز مناسب زلزله برای پل‌های راه و راه‌آهن" سپاسگزاری می‌شود.

۸. پانویس‌ها

1- Fast Nonlinear Analysis



جداگر نوع (a)



جداگر نوع (b)

شکل ۱۲. نمودار هیستریزس نیرو-جابجایی انواع جداگرها در پل اول تحت مولفه عرضی زلزله طبس

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق توانایی و مزایای جداگرهای لرزه‌ای به‌عنوان ابزار کنترل غیرفعال نیروهای زلزله که به طراحان اجازه می‌دهد نیروهای زلزله وارد بر پایه‌ها و کوله‌های پل را کاهش داده و یا متعادل کنند، به‌خوبی به اثبات رسید. با دقت در نتایج حاصل از تحلیل می‌توان گفت که جداگرها سطح نیروهای جانبی ناشی از زلزله را پائین آورده و با انحراف و جذب عمده انرژی ورودی زلزله، از اجزای زیر سازه پل محافظت می‌کنند. هر چه پل دارای سختی جانبی بیشتری باشد مثل پل‌های با دهانه کوتاه تا متوسط که روی پایه‌های کوتاه قرار داشته باشند، تأثیر جداسازی لرزه‌ای مشهودتر است. سختی اولیه جداگر نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده سیستم ایفا می‌کند. نیروی تسلیم جداگر نیز با کنترل میرایی هیستریتیک، در رتبه دوم اهمیت قرار دارد. در پل‌های مورد بررسی در حالت جداسازی شده و با توجه به نوع جداگر، برش پایه عرضی بین ۷۰٪ تا ۹۰٪ و برش پایه طولی تقریباً بین ۶۰٪ تا ۸۵٪ کاهش یافته است.

کارایی تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی به خوبی جداگرهای لرزه‌ای نیست و حتی در صورت امکان لغزش لازم در آنها به هنگام زلزله، بر اساس تحلیل‌ها و آزمایش‌های انجام گرفته بر روی این تکیه‌گاه‌ها به علت الاستیک خطی بودن رفتار نیرو-تغییر مکان، میرایی و استهلاک انرژی چندانی نداشته و نمی‌توانند از سطح انرژی و نیروهای برشی وارد بر زیرسازه پل‌ها به میزان قابل

Proc. of Twelfth World Conf. on Earthquake Engineering, Paper No. 0321.

10. Tongaonkar, N.P. and Jangid, R.S. (2000) "Earthquake response of seismically isolated bridges", European Earthquake Engineering, Vol. XIV, pp. 48-58.

11. Park, K.S., Cho, S.W. and Lee, I.W. (2002) "A comparative study on aseismic performances of base isolation systems for multi-span continuous bridge", Engineering Structures, Vol.24, pp. 1001-1013.

12. Kaplan, H. and Seireg, A. (2002) "A base isolation system for bridges subjected to seismic disturbances", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, pp. 1093-1112.

۱۳. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (۱۳۸۲) "لاستیک - بالشتک‌های زیرسری پل - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون"، استاندارد ملی ایران، شماره ۶۵۸۳.

14. SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures(2003) "User manual, Ver. 8.3.3", Berkeley, California.

15. Shome, N. and Cornell, C.A. (1999) "Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures", Report No. RMS-35, Reliability of marine structures program, Dept of Civil & Environmental Engineering, Stanford University.

16. Silva, W. and Lee, K. (1987). "State of the art for assessing earthquake hazards in the United States, Report 24, WES RASCAL code for synthesizing earthquake ground motions", Miscellaneous paper S-73-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

۱. زهرائی، سید مهدی (۱۳۸۴) "طرح و توسعه جداساز مناسب زلزله برای پل‌های راه و راه‌آهن"، گزارش تحقیقاتی پژوهشکده حمل‌ونقل وزارت راه و ترابری، شهریور ۸۴

۲. زهرائی، سید مهدی و محمدی، محمد مهدی (۱۳۸۴) "افزایش ایمنی پل‌ها در برابر زلزله به کمک جداسازی لرزه‌ای"، پژوهشنامه حمل‌ونقل، شماره ۴، ص. ۲۲۳-۲۳۵.

3. Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999) "Design of seismic isolated structures from theory to practice", John Wiley and Sons, New York.

4. Ghobarah, A. (1988) "Seismic behavior of highway bridges with base isolation", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 15, pp.72-78.

5. Ghobarah, A. and Ali, H.M. (1988) "Seismic performance of highway bridges", Engineering Structures, Vol.10, pp.157-166.

6. Turkington, D.H., Cooke, N., Moss, P.J. and Carr, A.J. (1989) "Development of design procedures for bridges on Lead-rubber bearings", Engineering Structures, Vol. 11, pp. 3-8.

7. Li, X.M. (1989). "Optimisation of the stochastic response of a bridge isolation system with hysteretic dampers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, pp. 951-964.

8. Saiidi, M., Maragakis, E. and Griffin, G. (1999) "Effect of base isolation on the seismic response of multi-column bridges", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 8, pp. 411-419.

9. Abe, M., Fujino, Y. and Yoshida, J. (2000) "Dynamic behaviour and seismic performance of base-isolated bridges in observed seismic records",