افزایش ایمنی پل‌ها در برابر زلزله به کمک جداسازی لرزه‌ای*

سیّد مهدی زهرایی، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
محمّد مهدی محمّدی، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
E-mail:mzahrai@ut.ac.ir.

چکیده

با توجه به انواع خسارتهای پلها در زلزله‌های گذشته که عمدتاً به علت تخمین کمتر از واقع نیروهای زلزله بر آنها ایجاد شده، می‌توان از جداگرهای لرزه‌ای به نحو مؤثری در مقاوم‌سازی پلهای موجود و یا طراحی پلهای جدید واقع در نواحی لرزه‌خیز بهره گیری کرد. هدف از تحقیق حاضر، ضمن بررسی خواص جداگرهای لرزه‌ای الاستومری، ارائه مبانی طراحی این جداگرها بر طبق آیین نامه آشتو و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف این جداگرها مانند سختی اولیه، سختی ثانویه و نیروی‌تسلیم آنها در بهبود رفتار لرزه‌ای پنج پل بزرگراهی نمونه بوده است. بر اساس نتایج به دست آمده، این جداگرها در کاهش نیروها و جابه‌جایی‌های لرزه‌ای پلها تأثیر بسزایی دارند. هر چه پل سختی جانبی بیشتری داشته باشد، تأثیر جداسازی لرزه‌ای مشهودتر است. سختی اولیه جداگر نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده سیستم ایفا می‌کند. نیروی تسلیم جداگر نیز با کنترل میرایی هیسترتیک، در رتبه دوم اهمیت قرار دارد. همچنین هرچه سختی اولیه جداگر کمتر باشد، معمولاً نیروها و جابه‌جایی‌های نسبی پل کاهش بیشتری پیدا می کنند، اما جابه‌جایی‌های مطلق عرشه پل بیشتر می شود که می‌توان با بکارگیری قطعاتی که نیروی تسلیم و میرایی جداگر را افزایش دهد، مقدار جابه‌جایی‌های کل را نیزکاهش داد. بنابراین با توجه به طراحی‌ها و تحلیل‌های انجام شده، می‌توان از جداگرهای لرزه‌ای الاستومری در مقاوم‌سازی پلهای موجود یا طراحی پلهای جدید، به نحو مؤثری بهره گیری کرد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی لرزه‌ای، جداگرهای الاستومری، طراحی و بهسازی لرزه‌ای، رفتارغیرخطی جداگر، تحلیل‌غیرخطی، تاریخچه زمانی

۱. مقدمه

روش مرسوم طراحی مقاوم در برابر زلزله برای پل‌ها افزایش مقاومت یا افزایش ظرفیت جذب انرژی (معرف شکل‌پذیری) اجزای آن است. این شکل‌پذیری دربردارنده خسارت بوده، در نتیجه روش طراحی مرسوم از فروپاشی پل جلوگیری می‌کند، ولی مانع خسارت وارده به پل نمی‌شود. یک روش مدرن، جداسازی پل با استفاده از جداگرهای لرزه‌ای است. اگرچه تنها بیش از دو دهه ازکاربرد جداسازی لرزه‌ای در پل‌ها می‌گذرد، اما مطالعات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته‌اند که همگی کارآیی آنها در پل‌ها را تأیید می‌کنند. مفهوم اصلی جداسازی لرزه‌ای، یکی افزایش دوره تناوب سازه و دیگری افزایش میرایی سازه یا هردو باهم است [۱و۲]. جداسازی لرزه‌ای روشی است که نیروهای لرزه‌ای را در محدوده ظرفیت ارتجاعی عضو نگه می‌دارد، در نتیجه از تغییرشکل‌های غیرکشسان جلوگیری کرده یا دست کم آنها را کاهش می‌دهد.

روش جداسازی لرزه‌ای به دلیل مزایایی که دارد، از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روشهای مقاوم‌سازی به‌شمار می‌رود، زیرا با جایگزینی تکیه‌گاه‌های موجود پل‌ها باجداگرهای لرزه‌ای، ضمن جلوگیری از قطع ترافیک و همچنین سرعت کار، به‌تعویض‌یا ترمیم‌اجزای دیگر پل نیازی نیست و دراین هزینه‌ها صرفه‌جویی شده وتنهاهزینه واحدهای جداگر مورداستفاده بایددرنظرگرفته‌شود.

* تاریخ دریافت: ۸۳/۱۲/۲۶ – تاریخ پذیرش: ۸٤/۱۰/۱۱

Archive of SID
www.SID.ir

۱. انوع جداگرها

تاکنون دو گروه کلی جداگرهای لرزه‌ای ابداع و از آنها در پل‌ها استفاده شده است: جداگرهای الاستومری و جداگرهای اصطکاکی. هریک از این دو گروه دارای انواع مختلف است که موارد استفاده از آنها با توجه فنآوری ساخت هر کشور و اهمیت پلها و نیاز عملکردی آنها، متفاوتند. بعضی از سیستم های جداگر رفتار صرفاً نرم‌شونده دارند و رابطه نیرو – تغییر مکان تقریباً دوخطی از خود نشان می‌دهند، مانند جداگرهای لاستیکی– سربی، پاندول اصطکاکی و یا سیستم‌های دوگانه شامل سطوح لغزش با فنرهای بازگرداننده. برای تحلیل غیرخطی این سیستم‌ها، با استفاده از اجزای هیسترزیس می‌توان پاسخ آن را در همهٔ محدوده‌های تغییرمکانی، با دقت به دست‌آورد. از دیدگاه انرژی، اجزای هیسترزیس برای چنین جداگرهایی مناسبند، زیرا مکانیزم استهلاک انرژی یا به‌صورت فرآیند ناشی از تسلیم سرب و یا اصطکاک کولمب (لغزشی) است وبه دقت با استهلاک انرژی حاصل از مدل جزء دوخطی مطابقت دارد. اما بعضی از جداگرها مانند لاستیک با میرایی زیاد خود رفتار نرم‌شونده – سخت‌شونده دارند. برای چنین سیستم‌هایی، مدل سادهٔ دوخطی، رابطه نیرو– تغییرمکان را در محدودهٔ تغییرمکان های زیاد به درستی نشان نمی‌دهد [۳].

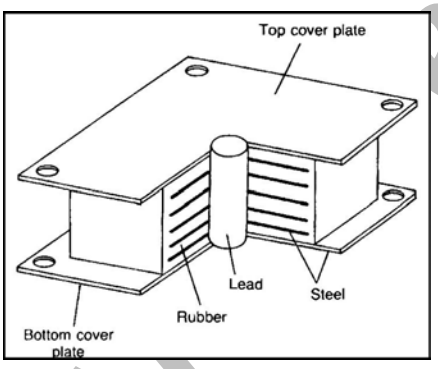
با توجه به استفاده از تکیه‌گاه‌های نئوپرنی در پلهای موجود و امکان ساخت جداگرهای الاستومری در کشور، استفاده از جداگرهای الاستومری، منطقی و عملی به نظر می‌رسد.

۱–۱ جداگرهای الاستومری چندلایه ای مسلح شده توسط ورقهای فولادی (ERB)

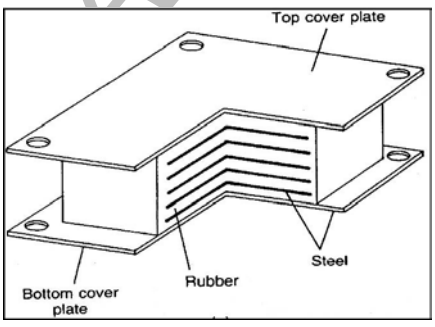
در این جداگرها، لاستیک طبیعی یا مصنوعی توسط ورق‌های فولادی مسلح می‌شود، به این صورت که صفحات فولادی و لاستیک یک در میان روی هم قرار می‌گیرند. کاربرد اولیهٔ این جداگرها در روسازه پل‌ها، البته به صورت ساده و ابتدایی، برای تحمل تغییرشکل های ناشی از تغییرات درجه حرارت بوده است. این جداگرها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که وزنهای بزرگ را تحمل می‌کنند، در حالی که در برابر جابه‌جایی‌های افقی بزرگ، مقاومت اندکی ازخود نشان می‌دهند. با تغییرات ساختاری این تکیه‌گاه‌ها می‌توان ظرفیت باربری و انعطاف‌پذیری افقی و میرائی لازم برای جداسازی لرزه‌ای را تأمین کرد. چنین سیستمی عموماً دارای ظرفیت میرایی زیاد با میرایی ذاتی لاستیک و یا به وسیلهٔ سیستم های میرایی مکمل انعطاف‌پذیری افقی و سختی قائم زیاد است و معمولاً دو صفحهٔ انتهایی ضخیم فولادی و نیز تعدادی صفحات نازک فولادی داخلی دارد.

۱–۲ جداگرهای لاستیکی – سربی (LRB)

جداگرهای لاستیکی– سربی، ازنوع جداگرهای لاستیکی شبیه به جداگرهای الاستومری چند لایه هستند، ولی یک یا چند هستهٔ سربی دارند که به منظور اضافه‌کردن میرایی به این سیستم جداگر در منافذی قرارگرفته‌اند. صفحات فولادی موجود در این جداگر، هستهٔ سربی را وادار می‌کنند که در برش تغییرشکل بدهد. رفتار نیرو – تغییرمکان این جداگر تحت بارهای بهره برداری به صورت ارتجاعی بوده، ولی در هنگام زلزله، هستهٔ سربی به صورت پلاستیک تغییر شکل می‌دهد. تسلیم و تغییرشکل پلاستیک هستهٔ سربی نسبت میرایی سازه را افزایش می‌دهد. بنابراین جداگرهای با هسته سربی قادرند به طور همزمان بار قائم سازه را تحمل کرده، انعطاف‌پذیری افقی به همراه نیروی بازگرداننده و نیز میرایی هیسترتیک مورد نیاز را تأمین کنند. قابلیت جذب انرژی توسط هسته سربی، جابه‌جایی‌های افقی جداگر را کاهش می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱. تکیه گاه الاستومریک چند لایه لاستیکی با میرایی کم (الف) و لاستیکی– سربی (ب)

Archive of SID
www.SID.ir

۲. مروری بر پیشینهٔ مطالعات

پژوهشگران مختلف، پارامترها و خصوصیات مختلف انواع جداگرهای لرزه‌ای در پلهای مختلف را مورد تحلیل و آزمایش قرار داده‌اند که به طور خلاصه می‌توان گفت که همگی نقش مؤثرجداگرهای لرزه‌ای در بهبود رفتار پل را تأیید کرده‌اند[۱].

در اواخر دهه ۸۰ میلادی، غباره [٤] با بررسی پاسخ لرزه ای پل‌های یک و دو دهانه مجهز به جداگرهای لاستیکی- سربی به صورت فنر دوخطی چنین بیان نمود که هرچه سختی و خروج از مرکزیت پایه‌ها از جداگرها افزایش یابد، کارآیی جداگرهای لرزه‌ای بیشتر شده و تأثیر آنها در بهبود رفتار پل‌ها نمایان‌تر می‌شود؛ از سوی دیگر با افزایش سختی عایق لرزه‌ای، کارآیی آنها تا حدی کاهش می‌یابد. در تحقیقی مشابه [٥] پاسخ یک پل سه دهانه عایق بندی شده با جداگرهای لاستیکی - سربی در برابر زلزله بررسی شده است. نتیجه‌گیری شده است که پل‌های بزرگراهی با دو یا سه دهانه معمولی، با فرض عرشه صلب در جهت افقی برای جداسازی لرزه‌ای مناسبند. همچنین ترکینتون و همکاران [٦] بیان می‌کنند که جداگرهای لاستیکی - سربی در ترکیب با بالشتک‌های الاستومری ابزار مؤثری برای توزیع نیروی‌زلزله بین پایه‌ها و کوله‌ها هستند. مایس و همکاران [۷] با مرور بر مفاهیم اساسی و اصول طراحی جداسازی لرزه‌ای و اهداف و فلسفه ضوابط مربوط در راهنمای آئین‌نامه آشتو (AASHTO) عنوان کرده‌اند که سیستم‌های جداسازی با هراندازه میرایی، مؤثر و کارآ هستند.

هوانگ و شنگ [۸] نسبت میرایی معادل برای پل با بالشتک‌های لاستیکی- سربی را با استفاده از روش خطی معادل بر طبق آیین‌نامه آشتو بررسی کرده و نتیجه‌گرفته‌اند که نسبت میرایی معادل که از روش آشتو به دست می‌آید با افزایش تغییر شکل غیرخطی بالشتک‌های لاستیکی - سربی کاهش می‌یابد. رینهورن و همکاران [۹] نیز با بررسی اثر تغییر مشخصه‌های حدتسلیم جداگر و پایه پل بر پاسخ پلهای جداسازی شده مشخص کرده‌اند که پلهای جداسازی شده، به علت درجه نامعینی کم و غلبه حالت ارتعاشی عرشه پل، به خصوصیات حرکت زمین بسیار حساسند. بعد از جاری شدن، با توجه به خصوصیات سختی و دوره تناوب سیستم پل- عرشه، ممکن است سختی ثانویه جداگرها کاملاً حاکم شود. این مطالعه همچنین حساسیت پاسخ پل به تغییرات اندک سختی بعد از جاری شدن سیستم جداسازی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

ابه و همکاران [۱۰] با بررسی پاسخ لرزه ای سه پل با جداگرهای لاستیکی- سربی و بالشتک‌های الاستومری، کارآیی لرزه‌ای آنها را با مقایسه بین سختی شناسایی شده از شتابنگاشت زلزله و مقادیر میرایی پیش بینی شده حاصل از آزمایش بارگذاری ارزیابی کرده‌اند. این تحلیل مشخص می‌کند که جداسازی لرزه ای در تمام پل‌ها مؤثر است.

سوگیاما [۱۱] خصوصیات دینامیکی یک پل با جداگر از نوع لغزشی و یک پل با سیستم جداگر الاستومری را تحت اثرحرکت زلزله مقایسه کرده است. با محاسبه مقادیر بیشینهٔ شتاب عرشه، نیروی برشی وارد بر سرستون‌ها، جابه‌جایی نسبی و پسماند بین عرشه، پایه و شتاب پایه‌ها تحت چند نوع زلزله قوی از طریق تحلیل تاریخچه زمانی، نشان می‌دهد که اگرچه جابه‌جایی نسبی بین روسازه و زیرسازه پل به طور قابل توجهی بزرگ است، اما از نقطه‌نظر کاهش شتاب عرشه، در حالتی که زلزله‌های قوی بر پل اثر می‌کنند، سیستم عایق لغزشی مؤثرتر از سیستم الاستومری است. البته هیچ تفاوت قابل توجهی بین این دو نوع عایق لرزه ای در حالت زلزله‌های نسبتاً کوچک‌تر وجود ندارد. تنگانکار و جانگید[۱۲] 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 درکاهش پاسخ لرزه‌ای پل‌ها بسیار مؤثرند. به علاوه، کارآیی بالشتک‌های الاستومری عمدتاً تحت تأثیر خصوصیات سختی و میرایی قرار دارند.

پارک و همکاران [۱۳] یک مطالعه مقایسه‌ای بر روی کارآیی ضد زلزله انواع جداگرهای لرزه‌ای در یک پل پیوسته چند دهانه به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام داده‌اند و در آن تأثیر نسبی جداگرهای لرزه‌ای مختلف را برحسب تغییرات پارامترهای طراحی، مورد بررسی قرار داده‌اند. ضمنا نشان داده‌اند که مهم‌ترین پارامترهایی که کارآیی جداگرها را کنترل می‌کنند دوره تناوب طبیعی سازه جداسازی شده و ضریب اصطکاک آن هستند. علاوه بر این، عملکردجداگرها تحت تأثیر دامنهٔ فرکانسی و بیشینهٔ شتاب زلزله ورودی نیز قرار می‌گیرد.

۳. طراحی جداگرهای لرزه‌ای الاستومری برای مثال‌های عددی

آیین‌نامه‌ها شرایط و روشهایی را برای تحلیل و طراحی جداگرهای لرزه‌ای قابل استفاده در پل‌ها ارایه کرده‌اند. روش‌های تحلیل مورد

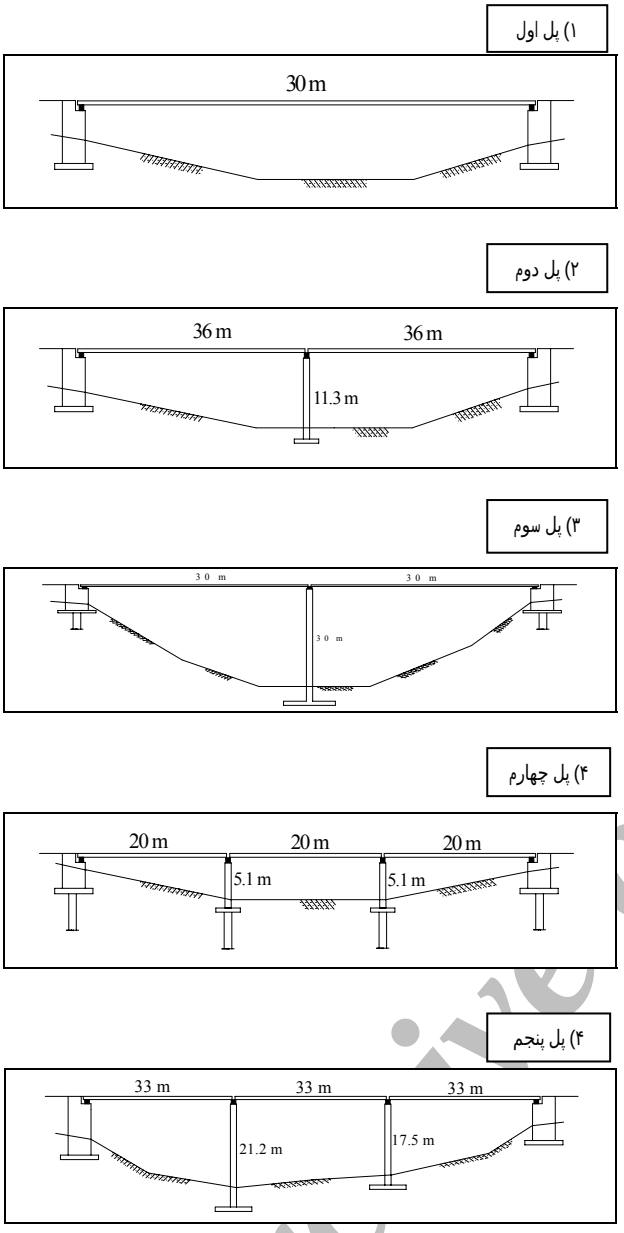
Archive of SID
www.SID.ir

قبول آیین‌نامه‌ها عبارتند از روش استاتیکی معادل یا بار یکنواخت، روش مـودال و روش تاریخچـه‌زمـانی. روش‌هـای اول و دوم هر یک محدودیت‌هایی دارند ولـی روش سـوم بـه علـت اعمـال شتابنگاشت‌های زلزله‌های واقعی به پل‌ها، کامل‌ترین روش است و جوابهای حاصل از آن قابل اعتمادترند.

بین آیین‌نامه‌های مطرح، آیین‌نامه آشتو [١٤] به عنوان متداول‌تـرین آیین‌نامه طراحی پل‌های بزرگراهی برای تحلیل و طراحی انتخـاب می‌شود. پنج پل بزرگراهی اخیرا طراحـی شـده کشـور بـر مبنـای آیین‌نامه طـرح پـل‌هـای شوسـه و راه آهـن در برابـر زلزلـه [١٥] (شکل ٢ و جدول ١) به عنوان مثـال‌هـای عـددی در ایـن تحقیـق بررسی می شوند. نیروی جانبی زلزله موثر بر عرشه پل F، در هـر یک از دو امتداد از رابطه (١) به دست می آید:

$$F = \frac{ABI}{R}W \qquad (١)$$

که در آن, A شتاب مبنای طرح، B ضریب بازتاب پـل، I ضـریب اهمیت پل, W وزن مرده عرشه پل باضـافه درصـدی از بـار زنـده روی پل و R ضریب رفتار پل هستند. برای پنج پل مـورد نظـر بـا استفاده از آیین‌نامه آشتو و با الهـام از برخـی تحقیقـات ذکرشـده، بـه طراحـی چنـد جـداگر لـرزه‌ای الاسـتومری بـا مشخصـات و پارامترهای مختلف اقدام می‌شـود[١]. ایـن پـل‌هـا دارای تنـوع در تعداد و طول دهانه‌ها، ارتفاع پایه‌های میانی و جنس شاهتیرها بوده وهمگی درسالهای اخیر طراحی شـده‌انـد. یـادآوری مـی‌شـود کـه پل‌های اول و سوم بـه علـت داشـتن شـاهتیرهای فـولادی بسـیار سبک‌تر از پل‌های دوم، چهارم و پنجم با شاهتیرهای بتن مسلح‌اند. طراحی اولیه جداگرها بر اساس روش بار یکنواخـت آشـتو انجـام می‌شود و پارامترهای لازم برای تحلیل تاریخچه زمـانی بـه دسـت می‌آیند. پس از آن تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی روی پـل‌هـای مجهز به این جداگرها انجام شده و براساس نتایج تحلیل‌ها، طـرح اولیه جداگرها اصلاح می‌شـود. سـپس بـا اسـتفاده از جـداگرهای جدید تحلیل‌های دوباره صورت می‌گیرند و پاسخ‌هـای نیرویـی و جابه‌جایی پل بـه دسـت مـی‌آینـد. بـه منظـور مقایسـه نتـایج پـل جداسازی شده با پـل معمـولی و نمـایش تـأثیر و مزیـت کـاربرد جداگرهای لرزه‌ای در این پل‌ها، در حالت جداسازی‌نشـده نیـز بـا استفاده از همان شتابنگاشت‌های وارده به پل‌های جداسـازی‌شـده، تحلیل تاریخچه زمانی صورت می‌گیرد.



شکل ٢. نمودار شماتیک دوبعدی پل‌های نمونه

جدول ١. مشخصات پل‌های مورد بررسی

	پل اول	پل دوم	پل سوم	پل چهارم	پل پنجم
تعداد دهانه‌ها	١ دهانه	٢ دهانه	٢ دهانه	٣ دهانه	٣ دهانه
طول‌دهانه‌ها (m)	٣٠	٣٦	٣٠	٢٠	٣٣
عرض پل (m)	١٤/٦	١١/٨	١١/٨	١١/٨	١١/٨
تعداد شاهتیرها	٧ عدد	٨ عدد	٤ عدد	٨ عدد	٥ عدد
ستونهای هرپایه	–	٢ عدد	٣ عدد	٣ عدد	٤ عدد
ارتفاع پایه ها	–	١١/٣ متر	٣٠ متر	٥/١ متر	١٧/٥ متر و ٢١/٢ متر
مقطع‌هرستون (m)	–	دایره به قطر ١/٥	دایره به قطر ١/٥	دایره به قطر ١/٢	١/٥ × ٢/٥
وزن عرشه	٣٠٠٠	١١٠٠٠	٥٠٠٠	٩٠٠٠	١٤٠٠٠

Archive of SID
www.SID.ir

برای طراحی حداکثر و تحلیل جداگرهای لرزه‌ای، دانستن پارامترهایی چون نیروی وارده، جابه‌جایی و کمیت‌های سختی حالت ارتجاعی (سختی اولیه)، سختی پس از جاری شدن (سختی ثانویه) و نیروی تسلیم جداگرها اولین گام را تشکیل می‌دهد.

رفتار تقریباً همه جداگرهای الاستومری را می‌توان دوخطی در نظرگرفت. بنابراین، سه کمیت یادشده اساس رفتار جداگر را تشکیل می‌دهند. به همین علت در طراحی، این پارامترها در محدوده‌ای انتخاب شده‌اند که بتوان رفتار واقعی جداگرهای الاستومری را پیش‌بینی کرد. دومین گام، خصوصیات مربوط به میرایی جداگرها هستند که نقش کنترل کننده پاسخ‌های جابه‌جایی لرزه‌ای پل را بر عهده دارند.

۳-۱ گام‌های طراحی جداگرها

براساس روش بار یکنواخت آشتو[۱۷] ، چهار جداگر برای هر پل با نامهای a ، b ، c و d طراحی می‌شود. در طراحی جداگرها فرض می شود که پل‌ها در مناطق با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد قرار گرفته و خاک محل پل نیز از جنس خاک نسبتاً سخت است؛ بنابراین برطبق آشتو، مقدار شتاب مؤثر A برابر ۰/٤ ومقدار S_i نیز برابر ۱/۵ است. روش طراحی به صورت گام به گام به این شرح است [۱ و ١٤ و ۱۷]:

۱- فرض ابتدایی برای سختی اولیه برشی (K_u)، سختی ثانویه (K_d) ، نیروی تسلیم (F_y) و بیشینهٔ جابه‌جایی جداگر (d)

۲- برای هرجداگر، سختی مؤثر K_{eff} از رابطه (۲) محاسبه شده و سختی مؤثرکل سازه جداسازی‌شده K_{eff} که ترکیب سختی همه جداگرها و سختی زیرسازه (k_{sub}) است، طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$K_{eff} = \left[F_y + K_d\left(d - F_y / K_u\right)\right] / d \qquad (۲)$$

$$K_{eff} = \left(\frac{K_{sub} * k_{eff}}{K_{sub} + k_{eff}}\right) \qquad (۳)$$

۳- محاسبه پریود مؤثرکل سازه جداسازی‌شده T_{eff} از رابطه (٤) و تعیین ضریب میرایی C از رابطه (۵) که W وزن پل g، شتاب ثقل A، ضریب شتاب و S_i ضریب ساختگاه برای طراحی جداسازی لرزه ای هستند.

$$T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{W}{K_{eff} g}} \qquad (٤)$$

$$d = \frac{250 A S_i T_{eff}}{C} \ \text{(mm)} \qquad (۵)$$

٤- محاسبه میرایی ویسکوز معادل β از رابطه (٦) (EDC سطح محصور در نمودار هیسترتیک جداگر و d_i جابه‌جایی حداکثر جداگر i ام است)

$$\beta = \frac{1}{2\pi} * \frac{EDC}{\sum (k_{eff} d^2{}_i)} \qquad (٦)$$

۵- با توجه به میرایی ویسکوز معادل، تعیین C از جدول (۲)

جدول ۲. ضریب میرایی C

	درصد میرایی						
	≤ ۲	۵	۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	۵۰
C	۰/۸	۱/۰	۱/۲	۱/۵	۱/۷	۱/۹	۲/۰

٦- مقایسه مقدار C در گام ۳ با ۵

۷- در صورت مغایرت مقدار C در دو گام فوق‌الذکر، تغییر فرض اولیه جابه‌جایی حداکثر d و تکرار گامهای فوق برای همگراشدن پاسخ.

۸- بر اساس مقدار d و وزن پل و سایر پارامترها، ابعاد اولیه جداگر شامل طول، عرض، ضخامت هر لایه لاستیکی، تعداد لایه‌ها و ضخامت کل الاستومر به گونه‌ای به دست می‌آیند که شرایط (۷) تا (۹) که مربوط به جداگرهای الاستومری هستند، ارضاء شوند [١٤].

Archive of SID

www.SID.ir

$$\gamma_C \le 2.5 \qquad (۷)$$

$$\gamma_C + \gamma_{S,S} + \gamma_r \le 5.0 \qquad (۸)$$

$$\gamma_C + \gamma_{S,eq} + 0.5\gamma_r \le 5.5 \qquad (۹)$$

γ_C کرنش برشی ناشی از فشار بارهای قائم، $\gamma_{S,S}$ کرنش برشی ناشی از تغییرمکان جانبی غیرلرزه‌ای، $\gamma_{S,eq}$ کرنش برشی ناشی از تغییرمکان جانبی لرزه‌ای و γ_r کرنش برشی ناشی از دوران را بیان می کنند. این کرنشها از روابط (۱۰) تا (۱۳) محاسبه می‌شوند [۱۶]:

$$\gamma_c = \sigma / (GS) \qquad (۱۰)$$

$$\gamma_{S,S} = \frac{\Delta_s}{T_r} \qquad (۱۱)$$

$$\gamma_{S,eq} = \frac{d_t}{T_r} \qquad (۱۲)$$

$$\gamma_r = \frac{B^2\theta}{2t_i T_r} \qquad (۱۳)$$

σ تنش قائم وارد بر سطح جداگر و G مدول برشی جداگر (حدود KN/m^2 ۷۰۰ برای جداگرهای a و b و حدود KN/m^2 ۱۸۰۰ برای جداگرهای c و d)، Δ_s تغییر شکل برشی تکیه‌گاه حاصل از تغییر مکان غیر لرزه‌ای روسازه (شامل دما، انقباض و خزش)، B اندازهٔ ضلع تکیه‌گاه مستطیلی در راستای بارگذاری یا قطر تکیه‌گاه مدور، t_i ضخامت هر لایه و T_r ضخامت کل لاستیک است. دوران طراحی θ بایستی شامل اثرات دوران DL (بار مرده)، LL (بار زنده) و ساخت باشد.

همچنین ضخامت هر ورق فولادی حداقل دو میلیمتر انتخاب شده است تا بتوان اطمینان حاصل کرد که جداگر تحت تنش قائم با هر معیار زوالی خوب عمل می‌کند [۱۷]. همچنین بر اساس توصیه مرجع [۱۶] مقدار ضریب شکل S بین هشت تا دوازده انتخاب می‌شود تا نسبت سختی قائم به سختی افقی جداگر حدود ۴۰۰ باشد.

۹- بر اساس طراحی اولیه جداگرها، با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، مقدار d_t که برابر تغییرمکان حداکثر جداگر بر اثر زلزله است، جایگزین مقدار فرض اولیه d شده و با تکرار گامهای فوق، سختی مؤثر، دوره تناوب مؤثر و نسبت میرایی ویسکوز معادل به دست می‌آیند.

۱۰- در نهایت باید کنترل کرد که سختی ارتجاعی K_u از رابطه (۱۴) کمتر نشود: [۱۷]

$$K_s = G\,A_b / T_r \qquad (۱۴)$$

که K_s سختی الاستیک در جداگر با رفتار خطی، A_b سطح تکیه‌گاه و S ضریب شکل است. سختی قائم جداگر از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود که به قدر کافی (از مرتبه S^2 ٤ یا حدود ۴۰۰ برابر) از سختی افقی بیشتر است [۱۸]:

$$K_v = E_C\,A_b / T_r \qquad (۱۵)$$

که در آن E_c مدول فشاری لحظه‌ای الاستومر است و برای جداگرهای مستطیلی از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$E_c = 4GS^2 \qquad (۱۶)$$

مشخصات هندسی جداگرهای طراحی شده مورد استفاده در این پل‌ها در جدول‌های ۳ تا ۷ آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که مشخصات تحلیلی جداگرها (جدول ۸) طوری درنظرگرفته شده‌اند که بتوان مقایسه‌ای بین آنها انجام داد.

در این جدول‌ها، L طول جداگر، B عرض جداگر، h ارتفاع کل جداگر، t_i ضخامت هر لایه لاستیک، T_r ارتفاع کل لاستیک، t_s ضخامت هر لایه فولاد و n تعداد لایه‌های لاستیک را بیان می‌کنند. همچنین γ_s ،γ_r ،γ_c به ترتیب کرنش برشی ناشی از فشار بار قائم، کرنش برشی ناشی از دوران و کرنش برشی ناشی از تغییرمکان لرزه‌ای هستند.

طبق رابطه (۷) مقدار γ_c باید کمتر از ۲/۵ و ستون مربوط به رابطه (۹) (مجموع کرنشهای برشی) نیز باید کمتر از ۵/۵ باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳ . مشخصات هندسی جداگرها در پل اول (تعداد کل جداگرها = ١٤)

نوع جداگر	L (cm)	B (cm)	h (cm)	t_i (mm)	T_r (cm)	t_s (mm)	n	γ_c	γ_r	γ_s	رابطه (٨)
a	٣٥	٣٥	١٢/٤	٧	٩/٨	٢	١٤	١/١	٠/٤	١/٢	٢/٥
b	٣٥	٣٠	١١/٥	٧	٩/١	٢	١٣	١/٠	٠/٥	١/١	٢/٣
c	٤٥	٤٥	١١/٤	١٠	٩/٠	٣	٩	٠/٩	٠/٥	١/١	٢/٣
d	٤٥	٤٥	١٠/١	١٠	٨/٠	٣	٨	٠/٧	٠/٥	٠/٧	١/٧

جدول ٤. مشخصات هندسی جداگرها در پل دوم (تعداد کل جداگرها = ٣٢)

نوع جداگر	L (cm)	B (cm)	h (cm)	t_i (mm)	T_r (cm)	t_s (mm)	n	γ_c	γ_r	γ_s	رابطه (٨)
a	٤٥	٤٥	١٩/٢	١٠	١٥	٣	١٥	١/١	٠/٥	١/٧	٣/٠
b	٤٥	٤٠	١٧/٩	١٠	١٤	٣	١٤	١/٠	٠/٦	١/٦	٢/٩
c	٥٠	٤٥	١٢/٧	١٠	١٠	٣	١٠	٠/٧	٠/٧	١/٤	٢/٤
d	٥٠	٤٥	١٢/٠	١٠	٩	٣	٩	٠/٦	٠/٨	١/٢	٢/٢

جدول ٥. مشخصات هندسی جداگرها در پل سوم (تعداد کل جداگرها = ٤٨)

نوع جداگر	L (cm)	B (cm)	h (cm)	t_i (mm)	T_r (cm)	t_s (mm)	n	γ_c	γ_r	γ_s	رابطه (٨)
a	٤٥	٤٥	١٩/٥	١٠	١٥	٣	١٥	١/٠	٠/٥	١/٦	٢/٨
b	٤٠	٤٠	١٥/٣	١٠	١٢	٣	١٢	٠/٧	٠/٦	١/٧	٢/٧
c	٥٠	٥٠	١١/٧	١٠	١٠	٣	١٠	٠/٧	٠/٥	١/١	٢/٠
d	٥٠	٤٥	١١/٨	١٠	٩/٦	٣	٩	٠/٧	٠/٦	٠/٩	١/٩

جدول ٦. مشخصات تحلیلی تقریبی جداگرهای مورد استفاده در پل‌ها

نوع جداگر	G (KN/m^2)	K_U (KN/m)	F_y (KN)	K_d / K_U	K_v (KN/m)
a	٧٠٠	١٠٠٠	٤٠	٠/٢	٤٠٠,٠٠٠
b	٧٠٠	١٠٠٠	٨٠	٠/٢	٤٠٠,٠٠٠
c	١٨٠٠	٥٠٠٠	٤٠	٠/١٥	٢,٠٠٠,٠٠٠
d	١٨٠٠	٥٠٠٠	٨٠	٠/١٥	٢,٠٠٠,٠٠٠

Archive of SID

www.SID.ir

٤. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

پس از طراحی جداگرها به صورت المان‌هایی با رفتار دوخطی، پل‌های جداسازی‌شده با این جداگرها با استفاده از نرم افزار SAP2000 Nonlinear [۱۹] مدلسازی و تحلیل شده‌اند. این نرم‌افزار به عنوان یک نرم‌افزار قوی در زمینه تحلیل دینامیکی سازه‌هایی که اجزای غیرخطی موضعی دارند معرفی شده است [۲]. در این نرم افزار عضوی وجود دارد که می‌تواند رفتار غیرخطی جداگر الاستومری را مدل کند. بنابراین برای مدل‌سازی جداگرها از المان rubber isolator استفاده می‌شود. مدل کامل سه بعدی پل‌های جداسازی شده که شامل اجزای روسازه و زیرسازه خطی و اجزای جداگر غیرخطی هستند به وسیله زوج شتابنگاشت‌های مقیاس‌شده، تحلیل تاریخچه زمانی شده‌اند. به منظور مقایسه نتایج و مشاهده تأثیر جداسازی لرزه‌ای، پل‌های جداسازی‌نشده نیز تحلیل و بررسی شده‌اند. در این حالت به علت این که تحلیل به صورت خطی صورت گرفته، علاوه بر مقایسه پاسخ‌های سازه، تنشهای نقاط خاصی از پل‌ها که احتمال تشکیل مفصل پلاستیک در آنها می‌رود نیز بررسی شده‌اند که عبور این تنشها از حد تسلیم و ورود به تنش‌های غیرارتجاعی و رفتار غیرخطی را بتوان تشخیص داد. می‌توان به اختصار فرضیات صورت گرفته در تحلیل دینامیکی سیستم پل‌های جداسازی شده را به این موارد خلاصه کرد:

۱- پل‌ها به صورت سه بعدی مدل شده‌اند.

۲- روسازه پل و پایه‌ها در حین زلزله در محدوده ارتجاعی باقی می‌مانند. این یک فرض معقول است، زیرا جداسازی لرزه‌ای می‌کوشد تا نیروهای زلزله را به نحوی کاهش دهد که سازه در محدوده ارتجاعی باقی بماند. البته صحت این فرض با محاسبه تنش‌ها در اجزای پل بررسی می‌شود.

۳- رفتار نیرو- تغییر مکان جداگرهای الاستومری، به صورت دوخطی نرم شونده است.

٤- پایه‌های پل در سطح پی، گیردار فرض می‌شوند و اثرات اندرکنش خاک - سازه نادیده گرفته شده‌اند. کوله‌های پل، به علت داشتن پشت‌بند و دیوار برگشتی صلب فرض می‌شوند.

۵- در پل‌های با پی عمیق، شمعها مدل نشده‌اند و فرض شده‌است که پی در سطح زمین قرار دارد.

٦- پل بر روی خاک سفت یا سنگ بنا نهاده شده و تحریک زلزله به طور کامل در تمام تکیه‌گاه‌ها اعمال می‌شود.

۷- مشخصات سیستم جداسازی، همسانگرد است و در دو جهت افقی خصوصیات یکسان دارد. جداگرها نیز در روی پایه‌ها و کوله‌ها دارای خصوصیات دینامیکی یکسان هستند.

۸- پل در معرض زلزله‌های افقی طولی و عرضی به صورت همزمان قرار داده شده است.

۹- جداگرها در تراز روی تیر سرستون یا روی کوله و زیر عرشه قرار داده می‌شوند.

۱۰- تعداد جداگرها در هر پل به تعداد نئوپرنهای موجود در پل درنظر گرفته شده است. بنابراین روی هر کوله به تعداد شاهتیرها و روی تیر سرستون هر پایه میانی، دو برابر تعداد شاهتیرها جداگر وجود دارد.

۱۱- در تحلیل‌ها از سه جفت شتابنگاشت طبس، السنترو و آب‌بر استفاده شده است (جدول ۹).

جدول ۷. مشخصات زوج شتابنگاشت‌های مورد استفاده

شتابنگاشت	تاریخ ثبت	PGA مقیاس نشده (g)		PGA مقیاس شده (g)		ضریب مقیاس
		مؤلفه طولی	مؤلفه جانبی	مؤلفه طولی	مؤلفه جانبی	
طبس	۱۹۷۸	۱/۰۱۸	۰/۸۹٤	۰/۷۱۳	۰/٦۲٦	۰/۷
السنترو	۱۹٤۰	۰/۳٤٦	۰/۳۱۹	۰/۳٤٦	۰/۳۱۹	۱/۰
آب‌بر	۱۹۹۰	۰/٦۰۷	۰/٤۹۸	۰/۷۲۸	۰/۵۹۸	۱/۲

ابتدا با اعمال جفت شتابنگاشت‌های مقیاس‌شده به پل‌ها، پاسخ‌های نیرویی استخراج می‌شود. از جمله پارامترهای مهم، اندازه نیروی برشی و لنگرخمشی در ستون پایه‌های میانی است. با محاسبه تنش‌های خمشی در پای ستون‌ها و مقایسه آنها با ظرفیت خمشی مقطع می‌توان نتیجه‌گرفت که همه پل‌ها در حالت معمولی، در پای ستون‌های خود تشکیل مفصل پلاستیک داده‌اند. بنابراین در حالت معمولی (جداسازی نشده) برای پل‌های دوم تا پنجم، تحلیل را تکرار کرده و در پای ستون‌ها از جزء غیرخطی Wen استفاده می‌شود که می‌تواند رفتار غیرخطی موضعی ستون را مدل کند. پارامترهای نیرو- تغییرمکان آن براساس ظرفیت خمشی مقطع انتخاب شده و نیروی تسلیم براین اساس انتخاب می‌شود که چه نیرویی تولید لنگرخمشی بیشینه را در مقطع ستون موردنظر می‌کند. نتایج تحلیل پل‌های اول تا پنجم درحالت جداسازی‌شده و نشده در جداول ۸ تا ۱۲ ارائه شده‌اند.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۸. نتایج تحلیل پل اول (درحالت جداسازی شده تعدادکل جداگرها = ١٤)

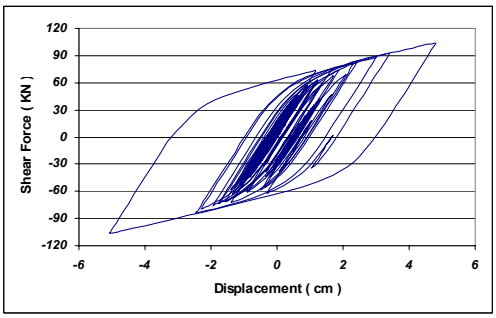
پل اول		حالتهای مختلف پل				
پاسخ‌های پل در برابر زلزله		جداسازی نشده	جداسازی شده با جداگر			
			a	b	c	d
دوره تناوب مؤثر (ثانیه)		۰/۰۵	۱/٤۰	۱/۱	۰/۹۰	۰/۷۰
حداکثر برش پایه عرضی(KN)	طبس	۳۳۳٤	۱۰۱۵	۱۲۷۱	١٦٤٠	۱۷٥٤
	السنترو	۲۱۹۸	٦۳۹	۹۲٦	۱۰٤۸	۱۲۲۲
	آب بر	۲٦٦۱	٥٤۲	۸۸۹	۱۰۹٤	۱۱٤۷
حد اکثر برش پایه طولی(KN)	طبس	۲۸۷۸	۹٤۹	۱۱۸٥	۱٥٤٦	١٦٤۹
	السنترو	۲۱۰۹	٥٥٦	۸۰٦	۹۲۰	۱۰٦۰
	آب بر	۲٤۹۹	٥٤۲	۸۹۲	۱۱۰٤	۱۱٤۳
حداکثر نیروی برش درکوله‌ها (KN)	طبس	١٦٦۷	٤۰۰	٦۰۲	۷٤۹	۷۹۱
	السنترو	۱۲۰۰	۳۷۸	٤٦۳	٥۲٤	٦۱۱
	آب بر	۱۳۳۱	۲۷۱	٤٤٦	٥٤۷	٥۷۳
حداکثر جابجائی نسبی جانبی وسط عرشه (cm)	طبس	۸/٤	۰/۲	۰/۳	۰/٤	۰/۳٥
	السنترو	۳/۱	۰/۰٤	۰/۰٤	۰/۰۷	۰/۰٦
	آب بر	٤/۰	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲
حد اکثر لنگر پایه (KN m)	طبس	۲٦٦۷۰	۸۹٤۳	۱۰٤۹۰	۱۲۱۲۰	۱۲۲٤۰
	السنترو	۱۹٥۸۳	٥۲۲۹	۷٤۹۲	۹۲۲۱	۱۰۰۸۰
	آب بر	۲۱۲۹۰	٤٦۸۳	۷٤۱٤	۱۱۲۱۰	۱۰۲۳۰

جدول ۹. نتایج تحلیل پل دوم (درحالت جداسازی‌شده تعدادکل جداگرها – ۳۲)

پل دوم		حالت‌های مختلف پل				
پاسخ‌های پل در برابر زلزله		جداسازی نشده	جداسازی شده با جداگر			
			a	b	c	d
دوره تناوب مؤثر (ثانیه)		۰/۲٥	۲/۰	۱/٦۰	۱/۳۰	۱/۱۰
حداکثر برش پایه عرضی (KN)	طبس	٤۸۳۲۰	۷۲۹۳	۷۳۷۷	٦۷۱۹	۷۱۱٥
	السنترو	٤۳٤۹۰	٤۱٤٦	٤٤٤٦	۲٦٥۷	۳۸۸۳
	آب بر	۲٥٥٦۰	٤۱۲٥	٤٥٦۷	۲۹۷۱	۳٥٦۱
حد اکثر برش پایه طولی(KN)	طبس	۱۹۱۷۰	٤٤٤۹	٤۷۸۷	٥۲۱٤	٥۲٤٥
	السنترو	۱۸۲۰۰	۲۸٥۱	۳۳۲۱	۲۷۸۸	۲۹٤۱
	آب بر	۲٤۷۳۰	۲۱۳٥	۲۲٤٦	۲۲۱۰	۳۰۱٥
حداکثر نیروی برش در ستون پایه‌های میانی (KN)	طبس	٥٤۷۷	۱۹۲۷	۱۹۳۱	۱٥٥۰	۱۲۸۷
	السنترو	٥۱۱۳	۱۹٤٥	۲۱۱۱	۱۰٥٦	۱۲٥۷
	آب بر	۳۸٦٥	۱۸۲٤	۱۸۸۹	۱٤٦۸	۱۱۷۱
حداکثر نیروی برش در کوله‌ها (KN)	طبس	۱۸٦۸۰	۱۷۲۰	۱۷٦۰	۱۸۱۰	۱۳۳٥
	السنترو	١٦٦۰۰	۱٥٦۰	١٦٨۰	۱۹۸۲	۲۰۲۰
	آب بر	۸۹۱۰	۱٤۷۰	١٦۳۰	۱۷۷۳	۱۹۲٤
حداکثر جابجایی جانبی سرستون‌های پایه‌های میانی (cm)	طبس	۷/٥	٤/۸	٤/۹	٤/۱	۳/٦
	السنترو	٦/۷	۳/۹	٤/۲	۲/۱	۲/٥
	آب بر	٤/۰	۲/۱	۲/۳	۱/۹	۱/۳
حداکثر لنگر خمشی در ستون پایه‌های میانی (KN.m)	طبس	۲۰۰۹۲	۷۱۲۱	۷٤۹۳	٦٤۸۱	٥۸۸۸
	السنترو	۱۷۹٦٤	۸۹٦۱	۹٥۳۹	٤۸۷۱	٤۰۸٦
	آب بر	۱۰۷۹٦	٥۲۷٤	٥٦٤٦	٤۳۸۱	۳۷۳٤

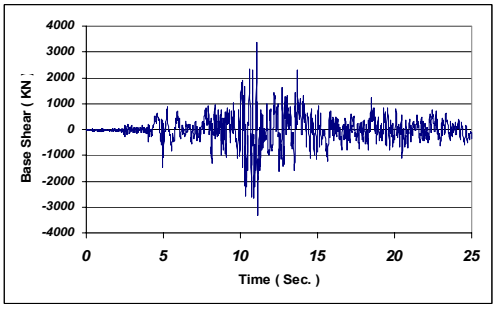
Archive of SID

www.SID.ir

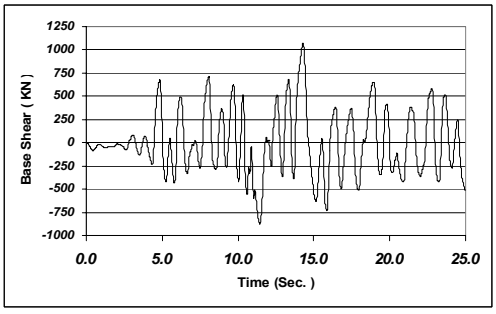


شکل ۳. نمودار هیسترتیک نیرو- جابه‌جایی جداگر d در پل اول تحت زلزله السنترو

شکل ۳ رفتار دوخطی جداگر d تحت زلزله السنترو را به عنوان نمونه برای بیان استهلاک انرژی و میرایی معادل جداگرها و شکلهای ٤ تا ٦ تأثیر جداسازی لرزه‌ای در کاهش پاسخ‌های نیرویی و تغییرمکانی پل‌ها در برابر زلزله نسبت به حالت جداسازی نشده را برای پلهای اول تا سوم نمایش می‌دهند. همان گونه که در اشکال و جداول ۸ تا ۱۲ دیده می‌شود، جداگرهای لرزه ای طراحی شده توانسته‌اند بخوبی نیروهای جانبی و جابجایی‌ها را کاهش دهند. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص جزییات طراحی و تحلیل‌های عددی به مرجع [۱] مراجعه شود.

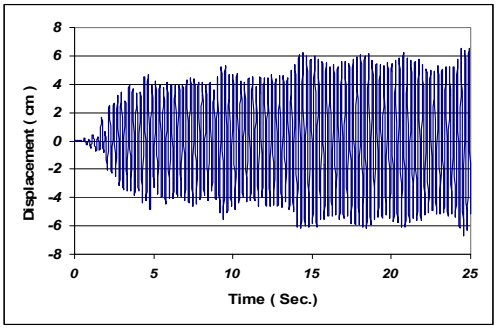


(الف)

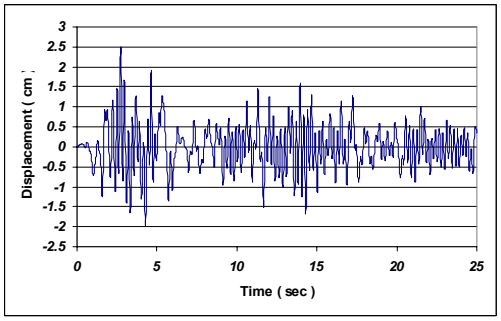


(ب)

شکل ٤. نمودار تاریخچه زمانی برش پایه جانبی در پل اول در دو حالت جداسازی‌نشده (الف)و با جداگر a (ب) تحت زلزله طبس



(الف)



(ب)

شکل ۵. نمودار تاریخچه زمانی جابجائی جانبی سر ستون پل دوم در حالات جداسازی نشده (الف) و با جداگر d (ب) تحت زلزله السنترو

جدول ۱۰. نتایج تحلیل پل سوم

(در حالت جداسازی شده تعدادکل جداگرها = ١٦)

پل سوم		حالتهای مختلف پل				
پاسخهای پل در برابر زلزله		جداسازی نشده	جداسازی شده با جداگر			
			a	b	c	d
دوره تناوب مؤثر (ثانیه)		۰/۲۵	۲/۰	۱/٦	۱/٤	۱/۲
حداکثر برش پایه عرضی (KN)	طبس	۲۲۲۳۰	۳۳٤٤	۳٥۸۱	۳۸۹٤	۳۷٤٦
	السنترو	۱۸۰۷٤	۱۷۰۷	۱۷٤۰	۱۹٦٥	۱۷۳٤
	آب بر	۱٤۱۲۰	۲٥۱۷	۲۸۰۷	۲۹٥۹	۲۹٤۰
حد اکثر برش پایه طولی(KN)	طبس	۱۰۱٦۰	٤٤٥۹	٤٥۰٦	٤۷۱٥	٤٦٤٦
	السنترو	۸٤۰۸	۱٥۰٥	۱٦۰۸	۱۹۱٦	۱۸٥۹
	آب بر	۱۱۳۷۰	۲٤۷۱	۲۷۱۰	۲۹٤٤	۲۸۱۳
حداکثر نیروی برش در ستون پایه‌های میانی (KN)	طبس	۲۳۷۹	۹۸۳	۹۹۸	۱۱٥٥	۱۰۳۰
	السنترو	۱۷٥۳	٤٦۳	٤۷۸	٦٦۱	٥۸۸
	آب بر	۱۹۹٤	٦۱۷	٦٦٤	۷۹٤	۷۸۳
حداکثر نیروی برش در کوله‌ها (KN)	طبس	۷٥٥۰	۷٥٥	۷۷٥	۸٦٥	۸۲۰
	السنترو	٦٤۰۰	۲۸٥	۳۰۳	٥۳۰	٤٦۰
	آب بر	٤۸۰۸	۳۳٥	٤۱۰	٥٦٥	٥۲۹
حداکثر جابجایی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی (cm)	طبس	۱۰/٦	۳/٥	۳/۷	٤/۱	٤/۰
	السنترو	۷/۲	۳/۰	۳/٦	۳/۷	۳/٥
	آب بر	۷/۹	۲/٤	۲/٥	۳/۱	۲/٥
حداکثر لنگر خمشی در ستون پایه‌های میانی (KN.m)	طبس	۱٦٦۸۸	۷٤٦۰	۷۸٦۰	٦۱۳۰	٦۱۱۷
	السنترو	۱٥۲۹٤	٥۲۸٦	٥٤۷۸	۳۹٤۷	٤۱٥۱
	آب بر	۱۲۳۱۰	۸۰٥۰	۷٦۱۱	٦٥٦۰	۷۱۰۹

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱۱. نتایج تحلیل پل چهارم

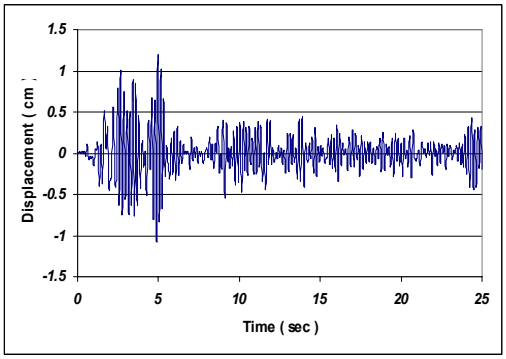
(درحالت جداسازی‌شده تعدادکل جداگرها = ٤٨)

پل چهارم		حالتهای مختلف پل				
پاسخهای پل در برابر زلزله		جداسازی نشده	جداسازی شده با جداگر			
			a	b	c	d
دوره تناوب مؤثر (ثانیه)		۰/۱۹	۲/۳	۲/۰	۱/۵	۱/۳
حداکثر برش پایه عرضی (KN)	طبس	۱۰٤۲۰۰	۸٤۹۳	۹۸٦۲	۲۸٤۷۰	۲۵۸۰۰
	السنترو	۷۳۸٤۰	۳۸٤۵	۳۸٦۳	۱۲۲۵۰	۹۸٦٤
	آب بر	۸۹۰۹۰	۳۳۵۱	٤۳۵۷	۱۱۰۳۰	۸۲۰۱
حد اکثر برش پایه طولی (KN)	طبس	٤۷۷۰۰	۸۵۲۹	۹۸۰٦	۹۳۹۱	۸۸۵۱
	السنترو	۳٦۵٦۰	٤۷۷۱	٤۹۵۵	٤۳٤۷	٤۳٤۵
	آب بر	۵۵۷٦۰	٤۵٤۷	۵۳۸۲	٤۷۹٦	٤٦٤۳
حداکثر نیروی برش در ستون پایه‌های میانی (KN)	طبس	٦۸۸۷	۹۵۱	۹۹۱	۱۳۳۹	۱۰۳٤
	السنترو	٤۲۳۱	٦٤۸	٦۹۱	۹۱۹	۸۷۲
	آب بر	۵۷۹۳	٦۵۵	۷۲٤	۱۷۱۷	۱۲۳۲
حداکثر نیروی برش در کوله‌ها (KN)	طبس	۳۱٤۳۰	۱۳۹۱	۱۹۳۰	۱۰۲۱۸	۹۷۹۸
	السنترو	۱٦۲۰۰	۵٦۰	٦۷۱	۳۳٦۸	۲۳۱٦
	آب بر	۱۸۱۵۰	٤۲۰	٦۳۵	۷۰۰	۸٤۰
حداکثر جابجایی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی(cm)	طبس	۲/٦	۰/۵	۰/٦	۰/٦	۰/۷
	السنترو	۱/۲	۰/٤	۰/٤	۰/۵	۰/۵
	آب بر	۲/۰	۰/۵	۰/۷	۰/٦	۰/۷
حداکثر لنگر خمشی در ستون پایه‌های میانی (KN.m)	طبس	۱۸٤٦۱	٤٦٤۵	٤٤٤۵	۵۹۷۰	۵۳۳۸
	السنترو	۱۲۸۲٤	۳۰۵۵	۳۲۱۷	۳۷۲۷	۳٦۲۵
	آب بر	۱۵۱۲٤	۳۰۷۱	۳۳۹۹	٤۳۲۳	۳۰۳٤

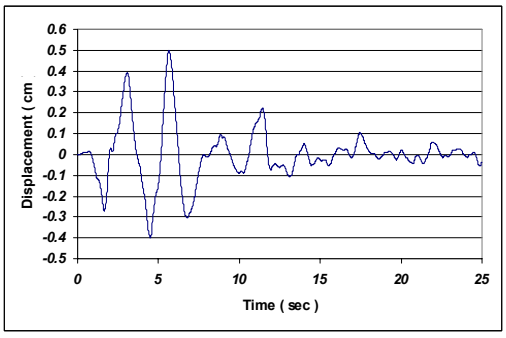
جدول ۱۲. نتایج تحلیل پل پنجم

(درحالت جداسازی‌شده تعدادکل جداگرها = ۳۰)

پل پنجم		حالتهای مختلف پل				
پاسخهای پل در برابر زلزله		جداسازی نشده	جداسازی شده با جداگر			
			a	b	c	d
دوره تناوب مؤثر (ثانیه)		۰/۳۲	۲/۰	۱/۹	۱/۵	۱/۳۵
حداکثر برش پایه عرضی(KN)	طبس	٤٤۷۷۰	۲۱۹۰۰	۲۱۸۲۰	۲۲۲۸۰	۲۱٤٤۰
	السنترو	۲۵۳۵۰	۹۲۸۵	۹۷٤۹	۹۱۱۲	۸۱۰٤
	آب بر	٤۲۷۵۰	۱۸٦۹۰	۱۸۹۸۰	۱۷۹۷۰	۱٦۹٦۰
حد اکثر برش پایه طولی(KN)	طبس	٦٤۷۵۰	۱۲٦٤۰	۱۲۷۹۰	۱۳۳۹۰	۱۲۵٦۰
	السنترو	۲٦۱۰۰	٤۹۹٦	٦۰٦٤	٦۲۰۹	۵۸۵۷
	آب بر	۷۹۹٤۰	۸۷٦٤	۸۸۸۲	۹۲۰۳	۹۰۱۷
حداکثر نیروی برش در ستون پایه‌های میانی (KN)	طبس	٤۰۵۰	۱۳۱۳	۱۲۹۲	۱۱۵۵	۱۱۱۳
	السنترو	۱٦۵۰	٦۸۰	٦۹۵	٦۵۲	٦۱۰
	آب بر	٤۸۱٤	۱٦۰٤	۱٦۲۳	۱۵۵۱	۱۳۹۵
حداکثر نیروی برش در کوله‌ها (KN)	طبس	۱٦۱۹۰	۵۱۲۰	۵۳٤۲	٦۵۲۰	٦۲۷۰
	السنترو	٦٤۵۰	۱۹۲۲	۲۰۹۵	۱۹۵۰	۱٦۲۰
	آب بر	۲۰۷۱٤	۲۹۳۰	۲۹٦۵	۲۷۸۳	۲۹۰۵
حداکثر جابجایی جانبی سرستونهای پایه‌های‌میانی(cm)	طبس	۷/۵	۲/۲	۲/۳	۲/۰	۱/٦
	السنترو	٤/۱	۱/۹	۲/۰	۱/٦	۱/۵
	آب بر	٦/۵	۲/۲	۲/۲	۱/۹	۱/۵
حداکثرلنگر خمشی در ستون پایه‌های میانی (KN.m)	طبس	۵۳۲۲۲	۱۵۸۳۱	۱۵٦٦٤	۱۳۹۸۵	۱۲۰۰۰
	السنترو	۲۵٤۵۸	۸۵۵۵	۵۳۹۹	۵٤۱۰	۳۹۲٦
	آب بر	٤٤٦۵۵	۱۵۸۵٦	۱٦۲۳۳	۱٤٦۲۷	۱۳۷۳۰



(الف)



(ب)

شکل ٦. نمودارتاریخچه زمانی جابجائی جانبی سرستون پل چهارم درحالات جداسازی نشده(الف) وبا جداگرc (ب) تحت زلزله السنترو

۵. نتایج تحلیل‌های عددی

با مقایسه جداگرهای طراحی شده برای پلهای مختلف می‌توان نتایج زیر را بیان کرد: طبق جداول ۸ تا ۱۲، هرچه سختی اولیه و نیروی تسلیم جداگر افزایش یابد، با زیاد شدن سختی مؤثر کل سازه، دوره‌تناوب مؤثر پل وجابه‌جایی طرح جداگر کاهش می‌یابد. به این ترتیب با هندسه یکسان، می‌توان تعداد یا ضخامت لایه‌های لاستیک را کاهش داد. از طرف دیگر، هرچه سختی اولیه جداگرها افزایش پیدا کند، نیروی برشی تولید شده زیاد می‌شود که منجر به افزایش جابه‌جایی جانبی کل عرشه می‌گردد، بنابراین با توجه به محدودیت در جابه‌جایی حداکثر عرشه می‌باید از جداگری با سختی اولیه مناسب استفاده کرد. با افزایش نیروی تسلیم جداگرها، نیروی برشی بیشتری در جداگرها تولید شده، درنتیجه نیروی برش منتقل‌شده به پایه‌های میانی وکوله‌ها بیشتر می‌شود و جابه‌جایی جانبی سر پایه‌ها افزایش می‌یابد و همچنین جابه‌جایی بیشینهٔ عرشه افزایش می‌یابد.

– با افزایش سختی برشی اولیه جداگر، ابعاد هندسی آن در ارتفاع کاهش می‌یابند زیرا جابه‌جایی جداگر کمتر می‌شود. اما با افزایش

Archive of SID

www.SID.ir

سختی برشی اولیه جداگرها، ابعاد آنها در پلان نیز افزایش می‌یابد که این امر باعث کاهش کرنش‌های برشی جداگر می‌شود. هر چه سختی پس از جاری شدن یک جداگر افزایش یابد، سختی مؤثر کل پل افزایش یافته ولی دوره تناوب مؤثر پل و نسبت میرایی چسبنده (ویسکوز) معادل جداگر کاهش می‌یابد، پس هرچه رفتار دوخطی جداگر به سمت حالت الاستوپلاستیک کامل برود، بازده آن بیشتر خواهد بود.

– هرچه نسبت سختی ثانویه به اولیه افزایش یابد، با سختی اولیه یکسان، نیروی برشی تولید شده در جداگرها افزایش می یابد، در نتیجه نیروی برشی تولیدشده در اجزای زیرسازه و به تبع آن برش پایه افزایش می‌یابد. هرچه سختی اولیه جداگر بیشتر باشد، این افزایش بیشتر خواهد بود. هرچه نسبت سختی ثانویه به اولیه افزایش یابد، با سختی اولیه یکسان، حداکثر تغییرمکان جداگرها غالباً کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان جابه‌جایی‌ها را کنترل نمود.

– در سختی اولیه ثابت وبا طرح هندسی ثابت اگر نیروی تسلیم را افزایش دهیم، در اثر زلزله کرنش‌های برشی جداگر کاهش می‌یابند، پس هرچه بتوان حد جاری شدن جداگر را بالا برد به حاشیه اطمینان بیشتری دستیابی خواهد شد.

– در حالت پل جداسازی‌نشده، شکل اصلی ارتعاشی پل، عمدتاً حالت حرکت قائم عرشه است. هرقدر سختی جانبی جهت عرضی عرشه پل بیشتر باشد، این شکل ارتعاش پل در مودهای بیشتری به چشم می‌خورد. جداسازی لرزه‌ای، مود ارتعاشی انتقال جانبی پل را به مود اصلی ارتعاش پل تبدیل می‌کند، به همین علت از اثرات زیانبار زلزله بر پل می‌کاهد.

– پل هر چه سخت‌تر باشد، تأثیر جداسازی لرزه‌ای در کاهش پاسخ‌های نیرویی و تغییرمکانی بیشتر است. با توجه به شتابنگاشت‌های مورد استفاده و نوع پل، مقدار کاهش برش پایه و تأثیرپذیری پل با سختی اولیه متفاوت است. در پل‌هایی که سختی جانبی نسبی بیشتر و دوره تناوب جانبی کمتری دارند، برش پایه در حالت جداسازی نشده بسیار بیشتر از حالت‌های جداسازی شده است که مقدار کاهش آن نیز بستگی به زلزله (نوع شتابنگاشت) وقوع یافته دارد.

– همان گونه که در جداول ۸ تا ۱۲ و اشکال ٤ تا ٦ مشاهده می‌شود، با اعمال جداگرهای لرزه‌ای پاسخ‌های جابه‌جایی کل سازه به‌دلیل جابه‌جایی‌های غیرکشسان جداگرها افزایش می‌یابد، ولی جابه‌جایی نسبی جانبی وسط عرشه وسرستونها در پایه‌های میانی درحالت جداسازی شده کاهش قابل ملاحظه دارد، این وضعیت بسته به نوع پل و نوع شتابنگاشت متغیر است. هر قدر پل دارای پایه‌های میانی بلندتری باشد، این مقدار کاهش کمتر می‌شود.

٦. نتیجه‌گیری

پس از فرض سختی اولیه و سختی ثانویه و نیروی تسلیم جداگرها، عاملی که طراحی را کنترل می‌کند، جابه‌جایی طرح یا همان جابجائی حداکثر جداگر است. نیروی تسلیم جداگر اساساً در میرایی آن تأثیر می‌گذارد به گونه‌ای که هرچه نیروی تسلیم جداگر افزایش یابد، این میرایی زیاد می‌شود؛ اما با افزایش سختی اولیه جداگر، این نسبت لزوماً افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در نیروی تسلیم کم اگر سختی اولیه افزایش یابد، این نسبت کاهش می‌یابد ولی در نیروی تسلیم زیاد، با افزایش سختی اولیه، نسبت میرایی نیز افزایش می‌یابد.

با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی هم می‌توان گفت که هرچه سختی اولیه جداگر کمتر و سختی جانبی پل بیشتر باشد، تأثیر جداگرهای الاستومری در کاهش نیروها و جابه‌جایی‌های نسبی بیشتر خواهد بود، اما جابه‌جایی‌های مطلق پل را با افزایش سختی اولیه جداگر می‌توان بیشتر کاهش داد، پس باید با بررسی عددی، حالت بهینه‌ای بین آنها پیدا شود. همچنین افزایش نیروی تسلیم جداگر نیز باعث تأثیر مثبت در کاهش نسبی جابه‌جایی‌ها می‌شود، که این مسأله به ویژه در سختی اولیه زیادتر بیشتر به چشم می‌خورد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل پلهای مختلف، می‌توان جداگرهای لرزه‌ای الاستومری را در پل‌های متعارف کشور به کاربرد. البته استفاده از جداگرها هم در مقاوم‌سازی پلهای موجود و هم در طراحی پلهای جدید می‌تواند تأثیر مثبت بسزایی بگذارد.

۷. سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت تحقیقات و آموزش وزارت راه و ترابری برای حمایت از پروژه تحقیقاتی بررسی جداگرهای لرزه ای پل‌ها سپاسگزاری می‌شود.

۸. مراجع

۱. زهرائی، سید مهدی (۱۳۸٤) "طرح و توسعه جداساز مناسب زلزله برای پلهای راه و راه آهن"، گزارش تحقیقاتی پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری, شهریور ۸٤.

Archive of SID
www.SID.ir

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

3. Karshenas, M. and Kaspar, I.I. (1998) "Applications of isolation bearings to bridges", Proc. of the US-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, MCEER, Buffalo, N.Y., pp. 147-155.

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. Mayes, R.L., Buckle, I.G., Kelly, T.E. and Jones, L.R. (1992) "AASHTO seismic isolation design requirements for highway bridges", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, pp. 284-304.

8. Hwang, J.S. and Sheng, L.H.(1993) "Effective stiffness and equivalent damping of base isolated bridges", Journal of Structural Engineering , ASCE, Vol. 119, 3094-3101.

9. Reinhorn, A.M., Simeonov, V.K., Derue, G. and Constantinou, M.C. (1998) "Sensitivity of response of isolated bridges to modeling and design parameters :a case study", Proc. of the US-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, MCEER, Buffalo, NY, pp. 213-223.

10. Abe, M., Fujimo, Y. and Yoshida, J. (2000) "Dynamic behavior and seismic performance of base-isolated bridges in observed seismic records", Proc. of Twelfth World Conf. on Earthquake Engineering, Paper No. 0321.

11. Sugiyama, T. (2000) "Comparison of seismic response between bridge with sliding type base isolation system and that with laminated rubber bearing", Proc. of Twelfth World Conf. on Earthquake Engineering, Paper No.1221.

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

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

14. Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transportation Officials, (AASHTO), 2001.

۱۵. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۷٤) "آئین نامه طرح پلهای شوسه و راه آهن در برابر زلزله"، ابلاغیه شماره ۲۰۱۹٦ مورخ ۷٤/٤/۱۸ موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران, نشریه شماره ۲۳۵.

16. Stanton, J.F. (1998). "The 1997 AASHTO seismic isolation guide specification", Proc. of the US-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, MCEER, Buffalo, NY, 31-45.

17. Gregory, I.H. and Muhr, A.H., (1995) "Design of elastomeric anti-seismic bearings", European Seismic Design Practice", Balkema, Rotterdam.

18. Kelly, J.M. (1997) "Earthquake–resistant design with rubber", 2nd Edition, Springer Verlag, London, England.

19. SAP 2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, User Manual, Ver. 8.0.8, Berkeley, California, 2002.

Archive of SID

www.SID.ir