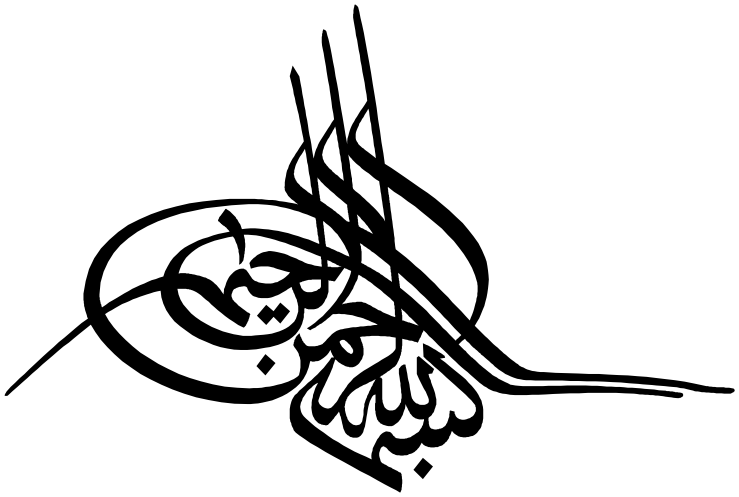


وزارت راه و ترابري
معاونت آموزش، تحقيقات و فناوري
پژوهشکده حمل‌ونقل

آشنایی با جداسازهای لرزه‌ای و تاثیر آنها بر عملکرد پلها

عنوان و پديدآور	: اشنايي با جداسازهاي لرزه‌اي و تاثير آنها بر عملكرد پلها/ مجري مهدي زهرائي.
مشخصات نشر	: تهران: وزارت راه و ترابري، معاونت آموزش، تحقيقات و فناوري، پژوهشكده حمل‌ونقل،۱۳۸۵
مشخصات ظاهري	: ۲۲۰ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابك	: ۹۷۸-۹۶۴-۶۲۹۹-۷۶-۴ ISBN: 978-964-6299-76-4
يادداشت	: فيپا
يادداشت	: پشت جلد Design and Development of Seismic Isolation for Bridges
موضوع	: پل و پل‌سازي- - طرح و محاسبه.
موضوع	: پلها- - اثر زلزله.
موضوع	: پلها- - طرح و ساختمان.
شناسه افزوده	: ايران. وزارت راه و ترابري. پژوهشكده حمل‌ونقل
رده‌بندي كنگره	: ۵ آ۹ز/۳۰۰ TG
رده‌بندي ديوي	: ۶۲۴/۲۵
شماره كتابخانه ملي	: ۳۱۵۶۳- ۸۵م

معاونت آموزش، تحقيقات و فناوري – پژوهشكده حمل‌ونقل

عنوان	**: آشنايي با جداسازهاي لرزه‌اي و تاثير آنها بر عملكرد پلها**
بخش پژوهشي	**: مقاوم‌سازي**
مجري	**: معاونت پژوهشي دانشگاه تهران- دكتر مهدي زهرائي**
ناظر	**: دكتر سيد احمد انوار – مهندس مصطفي طباطبايي**
ناشر	**: پژوهشكده حمل‌ونقل**
طرح جلد	**: ليلا سلوكي**
كد انتشار	**: 85/BRRM/208**
شابك	**: ۹۷۸-۹۶۴-۶۲۹۹-۷۶-۴**
نوبت چاپ	**: اول**
تاريخ انتشار	**: زمستان ۱۳۸۵**
شمارگان	**: ۱۰۰۰ نسخه**
قيمت	**: ۲۵۰۰ تومان**
ليتوگرافي	**: باران**
چاپ و صحافي	**: پژمان**
نشاني	**: ميدان آرژانتين- ابتداي بزرگراه آفريقا- اراضي عباس‌آباد- ساختمان‌شهيد دادمان- وزارت راه و ترابري- طبقه سيزدهم شمالي- واحد اطلاع‌رساني و نشر پژوهش‌ها**
	تلفكس ۸۲۲۴۴۱۶۴ web:www.rahiran.ir
	وب سايت فروش نشريات http://shop.rahiran.ir
	مركز فروش نشريات (انتشارات رنگين فلم) ۸۸۹۶۹۴۵۱

بسمه تعالي

جايگاه و نقش حمل‌ونقل در ابعاد مختلف اقتصادي، سياسي و اجتماعي جوامع امروزي بر كسي پوشيده نيست. حمل‌ونقل يكي از پايه‌هاي اصلي توسعه پايدار و متوازن در جوامع بشري محسوب شده و در واقع شبكه‌هاي حمل‌ونقل با مولفه‌هاي مهمي همچون اقتصاد، امنيت و عدالت اجتماعي ارتباط تنگاتنگ دارند. در فرآيند توسعه اقتصادي و اجتماعي كشورها، همبستگي مستقيم ميان گسترش حمل‌ونقل و دستيابي به نرخ رشد اقتصادي بيشتر وجود دارد. به عبارت ديگر همراه با افزايش توليد ناخالص داخلي، ميزان ارزش افزوده بخش حمل‌ونقل نيز افزايش مي‌يابد و به همين دليل است كه توسعه و رشد اقتصادي وابسته به توسعه بخش حمل‌ونقل است و فعاليتهاي حمل‌ونقل از جمله فعاليتهاي اساسي و زيربنايي براي رشد و تحول اقتصاد به حساب مي‌آيد.

طي سالهاي اخير استفاده از نتايج تحقيقات و مطالعات انجام شده در دنيا به افزايش بهره‌وري و ارتقاء كيفيت در اجرا، بهره‌برداري و نگهداري بهينه از طرحها و پروژه‌هاي حمل‌ونقل منجر شده و افق‌هاي جديدي را به منظور ارائه راهكارها و راهبردهاي نوين در عرصه حمل‌ونقل گشوده است. به‌همين دليل اطلاع‌رساني در اين زمينه به منظور ايجاد ارتباط بين حوزه‌هاي مختلف يك ضرورت اجتناب‌ناپذير مي‌باشد. پژوهشكده حمل‌ونقل در راستاي ايفاي تعهدات و وظايف خويش در امر اطلاع‌رساني و بسترسازي علمي در زمينه‌هاي مرتبط با حمل‌ونقل مي‌كوشد تا با عرضه نتايج مطالعات و تحقيقات انجام شده در اين پژوهشكده، در ايجاد تعامل و تبادل اطلاعات مابين محققان و متخصصان اين رشته نقش مفيد و موثري ايفا نمايد. اميد آن است تا در اين رهرو بتوانيم خدمتي شايسته و در خور به انجام رسانيم و در مسير سازندگي و بالندگي ايران اسلامي و سرافرازي كشورمان از طريق رشد علمي فرزندان اين آب و خاك حركت نمائيم.

در مجموعه حاضر ضمن بررسي عملكرد پلها در زلزله‌هاي اخير و روشهاي بهسازي آنها به انواع تكيه‌گاه‌هاي جداگر لرزه‌اي و مقايسه آنها پرداخته مي‌شود. مطالعات آزمايشگاهي و بررسي مشخصه‌هاي مكانيكي جداگرها از مطالب ديگري است كه در اين مجموعه مورد توجه قرار گرفته است. همچنين ضوابط آيين‌نامه‌اي موجود در سطح دنيا و آزمايشات مختلف كنترل كيفيت و نيز توجيه فني اقتصادي كاربرد جداگرها در فصول بعدي اين مجموعه ارايه شده است. با عنايت به بعد فني مسايل مطرح شده مطالعه و استفاده از آن به متخصصين طراح پل و شركتهاي

مشاور ذيربط و كارشناسان مربوط در وزارت راه‌وترابري و شركت ساخت و توسعه زيربناهاي حمل‌ونقل توصيه مي‌گردد.

بدون‌شک نقایص نوشتاری ومحتوايي اين كتاب از چشم تيزبين اساتيد، صاحب‌نظران و متخصصان پوشيده نخواهد ماند و مطمئناً ما را از راهنماييهاي خويش بهره‌مند خواهند نمود.

پژوهشكده حمل‌ونقل به اين وسيله مراتب تشكر و قدرداني خود را نسبت به كليه اعـضاء گـروه تهيه‌كننده: آقاي **دكتر مهدي زهرائي** / مدير پروژه و آقايان **دكتر سـيد احمـد انـوار** و **مهنـدس مصطفي طباطبايي**/ ناظرين پروژه و آقاي **مهندس محمدرضا يـدالهي**/ كارشـناس پـروژه و نيـز آقاي **مهندس حميد عباسي**/ رئيس بخش مقاوم‌سازي و مديريت بحران و آقاي **دكتـر كيـومرث عماد**/ رئيس بخش زيرساختها ابراز مي‌دارد. همچنين از كليه بخـشها، سـازمانها و مؤسـساتي كـه درمراحل تهيه و نظرخواهي اين مجموعه همكاري نمودند، سپاسگزاري مي‌گردد.

محمود عامري

رئيس پژوهشكده حمل‌ونقل

پیشگفتار

توانایی و مزایای جداگرهای لرزه‌ای بعنوان ابزار کنترل غیرفعال نیروهای زلزلـه کـه بـه طراحـان اجازه می‌دهد نیروهای زلزله وارد بر پایه‌ها و کوله‌هـای پـل را کـاهش داده و یـا متعـادل کننـد، به‌خوبی به اثبات رسیده است. با توجه به انواع خسارتهای وارد بر پلها در زلزله‌های گذشـته کـه عمدتاً بواسطه تخمین نادرست نیروهای زلزله می‌باشد، از این جداگرها می‌توان به نحو مؤثری در بهسازی پلهای موجود و یا طراحی پلهای جدید واقع در نواحی لرزه‌خیز بهره برد. تعـداد زیـادی پل در نواحی زلزله خیز کشور وجود دارد که اتصال روسازه به زیرسازه آنها بوسیله تکیه‌گاههـای معمولی انبساط حرارتی انجام می‌پذیرد. برای کاهش اثرات نیروهای زلزله و افزایش ایمنـی ایـن پلها در هنگام زلزله، می‌توان به‌راحتی تکیه‌گاههای فوق را با جداگرهای لرزه‌ای جایگزین کرد.

هدف از تحقیق حاضر، آشنایی با سیستم جداسازی لرزه‌اي، انواع جداگرها و کاربرد آنها در پلهـا برای کاهش اثرات نیروهای جانبی زلزله، مطالعه آیین‌نامه‌های اروپایی، آشتو و ژاپن برای طراحـی و کاربرد جداسازی لرزه‌اي و در نهایت بررسی امکان استفاده از این روش کنترل در پلهـای راه و راه‌آهن کشور می‌باشد. همچنین ضمن بررسی آزمایشگاهی خواص جداگرهای لرزه‌ای الاستومری که امکان ساخت و تولید انبوه آنها در کشور وجود دارد، مبانی طراحـی ایـن جـداگرها بـر طبـق آیین‌نامه آشتو که متداولترین آیین‌نامه در زمینه طراحی پلها می‌باشد، ارائه شـده و بـا اعمـال ایـن جداگرها به چندین پل راه اصلی موجود تأثیر پارامترهای مختلف این جداگرها مانند میزان سختی اولیه، سختی ثانویه و نیروی‌تسلیم آنها در بهبود رفتار لرزه‌ای پلها بررسی عددی شده است.

نتیجه چنین است که جداگرهای لرزه‌ای الاستومری در کاهش نیروهـا و جابجائیهـای لـرزه‌ای در پلهای اصلی و بزرگراهی معمول کشور تأثیر بسزایی دارند. جداگرها بـا تغییـر طبیعـت ارتعاشـی پلها سطح نیروهای جانبی ناشی از زلزلـه را پـائین آورده و بـا انحـراف و جـذب عمـده انـرژی ورودی زلزله، از اجزای زیر سازه پل محافظت می‌نمایند که بـه ایـن توانـایی مهـم جـداگرها در کسب ضریب مناسب حفاظت پایه جز با طراحی دقیق آنها نمی‌توان دست یافت.

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 هیسترتیک، در رتبه دوم اهمیت قرار دارد. همچنین هرچه سختی اولیه جداگر کمتر باشد، معمولاً نیروها و جابجائیهای نسبی پل کاهش بیشتری پیدا می‌نمایند، اما جابجائیهای مطلق عرشه پل بیشتر می‌گردد که می‌توان با اعمال قطعاتی که نیروی تسلیم و میرایی جداگر را افزایش دهد، میزان جابجائیهای کل را نیزکاهش داد. بنابراین با توجه به طراحیها و تحلیل‌های انجام شده، از جداگرهای لرزه‌ای الاستومری در مقاوم‌سازی پلهای موجود یا طراحی پلهای جدید در کشور، به نحو بسیار مؤثری می‌توان بهره برد.

همچنین جهت آشنایی با عملکرد لرزه‌اي پلهای موجود با تکیه‌گاههای نئوپرن انبساط حرارتی و امکان کاربری جزئی و محدود آنها برای جداسازی لرزه‌اي پلها، پلهای نمونه با چنین تکیه‌گاههایی تحت اثر زلزله‌های مورد نظر قرار گرفته و نشان داده شده است که حتی در صورت امکان لغزش لازم در آنها به هنگام زلزله، بر اساس آزمایشات انجام گرفته بر روی این تکیه‌گاهها به علت الاستیک خطی بودن رفتار نیرو- تغییرمکان، میرایی و استهلاک انرژی چندانی نداشته و نمي‌توانند از سطح انرژی و نیروهای برشی وارد بر زیرسازه پلها به میزان قابل ملاحظه‌اي بکاهند. برای کاربرد بهینه جداسازی لرزه‌اي در پلهای جدید و نیز بهسازی پلهای موجود کشور در برابر زلزله، تحقیق به منظور بهبود ساخت و تولید جداگرهای چند لایه الاستومری مسلح شده با ورقهای فولادی و یا الیاف پلیمری برای کسب میرایی بالا توصیه مي‌شود.

به منظور بررسي تاثیر جداسازي لرزه‌اي، پاسخ لرزه‌اي پلهاي جداسازي شده در هر دو حالت تحريك يك جهته و دو جهته با پاسخ لرزه‌اي پلهاي جداسازي نشده نيز مقايسه گرديده است. نتايج نشان مي‌دهد كه اندركنش دوجهته نيرو هاي نشيمن تاثير قابل ملاحظه‌اي در پاسخ لرزه‌اي پلهاي جداسازي شده دارد و در صورتيكه از اين اثرات صرفنظر شود تغيير مكان حداكثر نشيمن مقدار كمتري برآورد مي‌شود.

از آنجائيكه در واقعيت سازه‌ها در هنگام وقوع زلزله بـا تحريـك دو جهتـه زلزلـه روبـرو هـستند توصيه مي‌شود اين امر در طراحي سيستم جداسازی پلها مد نظر قرار گيرد.

اين مجموعه در قالب يك پروژه تحقيقاتي در پژوهشكده حمل‌ونقل به انجام رسـيده و نتـايج آن قابل توجه كليه متخصصين ذيربط در وزارت راه و ترابري و شركتهاي فعال در زمينه ساخت پلها مي‌باشد. در پايان لازم است تا از آقايان دكتر محمدجعفر اكرام‌جعفري معاون آموزش، تحقيقات و فناوري، دكتر محمود عامري رئيس محترم پژوهشكده حمل‌ونقل، مهندس حميـد عباسـي رئـيس محترم بخش مقاوم‌سازي و دكتر كيومرث عماد رئـيس محتـرم بخـش زيرسـاختهاي پژوهـشكده حمل‌ونقل به جهت حمايت و بذل توجه در تدوين اين مجموعه تشكر و قدرداني گردد. همچنين از كليه همكاراني كه در مراحل مختلف تدوين با اينجانب همكاري نمودند سپاسگزاري مي‌گردد.

مهدي زهرائي

عضو هيئت علمي دانشكده فني دانشگاه تهران

آشنايي با جداسازهاي لرزه‌اي و تأثير آن بر عملكرد پلها

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ششم- تحلیل دینامیکی غیرخطي پلهای جداسازی شده

فصل نهم- توجيه فني اقتصادي كاربرد جداگرهاي لرزه‌اي

فصل دهم- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

فصل اول

عملکرد پلها در زلزله‌هاي اخير و روشهای بهسازی آنها

۱-۱- کلیات

پلها به عنوان سیستم‌هاي سازه‌اي نسبتاً ساده، جایگاه ویژه‌ای در ذهن طراحان سازه داشته زیرا شکل ساختاری آنها بیان ساده‌اي از نیاز عملکردی آنهاست. به همین علت، راه‌حل‌هاي سازه‌اي که براي آنها وضع مي‌شود باید هم از لحاظ عملکرد پل و هم از جهت زیبایي تأیید شود. علیرغم سادگي سازه‌اي پلها، بخصوص آنهایي که از بتن مسلح یا بتن پیش‌تنیده ساخته شده‌اند، تحت زلزله‌هاي مختلف نتوانسته‌اند در سطح توقع طراحان عمل کنند. زلزله‌هاي اخیر در کالیفرنیا، ژاپن و آمریکاي میانه و جنوبي نشان داد که بسیاری از پلهاي طرح شده براساس ضوابط آیین‌نامه‌هاي زلزله، دچار خسارتهای شدید و یا حتي واژگوني شدند و 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 طراحي ارتجاعی است که با معضل عدم توجه به جزئیات طراحي در اجرا نیز بحرانی‌تر مي‌شود. زمین لرزه‌ها نقاط ضعف ساختاری را به طور طبیعی مشخص می‌کنند و بر اساس شواهد موجود خسارتها نیز در همین نقاط مشاهده مي‌شوند. پلها، بر خلاف ساختمانها، داراي درجه نامعیني اندکی مي‌باشند یا این که به کلي

معين‌اند؛ بنابراين زوال يك عضو سازه‌اي يا اتصال بين اعضا، با احتمال بيشتري به خرابی يا فروپاشي پل مي‌انجامد. پس بايد خاطرنشان كرد كه اگرچه ساختار ساده پلها منجر به درجه اطمينان بيشتر در پيش‌بيني پاسخهاي لرزه‌اي آنها مي‌شود ولي در عين حال بايد حساسيت بيشتری نسبت به خطاهاي طراحي اعمال گردد.

براي ارائه طرح مؤثر پلهاي جديد و تدوين روشهاي ترميم، بازسازي و مقاوم‌سازي بهينه پلهای موجود، فهم دقيق حوزه‌هاي بالقوه مسأله ضروري است. بهترين راه حل براي اين كار يك نگرش كلي و طبقه‌بندي زوالها و خسارتهايي است كه در زلزله‌هاي گذشته در پلها به وقوع پيوسته است. پس ابتدا بايستي خسارتهاي لرزه‌اي گذشته وارد بر پلها وهمچنين نقايص معمول طراحي و اجرای پلها مرور شود.

۱-۲- خسارتهاي وارده به پلها در زلزله‌هاي اخير

با بررسي خسارتهاي وارد بر پلها ناشي از زلزله‌هاي اخير، سه نقص عمده طراحي را مي‌توان عنوان كرد كه با همراه شدن ضعفهای اجرایی معضل بحرانی‌تری شكل مي‌گيرد؛ اگرچه ممكن است هر نقص به شكلهاي مختلف تجلي كند. اين نقايص نتيجه مستقيم فلسفه طراحي الاستيك مي‌باشند كه قبل از سال ۱۹۷۰ عموماً استفاده مي‌شد و هنوز نيز در بعضي از كشورها استفاده مي‌شود. درطرح لرزه‌اي الاستيك پلهاي قديم نوعاً سطوح پائين تنش مجاز استفاده مي‌شد و متناظر با نيروهاي زلزله‌اي بود كه تنها كسر كوچكي از نيروهاي واقعي توليد شده در سازه با پاسخ الاستيك و مقاومت بالا را تشكيل می‌دادند؛ در حاليكه مقاومت لازم واقعي حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ درصد بيشتر از سطح نيروهاي الاستيك بود كه حتي در يك زلزله متوسط نيز تجربه می‌شد. بنابراين نتايج روش طرح الاستيك چنين بودند[۳۵]:

۱- تغيير شكل لرزه‌اي كه براساس سطوح نيروي جانبي مشخص شده بودند، بسيار كمتر از مقادير واقعي تخمين زده مي‌شدند.

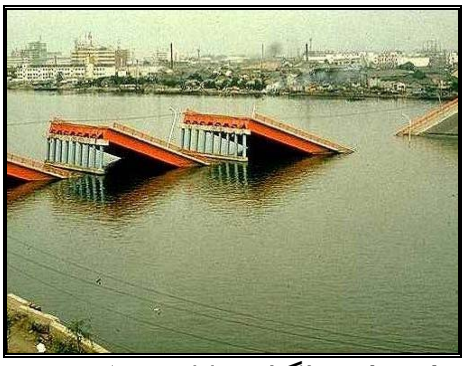
۲- چون سطوح نيروي زلزله پائين فرض مي‌شد، نسبت بار ثقلي به نيروي زلزله نادرست تصور می‌شده و لذا الگوهاي لنگر پائين و با شكل نامناسب در نظر گرفته مي‌شد.

۳- كنشهاي غيرالاستيك سازه‌اي و مفاهيم شكل‌پذيري و طرح ظرفيت كه براي بقاي سيستمهاي غيرالاستيك تحت زلزله‌هاي شديد حياتي هستند، در روش طرح الاستيك ملاحظه نمي‌شد، بنابراين موقعيتهاي بحراني مفصل بالقوه براي تحمل تغيير فرمهاي غيرالاستيك بزرگ بدون كاهش مقاومت، بدرستي تعيين نمي‌شدند. درنتيجه مقاومت برشي عضو بيشتر از مقاومت خمشي آن نمي‌شد و بنابراين زوال برشي ترد، محتمل و ممكن بود.

انواع خسارتهاي وارده به پلها در زلزله‌هاي گذشته (اشكال ۱-۱ تا ۱-۱۵) كه وابسته به يك يا تركيبي از نقيصه‌هاي اشاره شده مي‌باشند، عبارتند از [۳۵ و ۳۰]:

- زوال دهانه پلها ناشي از نشيمنگاه ناكافی در درزهاي جابجائي
- بزرگنمايي جابجائيها ناشي از اثرات خاك
- برخوردبين قابهای پل
- فرونشست (Slumping) كوله‌ها
- زوال ستونها
- زوال ناشي از عدم شكل‌پذيري و مقاومت خمشي
- كافي نبودن نيروهای طراحی
- مقاومت خمشي غير قابل اعتماد ستونها
- شكل‌پذيري خمشي ناكافي
- قطع زود هنگام ميلگردهاي ستون
- زوال برشي ستون
- زوال اتصالات
- زوال تير سرستون (Cap – beam)
- خسارتهای اجزای پلهای فلزی
- زوال پی‌ها


شکلهای (۱-۱) و (۱-۲) خسارت پل بعلت نشیمنگاه ناکافی (راست: زلزله ۱۹۹۹ تایوان چپ: زلزله ۱۹۹۵ کوبه)

شکلهای (۱-۳) و (۱-۴) افزایش جابجائیها و واژگونی پل به علت روانگرایی (زلزله ۱۹۹۵ کوبه)

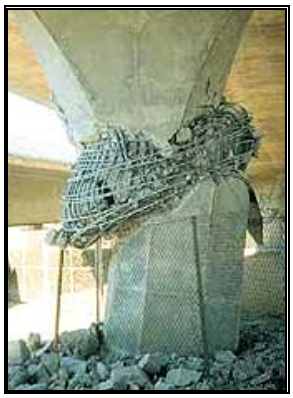
شکل (۱-۶) زوال ستون به علت فلاب ناکافی (زلزله ۱۹۹۴ نرتریج)

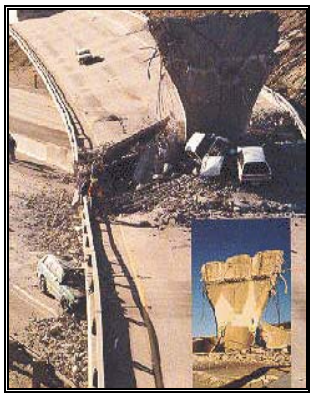
شکل (۱-۵) فروریختن دهانه‌ها به علت چرخش پایه‌ها و فرونشست کوله‌ها (زلزله ۱۹۹۹ تایوان)

شکلهای (۱-۷) و (۱-۸) زوال ستون پل به علت مقاومت خمشی پائین (زلزله ۱۹۷۱ سان‌فرناندو)

شکل (۱-۹) شکست پایه پل به علت عدم شکل‌پذیری خمشی (زلزله ۱۹۹۹ تایوان)

شکل (۱-۱۰) شکست برشی ستون (زلزله ۱۹۹۹ تایوان)





شکلهای (۱-۱۱) و (۱-۱۲) و (۱-۱۳) زوال سنونها به علل مختلف ضعف طراحی(زلزله ۱۹۹۴نرتریج)


شکلهای (۱-۱۴) و (۱-۱۵) خسارت پل به علت ضعف اتصالات (زلزله ۱۹۹۹ تایوان)

۱-۳- علل عمده آسیب‌پذیری لرزه‌اي و روشهای ترمیم و بهسازی پلها

در سالهای اخیر روشهای بازسازی، بهسازی و مقاوم‌سازی به منظور اصلاح مشکلات موجود در پلهای موجود ارائه شده‌است. در این قسمت، بطور خلاصه عمده‌ترین موارد آسیب‌پذیری لرزه‌ای در پلها و راهکارهای بهسازی آنها آورده شده است:

۱-۳-۱- عدم وجود نشیمنگاه کافی

باتوجه به احتمال فرو افتادن عرشه درمحل درزهای جابجایی هنگام وقوع زلزله، راه کارهایی جهت برطرف کردن این نقیصه چه از دیدگاه طراحی و چه از دیدگاه ترمیم ارائه شده است. به طور کلی این مهم را مي‌توان به دو بخش افزایش عرض نشیمنگاه و کنترل تغییر مکان در نقاط متحرک تقسیم کرد.

۱-۳-۲- روانگرایی و فرونشست کوله‌ها

بعضی از سخت‌ترین و پرهزینه‌ترین روشهای ترمیم مربوط به کاهش خطرات ناشی از زوال خاک مي‌باشد. روشهای کاهش خطر روانگرایی عبارتند از: متراکم کردن خاک با ارتعاش مصنوعی درحالت اشباع (Vibrofloatation)؛ قرار دادن ستونهای سنگی و کاهش تولید فشار آب حفره‌ای. از طرف دیگر، اثرات سازه‌ای روانگرایی را مي‌توان با افزایش درجه نامعینی پل کاهش داد. در نتیجه روشهای بازسازی بایستی بر این اساس باشد که روسازه به صورت پیوسته روی پایه‌ها درآید و حتی در صورت امکان با پایه‌ها به صورت یکپارچه گردد.

۱-۳-۳- زوال ستون

روشی که تاکنون بسیار مورد استفاده قرار گرفته است که شکل‌پذیری خمشی، مقاومت برشی وکارآیی وصله پوششی راافزایش مي‌دهد، استفاده از انواع پوشش فولادی (Steel jacketing) بتنی و الیافFRP مي‌باشد. برای ستونهای دایروی دو تا نیم ورقه فولادی با شعاع کمی بزرگتر از ستون، دور ستون قرار گرفته و به هم جوش می‌شوند. فاصله بین ورق و ستون را با تزریق پر مي‌کنند. نسبت قطر ستون به ضخامت ورقه در محدوده ۱۰۰ به ۱ تا ۲۰۰ به ۱ مي‌باشد. پوشش فولادی مثل یک میلگرد جانبی بسیار مؤثر در افزایش محدودیت مفصل‌های پلاستیک و افزایش مقاومت برشی مکانیزم برش خرپایی مي‌باشد.مقاطع غیردایروی را نیز مي‌توان به این روش مقاوم نمود، به این ترتیب که پوشش را به شکل دایروی یا بیضوی درآورده و دور ستونها قرار داده و فاصله بین را با بتن پر کرد[۳۵].

۱-۳-۴- مقاومت خمشی و برشی تیر سرستون

در این موارد بایستی مقاومت خمشی و برشی بالای سطوح نظیر تشکیل مفاصل پلاستیک ستون را افزایش داد. یکی از رایجترین روشهای مقاوم سازی، پس کشیده نمودن تیر سر ستون با استفاده از تاندونهای خارجی است که در برابر بلوکهای انتهایی مهار شده باشند، یا تاندونهایی که در تمام طول تیر سرستون در محفظه‌هایی در هسته آنها قرار گرفته‌اند. پیش تنیدگی مي‌تواند مقاومت خمشی و برشی لازم را در بسیاری از موارد با هزینه کم افزایش دهد و نیز کارآیی اتصال را افزایش دهد.

۱-۳-۵- زوال اتصالات

اتصالات ضعیف تیر- ستون یا ستون – پی ناشی از مقاومت برشی ناکافی اتصال یا مهار ناکافی میلگردهای ستون نیاز به روشهای بازسازی دقیق برای تضمین کارآیی پل در مقایسه با طرح پلهای جدید دارد. در بعضی موارد نیاز به برداشتن بتن اتصال و قرار دادن میلگردهای برشی اضافی در اتصال مي‌باشد.

همچنین پیش تنیدن تیر سر ستون برای کاهش تنشهای کششی اصلی در مناطق اتصال تیر– ستون استفاده مي‌شود که شدت زوال برشی اتصال را کاهش مي‌دهد. بازسازی اتصالات ستون - پی مشکل‌تر است. افزایش عمق پی با یک لایه فوقانی در بعضی موارد تنشهای برشی اتصال را به میزان قابل قبولی کاهش مي‌دهد.

در این موارد بایستی هزینه انجام این اصلاحات را برآورد کرد که ممکن است در بعضی حالات به صرفه نباشد. در بعضی موارد ممکن است که یک پل با درجه نامعینی کافی قادر به تحمل سطح مورد انتظار جابجائیهای پاسخ بدون فروافتادن حتی پس از تخریب اتصال تیر- ستون یا ستون - پی باشد. در چنین مواردی بایستی دانست که ظرفیت بار مردة پل با تخریب اتصال از بین نمی‌رود؛ البته به این شرط که کاهش کارکرد و استفاده پل قابل تحمل باشد[۳۵].

۱-۳-۶- زوال پی

مثل حالت اتصالات، مقاوم سازی برای افزایش کارآیی پی ممکن است خیلی پر هزینه باشد، پس ابتدا باید دید که آیا در صورت زوال پی، پل قادر به تحمل سطح پاسخهای لرزه‌اي طرح مي‌باشد. حرکت گهواره ای یا چرخش حول محور جانبی پی(Rocking) در بسیاری موارد به عنوان یک جداسازی لرزه‌اي قابل قبول با ظرفیت جابجائی عظیم تلقی مي‌شود. نتیجه چنین چرخشی، محدود نمودن سطوح نیرویی در قسمتهایی از سازه به سطح قابل تحمل مي‌باشد. وقتی بازسازی پی قابل اجتناب نباشد، معمول است که ابعاد پلان پی را به منظور افزایش پایداری حالت چرخش گهواره‌ای افزایش دهند وهمچنین اگر شرایط زمین اجازه دهد، شمعهای محیطی اضافی احداث کنند؛ یک لایه مسلح نیز اغلب در بالای پی موجود ایجاد مي‌شود که به منظور اتصال بین بتن جدید و قدیم، یک سری میلگردهای انتظار با فواصل کم را در آن قرار می‌دهند. این لایه فوقانی اضافی، همچنین سطح تنشهای برشی را در اتصال پی به ستون کاهش مي‌دهد و شرایط مهاربندی بهتری برای میلگردهای ستون ایجاد می‌کند.

۱-۴- جداسازی لرزه‌اي به عنوان یک روش مقاوم سازی

تأمین جداگرهای لرزه‌اي یا قطعات میراگر بخصوص در سازه موجود، مي‌تواند کارآیی لرزه‌اي آنرا افزایش دهد. اغلب دیده شده است وقتی روسازه واقع بر تیر سرستون توسط بالشتکها تحمل مي‌شود، بالشتکها قادر به تحمل نیروها نیستند و باید تعویض شوند. بنابراین مناسب است که آنها را با بالشتکهای جداگر ویژه‌اي که نیرو در پایه‌های پل را به سطحی می‌رساند که در محدوده پاسخ الاستیک قابل تحمل باشد، تعویض نمود. با تنظیم مشخصه‌هاي جابجائی و مقاومت بالشتکها در روی پایه‌های مختلف، مي‌توان پاسخ لرزه‌اي را نیز منظم ساخت و از تمرکز خسارت در پایه‌های سخت کوتاه اجتناب کرد.

در حدود سه دهه ازکاربرد جداسازی لرزه‌اي در پلها می‌گذرد و کارایی این نوع پلها همچنان تأیید شده است. مفهوم اصلی جداسازی لرزه‌اي یکی افزایش دوره تناوب سازه و دیگری افزایش میرایی سازه یا هردو باهم مي‌باشد. در دهه ۱۹۷۰ ایجاد جداگرهای لرزه‌اي در پلها به

عنوان ابزار مقاوم در برابر زلزله آغاز شد. این فناوری ظرف سی سال گذشته به سرعت گسترش یافت، به طوری که امروزه موارد کاربرد زیادی از آنها در سرتاسر دنیا بویژه در زلاندنو، امریکا، کانادا، ایتالیا، ایسلند، ژاپن و تایوان مشاهده مي‌شود. بیشترین تعداد پل در زلاند نو (بیش از ۵۰ عدد) جداسازی لرزه‌اي شده‌اند.

به هر حال، تعداد پلهای مجهز به جداگرهای لرزه‌اي که زلزله‌های حقیقی را تجربه کرده باشند بسیار کم است، درنتیجه، داده‌های ثبت شده بسیار اندکی در مورد پاسخ چنین پلهایی موجود است و کارآیی آنها نسبت به زلزله‌های قوی باید در عمل اثبات شود. به هرصورت، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده های موجود ارزشمند مي‌باشد.

پل راه‌آهن رانگیتیکل جنوبی، اولین سازه جدا شده در زلاندنو با ساخت در سال ۱۹۷۴ است. سازه پل دارای ۶ دهانه با بتن پیش‌تنیده بوده و حداکثر ارتفاع در بالای رودخانه ۶۸ متر مي‌باشد. بارهای ثقلی توسط تکیه‌گاههای الاستومر منتقل می شوند. کنترل جابجائی جانبی سازه با یک زوج مستهلک کننده میله‌ای فولادی پیچشی با مقاومت تسلیم ۴۰۰ کیلونیوتن و حرکت کل ۸۰ سانتیمتر در پای هر شمع انجام شده است.

پل Te Teko در زلاندنو : این پل در سال ۱۹۸۳ ساخته شد و دارای پنج دهانه از جنس بتن پیش‌تنیده مي‌باشد که مجهز به بالشتکهای لاستیکی- سربی روی هر پایه و بالشتکهای لاستیکی روی کوله‌ها مي‌باشد. این پل در معرض زلزله ۱۹۸۷ Edgecumbe با بزرگی ۶/۳ ریشتر قرار گرفت. این پل به علت نقص در مرحله ساخت بالشتک روی یکی از کوله‌ها دچار خسارت جزئی شد و یک جابجائی دائمی اندک در روسازه پدید آمد. با توجه به اینکه تحت این زلزله شدید، پل تنها خسارت اندکی دید، مي‌توان نتیجه گرفت که عملکرد لرزه‌اي پل مناسب بوده است [۲۵].

پل Sierra Point در امریکا : این پل منحنی شکل است و طول آن ۱۸۴/۸ متر و عرض آن ۳۵/۱ متر مي‌باشد. این پل در سال ۱۹۵۶ ساخته شده و در سال ۱۹۸۵ با بالشتکهای لاستیکی- سربی بین ستونها و روسازه مقاوم شده است. این پل زلزله ۱۹۸۹ لوما پرایتا را بدون وارد شدن خسارت به ستونها تحمل کرد[۲۵].

پل Eel River درامریکا : این پل در سال ۱۹۸۷ با بالشتکهای لاستیکی - سربی مقاوم شد. دو دهانه خرپایی پل عایق بندی شدند که هر دهانه ۹۰ متر طول دارد. این پل در معرض زلزله ۱۹۹۲ با بزرگی ۷ ریشتر و شتاب ماکزیمم زمین حدود g ۰/۵۵ قرارگرفت. خسارتهای وارده به پل بسیار جزئی بوده و به فروریختن بتن در درزها محدود مي‌شود[۲۵].

پل Miyagawa در ژاپن : این پل در سال ۱۹۹۱ ساخته شد و دارای سه دهانه با عرشه پیوسته ازجنس تیر ورق فولادی با طول ۱۰۸/۵ متر و عرض مؤثر ۱۰/۵ متر بوده که با بالشتکهای لاستیکی – سربی (شرح در فصل سوم) جداسازی شده است. این پل در سال ۱۹۹۱ تحت زلزله به بزرگی ۴/۹ ریشتر قرار گرفت. براساس گزارشها، ماکزیمم شتاب عرشه نصف ماکزیمم شتاب زمین بود و فرکانسهای در محدوده ۳ تا ۵ هرتز توسط عایقها با موفقیت فیلتر شدند، ولی فرکانس ۱/۲ هرتز با ضریب دو افزایش یافت. در این زلزله به علت پایین بودن شتاب زمین، رفتار غیرخطي بالشتکها وارد عمل نشد که اگر زلزله‌های قوی تری رخ دهد عایقها قطعاً بهتر عمل خواهندکرد[۲۵].

پل Matsunohama در ژاپن : این پل در سال ۱۹۹۱ ساخته شد که دارای چهار دهانه با عرشه پیوسته ازجنس فولادی با طول ۲۱۱/۵ وعرض ماکزیمم ۲۲ متر و شعاع انحنای ۵۶۰ متر مي‌باشد، که عایق بکاررفته در آن از نوع بالشتک لاستیکی – سربی مي‌باشد که در معرض زلزله ۱۹۹۵ کوبه با بزرگی ۷/۲ ریشتر قرار گرفته است. ماکزیمم شتاب عرشه اندکی کوچکتر از ماکزیمم شتاب بالای پایه بوده است، ولی عایقها وارد محدوده غیرخطی شده‌اند که برطبق مشاهدات سیستم جداگر مطابق انتظار عمل کرده است [۲۵].

پل Maruki-bashi در ژاپن : این پل در سال ۱۹۹۲ ساخته شد که با بالشتکهای لاستیکی – سربی عایق بندی شده است. این پل سه دهانه با عرشه پیوسته از جنس بتن پیش‌تنیده با طول ۹۲/۸ متر و عرض مؤثر ۱۱ متر مي‌باشد. این پل در سال ۱۹۹۴ تحت زلزله به بزرگی ۷/۵ ریشتر قرار گرفت. ماکزیمم شتاب عرشه % ۱۱ کمتر از ماکزیمم شتاب بالای پایه بود، با این وجود ماکزیمم شتاب عرشه ۱/۷ برابر ماکزیمم شتاب زمین بود، در این زلزله نیز عایقها در

محدوده خطی باقی ماندند و جاری نشدند. بنابراین کارآیی جداسازی لرزه‌اي از داده‌های ثبت شده واضح نیست [۲۵].

پل Yama-age در ژاپن : این پل در سال ۱۹۹۳ ساخته شد و دارای شش دهانه با عرشه پیوسته از جنس بتن پیش تنیده با طول ۲۴۶/۳ متر و عرض مؤثر ۱۰/۵ تا ۱۳/۵ متر می‌باشد. این پل با بالشتکهای لاستیکی با میرایی زیاد عایق بندی شده است. پاسخهای لرزه‌اي پل تحت زلزله ۱۹۹۴ Hokkaido-toho-oki با بزرگای ۸/۱ ریشتر ثبت شده است. ماکزیمم شتاب عرشه یک سوم ماکزیمم شتاب بالای پایه بوده و هیچ یک از جداگرها در محدوده غیرخطی قرار نگرفتند. آنالیز طیفی پاسخهای ثبت شده نشان می‌دهد که باوجود جداگرها، مؤلفه ارتعاشی با فرکانسی برابر فرکانس اساسی پایه به عرشه منتقل نشده است [۲۵].

پل Bai-Ho در تایوان: این پل سه دهانه با عرشه پیوسته از جنس بتن پیش تنیده با طول ۱۴۵ متر و عرض ماکزیمم ۱۶/۱ متر می‌باشد، که مجهز به بالشتکهای لاستیکی – سربی روی هر پایه و بالشتکهای لاستیکی با پوشش تفلون روی کوله‌ها می‌باشد. اگرچه درحین زلزله ۱۹۹۹ با بزرگی ۶ ریشتر، ساخت پل هنوز تمام نشده بود، اما پل هیچ خسارتی ندید. افزایش قابل توجه دوره تناوب پل به علت رفتار غیرخطي بالشتکها باعث عملکرد مثبت پل در جهت طولی شده است[۲۵] (شکلهای ۱- ۱۶ و ۱- ۱۷).

روگذر Bolu درترکیه : در عایق‌بندی این روگذر که از نوع بتن پیش‌تنیده می‌باشد، از میراگرهای هیسترتیک فولادی به شکل C و بالشتکهای تفلونی استفاده شده است. طول آن بالغ بر ۲۳۱۳ متر و عرض آن به ۱۷/۵ متر می‌رسد. در زلزله‌های سال ۱۹۹۹ ترکیه که بزرگای آنها به طور متوسط ۷/۵ ریشتر بوده است، پاسخ این پل جداسازی شده کاملاً رضایت بخش بوده است طوریکه در زلزله‌اي با شتاب ماکزیمم حدود g ۱/۰ که خیلی بیشتر از شتاب طرح بوده است، پل جداسازی شده با وجود تحمل خسارت‌های بسیار، واژگون نشده است.

خسارتهای وارده به پایه‌ها محدود به ترکهای خمشی ظریف می‌شود و اغلب خسارتهای سازه‌ای توسط روسازه وکوله‌ها تحمل شده‌اند. جابجائی جانبی قابل توجهی در عرشه نسبت به

پايه‌ها رؤيت شده است؛ خرد شدگی بتن و چرخش كوله‌ها در انتهای روگذر مشاهده مي‌شود كه به علت برخوردبين عرشه و كوله مي‌باشد.

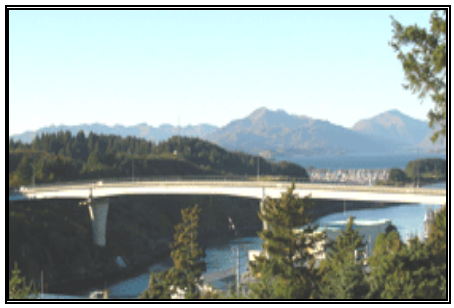
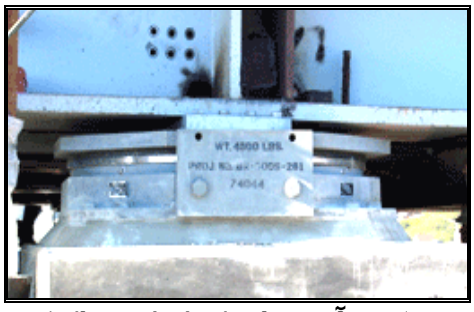
شكلهای (۱- ۱۶) و (۱- ۱۷) پل Bai-Ho در تايوان (بالا) و سيستم جداسازی آن (پايين)

بالشتكهای تفلونی، روی اغلب پايه‌ها از محل خود خارج شده‌اند و در ميراگراهای هيسترتيک فولادی كه به عنوان قطعات مستهلک كننده انرژی مي‌باشند، تغييرشكلهای دائمی ناشی از جاری شدن عناصر فولادی صورت گرفته است. اين درحالی است كه قبل از آن، همين روگذر در معرض زلزله‌اي به همين بزرگی و با شتاب ماكزيمم زمين مشابه شتاب طرح g ۰/۴ مواجه شده بود، كه هيچگونه خسارتی نديده بود [۲۵] (شكلهای ۱- ۱۸ و ۱-۱۹).

در ايسلند نيز چهار پل جداسازی شده در زلزله‌های سال ۲۰۰۰ عملكرد رضايت بخشی داشته‌اند؛ اين زلزله دارای شتاب ماكزيمم g ۰/۸۴ بوده است. پلهای جداسازی شده با جداگرهای لاستيكی- سربی تنها در جهات طولی و عرضی مقداری جابجائی پيدا كرده‌اند و هيچ مشكل ديگر يا خسارت سازه‌ای نداشته‌اند [۲۵].


شکلهای (۱- ۱۸) و (۱- ۱۹) روگذر Bolu درترکیه (راست) وزوال بالشتک آن (چپ)

در ادامه چند پل جداسازی شده تازه ساز که در آنها از بالـشتک پانـدول اصـطکاکی بـرای تحمل نیروهای بزرگ بهره گرفته شده است، آورده مي‌شود (شکلهای۲ –۲۰ تا ۲– ۲۷).

شکلهای (۱-۲۰) و (۱- ۲۱) پل Kodiac-Near Island که در آن ۱۵ عایق لرزه‌اي از نوع بالشتک پاندول اصطکاکی بکاررفته است (آلاسکا)


شکلهای (۱– ۲۲) و (۱– ۲۳) پل Benicia-Martinez که در آن بازای هرپایه دو عایق لرزه‌اي از نوع بالشتک پاندول اصطکاکی بکاررفته است (کالیفرنیا)


شكلهای (۱– ۲۴) و (۱– ۲۵) پل American River كه در آن ۴۸ عايق لرزه‌اي از نوع بالشتک پاندول اصطكاكی بكاررفته است (كاليفرنيا)


شكلهای (۱– ۲۶) و (۱– ۲۷) پل I - 40 و عايق لرزه‌اي بكاررفته در آن كه از نوع بالشتک پاندول اصطكاكی مي‌باشد (روی رود Mississippi)

زماني كه طراحي يك پل به صورت جداسازي شده توجيه مي‌شود، فرض مي‌گردد كه عمده اتلاف انرژي در سيستم جداساز اتفاق مي‌افتد و تنها تحت زلزله‌هاي حدي ممكن است مقدار كمي شكل‌پذيري توسط پايه‌ها نياز باشد. دستيابي به چنين پاسخي به سادگي امكان‌پذير است، به شرطي كه سطح تسليم سيستم جداساز طوري انتخاب شود كه تسليم در پايه‌ها اتفاق نيفتد. به عبارت ديگر لازم خواهد بود تا سيستم جداساز حتماً زودتر از پايه تسليم شود.

ضرايب حفاظت پايه در محاسبه مقاومتهاي اسمي به منظور پرهيز از تسليم زودهنگام پايه به كار مي‌روند. اين ضرايب به ميزان قابليت اعتماد مشخصات مكانيكي سيستمهاي جداساز بستگي دارد. در بسياري از موارد لازم است كه مقاومت واقعي سيستم جداساز بيشتر از ۱۰ درصد با مقاومت طرح آن اختلاف نداشته باشد و مقاومت سيستم جداساز در تغيير مكان طرح برابر ۸۵

درصد مقاومت اسمي پايه باشد[۳۵]. اصول طراحي بر مبناي ظرفيت به منظور پرهيز از مودهاي شكست نامطلوب پايه‌ها و پي‌ها همچنان قابل كاربرد مي‌باشد. به طور مثال اطمينان از اينكه مقاومت برشي پايه زودتر از مقاومت خمشي آن فعال نمي‌شود، ضروري است. ضرايب حفاظت پايه در محاسبه مقاومت تكيه‌گاهها، اتصالات و كوله‌ها به كار مي‌روند. ضريب حفاظت پايه (PPI) از رابطه زير به دست مي‌آيد :

$$PPI = \frac{\Delta_{mni} - \Delta_{mi}}{\Delta_{mni}} \qquad (۱-۱)$$

به گونه‌اي كه Δ_{mni} حداكثر تغيير مكان جانبي رأس پايه در حالت پل جدا نشده و Δ_{mi} حداكثر تغييرمكان جانبي رأس پايه در حالت پل جدا شده مي‌باشد. لازم به ذكر است كه مقدار PPI همواره بين صفر و يك قرار مي‌گيرد. زماني كه پايه در حالت جدا نشده باشد، مقدار ضريب حفاظت پايه برابر صفر مي‌باشد و مقدار ۱ براي ضريب حفاظت پايه بدين معناست كه پايه كاملاً از حركات زمين جدا شده است[۳۵].

معمولاً افزايش سختي جداساز منجر به كاهش تغيير مكانهاي عرشه مي‌گردد. ليكن تغيير مكان رأس پايه با تغيير سختي جداساز تغيير چنداني نمي‌كند. به عبارت ديگر مقدار ضريب حفاظت پايه در محدوده مشخصی از مقدار سختي جداساز مستقل است. همچنين افزايش سطح تسليم جداساز در غالب موارد باعث كاهش تغيير مكانهاي عرشه مي‌گردد. ميزان تأثير افزايش سطح تسليم جداساز در كاهش تغيير مكانهاي عرشه، زماني قابل توجه است كه سختي جداساز در حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد سختي پايه انتخاب شود. با افزايش سختي جداساز از ميزان اين تأثير به شدت كاسته مي‌شود. همواره با كاهش مقاومت تسليم جداساز تغيير مكانهاي رأس پايه كاهش مي‌يابد و به عبارت ديگر كاهش مقاومت تسليم جداساز باعث افزايش ضريب حفاظت پايه مي‌گردد. در حالی كه با افزايش مقاومت تسليم جداساز، ضريب حفاظت پايه كاهش يافته و امكان ورود پايه به محدوده‌هاي غير ارتجاعي افزايش مي‌يابد. لذا در چنين مواردي مانند حالت پل جداسازی نشده و يا پلهای با تكيه‌گاههای نئوپرن انبساط حرارتی، لازم است كه پايه‌های پل با استفاده از المانهاي داراي رفتار غير خطي مدلسازي شود.

فصل دوم

جداسازی لرزه‌ای پلها و انواع تکیه‌گاههای جداگر

۲-۱- مفهوم و مکانیزم جداسازی لرزه‌اي پلها

توانایی و مزایای تکیه‌گاههای جداگر بعنوان ابزار کنترل نیروهای جانبی که به طراحان اجازه مي‌دهد نیروهای زلزله وارد بر پایه‌ها و کوله‌های پل را کاهش داده و یا منحرف کنند، به خوبی به اثبات رسیده است. از این تکیه‌گاهها مي‌توان به نحو مؤثری در مقاوم سازی پلهای موجود و یا طراحی سازه پلهای جدید واقع در نواحی لرزه‌خیز بهره برد. هزینه اضافی تکیه‌گاههای جداکننده نسبت به تکیه‌گاههای معمولی اغلب با صرفه‌جویی در هزینه مقاوم سازی زیر سازه و یا ساخت پل جبران مي‌شود. این صرفه جویی به علت کاهش میزان نیروی زلزله‌به علت استفاده از این تکیه‌گاهها مي‌باشد. البته کوششهایی نیز برای ساخت جداکننده‌های لرزه‌اي ارزان قیمت در کشور انجام مي‌گیرد که با به ثمر رسیدن آن، هزینه اضافی فوق نیز کاهش یافته و یا از بین خواهد رفت. تکیه‌گاههای جداگر مورد استفاده در جداسازی لرزه‌اي پلها معمولاً در زیر عرشه پل و روی پایه‌ها و کوله‌ها قرار می‌گیرند.

مکانیزم کاهش نیروی زلزله در یک پل دارای تکیه‌گاههای جداکننده مي‌تواند بوسیلة یک یا چند مورد از عوامل زیر بوجود آید[۳۵]:

۱- افزایش پریود اصلی سازه پل (اثر تغییر پریود در طیف پاسخ) در اثر کاهش سختی جانبی پل که نیروها را کاهش داده، ولی تغییر مکانها را افزایش می‌دهد.
۲- افزایش میرایی که تغییر مکانها را کاهش داده و ممکن است نیروها را نیز کاهش دهد. افزایش میرایی می‌تواند در اثر جاری شدن بعضی از اجزاء تکیه‌گاه مانند هستهٔ سربی و یا بوسیلهٔ نیروهای اصطکاکی موجود در سطوح لغزش تکیه‌گاهها بوجود آید.
۳- توزیع و پخش نیروهای زلزله در همهٔ تکیه‌گاهها؛ افزایش انعطاف‌پذیری جانبی یک پل، منجر به افزایش تغییر مکان افقی روسازهٔ پل تحت بارهای جانبی می‌شود. بکار بردن تکیه‌گاههای جداکننده در پلها، انعطاف پذیری جانبی و پریود ارتعاش پل را در هنگام زلزله افزایش می‌دهد که این امر با افزایش تغییر مکان‌های جانبی روسازهٔ پل همراه می‌باشد.

در شرایط بار سرویس، تغییر مکان روسازه بایستی در حدود مجاز نگه داشته شود. تکیه‌گاههای جداکننده تحت بار زلزله نیز تغییر مکان روسازه نسبت به زیر سازه را کنترل می‌کنند. با افزایش میرایی جداکننده‌ها می‌توان از تغییر مکان زیاد جلوگیری نمود.

شتاب اکثر زلزله‌ها معمولاً دارای زمان تناوب غالبی در حدود ۰/۱ تا ۱ ثانیه می‌باشد و حداکثر شدت آن در محدودهٔ زمان تناوب‌های ۰/۲ تا ۰/۶ ثانیه است. بنابراین چون امکان تشدید پاسخ سازه‌هایی که زمان تناوب طبیعی آنها در محدودهٔ ۰/۱ تا ۱ ثانیه است، در مقابل زلزله وجود دارد، این سازه‌ها در محدوده‌های تناوبی فوق آسیب‌پذیرترند. مهمترین ویژگی جداکننده‌های لرزه‌اي در این است که با انعطاف پذیری زیاد خود، زمان تناوب طبیعی سازه را افزایش می‌دهند. این پدیدهٔ افزایش زمان تناوب سازه موجب می‌گردد که از عمل تشدید یا از نزدیک شدن به آن اجتناب شود و در نهایت، پاسخ سازه کاهش یابد. اما لایه‌های عمیق خاک نرم می‌تواند فرکانس پایین حرکات زلزله را تشدید نماید. منطقهٔ بستر دریاچهٔ قدیمی در مکزیکوسیتی مثالی از این مورد است. در چنین حالاتی، سازه‌های انعطاف‌پذیری که میرایی متوسطی داشته باشند، به جای کاهش پاسخ سازه باعث افزایش آن می‌شوند. در این حالت تمهیدات لازم به منظور افزایش

میرایی بعنوان بخشی از سیستم جدا کنندهٔ لرزه‌اي مي‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از وقوع رویدادهای غیر قابل پیش‌بینی داشته باشد.

همانطور که گفته شد، یکی از خصوصیات مهم تکیه‌گاههای جداکننده در پلها قابلیت استهلاک انرژی زلزله مي‌باشد. بعنوان مثال در یک تکیه‌گاه لاستیکی استهلاک انرژی بوسلهٔ تغییر شکل پلاستیک هستهٔ سربی انجام مي‌شود و در یک تکیه‌گاه از نوع اصطکاکی، انرژی توسط کار نیروهای اصطکاکی موجود بین سطوح لغزشی مستهلک می‌گردد.

در مورد روسازه‌های واقع بر تکیه‌گاههای جدا کننده، همهٔ تکیه‌گاهها مي‌توانند در تحمل و انتقال نیروهای جانبی شرکت کنند. اصلاح توزیع بار جانبی بین تکیه‌گاهها وسیلهٔ مقاوم سازی مؤثری است که مي‌تواند با استفاده صحیح از تکیه‌گاههای جداکننده بدست آید.

بعضی از سیستم‌های جداسازی رفتار صرفاً نرم شونده دارند و تقریباً رابطه نیرو - تغییر مکان دو خطی از خود نشان می‌دهند، مانند تکیه‌گاههای لاستیکی- سربی، تکیه‌گاههای پاندول اصطکاکی و یا سیستم‌های دوگانه شامل سطوح لغزش با فنرهای بازگرداننده که در قسمتهای بعدی معرفی خواهند شد. برای تحلیل غیرخطی چنین سیستم‌هایی، با استفاده از قطعات هیسترزیس (برای هر تکیه‌گاه یک قطعه) مي‌توان پاسخ تکیه‌گاه را در همهٔ محدوده‌های تغییر مکان، با دقت بدست آورد. از نقطه نظر انرژی، المان‌های هیسترزیس برای چنین تکیه‌گاههایی مناسب هستند، زیرا مکانیزم استهلاک انرژی یا مکانیزم ناشی از تسلیم سرب و یا ناشی از اصطکاک کولمب (لغزشی) مي‌باشد و به دقت با استهلاک انرژی حاصل از مدل المان دو خطی مطابقت دارد. لکن بعضی از سیستم‌های جداکننده مانند لاستیک با میرایی زیاد، رفتار نرم شونده - سخت شونده دارند. برای چنین سیستم‌هایی، مدل سادهٔ دو خطی رابطه نیرو – تغییر مکان را در محدودهٔ تغییر مکان‌های زیاد به درستی نشان نمي‌دهد [۱۸]. برای تحلیل سیستم جداگر تحت زلزله‌های خیلی قوی، مدل بایستی رفتار لاستیک را در کرنش‌های بزرگ در نظر بگیرد. تکیه‌گاههای الاستومریک اگر بطور صحیح و بخوبی طراحی و ساخته شوند در کرنش‌های بزرگ سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند که این پدیده ناشی از کریستالیزه شدن کرنشی در لاستیک

مي‌باشد. اگرچه اکثر پروژه‌های طراحی شده تا امروز فقط با اتکا بر سیستم‌های جداکنندة نرم‌شونده بوده است، تمایل به استفاده از زلزله‌های طرح بزرگتر احتمالاً منجر به بهره‌گیری از سیستم‌های نرم‌شونده – سخت‌شونده خواهد شد تا عملکرد قابل قبولی در محدوده‌های گسترده‌تر شدت‌های زلزله فراهم شود. یک سیستم صرفاً نرم شونده که برای زلزله‌های خیلی بزرگ، بهینه طراحی شده باشد، تحت زلزله‌های متوسط معمول، نسبتاً سخت مي‌باشد که باعث افزایش شتاب در سطح روسازه مي‌شود. در مقابل، یک سیستم نرم شونده – سخت شونده را در ترازهای زلزله متوسط، مي‌توان با انعطاف پذیری کافی طراحی کرد، بطوریکه نیروهای منتقل شده بوسیلة تکیه‌گاهها در زلزله‌های مورد انتظار کاهش اساسی پیدا کند، در حالی که در زلزله‌های سخت احتمال وقوع تغییر مکانهای بزرگتر از حدود مجاز بسیار کم باشد[۱۸].

۲-۲- انواع تکیه‌گاههای جداگر لرزه‌ای

تاکنون، سیستم‌های جداگر متنوع و مختلف بسیاری ساخته شده و به ثبت رسیده است و همه ساله نیز بر تعداد انواع آن افزوده مي‌شود. دو نوع اصلی سیستم جداکننده وجود دارد: تکیه‌گاههای الاستومریک متشکل از لاستیک طبیعی یا نئوپرن و تکیه‌گاههای لغزشی با سطح لغزشی حاصل از تفلون و فولاد ضد زنگ و یا سطوح لغزشی دیگر. سیستم‌هایی نیز پیشنهاد و ساخته شده‌اند که ترکیبی از تکیه‌گاههای الاستومریک و لغزشی مي‌باشند. در ادامه، انواع تکیه‌گاههای جداکننده معرفی مي‌شود.

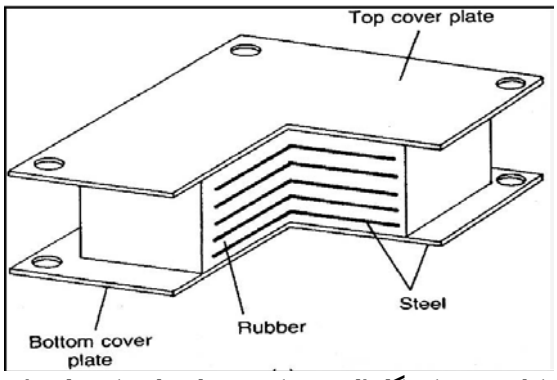
۲-۲-۱- سیستم‌های الاستومریک

تکیه‌گاه جداکنندة الاستومریک که در آن از لاستیک طبیعی یا مصنوعی (نئوپرن) استفاده مي‌شود، بعنوان ابزاری برای کاهش نیروهای زلزله و توزیع بهتر نیروهای جانبی بین تکیه‌گاههای پل مورد استفاده قرار مي‌گیرد. بطور کلی انعطاف‌پذیری این تکیه‌گاه، سختی جانبی کل پل را کاهش داده و در هنگام زلزله تغییر مکانهای جانبی روسازه را افزایش داده و نیروهای اینرسی را کاهش مي‌دهد. این تکیه‌گاهها در عین حال که حرکات پل را تحت بار سرویس در یک حد

مجاز، نگه مي‌دارند، امكان يک مقدار كنترل شدة حركت روسازه نسبت به زيرسازه را درهنگام زلزله فراهم مي‌كنند. همچنين نيروهای جانبی به نسبت سختی قسمتهای مختلف زير سازه كه شامل اثرات نرمی تكيه‌گاههای جداكننده نيز مي‌باشد، بين هستة تكيه‌گاهها توزيع مي‌شود. اين سيستم در هر تكيه‌گاه بين روسازه و زير سازه اتصال برقرار می‌كند و خطر فروافتادن شاهتيرها را كه اغلب در طی زلزله‌های گذشته در پلهای با تكيه‌گاههای معمولی اتفاق افتاده است از بين می‌برد. بطور كلی اين جداكننده‌ها را مي‌توان به انوع زير تقسيم‌بندی نمود:

۲-۲-۱-۱- تكيه‌گاههای جداكننده‌الاستومريک چند لايه مسلح شده توسط ورقهای فولادی (LRB):

در اين تكيه‌گاهها لاستيک طبيعی يا مصنوعی با ورقهای فولادی مسلح مي‌شود، به اين صورت كه صفحات فولادی و لاستيک يک در ميان روی هم قرار می‌گيرند. كاربرد اولية اين تكيه‌گاهها در روسازه‌های پلها برای تحمل تغيير شكل‌های ناشی از تغييرات درجه حرارت بوده است. اين بالشتكها طوری طراحی می‌شوند كه وزنهای بزرگ را تحمل كرده، در حالی كه در برابر جابجاييهای بزرگ مقاومت اندكی دارند. اين تكيه‌گاهها را مي‌توان با ابعادی ساخت كه ظرفيت باربری و انعطاف پذيری افقی لازم برای جداسازی لرزه‌اي را تأمين كنند.



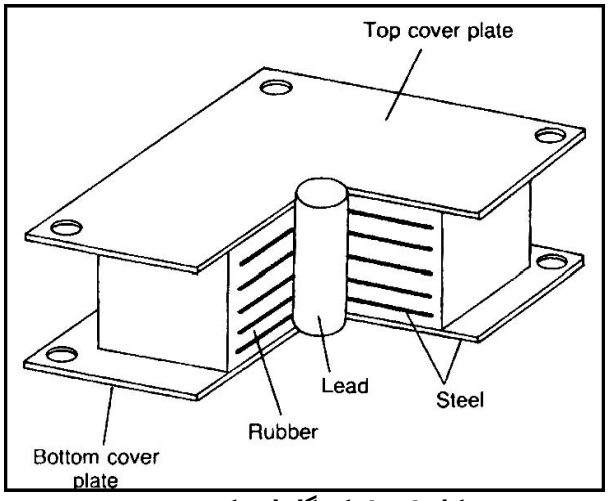
شكل(۲-۱) تكيه‌گاه الاستومريک چند لايه لاستيكی با ميرايی كم

اين نوع تكيه‌گاهها به انواع زير تقسيم مي‌شوند [۲۱ و ۳۲]:

۱- تكيه‌گاه الاستومريک چند لايه لاستيكی با ميرايی كم

۲- تکیه‌گاههای لاستیکی - سربی

۳- تکیه‌گاه الاستومریک چند لایه لاستیکی با میرایی زیاد (HDRB)



شکل (۲-۲) تکیه‌گاه لاستیکی- سربی

۲-۲-۱-۲- جداکننده‌های الاستومریک مسلح شده توسط الیاف (F-REI)

در این نوع جداکننده‌ها، به جای صفحات فولادی از الیاف پلیمری (مانند الیاف کولار) با سختی و مقاومت بالا برای مسلح کردن الاستومر استفاده می‌شود. این الیاف قابلیت چسبندگی و پیوستگی مناسبی با زمینهٔ الاستومر دارند. همچنین این الیاف دارای وزن کمی می‌باشد. بنابراین با بکار بردن این روش، معایب استفاده از صفحات فولادی که عبارت از سنگینی آنها و نیز گران قیمت بودن به علت فرآیند پیچیدهٔ آماده ساختن آنها جهت قرار دادن در بین لایه‌های لاستیکی و حرارت دادن مجموعه آن می‌باشد، مرتفع می‌گردد [۲۲ و ۳۲].

۲-۲-۲- سیستم‌های جداکنندهٔ لغزشی (اصطکاکی)

یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین تکنیکها در جداسازی لرزه‌اي، استفاده از تکیه‌گاههای جداکننده لغزشی است. سیستم‌های لغزشی تحت انواع بارگذاری زلزله‌های شدید به خوبی عمل کرده و در کاهش شتاب روسازه پلها بسیار مؤثرند. مزایای سیستم جداکنندة لغزشی در مقایسه با تکیه‌گاههای لاستیکی عبارتند از:

۱- سیستم با جداگر اصطکاکی در محدودة وسیعی از فرکانسهای ورودی مؤثر است.

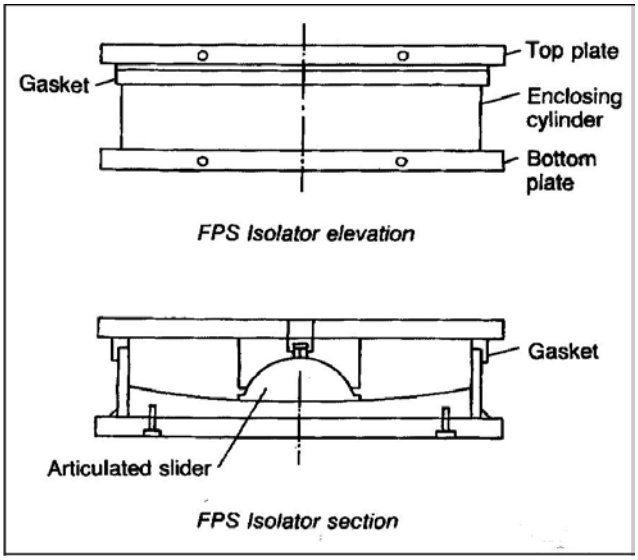
۲- از آنجا که نیروهای اصطکاکی که در پایه تولید می‌شوند با جرم سازه متناسب‌اند و مرکز جرم و مرکز مقاومت نگهدارندة لغزشی برهم منطبق مي‌باشند، در نتیجه اثرات پیچشی ناشی از سازه‌های نامتقارن خنثی مي‌شود.

در تکیه‌گاه لغزشی، کم بودن مقدار اصطکاک، انتقال برش را از سطح جداسازی کاهش مي‌دهد. هر قدر ضریب اصطکاک کمتر باشد، برش کمتری انتقال مي‌یابد. همچنین تغییر مکانهای بین روسازه و زیرسازه و مقاومت اصطکاکی در سطح لغزش تکیه‌گاه، انرژی زلزله را مستهلک می‌کند. گاهی اوقات میراگرهایی نیز مانند پین‌های فلزی با میرایی هیسترزیس در داخل یک تکیه‌گاه لغزشی به آن اضافه مي‌شود. برای فراهم نمودن مقاومت کافی در برابر باد و اجتناب از حرکت سازه تحت زلزله‌های کوچک یا اثرات دیگر، یک مقدار مناسب ضریب اصطکاک لازم است. مشخصه‌هاي لغزشی بسیاری از سطوح اصطکاکی به فشار و سرعت نسبی لغزش وابسته بوده و فرآیند لغزش ذاتاً غیرخطی است. بنابراین تحلیل دینامیکی این سیستم‌ها باید بصورت غیرخطی انجام پذیرد. در تحلیل‌های تئوری تکیه‌گاههای لغزشی معمولاً از فرض اصطکاک کولمب استفاده مي‌شود، ولی این فرض نشان‌دهندة رفتار دقیق واقعی سیستم نمي‌باشد.

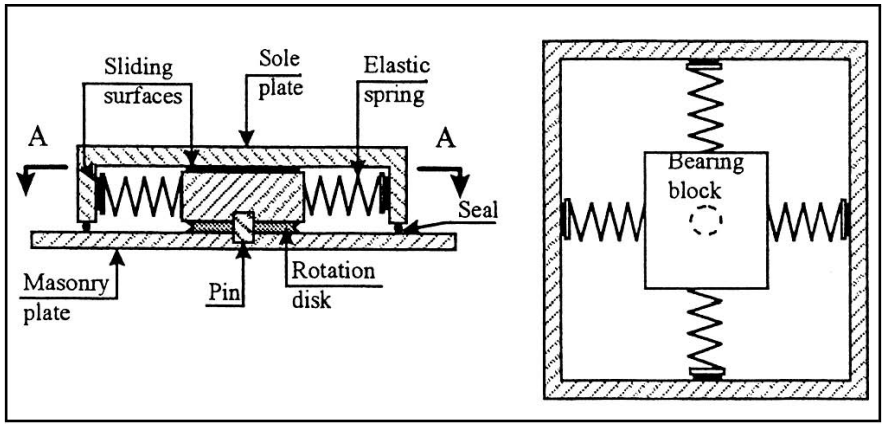
ماده‌اي که بیشترین کاربرد را در تکیه‌گاههای لغزشی دارند، پلی‌تترافلور اتیلن (PTFE یا تفلون) واقع بر فولاد ضد زنگ مي‌باشد و مشخصه‌هاي اصطکاکی این سیستم به دما، سرعت حرکت صفحة میانی، درجة سایش و تمیزی سطح وابسته است. مواد دیگری که برای تکیه‌گاه لغزشی مورد استفاده قرار می‌گیرند، صفحات آلیاژ سرب- برنز مي‌باشند که بر روی یک سطح از جنس فولاد ضد زنگ می لغزد.

مشکل استفاده از لغزنده‌ها در سیستم جداسازی این است که نیروی مقاوم و بازگردانندة مؤثری وجود ندارد. بنابراین تغییر مکان سیستم نسبتاً بزرگ مي‌شود. چون این تغییر مکان مي‌تواند در هر جهت افقی رخ بدهد، قطر صفحات تکیه‌گاه و سیستم تکیه‌گاه باید خیلی بزرگ باشد، لکن به چند روش مي‌توان نیروهای مقاوم و بازگرداننده را ایجاد نمود. بعنوان مثال مي‌توان از ترکیب سطوح لغزشی و الاستومریک استفاده کرد. بعضي از انوع این نوع تکیه‌گاه عبارتند از [۱۸]:

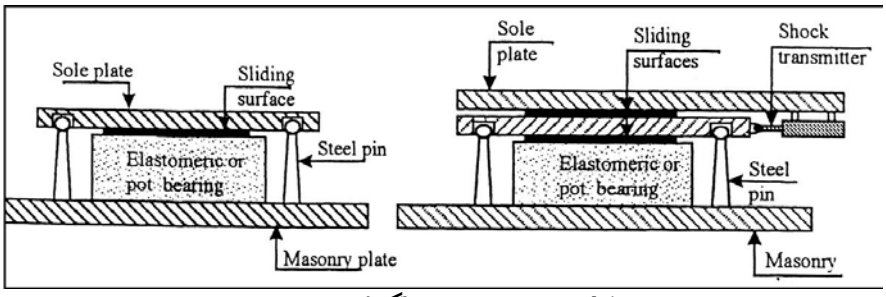
- سیستم اصطکاک خالص (P-F)
- میله‌های غلتان بین پایه و پی (دایروی یا بیضوی)
- سیستم پاندول اصطکاکی (FPS)
- سیستم اصطکاکی EQS
- سیستم جداگر لغزشی FIP



شکل (۲-۳) سیستم پاندول اصطکاکی برای جداسازی لرزه‌اي در پلها



شکل (۲-۴) اجزای تشکیل دهنده یک سیستم اصطکاکی EQS



شکل (۲-۵) سیستم جداگر لغزشی FIP

۲-۲-۳- سیستم جداکنندهٔ ترکیبی الاستومر و لغزنده‌ها

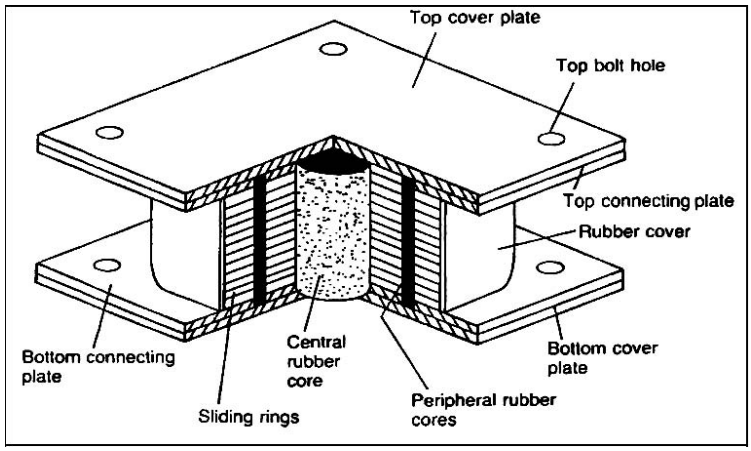
برای تأمین نیروی بازگرداننده در تکیه‌گاههای جداکنندهٔ لغزشی می‌توان آنها را در ترکیب با الاستومر و یا تکیه‌گاههای الاستومریک بکار برد. ترکیب لغزنده‌ها و تکیه‌گاههای الاستومریک توسط آقای کلی به منظور بهره بردن از مزیت‌های هر دو نوع جداکنندهٔ فوق پیشنهاد شد. لغزنده‌ها پریود سیستم را بالا برده و تکیه‌گاههای لاستیکی با ایجاد نیروهای بازگرداننده، تغییر مکان را کنترل می‌کنند. این تکیه‌گاهها پیچش را نیز کنترل نموده و اگر تغییر مکان‌ها از تراز طراحی تجاوز کند، رفتار سخت شونده نشان می‌دهند. برای ترکیب سیستم‌های لغزشی و الاستومریک می‌توان از هر دو نوع تکیه‌گاه فوق در یک سازه استفاده نمود (یعنی بعضی از

تکیه‌گاههای سازه از نوع الاستومریک مانند لاستیک مسلح طبیعی با میرایی کم و یا زیاد با بعضی از تکیه‌گاههای سازه از نوع لغزشی مانند المان‌های تفلون، فولاد ضد زنگ و یا صفحات آلیاژ سرب - برنز واقع بر سطح فولاد ضد زنگ باشد) و یا اینکه هم سطوح لغزشی اصطکاکی و هم الاستومریک را در یک تکیه‌گاه بکاربرد. چند نوع از سیستمهاي تکیه‌گاه جدا کنندۀ ترکیبی عبارتند از [۳۲]:

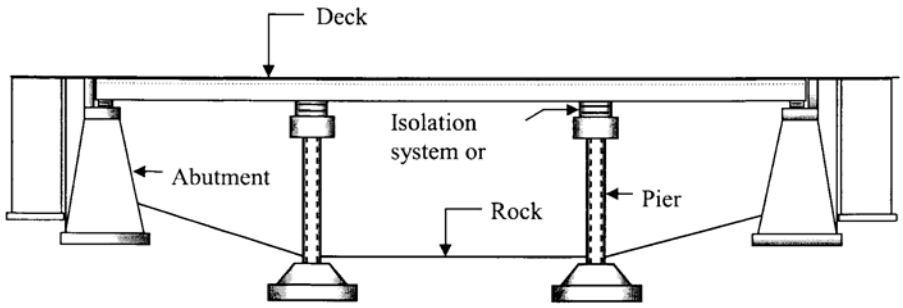
۱- سیستم TASS

۲- سیستم جداکنندۀ فنری- اصطکاکی (R-FBI) (Resilient-Friction Base Isolation)

۳- سیستم EDF (Electric De France)



شکل (۲-۶) سیستم جداکنندۀ فنری – اصطکاکی



شکل (۲- ۷) شماتیک یک پل جداسازی شده با عرشه پیوسته

۲-۳- مقایسه انواع جداگرهای لرزه‌ای

در این بخش به مقایسه مزایا و معایب انواع جداگرهای مختلف می‌پردازیم. انواع جداگرها و وسایل مکمل براي تامين ميرايي جداگرها در جدول (۲-۱)، مزایا و معایب انواع جداگرها در جدول (۲-۲)، مزایا و معایب وسایل مکمل براي تامين ميرايي جداگرها در جدول (۲-۳)، ارائه شده‌اند و از بین آنها جداگرهای لرزه‌اي چند لایه که امکان ساختشان با توجه به امکانات و تکنولوژی موجود در کشور موجود باشد و همچنین عملکرد و کارآیی مناسب داشته باشند، در بخشهای بعدی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

جدول (۲-۲)، اغلب مزایا و معایب جداگرهای متداول را نشان می‌دهد. بعضی از این معایب به تنهایی برای خود جداگر ضعف محسوب نمی‌شوند اما ممکن است ضعف طراحی برای برخی کاربردها باشند. برای مثال، تکیه‌گاه‌های LRB و HDR ممانهای اولیه و ثانویه ($P\text{-}\Delta$) ایجاد می‌کنند که به طور مساوی در بالا و پایین تکیه‌گاه پخش می‌شوند. بنابراین پی و سازه بالای جداگر برای این ممانها باید طراحی شوند. اما برای سیستم‌های لغزشی ممان ($P\text{-}\Delta$) می‌تواند جهت‌دهی شود تا اینکه همه ممان توسط پی تحمل گردد و هیچ سهمی به سازه بالای جداگر نرسد.

مزایا و معایب اشاره شده در جدول (۲-۲) عمومی و کلی بوده و ممکن است جامع و فراگیر نباشند. در هر پروژه‌ای، برخی مشخصات جداگر ممکن است مهمتر از بقیه مشخصات با-شند. بخاطر همین، توصیه نمی‌شود که برخی جداگرها در همان مرحله اولیه طراحی، زود کنار گذاشته شوند. معمولا مقرون به صرفه است که حداقل در مرحله اولیه طراحی، چندین نوع سیستم جداگر مورد مطالعه قرار گرفته تا مشخص شود کدام سیستم بهینه کار می کند. توصیه می‌شود که با کارخانجات سازنده این وسایل در همان مرحله ابتدایي طراحی جهت راهنمایي تماس گرفته و اطمینان حاصل گردد که اغلب مشخصات مورد استفاده آنها برای جداگر مورد نظر به روز می‌باشد.

جدول (۲-۱) انواع جداگرهای لرزه‌ای

انواع جداگر لرزه‌اي	جداگرهاي الاستومري چند لايه مسلح شده توسط ورقهاي فولادي(ERB) Elastomeric Rubber Bearing	جداگرهاي الاستومري چند لايه با ميرايي كم (LDRB) Low Damping Rubber Bearing
		جداگرهاي لاستيكي- سربي (LRB) Lead Rubber Bearing
		جداگرهاي الاستومري چند لايه با ميرايي زياد (HDRB) High-Damping Rubber Bearing
	جداگرهاي الاستومري مسلح شده توسط الياف (F-REI) Fiber-Reinforced Elastomeric Isolator	
	سيسم‌هاي جداكننده لغزشي (اصطكاكي)	سيستم اصطكاک خالص (P-F) Pure-Friction
		ميله‌هاي غلتان بين پايه و پي (دايروي يا بيضوي) Roller Bearing
		سيستم پاندولي اصطكاكي (FPS) Friction Pendulum System
		سيستم اصطكاكي EQS
		سيستم جداگر لغزشي FIP
	سيستم‌هاي تركيبي الاستومري و لغزشي	سيستم TASS
		سيستم جداگر فنري – اصطكاكي(R-FBI) Resilient – Friction Base Isolator
		سيستم EDF Elastomeric de France
		سيستم اصطكاكي - فنري لغزشي Sliding Resilient – Friction
وسايل مكمل براى تامين ميرايى جداگرها		ميراگرهاي هيسترتيک Hysteretic Dampers
		ميراگرهاي هيدروليكي (ويسكوز) Viscous Dampers
		ميراگرهاي سربي - تزريقي Lead Etrusion Dampers

جدول(۲-۲) مزايا و معايب جداگرهاي لرزه‌اي

جداگر	مزايا	معايب	ملاحظات
جداگرهاي الاستومري چند لايه با ميراني كم (LDRB) Low Damping Rubber Bearing	كاهش هزينه	ميراني كم (۳% ~ ۴%)	
	كاهش شتاب سازه	نيازمند يک سيستم ميراني مكمل	
	نيروي بازگرداننده	ميراگرهاي مكمل نيازمند وسايل اتصال مكانيكي و مراقبت دائم	
		جابجايي هاي زياد	
		در برابر بارهاي جانبي سرويس (باد و نيروي ترمز ...) مقاومت و سختي ندارند	
		ايجاد مفاصلهاي ثانويه (P-Δ) در بالا و پايين جداگر	
جداگرهاي لاستيكي – سربي (LRB) Lead Rubber Bearing	ميراني بالا (۳۵% ~ ۱۵%)	تغييرات سيكليک مشخصات	
	نيروي بازگرداننده	ايجاد مفاصلهاي ثانويه (P-Δ) در بالا و پايين جداگر	
	مقاومت و سختي كافي در برابر بارهاي جانبي سرويس (باد و نيروي ترمز ...)		
	امكان ساخت با سختي و ميراني هاي متنوع		
	ملايم كردن شتاب سازه		
جداگرهاي الاستومري چند لايه با ميراني زياد (HDRB) High-Damping Rubber Bearing	ميراني بالا بدون نياز به المانهاي ميراني مكمل (۱۵% ~ ۸%)	ايجاد مفاصلهاي ثانويه (P-Δ) در بالا و پايين جداگر	
	مقاومت و سختي كافي در برابر بارهاي جانبي سرويس (باد و نيروي ترمز ...)	كرنش تابع سختي و ميراني	
	ملايم كردن شتاب سازه	آناليز و تحليل پيچيده	
	نيروي بازگرداننده	انتخاب محدود براي مقادير سختي و ميراني	
		ايجاد مفاصلهاي ثانويه (P-Δ) در بالا و پايين جداگر	
		بدليل پيچيده بودن مشخصات اين جداگر، هنوز متداول نمي‌باشد	
جداگرهاي الاستومري مسلح شده توسط الياف (F-REI) Fiber-Reinforced Elastomeric Isolator	سبک		
	ارزانترند		
	جمع‌شدگي بين لاستيک و الياف بهتر انجام مي‌شود		

ادامه جدول(۲-۲) مزایا و معایب جداگرهاي لرزه‌اي

جداگر	مزایا	معایب	ملاحظات
سیستم اصطکاک خالص (P-F) Pure-Friction	ساده ترین سیستم جداسازی لغزشی	خصوصیات جداگر تابعی از فشار و سرعت	
	در محدوده وسیعی از فرکانسهای ورودی موثرند	مشکل نصب	
	مقاومت و سختی کافی در برابر بارهای جانبی سرویس (باد و نیروی ترمز ...)	قابلیت اتصاد پایین	
		نیروی بازگرداننده وجود ندارد	
	میرایی بالا	افزایش شتاب سازه	
	ایجاد مماسهای ناموبه (P-۸) در بالا یا پایین جداگر	میرایی پایین	
میله های غلتان بین پایه و پی (دایروی یا بیضوی) Roller Bearing	انتقال نیروی زلزله اندک به روسازه بدلیل میزان اندک ضریب اصطکاک		
	نیروی بازگرداننده بدلیل خروج از مرکزیت میله های بیضوی و کاهش جابجایی	جابجایی های بسیار بزرگ و بیسماد بدلیل فقدان نیروی بازگرداننده در میله های غلتان دایروی	
	کاهش شتاب سازه	در برابر بارهای جانبی سرویس (باد و نیروی ترمز ...) مقاومت و سختی ندارند	
	مؤثر در محدوده وسیعی از فرکانسهای ورودی	خصوصیات جداگر تابعی از فشار و سرعت	
	نیروی بازگرداننده	مشکل نصب	
	میرایی بالا	قابلیت اتصاد پایین	
سیستم پاندولی اصطکاکی (FPS) Friction Pendulum System	کاهش پاسخ پیچشی	افزایش شتاب سازه	
	ایجاد مماسهای ناموبه (P-۸) در بالا یا پایین جداگر	پس از وقوع زلزله‌های بزرگ،سازه به جای اصلی خود باید منتقل شود	
	مقاومت و سختی کافی در برابر بارهای جانبی سرویس (باد و نیروی ترمز ...)		
	جمعه دور آن (استوانه محیطی) از اجزاء داخلی در برابر آلودگیهای محیط محافظت می کند		
	قید تغییر مکان توسط استوانه محیطی		

ادامه جدول(۲-۲) مزايا و معايب جداگرهاي لرزه‌اي

جداگر	مزايا	معايب	ملاحظات
سيستم اصطكاكي EQS	ميراي بالا	خصوصيات لغزشي جداگر تابعي از فشار و سرعت	
	كاهش شتاب سازه	قابليت اعتماد پايين	
	مؤثر در محدوده وسيعي از فركانسهاي ورودي	تغيير ضريب اصطكاك آن با زمان به علت خستگي سطوح لغزش	
	كاهش پاسخ پيچشي		
	نيروي بازگرداننده		
	جمعه دور آن كه مانع از آلوده شدن سطح لغزش مي‌شود		
	مقاومت و سختي كافي در برابر بارهاي جانبي سرويس (باد و نيروي ترمز ...)		
سيستم جداگر لغزشي FIP	ميراي بالا		
	كاهش پاسخ پيچشي		
	كاهش شتاب سازه		
	مؤثر در محدوده وسيعي از فركانسهاي ورودي		
	ساخت سطحهاي فولادي با سختي هاي متنوع		
	امكان بازنگري سطحهاي فولادي بكار رفته بعد از زلزله		
	مقاومت و سختي كافي در برابر بارهاي جانبي سرويس (باد و نيروي ترمز ...)		
سيستم TASS	دارای مزاياي هر دو جداگر الاستومري و اصطكاكي		
	افزايش برود، ايجاد نيروي بازگرداننده، كنترل پيچش		
سيستم جداگر قدري – اصطكاكي Resilient – Friction Base (R-FBI) Isolator	دارای مزاياي هر دو جداگر الاستومري و اصطكاكي		
	افزايش برود، ايجاد نيروي بازگرداننده، كنترل پيچش		
سيستم EDF Elastomeric de France	دارای مزاياي هر دو جداگر الاستومري و اصطكاكي		
	افزايش برود، ايجاد نيروي بازگرداننده، كنترل پيچش		
سيستم اصطكاكي - قدري لغزشي Sliding Resilient - Friction	دارای مزاياي هر دو جداگر الاستومري و اصطكاكي		
	افزايش برود، ايجاد نيروي بازگرداننده، كنترل پيچش		

جدول(۲-۳) وسايل مكمل براي تامين ميرايي جداگرها

میراگر	مزایا	معایب	ملاحظات
میراگرهای هیسترتیک Hysteretic Dampers	میرایی بالا	نیرو به سیتم اضافه می کنند	
	ارزان		
	کنترل جابجایی		
	مقاومت بیشتر در مقابل خستگی		
	عملکرد مطلوب در سطوح بالاتری از کرنشهای پلاستیک		
	مقاومت و سختی کافی در برابر بارهای جانبی سرویس (باد و نیروی ترمز ...)		
میراگرهای هیدرولیکی (ویسکوز) Viscous Dampers	کنترل جابجایی	گران	
	نسبت به میراگرهای هیسترتیک،کمتر نیرو به سازه اضافه می کند	دسترسی محدود	
میراگرهای سربی - تزریقی Lead Extrusion Dampers	میرایی بالا	تحلیل و طراحی پیچیده	
	سادگی نصب به دلیل ابعاد مناسب	محتمل شدن عملکرد میراگر در اثر کمانش میله مرکزی	
	مقاومت و سختی کافی در برابر بارهای جانبی سرویس (باد و نیروی ترمز ...)		
	عمر طولانی به دلیل عدم نیاز به تعویض و جایگزینی پس از هر زلزله		
	عملکرد پایدار		
	اصول کار ساده		

فصل سوم

مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی جداسازی لرزه‌ای پلها

۳-۱- مقدمه

در این فصل، کارهای انجام شده در زمینه جداسازی لرزه‌ای در پلها به تفکیک مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی و به ترتیب زمانی، ارائه مي‌شود. شایان ذکر است که هنوز در ایران از جداگرهای لرزه‌اي استفاده نشده است و همه موارد موجود در پلها نئوپرنهای انبساط حرارتی هستند و لذا در این تحقیق بیشتر مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی سیستم جداسازی لرزه‌اي در کشورهای خارجی مورد توجه قرار گرفته است.

۳-۲- مطالعات تحلیلی و پارامتریک

دراین‌قسمت،کارهای‌تحلیلی‌و عددی کاربرد جداسازی لرزه‌اي مرور مي‌شود. Ghobarah (۱۹۸۸) پاسخ لرزه‌اي پلهای بزرگراهی یک و دو دهانه با بالشتکهای لاستیکی- سربی که به صورت فنر دو خطی مدل شده‌اند، بررسی کرده است. تأثیر پارامترهای مهم مثل سختی عایق لرزه‌اي، سختی پایه و خروج از مرکزیت پایه بر کارآیی عایق لرزه‌اي مورد بررسی قرار گرفته است[۱۳].

Ghobarah و Ali (۱۹۸۸) پاسخ یک پل سه دهانه عایق‌بندی شده با بالشتکهای لاستیکی - سربی در برابر حرکات زلزله بررسی کرده‌اند. اثر سختی عرشه بر پاسخهای لرزه‌اي بررسی شده است. نتیجه‌گیري شده است که پلهای بزرگراهی دو یا سه دهانه معمولی برای عایق‌بندی لرزه‌اي مناسب مي‌باشند، با این فرض که عرشه پل در جهت افقی رفتار صلب داشته باشد. مقاومت تسلیم هسته سربی به عنوان یک تعادل قابل قبول بین نیروهای کاهش یافته در پایه‌ها و نیروهای افزایش یافته در کوله‌ها به میزان ۴% وزن پل توصیه شده است[۱۴]. آنها در ادامه تحقیق، یک روش طراحی ساده با استفاده از روش طیف پاسخ غیرخطی برای پلهای بزرگراهی جداسازی شده ارائه کردند که هدف آنها توازن بهینه بین نیروهای برشی منتقل شده به تکیه‌گاهها و جابجائیهای قابل تحمل عرشه بوده است. درنهایت جدولهای ساده شده‌ای ارائه شده است که به عنوان یک کمک طراحی برای پلهای جدید و مقاوم سازی پلهای موجود به کار می رود.

Briseghella و همکاران (۱۹۸۹) یک روش طراحی برای اعمال فناوری جداسازی لرزه‌اي به پلهای معمولی با عرشه بتنی و دهانه‌های متوسط پیوسته ارائه کرده‌اند. روشی برای ساخت طیف پاسخ غیرخطی برای سیستم‌های کاملاً پلاستیک ارائه شده است که در آن یک رابطه مستقیم مقاومت–جابجائی، بدون وابستگی به زمان تناوب الاستیک بدست آمده است[۵].

Turkington و همکاران (۱۹۸۹) پاسخ پلهای دو و چهار دهانه در برابر زلزله‌های حقیقی را با استفاده از سه مدل بررسی کرده‌اند. اولین مدل نمایانگر یک روسازه پل متکی بر بالشتکهای واقع بر پی صلب مي‌باشد و شامل یک جرم متصل به فنر دو خطی که از طرف دیگر کاملاً صلب نگه داشته شده است، مي‌باشد. خصوصیات برشی بالشتک با یک فنر دو خطی مدل مي‌شود. مدل دوم ترکیبی از بالشتکهای الاستومریک و سربی – لاستیکی بوده و ارتفاع پایه‌های پل متفاوت مي‌باشد. پایه‌ها با المانهای تیر الاستیک مدل مي‌شود. از ترکیب مدل‌پایه‌وبالشتک،مدل سوم بدست‌مي‌آید. نشان داده شده است که بالشتکهای سربی– لاستیکی در ترکیب با بالشتکهای الاستومریک مي‌توانند نیروهای زلزله را بین کوله‌ها و پایه‌ها توزیع کنند. همچنین مشخص شده است که وجود سرب، پریود طبیعی سازه را جابجا می‌کند و میزان میرایی را با وجود کاهش

جابجائیها، افزایش مي‌دهد. آنها در ادامه پلهای عایق‌بندی شده در برابر زلزله با بالشتکهای لاستیکی– سربی را مطالعه پارامتریک نموده و نتیجه‌گیري نموده‌اند که عایقهای LRB در ترکیب با بالشتکهای الاستومریک یک ابزار مؤثر برای توزیع نیروهای پاسخ زلزله بین پایه‌ها و کوله‌ها مي‌باشد. رکوردهای زلزله ارتعاشی عموماً منجر به میرایی‌های اضافی بزرگتر می‌شوند درصورتی که زلزله‌های ضربه ای میرایی اضافی کمتری ایجاد مي‌کنند و نیز زلزله‌های با بزرگای بیشتر باعث جابجائی بیشتر دوره تناوب می شوند[۴۶].

Li (۱۹۸۹)پاسخ یک پل سه دهانه با سیستم جداگر لرزه‌اي که شامل بالشتهای لاستیکی و مستهلک کننده‌های هیسترتیک در جهت طولی بود، بررسی نمود. معادلات غیرخطی حرکت برای مود اول ارتعاش استخراج شده است و پاسخ Stochastic شتاب زمین با اغتشاش سفید فیلتر شده با استفاده از تکنیک معادل سازی خطی تعیین شده است. روشی نیز برای طرح بهینه سیستم جداگر لرزه‌اي با میراگرهای هیسترتیک ارائه شده است. نتیجه‌گیري 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 مي‌یابد. همچنین نتیجه‌گیري شده است که هرچه میزان ماکزیمم جابجائی مجاز مورد استفاده بزرگتر باشد، سیستم جداگر مؤثرتر خواهد بود[۲۶].

Mokha و همکاران (۱۹۹۰) یک مدل ریاضی از رفتار اصطکاکی بالشتکهای لغزشی تفلونی برای جداسازی لرزه‌اي پلها به دست آورده‌اند. این مدل قادر است که این موارد را محاسبه کند: اول، حرکت یک سویه و چند سویه در سطح تماس فولاد با تفلون، دوم، وابستگی ضریب اصطکاک لغزشی به سرعت و فشار، سوم، اثرات اصطکاک استاتیکی. پارامترهای مشخص کننده مدل عبارتند از: مقادیر حداکثر و حد اقل ضریب اصطکاک لغزشی، نسبت ضریب اصطکاک استاتیکی به ضریب اصطکاک لغزشی در شروع لغزش و پارامتری که تغییرات ضریب اصطکاک لغزشی با سرعت را توصیف کند[۳۱].

Constantinou و همکاران (۱۹۹۱) یک سیستم جداگر لرزه‌اي که شامل بالشتکهای تفلون چند سویه و قطعات کنترل جابجائی مي‌شود، ارائه کرده است. قطعات کنترل جابجائی قابلیت برگرداندن دوباره به حالت اول و کنترل جابجائی درحین زلزله و صلبیت دربرابر بارهای سرویس را دارند. مشاهده شده است که این قطعات توانایی تأمین صلبیت عرشه پل در برابر بارهای سرویس تا ۵ درصد وزن عرشه و قابلیت کنترل جابجائی و استهلاک قابل توجه انرژی در زلزله‌های شدید با شتاب ماکزیمم g ۰/۶ را دارد. همچنین گزارش شده است که ترکیب بالشتک با صفحه لغزشی و قطعه کنترل جابجائی، نیروهای اینرسی عرشه را در مقایسه با روشهای مرسوم تا ۲/۵ برابر کاهش مي‌دهد[۹].

Mayes و همکاران (۱۹۹۲) مروری بر مفاهیم اساسی و اصول طراحی جداسازی لرزه‌اي ارائه کرده‌اند و اهداف و فلسفه ضوابط مربوط در آیین‌نامه (AASHTO ۱۹۹۱) را بحث نموده‌اند ودرنهایت کارآیی سیستم‌های جداسازی با مقادیر مختلف میرایی را نتیجه‌گیري کرده‌اند[۲۹].

Maragakis و Saiidi (۱۹۹۳) چهار مدل تحلیلی یک سویه خطی را در پلهای جداسازی شده مقایسه کرده‌اند و مدلهای ساده شده خطی را برای آنها بدست آورده‌اند. از این مدلها در ارائه یک مدل سه بعدی غیرخطي در پلهای جداسازی شده استفاده شده است و در ارزیابی اثرات جداسازی پی بر نیاز شکل پذیری پایه‌ها تأکید شده است[۲۸].

Mahin (۱۹۹۳) یک روش طراحی مقدماتی برای پلهای ساده که با سیستم‌های لغزشی عایق‌بندی شده‌اند، ارائه می‌کند که مبتنی است بر پایستاری جابجائی و انرژی در محدوده‌های کوتاه و بلند زمان تناوب سازه. این روش بر تخمین جابجائی‌های کلی عرشه پل متمرکز مي‌شود. یک فرم بخصوص غیر ابعادی معادلات حرکت ارائه شده است تا کارآیی این روش طراحی مشخص شود و از طریق یک بررسی پارامتری، تغییرات اندیسهای پاسخ با تغییرات حرکت زمین، جداگر لرزه‌اي و خصوصیات سازه تعیین شود[۲۷].

Hwang و Sheng (۱۹۹۳) بازده و نسبت میرایی معادل برای یک سیستم الاستیک معادل پل با بالشتکهای لاستیکی– سربی را بر طبق آیین‌نامه (AASHTO ۱۹۹۱) بررسی کرده‌اند. چنین نتیجه‌گیري شده است که نسبت میرایی معادل که از روش AASHTO بدست مي‌آید با افزایش

تغییر شکل غیر الاستیک بالشتکهای لاستیکی – سربی کاهش مي‌یابد. در ادامه تحقیق، مدل خطی معادل پل جداسازی شده را که توسط Caltrans مشخص شده است براساس پیش بینی خود از ماکزیمم پاسخ غیر الاستیک لرزه‌اي، تأیید کرده‌اند[۱۶].

Jangid و Banerji (۱۹۹۵) پاسخ پلهای جداسازی شده با سیستم اصطکاکی خالص (P-F) در جهت طولی را بررسی کرده‌اند. رفتار سیستم به صورت کاملاً پلاستیک مدل شده است. نشان داده شده است که قطعات اصطکاکی خالص که بین روسازه و زیرسازه نصب می‌شوند، برش پایه پایه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش مي‌دهند. مهمترین عیب سیستم اصطکاکی خالص این است که هیچ‌گونه نیروی بازگرداننده‌ای تأمین نمی‌کند، در نتیجه جابجائیهای لغزشی ماکزیمم و پسماندی بسیار بزرگند[۱۸].

Hwang (۱۹۹۶) در مقالات خود یک مدل خطی معادل برای آنالیز لرزه‌اي پلهای جداسازی شده با بالشتکهای هیسترتیک دو خطی ارائه کرده و اصلاحاتی در دستورالعملهای طراحی که قابل کاربرد در فعالیتهای مهندسی است پیشنهاد کرده است. به عنوان یک روش جایگزین، برای محاسبه انتقال پریود معادل و میرایی معادل فرمولهای تجربی ارائه شده‌اند. با فرضیات میرایی کلاسیک و غیرکلاسیک، نسبت میرایی مرکب سیستم بدست آمده است. نسبت میرایی مرکبی که بدست آمده است با روش انرژی کرنشی مودال مقایسه شده است. مشاهده مي‌شود که نسبتهای میرایی مرکب تعیین شده براساس میرایی کلاسیک و غیرکلاسیک، برای پلهای جداسازی شده تعریف شده در (AASHTO ۱۹۹۱) تقریباً یکسان است[۱۷].

Eftekhari و Zadeh (۱۹۹۶) اثرات عایقها و موقعیت آنها بر رفتار دینامیکی پلهای جداسازی شده را بررسی کرده‌اند. با این فرض که در مطالعه اثرات تغییر پارامترهای مختلف عایق‌بندی مثل سختی عرشه، پایه‌ها و بالشتکهای الاستومریک، عایقها خطی رفتار مي‌کنند، رفتار مواد آنالیز شده است. علاوه بر این، رفتار غیرخطي عایقها مورد بررسی قرار گرفته است[۱۲].

Delis (۱۹۹۷) ضوابط آنالیز و طراحی یک پل فلزی پیوسته جداسازی شده را در یک منطقه با لرزه خیزی بالا بررسی کرده است. دو نوع از سیستمهای عایق لرزه‌اي مورد توجه قرار

گرفته است؛ یکی بالشتکهای اصطکاکی و دیگری بالشتکهای اصطکاکی با میراگرهای سیال ویسکوز غیرخطی. یک آنالیز سه بعدی تاریخچه زمانی با استفاده از چند تحریک لرزه‌اي صورت گرفته است. مشاهده مي‌شود که با وجود بالشتکها، نیروهای زلزله بسیار کاهش یافته‌اند. همچنین، نیاز جابجائی افزایش یافته در کوله‌ها با درزهای انبساط بخصوص وفق داده شده است که حرکات و جابجائی‌های بزرگی را درهر دو جهت افقی اجازه مي‌دهد[۱۰].

Tsopelas و Constantinou (۱۹۹۷) پلهای با میراگرهای فلزی به شکل E را بررسی نموده‌اند. نقش میراگرهای به شکل E، اولاً ایجاد صلبیت در برابر بارهای سرویس در موقعیتهای انتخاب شده و ثانیاً استهلاک انرژی در تحریک لرزه‌اي، ناشی ازجاری شدن خود مي‌باشد. رفتار قطعات به شکل E تابعی‌ازهندسه و مشخصه‌هاي جنس آنهاست. رفتار آنها تقریباً الاستو– پلاستیک با سختی اندک بعد از تسلیم مي‌باشد. نشان داده شده است که بخصوص در زلزله‌های قوی با خصوصیات شوک مانند بارگذاری جابجائیهای دائمی قابل توجهی تولید مي‌شود. نتیجه‌گیري شده است وقتی که ظرفیت تغییر مکانها تأمین شود و تمهیداتی برای بازگرداندن پل و بالشتکها فراهم شود، سیستم‌های جداساز الاستو – پلاستیک بسیار مؤثر مي‌باشد[۴۵].

Calvi و Pavese (۱۹۹۷) روش طراحی مبنی بر جابجائی با استفاده از یک مدل معادل یک درجه آزادی خطی ارائه کرده‌اند. طرح مقدماتی یک سیستم جداسازی برای پلهای موجود مبتنی بر تعریف سازه منظم مي‌باشد که تعیین می‌کند تخمین پاسخ سازه واقعی شبیه پاسخ پیش‌بینی شده در فاز طراحی مقدماتی مي‌باشد یا خیر. کارآیی این روش در طرح سیستم عایق برای پل کاملاً نامنظم نشان داده شده است. به علاوه، یک روش بهینه‌یابی که به عنوان یک روش طراحی پیشنهادی مي‌باشد، در یک برنامه نرم افزاری مناسب به کار رفته است و به موارد زیادی اعمال شده است که صحت اصولی را که در فلسفه طراحی بکار رفته بودند، تأیید می‌نماید. روش طراحی فرض می‌کند که یک پروفیل جابجائی را که با استفاده از یک مدل خطی معادل بدست آمده است مي‌توان با پوش جابجائی ماکزیمم تولید کرد که از یک سری آنالیز غیرخطي بدست آمده است و به عنوان نماینده ای از پاسخ واقعی به حساب مي‌آید[۷].

Anderson و Mahin (۱۹۹۸) یک روش طراحی لرزه‌اي مقدماتی برای پلهای ساده جداسازی شده ارائه کرده‌اند که براساس پایستاری جابجائی و انرژی در محدوده‌های کوتاه و بلند دوره تناوب سازه مي‌باشد. این روش بر تخمین جابجائیهای کلی عرشه پل متمرکز است که بر محدودیتهای ایده‌آل سازی معادل خطی فائق مي‌آید و رفتار غیرخطي غیرالاستیک در سیستم‌های جداسازی شده را واضح‌تر بیان می‌کند[۳].

Braga و همکاران (۱۹۹۸) دستورالعملهای رسمی اروپا و ایتالیا در تنظیم طرح پلهای جداسازی شده با استفاده از بالشتکهای الاستومریک و عناصر الاستو – پلاستیک را مورد بررسی قرار داده‌اند. فلسفه طراحی با هدف تضمین محافظت کافی باتوجه به دو شرط حدی یا سطح کارکرد مي‌باشد: اول، حد پاسخ کاملاً الاستیک و دوم حالتی که سازه هنوز تخریب نشده در حالی که عناصر جداسازی درشرف تغییر فرم نهایی شان مي‌باشند. شرایط مفصل بر رفتار عناصر جداگر که بتواند نقش محافظتی خود را به طرز قابل اعتمادی محقق کند، معین شده است[۴].

Jankowski و همکاران (۱۹۹۸) آنالیز ضربه بین قطعات سازه فوقانی یک پل مرتفع عایق‌بندی شده که تحت موج لرزه‌اي پخش شونده قرار گرفته است، بررسی کرده‌اند. بالشتکهای لاستیکی با میرایی زیاد که به عنوان ابزار عایق‌بندی استفاده شده‌اند، با فرمول بندی غیرخطي پیشنهادی مدل شده‌اند و اهمیت مدل بالشتک در موارد ضربه خاطر نشان شده است. نتایج مطالعه نشان مي‌دهد که باتوجه به فاصله بین قطعات رو سازه، ضربه به افزایش یا کاهش نیروهای وارد بر پایه‌ها منجرمي‌شود[۱۹].Tongaonkar وJangid(۱۹۹۸)پاسخ لرزه‌اي پلها با سیستم جداسازی لغزشی بین روسازه و زیر سازه را بررسی کرده‌اند. فرض شده است که نیروی اصطکاکی سیستم جداسازی دارای خصوصیات ایده‌آل اصطکاک کولمب مي‌باشد. به علاوه، یک نیروی بازگرداننده خطی توسط سیستم جداسازی تأمین مي‌شود. پاسخ لرزه‌اي سیستم پل جداسازی شده در جهات طولی و عرضی با حل معادلات غیرخطي حرکت (غیرخطي به خاطر سیستم لغزش) به شکل گام به گام و تکه‌ای با استفاده از روش نیومارک بدست آمده است. سیستم در دو جهت افقی تحت

زلزله حقیقی قرار گرفته است و اثرات پارامترهای جداسازی بر پاسخ ماکزیمم پل جداسازی شده بررسی شده است[۴۳].

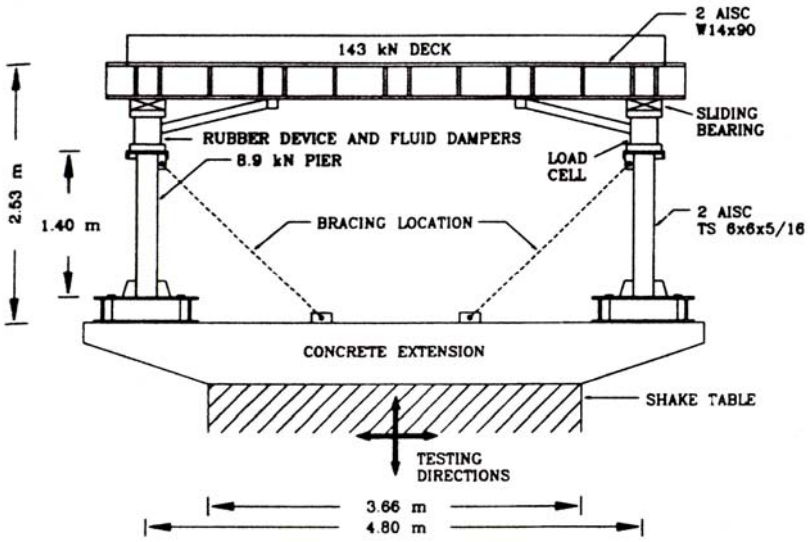
Reinhorn و همکاران (۱۹۹۸) اثرات تغییرات نسبت مشخصه‌هاي جاری شدن عایق و پایه بر پاسخ پلهای جداسازی شده را بررسی کرده‌اند. مشخص شده است که بخاطر درجه نامعینی پائین و غلبه مود ارتعاشی عرشه پل، پلهای جداسازی شده، به خصوصیات حرکت زمین بسیار حساس مي‌باشند. بعد از جاری شدن، با توجه به خصوصیات سختی و پریودهای سیستم پل – عرشه، ممکن است سختی ثانویه عایقها کاملاً حاکم شود. این مطالعه حساسیت پاسخ پل به تغییرات اندک سختی بعد از جاری شدن سیستم جداسازی را مورد بررسی قرار مي‌دهد. از آنجا که عرشه بیشترین جرم پل را به خود اختصاص مي‌دهد، مدل‌های تحلیلی طراحی، تمایل به حذف جرم پایه‌ها و مودهای ارتعاش ناشی از آنها دارند. بهرحال، در پلهای با عرشه جداسازی شده، مودهای محلی ستونهای بلند جرم‌دار ممکن است در نیاز جابجائی نسبی سیستم پایه پل – عایق اساساً اثر داشته باشد. همچنین اثر صرفنظر کردن از جرم پایه‌ها در مدل نمودن پلها مورد مطالعه قرار گرفته است[۳۷].

Dolce (۱۹۹۸) رفتار لرزه‌اي پلهای راه‌آهن را که مجهز به قطعات جداکننده و مستهلک کننده انرژی است، بررسی کرده است. یک پل نوعی از خطوط ریلی سریع‌السیر ایتالیا که در دست احداث بوده و دارای رفتار الاستو – پلاستیک مي‌باشد مورد ملاحظه و بررسی قرار گرفته است و پارامترهای تعیین کننده پاسخ این قطعات مثل نیرو و سختی بعد از جاری شدن، تغییر داده شده است. مزایای عملی جداسازی لرزه‌اي در مقایسه با طراحی مرسوم پلهای راه‌آهن بررسی شده و تعدادی ضابطه برای پارامترهای رفتاری در انتخاب طرح بهینه بدست آمده است. وی در مقاله خود عنوان کرده است که اثرات ویژه‌اي مثل رفتار غیرخطي بالاست، رفتار دینامیکی قطار، وجود قید یک جهته بین چرخ قطار و ریل، بین ریل و عرشه و بین ریل و بالشتکهای پل بایستی در نظر گرفته شوند. در این راستا بایستی یک آنالیز سه بعدی کامل صورت گیرد تا پدیده‌های غیرخطي در سازه و ریل را در نظر آورد، به همین منظور یک برنامه سه بعدی اجزاء محدودی به نام BRIE توسط وی نگاشته شده است[۱۱]. در این تحقیق تنها یک پل در نظر

گرفته شده است که دارای ۵ دهانه ساده هر یک به طول ۳۳/۶ متر و پایه‌های به ارتفاع ۱۱/۶ متر مي‌باشد. یک سیستم جداگر الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده که برای شرایط راه‌آهن که عبارتند از سختی اولیه زیاد و مقاومت بالا در رابطه با نیروهای ترمز/ شتاب، مناسب مي‌باشد و در نهایت مقایسه‌ای بین این پلها و پلهای معمولی صورت گرفته است.

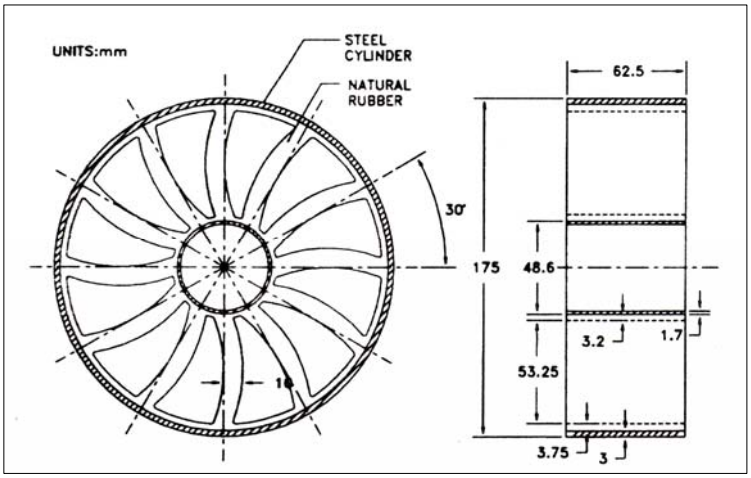
۳- ۳- مطالعات آزمایشگاهی

به عنوان نمونه‌ای از کارهای آزمایشی، در تحقیقي توسطTsopelas و همکاران (۱۹۹۶) مدلی از پل ساخته شده است و به نحوی طرح گردیده که پایه‌های انعطاف‌پذیری داشته باشد که در شرایط جداسازی نشده دارای پریود اساسی ۰/۲۵ ثانیه در جهت طول باشد، (یا در نمونه اصلی دارای پریود ۰/۵ ثانیه باشد.) این مدل در مقیاس طول $\frac{۱}{۴}$ مي‌باشد که دارای دهانه به طول ۴/۸ متر به ارتفاع ۲/۵۳ متر و وزن ۱۵۷/۸ کیلو نیوتن مي‌باشد.



شکل (۳- ۱) شکل شماتیک مدل پل بامقیاس $\frac{۱}{۴}$

سامانه موردنظر آنها شامل یک بالشتک لغزشی و قطعات بازگرداننده لاستیکی نیرو بـود. از میراگرهای سیال ویسکوز نیز استفاده کردند. وزن کل عرشه توسط تعداد چهار بالشتک اصطکاکی چند جهته از نوع دیسک تحمل مي‌شود. هر بالشتک شامل یک صفحه فوقانی به صورت صـفحه فولادی ضد زنگ پرداخت شده و یک صفحه تحتانی مي‌باشد که بر روی یک دیـسک بـا امکـان چرخش قراردارد. قرار دادن این صفحه تحتانی بجای صفحه از جنس تفلون باعث مي‌شود که در سرعتهای اصطکاکی بالا دارای ضریب اصطکاک ۰/۰۷ تا ۰/۱۵ باشد. برای شناسایی پارامترهـای مورد نیاز مدل، از یک میز لرزه با فرکانس بین ۰ تا ۲۰ هرتـز و شـتاب مـاکزیمم ۰/۰۳g اسـتفاده شده است[۴۴].



شکل (۳- ۲) جزییات قطعه جداگر مورد بررسی

- **برنامه آزمایش**

آزمایش مدل پل در پنج حالت مختلف پل و هفت سیستم جداگر مختلف صورت گرفته است. پنج حالت مختلف پل عبارتند از:

الف) بالشتکهای اصطکاکی توسط صفحات کناری قفل شده‌اند تا نمایانگر یک پل جداسازی نشده باشند. در این حالت، تعدادی آزمایش لرزه‌اي صورت گرفته است.

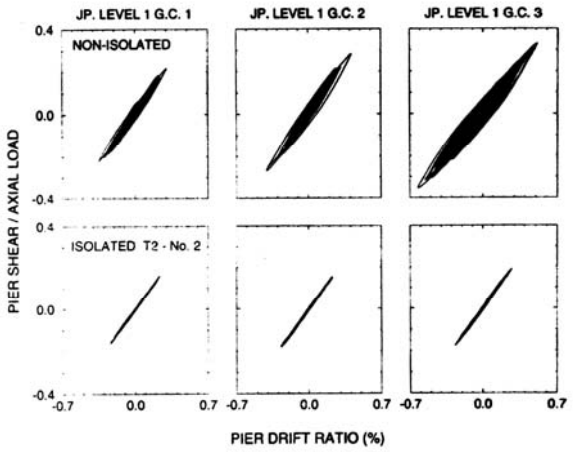
ب) مهاربندی‌هایی نصب شده‌اند تا پایه‌ها را سخت‌تر کنند و عرشه نیز توسط میله‌های سختی به یک دیوار در نزدیکی محل متصل شده است. در این وضعیت، میز لرزه در حالت کنترل شده جابجائی، با فرکانس و دامنه حرکت هارمونیک معین راه‌اندازی مي‌شود. حلقه‌های نیروی افقی بالشتک در مقابل جابجائی بالشتک ثبت شده و از آنها برای استخراج خصوصیات اصطکاکی بالشتکها استفاده مي‌شود.

پ) هر دو پایه توسط مهاربندی‌هایی سخت شده‌اند تا نمایانگر کوله‌های سخت باشند. در این وضعیت، مدل به شکل یک پل جداسازی شده ساده یک دهانه مي‌باشد.

ت) پایه جنوبی با مهاربندی‌هایی سخت شده تا نمایانگر کوله سخت باشد. در این وضعیت، مدل به شکل یک پل دو دهانه با دو کوله سخت و یک پایه انعطاف‌پذیر مي‌باشد.

ث) وضعیتی با دو پایه انعطاف‌پذیر که نمایانگر بخشی از پل چند دهانه بین درزهای انبساطی مي‌باشد.

سیستم جداسازی نیز شامل بالشتکهای اصطکاکی، قطعات لاستیکی و میراگرهای سیال مي‌باشد که در هفت وضعیت مختلف برای انجام آزمایشها قرار گرفته‌اند.



شکل (٣- ٣) مقایسه پاسخ زیرسازه بین پل جداسازی شده (پایین) و پل معمولی (بالا)

نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهندهٔ یک کاهش عمده در نیروهای لرزه‌اي زیر سازه پل جداسازی شده در مقایسه با پاسخهای پل جداسازی نشده مي‌باشد. جابجائیهای بالشتک در مقیاس سازه واقعی کمتر از ۱۶۰ میلی‌متر بوده و نیروهای سیستم جداگر نیز کمتر از ۰/۳۵W در تقریباً تمام تحریکهای لرزه‌اي مي‌باشد. برای این حرکات با دوره تناوب زیاد، نیاز به افزایش ظرفیت استهلاک انرژی سیستم جداگر با میراگرهای سیال ویسکوز مي‌باشد. در این شرایط، جابجائیهای بالشتک کمتر از ۱۶۰ میلیمتر و نیروی سیستم جداگر کمتر از w ۰/۳۳ مي‌باشد. به علاوه این سیستم افزایش یافته، نسبت به دامنه فرکانسی زلزله ورودی حساس نمي‌باشد. در طی آزمایشها که در جهات مختلف صورت گرفته معین شد که تحریک قائم، اثرات کمتری بر پاسخهای پلهای جداسازی شده دارد.

فصل چهارم

مشخصه‌هاي مکانیکی جداگرهای الاستومرچندلایه

۴-۱- کلیات

همانطور که در معرفی انـواع جـداگرهای لـرزه‌اي بـرای اسـتفاده در پلهـا در فـصل سـوم مرورگردید کاربرد تکیه‌گاههای جداگر الاستومر چند لایه از سایر انواع جداگرها برای استفاده در پلهای کشور با عنایت به توانمندی صنایع داخلی عملی‌تر مي‌باشد و لذا در این تحقیق بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این فصل مشخصه‌هاي مکانیکی تکیه‌گاههـای جـداگر الاسـتومر چنـد لایه مسلح شده با صفحات فولادی و نیز الیاف پلیمری ارائه می‌گردد.

۴-۲- مشخصه‌هاي مکانیکی تکیه‌گاههای جداگر الاستومر چند لایه

مشخصات مکانیکی تکیه‌گاههای الاستومر چند لایه، چند دهه است که مورد مطالعه قرار گرفته است و در حالی که تحلیل‌های دقیق با استفاده از تکنیک‌هاي غیرخطي هنوز نسبتاً مشکل است، روابط ساده‌اي براساس تئوري الاستیک توسط محققان بسیاري بدست آمده و بوسیلة آزمایشات و اخیراً توسط تحلیل المان محدود، مورد تأیید قرار گرفته است.

مهمترين خاصيت مكانيكي تكيه‌گاه جداگر، سختي افقي آن بوده و سختي قائم و سختي خمشي[1] تكيه‌گاه جداگر نيز براي طراحي آن مورد نياز مي‌باشد. خواص مكانيكي فوق براي تكيه‌گاههاي الاستومر چند لاية مسلح شده با صفحات فولادي و مسلح شده با الياف در بخش‌هاي مربوط به هر كدام از اين نوع جداگرها معرفي خواهد شد.

فركانس قائم يک سازة جداسازي شده، كه در بسياري از موارد يكي از معيارهاي مهم طراحي مي‌باشد، بوسيلة سختي قائم تكيه‌گاهها كنترل مي‌شود. براي محاسبه اين فركانس قائم، فقط لازم است كه سختي قائم تكيه‌گاهها تحت مقدار معيني بار مرده توسط طراح محاسبه شود و براي اين كار، كافي است كه يك تحليل خطي انجام شود. پاسخ اوليه يك تكيه‌گاه تحت بار قائم، بسيار غيرخطي است و به چند فاكتور بستگي دارد، تكيه‌گاهها معمولاً قبل از اينكه سختي قائم آنها بطور كامل بسيج شود، يك حالت رواني[2] (منظور انعطاف‌پذيري قائم بسيار زياد مي‌باشد) ذاتي از خود نشان مي‌دهند. اين حالت رواني كه بسيار تحت تاثير نحوه جاگذاري صفحات مسلح كننده (از لحاظ امتداد و تراز بودن صفحات) و جنبه‌هاي ديگر مهارت در عمليات قالب‌گيري قرار دارد، نمي‌تواند بوسيله تحليل محاسبه شود، ولي معمولاً اهميت كمي در محاسبه پاسخ قائم تكيه‌گاه دارد.

خاصيت مهم ديگر تكيه‌گاه كه بايد براي طراحي مورد توجه و تحليل قرار بگيرد، رفتار كمانشي جداگر مي‌باشد. براي انجام اين تحليل، پاسخ تكيه‌گاه تحت فشار در مقابل لنگر خمشي مورد نياز مي‌باشد. سختي خمشي كه جداگر را در مقابل بارهاي قائم بزرگ پايدار مي‌سازد را مي‌توان با بسط و توسعة همان تحليل انجام شده براي تعيين سختي قائم بدست آورد.

مشخصة اصلي جداگر الاستومر، نسبت خيلي بزرگ سختي قائم به سختي افقي آن مي‌باشد. اين خاصيت توسط صفحات مسلح كننده كه در صنعت استاندارد رايج، صفحات فولادي نازكی مي‌باشند ايجاد مي‌شود. اين صفحات از برآمدگي جانبي لاستيک جلوگيري مي‌كنند، اما به آن اجازه مي‌دهند كه آزادانه تغيير شكل برشي بدهد. سختي قائم مي‌تواند چند صد

1- Tilting stiffness or Bending stiffness
2- Run-in

برابر سختي افقي باشد. صفحات فولادي مسلح كننده اثر مشابهي نيز بر روي مقاومت جداگر در مقابل لنگرهاي خمشي دارد كه معمولاً به آن «سختي خمشي» مي‌گويند.

سختي قائم يک تكيه‌گاه لاستيكي چند لايه توسط فرمول زير بدست مي‌آيد[٣٢]:

$$K_V = \frac{E_c A}{T_r} \qquad (١-٤)$$

كه A سطح تكيه‌گاه، T_r ضخامت كل لاستيک در تكيه‌گاه و E_c (كه مقدار آن مستقل از تعداد لايه‌هاي الاستومر در تكيه‌گاه است) مدول فشاري آني (لحظه‌اي) تركيب لاستيک– فولاد تحت يک مقدار معين بار قائم مي‌باشد.

همچنين به منظور مقايسه با معادلة معمولي خمش تيرها، $M = EI/\rho$، رابطة خمشي را براي يک تكيه‌گاه الاستومري يک يا چند لايه مي‌توان بصورت زير نوشت [٢٢]:

$$M = (EI)_{eff} / \rho = E_c I_{eff} / \rho \qquad (٢-٤)$$

$$1/\rho = \theta / t = \theta_t / T_r \qquad (٣-٤)$$

كه ρ = شعاع انحنا كه در اثر تغيير شكل بوجود مي‌آيد، θ = زاويه بين صفحات صلب بالا و پايين يک لاية الاستومر پس از تغيير شكل لاية الاستومر، t = ضخامت يک لايه الاستومر (لاستيک)، θ_t = زاوية بين دو صفحة صلب انتهايي يک تگيه‌گاه چند لايه پس از تغيير شكل تكيه‌گاه، T_r = ضخامت كل لاستيک در تكيه‌گاه چند لايه، $(EI)_{eff}$ = سختي خمشي مؤثركه مقدار آن مستقل از تعداد لايه‌هاست و براي يک تكيه‌گاه يک لايه و يا چند لايه يكسان است، و I_{eff} = ممان اينرسي مؤثر تكيه‌گاه يک يا چند لايه مي‌باشد.

٤-٣- پايداري (Rollout)

اگر تكيه‌گاه جداگر بوسيله اتصالات كليد برشي كه نمي‌تواند بارهاي كششي را تحمل كند به پي يا شالوده در پايين و روسازه در بالا متصل شده باشد، حتي اگر تحت بار طراحي خود نيز پايدار باشد، ممكن است شكل ديگري از ناپايداري را تجربه كند. طراحان اوليه به گمان اينكه

لاستيك نبايد تحت كشش واقع شود، قبلاً در طراحي‌هاي تكيه‌گاههاي الاستيكي، از اتصالات برشي زبانه‌دار[1] بيشتر از اتصالات پيچ شده استفاده مي‌نمودند. اما تكيه‌گاههاي زبانه‌دار ممكن است يك حالت ناپايدار، تحت عنوان "Rollout" را تجربه كنند كه به تغيير مكان جانبي مربوط مي‌شود و حداكثر تغيير مكان قابل تحمل توسط تكيه‌گاه را محدود به يك حد مشخص مي‌نمايد.

تكيه‌گاه به اين صورت ناپايدار مي‌گردد كه در تغيير مكانهاي بزرگتر از حد فوق، شيب منحني نيرو- تغيير مكان افقي منفي مي‌شود. چون تكيه‌گاه با اتصالات كليد برشي نمي‌تواند كشش تحمل كند، در اثر تغيير امتداد اثر برآيند بار قائم، حركتي در بالا و پايين تكيه‌گاه ايجاد مي‌شود [٣٢].

آزمايشاتي كه اخيراً در مركز تحقيقات مهندسي زلزله[2] (EERC در دانشگاه بركلي كاليفرنيا) و ژاپن انجام شده است، ثابت كرده‌اند كه لاستيك قادر است تنش‌هاي كششي نسبتاً زيادي را تحمل كند و اكنون استفاده از اتصالات پيچی در تكيه‌گاههاي جداسازي، رايج‌تر از اتصالات زبانه‌دار شده است. اگرچه در بعضي آزمايشات، مواردي نشان داده شده است كه تغيير مكان از قطر تكيه‌گاه نيز تجاوز كرده است، لكن محدود نمودن تغيير مكان به مقدار متناظر با پايداری rollout در طراحي حتي در مواقعي كه اتصالات پيچی استفاده شده باشد، يقيناً كار خوبي است.

۴-۴- تكيه‌گاههاي جداگر الاستومري مسلح شده توسط الياف

تكنولوژي جداسازي لرزه‌اي امروزه تقريباً فقط براي ساختمانهاي بزرگ و گران قيمتي كه تجهيزات داخلي حساسي را در خود جاي مي‌دهند، مانند مراكز كامپيوتر، ساختمانهای حساس مخابراتی، مراكز عمليات اضطراري، بيمارستان‌ها و غيره بكار مي‌رود و جداگرهاي مورد استفاده، بزرگ، گران قيمت و سنگين هستند. يک تكيه‌گاه جداكنندۀ واحد مي‌تواند وزني برابر يک تن و

1- Dowelled
2- Earthquake Engineering Research center of the University of California at Berkeley

اغلب بيشتر داشته باشد. براي گسترش اين راهكار با ارزش مقاوم در برابر زلزله براي استفاده در ساختمانهاي مسكوني و تجاري، لازم است كه قيمت و وزن جداگرها كاهش يابد.

۴-۵- مزاياي جداگرهاي الاستومري مسلح شده با الياف نسبت به جداگرهاي الاستومري مسلح شده با صفحات فولادي

وزن اصلي يک جداگر، ناشي از صفحات فولادي مسلح‌كننده‌اي است كه براي فراهم نمودن سختي قائم المان مركب لاستيک - فولاد بكار مي‌رود. بطور نمونه، يک جداگر لاستيكي ممكن است داراي دو صفحة انتهايي بزرگ (با ضخامت حدود يک اينچ) و ۲۰ صفحة مسلح‌كنندة نازک (با ضخامت ۳ ميليمتر) باشد. هزينة زياد توليد جداگرها ناشي از كار آماده‌سازي صفحات فولادي و قرار دادن ورقه‌هاي لاستيک و صفحات فولادي در يک قالب براي اتصال و پيوستگي ولكانيزه‌اي آنها مي‌باشد. صفحات فولادي بريده و سند بلاست شده، با اسيد تميز شده و سپس با مواد چسباننده پوشيده مي‌شود.

سپس ورقه‌هاي لاستيک با صفحات فولادي لابه لاي آنها در يک قالب قرار گرفته و به مدت چند ساعت تحت فشار حرارت داده مي‌شود تا فرآيند ساخت جداگر كامل گردد. با حذف صفحات مسلح كنندة فولادي و جايگزيني آنها با الياف مسلح كننده مي‌توان وزن و قيمت جداگرها را كاهش داد[۲۲]. در واقع اين الياف داراي سختي الاستيك از همان مرتبه سختي الاستيك فولاد مي‌باشد. مصالح مسلح كننده مورد نياز براي فراهم نمودن سختي قائم در جداگر مي‌تواند به جاي صفحات فولادي، با استفاده از مواد الياف با حجم مشابه فولاد مسلح كننده، ولي با وزن بسيار سبكتر تامين گردد كه باعث كاهش وزن جداگر مي‌شود.

كاهش هزينه نيز به خاطر اين است كه استفاده از الياف امكان فرآيند ساده‌تر و آسان‌تر ساخت را فراهم مي‌كند. همچنين با استفاده از الياف به جاي صفحات فولادي، مي‌توان روش

رايج ولكانيزه كردن (پخت گوگردي) تحت فشار در يك قالب با حرارت بخار آب را با روش حرارت مايكرويو[1] در يك اتوكلاو[2] جايگزين نمود [۲۲].

در جداگرهاي مسلح شده با الياف، از الياف با سختي و مقاومت بالا استفاده مي‌شود. از مزاياي مهم اين سيستم چسبندگي و پيوستگي مناسب الياف با زمينة الاستومري است. الياف مورد استفاده مي‌تواند الياف كولار، الياف تهيه شده از بلورهاي مايع[3] و پلي‌آميدهاي آروماتيكي كه داراي مقاومت كششي بيشتر از فولاد وچگالي كمتر از آن هستند، الياف كربن يا الياف شيشه باشد. از بين موارد ذكر شده، الياف كولار نسبت به ديگر الياف ارجح است[۲۲].

سيستم جداگر مسلح شده با الياف، شامل لايه‌هاي الاستومري (به شكل مربع، دايره و يا هر شكل مورد نياز ديگر) است كه بطور افقي روي هم قرار گرفته‌اند و براي اتصال اين لايه‌ها به يكديگر از عمل پخت گوگردي استفاده مي‌شود. هر كدام از اين لايه‌ها شامل الياف پيوسته‌اي است كه در زمينه الاستومري تعبيه شده است. پس از اتصال لايه‌هاي فوق به يكديگر، قدم بعدي در ساخت جداگرها اتصال صفحات انتهايي است. اين صفحات انتهايي براي اتصال جداگر به پايه يا پي و روسازه مورد استفاده قرار مي‌گيرد. بسته به نوع كاربرد، صفحات انتهايي مي‌تواند فلزي (مثل فولاد)، لايه‌هاي با سختي بسيار بالا، كامپوزيت متشكل از زمينه اپوكسي و الياف تقويت‌كننده بسيار مقاوم، يا ساختار تخته چند لايه[4] باشد. صفحات انتهايي با روشهاي مختلفي به سطوح بالا و پايين جداگر وصل مي‌شوند. يك روش، استفاده از عمل پخت گوگردي است كه تمام لايه‌ها را به هم متصل مي‌كند، در اين روش بايد صفحات انتهايي با لايه الاستومري در تماس باشند، سپس با پخت گوگردي تحت حرارت و فشار تمام لايه‌ها از جمله صفحات انتهايي به هم متصل مي‌شوند. مزيت ديگر استفاده از الياف مسلح‌كننده اين است كه مي‌توان جداگرها را به شكل نوارهاي مستطيلي طويلي ساخت كه براي تهيه

1- Microwave
2- Autoclave
3- Liquid crystalline
4- Polywood

جداگرهاي واحد مي‌تواند بـه انـدازه‌هـاي مـورد نيـاز بريـده شـود. براسـاس ايـن گمـان اشـتباه كه اگـر سيـستم جداسـازي بـراي يـك سـازه بخواهـد ايزوتروپيـك باشـد، بايـد از جـداگرهاي با شكل متقارن سـاخته شـود، مرسـوم اسـت كـه غالـب جـداگرها را بـه شـكل دايـره يـا مربـع مـي‌سـازند. در مـورد پلهـا يـا سـاختمانهايي كـه سيـستم مقـاوم جـانبي آنهـا از ديـوار تـشكيل شده باشـد، كاربردهـاي جـداگرهاي مـستطيلي بـه شـكل نوارهـاي طويـل، مزايـايي نـسبت بـه جـداگرهاي دايـروي و يـا مربعـي دارد. هنگاميكـه در سـاختمانهاي بـا ديوارهـاي سـازه‌اي از جداسازي استفاده مـي‌شـود، تيرهـاي ديـواري[1] اضـافه‌اي بـراي انتقـال بـار ديـوار بـه جـداگرها لازم است .

در مدلـسازي جـداگر مـسلح شـده بـا صـفحات فـولادي، فـرض مـي‌شـود كـه ايـن صـفحات غيـر قابـل كـشش بـوده و در خمـش نيـز صـلب مـي‌باشـند. اليـاف مـسلح‌كننـده از تعـداد زيـادي اليـاف تكـي سـاخته شـده اسـت كـه بـصورت رشـته‌هـايي دسـته‌بنـدي شـده و بصورت يك نخ با قطر كمتر از يك ميليمتـر تابيـده شـده اسـت. ايـن نـخ‌هـا در كـشش نـسبت بـه اليـاف تكـي انعطـاف‌پذيرترنـد، بنـابراين موقعيكـه تكيـه‌گـاه تحـت بـار وزن سـازه قـرار مـي‌گيـرد، ممكـن اسـت افـزايش طـول دهنـد. از طـرف ديگـر، ايـن نـخ‌هـا در خمـش كـاملاً انعطاف پذيرند، بنـابراين فـرض انجـام شـده در مدلـسازي جـداگرهاي رايـج (مـسلح شـده بـا صفحات فـولادي) كـه مقـاطع مـسطح بـصورت مـسطح بـاقي مـي‌ماننـد در مـورد جـداگرهاي مسلح شـده بـا اليـاف صـحيح نمـي‌باشـد. در حقيقـت، موقعيكـه يـك جـداگر مـسلح شـده بـا الياف تحت بارگذاري برشي قـرار مـي‌گيـرد، يـك مقطـع عرضـي مـسطح بـصورت خميـده در مـي‌آيـد. ايـن پديـده موجـب يـك مزيـت غيرقابـل انتظـار در اسـتفاده از اليـاف مـسلح كننـده مي‌شود. هنگاميكه تكيه‌گـاه تحـت بـرش تغييـر مكـان مـي‌دهـد، كـشش ايجـاد شـده در دسـته الياف (اين كشش بر روي لايـه خميـده اليـاف مـسلح‌كننـده كـه در اثـر بـرش انحنـا پيـدا كـرده است، عمل مي‌نمايد) ميرايي اصـطكاكي توليـد مـي‌كنـد كـه ناشـي از لغـزش رشـته‌هـاي تكـي

1- Wall beams

الياف نسبت بـه يكـديگر در دسـته اليـاف مـي‌باشـد. ايـن مقـدار اسـتهلاك انـرژي انجـام شـده در الياف مسلح‌كننده به مقدار استهلاك انرژي ايجاد شده در الاستومر اضافه مي‌شود.

آزمايشات نـشان مـي‌دهنـد كـه ايـن مقـدار اسـتهلاك انـرژي بزرگتـر از مقـدار فـوق در الاسـتومر مـي‌باشـد. بنـابراين هنگـام طراحـي يـك جـداگر مـسلح شـده بـا اليـاف كـه مقـدار معينـي ميرايـي بـراي آن مـورد نيـازمي‌باشـد، بـا در نظـر گـرفتن و اسـتفاده از ميرايـي اضـافي ناشـي از اليـاف، ديگـر بكـارگيري روشـهاي پرزحمـت بـراي فـراهم نمـودن ميرايـي مثـل اسـتفاده از هـسته سـربی كـه در جـداگرهای چنـد لايـه الاسـتومر مـسلح شـده بـا صـفحات فولادی بكار می رود لازم نيـست[۲۲]. سـختي افقـي و كمـانش جـداگر مـسلح شـده بـا فـولاد بوسيله تئوري تيـر معـادلي مـدل مـي‌شـود كـه بوسـيله آن يـك تكيـه‌گـاه بـا لايـه‌هـاي جـداي بسيار توسط تير پيوسته مركبي جـايگزين مـي‌گـردد كـه در آن فـرض مـي‌شـود مقـاطع مـسطح عمود بر محور تغيير شكل نيافتـه مـسطح بـاقي مـي ماننـد، ولـي بـر محـور تغييـر شـكل يافتـه عمـود نيـستند كـه ايـن حالـت مـنعكس‌كننـده سـختي بـرش بـسيار كـم لاسـتيك و صـلبيت خمـشي فـولاد مـسلح‌كننـده مـي‌باشـد. هنگـامي كـه مـصالح مـسلح‌كننـده در خمـش كـاملاً انعطاف‌پـذير باشـند، مـدل تيـر فـوق بايـستي بـسط داده شـود تـا اعوجـاج مقطـع عرضـي نيـز قابل مدلسازي باشد. براي يك تير واقعـي، اعوجـاج مقطـع عرضـي اثـر خيلـي كمـي بـر رفتـار مكانيكي تير دارد، ولي براي يـك جـداگر كـه در واقـع يـك تيركوتـاه بـا سـختي برشـي خيلـي كم مي‌باشـد ايـن اثـر مـي‌توانـد بـزرگ باشـد. اگـر مـصالح مـسلح‌كننـده انعطـاف پـذير مـورد استفاده قرار گيـرد، ممكـن اسـت سـختي افقـي و بـار كمـانش كـاهش يابـد. چـون تـنش‌هـاي نرمـال در لاسـتيك بوسـيله روش معـروف بـه حـل فـشاري بدسـت مـي‌آيـد، مـدل نمـودن جداگر با استفاده از تئوري تير پيچيده مي‌شود.

فصل پنجم

ضوابط آیین‌نامه‌ای درمورد پلهای جداسازی‌شده

۵-۱- مقدمه

در این فصل مروری بر قسمتهای مربوط به جداسازی لرزه‌ای پلها در آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی در زمینه طراحی پلها ارائه می‌شود. به همین علت سه آیین‌نامه مطرح در این زمینه که طی دهه گذشته اقدام به ارائه ضوابطی در این زمینه کرده‌اند انتخاب شده‌اند.

این آیین‌نامه‌ها عبارتنداز: آیین‌نامه راهنمای آشتو، آیین‌نامه یوروکد و آیین‌نامه ژاپن.

اگرچه مبانی و مفاهیم هر سه آیین‌نامه یکسان است، اما روش برخورد هریک ممکن است متفاوت باشد. در این میان به علت در دست داشتن کلیه مطالب مربوط به طرح جداسازی لرزه‌ای در پلها از دو آیین‌نامه آشتو و یوروکد، سعی شده‌است که مرور نسبتاً کاملی بر روشهای تحلیل و ضوابط طراحی جداگرهای الاستومری انجام شود.

۵-۲- ضوابط آیین‌نامه آشتو AASHTO درمورد طراحي جداسازي لرزه‌اي پلهاي بزرگراهی

۵-۲-۱- کلیات

در اين بخش، مشخصات راهنماي طراحي جداسازي لرزه‌اي پـل‌هـاي بزرگراههـا[۱]، از انتشارات ۲۰۰۱ آشتو كه اصلاح ويرايش ۱۹۹۱ آن مي‌باشد، معرفي مي‌گردد. ايـن راهنمـا مكمـل مشخصات استاندارد آشتو براي طراحي لرزه‌اي پل‌هاي بزرگراهی[۲] مي‌باشـد. مشخـصات ارائـه شده در اينجا براي سيستم‌هايي است كه فقط در صفحه افقي جداسازي ايجاد مي‌كنند و در مـورد آنها فرض بر اين است كه در راستاي قائم كاملاً صلب هستند. بعلاوه، مشخصات راهنمـاي فـوق فقط براي سيستم‌هاي جداساز غيرفعال در نظر گرفته شده است.

۵-۲-۲- ضريب شتاب

براي طراحي جداسازي لرزه‌اي نيز همـان ضـريب شـتاب A مقـرر شـده بـراي طراحـي معمولي (بدون جداسازي لرزه‌اي) بكار مي‌رود. لكن مقدار A نبايد كوچكتر از ۰/۱ در نظر گرفته شود.

۵-۲-۳- سطوح عملكرد لرزه‌اي

سطوح عملكرد لرزه‌اي در طراحي جداسازي نيز همان سطوح عملكرد لرزه‌اي در طراحي معمولي (بدون جداسازي لرزه‌اي) مي‌باشـد. سـطوح عملكـرد لـرزه‌اي، روش تحليـل و الزامـات حداقل طراحي را تعيين مي‌نمايد.

۵-۲-۴- اثرات و ضريب ساختگاه

ضريب ساختگاه براي طراحي جداسازي لرزه‌اي، S_i، كه اثـرات شـرايط سـاختگاه را بـر روي ضريب پاسخ الاستيك اعمال مي‌كند، در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

جدول(۵-۱) ضريب ساختگاه براي جداسازي لرزه‌اي، S_i

	نوع پروفيل خاك			
	I	II	III	IV
S_i	۱/۰	۱/۵	۲/۰	۲/۷

۵-۲-۵- ضريب اصلاح پاسخ (R)

ضريب اصلاح پاسخ براي همة قسمتهاي زير سازه، بايستي نصف مقـادير ارائـه شـده در حالت طراحي معمولي (بدون جداسازي) باشد. لكن مقدار R نبايد كوچكتر از ۱/۵ در نظر گرفته شود.

۵-۲-۶- روشهاي تحليل

روشهاي تحليل زير در نظر گرفته مي‌شود:

روش اول: روش بار يكنواخت

روش دوم: روش طيفي تک مودي

روش سوم: روش طيفي چند مودي

روش چهارم: روش تاريخچه زماني

۵-۲-۷- فاصله‌هاي آزاد

فواصل آزاد در دو راستاي متعامد بايستي برابر حداكثر تغيير مكـان حاصـل از تحليـل در هر راستا باشد. فاصله آزاد نبايد كمتر از مقادير زير و يا يك ايـنچ (۲۵mm)، (هـر كـدام بزرگتـر باشد) باشد:

$$\frac{8AS_i T_{eff}}{B} \quad (inch) \qquad (۱a-۵)$$

$$\frac{200AS_i T_{eff}}{B} \quad (mm) \qquad (۱b-۵)$$

تغییر مکانهاي جداگرها ناشي از ترکیبات بار تعیین شده طبق مشخصات استاندارد آشتو شامل LF (نیروهاي طولي)، WL (بار باد)، CF (نیروهاي گریز از مرکز) و T (اثرات حرارت) بایستي محاسبه شده و ضابطة فاصلة آزاد براي آنها کفایت کند. نیروهاي حداقل طراحي بایستي با فواصل آزاد محاسبه شده توسط معادله ۵-۱۳ سازگار باشند.

۵-۲-۸- نیروهاي طراحي براي سطح عملکرد لرزه‌اي A

نیروي طراحي لرزه‌اي براي اتصال بین روسازه و زیرسازه در هر تکیه‌گاه توسط رابطة زیر بدست مي‌آید:

$$F_A = K_{eff} d_t \qquad (۵-۲)$$

که d_t (تغییر مکان کل طراحي) بایستي براساس یك ضریب شتاب حداقل A، که از ۰/۱ کوچکتر نباشد، محاسبه گردد.

۵-۲-۹- نیروهاي طراحي براي سطوح عملکرد لرزه‌اي B، C و D

نیروي طراحي لرزه‌اي براي ستون‌ها و پایه‌ها نباید کوچکتر از نیروهاي حاصل از سطح تسلیم یك سیستم نرم شونده، سطح اصطکاك یك سیستم لغزشي یا ظرفیت نهایي یك سیستم جاری شونده باشد. در همة موارد، هر کدام از شرایط استاتیکي یا دینامیکي که بزرگتر باشد بایستي بکار رود.

اگر نیروهاي الاستیك پی کمتر از نیروهاي حاصل از مفصل شدن ستون باشد، مي‌توان از آنها براي طراحي پی با استفاده از مقدار R برابر ۱/۰ استفاده نمود. نیروي طراحي لرزه‌اي براي اتصال بین روسازه و زیرسازه در هر تکیه‌گاه توسط رابطة زیر بدست مي‌آید:

$$F_a = K_{eff} d_t \qquad (۵-۳)$$

۵-۲-۱۰- ساير الزامات

سيستم جداسازي بايد در مقابل همة تركيبات بار جانبي غير لرزه‌اي وارد شـده در بـالاي سطح جداسازي مقاومت كند. اين تركيبات بار طبق مشخصات اسـتاندارد آشـتو، شـامل w، wL، LF، CF و T مي‌باشند.

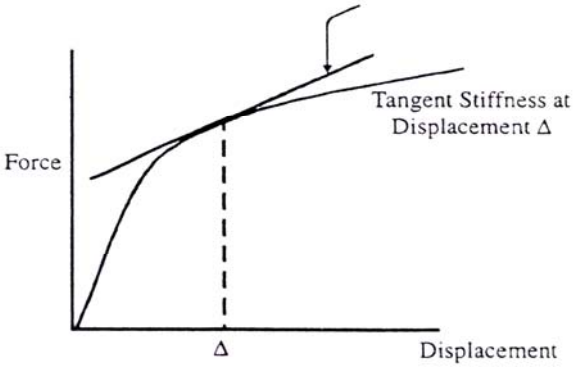
الف) مقاومت نيروي بهره‌برداري (سرويس)

مقاومت در برابر نيروهايي از قبيل باد، گريز از مركز، ترمز و نيروهاي ايجاد شـده توسـط قيد تغيير مكانهاي حرارتي بايستي بوسيلة آزمايش مطابق بخش ۷-۲ در فصل هفتم ايـن گـزارش مورد تأييد قرار گيرد.

ب) الزامات هواي سرد

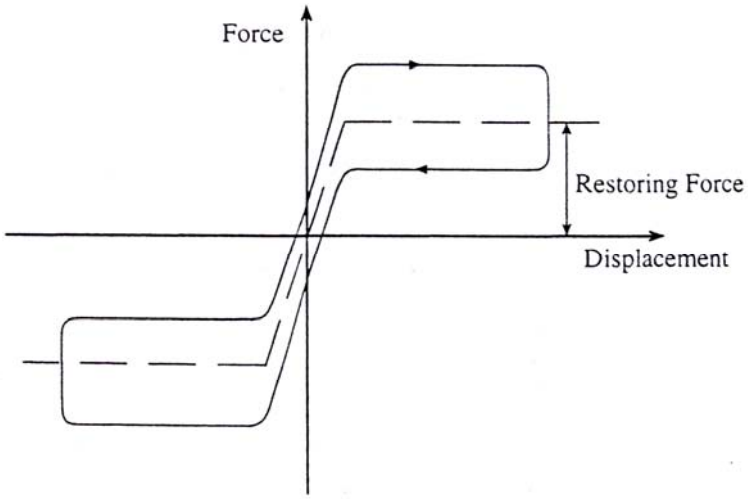
در طراحي همة انواع سيستم‌هاي جداسازي بايستي عملكرد در هواي سرد در نظر گرفتـه شود. مناطق با دماي پايين بايستي در صورت فقدان اطلاعات بيشتر ويـژه سـاختگاه، مشخـصات استاندارد آشتو، بخش I مطابق باشند.

سيستم جداسازي بايد يك نيروي مقاوم جانبي ايجـاد كنـد، بطوريكـه پريـود متنـاظر بـا سختي تانژانتي آن براساس نيروي مقاوم تنها در هر تغيير مكـان Δ تـا تغييـر مكـان طراحـي آن، كمتر از ۶ ثانيه باشد. (شكل ۵-۱)



شكل (۵-۱) سختي تانژانتي سيستم جداسازي

همچنين نيروي مقاوم در d_i (d_i = تغيير مكان طراحي در مركز سختي سيستم جداسازي در راستاي مورد نظر)بايد حداقل به اندازة w/80 بزرگتر از نيروي مقاوم در $0/5\,d_i$ باشد. سيستم‌هاي جداسازي با نيروي مقاوم ثابت (شكل۵-۲) نيازي به برآورده ساختن الزامات بالا ندارند. در اين موارد، نيروي مقاوم ثابت تركيبي سيستم جداسازي بايد حداقل ۱/۰۵ برابر مقاومت مشخصه سيستم جداسازي تحت شرايط سرويس باشد. نيروهايي كه مانند نيروهاي ويسكوز به تغيير مكان بستگي ندارند، نمي‌توانند براي برآوردن الزامات حداقل نيروي مقاوم يا سختي تانژانتي مورد استفاده قرار گيرند.



شكل (۵-۲) رابطه نيرو – تغيير مكان سيستم‌هاي با نيروي مقاوم ثابت

سيستم جداسازي بايد يك ضريب ايمني حداقل برابر ۳ براي بارهاي قائم (بار مرده به اضافه بار زنده لرزه‌اي) در حالت بدون تغيير شكل جانبي فراهم كند. همچنين بايد طوري طراحي شود كه تحت ۱/۲ برابر بار مرده به اضافه هر بار قائم حاصل از بار زنده لرزه‌اي، به اضافة واژگوني در يك تغيير مكان افقي برابرتغيير مكان افست[1] به علاوة ۱/۱ برابر تغيير مكان كل

۱- Offset displacement تغيير مكان جانبي يك واحد جداگر حاصل از خزش، انقباض و ۵۰ درصد تغيير مكان حرارتي مي‌باشد.

طراحي براي حداكثر زلزله باوركردني[1]، يا ۱/۵ برابر تغيير مكان كل طراحي بـراي زلزلـه بـا دوره بازگشت ۴۷۵ سال با شتابهاي بزرگتر از g ۰/۱۹ يا ۲ برابر تغيير مكان كل طراحي براي زلزلـه بـا دوره بازگشت ۴۷۵ سال با شتابهاي كوچكتر يا مساويg ۰/۱۹پايدار بماند.

ظرفيت دوراني طراحي واحد جداسازي بايد شامل اثرات بار مـرده، بـار زنـده و اجـراي غلط (امتدادهاي غلط در ساخت) باشد. در هيچ موردي نبايد دوران طراحـي بـراي اجـراي غلـط كمتر از ۰/۰۰۵ راديان باشد.

۵-۲-۱۱- تكيه‌گاههاي الاستومر

تكيه‌گاههاي الاستومر مورد استفاده در طراحي جداسازي لرزه‌اي بايستي بوسيلة روشها و مشخصات مخصوص كه در اين آيين‌نامـه ذكـر شـده اسـت، طراحـي شـوند. روشـهاي طراحـي براساس بارهاي سرويس بدون اثر ضربه هستند. تكيه‌گاههاي الاستومر بايستي با استفاده از فـولاد مسلح شوند. تكيه‌گاههاي الاستومر بايستي شرايط زير را ارضا كنند:

$$\gamma_C \le ۲/۵ \qquad (۴-۵)$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,s} + \gamma_r \le ۵/۰ \qquad (۵-۵)$$

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + ۰/۵\gamma_r \le ۵/۵ \qquad (۶-۵)$$

۵-۳- طراحی پلهای جداسازی شدة لرزه‌اي طبق آيين‌نامة يوروكد

۵-۳-۱- كليات

در اين قسمت روشهاي تعيين شده در آيين‌نامه يوروكد[۳۴] براي طراحي پلهايي كه در آنها به منظور كاهش پاسخ ناشي از نيروهاي افقي زلزله از سيستم جداسازي لرزه‌اي استفاده مي‌شود، معرفي مي‌گردد. تكيه‌گاههاي جداكننده در تراز جداسازي نصب مي‌شوند كه معمولاً در زير عرشه و بالاي پايه‌ها و كوله‌ها قرار دارد.

1- Maximum credible event

کاهش پاسخ ناشي از زلزله مي‌تواند بوسيلة عوامل زير حاصل شود:

- افزايش پريود اصلي سازه (اثر تغيير پريود در طيف پاسخ) كه نيروها را كاهش داده، ولي موجب افزايش تغيير مكان‌ها مي‌گردد.
- افزايش ميرايي كه تغيير مكان‌ها را كاهش داده و ممكن است باعث كاهش نيروها نيز بشود.
- تركيب دو عامل فوق

۵-۳-۲- مقررات اساسي و معيارهاي پذيرش

در مورد پلهاي جداسازي شدة لرزه‌اي نيز بايستي مقررات اساسي مربوط به پلها رعايت گردد و پاسخ لرزه‌اي روسازه (قسمتي از سازه كه بر روي سيستم جداسازي قرار مي‌گيرد كه در پلها معمولاً عرشه مي‌باشد) و زير سازه (قسمتهايي از سازه كه در زير سيستم جداسازي قرار مي‌گيرد كه در پلها معمولاً شامل پايه‌ها و كوله‌ها مي‌باشد)، بايستي بصورت كاملاً الاستيک باقي بماند. همچنين به خاطر نقش بحراني قابليت تغيير مكان سيستم جداسازي در ايمني سازه، قابليت اعتماد بيشتري (نسبت به روسازه و زير سازه) براي مقاومت و سالم بودن سيستم جداسازي لازم مي‌باشد. طبق آيين‌نامة فوق همة واحدهاي جداگر، به استثناي تكيه‌گاههاي الاستومر معمولي، بايستي تحت آزمايشات كيفيت[1] و نمونه[2] قرار بگيرند.

۵-۳-۳- حركات زلزله

۵-۳-۳-۱- طيف‌هاي طرح

براي پلهاي جداسازي شدة لرزه‌اي نيز از همان طيف پاسخ الاستيک نوع ۱ مربوط به پلهاي جداسازي نشده و با فرض T_D = ۲/۵ sec استفاده مي‌شود. اگر ساختگاه در فاصلة كمتر از ۱۰ كيلومتر از يک منبع زلزله شناخته شده كه ممكن است زلزله‌اي با بزرگي گشتاوري بيشتر از

1- Qualification
2- Prototype

۶/۵ توليد كند و يا يک منبع فرورانش واقع شده باشد، بايستي از طيف‌هاي ويژه ساختگاه كه اثرات منبع نزديک را در نظر مي‌گيرد استفاده شود.

۵-۳-۳-۲- تاريخچه‌هاي زماني زلزله

براي پلهاي جداسازي شدة لرزه‌اي نيز از همان تاريخچه‌هاي زماني زلزله مربوط به پلهاي جداسازي نشده استفاده مي‌شود.

۵-۳-۴- روشهاي تحليل و مدلسازي

روشهاي تحليل پلهاي جداسازي شدة لرزه‌اي طبق آيين‌نامه يوروكد[۳۴]، شامل۳ روش زير مي‌باشد:

الف) تحليل طيفي مود اصلي[1]

ب) تحليل طيفي چند مودي[2]

ج) تحليل تاريخچه زماني غيرخطي[3]

۵-۳-۵- كنترل طراحي

تركيبات بارگذاري زلزله در مورد پلهاي جداسازي شده نيز مانند پلهاي جداسازي نشده مي‌باشد. اثرات زلزله براي سيستم جداسازي بايستي طبق قسمت (۵-۳-۵-۱) و براي روسازه و زير سازه طبق قسمت (۵-۳-۵-۲) در نظر گرفته شود.

۶-۳-۵-۱- كنترل طراحي سيستم جداسازي

قابليت اعتماد اضافي لازم براي سيستم جداسازي كه در قسمت (۶-۳-۲) به آن اشاره شده، بايستي با طراحي سيستم جداسازي براي زلزله‌اي با شتاب طرح بزرگتر تأمين شود كه اين

1- Fundamental mode spectrum analysis
2- Multimode Spectrum analysis
3- Time – history non – linear analysis

شتاب، ١/٥ برابر شتاب طرح زلزله براي طراحي روسازه و زير سازه در نظر گرفته مي‌شود. البته شتاب فوق لازم نيست كه از شتاب مربوط به زلزله اي با دوره بازگشت ٢۴٠٠ سال بزرگتر باشد.

همة اجزاء سيستم جداسازي بايستي در تغيير مكان حداكثر كل حاصل از زلزلة افزايش يافتة فوق، قادر به كار كردن باشند و مقاومت طراحي هر المان باربر در سيستم جداسازي بايستي بزرگتر از نيروي طراحي حداكثر افزايش يافتة موجود در المان در هنگام وقوع تغيير مكان حداكثر كل ناشي از زلزلة افزايش يافته باشد. همچنين مقاومت طراحي هر المان بايد بزرگتر از نيروي طراحي حاصل از بارگذاري باد بر روي سازه در راستاي مربوطه باشد. در طراحي لرزه‌اي پلها، تكيه‌گاههاي الاستومري چند لايه، چه نوع معمولي آن و چه نوع خاص آن، بايستي معيارهاي طراحي زير را ارضا نمايند كه مطابق جدول (٥-٢) مي‌باشد.

جدول (٥-٢) مقادير حداكثر مجاز كرنش‌هاي برشي

كرنش برشي	مقدار حداكثر مجاز
ناشي از فشار	٢/٥
ناشي از تغيير مكان لرزه‌اي طراحي كل	٢/٠
كرنش برشي طراحي كل	۶/٠

كرنش برشي طراحي كل، برابر با مجموع كرنش برشي ناشي از فشار (حاصل از تركيب بار لرزه‌اي طراحي)، كرنش برشي ناشي از تغيير مكان لرزه‌اي طراحي كل شامل اثرات پيچش (اين تغيير مكان در مورد تكيه‌گاههاي الاستومري كه بعنوان جداگر لرزه‌اي بكار رفته‌اند، ناشي از زلزلة افزايش يافتة معرفي شده در بالا مي‌باشد) و كرنش برشي ناشي از درون زاويه‌اي تكيه‌گاهها (معمولاً اثر دوران زاويه‌اي تكيه‌گاهها در طراحي لرزه‌اي پلها ناچيز است) مي‌باشد.

معيارهاي مربوط به پايداري: اين معيارها بصورت روابطي برحسب ابعاد و اندازه و خصوصيات تكيه‌گاه الاستومر و حداكثر نيروي محوري (قائم) وارد بر تكيه‌گاه ناشي از تركيب بار طراحي لرزه‌اي بيان مي‌شود.

۵-۳-۵-۲- کنترل طراحي زير سازه‌ها و روسازه

نيروهاي داخلي حاصل از زلزلة طراحي در زير سازه‌ها و روسازه، با انجام يک تحليل مناسب مطابق روشهاي ذکر شده در بخش (۵-۳-۴) بدست مي‌آيد. بايستي بررسي و تأييد شود که همة اعضاي زير سازه‌ها و روسازه کاملاً الاستيک باقي بمانند.

۵-۳-۶- مقررات ويژه براي سيستم جداسازي

۵-۳-۶-۱- نيروي مقاوم جانبي

سيستم جداسازي بايستي در تغيير مکان طراحي، نيروهاي مقاومي را از خود نشان بدهد که حداقل به مقدار W_d ۰/۰۲۵ از نيروي مقاوم متناظر با ۵۰% تغيير مکان طراحي، بيشتر باشد (W_d وزن روسازه مي‌باشد).

۵-۳-۶-۲- قيد جانبي در سطح جداسازي

سيستم جداسازي بايستي براي برآورده ساختن مقررات آيين‌نامه دربارة محدود ساختن تغيير مکان‌ها يا تغيير شکل‌ها تحت شرايط بهره‌برداري، به مقدار کافي قيد جانبي در سطح جداسازي فراهم نمايد. اين ضابطه معمولاً براي بار ترمز در پلهاي راه‌آهن بحراني است.

اگر از سيستم فيوز (مهار بندهاي قرباني شونده[1]) براي ايجاد قيود تغيير مکان بهره برداري بين عرشه و زير سازه‌ها در سيستم پل استفاده شود، ظرفيت تسليم فيوز نبايد از ۴۰% نيروي حاصل از زلزلة طراحي در تکيه‌گاه و راستاي مورد نظر تجاوز کند.

۵-۳-۶-۳- تعمير و بازرسي فني

همة واحدهاي جداگر بايستي براي تعمير و بازرسي فني، قابل دسترسي باشند. همچنين بايستي يک برنامه براي تعمير و بازرسي فني دوره‌اي سيستم جداسازي و همة اجزاء سطح

1- Sacrificial bracings

جداسازي بوسيلة طرح مسئول تنظيم شده و توسط كارفرما اجرا گردد و تعمير و ترميم و تعويض و تقويت هر واحد جداگر يا هر عضو در سطح جداسازي تحت راهنمايي و نظارت گروه مسئول انجام و گزارش شود.

۵-۳-۷- خصوصيات طراحی جداگرهای الاستومري

۵-۳-۷-۱- سختی در جهت قائم

سختی جهت قائم هر واحد جداگر بایستی به اندازه کافی زیاد باشد. این شرط باید هنگامی که جابجائی افقی در مرکز جرم روسازه، به واسطه انعطاف‌پذیری قائم واحدهای جداگر، کمتر از ۵% جابجائی طرح می‌باشد، ارضاء شود. این حالت در مورد تکیه‌گاههای الاستومری معمولی که به عنوان عناصر باربر قائم در طراحی استفاده می‌شوند، لازم نیست بررسی شود.

۵-۳-۷-۲- میرایی جداگرها

جداگرهای الاستومري (جداگرهای لاستیکی چند لایه) با درنظرگرفتن میرایی به دو دسته "میرایی کم" و "میرایی زیاد" تقسیم می‌شوند.

- جداگرهای لاستیکی با میرایی کم دارای نسبت میرایی ویسکوز معادل تقریباً ۰/۰۵ می‌باشند. این جداگرها دارای رفتار سیکلیک شبیه به رفتار هیسترتیک با حلقه‌های هیسترزیس لاغر می‌باشند. رفتار آنها با المان الاستیک خطی تقریب زده می‌شود.
- جداگرهای لاستیکی با میرایی زیاد دارای حلقه‌های هیسترزیس چاقتری بوده که نسبت میرایی ویسکوز معادل آنها بین ۰/۱۰ تا ۰/۲۰ می‌باشد. تکیه‌گاههاي الاستومر معمولي، تکیه‌گاههاي با ميرايي كمي مي‌باشند كه همة شرايط زير را داشته باشند:

- ميرايي ويسكوز معادل: ζ = ۰/۰۵ (± ٪۲۰)
- ضريب شكل: $۱۰ \le S \le ۱۵$
- مدول برشي سكانتي در كرنش برشي ۲/۰: G = ۱/۰ MPa (± ٪۱۵)

۵-۴- ضوابط آيين‌نامه كشور ژاپن در مورد طراحي جداسازي لرزه‌اي پل‌هاي بزرگراهها

۵-۴-۱- مقدمه

در اين بخش روش و جزئيات طراحي جداسازي لرزه‌اي پل‌ها براي كاهش نيروي اينرسي مطابق فصل هشتم (طراحي جداسازي لرزه‌اي) از قسمت پنجم (طراحي لرزه‌اي) مشخصات طراحي پل‌هاي بزرگراهها براساس آيين‌نامه كشور ژاپن[۲۰]، شرح داده مي‌شود. بسته به تعريف، طراحي‌هاي لرزه‌اي متنوعي براي سازه‌ها با استفاده از جداسازي لرزه‌اي وجود دارد. در اينجا مواردي كه سه شرط زير را برآورده مي‌سازد، در نظر گرفته شده است:

۱) حالتي كه پل براي ايجاد پريود طبيعي بزرگتر و كاهش نيروي زلزله بصورت نرم در جهت جانبي بر روي جداگر تكيه مي‌كند.
۲) حالتي كه تغيير مكان نيز با استفاده از ميراگر كاهش مي‌يابد، بطوريكه مشكل تغيير مكان زياد پل در هنگام زلزله ناشي از ايجاد پريود طبيعي بزرگتر برطرف مي‌شود.
۳) حالتي كه جداگر يا ميراگر داراي مقدار معيني سختي ذاتي براي ايجاد مقاومت، به‌منظور جلوگيري از ارتعاشات معكوس پل در اثر بار باد يا ترمز مي‌باشد.

اين بخش روشهاي طراحي كه سه شرط بالا را فراهم مي‌سازد را با استفاده از تكيه‌گاه جداسازي لاستيكي كه هم داراي جداگر و هم ميراگر مي‌باشد، از قبيل تكيه‌گاه لاستيكي چند لايه با هستة سربي يا تكيه‌گاه لاستيكي چندلايه با ميرايي زياد كه هر دو آنها كاربرد روزافزوني دارند، شرح مي‌دهد.

۵-۴-۲- استفاده از طراحي جداسازي لرزه‌اي

اينكه آيا طراحي جداسازي لرزه‌اي قابل استفاده و سودمند مي‌باشد يا خير، بستگي به شرايط سازه‌اي پل و شرايط زمين اطراف فونداسيون پل دارد. عملكرد لرزه‌اي زمين اطراف فونداسيون پل در هنگام زلزله، تأثير قابل توجهي بر عملكرد لرزه‌اي پل دارد.

در شرايط زير، اصولاً روش طراحي جداسازي لرزه‌اي نبايد اتخاذ شود:

- موقعيكه لايه خاك اطراف فونداسيون پل از نوعي باشد كـه ظرفيـت تكيـه‌گـاهي آن در طراحي لرزه‌اي برابر صفر باشد.
- موقعيكه زمين اطراف فونداسيون پل در هنگام زلزلـه ناپايـدار شـود، اثـرات جداسـازي لرزه‌اي مشخص شده در طراحي، بوقوع نمي‌پيوندد. در اين حالـت طراحـي جداسـازي لرزه‌اي نبايد مورد استفاده قرار گيـرد. هنگاميكـه يـك لايـه خـاك ماسـه‌اي در اطـراف فونداسيون دچار روانگرايي يا انتشار جانبي شود يا زمين اطراف فونداسيون يـك خـاك چسبندة خيلي ضعيف يـا لايـه خـاك لاي‌دار (سـيلتي) باشـد، پايـداري زمـين اطـراف فونداسيون پل در هنگام زلزله غيرقابل پيش‌بيني اسـت. بنـابراين مقـرر شـده اسـت كـه موقعيكه ظرفيت تكيه‌گاهي لايه خاك در هنگام زلزله از بين مي‌رود، طراحي جداسـازي لرزه‌اي نبايد مورد استفاده قرار گيرد.
- پل با انعطاف‌پذيري زياد زيرسازه و پريود طبيعي بزرگ
- مواردي كه به علت نرم بودن زمين اطراف فونداسيون، ممكن است ايجاد پريود طبيعـي بزرگتر براي پل، باعث ايجاد تشديد (رزونانس) بين زمين و پل شود.
- موقعيكه ممكن است تكيه‌گاه عكس‌العمل منفي داشته باشد.

۵-۴-۳- بهبود عملكرد ميرايي

جداسازي لرزه‌اي با ايجاد يك پريود طبيعـي بزرگتـر و بهبـود عملكـرد ميرايـي، نيـروي اينرسي را كاهش مي‌دهد. كشورهاي ديگر نيروي طرح زلزله را براي زلزله‌هـاي بـا پريـود غالـب نسبتاً كوتاه كاهش داده‌اند. لكن ژاپن با بعـضي شـرايط اسـتثنايي از قبيـل شـرايط زمـين معمـولاً ناپايدار و زلزله‌هاي كثيرالوقوع بزرگ با پريود غالـب بـالا روبـرو اسـت. براسـاس ايـن شـرايط، پريودي كه به ازاي آن، ضريب نيروي جانبي طراحي در روش طراحـي شـكل‌پـذيري در هنگـام زلزله با نسبت عكس پريود به توان $\frac{2}{3}$ شروع به كاهش مي‌كند، براي خاك نوع I برابـر ۱/۴ ثانيـه، براي خاك نوع II برابر ۱/۶ ثانيه و براي خاك نوع III برابر ۲/۰ ثانيه مـي‌باشـد. بـه همـين دليـل

كاهش نيروي اينرسي محدود مي‌شود، مگر اينكه پريود طبيعي بزرگتر از پريودهاي فوق‌الذكر ايجاد شود. لكن پريود طبيعي بزرگتر باعث تغيير مكان بزرگتر روسازه در هنگام زلزله مي‌گردد. بنابراين كاهش نيروي اينرسي با ايجاد يك پريود طبيعي بزرگتر ممكن است در خاك نوع III مشكل باشد. در اين حالت، تمركز طرح جداسازي لرزه‌اي بر بهبود عملكرد ميرايي است. ضمن كاهش نيروي اينرسي بوسيلة ايجاد پريود طبيعي بزرگتر و بهبود عملكرد ميرايي، افزايش تغيير مكان روسازه نيز بايد در هنگام زلزله در حد مجاز طراحي نگه‌داشته شود. از ايجاد پريود طبيعي خيلي بزرگ نيز بايستي اجتناب شود.

۵-۴-۴- تغييرات پريود طبيعي پل

به دليل زير مقرر شده است كه پريود طبيعي قسمتي از پل كه در آن تكيه‌گاه جداسازي بكار رفته است، حداقل دو برابر پريود طبيعي قسمت ديگر پل كه بدون تكيه‌گاه جداسازي است، باشد. اگر اختلاف بين پريود طبيعي روسازه و زيرسازه در حدود اين مقدار باشد، اثرات ارتعاشات درگير روسازه و زيرسازه كوچك شده و تغيير مكان پل عمدتاً در تكيه‌گاه جداسازي متمركز مي‌شود. برعكس، اگر پريود طبيعي قسمتي از پل كه در آن تكيه‌گاه جداسازي بكار رفته است كمتر از دو برابر پريود طبيعي قسمت ديگر پل كه بدون تكيه‌گاه جداسازي است باشد، تغيير شكل در تكيه‌گاه جداسازي متمركز نخواهد شد و ممكن است در عوض در زيرسازه اتفاق بيافتد.

در اين حالت نقش تكيه‌گاه جداسازي مؤثر نخواهد بود. بنابراين در طراحي جداسازي لرزه‌اي بايد از اين حالت اجتناب شود. پريود طبيعي موقعيكه تكيه‌گاه جداسازي بكار نرفته است به پريود طبيعي حالتي اشاره مي‌كند كه همة تكيه‌گاهها بصورت ثابت در نظر گرفته مي‌شوند.

۵-۴-۵- شرايط لازم تكيه‌گاه جداسازي

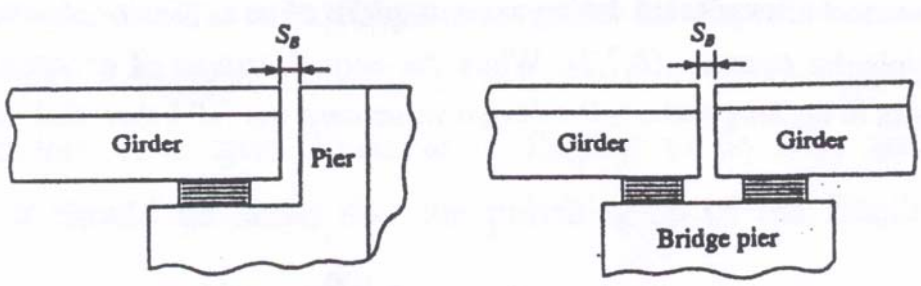
يك تكيه‌گاه جداسازي بايد شرايط زير را برآورده سازد:

- بايد مكانيزم ساده‌اي داشته باشد و بخوبي كار كند. همچنين بايد در محدوده‌اي مورد استفاده قرار گيرد كه رفتار مكانيكي آن بطور واضح شناخته شده باشد.

- باید در تمام مدت زلزله، عملکرد پایداري را نشان دهد.
- تکیه‌گاه جداسازي باید براي یك مدت زمان طولاني، از نظر جنس مواد و مکـانیزم قابل استفاده باشد. با گذشت زمان، تکیه‌گاه جداسازي فرسوده شـده و یـا معیـوب مي‌گردد. بنابراین باید امکان تعویض آن با تکیه‌گاه جداسازي که داراي مشخـصات یکساني با آن باشد وجود داشته باشد.
- بولت هاي مهاري و اتصالات دیگر باید بطور مؤثري نیروي زلزله را بین تکیـه‌گـاه جداسازي، شاهتیر و زیرسازه منتقل کنند.

۵-۴-۶- فاصله (شکاف) در انتهاي شاهیترها

چون ایجاد پریود طبیعي بزرگتر باعـث افـزایش تغییـر مکـان روسـازه در هنگـام زلزلـه مي‌شود، یك مسئلة مهم مطابق شکل (۵-۳) ایجاد فاصله بـین کولـه و شـاهتیر، بـین شـاهتیرهاي مجاور و بین سازه‌هاي اصلي دیگر است.



شکل(۵-۳) شکاف در انتهاي شاهتیرها

۵-۵- اثر بار زنده در طراحی لرزه‌اي پلها

همانطور که پیشتر اشاره شد، پس از خرابی‌های متعددی که بعـد از وقـوع زلزلـه در پلهـا مشاهده گردید، محاسبه پلها در مقابل نیروی زلزله اهمیت بیشتری به خود گرفت. مقـدار نیـروی زلزله بستگی به طبیعت زلزله و پریود طبیعی ارتعاش خاک زیر شـالوده دارد. در طراحـی پلهـای

استثنایی با دهانه خیلی بزرگ یا پلهایی که در نزدیکی گسل قرار دارند، بـرای محاسـبه نیروهـای ناشی از زلزله، مطالعات دقیق دینامیکی نیاز اسـت. در مقیـاس پلهـای کوچـک و متوسـط کـه در نزدیکی گسل قرار ندارند، از روش نیروی استاتیکی معادل مي‌توان استفاده نمود.

در مورد پلهای معمولی که بـا پایـه ثابـت و بـدون جداسـاز لـرزه‌اي هـستند، در محاسـبه نیروهای جانبی زمین لرزه که به سازه پل وارد مي‌شود، در اکـثر آیین‌نامه‌ها فقط وزن مرده پل در نظر گرفته مي‌شود، که از این جمله مي‌توان به آیین‌نامـه آشـتو(AASHTO)، آیـین‌نامـه ژاپـن و آیین‌نامه اروپا (EURO Code) اشاره نمود. در آیین‌نامه ایران برای محاسبه نیروی زلزله چنانچـه بار زنده کمتر از نصف بار مرده پل باشد، از تاثیر بار زنده صرف نظر مي‌شود، لـیکن در صـورتی که بار زنده بیشتر از نصف بار مرده باشـد، در محاسـبه وزن مـوثر سـازه در نیـروی زلزلـه، ۶۷% مجموع بار زنده و بار مرده را در نظر گرفته مي‌شود ($\frac{2}{3}(D_L + L_L)$).

برای محاسبه نیروی زلزله در حالتی که در پلها از جـداگرهای لـرزه‌اي اسـتفاده شـود، بـه دلیل اینکه پلهای با جداسازی لرزه‌اي انعطاف‌پذیری بیشتری خواهند داشت، باید درصدی از بـار زنده به همراه بار مرده به عنوان وزن موثر پل در نظر گرفته شود. به همین منظور در آیین‌نامه‌هایی که روش‌های طراحی پلهای با جـداگرهای لرزه‌اي گنجانده شده است، بـرای محاسـبه وزن مـوثر سازه، مجموع بار مرده و بار زنده لرزه‌اي (درصـدی از بـار زنـده در حـدود ۳۰ درصـد) منظـور مي‌شود. درصد بار زنده که برای تعیین وزن موثر سازه محاسبه مي‌شود در آیین‌نامه‌هـای مختلـف متفاوت است. با توجه به مطالب ارائه شده و به استناد اکثر آیین‌نامه‌ها، نتیجه مـي‌شـود کـه بـرای پلهای معمولی نیازی به در نظر گرفتن بار زنده نیست اما برای بارگذاری زلزله و طراحی پلهای با جداگرهای لرزه‌اي درصد محدودی از بار زنده مد نظر قرار مي‌گیرد.

۵-۶- مقایسه بین آیین‌نامه‌ها

با ارائه مطالب آیین‌نامه‌های مختلف می‌توان نتایج زیر را خاطرنشان کرد (البته به علت بیان جزئیات بیشتر دو آیین‌نامه آشتو و یوروکد، مقایسه بیشتر بین این دو می‌باشد):

- فلسفه هر سه آیین‌نامه، افزایش پریود اصلی سازه برای کاهش پاسخهای نیرویی و افزایش میرایی سازه برای کاهش جابجائیها می‌باشد.
- روشهای تحلیل مودی و تاریخچه زمانی آیین‌نامه‌های آشتو و یوروکد مشابه یکدیگر می‌باشد.
- میرایی مؤثر حدود ۳۰ % به عنوان مرز حالتهای مودی و تاریخچه زمانی می‌باشد.
- روش طیفی تک مودی آشتو و روش تحلیل طیفی مود اصلی یوروکد، براساس فرض سیستم خطی معادل می‌باشند که سختی مؤثر و میرایی مؤثر را در تغییرمکان طراحی در نظر می‌گیرند.
- روش طیفی آیین‌نامه‌ها مرز ۰/۸ پریود مؤثر را برای در نظر گرفتن تعداد مودها در نظر می‌گیرند. البته آیین‌نامه آشتو مودهای پایین‌تر را با میرایی ۵% در نظر می‌گیرد.
- روش تحلیل تاریخچه زمانی به عنوان کامل ترین روش برای پیدا کردن پاسخ سیستمها اشاره‌شده است که می‌تواند برای هر پلی بکاررود.
- در آیین‌نامه‌ها برای کنترل کرنشهای جداگرهای الاستومری ضوابطی وجود دارد که مقدار حداکثر مجاز کرنش فشاری در هر دو آیین‌نامه یکسان می‌باشد ولی میزان حداکثر کرنش برشی در آیین‌نامه یوروکد اندکی بیشتر از آیین‌نامه آشتو می‌باشد.
- در قسمت مربوط به نیروی مقاوم جانبی، میزان حداقل نیروی بازگرداننده در نصف جابجائی طراحی، در آیین‌نامه آشتو نصف میزان نظیر در یوروکد می‌باشد.
- در آیین‌نامه ژاپن مواردی که جداسازی لرزه‌ای اثر معکوس خواهد داشت مانند حالتی که خاک محل پتانسیل روانگرایی داشته باشد، یا زیرسازه پل انعطاف‌پذیري زیاد و پریود طبیعي بزرگی داشته باشد، یا مواردی که به علت نرمی خاک، امکان پدیده تشدید وجود داشته باشد، را به صراحت بیان کرده و از جداسازی لرزه‌ای در این حالتها بر حذر می‌دارد.

فصل ششم

تحلیل دینامیکی غیرخطي پلهای جداسازی شده

۶-۱- مقدمه

به منظور ارزیابی خواص لرزه‌اي انواع جداگرها، مطالب این فصل در چهار قسمت اصلی تنظیم شده است. ابتدا در فاز اول به تحلیل دینامیکی غیرخطی و ارزیابی چند مدل پل که با استفاده از جداگرهای مختلف طرح شده‌اند، پرداخته و سپس در بخش دوم با در نظر گرفتن پنج پل نمونه موجود، تحلیل‌های پارامتریک روی آنها انجام شده و در بخش سوم پس از طراحی جداسازی لرزه‌اي برای پلهای مزبور، تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی بر روی آنها صورت مي‌گیرد. مقایسه پاسخ لرزه‌اي پلهای جداسازی شده تحت تحریک یک و دو جهته زلزله نیز در قسمت آخر این فصل بررسی می‌گردد.

هدف از انجام فاز اول این فصل نشان دادن کارایی جداگرهای لرزه‌اي به صورت تحلیل عددی یک پل مفروض مي‌باشد. ابتدا نحوة مدل سازی پلهای مورد مطالعه بیان مي‌شود. پس از آن آنالیز غیرخطي تاریخچه زمانی تشریح می‌گردد. در ادامه نیز نمودار تاریخچه پاسخهای مورد نظر و جداول حاوی نتایج آنالیزها ارائه می‌گردد. در انتهای این بخش نیز، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی در پلهای جداسازی‌شده با دونوع جداگر انتخابی و پل جداسازی نشده مقایسه مي‌شود.

۲-۶- بررسی عددی کاربرد جداگرهای LRB و FPS

جداگرهای مورد بررسی از دو نوع رایج جداگرها مي‌باشند: یکی جداگر لاستیکی چند لایه با هسته سربی(LRB) و دیگری جداگر پاندول اصطکاکی(FPS). این جداگرها در ترکیب با مدل پل فرضی به کار گرفته شده‌اند و تحت اثر سه نوع زلزله که هر یک در دو جهت افقی بر سازه پل اثر می‌کند، آنالیز غیرخطي تاریخچه زمانی شده‌اند. جداگر لاستیکی چند لایه با هسته سربی به صورت مدل ایده آل هیسترتیک دو خطی در نظر گرفته شده که دارای خصوصیات غیرخطي در درجات آزادی برشی و خصوصیات خطی در سایر درجات آزادی مي‌باشد.

مدل غیرخطي براساس رفتار هیسترتیک ارائه شده توسط Wen (۱۹۷۶)، Park و همکاران (۱۹۸۶) و مدل بکار گرفته شده در آنالیز سازه جداسازی شده توسط Nagarajaiah و همکاران (۱۹۹۱) [۳۳] مي‌باشد. براساس این روش، پارامترهای مورد نیاز برای جداگر لاستیکی - سربی عبارتند از :

سختی مؤثر در حالت خطی (K_{eff}) در درجات آزادی با خصوصیات خطی، سختی اولیه در حالت غیرخطي(k_1) که در درجات آزادی با خصوصیات غیرخطي در نظر گرفته مي‌شود و منظور سختی اولیه جداگر در مدل ایده‌آل دو خطی مي‌باشد، مقاومت جاری شدن (F_y) و نسبت سختی پس از جاری شدن (k_2/k_1)، که دو پارامتر اخیر نیز در درجات آزادی با خصوصیات غیرخطي اعمال می شوند.

جداگر پاندول اصطکاکی به صورت مدل ایده آل پاندول اصطکاکی دو خطی در نظر گرفته شده که دارای خصوصیات غیرخطي در درجات آزادی برشی، سختی پس از لغزش در جهات برش ناشی از شعاع انحنای پاندول در سطوح لغزش، رفتار فقط فشاری در جهت محوری و خصوصیات سختی مؤثرخطی در درجات آزادی چرخشی مي‌باشد.

مدل اصطکاک براساس رفتار هیسترتیک ارائه شده توسط Wen (۱۹۷۶)، Park و همکاران (۱۹۸۶) و مدل بکار گرفته شده در آنالیز سازه جداسازی شده توسط Nagarajaiah و همکاران (۱۹۹۱) [۳۳] مي‌باشد. رفتار پاندولی نیز براساس روش Zayas و Low (۱۹۹۰)

مي‌باشد. نيروهای اصطكاک و پاندولی مستقيماً متناسب بانيروی محوری فشاری المان مي‌باشند كه اين المان قادر به تحمل نيروی محوری كشش مي‌باشد. براساس اين روش، پارامترهای مورد نياز برای جداگر پاندول اصطكاكی عبارتند از:

سختی مؤثر در حالت خطی(K_{eff}) در درجات آزادی با خصوصيات خطی، سختی اوليه در حالت غيرخطي(k_1) كه همان سختی اوليه جداگر در مدل دو خطی در درجات آزادی با خصوصيات غيرخطي مي‌باشد، ضريب اصطكاک سطح، شعاع انحنای سطح پاندولی (به شكل كروی).

۶-۲-۱- مدلسازی پلهای جداسازی شده

برای مدلسازی و تحليل تاريخچه زمانی غيرخطي پلهای جداسازی شده از نرم افزار SAP2000 Nonlinear [۳۹] استفاده شده است. الگوريتم بكار رفته در اين برنامه برای حل معادلات حركت، بسط روش FNA (Fast Nonlinear Analysis) مي‌باشد كه توسط ويلسون توسعه داده شده است. [Wilson (۱۹۸۹) و Ibrahimbegovic و Wilson(۱۹۹۳)]. روش FNA يک روش بسيار مؤثر و كارآمد مي‌باشد كه برای تحليل سيستم‌های سازه‌ای كه در اصل دارای رفتار الاستيک خطی مي‌باشند ولی در آنها از تعداد محدودی المان غيرخطي از پيش تعريف شده استفاده مي‌شود، بكارمي‌رود. در اين نرم افزار، فقط المانهای Nllink دارای رفتار غيرخطي مي‌باشند كه استفاده از اين روش بسيار مفيد است.

اين نرم افزار توسط Naeim و Kelly [۳۲] به عنوان يک نرم افزار قدرتمند در آنالیز ديناميكی سازه‌هايی كه دارای المانهای غيرخطي موضعی مي‌باشند، معرفی شده است. چون فرض بر اين است (طبق توصيه آيين‌نامه‌ها) كه المانهای روسازه و زيرسازه در پلهای جداسازی شده در محدوده خطی باقی می‌مانند، بنابراين در تحليل‌ها، المانهای زيرسازه يعنی پايه‌ها با استفاده از المان Frame كه دارای رفتار خطی مي‌باشد و المانهای روسازه يعنی شاهتيرهای طولی و ديافراگمهای عرضی عرشه نيز توسط المان Frame كه دارای رفتار خطی مي‌باشد و المان‌های عرشه پل نيز توسط المان Shell كه دارای رفتار خطی مي‌باشد، مدل شده‌اند.

تنها برای مدلسازی المانهای جداگر المانهای غیرخطيNllink استفاده شده است که برحسب نوع جداگر از المانهای Isolator 1 (rubber isolator) و (sliding isolator) Isolator 2 به ترتیب برای مدل کردن جداگرهای لاستیکی- سربی و جداگرهای پاندول اصطکاکی استفاده شده است که این المانها در حین یک آنالیز تاریخچه زمانی قادربه ارائه رفتار غیرخطي از خود مي‌باشند.

۶-۲-۲- مدلسازی پل جداسازی نشده

برای مقایسه پاسخهای لرزه‌اي پل جداسازی شده نسبت به حالت جداسازی نشده، بایستی مدل پل معمولی را نیز مدل کنیم تا بتوانیم نتایج حاصل را مقایسه کرده و کارآیی جداگرهای لرزه‌اي را ثابت کنیم. به منظور مقایسه بهتر و منطقی تر پاسخ پلهای جداسازی شده و نشده، المانهای پل جداسازی نشده نیز مانند پلهای جداسازی شده با استفاده از نرم افزار SAP2000 Nonlinear [۳۹] به صورت خطی مدل شده‌اند. برای مدلسازی روسازه و زیر سازه پل جداسازی نشده از همان المانهای Frame و Shell، استفاده شده است.

۶-۲-۳- رکوردهای زمین لرزه مورد استفاده در تحلیل

در آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی، بایستی از رکوردهای زلزله‌هایی که تا کنون رخ داده استفاده شود. به دلیل متفاوت بودن شدت، مدت و محتوای فرکانسی زلزله‌های مختلف، اثر آنها در پاسخ دینامیکی سازه‌ها متفاوت مي‌باشد. در این تحلیل‌ها، سه زلزله مختلف برای ارزیابی لرزه‌اي پل مورد نظر انتخاب شده‌اند که بدین ترتیب دامنه وسیعی از فرکانسها را پوشش می‌دهند. فعلا این زلزله‌ها با ماکزیمم شتاب ۰/۴g همپایه شده‌اند.

زلزله‌های مورد استفاده عبارتند از:

۱- زلزله ۱۹۴۰ ال سنترو با مؤلفه شمال – جنوب
۲- زلزله ۱۹۷۷ ناغان با مؤلفه طولی
۳- زلزله ۱۹۷۸ طبس با مؤلفه طولی (N16W)

۶-۲-۴- جزئیات مدلهای مورد تحلیل

پل مورد تحلیل که در سه حالت (در دو حالت جداسازی شده و در یک حالت جداسازی نشده) مورد بررسی قرار مي‌گيرد به صورت یک پل سه دهانه با دهانه‌های به طول ۱۵، ۲۰ و ۱۰ متر مي‌باشد که در دو انتها بر روی کوله واقع مي‌باشد. هر پایه میانی شامل۴ ستون دایروی بتن آرمه به قطر ۱/۰ متر مي‌باشند. ارتفاع هر ستون ۸ متر مي‌باشد که البته در حالتی که پل جداسازی شده باشد، به علت ضخامت جداکننده این ارتفاع مقداری کاهش مي‌یابد.

عرض پل ۱۱ متر مي‌باشد که از هر طرف ۱ متر به صورت طره مي‌باشد. عرشه پل به صورت دال بتنی به ضخامت ۱۵ سانتی متر مي‌باشد که در عرض پل در فواصل ۳ متری توسط شاهتیرهایی به عرض ۰/۴ متر و عمق ۱/۰ نگه داشته مي‌شود. جداگرها در تراز زیر عرشه و روی پایه‌ها و کوله‌ها قرار مي‌گيرد. یعنی۴ جداگر روی هر پایه میانی بوده و روی هر کوله نیز ۴ جداگر قرار مي‌گيرد.

جدول (۶-۱) مشخصات پل مورد نظر

طول کل پل	۴۵ متر
عرض پل	۱۱متر
اندازه دهانه‌ها	۱۵، ۲۰، ۱۰ متر
ارتفاع پایه‌ها	۸ متر
قطر هر ستون پایه	۱/۰ متر
ابعاد شاهتیرها	۰/۴ در ۱/۰ متر
ضخامت دال عرشه	۱۵ سانتی متر
سیستم عرشه	تیر و دال بتن آرمه

جدول (۶- ۲) مشخصات و پارامترهای جداگر لاستیکی LRB

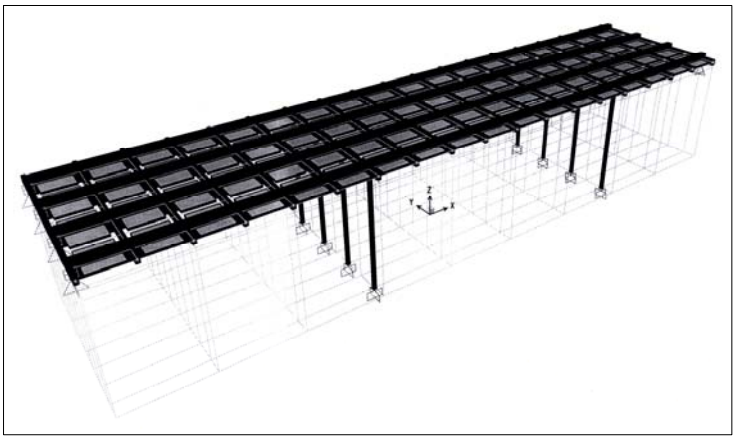
وزن	۲/۵ کیلو نیوتن
ابعاد	۰/۴ در ۰/۳ در ۰/۳ متر
تعداد	۱۶ عدد

درجه آزادی	سختی مؤثر در حالت خطی یا (KN/m) (KN.rad/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	-	-	-

جدول (۶- ۳) مشخصات و پارامترهای جداگر اصطکاکی FPS

وزن	۵ کیلو نیوتن
تعداد	۱۶ عدد
شعاع انحنای سطح تماس کروی	۲ متر
ضریب اصطکاک	۰/۰۵

درجه آزادی	سختی مؤثر در حالت خطی یا (KN/m) (KN.rad/m)	سختی اولیه در حالت غیرخطی (KN/m)
U1	۲،۰۰۰	۲،۰۰۰
U2	۱،۰۰۰	۱،۰۰۰
U3	۱،۰۰۰	۱،۰۰۰
R1	۲۰،۰۰۰	-
R2	۲،۰۰۰	-
R3	۲،۰۰۰	-



شکل (۶-۱) نمایی از مدل پل مورد تحلیل در نرم افزار SAP2000

۶-۲-۵- نتایج حاصل از تحلیل

جزئیات نتایج عددی تحلیل‌ها در جداول (۶-۴) تا (۶-۶) آمده است. با جداسازی پل پریود اصلی ارتعاش جانبی آن از ۰/۲۱ به ۱/۱۴ و ۱/۰۳ ثانیه به ترتیب برای جداسازی با و افزایش یافته و به همین دلیل نیروهای برشی در پایه‌ها و کوله‌ها با انحراف در انرژی ورودی به سازه پل کاهش یافته است.

جدول (۶-۴) نتایج حاصل از تحلیل درپل جداسازی شده با جداگر لاستیکی LRB

دوره تناوب اساسی	۱/۱۴ ثانیه
دوره تناوب مود دوم	۱/۱۲ ثانیه
دوره تناوب مود سوم	۰/۸۱ ثانیه
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله طبس)	۸۴۰ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله السنترو)	۱۳۸۷ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله ناغان)	۷۷۲ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله طبس)	۸۹۰ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله السنترو)	۱۴۶۰ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله ناغان)	۸۱۱ کیلو نیوتن

جدول (۶-۵) نتایج حاصل از تحلیل درپل جداسازی شده با جداگر اصطکاکی FPS

دوره تناوب اساسی	۱/۰۳ ثانیه
دوره تناوب مود دوم	۱/۰۱ ثانیه
دوره تناوب مود سوم	۰/۸۶ ثانیه
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله طبس)	۲۴۸۳ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله السنترو)	۲۳۰۶ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله ناغان)	۱۳۲۱ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله طبس)	۲۸۳۷ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله السنترو)	۲۷۴۰ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله ناغان)	۱۳۲۰ کیلو نیوتن

جدول (۶-۶) نتایج حاصل از تحلیل درپل جداسازی نشده

دوره تناوب اساسی	۰/۲۱ ثانیه
دوره تناوب مود دوم	۰/۱۹ ثانیه
دوره تناوب مود سوم	۰/۱۳ ثانیه
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله طبس)	۱۸۴۷ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله السنترو)	۱۹۳۹ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت طولی (زلزله ناغان)	۲۳۶۸ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله طبس)	۳۹۸۷ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله السنترو)	۸۰۷۰ کیلو نیوتن
ماکزیمم برش پایه جهت جانبی (زلزله ناغان)	۴۶۰۵ کیلو نیوتن

۶-۲-۶- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی

با دقت در نتایج حاصل از تحلیل پلهای جداسازی شده با انواع جداگرها ویل جداسازی نشده، مي‌توان نتیجه‌گیري کرد که جداسازی لرزه‌اي یک روش مؤثر و کارا در کاهش و توزیع متعادل نیروهای زلزله مي‌باشد که نیروها و جابجاییهای اجزای سازه را تا حد قابل قبولی کاهش

مي‌دهد؛ بنابراين مي‌توان در مناطق لرزه خيز با احتمال وقوع زلزله‌های بزرگ، از آنها استفاده كرد. مسلماً طرح دقيق جداگرها كه انتخاب دقيق مشخصه‌ها و پارامترهای انواع جداگرها مي‌باشد، در ميزان كارآيی آنها نقش اساسی دارد.

در اين مطالعه، با انتخاب پارامترهای مختلف دو نوع جداگر مورد بررسی، دوره تناوب اساسی پل در هردو حالت جداسازی شده، حدود ۵ برابر دوره تناوب اساسی پل در حالت جداسازی نشده مي‌باشد، به همين علت پاسخ سازه در هر دو حالت جداسازی شده تقريباً يكسان مي‌باشد. در اين ميان جداگر، تحت زلزله السنترو به علت اينكه در معرض محدوده وسيعتر فركانسها قرار مي‌گيرد بيشترين انرژی را دريافت می‌كند.

در پل جداسازی شده با FPS برش پايه جهت طولی نسبت به حالت جداسازی نشده تفاوت چندانی نداشته (وحتی افزايش داشته است) در حاليكه برش پايه جهت جانبی نسبت به حالت جداسازی نشده كاهش چشمگيری داشته است؛ اما در پل جداسازی شده با LRB برش پايه در هر دو جهت كاهش اساسی داشته است (برش پايه در حالتهای جداسازی شده تقريباً با ضريب بين ۲ تا ۵ كاهش مي‌يابد).

در پل جداسازی نشده به علت نسبت سختی زياد كوله به پايه (حدود ۳۰۰ برابر) نيروی برشی بزرگی به كوله‌ها مي‌رسد به طوری كه تقريباً هشتاد درصد برش پايه به كوله‌ها می‌رسد و سهم پايه‌ها اندک است. نقش و مزيت سيستم جداسازی اين است كه توزيع يكنواختی بين برش در پايه‌ها و كوله‌ها ايجاد می‌كند به نحوی كه سهم نيروی برش در پايه‌ها نسبت به حالت جداسازی نشده افزايش مي‌يابد (حدود ۶ برابر) ولی نيروی برشی در كوله‌ها تا ۵ برابر كاهش مي‌يابد و به اين ترتيب توازن بهتری بين نيروی برشی در پايه‌ها و كوله‌ها به وجود مي‌آيد و سطح نيروها در هر كدام در حد قابل قبول قرار مي‌گيرد. بنابر اين تاثير و اهميت جداسازی لرزه‌اي در حالتی است كه اختلاف سختی بين كوله‌ها وپايه‌ها و حتی اختلاف سختی بين پايه‌ها زياد باشد كه در اين حالت، جداگرها نقش توزيع يكنواخت نيروی زلزله بين پايه‌ها و كوله‌ها را بر عهده گرفته و نيروها را در سطح قابل قبول قرار می‌دهند. طبق تحليل‌های صورت گرفته به منظور بررسی نقش سختی پايه‌ها در يک حالت خاص نيز ارتفاع پايه‌ها از ۸ متر به ۳ متر تبديل شده

است. مشاهده مي‌شود که دوره تناوب این حالت نسبت به حالت قبل تفاوت چندانی نمی نماید، ولی چون نسبت سختی کوله به پایه کاهش اساسی نموده است، (نسبت سختی از ۳۰۰ به ۱۸ می‌رسد) در حالت جداسازی نشده نیروی برش در کوله‌ها چندین برابر کاهش مي‌یابد و نیروی برش در پایه‌ها افزایش مي‌یابد بنابراین نقش جداسازی لرزه‌اي توزیع یکنواخت تر نیروی زلزله بین پایه‌ها و کوله‌ها مي‌باشد که نسبت به حالت قبل تفاوت چندانی نمی‌نماید.

۶-۳- تحلیل پارامتری پلهای نمونه موجود با تغییرات مشخصات جداگرها

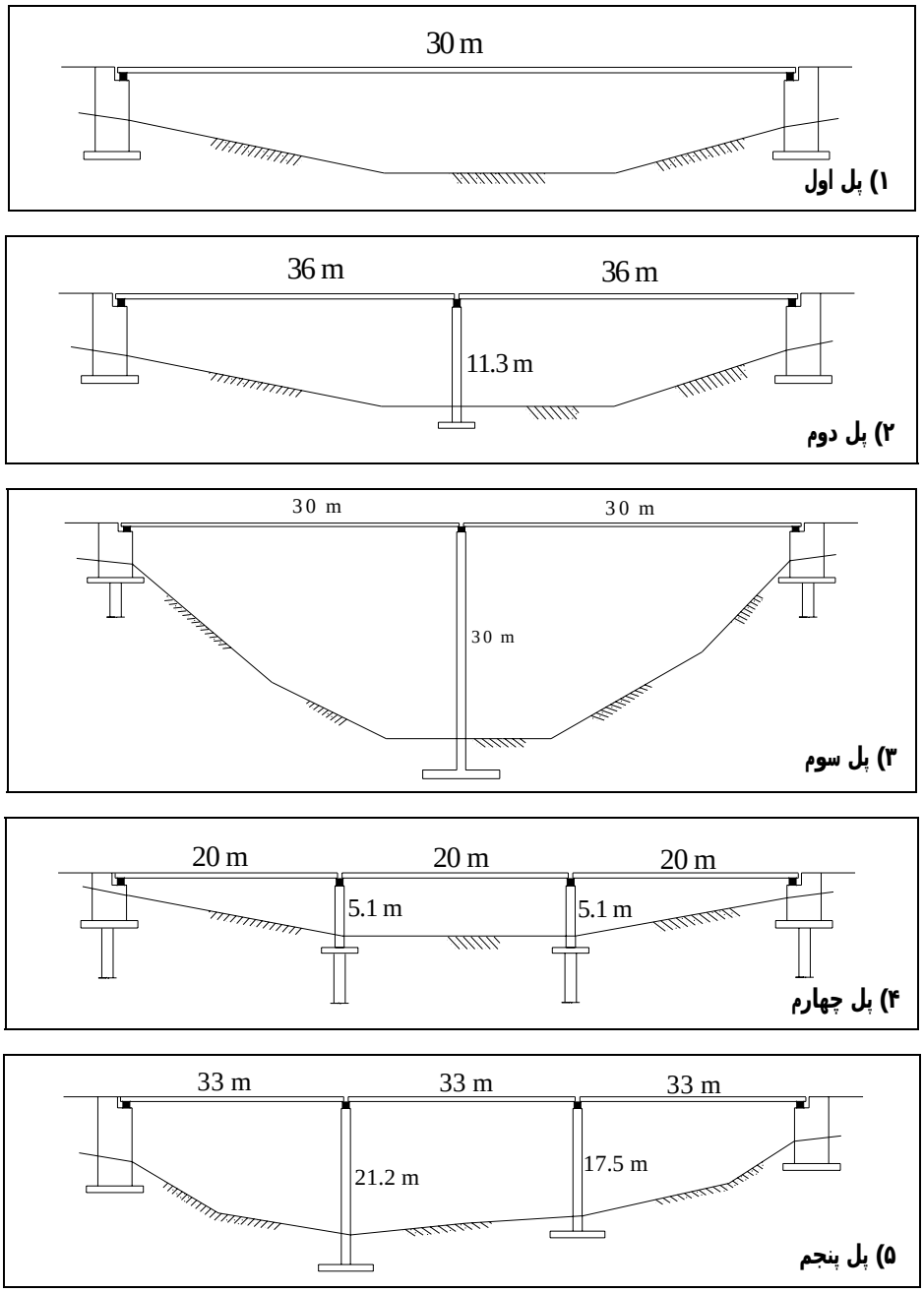
۶-۳-۱- کلیات و روش تحلیل

در این قسمت به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف جداگرهای لرزه‌اي الاستومری بر پاسخ دینامیکی پلها و کارآیی انواع مختلف پلهای موجود در کشور، تعداد پنج پل با مشخصات متفاوت بررسی و تحلیل پارامتري شده است. این مشخصات شامل تعداد و طول دهانه‌ها، ارتفاع پایه‌ها، جنس شاهتیرها، تعداد و فواصل شاهتیرها، تعداد ستونهای پایه‌های میانی و نوع پی مي‌باشد. این پلها ابتدا در حالت معمولی، یعنی حالت جداسازی نشده مورد تحلیل قرار گرفته‌اند و پاسخهای نیرو و تغییر مکان آنها بدست آمده است. سپس هر پل را با اعمال جداگرهای مختلف الاستومری، تحلیل کرده و پاسخها را بدست آورده‌ایم. شتابنگاشتهای مورد استفاده مربوط به زلزله‌های طبس، السنترو و آب بر (منجیل) مي‌باشند. علت انتخاب این جداگرها این است که بر اساس آیین‌نامه طرح پلهای راه و راه‌آهن ایران و آیین‌نامه آشتو بایستی سه شتابنگاشت که با خصوصیات زمین شناسی، تکنونیکی، لرزه شناسی محل مشابهت داشته باشند، انتخاب نمود. از طرف دیگر باید مدت زمان حرکت شدید آنها حداقل برابر ده ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه، هر کدام که بیشتر است، باشد؛ حال چون زمان تناوب اصلی پلها اندک است، زمان ده ثانیه کنترل می‌کند. بنابراین زلزله‌های طبس و آب بر، بر این اساس انتخاب شده‌اند و اینکه محتوای فرکانسی آنها متفاوت مي‌باشد. زلزله السنترو را نیز به علت اینکه زلزله‌اي است که اکثر محققین در کارهای تحقیقاتی از آن استفاده

نموده‌اند، انتخاب شده است. سپس شتابنگاشتها و طیف طرح آیین‌نامه پل ایران (که با توجه به قدیمی بودن آیین‌نامه پل و احتمال تغییر آن مطابق استاندارد ۲۸۰۰) از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. در به مقیاس در آوردن شتابنگاشتها، شتاب مبنا (A) برابر ۰/۳۵ (خطر نسبی زلزله خیلی زیاد)، ضریب اهمیت پل برابر ۱/۲ و ضریب رفتار پل برابر ۶ (برای جهت عرضی پلهای با پایه‌های میانی چند ستونی با فرضی رفتار خطی) در نظر گرفته شده است.

سپس براساس آیین‌نامه، طیف پاسخ هر شتابنگاشت باید به گونه‌اي به مقیاس درآید که پس از اعمال ضرایب فوق در محدوده T -۰/۵ تا T +۰/۵ (T برابر دوره تناوب موثر سازه مي‌باشد) با طیف طرح آیین‌نامه مطابقت نماید. بنابراین شتابنگاشت زلزله طبس با شتاب حداکثر ۰/۸۹۴g، در حالت مقیاس شده دارای شتاب حداکثر ۰/۴۰g، شتابنگاشت زلزله السنترو با شتاب حداکثر ۰/۳۷۶g در حالت مقیاس شده دارای شتاب حداکثر ۰/۳۰g و شتابنگاشت زلزله آب بر با شتاب حداکثر ۰/۴۹۸g در حالت مقیاس شده دارای شتاب حداکثر ۰/۳۸g مي‌باشند. حال پس از مقیاس شدن شتابنگاشتها، برای رفتار غیرخطی سازه را تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می‌کنیم.

به منظور مقایسه پاسخهای پلها در حالتهای جداسازی نشده، همان شتابنگاشتها با مقیاسهای جدید به سازه جداسازی شده نیز اعمال شده است. در این بخش سعی شده است با تغییر پارامترهای اساسی در جداگرهای الاستومری که امکان ساخت و توسعه آنها در کشور بیش از سایر جداگرهاست، طیفی از جداگرهای الاستومری پوشش داده شده و تاثیر و کارایی آنها بررسی گردد. پارامترهای اصلی در هر جداگر الاستومری عبارتند از: سختی جانبی اولیه حالت خطی، سختی حالت غیرخطی (یا نسبت سختی ثانویه به اولیه) و نیروی تسلیم (حد جاری شدن). سپس هر پل را با جداگرهایی که این پارامترها در آن متغیر بوده‌اند، تحلیل و بررسی شده است.



شکل (۶- ۲) نمودار شماتیک دوبعدی پلهای نمونه مورد تحلیل

جدول (۶- ۷) مشخصات پلهای تحلیل و بررسی شده

	پل اول	پل دوم	پل سوم
نام پل	امامزاده هاشم	سید آباد	حسینیها
موقعیت پل	محور هراز	راه رودهن- فیروزکوه	راه رامهرمز- بهبهان
نوع پل	دهانه ساده	دهانه ساده	دهانه ساده
تعداد دهانه‌ها	۱ دهانه	۲ دهانه	۲ دهانه
طول دهانه‌ها	۳۰ متر	۳۶ متر	۳۰ متر
عرض پل	۱۴/۶ متر	۱۱/۸ متر	۱۱/۸ متر
نوع عرشه	تیر- دال	تیر- دال	تیر- دال
ضخامت دال	۲۰ cm	۲۰ cm	۲۰ cm
نوع شاهتیرها	تیرورق فولادی	تیر پیش‌ساخته بتن‌مسلح	تیرورق فولادی
تعداد شاهتیرها	۷ عدد	۸ عدد	۴ عدد
فواصل شاهتیرها	۲/۱ متر	۱/۴۵ متر	۳ متر
ابعادجان شاهتیرها	۱۰mm * ۱۵۵۵	۰/۲ * ۱/۴ متر	۱۲ mm *۲۰۰۰
ابعادبال شاهتیرها	۲۵ mm * ۶۰۰	۰/۲ * ۰/۶ متر	۳۰ mm * ۵۰۰
نوع پایه‌های میانی	-	چند ستونی	چند ستونی
تعداد ستونهای هرپایه	-	۲ عدد	۳ عدد
ارتفاع پایه‌ها	-	۱۱/۳ متر	۳۰ متر
ابعاد مقطع هر ستون	-	دایره به قطر ۱/۵ متر	دایره به قطر ۱/۵ متر
نوع کوله‌ها	بسته با دیوار برگشتی	بسته با دیوار برگشتی	بسته با دیوار برگشتی
نوع پی	سطحی	سطحی	عمیق
ارتفاع تیر سرستون	-	۲/۵ متر	۱/۴ متر
عرض تیر سرستون	-	۲ متر	۱/۹ متر
دیافراگم عرضی	به فواصل ۱۰ متری	به فواصل ۱۲ متری	به فواصل ۱۰ متری
وزن عرشه	۳۰۰۰ KN	۱۱۰۰۰ KN	۵۰۰۰ KN

ادامه جدول (۶- ۷) مشخصات پلهای تحلیل و بررسی شده

	پل چهارم	پل پنجم
نام پل	میاندورود	پل راه تهران- رودهن
موقعیت پل	مسیر لنگرود - رامسر	کیلومتر ۳۰۰ +۳۰
نوع پل	دهانه ساده	دهانه ساده
تعداد دهانه‌ها	۳ دهانه	۳ دهانه
طول دهانه‌ها	۲۰ متر	۳۳ متر
عرض پل	۱۱/۸ متر	۱۱/۸ متر
نوع عرشه	تیر- دال	تیر- دال
ضخامت دال	۲۰ cm	۲۰ cm
نوع شاهتیرها	تیر پیش ساخته بتن مسلح	تیر پیش ساخته بتن مسلح
تعداد شاهتیرها	۸ عدد	۵ عدد
فواصل شاهتیرها	۱/۴ متر	۲/۵ متر
ابعادجان شاهتیرها	۰/۲ * ۱/۴ متر	۰/۲ * ۱/۸ متر
ابعاد بال شاهتیرها	۰/۱۵ *۰/۶ متر	بالا ۰/۱۵* ۰/۰ متر و پایین ۰/۲۵*۰/۷ متر
نوع پایه‌های میانی	چند ستونی	چند ستونی
تعداد ستونهای هرپایه	۳ عدد	۴ عدد
ارتفاع پایه‌ها	۵/۱ متر	یک ردیف ۱۷/۵ متر و دیگری ۲۱/۲ متر
ابعاد مقطع هر ستون	دایره به قطر ۱/۲ متر	۱/۵ * ۲/۵ متر
نوع کوله‌ها	بسته با دیوار برگشتی	بسته با دیوار برگشتی و پشت‌بند
نوع پی	عمیق	سطحی
ارتفاع تیر سرستون	۱/۱۵ متر	۲/۵ متر
عرض تیر سرستون	۲ متر	۲/۵ متر
دیافراگم عرضی	به فواصل ۱۰ متری	به فواصل ۱۱ متری
وزن عرشه	۹۰۰۰ KN	۱۴۰۰۰ KN

۶-۳-۲- نتايج تحليل‌های انجام شده

براساس تحليل‌های صورت گرفته، مي‌توان نتايج زير را خاطر نشان كرد:

با افزايش سختی اوليه جداگرها دوره تناوب اصلی سازه كه در حالت جداسازی شده همان مود انتقال جانبی مي‌باشد، كاهش مي‌يابد؛ بنابراين برش پايه سازه، افزايش مي‌يابد و به برش پايه حالت جداسازی نشده نزديک مي‌شود؛ اين وضعيت در پلهای اول و چهارم ديده مي‌شود. در ساير پلها روند خاصی در كاهش يا افزايش ديده نمي‌شود كه به خاطر اين است كه ميزان انتقال دوره تناوب سازه به نحوی بوده است كه لزوماً با افزايش دوره تناوب، با توجه به طيف زلزله، پاسخ نيرويی روند خاصی را طی نمی‌كند ولی اختلاف بين نيروها بسيار اندک مي‌باشد. البته با توجه به شتابنگاشتهای استفاده شده و نوع پل، ميزان كاهش برش پايه و تاثير پل از افزايش سختی اوليه متفاوت مي‌باشد؛ در پل اول ميزان كاهش برش پايه در حالت جداسازی شده تحت زلزله السنتر و نسبت به دو زلزله ديگر كمتر مي‌باشد، زيرا پل اول به علت سختی جانبی بسيار زياد خود، در محدوده‌ای از طيف السنتر و قرار مي‌گيرد كه پاسخ نيرويی اندكی توليد می‌كند كه با افزايش دوره تناوب اختلاف بين پاسخها چندان نمي‌باشد ولی در دو زلزله ديگر اين اختلاف مشهودتر است. در ساير پلها كه سختی جانبی به نسبت كمتری دارند و دوره تناوب جانبی بيشتری دارند، برش پايه در حالت جداسازی نشده بسيار بيشتر از حالتهای جداسازی شده مي‌باشد و ميزان كاهش آن نيز در هر سه زلزله تقريبا يكسان مي‌باشد. پس در ميزان كاهش برش پايه، هم دوره تناوب جانبی مهم مي‌باشد و هم نوع شتابنگاشت.

در پلهايی كه سختی جانبی پايه‌های ميانی در آنها به نسبت كمتر است (ارتفاع ستونها زياد است مثل پل سوم و پنجم) ميزان كاهش نيروی برشی در پايه‌های ميانی در حالتهای جداسازی شده نسبت به حالت معمولی كمتراز پلهای ديگر است. علت اين است كه نقش جداسازی لرزه‌اي در اين پلها توازن پاسخهای نيرو بين اجزای مختلف زير سازه مي‌باشد، بنابراين در اين پلها با كاهش قابل ملاحظه نيروی برشی در كوله‌ها به

خاطر کاهش زیاد برش پایه مواجه می‌شویم. پس در پلهای با سختی کمتر پایه‌های میانی نقش جداسازی کاهش نیروها در کوله‌ها و در نتیجه توازن بین پاسخ نیروها در اجزای زیر سازه (کوله‌ها و پایه‌های میانی) مي‌باشد.

با اعمال جداگرهای لرزه‌اي پاسخهای جابجائی سازه افزایش مي‌یابد ولی جابجای نسبی ستونها در پایه‌های میانی در حالت جداسازی شده کمتر مي‌باشد، این وضعیت بسته به نوع پل و نوع شتابنگاشت متغیر مي‌باشد. هر چه پل دارای پایه‌های بلندتری باشد، این میزان کاهش کمتر مي‌شود.

هر چه سختی اولیه جداگرها افزایش یابد، نیروی برشی تولید شده درآنها افزایش مي‌یابدو در نتیجه جابجائی حداکثر آنها افزایش مي‌یابد، که منجر به افزایش جابجائی جانبی عرشه مي‌شود، بنابراین با توجه به محدودیت درجابجائی حداکثر عرشه، می‌بایست از جداگری با سختی اولیه مناسب استفاده نمود.

با افزایش نیروی تسلیم (حد جاری شدن) جداگرها، نیروی برشی بیشتری در جداگرها تولید شده، در نتیجه نیروی افقی بالای ستونها افزایش یافته، برش در پایه‌های میانی و کوله‌ها بیشترمي‌شود و جابجایی جانبی سر پایه‌ها افزایش مي‌یابد و همچنین جابجائی حداکثر عرشه افزایش مي‌یابد.

هر چه نیروی تسیلم جداگر افزایش یابد، با سختی اولیه یکسان، با جابجائی حداکثر کمتری مي‌توان به میرایی واحدی رسید؛ بنابراین جداگرهای لاستیکی با میرایی بالا در قبال تولید میرایی یکسان، در مقایسه با جداگرهای لاستیکی با میرایی پایین، جابجائی کمتری ایجاد مي‌کنند که از این جهت دارای مزیت مي‌باشند.

هرچه نسبت سختی ثانویه به اولیه افزایش یابد، با سختی اولیة یکسان، نیروی برشی تولید شده در جداگرها افزایش یافته و در نتیجه نیروی برش تولید شده دراجزای زیرسازه و به تبع آن برش پایه افزایش مي‌یابد. هرچه سختی اولیه جداگر بیشتر باشد، این افزایش بیشتر خواهد بود. بدین ترتیب حداکثر تغییر مکان جداگرها غالباً کاهش مي‌یابد؛ بنابراین مي‌توان جابجائی‌ها را کنترل نمود.

مي‌توان نتيجه‌گيري نمود كه هر چه پل داراى سختى جانبى بيشترى باشد و در نتيجه داراى دوره تناوب كوچكترى باشد، بازده جداسازى لرزه‌اي بيشتر است. براى پلهاى بررسى شده كه با دهانه‌هاى حدود ۲۰ تا ۳۶ مي‌باشند، جداگرهاى لرزه‌اي مؤثر و كارآمد مي‌باشند. البته هرچه پايه‌ها و دهانه‌ها كوتاهتر باشند، تأثير جداسازى بيشتر است.

۶-۴- طراحی جداسازی لرزه‌اي براى پلهاى نمونه و بررسی عملكرد آنها

۶-۴-۱- مقدمه

در هر كار مهندسى، نخست بايد درک صحيحى از پارامترهاى مؤثر در آن داشت، سپس با توجه به تمام عوامل تأثيرگذار، اقدام به طراحى، مدلسازى و تحليل نمود. مدلسازى مهمترين بخش هر كار را تشكيل مى‌دهد، زيرا بر اساس يک مدل دقيق كه پارامترهاى مهم را به درستى منعكس مى‌نمايد، مى‌توان تحليل وطراحى را استوار نمود.

پلها از جمله سازه‌هايى هستند كه از اجزاء متنوع زياد با فراوانى كم تشكيل شده‌اند و به دليل خاص بودن عناصر موجود و اهميت آنها در رفتار پل، طراحى و مدل‌سازى، توجه و دقت ويژه‌اى را مى‌طلبد. به عنوان مثال يک پل ساده شامل اين اجزاء است: عرشه شامل دال، شاهتيرهاى طولى، تيرهاى عرضى، درزهاى انبساط، رويه آسفالتى؛ پايه‌هاى ميانى شامل ستون، پى، شمع، تير سرستون؛ كوله‌ها شامل ديوارهاى نگهدارنده، ديوارهاى برگشتى، پى؛ قطعات نشيمنگاهى و در صورت وجود، جداگرهاى لرزه‌اى. از سوى ديگر مسائلى نظير زاويه ميل پل با امتداد ستونها در پلهاى كج، انحناى پل، شيب، اختلاف ارتفاع پايه‌ها و طول دهانه‌هاى مجاور، رفتار غيرخطى چه مادى و چه هندسى، رفتار خطى و غيرخطى جداگرها نيز عواملى هستند كه بر رفتار و عملكرد پل تأثيرگذارند. بديهى است كه شركت دادن تمامى اين عوامل در يک مدل، گاهى سبب پيچيده و غيركاربردى شدن آن مى‌گردد؛ بنابراين بايستى ابتدا پارامترها و عناصر

اصلی را که دارای بیشترین اهمیت می‌باشند، شناسایی و مدل‌سازی نمود، سپس بسته به مورد، عوامل مؤثر دیگر را نیز به مدل افزود.

همان طور که در فصل سوم نیز بیان شد، چندین نوع جداگر لرزه‌ای تا به امروز ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هریک خواص و کاربرد خاصی دارند. با توجه به امکانات کشور و هزینه‌های مرتبط با جداگرهای لرزه‌ای، امکان ساخت و تولید همه آنها در کشور فراهم نیست. از طرف دیگر مدتهاست که تکیه‌گاههای نئوپرن برای تحمل نیروهای درون عرشه پل مثل نیروهای حرارت و ترمز مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف از انجام این تحقیق آن است که بر اساس مطالب گفته شده در فصل دوم، به عنوان راهکار بهسازی لرزه‌ای، بتوان نئوپرنهای موجود را با جداگرهای لرزه‌ای الاستومری جایگزین نمود که نقش کنترل‌کننده پل را در کاهش نیروهای زلزله وارده برعهده بگیرند تا بتوان ایمنی پلهای موجود را افزایش داد و همچنین با به کار بردن آنها در طراحی پلهای جدید، بتوان به طرحهای اقتصادی‌تری رسید.

برای بررسی و ارزیابی خواص لرزه‌ای جداگرهای الاستومری وبه منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف این جداگرها بر پاسخ دینامیکی پلها و نحوه عملکرد انواع مختلف پلها، تعداد پنج پل بزرگراهی موجود را که در سالهای اخیر طراحی و اجرا شده‌اند و دارای مشخصات متفاوت با یکدیگر می‌باشند، بررسی و تحلیل شده‌اند. این مشخصات شامل تنوع درتعداد و طول دهانه‌ها، ارتفاع پایه‌ها، جنس شاهتیرها، تعداد و فواصل شاهتیرها، تعداد ستونهای پایه‌های میانی و نوع پی می‌باشد.

روش کار چنین است که ابتدا بر اساس روش بار یکنواخت آیین‌نامه آشتو، برای هر پل، چهارجداگر با خصوصیات مختلف از لحاظ ابعاد هندسی، تعداد لایه‌ها و پارامترهای تحلیلی، طراحی اولیه شده‌اند. سپس هر پل با اعمال این جداگرها تحت تأثیر سه جفت شتابنگاشت مختلف زلزله، تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی شده‌اند. بر اساس نتایج تحلیل‌ها طراحی اولیه اصلاح شده است و جداگرها با ابعاد نهایی به دست آمده‌اند. در این تحلیل‌ها، تأثیر پارامترهای مختلف جداگرها مانند سختی برشی حالت الاستیک، سختی پس از جاری شدن و نیروی‌تسلیم (حد جاری‌شدن) آنها در رفتار و پاسخ لرزه‌ای پلها بررسی شده است. سپس هر پل در حالت

معمولی (جداسازی‌نشده) نیز تحلیل شده‌است تا ضمن مقایسه نتایج حاصل از دو حالت، بتوان کارآیی و مزیت کاربرد جداسازی لرزه‌ای را نشان داد.

۶-۴-۲- طراحی جداگرهای لرزه‌ای الاستومری

برای طراحی و تحلیل جداگرهای لرزه‌ای دانستن پارامترهایی مثل نیروی وارده، جابجائی حداکثر و کمیتهای سختی حالت الاستیک (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 دربرمی‌گیرند. به همین علت در طراحی، این پارامترها در محدوده‌ای انتخاب شده‌اند که بتوان رفتار واقعی جداگرهای الاستومری را پیش‌بینی نمود. دومین گام، خصوصیات مربوط به میرایی جداگرها می‌باشد که نقش کنترل کننده پاسخهای جابجائي لرزه‌ای پل را بر عهده دارد. هدف معمول طرح جداسازی لرزه‌ای، کاهش نیروها در سازه و پی می‌باشد. این امر را می‌توان با استفاده از سیستم جداسازی‌شده با دوره‌تناوب بیشتر به‌دست آورد. اما هزینه را در جابجائیهای بزرگ در سطح جداگر باید پرداخت. با افزایش میرایی، جابجائیها را تا حدی می‌توان کاهش داد، اما در روش بار یکنواخت که فرض می‌کند سیستم را می‌توان با دقت کافی با یک سیستم خطی با میرایی ویسکوالاستیک مدل نمود، یک رابطه اساسی بین نیرو و جابجائی موجود است که نیروی کوچکتر دربردارنده جابجائی بزرگتر می‌باشد[۴۲]. طراح از بین ترکیبات مختلف نیرو/ جابجائی، ترکیبی را که قابل قبول بداند انتخاب می‌کند.

این فلسفه با روش طرح سازه‌های معمولی متفاوت است که در آن، باسازه‌ای مواجه هستیم که خصوصیات سختی آن تغییرناپذیر بوده و بایستی نیروها و جابجائیها را بر اساس آن محاسبه نمود. مزیت این روش در این است که تحلیل را به نسبت آسان نموده و چون یک طیف را از قبل تعیین نموده است، دیگر مشکل انتخاب شتابنگاشت مناسب را ندارد. اما عیب این روش و روشهای طیفی تک‌مودی و چندمودی فقدان دقت کافی در ارائه پاسخ صحیح سیستم می‌باشد؛

به همین علت، تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی انجام شده، این عیب را برطرف می‌نمایند. از طرف دیگر، خصوصیات جداگرها به واسطه تفاوتهای در ساخت، سن، خستگی، درجه حرارت و عوامل دیگر تغییر می‌کند و این تغییرات ممکن است دوره تناوب مؤثر یا میرایی سیستم را تغییر دهند، بنابراین در پاسخ سیستم تأثیر خواهند گذاشت. به همین علت، در این بررسی، محدوده‌ای از پارامترهای مختلف مؤثر در جداگرهای لرزه‌ای الاستومری در نظرگرفته شده که بتوان رفتار لرزه‌ای انواع جداگرها را مورد تجزیه و تحلیل قرارداد. البته باید خاطرنشان کرد که به دنبال طراحی انجام گرفته، صرفاً جداگرهای لرزه‌ای الاستومری در مدل پلها استفاده و تحلیل شده‌اند.

ابتدا بر اساس روش بار یکنواخت آشتو، بنا بر فرضیات صورت‌گرفته، چهار جداگر برای هر پل با نامهای a، b، c و d طرح می‌شود. سپس بر اساس تحلیل‌های تاریخچه زمانی که در بخش بعدی خواهد آمد، طرح اولیه نهایی می‌گردد. در طراحی جداگرها فرض شده است که پلها در مناطق با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد بوده وخاک محل پل نیز از جنس خاک نسبتاً سخت می‌باشد؛ بنابراین مقدار شتاب مؤثر A برطبق آشتو[۱] برابر ۰/۴ ومقدار S_i نیز براساس جدول (۶-۱) برابر ۱/۵ می‌باشد. روش طراحی به صورت گام به گام به این شرح است:

۱- فرض ابتدایی برای سختی اولیه برشی (K_U)، سختی ثانویه (K_d)، نیروی تسلیم (F_y) و جابجائی ماکزیمم جداگر (d).

۲- برای هرجداگر، سختی مؤثر k_{eff} از رابطه (۶-۱) محاسبه شده و سختی مؤثر کل سازه جداسازی‌شده K_{eff} که ترکیب سختی همه جداگرها و سختی زیرسازه (k_{sub}) می‌باشد، طبق رابطه (۶-۲) محاسبه می‌گردد:

$$k_{eff} = [F_y + K_d (d - F_y / K_U)] / d \qquad (۱-۶)$$

$$K_{eff} = \sum \left(\frac{K_{sub} \times k_{eff}}{K_{sub} + k_{eff}} \right) \qquad (۲-۶)$$

۳- محاسبه پریود مؤثرکل سازه جداسازی‌شده T_{eff} از رابطه (۶-۳) و تعیین ضریب میرایی B از رابطه (۶-۴) که Wوزن پل، g شتاب ثقل، A ضریب شتاب و S_i ضریب ساختگاه برای طراحی جداسازی لرزه‌اي هستند.

$$T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{W}{K_{eff}\,g}} \qquad (۶-۳)$$

$$d = \frac{250AS_iT_{eff}}{B}\ (\text{mm}) \qquad (۶-۴)$$

۴- محاسبه میرایی ویسکوز معادل β از رابطه (۶-۵) (EDC سطح محصور در نمودار هیسترتیک جداگر و d_i جابجائی حداکثر جداگرi ام مي‌باشد)،

$$\beta = \frac{1}{2\pi} * \frac{EDC}{\sum(k_{eff}d^2{}_i)} \qquad (۶-۵)$$

۵- با توجه به میرایی ویسکوز معادل، تعیین B از جدول (۶-۲)

۶- مقایسه مقدار B در گام ۳ با ۵

۷- در صورت مغایرت مقدار B در دو گام بالا، تغییر فرض اولیه جابجائی حداکثر d و تکرار گامهای فوق برای همگراشدن جواب.

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 (۵-۴) تا (۶-۵) ارضاء شوند. بر اساس توصیه مرجع [۴۱] مقدار ضریب شکل S بین هشت تا دوازده انتخاب می‌شود تا نسبت سختی قائم به سختی افقی جداگر حدود ۴۰۰ باشد. همچنین رابطه ساده شده زیر را می‌توان استفاده کرد [۴۲] :

$$\gamma_c = \sigma/\,(GS) \qquad (۶-۶)$$

که در آن 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) می‌باشند. در عمل مدول برشی الاستومرها بین KN/m^2 ۳۰۰ تا KN/m^2 ۲۰۰۰ می‌باشد [۱۵]. 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 [۱۵].

۹- بر اساس طراحی اولیه جداگرها، مطابق مراحل ارائه شده در بخش ۶-۴-۳ با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، مقدار d_t که برابر تغییرمکان حداکثر جداگر بر اثر زلزله می‌باشد، 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- درنهایت بایدکنترل کرد که سختی الاستیک K_U از رابطه (۶-۷) کمتر نشود: [۱۵]

$$K_s = G\ A\ /T_r \qquad (۶-۷)$$

همچنین سختی قائم جداگر از رابطه (۶-۸) محاسبه می‌شود که به قدر کافی (از مرتبه S^2 ۴ حدود ۴۰۰ برابر) از سختی افقی بیشتر می‌باشد:

$$K_v = E_c\ A\ /\ T_r \qquad (۶-۸)$$

که در آن E_c مدول فشاری لحظه‌ای الاستومر[1] می‌باشد و برای جداگرهای مستطیلی از رابطه (۶-۹) محاسبه می‌شود:

$$E_c = 4\ G\ S^2 \qquad (۶-۹)$$

مشخصات تحلیلی و هندسی جداگرهای مورد استفاده در این پلها در جدولهای (۶-۸) تا (۶-۱۷) آمده است. لازم به ذکر است که مشخصات تحلیلی جداگرها (جدول ۶-۱۸) طوری در نظر گرفته شده است که بتوان مقایسه‌ای بین آنها انجام داد. در این جدولها، K_U سختی اولیه

1- Instantaneous compression modulus

جداگر (سختی حالت الاستیک)، G مدول برشی جداگر، F_y نیروی‌تسلیم یا حد جاری شدن، K_d / K_U نسبت سختی ثانویه (پس از جاری شدن) به سختی اولیه، K_v سختی قائم جداگر، w بار قائم وارد بر هر جداگر، d_t جابجائی طرح جداگر (برای نیروهای لرزه‌ای حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی)، K_{eff} سختی مؤثر پل جداسازی‌شده، T_{eff} دوره تناوب پل جداسازی شده، β نسبت میرایی ویسکوز معادل، S ضریب شکل جداگر، 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 می‌باشد. همچنین γ_c ، γ_r و γ_s به ترتیب کرنش برشی ناشی از فشار بار قائم، کرنش برشی ناشی از دوران و کرنش برشی ناشی از تغییرمکان لرزه‌ای می‌باشند. طبق بخش ۶-۲-۱۱ مقدار γ_c بایستی کمتر از ۲/۵ و ستون مربوط به رابطه ۵- ۶ (مجموع کرنشهای برشی) نیز بایستی کمتر از ۵/۵ باشد.

در هر پل با توجه به تعداد شاهتیرها، تعداد جداگرها تعیین شده است به گونه‌اي که در محل کوله‌ها زیر هر شاهتیر یک جداگر قرار گرفته و در محل پایه‌های میانی با توجه به اینکه دهانه‌های پل ساده می‌باشند، انتهای هر شاهتیر روی یک جداگر قرار می‌گیرد. در ادامه جدولهای مشخصات و پارامترهای طراحی، هندسی و تحلیلی جداگرهای استفاده شده در پلها آورده می‌شود.

جدول (۶- ۸) پارامترهای طراحی جداگرها در پل اول (تعداد کل جداگرها = ۱۴)

نوع جداگر	w (KN)	d_t (cm)	K_{eff} (KN/m)	T_{eff} (sec)	β (%)	S
a	۲۱۴	۱۲/۵	۶۳۸۴	۱/۵	۱۰	۱۲/۵
b	۲۱۴	۱۱	۱۰۹۳۴	۱/۳	۱۵	۱۱/۵
c	۲۱۴	۱۰	۱۵۲۶۰	۱/۰۰	۱۰	۱۱/۳
d	۲۱۴	۶	۲۶۳۶۲	۰/۹۰	۲۰	۱۱/۳

جدول (۶- ۹) مشخصات هندسی جداگرها در پل اول (تعداد کل جداگرها = ۱۴)

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 ۲۳-۶
a	۳۵	۳۵	۱۲/۴	۷	۹/۸	۲	۱۴	۱/۱	۰/۴	۱/۲	۲/۵
b	۳۵	۳۰	۱۱/۵	۷	۹/۱	۲	۱۳	۱/۰	۰/۵	۱/۱	۲/۳
c	۴۵	۴۵	۱۱/۴	۱۰	۹/۰	۳	۹	۰/۹	۰/۵	۱/۱	۲/۳
d	۴۵	۴۵	۱۰/۱	۱۰	۸/۰	۳	۸	۰/۷	۰/۵	۰/۷	۱/۷

جدول (۶-۱۰) پارامترهای طراحی جداگرها در پل دوم (تعداد کل جداگرها = ۳۲)

نوع جداگر	w (KN)	dt (cm)	Keff (KN/m)	Teff (sec)	β (%)	S
a	۴۴۷	۲۵	۸۲۱۸	۲/۳	۱۲	۱۱/۳
b	۴۴۷	۲۳	۱۴۸۰۶	۱/۷	۱۴	۱۰/۶
c	۴۴۷	۱۵	۲۲۸۸۷	۱/۴	۱۰	۱۱/۸
d	۴۴۷	۱۲	۳۱۷۸۱	۱/۲	۱۷	۱۱/۸

جدول (۶-۱۱) مشخصات هندسی جداگرها در پل دوم (تعداد کل جداگرها = ۳۲)

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 ۲۳-۶
a	۴۵	۴۵	۱۹/۲	۱۰	۱۵	۳	۱۵	۱/۱	۰/۵	۱/۷	۳/۰
b	۴۵	۴۰	۱۷/۹	۱۰	۱۴	۳	۱۴	۱/۰	۰/۶	۱/۶	۲/۹
c	۵۰	۴۵	۱۲/۷	۱۰	۱۰	۳	۱۰	۰/۷	۰/۷	۱/۴	۲/۴
d	۵۰	۴۵	۱۲/۰	۱۰	۹	۳	۹	۰/۶	۰/۸	۱/۲	۲/۲

جدول (۶-۱۲) پارامترهای طراحی جداگرها در پل سوم (تعداد کل جداگرها = ۱۶)

نوع جداگر	w (KN)	d_t (cm)	K_{eff} (KN/m)	T_{eff} (sec)	β (%)	S
a	۴۲۰	۲۵	۴۱۰۵	۲/۲	۱۲	۱۱/۳
b	۴۲۰	۲۰	۶۶۵۸	۱/۷	۱۶	۱۰
c	۴۲۰	۱۶	۱۰۱۹۹	۱/۴	۱۰	۱۱/۳
d	۴۲۰	۱۱	۱۴۸۱۴	۱/۲	۲۰	۱۱/۳

جدول (۶-۱۳) مشخصات هندسی جداگرها در پل سوم (تعداد کل جداگرها = ۱۶)

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 ۶-۲۳
a	۴۵	۴۵	۲۰/۵	۱۰	۱۶	۳	۱۶	۱/۶	۰/۵	۱/۶	۳/۴
b	۴۰	۴۰	۱۵/۳	۱۰	۱۲	۳	۱۲	۱/۱	۰/۶	۱/۷	۳/۰
c	۴۵	۴۵	۱۱/۴	۱۰	۹	۳	۹	۰/۸	۰/۷	۱/۵	۲/۷
d	۴۵	۴۵	۱۰/۴	۱۰	۸	۳	۸	۰/۷	۰/۹	۱/۳	۲/۳

جدول (۶-۱۴) پارامترهای طراحی جداگرها در پل چهارم (تعداد کل جداگرها = ۴۸)

نوع جداگر	w (KN)	d_t (cm)	K_{eff} (KN/m)	T_{eff} (sec)	β (%)	S
a	۲۷۰	۲۵	۱۳۱۹۵	۱/۶	۱۰	۱۱/۳
b	۲۷۰	۲۰	۲۳۳۶۷	۱/۲	۱۵	۱۰
c	۲۷۰	۱۱	۳۴۶۶۱	۱/۰	۹	۱۲/۵
d	۲۷۰	۹	۵۴۵۴۳	۰/۸	۲۰	۱۲

جدول (۶-۱۵) مشخصات هندسی جداگرها در پل چهارم (تعداد کل جداگرها = ۴۸)

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 ۶-۲۳
a	۴۵	۴۵	۱۹/۵	۱۰	۱۵	۳	۱۵	۱/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۸
b	۴۰	۴۰	۱۵/۳	۱۰	۱۲	۳	۱۲	۰/۷	۰/۶	۱/۷	۲/۷
c	۵۰	۵۰	۱۱/۷	۱۰	۱۰	۳	۱۰	۰/۷	۰/۵	۱/۱	۲/۰
d	۵۰	۴۵	۱۱/۸	۱۰	۹/۶	۳	۹	۰/۷	۰/۶	۰/۹	۱/۹

جدول (۶-۱۶) پارامترهای طراحی جداگرها در پل پنجم (تعداد کل جداگرها = ۳۰)

نوع جداگر	w (KN)	d_t (cm)	K_{eff} (KN/m)	T_{eff} (sec)	β (%)	S
a	۶۸۰	۲۷	۶۲۷۰	۲/۸	۱۰	۱۱
b	۶۸۰	۲۵	۱۰۳۵۷	۲/۳	۱۴	۱۱/۶
c	۶۸۰	۱۹	۱۸۴۴۳	۱/۷	۹	۱۳
d	۶۸۰	۱۴	۲۳۸۴۰	۱/۵	۱۸	۱۳

جدول (۶-۱۷) مشخصات هندسی جداگرها در پل پنجم (تعداد کل جداگرها = ۳۰)

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 ۶-۲۳
a	۴۵	۴۵	۱۹/۲	۱۰	۱۵	۳	۱۵	۱/۱	۰/۷	۱/۸	۳/۲
b	۴۵	۴۰	۱۷/۹	۱۰	۱۴	۳	۱۴	۱/۰	۰/۷	۱/۸	۳/۱
c	۵۵	۵۰	۱۵/۳	۱۰	۱۲	۳	۱۲	۱/۲	۰/۶	۱/۴	۲/۸
d	۵۵	۵۰	۱۴/۰	۱۰	۱۱	۳	۱۱	۰/۹	۰/۷	۱/۲	۲/۴

جدول(۶-۱۸) مشخصات جداگرهای مورد استفاده در تحلیل پلها

نوع جداگر	G (KN/m^2)	K_U (KN/m)	F_y (KN)	K_d / K_U	K_v (KN/m)
a	۷۰۰	۱۰۰۰	۴۰	۰/۲	۴۰۰,۰۰۰
b	۷۰۰	۱۰۰۰	۸۰	۰/۲	۴۰۰,۰۰۰
c	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۴۰	۰/۱۵	۲,۰۰۰,۰۰۰
d	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۸۰	۰/۱۵	۲,۰۰۰,۰۰۰

۶-۴-۳- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

۶-۴-۳-۱- مقدمه

امروزه با توجه به پيشرفت بشر در زمينه رايانه و در اختيار داشتن نرم‌افزارهاي مهندسي و سرعت بالاي آنها، مي‌توان پيچيده‌ترين سازه‌ها را با جزئيات دقيق مدل و تحليل نمود. مي‌توان گفت كه يكي از عوامل موفقيت در كاربرد جداسازي لرزه‌اي در سازه‌ها، توسعه نرم‌افزارهاي قابل اعتماد براي مدلسازي و تحليل سازه‌هاي جداسازي‌شده مي‌باشد. ظرف سه دهه گذشته در زمينه ارائه نرم‌افزارهايي كه قادر به تحليل غيرخطي سيستم‌هاي سازه‌اي باشند، تلاشهاي مفيدي صورت گرفته است و امروزه چندين نرم‌افزار با اين خصوصيت يافت مي‌شود.

پس از طراحی جداگرها به صورت المانهایی با رفتار دوخطی، پلهای جداسازی‌شده با این جداگرها با استفاده از نرم افزار SAP2000 Nonlinear مدلسازی و تحلیل شده‌اند. این نرم افزار به عنوان یک نرم‌افزار قوی در زمینه تحلیل دینامیکی سازه‌هایی که دارای المانهای غیرخطی موضعی می‌باشند معرفی شده است. در این نرم افزار عنصری وجود دارد که می‌تواند رفتار غیرخطی جداگر الاستومری را مدل نماید.

در این بخش، مدل کامل سه بعدی پلهای جداسازی‌شده که شامل المانهای روسازه و زیرسازه خطی و المانهای جداگر غیرخطی می‌باشند بوسیله زوج شتابنگاشتهای مقیاس‌شده،

تحلیل تاریخچه زمانی شده‌اند. به منظور مقایسه نتایج و مشاهده تأثیر جداسازی لرزه‌ای، پلهای جداسازی نشده نیز تحلیل و بررسی شده‌اند. در این حالت به علت اینکه تحلیل به صورت خطی می‌باشد، علاوه بر مقایسه پاسخهای سازه، تنشهای نقاط خاصی از پلها که احتمال تشکیل مفصل پلاستیک در آنها می‌رود، نیز بررسی شده که عبور این تنشها از حد جاری شدن و ورود به تنشهای غیرارتجاعی و رفتار غیرخطی را بتوان تشخیص داد. همچنین برای تأیید نتایج در این حالت از نرم‌افزار ANSYS 5.6 نیز استفاده شده و صحت جوابها بررسی شده است.

نتایج مورد بررسی در این تحلیل‌ها شامل برش پایه در جهات عرضی و طولی پل، نیروی برشی ولنگرخمشی در ستونهای پایه‌های میانی و کوله‌ها، جابجائی نسبی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی و جابجائی نسبی جانبی وسط عرشه نسبت به دو انتهای عرشه می‌باشد. در این بخش ابتدا نحوه مدلسازی سازه‌های مورد مطالعه بیان می‌شود، سپس به تشریح تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی و بیان مقیاس‌کردن شتابنگاشتهای مورد استفاده در تحلیل‌ها اشاره می‌شود.

۶-۴-۳-۲- مدلسازي سیستم پل جداسازي شده

همان طور که گفته شد، مدلسازی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی پلهای جداسازی شده با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 Nonlinear انجام شده است. الگوریتم بکار رفته در این برنامه برای حل معادلات حرکت، بسط روش (FNA)[1] می‌باشد که توسط ویلسون[2] (۱۹۸۹ و۱۹۹۳) توسعه داده شده است. این روش حل، یک روش بسیار مؤثر و کارآمد می‌باشد که برای تحلیل سیستم‌های سازه‌ای که در اصل دارای رفتار الاستیک خطی می‌باشند ولی در آنها از تعداد محدودی المان غیرخطی از پیش تعریف شده استفاده می‌شود، بکار می‌رود. در این نرم افزار، المانهای Nllink دارای رفتار غیرخطی می‌باشند و چون به صورت موضعی در مدل خطی قرار می‌گیرند، استفاده از این روش بسیار مفید است.

1- Fast Nonlinear Analysis
2- Wilson

به علت اینکه شاهتیرها به صورت تیرهای عمیق رفتار می‌کنند، مدل کردن آنها با المان Frame ممکن است دقت مطلوب را کاهش دهد، بنابراین در پلهای اول و سوم که دارای شاهتیرهای عمیق فلزی می‌باشند، شاهتیرها با استفاده از المان Shell نیز مدل شده‌اند تا دقت جوابها بررسی شود. در این حالتها با تغییر سختی دیافراگم عرضی، سختی جانبی پل تغییر کرده و پاسخها (عمدتاً پاسخهای تغییرمکانی) اندکی متفاوت می‌شوند. در شرایط واقعی، با استفاده از دیافراگمهای عرضی طرح شده در پل، حد متوسط جوابها به دست می‌آید.

در این حالت مقدار برش پایه و لنگر پایه و نیروهای برشی و لنگرهای خمشی پایه‌ها و جابجائیها با اختلاف کمتر از ۵% با جوابهای قبل مطابقت دارد(جدول ۶-۱۹)، ولی در حالت جداسازی نشده اختلاف بین تغییرمکانهای نسبی عرشه در دو مدل بیش از این مقدار می‌باشد، که جوابهای مدلسازی با شاهتیر واقعی در نتایج و جدولها آورده شده است. در پلهای با شاهتیر بتنی، به علت سختی جانبی بالا، تنها از مدل Frame استفاده شده است.

جدول (۶-۱۹) مقایسه مدلهای مختلف استفاده شده برای تحلیل پل اول (تعدادکل جداگرها = ۱۴)

پاسخ پل در برابر زلزله طبس	جداسازی نشده		جداسازی‌شده با a		جداسازی‌شده با c	
	Frame	Shell	Frame	Shell	Frame	Shell
دوره تناوب مؤثر (ثانیه)	۰/۲	۰/۲۶	۱/۴۰	۱/۵۵	۰/۹	۱/۰
حداکثر برش پایه عرضی (KN)	۳۳۳۴	۳۴۵۳	۱۰۱۵	۹۹۵	۱۶۴۰	۱۴۱۰
حداکثر برش پایه طولی(KN)	۲۸۷۸	۳۰۰۰	۹۴۹	۱۰۰۵	۱۵۴۶	۱۴۷۱
حداکثر لنگر پایه (KN m)	۲۶۶۸۰	۲۶۷۸۰	۸۹۴۳	۸۵۱۷	۱۲۱۲۰	۱۱۹۵۰
جابجائی نسبی وسط دهانه (cm)	۰/۵	۸/۴	۰/۰۵	۰/۲	۰/۱	۰/۴

برای مدل کردن جداگرها از المانهای غیرخطی Nllink استفاده شده است که چون جداگر به صورت الاستومری در نظر گرفته‌شده، در مدل جداگرها از المان rubber isolator استفاده گردیده است. این المانها در حین یک تحلیل تاریخچه زمانی قادر به ارائه رفتار غیرخطی

از خود می‌باشند. برای مدل کردن جداگرهای الاستومری، رفتار آنها به صورت مدل ایده‌آل هیسترتیک دوخطی درنظرگرفته می‌شود که دارای خصوصیات غیرخطی در درجات آزادی برشی افقی (جهات طولی و عرضی پل) و خصوصیات خطی در سایر درجات آزادی می‌باشد.

مدل غیرخطی این نرم‌افزار براساس رفتار هیسترتیک ارائه شده توسط ون[1] (۱۹۷۶)، پارک[2] و همکاران (۱۹۸۶) بوده و مدل بکارگرفته شده در تحلیل سازه جداسازی‌شده توسط ناگاراجایا[3] و همکاران (۱۹۹۱) می‌باشد. براساس این روش، پارامترهای مورد نیاز برای جداگر الاستومری عبارتنداز: سختی مؤثر (K_{eff})، سختی اولیه یا الاستیک (K_U) (که در درجات آزادی با خصوصیات غیرخطی در نظرگرفته می‌شود و منظور سختی اولیه جداگر در مدل ایده‌آل دوخطی می‌باشد) مقاومت جاری شدن (F_y) و نسبت سختی پس از جاری شدن به سختی اولیه (K_d /K_U). می‌توان به اختصار فرضیات صورت گرفته در تحلیل دینامیکي سیستم پلهای جداسازي شده را در این موارد خلاصه کرد:

۱- پلها به صورت سه بعدی مدل شده‌اند.

۲- روسازه پل و پایه‌ها در حین زلزله در محدوده الاستیك باقي مي‌مانند. این یك فرض معقول مي‌باشد، زیرا جداسازي لرزه‌اي مي‌کوشد تا نیروهاي زلزله را به نحوي کاهش دهد که سازه در محدوده الاستیك باقي بماند. البته صحت این فرض با محاسبه تنشها در اجزای پل بررسی می‌شود.

۳- رفتار نیرو- تغییر مکان جداگرهای الاستومري، به صورت دوخطي نرم‌شونده می‌باشد.

۴- پایه‌هاي پل در سطح پي گیردار فرض مي‌شوند و اثرات اندرکنش خاك - سازه صرفنظر شده است. کوله‌هاي پل، به علت داشتن پشت‌بند و دیوار برگشتی صلب فرض مي‌شوند.

1- Wen
2- Park
3- Nagarajaiah

۵- در پلهای با پی عمیق، شمعها مدل نشده‌اند و فرض شده‌است که پی در سطح زمین می‌باشد.
۶- پل بر روي خاك سفت يا سنگ بنا نهاده شده و تحريك زلزله به طور كامل در تمام تكيه‌گاهها اعمال مي‌شود.
۷- خصوصيات سيستم جداسازي، ايزوتروپيك مي‌باشد و در دو جهت افقي داراي خصوصيات يكسان مي‌باشد. جداگرها نيز در روي پايه‌ها و كوله‌ها داراي خصوصيات ديناميكي يكسان مي‌باشند.
۸- پل در معرض زلزله‌هاي افقی طولي 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.

۶-۴-۳-۳- مقیاس کردن شتابنگاشتها

شتابنگاشتهای مورد استفاده مربوط به سه زلزله طبس، السنترو و آب‌بر (منجیل) می‌باشند. علت انتخاب این شتابنگاشتها این است که بر اساس آیین‌نامه آشتو(بخش۶-۲-۶-۴) بایستی سه جفت شتابنگاشت که با خصوصیات زمین شناسی، تکتونیکی، لرزه شناسی محل مشابهت داشته باشند، انتخاب نمود و پاسخ حداکثر بدست آمده از آنها را برای طراحی استفاده نمود. دو زلزله طبس و آب‌بر به این علت که از زلزله‌های مهم ایران محسوب می‌شوند، انتخاب شده‌اند؛ زلزله السنترو نیز به علت اینکه با داشتن محتوای فرکانسی بالا در غالب درکارهای تحقیقاتی به صورت زلزله شاخص از آن استفاده می‌شود، انتخاب گردیده است. پس از انتخاب شتابنگاشتها باید آنها را به مقیاس درآورد(جدول ۶-۲۰).

نحوه مقیاس‌کردن به این صورت است که براي هـر زلزلـه، طیـف پاسـخ بـا ۵ درصـد میرایي هر دو مؤلفه افقی آن تهیه می‌شود. سپس طیف (SRSS) براي آن زلزلـه بـا گـرفتن جـذر مجموع مربعات طیف‌هاي دو مؤلفهٔ عمود بر هم ساخته می‌شود. سپس یک طیف با متوسط‌گیري از طیف‌هاي (SRSS) همه زلزله‌هاي مستقل تشکیل داده می‌شود. این طیف بـه گونـه‌ای مقیـاس می‌شودکه در محدودهٔ T_{eff} ۰/۵ تا T_{eff} ۱/۵ از ۱/۳ برابر طیـف پایـه طـرح بـا میرایـي ۵ درصـد (مطابق آیین‌نامه آشتو با شتاب مؤثر g ۰/۴ و خاک نوع دو) کمتر نشود. بنـابراین بـا فـرض T_{eff} برابر ۱/۵ که مقدار متوسط دوره تناوب مؤثر پلهای جداسازی‌شـده مـی‌باشـد، طیـف میـانگین در محدوده ۰/۷ تا ۲/۳ ثانیه مقیاس شده است.

جدول (۶-۲۰) 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	۰/۸۹۴	۰/۷۱۳	۰/۶۲۶	۰/۷
السنترو	۱۹۴۰	۰/۳۴۶	۰/۳۱۹	۰/۳۴۶	۰/۳۱۹	۱/۰
آب‌بر	۱۹۹۰	۰/۶۰۷	۰/۴۹۸	۰/۷۲۸	۰/۵۹۸	۱/۲

۶-۴-۳-۴- مدلسازي سیستم پل جداسازي نشده

به منظور مقایسه نتایج پاسخهای نیرو و تغییرمکان در پلهای جداسازی‌شده نسبت به حالت معمولی (جداسازی‌نشده)، پل معمولی نیز به صورت سه بعدی با استفاده از همان المانهای سازه‌ای مدل شده و با نرم‌افزارSAP2000 Nonlinear تحلیل تاریخچه زمانی گردیده است. شتابنگاشتهای مورد استفاده برابر همان شتابنگاشتهای مقیاس شده حالت جداسازی‌شده می‌باشد؛ علت کار این است که اگرچه روش مقیاس کردن شتابنگاشت در حالت جداسازی‌نشده، طبق آیین‌نامه آشتو اندکی با حالت جداسازی‌شده متفاوت می‌باشد، ولی چون در اینجا هدف مقایسه

نتایج بوده و قصد طراحی پل وجود نداشته، همان شتابنگاشتهای حالت جداسازی‌شده به پلهای جداسازی‌نشده اعمال شده است.

۶-۴-۳-۵- مدلسازی پل با استفاده از المان غیرخطی

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 می‌باشد. با محاسبه تنشهای خمشی در پای ستونها و مقایسه آنها با ظرفیت خمشی مقطع می‌توان نتیجه گرفت که همه پلها در حالت معمولی، در پای ستونهای خود تشکیل مفصل پلاستیک داده‌اند(جدول ۶-۲۱). بنابراین در حالت معمولی (جداسازی‌نشده) برای پلهای دوم تا پنجم، تحلیل را تکرار نموده و در پای ستونها از المان غیرخطی Wen استفاده می‌شود که می‌تواند رفتار غیرخطی موضعی ستون را مدل نماید (شبیه کار کاپلان و سیرگ). پارامترهای نیرو- تغییرمکان آن براساس ظرفیت خمشی مقطع انتخاب شده و نیروی تسلیم، براین اساس انتخاب می‌شود که چه نیرویی تولید لنگرخمشی ماکزیمم در مقطع ستون موردنظر می‌کند. برای پل اول نیز در مدل SAP، تنش حداکثر در المانهای Shell نزدیک به تکیه‌گاهها بررسی شده است، اما مشکل خاصی از لحاظ غیرخطی شدن شاهتیرهای پل در این مدل مشاهده نشده است.

البته به منظور تأیید نتایج در این حالت، از نرم‌افزار ANSYS 5.6 استفاده می‌شود که قابلیت تحلیل غیرخطی مادی را دارد. پل اول با استفاده از این نرم‌افزار مدل شده و تحت اثر مؤلفه عرضی زلزله السنترو قرار گرفته است. در این مدل المانهای شاهتیرها و دال بتنی با استفاده از المان Shell43 که المانی با رفتار مادی غیرخطی می‌باشد، مدل شده است. نتایج حاصل از این تحلیل و مقایسه آن با مدل SAP نشان می‌دهد که تنها تعدادی از المانهای بال شاهتیرها در نزدیکی تکیه‌گاه، اندکی وارد محدوده غیرخطی شده‌اند که تأثیر آن در پاسخهای کلی پل قابل اغماض می‌باشد. به همین علت نتایج هر دو مدل، بسیار نزدیک به هم می‌باشند.

جدول (۶-۲۱) تنش حداکثر بر حسب (MPa) در پایه‌های میانی پلها با فرض رفتار خطی در حالت اول که از المان غیرخطی در پای ستونها استفاده نشده است

تنش حداکثر در ستون پایه‌های میانی		حالتهای مختلف تحلیل پل				
نوع پل	زلزله	جداسازی‌نشده	جداسازی‌شده با جداگر			
			a	b	c	d
پل دوم	طبس	۶۰/۶	۲۰/۷	۲۱/۱	۱۷/۵	۱۵/۵
	السنترو	۵۲/۶	۲۳/۱	۲۷/۸	۱۳/۸	۱۱/۴
	آب بر	۳۸/۳	۲۱	۲۲/۱	۱۵/۳	۱۰/۳
پل سوم	طبس	۵۰/۴	۲۱/۲	۲۳/۸	۲۰/۶	۲۰/۵
	السنترو	۴۶	۱۶	۱۶/۵	۱۱/۹	۱۲/۵
	آب بر	۴۱/۱	۲۴/۳	۲۳	۱۹/۸	۲۱۴
پل چهارم	طبس	۵۵/۸	۱۳/۴	۱۳/۲	۱۴/۶	۱۴
	السنترو	۴۴/۳	۱۲	۱۳	۱۳/۹	۱۳/۴
	آب بر	۴۹/۱	۱۲/۱	۱۲	۱۳/۵	۱۲/۹
پل پنجم	طبس	۵۸/۱	۱۸/۷	۱۸/۵	۱۶/۳	۱۳/۸
	السنترو	۳۲/۶	۱۱/۲	۹/۲	۹/۱	۷/۹
	آب بر	۴۷/۲	۱۷/۱	۱۷/۶	۱۵/۵	۱۴/۴

۶-۴-۴- نتایج حاصل از تحلیل پلها

بر اساس نتایج بدست آمده ملاحظه مي‌شود که با قراردادن جداگر در سیستم پل، دوره تناوب آن افزایش می‌یابد. منظور از دوره تناوب، همان دوره تناوب مؤثر می‌باشد که دوره تناوب مربوط به شکل مود انتقال جانبی پل را دربردارد. درحالت جداسازی‌شده، اولین مود ارتعاشی به شکل انتقال جانبی می‌باشد، ولی در حالت پل معمولی، لزوماً اولین مود، به صورت انتقال جانبی نمی‌باشد.

۶-۴-۵- مقایسه جداگرهای طراحی شده

با مقایسه جداگرهای طراحی‌شده برای پلهای مختلف نتایج زیر را می‌توان خاطر نشان کرد:

- هرچه سختی اولیه و نیروی تسلیم جداگر افزایش یابد، سختی مؤثر کل سازه افزایش و دوره‌تناوب مؤثر پل کاهش می‌یابد و جابجائی طرح، هم از روش بار یکنواخت و هم از روش تحلیل تاریخچه زمانی کاهش می‌یابد. هرچه سختی اولیه و نیروی تسلیم جداگر افزایش یابد، با هندسه یکسان، می‌توان تعداد یا ضخامت لایه‌های لاستیک را کاهش داد.
- با افزایش سختی برشی اولیه جداگر، ابعاد هندسی جداگر در ارتفاع کاهش می‌یابد، زیرا جابجائي طرح جداگر کوچکتر می‌شود. اما با افزایش سختی برشی اولیه جداگرها، ابعاد جداگر 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 ویسکوز معادل جداگر کاهش می‌یابد؛ پس هرچه رفتار دوخطی جداگر به سمت حالت الاستوپلاستیک کامل برود، بازده آن بیشتر خواهد بود.
- با افزایش نیروی تسلیم جداگرها، نسبت میرایی ویسکوز معادل بر اساس روش بار یکنواخت آشتو افزایش می‌یابد، اما با افزایش سختی اولیه جداگر، این نسبت لزوماً افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در نیروی تسلیم پایین اگر سختی اولیه افزایش یابد، این نسبت کاهش می‌یابد ولی در نیروی تسلیم بالا، با افزایش سختی اولیه، نسبت میرایی نیز افزایش می‌یابد. در سختی اولیه ثابت وبا هندسه ثابت، اگر نیروی تسلیم را افزایش دهیم، در اثر زلزله کرنشهای برشی جداگر کاهش می‌یابد، پس هرچه بتوان حد جاری شدن جداگر را بالا برد در حاشیه اطمینان بیشتری خواهیم بود.
- هرچه تعداد جداگرها در پل بیشتر باشد، نیروها و بارهای وارد بر هر واحد جداگر کاهش می‌یابد، پس ابعاد هندسی آن کاهش می‌یابد؛ اما نکته قابل توجه آن است که با

افزایش تعداد جداگر در پل، سختی مؤثر کل نیز افزایش می‌یابد که خود باعث کاهش دوره تناوب مؤثر پل جداسازی‌شده می‌شود، بنابراین باید تا آنجا که امکان دارد (از لحاظ محدودیتهای اعمال شده از طرف ساختار پل و همچنین هزینه هر واحد جداگر) یک حالت بهینه برای تعداد جداگرهای مورد استفاده در پلها به دست آید.

- بر اساس طراحی‌های صورت گرفته که در حد ابعاد متداول جداگرها می‌باشد، کرنشهای برشی به دست آمده حدود نصف مقدارمجاز حداکثر آیین‌نامه آشتو شده است که نشان می‌دهد طراحی انجام شده، با در نظر گرفتن کرنشهای برشی حالت محافظه کارانه داشته است.
- براساس تقسیم‌بندی آیین‌نامه یوروکد (بخش ۶-۳-۷-۲) جداگرهای طراحی‌شده جزو گروه جداگرهای لاستیکی با میرایی زیاد قرار می‌گیرند، زیرا نسبت میرایی ویسکوز معادل آنها عمدتاً بین ۰/۱ تا ۰/۲ (۱۰ % تا ۲۰ %) می‌باشد.

۶-۴-۶- مقایسه نتایج تحلیل‌های دینامیکی

۶-۴-۶-۱- مقایسه برش پایه

برش پایه در حالت جداسازی‌شده نسبت به حالت معمولی کاهش چشمگیری داشته است. البته این مقدار کاهش به میزان افزایش دوره تناوب در حالت جداسازی‌شده و نوع پل و زلزله اعمال شده نیز بستگی دارد. در پل اول به علت اینکه دوره تناوب پل در حالت جداگرهای c و d به اندازه کافی منتقل نشده است و در محدوده کمتر از یک ثانیه می‌باشد، برش پایه را با ضریب ۲/۰ نسبت به حالت معمولی کاهش می‌دهد. این ضریب کاهش برای جداگرهای a و b که دوره تناوب را به بیش از یک ثانیه منتقل کرده‌اند، حدود ۳/۰ می‌باشد. این وضعیت برای برش پایه عرضی و طولی در هر سه زلزله مشابه است. این وضعیت که با افزایش دوره تناوب، برش پایه کاهش می‌یابد، کمابیش در سایر پلها نیز مشاهده می‌شود. اما در سایر پلها که انتقال دوره تناوب به محدوده‌های بالاتر رخ می‌دهد، این روند افزایشی مشاهده نمی‌شود.

در پل دوم، برش پایه عرضی برای تمام زلزله‌ها جز زلزله آب‌بر، حدود دو برابر برش پایه طولی می‌باشد. در این پل دو دهانه که ارتفاع پایه‌های متوسطی دارد، برش پایه در حالتهای مختلف جداسازی بین پنج تا ده برابر نسبت به حالت معمولی کاهش داشته است. این میزان بسته به نوع زلزله متفاوت می‌باشد به طوری که میزان کاهش در زلزله آب‌بر بیش از بقیه بوده است. جداگرهای مختلف تقریباً به یک میزان برش پایه را کاسته‌اند، که در این میان تأثیر جداگرc بیش از سایر جداگرها بوده است.

در پل سوم، که پلی دو دهانه با پایه‌های مرتفع می‌باشد، برش پایه عرضی حالت معمولی جز در زلزله آب‌بر، حدود دو برابر برش پایه طولی آن می‌باشد. در اثر جداسازی، کمترین میزان کاهش مربوط به جهت طولی زلزله طبس می‌باشد که ضریب کاهش برابر ۲/۰ دارد. در بقیه حالات این ضریب بین ۴/۵ تا ۱۰/۰ در نوسان است. جداگرهای لرزه‌ای در این حالت برش پایه در دو جهت را متعادل نموده‌اند و اگر چه میزان تأثیر آنها در کاهش برش پایه تقریباً یکسان بوده ولی جداگر a از همه مؤثرتر بوده است.

در پل چهارم، که پلی سه دهانه با پایه‌های کوتاه می‌باشد، برش پایه عرضی در تمام زلزله‌ها دو برابر برش پایه طولی می‌باشد. در این حالت نیز جداگرهای لرزه‌ای، برش پایه در دو جهت را متعادل می‌نمایند ولی میزان تأثیر آنها در کاهش برش پایه یکسان نبوده به طوری که جداگرهای a و b برش عرضی را بین ۱۱/۰ تا ۲۵/۰ برابر کاهش داده‌اند در حالی که این نسبت برای جداگرهای c و d بین ۴/۰ تا ۱۰/۰ می‌باشد. میزان کاهش برش پایه جهت طولی برای تمام جداگرها تقریباً به یک نسبت می‌باشد و بسته به نوع زلزله بین ۶/۰ تا ۱۲/۰ متغیر می‌باشد.

در پل پنجم، در حالت معمولی برش پایه طولی بیشتر از عرضی می‌باشد ولی این نسبت در حالتهای جداسازی‌شده برعکس بوده و برش پایه عرضی حدود دو برابر برش پایه طولی می‌باشد. میزان کاهش برش پایه طولی حدود ۲/۵ برابر و کاهش برش پایه عرضی بین ۵/۰ تا ۹/۰ برابر می‌باشد. جداگر d در جهت عرضی و جداگر a در جهت طولی بیشترین کاهش را ایجاد کرده‌اند.

۶-۴-۶-۲- مقایسه نیروی برشی در ستونها و کوله‌ها

براساس تحلیل‌های انجام گرفته، همه پلها در اثر اعمال این زلزله‌ها دچار رفتار غیرخطی در پای ستونهای خود شده‌اند، ولی با قرار دادن جداگرها در پل نیروهای برشی و لنگرهای خمشی تا اندازه‌ای کاهش یافته‌اند، که زیرسازه پلها به صورت الاستیک باقی می‌مانند؛ بنابراین با اعمال جداگرهای طرح شده، این فرض اساسی تحقق یافته است.

در پل اول، نیروی برشی درکوله‌ها در حالت جداسازی‌شده برای همه زلزله‌ها بین ۲/۰ تا ۴/۰ برابرکاهش داشته است. از بین جداگرها، جداگر a بیشترین کاهش را ایجاد کرده است و جداگر d کمترین تأثیر را داشته است.

در پل دوم، نیروی برشی در ستونها در حالت جداسازی‌شده، بین ۲/۵ تا ۴/۵ برابر کاهش داشته است. در این حالت جداگر d بیشترین تأثیر را داشته است. نیروی برشی در کوله‌ها نیز بین ۴/۵ تا ۱۴ برابر کاهش داشته است که در این حالت نیز جداگر d مؤثرترین بوده است. بیشترین میزان کاهش نیروی برشی در کوله‌ها در اثر زلزله طبس می‌باشد.

در پل سوم، نیروی برش ستونها در حالت جداسازی‌شده بین ۲/۰ تا ۴/۰ برابر کاهش داشته است. نیروی برشی کوله‌ها نیز بین ۸/۰ تا ۲۰/۰ برابر کاهش داشته است که بیشترین کاهش در زلزله السنترو رخ داده است. جداگر a بیشترین کاهش را در برش کوله‌ها و پایه‌ها ایجاد کرده است.

در پل چهارم، نیروی برش ستونها در حالت جداسازی‌شده بین ۵/۰ تا ۹/۰ برابر کاهش داشته است. نیروی برش کوله‌ها نیز غیر از حالتهای c و d در زلزله طبس و السنترو بین ۱۵ تا ۴۰ برابر کاهش داشته است. جداگرهای a و b بیشترین تأثیر را داشته‌اند. در حالتهای c و d در زلزله‌های طبس و السنترو بین ۳/۰ تا ۸/۰ برابر کاهش مشاهده می‌شود.

در پل پنجم، نیروی برشی در ستونها در حالت جداسازی‌شده بین ۳/۰ تا ۴/۰ برابر کاهش داشته است و نیروی برشی کوله‌ها نیز بین ۳/۰ تا ۷/۰ برابر کاهش داشته است. جداگرهای

مختلف تقریباً به یک میزان نیروها را کاهش داده‌اند ولی جداگر d به نسبت بیشترین کاهش را ایجاد کرده است.

۶-۴-۶-۳- مقایسه بین جابجائیها

در پل اول جابجائی نسبی جانبی وسط عرشه در حالت جداسازی‌شده به میزان ۲/۰ تا ۶/۰ برابر کاهش داشته است. جداگرهای a و b بیشترین کاهش را ایجاد کرده‌اند. جداگر d نیز نسبت به جداگر c، جابجائیها را بیشتر کاهش داده است.

در پل دوم، جابجائی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی در حالت جداسازی‌شده بین ۱/۵ تا ۳/۰ برابر کاهش داشته است. جداگرهای c و d به نسبت a و b جابجائیها را بیشتر کاهش می‌دهند که در این میان جداگر d بیشترین تأثیر را دارد.

در پل سوم نیز جابجائی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی در حالت جداسازی‌شده بین ۲/۰ تا ۳/۵ برابر کاهش داشته است. جداگرهای a و b به نسبت c و d جابجائیها را بیشتر کاهش می‌دهند و جداگر d نیز نسبت به c مؤثرتر بوده است.

در پل چهارم نیز جابجائی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی در حالت جداسازی‌شده بین ۲/۵ تا ۵/۰ برابر کاهش داشته است که در این میان جداگر a بیشترین تأثیر را دارد.

در پل پنجم نیز جابجائی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی در حالت جداسازی‌شده بین ۲/۰ تا ۴/۵ برابر کاهش داشته است که در این میان جداگر d بیشترین تأثیر را دارد. جداگر c نیز نسبت به a و b مؤثرتر بوده است.

۶-۴-۶-۴- نتایج تحلیل‌های انجام شده

براساس تحلیل‌های صورت گرفته، می‌توان نتایج زیر را خاطرنشان کرد:

در حالت معمولی یا جداسازی‌نشده پل، مود اصلی ارتعاشی پل، عمدتاً مود حرکت قائم عرشه می‌باشد. این وضعیت در پلهای مورد بررسی کماکان مشاهده می‌شود، هرقدر سختی جانبی

(عرضی) عرشه پل بیشتر باشد، این شکل ارتعاش پل در مودهای بیشتری به چشم می‌خورد. اما در پل اول که دارای شاهتیرهای فلزی عمیق می‌باشد، مود اصلی ارتعاشی آن همان مود انتقال جانبی می‌باشد، ولی در سایر پلها مود انتقال جانبی پل در مودهای بالاتر رخ می‌دهد. جداسازی لرزه‌ای، مود ارتعاشی انتقال جانبی پل را به مود اصلی ارتعاش پل تبدیل می‌کند، به همین علت از اثرات زیانبار زلزله وارد بر پل می‌کاهد.

با افزایش سختی اولیه جداگرها دوره تناوب اصلی سازه که در حالت جداسازی شده همان مود انتقال جانبی می‌باشد، کاهش می‌یابد؛ بنابراین برش پایه سازه، افزایش می‌یابد و به برش پایه حالت جداسازی نشده نزدیک می‌شود؛ این وضعیت در پلهای اول و چهارم دیده می‌شود. در این پلها که به نسبت سایر پلها سخت‌تر می‌باشند، اثر کاهش نیروها ناشی از جداسازی لرزه‌ای بیشتر احساس می‌شود. در حقیقت، پل هر چه سخت‌تر باشد، تأثیر جداسازی لرزه‌ای در کاهش پاسخهای نیرویی و تغییرمکانی بیشتر می‌باشد. درحالتهایی که روند خاصی در کاهش یا افزایش نیروها دیده نمی‌شود احتمالاً به این خاطر است که میزان انتقال دوره‌تناوب سازه به نحوی بوده است که با توجه به طیف زلزله، پاسخ نیرویی روند خاصی را نمی‌توانسته است طی کند، اما در این حالتها اختلاف بین پاسخها نسبتاً اندک می‌باشد. البته با توجه به شتابنگاشتهای استفاده شده و نوع پل، میزان کاهش برش پایه و تأثیرپذیری پل از سختی اولیه متفاوت می‌باشد. 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 می‌باشد که میزان کاهش آن نیز بستگی به زلزله اعمال شده دارد. پس در میزان کاهش برش پایه، هم دوره تناوب جانبی مهم می‌باشد و هم نوع شتابنگاشت اعمال شده.

در پلهایی که سختی جانبی پایه‌های میانی در آنها به نسبت کمتر است (ارتفاع ستونها زیاد است مثل پل سوم و پنجم) میزان کاهش نیروی برشی در پایه‌های میانی در حالتهای جداسازی شده نسبت به حالت معمولی کمتر از پلهای دیگر است. علت این است که نقش جداسازی لرزه‌ای در این پلها توازن پاسخهای نیرو بین اجزای مختلف زیرسازه می‌باشد، بنابراین در این پلها با کاهش قابل ملاحظه نیروی برشی در کوله‌ها به خاطر کاهش زیاد برش پایه مواجه

می‌شویم. پس در پلهای با پایه‌های میانی انعطاف‌پذیرتر، نقش جداسازی لـرزه‌ای عمـدتاً کـاهش نیروها در کوله‌ها ودرنتیجه توازن بین پاسخ نیروها در اجزای زیرسازه (کوله‌ها و پایه‌های میـانی) می‌باشد.

با اعمال جـداگرهای لـرزه‌ای پاسـخهای جابجـائی کـل سـازه بـه خـاطر جابجائیهـای غیرالاستیک جداگرها افزایش می‌یابد، ولی جابجائي نـسبی جـانبی وسـط عرشـه وسرسـتونها در پایه‌های میانی درحالت جداسازی شده کاهش قابل ملاحظه دارد، این وضعیت بسته به نوع پـل و نوع شتابنگاشت متغیر می‌باشد. هر قدر پل دارای پایه‌های میانی بلندتری باشد، این میزان کـاهش کمتر می‌شود.

هرچه سختی اولیه جداگرها افزایش یابد، نیـروی برشـی تولیـد شـده در آنهـا افـزایش می‌یابد ودر نتیجه جابجائی حداکثر آنها افزایش می‌یابد، که منجر به افزایش جابجائی جـانبی کـل عرشه مي‌شود، بنابراین با توجه به محدودیت در جابجائی حداکثر عرشه، می‌بایست از جـداگری با سختی اولیه مناسب استفاده نمود.

با افزایش نیروی تسلیم (حد جاری شدن) جداگرها، نیروی برشی بیشتری در جـداگرها تولید شده، درنتیجه نیروی برش منتقل‌شده به پایه‌های میانی وکوله‌ها بیشتر می‌شـود و جابجـایی جانبی سر پایه‌ها افزایش می‌یابـد و همچنـین جابجـائی حـداکثر عرشـه افـزایش مـی‌یابـد. تـأثیر جداسازی لرزه‌ای در پلهای بررسی شده به این صورت است که جداگرهای a و d بیشترین تـأثیر را در پلها دارند. پس در مقادیر سختی اولیه کم، تأثیر نیروی تسلیم جداگر ملموس نمی‌باشد. امـا هرچه سختی اولیه افزایش یابد، تأثیر افزایش نیروی تسلیم جداگر مشخص می‌شود. هرچه نسبت سختی ثانویه به اولیه افزایش یابد، با سختی اولیه یکسان نیروی برشـی تولیـد شـده در جـداگرها افزایش مي‌یابد، در نتیجه نیروی برش تولیدشده در اجزای زیرسازه و به تبع آن برش پایه افزایش می‌یابد. هرچه سختی اولیه جداگر بیشتر باشد، این افزایش بیشتر خواهـد بـود. در چنـین حـالتی حداکثر تغییرمکان جداگرها غالباً کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان جابجائیها را کنترل نمود.

می‌توان نتیجه‌گیری نمود که هر چه پل دارای سختی جانبی بیـشتری باشـد و در نتیجـه دارای دوره‌تناوب کوچکتری باشد، بازده جداسازی لرزه‌ای بیشتر است. برای پلهای بررسی شـده

که با دهانه‌های حدود ۲۰ تا ۳۶ متر می‌باشند، جداگرهای لرزه‌ای مؤثر و کارآمد می‌باشند. البته هرچه پایه‌ها و دهانه‌ها کوتاهتر باشند، تأثیر جداسازی بیشتر است.

۶-۵- مقايسه پاسخ لرزه‌اي پلهاي جداشده در دو حالت تحريك يك و دوجهته زلزله

۶-۵-۱- مقدمه

تقريباً در تمامي زلزله‌هاي بزرگ، تخريب پلها در اثر فرو ريزش و تخريب پايه‌ها مشاهده شده است. آسيب ديدگي پلها در زلزله‌هاي سال ۱۹۹۴ نرتريج و سال ۱۹۹۵ كوبه به همگان ثابت كرد كه معيار مقاومت به تنهايي هرگز براي تضمين ايمني پلها و عملكرد مناسب آنها در حين زلزله كفايت نمي‌كند. تا بحال تحقيقات بسياري با هدف يافتن روش‌هاي منطقي براي محافظت پل در زلزله‌هاي شديد انجام شده است كه در اين ميان جداسازي لرزه‌اي راه حلي مناسب براي كاهش نيروهاي ناشي از زلزله تا حد ظرفيت الاستيك اعضاي سازه مي‌باشد. بدين ترتيب اعضاي سازه پل از ورود به ناحيه غير خطي مصون مانده كه اين به معناي سالم ماندن سازه پل در حين زلزله مي‌باشد.

ايده اصلي در جداسازي لرزه‌اي،كاهش فركانس پايه ارتعاش سازه و رساندن آن به مقداري كمتر از فركانس هاي حاوي انرژي غالب زلزله مي‌باشد. به بياني ديگر جداسازي لرزه‌اي پريود ارتعاشي سازه را افزايش داده و آن را از پريود هاي حاوي انرژي غالب زلزله دور مي‌كند. بدين ترتيب انرژي ورودي به سازه ناشي از زلزله با جداسازي لرزه‌اي كاهش مي‌يابد. ديگر مزيت جداسازي لرزه‌اي فراهم نمودن وسيله‌اي جهت اتلاف انرژي مي‌باشد كه انرژي وارد شده به سازه در نقاط معدود و بصورت كنترل شده تلف شود. بدين ترتيب تخريب و آسيب ديدگي در نقاط خاص و معدود متمركز شده وامكان تعويض اين قطعات پي از زلزله وجود خواهد داشت.

در حال حاضر پلهـاي بزرگراهـي ايـران داراي سـه نـوع عمـده تكيـه‌گـاه هـاي فلـزي، بتني و الاستومري مي‌باشـند كـه از ميـان تكيـه‌گاههـاي الاسـتومري بـه دلايـل فنـي و اقتـصادي ذكر شده در ذيل بخش عمده اي از تكيه‌گاههاي پلها را تشكيل مي دهند.

۱- داراي وزني سـبك بـوده و بـه راحتـي نـصب مـي‌شـوند عـلاوه بـر ايـن فـضاي كمي را اشغال مي‌كند.
۲- نياز به تعميرات ندارند.
۳- دچار زنگ زدگي نمي‌شوند وداراي قطعات متحرك نيستند.
۴- با سطوح نا منظم تماس خوبي برقرار مي‌كنند.
۵- در هر دو جهت امكان تغيير شكل و حركت دارند.
۶- ميرايي ارتعاشي خوبي دارند.
۷- صرفه‌جويي اوليه و دراز مدت درهزينه و زمان دارند.
۸- در برابر هوازدگي مقاومت خوبي دارند.
۹- در برابر مواد نفتي و شيميايي از مقاومت خوبي برخوردارند.

امـا آيـا ايـن تكيـه‌گاههـاي الاسـتومري مـي‌تواننـد نقـش يـك جـداگر لـرزه‌اي را در حين زلزله براي افزايش پريود سازه پل و اتلاف انرژي زلزله در داخل خود بازي كنند؟

جـواب ايـن سـئوال نيـاز بـه تحقيقـات بيـشتر و انجـام تـستهاي آزمايـشگاهي و مدلـسازي‌هـاي تحليلـي اجـزا محـدودي دارد كـه همـراه بـا درك و شـناخت كـافي از رفتـار الاستومرها ومدلسازي آنهـا مـي‌باشـد كـه متاسـفانه تابحـال در كـشور انجـام نگرفتـه اسـت. در واقـع بررسـي كفايـت تكيـه‌گاههـاي الاسـتومري جهـت جداسـازي لـرزه‌اي ومطالعـه رفتـار و عملكـرد لـرزه‌اي آنهـا در حـين وقـوع زلزلـه امـري واجـب بـوده كـه بايـستي بـه آن اهتمـام ورزيد.

متاسـفانه در آزمايـشات انجـام شـده بـر روى تكيـه‌گاههـاى پلهـا، تنهـا هـدف بدسـت آوردن مدول برشـي الاسـتيك (اوليـه) نـشيمن در دوجهـت طـولي و عرضـي و سـفتي فـشاري آنها بوده است. لذا اين آزمايـشات بـه هـيچ عنـوان اطلاعـاتي در مـورد رفتـار غيـر خطـي ايـن

نشیمن‌ها در اختیار قرار نمي‌دهند. این در حالیست که حتی استاندارد ملي ایران به شماره ۶۵۸۳ با عنوان «لاستیك- بالشتك‌هاي زیر سري پل- ویژگیها و روش هاي آزمون» با ذکر روشي مطابق با استاندارد ISO 6446 و DIN 4141-140 نحوه بدست آوردن منحني تغییرات تنش برشي بر حسب کرنش برشي براي نشیمن‌ها را بیان مي‌کند.

لذا تاکید مي‌گردد که به منظور بررسي رفتار لرزه‌اي نشیمن‌هاي الاستومري موجود پلهاي کشور انجام آزمایشاتي مدون و جهت دار بر طبق استاندارد ملي ۶۵۸۳ و همچنین آیین‌نامه آشتو[۱] امري الزامي است. در این تحقیق با فرض عدم کفایت لرزه‌اي نشیمن‌هاي موجود و تعویض آنها با نشیمن‌هاي لرزه‌اي مناسب نظیر نشیمن‌هاي لاستیکي (Laminated Rubber Brearing (LRB)) یا نشیمن‌هاي سربي – لاستیکي (Lead–Rubber Brearing (L-RB)) پاسخ لرزه‌اي چند پل بزرگراهي نمونه قبلی با در نظر گرفتن اثرات زلزله در یك جهت و اثرات زلزله بطور همزمان در دو جهت با هم مقایسه مي‌شوند.

در واقع فرض مي‌شود که نشیمن‌هاي موجود با تکیه‌گاههاي جداگر لرزه‌اي تعویض گشته و بدین طریق روسازه (عرشه) پل از زیر سازه (پایه) پل جدا گشته است که این امر به افزایش پریود سازه و در نتیجه کاهش شتاب عرشه و در نتیجه کاهش نیروهاي پایه مي‌گردد. تا بحال مطالعات بسیاري در مورد تاثیر جداگرها بر رفتار لرزه‌اي پلها و طرح لرزه‌اي جداگر و پلها انجام گرفته است. Li (۱۹۸۹) پاسخ تصادفي یك پل سه دهانه با سیستم جداگر لرزه‌اي شامل نشیمن‌هاي لاستیکي و میراگر هیسترتیك را با تکنیك خطي سازي معادل بدست آورد[۲۶].

Constantinou و همکاران (۱۹۹۱) [۹]، Tsopelas و همکاران (۱۹۹۶) [۴۴] مطالعات تحلیلي و آزمایشگاهي بر روي پاسخ لرزه‌اي پلهاي جداسازي شده توسط سیستم‌هاي جداگر لغزشي (Sliding Isolator) انجام داده و کارآمدي آنها را به اثبات رساندند.

Hwang و Sheng (۱۹۹۳) سختي موثر مشخصه و نسبت ميرايي معادل يك سيستم الاستيك معادل پلهاي جداسازي شده را بدست آورده و روابط تجربي براي محاسبه تغيير پريود معادل و نسبت ميرايي معادل ارائه كردند. Hwang (۱۹۹۶) يك مدل خطي براي تحليل لرزه‌اي پلهاي جداسازي شده با نشيمن‌هاي سربي – لاستيكي (L-RB) با استفاده از يك روش مشخصه بدست آورد[۱۶].

Ghorbrah و Ali (۱۹۸۸) [۱۴] و Turkington و همكاران (۱۹۸۹) [۴۶] نشان دادند كه L-RB ها در كاهش پاسخ لرزه‌اي پل بسيار كارآمد هستند. Saiidi و همكاران (۱۹۹۹) تاثير جداسازي لرزه‌اي را در كاهش نيرو و تغيير مكان رو سازه يك پل شش دهانه بررسي كرده و نتيجه گرفتند كه استفاده از جداگرها لزوماً تغيير مكان در عرشه را افزايش نمي‌دهد[۳۸]. Chaudhary و همكاران (۲۰۰۱) در تعيين پارامترهاي سيستم ناشي از شتاب‌ها لرزه‌اي ثبت شده روي يك پل جداسازي شده و بررسي عملكرد اجزا مختلف پلها تحقيقاتي انجام دادند[۸].

تمامي تحقيقات ذكر شده در بالا با فرض رفتار نيرو- تغيير مكان دو خطي جداگر با درنظر گرفتن فقط يك مولفه تحريك زلزله بوده است. در سالهای اخير تنها در سه مورد سعی در بررسی پاسخ لرزه‌اي تحت اثر تحريک دو جهته و مقايسه آن با تحريک يک جهته به عمل آمده است[۴۷] كه با روشهای مختلف، نتايج مختلفی به دست آمده كه عمدتاً قابل مقايسه با يكديگر نبوده و نياز به تحقيقات بيشتر در اين زمينه كاملا محسوس است. اما در اين تحقيق سعي شده است با نگرشی متفاوت و بدون ساده سازی، پاسخ لرزه‌اي چهار پل موجود بزرگراهي كشور در حالت تحريك يك جهته و دوجهته مورد مقايسه قرار گيرد.

در واقع هنگامي كه سيستم تحت اثر تحريك دو جهته (دو مؤلفة افقي حركت قوي زلزله) قرار مي‌گيرد فرض رفتار دو خطي درست نيست و در نتيجه نياز به مطالعه رفتار پلهاي جداسازي شده با LRB يا L-RB تحت تحريك زلزله دو جهته وجود دارد.

در اين بخش پاسخ چهار پل دو و سه دهانه كه توسط L-RB يا L-RB جداسازي لرزه‌اي شده‌اند و تحت دو مؤلفه افقي حركت قوي زمين لرزه قرار گرفته‌اند بررسي مي‌شود. رفتار نيرو- تغيير مكان جداگر لرزه‌اي بصورت دو خطي در هر جهت افقي در صورت بارگذاری يک

جهته در نظر گرفته مي‌شود. هدف اصلي از ايـن تحقيـق بررسـي انـدركنش دوجهتـه نيـروهـاي ايجادشده در جداگر برروي پاسخ لـرزه‌اي پلهـاي جـداسـازي شـده در مقايـسه بـا حالـت غيـر اندركنشي (تحريك يك جهته) مي‌باشد.

۶-۵-۲- رفتار لرزه‌اي جداگرها

مهـم‌تـرين پـارامتر طراحـي سيـستم‌هـاي جداسـازي شـده، تغييـر مكـان در سـطح جداگر مي‌باشد. تغيير مكان جداگر موارد ذيل را ديكته مي‌كند:

- فضاي اطراف روسازه جداسازي شده
- كرنش برشي جداگرهاي لاستيكي و پايداري آنها
- پلان هندسه جداگرهاي لغزشي
- نيروهاي انتقال يافته به روسازه پل براي جداگر با سختي مشخص

خـواص مكـانيكي جـداگر كـه در طراحـي وتحليـل سيـستم جداسـازي شـده مـورد استفاده قرار مي‌گيرد بايـستي توسـط آزمايـشات تمـام مقيـاس بـه اثبـات برسـد. روش طراحـي معمـول سيـستم‌هـاي جداسـازي پلهـا در كـشور بـر اسـاس آيـين‌نامـه آشـتو مـي‌باشـد. ايـن آيـين‌نامـه راهنمـايي‌هـا و توصـيه‌هـايي بـراي تحليـل و طراحـي سيـستم جداسـازي شـده و جداگر و همچنين آزمايشات تمام مقياس جداگرهاي لرزه‌اي ارائه مي‌كند.

تحقيقات قبلي نشان داده‌اند كه در نـشيمن‌هـاي اصـطكاكي (F)، اصـطكاكي – پانـدولي (FP)، سربي– لاستيكي (L-R) و لاستيكي لايه‌اي (LR) يك همبستگي بين پاسخ در هـر يـك از دو جهت عمود بر هم بوجود مـي‌آيـد. صـرفنظر كـردن از ايـن همبـستگي منجـر بـه تخمـين غيرمحافظه‌كارانه تغيير مكان حداكثر جداگر به مقدار ۲۰% مي‌گردد.

لـذا بـراي بررسـي رفتـار ايـن جـداگرهاي لـرزه‌اي تحـت بارگـذاري دينـاميكي، رفتـار همبسته بايد مد نظر قـرار گيـرد. در صـورت ادامـه تحقيقـات مـي‌تـوان رابطـه جديـدي كـه در برگيرنده افزايش تغيير مكان حداكثر بر اثر تحريك دو جهته و پاسخ همبسته مي‌باشد.

اين رابطه مي‌تواند به صورت زير باشد:

$$d = \alpha_1 \alpha_2 \left(\frac{250\, A\, S_i\, T_{eff}}{B}\right) \qquad (۱۰-۶)$$

كه α_1: ضريبي براي در نظر گرفتن همبستگي پاسخ و α_2: ضريبي براي در نظر گرفتن تحريك دو جهته مي‌باشد. درادامه مشخصات پلهاي مورد بررسي در اين تحقيق، مشخصات جداگرهاي مورد استفاده در آنها به همراه توضيحاتي در رابطه با مدل سازه‌اي پلهاي جداسازي شده خواهد آمد. در پايان نيز نتايج تحليلي بدست آمده از اين تحقيق ارائه شده و مورد بحث و بررسي قرار مي‌گيرند.

۶-۵-۳- مشخصات پلهاي مورد بررسي و جداگرهای آنها

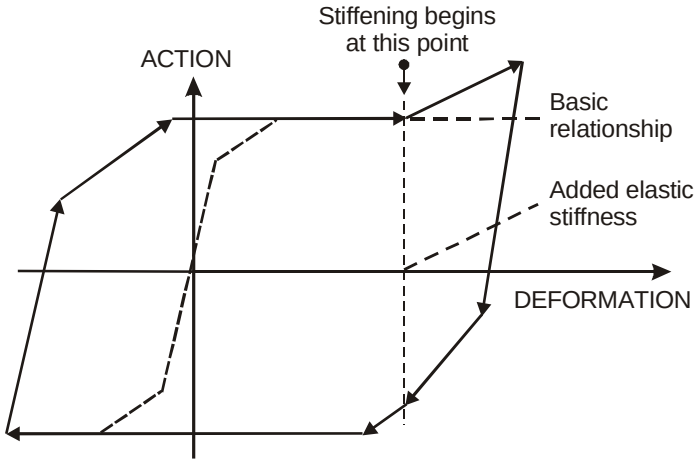
در اين تحقيق همان چهار پل بزرگراهي با شماره‌های ۲ تا ۵ مورد بررسي قرار مي‌گيرند. بطور خلاصه مي‌توان گفت پلهاي شماره ۲ و ۳ دو دهانه و پلهاي شماره ۴ و ۵ سه دهانه مي‌باشند. پلهاي ۲ و۴و ۵ داراي شاهتيرهاي بتني و پل شماره ۳ داراي شاهتيرهاي فولادي مي‌باشد. نوع پايه‌هاي هر چهار پل نيز به صورت چند ستوني با تير سر ستون مي‌باشد. با توجه به ارتفاع كم پايه‌ها در پلهاي شماره ۲و ۴ اين دو پل نماد پلهاي با سختي پايه زياد در مقايسه با پلهاي شماره ۳ و ۵ هستند كه داراي پايه‌هاي با ارتفاع زياد مي‌باشند.

با توجه به شاهتيرهاي فولادي پل شماره ۳، اين پل از وزن عرشه به نسبت كمتري نسبت به پلهای ديگر برخوردار است. همانگونه كه در قسمتهاي قبلي اين فصل مشاهده شد، براي هر يك از اين پلها بر اساس روش بار يكنواخت آشتو چهار جداگر با نامهاي a وb وc وd طراحي شده است. در طراحي اين جداگرها فرض شده است كه پلها در مناطق با خطر نسبي زلزله بسيار زياد بوده و خاك محل پل نيز از جنس خاك نسبتاً سخت مي‌باشد. بنابراين مقدار شتاب مؤثر بر طبق آيين‌نامه آشتو ۰/۴ مقدار S_i نيز بر اساس جدول آيين‌نامه برابر ۱/۵ مي‌باشد.

به جهت حذف اثرات مشخصات جداگر در نتایج تحلیلي این بخـش از تحلیـل، تمـامي پلهـا بـا جداگر نوع a مدلسازي شده‌اند.

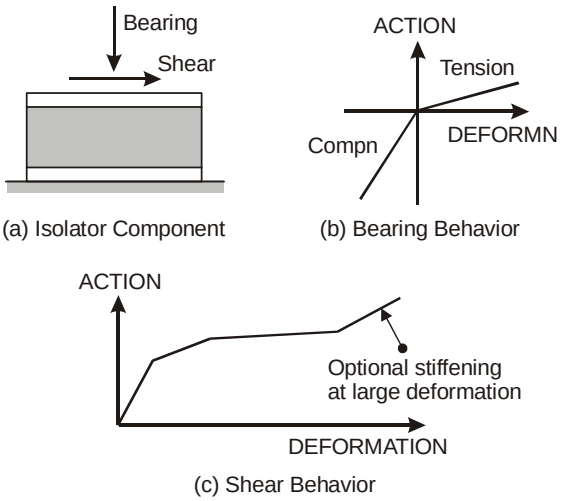
۶-۵-۴- مدلسازي پلهاي جداسازي شده در برنامه تحلیل غیرخطي Ram Perform 3D

به منظور مدلسازي هر چه دقیق‌تر پلها در این تحقیق، مدلسازي و تحلیل در برنامه Ram Perform 3D انجام گرفت. این برنامه نسل بعدي برنامه تحلیل غیرخطي Drain 3DX مي‌باشد که توسط پروفسور پاول و همکاران به منظور تحلیل خطي و غیرخطي استاتیکي و دینامیکي عمدتاً سازه‌هاي ساختماني تدوین گشته که توانایي در نظر گرفتن معیارهاي عملکردي مختلف را دارا مي‌باشد. این برنامه توانایي مدلسازي رفتار جداساز بصورت سه خطي (سخت شدگي در کرنش‌هاي بالا) را نیز دارد که مدل کلي آن در شکل (۶-۳) مي‌آید. شایان ذکر است در این تحقیق رفتار جداگر بصورت دو خطي مدل مي‌شود.



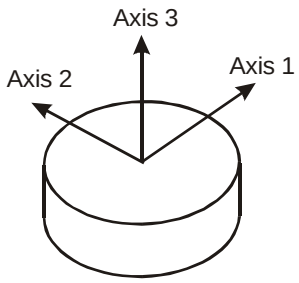
شکل (۶-۳) حلقه هیسترزیس المان جداگر

المان جداگر در این برنامه خصوصیات برشي و اتکایي مطابق شکل (۶-۴) را دارد که رفتار اتکایي بصورت الاستیك با سختي‌هاي متفاوت در کشش و فشار مي‌باشد.



شكل (۶-۴) خصوصيات جداگر لرزه‌اي

رفتار برشي نيز بصورت سه خطي با سخت‌شدگي اختياري در تغيير شكل‌هاي بزرگ مي‌باشد. هيچگونه افت مقاومت نيز در برش در نظر گرفته نمي‌شود. هر جداگر لرزه‌اي داراي سه محور مي‌باشد كه در شكل (۶-۵) نشان داده شده است.



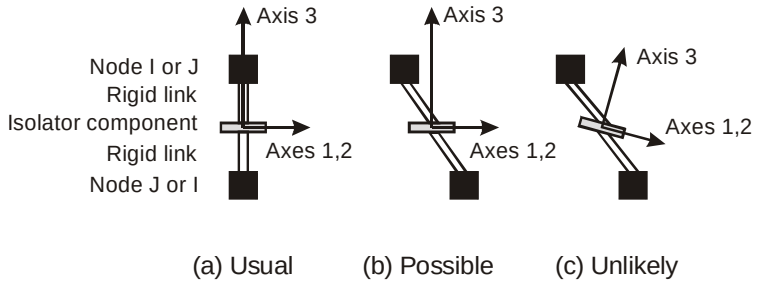
شكل (۶-۵) شماي محورهاي جداگر لرزه‌اي

براي نيروهاي برشي مايل نسبت به محورهاي ۱و۲، نيـروي برشـي مـؤثر و تغييـر شـكل برشي متوسط با روابط زير در نظر گرفته مي‌شوند:

$$F = \sqrt{F_1^{2} + F_2^{2}} \qquad D = \sqrt{D_1^{2} + D_2^{2}}$$

که F و D به ترتیب نیروي برشي مؤثر و تغییر مکان مي‌باشند.

$D_{۱}$،$F_{۲}$،$F_{۱}$ و$D_{۲}$ نیز مؤلفه‌هاي نیرو و تغییر مکان در راستاي محورهاي ۱ و ۲ مي‌باشند. در واقع یك سطح دایروي براي جاري شدن مصالح جداساز در نظر گرفته مي‌شود. شمایي از المان جداگر برنامه در چند حالت ممکن در شکل (۶-۶) مي‌آید.



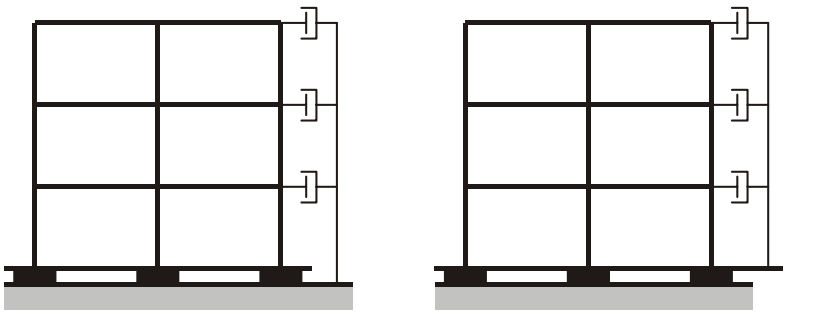
شکل (۶-۶) شماي المان جداگر لرزه‌اي

در نهایت به مدلسازي دقیق سازه پلها در برنامه Ram Perform 3D پرداخته شده است. در این مدلسازي دقت عمل خاص و ویژه‌اي به عمل آمده است. بدین ترتیب که تمامي اعضاي سازه‌اي در موقعیت واقعي خود مدل شده و هیچگونه ساده‌سازي در این قسمت انجام نگرفته است. در ادامه به اختصار به توضیح ظرایف و دقایق این مدلسازي پرداخته مي‌شود.

۱- در مدلسازي پایه پلها از ترکیب چندین المان استفاده شده است.

در ابتدا و انتهاي پایه دو عدد منفصل پلاستیك چرخشي خمشي تعریف مي‌شود. حد فاصل این دو مفصل پلاستیك یك المان الاستیك تعریف مي‌شود و به منظور در نظر گرفتن قسمت صلب سرستون در پایه از المان ناحیه انتهایي صلب استفاده مي‌شود. براي تعریف جرم پایه، در وسط ارتفاع ستون یك جرم متمرکز به اندازه نصف وزن پایه تعریف شده و در انتهاي آن نیز یك جرم متمرکز به اندازه یك چهارم وزن پایه و وزن سهمیه حاصل از تیر سر ستون تعریف مي‌شود.

۲- المان جداگر با طول ۰/۲ متر در محل واقعي خود مدل مي‌شود. براي رسيدن به اين هدف از سه المان صلب كه به صورت T شكل به يكديگر متصل مي‌شوند، استفاده مي‌شود.
۳- تير سرستون با المان‌هاي الاستيك و در نظر گرفتن نواحی صلب انتهايي ناشي از پايه‌ها مدل مي‌شود.
۴- شاهتيرها به صورت يك المان الاستيك مدلسازي مي‌شوند. براي مدلسازي جرم شاهتيرها و عرشه، محل مركز جرم حاصل از شاهتيرها و بتن كف بصورت دستي محاسبه شده و سپس با استفاده از يك المان صلب الاستيك جرم‌هاي دال و عرشه در محل واقعي خود مدل مي‌شوند.
۵- ديافراگم‌هاي انتهايي و مياني توسط المانهاي الاستيك با دقت بالا مدلسازي مي‌شوند.
۶- روسازه نشيمن هاي پل بصورت سه درجه آزادي (دو درجه آزادي انتقالي و يك درجه آزادي چرخشي) مدل مي‌شود.
۷- نحوه در نظر گرفتن ميرايي توسط برنامه Ram Perform 3D درحالت جداسازي به دو صورت مي‌تواند باشد كه در شكل (۶-۷) نشان داده شده است. در اين تحقيق از مدل b براي تحليل ديناميكي غير خطي سازه پلها استفاده مي‌شود.



شكل (۶-۷) دو مدل مختلف براي درنظرگرفتن ميرايي حاصل از جرم سازه

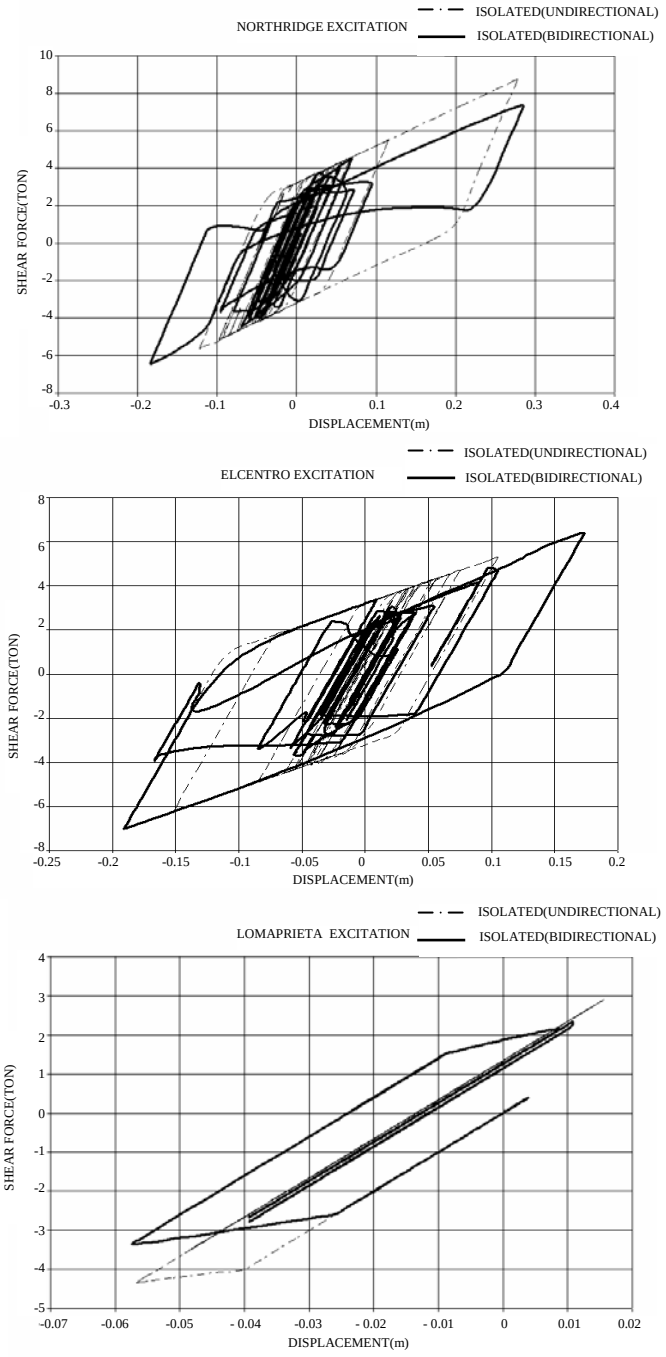
۶-۵-۵- بررسي رفتار دینامیکي غیرخطي پلها با تحلیل تاریخچه زماني

این تحقیق با استفاده از سه تاریخچه مربوط به مؤلفه شمالي– جنوبي زلزله‌هاي السنترو، لوما پرایتا و نرتریج انجام مي‌گیرد. از آنجایي که هدف تنها مقایسه مقادیر نسبي در هر زلزله و نه مطلق مي‌باشد در اینجا زلزله‌ها صرفاً با مقادیر حداکثر خود همپایه مي‌شوند. بدین ترتیب که همگي با PGA=0.5g همپایه شده‌اند.

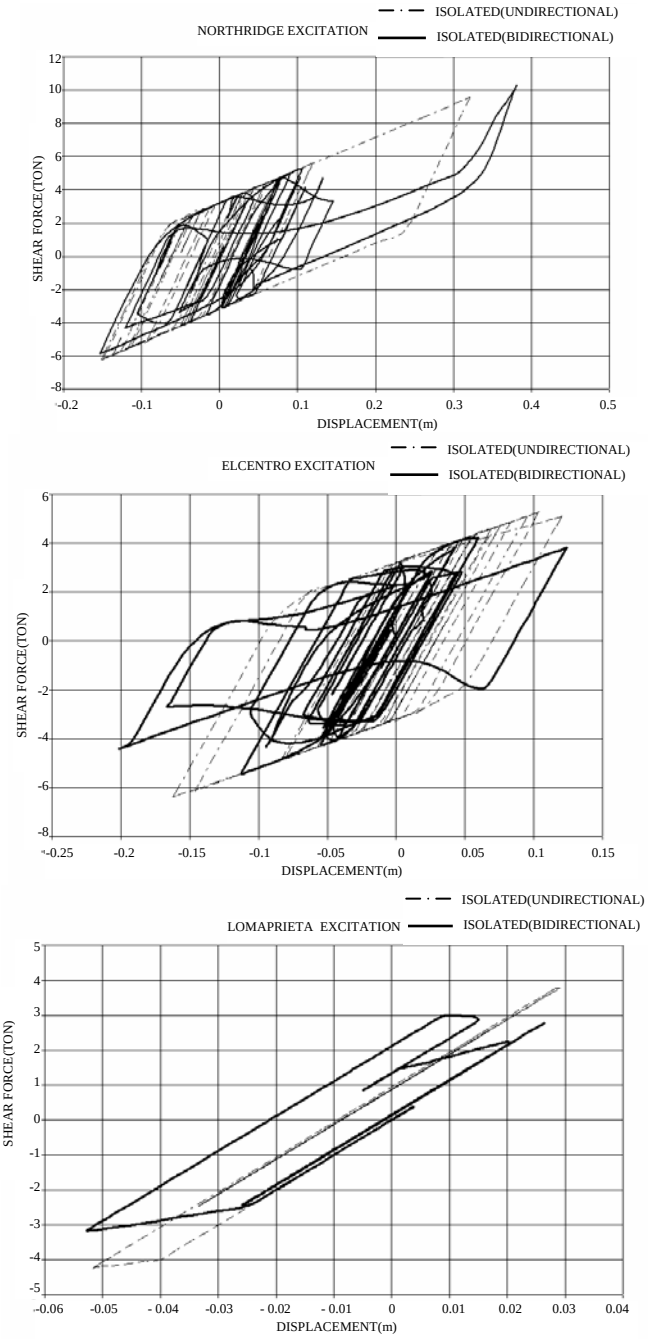
در حالت تحریك یك جهته تنها یك مؤلفه شمالي جنوبي زلزله‌هاي بالا درهر جهت به تنهایي وارد مي‌شود. در حالت تحریك دو جهته دو مؤلفه شمالي جنوبي زلزله‌هاي ذکر شده بطور همزمان در هر دو جهت وارد مي‌شود. بدین ترتیب با این نوع انتخاب و اعمال تاریخچه‌هاي زماني، بررسي رفتار جداگرها مستقل از خواص رکورد زلزله بوده و مطلوب مي‌باشد.

۶-۵-۶- بررسي نتایج تحلیلي

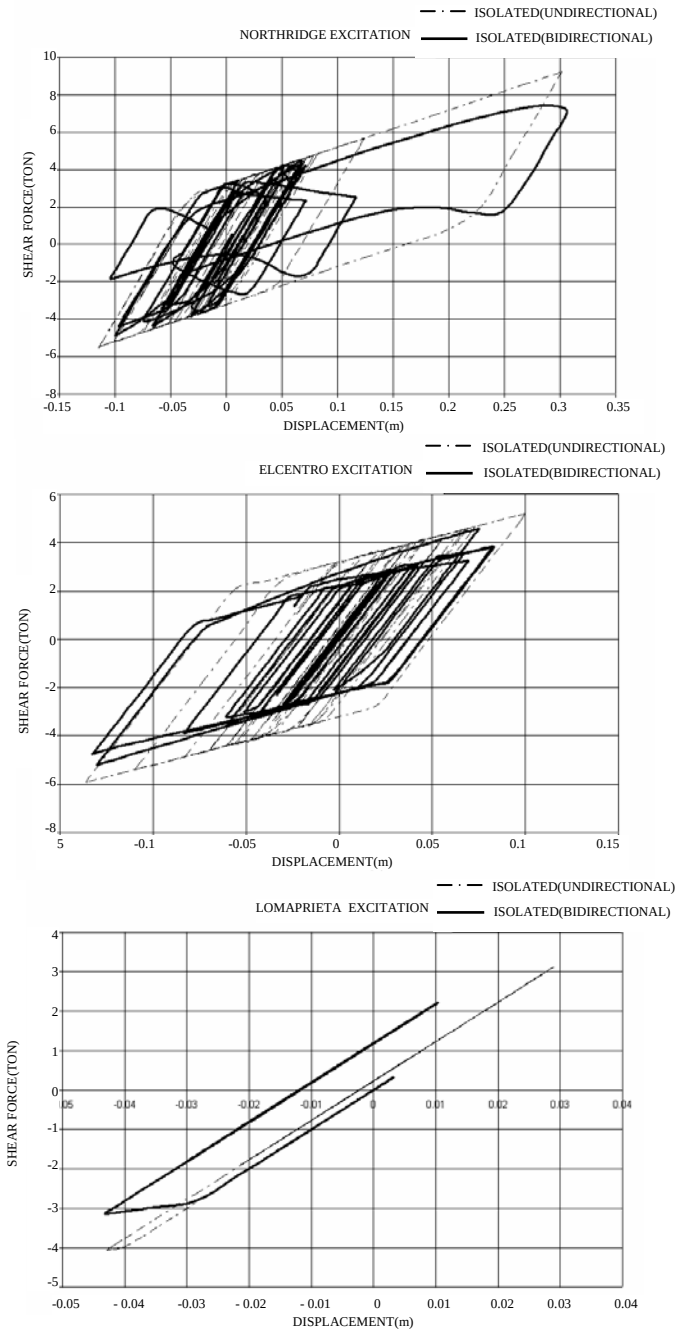
در این قسمت خلاصه اي از نتایج تحلیلي و نتایج حاصل از بررسي آنها ارائه مي‌شود. در ابتدا رفتار جداگرها به تنهایي در هر پل تحت اثر زلزله‌هاي مختلف بررسي مي‌شود. در ادامه در شکل‌هاي (۶-۸) تا (۶-۱۱) نمودار هیسترزیس نیرو – تغییر مکان جداگرکناري تحت اثر سه رکورد زلزله به ترتیب براي پلهاي شماره ۲ و ۳ و ۴ و ۵ مي‌آیند.



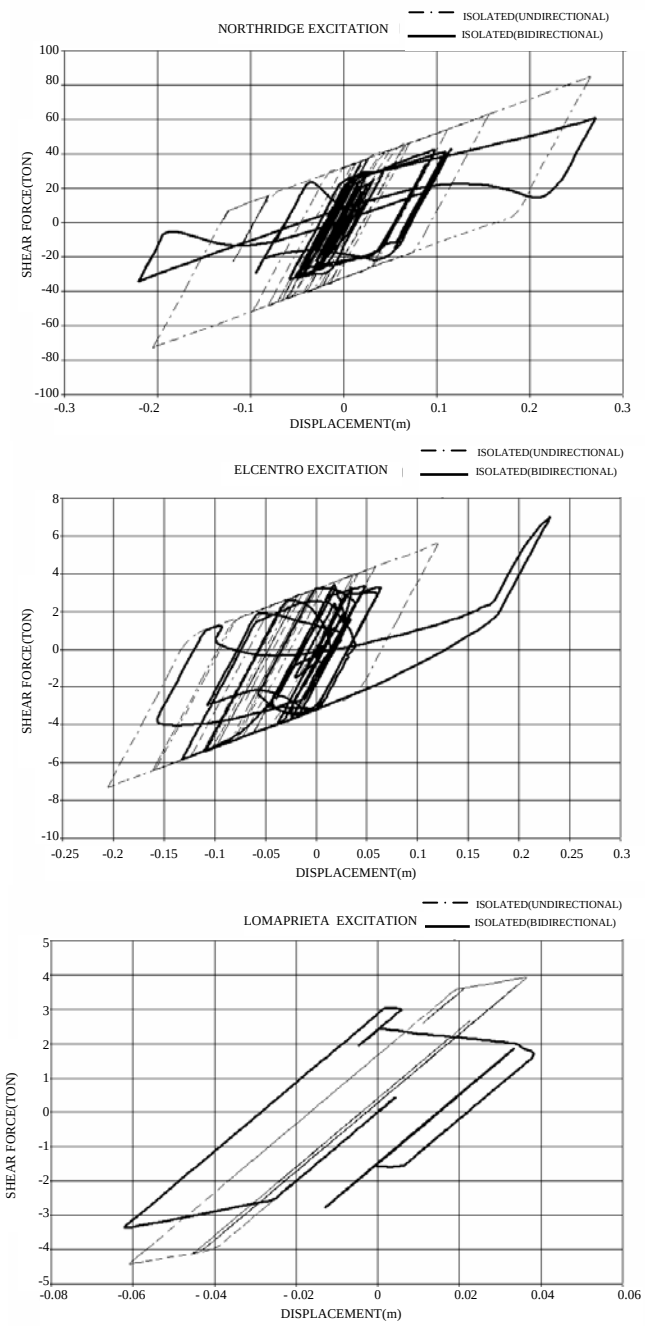
شكل (۶-۸) نمودار هيسترزيس نيرو- تغيير مكان جداگر كناري پل شماره ۲



شكل (۶-۹) نمودار هيستريزيس نيرو- تغيير مكان جداگر كناري پل شماره ۳



شكل (۶-۱۰) نمودار هيسترزيس نيرو- تغيير مكان جداگر كناري پل شماره ۴

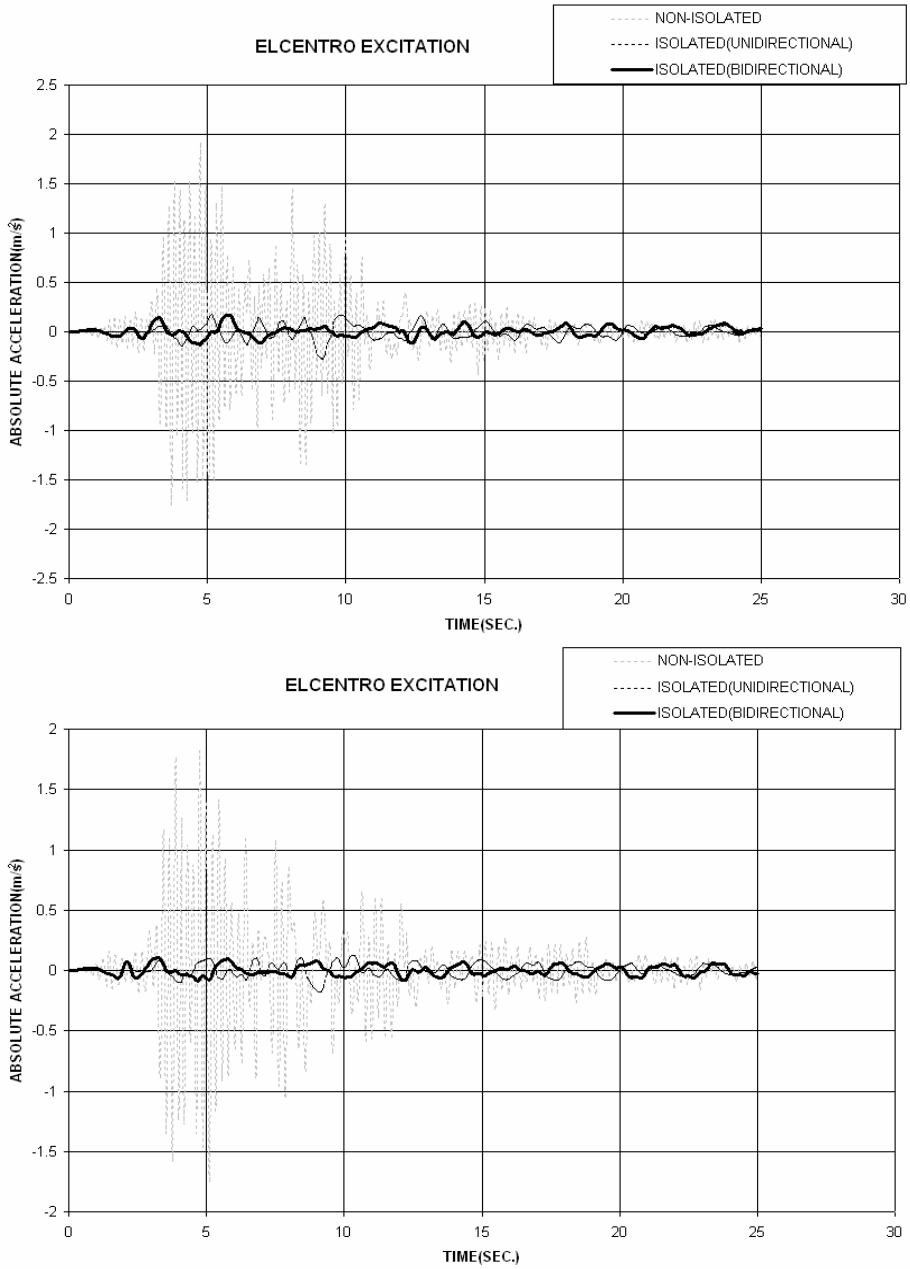


شكل (۶-۱۱) نمودار هيسترزيس نيرو- تغيير مكان جداگر كناري پل شماره ۵

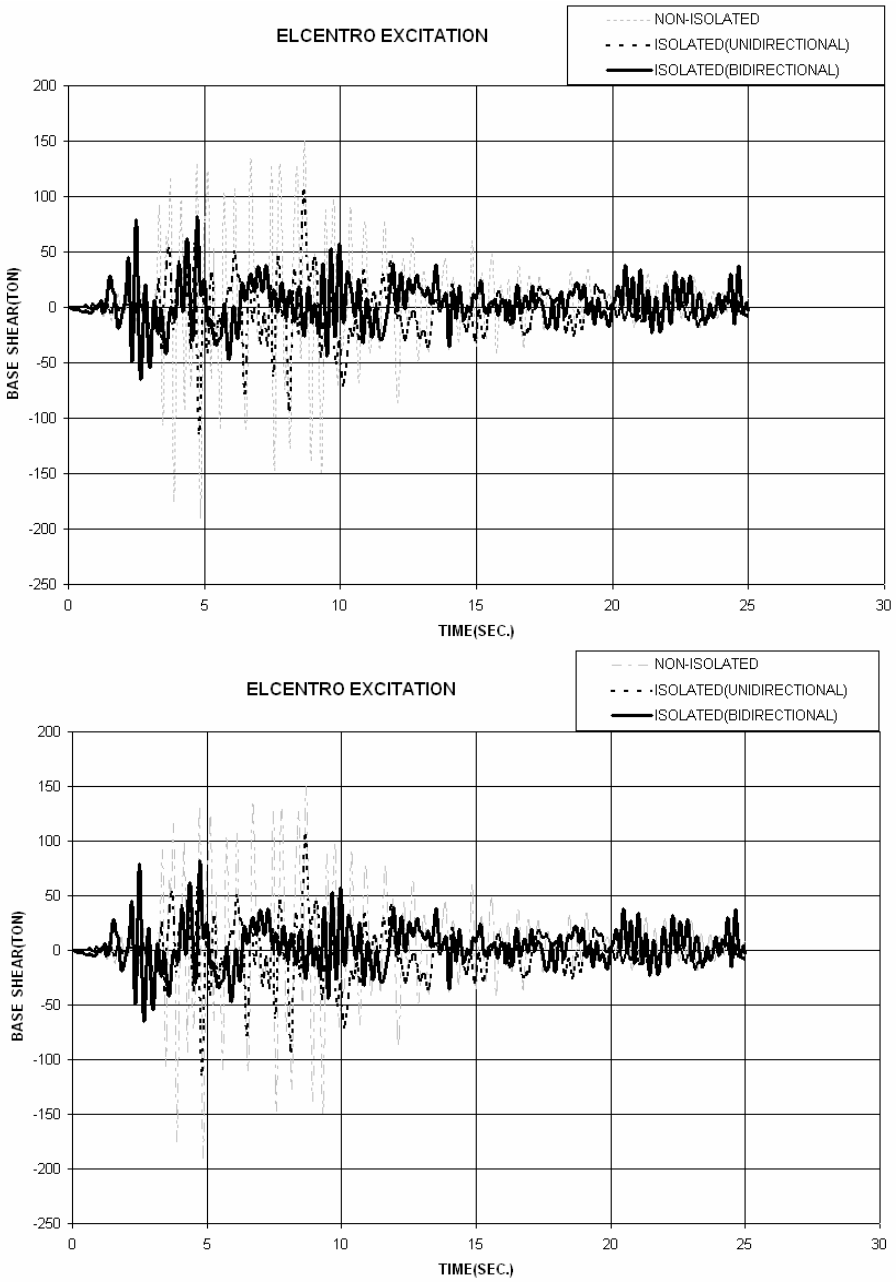
همانگونه كه ملاحظه مي‌شود رفتار نيرو تغيير مكان در حالت تحريك يك جهته كاملاً منظم بوده و با رابطه آشتو هماهنگي و سازگاري مناسبي دارد اما در حالت تحريك دو جهته رفتار نيرو تغيير مكان جداگر كاملاً بي نظم بوده و از حدي كه رابطه آشتو براي جداگر تعيين مي‌كند فراتر مي رود. بدين ترتيب ضرورت تعريف ضرايب α_1 و α_2 كه در رابطه (۷-۱۰) تعريف شدند كاملاً احساس مي‌شود. با يك مطالعه اجمالي تقريباً مي‌توان گفت در حالت تحريك دو جهته در حدود ۲۰% تغيير مكان افزايش يافته كه البته اين عدد صرفاً يك عدد مهندسي بوده و تا رسيدن به مقادير مناسب α_1 و α_2 راه زيادي باقي است. علت رفتار منظم نمودار نيرو- تغيير مكان جداگر رفتار دو خطي المان جداگر در جهات مختلف در هر لحظه از ركورد مي‌باشد كه در نهايت تصوير آن بر روي هر جهت چنين نمودار بي‌نظمي را به تصوير كشيده است.

در ادامه به بررسي نمودارهاي شتاب مطلق عرشه، برش پايه و تغيير مكان جداگر در طول زمان اعمال ركورد پرداخته مي‌شود. تنها نتايج رفتار پلهاي شماره ۲ و شماره ۳ كه به ترتيب بيانگر پلهاي با سختي پايه زياد و كم هستند تحت اثر ركورد زلزله السنترو در اينجا ارائه مي‌شود. لازم به ذكر است رفتار پلهاي شماره ۴ و ۵ در توافق كامل با رفتار پلهاي شماره ۲ و ۳ به ترتيب مي‌باشد. نمودار شتاب مطلق عرشه، برش پايه و تغيير مكان جداگر به ترتيب در شكل‌هاي (۶-۱۲) تا (۶-۱۳) آمده است.

همانگونه كه ملاحظه مي‌شود صرفنظر از تاثير قابل ملاحظه جداسازي در كاهش شتاب مطلق عرشه و برش پايه، در حالت تحريك دو جهته شتاب مطلق عرشه و برش پايه مقادير بيشتري نسبت به حالت تحريك يك جهته ارائه مي‌كند. تاريخچه تغييرمكان جداگر نيز نشان مي‌دهد در حالت تحريك دو جهته جدا گر متحمل تغيير مكان‌هاي بيشتري نسبت به حالت يك جهته مي‌شود.



شكل (۶-۱۲) تاريخچه شتاب مطلق عرشه به ترتيب براي پلهاي شماره ۲و۳



شكل (۶-۱۳) تاريخچه برش پايه به ترتيب براي پلهاي شماره ۲و۳

با توجه به مطالب ذکر شده نشان داده شد که، رفتار سازه پلهاي جداسازي شده تحت اثر تحريك دو جهته نسبت به تحريك يك جهته تفاوت قابل ملاحظه‌اي دارد و به حساب نياوردن اين اثرات در تحليل و طراحي پلهاي جداسازي شده مي‌تواند به تخمين دست پايين مقادير تغيير مكان جداگر، شتاب مطلق عرشه و برش پايه بيانجامد. اين در حاليست كه رابطه آيين‌نامه آشتو كه غالباً در طراحي پلهاي كشورمان استفاده مي‌شود تمهيدي براي در نظر گرفتن اين اثرات نيانديشيده كه اين امر مي‌تواند منجر به كاهش حاشيه ايمني در طراحي پلهاي جداسازي شده بيانجامد.

فصل هفتم

عملکرد لرزه‌ای پلها با جداگر و تکیه‌گاه انبساط حرارتی

۷-۱- مقدمه

در اوایل قرن گذشته روش جداسازی پایه‌های سازه‌ها به عنوان یک روش کنترل غیرفعال سازه‌ها در برابر زلزله مطرح شد. این روش در سالهای اخیر به علت در دسترس قرار گرفتن امکانات مختلف چه از نظر تکنولوژی ساخت و چه از نظر دانش مهندسی در خصوص تحلیل، طراحی و اجرا برای مصون ساختن سازه‌ها در برابر زلزله به عرصه عمل وارد شده و به سرعت در حال توسعه و پیشرفت می‌باشد و روز به روز بر مقبولیت آن افزوده می‌شود.

بر اساس این روش، پاسخ سازه در هنگام زلزله بوسیله 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.

در این فصل به طور مختصری عملکرد پلهای جدا شده و نیز مقایسه آنها با پلهای معمولی که عرشه آنها به صورت ثابت یا بر روی تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی می‌باشند، بررسی شده و به مزایا و معایب هر کدام اشاره می‌شود. پس هدف اصلی در این قسمت مقایسه پلها با تکیه‌گاه‌های

انبساط حرارتی با حالت جداسازی شده و حالت تکیه‌گاه‌های ثابت می‌باشد و بررسی اینکه آیا و تا چه حد این تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی به عنوان جداگر لرزه‌ای کار می‌کنند. بنابراین ابتدا نحوه مدلسازی پلهای مورد مطالعه، بیان می‌شود. پس از آن به تشریح آنالیز غیرخطی تاریخچه زمانی و بیان نحوه همپایه کردن رکوردهای مورد استفاده در آنالیز (طبس، السنترو، ناغان) اشاره می‌گردد.

۷-۲- روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی

۷-۲-۱- مقدمه

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی روشی تحلیلی است برای تعیین بازتاب‌ها در هر مقطع زمانی در مدت وقوع زلزله در یک سازه وقتی که سازه در تراز پایه تحت تاثیر شتابهای ناشی از حرکت زمین (شتاب‌نگاشت) هنگام زلزله قرار می‌گیرد. در این روش بازتاب‌های دینامیکی سازه که تابعی از زمان است بوسیله انتگرال‌گیری عددی معادله حرکت سازه محاسبه می‌گردد. از این روش می‌توان برای تحلیل خطی الاستیک و یا تحلیل غیرخطی سازه‌ها استفاده نمود. نسبت میرایی در محاسبات غیرخطی با توجه به توصیه‌های تخصصی و میزان غیرخطی بودن رفتار اجزای سازه منظور می‌شود. تحلیل تاریخچه زماني تنها روش ممكن براي انجام تحليل ديناميكي غير خطي است.

اين روش در تمام مواردي كه با پلهاي بسيار مهم سر وكار داشته باشيم، مورد استفاده مي‌باشد. رفتار غيرخطي مي‌تواند تنها به سيستم جداساز محدود شود و با تعريف يك رابطه نيرو-تغيير مكان چند خطي مي‌تواند به وسيله برنامه‌هاي كامپيوتري موجود مدلسازي گردد. در این قسمت پلهای مورد مطالعه در تمام حالات با استفاده از نرم افزار SAP2000 Nonlinear مدلسازی و تحلیل شده‌اند. این نرم افزار به عنوان یک نرم‌افزار قوی در زمینه تحلیل دینامیکی سازه‌هایی که دارای المانهای غیرخطی موضعی می‌باشند معرفی شده است. در این نرم افزار عنصری وجود دارد که می‌تواند رفتار غیرخطی جداگر الاستومری و تکیه‌گاه انبساط حرارتی را

مدل نماید. در این بخش، مدل کامل سه بعدی پلهای جداسازی شده و پلهای با تکیه‌گـاه انبـساط حرارتی که شامل المانهای روسازه و زیرسازه و تکیه‌گاه انبساط حرارتی خطی و المانهای جـداگر غیرخطی می‌باشند بوسیله شتابنگاشت‌های مقیاس‌شده، تحلیل تاریخچه زمـانی غیرخطـي مـودال شده‌اند. به منظور مقایسه نتایج و مشاهده تأثیر جداسازی لـرزه‌ای و تکیـه‌گـاه انبـساط حرارتـی، پلهای جداسازی نشده نیز تحلیل و بررسی شده‌اند.

نتایج مورد بررسی در این تحلیل‌ها شامل برش پایه در جهات عرضی و طولی پل، نیروی برشی در ستونهای پایه‌های میانی و کوله‌ها، جابجائی نسبی جانبی سرستون‌های پایه‌های میانی، جابجائی جانبی وسط عرشه، شتاب مطلق وسط عرشه و انرژی ورودی زلزله و نحوه اتلاف آن می‌باشد. در این بخش ابتدا نحوه مدلسازی سازه‌های مورد مطالعه بیان می‌شود، سپس به تشریح تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی و بیان مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌ها اشاره می‌شود. در ادامه نیز جداول، نمودارها و شکلهای حاوی نتایج تحلیل‌ها ارائه می‌گردد.

۷-۲-۲- مدلسازي سيستم پل جداسازي شده و پل با تكيه‌گاه انبساطی

الگوریتم بکار رفته در این برنامه برای حل معادلات حرکت، بسط روش(FNA)[1] می‌باشدکه توسط ویلسون[2] (۱۹۸۹ و۱۹۹۳) توسعه داده شده است. چون فرض این تحقیق بر این است که المانهای روسازه و زیرسازه در پلهای جداسازی شده در محدوده خطی باقی می‌مانند، بنابراین در تحلیل‌ها، زیرسازه پلها 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 می‌باشند، مدل شده‌اند.

برای مدل کردن جداگرها و تکیه‌گاههای انبساط حرارتی از المانهای غیرخطی Nllink و از نوع Rubber Isolator استفاده شده است (جدول۷-۱).المان‌های تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی به صورت خطی مدل شده‌اند. برای مدل کردن جداگرهای الاستومری، رفتار آنها به صورت مدل

1- Fast Nonlinear Analysis
2- Wilson

ایده‌آل هیسترتیک دوخطی در نظرگرفته می‌شود که دارای خصوصیات غیرخطی در درجات آزادی برشی افقی (جهات طولی و عرضی پل) و خصوصیات خطی در سایر درجات آزادی می‌باشند.

جدول (۷-۱) مشخصات تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی مورد استفاده: E.b1) نتایج آزمایشگاه دانشگاه صنعتی امیرکبیر و E.b2) نتایج آزمایشگاه بخش سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

تکیه‌گاه انبساط حرارتی	G (KN/m^2)	E (KN/m^2)	K_v (KN/m)	K_h (KN/m)
E.b1	۹۰۰	۱۰۷۰۰۰	۱۹۱۳۰۰	۱۷۱۵
E.b2	۹۷۵	۲۵۶۰۰۰	۶۵۷۷۰۰	۲۵۰۰

می‌توان به اختصار فرضیات صورت گرفته در تحلیل دینامیکي سیستم پلهای جداسازي شده و پلها با تکیه‌گاه انبساط حرارتی را علاوه بر فرضیات فصل پیش، در این موارد خلاصه کرد:

۱- بار مرده آسفالت KN/m^2 ۱/۵۴ در نظر گرفته شده است.

۲- به دلیل اینکه پلها به صورت دهانه ساده هستند، شاهتیرها در محل سرستونها به صورت مفصل مدل شده‌اند.

۳- رفتار نیرو- تغییر مکان تکیه‌گاههای انبساط حرارتی، به صورت خطي می‌باشد.

۴- خصوصیات تکیه‌گاههای انبساط حرارتی، ایزوتروپیك مي‌باشد و در دو جهت افقي داراي خصوصیات یکسان مي‌باشد. تکیه‌گاههای انبساط حرارتی نیز در روي پایه‌ها و کوله‌ها داراي خصوصیات دینامیکي یکسان مي‌باشند.

۵- پل در معرض زلزله‌هاي افقی طولي و عرضی به صورت مستقل قرار داده شده است.

۶- تکیه‌گاههای انبساط حرارتی در تراز روی تیر سرستون یا روی کوله و زیر عرشه قرار داده می‌شوند.

۷-۲-۳- مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها

به منظور انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی بایستی بعد از انتخاب اولیه شتابنگاشت‌ها به نوعی آنها را مقیاس (Scale) نمود. روشهای مقیاس کردن شتابنگاشت‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

۱- روش ساده (Simple Scaling)

در روش ساده مقیاس کردن، تاریخچه زمانی شتاب طوری مقیاس می‌شود که طیف پاسخ حاصل از آن در محدوده فرکانسی مهم برای پاسخ سازه مورد نظر با طیف طراحی هماهنگ گردد. بنابراین در این روش ضریب مقیاس بایستی به نحوی انتخاب گردد که اختلاف طیف پاسخ و طیف طراحی در محدوده مورد نظر به حداقل برسد.

انتخاب محدوده مورد نظر برای هماهنگی دو طیف بایستی توسط طراح مشخص گردد. برای این منظور در آیین‌نامه UBC97 محدوده پریود ۰/۲T تا ۱/۵T و در آیین‌نامه آشتو ۰/۵T تا ۱/۵T ذکر گردیده است که در آن T پریود ارتعاشی اصلی سازه و یا سایر مودهای مهم در سازه می‌باشد. بایستی توجه نمود که فرض اساسی در این روش هماهنگی نسبی و نزدیکی شکل کلی طیف پاسخ و طیف طراحی می‌باشد.

۲- روش سازگار با طیف (Spectrum Matching)

در روش‌های تولید تاریخچه زمانی سازگار با طیف، تاریخچه زمانی مورد نظر به نحوی تغییر می‌یابد که طیف پاسخ آن به طور کلی با طیف طراحی کاملاً هماهنگ گردد. این روش به دو دسته کلی تنظیم در حوزه فرکانس و تنظیم در حوزه زمان تقسیم مي‌شود.

در روش حوزه فرکانس، تغییرات مورد نظر در حوزه فرکانس بر روی شتابنگاشت‌های انتخابی اعمال می‌گردد در حالي‌که در روش‌های حوزه زمان تغییرات در حوزه زمان بر روی شتابنگاشت اعمال می‌شود به طور کلی ضعف هماهنگی طیف در روش حوزه زمان بیشتر از روش حوزه فرکانس خواهد بود. مزیت این روش نسبت به روش‌های تولید شتابنگاشت‌های

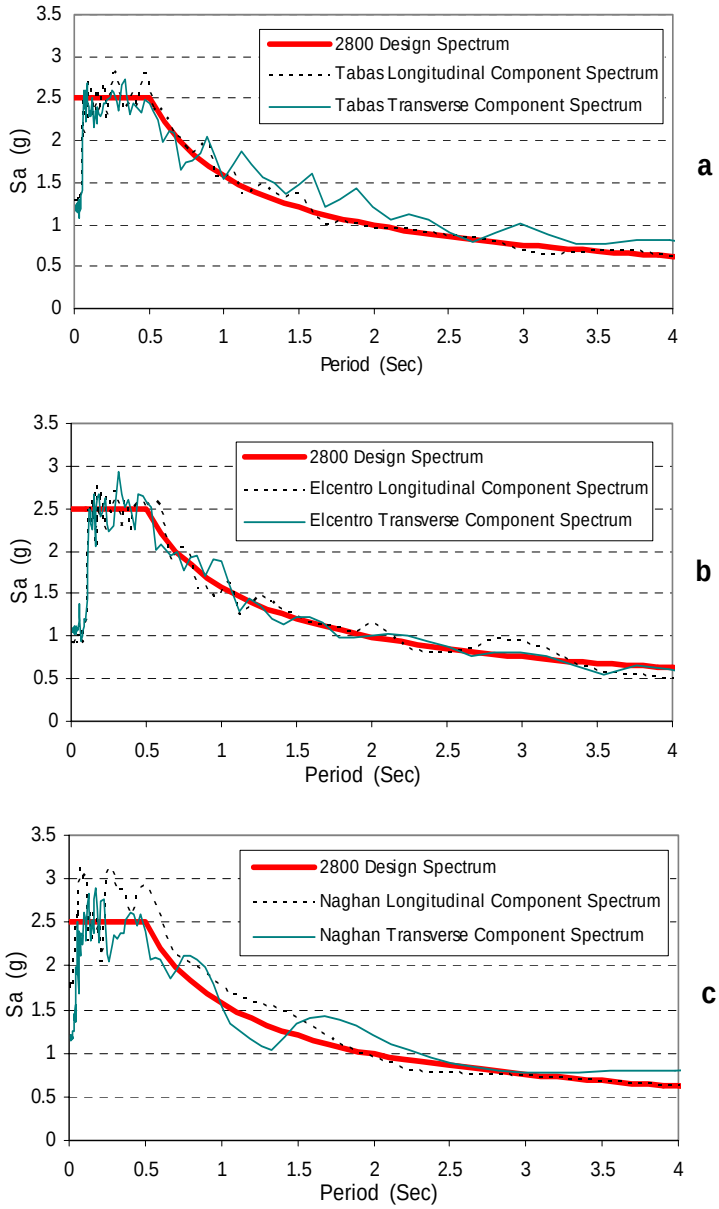
مصنوعی این است که در این روش یک تاریخچه زمانی واقعی انتخاب می‌شود و سپس تغییرات بر روی شتابنگاشت واقعی اعمال خواهد شد.

در روش حوزه فرکانس یک تاریخچه زمانی انتخاب شده و طیف فوریه آن محاسبه مي‌گردد. سپس مقادیر طیف فوریه به نسبت طیف طراحی به طیف پاسخ شتابنگاشت مورد نظر تغییر خواهد یافت در حالیکه مقادیر زوایای فاز بدون تغییر باقی می‌مانند. این عمل چندین بار تا هماهنگی کامل دو طیف ادامه می‌یابد. بدین ترتیب بدون اینکه شکل کلی شتابنگاشت در حوزه زمان تغییر پیدا کند طیف پاسخ آن به خوبی با طیف طراحی هماهنگ خواهد شد[۴۰]. هر یک از دو روش ذکر شده مزیت‌های خاص خود را دارند.

به عنوان مثال مزیت روش مقیاس کردن ساده این است که تاریخچه زمانی تقریباً دست نخورده و طبیعی باقی می‌ماند. از طرف دیگر روش سازگار کردن با طیف دارای این مزیت است که تعداد کمتری تاریخچه زمانی برای انجام آنالیز مورد نیاز است. شتابنگاشت‌های مورد استفاده مربوط به سه زلزله طبس، السنترو و ناغان می‌باشند.

جدول (۷-۲) مشخصات زوج شتابنگاشت‌های مورد استفاده

شتابنگاشت	تاریخ ثبت	PGA مقیاس نشده (g)	
		مؤلفه طولی	مؤلفه جانبی
طبس	۱۹۷۸	۰/۸۳۶	۰/۸۵۲
السنترو	۱۹۴۰	۰/۲۱۴	۰/۳۴۸
ناغان	۱۹۷۷	۰/۴۶۸	۰/۷۳۰



شکل (۷-۱) نمودارهای مقیاس شده طیفهای پاسخ شتابنگاشت‌های سه زلزله طبس، السنترو و ناغان

a) زلزله طبس b) زلزله السنترو c) زلزله ناغان

۷-۲-۴- مدلسازي سيستم پل جداسازي نشده

به منظور مقایسه نتایج پاسخ‌های نیرو و تغییرمکان در پلهای جداسازی شده نسبت به حالت معمولی (جداسازی‌نشده)، پل معمولی نیز به صورت سه بعدی با استفاده از همان المانهای سازه‌ای مدل شده و با نرم‌افزارSAP2000 Nonlinear تحلیل تاریخچه زمانی انتگرال‌گیری مستقیم (Direct Integration) گردیده است. چون در اینجا هدف مقایسه نتایج بوده و قصد طراحی پل نداشته‌ایم، همان شتاب‌نگاشت‌های حالت جداسازی‌شده به پلهای جداسازی نشده اعمال شده است.

در حالت معمولی (جداسازی نشده) برای پلهای دوم تا پنجم، در دو انتهای ستونها مفصل پلاستیک تعریف شده که می‌تواند رفتار غیرخطی موضعی ستون را مدل نماید. با اعمال شتاب-نگاشت‌های مقیاس‌شده به پلها، می‌توان نتیجه گرفت که همه پلها در حالت معمولی، در پای ستونهای خود تشکیل مفصل پلاستیک داده‌اند. برای پل اول نیز در مدل SAP، در دو انتهای شاهتیرها مفصل پلاستیک تعریف شده، اما مشکل خاصی از لحاظ غیرخطی شدن شاهتیرهای پل در این مدل مشاهده نشده است. در حالتهای جداسازی‌شده و اکثر حالات با تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی، پل به صورت الاستیک باقی می‌ماند.

۷-۳- نتایج حاصل از تحلیل پلها

۷-۳-۱- مقدمه

همانطور که اشاره شد کارايي جداگرها به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر سختی و ميرايي آنها می‌باشد. در سیستم جداسازی شده نیروی جانبی زلزله کاهش یافته و بین همه تکیه-گاه‌ها، تقریبا 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 موثر کل سازه افزایش یافته و دوره تناوب موثر پل کاهش می‌یابد. با قرار دادن جداگر در سیستم پل، دوره تناوب آن افزایش می‌یابد. منظور از دوره تناوب، همان دوره تناوب مؤثر می‌باشد که دوره

تناوب مربوط به شکل مود انتقال جانبی پل را در بردارد. مقدار زمان تناوب مربوط به شکل مود انتقال جانبی پل در جداول آورده شده است.

۷-۳-۲- 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 ثابت می‌باشد. با توجه به خروجيهاي بدست آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که:

در پل اول برش پایه عرضی در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر، تحت زلزله طبس ۷۲% تا ۷۸%، تحت زلزله السنترو ۱۲% تا ۵۱%، تحت زلزله ناغان ۵۴% تا ۷۳% کاهش یافته است در حالیکه در حالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی برش پایه عرضی تحت زلزله طبس ۴۲% تا ۵۰%، تحت زلزله ناغان ۱۲% تا ۱۸% کاهش یافته و تحت زلزله السنترو این تکیه-گاهها هیچ کارايي نداشته‌اند. برش پایه طولی نیز در حالت جداسازی شده تحت زلزله طبس ۸۵% تا ۹۰%، تحت زلزله السنترو ۷۵% تا ۸۵%، تحت زلزله ناغان ۶۰% تا ۷۶% کاهش یافته است در حالیکه در حالت استفاده از تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی برش پایه طولی تحت زلزله طبس ۶۸% تا ۷۲%، تحت زلزله السنترو ۴۸% تا ۵۲%، تحت زلزله ناغان ۳۳% تا ۴۲% کاهش یافته است. جداگر نوع a نسبت به بقیه جداگرها در کاهش نیروی برش پایه بیشتر موثر بوده و تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی نسبت به جداگرها در کاهش برش پایه کارايي کمتری داشته‌اند.

در پل دوم برش پایه عرضی در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر، ۷۹% تا ۸۹% و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۵۰% تا ۷۵% کاهش یافته؛ برش پایه طولی در حالت جداسازی شده ۵۹% تا ۸۵% و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی تحت زلزله‌های طبس و ناغان ۶۰% تا ۵۳% کاهش یافته ولی تحت زلزله السنترو هیچ کارايي نداشته‌اند. جداگر نوع a نسبت به بقیه جداگرها در کاهش نیروی برش پایه بیشتر موثر بوده است.

در پل سوم برش پایه عرضی در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر، ۷۳% تا ۹۲% و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۵۱% تا ۸۹% کاهش یافته؛ برش پایه طولی

در حالت جداسازی شده %۴۳ تا %۹۲ و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی تحت زلزله‌های طبس و ناغان %۸۲ تا %۶۶ کاهش یافته ولی تحت زلزله السنترو هیچ کارایی نداشته‌اند. جداگرنوعa نسبت به بقیه جداگرها در کاهش نیروی برش پایه بیشتر موثر بوده است.

در پل چهارم برش پایه عرضی در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر، %۷۱ تا %۸۵ و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی %۵۵ تا %۶۷ کاهش یافته؛ برش پایه طولی در حالت جداسازی شده %۵۷ تا %۸۵ و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی %۶۳ تا %۳۰ کاهش یافته است. جداگر نوع a نسبت به بقیه جداگرها در کاهش نیروی برش پایه بیشتر موثر بوده است. برش طولی زلزله السنترو به دلیل کوچک بودن در این مقایسه لحاظ نشده است.

در پل پنجم برش پایه عرضی در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر، %۷۱ تا %۸۰ و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی %۵۳ تا %۷۰ کاهش یافته؛ برش پایه طولی در حالت جداسازی شده %۸۰ تا %۹۲ و درحالت استفاده از تکیه‌گاههای انبساط حرارتی %۷۱ تا %۸۴ کاهش یافته است. جداگر نوع a نسبت به بقیه جداگرها در کاهش نیروی برش پایه بیشتر موثر بوده است.

در پل اول نیروی برشی تکیه‌گاههای انبساط حرارتی تا ۳/۵ برابر بیشتر از نیروی برشی جداگرها بوده و حداکثر کرنش برشی جداگرها %۹۱ و تکیه‌گاههای انبساط حرارتی %۴۳ می‌باشد.

در پل دوم نیروی برشی تکیه‌گاههای انبساط حرارتی تا ۷/۵ برابر بیشتر از نیروی برشی جداگرها بوده و حداکثر کرنش برشی جداگرها %۱۲۶ و تکیه‌گاههای انبساط حرارتی %۱۴۶ می‌باشد و دور از انتظار است که تکیه‌گاههای انبساط حرارتی بتوانند این کرنش برشی بالا را تحمل کنند.

در پل سوم نیروی برشی تکیه‌گاههای انبساط حرارتی تا ۷ برابر بیشتر از نیروی برشی جداگرها بوده و حداکثر کرنش برشی جداگرها %۱۶۷ و تکیه‌گاههای انبساط حرارتی %۹۵ می‌باشد و دور از انتظار است که تکیه‌گاههای انبساط حرارتی بتوانند این کرنش برشی بالا را در سیکلهای زیاد زلزله تحمل کنند.

در پل چهارم نیروی برشی تکیه‌گاههای انبساط حرارتی تا ۴ برابر بیشتر از نیروی برشی جداگرها بوده و حداکثر کرنش برشی جداگرها ۸۱% و تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۳۸% می‌باشد.

در پل پنجم نیروی برشی تکیه‌گاههای انبساط حرارتی تا ۵ برابر بیشتر از نیروی برشی جداگرها بوده و حداکثر کرنش برشی جداگرها ۱۶۴% و تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۱۰۸% می‌باشد و دور از انتظار است که تکیه‌گاههای انبساط حرارتی بتوانند این کرنش برشی بالا را در سیکلهای زیاد زلزله تحمل کنند.

۷-۳-۳- مقایسه نیروی برشی در ستونها و کوله‌ها

در پل اول، نیروی برشی عرضی در کوله‌ها در حالت جداسازی شده با توجه به نوع جداگر برای همه زلزله‌ها حداکثر تا ۵/۵ برابر، و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی حداکثر تا ۲ برابر کاهش داشته است و از بین جداگرها، جداگر a بیشترین کاهش را ایجاد کرده است.

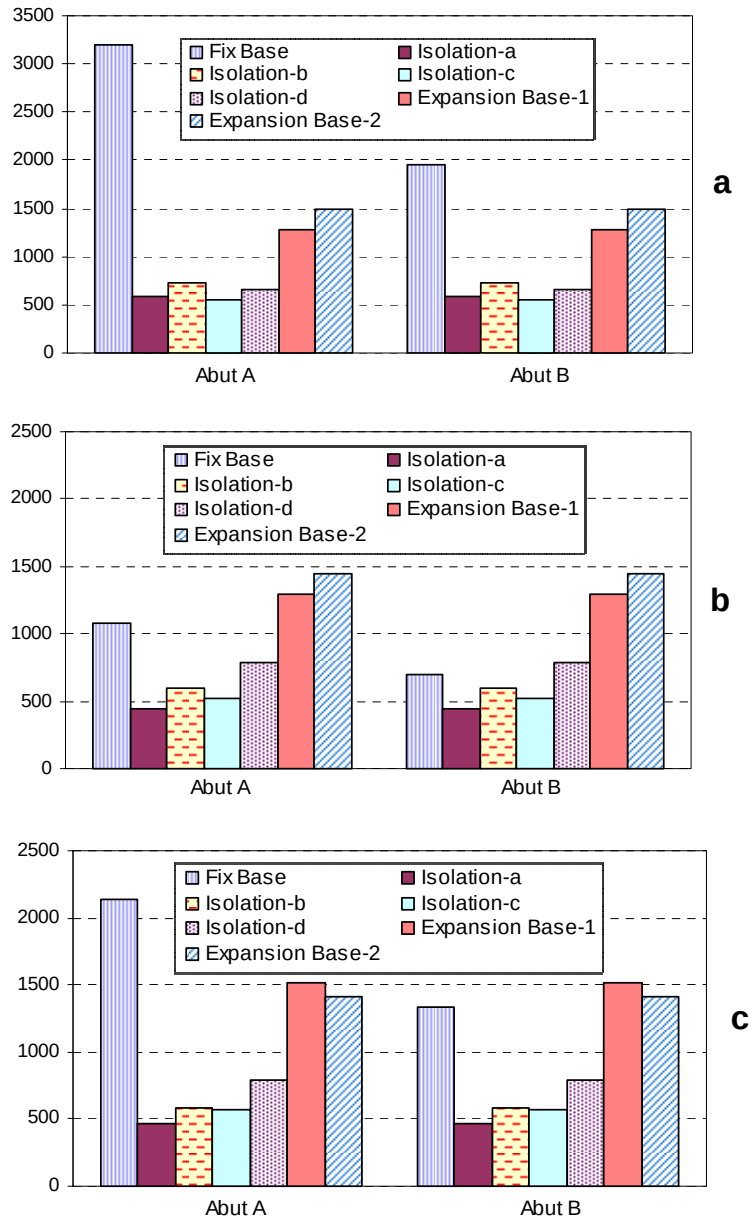
در پل دوم، نیروی برشی عرضی در کوله‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بین۶ تا ۲۲ برابر، و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۲/۵ تا ۶ برابر کاهش داشته است. نیروی برشی عرضی در پایه‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بین۱/۴ تا ۲/۱ برابر کاهش داشته و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی نیروی برشی عرضی در پایه‌ها اصلا کاهش نیافته است.

در پل سوم، نیروی برشی عرضی در کوله‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بین۹ تا ۴۱ برابر، و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۳ تا ۱۱ برابر کاهش داشته است. نیروی برشی عرضی در پایه‌ها در حالت جداسازی شده و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی، به دلیل بلند و لاغر بودن ستونها و رفتار نرمشان، نه تنها کاهش نیافته بلکه افزایش هم پیدا کرده است.

در پل چهارم، نیروی برشی عرضی در کوله‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بین ۵ تا ۱۶ برابر، و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۳ تا ۵ برابر کاهش داشته است. نیروی برشی عرضی در پایه‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بین ۳ تا ۷ برابر

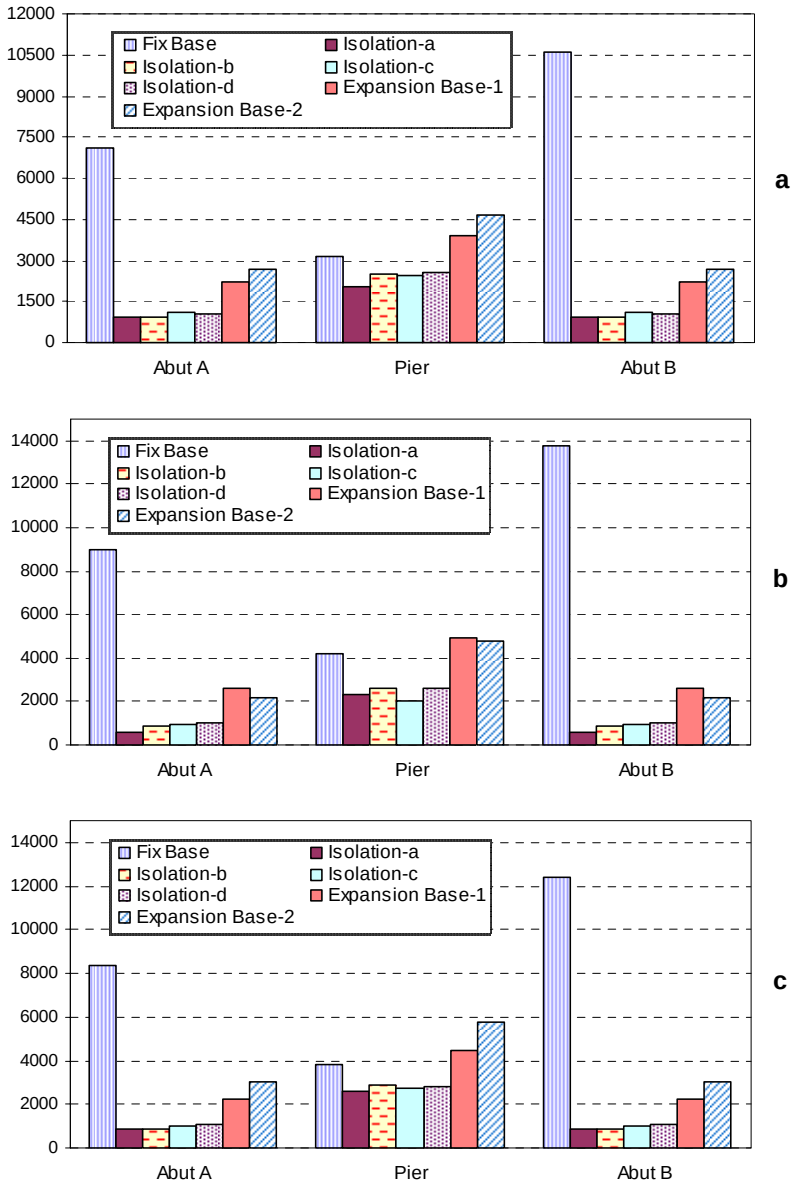
و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی بین ۱/۵ تا ۲/۷ کاهش یافته است. در این پل به دلیل کوتاه بودن پایه‌ها و رفتار صلب، جداسازی بیشترین کاهش نسبی در نیروی برشی عرضی را داشته است.

در پل پنجم، نیروی برشی عرضی در کوله‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بین ۴/۵ تا ۲۴ برابر و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی ۱/۴ تا ۸ برابر کاهش داشته است. نیروی برشی عرضی در پایه‌ها با توجه به نوع جداگر در حالت جداسازی شده، بین ۱/۳ تا ۳/۵ برابر و درحالت تکیه‌گاههای انبساط حرارتی بین ۱/۲ تا ۳ کاهش یافته است.



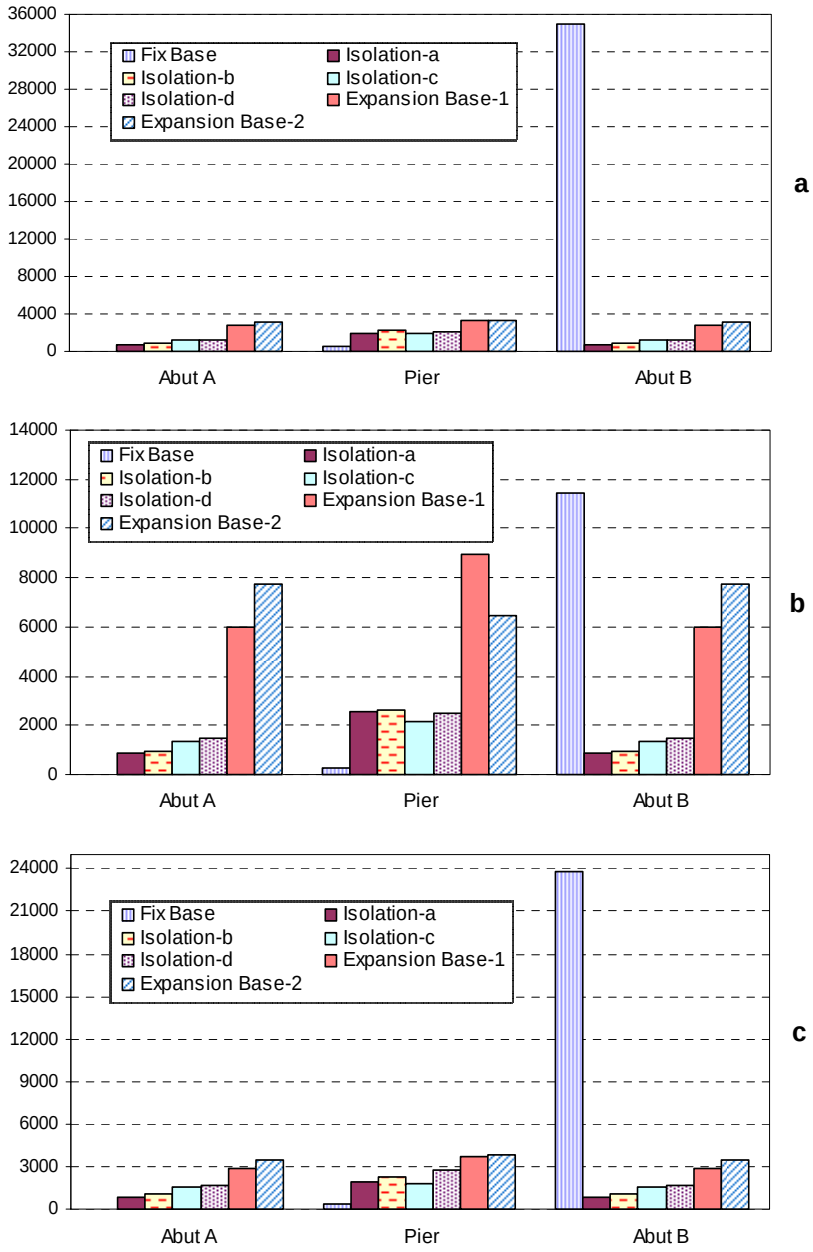
شكل(۷-۲) برش عرضی کوله‌های پل اول

a) تحت زلزله طبس b) تحت زلزله السنترو c) تحت زلزله ناغان



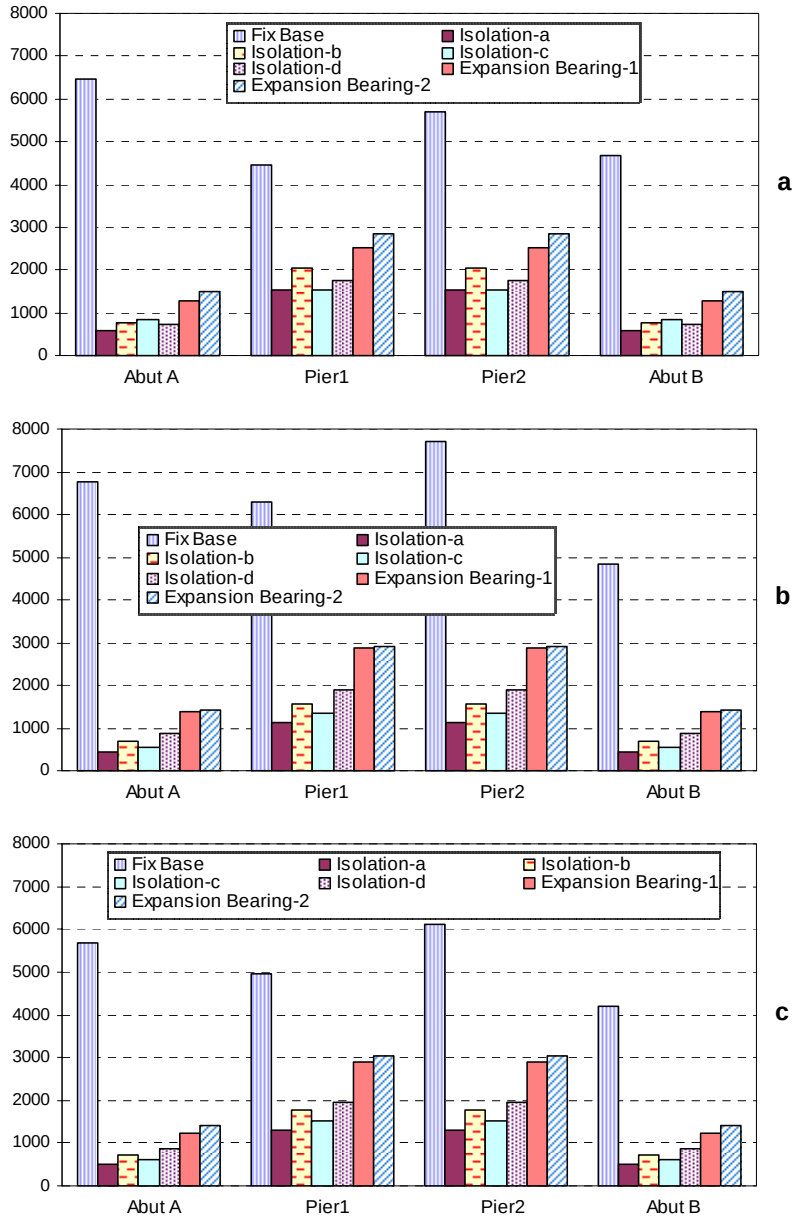
شکل(۷-۳) برش عرضی کوله‌ها و پایه پل دوم

a) تحت زلزله طبس b) تحت زلزله السنترو c) تحت زلزله ناغان



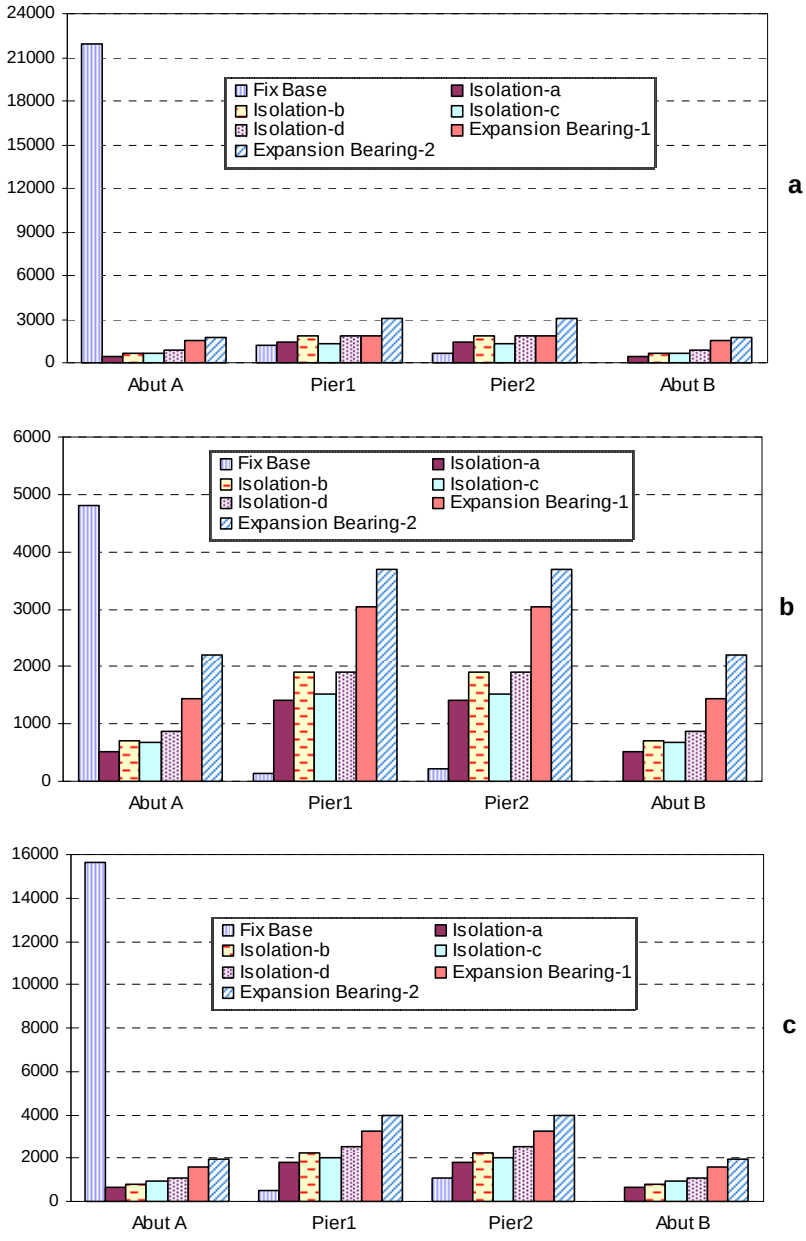
شكل(۷-۴) برش طولی کوله‌ها و پایه پل دوم

a) تحت زلزله طبس b) تحت زلزله السنترو c) تحت زلزله ناغان



شکل(۷-۵) برش عرضی کوله‌ها و ستونهای پل چهارم

a) تحت زلزله طبس b) تحت زلزله السنترو c) تحت زلزله ناغان



شکل (۶-۷) برش طولی کوله‌ها و ستونهای پل چهارم

a) تحت زلزله طبس b) تحت زلزله السنترو c) تحت زلزله ناغان

۷-۳-۴- مقایسه بین جابجایی‌های سرستونها

در پل‌های با پایه‌های کوتاه که رفتار صلب‌تری دارند، وقتی جداسازی شوند انتظار می‌رود که جابجایی‌های سرستون‌ها کاهش یافته و ضریب حفاظت پایه افزایش یابد. روند کاهش جابجایی‌های سرستون‌های پل با پایه‌های کوتاه بدین صورت است که قبل از اینکه پل جداسازی شود نیروی جانبی زلزله به دلیل صلبیت نسبی پایه‌ها، تقریبا بین کوله‌ها و پایه‌ها بطور مساوی و به نسبت سطح بارگیرشان 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 (پل سوم) 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 جانبی زلزله 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 سرستون‌های پل سوم افزایش پیدا کرد. اما در بقیه پل‌ها که رفتار صلبتری داشتند در حالت جداسازی شده برش پایه‌ها تقلیل و جابجایی سرستون‌ها کاهش یافته است. جابجایی سرستون‌های پل‌های دوم و چهارم نشان می‌دهد که این پل‌ها نسبت به بقیه صلب بوده و کارایی جداگرها در کاهش جابجایی سرستون‌ها مشخص می‌باشد. بنابراین با جداسازی، به ترتیب پل‌های چهارم، دوم و پنجم، جابجایی نسبی سرستون‌هایشان با توجه به میزان صلبیت آنها کاهش یافته و هر اندازه که پل صلب تر باشد، جداسازی بهتر کارایی خود را نشان می‌دهد. تکیه‌گاه‌های انبساط حرارتی در پل دوم اصلا کارایی نداشته و در پل چهارم هم تقریبا نصف جداگر، کارایی دارند.

۷-۳-۵- مقایسه ضریب حفاظت پایه‌ها و شتاب مطلق جانبی پلهای مورد مطالعه

در پل‌های با پایه‌های کوتاه انتظار می‌رود که با جداسازی جابجایی‌های سرستون‌ها کاهش یافته و ضریب حفاظت پایه افزایش یابد. ضریب حفاظت پایه‌های پل چهارم به دلیل اینکه از بقیه پلها صلب‌تر است، بزرگتر بوده و کارایی مطلوب جداسازی در پلهای با پایه‌های کوتاهتر

را نشان مي‌دهد. پل سوم به دليل داشتن پايه‌های بلند و لاغر، رفتار نرمتری نسبت به بقيه پلها داشته و در نتيجه جداسازی لرزه‌اي چندان برای اين پل موثر نبوده و ضريب حفاظت پايه در اينجا مطرح نيست. تكيه‌گاههای انبساط حرارتی در پل دوم برای افزايش ضريب حفاظت پايه اصلاً عملكرد مطلوبی نداشته و در پلهای چهارم و پنجم كارايي ضعيف‌تری نسبت به جداگرها دارند. كارايي تكيه‌گاه‌های انبساط حرارتی نسبت به جداگرها در كاهش شتاب مطلق جانبی عرشه ۳۰% تا ۶۰% مي‌باشد.

۷-۳-۶- مقايسه انرژی ورودی و نحوه جذب و اتلاف آن در پلهای مورد مطالعه

همانطور كه اشاره شد، كارآيي جداگرها به طور قابل ملاحظه‌اي تحت تأثير سختي و ميرايي آنها مي‌باشد. بنابراين بايد اين پارامترها را به دقت در نظر گرفت و در مدل وارد كرد. ميرايي جداگر جابجاي را كنترل كرده و قسمتی از انرژی ورودی زلزله را جذب و اتلاف می‌كند. انرژی ورودی زلزله در پل‌های جداسازی شده به صورت چهار انرژی، ميرائی جداگرهای لرزه‌اي يا هيسترتيک سيستم جداساز Link Hysteretic، ميرائی مودال Modal Damping، جنبشی Kinetic و پتانسيل Potential جذب و اتلاف می‌شود. نمودارها نشان می‌دهند كه ۵۰% تا ۷۰% انرژی ورودی زلزله توسط جداگرها جذب می‌شود در حالی كه در پل‌های با تكيه‌گاه انبساط حرارتی به دليل اينكه ميرايي ندارند، ترم چهارم جذب و اتلاف انرژی (Link Hysteretic) وجود نداشته و پلها با جابجايي و تغيير شكل‌های بزرگ، انرژی ورودی زلزله را عمدتاً به صورت ميرايي ذاتي خود جذب و اتلاف می‌كنند.

همچنين هر چقدر سختی اوليه و نيروی تسليم جداگر افزايش می‌يابد، سطح داخل منحنی‌ها كوچک شده و در نتيجه از مقدار انرژی اتلاف شده توسط جداگرها كاسته می‌شود. به بيان ديگر هر چه سختی پس از جاری شدن يک جداگر افزايش يابد، سختی مؤثر كل پل افزايش يافته ولی دوره تناوب مؤثر پل و نسبت ميرايی ويسكوز معادل جداگر كاهش می‌يابد؛ پس هرچه رفتار دوخطی جداگر به سمت حالت الاستوپلاستيک كامل برود، بازده آن بيشتر خواهد بود.

فصل هشتم

آزمایشات بر روی جداگرها

۸-۱- مقدمه

براي بدست آوردن مشخصه‌هاي نيرو- تغيير شكل سيستم جداسازي از جمله ارزيابي سختي مؤثر و ميرايي ويسكوز معادل و نيز ارزيابي كفايت سيستم جداگرهاي مورد استفاده در يک پروژه، بايستي بر روي آنها آزمايشات نمونه انجام شود. همچنين آزمايشات كنترل كيفيت نيز بايستي بر روي جداگرهای انتخابی انجام گيرد. بديهي است كه براي انجام تحليل و طراحي اولية فوق، اطلاعات حداقلي در مورد رفتار نيرو- تغيير شكل جداگرهايي از نوع جداگرهاي مورد استفاده لازم مي‌باشد.

در صورتيكه اين اطلاعات حداقل، از طريق كارخانه سازنده و يا از روي تحقيقات قبلي قابل دسترسي نباشد، لازم است كه قبل از هر چيز آزمايشات حداقلي در راستاي افقي (برشي) و قائم براي بدست آوردن منحني‌هاي نيرو- تغيير شكل برشي و قائم جداگرها بر روي آنها انجام گيرد.

۸-۲- آزمايشات لازم براي سيستم‌هاي جداسازي

عملكرد لرزه‌اي همه سيستم‌هاي جداسازي بايستي بوسيله آزمايش بررسـي و مـورد تأييـد قرار گيرد. بطور كلي سه نوع آزمايش بر روي سيستم‌هاي جداسازي انجام مي‌شود:

۱) آزمايشات مشخصات سيستم
۲) آزمايشات نمونه
۳) آزمايشات كنترل كيفيت

۸-۲-۱- آزمايشات مشخص‌سازي سيستم

قبل از استفاده از سيستم جداسازي، بايستي خواص اساسـي آن بوسـيله آزمـايش ارزيـابي شود. هدف از آزمايشات مشخص‌سازي سيستم، نشان دادن خـواص اساسـي واحـدهاي جـداگر تكي و رفتار يك سيستم جداسازي مي‌باشد. بنابراين اين آزمايشات هم شامل آزمايشات بـر روي واحدهاي جداگر تكي و هم آزمايشات ميزلرزه بر روي سيستم‌هاي كامل جداسازي مي‌باشـد[۱]. اين آزمايشات (آزمايشات بر روي واحدهاي جداگر تكي طبق ضوابط مؤسسة ملـي اسـتاندارد و تكنولوژي[1] (NIST) يا ضوابط مركز ارزيابي تكنولوژي نوين بزرگراهها[2] (HITEC) و آزمايشات ميز لرزه در مقياس حداقل يک چهارم كه ضرايب مقياس بايـستي بـه درسـتي تعيـين شـده و بـه تصويب مهندس طراح برسد.) عبارتند از:

۱) آزمايش دماي پايين
۲) آزمايشات ساييدگي و خستگي
۳) تعيين مشخصه‌هاي سيستم
۴) كفايت سيستم

1- National Institute of Standards and Technology
2- Highway Innovative Technology Evaluation Center

۸-۲-۳- آزمایشات کنترل کیفیت

کلیه تکیه‌گاههای جداگر لرزه‌اي نیاز به بررسی دقیق توسط آزمایشات کنترل کیفیت دارند تا از وضعیت رفتار لرزه‌اي آنها اطمینان حاصل شود[۱]. مثلاً با توجه به انتخاب جداگرهای چند لایه به عنوان گزینه مناسب‌تر در پلهای کشور، آزمایشات کنترل کیفیت زیر نیز بایستي بر روي تکیه‌گاههاي الاستومر انجام شود.

۱) ظرفیت فشاري
۲) ترکیب فشار و برش
۳) معیارهاي پذیرش

بعد از آزمایشات کنترل کیفیت، همة تکیه‌گاهها بایستي براي نقص‌یابي مورد بازرسي چشمي قرار گیرند. در صورت وجود نقص‌هاي زیر بایستي تکیه‌گاه مردود شمرده شود:

۱) عدم اتصال لاستیك به فولاد
۲) نقص جاگذاري (روي هم قرار دادن) لایه‌ها
۳) ترك‌هاي سطحي بر روي لاستیك که پهن‌تر یا عمیق‌تر از $\frac{2}{3}$ ضخامت پوشش لاستیك باشد.
۴) تغییر شکل دائمي

۸-۳- آزمایش‌های برشی و فشاری بر روی تکیه‌گاههای نئوپرن معمولی

برای مطالعه کارایی تکیه‌گاههای معمول مورد استفاده در پلها در مقایسه با سایر جداگرهای لرزه‌اي، باید رفتار آنها را بررسی کرد. غالب تکیه‌گاههای موجود در بازار که در پلها استفاده می‌شوند از همین نوع هستند و متاسفانه خیلی از مهندسین، آنها را با تکیه‌گاههای جداگر لرزه‌اي اشتباه می‌گیرند. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف برشی و فشاری

مشخص شده است که میرایی نئوپرن‌ها (که به عنوان تکیه‌گاههای انبساط حرارتی پلها استفاده می‌شوند) بسیار کم است، لذا میزان استهلاک انرژی در آنها قابل توجه نیست.

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده در داخل و خارج کشور لزوم به کارگیری سیستم‌های جداساز لرزه‌اي کاملاً واضح است. اما با توجه به توانايي کم ساخت لاستیک‌های با میرايي زیاد در داخل کشور به نظر می‌رسد در کنار تشویق صنایع مربوطه به تولید اینگونه لاستیک‌ها برای بهبود عملکرد پلهای راه و راه‌آهن مي‌توان از میراگرهای ویسکوز یا میراگرهای ویسکوالاستیک در کنار سیستم‌های جداساز لرزه‌اي که از جداگرهای از لاستیک‌های با میرایی کم ساخته شده است، استفاده نمود.

فصل نهم

توجيه فني اقتصادي كاربرد جداگرهاي لرزه‌اي

۹-۱- مقدمه

روش جداسازي لرزه‌اي بصورت يك روش كنترل غيرفعال در سه دهه اخير در كنار سـاير تكنيك‌هاي مقاوم سازي و استهلاك انرژي سازه‌ها بطور موثري مطرح شده است كـه در سـالهاي اخير به علت در دسترس قرار گرفتن زمينه‌هاي لازم از لحاظ تكنولوژي ساخت و دانش مهندسي براي تحليل، طراحي و اجرا، به منظور مقابله با اثر زلزله بر سازه‌ها و بخـصوص پلهـا وارد عمـل شده و بسرعت توسعه يافته است. بر مبناي اين روش پاسخ سازه در هنگام زلزلـه بـا ايجـاد يـك لايه انعطاف پذير بين روسازه و زير سازه از ارتعاشات و لرزش شديد زمين جدا مي‌شود و لذا از نيازهاي مقاومت لرزه‌اي آن تا حد زيادي كاسته مي‌شود.

تلاشهاي قابل ملاحظه اي در سالهای اخيـر صـورت گرفتـه اسـت تـا روشـهاي طراحـي تكيه‌گاههای جداساز لرزه‌اي نوين براي پلهاي جديد و روشهاي ترميم و بازسازي پلهاي موجـود تدوين شود. مزاياي تكيه‌گاههاي جداگر لرزه‌اي بصورت محدوده كننـده نيروهـاي جـانبي زلزلـه بخوبي به اثبات رسيده و طراحان مي‌توانند نيروهاي لرزه‌اي وارد بر پايه مياني و كوله‌هـاي پـل را كاهش دهند. از اين تكيه‌گاهها در نواحي لرزه خيز مي‌توان براي طراحـي بهينـه پلهـاي جديـد و

بهسازي پلهاي موجود در برابر زلزله بهره جست. هزينه اضافي تكيه‌گاههاي جداگر لرزه‌اي نسبت به تكيه‌گاههاي معمولي معمولاً با صرفه‌جويي در هزينه مقاوم سازي زير سازه پل موجود و يا ساخت قوي تر پل جديد جبران مي‌گردد. اين صرفه‌جويي اقتصادي عمدتاً بدليل كاهش سطح نيروهاي زلزله در پي استفاده از اين تكيه‌گاهها و افزايش انعطاف پذيري سازه پل مي‌باشد. البته كوششهايی نيز برای ساخت جداكننده‌های لرزه‌اي ارزان قيمت در كشور انجام مي‌شود كه با به ثمر رسيدن آن، هزينه اضافی فوق نيز كاهش يافته و يا از بين خواهد رفت. با استفاده از تكيه‌گاههای جداكننده در مقاوم سازی پلهای موجود، به علت عدم نياز به تقويت زير سازه (پايه‌ها و كوله‌ها)، مي‌توان هزينه اجرايی و نيز هزينه ناشی از قطع ترافيک راكاهش داد.

۹-۲- برآورد فني- اقتصادي برتري كاربرد جداسازي لرزه‌اي

شتابنگاشت بسياري از زمين‌لرزه‌ها داراي زمان تناوب غالب حدود ۰/۱ تا ۱ ثانيه هستند و بخصوص حداكثر مقادير شتاب لرزه‌اي در محدوده پريود ۰/۲ تا ۰/۶ ثانيه رخ مي‌دهد. در نتيجه چون امكان تشديد پاسخ سازه‌هايي با سختي زياد كه پريود طبيعي آنها در حدود ۰/۱ تا ۱ ثانيه مي‌باشد در برابر زلزله وجود دارد، به كمك جداگرهاي لرزه‌اي و انعطاف‌پذيري بالاي آنها مي‌توان پريود طبيعي سازه پل را افزايش داد.

سيستمهاي جداگر لرزه‌اي موجب كاهش قابل توجه در برش پايه مي‌شوند و در كاهش اثرات غير معمول پيچشی پلها نيز موثرند. با نصب سازه پل بر روي لايه‌هاي جداگر كه شكل‌پذيري افقي زيادي دارند، در حاليكه به هنگام زلزله زمين زيرسازه بشدت مي‌لرزد، فقط حركت محدودي در سازه پل القا مي‌شود. جداسازي معمولاً هزينه تامين مقاومت لرزه‌اي را تا حد مطلوبي كاهش مي‌دهد. كاهش در هزينه‌ها بطور عمده با كاهش در سطح نيروي ناشي از زلزله، كاهش در مقاومت و شكل‌پذيري لازم و در نتيجه كاربرد اعضاي باربر ضعيف‌تر و كاهش تغييرمكانهاي نسبي سازه‌اي كه به استفاده از نماهاي خارجي و روكاري‌هاي كم هزينه‌تر منجر مي‌گردد، ارتباط دارد. بنابراين با توجه به مزاياي فني اقتصادي اين جداگرها طبيعي است كه در صدر روشهاي بهسازي لرزه‌اي قرار گيرند.

در دهه اخير تلاشهايي براي ساخت جداگرهاي لرزه‌اي ارزان در دنيا انجام شده كه با تحقق آن، هزينه نسبي اضافي اين تكيه‌گاهها در مقايسه با موارد معمولي نيز كاهش يافته يا از بين خواهد رفت. جنبه‌هاي تحقيقاتي كار در ايران نيز بيشتر مورد توجه قرار گرفته است. با كاربرد تكيه‌گاههاي جداگر لرزه‌اي در بهسازي پلهاي موجود، بعلت عدم نياز به تقويت زير سازه (پايه‌ها، كوله‌ها، و ...) هزينه اجرا و قطع موقت ترافيك نيز كاهش مي‌يابد. تعداد زيادي پل در نواحي زلزله خيز وجود داشته و يا در حال ساخت مي‌باشد كه در آنها اتصال روسازه و عرشه به زير سازه توسط تكيه‌گاههاي معمولي صورت مي‌گيرد كه براي كاهش تاثير نيروهاي زلزله و افزايش ايمني اين پلها در هنگام زلزله، براحتي مي‌توان تكيه‌گاههاي موجود را با تكيه‌گاههاي جداگر لرزه‌اي جايگزين نمود.

كارهاي تحليلي تا به حال با ارزيابي كارايي پلهاي جداسازي شده، مزاياي طراحي و اجرا بر مبناي جداگرهاي لرزه‌اي نسبت به تكيه‌گاههاي معمولي و در عوض استفاده از ساير روشهاي مقاوم سازي لرزه‌اي را نشان داده‌اند. مناسب بودن نوع و تركيب بخصوص سيستم جداگر لرزه‌اي به پارامترهاي مشخصه‌اي از قبيل: طول دهانه، تعداد دهانه‌هاي پيوسته، لرزه خيزي منطقه، فركانسهاي ارتعاشي، مولفه‌هاي شديد زلزله، امكانات نگهداري و جايگزيني بستگي دارد و جداسازی براي پلهاي با ارتفاع زياد پايه‌ها و طول بلند دهانه‌ها راندمان محدودي خواهد داشت.

۹-۲-۱- ميرايي و استهلاك انرژي

تكنيك‌ها و استراتژی‌هاي كاهش اثرات زلزله كه ميرايي غيرفعال يكي از آنهاست در عوض افزودن ظرفيت و مقاومت سازه‌اي سعي در كاهش نياز لرزه‌اي سازه دارند. سه دسته عمده روشهاي كاهش اثرات تخريبي زلزله، جداسازي لرزه‌اي، استهلاك انرژي بصورت غيرفعال و كنترل فعال هستند، اين روشها و دستورالعمل‌های آنها در عمل به شرايط كاربردي قطعات استهلاك انرژي بصورت غيرفعال محدود مي‌شوند. اگرچه جداسازي لرزه‌اي زير مجموعه‌اي از دسته عمومي‌تر استهلاك انرژي بطور غيرفعال محسوب مي‌شود، ميرايي اضافي (افزون يا پاسيو) در سازه‌ها از دونقطه نظر با جداسازي فرق مي‌كند:

۱- ميرايي افزون در تمام طول و ارتفاع سازه پخش مي‌شود به جاي آنكه صرفاً در يك صفحه افقي متمركز شود.

۲- اثر عمده جداسازي همان افزايش پريود سازه و سهم كمتري از اثر ميرايي است. ميرايي تاثير ناچيزي بر پريود مي‌گذارد و اغلب اگر هم دخالتي داشته باشد در جهت كوتاه كردن آنست.

از نقطه نظر مهندسي، تفاوت اساسي در نحوه اتصال با سازه است كه در سيستم جداسازي مثل فنرهاي سري ولي در ميرايي افزون بصورت موازي است. سيستم جداسازي انرژي زلزله را جذب نموده و حركت لرزشي را قبل از رسيدن به سيستم سازه‌اي فيلتر مي‌كند. براي يك سازه با ميرايي افزون تمامي انرژي ورودي به سيستم تركيبي اعمال مي‌شود و براساس مشخصات ميرايي استهلاك صورت مي‌گيرد. اين امر به تنظيم بودن ميرايي با شرايط سازه براي داشتن عملكرد بهينه بستگي دارد كه مسئله طراحي را نسبت به سيستم جداسازي پيچيده مي‌كند[۲۳].

كاهش رفتار سازه‌اي در اثر ميرايي افزون معمولا باندازه جداسازي چشمگير نمي‌شود. جداسازي مي‌تواند نيروها و تغيير مكانهاي سازه را با ضريبي حدود ۴ تا ۶ كم كند در حاليكه در حالت ميرايي افزون اين كاهش به حدود ۱/۵ تا ۲ مي‌رسد. ولي از طرف ديگر راحت‌تر و ارزانتر نصب مي‌شوند. بطور كلي پلهايي را كه نتوان به سيستم جداسازي لرزه‌اي مجهز نمود بهترين گزينه براي ميرايي افزون هستند، بخصوص آنها كه با دهانه يا پايه‌هاي بلند خيلي انعطاف‌پذيرند و يا روي منطقه خاك نرم قرار دارند.

چهار روش عمده ميرايي بصورت كنترل غيرفعال عبارتند از :

۱) ميراگرهاي هيسترزيس
۲) ميراگرهاي اصطكاكي
۳) ميراگرهاي ويسكوز
۴) ميراگرهاي ويسكوالاستيك

كـه اسـتهلاک انـرژی از طريـق تغييـر شـكلهاي غيـرارتجـاعي، اصـطكاک، چـسبندگی سيال و اختلاف فاز بـين تنـشها و كـرنش‌هـای برشـی انجـام مـي‌شـود. ميراگرهـا بـا نـصب در سيـستم مهاربنـدي ديافراگمهـاي انتهـايي پلهـا و يـا سيـستم جداسـازي لـرزه‌اي آنهـا عمـلاً بصورت خمشي، برشي يـا محـوري جـاري شـده و تحـت تغييـر شـكلهاي غيـرارتجـاعي قـرار مـي‌گيرنـد و مـي‌تواننـد تـا ۳۰% ميرايـي معـادل (در مقايـسه بـا ۲ تـا ۵% ميرايـي ذاتـي سـازه) بوجود آورند[۲۳].

۹-۲-۲- ساخت و اجرا

مـشابه احـداث هـر سـازه‌اي، مرحلـه سـاخت و اجـراي جداسـازي براسـاس جزئيـات طراحـي دنبـال مـي‌شـود اگرچـه الزامـات اضـافي زيـر بـراي يـك سيـستم جداسـازي لـرزه‌اي رعايت مي‌شود[۲۴].

۱- آيـين‌نامـه‌هـا معمـولاً آزمايـشات نمونـه و كنتـرل كيفيـت را لازم مـي‌بيننـد. ايـن آزمايـشها بـا نظـارت مناسـبي نتـايج را بـراي همـاهنگي بـا دسـتورالعملها بـرآورد مي‌كننـد. ايـن فعاليـت ممكـن اسـت برنامـه سـاخت پـروژه را ۲ تـا ۳ مـاه بـراي زمان لازم جهت توليد، آزمايش و ارزيابي نمونه تكيه‌گاه به تعويق بياندازد.

۲- نصب جداگرها بخصوص براي بهسازي لرزه‌اي تدابير مخصوصي می‌طلبد.

۳- جهـت نگهـداري، تعميـرات و بازرسـي‌هـاي پـس از زلزلـه‌هـا بايـد برنامـه مشخصي وجود داشته باشد.

۹-۲-۳- هزينه‌هاي جداسازي لرزه‌اي

هزينه جداسازي پايه همواره يك مسئله مهم در ملاحظات طراحي و اجراي پروژه‌ها بوده و در واقع يكي از اولين سئوالات مهندسين براي در نظر گرفتن جداسازي لرزه‌اي اسـت. در ايـن رابطه دو دسته هزينه‌هاي مستقيم و غيرمستقيم وجود داشته و در مقابل، صرفه‌جويي نيـز بايـد در نظر گرفته شود. در غالب حالات، يك ساختمان جديد با جداسـازي لـرزه‌اي بـا در نظـر گـرفتن

جميع جهات تا حدود ۵% از ساختمان با پي ثابت گرانتر در مي‌آيد كه عمدتاً بدليل نياز به نـصب سيستم جداسازي است در حاليكه ساختمان معمولي اصلاً تكيه‌گاههـايي مـشابه جـداگر لـرزه‌اي ندارند[۲۴]. منتها در پلها كه تكيه‌گاههاي معمولي وجود دارند و فقـط بايـد آنهـا از نـوع جـداگر لرزه‌اي استفاده شوند، معمولاً در كل صرفه‌جويي اقتصادي تا ١٠% شكل مي‌گيرد. چـون سـازه بـا جداسازي لرزه‌اي بـراي سـطح عملكـرد بـالاتري طراحـي شـده، كـاهش بارهـاي جـانبي زلزلـه صرفه‌جويي قابل توجهي در هزينه زير سازه بوجـود مـي‌آورد. كـاربرد جداسـازي از نقطـه نظـر بهسازي و مقاوم سازي لرزه‌اي نيز با توجه به دسترسي ساده به تكيـه‌گاههـا در پلهـا (نـسبت بـه ساختمانها) راه‌حل اقتصادي‌تري بنظر مي‌رسد.

۹-۲-۴- هزينه‌هاي طراحي و محاسبات مهندسي

سازه جداسازي شده معمولاً از لحاظ محاسبات مهندسي، طراحي و جزئيات كار بيـشتري مي‌طلبد. اگرچه هزينه‌هاي اضافي در اين زمينه تا حد زيادي به مشخـصات پـروژه بـستگي دارد، موارد زير قابل توجه است:

- تلاشهاي محاسباتي معمـولاً عمـده اضـافه هزينـه‌هـاي مهندسـي اسـت. نـوع تحليـل و هزينه آن وابسته به نـوع پـل و موقعيـت آن اسـت. در سـازه‌هـاي جداسـازي شـده محـدودي مـي‌تـوان روش بـار اسـتاتيكی معـادل را بكـار بـرد و حـداقل يـك آنـاليز طيف پاسخ لازم اسـت. تحليـل تاريخچـه زمـاني در بعـضي سـازه‌هـا نيـاز مـي‌شـود. حتي در صورت اسـتفاده از ايـن روشـهاي تحليلـي در پلهـاي بـا پايـه ثابـت، بـازهم در حالت جداسازي شـده بعلـت وابـستگي خـصوصيات سـختي و ميرايـي بـه تغييـر مكان كه خودش به سختي و ميرايي بستگي دارد توجه بيشتري لازم مي‌شود.
- اگر چه طراحـي جـداگر از طـرف كارخانـه سـازنده انجـام شـده ولـي بـه هـر حـال زمان بيشتري در ارزيابي طراحي جداسازي صرف مي‌شود.
- تعيين جزئيات اتـصالات جـداگرها هزينـه اضـافي دارد. تغييـر مكانهـاي بـزرگ نيـاز به درنظر گرفتن اثرات و لنگرهاي ثانويه را ايجاب مي‌نمايد.

- در بعضي اوقات نياز به برآورد تعدادي پيشنهادات پيچيده مي‌شود. نظارت و ارزيابي آزمايشات نمونه و توليد آنها نيز دخالت مي‌كند.
- نصب جداگرهاي لرزه‌اي به نظارت كارگاهي بيشتري نياز دارد.

٩-٢-٥- هزينه جداگرها

محدوده وسيعي براي هزينه جداگرها مطرح است. در اكثر اوقات، هزينه جداگرها بيشتر تحت تاثير حداكثر تغييرمكان آن بوده و كمتر به بارهايي كه بايد تحمل كند بستگي دارد. براي يك سطح بار لرزه‌اي مشخص، جابجايي متناسب با پريود جداسازي شده بوده و لذا با افزايش ميزان جداسازي هزينه زياد مي‌شود.

هزينه هر قطعه جداگر از 500$ تا 5000$ (وابسته به شرايط پل) فرق مي‌كند. هزينه كل سيستم جداسازي به راندمان طرح كلي آن بستگي دارد. عموماً با افزايش بار قابل تحمل توسط جداگرها، بازدهي آنها بيشتر مي‌شود. مثلاً هزينه كلي سيستم جداسازي براي سازه‌اي برروي ٥٠ جداگر در يك منطقه با لرزه خيزي بالا، حدود ٢٠ تا ٤٠ % كمتر از حالت مشابه بر روي ١٠٠ جداگر مي‌باشد. بطور كلي ابعاد جداگر و لذا هزينه آن بيشتر براساس جابجايي بوده و براي اكثر انواع جداگرها، كمتر به بار محوري بستگي دارد[٢٤].

٩-٢-٦- هزينه تغييرات سازه‌اي

اغلب هزينه اصلاحات سازه‌اي، نقش عمده‌اي در هزينه‌هاي ابتدايي دارد. پرواضح است كه هزينه‌هاي تغييرات سازه‌اي براي جادادن جداگرهاي لرزه‌اي بيشتر به مشخصات پروژه بستگي دارد و اضافه هزينه مقاوم سازي معمولاً تا ٥% هزينه‌هاي سازه‌اي را شامل مي‌شود كه غالب موارد در محدوده ١ تا ٣% بوده است.

٩-٢-٧- صرفه‌جويي در هزينه سيستم سازه‌اي

فلسفه جداسازي لرزه‌اي، كاهش نيروهاي زلزله وارد برسيستم سازه‌اي بوده و لذا طبيعي است كه هزينه سازه كاهش مي‌يابد. ميزان كاهش نيرو به خود سازه، سطح لرزه‌خيزي و ميزان جداسازي بستگي دارد. بطور كلي، نيروهاي زلزله با ضريب حداقل ٣ كاهش يافته و حتي در موارد ايده آل ممكن است تا ٨ برابر يا بيشتر هم كاهش يابند.

متاسفانه، كاهش نيروهاي زلزله با ضريبي مثل ٥، هزينه‌ها را به همين نسبت كم نمي‌كند. سيستم سازه پل هنوز بايد بارهاي ديگر مثل بارهاي ثقلي و باد را تحمل نمايد و اين عوامل ممكن است حداقل مقاطع و مقاومتهايي را براي اعضاي سازه‌اي تعيين نمايند. از اين مهمتر، كاهش نيروها در اثر جداسازي لرزه‌اي، معمولاً در همان حدود كاهش نيروها با در نظر گرفتن شكل‌پذيري در سازه‌هاي جدا نشده است[٢٤].

لذا پتانسيل صرفه‌جويي هزينه در سيستم سازه‌اي براي سازه‌هاي با كمترين شكل‌پذيري ذاتی به حداكثر خود مي‌رسد. براي سيستم‌هاي خيلي شكل‌پذير مثل قابهاي مشي ويژه در ساختمانها يا ديافراگم‌های شكل‌پذير در پلها، بنظر نمي‌رسد كه صرفه‌جويي خاصي در سيستم سازه‌اي در اثر جداسازي لرزه‌اي بدست آيد. در هر حال براي بهسازي لرزه‌اي بكمك جداسازي، صرفه‌جويي در سيستم سازه‌اي نسبت به يك سازه جديد بيشتر مي‌شود.

٩-٢-٨- كاهش هزينه خسارات

بدون توجه به صرفه‌جويي‌هاي اوليه با استفاده از سيستم جداسازي، پل جداشده بعلت نياز كمتر به شكل‌پذيري زير سازه، همواره كمتر از پل با پايه ثابت خسارت مي‌بيند. در ضمن با توجه به كاهش شتاب عرشه، شرايط رفاهي و بهره‌برداري نيز ارتقاء يافته و خسارت كمتري به قطعات الحاقي و غيرسازه‌اي پل وارد مي‌شود. خسارات لرزه‌اي را مي‌توان در ٢ طبقه زير تقسيم‌بندي نمود:

١- خسارات ناشي از جابجايي نسبي كه عمدتاً به اعضاي زيرسازه پل صدمه مي‌زند.

٢- شتاب كه بيشتر به قطعات الحاقي و غيرسازه‌اي لطمه مي‌زند و عدم رفاه ايجاد مي‌نمايد.

در غالب سازه‌هاي جداسازي نشده، مشكل بتوان هر دو دسته خسارات را مهار كرد. با افزايش سختي سازه، جابجايي‌هاي نسبي كاهش يافته ولي در عوض شتابها افزايش مي‌يابد. ليكن براي يك سيستم جداسازي لرزه‌اي بعنوان مثال، جابجايي از ٢% به ٠/٥ و شتابها از g ٠/٥ به ٠/١٨g كاهش مي‌يابند. در اين‌حالت متوسط نسبت هزينه خسارات ناشي از جابجايي از ٠/٢٩ به ٠/٠۶ و هزينه خسارات ناشي از شتاب از ٠/٣٩ به ٠/٠٩ كاهش مي‌يابد[٢۴]. بطور متوسط، هزينه خسارات از ٣۵% هزينه كل سازه، به ٨% آن تقليل مي‌يابد. بر اين اساس، افزايش هزينه اوليه حداكثر ۵% بخاطر استفاده از سيستم جداسازي لرزه‌اي بخوبي توصيه مي‌گردد.

٩-٣- اظهارات كارشناسی در خصوص توجيه اقتصادی جداسازی لرزه‌اي

بر اساس نظرات كارشناسی دكتر ماريونی(Marioni) استاد دانشگاه و متخصص طراحی و اجرای جداسازی لرزه‌اي در ايتاليا، منافع مالي كاربرد جداسازي لرزه‌اي در پلها براساس قيمتهاي روز ايتاليا بشرح زير مي‌باشد. هزينه ساخت يك پل بزرگراهي با دهانه‌هاي پيوسته ۴٠ متري، 2000€ در هر مترمربع در مي‌آيد كه بطور متوسط تقريباً نصف آن براي ساخت عرشه پل و نصف ديگر براي ساخت پي، پايه‌ها و اعضاي ديگر زير سازه صرف مي‌شود. هزينه تكيه‌گاههاي مفصلي معمولي (كاسه‌اي pot) پل در حدود ١% يعني 20€ براي هر مترمربع احداث پل در مي‌آيد. هزينه سيستم جداسازي كامل ٢% ديگر به آن اضافه مي‌كند يعني كل هزينه تكيه‌گاهها شامل جداگرهاي لرزه‌اي، ٣% هزينه كل پل يا 60€ در هر مترمربع عرشه برآورد مي‌شود. عليرغم اين افزايش هزينه، كاربرد جداسازي لرزه‌اي، مي‌تواند حدود ١٠ تا ٣٠% يا حتي بيشتر در ساخت پي و پايه‌هاي پل صرفه‌جويي ايجاد نمايد يعني براي هر مترمربع عرشه حدود ١٠٠ تا ٣٠٠ يورو كاهش هزينه تركيب كاربرد ميراگرها (مثل ميراگرهاي هيسترزيس) با سيستم جداسازي لرزه‌اي مي‌تواند نتايج اقتصادي‌تري به بار آورد.

طبق نظر دکتر میلبوم(Milbum) مدیر هولمز Holmes در نیوزیلند، جداگرهاي LRB یا تکیه‌گاههاي مشابه دیگر به منظور تامین حفاظت بیشتر سازه‌ها در برابر زلزله، یا گاهي براي بهبود عملکرد لرزه‌اي با تکیه‌گاههاي عادي پلها تعویض مي‌شوند. براي سازه‌هاي مهم، روش جداسازي لرزه‌اي نه تنها بهسازي خوبي در مقابل زلزله بوجود مي‌آورد بلکه تغییرات ظاهري آن نیز حداقل است. در شرایطي که نیروهاي لرزه‌اي طراحي مقادیر خیلي بزرگي باشند منافع اقتصادي در کاربرد جداگرهاي لرزه‌اي چشمگیر مي‌شوند. هر چه نصب جداگرها لرزه‌اي بین روسازه و پایه‌ها آسانتر باشد، شرایط اقتصادي تر و اجرایي‌تري شکل مي‌گیرد.

از طرف دیگر بر اساس تجربه بدست آمده در خصوص پلها، دکتر کتز (Kotze)، رئیس شعبه ولینگتون شرکت هولمزHolmes در نیوزیلند معتقد است که جداسازی لرزه‌اي تنها در موارد مشخصی که ایجاب نماید استفاده مي‌شود و بطور کلی ممکن است صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی نداشته باشد. دلیل این امر آن است که بطور معمول طراحی پلهای جدید بر اساس کدهای نیوزیلند به کمک جزئیات شکل‌پذیری در برابر نیروهای زلزله صورت مي‌گیرد. منتها هنگامی که پلهای موجود تقویت می‌شوند و یا روسازه‌های جدیدی قرار است بر روی زیر سازه‌های قدیمی موجود واقع شوند از جداسازی لرزه‌اي استفاده مي‌شود. در چنین حالاتی کاربرد جداسازی لرزه‌اي منافع سازه‌ای و اقتصادی خواهد داشت.

نقطه نظرات در خصوص منافع اقتصادي از کاربرد جداسازي لرزه‌اي بشرح زیر توسط دکتر کلی، (Kelly) مدیر فنی شرکت هولمزHolmes در نیوزیلند تجربه شده است. در مناطق با لرزه‌خیزي کم، اغلب مي‌توان تکیه‌گاههاي موجود را با حتی جداگرهای کوچک LRB با همان حدود هزینه جایگزین نمود. این امر غالباً بدلیل تغییر مکانهای کوچک در چنین حالتی مي‌باشد و در هر حال چنانچه به تغییر تکیه‌گاهها نیاز باشد، احتمالا هزینه اضافی شکل نمي‌گیرد. برای پلهای جدید، تقریبا صرفه‌جویی خاصی در روسازه شکل نگرفته و عمده صرفه‌جویی در زیرسازه خواهد بود. از آنجا که

در صورت کاربرد جداگرهای لرزه‌اي، سطح نیروهای جانبی کاهش مي‌یابد، با احتساب هزینه جداگرهای لرزه‌اي معمولاً صرفه‌جویی اندکی با توجه به کاهش ابعاد و مقاطع پایه‌های پل ایجاد مي‌شود.

برای مقاوم سازی پلهای موجود با زیرسازه‌های ضعیف در برابر زلزله، در صورت جداسازی لرزه‌اي صرفه‌جویی قابل توجهی در مقاوم‌سازی پایه‌ها و پی ایجاد مي‌شود و چه بسا نیازی به بهسازی در این اجزا نباشد. در مواردیکه به شمع در پی نیاز باشد، چون با استفاده از جداسازی لرزه‌اي تعداد کمتر شمع بکار می رود صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌اي بوجود مي‌آید. البته بعلت نیاز به درزهای جدایی بزرگتر وابسته به شکل و مشخصات پل، قدری هزینه‌های اضافی شکل مي‌گیرد.

در نیوزیلند براساس اظهارات دکتر کلی برای همه پلهای کوتاه در مناطق با لرزه‌خیزی متوسط تا زیاد از جداسازی لرزه‌اي استفاده مي‌شود. این پلها مثل پلهای روگذر بزرگراهی معمولا بصورت سه دهانه ۳۰ متری یا حدود آن بوده و در هر حال به تکیه‌گاههای به شکل سنتی نیاز دارند. جداگرهای لرزه‌اي مثلا از نوع LRB، هزینه اضافی نسبتاً کمی ایجاد مي‌کنند. برای پلهای بزرگتر بیشتر از ساخت سنتی با تکیه‌گاههای ثابت و زیرسازه‌های مقاوم شکل پذیر استفاده مي‌شود و کاربرد جداگرهای لرزه‌اي چندان توجیه اقتصادی نخواهد داشت.

بر اساس گزارش توجیه اقتصادی جداسازی لرزه‌اي برای سه پل سه دهانه در نیوزیلند که توسط شرکت هولمزHolmes انجام شده است، هزینه‌های اضافی کاربرد جداسازي لرزه‌اي عمدتا ناشی از تکیه‌گاههای استفاده شده به قطر ۳۶ اینچ و به ضخامت تقریبی کل ۲۲ اینچ (شامل ۱/۵ صفحات بارگذاری) مي‌باشد. برآورد هزینه این جداگرها شامل آزمایشات نمونه و حمل به محل، ۱۱۲۰۰$ برای هر جداگر بوده و برای کل سه پل، ۴۸ عدد جداگر لرزه‌اي با هزینه کل ۵۳۷۶۰۰$ نیاز خواهد بود. بعلاوه، ۰/۹تن ورق فولادی جهت آماده سازی هر تکیه‌گاه و در مجموع ۴۳ تن برای سه پل نیاز مي‌شود. چنانچه بتوان در محل تکیه‌گاههای میانی برای منظور نمودن حرکات حرارتی، مشابه آنچه اخیرا برای پلهای بزرگراهی در ایتالیا انجام شده است از

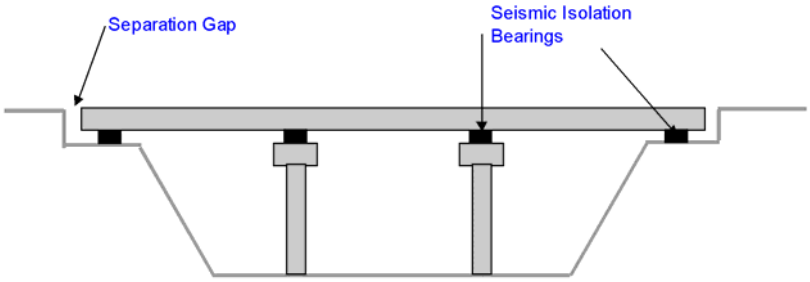
تکیه‌گاههای تکی با اتصالات شیاردار استفاده نمود، ۶ مورد جداگر یعنی معادل ۶۷۲۰۰$ صرفه‌جويي مي‌شود. صرفه‌جويي عمده اقتصادی به علت کاهش نیروهای زلزله شکل مي‌گيرد. این کاهش هزینه معادل ۶۹ تن در آرماتورهای تسلیح بتن در ستونها، ۲۲۰۰ یارد مکعب در بتن پایه‌ها و پی و ۹۰۰ فوت در طول کل شمعها برآورد شده است. بعلاوه، صرفه‌جويي کاهش آرماتورگذاری عرضی پایه‌ها و اینکه دیگر به تکیه‌گاههای معمولی در پلهای مورد نظر نیازی نیست، نیز اضافه می‌گردد.

۹-۴- تفاوت کاربرد جداسازی در پلها با ساختمان‌ها

مفهوم جداسازی لرزه‌اي در پلها به طور اساسی با ساختمانهای معمولی فرق می‌کند. موارد فراوانی در پلها وجود دارد که با ساختمان‌ها متفاوت بوده و مفهوم جداسازی لرزه‌اي را تحت تأثیر قرار مي‌دهد[۲۴]:

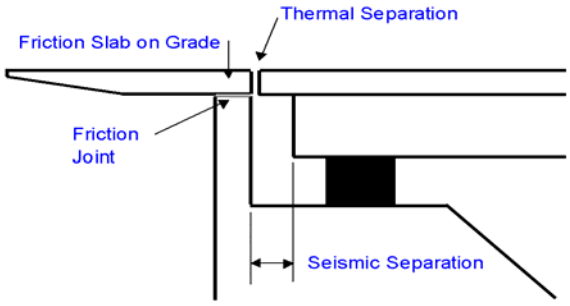
- بیشتر وزن در روسازه و در یک صفحه افقی (عرشه پل) متمرکز شده است.
- روسازه برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌اي بسیار مقاوم است در حالي که زیرسازه پل (پایه‌ها و کوله‌ها) بسیار آسیب پذیرند.
- مقاومت لرزه‌اي غالباً در دو جهت افقی عمود بر هم طولی و عرضی متفاوت است.
- پلها باید بارهای جانبی سرویس بیشتری و تغییر مکان‌های ناشی از باد، بار ترافیک، خزش، حرکات انقباضی و حرارتی را تحمل کنند.

هدف جداسازی لرزه‌اي پلها متفاوت از ساختمانهای معمولی است. در ساختمانهای معمولی، جداسازی لرزه‌اي به منظور کاهش نیروهای اینرسی سازه بالای جداگر مي‌باشد تا نیروهای اعضا را کاهش دهد. در پلها به طور معمول جداسازی لرزه‌اي در زیر روسازه انجام مي‌گیرد و هدف آن محافظت از المانهای زیر جداگر مي‌باشد. این کار با کاهش نیروهای اینرسی منتقل شده از روسازه به زیرسازه صورت مي‌گیرد. در شکل (۹-۱) نمونه‌ای از یک پل جداسازی شده نشان داده شده است.



شكل (٩-١) نمونه‌اى از يک پل جداسازى شده لرزه‌اي

معمولاً جداکردن پلها به خصوص در جهت طولی مشکل است. در سازه‌های جداسازی شده اگر فاصله کافی برای تغییر مکان سازه وجود نداشته باشد موجب مي‌شود که ضربه ای از محل تکیه‌گاه به سازه وارد شود. برای ساختمانها، این ضربه اثرات نامناسبی در بر خواهد داشت. ضربه وارده یک شوک با فرکانس بالا ایجاد می‌کند که به صورت موج در سازه بالا می‌رود و لذا موجب این خرابی‌ها مي‌شود که قرار بود سیستم جداساز از آن جلوگیری کند[٢۴]. در پلها، در صورت کم بودن فاصله مزبور روسازه با کوله پل برخورد می‌کند که معمولاً شتاب زیاد در آنها ایجاد خرابی می‌کند و به این دلیل ضربه تأثیر زیادی بر پل نمی‌گذارد. نیروی ناشی از ضربه را مي‌توان با قرار دادن ماده شکننده و ترد در محل برخورد کاهش داد. شکل (٩-٢) نمونه‌ای از آن را نشان مي‌دهد.



شكل (٩-٢) جزئيات محل اتصال عرشه پل به كوله آن

ویرایش ۱۹۹۱ دستورالعمل جداسازی لـرزه‌اي AASHTO اجـازه داده اسـت کـه پلهـای جداشده برای همان ضریب شکل‌پذیری (R) که برای پلهای جداسازی نـشده اسـتفاده مـي‌شـود، طراحی شوند که این مسئله برای ساختمانها متفاوت است.

این دستورالعمل دو روش تحلیل طیفی، تک‌مودی[1] و چندمودی[2] را پیشنهاد می‌کنـد. روش اول شبیه روش خطی است و روش دوم همانند روش معمول تحلیل طیفی است. همچنین تحلیل تاریخچه زمانی نیز برای پلهای جداسازی شده لرزه‌اي اجازه داده شد و در ضمن آزمایشهایی باید بر روی سیستم‌های جداگر انجام شود. در بازنگری ۱۹۹۹، دسـتورالعملAASHTO بـا تغییـرات اساسی مواجه شد. تفاوت‌های اساسی بین دو ویرایش آشتو از این قرار است[۲۴]:

- محدودیت در ضریب R، بدین ترتیب که ضریب به نـصف مقـدار آن بـرای پلهـای جداسازی شده ولی نه کمتر از ۱/۵محدود شد.
- اضافه شدن روش تحلیل بار یکنواخت بـه روش‌هـای تحلیـل موجـود. ایـن روش، روش بار استاتیکی است که انعطاف‌پذیری زیرسازه را نیز به حساب می‌آورد.
- ارائه روش‌هایی برای تحلیل پلهای با میراگرهای ویسکوز
- در نظر گرفتن کرانه بالا و پائین برای طراحی بر اساس جابجایی حداکثر
- نیاز به انجام آزمایش‌های وسیع‌تر شامل آزمایش تعیین مشخصات سیستم

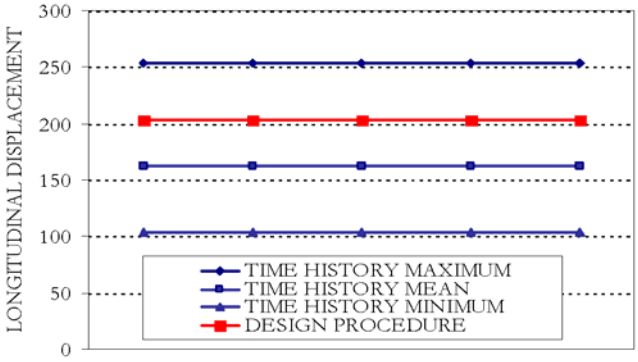
۹-۵- ارزیابی اجرایی

۹-۵-۱- فرآیند تحلیل

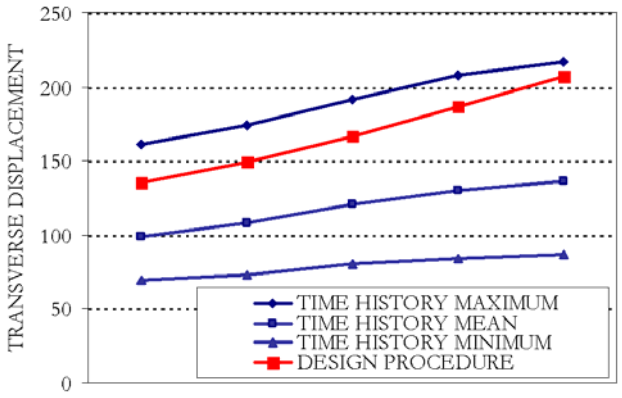
آشتو اجازه مي‌دهد که از روشهای تک مودی و یا تاریخچه زمانی استفاده شود. در شکل (۱۰-۳) و (۱۰-۴) مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحلیل به روش تک مودی و با نتایج حاصـل از حداکثر، حداقل و میانگین حاصل از تحلیل به روش تاریخچه زمانی با ۷ زلزلـه نـشان داده شـده است. نتایج حاصله حاکی از این است که روش تک مودی که یک روش سـاده شـده اسـت کـه

1- Signal- Mode
2- Multi- Mode

انعطاف‌پذیری خمشی را نیز در نظر مي‌گيرد، با تقريب مناسبی نتايج را نسبت به جواب دقيق تاريخچه زمانی تخمين می‌زند. نتايج حاصله از اين روش از ميانگين نتايج روش تاريخچه زمانی بيشتر و از حداكثر آنها كمتر است. بنابراين مي‌توان دريافت كه نتايج مذكور بر اساس اين كه در روش تاريخچه زمانی پاسخ حاصل از ميانگين پاسخ ناشی از ٧ ركورد در نظر گرفته مي‌شود، تا حدی محافظه‌كارانه است. اگر نسبت به نتايج حداكثر حاصل از ٣ ركورد در نظر گرفته شود، نتايج كمی غيرمحافظه‌كارانه خواهد بود. با توجه به عدم قطعيت در انتخاب ركوردهای زلزله مي‌توان گفت كه روش طراحی ساده سازی‌شده، سيستمی با عملكرد قابل قبولی ايجاد می‌كند[٢۴].



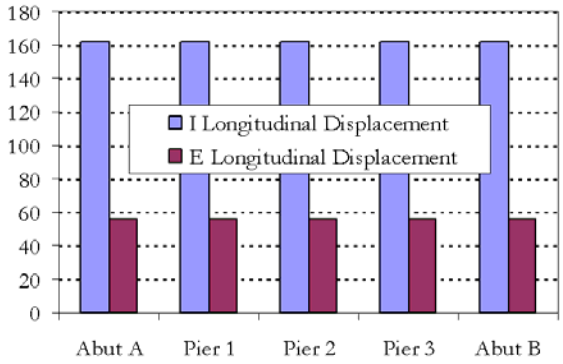
شكل (٩-٣) مقايسه جابجايی طولی در پل تحليل شده به روش تک مودی و تاريخچه زمانی



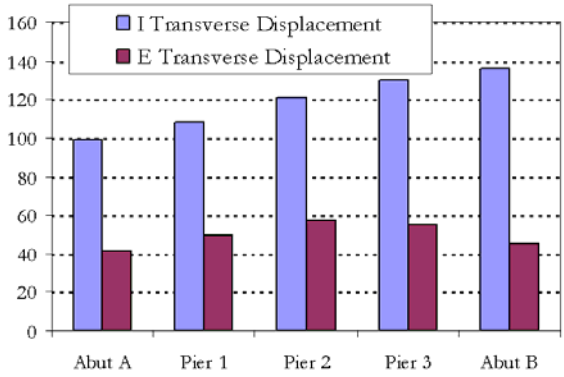
شكل (٩-۴) مقايسه جابجايی عرضی در پل تحليل شده به روش تک مودی و تاريخچه زمانی

۹-۵-۲- تاثیر جداسازی لرزه‌اي در جابجایی‌ها

شکل (۹-۵) و (۹-۶) بـه ترتیـب جابجـایی طـولی و عرضـی عرشـه را بـرای سیـستم جداسازی لرزه‌اي (I) و سیستم اتلاف انرژی (E) مقایسه می‌کند. در جهت طولی، جابجایی‌هـا در تراز عرشه در حالت جداسازی لرزه‌اي، ۱۶۰ mm است که تقریباً ۲,۵ برابر جابجایی حـداکثر در حالت اتلاف انرژی است. در جهت عرضی هسته بزرگ سربی در کوله پـل موجـب مهـار کـردن چرخش گردیده است و تغییر مکانی در اثر خمش عرشه بوجود آمده است. بیشترین جابجایی در سیستم جداسازی شده در کوله B، ۱۳۶ mm است در حالی که در سیستم اتلاف انرژی ۵۷ mm است که تغییر مکان عرضی در سیستم جداسازی شده مانند تغییر مکـان طـولی ۲,۵ برابـر حالـت سیستم اتلاف انرژی است.



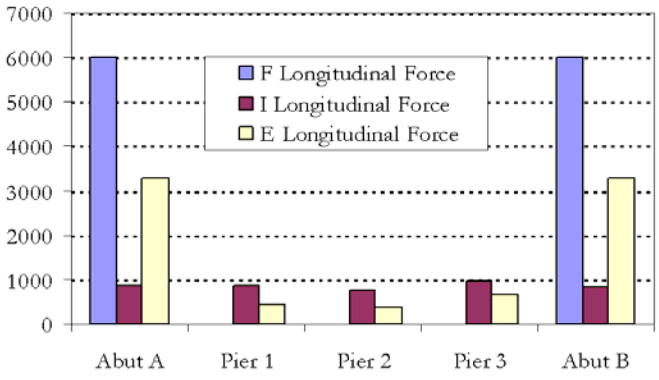
شکل (۹-۵) مقایسه جابجایی طولی در پل تحلیل‌شده در حالت جداسازی لرزه‌اي (I) و اتلاف انرژی (E)



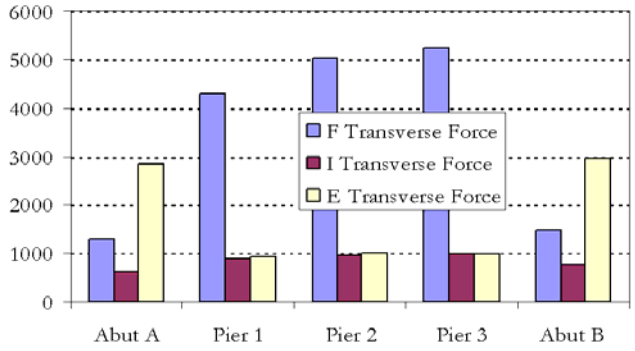
شکل(۹-۶) مقایسه جابجایی عرضی در پل تحلیل شده درحالت‌جداسازی لرزه‌اي(I) واتلاف انرژی(E)

۹-۵-۳- تاثير جداسازی لرزه‌اي بر نيروها

شکل (۹-۷) و (۹-۸) به ترتیب نیروهای عرضی و طولی تکیه‌گاهها را برای حالت جداسازی شده (F)، جداگرهای لرزه‌اي (I) و تکیه‌گاههای اتلاف کننده انرژی (E) با هم مقایسه می‌کند. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، سیستم جداسازی لرزه‌اي و اتلاف انرژی تاثیر زیادی بر مقدار و توزیع نیروها دارد[۲۴].



شکل(۹-۷)مقایسه نیروی طولی در پل تحلیل‌شده
تکیه‌گاه‌ثابت(F)، جداسازی لرزه‌اي(I) واتلاف انرژی(E)



شکل (۹-۸) مقایسه نیروی عرضی در پل تحلیل‌شده
تکیه‌گاه ثابت(F)، جداسازی لرزه‌اي(I) و اتلاف انرژی(E)

الف- در جهت طولی

در جهت طولی هنگامی که تکیه‌گاهها ثابت هستند نیروی لرزه‌اي كل توسط کوله‌ها تحمل مي‌شود وحداکثر نیرو KN ۶۰۰۰ است. اگرازتکیه‌گاههای جداساز لرزه‌اي استفاده شود، نیروها تقریباً به طور یکسان بین پایه‌ها و کوله‌ها توزیع مي‌شود و حداکثر نیرو از KN ۷۶۹ تا KN ۹۷۵ متغیر است و در حدود ۶ برابر نسبت به حالت با تکیه‌گاه ثابت کاهش یافته است.

در صورت استفاده از تکیه‌گاههای اتلاف کننده انرژی توزیع نیرو به گونه‌اي است که نیروی بیشتری در کوله‌ها (حداکثر KN ۳۲۸۴) و نیروی بسیار کمتری در پایه‌ها (حداکثر ۶۵۲KN) ایجاد مي‌شود. نیروهای ایجاد شده بیشتر از حالتی است که از تکیه‌گاههای جداساز لرزه‌اي استفاده مي‌شود ولی نسبت به حالت با تکیه‌گاه ثابت حدود ۲ برابر کاهش یافته است.

ب- در جهت عرضی

در جهت عرضی در حالی که تکیه‌گاهها ثابت هستند، نیروها به نسبت سختی پایه‌ها بین آنها توزیع مي‌شود. حداکثر نیروی ایجاد شده در کوله KN ۱۴۷۹ و حداکثر نیروی پدید آمده در پایه KN ۵۲۴۳ در پایه سوم که کوتاهترین پایه است، مي‌باشد. با استفاده از تکیه‌گاههای جداساز لرزه‌اي، نیروها تقریباً به طور یکنواخت بین همه پایه‌ها توزیع شده است و حداکثر نیروی کوله KN ۷۴۱ و حداکثر نیروی پایه KN ۹۸۷ است که نیروها حدود ۵ برابر نسبت به حالت با تکیه‌گاه ثابت کاهش یافته است.

با استفاده از تکیه‌گاههای اتلاف کننده انرژی توزیع نیرو متفاوت از دو حالت قبلی است به طوری که بیشتر نیروی ایجاد شده در کوله‌ها تحمل شده که حداکثر آن KN ۲۹۵۲ است و کمترین سهم نیرو در پایه‌ها است که مقدار حداکثر آن KN ۱۰۱۲ مي‌باشد. نتایج تحلیل این پل نشان مي‌دهد که استفاده از تکیه‌گاهها چگونه مي‌تواند در کاهش نیروهای وارد بر پل و تغییر توزیع آنها در اجزای زیرسازه موثر باشد.

در این مثال که سیستم جداساز لرزه‌اي با پریود ۲ ثانیه در پایه‌ها و کوله‌ها قرار داده شده است موجب شد تا نیروهای لرزه‌اي را در حدود ۲/۸ برابر در جهت طولی و ۴ برابر در جهت

عرضی کاهش دهد به دلیل اینکه نیروها تقریباً به طور یکنواخت توزیع شده است. ایجاد نیروهای محلی در سازه به شدت کاهش یافته است. نیروهای طولی کوله‌ها به میزان ۷ برابر و نیروهای عرضی پایه‌ها در حدود ۵ برابر کاهش یافته است. این کاهش در نیروها فقط با جابجایی حداکثر ۱۶۰mm در عرشه ایجاد شده است.

در سیستم با تکیه‌گاههای اتلاف انرژی، از تکیه‌گاههای سخت تری که هسته سربی بزرگتری داشتند در کوله‌ها استفاده شد تا پریود سیستم جداسازی شده در حدود ۱ ثانیه شود و نیروها در کوله‌ها متمرکز شوند که باعث شد تغییر مکان عرشه به حدود ۶۰mm برسد و ۳۵% نسبت به حالت قبلی کاهش یابد.

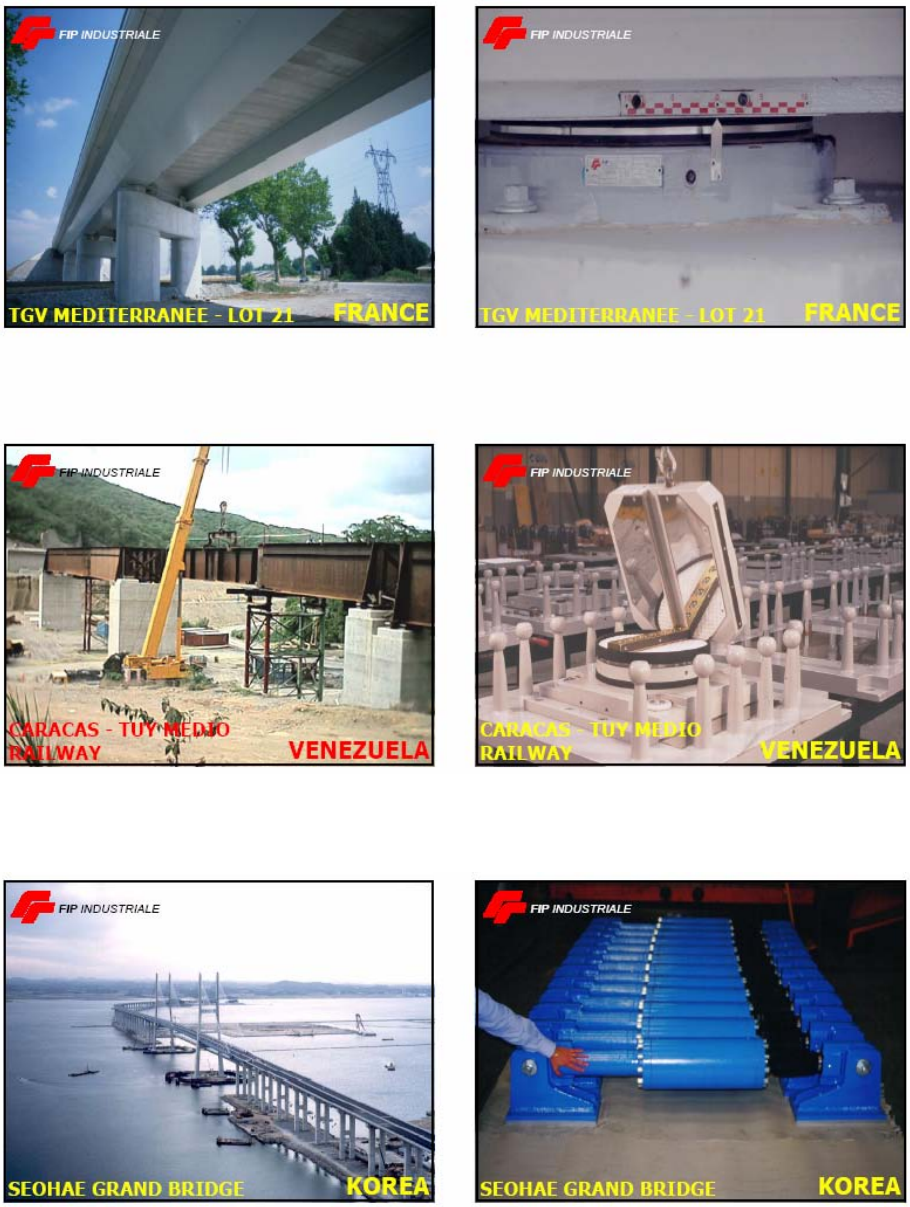
با توجه به اینکه پریود نسبت به حالت تا تکیه‌گاه ثابت کمتر به پریود بالاتر منتقل شده است کاهش نیروهای لرزه‌اي نسبت به حالت با تکیه‌گاه ثابت کمتر بوده و میزان ۱/۵ برابر در جهت طولی و ۲ برابر در جهت عرضی محدود مي‌شود. این سیستم نیروهای طولی کوله را در حدود ۲ برابر و نیروهای عرضی پایه را در حدود ۵ برابر کاهش مي‌دهد[۲۴].

۹-۶- کاربرد جداگرهای لرزه‌اي در پلها در کشورهای مختلف

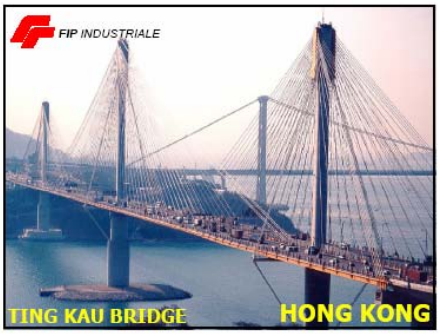
نمونه‌هائی از پلهای جداسازی شده و جزئیات کاربرد جداگرها در شکل (۹-۹) به جهت تکمیل موارد مذکور و تائید مجدد استقبال کشورهای مختلف از این روش برای طراحی و بهسازی لرزه‌اي پلها ارائه شده‌اند. همانطور که در مباحث این فصل مرور شد، استفاده از جداگرهای الاستومري با توجه به امکانات و توانائی‌های شرکتهای داخلی توصیه مي‌شود.

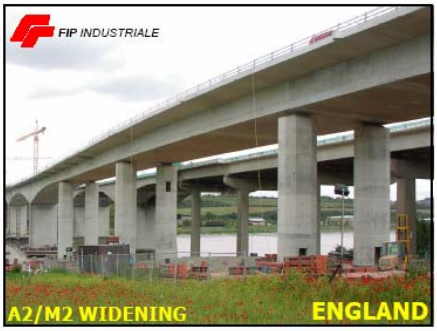
شکل (۹-۹) نمونه‌هایی از جداگرهای لرزه‌اي استفاده شده در پلها

ادامه شكل (۹-۹) نمونه‌هايی از جداگرهای لرزه‌اي استفاده شده در پلها



شکل (۹-۱۰) نمونه‌هایی از جداگرهای لرزه‌اي استفاده شده در پلها





ادامه شكل (۹-۱۰) نمونه‌هايی از جداگرهای لرزه‌اي استفاده شده در پلها

فصل دهم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۱۰-۱- مقدمه

جداگرهای الاستومریك شامل لایه‌هاي متناوب لاستیك و صفحات فلزي مي‌باشند. این جداگرهادرجهت قائم بسیار سخت و درجهت افقي بسیار انعطاف‌پذیر مي‌باشند. انعطاف‌پذیري افقي با افزایش زمان تناوب و مشخصه‌هاي میرایي بالشتکها با ارتقای استهلاک انرژی زلزله، اثرات مطلوب جداسازي را در سیستم فراهم مي‌کنند. کارآیي آنها به طور قابل ملاحظه‌اي تحت تأثیر سختي و میرایي آنها مي‌باشد. بنابراین باید این پارامترها را به دقت در نظر گرفت و در مدل وارد کرد.

موقعیت قرارگیري جداگرها در پلها، تراز روي تیر سرستون یا روي کوله و زیر شاهتیرهای عرشه مي‌باشد، که باعث مي‌شود بواسطه عمل جداسازی، اثر نیروي جانبي زلزله که به علت تمرکز جرم سیستم پل در عرشه، در این تراز وارد مي‌شود، به زیرسازه (پایه‌هاي میاني و کوله‌ها) کاهش یابد و در نتیجه به اجزاء زیرسازه، نیروي لرزه‌اي کمتري وارد شود. نقش دیگر جداسازی لرزه‌ای متعادل کردن پاسخ نیرویی بین پایه‌ها و کوله‌ها می‌باشد که در این حالت مزیت

جداسازي لرزه‌اي اين است كه پاسخ نيرويي شديد وارد بر اجزاء سخت‌تر زيرسازه را كاهش داده و نيروهای زلزله را بين همه المانهای زيرسازه تقسيم می‌نمايد.

در اين تحقيق، پس از بررسی كاربرد جداسازی لرزه‌اي در پلها و شناخت انواع جداگرهای لرزه‌اي، مرور آيين‌نامه‌ها و روشهای طراحی، جداگرهای لرزه‌ای الاستومری كه از لحاظ ساختاری از ساير جداگرها به نسبت ساده‌تر بوده و امكان ساخت آنها در داخل كشور، با توجه به تكنولوژی ساخت ساده آنها فراهم است، مورد طراحی و تحليل قرارگرفته‌اند. پارامترهای مؤثر در اين جداگرها متغير فرض شده است تا امكان بررسی خواص مختلف آنها وجود داشته باشد. چندين پل كه از لحاظ ساختار و ابعاد و اندازه‌ها از پلهای متداول كشور محسوب می‌شوند، برای اين كار در نظر گرفته شده‌اند تا بتوان امكان كاربرد جداگرهای لرزه‌ای در پلهای كشور را بررسی نمود. در همين راستا برای هر پل، چند جداگر طرح شده است و هريک نيز در مدل پل جداسازی‌شده مورد تحليل قرار گرفته است.

۱۰-۲- نتيجه‌گيري

با مرور مطالب ارائه شده در اين گزارش، مقايسه جداگرهای طراحی شده و بررسی تحليل‌ها برای پلهای مختلف نتايج زير را می‌توان خاطرنشان كرد:

هرچه سختی اوليه و نيروی تسليم جداگر افزايش يابد، سختی مؤثر كل سازه افزايش و دوره‌تناوب مؤثر پل كاهش می‌يابد. بدين ترتيب با هندسه يكسان، می‌توان تعداد يا ضخامت لايه‌های لاستيک را كاهش داد و جابجائی طرح، هم از روش بار يكنواخت و هم از روش تحليل تاريخچه زمانی كاهش می‌يابد، اما ابعاد جداگر در پلان نيز افزايش می‌يابد كه اين امر باعث كاهش كرنشهای برشی جداگر می‌شود.

در پلهايی كه سختی جانبی پايه‌های ميانی در آنها به نسبت كمتر است (ارتفاع ستونها زياد است) ميزان كاهش نيروی برشی در پايه‌های ميانی در حالتهای جداسازی شده نسبت بـه حالـت معمولی كمتر از پلهای ديگر است. علت اين است كه نقش جداسازی لرزه‌ای در اين پلهـا تـوازن

پاسخهای نیرو بین اجزای مختلف زیرسازه می‌باشد، بنابراین در این پلها با کاهش قابل ملاحظه نیروی برشی در کوله‌ها به خاطر کاهش زیاد برش پایه مواجه می‌شویم. پس در پلهای با پایه‌های میانی انعطاف‌پذیرتر، نقش جداسازی لرزه‌ای عمدتاً کاهش نیروها در کوله‌ها ودرنتیجه توازن بین پاسخ نیروها در اجزای زیرسازه (کوله‌ها و پایه‌های میانی) می‌باشد.

هرچه سختی اولیه جداگرها افزایش یابد، نیروی برشی تولید شده در آنها افزایش می‌یابد ودر نتیجه جابجائی حداکثر آنها افزایش می‌یابد، که منجر به افزایش جابجائی جانبی کل عرشه مي‌شود، بنابراین با توجه به محدودیت در جابجائی حداکثر عرشه، می‌بایست از جداگری با سختی اولیه مناسب استفاده نمود. با افزایش نیروی تسلیم (حد جاری شدن) جداگرها، نیروی برشی بیشتری در جداگرها تولید شده، درنتیجه نیروی برش منتقل‌شده به پایه‌های میانی وکوله‌ها بیشتر می‌شود و جابجایی جانبی سر پایه‌ها افزایش می‌یابد و همچنین جابجائی حداکثر عرشه افزایش می‌یابد. تأثیر جداسازی لرزه‌ای در پلهای بررسی شده به این صورت است که جداگرهای a و d بیشترین تأثیر را در پلها دارند. پس در مقادیر سختی اولیه کم، تأثیر نیروی تسلیم جداگر ملموس نمی‌باشد. اما هرچه سختی اولیه افزایش یابد، تأثیر افزایش نیروی تسلیم جداگر مشخص می‌شود.

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

می‌توان نتیجه‌گیری نمود که هر چه پل دارای سختی جانبی بیشتری باشد ودر نتیجه دارای دوره‌تناوب کوچکتری باشد، بازده جداسازی لرزه‌ای بیشتر است. برای پلهای بررسی شده که با دهانه‌های حدود ۲۰ تا ۳۶ متر می‌باشند، جداگرهای لرزه‌ای مؤثر و کارآمد می‌باشند. البته هرچه پایه‌ها و دهانه‌هاکوتاهتر باشند، تأثیر جداسازی بیشتر است.

با افزایش نیروی تسلیم جداگرها، نسبت میرایی ویسکوز معادل بر اساس روش بار یکنواخت آشتو افزایش می‌یابد، اما با افزایش سختی اولیه جداگر، این نسبت لزوماً افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در نیروی تسلیم پایین اگر سختی اولیه افزایش یابد، این نسبت کاهش می‌یابد ولی در نیروی تسلیم بالا، با افزایش سختی اولیه، نسبت میرایی نیز افزایش می‌یابد. 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 ویسکوز معادل جداگر کاهش می‌یابد؛ پس هرچه رفتار دوخطی جداگر به سمت حالت الاستوپلاستیک کامل برود، بازده آن بیشتر خواهد بود. براساس تقسیم‌بندی آیین‌نامه یوروکد جداگرهای طراحی‌شده جزو گروه جداگرهای لاستیکی با میرایی زیاد قرار می‌گیرند، زیرا نسبت میرایی ویسکوز معادل آنها عمدتاً بین ۰/۱۵ تا ۰/۲ (۱۵ % تا ۲۰ %) می‌باشد.

با افزایش تعداد جداگرها، نیروها و بارهای وارد بر هر واحد جداگر کاهش می‌یابد، پس ابعاد هندسی آن کاهش می‌یابد؛ اما نکته قابل توجه آن است که با افزایش تعداد جداگر در پل، سختی مؤثر کل نیز افزایش می‌یابد که خود باعث کاهش دوره تناوب مؤثر پل جداسازی‌شده می‌شود، بنابراین باید تا آنجا که امکان دارد (از لحاظ محدودیتهای اعمال شده از طرف ساختار پل و همچنین هزینه هر واحد جداگر) یک حالت بهینه برای تعداد جداگرهای مورد استفاده در پلها به دست آید.

برش پایه در حالت جداسازی‌شده نسبت به حالت معمولی کاهش چشمگیری داشته است. البته این مقدار کاهش به میزان افزایش دوره تناوب در حالت جداسازی‌شده و نوع پل و زلزله اعمال شده نیز بستگی دارد. بطور کلی با افزایش دوره تناوب، برش پایه کاهش می‌یابد. براساس تحلیل‌های انجام گرفته، همه پلها در حالت پی ثابت در اثر اعمال این زلزله‌ها دچار رفتار غیرخطی در پای ستونهای خود شده‌اند، ولی با قرار دادن جداگرها در پل نیروهای برشی و لنگرهای خمشی تا اندازه‌ای کاهش یافته‌اند که زیرسازه پلها به صورت الاستیک باقی می‌مانند؛ بنابراین با اعمال جداگرهای طرح شده، این فرض اساسی تحقق یافته است. نیروی برشی درکوله‌ها در حالت جداسازی‌شده برای همه زلزله‌ها در پل یک دهانه بین ۲/۰ تا ۴/۰ برابرکاهش

داشته است. در پلهای چند دهانه مطالعه شده، نیروی برشی در ستونها در حالت جداسازی‌شده، بین ۳ تا ۵ برابر و در کوله‌ها نیز حدود ۱۰ تا ۲۰ برابر کاهش داشته است.

با اعمال جداگرهای لرزه‌ای پاسخهای جابجائی کل سازه به خاطر جابجائیهای غیرالاستیک جداگرها افزایش می‌یابد، ولی جابجائي 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 می‌باشد. هر قدر پل دارای پایه‌های میانی بلندتری باشد، این میزان کاهش کمتر می‌شود. در پلهای بررسی شده، جابجائی جانبی سرستونهای پایه‌های میانی در حالت جداسازی‌شده تقریبا بین۲ تا ۴ برابر کاهش داشته است. جداگرهای c و d به نسبت a و b جابجائیها را بیشتر کاهش می‌دهند که در این میان جداگر d بیشترین تأثیر را دارد.

در حالت معمولی یا جداسازی‌نشده پل، شکل اصلی ارتعاشی پل عمدتاً مود حرکت قائم عرشه می‌باشد. این وضعیت در پلهای مورد بررسی کماکان مشاهده می‌شود، هرقدر سختی جانبی (عرضی) عرشه پل بیشتر باشد، این شکل ارتعاش پل در مودهای بیشتری به چشم می‌خورد. در پلهای یک دهانه کوتاه که دارای شاهتیرهای فلزی عمیق باشند، شکل اصلی ارتعاشی همان مود انتقال جانبی می‌باشد، ولی در پلهای بلندتر و چند دهانه مود انتقال جانبی پل در مودهای بالاتر رخ می‌دهد. جداسازی لرزه‌ای، مود ارتعاشی انتقال جانبی پل را به مد اصلی ارتعاش پل تبدیل می‌کند، به همین علت از اثرات زیانبار زلزله وارد بر پل می‌کاهد.

با افزایش سختی اولیه جداگرها دوره تناوب اصلی سازه که در حالت جداسازی شده همان مود انتقال جانبی می‌باشد، کاهش می‌یابد؛ بنابراین برش پایه سازه افزایش می‌یابد و به برش پایه حالت جداسازی نشده نزدیک می‌شود؛ این وضعیت در پلهای به نسبت سخت‌تر دیده مي‌شود و اثر کاهش نیروها ناشی از جداسازی لرزه‌ای بیشتر احساس می‌شود. در حقیقت همانطور که گفته شد، هر چه پل سخت‌تر باشد، تأثیر جداسازی لرزه‌ای مناسب در کاهش پاسخهای نیرویی و تغییرمکانی بیشتر می‌باشد.

۱۰- ۳- جمع‌بندی نهائی

جداگرهای الاستومری در این تحقیق، به نحوی برای پلهای مختلف طرح شده‌اند که شرایط کرنشهای برشی آیین‌نامه را ارضاء نمایند. سختی اولیه جداگر، مهمترین پارامتر در طراحی جداگر می‌باشد. پس از آن بیش از سایر پارامترها مثل سختی ثانویه و نیروی تسلیم جداگر، جابجائی طرح جداگر عامل تعیین‌کننده خواهد بود. با توجه به آیین‌نامه‌های مختلف، در طراحی جداگرها باید کرنشهای برشی هر واحد جداگر از حدود مشخصی تجاوز نکند. اما با توجه به طراحیهای انجام شده، هیچ‌گاه این کرنشها در طراحی تعیین‌کننده نبودند.

دوره تناوب محاسبه شده از روش بار یکنواخت که به صورت دستی باید سختی زیرسازه و روسازه را محاسبه نمود و با سری و موازی گرفتن اجزاء مختلف، سختی مؤثر کل را محاسبه نمود، با دوره تناوب محاسبه شده توسط نرم‌افزار به هم نزدیک می‌باشند، اما روش دستی دوره تناوب را بیشتر فرض می‌کند. رفتار سازه پلهاي جداسازي شده تحت اثر تحريك دو جهته نسبت به تحريك يك جهته تفاوت قابل ملاحظه‌اي دارد و به حساب نياوردن اين اثرات در تحليل و طراحي پلهاي جداسازي شده مي‌تواند به تخمين دست پايين مقادير تغيير مكان جداگر، شتاب مطلق عرشه و برش پايه بيانجامد. اين در حاليست كه رابطه آيين‌نامه آشتو كه غالباً در طراحي پلهاي كشورمان استفاده مي‌شود هيچگونه تمهيدي براي اين اثرات در نظر نگرفته كه اين امر مي‌تواند منجر به كاهش حاشيه ايمني در طراحي پلهاي جداسازي شده گردد.

تکیه‌گاههای انبساط حرارتی همانند جداگرهای الاستومریك شامل لایه‌هاي لاستيك و صفحات فلزي مي‌باشند. اين تكيه‌گاهها در اصل برای تحمل نیروهای درون عرشه پل مثل نیروهای حرارت و ترمز مورد استفاده قرار می‌گیرند. كارايي اين تكيه‌گاهها به خوبی جداگرهای لرزه‌ای نمی‌باشد و حتی در برخی موارد اصلا به عنوان جداگر کار نکرده‌اند. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که این تکیه‌گاههای انبساط حرارتی کرنشهای بالايي حتی تا ۱۵۰% را باید بدون ایجاد اختلال در کارايي‌شان به عنوان جداگر، تحمل نمایند که با توجه به مشخصات فیزیکی آنها، دور از انتظار مي‌باشد که بتوانند این کرنشها را تحمل کنند. علاوه بر آن همه

تکیه‌گاههای انبساط حرارتی پلهای موجود در محل نصبشان دارای کلید برشی بوده که جابجـایي و تغییر شکلهای این تکیه‌گاهها را محدود می‌کنند. بنـابراین عـلاوه بـر مشخـصات فیزیکـی ایـن تکیه‌گاهها، محل مناسب و نحوه درست نصب آنها برای تحمـل و امکـان ایجـاد تغییرشـکل‌هـای برشی بالا به هنگام وقوع زلزله لازم است.

نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که این تکیه‌گاههای انبساط حرارتی میرایـي لازم برای جذب و اتـلاف انـرژی ورودی زلزلـه را ندارنـد. بنـابراین پلهـا بـا جابجـایي و تغییـر شکل‌های بزرگ، انرژی ورودی زلزله را عمدتاً به صـورت میرایـي ذاتـي خـود جـذب و اتـلاف می‌کنند. در ضمن این تکیه‌گاههای انبساط حرارتی در مدت وقوع زلزله و به تعـداد سـیکل‌هـای زیاد، باید دوام لازم را داشته و ازکارایي فیزیکی آنها به عنوان جداگر کاسته نشود. اما با توجه بـه اینکه مشخصات فیزیکی این تکیه‌گاهها اغلب مربوط به آزمایشات غیرچرخه‌ای می‌باشد، بنابراین نمی‌شود اعتماد کرد که این تکیه‌گاه‌ها بتوانند سیکل‌های زیاد زلزلـه را بـدون کـاهش در کـارایي لازم، تحمل کنند. بنابراین با توجه به مطالب اشاره شده، مي‌توان نتیجه گرفت که تـضمینی بـرای اینکه تکیه‌گاههای انبساط حرارتی بتوانند به عنوان جداگرهای لـرزه‌ای عمـل نمـوده و کـارایي و عملکرد نسبی جداگر را داشته باشند، وجود ندارد و در صورت اتکای به آنها باید از دسـتگاههای استهلاک انرژی بطور همزمان استفاده نمود.

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. با حمایت شرکتهایی که در کار ساخت و تولید لاستیکهای طبیعی یا مصنوعی هستند، می‌توان جداگرهایی ساخت که جایگزین نئوپرنهای موجود پلها شود، و این در حالی است که این کار نیاز به تکنولوژی پیشرفته‌ای هم ندارد، اما بر طبق کارهای انجام شده، تأثیر آنها در پلها بسیار زیاد خواهد بود. بر اساس مقایسه و توجیه اقتصادی کاربرد جداگرهای لرزه‌اي در کشورهای دیگر، براحتی مي‌توان از منافع مالی استفاده از این تکیه‌گاهها در پلهای جدید و موجود کشور اطمینان حاصل نمود. البته باید توجه داشت که بدین ترتیب عملکرد لرزه‌اي پلها در کلاس بالاتری قرار

مي‌گيرد و نبايد تنها به تفاوت مستقيم هزينه‌ها آن هم در اوايل استفاده از اين روش كه ممكن است تا حدی ارزبری داشته باشد، بسنده نمود.

با توجه به نتايج آزمايش‌های انجام شده در داخل و خارج كشور لزوم به كارگيری سيستم‌های جداساز لرزه‌اي در پلها كاملاً واضح است. اما با توجه به توانايي كم ساخت لاستيک‌های با ميرايي زياد در داخل كشور به نظر می رسد در كنار تشويق صنايع مربوطه به توليد اينگونه لاستيک‌ها برای بهبود عملكرد پلهای راه و راه‌آهن مي‌توان از ميراگرهای ويسكوز يا ميراگرهای ويسكوالاستيک در كنار سيستم‌های جداساز لرزه‌اي كه از جداگرهای از لاستيک‌های با ميرايی كم ساخته شده است، استفاده نمود. با ادامه اين تحقيق، در كنار انجام آزمايشهای متعدد می‌توان به آيين‌نامه‌ای در زمينه جداسازی لرزه‌ای در پلها دست يافت كه ضرورت آن با توجه به كارآيی و بازده جداگرهای لرزه‌ای در رفتار پلها، روز به روز بيشتر احساس می‌شود.

با توجه به پارامترها و خصوصيات جداگرهای استفاده شده در اين تحقيق، بايستی برای تأييد رفتار واقعی جداگرها آزمايشهاي بيشتری صورت گيرد تا بتوان طبق نتايج آزمايشها، با قطعيت بيشتری طراحی جداگرها را استوار كرد كه پيشنهاد مي‌شود جهت ادامه كار اين پژوهش، طراحی جداگرها و آزمايشات جامع لازم برای بهسازی لرزه‌اي پلهای مشخص انجام گردد.

اين تحقيق به عنوان يک زمينه ساز برای تدوين آيين‌نامه‌ای در زمينه جداگرهای لرزه‌ای الاستومری و كاربرد آنها در پلهای كشور می‌باشد. مي‌توان اين كار را به انواع ديگر جداگرها نيز تسری داد، بويژه كار بر روی جداگرهای لاستيکی- سربی به عنوان جداگرهايی كه با توجه به تكنولوژی ساخت ساده‌ای كه دارند، امكان ساخت آنها در كشور وجود دارد، توصيه می‌شود. همچنين می‌توان به منظور تكميل و توسعه تحقيق حاضر، اثر اندركنش خاک و سازه، مدل كردن پی عميق و خاک، مدل كردن پلهای كج و منحنی‌شكل، تركيب سيستمهای جداگر مختلف با هم، محل قرارگيری تركيب جداگرها و بهينه كردن نوع و محل جداگرها و برآورد اقتصادی از لحاظ كاهش ابعاد مقاطع اعضای سازه‌ای يک پل مشخص و هزينه جداگرهای آن را مطالعه و بررسی نمود.

مراجع

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

2- American Association of State Highway and Transportation Officials (1999). “AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges”, 16th Edition, Division I-A: Seismic Design.

3- Anderson, E. and Mahin, S.A. (1998). “Displacement-based design of seismically isolated bridges”, Proc. of the Sixth US National Conf. on Earthquake Engineering, EERI, Oakland, California.

4- Braga, F., Calvi, G.M. and Pinto, P.E. (1998). “Italian and European guidelines for seismic design of isolated bridges”, Proc. of the US-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, MCEER, Buffalo, NY, 3-12.

5- Briseghella, L., Gori, R. and Negro, P. (1989). “Seismic isolation of pier bridges”, Proc. Of 9th World Conf. on Earthquake Engineering, Vol. V, 621-626.

6- Buckle, I.G. and Mayes, R.L. (1990). “Seismic isolation: History, application, and performance- A world view”, Earthquake Spectra, Vol.6, No.2, pp. 161-201.

7- Calvi, G.M. and Pavese, A. (1997). “Conceptual design of isolation systems for bridge structures”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 1, 193-218.

8- Chaudhary, M.T.A., Abe, M., Fujino, Y. and Yoshida, J. (2001). “Performance evaluation of base-isolated Yama-age Bridge with high damping rubber bearings using recorded seismic data”, Engineering Structures, Vol. 23, 902-910.

9- Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., Mokha, A. and Watson, R. (1991). “Displacement control device for base isolation of bridges”, Earthquake Spectra, Vol. 7, 179-200.

10- Delis, E., (1997). “Analytical studies for seismic isolation in highway bridges”, Proc. of Structures Congress XV, ASCE, Vol. 2, 1471-1478.

11- Dolce, M. (1998). “Seismic isolation of railway bridges”, Proc. of the US-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, MCEER, Buffalo, NY, 127-146.

12- Eftekhari, M. and Zadeh, M.T. (1996). “Effect of seismic isolation systems on dynamic behaviour of bridges under earthquake loading”, Proc. of Eleventh World Conf. on Earthquake Engineering, Paper No. 1347.

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

14- Ghobarah, A. and Ali, H.M. (1988). “Seismic performance of highway bridges”, Engineering Structures, Vol.10, 157-166.

15- Gregory, I.H. and Muhr, A.H., (1995).“Design of elastomeric anti-seismic bearings”, European Seismic Design Practice, Elnashai edited, Balkema, Rotterdam.

16- 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.

17- Hwang, J.S. (1996). “Evaluation of equivalent linear analysis methods of bridge isolation”, Journal of Structural Engineering , ASCE, Vol. 122, 972-976.

18- Jangid, R.S. and Banerji, P. (1995). “Seismic response of bridges with non-linear supports”, Second Int. Conf. on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Vol. 1, 561-568.

19- Jankowski, R., Wilde, K., Fujino, Y. (1998).“Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, 487-502.

20- Japan Road Association (1996). “Design Specifications of Highway Bridges”, part V, Seismic Design, , December 1996.

21- Kelly, J.M. (1998). “The analysis and design of elastomeric bearings for application in bridges”, Proc. of the US-Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, MCEER, Buffalo, NY, 73-87.

22- Kelly, J.M. (1999). “Analysis of fiber reinforced elastomeric isolator”, JSEE, Fall 1999, Vol. 2, No.1, pp19-34.

23- Kelly, T.E. (2001). “In-structure damping and energy dissipation, Design Guidelines”, Holmes Consulting Group Ltd.

24- Kelly, T.E. (2001). “Base isolation of structures, Design Guidelines”, Holmes Consulting Group Ltd.

25- Lee, G.C., Kitane, Y., Buckle, I.G., (2001). Literature review of the observed performance of seismically isolated bridges, http://mceer.buffalo.edu/publication, pp51-62.

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

27- Mahin, S.A. (1993). “A simplified preliminary design approach for base isolated bridges”, Proc. of the Second U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges, Public Works Research Institute, Tsukuba Science City, Japan, 311-320.

28- Maragakis, E. and Saiidi, M. (1993). “Development and application of simple analytical models of lead-rubber base isolated bridges” . Proc. of the Second U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges, Public Works Research Institute, Tsukuba Science City, Japan, 275-284.

29- 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, 284-304.

30- MCEER (2000). “The Chi-Chi, Taiwan Earthquake of September 21, 1999 : Reconnaissance Report”.

31- Mokha, A., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M. (1990). “Teflon bearings in seismic base isolation II:Modeling”, Journal of Structural Engineering , ASCE, Vol. 116, 455-474.

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

33- Nagarajaiah,S., Reinhorn,A.M., and Constantinou,M.C. (1991). "Nonlinear dynamic analysis of 3-D base-isolated structures.’’, Journal of Structural Engineering, ASCE, 117(7), 2035–2054.

34- PrEN 1998 -2:200X (1998). “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake resistance”, part 2: Bridges , DRAFT No. 2

35- Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M. (1996). “Seismic design and retrofit of bridges”, John Wiley and Sons, New York.

36- Ram Perform 3D (2000). User Manual, Ram International Company.

37- 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, 213-223.

38- 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, 411-419.

39- SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures(2002). User manual, Ver. 8.0.8, Berkeley, California.

40- Shome, N., 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.

41- Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. (1993). “An introduction to seismic isolation”, John Wiley and Sons, England.

42- 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.

43- Tongaonkar, N.P. and Jangid, R.S. (1998). “Seismic response of bridges with sliding isolation devices”, ISET Journal of Earthquake Technology, Vol. 35, 9-27.

44- Tsopelas, P., Constantinou, M.C., Okamoto, S., Fujii, S. and Ozaki, D. (1996). “Experimental study of bridge seismic sliding isolation system”, Engineering Structures, Vol. 18, 301-310.

45- Tsopelas, P., Constantinou, M.C. (1997). “Study of elastoplastic bridge seismic isolation system”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, 489-498.

46- 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, 3-8.

47- Warn,G.P., Whittaker,A.S. (2004) "Performance estimates in seismically isolated bridge structures", Engineering Structures, Vol. 26, 1261–1278.

فهرست انتشارات

عنوان کتاب	تاریخ انتشار		قیمت (ریال)
الف) پروژه‌هاي تحقيقاتي			
۱. کاربرد آب و مصالح محلي چابهار براي ساخت بلوکهاي ساختماني	بهار	۸۳	۱۱/۰۰۰
۲. شيوه‌هاي طراحي و کاربرد حفاظها و ضربه‌گيرهاي ايمني در راهها	بهار	۸۳	۱۳/۰۰۰
۳. ضوابط طراحي و اجراي روسازي راه آهن بدون بالاست	بهار	۸۳	۱۴/۰۰۰
۴. بررسي و مقايسه فني و اقتصادي رويه‌هاي بتني و آسفالتي	بهار	۸۳	۲۷/۰۰۰
۵. بررسي مسائل کمي و کيفي مصرف قير در راههاي کشور	زمستان	۸۳	۱۶/۰۰۰
۶. ضوابط طراحي و اجراي آسفالت ماستيك	بهار	۸۴	۱۱/۰۰۰
۷. راهنماي طراحي و ايمن‌سازي پايه علائم راه	بهار	۸۴	۱۱/۰۰۰
۸. بررسي عوامل مؤثر در ارزيابي و توجيه فني و اقتصادي، اجتماعي و زيست محيطي پروژه‌هاي راه و راه‌آهن	تابستان	۸۴	۲۴/۰۰۰
۹. راهنماي طراحي واجراي سيستم زهکشي آبهاي سطحي و زيرسطحي راه، راه‌آهن وفرودگاه (و نقشه‌هاي اجرايي)	تابستان	۸۴	۲۳/۰۰۰
۱۰. روش‌هاي جديد طرح مخلوط‌هاي آسفالتي بر اساس عملکرد و پيشنهاد روش مناسب براي کشور	تابستان	۸۴	۱۳/۰۰۰
۱۱. راهنماي تثبيت لايه‌هاي خاکريز و روسازي راهها	تابستان	۸۴	۱۸/۰۰۰
۱۲. تسليح خاکريز و بستر راهها با استفاده از ژئوگريد	تابستان	۸۴	۱۴/۰۰۰
۱۳. سيستم‌هاي هوشمند حمل‌ونقل ريلي	پاييز	۸۴	۲۰/۰۰۰
۱۴. ظرفيت باربري محوري شمعها	زمستان	۸۴	۱۷/۰۰۰
۱۵. تثبيت شيب شيرواني خاکريزها و خاکبرداري‌ها	بهار	۸۵	۱۴/۰۰۰
۱۶. روشهاي نوين تعيين مشخصات و ارزيابي روسازي راه	بهار	۸۵	۱۰/۰۰۰
۱۷. طرح ضوابط مخلوطهاي آسفالتي براي مناطق گرمسير، سردسير و شيبهاي تند جاده‌ها	بهار	۸۵	۱۰/۰۰۰
۱۸. روشهاي بازيافت سرد و گرم آسفالت و امکان‌سنجي اقتصادي آن در ايران	بهار	۸۵	۱۵/۰۰۰
۱۹. ارائه روش‌هاي ساماندهي فعاليت عوارضي در آزادراههاي کشور	بهار	۸۵	۲۲/۰۰۰

۲۰. کاربرد پليمر در بهبود خواص قيرها و مخلوطهاي آسفالتي	بهار	۸۵	۱۷/۰۰۰
۲۱. مديريت پل	پاييز	۸۵	۷۵/۰۰۰
۲۲. آشنايي با جداسازهاي لرزه‌اي و تاثير آنها بر عملکرد پلها	زمستان	۸۵	۲۵/۰۰۰

ب) گزارش‌هاي تخصصي

۱. ممیزي ايمني راه	تابستان	۸۲	۱۰/۰۰۰
۲. پيشنهاداتي براي آزمايش ژئوتکستايلها	پاييز	۸۲	۱۰/۰۰۰
۳. راهنماييهاي سودمند براي طراحي و ساخت خاکريزهاي راه	پاييز	۸۲	۱۰/۰۰۰
۴. روشها و شرايط لازم براي عمليات خاکي به منظـور کـاهش اثـرات زيـست محيطي پروژه‌هاي راه	پاييز	۸۲	۱۰/۰۰۰
۵. آلودگي ناشي از دي اکسيد نيتروژن در تونلهاي راه	پاييز	۸۲	۱۰/۰۰۰
۶. ايمني در تونلها	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۷. مديريت ترافيك و کيفيت سرويس	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۸. بهينه سازي شبکه‌هاي موجود بين شهري	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۹. بيست و دومين همايش جهاني راه پيارك	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۰. يارانه‌ها هزينه‌ها و منافع اجتماعي حمل‌ونقل عمومي	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۱. برنامه‌ريزي و بودجه در شبکه راهها	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۲. روشهاي مشارکت همگاني در توسعه پروژه راه	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۳. قيمت‌هاي بين‌المللي سوخت (بنزين و گازوييل)	بهار	۸۳	۱۱/۰۰۰
۱۴. سياست حمل‌ونقل اروپايي تا سال ۲۰۱۰	بهار	۸۳	۱۱/۰۰۰
۱۵. مباني تحليل اقتصادي	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۶. گزارش سالانه ژوئيه ۲۰۰۳ GRSP	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۷. راهنماي ممیزي ايمني راه	بهار	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۸. راهنماي فيلم‌هاي IRF	تابستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۱۹. انتخاب مصالح و طراحي روسازي‌هاي انعطاف‌پذير براي آمدوشد و شـرايط آب‌وهوايي سخت	تابستان	۸۳	۱۶/۰۰۰
۲۰. راههاي دسترسي به مناطق برون شهري	تابستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۱. روشهاي ساده نگهداري راه	تابستان	۸۳	۱۱/۰۰۰

۲۲. تجهيزات اتوماتيك بررسي ترك خوردگي روسازي راه	تابستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۳. ارتقاء و بهبود عملكرد داخلي راهها	پاييز	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۴. تأمين مالي و ارزيابي اقتصادي	پاييز	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۵. بهبود تأمين منابع مالي و مديريت نگهداري راه	پاييز	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۶. بازيافت روسازي‌هاي انعطاف‌پذير موجود	پاييز	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۷. حمل‌ونقل هوشمند	پاييز	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۸. محيط زيست و پروژه‌هاي راهسازي	پاييز	۸۳	۱۰/۰۰۰
۲۹. تقسيم مسؤوليت براي داشتن جاده‌هاي ايمن‌تر	پاييز	۸۳	۱۰/۰۰۰
۳۰. فرآيند تصميم‌گيري در اعمال سياست‌هاي پايدار حمل‌ونقل جاده‌اي	زمستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۳۱. كيفيت خدمات جاده‌اي	زمستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۳۲. روشهايي براي ارزيابي خطر وقوع زمين لغزه‌ها	زمستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۳۳. روشهاي ارزيابي اقتصادي براي پروژه‌هاي راه در كشورهاي عضو پيارك	زمستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۳۴. راهنماي ارزيابي سيستم‌هاي نگهدارنده خاك	زمستان	۸۳	۱۰/۰۰۰
۳۵. آشنايي با مفاهيم مديريت روسازي	بهار	۸۴	۱۰/۰۰۰
۳۶. راهنماي انعقاد قرارداد، نحوه انتخاب و مديريت مشاوران در فعاليت‌هاي مهندسي پيش از ساخت	بهار	۸۴	۱۰/۰۰۰
۳۷. تضمين كيفيت در عمليات خاكي	بهار	۸۴	۱۰/۰۰۰
۳۸. رويه‌هاي بتني مسلح پيوسته	بهار	۸۴	۱۰/۰۰۰
۳۹. طبقه‌بندي تونل‌ها، دستورالعمل‌ها، تجربيات موجود و پيشنهادات	بهار	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۰. نقش مدل‌هاي اقتصادي و اجتماعي- اقتصادي در مديريت راه	بهار	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۱. حمل‌ونقل تركيبي، اقداماتي جهت تشويق به استفاده از حمل‌ونقل عمومي	تابستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۲. پيشرفت مديريت و تأمين بودجه نگهداري راهها در افريقا	تابستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۳. برنامه ملي ايمني ترافيك كشور تركيه	پاييز	۸۴	۱۱/۰۰۰
۴۴. بررسي توسعه حمل‌ونقل در منطقه اسكاپ در سال ۲۰۰۳، آسيا و اقيانوسيه	پاييز	۸۴	۱۷/۰۰۰
۴۵. تبادل فناوري و توسعه	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۶. راههاي داراي رويه بتني	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۷. تجديد ساختار بخش راه	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۸. حمل‌ونقل كالا	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۴۹. گزارش سالانه ژوئن GRSP ۲۰۰۴	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰

۵۰. بكارگيري مصالح حاصل از بازيافت رويه‌هاي آسفالتي و بتن خرد شده در خاكريز	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۵۱. تراكم ترافيك در آزادراهها و بزرگراهها	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۵۲. كاربرد بتن غلتكي در راهسازي	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۵۳. راهنماي تأمين روشنايي راهها	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۵۴. راهسازي در نواحي بياباني	زمستان	۸۴	۱۰/۰۰۰
۵۵. مديريت عملكرد پلها	بهار	۸۵	۱۰/۰۰۰
۵۶. سيستم مديريت ايمني در صنعت حمل‌ونقل ريلي	بهار	۸۵	۱۲/۰۰۰
۵۷. راهنماي ممیزي سيستم مديريت ايمني هوايي	بهار	۸۵	۱۰/۰۰۰
۵۸. توسعه ابزارهاي سنجش عملكرد	بهار	۸۵	۱۰/۰۰۰
۵۹. نگهداری نواحي كنار راه و زهكشي (جلد اول)	تابستان	۸۵	۳۰/۰۰۰
۶۰. تعمير و نگهداري راههاي شوسه (جلد دوم)	تابستان	۸۵	۳۰/۰۰۰
۶۱. تعمير و نگهداري راههاي داراي رويه آسفالتي (جلد سوم)	تابستان	۸۵	۲۵/۰۰۰
۶۲. نگهداري سازه‌ها و ادوات كنترل ترافيك (جلد چهارم)	تابستان	۸۵	۱۵/۰۰۰
۶۳. فناوري و اقدامات ابتكاري كنترل ترافيك در اروپا	تابستان	۸۵	۱۰/۰۰۰
۶۴. معرفي سيستم مديريت ريسك	تابستان	۸۵	۱۰/۰۰۰
۶۵. تعمير و مقاوم‌سازي زيرسازه پلها	تابستان	۸۵	۱۲/۰۰۰
۶۶. الگوي مناسب براي بهره‌برداري و نگهداري تونلهاي جاده‌اي	پاييز	۸۵	۲۰/۰۰۰
۶۷. مديريت ايمني راه	پاييز	۸۵	۲۶/۰۰۰
۶۸. مطالعه‌اي بر مديريت ريسك در راهها	پاييز	۸۵	۱۰/۰۰۰
۶۹. گزارش جهاني در خصوص پيشگيري از صدمات ناشي ازتصادفات جاده‌اي	پاييز	۸۵	۱۰/۰۰۰
۷۰. ارزيابي و تأمين بودجه نگهداري راه در كشورهاي عضو پيارك	پاييز	۸۵	۱۰/۰۰۰

ج) كتب

۱. فرهنگ جامع دريايي	تابستان	۸۳	۱۵/۰۰۰
۲. برنامه‌ريزي و طراحي فرودگاه (دو جلد)	تابستان	۸۳	۳۹/۰۰۰
۳. فرهنگ و اصطلاحات فني و مهندسي راه	تابستان	۸۳	۷/۰۰۰
۴. راهنماي ايمني راه (پيارك)	پاييز	۸۴	۱۲۵/۰۰۰
۵. فرهنگ مصور دريايي (همراه با نسخه الكترونيك)	پاييز	۸۴	۴۰/۰۰۰

د) ضوابط

۱. آیین‌نامه نحوه بارگیري، حمل و مهار ایمن بار وسایل نقلیه باربري جاده‌اي	زمستان	۸۴	۵۰/۰۰۰
۲. راهنماي تهیه مشخصات فني، جزئیات ونقشه‌ها در پل و سازه‌هاي راه	زمستان	۸۴	۲۶/۰۰۰
۳. دستورالعمل مطالعات و طراحي سیستمهاي ایمني، روشنایي، تهویه، کنتـرل و برق تونلهاي جاده‌اي	زمستان	۸۵	۲۰/۰۰۰
۴. دستورالعمل آزمایشهاي استاتیکي شمعها	زمستان	۸۵	۲۰/۰۰۰
۵. دستورالعمل تحویل موقت و قطعي راهها	زمستان	۸۵	۲۰/۰۰۰

ه) لوح فشرده

۱. نشریات Austroads (شامل ۱۸۶ عنـوان از نـشریات وزارت راه اسـترالیا و نیوزلند در موضوعات مختلف بصورت فایل pdf)	پاییز	۸۳	۳۴/۵۰۰
۲. فیلم‌هاي آموزشي راه IRF (شامل ۱۰۷ فیلم در ۴۲ لوح فشرده)	زمستان	۸۳	۳۴/۵۰۰ (قیمت واحد)
۳. نشریات SWOV (شامل ۱۳۸ عنـوان از نـشریات DRI , VTI ,SWOV NCHRP, در موضوعات مختلف بصورت فایل pdf)	بهار	۸۴	۳۴/۵۰۰
۴. آیین‌نامه ایمني راهها (مجموعه هفت جلدي منتـشر شـده از سـوي سـازمان مدیریت و برنامه‌ریزي)	پاییز	۸۴	۴۷/۵۰۰
۵. آیین‌نامه طراحي بنادر و سازه‌هاي دریایي ایران	پاییز	۸۵	۵۰/۰۰۰

Ministry of Roads and Transportation
Deputy of Education Research and Technology
Transportation Research Institute

Design and Development of Seismic Isolation for Bridges