

مقایسه پاسخ لرزه‌ای غیر همبسته یک جهت و همبسته دو جهت در جداگرهای لاستیکی - سربی پل‌های جداسازی شده

سید مهدی زهرائی*، دانشیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختها، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

کامیار کرباسی آرانی، دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: mzahrai@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۶/۰۵/۱۵ - پذیرش: ۱۳۸۷/۰۷/۱۵

چکیده

پل‌های بزرگراهی، مهم‌ترین عضو شریان حیاتی شبکه حمل و نقل کشور در هنگام بروز بلایای طبیعی همچون زلزله اند. در میان راه حل‌های گوناگون بهسازی لرزه‌ای پل‌ها، جداسازی لرزه‌ای را می‌توان گزینه‌ای مناسب جهت بهسازی لرزه‌ای پل‌های موجود بزرگراهی کشور دانست. تعویض تکیه‌گاه‌های الاستومری موجود با جداگرهای لرزه‌ای لاستیکی - سربی راه حلی کارآمد برای به‌نیاز کردن زیرسازه پل از تقویت‌های پرهزینه سازه‌ای است. از آنجا که استفاده از جداگرهای لرزه‌ای سبب افزایش تغییرمکان عرشه می‌شود، برآورد هرچه دقیق‌تر مقدار تغییرمکان عرشه برای برآورد فضای آزاد مورد نیاز در انتهای شاه‌تیرهای پل ضروری است. در این مقاله، با هدف برآورد واقعی‌تر این تغییرمکان‌ها، از یک قانون پلاستیسیته همبسته برای رفتار غیرخطی جداگر لرزه‌ای، استفاده شده است و تحریک زلزله در هر دو جهت طولی و عرضی به طور همزمان به پایه پل اعمال گردیده و نتایج حاصل از این تحلیل با حالت مرسوم تحریک یک جهت پایه و رفتار پلاستیسیته غیر همبسته جداگر لرزه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج، حاکی از برآورد غیر واقع‌بینانه تغییرمکان‌های حداکثر و حداقل جداگر در حالت یک جهت غیر همبسته نسبت به حالت دو جهت همبسته است.

واژه‌های کلیدی: جداگرهای لرزه‌ای لاستیکی - سربی، تکیه‌گاه الاستومری، تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی غیرخطی، جداسازی لرزه‌ای، تحریک یک جهت و دو جهت زلزله

۱. مقدمه

سالم ماندن سازه پل در حین زلزله است. ایده اصلی در جداسازی لرزه‌ای، کاهش فرکانس پایه ارتعاش سازه و رساندن آن به مقداری کمتر از فرکانس‌های حاوی انرژی غالب زلزله است. به بیانی دیگر جداسازی لرزه‌ای، پیروی ارتعاشی سازه پل را افزایش داده و آن را از پیوندهای حاوی انرژی ورودی غالب زلزله دور می‌کند و به این ترتیب انرژی ورودی به پایه، ناشی از زلزله، با جداسازی لرزه‌ای کاهش می‌یابد. دیگر مزیت جداسازی لرزه‌ای فراهم کردن وسیله‌ای جهت اتلاف انرژی است که انرژی وارد شده به سازه در نقاط محدود و به صورت کنترل شده، اتلاف شود. به این ترتیب تخریب و آسیب دیدگی در نقاط خاص و

تقریباً در تمامی زلزله‌های بزرگ، تخریب پل‌ها در اثر فرو ریزش پایه‌ها مشاهده شده است. آسیب دیدگی پل‌ها در زلزله‌های سال ۱۹۹۴ نورتریج و سال ۱۹۹۵ کوه ثابت کرد که معیار تأمین مقاومت هرگز برای تضمین ایمنی پل‌ها و عملکرد مناسب آنها در حین زلزله به تنهایی، کفایت نمی‌کند. تا کنون تحقیقات بسیاری با هدف یافتن روش‌های منطقی برای محافظت از پل‌ها در زلزله‌های شدید انجام شده است که در این میان جداسازی لرزه‌ای راه حلی مناسب برای کاهش نیروهای ناشی از زلزله تا حد ظرفیت الاستیک پایه‌ها است. به این ترتیب پایه‌های پل از ورود به ناحیه غیر خطی مصون مانده که این به معنای

مقادير تغييرمکان حداکثر عرشه پل‌ها و نيز بررسي اثرات اندرکنش دو جهته نيروهاي جداگرهاي لرزه‌اي، مطالعاتي پارامتریک با تغيير پارامترهاي سختی پايه‌هاي پل و سختی اوليه و ثانويه جداگر و مقاومت جاري شدن جداگرهاي لاستيکی - سربي انجام داد. نتايج مطالعات اوحاکی از اثرات قابل توجه اندرکنش دو جهته نيروها بر روی رفتار و عملکرد پل است که اگر اين اثرات مورد توجه قرار نگیرد، تغييرشکل‌هاي حداکثر جداگر کمتر تخمين زده شده و طراحي سيستم جداگر را مخدوش می‌کند.

ريان و چوپرا در سال ۲۰۰۴ [۹] به منظور تخمين هر چه دقيق‌تر تغييرشکل‌ها و نيروهاي جداگر روابط طرح جديدي را پيشنهاد کردند که برای منظور کردن اثرات دو جهته ضريب اصلاحي ۱/۱۳ بکار می‌رود. وارن و ويتاکر [۱۰] نيز با هدف کنترل صحت روابط طراحي و آزمایش دستورالعمل راهنمای آشتو [۱۱] و تعيين مقدار افزايش در تغييرمکان جداگر در اثر تحریک دو جهته مطالعاتي تحلیلي بر روی یک پل دهانه ساده انجام دادند. اين محققان برای منظور کردن اثر همبستگی از قانون سطح جاري شدگی دایره‌اي استفاده و پيشنهاد کردند ضريب اصلاحي ۱/۲ در رابطه طراحي تغييرمکان جداگر دستورالعمل راهنمای آشتو برای در نظرگرفتن اثرات همبستگی در نظر گرفته شود. در حال حاضر اغلب پل‌هاي بزرگراهي ايران دارای سه نوع عمده تکیه‌گاه‌هاي فلزی، بتنی و الاستومری هستند که در اين میان تکیه‌گاه‌هاي الاستومری به دلایل فنی و اقتصادي بخش عمده‌اي از تکیه‌گاه‌هاي پل‌ها را تشکیل می‌دهند [۱۲]. رفتار برشی اين تکیه‌گاهها تا لحظه شکست به صورت خطی بوده و به اين ترتيب فاقد میرايی هیستریزيس هستند. تعویض اين تکیه‌گاه‌هاي الاستومری با جداگرهاي لرزه‌اي لاستيکی - سربي می‌تواند گزینه مناسبی برای بهسازی لرزه‌اي سازه پل باشد. از آنجاکه استفاده از جداگرهاي لرزه‌اي سبب افزايش تغييرمکان عرشه می‌شود، برآورد هرچه دقيق‌تر مقدار تغييرمکان عرشه برای برآورد فضای آزاد مورد نیاز در انتهای شاه‌تيرهاي پل ضروري است. در اين مقاله با هدف برآورد واقعي تر اين تغييرمکان‌ها، سعی شده است با نگرشی متفاوت و بدون انجام ساده‌سازی در مدلسازی، از یک قانون پلاستیسیته همبسته برای رفتار غيرخطی جداگر لرزه‌اي، استفاده شود و بنابراین تحریک زلزله در هر دو

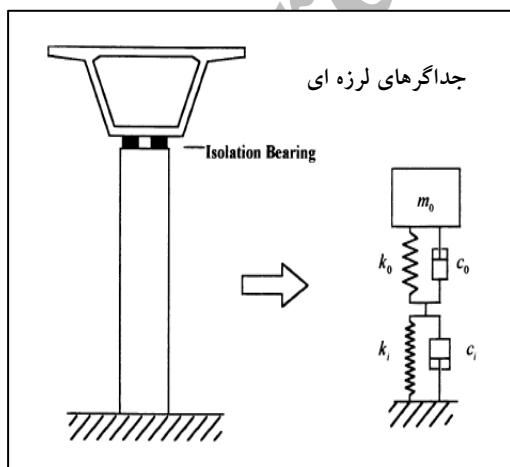
معدود متمرکز شده وامکان تعویض اين قطعات پس از زلزله وجود خواهد داشت.

تا کنون مطالعات بسياری در مورد تأثیر جداگرهاي لرزه‌اي بر رفتار لرزه‌اي پل‌ها و طرح لرزه‌اي آنها در پل‌ها انجام گرفته است. وانگ و شنگ در سال ۱۹۹۴ [۱] سختی موثر و نسبت میرايی موثر را برای یک سيستم الاستيک معادل پل‌هاي جداسازی شده با جداگرهاي لرزه‌اي لاستيکی - سربي به دست آورده و روابط تجربی برای محاسبه تغيير پریود موثر و نسبت میرايی موثر ارایه کردند. وانگ و چيو [۲] و وانگ و همکاران در سال ۱۹۹۶ [۳] یک مدل خطی برای تحليل لرزه‌اي پل‌هاي جداسازی شده با جداگرهاي سربي - لاستيکی با استفاده از یک روش مشخصه به دست آوردند. غباره و علی در سال ۱۹۹۸ [۴] نشان دادند که جداگرهاي لاستيکی - سربي در کاهش پاسخ لرزه‌اي پلهای بزرگراهي بسيار کارآمد هستند. پاگینی و سلاری در سال ۱۹۹۹ [۵] پاسخ تصادفی یک پل سه دهانه با سيستم جداگر لرزه‌اي شامل نشیمن‌هاي لاستيکی و میراگر هیستریتيک را با تکنیک خطی سازی معادل به دست آوردند.

سعیدی و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۶] تأثیر جداسازی لرزه‌اي را در کاهش نیرو و تغيير مکان رو سازه یک پل شش دهانه بررسي کرده و نتیجه گرفتند که استفاده از جداگرها لزوماً تغيير مکان در عرشه را افزايش نمی‌دهد. چادهاري و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۷] در زمينه تعيين پارامترهاي سيستم ناشی از شتاب‌هاي لرزه‌اي ثبت شده روی یک پل جداسازی شده و بررسي عملکرد اجزا مختلف پل‌ها، تحقیقاتي انجام دادند.

تمامی تحقیقات ذکر شده در بالا با فرض رفتار نیرو - تغييرمکان دو خطی و غير همبسته جداگر با در نظرگرفتن فقط یک مولفه تحریک زلزله بوده است. در سال‌هاي اخير تنها در سه مورد، سعی در بررسي پاسخ لرزه‌اي تحت اثر تحریک دو جهته و رفتار همبسته جداگر و مقایسه آن با تحریک یک جهته و رفتار غير همبسته به عمل آمده است که محققين مختلف با روش‌هاي گوناگون، نتايج متفاوتی به دست آورده‌اند و نیاز به تحقیقات بیشتر در اين زمينه کاملاً محسوس است. جانگید در سال ۲۰۰۴ [۸] با هدف بررسي اثرات جداسازی لرزه‌اي بر روی

ویسکوز مستقیماً با میزان سرعت در ارتباط است، اما اتلاف انرژی هیستریزس از فاصله مابین شاخه‌های بارگذاری و باربرداری منحنی تحت بارگذاری چرخه‌ای ناشی می‌شود [۱۱]. در شکل ۴ منحنی رفتاری دو خطی یک جداگر لرزه‌ای نشان داده شده است. جداگر در تغییر مکان d_y (تغییر مکان جاری شدن) به نیروی F_y (نیروی جاری شدن) رسیده و سپس تا تغییر مکان d_{max} و نیروی F_{max} طی مسیر کرده است. قسمت اول مسیر با شیب k_u (سختی الاستیک) طی شده و قسمت دوم مسیر با شیب k_d (سختی پلاستیک) طی گردیده است. سطح داخل این منحنی که بیانگر طی یک چرخه کامل تغییر مکانی است بیانگر انرژی تلف شده هیستریزس در آن چرخه است. این میرایی در سازه جداسازی شده از دو منبع تأمین می‌شود: اتلاف انرژی ویسکوز و اتلاف انرژی هیستریزس. اتلاف انرژی ویسکوز مستقیماً با میزان سرعت در ارتباط است، اما اتلاف انرژی هیستریزس از فاصله مابین شاخه‌های بارگذاری و باربرداری منحنی تحت بارگذاری چرخه‌ای ناشی می‌شود [۱۱]. در شکل ۴ منحنی رفتاری دو خطی یک جداگر لرزه‌ای نشان داده شده است. جداگر در تغییر مکان d_y (تغییر مکان جاری شدن) به نیروی F_y (نیروی جاری شدن) رسیده و سپس تا تغییر مکان d_{max} و نیروی F_{max} طی مسیر کرده است. قسمت اول مسیر با شیب k_u (سختی الاستیک) طی شده و قسمت دوم مسیر با شیب k_d (سختی پلاستیک) طی گردیده است. سطح داخل این منحنی که بیانگر طی یک چرخه کامل تغییر مکانی است بیانگر انرژی تلف شده هیستریزس در آن چرخه است.



شکل ۱. سازه پل جداسازی شده و مدل ساده شده یک درجه آزادی آن [۱۳]

جهت طولی و عرضی به طور همزمان به پایه چهار پل موجود بزرگراهی کشور با فرض تعویض تکیه‌گاههای الاستومری آنها با جداگرهای لرزه‌ای لاستیکی-سربی اعمال شده و نتایج پاسخ لرزه‌ای حاصل از این تحلیل با حالت مرسوم تحریک یک جهت پایه و رفتار پلاستیسیته غیر همبسته جداگر لرزه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲. مبانی جداسازی لرزه‌ای در پلها

اضافه کردن یک جداگر لرزه‌ای به یک پل با جرم m_0 ، سختی پایه k_0 و ضریب میرایی ویسکوز C_0 همانند اضافه کردن یک فنر با ثابت فنری k_i و یک میراگر ویسکوز با ضریب میرایی C_i است. (شکل ۱)

به این ترتیب سختی کل مجموعه جداسازی شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود که همان رابطه آشنای سختی معادل دو فنر سری است.

$$k = \frac{k_0 k_i}{k_0 + k_i} \quad (1)$$

بنا بر این معادله حرکت این سیستم جدید یک درجه آزادی تحت اثر تحریک زلزله با رابطه ۲ بیان می‌شود:

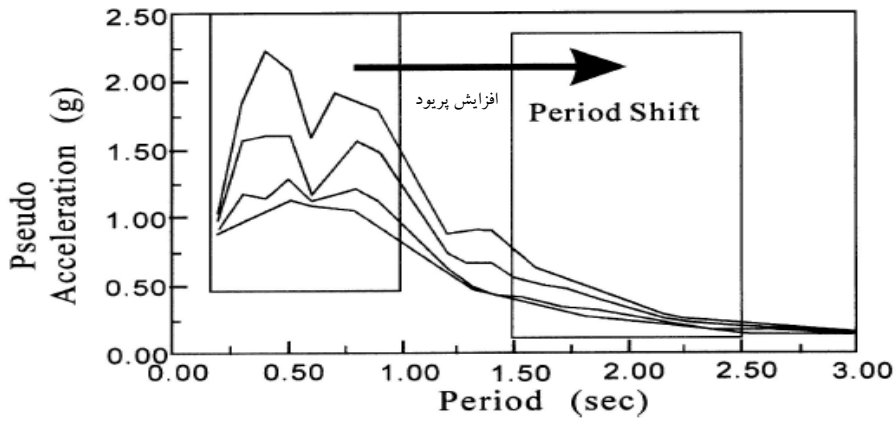
$$m_0 \ddot{x} + (c_0 + c_i) \dot{x} + kx = -m_0 \ddot{x}_g \quad (2)$$

پریود طبیعی این سازه T نیز با رابطه ۳ بیان می‌شود:

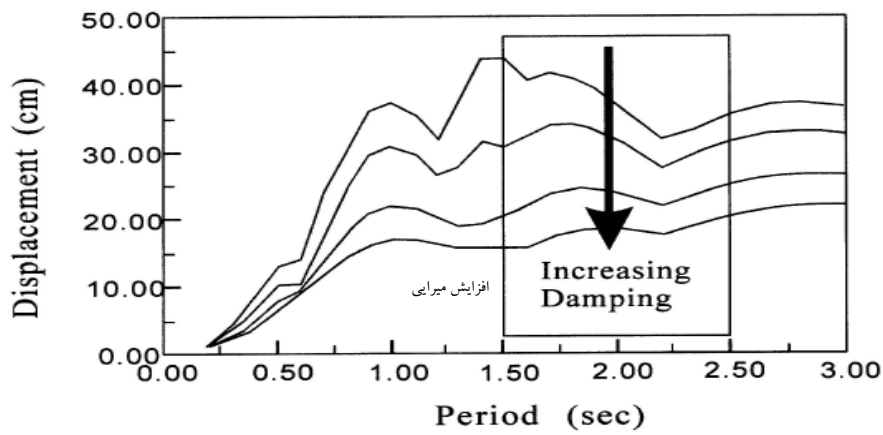
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0 (k_0 + k_i)}{k_0 k_i}} \quad (3)$$

از آنجا که سختی جداگر همواره از سختی پایه کمتر انتخاب می‌شود، بنابراین k از k_0 کوچک تر خواهد بود و پریود طبیعی سیستم جداسازی شده زیاده‌تر از سیستم جداسازی نشده است. این افزایش پریود از یک طرف منجر به کاهش شتاب ورودی به سیستم ناشی از زلزله می‌شود (شکل ۲) که به معنای کاهش برش پایه لرزه‌ای است و از طرف دیگر منجر به افزایش تغییر مکان سازه ناشی از زلزله می‌شود (شکل ۳). از آنجا که اضافه کردن جداگر لرزه‌ای باعث افزایش میرایی سازه نیز می‌شود، بنابراین مقداری از این تغییر مکان با افزایش میرایی سازه، کاهش می‌یابد. (شکل ۳) و متعاقباً شتاب ورودی به سیستم ناشی از زلزله نیز با افزایش میرایی سازه کم می‌شود.

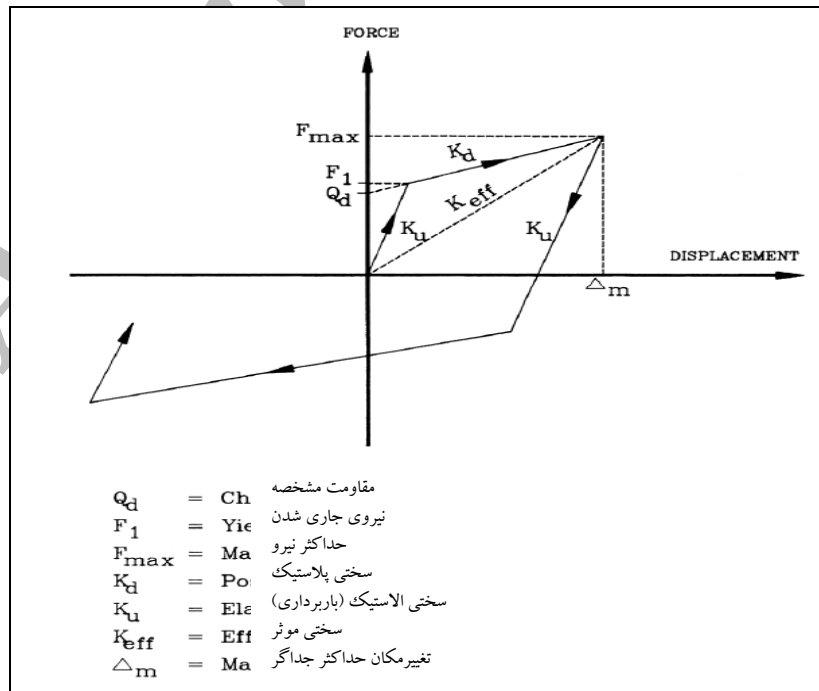
این میرایی در سازه جداسازی شده از دو منبع تأمین می‌شود: اتلاف انرژی ویسکوز و اتلاف انرژی هیستریزس. اتلاف انرژی



شکل ۲. کاهش شتاب ورودی به سیستم با افزایش پریود [۱۴]



شکل ۳. کاهش تغییر مکان سازه با افزایش میرایی [۱۴]



شکل ۴. منحنی رفتاری دوخطی یک جداگر لرزه‌ای لاستیکی - سربی [۱۱]

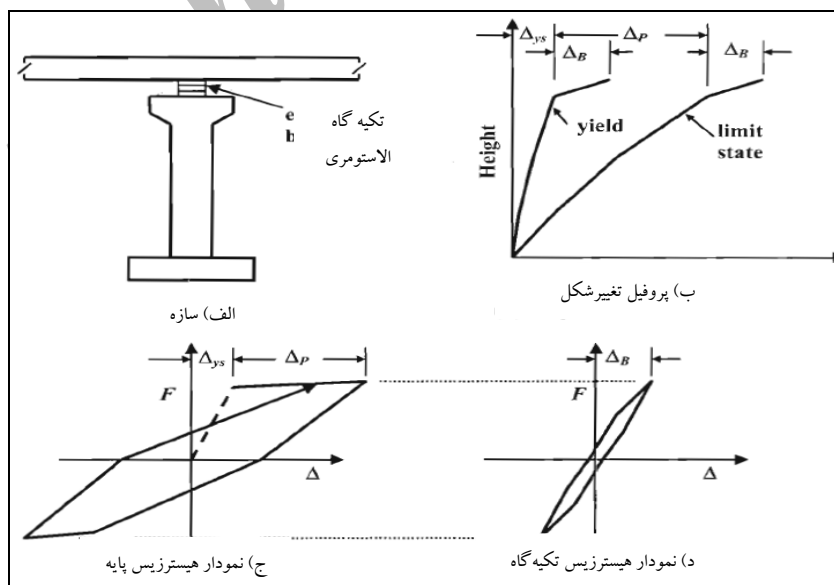
فولاد چسبانده می شود [۱۴]. از آنجا که رفتار این لاستیک‌ها در برش تا کرنش‌هایی بیش از صد در صد کاملاً خطی بوده و میرایی آن در حدود ۲ تا ۳ درصد میرایی بحرانی است، بنابراین عملکرد مناسبی در حین زلزله‌های شدید نداشته و باعث تغییر مکان‌های بیش از حد رو سازه پل و ایجاد ناپایداری در رو سازه پل می‌شوند. به عبارتی تنها در صورتی می‌توان از این نشیمن‌ها به عنوان جداگر لرزه‌ای بهره برد که یک سیستم میراگر اضافی برای تامین میرایی لازم در کنار آنها قرار گیرد [۱۵].

تعویض این نشیمن‌ها با نشیمن‌های جداگر لرزه‌ای لاستیکی-سربی می‌تواند گزینه مناسبی برای بهسازی لرزه‌ای پل‌های کشور باشد. در شکل ۵- الف یک سازه پل دارای تکیه‌گاه الاستومری نشان داده شده است و در شکل ۵- ب پروفیل تغییر شکل این سازه در اثر تقاضاهای لرزه‌ای در حالات جاری شدن و حدی به نمایش در آمده است. همان گونه که در شکل‌های ۵- ج و ۵- د ملاحظه می‌شود رفتار هیستریزس در پایه پل متمرکز شده که این به معنای آسیب یا شکست زیر سازه پل است.

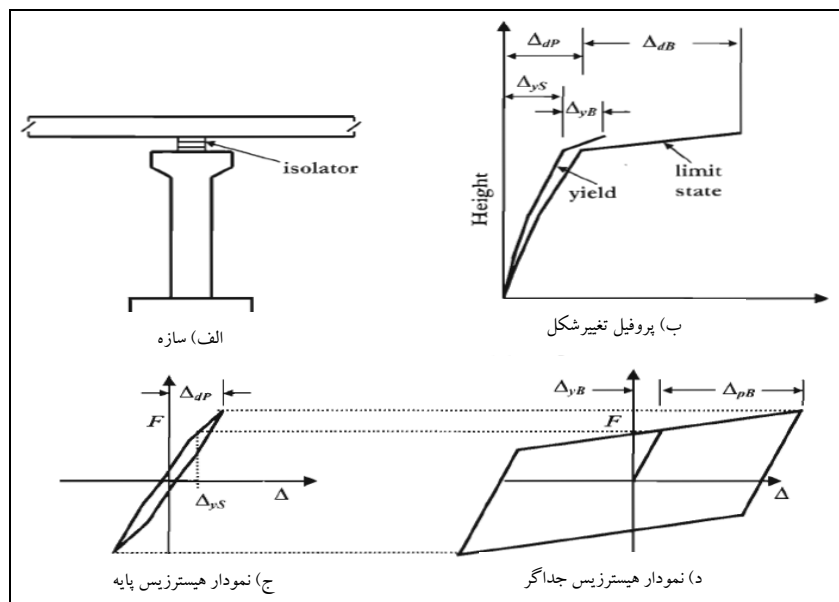
در شکل ۶- الف یک سازه پل دارای جداگر لرزه‌ای لاستیکی-سربی نشان داده شده است و در شکل ۶- ب پروفیل تغییر شکل این سازه در اثر تقاضاهای لرزه‌ای در حالات جاری شدن و حدی به نمایش در آمده است. همان گونه که در شکل‌های ۶- ج و ۶- د ملاحظه می‌شود رفتار هیستریزس در جداگر لرزه‌ای متمرکز شده که این به معنای سالم ماندن زیر سازه پل است.

جداگرهای لرزه‌ای لاستیکی-سربی مشابه نشیمن‌های لاستیکی با میرایی پایین (نئوپرن‌ها) بوده اما دارای یک هسته سربی هستند که در سوراخی در وسط آنها قرار گرفته است. سرب دارای سختی برشی اولیه زیاد و مقاومت برشی جاری شدن کم است و دارای رفتار الاستوپلاستیک کامل و خصوصیات خستگی ناپذیری مناسب در سیکل‌های پلاستیک است. این خصوصیات سرب باعث می‌شود جداگر لرزه‌ای لاستیکی-سربی دارای سختی افقی بالادر برابر بارهای سرویس و اتلاف انرژی بالا در برابر بارهای لرزه‌ای قوی باشد. هسته‌های سربی در تنش برشی حدود ۱۰ مگاپاسکال تغییر شکل فیزیکی داده و سبب ایجاد یک پاسخ دوخطی در نشیمن می‌گردند [۱۴]. این جداگرها همچنین دارای صفحات یک در میان لاستیک و فولاد هستند. صفحات فولادی هم در تحمل بارهای قائم سرویس و هم در تحمل بارهای افقی نقش دارند. در بارهای قائم سرویس، صفحات فولادی از انبساط جانبی لاستیک جلوگیری کرده و سختی قائم نشیمن را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند، در حالی که هیچ‌گونه تأثیری بر سختی افقی نشیمن که با مدول برشی پایین الاستومر کنترل می‌شود ندارند. در بارهای افقی لرزه‌ای، صفحات فولادی سبب تغییر شکل هسته سربی در برش می‌شوند.

تکیه‌گاههای الاستومری از لاستیک طبیعی یا مصنوعی (نئوپرن) ساخته می‌شوند و دارای دو صفحه ضخیم فولادی در بالا و پایین و صفحات نازک فولادی متعدد هستند. لاستیک پس از ولکانیزه شدن، در یک مرحله تحت فشار و دمای زیاد در قالب به



شکل ۵. پل جداسازی نشده با تکیه‌گاههای الاستومری [۱۶]



شکل ۶. پل جداسازی شده با جداگرهای لرزه‌ای لاستیکی - سربی [۱۶]

مورد نیاز انتهای شاه‌تیرهای این چهار پل، با فرض تعویض تکیه‌گاههای موجود، از آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر تحریک دو جهته زلزله و رفتار غیرخطی همبسته جداگرهای لرزه‌ای استفاده شده است و مقایسه‌ای با حالت تحریک یک جهته زلزله و رفتار غیرخطی غیرهمبسته جداگرهای لرزه‌ای که رسم معمول مهندسان طراح و توصیه آیین‌نامه‌های حال حاضر است صورت پذیرفته است.

۳. مشخصات پل‌های مورد بررسی

چهار پل بزرگراهی کشور به عنوان نمایندگان جامعه آماری پل‌های بزرگراهی کشور در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اولین پل (پل شماره ۱) پل سیدآباد واقع در محور رودهن - فیروزکوه، دومین پل (پل شماره ۲) پل حسینینها واقع در محور رامهرمز - بهبهان، سومین پل (پل شماره ۳) پل میان‌دورود واقع در محور لنگرود - رامسر و چهارمین پل (پل شماره ۴) پل کیلومتر ۳۰ + ۳۰۰ محور تهران - رودهن است.

مشخصات کامل این چهار پل به همراه شمای کلی آنها در جدول شماره ۱ آمده است. با توجه به ارتفاع پایه کمتر، پل‌های شماره ۱ و ۳ دارای سختی جانبی بالاتری نسبت به پل‌های شماره ۲ و ۴ هستند. لازم به ذکر است هیچ کدام از پلها دارای کجی نیستند.

اما با توجه به آن که استفاده از جداگرهای لرزه‌ای سبب افزایش مقدار تغییر مکان روسازه می‌شود، برآورد هرچه دقیق‌تر مقدار تغییر مکان جداگر لرزه‌ای جهت تخمین فضای آزاد مورد نیاز در انتهای شاه‌تیرهای پل ضروری است. در صورت تأمین نشدن این فضا، امکان برخورد شاه‌تیرهای پل با کوله (در تکیه‌گاه کناری) و یا با یکدیگر (در تکیه‌گاه میانی ناپیوسته) وجود خواهد داشت که در نتیجه جداسازی لرزه‌ای نه تنها موثر نبوده، بلکه موجب ایجاد خسارت‌های بیشتر در پل، همچون چرخش کوله در تکیه‌گاه کناری یا سقوط شاه‌تیرها از روی کوله و پایه در تکیه‌گاه‌های کناری و میانی ناپیوسته می‌شود.

در راستای برآورد هر چه دقیق‌تر این تغییر مکان، چهار پل بزرگراهی کشور مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نشیمن‌های تکیه‌گاهی این پل‌ها تکیه‌گاههای الاستومری از لاستیک مصنوعی (نئوپرن) هستند. مطالعات ارزیابی ایمنی و آسیب‌پذیری سازه‌ای این پل‌ها نشان داده که پایه‌های میانی این پل‌ها به هیچ عنوان کفایت لرزه‌ای لازم را در برابر زلزله طرح دارا نبوده و نیاز به عملیات تقویت و بهسازی لرزه‌ای وجود دارد. گزینه تعویض نشیمن‌های تکیه‌گاهی موجود با جداسازی‌های لرزه‌ای، ارزان‌ترین، سریع‌ترین و راحت‌ترین گزینه اجرایی است، زیرا با کاهش تقاضای لرزه‌ای روسازه، زیر سازه از نیاز به تقویت معاف می‌شود. بنابراین به منظور برآورد هرچه دقیق‌تر فضای آزاد

۴. طراحی جداگرهای لرزه‌ای

لاستیکی - سربی

جنس خاک نسبتاً سخت است. بنابراین مقدار شتاب موثر بر طبق آیین‌نامه آشتو ۰/۴ و مقدار S_d نیز بر اساس جدول آیین‌نامه برابر ۱/۵ است. جزئیات کامل طراحی این جداگرها در مرجع [۱۷] آمده است. در این تحقیق به جهت حذف اثرات مشخصات جداگر در نتایج تحلیلی با هدف مقایسه بهتر نتایج، فقط از جداگر نوع a استفاده شده است که خلاصه مشخصات تحلیلی تقریبی آن به شرح جدول ۲ است.

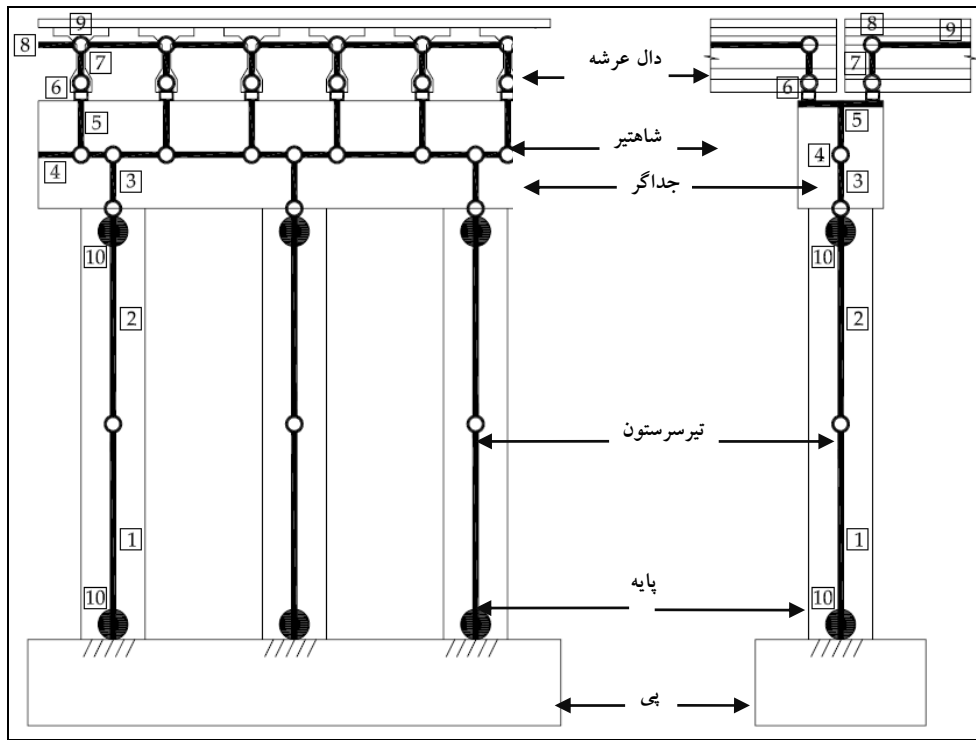
برای هر یک پل‌های مورد مطالعه بر اساس روش بار یکنواخت آشتو [۱۱] چهار جداگر با نام‌های a ، b ، c و d طراحی شده است. در طراحی این جداگرها فرض شده است که پل‌ها در مناطق با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد بوده و خاک محل پل نیز از

جدول ۱. مشخصات پل‌های مورد بررسی

پل شماره ۴	پل شماره ۳	پل شماره ۲	پل شماره ۱	نام پل
۳۰+۳۰۰ کیلومتر	میان‌دورود	حسینیها	سیدآباد	
				شمای کلی پل
راه اصلی تهران-رودهن	راه اصلی لنگرود-رامسر	راه اصلی رامهرمز-بهبهان	راه اصلی رودهن-فیروزکوه	موقعیت پل
دهانه ساده	دهانه ساده	دهانه ساده	دهانه ساده	نوع دهانه‌های پل
۳ دهانه	۳ دهانه	۲ دهانه	۲ دهانه	تعداد دهانه‌ها
۳۳ متر	۲۰ متر	۳۰ متر	۳۶ متر	طول دهانه‌ها
۱۱/۸ متر	۱۱/۸ متر	۱۱/۸ متر	۱۱/۸ متر	عرض پل
تیر - دال	تیر - دال	تیر - دال	تیر - دال	نوع عرشه
۲۰ سانتی متر	۲۰ سانتی متر	۲۰ سانتی متر	۲۰ سانتی متر	ضخامت دال عرشه
تیر پیش ساخته بتنی مسلح	تیر پیش ساخته بتنی مسلح	تیر ورق فولادی	تیر پیش ساخته بتنی مسلح	نوع شاهتیرها
۵ عدد	۸ عدد	۴ عدد	۸ عدد	تعداد شاهتیرها
۲/۵ متر	۱/۴ متر	۳ متر	۱/۴۵ متر	فواصل شاهتیرها
۱/۸ × ۰/۲ متر	۱/۴ × ۰/۲ متر	۱۲ × ۲۰۰۰ میلی‌متر	۱/۴ × ۰/۲ متر	ابعاد جان شاهتیرها
بال بالا ۱/۰ × ۰/۱۵ متر و بال پایین ۰/۷ × ۰/۲۵ متر	۰/۶ × ۰/۱۵ متر	۳۰ × ۵۰۰ میلی‌متر	۰/۶ × ۰/۲ متر	ابعاد بال شاهتیرها
چند ستونی	چند ستونی	چند ستونی	چند ستونی	نوع پایه میانی
۴ عدد	۳ عدد	۳ عدد	۲ عدد	تعداد ستون‌های هر پایه
یک ردیف ۱۷/۵ متر و ردیف دیگر ۲۱/۲ متر	۵/۱ متر	۳۰ متر	۱۱/۳ متر	ارتفاع پایه‌ها
مستطیل به اضلاع ۲/۵ × ۱/۵ متر	دایره به قطر ۱/۲ متر	دایره به قطر ۱/۵ متر	دایره به قطر ۱/۵ متر	شکل و ابعاد مقطع هر ستون
بسته با دیوار برگشتی	بسته با دیوار برگشتی	بسته با دیوار برگشتی	بسته با دیوار برگشتی	نوع کوله‌ها
سطحی	عمیق	عمیق	سطحی	نوع پی
۲/۵ متر	۱/۱۵ متر	۱/۴ متر	۲/۵ متر	ارتفاع تیر سر ستون
۲/۵ متر	۲ متر	۱/۹ متر	۲ متر	عرض تیر سر ستون
۱۱ متر	۱۰ متر	۱۰ متر	۱۲ متر	فواصل دیافراگم عرضی
۱۴۰۰۰ KN	۹۰۰۰ KN	۵۰۰۰ KN	۱۱۰۰۰ KN	وزن تقریبی عرشه

جدول ۲. مشخصات تحليلي تقريبي جداگر نوع a

نوع جداگر	مدول برشي (G) (KN/m ²)	سختي اوليه (K _u) (KN/m)	نيروي تسليم (F _y) (KN)	نسبت سختي ثانويه به سختي اوليه (K _d /K _u)	سختي قائم (K _v) (KN/m)
a	۷۰۰	۱۰۰۰	۴۰	۰/۲	۴۰۰/۰۰۰



شکل ۷. نحوه المان‌بندی سازه پل مورد مطالعه

۵. مدل‌سازی پل‌های جدا سازی شده

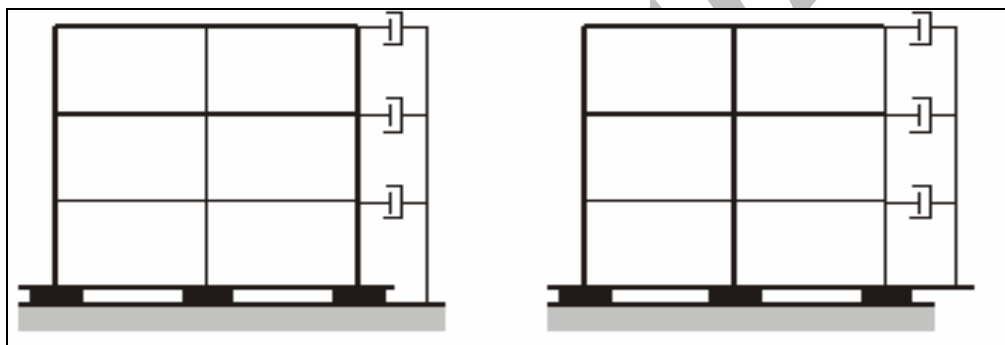
به منظور مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر پل‌ها در این تحقیق، مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار تحلیل غیر خطی Ram Perform 3D [۱۸] انجام گرفته است. این نرم‌افزار به منظور تحلیل خطی و غیر خطی استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها تدوین شده که توانایی در نظر گرفتن معیارهای عملکردی مختلف را نیز دارد.

۱-۵ مدل‌سازی هندسی

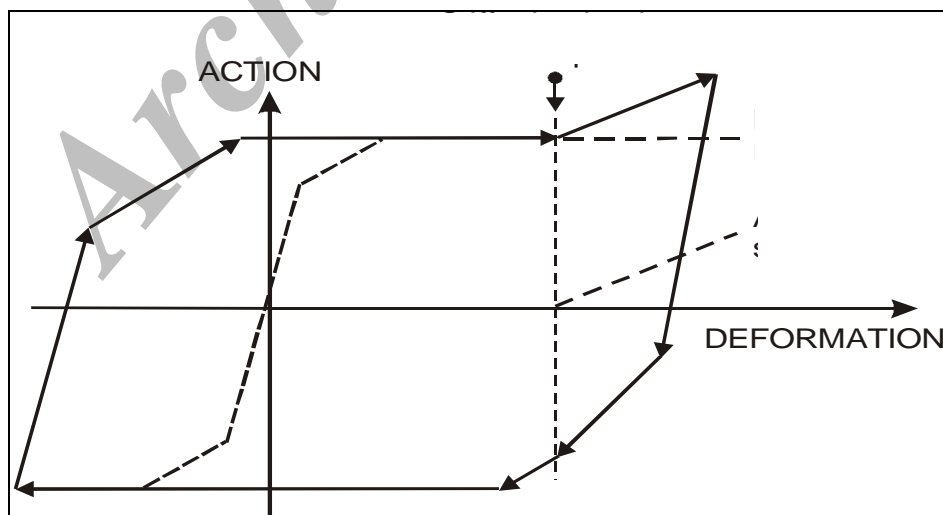
در مدل‌سازی هندسی پل‌ها، دقت عمل خاص و ویژه‌ای به عمل آمده به گونه‌ای که تمامی اعضای سازه‌ای در موقعیت واقعی خود مدل شده و هیچ‌گونه ساده سازی در این قسمت انجام نگرفته است (شکل ۷).

۱- در مدل‌سازی پایه پل‌ها از ترکیب چندین المان استفاده شده است. در ابتدا و انتهای پایه دو عدد مفصل پلاستیک چرخشی محوری- خمشی تعریف می‌شود (المان شماره ۱۰). حد فاصل این دو مفصل پلاستیک یک المان الاستیک تعریف می‌شود (المان‌های شماره ۱ و ۲) و به منظور در نظر گرفتن قسمت صلب سرستون در پایه از یک المان الاستیک صلب استفاده می‌شود (المان شماره ۳). برای تعریف جرم پایه، در وسط ارتفاع ستون یک جرم متمرکز به اندازه نصف وزن پایه تعریف شده (گره مابین المان‌های شماره ۱ و ۲) و در انتهای پایه نیز یک جرم متمرکز به اندازه یک چهارم وزن پایه و وزن سهمیه حاصل از تیر سر ستون تعریف می‌شود (گره مابین المان‌های شماره ۲ و ۳).

- ۲- المان جداگر با طول 0.2 متر در محل واقعی خود مدل المان الاستیک صلب که به صورت T شکل به یکدیگر متصل می‌شوند، استفاده می‌شود (المان شماره ۵).
- ۳- تیر سر ستون با المان‌های الاستیک و با در نظر گرفتن ناحیه‌های صلب انتهایی ناشی از پایه‌ها مدل می‌شود (المان‌های شماره ۴ و ۵).
- ۴- شاهی‌ها به صورت یک المان الاستیک مدلسازی می‌شوند (المان شماره ۹) و برای مدلسازی جرم شاهی‌ها و عرشه، محل مرکز جرم حاصل از شاهی‌ها و بتن کف به صورت دستی محاسبه شده و سپس با استفاده از یک المان صلب الاستیک جرم‌های دال و عرشه در محل واقعی خود مدل می‌شوند (المان شماره ۷).
- ۵- دیافراگم‌های انتهایی و میانی توسط المان‌های الاستیک صلب مدلسازی می‌شوند (المان شماره ۸)
- ۶- روسازه پل به صورت سه درجه آزادی (دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی چرخشی) مدل می‌شود [۱۹].
- ۷- نحوه در نظر گرفتن میرایی ویسکوز αM توسط نرم‌افزار در حالت جداسازی به دو صورت می‌تواند باشد که در شکل ۸ نشان داده شده است. در این تحقیق از مدل الف برای تحلیل دینامیکی غیر خطی سازه پل‌ها استفاده می‌شود.
- ۸- محل اتصال پایه به پی به صورت گیردار مدلسازی شده و شمع‌ها مدل نشده‌اند.



الف- گزینه جداسازی شده (میراگرهای ویسکوز αM ب- گزینه استاندارد (میراگرهای ویسکوز αM به سطح بالایی جداسازی شده متصل می‌شوند) به زمین متصل می‌شوند) شکل ۸ دو مدل مختلف برای در نظر گرفتن میرایی حاصل از جرم سازه [۱۸]



شکل ۹. حلقه هیستریزس المان جداگر [۱۸]

۲-۵ مدل‌سازی رفتار غیرخطی جداگر

نرم‌افزار 3D Ram Perform توانایی مدل‌سازی رفتار جداگر به صورت سه خطی (سخت شدگی در کرنش‌های بالا) را نیز دارد که مدل کلی آن در شکل ۹ نشان داده شده است. اما در این تحقیق رفتار جداگر به صورت دو خطی مدل می‌شود. المان جداگر در این برنامه خصوصیات برشی و محوری مطابق شکل ۱۰ را دارد که رفتار محوری به صورت الاستیک با سختی‌های متفاوت در کشش و فشار است. رفتار برشی نیز به صورت سه خطی با سخت شدگی اضافی اختیاری در تغییر شکل‌های بزرگ است. هیچگونه افت مقاومت نیز در برش در نظر گرفته نمی‌شود. هر جداگر لرزه‌ای دارای سه محور است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

برای نیروهای برشی مایل نسبت به محورهای X و Y، نیروی برشی مؤثر و تغییر شکل برشی مؤثر با روابط اندرکنشی زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (6)$$

$$D = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (7)$$

که F و D به ترتیب نیروی برشی مؤثر و تغییر مکان مؤثر هستند که رابطه بین آنها در شکل شماره ۱۰-ج نشان داده شد. F_x, F_y, D_x, D_y نیز مؤلفه‌های نیرو و تغییر مکان در راستای محورهای X و Y هستند. در واقع یک سطح دایره‌ای برای جاری شدن مصالح جداگر در نظر گرفته می‌شود. این روابط اندرکنشی امکان همبستگی بین روابط نیرو- تغییر مکان در دو جهت را فراهم می‌کنند. به عبارتی یک مدل پلاستیسیته همبسته برای رفتار برشی جداگر لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

تفاوت بین یک رابطه پلاستیسیته برای رفتار همبسته (تابع جاری شدن دایره‌ای) و یک رفتار غیر همبسته (تابع جاری شدن مربعی) از مقایسه پاسخ آنها به یک مسیر تغییر مکانی از پیش تعیین شده امکان‌پذیر است [۱۰]. در شکل ۱۲-الف این مسیر تغییر مکانی از پیش تعیین شده، نشان داده شده است و در شکل‌های ۱۲-ب، ۱۲-ج و ۱۲-د نیز به ترتیب مسیر نیرویی، پاسخ نیرو تغییر مکان در جهت Y متناظر با مسیر تغییر مکانی شکل ۱۲-الف نشان داده شده است. لازم به یادآوری است پاسخ همبسته با خط توپر و پاسخ غیرهمبسته با خط چین نشان داده شده‌اند. با دقت در شکل ۱۲ تفاوت اصلی رفتار همبسته و غیر همبسته به صورت ذیل مشخص می‌شود:

۱- کاهش سختی مؤثر در رفتار همبسته نسبت به رفتار غیر

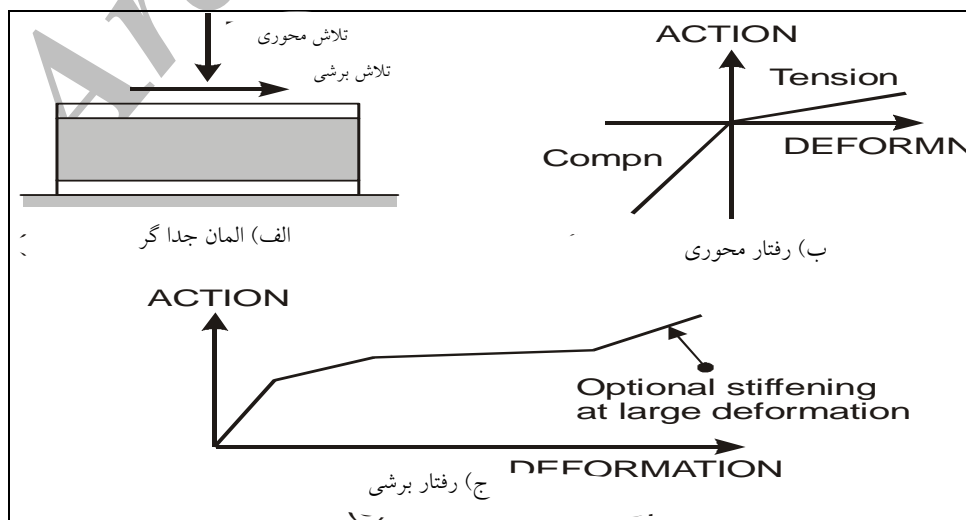
همبسته

۲- کاهش میرایی مؤثر (میرایی هیستریزس) در رفتار

همبسته نسبت به رفتار غیر همبسته که با مساحت

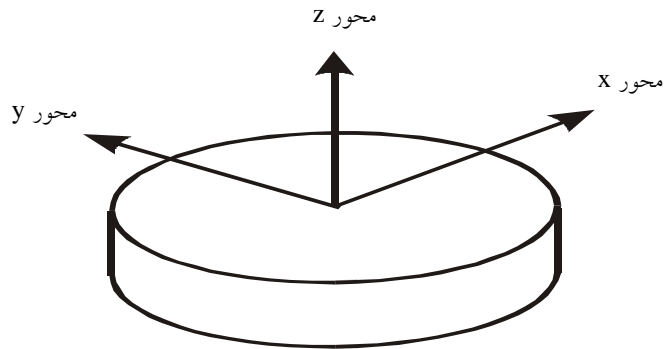
سطح زیر منحنی هیستریزس مرتبط است.

این کاهش در سختی مؤثر و میرایی مؤثر در وهله اول مستقیماً متناظر با افزایش تغییر مکان جداگر است، اما از طرف دیگر با کاهش سختی مؤثر سیستم، پیوند سازه جداسازی شده طبق رابطه ۵ افزایش یافته و بنابراین مشخصات تحریک زلزله پایه نیز در رفتار کلی تأثیرگذار خواهد بود. به عبارتی دو پارامتر در مقدار تغییر مکان جداگر تأثیرگذارند؛ یکی تعیینی و دیگری احتمالاتی که اولی (پارامتر تعیینی) الزاماً افزایش تغییر مکان جداگر را دیکته نموده و دومی (پارامتر احتمالاتی) می‌تواند منجر به افزایش یا کاهش تغییر مکان جداگر شود.

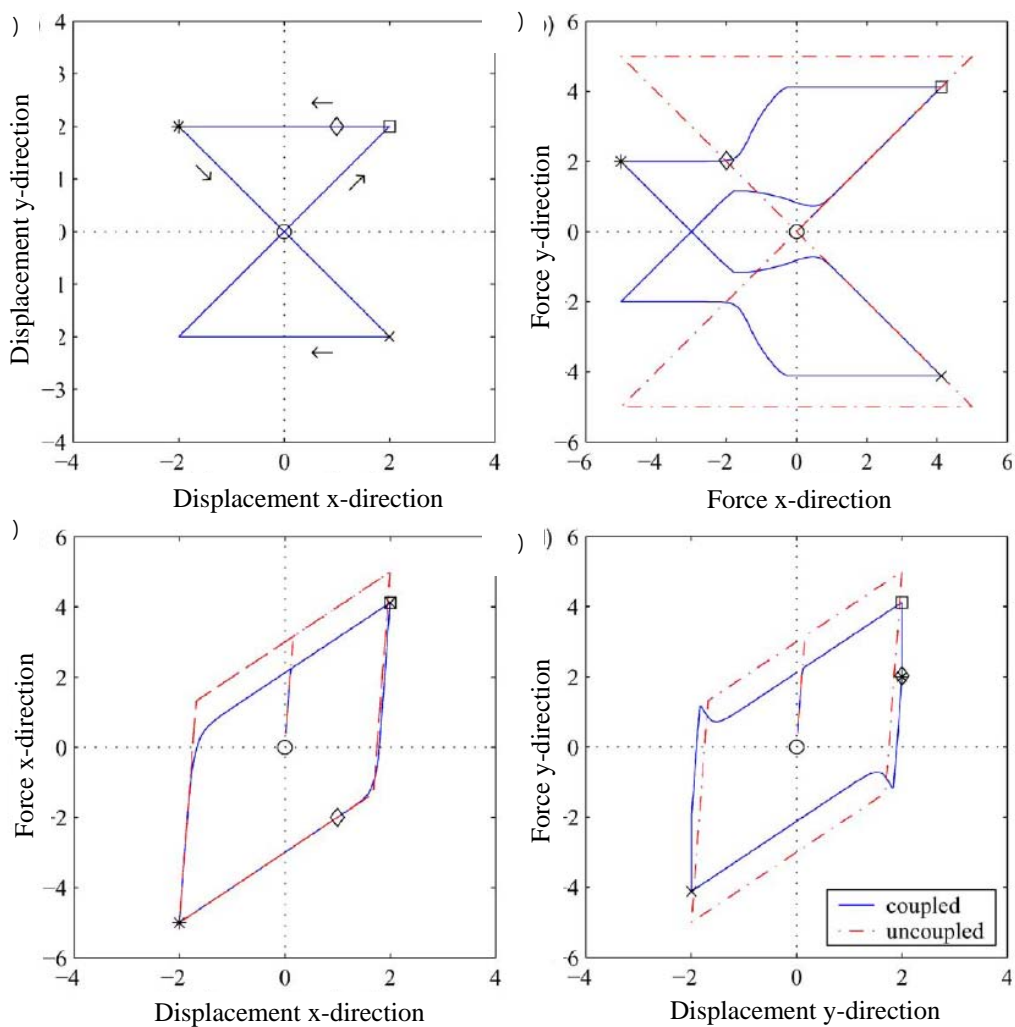


شکل ۱۰. خصوصیات جداگر لرزه‌ای [۱۸]

مقایسه پاسخ لرزه‌ای غیر همبسته یک جهت و همبسته دو جهت ...



شکل ۱۱. شمای محوره‌های جداگر لرزه‌ای [۱۸]



شکل ۱۲. مسیر تغییر مکانی از پیش تعیین شده (الف)، مسیر نیرویی متناظر (ب)، پاسخ نیرو-تغییر مکان در راستای X (ج) و پاسخ نیرو-تغییر مکان در راستای y (د) [۱۰]

۶. تاريخچه‌هاي زماني زلزله مورد استفاده

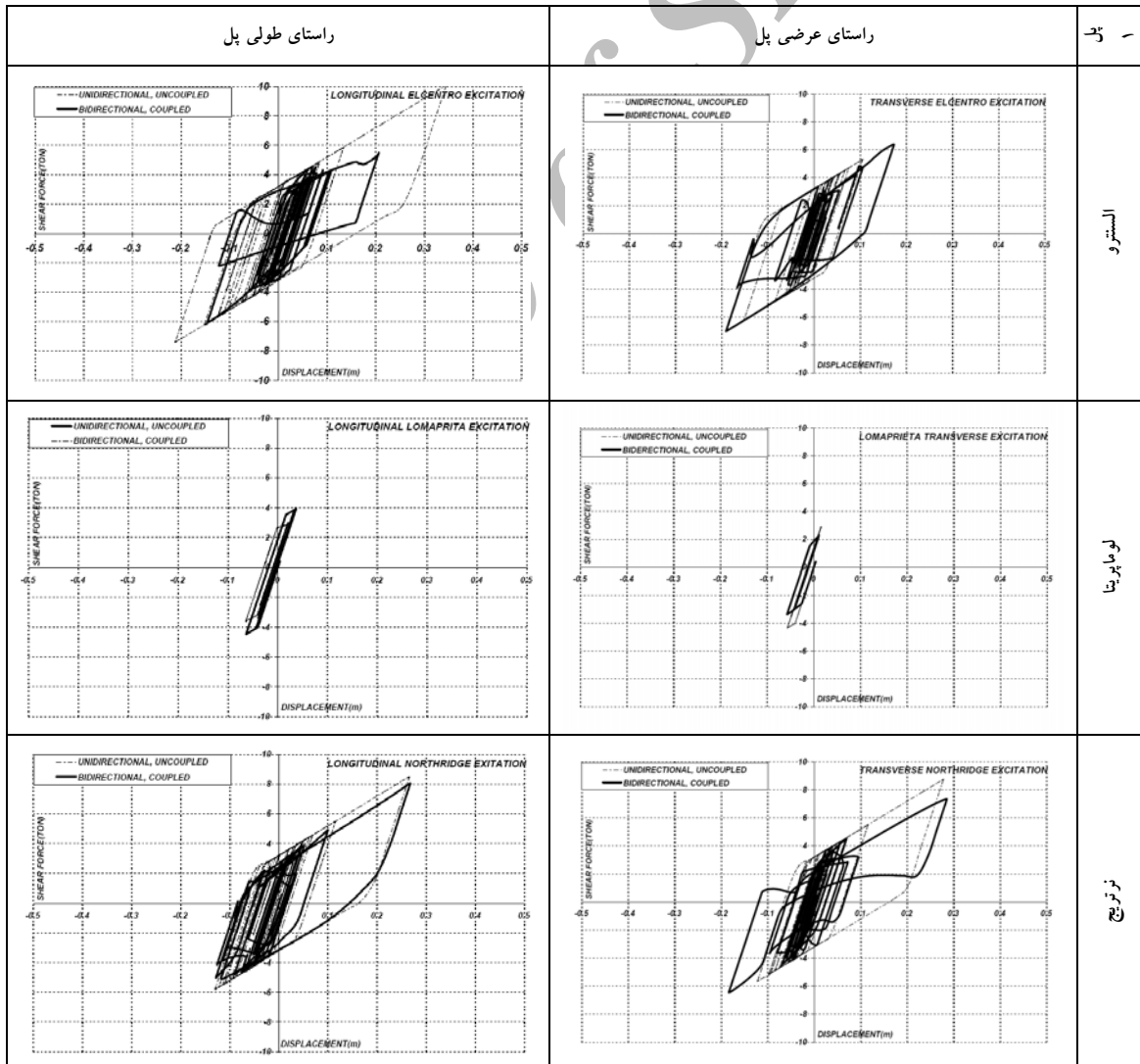
در تحليل تاريخچه زماني ديناميكي

غيرخطي

در اين تحقيق از مولفه‌هاي شمالي-جنوبي زلزله‌هاي السنترو، لوماپريتا و نورتريج استفاده شده است. در حالت تحريك دو جهته اين مولفه به طور همزمان در هر دو راستاي طولی و عرضی پل به پايه پل وارد می شود و در حالت تحريك يك جهته اين مولفه دو بار و هر بار در يك راستا (طولی يا عرضی) به پايه پل وارد می شود. همپايه سازي رکوردها در فضاي زمان انجام گرفته، به نحوی که حداکثر شتاب رکورد (PGA) ۰/۵g باشد. از آنجا که هدف از اين تحقيق تنها مقايسه تغييرشکل‌هاي جداگرهاي هر پل در هر رکورد زلزله در حالات دو جهته و يك جهته است اين روش همپايه سازي کامل است.

۷. بررسي نتايج تحليلی

با توجه به اينکه بررسي مقادير تغييرشکل در محل جداگر و مقايسه اين مقادير در دو حالت يك جهته غير همبسته و دو جهته همبسته هدف اصلي تحقيق است، نمودارهاي هيستريزيس نيروی برشی جداگر در برابر تغييرشکل جداگر مورد توجه قرار می گيرد. برای اختصار در ارايه مطالب تنها نمودارهاي هيستريزيس نيروی برشی - تغييرمکان جداگرهاي کناری پلها شماره ۱ و ۲ در اشکال ۱۳ و ۱۴ در هر دو راستاي طولی و عرضی و تحت اثر تحريك زلزله‌هاي السنترو، لوماپريتا و نورتريج نشان داده شده است. به طور کلی می توان گفت رفتار جداگر در هردو پل تحت تحريك زلزله‌هاي السنترو و نورتريج کاملاً در ناحیه غيرخطی بوده اما در تحريك زلزله لوماپريتا تنها به مقدار کمی وارد ناحیه غيرخطی شده است.

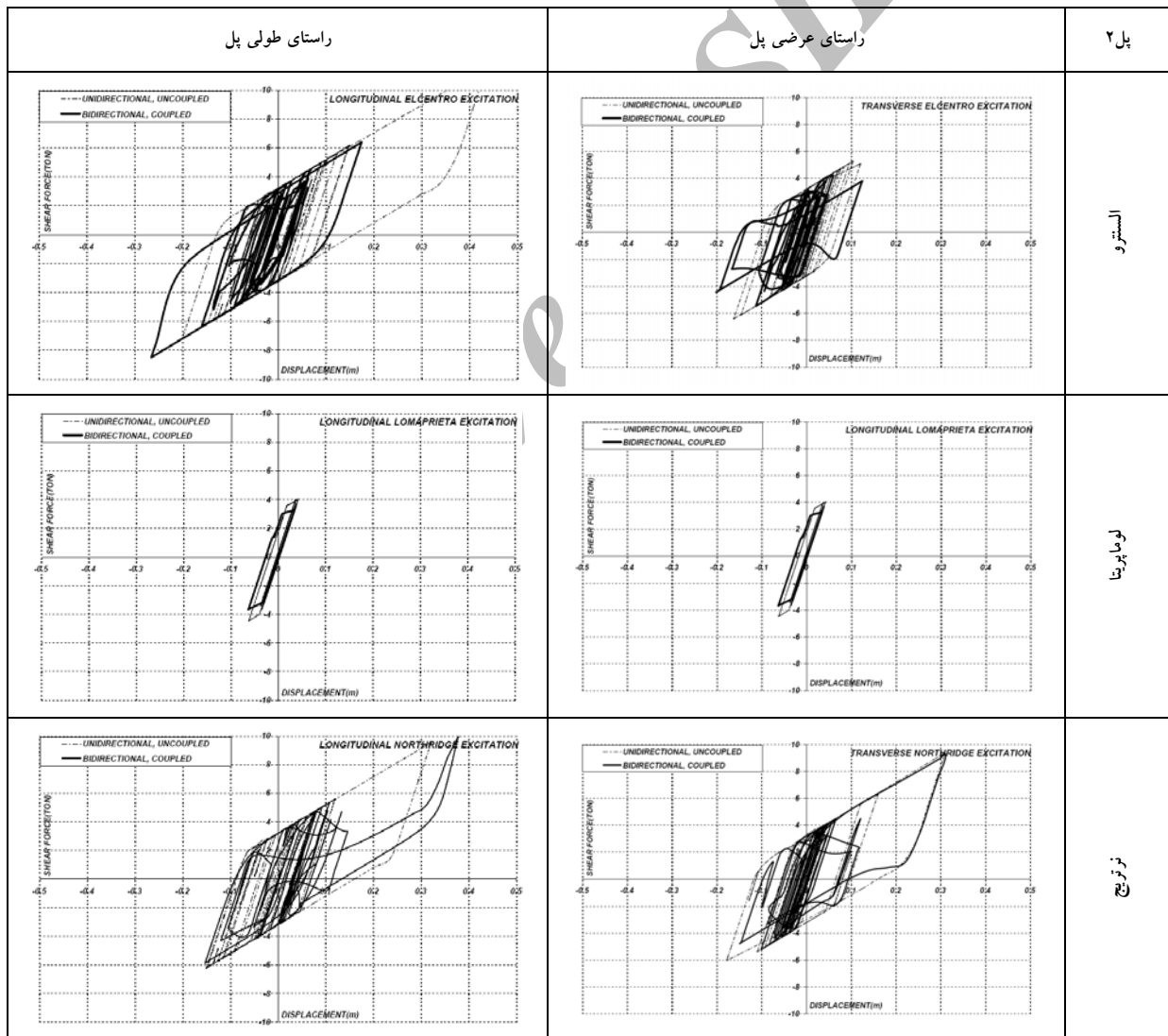


شکل ۱۳. نمودارهاي هيستريزيس نيروی برشی در برابر تغييرشکل جداگر کناری پل شماره ۱

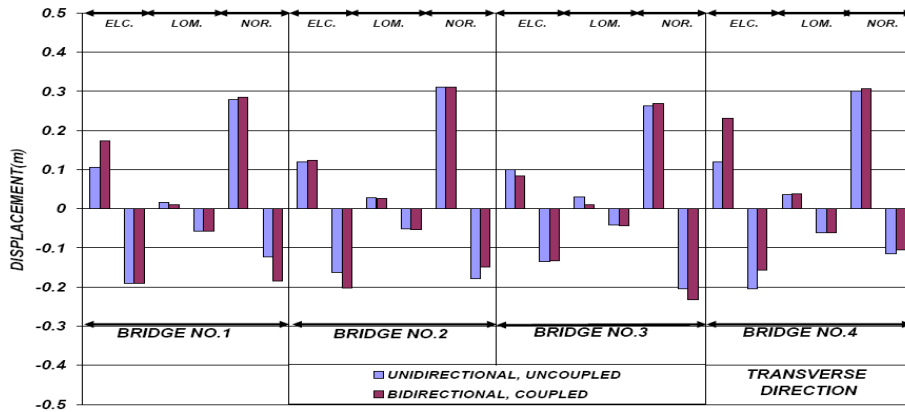
مقایسه پاسخ لرزه‌ای غیر همبسته یک جهت و همبسته دو جهت . . .

نمودارهای ستونی تغییر مکان‌های بیشینه و کمینه جداگر به ترتیب برای جهات طولی و عرضی در پل‌های مختلف و تحت اثر زلزله‌های مختلف نشان داده شده است. مقایسه میزان تغییر مکان بیشینه و کمینه در دو حالت یک جهت غیر همبسته و دو جهت همبسته نشان از غلبه بعد تصادفی و احتمالاتی موضوع بر بعد تعینی دارد. به عبارتی دیگر، کاهش سختی موثر و کاهش میرایی موثر ناشی از پلاستیسیته همبسته، الزاماً افزایش تغییر مکان جداگر را به همراه دارد، اما از طرف دیگر افزایش پریود ناشی از کاهش سختی موثر و نیز کاهش میرایی موثر بسته به فرکانس غالب و محتوای فرکانسی تحریک زلزله (پارامتر احتمالاتی) می‌تواند منجر به افزایش یا کاهش تغییر مکان جداگر شوند.

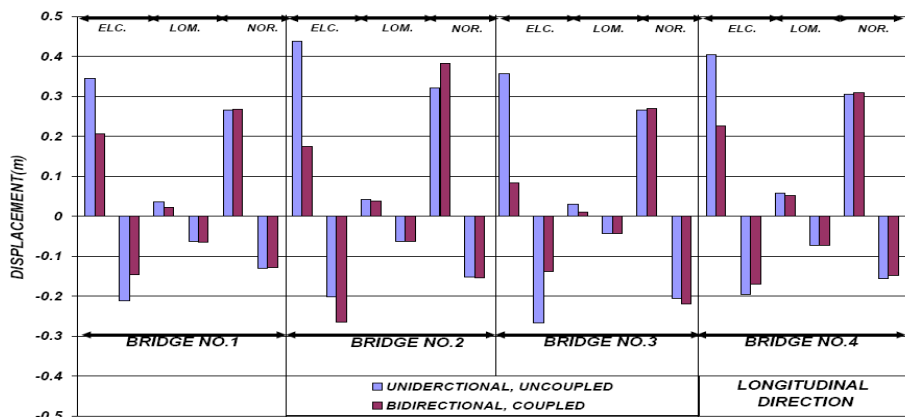
نمودار هیستریزیس در حالت تحریک دو جهت و پلاستیسیته همبسته با خط توپر و نمودار هیستریزیس در حالت تحریک یک جهت و پلاستیسیته غیر همبسته با خط چین نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود رفتار یک جهت غیر همبسته کاملاً منظم بوده و از قانون پلاستیسیته تک جهت جداگر تبعیت می‌کند، اما رفتار دو جهت همبسته کاملاً نامنظم است. در واقع تصویر مسیر نیرویی و تغییر مکانی روی محورهای X و Y باعث ایجاد نامنظمی و اغتشاش ظاهری نمودارهای هیستریزیس می‌شود. با مقایسه مقادیر حدی تغییر مکان جداگر و مقایسه آن در دو حالت ملاحظه می‌شود که نمی‌توان همواره انتظار بیشتر بودن تغییر مکان جداگر در حالت دو جهت همبسته را نسبت به حالت یک جهت غیر همبسته داشت. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶



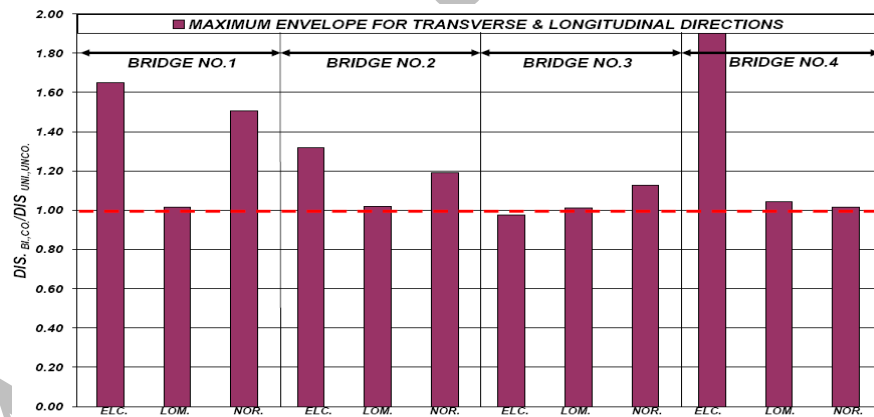
شکل ۱۴. نمودارهای هیستریزیس نیروی برشی در برابر تغییر شکل جداگر کناری پل شماره ۲



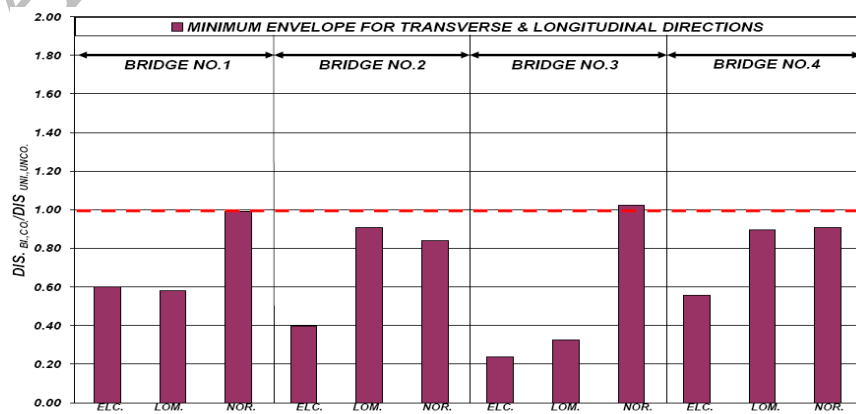
شکل ۱۵. نمودار ستونی تغییر مکان‌های بیشینه و کمینه جداگر در جهت عرضی پل



شکل ۱۶. نمودار ستونی تغییر مکان‌های بیشینه و کمینه جداگر در جهت طولی پل



شکل ۱۷. نمودار پوش بیشینه نسبت نرمال شده تغییر مکان در حالت دو جهته همبسته به تغییر مکان در حالت یک جهته غیر همبسته



شکل ۱۸. نمودار پوش کمینه نسبت نرمال شده تغییر مکان در حالت دو جهته همبسته به تغییر مکان در حالت یک جهته غیر همبسته

۹. سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری، بابت حمایت از پروژه "بررسی عایق لرزه‌ای مناسب برای پل‌های راه و راه‌آهن" تشکر و قدردانی می‌کنند.

۱۰. مراجع

1. Hwang, J.S. and Sheng, L.H. (1994) "Equivalent elastic seismic analysis of base-isolated bridges with lead-rubber bearings", *Engineering Structures*, Vol.16, No.3, pp. 201-209.
2. Hwang, J.S. and Chiou, J.M. (1996) "Equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings", *Engineering Structures*, Vol. 18, No.7, pp. 528-536.
3. Hwang, J.S. , Chiou, J.M., Sheng, L.H. and Gates, J.H. (1996) "A refined model for base isolated bridges with bi-linear hysteretic bearings", *Earthquake Spectra*, Vol.12, No.2, pp. 245-273.
4. Ghobarah, A. and Ali, H.M. (1988) "Seismic performance of highway bridges", *Engineering Structures*, Vol.10, No.3, pp. 157-166.
5. Pagnini, L.C. and Solari, G. (1999) "Stochastic analysis of the linear equivalent response of bridge piers with aseismic devices", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.28, No.5, pp. 543-560.
6. Saiidi, M., Maragakis, E. and Griffin, G. (1999) "Effect of base isolation on seismic response of multi-column bridges", *Structural Engineering Mechanics*, Vol.8, No.4, pp. 411-419.
7. 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, No.8, pp. 902-910.
8. Jangid, R.S. (2004) "Seismic response of isolated bridges", *Bridge Engineering*, Vol.9, No.2, pp. 156-166.
9. Ryan, K. L. and Chopra, A. K. (2004) "Estimation of seismic demands on isolators based on nonlinear analysis", *Structural Engineering*, Vol.130, No.3, pp. 392-402.
10. Warn, G. P. and Whittaker, A. S. (2004) "Performance estimates in seismically isolated

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب پوش بیشینه و کمینه نسبت نرمال شده تغییر مکان در حالت دو جهت همبسته به تغییر مکان در حالت یک جهت غیر همبسته در هر دو راستای طولی و عرضی پل نشان داده شده است. میانگین نتایج پوش بیشینه $1/23$ با انحراف استاندارد $0/29$ و میانگین نتایج پوش کمینه $0/69$ با انحراف استاندارد $0/26$ است.

۸. نتیجه‌گیری

از آنجایی که مهم‌ترین عامل در طراحی سیستم جداگر لرزه‌ای پل‌ها، تغییر مکان عرشه (روسازه) پل است و عامل تعیین‌کننده این تغییر مکان، تغییر شکل جداگر است، بنابراین برآورد واقعی‌تر تغییر شکل برای جلوگیری از تصادم عرشه‌های پل با یکدیگر یا کوله پل امری ضروری است. متداول‌ترین آیین‌نامه طرح سیستم جداگر لرزه‌ای پل در حال حاضر دستورالعمل راهنمای آیین‌نامه آشتو است. طراحان سیستم‌های جداگر لرزه‌ای پل‌ها، پس از طرح جداگر با استفاده از روش بار یکنواخت این دستورالعمل به ارزیابی عملکرد سیستم با یک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می‌پردازند. در این تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کلیه اجزای روسازه و زیرسازه پل به صورت الاستیک مدل شده و تنها المان‌های جداگر لرزه‌ای دارای خواص غیرخطی هستند که البته این فرض با فلسفه جداسازی لرزه‌ای تا حد زیادی سازگار است. تاریخچه‌های زمانی نیز به صورت غیر همزمان یا همزمان (بسته به توانایی‌های نرم‌افزار مورد استفاده) به پایه اعمال شده و رفتار جداگر نیز به صورت دو خطی در دو جهت اصلی طولی و عرضی پل و بدون اعمال یک قانون پلاستیسیته همبسته مدلسازی شد. در این تحقیق نشان داده شد که در نظر نگرفتن اثرات همبستگی پلاستیسیته در دو جهت طولی و عرضی پل در حالت اعمال تحریک دو جهت منجر به برآورد غیرواقعی بینانه تغییر مکان‌های جداگر می‌شود. دامنه این تغییرات با توجه به مطالعات عددی انجام شده، برای مقادیر حداکثر تغییر مکان جداگر تا 52 درصد افزایش $(\mu + \sigma)$ و برای مقادیر حداقل تغییر مکان جداگر تا 57 درصد کاهش $(\mu - \sigma)$ است.

حرارتي"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره چهارم، زمستان، ص ۳۱۹-۳۳۱.

16. Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. and Kowalsky, M.J. (2007) "Displacement-based seismic design of structures", IUSS Press.

۱۷. زهرايي، سيد مهدي و محمدي، محمد مهدي (۱۳۸۴) "افزايش ايمني پلها در برابر زلزله به کمک جداسازي لرزه‌اي"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوم، شماره ۴، زمستان، ص ۲۲۳-۲۳۷.

18. Powell, G.H. (2000) "RAM perform-3D element descriptions", Powell Inc.

19. Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and Constantinou, M.C. (1991) "Nonlinear dynamic analysis of 3-D base-isolated structures", Structural Engineering, Vol.17, No.7, pp. 2035-2054.

bridges", Engineering Structures, Vol.26, pp. 1261-1278.

11. American Association of State Highway Officials (1999) "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", Washington, D.C., American Association of State Highway Officials.

۱۲. صادقي، ارژنگ (۱۳۷۵) "دستگاههاي تكيه‌گاهي پلها"، انتشارات مرکز تحقيقات و مطالعات وزارت راه و ترابري، ۲۸۰ ص.

13. Chen, W.F. and Duan, L. (2000) "Bridge engineering handbook", CRC Press LLC.

14. Naeim, F. & Kelly, J. M. (1999) "Design of seismic isolated structures from theory to practice", John Wiley and sons.

۱۵. زهرايي، سيد مهدي و سامي، حبيب (۱۳۸۷) "ارزيابي عملکرد لرزه اي پلها با تكيه گاههاي موجود انبساط

Archive of SID