

ارزیابی اثرات زلزله‌های نزدیک گسل روی آسیب‌پذیری پل‌های بزرگراهی

غلامرضا قدرتی امیری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
سید محمد مهدی زمردیان*، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
علیرضا تاجیک داوودی، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: mzomorod@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۱۳ - پذیرش: ۱۳۹۰/۰۹/۰۶

چکیده

هدف از این مطالعه، استفاده از یک روش تحلیلی برای تولید منحنی‌های شکنندگی برای یک پل بزرگراهی در شهر تهران می‌باشد. به این منظور از مدل سه بعدی اجزای محدود پل، آنالیزهای استاتیکی غیرخطی و تاریخچه زمانی غیرخطی برای تولید منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های خاص زلزله‌های نزدیک گسل و پدیده‌ای مانند جهت‌داری پیش رونده، در این تحقیق اثرات این گونه زلزله‌ها روی پل بزرگراهی در مقایسه با زلزله‌های دور از گسل با استفاده از منحنی‌های شکنندگی، بررسی شده است. با توجه به هندسه پل و کجی آن، برای آنالیز دقیق، پل موردنظر تحت اثر رکوردهای زلزله در جهات مختلف قرار گرفته است. مشاهده شد که منحنی‌های شکنندگی به زاویه ورودی، به خصوص در سطوح بالای جنبش زمین، حساس هستند. در سطوح زمین لرزش بالا مانند ۱/۰ g تفاوت در منحنی‌های شکنندگی ناشی از جهات مختلف اعمال شتاب‌نگاشت در برخی زاویه‌ها تا ۲/۵ برابر می‌باشد. همچنین، منحنی‌های شکنندگی که بر اساس رکوردهای نزدیک گسل با جهت‌داری پیش رونده ایجاد شده‌اند، در مقایسه با رکوردهای دور از گسل در یک سطح از جنبش زمین، احتمال فراگذشت بیشتری را از یک حالت حدی خاص نشان می‌دهند. منحنی‌های حاصله ناشی از رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل، دارای جهت‌داری پیش رونده در برخی موارد برای یک سطح جنبش زمین اختلافی ۳۰ درصدی دارند.

واژه‌های کلیدی: پل، مدل‌سازی اجزای محدود، زلزله‌های نزدیک گسل، آسیب‌پذیری، منحنی شکنندگی

۱- مقدمه

اثرات منفی دراز مدت روی اقتصاد منطقه خواهد داشت (SeongKwan, Tschangho and Seung, 2007). یک وسیله تصمیم‌گیری که استفاده از آن برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای در حال گسترش است، منحنی‌های شکنندگی می‌باشد. منحنی شکنندگی، احتمال فراگذشت حالت معینی از سازه از مقدار حدی تعیین شده برای آن، تحت یک معیار شدت زلزله را بیان می‌کند. منحنی‌های شکنندگی قابل اطمینان نه تنها برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، بلکه برای فعالیت‌های دیگر مانند اولویت‌دهی بهسازی پل‌ها و برنامه‌ریزی برای

قرارگیری تهران روی گسل‌های نیاوران، گسل محمودیه، گسل داوودیه، گسل شمال تهران و غیره، لرزه‌خیز بودن این منطقه را نشان می‌دهد. بررسی زلزله‌های شدیدی که اخیراً رخ داده، بیانگر این مطلب است که خسارت‌های ثانویه به کلان‌شهرها به علت از کار افتادن فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی بسیار جدی‌تر از خسارت‌های مستقیم، مانند خرابی ساختمان‌ها است. یکی از مهم‌ترین سازه‌هایی که در زلزله‌های اخیر به شدت آسیب دیده‌اند، پل‌های شهری می‌باشند. آسیب به آنها می‌تواند به طور جدی باعث اختلال در شبکه حمل و نقل شود، که به طور مستقیم

ماکزیمم زمین انجام می‌شود. نتایج تمام این عملیات به صورت ماتریس فرکانس آسیب درآورده می‌شوند. سپس منحنی‌های شکنندگی شبیه به منحنی‌های شکنندگی تجربی محاسبه می‌گردد. محققان اعتقاد داشتند که نتایج به دست آمده از این روش تقریب خوبی با نتایج به دست آمده از روش‌های پیچیده تر دارند.

روش دیگر، روش استاتیکی غیرخطی (Mander and Basoz, 1999)، (Monti and Nistico, 2002) می‌باشد. این روش یک فرایند استاتیکی غیرخطی است که معمولاً از آن به عنوان روش طیف ظرفیت یاد می‌شود. این روش اصولاً از یک منحنی پوش آور استاتیکی غیرخطی در کنار طیف پاسخ استفاده می‌کند. به علت صرفه‌جویی در زمان، این روش توسط محققان بسیاری برای تولید منحنی‌های شکنندگی پل‌ها استفاده شده است.

روش دینامیکی غیرخطی (Mackie and Stoidinovic, 2006) و (Choi, DeRoches and Nielson, 2004)، روش دیگری است که اولین مرحله در این روش به دست آوردن تعدادی زمین لرزش می‌باشد که بیانگر ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه است و همچنین باید تردیدهای موجود در اندازه و فاصله‌های مرکز زلزله را در بر بگیرد. سپس پارامترهای سازه‌ای (مقاومت‌های مصالح و مقادیر هندسی) به صورت احتمالاتی از یک مدل عددی پل، نمونه برداری می‌شود. این کار به تعداد n مرتبه انجام می‌شود تا n نمونه مدل پل ظاهراً یکسان، اما متفاوت ایجاد شود. سپس به هر نمونه مدل پل، یک زمین لرزش اختصاص داده می‌شود و برای هر کدام از آنها یک آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام می‌گیرد. برای هر آنالیز، ماکزیمم پاسخ‌های سازه‌ای، مانند شکل‌پذیری ستون‌ها، تغییر شکل‌های تکیه‌گاه‌ها، جابه‌جایی کوله‌ها و غیره، به دست آورده می‌شود. با استفاده از پاسخ‌های ماکزیمم مؤلفه‌های مختلف پل، یک مدل پاسخ لرزه‌ای احتمالاتی با استفاده از رگرسیون شاخص‌های زمین لرزش و ماکزیمم پاسخ سازه‌ای و یا با استفاده از روش‌های دیگری، مانند روش احتمالاتی ماکزیمم به دست می‌آید. همچنین (Hwang et al., 2000)، فرایندی برای تولید منحنی‌های شکنندگی به صورت تحلیلی ارائه کردند. این کار برای یک پل چهار دهانه با شاه‌تیرهای بتنی و با استفاده از زمین لرزش‌های مصنوعی که متناسب با منطقه تولید کرده بودند، صورت گرفت. آنها از تغییر شکل ستون‌ها، ناشی از بارگذاری

مسیرهای امدادسانی پس از زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند (Karim and Yamazaki, 2001).

امروزه اثرات مخرب زلزله‌های نزدیک به گسل به خوبی شناخته شده است. تخریب پل‌ها در زلزله‌های نزدیک گسل در سالیان اخیر نشان می‌دهد که در طراحی پل‌ها باید اثرات این نوع زلزله‌ها را در نظر گرفت. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع زلزله‌ها پدیده جهت‌داری می‌باشد. با توجه به مطالب بالا، در این مطالعه به بررسی اثرات زلزله‌های نزدیک گسل با جهت‌داری و مقایسه آن با اثرات زلزله‌های دور از گسل روی یک پل بزرگراهی بتنی واقع در تهران، در غالب منحنی‌های شکنندگی پل‌ها پرداخته شده است. با توجه به این‌که از گسل‌های موجود در اطراف پل، هیچ‌گونه رکورد مناسب برای این مطالعه موجود نیست، به خصوص رکوردهای نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش رونده هستند، بنابراین، از رکوردهای خارجی استفاده شده است. محدودیت در نظر گرفته شده برای انتخاب رکوردهای نزدیک گسل، این بوده است که تا آنجا که امکان داشت از رکوردهای دارای شرایط ساختگاهی مشابه پل مورد نظر استفاده شود.

منحنی‌های شکنندگی سازه‌ها به صورت تجربی و تحلیلی تهیه می‌شوند. منحنی‌های شکنندگی تجربی بر اساس گزارش‌های آسیب وارده به سازه از زلزله‌های گذشته و منحنی‌های شکنندگی تحلیلی، بر اساس پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها به دست می‌آیند. از آنجایی که داده‌های آسیب وارد به سازه‌ها، ناشی از زلزله در تهران بسیار کم است، روش تحلیلی، منطقی‌ترین روش برای تولید منحنی‌های شکنندگی سازه‌ها در این ناحیه می‌باشد.

مطالعات بسیاری روی منحنی‌های شکنندگی تحلیلی پل‌ها صورت گرفته و روش‌های گوناگونی برای تولید این منحنی‌ها ارائه شده است. یکی از این روش‌های تحلیلی روش طیف الاستیک (Jeringan and Hwang, 2002) است. در این روش نسبت‌های ظرفیت به پاسخ (C/D) برای مؤلفه‌های مختلف پل ایجاد می‌شود و پاسخ پل‌ها با استفاده از انجام تحلیل طیفی الاستیک روی مدل‌های پل‌ها با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری به دست می‌آید. زمانی که ظرفیت‌ها و پاسخ‌ها برای مؤلفه‌ها در هر نمونه پل - زلزله محاسبه شد، نسبت‌های C/D محاسبه شده و به سطح آسیب متناظر نسبت داده می‌شود. این کار برای سطح‌های مختلف شتاب

۲- مدل‌سازی پل بزرگراهی

در ساخت پل‌ها از مصالح بسیار مقاوم استفاده می‌شود؛ امروزه رایج‌ترین این مصالح بتن مسلح، بتن پیش‌تینیده و فولاد است. استفاده از بتن مسلح در ساخت پل‌ها بسیار مرسوم می‌باشد. ترکیب دو نوع مصالح با ویژگی‌های متفاوت، منجر به پیچیدگی آنالیز سازه‌های بتن مسلح نسبت به سازه‌های فولادی می‌شود. با استفاده از اجزای محدود، می‌توان سازه‌های بتنی را با دقت بیشتری مدل کرد. با توجه به اهمیت بررسی دقیق رفتار پل‌های بزرگراهی ناشی از زلزله، در این مطالعه، برای مدل‌سازی پل‌های بزرگراهی از نرم‌افزار Opensees استفاده شده است. این نرم‌افزار حاصل کار مرکز علمی زلزله‌شناسی واقع در دانشگاه برکلی می‌باشد و قابل دریافت از سایت دانشگاه برکلی است. برای مدل کردن سیستم‌های سازه‌ای، Opensees از روش‌های اجزای محدود استفاده می‌کند (Opensees, 2003).

در این مطالعه از پل بزرگراهی S10 واقع در قسمت جنوبی از مجموعه پل‌های فجر در شهر تهران استفاده شده است (شکل ۱). این پل بتنی دارای طولی برابر با ۱۲۰ متر و قوس افقی در انتهای غربی و همچنین کوله کج در انتهای غربی می‌باشد. عرشه این پل بزرگراهی از نوع صندوقه‌ای به عرض ۱۱/۶ متر است. این پل دارای چهار پایه، که هر پایه شامل دو ستون بتنی دایروی به قطر ۱/۲ متر و به ارتفاع‌های متغیر از ۱۱/۱ متر تا ۱۱/۴ می‌باشد. در ستون‌های دو پایه انتهایی از ۶۶ عدد آرماتور به قطر ۴۰ میلی‌متر و در ستون‌های دو پایه میانی از ۴۰ عدد آرماتور به قطر ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است.

با توجه به این‌که آنالیز پل به صورت دو بعدی نمی‌تواند اندرکنش بین قسمت‌های مختلف پل را به دست آورد و در نتیجه منجر به خطاهای زیادی در محاسبه پاسخ مؤلفه‌های آنالیز می‌شود، در این مطالعه، از آنالیز سه بعدی کامل پل برای ارزیابی رفتار پل بزرگراهی استفاده می‌گردد. سیستم مختصات مورد استفاده برای مدل‌سازی و آنالیز پل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. محور کلی X در جهت امتدادی است که کوله‌ها را به هم وصل می‌کند، از این جهت به عنوان "جهت طولی" یاد می‌شود. جهت کلی Y محور عمود بر محور X در صفحه افقی است که بیانگر جهت عرضی می‌باشد. همچنین محور Z ، بیانگر جهت قائم پل است. برای آنالیز المان‌های پل با استفاده از المان‌های دو گره‌ای،

لرزه‌ای در دو جهت طولی و عرضی برای مدل کردن پاسخ پل استفاده کردند.

(Karim and Yamazaki, 2003) از تحلیل‌های ساده و تکنیک‌های اجزای محدود برای تولید منحنی‌های شکنندگی تحلیلی استفاده کردند. همچنین به بررسی اثرات زمین لرزش‌ها بر روی منحنی‌های شکنندگی پرداختند و روش ساده‌ای برای تولید منحنی‌ها برای دسته‌ای از پل‌های موجود در ژاپن ارائه شد. (Nielson and DesRoches, 2007) منحنی‌های شکنندگی برای ۹ کلاس مختلف پل با در نظر گرفتن اثرات مؤلفه‌های مختلف پل تولید کردند. این محققان در روش خود سهم مؤلفه‌های اساسی پل‌ها مانند ستون‌ها، کوله‌ها و تکیه‌گاه‌ها را در شکنندگی کلی پل‌ها در نظر گرفتند و نشان دادند که در نظر گرفتن آسیب‌پذیری پل به صورت یک سیستم کلی، نسبت به در نظر گرفتن مؤلفه‌های پل به صورت جدا، شکننده‌تر می‌باشند.

در این مطالعه، برای تولید منحنی‌های شکنندگی پل‌ها از یک روش تحلیلی استفاده شده است. در این روش، از آنالیزهای استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی مدل سه بعدی غیرخطی پل، استفاده گردید. همچنین با توجه به ویژگی‌های خاص زلزله‌های نزدیک گسل و پدیده‌های مانند جهت‌داری پیش رونده، در این تحقیق اثرات این‌گونه زلزله‌ها روی پل بزرگراهی در مقایسه با زلزله‌های دور از گسل، با استفاده از منحنی‌های شکنندگی بررسی شده است. به علاوه، با توجه به هندسه پل بزرگراهی مورد نظر و کجی کوله‌ها، برای آنالیز دقیق، پل مورد نظر تحت اثر رکوردهای زلزله در جهات مختلف قرار گرفته است.

هدف اصلی این تحقیق، با توجه به کارهای قبلی بررسی اثرات زلزله‌های نزدیک گسل، دارای جهت‌داری پیش رونده روی پاسخ پل‌ها و در واقع بررسی آسیب‌پذیری پل در غالب منحنی‌های شکنندگی و مقایسه آن با زلزله‌های دور از گسل می‌باشد. همچنین با توجه به کجی پل و قوس افقی آن برای به دست آوردن ماکزیمم پاسخ رکوردهای افقی عمود بر هم، زلزله‌ها در جهات مختلف به سازه اعمال شده است. به علاوه برخلاف تحقیقات مشابه، برای انتخاب رکوردهای نزدیک گسل، تنها به پارامتر فاصله از مرکز زلزله بسنده نشده است و پارامترهای دیگری نیز لحاظ شده‌اند که از مزایای این پژوهش نسبت به کارهای مشابه می‌باشد.

در نرم افزار Opensees، رفتار بتن محصور نشده با استفاده از مصالح "Concrete01" مدل می شود. این ماده از سختی کاهش یافته خطی در بارگذاری و باربرداری و تنش پسماند برای بتن استفاده می کند. مدل کردن بتن محصور شده که در میان میلگردهای عرضی قرار دارد (هسته ستون)، قدری با مدل کردن بتن محصور نشده، متفاوت است. محققان نشان داده اند که مسلح شدن بتن و محصور شدگی با میلگردهای عرضی موجب افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن در فشار می شود. بهتر است که برای بتن محصور شده، مقاومت کششی در نظر گرفت. برای مدل کردن بتن محصور شده در نرم افزار Opensees از مصالح "Concrete02" استفاده شده است. این مصالح دارای مقاومت کششی با کاهش خطی است.

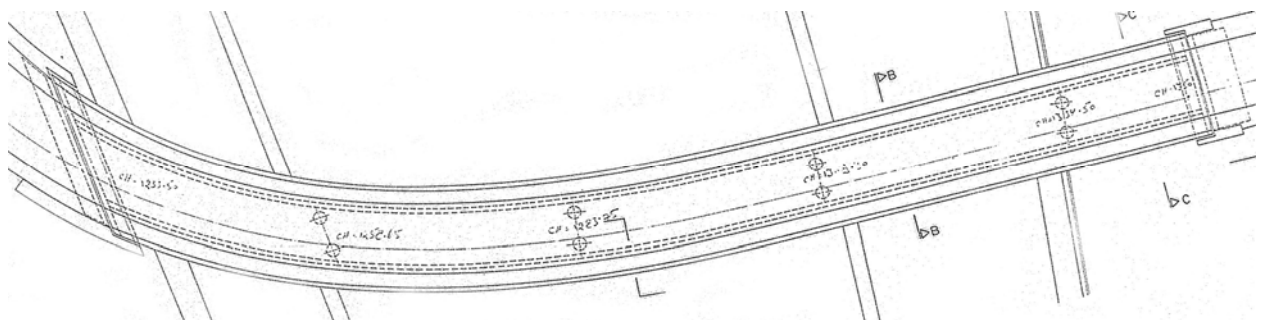
برای تعریف پارامترهای فولاد استفاده شده پل در مدل سازی، طبق ضوابط آیین نامه Caltrans 2006 عمل می شود. فولاد تقویتی باید به گونه ای با رابطه تنش - کرنش مدل شود که ناحیه اولیه الاستیک خطی، ناحیه جاری شدن و ناحیه سخت شدگی کرنشی که تنش با کرنش افزایش می یابد، در نظر گرفته شود. برای مدل کردن میلگردهای مقاطع بتنی در نرم افزار Opensees مصالح مختلفی وجود دارد که می توان استفاده کرد. در این مطالعه برای مدل کردن دقیق رفتار میلگردهای تقویت کننده از مصالح "Steel02" استفاده شده است.

ایده آل ترین حالت برای توزیع جرم بین المان های پل، آن است که جرم بر اساس طول بین المان ها توزیع شود. جرم های انتقالی در جهات طولی، عرضی و قائم به گره ها بر اساس طول مؤثر آنها اختصاص داده شده است. برای تقریب زدن جرم توزیع شده بین المان ها با جرم متمرکز در گره ها، تعداد کافی گره در مدل تعریف شده است.

از سیستم مختصات محلی، مانند شکل ۲ مورد استفاده قرار گرفته است.

برای آنالیز دینامیکی پل ها از المان های سه بعدی تیر-ستون برای اختصاص به المان های با سطح مقطع های مورد نظر برای مدل کردن عرشه و ستون ها و سر ستون ها استفاده شده است. برای آنکه بتوان ظرفیت و رفتار پل مورد نظر را به درستی به دست آورد، مقاومت مورد انتظار مصالح و روابط تنش و کرنش باید به طور دقیق برای مصالح مختلف استفاده شده در مدل سازی پل، محاسبه و استفاده شود. مهم ترین مصالح مورد استفاده با توجه به نوع پل، بتن و فولاد است که تعریف دقیق آنها برای مدل سازی اصولی و دقیق پل بسیار ضروری می باشد. مصالح را باید با توجه به مؤلفه های مختلف پل مانند عرشه، ستون ها، سرستون ها و کوله ها که در ساخت آنها این مصالح به کار رفته است، به صورت جداگانه با توجه به مقاومت و رفتار آنها در عضو مورد نظر بتن محصور شده و بتن محصور نشده ستون ها تعریف کرد.

برای تعریف بتن استفاده شده پل در مدل سازی، مطابق با آیین نامه (SDC 2006) (Caltrans, 2006))، از پارامترهای مربوط به بتن تهیه شده با سیمان پرتلند با وزن متوسط استفاده شده است. مقاومت کششی بتن محصور شده و محصور نشده در تعریف بتن استفاده شده در مدل سازی پل منظور گردید. برای محاسبه ظرفیت و شکل پذیری اعضای بتنی باید از یک مدل تنش-کرنش برای تعریف بتن محصور نشده و محصور شده در مدل پل استفاده شود. برای مدل سازی بتن، مدل رایج مورد استفاده مدل تنش و کرنش بتن محصور شده مندر (Mander, Priestley, Park, 1988) می باشد. مدل ارایه شده توسط مندر، اجازه بارگذاری تناوبی را می دهد و شامل اثرات نرخ کرنش نیز می باشد. در این مدل، اثرات انواع مختلف محصور شدگی با تعریف تنش جانبی مؤثر محصور شده که وابسته به نحوه آرماتورگذاری طولی و عرضی می باشد، در نظر گرفته شده است.

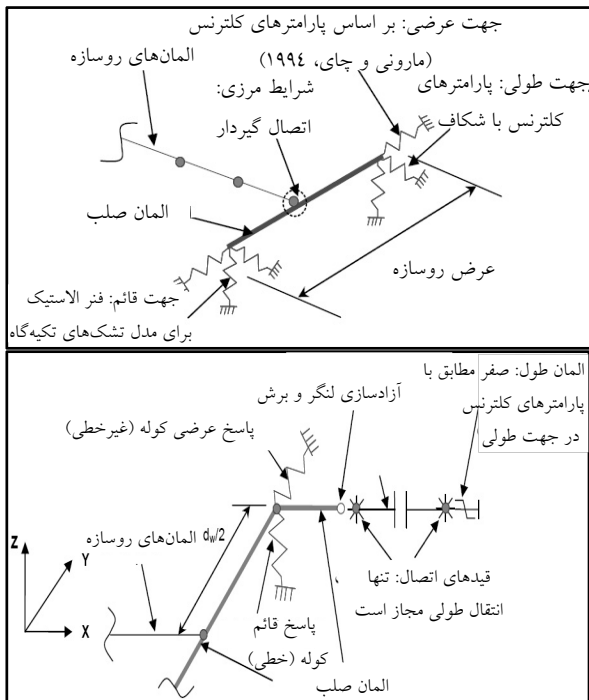


شکل ۱. نمای پلان پل بزرگراهی S10

غیر الاستیک و مستعد تشکیل مفصل پلاستیک در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن ستون‌ها از المان‌های غیر الاستیک "Nonlinear Beam Column" استفاده شده و این المان‌ها به کل طول ستون اختصاص داده شده‌اند.

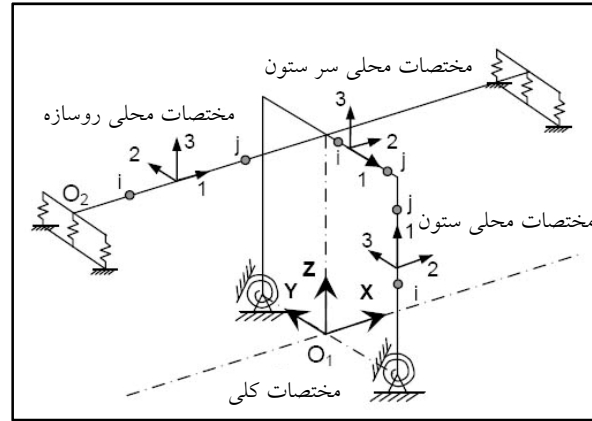
۲-۴- کوله‌های پل

با توجه به وجود روش‌های گوناگون در مدل کردن کوله‌ها، در این مطالعه، برای مدل کردن کوله‌های پل بزرگراهی S10 از روش پیشنهادی که حاصل کار (Aviram, Mackie and Stojadinovic, 2008a) می‌باشد، استفاده شده است. در این مدل از یک سری فنرهای غیرخطی برای مدل کردن رفتار کوله استفاده می‌شود. این نوع مدل به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مدل کوله ساده شده و مجموعه پاسخ طولی کوله (Aviram, Mackie and Stojadinovic, 2008b)

این مدل شامل یک المان صلب به طول dw (عرض روسازه) که به وسیله یک اتصال صلب به المان روسازه متصل است، می‌باشد. همچنین فنرهای غیرخطی که بیانگر رفتار غیرخطی در جهت‌های طولی، عرضی و قائم هستند، در دو انتهای این المان صلب قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، در جهت



شکل ۲. سیستم مختصات کلی و محلی (Aviram, Mackie and Stojadinovic, 2008a)

۲-۱- مدل کردن عرشه پل

نحوه مدل کردن عرشه پل، تأثیر بسزایی روی پاسخ و رفتار پل در آنالیز استاتیکی و دینامیکی دارد. در این پژوهش، با توجه به این‌که انتظار می‌رود رفتار عرشه وارد مرحله غیرخطی شود، عرشه پل به صورت غیرخطی مدل شده است. برای مدل‌سازی عرشه به صورت غیرخطی از المان‌های غیرخطی تیر-ستون مبتنی بر تغییر مکان و با پلاستیسیته توزیع شده، استفاده می‌گردد. در نرم‌افزار Opensees برای مدل کردن عرشه به صورت المان‌های غیرخطی از دستور "Element Disp Beam Column" استفاده می‌شود.

۲-۲- مدل کردن سرستون‌های پل

در برخی از پل‌هایی که پایه‌های آنها شامل چندین ستون است و سرستون وجود ندارد و یا داخل عرشه پنهان است، مانند پل بزرگراهی S10، ستون‌ها مستقیماً به عرشه متصل هستند. بهتر است در این گونه پل‌ها، سرستون‌ها را با استفاده از المان‌های صلب، مدل کرد.

۲-۳- پایه‌های بتنی

پایه‌های پل، مؤلفه‌های زیرسازه‌ای هستند که به عنوان تکیه‌گاه‌های میانی برای عرشه پل در جهت افقی و قائم عمل می‌کنند. برای مدل کردن ستون‌های پایه در نرم‌افزار Opensees از المان‌های سه بعدی غیر الاستیک تیر-ستون استفاده شده است. در این مطالعه برای مدل کردن ستون‌ها با المان‌های غیر الاستیک، کل طول ستون

سیستم‌های شالوده پل برای به‌دست آوردن دقیق ظرفیت شکل‌پذیری و پاسخ لرزه‌ای پل‌ها در نظر گرفته شوند. در بیشتر پل‌های بزرگراهی، مانند پل S10، از شالوده‌های عمیق با یک سیستم شمع استفاده می‌شود. برای مدل کردن پی‌های شمعی از یک سری فنرهای ساده غیرخطی که هم رفتار چرخشی و هم انتقالی را در نظر می‌گیرند، استفاده شده است. برای این کار سختی هر کدام از شمع‌ها به‌دست آمده و سپس این مقادیر برای در نظر گرفتن اثرات دسته شمع‌ها اصلاح شده است.

۳- انتخاب رکوردهای زلزله

نزدیکی ساختگاه به چشمه لرزه‌زا از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در میزان تخریب ناشی از زلزله‌ها می‌باشد. پدیده‌هایی مانند جهت‌داری زلزله از اثرات این نزدیکی می‌باشند. جهت‌داری ناشی از یک ضربه قابل ملاحظه می‌باشد که در ابتدای تاریخچه زمانی زلزله بروز می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که شهرهای بزرگ ایران مانند تهران، تبریز و بسیاری از مناطق مسکونی دیگر، نظیر شهرهای استان کرمان در کنار گسل‌های فعال ساخته شده‌اند و یا حتی گسترش این شهرها در طول سالیان متمادی باعث شده گسل‌ها از میان این شهرها بگذرند (زمردیان، ۱۳۸۹). با توجه به اهمیت بررسی زلزله‌های نزدیک گسل در شهر تهران، در این مطالعه برای ایجاد منحنی‌های شکنندگی از زمین لرزه‌های نزدیک گسل و دارای جهت‌داری پیش رونده، استفاده شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات زلزله‌های نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش رونده روی خرابی پل‌ها، منحنی‌های شکنندگی ناشی از زمین لرزه‌های دور از گسل و نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش رونده برای پل بزرگراهی S10 ایجاد و منحنی‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

تحقیقات در دهه‌های اخیر نشان داده است که زمین لرزه‌های ضربه‌گونه که از اثرات جهت‌داری است، منجر به آسیب‌های شدید سازه‌ای می‌شود (Rodriguez and Cofer, 2007). اگرچه جهت‌داری پیش رونده تهدید جدی برای سازه‌ها به شمار می‌رود، ولی این تهدید برای همه سازه‌ها یکسان نمی‌باشد. به عنوان مثال، منطبق شدن دوره سازه و دوره ضربه زمین لرزه، موجب آن می‌شود که سازه بیشتر تحت تأثیر زلزله قرار گیرد. دوره پالس زمین لرزه، دارای جهت‌داری پیش رونده متناسب با زلزله است و

طولی یک مجموعه سیستم تعریف شده است. این مجموعه شامل یک المان صلب با آزاد بودن (صفر بودن) برش و لنگر در یک انتها، یک المان گپ و المان طول صفر می‌باشد. به المان طول صفر مصالح الاستیک - کاملاً پلاستیک اختصاص داده می‌شود. این مصالح با تعریف سختی کوله (Kabut) و مقاومت نهایی (Pbw) که با استفاده از آیین‌نامه Caltrans به‌دست می‌آیند، ایجاد می‌شود. در نرم‌افزار Opensees با استفاده از دستور " Uniaxial Material Elastic PP" این مصالح تعریف می‌شود.

پاسخ طولی این نوع مدل کوله تنها شکاف و پاسخ خاکریز در جایی که فشارهای مقاوم توسط دیوار جلوی تیر واقع در کوله ایجاد می‌شود، را در نظر می‌گیرد. در مدل کردن کوله‌ها عرض شکاف برابر با ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در این مدل از مقاومت برشی تکیه‌گاه‌ها صرف‌نظر شده است. برای مدل کردن پاسخ خاکریز و دیوارجلوی تیر در جهت طولی در نرم‌افزار Opensees از مصالح "ElasticPPGap" استفاده شده است. در جهت عرضی، در هر یک از دو انتهای المان صلب یک المان طول صفر در نظر گرفته شده است. به المان طول صفر مصالح الاستیک - کاملاً پلاستیک که بیانگر رفتار خاکریز، دیوار جناحی و پاسخ سیستم شمع‌های شالوده کوله می‌باشد، اختصاص داده می‌شود. سختی کوله (Kabut) و مقاومت دیوار جلوی تیر (Pbw) که برای جهت طولی به‌دست آمدند، با استفاده از فاکتورهایی مطابق با تأثیر دیوار (CL) برابر با ۲/۳ و ضریب مشارکت (CW) برابر با ۴/۳ اصلاح می‌شوند (Maroney & Chay, 1994). برای مدل کردن پاسخ خاکریز و دیوار جناحی در جهت عرضی در نرم‌افزار Opensees از مصالح "Steel01" استفاده شده است. در جهت قائم، در هر یک از دو انتهای المان صلب یک فنر الاستیک با سختی‌های مطابق با سختی تشک‌های تکیه‌گاه (KV)، در نظر می‌گیریم. در این مدل توزیع تشک‌های تکیه‌گاهی و سختی قائم خاکریز در نظر گرفته نمی‌شود و در واقع شرایط خاک صلب فرض می‌گردد.

۲-۵- اندرکنش خاک و سازه

اندرکنش دینامیکی بین خاک و شمع‌های موجود در شالوده پل‌ها در پاسخ لرزه‌ای پل‌ها، تأثیر زیادی دارد. شرایط مرزی باید به‌درستی به‌وسیله مدل‌های ساده و واقع‌گرایانه از کوله‌ها و

برای مقایسه اثرات زلزله‌های نزدیک گسل و دور از گسل روی رفتار پل‌ها، پل بزرگراهی S10 تحت آنالیز تاریخیچه زمانی غیر خطی با ۴۰ رکورد نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده و ۴۰ رکورد دور از گسل قرار گرفته است. برای آنالیزهای تاریخیچه زمانی از رکوردهای زمین لرزش‌های زلزله‌های ذکر شده در جدول ۲ استفاده شده است.

۴- آنالیز شکنندگی پل‌ها

با توجه به اینکه سیستم‌های بزرگراهی برای مردمی که در شهرها زندگی می‌کنند، بسیار حیاتی به‌شمار می‌آیند، باید آسیب‌پذیری پل‌ها و سیستم‌های بزرگراهی را در مناطق مستعد زلزله ارزیابی کرد. معمولاً آسیب‌پذیری پل‌های بزرگراهی به‌صورت منحنی‌های شکنندگی بیان می‌شوند. منحنی شکنندگی احتمال فراگذشت حالت این منحنی‌ها یک دید منطقی احتمالاتی از آسیب را فراهم می‌کنند.

قسمت مهم این آسیب، تابع شکنندگی نامیده می‌شود. این تابع آسیب یک ابزار احتمالاتی است که برای محاسبه آسیب محتمل وارده به سازه، ناشی از فعالیت‌های لرزه‌ای به‌کار برده می‌شود.

از آنجا که داده‌های آسیب لرزه‌ای در ایران و به‌خصوص تهران، بسیار کم هستند، روش تحلیلی تنها روش عملی برای تولید منحنی‌های شکنندگی سازه‌ها در این منطقه می‌باشد. در این مطالعه، روشی تحلیلی برای تولید منحنی‌های شکنندگی پل‌های بزرگراهی ارائه شده است.

در این روش، با استفاده از مدل سه بعدی المان محدود سازه و همچنین تحلیل‌های پوش‌آور و دینامیکی غیرخطی منحنی‌های شکنندگی تولید می‌شوند.

جدول ۱. حدود پایین دست پارامترهای زمین لرزه

| پارامتر زمین لرزه | حد پایین |
|-------------------|--|
| PGA | 0/2g |
| CAV | 0/30 g.sec |
| PGV | 20 cm/sec |
| I_A | 0/4 m/sec |
| I | $30 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-0.75}$ |
| a_{rms} | $0/5 \text{ m/sec}^2$ |

با افزایش بزرگای دوره، پالس نیز بزرگ‌تر می‌شود. در نتیجه، آسیب‌های ناشی از زلزله‌های با بزرگای کوچک‌تر در سازه‌های با دوره کوچک‌تر، بیشتر است تا آسیب‌های ناشی از زلزله‌های با بزرگای بیشتر. علت این امر، آن است که دوره پالس زمین لرزش‌های نزدیک گسل در زلزله‌های با بزرگای کوچک‌تر به دوره اصلی سازه نزدیک‌تر است. با توجه به پایین بودن پریود پل‌ها، خرابی در آنها ناشی از این چنین زمین لرزه‌هایی بسیار محتمل است. برای آنالیز دامنه زمانی سازه‌های غیر خطی، نیازمند استفاده از تاریخیچه زمانی شتاب زلزله می‌باشیم.

در این مطالعه، برای انتخاب زمین لرزش‌ها، ابتدا بر اساس فرایند ارایه شده توسط (Maniatakis, Taflampas and Spyarakos, 2008)، تعداد ۶۰ زمین لرزش نزدیک گسل گردآوری شده است.

سپس از میان آنها، طبق فرایند و داده‌های اولیه زمین لرزه‌های ارایه شده توسط (Bray and Rodriguez, 2004) تعداد ۴۰ عدد زمین لرزش دارای جهت‌داری پیش‌رونده، برای آنالیز تاریخیچه زمانی انتخاب شده است. همچنین برای آنالیز تاریخیچه زمانی ناشی از زلزله‌های دور از گسل، تعداد ۴۰ شتاب نگاشت دور از گسل ($R > 20 \text{ km}$) زلزله‌های انتخاب شده برای آنالیز تاریخیچه زمانی زلزله‌های نزدیک گسل، به‌کار برده شده است.

برای انتخاب زمین لرزه‌های نزدیک گسل از رکوردهای زلزله با فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از رومرکز زلزله استفاده شده است. همچنین، علاوه بر پارامتر فاصله از پارامترهای ماکزیمم شتاب افقی زمین (PGA)، سرعت مطلق تجمعی (CAV)، ماکزیمم سرعت افقی زمین (PGV)، شدت آریاس (I_A)، ریشه دوم میانگین مربعات شتاب (a_{rms}) و پارامتر پتانسیل آسیب (I)، ارایه شده توسط (Fajfar, Vidic and Fischinger, 1990) استفاده شده است. این پارامتر طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$I = PGV \cdot t_D^{0.25} \quad (1)$$

در این رابطه مدت زمان لرزش شدید زمین طبق تعریف (Trifunak & Brady, 1975) می‌باشد. جدول ۱ نشان‌دهنده حدود پایین دست، برای پارامترهای ذکر شده در بالا می‌باشند تا رکوردهایی که نزدیک گسل در نظر گرفته می‌شوند، مشخص گردند.

جدول ۲. زلزله‌های استفاده شده در آنالیزهای تاریخچه زمانی

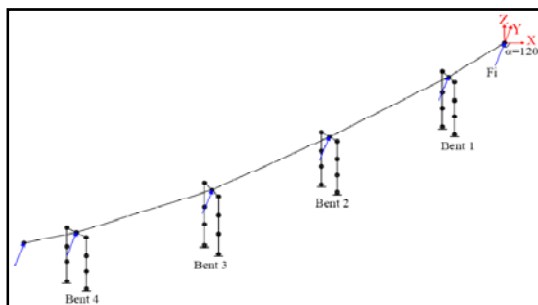
| نام زلزله | تاریخ رویداد | بزرگا (M _w) | مکانیزم گسل |
|--------------------|--------------|-------------------------|-------------|
| Parkfield | 6/27/66 | 6.1 | امتداد لغز |
| San Fernando | 2/9/71 | 6.6 | معکوس |
| Imperial Valley | 10/15/79 | 6.5 | امتداد لغز |
| MorganHill | 4/24/84 | 6.2 | امتداد لغز |
| Superstition hills | 11/24/87 | 6.6 | امتداد لغز |
| Loma Prieta | 10/17/89 | 7 | مورب لغز |
| Turkey-Erzincan | 3/13/92 | 6.7 | امتداد لغز |
| Landers | 6/28/92 | 7.3 | امتداد لغز |
| Northridge | 1/17/94 | 6.7 | معکوس |
| Kobe | 1/17/95 | 6.9 | امتداد لغز |
| Turkey-Kocaeli | 8/17/99 | 7.3 | امتداد لغز |
| Turkey-Duzce | 11/12/99 | 7.2 | امتداد لغز |
| Chi-chi | 9/21/99 | 7.6 | معکوس |
| Bam | 12/26/03 | 6.6 | امتداد لغز |
| ParkField | 9/28/04 | 6.0 | امتداد لغز |

سازه وارد می‌شوند. در واقع آنالیز پوش آور در ادامه آنالیز استاتیکی ثقی که بارهای مرده پل به‌طور کامل وارد می‌شود، صورت می‌گیرد.

در این مطالعه، الگوی بار جانبی برای آنالیز پوش آور، طبق رابطه (۲) بر اساس نسبت جرم مؤثر اختصاص یافته به هر گره به جرم کل پل تعریف شده است.

$$F_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (2)$$

در این رابطه m_i ، جرم مؤثر اختصاص یافته به هر گره و F_i بار جانبی وارده به هر گره از روسازه می‌باشد. یکی از اهداف این مطالعه، با توجه به کجی در کوله‌ها و قوس افقی پل، ارزیابی اثرات جهت زمین لرزش بر رفتار پل‌ها و در نهایت منحنی‌های شکنندگی است، در نتیجه مقاومت پل مورد نظر در جهات مختلف بررسی شده است. بنابراین، آنالیز پوش آور برای پل بزرگراهی مورد بررسی در این مطالعه، در جهات مختلف صورت گرفته است. آنالیز پوش آور با زاویه‌ای برابر با α ، نسبت به محور کلی X پل، صورت می‌گیرد. به این معنا که بار جانبی در هر کدام از آنالیزهای پوش آور نسبت به محور X ، زاویه α می‌سازد. زاویه α برای هر آنالیز پوش آور به مقدار ۲۰ درجه، از زاویه صفر درجه نسبت به محور X شروع شده و تا زاویه ۱۶۰ درجه افزایش یافته است. در شکل ۴ الگوی بار جانبی در پل بزرگراهی S10 با $\alpha = 120^\circ$ نشان داده شده است.



شکل ۴. الگوی بار جانبی در مدل پل بزرگراهی S10 ($\alpha = 120^\circ$)

پس از انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی، منحنی پوش آور مانند شکل ۵ به‌دست می‌آید. از منحنی‌های پوش آور که بر اساس برش پایه در برابر جابه‌جایی هر کدام از پایه‌ها می‌باشند، در دو جهت طولی (X) و عرضی (Y)، جابه‌جایی جاری شدن ($y\delta$)، جابه‌جایی نهایی ($u\delta$) و نیروی تسلیم (F_y)، برای هر کدام از پایه‌های پل محاسبه شده است. در این مطالعه، جابه‌جایی نهایی بر اساس ترک خوردن بتن محصور شده، به‌دست آمده است. این نقطه بر

۴-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی

آنالیز استاتیکی غیرخطی، وسیله‌ای بسیار قدرتمند برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای غیر الاستیک سازه‌ها می‌باشد. تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش آور) فرایندی است که در آن سازه تحت یک بار جانبی افزایشی مشخص قرار می‌گیرد تا اینکه به یک جابه‌جایی هدف برسد. در این جابه‌جایی هدف، پاسخ‌های لرزه‌ای سازه پل به بار وارده محاسبه می‌گردد. با افزایش بار جانبی، اتصالات ضعیف و مدهای شکست سازه پل به‌دست می‌آید. هدف از تحلیل پوش آور، ارزیابی مقاومت کلی پل با استفاده از محاسبه برش پایه، جابه‌جایی جاری شدن، نهایی و همچنین ظرفیت شکل‌پذیری سازه پل می‌باشد. آنالیز پوش آور می‌تواند حالت‌های حدی متوالی، شکل‌گیری مفصل‌های پلاستیک و توزیع مجدد نیروها در سازه را با افزایش تدریجی بار جانبی و یا جابه‌جایی ارزیابی کند (Aviram, Mackie and Stojadinovic, 2008a). بارهای جانبی وارد بر پل در آنالیز پوش آور از مرحله آخر آنالیز ثقی به

۱۰۰ درصد به ۴۰ درصد، برای آنالیزهای تاریخیچه زمانی منجر به نتایج محافظه‌کارانه‌ای نمی‌شود. در این شرایط، بهتر است سازه تحت اثر جفت شتاب‌نگاشت‌های عمود بر هم در جهات مختلف قرار گیرد (Maleki and Bisadi, 2006). پل‌های قرار گرفته در مناطق لرزه‌خیز باید بتوانند نیروهای لرزه‌ای وارده از هر جهت را تحمل کنند. با توجه به تحقیقات، هیچکدام از قانون‌های ترکیب، نمی‌توانند نمایانگر ماکزیمم پاسخ پل‌های کج و قوسی باشند. پیشنهاد شده است که زاویه بحرانی اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها از طریق سعی و خطا و با اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌های افقی در جهت‌های مختلف عمود بر هم به دست آید.

در این مطالعه، برای ارزیابی جهت اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها بر روی پاسخ لرزه‌ای پل‌ها و در نتیجه، منحنی‌های شکنندگی، هر کدام از جفت شتاب‌نگاشت‌ها با زاویه‌های مختلفی از صفر درجه تا ۱۶۰ درجه، با نرخ افزایشی ۲۰ درجه نسبت به محور اصلی X به پل‌های بزرگراهی مورد بررسی اعمال شده است و منحنی‌های شکنندگی ناشی از اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها در هر کدام از این زوایا ایجاد شده است.

۴-۳- منحنی‌های شکنندگی

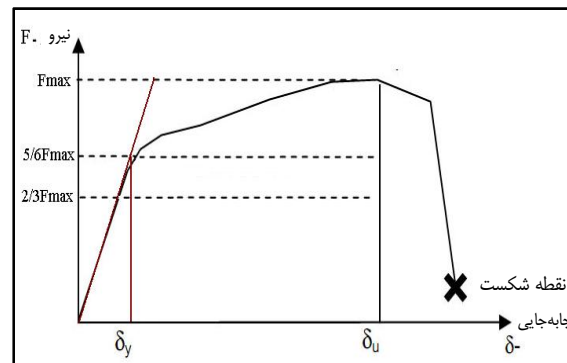
در صورتی که بتوان رابطه‌ای بین یک زلزله و آسیب متناظر به پل را محاسبه کرد، درجه آسیب را می‌توان با استفاده از یک مدل احتمالاتی تخمین زد (Shinozuka et al., 2000). در این مطالعه، برای پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای پل‌های مورد بررسی از شاخص زمین لرزش ماکزیمم شتاب زمین (PGA) استفاده شده است. مرسوم است که برای تولید منحنی‌های شکنندگی تحلیلی پل‌ها از یک مؤلفه اصلی برای بیان شکنندگی و آسیب‌پذیری پل استفاده شود. این مؤلفه اصلی برای بیان شکنندگی پل، پایه‌های پل می‌باشند. محققان زیادی مانند (Hwang et al., 2000)؛ (Karim and Yamazaki, 2001)؛ (Mackie and Stojadinovic, 2001) و (Nateghi and Shahsavar, 2004) پایه‌های پل را به عنوان پارامتر اصلی برای ارزیابی آسیب‌پذیری پل‌ها استفاده کردند. با توجه به این‌که مقاومت و پایداری یک پل ارتباط زیادی به مقاومت پایه‌های آن دارد و همچنین آسیب به پایه‌های یک پل، می‌تواند سلامت و قابلیت بهره‌برداری از پل را به خطر اندازد، در نظر گرفتن پایه‌های پل‌ها به عنوان پارامتر اصلی در ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها امری منطقی می‌باشد.

منحنی‌های شکنندگی در جایی می‌باشد که دارای ماکزیمم برش پایه می‌باشد و از آن به بعد با ترک خوردن بتن محصور شده منحنی شروع به تنزل می‌کند.

۴-۲- تحلیل دینامیکی غیرخطی

تحلیل دینامیکی غیر خطی یا همان آنالیز تاریخیچه زمانی غیر خطی، کاهش مقاومت و غیرخطی‌های المان‌های مختلف پل و همچنین شدت زمین لرزش را در نظر می‌گیرد. برای به دست آوردن داده‌های آسیب کافی به خصوص در سطوح آسیب شدید، شتاب ۰/۱ g تا ۱ g مقیاس شده‌اند و در حدود ۸۰۰ رکورد تاریخیچه زمانی ایجاد شده است.

در این مطالعه، تحلیل دینامیکی غیر خطی با استفاده از روند انتگرال‌گیری نیومارک، ارایه شده در نرم‌افزار Opensees و با گزینه کنترل انرژی افزایشی وابسته سیستم و با دقت ۸۱-e انجام گرفته است. جذب انرژی در المان‌های سازه‌ای پل، توسط میرایی تشعشعی ناشی از میرایی ویسکوز ریلی (کلاف و پنزین، ۱۹۹۳) انجام می‌گیرد. مقدار ۵ درصد میرایی ویسکوز برای دو مد ارتعاشی اول پل فرض شده است.



شکل ۵. پارامترهای مورد نیاز از منحنی پوش‌آور

در سازه‌های سه بعدی پیچیده، مانند پل‌های قوسی، به دلیل این‌که جهتی که زلزله موجب ایجاد ماکزیمم تنش در یک عضو خاص و یا نقطه خاص می‌شود، مشخص نیست، باید آنالیز تاریخیچه زمانی با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های اعمال شده در جهات مختلف صورت گیرد (Aviram, Mackie, and Stojadinovic, 2008a). ترکیبات رایج برای در نظرگیری اثرات زلزله در دو جهت عمود بر هم، مانند قانون‌های ۱۰۰ درصد به ۳۰ درصد و

۵- آنالیز آسیب پذیری پل ها

برای تعریف و طبقه بندی آسیب زلزله به سازه پل، نیاز به تفهیم حالات خسارت لرزه ای است تا از روی آن اقدام به تعیین میزان خسارت ناشی از زلزله و نیز ماتریس های شکنندگی شود. در این مطالعه، برای ارزیابی آسیب پذیری پایه های پل های مورد بررسی تحت اثر رویدادهای لرزه ای از شاخص آسیب (Park and Ang, 1985) استفاده شده است.

این محققان، آسیب سازه ای اعضای بتنی را بر اساس ترکیب خطی ماکزیمم تغییر شکل و انرژی هیسترتیک جذب شده، تعریف کرده اند. این تابع خسارت مبتنی بر انرژی هیسترتیک در رابطه (۳) آورده شده است.

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta_0 \cdot E_H}{\delta_u \cdot F_y} \quad (3)$$

در این رابطه DI شاخص آسیب، δ_m تغییر مکان حداکثر ناشی از تحلیل تاریخچه زمانی، δ_u تغییر مکان نهایی حد گسیختگی حاصل از تحلیل پوش آور، E_H انرژی هیسترتیک جذب شده در المان ها (پایه های پل ها)، F_y مقاومت حد تسلیم المان مورد مطالعه حاصل از تحلیل پوش آور و β_0 ضریب بارگذاری سیکلی می باشد که برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. وقتی که شاخص های آسیب ناشی از هر سطح جنبش زمین به دست آمد، این شاخص با استفاده از روش ارزیابی شده توسط (Ghobarah, Aly and EI-Attar, 1997) به حالت های حدی که بیانگر سطح آسیب هستند، تبدیل شده است. حالات آسیب لرزه ای و سطوح عملکردی متناظر آنها در جدول ۳ تعریف شده اند.

جدول ۳. طبقه بندی حالات آسیب لرزه ای و سطوح عملکردی متناظر

(Ghobarah et al., 1997)

| توصیف | درجه آسیب | شاخص آسیب (DI) |
|------------|-----------|-----------------------|
| عدم آسیب | N | $0/00 < DI \leq 0/14$ |
| آسیب کم | S | $0/14 < DI \leq 0/40$ |
| آسیب متوسط | M | $0/40 < DI \leq 0/60$ |
| آسیب سنگین | E | $0/60 < DI \leq 1/00$ |
| آسیب کامل | C | $1/00 \leq DI$ |

۵-۱- ایجاد ماتریس شکنندگی

اگر ظرفیت سازه ای و تقاضای لرزه ای دو متغیری باشند که از توزیع طبیعی لگاریتمی تبعیت کنند، پیرو قضیه حد وسط می توان نشان داد که کارایی مرکب حاصل شده، به طور طبیعی لگاریتمی توزیع شده است (ناطقی و شهسوار، ۱۳۸۵). بنابراین، توزیع احتمالی توسط تابع چگالی احتمال تجمعی طبیعی لگاریتمی بیان می شود. برای هر سطح آسیب یک سری داده از PGA و DI داریم. با استفاده از این داده ها منحنی های شکنندگی برای پایه های پل های بزرگراهی مورد مطالعه با فرض یک توزیع لوگ نرمال به دست آمده اند. احتمال رخ دادن آسیبی برابر و یا بیشتر از سطح R، طبق رابطه (۴) به دست می آید.

$$P_R = \Phi \left(\frac{1n(PGA) - \lambda}{\lambda} \right) \quad (4)$$

در این رابطه Φ ، توزیع نرمال استاندارد، λ میانگین و λ انحراف معیار توزیع می باشد. روش استخراج دو پارامتر توزیع نرمال، توزیع پارامترها روی کاغذ احتمال لوگ نرمال و استخراج میانگین و انحراف معیار از روی خط انطباق است (Karim and Yamazaki, 1998).

برای ایجاد ماتریس های شکنندگی مرتبط با حالات خسارت لرزه ای، گردآوری و جمع بندی روی نتایج تحلیل خسارت با استفاده از تهیه یک بسته نرم افزاری در Matlab انجام شده است (زمردیان، ۱۳۸۹). ابتدا تعداد وقوع هر حالت خسارت در سطوح مختلف شتاب حداکثر زمین (PGA) شمرده شده است. سپس برای تعیین میانگین و انحراف معیار پارامتر شکنندگی پل های مورد بررسی، تعداد وقوع حالات خسارت وابسته به تابع خسارت Park and Ang روی کاغذ احتمال لوگ نرمال ترسیم شده است. سپس طی تحلیل رگرسیونی غیرخطی بین داده ها، معادلات حاکم استخراج و میانگین و انحراف معیار داده ها استخراج شده است. در نهایت منحنی های شکنندگی با استفاده از رابطه (۴) ایجاد شده اند.

۶- نتایج و تحلیل آنها

منحنی های پوش آور برای پایه های مختلف پل بزرگراهی S10، با توجه به اعمال بار جانبی در جهات مختلف ($0 < \alpha < 160$) به دست آمده است. به عنوان نمونه، در شکل ۶ منحنی های پوش آور پایه شماره ۱ پل بزرگراهی S10، تحت بارگذاری جانبی با زاویه $\alpha = 40$ درجه، نسبت به محور Y نشان داده شده است.

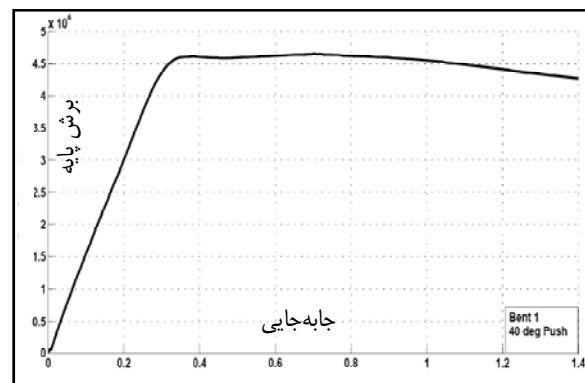
تحلیل دینامیکی ($u\delta$) و ماکزیمم انرژی جذب شده توسط پایه‌ها (EH) به دست آمده‌اند.

برای ارزیابی تأثیر جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها بر پاسخ پل مورد نظر، تاریخچه زمانی تغییر مکان پایه شماره ۲ پل بزرگراهی S10 در جهت X و $\alpha=60^\circ$ و $\alpha=20^\circ$ ناشی از شتاب‌نگاشت ایستگاه "CoyoteLakeDam" مربوط به زلزله MorganHill و با مقیاس g/0.6 در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین برای نشان دادن تأثیرات جهت اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها بر انرژی هیسترتیک جذب شده توسط پایه‌ها، در شکل ۹ تاریخچه زمانی انرژی هیسترتیک جذب شده در پایه شماره ۲، ناشی از رکورد یاد شده در جهت X و $\alpha=60^\circ$ و $\alpha=20^\circ$ نشان داده شده است. برای مقایسه اثرات زلزله‌های دور از گسل و نزدیک گسل دارای جهت داری بر پل‌های بزرگراهی، در شکل ۱۰ منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی و در شکل ۱۱ منحنی نیرو-تغییر مکان پایه شماره ۳ در جهت Y، $\alpha=120^\circ$ و با مقیاس g/0.7، تحت اثر تاریخچه زمانی دور از گسل "NST" مربوط به زلزله Chi-Chi و تحت اثر تاریخچه زمانی نزدیک گسل "TCU068" مربوط به زلزله Chi-Chi مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها، تأثیر زیادی بر پاسخ پل‌ها می‌گذارد. به عنوان مثال، تاریخچه زمانی جابه‌جایی پایه شماره ۳ پل یاد شده تحت شتاب‌نگاشت با زاویه $\alpha=60^\circ$ در بازه زمانی ۵ تا ۱۰ ثانیه تقریباً دو برابر پاسخ تحت اثر شتاب‌نگاشت با زاویه $\alpha=20^\circ$ می‌باشد. تأثیر جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها بر پاسخ پل بزرگراهی S10 با مقایسه حداکثر انرژی هیسترتیک جذب شده توسط پایه‌ها بیشتر قابل مشاهده است. حداکثر انرژی هیسترتیک جذب شده توسط پایه‌ها، بسیار به جهت اعمال شتاب‌نگاشت حساس می‌باشد. به عنوان مثال، حداکثر انرژی هیسترتیک جذب شده توسط پایه شماره ۴ تحت شتاب‌نگاشت با زاویه $\alpha=0^\circ$ تقریباً ۲/۵ برابر حداکثر انرژی هیسترتیک جذب، ناشی از اعمال شتاب‌نگاشت با زاویه $\alpha=140^\circ$ می‌باشد.

یکی از اهداف این مطالعه، بررسی اثرات زلزله‌های دور از گسل و نزدیک گسل، دارای جهت‌داری پیش‌رونده روی پاسخ پل‌های بزرگراهی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود،

ظرفیت‌های مقاومتی پل، ناشی از اعمال بار جانبی در جهات مختلف به دست آمده است. مشاهده شد که برای اعمال بار جانبی در آنالیز پوش‌آور در محاسبه پارامترهای مقاومتی مانند جابه‌جایی جاری شدن و جابه‌جایی نهایی و همچنین نیروی تسلیم پایه‌های مختلف پل مؤثر است. در شکل ۷ منحنی‌های پوش‌آور پایه شماره ۲ پل بزرگراهی S10 در جهت Y، با اعمال بار جانبی در جهات مختلف نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی پوش‌آور پایه شماره ۱ پل بزرگراهی S10 در جهت $\alpha=40^\circ$ Y

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، جهت اعمال بار تأثیر زیادی بر محاسبه پارامترهای مقاومتی پل به خصوص نیروی تسلیم دارد. به عنوان مثال، جابه‌جایی نهایی پایه شماره ۳ در جهت X، ناشی از پوش‌آور با زاویه $\alpha=160^\circ$ برابر با ۰/۸۸ متر می‌باشد، در صورتی که این مقدار برای پوش‌آور با زاویه $\alpha=120^\circ$ برابر با ۰/۷۲ متر می‌باشد، که اختلافی ۲۳ درصدی را نشان می‌دهد. همچنین نیروی تسلیم در پایه شماره ۴، در جهت X ناشی از پوش‌آور با زاویه $\alpha=0^\circ$ برابر با ۴۳۷۳۲۵۰ نیوتن می‌باشد که این مقدار برای پوش‌آور با زاویه $\alpha=120^\circ$ درجه برابر با ۴۷۶۷۲۹۷ نیوتن می‌باشد، که اختلافی ۱۰ درصدی را نشان می‌دهد.

آنالیز تاریخچه زمانی پل بزرگراهی S10، با استفاده از ۴۰ عدد زوج شتاب‌نگاشت دور از گسل و ۴۰ عدد زوج شتاب‌نگاشت نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده، صورت گرفته است و زوج شتاب‌نگاشت‌ها در جهات مختلف به پل اعمال شده‌اند. با استفاده از آنالیز تاریخچه زمانی پارامترهای مورد نیاز برای تولید منحنی‌های شکنندگی، که عبارتند از ماکزیمم جابه‌جایی ناشی از

منحنی‌های شکنندگی ناشی از جهت اعمال شتاب‌نگاست ملموس‌تر است. به عنوان مثال، در سطح آسیب کم، تفاوت در منحنی‌های شکنندگی در سطوح زمین لرزش بین $g2/0$ تا $g4/0$ بیشتر می‌باشد. در سطوح آسیب کامل، مشاهده شد که در سطوح زمین لرزش بالا، مانند $g0/1$ تفاوت در منحنی‌های شکنندگی ناشی از جهت مختلف اعمال شتاب‌نگاشت در برخی زاویه‌ها (α) تا $2/5$ برابر می‌باشد.

برای ارزیابی دقیق اثر زلزله‌های دور از گسل و نزدیک گسل دارای جهت داری پیش رونده بر روی منحنی‌های شکنندگی، این منحنی‌ها تحت جهت یکسان اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌های در یک شکل ترسیم شده‌اند و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به عنوان مثال، منحنی شکنندگی پایه شماره ۴، ناشی از رکورد‌های دور از گسل و نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش رونده با $\alpha=20^\circ$ در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

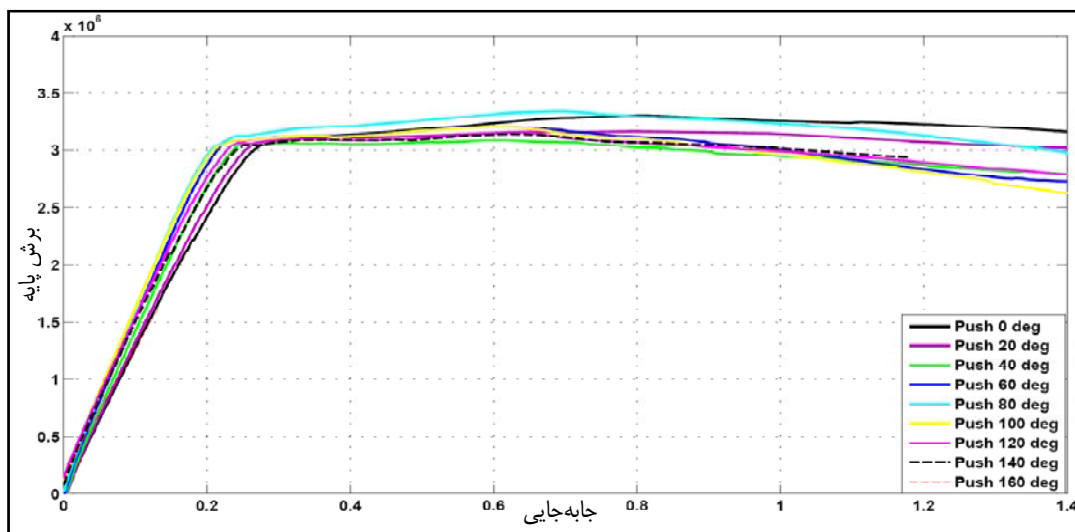
همان‌طور که مشاهده می‌شود، احتمال فراگذشت از یک سطح آسیب مشخص ناشی از زلزله‌های نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده بیشتر از زلزله‌های دور از گسل می‌باشد. با افزایش سطح آسیب و همچنین سطح جنبش زمین، تفاوت آسیب محتمل وارد به پل ناشی از زمین لرزه‌های دور و نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده، بیشتر شده است. بررسی منحنی‌های شکنندگی پایه‌های مختلف پل در جهات مختلف نیز منجر به همین نتیجه‌گیری شده است.

جابه‌جایی و برش پایه حاصل شده از رکورد نزدیک گسل، در مقایسه با رکورد دور از گسل دارای حداکثر شتاب زمین یکسان، بسیار بیشتر است. همچنین، اثر پالس گونه زلزله‌های نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده، در تاریخچه زمانی جابه‌جایی پایه شماره ۳ قابل مشاهده است.

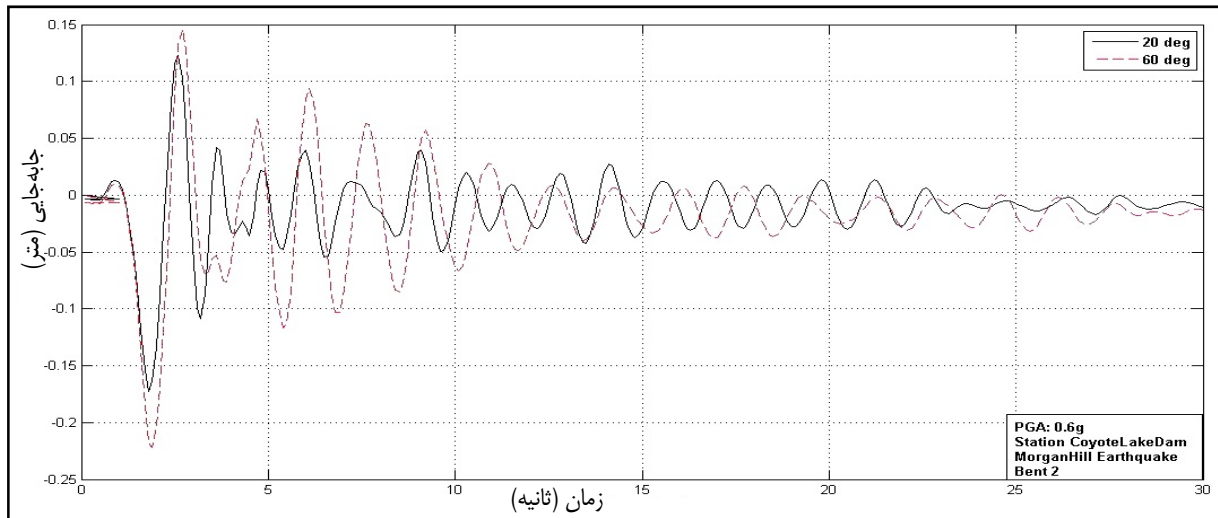
با استفاده از نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی پل یاد شده، منحنی‌های شکنندگی تولید شده‌اند. تعداد وقوع هر حالت خسارت در سطوح مختلف شتاب حداکثر زمین شمرده شده است و سپس برای تعیین میانگین و انحراف معیار پارامتر شکنندگی پل، تعداد وقوع حالات خسارت وابسته به تابع خسارت روی کاغذ احتمال لوگ نرمال ترسیم شده‌اند (شکل ۱۲). سپس طی تحلیل رگرسیونی غیرخطی بین داده‌ها، معادلات حاکم استخراج و میانگین و انحراف معیار داده‌ها استخراج شده است.

در ادامه، منحنی‌های شکنندگی پل بزرگراهی S10 با استفاده از نتایج حاصل و به کمک معادله (۴) ایجاد شده است.

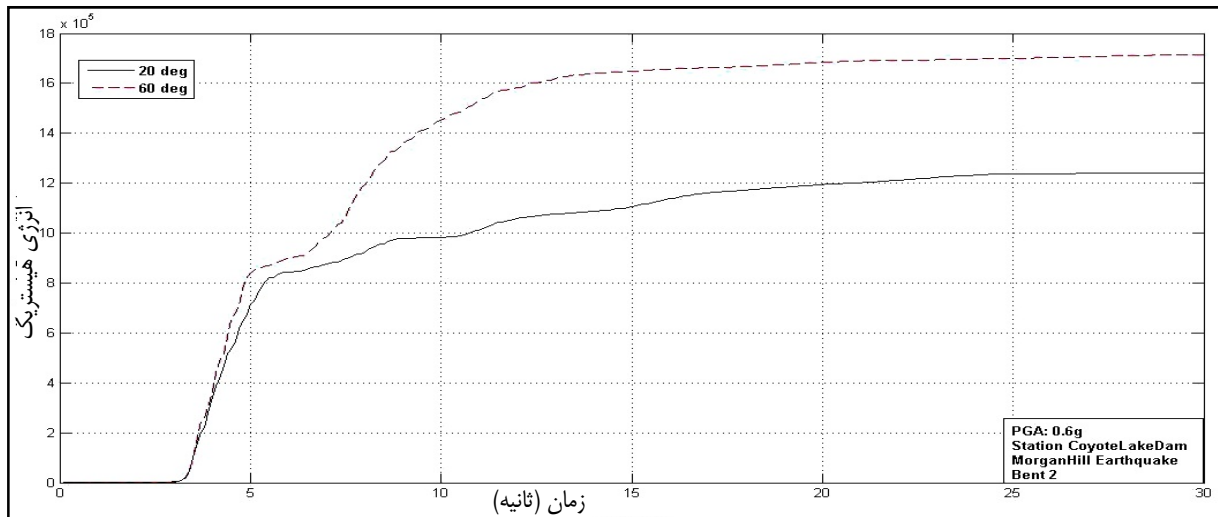
برای ارزیابی تأثیر جهت اعمال شتاب‌نگاشت‌ها بر منحنی‌های شکنندگی پل بزرگراهی S10، منحنی‌های شکنندگی سطوح آسیب مختلف، پایه‌های مختلف ناشی از اعمال شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده در جهات مختلف مدل نام برده بررسی شده است. مشاهده شد، جهت اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها تأثیر بسیاری بر منحنی‌های شکنندگی به‌دست آمده دارد. با افزایش سطح آسیب، در سطوح زمین لرزش‌های بالا این تفاوت در



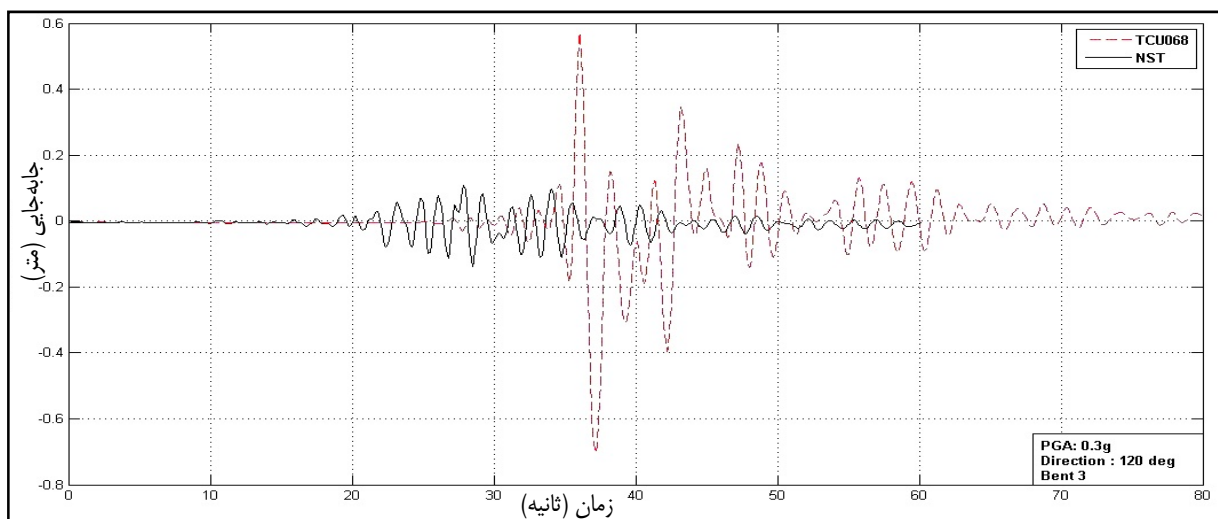
شکل ۷. منحنی‌های پوش‌آور پایه شماره ۲ مدل پیچیده پل بزرگراهی S10 در جهت $Y (0 < \alpha < 160)$



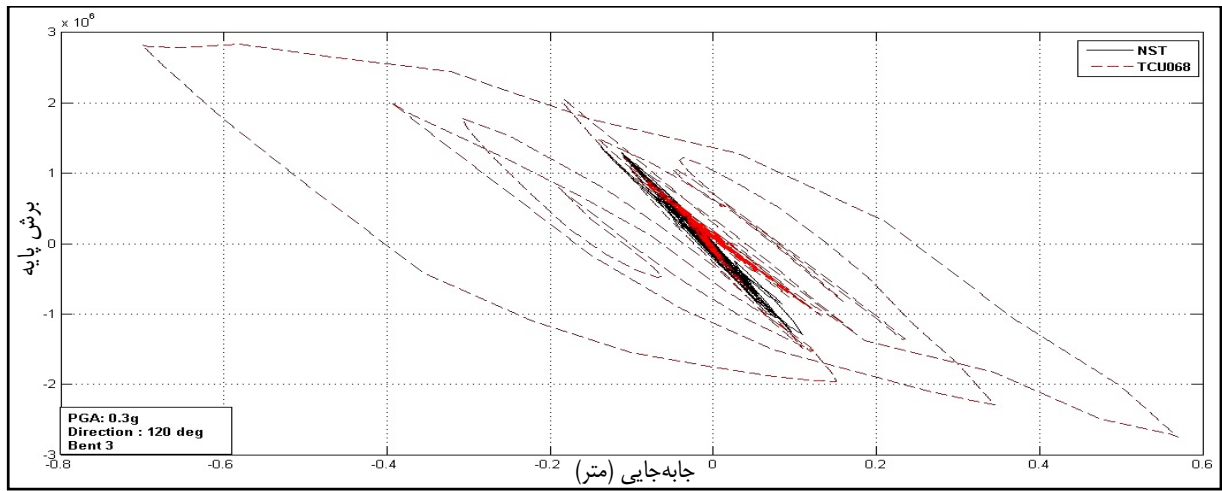
شکل ۸. تاریخچه زمانی تغییر پایه شماره ۲ در جهت X ($\alpha=20^\circ$ و $\alpha=60^\circ$)



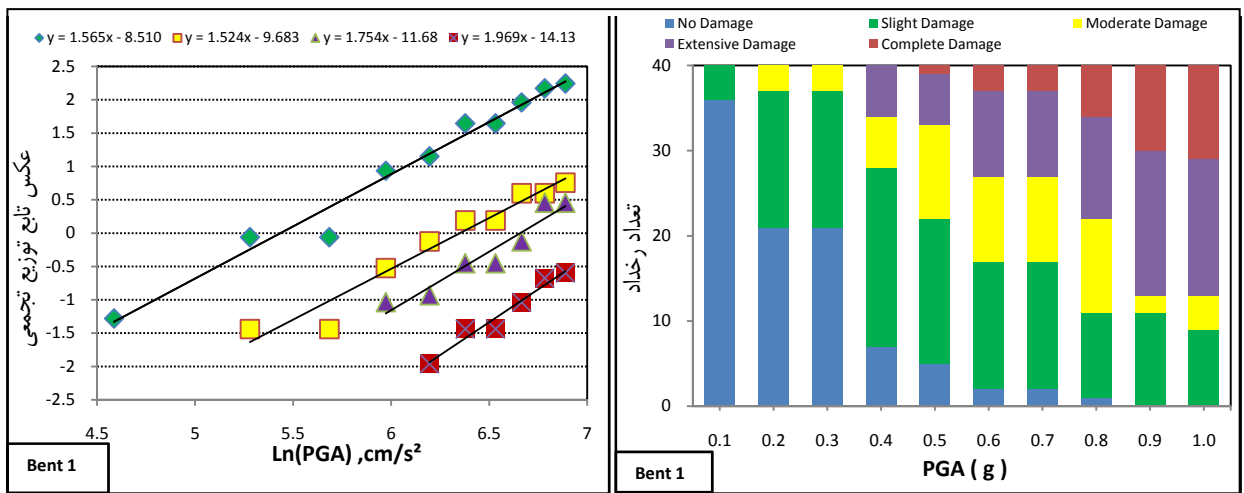
شکل ۹. تاریخچه انرژی هیسترتیک جذب شده پایه شماره ۲ در جهت X ($\alpha=20^\circ$ و $\alpha=60^\circ$)



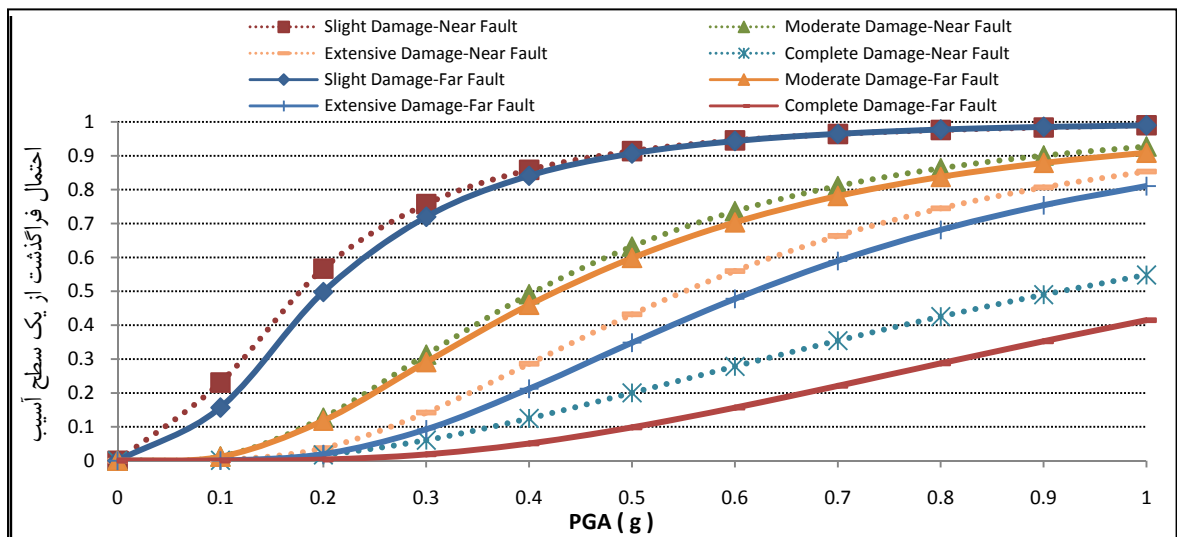
شکل ۱۰. منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی پایه شماره ۳ در جهت Y تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل ($\alpha=120^\circ$)



شکل ۱۱. منحنی نیرو-تغییر مکان پایه شماره ۳ در جهت Y تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل ($\alpha=120^\circ$)



شکل ۱۲. تعداد وقوع حالات خسارت پایه شماره ۱ در سطوح مختلف حداکثر زمین تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل و ترسیم زمین روی کاغذ احتمال لوگ نرمال ($\alpha=120^\circ$)



شکل ۱۳. منحنی شکنندگی پایه شماره ۴ ناشی از رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل دارای جهت داری پیش‌رونده ($\alpha=20^\circ$)

۷- جمع‌بندی

در این پژوهش، ظرفیت‌های سازه‌ای و پاسخ‌های لرزه‌ای پل بزرگراهی مورد نظر با استفاده از تحلیل غیر خطی استاتیکی و تحلیل دینامیکی غیرخطی به‌دست آمده‌اند. برای به‌دست آوردن منحنی‌های شکنندگی پل‌های بزرگراهی روشی محاسباتی ارایه شده است.

مشاهده شده است که جهت اعمال بار جانبی در آنالیز پل‌ها، در محاسبه پارامترهای مهمی همانند جابه‌جایی جاری شدن، جابه‌جایی نهایی و همچنین نیروی تسلیم پایه‌های مختلف پل تأثیر زیادی دارد. در آنالیزهای تاریخچه زمانی، جهت اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها در پاسخ پل‌ها، مانند حداکثر انرژی هیسترتیک جذب شده در پایه‌ها بسیار حساس می‌باشد. در نهایت تأثیر جهت اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها بر منحنی‌های شکنندگی پل‌ها بررسی شده است و مشاهده شده است که جهت اعمال جفت شتاب‌نگاشت‌ها تأثیر بسیاری بر منحنی‌های شکنندگی به‌دست آمده دارد. با افزایش سطح آسیب، در سطوح زمین لرزش‌های بالا این تفاوت در منحنی‌های شکنندگی ناشی از جهت اعمال شتاب‌نگاشت ملموس‌تر است. مشاهده شده است که در سطوح زمین لرزش بالا مانند $1/0g$ تفاوت در منحنی‌های شکنندگی ناشی از جهات مختلف اعمال شتاب‌نگاشت در برخی زاویه‌ها (α) تا $2/5$ برابر می‌باشد که به نظر می‌رسد این امر به علت ویژگی هندسی پل مورد نظر می‌باشد که موجب مقاومت متفاوت پل در جهات مختلف می‌شود.

با توجه به ویژگی‌های خاص زلزله‌های نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده و تفاوت آنها با زلزله‌های دور از گسل، پاسخ پل‌ها و منحنی‌های شکنندگی ناشی از زلزله‌های دور از گسل و نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده بررسی شده است. جابه‌جایی و برش پایه حاصل شده از رکورد نزدیک گسل در مقایسه با رکورد دور از گسل دارای حداکثر شتاب زمین یکسان بسیار بیشتر می‌باشد. همچنین، احتمال فراگذشت از یک سطح آسیب مشخص ناشی از زلزله‌های نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده، بیشتر از زلزله‌های دور از گسل است. با افزایش سطح آسیب و همچنین سطح جنبش زمین، تفاوت آسیب محتمل وارد به پل ناشی از زمین لرزه‌های دور و نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده بیشتر شده است. به عنوان مثال در منحنی

شکنندگی پایه شماره ۴ پل بزرگراهی S10، تحت زاویه شتاب‌نگاشت‌های $\alpha=20^\circ$ ، در سطح آسیب کامل و شتاب زمین برابر با $1/0g$ ، منحنی‌های به دست آمده ناشی از رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل دارای جهت‌داری پیش‌رونده، اختلافی ۳۰ درصدی دارد.

۸- مراجع

- زمردیان، م. (۱۳۸۹) "منحنی شکنندگی برای پل‌های بزرگراهی تهران"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- ناطق‌الهی، ف.، واثقی، ا. و لعل شهنسوار، و. (۱۳۸۵) "توسعه منحنی‌های شکنندگی و قابلیت اعتماد و ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل بتنی تله‌زنگ" استقلال، سال ۲۵، شماره ۱، ص ۸۰-۹۹.
- Rodriguez-Marek A., Cofer A. (2007) "Dynamic response of bridges to near-fault, forward directivity ground motion", Research report, Washington State Transportation Center, Agreement 355270, Task 6.
- Aviram A., Mackie K. and Stojadinovic B. (2008a) "Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California", Technical Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Aviram A., Mackie K., Stojadinovic B. (2008b) "Effect of abutment modeling on the seismic response of bridge structures", Earthquake Engineering & Engineering Vibration, Vol. 7, pp. 395-402.
- Bray J. D., Rodriguez-Marek A. (2004) "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, pp. 815-828.
- Caltrans (2006) "Caltrans Seismic Design Criteria", version 1.4, California Department of Transportation, Sacramento, California.
- Choi E., DesRoches R., Nielson B. (2004) "Seismic fragility of typical bridges in moderate

- Maleki S. Bisadi V. (2006) "Orthogonal Effects in Seismic Analysis of Skewed Bridges", ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 122- 130.
- Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R. (1988) "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 114(8), pp. 1827–1849.
- Mander JB., Basoz N. (1999) "Seismic fragility curve theory for highway bridges", 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE: Seattle, W.A., U.S.A.
- Maniatakis Ch.A., Taflampas I.M, Spyarakos C.C. (2008) "Identification of Near-Fault Earthquake Record Characteristics", Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Maroney B. H., Chai Y. H. (1994) "Seismic design and retrofitting of reinforced concrete bridges", Proceedings of 2nd International Workshop, Earthquake Commission of New Zealand, Queenstown.
- Monti G., Nistico N. (2002) "Simple probability-based assessment of bridges under scenario earthquakes", Journal of Bridge Engineering, Vol. 7, pp. 104–114.
- Nateghi F., Shahsavari V. L. (2004) "Development of Fragility and Reliability Curves for Seismic Evaluation of a Major Pre-stressed Concrete Bridge", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C. Canada.
- Nielson, B. G., DesRoches, R. (2007) "Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 36, pp. 823-839.
- Opensees.Website: <http://opensees.berkeley.edu>.
- Park Y. J., A. H-S. Ang., (1985) "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 4, pp. 722-739.
- seismic zones". Engineering Structures, Vol. 26, pp. 187–199.
- Fajfar P., Vidic T., Fischinger M. (1990) "A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 9, pp. 236-242.
- Ghobarah A, Aly N.M., EI-Attar M. (1997) "Performance level criteria and evaluation", Proceedings on the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the next Generation of Codes, Bled, Slovenia.
- Hwang H., Jernigan JB., Lin Y-W. (2000) "Evaluation of seismic damage to Memphis bridges and highway systems", Journal of Bridge Engineering, Vol. 5, pp. 322–330.
- Jernigan J.B., Hwang H. (2002) "Development of bridge fragility curves", 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI: Boston, M.A.
- Karim Kazi R., Yamazaki F. (1998) "Development of Analytical Fragility Curves for RC Bridge Piers Using Strong Motion Records", MCEER-98-0004, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York. pp.1-35 .
- Karim K.R., Yamazaki F. (2003) "A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, pp. 1603–1626.
- Karim, Kazi R., Yamazaki, Fumio (2001) "Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers base on numerical simulation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, pp. 1839-1856.
- Mackie K. and Stojadinovic B. (2001) "Probabilistic Seismic Demand Model for California Bridges", Journal of Bridge Engineering, Vol. 6(6), pp.468–480.
- Mackie KR, Stojadinovic B. (2006) " Post-earthquake functionality of highway overpass bridges", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, pp. 77–93.

- Fragility Curve Development", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126 (12), pp. 1287-1296.
- Trifunak M. D., Brady A. G. (1975) "A study on the duration of strong earthquake ground motion", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, pp. 581-626.
 - Seongkwan, Mark Lee, Tschangho, John Kim, and Seung, Lim Kang (2007) "Development of Fragility Curves for Bridges in Korea", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 165-174.
 - Shinozuka M., Feng Maria Q., Kim H. K., and Kim S. H. (2000) "Nonlinear Static Procedure for