

مقاله پژوهشی

ارزیابی احتمالاتی آسیب‌پذیری لرزه‌ای زیر ساخت‌های شبکه حمل و نقل با تأکید بر پل‌های عرشه جعبه‌ای بتن آرمه مستقیم و قوسی تحت تحریکات چندگانه

محسنعلی شایانفر (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اسدالله عباسلو، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حسین پهلوان، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمدعلی برخوردار، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

Email: shayanfar@iust.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۰

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۵

چکیده

تحریکات ناشی از یک زلزله ممکن است به طور قابل توجهی حتی در فواصل کم مکانی، به اندازه طول برخی سازه‌ها در شبکه حمل و نقل، دچار تغییراتی شوند. این امر ناشی از ناهمگنی و عدم انسجام محیط خاک، اثرات عبور موج زلزله و بازتاب و شکست موج در عبور از محیط‌های با سختی‌های متفاوت خاک است. در نتیجه انتظار می‌رود ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های طویل مانند پل‌ها و برخی سدها به شدت تحت تأثیر تغییرات ناشی از حرکت موج زلزله در امتداد طول سازه باشد. در این مقاله برای بررسی تأثیر این موضوع بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها، تحلیل شکنندگی با لحاظ تحریک غیریکنواخت ناشی از زلزله در پایه‌های پل انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، ۷۰ پل قوسی عرشه جعبه‌ای بتن آرمه، با لحاظ عدم قطعیت‌های هندسی، در نرم افزار اجزا محدود OpenSEES مدلسازی شده و در دو سناریوی مختلف تحت تحریکات یکنواخت و چندگانه تحلیل تاریخچه زمانی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند میانه شکنندگی این دسته از پل‌ها با کاهش شعاع عرشه، به میزان بیش از ۵۰ درصد (بسته به سطح آسیب و شعاع عرشه) افزایش می‌یابد و همچنین با لحاظ تحریکات غیر یکنواخت، آسیب‌پذیری اجزا و سیستم پل تا بیش از ۱۰ درصد بیشتر از حالت اعمال تحریکات یکنواخت ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی لرزه‌ای، پل عرشه جعبه‌ای، تحریکات چندگانه، شکنندگی

۱. مقدمه

در سیستم حمل و نقل درون شهری و برون شهری ایران پل‌های بسیاری به کار برده شده است که با توجه به اینکه تعداد بسیاری از آن‌ها تا قبل از سال ۱۳۸۰ ساخته شده‌اند، با معیارهای آیین نامه‌های لرزه‌ای جدید مطابقت فنی ندارند [Khanmohammadi, Abbasloo and Valadi, 2016]. لذا ارزیابی لرزه‌ای این دسته از زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل اجتناب ناپذیر است. در دو دهه گذشته توسعه منحنی های شکنندگی که احتمال آسیب پذیری سیستم پل را در سطوح مختلف آسیب با توجه به شدت زلزله نشان میدهند بسیار مورد علاقه محققین در این زمینه بوده است به ویژه که در استفاده از منحنی های شکنندگی می‌توان عدم قطعیت های مختلف ذاتی مشخصات پل‌ها و زلزله را در نظر گرفت. در اکثر تحقیقات انجام شده برای ارزیابی پل‌ها با استفاده از منحنی‌های شکنندگی، تأثیر پارامترهای هندسی مانند بیه کوله‌ها، انحناهای عرشه و نامنظمی در ارتفاع ستون‌های پل بر آسیب‌پذیری کلاس‌های مختلف پل انجام شده است.

در تحقیقات ذاکری و همکاران که مجموعه‌ای از پل‌های دو دهانه عرشه جعبه ای بتن آرمه با زوایای بیه از صفر تا ۴۵ درجه را به روش احتمالاتی مورد ارزیابی قرار گرفت، نشان داده شد در بیه های کمتر ۱۵ درجه تأثیر بیه بر آسیب پذیری کلی پل و اجزای آن آنچنان محسوس نبوده در حالی که افزایش بیه به مقادیر بیش از ۱۵ درجه به شدت آسیب‌پذیری کلی پل و اجزای آن (به خصوص الاستومرها و کوله) را در هر چهار سطح آسیب افزایش می‌دهد [Zakeri, Padget and Ghodrati, 2014]. برای ارزیابی تأثیر نامنظمی در ارتفاع ستون‌ها بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها، عباسی و همکاران تحقیقی بر روی پل‌های عرشه جعبه ای بتن آرمه چهار دهانه در چهار گروه نامنظمی ارتفاعی (پل های منظم با ارتفاع ستون‌های مساوی تا پل های به شدت نامنظم با اختلاف ارتفاع زیاد در ستون‌ها) انجام دادند که نشان داده شد با افزایش

اختلاف ارتفاع بین ستون‌های یک پل آسیب‌پذیری ستون‌ها و سیستم پل به صورت محدود افزایش می‌یابد [Abbasi et al. 2011]. در جدیدترین تحقیقات بر روی این کلاس از پل‌ها (عرشه جعبه ای بتن آرمه) پهلوان و همکاران پل‌های قوسی چندقابی را مورد ارزیابی احتمالاتی قرار دادند که نتیجه پژوهش آنها منجر به تعیین ضریب اصلاح شعاع قوس در میانه شکنندگی این کلاس از پل شد [Pahlavan et al. 2015].

خنون و همکاران در تحقیقی گسترده‌تر تأثیر پارامترهای هندسی مختلف را بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های عرشه جعبه‌ای بتن آرمه بررسی کردند و نشان داده شد که در بین پارامترهای هندسی مختلف تغییر در ارتفاع ستون بیشترین تأثیر را بر شکنندگی این کلاس پل دارد به طوری که با افزایش ارتفاع ستون و بروز نامنظمی ارتفاعی پل، پل‌ها به شدت آسیب پذیرتر می‌شوند [Jeon et al. 2016]. علاوه بر این، مانگالاتو و همکاران در تحقیقی مشابه بر روی همین کلاس پل، سه گروه پل با ارتفاع ستون متوسط، ستون‌های بلند و ستون‌های بسیار بلند را با در نظر گرفتن عرشه‌های قوسی شکل مورد ارزیابی قرار دادند که نشان داده شد پل‌های با ستون‌های بلند و شعاع عرشه کمتر، شکننده ترین پل در این دسته بندی هستند [Mangalathu et al. 2018]. برخی از تحقیقات انجام شده منجر به ارائه ضرایب اصلاح کننده برای در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای هندسی مانند بیه در محل کوله‌ها شده اند که به عنوان مثال پژوهش مانگالاتو و همکاران برای سه زاویه بیه ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در دو حالت نزدیک و دور از گسل ضرایب اصلاحی ارائه کرده است [Mangalathu et al. 2019].

از آنجا که عمده تحقیقات انجام شده تأثیر پارامترهای هندسی بر روی آسیب‌پذیری پل‌ها را ارزیابی کرده‌اند، در این تحقیقات کمتر به موضوع نحوه اعمال بار زلزله به پل‌ها پرداخته شده است. به این مفهوم که در این مطالعات به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی، اثر زلزله به صورت یکنواخت به تمام پایه های مختلف در طول پل اعمال شده است.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره اول (۴۶) / پاییز ۱۳۹۹

عدم قطعیت مربوط به زلزله انجام شده است. علاوه بر این با تغییر در شعاع قوس عرشه، تغییرات تأثیر تحریکات چندگانه و شعاع عرشه بر درجه شکنندگی اجزا و سیستم پل بررسی شده است.

در این مقاله، از تحقیقات گسترده ونمارک و همکاران (۱۹۹۳) با تشکیل تابع چگالی طیفی و هبستگی بین نقاط با فواصل کم، برای ایجاد تحریکات چندگانه استفاده شده است که در بخش‌های بعدی مقاله به این موضوع پرداخته شده است.

همچنین منحنی‌های شکنندگی برای پل‌های عرشه جعبه‌ای بتن آرمه با پایه‌های چندستونی پیوسته با روسازه که دارای قوس در پلان هستند، در دو سناریو مختلف تحت تحریک یک‌نواخت و تحریکات چندگانه با لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ذاتی در مصالح، هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری (ثقلی و لرزه‌ای) توسعه داده شده‌اند.

از آنجا که روش ارزیابی در این تحقیق احتمالاتی است، تعداد ۱۰ نمونه تصادفی پل با مشخصات هندسی متفاوت و هر کدام در ۷ شعاع عرشه مختلف به نحوی انتخاب شده‌اند که نماینده مجموعه وسیعی از این کلاس پل باشند [NBI 2010]. از نتایج تحلیل غیر خطی بر روی مدل‌های تهیه شده از این پل‌ها مدل احتمالاتی تقاضای اجزا آسیب‌پذیر پل تشکیل شده است که با مقایسه این مدل‌ها با مدل ظرفیت اجزا پل، احتمال آسیب‌پذیری در چهار سطح آسیب اندک، متوسط، گسترده و کامل ارائه شده است. در ادامه مقاله، جزئیات مدلسازی و تحلیل‌ها به همراه روش مورد استفاده برای آنالیز شکنندگی و دیگر گام‌های انجام کار آورده شده است.

۲. شرح پل‌های مورد مطالعه و جزئیات

مدلسازی‌های عددی

۲-۱ خصوصیات پل‌های عرشه جعبه‌ای بتن آرمه با

قوس در پلان

این در حالست که در دهه اخیر این موضوع به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است، که برای سازه‌های طویل، مانند سدها و پل‌ها از تحریک غیر یک‌نواخت در نقاط تکیه‌گاهی این سازه‌ها در تحلیل‌ها استفاده شود چرا که تحریکات ناشی از یک زلزله ممکن است به طور قابل توجهی حتی در فواصل کم، به اندازه طول برخی سازه‌ها، با یکدیگر متفاوت باشند [Zhong et al. 2018]. این امر ناشی از ناهمگنی و عدم انسجام محیط خاک، اثرات عبور موج زلزله و بازتاب و شکست موج در عبور از محیط‌های با سختی‌های متفاوت خاک است. در نتیجه انتظار می‌رود ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های طویل مانند پل‌ها به شدت تحت تأثیر تغییرات ناشی از حرکت موج زلزله در امتداد طول سازه باشد [Falamarz-Sheikhabadi and Zerva, 2016].

در ارزیابی شکنندگی پل‌ها لازم است به روش مناسبی میزان تغییرات خصوصیات زلزله در فواصل بین پایه‌های پل تعیین شود و این تغییرات در بارگذاری لرزه‌ای پل در تحلیل‌های تاریخیچه زمانی لحاظ شود که در اصطلاح به این روش، تحلیل تحت تحریکات چندگانه گفته می‌شود. عمده تحقیقاتی که تا کنون برای لحاظ اثرات تحریکات چندگانه در ارزیابی پل‌ها انجام شده است به صورت مطالعه موردی بر روی پل‌های کابلی و معلق بوده است [Adanur et al. 2016]. اما با توجه به اینکه پل‌های متداول تیر و دال نیز گاهی با طول زیاد احداث می‌شوند ضروری است یک تحقیق گسترده بر روی اثر تحریکات چندگانه در نتایج ارزیابی این دسته از پل‌ها انجام گیرد.

هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی اثر تحلیل تحت تحریکات چندگانه در ارزیابی لرزه‌ای پل‌های بزرگراهی می‌باشد که تا کنون در تحقیقات گذشته به این موضوع پرداخته نشده است. در این مقاله بر خلاف مطالعاتی که تاکنون بر روی این کلاس از پل‌ها انجام شده است، تحلیل تحت تحریکات چندگانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هندسی و مکانیکی اجزای مختلف پل و

است به این صورت که پل ۴ دهانه با یک درز میانی به دو قاب تفکیک شده است. درز میانی عرشه به منظور حداقل رساندن تنش-های حرارتی و سهولت اجرا در این دسته از پل‌ها که روسازه به صورت یکپارچه با زیرسازه است، جایگذاری می‌شود. به این دسته از پل‌ها اصطلاحاً پل چندقاب‌ی گفته می‌شود.

با توجه به اینکه کوله و درزهای میانی عرشه به صورت نشیمنی برای انتقال بارهای ثقلی از طریق الاستومرها، اجرا می‌شوند، به دلیل وجود احتمال فروافتادگی عرشه و یا برخورد عرشه و کوله (در محل کوله‌ها) و برخورد دو قسمت عرشه (در محل درزهای میانی) از نقاط آسیب‌پذیر این کلاس پل محسوب می‌شوند که در مدلسازی‌های عددی این مقاله لحاظ شده‌اند.

برای لحاظ کردن عدم قطعیت هندسی مربوط به نوع پایه‌ها در ارزیابی شکنندگی این دسته از پل‌ها، پایه‌ها از نوع چند ستونی قابی شکل با تعداد ستون‌های ۲، ۳ و ۴ در هر پایه در نظر گرفته شده‌است که بسته به عرض عرشه تعداد ستون‌های موجود در هر پایه تعیین می‌شود. با توجه به مطالعات گسترده بر روی مشخصات هندسی این دسته از پل‌ها که توسط راماناتان^۶ در سال ۲۰۱۲ انجام گرفته است، برای عرض عرشه کمتر از ۱۲ متر، پایه‌ها دو ستونی، برای محدوده ۱۲ تا ۲۴ متر پایه‌ها سه ستونی و برای عرض عرشه بیش از ۲۴ متر پایه‌های چهار ستونی برای پل‌ها در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، ستون‌های این کلاس پل انتخاب شده، مقطع دایره‌ای با متوسط قطر ۱/۵۳ متر دارند که با ۳/۷-۱ درصد آرماتور طولی مسلح شده‌اند. شرایط محصور شدگی در این ستون‌ها با آرماتور نمره ۴ (قطر ۱۳ میلیمتر) با گام ۱۵-۱۰ فراهم شده است.

فونداسیون پایه‌ها از گروه شمع‌های درجا ریز تشکیل شده که سختی این شمع‌ها نیز در مدلسازی‌های عددی لحاظ شده است. بارهای عرض عرشه توسط کلیدهای برشی خارجی که ظرفیتی معادل ۲۵٪ ظرفیت قاب‌های پایه‌های مجاور دارند، به کوله منتقل می‌شود [Ramanathan, 2012]. بر اساس سال طراحی، پل‌ها به سه دوره ساخت تقسیم می‌شوند، دوره قبل از ۱۹۷۱ که عمدتاً طرح لرزه‌ای خاصی نداشته‌اند و در زلزله ۱۹۷۱ سن فرنادو آسیب بسیار جدی دیده‌اند.

از میان پل‌های بزرگراهی موجود، پل‌های با عرشه جعبه‌ای بتن آرمه از فراوانی بالایی برخوردار هستند. ۳۷ درصد از پل‌های موجود در آمریکا از نوع عرشه جعبه‌ای بتن آرمه که به صورت پیوسته با پایه‌های ستونی اجرا شده‌اند هستند که بیشترین فراوانی را در بین پل‌های موجود در آمریکا دارند [Ramanathan, 2012]. با توجه به رایج بودن این تیپ از پل‌های بتنی در این مطالعه ارزیابی لرزه‌ای این کلاس پل مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور ده نمونه تصادفی پل که از مجموعه اطلاعات پل‌های موجود در غرب آمریکا اتخاذ شده‌اند و در تحقیقات گذشته نویسندگان همین مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، در جدول ۱ آورده شده است. از آنجا که آیین نامه‌های طراحی پل‌های ایران مشابه آیین نامه‌های پل آمریکا مانند کترینس^۱ و آشتو^۲ بوده و از طرفی شرایط لرزه خیزی ایران مشابه منطقه غرب آمریکا است [Pahlavan, 2015]، در این مقاله با اقتباس از مطالعات زیادی که در ایران بر روی این دسته از پل‌ها انجام شده است [Zakeri, Abedini, 2013, 2013]، از اطلاعات پایگاه داده پل‌های آمریکا^۳ استفاده شده است. در مجموع ۱۰ هندسه مختلف پل که هر کدام برای ۷ شعاع عرشه مختلف در نظر گرفته شده‌اند، برای ارزیابی تأثیر همزمان انحنای در عرشه و لحاظ تحریکات غیر یکنواخت در پایه‌ها انتخاب شده‌اند.

دیگر مشخصات هندسی مانند طول دهانه‌ها، ارتفاع ستون‌ها، عرض عرشه و تعداد ستون‌های هر پایه با استفاده از تکنیک انتخاب نمونه لاتین هایپرکیوب^۴، از مجموعه پل‌ها انتخاب شده است. در این روش انتخاب نمونه، ۱۰ هندسه متفاوت پل انتخاب شده‌است به طوری که گویای کل مجموعه آماری این کلاس پل باشد. در مجموع ۷۰ نمونه عددی پل متفاوت برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی در نرم افزار اوپنسیس^۵ تهیه شده است (۷ شعاع عرشه مختلف با ۱۰ هندسه متفاوت). جدول ۱ برخی مشخصات هندسی این پل‌ها را به تفکیک نشان می‌دهد.

در کلاس پل مورد مطالعه، کوله‌ها از نوع نشیمنی انتخاب شده و با توجه به طول پل‌ها در عرشه آن‌ها درز میانی در نظر گرفته شده

جدول ۱. پارامترهای هندسی نمونه پل‌های مدل‌سازی شده

ارتفاع ستون (متر)	طول دهانه (متر)	تعداد ستون- های هر پایه	طول پل/شعاع عرشه	تعداد دهانه	شماره نمونه پل
۴/۹۶	۴۴/۱۰	۳	∞	۴	۱
۶/۶۷	۲۷/۴۷	۴	∞	۴	۲
۳/۸۸	۳۴/۲۷	۲	∞	۴	۳
۵/۴۶	۲۳/۹۷	۴	∞	۴	۴
۴/۷۹	۳۸/۴۰	۳	∞	۴	۵
۳/۶۶	۳۰/۷۷	۲	∞	۴	۶
۴/۴۲	۵۴/۹۳	۳	∞	۴	۷
۵/۸۴	۳۳/۳۶	۴	∞	۴	۸
۵/۱۳	۱۷/۱۷	۲	∞	۴	۹
۷/۲۱	۲۶/۶۳	۲	∞	۴	۱۰

ستون هستند به صورت المانهای رشته‌ای تغییر شکلی تیرستون مدل‌سازی شده اند که امکان تشکیل مفصل پلاستیک در هر طولی از ستون امکانپذیر است. کوله‌ها به صورت نشیمنی با درز انبساط از عرشه مجزا در نظر گرفته شده‌اند که بار ثقلی روسازه با استفاده از نئوپن‌های غیر لرزه‌ای به کوله منتقل می‌شود که با استفاده از المان بدون طول^۷ با مصالح دو خطی الاستوپلاستیک در مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. چرا که اتصال الاستومرها به بتن به صورت اصطکاکی بوده و تا قبل از اینکه نیروی برشی الاستومر کمتر از اصطکاک بین بتن و الاستومر باشد رفتار الاستومر به صورت الاستیک خطی کنترل شده با مدول برشی الاستومر است و پس از آن با نیروی اصطکاک کنترل می‌شود. بار عرضی توسط برشگیرهایی در دوطرف انتهای کوله از روسازه به کوله و سپس به شمع‌های کوله منتقل می‌شود برشگیرها نیز المان‌های بدون طول با مشخصات مصالح سه خطی در نظر گرفته شده اند.

خاک پشت کوله نیز در مدل‌سازی‌های عددی لحاظ شده است. در جهت طولی، به هنگام حرکت عرشه به سمت کوله‌ها، خاک پشت کوله عملکرد غیرفعال^۸ خواهد داشت و سختی خاک غیر فعال با

پس از آن با تغییر رویکردهای طراحی لرزه‌ای، حد فاصل سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۴ به دوره میانی مشهور است که در آن برخی ضعف‌های مشاهده شده در زلزله‌ها قبل رفع شده بود. دوره طراحی نوین از مشاهدات سطوح آسیب پل‌ها در اثر زلزله ۱۹۹۴ نورث ریج، آغاز شد [Caltrans, 2007]. مشخصات هندسی و جزئیات آرماتورگذاری پل‌های انتخاب شده در این مقاله، منطبق بر پل‌های دوره طراحی میانی (۱۹۷۱-۱۹۹۴) فرض شده اند، چرا که از نظر فراوانی تعداد پل‌های موجود ساخته شده در این دوره نسبت به دوره‌های طراحی دیگر بیشتر بوده و ضمن آن، این دوره شروعی بر در نظر گرفتن الزامات خاص لرزه‌ای در طراحی اجزا پل‌ها بوده است، لذا ارزیابی لرزه‌ای این دوره طراحی برای محققین جذابیت بیشتری داشته است. در ادامه به جزئیات مدل‌سازی و فرضیات لحاظ شده در پل‌های مورد بحث در مقاله پرداخته شده است.

۲-۲ مدل‌های تحلیلی از اجزا پل‌های مورد مطالعه

برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی، مدل غیر خطی پل‌های مذکور در نرم افزار اجزا محدود اوپنسیس تهیه شده‌اند. پایه‌های این پل‌ها که با توجه به عرض عرشه، قاب‌هایی با ۲، ۳ و یا ۴ فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره اول (۴۶) / پاییز ۱۳۹۹

سختی شمع‌های کوله با هم عمل می‌کنند در صورتی که در جهت عرضی کوله و یا هنگام حرکت دورشونده عرشه از کوله خاک پشت کوله عملکرد فعال داشته و از فشار آن در مدلسازی صرفنظر شده است. در نتیجه در جهت عرض و در جهت طولی دور شونده از کوله فقط سختی شمع‌های کوله در مدلسازی آورده شده است. برای مدلسازی خاک حالت غیر فعال، از مدل هذلولی شمس آبادی و همکاران [Shamsabadi et al.2010] استفاده شده است که با المانی به همین نام در نرم افزار عددی در محل کوله جایگذاری شده است.

فونداسیون پایه‌ها و کوله‌ها از گروه شمع‌ها تشکیل شده است که توسط یک سرشمع به سازه متصل شده اند. در مدلسازی فونداسیون از فنرهای انتقالی سه خطی و فنر دورانی کاملاً الاستیک که به صورت موازی با هم عمل می‌کنند استفاده شده است. از آنجا که روسازه پل‌ها عمدتاً به صورت ثقلی طراحی می‌شود و در طی زلزله به صورت الاستیک باقی می‌ماند، عرشه با استفاده از المان‌های تیرستونی الاستیک^۹ در نرم افزار مدل شده است که مشخصات این المان‌ها با توجه به ابعاد و تعداد سوراخ‌های مقطع عرشه تعیین شده است. علاوه بر این، با توجه به انحنا عرشه پاسخ لرزه‌ای این دسته از پل‌ها در جهت عرضی و جهت طولی و همچنین پیچش عرشه با یکدیگر برهم کنش دارند که برای لحاظ کردن این رفتار، المان‌های عرضی تیر-ستون صلب در عرشه در نظر گرفته شده است که جرم متمرکز عرشه در چند نقطه عرضی را به هم متصل می‌کنند.

در تحقیقات گذشته نشان داده شده است که در ۵۰ درصد پل‌های این کلاس با افزایش تعداد دهانه تا بیش از ۴ دهانه، برای کنترل تنش‌های ناشی از تغییر شکل‌های طولی عرشه، حداقل یک درز انبساط میانی برای این پل‌ها در نظر گرفته می‌شود [Ramanathan, 2012]. در این مقاله نیز پل‌ها دارای درز میانی هستند که در محل درز برای انتقال بار ثقلی بین دو قسمت عرشه از المان بدون طول مربوط به تئوپرن‌های مشابه کوله استفاده شده، از طرفی برای مدلسازی اثر برخورد دو قسمت عرشه در محل درز

میانی و در محل کوله، از المان‌های بدون طول دو خطی با گپ اولیه و رفتار صرفاً فشاری، در محل درز میانی و درز در محل کوله‌ها استفاده شده است.

جزئیات اجزای مختلف پل و المان در نظر گرفته شده معادل برای آن‌ها در مدلسازی، در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مشخصات هندسی و مقاطع ستون‌ها و عرشه، با تغییر در تعداد دهانه و شعاع عرشه تغییری نخواهد کرد و این پارامترها فقط در ۱۰ دسته اشاره شده در جدول ۱ با یکدیگر متفاوت خواهند بود. برای بررسی اثر شعاع قوس افقی عرشه در آسیب‌پذیری این دسته از پل‌ها، هفت شعاع مختلف برای عرشه پل‌ها فرض شده است. با توجه به میانه طول دهانه پل‌های انتخابی (۳۴/۲ متر)، شعاع عرشه پل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که نسبت شعاع عرشه به میانه طول کل پل مطابق شکل ۳ مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴ و بینهایت (پل صاف) در نظر گرفته شده است. در این شکل L طول کل پل و R شعاع قوس افقی عرشه است.

خصوصیات مکانیکی مصالح فولاد، بتن و الاستومرها به صورت متغیرهای تصادفی هستند که بر اساس مطالعات گذشته نحوه لحاظ عدم قطعیت مربوط به آن‌ها در مدلسازی در قسمت بعدی مقاله شرح داده شده است.

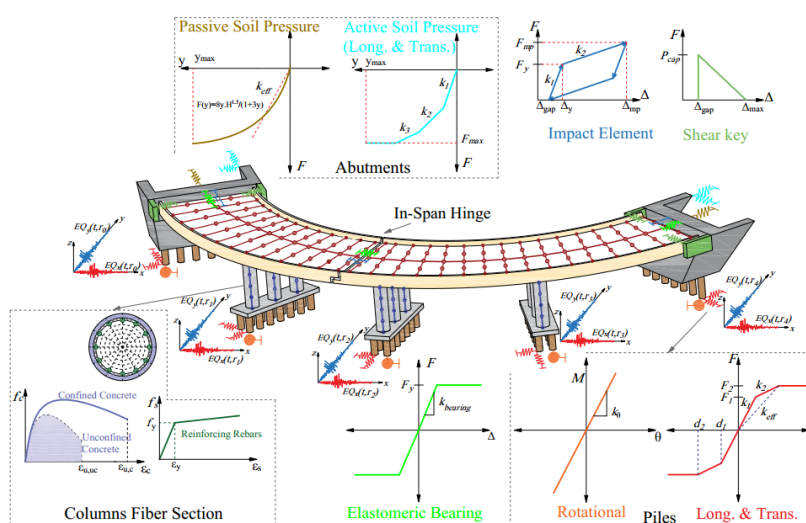
۲-۳ لحاظ کردن عدم قطعیت‌های پارامترهای مدلسازی و مشخصات زمین لرزه‌ها

هدف اصلی در تحلیل شکنندگی پل‌ها، لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ذاتی مختلف، در ارزیابی آسیب‌پذیری و اندازه‌گیری احتمال خسارت در اجزا و یا کل سیستم سازه است. مشخصات مصالح، ویژگی‌های زمین لرزه‌ها و مشخصات هندسی، منشأ اصلی عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده در این مقاله هستند. با توجه به اینکه از روش لاتین هاپر کیوب برای نمونه‌گیری از یک مجموعه داده وسیع استفاده شده است، می‌توان گفت عدم قطعیت‌های مربوط به هندسه پل در مدلسازی‌ها در نظر گرفته شده است. با این تفسیر که برای پل‌ها شعاع‌های مختلف، تعداد دهانه مختلف

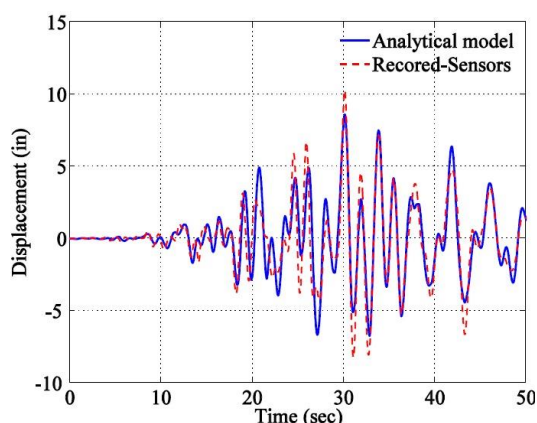
مطالعات گسترده رامناتان، برای این پارامترها توزیع آماری نرمال، نرمال لوگاریتمی و یا توزیع یکنواخت برازش داده شده است. طبق این مطالعات جدول ۲ توزیع احتمالاتی مورد استفاده برای هر کدام از جزئیات را به همراه پارامترهای مورد نیاز هر توزیع نشان می‌دهد [Padgett and DesRoches, 2008].

به عنوان مثال بر اساس اطلاعات موجود در این جدول، برای مشخصات مکانیکی مربوط به مقاومت فشاری بتن از یک توزیع

به همراه مجموعه ده تایی متنوعی از نظر طول دهانه، ارتفاع ستون، عرض عرشه، تعداد ستون در هر پایه در نظر گرفته شده تا عدم قطعیت مربوط به هندسه پل به خوبی لحاظ شده باشد. بر اساس مطالعات گذشته بر روی این دسته از پل‌ها، سایر عدم قطعیت‌های مربوط به مشخصات مصالح، برخی ابعاد و اندازه مربوط به جزئیات و یا عدم قطعیت در وزن لرزه‌ای به این ترتیب لحاظ شده است که، هر کدام از این مشخصات نامبرده در مجموعه پل‌های پایگاه داده آمریکا از یک توزیع آماری پیروی می‌کنند. طبق



شکل ۱. نمای شماتیک المان‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

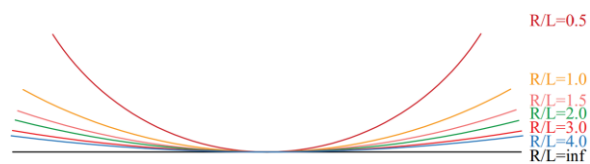


شکل ۲. مقایسه پاسخ واقعی و تحلیلی پل کالتون در محل درز میانی

برای لحاظ کردن عدم قطعیت مربوط به زلزله‌ها باید از یک مجموعه زلزله استفاده شود که به نوعی گویای شرایط لرزه‌خیزی منطقه باشد. بر این مبنا مجموعه ۸۰ جفت افقی (مولفه طولی و عرضی)

نرمال با میانگین ۳۴/۵ مگاپاسکال و انحراف استاندارد ۴/۳ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. به منظور حصول اطمینان از صحت فرضیات مدل‌سازی، از مقایسه نتایج تحلیل و پاسخ ثبت شده طی زلزله ۱۹۹۲ لندرز^۱ برای پل کالتون^{۱۱} استفاده شده است این پل که در سال ۱۹۶۲ ابزار گذاری شده بود پاسخ مربوط به زلزله‌های بزرگ عمر خود را ثبت کرده است. شکل ۲ مقایسه بین نتایج مدل‌سازی و تغییر مکان ثبت شده در جهت طولی در محل درز میانی عرشه پل را در طی زلزله لندرز نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج تحلیل و جواب واقعی سازه می‌توان نتیجه گرفت با وجود فرضیات ساده کننده در روش مدل‌سازی انتخاب شده، نتایج قابل استناد و انطباق خوبی با رفتار واقعی این گروه از پل‌ها را دارند.

زلزله‌های جمع آوری شده توسط بیکر و همکاران در سال ۲۰۱۰ که گویای زلزله‌های دور از گسل هستند، به همراه ۲۰ جفت زلزله نزدیک گسل مورد استفاده در پروژه سک^{۱۲} در کالیفرنیا انتخاب شده است [Baker et al.2011]. این مجموعه ۱۰۰ عددی گویای شرایط لرزه خیزی، ساختگاه و دیگر پارامترهای مربوط به عدم قطعیت زلزله هستند. این صد زلزله یک بار به شیوه تحریک یکنواخت و بار دیگر به صورت تحریک چندگانه و به طور تصادفی به ۷۰ مدل عددی تهیه شده از پل‌ها اعمال می‌شوند و در مجموع ۱۴۰۰۰ تحلیل دینامیکی غیر خطی (۷۰۰۰ تحلیل با تحریک یکنواخت و ۷۰۰۰ تحلیل دیگر با تحریک چندگانه) با لحاظ تمامی عدم قطعیت‌های هندسی و مکانیکی انجام شده است که از نتایج آن برای تحلیل شکنندگی در سطح اجزا و کل سیستم پل استفاده شده است.



شکل ۳. تغییرات شعاع عرشه نسبت به طول پل در مدل‌سازی‌ها

۳. شبیه سازی تحریکات چندگانه زلزله

در تحقیقاتی که تا کنون به روش احتمالاتی برای ارزیابی آسیب‌پذیری پل‌ها انجام شده است، همواره به ازای هر شتاب

نگاشت از مجموعه زلزله‌های مورد نظر، از یک تحریک یکسان^{۱۳} برای تمام پایه‌ها و کوله‌های پل استفاده شده است. این در حالی است که، اگر یکی از کوله‌های پل را به عنوان مرکز اعمال تحریکات زلزله در نظر بگیریم با توجه به تغییر سرعت موج برشی در خاک‌های با سختی متفاوت و فاصله پایه‌های دیگر از کوله مورد نظر، موج زمین‌لرزه‌ای که به بقیه پایه‌ها و کوله‌ها می‌رسد، از نظر فاز و دامنه متفاوت خواهد بود و لازم است با توجه به جنس خاک و فواصل پایه‌ها از یکدیگر اصلاح شود [Zhong et al.2017]. در این مقاله تأثیر این شیوه اعمال تحریکات زلزله (تحریکات چندگانه پایه‌ها^{۱۴}) در تعیین آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های چند قابی عرشه جعبه‌ای بتن‌آرمه بررسی شده است.

برای اعمال اثر تحریکات چندگانه بر روی پل از روش ارائه شده توسط ونمازک استفاده شده است [Jeon, Shafieezadeh and DesRoches 2015] که در اینجا به برخی نکات اساسی این روش اشاره می‌شود و جزئیات بیشتر این روش در مراجع مربوط به صورت مبسوط منتشر شده است. در این روش هر کدام از شتاب نگاشت‌های زلزله‌های مجموعه صدتایی که قبلاً تشریح شد، به عنوان زلزله معلوم به کوله پل اعمال می‌شود، و تحریک مربوط به بقیه پایه‌ها با روش شبیه سازی وابسته به زلزله معلوم تعیین می‌شود.

جدول ۲. توزیع احتمالاتی در نظر گرفته شده به همراه پارامترهای آن‌ها در مدلسازی پل‌ها

پارامتر مورد نظر	توزیع احتمالاتی	پارامترهای توزیع		واحد	مرجع
		پارامتر اول	پارامتر دوم		
مقاومت فشاری بتن	نرمال	۳۴/۵	۴/۳	MPa	[Choi, 2002]
مقاومت کششی آرماتور	نرمال لوگاریتمی	۲۹	۰/۰۸	MPa	[Ellingwood and Hwang, 1985]
مدول برشی الاستومر	یکنواخت	۵۵۱	۱۷۲۳	MPa	[Ramanathan, 2012]

ضریب اصطکاک بتن و الاستومر	نرمال لگاریتمی	۰	۰/۱	-	[Ramanathan, 2012]
سختی شمع ها	نرمال لگاریتمی	۷/۰۶	۰/۳	kN/mm	[Caltrans, 2007]
درز انبساط	یکنواخت	۳۸/۱	۱۵۲	mm	[Ramanathan, 2012]
خاک پشت کوله	یکنواخت	۱۴/۵	۲۹	kN/mm/m	[Shamsabadi et al.2010]
جرم	یکنواخت	۱/۱	۱/۴	-	Padgett and DesRochers,] [2008
میرایی	نرمال	۰/۰۴۵	۰/۰۱۲۵	-	[Ramanathan, 2012]
راستای اعمال بار زلزله	یکنواخت	۰	$\pi 2$	rad	[Ramanathan, 2012]

زمان شبیه سازی شده مربوط به هر پایه در محل قرارگیری آن پایه به صورت همزمان، پاسخ لرزه ای پل در اثر اعمال تحریکات چندگانه (غیر یکنواخت) بدست می آید که برای مراحل بعدی ارزیابی لرزه ای از این پاسخ ها استفاده شده است [Liao and Zerva, 2006].

۴. چارچوب تهیه منحنی شکنندگی

۴-۱ مدل احتمالاتی نیاز لرزه ای

توسعه منحنی های شکنندگی مستلزم این است که یک مدل احتمالاتی از نیاز لرزه ای تهیه شود که پارامترهای تقاضای مهندسی^{۱۵} را به معیار شدت اندازه گیری^{۱۶} زلزله که در این مقاله شتاب حداکثر زمین (PGA) در نظر گرفته شده است ارتباط دهد. در اکثر مطالعات شکنندگی مربوط به پل ها فقط تغییر شکل یا شکل پذیری ستون های پل به عنوان پارامتر تأثیر گذار در نظر گرفته شده و مدل تقاضا فقط برای آن تشکیل می شود. در حالی که در این مقاله تأثیر تمام اجزای تشکیل دهنده پل و میزان آسیب پذیری آن ها به همراه میزان مشارکت هر کدام از آن ها در آسیب پذیری کل سیستم پل بررسی شده است. در نتیجه در این مقاله مدل نیاز لرزه ای برای پارامترهایی از قبیل: شکلی پذیری ستون ها، افتادگی عرشه از روی کوله و یا در محل درز میانی، جابجایی کوله در جهت طولی فعال، طولی غیر فعال و جهت عرضی، تغییر شکل کلیدهای برشی، تغییر شکل جانبی

شتابنگاشت زلزله معلوم به چند بازه تفکیک می شود به طوری که در هر بازه از نظر دامنه و محتوای فرکانسی تقریباً مانا باشد. برای هر کدام از این زیربازه های مانا تابع چگالی طیفی تشکیل می شود که این تابع در واقع گویای خصوصیات ذاتی زلزله (محتوای فرکانسی و بزرگا) است. با توجه به همبستگی نقاط مربوط به پایه ها، تابع چگالی طیفی به روش تصادفی و با توجه به تابع همبستگی رابطه (۱) برای دیگر پایه ها تولید می شود [Loh and Yeh, 1988]. در نهایت با استفاده از روش فوریه معکوس این توابع چگالی طیفی، تاریخچه زمانی شتاب در نقطه جدید را ارائه می دهند.

$$\rho(\omega, r) = \exp \left[-\frac{\omega r}{2\pi v_s \xi} \right] \quad (1)$$

در این رابطه ρ تابع همبستگی بین نقاط تکیه گاهی، r فاصله پایه های پل از کوله، v_s سرعت موج برشی زلزله در خاک، ξ ضریب مقیاس فواصل (در اینجا برابر ۵ در نظر گرفته شده است) و ω فرکانس زاویه ای در تابع چگالی طیفی هستند. بدین ترتیب برای هر کدام از رکوردهای مجموعه صدماتی این فرایند شبیه سازی شتابنگاشت در محل پایه های مختلف انجام شده است. از آنجا که تغییرات مربوط به امواج زلزله در فواصل کم پاسخ تغییر مکان شبه استاتیکی پل را تحت تأثیر قرار می دهد لازم است شتاب نگاشت های حاصل از شبیه سازی، با استفاده از انتگرال گیری به تاریخچه زمانی جابجایی تبدیل شوند. با اعمال تاریخچه

اجزا، تابع شکنندگی کل سیستم پل بدست آمده است که در ادامه مقاله به آن پرداخته شده است.

۴-۲ مدل‌های ظرفیت اجزا پل و حالات حدی آسیب

ارزیابی لرزه‌ای به روش‌های احتمالاتی (تشکیل منحنی‌های شکنندگی) شامل مدل‌های مناسب برای نیاز لرزه‌ای و ظرفیت اجزا مختلف سازه است. با محاسبه احتمال فراگذشت نیاز از ظرفیت به ازای یک معیار شدت زلزله خاص، احتمال شکست یا منحنی شکنندگی تشکیل می‌شود.

بر اساس مطالعات گذشته و بررسی مقادیر پیشنهادی برای ظرفیت در دستورالعمل‌های ارزیابی و با توجه به دوره ساخت پل‌ها (در این مقاله دوره میانی طراحی ۱۹۹۴-۱۹۷۱) ظرفیت مورد انتظار اجزا مختلف پل پیشنهاد می‌شود [Ramanathan, 2012].

با توجه به اینکه ارزیابی آسیب‌پذیری برای مجموعه‌ای گسترده از پل‌ها در یک کلاس خاص انجام می‌شود، ظرفیت اجزا مختلف پل دارای عدم قطعیت‌هایی هستند که لازم است مشابه آنچه برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های نیاز لرزه‌ای بیان شد، برای ظرفیت‌ها نیز یک مدل احتمالاتی مناسب در نظر گرفته شود به طوریکه گویای عدم قطعیت‌های موجود در ظرفیت اعضای پل باشد.

برای توسعه مدل ظرفیت در این کلاس پل با دوره طراحی میانی، توزیع نرمال لگاریتمی با پراکندگی ۰/۳۵ برای تمامی اجزا در نظر گرفته شده است. لازم بذکر است اسن نوع توزیع با همین مقدار پراکندگی در مطالعات اخیر مربوط به ارزیابی شکنندگی استفاده شده است [Pahlavan et al. 2015]. با توجه به میزان تأثیر آسیب اجزا به پایداری ثقلی پل یا ظرفیت ترافیکی پل، اجزا آسیب پذیر پل به دو گروه اولیه و ثانویه تفکیک شده است. آسیب در ستون‌ها و یا آسیب از نوع افتادگی عرشه در محل کوله یا درز میانی، پایداری ثقلی پل را تحت تأثیر مستقیم قرار داده و موجب محدودیت‌های ترافیکی می‌شود.

الاستومرها، ضربه زدن عرشه و کوله، تغییر شکل شمع‌ها و تغییر مکان طولی و عرضی عرشه، تهیه شده است و در تحلیل شکنندگی پل لحاظ شده است. برای هر کدام از ۶۰ دستگاه پل مورد نظر که در شعاع و مشخصات هندسی با یکدیگر متفاوت هستند، در ترکیب با زلزله‌های مطرح شده، ۱۰۰ تحلیل تاریخیچه زمانی انجام شد. پاسخ حداکثر مربوط به هر پارامتر بحرانی در برابر (PGA) استخراج شده است. شکل ۴ (الف) به صورت شماتیک نحوه استخراج پارامترهای نیاز لرزه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴ (ب) مدل نیاز لرزه‌ای شکل‌پذیری انحنای ستون برای یک پل ۴ دهانه با نسبت شعاع به طول ۱ نشان ارائه شده است.

بر اساس مطالعات کرنل و همکاران مدل احتمالاتی نیاز لرزه‌ای به صورت رابطه (۲) که نشان دهنده ارتباط خطی بین تقاضا و معیار شدت زلزله در فضای لگاریتمی است، پیشنهاد شده [Cornell et al. 2002].

$$\ln(S_D) = \ln(a) + b \ln(IM) \quad (2)$$

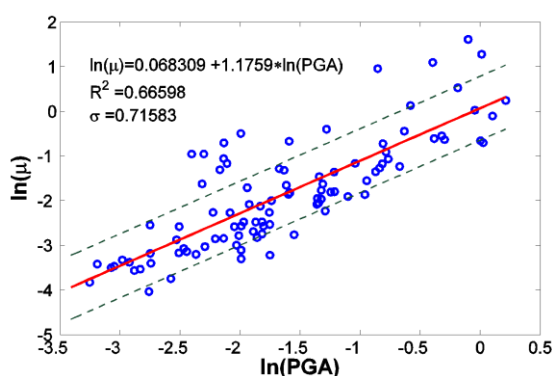
که در این رابطه S_D میانه نیاز لرزه‌ای پارامتر بحرانی، a و b ضرایب رابطه خطی که از تحلیل رگرسیون محاسبه می‌شوند و IM معیار شدت زلزله است که در این مقاله شتاب حداکثر زمین در نظر گرفته شده است.

بر این اساس مدل احتمال شرطی تقاضای لرزه‌ای به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود که احتمال فراگذشت تقاضا از یک مقدار مشخص با شرط معیار شدت زلزله خاص، بیان می‌کند

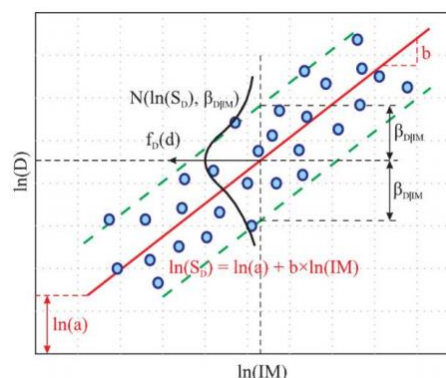
$$P[D > d|IM] = 1 - \Phi\left\{\frac{\ln d - \ln S_D}{\beta_{D|IM}}\right\} \quad (3)$$

که در آن $\beta_{D|IM}$ انحراف استاندارد نیاز لرزه‌ای به ازای معیار شدت زلزله است که از تحلیل رگرسیون بدست می‌آید و Φ تابع چگالی احتمال نرمال لگاریتمی تجمعی است.

با استفاده از همین رویه، تابع شکنندگی هر یک از اجزا پل تهیه شده است و در نهایت با ترکیب و برهم نهی نتایج شکنندگی



(ب)



(الف)

شکل ۴. الف: توسعه توزیع نرمال لگاریتمی برای نیاز لرزه‌ای، ب: مدل نیاز لرزه‌ای ستون پل چهار دهانه

در آیین نامه‌های ارزیابی لرزه‌ای، با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی برای هر عضو در هر سطح آسیب تعریف کمی‌ای ارایه شده است. به طور مثال در سطح آسیب جزئی در یک عضو اولیه پل (مثلاً ستون) فقط ترک‌های محدودی بدون تغییر شکل‌های ماندگار مشاهده می‌شود و محدودیت ترافیکی در حد تک لاین کردن مسیر و یا با اعمال محدودیت سرعت تا تعمیر

ستون‌ها در نظر گرفته خواهد شد [HAZUS, 2003].

در روش ارزیابی شکنندگی به کار گرفته شده در این مقاله، توزیع نرمال لگاریتمی برای ظرفیت اعضا یا حالات حدی تعریف شده است که در سطوح مختلف آسیب میزان میانه این مدل‌ها با یکدیگر متفاوت خواهد بود اما پراکندگی در تمام حالات حدی، طبق پیشنهاد رامناتان ۰/۳۵ است. مقادیر میانه حالات حدی در چهار سطح آسیب در جدول ۳ به تفکیک آورده شده است. به عنوان مثال، میانه ظرفیت شکل پذیری انحنایی ستون‌ها در چهار سطح آسیب جزئی، متوسط، گسترده و کامل، به ترتیب مقادیر ۱، ۲، ۳/۵ و ۵ است.

همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، برای اعضا اولیه چهار سطح آسیب ذکر شده تعریف می‌شود و برای اعضا ثانویه فقط در دو سطح آسیب حالت حدی تعریف شده است که با مطالعات گذشته و مشاهدات در زلزله‌های قبل انطباق دارد. دلیل این امر، قابل جایگزین بودن اعضا ثانویه حتی در سطح آسیب متوسط است.

در نتیجه این دو، اجزا اولیه (اصلی) خواهند بود. بقیه اجزا مورد بحث مانند کلیدهای برشی، الاستومرها، فونداسیون و کوله‌ها از اجزا ثانویه و با میزان تأثیر کمتری در آسیب‌پذیری سیستم پل دسته بندی شده‌اند.

علاوه بر این، برای اعضا اولیه آسیب در چهار سطح، جزئی، متوسط، گسترده و کامل در نظر گرفته می‌شود درحالی که اعضا ثانویه فقط در دو سطح آسیب جزئی و متوسط ارزیابی می‌شوند. هر کدام از این سطوح آسیب به صورت کیفی با توجه به محدودیتی که در کاربری پل ایجاد می‌شود در آیین نامه‌ها تعریف شده و کمی سازی شده‌اند. این چهار سطح آسیب عبارتند از:

الف: سطح آسیب جزئی که در آن عضو نیاز به تعمیر جزئی و یا بدون تعمیر قادر به بهره برداری پس از زلزله است.

ب: سطح آسیب متوسط که در آن خسارات وارده به پل عملکرد آن را تحت تأثیر قرار داده و برخی یا همه اجزا اصلی پل نیاز به تعمیر دارند اما ترافیک پل با اعمال محدودیت‌هایی همچنان قابل برقراری است.

ج: سطح آسیب گسترده که برخی نقاط پل آسیب جدی دیده و نیاز به تعمیر اساسی دارند، در این سطح آسیب از پل احتمال قطع ترافیک پل زیاد است.

د: سطح آسیب کامل که احتمال فروپاشی پل وجود دارد و بهره برداری از پل بدون نظر کارشناس امکان‌پذیر نیست، در این سطح آسیب احتمال جایگزین کردن پل بیش از احتمال تعمیر آن است.

۴-۳ توسعه منحنی‌های شکنندگی در سطح اعضا و

سیستم پل

منحنی شکنندگی اعضا مختلف پل، اطلاعات ارزشمندی در رابطه با ارزیابی و تعیین سطح بهسازی‌های لازم، بدست می‌دهد. با فرض توزیع نرمال لوگاریتمی برای نیاز لرزه‌ای و ظرفیت اعضا، منحنی شکنندگی با استفاده از فرم بسته رابطه (۴) در سطوح مختلف آسیب بدست می‌آیند. در این رابطه D و C به ترتیب معرف نیاز (تقاضا) و ظرفیت هستند، S_D و S_C میانه و همچنین β_D و β_C پراکندگی مربوط به تقاضا و ظرفیت هستند. در این رابطه DC_i نشان دهنده سطح آسیب از ۱ تا ۴ به عنوان سطوح آسیب جزئی تا کامل هستند که احتمال آسیب در هر سطح با توجه به حداکثر شتاب زمین وارد شده به پل تعیین می‌شود.

$$P[DC_i|PGA] = \Phi \left[\frac{\ln S_D / S_C}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (4)$$

با جایگذاری رابطه (۱) در رابطه (۴)، می‌توان به صورت رابطه (۵) معادله شکنندگی را باز نویسی کرد و با ساده نویسی و ادغام متغیرها، فرم بسته رابطه (۶) برای محاسبه احتمال آسیب اعضا بحرانی پل در سطوح آسیب چهارگانه با توجه به شتاب حداکثر زمین حاصل می‌شود.

$$P[DC_i|PGA] = \Phi \left\{ \frac{\ln(PGA) - [\ln(S_{Ci}) - \ln(a)]/b}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_{Ci}^2/b}} \right\} \quad (5)$$

$$P[DC_i|PGA] = \Phi \left[\frac{\ln(PGA) - \ln(\lambda_c)}{\zeta_c} \right] \quad (6)$$

رابطه (۶) که نشان دهنده احتمال آسیب پذیری هر یک از اعضا پل به صورت مستقل در یک زلزله مشخص است، در واقع یک تابع توزیع نرمال لوگاریتمی با میانه λ_c و پراکندگی ζ_c را نشان می‌دهد.

منحنی‌های شکنندگی سطح سیستم از طریق توسعه مدل نیاز لرزه‌ای احتمالاتی مشترک^{۱۷} با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی بین نیاز لرزه‌ای اعضا و تشکیل ماتریس کواریانس‌ها، حاصل می‌شود.

نیاز لرزه‌ای احتمالاتی مشترک بدست آمده سپس با مقدار توزیع ظرفیت مشترک اعضا برآورد شده با استفاده از توزیع مونت کارلو^{۱۸} مقایسه شده و مشخصات شکنندگی سیستم پل تعیین می‌گردد. همبستگی بین سطوح آسیب مربوط به هر عضو به صورت همبستگی کامل در نظر گرفته شده است در حالی که ظرفیت اعضا با ضریب همبستگی صفر لحاظ شده‌اند. نمونه‌های متعددی از هر دو مدل تقاضا و ظرفیت توسعه می‌یابند و احتمال تقاضا بیش از ظرفیت برای مقداری خاص PGA ارزیابی می‌شود. این روش برای افزایش مقادیر PGA تکرار می‌شود و در نهایت با تحلیل رگرسیون، میانه و پراکندگی تابع توزیع احتمالاتی نرمال لوگاریتمی برای شکنندگی سیستم پل بدست می‌آیند. در این روش، پل به عنوان یک سیستم سری در نظر گرفته می‌شود و توزیع‌های نرمال لوگاریتمی که همان تابع شکنندگی سیستم پل است مطابق رابطه (۷) برآورد می‌شود.

$$P[DS|PGA] = \Phi \left[\frac{\ln(PGA) - \ln(\lambda_{sys})}{\zeta_{sys}} \right] \quad (7)$$

در این رابطه λ_{sys} و ζ_{sys} به ترتیب مقادیر میانه و پراکندگی تابع توزیع احتمال شکنندگی سیستم پل هستند. چهارچوب کلی روند مورد بحث برای آنالیز شکنندگی پل‌ها که در این مقاله از آن استفاده شده‌است در شکل ۵ به صورت شماتیک نشان داده شده‌است. این چهارچوب به صورت ساده بیان می‌کند که برای تشکیل مدل شکنندگی هر یک از اعضا پل، مدل تصادفی تقاضا (حاصل از تحلیل عددی نمونه‌های تصادفی) با مدل تصادفی ظرفیت (تعیین شده توسط آیین‌نامه‌های ارزیابی لرزه‌ای) در سطوح مختلف آسیب مقایسه می‌شود و احتمال آسیب در هر مقدار از شدت زلزله مشخص می‌گردد.

۵. تفسیر نتایج در سطح اعضا و سیستم پل

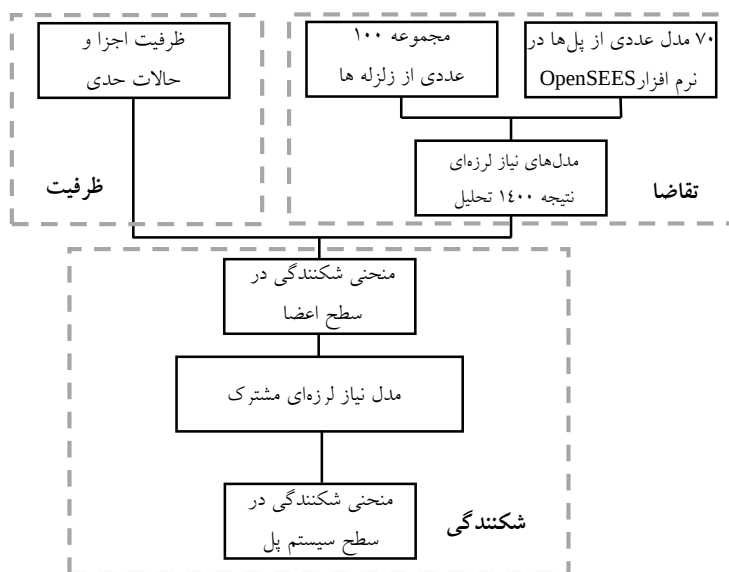
با تشکیل مدل‌های نیاز لرزه‌ای و تعیین مدل‌های ظرفیت برای اجزا پل و سیستم پل، نتایج آسیب‌پذیری اجزای مختلف پل مانند ستون‌ها، کوله‌ها، الاستومرها، کلید برشی و همچنین افتادگی عرشه در محل کوله‌ها و درز میانی به همراه منحنی شکنندگی کل

سیستم پل برای ۴ سطح آسیب جزئی، متوسط، گسترده و کامل استخراج شده است. از آنجا که در آیین نامه‌های ارزیابی شدت زلزله‌ای که منجر به احتمال خرابی ۵۰ درصد در هر عضو یا سیستم پل می‌شود معیار قابل استنادی برای ارزیابی لرزه‌ای است [HAZUS, 2003] در این مقاله در کنار منحنی‌های شکنندگی، برخی از نتایج نیز با مقایسه این پارامتر که میانه شکنندگی نام دارد ارائه شده است.

شکل ۶ مقادیر میانه شکنندگی اجزا آسیب پذیر یک نمونه پل در سطح آسیب متوسط را در دو حالت تحلیل تحت تحریک یکنواخت و تحریک چندگانه (غیریکنواخت) را نشان می‌دهد. این نمودار برای نمونه پل با شعاع دو برابر طول کل پل رسم شده است و برای دیگر نسبت‌های بین شعاع و طول پل روند مشابهی در نمودارها مشاهده شد.

جدول ۳. پارامترهای توزیع احتمالاتی حالات حدی ظرفیت

اجزا بحرانی	واحد	نوع تأثیر بر آسیب پل	آسیب جزئی	آسیب متوسط	آسیب گسترده	آسیب کامل
		میانه	پراکندگی	میانه	پراکندگی	میانه
شکل پذیری ستون	-	اولیه	۱	۰/۳۵	۲	۰/۳۵
افتادگی عرشه	mm	اولیه	۲۵	۰/۳۵	۷۵	۰/۳۵
کوله در جهت غیر فعال	mm	ثانویه	۷۵	۰/۳۵	۲۵۰	۰/۳۵
کوله در جهت فعال	mm	ثانویه	۳۸	۰/۳۵	۱۰۰	۰/۳۵
کوله در جهت عرضی	mm	ثانویه	۲۵	۰/۳۵	۱۰۰	۰/۳۵
الاستومر در جهت طولی	mm	ثانویه	۲۵	۰/۳۵	۱۰۰	۰/۳۵
الاستومر در جهت عرضی	mm	ثانویه	۲۵	۰/۳۵	۱۰۰	۰/۳۵
جابجایی عرشه	mm	ثانویه	۱۰۰	۰/۳۵	۳۰۰	۰/۳۵
درز آبیند	mm	ثانویه	۱۵	۰/۳۵	-	۰/۳۵
جابجایی در فونداسیون	mm	ثانویه	۲۵	۰/۳۵	۱۰۰	۰/۳۵
چرخش فونداسیون	rad	ثانویه	۱/۵	۰/۳۵	۶	۰/۳۵
کلید برشی	mm	ثانویه	۴۰	۰/۳۵	۱۲۵	۰/۳۵



شکل ۵. روند بکار گرفته شده برای تشکیل منحنی شکندگی در سطح اعضا و سیستم پل

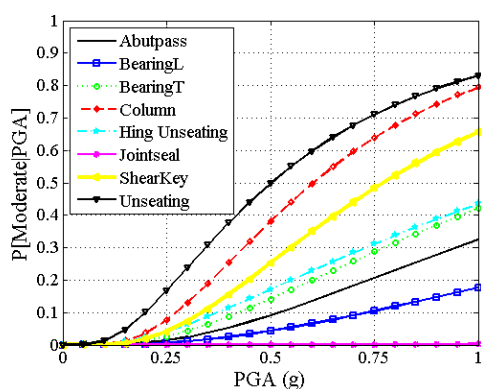
اجزا مختلف پل احتمال آسیب پذیری در آنها کاهش می یابد. با این حال از این نمودار مشاهده می شود که اکثر اجزا پل میانه شکندگی کمتر از $1.5g$ دارند که این گویای مشارکت این اجزا در آسیب پذیری سیستم پل است.

همانطور که در این نمودار مشاهده می شود، در سطح آسیب متوسط، افتادگی عرشه از کوله محتمل ترین خسارت است چرا که میانه شکندگی مربوط به این پدیده در بین دیگر اجزا پل کمترین مقدار را دارد و پس از آن احتمال آسیب پذیری در ستون ها بیشتر از دیگر اجزا است. به همین ترتیب با افزایش میانه شکندگی در



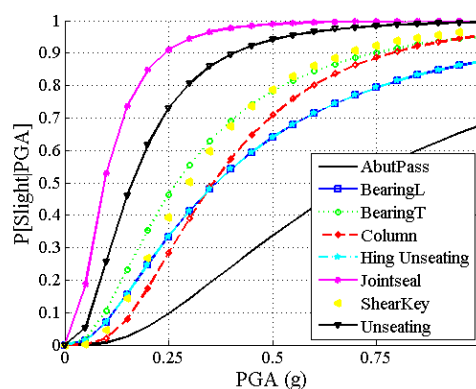
شکل ۶. میانه شکندگی اجزا پل در سطح آسیب متوسط با نسبت شعاع به طول ۲

زلزله (PGA) بر حسب شتاب گرانش زمین (g)، و محور قائم احتمال آسیب پذیری اجزا پل (P) در هر یک از شدت‌های مختلف زلزله را نمایش می‌دهند. مشاهده می‌شود در سطح آسیب جزئی، درز آبنند آسیب پذیر ترین عضو پل است در حالی که در سطوح آسیب بالاتر به ترتیب افتادگی عرشه از کوله و ستون‌ها احتمال آسیب پذیری بیشتری نسبت به دیگر اجزا خواهند داشت. سطح آسیب جزئی در درز آبنند، با رسیدن به تغییر مکان ۱۵ میلیمتر اتفاق می‌افتد که در محدوده تغییر شکل‌های الاستیک پل است بنابراین قبل از آنکه بقیه اجزای پل تغییر شکل غیر الاستیک دهند درز آبنند دچار آسیب دیدگی می‌شود. این امر به دلیل اینکه عمدتاً در پل‌ها قطعات درز آبنند به راحتی قابل تعویض می‌باشند، در محدوده زلزله‌های کوچک پذیرفته شده است (در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود که احتمال آسیب جزئی درز آبنند در زلزله‌های با شتاب نسبی بیشتر از ۰/۲۵ بالای ۹۰ درصد است). در سطوح آسیب بالاتر، اجزا ثانویه پل (طبق دسته بندی جدول ۳) به دلیل تأثیر مستقیم بر باربری ثقلی، محدودیت تغییر شکلی داشته و در ارزیابی‌ها احتمال آسیب پذیری بیشتری برای این اجزا برآورد شده است. علاوه بر این در فلسفه طراحی ظرفیتی اجزا پل، فرض بر این است که تغییر شکل‌های غیرخطی در ستون‌ها متمرکز شود بنابراین می‌توان گفت در ارزیابی‌های لرزه‌ای، بقیه اجزا تا به ظرفیت رسیدن ستون احتمال آسیب کمتری دارند.

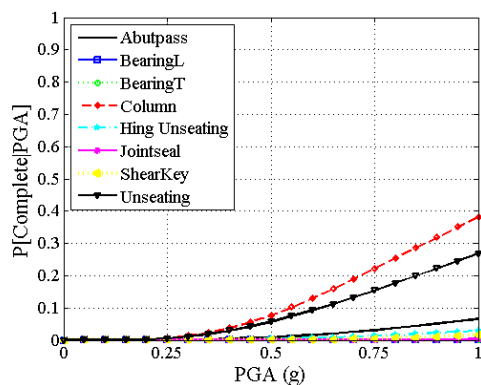


ب- آسیب دیدگی متوسط

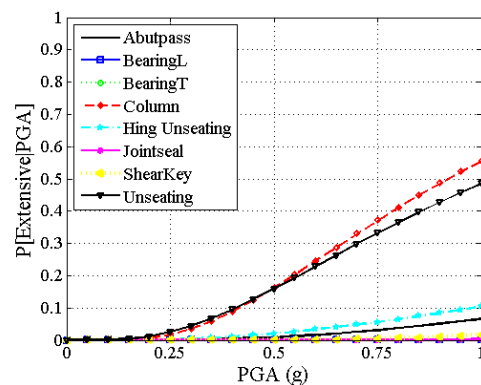
این در حال است که اکثر آیین نامه‌های ارزیابی و همچنین بسیاری از مطالعات گذشته تنها آسیب پذیری ستون را به عنوان معیار شکنندگی در نظر می‌گیرند که این امر ارزیابی آسیب پذیری را به صورت غیر واقع نشان می‌دهد. همچنین در این نمودار مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از تحلیل تحت تحریک غیریکنواخت پایه‌های پل، در بیشتر اجزا منجر به پاسخ شکننده تری نسبت به حالت تحلیل تحت تحریک یکنواخت شده‌اند. این موضوع با توجه به اینکه در تحریک غیر یکنواخت تغییر مکان‌های شبه استاتیکی سازه نسبت به تحریک یکنواخت بیشتر می‌باشد، قابل توجیه است که در این نمودار نیز عمدتاً اجزایی که معیار شکنندگی از جنس جابجایی دارند، آسیب پذیر تر از حالت تحریک یکنواخت ارزیابی شده‌اند. همانگونه که ذکر شد، در دیگر شعاع‌ها روند مشابهی مشاهده شد که در اینجا به ذکر همین یک نمونه بسنده شده‌است. از طرفی بین اجزای مختلف پل از نظر آسیب پذیری تقدم و تأخر وجود دارد، هر چند که این تقدم و تأخر در آسیب پذیری اجزا به ازای شعاع‌های مختلف عرشه تغییر چندانی نمی‌کند، اما در سطوح آسیب چهارگانه میزان آسیب پذیری اجزا نسبت به یکدیگر دچار تغییراتی می‌شود. به طور مثال در شکل ۷ منحنی شکنندگی اجزا مختلف یک نمونه پل به نسبت شعاع عرشه به طول ۱ که تحت تحریک غیریکنواخت تحلیل شده است، به تفکیک در چهار سطح آسیب ارائه شده. در این منحنی‌ها برای اجزا مختلف پل عناوینی مطابق جدول ۴ به اختصار آورده شده است. در منحنی‌های شکنندگی محور افقی حداکثر شتاب



الف- آسیب دیدگی جزئی



د- آسیب دیدگی کامل



ج- آسیب دیدگی گسترده

شکل ۷. منحنی شکنندگی اجزا پل با نسبت شعاع عرشه به طول ۱ تحت تحریک غیریکنواخت در چهار سطح آسیب: الف- آسیب جزئی، ب- آسیب متوسط، ج- آسیب گسترده و د- آسیب کامل

قابل پیشبینی نیست و لازم است که در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای کلیه اجزا مستعد آسیب، در نظر گرفته شوند. با بکارگیری رابطه (۷) و استفاده از مدل نیاز لرزه‌ای مشترک برای اجزای مختلف پل که جزئیات آن در مرجع [Padgett, 2007] مورد بررسی قرار گرفته است، آنالیز شکنندگی در سطح سیستم پل برای تمامی مدل‌های در نظر گرفته شده تشکیل شده است. نمودار شکل ۸ مقادیر میانه شکنندگی سیستم پل در سطح آسیب متوسط به ازای مقادیر مختلف نسبت شعاع به طول عرشه را نشان می‌دهد. این نمودار میانه شکنندگی در دو حالت نتایج تحلیل تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت را به ازای مقادیر مختلف نسبت شعاع به طول پل از مقدار ۰/۵ (بیشترین انحنا عرشه) تا بینهایت (پل مستقیم) را شامل می‌شود. از این نمودار به وضوح می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش انحنا در عرشه (کاهش نسبت شعاع به طول) آسیب‌پذیری پل به صورت قابل توجه افزایش می‌یابد به طوریکه در یک پل قوسی با شعاع عرشه برابر با طول آن (نسبت شعاع به طول ۱) میزان آسیب‌پذیری آن در سطح متوسط بسیار بیشتر از پل مستقیم است چرا که میانه شکنندگی مربوط به چنین پلی تقریباً نصف میانه شکنندگی پل مستقیم در این نمودار است. همچنین می‌توان بیان کرد تغییرات در میانه شکنندگی در پل‌های با انحنا بیشتر، واضح تر از تغییرات در

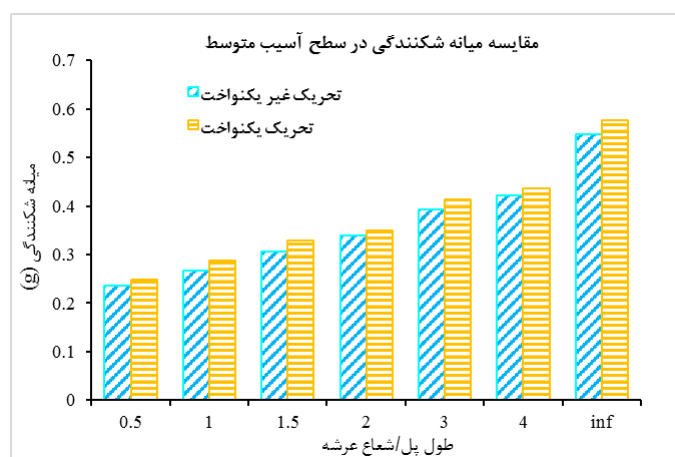
جدول ۴. اجزا آسیب‌پذیر پل و عنوان معادل آن‌ها در منحنی‌های شکنندگی ارائه شده

عنوان معادل	اجزا پل
Abutpass	جایجایی کوله، جهت مقاوم
BearingL	الاستومر کوله، جهت طولی
BearingT	الاستومر کوله، جهت عرضی
Column	ستون‌ها
Hinge Unseating	افتادگی عرشه، درز انقطاع
Jointseal	درز آببند
ShearKey	کلید برشی
Unseating	افتادگی عرشه از کوله

در سطح آسیب جزئی، برخی اجزای ثانویه مانند کلید برشی و یا الاستومرها در جهت عرضی، شکننده‌تر از ستون و افتادگی عرشه در محل درز انبساط می‌باشند در حالی که در سطوح آسیب بالاتر این روند برعکس شده و آسیب‌پذیری کلید و الاستومر از ستون کمتر می‌شود. این منحنی‌های شکنندگی بیش از پیش اهمیت لحاظ کردن آسیب‌پذیری تک تک اجزا در روند ارزیابی لرزه‌ای یک سیستم پل را نشان می‌دهد و می‌توان گفت تقدم و تأخر آسیب‌دیدگی اجزای مختلف در سطوح آسیب گوناگون

پل‌های با انحنا کمتر است. علاوه بر این در تمامی حالات شعاع قوس مختلف به وضوح مشخص است که در این سطح آسیب، میانه شکنندگی حاصل از تحلیل تحت تحریک غیر یکنواخت در هر مورد حدود ۱۰ درصد کمتر از حالت تحریک یکنواخت است و این نشان می‌دهد که ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای با لحاظ تحریکات غیر یکنواخت منجر به مقادیر بحرانی‌تری از احتمال آسیب‌پذیری سیستم پل می‌شوند. از آنجا که اعمال تحریکات زلزله به صورت غیریکنواخت و لحاظ کردن اثرات حرکت موج زلزله در فواصل بین پایه‌ها به واقعیت و ذات زلزله‌های واقعی نزدیکتر است، لذا مقادیر بدست آمده از ارزیابی آسیب‌پذیری تحت تحریکات غیر یکنواخت قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به تحریک یکنواخت دارند. لازم بذکر است که با افزایش فواصل بین پایه‌های پل و افزایش طول پل این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند چرا که تغییر خصوصیات موج زلزله از جمله دامنه و فاز نوسانات، به شدت تابع فاصله بین پایه‌های پل است. از آنجا که حداکثر دهانه پل در این مقاله طبق جدول ۱، ۵۴/۹۳ متر است تأثیرات اعمال تحریک چندگانه در این فواصل آنچنان شدید نبوده اما انتظار می‌رود با افزایش تعداد دهانه‌ها و طول پل این تأثیرات بیشتر باشد با وجود اینکه میانه شکنندگی پارامتر مناسبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری پل محسوب می‌شود اما برای تعیین میزان

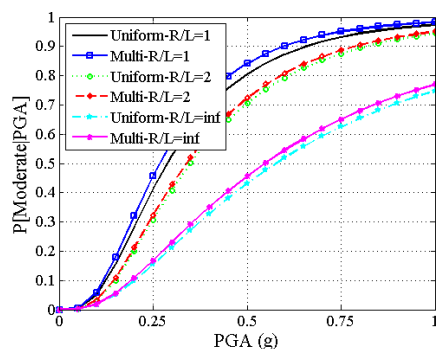
احتمال آسیب و نوع آسیب وارد بر سیستم پل به ازای شدت‌های مختلف زلزله لازم است منحنی شکنندگی برای سیستم پل در سطوح آسیب چهارگانه توسعه داده شود. شکل ۹ این منحنی‌ها را برای سه دسته از پل‌های در نظر گرفته شده در این مقاله با انحنا زیاد، متوسط و صفر (پل مستقیم) در هر دو حالت تحریک یکنواخت و غیر یکنواخت نشان می‌دهد. در این شکل از اصطلاحات **Uniform** و **Multi** به ترتیب برای مشخص کردن منحنی مربوط به تحلیل با اعمال زلزله یکنواخت و چندگانه (غیر یکنواخت) استفاده شده است. با بررسی کلی این نمودارها ابتدا نتیجه می‌شود احتمال آسیب‌پذیری پل در سطوح آسیب متوسط و بالاتر به شدت تحت تأثیر شعاع عرشه و انحنای پل است. اما در سطح آسیب جزئی مشاهده می‌شود برای زلزله‌های با شدت $0.35g$ و بیشتر، احتمال آسیب جزئی در تمام دسته‌های پل بیش از ۹۰ درصد است و حتی در زلزله‌های کوچک نیز احتمال آسیب جزئی به پل‌های با شعاع عرشه متفاوت بیش از ۶۰ درصد است. در زلزله با حداکثر شتاب $0.5g$ پل با نسبت شعاع عرشه به طول ۱، دارای احتمال ۸۰ و ۵۰ درصد بترتیب در سطح آسیب متوسط و گسترده است در حالی که پل بدون قوس در همین شدت زلزله



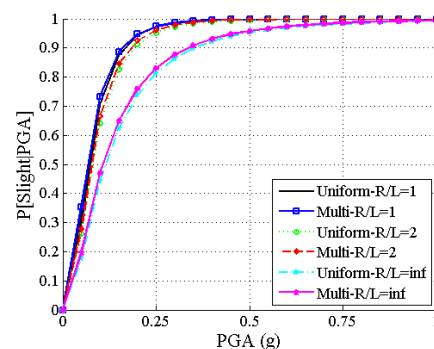
شکل ۸. میانه شکنندگی پل‌ها با نسبت شعاع عرشه به طول متفاوت در سطح آسیب متوسط و دو حالت تحلیل تحت تحریک یکنواخت و غیر یکنواخت

محدود بودن طول پل‌های مورد ارزیابی در این مقاله (بین ۱۳۲ تا ۲۲۰ متر) تأثیر اعمال زلزله به صورت تحریکات غیریکنواخت در سطوح آسیب متوسط و بالاتر به وضوح قابل مشاهده است. برای دیگر شعاع‌های عرشه روند منحنی‌های شکنندگی، مشابه آنچه ذکر شد بوده و مقادیر میانه شکنندگی آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

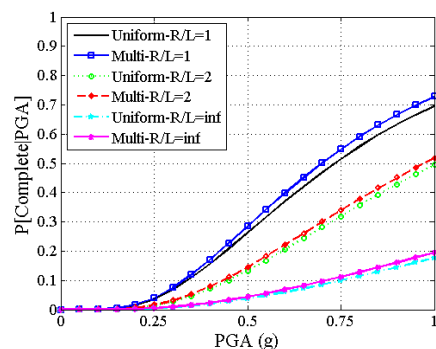
احتمال ۴۵ و ۱۲ درصد بترتیب در سطح آسیب متوسط و گسترده را نشان می‌دهد. علاوه بر این از بررسی شکل ۸ مشاهده می‌شود در همه حالات منحنی شکنندگی حاصل از اعمال تحریک غیریکنواخت قدری بالاتر از منحنی حاصل از اعمال تحریک یکنواخت است که این موضوع نیز نشان می‌دهد تحت تحریک چندگانه رفتار پل قدری شکننده تر ارزیابی می‌شود. با وجود



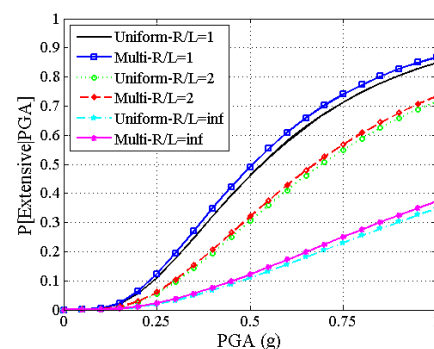
ب- سطح آسیب متوسط



الف- سطح آسیب جزئی



د- سطح آسیب کامل



ج- سطح آسیب گسترده

شکل ۹. منحنی شکنندگی سیستم پل با سه نسبت شعاع عرشه به طول ۱، ۲ و بینهایت (پل مستقیم) با لحاظ تحریکات یکنواخت و غیر یکنواخت در چهار سطح آسیب: الف- آسیب جزئی، ب- آسیب متوسط، ج- آسیب گسترده و د- آسیب کامل

جدول ۵. میانه شکنندگی حالات مختلف تحلیل در چهار سطح آسیب و در شعاع‌های مختلف عرشه بر حسب g

سطح آسیب	جزئی		متوسط		گسترده		کامل	
	یکنواخت	غیر یکنواخت	یکنواخت	غیر یکنواخت	یکنواخت	غیر یکنواخت	یکنواخت	غیر یکنواخت
نسبت شعاع عرشه به طول	۰/۵	۰/۰۵۸	۰/۰۴۳	۰/۲۴۸	۰/۲۳۵	۰/۴۵۵	۰/۳۸۷	۰/۶۱۸
۱	۰/۰۷۰	۰/۰۶۵	۰/۲۸۸	۰/۲۶۷	۰/۵۳۲	۰/۵۰۷	۰/۷۳۴	۰/۶۹۹
۱/۵	۰/۰۷۳	۰/۰۶۹	۰/۳۲۸	۰/۳۰۷	۰/۶۴۸	۰/۵۹۳	۰/۹۳۲	۰/۸۹۷

۰/۹۷۴	۱/۰۰۷	۰/۶۷۳	۰/۶۹۹	۰/۳۳۹	۰/۳۵۰	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۲
۱/۲۰۵	۱/۲۶۶	۰/۸۲۵	۰/۸۶۵	۰/۳۹۳	۰/۴۱۳	۰/۰۸۳	۰/۰۸۸	۳
۱/۳۷۶	۱/۴۰۶	۰/۹۲۷	۰/۹۴۹	۰/۴۲۲	۰/۴۳۷	۰/۰۸۶	۰/۰۹۱	۴
۲/۰۱۳	۲/۱۲۹	۱/۳۰۸	۱/۳۸۰	۰/۵۴۷	۰/۵۷۷	۰/۱۰۷	۰/۱۱۵	بینهایت

بار زلزله در دو حالت مجزا، یکی اعمال یکنواخت زلزله به همه پایه های پل و دیگری اعمال تحریکات غیر یکنواخت با لحاظ کردن اثر حرکت موج زلزله در خاک حد فاصل بین پایه ها، در نظر گرفته شده و نتیجه ارزیابی شکنندگی حاصل از هر دو نوع اعمال تحریک زلزله ارائه شده است. نتایج زیر در این مقاله قابل توجه است:

- اکثر آیین نامه های ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای مانند HAZUS فقط دریف ستون را به عنوان معیار شکنندگی پل لحاظ میکنند در حالیکه هر یک از اجزای مختلف پل در آسیب پذیری پل سهیم بوده و در نظر گرفتن صرفاً یک مولفه (مثلاً دریف یا شکل پذیری ستون ها) به عنوان معیار آسیب پذیری کل سیستم پل مناسب نیست.

- برای پل با شعاع عرشه دو برابر طول پل مقادیر میانه شکنندگی ستون در چهار سطح آسیب به ترتیب برابر مقادیر ۰/۳۶، ۰/۶۰، ۰/۹۲ و ۱/۲۱ بر حسب g هستند در حالی که میانه شکنندگی سیستم این پل در همان چهار سطح آسیب به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۳۴، ۰/۶۷ و ۰/۹۷ بر حسب g محاسبه شده است.

- آسیب پذیری اجزای مختلف پل نسبت به یکدیگر در سطوح آسیب چهارگانه ثابت نیست. در سطح آسیب جزئی درز آبند آسیب پذیرترین عضو پل است و پس از آن افتادگی عرشه و کلید برشی، در حالی که در سطح آسیب متوسط ستون ها آسیب پذیر تر از سایر اجزا ارزیابی شده اند.

- با افزایش انحنای عرشه پل احتمال آسیب پذیری اجزا و سیستم پل بیشتر می شود در حالیکه در آیین نامه ها ارزیابی شکنندگی لرزه ای در این کلاس پل در نظر گرفته نمی شود.

نتایج ارزیابی آسیب پذیری تمامی گروه پل های مورد مطالعه در این مقاله، در جدول ۵ با بیان مقدار میانه شکنندگی آورده شده اند. مقادیر میانه شکنندگی در سطوح آسیب مختلف گویای افزایش آسیب پذیری سیستم پل با افزایش انحنای عرشه آن هستند. علاوه بر آن مقادیر میانه حاصل از تحریک غیر یکنواخت کمتر از حالت تحریک یکنواخت محاسبه شده که در تمام سطوح آسیب این تفاوت ظاهر شده است.

با بررسی میانه شکنندگی پل ها در سطح آسیب متوسط مشاهده می شود که پل های با شعاع عرشه کمتر از دو برابر طول پل عمدتاً میانه شکنندگی کمتر از 0.35g دارند که از این امر می توان نتیجه گرفت که اگر این کلاس پل در منطقه ای با خطر لرزه خیزی شدید در ایران ساخته شده باشد، احتمال آسیب دیدگی آن در سطح آسیب متوسط بیش از ۵۰ درصد خواهد بود اما در سطوح بالاتر آسیب احتمال خرابی این کلاس پل کمتر از ۵۰ درصد برآورد می شود. به عنوان مثالی دیگر از مقایسه میانه شکنندگی ها در جدول ۵ می توان گفت این کلاس پل در مناطق با خطر لرزه خیزی کم در ایران احتمال آسیب متوسط در آنها کمتر از ۵۰ درصد است.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از نتایج تحلیل تاریخچه زمانی بر روی مدل های سه بعدی غیر خطی با مشخصات هندسی و مکانیکی تصادفی، مدل های نیاز لرزه ای احتمالاتی به صورت توابع نرمال لگاریتمی تهیه شده اند. با مقایسه نیاز لرزه ای و مدل احتمالاتی ظرفیت اجزا مختلف پل که خود نیز توابع احتمالاتی با توزیع نرمال یا نرمال لگاریتمی می باشند، منحنی های شکنندگی در سطح اجزا و سیستم پل تهیه شده است. در این مقاله نحوه اعمال فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره اول (۴۶) / پاییز ۱۳۹۹

18. Monte Carlo

۷. مراجع

- پهلوان، حسین (۱۳۹۴) "توسعه منحنی های شکنندگی لرزه ای برای پل های قوسی شکل عرشه باکس بتن آرمه" پایان نامه دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- ذاکری، بهزاد (۱۳۹۲) "بررسی آسیب پذیری پل های بتنی مورب مقاوم سازه شده با استفاده از روش های احتمالاتی" پایان نامه دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- عابدینی، محمد جواد (۱۳۹۲) "بررسی آسیب پذیری لرزه ای پل های قوسی بتنی چند قابی با استفاده از منحنی های شکنندگی" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-Abbasi, M., Zakeri, B. and Ghodrati Amiri, Gh. (2015) "Probabilistic Seismic Assessment of Multiframe Concrete Box-Girder Bridges with Unequal-Height Piers", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 30, No. 2, pp. 04015016-1-9.

-Adanur, S., Altunisik, A. C., Soyluk, K., Bayraktar, A. and Dumanoglu, A. (2016) "Multiple-support seismic response of Bosphorus Suspension Bridge for various random vibration methodsPiers", Journal of Case Study in Structural Engineering, Vol. 5, No. 1, pp.54-67.

-Baker, J. W., Ling, T., Shahi, S. K. and Jayaram, N. (2011) "New Ground Motion Selection Procedures and Selected Motions for the PEER Transportation Research Program", Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, CA.

-Choi, E. (2002) "Seismic analysis and retrofit of mid-America bridge", Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

-Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O. and Foutch, D. A. (2002) "Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره اول (۱۳۹۹/پاییز

- با کاهش شعاع عرشه از مقدار بینهایت (پل مستقیم) تا شعاعی برابر نصف طول پل در سطح آسیب متوسط میانه شکنندگی ۵۷ درصد کاهش می یابد که در سطوح آسیب گسترده و کامل این عدد به ترتیب مقادیر ۶۷ و ۷۱ کاهش در میانه شکنندگی نسبت به پل مستقیم را نشان می دهد.

- با اعمال تحریکات غیریکنواخت (چندگانه) نسبت به حالت اعمال زلزله یکنواخت به همه پایه ها، میانه شکنندگی پل در سطوح آسیب مختلف بین ۴ تا ۱۰ درصد کاهش را نشان می دهد. این کاهش به این معنی است که ارزیابی شکنندگی بدون در نظر گرفتن اثر تحریکات چندگانه مقادیر دست پایین از آسیب پذیری ارائه می کند.

- آسیب پذیری پل های مستقیم و پل های قوسی تقریباً به یک میزان حساسیت نسبت به نحوه اعمال زلزله یکنواخت و چندگانه دارند.

- در سطح آسیب جزئی می توان از در نظر گرفتن تأثیر شعاع قوس و اثر تحریکات چندگانه در ارزیابی این کلاس پل صرف نظر کرد.

۷. پی نوشت ها

1. Caltrans
2. AASHTO
3. National Bridge Inventory
4. Latin-Hypercube Technique
5. OpenSEES
6. Ramanathan
7. Zero-Length
8. Passive
9. Elastic Beam-Column Element
10. Landers
11. Calton
12. SAC
13. Uniform Excitation
14. Multi Support Excitation
15. Engineering Demand Parameter (EDP)
16. Intensity measure (IM)
17. Joint Probabilistic Seismic Demand Model (JPSDM)

Engineering Structural Dynamics, Vol. 35, pp. 891–919.

-Loh, C.H. and Yeh, Y.T. (1988) "Spatial variation and stochastic modeling of seismic differential ground movement", Journal of Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. 16, No. 4, pp. 583–596.

-Mangalathu, S., Choi, E., Park, H.C. and Jeon, J.S. (2018) "Probabilistic Seismic Vulnerability Assessment of Horizontally Curved Concrete Bridges in California", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 32, No. 6, pp. 04018080-1-11.

-Mangalathu, S., Jeon, J.S. and Jiang J. (2019) "Probabilistic Seismic Vulnerability Assessment of Horizontally Curved Concrete Bridges in California", Journal of Bridge Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 04015016-1-11.

-NBI (National Bridge Inventory) (2010) "National bridge inventory data ", U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC

-Pahlavan, H., Zakeri, B., Ghodrati Amiri, Gh. and Shayanfar, M. (2014) "Probabilistic Vulnerability Assessment of Horizontally Curved Multiframe RC Box-Girder Highway Bridges", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 30, No. 3, pp. 04015038-1-12

-Padgett, J. E. (2007) "Seismic vulnerability assessment of retrofitted bridges using probabilistic methods" Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

-Padgett, J. E., Nielson, B. G. and DesRoches, R. (2008) "Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios", Journal of Earthquake

Agency steel moment frame guidelines", Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 4, pp. 526–533.

-Ellingwood, B. and Hwang, H. (1985) "Probabilistic descriptions of resistance of safety related structures in nuclear plants", Nuclear Engineering and Design, Vol. 88, No. 2, pp. 169–178.

-Falamarz-Sheikhabadi, M. R. and Zerva A. (2016) "Analytical Seismic Assessment of a Tall LongSpan Curved Reinforced-Concrete Bridge. Part II: Structural Response" Journal of Earthquake Engineering, Vol. 21, No. 8, pp. 1335-1364.

-HAZUS (2003), MH MR4 technical manual: Multi-hazard loss estimation methodology earthquake model, Department of Homeland Security Emergency Preparedness and Response Directorate, FEMA Mitigation Div., Washington, DC.

-Jeon, J. S., DesRoches, R., Kim, T. and Choi, E. (2016) "Geometric parameters affecting seismic fragilities of curved multi-frame concrete box-girder bridges with integral abutments", Published in Journal of Engineering Structures, Vol. 122, pp.121-143

-Jeon, J. S., Shafieezadeh, A. and DesRoches, R. (2015) "System Fragility Curves for a Long Multi-Frame Bridge under Differential Support Motions", 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12 Vancouver, Canada: 12-15 July 2015.

-Khanmohammadi, M., Abbasloo, A. and Valadi, E. (2016) "Enhancing shear strength of cap beam–column joints in existing multicolumn bent bridges using an innovative method", Published in Journal Bridge Engineering, Vol. 21, No. 12, pp.1-14

-Liao, S. and Zerva, A. (2006) "Physically compliant, conditionally simulated spatially variable seismic ground motions for performance-based design", Earthquake

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره اول (۴۶) / پاییز ۱۳۹۹

frame concrete box girder bridges" Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 28, No. 3, pp. 571-582.

-Zhong, J., Jeon, J.S., Yuan, W. and Desroches, R. (2017) "Impact of spatial variability parameters on seismic fragilities of a cable-stayed bridge subjected to differential support motions", Journal of Bridge Engineering, Vol. 22, No 6, pp. 04017013-1-15.

-Zhong, J., Jeon, J. S. and Ren, W. (2018) "Risk assessment for a long-span cable-stayed bridge subjected to multiple support excitations", Journal of Engineering. Structures, Vol. 176, pp. 220-230.

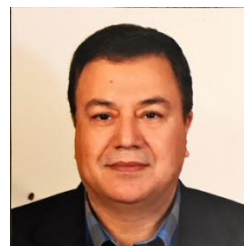
Engineering and Structural Dynamics, Vol. 37, No. 5, pp. 711-725.

-Ramanathan, N.K. (2012) "Next generation seismic fragility curves for California bridges incorporating the evolution in seismic design philosophy", Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

-Shamsabadi, A., Khalili-Tehrani, P., Stewart, J. P. and Taciroglu, E. (2010) "Validated simulation models for lateral response of bridge abutments with typical backfills", Journal of Bridge Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 302-311.

-Zakeri, B., Padgett, J. E. and Ghodrati Amiri, Gh. (2014) "Fragility analysis of skewed single

محسنعلی شایانفر، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۶۵ از دانشگاه سیستان و بلوچستان و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-سازه در سال ۱۳۶۸ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۷۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران سازه از دانشگاه مک گیل کانادا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ارزیابی قابلیت اطمینان سازه ها بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



اسدالله عباسلو، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-سازه در سال ۱۳۹۲ را از دانشگاه تهران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ارزیابی و بهسازی لرزه ای پل بوده و در حال حاضر دانشجوی دکتری سازه در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



حسین پهلوان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه گیلان و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-زلزله در سال ۱۳۸۶ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران زلزله از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ارزیابی لرزه ای سازه ها بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.

