

توسعه منحنی های شکنندگی و ارزیابی مقادیر حالات حدی عملکرد لرزه ای پل بهینه بتن مسلح با عرشه نیمه جداسازی شده

حمید گنجه ای

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

پنাম زرفام*

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

محسن غفوری آشتیانی

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

چکیده

در این تحقیق، پل معروف چند دهانه بزرگراهی که بر اساس نتایج تحقیقات قبلی مؤلفان، دارای عرشه نیمه جداسازی شده و مشخصات طراحی جداساز و پایه بتن مسلح بهینه شده است، در نظر گرفته شده است. با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده، با انتخاب دو مورد تغییر مکان عرشه نیمه جداسازی شده و تغییر مکان جداساز یا کرنش برشی جداساز، اقدام به ترسیم منحنی های تحلیل دینامیکی فزاینده، تحت اثر شتاب نگاشت های حوزه دور پیشنهاد شده در FEMA P695 شده است. سپس، ضمن اجرای تحلیل شکنندگی بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده، تعیین منحنی های شکنندگی برای تغییر مکان عرشه نیمه جداسازی شده و تغییر مکان جداساز یا کرنش برشی جداسازها در دو وضعیت زلزله طولی و عرضی پل انجام شده و با توجه به این منحنی ها، مقادیر مربوط به حالات حدی عملکردی برای فروریزش یا تخریب سازه ای، ایمنی جانی، تخریب متوسط و قابل تعمیر، خرابی کم و اولین تسلیم تعیین و پیشنهاد شده است.

واژه های کلیدی: پل با عرشه نیمه جداسازی شده، تحلیل دینامیکی فزاینده، منحنی شکنندگی، یا تاق هسته سری.

۱- مقدمه

که توان محاسباتی بالا و زمان زیاد تحلیل ها، از دلایل عدم برتری این روش خواهد بود.

در این پژوهش برای پارامتر تقاضای مهندسی Engineering Demand Parameter (EDP) از تغییر مکان عرشه نیمه جداسازی شده استفاده شده است. همچنین برای پارامتر ظرفیت مهندسی از شتاب طیفی رکورد در پریود مود اول سازه پل با عرشه نیمه جداسازی شده $S_a(T_1, \xi)$ استفاده شده است. ثابت شده است که استفاده از این پارامتر باعث کم شدن پراکندگی نتایج و شکل های خروجی IDA خواهد بود.

در این تحقیق، از الگوریتم هانت-فیل برای ترسیم منحنی IDA سازه پل نیمه جداسازی شده استفاده شده است.

همچنین، تغییر مکان عرشه نیمه جداسازی شده u_d تحت هر سطح معیار ظرفیت S_a از زلزله خاص، محاسبه می شود. این روند با افزایش S_a تا ناپایداری سازه یا رسیدن سازه به سناریوی شکست گفته شده ادامه یافته و سپس برای تمامی ۴۲ شتاب نگاشت در نظر گرفته شده در این تحقیق تکرار می شود. با داشتن مقادیر حاصله اقدام به ترسیم منحنی فزاینده دینامیکی میانه ۵۰٪ (تغییر مکان در مقابل شتاب طیفی) برای سازه پل نیمه جداسازی شده می شود.

۳- تحلیل شکنندگی

منحنی های شکنندگی، ابزارهای مفید و قدرتمند برای ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه ای می باشند. منحنی شکنندگی لرزه ای نشان داده شده در معادله ۱ احتمال تجاوز پارامتر تقاضای مهندسی از ظرفیت سازه در هر حالت خسارت (به عنوان مثال در این تحقیق، فروپاشی) تحت یک سطح IM از حرکت زمین است.

$$Fragility = P(\text{Demand} \geq \text{Capacity} | \text{IM}) \quad (1)$$

سه روش برای ترسیم منحنی های شکنندگی وجود دارد: تجربی، تحلیلی و ساده شده. این تحقیق با استفاده از روش ساده شده تحلیل های دینامیکی فزاینده IDA انجام شده است.

محققان زیادی تلاش نمودند و روش هایی برای رسیدن به منحنی شکنندگی در سازه های خاص و من جمله در سازه های ساختمانی را پیشنهاد دادند. کریم و یامازاکی [۲] برای اولین بار، روش محاسبه تابع شکنندگی با استفاده از نقاط فروپاشی در تحلیل IDA را برای سطوح مختلف ظرفیت و تقاضای لرزه ای پیشنهاد نمودند. در ادامه، ژانگ و هو [۳] اقدام به ترسیم منحنی شکنندگی برای

در دهه های اخیر استفاده از سیستم های جداسازی لرزه ای برای سازه های مهم و با ارتفاع زیاد عمومیت یافته و طراحان به خصوص پس از زلزله های نورث ریج و کوبه و چی چی و کریسچرچ در مناطق لرزه خیز به استفاده از این ادوات روی آورده اند. پل ها به عنوان یکی از سازه های ضروری و بحرانی برای عملکرد بی وقفه پس از وقوع زلزله، شناخته شده و در حال حاضر در تقریباً تمامی پل ها از ادوات جداسازی لرزه ای برای مقاوم سازی پل های موجود و بهینه سازی طراحی لرزه ای پل های جدید استفاده می شود. لذا ارزیابی عملکرد لرزه ای پل های جداسازی شده برای اطمینان از صحت عملکرد آنها و قابلیت اعتماد آنها ضروری می باشد.

بیشترین تعداد ادوات جداسازی لرزه ای اجرا شده در کل جهان را جداساز لرزه ای لاستیکی با هسته سربی به خود اختصاص داده است. به این دلیل از این نوع جداساز در این تحقیق استفاده شده است. از جمله مزایای این جداساز، غیر خطی بودن شدید با وجود هسته سربی و نیروی مقاوم بازگشتی آن می باشد.

در این تحقیق با استفاده از نتایج پژوهش های پیشین انجام شده توسط مؤلفین، عرشه پل جداسازی شده است و جداسازهای لرزه ای لاستیکی با هسته سربی در تراز زیر عرشه و بالای بنت بتن مسلح قرار داده شده اند. همچنین از نتایج پژوهش های پیشین مشخص شده است که بهینه سازی طرح پایه ها و جداسازها با قرار دادن جداسازها در زیر تیرهای دهانه میانی پل سه دهانه در نظر گرفته شده در این تحقیق انجام می شود. لذا جداسازها تنها در دهانه میانی قرار داده شده و برای دهانه های کناری از تکیه گاه الاستومری نئوپرن استفاده شده است و عرشه با نام عرشه نیمه جداسازی شده نامگذاری شده است.

۲- تحلیل دینامیکی فزاینده

تحلیل دینامیکی فزاینده برای اولین بار توسط وامواتسیکوس و کرنل [۱] پیشنهاد شد و ارتباط بین ظرفیت و تقاضای لرزه ای توسط رسم منحنی به نام منحنی Incremental Dynamic Analysis (IDA) نشان داده شد. پژوهشگران متعدد در ادامه کار ایشان را بر اساس مفاهیم طراحی لرزه ای بر مبنای عملکرد سازه ای سازه ادامه دادند. لازمه اجرای تحلیل دینامیکی فزاینده، انجام تعداد زیادی تحلیل های دینامیکی تاریخچه زمانی می باشد

پجت و دس روشه [۱۰] اقدام به اجرا و ترسیم منحنی های شکنندگی تحلیلی بر روی پل مقاوم سازی شده با پنج روش مختلف نمودند. ایشان اعلام نمودند که مقاوم سازی پل در نظر گرفته شده باعث افزایش ایمنی در بعضی اجزای پل و ثابت ماندن یا کاهش ایمنی در بعضی دیگر از اجزای پل شده است. اثر مقاوم سازی بر عملکرد لرزه ای کلی پل نیز به حالت خرابی مورد نظر بستگی دارد.

لایه های خاک سایت نیز ممکن است بر پاسخهای پل های جداسازی شده تاثیر گذارد. الموس و همکاران [۱۱] اثر LRB بر خصوصیات پاسخ های لرزه ای پل در شرایط خاک سخت و خاک متوسط را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حتی در لایه های خاک متوسط، سیستم جداسازی مؤثر بود.

۴- فرمولاسیون محاسبات آماری

احتمال تجمعی وقوع خسارت P_f ، مساوی یا بالاتر از رتبه آسیب R داده شده به صورت زیر:

$$P_f(\geq R) = \Phi[(\ln S_a - \lambda_{Sa}) / \xi_{Sa}] \quad (2)$$

که در آن Φ تابع توزیع نرمال استاندارد، S_a شتاب طیفی در پرورد مود اول سازه و میرایی آن، λ_{Sa} و ξ_{Sa} میانگین و انحراف معیار $\ln S_a$ هستند و برای هر حالت خسارت، از محاسبات آماری قابل تعیین هستند.

۵- سناریوی شکست و فروریزش سازه ها

سه سناریوی فروریزش سازه پل با عرشه نیمه جداسازی شده و سازه های یک درجه آزاد معادل مودی در نظر گرفته شده است:

الف- سختی سازه به ۲۰٪ سختی اولیه برسد.

ب- تغییر مکان جانبی عرشه پل با عرشه جداسازی شده به ۱۵ سانتیمتر (فاصله موجود در کلید برشی و فاصله بین تیرهای پیش تنیده عرشه برای عدم ایجاد ضربه و در تطابق با تحلیل IDA برسد.

پ- سازه به ناپایداری دینامیکی برسد و دچار عدم همگرایی عددی شود.

۶- زلزله های در نظر گرفته شده در تحقیق

بر اساس مشخصات سازه ای پل با عرشه نیمه جداسازی شده ۲۱ زلزله حوزه دور معرفی شده توسط نشریه FEMA P695 انتخاب

حالت های مختلف عملکردی با استفاده از تحلیل IDA برای یک پل تک پایه چند دهانه با عرشه جعبه ای که با ادوات جداسازی مقاوم سازی نموده بودند، کردند.

سپس، رحمان بویان و شهریا علم [۴] با استفاده از مدل دو بعدی و بیست شتاب نگاشت، اقدام به ارزیابی شکنندگی لرزه ای و ترسیم منحنی شکنندگی برای پل سه دهانه مقید شده با SMA و از پایه جداسازی شده نمودند. ایشان حالات حدی مختلف در نظر گرفته و نتیجه گیری نمودند که استفاده از قیود SMA باعث افزایش آسیب پذیری لرزه ای پل می شود و استفاده از جداسازی پایه توسط LRB بسیار زیاد از آسیب پذیری لرزه ای پل می کاهد. آگوتیر و آلمازون [۵] در مقاله ای به بررسی کاهش پتانسیل خسارت سازه های غیرخطی بهینه با کنترل غیر فعال پرداختند و با استفاده از دستگاه های اتلاف انرژی و اضافه کردن میرایی به سیستم های یک درجه آزاد غیر خطی و دو درجه آزاد غیر خطی و در نهایت قاب هشت طبقه واقعی، نتیجه گیری نمودند که نیروی برش پایه طراحی ناشی از سازه های محافظت شده لرزه ای کم میشود. همچنین تحلیل عملکرد سازه از طریق انجام تحلیل دینامیکی فزاینده و استفاده از شاخص خسارت پارک و آنگ و ترسیم منحنی های شکنندگی را اجرا نمودند. برای این امر، ایشان مجموعه ای از ۴۲ شتاب نگاشت ثبت شده در زلزله با بزرگای ۸٫۸ ۲۰۱۰ Maule شیلی برای پانزده شدت در حال افزایش را در نظر گرفتند.

هان و همکاران [۶] ریسک لرزه ای ساختمان های بتن مسلح غیر شکل پذیر جداسازی پایه شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و ترکیب زلزله اصلی-پس لرزه را محاسبه نمودند و پس از مدل سازی قاب دو بعدی ساختمانی در نرم افزار OpenSEES اقدام به ترسیم منحنی های شکنندگی نموده و در انتها نتیجه گیری نمودند که در نظر گرفتن پس لرزه باعث افزایش تقاضای لرزه ای و ریسک ساختمان می شود.

تحلیل شکنندگی لرزه ای پل ها در مقالاتی دیگر با ارائه منحنی های شکنندگی مربوطه ارائه شده است. [۷، ۸، ۹]

در مورد استفاده از جداساز LRB در مقاوم سازی پل ها، ثابت شده است که ادوات جداسازی که برای مقاوم سازی سازه در برابر حرکات حوزه نزدیک و خصوصاً حوزه دور زمین دارای عملکرد مناسب است، جداساز LRB است.

شده [۱۲] و رکوردهای مربوطه از سایت PEER [۱۳] استخراج شد و آماده سازی رکوردها برای استفاده در تحقیق کنونی انجام شده است. در جدول ۱ مشخصات زلزله های در نظر گرفته شده ارائه شده است. لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن دو جهت زلزله های در نظر گرفته شده، مجموعاً ۴۲ شتاب نگاشت برای انجام امور این تحقیق استفاده شده است.

۷- مدل تحلیلی

پل اصلی (قبل از بهینه سازی) بررسی شده در این مطالعه، با توجه به فهرست موجودی پل ملی آمریکا (NBI)، بالاترین تعداد ساخته شده در سراسر ایالات متحده، ۳۰۹۲۳ پل که ۱۸٫۹٪ از کل است [۱۴]. مشخصات عمومی این پل که در اکثر ادبیات تحقیق به سادگی تکیه گاه ساده چند دهانه (Multi Span Simply Support) نامیده می شود، یا به طور مختصر به صورت MSSS بیان می شود، در زیر در جدول ۲ و شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح پل

مشخصه	نماینه	مقدار	واحد
مدول برشی لاستیک	G	۱	مگاپاسکال
تنش تسلیم فولاد	F _{ys}	۲۴۰	مگاپاسکال
تنش تسلیم میلگرد	F _y	۴۱۴	مگاپاسکال
ضریب الاستیته فولاد	E _s	۲*۱۰ ^۵	مگاپاسکال
مقاومت مشخصه بتن	f _c	۲۸	مگاپاسکال
ضریب الاستیته بتن	E _c	۲۵۲۶۷	مگاپاسکال

عرض هر دهانه ۱۵٫۰۱ متر است که از هشت تیر پیش تنیده نوع ۲ آشتو ساخته شده است. تیرهای دهانه های کناری تیرهای نوع یک آشتو هستند که بر روی کوله انتهایی دارای شمع در یک انتها و یک بنت چند ستونی در انتهای دیگر تحمل می شوند. دهانه میانی با بهره گیری از تیرهای نوع آشتو که به طور کامل توسط دو بنت چند ستونی پشتیبانی می شوند. یاطاقان برای این پل، LRB می باشد. مقاومت طراحی برای بتن ۲۰٫۷ مگاپاسکال فرض می شود و آرماتورها دارای مقاومت تسلیم ۴۱۴ مگاپاسکال است. ویژگی های این جزئیات ستون از یک تحقیق از پل های موجود و همچنین از کار انجام شده توسط نیلسون است [۱۴].

جدول ۱- زلزله های در نظر گرفته شده در این تحقیق

ردیف	جهت های متعامد	رویداد	کمترین مدت فرکانس (هرتز)	مدت (ثانیه)	شماره رکورد
۱	۰۰۹/۲۷۹	نورث ریج	۰٫۲۵	۲۰	۹۵۳
۲	۰۰۰/۲۷۰	نورث ریج	۰٫۱۳	۲۰	۹۶۰
۳	۰۰۰/۰۹۰	دوزجه	۰٫۰۶	۱۲	۱۶۰۲
۴	۰۰۰/۰۹۰	هکتور	۰٫۰۴	۱۰	۱۷۸۷
۵	۲۶۲/۳۵۲	ایمپریال ولی	۰٫۰۶	۱۳-۵	۱۶۹
۶	۱۴۰/۲۳۰	ایمپریال ولی	۰٫۲۵	۱۳-۵	۱۷۴
۷	۰۰۰/۰۹۰	کوبه	۰٫۱۳	۲۰	۱۱۱۱
۸	۰۰۰/۰۹۰	کوبه	۰٫۱۳	۲۰	۱۱۱۶
۹	۱۸۰/۲۷۰	کوجاعلی	۰٫۲۴	۳۷	۱۱۵۸
۱۰	۰۰۰/۰۹۰	کوجاعلی	۰٫۰۹	۳۷	۱۱۴۸
۱۱	۲۷۰/۳۶۰	لندرز	۰٫۰۷	۳۰	۹۰۰
۱۲	LN/TR	لندرز	۰٫۱۳	۳۰	۸۴۸
۱۳	۰۰۰/۰۹۰	لوماپریتا	۰٫۱۳	۱۵-۸	۷۵۲
۱۴	۰۰۰/۰۹۰	لوماپریتا	۰٫۱۳	۱۵-۸	۷۶۷
۱۵	L/T	منجیل	۰٫۱۳	۶۰	۱۶۳۳
۱۶	۰۰۰/۰۹۰	سوپراستیشن هیلز ۲	۰٫۱۳	۹	۷۲۱
۱۷	۲۷۰/۳۶۰	سوپراستیشن هیلز ۲	۰٫۲۵	۹	۷۲۵
۱۸	E/N	چی چی	۰٫۰۵	۳۰	۱۲۴۴
۱۹	E/N	چی چی	۰٫۰۵	۳۰	۱۴۸۵
۲۰	۰۹۰/۱۸۰	سن فرناندو	۰٫۲۵	۱۲	۶۸
۲۱	۰۰۰/۰۹۰	فریولی	۰٫۱۳	۳۰	۱۲۵

۷-۱- اعتبارسنجی مدل

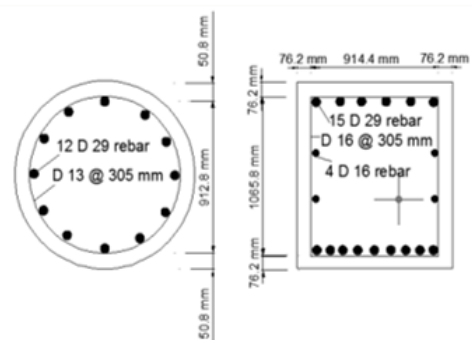
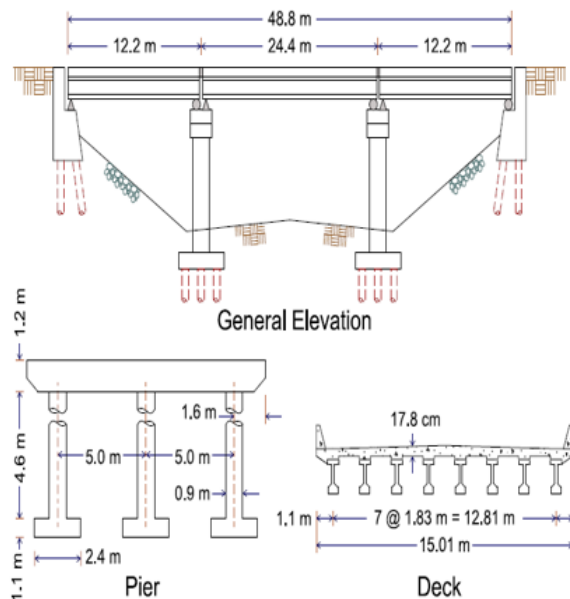
مشخصات دقیق این پل مشابه مرجع ۱۴ در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج خروجی تحلیل مودهای پل ذکر شده در مرجع فوق، اولین مود ارتعاش پل برای ارتفاع پایه خالص ۴,۶ متر برابر ۰,۶۲ ثانیه در جهت طولی است و دوره تناوب مود دوم ارتعاش پل برابر ۰,۴۲ ثانیه در جهت عرضی است.

بر اساس نتایج تحلیل مود در این پژوهش، دوره تناوب مود اول ارتعاش پل برای ارتفاع پایه خالص ۴,۶ متر برابر ۰,۶۱ ثانیه در جهت طولی و مود دوم پل ۰,۴۲ ثانیه در جهت عرضی است، که نتایج مرجع ۱۴ را تأیید می کند.

۷-۲- مدل بهینه سازی شده

مدل مورد استفاده برای ادامه روند تحقیق با افزودن جداسازهای LRB در پایین سطح عرشه و بالای سطح بنت تولید می شود. مشخصات LRB استفاده شده در دهانه میانی پل براساس الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده است.

همانطور که قبلاً ذکر شد بر اساس نتایج پژوهش های پیشین، پس از بهینه سازی طرح پل با الگوریتم های ژنتیک، استفاده از جداساز لاستیکی هسته سربی فقط برای دهانه میانی عرشه پیشنهاد شده و در این تحقیق نیز استفاده شده است. دلیل عبارت عرشه نیمه جداسازی شده نیز، همین امر است. نتایج بهینه سازی طرح پل به صورت خلاصه در جدول ۳ مشاهده می شود.



عرشه بتن پیش تنیده پایه

شکل ۱- جزئیات پل در نظر گرفته شده [۱۴]

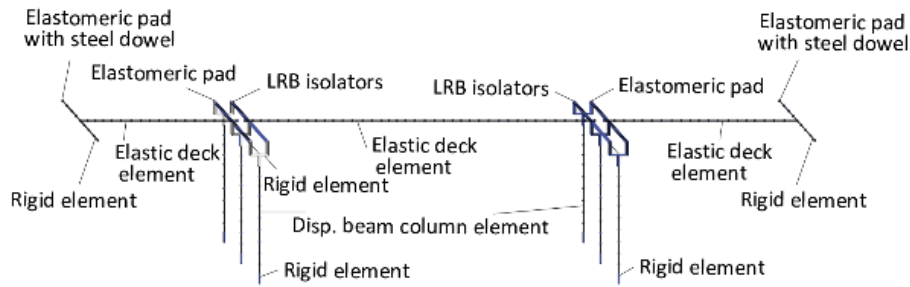
جدول ۳- مشخصات جداساز در دهانه میانی

دهانه میانی LRB							
h_c (m)	d (mm)	n_r	dL (mm)	D_c (cm)	Q_d (kN)	K_u (kN/mm)	K_{eff} (kN/mm)
۴,۶۰	۳۵۰	۶	۱۰۵	۹۰	۷۰,۱۰	۲۰,۰۶	۲,۹۴

یکی از نتایج طراحی صورت گرفته، حداکثر جابجایی عرشه حدود ۷۵ میلیمتر است که در این تحقیق نیز از دو برابر این مقدار برای ممانعت از ضربه تیرهای بتن مسلح پیش تنیده عرشه به یکدیگر در سناریوی شکست استفاده شده است.

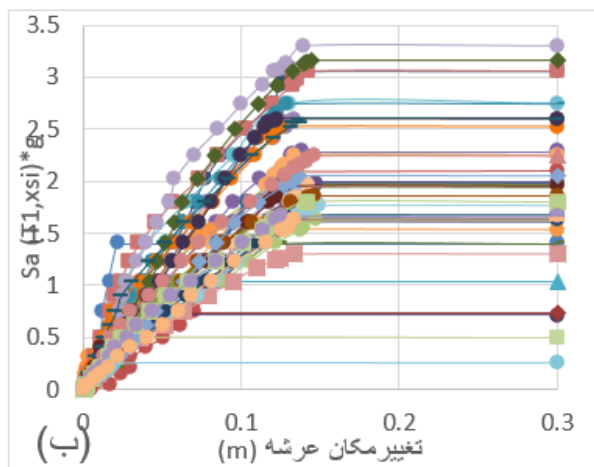
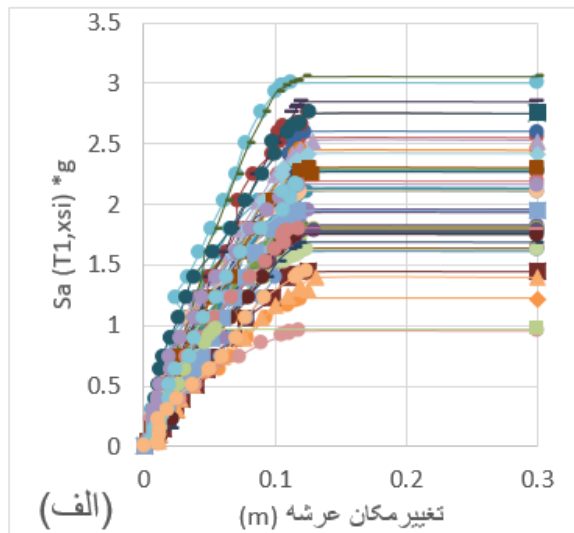
پس از مشخص شدن مشخصات مدل پل بهینه با عرشه نیمه جداسازی شده، ساخت مدل دقیق سه بعدی اجزای محدود در برنامه OpenSEES انجام شد که در شکل ۲ ملاحظه می شود.

که h_c ارتفاع پایه پل، d قطر کل جداساز، n_r تعداد لایه لاستیک مورد استفاده، Q_d مقاومت مشخصه جداساز LRB، K_u سختی الاستیک جداساز LRB، K_{eff} سختی مؤثر جداساز LRB و D_c قطر پایه بتن مسلح حاصل از بهینه سازی طرح با الگوریتم های ژنتیک می باشند. همچنین ضخامت ورق فولادی بالا و پایین جداساز برابر ۸ میلیمتر و ضخامت ورق های فولادی مابین لایه های لاستیک برابر ۳ میلیمتر محاسبه و در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- مدل دقیق پل نیمه جداسازی شده در نظر گرفته شده

که بیشتر از مقادیر متناظر با فروریزش سازه ای می باشد، رسم و نمایش داده شده اند. میرایی جداسازهای بهینه دهانه میانی ۱۹/۲۱٪ بوده و از اثر میرایی افزون بر ۵٪ آن بر میرایی کلی سازه صرف نظر شده است و میرایی کل ۵٪ در مدل پل و محاسبات طیف پاسخ شتاب نگاشت ها در نظر گرفته شده است.



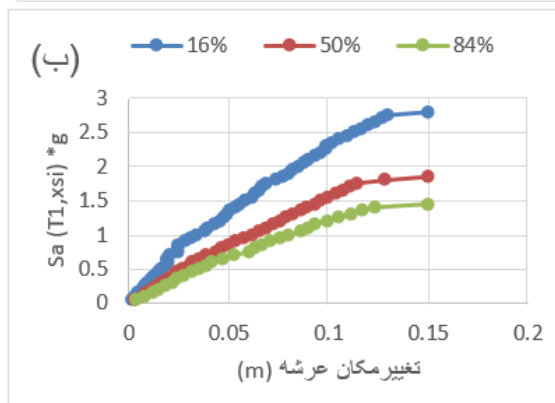
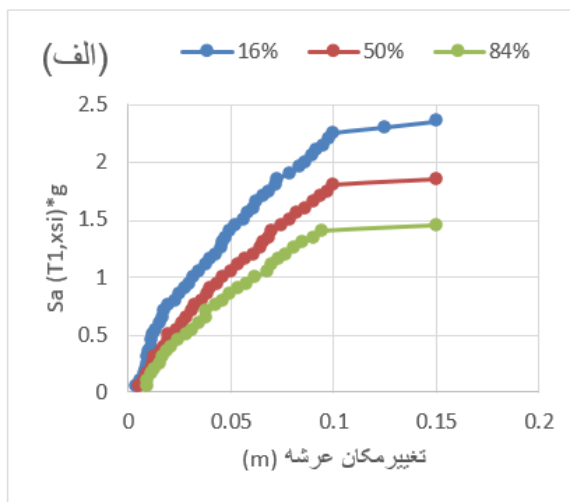
شکل ۳- نمودارهای کلی IDA تغییر مکان عرشه برای ۴۲ شتاب نگاشت زلزله حوزه دور پل بهینه شده: الف) جهت طولی پل ب) جهت عرضی پل

۸- نتایج اجرای تحقیق

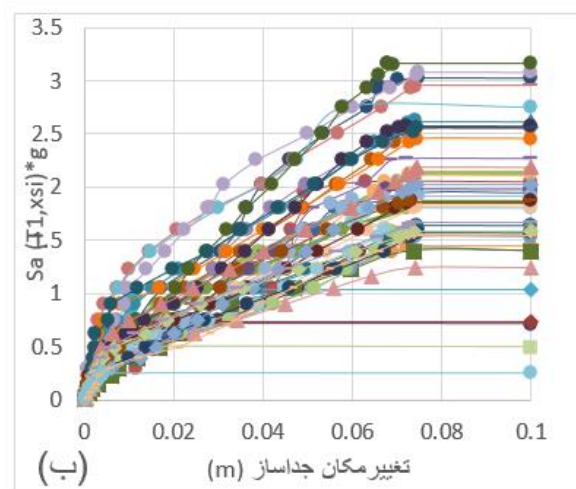
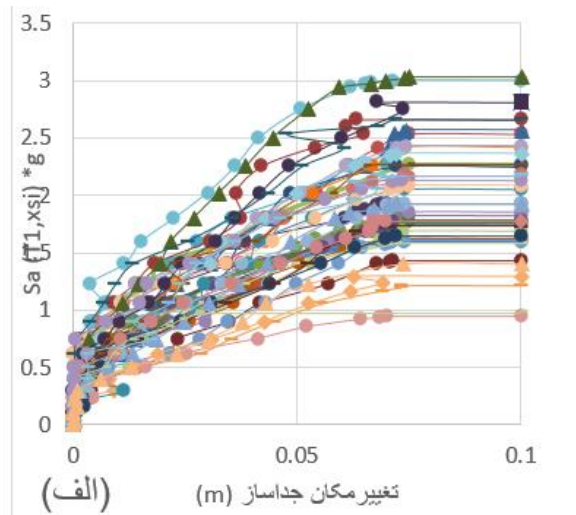
اجرای تحلیل دینامیکی فزاینده IDA به روش hunt & fill با مقیاس بندی رکوردها بر اساس شتاب طیفی Sa هر دو مؤلفه افقی X و Y رکوردهای ۲۱ گانه گفته شده (نهایتاً ۴۲ شتاب نگاشت) از مقادیر کم شتاب زلزله تا مقادیر زیاد که ایجاد فروریزش سازه پل می نماید و تعیین شتاب طیفی در نقطه فروریزش و تغییر مکان جانبی عرشه و کرنش برشی جداساز و چرخش پایه های پل در جهت های زلزله افقی طولی و عرضی (X و Y) انجام می شود. بدین منظور ارتقا و نگارش کد TCL نرم افزار OpenSEES برای ترسیم نمودارهای IDA برای ۴۲ رکورد حوزه دور در نظر گرفته شده در جهت های زلزله افقی طولی و عرضی (X و Y) برای آیتیم های تغییر مکان عرشه در جهت X و Y و کرنش برشی جداساز در هر دو جهت که نمودارها به پیوست در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده اند. همانطور که در شکل ها ملاحظه می شود، هم برای تغییر مکان عرشه و هم برای تغییر مکان یا کرنش جداساز، شتاب طیفی نقاط فروریزش سازه پل در هنگام اعمال رکوردها در جهت طولی پل در بازه 1g تا 3g متغیر بوده است. لیکن این مقدار در هنگام اعمال رکوردها در جهت عرضی پل در بازه 0.25g تا 3.25g متغیر بوده است که این موضوع برای چهار رکورد رخ داده و سایر ۳۸ رکورد در بازه قبل می باشند. همچنین به استثنای رکوردهای فوق الذکر، عمده دلیل فروریزش سازه ای پل ها، بر اساس رسیدن تغییر مکان عرشه و تغییر مکان جداساز به حدود تعیین شده مندرج در بند ۵ تحقیق کنونی بوده است و حد رسیدن سختی سازه پل به ۲۰٪ سختی اولیه در اکثریت قریب به اتفاق تحلیل های انجام شده، بحرانی و شرط فروریزش نبوده است. نقاط فروریزش برای تغییر مکان عرشه و تغییر مکان جداساز بهینه در یک نقطه شتاب طیفی یکسان نبود. لذا برای هر کدام، نمودارهای IDA مربوط به خود آنها محاسبه و ترسیم شده است. برای نمایش بهتر شکل نمودارها، تغییر مکان عرشه تا ۳۰ سانتیمتر و تغییر مکان جداساز بهینه تا ۱۰ سانتیمتر

است که حدود ۲۰٪ از مقدار شتاب طیفی میانه فروریزش کمتر است. لیکن مقدار شتاب طیفی میانه به اضافه یک انحراف معیار فروریزش سازه پل در دو جهت طولی و عرضی پل متفاوت بوده و برای جهت طولی ۲.۳g و برای جهت عرضی ۲.۸g مشاهده می شود که پراکندگی بیشتری از ۲۰٪ تا ۵۰٪ دارد.

سایر مقادیر شتاب طیفی با احتمال خاص ۱۶٪ و ۵۰٪ و ۸۴٪ در نقاط غیرفروریزش متناظر با تغییر مکان عرشه و تغییر مکان جداساز بهینه یا کرنش برشی آن در دو جهت طولی و عرضی پل در شکل های ۵ و ۶ قابل مشاهده است. نقاط فروریزش برای تغییر مکان عرشه و تغییر مکان جداساز بهینه در یک نقطه شتاب طیفی یکسان نبود. لذا برای هر کدام، نمودارهای IDA مربوط به خود آنها محاسبه و ترسیم شده است. نمایش نمودارهای صدک IDA، برای تغییر مکان عرشه و تغییر مکان جداساز بهینه تا مقادیر حدی در نظر گرفته شده در بند ۵ انجام شده است.



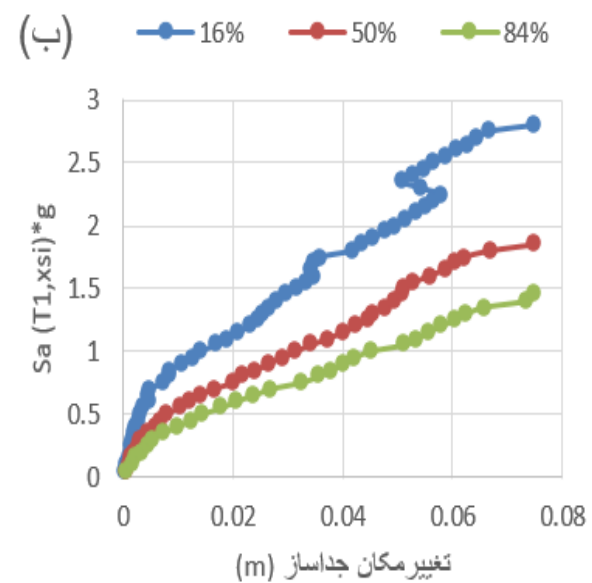
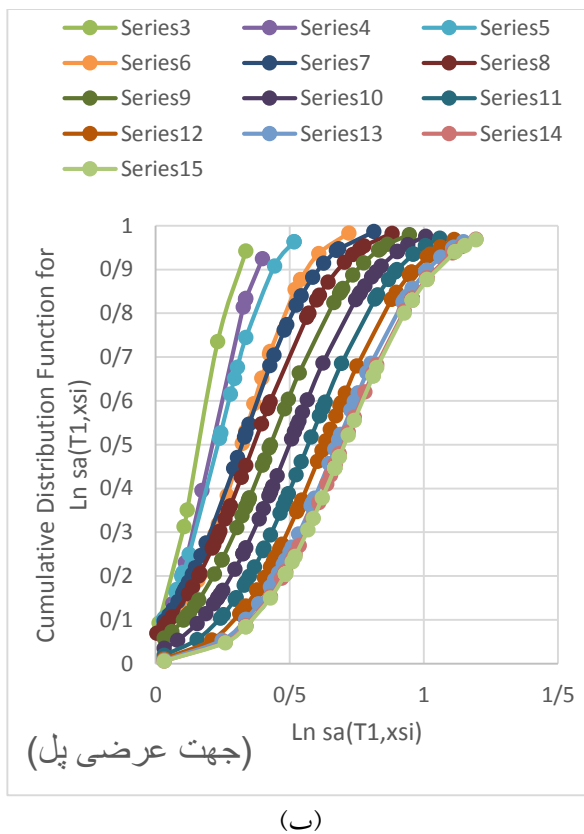
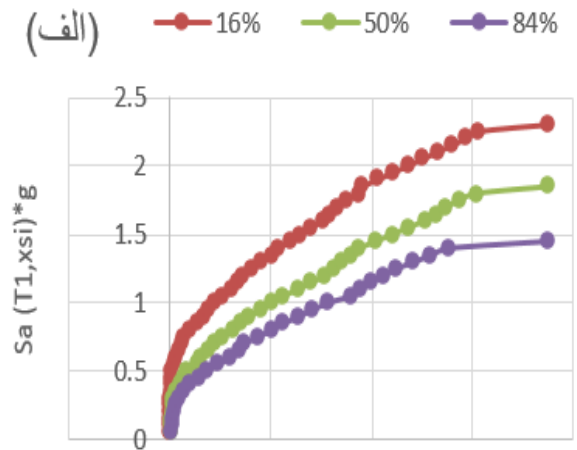
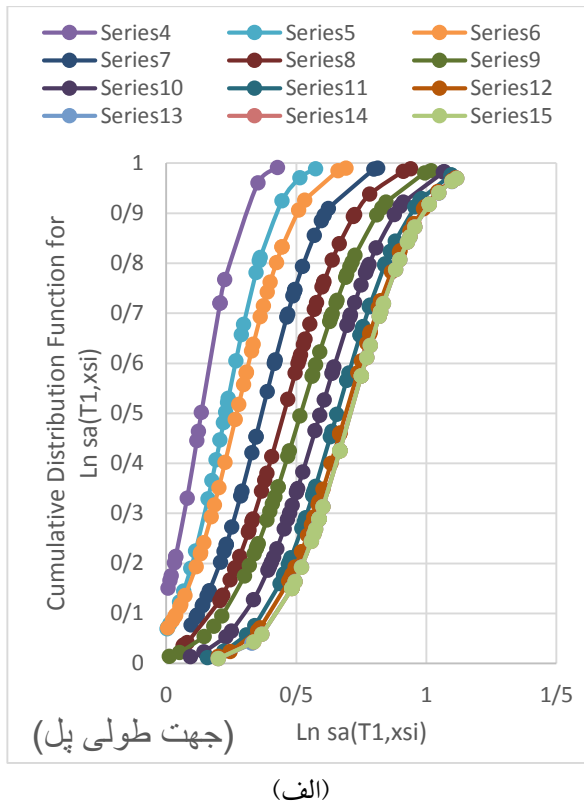
شکل ۵- نمودارهای صدک IDA تغییر مکان عرشه برای ۴۲ شتاب نگاشت زلزله حوزه دور پل بهینه شده: الف) جهت طولی پل ب) جهت عرضی پل



شکل ۴- نمودارهای کلی IDA تغییر مکان جداساز برای ۴۲ شتاب نگاشت زلزله حوزه دور پل بهینه شده: الف) جهت طولی پل ب) جهت عرضی پل

سپس ارتقا و نگارش کد TCL نرم افزار OpenSEES برای ترسیم نمودارهای صدک IDA (۱۶٪ و ۵۰٪ و ۸۴٪) برای ۴۲ رکورد حوزه دور در نظر گرفته شده در جهت های زلزله افقی طولی و عرضی (y و x) برای آیتیم های تغییر مکان عرشه در جهات X و y و کرنش برشی جداساز در هر دو جهت که نمودارها به پیوست در شکل های ۵ و ۶ ارائه شده اند.

همانطور که در شکل های بالا هم برای تغییر مکان عرشه و هم برای تغییر مکان یا کرنش جداساز ملاحظه می شود، شتاب طیفی میانه فروریزش سازه پل در هنگام اعمال رکوردها در جهت های طولی و عرضی پل، تقریباً یکسان و نزدیک به ۱.۹g بوده است. شتاب طیفی میانه منهای یک انحراف معیار فروریزش سازه پل در دو جهت طولی و عرضی پل تقریباً یکسان و نزدیک به ۱.۵g بوده



شکل ۶- نمودارهای صدک IDA تغییر مکان جداساز برای ۴۲ شتاب نگاشت زلزله حوزه دور پل بهینه شده: الف) جهت طولی پل ب) جهت عرضی پل

در ادامه، ارتقا و نگارش کد TCL نرم افزار OpenSEES برای ترسیم منحنی شکنندگی حاصل از ۴۲ رکورد حوزه دور در نظر گرفته شده در جهت های زلزله افقی طولی و عرضی (X و Y) برای آیتم های تغییر مکان عرشه در جهت های X و Y برای هر سانتیمتر از تغییر مکان عرشه از ۱ تا ۱۵ سانتیمتر و شتاب طیفی متناظر آن و کرنش برشی جداساز در هر دو جهت برای هر سانتیمتر از تغییر مکان عرشه از ۱ تا ۷/۵ سانتیمتر و شتاب طیفی متناظر آن که نمودارها به پیوست در شکل های ۷ و ۸ ارائه شده اند. منحنی ها برای شتاب طیفی بیشتر از 1g رسم شده اند و برای نمایش بهتر به جای S_a از $\ln(S_a)$ بهره گرفته شده است.

شکل ۷- منحنی شکنندگی تغییر مکان عرشه برای ۴۲ شتاب نگاشت

زلزله حوزه دور پل:

الف) جهت طولی پل ب) جهت عرضی پل

حدود عملکردی سازه ای برای تغییر مکان عرشه در جهت طولی با استفاده از حدود کیفی مندرج در AASHTO LRFD 2014 [۱۵] با تعریف پنج حد به شرح زیر پیشنهاد می شود: فروریزش یا تخریب سازه ای برابر ۱۵ سانتیمتر، ایمنی جانی برابر ۱۰ سانتیمتر، تخریب متوسط و قابل تعمیر برابر ۸ سانتیمتر، خرابی کم برابر ۶ سانتیمتر و اولین تسلیم برابر ۴ سانتیمتر.

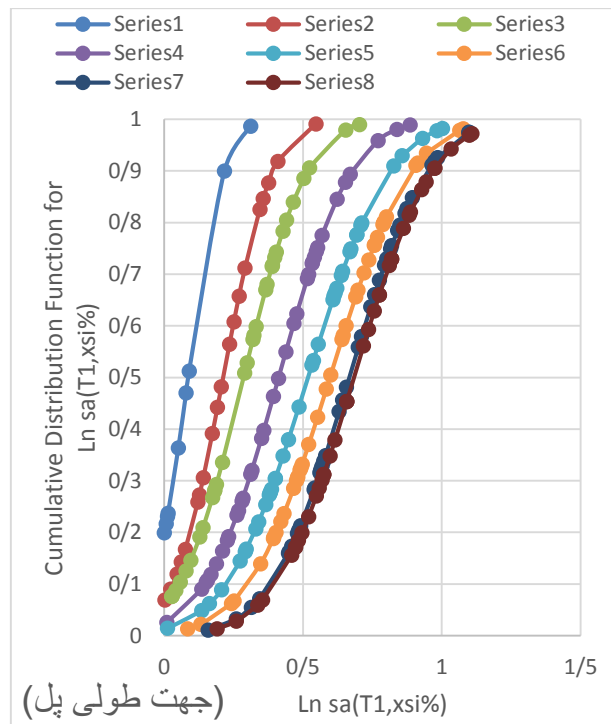
حدود عملکردی سازه ای برای تغییر مکان عرشه در جهت عرضی با استفاده از حدود کیفی مندرج در مرجع ۱۵ با تعریف پنج حد به شرح زیر پیشنهاد می شود: فروریزش یا تخریب سازه ای برابر ۱۵ سانتیمتر، ایمنی جانی برابر ۱۱ سانتیمتر، تخریب متوسط و قابل تعمیر برابر ۹ سانتیمتر، خرابی کم برابر ۷ سانتیمتر و اولین تسلیم برابر ۳ سانتیمتر.

حدود عملکردی سازه ای برای تغییر مکان جداساز بهینه یا کرنش برشی جداساز بهینه در جهت طولی با استفاده از حدود کیفی مندرج در مرجع ۱۵ با تعریف پنج حد به شرح زیر پیشنهاد می شود: فروریزش یا تخریب سازه ای برابر ۷/۵ سانتیمتر یا ۲۰٪، ایمنی جانی برابر ۶ سانتیمتر یا ۱۶٪، تخریب متوسط و قابل تعمیر برابر ۴ سانتیمتر یا ۱۰٪، خرابی کم برابر ۳ سانتیمتر یا ۸٪ و اولین تسلیم برابر ۱ سانتیمتر یا ۳٪.

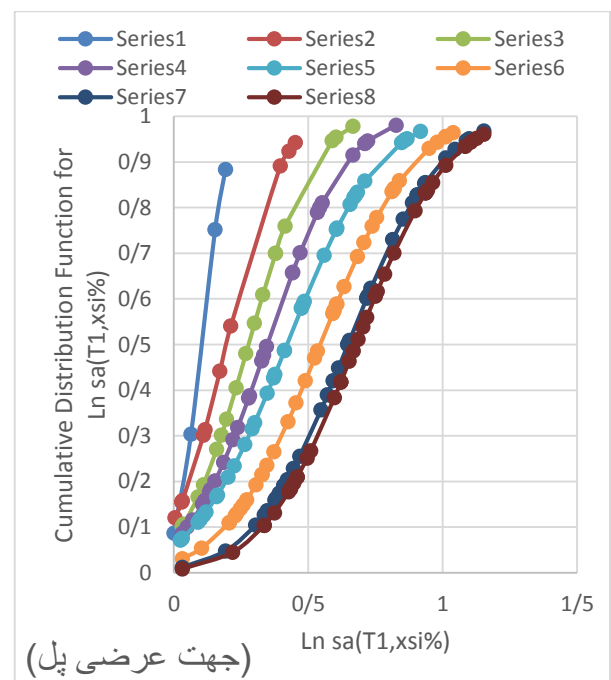
حدود عملکردی سازه ای برای تغییر مکان جداساز بهینه یا کرنش برشی جداساز بهینه در جهت عرضی با استفاده از حدود کیفی مندرج در مرجع ۱۵ با تعریف پنج حد به شرح زیر پیشنهاد می شود: فروریزش یا تخریب سازه ای برابر ۷/۵ سانتیمتر یا ۲۰٪، ایمنی جانی برابر ۶ سانتیمتر یا ۱۶٪، تخریب متوسط و قابل تعمیر برابر ۴ سانتیمتر یا ۱۰٪، خرابی کم برابر ۲ سانتیمتر یا ۵٪ و اولین تسلیم برابر ۱ سانتیمتر یا ۳٪.

به صورت تقریبی می توان بیان نمود که شتاب طیفی از حد اولین تسلیم تا حد فروریزش در هر حد ۱۵ الی ۲۰ درصد اضافه شده است. همانطور که ملاحظه می شود با استفاده از جداساز بهینه اقتصادی و عملکردی در دهانه میانی پل سه دهانه و کاهش قطر پایه های پل، شیب ملایم منحنی های شکنندگی بیانگر عملکرد مناسب سیستم سازه ای پل جداسازی شده می باشد.

مقادیر شتاب طیفی حدود مختلف عملکردی ذکر شده در بالا و احتمال مرتبط با آنها برای تغییر مکان عرشه و تغییر مکان جداساز بهینه یا کرنش برشی آن در دو جهت طولی و عرضی پل در شکل های ۷ و ۸ و جدول ۴ قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

شکل ۸- منحنی شکنندگی تغییر مکان جداساز برای ۴۲ شتاب نگاشت زلزله حوزه دور: الف) جهت طولی پل ب) جهت عرضی پل

همانطور که در شکل های بالا هم برای تغییر مکان عرشه و هم برای تغییر مکان یا کرنش جداساز بهینه ملاحظه می شود، شکنندگی سازه پل در هنگام اعمال رکوردها در جهت عرضی از جهت طولی بیشتر است.

جدول ۴- مقادیر حدود عملکردی پل بهینه نیمه جداسازی شده

تغییر مکان جداساز (cm)		تغییر مکان عرشه (cm)		حالات حدی
جهت عرضی	جهت طولی	جهت عرضی	جهت طولی	
۷,۵	۷,۵	۱۵	۱۵	فروریزش سازه ای
۶	۶	۱۱	۱۰	ایمنی جانی
۴	۴	۹	۸	تخریب متوسط
۲	۳	۷	۶	خرابی کم
۱	۱	۳	۴	اولین تسلیم

[2] Karim, K.R., and Yamazaki, F. (2001). "Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, 30, 1839–1856.

[3] Zhang, J., and Huo, Y. (2008). "OPTIMUM ISOLATION FOR HIGHWAY BRIDGES USING FRAGILITY FUNCTION METHOD". The 14th world Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), October 12-17, 2008, Beijing, China.

[4] Rahman Bhuiyan, A., and Shahria Alam, M. (2012). "Seismic Fragility Assessment of a Multi-span Continuous Highway Bridge Isolated by Shape Memory Alloy Restrainer and Lead Rubber Bearing". The 15th world Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), 2012, Lisboa, Portugal.

[5] Aguirre, J.J., and Almazan, J.L. (2015). "Damage Potential reduction of optimally passive-controlled nonlinear structures." *Engineering Structures.*, 89(2015), 130–146.

[6] Han, R., Li, Y., and van de Lindt, J. (2014). "seismic risk of base isolated non-ductile reinforced concrete buildings considering uncertainties and mainshock-aftershock sequences." *Structural Safety.*, 50, (2014) 39–56.

[7] Yang, C.W., Werner, W., and DesRoches, R. (2015). "Seismic fragility analysis of skewed bridges in the central southeastern United States." *Engineering Structures.*, 83(2015), 116–128.

[8] Ramanathan, K., Padgett, J.E., and DesRoches, R. (2015). "Temporal evolution seismic fragility curves for concrete box-girder bridges in california." *Engineering Structures.*, 97(2015), 29–46.

[9] Siqueira, G.H., Sanda, A.S., Paultre, P., and Padgett, J.E. (2014). "Fragility curves for isolated

چون نقاط مرتبط برای تغییر مکان عرشه و تغییر مکان جداساز بهینه در یک نقطه شتاب طیفی یکسان نبود، لذا برای هر کدام، منحنی های شکنندگی مربوط به هر کدام از آنها و همچنین برای دو جهت طولی و عرضی آنها محاسبه و ترسیم شده است. برای نمایش بهتر منحنی های شکنندگی، به جای S_a از $\ln(S_a)$ بهره گرفته شده است.

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق، با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده و روند آماری تحلیل شکنندگی، با انتخاب دو مورد تغییر مکان عرشه نیمه جداسازی شده و کرنش برشی جداساز (تغییر مکان بالا و پایین جداساز بخش بر ارتفاع آن) در جهات طولی و عرضی پل معروف چند دهانه که با روش الگوریتم های ژنتیک توسط مولفین بهینه شده است و عرشه نیمه جداسازی شده است، اقدام به ترسیم منحنی های IDA تحت اثر شتاب نگاشت های حوزه دور پیشنهاد شده در FEMA P695 شده است. در ادامه نمودارهای صدک IDA و سپس ترسیم منحنی های شکنندگی شده و با توجه به این منحنی ها، مقادیر مربوط به حالات حدی عملکردی برای فروریزش یا تخریب سازه ای، ایمنی جانی، تخریب متوسط و قابل تعمیر، خرابی کم و اولین تسلیم تعیین و پیشنهاد شده است.

۱۰- مراجع

[1] Vamvatsikos, D., and Cornell, C. A. (2002). "Incremental dynamic analysis." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, 31(3), 491–514.

bridges in eastern Canada using experimental results.” *Engineering Structures.*, 74(2014), 311–324.

[10] Jamie E. Padgett, J.E., and DesRoches, R. (2008). “Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, 37(8), 1157–1184.

[11] Olmos, B.A., Jara, J. M., and Roesset, J. M. (2010). “Effects of isolation on the seismic response of bridges designed for two different soil types.” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(2):641-656.

[12] FEMA P695, “Quantification of Building Seismic Performance Factors”. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY., (June 2009).

[13] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 325 Davis Hall, University of California, Berkeley, CA 94720-1792.

[14] Bryant G. Nielson, *Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones*, Georgia Institute of Technology, 2005

[15] AASHTO, *LRFD Bridge design specifications*. 1998, American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, D.C.

Development of fragility curves and evaluation of limit state values of seismic performance of optimal reinforced concrete bridge with semi-isolated deck

Hamid Ganjehei

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Panam Zarfam *

Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mohsen GHafory-Ashtiany

Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.

Abstract

In this research, the famous multi-span highway bridge, which is based on the results of the previous researches of the authors, has a semi-isolated deck and optimized design specifications of the isolators and reinforced concrete piers have been considered. Using incremental dynamic analysis, by selecting two cases of displacement of the semi-isolated deck and displacement of the isolators or the shear strain of the isolators, the incremental dynamic analysis curves are obtained under the records proposed in FEMA P695. Then, while performing fragility analysis based on the results of incremental dynamic analysis, fragility curves are determined for the displacement of the semi-isolated deck and the displacement of isolators or the shear strain of the isolators in longitudinal and transverse directions of the bridge. Based on these curves, the values of the limit states for structural collapse, life safety, moderate damage, slight damage and first yield has been identified and proposed.

Keywords: Bridge with semi-isolated deck, incremental dynamic analysis, fragility curve, lead rubber bearing (LRB).

* Corresponding Author: zarfam@srbiau.ac.ir