



تأثیر پارامترهای سازه‌ای بر احتمال شکست پایه‌های پل‌های بتنی دارای جداگر لرزه‌ای الاستیک

محمودرضا شیرواند*، محمد واصف

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۰

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

کلمات کلیدی:

پل‌های بتنی
جداگر لرزه‌ای الاستیک
تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی
منحنی‌های شکنندگی

خلاصه: پل‌ها از جمله ارکان اصلی خطوط حمل و نقل شهری و بین شهری می‌باشند. بنابراین باید طوری طراحی شوند که بعد از وقوع زلزله قابل استفاده بوده و منجر به قطع ارتباط سیستم حمل و نقل عمومی نشوند. عوامل مختلفی می‌توانند بر روی احتمال شکست پایه‌ها و رفتار پل، مؤثر باشند و هدف این پژوهش، بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای سازه‌ای (مقاومت مشخصه بتن، تنش تسلیم فولاد، قطر ناحیه محصور بتن، قطر پایه، سختی جداگر لرزه‌ای و قطر میلگردهای طولی) بر میزان احتمال شکست پایه‌های پل‌های بتنی دارای جداگر الاستیک می‌باشد. برای این کار از نرم‌افزار OpenSees جهت مدل‌سازی و تحلیل پل‌ها استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی، انجام و منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی و منحنی‌های شکنندگی برای مدل‌های مختلف پل‌ها استخراج و ارائه شده است. بطور کلی ۱۶ مدل پل تحت تحلیل دینامیکی افزایشی قرار گرفته و منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی و شکنندگی برای آن‌ها ارائه شده و احتمال شکست آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نمودارهای ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش قطر ناحیه محصور و افزایش سختی جداگر الاستیک، احتمال خرابی افزایش یافته و افزایش قطر پایه‌ها، مقاومت مشخصه بتن، تنش تسلیم فولاد و قطر میلگرد طولی، موجب کاهش احتمال خرابی پایه‌ها می‌گردد.

۱- مقدمه

بزرگراه در اثر زلزله هستند [۲]. بنابراین ارزیابی احتمال شکست و یا آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها به منظور طراحی، تعمیر و نگهداری و مقاوم‌سازی و ارزیابی چرخه حیات آن‌ها جهت تحقیقات و کارهای حرفه‌ای مهندسی ضروری می‌نماید.

پل‌ها دارای دو قسمت اصلی به نام روسازه^۱ و زیرسازه^۲ می‌باشند. اتصال بین این دو قسمت اصلی در سازه پل‌ها، به روش‌های گوناگون انجام می‌گیرد [۳]:

پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین و در عین حال آسیب‌پذیرترین سازه‌ها در شریان‌های حیاتی هر کشور محسوب می‌شوند. ویرانی یک یا چند پل در اثر زلزله آثار منفی زیادی بر اقتصاد یک کشور داشته و می‌تواند آسیب جدی به عملکرد شبکه حمل و نقل آن کشور وارد کرده و همچنین امدادسانی پس از زلزله را با مشکلات جدی مواجه خواهد نمود. هزینه بالای ساخت و استراتژیک بودن آن‌ها اهمیت پل‌ها را دوچندان کرده است. مطالعه و بررسی خرابی‌های پل‌ها در زلزله‌های گذشته، عملکرد قابل قبولی از آن‌ها نشان نمی‌دهد [۱]. چیزی که از زلزله‌های مخرب مشاهده شده است، حاکی از آن است که پل‌ها یکی از آسیب‌پذیرترین اجزاء یک سیستم

۱. اتصال پیوسته روسازه به زیرسازه

۲. اتصال روسازه به زیرسازه از طریق نشیمن‌های الاستومری

انبساط حرارتی (نئوپرن‌ها)

1 Superstructure

2 Substructure

3 Neoprene

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_shiravand@sbu.ac.ir



۳. اتصال روسازه به زیرسازه با استفاده از سیستم‌های منحرف‌کننده نیرو یا مستهلک‌کننده انرژی (جداگر لرزه‌ای غیرخطی و انواع میراگرهای انرژی)

در هر یک از حالات فوق پاسخ لرزه‌ای زیرسازه به تحریکات زمین متفاوت می‌باشد، به همین علت نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و یا ایجاد مکانیسم در پایه‌ها نیز با توجه به نوع اتصال، متفاوت خواهد بود. جداسازی لرزه‌ای یک روش طراحی سازه‌ای برای کاهش یا حذف پتانسیل خسارت زمین‌لرزه است که امروزه در پل‌ها به طور گسترده استفاده می‌شود. سیستم جداساز با سختی افقی پایینی که بین عرشه و پایه پل ایجاد می‌کند، سازه را از مؤلفه افقی حرکت زمین جدا می‌سازد و به طراحان اجازه می‌دهد نیروهای زلزله وارد بر پایه‌ها و کوله‌های پل را کاهش داده و یا منحرف کنند. این عمل سیستمی را به وجود می‌آورد که فرکانس پایه آن بسیار پایین‌تر از فرکانس‌های غالب زمین‌لرزه و نیز فرکانس پایه همان پل با اتصال گیردار می‌باشد. عوامل بسیاری در طراحی سازه‌ها حائز اهمیت هستند. علی‌رغم آنچه که ما اغلب می‌اندیشیم، پارامترهای بارگذاری و ظرفیت‌های باربری اعضای سازه‌ای کمیت‌های دقیق نیستند، بلکه آن‌ها متغیرهای تصادفی هستند و به همین دلیل، کاملاً ایمن و قابل دست‌یابی نیز نمی‌باشند. همچنین پیش‌بینی عملکرد سازه‌ای تنها با در نظر گرفتن احتمالات و یک حس احتمالاتی قابل انجام است. وجود عدم قطعیت‌ها در هندسه، مصالح، بارهای سازه، مدل‌سازی و فرآیند تحلیل اجتناب‌ناپذیر است. این امر موجب شده است که تحلیل‌های احتمالاتی و قابلیت اعتماد سازه‌ها به یک بحث به‌روز و مهم تبدیل گردند. حساسیت پاسخ، معیار تغییر در پاسخ در نتیجه‌ی یک تغییر در پارامتر سیستم می‌باشد. این پارامترها می‌تواند مشخصات مصالح، هندسه مقطع، موقعیت گره‌ها و یا بارهای وارده در مدل باشند. پاسخ سازه نیز، می‌تواند به هر کمیتی که رفتار سیستم را نشان می‌دهد، اشاره کند [۴].

از جمله روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای که در سال‌های اخیر در مطالعات آسیب‌پذیری لرزه‌ای به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، منحنی‌های شکنندگی^۱ می‌باشد. منحنی‌های شکنندگی مؤلفه اصلی در مطالعات تحلیل خرابی سازه در زلزله می‌باشند و ارتباط بین دو مؤلفه‌ی خطر زلزله و ویژگی‌های سازه را برقرار می‌کنند [۵]. طبق تعریف، منحنی شکنندگی احتمال شرطی رسیدن به یک

حالت حدی از خرابی و یا تجاوز از آن را به صورت تابعی از پارامترهای حرکت زمین (نظیر: بیشینه شتاب زمین^۲، بیشینه سرعت زمین^۳، بیشینه تغییرمکان زمین^۴، شتاب طیفی، سرعت طیفی، تغییرمکان طیفی) بیان می‌کند و از روش احتمالی به منظور در نظر گرفتن انواع حالت‌ها و عدم قطعیت‌های مختلف که بر سازه‌ها و زلزله‌ها مؤثر هستند، استفاده می‌کند.

زه‌رایی و محمدی ضمن ارائه مبانی طراحی جداگرهای لرزه‌ای الاستومری طبق آیین‌نامه آشتو، تأثیر پارامترهای مختلف این جداگرها را در بهبود رفتار لرزه‌ای پنج پل بزرگراهی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که جداگرهای لرزه‌ای نقش مهمی در کاهش نیروهای لرزه‌ای و تغییرمکان حاصل از آن دارند و همچنین موجب محافظت از المان‌های زیرسازه که معمولاً ضعیف و شکننده می‌باشند، می‌گردند [۶]. زهرایی و سامی عملکرد لرزه‌ای پل‌های موجود با تکیه‌گاه‌های نئوپرن انبساط حرارتی و امکان کاربری جزیی و محدود آن‌ها برای جداسازی لرزه‌ای پل‌ها را، به صورت تحلیلی بررسی کردند. نتایج نشان دادند که کارایی تکیه‌گاه‌های موجود انبساط حرارتی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مناسب بوده و حتی در صورت امکان لغزش لازم و تحمل کرنش‌های برشی بزرگ در آن‌ها به هنگام زلزله، به علت الاستیک‌خطی بودن رفتار نیرو-تغییرمکان، میرایی و استهلاک انرژی چندان نداشته و نمی‌توانند از سطح انرژی زلزله و نیروهای برشی وارد بر زیرسازه پل‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای بکاهند، در صورتی که سهم جداگرها در جذب و استهلاک انرژی ورودی زلزله بیش از ۵۰ درصد است [۷]. کلانتری و مویدی آثار فزاینده مؤلفه قائم زلزله بر پل‌های بزرگراهی جداسازی شده با طراحی جداساز ترکیبی اصطکاکی-لاستیکی برای یک پل بزرگراهی را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد نیروی برشی و جابه‌جایی نسبی جداساز مورد نظر در برخی از رویدادهای لرزه‌ای افزایش می‌یابد [۸]. زمانی و محمدی آسیب‌پذیری پل‌های بتنی را به کمک منحنی‌های شکنندگی و تحت تأثیر زلزله‌های اقلیم ایران بررسی کردند. نتایج نشان از تأثیر زیاد عدم قطعیت موجود در رکوردهای مختلف زلزله داشت. همچنین مشاهده گردید که با افزایش بیشینه شتاب زمین، احتمال آسیب‌پذیری پل افزایش می‌یابد [۹]. گوستاوو و همکاران

2 PGA
3 PGV
4 PGD

1 Fragility curves

سریع از خسارت‌های اقتصادی، کنترل طراحی، ارزیابی نوع سیستم پل، طراحی بهینه با توجه به ایمنی، هزینه و عملکرد و برنامه‌ریزی پشتیبانی (اثرات ترافیک از سناریوهای مختلف، روش مقاوم سازی به صرفه اقتصادی). پالازو و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده توسط جداساز اصطکاکی پاندولی پرداختند. آن‌ها مشخصات اصلی زلزله و ویژگی‌های جداساز را به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفتند [۱۶]. سیمون و لازلو در سال ۲۰۱۷ با ارزیابی قابلیت اعتماد لرزه‌ای و انجام تحلیل شکنندگی بر روی پل‌های بزرگراهی مجارستان، نشان دادند که پل‌های دارای دال و شاه‌تیرهای چندگانه که از نشیمن الاستومریک در آن‌ها استفاده شده است، نسبت به پل‌های دارای شاه‌تیر و نشیمن‌های معمولی و مرسوم عملکرد ضعیف‌تری دارند [۱۷].

در رفتار پل‌های بتنی دارای جداگر الاستیک عوامل مختلفی نظیر مشخصات هندسی و مشخصات مصالح مصرفی می‌توانند مؤثر باشند که تغییرات هر کدام می‌تواند موجب بهبود و یا ضعیف‌تر شدن عملکرد پل شود. از این رو در این پژوهش به ارزیابی حساسیت میزان احتمال شکست پایه‌های پل‌های بتنی عرشه پیوسته دارای جداگر الاستیک نسبت به تغییرات برخی از پارامترهای مؤثر در رفتار پل‌ها (مقاومت مشخصه بتن، تنش تسلیم فولاد، قطر ناحیه محصور، قطر پایه، سختی جداگر لرزه‌ای و قطر میلگردهای طولی) تحت رکورد‌های مختلف زمین‌لرزه پرداخته شده است و همچنین از حدود خرابی تعریف شده توسط مندر و دوتا [۱۸] برای تحلیل شکنندگی پل‌ها استفاده شده است. بدین منظور ۱۶ مدل پل در نرم‌افزار OpenSees [۱۹] مدل‌سازی گشته و پاسخ لرزه‌ای پایه‌های پل تحت ۷ رکورد زلزله و با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) در مقادیر مختلف متغیرهای در نظر گرفته شده، محاسبه گشته است. نتایج نشان می‌دهند که کاهش قطر ناحیه محصور بتنی و افزایش سختی جداگر موجب افزایش احتمال خرابی پایه‌های پل شده و افزایش قطر پایه‌ها، مقاومت مشخصه بتن، تنش تسلیم فولاد و قطر میلگرد موجب کاهش احتمال خرابی می‌گردد. از دیگر قابلیت‌های منحنی‌های شکنندگی این است که می‌توان پی برد که تغییرات کدام پارامترهای مؤثر در طراحی، تأثیر بیشتری بر میزان احتمال شکست پایه‌های پل دارد که در این پژوهش با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد تأثیر میزان قطر ناحیه محصور و مقاومت مشخصه

در سال ۲۰۱۴ به ارائه منحنی‌های شکنندگی برای پل‌های جداسازی شده در کانادای شرقی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی پرداختند [۱۰]. کومار و گردونی در سال ۲۰۱۴ به بررسی تخریب لرزه‌ای پل‌های بتن مسلح بزرگراهی و اثر تخریب بر عملکرد و قابلیت اطمینان برای پل‌هایی که در معرض زلزله قرار دارند، پرداختند و نشان دادند که تخریب در ستون‌های بتن مسلح، بصورت جدی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های بتن مسلح بزرگراهی را افزایش می‌دهد [۱۱]. شیروند و همکاران به ارزیابی لرزه‌ای پل‌های بتنی عرشه پیوسته دارای زاویه بیه به کمک منحنی‌های شکنندگی پرداخته‌اند. نتایج حاصل نشان دادند که افزایش بیه موجب افزایش احتمال خرابی پل به‌ویژه در حدود خرابی زیاد و کامل می‌گردد [۵]. پژوهش‌های بسیاری به منظور تعیین روابط شکنندگی با استفاده از شبیه‌سازی و مدل‌های تحلیلی صورت گرفته است. از جمله این پژوهش‌ها عبارتند از: سینگهال و کرمیدجیان [۱۲] و اربریک و النشای [۱۳] که از مدل سه‌بعدی استفاده کردند. همچنین روش ساده تحلیل غیرخطی مدل سازه‌ی یک درجه آزادی معادل در مطالعات جوانگ و النشای [۱۴] مشاهده می‌شود.

منحنی‌های شکنندگی تجربی، حاصل اطلاعاتی است که در تحقیقات صورت گرفته در مورد خرابی سازه‌ها در اثر حوادث لرزه‌ای جمع‌آوری می‌شود. درحالی‌که منحنی‌های نظری براساس نظر متخصصان شاخه مهندسی زلزله به دست می‌آیند و در نهایت منحنی‌های تحلیلی از داده‌های تحلیلی حاصل از آزمایش‌های تجربی و یا شبیه‌سازی حاصل می‌شوند. روابط شکنندگی ترکیبی نیز با ترکیب دو یا سه روش ذکر شده در بالا برای افزایش دقت و کاهش کمبودهای هر یک از این روش‌ها که منحنی‌های شکنندگی را تنها از یک جنبه مورد بررسی قرار می‌دهند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌ای از این حالت که در آن روش نظری با روش تحلیلی و یا داده‌های حاصل از مشاهدات مورد تأیید و پشتیبانی قرار می‌گیرد، در ATC-13 و ATC-40 دیده می‌شود. در این مطالعات روابط آسیب‌پذیری به شدت وابسته به نظر متخصصان می‌باشد، اما تا حدودی از داده‌های حاصل از زلزله سال ۱۹۷۱ سن فرناندو و ۱۹۹۴ نورث‌ریچ استفاده شده است [۱۵].

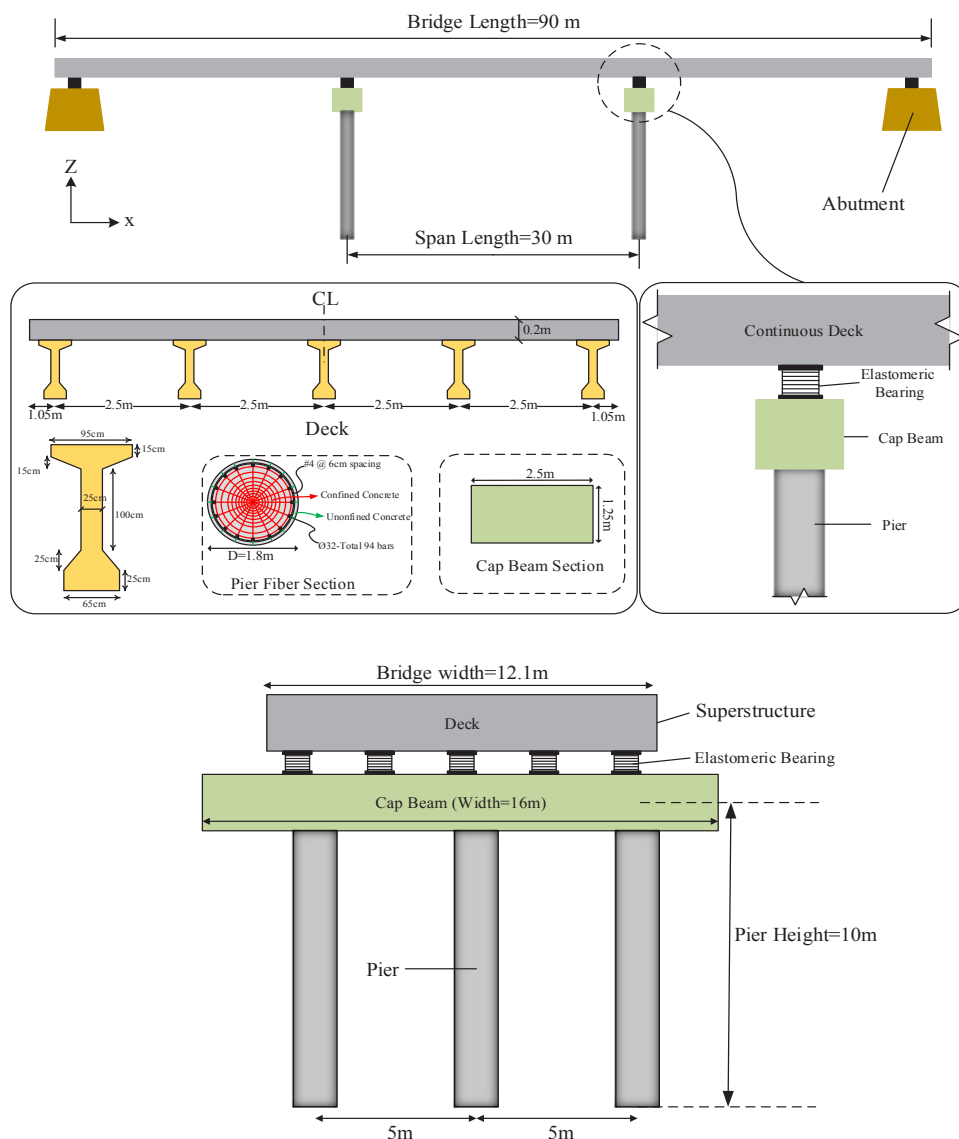
منحنی‌های شکنندگی در پل‌ها دارای کاربردهای مختلفی هستند از جمله: بررسی‌های اولیه پل پس از زلزله، تخمین اولیه و

بتن کمتر از دیگر پارامترهای در نظر گرفته شده می‌باشد.

۲- الگوسازی نظری

پل مورد مطالعه یک پل منظم می‌باشد که اتصال رو سازه به سازه از طریق جداگر الاستیک انجام شده است. این پل طبق آیین‌نامه آبا، آیین‌نامه طرح و محاسبه پل‌های بتن آرمه (نشریه شماره ۳۸۹) و آیین‌نامه آشتو [۲۰] طراحی شده است. ساختگاه مورد نظر، منطقه‌ای با خطر لرزه خیزی خیلی زیاد است و دارای خاک تیپ III می‌باشد. ضریب زلزله با استفاده از روش استاتیکی معادل محاسبه شده و ضریب رفتار پل در جهت طولی برابر ۳ در نظر گرفته شده است.

همچنین وزن اجزای سازه‌ای محاسبه شده و بصورت بار گسترده بر روی المان‌ها قرار گرفته است. طبق آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه آهن در برابر زلزله [۲۱]، میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری سطح زمین در خاک تیپ III، ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه می‌باشد. در این تحقیق برای مدل مبنا از یک پل طراحی شده‌ی منظم سه دهانه که اتصال روسازه به زیرسازه از طریق جداگر الاستیک انجام گرفته است، استفاده شده است. طول هر دهانه ۳۰ متر بوده و عرشه بصورت پیوسته و سیستم آن دال بتنی و شاه‌تیر پیش‌ساخته و تعداد شاه‌تیرها ۵ عدد می‌باشد. تعداد ستون‌های هر پایه سه عدد بوده و ارتفاع آن‌ها ۱۰ متر و دارای قطر ۱/۸ متر می‌باشند. شکل ۱ مهم‌ترین مشخصات



شکل ۱. مهم‌ترین مشخصات پل در حالت مبنا

Fig. 1. Main characteristics of the base bridge model

جدول ۱. مشخصات مصالح بتنی در پل مینا

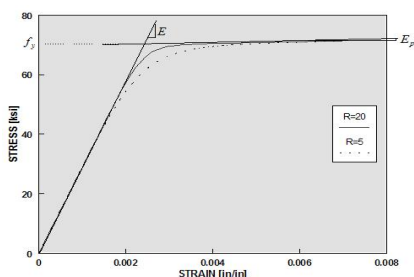
Table 1. Concrete material properties of base bridge model

پارامتر	f'_c (MPa)	ϵ_c	f'_{cu} (MPa)	ϵ_u	λ	f_t (MPa)	E_{cs} (MPa)
بتن پوشش (cover)	۲۵	۰/۰۰۲۲	۰	۰/۰۰۵	۰/۲	۳/۱۱	۲۵۰۰/۲
بتن هسته (core)	۳۱/۷۱	۰/۰۰۵۱	۲۸/۷۲	۰/۰۱۲	۰/۲	۳/۱۱	۲۵۰۰/۲

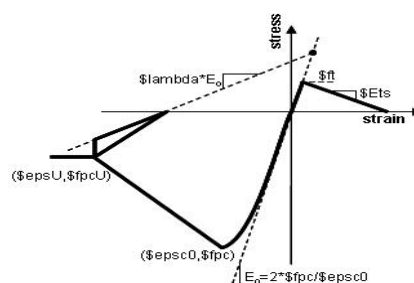
جدول ۲. مشخصات فولاد طولی در پل مینا

Table 2. Rebar material properties of base bridge model

پارامتر	F_y (MPa)	E (MPa)	b	RO	$cR1$	$cR2$
فولاد طولی	۴۰۰	۲۰۰۰۰۰	۰/۰۱	۱۷	۰/۹۲۵	۰/۱۵



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) منحنی تنش - کرنش مصالح بتنی و ب) منحنی تنش - کرنش مصالح فولاد

Fig. 2. (a) Concrete material stress-strain curve, (b) Steel material stress-strain curve

تیر طولی مدل گشته است.

پل مینا را نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی مصالح بتنی هسته و پوشش روی میلگردها از مصالح Concrete 02 استفاده شده است. در این مصالح، مقاومت کششی همراه با نرم‌شدگی خطی است. مشخصات بتن محصور شده هسته و محصور نشده پوشش میلگردها با استفاده از تئوری مندر به دست می‌آیند [۲۳]. در جدول ۱ مشخصات مصالح بتنی استفاده شده در پل مینا آورده شده است.

همچنین برای مدل‌سازی رفتار فولاد از Steel02 با رفتار غیرخطی همراه با سخت‌شدگی کرنشی ایزوتروپیک استفاده شده است. مشخصات مصالح فولادی استفاده شده در مدل‌سازی در جدول ۲ مشاهده می‌گردد. همچنین در شکل ۲ منحنی رفتاری مصالح بتنی و فولادی ارائه شده است.

پارامترهای جدول ۱ با توجه به شکل ۲ و تعریف آن‌ها در نرم افزار عبارتند از: f'_c مقاومت ۲۸ روزه بتن؛ ϵ_0 کرنش بتن در

۲-۱- مدل‌سازی پل‌ها

در اکثر موارد جهت مدل‌سازی پل‌ها از مدل شاخه‌ای^۱ که یک مدل ساده و در عین حال مناسب می‌باشد، استفاده می‌شود. وی‌کفیلد^۲ و همکاران از این مدل جهت مدل‌سازی پل استفاده کرده‌اند [۲۲]. در این نوع از مدل‌سازی، عرشه توسط یک تیر طولی با ویژگی‌های مشابه با عرشه واقعی نظیر سطح مقطع، طول، جرم و ممان اینرسی، معادل‌سازی می‌گردد. مطالعات بر روی رفتار دینامیکی و تئوری ارتعاشی ورق‌ها نشان داده است که معادل‌سازی عرشه‌های مستطیلی توسط یک تیر طولی از دقت خوبی برخوردار است. بنابراین در این پژوهش نیز عرشه پل مورد نظر با استفاده از مدل شاخه‌ای و با یک

1 Stick model

2 Wakefield

جدول ۳. مشخصات هندسی تیرهای معادل عرشه و سرستون

Table 3. Properties of deck's and cap beam's equivalent beams

پارامتر	$A (m^2)$	$I_z (m^4)$	$I_y (m^4)$	$J (m^4)$
تیر طولی عرشه	۶/۲۱	۷۷/۲	۱/۲۷	۰/۰۵۶
تیر سر ستون	۳/۱۲۵	۱/۶۳	۰/۴۱	۱/۱۲

جدول ۴. پارامترهای سازه‌ای مورد نظر و مقادیر در نظر گرفته شده برای آن‌ها

Table 4. Assumed structural parameters and their amounts

پارامتر	واحد	مقادیر در نظر گرفته شده
مقاومت مشخصه (f_c)	مگاپاسکال	۳۰-۲۸-۲۵-۲۰
تنش تسلیم (f_y)	مگاپاسکال	۵۰۰-۴۰۰-۳۰۰
قطر ناحیه محصور	متر	۱/۷۰-۱/۷۳-۱/۷۵-۱/۷۷
سختی جداگر (k)	تن بر متر	۸۰۰-۴۰۰-۲۰۰-۱۰۰
قطر پایه‌ها	متر	۲-۱/۸-۱/۵
قطر میلگرد مصرفی	میلی‌متر	۳۲-۲۶-۲۰

می‌باشد. تیرهای عرضی عرشه با افزایش مقدار مدول الاستیسیته به صورت صلب مدل گشته‌اند.

برای در نظر گرفتن رفتار واقعی‌تر ستون‌ها، این اعضا به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده و برای مدل‌سازی آن‌ها از المان (`dispBeamColumn`) با تخصیص یک مقطع فایبر استفاده گردیده است. بنابر جزئیات اجرایی این پل، مقاطع ستون‌ها به صورت دایره‌ای می‌باشد.

برای در نظر گرفتن اثر صلبیت اتصال ستون‌ها به تیرهای سرستون، انتهای فوقانی ستون‌ها به اندازه فاصله مرکز سطح سرستون تا انتهای فوقانی ستون که به میزان ۰/۶۲۵ متر می‌باشد، صلب در نظر گرفته شده است.

در روند مدل‌سازی پل، از مدل‌سازی خاک و همچنین اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است و پایه‌ها و کوله‌ها به صورت صلب به زمین متصل هستند. همچنین در راستای مدل‌سازی پل‌ها با متغیرهای در نظر گرفته شده، روند طراحی پل‌های جدید بررسی نشده و از مشخصات پل مبنا برای مدل‌سازی پل‌های دیگر استفاده شده است.

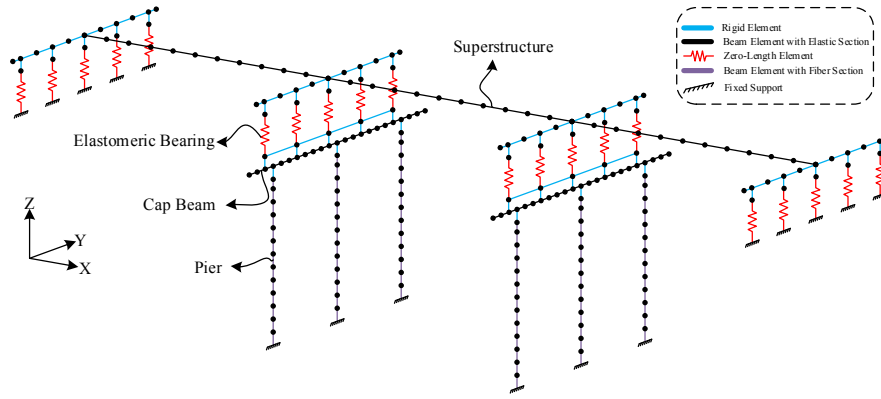
در این تحقیق، ارزیابی لرزه‌ای پل‌های بتنی دارای جداگر لرزه‌ای به صورت احتمالاتی و از طریق منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای انجام شده و همچنین به منظور بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای سازه‌ای

بیشینه مقاومت؛ f'_{cu} مقاومت شکست بتن؛ ϵ_u کرنش بتن در مقاومت شکست؛ λ نسبت مابین شیب باربرداری در ϵ_u و شیب اولیه؛ f_t مقاومت کششی بتن؛ E_{ts} شیب شاخه نرم شوندگی تنش خطی.

همچنین در جدول ۲، F_y تنش تسلیم فولاد؛ E مدول الاستیسیته فولاد؛ b نسبت کرنش سخت شوندگی؛ RO و RO و $CR2$ پارامترهای کنترل کننده انتقال از شاخه الاستیک به پلاستیک می‌باشند که مقدار آن‌ها با توجه به مقادیر پیشنهادی نرم افزار انتخاب شده اند.

برای اتصال روسازه پل به زیرسازه از جداگرهای الاستیک استفاده شده است. این نوع جداگرها که به طور گسترده در پل‌ها استفاده می‌شوند، فاقد رفتار هیستریزس مناسب بوده و انرژی زلزله را به خوبی مستهلک نمی‌کنند. در پل‌های دارای این نوع جداگر مقداری از تغییرشکل‌ها در پایه‌ها ظهور می‌یابد و مفاصل پلاستیک در پایه‌ها شکل می‌گیرند. برای مدل‌سازی جداگرهای لرزه‌ای از المان با طول صفر (`zeroLenght`) استفاده شده است. المان با طول صفر برای مدل‌سازی، نیاز به شماره گره ابتدا و انتها، نوع مصالح جداگر و جهت عملکرد دارد که در این پژوهش به شرحی که در ادامه توضیح داده شده است انتخاب گشته‌اند. مصالح مصرفی در آن از نوع `uniaxialMaterial` و نوع خطی (`Elastic`) انتخاب شده است. همچنین این المان‌ها در سه جهت طولی، عرضی و ارتفاع استفاده شده‌اند که برای جهت طولی و عرضی از مقدارهای مشخص شده برای سختی جداگرها استفاده شده است، درحالی‌که برای جهت قائم از سختی بالا استفاده گردید.

در این تحقیق، تیرهای طولی عرشه و تیرهای سرستون با استفاده از المان غیرخطی (`dispBeamColumn`) و با تخصیص یک مقطع الاستیک مدل‌سازی شده‌اند. در جدول ۳ مشخصات تیرهای طولی معادل عرشه و تیرهای سرستون ارائه شده‌اند. از قابلیت‌های این المان، پذیرش جرم گسترده در طول خود می‌باشد که برای تخصیص جرم عرشه به صورت گسترده، استفاده از این المان بسیار مناسب

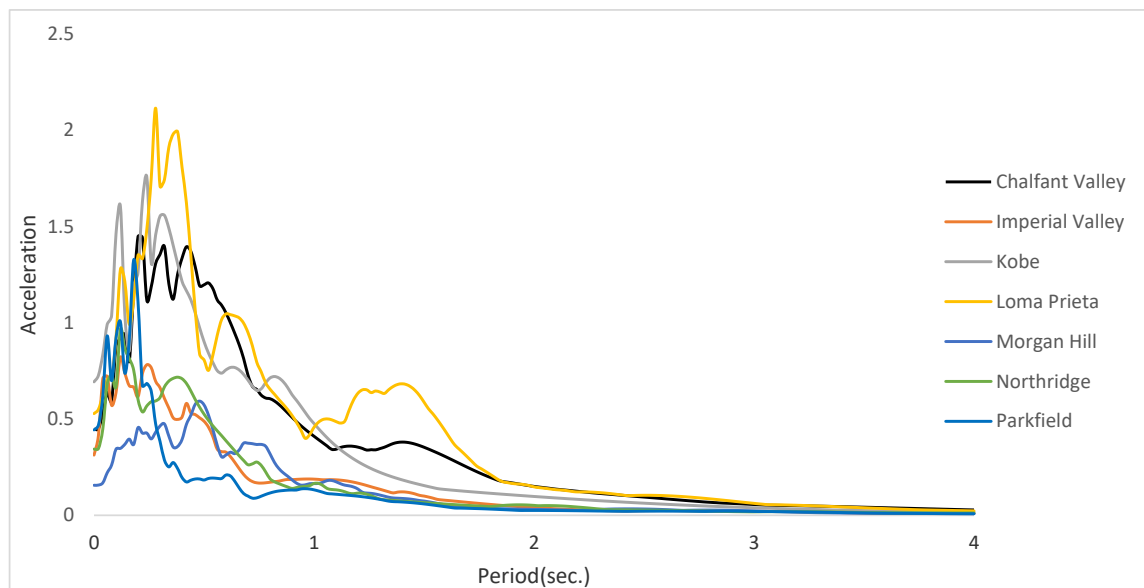


شکل ۳. مدل سازی سه بعدی پل در نرم افزار
Fig. 3. 3D model of bridges in OpenSees

جدول ۵. مشخصات رکورد زلزله های مورد استفاده

Table 5. Properties of considered earthquake records

شماره	نام زلزله	سال وقوع	ایستگاه	بزرگا	مکانیزم گسلش	PGA (g)
۱	Kobe	۱۹۹۵	Takarazuka	۶/۹	امتداد لغز	۰/۶۹
۲	Imperial Valley	۱۹۴۰	Elcentro	۶/۹۵	امتداد لغز	۰/۳۱
۳	Northridge	۱۹۹۴	Arleta	۶/۶۹	معکوس	۰/۳۴
۴	Loma Prieta	۱۹۸۹	Capitola	۶/۹۳	معکوس	۰/۵۳
۵	Parkfield	۱۹۶۶	Cholame-Shandon	۶/۱۹	امتداد لغز	۰/۴۴
۶	Morgan Hill	۱۹۸۴	Halls Valley	۶/۱۹	امتداد لغز	۰/۱۶
۷	Chalfant Valley	۱۹۸۶	Zack brother Ranch	۶/۱۹	امتداد لغز	۰/۴۵



شکل ۴. طیف رکوردهای زلزله
Fig. 4. Considered earthquake response spectra

حالت الاستیک تا گسیختگی کامل می‌باشد. افزایش شدت جنبش‌ها به کمک یک ضریب مقیاس انجام می‌گیرد و انجام تحلیل دینامیکی افزایشی بر مبنای تعیین یک معیار شدت و یک معیار خرابی صورت می‌گیرد. ضریب مقیاس مقداری مثبت است که حاصل ضرب آن در شتاب‌نگاشت انتخابی، شتاب‌نگاشت مقیاس شده را ایجاد می‌نماید. در هر گام مقیاس کردن، مدل سازه‌ای تحت نگاشت‌های مورد نظر تحلیل شده و یک یا چند منحنی پاسخ بر حسب شدت زلزله حاصل می‌شود [۲۹]. در تعریف معیار شدت زلزله، از کمیت‌های مختلفی نظیر بیشینه شتاب زمین‌لرزه و شتاب طیفی استفاده می‌شود. یکی از شرایط مهم انتخاب پارامتر مناسب شدت زلزله، مناسب بودن آن با ضریب مقیاس می‌باشد. پارامتر خرابی، در واقع یک کمیت قابل مشاهده است که از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی به دست می‌آید. این کمیت می‌تواند بیشینه شاخص خسارت مورد نظر باشد [۲۸]. با انتخاب این پارامترها منحنی پاسخ سازه در زلزله تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف به دست آمده و با استفاده از این منحنی‌ها و تعریف حالت حدی و در نهایت ترکیب نتایج با منحنی تحلیل احتمالاتی، می‌توان به ارزیابی سازه‌ها پرداخت. این روش علاوه بر بررسی رفتار لرزه‌ای سازه، ظرفیت سازه را نیز نشان می‌دهد و می‌تواند در تعیین عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد.

منظور انجام تحلیل دینامیکی افزایشی، ابتدا رکوردهای هفت زلزله انتخابی به شتاب حداکثر g نرمالیزه شده و سپس هر یک از رکوردها، با توجه به پیوند مد اصلی پل با گام‌های زمانی $0/g$ مقیاس می‌گردد. تغییرمکان نسبی ستون‌های پایه (دریافت)، به عنوان پارامتر خرابی و بیشینه شتاب زمین‌لرزه به عنوان پارامتر شدت جنبش‌های زلزله، در تحلیل دینامیکی در نظر گرفته می‌شود. سپس تحلیل دینامیکی غیرخطی در هر گام زمانی صورت گرفته و در پایان هر یک از مراحل و تحت هر رکورد مقیاس شده، منحنی پاسخ سازه در برابر پارامتر شدت لرزه‌ای رسم می‌گردد. رفتار پایه‌های پل، تحت تحریک رکورد زلزله‌های انتخابی که در راستای طولی بر پل اعمال شده، بررسی می‌گردد و منحنی‌های دینامیکی افزایشی بر مبنای دریافت پایه‌های پل رسم می‌شود.

با استفاده از منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی، رفتار لرزه‌ای پایه‌ها تحت تحریکات لرزه‌ای تعیین می‌گردد و مقادیر تغییرمکان‌های متناظر با حد تسلیم، آستانه فروریزش و ناپایداری پایه‌ها را می‌توان

در احتمال شکست پایه‌های پل، مقادیر پارامترهای مورد نظر (مقاومت مشخصه بتن، تنش تسلیم فولاد، قطر ناحیه محصور، سختی جداگرها، قطر پایه‌ها و قطر میلگرد مصرفی) مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است. [۲۴-۲۶].

مقادیر مشخصات مصالح مصرفی و مشخصات اجزای پل برای مدل مینا و برای پارامترهای مقاومت مشخصه، تنش تسلیم، قطر ناحیه محصور، سختی جداگر، قطر پایه‌ها و قطر میلگرد مصرفی به ترتیب برابر است با ۲۵ مگاپاسکال، ۴۰۰ مگاپاسکال، ۱/۷۵ متر، ۴۰۰ تن بر متر، ۱/۸ متر و ۳۲ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۳ نحوه مدل‌سازی اجزا محدودی پل‌ها در نرم‌افزار OpenSees مشاهده می‌شود.

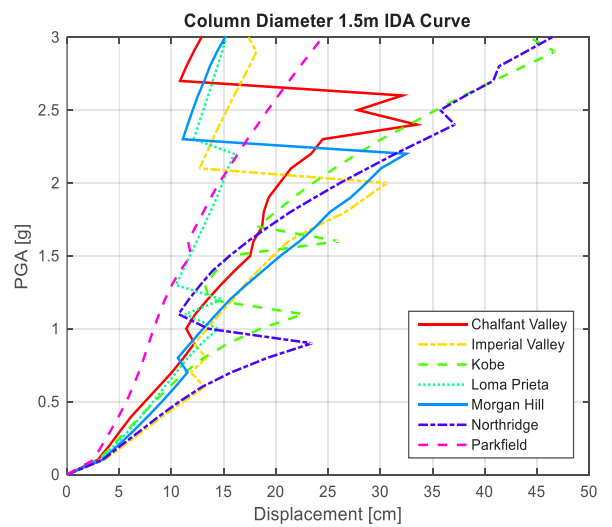
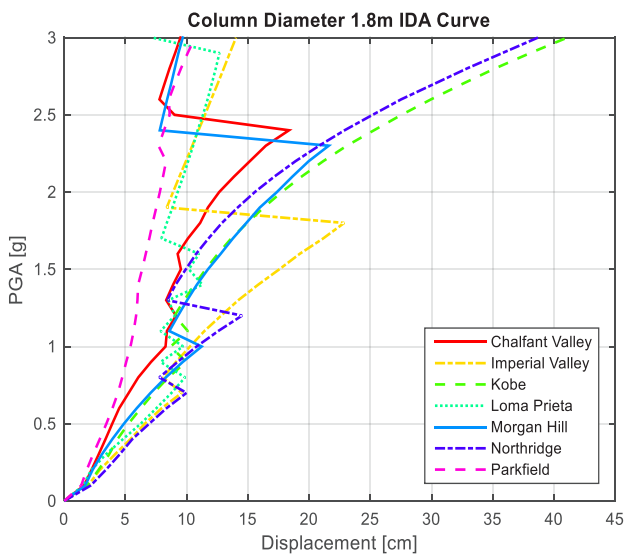
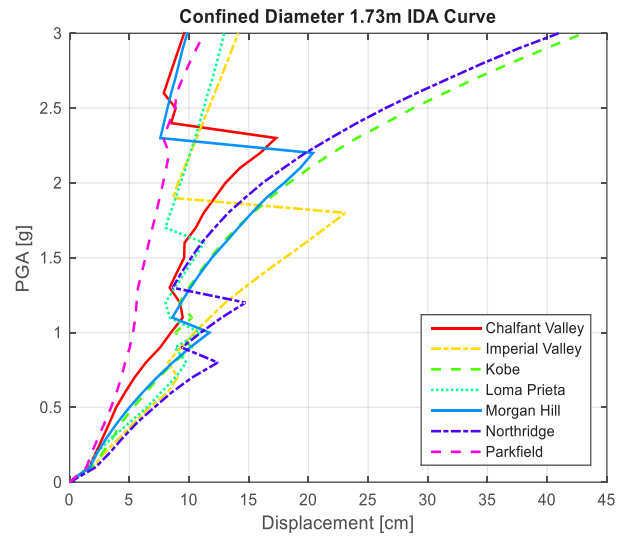
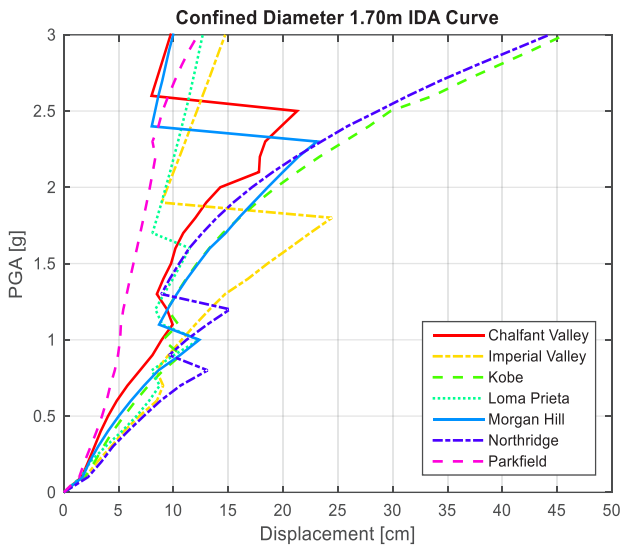
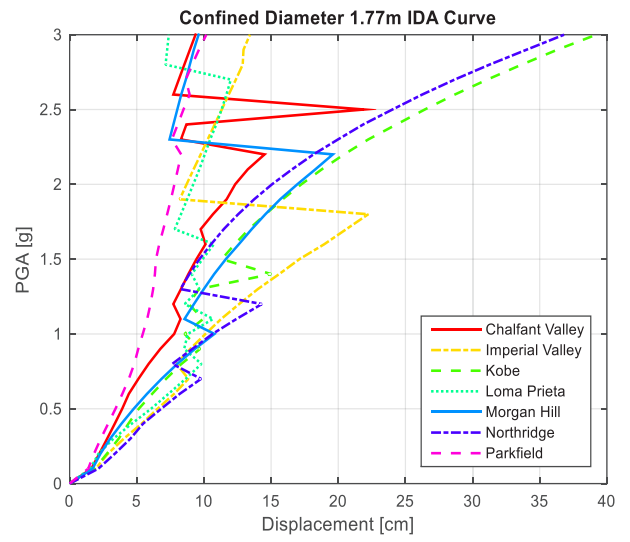
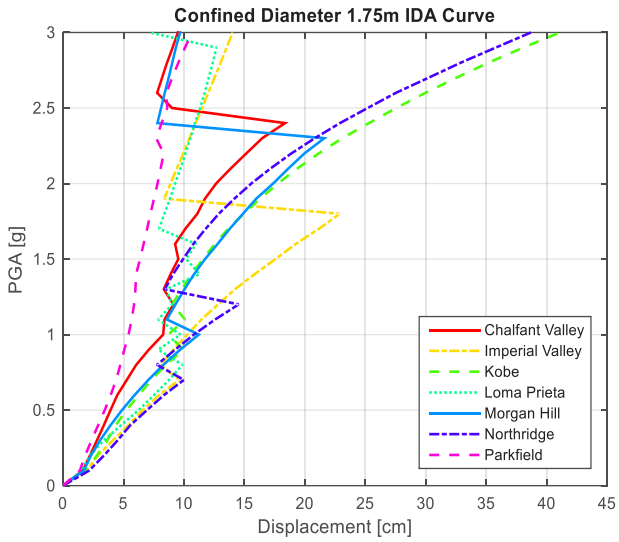
۲-۲- انتخاب رکوردهای زلزله

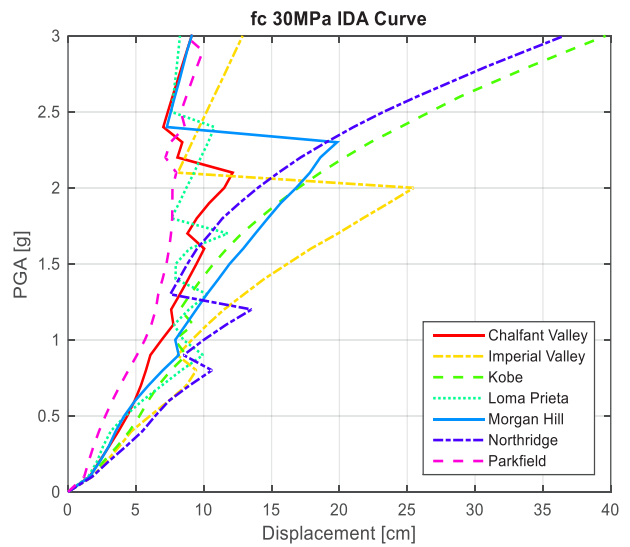
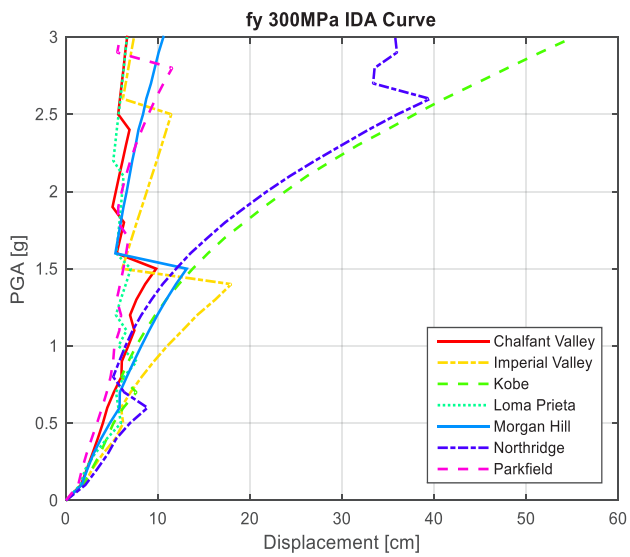
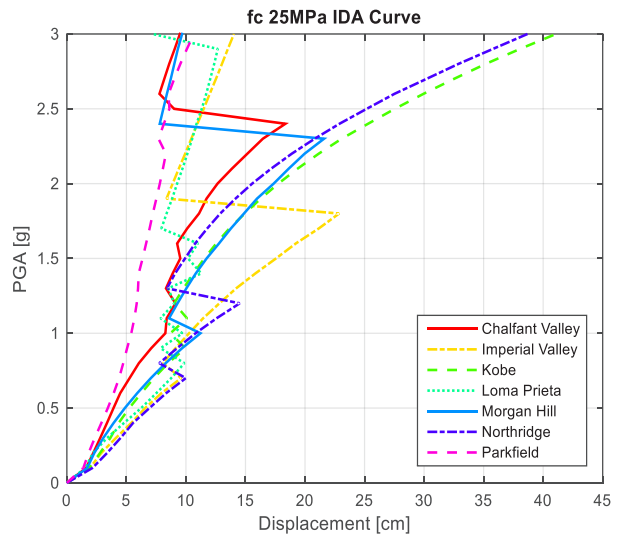
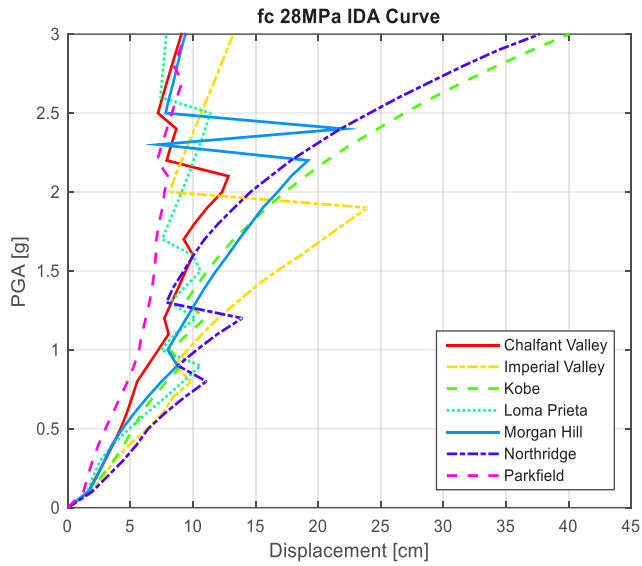
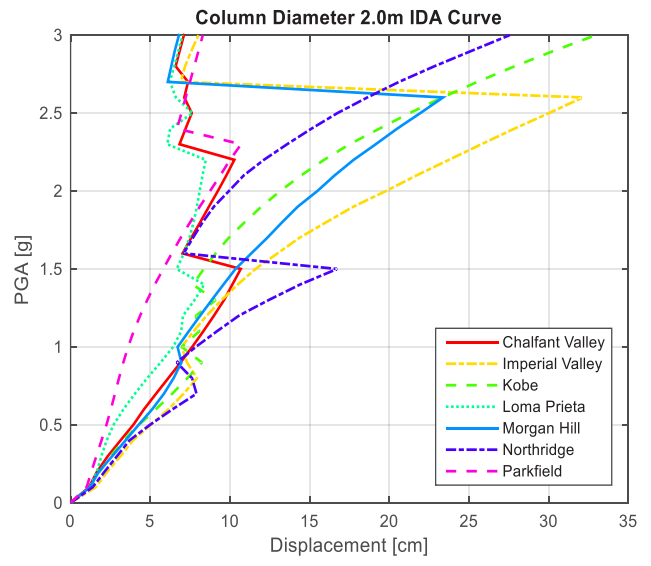
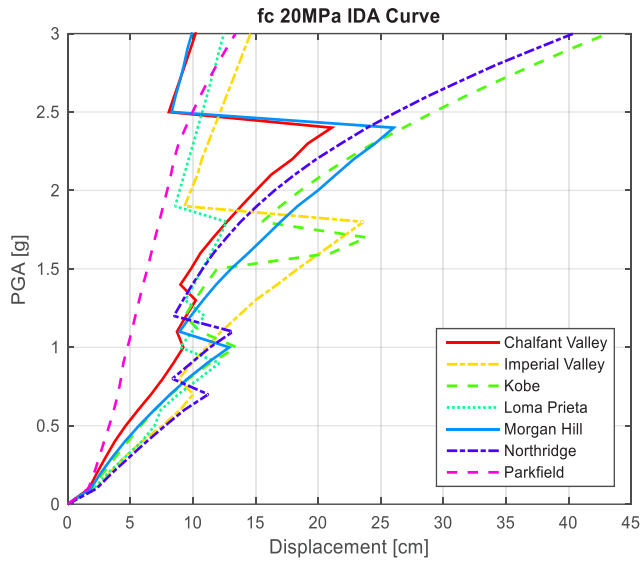
در این مطالعه، هفت رکورد از زلزله‌های جهان مورد استفاده قرار گرفته است. این رکوردها دارای بزرگای ۶ تا ۷ ریشتر، در خاک نوع III و همچنین حوزه نزدیک می‌باشند. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در جدول ۵ ارائه شده و همچنین طیف حاصل از همه رکوردها در شکل ۵ نشان داده شده است.

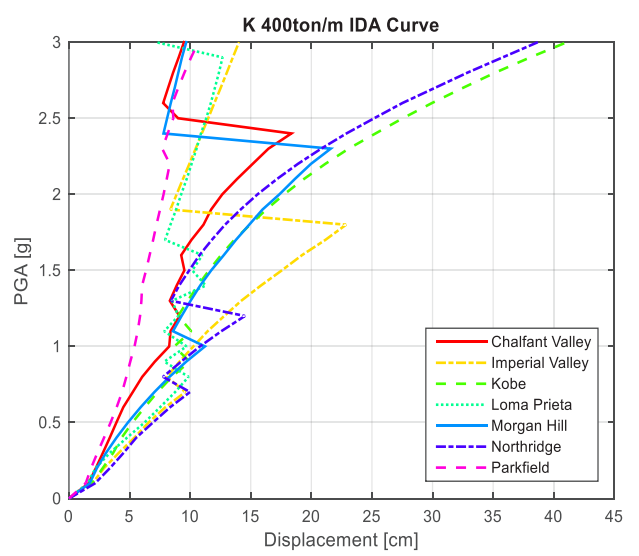
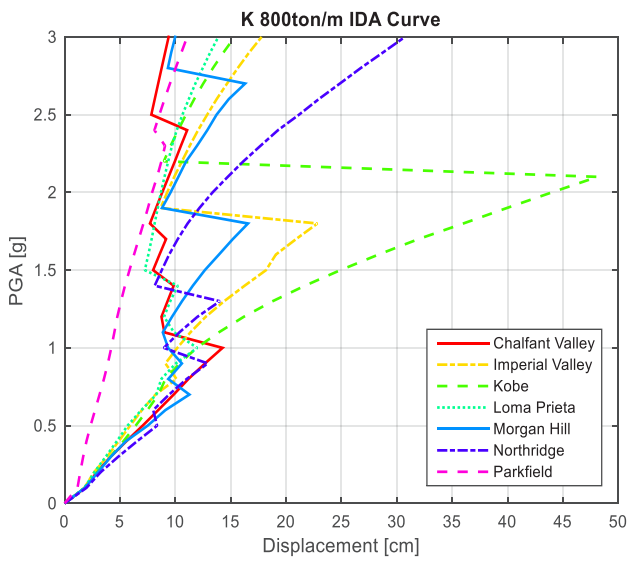
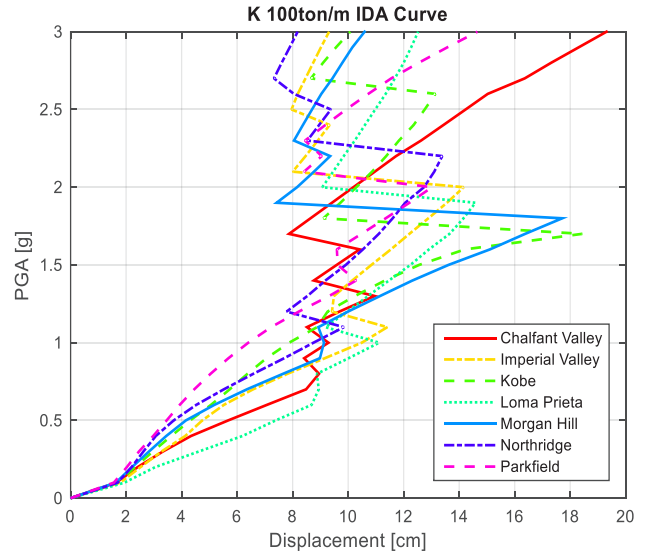
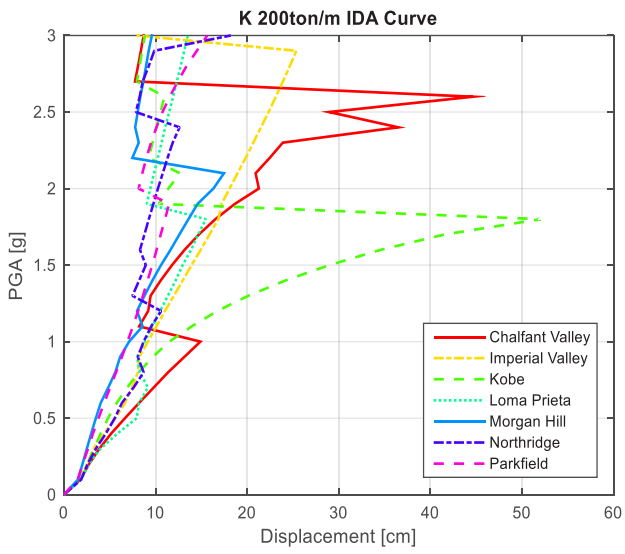
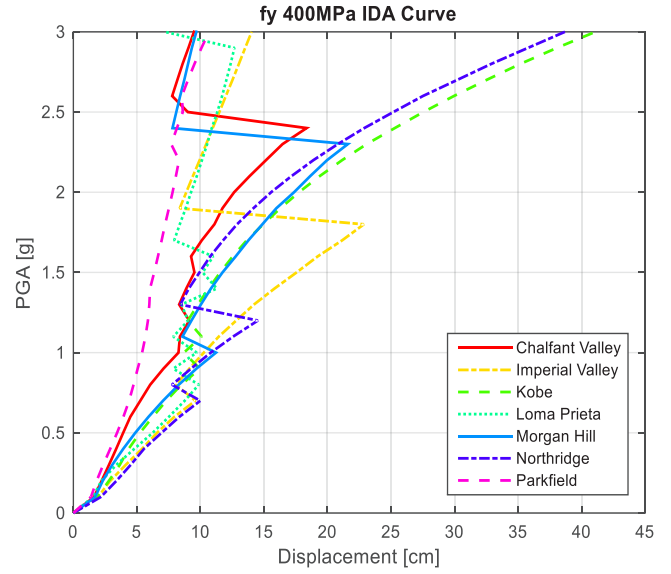
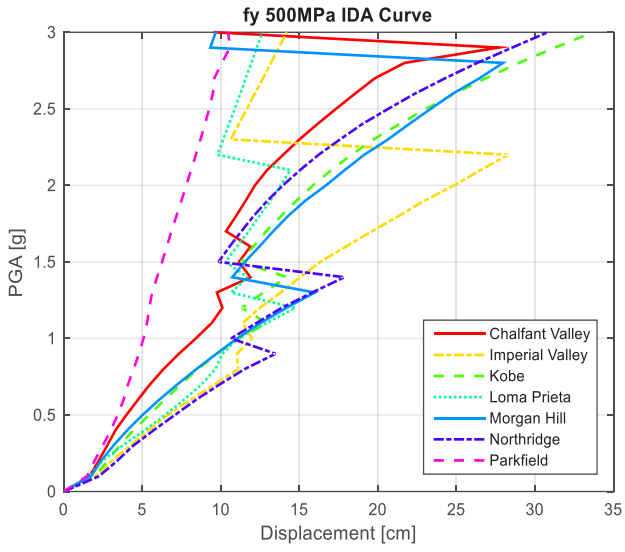
۳- نتایج و بحث

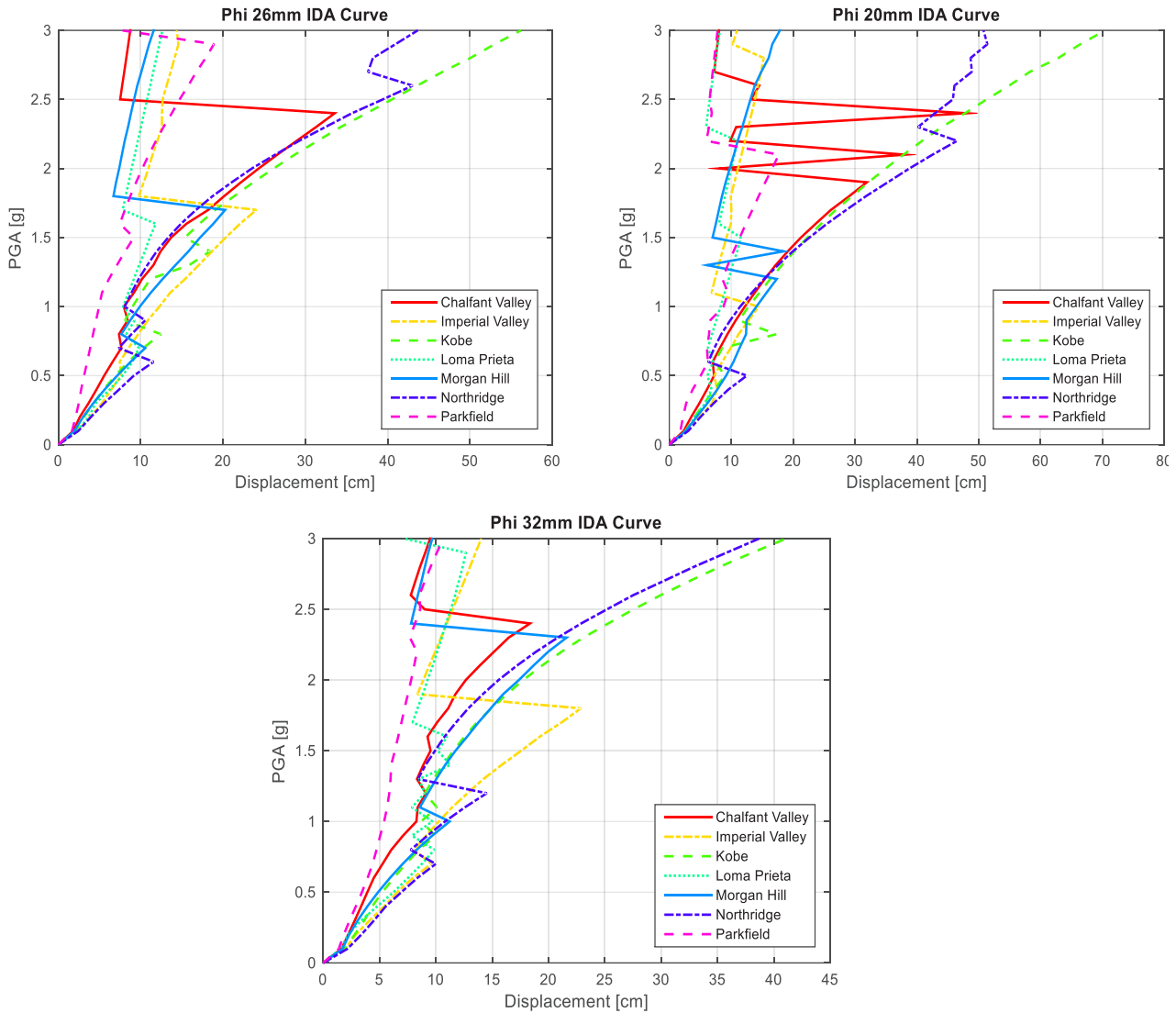
۳-۱- تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

یکی از دقیق‌ترین روش‌های تحلیل سازه، روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) می‌باشد. این روش جهت بررسی عملکرد سازه‌ها تحت بار زلزله ابداع شده است و با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی براساس رکوردهای مقیاس شده میزان تقاضای لرزه‌ای و ظرفیت سازه مقایسه می‌گردد [۵]. در این روش، شدت جنبش‌های زمین به صورت تدریجی افزوده شده و در سطوح مختلف خطر، تحلیل دینامیکی غیرخطی صورت می‌گیرد. این روش برای تعیین ظرفیت فروریزش کلی توسط FEMA پایه‌گذاری شد [۲۷، ۲۸] و فرمولاسیون کلی آن توسط کورنل [۲۹] ارائه شده است. تحلیل دینامیکی با کمک روش تحلیل دینامیکی افزایشی درک کاملی از تغییرات پاسخ سازه‌ای با افزایش شدت جنبش‌ها فراهم می‌کند. در این روش، به منظور اعمال تدریجی شتاب‌نگاشت‌ها، یک یا چند شتاب‌نگاشت به چندین سطح از شدت مقیاس شده و به سازه اعمال می‌گردد. هدف از مقیاس نمودن شتاب‌نگاشت‌ها، پوشش دقیق‌تر کل محدوده رفتاری سازه از









شکل ۵. نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی برای تمامی پارامترها و تحت تمامی رکوردهای زلزله
Fig. 5. IDA curves of all bridge models subjected to 7 different earthquake records

برای زلزله کوبه، تغییرمکانی برابر با ۲۰ سانتی‌متر برای مقادیر قطر ناحیه محصور ۱/۷۷ و ۱/۷۵ متر در شتابی معادل ۲/۲g، برای مقدار قطر ناحیه محصور ۱/۷۳ متر در شتابی معادل ۲/۱g و برای مقدار قطر ناحیه محصور ۱/۷ متر این تغییر مکان در شتاب ۲g اتفاق افتاده است. مشاهده می‌گردد که با کاهش قطر ناحیه محصور بتن، با شتاب کمتری، تغییرمکان ۲۰ سانتی‌متری ایجاد می‌گردد.

همچنین تحت زلزله کوبه، تغییرمکان ۲۰ سانتی‌متری برای قطر پایه ۱/۵ متر در شتاب ۱/۱g، برای قطر ۱/۸ متر در شتاب ۲/۱g و برای قطر ۲ متر در شتاب ۲/۴g اتفاق می‌افتد. این امر نشان‌دهنده این است که با افزایش قطر پایه، تغییرمکانی یکسان در شتاب بالاتری

از روی این نمودارها مشخص نمود. با توجه به مفاهیم ارائه شده در FEMA، آخرین نقطه در منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی که شیب آن ۲۰٪ شیب الاستیک باشد، به عنوان حد آستانه فروریزش در نظر گرفته می‌شود [۲۸]. همچنین اولین نقطه‌ای که در آن با افزایش مقدار شتاب طیفی، تغییرشیب ناگهانی و کاهش تغییرمکان مشاهده می‌گردد، به عنوان حد ناپایداری در نظر گرفته می‌شود [۲۹].

در شکل ۵، منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی برای تمامی پارامترهای فرض شده و برای تمامی رکوردها، نشان داده شده است. در این نمودارها مشاهده می‌گردد که برای مقادیر قطر ناحیه محصور ۱/۷۷، ۱/۷۵، ۱/۷۳ و ۱/۷ متر، به عنوان مثال می‌توان گفت،

ایجاد می‌گردد.

استاندارد لگاریتمی برابر با β_{ds} می‌باشد [۳۰]. احتمال شرطی وقوع یک حالت خرابی در تغییرمکان طیفی توسط تابع رابطه (۲) تعریف می‌شود [۱۵]:

$$P[ds | S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right] \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\overline{S_{d,ds}}$ مقدار میانگین تغییرمکان طیفی در حالت خرابی ds است. β_{ds} انحراف معیار استاندارد لگاریتم طبیعی تغییرمکان طیفی در حالت خرابی ds و Φ تابع تجمعی توزیع نرمال می‌باشد [۱۵].

به منظور تعیین منحنی شکنندگی، لازم است مقادیر مرزی هر یک از حالات خرابی مشخص گردد. حالت‌های خرابی معمولاً به صورت کیفی، مشاهداتی و کمی می‌باشند. حالات خرابی بر اساس مقادیر مختلف معیارهای خرابی تعریف می‌گردد. معیار خرابی رابطه‌ای تحلیلی است که با توجه به تاریخچه بارگذاری (تقاضا) و ویژگی‌های سازه (ظرفیت)، شاخصی برای بیان خرابی سازه ارائه می‌دهد. معیارهای خرابی ممکن است تنها مختص به المان‌های سازه‌ای باشند و یا به کل سازه مرتبط باشند. مقادیر معیارهای خرابی از صفر، که نشان‌دهنده عدم خرابی است، تا یک که نشان‌دهنده خرابی کامل می‌باشد، متغیر است. برای مقادیر بین صفر تا یک لازم است برخی ویژگی‌های کمی و کیفی خرابی مورد نظر تعیین گردد. به عنوان مثال در سازه‌های بتنی این ویژگی‌ها ممکن است شامل انواع و مقادیر ترک‌خوردگی و اندازه ترک‌ها، پوسته پوسته شدن پوشش بتن، کمانش میلگرد، خرد شدن بتن و یا کاهش مقاومت بتن باشند. تعیین یک ارتباط قابل قبول بین معیار خرابی و سطح خرابی، از ارکان روش طراحی بر اساس عملکرد می‌باشد. از این رو پارامترهای مختلفی از رفتار سازه در برابر زلزله، به عنوان معیار خرابی سازه در نظر گرفته می‌شود. این پارامترها شامل تغییرشکل جانبی نسبی (دریفت)، شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی، مقاومت مصالح و غیره می‌باشند [۱۵].

در این تحقیق مطابق جدول ۶ از معیار دریفت ستون‌ها و حدود خرابی ارائه شده توسط مندر برای رسم منحنی‌های شکنندگی استفاده می‌گردد. برای رسم منحنی شکنندگی، مقادیر میانگین پاسخ سازه در همه زلزله‌ها محاسبه شده و منحنی شکنندگی با استفاده از

در این نمودارها می‌توان گفت که به عنوان نمونه برای زلزله کوبه، تغییرمکان ۲۰ سانتی‌متر برای تمامی مقادیر انتخابی مقاومت مشخصه بتن در شتابی حدود ۲/۱g اتفاق می‌افتد.

نمودارهای تحلیل دینامیکی افزایشی برای مقادیر مختلف تنش تسلیم میلگرد بیانگر این است که با افزایش مقدار تنش تسلیم میلگرد، برای تغییرمکانی معین، به میزان شتاب بالاتری احتیاج است. به عنوان مثال تحت زلزله کوبه، تغییرمکان ۲۰ سانتی‌متر برای تنش تسلیم ۳۰۰ مگاپاسکال در شتاب ۱/۸g ولی برای تنش تسلیم ۵۰۰ مگاپاسکال در شتاب ۲/۳g اتفاق می‌افتد.

همچنین منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی برای مقادیر مختلف سختی جداگر لرزه‌ای، نشان‌دهنده این است که با افزایش میزان سختی جداگر، نیروی وارده و همین‌طور تغییرمکان بیشتری به زیرسازه وارد می‌شود. با توجه به نمودارها، مشاهده می‌گردد که تغییرات سختی جداگر، تأثیر زیادی بر روی نوع رفتار پل دارد.

در نهایت برای قطرهای مختلف میلگرد طولی، مشاهده می‌گردد که بطور مثال، تحت زلزله کوبه، ایجاد تغییرمکانی برابر با ۲۰ سانتی‌متر برای قطر ۲۰ میلی‌متر نیازمند شتاب ۱/۴g است؛ درحالی‌که همین میزان تغییرمکان در صورت استفاده از قطر ۳۲ میلی‌متر، در شتاب ۲/۱g اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان گفت، افزایش قطر میلگرد طولی، موجب افزایش میزان شتاب برای ایجاد تغییرمکان معین می‌باشد.

۳-۲- منحنی‌های شکنندگی

منحنی‌های شکنندگی رویکردی مؤثر به منظور مقایسه دقیق رفتار لرزه‌ای سازه در زلزله و در نظر گرفتن آسیب‌پذیری اجزای سازه می‌باشند. منحنی شکنندگی احتمال افزایش میزان تقاضای لرزه‌ای سازه نسبت به ظرفیت آن در یک مقدار معلوم از شدت زلزله را مشخص می‌کند. هر منحنی شکنندگی با مقدار میانگین پارامتر تقاضا (مثل تغییر مکان طیفی، S_d)، که حد حالت خرابی (ds) را نشان می‌دهد) به صورت رابطه (۱) توزیع می‌شود [۱۵]:

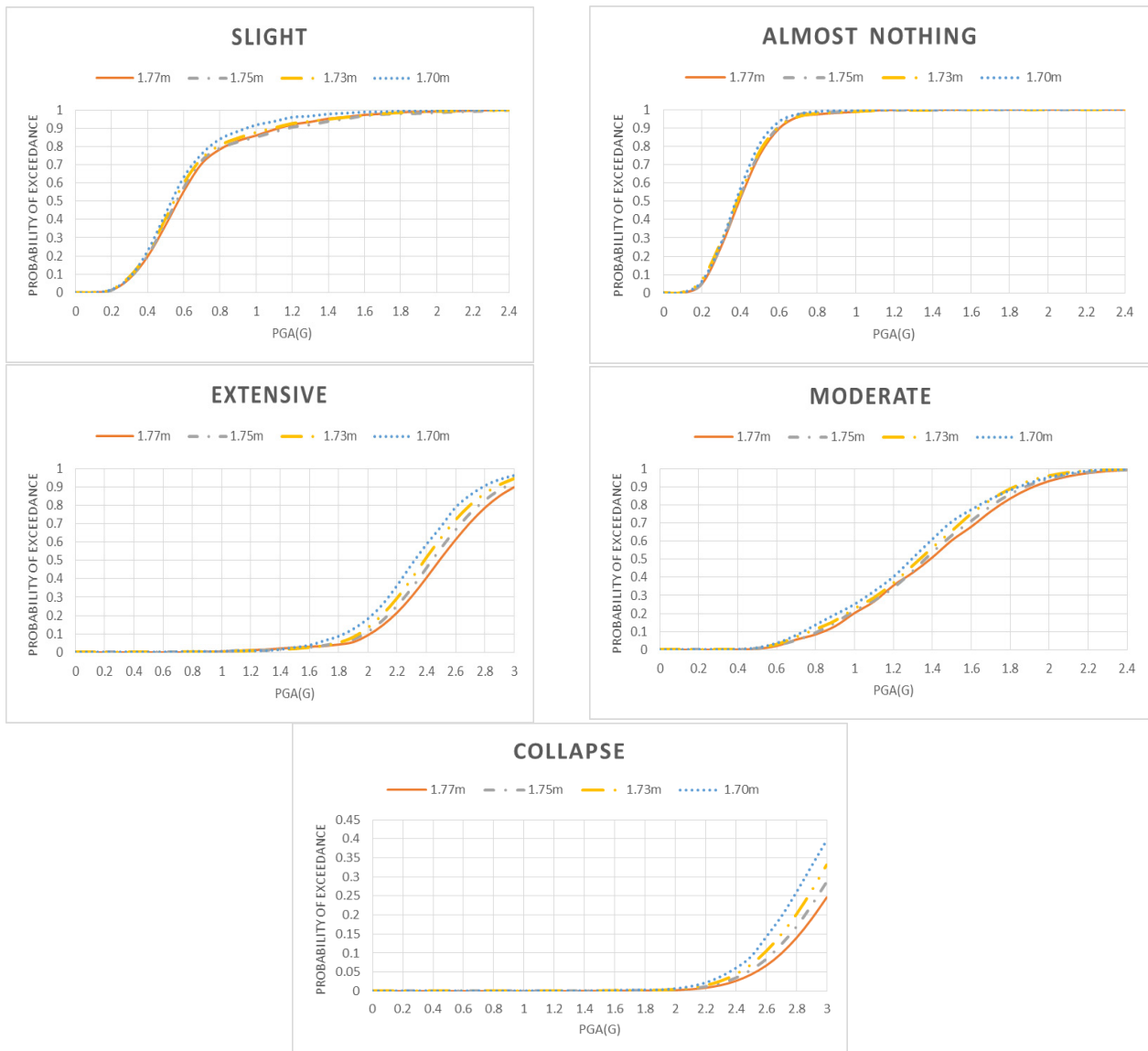
$$S_d = \overline{S_{d,ds}} \cdot \varepsilon_{ds} \quad (1)$$

$\overline{S_{d,ds}}$ مقدار میانگین تغییرمکان طیفی در حالت خرابی ds است. ε_{ds} متغیر تصادفی لگاریتمی با میانگین واحد و انحراف معیار

جدول ۶. مقادیر حدود خرابی منحنی‌های شکنندگی پل‌ها بر اساس معیارهای مندر و دوتا [18]

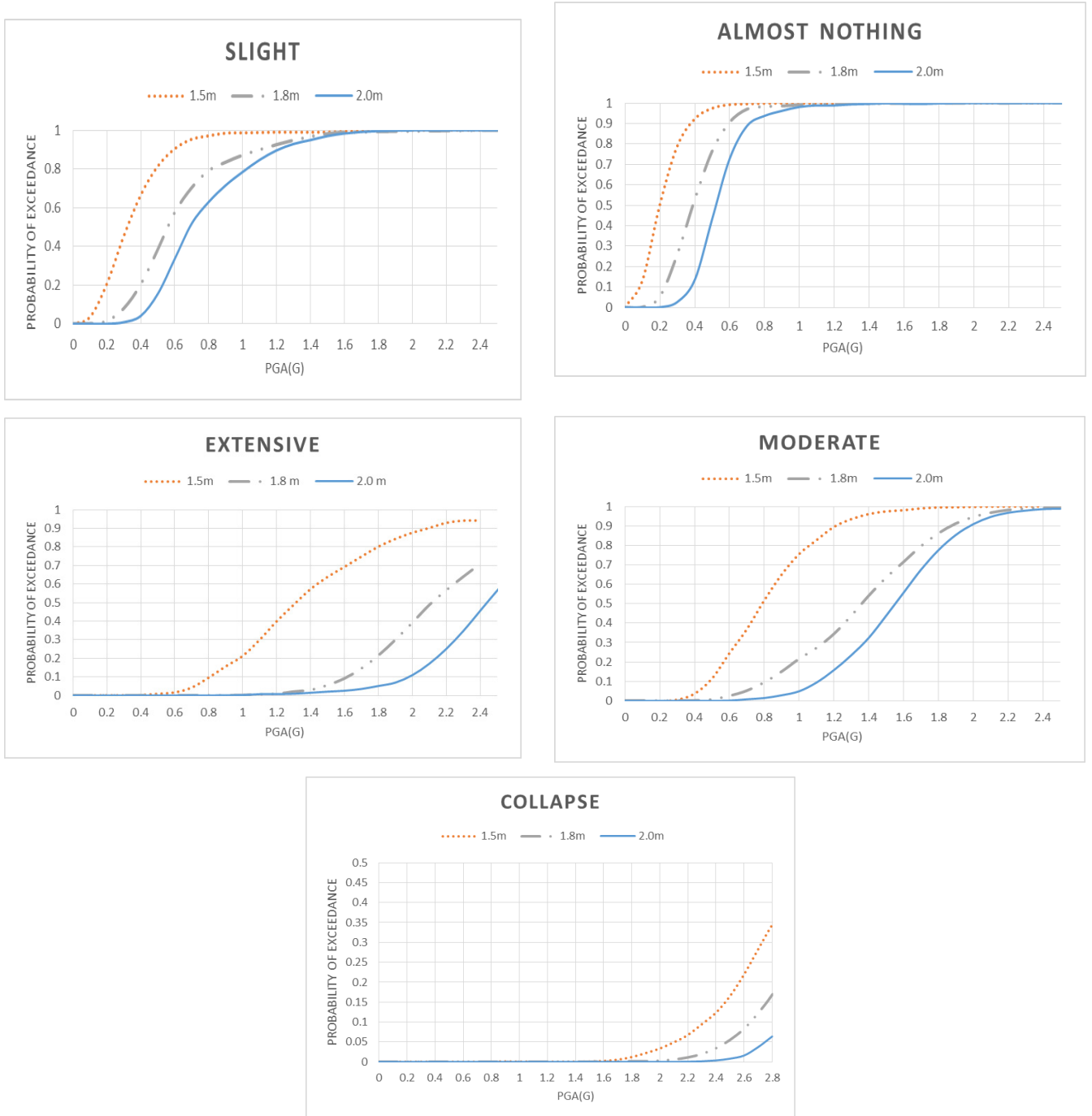
Table 6. Dutta and Mander limit states

مقدار میانگین در یفت برای حالت حدی	توصیف حالت حدی خرابی پل	حالت خرابی
۰/۰۰۵	تسلیم اولیه	محدود (Almost no)
۰/۰۰۷	پوسته پوسته شدن پوشش بتن	کم (Slight)
۰/۰۱۵	خسارت تکیه‌گاه	متوسط (Moderate)
۰/۰۲۵	خرابی اولیه ستون	زیاد (Extensive)
۰/۰۵	خرابی پایه‌ها	کامل (Complete)



شکل ۶. مقایسه میانگین منحنی‌های شکنندگی پل در پنج حالت خرابی و در مقادیر قطر ناحیه محصور مختلف

Fig. 6. Fragility curves of different confined diameter of piers in all damage states

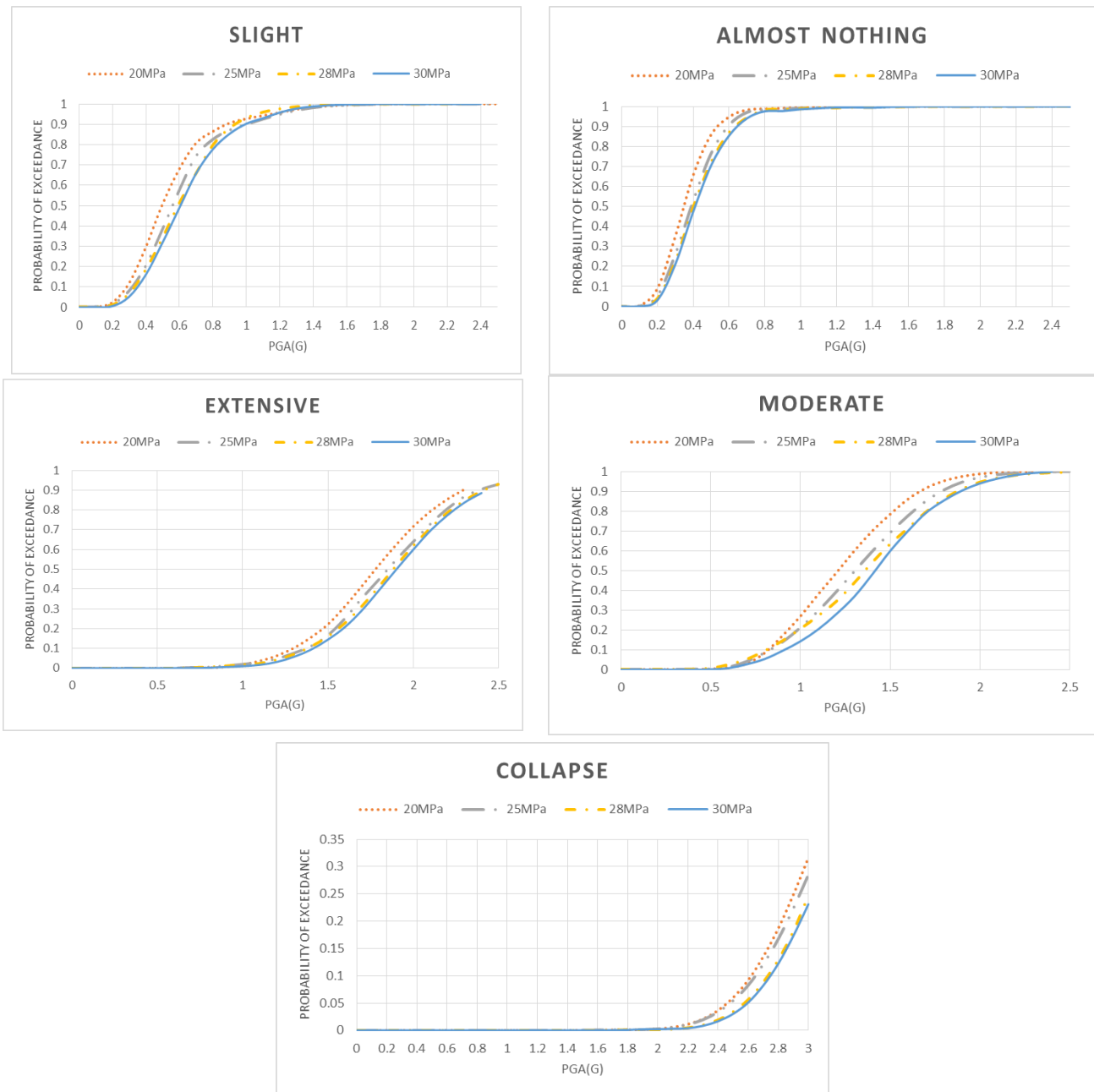


شکل ۷. مقایسه میانگین منحنی‌های شکنندگی پل در پنج حالت خرابی و در مقادیر مختلف قطر پایه
Fig. 7. Fragility curves of different pier diameter in all damage state

محصور بتن در هریک از حالات خرابی محدود، کم، متوسط، زیاد و کامل با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، به عنوان نمونه می‌توان گفت، احتمال وقوع خرابی متوسط در شتاب $1/4g$ در پل با مقادیر قطر ناحیه محصور $1/77$ ، $1/75$ ، $1/73$ و $1/7$ متر به ترتیب برابر 51% ، 53% ، 56% و 61% می‌باشد.

میانگین پاسخ همه زلزله‌ها در حالت‌های خرابی مورد نظر ترسیم شده است.

۳-۳- اثر تغییرات قطر ناحیه محصور بتن بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها
 به منظور بررسی اثر قطر ناحیه محصور بتن بر احتمال خرابی پل‌ها، منحنی‌های شکنندگی پل‌ها با مقادیر مختلف قطر ناحیه



شکل ۸. مقایسه میانگین منحنی‌های شکنندگی پل در پنج حالت خرابی و در مقادیر مختلف مقاومت مشخصه بتن

Fig. 8. Fragility curves of different concrete compressive strength in all damage states

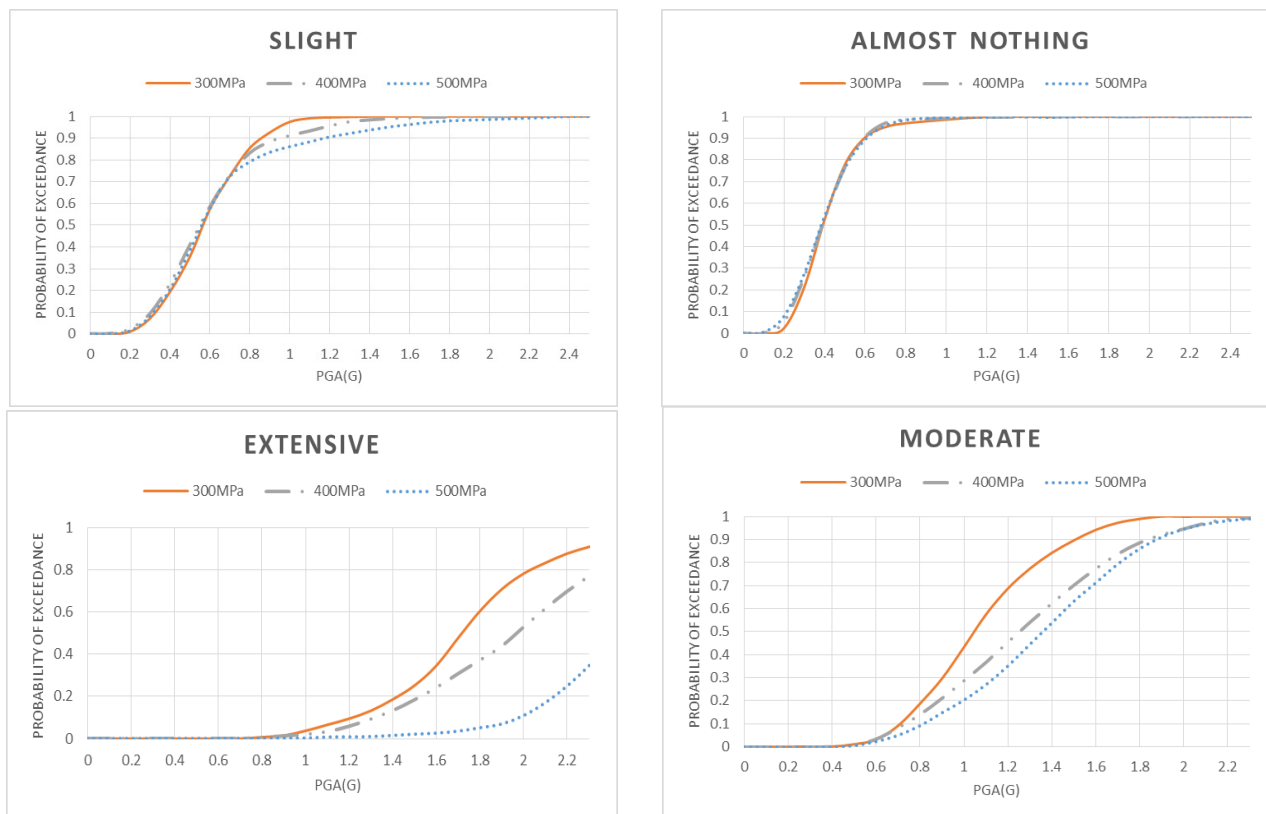
شکنندگی مشاهده می‌شود که قطر پایه از عوامل مهم در احتمال خرابی پایه می‌باشد.

۳-۵- اثر مقاومت مشخصه بتن بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها
جهت بررسی اثر تغییرات مقاومت مشخصه بتن بر پاسخ لرزه‌ای پل، منحنی‌های شکنندگی پل با مقادیر مختلف مقاومت مشخصه، به دست آمده و در شکل ۸ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در شتاب $g/0.4$ احتمال وقوع خرابی محدود برای مقاومت‌مشخصه‌های

می‌توان گفت که در تمامی حالت‌ها، با کاهش قطر ناحیه محصور بتن، احتمال خرابی پایه‌ها افزایش می‌یابد.

۳-۴- اثر قطر پایه بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها

شکل ۷ نشان می‌دهد که به عنوان نمونه برای خرابی زیاد و شتاب $g/1.8$ ، احتمال وقوع خرابی پایه به ترتیب برابر 80% ، 22% و 6% می‌باشد. همچنین برای قطر $1/5$ متر، خرابی زیاد در شتابی کمتر از $g/0.5$ اتفاق نمی‌افتد، همچنین این مقادیر برای قطرهای $1/8$ متر و 2 متر به ترتیب برابر $g/1$ و $g/1.2$ می‌باشد. با توجه به نمودارهای



شکل ۹. مقایسه میانگین منحنی‌های شکنندگی پل در چهار حالت خرابی و در مقادیر مختلف تنش تسلیم فولاد طولی

Fig. 9. Fragility curves of different rebar yield strength in all damage states

وقوع خرابی زیاد برای هیچ‌کدام از مقادیر تنش تسلیم فولاد مشاهده نمی‌گردد. می‌توان گفت با افزایش مقدار تنش تسلیم فولاد، احتمال خرابی پایه‌ها کاهش می‌یابد.

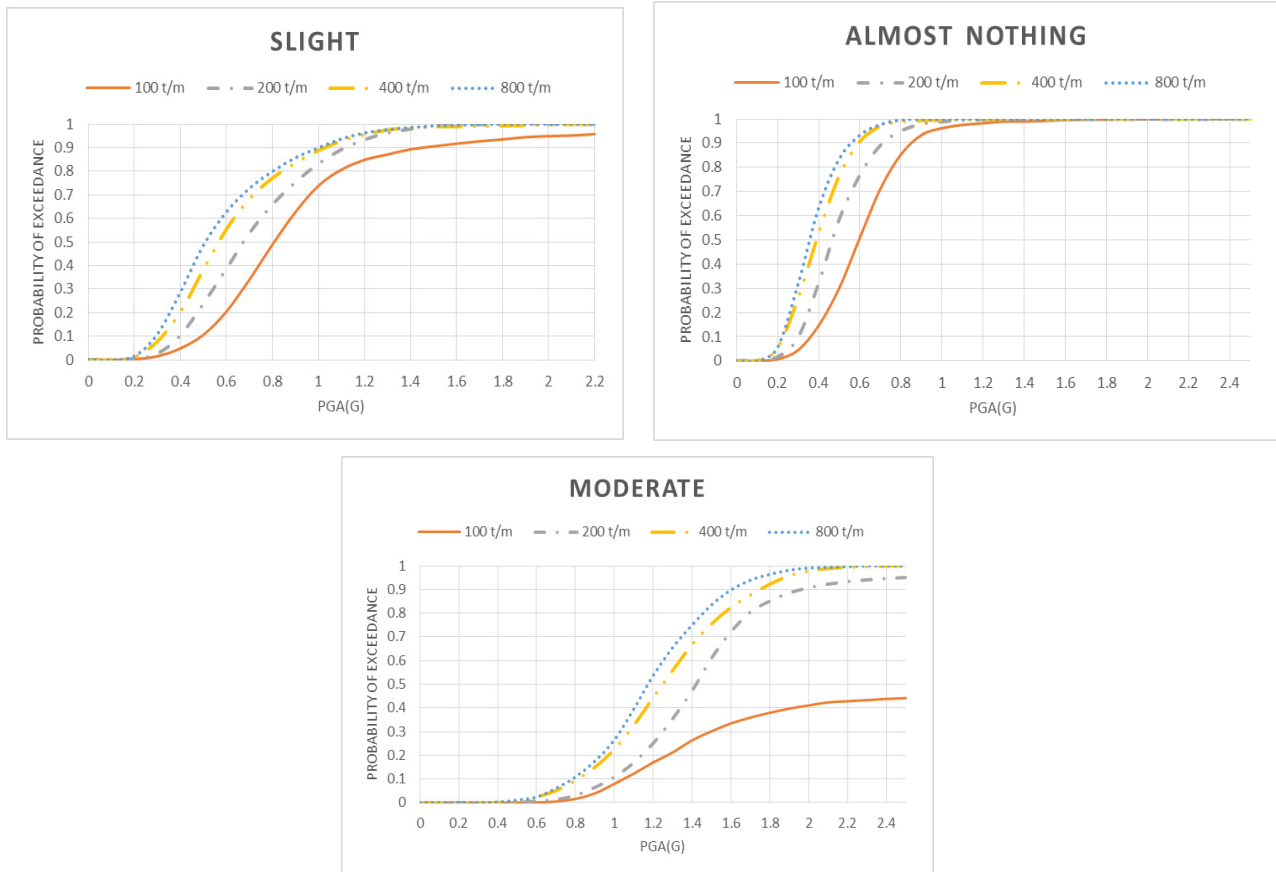
۳-۷- اثر سختی جداگر لرزه‌ای بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سختی جداگر، احتمال خرابی پایه‌های پل افزایش می‌یابد. علت این پدیده این است که با افزایش مقدار سختی جداگر، اتصال رو سازه و زیر سازه با سختی بیشتری انجام گرفته و بنابراین پایه‌ها باید تغییر مکان و در نتیجه دریافت بیشتری را تحمل کنند و این امر موجب افزایش احتمال خرابی می‌گردد. بطور مثال می‌توان گفت که در حد خرابی محدود و شتاب $0.4g$ احتمال خرابی پایه برای سختی ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ تن بر متر به ترتیب برابر است با ۱۵٪، ۳۲٪، ۵۳٪ و ۶۳٪. برای شتاب $0.8g$ و حد خرابی کم احتمال خرابی برای مقادیر مختلف سختی جداگر به ترتیب برابر است با ۴۹٪، ۶۶٪، ۷۷٪ و ۸۰٪.

۳۰، ۲۸، ۲۵ و ۲۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۴۷٪، ۵۰٪، ۵۳٪ و ۶۵٪ می‌باشد. احتمال وقوع حالت خرابی کم در شتاب $0.6g$ برای مقادیر مقاومت مشخصه به ترتیب برابر ۴۹٪، ۵۱٪، ۵۷٪ و ۶۸٪ می‌باشد. در شتاب $1.2g$ احتمال وقوع خرابی متوسط به ترتیب برابر ۲۸٪، ۳۴٪، ۳۹٪ و ۴۹٪ می‌باشد. برای تمامی مقادیر مقاومت مشخصه، خرابی زیاد در مقدار شتاب کمتر از $0.9g$ اتفاق نمی‌افتد.

۳-۶- اثر تنش تسلیم فولادهای طولی بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها

با توجه به شکل ۹ که به منظور بررسی اثر تغییرات تنش تسلیم فولاد بر روی احتمال خرابی پل‌ها ارائه شده است، می‌توان نتیجه گرفت که برای حد خرابی محدود و در شتاب $0.4g$ احتمال خرابی پایه برای تمامی مقادیر تنش تسلیم برابر ۵۴٪ می‌باشد. همچنین در شتاب $2g$ و برای حد خرابی زیاد، احتمال خرابی پایه‌ها برای مقادیر تنش تسلیم ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۷۸٪، ۵۳٪ و ۱۱٪ می‌باشد. در مقادیر شتاب کمتر از $0.9g$ احتمال



شکل ۱۰. مقایسه میانگین منحنی‌های شکنندگی پل در سه حالت خرابی و برای مقادیر مختلف سختی جداگر لرزه‌ای
Fig. 10. Fragility curves of different isolator stiffness in three damage states

قطر میلگردهای طولی پایه به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند و با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی و رسم منحنی‌های شکنندگی به بررسی احتمال خرابی پل‌ها پرداخته شده است. با توجه به منحنی‌های شکنندگی ارائه شده برای حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده، می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

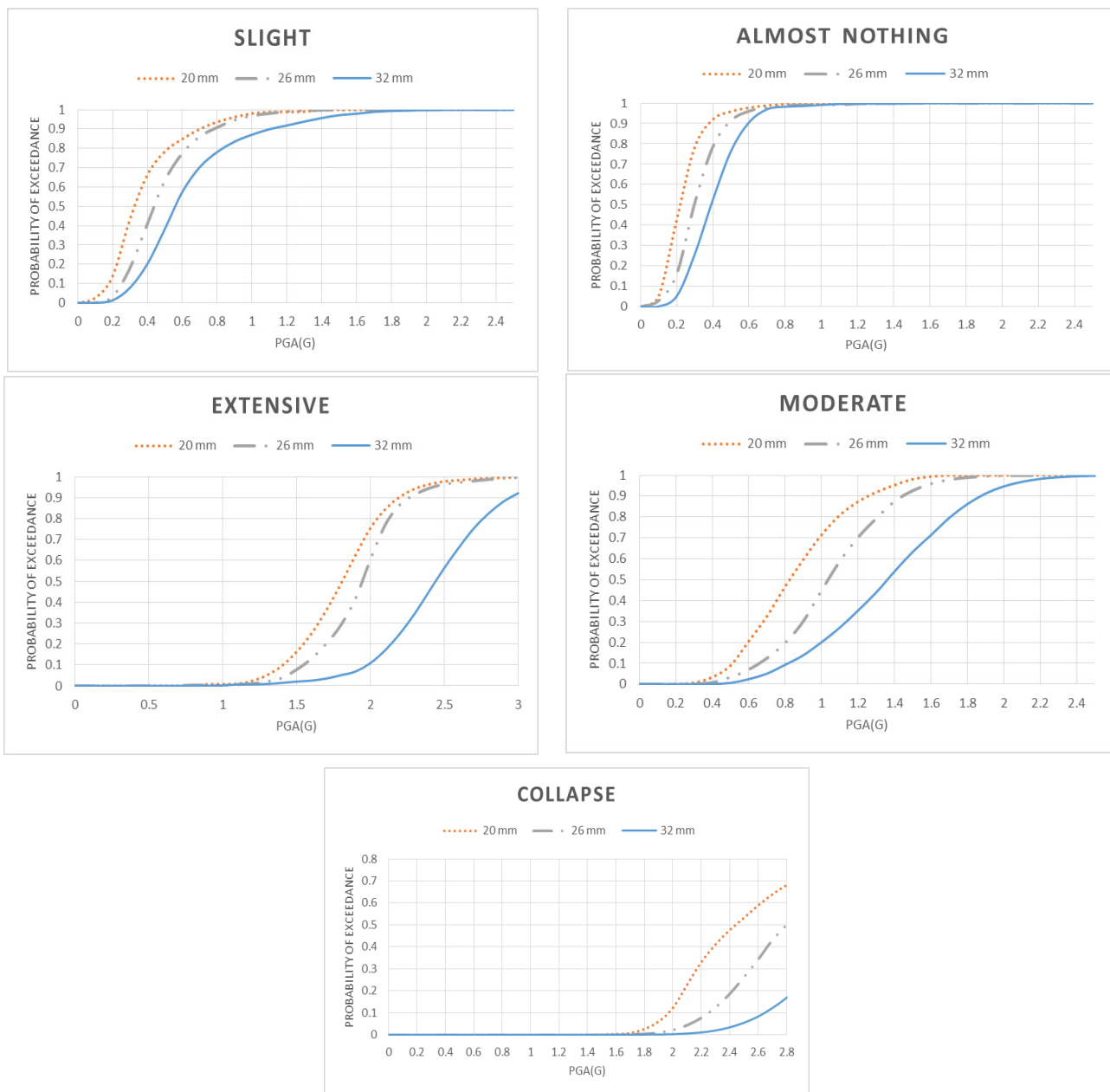
- با توجه به منحنی‌های شکنندگی که برای مقادیر مختلف قطر ناحیه محصور بتن رسم شده است، می‌توان نتیجه گرفت با کاهش قطر ناحیه محصور بتن، احتمال خرابی پایه‌های پل افزایش می‌یابد.
- برای مقادیر قطر پایه در نظر گرفته شده، مشاهده می‌گردد با افزایش قطر پایه پل‌ها، احتمال خرابی پایه‌ها کاهش می‌یابد. در این پژوهش قطر ۱/۵، ۱/۸ و ۲ متر برای پایه‌ها در نظر گرفته شده است.
- برای مقادیر مقاومت مشخصه بتن، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مقاومت مشخصه بتن تأثیر قابل توجهی بر روی احتمال خرابی ندارد. با این وجود افزایش مقاومت مشخصه بتن کاهش

۳-۸- اثر قطر میلگرد طولی بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها

شکل ۱۱ نشان‌دهنده منحنی‌های شکنندگی مربوط به مقادیر مختلف قطر میلگرد طولی می‌باشد که برای بررسی اثر تغییرات قطر میلگرد طولی بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها استفاده می‌کنیم. مطابق شکل می‌توان گفت که با افزایش قطر میلگرد طولی، احتمال خرابی برای تمامی حدود خرابی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، در حد خرابی محدود و برای شتاب $0.4g$ احتمال خرابی پایه‌های پل برای قطر میلگرد ۲۰، ۲۶ و ۳۲ میلی‌متر به ترتیب برابر است با ۹۲٪، ۷۸٪ و ۵۳٪. همچنین برای حد متوسط و شتاب $1.2g$ ، احتمال خرابی پایه‌ها به ترتیب عبارت است از ۸۷٪، ۷۰٪ و ۳۵٪.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مقادیر قطر ناحیه محصور بتن، قطر پایه، مقاومت مشخصه بتن، تنش تسلیم فولاد، سختی جداگر لرزه‌ای و



شکل ۱۱. مقایسه میانگین منحنی‌های شکنندگی پل در پنج حالت خرابی و برای مقادیر مختلف قطر میگرد طولی

Fig. 11. Fragility curves of different longitudinal rebar diameter in all damage states

پژوهش می‌باشد. با توجه به نمودارهای IDA و منحنی‌های شکنندگی ارائه شده، مشاهده می‌گردد که میزان سختی جداگرها نقش مهمی در نوع رفتار پایه‌ها و میزان خرابی دارد، بطوری‌که با افزایش میزان سختی جداگر لرزه‌ای، اتصال رو سازه به زیر سازه با سختی بیشتری انجام گرفته و پایه‌ها تغییر مکان بیشتری را تحمل می‌کنند. با توجه به نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان سختی جداگر لرزه‌ای، احتمال خرابی پایه‌ها افزایش می‌یابد.

احتمال خرابی می‌گردد.
 • با توجه به منحنی‌های شکنندگی ارائه شده، مشاهده می‌گردد با افزایش میزان تنش تسلیم فولاد از ۳۰۰ مگاپاسکال به مقدار ۴۰۰ مگاپاسکال و از ۴۰۰ به ۵۰۰ مگاپاسکال، احتمال خرابی پایه‌های پل کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش تنش تسلیم فولاد موجب کاهش احتمال خرابی می‌گردد.
 • سختی جداگرهای لرزه‌ای نیز دیگر متغیر استفاده شده در این

- Safety Using Seismic Isolation Journal of Transportation Research, 2006) (4)2).
- [7] S.M. ZAHRAEI, H. SAMI, Seismic performance evaluation of bridges with existing expansion bearings, 4)5 (17)) (2009)
- [8] A. Kalantari, A. Moayedi, Evaluation of Seismic Performance Indices of Rubber-Friction Bearings in an Isolated Highway Bridge under Near Fault Ground Motion Bulletin of Earthquake Science and Engineering.
- [9] S.M. Majidzamani, H. Vulnerability assessment of concrete bridges using fragility curves and Iran seismic zone's earthquakes (in Persian), in: Seventh national concrete conference of Iran, Tehran, .2015
- [10] G.H. Siqueira, A.S. Sanda, P. Paultre, J.E. Padgett, Fragility curves for isolated bridges in eastern Canada using experimental results, Engineering Structures, 74 (2014) .324-311
- [11] R. Kumar, P. Gardoni, Effect of seismic degradation on the fragility of reinforced concrete bridges, Engineering Structures, 79 (2014) .275-267
- [12] A. Singhal, A.S. Kiremidjian, A method for earthquake motion-damage relationship with application to reinforced concrete frames, National Center for Earthquake Engineering Research, .1997
- [13] M.A. Erberik, A.S. Elnashai, Fragility analysis of flat-slab structures, Engineering Structures, 7)26) (2004) .948-937
- [14] S.-H. Jeong, A.S. Elnashai, Probabilistic fragility analysis parameterized by fundamental response quantities, Engineering Structures, 6)29) (2007) .1251-1238
- [15] H.-M. MR1, Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Technical Manual, National Institute of Building Sciences, .2003
- [16] A. Palazzo, P. Castaldo, P.D. Vecchia, Seismic reliability analysis of base-isolated structures with friction pendulum system, in: 2014 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems Proceedings, 2014, pp. .6-1
- [17] J. Simon, L. Gergely Vigh, Seismic Reliability Assessment of Typical Road Bridges in Hungary, Journal of Earthquake Engineering, 10)22) (2018) .1786-1758

• در این پژوهش قطرهای ۲۰، ۲۶ و ۳۲ میلی متر برای انجام تحلیل در نظر گرفته شده است. نمودارهای شکنندگی نشان می‌دهند که با افزایش قطر میلگردهای طولی، احتمال خرابی پایه‌ها کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
I	ممان اینرسی، m^4
J	ممان اینرسی پیچشی، m^4
f'_c	مقاومت مشخصه بتن، MPa
f_y	تنش تسلیم فولاد، MPa
K	سختی جداگر لرزه‌ای، ton/m
PGA	بیشینه شتاب زمین، g (m/s^2)
$Cover$	پوشش بتن، cm
D	قطر پایه، m
ϕ	قطر میلگرد طولی، mm

مراجع

- [1] S. Banerjee, M. Shinozuka, Mechanistic quantification of RC bridge damage states under earthquake through fragility analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 1)23) (2008) .22-12
- [2] Kilanitis, A. Sextos, Impact of earthquake-induced bridge damage and time evolving traffic demand on the road network resilience, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 1)6) (2019) .48-35
- [3] A. Khorraminezhad, Investigation of behavior factor in isolated and non-isolated concrete bridges (in Persian), Elm O Farhang, .2012
- [4] M.G.B. Shayanfar, M; Jahani, M, Reliability Theory of Structures (in Persian), Iran University of Science and Technology, .2015
- [5] M.R Shiravand., S. Mahboubi, P. O, Journal of Structural and Construction Engineering, Study on seismic behavior of integral concrete bridges with different skew angles through fragility curves, 4)4 (14)) (2018).
- [6] M. Zahraiee, M.M. Mohammadi, Upgrading Bridge

- Science Ltd, Oxford, 2003, pp. 2212-2208
- [26] B.G. Nielson, R. DesRoches, Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach, 6(36) (2007) .839-823
- [27] FEMA-350, Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, in: Prepared by SAC Joint Venture for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., .2000
- [28] FEMA-351, Recommended seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings, in: Prepared by SAC Joint Venture for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
- [29] A. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, 3(31) (2002) .514-491
- [30] O.-S. Kwon, A.S. Elnashai, Fragility analysis of a highway over-crossing bridge with consideration of soil-structure interactions, Structure and Infrastructure Engineering, 2-1(6) (2010) .178-159
- [18] A. Dutta, J.B. Mander, Seismic fragility analysis of highway bridges, Center-to-Center Project Workshop on Earthquake Engineering in Transportation Systems, .1999
- [19] U.o. California, Open System for Earthquake EngineeringSimulation, <https://opensees.berkeley.edu.in>.
- [20] A.A.o.S.H.a.T. Officials, AASHTO LRFD bridge design specifications, customary U.S units, in, .2012
- [21] M.o.R.a. Transportation, Code 463 Road and Railway Bridges Seismic Resistant Design Code, in, .2008
- [22] R.R. Wakefield, A.S. Nazmy, D.P. Billington, Analysis of Seismic Failure in Skew RC Bridge, 3(117) (1991) .986-972
- [23] J.B. Mander, M.J.N. Priestley, R. Park, Theoretical Stress and Strain Model for Confined Concrete, 8(114) (1988) 1826-1804
- [24] J.C.o.S.S. (JCSS), JCSS Probabilistic Model Code in, .2001
- [25] F. Biondini, F. Bontempi, D.M. Frangopol, - Reliability of material and geometrically nonlinear reinforced and prestressed concrete structures, in: K.J. Bathe (Ed.) Computational Fluid and Solid Mechanics 2003, Elsevier

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.R. Shiravand, M. Vasef, Effect of Structural Parameters on Failure Probability of Piers in Seismic Isolated Concrete Bridges, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2995-3016.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17505.6617](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17505.6617)



