بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه علم و فرهنگ

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران – گرایش سازه

ارزیابی اثر عدم قطعیت زلزله، مصالح و مدلسازی بر منحنی های شکنندگی پل ها

نگارش

حمیدرضا محمدی

استاد راهنما

دکتر رضا کرمی محمدی

اسفند ماه ۱۳۹۱

(صفحه مربوط به حق مالکیت پایان‌نامه)

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق

موضوع این پایان‌نامه/ رساله متعلق به دانشگاه علم و فرهنگ است.

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه علم و فرهنگ

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران – گرایش سازه

ارزیابی اثر عدم قطعیت زلزله، مصالح و مدلسازی بر منحنی های شکنندگی پل ها

نگارش

حمیدرضا محمدی

استاد راهنما

دکتر رضا کرمی محمدی

اسفند ماه ۱۳۹۱

تقدیم به

خانواده ی عزیزم

که همواره در تمام مراحل زندگی پشتیبان اصلی ام هستند.

در اینجا لازم می‌دانم از استاد فرزانه، جناب آقای دکتر رضا کرمی محمدی که در طول انجام پایان نامه همواره از راهنمایی‌های ایشان بهره مند بوده‌ام و بی‌دریغ وقت ذیقیمت خود را در اختیار اینجانب قرار داده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. از آقایان دکتر سید بهرام بهشتی اول و دکتر علیرضا آقابابایی مبارکه که زحمت تصحیح و حضور در جلسه دفاع از این پایان نامه را تقبل کردند نیز کمال تشکر را دارم.

در پایان نیز بر خود لازم می دانم از:

انجمن بتن ایران، شرکت مهندسین مشاور فراشار آسیا، آقایان دکتر حسین پرستش، دکتر محمد یکرنگ‌نیا، مهندس محمدرضا محمودیان دانشجوی محترم دکتری سازه، مهندس محمودرضا محمدی، مهندس امیر حسین محمود هاشمی و مهندس بابک جلیلی که در مقاطع مختلف این پایان نامه از هم یاریشان بهره مند بوده‌ام، صمیمانه تشکر نمایم.

چکیده

در این پایان‌نامه اثر عدم قطعیت موجود در ظرفیت مصالح در کنار عدم قطعیت ناشی از رکوردهای مختلف زلزله و عدم قطعیت مدلسازی پل‌ها در منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای برای پل بتنی سه دهانه‌ی متعارف کشور مورد بررسی قرار گرفته است. بر این مبنا بر روی نتایج مقاومت فشاری بتن و تنش تسلیم آرماتور مطالعات میدانی صورت گرفته و نتایج آن در مدلسازی تحلیلی پل مورد استفاده قرار گرفته است. جهت مدلسازی پل بصورت سه بعدی از نرم افزار کد باز Opensees استفاده شده و برای انجام آنالیز تاریخچه زمانی، رکوردهای میدان دور با فاصله ی ۱۵ تا ۸۰ کیلومتری انتخاب شده است. در ادامه تاثیر عدم قطعیت‌های مذکور بر منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل ارزیابی شده است که نشان می دهد عدم قطعیت زلزله بر منحنی شکنندگی لرزه‌ای تاثیر زیادی دارد. عدم قطعیت مصالح فولادی و بتنی در سطوح PGA کوچکتر اثر چندانی بر منحنی شکنندگی لرزه‌ای ندارند اما در سطوح بالاتر PGA، تاثیر آن‌ها قابل چشم پوشی نیست. نتایج حاصله نشان می-دهد آسیب پذیری پل مورد مطالعه در سطوح خسارات مختلف در جهات طولی و عرضی کم برآورد می‌شود. با این حال باید اثر پارامترهای مختلف در منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد تا طراحان و مهندسان بتوانند اثر پارامترهای طراحی پل‌ها را در خسارت‌های مورد نظر پس از زلزله با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهند.

واژگان کلیدی: عدم قطعیت، منحنی شکنندگی، حالت حدی خسارت، آنالیز دینامیکی فزاینده

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۱-۱- منحنی های شکنندگی تجربی ۳

۱-۱-۲- منحنی های شکنندگی مبتنی بر قضاوت مهندسی ۴

۱-۱-۳- منحنی های شکنندگی تحلیلی ۴

۱-۱-۴- منحنی های شکنندگی ترکیبی ۴

۱-۲- طرح مسأله ۴

۱-۳- اهداف مطالعه ۵

۱-۴- چکیده مطالب فصل ها ۶

فصل دوم: تاریخچه ی مطالعات قبلی ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- تاریخچه مطالعه ۸

فصل سوم: مفاهیم و فرضیات مدلسازی ۲۶

۳-۱- مقدمه ۲۷

۳-۲- مشخصات بتن ۲۷

۳-۲-۱- مدول الاستیسیته بتن ۲۷

۳-۲-۲- رفتار فشاری بتن ۲۸

۳-۲-۳- ضریب پواسون و مدول برشی بتن ۳۳

۳-۳- مشخصات آرماتورهای فولادی ۳۳

۳-۴- مطالعات میدانی برای تعیین عدم قطعیت مصالح ۳۳

۳-۴- شاخص خسارت ۳۵

۳-۵- توسعه ی منحنی های شکنندگی لرزه ای با استفاده از روش تحلیلی ۳۹

فصل چهارم: مدلسازی اجزاء محدود پل مورد مطالعه ۴۲

۴-۱- مقدمه ۴۳

۴-۲- نرم افزار اجزاء محدود OPENSEES ۴۴

۴-۳- ویژگی های مدل اجزاء محدود پل مورد مطالعه ۴۵

۴-۳-۱- مشخصات فنی و هندسه ی پل مورد مطالعه ۴۵

۴-۳-۲- فرضیات اصلی مدلسازی ۴۸

۴-۳-۳- مدلسازی عرشه ۴۸

۴-۳-۴- مدلسازی ستون های پل ۵۰

۴-۳-۵- مدلسازی تیر سرستون ۵۱

۴-۳-۶- مشخصات سایر المان های مورد استفاده در مدلسازی ۵۲

۴-۳-۷- مصالح به کار رفته در مدلسازی ۵۳

۴-۳-۸- روش تحلیل ۵۵

۴-۴- نتایج تحلیل پوش آور ستون ها و ارائه ی شاخص خسارت ۵۶

۴-۵- تحلیل دینامیکی مدل اجزاء محدود ۵۷

۴-۵-۱- تحلیل ارتعاش آزاد ۵۷

۴-۵-۲- تحلیل دینامیکی ۵۷

۴-۶- بررسی صحت مدلسازی ۶۷

۴-۶-۱- مقدمه ۶۷

۴-۶-۲- مدلسازی ۶۸

۴-۶-۳- نتایج عددی ۷۴

فصل پنجم: بررسی نتایج ۷۷

۵-۱- مقدمه ۷۸

۵-۲- منحنی های دینامیکی فزاینده پل مورد مطالعه ۷۸

۵-۳- منحنی های شکنندگی لرزه ای پل مورد مطالعه ۸۰

۵-۴- ارزیابی اثر عدم قطعیت در منحنی های شکنندگی لرزه ای پل مورد مطالعه ۸۱

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۳

۶-۱- مقدمه ۹۴

۶-۲- نتیجه گیری ۹۵

۶-۳- پیشنهادات ۹۶

فهرست مراجع ۹۸

پیوست الف: منحنی‌های دینامیکی فزاینده پل مورد مطالعه ۱۰۲

پ-الف-۱- مقدمه ۱۰۳

پ-الف-۲- منحنی های دینامیکی فزاینده پل مورد مطالعه در تحریک طولی ۱۰۳

پ-الف-۳- منحنی های دینامیکی فزاینده پل مورد مطالعه در تحریک عرضی ۱۱۲

پیوست ب: منحنی‌های شکنندگی لرزه ای پل مورد مطالعه ۱۲۱

پ-ب-۱- مقدمه ۱۲۲

پ-ب-۲- منحنی های شکنندگی لرزه ای پل مورد مطالعه در جهت طولی ۱۲۲

پ-ب-۳- منحنی های شکنندگی لرزه ای پل مورد مطالعه در جهت عرضی ۱۳۱

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۳- ۱- تعریف کیفی سطوح خسارت ۳۶
جدول ۳- ۲- شاخص های خسارت ارائه شده توسط محققین..... ۳۷
جدول ۳- ۳- شاخص خسارت مورد استفاده در این مطالعه ۳۸
جدول ۴- ۲- مشخصات روسازه پل مورد مطالعه..... ۴۹
جدول ۴- ۳- مشخصات مصالح بتنی با مقاومت مشخصه ی ۲۷مگاپاسکال ۵۴
جدول ۴- ۴- مشخصات مصالح بتنی با مقاومت مشخصه ی ۲۸مگاپاسکال ۵۴
جدول ۴- ۵- مشخصات مصالح بتنی با مقاومت مشخصه ی ۲۹مگاپاسکال ۵۴
جدول ۴- ۶- مشخصات مصالح بتنی با مقاومت مشخصه ی ۳۰مگاپاسکال ۵۴
جدول ۴- ۷- مشخصات مصالح بتنی با مقاومت مشخصه ی ۳۱مگاپاسکال ۵۵
جدول ۴- ۸- مشخصات مصالح فولادی تعریف شده برای آرماتورهای طولی ۵۵
جدول ۴- ۹- مقادیر تغییرمکان حد تسلیم پایه پل در جهات طولی و عرضی..... ۵۶
جدول ۴- ۱۰- دوره ی تناوب پل مورد مطالعه با فرض عرشه ی انعطاف پذیر..... ۵۷
جدول ۴- ۱۱- مشخصات زلزله های انتخاب شده..... ۵۹
جدول ۴- ۱۲- مشخصات تیرهای طولی معادل عرشه و تیرهای سرستون ۷۱
جدول ۴- ۱۳- مشخصات آرماتورهای طولی ستون ها..... ۷۱
جدول ۴- ۱۴- مشخصات مصالح بتنی ستون ها ۷۱
جدول ۴- ۱۵- مقایسه دوره تناوب بدست آمده برای پل فوت هیل در این مطالعه و سایر مراجع ۷۴
جدول ۵- ۱- اثر افزایش تنش تسلیم آرماتور بر کاهش احتمال خرابی برای PGA=1.0g در جهت طولی ۸۹
جدول ۵- ۲- اثر افزایش مقاومت فشاری بتن بر کاهش احتمال خرابی برای PGA=1.0g در جهت طولی..... ۸۹
جدول ۵- ۳- اثر افزایش تنش تسلیم آرماتور بر کاهش احتمال خرابی برای PGA=1.6g در جهت عرضی ۹۰
جدول ۵- ۴- اثر افزایش مقاومت فشاری بتن بر کاهش احتمال خرابی برای PGA=1.6g در جهت عرضی..... ۹۰

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲- ۱- تعریف منحنی شکنندگی ۹
شکل ۲- ۲- ماتریس فرکانسی خسارت برای پل های چند دهانه (باسوز و همکاران) ۱۰
شکل ۲- ۳- الف- ماتریس احتمال خسارت؛ ب- منحنی شکنندگی تجربی؛ برای پل های چند دهانه ۱۱
شکل ۲- ۴- تبدیل منحنی پوش آور به طیف ظرفیت (داتا، ۱۹۹۹) ۱۵
شکل ۲- ۵- طیف پاسخ شتاب – جابجایی ۱۵
شکل ۲- ۶- نمایش احتمالاتی نیاز سازه ای و ظرفیت ۱۶
شکل ۲- ۷- تولید منحنی شکنندگی تحلیلی با استفاده از تحلیل های تاریخچه ی زمانی غیرخطی ۱۷
شکل ۲- ۸- مدل نیاز لرزه ای احتمالاتی کرنل ۱۷
شکل ۲- ۹- منحنی های شکنندگی پل شماره ۱ در دو حالت خسارت کامل و خسارت متوسط ۱۹
شکل ۲-۱۰- منحنی شکنندگی لرزه ای ایجاد شده با روش تابع چگالی احتمال ۲۱
شکل ۲- ۱۱- انواع حالت های مقاوم سازی در مطالعه ی پدگت و همکاران ۲۲
شکل ۲- ۱۲- مدل مورد استفاده در مطالعات چیو و همکاران ۲۳
شکل ۲- ۱۳- طرح آنالیز پل مورد مطالعه در مصر ۲۴
شکل ۲- ۱۴- منحنی شکنندگی پل مورد مطالعه توسط از ال عرب ۲۴
شکل ۳ - ۱- دیاگرام تنش-کرنش بتن ارائه شده توسط کالترانس ۲۸
شکل ۳ - ۲- مدل تنش-کرنش پیشنهادی مندر برای بتن محصور و غیر محصور ۲۹
شکل ۳ - ۳- هسته ی محصور موثر برای خاموت مستطیلی ۳۰
شکل ۳ - ۴- تعیین مقاومت بتن محصور شده از روی تنش محصورکننده ی جانبی ۳۲
شکل ۳ - ۵- فراوانی داده های مقاومت فشاری بتن ۳۴
شکل ۳ - ۶- فراوانی داده های تنش تسلیم آرماتورها ۳۴
شکل ۳ - ۷- توزیع نرمال مقاومت فشاری بتن ۳۵
شکل ۳ - ۸- توزیع نرمال تنش تسلیم آرماتورها ۳۵
شکل ۳ - ۹- معادلسازی منحنی پوش آور بصورت دو خطی ۳۸
شکل ۳ -۱۰- متدولوژی منحنی شکنندگی بر اساس تحقیقات تاوارس ۴۱
شکل ۴- ۱- نمای پل مورد مطالعه ۴۶
شکل ۴- ۲- پلان پل مورد مطالعه (ابعاد بر حسب سانتیمتر) ۴۶
شکل ۴- ۳- جزئیات نمای پل مورد مطالعه (ابعاد برحسب سانتیمتر) ۴۶
شکل ۴- ۴- جزئیات عرشه پل مورد مطالعه (ابعاد برحسب سانتیمتر) ۴۷
شکل ۴- ۵- جزئیات پایه های پل مورد مطالعه (ابعاد برحسب سانتیمتر) ۴۷
شکل ۴- ۶- مختصات عمومی پل مورد مطالعه ۴۸
شکل ۴- ۷- شکل شماتیک روسازه پل مورد مطالعه ۴۹
شکل ۴- ۸- شکل شماتیک مقطع ستون ها همراه با تقسیمات فایبرها ۵۰
شکل ۴- ۹- شکل شماتیک مدل اجزاء محدود پایه های پل ۵۱

شکل ۴- ۱۰-مدلسازی تیرهای سرستون به همراه تقسیمات فایبر آن ۵۲
شکل ۴- ۱۱- المان های صلب در مدلسازی ۵۲
شکل ۴- ۱۲-منحنی رفتاری مصالح بتنی Concrete01 ..... ۵۳
شکل ۴- ۱۳- منحنی رفتاری مصالح فولادی نوع Steel02 ..... ۵۳
شکل ۴- ۱۴- شتابنگاشت زلزله طبس با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۲۷۹g ۵۹
شکل ۴- ۱۵- شتابنگاشت زلزله طبس با بیشینه شتاب زمین ۰/۴۰۶۱g ۶۰
شکل ۴- ۱۶- شتابنگاشت زلزله چی چی با بیشینه شتاب زمین ۰/۵۱۲g ۶۰
شکل ۴- ۱۷- شتابنگاشت زلزله لندرز با بیشینه شتاب زمین ۰/۲۸۲۸g ۶۰
شکل ۴- ۱۸- شتابنگاشت زلزله ویتیر ناروس با بیشینه شتاب زمین ۰/۲۹۳۵g ۶۱
شکل ۴- ۱۹- شتابنگاشت زلزله لوماپریتا با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۲۴۱g ۶۱
شکل ۴- ۲۰- شتابنگاشت زلزله کپ مندوسینو با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۸۵g ۶۱
شکل ۴- ۲۱- شتابنگاشت زلزله نورثریج با بیشینه شتاب زمین ۰/۴۴۴g ۶۲
شکل ۴- ۲۲- شتابنگاشت زلزله نورثریج با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۵۴۶g ۶۲
شکل ۴- ۲۳- شتابنگاشت زلزله نورثریج با بیشینه شتاب زمین ۰/۵۶۲۵g ۶۲
شکل ۴- ۲۴- طیف فوریه زلزله طبس با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۲۷۹g ۶۳
شکل ۴- ۲۵- طیف فوریه زلزله طبس با بیشینه شتاب زمین ۰/۴۰۶۱g ۶۳
شکل ۴- ۲۶- طیف فوریه زلزله چی چی با بیشینه شتاب زمین ۰/۵۱۲g ۶۳
شکل ۴- ۲۷- طیف فوریه زلزله لندرز با بیشینه شتاب زمین ۰/۲۸۲۸g ۶۴
شکل ۴- ۲۸- طیف فوریه زلزله ویترناروس با بیشینه شتاب زمین ۰/۲۹۳۵g ۶۴
شکل ۴- ۲۹- طیف فوریه زلزله لوماپریتا با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۲۴۱g ۶۴
شکل ۴- ۳۰- طیف فوریه زلزله کپ مندوسینو با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۸۵g ۶۵
شکل ۴- ۳۱- طیف فوریه زلزله نورثریج با بیشینه شتاب زمین ۰/۴۴۴g ۶۵
شکل ۴- ۳۲- طیف فوریه زلزله نورثریج با بیشینه شتاب زمین ۰/۳۵۴۶g ۶۵
شکل ۴- ۳۳- طیف فوریه زلزله نورثریج با بیشینه شتاب زمین ۰/۵۶۲۵g ۶۶
شکل ۴- ۳۴- آسیب وارده به ستون های پایه میانی پل جنوب شرقی زیر گذر بلوار فوت هیل ۶۷
شکل ۴- ۳۵- جابجایی ماندگار ۷/۶۷ سانتیمتری در راستای افزایش تورب ۶۸
شکل ۴- ۳۶- ابعاد هندسی و مشخصات کلی پل جنوب شرقی زیرگذر بلوار فوت هیل ۶۹
شکل ۴- ۳۷- ابعاد هندسی پایه ها و عرشه ی پل جنوب شرقی زیرگذر بلوار فوت هیل ۶۹
شکل ۴- ۳۸- مقطع ستون های پل جنوب شرقی زیرگذر بلوار فوت هیل ۶۹
شکل ۴- ۳۹- نمای سه بعدی مدل اجزاء محدود پل مورب فوت هیل در نرم افزار Opensees ۷۲
شکل ۴- ۴۰- شتابنگاشت مولفه ی طولی زمین لرزه ی سانفرناندو ۷۳
شکل ۴- ۴۱-شتابنگاشت مولفه ی عرضی زمین لرزه ی سانفرناندو ۷۳
شکل ۴- ۴۲-شتابنگاشت مولفه ی قائم زمین لرزه ی سانفرناندو ۷۳
شکل ۴- ۴۳- بیشینه ی جابجایی عرضی گره گوشه عرشه ۷۵
شکل ۴- ۴۴- بیشینه ی جابجایی طولی گره گوشه عرشه ۷۵
شکل ۴- ۴۵- بیشینه ی نیروی برشی ستون ها در راستای طولی ۷۵

شکل ۴- ۴۶- بیشینه ی نیروی برشی ستون ها در راستای عرضی ۷۶
شکل ۴- ۴۷- بیشینه ی لنگر خمشی ستون ها حول محور در راستای طولی ۷۶
شکل ۴- ۴۸- بیشینه ی لنگر خمشی ستون ها حول محور در راستای عرضی ۷۶
شکل ۵- ۱- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=27 MPa و fy=420 MPa) ۷۹
شکل ۵- ۲- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=27 MPa و fy=420 MPa) ۷۹
شکل ۵- ۳- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=27 MPa و fy=420 MPa) ۸۰
شکل ۵- ۴- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=27 MPa و fy=420 MPa) ۸۰
شکل ۵- ۵- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت خسارت خفیف ۸۳
شکل ۵- ۶- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت خسارت متوسط ۸۳
شکل ۵- ۷- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت خسارت گسترده ۸۴
شکل ۵- ۸- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت فروریزش کامل ۸۴
شکل ۵- ۹- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت خسارت خفیف ۸۴
شکل ۵- ۱۰- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت خسارت متوسط ۸۵
شکل ۵- ۱۱- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت خسارت گسترده ۸۵
شکل ۵- ۱۲- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت طولی در حالت فروریزش کامل ۸۵
شکل ۵- ۱۳- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت خسارت خفیف ۸۶
شکل ۵- ۱۴- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت خسارت متوسط ۸۶
شکل ۵- ۱۵- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت خسارت گسترده ۸۶
شکل ۵- ۱۶- اثر تنش تسلیم آرماتور بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت فروریزش کامل ۸۷
شکل ۵- ۱۷- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت خسارت خفیف ۸۷
شکل ۵- ۱۸- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت خسارت متوسط ۸۷
شکل ۵- ۱۹- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت خسارت گسترده ۸۸
شکل ۵- ۲۰- اثر مقاومت فشاری بتن بر منحنی شکنندگی جهت عرضی در حالت فروریزش کامل ۸۸
شکل ۵- ۲۱- در نظر گرفتن عدم قطعیتهای مذکور برای ترسیم یک منحنی شکنندگی واحد ۹۱
شکل ۵- ۲۲- منحنی شکنندگی پل با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در جهت طولی ۹۲
شکل ۵- ۲۳- منحنی شکنندگی پل با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در جهت عرضی ۹۲
شکل پ-الف- ۱- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=27 MPa و fy=420 MPa) ۱۰۳
شکل پ-الف- ۲- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=28 MPa و fy=420 MPa) ۱۰۳
شکل پ- الف- ۳- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=29 MPa و fy=420 MPa) ۱۰۴
شکل پ- الف- ۴- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=30 MPa و fy=420 MPa) ۱۰۴
شکل پ- الف- ۵- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=31 MPa و fy=420 MPa) ۱۰۴
شکل پ- الف- ۶- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=27 MPa و fy=440 MPa) ۱۰۵
شکل پ- الف- ۷- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=28 MPa و fy=440 MPa) ۱۰۵
شکل پ- الف- ۸- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=29 MPa و fy=440 MPa) ۱۰۵
شکل پ- الف- ۹- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=30 MPa و fy=440 MPa) ۱۰۶
شکل پ- الف- ۱۰- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=31 MPa و fy=440 MPa) ۱۰۶

شکل پ- الف- ۱۱- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=27 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۰۶
شکل پ- الف- ۱۲- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=28 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۰۷
شکل پ- الف- ۱۳- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=29 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۰۷
شکل پ- الف- ۱۴- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=30 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۰۷
شکل پ- الف- ۱۵- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=31 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۰۸
شکل پ- الف- ۱۶- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=27 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۰۸
شکل پ- الف- ۱۷- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=28 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۰۸
شکل پ- الف- ۱۸- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=29 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۰۹
شکل پ- الف- ۱۹- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=30 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۰۹
شکل پ- الف- ۲۰- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=31 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۰۹
شکل پ- الف- ۲۱- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=27 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۰
شکل پ- الف- ۲۲- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=28 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۰
شکل پ- الف- ۲۳- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=29 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۰
شکل پ- الف- ۲۴- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=30 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۱
شکل پ- الف- ۲۵- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک طولی (fc=31 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۱
شکل پ- الف- ۲۶- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=27 MPa و fy=420 MPa)..... ۱۱۲
شکل پ- الف- ۲۷- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=28 MPa و fy=420 MPa)..... ۱۱۲
شکل پ- الف- ۲۸- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=29 MPa و fy=420 MPa)..... ۱۱۳
شکل پ- الف- ۲۹- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=30 MPa و fy=420 MPa)..... ۱۱۳
شکل پ- الف- ۳۰- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=31 MPa و fy=420 MPa)..... ۱۱۳
شکل پ- الف- ۳۱- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=27 MPa و fy=440 MPa)..... ۱۱۴
شکل پ- الف- ۳۲- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=28 MPa و fy=440 MPa)..... ۱۱۴
شکل پ- الف- ۳۳- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=29 MPa و fy=440 MPa)..... ۱۱۴
شکل پ- الف- ۳۴- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=30 MPa و fy=440 MPa)..... ۱۱۵
شکل پ- الف- ۳۵- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=31 MPa و fy=440 MPa)..... ۱۱۵
شکل پ- الف- ۳۶- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=27 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۱۵
شکل پ- الف- ۳۷- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=28 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۱۶
شکل پ- الف- ۳۸- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=29 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۱۶
شکل پ- الف- ۳۹- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=30 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۱۶
شکل پ- الف- ۴۰- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=31 MPa و fy=460 MPa)..... ۱۱۷
شکل پ- الف- ۴۱- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=27 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۱۷
شکل پ- الف- ۴۲- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=28 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۱۷
شکل پ- الف- ۴۳- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=29 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۱۸
شکل پ- الف- ۴۴- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=30 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۱۸
شکل پ- الف- ۴۵- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=31 MPa و fy=480 MPa)..... ۱۱۸
شکل پ- الف- ۴۶- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=27 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۹

شکل پ- الف- ۴۷- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=28 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۹
شکل پ- الف- ۴۸- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=29 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۱۹
شکل پ- الف- ۴۹- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=30 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۲۰
شکل پ- الف- ۵۰- منحنی دینامیکی فزاینده تحت تحریک عرضی (fc=31 MPa و fy=500 MPa)..... ۱۲۰
شکل پ- ب- ۱- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=27 MPa و fy=420 MPa) ۱۲۲
شکل پ- ب- ۲- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=28 MPa و fy=420 MPa) ۱۲۲
شکل پ- ب- ۳- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=29 MPa و fy=420 MPa) ۱۲۳
شکل پ- ب- ۴- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=30 MPa و fy=420 MPa) ۱۲۳
شکل پ- ب- ۵- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=31 MPa و fy=420 MPa) ۱۲۳
شکل پ- ب- ۶- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=27 MPa و fy=440 MPa) ۱۲۴
شکل پ- ب- ۷- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=28 MPa و fy=440 MPa) ۱۲۴
شکل پ- ب- ۸- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=29 MPa و fy=440 MPa) ۱۲۴
شکل پ- ب- ۹- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=30 MPa و fy=440 MPa) ۱۲۵
شکل پ- ب- ۱۰- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=31 MPa و fy=440 MPa) ۱۲۵
شکل پ- ب- ۱۱- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=27 MPa و fy=460 MPa) ۱۲۵
شکل پ- ب- ۱۲- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=28 MPa و fy=460 MPa) ۱۲۶
شکل پ- ب- ۱۳- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=29 MPa و fy=460 MPa) ۱۲۶
شکل پ- ب- ۱۴- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=30 MPa و fy=460 MPa) ۱۲۶
شکل پ- ب- ۱۵- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=31 MPa و fy=460 MPa) ۱۲۷
شکل پ- ب- ۱۶- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=27 MPa و fy=480 MPa) ۱۲۷
شکل پ- ب- ۱۷- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=28 MPa و fy=480 MPa) ۱۲۷
شکل پ- ب- ۱۸- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=29 MPa و fy=480 MPa) ۱۲۸
شکل پ- ب- ۱۹- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=30 MPa و fy=480 MPa) ۱۲۸
شکل پ- ب- ۲۰- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=31 MPa و fy=480 MPa) ۱۲۸
شکل پ- ب- ۲۱- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=27 MPa و fy=500 MPa) ۱۲۹
شکل پ- ب- ۲۲- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=28 MPa و fy=500 MPa) ۱۲۹
شکل پ- ب- ۲۳- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=29 MPa و fy=500 MPa) ۱۲۹
شکل پ- ب- ۲۴- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=30 MPa و fy=500 MPa) ۱۳۰
شکل پ- ب- ۲۵- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت طولی (fc=31 MPa و fy=500 MPa) ۱۳۰
شکل پ- ب- ۲۶- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=27 MPa و fy=420 MPa) ۱۳۱
شکل پ- ب- ۲۷- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=28 MPa و fy=420 MPa) ۱۳۱
شکل پ- ب- ۲۸- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=29 MPa و fy=420 MPa) ۱۳۲
شکل پ- ب- ۲۹- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=30 MPa و fy=420 MPa) ۱۳۲
شکل پ- ب- ۳۰- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=31 MPa و fy=420 MPa) ۱۳۲
شکل پ- ب- ۳۱- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=27 MPa و fy=440 MPa) ۱۳۳
شکل پ- ب- ۳۲- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=28 MPa و fy=440 MPa) ۱۳۳

شکل پ- ب- ۳۳- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=29 MPa و fy=440 MPa) ۱۳۳
شکل پ- ب- ۳۴- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=30 MPa و fy=440 MPa) ۱۳۴
شکل پ- ب- ۳۵- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=31 MPa و fy=440 MPa) ۱۳۴
شکل پ- ب- ۳۶- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=27 MPa و fy=460 MPa) ۱۳۴
شکل پ- ب- ۳۷- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=28 MPa و fy=460 MPa) ۱۳۵
شکل پ- ب- ۳۸- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=29 MPa و fy=460 MPa) ۱۳۵
شکل پ- ب- ۳۹- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=30 MPa و fy=460 MPa) ۱۳۵
شکل پ- ب- ۴۰- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=31 MPa و fy=460 MPa) ۱۳۶
شکل پ- ب- ۴۱- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=27 MPa و fy=480 MPa) ۱۳۶
شکل پ- ب- ۴۲- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=28 MPa و fy=480 MPa) ۱۳۶
شکل پ- ب- ۴۳- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=29 MPa و fy=480 MPa) ۱۳۷
شکل پ- ب- ۴۴- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=30 MPa و fy=480 MPa) ۱۳۷
شکل پ- ب- ۴۵- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=31 MPa و fy=480 MPa) ۱۳۷
شکل پ- ب- ۴۶- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=27 MPa و fy=500 MPa) ۱۳۸
شکل پ- ب- ۴۷- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=28 MPa و fy=500 MPa) ۱۳۸
شکل پ- ب- ۴۸- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=29 MPa و fy=500 MPa) ۱۳۸
شکل پ- ب- ۴۹- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=30 MPa و fy=500 MPa) ۱۳۹
شکل پ- ب- ۵۰- منحنی شکنندگی لرزه ای در جهت عرضی (fc=31 MPa و fy=500 MPa) ۱۳۹

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه

پل‌ها به عنوان یکی از سازه‌های زیربنایی و عناصر مهم در شریان حیاتی و شبکه‌ی راه‌ها و حمل و نقل یک کشور، لازم است در برابر عوامل ویرانگر مختلف که بصورت خطرهای طبیعی نظیر زلزله، خطرهای تکنولوژیکی و خطرهای تروریستی هستند، ایمن باشند. واضح است که خرابی پل‌ها تحت اثر زلزله، می‌تواند منجر به بسته شدن خطوط ارتباطی گردد و خرابی‌های فیزیکی مستقیم، صدمات اجتماعی و زیان‌های اقتصادی نظیر ایجاد وقفه در حمل و نقل و عملیات امداد رسانی و ... را بدنبال خواهد داشت. مطالعه و بررسی خرابی‌های پل‌ها در زلزله‌های گذشته، عملکرد قابل قبولی از آن‌ها نشان نمی‌دهد. چیزی که از زلزله‌های مخرب مشاهده شده است، حاکی از آن است که پل‌ها یکی از آسیب‌پذیرترین اجزاء یک سیستم بزرگراه در اثر زلزله هستند[۱]. بنابراین ارزیابی قابلیت اطمینان و یا آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها به منظور طراحی، تعمیر و نگهداری و مقاوم سازی و ارزیابی چرخه‌ی حیات آن‌ها جهت تحقیقات و کارهای حرفه‌ای مهندسی ضروری می‌نماید[۱] و [۲]. یکی از روش‌های پر استفاده که در سال‌های اخیر برای ارزیابی عملکرد یک سازه تحت سطوح مختلف خطر لرزه‌ای و ارزیابی خطر آسیب‌دیدگی آن بدلیل زلزله، به طور گسترده در میان جامعه‌ی علمی مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته است، مدل‌های شکنندگی هستند که بصورت منحنی‌های شکنندگی ارائه می‌شوند[۲]. 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[1]، بیشینه سرعت زمین[2]، بیشینه تغییر مکان زمین[3]، شتاب طیفی، سرعت طیفی، تغییر مکان طیفی) بیان می‌کند و از روش احتمالی به منظور در نظر گرفتن انواع حالت‌ها و عدم قطعیت‌های مختلف که بر سازه‌ها و زلزله‌ها موثر هستند، استفاده می‌شود. از طرفی مدل‌های آماری و تصادفی بسیاری در ارتباط با ارزیابی خطر لرزه‌ای سازه‌های موجود، تا کنون ارائه شده است که این پروسه‌ها در چهار دسته قرار می‌گیرند: منحنی‌های شکنندگی تجربی، منحنی‌های شکنندگی تولید شده بر مبنای قضاوت مهندسی، منحنی‌های شکنندگی تحلیلی و منحنی‌های شکنندگی ترکیبی[۲].

ابتدا به توضیح مختصری درباره‌ی آن‌ها می‌پردازیم.

۱-۱-۱- منحنی‌های شکنندگی تجربی

منحنی‌های شکنندگی تجربی بر اساس مشاهده‌ی داده‌های خسارت جمع آوری شده از زلزله-های گذشته، از طریق آنالیز رگرسیون منطقی به منظور محاسبه‌ی عدم قطعیت یا ماکزیمم احتمال در داده‌های خسارت، شبیه سازی یا محاسبه می‌شوند[۳]، اما منحنی‌های شکنندگی تجربی نوع سازه-ها را مشخص نمی‌کنند(به عنوان مثال اثر پارامترهای مکانیکی، عملکرد استاتیکی یا دینامیکی سازه، ثابت فرکانس، طول مدت و سایر ورودی‌های مربوط به حرکت). به نظر برخی از پژوهشگران، منحنی-های شکنندگی تجربی نتایج منطقی‌تری دارند زیرا بر مبنای خسارت‌های واقعی ایجاد شده در سازه واقعی در اثر زلزله‌های واقعی هستند. با این حال آن‌ها را نمی‌توان به منظور تخمین سطوح خرابی برای یک سیستم خاص قبول کرد و در مناطقی که تجربیات زمین لرزه به اندازه‌ی کافی وجود ندارد، استفاده کرد[۲].

1. Peak Ground Acceleration, PGA
2. Peak Ground Velocity, PGV
3. Peak Ground Displacement, PGD