دانشگاه کردستان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی عمران

عنوان:

بدست آوردن منحنی‌های آسیب‌پذیری پل‌ها با روش‌های احتمالاتی

پژوهشگر:

امیر ملکشاهی

استاد راهنما:

دکتر مرتضی بسطامی

استاد مشاور:

دکتر هوشنگ دباغ

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش سازه

اسفند ماه ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایـج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان‌نامه (رسـاله) متعلق به دانشـگاه کردستان است.

تعهد نامه

اینجانب امیر ملکشاهی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش سازه دانشگاه کردستان، دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

امیر ملکشاهی

۱۸ / ۱۲ / ۱۳۸۸

دانشگاه کردستان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش سازه

عنوان:

بدست آوردن منحنی‌های آسیب‌پذیری پل‌ها با روش‌های احتمالاتی

پژوهشگر:
امیر ملکشاهی

در تاریخ / / ۱۳ توسط کمیته تخصصی وهیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره ..... و درجه ..... به تصویب رسید.

هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱ـ استاد راهنما	دکتر مرتضی بسطامی	استادیار	
۲ـ استاد مشاور	دکتر هوشنگ دباغ	استادیار	
۳ـ استاد داور خارجی	دکتر امیر هوشنگ اخویسی	استادیار	
۴ـ استاد داور داخلی	دکتر علیرضا حبیبی	استادیار	

مهر و امضاء گروه

مهر و امضاء معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

که سبزی وجودم از آنهاست

تقدیر و تشکر

نهایت تقدیر خود را نسبت به آقای دکتر مرتضی بسطامی که در انجام این تحقیق مرا یاری نمودند و با راهنمایی‌های بجا در نیل به مقصود چراغ راه من بودند اعلام می‌دارم.

از آقای دکتر هوشنگ دباغ که زحمت مشاوره این پایان نامه را تقبل فرمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

دوستان عزیز و گران قدری در انجام این تحقیق همراه و همپای من در مسیر زندگی دانشجویی بودند که به نوبه خود مسائل درسی و غیر درسی بسیاری از آنها آموختم. آشنایی با آنها سعادتی بزرگ برای اینجانب می‌باشد. از آقایان حامد مهدیلو ترکمانی، فرشاد صادقی، مهدی یوسفی، مازیار باغبدرانی، مصطفی کردی، مهدی ایزدپناه، سعید دامادی، مهران دلجوان امیری، مهدی رضادوست و ... می‌توانم به عنوان یاران صمیمیم یاد کنم و خواهان موفقیت آنها در تمام دوران زندگی شان هستم.

چکیده

پل‌ها در سیستم حمل و نقل نقش کلیدی را ایفا می کنند و حفاظت از آنها حین وقوع حوادث طبیعی مانند زلزله جهت رساندن کمک های اولیه به مناطق آسیب دیده و یا حمل و نقل مجروحین و آسیب دیدگان زلزله ضروری می نماید. جهت رسیدن به این مقصود روش ارزیابی که بتواند مقدار آسیب‌پذیری پل‌ها را متناسب با پارامترهای زلزله بیان کند، سودمند می‌باشد چون می‌توان مقدار هزینه‌های بازسازی و تعمیر و همچنین بهسازی اولیه را سنجید و با توجه به میزان اهمیت پل در مورد توجیه طرح بهسازی پل تصمیم گرفت. تاریخچه آسیب پل‌ها در زلزله‌های گذشته مانند نورثریج و کوبه مویدی بر لزوم توجه به عملکرد پل‌ها در زلزله می‌باشد. یکی از روش‌های موثر در ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها، استفاده از منحنی‌های آسیب‌پذیری است. روش بدست آوردن منحنی‌های آسیب‌پذیری را می‌توان به روش‌های مختلف از جمله روش‌های آماری، روش‌های احتمالاتی و روش‌هایی که بر اساس نظریه متخصصین است و غیره طبقه‌بندی کرد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از اطلاعات خسارت زلزله‌های نورثریج و کوبه منحنی‌های آسیب‌پذیری تجربی رسم گردیده است. در ادامه در مورد المان‌های مختلف پل مانند تکیه‌گاه‌های الاستومری و کابل‌های مهاری پل توضیحاتی داده شده است. منحنی آسیب‌پذیری چند پل با استفاده از شاخص‌های خسارت تعریف شده و روش‌های بررسی آسیب‌پذیری احتمالاتی بدست آورده شده است. شاخص خسارت، اندازه کمی میزان خسارت وارد شده بر یک عضو و یا کل سازه را بیان می‌کند. وقتی ارزیابی خسارت بصورت کمی بیان شود تصمیم‌گیری در خصوص سازه را راحت‌تر می‌کند و تصمیم‌گیری قبل و بعد از زلزله درباره آن سازه آسان‌تر خواهد بود. به منظور ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها مدل سه بعدی از پل‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار اجزای محدود تهیه شده و با انتخاب حرکات زمین مناسب و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، به محاسبه شاخص‌های خسارت پرداخته شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده و روش‌های احتمالاتی منحنی‌های آسیب‌پذیری رسم می‌گردند و در مورد نحوه عملکرد پل‌ها در زلزله‌ها قضاوت می‌گردد. در مورد یک پل کابل مهاری بکار برده شده و منحنی آسیب‌پذیری بعد و قبل نصب مهار با یکدیگر مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی: پل، زلزله، منحنی آسیب‌پذیری تجربی، شاخص خسارت، تحلیل دینامیکی غیرخطی، منحنی آسیب‌پذیری تحلیلی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱- منحنی‌های آسیب‌پذیری پل‌ها ۱

۱-۱- مقدمه..... ۲

۱-۲- شکنندگی لرزه‌ای پل‌ها ۲

۱-۲-۱- روش‌های ارزیابی عمومی و کاربردها ۲

۱-۲-۲- روش‌های مشاهداتی ۴

۱-۲-۳- توزیع لگاریتمی نرمال ۶

۱-۲-۴- تابع توزیع تجمعی (Φ) ۷

۱-۳- حالات حدی ۹

۱-۳-۱- نیازمندی‌هایی که حالات حدی جامع برای ارزیابی باید داشته باشند. ۹

۱-۳-۲- حالات حدی مشاهداتی ۱۰

۱-۳-۳- حالات حدی عملکردی ۱۵

۱-۳-۴- حالات حدی تحلیلی (آنالیزی) ۱۶

۱-۳-۴-۱- مقدمه ۱۶

۱-۳-۵- تشریح روش‌های تحلیلی (نظری) ارزیابی آسیب‌پذیری ۱۷

۱-۳-۶- شاخص‌های آسیب ترکیبی ۱۸

۱-۳-۷- شاخص‌های خسارت در پل‌های بتنی ۱۹

۱-۳-۸- منحنی آسیب‌پذیری ۲۶

۱-۳-۹- روش‌های رگرسیون داده‌ها ۲۷

۱-۳-۱۰-تاریخچه منحنی‌های آسیب‌پذیری ۲۸

۱-۴- خلاصه فصل..... ۳۳

۲- منحنی‌های آسیب‌پذیری تجربی..... ۳٤

۲-۱- مقدمه..... ۳۵

۲-۲- منحنی‌های آسیب‌پذیری تجربی ۳۵

۲-۲-۱- متدلوژی ۳۵

۲-۲-۲- رسم منحنی‌های آسیب‌پذیری تجربی..... ۳۷

۲-۳- خلاصه فصل..... ۵۱

۳- مدل‌سازی و معرفی مولفه‌های آن..... ۵۲

۳-۱- مقدمه..... ۵۳

۳-۲- تکیه‌گاه‌های الاستومری.. ۵۳
۳-۲-۱- مشخصه‌های رفتاری الاستومر ۵۴
۳-۲-۲- ضریب شکل الاستومر ۵۵
۳-۲-۳- رفتار تکیه‌گاه‌های الاستومری تحت بارگذاری دینامیکی ۵۶
۳-۲-۳-۱- مدول برشی تشدید یافته ۵۶
۳-۲-۴- روابط رفتاری کاربردی تکیه‌گاه‌های الاستومری ۵۶
۳-۲-۴-۱- سختی فشاری ۵۶
۳-۲-۴-۲- سختی برشی ۵۸
۳-۳- مهارهای کابلی ۵۸
۳-۳-۱- مقدمه ۵۸
۳-۳-۲- تاریخچه ۶۰
۳-۳-۳- پاسخ مهار به انتقال از حالت شلی به حالت کشیدگی ۶۲
۳-۳-۴- طراحی مهار ۶۳
۳-۳-۴-۱- روش‌های موجود طراحی مهارها ۶۳
۳-۳-۴-۲- کالترنس ۹۰ (روش استاتیکی معادل) ۶۴
۳-۳-۴-۳- آشتو ۱۹۹۶ ۶۵
۳-۳-۴-۴- تروچالاکیس و همکاران (۱۹۹۷)..... ۶۵
۳-۳-۴-۵- ژاپن (۲۰۰۲) ۶۶
۳-۳-۴-۶- آیین نامه ایران (۱۳۸۷) ۶۶
۳-۳-۴-۷- دسروچس و فنوس (۲۰۰۳-۲۰۰۰) ۶۶
۳-۳-۴-۸- روش طراحی مهار FRP (۲۰۰۴) ۶۷
۳-۳-۴-۹- کالترنس ۲۰۰۸..... ۶۷
۳-۴- معرفی پل‌های مورد مطالعه و مدل‌سازی آنها ۶۸
۳-۴-۱- معرفی پل‌ها... ۶۸
۳-۴-۱-۱- پل هشگر... ۶۸
۳-۴-۱-۲- پل دهگلان ۶۹
۳-۴-۲- مدل‌سازی و انجام تحلیل بار – افزون ۷۰
۳-۴-۲-۱- نرم‌افزارهای مورد استفاده در تحقیق ۷۰
۳-۴-۳- تشریح جزئیات مدل‌سازی... ۷۱
۳-۴-۳-۱- نرمافزار ANSYS ۷۱
۳-۴-۳-۱-۱- المان SOLID65 ۷۱

۳-۴-۳-۱-۲- المان COMBIN14 ..... ۷۲
۳-۴-۳-۱-۳- المان SHELL181 ..... ۷۳
۳-۴-۳-۱-۴- المان BEAM188 ..... ۷۳
۳-۴-۳-۱-۵- المان CONTAC52 ..... ۷۴
۳-۴-۳-۲- شبیه‌سازی مصالح مورد استفاده ۷۵
۳-۴-۳-۲-۱- فولاد ۷۵
۳-۴-۳-۲-۲- بتن ۷۶
۳-۴-۳-۲-۳- مدل‌سازی خردشدگی ۷۷
۳-۴-۳-۲-۴- مدل‌سازی مصالح بتن همراه با تعریف مدل همسانگرد چند خطی..... ۷۷
۳-۴-۳-۲-۵- خصوصیات بتن مورد استفاده در تحلیل ۸۰
۳-۴-۳-۲-۵-۱- فرمول‌بندی غیرخطی مصالح بتن ۸۰
۳-۴-۳-۲-۶- رابطه تنش-کرنش فشاری ۸۰
۳-۴-۳-۲-۶-۱- بتن محصور نشده ۸۰
۳-۴-۳-۲-۶-۲- بتن محصور شده – مدل مندر ۸۲
۳-۴-۳-۲-۷- مدل پل هشگر ۸۳
۳-۴-۳-۲-۷-۱- مدل‌سازی نئوپرن‌ها (الاستومرها) ۸۳
۳-۴-۳-۲-۷-۲- مدل‌سازی شاه‌تیرها و سخت‌کننده‌ها ۸۴
۳-۴-۳-۲-۷-۳- مدل‌سازی برخورد بین شاه‌تیرها ۸۵
۳-۴-۳-۲-۷-۴- مدل‌سازی پایه و انجام تحلیل بار-افزون ۸۶
۳-۴-۳-۲-۷-۵- محاسبه مهار مورد نیاز برای پل هشگر..... ۸۹
۳-۴-۳-۲-۷-۶- مدل‌سازی پل هشگر در نرم‌افزار SAP2000 ..... ۹۰
۳-۴-۳-۲-۷-۷- روش انجام تحلیل بار- افزون در نرم‌افزار SAP2000 ..... ۹۱
۳-۴-۳-۲-۷-۷-۱- انجام تحلیل بار- افزون بر روی پایه پل در نرم‌افزار SAP2000 ..... ۹۲
۳-۴-۳-۲-۷-۸- مدل‌سازی پل دهگلان ۹۳
۳-۴-۳-۲-۷-۸-۱ مدل‌سازی پایه پل دهگلان و انجام تحلیل بار- افزون..... ۹۳
۳-۵- خلاصه فصل ۹۵
٤- نتایج تحلیل‌ها و بدست آوردن منحنی‌های آسیب‌پذیری تحلیلی..... ۹٦
۴-۱- مقدمه ۹۷
۴-۲- مبانی روش‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی..... ۹۷
۴-۲-۱- ماتریس میرایی ۹۸
۴-۳- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخچه‌زمانی..... ۹۸

۴-۴- نتایج پل هشگر ۱۰۱
۴-۴-۱- تحلیل مودال... ..... ۱۰۱
۴-۴-۲- انجام آنالیز تاریخچه‌زمانی و مقایسه با نتایج SAP2000..... ۱۰۲
۴-۴-۲-۱- زلزله نورثریج ۰/۵۶۳g ۱۰۲
۴-۴-۲-۲- زلزله منجیل... ..... ۱۰۴
۴-۴-۲-۳- استخراج نتایج از نرم‌افزار SAP2000 و محاسبه شاخص‌های خسارت ۱۰۶
۴-۵- نتایج پل دهگلان..... ۱۱۹
۴-۵-۱- تحلیل مودال... ..... ۱۱۹
۴-۵-۲- تحلیل تاریخچهزمانی ۱۱۹
۴-۶- جمع‌بندی نتایج..... ..... ۱۲۶
۴-۷- پیشنهاد برای کارهای تحقیقاتی آینده..... ..... ۱۲۷
۵- منابع و مراجع..... ۱۳۰

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: اطلاعات خسارت مشاهده شده توسط بیزن و همکاران (۱۹۹۹) – زلزله نورثریج [۳] ۵

جدول ۱-۲: اطلاعات خسارت یامازاکی و همکاران (۱۹۹۹) – زلزله هیوگو-کن نابو [۴] ۶

جدول ۱-۳: تعریف سطوح خسارت مشاهداتی[۳] ۱۲

جدول ۱-٤: زلزله طراحی و اهداف عملکردی لرزهای از دیدگاه رهنمودهای ATC/MCEER 2004 [۹] ۱۵

جدول ۱-۵: توضیح سطوح عملکردی در جملات تراز سرویس، تراز خسارت و تکنیک مورد نیاز برای تعمیر[۱۲]۱۵

جدول ۱-٦: حالات حدی برای ترازهای متفاوت تعمیر [۱۲, ۱۶] ۲۰

جدول ۱-۷: رابطه بین شاخص خسارت پارک و انگ (DI) اصلاحی و حالت خرابی پایه [۱۷] ۲۱

جدول ۱-۸: تعریف حالات خرابی برای مولفه‌های غیر شکل‌پذیر پل [۲۰] ۲۲

جدول ۱-۹: توضیحات حالات خسارت توسط HAZUS 97 [۲۱] ۲۳

جدول ۱-۱۰: ارزیابی مقایسه‌ای پیشرفت خسارت در یکی از نمونه‌های آزمایش [۲۵] ۲۵

جدول ۱-۱۱: توضیح حالات خسارت [۳۱] ۲۹

جدول ۲-۱: میزان خسارت بر اساس حداکثر شتاب زمین در زلزله نورثریج [۱۰] ۳۸

جدول ۲-۲: مقادیر نسبت‌های خسارت و ظرفیت میانگین محاسبه شده برای پل‌های کالترنس در زلزله نورثریج ... ۴۲

جدول ۲-۳: ادامه جدول ۳-۲ و محاسبه معرف ظرفیت میانگین و انحراف معیار لگاریتمی استاندارد ۴۳

جدول ۲-٤: میزان خسارت پایه‌های بتنی بزرگراه هانشین بر اساس حداکثر شتاب زمین در زلزله کوبه [۱۰] ۴۶

جدول ۲-۵: توضیح حالت خسارت پل‌های بزرگراهی هانشین [۱۰] ۴۷

جدول ۲-٦: مقادیر نسبت‌های خسارت و ظرفیت میانگین محاسبه شده برای پایه‌های پل‌های بزرگراه هانشین در زلزله کوبه و محاسبه معرف ظرفیت میانگین و انحراف معیار لگاریتمی استاندارد ۵۰

جدول ۳-۱: مقادیر متناظر سختی و مدول برشی برای لاستیک طبیعی [۴۰] ۵۵

جدول ۳-۲: ضرایب سخت‌شوندگی دینامیکی برای بارهای با تواتر بالا [۴۰] ۵۷

جدول ۳-۳: تعریف پارامترهای مورد استفاده برای تعریف سطح شکست [۶۵] ۷۶

جدول ۳-٤: خلاصه مدل‌های آنالیز شده در نرم‌افزار ANSYS [۶۷] ۷۹

جدول ۳-۵ : خصوصیات نئوپرن مورد استفاده بر اساس نئوپرن‌های شرکت GUMBA ۸۴

جدول ٤-۱ : مجموعه رکوردهای مورد استفاده در تحلیل ۹۹

جدول ٤-۲: مود ارتعاشی سازه پل هشگر و پریود ارتعاشی متناسب با آن ۱۰۲

جدول ٤-۳: مقایسه نتایج پل هشگر در دو نرم‌افزار ANSYS و SAP2000 ..... ۱۰۴

جدول ٤-٤: درجه بندی خسارت پایه بتنی با توجه به شاخص خسارت پارک و انگ ۱۰۸

جدول ٤-٥ : درجه بندی خسارت الاستومر با توجه به میزان جابجایی آن ۱۰۸
جدول ٤-٦: مقادیر عددی پاسخ پل هشگر بر اساس شاخص‌های خسارت ۱۱۰
جدول ٤-٧: تعدادی از نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی پل هشگر ۱۱۸
جدول ٤-٨: مود ارتعاشی سازه پل دهگلان و پریود ارتعاشی متناسب با آن ۱۱۹
جدول ٤-٩: مقادیر عددی پاسخ پل دهگلان بر اساس شاخص خسارت پارک و انگ ۱۲۱

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: ترسیم شماتیک روش‌های ارزیابی قطعی و احتمالاتی [۱] ۳

شکل ۱-۲: رسم تابع چگالی احتمالاتی با توزیع لگاریتمی نرمال برای چهار مقدار میانگین ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ [۵] ۷

شکل ۱-۳: تابع توزیع تجمعی لگاریتمی نرمال برای چهار مقدار میانگین ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ [۵] ۸

شکل ۱-٤: رابطه بین دریفت و حالت خسارت پایه‌ها [۱۹] ۲۲

شکل ۱-۵: ساختار بتن ترک‌خورده [۲۵] ۲۵

شکل ۱-٦: مقایسه شاخص‌های خسارت و نتایج آزمایشات کیم [۲۵] ۲۵

شکل ۲-۱ : مراحل به دست آوردن منحنی آسیب‌پذیری تجربی برای پل‌ها [۲۷] ۳۹

شکل ۲-۲: نقشه پل‌های آزادراه‌های کالترنس در منطقه لس‌آنجلس [۱۰] ۴۰

شکل ۲-۳: نقشه سطوح مختلف PGA بر اساس اطلاعات ولد (در زلزله نورثریج) [۱۰] ۴۰

شکل ۲-٤: منحنی آسیب‌پذیری تجربی پل‌های کالترنس برای حد خسارت حداقل ۴۴

شکل ۲-۵: منحنی آسیب‌پذیری تجربی پل‌های کالترنس برای حد خسارت متوسط ۴۴

شکل ۲-٦: منحنی آسیب‌پذیری تجربی پل‌های کالترنس برای حد خسارت زیاد ۴۵

شکل ۲-۷: منحنی آسیبپذیری تجربی پلهای کالترنس برای حد خسارت خرابی ۴۵

شکل ۲-۸: تیپ کلی مقطع عرضی ستون‌های پل‌های بزرگراه هانشین [۱۰] ۴۸

شکل ۲-۹: منحنی آسیب‌پذیری تجربی پایه‌های پل‌های بزرگراه هانشین برای حد خسارت کم ۴۹

شکل ۲-۱۰: منحنی آسیب‌پذیری تجربی پایه‌های پل‌های بزرگراه هانشین برای حد خسارت متوسط ۴۹

شکل ۲-۱۱: منحنی آسیب‌پذیری تجربی پایه‌های پل‌های بزرگراه هانشین برای حد خسارت زیاد ۵۱

شکل ۳-۱: نمایش چگونگی محل قرارگیری نشیمن‌گاه‌های الاستومری در پل‌ها[۳۸] ۵۴

شکل ۳-۲: نمودار طراحی آشتو برای تنش فشاری- کرنش فشاری الاستومر ۵۷

شکل ۳-۳: نصب مهار از شاه‌تیر فلزی به تیر کلاهک (الف) و نصب مهار از شاه‌تیر به شاه‌تیر (ب)[۴۶] ۵۹

شکل ۳-٤: استفاده از مهار در پل با دهانه ساده (الف) نمونه دیگری از مهار عرشه با کابل (ب)[۴۶] ۶۰

شکل ۳-۵: نمای پایه پل و نحوه تیرریزی شاه‌تیرها (الف)، پایه، شاه‌تیرها و سخت‌کننده‌ها (ب) ۶۹

شکل ۳-٦ : قرارگیری شاه‌تیر بر روی کوله (الف) و نمایی از انتهای شاه‌تیر در محل قرارگیری روی الاستومر (ب) ۶۹

شکل ۳-۷: شمای کلی پل دهگلان (الف) و (ب) ۷۰

شکل ۳-۸: وضعیت ستون‌ها و تیرها و کلاف‌های عرضی (الف)، وضعیت کوله (ب) ۷۰

شکل ۳-۹: هندسه المان SOLID 65 [۶۵] ۷۲

شکل ۳-۱۰: هندسه المان COMBIN 14 [۶۵] ۷۲

شکل ۳-۱۱: هندسه المان SHELL181 [۶۵] ۷۳
شکل ۳-۱۲: هندسه المان BEAM188 [۶۵] ۷۳
شکل ۳-۱۳: هندسه المان CONTAC52 [۶۵] ۷۴
شکل ۳-۱٤: رابطه نیرو- تغییرشکل المان CONTAC52 [۶۵] ۷۴
شکل ۳-۱۵: سطح شکست در فضای تنش‌های اصلی با تنشی نزدیک تنش دو محوری [۶۵] ۷۷
شکل ۳-۱٦: منحنی‌های تنش-کرنش ایده‌آل شده برای بتن در فشار تک محوری [۶۶] ۸۱
شکل ۳-۱۷: رابطه تنش-کرنش بتن مورد استفاده بر اساس مدل هاگنستاد ۸۱
شکل ۳-۱۸: منحنی‌های تنش-کرنش مدل مندر [۶۶] ۸۳
شکل ۳-۱۹: مدل المان محدود پل هشگر در نرم‌افزار ANSYS ۸۳
شکل ۳-۲۰: نحوه مدل‌سازی فنرهای جانشین نئوپرن ۸۵
شکل ۳-۲۱: شمای کلی شاه‌تیرها و دیافراگم‌ها (الف)، المان بندی شاه‌تیرها، سخت‌کننده‌ها و دیافراگم‌های عرضی (ب) ۸۵
شکل ۳-۲۲: بکارگیری المان CONTAC52 برای مدل‌سازی برخورد شاه‌تیرها ۸۶
شکل ۳-۲۳: نحوه المان‌بندی پایه بتنی پل هشگر در نرم‌افزار ANSYS (الف) و (ب) ۸۶
شکل ۳-۲٤: نحوه اعمال بارگذاری جابجایی به بالای پایه و ایجاد ترک‌خوردگی در پایه پل هشگر (الف) و (ب) . ۸۷
شکل ۳-۲۵: شمای ترک‌خوردگی پایه پل هشگر در قسمت جلو (الف) و کنار (ب) ۸۸
شکل ۳-۲٦: نمودار برش پایه در برابر تغییرمکان بالای پایه در جهت طولی برای پایه پل هشگر (الف) کانتور تغییرمکان در جهت طولی (ب) ۸۸
شکل ۳-۲۷: الگوی بارگذاری جابجایی تناوبی اعمال شده به پایه پل هشگر ۸۹
شکل ۳-۲۸: ترک‌خوردگی پایه پل هشگر در اثر اعمال بارگذاری جابجایی تناوبی ۸۹
شکل ۳-۲۹: مدل پل هشگر در نرم‌افزار SAP2000 ..... ۹۱
شکل ۳-۳۰: مقطع عرضی پایه پل هشگر معرفی شده به نرم‌افزار SAP2000 ..... ۹۲
شکل ۳-۳۱: متناسب سازی رفتار پایه پل هشگر در نرم‌افزار SAP2000 ..... ۹۳
شکل ۳-۳۲: نحوه المان‌بندی، اعمال بارگذاری جابجایی و ترک‌خوردگی در پایه پل دهگلان ۹۴
شکل ۳-۳۳: نمودار برش پایه در برابر جابجایی برای پایه پل دهگلان ۹۴
شکل ۳-۳٤: مدل پل دهگلان در نرم‌افزار SAP2000 ..... ۹۵
شکل ٤-۱: رکوردهای تاریخچه‌زمانی زلزله نورثریج g ۰/۵۶۳ در جهت طولی و عرضی ۱۰۰
شکل ٤-۲: رکوردهای تاریخچه‌زمانی زلزله لوماپریتا g ۰/۶۳۸ در جهت طولی و عرضی ۱۰۰
شکل ٤-۳: مقایسه تعدادی از رکوردهای مختلف تاریخچه‌زمانی ۱۰۱

شکل ٤-٤: مودهای ارتعاش پل مود اول (الف) حرکت دو عرشه در جهت طولی، مود دوم (ب) حرکت دو عرشه در جهت عرضی و مد هفتم (ج) جابجایی طولی پایه می‌باشند ۱۰۲
شکل ٤-٥: مقایسه جابجایی بالای پایه پل هشگر در نرم‌افزارهای ANSYS و SAP2000 در اثر اعمال رکورد نورثریج ۱۰۳
شکل ٤-٦: مقدار جابجایی روسازه پل هشگر برابر ۰/۰۳۱ متر در ثانیه ۱۱/۱۶ بر اثر اعمال رکورد نورثریج ۰/۵۶۳g ۱۰۳
شکل ٤-٧: مقایسه جابجایی روسازه پل هشگر در نرم‌افزارهای ANSYS و SAP2000 در اثر اعمال رکورد نورثریج ۱۰۳
شکل ٤-٨: مقدار جابجایی بالای پایه پل هشگر در اثر اعمال رکورد منجیل در نرم‌افزارهای SAP2000 و ANSYS ۱۰۴
شکل ٤-٩: مقدار جابجایی روسازه پل هشگر در اثر اعمال رکورد منجیل در نرم‌افزارهای SAP2000 و ANSYS ۱۰۴
شکل ٤-١٠: جابجایی بالای پایه و روسازه در جهت طولی (X) در ثانیه ۹/۳۴ ..... ۱۰۵
شکل ٤-١١: کانتور جابجایی در جهت طولی پل هشگر در ثانیه ۱۱/۰۴ ..... ۱۰۵
شکل ٤-١٢: نمای ترکخوردگی در پایه پل هشگر در اثر اعمال رکورد منجیل ۱۰۵
شکل ٤-١٣: نمودار برش پایه در برابر جابجایی در زلزله منجیل در حالت بدون مهار ۱۰۶
شکل ٤-١٤: نمودار برش پایه در برابر جابجایی در زلزله منجیل در حالت با مهار ۱۰۶
شکل ٤-١٥: نمودار برش پایه در برابر جابجایی در زلزله ترکیه در حالت بدون مهار ۱۰۷
شکل ٤-١٦: نمودار برش پایه در برابر جابجایی در زلزله منجیل در حالت با مهار ۱۰۷
شکل ٤-١٧: نمودار شاخص خسارت پارک و انگ (P&A) در برابر حداکثر شتاب زمین (PGA) در فضای لگاریتمی قبل از به‌سازی برای پل هشگر ۱۱۱
شکل ٤-١٨: نمودار شاخص خسارت پارک و انگ (P&A) در برابر حداکثر شتاب زمین (PGA) در فضای لگاریتمی بعد از به‌سازی برای پل هشگر ۱۱۱
شکل ٤-١٩: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل هشگر با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار شاخص ۰/۱ ..... ۱۱۲
شکل ٤-٢٠: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل هشگر با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار شاخص ۰/۲۵ ..... ۱۱۲
شکل ٤-٢١: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل هشگر با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار شاخص ۰/۴ ..... ۱۱۳
شکل ٤-٢٢: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل هشگر با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار مقدار شاخص ۱/۰ ۱۱۳
شکل ٤-٢٣: نمودار شاخص خسارت جابجایی الاستومر (Δ) در برابر حداکثر شتاب زمین (PGA) در فضای لگاریتمی قبل از به‌سازی برای پل هشگر ۱۱۵

شکل ٤-٢٤: نمودار شاخص خسارت جابجایی الاستومر (Δ) در برابر حداکثر شتاب زمین (PGA) در فضای لگاریتمی بعد از به‌سازی برای پل هشگر ۱۱۵
شکل ٤-٢٥: منحنی آسیب‌پذیری الاستومر پل هشگر با توجه به شاخص Δ برای مقدار شاخص ۰/۰۵ ..... ۱۱۶
شکل ٤-٢٦: منحنی آسیب‌پذیری الاستومر پل هشگر با توجه به شاخص Δ برای مقدار شاخص ۰/۱ ..... ۱۱۶
شکل ٤-٢٧: منحنی آسیب‌پذیری الاستومر پل هشگر با توجه به شاخص Δ برای مقدار شاخص ۰/۱۵ ..... ۱۱۷
شکل ٤-٢٨: منحنی آسیب‌پذیری الاستومر پل هشگر با توجه به شاخص Δ برای مقدار شاخص ۰/۲۰ ..... ۱۱۷
شکل ٤-٢٩: مودهای ارتعاش پل مود اول (الف) جابجایی پایه در جهت عرضی، مود دوم (ب) جابجایی قائم عرشه و جابجایی طولی پایه و مد سوم (ج) جابجایی قائم عرشه و جابجایی طولی پایه می‌باشند ۱۱۹
شکل ٤-٣٠: ستون در نظر گرفته برای استخراج نتایج در پل هشگر ۱۲۰
شکل ٤-٣١: نمودار برش پایه در برابر تغییرمکان پایه پل دهگلان برای زلزله ترکیه ۰/۸۲۲g ۱۲۱
شکل ٤-٣٢: نمودار برش پایه در برابر تغییرمکان پایه پل دهگلان برای زلزله نورثریج ۰/۵۱۶g ۱۲۱
شکل ٤-٣٣: نمودار شاخص خسارت پارک و انگ (P&A) در برابر حداکثر شتاب زمین (PGA) در فضای لگاریتمی برای پل دهگلان ۱۲۲
شکل ٤-٣٤: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل دهگلان با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار مقدار شاخص ۰/۱ ..... ۱۲۲
شکل ٤-٣٥: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل دهگلان با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار مقدار شاخص ۰/۲۵ ..... ۱۲۳
شکل ٤-٣٦: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل دهگلان با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار مقدار شاخص ۰/۴۰ ..... ۱۲۳
شکل ٤-٣٧: منحنی آسیب‌پذیری پایه پل دهگلان با توجه به شاخص پارک و انگ برای مقدار مقدار شاخص ۱/۰ ..... ۱۲۴
شکل ٤-٣٨: مقایسه نتایج پایه پل دهگلان و اطلاعات خسارت زلزله کوبه برای حد خسارت کم ۱۲۵
شکل ٤-٣٩: مقایسه نتایج پایه پل دهگلان و اطلاعات خسارت زلزله کوبه برای حد خسارت متوسط ۱۲۵
شکل ٤-٤٠: مقایسه نتایج پایه پل دهگلان و اطلاعات خسارت زلزله کوبه برای حد خسارت زیاد ۱۲۶

فصل اول

منحنی‌های آسیب‌پذیری
پل‌ها