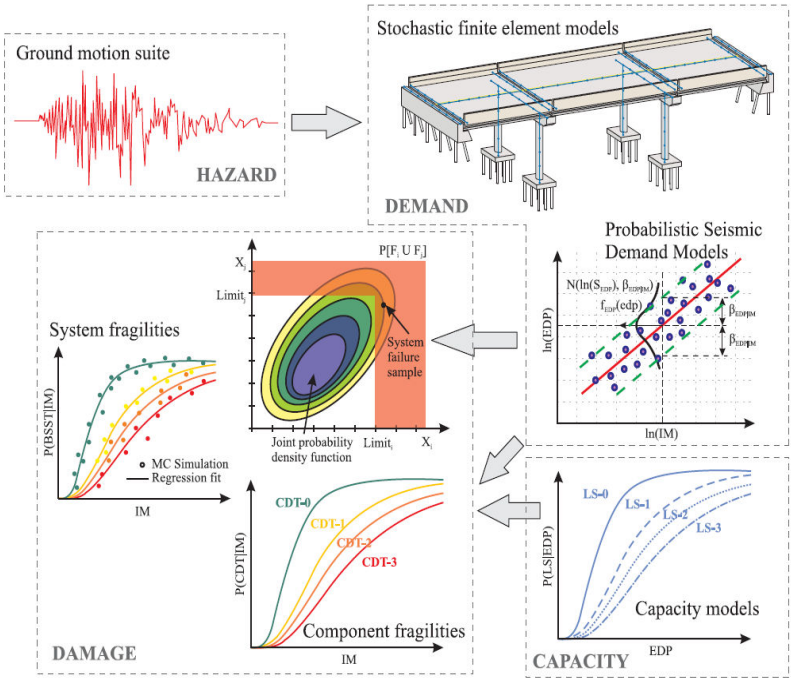
ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای احتمالاتی و مقاوم‌سازی پل‌های بتن آرمه با نرم‌افزار

OpenSEES

(*The Open System For Earthquake Engineering Simulation*)



تالیف :

حسین پهلوان

(دکتری مهندسی زلزله دانشگاه علم و صنعت ایران و استادیار دانشگاه)

زمستان ۱۳۹٤

● کلیه حقوق قانونی و شرعی برای ناشر محفوظ است.
● تکثیر تماماً یا قسمتی از این اثر به صورت حروفچینی، چاپ مجدد، چاپ افست، پلی‌کپی، فتوکپی و انواع دیگر چاپ ممنوع است.
● این اثر مشمول قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان مصوب سال ۱۳۴۸ است، هر کس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر، نشر، پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

انتشارات آزاده — **سری کتاب‌های فنی مهندسی**

● **ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای احتمالاتی و مقاوم‌سازی پل‌های بتن آرمه با نرم‌افزار OpenSEES**
□ تألیف : حسین پهلوان
□ ناظر فنی و چاپ: امیر بدوستانی
□ حروفچینی و آماده‌سازی : انتشارات آزاده
□ لیتوگرافی : آرمانسا
□ چاپ: اصلانی
□ صحافی: صالحانی
□ تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه
□ چاپ اول: زمستان ۱۳۹۴
□ ناشر: انتشارات آزاده
□ شابک: ۹ ـ ۸۷۷ ـ ۵۰۱ ـ ۹۶۴ ـ ۹۷۸
□ بها: ۳۰/۰۰۰ تومان

مسئولیت مطالب کتاب به عهده مؤلف و حق چاپ و نشر برای ناشر محفوظ است.

● مرکز پخش: انتشارات آزاده ـ خیابان انقلاب، مقابل دانشگاه تهران (بین خ فخررازی و خ دانشگاه)، جنب بانک ملت، پاساژ پلاک ۱۲۰۲، طبقه زیرهمکف ـ کدپستی ۱۳۱۴۷۵۴۷۱۳ تلفن: ۶۶۴۱۴۳۷۴ ـ ۶۶۴۱۵۷۵۳ دورنویس: ۶۶۴۱۴۵۱۰

سرشناسه	: پهلوان، حسین، ۱۳۵۷ ـ
عنوان و پدیدآور	: ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای احتمالاتی و مقاوم‌سازی پل‌های بتن آرمه با نرم‌افزار OpenSEES / تألیف حسین پهلوان.
مشخصات نشر	: تهران: آزاده، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	: ۳۷۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.
فروست	: سری کتاب‌های فنی و مهندسی.
شابک	: ۹ ـ ۸۷۷ ـ ۵۰۱ ـ ۹۶۴ ـ ۹۷۸
وضعیت فهرستنویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۳۶۶.
موضوع	: نرم‌افزار اپن‌سیس
موضوع	: تحلیل سازه --برنامه‌های کامپیوتری
موضوع	: تحلیل سازه -- نرم‌افزار
موضوع	: پل‌های بتنی
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۴ ۴ الف ۹۴ پ / TA ۶۴۷
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۴/۱۱۰۲۸۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۰۵۲۸۷۳

برای خرید ***online*** به آدرس زیر مراجعه کنید:
www.rahianarshad.com

پیشگفتار مولف

پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین و در عین حال آسیب پذیرترین 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 امداد رسانی پس از زلزله را با مشکلات جدی مواجه خواهد نمود. هزینه بالای ساخت و استراتژیک بودن آن‌ها اهمیت پل‌ها را دو چندان کرده است.

تعداد زیادی از پل‌های موجود دنیا بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های قدیمی طراحی و ساخته شده‌اند. بدیهی است این پل‌ها نیازهای لرزه‌ای آیین‌نامه‌های جدید را ارضاء نمی کنند. این دسته از پل‌ها باید مورد مطالعات بهسازی لرزه‌ای قرار گرفته و در صورت نیاز با روشی مناسب مقاوم‌سازی شوند. هم اکنون کشورهای لرزه‌خیز دنیا مانند آمریکا، ایران و ژاپن هر ساله بودجه‌های هنگفتی را جهت ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و مقاوم‌سازی پل‌ها تخصیص می‌دهند. لیکن، تعداد زیاد پل‌های قدیمی این کشورها و بودجه‌های محدود مقاوم‌سازی، اجرای این طرح‌های ملی را با چالش‌های جدی مواجه نموده است. پاسخ به این دو سوال در این ارتباط اساسی است که از میان پل‌های مختلف کشور کدام دسته از آن‌ها آسیب پذیرتر هستند و نیز بین روش‌های مختلف مقاوم‌سازی پل‌ها کدام روش‌ها بهینه‌تر می‌باشند.

امروزه در گرایش مهندسی زلزله از رشته مهندسی عمران منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای (Seismic Fragility Curves) ابزاری جدید و پیشرفته جهت ارزیابی لرزه‌ای پل‌های موجود و همچنین انتخاب روش یا روش‌های بهتر مقاوم‌سازی بوده و چند سالی است که در آیین‌نامه‌های بهسازی لرزه‌ای پل‌ها ورود کرده‌اند. ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها به کمک منحنی‌های شکنندگی نیازمند انجام تحلیل‌های سه بعدی اجزاء محدود پل‌ها بوده و نرم‌افزار قدرتمند OpenSEES قویترین نرم‌افزار دنیا در این رابطه می‌باشد. اپنسیس یک نرم‌افزار رایگان و منبع باز بوده و موتور تحلیل بسیار قوی و سریع در حوزه رفتار غیرخطی سازه‌های مختلف دارد.

قابلیت اتصال این نرم‌افزار به نرم‌افزارهایی مانند MATLAB و دقت بالای نتایج خروجی برنامه و داشتن آرشیو کاملی از مواد و المان‌ها و قابلیت کدنویسی برای چندین آنالیز پی در پی مانند تحلیل‌های IDA و کوچک بودن حجم نرم‌افزار و خروجی‌های آن در مقایسه با سایر نرم‌افزارها و همچنین سهولت تحلیل نتایج و سایر ویژگی‌های منحصر به فرد این نرم‌افزار آن را به نرم‌افزاری بدون رقیب در پژوهش‌های مهندسی زلزله تبدیل نموده است.

علی‌رغم مزایا زیاد این نرم‌افزار، استفاده از آن به جهت نیاز به آشنایی با تکنیک‌های کدنویسی تا حدی مشکل بوده و در ایران تا این لحظه کتب محدودی جهت آموزش این نرم‌افزار تألیف شده‌اند که عمدتاً تحلیل‌های اجزاء محدود ساختمان‌ها (و نه پل‌ها) را آموزش می‌دهند. بنابراین تالیف یک کتاب آموزشی جهت مدلسازی و تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی و ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها با این نرم‌افزار ضروری به نظر می‌رسید.

مباحث مطرح شده در این کتاب که عمدتاً شامل نتایج حاصل ازتحقیقات مولف جهت انجام رساله دوره دکتری می‌باشند با هدف آموزش تکنیک‌های مدلسازی اجزاء محدود و تحلیل‌های غیرخطی پل‌ها در نرم‌افزار اپنسیس و همچنین با هدف آموزش تهیه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای تحلیلی پل‌های مقاوم‌سازی شده برای دانشجویان مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری سازه و زلزله تالیف گردیده و می‌تواند مرجع تکمیلی مناسبی برای دروس طراحی پل، مهندسی زلزله، سازه‌های بتن آرمه پیشرفته، قابلیت اعتماد سازه‌ها و بخصوص درس تحلیل دینامیکی غیرخطی این دانشجویان به حساب آید.

تأکید می‌گردد که مباحث مطرح شده در ارتباط با مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود پل‌ها در این کتاب بصورت پیشرفته بوده و دانشجویان عزیز لازم است جهت بهره برداری مطلوب از این کتاب به دروس پایه گرایش مهندسی زلزله مانند دینامیک سازه‌ها، تحلیل اجزاء محدود و قابلیت اعتماد سازه‌ها تسلط داشته باشند. همچنین به مبانی مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود با نرم‌افزار اپنسیس نیز آشنایی کامل داشته باشند. در این ارتباط مطالعه کتاب "کاربرد نرم‌افزار اپنسیس در مدلسازی و تحلیل سازه‌ها" تالیف آقایان دکتر مجتبی حسینی و دکتر هادی کنارنگی، بعنوان پیش نیاز استفاده از این کتاب توصیه می‌گردد. در این کتاب مباحث زیر آموزش داده می‌شوند:

- مشخصات اجزاء سازه‌ای و غیر سازه‌ای پل‌های بتن آرمه آمریکا
- تکنیک‌های مدلسازی اجزاء محدود المان‌های مختلف پل‌های بتن آرمه شامل ستون‌ها، کوله‌ها، عرشه‌ها، بالشتک‌های الاستومریک، کلیدهای برشی، کابل‌های نگه‌دارنده عرشه، درزهای آب بندی، فونداسیون، خاک و ... در اپنسیس
- تکنیک‌های مدلسازی سه بعدی و انجام تحلیل‌های مودال و دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی پل‌های بتن آرمه در اپنسیس

- نکات ویژه انتخاب رکوردهای زلزله در ارزیابی‌های لرزه‌ای احتمالاتی و تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی پل‌ها
- روش‌های رایج مقاوم‌سازی پل‌ها و تکنیک‌های مدلسازی آن‌ها در اپنسیس
- نکات ویژه چگونگی لحاظ عدم قطعیت‌ها در ارزیابی لرزه‌ای احتمالاتی پل‌ها
- آموزش گام به گام تهیه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای تحلیلی پل‌های مقاوم‌سازی شده بتن آرمه
- ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در کاهش شکنندگی لرزه‌ای پل‌ها و نحوه انتخاب روش یا روش‌های برتر مقاوم سازی
- تعیین آثار انحناء عرشه پل‌های مقاوم‌سازی شده بتن آرمه در میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن‌ها

علم مولف که در برابر اقیانوس اطلاعات فنی و تخصصی رشته مهندسی زلزله قطره‌ای بیش نیست حاصل تلمذ نزد اساتید بزرگ و گرانقدر دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران به ویژه جناب آقایان پروفسور قدرتی امیری- پروفسور کاوه – دکتر شایانفر و دکتر زاهدی می‌باشد. به شاگردی این اساتید بزرگ بر خود می‌بالم و افتخار می‌کنم. ضمناً از زحمات استاد ارجمند درس اصول مهندسی پل مقطع کارشناسی‌ام در دانشگاه گیلان جناب آقای دکتر اسلامی نیز قدردانی می‌نمایم.

در ادامه برخود واجب می‌دانم از سایر اساتید و همکارانی که در تالیف این کتاب مشارکت نموده‌اند قدردانی نمایم. بی‌شک بدون همکاری و مشارکت این عزیزان گردآوری این مجموعه ممکن نبود:

آقای دکتر بهزاد ذاکری مشاور رساله دکتری اینجانب به جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات فنی و آماری پل‌های آمریکا و همچنین نقش کلیدی‌شان در راه اندازی و آموزش و هدایت تیم تحقیقاتی ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها در دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران در سال‌های ۹۰ تا ۹۴.

آقای دکتر شامخی استادیار گروه سازه و زلزله دانشگاه صنعتی شاهرود به جهت پیشنهادات ارزنده و کمک‌های ارزشمندشان در تالیف کتاب.

آقایان جواد عابدینی و امید قرهی دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد زلزله دانشگاه علم و صنعت و آقای علی ناصری دانشجو دکتری سازه دانشگاه صنعتی بابل که کمک‌های ارزشمندی در تهیه بخش‌هایی از مباحث فنی مورد استفاده در این کتاب نموده‌اند.

آقای مهندس میلاد پهلوان که زحمت تدوین و آقای مهندس بخشی که زحمت طراحی جلد و صفحه آرایی کتاب را تقبل کرده‌اند.

موسسه آموزشی تخصصی سازه ۸۰۸ و آقای مهندس مجتبی اصغری به جهت حمایت‌هایشان در تالیف این کتاب.

مدیریت انتشارات آزاده و آقای عالی‌خانی به جهت تقبل زحمات نشر و سرکار خانم محمدلو برای صفحه‌بندی کتاب.

در پایان از همسر عزیزم که مشوق اصلی اینجانب در نگارش این کتاب بوده‌اند قدردانی می‌نمایم.

حسین پهلوان- زمستان ۱۳۹۴

فهرست مطالب

مقدمه ۱۱

فصل اول: انواع خسارات پل‌ها در زلزله‌های گذشته ۱۷

۱-۱ مقدمه ۱۷

۱-۲ مشخصات تعدادی از زلزله‌های مخرب پل ها ۱۹

۱-۲-۱ زلزله کانتو - ژاپن (۱۹۲۳) ۱۹

۱-۲-۲ زلزله نیگاتا - ژاپن (۱۹۶۴) ۱۹

۱-۲-۳ زلزله سان فرناندو - آمریکا (۱۹۷۱) ۱۹

۱-۲-۴ زلزله لوماپریتا -آمریکا (۱۹۸۹) ۲۰

۱-۲-۵ زلزله نورتریج - آمریکا (۱۹۹۴) ۲۰

۱-۲-۶ زلزله کوبه - ژاپن (۱۹۹۵) ۲۰

۱-۳ عوامل کلی مؤثر بر میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها ۲۱

۱-۳-۱ تأثیر شرایط ساختگاهی ۲۱

۱-۳-۲ تأثیر زمان طراحی و ساخت پل ۲۲

۱-۳-۳ تأثیر تغییر شرایط فیزیکی در میزان آسیب‌پذیری ۲۳

۱-۳-۴ تأثیر ساختار هندسی پل ۲۴

۱-۴ بررسی آسیب‌های وارده به اجزاء مختلف پل‌ها در زلزله‌های گذشته ۲۵

۱-۴-۱ آسیب‌های وارد بر رو سازه ۲۵

۱-۴-۱-۱ فروافتادن و شکست عرشه به سبب از دست رفتن سطح اتکا در محل درزهای انبساط ۲۷

۱-۴-۱-۲ آسیب‌دیدگی نشیمن‌گاه‌ها ۲۹

۱-۴-۲ آسیب‌دیدگی اتصالات ۳۰

۱-۴-۳ آسیب‌دیدگی کلیدهای برشی ۳۰

۱-۴-۴ آسیب‌پذیری تکیه‌گاه‌ها ۳۱

۱-۴-۵ آسیب‌پذیری ستون‌ها ۳۲

۱-۴-۶ تیرها ۳۷

۱-۴-۷ کوله‌ها ۳۷

۱-۴-۸ شالوده‌ها ۳۹

۱-۵ جمع بندی ۳۹

فصل دوم: تحقیقات گذشته ارزیابی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی پل‌ها ۴۱

۲-۱ مقدمه ۴۱

۲-۲ تاریخچه مطالعات منحنی‌های شکنندگی پل‌های مستقیم ۴۱

۲-۳ تحقیقات گذشته آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های نامنظم ۵۲

۲-۴ مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها در آمریکا ۷۲

۲-۴-۱ مروری بر روش‌های رایج مقاوم سازی ۷۲

۲-۴-۱-۱ مقاوم‌سازی ستون‌ها ۷۳

۲-۴-۱-۲ جداساز لرزه‌ای ۷۴

۲-۴-۱-۳ قیدهای طولی ۷۵

۲-۴-۱-۴ سایر لوازم محدودکننده جابجایی پل ۷۷

۲-۴-۱-۵ کلیدهای برشی و ادوات محدودکننده حرکت عرضی ۷۷

۲-۴-۱-۶ ادوات افزایش‌دهنده عرض نشیمن عرشه ۷۸
۲-۴-۱-۷ مقاوم‌سازی تیر سرستون پل‌ها ۸۰
۲-۴-۲ مروری بر مطالعات انجام شده بر روی اثربخشی روشهای مقاوم‌سازی پل ها ۸۱
۲-۵ منحنی‌های شکنندگی و کاربرد آنها در ارزیابی پل‌های مقاوم‌سازی شده ۸۲
۲-۵-۱ منحنی‌های شکنندگی مبتنی بر نظرکارشناسان پل ۸۳
۲-۵-۲ منحنی‌های شکنندگی تجربی ۸۵
۲-۵-۳ منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای تحلیلی ۸۶
۲-۵-۳-۱ روش طیف پاسخ Response Spectrum Analysis (RSA) ۸۷
۲-۵-۳-۲ روش استاتیکی غیر خطی یا طیف ظرفیت ۸۸
۲-۵-۳-۳ روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ۹۱
۲-۵-۳-۴ تحلیل دینامیکی فزاینده Incremental Dynamic Analysis (IDA) ۹۵
۲-۶ جمع بندی ۹۷

فصل سوم: مشخصات اجزاء سازه‌ای پل‌های بتن آرمه کالیفرنیا ۹۹
۳-۱ مقدمه ۹۹
۳-۲ طبقه‌بندی پل‌ها بر مبنای NBI و HAZUS ۹۹
۳-۳ دوران‌های مختلف طراحی لرزه‌ای پل‌های کالیفرنیا ۱۰۰
۳-۳-۱ دوران طراحی لرزه‌ای پیش از ۱۹۷۱ ۱۰۱
۳-۳-۱-۱ جزئیات طراحی ۱۰۲
۳-۳-۱-۲ نوع آسیب پذیری ۱۰۲
۳-۳-۲ دوران طراحی لرزه‌ای ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۰ (دوره میانی) ۱۰۲
۳-۳-۲-۱ جزئیات طراحی ۱۰۲
۳-۳-۲-۲ نوع آسیب پذیری ۱۰۳
۳-۳-۲-۳ استراتژی‌های بهسازی لرزه‌ای پل‌ها ۱۰۴
۳-۳-۳ دوران طراحی لرزه‌ای پس از ۱۹۹۰ (دوره نوین طراحی لرزه‌ای پل‌ها) ۱۰۴
۳-۳-۳-۱ جزئیات طراحی سازه‌ای پل‌ها ۱۰۴
۳-۳-۳-۲ استراتژی‌های بهسازی لرزه‌ای پل‌ها ۱۰۵
۳-۴ جزئیات سازه‌ای پل‌های بتن آرمه کالیفرنیا ۱۰۵
۳-۴-۱ روسازه پل ۱۰۵
۳-۴-۲ ستون‌ها ۱۰۶
۳-۴-۲-۱ ویژگی‌های ستون‌های دوره طراحی پیش از ۱۹۷۱ ۱۰۷
۳-۴-۲-۲ ویژگی‌های ستون‌های دوران طراحی ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۰ ۱۰۸
۳-۴-۲-۳ ویژگی ستون‌های دوره نوین طراحی لرزه‌ای پل‌ها (بعد از ۱۹۹۰) ۱۰۹
۳-۴-۳ کوله‌ها ۱۱۰
۳-۴-۳-۱ کوله‌های یکپارچه ۱۱۰
۳-۴-۳-۲ کوله‌های نشیمن‌دار ۱۱۲
۳-۴-۴ ویژگی‌های شالوده پل‌های کالیفرنیا ۱۱۳
۳-۴-۵ جزییات تکیه‌گاه‌ها، درز عرشه و کلیدهای برشی در پل‌های کالیفرنیا ۱۱۷
۳-۵ جمع‌بندی ۱۲۰

فصل چهارم: جزییات مدلسازی در اپنسیس، تحلیل و ارزیابی ... ۱۲۱
۴-۱ مقدمه ۱۲۱
۴-۲ جزییات مدلسازی اعضای پل در نرم‌افزار اپنسیس ۱۲۲
۴-۲-۱ زیر سازه: قاب‌های چند ستونی بتن آرمه ۱۲۲

۴-۲-۲ مدل‌های تحلیلی مصالح بتن و فولاد در اپنسیس ۱۲۲
۴-۲-۳ مدلسازی ستون‌ها در اپنسیس ۱۲۴
۴-۲-۴ مدلسازی شالوده پل‌ها در اپنسیس ۱۲۴
۴-۲-۵ مدلسازی کوله ۱۲۵
۴-۲-۶ مدلسازی عرشه ۱۲۸
۴-۲-۷ مدلسازی بالشتک‌های تکیه‌گاهی الاستومریک ۱۳۰
۴-۲-۸ مدلسازی کلیدهای برشی ۱۳۱
۴-۲-۹ مدلسازی برخورد عرشه به کوله با المان‌های ضربه ۱۳۱
۴-۳ معرفی کلاس پل قوسی مورد مطالعه ۱۳۲
۴-۴ مدل‌های تحلیلی پل‌های قوسی مورد مطالعه ۱۳۴
۴-۵ آنالیز مودال پل‌های قوسی مورد مطالعه ۱۳۶
۴-۶ جزییات مدلسازی روش‌های مقاوم‌سازی ۱۳۷
۴-۶-۱ مدلسازی ژاکت‌های فولادی ستون‌ها ۱۳۷
۴-۶-۲ مدلسازی کابل‌های فولادی ۱۴۰
۴-۶-۳ مدلسازی روش افزایش‌دهنده عرض نشیمن ۱۴۲
۴-۶-۴ مدلسازی کلیدهای برشی پل‌ها در اپنسیس ۱۴۳
۴-۷ چهارچوب تهیه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای تحلیلی پل‌ها ۱۴۵
۴-۷-۱ مشخصات زمین لرزه‌های استفاده شده در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی ۱۴۸
۴-۷-۲ عدم قطعیت‌ها در ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها ۱۵۰
۴-۷-۳ عدم قطعیت‌های مدلسازی مصالح ۱۵۲
۴-۷-۳-۱ عدم قطعیت در مشخصات بتن و فولاد ۱۵۲
۴-۷-۳-۲ عدم قطعیت در پارامترهای تکیه‌گاه الاستومریک ۱۵۲
۴-۷-۴ عدم قطعیت‌های پارامترهای هندسی و سازه‌ای پل‌های مورد مطالعه ۱۵۲
۴-۷-۴-۱ عدم قطعیت‌های پارامترهای هندسی پل‌ها ۱۵۲
۴-۷-۴-۲ عدم قطعیت در ارتفاع دیوار پشتی کوله پل‌ها ۱۵۳
۴-۷-۴-۳ عدم قطعیت در میزان آرماتور ستون ها ۱۵۳
۴-۷-۴-۴ عدم قطعیت پارامتر درز بین عرشه و کوله ۱۵۳
۴-۷-۴-۵ عدم قطعیت پارامتر سختی مؤثر شمع‌های شالوده کوله ها ۱۵۴
۴-۷-۴-۶ عدم قطعیت پارامتر سختی فنرهای انتقالی و دورانی شالوده ستون‌ها ۱۵۴
۴-۷-۴-۷ عدم قطعیت پارامتر سختی مقاوم خاک پشت کوله ۱۵۴
۴-۷-۵ سایر پارامترهای عدم قطعیت لحاظ شده در مدلسازی پل ها ۱۵۵
۴-۷-۵-۱ وزن پل ۱۵۵
۴-۷-۵-۲ میرایی ۱۵۶
۴-۷-۵-۳ زاویه اعمال زلزله در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی پل ها ۱۵۶
۴-۷-۶ مدل‌های تصادفی پل‌های قوسی ۱۵۶
۴-۷-۷ مدل‌های نیاز لرزه‌ای احتمالاتی ۱۵۷
۴-۷-۸ تخمین ظرفیت اعضاء پل یا مدل‌های حالات حدی ۱۶۰
۴-۷-۸-۱ ظرفیت ستون‌ها در حالات حدی مختلف ۱۶۳
۴-۷-۸-۲ ظرفیت نشیمن کوله و درز آب‌بندی ۱۶۵
۴-۷-۸-۳ ظرفیت جابجایی عرضی عرشه ۱۶۵
۴-۷-۸-۴ ظرفیت جابجایی‌های مقاوم، محرک و عرضی کوله ۱۶۶
۴-۷-۸-۵ ظرفیت جابجایی و دورانی شالوده قاب‌ها ۱۶۶
۴-۷-۸-۶ ظرفیت تکیه‌گاه‌های الاستومریک و کلیدهای برشی ۱۶۷
۴-۸ صحت سنجی روش مدلسازی و تحلیل استفاده شده در کتاب ۱۶۸

۴-۸-۱ معرفی پل‌های انتخاب شده جهت تدقیق مدل‌های تحلیلی ۱۶۹
۴-۸-۱-۱ پل ملولند ۱۶۹
۴-۸-۱-۲ پل کالتون ۱۷۱
۴-۸-۱-۳پل پینتر در ریودل ۱۷۴
۴-۸-۲ تدقیق مدل‌های تحلیلی ۱۷۶
۴-۸-۳ نتیجه صحت سنجی مدلسازی و تحلیل ۱۸۰

فصل پنجم: ارائه و تفسیر نتایج ارزیابی لرزه‌ای پل‌های مقاوم‌سازی شده ۱۸۱
۵-۱ مقدمه ۱۸۱
۵-۲ منحنی شکنندگی لرزه‌ای سیستم پل ۱۸۱
۵-۲-۱ منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی عرشه باکس بتن آرمه ۱۸۴
۵-۲-۱-۱ پل در وضعیت چون ساخت ۱۸۴
۵-۲-۱-۲ منحنی شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی مقاوم‌سازی شده ۲۰۲
۵-۳ ضرایب اصلاح شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی مقاوم‌سازی شده ۲۲۴
۵-۴ جمع بندی ۲۲۶

فصل ششم: کد نویسی مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود یک نمونه پل ... ۲۲۷
۶-۱ مقدمه ۲۲۷
۶-۲ فرضیات مدلسازی مصالح ۲۲۷
۶-۲-۱ بتن ۲۲۷
۶-۲-۱-۱ بتن محصور نشده ۲۲۷
۶-۲-۱-۲ بتن محصور شده ۲۲۹
۶-۲-۲ فولاد تقویت کننده ۲۳۰
۶-۳ فرضیات مدلسازی اجزای پل ۲۳۲
۶-۳-۱ ستون‌ها ۲۳۲
۶-۳-۲ پی ۲۳۴
۶-۳-۳ کوله ۲۳۵
۶-۳-۴ عرشه ۲۳۸
۶-۳-۵ بالشتک‌های تکیه گاهی الاستومریک ۲۳۹
۶-۳-۶ کلیدهای برشی ۲۴۰
۶-۳-۷ المان ضربه ۲۴۲
۶-۴ یک نمونه کامل از کد اپنسیس جهت مدلسازی سه بعدی و تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی پل قوسی چهار دهانه با عرشه باکس بتن آرمه ۲۴۳
۶-۵ آنالیز مودال پل ها ۳۵۶
۶-۵-۱ مقدمه ۳۵۶
۶-۵-۲ کد نویسی آنالیز مودال نمونه برای پل بتن آرمه مثال کتاب در اپنسیس ۳۵۷

پیوست : جزییات و فرضیات مدلسازی اعضای پل‌های قوسی مورد مطالعه ۳۶۲

منابع و مراجع ۳۶۶

مقدمه

ایران همانند ژاپن و نیوزیلند یکی از لرزه‌خیزترین کشورهای دنیاست. این کشور دارای شبکه وسیعی از راه‌های اصلی، فرعی، روستایی و راه آهن بوده و ابنیه فنی موجود در این شبکه عظیم سرمایه قابل توجهی را تشکیل می‌دهند. در مورد پل‌های ایران باید گفت که حجم سرمایه موجود (قیمت روز پل‌ها) به چندین ده هزار میلیارد ریال بالغ می‌شود. نگهداری و بهسازی چنین سرمایه عظیمی توسط شبکه وسیعی از راهداری‌ها انجام می‌شود. با توجه به قدمت پل‌ها و افزایش حجم ترافیک عبوری، افزایش انتظارات بهره برداری و شرایط لرزه‌خیزی ایران، بحث بهسازی و مقاوم‌سازی پل‌ها بیش از پیش دارای اهمیت شده و مسائل مرتبط با آن‌ها از جمله اولویت‌بندی تخصیص منابع و تصمیم‌گیری در مورد میزان بهسازی و روش بهینه مقاوم‌سازی از اولویت ویژه برخوردار شده‌اند.

زلزله‌های اتفاق افتاده در دهه‌های گذشته در دنیا بخصوص در ژاپن و آمریکا نشان داده‌اند که پل‌ها یکی از آسیب پذیرترین المان‌ها در سیستم حمل و نقل می‌باشند. آسیب پل‌ها می‌تواند منجر به قطع ارتباط قسمت قابل توجهی از یک شبکه بزرگراهی شده که علاوه بر خسارات قابل توجه مالی، مانع از امکان واکنش اورژانسی و سریع بعد از زلزله خواهد شد. شبکه حمل و نقل بزرگراهی ایران شامل مجموعه‌ای از پل‌های مختلف و متفاوت چه از نظر هندسه و چه از نظر مصالح می‌باشد که ساخت اکثر آن‌ها به قبل از سال‌های تدوین آیین‌نامه‌های لرزه‌ای پیشرفته بر می‌گردد و بعلت عدم وجود دانش کافی و عدم اجرای صحیح در آن زمان در برابر زلزله آسیب‌پذیر هستند. به منظور پیشگیری از وقوع آسیب‌های بالقوه، پل‌هایی که فاقد عملکرد مناسب در مقابل زلزله هستند می‌بایست مقاوم‌سازی گردند.

از سویی دیگر تعداد زیادی از پل‌های بتن آرمه در ایران و سایر کشورهای دنیا دارای قوس در پلان و درزهای میانی هستندکه اصطلاحاً پل‌های قوسی چند قابی نامیده می‌شوند. بعنوان مثال در ایالت کالیفرنیا آمریکا بیش از پانزده درصد پل‌های بتن آرمه از نوع قوسی دارای درز میانی هستند. وجود انحناء و درز میانی در عرشه جعبه‌ای شکل پل‌های بتن آرمه باعث بروز رفتار دینامیکی پیچیده شده و آسیب‌پذیری لرزه‌ای این گونه از پل‌ها در قیاس با پل‌های بدون قوس نیز بیشتر بوده است. بنابراین باید اثر شعاع قوس عرشه و از سویی دیگر اثر روش‌های مختلف مقاوم‌سازی پل‌ها در میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای آن‌ها بایستی بررسی شوند.

در این کتاب ضمن آموزش مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود پل‌های بتن آرمه در نرم‌افزار اپنسیس، با استفاده از روش‌های احتمالاتی، تأثیر توامان شعاع قوس عرشه و روش‌های مختلف مقاوم‌سازی بر روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های بتن آرمه عرشه جعبه‌ای مورد بررسی قرار

می‌گیرند.

نمونه‌ای از پل‌های قوسی بتن آرمه با انحناءهای متفاوت عرشه

اهداف

در سال‌های اخیر میزان آگاهی از خطر زلزله افزایش یافته و اکثر کشورهای لرزه‌خیز دنیا بودجه‌ای را به منظور مقاوم‌سازی و کاهش آسیب‌پذیری پل‌های موجود اختصاص داده‌اند. اما با توجه به تعداد زیاد پل‌های موجود و روش‌های متعدد مقاوم‌سازی، محدود بودن بودجه تخصیص‌یافته و همچنین هزینه بالای اکثر روش‌های مقاوم‌سازی، تهیه یک مجموعه اطلاعات برای تعیین اولاً میزان آسیب‌پذیر بودن هریک از پل‌ها در جریان زلزله و ثانیاً میزان اثربخشی هر یک از روش‌های رایج مقاوم‌سازی برروی عملکرد لرزه‌ای آن‌ها، بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. تا به امروز مطالعات محدودی جهت ارزیابی میزان کارایی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در پل‌ها و یا پشتیبانی جهت تصمیم‌سازی ارتقاء لرزه‌ای پل‌ها به خصوص پل‌های قوسی شکل انجام شده است. لذا یک ارزیابی جامع بر روی کارایی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در پل‌های قوسی بتن آرمه ضروری به نظر می‌رسد.

به منظور تسهیل تصمیم‌سازی در مقاوم‌سازی پل‌ها اخیراً از منحنی‌های شکنندگی (Fragility Curves) استفاده می‌شود. آیین‌نامه‌های بهسازی لرزه‌ای معتبر دنیا رفته رفته از این منحنی‌ها برای کنترل‌های عملکردی پل‌ها استفاده می‌نمایند. منحنی‌های شکنندگی در واقع حالات احتمال شرطی هستند که به کمک آنها عملکرد لرزه‌ای مورد انتظار پل تبیین می‌گردد. این منحنی‌ها احتمال رسیدن و یا تجاوز از یک حد مشخص آسیب را به ازای مقادیر شدت زمین لرزه‌های متفاوت مشخص می‌نمایند. وجود منحنی‌های شکنندگی قابل اطمینان برای پل‌های مقاوم‌سازی شده قوسی، ارزیابی اثرات روشهای متفاوت مقاوم‌سازی بر روی عملکرد لرزه‌ای این نوع از پل‌ها

را امکان‌پذیر می‌سازد. چنین ابزاری به عنوان اطلاعات ورودی در سیستم مدیریت بحران و کاهش خطرپذیری به حساب آمده و همراه شدن نمودارهای شکنندگی پل‌های مقاوم‌سازی شده با چهارچوب‌های کاهش خطرپذیری می‌توانند تکیه‌گاه قابل اعتمادی جهت هزینه‌سازی مفید، صحیح و بهینه در بحث مقاوم‌سازی پل‌ها باشند.

با توجه به شرایط هندسی خاص و رفتار متفاوتی که پل‌های نامنظم (از جمله پل‌های قوسی) نسبت به پل‌های مستقیم در جریان زلزله از خود بروز می‌دهند، نیاز به بررسی میزان آسیب لرزه‌ای آن‌ها بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. در شکل زیر نمونه‌ای از گسیختگی عرشه پل قوسی بتن آرمه در زلزله نورتریج مشاهده می‌گردد.

نمونه‌ای از گسیختگی عرشه بتن آرمه پل قوسی شکل- زلزله ۱۹۹۴ نورتریج

از سویی دیگر اکثر مطالعات انجام شده برای تهیه منحنی‌های شکنندگی پل‌ها پارامترهای مختلف مؤثر در تحلیل‌ها را بصورت قطعی فرض کرده‌اند، در صورتیکه هم پارامترهای هندسی پل‌ها و هم مصالح مصرفی در آنها همچنین تحریکات زلزله همگی ماهیت احتمالاتی داشته که باید در روند تحلیل و ارزیابی لرزه‌ای بصورت احتمالاتی در نظر گرفته شوند. بعلاوه اکثر مطالعات انجام شده در این رابطه تک مؤلفه‌های مستقلی را معیار ویرانی پل در نظر گرفتن مثلاً اکثراً گسیختگی ستون یک پل را معیاری برای شکست آن پل در نظر گرفته‌اند در صورتیکه گسیختگی کوله‌ها، تکیه‌گاه‌ها و کلیدهای برشی و ... در ویرانی یک پل تأثیرگذار می‌باشند. این مؤلفه‌های مختلف مستقل از هم نبوده و وابسته به یکدیگر هستند. در تعیین میزان آسیب‌پذیری یک پل تحت زلزله مشخص با روش احتمالاتی، وابسته بودن این مؤلفه‌ها و المان‌های سازه‌ای باید در تحلیل لحاظ گردد که این مسأله بر پیچیدگی تهیه منحنی‌های شکنندگی به روش تحلیلی می‌افزاید.

در این کتاب منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی شکل چند قابی با عرشه باکس بتن آرمه مقاوم‌سازی شده، با لحاظ تمام عدم قطعیت‌های تأثیرگذار در رفتار لرزه‌ای‌شان و نیز با در نظر گرفتن وابستگی مؤلفه‌های مختلف سازه‌ای پل با یکدیگر و بصورت احتمالاتی تعیین می‌گردند. این مبحث یکی از مباحث پیچیده علم قابلیت اعتماد سازه‌ها می‌باشد که طی آن مشارکت اعضای مختلف پل‌ها در میزان آسیب‌پذیری کل سیستم پل بصورت احتمالاتی در نظر گرفته می‌شود. همانطور که قبلاً تأکید گردید آشنایی دانشجویان عزیز به مباحث درس قابلیت اعتماد سازه‌ها جهت بهره برداری از مباحث این کتاب ضروری می‌باشد.

مراحل ارزیابی لرزه‌ای احتمالاتی پل‌ها

برای ارزیابی لرزه‌ای احتمالاتی پل‌ها و تهیه منحنی‌های شکنندگی آن‌ها نیاز به یک مجموعه اطلاعات جامع از مشخصات پل‌ها بوده که متأسفانه در کشور ما این مجموعه کامل که شامل تقسیم‌بندی پل‌ها بر اساس مصالح، مشخصات هندسی و جزییات اعضاء مختلف پل‌ها می‌باشند موجود نیست. با توجه به اینکه آیین‌نامه‌های طراحی پل‌ها در کشور ما منطبق بر آیین‌نامه‌های آمریکایی بوده و دستورالعمل مقاوم‌سازی پل‌ها در ایران همان دستورالعمل مقاوم‌سازی پل‌های ایالات متحده می‌باشد و با توجه به شباهت زیاد شرایط لرزه‌خیزی ایران به نواحی غربی آمریکا، برای انجام این پژوهش با هدف رسیدن به نتایجی قابل اعتماد از مجموعه داده‌های پل‌های ایالت کالیفرنیا آمریکا استفاده شده است.

به طور خلاصه مجموعه اقدامات لازم مرتبط با اهداف آموزشی این کتاب به شرح زیر می‌باشد:

الف- ارزیابی روش‌های مقاوم‌سازی مناسب برای پل‌های قوسی عرشه جعبه‌ای بتن آرمه. شناسایی روش‌های بالقوه جهت مطالعه و تعیین میزان اثرپذیری آنها در کاهش آسیب‌پذیری این پل‌ها.

ب- تهیه مدل‌های ۳ بعدی در نرم‌افزار اپنسیس جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی پل‌ها در وضعیت چون ساخت و مقاوم‌سازی شده، با مشخصات متنوعی از طول دهانه‌ها، ارتفاع پایه‌ها، عرض عرشه، تعداد ستون پایه‌ها، شعاع انحناء عرشه و ... .

ج- شناسایی و مدلسازی احتمالاتی پارامترهای مدلسازی غیر قطعی بالقوه و تأثیرگذار در تعیین و تشکیل منحنی‌های شکسنندگی لرزه ای.

د- تعیین حالات آسیب[1] و حالات حدی[2] ظرفیت اعضای مختلف پل‌ها متناسب با میزان

[1] Damage states
[2] Limit states

ظرفیت ترافیکی مجاز پل بعد از وقوع زلزله.

ه- ارائه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی عرشه جعبه‌ای بتن آرمه در وضعیت چون ساخت برای اعضاء و سیستم پل و مقایسه پارامترهای شکنندگی آنها با مقادیر متناظرشان در آیین‌نامه ارزیابی خطر آمریکا[1] جهت تعیین میزان اثر انحناء عرشه در آسیب‌پذیری لرزه‌ای این نوع از پل‌ها.

و- ارائه منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی مقاوم‌سازی شده برای اعضاء و سیستم پل و بررسی اثر توامان شعاع قوس عرشه و روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای آنها.

ز- آموزش مدلسازی اجزاء محدود و تحلیل‌های مودال و دینامیکی غیرخطی پل‌های بتن آرمه در اپنسیس.

ساختار کتاب

این کتاب مشتمل بر بخش‌های زیر می‌باشد:

- **فصل اول** مروری بر انواع خسارات پل‌ها در زلزله‌های گذشته
- **فصل دوم** تحت عنوان مروری بر مطالعات گذشته در زمینه مقاوم‌سازی پل‌ها به معرفی روش‌های مختلف مقاوم‌سازی پل‌ها پرداخته ضمناً خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده درگذشته در مورد تهیه منحنی‌های شکنندگی پل‌های مقاوم‌سازی شده مرور می‌شوند.
- **فصل سوم** تحت عنوان مشخصات اجزاء سازه‌ای پل‌های بتن آرمه کالیفرنیا، به مرور مختصری از مشخصات اجزاء مختلف سازه‌ای پل‌های عرشه جعبه‌ای بتن آرمه کالیفرنیا آمریکا مانند ستون‌ها، عرشه، کوله، درز آب بندی، تکیه‌گاه، شمع و فونداسیون و ... که در این کتاب برای مدل‌های تحلیلی پل‌ها استفاده شده‌اند می‌پردازد. دانستن این جزییات در مدلسازی اجزاء محدود پل‌های مورد مطالعه در اپنسیس ضروری می‌باشد.
- **فصل چهارم** تحت عنوان مدلسازی، تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های بتن آرمه به کلیات نحوه مدلسازی اجزاء مختلف پل‌ها در نرم‌افزار اپنسیس و تحلیل‌های مورد نیاز مطالعات بهسازی پل‌ها و روش احتمالاتی ارزیابی لرزه‌ای بکار گرفته شده می‌پردازد. جزییات لازم در مورد مشخصات زلزله‌های مورد استفاده،

[1] HAZUS

مدل‌های احتمالاتی نیاز لرزه‌ای مشترک[1]، تخمین ظرفیت، منحنی‌های شکنندگی اعضاء و سیستم پل به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین مدلهای تحلیلی روش‌های مقاوم‌سازی در نرم‌افزار اپنسیس تشریح می‌گردد.

- **فصل پنجم** تحت عنوان ارائه و تفسیر نتایج، به ارائه منحنی‌های شکنندگی اعضاء و سیستم پل‌های بتن آرمه در وضعیت‌های چون ساخت و مقاوم‌سازی آن‌ها پرداخته و آثار توامان شعاع انحناء عرشه و روش‌های مختلف مقاوم‌سازی در میزان آسیب‌پذیری این نوع از پل‌ها بررسی می‌شوند.
- **فصل ششم** تحت عنوان تکنیک‌های مدلسازی اجزاء محدود پل‌ها در اپنسیس، به تشریح جزییات مدلسازی مؤلفه‌های مختلف سازه‌ای پل‌ها و تشریح کدنویسی موتور تحلیل‌های مودال و دینامیکی غیر خطی پل‌ها در اپنسیس می‌پردازد.

[1] Joint probabilistic seismic demand models