

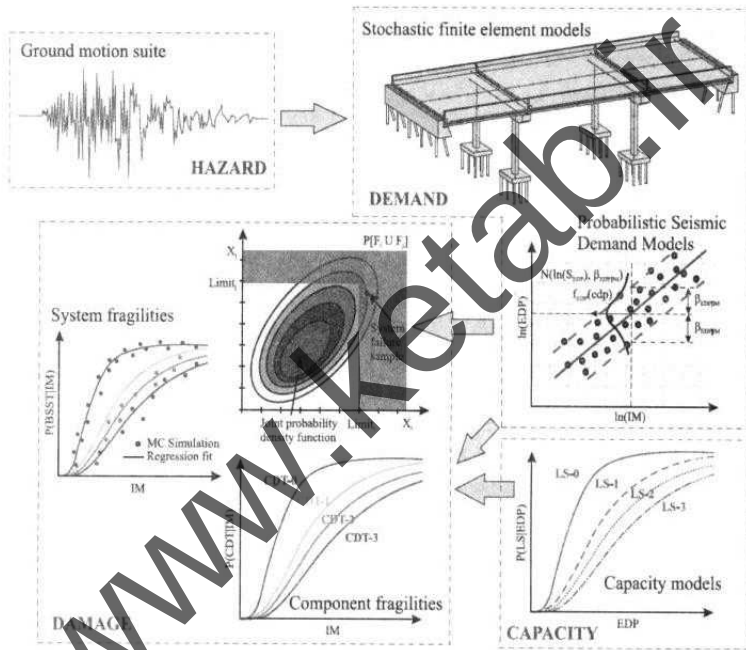
۱۳۷۱۷۱۸

کتابخانه اینترنتی

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای احتمالاتی و مقاومت‌سازی پل‌های بتن آرمه با نرم‌افزار

OpenSEES

(The Open System For Earthquake Engineering Simulation)



تألیف :

حسین پهلوان

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

● 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.



سری کتاب‌های فنی مهندسی

انتشارات آزاده

● ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای احتمالاتی و مقاوم‌سازی پل‌های بتن آرمه با نرم‌افزار OpenSEES

- تألیف: حسین پهلوان
- ناظر فنی و چاپ: امیر بدروستانی
- حروفچینی و آماده‌سازی: انتشارات آزاده
- لیتوگرافی: آرمانسا
- چاپ: اصلانی
- صحافی: صالحانی
- تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه
- چاپ اول: زمستان ۱۳۹۴
- ناشر: انتشارات آزاده
- شابک: ۹۷۸ - ۹۶۴ - ۵۰۱ - ۸۷۷ - ۹
- بها: ۳۰/۰۰۰ تومان

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

● مرکز پخش: انتشارات آزاده - خیابان انقلاب، مقابل دانشگاه تهران (بین خ معررانی و خ دانشگاه)، جنب بانک ملت، پاساژ

پلاک ۱۲۰۲، طبقه زیرهمکف - کدپستی ۱۳۱۴۷۵۴۷۱۳ | تلفن: ۶۶۴۱۴۳۷۴ - ۶۶۴۱۵۷۵۲ | دورنویس: ۶۶۴۱۴۵۱۰

سرشناسه	: پهلوان، حسین، ۱۳۵۷ -
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	: ۹۷۸ - ۹۶۴ - ۵۰۱ - ۸۷۷ - ۹
وضعیت فهرست نویسی	: فنی
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۳۶۶.
موضوع	: نرم‌افزار اپن سیس
موضوع	: تحلیل سازه - برنامه‌های کامپیوتری
موضوع	: تحلیل سازه - نرم‌افزار
موضوع	: پل‌های بتنی
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۴ الف ۹۴ پ ۶۴۷ / TA
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۴/۱۱۰۲۸۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۰۵۲۸۷۳

برای خرید online به آدرس زیر مراجعه کنید:

www.rahianarshad.com

میکتار مولف

پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین و در عین حال آسیب‌پذیرترین سازه‌ها در جریان‌های 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 بالایی 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 نمی‌کنند. این دسته از پل‌ها باید مورد مطالعات بهسازی لرزه‌ای قرار گرفته و در صورت نیاز با روشی مناسب مقاوم‌سازی شوند. هم‌اکنون 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 آسیب‌پذیرتر 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. اینسیس یک نرم‌افزار رایگان و منبع باز بوده و موتور تحلیل بسیار قوی و سریع در حوزه رفتار غیرخطی سازه‌های مختلف دارد.

اینست. اتصال بین نرم افزار به نرم افزارهایی مانند MATLAB و دقت بالای نتایج خروجی ارائه شده در دانش آرایشی کامپی از مواد و المانها و قابلیت کدنویسی برای چندین آنالیز پی در پی مانند تحلیل های IDA و کوچک بودن حجم نرم افزار و خروجی های آن در مقایسه با سایر نرم افزارها و همچنین سهولت تحلیل نتایج و سایر ویژگی های منحصر به فرد این نرم افزار آن را به نرم افزار بی بدون رقیب در پژوهش های مهندسی زلزله تبدیل نموده است.

علی رغم مزایای زیاد این نرم افزار، استفاده از آن به جهت نیاز به آشنایی با تکنیک های کدنویسی تا حدی مشکل بوده و در ایران تا این لحظه کتب محدودی جهت آموزش این نرم افزار تألیف شده اند که عمدتاً تحلیل های اجزاء محدود ساختمان ها (و نه پل ها) را آموزش می دهند. بنابراین تألیف یک کتاب آموزشی جهت مدلسازی و تحلیل های دینامیکی غیر خطی و ارزیابی لرزه ای پل ها با این نرم افزار ضروری به نظر می رسد.

مباحث مطرح شده در این کتاب که عمدتاً شامل نتایج حاصل از تحقیقات مولف جهت انجام رساله دوره دکتری می باشند با هدف آموزش تکنیک های مدلسازی اجزاء محدود و تحلیل های غیر خطی پل ها در نرم افزار اپنسیس و همچنین با هدف آموزش تهیه منحنی های شکنندگی لرزه ای تحلیلی پل های مقاوم سازی شده برای دانشجویان مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری سازه و زلزله تألیف گردیده و می تواند مرجع تکنیکی مناسبی برای دروس طراحی پل، مهندسی زلزله، سازه های بتن آرمه پیشرفته، قابلیت اعتماد سازه ها و بخصوص درس تحلیل دینامیکی غیر خطی این دانشجویان به حساب آید.

تأکید می گردد که مباحث مطرح شده در ارتباط با مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود پل ها 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 سازه ها، تحلیل اجزاء محدود و قابلیت اعتماد سازه ها تسلط داشته باشند. همچنین به مبانی مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود با نرم افزار اپنسیس نیز آشنایی کامل داشته باشند. در این ارتباط مطالعه کتاب "کاربردهای نرم افزار اپنسیس در مدلسازی و تحلیل سازه ها" تألیف آقایان دکتر مجتبی حسینی و دکتر هادی کنارنگی، بعنوان پیش نیاز استفاده از این کتاب توصیه می گردد. در این کتاب مباحث زیر آموزش داده می شوند:

- مشخصات اجزاء سازه ای و غیر سازه ای پل های بتن آرمه آمریکا
- تکنیک های مدلسازی اجزاء محدود المان های مختلف پل های بتن آرمه شامل ستون ها، کوله ها، عرشه ها، بالشتک های الاستومریک، کلیدهای برشی، کابل های نگه دارنده عرشه، درزهای آب بندی، فونداسیون، خاک و ... در اپنسیس
- تکنیک های مدلسازی سه بعدی و انجام تحلیل های مودال و دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی پل های 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 مقاوم‌سازی
- تعیین آثار انحاء 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 برخورد 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 راه‌اندازی 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

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۱۱	مقدمه.....
۱۷	فصل اول: انواع خسارات پل‌ها در زلزله‌های گذشته.....
۱۷	۱-۱ مقدمه.....
۱۹	۲-۱ مشخصات تعدادی از زلزله‌های مخرب پل‌ها.....
۱۹	۱-۲-۱ زلزله کانتو - ژاپن (۱۹۲۳).....
۱۹	۲-۲-۱ زلزله نیکلایا - ژاپن (۱۹۶۴).....
۱۹	۳-۲-۱ زلزله سان فرناندو - آمریکا (۱۹۷۱).....
۲۰	۴-۲-۱ زلزله لوما پریتا - آمریکا (۱۹۸۹).....
۲۰	۵-۲-۱ زلزله نورتریج - آمریکا (۱۹۹۴).....
۲۰	۶-۲-۱ زلزله کوبه - ژاپن (۱۹۹۵).....
۲۱	۳-۱ عوامل کلی مؤثر بر میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها.....
۲۱	۱-۳-۱ تأثیر شرایط ساختگاهی.....
۲۲	۲-۳-۱ تأثیر زمان طراحی و ساخت.....
۲۳	۳-۳-۱ تأثیر تغییر شرایط فیزیکی در میزان آسیب‌پذیری.....
۲۴	۴-۳-۱ تأثیر ساختار هندسی پل.....
۲۵	۴-۱ بررسی آسیب‌های وارده به اجزاء مختلف پل‌ها در زلزله‌های گذشته.....
۲۵	۱-۴-۱ آسیب‌های وارد بر رو سازه.....
۲۷	۱-۱-۴-۱ فروافتادن و شکست عرشه به سبب از دست رفتن سطح اتکا در محل درزه‌ای انبساط.....
۲۹	۲-۱-۴-۱ آسیب‌پذیری نشیمن گاه‌ها.....
۳۰	۳-۱-۴-۱ آسیب‌پذیری اتصالات.....
۳۰	۴-۱-۴-۱ آسیب‌پذیری کلبه‌های برشی.....
۳۱	۴-۴-۱ آسیب‌پذیری تکیه‌گاه‌ها.....
۳۲	۵-۴-۱ آسیب‌پذیری ستون‌ها.....
۳۷	۶-۴-۱ تیرها.....
۳۷	۷-۴-۱ کوله‌ها.....
۳۹	۸-۴-۱ شالوده‌ها.....
۳۹	۵-۱ جمع بندی.....
۴۱	فصل دوم: تحقیقات گذشته ارزیابی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی پل‌ها.....
۴۱	۱-۲ مقدمه.....
۴۱	۲-۲ تاریخچه مطالعات منحنی‌های شکنندگی پل‌های مستقیم.....
۵۲	۳-۲ تحقیقات گذشته آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های نامنظم.....
۷۲	۴-۲ مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها در آمریکا.....
۷۲	۱-۴-۲ مروری بر روش‌های رایج مقاوم سازی.....
۷۳	۱-۱-۴-۲ مقاوم‌سازی ستون‌ها.....
۷۴	۲-۱-۴-۲ جداساز لرزه‌ای.....
۷۵	۳-۱-۴-۲ قیوهای طولی.....
۷۷	۴-۱-۴-۲ سایر لوازم محدودکننده جابجایی پل.....
۷۷	۵-۱-۴-۲ کلبه‌های برشی و ادوات محدودکننده حرکت عرضی.....

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

فصل سوم: مشخصات اجزاء نمازهای پل‌های بتن آرمه کالیفرنیا..... ۹۹

۹۹	۳-۱ مقدمه.....
۹۹	۳-۲ طبقه‌بندی پل‌ها بر مبنای NBI و IIAZUS.....
۱۰۰	۳-۳ دوران‌های مختلف طراحی لرزه‌ای پل‌های کالیفرنیا.....
۱۰۱	۳-۳-۱ دوران طراحی لرزه‌ای پیش از ۱۹۷۱.....
۱۰۲	۳-۳-۱-۱ جزئیات طراحی.....
۱۰۲	۳-۳-۱-۲ نوع آسیب‌پذیری.....
۱۰۲	۳-۳-۲ دوران طراحی لرزه‌ای ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۰ (دوره میانی).....
۱۰۲	۳-۳-۲-۱ جزئیات طراحی.....
۱۰۳	۳-۳-۲-۲ نوع آسیب‌پذیری.....
۱۰۴	۳-۳-۳ استراتژی‌های بهسازی لرزه‌ای پل‌ها.....
۱۰۴	۳-۳-۳-۱ دوران طراحی لرزه‌ای پس از ۱۹۹۰ (دوره نوین طراحی لرزه‌ای پل‌ها).....
۱۰۴	۳-۳-۳-۲ جزئیات طراحی سازه‌ای پل‌ها.....
۱۰۵	۳-۳-۳-۳ استراتژی‌های بهسازی لرزه‌ای پل‌ها.....
۱۰۵	۳-۴ جزئیات سازه‌ای پل‌های بتن آرمه کالیفرنیا.....
۱۰۵	۳-۴-۱ روسازه پل.....
۱۰۶	۳-۴-۲ ستون‌ها.....
۱۰۷	۳-۴-۳ ۱ ویزگی‌های ستون‌های دوره طراحی پیش از ۱۹۷۱.....
۱۰۸	۳-۴-۳-۲ ویزگی‌های ستون‌های دوران طراحی ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۰.....
۱۰۹	۳-۴-۳-۳ ویزگی ستون‌های دوره نوین طراحی لرزه‌ای پل‌ها (بعد از ۱۹۹۰).....
۱۱۰	۳-۴-۳-۴ کوله‌ها.....
۱۱۰	۳-۴-۳-۵ کوله‌های یکپارچه.....
۱۱۲	۳-۴-۳-۶ کوله‌های نشیمن‌دار.....
۱۱۳	۳-۴-۳-۷ ویزگی‌های شالوده پل‌های کالیفرنیا.....
۱۱۷	۳-۵ جزئیات تکیه‌گاه‌ها، درز عرشه و کلیدهای برشی در پل‌های کالیفرنیا.....
۱۲۰	۳-۵-۱ جمع‌بندی.....

فصل چهارم: جزئیات مدلسازی در اپنسیس، تحلیل و ارزیابی ... ۱۲۱

۱۲۱	۴-۱ مقدمه.....
۱۲۲	۴-۲ جزئیات مدلسازی اعضای پل در نرم‌افزار اپنسیس.....
۱۲۲	۴-۲-۱ زیر سازه: قاب‌های چند ستونی بتن آرمه.....

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

۱۶۹	۱-۸-۴ معرفی پل‌های انتخاب شده جهت تدقیق مدل‌های تحلیلی.....
۱۶۹	۱-۸-۴-۱ پل مولوند.....
۱۷۱	۱-۸-۴-۲ پل کالتون.....
۱۷۴	۱-۸-۴-۳ پل پینتر در ریودل.....
۱۷۶	۲-۸-۴ تدقیق مدل‌های تحلیلی.....
۱۸۰	۳-۸-۴ نتیجه صحت سنجی مدل‌سازی و تحلیل.....
۱۸۱	فصل پنجم: ارائه و تفسیر نتایج ارزیابی لرزه‌ای پل‌های مقاومت‌سازی شده.....
۱۸۱	۱-۵ مقدمه.....
۱۸۱	۲-۵ منحنی شکنندگی لرزه‌ای سیستم پل.....
۱۸۴	۱-۲-۵ منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی عرشه باکس بتن آرمه.....
۱۸۴	۱-۲-۵-۱ پل در وضعیت چون ساخت.....
۲۰۲	۲-۱-۲-۵ منحنی شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی مقاومت‌سازی شده.....
۲۲۴	۳-۵ ضرایب اصلاح شکنندگی لرزه‌ای پل‌های قوسی مقاومت‌سازی شده.....
۲۲۶	۴-۵ جمع بندی.....
۲۲۷	فصل ششم: کد نویسی مدل‌سازی و تحلیل اجزاء محدود یک نمونه پل ---.....
۲۲۷	۱-۶ مقدمه.....
۲۲۷	۲-۶ فرضیات مدل‌سازی مصالح.....
۲۲۷	۱-۲-۶ بتن.....
۲۲۷	۱-۲-۶-۱ بتن محصور نشده.....
۲۲۹	۱-۲-۶-۲ بتن محصور شده.....
۲۳۰	۲-۲-۶ فولاد تقویت کننده.....
۲۳۲	۳-۶ فرضیات مدل‌سازی اجزای پل.....
۲۳۲	۱-۳-۶ ستون‌ها.....
۲۳۴	۲-۳-۶ پی.....
۲۳۵	۳-۳-۶ کوله.....
۲۳۸	۴-۳-۶ عرشه.....
۲۳۹	۵-۳-۶ بالشتک‌های تکیه گاهی الاستومریک.....
۲۴۰	۶-۳-۶ کلیدهای برشی.....
۲۴۲	۷-۳-۶ المان ضربه.....
۲۴۳	۴-۶ یک نمونه کامل از کد اینپسیس جهت مدل‌سازی سه بعدی و تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی پل قوسی چهار دهانه.....
۲۴۳	با عرشه باکس بتن آرمه.....
۲۵۶	۵-۶ آنالیز مودال پل ها.....
۲۵۶	۱-۵-۶ مقدمه.....
۲۵۷	۲-۵-۶ کد نویسی آنالیز مودال نمونه برای پل بتن آرمه مثال کتاب در اینپسیس.....
۳۶۲	پیوست : جزییات و فرضیات مدل‌سازی اعضای پل‌های قوسی مورد مطالعه.....
۳۶۶	منابع و مراجع.....

مقدمه

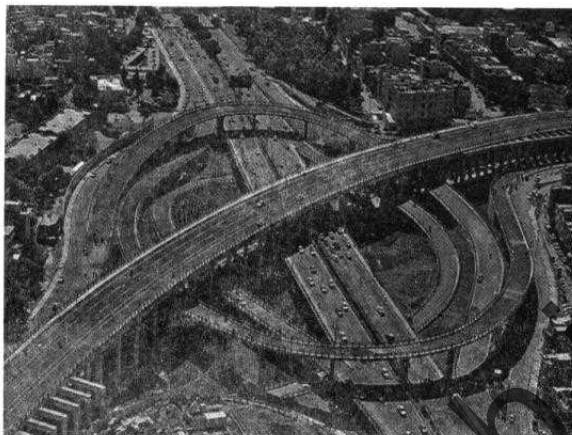
ایران همانند ژاپن و نیوزیلند یکی از لرزه‌خیزترین کشورهای دنیاست. این کشور دارای شبکه وسیعی از راه‌های اصلی، فرعی، روستایی و راه آهن بوده و ابنیه فنی موجود در این شبکه عظیم سرمایه قابل توجهی را تشکیل می‌دهند. در مورد پل‌های ایران باید گفت که حجم سرمایه موجود (قیمت روز پل‌ها) به چندین ده هزار میلیارد ریال 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 بهره‌برداری 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 آسیب‌پذیرترین 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 هستند که 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 انحنای متفاوت عرشه

اهداف

در سال‌های اخیر میزان آگاهی از خطر زلزله افزایش یافته و اکثر کشورهای لرزه‌خیز دنیا بودجه‌ای را به منظور مقاومت‌سازی و کاهش آسیب‌پذیری پل‌های موجود اختصاص داده‌اند. اما با توجه به تعداد زیاد پل‌های موجود و روش‌های متعدد مقاومت‌سازی، محدود بودن بودجه تخصیص‌یافته و همچنین هزینه بالای اکثر روش‌های مقاومت‌سازی، 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 مقاومت‌سازی بر روی عملکرد لرزه‌ای آن‌ها، پیش از پیش‌ضروری به نظر می‌رسد. تا به امروز مطالعات محدودی جهت ارزیابی میزان کارایی روش‌های مختلف مقاومت‌سازی 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 مقاومت‌سازی در پل‌های قوسی بتن آرمه ضروری به نظر می‌رسد.

به منظور تسهیل تصمیم‌سازی در مقاومت‌سازی 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 لرزه‌ها، متفاوت مشخص می‌نمایند. وجود منحنی‌های شکنندگی قابل اطمینان برای پل‌های مقاومت‌سازی شده قوسی، ارزیابی اثرات روشهای متفاوت مقاومت‌سازی بر روی عملکرد لرزه‌ای این نوع از پل‌ها

را امکان پذیر می سازد. چنین ابزاری به عنوان اطلاعات ورودی در سیستم مدیریت بحران و کاهش خطرپذیری به حساب آمده و همراه شدن نمودارهای شکنندگی پل های مقاوم سازی شده با چهارچوب های کاهش خطرپذیری می توانند تکیه گاه قابل اعتمادی جهت هزینه سازی مفید، صحیح و بهینه در بحث مقاوم سازی پل ها باشند.

با توجه به شرایط هندسی خاص و رفتار متفاوتی که پل های نامنظم (از جمله پل های قوسی) نسبت به پل های مستقیم در جریان زلزله از خود بروز می دهند، نیاز به بررسی میزان آسیب لرزه ای آن ها بیش از پیش ضروری به نظر می رسد. در شکل زیر نمونه ای از گسیختگی عرشه پل قوسی بتن آرمه در زلزله نورتریج مشاهده می گردد.



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

از سویی دیگر اکثر مطالعات انجام شده برای تهیه منحنی های شکنندگی پل ها پارامترهای مختلف مؤثر در تحلیل ها را بصورت قطعی فرض کرده اند، در صورتیکه هم پارامترهای هندسی پل ها و هم مصالح مصرفی در آنها همچنین تحریکات زلزله همگی ماهیت احتمالاتی داشته که باید در روند تحلیل و ارزیابی لرزه ای بصورت احتمالاتی در نظر گرفته شوند. بعلاوه اکثر مطالعات انجام شده در این رابطه تک مؤلفه های مستقلی را معیار ویرانی پل در نظر گرفتن مثلاً اکثراً گسیختگی ستون یک پل را معیاری برای شکست آن پل در نظر گرفته اند در صورتیکه گسیختگی کوله ها، تکیه گاه ها و کلیدهای برشی و ... در ویرانی یک پل تأثیرگذار می باشند. این مؤلفه های مختلف مستقل از هم نبوده و وابسته به یکدیگر هستند. در تعیین میزان آسیب پذیری یک پل تحت زلزله مشخص با روش احتمالاتی، وابسته بودن این مؤلفه ها و المان های سازه ای باید در تحلیل لحاظ گردد که این مسأله بر پیچیدگی تهیه منحنی های شکنندگی به روش تحلیلی می افزاید.

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 بهره‌برداری 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 اعضا 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 نتایج 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 انحنا عرشه و ...

ج- شناسایی و مدل‌سازی احتمالاتی پارامترهای مدل‌سازی غیر قطعی بالقوه و تأثیرگذار در تعیین و تشکیل منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای.

د- تعیین حالات آسیب^۱ و حالات حدی^۲ ظرفیت اعضای مختلف پل‌ها متناسب با میزان

^۱ Damage states

^۲ Limit states

ظرفیت ترفافیکی مجاز پل بعد از وقوع زلزله.

ه- ارائه منحنی های شکنندگی لرزه ای پل های قوسی عرشه جعبه ای بتن آرمه در وضعیت چون ساخت برای اعضاء و سیستم پل و مقایسه پارامترهای شکنندگی آنها با مقادیر متناظرشان در آیین نامه ارزیابی خطر آمریکا^۱ جهت تعیین میزان اثر انحناء عرشه در آسیب پذیری لرزه ای این نوع از پل ها.

و- ارائه منحنی های شکنندگی لرزه ای پل های قوسی مقاوم سازی شده برای اعضاء و سیستم پل و بررسی اثر توامان شعاع قوس عرشه و روش های مختلف مقاوم سازی در میزان آسیب پذیری لرزه ای آنها.

ز- آموزش مدلسازی اجزاء محدود و تحلیل های مودال و دینامیکی غیرخطی پل های بتن آرمه در اپنسیس.

ساختار کتاب

این کتاب مشتمل بر بخش های زیر می باشد:

- فصل اول مروری بر انواع خرابی های پل ها در زلزله های گذشته
- فصل دوم تحت عنوان مروری بر مطالعات گذشته در زمینه مقاوم سازی پل ها به معرفی روش های مختلف مقاوم سازی پل ها پرداخته ضمناً خلاصه ای از مطالعات انجام شده در گذشته در مورد تهیه منحنی های شکنندگی پل های مقاوم سازی شده مرور می شوند.
- فصل سوم تحت عنوان مشخصات اجزاء سازه ای پل های بتن آرمه کالیفرنیا، به مرور مختصری از مشخصات اجزاء مختلف سازه ای پل های عرشه جعبه ای بتن آرمه کالیفرنیا آمریکا مانند ستون ها، عرشه، کوله، درز آب بندی، گویه گاه، شمع و فونداسیون و ... که در این کتاب برای مدل های تحلیلی پل ها استفاده شده اند می پردازد. دانستن این جزئیات در مدلسازی اجزاء محدود پل های مورد مطالعه در اپنسیس ضروری می باشد.
- فصل چهارم تحت عنوان مدلسازی، تحلیل و ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای پل های بتن آرمه به کلیات نحوه مدلسازی اجزاء مختلف پل ها در نرم افزار اپنسیس و تحلیل های مورد نیاز مطالعات بهسازی پل ها و روش احتمالاتی ارزیابی لرزه ای بکار گرفته شده می پردازد. جزئیات لازم در مورد مشخصات زلزله های مورد استفاده،

¹ HAZUS

مدل‌های احتمالاتی نیاز لرزه‌ای مشترک^۱، تخمین ظرفیت، منحنی‌های شکنندگی اعضا و سیستم پل به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین مدل‌های تحلیلی روش‌های مقاومت‌سازی در نرم‌افزار اپنسیس تشریح می‌گردد.

• **فصل پنجم** تحت عنوان ارائه و تفسیر نتایج، به ارائه منحنی‌های شکنندگی اعضا و سیستم پل‌های بتن آرمه در وضعیت‌های چون ساخت و مقاومت‌سازی آن‌ها پرداخته و آثار توأمان شعاع انحناء عرشه و روش‌های مختلف مقاومت‌سازی در میزان آسیب‌پذیری این نوع از پل‌ها بررسی می‌شوند.

• **فصل ششم** تحت عنوان تکنیک‌های مدل‌سازی اجزاء محدود پل‌ها در اپنسیس، به تشریح جزئیات مدل‌سازی مؤلفه‌های مختلف سازه‌ای پل‌ها و تشریح کدنویسی موتور تحلیل‌های مودال و دینامیکی غیر خطی پل‌ها در اپنسیس می‌پردازد.

^۱ Joint probabilistic seismic demand models