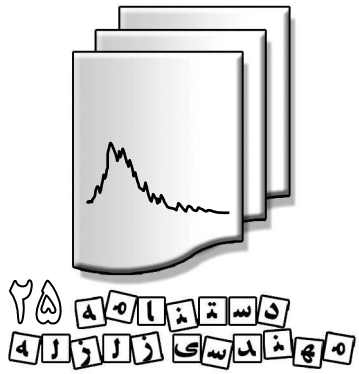
به نام آن که جان را فکرت آموخت



تحلیل غیرخطی سازه‌ها

تالیف:
دکتر محمدرضا تابش‌پور

فدک ایساتیس

سرشناسه	:	تابش‌پور، محمدرضا،۱۳۵۴-
عنوان و نام پدیدآور	:	تحلیل غیرخطی سازه‌ها / تالیف محمدرضا تابش‌پور.
مشخصات نشر	:	تهران: فدک ایساتیس، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری	:	۳۶۸ ص. مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	۱۱۰۰۰۰ ریال : ۵- ۰۰۰-۱۶۰-۶۰۰- ۹۷۸
یادداشت	:	واژه‌نامه.
موضوع	:	سازه. تجزیه و تحلیل
موضوع	:	ساختمان‌ها -- اثر زلزله
موضوع	:	سازه‌های بتنی -- پایداری
رده بندی کنگره	:	۱۳۹۰ ۳ت۱۵ت/۶۴۵ TA
رده بندی دیویی	:	۶۲۴/۱۷۱
شماره کتابشناسی ملی	:	۲۵۷۹۳۹۶

فدک ایساتیس

تحلیل غیرخطی سازه‌ها

تالیف	:	محمدرضا تابش‌پور
مدیر تولید	:	مجیدرضا زروئی
صفحه‌آرایی	:	مونا سروری
نوبت چاپ	:	اول - ۱۳۹۰
تیراژ	:	۲۰۰۰
لیتوگرافی	:	مهران نگار
چاپ	:	گنج‌شایگان
صحافی	:	کیمیا
قیمت	:	۱۱۰۰۰۰ ریال
شابک	:	۵ - ۰۰۰ - ۱۶۰ - ۶۰۰ - ۹۷۸

دفتر انتشارات : تهران - خیابان انقلاب - خیابان اردیبهشت- بین‌لبافی‌نژاد و جمهوری- ساختمان ۱۰
تلفن: ۶۶۴۶۵۸۳۱ - ۶۶۴۸۱۰۹۶ - ۶۶۴۸۲۲۲۱

نمایندگی تهران : خیابان انقلاب- نبش ۱۲فروردین- پلاک۱۳۱۲- انتشارات صانعی
تلفن: ۶۶۴۰۹۹۲۴- ۶۶۴۰۵۳۸۵

فروشگاه یزد: میدان آزادی (باغ ملی)- ابتدای خیابان فرخی- جنب مجتمع ستاره
تلفن: ۶۲۲۷۴۷۵- ۶۲۲۶۷۷۱- ۶۲۲۶۷۷۲

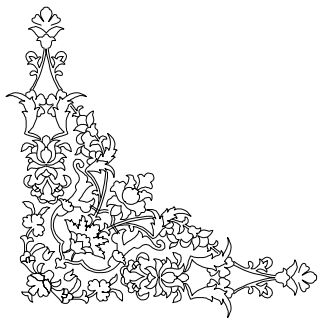
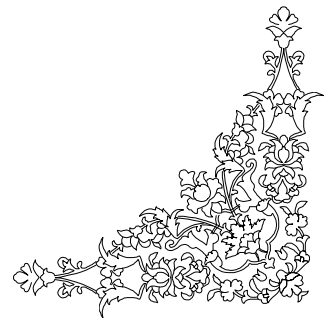
www.fadakbook.ir - info@fadakbook.ir

کلیهٔ حقوق و حق چاپ متن و عنوان کتاب که به ثبت رسیده است؛ مطابق با قانون حقوق مولفان و مصنفان مصوب ۱۳۴۸ محفوظ و متعلق به انتشارات فدک ایساتیس می‌باشد. هرگونه برداشت،تکثیر،کپی‌برداری به هرشکل (چاپ، فتوکپی، انتشار الکترونیکی) بدون اجازه کتبی از انتشارات فدک ایساتیس ممنوع بوده و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار خواهند گرفت.

معاونت حقوقی
انتشارات فدک ایساتیس

تقدیم به :

همسرم

دستنامه‌ی زلزله،
چرا و چگونه؟

... در کشور ایران، ضرورت وجود مجموعه‌ی مدوّنی از کتاب‌های مهندسی زلزله و طراحی ساختمان‌های مقاوم، برکسی پوشیده نیست. آموزش مبتنی بر سرفصل‌های مناسب در دانشگاه‌ها و مراکز آموزشی، ارتقاء دانش و تجربه‌ی مهندسان، تعریف و طرح مسائل پژوهشی مورد نیاز در این زمینه، مستلزم وجود کتاب‌هایی است که علاوه بر کیفیت علمی، با نیازهای بومی، انطباق کاملی داشته باشد. در راستای رسیدن به هدف بزرگ جامعه‌ی ایمن که لازمه‌ی حیات پایدار بشری برای سیر تکامل است، طی تلاشی مستمر در بیش از یک‌و نیم دهه، دوره‌ی «دستنامه‌ی مهندسی زلزله»، تدوین شده و در حال تکامل است. ...

... از همان ابتدای تحصیل در رشته‌ی عمران در دانشگاه صنعتی شریف (سال ۱۳۷۳) برنامه‌ای جدی برای کار علمی داشتم، ولی برایم روشن نبود که دقیقاً قرار است چه کاری انجام دهم. ... به‌علت آنکه در سال ۱۳۷۶ برنامه‌ای را که در سال ۷۳ برایم مبهم بود، تقریباً روشن شده بود و تصمیم خود را گرفته بودم که روی مباحث زلزله کار کنم، مطالعه‌ی کتب مرتبط با مهندسی زلزله و مقالاتی در این زمینه را به‌طور جدی در برنامه‌ی خود گذاشتم. به‌طور مرتب برخی از ایام هفته را صبح تا عصر در کتابخانه‌ی دانشگاه صرف ورق زدن مقالات مربوطه می‌کردم. چون آن موقع نیز مثل الان اطلاعاتم بسیار اندک بود، خیلی کم از مطالب مقالات سر در می‌آوردم ولی تقریباً افق دوردست را برای خودم ترسیم کرده بودم. به‌علت آنکه تصمیم قطعی خود را گرفته بودم که در موضوعات مرتبط با مهندسی زلزله کار کنم، در گرایش کارشناسی ارشد، مهندسی زلزله را در دانشگاه صنعتی شریف ادامه دادم. در همان سال به طور همزمان در کنکور کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی اجتماعی نیز شرکت کردم (آن موقع‌ها دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی اجتماعی به طور مستقل برگزار می‌شد) و با رتبه‌ی یک رقمی شروع کردم. ولی خیلی زود فهمیدم که این را ه اشتباه بوده و همان گرایش مهندسی زلزله را ادامه دادم. علاوه بر کار روی دروس این رشته، تقریباً تمامی دروس مرتبط با گرایش کارشناسی ارشد سازه و مکانیک جامدات را در دانشکده های عمران و مکانیک گذراندم. ... در دوره‌ی کارشناسی ارشد، افق برنامه‌ای که در سال ۷۳ برایم مبهم بود، بسیار روشن‌تر شده بود. می‌دانستم که قرار است مثلاً حدود ۱۰ تا ۱۵ سال و مثلاً روزی میانگین ۸ ساعت به مباحث مهندسی زلزله بپردازم و حاصل آن‌را در قالب چندین کتاب با یک عنوان کلی و مشترک منتشر کنم. اصلاً امتحانات دروس برایم اهمیتی نداشت، هرچند در سال ۱۳۷۹ در بین فارغ‌التحصیلان، رتبه‌ی اول شدم، ولی تمام سوگیری کارهایم برای هدف مشخصی بود. مطالبی که در سال چهارم کارشناسی و دو سال کارشناسی ارشد در این خصوص گردآوری کرده بودم در حدود ۱۰۰۰ صفحه بود که به مهندسی زلزله، طراحی لرزه‌ای، سازه‌های بنایی و ارتعاشات مربوط می‌شد. حدود ۶۰۰ صفحه مسائل و مطالبی بود که ترجمه به‌شمار نمی‌آمد، بلکه نگرشی شاید جدید و دسته‌بندی نوینی در ترکیب‌بندی مطالب بود. تصمیم گرفتم آنها را در قالب مثلاً ۳ کتاب منتشر کنم و کارهای مقدماتی آنها را هم در سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۷۹ انجام دادم. بعد از چندبار بررسی، منصرف شدم ولی هر روز به آنها مطالبی اضافه می‌کردم. تا آن زمان حدود ۷۵۰ جلد کتاب مرتبط با دروس مختلف دانشگاهی به زبان های فارسی و انگلیسی را تهیه کرده بودم. البته همه‌ی صفحات تمام کتاب‌ها را نمی‌خواندم. مثلاً در یک کتاب فقط به یک مثال که جای دیگر تکرار نشده بود پرداختم و بقیه‌اش را فقط ورق زدم. در چند زمینه مرتبط با مهندسی زلزله مقالات متعددی را تهیه کردم. از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۹ مجموعه‌ی خوبی از مقالات مورد علاقه که در مجلات و کنفرانس‌های کتابخانه‌ی دانشگاه بود تدوین کردم، حدود ۲۰۰ مقاله بود. برخی را دقیق می‌خواندم، برخی را هم در حد چنددقیقه فقط تماشا می‌کردم. کتب موجود در اکثر کتابخانه‌های دانشگاه شریف را که به‌نحوی با ریاضی، ارتعاشات و زلزله مرتبط بود نگاه کردم. در سال ۷۹ که دکترا را در دانشکده‌ی عمران دانشگاه صنعتی شریف شروع کردم، افق هدفم برایم نسبتاً روشن‌تر شده بود. چند درس که در دانشکده در زمینه‌ی سازه و زلزله ارائه می‌شد را گذراندم و پیشنهاد پایان‌نامه را در سال اول تدوین کردم، زیرا یک سابقه‌ی ۳ ساله را با حوصله و جدیت پشت سر گذاشته بودم. به‌علت تشابه مفاهیم و مبانی موجود در مهندسی زلزله و سازه‌های دریایی در زمینه‌ی

بارگذاری بارهای باد، زلزله و موج و مفاهیم مشترک نظیر طیف در هر دو و اشتراک‌هایی در مباحث مکانیک سازه و ارتعاشات در دوره‌ی ارشد و اوایل دکترا چند کلاس مرتبط با این رشته را هم می‌رفتم. به‌علت این پیش‌زمینه و علاقه‌ای که استاد راهنمای دکترای اینجانب به مباحث سازه‌های دریایی داشت و داغ بودن بحث دریای خزر در سال ۱۳۸۰ پیشنهادیه‌ی اول پایان‌نامه را که در خصوص مهندسی زلزله بود کنار گذاشتم و به مباحث سازه دریایی پرداختم، با توجه به پیش‌زمینه‌ای که در مکانیک سازه و ارتعاشات داشتم، کافی بود دروسی در زمینه‌ی تئوری موج، هیدرودینامیک و تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی بگذرانم. این‌گونه دروس را در دانشکده‌های مکانیک و عمران گذراندم. در تمام لحظات سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۶ که به پایان‌نامه‌ی خود در مورد سازه‌های دریایی مشغول بودم، در زمینه‌ی مهندسی زلزله هم مطالعه می‌کردم و مطلب می‌نوشتم و درگیر پایان نامه‌های مرتبط با مهندسی زلزله‌ی چند نفر از دانشجویان کارشناسی ارشد در دانشکده‌های عمران و مکانیک دانشگاه صنعتی شریف شدم. در سال ۱۳۸۵ بیش از ۳۰۰۰ صفحه مطلب آماده‌ی چاپ داشتم. هنگامی که پیشنهاد تهیه‌ی تفسیر استاندارد ۲۸۰۰ به اینجانب داده‌شد، برنامه‌ی قبلی خود را اندکی تغییر دادم و حدود ۱۲۰۰ صفحه از آن مطالب را در قالب تفسیر و تشریح ۲۸۰۰ چاپ کردم. در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ بازخورد مثبتی از کتب تفسیر استاندارد ۲۸۰۰ توسط خوانندگان محترم به من منتقل شد و اندک ابهامی هم که در افق برنامه‌ریزی و هدف خود داشتم رفع شد. تصمیم به تکمیل مطالبی گرفتم که تا آن روز گردآوری کرده بودم. تا آن زمان تمام فعالیت‌های آموزشی، پژوهشی، حرفه‌ای و اوقات فراغت خود را در راستای این هدف تنظیم کرده بودم و از سال ۸۶ مصمم‌تر به این کار ادامه دادم. برخی روزها از صبح تا شب ۵۰ صفحه مطلب تدوین می کردم ، چون سبقه‌ی چندین ساله را داشتم. هم سرعت ترجمه‌ام بسیار بالا رفته بود و هم با فوت‌وفن‌های تولید کتاب به خوبی آشنا شده بودم. برای قسمت‌هایی از ویرایش ادبی، یک سیستم مکانیزه تدوین کردم که کار سنتی ده روزه را در یک روز و با دقت بالایی انجام می‌دهد. سعی داشتم ترکیب‌بندی مطالب و ساختار کتاب‌ها تا حدی نو باشد. هدف این بود که کتاب‌ها مورد استفاده‌ی دانشجویان و مهندسان یا هر دو واقع شود. مجدانه مطالعه، تحقیق و نوشتن را ادامه دادم. البته این کار علاوه بر زمان، نیاز به هزینه‌های مالی بسیار زیادی هم داشت. در سال ۱۳۸۸ بیش از ۶۰۰۰ صفحه مطلب تایپ‌شده و ویرایش‌شده و بازخوانی‌شده داشتم. به‌طور جدی تصمیم به نشر این مطالب گرفتم. در سال های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ که به نشر آنها پرداختم، همواره در حال تدوین مطالب جدید هم بودم. در حال حاضر غیر از کتاب‌هایی که در سری دستنامه‌ی مهندسی زلزله منتشر شده، بیش از ۴۰۰۰ صفحه مطلب در زمینه‌های مختلف مرتبط با مهندسی زلزله، دروس دوره‌ی کارشناسی و ارشد، حروف‌چینی کرده‌ام. حروف‌چینی و کارهای فرمول و شکل کتاب‌ها را تا حدود ۶۰٪ شخصاً انجام داده‌ام (بسیار انگیزه می‌خواست و واقعاً طاقت‌فرسا بود). چند جلد از کتاب‌ها را با برخی از فارغ‌التحصیلان و یا دانشجویان مقطع دکترا به‌طور مشترک انجام دادم. باید افرادی را پیدا می‌کردم که دارای دو ویژگی مهم دیگر می‌بودند: علم و تلاش. مثلاً آقایان ابراهیمیان و قهاری توانمندی‌های فوق‌العاده‌ای در این زمینه داشتند و بسیار قوی کار را انجام دادند و در دست‌نامه‌های ۶ ، ۷ و ۸ همکاری کردند. در تمام این مدت یعنی از سال ۷۶ تا ۸۹ توان مالی و اکثر وقت خود را صرف تولید کتب دستنامه کرده‌ام. تعداد زیادی از خوانندگان عزیز تاکنون مرا مورد لطف قرار داده و مراتب رضایت خود را از این سری اعلام کرده‌اند. ولی خوشحالی باطنی بنده مربوط به زمانی است که یک نفر اشکالات و خطاهای موجود در این کتاب‌ها را به بنده تذکر دهد. همواره آرزوی توفیق برای عزیزانی را دارم که بنده را در رفع اشتباهات این کتاب ها یاری می‌کنند. ... اگر یک دانشجوی علاقه‌مند و باانگیزه در طول حدود ۱۵ سال تلاش شبانه‌روزی برای رسیدن به یک هدف مشخص به‌طور متوسط روزی ۱۲ ساعت یعنی ماهانه حدود ۳۵۰ ساعت به تلاش علمی بپردازد و تمام کارهای خود را در این مسیر تنظیم کند و در آخر سر حدود ۱۵۰۰۰ صفحه مطلب داشته باشد (۱۲x۱۵x۳۵۰=۶۳۰۰۰)، نشان‌دهنده‌ی استفاده از قسمت اندکی از انرژی و استعدادی است که خداوند در نهاد همه‌ی ما به ودیعه نهاده است. ...

محمدرضا تابش‌پور

سخن مؤلف

با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران باید به دروس و سرفصل‌های مربوط به مهندسی زلزله و طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله توجه خاصی شود. تدوین کتاب‌های درسی منطبق با سرفصل‌های مناسب از فعالیت‌های مهم در این راستا است. به‌منظور انجام وظیفه در راستای این رسالت، اینجانب بر آن شدم تا بر اساس دستاوردهای مهندسی زلزله و با توجه به تجربیات مربوط به زلزله‌های گذشته، دوره‌ی «دستنامه‌ی مهندسی زلزله» را به جامعه‌ی مهندسی عمران و معماری کشور تقدیم کنم. این دوره شامل مجموعه‌ی نسبتاً کاملی از مطالب علمی این زمینه است. کتاب حاضر بیست‌وپنجمین کتاب از این سری بوده و در هفت فصل و دو پیوست تدوین شده است.

تحلیل غیرخطی سازه‌ها به‌منظور درک رفتار نسبتاً دقیق و پیش‌بینی قابل‌قبول رفتار سازه‌ها در زلزله ضروری است. مهم‌ترین ابزار در مطالعات آسیب‌پذیری و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها، تحلیل غیرخطی است. تحلیل غیرخطی را می‌توان به روش‌های استاتیکی و دینامیکی انجام داد. در تحلیل غیرخطی استاتیکی که به آن پوش‌آور یا تحلیل بار افزون می‌گویند، ظرفیت‌های سازه به‌دست می‌آید و منحنی حاصل به نام منحنی ظرفیت است. البته با استفاده از روش‌های ساده‌ای می‌توان با دقت خوبی با کمک منحنی ظرفیت، نیاز لرزه‌ای سازه را پیش‌بینی کرد. در روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، می‌توان نیاز لرزه‌ای سازه را تحت نگاشت زلزله، تعیین کرد. البته با استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌توان ظرفیت سازه را نیز تعیین کرد. از آن‌جا که در کشور ایران، فرآیند بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود، اهمیت خاصی دارد، ضرورت آشنایی با روش‌های تحلیل غیرخطی سازه‌ها، بیشتر احساس می‌شود.

امروزه اصلی‌ترین بحث در مهندسی زلزله، طراحی ساختمان‌ها براساس عملکرد است. در این روش باید از تحلیل‌های غیرخطی استفاده شود. طراحی براساس عملکرد باعث استفاده‌ی بهینه از ظرفیت مصالح و اطمینان بالا از رفتار مورد نظر سازه در زلزله‌ای با شدت مشخص است.

از آقای مصطفی اخوات که جزو دانشجویان پرتلاش کارشناسی ارشد در دانشگاه علم‌وصنعت هستند، به‌خاطر بازخوانی کتاب و تبدیل واحدها تشکر می‌شود.

آقای یونس کماچی (فارغ‌التحصیل دانشگاه صنعتی شریف و عضو هیأت علمی)، فصل‌های سوم و ششم کتاب را بازخوانی و ویرایش کرده‌اند، از لطف و زحمت ایشان تشکر می‌شود.

آقای امیر آزاد فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف (شعبه‌ی کیش) بازخوانی و ویرایش فصل‌های اول، سوم و پنجم و پیوست اول را برعهده گرفتند، از زحمت ایشان تقدیر می‌شود.

از زحمات آقای مهندس حسن محمدی در ترجمه‌ی قسمت‌هایی از فصل‌های دوم و ششم تقدیر می‌شود. از سرکار خانم هانیه عمرانی که حروف‌چینی قسمت‌های عمده‌ای از کتاب را برعهده داشته‌اند؛ تشکر می‌شود. سرکار خانم مونا سروری بازخوانی و ویرایش ادبی قسمت‌های عمده‌ای از کتاب و صفحه‌آرایی آن را برعهده داشته‌اند که از زحمات ایشان صمیمانه تقدیر می‌شود.

آقای محمد کرمی شاهنده کمک بی‌شائبه‌ای در فرآیند تولید این کتاب داشته‌اند. از لطف ایشان صمیمانه تشکر می‌شود. آقای رضا کرمی شاهنده علاوه بر مدیریت تولید انتشاراتی فدک ایساتیس، تلاش‌های زیادی در راستای

افزایش کیفیت چاپ کتاب و صفحه‌آرایی آن انجام داده‌اند. آقای مجیدرضا زروئی مدیرعامل این انتشاراتی با دقت فراوانی فرآیند تولید کتاب را پی‌گیری می‌کنند؛ از حوصله و زحمات این عزیزان تقدیر می‌شود.

از حمایت مادی و معنوی بنیاد ملی نخبگان که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در سرعت تولید این اثر داشته است، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

از اساتید، دانشجویان و مهندسان محترم تقاضا می‌شود که نظرات و پیشنهادات خود را برای اصلاح و رفع نقایص کتاب برای نویسنده ارسال فرمایند. پیشاپیش از تمامی منتقدان و پیشنهاددهندگان که اینجانب را مورد منت قرار داده و زحمت ارسال نظرات و انتقادات خود را تقبل می‌کنند، صمیمانه تشکر می‌شود.

برای تفکیک حل مسائل بعد از تبدیل واحد به SI از زمینه‌ی خاکستری استفاده شده است.

از حمایت مادی و معنوی بنیاد ملی نخبگان که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در سرعت تولید این اثر داشته است، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

محمدرضا تابش‌پور

تهران، ۱۳۹۰

tabeshpour@yahoo.com

فهرست مطالب

فصل اول: رفتار غیرخطی مصالح و سازه‌ها ۱

۱.۱ مقدمه ۳
۲.۱ رفتار غیرالاستیک ایده‌آل ۴
۱.۲.۱ منحنی تنش-کرنش فولاد ۴
۲.۲.۱ منحنی تنش-کرنش بتن ۶
۳.۱ منحنی ممان-انحناء ۱۰
۴.۱ رفتار ناحیه‌ی بحرانی در تیر باربر فولادی ۱۲
۵.۱ رفتار غیرخطی در مقیاس سازه ۱۲
۶.۱ آزمایش سیکلی ۱۴
۷.۱ ضرورت بررسی رفتار غیرالاستیک ۱۷
۸.۱ مفهوم «جابه‌جایی- یکسان (برابر)» در طرح لرزه‌ای ۲۱
۹.۱ روش ASCE 7 برای تعیین جابه‌جایی بیشینه‌ی واقعی ۲۹
۱۰.۱ طیف طرح ASCE 7 ۳۰
۱۱.۱ مفهوم انرژی- یکسان (برابر) ۳۲

فصل دوم: منحنی ممان – انحناء ۳۵

۱.۲ مقدمه ۳۷
۲.۲ بازتوزیع ممان‌ها در سیستم‌های بتن مسلح ۳۷
۱.۲.۲ سیستم‌های باربر ثقلی ۳۷
۲.۲.۲ سیستم‌های باربر جانبی ۳۹
۳.۲ تحلیل ممان- انحناء مقاطع غیرمحصور ۳۹
۱.۳.۲ محاسبات پاسخ ۳۹
۲.۳.۲ تحلیل ممان انحنای یک دال ۴۰

۳.۳.۲ تحلیل ممان- انحنای تیر ۴۴
۴.۲ تحلیل ممان- انحناء مقاطع محصور ۴۸
۱.۴.۲ محاسبات پاسخ ۴۸
۵.۲ تحلیل ممان -انحنای مقاطع پیچیده ۵۶
۶.۲ آنالیز سطح مقطع با برنامه‌ی UCFyber ۵۹

فصل سوم: مفاهیم پایه‌ای مدل‌سازی ۶۱

۱.۳ مقدمه ۶۳
۲.۳ تعیین جابه‌جایی نیاز ۶۳
۳.۳ مفاهیم مدل‌سازی ۶۵
۴.۳ گام‌های تحلیل غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی ۶۶
۵.۳ انواع مدل اجزاء ۶۷
۱.۵.۳ مدل پدیده شناسانه برای جزء ۶۷
۲.۵.۳ مدل ماکروسکوپیک برای جزء ۶۸
۶.۳ مدل‌های چرخه‌ای و منحنی اسکلت‌بندی ۶۹
۷.۳ معرفی نرم‌افزارها ۷۰
۱.۷.۳ DRAIN، NONLIN-Pro ۷۰
۲.۷.۳ OpenSees ۷۷
۳.۷.۳ سایر برنامه‌های تجاری موجود ۷۹
۸.۳ مدل‌سازی تغییرشکل اتصال تیر- ستون در سازه‌های فولادی ۷۹
۱.۸.۳ روابط ممان- انحناء برای مدل کراوینکلر ۸۴
۲.۸.۳ مدل سیسور برای اتصال ۸۵
۹.۳ اثر $P-\Delta$ ۸۶

فصل چهارم: تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌ها ۹۱

۱.۴ مقدمه ۹۳
۲.۴ منحنی ظرفیت بر اساس ATC-40 ۹۴
۳.۴ منحنی نیاز ۹۴
۴.۴ مروری بر دینامیک سیستم‌های چنددرجه‌آزادی ۹۵

۵.۴ تبدیل منحنی پوش‌اور به منحنی ظرفیت ۹۶
۶.۴ استخراج منحنی پوش‌اور ۹۶
۷.۴ تبدیل منحنی پوش‌اور به منحنی ظرفیت ۱۰۳
۸.۴ میرایی لزج معادل ۱۰۳
۹.۴ روش NEHRP 2003 برای تحلیل پوش‌اور ۱۱۵
۱۰.۴ روش FEMA-356 برای تحلیل پوش‌اور ۱۱۶

فصل پنجم: تحلیل دینامیکی غیرخطی ۱۲۱

۱.۵ مقدمه ۱۲۳
۲.۵ مدل‌سازی میراگر لزج خطی در DRAIN ۱۲۴
۳.۵ انتخاب رکورد زلزله ۱۲۷
۴.۵ مقیاس‌بندی حرکت زمین به روش NEHRP ۱۲۹
۱.۴.۵ تحلیل دوبعدی ۱۲۹
۲.۴.۵ تحلیل سه‌بعدی ۱۳۰
۵.۵ معضلات روش NEHRP در مقیاس‌بندی رکورد ۱۳۰
۶.۵ مقیاس‌بندی رکورد برای تحلیل غیرخطی ۱۳۰
۷.۵ تحلیل فزاینده‌ی دینامیکی غیرخطی ۱۳۰
۸.۵ خصوصیات منحنی IDA ۱۳۳
۹.۵ رویکرد احتمالاتی به طراحی براساس عملکرد ۱۳۸
۱۰.۵ منحنی‌های شکنندگی (Fragility Curves) ۱۴۱

فصل ششم: پوش‌آور در نرم‌افزار Perform ۱۴۳

۱.۶ مقدمه ۱۴۵
۲.۶ روش‌های موجود برای تحلیل استاتیکی غیرخطی ۱۴۵
۳.۶ تفاوت بین روش‌ها ۱۴۶
۴.۶ نکات کلیدی ۱۴۷
۵.۶ گام‌های اصلی ۱۴۹

۶.۶ فرایند تعریف طیف‌های پاسخ ۱۵۰
۱.۶.۶ انواع طیف ۱۵۰
۲.۶.۶ اضافه کردن یا اصلاح طیف در perform-3D ۱۵۱
۳.۶.۶ کپی کردن طیف‌ها از یک سازه‌ی متفاوت ۱۵۱
۷.۶ فرایند مربوط به منحنی‌های ظرفیت و نیاز ۱۵۱
۱.۷.۶ انتخاب گزینه ۱۵۱
۲.۷.۶ رسم منحنی ظرفیت ۱۵۲
۳.۷.۶ گزینه شتاب طیفی بر حسب جابه‌جایی طیفی ۱۵۲
۴.۷.۶ ظرفیت شتاب طیفی ۱۵۳
۵.۷.۶ تعریف نقاط سعی ۱۵۴
۶.۷.۶ محاسبه‌ی پریود ۱۵۵
۷.۷.۶ انتخاب روش پوش‌اور و طیف پاسخ ۱۵۹
۸.۷.۶ ترسیم منحنی نیاز ۱۶۰
۹.۷.۶ مقیاس‌بندی منحنی ظرفیت برای تحلیل حساسیت ۱۶۱
۸.۶ ارزیابی عملکرد ۱۶۲
۹.۶ سازگاری (Consistency) ۱۶۲
۱.۹.۶ کلیات ۱۶۲
۲.۹.۶ محاسبه‌ی جابه‌جایی طیفی ۱۶۲
۳.۹.۶ روش‌های پیشنهادی ۱۶۳
۴.۹.۶ علت استفاده از گزینه‌ی S_d و S_a ۱۶۴
۱۰.۶ اتلاف (جذب) انرژی و میرایی ۱۶۵
۱.۱۰.۶ کلیات ۱۶۵
۲.۱۰.۶ سختی و کاهیدگی و نسبت انرژی ۱۶۵
۳.۱۰.۶ نسبت میرایی معادل ۱۶۶
۴.۱۰.۶ کاهیدگی در روش‌های پوش‌اور ۱۶۶
۵.۱۰.۶ روش PERFORM برای نسبت انرژی ۱۶۷
۶.۱۰.۶ میرایی اضافی حاصل از میراگرهای سیال ۱۶۸
۷.۱۰.۶ افت و زوال مقاومت ۱۶۹
۱۱.۶ تئوری رابطه‌ی میان S_a و H ۱۶۹

۱.۱۱.۶ کلیات ۱۶۹
۲.۱۱.۶ حالت خاص با بار مدال و شکل تغییرشکل یافته ۱۷۰
۳.۱۱.۶ حالت عمومی، هماهنگی بار با شکل تغییرشکل یافته ۱۷۲
۴.۱۱.۶ حالتی که بار با شکل تغییرشکل‌یافته هماهنگ نیست. ۱۷۳
۱۲.۶ نمودار جابه‌جایی هدف ۱۷۶
۱.۱۲.۶ روش جابه‌جایی هدف ۱۷۶
۱۳.۶ اجرای PERFORM ۱۷۸

فصل هفتم: سازه‌ی معادل ۱۸۱

۱.۷ سازه‌ی معادل ۱۸۳
۲.۷ پاسخ یک سیستم با پریود $T_r = 1s$ تحت زلزله‌ی السنترو ۱۸۴
۳.۷ محدودیت‌های روش ۱۸۵
۴.۷ تحلیل مودی سازه‌ی معادل ۱۸۷

فصل هشتم: ضریب رفتار ۱۹۹

۱.۸ مقدمه ۲۰۱
۲.۸ منحنی ظرفیت سازه ۲۰۲
۳.۸ نسبت شکل‌پذیری ۲۰۴
۴.۸ ضریب کاهش نیرو (ضریب رفتار، R) ۲۰۶
۱.۴.۸ ضریب کاهش به‌علت شکل‌پذیری R_μ ۲۰۷
۲.۴.۸ ضریب کاهش به‌علت مقاومت افزون R_s ۲۱۱
۳.۴.۸ ضریب کاهش به‌علت نامعینی R_R ۲۱۱
۴.۴.۸ ضریب کاهش به‌علت میرایی، R_ξ ۲۱۴
۴.۸ یک مثال از تعیین ضریب رفتار ۲۱۴
۵.۸ نگرش‌های طراحی ۲۱۷
۱.۵.۸ طراحی به روش حالت حدی و یا ضرایب بار و مقاومت نهایی ۲۱۷

۲.۵.۸ طراحی به روش تنش مجاز ۲۱۸
۶.۸ ضریب تبدیل جابه‌جایی خطی (طرح) به غیرخطی (واقعی) C_d ۲۱۹
۱.۶.۸ طراحی به روش حالت حدی و یا ضرایب بار و مقاومت نهایی ۲۱۹
۲.۶.۸ طراحی به روش تنش مجاز ۲۲۱
۷.۸ روش‌های آیین‌نامه‌ای در تخمین C_d ۲۲۲
۱.۷.۸ UBC-97 ۲۲۲
۲.۷.۸ استاندارد ۲۸۰۰ ۲۲۲
۳.۷.۸ IBC-2000 ۲۲۴
۴.۷.۸ مقایسه‌ی استاندارد ۲۸۰۰ و UBC-97 و IBC-2000 ۲۲۴

فصل نهم: کاربرد تحلیل پوش‌آور در بهسازی لرزه‌ای ۲۲۷

۱.۹ مقدمه ۲۲۹
۲.۹ تحلیل بار افزون (پوش‌آور) ۲۲۹
۳.۹ توزیع توانی عمومی ۲۳۰
۴.۹ توزیع منطبق بر مودها ۲۳۰
۵.۹ مطالعه‌ی مکانیزم شکست با استفاده از تحلیل بار افزون ۲۳۱
۶.۹ بهسازی سازه‌های موجود ۲۳۲
۷.۹ تعیین نقطه‌ی عملکرد ۲۳۶
۱.۷.۹ روش FEMA-273 ۲۳۶
۲.۷.۹ روش ATC-40 ۲۳۸
۸.۹ عدم وجود نقطه‌ی عملکرد ۲۳۹
۹.۹ توزیع بار جانبی ۲۴۰

فصل دهم: شاخص‌های خرابی ۲۴۳

۱.۱۰ مقدمه ۲۴۵
۲.۱۰ شاخص‌های خرابی ۲۴۵
۱.۲.۱۰ شاخص‌های خرابی محلی ۲۴۵

۲.۲.۱۰ شاخص‌های کلی خرابی ۲۵۲
۳.۲.۱۰ مدل‌های خرابی براساس خستگی ۲۵۵
۴.۲.۱۰ شاخص‌های خرابی نرم شدگی ۲۵۶

پیوست‌ها ۲۶۱

پیوست اول: رفتار چرخه‌ای اعضاء و اتصالات فولادی ۲۶۳
پیوست دوم: تبدیل سیستم‌های چنددرجه‌آزادی به سیستم یک‌درجه‌آزادی ۲۸۹
پیوست سوم: بحث در نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی ۳۰۱
منابع ۳۱۷
واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی ۳۲۳
واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی ۳۲۹
فهرست الفبایی ۳۳۵

فصل ۱

رفتار غیرخطی مصالح و سازه‌ها

۱.۱ مقدمه ۳
۲.۱ رفتار غیرالاستیک ایده‌آل ۴
۱.۲.۱ منحنی تنش-کرنش فولاد ۴
۲.۲.۱ منحنی تنش-کرنش بتن ۶
۳.۱ منحنی ممان-انحناء ۱۰
۴.۱ رفتار ناحیه‌ی بحرانی در تیر باربر فولادی ۱۲
۵.۱ رفتار غیرخطی در مقیاس سازه ۱۲
۶.۱ آزمایش سیکلی ۱۴
۷.۱ ضرورت بررسی رفتار غیرالاستیک ۱۷
۸.۱ مفهوم «جابه‌جایی- یکسان (برابر)» در طرح لرزه‌ای ۲۱
۹.۱ روش ASCE 7 برای تعیین جابه‌جایی بیشینه‌ی واقعی ۲۹
۱۰.۱ طیف طرح ASCE 7 ۳۰
۱۱.۱ مفهوم انرژی- یکسان (برابر) ۳۲