دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

بررسی اندرکنش خاک-سازه با مدل غیر ارتجاعی-خطی

نگارش:

بهتاش جاویدشریفی

استاد راهنمای اول:

دکتر حسین رهنما

استاد راهنمای دوم:

دکتر عبدالحسین بغلانی

استاد مشاور:

دکتر ساسان محاسب

اسفند ۱۳۹۲

بسمه تعالی

بررسی اندرکنش خاک-سازه با مدل غیر ارتجاعی-خطی

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

بهتاش جاویدشریفی

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه زلزله دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیأت داوران با درجه:

دکتر حسین رهنما استادیار در رشته عمران - مکانیک خاک و پی (استاد راهنمای اول)

دکتر عبدالحسین بغلانی استادیار در رشته عمران - سازه‌های هیدرولیکی (استاد راهنمای دوم)

دکتر ساسان محاسب استاد در رشته عمران - سازه و زلزله (استاد مشاور)

دکتر علی جوهری استادیار در رشته رشته عمران - مکانیک خاک و پی (داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب **بهتاش جاویدشریفی** دانشجوی رشته **مهندسی عمران-زلزله** مقطع تحصیلی **کارشناسی ارشد** به شماره دانشجویی **۹۰۱۵٤۰۰۵** تأیید می‌نماید کلیه نتایج این پایان نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان نامه و .... با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه‌های آموزشی، پژوهشی و انضباطی و ... عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می‌کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان نامه/رساله در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ گونه مسئولیتی دراین زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان نامه/ رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو:

بهتاش جاویدشریفی

تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

■ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا پنج سال پس از تاریخ دفاع بدون کسب مجوز رسمی از استاد راهنما ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

دکتر حسین رهنما

تاریخ:

امضا:

دکترعبدالحسین بغلانی

تاریخ:

امضا:

تقدیم به:

خانواده عزیزم

جامعه مهندسین عمران و زلزله

و دانشجویان گروه عمران دانشگاه صنعتی شیراز

تشکر و قدردانی:

اکنون که این رساله به پایان رسیده است برخود فرض می‌دانم که از اساتید ارجمند آقایان دکتر رهنما و دکتر بغلانی که به عنوان اساتید راهنمای این پژوهش ایفای نقش نمودند و از جناب آقای دکتر محاسب که به عنوان استاد مشاور در کنار من حضور داشتند صمیمانه تشکر نمایم. بی شک بدون حمایت این اساتید برداشتن کوچکترین قدمی در جهت انجام این تحقیق میسر نمی‌بود و خود را همیشه به عنوان شاگردی کوچک – اگر لیاقت آن را داشته باشم – مرهون حمایت‌ها و محبت‌های این بزرگان خواهم دانست. همچنین مراتب قدردانی خود را خدمت استاد بزرگوار جناب آقای دکتر جوهری به خاطر مطالعه این پایان نامه و نظرات ارزشمندشان تقدیم می‌نمایم. راهنمایی‌های آقای دکتر ام. کمال گنس نیز در مورد انتخاب مراجع و روش‌های حل قابل تقدیر است.

چکیده

تمامی سازه‌هایی که به مقاصد کاربری‌های مختلف بنا می‌شوند به نوعی با خاک سر و کار دارند. خاک، نه تنها به عنوان پر مصرف ترین مصالح ساختمانی، بلکه به عنوان بخشی پر اهمیت و تأثیرگذار در یک سیستم ساختمانی می‌تواند مهمترین نقش را در بقا یا زوال سازه ایفا نماید. باید دانست که خاک و سازه بطور توأمان امنیت کلی یک سیستم سازه ای را تأمین می‌نمایند.

از آنجا که پاسخ‌های واقعی یک سیستم خاک – سازه نسبت به پاسخ‌های سازه قرار گرفته بر روی زمین صلب گاهی تفاوت‌های فاحشی دارند، عدم لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه به ویژه برای سازه‌های خاص گاهی نمی تواند توجیهی داشته باشد. از طرفی، برای انجام یک تحلیل اندرکنشی دقیق، نیاز به مدل کردن رفتار خاک و سازه به شکلی است که در طبیعت با آن مواجه می‌شویم.

در این پایان نامه، مسأله اندرکنش خاک-سازه با استفاده از روش اجزاء محدود مرزی مقیاس شده برای خاک ناحیه دور و روش اجزاء محدود به همراه مدل رفتاری مناسب برای خاک ناحیه نزدیک بررسی شده است. برای مدل کردن اجزاء محدود از امکانات زبان برنامه نویسی Active Tcl در برنامه جامع شبیه ساز زلزله OpenSees استفاده شده و ناحیه دوردست با استفاده از برنامه SIMILAR که در محیط FORTRAN کدنویسی گردیده است. تحلیل نتایج و نیز آنالیزهای سایر بخش‌های این پایان نامه با استفاده از محیط برنامه نویسی MATLAB انجام شده اند.

در نظر گرفتن رخداد اندرکنش الاستوپلاستیک خاک سازه به روش مذکور نشان می‌دهد که نیروهای ایجاد شده درون سازه از مقادیر بدون در نظر گرفتن اندرکنش کمتر، اما جابه جایی‌های کل بیشتر می‌باشند. از طرفی، با فرض عدم رخداد روانگرایی، بحرانی ترین حالت نیرویی مربوط به زمانی است که اندرکنش را تنها الاستیک فرض نماییم. خواهیم دید که در صورت امکان وقوع روانگرایی، قسمت زیادی از سازه می‌تواند درون خاک فرو رود و سازه در مواردی عملاً غیرقابل استفاده باقی خواهد ماند.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، مدل رفتاری، روش اجزاء محدود مرزی مقیاس شده، روانگرایی، اندرکنش الاستیک.

فهرست مطالب

۱. فصل اول : مقدمه ۲

۱-۱- پیش گفتار ۳

۱-۲- روش تحقیق ۴

۱-۳- هدف تحقیق و اهمیت آن ۴

۱-۴- بیان کلیات مسأله ۵

۱-۵- بخش‌های پایان نامه ۵

۲. فصل دوم : مروری بر تحقیقات گذشته ٦

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- تعاریف، اصول و مبانی نظری ۷

۲-۲-۱- حل بنیادین ۷

۲-۳- مروری بر ادبیات موضوع ۸

۲-۳-۱- اندرکنش استاتیکی ۸

۲-۳-۲- اندرکنش دینامیکی ۱۰

۲-۴- نتیجه‌گیری ۱۳

۳. فصل سوم: روش پیشنهادی برای حل مسأله ١٤

۳-۱- مقدمه ۱۵

۳-۲- روش اجزاء محدود ۱۵

۳-۲-۱- مبانی روش اجزاء محدود ۱۶

۳-۲-۲- روش باقی مانده‌های وزنی ۱۷

۳-۲-۳- روش گالرکین ۱۹

۳-۳- معادلات حاکم بر محیط سازه ۲۱

۳-۳-۱- معادله الاستوپلاستیک تعادل دینامیکی ۲۱

۳-۳-۲- معادلات حاکم بر محیط ۲۳

۳-۳-۳- معادله‌ی موج ۲۳

۳-۳-۴- فرم ضعیف معادله‌ی موج ۲۳

۳-۳-۵- شرایط مرزی ۲۵

۳-۳-۶- فرم ماتریسی معادله‌ی موج ۲۷

۳-۳-۷- معادلات اندرکنش ۲۸

۳-۳-۸- حل عددی معادلات ۲۹
۳-۳-۹- آنالیز پاسخ دینامیکی دوبعدی ۳۱
۳-۳-۱۰- آنالیز اجزاء محدود دینامیکی ۳۲
۳-۳-۱۱- معادلات حرکت المانی ۳۲
۳-۳-۱۲- معادلات حرکت در مختصات کلی ۳۶
۳-۳-۱۳- مرزهای مقدماتی ۳۹
۳-۳-۱۴- مرزهای محلی ۳۹
۳-۳-۱۵- مرزهای سازگار ۳۹
۳-۳-۱۶- برخورد موج به فصل مشترک محیط‌های غیر همسان ۴۰
۳-۳-۱۷- روش خطی معادل ۴۸
۳-۳-۸- روش غیرخطی ۴۸
۳-۳-۱۹- مدلهای تنش-کرنش غیرخطی رفت و برگشتی ۴۹
۳-۳-۲۰- مدلهای رفتاری پیشرفته ۵۱
۳-۳-۲۱- مدل رفتاری UCSD ۵۲
۳-۳-۲۲- مدل رفتاری UCD ۵۸
۳-۳-۲۳- قانون جریان: ۶۵
۳-۳-۲۴- قوانین سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی: ۶۵
۳-۳-۲۵- اندرکنش خاک-سازه ۶۷
۳-۳-۲۶- طرح مسأله ای اندرکنش خاک-سازه ۶۸
۳-۴- روشهای حل ۷۵
۳-۴-۱- روش مستقیم ۷۶
۳-۴-۲- روش چند مرحله‌ای ۷۷
۳-۴-۳- اندرکنش سینماتیک ۷۷
۳-۴-۴- اندرکنش اینرسی ۷۹
۳-۴-۵- ترکیب اندرکنش سینماتیک و اینرسی ۸۰
۳-۴-۶- میرایی ۸۲
۳-۵- روش اجزاء محدود مرزی مقیاس شده ۸۳
۳-۵-۲- بسط روابط روش مرز مقیاسشده برای حالت الاستودینامیک ۹۴
۳-۵-۳- المان یک بعدی دو گرهی ۱۰۰
۳-۵-۴- المان یک بعدی سه گرهی ۱۰۱
۳-۵-۵- رابطه SBFEM در حوزه زمان ۱۰۲

۳-۶- معادلات اندرکنش در مختصات SBFEM ۱۰۵
۳-۶-۱- اندر کنش دینامیکی سازه با محیط بی نهایت ۱۰۵
۳-۶-۲- ترکیب SBFEM و FEM ۱۱۵
۳-۶-۳- نفوذپذیری خاک تحت بارهای لرزهای ۱۱۶
۳-۶-۴- عمق سنگ بستر ۱۱۹

٤. فصل چهارم: تحلیل مسأله اندرکنش خاک-سازه و ارائه نتایج ۱۲۱

۴-۱- مقدمه ۱۲۲
۴-۲- برنامه کامپیوتری ۱۲۲
۴-۳- حرکت ورودی مؤثر ۱۳۱
۴-۴- تحقیق انجام شده توسط Celebi, Goktepe و Karahan ۱۳۸
۴-۵- تحلیل سازه بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش و فونداسیون ۱۳۸
۴-۵-۱- جابجایی‌ها ۱۴۱
۴-۵-۲- واکنش‌های تکیه‌گاهی ۱۴۴
۴-۶- بررسی اندرکنش خاک-سازه به وسیله مدل UCD ۱۴۷
۴-۶-۱- سازه واقع بر زمین رسی نرم و متوسط ۱۴۷
۴-۶-۲- سازه واقع بر زمین رسی سخت ۱۵۶
۴-۶-۳- سازه واقع بر زمین ماسه‌ای کم تراکم ۱۶۱
۴-۶-۴- سازه واقع بر زمین ماسه‌ای با تراکم متوسط ۱۶۵
۴-۶-۵- سازه واقع بر زمین ماسه‌ای با تراکم بالا ۱۶۹
۴-۷- ماسه رس‌دار ۱۷۳
۴-۷-۱- ماسه رس‌دار کم تراکم ۱۷۳
۴-۷-۲- سازه واقع بر ماسه رس‌دار با تراکم متوسط ۱۷۶
۴-۷-۳- سازه واقع بر ماسه رس‌دار با تراکم بالا ۱۷۹
۴-۸- بررسی اندرکنش خاک-سازه به وسیله مدل UCSD ۱۸۲
۴-۸-۱- جابجایی‌ها ۱۸۲
۴-۸-۲- واکنش‌های تکیه‌گاهی ۱۸۶

۵. فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۹۰

۵-۱- مقدمه ۱۹۱
۵-۱-۱- پیشنهادها ۱۹۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱ تخمین قطعه ای از یک تابع با استفاده از مفهوم درون یابی..... ۱۷
شکل ۳-۲ شماتیک تفکیک نواحی خاکی اطراف سازه..... ۲۵
شکل ۳-۳ تفکیک زیرسازه‌های سیستم خاک – سازه از لحاظ رفتاری..... ۲۶
شکل ۳-۴ مثالهایی از مسائل قابل حل با فرض رفتار کرنش صفحه ای..... ۳۲
شکل ۳-۵ درجات آزادی یک المان مربعی از خاک بدون فشار آب حفره ای..... ۳۳
شکل ۳-۶ نگاشت المان اصلی به المان مادر..... ۳۴
شکل ۳-۷ شکل شماتیک مش بندی خاک ناحیه نزدیک..... ۳۸
شکل ۳-۸ انواع مرزهای جاذب..... ۴۰
شکل ۳-۹ برخورد موج به فصل مشترک محیط‌های غیر همسان در فضای یک بعدی..... ۴۱
شکل ۳-۱۰ جایگزینی نیمه ی بی نهایت محیط الاستیک یک بعدی با میراگر معادل..... ۴۷
شکل ۳-۱۱ منحنی شاخص رفتار تنش – کرنش..... ۴۹
شکل ۳-۱۲ قوانین Masing اصلاح شده..... ۵۰
شکل ۳-۱۳ مدل رفتاری UCSD برای خاک ماسه‌ای..... ۵۳
شکل ۳-۱۴ مدل رفتاری UCSD برای خاک رسی..... ۵۷
شکل ۳-۱۵ حالات مختلف فونداسیون قابل تولید با استفاده از مدل UCD..... ۶۴
شکل ۳-۱۶ انواع سخت‌شوندگی..... ۶۶
شکل ۳-۱۷ مدلسازی سازه دارای اندرکنش با خاک به روش مرسوم..... ۶۹
شکل ۳-۱۸ تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر روی پارامترهای دینامیکی..... ۷۴
شکل ۳-۱۹ روش حل مستقیم..... ۷۶
شکل ۳-۲۰ ایجاد اندرکنش سینماتیک بین خاک و فونداسیون..... ۷۸
شکل ۳-۲۱ میزان رخداد اندرکنش سینماتیک..... ۷۹
شکل ۳-۲۲ اندرکنش سینماتیک و اینرسی..... ۷۹
شکل ۳-۲۳ نمایش روش چند مرحله ای..... ۸۲
شکل ۳-۲۴ جداسازی ناحیه انتقالی در روش مرز مقیاس شده..... ۸۶
شکل ۳-۲۵ دامنه دو بعدی متناهی..... ۸۷
شکل ۳-۲۶ استفاده از روش مرز مقیاس شده برای دامنه‌ها..... ۹۴

شکل ۳-۲۷ مفهوم کشش سطحی در محیط‌های متناهی و نامتناهی در روش مرز مقیاس شده ۹۸
شکل ۳-۲۸ تفکیک مرز مسأله با روش مرز مقیاس شده.....۱۱۱
شکل ۳-۲۹ نحوه برهم نهی ناحیه دور با استفاده از روش مرز مقیاس شده.....۱۱۳
شکل ۳-۳۰ تغییرات رفتار امپدانسی محیط با عمق سنگ بستر ۱۲۰
شکل ۴-۱ نمودار رفتار هیسترتیک تنش – کرنش برای بتن بدون مقاومت کششی ۱۲۵
شکل ۴-۲ رفتار فولادهای مسلح کننده در شرایط بارگذاری یکنواخت.....۱۲۵
شکل ۴-۳ رفتار فولادهای مسلح کننده تحت بارگذاری رفت و برگشتی.....۱۲۶
شکل ۴-۴ مقطع تمان تیرها و ستون‌های قاب.....۱۲۶
شکل ۴-۵ نمونه ای از یک المان ۹ گره ای خاک.....۱۲۸
شکل ۴-۶ مدلسازی سازه و خاک به روش نیرومند در نرم افزار OpenSees.....۱۲۹
شکل ۴-۷ شتابنگاشت زلزله Loma-Prieta در راستای افق.....۱۳۲
شکل ۴-۸ شتابنگاشت زلزله Loma-Prieta در راستای قائم.....۱۳۲
شکل ۴-۹ طیف فوریه برای مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله Loma-Prieta.....۱۳۳
شکل ۴-۱۰ روش زیر سازه در برهم نهی سازه تعمیم یافته و خاک ناحیه دور.....۱۳۴
شکل ۴-۱۱ حرکت ورودی مؤثر برای مؤلفه افقی زلزله لوما به سایت ماسه‌ای.....۱۳۴
شکل ۴-۱۲ حرکت ورودی مؤثر برای مؤلفه افقی زلزله لوما به سایت ماسه‌ای.....۱۳۵
شکل ۴-۱۳ پاسخ ضربه واحد برای زمین‌های ماسه‌ای زه کشی شده و زه کشی نشده و رسی...۱۳۶
شکل ۴-۱۴ نیروهای اندرکنشی در راستای افقی.....۱۳۷
شکل ۴-۱۵ نیروهای اندرکنشی در راستای قائم.....۱۳۷
شکل ۴-۱۶ حداکثر جابه جایی‌ها برای سازه الاستیک فرو رفته در خاک و سازه غیر الاستیک بدون فرو رفتگی ۱۴۲
شکل ۴-۱۷ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک خطی فرو رفته درون خاک رسی.....۱۴۳
شکل ۴-۱۸ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک خطی فرو رفته درون خاک ماسه‌ای.....۱۴۳
شکل ۴-۱۹ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه غیر الاستیک بدون فرو رفتگی در خاک.....۱۴۴
شکل ۴-۲۰ برش‌های پایه برای سازه‌های خطی و غیر خطی بدون اندرکنش ۱۴۵
شکل ۴-۲۱ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه الاستیک خطی فرو رفته در خاک رسی.....۱۴۵
شکل ۴-۲۲ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه الاستیک خطی فرو رفته در خاک ماسه‌ای.....۱۴۶

شکل ۴-۲۳ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه غیرالاستیک واقع بر فونداسیون ثابت، بدون فرو رفتگی در خاک..... ۱۴۶
شکل ۴-۲۴ بیشینه پاسخ‌های سازه واقع بر زمین رسی نرم..... ۱۴۷
شکل ۴-۲۵ بیشینه پاسخ‌های سازه واقع بر زمین رسی متوسط..... ۱۴۸
شکل ۴-۲۶ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک خطی واقع بر شالوده الاستیک..... ۱۴۹
شکل ۴-۲۷ تاریخچه پاسخ‌های طبقات برای سازه الاستیک خطی با تکیه‌گاههای گیردار..... ۱۵۰
شکل ۴-۲۸ تاریخچه پاسخ‌های طبقات برای سازه الاستیک خطی واقع بر شالوده با رفتار غیرخطی ۱۵۱
شکل ۴-۲۹ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه غیر خطی واقع بر شالوده با رفتار غیرخطی..... ۱۵۲
شکل ۴-۳۰ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه غیرخطی با تکیه‌گاه‌های گیردار..... ۱۵۳
شکل ۴-۳۱ برش‌های پایه برای سازه‌های الاستیک و غیرالاستیک واقع بر بسترهای ثابت، الاستیک و رسی متوسط..... ۱۵۴
شکل ۴-۳۲ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه الاستیک واقع بر بستر الاستیک..... ۱۵۴
شکل ۴-۳۳ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه الاستیک واقع بر بستر رسی متوسط..... ۱۵۵
شکل ۴-۳۴ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه غیر الاستیک واقع بر بستر غیر الاستیک ۱۵۵
شکل ۴-۳۵ بیشینه پاسخ‌های سازه واقع بر زمین رسی سخت..... ۱۵۶
شکل ۴-۳۶ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر ارتجاعی ۱۵۷
شکل ۴-۳۷ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک..... ۱۵۷
شکل ۴-۳۸ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه غیر الاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک..... ۱۵۸
شکل ۴-۳۹ برش‌های پایه برای سازه‌های الاستیک و غیر الاستیک واقع بر بسترهای ثابت، الاستیک و رسی سخت..... ۱۵۹
شکل ۴-۴۰ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه الاستیک واقع بر بستر الاستیک..... ۱۵۹
شکل ۴-۴۱ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه الاستیک واقع بر بستر رسی متوسط..... ۱۶۰
شکل ۴-۴۲ واکنش‌های تکیه‌گاهی سازه غیر الاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۶۰
شکل ۴-۴۳ بیشینه پاسخ‌های سازه واقع بر زمین ماسه‌ای شل..... ۱۶۱
شکل ۴-۴۴ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر ارتجاعی ۱۶۲
شکل ۴-۴۵ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر غیرخطی..... ۱۶۲
شکل ۴-۴۶ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرخطی..... ۱۶۳

شکل ۴-۴۷ برش‌های پایه برای سازه‌های الاستیک و غیرالاستیک واقع بر بسترهای ثابت، الاستیک و ماسه‌ای شل ۱۶۴
شکل ۴-۴۸ واکنش‌های ی سازه الاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۶۴
شکل ۴-۴۹ واکنش‌های ی سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۶۵
شکل ۴-۵۰ بیشینه پاسخ‌های سازه واقع بر زمین ماسه‌ای با تراکم متوسط ۱۶۶
شکل ۴-۵۱ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر الاستیک ۱۶۶
شکل ۴-۵۲ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۶۷
شکل ۴-۵۳ تاریخچه پاسخ‌ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۶۷
شکل ۴-۵۴ برش‌های پایه برای سازه‌های الاستیک و غیرالاستیک واقع بر بسترهای ثابت، الاستیک و ماسه‌ای متوسط ۱۶۸
شکل ۴-۵۵ واکنش‌های ی سازه الاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۶۸
شکل ۴-۵۶ واکنش‌های ی سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۶۹
شکل ۴-۵۷ بیشینه پاسخ‌های سازه واقع بر زمین ماسه‌ای با تراکم بالا ۱۷۰
شکل ۴-۵۸ تاریخچه پاسخ ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر الاستیک ۱۷۰
شکل ۴-۵۹ تاریخچه پاسخ ها برای سازه الاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۷۱
شکل ۴-۶۰ تاریخچه پاسخ ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۷۱
شکل ۴-۶۱ برش های پایه برای سازه های الاستیک و غیر الاستیک واقع بر بستر های ثابت، الاستیک و ماسه‌ای متراکم ۱۷۲
شکل ۴-۶۲ واکنش های ی سازه الاستیک واقع بر بستر غیر الاستیک ۱۷۲
شکل ۴-۶۳ واکنش های ی سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۷۳
شکل ۴-۶۴ بیشینه پاسخ های سازه واقع بر ماسه رس‌دار با تراکم پایین ۱۷۴
شکل ۴-۶۵ تاریخچه پاسخ ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۷۴
شکل ۴-۶۶ برش های پایه برای سازه های الاستیک و غیر الاستیک واقع بر بستر های ثابت، الاستیک و ماسه رس‌دار کم تراکم ۱۷۵
شکل ۴-۶۷ واکنش های ی سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیر الاستیک ۱۷۵
شکل ۴-۶۸ بیشینه پاسخ های سازه واقع بر ماسه رس‌دار با تراکم متوسط ۱۷۶
شکل ۴-۶۹ تاریخچه پاسخ ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۷۷

شکل ۴-۷۰ برش های پایه برای سازه های الاستیک و غیرالاستیک واقع بر بسترهای ثابت، الاستیک و ماسه رس‌دار متوسط.....۱۷۸
شکل ۴-۷۱ واکنش های تکیه‌گاهی سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک ۱۷۸
شکل ۴-۷۲ بیشینه پاسخ های سازه واقع بر ماسه رس‌دار با تراکم بالا.....۱۷۹
شکل ۴-۷۳ تاریخچه پاسخ ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک.....۱۸۰
شکل ۴-۷۴ برش های پایه برای سازه های الاستیک و غیر الاستیک واقع بر بسترهای ثابت، الاستیک و ماسه رس‌دار باتراکم بالا ۱۸۱
شکل ۴-۷۵ واکنش های ی سازه غیرالاستیک واقع بر بستر غیرالاستیک.....۱۸۱
شکل ۴-۷۶ بیشینه پاسخ های سازه واقع بر خاک های ماسه‌ای زه کشی شده و زه کشی نشده و رسی ۱۸۲
شکل ۴-۷۷ تاریخچه پاسخ ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر رس UCSD.....۱۸۳
شکل ۴-۷۸ تاریخچه جابه جایی های نسبی طبقات برای سازه غیرالاستیک واقع بر رس UCSD ۱۸۴
شکل ۴-۷۹ تاریخچه پاسخ ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر ماسه زه کشی شده UCSD ۱۸۴
شکل ۴-۸۰ تاریخچه جابه جایی های نسبی طبقات برای سازه غیرالاستیک واقع بر ماسه زه کشی شده UCSD ۱۸۵
شکل ۴-۸۱ تاریخچه پاسخ ها برای سازه غیرالاستیک واقع بر ماسه زه کشی نشده UCSD.....۱۸۵
شکل ۴-۸۲ تاریخچه جابه جایی های نسبی طبقات برای سازه غیرالاستیک واقع بر ماسه زه کشی نشده UCSD.....۱۸۶
شکل ۴-۸۳ واکنش های ی سازه غیرالاستیک واقع بر رس UCSD.....۱۸۷
شکل ۴-۸۴ واکنش های ی سازه غیرالاستیک واقع بر ماسه زه کشی شده.....۱۸۸
شکل ۴-۸۵ واکنش های ی سازه غیرالاستیک واقع بر ماسه زه کشی نشده.....۱۸۸
شکل ۴-۸۶ برش های پایه برای سازه های غیر الاستیک واقع بر خاک های ماسه‌ای زه کشی شده و زه کشی نشده و رسی.....۱۸۹
شکل ۴-۸۷ مدل در نظر گرفته شده توسط Celebi و همکاران (۲۰۱۲) ۱۳۹
شکل ۴-۸۸ بیشینه پاسخ های سازه واقع بر خاک ماسه‌ای با مدل مور – کولمب تحت زلزله Loma - Prieta، الف) ماسه شل، ب) ماسه متوسط، پ) ماسه متراکم.....۱۴۰

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ دامنه های جابه جایی و بزرگاهای تنش برای نسبت های امپدانسی مختلف..... ۴۵
جدول ۳-۲ مشخصات خاک ماسه‌ای جهت استفاده در مدل رفتاری UCSD..... ۵۶
جدول ۳-۳ مشخصات رسی جهت استفاده در مدل رفتاری UCSD..... ۵۸
جدول ۳-۴ ضرائب سختی خاک بر اساس ATC-40 ..... ۶۱
جدول ۳-۵ پارامترهای رفتار دینامیکی و استاتیکی در روش SBFEM..... ۱۰۶
جدول ۳-۶ محدوده ی نفوذپذیری برای خاک های رسی و ماسه‌ای..... ۱۱۹
جدول ۴-۱ مشخصات مکانیکی المان ها در سازه با رفتار الاستیک خطی..... ۱۲۴
جدول ۴-۲ مشخصات قاب بتنی مورد مدل شده..... ۱۲۴
جدول ۴-۳ مشخصات مکانیکی مصالح بتنی برای سازه با رفتار غیرالاستیک..... ۱۲۴
جدول ۴-۴ مشخصات مکانیکی مصالح فولادی برای سازه با رفتار غیرالاستیک..... ۱۲۴
جدول ۴-۵ مقایسه‌ی حداکثر جابه جایی افقی های سازه غیرالاستیک بر روی خاک با رفتار الاستوپلاستیک..... ۱۴۰
جدول ۴-۶ مقایسه ی حداکثر جابه جایی های افقی سازه غیر الاستیک بر روی انواع خاک های مختلف با رفتار الاستوپلاستیک..... ۱۴۱

فهرست علائم اختصاری

مدل رفتاری University of California Davis برای خاک ..... UCD

مدل رفتاری University of California San Diego برای خاک ..... UCSD

روش اجزاء مرزی محدود مقیاس شده..... SBFEM

اندرکنش خاک-سازه ..... SSI

روش اجزاء محدود ..... FEM

روش اجزاء مرزی ..... BEM

فصل اول : مقدمه

۱-۱-پیش گفتار

مسأله‌ی اندرکنش خاک-سازه اگرچه بیش از نیم قرن است که از نظر مهندسی حائز اهمیت شمرده شده، اما روش به کارگیری صحیح آن در بررسی مسائل استاتیکی و مخصوصا دینامیکی هنوز نیاز به بهبود دارد به طوری که می‌توان ادعا کرد دقیق‌ترین روشهای تحلیل رایج امروز با رفتار واقعی سیستم مورد آنالیز بیش از مقدار مورد انتظار اختلاف دارند. از مهمترین عوامل این مسأله می‌توان به روش وارد کردن اثر خاک واقع در زیر سازه یا ساختمان در محاسبات اشاره کرد. نرم‌افزارهایی که به طور رایج مورد استفاده مهندسین طراح قرار می‌گیرند، اگرچه اکثراً دارای قابلیت‌هایی جهت لحاظ اثر غیرارتجاعی خاک بر سازه می‌باشند، اما اولاً به دلیل پوشیده ماندن اهمیتشان از چشم مهندسین مخفی مانده‌اند؛ در ثانی، بر مبنای روشهای سنتی بررسی مسأله اندرکنش خاک-سازه بنا شده‌اند و به دلیل بلااستفاده ماندن سالهاست پیشرفتی در رفتار آنها صورت نگرفته است.

هدف از انتخاب موضوع حاضر به عنوان زمینه تحقیق این پایان نامه بیان اهمیت از نظر پنهان مانده‌ی اثرات اندرکنشی خاک بر سازه به طور عام و تأثیرات رفتار غیرخطی خاک تحت بارهای دینامیکی به طور خاص و مقایسه‌ی این دو حالت می‌باشد. نتایج شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد اگرچه با فرض رفتار ارتجاعی متعارف – هرچند دور از واقعیت - برای خاک، تغییرات تراکم در حین وقوع لرزه و در نتیجه آن ضریب الاستیسیته خاک در روند کلی تغییرات نتایج تأثیری ندارد، قضاوت مشابهی در مورد خاک الاستوپلاستیک نمی‌توان کرد و برای شبیه‌سازی‌های مقایسه‌ای در حالات بدون اندرکنش، اندرکنش الاستیک و اندرکنش الاستوپلاستیک حالت بحرانی پاسخ‌های سازه بسته به شرایط خاک متفاوت است و این مسأله هم از دیدگاه برش پایه و هم از دیدگاه جابجایی‌های نقاط کنترل قابل مشاهده می باشد.

نه‌تنها برای بررسی پدیده‌های اندرکنشی خاک و سازه می‌توان از یک شبیه سازی واحد نتایج مختلفی را استخراج کرد، بلکه می‌توان در جستجوی پاسخی خاص شبیه‌سازی‌های گوناگونی را انجام