پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

پایان نامه دکتری

مهندسی عمران- مهندسی زلزله

تعیین مدول برشی و نسبت میرایی مصالح ریزدانه غیراشباع در بارگذاری تناوبی و شرایط کنترل مکش

دانشجو:

مهنوش بیگلری

اساتید راهنما:

دکتر محمد کاظم جعفری

دکتر علی شفیعی

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

همسرم ایمان که همراهیش سختیها را آسان کرد

و

مادر و پدر عزیزم که دعای خیرشان در این راه پشتیبانم بود.

تقدیر و تشکر

خداوند را سپاس می‌گویم که توفیق داد تا قطره‌ای از شهد شیرین اقیانوس علم را بنوشم، ناشناخته‌هایی را بشناسم و نادیده‌هایی را ببینم.
اکنون که این تحقیق را به پایان رسانیده‌ام جای آن است که از زحمات اساتید، دوستان، سازمانها و شرکتهایی که در این مسیر یاریم دادند تشکر و قدردانی کنم که "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق".
در ابتدا لازم می‌دانم که مراتب قدردانی خود را از اساتید محترم آقایان دکتر محمد کاظم جعفری و دکتر علی شفیعی اساتید راهنمای این رساله و آقای Prof. Claudio Mancuso و خانم Prof. Anna d'Onofrio اساتید دانشکده ژئوتکنیک و هیدرولیک دانشگاه فدریکو دوم که در مراحل مختلف این تحقیق راهنمایی‌های ارزنده‌شان راهگشای مشکلاتم بود، ابراز دارم.
مسلماً اگر کمکهای دوستانه و حرفه‌ای دوستانی چون آقایان مهندس Adolfo Cavallari و مهندس Carlo Adami از شرکت Megaris و آقای روبن اسحاق از شرکت صنایع مکانیک خاک ایران در ساخت و راه‌اندازی دستگاه سه محوری تناوبی با قابلیت کنترل مکش نبود، دستیابی به این ابزار با مشکلات فراوانی روبرو می‌شد، که بدین وسیله از ایشان تقدیر و تشکر می‌نمایم.
در خاتمه از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری جمهوری اسلامی ایران، برای حمایت مالی از این تحقیق در طول دوره تحقیقاتی، آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه فدریکو دوم، برای پذیرش اینجانب در دوره فرصت مطالعاتی، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای تأمین مالی تجهیزات ساخته شده و شرکت صنایع خاک چینی ایران برای تأمین رایگان خاک کائولینیت زنوز تشکر و قدردانی می‌کنم.

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی مدول برشی و نسبت میرایی خاک کائولینیت متراکم شده در شرایط کنترل مکش می‌پردازد. مدول برشی و نسبت میرایی اولیه در کرنشهای کوچک بوسیله ابزار ستون تشدید با قابلیت کنترل مکش توسعه یافته در دانشگاه فدریکو دوم، و در کرنشهای متوسط تا زیاد توسط دستگاه سه‌محوری تناوبی با قابلیت کنترل مکش ساخته شده در جریان این رساله در پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله اندازه‌گیری شده‌اند. رفتار این خاک در کرنشهای کوچک در مسیر تحکیم همسان، تر و خشک شدگی و در دو شرایط عادی‌تحکیم‌یافته و بیش‌تحکیم‌یافته در طی مسیرهای تنش پیچیده‌ای آزموده شده است. درحالیکه، رفتار مشاهده شده در کرنشهای کوچک در شرایط بیش‌تحکیم‌یافته از نظر کیفی مشابه نتایج مطالعات پیشین بوده‌است، نتایج آزمایشها در خاکهای عادی‌تحکیم‌یافته، رفتار متفاوتی از آنچه قبلاً در شرایط کاهش مکش گزارش شده بود، نشان می‌دهند. این نتایج روشن کننده نقش مهم دو پارامتر نسبت تخلخل و درجه اشباع بر مدول برشی اولیه خاکهای غیر اشباع است. از آنجا که نتایج اخیر نشان دادند که مدلهای موجود برای تخمین مدول برشی اولیه خاکهای غیر اشباع، قادر به پیش‌بینی این پارامتر در مسیر تر شدگی در خاکهای عادی‌تحکیم‌یافته که به پدیده فروریزش منجر می‌شوند، نیستند، لازم بود تا مدل جدیدی با قابلیتهای بیشتر توسعه یابد. این مشکل با بنا نهادن مدل جدیدی بر پایه مدل الاستوپلاستیک پیشرفته‌ای که قابلیت تشریح نسبت تخلخل و درجه اشباع را دارد، در این رساله حل شده‌است. معادله مدول برشی اولیه پیشنهادی با جایگزین کردن دو متغیر حالت تنش؛ تنش میانگین اسکلت و متغیر قیدی، در مدلی که پیشتر برای خاکهای اشباع ارائه شده بود و با اضافه کردن تابعی جدید بر حسب درجه اشباع، توسعه یافته است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدول برشی اولیه تخمین زده شده با این مدل، نه فقط تطابق خوبی نشان می‌دهد، بلکه بیانگر رابطه واحدی است که در هر دو شرایط اشباع و غیر اشباع قابل استفاده می‌باشد. بخش دوم تحقیق، پس از تشریح ابزار ساخته شده، به بررسی پارامترهای دینامیکی در کرنشهای برشی متوسط تا زیاد (10^{-4} تا 10^{-2}) در شرایط عادی‌تحکیم‌یافته می‌پردازد. نتایج هماهنگ با نتایج آزمایشهای انجام شده بر خاکهای اشباع، نشان می‌دهند که با افزایش کرنش برشی، مدول برشی کاهش و نسبت میرایی افزایش می‌یابد، با این تفاوت که افزایش مکش در کرنشهای برشی یکسان، موجب سخت‌تر شدن نمونه‌ها، افزایش مدول برشی و کاهش نسبت میرایی می‌شود. این اثرات در مدل جدیدی که از ارتقاء مدل ارائه شده توسط محققین پیشین در زمینه رفتار خاکهای اشباع، وارد شده است و در این مدلها نیز نتایج حاصل از مدل با آزمایش تطابق خوبی دارد. بعلاوه در کنار آزمایشهای انجام شده برای تعیین پارامترهای دینامیکی، مکش اولیه نمونه نیز توسط دستگاه تنسیومتر با ظرفیت بالا اندازه‌گیری شده که شرح عملیات به تفصیل در رساله ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی

خاک غیر اشباع، مدول برشی، نسبت میرایی، مدلسازی، آزمایش سه محوری تناوبی کنترل مکش، آزمایش ستون تشدید کنترل مکش، خاک رس لاغر

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده د

مقدمه ت

فصل اول مرور مطالعات پیشین بر رفتار خاکها تحت بارگذاری لرزه‌ای و در شرایط غیر اشباع ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- رفتار خاک تحت بارگذاری لرزه‌ای ۲

۱-۲-۱- متغیرهای مؤثر بر رفتار مکانیکی خاکها ۵

۱-۲-۱-۱- عوامل مؤثر بر سختی برشی اولیه ۵

۱-۲-۱-۲- عوامل مؤثر بر سختی ناحیه غیر خطی ۷

۱-۲-۲- اندازه‌گیری مدول برشی و میرایی ۸

۱-۲-۳- مدلسازی رفتار غیرخطی ۹

۱-۳- تأثیر شرایط غیر اشباع ۱۱

۱-۳-۱- متغیرهای حالت تنش در مکانیک خاکهای غیر اشباع ۱۱

۱-۳-۲- رفتار تغییر حجمی ۱۹

۱-۳-۲-۱- سطح حالت ۱۹

۱-۳-۲-۲- تراکم‌پذیری ۲۰

۱-۳-۲-۳- مسیرهای تر و خشک شدگی ۲۳

۱-۳-۳- مقاومت ۲۷

۱-۳-۳-۱- مقاومت برشی ۲۷

۱-۳-۳-۲- مقاومت برشی در تغییر شکلهای کوچک ۲۸

۱-۳-۵- مدلسازی رفتار المان حجمی خاک غیر اشباع ۴۲

۱-۳-۵-۱- مدلسازی رفتار مکانیکی ۴۲

۱-۳-۵-۲- مدلسازی رفتار هیدرو-مکانیکی ۴۳

۱-۳-۵-۳- جمع‌بندی ۶۰

فصل دوم ابزار آزمایش و روشهای اندازه‌گیری ۶۱

۲-۱- مقدمه ۶۲
۲-۲- مشخصات ابزار آزمایشگاهی مورد نیاز برای خاکهای غیر اشباع ۶۲
۲-۲-۱- کنترل مکش ۶۲
۲-۲-۱-۱- روش انتقال محورها ۶۳
۲-۲-۱-۲- روش اسمزی ۶۶
۲-۲-۱-۳- روش کنترل رطوبت محیطی ۶۹
۲-۲-۲- اندازه‌گیری تغییر شکلهای حجمی ۷۱
۲-۲-۲-۱- سیستمهای بر پایه اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع سیال سلولی ۷۱
۲-۲-۲-۲- سیستمهای بر پایه اندازه‌گیری تغییرات حجم سیال سلولی ۷۳
۲-۲-۲-۳- سیستمهای بر پایه اندازه‌گیری هوا و آب جابجا شده ۷۴
۲-۲-۲-۴- سیستمهای بر پایه اندازه‌گیری مستقیم تغییر شکل ۷۵
۲-۲-۳- اندازه‌گیری تغییرات درصد رطوبت ۷۶
۲-۳- دستگاه ستون تشدید- برش پیچشی با قابلیت کنترل مکش به روش انتقال محورها ۷۸
۲-۳-۱- شرح ابزار آزمایش ۸۰
۲-۳-۱-۱- سلول محصور کننده ۸۰
۲-۳-۱-۲- سیستم اعمال و رصد تنش ۸۲
۲-۳-۱-۳- ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل ۸۵
۲-۳-۱-۴- سیستم اندازه‌گیری درصد رطوبت ۸۸
۲-۳-۱-۵- سیستم کنترل و اندازه‌گیری فشار و تغییرات حجم ۹۰
۲-۳-۲- انجام آزمایش خودکار ۹۱
۲-۳-۲-۱- جعبه ابزار کنترل ۹۲
۲-۳-۲-۲- ابزار جمع‌آوری داده ۹۲
۲-۳-۲-۳- مدیریت اجزاء ۹۲
۲-۴- تنسیومتر با ظرفیت بالا ۹۳
۲-۴-۱- کاویتاسیون ۹۴
۲-۴-۱-۱- تعریف کاویتاسیون ۹۴
۲-۴-۱-۲- چگونگی وقوع کاویتاسیون ۹۵
۲-۴-۱-۳- چگونه می‌توان از کاویتاسیون جلوگیری کرد ۹۵
۲-۴-۲- طراحی تنسیومترهای با ظرفیت بالا (مروری بر تنسیومترهای موجود) ۹۷
۲-۴-۳- اجزاء تنسیومتر با ظرفیت بالا دانشگاه فدریکو دوم ۹۹

۲-۴-۴- سیستم اشباع تنسیومتر با ظرفیت بالا دانشگاه فدریکو دوم ۱۰۰
۲-۴-۴-۱- سیستم اشباع (نسخه اولیه) ۱۰۱
۲-۴-۴-۲- سیستم اشباع ارتقاء یافته ۱۰۱
۲-۴-۵- روش اشباع تنسیومتر با ظرفیت بالا دانشگاه فدریکو دوم ۱۰۲
۲-۴-۶- روش اندازه‌گیری مکش با تنسیومتر ۱۰۳
۲-۵- دستگاه سه محوری تناوبی با قابلیت کنترل مکش به روش انتقال محورها ۱۰۳
۲-۵-۱- شرح ابزار آزمایش ۱۰۶
۲-۵-۱-۱- سلول محصور کننده ۱۰۶
۲-۵-۱-۲- سیستم اعمال و رصد تنش ۱۰۷
۲-۵-۱-۳- ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل ۱۱۲
۲-۵-۱-۴- سیستم اندازه‌گیری درصد رطوبت ۱۱۶
۲-۵-۱-۵- سیستم کنترل و اندازه‌گیری فشار و تغییرات حجم ۱۱۷
۲-۵-۲- انجام آزمایش خودکار ۱۲۱
۲-۵-۳- توصیه‌های مهم در استفاده از دستگاه ۱۲۱
فصل سوم مصالح، برنامه، روش انجام و روش تحلیل نتایج آزمایشها ۱۲۳
۳-۱- مقدمه ۱۲۴
۳-۲- مصالح مورد آزمایش ۱۲۴
۳-۲-۱- ویژگیهای شیمیایی ۱۲۴
۳-۲-۲- ویژگیهای مکانیکی ۱۲۵
۳-۲-۲-۱- طبقه‌بندی ۱۲۵
۳-۲-۲-۲- ویژگیهای تراکمی ۱۲۶
۳-۳- برنامه آزمایشها ۱۲۶
۳-۳-۱- برنامه آزمایشهای ستون تشدید ۱۲۶
۳-۳-۲- برنامه آزمایشهای سه‌محوری تناوبی ۱۲۷
۳-۴- آماده‌سازی نمونه ۱۳۰
۳-۵- روش انجام آزمایش ۱۳۱
۳-۵-۱- آماده سازی‌های قبل از آغاز آزمایش ۱۳۱
۳-۵-۲- روش انجام آزمایش ستون تشدید ۱۳۲
۳-۵-۲-۱- جای‌گذاری نمونه ۱۳۲
۳-۵-۲-۲- به تعادل رسانی اولیه ۱۳۳

۳-۵-۲-۳- تحکیم همسان ۱۳۳
۳-۵-۲-۴- تر و خشک شدگی ۱۳۴
۳-۵-۲-۵- انجام آزمایش ستون تشدید ۱۳۴
۳-۵-۳- روش انجام آزمایش برش سه محوری تناوبی ۱۳۵
۳-۵-۳-۱- جای‌گذاری نمونه ۱۳۵
۳-۵-۳-۲- به تعادل رسانی اولیه ۱۳۶
۳-۵-۳-۳- تحکیم همسان اولیه ۱۳۶
۳-۵-۳-۴- انجام سیکلهای تنش ۱۳۷
۳-۵-۳-۵- تحکیم همسان نهایی ۱۳۷
۳-۶- روش تحلیل نتایج ۱۳۸
۳-۶-۱- روش تحلیل نتایج ستون تشدید ۱۳۸
۳-۶-۲- روش تحلیل نتایج سه محوری تناوبی ۱۳۹
فصل چهارم نتایج آزمایشها و تفسیر نتایج ۱۴۲
۴-۱- مقدمه ۱۴۳
۴-۲- آزمایش تعیین مکش بوسیله تنسیومتر با ظرفیت بالا ۱۴۳
۴-۳- آزمایش ستون تشدید ۱۴۴
۴-۳-۱- مسیر بارگذاری ۱۴۴
۴-۳-۲- تعادل اولیه ۱۵۰
۴-۳-۳- رفتار تغییر حجمی ۱۵۸
۴-۳-۴- سرعت موج برشی، مدول برشی اولیه و نسبت میرایی اولیه ۱۶۴
۴-۳-۴-۱- مسیر تحکیم همسان ۱۶۵
۴-۳-۴-۲- مسیرهای تر و یا خشک شدگی ۱۷۴
۴-۴- آزمایش سه محوری تناوبی ۱۷۸
۴-۴-۱- مسیر بارگذاری ۱۷۹
۴-۴-۲- تعادل اولیه ۱۸۴
۴-۴-۳- رفتار تغییر حجمی ۱۸۹
۴-۴-۴- مدول الاستیسیته (مدول یانگ)، مدول برشی، نسبت میرایی ۱۹۸
۴-۴-۴-۱- مدول یانگ ۱۹۹
۴-۴-۴-۲- مدول برشی ۲۰۱
۴-۴-۴-۳- نسبت میرایی ۲۱۱

۴-۴-۵- مقایسه نتایج مدول برشی و نسبت میرایی در مکشهای مختلف ۲۱۲
فصل پنجم مدلسازی مدول برشی و نسبت میرایی ۲۱۸
۵-۱- مقدمه ۲۱۹
۵-۲- مدلسازی مدول برشی در کرنشهای کوچک ۲۱۹
۵-۲-۱- مقایسه مدول برشی اولیه تخمین زده شده از مدلهای موجود و نتایج آزمایشگاهی ۲۲۰
۵-۲-۲- معرفی مدل جدید برای مدول برشی اولیه با استفاده از نسبت تخلخل و درجه اشباع ۲۲۲
۵-۲-۲-۱- تعیین پارامترهای مدل الاستو-پلاستیک ۲۲۲
۵-۲-۲-۲- مدلسازی مدول برشی اولیه ۲۲۵
۵-۲-۳- ارزیابی مدل جدید ۲۲۹
۵-۳- مدلسازی مدول برشی و نسبت میرایی در کرنشهای متوسط تا زیاد ۲۳۳
۵-۳-۱- مدلهای موجود در خاکهای اشباع ۲۳۳
۵-۳-۲- مدلسازی مدول برشی ۲۳۵
۵-۳-۳- مدلسازی نسبت میرایی ۲۳۸
فصل ششم جمع‌بندی و پیشنهادها ۲۴۱
۶-۱- جمع‌بندی ۲۴۱
۶-۱-۱- رفتار در کرنشهای برشی کوچک ۲۴۲
۶-۱-۲- رفتار در کرنشهای برشی متوسط تا زیاد ۲۴۳
۶-۲- پیشنهادها ۲۴۴
مراجع ۲۴۶

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل(۱-۱): رفتار یک المان خاک تحت اثر برش ساده متغیر در زمان بصورت نامنظم ۳

شکل(۱-۲): تعریف پارامترهای سختی برشی، G، و عامل میرایی، D، برای یک سیکل تنش- کرنش ۳

شکل(۱-۳): سطوح تغییر شکل و زمینه‌های رفتار مکانیکی خاک در شرایط سیکلهای برش ساده ۴

شکل(۱-۴): اثر تاریخچه تنش بر سختی برشی چهار نوع خاک ریزدانه (Rampello و همکاران، ۱۹۹۵) ۶

شکل(۱-۵): همبستگی بین γ_l و γ_v و شاخص خمیری (Vinale و همکاران، ۱۹۹۵) ۸

شکل(۱-۶): نمایش مماس بر هر منحنی بارگذاری یا باربرداری ۱۰

شکل(۱-۷): ارائه الگووار از آب میان بافتی و آب حجمی (از Wheeler و همکاران، ۲۰۰۳) ۱۲

شکل(۱-۸): نحوه قرار گیری هوا و آب در حفره‌ای از خاک (Sharma، ۱۹۹۸) ۱۳

شکل(۱-۹): آب میان بافتی: تأثیر مکش بر توزیع تنش بین ذرات (Mancuso و همکاران، ۲۰۰۲) ۱۴

شکل(۱-۱۰): اثر مکش بر آب میان‌بافتی و آب حجمی (Mancuso و همکاران، ۲۰۰۲) ۱۵

شکل(۱-۱۱): تعیین مقدار فشار ورود هوا و درجه اشباع پسماند: الف) شکل منحنی، ب) درجه اشباع به عنوان تابعی از مکش مؤثر (از Brooks و Corey، ۱۹۶۴) ۱۶

شکل(۱-۱۲): تعیین آزمایشگاهی سطح حالت: الف) نتایج آزمایشهای تحکیم در شرایط مکش ثابت، ب) نتایج آزمایشهای کاهش مکش در شرایط تنش خالص ثابت، ج) ارائه سه بعدی نتایج (Matyas و Radhakrishna، ۱۹۶۸) ۲۰

شکل(۱-۱۳): آزمایش تحکیم همه‌جانبه در مکش ۲۰۰ کیلو پاسکال بر روی خاک متراکم کائولن ترکیب شده با بنتونیت (Sharma، ۱۹۹۸) ۲۲

شکل(۱-۱۴): تغییر در ساختار ذرات در اثر افزایش در تنش متوسط خالص (بارگذاری) و کاهش در مکش (فروریزش) (Gens، ۱۹۹۵) ۲۴

شکل(۱-۱۵): تأثیر تنش متوسط خالص پدیده تورم و فروریزش: الف) مسیر تنش ب) رفتار مشاهده شده در مسیرهای FD و FIG (Josa و همکاران، ۱۹۸۷) ۲۵

شکل(۱-۱۶): فروریزش در نمونه اشباع با آزمایش تحکیم در شرایط کنترل مکش (Suriol و همکاران، ۱۹۹۸) ۲۵

شکل(۱-۱۷): تأثیر سیکلهای تر و خشک شدگی بر رسهای بسیار متورم شونده (Chu و Mou، ۱۹۷۳) ۲۶
شکل(۱-۱۸): تأثیر سیکلهای تر و خشک شدگی بر کائولن متراکم: الف) مسیر تنش ب) نتایج آزمایشگاهی (Alonso و همکاران، ۱۹۹۰) ۲۶
شکل(۱-۱۹): تأثیر سیکلهای تر و خشک شدگی بر خاک رس Boom (Alonso و همکاران، ۱۹۹۵) ۲۷
شکل(۱-۲۰): رابطه بین منحنی ذخیره آب-خاک و مقاومت برشی ماسه و رس (Fredlund، ۱۹۹۵) ۲۸
شکل(۱-۲۱): اثر درجه اشباع بر سختی برشی یک خاک سیلتی (Wu و همکاران، ۱۹۸۵) ۲۹
شکل(۱-۲۲): رابطه بین درجه اشباع بهینه و D_{10} استخراج شده از ۵ نوع خاک مورد آزمایش (از Wu و همکاران ۱۹۸۴) ۳۰
شکل(۱-۲۳): رابطه بین نسبت تخلخل، درصد رطوبت، مکش و سختی محاسبه شده با بندرالمنت (از Marinho و همکاران، ۱۹۹۵). ۳۱
شکل(۱-۲۴): مدول برشی اولیه ماسه Metramo در تراکم بهینه اندازه‌گیری شده بوسیله دستگاه ستون تشدید-برش پیچشی دارای قابلیت کنترل مکش (Mancuso و همکاران، ۲۰۰۲) ۳۳
شکل(۱-۲۵): مدول برشی اولیه ماسه Metramo در تراکم با درصد رطوبت مرطوبتر از بهینه اندازه‌گیری شده بوسیله دستگاه ستون تشدید-برش پیچشی دارای قابلیت کنترل مکش (Mancuso و همکاران، ۲۰۰۲) ۳۳
شکل(۱-۲۶): مدول برشی اولیه به عنوان تابعی از تنش میانگین خالص و مکش در خاک رس سیلتی ۳۴
شکل(۱-۲۷): مقادیر ضریب β بدست آمده از میان‌یابی داده‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی (d'Onza و همکاران، ۲۰۰۷) ۳۵
شکل(۱-۲۸): مقادیر ضریب r بدست آمده از میان‌یابی داده‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی(d'Onza و همکاران، ۲۰۰۷) ۳۵
شکل(۱-۲۹): (a) تأثیر خشک شوندگی از مکش ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال بر مدول برشی اولیه، آزمایش mp04RC، (b) تأثیر تر و خشک شوندگی بر مدول برشی اولیه، آزمایش mp05RC، (c) تغییرات حجم مشاهده شده در حین آزمایشهای mp04RC و mp05RC، شامل مراحل خشک شونگی از مکش ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلو پاسکال (از Vassallo و همکاران، ۲۰۰۷b). ۳۷
شکل(۱-۳۰): تأثیر مکش بر مدول برشی اولیه خاک عادی تحکیم یافته (از Vassallo و همکاران، ۲۰۰۷b). ۳۸
شکل(۱-۳۱): مقایسه نتایج آزمایش mp05RC با مقدار پیش‌بینی شده (از Vassallo و همکاران، ۲۰۰۷b). ۳۹
شکل(۱-۳۲): مقایسه نتایج مدول برشی اولیه تعیین شده با ابزار ستون تشدید و بندر المنت (Pineda و همکاران، ۲۰۰۸) ۴۰
شکل(۱-۳۳): رابطه بین سرعت موج برشی و تنش میانگین خالص (Ng و Yung، ۲۰۰۸) ۴۱

شکل(۱-۳۴): رابطه بین سرعت موج برشی و مکش (Ng و Yung، ۲۰۰۸) ۴۱
شکل(۱-۳۵): تغییرات بین سرعت موج برشی و مکش در حین ترشدگی و خشک‌شدگی (Xu و همکاران، ۲۰۰۸) ۴۲
شکل(۱-۳۶): سازوکار جریان الف) حفرات پر شده با آب ب) حفرات خالی شده از آب (Buisson و Wheeler، ۲۰۰۰) ۴۶
شکل(۱-۳۷): ارائه الاستیک و پلاستیک پدیده هیسترسیز هیدرولیکی (Buisson و Wheeler، ۲۰۰۰) ۴۷
شکل(۱-۳۸): پاسخ مدل در صفحه حجم ویژه آب- مکش (از Vaunat و همکاران، ۲۰۰۰) ۴۸
شکل(۱-۳۹): تحولات محل سطوح تسلیم در مسیر ABCD (Chen و همکاران، ۱۹۹۹) ۵۰
شکل(۱-۴۰): مسیرهای تنش مورد استفاده به منظور تعیین محل سطوح تسلیم (Sivakumar و Ng، ۱۹۹۸) ۵۰
شکل(۱-۴۱): محل سطوح تسلیم وابسته LC و SI (Sivakumar و Ng، ۱۹۹۸) ۵۱
شکل(۱-۴۲): اثر سیکلهای تر و خشک شدگی (مسیر ABCDE) بر حجم ویژه و درجه اشباع (Sharma، ۱۹۹۸) ۵۳
شکل(۱-۴۳): مدل مفهومی Sharma (۱۹۹۸): رفتار در طول مسیر ABC تر و خشک شدگی، در تنش میانگین خالص ثابت ($p-u_a$) درون سطح تسلیم (Sharma، ۱۹۹۸) ۵۴
شکل(۱-۴۴): مدل مفهومی Sharma، ۱۹۹۸:نتایج تسلیم مراحل خشک شدگی در تنش میانگین خالص ثابت ($p-u_a$)(Sharma، ۱۹۹۸) ۵۵
شکل(۱-۴۵): رابطه بین نیروهای بین ذره‌ای در مکش S و مکش صفر درنتیجه قرار گیری آب بافتی در محل تماس بین دو ذره ایده‌آل کروی از حل تئوری Fisher (۱۹۲۶) (Gallipoli و همکاران (۲۰۰۳)) ۵۷
شکل(۱-۴۶): خط مکش ثابت تحکیم بکر در صفحه e:ln(p") (داده آزمایشگاهی Sivakumar، ۱۹۹۳) (Gallipoli و همکاران (۲۰۰۳)) ۵۹
شکل(۱-۴۷): پاسخ مدل به سیکلهای تر و خشک شدگی (داده آزمایشگاهی Sivakumar، ۱۹۹۳) (Gallipoli و همکاران (۲۰۰۳)) ۵۹
شکل(۲-۱): سلول سه محوری با قابلیت کنترل مکش به روش انتقال محورها (Romero، ۱۹۹۹) ۶۵
شکل(۲-۲): جزئیات صفحه زیرین و کلاهک بالایی سلول سه محوری با قابلیت کنترل مکش (Romero، ۱۹۹۹) ۶۵
شکل(۲-۳): منحنی‌های کالیبراسیون محلولها در غلظتهای متفاوت PEG (Gens و Romero، ۲۰۰۰) ۶۷
شکل(۲-۴): سلول سه محوری با قابلیت اندازه‌گیری مکش به روش اسمزی (Delage و همکاران، ۱۹۸۷) ۶۸

شکل(۲-۵): دستگاه تحکیم یک بعدی با قابلیت کنترل مکش به روش اسمزی (Dineen و Burland، ۱۹۹۵) ۶۸
شکل(۲-۶): سیستم برای بکاربردن مکش با روش کنترل رطوبت محیطی (Romero، ۱۹۹۹) ۷۰
شکل(۲-۷): دستگاه تحکیم یک بعدی برای خاکهای درشت دانه با قابلیت کنترل مکش کل (Alonso و Oldecop، ۲۰۰۰) ۷۱
شکل(۲-۸): سلول سه محوری با قابلیت کنترل مکش با استفاده از روش انتقال محورها (Bishop و Donald، ۱۹۶۱) ۷۲
شکل(۲-۹): سیستم اندازه‌گیری تغییر شکلهای شعاعی با کمک فشارسنجهای تفاضلی (Tatsuoka، ۱۹۸۸) ۷۳
شکل(۲-۱۰): سلول سه محوری دو جداره برای آزمایش بر خاکهای غیر اشباع (Wheeler، ۱۹۸۶) ۷۴
شکل(۲-۱۱): سلول سه محوری با سیستم سرو-کنترل برای اندازه‌گیری میزان سیال ورودی یا خروجی از سلول (Qing و Jianqui، ۱۹۹۸) ۷۴
شکل(۲-۱۲): اندازه‌گیری تغییرات حجم هوای حفره‌ای در فشار اتمسفر در سلول سه محوری (Bishop و Henkel، ۱۹۶۲) ۷۵
شکل(۲-۱۳): نفوذپذیری سه محوری با اندازه‌گیری محلی تغییرشکلهای شعاعی (Huang و همکاران، ۱۹۹۵) ۷۶
شکل(۲-۱۴): سیستم پمپ و ذخیره حباب هوای نفوذی (Bishop و Donald، ۱۹۶۱) ۷۸
شکل(۲-۱۵): سیستم برای اندازه‌گیری حجم هوای نفوذی (Fredlund، ۱۹۷۵) ۷۸
شکل(۲-۱۶): نمای شماتیکی از RCTS در زمانی که با پیکره‌بندی متناسب با خاکهای اشباع مورد استفاده بود (a) نما از بالا (b) مقطع (Silvestri، ۱۹۹۱) ۷۹
شکل(۲-۱۷): شمای کلی دستگاه ستون تشدید-برش پیچشی با قابلیت کنترل مکش (Vassallo و همکاران، ۲۰۰۷) ۸۰
شکل(۲-۱۸): عکس سلول دستگاه ستون تشدید- برش پیچشی با قابلیت کنترل مکش (d'Onza، ۲۰۰۷) ۸۱
شکل(۲-۱۹): جزئیات پایه که دیسک سرامیکی بر روی آن قرار می‌گیرد (Mancuso و همکاران، ۲۰۰۲) ۸۳
شکل(۲-۲۰): قسمت A از پایه (d'Onza، ۲۰۰۷) ۸۳
شکل(۲-۲۱): موتور الکترومغناطیسی برای اعمال ممان (d'Onza، ۲۰۰۷) ۸۴
شکل(۲-۲۲): نمای ارائه کننده سیستم اندازه‌گیری تغییر شکل محوری و شعاعی (d'Onza، ۲۰۰۷) ۸۶
شکل(۲-۲۳): استوانه اندازه‌گیری تغییر شکل شعاعی (d'Onza، ۲۰۰۷) ۸۷
شکل(۲-۲۴): نمایی از سیستم اندازه‌گیری تغییرات درصد رطوبت (d'Onza، ۲۰۰۷) ۸۷
شکل(۲-۲۵): زنجیره ابزار کنترل و اندازه‌گیری فشارها و تغییرات حجم (d'Onza، ۲۰۰۷) ۹۰

شکل(۲-۲۶): زنجیره ابزار بکار رفته برای انجام آزمایش ستون تشدید (d'Onza، ۲۰۰۷) ۹۱
شکل(۲-۲۷): زنجیره ابزار بکار رفته برای انجام آزمایش برش پیچشی (d'Onza، ۲۰۰۷) ۹۲
شکل(۲-۲۸): حبابهای ریز کاویتاسیون (Marinho و de Sousa Pinto، ۱۹۹۷) ۹۶
شکل(۲-۲۹): تنسیومترهای با ظرفیت بالا معرفی شده در ادبیات فنی (Marinho و همکاران، ۲۰۰۸) ۹۸
شکل(۲-۳۰): تنسیومتر با ظرفیت بالا موجود در دانشگاه فدریکو دوم (Rojas و همکاران، ۲۰۰۸) ۹۹
شکل(۲-۳۱): پیکره‌بندی دایروی کرنش سنج بر روی دیافراگم (Acikel، ۲۰۰۹) ۹۹
شکل(۲-۳۲): سیستم اشباع تنسیومتر با ظرفیت بالا (نسخه اولیه) (Rojas و همکاران، ۲۰۰۸) ۱۰۱
شکل(۲-۳۳): سیستم اشباع ارتقاء یافته (Acikel و Mancuso، ۲۰۰۹) ۱۰۲
شکل(۲-۳۴): شمای کلی دستگاه سه محوری تناوبی با قابلیت کنترل مکش ۱۰۵
شکل(۲-۳۵): عکس دستگاه سه محوری تناوبی غیر اشباع با قابلیت کنترل مکش ۱۰۶
شکل(۲-۳۶): مبدل الکترو-پنوماتیکی Watson-Smith 101XA ۱۰۸
شکل(۲-۳۷): شکل و اندازه به میلی‌متر فشار سنج Druck PDCR 810 ۱۰۹
شکل(۲-۳۸): پیستون تنظیم فشار محوری ۱۰۹
شکل(۲-۳۹): سلول بار ۱۱۰
شکل(۲-۴۰): جزئیات پایه و کلاهک غیر اشباع که دیسک سرامیکی بر روی آن قرار می‌گیرد ۱۱۱
شکل(۲-۴۱): نمایی از پایه و کلاهک غیر اشباع ۱۱۱
شکل(۲-۴۲): جابجایی‌سنج GEFRAN PY2 (A=88mm، B=40mm و C=196mm) ۱۱۳
شکل(۲-۴۳): جابجایی‌سنج با دقت بالا (Gap Sensor) ۱۱۳
شکل(۲-۴۴): نمای ارائه کننده سیستم اندازه‌گیری تغییر شکل محوری و شعاعی ۱۱۴
شکل(۲-۴۵): استوانه اندازه‌گیری تغییر شکل شعاعی ۱۱۵
شکل(۲-۴۶): نمایی از سیستم اندازه‌گیری تغییرات درصد رطوبت ۱۱۵
شکل(۲-۴۷): فشار سنج تفاضلی (GE Druck, STX2100) ۱۱۶
شکل(۲-۴۸): پمپ پریستالتیک ۱۱۷
شکل(۲-۴۹): صفحه جلویی IDACS ۱۱۸
شکل(۲-۵۰): صفحه پشتی IDACS ۱۱۹
شکل(۲-۵۱): داخل جعبه IDACS ۱۱۹
شکل(۲-۵۲): زنجیره ابزار کنترل و اندازه‌گیری فشارها و تغییرات حجم ۱۲۰
شکل(۲-۵۳): نرم‌افزار نوشته شده برای کنترل دستگاه سه محوری سیکلی غیر اشباع و اشباع ۱۲۱

شکل(۳-۱): منحنی دانه‌بندی خاک کائولینیت زنوز ۱۲۵
شکل(۳-۲): منحنی تراکم پراکتور استاندارد خاک کائولینیت زنوز ۱۲۶
شکل(۳-۳): شکل کلی نتایج ستون تشدید (d'Onza، ۲۰۰۷) ۱۳۸
شکل(۳-۴): حلقه بدست آمده از آزمایش سه محوری تناوبی ۱۴۰
شکل(۴-۱): تعیین فشار آب داخل نمونه بعد از تراکم اولیه بوسیله تنسیومتر با ظرفیت بالا ۱۴۳
شکل(۴-۲): مسیر تنش آزمایش ZK1 ۱۴۶
شکل(۴-۳): مسیر تنش آزمایش ZK2 ۱۴۷
شکل(۴-۴): مسیر تنش آزمایش ZK3 ۱۴۸
شکل(۴-۵): مسیر تنش آزمایش ZK4 ۱۴۹
شکل(۴-۶): مسیر تنش آزمایش ZK5 ۱۴۹
شکل(۴-۷): تغییرات حجم ویژه آب در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK2 ۱۵۱
شکل(۴-۸): تغییرات حجم ویژه آب در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK3 ۱۵۱
شکل(۴-۹): تغییرات حجم ویژه آب در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK4 ۱۵۲
شکل(۴-۱۰): تغییرات حجم ویژه آب در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK5 ۱۵۲
شکل(۴-۱۱): تغییرات حجم ویژه در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK2 ۱۵۳
شکل(۴-۱۲): تغییرات حجم ویژه در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK3 ۱۵۴
شکل(۴-۱۳): تغییرات حجم ویژه در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK4 ۱۵۴
شکل(۴-۱۴): تغییرات حجم ویژه در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK5 ۱۵۵
شکل(۴-۱۵): تحولات سطح سیلان در پایان مرحله تعادل اولیه مستخرج از تفسیر داده‌های تغییر حجمی آزمایش ZK2 ۱۵۶
شکل(۴-۱۶): تحولات سطح سیلان در پایان مرحله تعادل اولیه مستخرج از تفسیر داده‌های تغییر حجمی آزمایش ZK3 ۱۵۷
شکل(۴-۱۷): تحولات سطح سیلان در پایان مرحله تعادل اولیه مستخرج از تفسیر داده‌های تغییر حجمی آزمایش ZK4 ۱۵۷
شکل(۴-۱۸): تحولات سطح سیلان در پایان مرحله تعادل اولیه مستخرج از تفسیر داده‌های تغییر حجمی آزمایش ZK5 ۱۵۸
شکل(۴-۱۹): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK1 ۱۵۹
شکل(۴-۲۰): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK2 ۱۵۹
شکل(۴-۲۱): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK3 ۱۶۰

شکل(۴-۲۲): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK4 ۱۶۰
شکل(۴-۲۳): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK5 ۱۶۱
شکل(۴-۲۴): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK1 ۱۶۱
شکل(۴-۲۵): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK2 ۱۶۲
شکل(۴-۲۶): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK3 ۱۶۲
شکل(۴-۲۷): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK4 ۱۶۳
شکل(۴-۲۸): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK5 ۱۶۳
شکل(۴-۲۹): سرعت موج برشی بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان و باربرداری همسان در مکش ثابت صفر در نمونه ZK1 ۱۶۵
شکل(۴-۳۰): سرعت موج برشی بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK2 ۱۶۶
شکل(۴-۳۱): سرعت موج برشی بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK3 ۱۶۶
شکل(۴-۳۲): سرعت موج برشی بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال، دو مرحله تر شدگی در تنش میانگین خالص ثابت ۳۵۰ کیلوپاسکال و بارگذاری همسان مجدد در مکش ثابت ۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK4 ۱۶۷
شکل(۴-۳۳): سرعت موج برشی بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری و باربرداری همسان در مکش ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK5 ۱۶۷
شکل(۴-۳۴): مدول برشی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان و باربرداری همسان در مکش ثابت صفر در نمونه ZK1 ۱۶۸
شکل(۴-۳۵): مدول برشی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK2 ۱۶۸
شکل(۴-۳۶): مدول برشی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK3 ۱۶۹
شکل(۴-۳۷): مدول برشی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال، دو مرحله تر شدگی در تنش میانگین خالص ثابت ۳۵۰ کیلوپاسکال و بارگذاری همسان مجدد در مکش ثابت ۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK4 ۱۶۹
شکل(۴-۳۸): مدول برشی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری و باربرداری همسان در مکش ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK5 ۱۷۰

شکل(۴-۳۹): نسبت میرایی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK2 ۱۷۲
شکل(۴-۴۰): نسبت میرایی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK3 ۱۷۲
شکل(۴-۴۱): نسبت میرایی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری همسان در مکش ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال، دو مرحله تر شدگی در تنش میانگین خالص ثابت ۳۵۰ کیلوپاسکال و بارگذاری همسان مجدد در مکش ثابت ۵۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK4 ۱۷۳
شکل(۴-۴۲): نسبت میرایی اولیه بر حسب تنش میانگین خالص، اندازه‌گیری شده در طی مرحله بارگذاری و باربرداری همسان در مکش ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال در نمونه ZK5 ۱۷۳
شکل(۴-۴۳): سرعت موج برشی بر حسب مکش، اندازه‌گیری شده در کل مسیر تنش در نمونه ZK4 ۱۷۵
شکل(۴-۴۴): سرعت موج برشی بر حسب مکش، اندازه‌گیری شده در کل مسیر تنش در نمونه ZK5 ۱۷۵
شکل(۴-۴۵): مدول برشی اولیه بر حسب مکش، اندازه‌گیری شده در کل مسیر تنش در نمونه ZK4 ۱۷۶
شکل(۴-۴۶): مدول برشی اولیه بر حسب مکش، اندازه‌گیری شده در کل مسیر تنش در نمونه ZK5 ۱۷۶
شکل(۴-۴۷): مسیر تنش آزمایش ZK6 ارائه شده در (a) صفحه تنش میانگین خالص: مکش (b) صفحه تنش میانگین خالص: تنش محوری ۱۸۰
شکل(۴-۴۸): مسیر تنش آزمایش ZK7 ارائه شده در (a) صفحه تنش میانگین خالص: مکش (b) صفحه تنش میانگین خالص: تنش محوری ۱۸۲
شکل(۴-۴۹): مسیر تنش آزمایش ZK8 ارائه شده در (a) صفحه تنش میانگین خالص: مکش (b) صفحه تنش میانگین خالص: تنش محوری ۱۸۳
شکل(۴-۵۰): تغییرات حجم ویژه آب در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK7 ۱۸۵
شکل(۴-۵۱): تغییرات حجم ویژه آب در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK8 ۱۸۶
شکل(۴-۵۲): تغییرات حجم ویژه در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK7 ۱۸۷
شکل(۴-۵۳): تغییرات حجم ویژه در حین به تعادل رسانی اولیه آزمایش ZK8 ۱۸۸
شکل(۴-۵۴): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK6 ۱۹۰
شکل(۴-۵۵): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK7 ۱۹۰
شکل(۴-۵۶): حجم ویژه آب در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK8 ۱۹۱
شکل(۴-۵۷): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK6 ۱۹۱
شکل(۴-۵۸): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK7 ۱۹۲
شکل(۴-۵۹): حجم ویژه در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برای آزمایش ZK8 ۱۹۲

شکل(۴-۶۰): سطح سیلان در فضای تنش میانگین خالص: تنش محوری: مکش (Alonso و همکاران، ۱۹۹۰) ۱۹۵
شکل(۴-۶۱): سطح سیلان در فضای تنش میانگین خالص: تنش محوری: مکش برای آزمایش ZK6 ۱۹۶
شکل(۴-۶۲): سطح سیلان در فضای تنش میانگین خالص: تنش محوری: مکش برای آزمایش ZK7 ۱۹۷
شکل(۴-۶۳): سطح سیلان در فضای تنش میانگین خالص: تنش محوری: مکش برای آزمایش ZK8 ۱۹۸
شکل(۴-۶۴): مدول یانگ برحسب کرنش محوری برای آزمایش ZK6 ۱۹۹
شکل(۴-۶۵): مدول یانگ برحسب کرنش محوری برای آزمایش ZK7 ۲۰۰
شکل(۴-۶۶): مدول یانگ برحسب کرنش محوری برای آزمایش ZK8 ۲۰۰
شکل(۴-۶۷): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای اول دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK6 ۲۰۲
شکل(۴-۶۸): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای سوم دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK6 ۲۰۲
شکل(۴-۶۹): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای پنجم دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK6 ۲۰۳
شکل(۴-۷۰): تغییرات منحنی ستون فقرات در سیکلهای مختلف برای آزمایش ZK6 ۲۰۳
شکل(۴-۷۱): مدول برشی برحسب کرنش برشی برای آزمایش ZK6 ۲۰۴
شکل(۴-۷۲): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای اول دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK7 ۲۰۵
شکل(۴-۷۳): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای سوم دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK7 ۲۰۶
شکل(۴-۷۴): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای پنجم دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK7 ۲۰۶
شکل(۴-۷۵): تغییرات منحنی ستون فقرات در سیکلهای مختلف برای آزمایش ZK7 ۲۰۷
شکل(۴-۷۶): مدول برشی برحسب کرنش برشی برای آزمایش ZK7 ۲۰۷
شکل(۴-۷۷): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای اول دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK8 ۲۰۸
شکل(۴-۷۸): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای سوم دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK8 ۲۰۹
شکل(۴-۷۹): حلقه‌های تنش برشی برحسب کرنش برشی در سیکلهای پنجم دامنه‌های مختلف برای آزمایش ZK8 ۲۰۹

شکل(۴-۸۰): تغییرات منحنی ستون فقرات در سیکلهای مختلف برای آزمایش ZK8 ۲۱۰
شکل(۴-۸۱): مدول برشی برحسب کرنش برشی برای آزمایش ZK8 ۲۱۰
شکل(۴-۸۲): نسبت میرایی برحسب کرنش برشی برای آزمایش ZK6 ۲۱۱
۲شکل(۴-۸۳): نسبت میرایی برحسب کرنش برشی برای آزمایش ZK7 ۲۱۱
شکل(۴-۸۴): نسبت میرایی برحسب کرنش برشی برای آزمایش ZK8 ۲۱۲
شکل(۴-۸۵): مدول برشی برحسب کرنش برشی برای سیکلهای اول آزمایشهای ZK6، ZK7 و ZK8 ۲۱۳
شکل(۴-۸۶): مدول برشی برحسب کرنش برشی برای سیکلهای سوم آزمایشهای ZK6، ZK7 و ZK8 ۲۱۳
شکل(۴-۸۷): مدول برشی برحسب کرنش برشی برای سیکلهای پنجم آزمایشهای ZK6، ZK7 و ZK8 ۲۱۴
شکل(۴-۸۸): نسبت مدول برشی به مدول برشی اولیه برحسب کرنش برشی برای سیکلهای اول آزمایشهای ZK6، ZK7 و ZK8 ۲۱۵
شکل(۴-۸۹): نسبت میرایی برحسب کرنش برشی برای سیکلهای اول آزمایشهای ZK6، ZK7 و ZK8 ۲۱۶
شکل(۴-۹۰): نسبت میرایی برحسب کرنش برشی برای سیکلهای سوم آزمایشهای ZK6، ZK7 و ZK8 ۲۱۶
شکل(۴-۹۱): نسبت میرایی برحسب کرنش برشی برای سیکلهای پنجم آزمایشهای ZK6، ZK7 و ZK8 ۲۱۷
شکل(۵-۱): مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل Mancuso و همکاران (۲۰۰۲) ۲۲۱
شکل(۵-۲): رابطه بین نسبت e/e_{sat} و متغیر قیدی ξ در مسیر بارگذاری همسان بکر در مکش ثابت ۲۲۳
شکل(۵-۳): تحولات منحنی سیلان در مسیر تنش آزمایش ZK4 در صفحه ξ:"p ۲۲۴
شکل(۵-۴): تحولات منحنی سیلان در مسیر تنش آزمایش ZK5 در صفحه ξ:"p ۲۲۴
شکل(۵-۵): مدول برشی اولیه اندازه‌گیری شده در مسیر تحکیم همسان در مکش ثابت برحسب تنش میانگین اسکلت ۲۲۵
شکل(۵-۶): مقایسه مدول برشی اولیه بدست آمده از آزمایش ZK1 با منحنی برازش یافته بر آن ۲۲۷
شکل(۵-۷): مقایسه مدول برشی اولیه بدست آمده از آزمایش ZK2 با مقادیر تخمین زده شده از رابطه‌ای مشابه رابطه مدول برشی اشباع برحسب تنش میانگین اسکلت ۲۲۸
شکل(۵-۸): مقایسه مدول برشی اولیه حاصل از آزمایش ZK2 با مقادیر تخمین زده شده از مدل عمومی معادله (۵-۵) ۲۲۹
شکل(۵-۹): مقایسه مدول برشی اولیه حاصل از آزمایش ZK3 با مقادیر تخمین زده شده از مدل عمومی معادله (۵-۵) ۲۳۰
شکل(۵-۱۰): مقایسه مدول برشی اولیه حاصل از آزمایش ZK4 با مقادیر تخمین زده شده از مدل عمومی معادله (۵-۵) ۲۳۰