بنام خدا
جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

رساله دکترای
مهندسی عمران- مهندسی زلزله :

بررسی مشخصات تغییرشکل دینامیکی مصالح مخلوط رس – سنگدانه

Dynamic deformation properties of aggregate-clay mixture

اکبر حسنی‌پور

استاد راهنما:
دکتر علی شفیعی

استاد مشاور:
دکتر محمد کاظم جعفری

۱۳۸۹

International Research Center of Earthquake Engineering and Seismology
(IIEES)

PhD Thesis
For the degree of doctor of philosophy in earthquake engineering

Entitled:

Dynamic deformation properties of aggregate-clay mixture

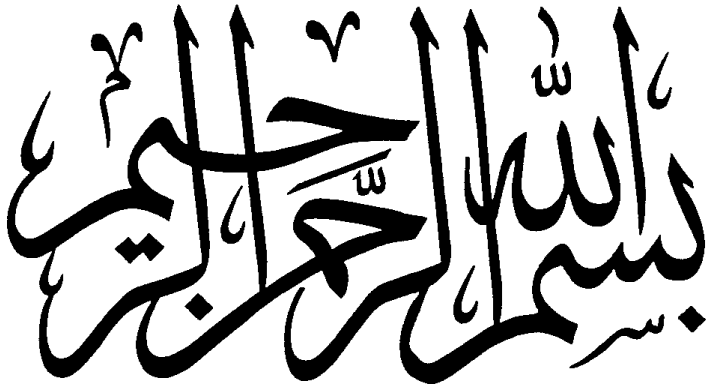
By:

Akbar Hassanipour

Supervisor:

Dr. A. Shafiee

۲۰۱۰


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

شهدای دوران دفاع مقدس

ارواح پدر و همسر عزیزم

مادر، همسر و فرزندان عزیزم

سپاسگزاری:

با سپاس از ایزد منان که مرا در تمام مراحل زندگی یاری داده است. در اینجا از زحمات جناب آقای دکتر شفیعی به عنوان استاد راهنما که در طول دوره تحصیل از راهنمایی ایشان بهره بردم و از جناب آقای دکتر جعفری به عنوان استاد مشاور که همواره یاری‌بخش اینجانب بودند سپاسگزارم.

از اساتید بزرگوارم آقایان دکتر آشتیانی، دکتر کمالیان، دکتر عسکری و دکتر داودی که در طول دوره تحصیل زحمات بسیاری متقبل شدند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از دوستان عزیزم دکتر مجتبی موسوی، مهندس جواد جلیلی که همواره اینجانب را یاری نموده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم و به روح دوست عزیزم مسعود میرابوطالبی درود و سلام می‌فرستم.

از آقایان آزادمنش، عسکری، هادوی، یوسفی و شیرازیان در آزمایشگاه خاک سپاسگزارم.

چکیده

مصالح مخلوط که طیف وسیعی از ترکیب انواع خاک شامل رس، سیلت، ماسه، شن و حتی قلوه سنگ را در بر می‌گیرد، در طبیعت به ویژه در رسوبات طبیعی و همچنین در سازه‌های ژئوتکنیکی به وفور یافت می‌شود. مطالعه رفتار مکانیکی رسهای مخلوط بدلیل وجود آنها در بسیاری از مناطق و همچنین کاربرد آن در پروژه‌های مهمی همچون هسته سدهای خاکی، یک نیاز کاربردی و ضروری مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. در سالهای اخیر رفتار رسهای مخلوط در بارگذاریهای متداول استاتیکی و دینامیکی تا حدودی بررسی شده است، ولی هنوز نیاز به تحقیقات بیشتر برای بررسی رفتار مکانیکی این مصالح وجود دارد. بمنظور بررسی رفتار خاکها تحت بارگذاری-های دینامیکی (مثلاً تحلیل پاسخ زمین در اثر زلزله) در روشهای مختلف به برخی از پارامترهای خاک که معمولاً تحت عنوان خواص تغییر شکل دینامیکی خاکها نامیده می‌شوند، نیاز می‌باشد. مدول برشی و نسبت میرایی از مهمترین این پارامترها می‌باشند که کاربرد وسیعی در تحلیلهای خطی معادل و غیرخطی در مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای دارند.

در تحقیق حاضر تاثیر پارامترهای مهم بر مدول برشی و نسبت میرایی مخلوطهای رس-سنگدانه بمنظور بررسی مشخصات تغییر شکل دینامیکی این مصالح بررسی شده است. تأثیر پارامترهایی همچون نسبت سنگدانه، نشانه خمیری بخش ریزدانه، فشار همه‌جانبه و تراکم نسبی اولیه بر مدول برشی و نسبت میرایی بررسی گردیده است. جهت انجام این تحقیق، نمونه هایی از رس خالص و ترکیب ۶۰٪ رس با ۴۰٪ سنگدانه، ۴۰٪ رس با ۶۰٪ سنگدانه و ۲۰٪ رس با ۸۰٪ سنگدانه با سه نوع رس مختلف (با نشانه خمیری کم، متوسط و زیاد) در تراکم‌های مختلف تهیه، و در تنش‌های تحکیمی ۱۰۰، ۳۰۰ و۵۰۰ کیلوپاسکال تحکیم و آزمایش شدند. جهت انجام آزمایشات از دستگاههای ستون تشدید و برش پیچشی تناوبی استفاده گردیده است.

در نهایت بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق مدلهای ریاضی برای تعیین مدول برشی حداکثر (G_{max}) بر حسب تخلخل، فشار همه‌جانبه و نسبت سنگدانه، مدول برشی تراز شده (G/G_{max}) بر حسب کرنش برشی، نشانه خمیری بخش ریزدانه، فشار همه‌جانبه و نسبت سنگدانه و نسبت میرایی (D) بر حسب کرنش برشی، نشانه خمیری بخش ریزدانه، کرنش برشی و نسبت سنگدانه ارائه شده است و در نتیجه منحنی‌های استاندارد برای مدول برشی تراز شده و نسبت میرایی در مخلوطهای رس – سنگدانه ارائه شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار الف

چکیده ب

فصل اول مقدمه، هدف و برنامه تحقیقات، محدوده تحقیق و ساختار رساله

۱-۱-مقدمه ۱

۱-۲- هدف و برنامه تحقِیقات ۵

۱-۳- محدوده تحقیق ۵

۱-۴- ساختار رساله ۶

فصل دوم مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱-مقدمه ۹

۲-۲- مطالعات انجام شده بر روی مصالح دانه ای و ریزدانه ۱۰

۲-۲-۱- خصوصیات تغییر شکل دینامیکی محیطهای چسبنده ۱۳

۲-۲-۲- بررسی خصوصیات تغییر شکل دینامیکی ماسه ۱۸

۲-۲-۳- بررسی خصوصیات تغییر شکل دینامیکی شن ۲۲

۲-۳- مطالعات انجام شده بر روی مصالح مخلوط چسبنده ۳۳

فصل سوم تجهیزات و وسایل آزمایشگاهی، مصالح ، روش آزمایش و آزمایش نفوذ پذیری

۲-۱-مقدمه ۶۱

۳-۲- دستگاههای آزمایش ۶۲

۳-۲-۱- دستگاه آزمایش ستون تشدید ۶۲

۳-۲-۲- دستگاه آزمایش برش پیچشی ۶۴

۳-۳- مصالح مورد استفاده ۶۶

۳-۴- روش انجام آزمایش ۷۰

۳-۴-۱- نمونه‌سازی ۷۰

۳-۴-۲- اشباع، تحکیم نمونه و بارگذاری نمونه‌ها ۷۵

۳-۴-۳- بارگذاری ۷۵

۳-۵- آزمایش‌های تراکم ۷۶

فصل چهارم بررسی مدول برشی حداکثر (G_{max}) و نسبت میرایی حداقل (D_{min}) در مخلوطهای رس-سنگدانه

۴-۱-مقدمه ۸۱
۴-۲- آزمایش‌های ستون تشدید ۸۴
۴-۳- بررسی تاثیر عوامل مختلف بر G_{max} و D_{min} ۸۶
۴-۳-۱- تاثیر نسبت سنگدانه بر G_{max} و D_{min} ۸۶
۴-۳-۲- تاثیر فشار همه‌جانبه بر G_{max} و D_{min} ۹۰
۴-۳-۳- تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه و تخلخل اولیه بر G_{max} و D_{min} ۹۴
۴-۴- تعیین رابطه مدول برشی حداکثر (G_{max}) ۹۷

فصل پنجم بررسی تغییرات مدول برشی (G، G/G_{max}) و نسبت میرایی (D) با کرنش برشی در مخلوطهای رس-سنگدانه

۵-۱-مقدمه ۱۰۱
۵-۲- تاثیر نسبت سنگدانه، فشار همه‌جانبه، نشانه خمیری بخش ریزدانه و تراکم اولیه بر G ۱۰۵
۵-۲-۱- تاثیر نسبت سنگدانه ۱۱۱
۵-۲-۲- تاثیر فشار همه‌جانبه ۱۱۱
۵-۲-۳- تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه ۱۱۱
۵-۲-۴- تاثیر تراکم اولیه ۱۱۱
۵-۳- تاثیر نسبت سنگدانه، فشار همه‌جانبه، نشانه خمیری بخش ریزدانه و تراکم اولیه بر G/G_{max} ۱۲۲
۵-۳-۱- تاثیر نسبت سنگدانه ۱۲۲
۵-۳-۲- تاثیر فشار همه‌جانبه ۱۳۰
۵-۳-۳- تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه ۱۳۰
۵-۳-۴- تاثیر تراکم اولیه ۱۳۰
۵-۴- تاثیر نسبت سنگدانه، فشار همه‌جانبه، نشانه خمیری بخش ریزدانه و تراکم اولی بر D ۱۳۹
۵-۴-۱- تاثیر نسبت سنگدانه ۱۳۹
۵-۴-۲- تاثیر فشار همه‌جانبه ۱۴۷
۵-۴-۳- تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه ۱۴۷
۵-۴-۴- تاثیر تراکم اولیه ۱۴۷
۵-۵- کرنش برشی آستانه، کرنش برشی زوال و کرنش برشی مرجع ۱۵۶
۵-۶- ارائه مدل برای مدول برشی تراز شده ۱۶۲
۵-۷- ارائه مدل برای نسبت میرایی ۱۶۸

۵-۷-۱- مدل نسبت میرایی با توجه به مدول برشی تراز شده ۱۶۸
۵-۷-۲- مدل نسبت میرایی با توجه به نشانه خمیری، نسبت سنگدانه و کرنش برشی ۱۶۸
۵-۷- بررسی تاثیر تعداد سیکل (N) بر G/G_{max} و D ۱۷۵

فصل ششم جمع‌بندی و نتیجه گیری

۷-۱- مقدمه ۱۷۷
۷-۲- نتایج تحقیق ۱۷۸
۷-۲- زمینه‌های ادامه تحقیق ۱۸۴

مراجع ۱۸۵
پیوست ۱۹۱
چکیده انگلیسی ۱۹۹

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): نمونه‌هایی از منحنی‌های مدول برشی حداکثر رس (Ishihara ۱۹۹۶) ۱۵

شکل (۲-۲): منحنی های مدول برشی و نسبت میرایی رس (Seed- Idriss ۱۹۷۰) ۱۶

شکل (۲-۳): منحنی های مدول برشی و نسبت میرایی رس ($PI \geq$ ٪ ۳۰) (سه نمودار میرایی برای حد پایین، میانگین و حد بالا می‌باشند)، (موسسه تحقیقاتی بندر و اسکله ژاپن ۱۹۹۷) ۱۶

شکل (۲-۴): منحنی‌های مدول برشی و نسبت میرایی رس (٪ ۳۰ > PI > ٪ ۹.۴) (سه نمودار میرایی برای حد پایین، میانگین و حد بالا می‌باشند)، موسسه تحقیقاتی بندر و اسکله ژاپن ۱۹۹۷) ۱۶

شکل (۲-۵): منحنی‌های مدول برشی و نسبت میرایی رس (٪ ۹.۴ > PI> NP) (سه نمودار میرایی برای حد پایین، میانگین و حد بالا می‌باشند)، (موسسه تحقیقاتی بندر و اسکله ژاپن ۱۹۹۷) ۱۷

شکل (۲-۶): منحنی‌های مدول برشی رس (Vucetic-Dobry ۱۹۹۱) ۱۷

شکل (۲-۷) : منحنی های نسبت میرایی رس ، (Vucetic-Dobry ۱۹۹۱) ۱۷

شکل (۲-۸): منحنی‌های مدول برشی و نسبت میرایی ماسه(سه نمودار مدول برشی تراز شده و میرایی برای حد پایین، میانگین و حد بالا می‌باشند)، (Seed- Idriss ۱۹۷۰) ۲۰

شکل (۲-۹): منحنی‌های مدول برشی و نسبت میرایی ماسه تویورا، (Kokusho ۱۹۸۰) ۲۰

شکل (۲-۱۰): نتایج بررسی تاثیر فشار همه جانبه بر مدول برشی (Laird-Stoke ۱۹۹۳) ۲۱

شکل (۲-۱۱): نتایج بررسی تاثیر فشار همه جانبه بر نسبت میرایی (Laird-Stoke ۱۹۹۳) ۲۱

شکل (۲-۱۲): نتایج بررسی تاثیر فشار همه جانبه بر مدول برشی و میرایی(Laird-Stoke ۱۹۹۳) ۲۲

شکل (۲-۱۳): منحنی های مدول برشی و نسبت میرایی شن (سه نمودار مدول برشی تراز شده برای حد پایین، میانگین و حد بالا می‌باشند)، (Seed و همکاران ۱۹۸۶) ۲۳

شکل (۲-۱۴): نمودار و مشخصات مصالح آزمایش شده (Hardin-Kalinski **۲۰۰۵**) ۲۴

شکل(۲-۱۵): نمودار دانه بندی مصالح و نتایج آزمایشها روی آنها (Hardin-Kalinski **۲۰۰۵**) ۲۴

شکل (۲-۱۶): نمودار دانه بندی مصالح و نتایج آزمایشها روی آنها (Hardin-Kalinski **۲۰۰۵**) ۲۵

شکل (۲-۱۷): نمودار دانه‌بندی مصالح و نتایج آزمایشها روی آنها (Hardin-Kalinski **۲۰۰۵**) ۲۵

شکل (۲-۱۸): نمودار دانه بندی مصالح و نتایج آزمایشها روی آنها (Hardin-Kalinski **۲۰۰۵**) ۲۶

شکل (۲-۱۹): نمودار دانه‌بندی مصالح و نتایج آزمایشها روی آنها،(Hardin-Kalinski **۲۰۰۵**) ۲۶

شکل (۲-۲۰): نمودار دانه بندی مصالح (.Rolins et al **۱۹۹۸**) ۲۹

شکل (۲-۲۱): نمودار دانه‌بندی مصالح (.Rolins et al **۱۹۹۸**) ۳۰

شکل (۲-۲۲): نتایج G/G_{max} در برابر γ (.Rolins et al **۱۹۹۸**) ۳۰

شکل (۲-۲۳) : نتایج G/G_{max} در برابر γ مصالح شنی حاصل از این تحقیق به ازاء تنشهای فشاری مختلف (.Rolins et al **۱۹۹۸**) ۳۱

شکل (۲-۲۴): نتایج G/G_{max} در برابر γ مصالح مخلوط شن - ماسه برای ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد شن (Rolins et al. ۱۹۹۸) ۳۱
شکل (۲-۲۵): مقایسه منحنی میانگین G/G_{max} در برابر γ مصالح شنی برای آزمایشهای زهکشی نشده روی نمونه های اشباع و آزمایشهای روی نمونه های خشک (Rolins et al. ۱۹۹۸) ۳۲
شکل (۲-۲۶) : نتایج D در برابر γ مصالح شنی حاصل از این تحقیق به ازاء تنشهای فشاری مختلف (Rolins et al. ۱۹۹۸) ۳۲
شکل (۲-۲۷) : نتایج میرایی بر حسب γ در مصالح شنی حاصل از ۸ تحقیق (Rolins et al. ۱۹۹۸) ۳۲
شکل (۲-۲۸): تغییرات مدول برشی حداکثر (G_{max}) بر حسب تغییرات فشار همه جانبه (Borden-Shao-Gupta ۱۹۹۶) ۳۵
شکل (۲-۲۹): تغییرات G/G_{max} بر حسب کرنش برشی (γ) (Borden-Shao-Gupta ۱۹۹۶) ۳۵
شکل (۲-۳۰): تغییرات D بر حسب کرنش برشی (γ) (Borden-Shao-Gupta ۱۹۹۶) ۳۵
شکل (۲-۳۱): تغییرات G/G_{max} بر حسب γ برای مصالح رسی سد کرخه (جعفری–شفیعی ۱۹۹۹) ۳۶
شکل (۲-۳۲) : تغییرات مدول برشی تراز شده (G/G_{max}) بر حسب γ برای مصالح مخلوط سد کرخه (جعفری – شفیعی ۱۹۹۹) ۳۷
شکل (۲-۳۳) : تغییرات نسبت میرایی (D) بر حسب γ برای مصالح مخلوط سد کرخه (جعفری– شفیعی ۱۹۹۹) ۳۷
شکل (۲-۳۴): نمودار دانه بندی مصالح سد مسجد سلیمان (جعفری– شفیعی ۱۹۹۹) ۳۸
شکل (۲-۳۵): تغییرات G/G_{max} بر حسب γ سد مسجد سلیمان (جعفری–شفیعی ۱۹۹۹) ۳۹
شکل (۲-۳۶): تغییرات نسبت میرایی بر حسب γ سد مسجد سلیمان (جعفری–شفیعی ۱۹۹۹) ۴۰
شکل (۲-۳۷): تغییرات مدول برشی بر حسب تعداد سیکلهای بارگذاری در کرنشهای برشی مختلف و در تنش همه جانبه اولیه ۱۰۰ KPa (شفیعی–جعفری ۱۳۸۵) ۴۲
شکل (۱-۳۸): تغییرات نسبت میرایی بر حسب تعداد سیکلهای بارگذاری در کرنشهای برشی مختلف و در تنش همه جانبه اولیه ۱۰۰ KPa (شفیعی–جعفری ۱۳۸۵) ۴۳
شکل (۱-۳۹): تاثیر تنش همه جانبه بر مدول برشی ، نشانه زوال و نسبت میرایی (شفیعی– جعفری ۱۳۸۵) ۴۴
شکل (۲-۴۰): تغییرات میرایی در مصالح مخلوط و رسی با کرنش برشی سد کرخه (میر محمد حسینی ۲۰۰۷) ۴۶
شکل (۲-۴۱): تغییرات مدول برشی در مصالح مخلوط و رسی با کرنش برشی سد کرخه (میر محمد حسینی ۲۰۰۷) ۴۶
شکل (۲-۴۲): تاثیر حجم دانه ها بر مدول برشی تراز شده در آزمایش کنترل تنش (N=10) ۴۸
شکل (۲-۴۳): تاثیر حجم دانه ها بر نسبت میرایی در آزمایش کنترل تنش (N=10) ۴۹
شکل (۲-۴۴): تغییرات مدول برشی برشی با توجه به نسبت سنگدانه (Suguru و همکاران ۲۰۰۸) ۵۲

شکل (۲-۴۵): تعییرات مدول برشی تراز شده و نسبت میرایی با توجه به نسبت سنگدانه (Suguru و همکاران ۲۰۰۸) ۵۲
شکل (۲-۴۶): تعییرات مدول برشی تراز شده و نسبت میرایی با توجه به فشار (Suguru و همکاران ۲۰۰۸) ۵۳
شکل (۲-۴۷): تعییرات مدول برشی تراز شده و نسبت میرایی با توجه به فرکانس (Suguru و همکاران ۲۰۰۸) ۵۳
شکل (۲-۴۸): تعییرات مدول برشی حداکثر تراز شده و نسبت میرایی بر حسب نشانه خمیری در کرنشهای برشی مختلف (Suguru و همکاران ۲۰۰۸) ۵۴
شکل (۲-۴۹): تعییرات مدول برشی حداکثر تراز شده و نسبت میرایی بر حسب نشانه خمیری در کرنشهای برشی مختلف (Suguru و همکاران ۲۰۰۸) ۵۴
شکل (۲-۵۰): مقایسه‌ای بین منحنی‌های بدست آمده از مدل با نتایج حاصل از آزمایشات (میدانی ۲۰۰۸) ۵۸
شکل (۲-۵۱): مقایسه‌ای بین منحنی‌های بدست آمده از مدل با نتایج حاصل از آزمایشات (میدانی ۲۰۰۸) ۵۸
شکل (۲-۵۲): مقایسه‌ای بین منحنی‌های بدست آمده از مدل با نتایج حاصل از آزمایشات (میدانی ۲۰۰۸) ۵۹
شکل (۲-۵۳): مقایسه‌ای بین منحنی‌های بدست آمده از مدل با نتایج حاصل از آزمایشات (میدانی ۲۰۰۸) ۵۹
شکل (۳-۱): نمای کلی دستگاه ستون تشدید پژوهشگاه ۶۳
شکل (۳-۲): تصویر کلی دستگاه برش پیچشی پژوهشگاه ۶۵
شکل (۳-۳): نمودار دیاگرام آزاد المان استوانه توخالی ۶۵
شکل (۳-۴): منحنی توزیع اندازه ذرات رس و سنگدانه ۶۸
شکل (۳-۵): تصاویری از سنگدانه و رس‌های مورد استفاده در این تحقیق ۶۹
شکل (۳-۶): عکس گرفته شده از نمونه رسی خالص (برای آزمایش ستون تشدید) ۷۱
شکل (۳-۷): عکس گرفته شده از نمونه رسی خالص (برای آزمایش برش پیچشی) ۷۱
شکل (۳-۸): عکس گرفته شده از نمونه حاوی ۶۰٪ رس (برای آزمایش ستون تشدید) ۷۲
شکل (۳-۹): عکس گرفته شده از نمونه نمونه حاوی ۶۰٪ رس (برای آزمایش برش پیچشی) ۷۲
شکل (۳-۱۰): عکس گرفته شده از نمونه حاوی ۴۰٪ رس (برای آزمایش ستون تشدید) ۷۳
شکل (۳-۱۱): عکس گرفته شده از نمونه حاوی ۴۰٪ رس (برای آزمایش برش پیچشی) ۷۳
شکل (۳-۱۲): عکس گرفته شده از نمونه حاوی ۲۰٪ رس (برای آزمایش ستون تشدید) ۷۴
شکل (۳-۱۳): عکس گرفته شده از نمونه حاوی ۲۰٪ رس (برای آزمایش برش پیچشی) ۷۴
شکل (۳-۱۴): تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر بر حسب درصد سنگدانه ۷۷

شکل (۳-۱۵): تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر در مقابل درصد رطوبت برای نمونه‌های با درصد سنگدانه متفاوت ۷۸
شکل (۳-۱۶): تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر در مقابل درصد رطوبت برای نمونه‌های با نشانه خمیری متفاوت ۷۹
شکل (۴-۱): تصاویری از نمونه های آزمایش شده توسط دستگاه ستون تشدید ۸۵
شکل (۴-۲): تاثیر نسبت سنگدانه بر مدول برشی حداکثر مصالح مخلوط و رسی ۸۷
شکل (۴-۳): تاثیر نسبت سنگدانه بر تخلخل نمونه‌های مخلوط و رسی ۸۸
شکل (۴-۴): تاثیر نسبت سنگدانه بر نسبت میرایی حداقل مصالح مخلوط و رسی ۸۹
شکل (۴-۵): تاثیر فشار همه‌جانبه بر مدول برشی حداکثر در مصالح مخلوط و رسی ۹۱
شکل (۴-۶): تعیین میزان تاثیر تنش همه‌جانبه با فرض n=۰/۵ بر G_{max} بر حسب نسبت سنگدانه ۹۲
شکل (۴-۷): تغییرات نسبت میرایی حداقل بر حسب نسبت سنگدانه در فشارهای همه‌جانبه مختلف ۹۳
شکل (۴-۸): تاثیر تخلخل بر مدول برشی حداکثر مصالح مخلوط و رسی ۹۵
شکل (۴-۹): تغییرات نسبت میرایی بر حسب تخلخل در مصالح مخلوط و رسی ۹۶
شکل (۴-۱۰): تغییرات $(G_{max}/P_a)/(\sigma_m/P_a)^{0.5}$ - Agg بر حسب F(e) ۹۸
شکل (۴-۱۱): مقادیر A بر حسب درصد سنگدانه ۹۹
شکل (۴-۱۲): مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده با رابطه پیشنهادی ۱۰۰
شکل (۵-۱): یک حلقه کامل تنش – کرنش ۱۰۳
شکل (۵-۲): منحنی بارگذاری تناوبی برای نمونه رس خالص در محدود رفتار الاستیک ۱۰۴
منحنی بارگذاری تناوبی برای نمونه حاوی ۴۰٪ درصد سنگدانه در محدود رفتار خمیری ۱۰۴
شکل (۵-۴): تاثیر نسبت سنگدانه بر تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=۳۰۰ kPa و RC=۹۵٪) ۱۰۶
شکل (۵-5): تاثیر نسبت سنگدانه بر تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=100 kPa و RC=۹۵٪) 107
شکل (۵-6): تاثیر نسبت سنگدانه بر تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=500 kPa و RC=۹۵٪) 108
شکل (۵-7): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های رسی خالص 110
شکل (۵-8): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰٪ سنگدانه 111
شکل (۵-9): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰٪ سنگدانه 112
شکل (۵-10): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰٪ سنگدانه 113

شکل (۵-11): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های رس خالص در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa (RC=۹۵٪) 114
شکل (۵-12): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa (RC=۹۵٪) 115
شکل (۵-13): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa (RC=۹۵٪) 116
شکل (۵-14): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa (RC=۹۵٪) 117
شکل (۵-15): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های رسی خالص در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa 118
شکل (۵-16): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa 119
شکل (۵-17): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa 120
شکل (۵-18): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa 121
شکل (۵-19): تغییرات مدول برشی تراز شده بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=۳۰۰ kPa و RC=۹۵٪) 124
شکل (۵-20): تغییرات مدول برشی تراز شده بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=۱۰۰ kPa و RC=۹۵٪) 125
شکل (۵-21): تغییرات مدول برشی تراز شده بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=۵۰۰ kPa و RC=۹۵٪) 126
شکل (۵-۲۲): مقایسه نتایج آزمایشات در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa و تراکم اولیه ۹۵٪ تراکم استاندارد با نمودارهای وستیک و دوبری و رولینز 127
شکل (۵-۲۳): سطح تغییرات مدول برشی تراز شده بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (kPa σ=۳۰۰، RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۱۲/۵) ۱۲۸
شکل (۵-۲۴): سطح تغییرات مدول برشی تراز شده بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (kPa σ=۳۰۰، RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۲۵) ۱۲۸
شکل (۵-۲۵): سطح تغییرات مدول برشی تراز شده بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (kPa σ=۳۰۰، RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۵۰) ۱۲۹
شکل (۵-۲۶): سطح تغییرات مدول برشی تراز شده بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (kPa σ=۳۰۰، RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۱۲/۵، ۲۵ و ۵۰) ۱۲۹
شکل (۵-۲۷): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های رسی خالص ۱۳۱

شکل (۵-۲۸): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰٪ سنگدانه ۱۳۱

شکل (۵-۲۹): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰٪ سنگدانه ۱۳۲

شکل (۵-۳۰): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰٪ سنگدانه ۱۳۲

شکل (۵-۳۱): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های رس خالص در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa ۱۳۳

شکل (۵-۳۲): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa ۱۳۴

شکل (۵-۳۳): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa ۱۳۵

شکل (۵-۳۴): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa ۱۳۶

شکل (۵-۳۵): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های رسی خالص در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۳۷

شکل (۵-۳۶): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۳۷

شکل (۵-۳۷): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۳۸

شکل (۵-۳۸): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات مدول برشی تراز شده در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۳۸

شکل (۵-۳۹): تغییرات نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=۳۰۰ kPa و RC=۹۵٪) ۱۴۱

شکل (۵-۴۰): تغییرات نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=۱۰۰ kPa و RC=۹۵٪) ۱۴۲

شکل (۵-۴۱): تغییرات نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی برای نمونه‌های رسی خالص و مخلوط (σ=۵۰۰ kPa و RC=۹۵٪) ۱۴۳

شکل (۵-۴۲): مقایسه نتایج آزمایشات در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa و تراکم اولیه ۹۵٪ تراکم استاندارد با نمودارهای وستیک و دوبری و رولینز ۱۴۴

شکل(۵-۴۳): سطح تغییرات نسبت میرایی بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (σ=۳۰۰ kPa، RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۱۲/۵) ۱۴۵

شکل(۵-۴۴): سطح تغییرات نسبت میرایی بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (σ=۳۰۰ kPa، ۱۴۵

RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۲۵)

شکل(۵-۴۵): سطح تغییرات نسبت میرایی بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (σ=۳۰۰ kPa، RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۵۰) ۱۴۶

شکل (۵-۴۶): سطح تغییرات نسبت میرایی بر حسب درصد سنگدانه و کرنش برشی (σ=۳۰۰ kPa، RC=۹۵٪ و نشانه خمیری بخش ریزدانه= ۱۲/۵، ۲۵ و ۵۰) ۱۴۶

شکل (۵-۴۷): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های رسی خالص ۱۴۸

شکل (۵-۴۸): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰٪ سنگدانه ۱۴۸

شکل (۵-۴۹): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰٪ سنگدانه ۱۴۹

شکل (۵-۵۰): تاثیر فشار همه‌جانبه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰٪ سنگدانه ۱۴۹

شکل (۵-۵۱): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر نسبت میرایی در نمونه‌های رس خالص در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و kPa ۱۵۰

شکل (۵-۵۲): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و kPa ۱۵۱

شکل (۵-۵۳): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و kPa ۱۵۲

شکل (۵-۵۴): تاثیر نشانه خمیری بخش ریزدانه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa، ۳۰۰ kPa و kPa ۱۵۳

شکل (۵-۵۵): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های رسی خالص در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۵۴

شکل (۵-۵۶): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۵۴

شکل (۵-۵۷): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۵۵

شکل (۵-۵۸): تاثیر تراکم نسبی اولیه بر تغییرات نسبت میرایی در نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa ۱۵۵

شکل (۵-۵۹): نمایش کرنشهای برشی آستانه، زوال و مرجع ۱۵۷

شکل (۵-۶۰): تاثیر نسبت سنگدانه بر کرنش برشی آستانه برای مصالح با نشانه خمیری بخش ریزدانه متفاوت ۱۵۸

شکل (۵-۶۱): تاثیر نسبت سنگدانه بر کرنش برشی زوال برای مصالح با نشانه خمیری بخش ریزدانه متفاوت ۱۵۸

شکل (۵-۶۲): تاثیر نسبت سنگدانه بر کرنش برشی مرجع برای مصالح با نشانه خمیری بخش ریزدانه متفاوت ۱۵۸
شکل (۵-۶۳): تاثیر فشار همه‌جانبه نسبت سنگدانه بر کرنش برشی آستانه ۱۵۹
شکل (۵-۶۴): تاثیر فشار همه‌جانبه نسبت سنگدانه بر کرنش برشی زوال ۱۶۰
شکل (۵-۶۵): تاثیر فشار همه‌جانبه نسبت سنگدانه بر کرنش برشی مرجع ۱۶۱

شکل (۵-۶۶) مقایسه نتایج آزمایشات و مدل برای نمونه‌های رسی خالص در فشار همه‌جانبه kPa ۳۰۰ ۱۶۴
شکل (۵-۶۷) مقایسه نتایج آزمایشات و مدل برای نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه kPa ۳۰۰ ۱۶۵

شکل (۵-۶۸) مقایسه نتایج آزمایشات و مدل برای نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه kPa ۳۰۰ ۱۶۶
شکل (۵-۶۹) مقایسه نتایج آزمایشات و مدل برای نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه kPa ۳۰۰ ۱۶۷
شکل (۵-۷۰): نسبت میرایی بر حسب مدول برشی تراز شده (مدل اول) ۱۷۰
شکل (۵-۷۱): مقایسه نتایج نسبت میرایی حاصل از مدل و آزمایشات (مدل دوم) ۱۷۰
شکل (۵-۷۲) مقایسه نتایج آزمایشات و مدلهای میرایی برای نمونه‌های رسی خالص در فشار همه-جانبه kPa ۳۰۰ ۱۷۱
شکل (۵-۷۳) مقایسه نتایج آزمایشات و مدل برای نمونه‌های مخلوط حاوی ۴۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه kPa ۳۰۰ ۱۷۲
شکل (۵-۷۴) مقایسه نتایج آزمایشات و مدل برای نمونه‌های مخلوط حاوی ۶۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه kPa ۳۰۰ ۱۷۳
شکل (۵-۷۵) مقایسه نتایج آزمایشات و مدل برای نمونه‌های مخلوط حاوی ۸۰ درصد سنگدانه در فشار همه‌جانبه kPa ۳۰۰ ۱۷۴
شکل (۵-۷۶) تاثیر تعداد سیکلها بر مدل برشی تراز شده برای مصالح رس چاق-سنگدانه (σ=۳۰۰ kPa و DR=٪۹۵) ۱۷۶
شکل (۵-۷۷) تاثیر تعداد سیکلها ب نشانه زوال ۱۷۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱): خلاصه برخی از منحنی های استاندارد شده مدول دینامیکی خاک (**Bardet et al.**) ۱۰

جدول (۲-۲): خلاصه نتایج برخی از آزمایشها (**Bardet et al. 2001**) ۱۱

جدول (۲-۳) : نمونه هایی از روابط مدول برشی حداکثر (**Ishihara ۱۹۹۶**) 15

جدول (۲-۴): خلاصه خصوصیات مکانیکی خاکهای شنی در ۱۵ تحقیق به کمک آزمایشهای سه محوری (Rolins et al. **۱۹۹۸**) ۲۸

جدول (۲-۵): خلاصه لوازم و شرایط آزمایش در ۱۵ تحقیق به کمک آزمایشهای سه محوری (Rolins et al. **۱۹۹۸**) ۲۹

جدول (۲-۶): مشخصات نمونه‌های آزمایشی ،فشار همه جانبه و مدول برشی حداکثر و حداقل نسبت میرایی (Borden-Shao-Gupta **۱۹۹۶**) ۳۴

جدول (۲-۷): مشخصات (Borden-Shao-Gupta **۱۹۹۶**) ۳۴

جدول (2-8): مقادیر a_G، b_G، a_h و b_h برای مقادیر مختلف کرنش (Suguru et al. ۲۰۰۸) ۵۱

جدول (۳-۱): مشخصات کلی دستگاه ستون تشدید ۶۲

جدول (۳-۲): مشخصات کلی دستگاه برش پیچشی دینامیکی ساخت شرکت GCTS ۶۴

جدول (۳-۳): نشانه خمیری و وزن مخصوص ذرات خاک‌های رسی ۶۷

جدول (۳-۴): مشخصات نمونه‌ها، قبل از آزمایش ۷۷

جدول (۴-۱) ثابتهای برخی معادلات تجربی برای مدول برشی حداکثر با رابطه $G_{\max} = A\frac{(B-e)^2\sigma_m'^{0.5}}{1+e}$ ۸۲

جدول (۴-۲): نسبت تخلخل نمونه‌ها در انتهای تحکیم ۸۴

جدول (۴-۳): مقادیر A برای مصالح مختلف ۹۹

جدول (۵-۱): لیست آزمایش های برش پیچشی تناوبی انجام شده در تحقیق حاضر ۱۰۲

جدول (۵-۲): مقادیر کرنش برشی آستانه، زوال و مرجع ۱۵۷

جدول (۵-۳): روابط رایج برای تعریف مدول برشی بر اساس کرنش برشی ۱۶۵

فصل اول

مقدمه، هدف و برنامه تحقیقات، محدوده تحقیق و ساختار رساله

۱-۱- مقدمه

مصالح خاکی (رس، سیلت، ماسه، شن) در طبیعت و سازه‌های خاکی به صورت خالص و یا مخلوط وجود دارند. مخلوط‌های رس-سنگدانه نمونه‌ای از مصالح مخلوط هستند که در طبیعت به وفور یافت می‌شوند و همچنین از آنها بدلایل مختلف از قبیل مسائل اقتصادی در بسیاری از پروژه‌ها مانند هسته سدهای خاکی استفاده می‌شود. بنابراین شناخت خصوصیات این مصالح در بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی و مدلسازی رفتار آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعه تاریخچه تحقیقات در خصوص بررسی رفتار مصالح مخلوط نشان می‌دهد که در شرایط بارگذاری استاتیکی تا کنون تحقیقات زیادی انجام گردیده است ولی در خصوص رفتار این مصالح در شرایط بارگذاری دینامیکی تحقیقات کمی انجام گردیده است. با توجه به تمایل روزافزون به استفاده از رسهای مخلوط به عنوان هسته سدهای خاکی در ایران (بعنوان مثال می‌توان به مصالح هسته سدهای کرخه و گتوند اشاره نمود) شناخت جنبه‌های مختلف رفتار مکانیکی این مصالح از اهمیت روزافزونی برخورداراست.

برخی خصوصیات مصالح مخلوط نظیر نفوذپذیری (شفیعی ۲۰۰۸، Chapuis ۱۹۹۰، Abeele ۱۹۸۶، Lundgren ۱۹۸۱، Pandian ۱۹۹۵)، مقاومت برشی استاتیکی (Patwardhan et al. ۱۹۷۰، Holtz & Willard ۱۹۵۶، Irfan and Tang ۱۹۹۳، Vallejo- Zhou ۱۹۹۴، جعفری-شفیعی ۲۰۰۴)، رفتار تناوبی (جعفری و شفیعی ۱۹۹۸ و ۲۰۰۴، Muir Wood-Kumar ۲۰۰۰، Kimura et al. ۱۹۹۴، Kuwano et al. 1995، میر محمد حسینی ۲۰۰۴)، رفتار پس تناوبی (سلطانی‌جیقه-سروش ۲۰۰۷) و بررسی پایداری لرزه‌ای سدهای خاکی متشکل از این مصالح (شفیعی ۲۰۰۸، شفیعی و همکاران ۲۰۰۸) مطالعه گردیده است. ولی در خصوص پارامترهای تغییر شکل دینامیکی این مصالح یعنی مدول برشی و نسبت میرایی در کرنشهای کوچک و بزرگ کار منسجم و کاملی انجام نشده و بررسی این موضوع یکی از کمبودهای موجود در خصوص شناخت رفتار دینامیکی این مصالح را برطرف می‌کند.

خاک در حالت کلی یک محیط سه فازی متشکل از دانه‌های خاک، آب و هوا است. این محیط چند فازی، یک محیط ناپیوسته را تشکیل می‌دهد ولی از آنجا که معمولاً گستره‌ای که در خاک‌ها تحت اثر تنش قرار می‌گیرد نسبت به محدوده بارگذاری بسیار بزرگ است، کل خاک را می‌توان به صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفت.