بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه بوعلی سینا

دانشکده مهندسی

گروه عمران

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران

گرایش مکانیک خاک و پی

مطالعه تاثیر نانورس‌ها بر خصوصیات رفتاری خاک‌های رمبنده

استاد راهنما:

پروفسور وحید رضا اوحدی

پژوهشگر:

حامد بخشعلی‌پور

پاییز ۸۹

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانس ها و یا سخنرانی ها، باید نام دانشگاه بوعلی (یا استاد یا اساتید راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر ماخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است،

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه را به

پدر و مادر عزیزم

تقدیم می‌کنم.

تشکر و قدردانی

" آنجا که سخن در تجلی آرمان‌ها و امیدهای آدمی در می‌ماند، آنجا که احساس آزادگی به انسان دست می‌دهد و ستایش‌ها، پرس و جوها و ژرف‌نگری‌ها آغاز می‌شود، آنجا را می‌توان اقلیم هنر و علم نام نهاد."

منت ایزد دانایی را که عزت و ذلت آدمی بدست اوست.

بر خود لازم می‌دانم از تمامی عزیزانی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم. همچنین در این مجال از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی جناب آقای دکتر وحیدرضا اوحدی در راستای انجام این پروژه، تشکر و قدردانی نموده و برای ایشان آرزوی سلامتی دارم.

از آقایان دکتر محمد ملکی و دکتر عباس قدیمی که بعنوان اساتید ممتحن و آقای دکتر رضایی که بعنوان ناظر تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع بنده شرکت نموده‌اند، بسیار سپاسگزارم. همچنین از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو که با حمایت مالی امکان انجام مناسب‌تر و عمیق‌تر این تحقیق را فراهم کردند، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

از دوستان عزیزم بخصوص سرکار خانم مهندس آهو قلندری و آقایان مهندس محمد خلج، مهندس محمد جعفری، مهندس مهرداد رنگ‌چی کردستانی، مهندس علی‌رضا زمان، مهندس آروین طلایی، مهندس مرتضی دیرانلو و مهندس صلاح‌الدین حمیدی که همکاری صمیمانه‌ای با بنده داشته‌اند، تقدیر و تشکر نموده و برای ایشان آرزوی توفیق روز افزون دارم.

از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و نیز شرکت آب منطقه‌ای استان همدان بواسطه حمایت مالی بخشی از مواد و مصالح پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌نمایم.

دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان:

مطالعه تاثیر نانورس‌ها بر خصوصیات رفتاری خاک‌های رمبنده

نام نویسنده: حامد بخشعلی‌پور

نام استاد/اساتید راهنما: پروفسور وحیدرضا اوحدی

نام استاد/اساتید مشاور:

دانشکده : مهندسی	**گروه آموزشی: مهندسی عمران**	
رشته تحصیلی: مهندسی عمران-عمران	**گرایش تحصیلی: مکانیک خاک و پی**	**مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد**
تاریخ تصویب: ۱۳۸۷/۶/۳۱	**تاریخ دفاع: ۱۳۸۷/۷/۱۴**	**تعداد صفحات: ۱۴۷**

چکیده:

در طی سالیان گذشته گزارش‌های متعددی در رابطه با وقوع نشست‌های ناگهانی و گسترده خاک در نقاط مختلف دنیا که در پی اشباع شدن خاک‌های دانه‌ای با دانسیته کم صورت می‌گرفت، ارائه شده‌است. در واقع این خاک‌ها که تحت عنوان خاک‌های رمبنده شناخته می‌شوند در محل ساخت سدها، نیروگاه‌ها و همچنین زمین‌های کشاورزی با تغییرات سطح آب زیر زمینی و تغییر درجه اشباع خاک، نشست‌های قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. کشور ایران هم بدلیل داشتن شرایط آب و هوایی خشک و بیابانی در قسمتی از پهنه خود دارای خاک رمبنده در این مناطق است. بنا به اهمیت مساله و خسارت‌های فراوان بوجود آمده در اثر نشست این خاک‌ها، مطالعات فروانی در زمینه پارامترهای موثر بر فرآیند رمبندگی خاک انجام شده است تا بتوان نگرش صحیحی از رفتار خاک در طی این فرآیند و میزان نشست‌های بوجود آمده داشت. با توجه به حضور کانی‌های رسی در خاک‌های رمبنده طبیعی و عدم بررسی جامع در رابطه با تاثیر این بخش همچون اندازه ذرات، و خصوصیات خمیری بخش رسی بر رفتار رمبندگی خاک‌ها، در این پژوهش اقدام به مطالعه این موارد شد. برای این منظور نمونه‌هایی حاوی ماسه سیلیسی با دانه‌بندی معین و کنترل شده به همراه بخش رسی که در این تحقیق شامل بنتونیت طبیعی، نانورس صنعتی Closite®20A و بنتونیت آسیاب شده است، ساخته شد. در واقع اندازه ذرات بنتونیت طبیعی با استفاده از دستگاه آسیاب سیاره‌ای به مقیاس نانو کاهش داده شد. آزمایش ادومتر ساده بر روی نمونه‌ها به منظور سنجش میزان رمبندگی انجام شد که نتایج نشان دهنده آن است که در رفتار خاک ماسه‌ای حاوی بخش رسی، پارامتر حاکم بر رفتار رمبندگی خاک شاخص خمیری بخش رسی است. ضمن آن‌که اندازه ذرات بخش رسی نیز در مواردی همچون میزان نشست خشک خاک تاثیرگذار است. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که به ازای یک درصد مشخص رس در نمونه‌های رمبنده ماسه‌ای، یک حداکثر نشانه رمبندگی قابل مشاهده است. با کاهش اندازه ذرات بنتونیت، محل قله پیک رمبندگی بر اساس درصد رس، از ۲۰٪ به ۱۰٪ رس کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در صورتی‌که نمونه‌های ماسه‌ای در قالب اودومتربا آب مقطر اشباع شوند بین نشست رمبندگی نمونه‌های ماسه رس‌دار حاوی کربنات و فاقد کربنات تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: خاک رمبنده، نانورس، بنتونیت، آسیاب سیاره‌ای، کربنات

فهرست مطالب

فصل اول

۱- مقدمه‌ای بر خاک‌های رمبنده ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- آشنایی با خاک‌های رمبنده ۳

۱-۳- مکانیزم‌های تر شدن خاک ۶

۱-۴- مکانیزم‌های فرو ریزش خاک‌های رمبنده ۸

۱-۵- رفتار خاک رمبنده در شرایط تر شدن کامل در برابر تر شدن جزئی ۱۲

۱-۶- روش‌های شناسایی خاک‌های رمبنده ۱۴

۱-۶-۱- روش‌های صحرایی ۱۴

۱-۶-۱-۱- روش آزمایش درون چاله ۱۵

۱-۶-۱-۲- روش بارگذاری اصلاح شده ۱۷

۱-۶-۲- روش‌های آزمایشگاهی ۱۹

۱-۶-۲-۱- آزمایش تحکیم مضاعف ۱۹

۱-۶-۲-۲- آزمایش استاندارد ASTM D5333 ..... ۲۰

۱-۷- خصوصیات خاک‌های رمبنده ۲۲

۱-۷-۱- مشخصات عمومی لس‌ها ۲۲

۱-۷-۲- ترکیب دانه‌بندی لس‌ها ۲۳

۱-۷-۳- تاثیر دانسیته نسبی و میزان بخش رسی بر رمبندگی خاک‌ها ۲۵

۱-۷-۳-۱- تاثیر دانسیته نسبی بر رمبندگی خاک‌ها ۲۵

۱-۷-۳-۲- تاثیر میزان بخش رسی خاک بر رمبندگی ۲۶

۱-۷-۴- تاثیر درصد رطوبت تراکمی و تر و خشک شدن سیکلی روی رفتار خاک رمبنده ۲۷

۱-۷-۴-۱- تاثیر درصد رطوبت تراکمی روی رفتار خاک رمبنده ۲۷

۱-۷-۴-۲- تاثیر تر و خشک شدن سیکلی روی رفتار خاک رمبنده ۲۹
۱-۷-۵- تاثیر نسبت منافذ در پتانسیل رمبندگی خاک‌ها ۳۳
۱-۷-۶- تاثیر حضور نمک‌های کربناتی یا سولفاتی در خاک و pH آب حفره‌ای بر قابلیت رمبندگی ۳۶
۱-۷-۶-۱- تاثیر حضور نمک‌های کربناتی یا سولفاتی در خاک بر قابلیت رمبندگی ۳۶
۱-۷-۶-۲- تاثیر pH آب حفره‌ای بر قابلیت رمبندگی ۳۹
۱-۷-۶-۳- تاثیر رژیم‌های pH مختلف بر قابلیت تحکیم‌پذیری بنتونیت ۴۰
۱-۷-۷- تاثیر دانه‌بندی خاک روی پتانسیل رمبندگی ۴۲
۱-۷-۸- تاثیر کرنش برشی بر نشست رمبندگی خاک ۴۵
۱-۸- روش‌های اصلاح خاک‌های رمبنده ۴۸
۱-۹- مروری بر انواع ابزار و پارامترهای موثر بر فرآیند آسیاب ۵۰
۱-۹-۱- انواع آسیاب مورد استفاده جهت تولید پودر ۵۱
۱-۹-۱-۱- آسیاب‌های ارتعاشی یا لرزشی ۵۱
۱-۹-۱-۲- آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای ۵۲
۱-۹-۱-۳- آسیاب شافتی ۵۳
۱-۹-۱-۴- آسیاب‌های صنعتی ۵۳
۱-۹-۲- عوامل موثر بر فرآیند آسیاب مکانیکی ۵۳
۱-۹-۲-۱- ماده اولیه ۵۴
۱-۹-۲-۲- نوع آسیاب ۵۴
۱-۹-۲-۳- محفظه آسیاب ۵۴
۱-۹-۲-۴- سرعت آسیاب ۵۵
۱-۹-۲-۵- زمان آسیاب ۵۵
۱-۹-۲-۶- گلوله‌های آسیاب ۵۶

۱-۹-۲-۷- نسبت وزنی گلوله به پودر ۵۶
۱-۹-۲-۸- فضای اشغال شده توسط پودر و گلوله در محفظه ۵۷
۱-۱۰- جمع‌بندی ۵۷

فصل دوم

۲- مواد و روش‌های انجام آزمایش ۵۹
۲-۱- مقدمه ۵۹
۲-۲- انتخاب خاک جهت انجام مطالعات ۵۹
۲-۲-۱- بخش ماسه‌ای **خاک** ۶۰
۲-۲-۲- بخش رسی خاک ۶۱
۲-۲-۲-۱- بنتونیت ۶۱
۲-۲-۲-۲- Closite® 20A (نانورس صنعتی) ۶۳
۲-۲-۲-۳- بنتونیت آسیاب شده (نانورس طبیعی) ۶۴
۲-۳- روش انجام آزمایش ۶۷
۲-۳-۱- روش ساخت نمونه‌ها ۶۷
۲-۳-۲- روش انجام آزمایش ادومتر ساده جهت تعیین شاخص رمبندگی ۷۰
۲-۳-۳- روش محاسبه نشست نمونه‌ها ۷۲
۲-۳-۴- روش بررسی تاثیر کربنات موجود در بخش رسی بر شاخص رمبندگی ۷۴
۲-۳-۵- روش بررسی تاثیر حذف لای موجود در نانورس طبیعی بر شاخص رمبندگی ۷۵
۲-۳-۶- روش بررسی تاثیر pH آب حفره‌ای بر شاخص رمبندگی ۷۵

فصل سوم

۳- بحث و بررسی نتایج مطالعات آزمایشگاهی ۷۷
۳-۱- مقدمه ۷۷
۳-۲- انجام آزمایش رمبندگی بر روی خاک حاوی بنتونیت طبیعی ۷۷

۳-۲-۱- بررسی تاثیر درصدهای مختلف بنتونیت در شاخص رمبندگی خاک ماسه‌ای ۷۷
۳-۲-۲- بررسی اثر دانسیته خشک اولیه بر شاخص رمبندگی ۸۱
۳-۳- انجام آزمایش رمبندگی بر روی خاک حاوی نانورس صنعتی (Closite® 20A) با هدف بررسی تاثیر حضور فیزیکی بخش رسی در میزان رمبندگی خاک ماسه‌ای ۸۴
۳-۳-۱- بررسی تاثیر درصدهای مختلف نانورس صنعتی در شاخص رمبندگی خاک ماسه‌ای ۸۵
۳-۳-۲- بررسی اثر دانسیته خشک اولیه بر شاخص رمبندگی ۸۹
۳-۳-۳- بررسی تاثیر سربارهای مختلف در میزان رمبندگی ۹۳
۳-۴- انجام آزمایش رمبندگی بر روی خاک حاوی نانورس طبیعی (بنتونیت آسیاب شده) با هدف بررسی تاثیر اندازه ذرات بخش رسی بر میزان رمبندگی خاک ماسه‌ای ۱۰۰
۳-۴-۱- بررسی تاثیر درصدهای مختلف نانورس طبیعی در شاخص رمبندگی خاک ماسه‌ای ... ۱۰۰
۳-۴-۲- بررسی اثر دانسیته خشک اولیه بر شاخص رمبندگی ۱۰۴
۳-۴-۳- بررسی تاثیر سربارهای مختلف در میزان رمبندگی ۱۰۹
۳-۵- بررسی تاثیر حضور کربنات کلسیم موجود در بخش رسی بر شاخص رمبندگی خاک ۱۱۳
۳-۶- بررسی تاثیر حضور سیلت در بخش رسی بر شاخص رمبندگی خاک ۱۱۵
۳-۷- بررسی تاثیر خصوصیات مایع منفذی بر رفتار رمبندگی خاک ۱۱۷
۳-۸- جمع‌بندی ۱۲۰

فصل چهارم

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۱
مراجع ۱۲۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: ساختار تئوریکی مونت موریلونیت (Uddin, 2008)..... ۲

شکل ۱-۲: توزیع خاک‌های رمبنده در ایران ۶

شکل ۱-۳: مکانیزم وقوع پدیده موئینگی در خاک‌ها (Waltham, 1982)..... ۹

شکل ۱-۴: منحنی مشخصه آب – خاک (Houston et al., 2001) ۱۰

شکل ۱-۵: طرح شماتیک آرایش دانه‌های ماسه و سیلت (Dudley, 1970) ۱۰

شکل ۱-۶: پیوند رسی دانه‌های ماسه‌ای (Waltham, 1982) ۱۱

شکل ۱-۷: احاطه شدن دانه‌ای ماسه‌ای بوسیله ذرات سیلت و رس (Waltham, 1982) ۱۱

شکل ۱-۸: نمودار شماتیک واکنش خاک رمبنده به تر شدن (Houston et al., 2001) ۱۳

شکل ۱-۹: منحنی رمبندگی جزئی در مقابل تر شدن جزئی برای سه نمونه خاک (Houston et al., 2001) ۱۴

شکل ۱-۱۰: آزمایش رمبندگی درون چاله (Houston et al., 1995)..... ۱۶

شکل ۱-۱۱: طرح شماتیک آزمایش در محل خاک‌های رمبنده و قرار گیری جعبه‌ها روی صفحه بتنی (Houston et al., 2001)..... ۱۸

شکل ۱-۱۲: رفتار خاک رمبنده در طی آزمایش تحکیم مضاعف (Houston et al., 1988)..... ۲۰

شکل ۱-۱۳: رفتار خاک رمبنده در طی آزمایش ASTM D5333 ..... ۲۱

شکل ۱-۱۴: منحنی دانه‌بندی لس بدست آمده از حوزه رودخانه میسوری (Clevenger, 1959) ۲۴

شکل ۱-۱۵: منحنی دانه‌بندی لس بدست آمده از لانژو در چین (Derbyshire and Mellors, 1988) ۲۴

شکل ۱-۱۶: تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر دانسیته نسبی (Abbeche et al., 2007)..... ۲۵

شکل ۱-۱۷: تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر مقدار رس خاک (Abbeche et al., 2007)..... ۲۶

شکل ۱-۱۸: رفتار رمبندگی نمونه‌های متراکم شده (Rao and Revanasiddappa, 2004) ۲۸

شکل ۱-۱۹: رفتار رمبندگی نمونه‌های سری ۱ در دوحالت متراکم و بعد از اعمال سیکل (Rao and Revanasiddappa, 2004)..... ۳۰

شکل ۱- ۲۰: رفتار رمبندگی نمونه‌های سری ۲ در دوحالت متراکم و بعد از اعمال سیکل (Rao and Revanasiddappa, 2004) ۳۱

شکل ۱-۲۱: رفتار رمبندگی نمونه‌های سری ۳ در دوحالت متراکم و بعد از اعمال سیکل (Rao and Revanasiddappa, 2004) ۳۲

شکل ۱-۲۲: نمونه خاک رمبنده متشکل از خاک و ذرات پلی‌استایرن (Medero et al., 2005) ۳۳

شکل ۱-۲۳: پتانسیل رمبندگی تحت سربار مختلف برای خاک با نسبت منافذ ۰/۶ (Medero et al., 2005) ۳۴

شکل ۱-۲۴: پتانسیل رمبندگی تحت سربار مختلف برای خاک با نسبت منافذ ۱/۳ (Medero et al., 2005) ۳۵

شکل ۱-۲۵: افزایش قابلیت رمبندگی ماسه ناشی از حضور سولفات سدیم (Ouhadi and Goodarzi, 2005) ۳۷

شکل ۱-۲۶: افزایش اندک قابلیت رمبندگی ماسه ناشی از حضور کربنات کلسیم (Ouhadi and Goodarzi, 2005) ۳۷

شکل ۱-۲۷: افزایش قابلیت رمبندگی ماسه ناشی از حضور نمک کربنات سدیم (Ouhadi and Goodarzi, 2005) ۳۸

شکل ۱-۲۸: مقایسه تغییرات پتانسیل رمبندگی ماسه ناشی از تغییر مشخصات شیمیایی مایع منفذی و انحلال نمک‌های کربناتی نامحلول (Ouhadi and Goodarzi, 2005)..... ۳۹

شکل۱-۲۹: اثر pH آب حفره‌ای بر تحکیم‌پذیری خاک بنتونیت در غیاب آلاینده‌های فلزی سنگین (Ouhadi et al., 2006) ۴۱

شکل ۱-۳۰: منحنی توزیع دانه‌بندی اجزا تشکیل دهنده خاک (Sohby et al., 1987) ۴۲

شکل ۱-۳۱: تاثیر نسبی درصدهای مختلف سیلت و ماسه بر رمبندگی خاک (Sohby et al., 1987) .. ۴۳

شکل ۱-۳۲: رمبندگی خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی ناشی از اشبا ع شدن خاک تحت سربارهای مختلف (Sohby et al., 1987)..... ۴۴

شکل ۱-۳۳: تاثیر اندازه ذرات در میزان رمبندگی خاک (Sohby et al., 1987) ۴۵

شکل ۱-۳۴: پوش گسیختگی خاک در حالت تر و خشک (Alawaji, 2001)..... ۴۶

شکل ۱-۳۵: جابجایی افقی در مقابل جابجایی عمودی برای نمونه‌های اشباع شده و برش یافته تحت سربار ثابت ۱۰۰ کیلو پاسکال (Alawaji, 2001)..... ۴۷

شکل ۱-۳۶: پتانسیل رمبندگی معمول و ایجاد شده توسط برش در مقابل تغییرات دانسیته خشک اولیه (Alawaji, 2001)..... ۴۸

شکل ۱-۳۷: آسیاب لرزشی spex 8000 a)دستگاه اصلی آسیاب b)محفظه آسیاب به همراه گلوله‌ها (صادقیان، ۱۳۸۰) ۵۱

شکل ۱-۳۸: نحوه حرکت در آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای (Syrayanarayana, 2001)..... ۵۲

شکل ۱-۳۹: رابطه اندازه ذرات در حین فرآیند آسیاب با زمان و BPR (Syrayanarayana, 1998) ۵۶

شکل ۲-۱: منحنی دانه‌بندی بخش ماسه‌ای خاک مورد آزمایش ۶۱

شکل ۲-۲: منحنی دانه‌بندی بنتونیت مورد استفاده ۶۲

شکل ۲-۳: منحنی دانه‌بندی نانورس مورد استفاده ۶۴

شکل۲ -۴: تصویر دستگاه آسیاب سیاره‌ای و محفظه‌های آسیاب حاوی گلوله و بنتونیت..... ۶۵

شکل ۲-۵: عکس‌های SEM a. بنتونیت طبیعی b. نمونه آسیاب شده به مدت ۱/۵ ساعت c. نمونه آسیاب شده به مدت ۳ ساعت d. نمونه آسیاب شده به مدت ۶ ساعت ۶۶

شکل ۲-۶: نمونه‌های خاک مورد آزمایش در حال آماده سازی ۶۸

شکل ۲-۷: رفتار خاک رمبنده در طی آزمایش ASTM D5333 ..... ۷۱

شکل ۲-۸: دستگاه‌های تحکیم مورد استفاده ۷۲

شکل ۳-۱: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای با درصدهای مختلف بنتونیت و دانسیته خشک اولیه gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۷۸

شکل ۳-۲: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف بنتونیت برای نمونه‌های با دانسیته خشک اولیه gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۷۹

شکل ۳-۳: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای با درصدهای مختلف بنتونیت و دانسیته خشک اولیه gr/cm^3 ۱/۵..... ۸۱

شکل ۳-۴: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف بنتونیت برای نمونه‌های با دانسیته خشک اولیه ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۸۲

شکل ۳-۵: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف بنتونیت در دو دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 و ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۸۳

شکل ۳-۶: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی درصدهای مختلف نانورس صنعتی و دانسیته خشک اولیه ۱/۳ gr/cm^3 ..... ۸۵

شکل ۳-۷: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس در دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 ..... ۸۷

شکل ۳-۸: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس و بنتونیت در دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 ..... ۸۸

شکل ۳-۹: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای نمونه‌های ماسه‌ای حاوی درصدهای مختلف نانورس صنعتی و دانسیته خشک اولیه ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۸۹

شکل ۳-۱۰: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس صنعتی برای نمونه‌های با دانسیته خشک اولیه ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۹۱

شکل ۳-۱۱: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس صنعتی در دو دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 و۱/۵ gr/cm^3 ..... ۹۲

شکل ۳-۱۲: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس و بنتونیت در دانسیته ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۹۳

شکل ۳-۱۳: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی ۲۰٪ نانورس صنعتی و دانسیته خشک اولیه ۱/۳ gr/cm^3 و اشباع شده در ۵۰،۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال ۹۴

شکل ۳-۱۴: نمودار تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر سربارهای اعمالی مختلف به هنگام اشباع شدن برای نمونه‌های با درصد ثابت نانورس (۲۰٪) با دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 ..... ۹۵

شکل ۳-۱۵: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی ۲۰٪ نانورس صنعتی و دانسیته خشک اولیه ۱/۵ gr/cm^3 و اشباع شده در ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال ۹۶

شکل ۳-۱۶: نمودار تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر سربارهای اعمالی مختلف به هنگام اشباع شدن برای نمونه‌ها با درصد ثابت نانورس (۲۰٪) با دانسیته ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۹۷

شکل ۳-۱۷: نمودار تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر سربارهای اعمالی مختلف به هنگام اشباع شدن برای نمونه‌ها با درصد ثابت نانورس (۲۰٪) در دو دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 و ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۹۸

شکل ۳-۱۸: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی درصدهای مختلف نانورس طبیعی و دانسیته خشک اولیه ۱/۳ gr/cm^3 ..... ۱۰۱

شکل ۳-۱۹: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس طبیعی در دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 ..... ۱۰۲

شکل ۳-۲۰: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس طبیعی نانورس صنعتی و بنتونیت در دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 ..... ۱۰۳

شکل ۳-۲۱: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی درصدهای مختلف نانورس طبیعی و دانسیته خشک اولیه ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۱۰۴

شکل ۳-۲۲: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس طبیعی در دانسیته ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۱۰۶

شکل ۳-۲۳: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس طبیعی در دو دانسیته ۱/۳ gr/cm^3 و ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۱۰۷

شکل ۳-۲۴: نمودار تغییرات شاخص رمبندگی در برابر درصدهای مختلف نانورس طبیعی و بنتونیت در دانسیته ۱/۵ gr/cm^3 ..... ۱۰۸

شکل ۳-۲۵: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی ۲۰٪ نانورس طبیعی و دانسیته خشک اولیه ۱/۳ gr/cm^3 و اشباع شده در ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال ۱۱۰

شکل ۳-۲۶: نمودار تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر سربارهای اعمالی مختلف به هنگام اشباع برای نمونه‌های با درصد ثابت نانورس (۲۰٪) با دانسیته gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۱۱۱

شکل ۳-۲۷: نمودار تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر سربارهای اعمالی مختلف به هنگام اشباع شدن برای نمونه‌های با درصد ثابت نانورس طبیعی و صنعتی (۲۰٪) با دانسیته gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۱۱۲

شکل ۳-۲۸: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی ۲۰٪ بخش رسی و دانسیته خشک اولیه gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۱۱۳

شکل ۳-۲۹: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی ۲۰٪ بخش رسی و دانسیته خشک اولیه gr/cm^3 ۱/۵ ..... ۱۱۴

شکل ۳-۳۰: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر بار اعمالی برای خاک ماسه‌ای حاوی ۲۰٪ نانورس طبیعی (دارای سیلت و فاقد آن) در دانسیته خشک اولیه gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۱۱۶

شکل ۳-۳۱: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر تغییر بار برای شرایط مختلف آب حفره‌ای برای نمونه‌های ساخته شده با درصد نانورس صنعتی ثابت (۲۰٪) و دانسیته gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۱۱۸

شکل ۳-۳۲: نمودار تغییرات نسبت منافذ در برابر تغییر بار برای شرایط مختلف آب حفره‌ای برای نمونه‌های ساخته شده با درصد نانورس طبیعی ثابت (۲۰٪) و دانسیته gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۱۱۹

فهرست جداول

جدول ۱-۱: شاخص رمبندگی خاک‌ها طبق آزمایش ASTM D5333 ..... ۲۱

جدول ۲-۱: مشخصات دانه‌بندی بخش دانه‌ای خاک..... ۶۰

جدول۲-۲: مشخصات فیزیکی بنتونیت مصرفی ۶۲

جدول ۲-۳: مشخصات فیزیکی Closite® 20A..... ۶۳

جدول ۲-۴: برخی خصوصیات نانورس طبیعی..... ۶۷

جدول ۲-۵: میزان وزنی بخش رسی و ماسه‌ای نمونه خاک رمبنده با دانسیته خشک gr/cm^3 ۱/۳ ..... ۶۹

جدول ۲-۶: میزان وزنی بخش رسی و ماسه‌ای نمونه خاک رمبنده با دانسیته خشک gr/cm^3 ۱/۵ ..... ۷۰

جدول ۲-۷: شاخص رمبندگی خاک‌ها طبق آزمایش ASTM D5333 ..... ۷۱

جدول ۲-۸: میزان وزنی بخش‌های تشکیل دهنده نمونه‌ها..... ۷۴

جدول ۳-۱: شاخص رمبندگی و شدت شاخص رمبندگی نمونه‌های مختلف خاک ماسه‌ای حاوی بنتونیت ۸۴

جدول ۳-۲: مقایسه میزان e/e_0 در نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانورس صنعتی تحت بار ۲۰۰ کیلو پاسکال در حالت خشک ۹۰

جدول ۳-۳: شاخص رمبندگی و شدت شاخص رمبندگی نمونه‌های مختلف خاک ماسه‌ای حاوی نانورس صنعتی..... ۹۲

جدول ۳-۴: پتانسیل رمبندگی و شدت رمبندگی نمونه‌های خاک ماسه‌ای حاوی مقدار ثابت نانورس صنعتی در سربارهای مختلف..... ۹۹

جدول ۳-۵: مقایسه میزان e/e_0 در نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف بنتونیت و نانورس طبیعی تحت بار ۲۰۰ کیلو پاسکال در حالت خشک ۱۰۵

جدول ۳-۶: شاخص رمبندگی و شدت شاخص رمبندگی نمونه‌های مختلف خاک ماسه‌ای حاوی نانورس طبیعی..... ۱۰۹

جدول ۳-۷: پتانسیل رمبندگی و شدت رمبندگی نمونه‌های خاک ماسه‌ای حاوی مقدار ثابت نانورس صنعتی و طبیعی (۲۰٪) با دانسیته gr/cm^3 ۱/۳تحت سربارهای مختلف ۱۱۲

جدول ۳-۸: مقایسه میزان e/e_0 در نمونه‌های حاوی درصد ثابت بخش رسی (۲۰٪) در دو حالت دارای کربنات و فاقد کربنات در حالت خشک ۱۱۵

جدول ۳-۹: میزان شاخص رمبندگی و شدت آن برای نمونه‌های حاوی نانورس صنعتی و نانورس طبیعی در دانسیته $1/3\ gr/cm^3$ و شرایط آب حفره‌ای مختلف ۱۱۹

فصل اول

مقدمه‌ای بر خاک‌های رمبنده