

۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تعیین تأثیر درصد ریزدانه بر روی مقاومت خاک‌های تثبیت شده با
رزین اپوکسی و صمغ فارسی

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

نگارش:

یوسف شکاری

شهریورماه ۱۴۰۱



تقدیم بہ:

روح پاک پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونه در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم.
و روح پاک برادرم کہ ہموارہ در طول تحصیل تکیہ گاہ من در مواجہہ با مشکلات و مایہ دگر می من بود.
و بہ مادرم دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر.



آیس ۱۳۰۶

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأیید هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

تعیین تأثیر درصد ریزدانه بر روی مقاومت خاک های تثبیت شده با رزین اپوکسی و صمغ فارسی

توسط آقای یوسف شکاری صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در

مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک در تاریخ ۱۴۰۱/۰۶/۲۸ مورد تأیید قرار می دهند.

آقای دکتر حسن قاسم زاده

۱- استاد راهنما

آقای دکتر مرتضی اسماعیلی

۲- ممتحن خارجی

آقای دکتر فرزین کلانتری

۳- ممتحن داخلی

آقای دکتر فرزین کلانتری

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه

دانشکده عمران

تاریخ: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

اظہارنامہ دانشجو

این جانب یوسف شکاری دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک

دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در

پایان‌نامه با عنوان تعیین تأثیر درصد ریزدانه بر روی مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده با رزین اپوکسی

و صمغ فارسی بارانمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده، توسط شخص این جانب انجام شده

و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید است و در مورد استفاده از کار دیگر محققان

به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به‌علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای

دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط این جانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین

متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به‌طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

تاریخ:

۱۴۰۱/۶/۲۸

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.
ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیرشده وجود داشته باشد.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نیست.

تشکر و قدردانی:

حمد و ثنای خدای متعال را که به فضلش آدمی را اندیشه و عمل عطا فرمود تا بکاود و بداند و از علم و آگاهی چراغی برافروزد و هستی خویش را روشنی بخشد.

آنچه دارم همه از اوست. سخنان و علم و ادبمان همه سخن استادی است که به دل نشسته و آن را شادی و نشاط بخشیده است.

با تشکر از:

استاد ارجمند جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده و راهنمایی‌های ایشان که این پایان‌نامه حاصل زحمات ایشان در باروری و به‌روزرسانی اطلاعات این‌جانب هست.

خانواده عزیزم که با مشکلات موجود همواره پشتیبان من بودند و لحظه‌ای از حمایت خود دریغ نکردند.

در پایان از دوستان عزیزم که مطالب زیادی را به من آموختند و مرا در رسیدن به اهدافم یاری نمودند صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایم و برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی می‌کنم.

چکیده

در سال‌های اخیر مواد پلیمری گوناگونی ساخته شده است که قابل استفاده در تثبیت خاک است که با توجه به شرایط محیطی، نوع خاک و هدف از تثبیت خاک ماده مناسب جهت تثبیت خاک انتخاب می‌گردد. کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش مصرف انرژی و امکان استفاده از مواد معدنی موجود در خاک کشور نشان‌دهنده فرصت‌های مناسب جهت استفاده از مواد پلیمری جدید برای کمک به محیط‌زیست با تغییر روند برداشت سیمن، آهک و رس از معادن می‌باشد.

در این تحقیق به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک‌ها و بهبود خواص مهندسی خاک از پلیمرهای اپوکسی رزین، صمغ فارسی و پلی‌استر استفاده و نتایج مقایسه گردید. برای بررسی تأثیر نوع و درصد پلیمر بر رفتار خاک تثبیت شده نمونه‌هایی جهت انجام آزمایش تک‌محوری با درصدهای وزنی مختلف ساخته شد. همچنین برای تأثیر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها در بازه زمانی ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری گردیدند. در ادامه برای بررسی تأثیر محتوی ریزدانه نمونه‌هایی با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۲۰ ساخته شده و آزمایش‌های تک‌محوری، نفوذپذیری و دوام انجام شده است.

با توجه به نتایج آزمایش تک‌محوری مشاهده گردید که افزودن پلیمر به نمونه‌ها مقاومت فشاری به‌طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند به این صورت که با افزایش مقدار پلیمر اپوکسی رزین از ۲ درصد به ۴ درصد مقاومت فشاری حدود ۶۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری تا ۱۴ روز ظرفیت باربری تا ۳۰ درصد افزایش و کرنش لحظه گسیختگی ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. تغییر در مقدار ریزدانه خاک باعث تغییر رفتار خاک می‌گردد به این صورت که با افزودن ۱۰ درصد ریزدانه ظرفیت باربری نمونه‌ها تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد و افزایش تا ۲۰ درصد باعث کاهش ظرفیت باربری می‌گردد. مقدار ۸ تا ۱۰ درصد ریزدانه به‌عنوان مقدار بهینه تعیین گردید. همچنین نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان‌دهنده کاهش نفوذپذیری ماسه خالص با افزایش درصد پلیمر و افزایش درصد ریزدانه می‌باشد. با توجه به نتایج تست دوام مشخص گردید نمونه‌ها در برابر سیکل‌های ذوب و یخ رفتار بسیار مناسبی دارند به طوری‌که بعد از ۱۲ سیکل ذوب و انجماد تغییر جرم نمونه‌ها کمتر از ۱ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، خاک‌های دانه‌ای، محتوی ریزدانه، مواد پلیمری، اپوکسی رزین، صمغ فارسی

فهرست مطالب

و	فصل اول: مقدمه
۱-۱	مقدمه
۲	۲-۱- اهمیت موضوع
۳	۳-۱- اهداف تحقیق
۴-۱	۴-۱- ساختار پایان نامه
۴	فصل دوم: مبانی تئوری و مروری بر تحقیقات پیشین
۱-۲	۱-۲- مقدمه
۲-۲	۲-۲- بهسازی و تثبیت خاک
۳-۲	۳-۲- تثبیت خاک
۱-۳-۲	۱-۳-۲- اهداف تثبیت خاک
۲-۳-۲	۲-۳-۲- تثبیت شیمیایی خاک
۳-۳-۲	۳-۳-۲- انتخاب تثبیت کننده مناسب
۴-۲	۴-۲- بررسی نحوه تأثیر محتوی ریزدانه بر رفتار خاک
۵-۲	۵-۲- مواد پلیمری
۱-۵-۲	۱-۵-۲- اجزاء تشکیل دهنده پلیمرها
۲-۵-۲	۲-۵-۲- انواع پلیمرها
۳-۵-۲	۳-۵-۲- دسته بندی پلیمرها
۶-۲	۶-۲- تثبیت خاک با مواد پلیمری
۷-۲	۷-۲- اپوکسی رزین
۱-۷-۲	۱-۷-۲- خواص اپوکسی رزین
۲-۷-۲	۲-۷-۲- مروری بر استفاده از اپوکسی رزین در ژئوتکنیک
۸-۲	۸-۲- صمغ فارسی
۱-۸-۲	۱-۸-۲- خواص صمغ فارسی
۲-۸-۲	۲-۸-۲- مروری بر استفاده از صمغ فارسی در ژئوتکنیک
۹-۲	۹-۲- ملاحظات اقتصادی
۱۰-۲	۱۰-۲- جمع بندی
۳۲	فصل سوم: معرفی مصالح و آزمایش ها
۱-۳	۱-۳- مقدمه
۲-۳	۲-۳- مصالح مورد استفاده
۱-۲-۳	۱-۲-۳- خاک

۳۳	 ۱-۱-۲-۳- ماسه
۳۴	 ۲-۱-۲-۳- سیلت
۳۸	 ۲-۲-۳- پلیمر
۳۸	 ۱-۲-۲-۳- اپوکسی رزین
۴۰	 ۲-۲-۲-۳- صمغ فارسی
۴۱	 ۳-۲-۲-۳- پلی استر
۴۲	 ۳-۳- آماده سازی نمونه ها
۴۲	 ۱-۳-۳- انتخاب پلیمر
۴۳	 ۲-۳-۳- ساخت نمونه ها
۴۴	 ۴-۳- نام گذاری نمونه ها
۴۵	 ۵-۳- معرفی آزمایش ها
۴۶	 ۱-۵-۳- آزمایش مقاومت تک محوری
۴۶	 ۲-۵-۳- آزمایش دوام
۴۶	 ۳-۵-۳- آزمایش نفوذ پذیری
۴۹	 ۴-۵-۳- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
۵۰	 ۶-۳- برنامه آزمایش ها
۵۵	 ۷-۳- جمع بندی
۵۶	 فصل چهارم: بررسی و تفسیر نتایج
۵۷	 ۱-۴- مقدمه
۵۷	 ۲-۴- بررسی عملکرد اپوکسی رزین در تثبیت خاک دانه ای
۵۸	 ۱-۲-۴- تأثیر درصد پلیمر
۵۸	 ۱-۱-۲-۴- مقاومت فشاری
۵۹	 ۲-۱-۲-۴- مدول الاستیسیته
۵۹	 ۲-۲-۴- تأثیر محتوی ریزدانه بر مقاومت فشاری
۵۹	 ۱-۲-۲-۴- مقاومت فشاری
۶۳	 ۲-۲-۲-۴- مدول الاستیسیته
۶۴	 ۳-۲-۴- زمان عمل آوری
۶۴	 ۱-۳-۲-۴- مقاومت فشاری
۶۷	 ۲-۳-۲-۴- مدول الاستیسیته
۷۰	 ۳-۴- بررسی عملکرد پلی استر در تثبیت خاک های دانه ای
۷۰	 ۱-۳-۴- تأثیر درصد پلیمر
۷۰	 ۱-۱-۳-۴- مقاومت فشاری
۷۱	 ۲-۱-۳-۴- مدول الاستیسیته

۷۳	 تأثیر محتوی ریزدانه بر مقاومت فشاری ۲-۳-۴
۷۳	 مقاومت فشاری ۱-۲-۳-۴
۷۴	 مدول الاستیسیته ۲-۳-۴
۷۴	 زمان عمل آوری ۳-۳-۴
۷۴	 مقاومت فشاری ۱-۳-۳-۴
۷۷	 مدول الاستیسیته ۲-۳-۳-۴
۸۰	 نحوه گسیختگی نمونه ها ۴-۴
۸۴	 جمع بندی آزمایش تک محوری ۵-۴
۸۴	 آزمایش نفوذ پذیری ۶-۴
۸۵	 آزمایش دوام ۷-۴
۸۷	 SEM آزمایش ۸-۴
۹۰	 جمع بندی ۹-۴
۹۱	 فصل پنجم : بحث و نتیجه گیری
۹۲	 مقدمه ۱-۵
۹۲	 جمع بندی ۲-۵
۹۲	 پیشنهادها ۳-۵
۹۵	 منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- نمودار تغییرات نسبت تخلخل با توجه به محتوی ریزدانه ۸
- شکل ۲-۲- نمودار تغییرات ساختار خاک با توجه به محتوی ریزدانه ۱۰
- شکل ۳-۲- نمودار دانه‌بندی خاک و مکش خاک ۱۲
- شکل ۴-۲- نمودار تنش- کرنش خاک ۱۲
- شکل ۵-۲- نمودار نفوذپذیری با توجه به محتوی ریزدانه ۱۳
- شکل ۶-۲- نمودار اوج مقاومت برشی غیراشباع با توجه به محتوی ریزدانه ۱۳
- شکل ۷-۲- نمودار دانه‌بندی خاک و نسبت تخلخل با توجه به محتوی ریزدانه ۱۴
- شکل ۸-۲- نمودار تنش انحرافی -کرنش محوری و تنش گسیختگی ۱۴
- شکل ۹-۲- نمودار دسته‌بندی پلیمرها..... ۱۶
- شکل ۱۰-۲- نمودار طبقه‌بندی پلیمرها..... ۱۷
- شکل ۱۱-۲- ساختار شیمیایی اپوکسی رزین..... ۲۳
- شکل ۱۲-۲- ساختار شیمیایی اپوکسی رزین-بیسفنول A..... ۲۴
- شکل ۱۳-۲- ساختار سه‌بعدی اپوکسی رزین..... ۲۴
- شکل ۱۴-۲- صمغ فارسی و درخت بادام کوهی..... ۲۹
- شکل ۱-۳- آزمایش هیدرومتری ۳۲
- شکل ۲-۳- آزمایش دانه‌بندی خاک ۳۲
- شکل ۳-۳- منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای..... ۳۳
- شکل ۴-۳- آزمایش کاساگرانده ۳۴
- شکل ۵-۳- منحنی دانه‌بندی خاک سیلت..... ۳۴
- شکل ۶-۳- منحنی دانه‌بندی ماسه و سیلت ۳۵
- شکل ۷-۳- آزمایش تعیین چگالی ویژه..... ۳۵
- شکل ۸-۳- آزمایش تراکم پروکتور استاندارد..... ۳۵
- شکل ۹-۳- تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر با توجه به محتوی ریزدانه..... ۳۶
- شکل ۱۰-۳- تغییرات نسبت تخلخل با توجه به محتوی ریزدانه..... ۳۷
- شکل ۱۱-۳- نمونه اپوکسی رزین و هاردنر..... ۳۸
- شکل ۱۲-۳- نمونه‌های ساخته‌شده آزمایش تک‌محوری..... ۴۲
- شکل ۱۳-۳- نمونه‌های ساخته‌شده جهت آزمایش دوام..... ۴۳
- شکل ۱۴-۳- نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها..... ۴۴
- شکل ۱۵-۳- شکل شماتیک دستگاه تست نفوذپذیری بار افتان..... ۴۷
- شکل ۱۶-۳- قالب تست نفوذپذیری..... ۴۷
- شکل ۱۷-۳- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM..... ۴۹
- شکل ۱-۴- نمودار تنش-کرنش آزمایش تک‌محوری..... ۵۶

- شکل ۴-۲- نمودار مدول الاستیسیته نمونه تثبیت شده با اپوکسی رزین..... ۵۷
- شکل ۴-۳- نمودار تأثیر درصد ریزدانه بر مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده ۵۸
- شکل ۴-۴- نمودار تنش- کرنش نمونه های تثبیت شده با اپوکسی رزین با توجه به محتوی ریزدانه..... ۵۹
- شکل ۴-۵- نمودار تأثیر درصد ریزدانه بر مقاومت فشاری ۶۰
- شکل ۴-۶- نمودار تأثیر درصد ریزدانه بر مدول الاستیسیته..... ۶۲
- شکل ۴-۷- نمودار تغییرات مقاومت فشاری با توجه به زمان عمل آوری..... ۶۳
- شکل ۴-۸- نمودار تغییرات مقاومت فشاری با توجه به زمان عمل آوری..... ۶۴
- شکل ۴-۹- درصد بهبود مقاومت فشاری نمونه ها با توجه به زمان عمل آوری..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰- نمودار تغییرات مدول الاستیسیته با توجه به زمان عمل آوری ۶۶
- شکل ۴-۱۱- نمودار تنش- کرنش نمونه تثبیت شده با پلی استر ۶۹
- شکل ۴-۱۲- نمودار مدول الاستیسیته نمونه های تثبیت شده با پلی استر ۷۰
- شکل ۴-۱۳- نمودار مقاومت فشاری نمونه ۱۴ روزه تثبیت شده با پلی استر..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴- نمودار مدول الاستیسیته نمونه تثبیت شده با پلی استر با توجه به درصد ریزدانه ۷۲
- شکل ۴-۱۵- نمودار مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با پلی استر با توجه به زمان عمل آوری..... ۷۳
- شکل ۴-۱۶- نمودار مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با پلی استر با توجه به زمان عمل آوری ۷۴
- شکل ۴-۱۷- نمودار مدول الاستیسیته نمونه تثبیت شده با پلی استر با توجه به زمان عمل آوری..... ۷۵
- شکل ۴-۱۸- درصد بهبود مقاومت فشاری نمونه ها با توجه به زمان عمل آوری..... ۷۶
- شکل ۴-۱۹- شکل شماتیک نحوه گسیختگی نمونه های ۲ درصد اپوکسی رزین..... ۷۸
- شکل ۴-۲۰- شکل شماتیک نحوه گسیختگی نمونه های ۴ درصد اپوکسی رزین..... ۷۹
- شکل ۴-۲۱- شکل شماتیک نحوه گسیختگی نمونه های ۶ درصد اپوکسی رزین..... ۸۰
- شکل ۴-۲۲- نحوه گسیختگی نمونه ها ۸۱
- شکل ۴-۲۳- نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری ۸۳
- شکل ۴-۲۴- نمودار تغییرات جرم نمونه ها در آزمایش دوام ۸۵
- شکل ۴-۲۵- مقایسه نمونه ها با توجه به درصد پلیمر-بزرگنمایی ۵۰۰ میکرون - آزمایش SEM..... ۸۶
- شکل ۴-۲۶- مقایسه نمونه ها با توجه به درصد پلیمر -بزرگنمایی ۱ میلی متر - آزمایش SEM..... ۸۶
- شکل ۴-۲۷- مقایسه نمونه ها با توجه به درصد ریزدانه-بزرگنمایی ۵۰۰ میکرون - آزمایش SEM..... ۸۷
- شکل ۴-۲۸- مقایسه نمونه ها با توجه به درصد ریزدانه-بزرگنمایی ۱ میلی متر - آزمایش SEM..... ۸۷
- شکل ۴-۲۹- مقایسه نمونه ها با توجه به درصد ریزدانه - آزمایش SEM..... ۸۸

فهرست جداول

جدول ۱-۲	مشخصات فیزیکی و شیمیایی بخش محلول و نامحلول صمغ فارسی	۲۸
جدول ۱-۳	مشخصات ماسه فیروزکوه	۳۳
جدول ۲-۳	چگالی ویژه ماسه و سیلت و محتوی حدی ریزدانه	۳۶
جدول ۳-۳	مشخصات مکانیکی اپوکسی رزین	۳۸
جدول ۴-۳	مشخصات شیمیایی اپوکسی رزین	۳۹
جدول ۵-۳	ترکیب شیمیایی صمغ فارسی	۳۹
جدول ۶-۳	مشخصات شیمیایی پلی استر	۴۰
جدول ۷-۳	مشخصات خاک و تراکم نسبی نمونه ها	۴۲
جدول ۸-۳	برنامه تست تک محوری	۵۰
جدول ۹-۳	برنامه تست دوام	۵۲
جدول ۱۰-۳	برنامه تست نفوذپذیری	۵۳
جدول ۱۱-۳	SEM تست	۵۳
جدول ۱-۴	نتایج تست تک محوری نمونه های ساخته شده با اپوکسی رزین	۶۷
جدول ۲-۴	نتایج تست تک محوری نمونه های ساخته شده با پلی استر	۷۷
جدول ۳-۴	نتایج آزمایش نفوذپذیری نمونه های ساخته شده با اپوکسی رزین	۸۳

فصل اول

مقدمه

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

خاک‌های مسئله‌دار و ضعیف از گذشته گریبان گیر انسان بوده است و برخورد با این‌گونه مصالح اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد و ساخت‌وساز بر روی این‌گونه بسترها مشکلات فراوانی را ایجاد نموده است. از سال‌های دور، بشر تلاش فراوانی برای مقابله با مشکلات ناشی از بسترهای خاکی مسئله‌دار به کار گمارده است که از جمله قدیمی‌ترین این روش‌ها، می‌توان به استفاده از آهک و کاه در تثبیت و تسلیح خاک توسط ایرانیان از سالیان دور اشاره نمود. امروزه با افزایش جمعیت و گسترش شهرها، نیاز به احداث سازه‌های گوناگون و خاص، به‌شدت احساس می‌شود. امروزه نیز از موادی همچون آهک و سیمان برای تثبیت و بهسازی خاک استفاده فراوان می‌شود.

مواد سنتی مورد استفاده در تثبیت خاک نگرانی‌های زیست‌محیطی فراوانی همچون انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید آن‌ها و همچنین اثر نامطلوب بر محیط ناشی از برداشت بی‌رویه مصالح از معادن و اختلال در اکوسیستم خاک بعد از تزریق و تثبیت خاک با مواد افزودنی را در پی دارند.

انتشار دی‌اکسید کربن در اثر تولید سیمان پرتلند معادل بیش از ۵ درصد دی‌اکسید کربن تولیدشده جهانی می‌باشد که دومین عامل ایجاد گازهای گلخانه‌ای در جهان می‌باشد. تثبیت خاک با مواد شیمیایی متعارف علاوه و مصرف انرژی فراوان و منابع معدنی، معمولاً مقدار PH خاک را نیز افزایش می‌دهد که باعث بروز آثار مخرب بر پوشش گیاهی محیط و کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌شود.

امروزه اکثر مهندسان در تلاش هستند که نگرانی‌های زیست‌محیطی را کاهش دهند، لذا ناگزیر هستند تا اقدامات اصلاحی را با فناوری پایدار برای محیط‌زیست انجام دهند. پلیمرها به‌عنوان نسل جدید افزودنی‌های خاک غیر وابسته به سیمان در سال‌های اخیر به‌صورت گسترده در تثبیت خاک مطرح گردیده‌اند.

۱-۲- اهمیت موضوع

خاک طبیعی موجود در پروژه‌های عمرانی اغلب از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی برای احداث سازه مناسب نیست، علت آن مشخصات فنی نامطلوب خاک هست که یا از لحاظ ظرفیت باربری دچار ضعف هست یا از لحاظ ساختاری دارای ضعف هستند.

اولین گام برای اصلاح مشخصات خاک شناخت ساختار خاک و ترکیب‌های کانی‌شناسی آن، است که در تعریف خواص مهندسی مختلف خاک اهمیت زیادی دارد زیرا مقاومت خاک ناشی از درهم تنیدگی و انسجام و اصطکاک بین ذرات خاک است. توده خاک متشکل از دانه‌هایی با اندازه‌های متفاوت می‌باشد که هر یک به نحوی بر مقاومت خاک تأثیرگذار می‌باشد. در خاک‌های درشت‌دانه وجود ذرات ریزدانه تأثیر بسزایی بر روی رفتار خاک می‌گذارد به صورتی که با تغییر درصد مقدار ریزدانه‌ها تفاوت چشمگیری در پارامترهای مختلف خاک از جمله ظرفیت باربری، نفوذپذیری، تراکم‌پذیری، دانسیته و ... شاهد هستیم.

لذا با توجه به موارد ذکر شده، در این تحقیق با انجام آزمایش‌ها مختلف تأثیر تغییرات درصد ریزدانه بر روی پارامترهای مختلف خاک مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف ما از این تحقیق بررسی تأثیر درصد بخش ریزدانه خاک بر روی پارامترهای مختلف خاک تثبیت‌شده با مواد پلیمری می‌باشد که می‌توان به صورت خلاصه در موارد زیر بیان نمود:

- ۱- بررسی خواص خاک تثبیت‌شده با مواد پلیمری با توجه به نوع پلیمر
- ۲- بررسی تأثیر درصد و نوع ریزدانه خاک بر روی خواص خاک تثبیت‌شده
- ۳- بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی پارامترهای مقاومتی خاک تثبیت‌شده

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

تحقیق حاضر در پنج فصل به شرح زیر به بیان مطالب مورد نیاز می‌پردازد:

در فصل اول مقدمه‌ای از روش‌های تثبیت خاک، معرفی انواع تثبیت‌کننده‌ها و هدف از انجام این تحقیق شرح داده شده است.

در فصل دوم به معرفی مواد پلیمری، ساختار خاک و تأثیر آن بر روی رفتار خاک پرداخته شده و در ادامه به مطالعات گذشته و نتایج حاصل از تحقیقات محققین اشاره گردیده است.

در فصل سوم به معرفی مصالح مورد استفاده در این تحقیق و مشخصات هر کدام پرداخته شده است و در ادامه آزمایش‌های انجام گرفته مطابق با استانداردهای مرجع معرفی گردیده است.

در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده ارائه گردیده است نتایج آزمایش‌ها با توجه به نمودارها و جداول تفسیر و بررسی گردیده است.

در فصل پنجم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

فصل دوم

مبانی تئوری و مروری بر تحقیقات انجام شده

فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱- مقدمه

در این فصل به شرح مفاهیم مورد استفاده در تحقیق خواهیم پرداخت. در ابتدا به تشریح بهسازی و تثبیت خاک، اهداف تثبیت خاک و انواع روش‌های آن پرداخته و در ادامه با توجه به هدف اصلی تحقیق که بررسی تأثیر درصد ریزدانه در رفتار خاک تثبیت شده می‌باشد، به بررسی ساختار خاک و نحوه تأثیر ریزدانه‌ها بر بافت خاک پرداخته می‌شود و سپس به معرفی پلیمرها، اجزاء تشکیل دهنده آن‌ها و معرفی انواع پلیمرهای مورد استفاده در تثبیت خاک و دسته‌بندی پلیمرها پرداخته شده است.

۲-۲- بهسازی و تثبیت خاک

بازسازی کنترل شده خاک درجا برای استفاده مجدد در یک ساختار جدید ژئوتکنیکی را بهسازی خاک می‌گویند. بهسازی خاک از مفاهیم بسیار مهم و کاربردی در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد.

اکثر پروژه‌های چالش برانگیز و پرهزینه مهندسی عمران به دلیل وجود مشکلاتی مانند ظرفیت باربری درجای خاک، روانگرایی، تورم بالا و نشست بیش از حد، به خاک مناسب نیاز دارند. امروزه از روش‌های بهسازی خاک به طور گسترده‌ای در جهان استفاده می‌شود. کاربرد این روش‌ها باعث بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، کاهش هزینه، کوتاه شدن زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره‌برداری می‌گردد. یکی از روش‌های مهم و پر استفاده تثبیت خاک با استفاده از افزودنی‌های مختلف جهت بهبود خواص خاک مانند استحکام، کنترل فرسایش خاک، کاهش نشست می‌باشد [۱].

۲-۳- تثبیت خاک:

تثبیت خاک به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و مهندسی آن برای تأمین یک رشته اهداف از پیش تعیین شده اطلاق می‌گردد. تثبیت خاک به روش‌های گوناگونی مانند روش‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی انجام می‌گردد. هدف از تثبیت خاک بهبود خواص مقاومتی خاک در درازمدت هست. انتخاب روش تثبیت خاک‌ها بستگی به نوع و جنس خاک و همچنین هدف از تثبیت خاک دارد. تکنیک‌ها و روش‌های متفاوتی برای تثبیت و اصلاح خاک وجود دارد که باید مانند هر تصمیم دیگر مهندسی از نظر فنی و اقتصادی بررسی گردد.

برخی از خاک‌ها به علت مشخصات فنی نامطلوب و یا داشتن مقادیر بیش از حد مجاز رس و لای، برای پروژه‌های ساختمانی و راه‌سازی نامناسب می‌باشند. این گونه خاک‌ها به دلیل حساسیت و ضعف در برابر رطوبت، مقاومت کم و تراکم پذیری مشکلات زیادی را از نظر فنی و اقتصادی ایجاد می‌نمایند.

این امر باعث مصرف مقادیر قابل توجه مصالح و افزایش هزینه اجرایی و طولانی شدن مدت اجرای پروژه می‌گردد. با توجه به این که در بیشتر پروژه‌ها امکان تغییر محل پروژه و یا تعویض خاک محل اجرای پروژه مقرون به صرفه نیست و یا به طور کلی غیرممکن هست باید روش تثبیت خاک بررسی گردد تا چنانچه از لحاظ فنی و اقتصادی قابل توجیه باشد به انجام آن مبادرت گردد.

استفاده از عوامل تثبیت کننده برای خاک‌های ضعیف در بستر باعث بهبود در خصوصیات مقاومتی و چسبندگی خاک می‌گردد [۲].

۲-۳-۱- اهداف تثبیت خاک:

مهم ترین اهداف تثبیت خاک تأمین یک یا تعدادی از موارد افزایش ظرفیت باربری خاک بستر، کاهش نفوذپذیری خاک، کاهش تورم و انقباض، اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت، جلوگیری از فرسایش خاک، کاهش ضخامت لایه‌های خاک ریز و افزایش باربری لایه‌ها، جلوگیری از ایجاد گردوغبار، صرفه جویی در مصرف مصالح، صرفه جویی در مصرف انرژی، تسریع در روند اجرایی پروژه می‌باشد [۲].

۲-۳-۲- تثبیت شیمیایی خاک:

منظور از تثبیت شیمیایی خاک اصلاح ویژگی‌های مدنظر خاک به وسیله مواد افزودنی می‌باشد. در اثر فعل و انفعالات شیمیایی مواد افزودنی با خاک، خواص خاک از جمله چسبندگی، جذب آب، تورم و ... تحت تأثیر قرار می‌گیرند. افزودنی‌های شیمیایی که شامل مصالحی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و برخی از نمک‌ها هستند با ساختار شیمیایی خود، تغییراتی را در جهت اصلاح خاک‌های مسئله دار ایجاد می‌نمایند. ترکیب این گونه مصالح با خاک می‌تواند باعث بهبود در مشخصات، مقاومت، مشخصات تغییر شکل و نفوذپذیری خاک شود [۲].

جهت تعیین مقدار ماده شیمیایی تثبیت کننده، از آزمایش‌های مختلفی از جمله تعیین مقاومت نمونه‌های تثبیت شده، استفاده می‌گردد.

بهبود و اصلاح مشخصات خاک در تثبیت شیمیایی ممکن است با تغییر یون‌های خاک رس، چسبندگی ذرات خاک و یا پر کردن حفره‌های خاک در اثر واکنش شیمیایی ماده پایدارکننده با خاک، ایجاد گردد.

در سالیان اخیر تحقیقات فراوانی جهت به کارگیری مصالح تثبیت کننده شیمیایی در پروژه‌های مختلف در سراسر دنیا انجام گرفته است. از جمله آن می‌توان به استفاده وسیع از آهک و سیمان در پروژه‌های راه سازی، اختلاط عمیق مصالح، استفاده از ستون‌های آهک، اصلاح خاک‌های آلوده ریزدانه توسط اضافه کردن برخی از کانی‌های نمک و تأثیر انواع نمک‌ها بر روی نشانه خمیری خاک‌های رسی و ... اشاره کرد.

۲-۳-۳- انتخاب تثبیت‌کننده مناسب:

انتخاب تثبیت‌کننده مناسب نیاز به مطالعه و در نظر گرفتن پارامترهای بسیاری دارد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- نوع خاک:

توزیع دانه‌بندی و حدود اتر برگ^۱ در مصالح دانه‌ای، راهنمای بسیار خوبی برای انتخاب اولیه نوع تثبیت‌کننده است. محدوده مفید بودن هر تثبیت‌کننده بر اساس درصد مواد ریز تر از الک ۷۵ (۲۰۰ میکرون) و دامنه خمیری خاک‌ها تعیین می‌گردد.

۲- شرایط آب‌وهوا:

شرایط آب و هوایی می‌تواند تأثیر زیادی در انتخاب تثبیت‌کننده داشته باشد. در مناطق مرطوب‌تر، زمانی که رطوبت مصالح مورد استفاده بالا می‌باشد، باید از استقامت مصالح به‌دست‌آمده در شرایط مرطوب نیز اطمینان داشت. در چنین شرایطی تثبیت سیمانی بهتر به نظر می‌رسد اگرچه تثبیت با قیر و یا ترکیب سیمان و قیر نیز ممکن است رفتار مناسبی داشته باشد. آهک برای مصالح ریزدانه بسیار مناسب است، به‌ویژه اگر برای کاهش رطوبت نیز به کار رود. در صورت اضافه کردن مواد پوزولانی به خاک‌های لای دار، از آهک نیز به‌عنوان یک تثبیت‌کننده خوب در این خاک‌ها می‌توان استفاده نمود.

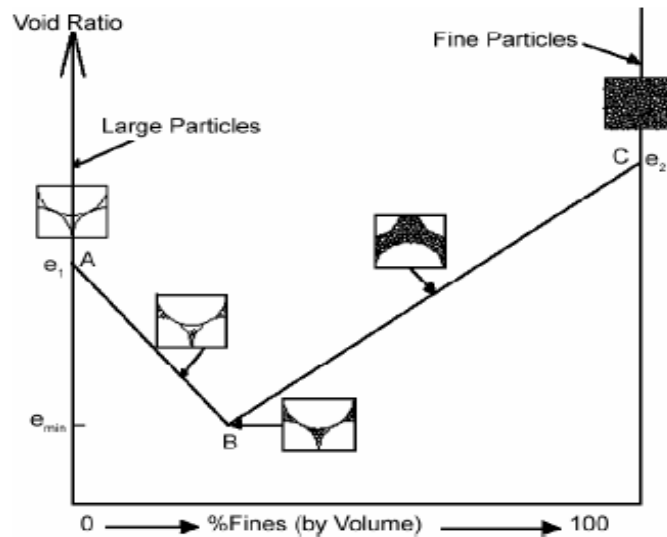
۳- نمونه‌گیری و آزمایش:

قبل از انجام هرگونه عملیات تثبیت، شناخت رفتار و مشخصات خاک محل پروژه و واکنش آن نسبت به مصالح مورد استفاده در عملیات تثبیت خاک الزامی است.

۲-۴- بررسی نحوه تأثیر درصد ریزدانه در بافت خاک

اضافه شدن رس یا سیلت به ماسه در درصد‌های مختلف می‌تواند به‌طور اساسی رفتار ماتریس مخلوط درشت‌دانه و ریزدانه را تغییر دهد. برای درک بهتر موضوع شکل شماره ۲-۱ که تغییرات درصد تخلخل را برحسب درصد ریزدانه نشان می‌دهد، رسم شده است [۳].

¹ Atterberg Limits



شکل ۲-۱- نمودار تغییرات نسبت تخلخل با توجه به محتوی ریزدانه [۳]

در قسمت A درصد ریزدانه صفر می‌باشد و دانه‌های ماسه به‌خوبی با یکدیگر در تماس می‌باشند و می‌توان نیرو را منتقل نمایند. هنگامی که از نقطه A به سمت نقطه B حرکت نماییم درصد ریزدانه افزایش می‌یابد. در این حالت ریزدانه‌ها فضای خالی بین دانه‌های ماسه را پر کرده و باعث کاهش تخلخل و افزایش دانسیته نسبی می‌شوند بدون آنکه در باربری سهمیم باشند تا اینکه در نقطه B ریزدانه‌ها کاملاً فضای خالی بین دانه‌های ماسه را پر می‌نمایند. به این مقدار ریزدانه (نقطه B)، ریزدانه حدی^۱ (LFC) گفته می‌شود. فراتر از این نقطه به دلیل وجود ریزدانه به مقدار زیاد تماس بین دانه‌های ماسه سست می‌شود و ساختار خاک به سمت ریزدانه خالص میل می‌نماید.

قابل ذکر است که مقدار حدی ریزدانه به دانه‌بندی خاک اصلی و خصوصیات ریزدانه بستگی دارد. به‌عنوان مثال خاک‌های خوب دانه‌بندی شده در مقایسه با خاک‌های بد دانه‌بندی شده نسبت تخلخل کمتری دارند و در نتیجه مقدار کمتری ریزدانه می‌توانند دانه‌های ماسه را کاملاً از هم جدا کنند. همچنین ذرات رس نسبت به ذرات سیلت دارای قطر کمتری داشته و می‌توانند به‌صورت مؤثرتری در پر کردن فضای خالی بین دانه‌های ماسه شرکت نمایند.

¹ Limiting fines content

مقدار حدی ریزدانه توسط رابطه (۲-۱) تعیین می‌گردد: [۴].

$$LFC = \frac{G_f * e_s}{G_f * e_s + G_s(1 + e_f)} \quad (2-1)$$

در این رابطه G_s و G_f به ترتیب چگالی ویژه ماسه و ریزدانه می‌باشند و e_s و e_f نیز مقدار نسبت تخلخل حداقل ماسه و ریزدانه می‌باشند.

مقدار حدی ریزدانه برای ماسه و سیلت غیر پلاستیک معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ هست و مقادیر کمتر از ۲۰ مربوط به خاک رس می‌باشند.

با افزایش ریزدانه هنگامی که از نقطه B به سمت نقطه C حرکت نماییم دانه‌های ماسه بیشتر از یکدیگر جدا شده و توسط ذرات ریزدانه احاطه می‌گردند. در این حالت ذرات ریزدانه نقش مهم‌تری را در باربری ایفا می‌نمایند. با ادامه حرکت به نقطه C خواهیم رسید و در این نقطه ریزدانه‌ها نمونه را تشکیل می‌دهند. با توجه به درصد محتوی ریزدانه دو حالت را می‌توان در نظر گرفت:

۱- مقدار ریزدانه کمتر از مقدار ریزدانه حدی باشد: $FC < LFC$

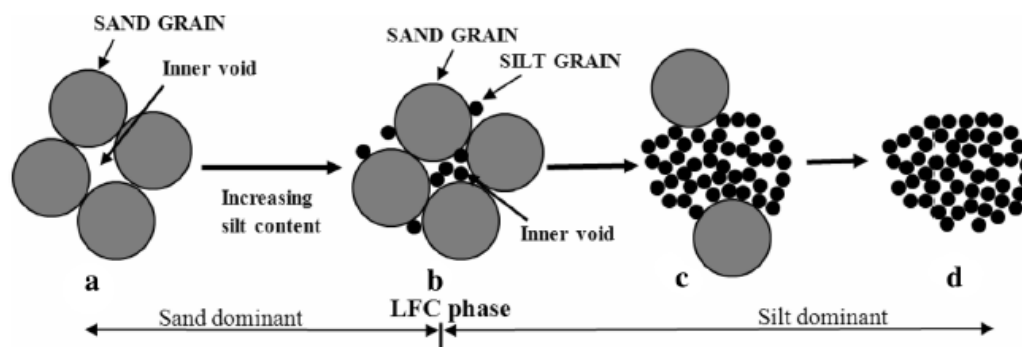
در این حالت ریزدانه‌ها به‌طور فعال در باربری نقش ندارند و کاملاً در فضای خالی بین دانه‌های ماسه قرار گرفتند و تخلخل کلی نمونه را کاهش می‌دهند و هیچ‌گونه کمکی در اسکلت درشت‌دانه ایفا نمی‌کنند. در این حالت دانه‌های ریزدانه در انتقال نیروهای بین‌ذره‌ای غیرفعال می‌باشند و بیشتر نقش پرکننده را ایفا می‌نمایند. با افزایش مقدار ریزدانه به تدریج ذرات ریزدانه تعدادی از دانه‌های ماسه را از هم جدا می‌کنند. این موضوع در شکل شماره ۲-۲ مشاهده می‌شود.

۲- مقدار ریزدانه بیشتر از مقدار حدی باشد: $FC > LFC$

در این حالت دانه‌های ریزدانه فضای خالی بین دانه‌های درشت را کاملاً پر کرده‌اند بطوریکه دانه‌های درشت با یکدیگر تماس ندارند و به‌صورت غوطه‌ور میان دانه‌های ریز قرار دارند و نمی‌توانند در باربری ماتریس خاک نقشی داشته باشند. در این حالت ریزدانه‌ها شروع به ایفای نقش در باربری می‌نمایند و نیروهای تماسی و برشی را تحمل می‌نمایند در حالیکه درشت‌دانه‌ها ممکن است به‌عنوان عناصر تقویت‌کننده در داخل مخلوط عمل نمایند.

تا زمانی که درشت‌دانه‌ها از یکدیگر جدا نشوند نمی‌توان از تأثیر آن‌ها چشم‌پوشی کرد. این موضوع در شکل شماره ۲-۲ نشان داده شده است.

با توجه به موارد فوق می‌توان فهمید که یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند بر مشخصات رفتاری خاک مؤثر باشد درصد و نوع ریزدانه می‌باشد.



شکل ۲-۲- نمودار تغییرات ساختار خاک با توجه به محتوی ریزدانه [۴].

نائینی. بازیار در سال ۲۰۰۴ به بررسی اثر درصد ریزدانه بر مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای پرداختند. آن‌ها با انجام آزمون سه محوری زهکشی نشده بر روی نمونه‌های ماسه‌ای با درصد‌های مختلف سیلت به بررسی رفتار خاک پرداختند. نتایج تحقیقات نشان‌دهنده آن بود که پیک مقاومت و مقاومت پسماند با افزایش مقدار ریزدانه تا مقدار ۳۵ درصد، کاهش می‌یابد. با افزایش درصد ریزدانه پیک مقاومت افزایش می‌یابد ولی کمتر از ماسه خالص می‌باشد. همچنین مقاومت برشی با افزایش محتوای سیلت کاهش می‌یابد.

از آنجایی که بسیاری از ماسه‌های طبیعی و نهشته‌های ساخته‌شده به دست انسان مانند سدها، دارای درصد فراوانی ریزدانه چسبنده و غیر چسبنده می‌باشند، بررسی مقاومت روانگرایی^۱ این خاک‌ها به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است که نشان‌دهنده نقش مهم ریزدانه‌ها بر رفتار خاک‌ها می‌باشد [۵].

در سال ۲۰۰۶ قهرمانی و همکاران به بررسی تأثیر درصد ریزدانه پلاستیک بر مقاومت روانگرایی ماسه پرداختند. آن‌ها به بررسی ماسه فیروزکوه به همراه ۱۰ تا ۵۰ درصد رس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده آن بود که رفتار ماسه و رس مشابه رفتار ماسه و سیلت می‌باشد به طوریکه در نسبت تخلخل ثابت با افزایش درصد رس مقدار روان گرایی کاهش و پس از رسیدن مقدار ریزدانه به مقدار حدی افزایش می‌یابد. وجود ریزدانه در ماسه می‌تواند باعث تغییر در تمایل خاک به انقباض و انقباض در اثر اعمال تنش برشی گردد. این تغییر به نوبه خود به افزایش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه مقاومت روان گرایی منجر می‌شود [۳].

در سال ۲۰۰۹ درخشندی به ارزیابی روان گرایی خاک‌های ماسه‌ای رس دار پرداخت. در این تحقیق با انجام آزمایش سه محوری استاتیکی و دینامیکی بر روی خاک ماسه‌ای به همراه درصد‌های مختلف کائولینیت^۱

^۱ Liquefaction

پرداخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن بود که نمونه‌های حاوی ۲۰ تا ۳۰ درصد کائولینیت رفتاری مشابه رس خالص داشته و نمونه‌های حاوی ۰ تا ۱۰ درصد رس نتایجی مشابه با ماسه خالص داشتند. همچنین مشاهده گردید که در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد رس فشار آب حفره‌ای در دوره‌های اولیه بارگذاری نسبت به ماسه تمیز افزایش می‌یابد. با افزایش درصد رس به ۲۰ درصد تغییر خاصی در منحنی فشار آب حفره‌ای مشاهده نگردید. با افزایش مقدار ریزدانه از ۲۰ به ۳۰ درصد اضافه فشار آب حفره‌ای به‌طور محسوسی کاهش یافت [۶].

نیم‌سال ۲۰۱۰ بر روی عوامل تأثیرگذار بر رفتار ماسه‌های رس دار پرداختند. آن‌ها با انجام آزمایش سه محوری استاتیکی بر روی خاک ماسه‌ای به همراه درصدهای مختلف از دو نوع رس، یکی با خاصیت خمیری کم و دیگری با خاصیت خمیری زیاد به ارزیابی پتانسیل روان گرایی خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج تحقیقات نشان‌دهنده آن بود که با افزایش درصد رس در نسبت تخلخل یا وزن مخصوص خشک ثابت مقاومت بیشینه در نمودار تنش- کرنش دچار کاهش می‌گردد. همچنین مشاهده گردید با افزایش مقدار رس تا ۵ درصد در زاویه اصطکاک داخلی تغییر چندانی ایجاد نمی‌شود ولی با افزایش درصد رس مقدار آن به شدت کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده آن بود که رس با خاصیت خمیری کمتر دارای مقاومت بالاتری می‌باشد. مواد مورد استفاده در خاک‌ریزی‌ها معمولاً از شن و ماسه، سیلت و رس تشکیل شده است. محتوای ریزدانه در یک خاک‌ریز تأثیر زیادی بر مقاومت برشی و تراوش در شرایط بارندگی در حالت غیراشباع دارد [۷].

در سال ۲۰۱۶ کیم و همکاران^۲ به بررسی تأثیر درصد ریزدانه بر مقاومت برشی غیراشباع مواد قرضه پرداختند. آن‌ها با استفاده از خاک ماسه همراه با ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ درصد سیلت به بررسی تأثیر درصد ریزدانه بر رفتار خاک ماسه‌ای پرداختند.

با توجه به نتایج تحقیقات مشخص گردید افزایش درصد ریزدانه باعث کاهش درجه اشباع اولیه نمونه‌ها می‌گردد، با کاهش درجه اشباع اولیه مقاومت فشاری بدون توجه به مقدار ریزدانه افزایش می‌یابد. در شکل شماره ۳-۲ نمودار دانه‌بندی (الف) و نمودار مکش نمونه‌ها با توجه به درجه اشباع (ب) نشان داده شده است.

¹Kaolinite

² Byeungsu et al