

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی اثر تسلیح الیاف طبیعی ضایعاتی ساقه برنج برروی رفتار مکانیکی خاک‌های فروریزی تثبیت شده با سیمان

نگارنده: فاطمه صباغزاده

استاد راهنما

دکتر محسن کرامتی

پاییز ۱۳۹۹

تقدیم بہ

خدائی کہ آفرید

جہان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و بہ کسانی کہ عشقان را در وجودم دمید؛ پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می‌دانم از استاد فرزانه جناب آقای دکتر کرامتی که به عنوان استاد راهنما در مراحل مختلف این پایان نامه همواره با سه صدر دکنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی‌های اخلاقی و علمی ایشان بهره‌جسته‌ام تشکر و قدردانی نمایم.

تهدنامه

اینجانب فاطمه صباغزاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته مهندسی عمران- ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحت عنوان "ارزیابی اثر تسلیح الیاف طبیعی ضایعاتی ساقه برنج بر روی رفتار مکانیکی خاک های فروریزی تثبیت شده با سیمان" تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محسن کرامتی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از مهمترین مسائل ژئوتکنیکی که کاربری طرح را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد و یا منجر به تخریب آن گردد، وجود خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد. خاک‌های مسئله‌دار به خاک‌های واگرا، متورم‌شونده، رمبنده، روانگرا و انحلال‌پذیر اطلاق می‌شود. در این تحقیق به طور خاص به خاک‌های رمبنده پرداخته شده است. محققان مختلفی در مورد تثبیت و بهسازی خاک‌های رمبنده تحقیق کرده‌اند. در این تحقیق به ارزیابی اثر الیاف ساقه برنج بر رفتار مکانیکی خاک‌های فروریزی تثبیت‌شده با سیمان پرداخته شده است. مطالعه اثر درصدهای مختلف اختلاط این الیاف بر روی مقاومت فشاری خاک رمبنده تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان با انجام آزمایش تک‌محوری و نیز بررسی اثر الیاف فوق بر نتایج آزمایش تراکم استاندارد، اساس تحقیقات آزمایشگاهی این پروژه را تشکیل داده‌اند. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داده‌است که در یک مقدار سیمان یکسان با افزایش مقدار الیاف نتایج تراکم نمونه‌ها با کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه همراه بوده‌است. بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده نشان داده‌است که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱٪ الیاف نسبت به نمونه حاوی ۰/۲۵٪ الیاف ۸۹/۴۹٪ افزایش یافته‌است و در بین نمونه‌های سیمانی‌شده و عمل‌آوری‌نشده با افزایش مقدار سیمان تا ۱۲٪، مقاومت فشاری ۶۰٪ نسبت به نمونه مرجع (حاوی ۰٪ سیمان و ۰٪ الیاف ساقه برنج) افزایش و کرنش گسیختگی ۲۸/۴۰٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته‌است. همچنین نتایج نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده حاوی الیاف و سیمان نشان داده‌است که در نمونه تنها حاوی ۱٪ الیاف، افزایش مقدار سیمان از ۰٪ تا ۱۲٪ سبب افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۱۷۲/۳۸٪ و کاهش کرنش گسیختگی به میزان ۶۸/۱۰٪ شده‌است. قابل ذکر است که در نمونه‌های حاوی ۱۲٪ سیمان و ۰/۲۵٪ الیاف با افزایش زمان عمل‌آوری از ۰ روز تا ۲۸ روز، مقاومت فشاری نسبی ۱۵۹۴٪ افزایش و کرنش گسیختگی نسبی ۲۱/۴۸٪ کاهش یافته‌است و به طور کلی افزایش زمان عمل‌آوری سبب افزایش مقاومت فشاری نسبی و کاهش کرنش گسیختگی نسبی شده‌است.

به صورت کلی نتایج نشان داده‌است که مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی‌شده از نمونه‌های تسلیح‌شده بیشتر بوده و نمونه‌های حاوی الیاف در کرنش بیشتری نسبت به نمونه‌های سیمانی‌شده گسیخته شده‌اند. با بررسی نتایج دیده شده‌است که به طور کلی در کوتاه مدت

می توان با جایگزینی الیاف و کاهش سیمان، مقاومت فشاری لازم را بدست آورد و کرنش گسیختگی را افزایش داد اما در بلندمدت اثر فرایند هیدراتاسیون بر اثر الیاف ساقه برنج غالب بوده و جایگزین کردن الیاف و کاهش مقدار سیمان تنها سبب افزایش کرنش گسیختگی شده و مقاومت فشاری کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: خاک رمبنده، الیاف ساقه برنج، آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده، سیمان.

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- بیان مساله و اهمیت موضوع
۴	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق
۵	۴-۱- اهداف پژوهش
۵	۵-۱- روش تحقیق
۶	۶-۱- ساختار پژوهش
۷	فصل ۲: مروری بر مطالعات گذشته
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- تعریف فروریزش
۹	۳-۲- انواع خاک‌های فروریزشی
۹	۲-۴- عوامل مؤثر بر میزان فروریزش
۹	۲-۴-۱- رطوبت اولیه
۱۰	۲-۴-۲- وزن مخصوص خشک اولیه
۱۱	۲-۴-۳- نوع خاک
۱۱	۲-۴-۴- تراکم نسبی
۱۲	۲-۴-۵- سطح تنش اعمالی
۱۳	۲-۴-۶- منشاء زمین شناسی
۱۳	۲-۵- مکانیزم فروریزش خاک‌های رمبده
۱۴	۲-۶- اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک‌ها
۱۵	۲-۷- مروری بر ادبیات فنی مرتبط
۱۵	۲-۷-۱- اثر الیاف کوتاه پلی‌پروپلین
۱۷	۲-۷-۲- تثبیت بیولوژیکی
۱۹	۲-۷-۳- اثر خاکستر لجن فاضلاب
۲۱	۲-۷-۴- اثر pH شیرابه فاضلاب
۲۳	۲-۷-۵- اثر آهک
۲۷	۲-۷-۶- اثر نانورس
۲۹	۲-۷-۷- اثر آهک، آمونیوم سولفات، پتاسیم کلرید و گرد کوره سیمان
۳۱	۲-۷-۸- اثر بیوپلیمرهای guar gum و xanthan gum
۳۳	۲-۷-۹- اثر نانومواد
۳۶	۲-۷-۱۰- اثر الیاف شیشه
۳۹	۲-۷-۱۱- اثر پلیمر مایع و الیاف پلی پروپلین

۴۲	۱۲-۷-۲- اثر الیاف ذرت و سیمان
۴۳	۱۳-۷-۲- اثر الیاف پلی پروپلین و Fly ash
۴۴	۸-۲- جمع بندی

فصل ۳: روش تحقیق

۴۷	۱-۳- مقدمه
۴۸	۲-۳- محل نمونه گیری
۴۸	۳-۳- مصالح مصرفی
۴۹	۱-۳-۳- خاک فروریزی چاله باغ گرگان
۴۹	□ دانه بندی و هیدرومتری
۵۱	□ درصد رطوبت طبیعی
۵۱	□ چگالی نسبی دانه های جامد
۵۱	□ حدود اتربرگ
۵۲	□ تراکم استاندارد
۵۳	□ پتانسیل فروریزش
۵۶	۲-۳-۳- افزودنی سیمان
۵۶	۳-۳-۳- مسلح کننده طبیعی الیاف ساقه برنج
۵۷	۴-۳- روش تحقیق
۵۸	۱-۴-۳- آزمایش تراکم استاندارد
۵۸	۲-۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده
۶۱	□ آماده سازی نمونه ها
۶۲	□ دستگاه مورد استفاده و متعلقات
۶۵	۵-۳- نام گذاری و علائم اختصاری

فصل ۴:

نتایج و تفسیر آزمایش ها

۶۷	۱-۴- مقدمه
۶۸	۲-۴- تراکم استاندارد
۶۸	۳-۴- مقاومت فشاری محدود نشده
۷۱	۱-۳-۴- اثر تسلیح با الیاف ساقه برنج
۷۱	۲-۳-۴- اثر افزایش افزودنی سیمان
۷۵	□ نمونه های عمل آوری نشده
۷۵	□ نمونه های ۷ روزه
۷۷	□ نمونه های ۲۸ روزه
۷۹	□ اثر افزایش زمان عمل آوری
۸۱	

۸۳	۴-۳-۳- نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و مسلح‌شده با الیاف
۸۷	۴-۳-۴- اثرافزایش زمان عمل‌آوری
۹۰	۴-۴- جمع‌بندی نتایج
۹۳	فصل ۵:
۹۳	نتایج و پیشنهادات
۹۴	۵-۱- مقدمه
۹۴	۵-۲- نتیجه‌گیری
۹۵	۵-۳- پیشنهادات
۹۷	مراجع
۱۰۳	Abstract

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) خرابی دیوارهای ساخته شده بر روی خاک رمبنده ۳
- شکل (۲-۱) نشست ساختمان سمت چپ و انحنای لوله گاز به علت ساخت بر روی خاک رمبنده ۳
- شکل (۱-۲) اثر رطوبت اولیه بر فروریزش ۱۰
- شکل (۲-۲) اثر تغییرات وزن مخصوص خشک اولیه بر فروریزش ۱۰
- شکل (۳-۲) اثر میزان رس بر فروریزش ۱۱
- شکل (۴-۲) رابطه پتانسیل فروریزی با تراکم نسبی ۱۲
- شکل (۵-۲) رابطه پتانسیل فروریزش با سطح تنش اعمالی ۱۳
- شکل (۶-۲) ساختار خاک فروریزی بارگذاری شده قبل و بعد از مرطوب شدن ۱۴
- شکل (۷-۲) نمودار تنش_کرنش نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپلین ۱۵
- شکل (۸-۲) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های حاوی سیمان ۱۶
- شکل (۹-۲) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه‌های حاوی سیمان و الیاف ۱۶
- شکل (۱۰-۲) پتانسیل رمبندگی در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۳ و ۱۴ روزه ۱۸
- شکل (۱۱-۲) مقایسه پتانسیل رمبندگی در سه مقدار کلسیم کلرید ۱۹
- شکل (۱۲-۲) تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب بر روی شاخص رمبندگی ۲۰
- شکل (۱۳-۲) مقایسه شاخص رمبندگی خاک بازسازی‌شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک و خاک بازسازی‌شده با آهک ۲۰
- شکل (۱۴-۲) نمودار مقایسه رفتار فروریزش خاک در مقابل pH ۲۱
- شکل (۱۵-۲) تاثیر افزودن درصدی شیرابه‌های اسیدی و قلیایی بر میزان فروریزش خاک ۲۲
- شکل (۱۶-۲) نمودار مقایسه پوش گسیختگی برای نمونه‌های خاک اشباع با pH های مختلف ۲۲
- شکل (۱۷-۲) درصد تغییرات مقاومت برشی خاک در pH های مختلف نسبت به pH=7 ۲۳
- شکل (۱۸-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی بر حسب زمان عمل‌آوری ۲۴
- شکل (۱۹-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی بر حسب درصد آهک ۲۴
- شکل (۲۰-۲) تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف آهک بر حسب زمان عمل‌آوری ۲۵
- شکل (۲۱-۲) تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف آهک بر حسب درصد آهک ۲۵
- شکل (۲۲-۲) دایره‌های مور و پوش گسیختگی آزمایش سه‌محوری خاک تزریق شده با آهک بر حسب تنش مؤثر ۲۶
- شکل (۲۳-۲) دایره‌های مور و پوش گسیختگی آزمایش سه‌محوری خاک تزریق شده با آهک بر حسب تنش کل ۲۶

- شکل (۲-۲۴) تأثیر افزودن نانورس بر منحنی تراکم خاک شبکه سد بوستان گنبد ۲۷
- شکل (۲-۲۵) منحنی تنش_ کرنش نمونه‌های بهسازی‌شده با نانورس و خاک معمولی شبکه سد بوستان ۲۸
- شکل (۲-۲۶) تأثیر افزودن نانورس بر میزان رمبندگی نمونه‌های خاک شبکه سد بوستان گنبد ۲۹
- شکل (۲-۲۷) تأثیر افزودن نانورس بر پتانسیل رمبندگی نمونه‌های خاک منطقه‌ی اینچه برون. ۲۹
- شکل (۲-۲۸) اثر تراکم بر مقدار پتانسیل رمبندگی برحسب مقدار افزودنی برای نمونه‌هایی با زمان عمل‌آوری ۱ ساعت و تثبیت‌شده با (a) آهک. (b) گرد کوره سیمان ۳۰
- شکل (۲-۲۹) اثر غلظت پتاسیم کلرید و آمونیم سولفات بر پتانسیل رمبندگی ۳۰
- شکل (۲-۳۰) اثر زمان عمل‌آوری برروی پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تثبیت‌شده با ۳٪ افزودنی با تراکم نسبی ۸۵٪ ۳۱
- شکل (۲-۳۱) اثر مقدار افزودنی بر وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه ۳۲
- شکل (۲-۳۲) اثر شرایط اختلاط، زمان عمل‌آوری و غلظت بیموپلیمر بر میزان فروریزش خاک بهسازی‌شده با بیوپلیمرها ۳۲
- شکل (۲-۳۳) تغییرات رمبندگی نمونه‌های بهسازی‌شده S_3 و S_5 برحسب درصد نانورس ۳۴
- شکل (۲-۳۴) تغییرات رمبندگی نمونه‌های بهسازی‌شده S_3 و S_5 برحسب درصد نانومس ۳۵
- شکل (۲-۳۵) تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های بهسازی‌شده S_3 و S_5 برحسب درصد نانوالومینیوم ۳۵
- شکل (۲-۳۶) تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های بهسازی‌شده S_3 و S_5 برحسب درصد نانوسیلیس ۳۶
- شکل (۲-۳۷) تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر تعداد ضربات ۳۷
- شکل (۲-۳۸) تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر درصد رطوبت ۳۷
- شکل (۲-۳۹) تغییرات پتانسیل رمبندگی برای خاک با ۲٪ رطوبت در برابر درصد الیاف و تعداد ضربات ۳۸
- شکل (۲-۴۰) تغییرات پتانسیل رمبندگی برای خاک با ۴٪ رطوبت در برابر درصد الیاف و تعداد ضربات ۳۸
- شکل (۲-۴۱) تغییرات پتانسیل رمبندگی برای خاک با ۶٪ رطوبت در برابر درصد الیاف و تعداد ضربات ۳۹
- شکل (۲-۴۲) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ساخته شده با مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان برحسب مقدار الیاف پلی‌پروپیلن ۴۰
- شکل (۲-۴۳) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ساخته شده با مقادیر مختلف پلیمر مایع و سیمان برحسب مقدار پلیمر مایع ۴۰

- شکل (۲-۴۴) تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف پلیمری و تثبیت‌شده با ۱۰٪ سیمان ۴۱
- شکل (۲-۴۵) تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های تسلیح‌شده با پلیمر مایع و تثبیت‌شده با ۱۰٪ سیمان ۴۱
- شکل (۲-۴۶) اثر درصد الیاف بر مقاومت فشاری با تغییر درصد سیمان و زمان عمل‌آوری ۴۲
- شکل (۲-۴۷) منحنی‌های مقاومت فشاری برحسب Fly ash ۴۳
- شکل (۲-۴۸) منحنی‌های مقاومت فشاری برحسب مقدار پلی‌پروپیلین ۴۴
- شکل (۳-۱) موقعیت مکانی شهرستان گرگان با مختصات جغرافیایی $36/83^{\circ}$ شمالی و $54/48^{\circ}$ شرقی ۴۸
- شکل (۳-۲) موقعیت مکانی منطقه چاله‌باغ واقع در شهرستان گرگان با مختصات جغرافیایی $36/83^{\circ}$ شمالی و $54/43^{\circ}$ شرقی ۴۹
- شکل (۳-۳) دستگاه شیکر و الک‌های مورد استفاده جهت انجام آزمایش دانه‌بندی ۵۰
- شکل (۳-۴) نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه ۵۰
- شکل (۳-۵) نمودار مربوط به آزمایش تراکم استاندارد خاک دست‌نخورده ۵۲
- شکل (۳-۶) نمونه دست‌نخورده جهت انجام آزمایش پتانسیل فروریزش ۵۴
- شکل (۳-۷) دستگاه تحکیم در حال بارگذاری نمونه رمبندگی ۵۵
- شکل (۳-۸) نتایج آزمایش پتانسیل رمبندگی نمونه دست‌نخورده ۵۵
- شکل (۳-۹) الیاف ساقه برنج به طول ۱ سانتی‌متر و قطر میانگین ۰/۲ سانتی‌متر ۵۷
- شکل (۳-۱۰) قالب نمونه‌ساز آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده ۶۲
- شکل (۳-۱۱) دستگاه مقاومت فشاری محدود نشده ۶۳
- شکل (۳-۱۲) دیتالاگر ۸ کاناله مورد استفاده ۶۳
- شکل (۳-۱۳) محیط نرم‌افزار Vira Data Soft ۶۴
- شکل (۴-۱) نتایج آزمایش تراکم استاندارد حاوی مقادیر مختلف الیاف و (a) ۰٪ سیمان. (b) ۴٪ سیمان. (c) ۸٪ سیمان. (d) ۱۲٪ سیمان ۷۰
- شکل (۴-۲) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف طبیعی ۷۲
- شکل (۴-۳) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف طبیعی برحسب مقدار الیاف ۷۳
- شکل (۴-۴) نحوه گسیختگی نمونه‌های تسلیح‌شده. (a) نمونه مرجع. (b) نمونه حاوی ۰/۲۵٪ الیاف. (c) نمونه حاوی ۰/۵٪ الیاف. (d) نمونه حاوی ۱٪ الیاف ۷۴
- شکل (۴-۵) نحوه گسیختگی نمونه حاوی الیاف، قبل و بعد از گسیخته شدن ۷۵
- شکل (۴-۶) منحنی تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان ۷۶

- شکل (۷-۴) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان برحسب مقدار سیمان ۷۶
- شکل (۸-۴) گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده و (a) حاوی ۴٪ سیمان. (b) حاوی ۸٪ سیمان. (c) حاوی ۱۲٪ سیمان ۷۷
- شکل (۹-۴) منحنی تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های ۷ روزه تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان ۷۸
- شکل (۱۰-۴) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های ۷ روزه تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان برحسب مقدار سیمان ۷۸
- شکل (۱۱-۴) گسیختگی نمونه‌های ۷ روزه و (a) حاوی ۴٪ سیمان. (b) حاوی ۸٪ سیمان. (c) حاوی ۱۲٪ سیمان ۷۹
- شکل (۱۲-۴) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان ۸۰
- شکل (۱۳-۴) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان برحسب مقدار سیمان ۸۰
- شکل (۱۴-۴) گسیختگی نمونه‌های ۲۸ روزه و (a) حاوی ۴٪ سیمان. (b) حاوی ۸٪ سیمان. (c) حاوی ۱۲٪ سیمان ۸۱
- شکل (۱۵-۴) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان برحسب زمان عمل‌آوری. ۸۲
- شکل (۱۶-۴) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان برحسب زمان عمل‌آوری ۸۲
- شکل (۱۷-۴) گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان ۲۸ روزه و (a) عمل‌آوری نشده. (b) ۷ روزه. (c) ۲۸ روزه. ۸۳
- شکل (۱۸-۴) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان عمل‌آوری نشده و تسلیح‌شده با ۰/۲۵٪ الیاف ۸۴
- شکل (۱۹-۴) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان عمل‌آوری نشده و تسلیح‌شده با ۰/۵٪ الیاف ۸۴
- شکل (۲۰-۴) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان عمل‌آوری نشده و تسلیح‌شده با ۱٪ الیاف ۸۵
- شکل (۲۱-۴) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی مقادیر مختلف الیاف و سیمان برحسب درصد سیمان ۸۶
- شکل (۲۲-۴) تغییرات کرنش گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی مقادیر مختلف الیاف و سیمان برحسب درصد سیمان ۸۶

شکل (۴-۲۳) گسیختگی نمونه عمل‌آوری نشده حاوی ۱٪ الیاف و (a) ۰٪ سیمان. (b) ۴٪ سیمان. ۸۷
(c) ۸٪ سیمان. (d) ۱۲٪ سیمان

شکل (۴-۲۴) اثر زمان عمل‌آوری بر منحنی تنش_کرنش نمونه‌های متشکل از ۴٪ سیمان و ۰/۲۵٪ الیاف ۸۸

شکل (۴-۲۵) تغییرات مقاومت فشاری نسبی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان و مقادیر مختلف الیاف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت برحسب مقدار سیمان ۸۹

شکل (۴-۲۶) تغییرات کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان و مقادیر مختلف الیاف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت برحسب مقدار سیمان ۸۹

شکل (۴-۲۷) گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان و ۰/۲۵٪ الیاف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت. (a) نمونه عمل‌آوری نشده. (b) نمونه ۷ روزه. (c) نمونه ۲۸ روزه ۹۰

فهرست جداول

۶	جدول (۱-۱) آزمایش‌های انجام‌شده
۱۵	جدول (۱-۲) رده‌بندی شاخص رمبندگی
۱۷	جدول (۲-۲) ترکیبات محیط کشت
۱۸	جدول (۳-۲) اثر روش اختلاط بر میزان کاهش پتانسیل رمبندگی
۲۷	جدول (۴-۲) مقایسه پارامترهای مقاومت برشی خاک طبیعی و بهسازی‌شده
۳۳	جدول (۵-۲) مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده
۳۳	جدول (۶-۲) نتایج آزمایش پتانسیل فروریزش نمونه‌ها
۳۴	جدول (۷-۲) نتایج آزمایش پتانسیل فروریزش بر روی نمونه‌های بهسازی‌شده S_3 و S_5
۴۴	جدول (۸-۲) نتایج کلی بررسی‌های انجام‌شده توسط سایر محققین
۵۱	جدول (۱-۳) نتایج آزمایش درصد رطوبت طبیعی خاک
۵۲	جدول (۲-۳) تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر خاک دست‌نخورده
۵۴	جدول (۳-۳) مشخصات نمونه دست‌نخورده مربوط به آزمایش فروریزش
۵۶	جدول (۴-۳) نتایج درصد وزنی اکسید عناصر و مقاومت فشاری سیمان پرتلند تیپ ۲
۵۸	جدول (۵-۳) مشخصات آزمایش‌های تراکم استاندارد
۶۰	جدول (۶-۳) نمونه‌های آزمایش تک محوری
۷۰	جدول (۱-۴) نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد
	جدول (۲-۴) مقادیر افزایش مقاومت فشاری و کاهش کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی سیمان
۸۳	با افزایش زمان عمل‌آوری

فصل ۱:

کلیات

۱-۱- مقدمه

خاک‌های رمبنده اکثراً در نواحی گرم و خشک مناطق بیابانی یافت می‌شوند. با توجه به گسترش نسبتاً وسیع خاک‌های رمبنده و توسعه شهرنشینی و فروریزش ناگهانی این خاک‌ها که به دلایل زیر است، تثبیت و بهسازی این گونه از خاک‌ها بیش از پیش آشکار می‌شود. محققین بسیاری همچون دادلی، باردن و همکاران^۱ و ... چهار شرط مورد نیاز برای ایجاد فروریزش را به‌صورت زیر بیان کرده‌اند:

- بافت باز، تقریباً ناپایدار و تقریباً اشباع
- تنش کل به حدی زیاد باشد که ساختار خاک ناپایدار گردد.
- وجود یک پیوند رسی یا عامل سیمان‌تاسیون به اندازه کافی قوی برای پایداری ساختار خاک در حالت خشک.

➤ اضافه کردن آب به خاک که مکش خاک کاهش یابد و باعث ایجاد فروریزش شود.[۱].

تقویت خاک‌های ضعیف و نامناسب با افزودن عناصری مانند الیاف طبیعی که مقاومت کششی را تقویت می‌کنند و پایدار نمودن با استفاده از تثبیت‌کننده‌هایی مانند سیمان و آهک که واکنش شیمیایی با خاک دارند، برای ایجاد پیکربندی خاکی با ویژگی‌های ژئوتکنیکی دلخواه، تسلیح و تثبیت خاک نامیده می‌شود.[۲]. در این پژوهش با استفاده از الیاف ساقه برنج و سیمان رفتار مکانیکی خاک رمبنده استان گلستان مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۱-۲- بیان مساله و اهمیت موضوع

از جمله معضلات ناشی از خاک‌های رمبنده نشست و فروریزش ناگهانی است که در اثر افزایش رطوبت بیش از حد بحرانی به‌وجود می‌آید. در اشکال (۱-۱) و (۲-۱) مشکلات ناشی از فروریزش و نشست خاک رمبنده استان گلستان نشان داده شده‌است.

¹ Dudley, Barden et.al and Mitchell



شکل (۱-۱) خرابی دیوارهای ساخته شده بر روی خاک رمبنده



شکل (۲-۱) نشست ساختمان سمت چپ و انحنای لوله گاز به علت ساخت بر روی خاک رمبنده.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

روش‌های مختلفی جهت بهسازی خاک‌های رمبنده وجود دارد که استفاده از هر کدام به شرایط مختلفی از جمله درجه رمبندگی، شرایط اقتصادی و شرایط سازه بستگی دارد. به عنوان مثال روش تزریق در شرایطی اثرگذار است که سازه سنگین باشد و یا بهسازی سازه زیرزمینی لازم باشد. همچنین با استفاده از شمع‌ها می‌توان بار سازه را به لایه‌های زیرین خاک رمبنده منتقل کرد. با وجود این که تثبیت شیمیایی اثرات مثبت قابل توجهی در سطح رمبندگی خاک‌های فروریزی بوجود آورده است، اما استفاده بیش از حد این مواد ضرر و زیان قابل توجهی به وجود می‌آورد و می‌تواند pH خاک را تغییر داده و خاک و آب‌های زیرزمینی را آلوده کند. [۱، ۳-۵].

یک روش رایج جهت افزایش مقاومت فشاری خاک استفاده از سیمان به عنوان تثبیت‌کننده می‌باشد. [۲، ۶-۱۳]. این افزایش مقاومت با تردشدگی و افزایش مدول الاستیسیته^۲ همراه است. [۹]. اما استفاده از سیمان در کنار افزایش مقاومت، مضراتی از جمله افزایش تولید CO_2 به همراه دارد که یک خطر برای محیط زیست در نظر گرفته می‌شود. [۱۴]. به همین علت استفاده از مواد سازگار با محیط زیست که این ضرر و زیان را پوشش دهد، ضروری است. الیاف‌ها برحسب ماهیتشان به دو دسته طبیعی و مصنوعی^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. [۱۵، ۱۶].

الیاف‌های مصنوعی مانند پلی پروپلین به دلیل عملکرد بالا و تقویت خاک مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. [۲، ۱۴، ۱۷-۲۴]. با این وجود بسیاری از محققین کارایی عالی الیاف‌های طبیعی جهت بهسازی خاک و ملات تأیید کرده‌اند. [۶، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۲۳-۳۵]. از آنجا که الیاف‌های طبیعی به وفور در طبیعت یافت می‌شوند و جزء منابع تجدیدپذیر محسوب می‌شوند، به نظر می‌رسد در صورت پایدارسازی، رفتار آن‌ها از نظر اقتصادی گزینه مناسبی به شمار رود. [۱۶، ۳۳-۳۵]. از دیگر محاسن استفاده از الیاف می‌توان به کاهش حجم زباله تولیدی اشاره کرد. [۳۳]. بنابراین می‌توان با استفاده توأم سیمان و الیاف، علاوه بر بهبود مشخصات مکانیکی خاک، مصرف سیمان را کاهش داد و از تولید بیشتر کربن دی‌اکسید جلوگیری کرد. [۳۲]. در این پژوهش رفتار مکانیکی خاک رمبنده مسلح شده با الیاف طبیعی ساقه برنج و تثبیت شده با سیمان مورد بررسی قرار گرفته است.

^۲ Elastic Modulu

^۳ Man-made

۱-۴- اهداف پژوهش

اصلاح و تثبیت خاک‌های رمبنده از جمله روش‌هایی است که جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی از قبیل مقاومت فشاری و مقاومت برشی بکار گرفته می‌شود. به منظور بهسازی خاک‌های رمبنده از روش‌های مختلفی استفاده شده‌است که یکی از این روش‌ها، استفاده از افزودنی‌هاست. جهت تثبیت خاک‌های رمبنده از سیمان می‌توان استفاده کرد که در کنار مضرات آن مانند تولید بیش از حد کربن‌دی‌اکسید، کارایی عالی درمورد افزایش مقاومت خاک دارد. بنابراین به جهت کاهش مصرف سیمان به علت آلودگی‌های مربوط به کربن‌دی‌اکسید می‌توان در کنار سیمان، از الیاف‌های طبیعی استفاده کرد که کارایی آن جهت بهسازی مورد تأیید محققین قرار گرفته و ضایعاتی بودن آن، باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. با توجه به تولید سالیانه بالای الیاف‌های طبیعی مانند الیاف ساقه برنج و به منظور کاهش حجم زباله‌های تولیدی، این پژوهش پیرامون تثبیت و تسلیح خاک‌های رمبنده جهت اصلاح پارامترهای مقاومتی به کمک سیمان و الیاف طبیعی ساقه برنج، متمرکز خواهد شد.

۱-۵- روش تحقیق

در این تحقیق به کمک آزمایش‌های اولیه که در جدول (۱-۱) قرار داده شده‌است، مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه مشخص شده و پس از آن به کمک آزمایش تراکم استاندارد، وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه هر نمونه با محتوی سیمان و الیاف متفاوت محاسبه شده که با توجه به این اطلاعات نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده ساخته و مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی آن‌ها برآورد شده‌است.

جدول (۱-۱) آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش مورد نظر	شماره استاندارد	تعداد دفعات انجام آزمایش
دانه‌بندی و هیدرومتری	ASTM D422[36]	۱
درصد رطوبت طبیعی	ASTM D2216-10[37]	۳
چگالی نسبی دانه‌های جامد	ASTM D854-02[38]	۱
حد روانی	ASTM D4318-00[39]	۳
حد خمیری	ASTM D4318-00[39]	۲
تراکم استاندارد	ASTM D698[40]	۱۶
تک‌محوری	ASTM D2166 [41]	۴۰

۱-۶- ساختار پژوهش

پایان‌نامه در ۵ فصل گوناگون ارائه شده‌است.

در فصل اول کلیات پژوهش و اهمیت انجام آن برشمرده شده‌است.

فصل دوم، مروری بر ادبیات فنی است که مطالعات آزمایشگاهی گذشته ارائه گردیده‌است.

در فصل سوم نتایج آزمایش‌های اولیه و مشخصات مصالح مورد استفاده ارائه شده‌است. همچنین نحوه انجام

آزمایش تراکم استاندارد، تک محوری و رمبندگی توضیح داده شده‌است.

در فصل چهارم نتایج آزمایش‌های پتانسیل رمبندگی، تراکم استاندارد و تک‌محوری مطرح شده‌است.

در پایان در فصل پنجم، نتایج حاصل از پژوهش برشمرده شده و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های بعدی ارائه

شده‌است.

فصل ۲:

مروری بر مطالعات گذشته

خاک‌های رمبنده اغلب ساختار لایه‌ای دارند که معمولاً باز و متخلخل است و ذرات خاک توسط عوامل سیمانتاسیون در هنگام بارگذاری پیوند خورده‌اند. در صورتی که این نهشته‌ها در معرض آب قرار گیرند تحت بارگذاری یا بدون بارگذاری، خاک دچار نشست‌های بزرگ می‌گردد. کاساگرانده^۴ نشان داده‌است که بخشی از ذرات ریزدانه خاک باعث پیوند ذرات مجاور هم می‌شود که این پیوندها فشار موضعی را تحمل می‌کنند. این پیوندها در اثر فشارهای داخلی در شکاف‌های بین ذرات مجاور قرار می‌گیرند. این خاک‌ها در درصد رطوبت طبیعی، تراکم اندکی تحت افزایش بار دارند و هنگامی که این خاک‌ها در معرض رطوبت بیش از حد بحرانی قرار گیرند، لایه‌ی پیوندی حل شده و این پیوندها تضعیف می‌گردند. در نهایت این پیوندها توانایی تحمل بار را نداشته و خاک دچار فروریزش و نشست می‌گردد.[۱].

۲-۲- تعریف فروریزش:

فروریزش به ریزش ناگهانی به علت از دست رفتن مقاومت عامل پیونددهنده ذرات خاک اطلاق می‌شود.[۴۲]. تعاریف زیادی در مورد فروریزش بیان شده‌است که تعدادی از آن‌ها در زیر آمده‌است:

- خاکی که در اثر بارگذاری، مرطوب شدن یا هر دو کاهش حجم شدیدی داشته باشد.
- هر خاک غیر اشباع که ذرات آن به نظم جدیدی در اثر مرطوب شدن برسد و کاهش حجم مورد توجهی داشته باشد، چه در اثر بارگذاری باشد و چه بارگذاری وجود نداشته باشد.
- نشست اضافی ایجاد شده در اثر مرطوب شدن یک خاک غیر اشباع چه در اثر بارگذاری باشد و چه بارگذاری وجود نداشته باشد.
- حالتی که خاک تحت بار موجود به صورت کامل تحکیم نیافته باشد که مرتبط با مقاومت چسبندگی ظاهری خاک‌های غیر اشباع است.[۳].

⁴ Casagrande

۲-۳- انواع خاک‌های فروریزی

براساس تحقیقات انجام شده خاک رمبنده به دو صورت در طبیعت یافت می‌شود:

- خاک‌های ماسه‌ای و لای‌دار که توسط پیوندهای رسی و سیلتی به یکدیگر چسبیده‌اند و ساختمان متخلخلی دارند. در صورتی که این خاک‌ها اشباع شوند، ذرات ماسه به خاطر خمیری شدن رس بر روی یکدیگر می‌لغزند و خاک کاهش حجم پیدا می‌کند.
- خاک‌های نیمه‌اشباعی که در حالت طبیعی دارای فشار منفی بوده و در اثر نیروی مکش به یکدیگر چسبیده‌اند. این خاک‌ها در حالت طبیعی به صورت موقت پایدارند اما در اثر افزایش رطوبت نیروی مکشی کاهش یافته و پیوند بین دانه‌های خاک از بین رفته و خاک دچار فروریزش می‌شود. [۴۳].

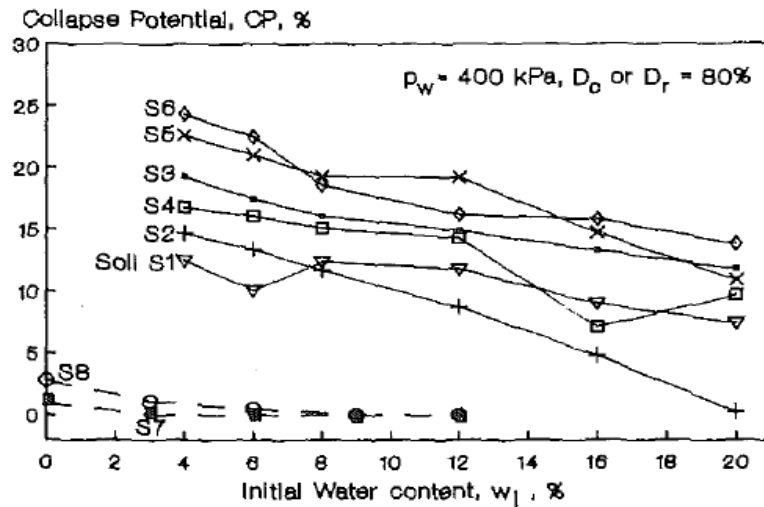
۲-۴- عوامل مؤثر بر میزان فروریزش:

محققین عوامل متعددی را به عنوان عوامل اثرگذار بر فروریزش معرفی کرده‌اند. از جمله این عوامل به رطوبت اولیه، وزن مخصوص خشک اولیه، نوع خاک و دانه‌بندی آن، تراکم، تنش موجود در هنگام اشباع کردن^۵ خاک و منشاء زمین شناسی نمونه اشاره شده‌است. [۱، ۴، ۴۴، ۴۵].

۲-۴-۱- رطوبت اولیه:

رطوبت اولیه از عواملی است که بر پتانسیل فروریزش خاک تأثیر به‌سزایی دارد. در شکل (۱-۲) اثر رطوبت اولیه بر پتانسیل فروریزش نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل (۱-۲) دیده می‌شود کاهش رطوبت اولیه خاک باعث شده‌است که خاک در حالت ناپایداری قرار گرفته باشد و فروریزش افزایش یافته باشد. [۴۴].

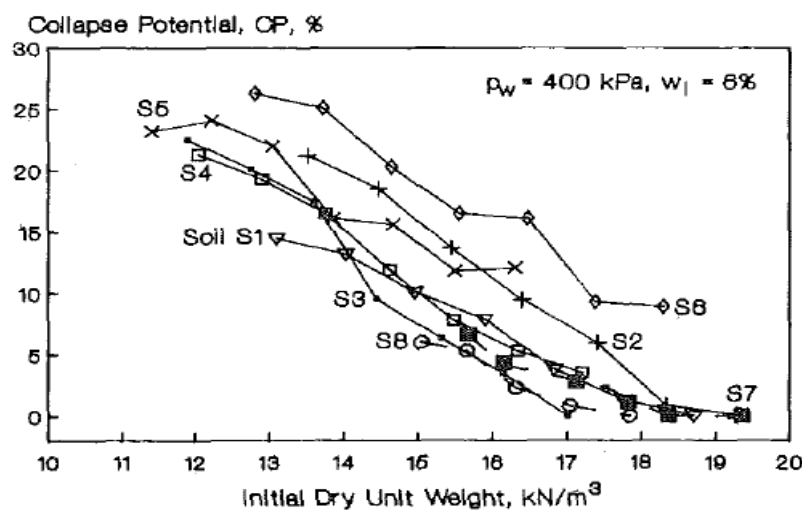
⁵ Pressure at wetting



شکل (۲-۱) اثر رطوبت اولیه بر فروریزش [۴۴]

۲-۴-۲- وزن مخصوص خشک اولیه:

براساس نتایج آزمایش‌های باسما و تانسر^۶، وزن مخصوص خشک اولیه اثر قابل توجهی بر میزان رمبندگی خاک داشته‌است. همانطور که در شکل (۲-۲) دیده می‌شود افزایش وزن مخصوص خشک اولیه در تنش اعمالی و رطوبت یکسان، سبب کاهش پتانسیل رمبندگی شده‌است. [۴۴].

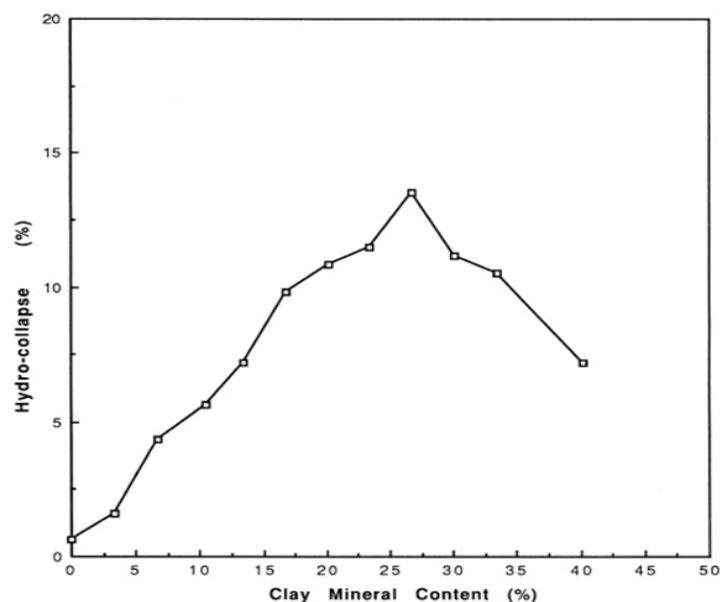


شکل (۲-۲) اثر تغییرات وزن مخصوص خشک اولیه بر فروریزش [۴۴]

⁶ Basma and Tuncer

۲-۴-۳- نوع خاک:

اسالی و همکاران^۷ در سال ۱۹۹۸ اثر مقدار رس را بر میزان فروریزش خاک لس بررسی کرده‌اند. شکل (۲-۳) نشان‌دهنده اثر رس بر میزان فروریزش است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش رس تا مقدار ۲۵٪، فروریزش افزایش یافته و بعد از آن کاهش یافته‌است. [۴۵].

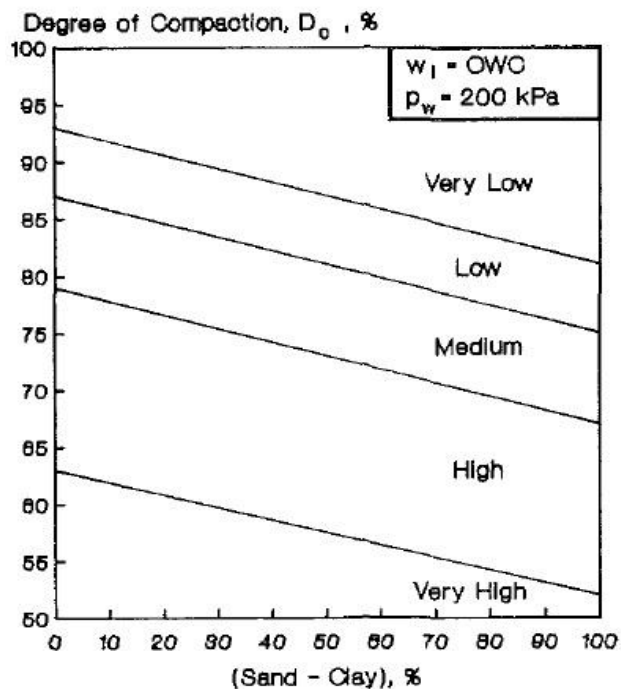


شکل (۲-۳) اثر میزان رس بر فروریزش [۴۵]

۲-۴-۴- تراکم نسبی:

در شکل (۲-۴) رابطه بین پتانسیل فروریزش و تراکم نسبی خاک نشان داده شده‌است. همانطور که واضح است، در درصد رطوبت ثابت، میزان فروریزش با افزایش تراکم خاک، کاهش یافته‌است و امکان فروریزش نمونه‌ای با تراکم ۱۰۰٪ بسیار پایین است. [۴۴].

⁷ Assallay et.al



شکل (۴-۲) رابطه پتانسیل فروریزشی با تراکم نسبی [۴۴]

۵-۴-۲- سطح تنش اعمالی:

در شکل (۵-۲) نتایج آزمایش‌های باسما و تانسر بر روی ۸ نمونه خاک با دانه‌بندی متفاوت نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص است، سطح تنش اعمالی اثر زیادی بر رمبندگی خاک داشته‌است. در نمونه‌های $S_1^A(CL)$ ، $S_2(CL)$ ، $S_3^A(CH)$ ، $S_4^A(ML-CL)$ ، $S_5^A(ML)$ و $S_6(CL)$ با افزایش تنش اعمالی، پتانسیل رمبندگی تا یک نقطه مشخص افزایش یافته و بعد از آن افزایش چشم‌گیری نداشته‌است. گرچه در نمونه‌های ماسه‌ای مانند $S_7^A(SM)$ و $S_8^A(SP-SC)$ با افزایش تنش اعمالی، پتانسیل رمبندگی همچنان افزایش یافته‌است. [۴۴].

⁸ Lean Clay

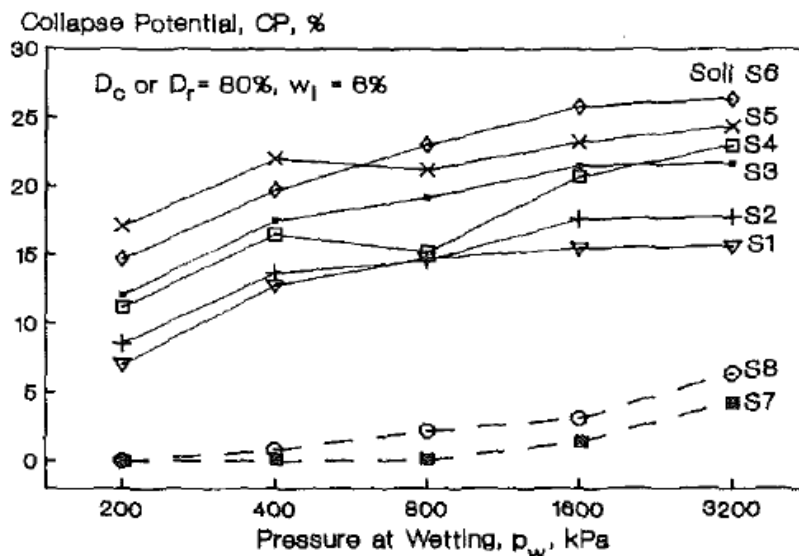
⁹ Fat Clay

¹⁰ Silty Clay

¹¹ Silt

¹² Silty Sand or Silty Sand with Gravel

¹³ Poorly graded Sand with Clay (or Silty Clay) or Poorly graded Sand with Clay and Gravel (or Silty Clay and Gravel)



شکل (۲-۵) رابطه پتانسیل فروریزش با سطح تنش اعمالی [۴۴]

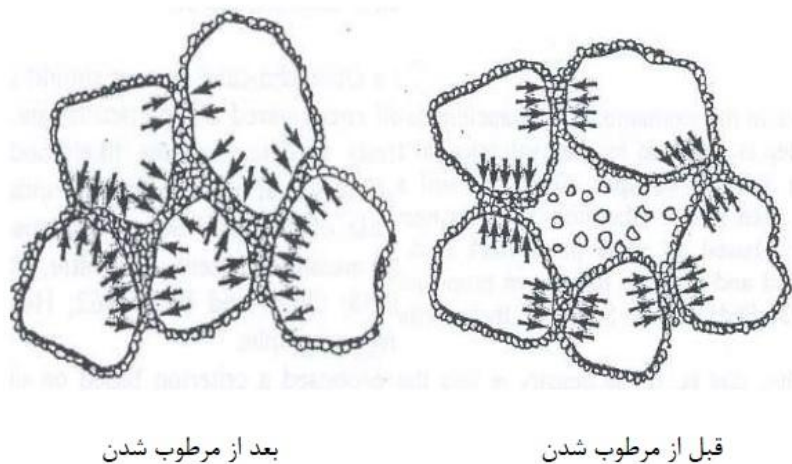
۲-۴-۶- منشاء زمین شناسی:

نتایج دستی‌گردی در سال ۱۳۹۱ نشان داده‌است که منشاء زمین‌شناسی از عوامل اثرگذار بر میزان فروریزش خاک است. خاک‌های انتقالی چگالی خشک بیشتری و نسبت تخلخل کمتری نسبت به خاک‌های برجا دارا بوده‌اند. هرچند که اشباع‌سازی و بارگذاری باعث کاهش تخلخل بیشتر در خاک‌های انتقالی یا برابر با خاک‌های برجا شده‌است. [۴۶].

۲-۵- مکانیزم فروریزش خاک‌های رمبنده:

پدیده فروریزش به ساختار متخلخل خاک مربوط است. نتایج نشان داده‌است که بخشی از ذرات ریزدانه خاک به عنوان ماده پیونددهنده بین ذرات مجاور هم عمل کرده که فشار موضعی را تحمل می‌کنند. خاک در درصد رطوبت طبیعی تحت اثر بار به آرامی متراکم می‌شود و در ساختار خاک تغییرات قابل توجهی ایجاد نمی‌شود. همانطور که در شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود، هنگامی که خاک بارگذاری شده در معرض رطوبت بیش از حد بحرانی قرار گرفته‌است، پیوندهای ایجاد شده توسط سیلت یا رس که یک سیمان‌تاسیون شکننده را فراهم

کرده‌اند، ضعیف شده و در نهایت ساختار خاک فرو ریخته‌است.[۱].



شکل (۶-۲) ساختار خاک فروریزی بارگذاری شده قبل و بعد از مرطوب شدن [۱]

۶-۲- اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک‌ها:

در استاندارد ASTM D5333-03 آزمایش تحکیم جهت اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی توضیح داده شده‌است. پتانسیل رمبندگی براساس تغییرات نسبت پوکی در اثر اشباع‌سازی در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال بدست آمده‌است. همچنین این شاخص بر اساس معادله (۱-۲) محاسبه شده‌است که در آن Δe تغییرات نسبت پوکی قبل و بعد از اشباع شدن در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال و e_0 نسبت پوکی اولیه می‌باشد.

$$I_c = \frac{\Delta e}{1+e_0} \times 100 \quad (1-2)$$

درجه رمبندگی خاک‌ها براساس شاخص رمبندگی در جدول (۱-۲) قرار داده شده‌است.[۴۷].

جدول (۱-۲) رده‌بندی شاخص رمبندگی [۴۷]

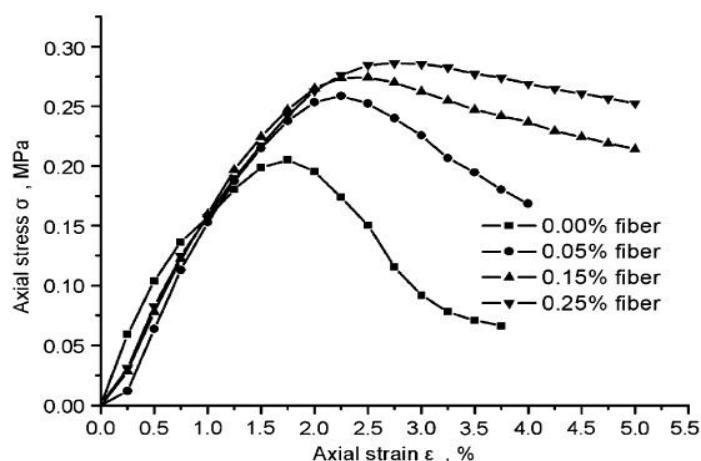
درجه رمبندگی	شاخص رمبندگی (%)
غیر رمبند	۰-۰/۱
کم	۰/۱-۲
متوسط	۲-۶
نسبتاً شدید	۶-۱۰
شدید	>۱۰

۷-۲- مروری بر ادبیات فنی مرتبط

۷-۲-۱- اثر الیاف کوتاه پلی پروپیلین

تانگ و همکاران^{۱۴} در سال ۲۰۰۷ از الیاف کوتاه پلی پروپیلین^{۱۵} جهت بهسازی خاک رسی استفاده کردند. در شکل‌های (۷-۲)، (۸-۲) و (۹-۲) به ترتیب اثر الیاف و سیمان به تنهایی و اثر همزمان آن‌ها بر نمودار تنش_کرنش نمایش داده شده است. [۲۰].

با توجه به شکل (۷-۲) واضح است که استفاده از الیاف به تنهایی سبب افزایش مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی شده است.

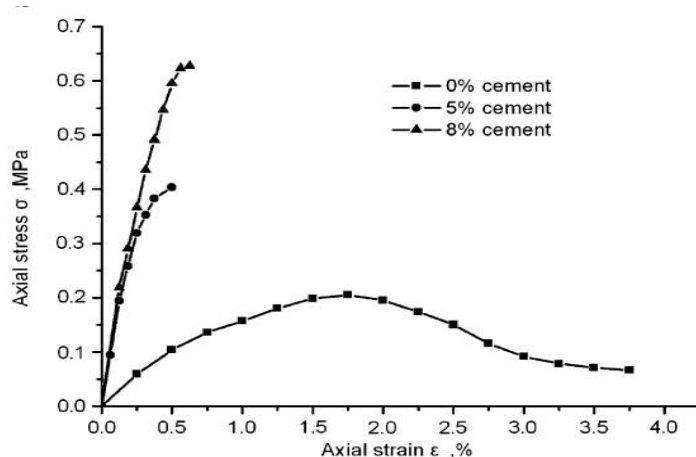


شکل (۷-۲) نمودار تنش_کرنش نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلین [۲۰]

¹⁴ Tang et.al

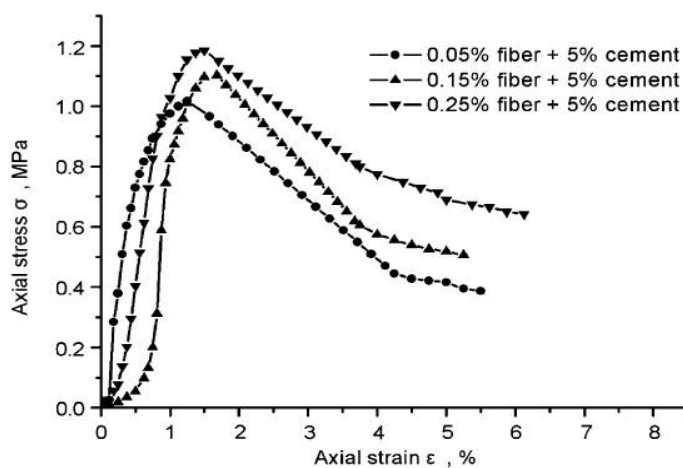
¹⁵ polypropylene fiber

در شکل (۸-۲) دیده می‌شود که با افزایش مقدار سیمان، مقاومت فشاری افزایش یافته‌است اما به علت تردشدگی نمونه، کرنش گسیختگی کاهش یافته‌است.



شکل (۸-۲) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های حاوی سیمان [۲۰]

شکل (۹-۲) اثر همزمان الیاف و سیمان را بر مقاومت فشاری نشان داده‌است. همانطور که دیده می‌شود در یک مقدار ثابت سیمان، با افزایش مقدار الیاف، مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی افزایش یافته‌است.



شکل (۹-۲) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه‌های حاوی سیمان و الیاف [۲۰]

۲-۷-۲- تثبیت بیولوژیکی

نیک اقبال سی سخت و همکاران در سال ۱۳۹۳ تثبیت بیولوژیکی خاک رمبنده را بررسی کردند. در این تحقیق از باکتری باسیلوس اسفاریکوس^{۱۶} و کلسیم کلرید^{۱۷} برای بهبود وضعیت رمبندگی استفاده شده است. همچنین از محیط کشت برای کشت باکتری استفاده شده که در جدول (۲-۲) اجزای محیط کشت آورده شده است. [۴۸].

جدول (۲-۲) ترکیبات محیط کشت. [۴۸].

اجزا محیط کشت	مقدار (گرم بر لیتر)
بیکربنات سدیم ^{۱۸}	۲/۱۲
نوترینت براث ^{۱۹}	۳
کلرید آمونیوم ^{۲۰}	۱۰
اوره ^{۲۱}	۱۰

در این تحقیق ابتدا نوع مخلوط کردن نمونه با باکتری و عامل رسوب ساز مورد آزمایش قرار گرفته است. بدین صورت که در حالت اول ابتدا کلسیم کلرید کاملاً با خاک مخلوط و سپس محلول باکتری به خاک اضافه شده است. (اختلاط نوع ۱) در حالت دوم محلول باکتری و کلسیم کلرید باهم به خاک اضافه و مخلوط شده اند. (اختلاط نوع ۲).

باتوجه به پتانسیل رمبندگی دو نمونه تهیه شده در دو حالت ۱ و ۲ می توان گفت نمونه تهیه شده با روش اختلاط نوع ۲، کاهش پتانسیل رمبندگی بیشتری را نسبت به نمونه دیگر داشته است. در جدول (۳-۲) اختلاف پتانسل رمبندگی بین دو روش اختلاط نشان داده شده است.

¹⁶ Bacillus Sphaericus

¹⁷ Calcium Chloride

¹⁸ Sodium Bicarbonate

¹⁹ Nutrient Broth

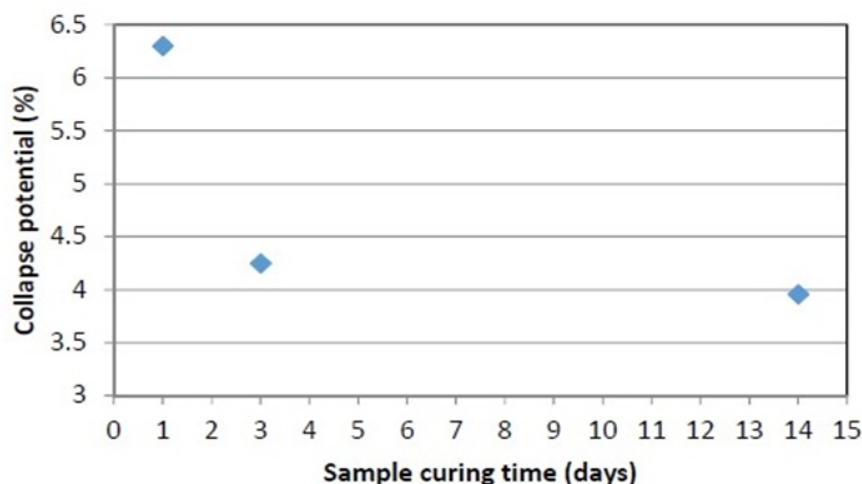
²⁰ Ammonium Chloride

²¹ Urea

جدول (۳-۲) اثر روش اختلاط بر میزان کاهش پتانسیل رمبندگی. [۴۸]

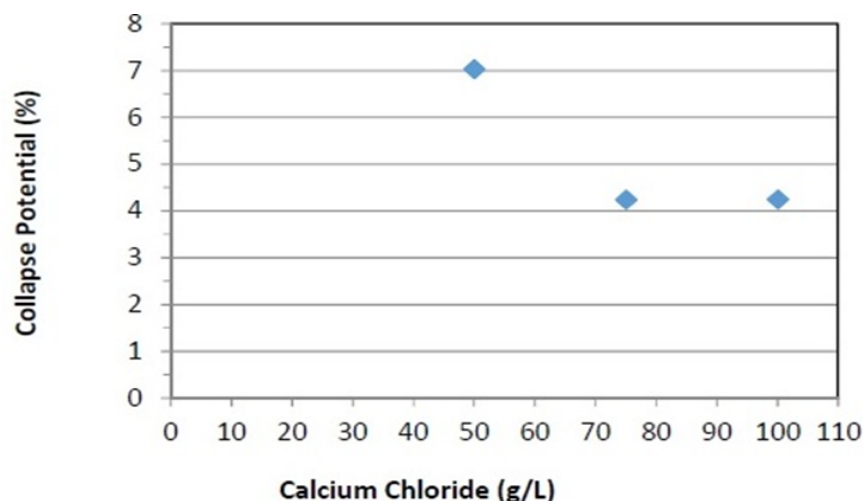
نوع نمونه	درصد پتانسیل رمبندگی
نمونه شاهد	۱۲/۴۴
اختلاط نوع ۱	۹/۸۳
اختلاط نوع ۲	۶/۴۷

با بررسی نتایج آزمایش تحکیم بر روی خاک تثبیت شده با باکتری باسیلوس اسفاریکوس و کلسیم کلرید مشاهده شده است که با ثابت نگه داشتن عواملی مانند درصد رطوبت، چگالی خشک خاک، مقدار باکتری و عامل رسوب ساز، با گذشت زمان عمل آوری، رمبندگی خاک کاهش یافته است. این نتایج در شکل (۲-۱۰) قابل مشاهده است.



شکل (۲-۱۰) پتانسیل رمبندگی در زمان های عمل آوری ۱، ۳ و ۱۴ روزه. [۴۸]

در شکل (۲-۱۱) اثر غلظت های مختلف محلول کلسیم کلرید بر پتانسیل رمبندگی نشان داده شده است. خاک شاهد در رده شدیداً رمبند قرار داشته که پس از تثبیت خاک با محلول باکتری و کلسیم کلرید با غلظت ۷۵ گرم بر لیتر درجه رمبندگی خاک به متوسط تغییر پیدا کرده است. از آنجایی که با افزایش عامل رسوب ساز، رمبندگی تغییرات چندانی نداشته است بنابراین مقدار بهینه کلسیم کلرید ۷۵ گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

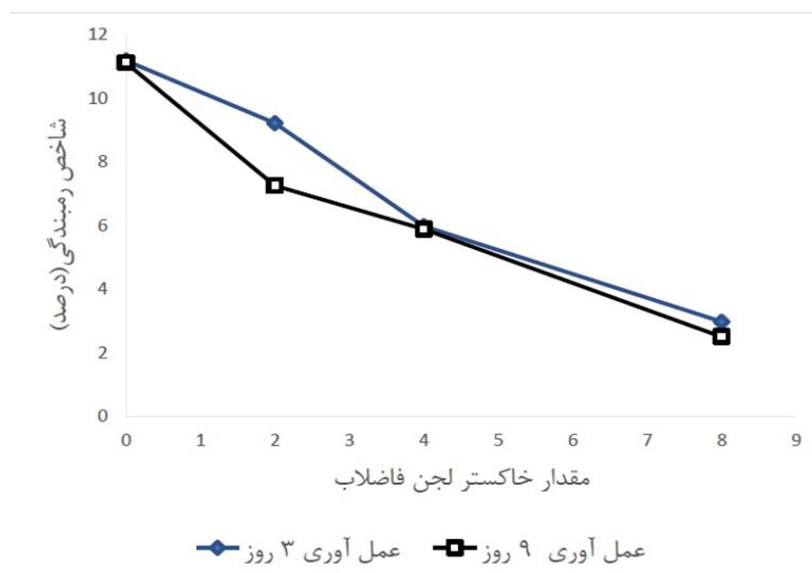


شکل (۱۱-۲) مقایسه پتانسل رمبندگی در سه مقدار کلسیم کلرید. [۴۸]

۲-۷-۳- اثر خاکستر لجن فاضلاب

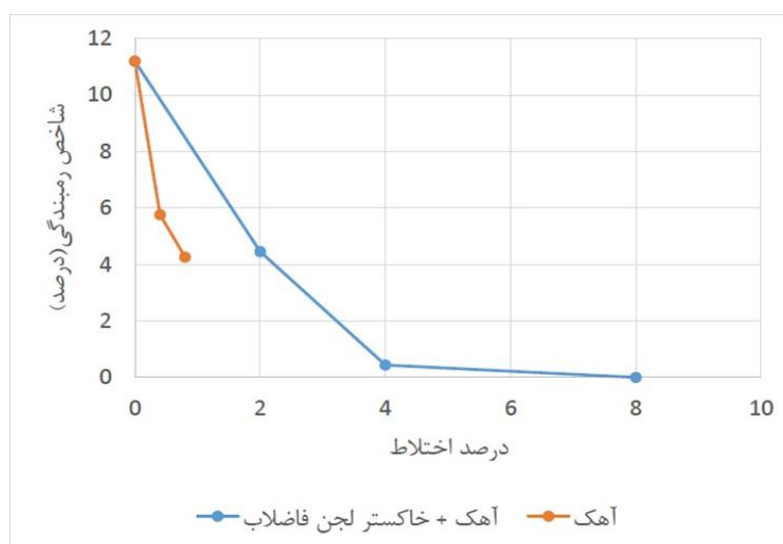
عطاردی و همکار در سال ۱۳۹۴ با استفاده از خاکستر لجن فاضلاب به بهسازی خاک رمبندهای که در رده CL قرار داشته، پرداختند. [۴۹].

نتایج حاصل از آزمایش رمبندگی بر روی نمونه‌های ساخته شده با مقادیر مختلف خاکستر لجن فاضلاب در شکل (۱۲-۲) نشان داده شده است. نتایج نشان داده است که در نمونه‌های ترکیب شده با خاکستر لجن فاضلاب با زمان عمل‌آوری ۳ روز، افزایش مقدار خاکستر لجن فاضلاب باعث کاهش شاخص رمبندگی شده است. به طوری که با اضافه کردن ۸٪ خاکستر و با در نظر گرفتن زمان عمل‌آوری ۳ روز شاخص رمبندگی ۷۳٪ کاهش یافته است. براساس نتایج به دست آمده مشاهده شده است که زمان عمل‌آوری ۹ روز تفاوت چندانی با زمان عمل‌آوری ۳ روز نداشته و فقط برای نمونه‌هایی که با ۲٪ خاکستر لجن فاضلاب تثبیت شده‌اند بین این دو زمان عمل‌آوری، تفاوت در مقدار شاخص رمبندگی بوجود آمده است.



شکل (۲-۱۲) تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب بر روی شاخص رمبندگی. [۴۹]

آن‌ها همچنین اثر همزمان خاکستر لجن فاضلاب و آهک را با نسبت چهار به یک بر روی پتانسیل رمبندگی بررسی کرده‌اند و مشاهده شده‌است که استفاده از خاکستر لجن و آهک اثر بیشتری نسبت به اضافه کردن خاکستر به تنهایی و یا آهک به تنهایی داشته‌است. شکل (۲-۱۳) به مقایسه بین شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک و خاک بازسازی شده با آهک پرداخته‌است.



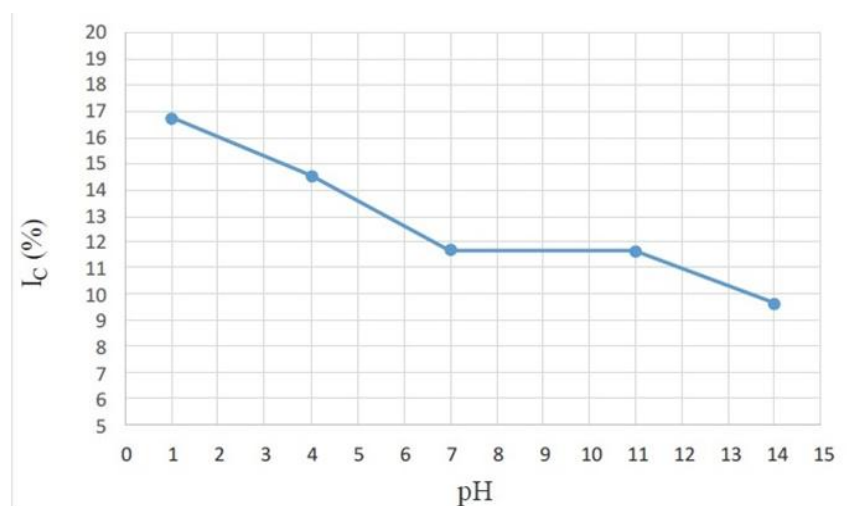
شکل (۲-۱۳) مقایسه شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک و خاک بازسازی شده با آهک. [۴۹]

۲-۷-۴- اثر pH شیرابه فاضلاب

خدابنده و همکاران در سال ۱۳۹۴ به بررسی تاثیر pH شیرابه بر میزان فروریزش و پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده پرداختند. خاک مورد استفاده در این مطالعه خاک لس بوده است که از منطقه کلانته استان گلستان تهیه شده و در سیستم طبقه بندی متحد در رده CL قرار گرفته است. [۵۰].

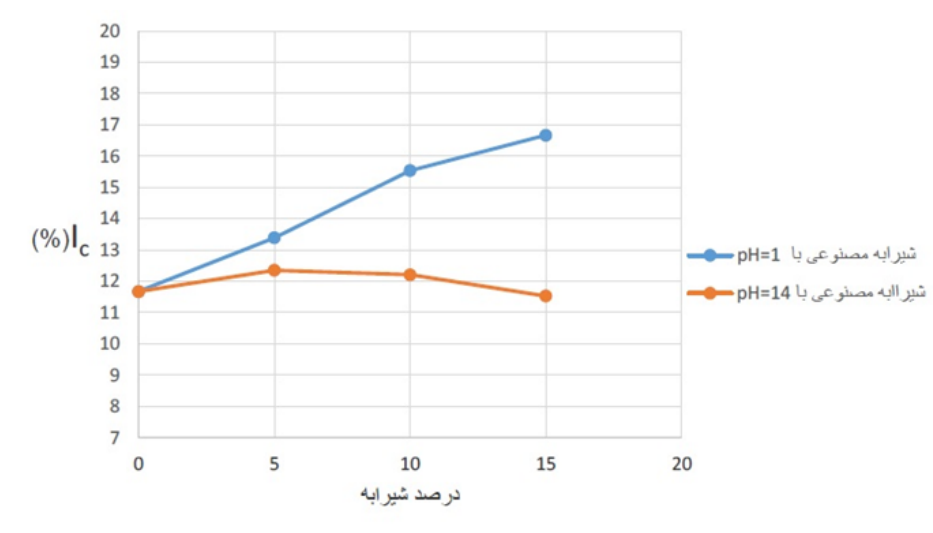
در شکل (۲-۱۴) اثر pH شیرابه بر پتانسیل رمبندگی نشان داده شده است که نتایج آن به شرح زیر است:

- با کاهش pH شیرابه و اسیدی تر شدن آن میزان فروریزش خاک افزایش یافته است.
- دامنه تغییرات پتانسیل رمبندگی خاک در pH های پایین و اسیدی بسیار بیشتر از pH های بالا و قلیایی بوده است.



شکل (۲-۱۴) نمودار مقایسه رفتار فروریزش خاک در مقابل pH [50]

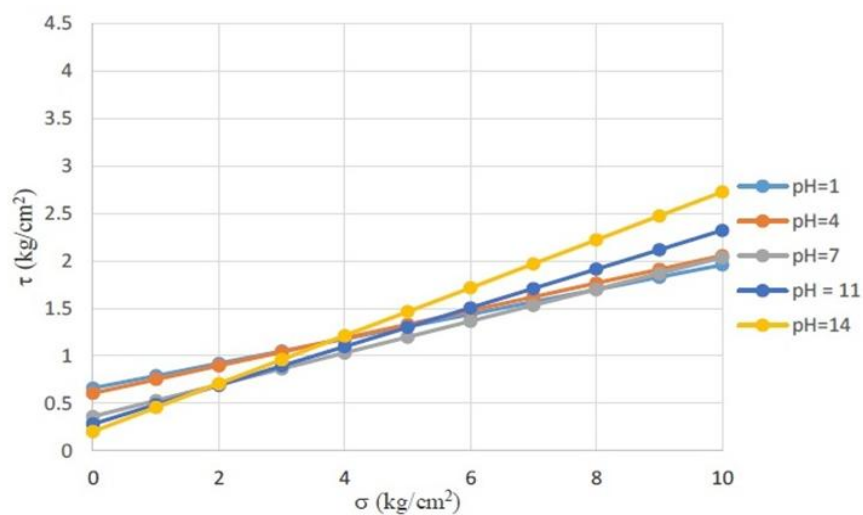
برای بررسی تاثیر درصد آلودگی بر میزان فروریزش خاک از نمونه های خاک با ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی شیرابه و pH های ۱ و ۱۴ استفاده شده است. سپس نمونه ها در شرایط اشباع تحت آزمایش تحکیم قرار گرفته اند. در شکل (۲-۱۵) نتایج این آزمایش نشان داده شده است. به دلیل اینکه نمونه ها در شرایط اشباع با آب قرار داشته اند، اسیدی و بازی بودن آن ها اثر چندانی بر روی میزان فروریزش نداشته است. همانطور که مشاهده می شود در نمونه قلیایی با افزایش درصد شیرابه، پتانسیل رمبندگی به میزان کمی افزایش یافته است اما در نمونه اسیدی با افزایش درصد شیرابه پتانسیل رمبندگی از مقدار ۱۱/۶۷ به ۱۶/۶۷ افزایش یافته است.



شکل (۲-۱۵) تاثیر افزودن درصدی شیرابه‌های اسیدی و قلیایی بر میزان فروریزش خاک. [50]

در شکل (۲-۱۶) نتایج آزمایش برش مستقیم نمونه‌های اشباع با pH های مختلف نشان داده شده‌است. بررسی‌ها نشان داده‌است که:

- با کاهش pH شیرابه و اسیدی‌تر شدن آن چسبندگی خاک افزایش پیدا کرده‌است.
- با کاهش pH شیرابه و اسیدی‌تر شدن آن زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش پیدا کرده‌است.

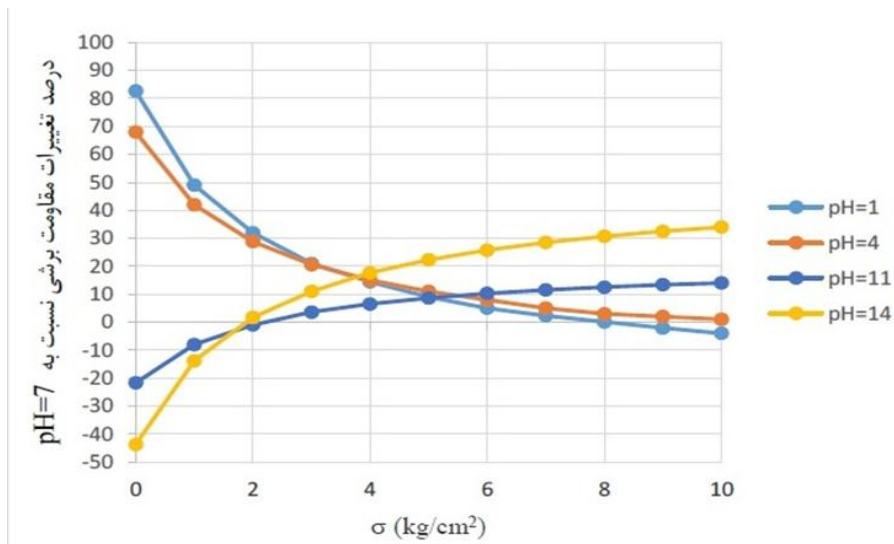


شکل (۲-۱۶) نمودار مقایسه پوش گسیختگی برای نمونه‌های خاک اشباع با pH های مختلف. [50]

- دامنه تغییرات پارامتر چسبندگی خاک در pH های پایین و اسیدی بسیار بیشتر از pH های بالا و

قلیایی بوده است.

➤ در خصوص تغییرات مقاومت برشی خاک در pH های مختلف نسبت به pH=7 که در شکل (۲-۱۷) نشان داده شده است، نتیجه گرفته شده است که به ازاء مقادیر بالا تنش قائم، با کاهش pH شیاره و اسیدی تر شدن آن چون زاویه اصطکاک داخلی رو به کاهش است، حاصلضرب آن در تنش قائم نیز کاهش یافته و حتی با افزایش مقدار چسبندگی، مقاومت برشی خاک یادشده، کاهش پیدا کرده است.

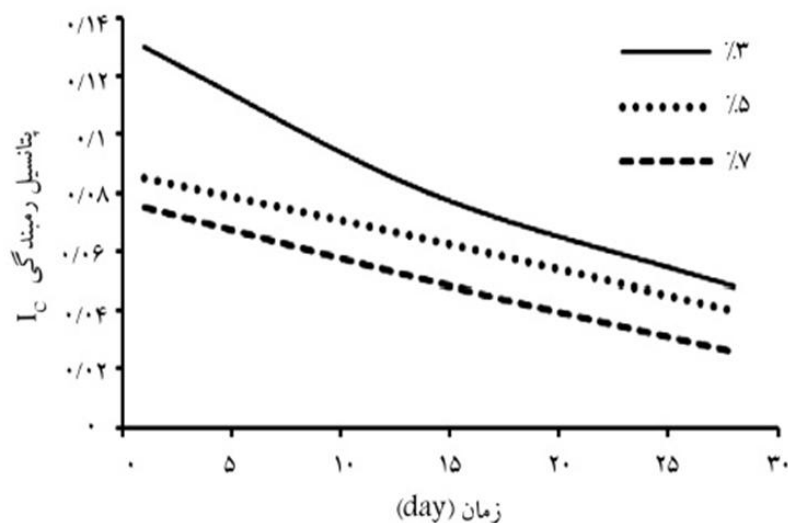


شکل (۲-۱۷) درصد تغییرات مقاومت برشی خاک در pH های مختلف نسبت به pH=7 [۵۰]

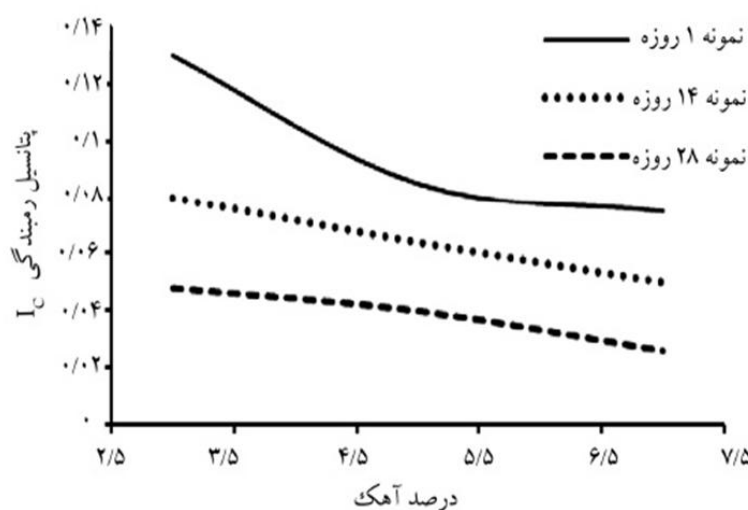
۲-۷-۵- اثر آهک

یوسفی و پرویزی در سال ۱۳۹۴ از آهک جهت بهبود پارامترهای مقاومت برشی و کاهش پتانسیل رمبندگی خاک رمبند که در رده CL قرار داشته، استفاده کردند. [۵۱].

در شکل های (۲-۱۸) و (۲-۱۹) نتایج آزمایش پتانسیل رمبندگی به ترتیب برحسب زمان عمل آوری و مقدار آهک نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۸) تغییرات پتانسیل رمبندگی برحسب زمان عمل‌آوری. [۵۱]

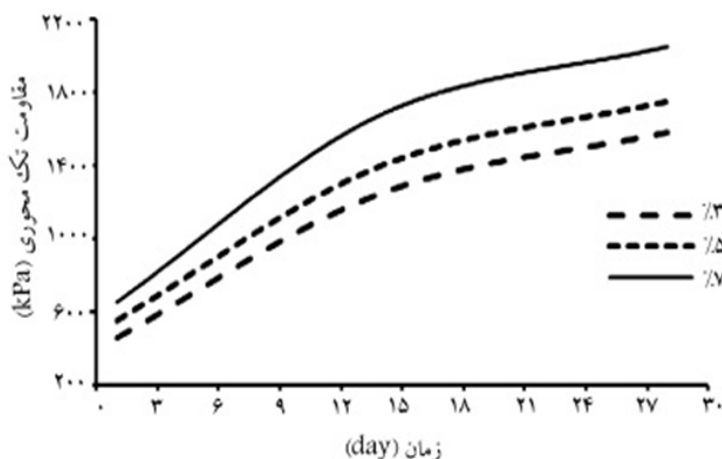


شکل (۲-۱۹) تغییرات پتانسیل رمبندگی برحسب درصد آهک. [۵۱]

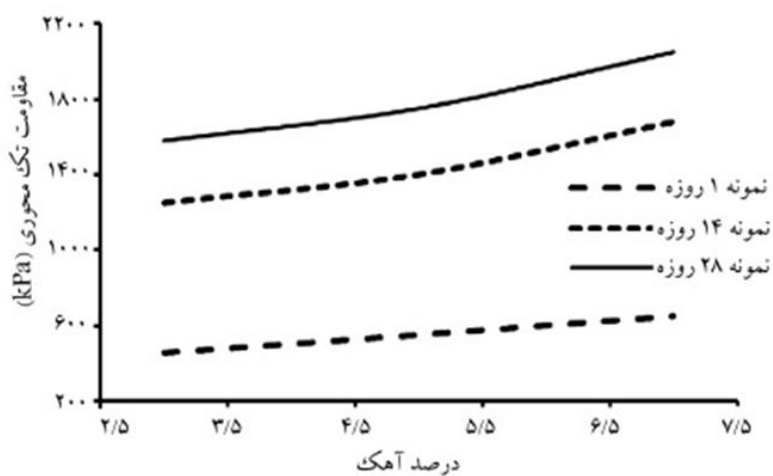
چنان‌چه مشاهده می‌شود با افزایش درصد آهک و زمان عمل‌آوری از میزان رمبندگی خاک کاسته شده‌است. با توجه به نمودارهای (۲-۱۸) و (۲-۱۹) نتیجه گرفته شده‌است که در صورتی‌که در اصلاح خاک زمان کافی وجود داشته باشد اصلاح خاک با ۳٪ آهک کافی است ولی در شرایطی که زمان کافی در اختیار نباشد توصیه به اصلاح خاک رمبند با ۵٪ آهک است.

در شکل‌های (۲-۲۰) و (۲-۲۱) تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک به ترتیب

برحسب زمان عمل‌آوری و مقدار آهک نشان داده شده‌است. چنان‌چه از شکل‌ها مشخص است، با افزایش مقدار آهک و زمان عمل‌آوری، مقاومت خاک تثبیت‌شده افزایش یافته و نرخ تغییرات مقاومت در ۱۴ روز اول اصلاح بیشتر بوده‌است.

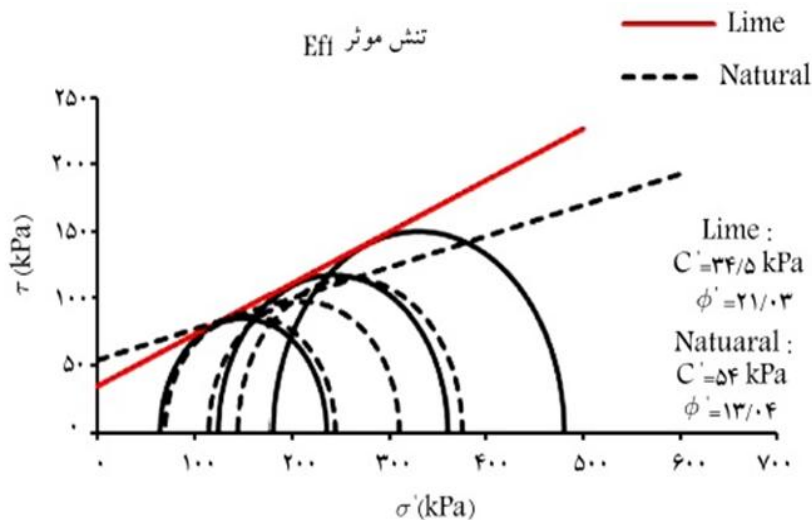


شکل (۲-۲۰) تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف آهک برحسب زمان عمل‌آوری. [۵۱]

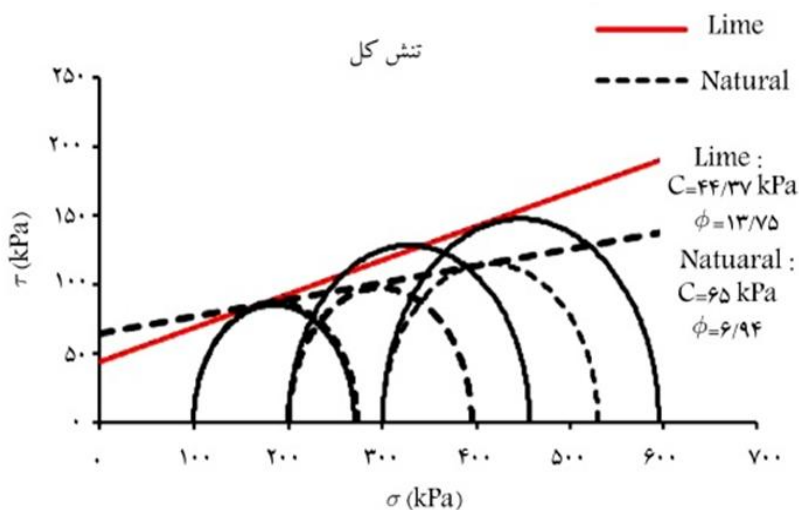


شکل (۲-۲۱) تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف آهک برحسب درصد آهک. [۵۱]

نتایج آزمایش سه‌محوری بر روی خاک تثبیت‌شده با آهک در شکل‌های (۲-۲۲) و (۲-۲۳) نشان داده شده‌است.



شکل (۲-۲۲) دایره های مور و پوش گسیختگی آزمایش سه محوری خاک تزریق شده با آهک بر حسب تنش مؤثر. [۵۱]



شکل (۲-۲۳) دایره های مور و پوش گسیختگی آزمایش سه محوری خاک تزریق شده با آهک بر حسب تنش کل. [۵۱]

با توجه به جدول (۲-۴) مشاهده شده است که پارامترهای مقاومت برشی خاک پس از تزریق بهبود یافته اند. ثابت بودن تنش ها در هردو حالت طبیعی و تزریق شده، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی خاک را به همراه داشته است که نشان از بهبود رفتار خاک پس از تزریق است.

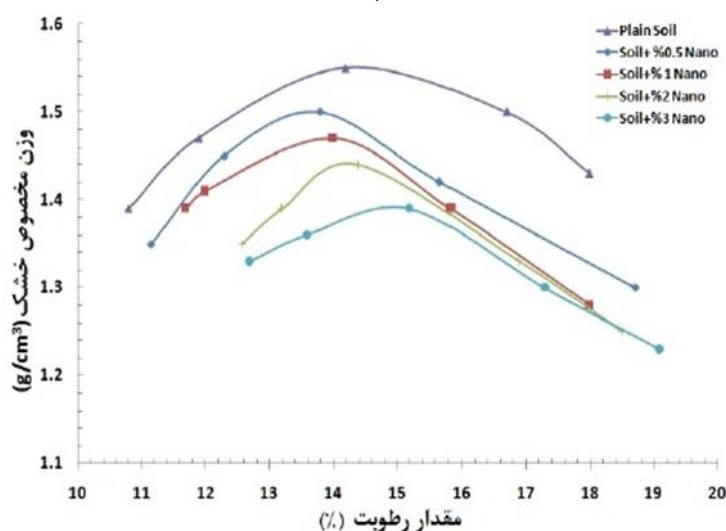
جدول (۲-۴) مقایسه پارامترهای مقاومت برشی خاک طبیعی و بهسازی شده. [۵۱]

نوع خاک	ϕ' (درجه)	C' (kg/cm^2)	ϕ_u (درجه)	C_u (kg/cm^2)
طبیعی	۱۳/۰۴	۰/۵۴	۶/۹۴	۰/۶۵
تزریق شده با آهک	۲۱/۰۳	۰/۳۴۵	۱۳/۷۵	۰/۴۴۳۷

۲-۷-۶- اثر نانورس

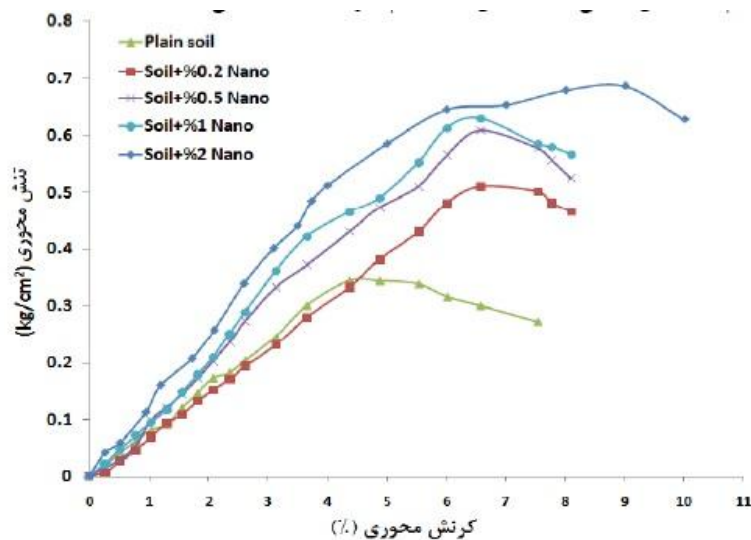
طبرسا در سال ۱۳۹۵ تأثیر نانورس را بر روی خاک شبکه سد بوستان گنبد و خاک منطقه اینچه برون بررسی کرده است. هر دو خاک در رده CL-ML قرار داشته است. [۵۲].

در شکل (۲-۲۴) اثر افزودن نانورس بر نتایج آزمایش تراکم نشان داده شده است. نتایج این آزمایش نشان داده است که با افزودن نانورس به خاک، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه ها، کاهش یافته است.



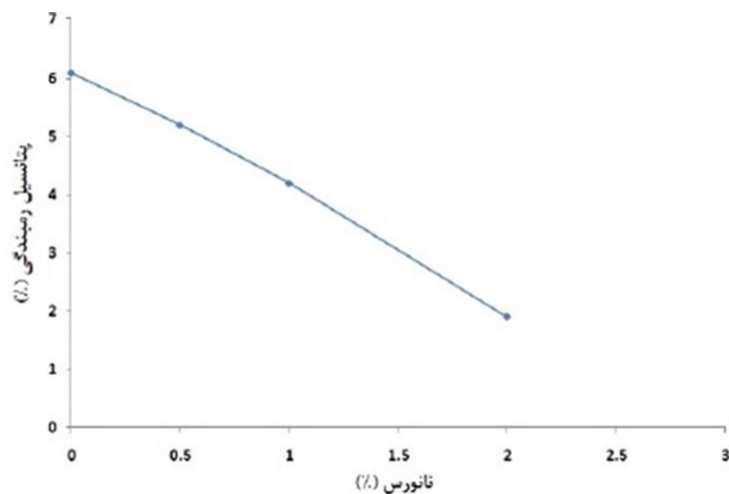
شکل (۲-۲۴) تأثیر افزودن نانورس بر منحنی تراکم خاک شبکه سد بوستان گنبد. [۵۲]

نتایج آزمایش تک محوری نمونه خاک معمولی و نمونه های حاوی نانورس در شکل (۲-۲۵) قرار داده شده و نشان داده است که افزایش درصد نانورس، موجب افزایش محسوس مقاومت فشاری نمونه ها شده است.

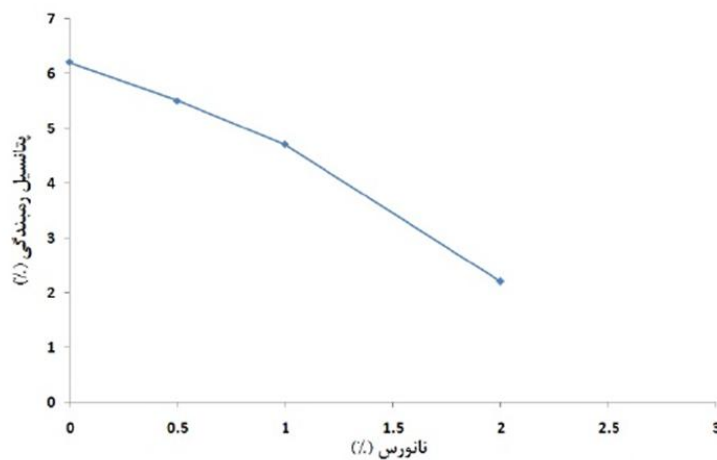


شکل (۲-۲۵) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های بهسازی‌شده با نانورس و خاک معمولی شبکه سد بوستان. [۵۲]

اثر افزودن نانورس بر پتانسیل رմبندگی نمونه‌های خاک شبکه سد بوستان گنبد و خاک منطقه‌ی اینچه برون به ترتیب در شکل (۲-۲۶) و (۲-۲۷) نشان داده شده‌است. با توجه به اهمیت پتانسیل رմبندگی خاک‌های بررسی‌شده، نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌است که در اثر افزودن مقادیر کم نانورس به خاک‌های بررسی‌شده، پتانسیل رմبندگی نمونه‌ها به صورت چشم‌گیری کاهش یافته‌است. طبق تحقیقات انجام شده تأثیر نانورس بر خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها تابع نوع خاک، دانه‌بندی و خواص خمیری آن‌هاست. به‌طوری که تأثیر مکانیسم بهسازی ناشی از افزودن نانورس در کاهش پتانسیل رմبندگی در خاک شبکه سد بوستان گنبد در مقایسه با خاک منطقه‌ی اینچه برون به مراتب بیش‌تر بوده‌است.



شکل (۲-۲۶) تأثیر افزودن نانورس بر پتانسیل رمبندگی نمونه‌های خاک شبکه سد بوستان گنبد. [۵۲]



شکل (۲-۲۷) تأثیر افزودن نانورس بر پتانسیل رمبندگی نمونه‌های خاک منطقه‌ی اینچه برون. [۵۲]

۲-۷-۷-۲- اثر آهک، آمونیوم سولفات^{۲۲}، پتاسیم کلرید^{۲۳} و گرد کوره سیمان^{۲۴}

نورزاد و پاک‌نیت در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر آهک، آمونیوم سولفات، پتاسیم کلرید و گرد کوره سیمان بر روی خاک فروریزی CL پرداختند. [۵۳].

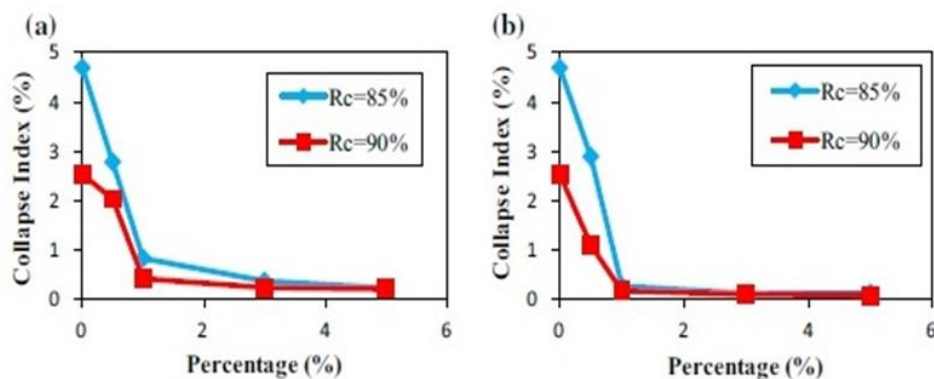
²² Ammonium Sulfate

²³ Potassium Chloride

²⁴ Cement kiln dust

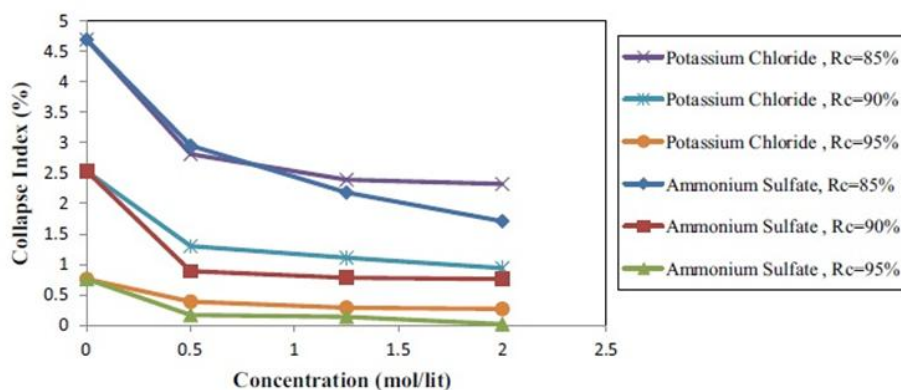
نتایج آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌ها نشان داده‌است که:

- با افزایش درصد تراکم و افزایش مقدار افزودنی بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و گرد کوره سیمان، شاخص رمبندگی کاهش یافته‌است که منحنی‌های آن در شکل (۲-۲۸) نشان داده شده‌است.



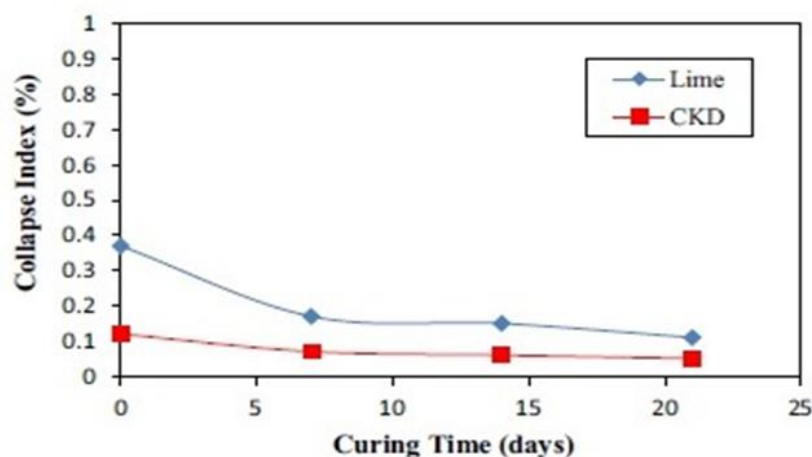
شکل (۲-۲۸) اثر تراکم بر مقدار پتانسیل رمبندگی بر حسب مقدار افزودنی برای نمونه‌هایی با زمان عمل‌آوری ۱ ساعت و تثبیت‌شده با (a) آهک. (b) گرد کوره سیمان. [۵۳].

- در شکل (۲-۲۹) اثر غلظت پتاسیم کلرید و آمونیوم سولفات بر پتانسیل رمبندگی نشان داده شده‌است. مشاهده شده‌است که در صورت بازسازی نمونه‌ها در درصد تراکم یکسان و استفاده از غلظت برابر محلول شیمیایی، نمونه‌های تثبیت‌شده با آمونیوم سولفات، شاخص رمبندگی کمتری نسبت به نمونه‌های تثبیت‌شده با پتاسیم کلراید دارند.



شکل (۲-۲۹) اثر غلظت پتاسیم کلرید و آمونیوم سولفات بر پتانسیل رمبندگی. [۵۳]

➤ در شکل (۲-۳۰) اثر زمان عمل‌آوری بر روی پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تثبیت‌شده با ۳٪ آهک و یا گرد کوره سیمان با تراکم نسبی ۸۵٪ نشان داده شده‌است. مشاهده شده‌است که در صورت بازسازی نمونه‌ها در درصد تراکم یکسان و استفاده از درصد برابر آهک و گرد کوره سیمان، با گذشت زمان عمل‌آوری، شاخص رمبندگی بیشتر کاهش یافته‌است.



شکل (۲-۳۰) اثر زمان عمل‌آوری بر روی پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تثبیت‌شده با ۳٪ افزودنی با تراکم نسبی ۸۵٪ [۵۳]

۲-۷-۸- اثر بیوپلیمرهای guar gum و xanthan gum

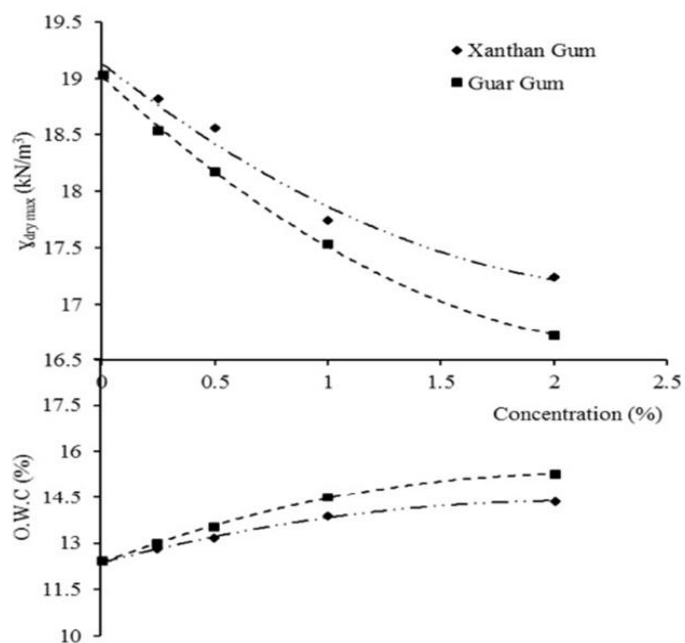
محمد آیلدین و همکاران^{۲۵} در سال ۲۰۱۶ جهت بهسازی خاک رمبند رده CL از دو بیوپلیمر xanthan gum و guar gum استفاده کردند... [۵].

با انجام آزمایش تراکم که نتایج آن در شکل (۲-۳۱) قرار داده شده‌است، مشاهده شده‌است که:

➤ با افزایش درصد افزودنی، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته‌است.

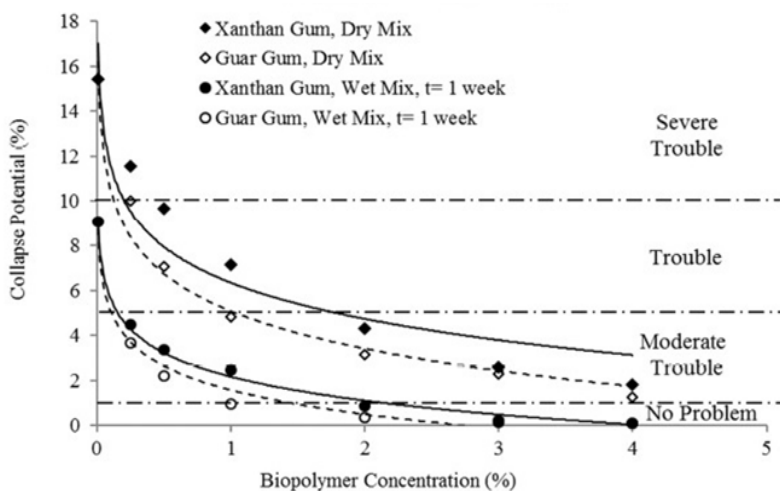
➤ استفاده از guar gum جهت کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه مناسب‌تر بوده‌است.

²⁵ Ayeldeen et.al



شکل (۳۱-۲) اثر مقدار افزودنی بر وزن مخصوص حداکثر و درصد رطوبت بهینه. [۵]

در شکل (۳۲-۲) اثر شرایط اختلاط، زمان عمل‌آوری و غلظت بیوپلیمر بر میزان فروریزش خاک بهسازی‌شده با بیوپلیمرها نشان داده شده‌است. نتایج آزمایش تحکیم نشان داده‌است که با افزایش مقدار بیوپلیمر در هردو شرایط اختلاط خشک و مرطوب، پتانسیل رمبندگی کاهش یافته‌است اما اثر بیوپلیمرها در شرایط اختلاط مرطوب حدود ۲ برابر شرایط خشک بوده‌است.



شکل (۳۲-۲) اثر شرایط اختلاط، زمان عمل‌آوری و غلظت بیوپلیمر بر میزان فروریزش خاک بهسازی‌شده با بیوپلیمرها. [۵]

۲-۷-۹- اثر نانومواد

ایران پور و حداد در سال ۲۰۱۶ با استفاده از نانومواد که شامل نانورس، نانومس، نانوالومینیوم و نانوسیلیس می‌شود، پتانسیل فروریزی خاک رمبنده را بررسی کردند. بهسازی خاک با نانومواد به قدری حساس بوده‌است که هم اثرگذاری مثبت داشته‌است و هم منفی. همچنین با استفاده از مقدار مناسب این مواد، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک بهبود یافته‌است. نمونه‌های خاک دست‌نخورده از مناطق نیمه‌خشک و دارای خاک مستعد فروریزش در ایران جمع‌آوری شده‌است و از S_1 تا S_5 نامگذاری شده‌اند. مشخصات و پارامترهای فیزیکی نمونه‌های مورد استفاده در جدول (۲-۵) ذکر شده‌است. [۵۴].

جدول (۲-۵) مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده.

شماره نمونه	$\omega(\%)$	G_s	PI(%)	LL (%)	$\gamma_d (kN/m^3)$	e_0	نوع خاک
S_1	۴/۴	۲/۵	۷	۲۸	۱۳/۷	۰/۸۵	CL-ML
S_2	۵	۲/۷	۹	۲۵	۱۵/۲	۰/۷۴	CL
S_3	۴	۲/۶۸	۱۱	۳۳	۱۳/۲	۰/۹۳	CL
S_4	۳	۲/۶۰	۱۰	۲۶	۱۵/۶	۰/۶۳	SC
S_5	۳/۸	۲/۵۸	۹	۲۴	۱۳/۸	۰/۷۸	CL

در جدول (۲-۶) تغییرات نسبت پوکی و پتانسیل فروریزش نمونه‌ها نشان داده شده‌است.

جدول (۲-۶) نتایج آزمایش پتانسیل فروریزش نمونه‌ها. [۵۴]

S_5	S_4	S_3	S_2	S_1	Δe در تنش 200kPa
۰/۰۸۷	۰/۰۲۸	۰/۱۰۰	۰/۰۱۱	۰/۰۴۷	
۴/۹۴	۱/۶۷	۵/۱۸	۰/۷۳	۲/۶۰	پتانسیل فروریزش (/.)
متوسط	اندک	متوسط	اندک	متوسط	درجه فروریزش

پس از مشخص شدن نمونه‌های دارای پتانسیل فروریزش به ارزیابی اثر نانومواد روی این نمونه‌ها

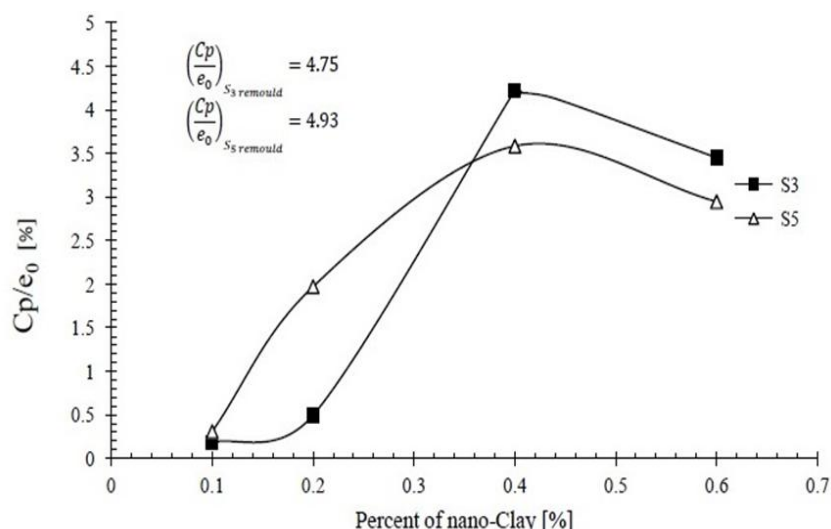
پرداخته شده است. آزمایش تعیین پتانسیل فروریزش بر روی نمونه‌های بازسازی شده S_3 و S_5 انجام شده که نتایج این آزمایشات در جدول (۷-۲) قرار داده شده است.

جدول (۷-۲) نتایج آزمایش پتانسیل فروریزش بر روی نمونه‌های بهسازی شده S_3 و S_5 . [۵۴]

S_3	S_5	Δe در تنش 200kPa
۰/۰۸۴	۰/۰۶۶	
۰/۹۱۵	۰/۷۶	e_0
۴/۳۵	۳/۷۵	پتانسیل فروریزش (%)
متوسط	متوسط	درجه فروریزش

بررسی اثر نانورس:

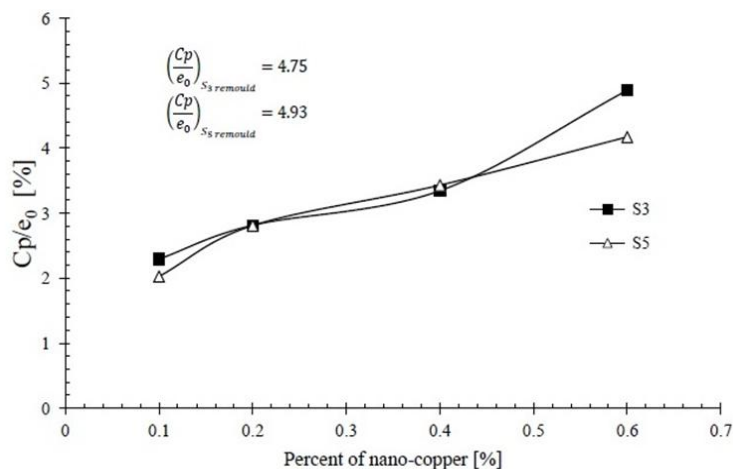
نتایج آزمایش رمبندگی که در شکل (۳۳-۲) قرار داده شده است. نشان داده است که پتانسیل رمبندگی با مصرف ۰/۱٪ نانورس به کمترین میزان رسیده است. [۵۴].



شکل (۳۳-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های بهسازی شده S_3 و S_5 بر حسب درصد نانورس. [۵۴]

بررسی اثر نانومس:

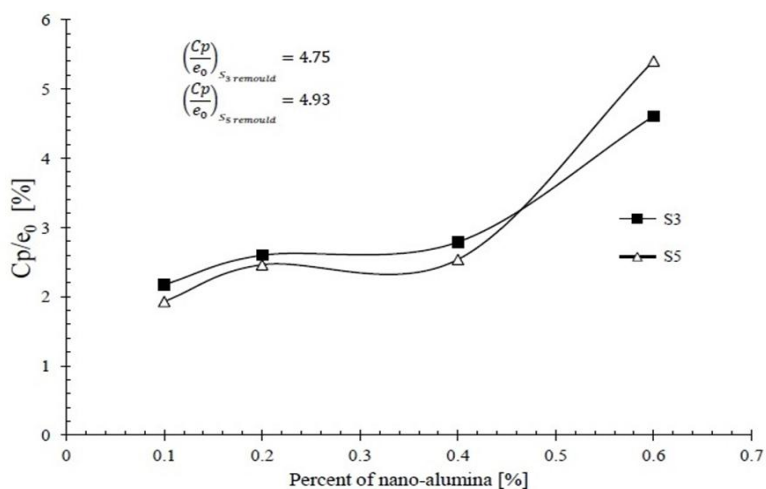
نتایج آزمایش رمبندگی نشان داده است که نمونه‌ای که با مقدار ۰/۱٪ نانورس ساخته شده است، کمترین میزان رمبندگی را داشته است. در شکل (۳۴-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی در اثر بهسازی با نانومس نشان داده شده است. [۵۴].



شکل (۳۴-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های بهسازی شده S_3 و S_5 برحسب درصد نانومس. [۵۴]

بررسی اثر نانوالومینیوم:

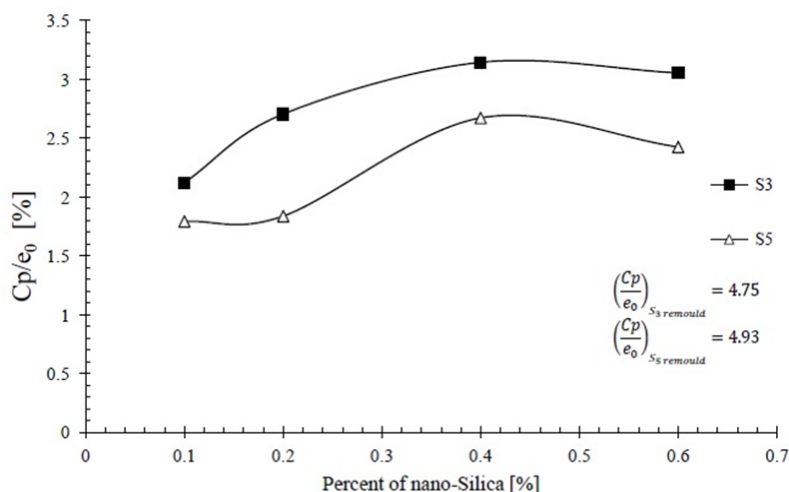
شکل (۳۵-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی در اثر بهسازی با نانوالومینیوم نشان داده شده است. نتایج نشان داده است که با افزایش مقدار نانوالومینیوم، پتانسیل رمبندگی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است و کمترین میزان رمبندگی مربوط به مصرف ۰/۱٪ نانوالومینیوم بوده است. [۵۴].



شکل (۳۵-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های بهسازی شده S_3 و S_5 برحسب درصد نانوالومینیوم. [۵۴]

بررسی اثر نانوسیلیس:

در شکل (۳۶-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی در اثر بهسازی با نانوسیلیس نشان داده شده است. نتایج آزمایش رمبندگی نشان داده است که پتانسیل رمبندگی با مصرف ۰/۱٪ نانوسیلیس به کمترین میزان رسیده است. [۵۴].



شکل (۳۶-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های بهسازی شده S_3 و S_5 بر حسب درصد نانوسیلیس. [۵۴]

به طور کلی نتایج نشان داده است که مقدار کم نانومواد باعث کاهش پتانسیل رمبندگی شده و مصرف بیشتر از مقدار بهینه آن‌ها، اثر منفی داشته است.

۲-۷-۱۰- اثر الیاف شیشه

بکیر و همکاران^{۲۶} در سال ۲۰۱۷ پتانسیل رمبندگی خاک فروریزی بهسازی شده با الیاف شیشه را با انجام آزمایش تحکیم مورد بررسی قرار دادند. خاک مورد مطالعه شامل ۸۰٪ ماسه و ۲۰٪ کائولین به عنوان ریزدانه بوده است. [۵۵].

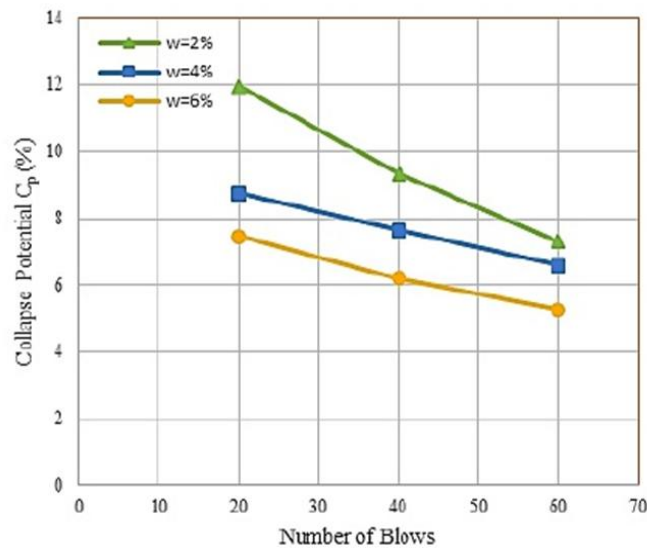
پارامترهای متغیر در آزمایش تحکیم شامل موارد زیر بوده است:

- درصد رطوبت: ۲، ۴ و ۶ درصد
- تعداد ضربات تراکم: ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ضربه

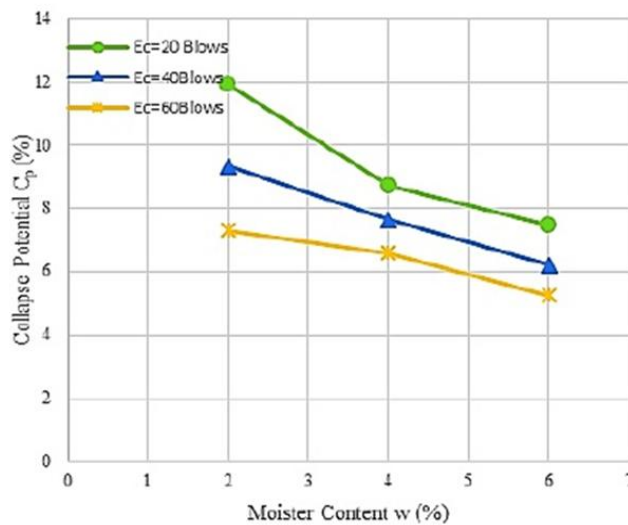
²⁶ Bakir et.al

➤ درصد الیاف شیشه: ۰، ۳، ۴، ۵ و ۶ درصد

در شکل‌های (۳۷-۲) و (۳۸-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی به ترتیب در برابر تعداد ضربات و درصد رطوبت نشان داده شده‌است. نتایج نشان داده‌است که با افزایش تعداد ضربات و افزایش درصد رطوبت، پتانسیل رمبندگی کاهش یافته‌است.

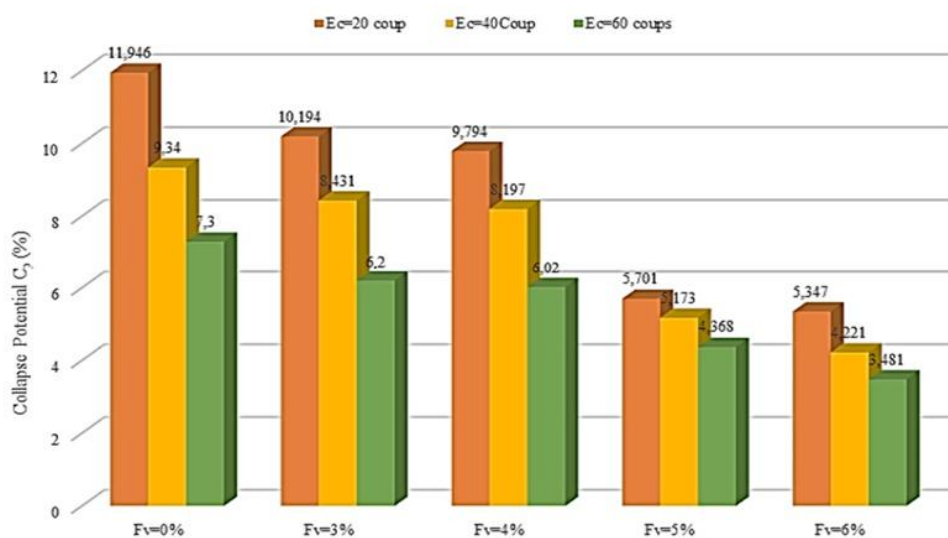


شکل (۳۷-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر تعداد ضربات. [۵۵]

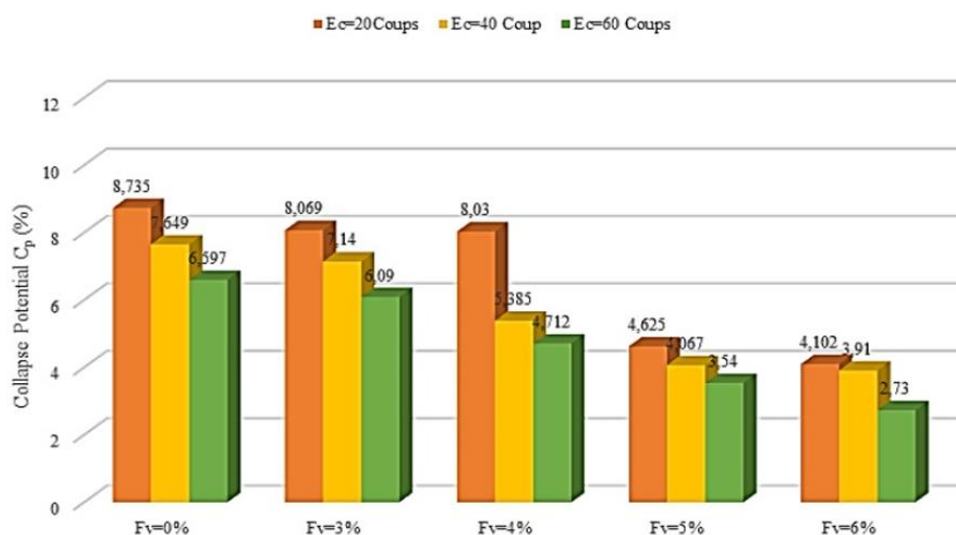


شکل (۳۸-۲) تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر درصد رطوبت. [۵۵]

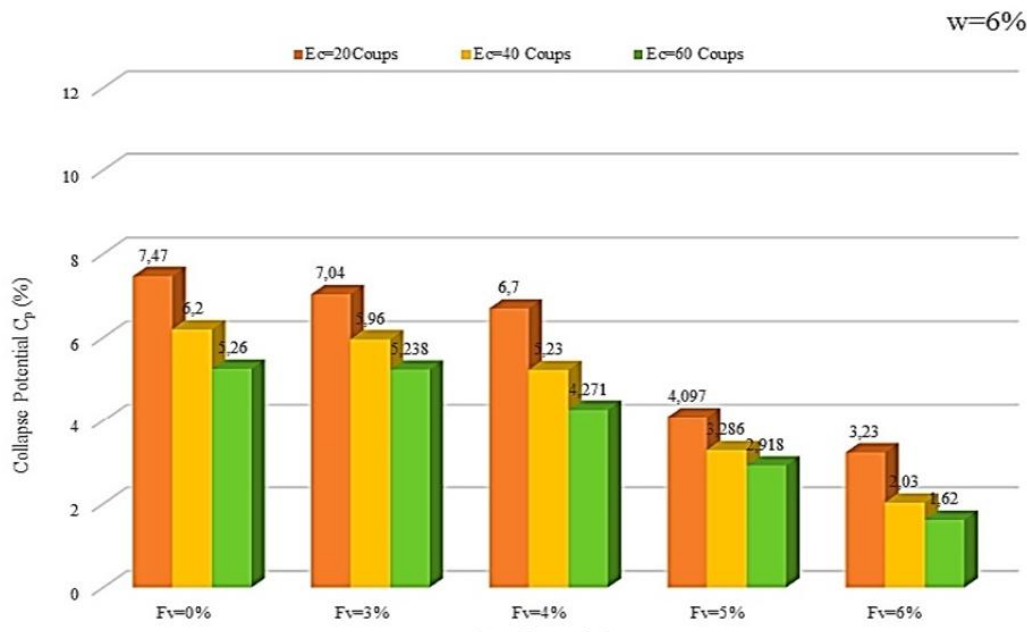
همچنین در شکل‌های (۲-۳۹)، (۲-۴۰) و (۲-۴۱) تغییرات پتانسیل رمبندگی در برابر درصد الیاف و تعداد ضربات برای نمونه‌هایی به ترتیب با ۲٪، ۴٪ و ۶٪ رطوبت نشان داده شده‌است. نتایج این نمودارها نشان داده‌است با تعداد ضربات یکسان، با افزایش مقدار الیاف شیشه، پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها کاهش یافته‌است. همچنین در مقدار الیاف ثابت با افزایش تعداد ضربات پتانسیل رمبندگی به طور قابل توجهی کاهش یافته‌است



شکل (۲-۳۹) تغییرات پتانسیل رمبندگی برای خاک با ۲٪ رطوبت در برابر درصد الیاف و تعداد ضربات. [۵۵]



شکل (۲-۴۰) تغییرات پتانسیل رمبندگی برای خاک با ۴٪ رطوبت در برابر درصد الیاف و تعداد ضربات. [۵۵]



شکل (۲-۴۱) تغییرات پتانسیل رهمبندگی برای خاک با ۶٪ رطوبت در برابر درصد الیاف و تعداد ضربات. [۵۵].

۲-۷-۱۱- اثر پلیمر مایع و الیاف پلی پروپیلین

آیلدین و کیتازوم^{۲۷} در سال ۲۰۱۷ از پلیمر مایع^{۲۸} و الیاف پلی پروپیلین جهت بهسازی ماسه نرم استفاده کردند. در شکل (۲-۴۲) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ساخته شده با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلین و سیمان برحسب مقدار الیاف پلی پروپیلین و شکل (۲-۴۳) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ساخته شده با مقادیر مختلف پلیمر مایع و سیمان برحسب مقدار پلیمر مایع نشان داده شده‌است. [۱۴].

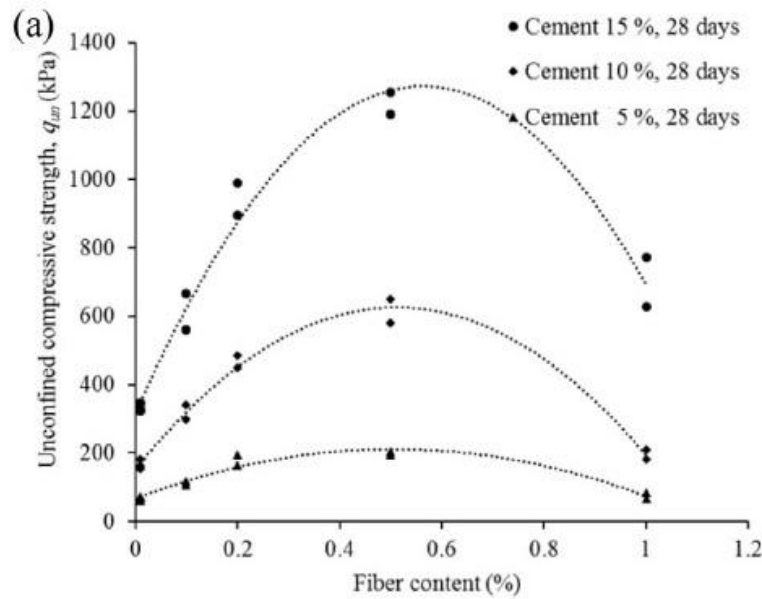
نتایج آزمایش تک‌محوری نشان داده‌است که با افزایش الیاف پلی پروپیلین تا ۵٪، مقاومت فشاری افزایش و پس از آن کاهش یافته‌است. همچنین نتایج نشان داده‌است که افزایش پلیمر مایع سبب افزایش مقاومت فشاری شده‌است.

در شکل (۲-۴۴) تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف پلیمری و تثبیت‌شده با ۱۰٪ سیمان و در شکل (۲-۴۵) تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های تسلیح‌شده با پلیمر مایع و تثبیت‌شده با ۱۰٪ سیمان نشان داده شده‌است. مشاهده شده‌است که

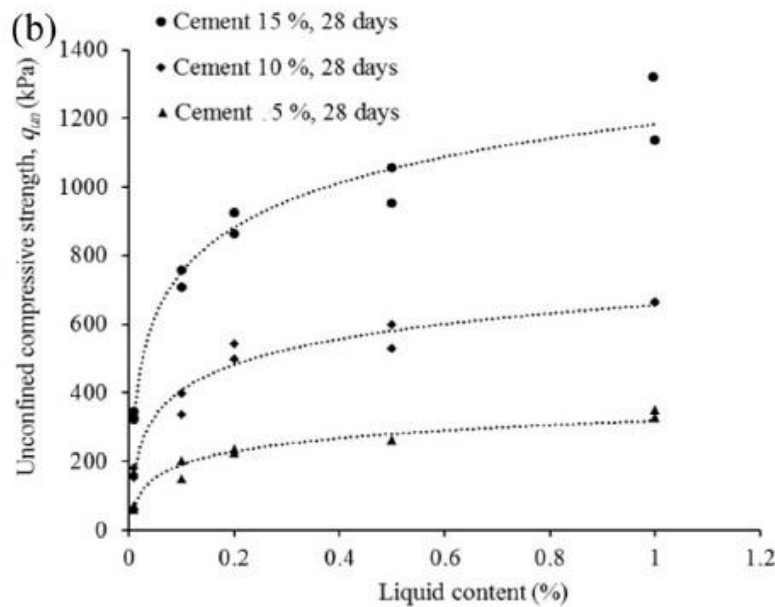
²⁷ Ayeldeen and Kitazume

²⁸ liquid polymer

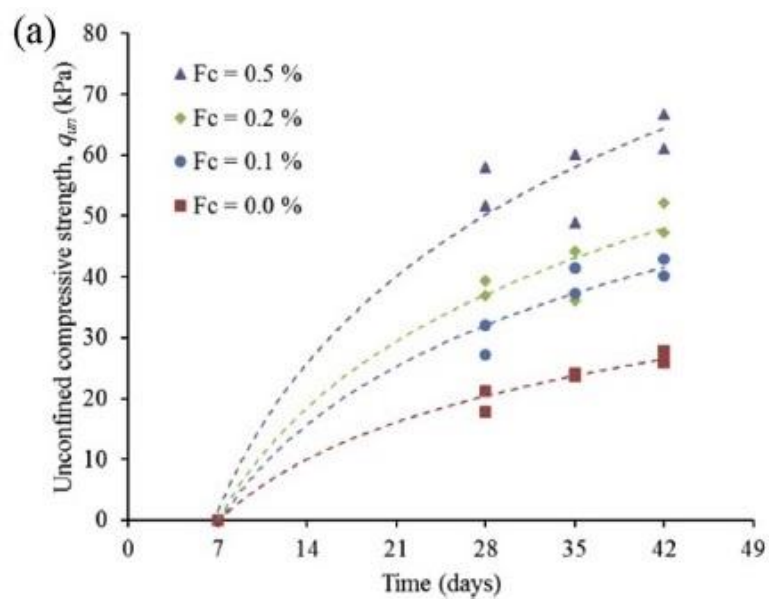
بازدهی پلیمرها با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافته‌است.



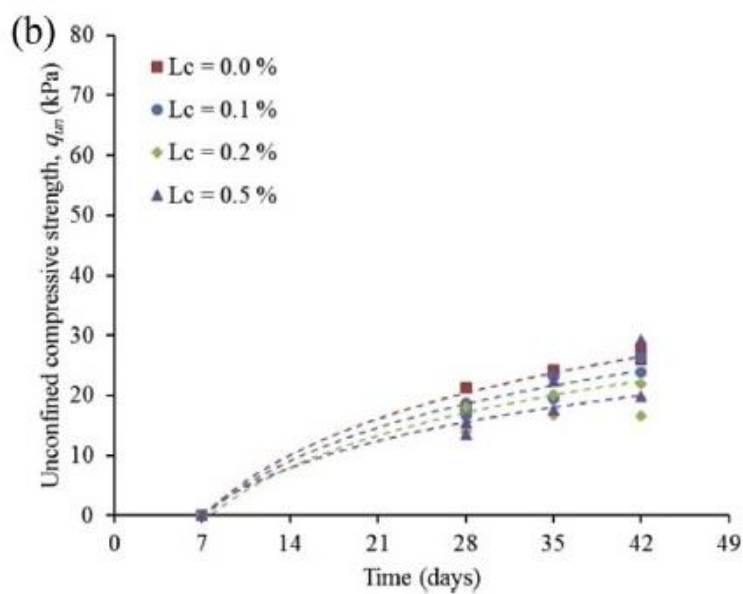
شکل (۲-۴۲) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ساخته شده با مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان برحسب مقدار الیاف پلی‌پروپیلن. [۱۴]



شکل (۲-۴۳) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه ساخته شده با مقادیر مختلف پلیمر مایع و سیمان برحسب مقدار پلیمر مایع. [۱۴]



شکل (۲-۴۴) تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف پلیمری و تثبیت‌شده با ۱۰٪ سیمان. [۱۴]



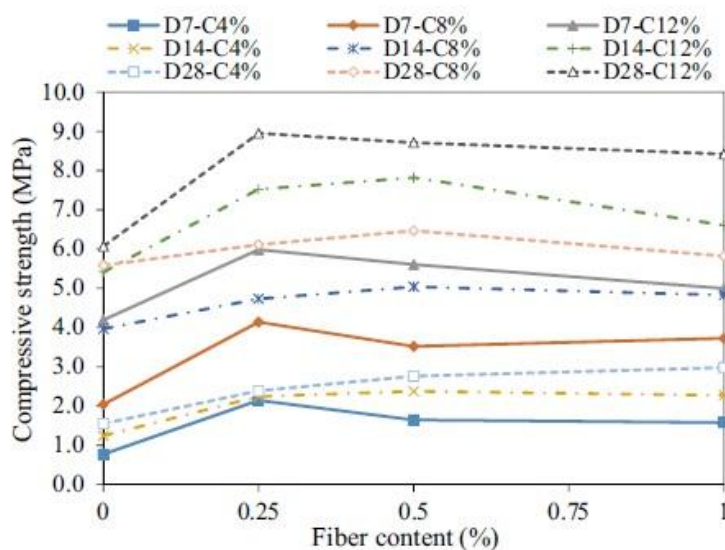
شکل (۲-۴۵) تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های تسلیح‌شده با پلیمر مایع و تثبیت‌شده با ۱۰٪ سیمان. [۱۴]

۲-۷-۱۲- اثر الیاف ذرت و سیمان

کوانگ تران و همکاران^{۲۹} در سال ۲۰۱۸ از الیاف ذرت و سیمان برای تسلیح و تثبیت خاک استفاده کردند. خاک مورد مطالعه شامل ۸٪ رس، ۸۴٪ سیلت و ۸٪ ماسه بوده است. [۳۲].

آن‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری را روی نمونه‌ها انجام داده و متوجه شده‌اند که به طور کلی افزایش الیاف ذرت باعث افزایش مقاومت فشاری شده است و درصد سیمان تأثیرگذارترین پارامتر در مقاومت فشاری است. همچنین نتایج نشان داده است که با افزایش سیمان و زمان عمل‌آوری، اثر الیاف ذرت بر مقاومت فشاری کاهش یافته است.

در شکل (۲-۴۶) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف و سیمان با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت برحسب مقدار الیاف نشان داده شده است. واضح است که به طور کلی افزایش الیاف ذرت باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. اما با افزایش الیاف به مقدار بیش از ۰/۵٪ مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است که به این علت است که با افزایش الیاف، تسلط سیمان بر نمونه کمتر شده و فرایند هیدراتاسیون کمتر انجام شده و بنابراین مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است.

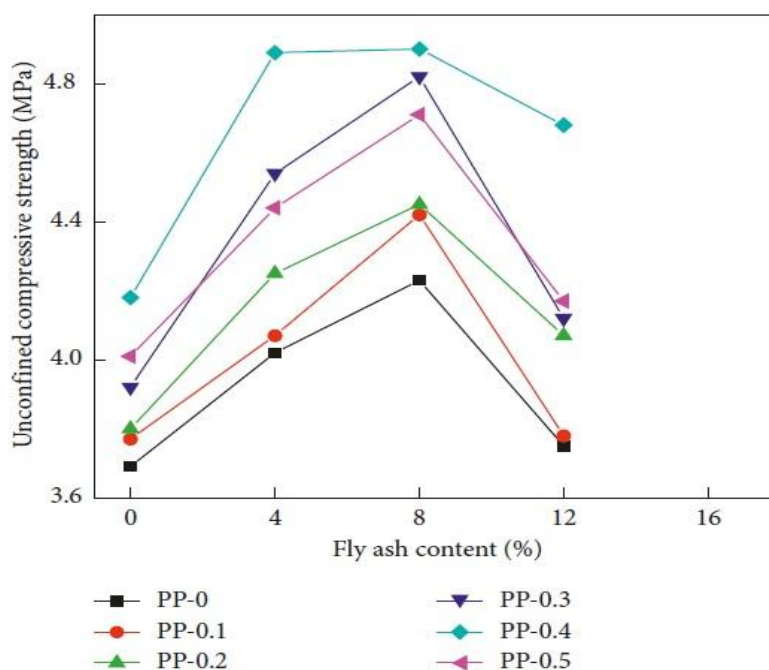


شکل (۲-۴۶) اثر درصد الیاف بر مقاومت فشاری با تغییر درصد سیمان و زمان عمل‌آوری. [۳۲]

²⁹ Quang Tran et.al

۲-۷-۱۳- اثر الیاف پلی پروپیلین و Fly ash

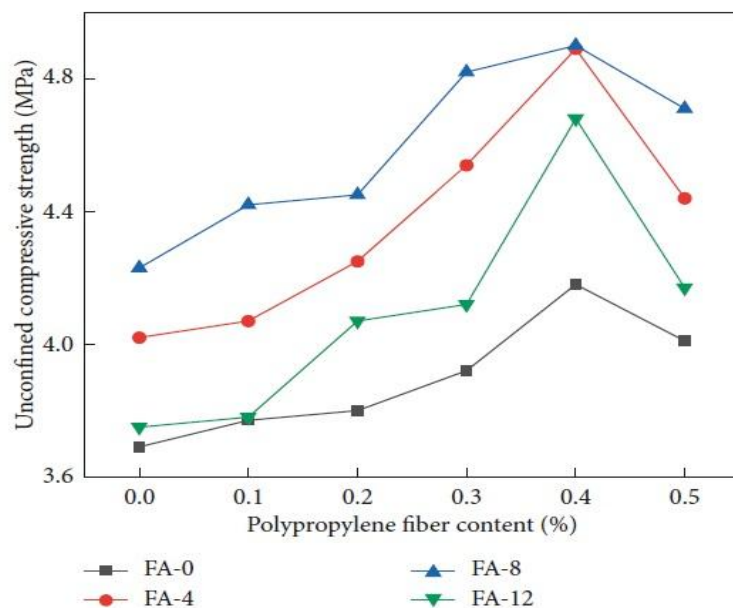
دوان و شوانگ^{۳۰} در سال ۲۰۱۹ از الیاف پلی پروپیلین و Fly ash جهت بهسازی خاک رسی استفاده کردند.[۵۶]. نتایج آزمایش تک محوری برحسب مقدار Fly ash در شکل (۲-۴۷) قرار داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در یک مقدار ثابت پلی پروپیلین با افزایش مقدار Fly ash تا ۸٪، مقاومت فشاری افزایش یافته و پس از آن کاهش یافته است. بنابراین مقدار بهینه Fly ash ۸٪ در نظر گرفته شده است.



شکل (۲-۴۷) منحنی های مقاومت فشاری برحسب Fly ash. [۵۶]

نتایج آزمایش تک محوری برحسب مقدار پلی پروپیلین در شکل (۲-۴۸) قرار داده شده است. همانطور که واضح است در یک مقدار ثابت Fly ash با مصرف پلی پروپیلین تا ۴٪ مقاومت فشاری افزایش و پس از آن کاهش یافته است. بنابراین مقدار بهینه الیاف پلی پروپیلین ۴٪ در نظر گرفته شده است.

³⁰ Duan and Zhang



شکل (۲-۴۸) منحنی‌های مقاومت فشاری برحسب مقدار پلی پروپیلین. [۵۶].

۲-۸- جمع‌بندی

در جدول زیر نتایج کلی بررسی‌های انجام شده توسط سایر محققین جمع‌آوری شده است.

جدول (۲-۸) نتایج کلی بررسی‌های انجام شده توسط سایر محققین.

ردیف	محقق (محققین)	افزودنی مورد استفاده	آزمایشات انجام شده	نتایج حاصل از مصرف افزودنی
۱	Ch.Tang et al. 2007	الیاف پلی پروپیلین سیمان	تک‌محوری	- افزایش مقاومت فشاری - کاهش کرنش گسیختگی
۲	نیک اقبال و همکاران - ۱۳۹۳	باکتری باسیلوس اسفاریکوس و کلسیم کلرید (تشبیت بیولوژیکی)	رمبندگی	- کاهش پتانسیل رمبندگی
۳	عطاردی وحسینی - ۱۳۹۴	خاکستر لجن فاضلاب آهک	رمبندگی	- کاهش شاخص رمبندگی

۴	خدابنده و همکاران ۱۳۹۴_	شیرابه فاضلاب	رمبندگی	- کاهش پتانسیل رمبندگی با افزایش pH شیرابه
۵	یوسفی و پرویزی ۱۳۹۴_	آهک	تک محوری رمبندگی سه محوری	- افزایش مقاومت فشاری - کاهش پتانسیل رمبندگی - افزایش زاویه اصطکاک داخلی - کاهش چسبندگی خاک
۷	R. Noorzad , H. Pakniat. 2016	آهک آمونیم سولفات پتاسیم کلرید گرد کوره سیمان	رمبندگی	- کاهش شاخص رمبندگی
۶	طبرسا _ ۱۳۹۵	نانورس	تراکم رمبندگی تک محوری	- افزایش درصد رطوبت بهینه - کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر - کاهش پتانسیل رمبندگی - افزایش مقاومت فشاری
۸	M. ayeldeen et al. 2016	بیوپلیمرهای xanthan gum و guar gum	تراکم رمبندگی	- کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر - افزایش رطوبت بهینه - کاهش پتانسیل رمبندگی
۹	B. Iranpour, A. haddad. 2016	نانورس نانومس نانوآلومینیوم نانوسیلیس	رمبندگی	- کمترین پتانسیل رمبندگی با مصرف ۰/۱٪ نانومواد
۱۰	N. Bakir et al. 2017	الیاف شیشه	رمبندگی	- کاهش پتانسیل رمبندگی
۱۱	M. Ayeldeen , M. Kitazume. 2017	پلیمر مایع الیاف پلی پروپیلن سیمان	تک محوری	- بیشترین مقاومت فشاری با مصرف ۵٪ پلی پروپیلن - افزایش مقاومت فشاری با مصرف پلیمر مایع

۱۲	Kh. Q. Tran et al. 2018	الیاف ذرت سیمان	تک محوری	- بیشترین مقاومت فشاری با مصرف ۰/۵٪ الیاف ذرت
۱۳	X. Duan , J.SH. Zhang, 2019	الیاف پلی پروپیلین Fly ash	تک محوری	- بیشترین مقاومت فشاری با مصرف Fly ash ۸٪ - بیشترین مقاومت فشاری با مصرف ۴٪ الیاف پلی پروپیلین

فصل ۳:

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

در این فصل محل تحقیق و خاک مورد مطالعه شرح داده شده و آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک مورد نظر توضیح و نتایج آن‌ها ارائه شده‌است. خاک مورد آزمایش و افزودنی‌های مورد نظر جهت تثبیت خاک مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات کلی آن‌ها ارائه شده‌است. همچنین ابتدا جهت اثبات رمبنده بودن خاک و تعیین پتانسیل فروریزش، نتایج آزمایش فروریزش بر روی خاک دست‌نخورده مطرح شده و نحوه انجام آزمایش تراکم استاندارد و تک محوری توضیح داده شده‌است.

۳-۲- محل نمونه‌گیری

خاک مورد مطالعه از منطقه چاله‌باغ شهرستان گرگان تهیه شده و برای پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌است. وزن مخصوص خشک این خاک برابر است با 1.32 gr/cm^3 . در شکل (۳-۱) و (۳-۲) موقعیت مکانی به ترتیب شهرستان گرگان و منطقه نمونه‌گیری نشان داده شده‌است.



شکل (۳-۱) موقعیت مکانی شهرستان گرگان با مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 48' 01''$ شمالی و $54^{\circ} 48' 01''$ شرقی



شکل (۲-۳) موقعیت مکانی منطقه چاله باغ واقع در شهرستان گرگان با مختصات جغرافیایی $36/83^{\circ}$ شمالی و $54/43^{\circ}$ شرقی

۳-۳- مصالح مصرفی

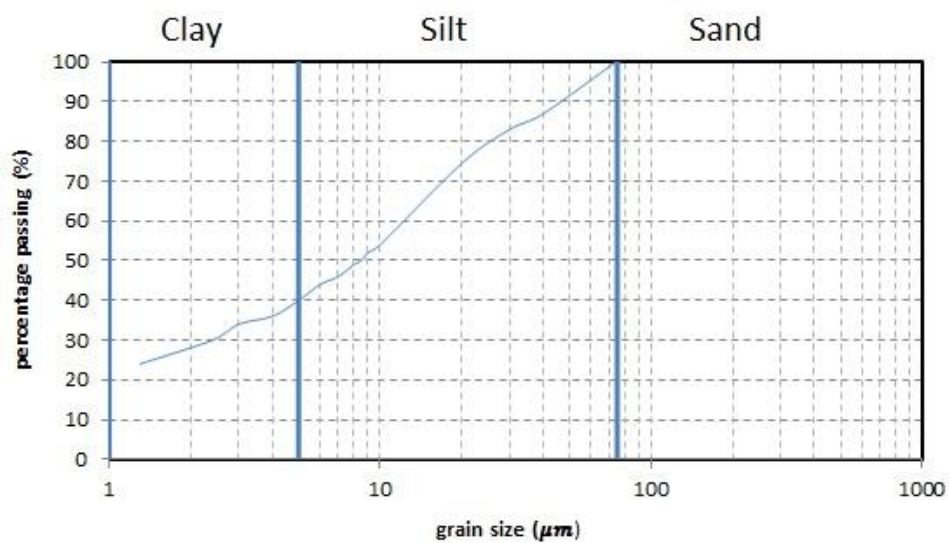
۳-۳-۱- خاک فروریزی چاله باغ گرگان

□ دانه بندی و هیدرومتری

طبق شکل (۳-۳) ابتدا مقدار مشخصی از خاک از الک شماره ۴، ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۲۰۰ عبور داده شده تا درصد ریزدانه مشخص شود. مشاهده شده است که ۱۰۰٪ خاک از الک ۲۰۰ عبور کرده است. بنابراین جهت تعیین دانه بندی، آزمایش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D422-63 انجام شده است که نتایج آن نشان داده که خاک در سیستم طبقه بندی متحد در رده CL قرار گرفته است. نمودار دانه بندی در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. [۵۷، ۳۶].



شکل (۳-۳) دستگاه شیکر و الک‌های مورد استفاده جهت انجام آزمایش دانه‌بندی.



شکل (۴-۳) نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.

□ درصد رطوبت طبیعی

برای محاسبه درصد رطوبت طبیعی، نمونه دست نخورده طبق استاندارد ASTM D2216-98 مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج آن در جدول (۱-۳) قرار گرفته است. [۳۷].

جدول (۱-۳) نتایج آزمایش درصد رطوبت طبیعی خاک.

شماره آزمایش	۱	۲	۳
وزن ظرف و خاک خشک (گرم)	۱۱۲۶/۹	۱۰۲۳/۴	۱۱۳۵/۷
وزن ظرف و خاک مرطوب (گرم)	۱۱۸۰/۳	۱۰۸۱/۵	۱۱۹۶/۱
درصد رطوبت	۵/۴۹	۵/۶۷	۵/۳۱
درصد رطوبت میانگین	۵/۴۹		

□ چگالی نسبی دانه‌های جامد

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D854-92 صورت گرفته است. [۳۸]. برای محاسبه چگالی نسبی از رابطه (۱-۳) استفاده شده است.

$$G_s = \frac{K * M_s}{(M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))} = \frac{1 * 49.9}{(668.1 - (699.34 - 49.9))} = 2.67 \quad (1-3)$$

رابطه (۱-۳) نشان می‌دهد که چگالی نسبی خاک مورد مطالعه ۲/۶۷ می‌باشد.

□ حدود اتربرگ

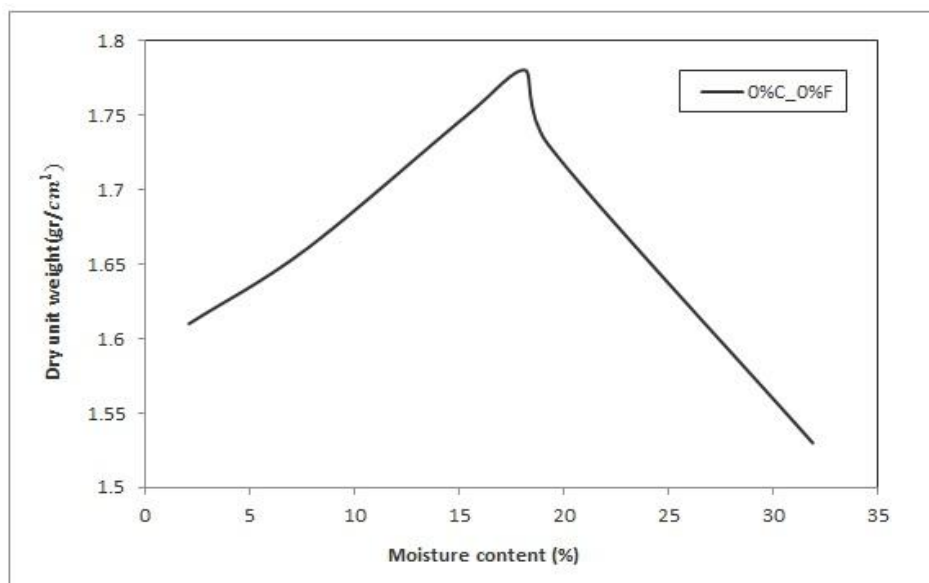
این آزمایش طبق استاندارد ASTM D4318-87 انجام شده است. نتایج نشان داده است که حد روانی ۳۰/۸۵٪ و نشانه خمیری ۱۰/۲۷٪ می‌باشد. [۳۹].

□ تراکم استاندارد

برای محاسبه وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه خاک دست نخورده، بخشی از آن مطابق با استاندارد ASTM D698 مورد آزمایش قرار گرفته که نتایج آن در جدول (۳-۲) و شکل (۳-۵) قرار داده شده است. [۴۰].

جدول (۳-۲) تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر خاک دست نخورده

وزن قالب و خاک (کیلوگرم)	وزن نمونه مرطوب و ظرف (گرم)	وزن نمونه خشک و ظرف (گرم)	وزن ظرف (گرم)	$\omega(\%)$	$\gamma(gr/cm^3)$	$\gamma_d(gr/cm^3)$
۵/۳۳۱	۷۵	۷۴	۲۶	۲/۰۸	۱/۶۵	۱/۶۱
۵/۴۵۶	۶۳	۶۱	۳۵	۱/۷۹	۱/۷۹	۱/۶۶
۵/۶۸۲	۷۱	۶۵	۲۶	۲/۰۳	۲/۰۳	۱/۷۵
۵/۷۶۲	۸۸	۸۰	۳۶	۲/۱۱	۲/۱۱	۱/۷۸
۵/۷۲۱	۱۲۶	۱۱۰	۲۷	۲/۰۷	۲/۰۷	۱/۷۳
۵/۶۷۲	۸۶	۷۱	۲۴	۲/۰۲	۲/۰۲	۱/۵۳



شکل (۳-۵) نمودار مربوط به آزمایش تراکم استاندارد خاک دست نخورده

با توجه به شکل (۳-۵) مشخص است که وزن مخصوص خشک حداکثر خاک و رطوبت بهینه به ترتیب برابر با ۱/۷۹ گرم بر سانتی متر مکعب و ۱۸/۲٪ می باشد.

□ پتانسیل فروریزش

جهت ارزیابی پتانسیل رمبندگی از دستگاه تحکیم طبق استاندارد ASTM D5333-03 برروی خاک دست نخورده استفاده شده است. [۴۷]. در این آزمایش یک نمونه خاک دست نخورده با رطوبت طبیعی هم اندازه با رینگ تحکیم تراشیده و سپس نمونه داخل دستگاه تحکیم قرار گرفته و دستگاه تراز شده است. پس از آن تنش هایی معادل ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال به نمونه اعمال و تغییر شکل نمونه در زمان های ۰/۱-، ۰/۵-۱-۲-۴-۱۵-۳۰ و ۶۰ دقیقه اندازه گیری شده است. نمونه ۱ ساعت پس از اعمال تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال، غرقاب و بارگذاری تا ۲۴ ساعت ادامه یافته و پس از آن تغییر شکل نمونه اندازه گیری شده است. پس از آن تنش هایی معادل ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۶۰۰ کیلو پاسکال به نمونه اعمال و تغییر شکل نمونه بعد از ۲۴ ساعت در زمان های ۰/۱-۰/۵-۱-۲-۴-۱۵-۳۰-۶۰-۱۲۰-۲۴۰ و ۱۴۴۰ دقیقه اندازه گیری شده، باربرداری انجام شده و اعداد گچ طبق زمان های ذکر شده ثبت شده اند.

براساس این آزمایش شاخص فروریزش که نشان دهنده میزان فروریزش نمونه بر حسب درصد در تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال می باشد، از رابطه (۳-۲) بدست آمده است. [۴۷].

$$I_e = \frac{\Delta e}{1+e_0} \times 100 \quad (2-3)$$

در این رابطه Δe تغییرات نسبت پوکی قبل و بعد از اشباع شدن در تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال و e_0 نسبت پوکی اولیه می باشد. درجه رمبندگی خاک ها براساس شاخص رمبندگی در جدول (۲-۱) قرار داده شده است. مشخصات نمونه دست نخورده به شرح ذیل می باشد:

جدول (۳-۳) مشخصات نمونه دست‌نخورده مربوط به آزمایش فروریزش

وزن نمونه (gr)	G_s	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	نسبت پوکی اولیه	نسبت پوکی قبل از اشباع شدن	نسبت پوکی بعد از اشباع شدن
۵۲/۶۶	۲/۶۷	۵/۴۹	۲۱/۳۸	۱/۰۲۳	۰/۹۸۱	۰/۷۴۷

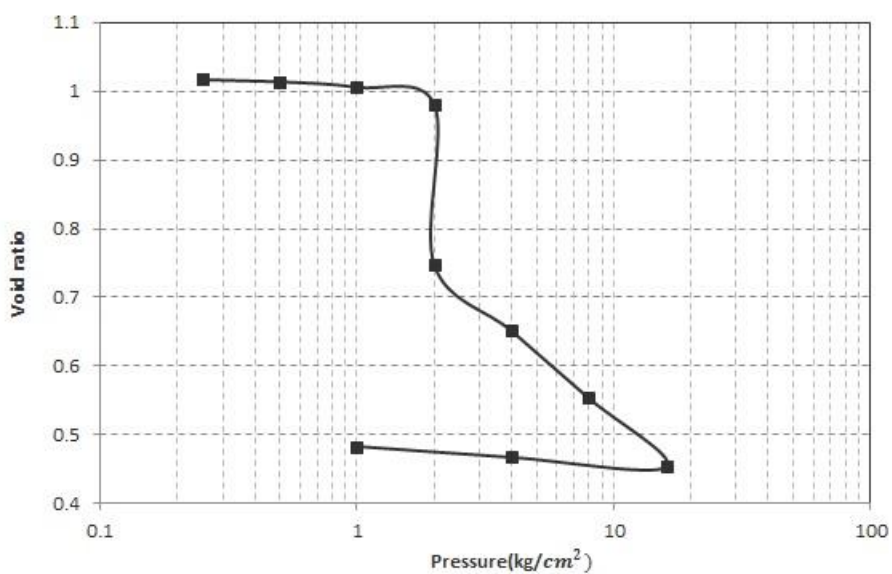
در شکل (۳-۶) نمونه دست‌نخورده تراشیده‌شده به ابعاد مورد نظر و شکل (۳-۷) دستگاه تحکیم در حال بارگذاری نمونه دست‌نخورده نشان داده شده‌است.



شکل (۳-۶) نمونه دست‌نخورده جهت انجام آزمایش پتانسیل فروریزش.



شکل (۷-۳) دستگاه تحکیم در حال بارگذاری نمونه رمبندگی.



شکل (۸-۳) نتایج آزمایش پتانسیل رمبندگی نمونه دست نخورده.

در شکل (۸-۳) رفتار فروریزی نمونه دست نخورده نشان داده شده است. طبق این نمودار و رابطه (۳-۳) پتانسیل فروریزی خاک برابر $11/56\%$ می باشد که طبق جدول (۱-۲) در رده شدیداً رمبند قرار گرفته است.

همچنین ضریب بارگذاری مجدد نمونه (C_r) برابر با ۰/۰۱۵ بدست آمده است.

$$I_c = \frac{.981 - .747}{1 + 1.023} \times 100 = 11.56\% \quad (3-3)$$

۳-۳-۲- افزودنی سیمان

در این تحقیق جهت تثبیت خاک رمبنده از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شده است که وزن مخصوص آن حدود 3 gr/cm^3 می باشد. مقدار اکسید عناصر این تیپ سیمان و مقاومت فشاری آن در جدول (۳-۴) قرار داده شده است.

جدول (۳-۴) نتایج درصد وزنی اکسید عناصر و مقاومت فشاری سیمان پرتلند تیپ ۲

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm ²)
۲۱/۷٪	۵/۲۲٪	۳/۷۴٪	۶۴/۴۴٪	۲/۲۲٪	۳۴۵	۴۶۵

۳-۳-۳- مسلح کننده طبیعی الیاف ساقه برنج

پسماندهای کشاورزی و صنایع چوبی و دانه های تولید انرژی، لیگنوسلولز^{۳۱} نامیده می شوند. سالانه حجم عظیمی از پسماندهای لیگنوسلولزی در سراسر جهان تولید می شود که این مسئله سبب نگرانی های زیست محیطی شده است. تخمین زده شده است که تولید سالیانه الیاف ساقه برنج در سطح جهان ۴۶۵۲۰۰ هزار تن است. امروزه در سطح زمین های کشاورزی مشاهده می گردد که بخشی از پسماندهای باقی مانده در سطح زمین های کشاورزی بدون برداشت بوده و توسط کشاورزان سوزانده می شوند که باعث آلودگی زیست محیطی شده و در صورت تداوم در طول سالیان بعدی باعث کاهش مواد آلی خاک می شود. لذا کاربرد این مواد در بهسازی خاک می تواند از این قبیل از مشکلات محیط زیستی بکاهد.

³¹Lignocellulose

از الیاف طبیعی ساقه برنج به عنوان تسلیح کننده در کنار افزودنی سیمان استفاده شده است. ساقه های برنج که در شکل (۳-۹) دیده می شوند، از منطقه کشاورزی گرگان با وزن مخصوص حدود 0.23 gr/cm^3 و با قطر میانگین 0.2 سانتی متر تهیه شده اند. با توجه به محدودیت های ابعادی قالب نمونه سازی تک محوری (قطر داخلی $49/9$ میلی متر و ارتفاع $99/02$ میلی متر) الیاف ها به صورت خشک به طول های 1 سانتی متر بریده شده اند.



شکل (۳-۹) الیاف ساقه برنج به طول 1 سانتی متر و قطر میانگین 0.2 سانتی متر

۳-۴- روش تحقیق

جهت مشخص شدن وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه نمونه ها، آزمایش تراکم استاندارد مطابق با ASTM D698 انجام شده است. پس از مشخص شدن پارامترهای لازم (وزن مخصوص خشک حداکثر، درصد رطوبت بهینه، مقدار الیاف و سیمان)، نمونه ها در قالب نمونه سازی مخصوص آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده ساخته شده و جهت ارزیابی مقاومت فشاری مورد آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفته اند.

۳-۴-۱- آزمایش تراکم استاندارد

قبل از ساخت نمونه‌های تک‌محوری ۱۶ آزمایش تراکم استاندارد جهت مشخص‌شدن وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای هر نمونه با مقادیر مختلف الیاف و سیمان انجام شده‌است. در جدول (۳-۵) شرایط مربوط به هر آزمایش تراکم استاندارد قرار داده شده‌است. این آزمایش مطابق ASTM D698 انجام شده‌است. [۴۰]. به این صورت که مخلوط خاک و الیاف و سیمان با هم به‌صورت همگن ترکیب شده و در ۳ لایه با ۲۵ ضربه چکش ۲/۵ کیلوگرمی متراکم شده‌اند. در هر مرحله ۳٪ آب به مخلوط اضافه و مراحل تکرار شده‌است. این روند تا جایی ادامه داشته که وزن کل مخلوط دو مرحله کاهش یافته است. همچنین در هر مرحله از خاک یک نمونه جهت تعیین درصد رطوبت تهیه شده‌است. از رسم نمودار $\omega - \gamma_d$ ، وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه بدست آمده‌است.

جدول (۳-۵) مشخصات آزمایش‌های تراکم استاندارد

ردیف	علامت اختصاری	درصد وزنی سیمان	درصد وزنی الیاف	ردیف	علامت اختصاری	درصد وزنی سیمان	درصد وزنی الیاف
۱	0%C_0%F	۰	۰	۹	8%C_0%F	۸	۰
۲	0%C_0.25%F	۰	۰/۲۵	۱۰	8%C_0.25%F	۸	۰/۲۵
۳	0%C_0.5%F	۰	۰/۵	۱۱	8%C_0.5%F	۸	۰/۵
۴	0%C_1%F	۰	۱	۱۲	8%C_1%F	۸	۱
۵	4%C_0%F	۴	۰	۱۳	12%C_0%F	۱۲	۰
۶	4%C_0.25%F	۴	۰/۲۵	۱۴	12%C_0.25%F	۱۲	۰/۲۵
۷	4%C_0.5%F	۴	۰/۵	۱۵	12%C_0.5%F	۱۲	۰/۵
۸	4%C_1%F	۴	۱	۱۶	12%C_1%F	۱۲	۱

۳-۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نوع خاصی از آزمایش UU^{۳۲} می‌باشد که معمولاً برای نمونه‌های رسی و

^{۳۲} Unconsolidated Undrained Test

چسبنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش فشار محدود کننده σ_3 برابر صفر است و بار محوری تا زمان گسیختگی به نمونه اعمال می‌شود.

در این پژوهش جهت بررسی اثر ساقه برنج و سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری خاک‌های رمبنده، آزمایش تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D2166 به شرح ذیل صورت گرفته‌است: [۴۱]

۱- به منظور ارزیابی مقاومت فشاری خاک دست‌نخورده فروریزی منطقه چاله‌باغ ابتدا آزمایش تک‌محوری بر روی خاک بدون افزودنی انجام پذیرفته‌است.

۲- به منظور بررسی تاثیر ساقه برنج بر مقاومت فشاری خاک ، ساقه برنج در درصد‌های مختلف به خاک دست‌نخورده اضافه و آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه ها انجام شده‌است.

۳- به منظور بررسی اثر سیمان بر مقاومت فشاری خاک ، سیمان در درصد‌های مختلف به خاک دست‌نخورده اضافه و آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه ها انجام شده‌است.

۴- به منظور بررسی تاثیر ساقه برنج و سیمان بر مقاومت فشاری خاک ، این افزودنی‌ها در درصد‌های مختلف به خاک دست‌نخورده اضافه و آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه ها انجام شده‌است.

۵- به منظور بررسی اثر زمان عمل‌آوری، سیمان و خاک و در صورت لزوم الیاف‌ها به شکلی نسبتاً همگن مخلوط شده و نمونه‌ها ساخته شده‌اند. سپس جهت بررسی اثر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۷ و ۲۸ روز درون نایلون جهت حفظ رطوبت نگهداری شده و پس از آن آزمایش تک‌محوری انجام شده‌است. همچنین برخی از نمونه‌ها به صورت عمل‌آوری نشده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

در جدول (۳-۶) لیست آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده همراه با شرایط نمونه‌سازی متفاوت مربوط به هر آزمایش ارائه داده شده‌است.

جدول (۳-۶) نمونه‌های آزمایش تک محوری

ردیف	علامت اختصاری	درصد وزنی سیمان	درصد وزنی الیاف ساقه برنج	زمان عمل‌آوری
۱	0%C_0%F	۰	۰	—
۲	4%C_0%F_0D	۴	۰	۰
۳	4%C_0%F_7D	۴	۰	۷
۴	4%C_0%F_28D	۴	۰	۲۸
۵	8%C_0%F_0D	۸	۰	۰
۶	8%C_0%F_7D	۸	۰	۷
۷	8%C_0%F_28D	۸	۰	۲۸
۸	12%C_0%F_0D	۱۲	۰	۰
۹	12%C_0%F_7D	۱۲	۰	۷
۱۰	12%C_0%F_28D	۱۲	۰	۲۸
۱۱	0%C_0.25%F	۰	۰/۲۵	—
۱۲	4%C_0.25%F_0D	۴	۰/۲۵	۰
۱۳	4%C_0.25%F_7D	۴	۰/۲۵	۷
۱۴	4%C_0.25%F_28D	۴	۰/۲۵	۲۸
۱۵	8%C_0.25%F_0D	۸	۰/۲۵	۰
۱۶	8%C_0.25%F_7D	۸	۰/۲۵	۷
۱۷	8%C_0.25%F_28D	۸	۰/۲۵	۲۸
۱۸	12%C_0.25%F_0D	۱۲	۰/۲۵	۰
۱۹	12%C_0.25%F_7D	۱۲	۰/۲۵	۷
۲۰	12%C_0.25%F_28D	۱۲	۰/۲۵	۲۸
۲۱	0%C_0.5%F	۰	۰/۵	—
۲۲	4%C_0.5%F_0D	۴	۰/۵	۰
۲۳	4%C_0.5%F_7D	۴	۰/۵	۷
۲۴	4%C_0.5%F_28D	۴	۰/۵	۲۸
۲۵	8%C_0.5%F_0D	۸	۰/۵	۰
۲۶	8%C_0.5%F_7D	۸	۰/۵	۷
۲۷	8%C_0.5%F_28D	۸	۰/۵	۲۸
۲۸	12%C_0.5%F_0D	۱۲	۰/۵	۰
۲۹	12%C_0.5%F_7D	۱۲	۰/۵	۷
۳۰	12%C_0.5%F_28D	۱۲	۰/۵	۲۸
۳۱	0%C_1%F	۰	۱	—
۳۲	4%C_1%F_0D	۴	۱	۰

۷	۱	۴	4%C_1%F_7D	۳۳
۲۸	۱	۴	4%C_1%F_28D	۳۴
۰	۱	۸	8%C_1%F_0D	۳۵
۷	۱	۸	8%C_1%F_7D	۳۶
۲۸	۱	۸	8%C_1%F_28D	۳۷
۰	۱	۱۲	12%C_1%F_0D	۳۸
۷	۱	۱۲	12%C_1%F_7D	۳۹
۲۸	۱	۱۲	12%C_1%F_28D	۴۰

■ آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از مشخص شدن وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه از طریق آزمایش تراکم استاندارد، نمونه‌ها با مقادیر مختلف خاک (برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر)، الیاف (نسبت‌های وزنی ۰٪، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر)، سیمان (نسبت‌های وزنی ۰٪، ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و مقدار رطوبت متفاوت برحسب درصد رطوبت بهینه در قالب نمونه‌سازی به قطر داخلی ۴۹/۹ میلی‌متر و ارتفاع ۹۹/۰۲ میلی‌متر ساخته شده‌اند. پس از متراکم شدن نمونه درون قالب، دو سطح مقطع آن صاف و یکدست شده و از قالب خارج شده‌است. نمونه‌ها برحسب زمان عمل‌آوری (۰، ۷ و ۲۸ روز) جهت حفظ رطوبت، درون نایلون به مدت لازم در دمای محیط که حدود ۲۵°C است، نگهداری شده‌اند. در شکل (۳-۱۰) قالب نمونه‌ساز آزمایش قرار داده شده است.

دقت شود که وزن بدست‌آمده از وزن مخصوص خشک حداکثر برابر است با مجموع وزن خاک، سیمان و الیاف نمونه مدنظر.



شکل (۳-۱۰) قالب نمونه‌ساز آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده.

□ دستگاه مورد استفاده و متعلقات

جهت انجام آزمایش ابتدا دستگاه کالیبره شده و نمونه در محل مخصوص خود قرار داده شده‌است. به‌طوریکه نمونه در مرکز صفحه پایینی قرار گرفته باشد. سپس سنسور تغییر مکان و لودسل^{۳۳} صفر شده و بار با سرعت 5 mm/min به نمونه اعمال شده‌است. این روند تا جایی ادامه یافته که یکی از حالات زیر اتفاق بیفتد:

- بار به نقطه اوج رسیده و سپس کاهش یافته‌باشد.

- مقادیر بار قبل از رسیدن به نقطه اوج معادل ۱۵٪ کرنش نمونه باشد. [۴۱].

در این آزمایش، تغییر طول (ΔL) به کمک سنسور^{۳۴} LVDT با کورس ۵۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر محاسبه شده‌است. همچنین جهت اندازه‌گیری تنش از یک لودسل با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلوگرم استفاده شده و اطلاعات از طریق یک دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر انتقال داده شده است. در شکل (۳-۱۱) دستگاه مقاومت

³³ Loadcell

³⁴ Linear Variable Differential Transformer Sensor

فشاری محدود نشده به همراه سنسورها و در شکل (۳-۱۲) دیتالاگر ۸ کاناله قرار داده شده است.



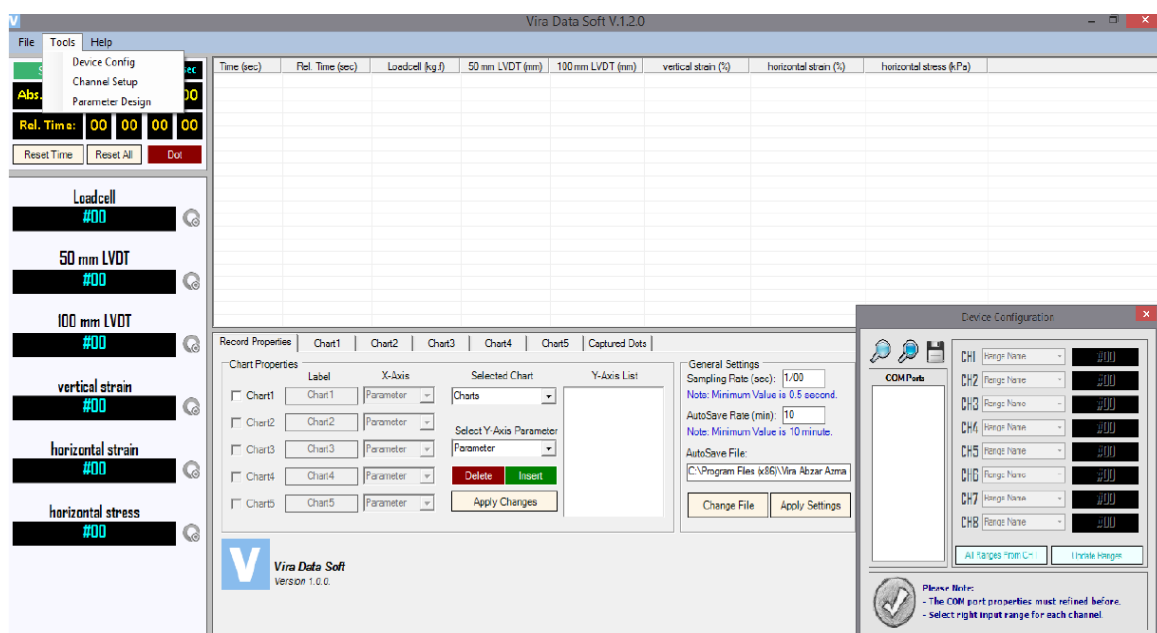
شکل (۳-۱۱) دستگاه مقاومت فشاری محدود نشده.



شکل (۳-۱۲) دیتالاگر ۸ کاناله مورد استفاده

دیتاهای خروجی در کامپیوتر، در محیط نرم افزار Vira Data Soft مربوط به دیتالاگر جمع آوری و پردازش می شوند. در این نرم افزار برای هریک از سنسورها، کانال مجزا تعریف شده که ابتدا در منوی Tools، زیرشاخه ی

Devis Config شناسایی و در زیرشاخه‌ی Channel Setup کالیبراسیون سنسور بر روی آن کانال انجام شده است. محیط این نرم‌افزار در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده‌است.



شکل (۳-۱۳) محیط نرم‌افزار Vira Data Soft

محاسبات آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

۱- کرنش قائم (ε) از رابطه (۳-۴) بدست آمده‌است:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (۳-۴)$$

ΔL تغییر طول نمونه بوده که از طریق سنسور LVDT اندازه‌گیری شده و L ارتفاع اولیه نمونه می‌باشد.

۲- سطح مقطع تصحیح شده نمونه به کمک رابطه (۳-۵) محاسبه شده‌است.

$$A_c = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (۳-۵)$$

A_0 برابر است با سطح مقطع نمونه در ابتدای آزمایش.

۳- مقدار تنش اعمالی بر روی نمونه از رابطه زیر محاسبه شده‌است:

$$\sigma = \frac{P}{A_C} \quad (۶-۳)$$

P برابر است با بار وارد شده بر روی نمونه.

۴- در مرحله آخر نمودار تنش برحسب کرنش رسم و مقدار مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی مشخص شده است.

۳-۵- نام‌گذاری و علائم اختصاری

در کل متن اسم نمونه‌ها با علامت اختصاری آورده شده است که این علائم به شرح ذیل است:

- C مخفف Cement به معنی سیمان.
- F مخفف Rice Straw Fiber به معنی الیاف ساقه برنج.
- D مخفف Day به معنی مدت زمان عمل‌آوری.
- CS مخفف Compressive Strength به معنی مقاومت فشاری
- FS مخفف Failure Strain به معنی کرنش گسیختگی است.

فصل ۴:

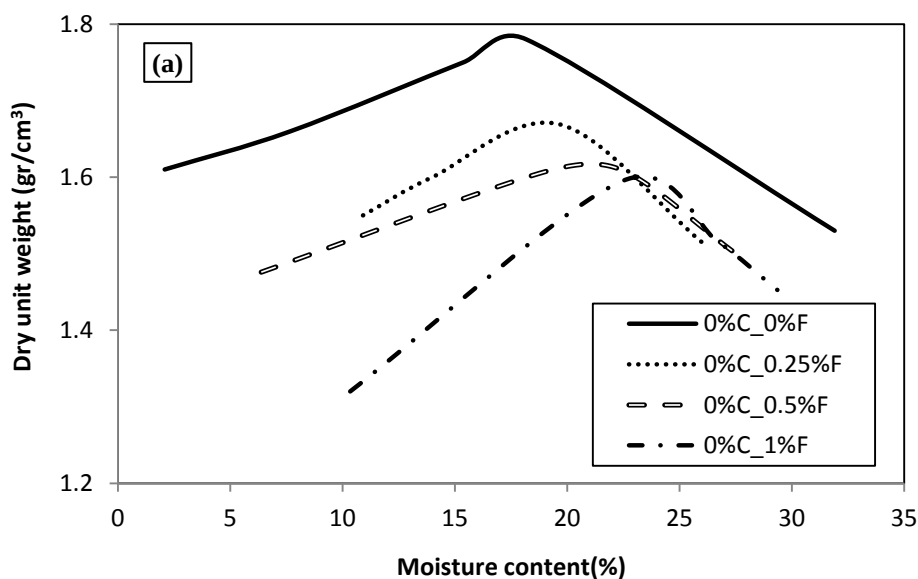
نتایج و تفسیر آزمایش‌ها

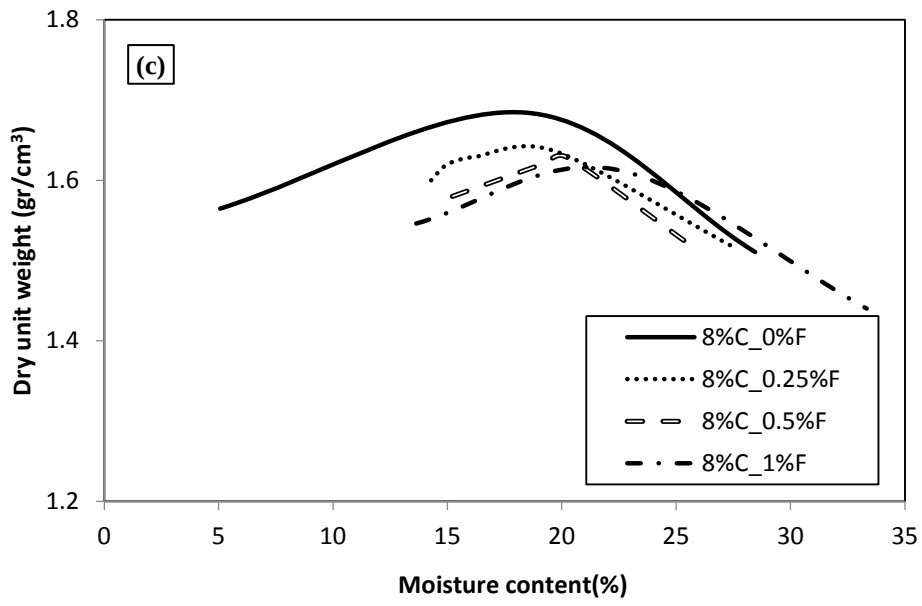
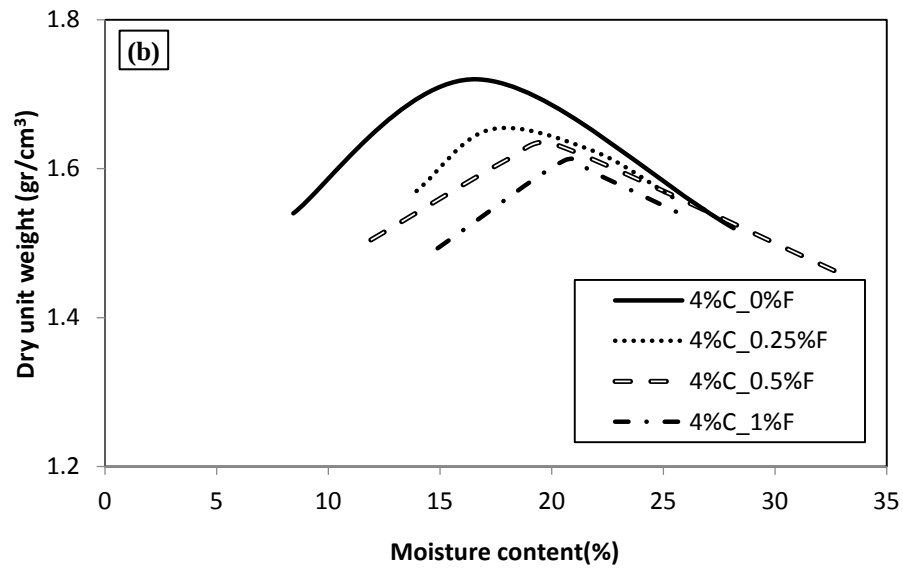
۴-۱- مقدمه

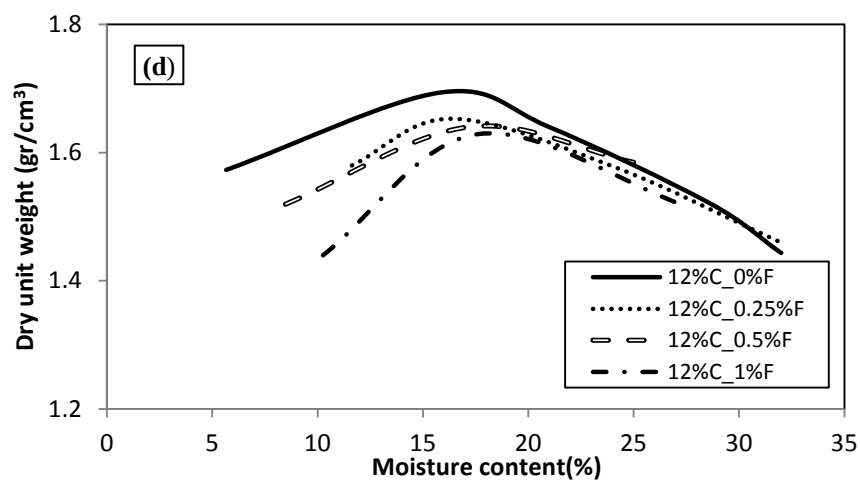
در فصل‌های پیشین به مرور تحقیقات انجام شده توسط محققین، نحوه و روند انجام آزمایش‌ها پرداخته شده بود. در این فصل نتایج آزمایش تراکم و آزمایش تک‌محوری جهت بررسی اثر الیاف طبیعی و سیمان بر روی خاک مورد نظر مورد بررسی قرار گرفته و تحلیل شده است.

۴-۲- تراکم استاندارد

نتایج بدست آمده از آزمایش تراکم استاندارد نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف و سیمان در شکل (۴-۱) و جدول (۴-۱) قرار داده شده است.







شکل (۴-۱) نتایج آزمایش تراکم استاندارد حاوی مقادیر مختلف الیاف و (a) ۰٪ سیمان، (b) ۴٪ سیمان، (c) ۸٪ سیمان، (d) ۱۲٪ سیمان.

جدول (۴-۱) نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد

ردیف	علامت اختصاری	درصد وزنی سیمان	درصد وزنی الیاف	$\omega(\%)$	$\gamma_d (gr/cm^3)$
۱	0%C_0%F	۰	۰	۱۸/۱۸	۱/۷۸
۲	0%C_0.25%F	۰	۰/۲۵	۱۹/۶۴	۱/۶۶
۳	0%C_0.5%F	۰	۰/۵	۲۲/۴۴	۱/۶۰۹
۴	0%C_1%F	۰	۱	۲۲/۵۰	۱/۵۹
۵	4%C_0%F	۴	۰	۱۶/۶۶	۱/۷۲
۶	4%C_0.25%F	۴	۰/۲۵	۱۷/۲۵	۱/۶۵
۷	4%C_0.5%F	۴	۰/۵	۲۰/۱۵	۱/۶۳
۸	4%C_1%F	۴	۱	۲۰/۵۶	۱/۶۱
۹	8%C_0%F	۸	۰	۱۸/۴۴	۱/۶۸
۱۰	8%C_0.25%F	۸	۰/۲۵	۱۹/۶۹	۱/۶۳
۱۱	8%C_0.5%F	۸	۰/۵	۲۰/۲۲	۱/۶۲
۱۲	8%C_1%F	۸	۱	۲۲/۳۶	۱/۶۱
۱۳	12%C_0%F	۱۲	۰	۱۵/۸۷	۱/۶۹
۱۴	12%C_0.25%F	۱۲	۰/۲۵	۱۶/۳۶	۱/۶۵
۱۵	12%C_0.5%F	۱۲	۰/۵	۱۷/۱۸	۱/۶۴
۱۶	12%C_1%F	۱۲	۱	۱۷/۶۳	۱/۶۲

با انجام آزمایش‌های تراکم مشخص شده‌است که با افزایش درصد الیاف در محتوی سیمان یکسان، نمودار تراکم استاندارد با کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه همراه بوده‌است، که دلیل آن افزایش محتوی الیاف با وزن مخصوص پایین است. بدین صورت که حضور الیاف که به دلیل عدم جذب آب نمونه، قبل از استفاده مرطوب شده‌است، از یک طرف باعث کاهش وزن مخصوص کلی نمونه‌ها شده و از طرف دیگر به دلیل رطوبت ذاتی خود الیاف و نیز نیاز به رطوبت جهت خنثی کردن اثر تسلیح ایجاد شده در نمونه، رطوبت بهینه افزایش یافته‌است. البته با افزایش درصد سیمان میزان تغییرات کاهش یافته‌است، بدین معنی که در درصد سیمان‌های بالاتر میزان کاهش وزن مخصوص و افزایش درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد الیاف کمتر شده‌است که این نیز خود به دلیل حضور ذرات ریز سیمان با وزن مخصوص بالا و البته فرآیند هیدراتاسیون سیمان بوده که منجر به آبکشی از نمونه‌ها شده‌است.

۴-۳- مقاومت فشاری محدود نشده

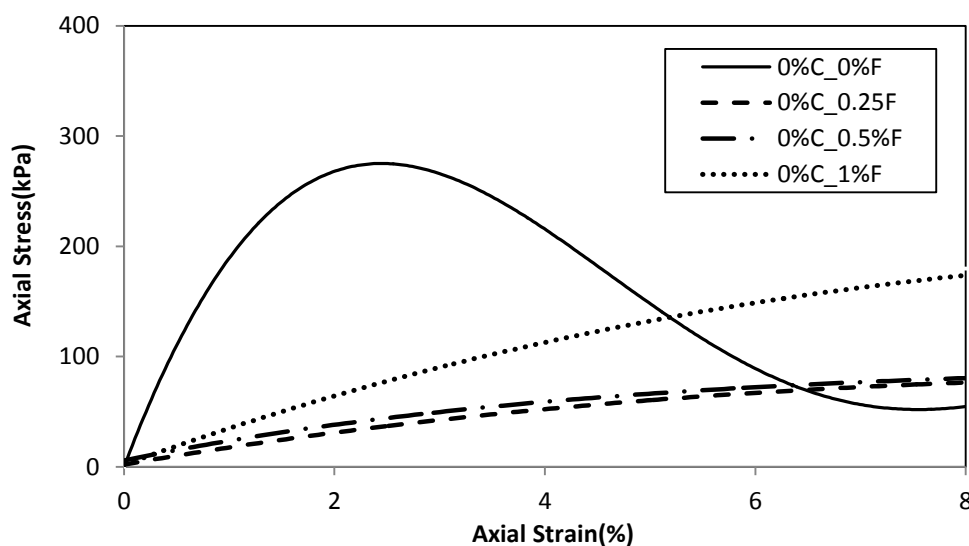
تعداد ۴۰ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده جهت ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط اولیه مختلف انجام شده‌است. پارامترهای متغیر آزمایش شامل مقدار الیاف (با نسبت‌های وزنی ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر)، مقدار سیمان (با نسبت‌های وزنی ۰٪، ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و زمان عمل‌آوری (۰، ۷ و ۲۸ روز) می‌باشد که در ادامه نتایج در سه قسمت تسلیح با الیاف، تثبیت با سیمان و استفاده همزمان الیاف و سیمان ارائه شده و مورد بحث و تفسیر قرار گرفته‌است.

۴-۳-۱- اثر تسلیح با الیاف ساقه برنج

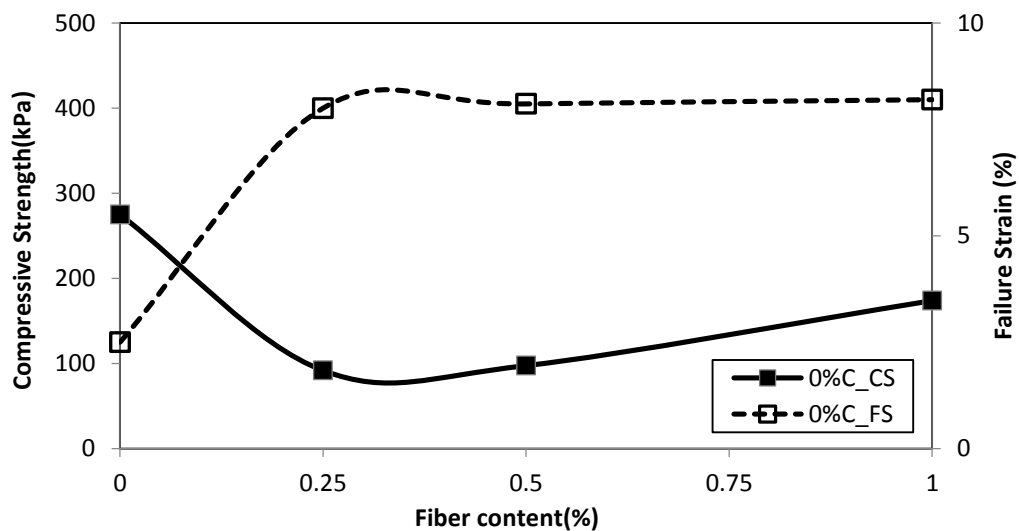
تعداد ۴ آزمایش تک محوری بر روی خاک مسلح نشده و خاک مسلح شده با ساقه برنج (با نسبت‌های وزنی ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) انجام شده‌است. در شکل (۴-۲) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه مرجع (حاوی ۰٪ الیاف و ۰٪ سیمان) و نمونه‌های تسلیح شده با مقادیر مختلف الیاف ساقه برنج نشان داده شده‌است. در شکل مذکور مشاهده شده‌است که نمونه‌های مسلح شده رفتار انعطاف‌پذیرتری

نسبت به نمونه مرجع داشته و در این نمونه‌ها برخلاف نمونه مرجع نقطه پیک گسیختگی وجود نداشته‌است. با افزایش مقدار الیاف، کرنش گسیختگی افزایش یافته که حاکی از تغییر رفتار به حالت انعطاف‌پذیر است. با توجه به شکل مذکور، مقاومت فشاری نمونه مرجع برابر با $275/034$ کیلوپاسکال و کرنش گسیختگی آن $2/50\%$ می‌باشد.

در شکل (۳-۴) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف برحسب مقدار الیاف نشان داده شده‌است. همانطور که واضح است در بین نمونه‌های حاوی الیاف با افزایش مقدار الیاف از $0/25\%$ تا 1% به علت اصطکاک جزئی ایجاد شده بین الیاف و خاک، مقاومت فشاری کمی بهبود یافته‌است اما چون چسبندگی خاک و الیاف ناچیز است، مقاومت فشاری نمونه مرجع همچنان از نمونه‌های تسلیح‌شده بیشتر است. به طور کلی نتیجه گرفته شده‌است که استفاده از الیاف به تنهایی اثر سوء داشته و باعث کاهش مقاومت فشاری شده‌است. بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان با استفاده از سیمان به عنوان یک افزودنی در کنار تسلیح الیاف، چسبندگی مورد نیاز ایجاد شود تا مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یابد. همچنین شکل (۳-۴) نشان‌دهنده افزایش کرنش گسیختگی است که دلیل آن مکانیزم رفتاری الیاف است که قادر به تحمل تنش کششی است و از گسیختگی زود هنگام جلوگیری کرده‌است.

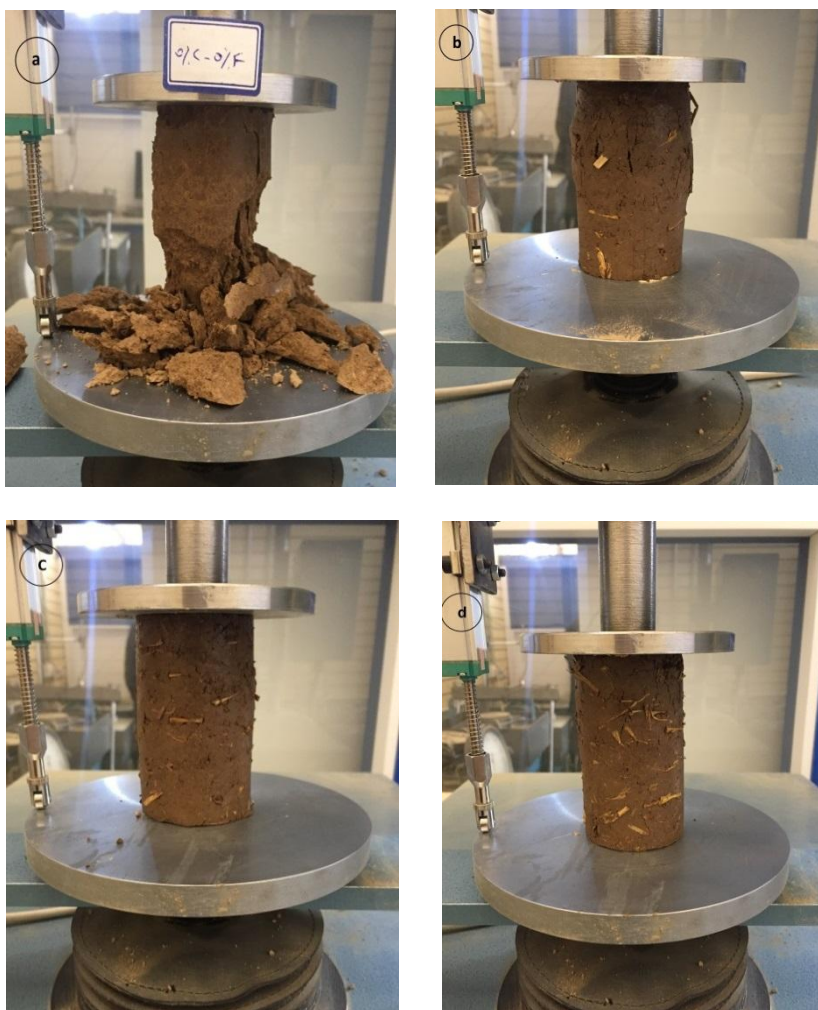


شکل (۳-۴) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف طبیعی.



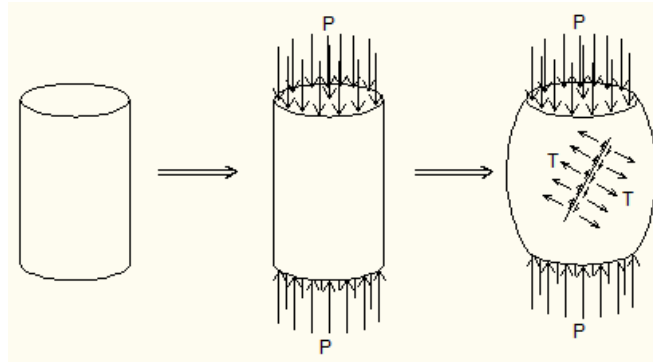
شکل (۳-۴) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های تسلیح‌شده با الیاف طبیعی برحسب مقدار الیاف.

در شکل (۴-۴) نحوه گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف آورده شده‌است. تمامی نمونه‌ها در کرنش یکسان ارزیابی شده‌اند و نشان دهنده تغییر رفتار به حالت انعطاف پذیر با افزایش درصد الیاف است. همچنین با افزایش درصد الیاف پدیده شکم‌دادگی موضعی دیگر وجود نداشته و به دلیل تسلیح تغییر شکل شعاعی در ارتفاع نمونه تقریباً به طور یکنواخت رخ داده‌است.



شکل (۴-۴) نحوه گسیختگی نمونه‌های تسلیح شده. (a) نمونه مرجع. (b) نمونه حاوی ۰/۲۵٪ الیاف. (c) نمونه حاوی ۰/۵٪ الیاف. (d) نمونه حاوی ۱٪ الیاف

در شکل (۴-۵) نحوه گسیختگی نمونه‌های تسلیح شده با الیاف نشان داده شده است. گسیختگی این نمونه‌ها بدین صورت است که در حین بارگذاری و انجام آزمایش، بیشترین تغییر شکل و افزایش قطر در وسط نمونه رخ داده است. بنابراین در مرکز به دلیل تمایل نمونه به کرنش عرضی بیشتر، تنش کششی وارد شده به الیاف موجود در لایه‌های مرکزی نمونه افزایش یافته است. [۵۸]. به همین علت مقدار الیاف موجود در لایه‌های مختلف نمونه می‌تواند در مقاومت فشاری اثرگذار باشد.



شکل (۴-۵) نحوه گسیختگی نمونه حاوی الیاف، قبل و بعد از گسیخته شدن. [۵۸]

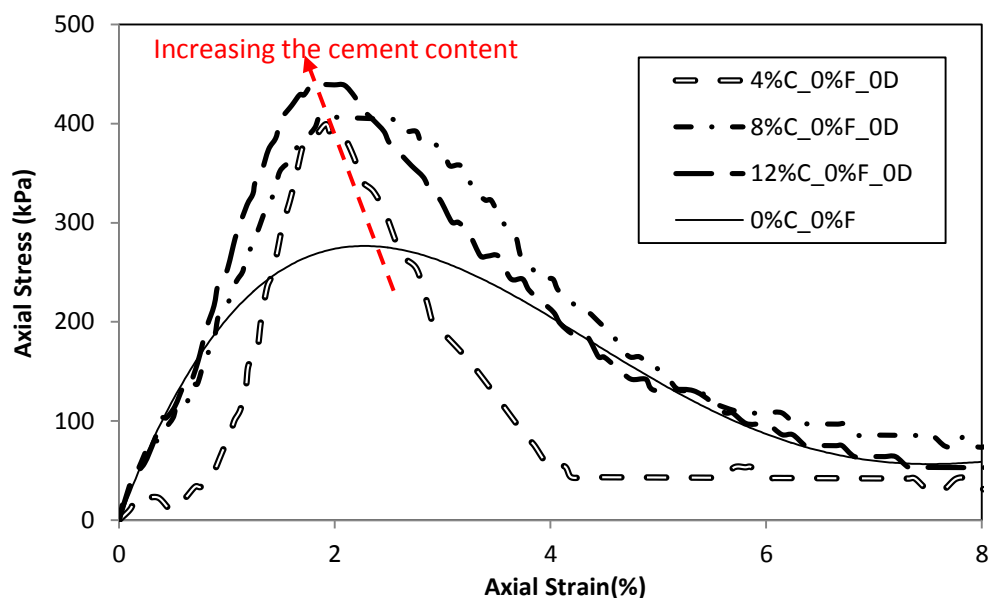
۴-۳-۲- اثر افزایش افزودنی سیمان

جهت بررسی اثر افزودنی سیمان ۱۰ آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌هایی با مقادیر مختلف سیمان (با نسبت وزنی ۰٪، ۴٪، ۸٪ و ۱۲٪ برحسب وزن مخصوص خشک حداکثر) و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت (۰، ۷ و ۲۸ روز) انجام شده‌است که نتایج آن در ادامه در سه بخش بدون عمل‌آوری، ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری آورده شده‌است.

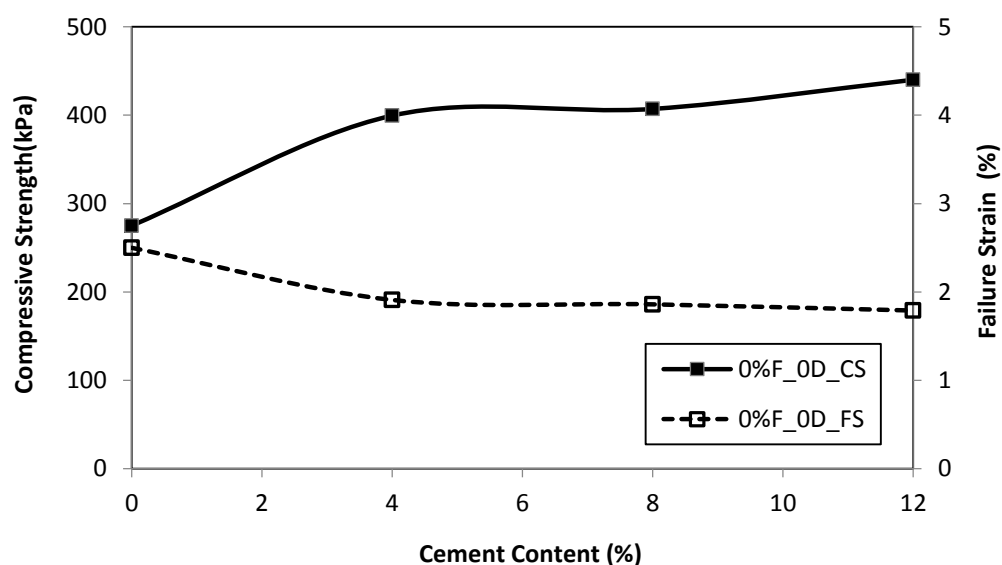
■ نمونه‌های عمل‌آوری نشده

در شکل (۴-۶) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان آورده شده‌است. با توجه به این شکل مشخص است در نمودار تنش_کرنش این نمونه‌ها نقطه پیک گسیختگی وجود داشته که نشان‌دهنده رفتار ترد و شکننده خاک با افزایش سیمان است و به وضوح مشخص است که با افزایش سیمان مقاومت فشاری افزایش و کرنش گسیختگی کاهش یافته‌است.

در شکل (۴-۷) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع (حاوی ۰٪ سیمان و ۰٪ الیاف) و نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان (برحسب درصد سیمان نسبت به خاک خشک) نشان داده شده‌است. مشاهده شده‌است که با افزایش مقدار سیمان تا ۱۲٪ به علت افزایش واکنش هیدراتاسیون، مقاومت فشاری ۶۰٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته‌است. همچنین دیده شده‌است که در این نمونه‌ها، با افزایش مقدار سیمان تا ۱۲٪، کرنش گسیختگی از ۲۸/۴۰٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته‌است که به علت تردشدگی بیشتر نمونه‌ها به دلیل حضور سیمان است.



شکل (۴-۶) منحنی تنش_ کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان.



شکل (۴-۷) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان بر حسب مقدار سیمان.

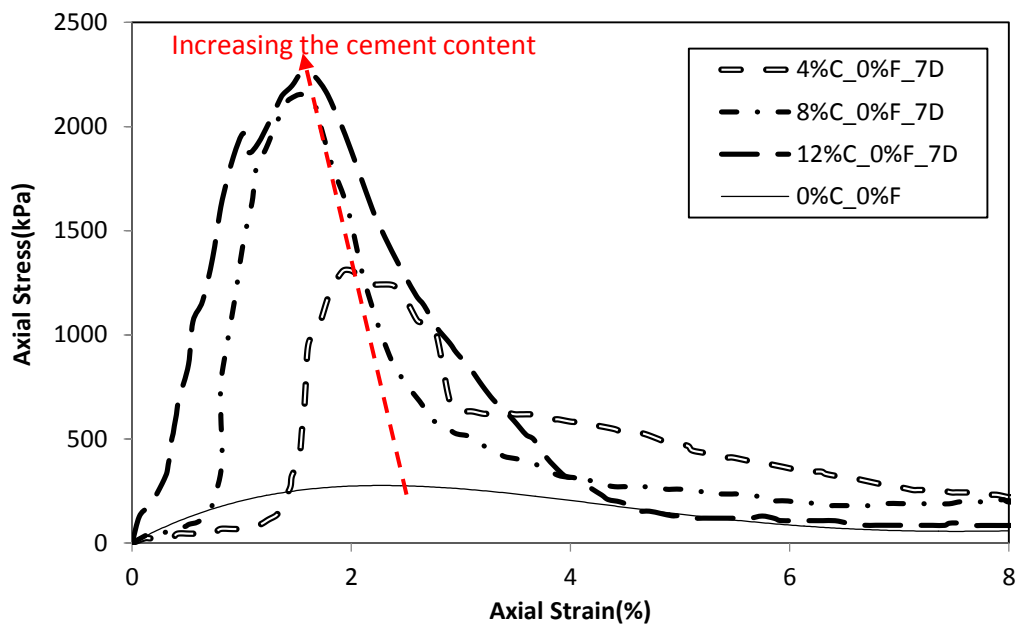
در شکل (۴-۸) نحوه گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده و حاوی مقادیر متفاوت سیمان که در کرنش یکسان ثبت شده‌اند، نشان داده شده‌است و مشاهده شده‌است که این نمونه‌ها رفتار ترد و شکننده‌ای داشته‌اند.



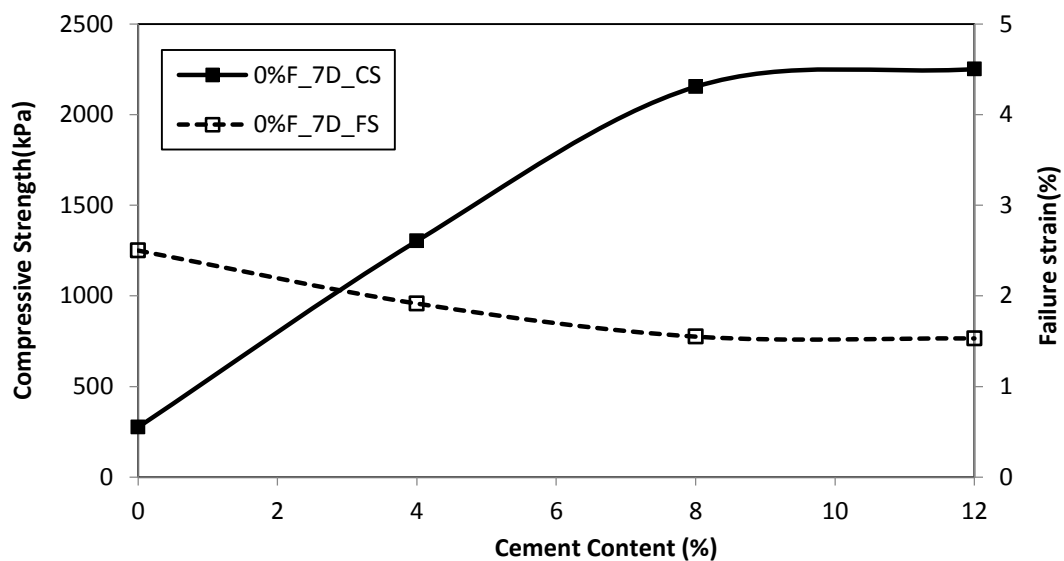
شکل (۴-۸) گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده و (a) حاوی ۴٪ سیمان. (b) حاوی ۸٪ سیمان. (c) حاوی ۱۲٪ سیمان.

■ نمونه‌های ۷ روزه

در شکل (۴-۹) رفتار نمونه مرجع و نمونه‌های ۷ روزه تثبیت شده با سیمان نشان داده شده‌است. رفتار این نمونه‌ها مشابه نمونه‌های عمل‌آوری نشده ترد و شکننده بوده و با توجه به شکل (۴-۱۰) دیده شده‌است که با افزایش مقدار سیمان تا ۱۲٪، مقاومت فشاری $718/619\%$ نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته‌است. اما اختلاف مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۸٪ سیمان و ۱۲٪ سیمان ناچیز است. بنابراین مقدار بهینه سیمان نمونه‌های ۷ روزه، ۸٪ وزن مخصوص خشک حداکثر در نظر گرفته شده‌است. همچنین با افزایش مقدار سیمان تا ۱۲٪، کرنش گسیختگی نمونه‌های ۷ روزه $38/80\%$ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته‌است.



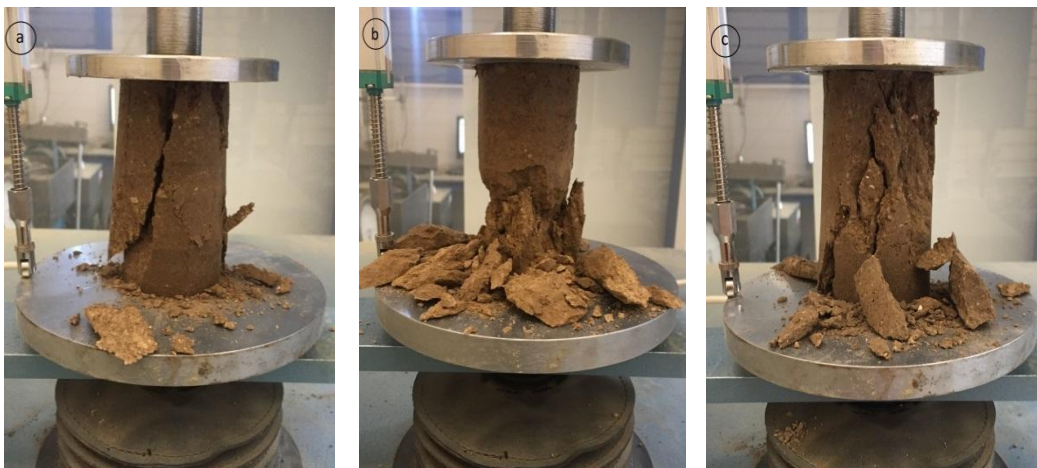
شکل (۹-۴) منحنی تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های ۷ روزه تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان.



شکل (۱۰-۴) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های ۷ روزه تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان برحسب مقدار سیمان.

در شکل (۱۱-۴) نحوه گسیختگی نمونه‌های ۷ روزه حاوی مقادیر مختلف سیمان نشان داده شده است. این تصاویر در کرنش یکسان ثبت شده‌اند و واضح است که این نمونه‌ها مانند نمونه‌های عمل‌آوری نشده رفتار ترد و

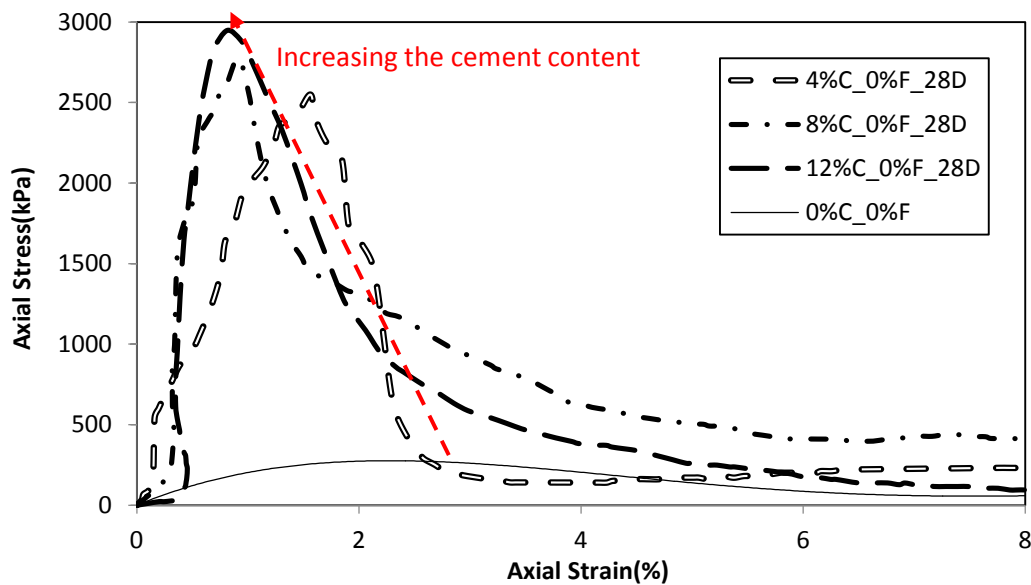
شکننده داشته‌اند.



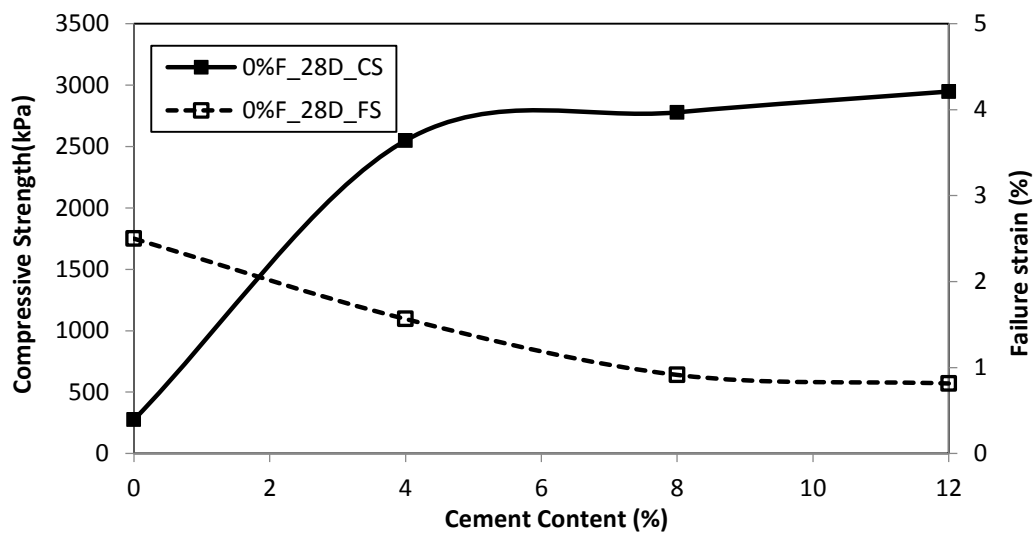
شکل (۴-۱۱) گسیختگی نمونه‌های ۷ روزه و (a) حاوی ۴٪ سیمان. (b) حاوی ۸٪ سیمان. (c) حاوی ۱۲٪ سیمان.

□ نمونه‌های ۲۸ روزه

در شکل (۴-۱۲) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان نشان داده شده‌است. مشاهده شده‌است که رفتار نمونه‌های ۲۸ روزه همانند نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده و ۷ روزه ترد و شکننده بوده‌است. همچنین در شکل (۴-۱۳) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های مذکور برحسب مقدار سیمان نشان داده شده‌است و بیان‌کننده آن است که با افزایش مقدار سیمان تا ۱۲٪، به علت افزایش فرآیند هیدراتاسیون، مقاومت فشاری ۶۴٪/۹۷۰ نسبت به نمونه مرجع افزایش و کرنش گسیختگی به علت تردشدگی نمونه، ۴۰٪/۶۷ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته‌است.



شکل (۴-۱۲) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه مرجع و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان.



شکل (۴-۱۳) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه مرجع و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان برحسب مقدار سیمان

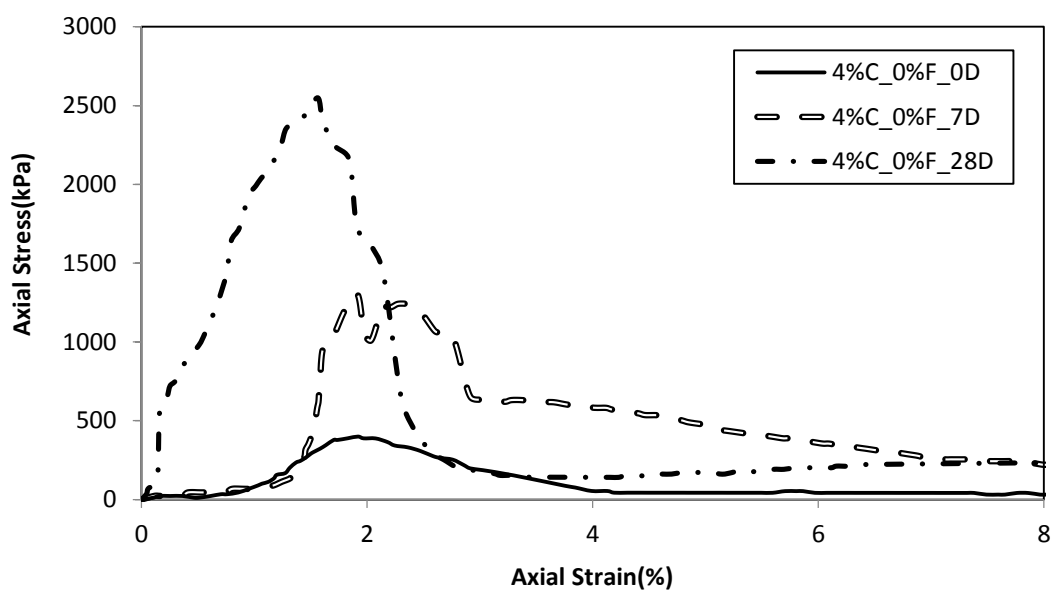
در شکل (۴-۱۴) نحوه گسیختگی نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی مقادیر مختلف سیمان که در کرنش یکسان ثبت شده‌اند، نشان داده شده‌است. واضح است که این نمونه‌ها همانند سایر نمونه‌های سیمانی شده رفتار ترد و شکننده داشته‌اند.



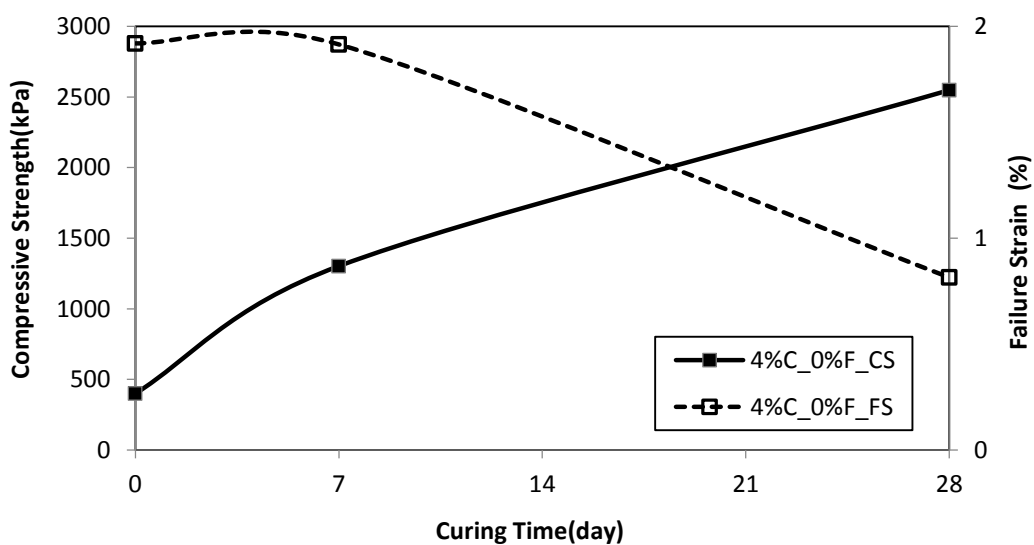
شکل (۴-۱۴) گسیختگی نمونه‌های ۲۸ روزه و (a) حاوی ۴٪ سیمان. (b) حاوی ۸٪ سیمان. (c) حاوی ۱۲٪ سیمان.

□ اثر افزایش زمان عمل‌آوری

در شکل (۴-۱۵) اثر زمان عمل‌آوری بر منحنی‌های تنش_کرنش نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده‌است. مشاهده شده‌است که در نمودار تنش_کرنش نمونه‌های سیمانی نقطه پیک گسیختگی وجود داشته‌است که به علت رفتار ترد و شکننده نمونه‌ها بوده‌است. همچنین در شکل (۴-۱۶) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان نشان داده شده‌است. واضح است که با افزایش زمان عمل‌آوری به دلیل افزایش فرآیند هیدراتاسیون مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته و کرنش گسیختگی به دلیل افزایش سختی و شکنندگی نمونه‌ها کاهش یافته‌است.



شکل (۴-۱۵) منحنی‌های تنش_ کرنش نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان برحسب زمان عمل‌آوری.



شکل (۴-۱۶) تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان برحسب زمان عمل‌آوری

رفتار نمونه‌های حاوی ۸٪ سیمان و ۱۲٪ سیمان مشابه نمونه‌های مذکور بوده و با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری افزایش و کرنش گسیختگی کاهش یافته است. در جدول (۴-۲) مقادیر تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه عمل‌آوری نشده به طور کامل شرح داده شده است.

جدول (۲-۴) مقادیر افزایش مقاومت فشاری و کاهش کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی سیمان با افزایش زمان عمل‌آوری.

مقدار کاهش کرنش گسیختگی (%)	مقدار افزایش مقاومت فشاری (%)	مشخصات نمونه
۵۷/۵۵	۵۳۸/۰۱۷۹	4%C_0%F
۵۰/۸۰	۵۸۲/۴۹	8%C_0%F
۵۴/۴۶	۵۶۹/۸۶	12%C_0%F

در شکل (۱۷-۴) گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت قرار داده شده‌است. با توجه به این شکل‌ها واضح است که نمونه‌های سیمانی رفتار ترد و شکننده داشته‌اند.



شکل (۱۷-۴) گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان ۲۸ روزه و (a) عمل‌آوری نشده . (b) ۷ روزه. (c) ۲۸ روزه.

۳-۳-۴- نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و مسلح‌شده با الیاف

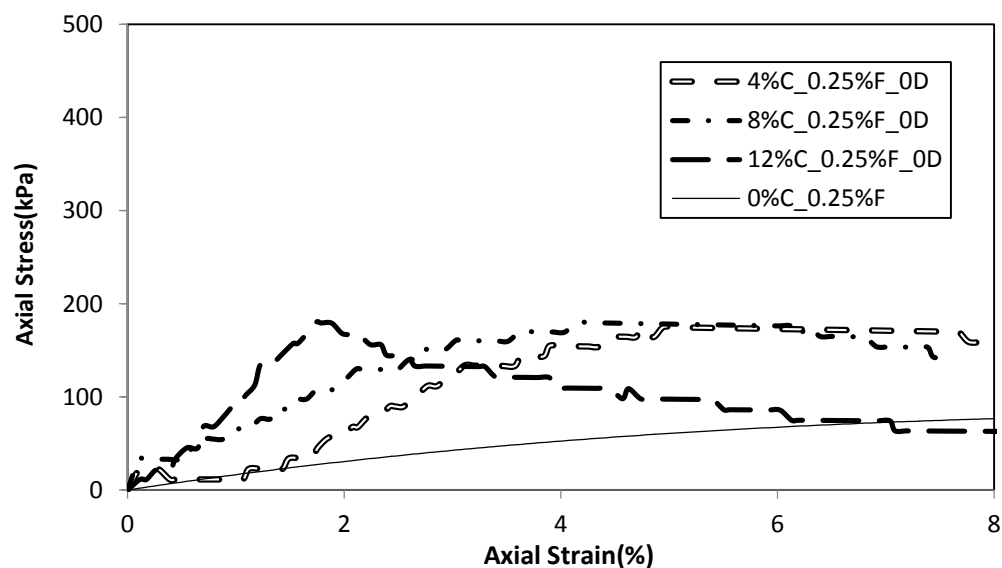
تعداد ۱۲ آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های عمل‌آوری نشده تثبیت شده با سیمان و مسلح‌شده با ساقه برنج انجام شده‌است. پارامترهای گوناگون آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر است:

الف: سه نسبت وزنی مختلف الیاف طبیعی (۰/۲۵٪ ، ۰/۵٪ ، ۱٪)

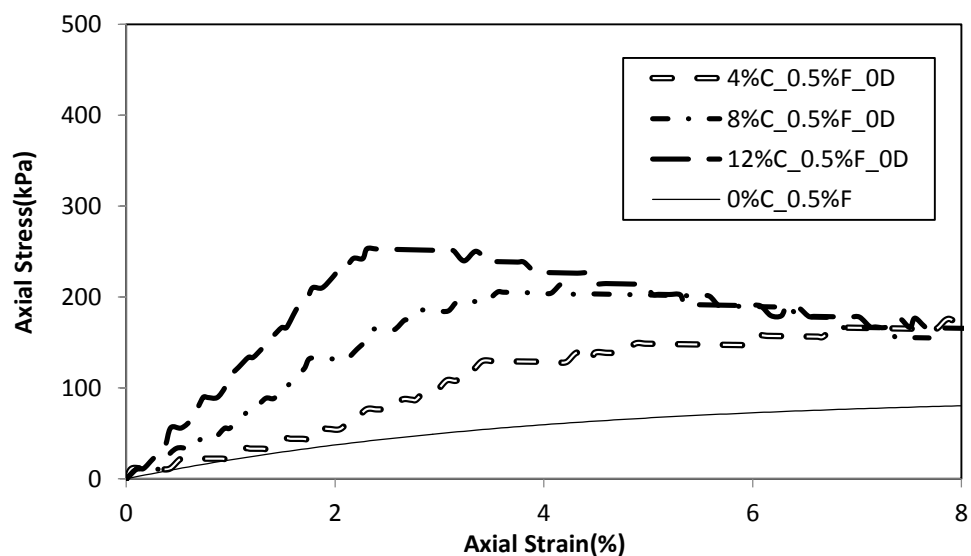
ب: درصدهای مختلف سیمان (۰ ، ۴٪ ، ۸٪ ، ۱۲٪)

در شکل‌های (۱۸-۴)، (۱۹-۴) و (۲۰-۴) منحنی‌های تنش_کرنش نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی الیاف و

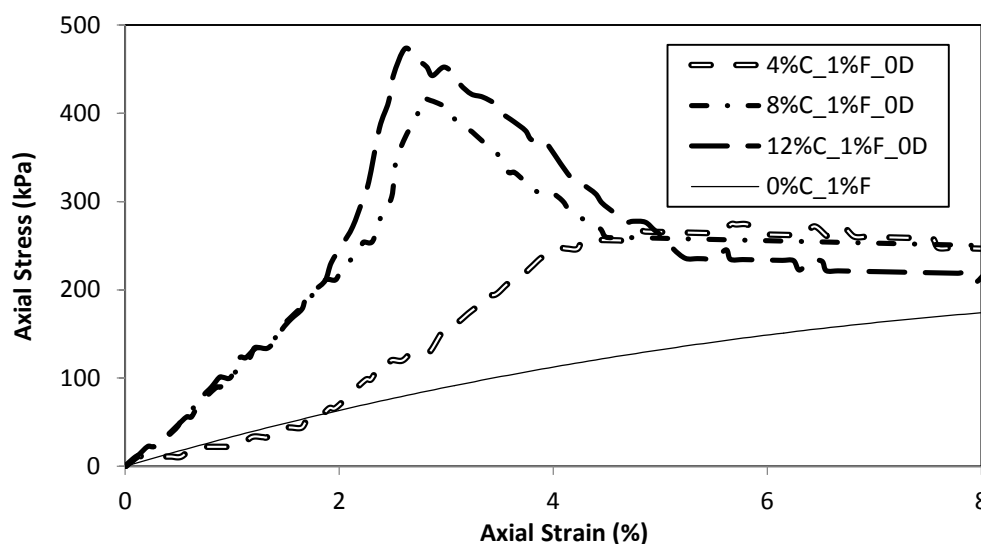
سیمان نشان داده شده است. مشاهده شده است که رفتار نمونه‌هایی که حاوی الیاف هستند، انعطاف پذیر بوده و نقطه پیک گسیختگی وجود ندارد. اما در نمونه‌هایی با مقدار الیاف یکسان، با افزایش مقدار سیمان، رفتار نمونه به رفتار ترد و شکننده نزدیک شده است. همچنین در این شکل‌ها واضح است که در مقدار سیمان یکسان، با افزایش مقدار الیاف مقاومت فشاری افزایش یافته که به دلیل تسلیح ناشی از حضور الیاف است.



شکل (۴-۱۸) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان عمل‌آوری نشده و تسلیح شده با ۰/۲۵٪ الیاف.

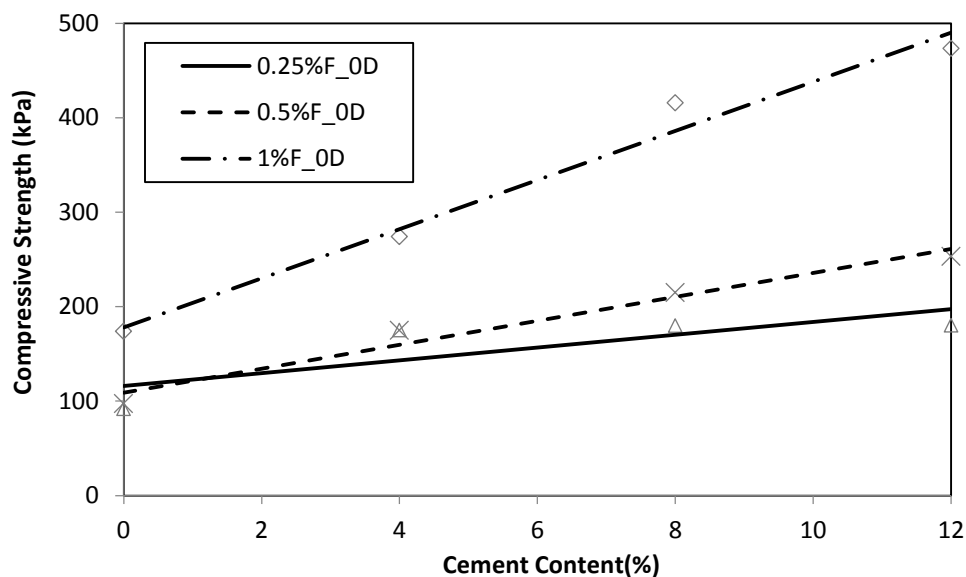


شکل (۴-۱۹) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان عمل‌آوری نشده و تسلیح شده با ۰/۵٪ الیاف.

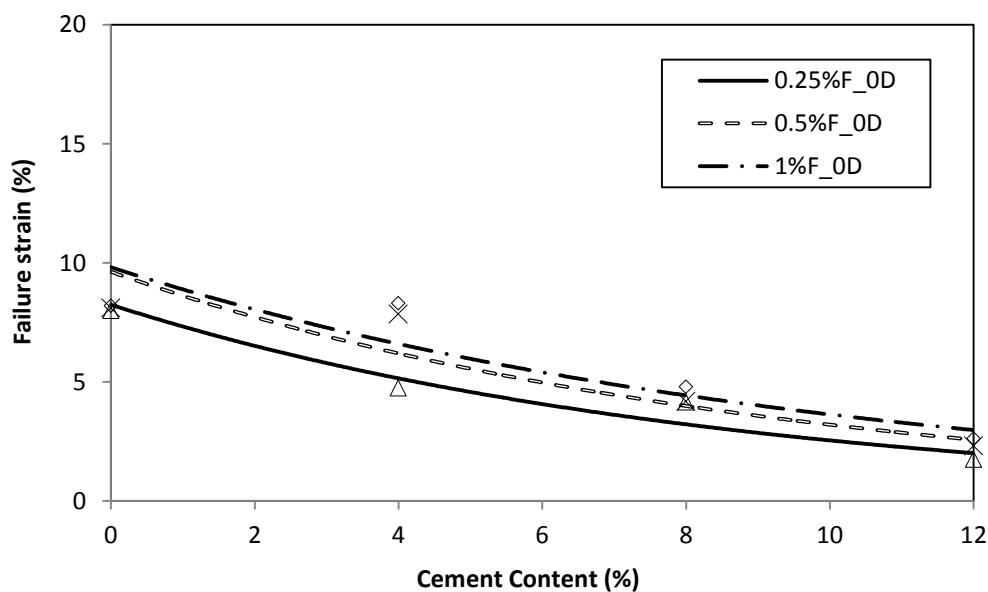


شکل (۴-۲۰) منحنی تنش_کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان عمل‌آوری نشده و تسلیح‌شده با ۱٪ الیاف.

در شکل (۴-۲۱) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری نشده برحسب درصد سیمان و همچنین شکل (۴-۲۲) تغییرات کرنش گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده برحسب درصد سیمان نشان داده شده‌است. همانطور که از شکل (۴-۲۱) مشخص است در یک مقدار ثابت الیاف، افزایش مقدار سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری و همچنین در یک مقدار ثابت سیمان، افزایش مقدار الیاف از ۰/۲۵٪ تا ۱٪ سبب افزایش مقاومت فشاری شده‌است. در شکل (۴-۲۲) دیده می‌شود که در یک مقدار یکسان الیاف، افزایش سیمان باعث تردتر و شکننده‌تر شدن نمونه‌های خاک شده، در نتیجه نمونه‌ها در کرنش‌های محوری کمتری گسیخته شده‌اند.



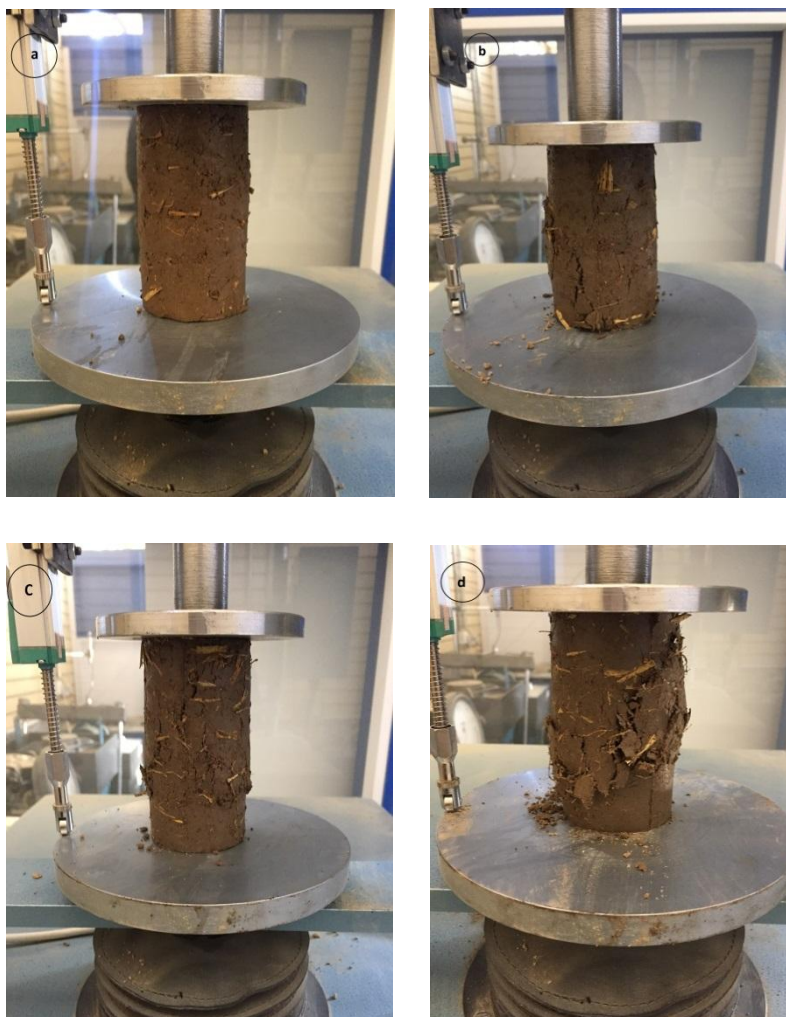
شکل (۴-۲۱) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده حاوی مقادیر مختلف الیاف و سیمان برحسب درصد سیمان



شکل (۴-۲۲) تغییرات کرنش گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری‌نشده حاوی مقادیر مختلف الیاف و سیمان برحسب درصد سیمان

در شکل (۴-۲۳) گسیختگی نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان و مسلح‌شده با ۱٪ الیاف نشان داده شده‌است که همگی در کرنش محوری یکسان ثبت شده‌اند. همانطور که از تصاویر مشخص است نمونه مسلح‌شده با ۱٪ الیاف رفتار انعطاف‌پذیر داشته و با افزایش مقدار سیمان رفتار نمونه‌ها به رفتار ترد و شکننده

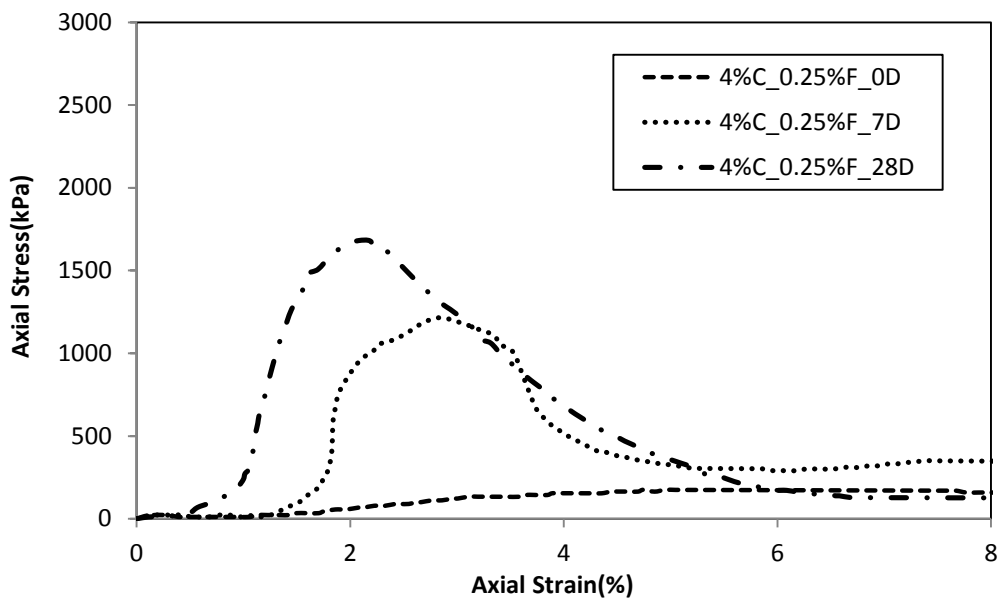
نزدیک شده است.



شکل (۴-۲۳) گسیختگی نمونه عمل آوری نشده حاوی ۱٪ الیاف و (a) ۰٪ سیمان. (b) ۴٪ سیمان. (c) ۸٪ سیمان. (d) ۱۲٪ سیمان.

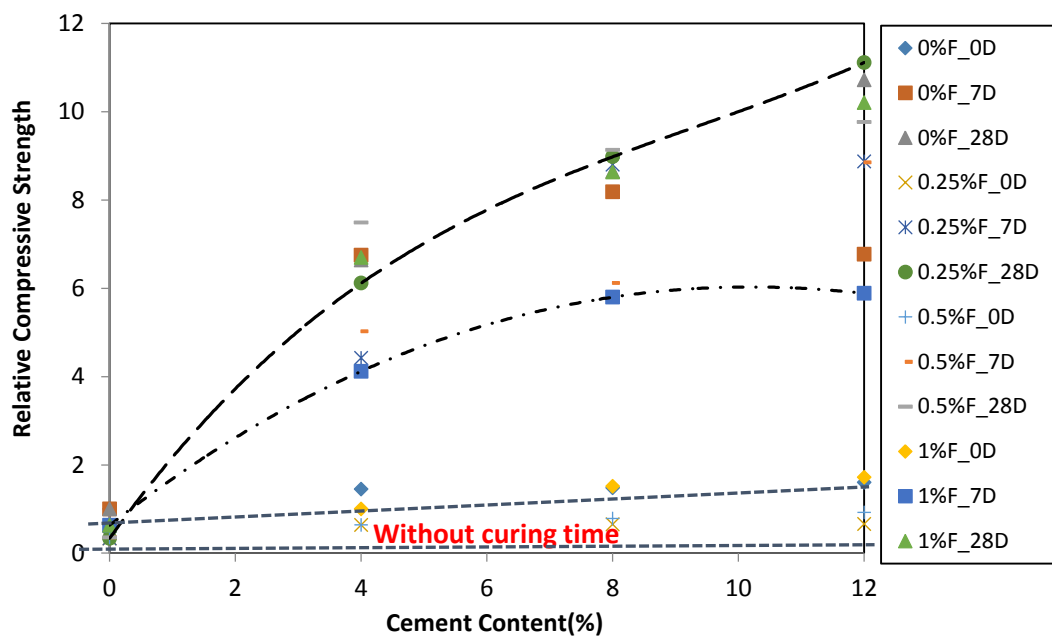
۴-۳-۴- اثرافزایش زمان عمل آوری

در شکل (۴-۲۴) اثر زمان عمل آوری بر منحنی‌های تنش _ کرنش نمونه‌های ساخته شده با ۴٪ سیمان و ۰/۲۵٪ الیاف در زمان‌های عمل آوری متفاوت نشان داده شده است. مشاهده شده است که در تمامی نمونه‌های متشکل از سیمان و الیاف در یک مقدار ثابت الیاف و سیمان با افزایش زمان عمل آوری رفتار نمونه از حالت انعطاف پذیر به حالت ترد نزدیک شده و نقطه پیک گسیختگی نمایان شده است.

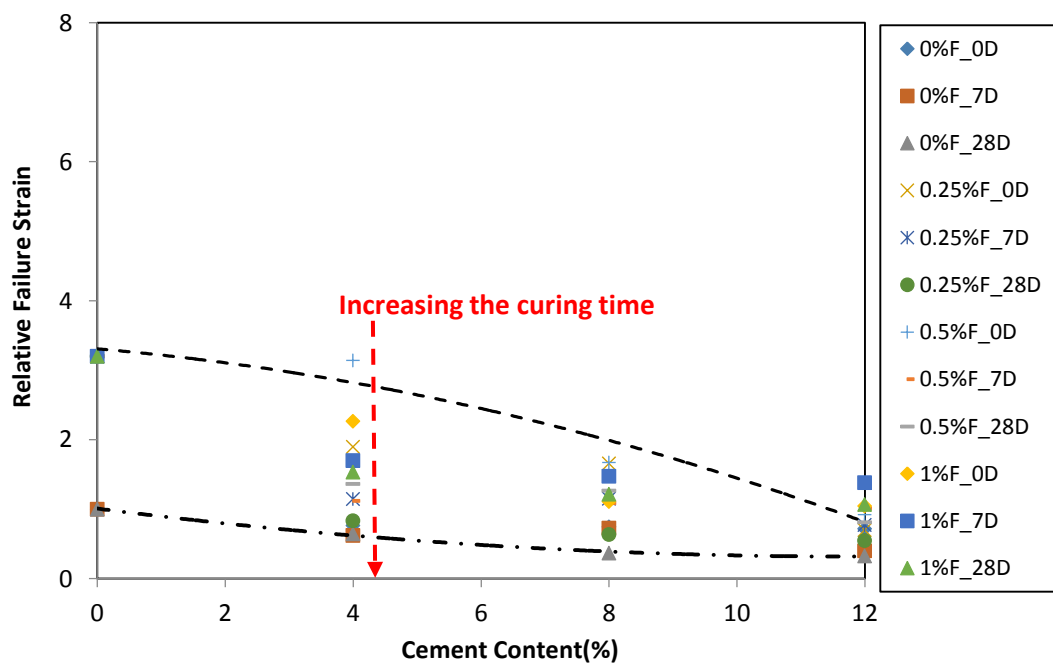


شکل (۴-۲۴) اثر زمان عمل‌آوری بر منحنی تنش_کرنش نمونه‌های متشکل از ۴٪ سیمان و ۰/۲۵٪ الیاف.

در شکل (۴-۲۵) تغییرات مقاومت فشاری نسبی (مقاومت فشاری نمونه مورد نظر نسبت به مقاومت فشاری نمونه مرجع) و در شکل (۴-۲۶) تغییرات کرنش گسیختگی نسبی (کرنش گسیختگی نمونه مورد نظر نسبت به کرنش گسیختگی نمونه مرجع) نمونه‌های حاوی سیمان و الیاف برحسب مقدار سیمان نشان داده شده‌است. با توجه به شکل (۴-۲۵) واضح است که در نمونه‌های مذکور در یک مقدار ثابت سیمان و الیاف با افزایش زمان عمل‌آوری، به علت افزایش فرآیند هیدراتاسیون مقاومت فشاری نسبی افزایش یافته‌است. همچنین نتایج شکل (۴-۲۶) نشان می‌دهند که به طور کلی در یک مقدار ثابت سیمان و الیاف با افزایش زمان عمل‌آوری، کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌ها کاهش یافته‌است.



شکل (۴-۲۵) تغییرات مقاومت فشاری نسبی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان و مقادیر مختلف الیاف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت برحسب مقدار سیمان.



شکل (۴-۲۶) تغییرات کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان و مقادیر مختلف الیاف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت برحسب مقدار سیمان.

در شکل (۴-۲۷) گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان و ۰/۲۵٪ الیاف نشان داده شده‌است که همگی در کرنش محوری ثابت ثبت شده‌اند. همانطور که از تصاویر مشخص است نمونه عمل‌آوری نشده رفتار انعطاف‌پذیری داشته و با افزایش زمان این رفتار به رفتار ترد و شکننده تبدیل شده‌است.



شکل (۴-۲۷) گسیختگی نمونه‌های حاوی ۴٪ سیمان و ۰/۲۵٪ الیاف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت. (a) نمونه عمل‌آوری نشده. (b) نمونه ۷ روزه. (c) نمونه ۲۸ روزه.

۴-۴- جمع‌بندی نتایج

در این فصل اثر تغییر مقادیر الیاف ساقه برنج، سیمان و افزایش زمان عمل‌آوری بر پارامترهای مکانیکی خاک رمبنده مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدای فصل نتایج آزمایش تراکم استاندارد بررسی شد و نتایج حاکی از آن بود که در یک مقدار ثابت سیمان، افزایش الیاف سبب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه شده‌است. در بخش ۱-۳-۴ به بررسی اثر الیاف پرداخته شد و مشاهده شد که به طور کلی افزایش الیاف به تنهایی سبب کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع شده و در عین حال باعث افزایش کرنش گسیختگی شده‌است. بنابراین استفاده از الیاف ساقه برنج به تنهایی پاسخ‌گو نیست. در بخش ۲-۳-۴ اثر افزودنی سیمان ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از سیمان به تنهایی باعث افزایش سختی و مقاومت فشاری شده و کرنش گسیختگی کاهش یافته‌است. همچنین در بین نمونه‌های حاوی سیمان افزایش زمان عمل‌آوری سبب افزایش مقاومت و کاهش کرنش گسیختگی شده و گذشت زمان عمل‌آوری تغییرات قابل توجهی در مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نسبت به افزایش سیمان به‌وجود آورده‌است. در بخش ۳-۳-۴ نمونه‌های حاوی الیاف

و سیمان بررسی شدند و نتایج نشان داد که استفاده همزمان الیاف و سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری شده و در یک مقدار سیمان یکسان، افزایش مقدار الیاف سبب افزایش کرنش گسیختگی شده و نمونه‌ها انعطاف‌پذیرتر شده‌اند. به همین صورت در یک مقدار الیاف یکسان، افزایش مقدار سیمان سبب کاهش کرنش گسیختگی شده و رفتار نمونه‌ها شکننده‌تر شده‌است. در بخش آخر اثر افزایش زمان عمل‌آوری بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که در یک مقدار ثابت سیمان و الیاف با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری نسبی افزایش و کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌ها کاهش یافته‌است.

نتایج کلی حاصل از آزمایش‌ها و نیز پیشنهادهایی در این زمینه، در فصل بعد ارائه شده است.

فصل ۵:

نتایج و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

همانطور که در فصلهای پیشین بیان شد، هدف از این پژوهش، بررسی رفتار مکانیکی خاک فروریزی تسلیح شده با الیاف طبیعی ضایعاتی ساقه برنج و تثبیت شده با سیمان بوده است. خاک فروریزی مورد مطالعه از منطقه چاله باغ شهرستان گرگان تهیه شده و به آزمایشگاه انتقال داده شد.

در این پژوهش بنا بر این بود تا اثر عواملی همچون مقادیر الیاف ساقه برنج، سیمان و زمان عمل آوری در نمونه های خاک بهسازی شده، بر وزن مخصوص خشک حداکثر، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری و شکل پذیری نمونه خاک مورد بررسی قرار گیرد. به منظور انجام تحلیل بر روی نمونه های بهسازی شده و مقایسه ی آن با نمونه ی بهسازی نشده، آزمایش تراکم استاندارد و مقاومت فشاری محدود نشده انجام گرفت و نتایج در قالب نمودارهای استاندارد با تحلیل تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه، رفتار نمونه ها، تغییرات مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی ارائه گردید.

۵-۲- نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده برروی خاک فروریزی تسلیح شده با الیاف طبیعی ضایعاتی ساقه برنج و تثبیت شده با سیمان مشاهده شد که مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه های بهسازی شده در مقایسه با خاک بهسازی نشده چشم گیر بوده است. نتایج دقیق حاصل از این پژوهش به شرح ذیل می باشد:

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های مسلح شده با الیاف بیانگر آن است که با افزایش مقدار الیاف رفتار نمونه ها انعطاف پذیرتر شده و مقاومت فشاری کمی بهبود یافته است. اما چون چسبندگی بین خاک و الیاف کم است، مقاومت فشاری خاک دست نخورده بیشتر است. بنابراین به طور کلی مقاومت فشاری کاهش یافته و استفاده از الیاف اثر عکس داشته است. همچنین به علت مکانیزم رفتاری الیاف که از گسیختگی زود هنگام جلوگیری می کند، افزایش الیاف سبب رفتار انعطاف پذیر شده و کرنش گسیختگی افزایش یافته است.
- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های عمل آوری نشده حاوی الیاف و سیمان نشان

داده‌اند که :

- در مقدار ثابت الیاف، افزایش مقدار سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری شده و همچنین افزایش سیمان باعث تردتر و شکننده‌تر شدن نمونه‌های خاک شده، در نتیجه نمونه‌ها در کرنش‌های محوری کمتری گسیخته شده و کرنش گسیختگی کاهش یافته‌است.
- همین‌طور در محتوی سیمان یکسان، با افزایش مقدار الیاف از ۰/۲۵٪ تا ۱٪، مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی افزایش یافته‌است.
- مقایسه کرنش گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی سیمان با نمونه‌های عمل‌آوری نشده حاوی سیمان و الیاف نشان داده‌است که به طور کلی کرنش گسیختگی نمونه‌های حاوی سیمان به علت رفتار تردتر کمتر از نمونه‌های حاوی الیاف و سیمان است.
- نمونه‌های عمل‌آوری نشده و مسلح‌شده با الیاف رفتار انعطاف‌پذیر داشته و با افزایش مقدار سیمان این رفتار به رفتار شکننده نزدیک‌تر شده‌است.
- در نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف و مقادیر مختلف سیمان با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت، در یک مقدار ثابت الیاف و سیمان با افزایش زمان عمل‌آوری رفتار نمونه از حالت انعطاف‌پذیر به حالت ترد نزدیک شده و نقطه پیک گسیختگی نمایان شده‌است. همین‌طور در یک مقدار ثابت سیمان و الیاف، افزایش زمان عمل‌آوری، سبب افزایش مقاومت فشاری نسبی و کاهش کرنش گسیختگی نسبی نمونه‌ها شده‌است.
- نتایج کلی نشان داده‌است که در کوتاه مدت می‌توان الیاف ساقه برنج را جایگزین سیمان کرد تا علاوه بر حصول مقاومت فشاری لازم، کرنش گسیختگی افزایش یابد. اما در بلندمدت اثر الیاف ساقه برنج با اثر فرایند هیدراتاسیون سیمان قابل قیاس نبوده و جایگزین کردن الیاف با سیمان تنها سبب افزایش کرنش گسیختگی شده و مقاومت فشاری مورد نظر حاصل نمی‌شود.

۵-۳- پیشنهادات

- ۱- با توجه به اینکه خاک در رده شدیداً رمبده قرار گرفته‌است، می‌توان اثر ساقه برنج و سیمان را بر میزان پتانسیل رمبندگی مورد بررسی قرار داد.

- ۲- با انجام آزمایشات گسترده‌تری می‌توان اثر پوسیدگی الیاف موجود در نمونه در اثر گذشت زمان را برروی مقاومت فشاری خاک مورد بررسی قرار داد و مقایسه کرد.
- ۳- به کمک آزمایش‌های دینامیکی می‌توان اثر الیاف ساقه برنج و سیمان را برروی پارامترهای دینامیکی مورد بررسی قرار داد.
- ۴- با استفاده از الیاف‌های مصنوعی می‌توان تغییرات پارامترهای دینامیکی را بررسی کرد.
- ۵- همچنین با انجام آزمایش‌های دینامیکی می‌توان تغییرات پارامترهای دینامیکی را در اثر از بین رفتن الیاف در بلندمدت به‌علت تجزیه بررسی کرد.

مراجع

1. Al-Rawas, A.A., *State-of-the-art-review of collapsible soils*. Sultan Qaboos University Journal for Science [SQUJS], 2000. 5: p. 115-135.
2. Consoli, N.C., et al., *Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range*. Geotextiles and Geomembranes, 2009. 27(3): p. 196-203.
3. Rogers, C., *Types and distribution of collapsible soils*, in *Genesis and properties of collapsible soils*. 1995, Springer. p. 1-17.
4. Haeri, S.M., A. Zamani, and A.A. Garakani, *Collapse potential and permeability of undisturbed and remolded loessial soil samples*, in *Unsaturated soils: Research and applications*. 2012, Springer. p. 301-308.
5. Ayeldeen, M., et al., *Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017. 9(2): p. 329-339.
6. Tran, K.Q., T. Satomi, and H. Takahashi. *Study on Effect of Cornsilk Fiber in Cemented Soil Stabilization*. in *Congrès International de Géotechnique–Ouvrages–Structures*. 2017. Springer.
7. Chew, S., A. Kamruzzaman, and F. Lee, *Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004. 130(7): p. 696-706.
8. Consoli, N.C., et al., *Key parameters for strength control of artificially cemented soils*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2007. 133(2): p. 197-205.
9. Pakbaz, M.S. and R. Alipour, *Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay*. Applied Clay Science, 2012. 67: p. 1-4.
10. Ayeldeen, M., et al., *Unconfined compressive strength of compacted disturbed cement-stabilized soft clay*. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2016. 2(4): p. 28.
11. Askarani, K.K. and M.S. Pakbaz, *Drained shear strength of over-consolidated compacted soil-cement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016. 28(5): p. 04015207.
12. Tran, K.Q., T. Satomi, and H. Takahashi, *Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test*. Journal of Building Engineering, 2019. 24: p. 100748.

13. Horpibulsuk, S., N. Miura, and D. Bergado, *Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004. **130**(10): p. 1096-1105.
14. Ayeldeen, M. and M. Kitazume, *Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay*. Geotextiles and Geomembranes, 2017. **45**(6): p. 592-602.
15. Fernandez, J., *Flax Fiber Reinforced Concrete-A Natural Fiber Biocomposite For Sustainable Building Materials*. WIT Transactions on The Built Environment, 2002. **59**.
16. Tran, K.Q., T. Satomi, and H. Takahashi, *Study on strength behavior of cement stabilized sludge reinforced with waste cornsilk fiber*. International Journal, 2017. **13**(39): p. 140-147.
17. Afroughsabet, V., L. Biolzi, and T. Ozbakkaloglu, *High-performance fiber-reinforced concrete: a review*. Journal of materials science, 2016. **51**(14): p. 6517-6551.
18. Soğancı, A., *The effect of polypropylene fiber in the stabilization of expansive soils*. Int. J. Environ. Chem. Ecol. Geol. Geophys. Eng, 2015. **9**(8): p. 994-997.
19. Dafalla, M.A., A.A.B. Moghal, and A.K. Al-Obaid, *Enhancing tensile strength in clays using polypropylene fibers*. International Journal of Geomate, 2017. **12**(29): p. 33-37.
20. Tang, C., et al., *Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil*. Geotextiles and Geomembranes, 2007. **25**(3): p. 194-202.
21. Ahmed, A., *Simplified regression model to predict the strength of reinforced sand with waste polystyrene plastic type*. Geotechnical and Geological Engineering, 2012. **30**(4): p. 963-973.
22. Balkis, A.P., *The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen*. Construction and Building Materials, 2017. **134**: p. 556-562.
23. Donkor, P. and E. Obonyo, *Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers*. Materials & Design, 2015. **83**: p. 813-819.
24. Machovic, V., et al., *Effect of aging of PET fibre on the mechanical properties of PET fibre reinforced cement composite*. Journal of Ceramics-Silikaty, 2008. **52**(3): p. 172-182.

25. Ghavami, K., R.D. Toledo Filho, and N.P. Barbosa, *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres*. Cement and Concrete Composites, 1999. **21**(1): p. 39-48.
26. Freitag, D.R., *Soil randomly reinforced with fibers*. Journal of Geotechnical Engineering, 1986. **112**(8): p. 823-826.
27. Prabakar, J. and R. Sridhar, *Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil*. Construction and Building Materials, 2002. **16**(2): p. 123-131.
28. Toledo Filho, R.D., et al., *Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability*. Cement and concrete composites, 2003. **25**(2): p. 185-196.
29. Yixian, W., et al., *Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute*. Geotechnical and Geological Engineering, 2016. **34**(4): p. 1079-1088.
30. Danso, H., et al., *Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres*. Construction and Building Materials, 2015. **101**: p. 797-809.
31. Sharma, V., H.K. Vinayak, and B.M. Marwaha, *Enhancing compressive strength of soil using natural fibers*. Construction and Building Materials, 2015. **93**: p. 943-949.
32. Tran, K.Q., T. Satomi, and H. Takahashi, *Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers*. Construction and Building Materials, 2018. **178**: p. 204-210.
33. Zak, P., et al., *The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials*. Construction and Building Materials, 2016. **106**: p. 179-188.
34. Mo, X., et al., *Physical properties of medium-density wheat straw particleboard using different adhesives*. Industrial Crops and Products, 2003. **18**(1): p. 47-53.
35. Rowell, R.M. and H.P. Stout, *Jute and kenaf*. Handbook of fiber chemistry. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2007. International fiber science and technology series; 16: Pages 409-456, 2007.
36. Standard, A., *Test method for particle-size analysis of soils*. ASTM international, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/D4513, 2007. **11**.
37. ASTM, D., *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. 2010, ASTM West Conshohocken, PA.

38. ASTM, D., *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. 2010.
39. ASTM, *ASTM D4318, standard test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. 2005.
40. Standard, A., *D698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, 2007.
41. ASTM, D., *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. 2006, American Society for Testing and Materials West Conshohocken, Pa.
42. Jennings, J. and K. Knight, *A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. 6th Regional Conf. for African on Soil Mech. & Found. Engineering*, September, 1975.
43. عطاردی، ح. (۱۳۹۵) پایان نامه کارشناسی ارشد: "بهسازی خاکهای رمبنده با استفاده از خاکستر لجن"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
44. Basma, A.A. and E.R. Tuncer, *Evaluation and control of collapsible soils*. Journal of Geotechnical engineering, 1992. **118**(10): p. 1491-1504.
45. Assallay, A., et al., *Fragipan formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis*. Geoderma, 1998. **83**(1-2): p. 1-16.
46. دستی گردی، ح. (۱۳۹۱) پایان نامه کارشناسی ارشد: "تأثیر افزودن مواد شیمیایی بر میزان تغییر شکل پذیری خاک های رمبنده"، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان.
47. ASTM, D., *Standard test method for measurement of collapse potential of soils*. The American, 1996.
48. نیک اقبال سی سخت، ب. حبیب آگهی، ق. نیازی، ع. نیکویی، ا. (۱۳۹۳)، "بررسی اثر بیولوژیکی بر روی بهبود وضعیت رمبندگی خاک" هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ص ۸، بابل.
49. عطاردی، ح. حسینی، م. (۱۳۹۵)، "بهسازی خاکهای رمبنده با استفاده از خاکستر لجن فاضلاب". کنفرانس علوم مهندسی و فناوری های محیط زیست، ص ۸، تهران.

50. خدابنده، م. کرامتی، م، حسینی، م، نوکنده، ص. (۱۳۹۸) "بررسی تاثیر pH شیرابه بر میزان فروریزش و پارامترهای مقاومت برشی خاک های رمبنده". مهندسی عمران امیرکبیر، شماره ۱، دوره ۵۱: ص ۵۸-۴۵.
51. یوسفی، م. پرویزی، م. (۱۳۹۴)، "تثبیت خاک با آهک جهت بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک و کاهش پتانسیل رمبندگی آن"، با مطالعه موردی (خاک مسیر یاسوج-یزد). مهندسی عمران شریف، شماره ۲، دوره ۲-۲۱: ص ۱۴۳-۱۳۳.
52. طبرسا، ع. (۱۳۹۶)، "تأثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم"، نشریه زمین شناسی مهندسی-دانشگاه خوارزمی، شماره ۲، دوره ۱۱: ص ۲۴۶-۲۲۵.
53. Noorzad, R. and H. Pakniat, *Investigating the effect of sample disturbance, compaction and stabilization on the collapse index of soils*. Environmental Earth Sciences, 2016. 75(18): p. 1262.
54. Iranpour, B., *The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment*. Engineering geology, 2016. 205: p. 40-53.
55. Bakir, N., K. Abbeche, and G. Panczer, *Experimental study of the effect of the glass fibers on reducing collapse of a collapsible soil*. Geomechanics and Engineering, 2017. 12(1): p. 71-83.
56. Duan, X.-l. and J.-s. Zhang, *Mechanical properties, failure mode, and microstructure of soil-cement modified with fly ash and polypropylene fiber*. Advances in Materials Science and Engineering, 2019. 2019.
57. Soil, A.C.D.-o. and Rock, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) 1*. 2017: ASTM International.
58. رجایی، ک. (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تأثیر نحوه گستردگی الیاف مسلح کننده طبیعی و پلیمری بر مقاومت فشاری تک محوری خاک رس" دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

Abstract

One of the most important geotechnical issues that can affect the design of the project or lead to its destruction is the existence of problematic soils. Problematic soils are divergent, expansive, collapsible, liquefied soils. In this research, special attention has been paid to collapsible soils. Various researchers have researched the stabilization and improvement of collapsible soils. In this research, the effect of rice straw waste fibers (RSF) on the mechanical behavior of collapsible soils stabilized with cement has been investigated. Studying of the effect of different percentages of mixing of these fibers on the compressive strength of collapsible soils stabilized with different amounts of cement through performing unconfined compressive strength (UCS) test and evaluation of the effect of the so-called fibers and cement on the results of standard compaction test (SCT) has formed the basis of laboratory research in this project. Results of standard compaction test have shown that as the percentage of fibers in equal cement content increased, the maximum dry unit weight and optimum water content decreased and increased, respectively. The results of unconfined compressive strength test revealed that in specimen containing 1% fibers, the compressive strength increased, by 89.49% compared to the specimen containing 0.25% fibers. In specimens stabilized with the cement and without curing time, the compressive strength increased by 60% compared to the reference specimen (containing 0% fibers and 0% cement) with increasing the amount of cement. Moreover, failure strain decreased by 28.40% compared to the reference specimen (RS). Also, results of uncured specimens containing fibers and cement have shown that in the specimen containing only 1% fibers compressive strength increased by 172.38% with increasing the amount of cement from 0% to 12% and failure strain decreased by 68.10%. It is remarkable that in specimens containing 12% cement and 0.25% fibers, with increasing curing time from 0 days to 28 days, the relative compressive strength increased by 1594%, and relative failure strain decreased by 21.48%. In general, aging and increasing the curing time has increased the relative compressive strength and decreased relative failure strain.

In general, the results show that the compressive strength of cemented specimens is higher than reinforced specimens, and the specimens containing fibers failed in more strain than cemented specimens. The results show that in general, in the short term, by replacing the fibers and reducing cement content, the required compressive strength can be obtained and the failure strain can be increased, but in the long term, the effect of the hydration process is dominant to rice

straw fiber effect and Reducing the amount of cement only increases the failure strain and decreases the compressive strength.

Keywords: Collapsible soil, unconfined compressive strength test, Rice Straw fiber, cement.



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Evaluation of the Reinforcement Effect of Natural Rice
Straw Fibers on the Mechanical Behavior of Collapsible
Soils Stabilized with Cement**

By:

Fateme Sabbaqzade

Supervisor:

Dr. Mohsen Kermati

Fall 2020