

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي جَعَلَ الْمَوْتَ
وَالْحَيَاةَ وَالَّذِي
يُحْيِي الْمَوْتَى
وَالَّذِي يُخْرِجُ
الْحَبَّ وَالذُّرْءَ
وَالَّذِي يُصَوِّرُ
الْبَشَرَةَ فِي أَحْسَنِ
تَقْوِيمٍ
سُبْحَانَ اللَّهِ عَمَّا يُشْرِكُونَ
اللَّهُ أَكْبَرُ
عَمَّا يُشْرِكُونَ



دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی مقاومت برشی خاک های رمبنده بهسازی شده با خاکستر لجن

نگارنده: امیر مصلائی

استاد راهنما

دکتر سید مهدی حسینی

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۹۵
تاریخ: ۱۴۶
۹۵،۲۷
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امیر مصلاهی به شماره دانشجویی ۹۳۱۶۱۲۴، رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان بررسی مقاومت برشی خاک رمینده بهسازی شده با خاکستر لجن که در تاریخ ۹۵/۶/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: ص امتیاز ۱۷۷) دفاع مجدد مردود

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)
۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)
۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید مهدی حسینی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر پویان برومند	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر امیر بذرافشان مقدم	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر رمضان واقعی	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

بگو چگونه تو را در قاب دفترم توصیف کنم؟

صبر و مهربانیت را چگونه در ابعاد کوچک ذهنم جا دهم؟

آن زمان که خط خطی های بی قراری ام را با مهر و محبتت پاک می کردی و با صبر و بردباری کلمه به کلمه ی زندگی را به من دیکته می گفتی خوب به خاطر من مانده است.

و من باز فراموش می کردم محبت تشدید دارد.

در تمام مراحل زندگی، قدم به قدم، هم پای من آمدی، بار بار زمین افتادم و هر بار با مهربانی دستم را گرفتی.

آری، از تو آموختم، حتی در سخت ترین شرایط، امید را هرگز از یاد نبرم.

تقدیم به مادرم...

پاس

آنجا که سخن در تجلی آرمان باو امیدهای آدمی در می ماند، آنجا که احساس آزادی به انسان دست می دهد و ستایش با پرس و جو باو ژرف نگری با آغاز می

شود، آنجا که می توان اقلیم هنر و علم نام نهاد.

بر خود لازم می دانم که در این مجال از راهبانی های ارزشمند توأم با صبر و شکیبایی استاد گرامی جناب آقای دکتر حسینی تشکر و قدردانی کنم.

همچنین از آقای دکتر ساغر وانی پاسکزارم که در فراهم سازی امکانات آزمایشگاهی، مساعدت شایانی داشتند. به علاوه، از کمک و همراهی آقای مهندس

کلاتری، مسئول آزمایشگاه مکانیک خاک تشکر می کنم.

در نهایت از آقای مهندس عطاردی و آقای مهندس اعتراف و آقای مهندس خداندی و دیگر دوستانی که در طی تمامی مراحل این پایان نامه از

نظر ایشان بهره مند شدم، کمال تشکر را دارم.

از اداره تصفیه خانه فاضلاب اکباتان، شهید محلاتی و زرکنده تهران نیز که برای تهیه افزودنی در این پژوهش، کمال بھاری را داشتند، پاسکزارم.

تعهد نامه

اینجانب امیر مصلائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران-ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی مقاومت برشی خاک های رمبنده بهسازی شده با خاکستر لجن تحت راهنمایی دکتر سید مهدی حسینی 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » 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 ۱۳۹۵/۶/۱۵

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 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

مشکلات زیست محیطی که لجن فاضلاب در دفن خود ایجاد می کند و اثرات مخربی که از دفع این ماده سمی خطرناک ایجاد می شود، باعث مورد توجه قرار گرفتن این ماده زائد شده است. از طرفی افزایش جمعیت و به تبع آن، افزایش حجم فاضلاب، نیاز احداث تصفیه خانه های فاضلاب بیشتر را می طلبد. با این تفاسیر، حجم لجن فاضلاب نیز رو به فزونی است. لذا ایجاد یک چرخه مناسب در جهت بکارگیری و مصرف این مواد، که ماده زائد تصفیه خانه فاضلاب می باشد، یک راه بسیار مناسب در جهت کاهش خطرات زیست محیطی ناشی از دفن آن می باشد. یکی از روش های مرسوم دفع لجن، خصوصا در مناطقی که با کمبود زمین مواجه هستند، سوزاندن آن می باشد. مشکل اصلی این روش چگونگی دفع خاکستر ناشی از سوزاندن لجن می باشد. از طرفی با توجه به گستره نسبتا وسیع خاک های رمبنده و لزوم طراحی سدها، کانال های آبیاری و سایر ابنیه فنی در این مناطق و نیز با توجه به توسعه شهرنشینی و لزوم گسترش برخی شهرهای بزرگ روی این خاک ها، بررسی تثبیت و بهسازی خاک های رمبنده از اهمیت دوچندانی برخوردار است. هدف از این پژوهش بررسی تاثیر خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده می باشد. برای این منظور بعد از تهیه لجن مورد نیاز از تصفیه خانه شهرک اکباتان تهران و سوزاندن لجن و همچنین تهیه خاک رمبنده، استفاده از خاکستر لجن به عنوان افزودنی در دستور کار قرار گرفت. بعد از انجام آزمایشات اولیه به تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد آزمایش در حالت بدون افزودنی و همچنین با افزودنی در درصدهای مختلف وزنی که شامل ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد می باشد پرداخته شد. نتیجه نهایی حاکی از آن است که با افزایش درصد خاکستر لجن به عنوان افزودنی، چسبندگی خاک افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می یابد. همچنین اثر زمان نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت و این نتیجه حاصل شد که با افزایش زمان عمل آوری خاک همراه با

خاکستر لجن، همانند حالت قبل، چسبندگی افزایش یافته و زاویه اصطکاک داخلی مقداری کمتر از حالت بدون افزودنی و بیشتر از حالت با افزودنی بدون زمان عمل آوری را به خود اختصاص می دهد. در نهایت می توان گفت که با توجه به خطوط پوش گسیختگی بدست آمده در حالات مختلف، با افزایش مقدار این افزودنی، تنش برشی، به ازاء مقادیر کوچک تنش قائم، افزایش داشته و به ازاء مقادیر بزرگ تنش قائم، کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: خاک های رمبنده، لجن، خاکستر لجن، مقاومت برشی

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه و کلیات

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ اهداف پژوهش ۲
- ۳-۱ ساختار پژوهش ۳

۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته

- ۱-۲ مقدمه ۶
- ۲-۲ خاک های مسئله دار ۶
- ۳-۲ خاک های رمبنده ۷
- ۴-۲ معیارهای فروریزش ۱۲
- ۵-۲ مقاومت برشی خاکها ۱۳
- ۱-۵-۲ معیار گسیختگی موهر- کولمب ۱۴
- ۲-۵-۲ زاویه گسیختگی در خاک ۱۵
- ۳-۵-۲ تعیین پارامترهای مقاومت برشی در آزمایشگاه ۱۷
- ۶-۲ مقاومت برشی خاک های رمبنده ۱۷
- ۷-۲ خاکستر لجن ۱۷
- ۸-۲ مروری بر پژوهش های انجام شده ۲۰

۳- فصل سوم: نحوه انجام آزمایش ها و نتایج شناسایی خاک

- ۱-۳ مقدمه ۳۴
- ۲-۳ محل نمونه گیری ۳۴
- ۳-۳ خواص خاک ۳۵
- ۱-۳-۳ دانه بندی و هیدرومتری ۳۵
- ۲-۳-۳ آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک ۳۶
- ۳-۳-۳ وزن مخصوص خشک خاک ۳۸
- ۴-۳-۳ چگالی نسبی دانه های جامد خاک (G_s) ۳۸
- ۵-۳-۳ آزمایش حد روانی و حد خمیری ۴۱
- ۶-۳-۳ عناصر خاک ۴۲
- ۴-۳ افزودنی مورد استفاده ۴۴
- ۵-۳ آزمایش برش مستقیم ۴۵
- ۱-۵-۳ روش اعمال بار ۴۷
- ۲-۵-۳ روند آزمایش ۴۷
- ۳-۵-۳ آماده سازی نمونه های بازسازی شده ۴۸

۴- فصل چهارم: نتایج آزمایش ها و تفسیر آن ها

- ۱-۴ نتایج آزمایش برش مستقیم ۵۰

- ۱-۱-۴ تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده ۵۰
- ۲-۱-۴ تاثیر سرعت انجام آزمایش بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ۵۲
- ۳-۱-۴ تاثیر درصد خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده ۵۳
- ۱-۳-۱-۴ نمونه ۳ روزه همراه با ۲ درصد خاکستر ۵۳
- ۲-۳-۱-۴ نمونه ۳ روزه همراه با ۴ درصد خاکستر ۵۵
- ۳-۳-۱-۴ نمونه ۳ روزه همراه با ۶ درصد خاکستر ۵۸
- ۴-۳-۱-۴ نمونه ۳ روزه همراه با ۸ درصد خاکستر ۶۰
- ۴-۱-۴ بررسی زمان عمل آوری و افزودن خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ۶۳
- ۱-۴-۱-۴ نمونه ۳۰ روزه همراه با ۲ درصد خاکستر ۶۳
- ۲-۴-۱-۴ نمونه ۳۰ روزه همراه با ۴ درصد خاکستر ۶۵
- ۳-۴-۱-۴ نمونه ۳۰ روزه همراه با ۶ درصد خاکستر ۶۷
- ۵-۱-۴ مقایسه نمونه با افزودنی درحالت زمان عمل آوری ۳ و ۳۰ روز ۷۰

۵- فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها

- ۱-۵ نتایج ۷۴
- ۲-۵ پیشنهادها ۷۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ عوامل استحکام و پایداری ساختار خاک رمبنده ۱۰
- شکل ۲-۲ (الف) نمودار پوش گسیختگی (ب) صفحه گسیختگی ۱۵
- شکل ۳-۲ دایره موهر و خط پوش گسیختگی ۱۶
- شکل ۴-۲ چرخه فاضلاب ۱۸
- شکل ۵-۲ خمیر سیمان، الف: ۲۰ درصد خاکستر لجن، ب: ۱۹ درصد خاکستر لجن ۱ درصد نانو سیلیس، ج: ۱۸ درصد خاکستر لجن ۲ درصد نانو سیلیس، د: ۱۷ درصد خاکستر لجن ۳ درصد نانو سیلیس ۲۲
- شکل ۶-۲ مقایسه ترکیب شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب با پوزولان های رایج ۲۳
- شکل ۸-۲ تاثیر درصدهای مختلف خاکستر بادی و آهک بر روی پارامترهای مقاومت برشی نمونه های ۷ و ۲۸ روزه ۲۵
- شکل ۱-۳ محل نمونه گیری خاک ۳۴
- شکل ۲-۳ نمودار دانه بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتری ۳۵
- شکل ۳-۳ نمای شماتیک ذره رسی و آب اطراف آن ۳۷
- شکل ۶-۳ الف: تصویر میکروسکوپ الکترونی از ذرات خاکستر لجن فاضلاب، ب: تصویر نمونه خاکستر لجن پس از آسیاب ۴۴
- شکل ۱-۴ نمودار تنش-کرنش خاک رمبنده بدون افزودنی ۵۰

- شکل ۴-۲ نمودار پوش گسیختگی خاک رمبنده بدون افزودنی
۵۲
- جدول ۴-۲ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده تعیین شده با سرعت ۰,۰۳۶ میلیمتر بر دقیقه
۵۳
- شکل ۴-۳ نمودار تنش- کرنش خاک رمبنده همراه با ۲ درصد افزودنی
۵۴
- شکل ۴-۴ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۲ درصد خاکستر لجن
۵۵
- شکل ۴-۵ نمودار تنش- کرنش خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن
۵۶
- شکل ۴-۶ نمودار پوش گسیختگی خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن
۵۸
- شکل ۴-۷ نمودار تنش- کرنش خاک رمبنده همراه با ۶ درصد خاکستر لجن
۵۸
- شکل ۴-۸ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۶ درصد خاکستر لجن
۶۰
- شکل ۴-۹ نمودار تنش- کرنش خاک رمبنده همراه با ۸ درصد خاکستر لجن
۶۰
- شکل ۴-۱۰ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۸ درصد خاکستر لجن
۶۲
- شکل ۴-۱۱ مقایسه پوش گسیختگی خاک رمبنده به همراه درصد های مختلف افزودنی
۶۲
- شکل ۴-۱۲ نمودار تنش کرنش خاک رمبنده به همراه ۲ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری
۳۰ روزه
۶۳
- جدول ۴-۷ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه ۲ درصد خاکستر لجن با زمان
عمل آوری ۳۰ روزه
۶۴

شکل ۴-۱۳ پوش گسیختگی خاک رمبنده به همراه ۲ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری

۳۰ روزه ۶۵

شکل ۴-۱۴ نمودار تنش- کرنش خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری

۳۰ روزه ۶۵

شکل ۴-۱۵ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۴ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰

روزه ۶۷

شکل ۴-۱۶ نمودار تنش- کرنش خاک رمبنده به همراه ۶ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری

۳۰ روزه ۶۷

شکل ۴-۱۷ پوش گسیختگی خاک همراه با ۶ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰ روز ۶۹

شکل ۴-۱۸ مقایسه پوش گسیختگی خاک به همراه درصدهای مختلف افزودنی با زمان عمل

آوری ۳۰ روز ۶۹

شکل ۵-۱ نمودار مقادیر چسبندگی در درصد و زمان عمل آوری مختلف افزودنی ۷۵

شکل ۵-۲ نمودار مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در درصد و زمان عمل آوری مختلف افزودنی

۷۵

شکل ۵-۳ تغییرات مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه درصدهای مختلف خاکستر لجن به

از مقادیر مختلف تنش نرمال با زمان عمل آوری ۳۰ روزه ۷۶

شکل ۵-۴ تغییرات مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه درصدهای مختلف خاکستر لجن به از

مقادیر مختلف تنش نرمال ۷۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاکها با استفاده از پارامترهای وزنی
حجمی (Elkady, 2002) ۱۲
- جدول ۲-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاکها با استفاده از نتایج آزمایش
ادومتر (Alkandari, 2000) ۱۳
- جدول ۱-۳ تعیین درصد رطوبت خاک ۳۷
- جدول ۲-۳ وزن مخصوص خشک خاک ۳۸
- جدول ۳-۳ مقادیر G_s برای کانی های مختلف ۳۹
- جدول ۴-۳ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانههای جامد خاک ۴۰
- جدول ۵-۳ نتایج حدود اتربرگ ۴۱
- جدول ۶-۳ ترتیب فراوانی کانی های موجود در خاک با توجه به آزمایش XRD (حسینی،
۱۳۹۴) ۴۲
- جدول ۷-۳ نتایج درصد وزنی اکسید عناصر در خاک با توجه به آزمایش XRF (حسینی،
۱۳۹۴) ۴۳
- جدول ۱-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده بدون افزودنی ۵۱

جدول ۳-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه ۲ درصد خاکستر لجن ۵۴

جدول ۴-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن ۵۷

جدول ۵-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده همراه با ۶ درصد خاکستر لجن ۵۹

جدول ۶-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه ۸ درصد خاکستر لجن ۶۱

جدول ۸-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده همراه با ۴ درصد خاکستر لجن با زمان

عمل آوری ۳۰ روزه ۶۶

جدول ۹-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک همراه با ۶ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری

۳۰ روزه ۶۸

۱- فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

وظیفه اصلی صنعت آب و فاضلاب هر کشوری تامین آب شرب مورد نیاز مردم می باشد. این موضوع در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران اهمیتی دوچندان می یابد، چرا که جمعیت در این کشورها عموماً در حال افزایش است و در نتیجه شاهد افزایش تقاضای آب و نیز تولید فاضلاب بیشتر می باشیم. حال با توجه به اینکه در تصفیه خانه های کشور از سیستم های لجن فعال یا لاگون هوادهی استفاده می نمایند که منجر به تولید حجم بالایی از پسماند (لجن) می گردد، لذا مدیران صنعت آب و فاضلاب می بایست راهکارهایی را به منظور جلوگیری از انباشت این پسماند در دستور کار خود قرار دهند. یکی از مهمترین راهکارهایی که از نظر هزینه و نیز اثرات زیست محیطی در بسیاری از کشورها مدنظر قرار گرفته است، سوزاندن لجن می باشد. سوزاندن لجن سبب کاهش حجم لجن تا ۹۵ درصد می گردد و محصول نهایی به صورت پودر می باشد. بر همین اساس می توان این ضایعات را در بهبودی مصالح دیگر بکار برد. از طرفی با توجه به گستره نسبتاً وسیع خاک های رمبنده و لزوم طراحی سدها، کانال های آبیاری و سایر ابنیه فنی در این مناطق و نیز با توجه به توسعه شهرنشینی و لزوم گسترش برخی شهرهای بزرگ روی این خاک ها، بررسی تثبیت و بهسازی خاک های رمبنده از اهمیت دوچندانی برخوردار است.

۱-۲ اهداف پژوهش

با توجه به رشد جمعیت و گسترش صنایع تعداد تصفیه خانه ها رو به افزایش است و به تبع آن لجن فاضلاب که ماده زائد تصفیه خانه می باشد نیز رو به افزایش است. در سالهای اخیر سوزاندن لجن فاضلاب و استفاده از خاکستر لجن در مصالح ساختمانی به عنوان افزودنی مورد توجه محققین قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی تاثیر خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک های رمبنده می باشد.

۳-۱ ساختار پژوهش

در فصل دوم به تعریف خاک های مسئله دار و خاک های رمبنده می پردازیم. سپس به بررسی خاکستر لجن و پژوهش های انجام شده در این رابطه می پردازیم.

در فصل سوم موقعیت جغرافیایی محل نمونه گیری، آزمایش های اولیه جهت شناسایی عمومی خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری، چگالی دانه های جامد خاک، درصد رطوبت طبیعی، دانه بندی به روش تر و هیدرومتری، حدود اتربرگ توضیح داده شده است. همچنین آزمایش برش مستقیم به طور مجزا تشریح شده است.

در فصل چهارم نتایج آزمایش ها به همراه تجزیه و تحلیل آزمایش های برش مستقیم انجام شده بیان می شود.

در نهایت در فصل پنجم، به جمع بندی نتایج و پیشنهادات برای تحقیق های آینده، می پردازیم.

۲- فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲ مقدمه

یکی از مسائل مهم در علم ژئوتکنیک وجود خاک های مسئله دار از جمله خاک رمبنده، واگرا، تورمی و ... می باشد. نقطه عطف هر ۳ نوع خاک مذکور و منشا پیدایش مشکلات ناشی از خاک های مسئله دار، تغییر رطوبت خاک که به معنای افزایش و یا کاهش حجم آن می باشد، است.

آب و هوای هر منطقه، شرایط محیطی خاصی را بر آن اعمال می کند. یکی از تاثیرگذارترین شرایط هر محیط، مقدار رطوبت آن می باشد و از آن جایی که خاک های سطحی بخش مهمی از محیط را تشکیل می دهند هر گونه تغییرات رطوبت، در وضعیت خاک منطقه نیز تاثیر خواهد گذاشت. خاک موجود در خشکی های زمین، معمولا به صورت نه کاملا اشباع و نه تماما خشک یافت می شود. در این شرایط وضعیت خاک معمولا تحت عنوان نیمه اشباع یا غیر اشباع نامیده می شود. رفتار خاک در این حالت نیز به شکلی متمایز با خاک های اشباع یا خشک خواهد بود. در زمینه ی خاک های خشک، به طور کلی، نتایج پژوهش های کلاسیک در حال حاضر نیز قابل قبول می باشد. در سال ۱۹۳۶، کارل ترزاقی با بررسی رفتار خاک ها در حالت اشباع، اصل معروف تنش موثر را ارائه کرد. وی تنش موثر را به عنوان بخشی از تنش کل معرفی نمود.

۲-۲ خاک های مسئله دار

خاک های مسئله دار در شرایط مختلف بارگذاری و یا رطوبت، مشکلاتی همچون نشست ناگهانی را به همراه دارند. از جمله این خاک ها می توان به خاک های متورم شونده، خاک های واگرا، خاک های انحلال پذیر و خاک های رمبنده اشاره کرد.

خاک های متورم شونده خاکهایی می باشند که به سبب جذب آب زیاد حجم آنها افزایش چشم گیری می یابد. این خاک ها، خاکهای دانه ریزی می باشند که مقدار کانیهای رسی متورم شونده مانند مونت موریلونیت در آنها زیاد می باشد. به فشار ناشی از تورم خاک، فشار تورمی گفته می شود.

در بیان خاک واگرا می توان گفت، واگرایی پدیده ای است که باعث می شود خاک در برخورد با آب چسبندگی خود را از دست داده و ذرات همدیگر را دفع کنند و ذرات خاک حتی با نیروی کم ناشی از حرکت بسیار آرام آب از یک دیگر دور شوند و خاک دچار فرسایش سریع گردد. این فرسایش در داخل خاک می تواند سبب ایجاد حفرات بزرگ گردد و نشست ناگهانی خاک را باعث شود.

خاک های انحلال پذیر خاکهایی هستند که بر اثر تماس آب با این نوع خاک ها که دارای مقادیری کانی های انحلال پذیر نظیر گچ و نمک هستند، در آب حل شده و از محیط به صورت محلول در آب خارج می شوند. در صورتی که مقدار این مواد در خاک زیاد باشد با تداوم انحلال می توانند موجب افزایش تخلخل و پوک شدن خاک گردیده و نشست های قابل ملاحظه ای در خاک ایجاد شود و این نشست ها باعث انهدام سازه های احداث شده بر روی این خاک ها می گردند.

در خاک های رمبنده بافت طبیعی خاک به طور ناگهانی درهم فرو میریزد و تخریب میشود که در نتیجه آن خاک دچار نشست ناگهانی شده و به سازه های احداث شده بر روی آن خسارات قابل توجهی وارد می شود. این پدیده مختص خاکهایی است که دارای بافت متخلخل بوده و اتصال ذرات به همدیگر ضعیف می باشد. از مهم ترین این خاک ها، رس ها و سیلت هایی که دارای بافت لانه زنبوری می باشند را می توان نام برد. در طی پدیده رمبندگی، بر اثر جذب آب توسط ذرات خاک، نیروهای بین مولکولی از بین رفته و ساختمان خاک به هم می ریزد.

۲-۳ خاک های رمبنده

تعاریف زیادی در مورد خاک های رمبنده بیان شده است. تعدادی از این تعاریف توسط راجرز، در مقالات و متون مختلفی جمع آوری شده که در زیر آمده است:

- خاکی که در اثر مرطوب شدن، اعمال بار، یا هر دو عامل، کاهش حجم قابل توجهی از

خود نشان می دهد.

- هر خاک غیر اشباع که ذرات آن به شرایط نظم یافتگی جدیدی در اثر مرطوب شدن برسد و حجم آن به مقدار قابل توجهی کاهش یابد، خواه تحت اثر بار باشد و یا اینکه باری وجود نداشته باشد.

- خاک با نشست اضافی ایجاد شده در اثر مرطوب شدن غیر اشباع، با افزایش بار یا بدون آن.

- خاک با حالتی که تحت بار موجود به صورت کامل تحکیم نیافته باشد که مرتبط با مقاومت چسبندگی ظاهری خاک های غیر اشباع می باشد.

شوارتز خاک رمبنده را به صورت زیر تعریف می کند:

خاکی که در حالت طبیعی و در درصد رطوبت کم، تنش های نسبتا زیاد را تحمل کرده و دچار نشست کم می شود. ولی در هنگام مرطوب شده، بدون آنکه تنش افزایش یابد دچار کاهش حجم و نشست چشم گیر می گردد.

مکچنی در گزارش کلی خود به جامعه بین المللی مهندسين ژئوتکنیک تلاش کرد خاک های رمبنده را به شکل زیر تعریف نماید:

"خاک های دارای وزن واحد حجم خشک کمتر از ۱۶ کیلونیوتن بر متر مکعب که به طور جزئی اشباع می باشند. همه خاک های دارای وزن واحد کم ضرورتا رمبنده نیستند، اما اشباع جزئی، عموما پیش نیاز رمبندگی است. این خاک ها انواع و منشاء زمین شناسی گسترده ای داشته و می توان آنها را بر اساس منشاء تشکیل، به خاک های انتقالی یا برجا تقسیم نمود. هم خاک های انتقالی هم خاک های برجا می توانند رمبنده باشند. ویژگی رایج ساختار خاک های رمبنده، نفوذپذیری نسبتا بالای آن می باشد."

از این تعاریف روشن می شود که خاک های غیر اشباع، منابع اصلی خاک های رمبنده را تشکیل می دهند. بر اساس بررسی راجرز، رمبندگی در خاکی رخ می دهد که خصوصیات زیر را داشته باشد:

- ساختار باز و ناپایدار
- نسبت تخلخل زیاد و وزن مخصوص خشک کم
- پوکی زیاد
- نهشته هایی از لحاظ زمین شناسی جوان یا نهشته هایی که اخیرا دگرگون شده اند
- نهشته هایی با حساسیت زیاد
- مقاومت کم پیوند بین ذرات خاک

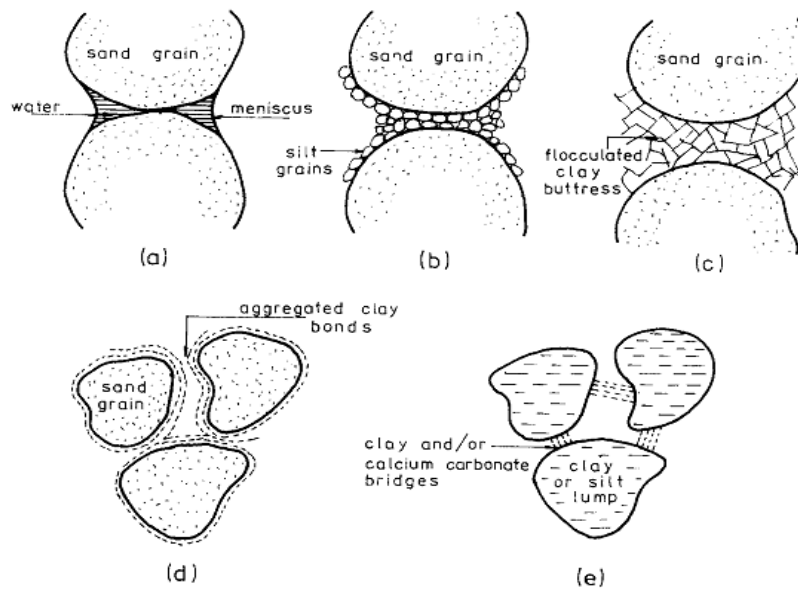
سه ویژگی اول مرتبط بوده و امکان آرایش مجدد، کاهش حجم و انتقال سیال در خاک های رمبنده را فراهم می کنند. ویژگی جوان بودن نهشته ها از لحاظ زمین شناسی یا نهشته هایی که اخیرا دگرگون شده اند، بیانگر این موضوع می باشد که رمبندگی از طریق فرایندهای طبیعی روی می دهد. ویژگی حساسیت زیاد، در کلی ترین حالت، بیان شده و در واقع این اصطلاح ممکن است در این زمینه صحیح نباشد و دلیل پذیرفتن این ویژگی، در نظر گرفتن رس های سزیم به عنوان خاک رمبنده می باشد. مقاومت پیوند بین ذره ای ضعیف، به ذراتی مربوط است که پیوندهای ضعیف دارند. از این رو رس کلاسیک به عنوان خاک رمبنده شناخته نمی شود.

بر اساس تحقیقات گریگوریان، خاک های رمبنده دارای ساختار لانه زنبوری بوده و محدوده تغییر نسبت تخلخل آنها بین ۰/۸ تا ۱ و محدوده تغییر وزن مخصوص آنها معمولا بین ۱۲ تا

۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب می باشد.

بر اساس گزارش دادلی اغلب خاک های رمبنده حد روانی کمتر از ۴۵ درصد و شاخص خمیری کمتر از ۲۵ درصد دارند.

خاک های رمبنده از سیلت تا ماسه ریز و گاهی شن تشکیل شده اند. این ذرات تمایل به جدا شدن از یکدیگر را دارند که توسط کشش مویینی و یا عوامل سیمانتاسیون به هم متصل شده اند. سیمانتاسیون بین ذرات این خاک ها ممکن است شامل اکسید آهن و کربنات کلسیم بوده و دیگر عامل ها شامل پل های رسی، پیوندهای سیلتی و رسی می شوند که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ عوامل استحکام و پایداری ساختار خاک رمبنده

چهار شرط اساسی که برای فروریزش خاک وجود دارد عبارتند از (Barden et al. 1969):

۱- ساختار خاک به صورت باز، نسبتاً ناپایدار و غیراشباع باشد.

۲- وجود تنش کل زیاد به گونه ای که قادر به تغییر ساختار خاک باشد.

۳- وجود عامل مکشی یا سیمانی در خاک که در شرایط غیر اشباع آن سبب پایداری ساختار گردد.

۴- اضافه شدن آب به خاک که سبب از بین رفتن یا کاهش عامل مکشی یا سیمانی آن شده به گونه ای که کاهش حجم توده خاک را تحت تنش ثابت نشان دهد.

(Futai and Admeida 2002) همچنین مشخصات کلی خاکهای فروریزی به طور خلاصه به

صورت زیر است:

۱- نسبت تخلخل بالا (بیش از 13 درصد)

۲- درجه اشباع پایین (کمتر از ۰,۶)

۳- مقدار لای و ماسه ریز بالا ($> 30\%$)

۴- از بین رفتن پیوند بین ذرات در اثر اشباع شدن

(Barden et al, 1969) طبق نظریه باردن، گاون و کولینز خاک های فروریزی به دو صورت در

طبیعت یافت می شوند:

۱- خاکهای ماسه ای و لای دار که توسط پیوندهای رسی به یکدیگر چسبیده اند و ساختمان

متخلخلی را به وجود آورده اند. در صورتی که خاک اشباع گردد دانه های ماسه در اثر خمیری

شدن رس بر روی یکدیگر می لغزند و خاک کاهش حجم پیدا خواهد نمود.

۲- خاکهای نیمه اشباعی که در حالت طبیعی دارای فشار منفی بوده و در اثر نیروی مکش به

یکدیگر چسبیده اند و خاک در حالت طبیعی به صورت موقت پایدار می باشد اما در اثر افزایش

رطوبت، نیروی مکشی کاهش یافته و پیوند بین دانه های خاک از بین رفته و اسکلت خاک

فروپاشیده و خاک دچار کاهش حجم می شود

۴-۲ معیارهای فروریزش

روش‌های مختلفی در متون فنی به منظور شناسایی وجود پتانسیل فروریزش در خاک‌ها پیشنهاد شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی اشاره کرد. البته از نظر (Houston et al, 1988) مزیت آزمایش‌های صحرایی نسبت به روش‌های آزمایشگاهی در این است که نمونه‌های آزمایشگاهی دچار دست‌خوردگی می‌شوند و میزان فروریزش کمتر از مقدار واقعی نشان داده می‌شود.

جدول ۱-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاکها با استفاده از پارامترهای وزنی حجمی (Elkady,2002)

محقق	معیار فروریزش	پارامترهای رابطه	توضیحات
Abelev (1948)	$\delta_s = \frac{\Delta e}{e_L + 1} \%$	Δe : کاهش نسبت تخلخل هنگام اشباع شدن e_L : نسبت تخلخل قبل از اشباع شدن	اگر δ_s از ۰.۲٪ بیشتر باشد امکان فروریزش وجود دارد
Priklnski (1952)	$k_0 = (\omega_0 - LL) / PI$	ω_0 : درصد رطوبت حالت طبیعی خاک LL : حد روانی خاک	$K_0 < 0$ درجه فروریزش شدید $K_0 > 0.5$ خاک غیرفروریزی $K_0 > 1.0$ خاک متورم شونده
Clevenger (1958)	—	γ_{dry} : وزن مخصوص خشک خاک	$\gamma_{dry} < 1.28$ خاک فروریزی $\gamma_{dry} > 1.44$ خاک غیرفروریزی
Feda (1964)	$K_1 = (\omega_0 / s_0) - (LL / PI)$	s_0 : درجه اشباع حالت طبیعی خاک	$K_1 > 0.85$ خاک فروریزی
Feda (1966)	—	n_0 : تخلخل طبیعی خاک	$n_0 > 40\%$ خاک فروریزی

در خصوص روش‌های آزمایشگاهی، این معیارها به دو دسته معیارهای کیفی مبتنی بر خصوصیات وزنی حجمی به نقل از (Elkady, 2002) و معیارهای کمی مبتنی بر انجام آزمایش‌های ادمتر تقسیم می‌گردند (Alkandari, 2000) در جدول ۱-۲ می‌توان جمع‌بندی روش‌های دسته اول و در جدول ۲-۲ روش‌های مبتنی بر دسته دوم را مشاهده کرد.

جدول ۲-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاک‌ها با استفاده از نتایج آزمایش ادمتر

(Alkandari, 2000)

توضیحات	پارامترهای رابطه	معیار فروریزش	محقق
$C_p > 6\%$ درجه فروریزش شدید	H_0 : ارتفاع اولیه نمونه	$C_p = \Delta H / H_0$	Sultan (1969)
$0 < C_p < 1\%$ غیر فروریزی $1 < C_p < 5\%$ درجه فروریزش کم $5 < C_p < 10\%$ درجه فروریزش متوسط $10 < C_p < 20\%$ درجه فروریزش شدید $C_p > 20\%$ درجه فروریزش بسیار شدید	ΔH : اختلاف بین ارتفاع اولیه نمونه (ماقبل اشباع- سازی) و ارتفاع نهایی نمونه (بعد از اشباع‌سازی) در آزمایش ادمتر	$C_p = \Delta H / H_0$	Jennings and Knight (1975)
$0 < C_p < 2\%$ غیر فروریزی $2 < C_p < 5\%$ درجه فروریزش متوسط $C_p > 5\%$ درجه فروریزش شدید	—	$C_p = \Delta H / H_0$	Sabbagh (1982)

۲-۵ مقاومت برشی خاکها

مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می‌تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی بروز دهد. برای تحلیل مسائل پایداری خاک نظیر ظرفیت باربری، پایداری شیروانی‌ها و فشار جانبی بر روی سازه‌های حایل خاک، لازم است طبیعت مقاومت برشی به خوبی شناخته شود.

۲-۵-۱ معیار گسیختگی موهر - کولمب

مور (۱۹۰۰) نظریه ای برای گسیختگی مصالح ارائه داد که در آن گسیختگی نه به علت تنش قائم حداکثر و نه تنش برشی حداکثر، بلکه به علت ترکیبی بحرانی از آنها پیش بینی می شود. طبق نظریه مور، رابطه بین مقاومت برشی و تنش قائم در صفحه گسیختگی به صورت زیر نوشته می شود.

$$\tau = f(\sigma)$$

پوش گسیختگی تعریف شده توسط رابطه $\tau = f(\sigma)$ ، یک خط منحنی است که در شکل نشان داده شده است. برای اغلب مسائل مکانیک خاک با دقت کافی می توان مقاومت برشی در روی صفحه گسیختگی را یک تابع خطی از تنش قائم در نظر گرفت (کولمب، ۱۷۷۶). این رابطه به صورت زیر بیان می شود:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

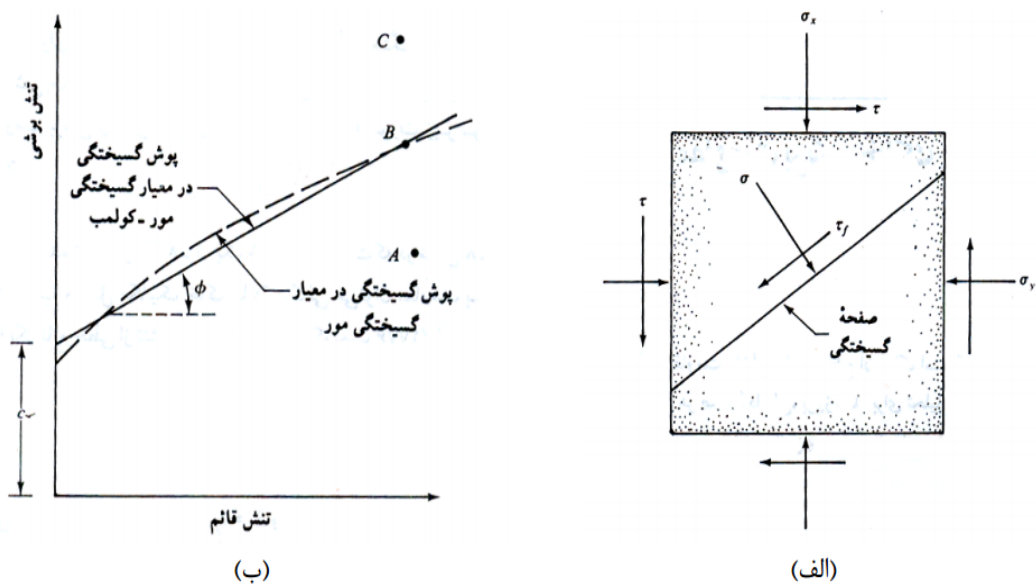
که در آن:

c = چسبندگی

τ_f = مقاومت برشی

ϕ = زاویه اصطکاک داخلی

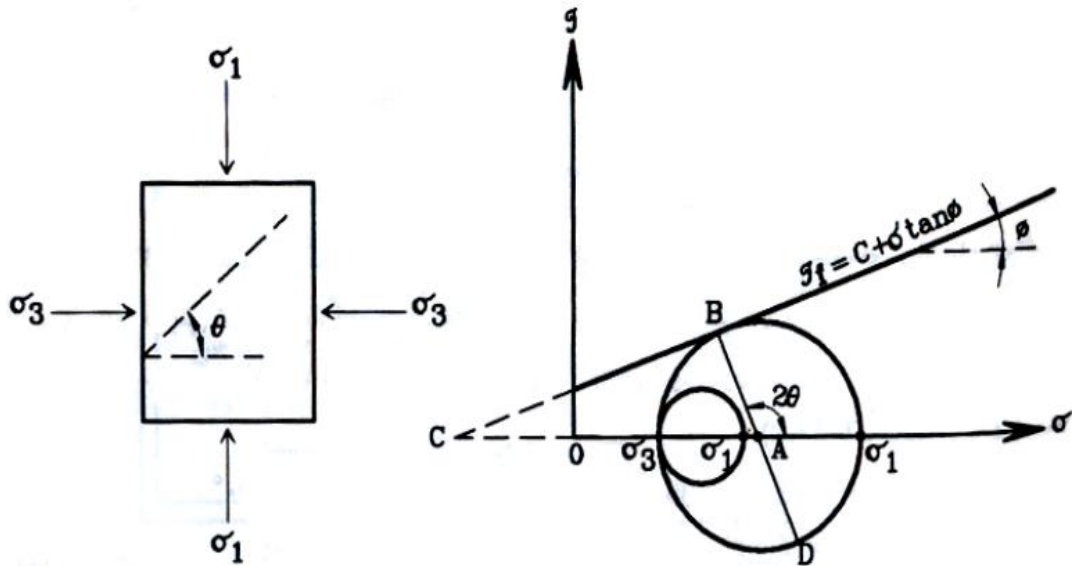
σ = تنش قائم



شکل ۲-۲ الف) نمودار پوش گسیختگی (ب) صفحه گسیختگی

۲-۵-۲ زاویه گسیختگی در خاک

مطابق شکل یک توده خاک در طبیعت تنها تحت تاثیر تنش های اصلی (تنش اصلی حداکثر σ_1 و تنش اصلی حداقل σ_3) قرار می گیرد و تنش برشی به آن وارد نمی شود. حداقل تنش اصلی حداکثری را که باعث گسیختگی در توده خاک می شود و نیز زاویه صفحه گسیختگی را با راستای افق را این گونه محاسبه می کنیم.



شکل ۲-۳ دایره موهر و خط پوش گسیختگی

ابتدا فرض می کنیم که فقط فشار همه جانبه و ثابت $\sigma_1 = \sigma_3$ از اطراف بر توده خاک وارد می شود و هیچگونه اعمال بار قائم بر آن وجود ندارد. سپس با ثابت بودن σ_3 بوسیله بارگذاری قائم، مقدار σ_3 را افزایش می دهیم که این عمل منجر به بزرگتر شدن دایره مور می گردد ولی مادامیکه دایره مور خط پوش گسیختگی را قطع نکند، هیچگونه گسیختگی در خاک رخ نخواهد داد. با افزایش بیشتر بار قائم تنش حداکثر نیز افزایش می یابد. تا جاییکه دایره مور به خط مذکور مماس خواهد شد. در این لحظه است که گسیختگی در توده خاک بوجود می آید و خاک در صفحه ای که با افق زاویه θ می سازد (در روی دایره مور این صفحه با صفحه تنش های اصلی زاویه 2θ می سازد) گسسته می شود. تنش قائم حداکثری که به ازای آن دایره مور بر روی خط پوش گسیختگی مماس شده است، کمترین تنش اصلی حداکثری است که باعث گسیختگی در راستای θ در توده خاک شده است.

۲-۵-۳ تعیین پارامترهای مقاومت برشی در آزمایشگاه

در آزمایشگاه، پارامترهای مقاومت برشی خاک با دو روش آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه محوری تعیین می گردد، که در فصل سوم با توجه به کار انجام شده در این پایان نامه، آزمایش برش مستقیم تشریح شده است.

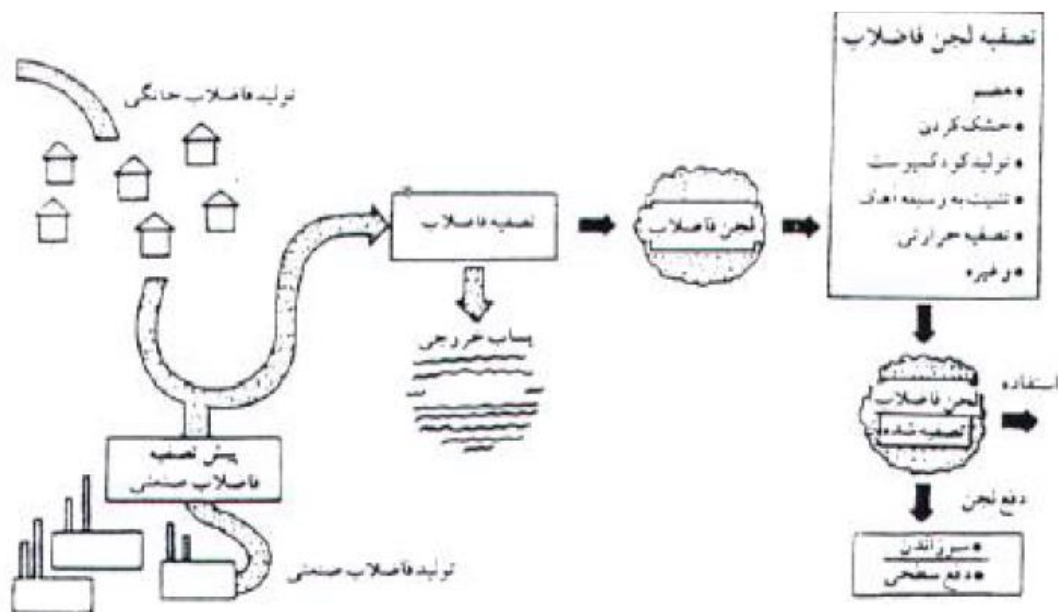
۲-۶ مقاومت برشی خاک های رمبنده

بر اساس تحقیقات انجام شده توسط کلونجر مقاومت برشی لس ها در درصد رطوبت طبیعی قابل توجه می باشد، به طوریکه می تواند حتی در صورتی که وزن حجمی آنها کم باشد، به صورت دایره قائم به ارتفاع ۱۵ تا ۲۴ متر بدون تکیه گاه پایدار بماند. در رطوبت پایین لس ها به علت قفل شدگی ذرات خاک و سیمان شدگی دارای ضرایب مقاومت برشی بالایی هستند. چسبندگی ظاهری خاک ممکن است به یک کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برسد که در اثر مرطوب شدن مقدار آن به ۰/۷۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع کاهش می یابد.

۲-۷ خاکستر لجن

لجن فاضلاب به عنوان باقیانده تصفیه فاضلاب خانگی و در اصل مواد جامدی که در روش های مختلف تصفیه به منظور حذف آلاینده های معلق و محلول از فاضلاب از طریق جداسازی مواد جامد از مایع به دست می آید، به دلیل مشکلات زیست محیطی ناشی از آن، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی با توجه به افزایش جمعیت جهان حجم فاضلاب خانگی تولیدی ناشی از این افزایش جمعیت بیشتر خواهد شد. در نتیجه دولت ها اقدام به ساخت بیشتر تصفیه خانه ها خواهند کرد. بر همین اساس در کشور ما تا افق ۱۴۰۰ ساله تعداد تصفیه خانه های فاضلاب شهری به ۸۰۰ خواهد رسید. در حال حاضر بیشتر تصفیه خانه های فاضلاب شهری در سراسر دنیا روزانه بیش از

هزاران بیلیون گالن فاضلاب خانگی یا انواع فاضلاب ها را تصفیه می نمایند. از میان اجزاء جدا شده از فاضلاب، لجن بیشترین حجم را به خود اختصاص می دهد. لجن مازاد باید به نحو صحیحی برای استفاده مجدد و دفع نهایی تصفیه شود. از مهمترین روش های استفاده مجدد و دفع لجن می توان مصارف کشاورزی لجن، احیای زمین، دفن بهداشتی، دفن سطحی در زمین و سوزاندن را نام برد. سوزاندن لجن به علت نیاز به تغلیظ و آبگیری بالای لجن و همچنین مسائل مربوط به کنترل آلودگی هوا، روش گران و پیچیده ای برای خیلی از کشورها از جمله ایران شناخته شده است. دفع سطحی لجن حاصل از تصفیه فاضلاب در زمین نیز کار مشکلی است چرا که انتخاب زمین مناسب جهت دفع و تامین تجهیزات خاص آن و همچنین اعمال قوانین و استاندارد های محیط زیستی، هزینه ی آن را بالا خواهد برد. گزینه ی استفاده مجدد در کشاورزی نیز نیازمند به رعایت مقررات و استاندارد های محیط زیستی و بهداشتی است. مضاف بر اینکه در ایران بسیاری از کشاورزان میل و رغبت زیاد جهت استفاده ی مجدد لجن در کشاورزی ندارند. گذشته از آن فرآیند تصفیه لجن فاضلاب به ویژه لجن مازاد ثانویه نیز پیچیده، پر هزینه و مشکل است.



شکل ۲-۴ چرخه فاضلاب

ایران تا پایان سال ۱۳۸۲ دارای تنها ۷۵ تصفیه خانه شهری در حال بهره برداری بوده است، که در نتیجه از میان ۳/۹ میلیارد متر مکعب در سال فاضلاب شهری تولید شده در کشور تنها ۹ درصد آن تصفیه و ۹۱ درصد دیگر بدون تصفیه وارد چاههای جذبی، رودخانه ها و یا زمین های کشاورزی می شود. با توجه به رشد ۱/۳ درصدی جمعیت ایران هر ساله حدود ۵۰ میلیون متر مکعب به حجم فاضلاب تولیدی اضافه می شود که این آمار نشان دهنده آن است که کشور ملزم به احداث تصفیه خانه های بیشتر بوده و همچنین بکارگیری روش های جدید تصفیه و دفع لجن فاضلاب، امری ضروری و اجتناب ناپذیر برای صنعت فاضلاب کشور خواهد بود.

بالا بودن میزان آب موجود در لجن، آلوده بودن لجن به پاتوژن ها و فلزات سنگین، وجود مواد آلی ناپایدار در آن و ایجاد بوی تعفن، موجب شده است که تصفیه و دفع لجن همواره به عنوان یک معضل اساسی در مباحث مدیریت لجن مطرح باشد. روش های عمده دفع لجن را می توان به دو بخش اساسی روش های مناسب (کاربرد مناسب در زمین های کشاورزی، دفن بهداشتی، سوزاندن و استفاده در تولید مصالح ساختمانی) و روش های نامناسب (دفن غیر بهداشتی، تزریق به چاههای جذبی، دفع سطحی به رودخانه ها و دریاها و...) تقسیم بندی نمود. در سالهای اخیر در برخی از کشورهای اروپایی و آسیایی (خصوصاً ژاپن و سنگاپور) به دلیل کمبود زمین برای دفن و کاربردهای کشاورزی، سوزاندن به عنوان یک راه حل مناسب برای دفع لجن مطرح می باشد. این گزینه با توجه به شرایط محیطی کشور ما می تواند برای استان های شمالی (گیلان و مازندران) و همچنین شهرهای با تراکم جمعیتی بالا مانند تهران به عنوان راهکاری مناسب برای مدیریت لجن به شمار آید. فرایند سوزاندن لجن به تولید خاکستری معدنی، بی خطر و عاری از پاتوژن ها و فلزات سنگین می انجامد.

لجن فاضلاب که در حقیقت محصول فرعی و مهم در فرایند تصفیه فاضلاب به شمار می رود از طریق جداسازی مواد جامد از مایع یا فعالیت های بیولوژیکی در تصفیه خانه فاضلاب بدست می آید. طبیعت لجن بدست آمده به فرایند تصفیه فاضلاب و منابع آن بستگی دارد که می تواند مخلوطی از

مواد مغذی، سموم کلرینه، فلزات سنگین، میکروارگانیزم ها، آزیست ها و فرآورده های نفتی و غیره باشد، هر یک از این اجزاء اثرات زیست محیطی خود را دارد و بایستی در موقع انتخاب روش دفع این اثرات مدنظر قرار گیرد. بالا بودن حجم لجن تولیدی، آلوده بودن لجن به پاتوژن ها و فلزات سنگین، دشوار بودن انتخاب زمین مناسب جهت دفن، افزایش هزینه ها و سخت گیرانه تر شدن قوانین دفن، سبب شده است که بیشتر کشور ها به فکر استفاده از راهکارهای جدید و سودمندانه از لجن فاضلاب بیفتند. با توجه به اینکه لجن فاضلاب به دلیل داشتن مواد آلی دارای ارزش گرمایی قابل توجهی می باشد، به همین دلیل می توان از آن به عنوان سوخت تجدید پذیر به منظور تولید انرژی استفاده نمود و از خاکستر تولید شده نیز در صنایع مختلف به عنوان یک منبع جایگزین استفاده کرد.

۸-۲ مروری بر پژوهش های انجام شده

یکی از روش هایی که در سال های اخیر بیشتر به آن توجه شده بحث استفاده مجدد از ضایعات تولید شده در صنایع مختلف می باشد بطوریکه این کار می تواند علاوه بر کاهش حجم زیادی از این ضایعات سبب کاهش مصرف انرژی و همچنین افزایش بازده اقتصادی شود (جعفرپور و ماجدی، ۱۳۷۶).

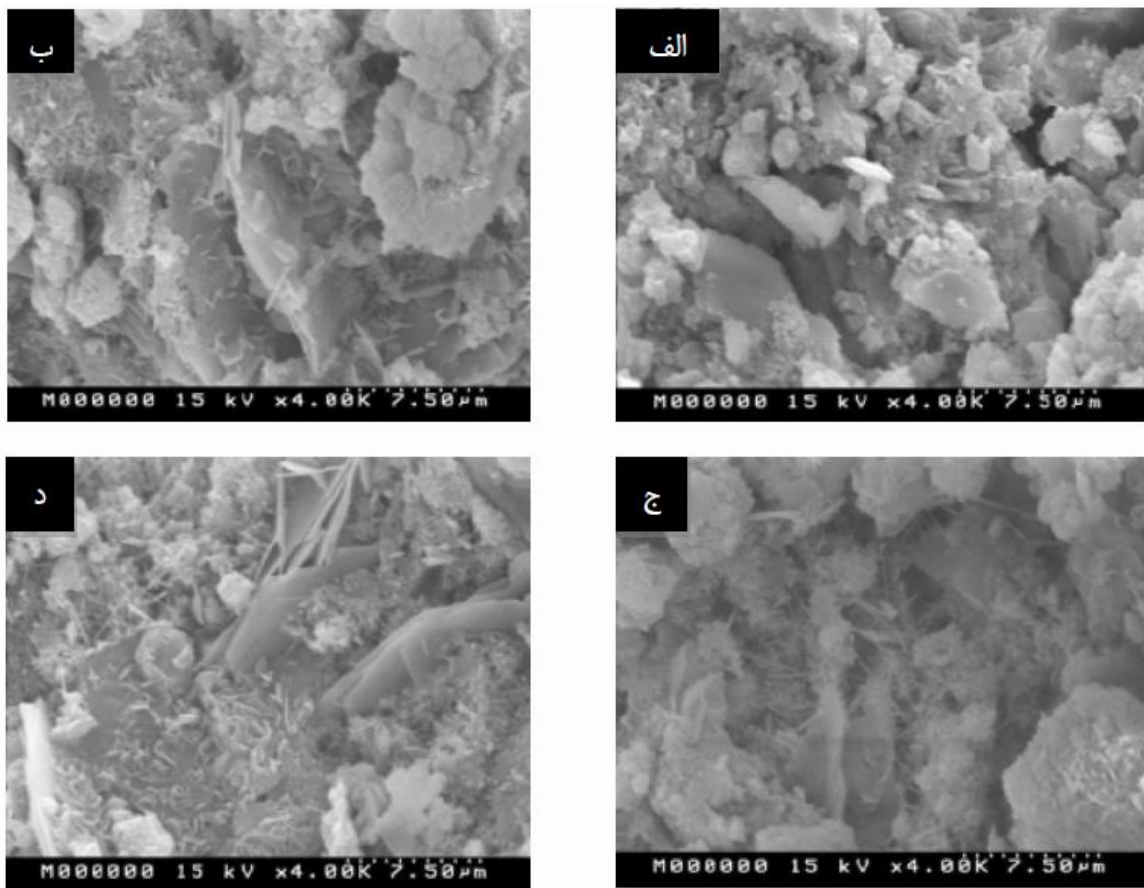
از آنجا که خاکستر لجن و پوسته برنج تولید شده عموماً از اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم، آلومینیوم و آهن تشکیل شده است و از طرفی این ترکیبات جزء ترکیبات اصلی سیمان می باشد، بنابراین می توان از این مواد نه تنها به عنوان بخشی از سیمان در تولید بتون و ملات سیمان استفاده نمود بلکه می تواند به عنوان بخشی از خوراک خام سیمان نیز مورد استفاده قرار گیرد (Xu, et al. 2014).

ایوب کریمی جشنی با جایگزین کردن نسبت های مختلفی از لجن با خوراک خاک سیمان و پخت نمونه ها در مدت زمان تعیین شده، میزان قابلیت پخت نمونه ها، میزان مقاومت فشاری و

همچنین خصوصیات فازی کلینکرهای تولید شده را مورد بررسی قرار داد. نتایج، حاکی از مشابه بودن کیفیت سیمان تولید شده با سیمان معمولی بود.

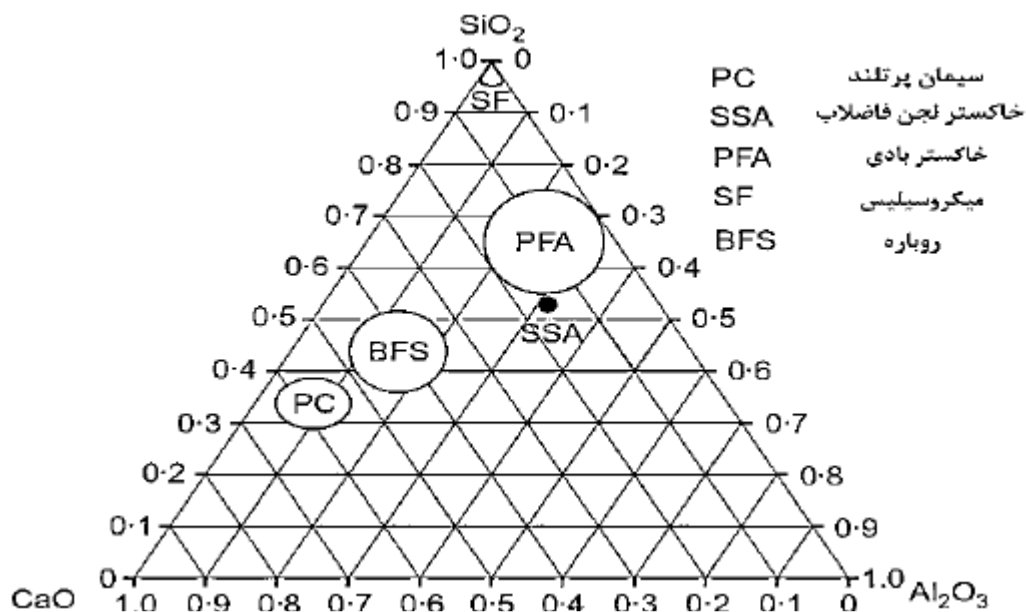
در بررسی جایگزینی خاکستر حاصل از سوزاندن لجن بجای سیمان در نمونه های بتنی در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه ها اندازه گیری شد. از مهم ترین پارامترهایی که برای شناسایی میزان فعالیت پوزولانی خاکستر بکار برده می شود، پارامتر درصد فعالیت پوزولانی می باشد. بالا بودن این درصد نشان دهنده آن است که خاکستر مورد استفاده دارای پتانسیل بالای تولید مواد سیمانی است. این آزمایش نشان می دهد که خاکستر لجن می تواند با اندکی افت مقاومت که در محدوده اطمینان قرار دارد به عنوان پوزولان در تولید بتن بکار رود. همچنین بالا بردن درجه حرارت و مدت زمان قرارگیری لجن در کوره باعث افزایش مقاومت فشاری درازمدت و همچنین دوام و پایداری بتن می گردد(علی فتوت).

گرچه زمان اندکی از کاربرد نانوذرات به عنوان مصالح پیشرفته در بتن نمی گذرد، اما تحقیقات وسیع انجام شده در این رابطه اثر بخشی فوق العاده این مواد در بتن را اثبات کرده است. در تحقیقات صورت گرفته دیگر، کاربرد نانوذرات در کنار سایر پوزولان ها در بتن مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصله نشان از اکتیواسیون عملکرد پوزولانها در بتن در حضور نانو ذرات دارند. بر طبق تحقیقاتی دیگر، نانوذرات سیلیس به عنوان اثر بخش ترین نانو ذره در بتن معرفی گردیده است. لذا در بررسی کاربرد لجن فاضلاب به عنوان یک خاکستر بیولوژیکی و اکتیواسیون عملکرد آن با نانوذرات سیلیس به این نتیجه می توان رسید که این افزودنی سبب بهبود رفتار دوامی مصالح پایه سیمانی می گردد، چرا که ایجاد ریزساختاری متراکم تر و چگال تر از نتایج کاربرد این مصالح به صورت جایگزین بخشی از سیمان می باشد. نانوذرات سیلیس به سبب تشکیل شدن از هیدروکسید سیلیسیم که مهمترین جزء موجود در مصالح پوزولانی و عامل اصلی واکنش پوزولانی می باشد و همچنین انرژی سطحی بسیار بالایی که دارد سبب بهبود قابل توجه ریز ساختار مصالح پایه سیمانی می شود (پیام



شکل ۲-۵ خمیر سیمان، الف: ۲۰ درصد خاکستر لجن، ب: ۱۹ درصد خاکستر لجن ۱ درصد نانو سیلیس، ج: ۱۸ درصد خاکستر لجن ۲ درصد نانو سیلیس، د: ۱۷ درصد خاکستر لجن ۳ درصد نانو سیلیس

مصرف ۱/۵ تن ماده اولیه (شامل سنگ آهک، خاک رس، ماسه سیلیسی و...) و ۴ گیگاژول انرژی برای تولید ۱ تن سیمان باعث گردیده تا صنعت سیمان در شمار پر مصرف ترین صنایع غیر فلزی قرار گیرد. بعلاوه به ازاء تولید هر تن سیمان حدود ۱ تن گاز گلخانه ای دی اکسید کربن نیز وارد اتمسفر می شود. لجن فاضلاب شهری که در فرایند تصفیه فاضلاب به عنوان یک ماده زائد تولید می شود این پتانسیل را دارد که هم به عنوان سوخت جایگزین در فرایند تولید انرژی بکار رفته و هم از خاکستر باقیمانده از احتراق آن، به عنوان ماده پوزولانی برای تولید سیمان استفاده شود. در شکل ترکیب شیمیایی خاکستر لجن با سایر پوزولان ها مقایسه شده است.

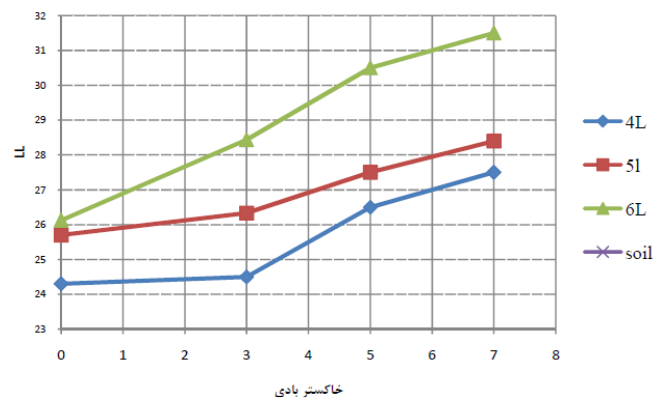


شکل ۲-۶ مقایسه ترکیب شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب با پوزولان های رایج

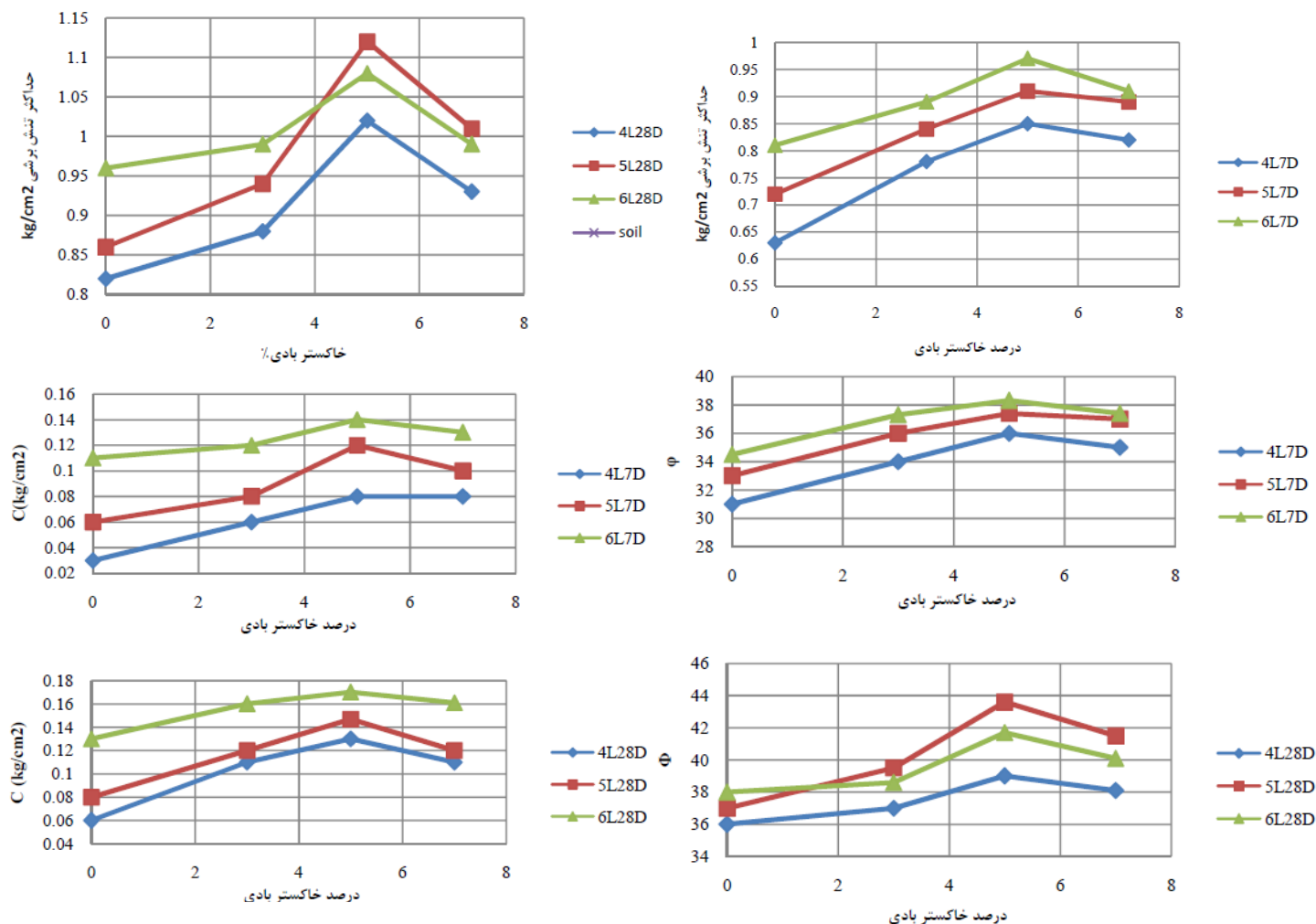
با این حال جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب با سیمان باید به نحوی انجام پذیرد که موجب کاهش ویژگی های مکانیکی محصولات مبتنی بر سیمان مانند ملات و بتن نشود. مهم ترین عوامل تاثیر گذار بر خواص مکانیکی محصولات سیمانی، پارامترهایی نظیر تاریخچه حرارتی، درصد جایگزینی، درجه نرمی و مورفولوژی نامنظم خاکستر لجن هستند. بالا بردن درجه حرارت و مدت زمان قرارگیری لجن در کوره، مقاومت فشاری طولانی مدت بتن حاوی خاکستر لجن را افزایش می دهد. کاهش خطی مقاومت فشاری و کاهش غیرخطی مقاومت خمشی نیز در برابر افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن رخ می دهد. به ازاء افزایش هر ۱۰۰ مترمربع بر کیلوگرم از درجه نرمی خاکستر لجن، مقاومت فشاری تقریباً ۵ درصد افزایش می یابد. با جایگزینی خاکستر لجن نسبت آب به مواد سیمانی نیز افزایش می یابد که البته این پدیده مربوط به مورفولوژی نامنظم تر و سطح مخصوص بیشتر خاکستر لجن در مقایسه با سیمان است. در نمونه های عمل آوری شده در سنین مختلف با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، مقاومت های مکانیکی کاهش می

یابد. با این حال کاهش مقاومت های مکانیکی از مقدار مجاز ارائه شده در استاندارد کمتر است، بنابراین خاکستر لجن این پتانسیل را دارد که در تولید سیمان پوزولانی مورد استفاده قرار گیرد (محمد امین ارشدترابی، ۱۳۹۳).

بنده زاده و همکاران به بررسی عامل زمان و درصد مخلوط آهک و خاکستر بادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه پرداختند. خاک مورد استفاده ML بوده که با درصدهای مختلف خاکستر بادی و درصد معینی از آهک مخلوط شده است. پارامتر چسبندگی نسبت به نمونه شاهد تا ۷۰۰ درصد افزایش در نمونه های ۲۸ روزه و تا ۶۰۰ درصد افزایش در نمونه های ۷ روزه را نشان می دهد. زاویه اصطکاک داخلی نیز ۶۹ درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد داشته است (بنده زاده و همکاران، ۱۳۹۰).



شکل ۲-۷ نمودار حد روانی نمونه خاک ریزدانه برحسب میزان خاکستر بادی



شکل ۲-۷ تاثیر درصدهای مختلف خاکستر بادی و آهک بر روی پارامترهای مقاومت برشی نمونه های ۷ و ۲۸ روزه

اوحدی و همکاران به مطالعه تغییرات پارامترهای خاک شیبستی همدان با تغییر در رطوبت و دانسیته پرداختند. شیبست ها یکی از فراوان ترین سنگ های دگرگونی دارای شیبستوزیته هستند و معمولا مقدار زیادی میکا به همراه دارند. کانی های گروه میکا که از گروه فیلوسیلیکات ها و یا کانی های صفحه ای هستند به وفور در شیبست ها یافت می شوند و نسبت به سایر کانی ها، پایداری کمتری در مقابل هوازدگی دارند. نمونه ها در ۴ دانسیته مختلف و ۵ درصد رطوبت متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که چسبندگی با افزایش رطوبت تا رطوبت بهینه افزایش

یافته و در رطوبت بهینه به بیشترین مقدار می رسد. افزایش دانسیته نیز بطور کلی موجب افزایش چسبندگی شده، اما نرخ افزایش چسبندگی با دانسیته، با افزایش رطوبت بیشتر از بهینه کمتر شده است. همچنین تغییرات زاویه اصطکاک داخلی شیبست مورد آزمایش با دانسیته، نشان دهنده حساسیت کم این پارامتر به تغییرات دانسیته می باشد.

دستی گردی و همکاران (۱۳۹۲) تاثیر افزودن مواد تثبیت کننده بر میزان تغییرشکل پذیری خاک های رمبنده سمنان را بررسی کردند. بدین منظور تعدادی آزمایش تعیین پتانسیل رمبندگی بر روی نمونه های تثبیت شده با درصدهای مختلف میکروسیلیس و بنتونیت انجام شد. نتایج حاکی از آن است که افزودن این مواد پتانسیل رمبندگی را کاهش می دهد.

در مطالعه موردی خاک مسیر یاسوج-یزد پارامترهای مقاومت برشی خاک مذکور بررسی گردید و جهت بهبود این پارامترها و تثبیت خاک از آهک استفاده شد. بدین منظور آهک به روش تزریق برای تثبیت خاک بکار برده شد. افزودن مواد شیمیایی به خاک موجب شروع چندین واکنش می گردد که از آن جمله می توان به واکنش تبادل یونهای مثبت، واکنش تجمع - تراکم، واکنش هیدراسیون و واکنش پوزولانی اشاره کرد. در سری لیتروپی هر یک از یونها تمایل به جایگزینی یونهایی که در سمت چپ آن قرار دارند داشته و به این ترتیب یونهای یک ظرفیتی با یونهای چند ظرفیتی جایگزین می شوند. در اثر واکنش تجمع - تراکم دانه های رس مجتمع شده و به صورت دانه های بزرگ تری در می آیند و به صورت آشکاری سبب تغییر بافت خاک می شوند. بوجود آمدن مواد سیمانی آلومینات کلسیم هیدراته تاثیر زیادی در شروع واکنش تجمع - تراکم دارد. به واکنش گرمازا که در آن اجزاء آهک زنده و سیمان با آب ترکیب می شوند هیدراسیون گفته می شود که در آن اجزای جامد تشکیل دهنده سیمان با آب واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته و آهک هیدراته را بوجود می آورند. این واکنش در مدت زمان کوتاهی صورت گرفته و باعث کاهش درصد رطوبت مخلوط می شود. واکنش های بین آهک، آب، مواد سیلیس دار و آلومین دار که

موجب تشکیل انواع مختلفی از ژل های چسباننده می شود، به عنوان واکنش های پوزولانی شناخته می شوند. واکنش پوزولانی سبب بوجود آمدن مواد سیمانی می شود که باعث افزایش مقاومت و دوام خاک می گردد. نتایج نشان می دهد که افزودن آهک به خاک باعث کاهش پتانسیل رمبندگی خاک می شود. همچنین پارامترهای مقاومت برشی خاک پس از تزریق بهبود یافته و مقدار زاویه اصطکاک زهکشی نشده $2/15$ برابر شده است. این افزایش زاویه اصطکاک داخلی منجر به کاهش چسبندگی خاک شده که نشان از بهبود رفتار خاک پس از تزریق دارد.

عربانی و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی تاثیر پودر آهن ضایعاتی در بهسازی خاک های ریزدانه رسی پرداخت. جنس خاک رس مورد استفاده در آزمایش ها به صورت ترکیبات مختلفی از کائولینیت و بنتونیت بوده و برای تعیین تاثیر مقدار ماده افزودنی، نمونه ها با درصد های وزنی متفاوت پودر آهن ضایعاتی مورد آزمایش قرار گرفته اند. نتایج حاصله نشان می دهد که افزودن پودر آهن ضایعاتی به خاک های رسی باعث پایین آمدن رطوبت بهینه خاک در آزمایش تراکم و کاهش پلاستیسیته در آزمایش حدود اتربرگ می شود.

نگهدار و همکاران (۱۳۹۲) تاثیر نانوسیلیس روی پارامترهای مقاومت برشی خاک را بررسی کرده اند. خاک های رس دار خصوصیت خاصی از نظر مهندسی دارند و اکثرا جزء خاک های مسئله دار به حساب می آیند. بنابراین تثبیت خاک رس و یا بهسازی آن کمک شایانی در پروژه های مهندسی خواهد بود. اصلاح رفتار خاک به کمک افزودنی ها یکی از روش های موثر در بهبود پارامترهای خاک می باشد. نانوسیلیس به عنوان یک پوزولان بسیار فعال جهت انجام واکنش های سمته شدن باعث افزایش چشمگیر مقاومت نمونه ها می شود. سیلیسم دی اکسید یا سیلیکا فراوان ترین ماده سازنده پوسته زمین است. این ترکیب در طبیعت به دو شکل بلوری و بی شکل یافت می شود که ماده ای سفید رنگ با دمای ذوب و جوش بالا می باشد. کاربرد سیلیس در تثبیت خاک بستگی زیادی به نوع و اندازه ذرات سیلیکا دارد که با ریزتر شدن ذرات سیلیکا تا حد نانو می توان

پیوستگی بهتر در دانه بندی تا حد نانو و در نتیجه کمتر شدن منافذ بین آنها با مقاومت بالاتر و دوام بیشتر و همچنین در عین حال دانه بندی سبک تری داشت. سیلیس یکی از معروف ترین موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پر کنندگی دارد. افزایش مقاومت در این شرایط به دلیل وجود بارهای سطحی بالا در ذرات نانوسیلیس بوده بطوری که این ماده به سرعت تمایل به کلوخه شدن دارد. لذا این ذرات تمایل زیادی به جذب شدن در اطراف ذرات رسی دارند. لذا با توجه به متراکم تر شدن خاک نفوذپذیری آن نیز کاهش می یابد. همچنین باید در نظر داشت که بر اساس بررسی میکروسکوپی TEM انجام شده در پژوهش های مختلف، نانوسیلیس های مصرفی می تواند دارای خصوصیات مختلف چه به لحاظ ابعاد ذرات و چه به لحاظ وضعیت کلوخه ای باشند. با توجه به آزمایش برش مستقیم انجام شده روی نمونه های آزمایشگاهی با ماده افزودنی نانوسیلیس و رسم پوش مور کولمب مشاهده می شود که درصد بهینه نانوسیلیس افزوده شده به نمونه های خاک ۴ درصد می باشد. به عبارت دیگر در این حالت نمونه های خاک بیشترین زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی را داراست.

جهانیان و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی الیاف فلزی بر روی مقاومت برشی خاک ماسه ای بوسیله انجام آزمایش برش مستقیم پرداخت. بدین منظور آزمایش هایی با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس (ابعاد مربعی ۳۰ سانتیمتر) بر روی نمونه های ماسه ای ترکیب شده با الیاف فلزی با خم در صفحه انجام پذیرفته است. پیش از این محققین زیادی در این مورد به مطالعه پارامتریک پرداخته اند که از آن می توان به Cai و همکارانش در سال ۲۰۰۶ و Tang و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد که اظهار داشتند که مقاومت برشی با افزایش درصد وزنی الیاف در خاک افزایش می یابد. در حالیکه یک سری از محققین دیگر مانند Benson و همکاران (۱۹۹۴)، عبدی و پارسا پزوه (۱۳۸۴) و اثنا عشری و همکاران (۱۳۸۹) نیز به یک درصد وزنی بهینه اشاره کرده اند که در این درصد، حداکثر مقاومت برشی و زاویه اصطکاک بیشینه رخ می دهد. افزودن الیاف بیش از این درصد

به خاک منجر به کاهش مقاومت برشی و پارامترهای آن می‌گردد. همچنين عذیری (۱۳۸۷)، پورحسینی (۱۳۸۹) و Fauzia و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی اثر طول الیاف پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش طول الیاف نیز تا یک مقدار بهینه باعث افزایش مقاومت برشی و پارامترهای آن می‌شود و افزایش بیشتر طول در هر نوع خاک مسلح، کاهش مقاومت برشی و اصطکاک بین ذرات را در پی دارد که آن می‌تواند به خاطر توزیع غیر یکنواخت الیاف که در نمونه قرار گرفته اند باشد. لازم به ذکر است که طول بهینه الیاف به اندازه نمونه بستگی دارد. نتایج آزمایش های قضاوی و درزیرامندی (۱۳۸۳) بر روی زاویه اثر خم نشان داد که زاویه خم نیز می‌تواند بر روی مقاومت برشی اثر بگذارد. همچنین آنها به این نتیجه رسیده اند که با افزایش زاویه خم مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است جهت بررسی اثر طول و درصد وزنی الیاف ابتدا الیاف فولادی به قطر ۰/۷ میلیمتر با طول های ۳، ۵، ۸ و ۱۰ سانتیمتر و با درصد های ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی برای الیاف بدون خم (مستقیم) مورد بررسی قرار گرفته اند و سپس برای طول و درصد وزنی بهینه بدست آمده اثر تغییر خم الیاف با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه ها تحت سربارهای قائم ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوپاسکال آزمایش شده اند. نتایج بدست آمده از نمونه های خاک ماسه ای ترکیب شده با الیاف مستقیم نشان می‌دهد که نمونه های ترکیب شده با الیاف به طول ۸ سانتیمتر بیشترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد، بطوریکه مقاومت برشی برای تنش های نرمال ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب به میزان ۲۷ و ۳۸ درصد نسبت به خاک غیر مسلح افزایش یافت. اینگونه به نظر می‌رسد که برای طولهای کوتاه تر از طول بهینه الیاف فلزی مستقیم، خم زدن الیاف مستقیم اثر نامطلوب بر روی مقاومت برشی نمونه ها دارد اما برای طولهای بزرگتر از طول بهینه الیاف فلزی مستقیم، خم زدن الیاف باعث افزایش مقاومت برشی می‌گردد.

تحقیقات بسیاری در مورد تثبیت و بهسازی انواع خاک ها انجام گرفته است. Alawaji در سال ۲۰۰۱ آزمایشاتی را جهت تثبیت خاک رمبنده با استفاده از ماسه - ژئوگرید انجام داد. وی نتیجه

گرفت که تثبیت با استفاده از این ترکیب، موجب ۹۵ درصد کاهش در نشست، ۲۰۰۰ درصد افزایش در مدول الاستیسیته و ۳۲۰ درصد افزایش ظرفیت باربری می شود. همچنین نتایج او نشان داد که تاثیر ماسه - ژئوگرید با افزایش پهنای ژئوگرید و کاهش عمق ژئوگرید افزایش پیدا می کند. وکیلی و همکاران در سال ۱۳۸۷ آزمایشاتی را روی خاک رَمبنده انجام دادند و افزایش آهک و زمان عمل آوری را روی میزان رَمبندگی خاک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در صورتی که در اصلاح خاک رَمبنده زمان کافی وجود داشته باشد، درصد اختلاط بهینه آهک، ۳ درصد و در شرایطی که زمان کافی در اختیار نباشد، درصد اختلاط بهینه ۵ درصد می باشد. آنها با انجام آزمایش تک محوری روی خاک رَمبنده به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد آهک و زمان عمل آوری مقاومت تک محوری نمونه ها افزایش می یابد. محمدعلی زاده رفیعی در سال ۱۳۸۸ آزمایشاتی را جهت تثبیت خاک رَمبنده واقع در ایستگاه راه آهن سمنان با استفاده از تزریق آهک و سیمان انجام داد و به این نتیجه رسید که تزریق آهک و سیمان، پتانسیل رَمبندگی را ۷۰ درصد کاهش می دهد و با انجام آزمایش سه محوری CU به این نتیجه رسید که پس از انجام تزریق افزایش قابل ملاحظه ای در مشخصات مقاومت برشی خاک ایجاد شده است.

Harichane و Ghrici اثر آهک و پوزولانی را بر شاخص خمیری خاک های رسی (CL و CH) بررسی کرده اند و به این نتیجه رسیده اند که با افزایش آهک یا پوزولان به خاک های رسی، شاخص خمیری کاهش می یابد و هنگامی که هر دو ماده به خاک اضافه می شود، برای خاک های CH حد مایع کاهش و حد خمیری افزایش می یابد که کاهش شاخص خمیری را در پی خواهد داشت. در مورد خاک های CL افزودن این مواد به خاک، تغییر قابل ملاحظه ای در حد مایع بوجود نمی آورد و فقط حد خمیری افزایش می باید که کاهش شاخص خمیری را در پی خواهد داشت. استفاده از آهک تنها و آهک بعلاوه پوزولان، خاک را از گروه CL و یا CH به گروه MH تغییر می دهد. ضیایی موید و همکاران در سال ۲۰۱۰ آزمایشاتی را برای تثبیت خاک های رَمبنده انجام دادند. آنها تاثیر هم زمان

آهک و میکروسیلیس را روی خاک با درصد اختلاط ۲ درصد آهک و درصد اختلاط ۱، ۳ و ۵ درصد میکروسیلیس بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که اختلاط ۲ درصد آهک با ۱ درصد سیلیس مقاومت فشاری خاک را به طور رضایت بخشی بالا برده و خاک را برای زیرسازی جاده مناسب می گرداند. Gasaluck و Huangjing در سال ۲۰۱۰ آزمایشاتی را برای تثبیت خاک شل با استفاده از مواد افزودنی شیمیایی انجام دادند. آنها برای تثبیت از سیمان و خاکستر آتشفشانی و همچنین سیمان و خاکستر پوسته برنج استفاده کردند. نتایج آزمایش نشان می دهد که بهترین نسبت سیمان به خاکستر ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی می باشد و همچنین نتایج آزمایش CBR نشان می دهد که مخلوط سیمان و خاکستر به میزان ۱/۵ درصد وزن خاک شل، مقاومت فشاری را بسیار بالا می برد.

سهرابی و همکاران (۱۳۹۳) اثر ماستیک پلی یورتان B بر خصوصیات مکانیکی خاک رَمبند را بررسی کردند. خاک مورد نظر از منطقه حمیدیه اهواز جمع آوری گردیده و آزمایشات ژئوتکنیکی اولیه روی آن انجام شده است سپس آزمایش برش مستقیم به منظور بررسی میزان تاثیر این ماده روی پارامترهای مقاومت برشی انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد که بیشترین مقاومت برشی در درصد اختلاط ۱ می باشد. که در این درصد اختلاط چسبندگی ۲۷ درصد و مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۳ درصد افزایش داشته است.

۳- فصل سوم

نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج
شناسایی خاک

۱-۳ مقدمه

در این فصل ابتدا مکان و محدوده مورد مطالعه شرح داده می‌شود. سپس آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک مورد نظر توضیح داده شده و نتایج آزمایش‌ها آمده است. سپس به بررسی افزودنی مورد استفاده پرداخته می‌شود و در پایان آزمایش برش مستقیم انجام شده بر روی نمونه‌ها شرح داده می‌شود.

۲-۳ محل نمونه‌گیری

با توجه به وجود پهنه وسیعی از خاک‌های لسی در استان گلستان و همچنین دشت کلالة خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه کلالة و روستای تمرقره قوزی در اطراف این شهرستان تهیه شده و برای پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. منطقه نمونه‌گیری در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ محل نمونه‌گیری خاک

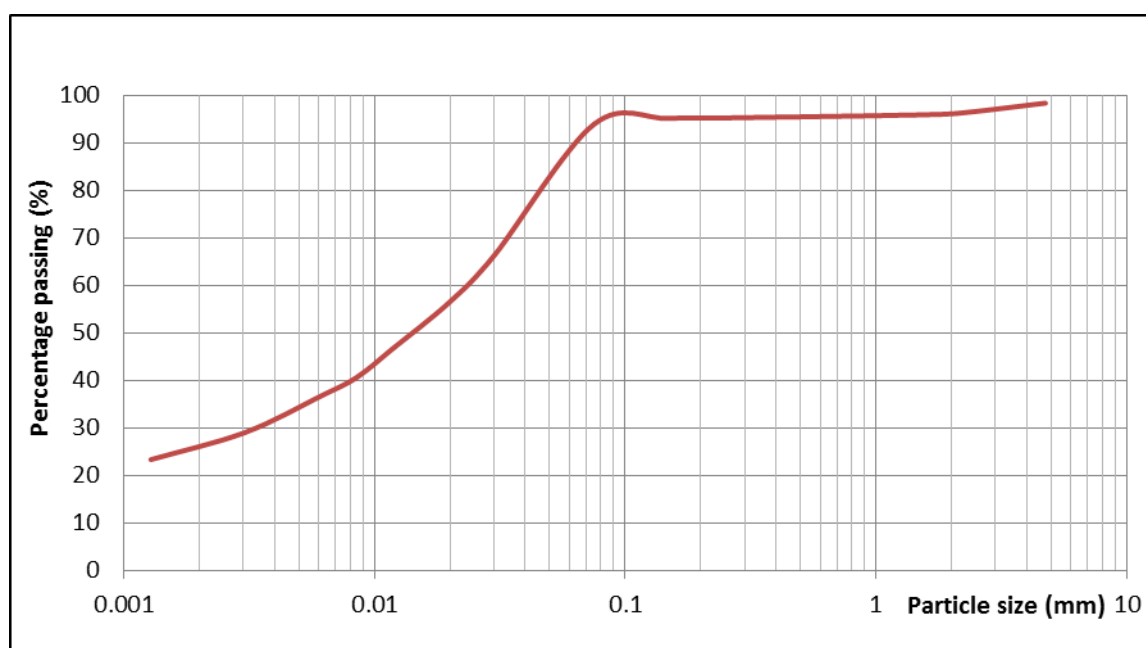
در ادامه به بررسی خواص اولیه خاک می‌پردازیم.

۳-۳ خواص خاک

۱-۳-۳ دانه بندی و هیدرومتری

به طور کلی اطلاعات حاصل از این آزمایش برای پیش بینی حرکت آب در خاک، میزان نفوذپذیری خاک، حساسیت خاک در مقابل یخ زدگی و رفتار خاک در آب و هوای سرد، خاصیت موینگی، استفاده به عنوان فیلتر و زهکش مفید است. آزمایش ها نشان می دهد که خاصیت موینگی و نفوذپذیری به قطر موثر ذرات بستگی دارد.

آزمایش دانه بندی به صورت تر برای دانه های بزرگتر 0.075mm و آزمایش هیدرومتری بر طبق استاندارد ASTM D 422-63 بر روی خاک انجام شده و پس از آن منحنی دانه بندی برای این آزمایش رسم شده است. روند کار بدین ترتیب است که ابتدا مقدار مشخصی از خاک از الک شماره 200 عبور داده تا درصد ریزدانه خاک به دست آید. مشاهده شد که به طور متوسط ۹۴٪ از خاک از الک نمره ۲۰۰ عبور می کنند. بنابراین جهت انجام آزمایش دانه بندی می بایست از روش هیدرومتری استفاده شود. شکل ۲-۳ نمودار حاصل از انجام آزمایش های دانه بندی خاک را نشان می دهد.



شکل ۲-۳ نمودار دانه بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتری

۳-۳-۲ آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک

در اکثر آزمایش های مکانیک خاک، لازم است درصد رطوبت خاک تعیین شود. این آزمایش برای تعیین درصد وزنی رطوبت سنگ نیز به کار می رود. البته این آزمایش نمی تواند درصد رطوبت واقعی مصالح را که دارای مقدار قابل توجهی کانی های هالوزیت، مونت موریلونیت و گچ است، بدست آورد. همچنین در مصالحی که آب درون منافذ آن ها دارای مقدار زیادی املاح محلول مثل کلروسدیم یا مواد آلی هستند، درصد رطوبت بدست آمده واقعی نیست. آب موجود در خاک را می توان به ۳ دسته زیر تقسیم کرد:

۱- ثقلی

۲- مویینه ای

۳- هیگروسکوپیک

در مهندسی ژئوتکنیک، رطوبت خاک، آن قسمت از آب آزاد است که فضای بین دانه ها را پر می کند و آب منفذی یا ثقلی نامیده می شود، نه آن که در ساختمان کریستالی کانی به کار رفته یا در سطح آن جمع شده است. بنابراین اگر در ساختمان خاک مقدار زیادی آب کریستالی وجود داشته باشد، نباید این آب را رطوبت خاک به حساب آورد.



شکل ۳-۳ نمای شماتیک ذره رسی و آب اطراف آن

برای محاسبه درصد رطوبت طبیعی خاک سه عدد کلوخه خاک نمونه دست نخورده برداشته و طبق آیین نامه ASTM D 2216 – 98 آزمایش بر روی این نمونه‌ها انجام شده و نتایج آزمایش در جدول ۱-۳ آمده است.

جدول ۱-۳ تعیین درصد رطوبت خاک

شماره آزمایش	ω%
۱	۵/۴۱
۲	۵/۴۷
۳	۵/۸۴
میانگین	۵/۵۷

۳-۳-۳ وزن مخصوص خشک خاک

برای محاسبه وزن مخصوص خشک خاک از روش موم‌گیری استفاده گردیده است. در این آزمایش ۵ عدد کلوخه خاک با رطوبت طبیعی با پارافین ذوب شده به طور کامل پوشانده می‌شود و با استفاده از حجم آب جابجا شده و وزن مخصوص پارافین که مشخص است وزن مخصوص خشک خاک محاسبه می‌شود. در جدول ۲-۳ خلاصه نتایج و میانگین داده‌ها آمده است.

جدول ۲-۰ وزن مخصوص خشک خاک

وزن مخصوص طبیعی (gr/cm^3)	وزن مخصوص خشک خاک (gr/cm^3)
۱/۴۵	۱/۴۲
۱/۳۸	۱/۳۵
۱/۴۰	۱/۳۷
۱/۴۸	۱/۴۵
۱/۵۳	۱/۵۰
میانگین = ۱/۴۵	میانگین = ۱/۴۲

۳-۳-۴ چگالی نسبی دانه های جامد خاک (G_s)

وزن مخصوص ویژه یا توده ویژه خاک عبارت است از نسبت وزن حقیقی حجم مشخصی از ذرات خاک به وزن حقیقی همان حجم آب مقطر در دمای ۴ درجه سانتیگراد.

وزن مخصوص ویژه اکثر کانی های خاک در دامنه ای بین ۲/۴ تا ۲/۹ تغییر می کند. وزن

مخصوص ویژه قسمت جامد ماسه های با رنگ روشن که قالبها از کوارتز تشکیل شده اند، در حدود ۲/۶۵ تخمین زده می شود. برای خاک های رسی و سیلتی این مقدار بین ۲/۴ تا ۲/۹ تغییر می کند. در ضمن وزن مخصوص ویژه خاک های سرب دار، ۴ و خاک های آلی، ۲ است. توده ویژه خاک های آلی به دلیل آن که این مواد بر اثر حرارت به شدت کاهش وزن می یابند، خیلی پایین است. توده ویژه کانی های آهن، بیشتر از کانی های رس (سیلیکات ها) است.

جدول ۳-۳ مقادیر G_s برای کانی های مختلف

چگالی (G_s)	کانی
۲,۶۵	کوارتز
۲,۶	کائولینیت
۲,۸	ایلیت
۲,۶۵ - ۲,۸	مونت موریلونیت
۲ - ۲,۵۵	هالوزیت
۲,۵۷	فلدسپات پتاسیم
۲,۶ - ۲,۹	کلریت
۲,۸ - ۳,۲	بیوتیت
۲,۷۶ - ۳,۱	مسکویت
۳ - ۳,۴۷	هورن بلاند
۳,۶ - ۴	لیمونیت
۳,۲۷ - ۳,۷	الیون

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D 854 که برای بدست آوردن چگالی نسبی دانه های

جامد خاک می باشد، صورت گرفته است.

برای محاسبه چگالی دانه های جامد خاک، از رابطه ۱-۳ استفاده می شود.

$$G_s = K * \frac{M_s}{M_s + M_{PW} - M_{PWS}}$$

M_s : جرم ذرات خاک

M_{PW} : جرم ذرات خاک و آب

$M_s + M_{PW} - M_{PWS}$: جرم ذرات خاک و آب و پیکنومتر

K : ضریب تصحیح دمای آب

این آزمایش بر روی سه نمونه خاک صورت پذیرفت و در نهایت میانگین آن‌ها به عنوان چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است، با توجه به این که دمای آب برابر ۲۴/۵ اندازه گیری شده است، ضریب K را ۰/۹۹۸۹۷ در نظر می‌گیریم. جدول ۳-۴ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک

شماره آزمایش	G_s
۱	۲/۶۵۷
۲	۲/۶۸۹
۳	۲/۶۵۹
میانگین	۲/۶۶۸

۳-۳-۵ آزمایش حد روانی و حد خمیری

حد روانی، درصد رطوبتی است که در آن و رطوبت های بالاتر از آن، خاک به صورت سیال لزج عمل می کند. حد خمیری، درصد رطوبتی است که خاک در آن تا قبل از حد روانی، به صورت خمیری رفتار می کند. حد انقباض، درصد رطوبتی است که اگر رطوبت خاک از آن کمتر شود، تغییر در حجم خاک به وجود نمی آید.

اتربرگ علاوه بر ۳ حد فوق، ۲ حد دیگر نیز پیشنهاد کرده است:

حد چسبندگی: درصد رطوبتی که در آن دانه های خاک تمایل بیشتری به چسبیدن به یکدیگر دارند تا چسبیدن به سایر اجسام.

حد چکنگی: درصد رطوبتی که در آن خاک به سطوح فلزی مثل تیغه کاردک و ماشین آلات بیشتر می چسبد تا به ذرات خود. این حد برای مهندسان کشاورزی و پیمانکاران عملیات خاکی از اهمیت زیادی برخوردار است.

آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 انجام شد. برای حد روانی از آزمایش جام کاساگرانده و آزمایش حد خمیری از روش فیتیله استفاده شد. نتایج آزمایش در جدول ۳-۵ آمده است.

جدول ۳-۵ نتایج حدود اتربرگ

حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
۲۵٪	۲۰٪	۵٪

۳-۳-۶ عناصر خاک

برای شناسایی کانی های موجود در خاک آزمایش XRD انجام شده است. نتایج آزمایش در

جدول ۳-۶ ارائه شده است (حسینی، ۱۳۹۴)

جدول ۳-۶ ترتیب فراوانی کانی های موجود در خاک با توجه به آزمایش XRD (حسینی، ۱۳۹۴)

ترتیب	نماد شیمیایی	نام
۱	SiO ₂	Quartz
۲	CaCO ₃	Calcite
۳	NaAlSi ₃ O ₈	Albite
۴	(Mg,Fe,Al) ₆ (Si,Cr) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinochlore
۵	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	Muscovite

همچنین برای تعیین درصد وزنی اکسید عناصر در خاک، آزمایش XRF نیز انجام شده است. در

جدول ۳-۷ نتایج آزمایش XRF را برای خاک مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۳-۷ نتایج درصد وزنی اکسید عناصر در خاک با توجه به آزمایش XRF (حسینی، ۱۳۹۴)

ترتیب	اکسید عناصر	درصد وزنی
۱	SiO ₂	۴۵/۹۰۲
۲	CaO	۱۷/۳۸۲
۳	Al ₂ O ₃	۱۱/۹۷۰
۴	Fe ₂ O ₃	۴/۷۹۸
۵	K ₂ O	۲/۲۲۷
۶	Na ₂ O	۰/۸۰۱
۷	TiO ₂	۰/۶۴۰
۸	P ₂ O ₅	۰/۱۲۵
۹	MnO	۰/۰۸۳
۱۰	SrO	۰/۰۴۵

۴-۳ افزودنی مورد استفاده

در این پژوهش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک از خاکستر لجن استفاده گردیده است. بدین منظور ابتدا لجن از تصفیه خانه شهرک اکباتان تهران تهیه گردیده است. با توجه به رقیق بودن لجن فاضلاب و زمان بر بودن خشک کردن آن، در این پژوهش از کیک لجن به جای لجن خشک شده استفاده شد. بعد از گذراندن لجن از دستگاه سانتریفیوژ تصفیه خانه فاضلاب ماده غلیظی به نام کیک لجن حاصل شد. سپس کیک لجن به آزمایشگاه دانشگاه شاهرود منتقل شده است و بعد از آن در کوره با دمای ۸۰۰ درجه سوزانده شد. ماده حاصله با استفاده از آسیاب چوبی به پودر تبدیل شد و بعد از عبور از الک شماره ۲۰۰ مطابق استاندارد ASTM 30618 شرایط یک ماده پوزولانی را پیدا کرد و به عنوان افزودنی استفاده شد.



شکل ۴-۳ الف: تصویر میکروسکوپ الکترونی از ذرات خاکستر لجن فاضلاب، ب: تصویر نمونه خاکستر لجن پس از آسیاب

۳-۵ آزمایش برش مستقیم

برای بدست آوردن مقاومت برشی در خاک ها، سه شیوه متداول وجود دارد که عبارتند از: آزمایش برش مستقیم، آزمایش برش سه محوری و آزمایش برش پیچشی. در آزمایش برش مستقیم با حرکت دادن نیمه بالایی یک جعبه محتوی خاک نسبت به نیمه پایینی آن، خاک داخل جعبه تحت تنش برشی قرار داده می شود تا تحت این تنش برشی، گسیخته شود. آزمایش برش مستقیم و برش سه محوری روش های آزمایشگاهی متداول تری هستند. آزمایش برش پیچشی در اروپا متداول تر از آمریکا است و می توان گفت که در حال حاضر از این روش برای تعیین مقاومت برشی خاک استفاده نمی شود.

از دیگر کاربردهای آزمایش برش مستقیم، تلفیق نتایج آن با نتایج به دست آمده از آزمایش سه محوری است. به علت زیاد بودن هزینه آزمایش سه محوری و مشکلات آن، معمولا تعداد کمتری از آن انجام می شود و با انجام تعداد بیشتری آزمایش برش مستقیم، پارامترهای مورد نیاز بدست می آید.

سابقا از آزمایش برش مستقیم بیشتر استفاده می شد، اما پس از مدتی کاربرد آن به دلایل زیر محدودتر گردید:

۱. با ادامه آزمایش، سطح نمونه کاهش می یابد. اما این عامل ممکن است خیلی مهم نباشد، زیرا اغلب نمونه ها در تغییر شکل های کوچک گسیخته می شوند.

۲. راستای برش و صفحه آن در آزمایش برش مستقیم از پیش تعیین شده است و در عمل ممکن است خاک در راستای دیگر گسیخته شود. ضمن این تنش های برشی روی سطح گسیختگی به طور یکنواخت توزیع نشده اند، در حالی که فرض ما بر این

است که توزیع تنش یکنواخت است.

۳. ابعاد نمونه کوچک است که این عامل خطاهایی نسبتاً مهم ایجاد می کند.

۴. ابعاد نمونه از بررسی شرایط آب منفذی در طول آزمایش جلوگیری می کند.

با پیشرفت مطالعات، برش مستقیم دوباره اهمیت و کاربرد پیشین خود را بدست آورد. برخی از دلایل این امر عبارتند از:

۱. با توجه به کوچکی ابعاد نمونه، مسیر زهکشی نسبتاً کوتاه است، بنابراین مدت زمان زهکشی حتی برای خاک های با نفوذپذیری کم، کوتاه است. به این ترتیب انجام آزمایش های تحکیم یافته زهکشی نشده و تحکیم یافته زهکشی شده زمان زیادی نخواهد برد.

۲. استفاده از جعبه های نمونه مربعی شکل مقدمه ای شد برای آن که اگر لازم باشد، کاهش در سطح نمونه در حین آزمایش اندازه گیری شود. البته برای آن که این اشکال از بین برود، نوع دیگری از دستگاه ساخته شده است به طوری که پس از یک حرکت یک طرفه، جهت حرکت برعکس می شود. بدین ترتیب سطح مقطع نسبتاً ثابت می ماند و می توان فرض کرد که تنش قائم در طول آزمایش ثابت خواهد بود. این نوع دستگاه به نام دستگاه متوالی یا آمسترته مشهور است.

۳. دستگاه برش مستقیم قابلیت سازگاری بیشتری با وسایل الکترونیکی جانبی برای قرائت نتایج دارد، به طوری که برای آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده که ممکن است چندین روز طول بکشد، لازم نیست یک اپراتور به صورت پیوسته برای قرائت اطلاعات کنار دستگاه باشد.

۴. بررسی ها نشان می دهد که پارامترهایی که از آزمایش برش مستقیم به دست می

آیند بسیار نزدیک به نتایج آزمایش سه محوری است.

آزمایش برای تعیین مقاومت برشی خاک و سنگ در سطوح ضعیف و شناخته شده ای مثل درزها و شکاف ها نیز قابل استفاده است.

۳-۵-۱ روش اعمال بار

در آزمایش برش مستقیم، برای اعمال بار می توان یکی از دو روش زیر را به کار گرفت:

۱. آزمایش کنترل تنش، که در آن نیروی برشی توسط وزنه ثابت وارد می شود و مقدار کرنش اندازه گیری می شود.

۲. آزمایش کنترل کرنش، که در این روش میزان تغییر شکل یا کرنش ثابت است و مقدار نیروی برشی اندازه گیری می شود. در این جا نیروی برشی به وسیله موتور سنکرون وارد می شود و مقدار نیرو به وسیله دینام اندازه گرفته می شود.

روش کنترل کرنش دارای مزیت بیشتری است، چراکه سرعت تغییر شکل ایجاد شده در نمونه خاک ثابت است و می توان به وسیله آن در خاک هایی مانند ماسه متراکم به مقاومت برشی باقی مانده که از مقاومت برشی حداکثر کمتر است نیز دسترسی پیدا کرد، در حالی که در حالت کنترل تنش فقط مقاومت حداکثر بدست می آید.

در این پژوهش از روش کنترل کرنش استفاده شده است.

۳-۵-۲ روند آزمایش

در این پژوهش برای بررسی تاثیر خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک های رمبنده

آزمایش های برش مستقیم به شرح ذیل صورت گرفت:

۱. به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک ابتدا آزمایش برش مستقیم بر روی خاک بدون افزودنی انجام پذیرفت.

۲. به منظور بررسی تاثیر خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، خاکستر لجن در درصد‌های مختلف به خاک بازسازی شده اضافه شده و آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه های خاک انجام شد.

۳. به منظور بررسی تاثیر زمان، ابتدا خاکستر لجن به خاک بازسازی شده اضافه شده و به مدت ۳۰ روز درون نایلون نگهداری شده و پس از آن آزمایش برش مستقیم بر روی خاک انجام شد.

۳-۵-۳ آماده سازی نمونه های بازسازی شده

برای اضافه کردن خاکستر لجن به خاک به صورت درصد وزنی، باید خاک مورد نظر با خاکستر لجن مورد استفاده بازسازی شود. بدین منظور ابتدا خاک دست خورده خرد شده و از الک نمره ۲۰ عبور داده شد. سپس خاک مورد نظر در اون به طور کامل خشک شد و برای بازسازی نمونه مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که نسبت تخلخل و وزن مخصوص خشک خاک محاسبه شده بود، برای بدست آوردن همان نسبت تخلخل ابتدا خاک خشک مورد نیاز برای کوبیدن در قالب بر اساس حجم قالب مشخص شد، سپس خاکستر لجن در درصد های وزنی مختلف به خاک اضافه شدند و جهت عمل آوری داخل نایلون پلاستیکی قرار داده شدند. بعد از گذشت زمان معین برای هر آزمایش، نمونه های خاک از داخل نایلون بیرون آورده شده، سپس نمونه ها در سه لایه داخل قالب کوبیده شدند و آزمایش برش مستقیم انجام شد.

۴- فصل چهارم

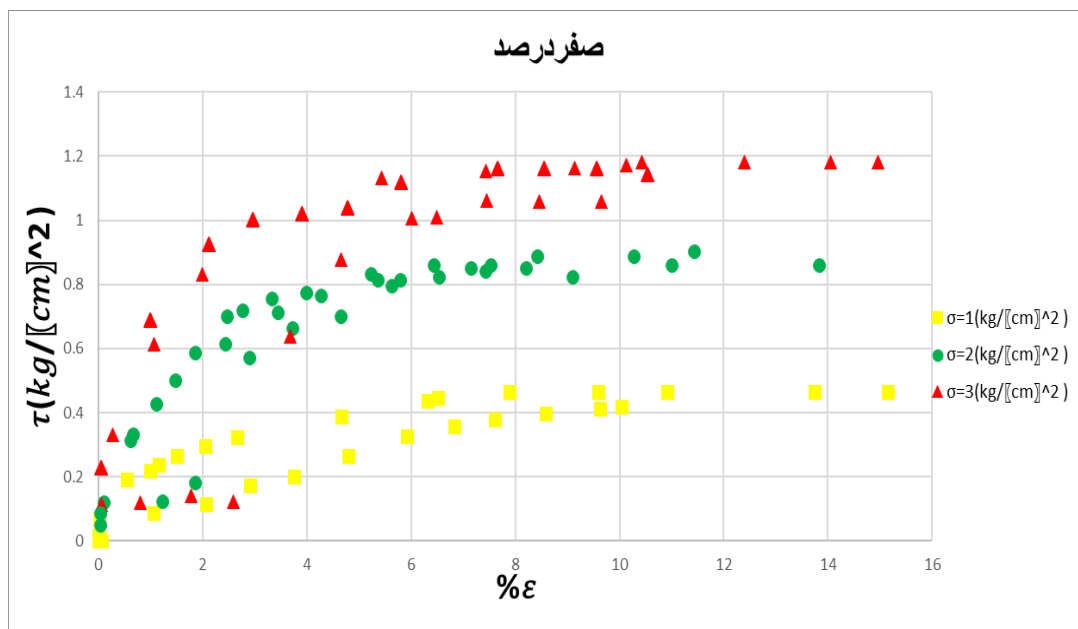
نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

در این فصل به بررسی تاثیر خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده و آزمایش های برش مستقیم انجام گرفته بر روی خاک می پردازیم.

۴-۱ نتایج آزمایش برش مستقیم

۴-۱-۱ تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده

به منظور تعیین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک رمبنده ابتدا بر روی خاک مورد نظر آزمایش برش مستقیم در شرایط زهکشی شده و با سرعت ۰/۰۴۸ میلیمتر بر دقیقه انجام پذیرفت. برای اطمینان از صحت آزمایش تمامی آزمایش ها با سه بار تکرار انجام شد. نمودار ۴-۱ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش را نشان می دهد.

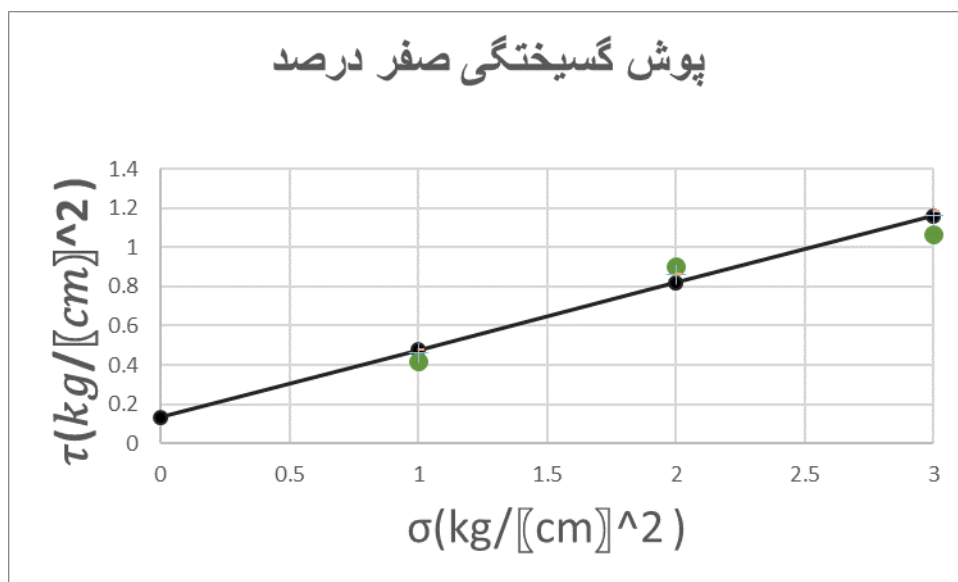


شکل ۴-۱ نمودار تنش-کرنش خاک رمبنده بدون افزودنی

جدول ۱-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده بدون افزودنی

میانگین زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	بیشینه تنش (kg/cm^2)	بار (kg/cm^2)	نمونه	درصد ماده افزودنی
۱۸/۸۹	۱۳/۴۸	۱۹/۲۵	۱۲/۹۱	۰/۴۶۲۷	۱	۱	صفر درصد
				۰/۸۵۹۴	۲		
				۱/۱۶۱۶	۳		
		۱۷/۹۲	۱۴/۶۴	۰/۴۷۲۲	۱	۲	
				۰/۸۵۹۴	۲		
				۱/۱۸۰۵	۳		
	۱۹/۵۰	۱۲/۹۱	۰/۴۷۲۲	۱	۳		
			۰/۸۵۹۴	۲			
			۱/۱۸۰۵	۳			

همانطور که در جدول ۴-۱ مشاهده می شود میانگین چسبندگی برای خاک بدون افزودنی ۱۳/۴۸ و مقدار زاویه اصطکاک نیز ۱۸/۸۹ بدست آمده است. شکل ۴-۲ نمودار تنش قائم - تنش برشی را برای این آزمایش نشان می دهد. بر طبق رابطه مور کولمب که در فصل دوم شرح داده شد، واضح است که شیب این خط مقدار زاویه اصطکاک داخلی را به ما خواهد داد و عرض از مبدا آن نیز چسبندگی را نشان می دهد.



شکل ۴-۲ نمودار پوش گسیختگی خاک رَمبنده بدون افزودنی

۴-۱-۲ تاثیر سرعت انجام آزمایش بر پارامترهای مقاومت برشی

خاک

با توجه به محدودیت آیین نامه ای در تعیین سرعت نرخ برش در دستگاه برش مستقیم، سرعت ۰/۰۳۶ با سرعت ۰/۰۴۸ میلیمتر بر دقیقه مورد مقایسه قرار گرفت، که با توجه به مورد قبول بودن هر دو سرعت از نظر آیین نامه ای و نزدیک بودن نتایج حاصل از هر دو آزمایش، سرعت ۰/۰۴۸ به دلیل سریع تر بودن ترجیح داده شد. جدول ۴-۲ پارامترهای مقاومت برشی خاک رَمبنده بدست آمده از آزمایش برش مستقیم با سرعت ۰,۰۳۶ میلیمتر را نشان می دهد.

جدول ۲-۴ پارامترهای مقاومت برشی خاک رَمبندۀ تعیین شده با سرعت ۰,۰۳۶ میلیمتر بر دقیقه

درصد ماده افزوده	نمونه	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	میانگین زاویه اصطکاک داخلی
صفر درصد	۱	۱۴/۱۱	۱۶/۵۲	۱۲/۱۴	۱۹/۸۶
	۲	۱۱/۷۳	۱۹/۷۶		
	۳	۱۰/۵۸	۲۳/۳		

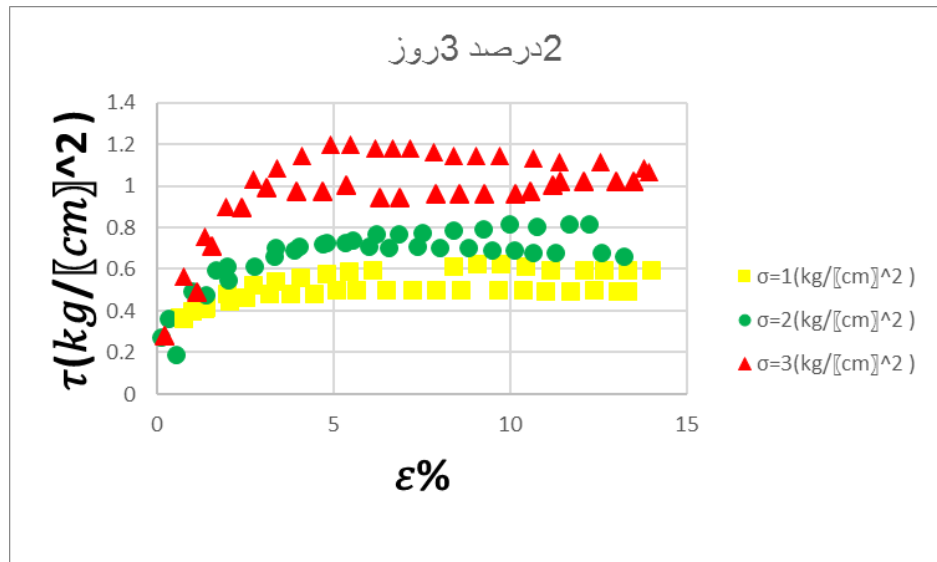
۳-۱-۴ تاثیر درصد خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی

خاک رَمبندۀ

برای بررسی تاثیر خاکستر لجن بر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، این افزودنی به صورت شرح داده شده در فصل سوم تهیه شده و به صورت درصد وزنی و در درصدهای ۲، ۴، ۶ و ۸ به خاک اضافه شد و آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه های بازسازی شده با خاکستر لجن و با سرعت ۰/۰۴۸ میلیمتر بر دقیقه انجام پذیرفت. لازم به ذکر است که زمان عمل آوری برای این آزمایش ۳ روز در نظر گرفته شد.

۳-۱-۴-۱ نمونه ۳ روزه همراه با ۲ درصد خاکستر

نمودار ۳-۴ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش برای نمونه ۳ روزه همراه با ۲ درصد خاکستر لجن را نشان می دهد.

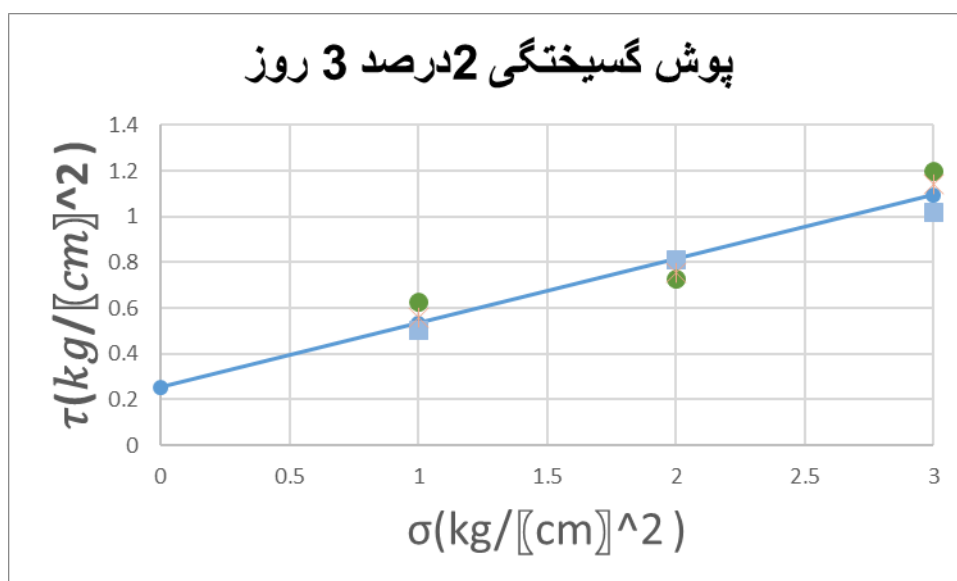


شکل ۳-۴ نمودار تنش- کرنش خاک رَمبند همراه با ۲ درصد افزودنی

جدول ۳-۴ پارامتر های مقاومت برشی خاک رَمبند به همراه ۲ درصد خاکستر لجن

درصد ماده افزودنی	نمونه	بار (kg/cm^2)	بیشینه تنش (kg/cm^2)	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	میانگین زاویه اصطکاک داخلی
۲ درصد	۱	۱	۰/۵۰۰۵	۲۵/۸۱	۱۴/۵۵	۲۵/۵۰	۱۵/۶۴
		۲	۰/۸۱۲۲				
		۳	۱/۰۲				
	۲	۱	۰/۵۵۷۲	۲۳/۳	۱۶/۳۲		
		۲	۰/۷۵۵۵				
		۳	۱/۱۴۲۷				

				۰/۶۲۳۳	۱		
		۱۶/۰۷	۲۷/۳۹	۰/۷۲۷۲	۲	۳	
				۱/۱۹۹۴	۳		



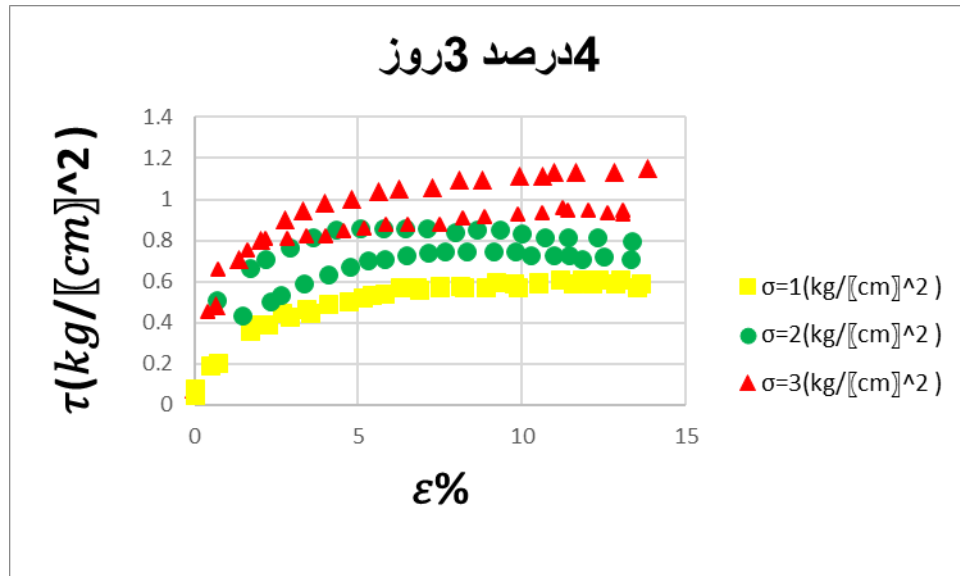
شکل ۴-۴ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۲ درصد خاکستر لجن

در جدول ۳-۴ مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک رمبنده به همراه ۲ درصد خاکستر لجن آورده شده است، که در شکل ۴-۴ با استفاده از این مقادیر، بهترین خط عبوری از این نقاط ترسیم شده است.

۴-۱-۳-۲ نمونه ۳ روزه همراه با ۴ درصد خاکستر

نمودار ۴-۵ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش برای نمونه ۳ روزه همراه با ۴ درصد خاکستر

لجن را نشان می دهد.

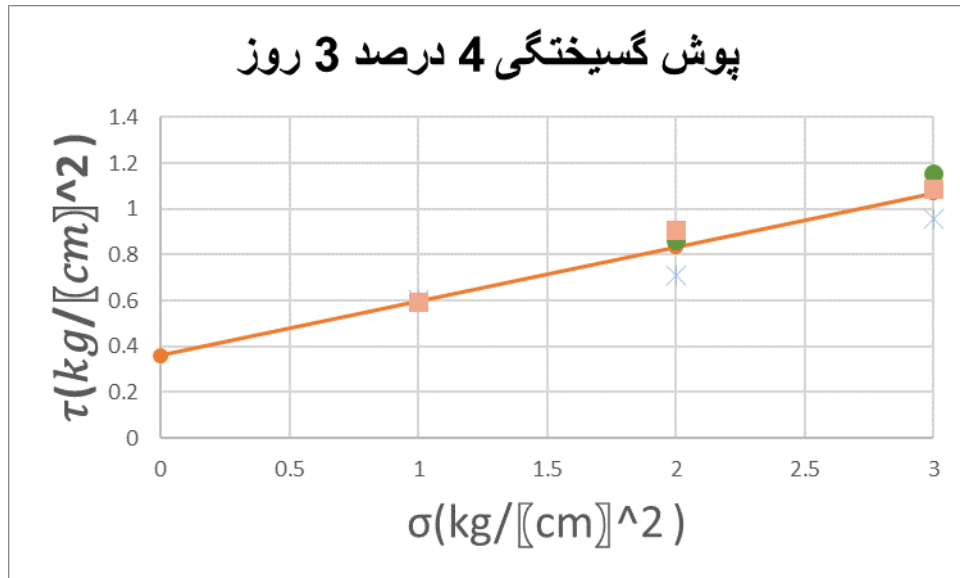


شکل ۴-۵ نمودار تنش- کرنش خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن

در جدول ۴-۴ نیز با توجه به مقدار بار اعمالی و مقدار بیشینه تنش ناشی از این بار، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی باری خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن، محاسبه شده است.

جدول ۴-۴ پارامتر های مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن

میانگین زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	بیشینه تنش (kg/cm^2)	بار (kg/cm^2)	نمونه	درصد ماده افزودنی
۱۳,۱۳	۳۶,۲۰	۱۳/۷۹	۳۷/۱۵	۰/۵۹۵	۱	۱	۴ درصد
				۰/۹۰۶۶	۲		
				۱/۰۸۶	۳		
		۱۵/۵۶	۳۱/۱۷	۰/۵۹۵	۱	۲	
				۰/۸۵۹۴	۲		
				۱/۱۵۲۲	۳		
		۱۰/۰۴	۴۰/۳	۰/۶۰۴۴	۱	۳	
				۰/۷۰۸۳	۲		
				۰/۹۵۸۶	۳		

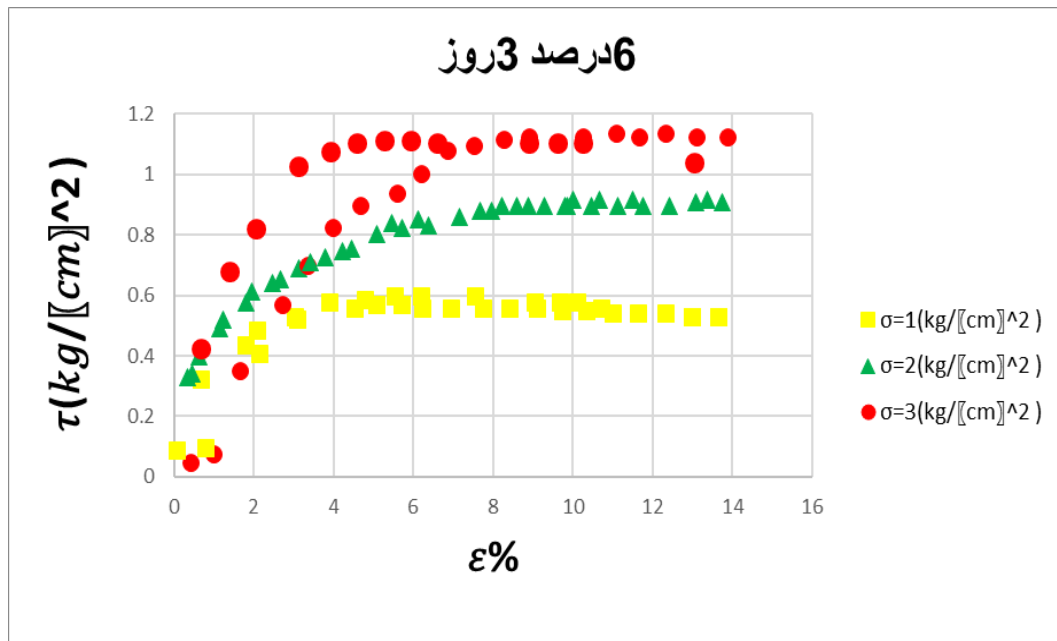


شکل ۴-۶ نمودار پوش گسیختگی خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن

۴-۳-۱-۳ نمونه ۳ روزه همراه با ۶ درصد خاکستر

نمودار ۴-۶ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش برای نمونه ۳ روزه همراه با ۶ درصد خاکستر

لجن را نشان می دهد.



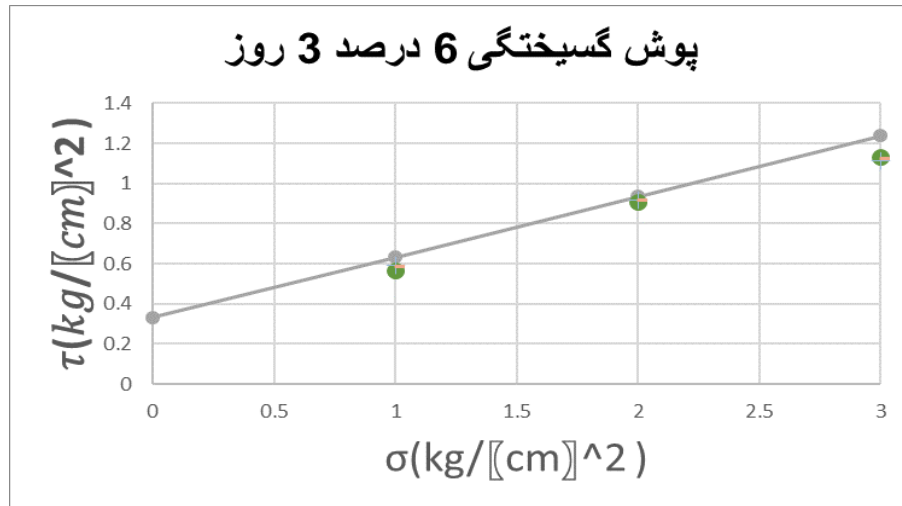
شکل ۴-۷ نمودار تنش-کرنش خاک رمبنده همراه با ۶ درصد خاکستر لجن

شکل ۴-۷ مقادیر مختلف کرنش بر حسب تنش و در ۳ حالت بارگذاری متفاوت را نشان می

دهد.

جدول ۴-۵ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمنده همراه با ۶ درصد خاکستر لجن

میانگین زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	بیشینه تنش (kg/cm^2)	بار (kg/cm^2)	نمونه	درصد ماده افزودنی
۱۶,۸۱	۳۳,۱۶	۱۵/۰۶	۳۳/۶۹	۰/۵۸۵	۱	۱	۶ درصد
				۰/۹۱۶۱	۲		
				۱/۱۲۳	۳		
	۳۳,۱۶	۱۹/۵۸	۳۵/۵۷	۰/۵۹۵	۱	۲	
				۰/۹۱۶۱	۲		
				۱/۱۱۴۴	۳		
	۳۳,۱۶	۱۵/۸۱	۳۰/۲۲	۰/۵۶۶۶	۱	۳	
				۰/۹۰۶۶	۲		
				۱/۱۳۳۳	۳		

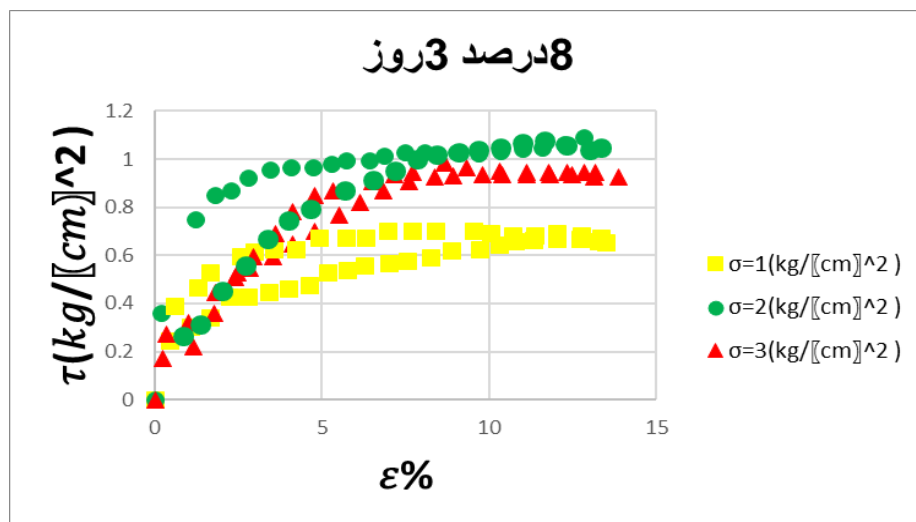


شکل ۴-۸ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۶ درصد خاکستر لجن

با توجه به نتایج ۳ آزمایش مندرج در جدول ۴-۵، پوش گسیختگی میانگین این ۳ آزمایش، در شکل ۴-۸ آمده است.

۴-۳-۱-۴ نمونه ۳ روزه همراه با ۸ درصد خاکستر

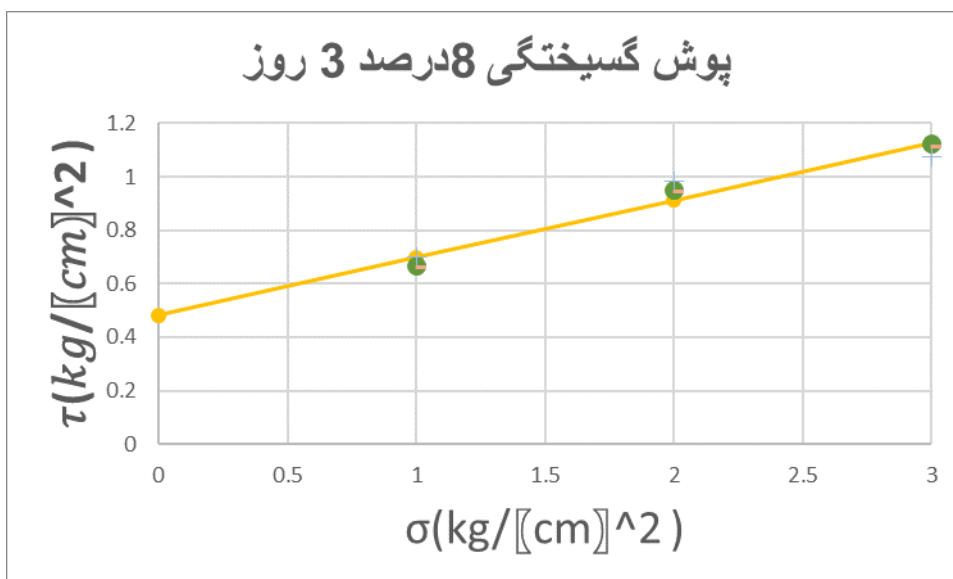
نمودار شکل ۴-۹ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش برای نمونه ۳ روزه همراه با ۸ درصد خاکستر لجن را نشان می دهد.



شکل ۴-۹ نمودار تنش-کرنش خاک رمبنده همراه با ۸ درصد خاکستر لجن

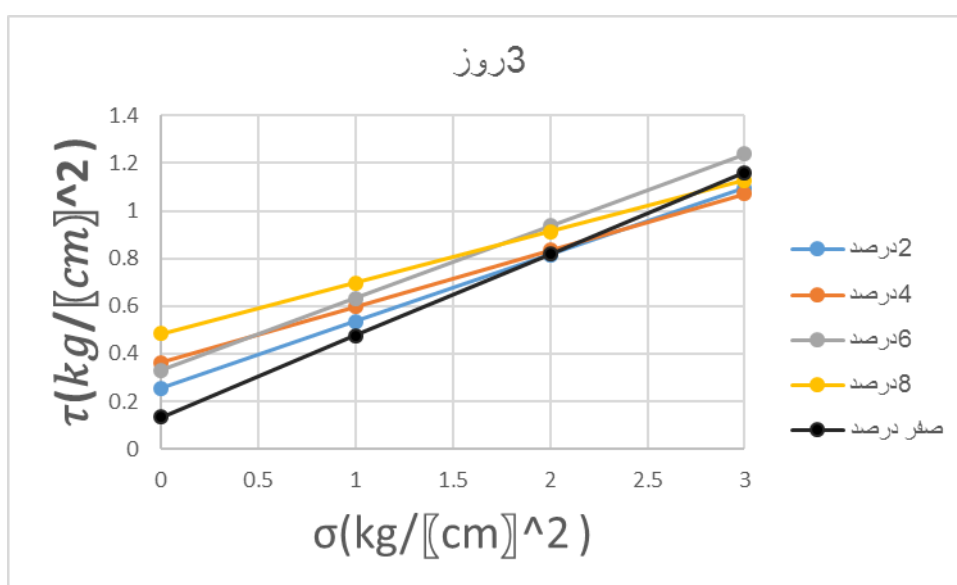
جدول ۴-۶ پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه ۸ درصد خاکستر لجن

میانگین زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	بیشینه تنش (kg/cm^2)	بار (kg/cm^2)	نمونه	درصد ماده افزودنی	
۱۲/۱۱	۴۸/۳۲	۱۰/۶۹	۵۴/۱۵	۰/۶۹۸۸	۱	۲	۸ درصد	
				۰/۹۸۲۲	۲			
				۱/۰۷۶۶	۳			
		۱۲/۸۹	۴۵/۴۹	۰/۶۶۵۸	۱			
				۰/۹۴۹۱	۲			
				۱/۱۲۳۸	۳			
		۱۲/۷۷	۴۵/۳۳	۰/۶۶۱۱	۱			۳
				۰/۹۴۴۴	۲			
				۱/۱۱۴۴	۳			



شکل ۴-۱۰ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۸ درصد خاکستر لجن

با مشاهده در جداول و بررسی اعداد بدست آمده مشخص شد که با افزودن ۲ درصدی خاکستر لجن به خاک، زاویه اصطکاک داخلی کاهش و مقدار چسبندگی افزایش یافته است. این روند برای ۴ درصد و ۸ درصد نیز به همین گونه بود ولی برای ۶ درصد روند تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی متفاوت بود.



شکل ۴-۱۱ مقایسه پوش گسیختگی خاک رمبنده به همراه درصد های مختلف افزودنی

در شکل ۴-۱۱ میانگین پوش گسیختگی برای مقادیر مختلف افزودنی رسم شده است.

۴-۱-۴ بررسی زمان عمل آوری و افزودن خاکستر لجن بر

پارامترهای مقاومت برشی خاک

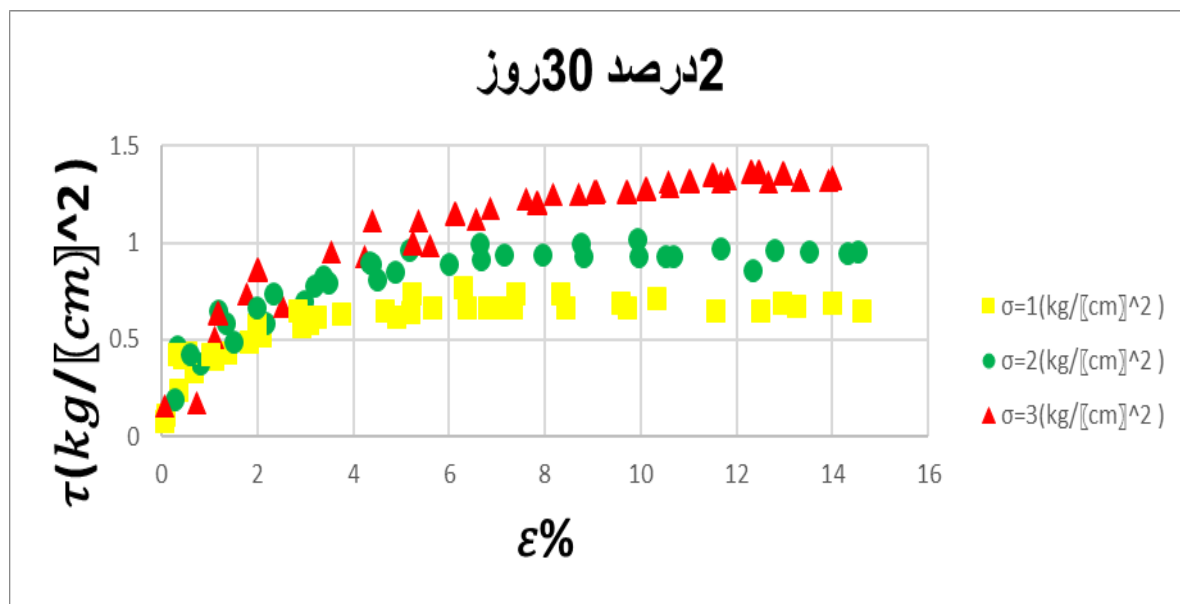
برای بررسی دقیق تر تاثیر خاکستر لجن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، این آزمایش در

زمان عمل آوری ۳۰ روزه نیز انجام پذیرفت تا درک بهتری از عملکرد این افزودنی بدست آید.

۴-۱-۴-۱ نمونه ۳۰ روزه همراه با ۲ درصد خاکستر

نمودار شکل ۴-۱۲ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش برای نمونه ۳۰ روزه همراه با ۲ درصد

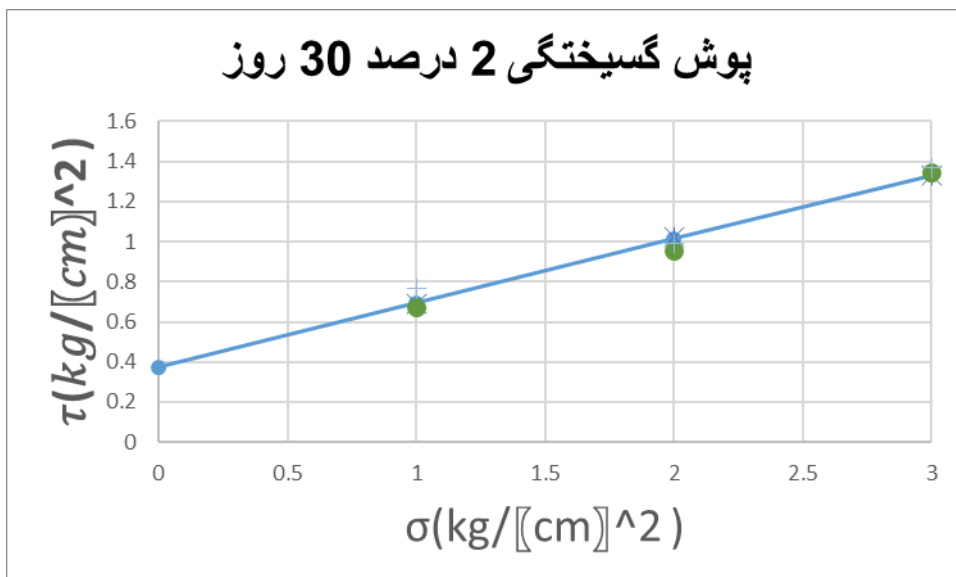
خاکستر لجن را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۲ نمودار تنش کرنش خاک رمبنده به همراه ۲ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰ روزه

جدول ۷-۴ C و ρ نمونه ی دارای ۲ درصد افزودنی بعد از ۳۰ روز

میانگین زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	بیشینه تنش (kg/cm^2)	بار (kg/cm^2)	نمونه	درصد ماده افزودنی
۱۷/۷۱	۳۷/۵۷	۱۷/۸۰	۳۷/۱۵	۰/۶۸۹۴	۱	۱	۲ درصد
				۱/۰۲	۲		
				۱/۳۳۱۶	۳		
		۱۸/۵۳	۳۱/۸	۰/۶۷۰۵	۱	۲	
				۰/۹۵۳۸	۲		
				۱/۳۴۱۱	۳		
	۱۶/۸۱	۴۳/۷۶	۰/۷۶۵	۱	۳		
			۰/۹۹۱۶	۲			
			۱/۳۶۹۴	۳			

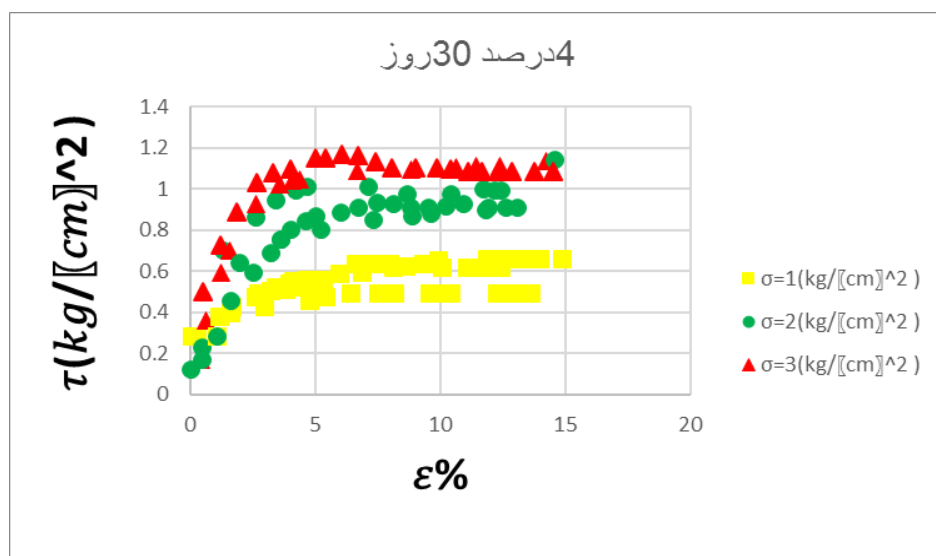


شکل ۱۳-۴ پوش گسیختگی خاک رمبنده به همراه ۲ افزودنی با زمان عمل آوری ۳۰ روزه

۲-۴-۱-۴ نمونه ۳۰ روزه همراه با ۴ درصد خاکستر

نمودار شکل ۱۴-۴ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش برای نمونه ۳۰ روزه همراه با ۴ درصد

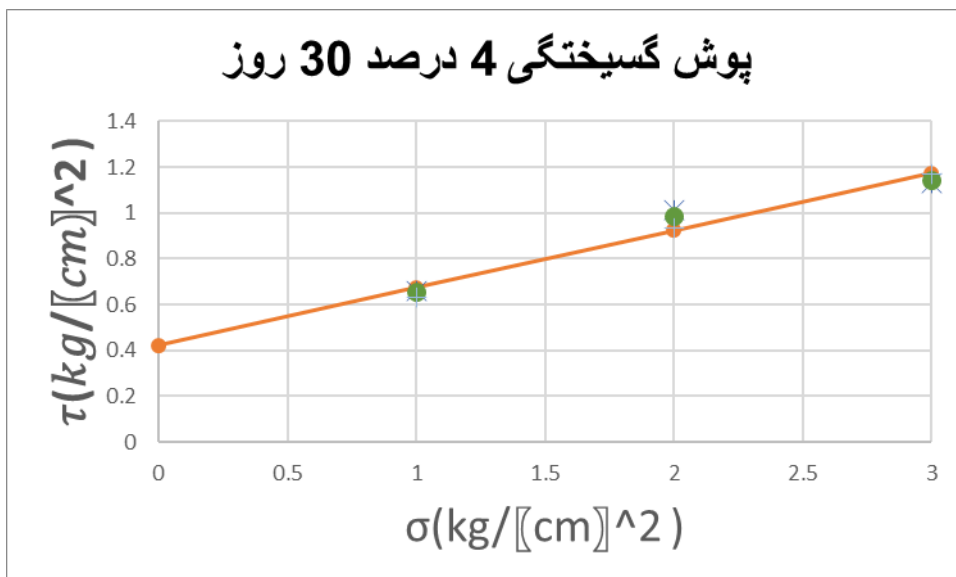
خاکستر لجن را نشان می دهد.



شکل ۱۴-۴ نمودار تنش-کرنش خاک رمبنده به همراه ۴ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰ روزه

جدول ۴-۸ و C نمونه ی دارای ۴ درصد افزودنی بعد از ۳۰ روز

میزان افزودنی	نمونه	بار(کیلوگرم)	بیشینه تنش	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	میانگین زاویه اصطکاک داخلی
۴ درصد	۱	۱	۰/۶۵۱۶	۴۳/۴۴	۱۳/۷۹		
		۲	۰/۹۸۲۲				
		۳	۱/۱۴۲۷				
	۲	۱	۰/۶۶۱۱	۴۶/۲۸	۱۳/۲۸		۴۲/۳۹
		۲	۱/۰۱۰				
		۳	۱/۱۳۳۳				
	۳	۱	۰/۶۳۲۷	۳۷/۴۷	۱۵/۰۶		۱۴/۰۴
		۲	۰/۹۳۵				
		۳	۱/۱۷۱۱				

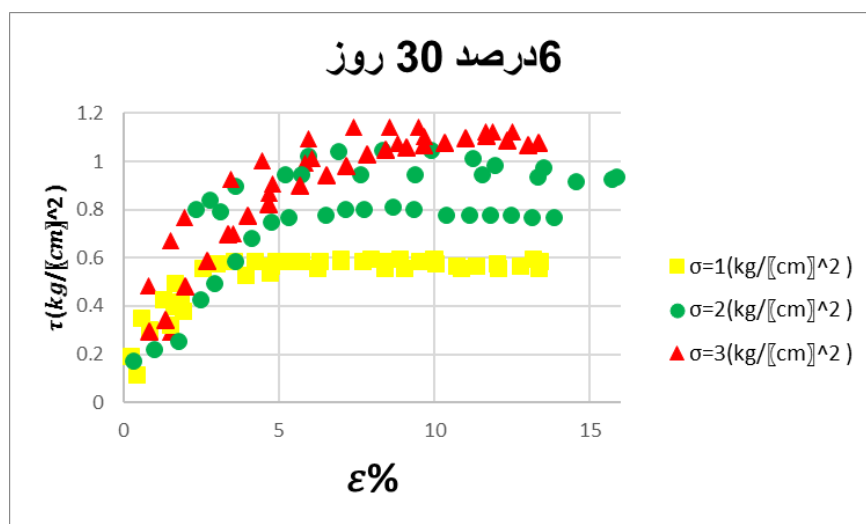


شکل ۴-۱۵ پوش گسیختگی خاک رمبنده همراه با ۴ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰ روزه

۴-۱-۳ نمونه ۳۰ روزه همراه با ۶ درصد خاکستر

نمودار ۴-۱۶ مقدار تنش بر حسب درصد کرنش برای نمونه ۳۰ روزه همراه با ۶ درصد خاکستر

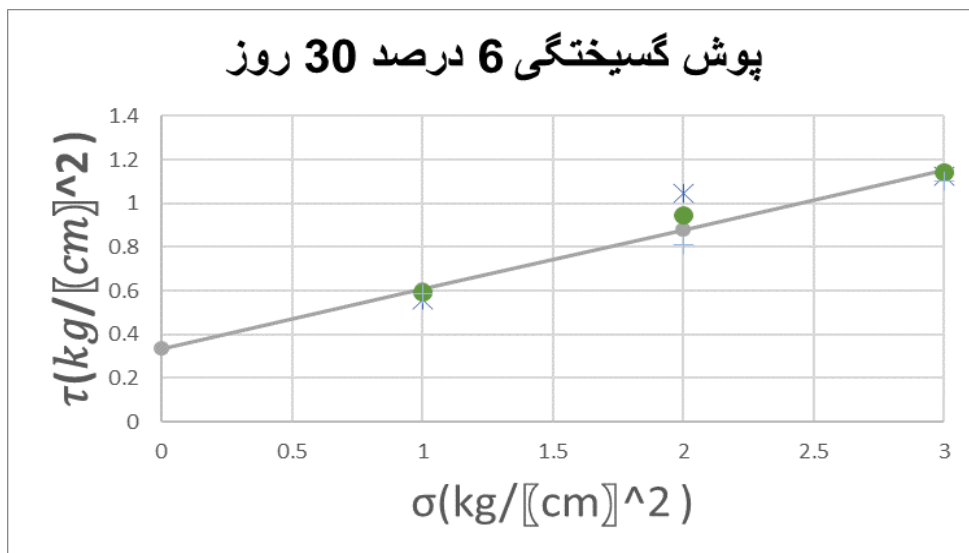
لجن را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۶ نمودار تنش-کرنش خاک رمبنده به همراه ۶ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰ روزه

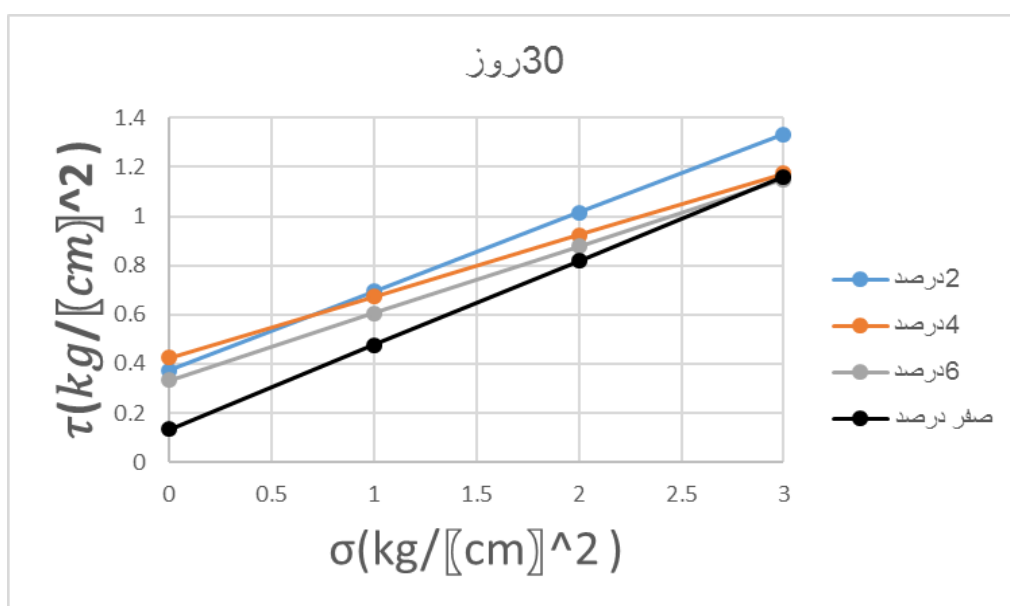
جدول ۴-۹ پارامترهای مقاومت برشی خاک همراه با ۶ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰ روز

میانگین زاویه اصطکاک داخلی	میانگین چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	بیشینه تنش (kg/cm^2)	بار (kg/cm^2)	نمونه	درصد ماده افزودنی
۱۵/۲۲	۳۳/۴۷	۱۴/۵۵	۳۱/۴۸	۰/۵۸۵۵	۱	۱	۶ درصد
				۰/۸۱۲	۲		
				۱/۱۰۵	۳		
		۱۵/۳۱	۳۴/۶۳	۰/۵۹۵	۱	۲	
				۰/۹۴۴۴	۲		
				۱/۱۴۲۷	۳		
		۱۵/۸۱	۳۴/۳۱	۰/۵۵۷۲	۱	۳	
				۱/۰۴۸۳	۲		
				۱/۱۲۳۸	۳		



شکل ۴-۱۷ پوش گسیختگی خاک همراه با ۶ درصد خاکستر لجن با زمان عمل آوری ۳۰ روز

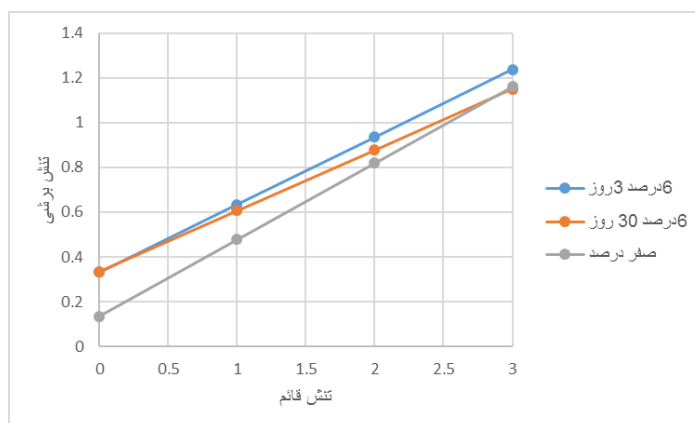
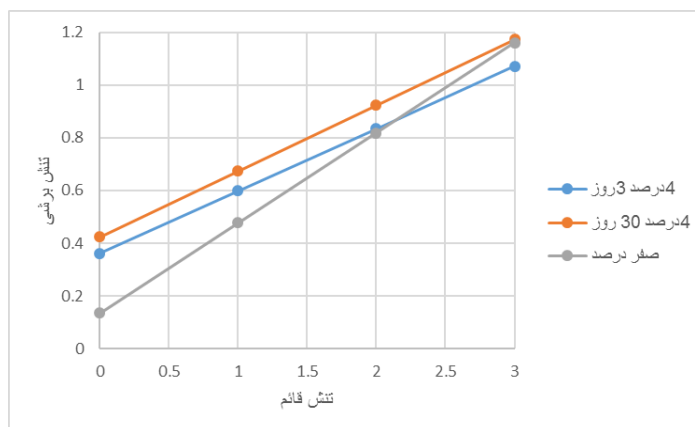
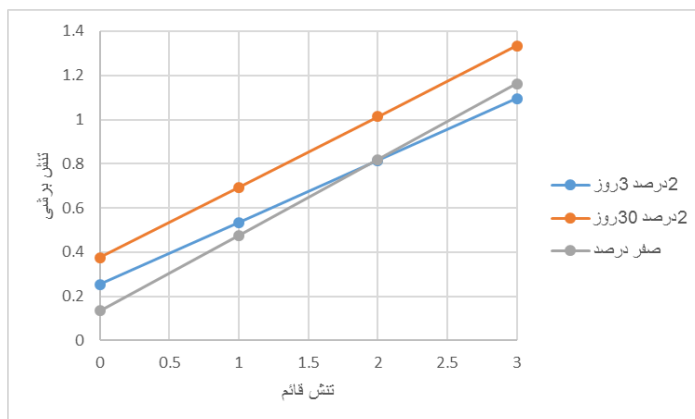
با توجه به جداول، مشاهده می شود که روند نتایج مطابق حالت بدون در نظر گرفتن اثر زمان می باشد. بدین ترتیب که باز هم با افزایش درصد خاکستر لجن چسبندگی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته که البته نرخ این تغییرات با افزایش درصد افزودنی رو به کاهش است. شکل ۴-۱۸ به طور محسوسی نمایانگر این روند می باشد.



شکل ۴-۱۸ مقایسه پوش گسیختگی در درصد های مختلف افزودنی با زمان عمل آوری ۳۰ روز

۴-۱-۵ مقایسه نمونه با افزودنی در حالت زمان عمل آوری ۳ و ۳۰

روز



در نمودار ۴-۱۹ مشاهده می شود که با افزودن ۲ درصد خاکستر لجن به خاک مورد آزمایش، مقدار چسبندگی یا عرض از مبدا خط پوش گسیختگی افزایش داشته و مقدار شیب این خط کاهش داشته

است. همچنین با مقایسه خاک در حالتی که دارای ۳۰ روز زمان عمل آوری بوده در همین نمودار، می توان دریافت که در این حالت نیز مقدار چسبندگی افزایش و مقدار زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت بدون افزودنی کاهش داشته است. مقدار چسبندگی در حالت با زمان عمل آوری ۳۰ روز، نسبت به حالت بدون زمان عمل آوری باز هم افزایش داشته است. مطلب جالب توجه این است که زاویه اصطکاک داخلی با افزایش مقدار و درصد افزودنی، کاهش داشته است، ولی با گذر زمان و افزایش زمان عمل آوری، شیب خط پوش گسیختگی افزایش دارد.

با توجه به نمودار های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ و مقایسه خاک مورد آزمایش در حالت بدون زمان عمل آوری با حالت دارای زمان عمل آوری ۳۰ روزه، در درصد های ۴ و ۶ درصد نیز همانند ۲ درصد می توان دریافت که با افزایش زمان عمل آوری مقدار خاکستر لجن مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر دو، افزایش دارد. اما در نهایت، مقدار زاویه اصطکاک داخلی در هر دو حالت، از حالت خاک بدون افزودنی کمتر است.

۵- فصل پنجم

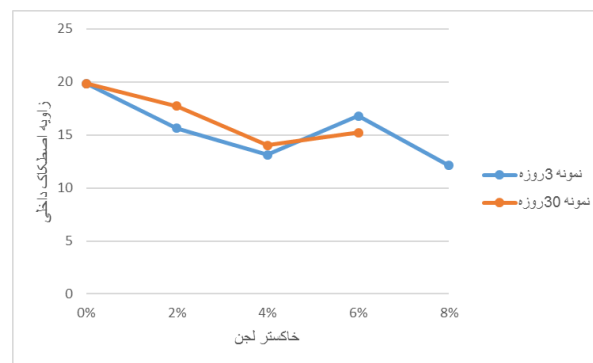
نتایج و پیشنهادها

۵-۱ نتایج

- آزمایش برش مستقیم بر روی خاک بدون افزودنی با سرعت های ۰/۰۴۸ و ۰/۰۳۶ انجام شد و نتایج یکسان بدست آمد، بنابراین می توان نتیجه گرفت که انتخاب سرعت در محدوده مجاز آیین نامه ای تفاوت چندانی در نتایج حاصله ندارد.
- با افزایش مقدار خاکستر لجن افزوده شده به خاک و بدون اعمال اثر زمان مشخص شد که چسبندگی خاک روند افزایشی داشته و زاویه اصطکاک داخلی کاهش پیدا می کند. به ازاء مقادیر بالای تنش قائم، چون زاویه اصطکاک داخلی رو به کاهش است، حاصلضرب آن در تنش قائم نیز رو به کاهش است. طبق رابطه مور کولمب، در نهایت می توان نتیجه گرفت که به ازاء مقادیر بالای تنش قائم، حتی با افزایش مقدار چسبندگی، مقاومت برشی خاک یاد شده، کاهش پیدا کرده است.
- برای بررسی اثر زمان نمونه های بازسازی شده دیگری بعد از گذشت ۳۰ روز آزمایش شد، این بار نیز با افزایش مقدار افزودنی، چسبندگی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش داشت.
- مقدار چسبندگی، در حالتی که ۳۰ روز زمان عمل آوری داشت، از هر دو حالت بدون افزودنی و با افزودنی بدون زمان عمل آوری، بیشتر بود. ولی زاویه اصطکاک داخلی در این حالت، عددی کوچکتر از این مقدار در حالت بدون افزودنی و بزرگتر در حالت با افزودنی به خود اختصاص داد.



شکل ۱-۵ نمودار مقادیر چسبندگی در درصد و زمان عمل آوری مختلف افزودنی

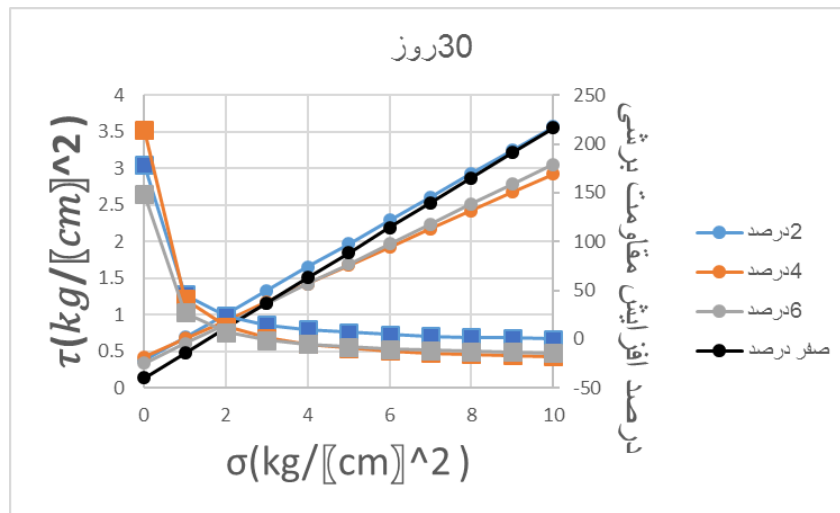


شکل ۲-۵ نمودار مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در درصد و زمان عمل آوری مختلف افزودنی

در نمودار های ۱-۵ و ۲-۵ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به ازاء مقادیر مختلف افزودنی و در ۲ زمان عمل آوری متفاوت ۳ روز و ۳۰ روز آمده است.

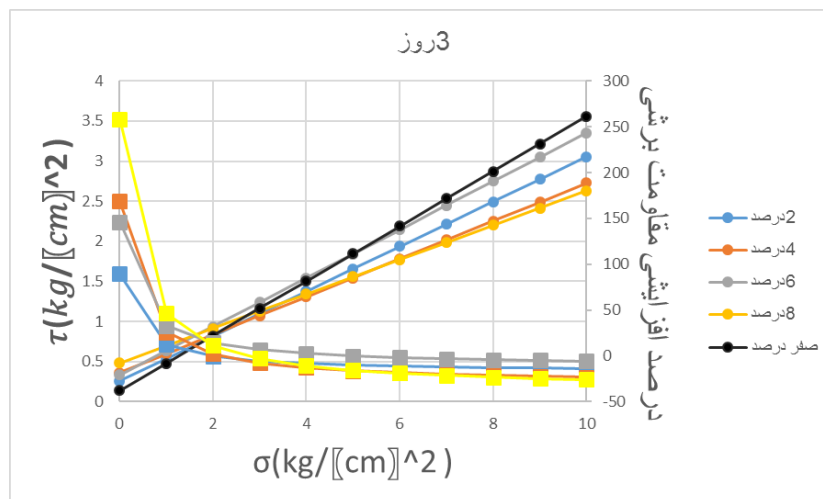
- در پژوهش های دیگر پتانسیل فروریزی خاک رمبنده، به همراه افزودنی خاکستر لجن بررسی شده و نتیجه گرفتند که خاکستر لجن بهبود دهنده پتانسیل فروریزی است و به همین دلیل، می توان از این افزودنی استفاده کرد. در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش مقدار این افزودنی، به ازاء مقادیر بالای تنش قائم، هرچند که مقدار چسبندگی افزایش داشته، ولی به دلیل کاهش زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت برشی خاک کاهش پیدا می کند.
- این افزودنی به ازاء مقادیر بزرگ تنش نرمال، اثر سوء در مقاومت برشی دارد. ۲ نمودار ۳-۵ و

۴-۵، مقدار افزایش و یا کاهش را به ازاء مقادیر مختلف تنش نرمال نشان می دهد



شکل ۳-۵ تغییرات مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه درصدهای مختلف خاکستر لجن به ازای مقادیر مختلف تنش

نرمال با زمان عمل آوری ۳۰ روزه



شکل ۴-۵ تغییرات مقاومت برشی خاک رمبنده به همراه درصدهای مختلف خاکستر لجن به ازای مقادیر مختلف تنش

نرمال

۲-۵ پیشنهادها

- با توجه به رشد جمعیت و توسعه صنایع و به تبع آن افزایش حجم فاضلاب شهری و صنعتی و مشکلات دفن و دفع آن، می توان این ضایعات و یا خاکستر آنها را به عنوان افزودنی در نظر گرفت و تاثیر این افزودنی ها را در راه سازی و بر روی آسفالت، بررسی کرد.
- همچنین برای بهسازی پارامترهای مقاومت برشی خاک رمبنده به ازاء مقادیر بالای تنش نرمال، می توان پودر لاستیک را به عنوان افزودنی مورد بررسی قرار داد.
- بررسی رابطه بین میزان فروریزش و مقاومت برشی خاک رمبنده

منابع

- Day, R.W., 2001. *Soil testing manual*. McGraw-Hill.
- McFarland, M.J., 2000. *Biosolids engineering*. McGraw-Hill Professional Publishing.
- Metcalf, E., 2003. Inc., wastewater engineering, treatment and reuse. *New York: McGraw-Hill*.
- Bitton, G., 2005. *Wastewater microbiology*. John Wiley & Sons.
- Rodríguez, N.H., Martínez-Ramírez, S., Blanco-Varela, M.T., Donatello, S., Guillem, M., Puig, J., Fos, C., Larrotcha, E. and Flores, J., 2013. The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production. *Journal of Cleaner Production*, 52, pp.94-102.
- Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R., 1969. Volume change calculations of unsaturated clay. *J Soil Mech Found Div, ASCE*, 95, pp.33-51.
- Futai, M.M. and De Souza Scares de Almeida, M., 2002. Collapsible soil: a theoretical and experimental study. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 7, p.16.
- Houston, S.L., Houston, W.N. and Spadola, D.J., 1988. Prediction of field collapse of soils due to wetting. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(1), pp.40-58.
- Elkady T. Y., (2002), PhD. Thesis. Static and dynamic behaviour of collapsible soils., Arizona State University, USA.
- Pan, S.C., Tseng, D.H., Lee, C.C. and Lee, C., 2003. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Cement and Concrete Research*, 33(11), pp.1749-1754.
- Coutand, M., Cyr, M. and Clastres, P., 2006. Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 159(4), pp.153-162.

- Chen, M., Blanc, D., Gautier, M., Mehu, J. and Gourdon, R., 2013. Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. *Waste Management*, 33(5), pp.1268-1275.
- Al Kandari, F.A., 2000. *Collapse of cemented carbonate sand*.
- Kakoli, S.T.N., 2011. *Negative skin friction induced on piles in collapsible soils due to inundation* (Doctoral dissertation, Concordia University).
- Al-Rawas, A.A., 2000. State-of-the-art review of collapsible soils. *Science and Technology, Special Review, Sultan Qaboos University*, pp.115-135.
- Clevenger, W.A., 1956. Experiences with loess as foundation material: *Jour. Soil Mech. and Found. Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng*, 82.
- Xu, W., Xu, J., Liu, J., Li, H., Cao, B., Huang, X. and Li, G., 2014. The utilization of lime-dried sludge as resource for producing cement. *Journal of Cleaner Production*, 83, pp.286-293.
- Tay, J.H. and Show, K.Y., 1999. Constructive sludge disposal option converting sludge into innovative civil engineering materials. In *Proceedings of 7th International Association on Water Quality (IAWQ). Asia-Pacific Regional Conference* (pp. 1023-1028).
- Tay, J.H. and Show, K.Y., 1991. Properties of cement made from sludge. *Journal of environmental engineering*, 117(2), pp.236-246.
- Petry, T. and Das, B., 2001. Evaluation of Chemical Modifiers and Stabilizers for Chemically Active Soils—Clays. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1757), pp.43-49.
- Cai, Y., Shi, B., Ng, C.W. and Tang, C.S., 2006. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*, 87(3), pp.230-240.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y., 2007. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), pp.194-202.
- Ahmad, F., Bateni, F. and Azmi, M., 2010. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), pp.93-99.

- Alawaji, H.A., 2001. Settlement and bearing capacity of geogrid-reinforced sand over collapsible soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(2), pp.75-88.
- Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S., 2012. Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: a preliminary study. *Environmental earth sciences*, 66(8), pp.2197-2205.
- Moayed, R.Z., Izadi, E. and Heidari, S., 2010. Improvement of Saline Silty Sand Soil Behavior Using Lime and Micro Silica. In *5th Civil Engineering Conference in the Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference 2010, The* (p. 466). Engineers Australia.
- Huangjing, S. and Gasaluck, W., 2010. The stabilization of loess by chemical additives for road base. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15.

حسینی، پیام؛ هادی بهادری و پردیس حسینی، ۱۳۸۸، کاربرد لجن فاضلاب به عنوان یک خاکستر بیولوژیکی در بتن و اکتیواسیون آن با استفاده از نانوذرات، سومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.

سهرابی شکفتی، ساحل و سیدحبیب موسوی جهرمی، ۱۳۹۳، اثر ماستیک پلی یورتان B بر خصوصیات مکانیکی خاکهای رمبنده، فصلنامه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز ۴۴ (74).

وکیلی، امیر؛ سید محمد علی زمردیان؛ امیر حسین وکیلی و مهرداد آرام، ۱۳۸۷، بررسی تاثیر آهک بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاکهای رمبنده، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، سمنان، دانشگاه سمنان.

بنده زاده، امید؛ محمد فرید آستانه و محمدهادی داودی، ۱۳۸۹، بررسی عامل زمان و درصد مخلوط آهک و خاکستر بادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، انجمن ژئوتکنیک ایران.

عربانی، مهیار؛ مازیار زاهدی فر و هادی احمدی، ۱۳۹۰، ارزیابی تاثیر پودر آهن ضایعاتی در بهسازی

خاکهای ریزدانه رسی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان.

نگهدار، رحمت اله؛ مرجان صدر جمالی و ناصرالدین شهبازی، ۱۳۹۲، تاثیر افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس روی خصوصیات مقاومتی خاک تثبیت شده با سیمان در دستگاه برش مستقیم،
اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی

اوحدی، وحیدرضا؛ پریسا سلیمی و مینا زنگنه، ۱۳۹۲، مطالعه تغییرات پارامترهای مقاومت برشی خاک شیستی با تغییر در رطوبت و دانسیته، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی .

جهانیان، محمد و محمود قضاوتی، ۱۳۹۲، بررسی اثر الیاف فلزی بر روی مقاومت برشی خاک ماسه ای به وسیله انجام آزمایش برش مستقیم، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.

دستی گردی، سید حسین و عبدالحسین حداد، ۱۳۹۲، تاثیر افزودن مواد تثبیت کننده بر میزان تغییر شکل پذیری خاک های رمبنده سمنان، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

یوسفی، مهدی؛ سمیه سیروس پور و منصور پرویزی، ۱۳۹۲، تثبیت خاک با آهک جهت بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک و کاهش پتانسیل رمبندگی آن، با مطالعه موردی (خاک مسیر یاسوج- یزد)، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.

ارشاد ترابی، محمدامین؛ شهناز دانش و محمدرضا توکلی زاده، ۱۳۹۳، اثر خاکستر لجن فاضلاب به عنوان ماده پوزولانی بر خواص مکانیکی بتن، سومین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران.

مهران, مجید؛ ایوب کریمی جشنی و محمود رضا ماهری، ۱۳۹۴، بررسی امکان استفاده از لجن فاضلاب و خاکستر پوسته در تولید سیمان پرتلند، دومین همایش ملی بهداشت محیط، سلامت و محیط زیست پایدار، همدان، دبیرخانه دائمی همایش، دانشکده شهید مفتح.

فتوت، علی؛ سید محمدرضا علوی مقدم؛ رضا مکنون و محمدحسن سبط، ۱۳۸۶، تاثیر جایگزینی خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب به جای سیمان بر مقاومت فشاری بتن، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی - مهندسی عمران.

اخباری، مسیح و سیدمحمدرضا علوی مقدم، ۱۳۸۳، بررسی استانداردهای EPA آمریکا در خصوص استفاده از لجن تصفیه خانه های فاضلاب در زمین های کشاورزی، یازدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، بندرعباس، دانشگاه هرمزگان، عمران.

تکدستان، افشین و مریم پازوکی، ۱۳۸۷، لزوم کاربرد مقررات، استاندارد و محدودیت زیست محیطی در کاربرد لجن فاضلاب در کشاورزی در کشور ایران، سومین کنگره ملی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدید شونده در کشاورزی، خوراسگان، دانشگاه آزاد واحد خوراسگان.

شایگان، جلال الدین و عباس افشاری، ۱۳۸۳، بررسی وضعیت فاضلاب های شهری و صنعتی در ایران، فصلنامه آب و فاضلاب ۱۵ (49)

مهردادی، ناصر؛ افشین تکدستان و غلامرضا بیدهندی، ۱۳۸۷، بررسی روشهای مختلف کاهش لجن بیولوژیکی در سیستم های هوازی تصفیه فاضلاب توسط فرایندهای فیزیکوشیمیایی، دومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.

قضاوی، محمود و مهدی درزی رامندی، ۱۳۸۳، اثر فایبرهای خم شده بر پارامترهای مقاومت برشی ماسه در حالت سست، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه شریف، عمران.

بهداری، هادی؛ پیام حسینی؛ آرش پژوه و پردیس حسینی، ۱۳۹۱، توسعه ساخت ملاتهای سبز
سیمانی با بکارگیری سیستم ترکیبی خاکستر لجن فاضلاب و نانوسیلیس، چهارمین کنفرانس
ملی بتن/ایران، تهران، انجمن بتن ایران.

موسوی، سید مهران، ارائه معیار تجربی و پهنه بندی پتانسیل رمبندگی خاک رس کرمان با روش های
آزمایشگاهی جهت استفاده در کارهای عملی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر
کرمان، ۱۳۸۹.

عذیری، عباس، تاثیر الیاف های خمیده سه بعدیبر مقاومت برشی خاک ماسه ای، پایان نامه کارشناسی
ارشد، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، ۱۳۸۴.

جعفرپور، فاطمه؛ محمد حسین ماجدی. ساخت سیمان بنایی با پوسته برنج. مرکز تحقیقات ساختمان
ومسکن، ۱۳۷۶.

رفیعی، ب.م.ع.، پایدار سازی خاک رمبندها استفاده از تکنولوژی تزریق-مطالعه موردی راه آهن
سمنان-دامغان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی قزوین، ۱۳۸۸.

Abstract

The bio-environmental problems made by burial of sewage sludge and the destructive effects created by disposal of this dangerous poisoning substance, caused attracting too much attention. In the other hand, increasing population and, consequently, increasing the volume of sewage, demands more construction of wastewater treatment plants, hence, the volume of sewage sludge is also growing. Therefore, establishing a proper cycle for application and use of this material, which is a waste substance of wastewater treatment plant, is a very convenient way to reduce the bio-environmental risks of burying it. One of the conventional methods of sludge disposal, especially in areas that are faced with scarcity of land, is burning it. The main problem of this method is how to dispose the ash left after burning the sludge. Moreover due to vast territory of collapsible soil and the compulsion of building dams, watering canals and other technical structures in those regions and also considering the growth of urbanizations and the necessity of expansion of some big cities over that kind of soil, inspection of the stability and improvement of collapsible soil is even more essential. The objective of this project is analyzing the effect of sewage sludge ash on collapsible soil sheer strength parameter. For this goal after obtaining the required sewage sludge from Tehran, Ikbatan, wastewater treatment plant and collecting collapsible soil, the use of sewage sludge ash as an additive was set on the agenda. After the primary assessments, sheer strength parameter of under investigation soil has been tested and determined without additive and with additive in different weight percentages, including 2%, 4%, 6% and 8%. The final results show that increasing the percentage of sewage sludge ash as an additive will also increase soil cohesion and decrease the internal friction angle ϕ . The effect of time is also investigated in this project which leads to this result: with increasing time of the soil treatment with sludge ash, like before, cohesion increases and the internal friction angle. At last, it can be concluded that considering the *Mohr-Coulomb* line in diverse conditions, with increasing this additive sheer strength increases for the small quantities of stress and decreases for the larger ones.

Key words: collapsible soil, sewage sludge, sewage sludge ash, sheer strength



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
MSc Thesis in of civil engineering

**assessment of shear strength of improved collapsible soil by
sewage sludge ash**

By: Amir Mosallaei

Supervisor(s):

Dr. S.M. Hosseini

September 2016