

اللَّهُمَّ احْمَدُكَ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش ژئوتکنیک

بررسی آزمایشگاهی تاثیر درصد وزنی و ابعاد مسلح کننده ی پلی اتیلن تر
فتالات (PET) بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه ای بندرانزلی

نگارنده: زهرا حاجیان نژاد

استادان راهنما

دکتر رضا نادری

دکتر محسن کرامتی

بهار ۱۳۹۸

پاسکزاری

در اینجا لازم می‌دانم استادان عزیز و سخت‌کوش خود را پاس فراوان گویم؛ استاد ارجمند جناب آقای دکتر نادری و استاد کران‌قدر جناب آقای دکتر کرامتی که با همت فراوان و از خودگذشتی در راستای تجهیز آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود تلاش نمودند و زمین‌پس‌کنش‌های تحقیقات آزمایشگاهی را پیش از پیش فراهم آوردند و بدانش و تدبیرشان این پایان‌نامه به سرانجام رسید. پاس فراوان از استاد محترم جناب آقای دکتر عجمی که از ابتدای این پایان‌نامه تا به انتها، بدانش به روز و محبت فراوان نسبت به این جانب، بنده را از راهمایی‌های بی‌دریشان بهره‌مند ساختند.

ساحت مقدس خورشید ہمیشہ تابناک ایران زمین، شمس الشموس، امام رضا (ع)؛
و پدر و مادر عزیزم کہ ہموارہ در تمام مراحل زندگی، مشوق و پشتیبان بندہ بودہ اند۔

تعهد نامه

اینجانب زهرا حاجیان نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک دانشکده‌ی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحت عنوان « بررسی آزمایشگاهی تاثیر درصد وزنی و ابعاد مسلح کننده‌ی پلی اتیلن تر فتالات (PET) بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بندرانزلی» تحت راهنمایی جناب آقای دکتر رضا نادری و دکتر محسن کرامتی متعهد می‌شوم:

- 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، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد . 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 نمی‌باشد.

حکیده

باتوجه به تولید روزافزون مواد پلاستیکی، دغدغهی بین‌المللی دفع یا بازیافت ضایعات پلاستیکی در جهان مطرح است. یکی از راه‌کارهای استفاده مجدد از ضایعات پلاستیکی، استفاده از آن‌ها در مهندسی و بهسازی ساخت‌گاه‌ها یا زمین‌های سست است. هدف از انجام این پژوهش یافتن راهی برای استفادهی مجدد نوعی خاص از پلاستیک‌ها (بطری‌های دوغ، نوشابه، آب معدنی و...) در کارهای ژئوتکنیکی جهت بهسازی خاک می باشد. در این مقاله رفتار مکانیکی ماسه‌ی بندر انزلی که با خرده‌های پلی‌اتیلن ترفتالات 1×1 سانتی متری و نوارهای 5×1 سانتی متری به مقادیر ۰ و $1/1$ و $1/5$ و ۱ و ۲ درصد و الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات به مقادیر $1/1$ و $1/5$ درصد از وزن خاک خشک که به‌طور جداگانه با ابعاد مختلف پت، مسلح شده است؛ مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی نمونه‌های دارای تراکم نسبی ۷۵ درصد انجام شده و تاثیر پارامترهایی چون ابعاد و درصد وزنی مسلح کننده‌ها در خاک بررسی گردیده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است اگرچه خرده‌ها و نوارهای پلی‌اتیلن ترفتالات موجب بهبود رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای شده‌اند، اما تاثیر تسلیح با الیاف بر بهبود خصوصیات مکانیکی خاک به مراتب بیشتر بوده است. همچنین درصد بهینه‌ی مسلح کننده‌های نواری و خرده‌های پلی‌اتیلن ترفتالات ۱ درصد از وزن خاک خشک و درصد بهینه‌ی الیاف $1/5$ درصد از وزن خاک خشک به دست آمده است. مقایسه‌ی بین نمونه‌های مسلح و غیر مسلح نشان داده است نمونه‌های مسلح شده با درصد‌های بهینه از مسلح کننده‌ها، دارای زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و در نهایت مقاومت برشی بیشتری بوده‌اند. همچنین نمونه‌های مسلح در کرنش‌های برشی بزرگتر، مقاومت بیشتری از خود نشان داده و شکل پذیرتر شده‌اند. در نهایت جهت مقایسه‌ی کمی تاثیر مسلح کننده‌ی پت بر مقاومت خاک می‌توان گفت در تسلیح با درصد بهینه‌ی ذکر شده برای تمامی ابعاد پت، ظرفیت باربری

نهایی برای نمونه‌های مسلح‌شده با خرده‌ها، نوارها و الیاف به ترتیب ۹۲،۷۵ و ۱۹۱ درصد نسبت به حالت غیر مسلح بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: ماسه ی بندر انزلی، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، برش مستقیم بزرگ مقیاس، تسلیح، رفتار مکانیکی خاک

فهرست مطالب

فهرست جداول س

فهرست اشکال ض

فهرست

علائم

ک

فصل ۱: کلیات ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ بیان مسئله و اهمیت موضوع ۳

۳-۱ ضرورت انجام تحقیق ۴

۴-۱ فرضیات تحقیق ۵

۵-۱ روش تحقیق ۶

۶-۱ ساختار پژوهش ۶

فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی ۹

۱-۲ مقدمه ۱۰

۲-۲ راه‌حل‌های پیش رو برای حل مشکلات زمین‌های دارای خاک مساله‌دار ۱۰

- ۱۲..... ۱-۲-۲ بهسازی خاک
- ۱۷..... ۳-۲ استفاده از پت در تسلیح خاک
- ۱۸..... ۴-۲ ضایعات پلاستیکی
- ۱۸..... ۱-۴-۲ مقدمه‌ای در مورد پلاستیکها
- ۱۹..... ۲-۴-۲ دسته‌بندی پلاستیکها
- ۲۲..... ۳-۴-۲ پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)
- ۲۶..... ۴-۴-۲ مدیریت پسماندهای پلاستیکی
- ۲۹..... ۵-۴-۲ بازیافت ضایعات پلاستیکی
- ۳۱..... ۲-۵ معرفی خانواده‌ی ژئوسنتتیکها
- ۳۱..... ۱-۵-۲ مقدمه
- ۳۳..... ۲-۵-۲ انواع ژئوسنتتیکها
- ۳۸..... ۳-۵-۲ مواد اولیه و فرایند تولید ژئوسنتتیکها
- ۳۹..... ۶-۲ مطالعات پیشین در زمینه‌ی تأثیر مسلح کننده بر خاک
- ۳۹..... ۱-۶-۲ بررسی افزایش مقاومت مخلوط خاک-مسلح کننده
- ۵۷..... ۲-۶-۲ بررسی افزایش شکل‌پذیری ترکیب خاک-مسلح کننده
- ۶۳..... ۷-۲ جمع‌بندی ادبیات فنی مرتبط و تعیین برنامه‌ی مطالعاتی

فصل ۳: روش انجام تحقیق

۶۵

۱-۳ مقدمه ۶۶

۲-۳ مصالح مورد استفاده ۶۶

۱-۲-۳ ماسه ۶۶

۲-۲-۳ پت (PET) ۷۱

۳-۳ آزمایش‌های برش مستقیم ۷۳

۱-۳-۳ تعریف مقاومت برشی ۷۴

۲-۳-۳ دستگاه و تجهیزات آزمایش برش مستقیم در این پژوهش ۷۶

۳-۳-۳ نمونه‌گیری و بازسازی نمونه‌ها ۷۹

فصل ۴: بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۸۵

۱-۴ مقدمه ۸۶

۲-۴ بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها ۸۶

۱-۲-۴ آزمایش‌های مرجع ۸۶

۲-۲-۴ تأثیر تسلیح خاک با درصدهای وزنی مختلف از مسلح کننده‌ی پت بر رفتار

مکانیکی نمونه‌ها ۹۱

۳-۲-۴ تأثیر تسلیح خاک با ابعاد مختلف پت بر رفتار مکانیکی نمونه‌های مسلح ۱۰۹

۴-۲-۴ مقایسه‌ی ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای مسلح‌شده با پت در این پژوهش با نمونه‌ی

خاک مسلح‌شده با ستون سنگی ۱۲۳

۳-۴ جمع‌بندی فصل ۱۲۸

۱۲۹ **فصل ۵: جمع‌بندی نتایج و ارائه‌ی پیشنهادها**

۱-۵ مقدمه ۱۳۰

۲-۵ نتیجه‌گیری ۱۳۰

۳-۵ پیشنهادها ۱۳۳

۱۳۴ **مراجع**

۱۳۷ **Abstract**

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ معرفی و کاربردهای پلاستیک‌ها..... ۲۰
- جدول ۲-۲ مقادیر عددی خصوصیات پت..... ۲۴
- جدول ۳-۲ تاریخچه تولید و کاربردهای ژئوسنتتیک..... ۳۱
- جدول ۴-۲ کاربردهای اصلی ژئوسنتتیک‌ها در فعالیت‌های عمرانی..... ۳۷
- جدول ۵-۲ پلیمرهای اصلی برای تولید انواع ژئوسنتتیک‌ها..... ۳۸
- جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی ماسه‌ی مورد استفاده ۶۷
- جدول ۲-۳ مشخصات پت به‌کاررفته در پژوهش حاضر ۷۳
- جدول ۳-۳ برخی پارامترهای مقاومتی تخمینی خاک و سنگ ۷۵
- جدول ۴-۳ چگالی حالت خشک خاک متناسب با تراکم نسبی هدف ۸۰
- جدول ۵-۳ جدول نام‌گذاری اختصاری آزمایش‌ها ۸۲
- جدول ۱-۴ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۰۳
- جدول ۲-۴ تغییرات پارامترهای C و ϕ خاک در مقاله‌ی دادوند و همکاران در سال ۱۳۹۶..... ۱۰۵
- جدول ۳-۴ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۷
- جدول ۴-۴ مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ی غیر مسلح و نمونه‌های مسلح‌شده با ستون‌های سنگی در پژوهش آنیل کومار و ایشان ۱۲۴

جدول ۴-۵ مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ی غیر مسلح و نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد و درصد‌های

وزنی مختلف پت در پژوهش حاضر ۱۲۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ کد شناسه‌ی پلیمر PET با نشان امکان یک بار بازیافت شدن ۵
- شکل ۱-۲ (الف) روش ستون سنگی و شکل (ب) تراکم دینامیکی از روش‌های بهسازی مکانیکی خاک ۱۲
- شکل ۲-۲ (الف) بهسازی فیزیکی به روش انجماد خاک و شکل (ب) بهسازی شیمیایی با آهک پاشی ۱۳
- شکل ۳-۲ کارگذاری فیلترهای تخلیه‌ی آب اضافه‌ی منفذی ۱۴
- شکل ۴-۲ نمایی از اجرای نیلینگ در شکل (الف) و اجرای انکراژ در شکل (ب) ۱۶
- شکل ۵-۲ روند اجرای میکروپایل ۱۷
- شکل ۶-۲ فرمول شیمیایی واکنش و فرایند تولید پلی‌اتیلن ترفتالات ۲۳
- شکل ۷-۲ تفکیک ۲۵۰ میلیون تن ضایعات MSW تولیدشده در دنیا در سال ۲۰۱۰ ۲۷
- شکل ۸-۲ فرایند بازیافت و تبدیل پت ضایعاتی به گرانول‌های پلیمری قابل ذوب مجدد ۲۹
- شکل ۹-۲ شکل‌های مختلف ژئوتکستایل‌ها ۳۴
- شکل ۱۰-۲ چپ به راست به ترتیب ژئوگرید تک‌محوره و دو‌محوره ۳۶
- شکل ۱۱-۲ نمودارهای تنش انحرافی- کرنش حاصل تحقیقات Li و Ding در سال ۲۰۰۲ ۴۱
- شکل ۱۲-۲ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی خروجی تحقیقات یتیم‌اقلو و سالباس ۴۲
- شکل ۱۳-۲ بارگذاری دیواره‌ی خاک مسلح در مجاورت ریل قطار با مقیاس واقعی در پژوهش تان و پارک در سال ۲۰۱۵ ۴۲

- شکل ۲-۱۴ نمودار تغییرات فشار جانبی وارد بر دیوار مسلح شده برحسب تغییرات عمق (h ارتفاع دیوار و H عمق خاک)..... ۴۳
- شکل ۲-۱۵ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نمونه‌ی غیرمسلح و مسلح..... ۴۴
- شکل ۲-۱۶ تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در خاک مسلح شده با الف) الیاف تایر و ب) الیاف پلی‌اتیلن با ۳ طول..... ۴۵
- شکل ۲-۱۷ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی- کرنش محوری در بالا و تغییرات کرنش قائم-کرنش محوری در پایین..... ۴۶
- شکل ۲-۱۸ نمودارهای کرنش قائم-کرنش برشی برای چهار نوع خاک به کاررفته در تحقیقات Lui و همکاران..... ۴۷
- شکل ۲-۱۹ تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در درصدهای مختلف مسلح کننده برای الف) خاک ماسه‌ای و ب) خاک رس قرمز..... ۴۸
- شکل ۲-۲۰ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی برای دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی در درصدهای مختلف مسلح کننده..... ۴۹
- شکل ۲-۲۱ اثر تسلیح خاک بر نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی تحقیقات سیم نگار و کمالی..... ۵۰
- شکل ۲-۲۲ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی نمونه‌های مسلح شده با PP تحت سه سربار..... ۵۲
- شکل ۲-۲۳ نمودارهای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برحسب: الف) عرض مسلح کننده و ب) تراکم مسلح کننده در خاک..... ۵۳
- شکل ۲-۲۴ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش، در دو تنش محصور کننده..... ۵۴

- شکل ۲-۲۵ تغییرات تنش برشی برحسب تغییرات سربار قائم در نمونه‌های خاک با درصدهای مختلف مسلح کننده..... ۵۵
- شکل ۲-۲۶ نمودار تغییرات تنش برشی در درصد مسلح کننده‌های مختلف در پژوهش پدایا و همکاران..... ۵۶
- شکل ۲-۲۷ تأثیر درصد پت بر مقاومت نهایی ماسه‌ی مسلح شده در سه تنش محصورکننده در آزمایش سه محوری..... ۵۷
- شکل ۲-۲۸ منحنی‌های تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در دو حالت (a) محصور نشده و (b) محصور شده..... ۵۸
- شکل ۲-۲۹ تغییرات ظرفیت جذب انرژی نرمالیزه شده برحسب کرنش محوری برای ترکیبات مختلف خاک..... ۵۹
- شکل ۲-۳۰ نمودار تنش محوری-کرنش محوری برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف، در آزمایش سه محوری فشاری محصور نشده برای دو نوع نمونه‌ی مسلح شده‌ی (a) بدون سیمان و (b) با سیمان..... ۶۰
- شکل ۲-۳۱ نمودارهای تغییرات تنش برشی ماسه مسلح، تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال (a) با سه درصد مختلف پت و نسبت ابعادی ۱ به ۴۰ مسلح کننده و (b) با دو درصد پت مختلف و دو نسبت ابعادی ۱ به ۴۰ و ۱ به ۱۵۰ مسلح کننده..... ۶۲
- شکل ۲-۳۲ نمودارهای تغییرات حجم و تغییرات تنش انحرافی بر حسب جابجایی محوری در پژوهش مارتینز و همکاران..... ۶۲
- شکل ۳-۱ خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش..... ۶۷
- شکل ۳-۲ الک‌های به کاررفته جهت دانه‌بندی بر روی شیکر اتوماتیک..... ۶۸
- شکل ۳-۳ منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در این پژوهش..... ۶۹

- شکل ۳-۴ آزمایش تعیین چگالی ویژه (Gs) خاک ماسه‌ای ۷۰
- شکل ۳-۵ انواع پت های استفاده شده در این پژوهش ۷۲
- شکل ۳-۶ آزمایش تعیین چگالی روغن با آب مقطر ۷۳
- شکل ۳-۷ دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود ۷۶
- شکل ۳-۸ دیتالاگر و سنسورهای به کاررفته در این پژوهش ۷۷
- شکل ۳-۹ نرم افزار جمع آوری اطلاعات از دیتالاگر ۷۸
- شکل ۳-۱۰ نمای شماتیک عملکرد دستگاه برش مستقیم و سنسورهای متصل به آن ۷۹
- شکل ۴-۱ نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب جابجایی برشی برای نمونه‌ی مرجع (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۸۷
- شکل ۴-۲ نمودار تنش برشی- کرنش برشی دو نوع خاک غیرمسلح در آزمایش‌های اژدرپور و همکاران ۸۸
- شکل ۴-۳ نمودار تغییرات کرنش قائم بر حسب تغییرات کرنش برشی در نمونه‌ی مرجع (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۸۹
- شکل ۴-۴ پوش گسیختگی نمونه‌ی مرجع (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۹۰
- شکل ۴-۵ نمودار تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از خرده‌های پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۹۲
- شکل ۴-۶ نمودار تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از نوارهای پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۹۲
- شکل ۴-۷ نمودار تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از الیاف پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۹۳

- شکل ۴-۸ نمودار تنش برشی- کرنش برشی برای نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف به طول ۳۰ میلی‌متر در پژوهش سیم نگار ۹۴
- شکل ۴-۹ نمودار مقاومت برشی بیشینه-درصد وزنی مسلح‌کننده برای شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۹۵
- شکل ۴-۱۰ نمودار کرنش برشی در نقطه‌ی شکست-درصد وزنی مسلح‌کننده برای شکل‌های مختلف پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۹۶
- شکل ۴-۱۱ نمودار مقاومت برشی بیشینه-درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با درصد وزنی-های مختلف از الیاف پلاستیکی مختلف (تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال و تراکم نسبی ۷۰٪) در پژوهش رنجبر ۹۸
- شکل ۴-۱۲ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح‌شده با درصد وزنی‌های مختلف خرده‌های پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۰۰
- شکل ۴-۱۳ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح‌شده با درصد وزنی‌های مختلف نوارهای پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۰۰
- شکل ۴-۱۴ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح‌شده با درصد وزنی‌های مختلف الیاف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۰۰
- شکل ۴-۱۵ نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۰۲
- شکل ۴-۱۶ نمودار تغییرات چسبندگی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۰۲
- شکل ۴-۱۷ نمای شمانیک یک مسلح‌کننده داخل خاک ۱۰۴

- شکل ۴-۱۸ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از خرده‌های پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۹ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از نوارهای پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۰ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از الیاف پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۱ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده با ۱/۰ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۲ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده با ۵/۰ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۱
- شکل ۴-۲۳ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده با ۱ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۱
- شکل ۴-۲۴ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده با ۲ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۵ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با ۱/۰ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۴
- شکل ۴-۲۶ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با ۵/۰ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۵
- شکل ۴-۲۷ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با ۱ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)..... ۱۱۵

- شکل ۲۸-۴ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با ۲ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۱۶
- شکل ۲۹-۴ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ۰/۱ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۱۸
- شکل ۳۰-۴ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ۰/۵ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۱۹
- شکل ۳۱-۴ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ۱ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۱۹
- شکل ۳۲-۴ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ۲ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) ۱۲۰
- شکل ۳۳-۴ نمودار تأثیر افزایش درصد الیاف بر منحنی کرنش قائم-کرنش برشی در پژوهش نیما رنجبر (تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال و تراکم نسبی ۷۰٪) ۱۲۳

فهرست علائم

G_s	چگالی ویژه ی دانه‌های جامد
C_c	ضریب انحنای
C_u	ضریب یکنواختی
$D_{50} (mm)$	قطری که ۵۰ درصد دانه‌های خاک از آن کوچک‌ترند
D_r	تراکم نسبی
$\sigma (kPa)$	تنش قائم
$\tau (kPa)$	تنش برشی
$\tau_{min} (kPa)$	تنش برشی حداقل
$(\gamma_d)_{max}$	حداکثر وزن مخصوص حالت خشک
$(\gamma_d)_{min}$	حداقل وزن مخصوص حالت خشک

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

در سراسر جهان، مدیریت پسماند به عنوان یک چالش جدی به حساب می‌آید که این بحران با گسترش شهرها، افزایش جمعیت و رشد صنعت جدی‌تر شده‌است. روش‌های متداول انهدام پسماند-های جامد عبارتند از دفن کردن، سوزاندن در کوره و بازیافت. در این بین فضا برای ساخت مراکز دفن زباله در حال کاهش بوده، کوره‌ها موجب تولید گازهای خطرناک شده و بازیافت پرهزینه می‌باشد. بنابراین بهترین کار، یافتن روشی است که موجبات "کاهش، استفاده‌ی مجدد و بازیافت" را برای پسماندهای جامد فراهم کند [۱].

امروزه تحقیقات و تکنولوژی‌های پیشرفته منجر به افزایش تولید محصولات متنوعی از جمله پلاستیک‌ها شده‌است که به هفت گروه پلی اتیلن ترفتالات^۱ (PET)، پلی اتیلن با چگالی بالا^۲ (HDPE)، پلی وینیل کلراید^۳ (PVC)، پلی اتیلن با چگالی کم^۴ (LDPE)، پلی پروپیلن^۵ (PP)، پلی استایرن^۶ (PS) و سایر پلاستیک‌ها (مانند پلی استر، پلی آمیدها و پلی کربنات‌ها) تقسیم می‌شوند. فرآیند بازیافت ضایعات پت اگرچه از جنبه‌های اجتماعی و زیست محیطی بسیار سودمند است؛ در عین حال پت دارای معایبی چون عدم تجزیه پذیری و به‌خطر انداختن سلامت موجودات زنده بوده و بازیافت نیز مشکلات و هزینه‌های خاص خود را دارد.

^۱ Polyethylene Terephthalate

^۲ High Density Polyethylene

^۳ Poly Vinyl Chloride

^۴ Low Density Polyethylene

^۵ Poly Propylene

^۶ Poly Styrene

در مهندسی عمران، سازه‌ها از طریق پی بارهای خود را به خاک انتقال می‌دهند؛ در نتیجه باید بر روی خاک‌هایی با مقاومت مناسب ساخته شوند تا کارایی مطلوب را داشته باشند. امروزه به علت گسترش شهرنشینی و مدرنیزه شدن، سازه‌های مهندسی بسیاری مانند جاده‌ها، خطوط ریلی، سدها، دیوارهای حائل، تونل‌ها، مخازن و ساختمان‌ها احداث می‌شوند که هرکدام نیازمند خاک با مقاومت کافی هستند. در برخی موارد خاک با مقاومت کافی در محل احداث سازه وجود نداشته و جایگزین کردن آن با خاک مقاوم نیازمند زمان و هزینه‌ی زیادی می‌باشد. چالش‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی محققین بسیاری را واداشته است تا به دنبال یافتن روش‌هایی برای بهبود کیفیت مصالح ژئوتکنیکی باشند. پژوهش‌ها نشان داده است تسلیح خاک‌های ضعیف با الیافی مانند پت باعث افزایش چشمگیری در مقاومت و دوام آن‌ها می‌شود [۲]. بنابراین اگر بتوان راهی یافت تا هم پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بهبود یابند و هم منبع جدیدی برای مصرف ضایعات پت فراهم شود عملاً دو هدف بهسازی خاک و حفظ محیط زیست محقق شده است.

۱-۲ بیان مسئله و اهمیت موضوع

از دیرباز بهسازی خاک‌های مختلف جهت بهبود رفتار مکانیکی خاک مورد توجه مهندسين عمران و به ویژه ژئوتکنیک، قرار داشته است. یکی از روش‌های پرکاربرد در بهسازی خاک، مسلح سازی به روش فیزیکی و مسلح کننده‌های بادوام است.

از روش‌های تسلیح خاک، می‌توان اختلاط آن با الیاف و رشته‌ها را نام برد. تلفیق این عناصر با خاک، محیطی مرکب ایجاد می‌کند که در آن درگیری المان‌های تسلیح با دانه‌های خاک، مقاومت خاک را در جهات مختلف بهبود می‌بخشد. حدود نیم‌قرن پیش، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح شده با الیاف شروع گردیده است و در این میان، استفاده از مواد

باطله به دلیل مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی، بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این بین، مواد پلاستیکی که همه روزه آن‌ها را به صورت بطری‌های نوشابه و آب‌معدنی و... می‌بینیم، بطری‌های ضایعاتی پلی‌اتیلن ترفتالات هستند که در اصطلاح علمی به آن‌ها پت یا PET گفته می‌شود. این بطری‌ها مدت استفاده‌ی کوتاهی دارند و پس از مصرف با توجه به کارآمد نبودن روش‌های بازیافتی (به دلیل سرعت تولید آن در مقایسه با سرعت بازیافت، همچنین مسائل اقتصادی و تولید گازها و بخارهای سمّی در هنگام بازیافت)، مشکلاتی را برای محیط‌زیست پدید آورده‌اند. این بطری‌ها با هزینه‌ی کم و به راحتی می‌توانند جمع‌آوری شوند و با توجه به مقاومت کششی و فشاری مناسب، شکل‌پذیری مطلوب، ماندگاری طولانی‌مدت و فراوانی و تولید روزافزون، می‌توانند قابلیت‌های زیادی در تسلیح خاک داشته باشند [۳]. همچنین استفاده از این مصالح در کارهای ژئوتکنیکی باعث ایجاد آلودگی در خاک نشده که این امر یکی از مهمترین مزایای تسلیح خاک با پت می‌باشد.

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

تحقیقات نشان داده‌اند استفاده از ضایعات پلاستیکی به عنوان مسلح کننده، به طور قابل توجهی باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و بهبود مقاومت برشی خاک می‌شود. مسلح کننده‌های پلاستیکی در خاک، مقاومت حداکثر و کرنش محوری متناسب با آن را افزایش داده و میزان اتساع و کرنش‌پذیری را کاهش می‌دهد، به علاوه سهولت اجرا نیز یکی دیگر از مزایای تسلیح با این گونه ضایعات است. بنابراین استفاده از این ضایعات در تسلیح خاک هم رفتار مکانیکی خاک را بهبود می‌بخشد و هم محل مصرف جدیدی برای استفاده‌ی مجدد از آن‌ها بدون هزینه‌های گزاف اقتصادی و آلودگی زیست‌محیطی پدید می‌آورد؛ چراکه امروزه نزدیک به ۱۲/۵ درصد از زباله‌ی تولیدشده در دنیا را پلاستیک‌ها تشکیل می‌دهند و در میان ضایعات پلاستیکی تولیدشده در دنیا، ظروف پلاستیکی

نوشیدنی یا همان PET ها ، بخش اعظمی از ضایعات را تشکیل می دهند. [۴] مشکل بزرگ PET ها که در شکل (۱-۱) در علامت شناسه‌ی آن مشخص است، محدودیت در دفعات بازیافت آنهاست که برخلاف اکثر ضایعات پلاستیکی، تنها یکبار امکان بازیافت دارند. به همین خاطر استفاده از این ضایعات پلاستیکی در کارهای مهندسی یکی از بهترین محل‌های استفاده مجدد از آنها محسوب می‌شود.



شکل ۱-۱ کد شناسه‌ی پلیمر PET با نشان امکان یکبار بازیافت شدن

۴-۱ فرضیات تحقیق

با توجه به ادبیات فنی آورده شده در فصل دوم، در این پژوهش فرض اولیه بر این بوده است که با افزودن پت به خاک، مقاومت خاک و همچنین شکل‌پذیری آن بهبود خواهند یافت. از طرفی با توجه به خصوصیات مکانیکی پت انتظار می‌رفت پس از انجام آزمایش هیچ‌گونه پارگی در مسلح‌کننده‌ها ایجاد نشود. همچنین با توجه به متراکم کردن نمونه‌ها برای رسیدن به تراکم نسبی ۷۵ درصد، فرض شده است که تراکم در تمام نمونه‌ها به صورت یکنواخت و یکسان صورت گرفته است.

۱-۵ روش تحقیق

پژوهش حاضر بر مبنای بهسازی خاک ماسه‌ای بندر انزلی با استفاده از خرده‌های، نوارها و الیاف پت جهت کاهش هزینه‌های بهسازی خاک و بررسی امکان افزایش مقاومت و حذف یا بهینه‌سازی روش-های بهسازی دیگر مانند اختلاط عمیق و تراکم دینامیکی و ... می‌باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های مسلح شده با درصد‌های مختلف ابعاد گوناگون پت در تراکم نسبی ۷۵ درصد، تحت سه سربار قائم، انجام شده است و قصد بر این است که با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های مسلح شده با پت، تأثیر درصد وزنی و ابعاد پت در نمونه‌ی مسلح شده، بر پارامترهای مقاومت برشی که خاک طی آزمایش از خود نشان می‌دهد بررسی شود؛ تا در صورت امکان، بتوان علاوه بر ایجاد محل مصرف جدیدی برای ضایعات پلاستیکی پت، مهر تأییدی بر مؤثر بودن استفاده از ضایعات پت بر پارامترهای مقاومتی خاک در روش تسلیح زد. همچنین این پژوهش می‌تواند نشان دهد در چه ابعاد یا درصد وزنی از پت، بهترین تأثیر از تسلیح با پت بر روی نمونه خاک گرفته می‌شود تا بتوان از این روش تسلیح در انجام پروژه‌های مهندسی مسلح سازی خاک‌های ماسه‌ای بهره برد.

۱-۶ ساختار پژوهش

همان‌طور که تا به اینجا در این فصل بیان شده است، در فصل اول این پژوهش به معرفی کلیات پژوهش، ضرورت و اهداف آن در راستای بهسازی زمین‌هایی با خاک ماسه‌ای بندر انزلی پرداخته شده است.

در فصل دوم، ابتدا به بیان مسائلی درمورد نیاز به بازیافت ضایعات پلاستیکی، انواع ضایعات پلاستیکی مرسوم در دنیا و نحوه‌ی مدیریت این پسماندها و درنهایت به معرفی روش‌های نوین بهسازی خاک‌های مسئله‌دار با استفاده از ضایعات پلاستیکی در راستای بهره‌وری دوجانبه‌ی مهندسی محیط زیست پرداخته‌شده است.

در فصل سوم، روش انجام تحقیق و آشنایی با مورد مطالعاتی، مصالح به‌کاررفته در آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر، آزمایش‌های شناسایی خاک و استانداردها و فرایند انجام آزمایش‌های برش مستقیم جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده و معرفی ابزار دقیق به‌کاررفته در این آزمایش‌ها آورده شده است.

در فصل چهارم، به تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش‌ها پرداخته‌شده و کلیه‌ی نتایج اعم از آزمایش‌های اولیه جهت شناسایی و آزمایش‌های برش مستقیم به‌صورت نمودارها و جداول استاندارد و شرح کامل نتایج، بیان شده است.

در فصل پنجم، به بیان نتیجه‌گیری کلی و خروجی نهایی پژوهش و ارائه‌ی پیشنهادهایی جهت ادامه و گسترش پژوهش‌ها در این زمینه و ارائه‌ی طرح عملیاتی برای اجرا در پروژه‌های مهندسی پرداخته‌شده است.

فصل ۲ : مروری بر ادبیات فنی

۱-۲ مقدمه

در این فصل نخست به راه حل‌های پیش رو برای حل مشکلات زمین‌های دارای خاک نامناسب اشاره شده است، در ادامه به بررسی مختصری پیرامون انواع روش‌های بهسازی خاک پرداخته شده و سپس انواع خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌ها و کاربردهای آن‌ها معرفی شده است. در انتها نیز به تحقیقات گذشته پیرامون تسلیح خاک با انواع مسلح‌کننده‌های طبیعی و پلاستیکی و نتایج تحقیقات بررسی شده پرداخته شده و در پایان، جمع بندی مختصری از این فصل صورت گرفته است.

۲-۲ راه حل‌های پیش رو برای حل مشکلات زمین‌های دارای

خاک مساله‌دار

خاک‌های مساله‌دار در مهندسی ژئوتکنیک عبارتند از : خاک‌های خورنده که عمدتاً بر روی فلزات اثر گذاشته و با خوردگی آن‌ها را از بین می‌برند. خاک‌های انحلال‌پذیر که در آن‌ها کانی‌های انحلال‌پذیر کربناته (آهک)، سولفات (گچ) یا کلروره (نمک) وجود دارد. انحلال این خاک‌ها باعث شسته شدن خاک می‌شود. خاک‌های رمبنده که به اندازه ماسه ریز (لس) هستند و به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شوند. به علت این که ذرات این نوع از خاک‌ها توسط سیمان کربناته به یکدیگر متصل شده اند به محض این که در معرض آب قرار گیرند به راحتی فرو می‌ریزند. خاک‌های واگرا که ریزدانه بوده و در تماس با آب به راحتی شسته می‌شوند.

در مهندسی عمران، مشخصات سایت یا همان محل اجرای پروژه‌ی عمرانی، بسیار حائز اهمیت است؛ به طوری که ویژگی‌های سایت انجام پروژه، قابلیت اجرای پروژه را در آن منطقه تعیین می‌کند.

در صورت مناسب نبودن خصوصیات مکانیکی و مساله‌دار بودن خاک موجود در سایت مورد نظر، بنا بر شرایط و امکانات موجود می‌توان یکی از چهار روش زیر را انتخاب کرد:

۱- تعویض محل پروژه

این کار به‌عنوان یک راه‌حل عملی، زمانی به کار می‌رود که بتوان محل مناسب دیگری برای اجرای پروژه یافت. همچنین زمانی که پروژه مستلزم اجرا در یک مکان خاص نباشد و از نظر اقتصادی نیز قابل توجیه باشد.

۲- خاک برداری و جایگزین کردن خاک ضعیف با خاک دارای خصوصیات مهندسی مناسب

این روش برای سالیان متعددی مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما به دلیل هزینه‌ی بالای مصالح مرغوب و حمل‌ونقل، هزینه‌های بالای اجرایی، عدم دسترسی مناسب به مصالح مرغوب و مشکلات زیست‌محیطی، کنار گذاشته شد.

۳- طراحی مجدد پروژه جهت تطبیق خاک و منطقه با پروژه‌ی موردنظر (اغلب شامل

طراحی اعضای سازه‌ای)

یک نمونه‌ی رایج، استفاده از شمع‌های کوبشی می‌باشد که با کنار گذاشتن خاک نرم و سست، به سطح مقاوم با ظرفیت باربری بالا رسیده و بارهای وارده را به این سطح وارد می‌کنند.

۴- بهسازی خاک به‌منظور بهبود مشخصات خاک از طریق تکنولوژی‌های در دسترس

روش‌های بهسازی زمین، جهت حل بسیاری از مشکلات خاک-زمین و بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های موجود یا در دسترس به کار می‌روند. علاوه بر این، بهسازی خاک-زمین اغلب موجب صرفه‌ی اقتصادی و حفظ محیط‌زیست می‌شود. [۵]

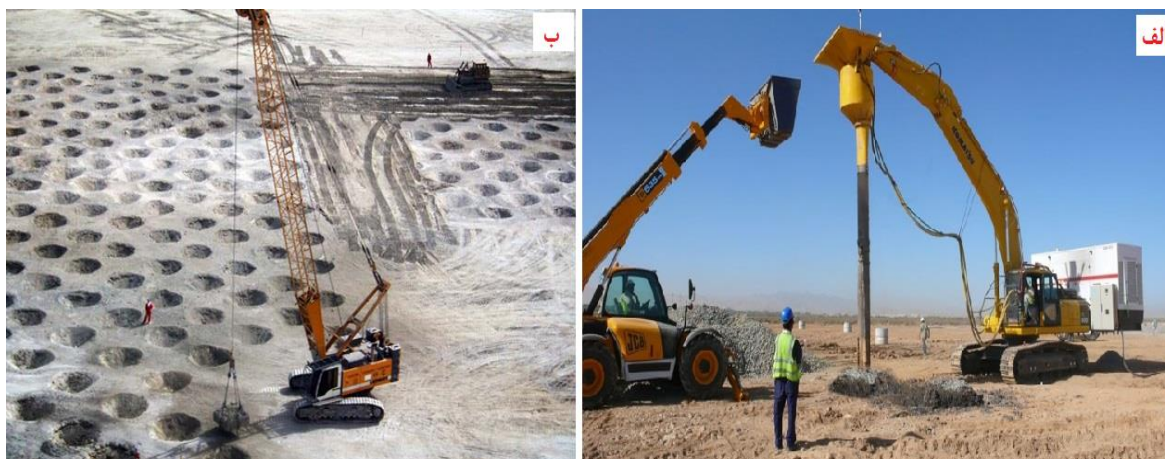
از میان راه‌حل‌های موجود یکی از بهترین و به‌صرفه‌ترین گزینه‌ها، بهسازی خاک است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۱-۲-۲ بهسازی خاک

بهسازی خاک عبارت است از انجام هرگونه عملیاتی که موجب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی (یا پاسخ مهندسی) در خاک (یا مصالح سطح زمین) شود. این عملیات می‌تواند به روش‌های زیر انجام شود:

۱-۱-۲-۲ بهسازی مکانیکی

در این روش، از نیروهای مکانیکی خارجی به منظور افزایش چگالی خاک استفاده می‌شود. آزمایش‌های تراکم شامل تراکم استاتیکی، دینامیکی و تراکم در عمق توسط چکش سنگین، در این روش به کار گرفته می‌شوند. بهسازی مکانیکی به دلیل لرزش و صدای زیاد، معمولاً در پروژه‌های خارج از محدوده‌ی شهری به کار گرفته می‌شود. نمونه‌هایی از بهسازی مکانیکی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ (الف) روش ستون سنگی و شکل (ب) تراکم دینامیکی از روش‌های بهسازی مکانیکی خاک

۲-۱-۲-۲ بهسازی به روش تغییرات فیزیکی و شیمیایی

اعمال تغییرات بر خاک در این روش، به دو دسته‌ی تغییرات فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شود که تغییرات فیزیکی شامل اعمال تغییر در ساختار دانه‌ای خاک یا کنترل میزان رطوبت بین‌دانه‌ای انجام می‌گیرد؛ مثلاً روش بهسازی حرارتی که با فریز کردن یا حرارت دادن خاک، رطوبت بین‌دانه‌ای را تغییر می‌دهد. ایجاد تغییرات شیمیایی نیز می‌تواند به صورت پایدارسازی خاک به شیوه‌ی اختلاط با افزودنی‌های فیزیکی و شیمیایی در اعماق مختلف خاک انجام پذیرد. این افزودنی‌ها می‌توانند طبیعی و یا مصنوعی تولیدی یا بازیافتی باشند؛ مانند افزودنی‌های شیمیایی از قبیل آهک، پلی اتیل آمید^۱، پلی اورتان^۲ و دیگر تثبیت‌کننده‌ها و افزودنی‌های شیمیایی که می‌توانند خصوصیات ژئوتکنیکی خاک را بهبود بخشند. در شکل (۲-۲) نمونه‌ای از بهسازی به روش تغییرات فیزیکی و شیمیایی نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ (الف) بهسازی فیزیکی به روش انجماد خاک و شکل (ب) بهسازی شیمیایی با آهک پاشی

^۱ Polyacrylamide

^۲ Polyurethane

۳-۱-۲-۲ بهسازی هیدرولیکی

در این روش، آب موجود در بین ذرات خاک، توسط زهکش یا چاههایی تخلیه می‌شود. پایین آوردن سطح آب زیرزمینی با پمپاژ کردن آب از ترانشه‌ها یا گمانه‌ها می‌تواند برای خاک‌های درشت‌دانه و غیر چسبنده، مؤثر واقع شود. برای خاک‌های ریزدانه و چسبنده نیز از اعمال بلندمدت فشارهای خارجی (روش پیش بارگذاری)^۱ که یا بارهای الکتریکی (تثبیت الکتروکینتیک)^۲ با ایجاد میدان الکتریکی توسط الکترودهای کار گذاشته‌شده در گمانه‌های خاک، استفاده می‌شود. در شکل (۳-۲) نمونه‌ای از بهسازی هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۳-۲ کارگذاری فیلترهای تخلیه‌ی آب اضافه‌ی منفذی

^۱ preloading

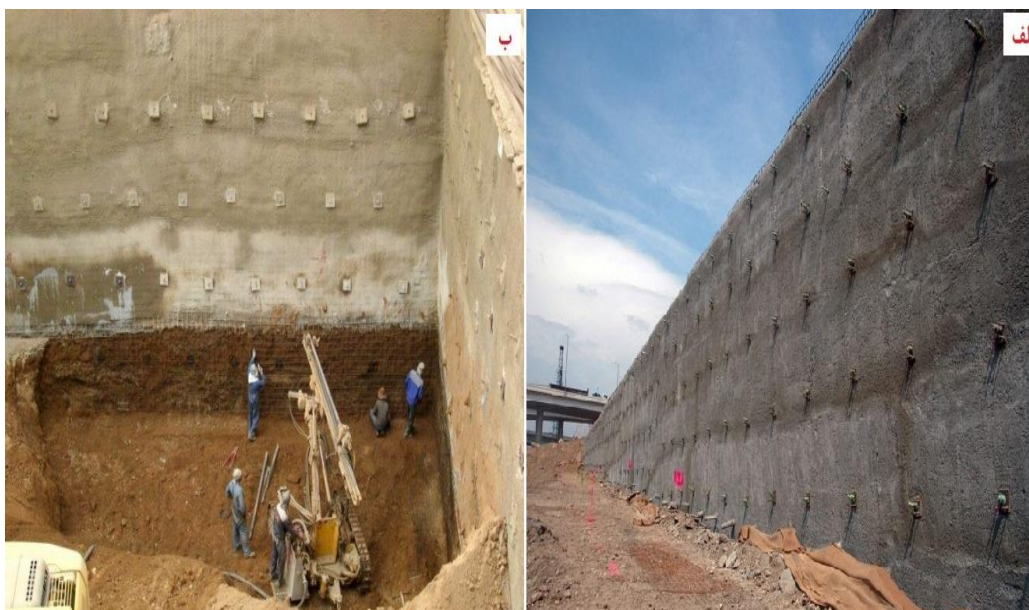
^۲ electrokinetic

در این شکل، فیلترهای عمودی نشان داده شده اند که تا عمق موردنظر برای زهکشی در گمانه‌های خاک قرار گرفته و آب منفذی را تخلیه می‌کنند. این روش یکی از روش‌های پرکاربرد از زیرمجموعه-های بهسازی هیدرولیکی به حساب می‌آید که بیشتر در خاک‌های دانه‌ای با نفوذپذیری پایین کاربرد دارد.

۲-۱-۲-۴ بهسازی به روش تسلیح خاک

تسلیح خاک، یکی از روش‌های بهسازی خاک است و به فرایندی اطلاق می‌شود که در آن با استفاده از مواد ترکیبی مصنوعی یا افزودنی‌های طبیعی، خصوصیات خاک-زمین بهبود می‌یابد. تسلیح خاک از طریق توزیع تصادفی یا منظم مسلح کننده، می‌تواند به وسیله‌ی الیاف مصنوعی یا طبیعی صورت گیرد. تسلیح می‌تواند با الیاف طبیعی مانند الیاف کاه، کنف، نارگیل، پالم، بامبو، ذرت، نیشکر و یا مسلح کننده‌های مصنوعی و ساخته‌ی دست بشر، مانند مش‌ها، میلگردها، ژئوگرید، ژئوتکستایل، تسمه‌های فولادی و پلاستیک‌های ضایعاتی از قبیل پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی-وینیل صورت گیرد. [۶]

در روش انکراژ، پس از قرار گرفتن المان فلزی که (معمولاً میلگرد یا کابل فلزی است) درون گمانه، انتهای آن با استفاده از سیمان گیردار شده و قسمت بیرونی آن توسط جک‌های مخصوصی کشیده می‌شود تا در المان فلزی ایجاد تنیدگی کند و خاک را فشرده سازد. نمونه‌ای از اجرای نیلینگ و انکراژ در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ نمایی از اجرای نیلینگ در شکل (الف) و اجرای انکراژ در شکل (ب)

همچنین اجرای میکروپایل یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه‌ی تسلیح خاک است. میکروپایل‌ها به شمع‌های با قطر کمتر از ۳۰ سانتی‌متر اطلاق می‌گردد که با تسلیح فولادی و تزریق همراه است. لوله کوبی یا حفاری و لوله‌گذاری خاک، تزریق و تسلیح، سه مرحله‌ای است که اساس بهسازی خاک به روش استفاده از میکروپایل را تشکیل می‌دهد. میکروپایل ابتدا برای ترمیم پی‌ها و ساختمان‌های موجود به کار گرفته می‌شود. اما با پیشرفت تجهیزات حفاری و تزریق، به سرعت ذهن محققین و مهندسان عرصه ژئوتکنیک را به خود معطوف کرد تا به استفاده بهینه‌تر و کاربردی از این روش دست یابند. در شکل (۲-۵) اجرای میکروپایل نشان داده شده است.



شکل ۲-۵ روند اجرای میکروپایل

۲-۳ استفاده از پت در تسلیح خاک

از حدود نیم قرن پیش، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح شروع گردیده است و در این میان استفاده از مواد باطله به عنوان مسلح کننده، به دلیل مسائل اقتصادی و زیست محیطی، بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از این مسلح کننده‌های خاک، پلاستیک‌های ضایعاتی می‌باشند. تلفیق این عناصر با خاک، محیطی مرکب ایجاد می‌کند که در آن درگیری المان‌های تسلیح با دانه‌های خاک، مقاومت و شکل‌پذیری خاک را در جهات مختلف بهبود می‌بخشد. [۳]

یکی از ضایعات پلاستیکی پرمصرف که می‌توان از آن جهت تسلیح خاک استفاده کرد، پت‌ها هستند که با مقاومت کششی بالا و دوام زیاد در خاک، می‌توانند موجب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی در خاک شوند. در ادامه به توضیح پیرامون انواع پلاستیک‌ها بیشتر پرداخته شده است.

۲-۴ ضایعات پلاستیکی

۲-۴-۱ مقدمه‌ای در مورد پلاستیک‌ها

پلاستیک‌ها، رزین‌ها یا پلیمرهایی هستند که از سنتز نفت یا مشتقات گاز طبیعی حاصل می‌شوند. اصطلاح پلاستیک به طیف گسترده‌ای از رزین‌ها که دارای خواص و ساختارهای متفاوتی هستند اطلاق می‌شود. خصوصیات رزین‌ها را می‌توان با استفاده از افزودنی‌ها بهبود بخشید. بسته به ترکیبات مختلف رزین‌ها و افزودنی‌ها، طیف گسترده‌ای از پلاستیک‌ها با خصوصیات گوناگون تولید می‌شود. پلیمرها ترکیبات شیمیایی بزرگ مولکول هستند که از به هم پیوستن واحدهای کوچک‌تر مونومر به وجود می‌آیند؛ که به‌تنهایی قابل‌استفاده نیستند و پس از ترکیب با افزودنی‌ها به شکل پلاستیک درمی‌آیند. این افزودنی‌ها شامل عوامل آنتی‌استاتیک، روغن‌ها، رنگ‌دانه‌ها، چگالنده‌ها، تسلیح‌کننده‌ها و تثبیت‌کننده‌ها می‌باشند. [۳]

در مقاله‌ای از سازمان حفاظت از محیط‌زیست امریکا (EPA)^۱ در سال ۱۹۹۰ عنوان شد که به دلیل مزایای زیاد پلاستیک نسبت به مصالح قدیمی، تولید و استفاده از آن‌ها به‌شدت رشد کرده است. برخی از ویژگی‌های مطلوب پلاستیک‌ها، شامل موارد زیر هستند: [۷]

۱- مقاومت بالا در برابر خوردگی

۲- وزن کم

۳- مقاومت در برابر خردشدگی

^۱ U.S. Environmental Protection Agency : <https://www.epa.gov>

۲-۴-۲ دسته‌بندی پلاستیک‌ها

انجمن بازرگانی صنعت پلاستیک (SPI)^۱ با همکاری متخصصان یک شرکت صنایع پلیمری (Kaytech)^۲، پلاستیک‌ها را بر اساس کاربری تقسیم‌بندی کرده است که در جدول (۱-۲) به‌طور مختصر نشان داده شده است. در این جدول، پلاستیک‌ها به هفت گروه تقسیم شده‌اند و نام علمی و کد شناسه‌ی هر پلاستیک همراه با عدد تعداد دفعات امکان بازیافت آن و نیز زمینه‌های کاربرد آن پلاستیک در ستون‌های مجزا آورده شده است. مهم‌ترین بخش جدول (۱-۲)، ستون کاربردهاست که در ادامه توضیحاتی در مورد آن داده شده است. [۳]

زمینه‌ی کاربرد PET ها بیشتر در ساخت بطری‌های نوشیدنی و محصولات دارویی که مستقیماً با سلامت انسان در ارتباط است، می‌باشد. همچنین از HDPE ها بیشتر در ساخت بطری‌های مواد شوینده و شامپوها استفاده می‌شود. PVC ها به دلیل سختی بیشتر، در ساخت درپوش بطری‌های نوشیدنی و ساخت لوله‌ها به کار می‌روند. LDPE ها در ساخت گلدان و جعبه و PP ها در ساخت بسته‌بندی‌های پلاستیکی و PS ها نیز در ساخت پاکت‌های فومی به کار می‌روند. مواد حاصل از بازیافت تمامی پلیمرهای نام برده شده، کاربردهای تقریباً یکسانی دارند و در ساخت گلدان‌ها، قاب‌ها، خط‌کش، سطل‌ها و از این دست موارد به کار می‌روند. مطالب ذکر شده از کاربرد پلاستیک‌ها به‌طور کامل در جدول (۱-۲) بیان شده است. [۸]

^۱ Society of the plastic industry: https://en.wikipedia.org/wiki/Society_of_the_Plastic_Industry

^۲ Engineered Fabrics Company : <http://kaytech.co.za>

جدول ۱-۲ معرفی و کاربردهای پلاستیک‌ها [۳۶]

ردیف	کد شناسه‌ی پلاستیک	پلاستیک	کاربردها
۱		پلی‌اتیلن ترفتالات	<ul style="list-style-type: none"> ساخت بطری برای آب، نوشیدنی، روغن، سرکه، محصولات دارویی، محصولات پاک‌کننده و روان‌کننده‌ها ساخت قوطی برای خوراکی‌های گرم و غذاهای پخته‌شده، ساخت غشا برای آب‌بندی، ساخت طناب و شانه از بازیافت پت می‌توان برای تولید کیف حمل، موکت، ژاکت، چمدان، لباس، روکش‌های فرسایشی و ژئومش استفاده کرد
۲		پلی‌اتیلن با چگالی بالا	<ul style="list-style-type: none"> ساخت بطری برای محصولاتی که مصرف روزانه دارند؛ مانند آب‌میوه، نوشیدنی‌ها، سس‌ها، سفیدکننده‌ها و شامپوها تولید در و محفظه‌ی بطری‌ها، شیشه‌ها، گلدان‌ها و جعبه‌ها پلاستیک ضایعاتی HDPE، می‌تواند بازیافت شود و تبدیل به انواع میزها، نیمکت‌ها، خودکار، گلدان، کف‌پوش و... شود
۳		پلی‌وینیل کلراید	<ul style="list-style-type: none"> تولید بطری برای روغن، سرکه، نوشیدنی‌ها، شامپوها و شوینده‌ها، همچنین ساخت لوله و کاشی ساخت در و محفظه برای بطری‌ها و جعبه‌ها ساخت جعبه بسته‌بندی سالادها، دسرها، گوشت و مرغ از PVC بازیافتی، می‌توان برای ساخت قاب موبایل، ناودانی‌ها، شیلنگ، گیره، کف‌پوش‌ها و کابل، استفاده کرد

<ul style="list-style-type: none"> • ساخت در و محفظه برای شیشه‌ها، بطری‌ها، گلدان-ها و جعبه‌ها • ساخت بطری‌های قابل فشردن • ساخت کیف‌های حمل و خرید • ساخت بسته‌های پلاستیکی برای بسته‌بندی غذا 	<p>پلی‌اتیلن با چگالی پایین</p>	 <p>LDPE</p>	<p>۴</p>
<ul style="list-style-type: none"> • ساخت بطری برای شربت، آبمیوه و سس‌ها همچنین ساخت محفظه برای بسته‌بندی سس‌ها، سوپ‌های گرم و غذاهای پخته‌شده • ساخت محفظه‌های بسته‌بندی، پاکت‌ها و کیسه‌ها • ساخت جعبه‌ی بسته‌بندی برای سبزیجات، تولیدات روزانه و سوپ‌ها • ساخت فنجان، گلدان، پلاستیک پوشک، قوطی ماست، ظروف غذا و طشت آب • از PP بازیافتی در ساخت سطل‌ها، بشکه‌های نفت، کابل باتری، برس‌ها، پوشش باطری موبایل و جاروها استفاده می‌شود 	<p>پلی پروپیلن</p>	 <p>PP</p>	<p>۵</p>
<ul style="list-style-type: none"> • تولید جعبه برای قنادی‌ها و محصولات روزانه • تولید فنجان قهوه، ظروف پلاستیکی غذا، گلدان، طشت آب و پاکت‌های فومی • از پلاستیک PS بازیافتی، می‌توان برای تولید عایق-های حرارتی، کلید برق، ترمومترها، جعبه‌های تخم مرغ، دریچه‌ها، فنجان، قاب‌ها و خط‌کش‌ها استفاده کرد 	<p>پلی‌استایرن</p>	 <p>PS</p>	<p>۶</p>
<ul style="list-style-type: none"> • از پلاستیک پلی کربنات در ساخت شیشه‌ی بچه، تانک‌های آب، دیسک‌های فشرده و محفظه‌های نگهداری دارو استفاده می‌شود. • پلاستیک پلی کربنات بازیافتی، می‌تواند تبدیل به تخته‌های پلاستیکی شود 	<p>سایر موارد شامل: پلی-استر، پلی-آمیدها، پلی کربنات</p>	 <p>07 0</p>	<p>۷</p>

۲-۴-۳ پلی اتیلن ترفتالات (PET)

در این بخش فرآیند تولید و کاربردهای پت به تفصیل آورده شده است.

۲-۴-۳-۱ فرایند تولید پلی اتیلن ترفتالات

پلی اتیلن ترفتالات (PET یا PETE)، یک فیبر مصنوعی و رزین محکم و خشک است. یکی از اعضای خانواده‌ی پلی استرها که پلیمر هستند، می‌باشد و از طریق پلیمر سازی اتیلن گلیکول^۱ و ترفتالات اسید^۲ حاصل می‌شود. اتیلن گلیکول، یک مایع بی‌رنگ بوده که از اتیلن تولید می‌شود و ترفتالات اسید، یک جامد کریستالی است که از زایلین^۳ تولید می‌گردد. ابتدا اتیلن گلیکول و ترفتالات اسید، تحت حرارت و تأثیر کاتالیزگر شیمیایی قرار می‌گیرند. نتیجه این فرایند، تولید پت ویسکوز ذوب‌شده است. در مرحله‌ی بعد، پت مذاب می‌تواند مستقیماً تبدیل به الیاف شده یا برای تبدیل شدن به پلاستیک، به صورت جامد درآید. از نظر شیمیایی، اتیلن گلیکول یک دیول است؛ یک الکل با ساختار مولکولی که شامل دو گروه هیدروکسیل (OH) می‌باشد. ترفتالات اسید، یک اسید دیکربوکسیلیک آروماتیک^۴، با ساختار مولکولی بوده که شامل یک کربن شش‌وجهی بزرگ یا حلقه‌ی آروماتیک و دو گروه کربوکسیل (CO₂H) می‌باشد.

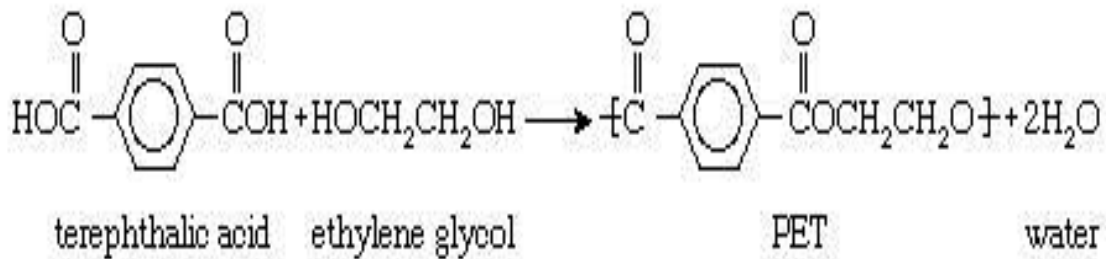
^۱ Ethylene glycol

^۲ Terephthalate acid

^۳ xylene

^۴ dicarboxylic aromatic acid

تحت تأثیر گرما و کاتالیزگرها، گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل تبدیل به گروه‌های استری (CO-) می‌شوند؛ سپس از طریق پیوند شیمیایی بین واحدهای پت، زنجیرهای پلیمری طولی به وجود می‌آیند. واکنش شیمیایی به صورت شکل (۶-۲) است:



شکل ۶-۲ فرمول شیمیایی واکنش و فرایند تولید پلی‌اتیلن ترفتالات

۲-۴-۳-۲ کاربردهای کلی و مشخصات پت

پلی‌اتیلن ترفتالات (پت)، معمولاً سخت و خشک بوده و این ویژگی موجب کاربرد آن در بخش‌های گسترده‌ای می‌شود. پت می‌تواند با تبدیل شدن به الیاف با مقاومت بالا، در صنعت نساجی به کار رود. الیاف پت با الیافی مانند ابریشم مصنوعی، پشم و کتان، آمیخته شده و باعث بهبود خاص ذاتی آن‌ها می‌شود؛ به طور مثال موجب جلوگیری از چروکیدگی می‌شود. یکی دیگر از کاربردهای پت، استفاده از آن در تولید الیاف برای پر کردن لباس‌ها (مثل کاپشن‌ها)، مبلمان و بالش‌ها است. همچنین ابریشم مصنوعی و موکت‌ها نیز به ترتب از رشته‌های کوچک و بزرگ پت ساخته می‌شوند. در تولید نخ‌های تاینر اتومبیل، کمربندهای ایمنی اتومبیل‌ها و بالابرها و تولید شیلنگ آب نیز از پت استفاده می‌شود. همچنین پت می‌تواند در تولید ژئوتکستایل‌هایی که برای زهکشی آب‌روها، کالورت‌ها و بستر ریل‌ها به کار می‌روند، مورد استفاده قرار گیرد. و به‌عنوان آخرین کاربرد پت، می‌توان به استفاده

از آن در تولید پوشک، فیلم‌های عکاسی، ظروف نگهدارنده مایعات و گازها، بطری‌های نوشیدنی و تولید دیسک‌های فشرده، اشاره کرد. در جدول (۲-۲) خصوصیات فیزیکی پت، آورده شده‌است. [۴]

جدول ۲-۲ مقادیر عددی خصوصیات پت [۴]

شماره	پارامتر	کد ASTM آزمایش	واحد	مقدار
خصوصیات فیزیکی				
الف	چگالی	D792	lbs/cu in ³	۰/۰۴۹۹
ب	جذب آب	D570	%	۰/۱
خصوصیات مکانیکی				
الف	Gs	D792	g/cu cm ³	۱/۳۸
ب	مقاومت کششی در هنگام گسیختگی	D638	Psi	۱۱۵۰۰
ج	مدول کششی	D638	Psi	۴×۱۰ ^۵
د	تغییر طول در هنگام گسیختگی	D638	%	۷۰
ه	مقاومت خمشی	D790	Psi	۱۵۰۰۰
و	مدول خمشی	D790	Psi	۴×۱۰ ^۵
ز	استحکام ضربه‌ای ایزوتوپ	D259	ft-lbs/in	۰/۷
ح	سختی راک ول ^۱	D785	-	R117
ط	ضریب زاویه‌ی اصطکاک	-	Static- dynamic	-۰/۲۵ ۰/۱۹

^۱ Rock well hardness

خصوصیات حرارتی				۳
۱۷۵	°F	D648	انحراف گرمایی	الف
۴۹۰	°F	-	نقطه‌ی ذوب	ب
-۵ ۳/۹×۱۰	In./in./ °F	D696	ضریب خطی انبساط حرارتی	ج
-۲۵۰ ۵۰	°F	-	محدوده‌ی دمایی قابل قبول برای انبساط حرارتی	د
۲۳۰	°F	-	ماکزیمم درجه حرارت قابل تحمل در دراز مدت	ه
HB	-	UL94	اشتعال پذیری	و
خصوصیات الکتریکی				۴
۱۰ ^{۱۶}	Ohm- cm	D257	مقاومت در برابر صدا	الف
۳/۴	-	D150	ثابت دی الکتریک	ب
۰/۰۰۲	-	D150	ضریب اتلاف	ج
۴۰۰	v/mil	D140	مقاومت دی الکتریک	د

۲-۴-۴ مدیریت پسماندهای پلاستیکی

"مدیریت پسماندهای جامد به کلیدی فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که برای کنترل، نگهداری، جمع‌آوری، انتقال، فرآوری و انهدام ضایعات انجام می‌شود. به نحوی که با بهترین اصول سلامت عمومی، اقتصادی، مهندسی، زیبایی‌شناسی و ملاحظات محیط‌زیستی تطابق داشته باشد."

مک دوگال و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۸، پسماندها را به صورت زیر طبقه‌بندی کرده‌اند: [۹]

۱- از نظر فیزیکی (مانند جامد، مایع و گاز)

۲- از نظر مبدأ (مانند کشاورزی، معدن، صنعت، ساخت‌وساز، بازرگانی و...)

۳- از نظر خصوصیات فیزیکی (قابل احتراق، قابل پوسیدن و قابل بازیافت)

۴- از نظر سطح ایمنی (مانند خطرناک و بی‌خطر)

۵- از نظر نوع مواد (مانند پلاستیک، شیشه، فلز کاغذ، غذا و...)

۶- از نظر کاربرد (مانند ضایعات بسته‌بندی و غذا و...)

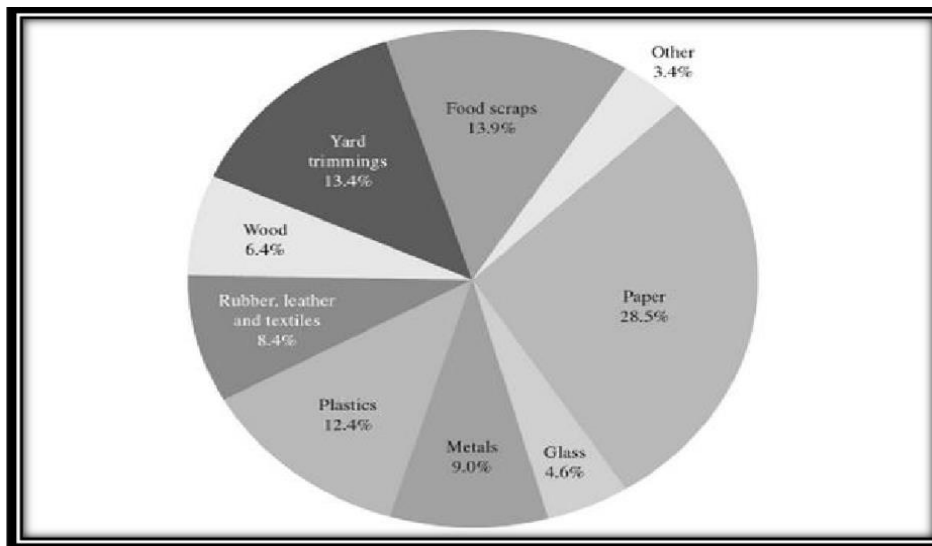
از تمامی پسماندها به جز مایعات و گازها به عنوان پسماندهای جامد یاد می‌شود. پسماندهای جامد بازرگانی و خانگی با هم پسماندهای جامد شهری (MSW^۲) را تشکیل می‌دهند. MSW شامل پلاستیک‌ها، زباله‌های طبیعی، فلزات، کاغذ و شیشه می‌شود. انجمن بین‌المللی مدیریت پسماندهای جامد (ISWA^۳)، وظیفه انهدام MSW را از طریق بازیافت، سوزاندن و دفن کردن به منظور جلوگیری از آلودگی طبیعت و زندگی بشر به عهده دارد. با توجه به شکل (۲-۷)، تفکیک MSW تولیدشده در دنیا در سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که پلاستیک‌ها بخش عظیمی از آن را تشکیل می‌دهند. (حدود

^۱ Mc Dougall et al 2008

^۲ Municipal Solid Waste

^۳ International Solid Waste Association, <https://www.iswa.org/>

۱۲/۵ درصد وزنی و ۱۴ درصد تا ۲۱ درصد حجمی). با توجه به آمارهای ارائه شده پیش‌بینی می‌شود روند تولید زباله‌های پلاستیکی، رو به رشد باشد. [۸]



شکل ۲-۷ تفکیک ۲۵۰ میلیون تن ضایعات MSW تولیدشده در دنیا در سال ۲۰۱۰

۲-۴-۴-۱ مشکلات دفن ضایعات پلاستیک‌ها در یک مدفن زباله

پلاستیک‌ها تجزیه‌ناپذیر بوده و ساختار سازه‌ای مدفن زباله را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. اما با توجه به حجم گسترده و تولید روزافزونشان، ظرفیت زیادی از مدفن را اشغال می‌کنند که این مسئله نیازمند احداث و یا توسعه‌ی مراکز دفن زباله است و هزینه‌های زیادی دربر دارد؛ در نتیجه دفن ضایعات پلاستیکی به هیچ وجه منطقی و مقرون‌به‌صرفه نیست.

۲-۴-۴-۲ مشکلات سوزاندن ضایعات پلاستیک‌ها در کوره

پلاستیک‌ها سهم مهمی در تولید گرمای احتراق در زباله‌های جامد شهری دارند؛ به‌طوری‌که سه برابر بقیه‌ی پسماندهای شهری، گرما تولید می‌کنند. باید بررسی کرد که آیا زباله‌های پلاستیکی هالوژن

دار (مثلاً پلی وینیل کلراید^۱) سهمی در انتشار گاز از کوره‌های زباله‌سوزی دارند یا خیر. تحلیل‌ها باید بر روی انتشار گازهای اسیدی سمی و دی اکسید فوران^۲ صورت گیرد. به‌علاوه تحقیقات باید بر روی سرب^۳ و کادمیوم^۴ (افزودنی‌های پلاستیک) انجام شود زیرا ممکن است فلزات سنگین در خاکسترهای سمی کوره‌ها وجود داشته باشند که دفع این خاکستر حاوی فلزات سنگین خود معضلی زیست‌محیطی به حساب می‌آید. [۱۰]

۲-۴-۳ روش‌هایی جهت کاهش آسیب پسماندهای پلاستیکی

منظور از کاهش از مبدأ، کاهش مقدار ضایعات پلاستیکی تولیدشده یا کاهش سمی بودن آنهاست؛ هدف کاهش از مبدأ، کمتر شدن میزان تولید زباله‌ها می‌باشد؛ زیرا کاهش مواد سمی از یک جزء زباله، کاری مشکل است. بنابراین تیم‌های مدیریت پسماند، قبل از اینکه محیط‌زیست به خطر بیفتد باید بر روی چگونگی محدود کردن کامل ضایعات برنامه‌ریزی کنند. عملیات کاهش از مبدأ در زیر آمده است: [۷]

۱- بهبود طراحی محصولات یا بسته‌بندی به‌منظور کاهش مقدار مصالح مصرفی

۲- صرفه‌جویی اقتصادی از طریق بسته‌بندی در سایزهای بزرگ

۳- ساخت محصولات بادوام‌تر

۴- پرهیز از به کار بردن مواد سمی در محصولات و بسته‌بندی‌ها

^۱ Polyvinyl chloride

^۲ Furan dioxide

^۳ Lead

^۴ Cadmium

۲-۴-۵ بازیافت ضایعات پلاستیکی



شکل ۲-۸ فرایند بازیافت و تبدیل پت ضایعاتی به گرانول‌های پلیمری قابل ذوب مجدد

مانند فرایند نشان داده شده برای پت در شکل (۲-۸)، بازیافت فرایند تبدیل مواد ضایعاتی به محصولات قابل استفاده است. هفت گروه پلاستیک‌ها که در جدول ۱-۲ معرفی و کاربردهای پلاستیک‌ها معرفی شده و ویژگی‌های آن‌ها ذکر شد را می‌توان برای استفاده مجدد بازیافت کرد. در بین این پلاستیک‌ها، PET و HDPE اهمیت بیشتری برای کارخانه‌های بازیافت دارند.

انواع پلاستیک‌های ذکر شده در جدول (۲-۱) می‌توانند به صورت مجزا یا به صورت ترکیب شده با یکدیگر، مثلاً بطری‌های نوشیدنی PET همراه با حلقه‌ی درپوش از جنس PVC، بازیافت شوند و به مصالح جدیدی تبدیل شوند. به فرایند بازیافت مجزای این پلاستیک‌ها، بازیافت رزین‌های همگن و به فرایند بازیافت ترکیبی آن‌ها، بازیافت ترکیبی می‌گویند.

بازیافت PET و HDPE نمونه‌ای از بازیافت رزین‌های همگن است که منجر به تولید محصولاتی با کیفیت مشابه با رزین‌های استفاده نشده می‌شود. پلاستیک‌های همگن از جمله PET و HDPE می‌توانند برای استفاده مجدد بازیافت شوند؛ بنابراین نیاز به انهدام در این پلاستیک‌ها کاهش می‌یابد.

^۱ به نوعی از شکل پلیمر بدست آمده در پتروشیمی که بصورت دانه بوده و برای مصارف و کاربردها باید ذوب و شکل دهی شود گرانول می‌گویند.

پلاستیک‌های ترکیبی یا همان رزین‌های ترکیبی بازیافت شده می‌توانند در ترکیب با موادی مانند چوب و بتن مورد استفاده قرار گیرند و دیگر امکان استفاده از محصول بازیافتی پلاستیک‌های ترکیبی در محصولات پلاستیکی همگن وجود ندارد. محصولات پلاستیکی تولیدشده از رزین‌های ترکیبی نیز به دلیل تفاوت دفعات امکان بازیافت پلیمرهای به کاررفته در آنها، نمی‌توانند مانند قبل بازیافت شوند. بنابراین، این امر انهدام نهایی ضایعات پلاستیکی را از طریق بازیافت را به تعویق می‌اندازد. [۱۰]

۲-۴-۵ عوامل محدودکننده بازیافت

- **جمع‌آوری و آماده‌سازی:** یکی از عوامل محدودکننده فرایند بازیافت، جمع‌آوری و آماده‌سازی رزین‌های منفرد یا ترکیب رزین‌هاست. رزین‌های منفرد به دلیل ترکیب پیچیده‌ی پلاستیک‌های ضایعاتی، بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در بسیاری موارد، ضایعات پلاستیکی از طیف گسترده‌ای از انواع پلاستیک‌ها تشکیل می‌شوند.

۲- **مراکز خرید و فروش:** مراکز خرید و فروش محصولات حاصل از بازیافت پلاستیک‌های PET و HDPE در مقیاس‌های بزرگ، قابل دسترسی هستند. با این وجود مراکز خرید و فروش محصولات حاصل از بازیافت ترکیب این پلاستیک‌ها، به‌سختی یافت می‌شوند و تولید این‌گونه محصولات، هنوز نوپا به حساب می‌آیند.

در ادامه به معرفی خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌ها و کاربردهای آنها در مهندسی عمران پرداخته می‌شود.

۲-۵ معرفی خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌ها^۱

۲-۵-۱ مقدمه

امروزه یکی از مواردی که در صنعت نساجی به عنوان منسوجات تخصصی و صنعتی کاربرد دارد، ژئوسنتتیک‌ها هستند. کاربرد متنوع این مواد به طور کلی در مهندسی عمران می‌باشد. در طراحی این نوع از مواد به دلیل استفاده این مواد در خاک و سنگ ارتباط نزدیکی با مهندسی ژئوتکنیک وجود دارد. امروزه در مهندسی عمران، کاربرد این مواد بسیار گسترده شده، به صورتی که مطالعه‌ی آنها خود نیازمند شاخه‌ای جدید از علم مهندسی عمران می‌باشد. به طور کلی آن بخش از دانش مهندسی، که در برگیرنده مصالح ژئوسنتتیک و کاربردهای آن می‌شود را می‌توان مهندسی ژئوسنتتیک نام نهاد. در استاندارد ASTM D۴۴۳۹ ژئوسنتتیک‌ها به این صورت تعریف می‌شوند: ژئوسنتتیک‌ها محصولاتی هستند که از مواد پلیمری ساخته شده و در پروژه‌های مهندسی عمران و ژئوتکنیک به کار برده می‌شوند [۱۱]. در جدول (۲-۳) شرح مختصری از تاریخچه تولید و کاربرد این مواد توضیح داده شده است.

جدول ۲-۳ تاریخچه تولید و کاربردهای ژئوسنتتیک [۱۲]

پیشرفت‌ها	دهه (میلادی)
اولین کاربرد پارچه‌ها در تسلیح راه‌ها به سال ۱۹۲۶ بر می‌گردد که در اداره راه کارولینای جنوبی صورت گرفت [13]. طی ۳ دهه، کاربرد پلیمرها در تولید ژئوسنتتیک‌ها گسترش یافت که روند آن	پیش از دهه ۵۰

^۱ Geosynthetics

<p>بدین شرح است: پلی وینیل کلراید (PVC) در سال ۱۹۹۳، پلی اتیلن با چگالی پایین (LDPE) و پلی آمید (PA) در سال ۱۹۳۹، پلی استایرن منبسط شده (EPS) در سال ۱۹۵۰، پلی استر (PET) در سال ۱۹۵۳، پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و پلی پروپیلن (PP) در سال ۱۹۵۵.</p>	
<p>انواع پارچه‌گونه‌ها به عنوان لایه‌های جداساز و فیلتراسیون بین خاکریز سنگ‌دانه‌ای و بسترهای ضعیف تولید شدند. پارچه‌گونه‌های بافته‌شده (یا همان ژئوتکستایل‌ها) نقشی اساسی در پروژه‌های ساحلی در هلند و ایالات متحده پیدا کرد. اداره‌ی احیای اراضی ایالات متحده از دهه ۵۰ به بعد از ژئوممبرین‌ها برای پوشش کانال‌های انتقال آب استفاده کرد.</p>	<p>دهه ۵۰</p>
<p>شرکت Rhone-Poulenc Textiles در فرانسه از ژئوتکستایل‌های بافته‌نشده سوزن‌کاری شده برای کاربردهای مختلف استفاده کرد. ژئوتکستایل‌ها نقش اصلی در بسترسازی بزرگراه‌ها و راه‌آهن‌ها پیدا کرد. پلی اتیلن‌های کلروسولفونات‌شده (CSPE) در حدود سال ۱۹۶۵ به وجود آمدند.</p>	<p>دهه ۶۰</p>
<p>اولین کاربرد ژئوتکستایل در سدسازی در سال ۱۹۷۰ از نوع ژئوتکستایل بافته‌نشده سوزن‌کاری‌شده با کارکرد فیلتراسیون برای زهکشی مصالح سنگی پایین دست در سد Valcross کشور فرانسه بود [14]. ژئوتکستایل‌ها به عنوان تسلیح‌کننده دیوارهای حائل، شیب‌های تند و غیره به کار گرفته شدند. شروع فرایند در حالت پیشرفت استانداردسازی ژئوسنتتیک‌ها با تشکیل کمیته استاندارد ASTM D-1318 و کمیته کارگروه صنایع آغاز شد. اولین نمونه‌های شبکه Tensar در آزمایشگاه‌های بلک برن شرکت Nelton در انگلستان و در سال ۱۹۷۸ ساخته شد. اولین کنفرانس با موضوع ژئوسنتتیک‌ها در سال ۱۹۷۷ در پاریس برگزار شد. به کار گرفتن ژئوفوم‌ها در خاکریزهای سبک‌وزن ابتدا در سال ۱۹۷۲ در نروژ اتفاق افتاد.</p>	<p>دهه ۷۰</p>
<p>شروع استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در ساخت محفظه‌های ایمن برای زباله‌های خطرناک زیست‌محیطی در این دهه اتفاق افتاد. سیستم‌های حفظ خاک مبتنی بر شبکه‌های لانه‌زنبوری ژئوتکستایل برای اولین بار طی دهه ۸۰ در فرانسه ایجاد و ارزیابی شد. شرکت Netlon محصول مشابه اما با ابعاد بزرگتر را تولید کرد و لایه (تشک) ژئوسلی را در سال ۱۹۸۲ معرفی کرد. اولین کاربرد زیست‌محیطی شناخته‌شده ژئونت در سال ۱۹۸۴ بود و برای تشخیص نشت زهکش‌های دو لایه ضایعات مایعات خطرناک در شهر Hopewell ایالت ویرجینیا به کار رفت. انجمن بین‌المللی ژئوسنتتیک‌ها در</p>	<p>دهه ۸۰</p>

سال ۱۹۸۳ ایجاد شد. اولین جلد مجله بین المللی با عنوان " ژئوتکستایل و ژئوممبرین‌ها" در سال ۱۹۸۴ منتشر شد.	
استانداردهای بسیاری در مورد ژئوسنتتیک‌ها زیر نظر موسسات استاندارد ASTM ایالات متحده، ISO سوئیس، BSI انگلیس، BIS هند و غیره انتشار یافت. دومین مجله بین المللی با عنوان " بین الملل ژئوسنتتیک‌ها" برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ انتشار یافت.	دهه ۹۰

۲-۵-۲ انواع ژئوسنتتیک‌ها

لغت ژئوسنتتیک از دو جزء "ژئو" به معنی زمین که بر فعالیت‌های مرتبط با خاک و سنگ ارتباط دارد و "سنتتیک" که در لغت به مفهوم مصنوعی است و به مواد مصنوعی ساخت دست بشر اشاره دارد؛ تشکیل شده است. این مواد مصنوعی معمولاً از نفت خام مشتق می‌شوند.

در حقیقت واژه‌ی ژئوسنتتیک شامل گروهی از فراورده‌های مصنوعی می‌باشد که در مهندسی عمران کاربرد دارند. از عناصر اصلی این گروه می‌توان به ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها، ژئوممبرین‌ها و کامپوزیت‌ها که معروف‌ترین عناصر این خانواده هستند، اشاره کرد.

۲-۵-۲-۱ ژئوتکستایل‌ها^۱

مطابق تعریف استاندارد ASTM D ۴۴۳۹، ژئوتکستایل‌ها یک نوع ژئوسنتتیک نفوذ پذیر هستند که پارچه‌گونه‌های منحصر به فردی را شامل می‌شوند. ژئوتکستایل‌ها در پی ساختمان و دیگر کاربردهایی که در تماس با خاک و سنگ، زمین و هرگونه مصالح مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک می‌باشند، به کار

^۱ Geotextiles

می‌رود. این مصالح به عنوان بخش جدایی ناپذیر از پروژه‌های عمرانی و مجموعه‌های ساخت بشر محسوب می‌شوند [۱۱] و [۱۲].

ژئوتکستایل یک صفحه‌ی پارچه‌گون از جنس پلیمر، مسطح، نفوذپذیر و انعطاف پذیر است. در شکل (۹-۲)، شکل‌های مختلف ژئوتکستایل‌ها نشان داده شده است.



شکل ۹-۲ شکل‌های مختلف ژئوتکستایل‌ها

از کاربردهای ژئوتکستایل‌ها می‌توان به جداسازی^۱ دو لایه، فیلتراسیون^۲، تسلیح^۳ خاک، زهکشی^۴ و آب بندی اشاره کرد که به دلیل تمرکز پژوهش حاضر بر روی تسلیح خاک ماسه‌ای، نقش مسلح کننده‌ی ژئوتکستایل توضیح داده شده است، به این صورت که ژئوتکستایل دارای مقاومت کششی

¹ Separation

² Filtration

³ Reinforcement

⁴ Drainage

می‌باشد و می‌تواند در ترکیب با خاک‌هایی که در کشش ضعیف عمل می‌کنند، مصالحی مقاوم در کشش و فشار باشد. بنابراین تقویت خاک‌های سست با ظرفیت باربری کم، اولین هدف تسلیح با استفاده از ژئوتکستایل محسوب می‌شود.

۲-۲-۵-۲ ژئوگریدها^۱

مطابق تعریف استاندارد ASTM D۴۴۳۹ ژئوگرید یک نوع ژئوسنتتیک است که از روی هم قرار گرفتن دو مجموعه نوارموازی با زاویه‌ی مختلف تشکیل شده و دارای چشمه‌هایی با اندازه‌ی مناسب است که این چشمه‌ها امکان قفل شدگی ژئوگرید با خاک، سنگ یا دیگر مواد ژئوتکنیکی را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که نوارهای ژئوگرید دارای مقاومت کششی مطلوبی هستند و دارای اتصال در بخش‌های گرهی می‌باشند. به حفره‌های موجود بر روی ژئوگریدها چشمه می‌گویند که اضلاع این چشمه‌ها بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد (ابعاد سوراخ‌های ژئوتکستایل‌ها کمتر از ۱۰ میلی‌متر می‌باشد). کاربرد اصلی ژئوگریدها در تسلیح خاک می‌باشد. به طور کلی ژئوگریدها را می‌توان به صورت شکل دادن، چسباندن و یا با در هم بافتن آماده کرد که نوع شکل دادن سبب ایجاد دو نوع ژئوگرید تک محوره^۲ و دو محوره^۳ می‌شود.

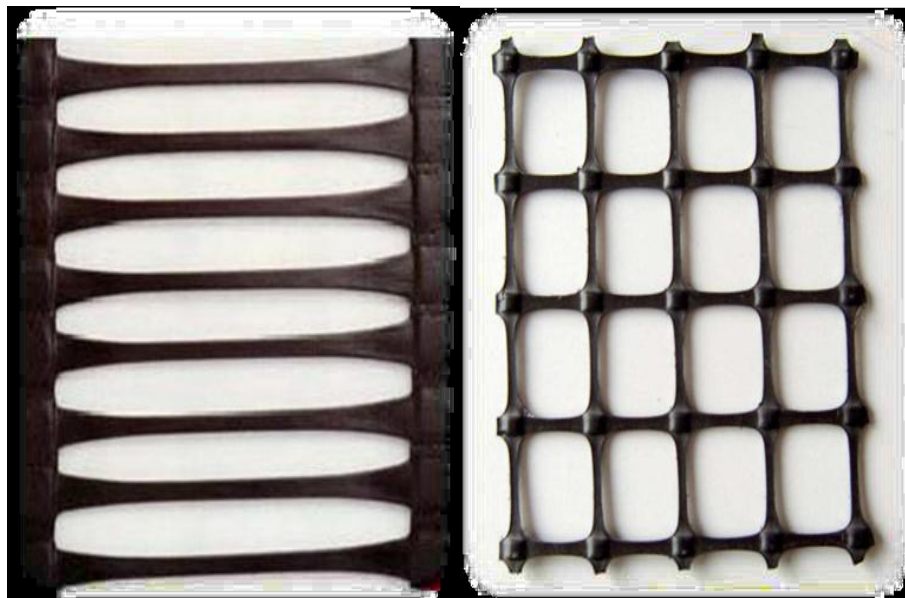
ژئوگریدهای تک محوره از کشیده شدن امتداد طولی در ورقه‌های پلیمری سوراخ شده به وجود می‌آیند. امتداد طولی این ژئوگریدها مقاومت بیشتری نسبت به امتداد عرضیشان دارد. ژئوگرید دو محوره به ژئوگریدی گفته می‌شود که از ایجاد کشش در هر دو امتداد طولی و عرضی ورق پلیمری سوراخ کاری شده تولید می‌شود، بنابراین این نوع از ژئوگرید در هر دو امتداد طولی و عرضی، مقاومت

^۱Geogrids

^۲Uniaxial Geogrid

^۳Biaxial Geogrid

یکسانی از خود نشان می‌دهد. در شکل (۲-۱۰) ژئوگرید تک‌محوره و دومحوره نشان داده شده است [۱۱] و [۱۲].



شکل ۲-۱۰ از چپ به راست به ترتیب ژئوگرید تک‌محوره و دومحوره

۲-۵-۲ ژئوممبرین‌ها

ژئوممبرین‌ها محصولاتی غیرقابل نفوذ و یا با نفوذ پذیری پایینی هستند که به عنوان عایق رطوبتی جهت آب بند کردن، ساخت دریاچه‌های مصنوعی، استخرهای صنعتی و غیره کاربرد دارند [۱۲].

۲-۵-۲-۴ ژئونت‌ها

ژئونت‌ها رشته‌های موازی باهم می‌باشند که با زاویه‌ی ثابتی (معمولا ۶۰ تا ۹۰ درجه) همدیگر را قطع کرده و شبکه‌ی متراکم و منظمی تشکیل می‌دهند. از این منسوجات در ساخت گابیون‌ها استفاده می‌شود. از جمله کاربردهای این منسوج، استفاده برای زهکشی می‌باشد [۱۲].

۲-۵-۲-۵ ژئوکامپوزیت‌ها

با استفاده‌ی ترکیبی از موارد یاد شده محصولاتی با چند کارایی به طور همزمان تولید می‌شوند که ژئوکامپوزیت نام دارند. ژئوکامپوزیت‌ها کارکرد موثر و ویژه‌ای نسبت به حالت‌های غیر ترکیبی دارند. از انواع متداول ژئوکامپوزیت بر حسب اجزای تشکیل دهنده‌ی آن‌ها می‌توان به ژئوتکستایل-ژئوگرید، ژئوتکستایل-ژئونت، ژئوتکستایل-ژئوممبرین، ژئوممبرین-ژئوگرید و غیره اشاره کرد [۱۲].

برخی از مهم‌ترین کاربردهای ژئوسنتتیک‌ها بر حسب نوع آن‌ها در جدول (۲-۴) آورده شده است.

جدول ۲-۴ کاربردهای اصلی ژئوسنتتیک‌ها در فعالیت‌های عمرانی [۱۱]

عملکرد اصلی ژئوسنتتیک					انواع ژئوسنتتیک
آب بند نمودن	زهکشی	فیلتراسیون	تسلیح و تقویت	جداسازی	
کاربرد ندارد ^۱	کاربرد دارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	کاربرد دارد	ژئوتکستایل‌ها
کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد دارد	کاربرد ندارد ^۲	ژئوگریدها
کاربرد ندارد	کاربرد دارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	ژئونت‌ها
کاربرد دارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد دارد ^۳	ژئوممبرین‌ها
کاربرد ندارد	کاربرد دارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	ژئوپایپ‌ها
کاربرد دارد ^۴	کاربرد دارد ^۴	کاربرد دارد ^۴	کاربرد دارد ^۴	کاربرد دارد ^۴	ژئوکامپوزیت‌ها

۱- مگر در حالتی که ژئوتکستایل توسط قیر و یا سایر مواد پلیمری اندود شود.

۲- مگر در شرایطی که مصالح طبیعی درشت دانه باشد.

۳- معمولاً بعنوان عملکرد ثانویه بکار برده می‌شوند.

۴- بستگی به نحوه طراحی، ساخت و نوع ژئوکامپوزیت دارد.

۲-۵-۳ مواد اولیه و فرایند تولید ژئوسنتتیک‌ها

همانطور که پیشتر گفته شد، ژئوسنتتیک‌ها از مواد پلیمری ساخته می‌شوند. کلمه‌ی Polymer از دو واژه‌ی یونانی Poly به معنای بسیار و Meros به معنی اجزا ساخته شده و در کل به موادی با اجزای بسیار گفته می‌شود. این اجزا در کنار هم آرایش پیدا کرده و ماده‌ای واحد می‌سازند. اصطلاحاً هر جزء یا واحد پلیمر را مونومر می‌گویند. از کنار هم قرار گرفتن مونومرها، پلیمرها ساخته می‌شوند [۱۲]

متداول‌ترین پلیمرهای مصرفی در ساخت ژئوسنتتیک‌ها، پلی پروپیلن (PP)، پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و پلی اتیلن ترفتالات (PET) می‌باشند.

انواع پلیمرهای به کار رفته در ساخت ژئوسنتتیک‌ها به صورت جدول (۲-۵) می‌باشد.

جدول ۲-۵ پلیمرهای اصلی برای تولید انواع ژئوسنتتیک‌ها [۱۵]

پلیمر	نوع ژئوسنتتیک
پلی اتیلن (PE)	ژئونکستایل، ژئوممبرین، ژئوگرید، ژئوکامپوزیت، ژئوپایپ، ژئونت
پلی پروپیلن (PP)	ژئونکستایل، ژئوممبرین، ژئوگرید، ژئوکامپوزیت
پلی وینیل کلراید (PVC)	ژئوممبرین، ژئوپایپ، ژئوکامپوزیت
پلی استر (PET)	ژئونکستایل، ژئوگرید
نایلون (PA)	ژئونکستایل، ژئوگرید، ژئوکامپوزیت
پلی استایرن (PS)	ژئونکستایل، ژئوفوم

در ادامه پیشینه‌ی تسلیح خاک با مسلح کننده‌های طبیعی و مصنوعی به تفصیل آورده شده است.

۲-۶ مطالعات پیشین در زمینه‌ی تأثیر مسلح کننده بر خاک

در این بخش به بررسی اثر تسلیح با الیاف گوناگون بر مقاومت خاک‌های مختلف در تحقیقات پیشین محققین پرداخته شده است.

۲-۶-۱ بررسی افزایش مقاومت مخلوط خاک-مسلح کننده

اندرسلند و ختاک^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۷۹، از پالپ فشرده‌ی خشک برای تقویت خاک اشباع کائولینیت استفاده کردند و با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، دریافتند که افزودن فایبر به نمونه منجر به افزایش مقاومت فشاری و افزایش کرنش شکست^۲ می‌شود [۱۶].

گری و اوهاشی^۳ در سال ۱۹۸۳، تحقیقاتی را در زمینه‌ی تسلیح ماسه خشک با الیاف مختلف طبیعی، سنتتیک و سیم‌های فلزی انجام دادند. آزمایش‌های انجام‌شده، برش مستقیم بوده و خصوصیات مکانیکی خاک مسلح، مورد بررسی قرار گرفت. الیاف تسلیح، شامل نی‌های رایج در سبذبافی، پلاستیک‌های PVC، پالمیرا^۴ و سیم‌های مسی بود. قطر الیاف استفاده‌شده، از ۱ تا ۲ میلی‌متر، با طول‌های ۲ تا ۲۵ سانتی‌متر و به میزان ۰/۲۵٪ تا ۰/۵٪ از وزن ماسه خشک بود.

نتایج نشان داد که افزایش مقاومت برشی به‌صورت مستقیم با الیافی که در جهت ۶۰ درجه نسبت به سطح برش قرار داشتند، متناسب بود. آن‌ها دریافتند که نتایج این آزمایش‌های راه‌حل مشکلات مختلفی، مانند پایدارسازی خاک‌های ماسه‌ای، درشت‌دانه در شیب‌های گرانیته‌ی، پایدارسازی سواحل

^۱ Andersland & Khattak

^۲ Failure Strain

^۳ Gray & Ohashi

^۴ فیبری سخت که از درخت پالم (نخل) در آفریقای جنوبی جمع‌آوری می‌شود.

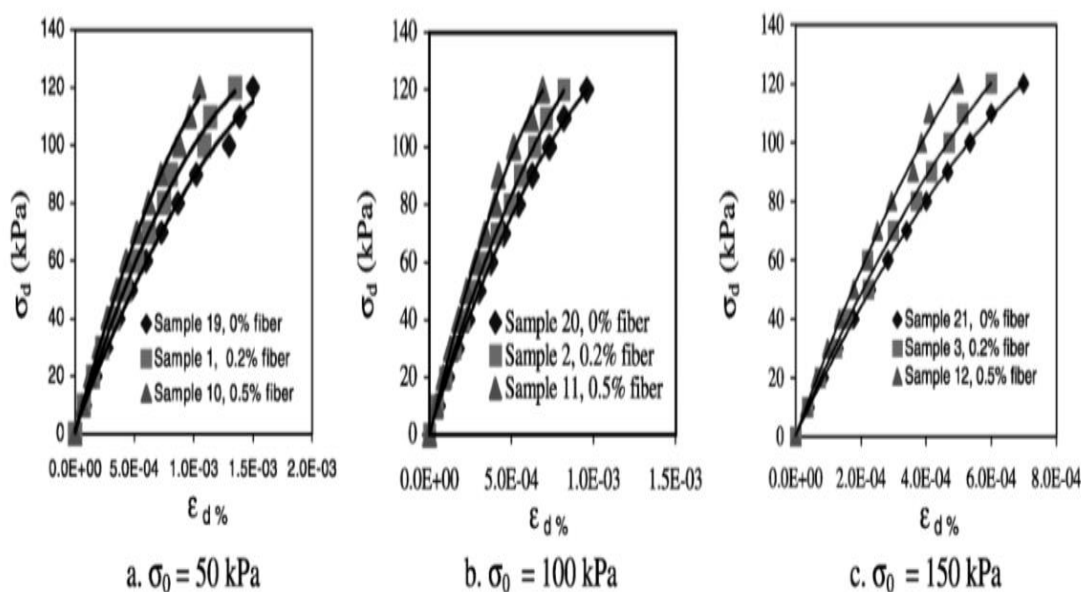
توسط ریشه‌ی گیاهان و همچنین پایدارسازی خاک‌های با مدول الاستیسیته پایین کمک می‌کند. [۱۷]

ماهر^۱ و هو^۱ در سال ۱۹۹۳ آزمایش‌های سه محوری فشاری و سه محوری سیکلی را بر روی ماسه ترکیب‌شده با سیمان و مسلح شده با الیاف پت با توزیع تصادفی انجام دادند. نتایج نشان داد که تسلیح با الیاف، به‌طور چشم‌گیری مقاومت فشاری و کششی ترکیب ماسه سیمانیه را افزایش می‌دهد. این افزایش مقاومت با افزایش درصد الیاف و افزایش طول الیاف، بیشتر شده است. حداکثر تنش برشی نمونه مسلح شده نشان داد که در اثر افزودن الیاف، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بین‌دانه‌ای خاک نیز افزایش پیدا کرد. ایشان با بررسی آزمایش‌های سه محوری دریافتند که الیاف میزان ظرفیت سربار حداکثر را نیز افزایش داد. [۱۸]

لی و دینگ^۲ در سال ۲۰۰۲ خاک چسبنده‌ای که از مناطقی با شیب تند برداشت‌شده بود را با استفاده از الیاف پت مسلح کرده و با انجام آزمایش سه محوره‌ی سیکلی در سه تنش محصورکننده ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه‌های مسلح شده، همان‌طور که در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است، مشاهده کردند با افزایش درصد مسلح‌کننده در هر سربار، تنش انحرافی افزایش پیدا کرد که نشان می‌دهد مقاومت نمونه بیشتر شده و زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافت. این تغییر، امکان برداشت خاک از سطوح با شیب بیشتر را فراهم می‌آورد. [۱۹]

^۱ Maher & Ho

^۲ Li & Ding

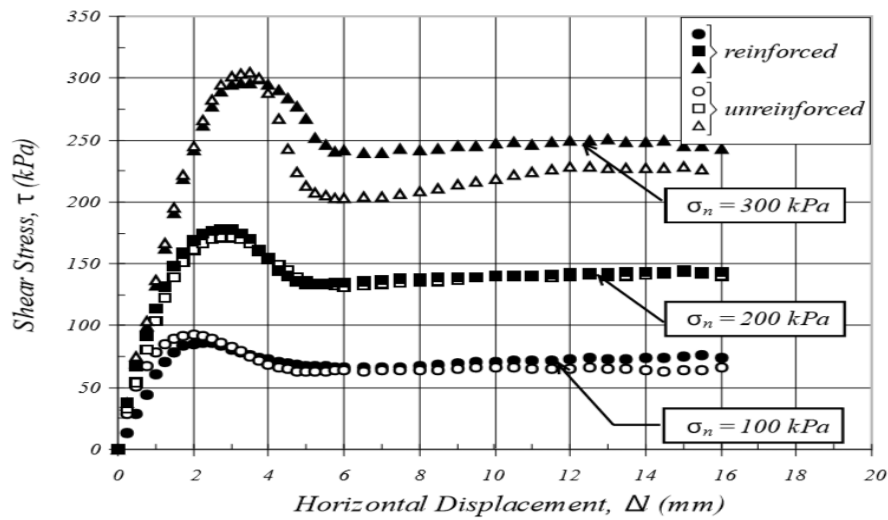


شکل ۲-۱۱ نمودارهای تنش انحرافی- کرنش حاصل تحقیقات Li و Ding در سال ۲۰۰۲ [۱۹]

یتیم‌اقلو و سالباس^۱ در سال ۲۰۰۳ مطالعه‌ای بر روی ماسه‌ی مسلح شده با الیافی که به صورت تصادفی و پراکنده در خاک پخش شده بودند، انجام دادند. الیاف پروپیلن به قطر ۰/۰۵ و طول ۲۰ میلی‌متر، به میزان ۰/۱٪، ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۱٪ از وزن ماسه، به خاک اضافه شدند. به منظور تعیین اثر تسلیح با الیاف بر مقاومت برشی خاک، آزمایش‌های برش مستقیم تحت ۳ سربار قائم، بر روی ماسه‌ی مسلح و غیرمسلح انجام شد.

همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ در نمودارهای تنش برشی بر حسب کرنش برشی نشان داده شده است، با توجه به شیب اولیه‌ی نمودارها و نقطه‌ی اوج آن‌ها، تسلیح ماسه با الیاف پلی‌پروپیلن، تأثیری بر سختی اولیه و مقاومت برشی بیشینه‌ی خاک نداشت، اما با افزایش سربار قائم، شکل‌پذیری خاک را بهبود بخشید و رفتار اتساعی و افت مقاومت پس از گسیختگی در خاک کاهش داده است. [۲۰]

^۱ Yetimoglu & Salbas



شکل ۲-۱۲ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی خروجی تحقیقات یتیم اقلو و سالباس [۲۰]

تان و پارک^۱ در سال ۲۰۰۵ در مورد مناسب بودن دیوار خاک - پلی پروپیلن تحقیق کردند. مطالعه بر روی دیواره‌ی خاکی ماسه سیلتی (SM) مسلح شده الیاف پلی پروپیلن به طول ۶۰ میلی‌متر و مقدار ۲٪ از وزن خاک صورت گرفت که در بالای دیواره، بارگذاری معادل بستر ریل قطار صورت گرفت. در شکل (۲-۱۳) فرایند بارگذاری نشان داده شده است.

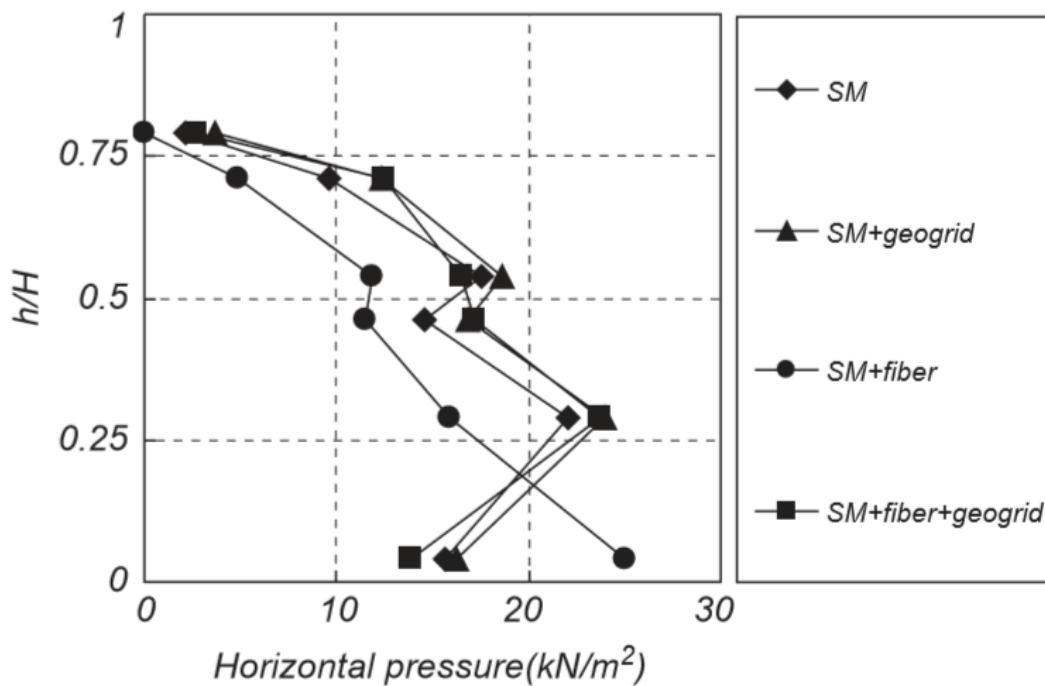


شکل ۲-۱۳ بارگذاری دیواره‌ی خاک مسلح در مجاورت ریل قطار با مقیاس واقعی در پژوهش تان و پارک در سال

[۲۱]۲۰۱۵

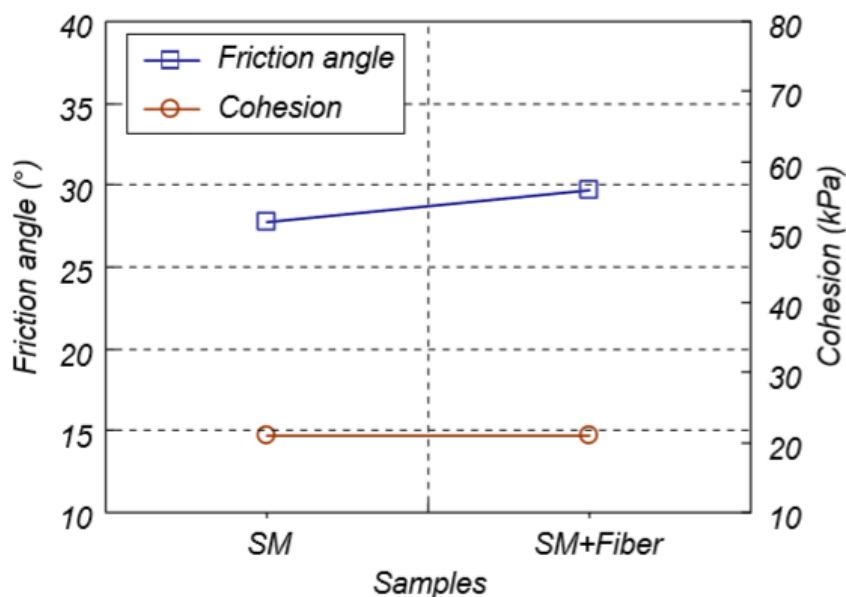
^۱ Tan & Park

همان‌طور که در شکل ۲-۱۴) نشان داده شده است، تحلیل‌های فیزیکی صورت گرفته بر روی دیوار خاکی مسلح نشان داد که تسلیح خاک با الیاف، باعث بهبود پایداری دیوار، کاهش فشار زمین و نشست دیوار شده است. نمودار همچنین نشان می‌دهد که در بین مسلح‌کننده‌ها، ترکیب ماسه و فایبر، فشار جانبی بیشتری نسبت به مسلح‌کننده‌های دیگر تحمل می‌کند. [۲۱]



شکل ۲-۱۴ نمودار تغییرات فشار جانبی وارد بر دیوار مسلح شده بر حسب تغییرات عمق (h) ارتفاع دیوار و H عمق خاک) [۲۱]

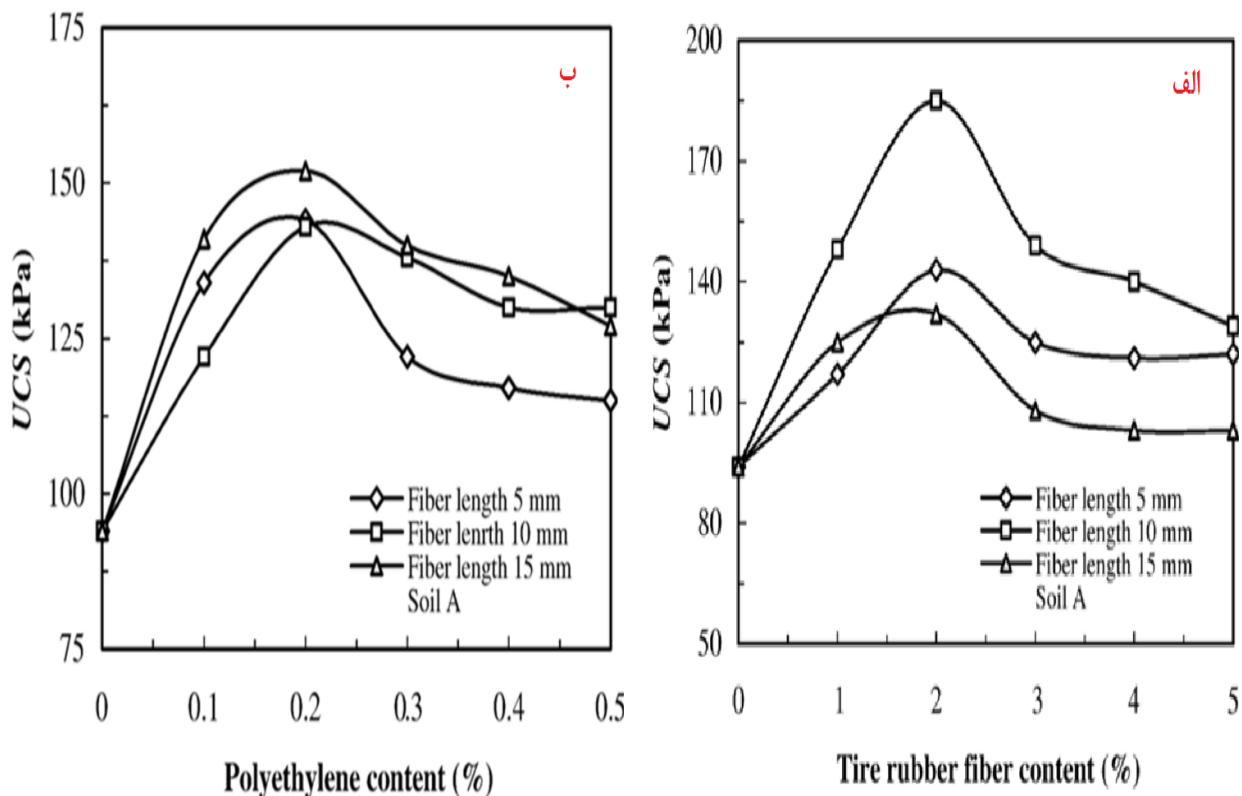
نمودار خروجی دیگری از نتایج تحقیقات تان و پارک، در شکل ۲-۱۵) نشان داده شده است. این نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ی خاک را در دو حالت مسلح و غیرمسلح بررسی می‌کند و نشان می‌دهد که در اثر تسلیح، زاویه اصطکاک داخلی خاک تغییری نکرده و چسبندگی افزایش پیدا کرده است. [۲۱]



شکل ۲-۱۵ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نمونه‌ی غیر مسلح و مسلح [۲۱]

اکبولوت و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۷، با استفاده از الیاف تایر و الیاف سنتتیک، موفق به بهبود خصوصیات خاک‌های رس شدند. این امر از طریق افزودن ۲٪ وزنی الیاف تایر و ۰/۲٪ وزنی پلی‌اتیلن و الیاف پلی‌پروپیلن به قطر ۰/۰۱ میلی‌متر و طول ۵ تا ۶۰ میلی‌متر صورت گرفت. به منظور تعیین خصوصیات مهندسی تایر، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، آزمایش‌های شناسایی بر روی آن‌ها انجام شد. سپس آزمایش‌های فشاری محصور نشده، برش مستقیم، بر روی نمونه‌های مسلح و غیرمسلح، به منظور تعیین خصوصیات مقاومتی آن‌ها انجام گرفت. در شکل ۲-۱۶) نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده نشان داده است که مقاومت فشاری محصور نشده‌ی نمونه‌ها بعد از تسلیح به طور قابل توجهی بهبود یافته است؛ این امر در مورد الیاف تایر از طول ۵ به ۱۰ میلی‌متر صادق بوده و در طول بیشتر، روند کاهشی بوده است؛ اما در تسلیح با پلی‌اتیلن، با افزایش طول مسلح کننده، نمونه افزایش مقاومت داشته است. [۲۲]

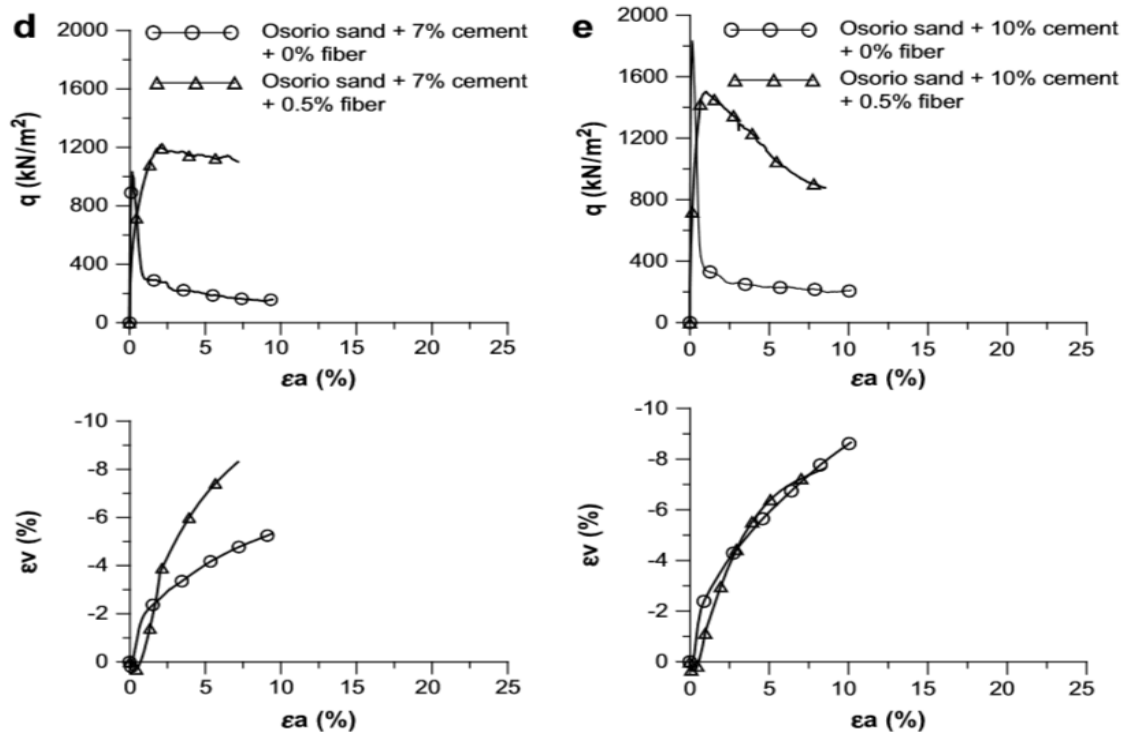
^۱ Akbulut et. al



شکل ۲-۱۶ تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در خاک مسلح شده با الف) الیاف تایر و ب) الیاف پلی اتیلن با ۳ طول [۲۲]

کنسولی و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۹ تحقیقاتی بر روی ترکیب ماسه با صفر و ۷ و ۱۰ درصد سیمان در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با ۰/۵ درصد وزنی الیاف پلی اتیلن انجام داده‌اند. ترکیب ماسه و سیمان، یکنواخت بوده و الیاف پلی اتیلن به قطر ۰/۰۲۳ میلی‌متر، طول ۲۴ میلی‌متر و مقدار ۰/۵ درصد از وزن ماسه‌ی خشک به خاک اضافه شدند. سپس آزمایش‌های سه محوری بر روی نمونه‌های بدون الیاف و با الیاف انجام شد که نتایج برخی از آن‌ها در شکل ۲-۱۷ آورده شده‌است.

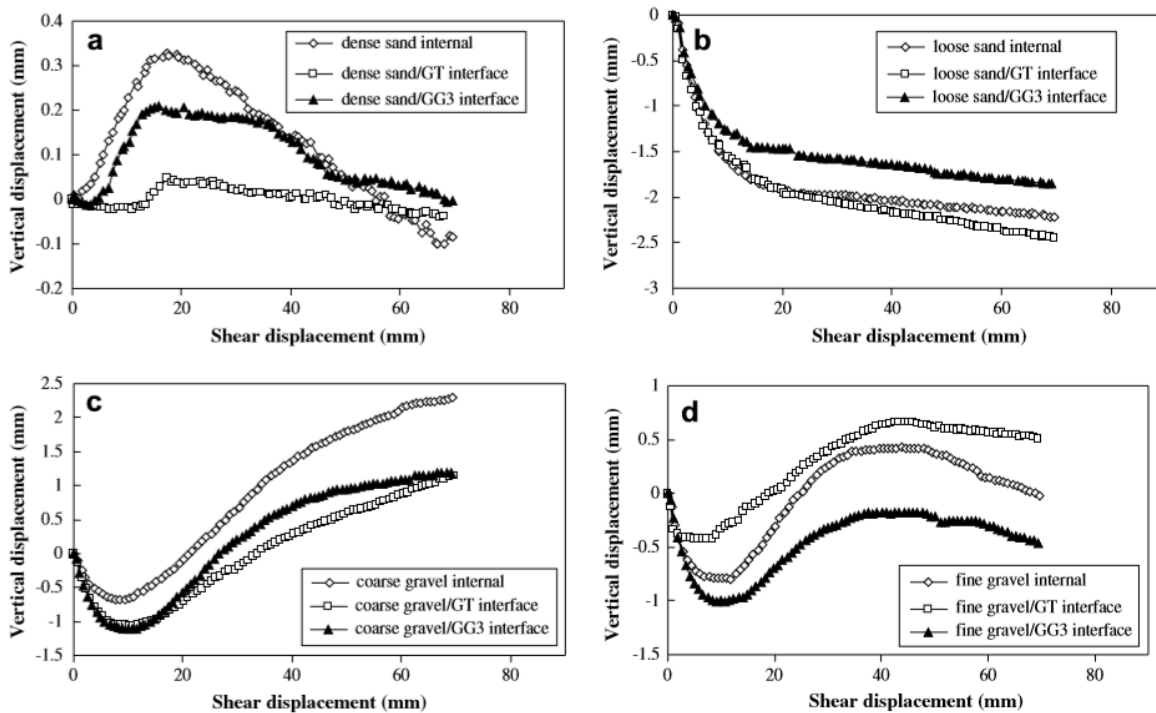
^۱ Consoli et.al



شکل ۲-۱۷ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی-کرنش محوری در بالا و تغییرات کرنش قائم-کرنش محوری در پایین [۲]

با توجه به نمودارهای شکل ۲-۱۷)، نمونه‌های ترکیب ماسه و سیمان، مقاومت اولیه‌ی بالایی از خود نشان می‌دهند ولی با رفتار ترد، در کرنش پایین دچار گسیختگی می‌شوند. این در صورتی است که در حضور الیاف مسلح کننده، تنش انحرافی همواره کاهشی بوده و رفتار نمونه سست بوده است. همچنین تغییرات حجم در نمونه‌های بدون مسلح کننده، در کرنش‌های پایین، ناگهانی و زیاد بوده است که دلالت بر رفتار ترد و اتساعی خاک دارد و فقط در ۱۰ درصد سیمان، تغییرات حجم نمونه مسلح و غیرمسلح، یکسان بوده است و در دیگر درصد‌های سیمان، همواره کرنش حجمی نمونه‌های فاقد مسلح کننده، بیشتر بوده است. [۲]

لیو، هو و هوانگ^۱ در سال ۲۰۰۹، با استفاده از ژئوگریدهای مشبک GT^۲ از جنس پلی اتیلن ترفتالات (پت) و GG3^۳ از جنس پلی پروپیلن، خاک ماسه‌ای، یک نوع خاک رسی و دو نوع خاک دانه‌ای را مسلح کرده و کرنش‌های برشی خاک را با استفاده از ژئوگرید در آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، کنترل کرده و پارامترهای مقاومت برشی بررسی کرده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۸ در نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی نشان داده شده است، آن‌ها مشاهده کرده‌اند که در اثر تسلیح، کرنش‌های قائم نمونه‌های خاک، کنترل شده و رفتار اتساعی خاک متراکم، کاهش یافته است. همچنین در خاک‌های سست، ژئوگرید GG3 و در خاک‌های متراکم، ژئوگرید GT به دلیل مقاومت کششی بیشتر، بازدهی بهتری داشته است. [۲۳]



شکل ۲-۱۸ نمودارهای کرنش قائم-کرنش برشی برای چهار نوع خاک به کاررفته در تحقیقات Lui و همکاران [۲۳]

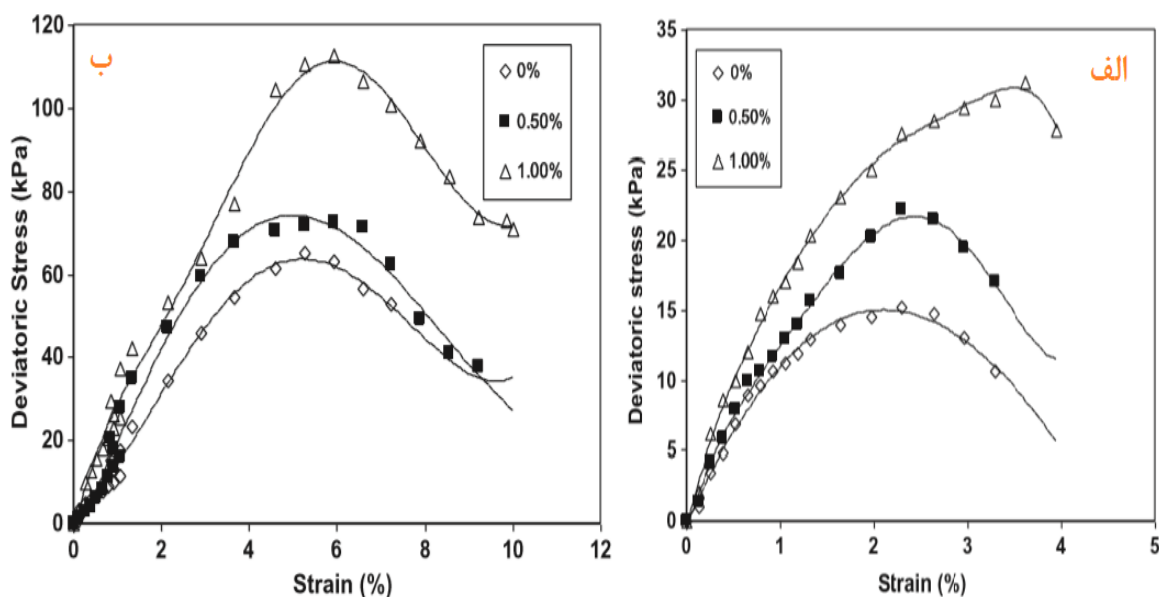
^۱ Liu & Ho & Huang

^۲ ژئوتکستایل

^۳ ژئوگرید سه جهتی

سیواکومار بابو و چوکسی^۱ در سال ۲۰۱۱، موفق به تحلیل پاسخ تنش- کرنش خاک با پلاستیک بازیافتی شدند. مقدار الیاف پلاستیک از ۰٪ تا ۰/۱٪ بود. در این تحقیق، خاک قرمز و ماسه با ذراتی بین ۷ میکرومتر تا ۴۲۵ میکرومتر همراه با الیافی به طول ۱۲ میلی‌متر و عرض ۴ میلی‌متر با یکدیگر مخلوط شدند.

به منظور تعیین خصوصیات خاک، آزمایش‌هایی مانند حدود اتربرگ، چگالی ویژه و تراکم انجام شد. سپس جهت تعیین پاسخ تنش-کرنش خاک مسلح، آزمایش‌های تراکم محصور نشده، تحکیم یافته‌ی زهکش نشده، تراکم سه محوری و تراکم تک‌محوره انجام شدند. تغییرات تنش انحرافی برای آزمایش‌های فشاری محصور نشده روی دو نوع خاک مورد آزمایش در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است.



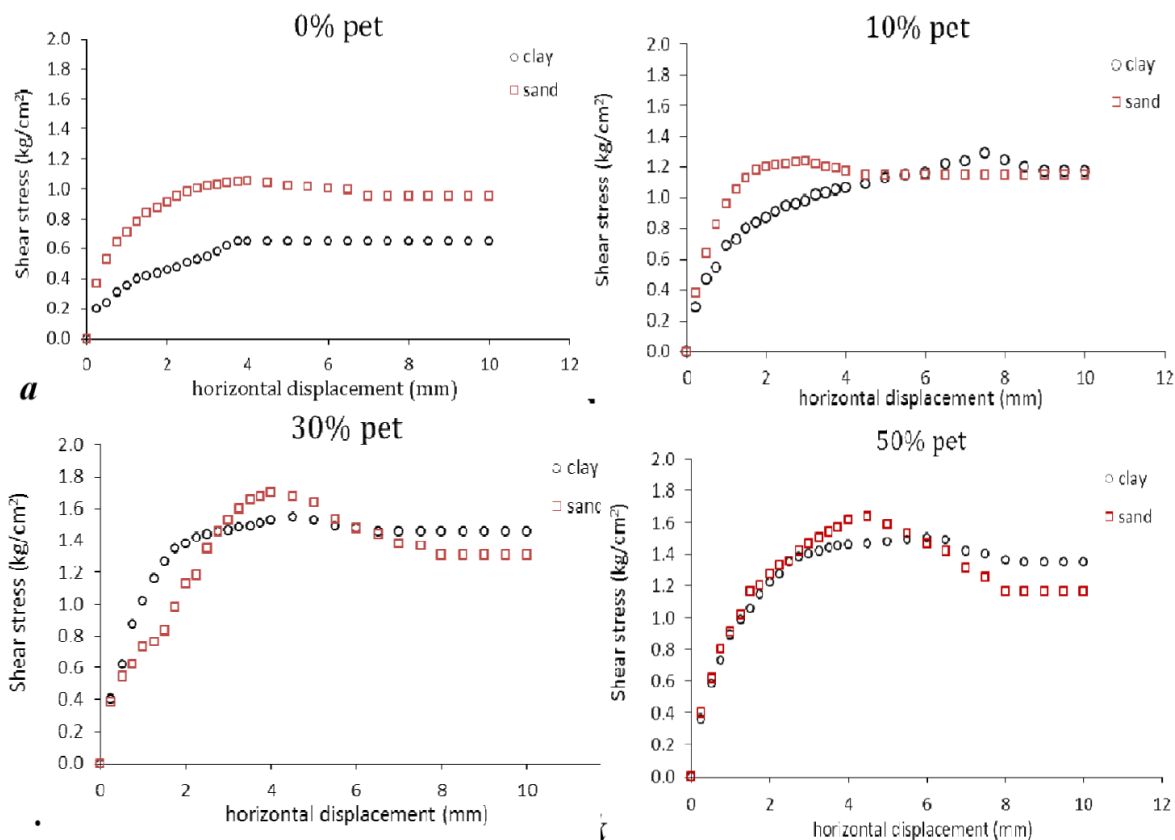
شکل ۲-۱۹ تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در درصد‌های مختلف مسلح کننده برای الف) خاک ماسه‌ای و

ب) خاک رس قرمز [۲۴]

^۱ Sivakumar Babu & Chouksey

از آزمایش‌های این‌گونه دریافت شد که در آزمایش فشاری محصور نشده، به‌طور متوسط مقاومت محصور نشدگی در هر دو نوع خاک مسلح شده با ۱٪ پلاستیک، به میزان ۷۳/۸٪ بیشتر از خاک غیرمسلح بود. [۲۴]

از درپور و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از خرده پت، تسلیح دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی را انجام دادند؛ آن‌ها از براده‌های پت با ابعاد رد شده از الک شماره ۱۰، و با درصدهای وزنی صفر تا ۵۰ درصد برای تسلیح استفاده نموده و آزمایش‌های تراکم و برش مستقیم کوچک‌مقیاس را بر روی نمونه‌های مسلح انجام دادند. نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی حاصل از این آزمایش‌ها، در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است.

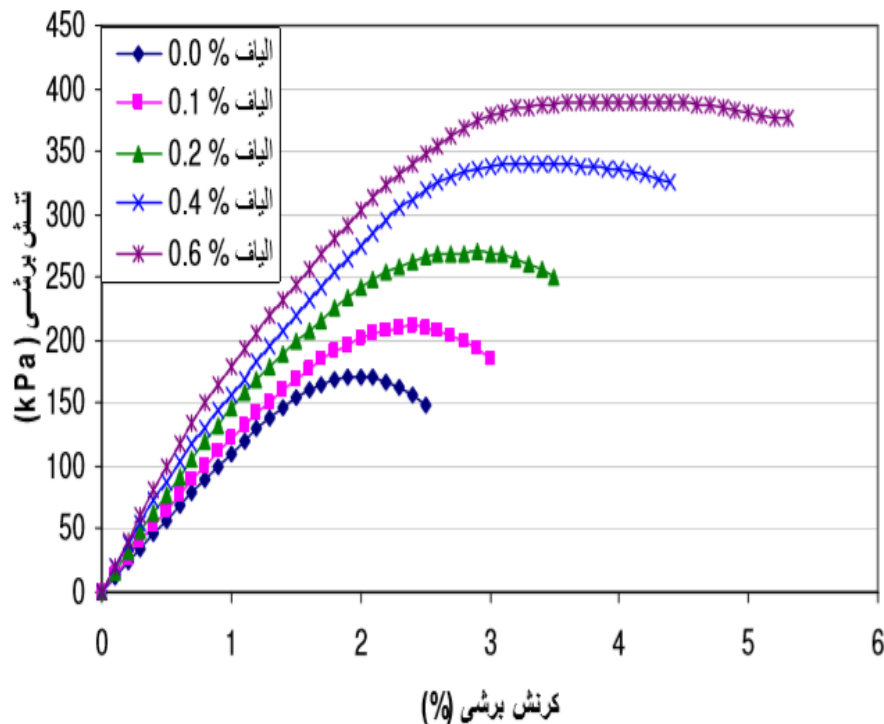


شکل ۲۰-۲ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی برای دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی در درصدهای مختلف مسلح

کننده [۲۵]

همان‌طور که در شکل ۲-۲۰) نشان داده شده است، افزودن مسلح کننده‌ی پت، موجب افزایش مقاومت برشی در هر دو نوع خاک شده که این اثر تسلیح، در خاک ماسه‌ای بیشتر از خاک رسی بوده است. و همچنین درصد بهینه‌ی مسلح کننده در خاک ماسه‌ای بیشتر از خاک رس بود. همچنین با توجه به کاهش نسبی مقاومت در ۵۰ درصد پت، ۳۰ درصد برای این آزمایش‌ها، درصد پت بهینه بوده است. [۲۵]

سیم نگار و کمالی در سال ۲۰۱۱، به مطالعه‌ی رفتار مکانیکی ماسه‌ی لای دار مسلح شده با ۰/۱ تا ۰/۶ درصد الیاف پت پرداختند و بر روی نمونه‌های مسلح، آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری)، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و برش مستقیم انجام دادند که نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم در شکل ۲-۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۱) اثر تسلیح خاک بر نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی تحقیقات سیم نگار و کمالی [۲۶]

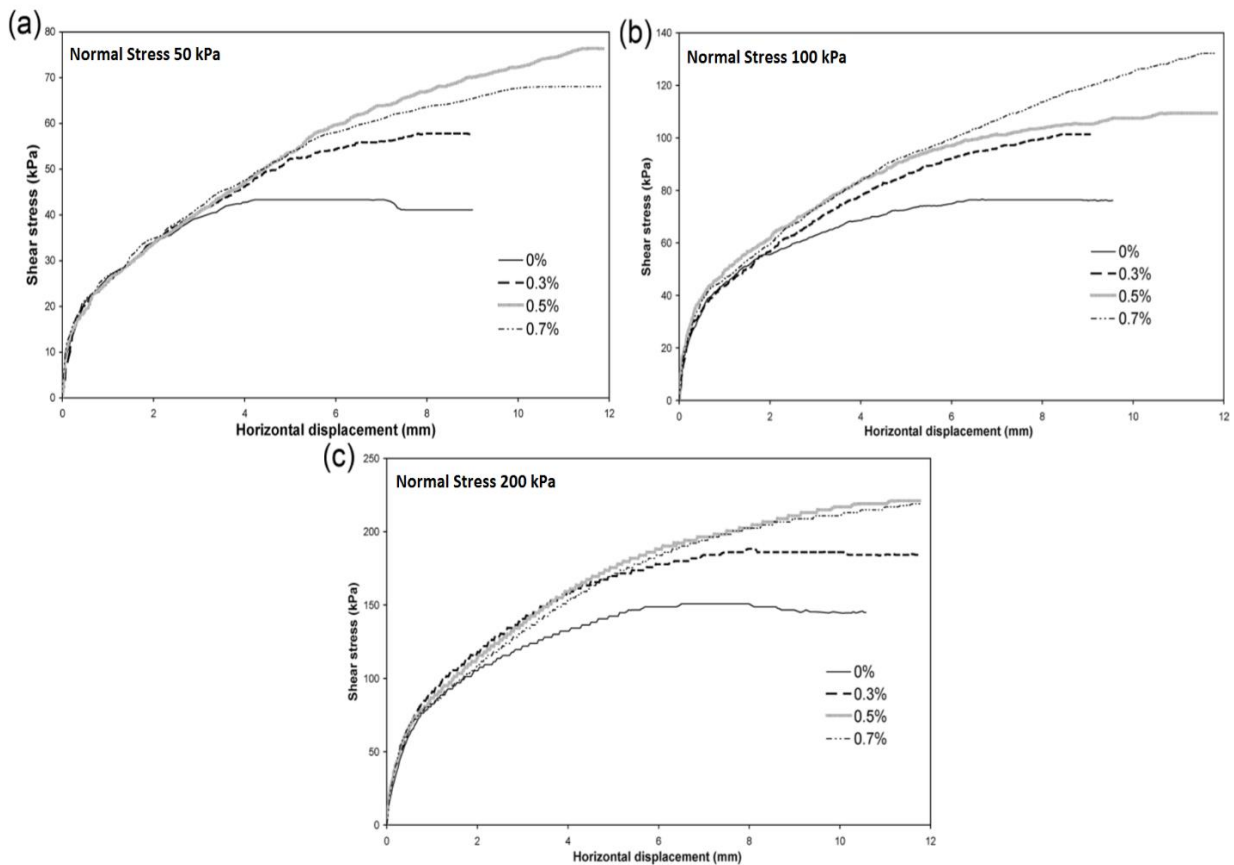
با توجه به نمودار شکل ۲-۲۱)، افزودن الیاف به خاک موجب افزایش مقاومت برشی خاک شده و رسیدن به تنش حداکثر در کرنش‌های بالاتر، نشان می‌دهد تسلیح موجب افزایش شکل‌پذیری خاک شده است. [۲۶]

آچاریا و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۳، به بررسی بهبود مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک رس همراه با خرده‌های بطری‌های پت پرداخته‌اند. خاک رسی با ۱۰٪ و ۲۰٪ ماسه، مخلوط شد و خرده‌های پت با طول‌هایی از ۵ میلی‌متر تا ۱۵ میلی‌متر و عرض ۵ میلی‌متر و مقدار ۲٪ تا ۵٪ از وزن خاک، به آن اضافه شدند. به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی خاک و مخلوط خاک-الیاف، آزمایش‌های حدود ات‌برگ، تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم انجام شد. همچنین آزمایش‌هایی از قبیل به دست آوردن پهنا، ضخامت، کشش و چگالی، جهت به دست آوردن مشخصات خرده‌های پت، صورت گرفت. نتایج آزمایش‌های نشان داد که افزایش درصد پت تا مقدار ۱٪، مقاومت فشار محصور نشده‌ی مخلوط خاک-الیاف هم افزایش یافت. [۲۷]

آناگنوستو پلوس و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار مهندسی خاک مسلح شده با پلی‌پروپیلن پرداختند. خاک ماسه سیلتی با الیاف پلی‌پروپیلن به مقدار ۰/۳٪، ۰/۵٪ و ۰/۷٪ مسلح شده است. الیاف پروپیلن، مورد آزمایش‌هایی از قبیل تعیین قطر، طول، چگالی، مقاومت کششی و کشیدگی در نقطه‌ی شکست قرار گرفتند و آزمایش‌های دانه‌بندی و چگالی ویژه برای تعیین خصوصیات خاک انجام شده است. نهایتاً آزمایش برش مستقیم با نتایج شکل ۲-۲۲) بر روی خاک صورت گرفته است. [۲۸]

^۱ Acharyya et.al

^۲ Anagnostopoulos



شکل ۲-۲۲ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های مسلح شده با PP تحت سه سربار [۲۸]

با توجه به شکل ۲-۲۲)، در تمامی سربارها، افزایش درصد الیاف تا ۰/۵ درصد از وزن خاک ماسه سیلتی باعث بهبود مقاومت برشی بیشینه گردیده و مقاومت، در ۰/۷ درصد کاهش نسبی داشته است

که نشان می‌دهد ۰/۵ درصد، مقدار بهینه‌ی مسلح کننده بوده است. [۲۸]

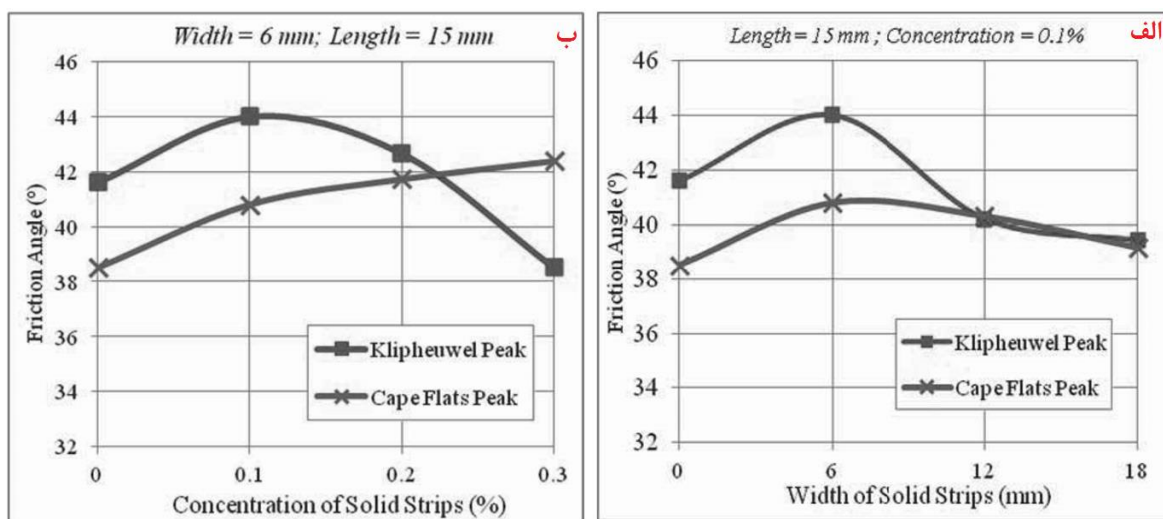
شبت و کالومبا^۱ در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار مهندسی خاک ماسه‌ی کلیفول^۲ و ماسه‌ی کیپ^۳ مسلح شده با پلاستیک‌های ضایعاتی پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) به طول ۱،۵، ۳۰ و ۴۵ میلی‌متر، عرض ۶ میلی‌متر تا ۱۸ میلی‌متر و مقادیر ۰/۱٪ و ۰/۲٪ و ۰/۳٪ پرداخته‌اند. خصوصیات مهندسی و

^۱ Chebet & Kalumba

^۲ klipheuwel Sand

^۳ Cape Sand

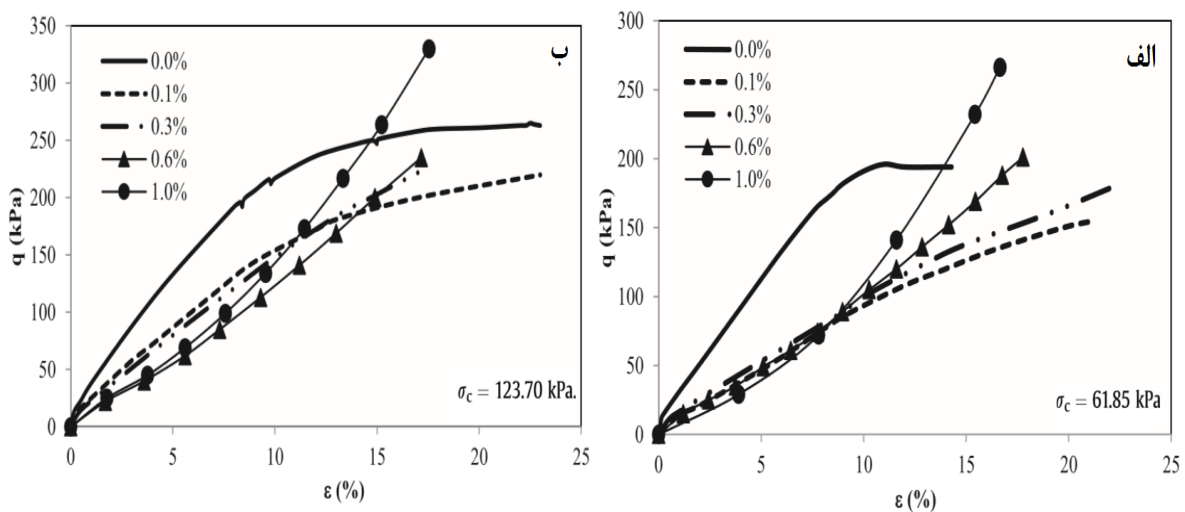
فیزیکی ماسه از طریق آزمایش‌های تعیین چگالی ویژه و دانه‌بندی تعیین شده‌اند. همچنین خصوصیات مکانیکی الیاف مانند چگالی، مدول کششی و مقاومت کششی مشخص گردید. سپس آزمایش برش مستقیم بر روی خاک مسلح برای تنش‌های نرمال ۲۵ کیلوپاسکال، ۵۰ کیلوپاسکال و ۱۰۰ کیلوپاسکال با نرخ برش ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده که تغییرات زاویه اصطکاک هر دو نوع خاک، برحسب تغییرات عرض و تراکم یا تمرکز مسلح کننده‌ها، در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است. [۲۹]



شکل ۲-۲۳ نمودارهای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برحسب: الف) عرض مسلح کننده و ب) تراکم مسلح کننده در خاک [۲۹]

با توجه به خروجی‌های آزمایش در شکل ۲-۲۳ استفاده از الیاف به عرض ۶ میلی‌متر، بهترین نتیجه را در بهبود زاویه اصطکاک داخلی به همراه داشته است (از ۳۸/۵ درجه به ۴۴/۵ درجه). در خاک ماسه‌ی کلیفول، ۰/۱٪ پت، درصد بهینه بوده که باعث بیشترین زاویه اصطکاک داخلی شده‌است، اما مقادیر ۰/۲٪ و ۰/۳٪ موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده‌اند و در خاک ماسه‌ی کپ، افزایش زاویه اصطکاک داخلی، تا ۰/۳٪ پت ادامه داشته است. [۲۹]

بوئرو و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۵، خاک سیلتی (MH) عبوری از الک شماره ۶۰ را با الیاف پت حاصل از بازیافت بطری‌ها مسلح کرده و بر روی نمونه‌های مسلح شده آزمایش‌های UU با فشارهای سربار معادل ۲/۵، ۵ و ۷/۵ متر و با درصد الیاف صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۱ درصد انجام دادند. خاک در سال ۲۰۱۲ از عمق ۴ تا ۶ متری دریاچه‌ای واقع در شمال شرقی مکزیکوسیتی استخراج شده بود و برای آزمایش، رطوبت آن به ۳۷٪ رسانده شد. در شکل ۲-۲۴) نتایج آزمایش‌ها نشان داده شده است.



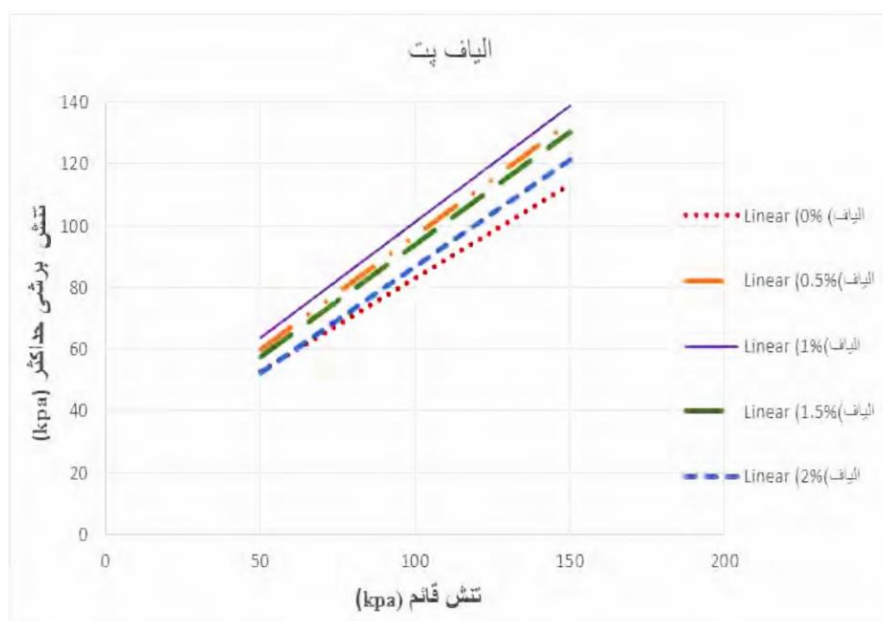
شکل ۲-۲۴ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش، در دو تنش محصورکننده [۳۰]

با توجه به نمودارهای شکل ۲-۲۴)، افزودن مسلح کننده به خاک تا ۱ درصد، موجب افزایش مقاومت نمونه خاک و شکل پذیری بیشتر شده است.

در تنش همه جانبه‌ی ۶۱/۸۵ کیلو پاسکال، مقاومت نمونه در اثر تسلیح، به حدود ۲۵۰ کیلو پاسکال و در تنش همه جانبه‌ی ۱۲۳/۷ کیلو پاسکال، مقاومت نمونه نزدیک به ۳۴۰ کیلو پاسکال شده است.

^۱ Botero.J

همچنین در نمونه‌های غیرمسلح برخلاف نمونه‌های مسلح، شکست ترد رخ داد که این امر به دلیل افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های مسلح بوده و شکل‌پذیری با افزایش سربار قائم، بیشتر شده است. [۳۰] دادوند و همکاران در سال ۲۰۱۷، پژوهشی بر روی ماسه‌ی بابلسر، مسلح شده با الیاف بطری‌های ضایعاتی پت، انجام دادند و طی آن با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و CBR، پارامترهای مقاومتی خاک را بررسی کردند. نتایج آزمایش برش مستقیم در شکل ۲-۲۵ آمده است.

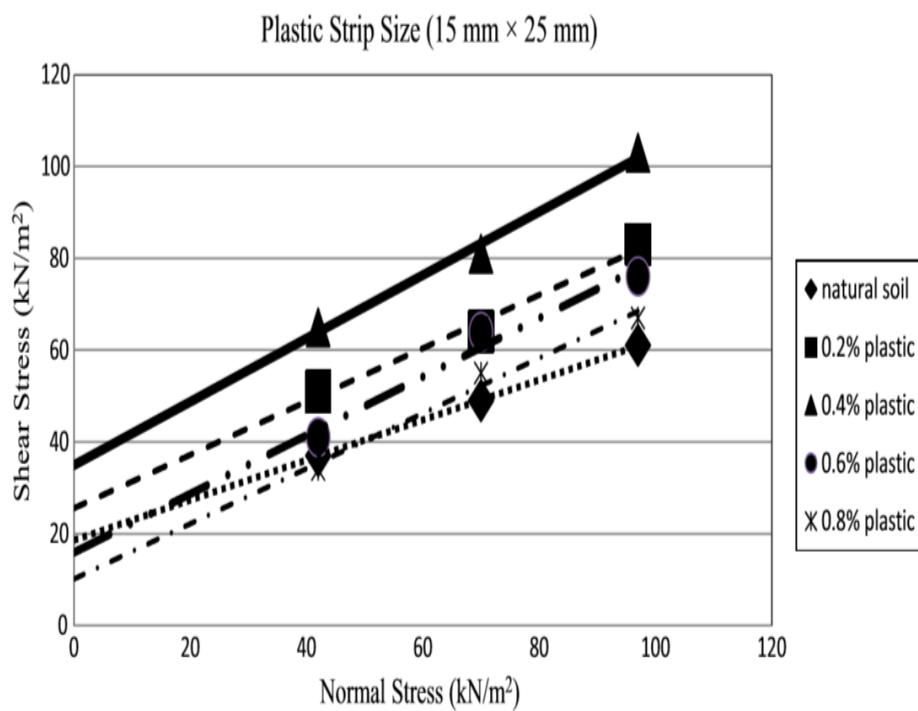


شکل ۲-۲۵ تغییرات تنش برشی برحسب تغییرات سربار قائم در نمونه‌های خاک با درصد‌های مختلف مسلح کننده [۳۱]

مطابق نمودار ارائه‌شده در شکل ۲-۲۵، الیاف پت باعث افزایش مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای در هر سربار شده‌اند و با افزایش سربار، این تأثیر بیشتر شده است. با توجه به نمودار، مقدار بهینه الیاف برای تقویت ماسه، ۱٪ به دست آمده است. همچنین الیاف پت باعث افزایش مقاومت برشی و چسبندگی می‌شود اما زاویه اصطکاک داخلی را کاهش می‌دهد. [۳۱]

رنجبر و همکاران در سال ۲۰۱۷ در زمینه‌ی تسلیح خاک با الیاف مختلف تحقیق کردند. همان‌گونه آن‌ها دریافتند افزودن الیاف پت با طول‌های ۱ سانتی‌متر به خاک منجر به افزایش مقاومت برشی پیشینه‌ی نمونه‌ها شده است [۴۱].

همچنین در سال ۲۰۱۸، پدایا و همکاران^۱ با افزودن خرده‌پت با ابعاد ۱/۵×۱/۵ سانتی‌متر با درصدهای ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد وزنی به خاک ماسه-سیلتی و انجام آزمایش‌های برش مستقیم، CBR و تراکم، به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک مسلح شده با پت پرداخته‌اند که نتایج آزمایش‌هایشان در نمودار شکل (۲-۲۶) نشان داده شده‌است.



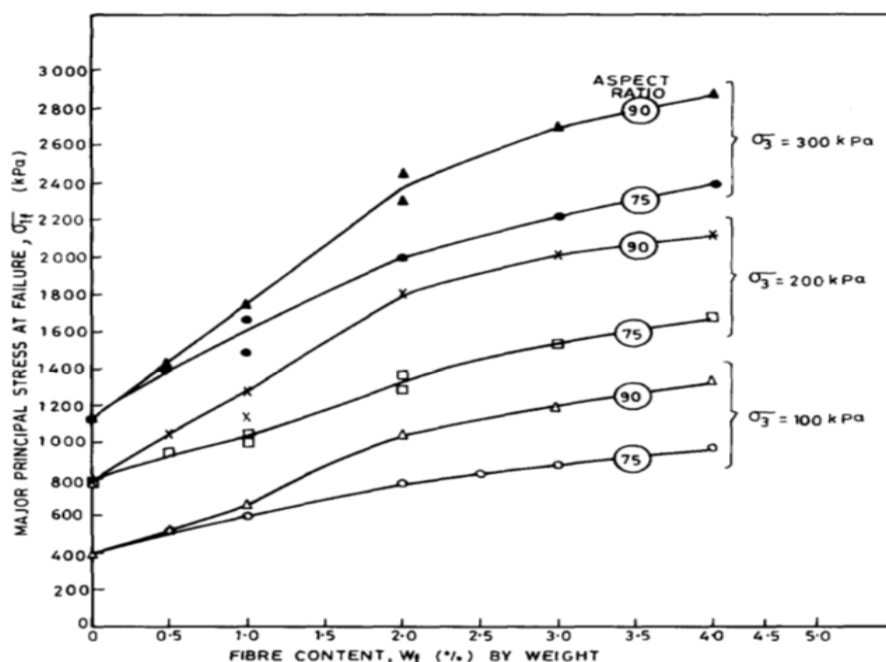
شکل ۲-۲۶ نمودار تغییرات تنش برشی در درصد مسلح کننده‌های مختلف در پژوهش پدایا و همکاران [۳۲]

^۱ Peddaiah et.al

۲-۶-۲ بررسی افزایش شکل پذیری ترکیب خاک-مسلح کننده

رانجان و همکاران^۱ در سال ۱۹۹۴، رفتار ماسه‌ی مسلح شده با الیاف پلاستیک را مطالعه کردند. ماسه‌ی ریزدانه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP-SM) با مقدار ۱٪ تا ۴٪ از وزن خاک، با الیافی که به صورت تصادفی در خاک پراکنده شدند، مخلوط شد.

برای تعیین خصوصیات ماسه‌ی ریزدانه، آزمایش دانه‌بندی و چگالی ویژه دانه‌های جامد انجام شدند و برای تعیین خصوصیات الیاف نیز، آزمایش تعیین قطر، چگالی ویژه، مقاومت کششی و مدول کششی، بر روی الیاف صورت گرفت. آزمایش سه محوری فشاری به منظور مطالعه‌ی تنش-تغییر شکل و رفتار گسیختگی نمونه‌های خاک-الیاف، مورد آنالیز قرار گرفت که در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است.



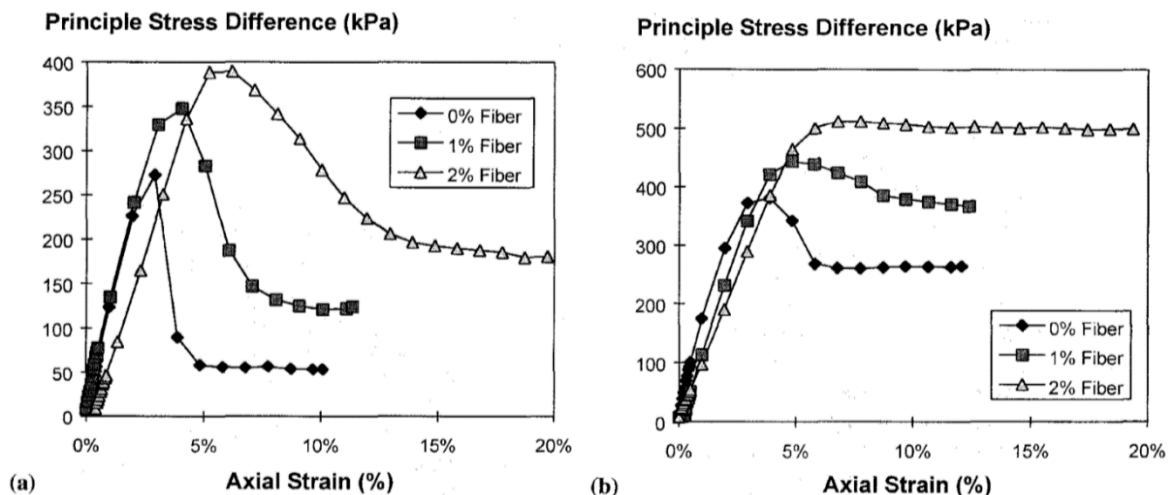
شکل ۲-۲۷ تأثیر درصد پت بر مقاومت نهایی ماسه‌ی مسلح شده در سه تنش محصورکننده در آزمایش سه

محوری [۳۳]

^۱ Ranjan et.al

مطابق نمودار شکل ۲-۲۷)، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد مسلح‌کننده، همواره مقاومت نهایی نمونه افزایش پیدا کرده و این تأثیر با افزایش تنش محصورکننده و نسبت ابعادی^۱، بیشتر نمایان شده است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت برشی نمونه‌ها، با افزایش درصد الیاف و نسبت ابعادی‌شان، افزایش می‌یابد. یافته‌های این تحقیق برای بهسازی خاک زمین در مخازن و زیراساس کاربرد دارد. [۳۳]

وانگ آدر سال ۱۹۹۹ ترکیب ماسه و سیمان را با استفاده از الیاف ضایعاتی فرش مسلح کرده و بر روی آن‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و محصور شده با تنش ۳۴/۵ کیلو پاسکال انجام دادند. درصد مسلح‌کننده در این آزمایش‌های از ۰/۷ درصد تا ۲ درصد بود. نتایج آزمایش‌های سه محوری فشاری در شکل ۲-۲۸) نشان داده شده است.

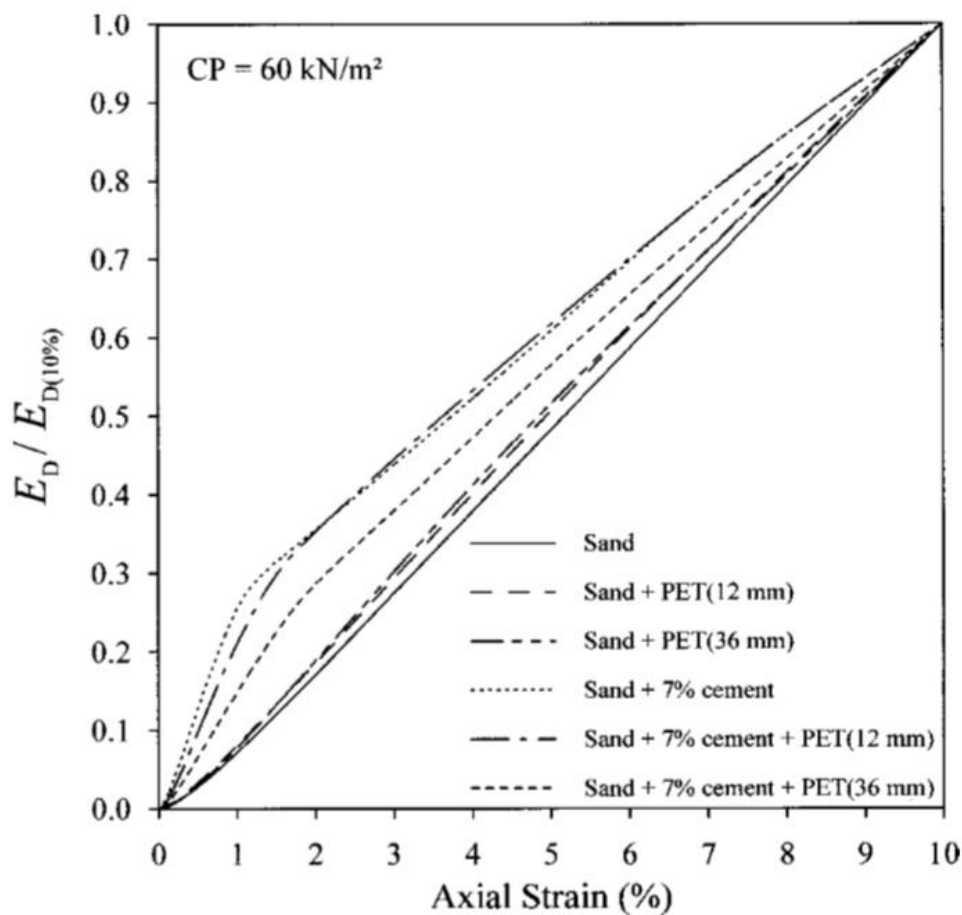


شکل ۲-۲۸ منحنی‌های تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در دو حالت (a) محصور نشده و (b) محصور شده [۳۴] با توجه به نتایج به دست آمده، تسلیح نمونه‌ها با الیاف ضایعات فرش، موجب افزایش شکل‌پذیری و مقاومت در برابر خردشدگی در کرنش‌های بالا گردید. [۳۴]

^۱ Aspect Ratio

^۲ Wang Youjiang

کنسولی و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۲ درباره‌ی رفتار مهندسی ماسه‌ی مسلح شده با پلاستیک ضایعاتی مطالعه کردند. مصالح مورد استفاده در این مطالعه شامل ماسه‌ی ریزدانه‌ی یکنواخت، الیاف پت تا طول ۳۶ میلی‌متر و تا مقدار ۰/۹٪ از وزن ماسه و سیمان پرتلند زود گیر به مقدار ۰٪ تا ۷٪ از وزن ماسه بودند. آزمایش‌های فشاری محصور نشده، استحکام کششی، فشاری سه محوره زهکشی شده، همراه یا اندازه‌گیری کرنش محلی انجام شد. این آزمایش‌ها برای ارزیابی بهبود رفتار مهندسی خاک و پت و ترکیب خاک و پت و سیمان صورت گرفت. در شکل ۲-۲۹ نمونه‌ای از این ارزیابی نشان داده شده است.

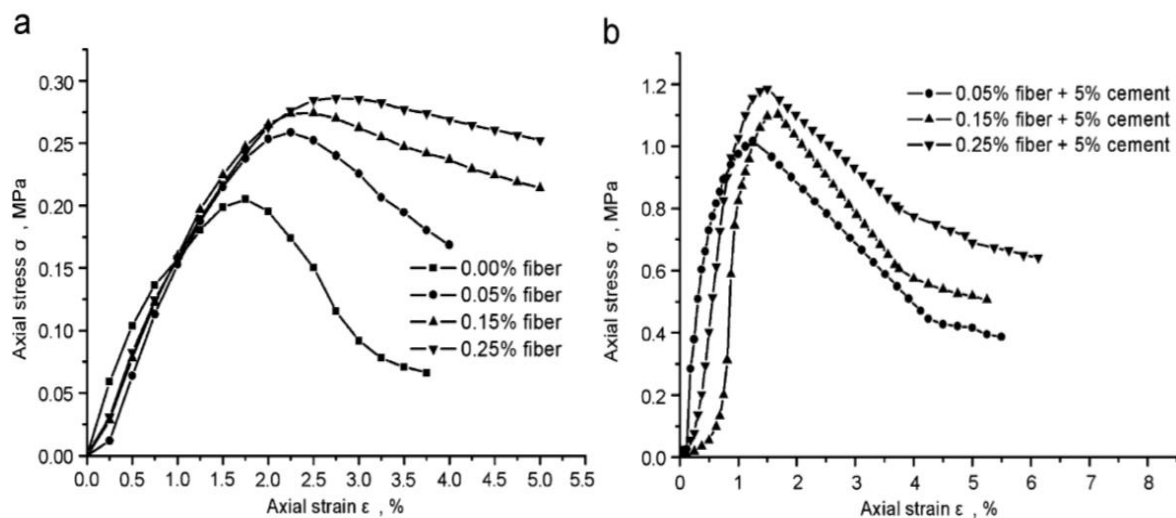


شکل ۲-۲۹ تغییرات ظرفیت جذب انرژی نرمالیزه شده برحسب کرنش محوری برای ترکیبات مختلف خاک [۳۵]

^۱ Consoli et al. 2002

نتایج نشان داد که تسلیح با الیاف پت، باعث بهبود جذب انرژی و افزایش مقاومت بیشینه‌ی خاک حاوی سیمان و خاک بدون سیمان می‌شود؛ همچنین تردی خاک سیمان دار را کاهش می‌دهد. [۳۵]

تانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۶، مقاومت و رفتار مکانیکی خاک رس مسلح شده با الیاف کوتاه پلی‌پروپیلن را در حالت تثبیت با سیمان و بدون سیمان تحلیل کردند. آزمایش بر روی خاک‌های رسی و الیاف پلی‌پروپیلن با مقادیر ۰/۲۵٪ و ۰/۱۵٪ و ۰/۵٪ از وزن خاک خشک و افزودن سیمان به میزان ۵٪ و ۸٪ از وزن خاک صورت گرفت. آزمایش‌های تعیین ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی بر روی سیمان و آزمایش‌های تعیین پارامترهای مقاومتی بر روی الیاف پلی‌پروپیلن انجام شد. سپس آزمایش‌های فشاری محصور نشده، برش مستقیم و اسکن الکترومیکروسکوپی (SEM^۲) بر روی نمونه‌های مسلح انجام شد. نتایج بررسی نمونه‌های مسلح، در شکل ۲-۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۰ نمودار تنش محوری- کرنش محوری برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف، در آزمایش سه محوری فشاری محصور نشده برای دو نوع نمونه‌ی مسلح شده‌ی (a) بدون سیمان و (b) با سیمان [۳۶]

^۱ Tang et.al

^۲ Scanning electron microscope

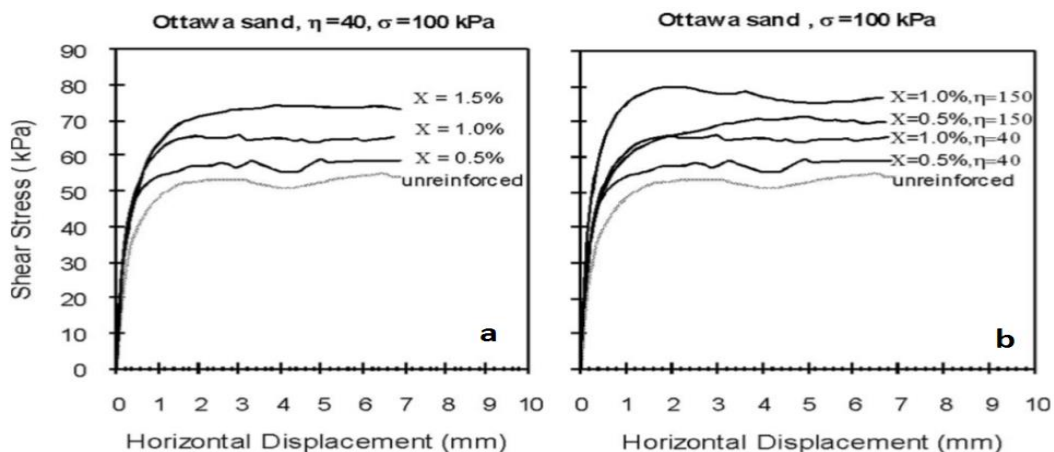
با بررسی نتایج نمودارها مشاهده می‌شود که ترکیب الیاف با خاک سیمان‌دار و بدون سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده (UCS^1)، کرنش محوری در لحظه‌ی گسیختگی شده‌است؛ همچنین حضور الیاف موجب کاهش سختی و مقاومت بیشینه شده و رفتار ترد خاک را شکل‌پذیرتر کرده است. [۳۶]

صادق و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۰، به بررسی مقاومت برشی ماسه‌ی مسلح شده با الیاف از طریق مخلوط کردن ماسه‌ی ریزدانه یا درشت‌دانه با سیم‌های نایلونی تور ماهیگیری به‌عنوان مسلح‌کننده پرداختند. قطر الیاف، ۰/۱۸ میلی‌متر و ۰/۷ میلی‌متر، طول آن‌ها از ۷ میلی‌متر تا ۲۷ میلی‌متر و مقدار آن‌ها در خاک از ۰٪ تا ۱/۵٪ از وزن ماسه‌ی خشک بوده است. آزمایش‌های چگالی ویژه دانه‌های جامد خاک (Gs) و دانه‌بندی، جهت تعیین خصوصیات فیزیکی ماسه انجام شدند. در حالی که خصوصیات الیاف نایلونی تور ماهیگیری، نظیر طول، قطر، مدول یانگ، مقاومت کششی و چگالی ویژه هم معین شد. سپس ۱۵۰ آزمایش برش مستقیم بر روی ترکیب ماسه-الیاف در تنش‌های نرمال ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال انجام شد. نمونه‌ای از بررسی تغییرات تنش برشی، تحت سربار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال، در شکل ۲-۳۱ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج نشان داده شده، افزودن الیاف به مقدار ۱٪ از وزن ماسه‌ی خشک، با نسبت ابعادی ۱۵۰ و طول ۲۷ میلی‌متر که نمونه‌ها با تراکم نسبی ۷۵٪ ($Dr=75\%$) آماده‌سازی شده‌اند، موجب افزایش مقاومت برشی و شکل‌پذیری به میزان ۳۷٪ در اثر مسلح‌کننده با الیاف کوتاه‌تر و ۴۶/۸٪ در اثر مسلح‌کننده با الیاف بلندتر شده‌است. [۳۷]

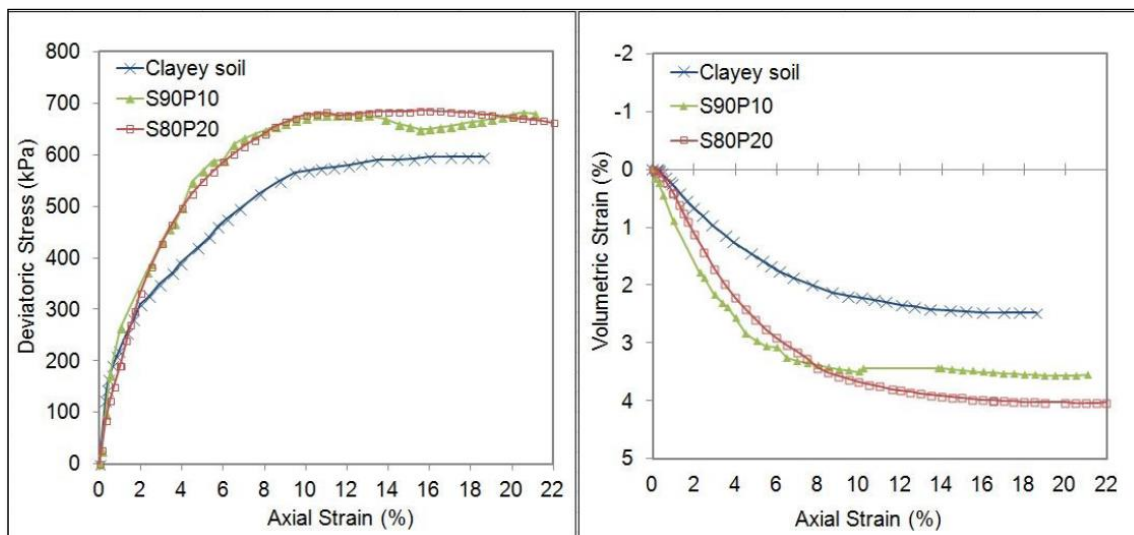
^۱ Unconfined Strength

^۲ Sadek et.al



شکل ۲-۳۱ نمودارهای تغییرات تنش برشی ماسه مسلح، تحت سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال (a) با سه درصد مختلف پت و نسبت ابعادی ۱ به ۴۰ و ۱ به ۱۵۰ مسلح کننده (b) با دو درصد پت مختلف و دو نسبت ابعادی ۱ به ۴۰ و ۱ به ۱۵۰ مسلح کننده [۳۷]

اینگرید مارتینز و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۴، با افزودن خرده پت به خاک رسی و انجام آزمایش سه-محوری به بررسی تأثیر خرده پت بر رفتار مقاومتی و تغییر شکل های نمونه ی مسلح شده پرداخته اند که نتایج آزمایش ها در شکل (۲-۳۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۲ نمودارهای تغییرات حجم و تغییرات تنش انحرافی بر حسب جابجایی محوری در پژوهش مارتینز و همکاران [۳۸]

^۱ Ingrid Melina Reyes Martinez et.al

مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل ۲-۳۲، مقایسه‌ی رفتار خاک رس غیر مسلح با حالت مسلح شده با ۱۰ و ۲۰ درصد پت، نشان داده که افزودن مسلح کننده‌ی پت، موجب افزایش تنش انحرافی مورد تحمل نمونه و افزایش شکل پذیری و جلوگیری از رفتار خردشونده‌ی نمونه خاک شده است. [۳۸]

رنجبر و همکاران در سال ۲۰۱۷ در زمینه‌ی تسلیح خاک با الیاف مختلف آزمایشات برش مستقیم انجام دادند. نتایج نشان داد افزودن الیاف پت با طول‌های ۱ سانتی‌متر به خاک تا کرنش ۱۰٪ منجر به بهبود رفتار تراکمی و کاهش اتساع نمونه‌ها شده است [۴۱].

۷-۲ جمع‌بندی ادبیات فنی مرتبط و تعیین برنامه‌ی مطالعاتی

آنچه در این فصل از پژوهش بیان شد، نگاهی جامع به حل مشکلات زمین‌های دارای خاک نامناسب و روش‌های بهسازی خاک‌های مسئله‌دار و همچنین کاربرد مواد پلاستیکی ضایعاتی در بهسازی خاک‌ها و پیشینه‌ی انجام این کار و مروری بر تحقیقات انجام شده در این زمینه بود. در تحقیقات انجام شده، خاک مورد استفاده، هم ماسه و هم رس بوده و سیمان پرتلند معمولی (OPC) به‌عنوان یک تثبیت‌کننده و ضایعات پلاستیکی به‌صورت براده و الیاف و رشته‌های سبد، PVC، پالمیرا، سیم مسی، ژئوتکستایل‌ها، HDPE، PET، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، خرده لاستیک و الیاف نایلونی تور ماهیگیری به‌عنوان مسلح‌کننده به کار گرفته شدند. طول مسلح‌کننده‌ها از ۵ میلی‌متر تا ۲۵ میلی‌متر، عرض آن‌ها از ۴ میلی‌متر تا ۸ میلی‌متر، قطرهای ۰/۰۲۳ میلی‌متر تا ۲ میلی‌متر و درصد وزنی مسلح‌کننده‌ها داخل خاک، از ۰/۰۵٪ تا ۴٪ از وزن خاک خشک بوده است.

محققین در این زمینه، با انجام آزمایش‌هایی نظیر برش مستقیم، سه محوری فشاری و سیکلی، فشاری محصور نشده و ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)، به بررسی تأثیر مسلح‌کننده‌های مختلف بر پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح شده پرداختند و مشاهده کردند که افزودن مسلح‌کننده‌ها

موجب بهبود رفتار مقاومتی و افزایش تغییرشکل پذیری و جلوگیری از بروز ترک و خردشگی در خاک شد.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته بر روی خاک ماسه‌ای مشاهده گردید درصد بهینه‌ی پت جهت تسلیح ماسه از صفر تا ۱ درصد متغیر بوده است که جهت اطمینان بیشتر در این مطالعه تا ۲ درصد وزنی پت به خاک اضافه شده است. جهت تعیین ابعاد مسلح‌کننده‌ی پت نیز با توجه به مطالعات پدایا و همکاران خاک ماسه‌ای مسلح‌شده با پت‌های ۲۵×۱۵ میلیمتری و همچنین پژوهش کومار و همکاران بر روی خاک ماسه‌ای مسلح‌شده با خرده‌های پلاستیک ۴×۱۲ میلیمتری، ابعادی مشابه به صورت خرده‌های ۱×۱ و ۵×۱ سانتیمتری در این پژوهش به کار برده شده است.

پژوهش حاضر با محوریت بهسازی خاک به روش تسلیح و باهدف بهبود پارامترهای مقاومتی خاک و فراهم آوردن امکان استفاده مجدد از پلاستیک ضایعاتی انجام گردید. جزئیات بیشتر در مورد خاک مورد مطالعه، مسلح‌کننده‌ها و آزمایش‌های صورت گرفته، در فصل سوم بیان می‌شود.

فصل ۳ : روش انجام تحقیق

۳-۱ مقدمه

در پژوهش حاضر، تسلیح خاک ماسه‌ای با استفاده از ضایعات پلاستیکی پلی‌اتیلن ترفتالات (پت)، صورت گرفته است. در این فصل تئوری آزمایش‌های انجام شده جهت شناسایی خاک از قبیل دانه-بندی، چگالی ویژه (G_s) و همچنین مجموعه آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص خاک (γ_d) جهت اعمال تراکم نسبی (D_r) موردنظر که بر روی خاک انجام گرفته و آزمایش‌های تعیین خصوصیات مسلح کننده‌ی پت مانند چگالی ویژه (G_s)، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بیان شده است. در انتها و پس از ترکیب سه شکل مختلف مسلح کننده در درصد‌های وزنی گوناگون با خاک به صورت جداگانه، نمونه‌های مسلح شده تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند.

۳-۲ مصالح مورد استفاده

در پژوهش حاضر بر روی تسلیح خاک ماسه‌ای ریزدانه بندر انزلی با خرده‌ها، نوارها و الیاف پت، تحت آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس کار شده است. در این بخش به معرفی مصالح و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱ ماسه

خاک ماسه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، از نوع ماسه‌ی کربناته‌ی دارای مقدار بسیار کمی ریزدانه، گرد گوشه، یکنواخت و بد دانه‌بندی شده می‌باشد که بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) در گروه ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر تمامی آزمایش‌ها بر روی این خاک در حالت خشک انجام شده است. مطابق آزمایش

دانه‌بندی خاک و الک‌های به‌کاربرده شده که بر اساس استاندارد ASTM D 422-87 صورت گرفته است. متوسط اندازه‌ی ذرات خاک (D_{50}) ، $0/17$ میلی‌متر است که در جدول (۳-۱) و در میان مشخصات فیزیکی ماسه آمده است.

جدول ۳-۱ مشخصات فیزیکی ماسه‌ی مورد استفاده

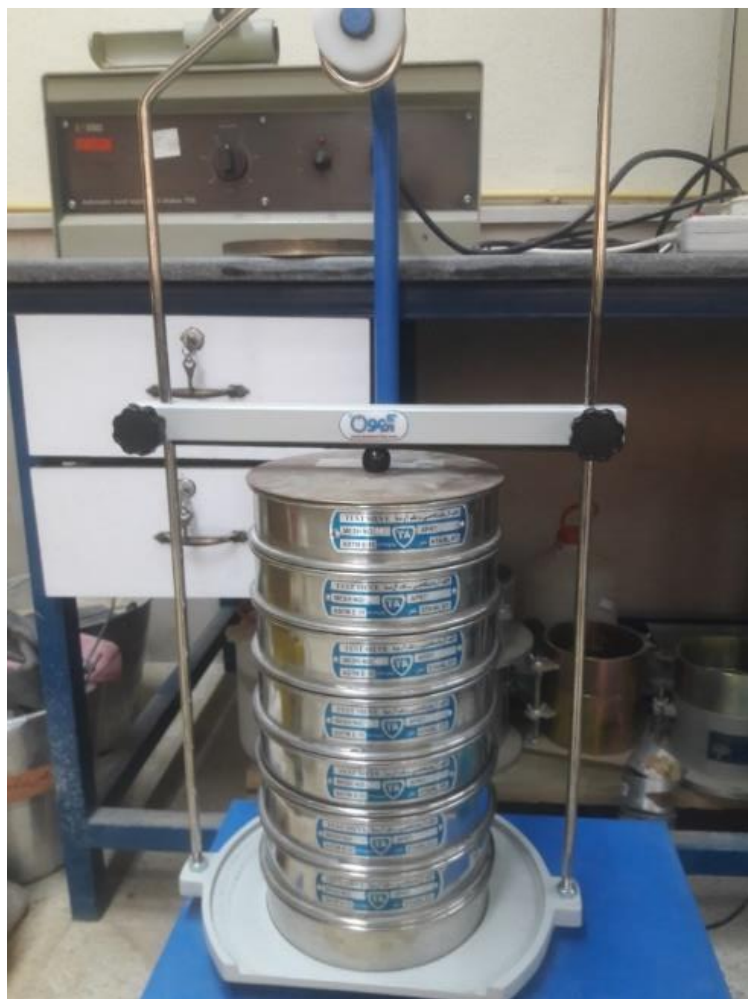
ویژگی	G_s	e_{min}	e_{max}	$(\gamma_d)_{min}$ gr/cm ³	$(\gamma_d)_{max}$ gr/cm ³	D_{50} mm	Cu	Cc
مقدار	۲/۶۸	۰/۶۵	۱/۱۲	۱/۲۵	۱/۶	۰/۱۷	۱/۲۵	۱/۰۷



شکل ۳-۱ خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش

۳-۲-۱-۱ آزمایش دانه‌بندی خاک

آزمایش دانه‌بندی بر روی خاک مطابق استاندارد ASTM D 422-87 صورت گرفت. هدف از این آزمایش، تعیین کمی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. توزیع ذرات درشت‌تر از $0/075$ میلی‌متر (خاک مانده روی الک ۲۰۰) با انجام آزمایش دانه‌بندی توسط الک تعیین می‌شود. از آنجاکه درصد عبوری از الک ۲۰۰ بسیار کم بود (کمتر از ۰/۱٪ وزنی خاک)، لذا خاک فاقد ریزدانه محسوب شده و در شکل (۳-۲) تصویری از شیکر و الک‌های به‌کاررفته در این آزمایش‌ها نشان داده شده است.



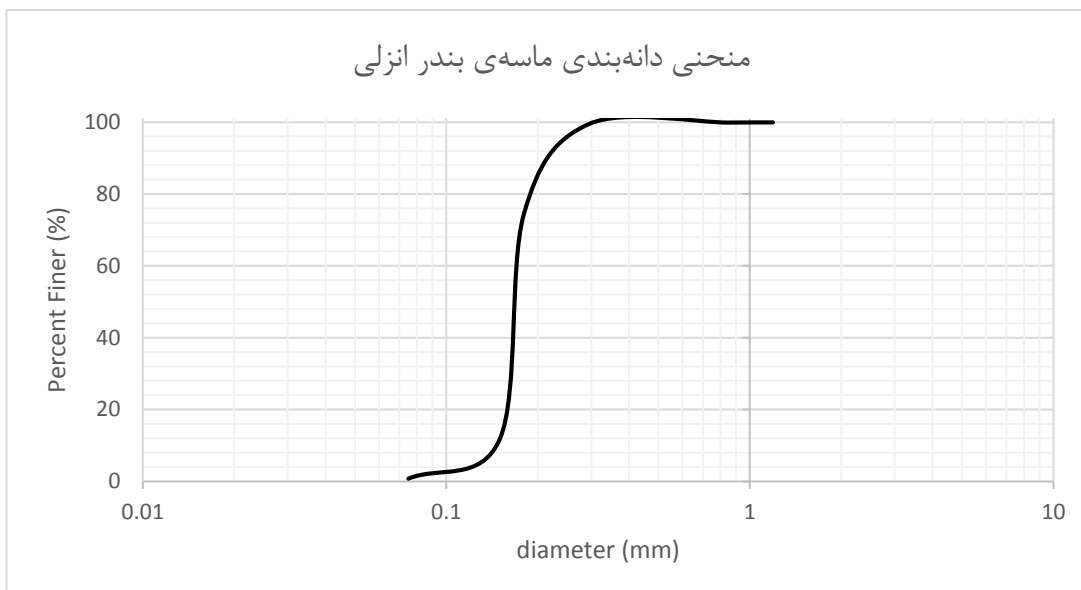
شکل ۳-۲ الک‌های به‌کاررفته جهت دانه‌بندی بر روی شیکر اتوماتیک

با استفاده از دانه‌بندی به روش الک کردن پارامترهایی همچون ضریب یکنواختی و ضریب انحنا از ویژگی‌های خاک ماسه‌ای مذبور به دست می‌آیند:

$$Cu=1.25$$

$$Cc=1.07$$

ماسه‌ی استفاده‌شده در این پژوهش، ماسه‌ی یکنواختی بوده و ذرات خاک محدوده‌ی ابعادی محدودی دارند. این امر در بررسی منحنی دانه‌بندی خاک که در شکل (۳-۳) نشان داده‌شده، مشهود است:



شکل ۳-۳ منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده‌شده در این پژوهش

همان‌طور که در منحنی دانه‌بندی مشاهده می‌شود، محدوده‌ی توزیع قطر دانه‌های خاک بسیار کم بوده و اغلب دانه‌ها در یک رده‌ی ابعادی هستند. به عبارت دیگر این یک ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده است که در گروه‌بندی یونیفاید^۱ یا متحد، در دسته‌ی SP قرار می‌گیرد.

۲-۱-۲-۳ آزمایش تعیین چگالی ویژه‌ی خاک (Gs)

در تعریف چگالی ویژه بخش جامد خاک، به نسبت وزن حجمی واحد بخش جامد خاک به وزن همان حجم از آب مقطر بدون گاز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد گفته می‌شود. چگالی ویژه‌ی بخش جامد خاک در محاسبه‌ی روابط وزنی مانند نسبت تخلخل و درجه اشباع کاربرد دارد. آزمایش تعیین چگالی ویژه، براساس استاندارد ASTM D 854-87 و با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید:

^۱ USCS : Unified Soil Classification System

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{w_3}{w_3 - w_1 + w_2} \quad \text{رابطه (۱-۳) چگالی دانه‌های جامد خاک (Gs)}$$

که در آن γ_s چگالی دانه‌های جامد خاک، γ_w چگالی آب، w_3 وزن خاک، w_2 وزن پیکنومتر و آب و w_1 وزن پیکنومتر و آب و خاک می‌باشد. G_s ماسه‌ی مورد آزمایش مطابق رابطه‌ی (۱-۳) به صورت زیر به دست آمده است:

$$G_s = \frac{20}{(20 + 161.13) - 173.68} = 2.68$$



شکل ۳-۴ آزمایش تعیین چگالی ویژه (Gs) خاک ماسه‌ای

وزن مخصوص ویژه‌ی اکثر کانی‌های خاک در دامنه‌ی بین ۲/۴ تا ۲/۹ تغییر می‌کند. وزن مخصوص ویژه‌ی قسمت جامد ماسه‌های رنگ روشن که غالباً از کوارتز تشکیل شده‌اند، در حدود ۲/۶۵ تخمین زده می‌شود. در بیشترین حالت، G_s خاک‌های سرب‌دار حدود ۴ و در کمترین حالت G_s خاک‌های آلی ۲ می‌باشد. G_s خاک‌های آلی به دلیل آن که وزن این مواد بر اثر حرارت، به شدت کاهش می‌یابند، بسیار پایین است. خاک ماسه‌ای به کاررفته در این پژوهش نیز از نوع ماسه‌های کربناته بوده و کانی اصلی آن کوارتز می‌باشد. در رابطه (۱-۳)، G_s این ماسه ۲/۶۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی یک ماسه‌ی معمولی از نظر وزن مخصوص می‌باشد.

۳-۲-۱-۳ آزمایش‌های تجربی تعیین حداقل و حداکثر چگالی ماسه خشک (γ_d)

جهت اعمال تراکم نسبی (D_r) ۷۵٪ بر نمونه خاک

در پژوهش حاضر، نمونه‌های خاک مسلح با تراکم نسبی ۷۵٪ ساخته شدند. برای اعمال این تراکم نسبی بر نمونه خاک در جعبه‌ی برش مستقیم، مطابق رابطه‌ی (۳-۲)، باید چگالی‌های خشک خاک (γ_d) به صورت تجربی اعمال می‌شدند.

$$D_r = \frac{(\gamma_d)_{\max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - (\gamma_d)_{\min}}{(\gamma_d)_{\max} - (\gamma_d)_{\min}} \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

برای این منظور، خاک با وزن ثابت، از ارتفاع‌های مختلف و با میزان کوبش‌های مختلف درون جعبه

ریخته شد تا به حجم‌های مختلف برای چگالی‌های مختلف برسد؛ همچنین $(\gamma_d)_{\max}$ و $(\gamma_d)_{\min}$

موردنیاز در

ر

ابطه (۳-۲)، از بین چگالی‌های اعمال شده تعیین شدند تا در نهایت یک روند تجربی ثابت برای رسیدن به تراکم ۷۵٪ حاصل گردید.

$$(\gamma_d)_{\min} = 1.25 \text{ gr/cm}^3$$

$$(\gamma_d)_{\max} = 1.6 \text{ gr/cm}^3$$

۳-۲-۲ پت (PET)

خرده‌ها و نوارهای پت استفاده شده در آزمایش‌های پژوهش حاضر، به صورت خرده‌های چپس ۱×۱

سانتی‌متری و نوارهای پت ۱×۵ سانتی‌متری با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و الیاف پت با طول میانگین ۵

سانتی‌متر و قطر ۰/۰۵ میلی‌متر بوده اند که به عنوان المان‌های مسلح کننده در خاک به کار گرفته شده

اند. خرده‌ها و نوارهای پت بعد از شستن کامل، خشک کردن و سپس خرد کردن بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی به دست آمده و الیاف از بازار تهیه شده‌اند. در شکل (۳-۵) پت‌های مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است.



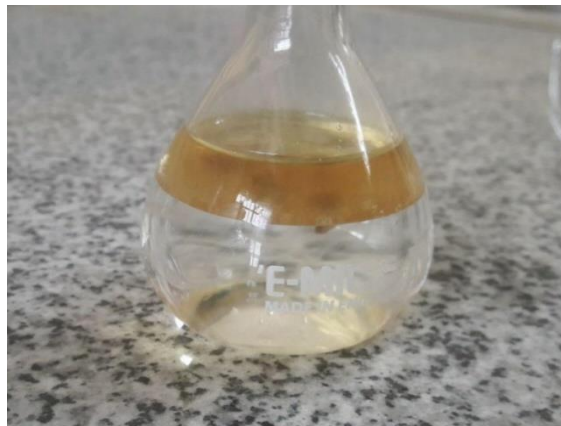
شکل ۳-۵ انواع پت‌های استفاده شده در این پژوهش

یکی از مشخصات فیزیکی پت که مورد ارزیابی قرار گرفته است، چگالی ویژه‌ی آن است که برای تعیین چگالی ویژه‌ی پت، از همان رابطه‌ی تعیین G_s خاک استفاده می‌شود، با این تفاوت که به جای استفاده از سیال آب، درون پیکنومتر روغن ریخته شد تا پت‌ها به راحتی در آن فرو روند:

$$G_s = \frac{\gamma_{pet}}{\gamma_{oil}} \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

حجم مشخصی از پت وزن شد و γ_{pet} برابر $1/13 \text{ gr/cm}^3$ به دست آمد، همین طور γ_{oil} با استفاده از یک بالن حجمی مدرج برابر $0/8 \text{ gr/cm}^3$ به دست آمده و در صورت و مخرج کسر رابطه‌ی (۳-۳) قرار داده شد.

$$G_s = \frac{1.13}{0.8} = 1.38$$



شکل ۳-۶ آزمایش تعیین چگالی روغن با آب مقطر

مشخصات اندازه‌گیری شده‌ی پت استفاده‌شده در پژوهش، در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول ۳-۲ مشخصات پت به‌کاررفته در پژوهش حاضر

فرمول شیمیایی	Gs	ضخامت یا قطر (mm)	طول (mm)	عرض (mm)	شکل مسلح-کننده
$(C_{10}H_8O_4)_n$	۱/۳۸	۰/۵	۱۰	۱۰	خرده پت
$(C_{10}H_8O_4)_n$	۱/۳۸	۰/۵	۵۰	۱۰	نوار پت
$(C_{10}H_8O_4)_n$	۱/۳۸	۰/۰۱	۵۰	-	الیاف پت

باتوجه به جدول (۲-۲) می‌توان گفت ماکزیمم درجه حرارت قابل تحمل در دراز مدت برای پت ۱۱۰ سانتیگراد می‌باشد، بنابراین پت به عنوان مسلح‌کننده در برابر گرما مقاوم بوده و در مناطق ساحلی و گرمسیر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳ آزمایش‌های برش مستقیم

۱-۳-۳ تعریف مقاومت برشی

مقاومت برشی را می‌توان تحت عنوان میزان پایداری در برابر تنش‌های برشی و نتیجه‌ای به دنبال تغییر شکل برشی تعریف کرد. مقاومت برشی در خاک‌ها نتیجه‌ی مقاومت در اثر اندرکنش ذرات، اصطکاک میان ذره‌ای خاک و چسبندگی میان ذرات خاک است. تنش وارد بر خاک، به سه طریق موجب تغییر در آن می‌شود:

- با ایجاد تغییر شکل الاستیک در خاک
 - ایجاد تغییر حجم در خاک با خارج کردن سیال (هوا یا آب) از منافذ میان ذره‌ای خاک که تراکم خاک نامیده می‌شود.
 - ایجاد لغزش میان ذرات خاک که موجب می‌شود بخشی از خاک روی سطح مشترک با بخشی دیگر بلغزد؛ این پدیده گسیختگی برشی نامیده شده و هنگامی ایجاد می‌شود که تنش برشی وارد شده بر خاک، از مقاومت برشی حداکثر خاک بیشتر باشد.
- پارامترهای مقاومت برشی یک خاک، عمدتاً متأثر از میزان چسبندگی بین‌دانه‌ای (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) آن خاک هستند.
- اعداد تخمینی برای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و سنگ در جدول ۳-۳ آورده شده- است.

جدول ۳-۳ برخی پارامترهای مقاومتی تخمینی خاک و سنگ

ردیف	دسته‌بندی نوع خاک	چسبندگی (C) , (kPa)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Ø) , (deg)
ماسه			
۱	بسیار سست		کمتر از ۳۰
۲	سست		بین ۳۰ تا ۳۵
۳	نسبتاً متراکم		بین ۳۵ تا ۴۰
۴	متراکم		بین ۴۰ تا ۴۵
۵	بسیار متراکم		بیشتر از ۴۵
رس			
۱	بسیار نرم	۰ تا ۱۲	
۲	نرم	بین ۱۲ تا ۲۵	
۳	سفت	بین ۲۵ تا ۵۰	
۴	نسبتاً سخت	بین ۵۰ تا ۱۰۰	
۵	سخت	بین ۱۰۰ تا ۲۰۰	
۶	بسیار سخت	بیشتر از ۲۰۰	
شن			
۱	شن ، ریگ و قلوه‌سنگ		بین ۳۵ تا ۴۰

روش‌های متعددی برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های خاک وجود دارد، از قبیل آزمایش برش مستقیم (بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس)، آزمایش سه محوری، برش ساده، سه محوری محدود نشده و برش پیچشی. در این بند از پژوهش حاضر، به اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک در آزمایشگاه با جعبه‌ی برش مستقیم بزرگ‌مقیاس پرداخته شده است. طی انجام این روش، با استفاده از لغزش بخشی از خاک بر روی بخش دیگر در یک صفحه‌ی برش اجباری مربع شکل در راستای افق، پارامترهای مقاومت برشی خاک اندازه‌گیری شده‌اند.

آزمایش برش مستقیم امکان اندازه‌گیری تنش برشی ایجاد شده در اثر برش خاک و تحت سربار قائم متناظر را فراهم می‌آورد. هدف از این آزمایش تعیین پارامترهای مقاومت برشی مؤثر یعنی چسبندگی

و زاویه اصطکاک داخلی خاک است که این پارامترهای مقاومتی خاک، در حل بسیاری از مشکلات مهندسی پی نقش مهمی ایفا می‌کنند.

۳-۳-۲ دستگاه و تجهیزات آزمایش برش مستقیم در این پژوهش

در پژوهش حاضر آزمایش‌های برش مستقیم جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت غیر مسلح و مسلح شده با خرده‌ها، نوارها و الیاف پت بر روی ماسه‌ی بندر انزلی انجام شده‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس نشان داده شده در شکل (۳-۷)، ساخت شرکت نیک آزما با ابعاد جعبه‌ی برش $15 \times 30 \times 30$ سانتی‌متر و جک بارگذاری قائم پنوماتیک متصل به یک کمپرسور هوا، انجام گرفته‌اند.



شکل ۳-۷ دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود ۳

در این آزمایش‌ها، جابجایی برشی و جابجایی قائم، به‌وسیله‌ی دو عدد سنسور^۱ LVDT، به ترتیب با کورس ۱۰۰ میلی‌متر و دیگری با کورس ۵۰ میلی‌متر، هر دو با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌است. همچنین تنش برشی به‌وسیله‌ی یک لودسل^۲ ۱۰^۲ تنی با دقت ۰/۱۵ کیلوگرم-فورس^۳ اندازه‌گیری شده و اطلاعات از طریق یک دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر انتقال داده شده است. همه‌ی ابزارهای ذکرشده، در شکل (۳-۸)، نشان داده شده‌اند.



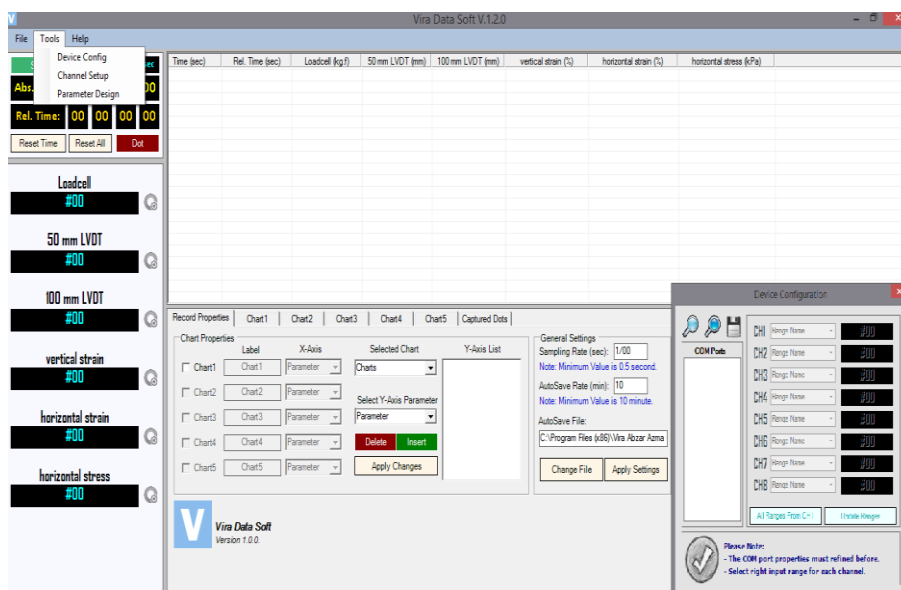
شکل ۳-۸ دیتالاگر و سنسورهای به‌کاررفته در این پژوهش

^۱Linear Variable Differential Transformer Sensor

^۲ Load Cell

^۳ Kg.f

داده‌های خروجی در کامپیوتر، در محیط نرم‌افزار Vira Data Soft مطابق شکل (۳-۹) مربوط به دیتالاگر و برنامه‌نویسی شده توسط شرکت ویرا ابزار آزما^۱، جمع‌آوری و پردازش می‌شوند. در نرم‌افزار برای هریک از سنسورها، کانال مجزا تعریف شده که ابتدا در منوی Tools، زیرشاخه‌ی Devise Config شناسایی شده و در زیرشاخه‌ی Channel Setup کالیبراسیون سنسور بر روی آن کانال انجام شده است و پارامترهای مورد اندازه‌گیری نیز در زیرشاخه‌ی Parameter Design تعریف شده‌اند. همچنین در منوی زمان، می‌توان در هر لحظه‌ی دلخواه ثبت اطلاعات را متوقف کرد و مجدداً ادامه داد. دقت این نرم‌افزار و دیتالاگر مربوطه به آن، امکان ثبت اطلاعات حداکثر با فرکانس ۲ هرتز را فراهم آورده است.

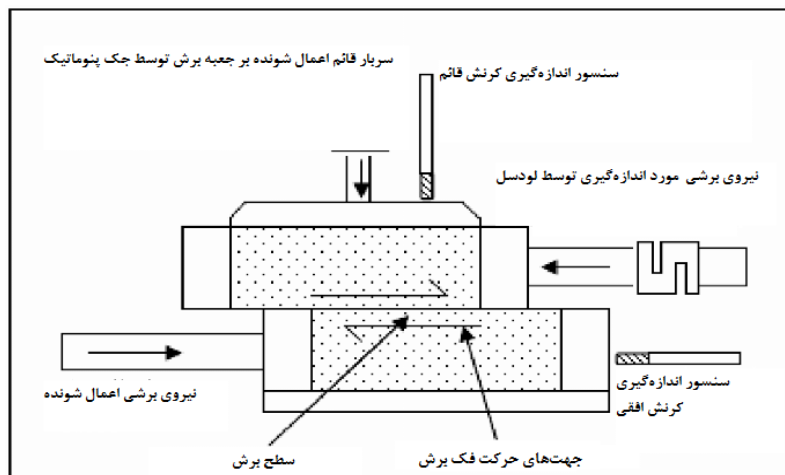


شکل ۳-۹ نرم افزار جمع آوری اطلاعات از دیتالاگر

به‌منظور درک بهتر از نحوه‌ی عملکرد سنسورها، نمای شماتیک جعبه‌ی برش و سنسورهای متصل به آن در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. سنسور LVDT افقی، با کورس ۱۰۰ میلی‌متر در

^۱Vira Abzar Azma

راستای حرکت برش، به فک محرک جعبه برش متصل بوده و میزان جابجایی افقی و سنسور LVDT دیگری با کورس ۵۰ میلی‌متر در راستای قائم و در بالای جعبه‌ی برش، تغییرات جابجایی قائم نمونه و لودسل ۱۰ تنی S شکل نیز به فک بالایی متصل بوده و نیروی برشی را اندازه‌گیری کرده‌اند.



شکل ۳-۱۰ نمای شماتیک عملکرد دستگاه برش مستقیم و سنسورهای متصل به آن

لازم به ذکر است که کلیه‌ی سنسور ها قبل از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده‌اند.

۳-۳-۳ نمونه‌گیری و بازسازی نمونه‌ها

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش متعلق به بندر انزلی بوده است که برای ساخت یک اسکله‌ی جدید از کف دریا استحصال شده است. معاونت عمرانی بندرانزلی با استفاده از کشتی‌های لایروب، در مجاورت موج‌شکن شرقی بندر عملیات لایروبی از کف دریا و انتقال به محل دپو با پمپ را انجام داده است. خاک لایروبی شده برای مدتی در نزدیکی محدوده‌ی موردنظر در سطح نسبتاً شیب‌دار وسیعی پخش شده و گل‌ولای و آب اضافی از آن جدا شده‌است، پس از جدا شدن کامل گل و لای از ماسه، مقداری از ماسه به آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل شده و عملیات بهسازی با پت بر روی آن انجام شده است.

در آزمایشگاه نمونه‌هایی با تراکم نسبی ۷۵ درصد که با ابعاد و درصد وزنی‌های مختلف پت مسلح شده بودند، آماده گردیده و تحت سه سربار مختلف، مورد آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس قرار گرفته اند. در قسمت بعد جزئیات شرایط اولیه‌ی نمونه‌ها و نحوه‌ی نمونه‌سازی‌ها به تفصیل آورده شده است.

۳-۳-۱ برنامه‌ی آزمایش‌های برش مستقیم

آزمایش‌های برش مستقیم این پژوهش، مطابق استاندارد ASTM D 3080-90 و تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال و بر روی نمونه‌هایی با تراکم نسبی ۷۵٪ در حالت خشک، تا کرنش ۱۰ درصد و با سرعت برش ثابت ۲/۰۶۷ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

برای رسیدن خاک به تراکم نسبی ۷۵٪ درون جعبه‌ی برش مستقیم، ۱۸ کیلوگرم خاک در ۳ لایه ۶ کیلوگرمی متراکم شده است. روش آزمایشگاهی تراکم، تجربی بوده و با تکرار و فقط برای همین یک نوع خاک ماسه‌ای تعبیه گردیده و در بخش ۳-۲-۱ با ذکر فرمول بیان شده و در جدول ۳-۴، نشان داده شده است.

جدول ۳-۴ چگالی حالت خشک خاک متناسب با تراکم نسبی هدف

Dr (%)	75%
γ_d (gr/cm ³)	1.5
ارتفاع خاک درون جعبه برش	13.33 cm
وزن خاک	18 kg

مطابق این روش‌ها، نمونه‌های هر لایه بایستی ۶ کیلوگرم باشند، که در مورد نمونه‌های مسلح، بخشی از خاک جای خود را به مسلح کننده می‌دهد تا وزن کل نمونه ثابت بماند. همچنین تعداد لایه‌ها

حتماً باید فرد باشد و فصل مشترک دولایه خاک ریزی منطبق بر صفحه برش نگردد. مسلح کننده های چیپسی و نوارهای پت با درصدهای ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی یعنی به ترتیب ۱۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ گرم پت، برای نمونه سازی به خاک اضافه شده اند. همچنین الیاف پت با مقادیر ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی به خاک افزوده شده اند. به دلیل عدم اختلاط مناسب خاک و الیاف در درصدهای بالاتر الیاف و همچنین حجیم بودن الیاف با توجه به محدودیت حجم جعبه ی برش، به همین مقادیر بسنده شد. در هر مرحله نمونه های ۶ کیلوگرمی همراه با مسلح کننده با درصد مشخص درون جعبه ریخته شده و توسط یک چکش لاستیکی کوبیده شده است؛ سطح هر لایه قبل از ریختن لایه ی بعدی با استفاده از یک کاردک چوبی صاف شده تا اتصال بین لایه ها بهتر صورت گیرد.

برای اعمال سربار، جهت کنترل چگالی خشک (γ_d)، ارتفاع نمونه با کولیس اندازه گیری شده و سنسورها آماده ی شروع تست شده اند. قبل از روشن کردن موتور محرک برش، باید پیچ های جعبه برش باز شوند. با زدن کلید استارت، دستگاه شروع به برش نمونه کرده و همزمان اطلاعات از سنسورها گرفته شده و از طریق دیتالاگر به کامپیوتر داده شده اند.

جهت تسهیل تفکیک آزمایش های انجام شده، جدول ۳-۵) بر اساس ویژگی های نمونه مورد آزمایش شامل درصد مسلح کننده و شکل ابعادی مسلح کننده ها و همچنین سربار قائم اعمال شده، رسم شده است.

جدول ۵-۳ جدول نام‌گذاری اختصاری آزمایش‌ها

ردیف	سربار قائم (kPa) σ	درصد پت Pet content	ابعاد پت (cm) Size	تراکم نسبی (Dr)	علامت اختصاری
۱	۵۰	۰	-	٪۷۵	۵۰-٪۷۵-٪۰
۲	۱۰۰	۰	-	٪۷۵	۱۰۰-٪۷۵-٪۰
۳	۱۵۰	۰	-	٪۷۵	۱۵۰-٪۷۵-٪۰
۴	۵۰	۰/۱	CH ^۱	٪۷۵	CH-۵۰-٪۷۵-۰/۱٪
۵	۵۰	۰/۱	S ^۲	٪۷۵	S-۵۰-٪۷۵-۰/۱٪
۶	۵۰	۰/۱	F ^۳	٪۷۵	F-۵۰-٪۷۵-۰/۱٪
۷	۱۰۰	۰/۱	CH	٪۷۵	CH-۱۰۰-٪۷۵-۰/۱٪
۸	۱۰۰	۰/۱	S	٪۷۵	S-۱۰۰-٪۷۵-۰/۱٪
۹	۱۰۰	۰/۱	F	٪۷۵	F-۱۰۰-٪۷۵-۰/۱٪
۱۰	۱۵۰	۰/۱	CH	٪۷۵	CH-۱۵۰-٪۷۵-۰/۱٪
۱۱	۱۵۰	۰/۱	S	٪۷۵	S-۱۵۰-٪۷۵-۰/۱٪
۱۲	۱۵۰	۰/۱	F	٪۷۵	F-۱۵۰-٪۷۵-۰/۱٪
۱۳	۵۰	۰/۵	CH	٪۷۵	CH-۵۰-٪۷۵-۰/۵٪
۱۴	۵۰	۰/۵	S	٪۷۵	S-۵۰-٪۷۵-۰/۵٪

^۱ CH حرف اول کلمه Chips بوده و منظور خرده‌های پت ۱×۱ سانتی‌متری می‌باشد.

^۲ S حرف اول کلمه Strips بوده و منظور نوارهای پت ۱×۵ سانتی‌متری می‌باشد.

^۳ F حرف اول کلمه Fiber بوده و منظور الیاف پت به طول ۵ سانتی‌متر می‌باشد.

۱۵	۵۰	۰/۵	F	%۷۵	F-۵۰-%۷۵-۰/۵%
۱۶	۱۰۰	۰/۵	CH	%۷۵	CH-۱۰۰-%۷۵-۰/۵%
۱۷	۱۰۰	۰/۵	S	%۷۵	S-۱۰۰-%۷۵-۰/۵%
۱۸	۱۰۰	۰/۵	F	%۷۵	F-۱۰۰-%۷۵-۰/۵%
۱۹	۱۵۰	۰/۵	CH	%۷۵	CH-۱۵۰-%۷۵-۰/۵%
۲۰	۱۵۰	۰/۵	S	%۷۵	S-۱۵۰-%۷۵-۰/۵%
۲۱	۱۵۰	۰/۵	F	%۷۵	F-۱۵۰-%۷۵-۰/۵%
۲۲	۵۰	۱	CH	%۷۵	CH-۵۰-%۷۵-۱%
۲۳	۵۰	۱	F	%۷۵	S-۵۰-%۷۵-۱%
۲۴	۵۰	۱	S	%۷۵	-
۲۵	۱۰۰	۱	CH	%۷۵	CH-۱۰۰-%۷۵-۱%
۲۶	۱۰۰	۱	S	%۷۵	S-۱۰۰-%۷۵-۱%
۲۷	۱۰۰	۱	F	%۷۵	-
۲۸	۱۵۰	۱	CH	%۷۵	CH-۱۵۰-%۷۵-۱%
۲۹	۱۵۰	۱	S	%۷۵	S-۱۵۰-%۷۵-۱%
۳۰	۱۵۰	۱	F	%۷۵	-
۳۱	۵۰	۲	CH	%۷۵	CH-۵۰-%۷۵-۲%
۳۲	۵۰	۲	S	%۷۵	S-۵۰-%۷۵-۲%
۳۳	۵۰	۲	F	%۷۵	-
۳۴	۱۰۰	۲	CH	%۷۵	CH-۱۰۰-%۷۵-۲%

۳۵	۱۰۰	۲	S	%۷۵	S-۱۰۰-%۷۵-۲%
۳۶	۱۰۰	۲	F	%۷۵	-
۳۷	۱۵۰	۲	CH	%۷۵	CH-۱۵۰-%۷۵-۲%
۳۸	۱۵۰	۲	S	%۷۵	S-۱۵۰-%۷۵-۲%
۳۹	۱۵۰	۲	F	%۷۵	-

با توجه به جدول (۳-۵)، در این پژوهش ۳ آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی نمونه‌ی غیر مسلح، موسوم به آزمایش‌های مرجع صورت گرفته و همچنین ۳۰ آزمایش بر روی نمونه‌های مسلح شده با پت انجام شده است.

در فصل چهارم نتایج آزمایش‌های برش مستقیم مطرح شده در این فصل، بیان می‌شود.

فصل ۴ : بررسی و تحلیل نتایج آزمایش؛

۴-۱ مقدمه

همان‌طور که در فصل‌های پیشین بیان شده است، جهت بررسی رفتار و تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های خاک در حالت مسلح شده با خرده‌ها، نوارها و الیاف پت، خروجی آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با استفاده از سنسورهای جابجایی و نیرو ثبت شده است. در این فصل نتایج این آزمایش‌ها به همراه نمودارها و جداول مربوطه و همچنین تحلیل و تفسیر آن‌ها ارائه شده است. در پایان نیز، نتایج با نمودارهای مرجع و نتایج تحقیقات پیشین در این زمینه مقایسه شده‌اند.

۴-۲ بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش‌های برش مستقیم و تأثیر تسلیح خاک با درصد‌های وزنی و ابعاد مختلف مسلح‌کننده‌ی پت بر پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح شده در مقایسه با نمونه‌های مسلح نشده، پرداخته شده است.

۴-۲-۱ آزمایش‌های مرجع

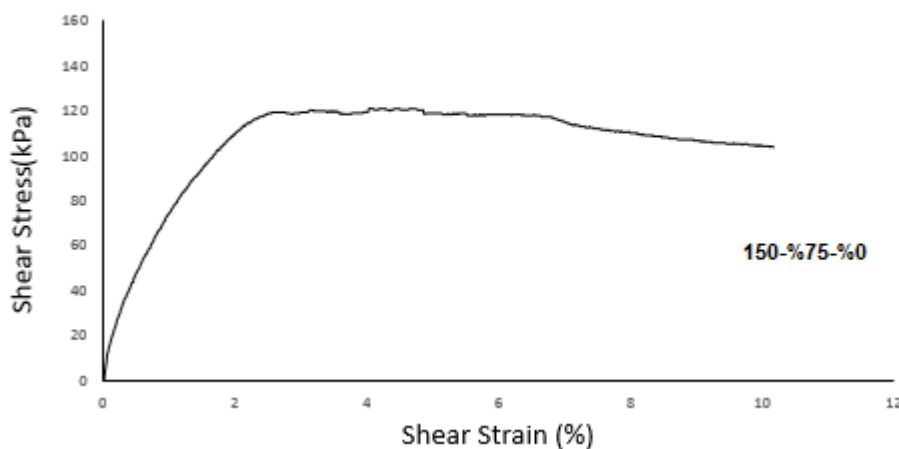
در این قسمت، رفتار خاک غیر مسلح تحت عنوان نمودارهای مرجع بررسی شده است. به این منظور منحنی‌های تنش برشی-کرنش برشی و کرنش قائم-کرنش برشی تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال و منحنی تنش برشی بیشینه-تنش قائم در تراکم نسبی ۰.۷۵ رسم شده‌اند. همچنین مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک غیرمسلح نیز ارائه شده است. لازم به ذکر است جهت رسم پوش گسیختگی و بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) نیاز به انجام کلیه‌ی آزمایش‌ها تحت سه سربار قائم مختلف وجود داشته است؛ اما چون هدف محقق از انجام

این پژوهش، بررسی تاثیرات سربار قائم بر مقاومت برشی خاک نبوده و بدیهی است که با افزایش سربار، مقاومت خاک افزایش می‌یابد، رفتار تنش- کرنش و همچنین تغییر شکل نمونه‌ها تنها تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال که درگیری دانه‌ها و پت‌ها با یکدیگر بیشتر بوده و خاک سطح مقاومتی بالاتری را از خود نشان داده، بررسی شده است.

پس از بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌ی مرجع، به بحث و بررسی پیرامون رفتار نمونه‌های مسلح و مقایسه‌ی آن‌ها با نمونه‌ی مرجع پرداخته شده است.

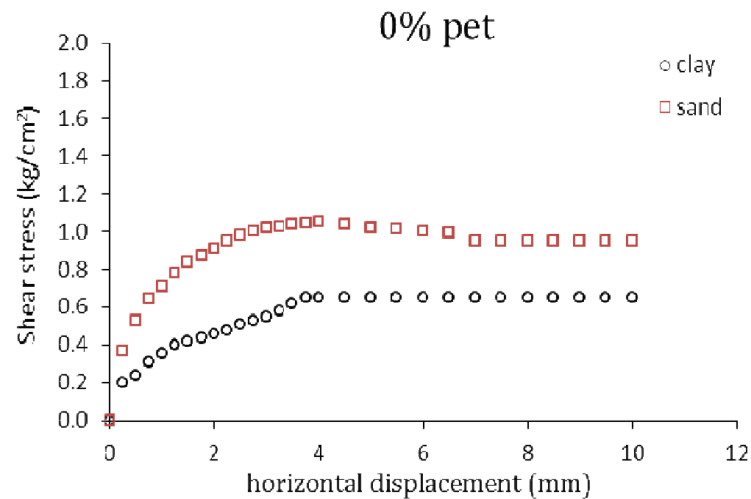
۴-۲-۱-۱ بررسی رفتار تنش-کرنش نمونه‌ی مرجع

در شکل (۴-۱) نمودار تنش برشی برحسب کرنش برشی در نمونه‌های مرجع، نشان داده شده است:



شکل ۴-۱ نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب جابجایی برشی برای نمونه‌ی مرجع (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال) همانطور که پیش‌تر گفته شد، نمونه‌ی ماسه‌ای غیر مسلح با تراکم نسبی ۷۵٪ تحت تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفته است. بر اساس نمودار، در این نمونه تا حدود ۲/۵٪ جابجایی برشی، خاک افزایش سختی داشته و تا تنش ۱۲۰ کیلوپاسکال را تحمل کرده است اما در کرنش‌های بالاتر مقاومت خاک تقریباً ثابت مانده است.

الگوی رفتار تنش برشی- کرنش برشی خاک را از درپور و همکاران نیز در سال ۱۳۹۰ در نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی دو نوع خاک غیرمسلح ماسه‌ای و رسی مشاهده کرده‌اند [۲۵] که در شکل (۲-۴) نمودار تنش برشی بر حسب کرنش برشی آزمایش آن‌ها نشان داده شده است:

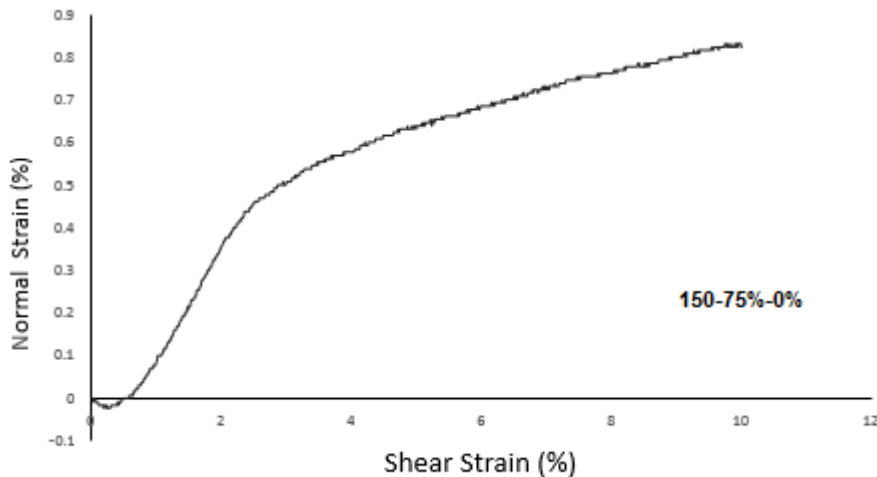


شکل ۲-۴ نمودار تنش برشی-کرنش برشی دو نوع خاک غیرمسلح در آزمایش‌های از درپور و همکاران [۲۵]

با توجه به نمودار شکل (۲-۴)، رفتار ماسه‌ای غیرمسلح، قابل مشاهده است که این رفتار مشابه رفتار نمونه‌ی مورد آزمایش در نمودار در شکل (۱-۴) بوده و نمونه خاک تقریباً در جابجایی برشی ۴ درصد، به حداکثر مقاومت برشی خود یعنی حدوداً ۱۱۰ کیلوپاسکال رسیده است.

۲-۱-۲-۴ بررسی رفتار تغییر شکل قائم خاک ماسه‌ای در نمونه‌ی مرجع

در شکل (۳-۴)، تغییرات کرنش قائم بر حسب درصد کرنش برشی در نمونه‌های مرجع تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است:

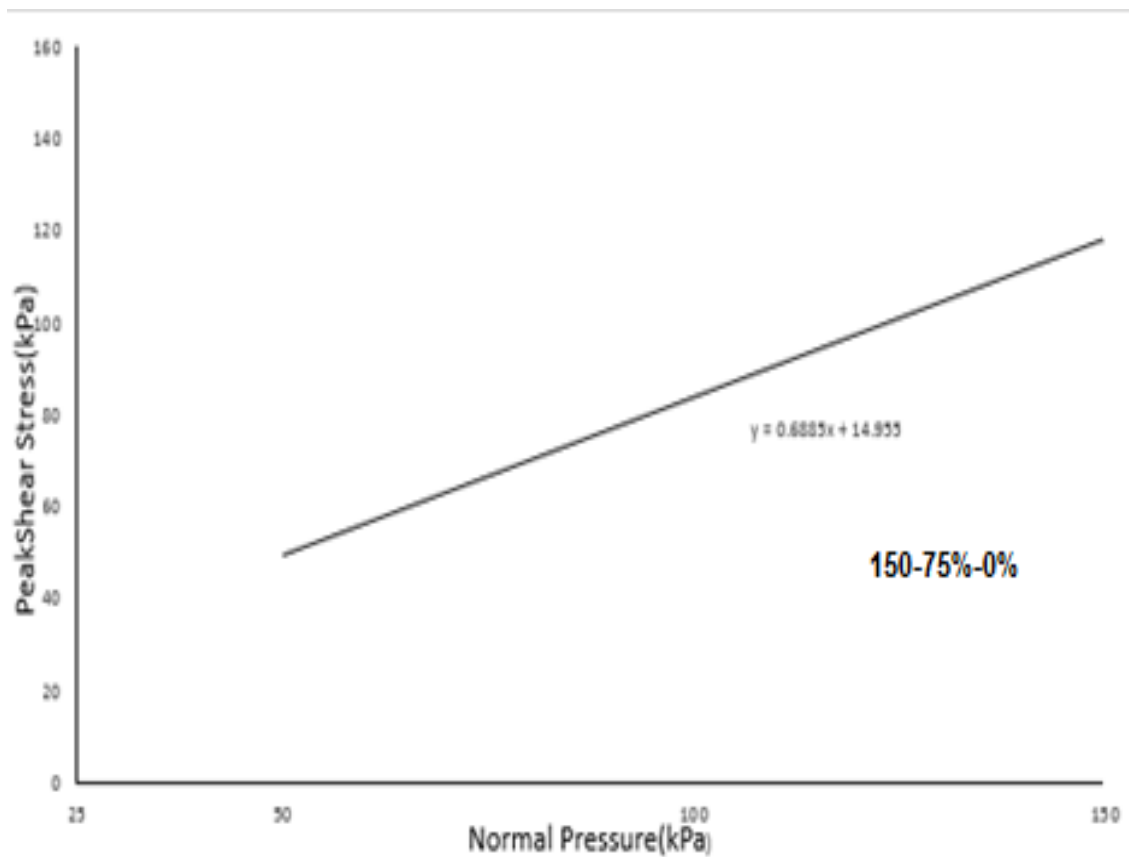


شکل ۳-۴ نمودار تغییرات کرنش قائم برحسب تغییرات کرنش برشی در نمونه‌ی مرجع (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل (۳-۴) تغییرات جابجایی قائم برای نمونه‌ی غیر مسلح تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال به این صورت بوده است که از ابتدای آزمایش تا ۰/۲۵٪ کرنش برشی، ارتفاع نمونه ۰/۰۳٪ کاهش یافته است، به عبارتی نمونه متراکم شده است؛ پس از آن تا کرنش برشی ۱۰٪ همواره کرنش قائم افزایش یافته تا به مقدار ۰/۸٪ رسیده است؛ به عبارت دیگر از کرنش برشی ۰/۲۵٪ به بعد خاک دچار اتساع شده است که بروز این رفتار، با توجه به تراکم خاک می‌تواند در نمونه‌ها و کرنش‌های مختلف رخ دهد.

۳-۱-۲-۴ بررسی پوش گسیختگی و پارامترهای مقاومت برشی در نمونه‌ی مرجع

در این بخش به بررسی پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ی غیر مسلح پرداخته شده است. در شکل (۴-۴) پوش گسیختگی برای نمونه‌ی غیرمسلح تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است.



شکل ۴-۴ پوش گسیختگی نمونه‌ی مرجع (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)

با توجه به پوش گسیختگی رسم شده برای نمونه‌ی ماسه‌ای غیر مسلح، مشاهده می‌شود که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در تراکم ۷۵٪ تحت سربارهای ذکر شده به ترتیب ۱۵ کیلوپاسکال و ۳۴/۵ درجه می‌باشد. دلیل وجود این مقدار چسبندگی در خاک ماسه‌ای، تراکم نسبتاً بالای نمونه‌ها و همچنین حضور مقدار ناچیزی لای (۲۱ گرم خاک مانده روی سینی الک‌ها از ۲ کیلو گرم خاک) می‌باشد.

۲-۲-۴ تأثیر تسلیح خاک با درصد‌های وزنی مختلف از مسلح

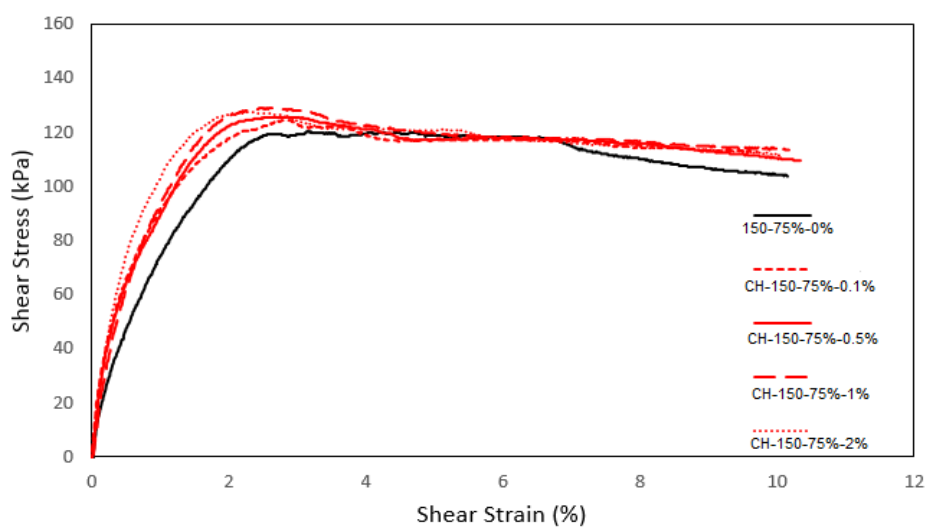
کننده‌ی پت بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها

در این بخش پیرامون اثر تسلیح خاک با مقادیر وزنی مختلف از مسلح کننده‌ی پت بر رفتار تنش- کرنش و مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی نمونه‌ها بحث شده است. نمونه‌های خاک با درصد‌های وزنی مختلف از پت (هر سه شکل)، مسلح شده و نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی و کرنش قائم-کرنش برشی تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال رسم شده اند. همچنین مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نیز برای نمونه‌های مسلح‌شده با درصد‌های وزنی مختلف از پت آورده شده است. هدف از رسم و تحلیل این نمودارها، یافتن بهترین درصد وزنی اشکال مختلف مسلح‌کننده‌ی پت جهت تسلیح خاک ماسه‌ای بوده است.

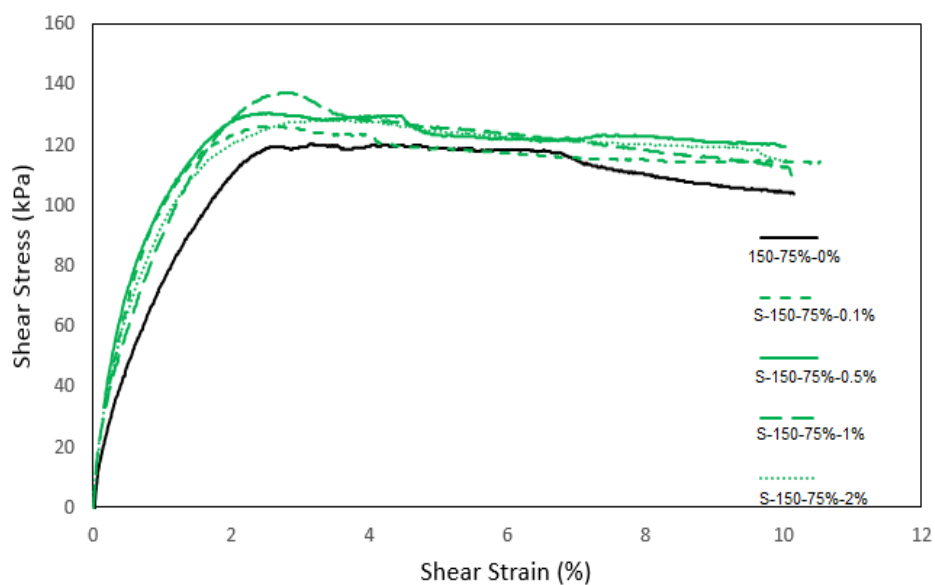
۱-۲-۲-۴ بررسی رفتار تنش-کرنش نمونه‌های مسلح‌شده با درصد‌های وزنی مختلف

از پت

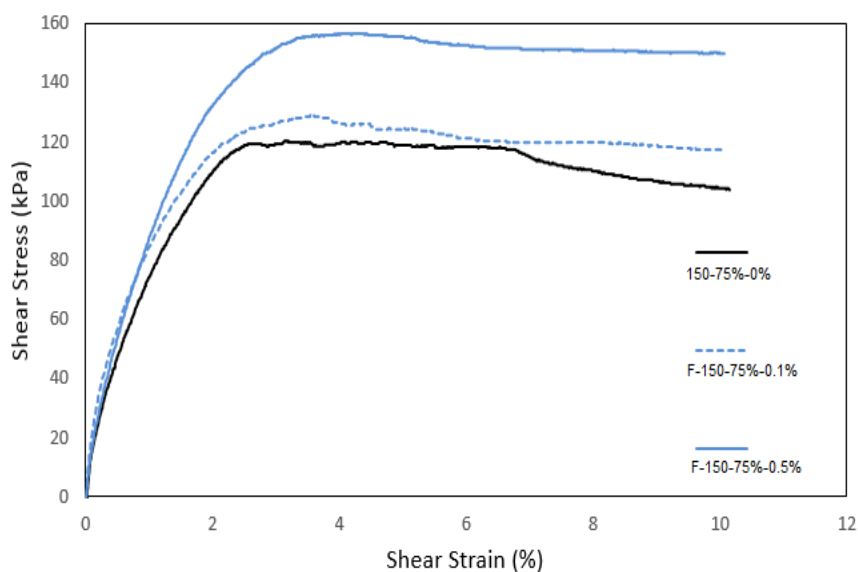
شکل‌های (۴-۵)، (۴-۶) و (۴-۷)، تغییرات تنش برشی نسبت به کرنش برشی را برای نمونه‌های مسلح‌شده در شرایط نمونه‌ی مرجع که با درصد‌های وزنی مختلف (۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد) از پت (برای الیاف ۰/۱ و ۰/۵)، مسلح شده اند و تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال مورد آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس قرار گرفته اند؛ نشان می‌دهند.



شکل ۴-۵ نمودار تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های ماسه‌ای غیر مسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از خردده‌های پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلو پاسکال)



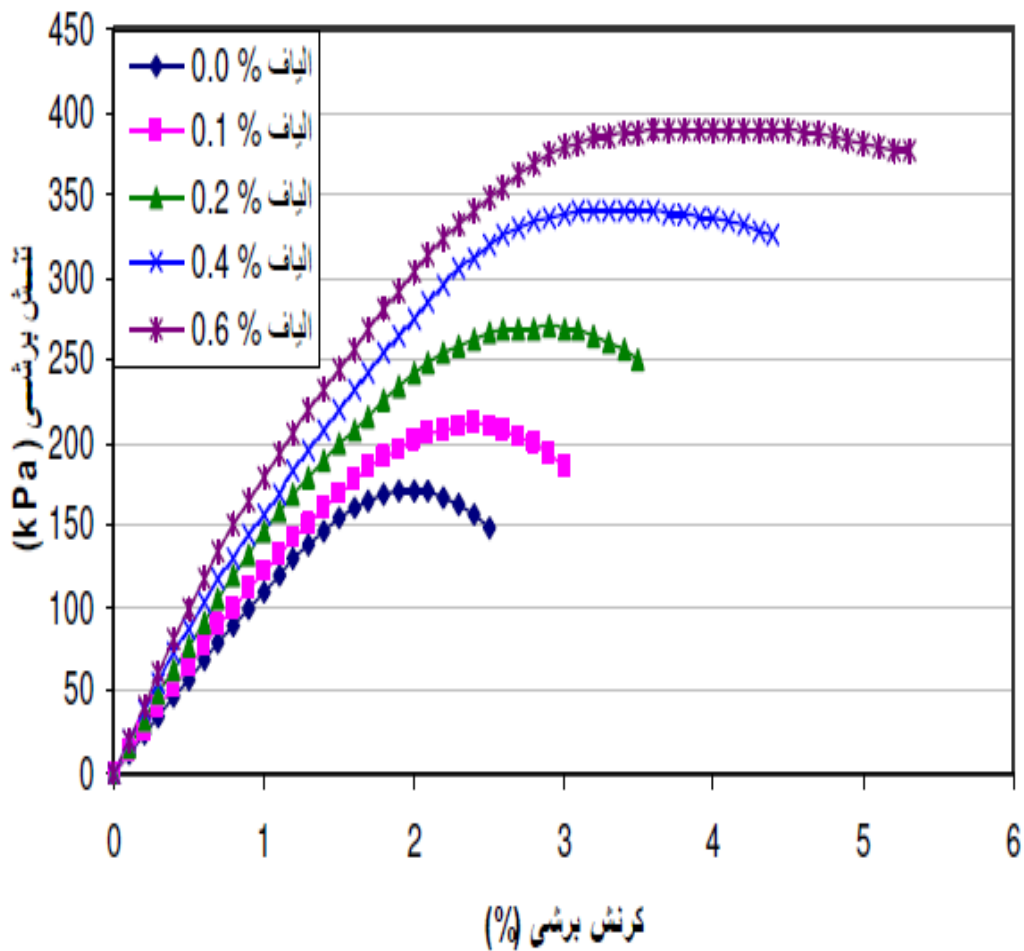
شکل ۴-۶ نمودار تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های ماسه‌ای غیر مسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از نوارهای پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴-۷ نمودار تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌های ماسه‌ای غیر مسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از الیاف پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلو پاسکال)

همان طور که در شکل‌های (۴-۵)، (۴-۶) و (۴-۷) دیده می‌شود، هر یک از منحنی‌های تنش-کرنش دارای یک قله بوده که متناظر با نقطه‌ی گسیختگی نمونه می‌باشد. همچنین رفتار نمونه‌های مسلح شده نسبت به نمونه‌ی مرجع بهبود یافته است که این تغییر با توجه به مقدار و ابعاد مسلح کننده‌ها متغیر است به طوریکه با افزایش درصد وزنی پت در نمونه‌ها (تا ۰.۱٪ برای خرده‌ها و نوارهای پت و ۰/۵٪ برای الیاف) تنش برشی و کرنش متناظر با تنش برشی ماکزیمم افزایش یافته و نمونه‌ها مقاوم تر و شکل پذیر تر شده اند.

در مورد مشابه می‌توان به نتایج آزمایش‌های سیم نگار و کمالی که در فصل دوم ذکر شد، اشاره کرد. شکل (۴-۸) نتایج آزمایش‌های تک محوری انجام شده توسط ایشان بر روی خاک ماسه‌ای مسلح شده با الیاف پت به طول ۳۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸ نمودار تنش برشی- کرنش برشی برای نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف به طول ۳۰ میلی‌متر در پژوهش سیم نگار [۲۲]

همانطور که از این شکل پیداست با افزایش درصد الیاف تا ۰/۶ درصد در ماسه، تنش برشی بیشینه و کرنش گسیختگی متناظر با آن افزایش پیدا کرده و رفتار خاک شکل پذیر تر شده است.

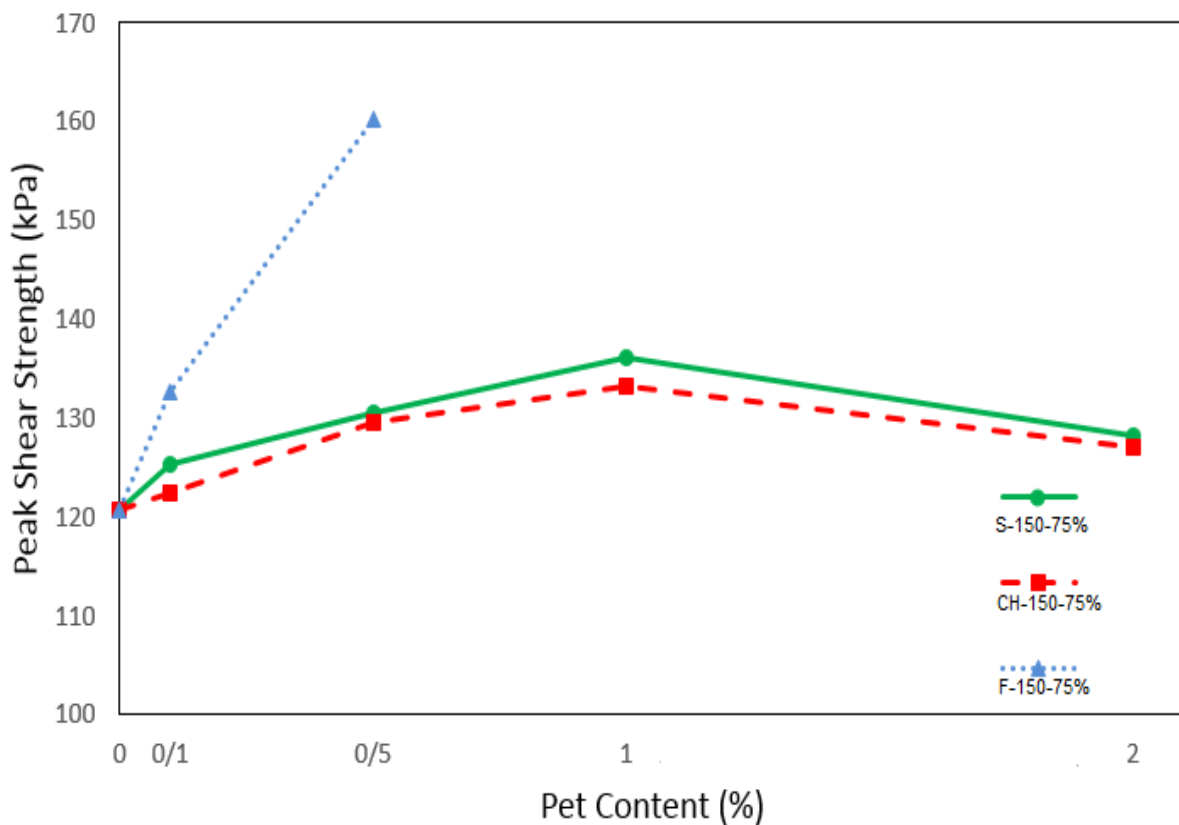
بررسی دقیق تر و بحث پیرامون علل بروز این گونه رفتار از سوی خاک در پژوهش حاضر، در قسمت بعد آورده شده است.

۲-۲-۲-۴ بررسی مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی در نمونه‌های مسلح-

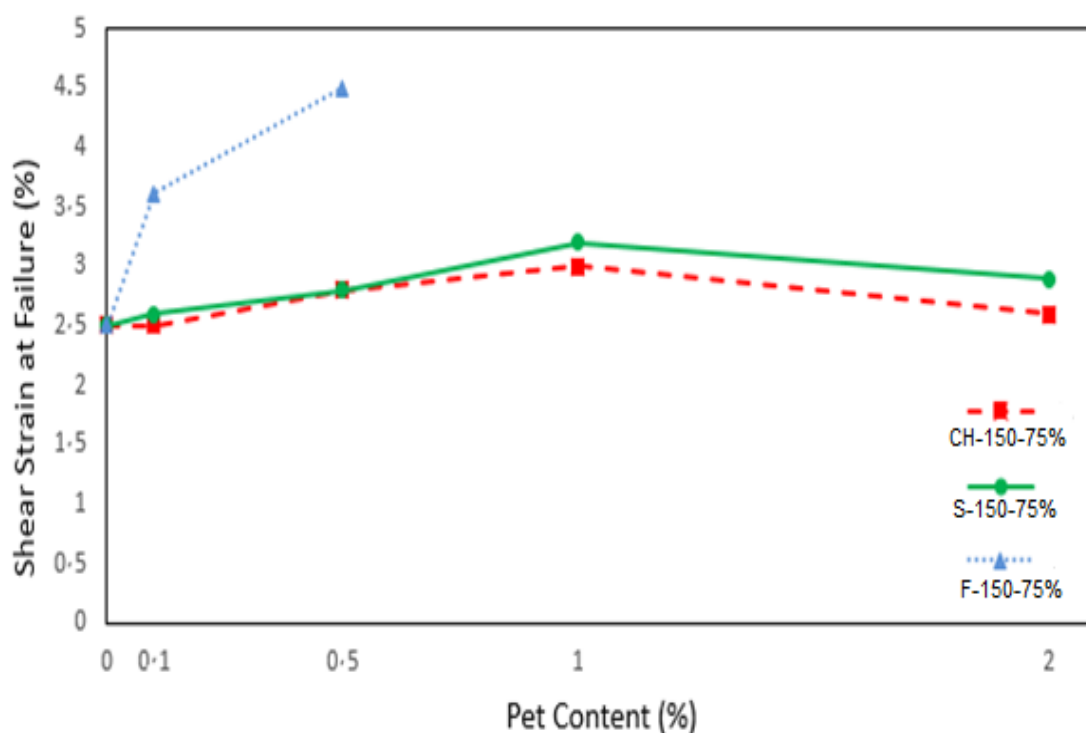
شده با درصد‌های وزنی مختلف از پت

نمودارهای شکل (۹-۴) و (۱۰-۴) برای مقایسه‌ی جزئی تر مقاومت برشی بیشینه و کرنش متناظر

با آن بین نمونه‌های مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از مسلح‌کننده‌ی پت، رسم شده‌اند.



شکل ۹-۴ نمودار مقاومت برشی بیشینه-درصد وزنی مسلح‌کننده برای شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۱۰ نمودار کرنش برشی در نقطه‌ی شکست-درصد وزنی مسلح کننده برای شکل‌های مختلف پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)

در این بخش مقایسه‌ای بین اثر تسلیح با درصدهای وزنی مختلف از مسلح‌کننده‌ی پت بر مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی نمونه‌های مسلح شده صورت گرفته است. نمودارهای شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) نشان می‌دهند در تسلیح خاک با ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد از نوارهای پت مقاومت برشی بیشینه به ترتیب ۱۲۵، ۱۳۰، ۱۳۶ و ۱۲۸ کیلوپاسکال بوده و کرنش گسیختگی متناظر نیز به ترتیب ۲/۶، ۲/۸، ۳/۲ و ۲/۹ درصد بوده است. همچنین در تسلیح خاک با ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد از خرده‌های پت مقاومت برشی بیشینه به ترتیب ۱۲۲، ۱۲۹، ۱۳۳ و ۱۲۷ کیلوپاسکال بوده و کرنش گسیختگی متناظر نیز به ترتیب ۲/۵، ۲/۷، ۳ و ۲/۶ درصد بوده است. بنابراین با افزایش درصد نوارها و خرده‌های پت تا ۱٪ در خاک، مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی افزایش یافته (رفتار نمونه‌ها شکل پذیر تر شده) و پس از آن کاهش یافته است. در تسلیح با الیاف

پت نیز مشابه همین روند حاکم بوده و افزودن الیاف تا ۰/۵ درصد وزنی به خاک، موجب بهبود رفتار خاک شده است (پیش تر توضیح داده شد که از نظر عملی افزودن بیش از ۰/۵ درصد الیاف به خاک میسر نبوده است)؛ به طوریکه در تسلیح با ۰/۱ درصد و ۰/۵ درصد از الیاف مقاومت برشی بیشینه به ترتیب ۱۳۲ و ۱۶۰ کیلوپاسکال بوده و کرنش گسیختگی متناظر نیز به ترتیب ۳/۶ و ۴/۵ درصد بوده است.

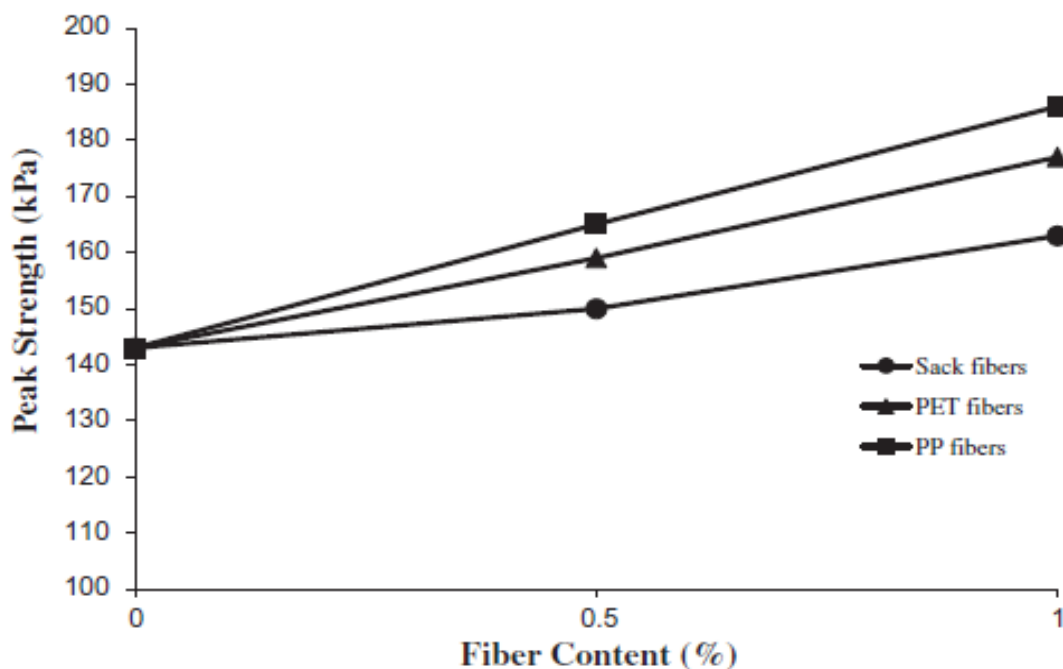
این روند تغییرات را می توان به این شکل تفسیر نمود که با افزودن پت (که رفتار شکل پذیری دارد) به محیط خاک (که رفتاری مشابه مواد شکننده دارد)، بخشی از خاک با مواد نرم تر و کشسان جایگزین می گردد و خاک حالت نرمتری به خود گرفته و انعطاف پذیری محیط افزایش می یابد؛ در نتیجه در کرنش های برشی به نسبت بالاتری گسیخته می شود. البته در درصدهای بالاتر از ۱٪ مسلح کننده ی پت، حضور پت در خاک به دلیل حجیم بودن پت ها موجب کاهش مقاومت خاک شده است که دلیل این امر تراکم بالای پت ها در خاک می باشد به طوری که در بعضی مناطق خاک مشاهده گردید نوارها یا خرده های پت در تماس با یکدیگر قرار گرفته بودند و به دلیل سطح صاف پت ها، اصطکاکی بین آن ها وجود نداشته است. همچنین همانطور که گفته شد در تسلیح خاک با پت مقداری از خاک با پت جایگزین شده است که اگر مقدار پت از حدی مشخص (۱ درصد) بیشتر شود، مخلوط خاک و پت نرم شده و افت مقاومت رخ می دهد. ضمناً در محل صفحه ی برش هیچ گونه پارگی در نوارها و خرده های پت مشاهده نگردیده است.

علت افزایش مقاومت نمونه با افزایش درصد وزنی الیاف در خاک (تا ۰/۵ درصد) آن است که چون الیاف به صورت درهم در مخلوط پخش شده است، این امر باعث پیچیدگی الیاف در یکدیگر شده و مقاومت کششی در برابر تنش کششی اعمال شده در الیاف بسیج می شود. این عکس العمل می تواند

به شکل کش آمدن (افزایش طول)، لغزش یا پاره شدن الیاف بروز کند و لذا مقاومت برشی خاک را افزایش می دهد.

در نمونه‌ی مشابه می توان به نتایج تحقیقات رنجبر در سال ۲۰۱۷ در زمینه‌ی تسلیح خاک با الیاف مختلف اشاره کرد. همان گونه که در فصل دوم بیان شد، افزودن الیاف پت با طول‌های ۱ سانتی‌متر به خاک منجر به افزایش مقاومت برشی بیشینه‌ی نمونه ها شده است. در پژوهش این محقق به دلیل طول کم الیاف، امکان اختلاط الیاف با خاک تا مقدار ۱ درصد وزنی وجود داشته است. شکل (۴-۱۱) نمودار مقاومت بیشینه در برابر درصد وزنی الیاف، در پژوهش رنجبر را نشان

می دهد.



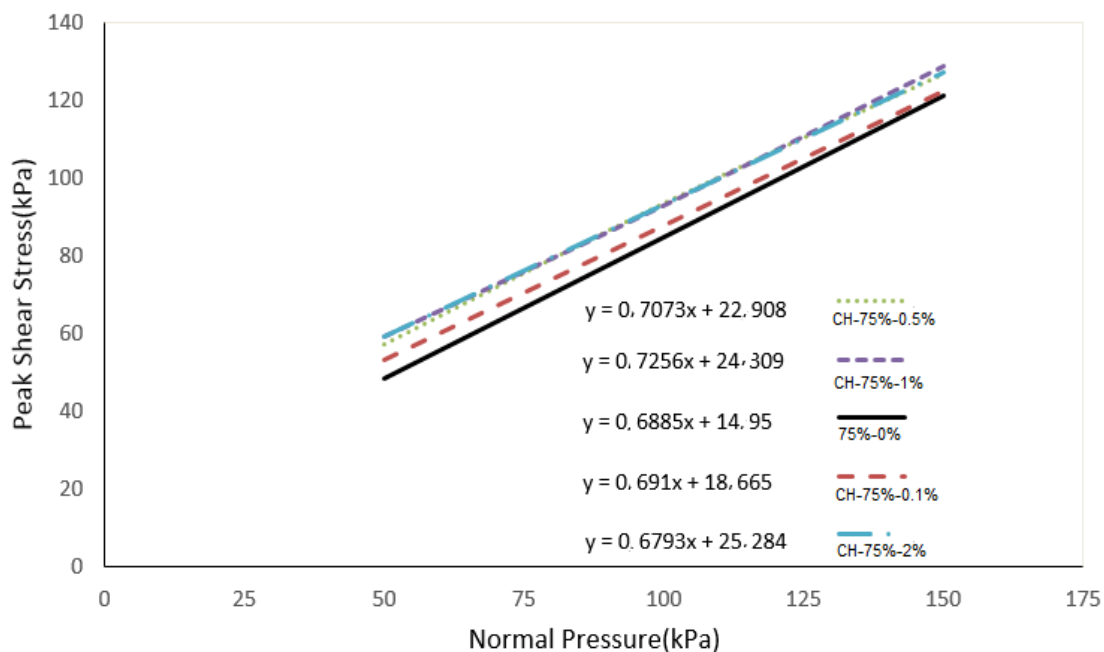
شکل ۴-۱۱ نمودار مقاومت برشی بیشینه-درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح شده با درصد وزنی‌های مختلف از الیاف پلیاستیکی مختلف (تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال و تراکم نسبی ۷۰٪) در پژوهش رنجبر [۴۱]

۳-۲-۲-۴ بررسی پوش گسیختگی و پارامترهای مقاومت برشی (C و Ø) در نمونه-

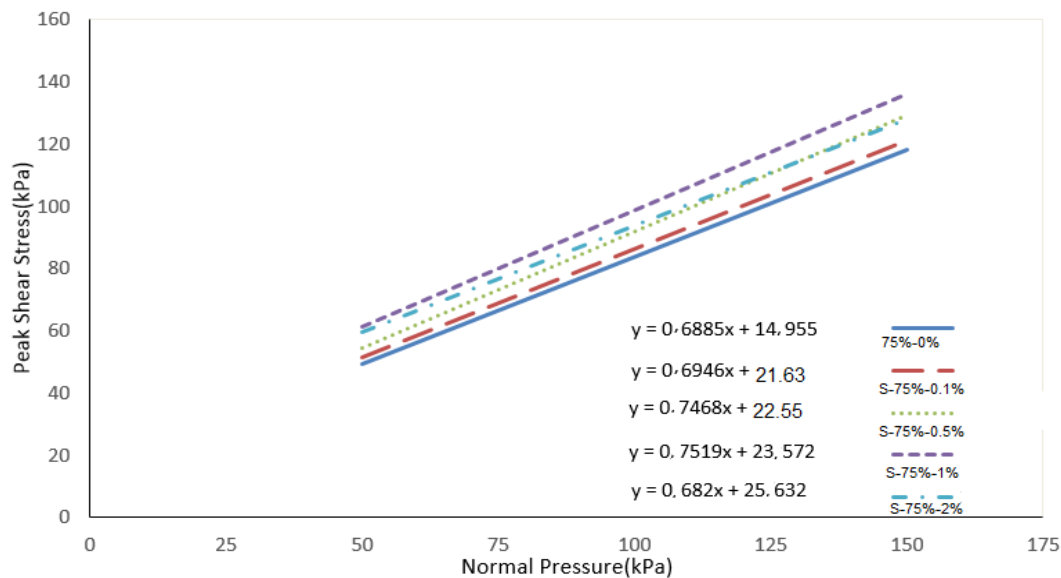
های مسلح شده با درصد های وزنی مختلف از پت

در بخش آزمایش های مرجع، پوش گسیختگی و پارامترهای مقاومت برشی نمونه ی غیر مسلح در تراکم نسبی ۷۵٪ و تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلو پاسکال نشان داده شد. در این قسمت به بررسی پوش گسیختگی و پارامترهای مقاومت برشی برای نمونه های مسلح شده با درصد وزنی های متفاوت از مسلح کننده ی پت پرداخته شده است.

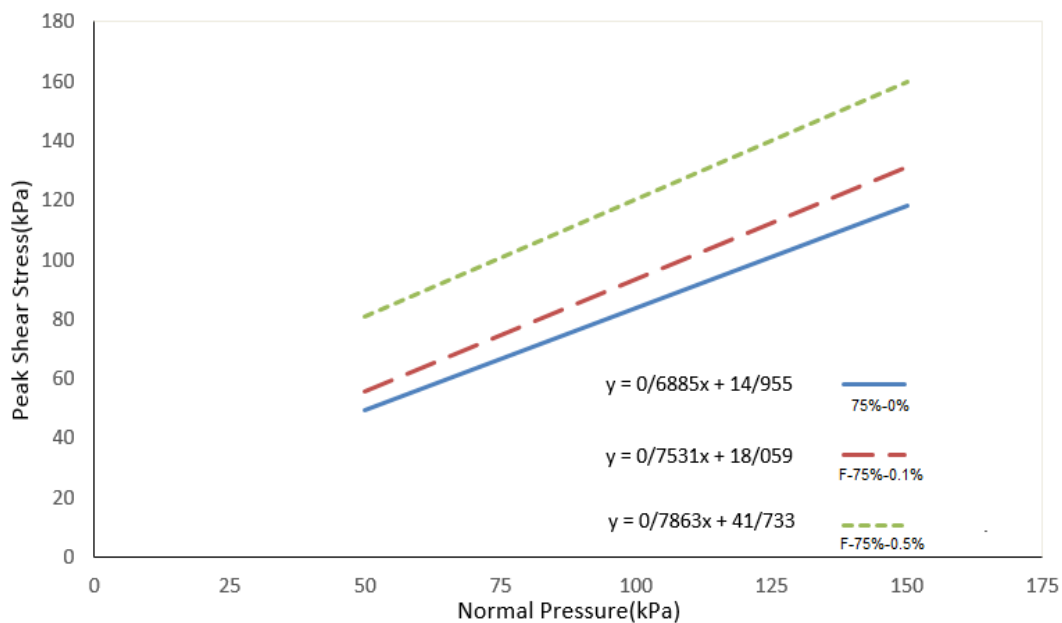
در شکل های (۱۲-۴)، (۱۳-۴) و (۱۴-۴) نمودارهای پوش گسیختگی به همراه معادله ی خط در تراکم ۷۵ درصد برای نمونه های مسلح شده با درصد های وزنی مختلف از پت، ترسیم شده است.



شکل ۱۲-۴ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله ی پوش برای نمونه های مسلح شده با درصد وزنی های مختلف خرده های پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴-۱۳ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با درصد وزنی‌های مختلف نوارهای پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)



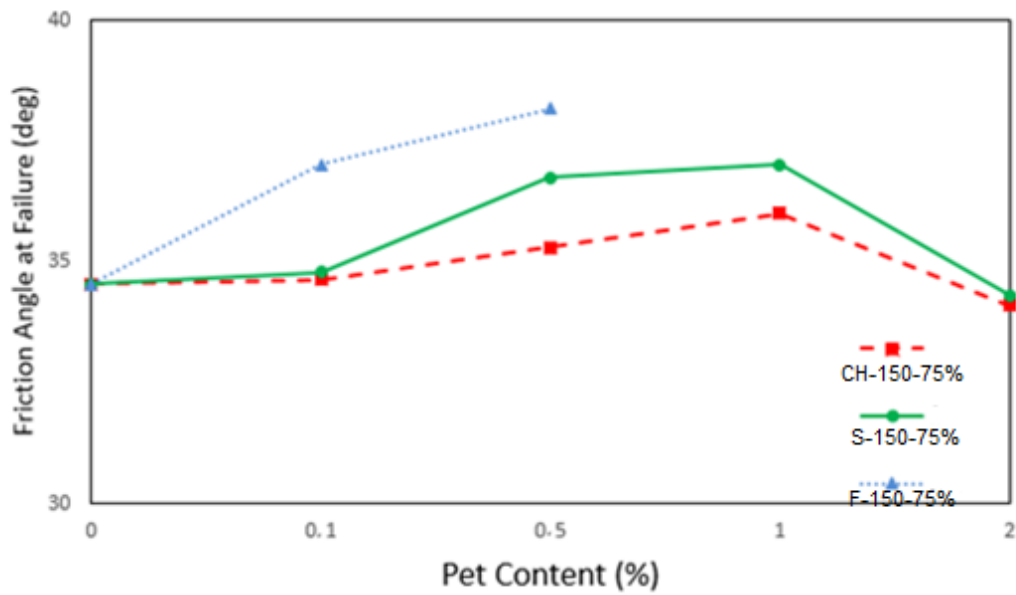
شکل ۴-۱۴ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با درصد وزنی‌های مختلف الیاف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)

شیب پوش‌ها (ضریب x در معادله خط) نشان‌دهنده‌ی زاویه اصطکاک داخلی و عرض از مبدأ نشان-
دهنده‌ی چسبندگی بین‌دانه‌ای می‌باشد.

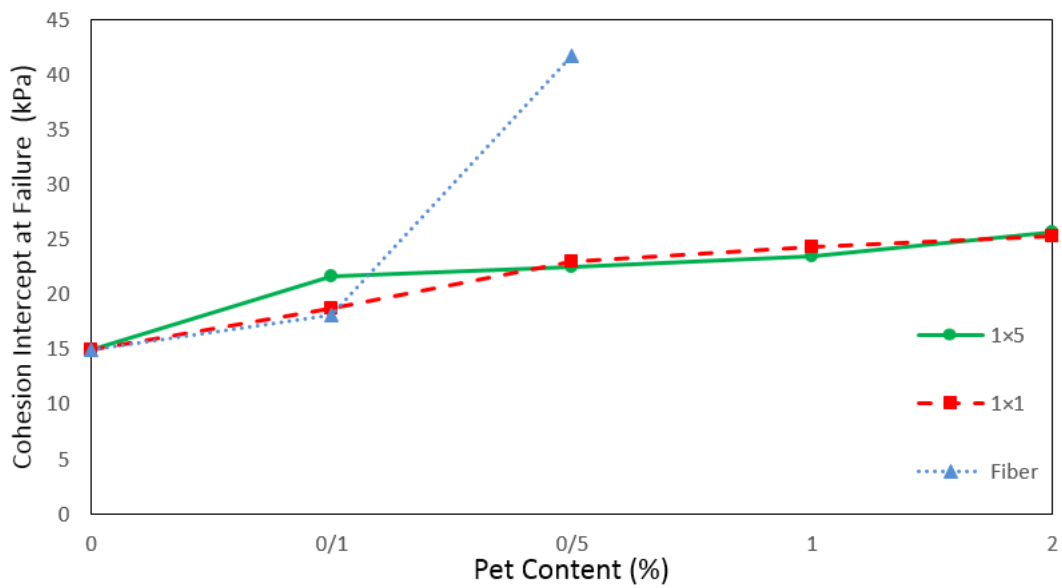
ذکر این نکته حائز اهمیت است که به دلیل وجود درصد کمی ریزدانه (۲۱ گرم مانده بر روس سینی الک‌ها در آزمایش دانه‌بندی خاک)، در خاک ماسه‌ای مورد آزمایش و همچنین تراکم نسبی نسبتاً بالای نمونه‌ها (۷۵ درصد)، در نمونه‌ی مرجع مقدار کمی چسبندگی (حدوداً ۱۵ کیلوپاسکال) مشاهده گردیده است که این مقدار چسبندگی برای خاک بسیار ناچیز بوده و بعد از تسلیح خاک با مسلح-کننده‌ها مقدار آن افزایش یافته است. دلیل این افزایش چسبندگی صرفاً حضور پت درون خاک می‌باشد که موسوم به "چسبندگی ظاهری" است. در واقع مقاومت اصلی خاک مورد آزمایش ناشی از اصطکاک بین ذراتش بوده است.

شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به ترتیب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را بر حسب تغییرات درصد وزنی پت، تحت سه سربار قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، برای نمونه‌های مسلح شده با ابعاد مختلف پت نشان می‌دهند.

همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) نشان داده شده است، با افزایش درصد وزنی پت تا ۱ درصد برای خرده‌ها و نوارها و ۰/۵ درصد برای الیاف، زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته، اما سیر تغییرات چسبندگی در تمام نمونه‌ها با افزودن تا ۰/۲٪ وزنی از پت صعودی بوده است.



شکل ۴-۱۵ نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۱۶ نمودار تغییرات چسبندگی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)

جهت بررسی دقیق‌تر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، جدول (۴-۱) ترسیم شده است.

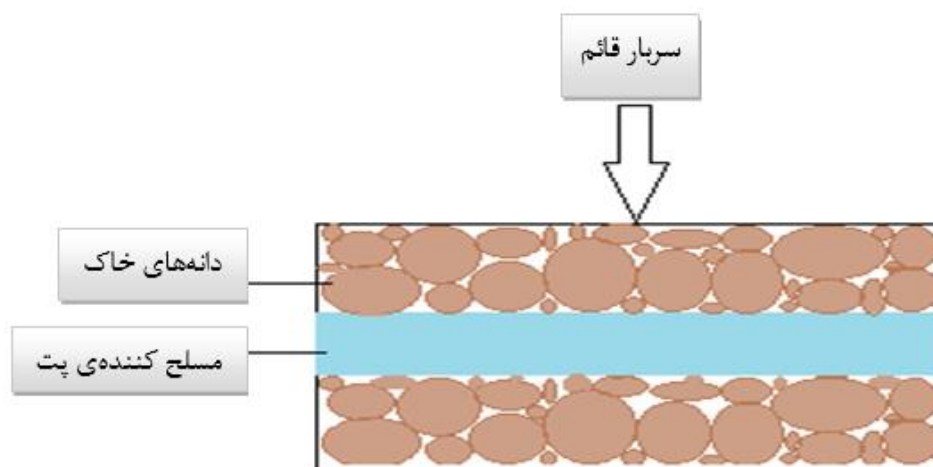
جدول ۴-۱ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)

ابعاد مسلح‌کننده (سانتی‌متر)	درصد وزنی مسلح‌کننده	زاویه اصطکاک داخلی در لحظه گسیختگی (درجه)	چسبندگی در لحظه گسیختگی (کیلوپاسکال)
خاک غیر مسلح	۰	۳۴/۵۴	۱۴/۹۵
۱×۱	۰/۱	۳۴/۶۴	۱۸/۶۶
	۰/۵	۳۵/۳	۲۲/۹
	۱	۳۶	۲۴/۳
	۲	۳۴/۱	۲۵/۳
۱×۵	۰/۱	۳۴/۷۸	۲۱/۶۳
	۰/۵	۳۶/۷۵	۲۲/۵
	۱	۳۷	۲۳/۵
	۲	۳۴/۳	۲۵/۶
الیاف با طول ۵	۰/۱	۳۷	۱۸/۰۶
	۰/۵	۳۸/۱۷	۴۱/۷۳

از جدول (۴-۱) می‌توان استنباط کرد که در تسلیح خاک با خرده‌های پت، با افزودن مقادیر ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد پت به خاک، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۰/۱، ۲/۲ و ۴/۲۲ درصد افزایش یافته است و بعد از آن با افزودن ۲٪ پت به خاک، ۱٪ کاهش یافته است. همچنین در تسلیح خاک با نوارهای پت نیز، با افزودن مقادیر ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد پت به خاک، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۰/۶، ۶ و ۷ درصد افزایش یافته است و بعد از آن با

افزودن ۲٪ پت به خاک، ۰/۶ درصد کاهش یافته است. برای نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف، اثر تسلیح به این صورت بوده است که با افزودن ۰/۱ و ۰/۵ درصد الیاف به خاک، زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۷ و ۱۰ درصد افزایش یافته است.

دلیل افزایش زاویه اصطکاک داخلی (با افزودن تا ۱٪ پت به خاک) را می‌توان این‌گونه توضیح داد که چون دانه‌های خاک نسبت به پت‌ها از زبری بیشتری برخوردار هستند، سطح پت را خراش داده و به طور نامحسوسی داخل آن فرو رفته‌اند که این ساز و کار بین پت و دانه‌های ماسه منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است. شکل (۴-۱۷) ساز و کار بین دانه‌های خاک و پت را تحت سربار قائم، به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷ نمای شماتیک یک مسلح کننده داخل خاک

بر خلاف تسلیح خاک با ۱ درصد پت، در تسلیح با افزودن ۲ درصد پت به خاک، زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. همان‌طور که قبلاً در بحث مقاومت برشی بیشینه نیز گفته شد، افزودن بیش از ۲ درصد از خرده‌ها و نوارهای پت به خاک به دلیل حجیم بودن پت‌ها، فضای زیادی از نمونه را اشغال کرده و بعضاً در برخی مناطق دیده شد که دو خرده یا نوار پت بر روی هم قرار گرفته‌اند

که به دلیل عدم وجود اصطکاک بین پت‌ها، اصطلاحاً بر روی هم سر خورده و موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک شده اند.

همچنین مقایسه‌ی چسبندگی نمونه‌های مختلف با استفاده از جدول (۴-۱) بیان‌گر این واقعیت است که در تسلیح با خرده‌های پت، با افزودن ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد پت به خاک، چسبندگی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۲۴/۸، ۵۳/۲، ۶۲ و ۷۰ درصد افزایش یافته است. به همین صورت، در تسلیح با نوارهای پت، با افزودن ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد پت به خاک، چسبندگی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۴۵، ۵۰، ۵۷ و ۷۱ درصد افزایش یافته است. در تسلیح خاک با ۰/۱ درصد و ۰/۵ درصد از الیاف نیز چسبندگی به ترتیب ۲۰ درصد و ۱۸۰ درصد افزایش یافته است.

بنابراین افزودن تا ۲ درصد پت همواره باعث افزایش چسبندگی در نمونه‌ها شده است.

در مورد مشابه، دادوند در سال ۱۳۹۶، در مقاله‌ای در کنفرانس عمران-معماری و شهرسازی که در فصل دوم در ادبیات فنی به آن اشاره شده است، جدول تغییرات C و Ø بر حسب درصد پت در خاک ماسه‌ای مسلح شده با الیاف پت را گزارش کرده‌اند [۳۱]:

جدول ۴-۲ تغییرات پارامترهای C و Ø خاک در مقاله‌ی دادوند و همکاران در سال ۱۳۹۶ [۲۷]

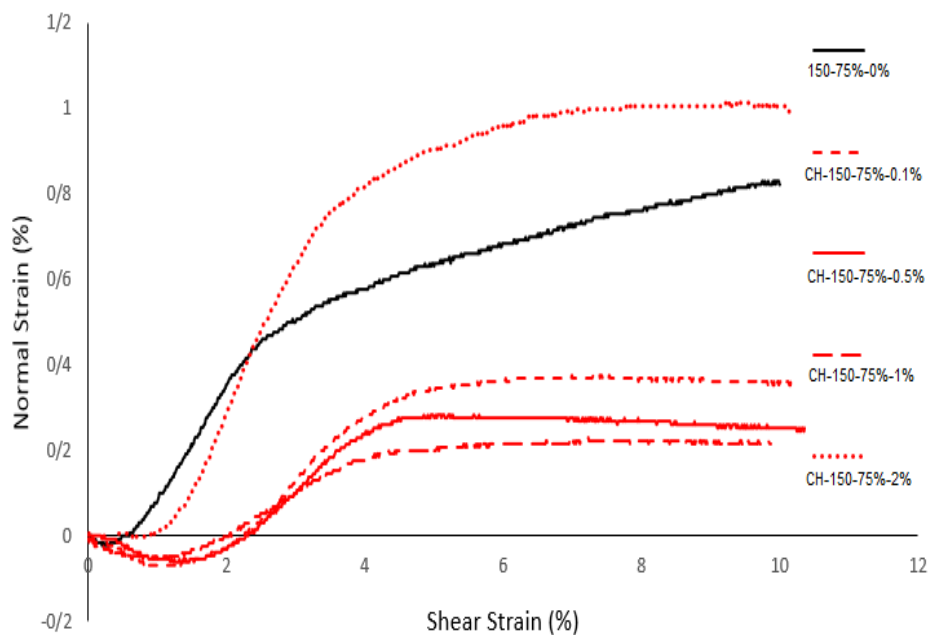
چسبندگی (kpa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	درصد وزنی الیاف پت
22.3	31.3	0
22.86	36.46	0.5
26.2	37	1
20.93	36	1.5
17.43	34.6	2

جدول (۲-۴) نشان می‌دهد با افزودن الیاف پت تا ۱ درصد، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک افزایش داشته و در درصد پت‌های بیشتر از آن، این مقادیر کاهش پیدا کرد که تغییرات C و ϕ نتایج مشابه این پژوهش داشته است.

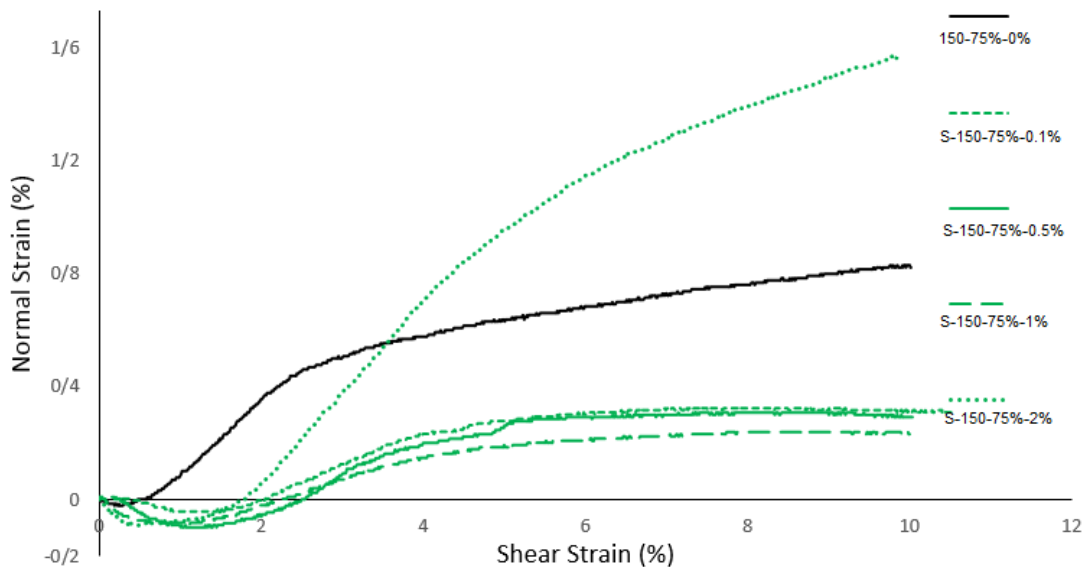
۴-۲-۲-۴ تأثیر تسلیح خاک با درصدهای وزنی مختلف از پت بر رفتار کرنش قائم-

کرنش برشی نمونه‌های مسلح

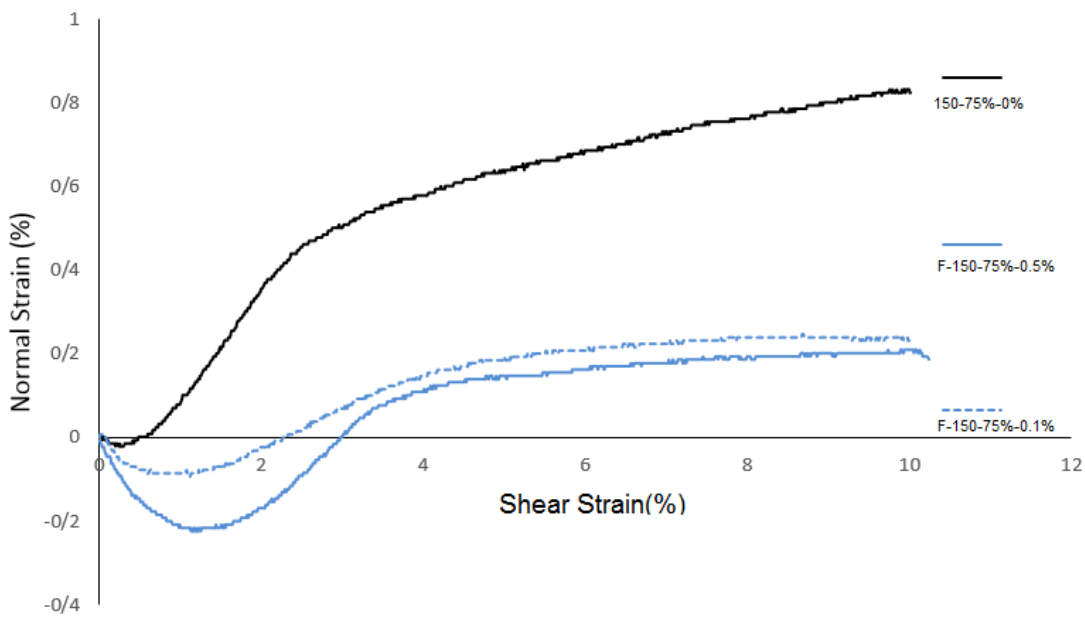
شکل‌های (۴-۱۸)، (۴-۱۹) و (۴-۲۰) نمودار تغییرات کرنش قائم بر حسب تغییرات کرنش برشی را برای نمونه‌ی مرجع و نمونه‌های مسلح‌شده با درصدهای وزنی مختلف از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت که تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال مورد آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس قرار گرفته اند، نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح‌شده با درصدهای وزنی مختلف از خرده‌های پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴-۱۹ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از نوارهای پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۲۰ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از الیاف پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)

با توجه به این شکل‌ها، تمامی نمودارهای کرنش قائم-کرنش برشی نمایانگر یک رفتار تراکمی اولیه از جانب نمونه‌ها هستند و بعد آن دچار اتساع شده‌اند، همچنین افزودن پت به خاک منجر به افزایش رفتار تراکمی اولیه‌ی خاک و کرنش قائم ماکزیمم شده است.

با توجه به شکل (۴-۱۸)، جهت بررسی و مقایسه‌ی تاثیر تسلیح با درصدهای وزنی مختلف از مسلح-کننده‌ها بر رفتار کرنش قائم-کرنش برشی می‌توان گفت در نمونه‌ی مرجع و نمونه‌های مسلح‌شده با ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد از خرده‌های پت، حداکثر کرنش قائم در حین تراکم به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۹، ۰/۰۹، ۰/۰۹ و صفر درصد بوده است. یعنی با افزودن خرده‌های پت به خاک نسبت به حالت غیر مسلح، رفتار تراکمی خاک بهبود یافته است اما این رفتار با افزایش درصد پت تا ۱ درصد تغییری نکرده است و با افزودن ۲ درصد پت به خاک، رفتار تراکمی خاک بدتر شده است.

در ارزیابی رفتار اتساعی نمونه‌های مسلح شده با درصدهای وزنی مختلف پت نیز می‌توان گفت نمونه‌ی مرجع و نمونه‌های مسلح شده با ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد از خرده‌های پت به ترتیب دارای حداکثر کرنش قائم اتساعی ۰/۸، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲۵ و ۱ درصد بوده‌اند. به عبارتی افزودن خرده‌های پت تا ۱٪ منجر به کاهش اتساع خاک شده است و بعد از آن با افزودن ۲ درصد پت به خاک، اتساع افزایش یافته است.

با توجه به شکل (۴-۱۹)، در نمونه‌های مسلح‌شده با ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد از نوارهای پت، حداکثر کرنش قائم در حین تراکم به ترتیب ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۰۵ درصد بوده است. یعنی با افزودن نوارهای پت به خاک نسبت به حالت غیر مسلح، رفتار تراکمی خاک بهبود یافته است؛ اما این رفتار با افزایش درصد پت تا ۱ درصد تغییری نکرده است و با افزودن ۲ درصد پت به خاک، رفتار تراکمی خاک کاهش پیدا کرده است.

در ارزیابی رفتار اتساعی نمونه‌های مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از نوارهای پت نیز می‌توان گفت نمونه‌ی مرجع و نمونه‌های مسلح شده با ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد از نوارهای پت به ترتیب دارای حداکثر کرنش قائم اتساعی ۰/۸، ۰/۳۵، ۰/۲۵، ۰/۲ و ۱/۶ درصد بوده‌اند. به عبارتی افزودن خرده‌های پت تا ۱٪ منجر به کاهش اتساع خاک شده است و بعد از آن با افزودن ۲ درصد پت به خاک، اتساع افزایش یافته است.

با توجه به شکل (۴-۲۰)، در نمونه‌های مسلح‌شده با ۰/۱ و ۰/۵ درصد از الیاف پت، حداکثر کرنش قائم در حین تراکم به ترتیب ۰/۱ و ۰/۲۲ درصد بوده است. یعنی با افزودن الیاف پت به خاک نسبت به حالت غیر مسلح، رفتار تراکمی خاک بهبود یافته است.

در ارزیابی رفتار اتساعی نمونه‌های مسلح شده با درصد‌های وزنی مختلف از الیاف پت نیز می‌توان گفت نمونه‌های مسلح شده با ۰/۱ و ۰/۵ درصد از الیاف پت به ترتیب دارای حداکثر کرنش قائم اتساعی ۰/۲ و ۰/۱۸ درصد بوده‌اند. به عبارتی افزودن الیاف پت تا ۰/۵ درصد منجر به کاهش اتساع خاک شده است.

۴-۲-۳ تأثیر تسلیح خاک با ابعاد مختلف پت بر رفتار مکانیکی

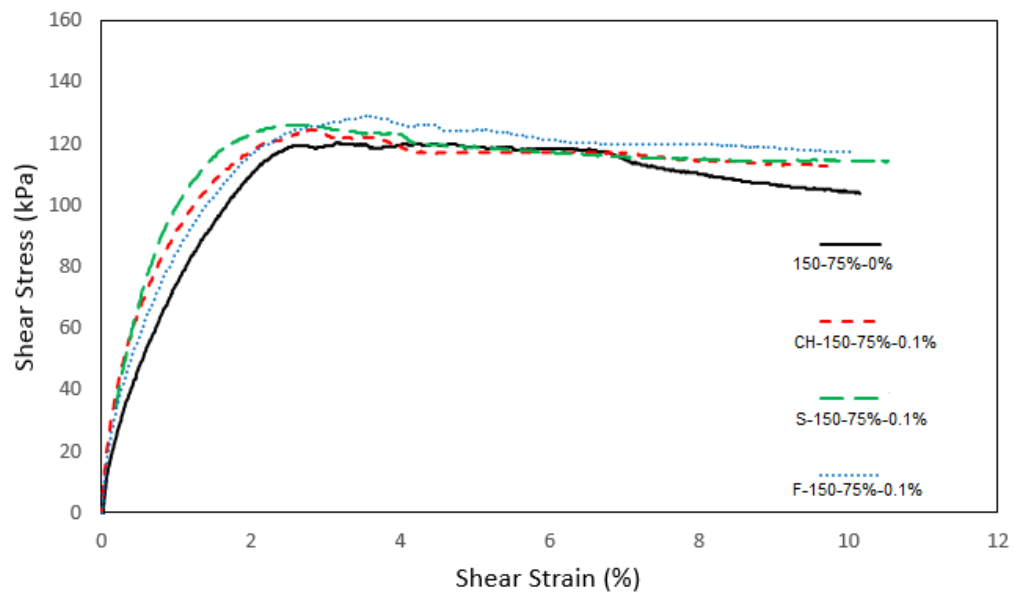
نمونه‌های مسلح

در این بخش پیرامون اثر تسلیح خاک با ابعاد مختلف از مسلح کننده‌ی پت، بر رفتار تنش-کرنش و مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی نمونه‌ها بحث شده است. نمونه‌های خاک با ابعاد مختلف از پت (سه شکل)، مسلح شده و نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی و کرنش قائم-کرنش برشی تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال رسم شده‌اند. همچنین پوش گسیختگی و مقادیر زاویه اصطکاک داخلی

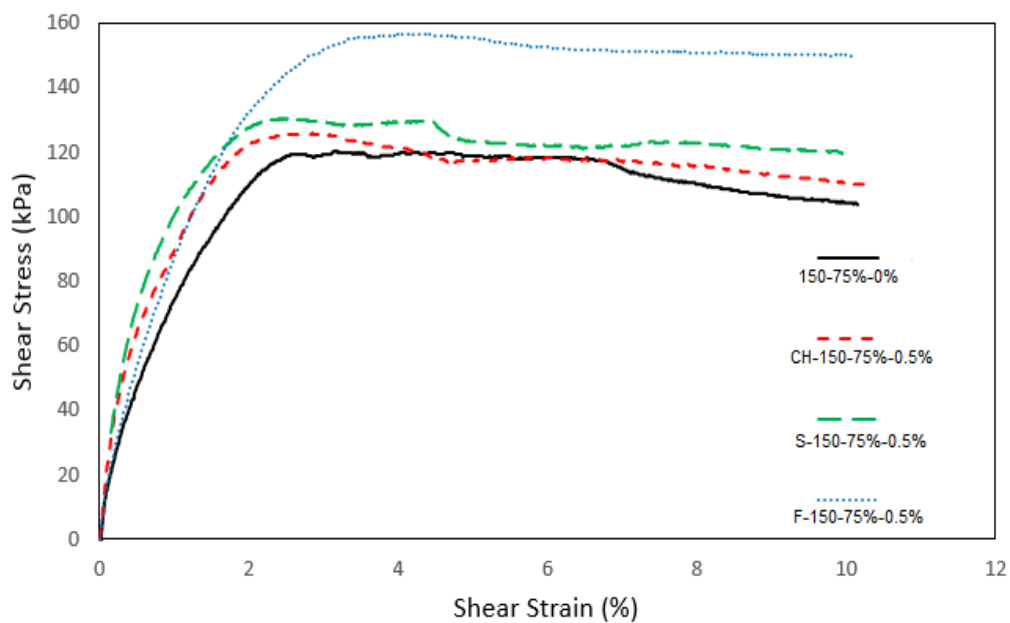
و چسبندگی نیز برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت آورده شده است. هدف از رسم و تحلیل این نمودارها، یافتن بهترین شکل از مسلح‌کننده‌ی پت جهت تسلیح خاک ماسه‌ای بوده است.

۱-۳-۲-۴ بررسی رفتار تنش-کرنش نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت

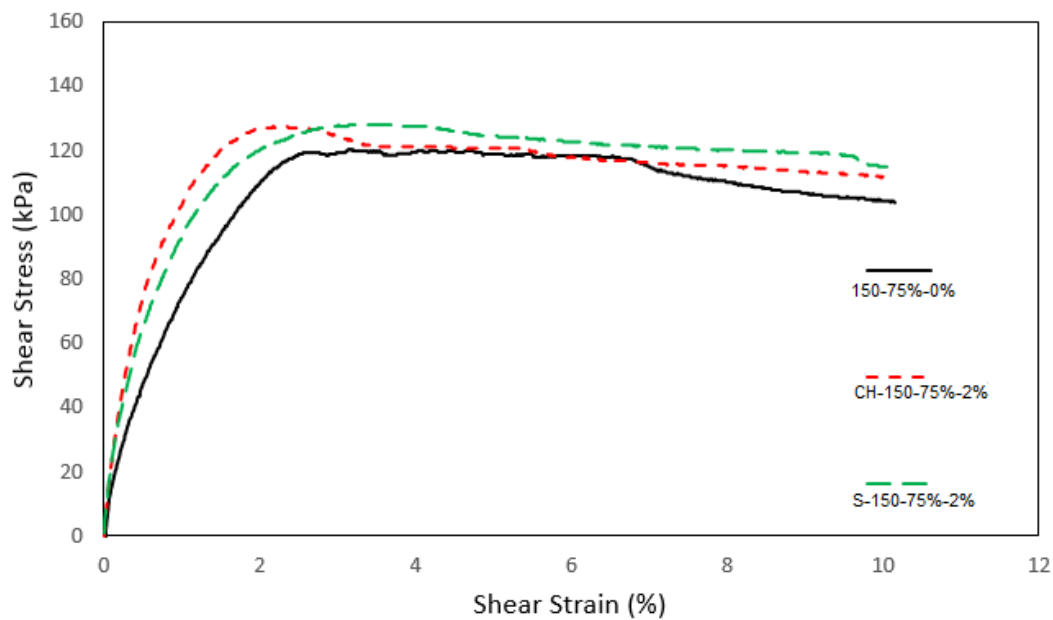
شکل‌های (۲۱-۴)، (۲۲-۴)، (۲۳-۴) و (۲۴-۴)، نمودارهای تنش-کرنش را برای نمونه‌های مسلح-شده‌ی نمونه‌ی مرجع که با شکل‌های مختلف پت (خرده‌ها، نوارها و الیاف) و در یک درصد وزنی مشخص، مسلح شده اند و در تراکم نسبی ۷۵ درصد تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال مورد آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس قرار گرفته اند؛ نشان می‌دهند.



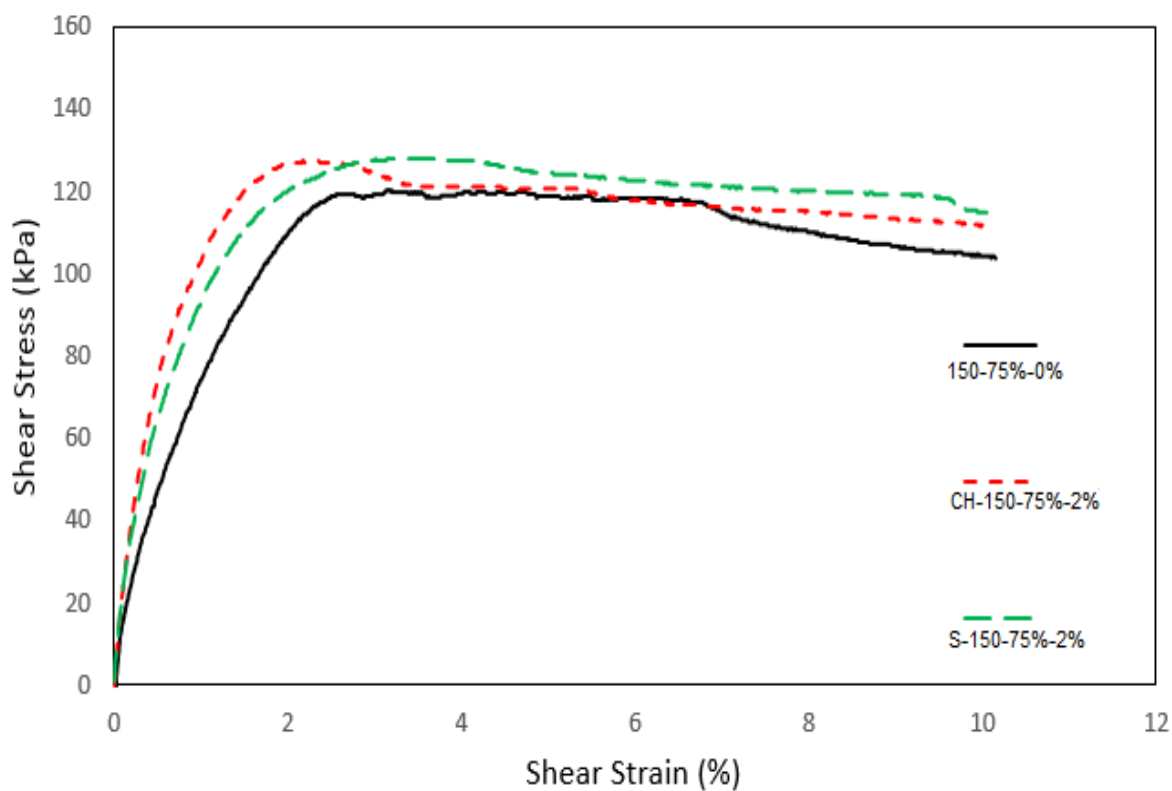
شکل ۲۱-۴ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح‌شده با ۰/۱ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۲۲-۴ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده با ۰/۵ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال)



شکل ۲۳-۴ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده با ۱ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴-۲۴ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده با ۲ درصد از شکل‌های مختلف پت (تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال)

شکل‌های (۴-۲۱)، (۴-۲۲)، (۴-۲۳) و (۴-۲۴) نشان می‌دهند در تسلیح خاک با یک درصد وزنی مخصوص از شکل‌ها و ابعاد مختلف پت به ترتیب الیاف نوارها و خرده‌ها بهترین عملکرد را در افزایش مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی داشته‌اند. بحث دقیق‌تر پیرامون این موضوع در بخش بعد آورده شده است.

۲-۳-۲-۴ بررسی مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی در نمونه‌های مسلح-

شده با ابعاد مختلف پت

در این بخش مقایسه‌ای بین اثر تسلیح با ابعاد مختلف از مسلح‌کننده‌ی پت بر مقاومت برشی بیشینه و کرنش گسیختگی نمونه‌های مسلح شده صورت گرفته است.

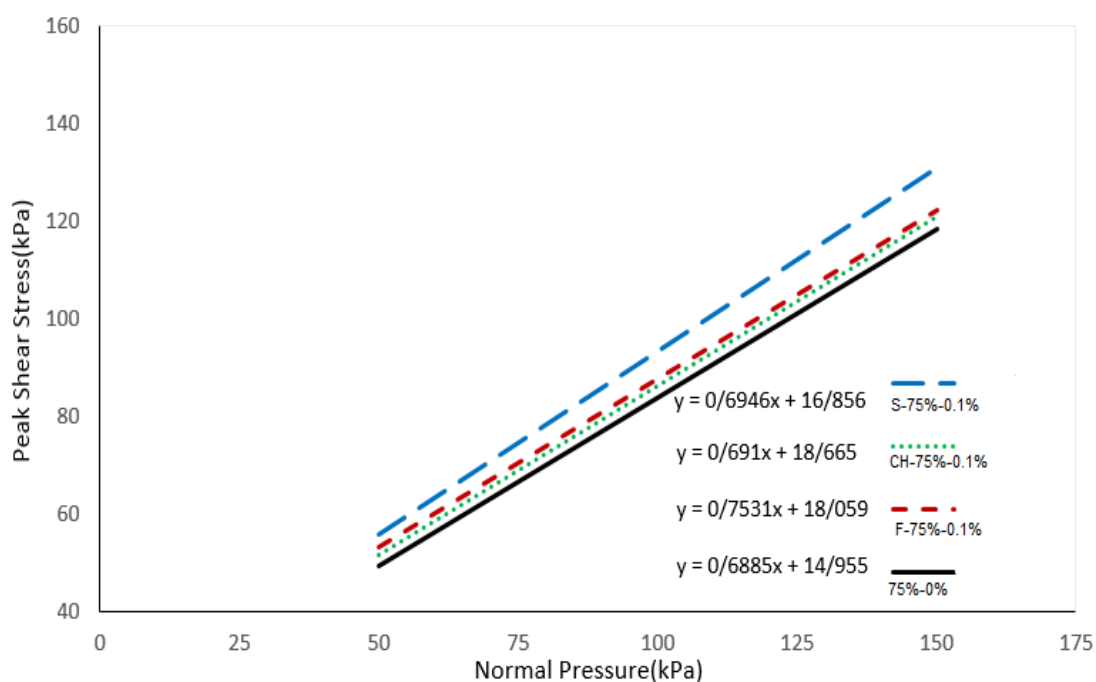
نمودارهای شکل‌های (۹-۴) و (۱۰-۴) نشان می‌دهند در تسلیح خاک با ۰/۱ درصد از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت مقاومت برشی بیشینه به ترتیب ۱۲۲، ۱۲۵ و ۱۳۲ کیلوپاسکال بوده است که کرنش‌های گسیختگی متناظر نیز به ترتیب ۲/۵، ۲/۶ و ۳/۶ درصد بوده است. به همین ترتیب در تسلیح خاک با ۰/۵ درصد از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت مقاومت برشی بیشینه به ترتیب ۱۲۹، ۱۳۰ و ۱۶۰ کیلوپاسکال بوده است که کرنش‌های گسیختگی متناظر نیز به ترتیب ۲/۶، ۲/۸ و ۴/۵ درصد بوده است. در تسلیح خاک با ۱ درصد از خرده‌ها و نوارهای پت مقاومت برشی بیشینه به ترتیب ۱۳۳ و ۱۳۶ کیلوپاسکال بوده است که کرنش‌های گسیختگی متناظر نیز به ترتیب ۳ و ۳/۲ درصد بوده است. همچنین در تسلیح خاک با ۲ درصد از خرده‌ها و نوارهای پت مقاومت برشی بیشینه به ترتیب ۱۲۷ و ۱۲۸ کیلوپاسکال بوده است که کرنش‌های گسیختگی متناظر نیز به ترتیب ۲/۶ و ۲/۹ درصد بوده است.

به طور خلاصه می‌توان گفت شکل‌های (۲۱-۴)، (۲۲-۴)، (۲۳-۴) و (۲۴-۴) نشان‌دهنده‌ی آن است که در یک درصد وزنی ثابت از مسلح‌کننده‌ی پت، نمونه‌های مسلح شده با الیاف پت نسبت به نمونه‌هایی که با نوارها و خرده‌های پت مسلح شده بودند، تنش برشی بیشتری را متحمل شدند؛ زیرا الیاف علاوه بر شکل‌پذیری و مقاومت کششی بیشتر نسبت به نوارها و خرده‌های پت، موجب پیوستگی بهتر خاک شده اند.

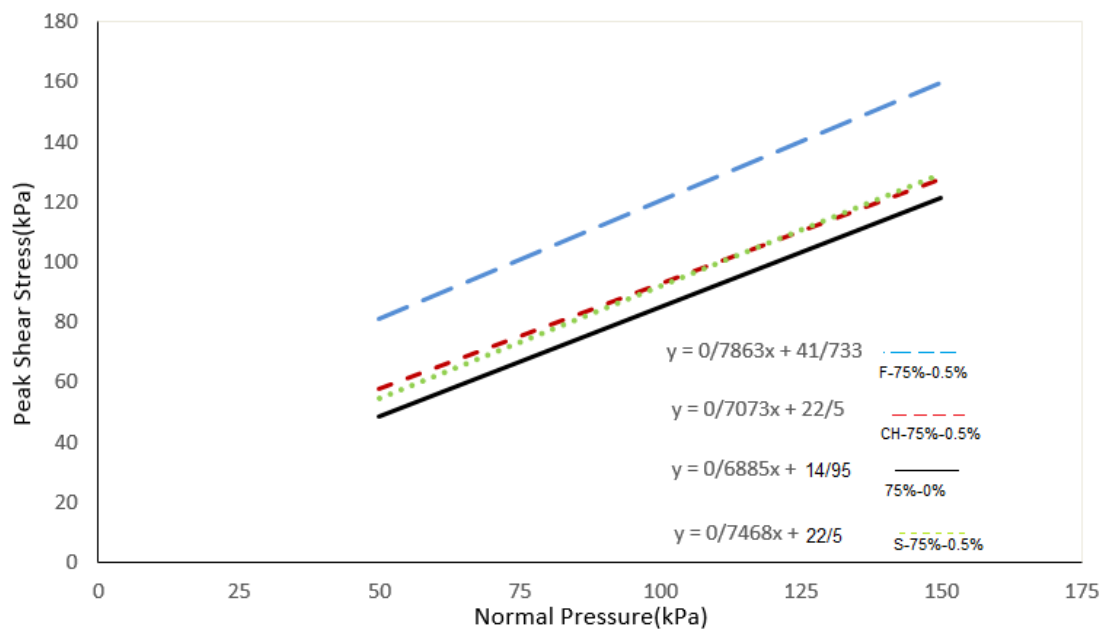
۳-۳-۲-۴ بررسی پوش گسیختگی و پارامترهای مقاومت برشی (C و ϕ) در نمونه-

های مسلح شده با ابعاد مختلف پت

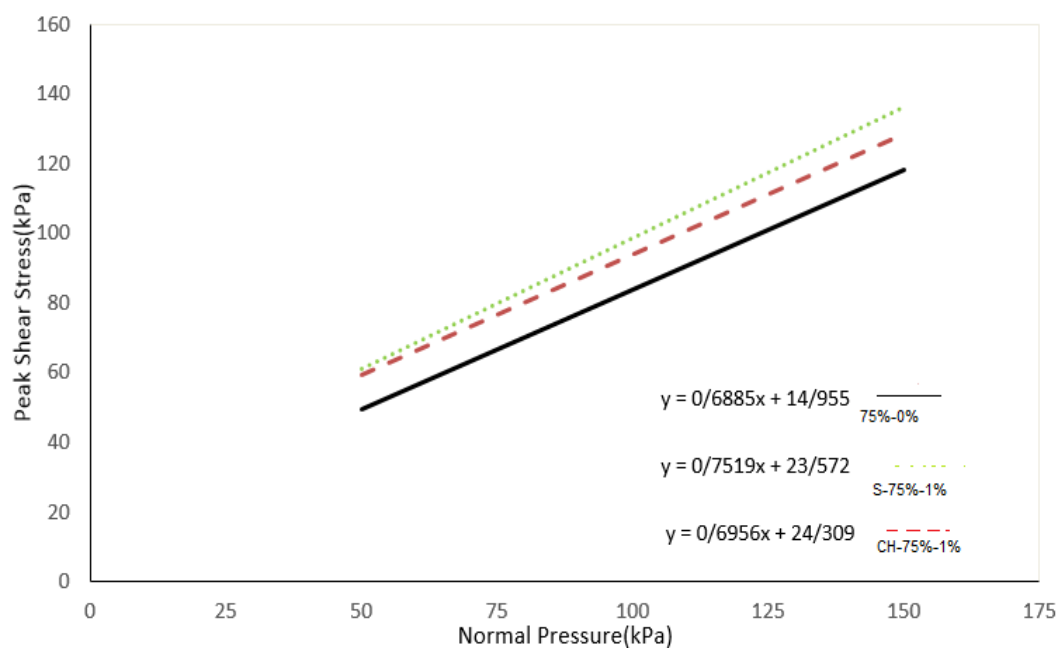
در شکل های (۲۵-۴)، (۲۶-۴) (۲۷-۴) و (۲۸-۴) نمودارهای پوش گسیختگی به همراه معادله ی خط در تراکم ۷۵ درصد برای نمونه های مسلح شده با ابعاد مختلف پت، ترسیم شده است. همانطور که قبلا گفته شد برای رسم پوش گسیختگی نیاز به انجام آزمایش ها تحت سه سربار قائم مختلف وجود داشته است.



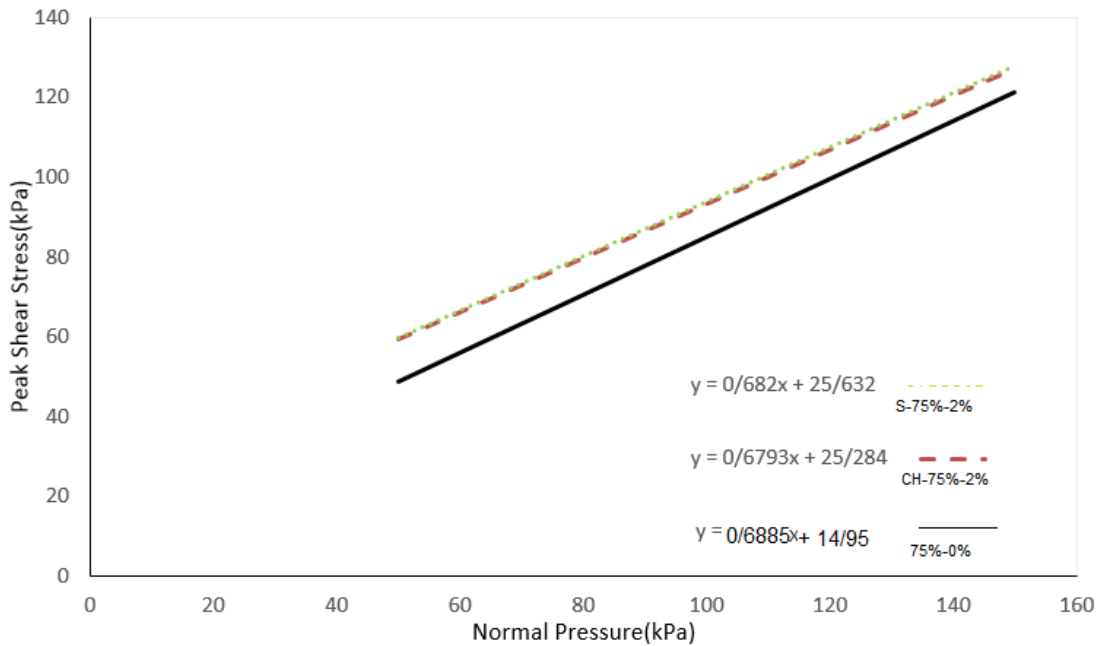
شکل ۲۵-۴ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله ی پوش برای نمونه های مسلح شده با ۱/۱ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۲۶ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با ۰/۵ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۲۷ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با ۱ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۲۸ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش برای نمونه‌های مسلح شده با ۲ درصد وزنی از ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)

نمودارها نشان می‌دهند در یک درصد وزنی ثابت از پت، شیب پوش‌ها (ضریب x در معادله خط) که نشان‌دهنده‌ی زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد به ترتیب برای نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف، نوارها و خرده‌ها بیشتر بوده است و عرض از مبدأ که نشان‌دهنده‌ی چسبندگی بین‌دانه‌ای می‌باشد نیز در تسلیح با ۱/۰ درصد وزنی از مسلح‌کننده‌ها به ترتیب برای نمونه‌های مسلح‌شده با نوارها، خرده‌ها و الیاف پت بیشتر بوده است؛ حال آنکه در تسلیح خاک با ۵/۰ درصد وزنی از مسلح‌کننده‌ها الیاف بیشترین چسبندگی را در خاک ایجاد کرده‌اند.

نمودارهای (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به وضوح تاثیر ابعاد مسلح‌کننده را بر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بر حسب درصد وزنی مسلح‌کننده نشان می‌دهند.

جدول (۴-۳) مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف مسلح‌کننده (در تسلیح با یک درصد وزنی ثابت از پت) نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در لحظه‌ی گسیختگی بر حسب تغییرات درصد وزنی پت برای نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف پت (تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال)

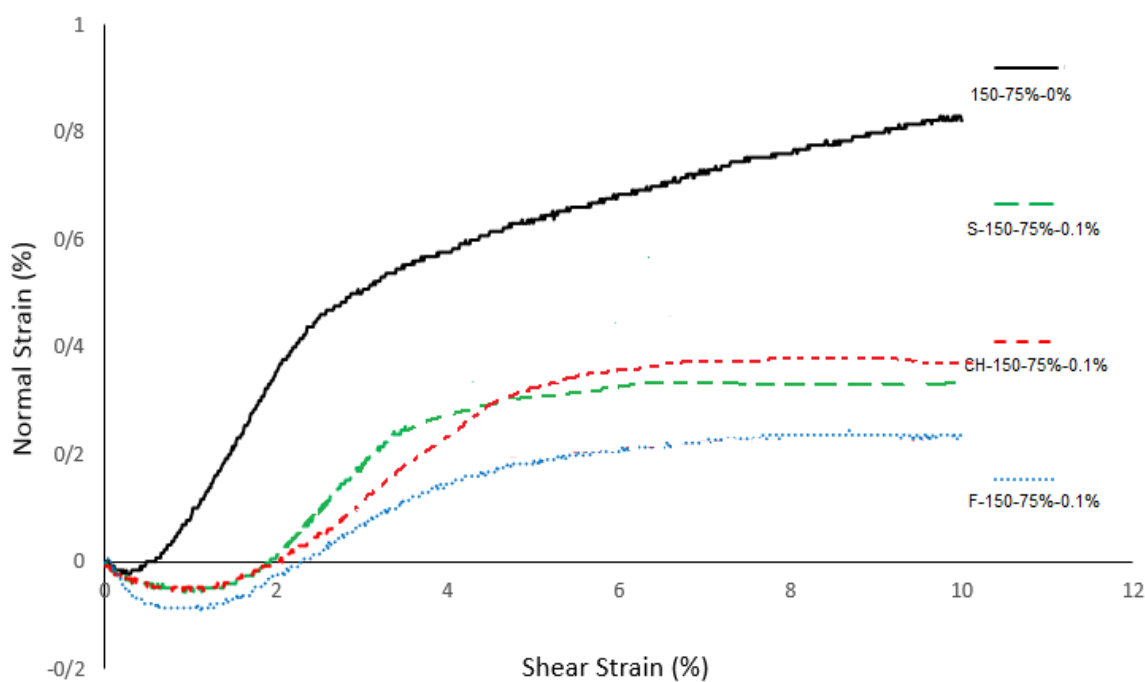
درصد وزنی مسلح‌کننده	شکل مسلح‌کننده	زاویه اصطکاک داخلی در لحظه گسیختگی (درجه)	چسبندگی در لحظه گسیختگی (کیلوپاسکال)
۰	-	۳۴/۵۴	۱۴/۹۵
۰/۱	CH	۳۴/۶۴	۱۸/۶۶
	S	۳۴/۷۸	۲۱/۶۳
	F	۳۷	۱۸/۰۶
۰/۵	CH	۳۵/۳	۲۲/۹
	S	۳۶/۷۵	۲۲/۵
	F	۳۸/۱۷	۴۱/۷۳
۱	CH	۳۶	۲۴/۳
	S	۳۷	۲۳/۵
۲	CH	۳۴/۱	۲۵/۳
	S	۳۴/۳	۲۵/۶

بنابراین از نظر ابعاد مسلح‌کننده‌ها، الیاف بهترین نقش را در بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک داشته‌اند.

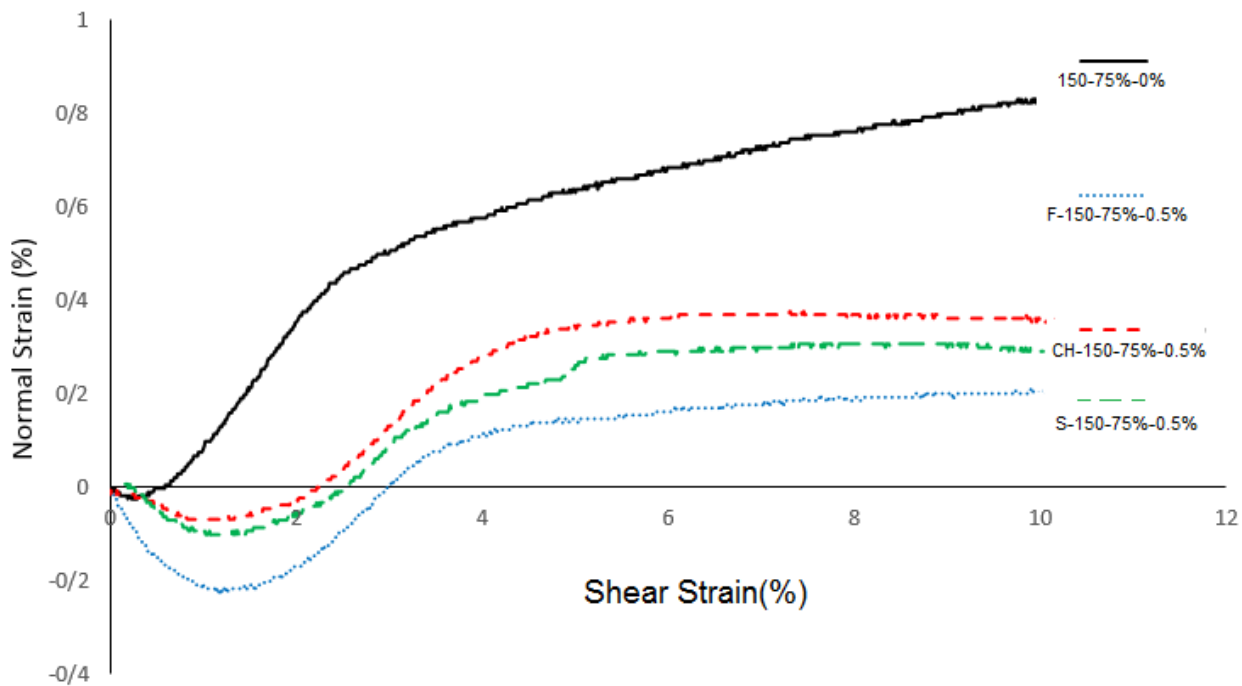
۴-۳-۲-۴ تأثیر تسلیح خاک با ابعاد مختلف پت بر رفتار کرنش قائم-کرنش برشی

نمونه‌های مسلح

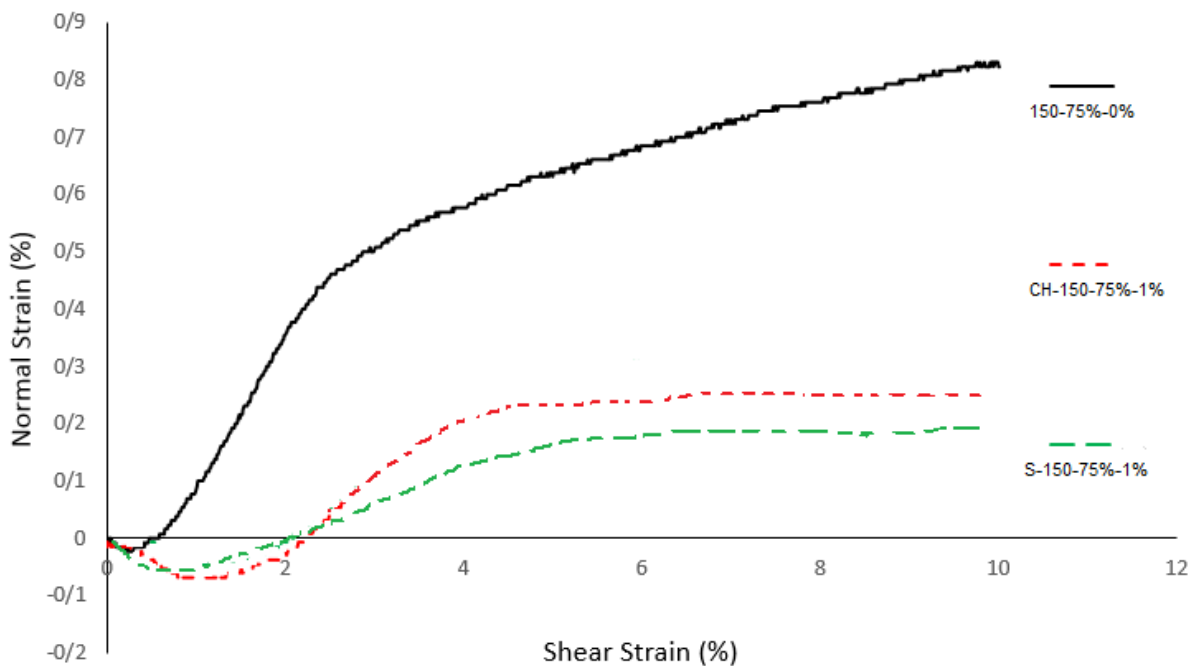
شکل‌های (۴-۲۹)، (۴-۳۰) و (۴-۳۱) نمودار تغییرات کرنش قائم بر حسب تغییرات کرنشی برشی را برای نمونه‌ی مرجع و نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد مختلف از پت که تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال مورد آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس قرار گرفته اند، نشان می‌دهد.



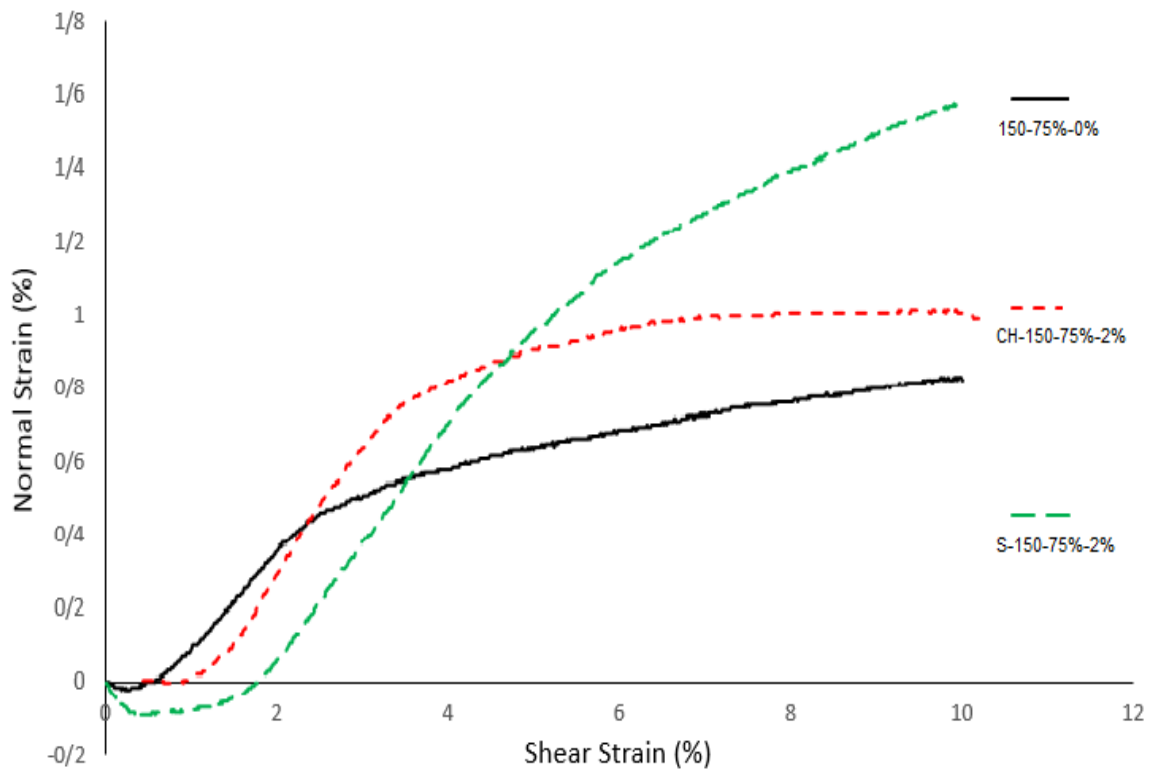
شکل ۴-۲۹ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح‌شده با ۰/۱ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴-۳ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ۰/۵ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۳۱ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ۱ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)



شکل ۴-۳۲ نمودار کرنش قائم-کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ۲ درصد وزنی از ابعاد مختلف از پت (تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال)

با توجه به این شکل‌ها، تمامی نمودارهای کرنش قائم-کرنش برشی نمایانگر یک رفتار تراکمی اولیه از جانب نمونه‌ها هستند و بعد آن دچار اتساع شده‌اند، همچنین افزودن پت به خاک منجر به افزایش رفتار تراکمی اولیه‌ی خاک و کرنش قائم ماکزیمم شده است. برای بررسی اثر ابعاد مسلح کننده‌ها بر رفتار کرنش قائم-کرنش برشی نمونه‌ها، می‌توان گفت در تسلیح خاک با ۰/۱٪ از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت، حداکثر کرنش قائم در حین تراکم به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۰۹ و ۰/۱ درصد بوده است؛ یعنی در یک درصد وزنی ثابت از مسلح کننده، نمونه‌ی مسلح شده با الیاف نسبت به نمونه‌های مسلح شده با دو شکل دیگر مسلح کننده، رفتار تراکمی بهتری

داشته است. در تسلیح خاک با نوارهای پت نیز رفتار شکل پذیری و تراکم پذیری نمونه نسبت به تسلیح با خرده‌های پت بهتر بوده است.

در ارزیابی رفتار اتساعی نمونه‌های مسلح شده با ابعاد مختلف پت نیز می‌توان گفت که نمونه‌های مسلح شده با ۰/۱٪ از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت به ترتیب دارای حداکثر کرنش قائم اتساعی ۰/۴، ۰/۳۵ و ۰/۲ درصد بوده اند؛ بنابراین نمونه‌ی مسلح شده با الیاف نسبت به نمونه‌های مسلح شده با دو شکل دیگر مسلح کننده، کمتر دچار اتساع شده است.

در تسلیح خاک با ۰/۵٪ از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت، حداکثر کرنش قائم در حین تراکم به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۱ و ۰/۲۲ درصد بوده است؛ یعنی باز هم در یک درصد وزنی ثابت از مسلح کننده، نمونه‌ی مسلح شده با الیاف نسبت به نمونه‌های مسلح شده با دو شکل دیگر مسلح کننده، رفتار تراکمی بهتری داشته است. در تسلیح خاک با نوارهای پت نیز رفتار شکل پذیری و تراکم پذیری نمونه نسبت به تسلیح با خرده‌های پت بهتر بوده است.

در ارزیابی رفتار اتساعی نمونه‌های مسلح شده با ابعاد مختلف پت نیز می‌توان گفت که نمونه‌های مسلح شده با ۰/۵٪ از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت به ترتیب دارای حداکثر کرنش قائم اتساعی ۰/۳، ۰/۲۵ و ۰/۱۸ درصد بوده اند؛ بنابراین نمونه‌ی مسلح شده با الیاف نسبت به نمونه‌های مسلح شده با دو شکل دیگر مسلح کننده، کمتر دچار اتساع شده است.

در تسلیح خاک با ۱٪ از خرده‌ها و نوارهای پت، حداکثر کرنش قائم در حین تراکم به ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۱ درصد بوده است؛ یعنی نمونه‌ی مسلح شده با نوارها نسبت به نمونه‌ی مسلح شده با خرده‌های پت، رفتار تراکمی بهتری داشته است.

در ارزیابی رفتار اتساعی نمونه‌های مسلح شده با ابعاد مختلف پت نیز می‌توان گفت که نمونه‌های مسلح شده با ۱٪ از خرده‌ها و نوارهای پت به ترتیب دارای حداکثر کرنش قائم اتساعی ۰/۲۵، ۰/۲ و

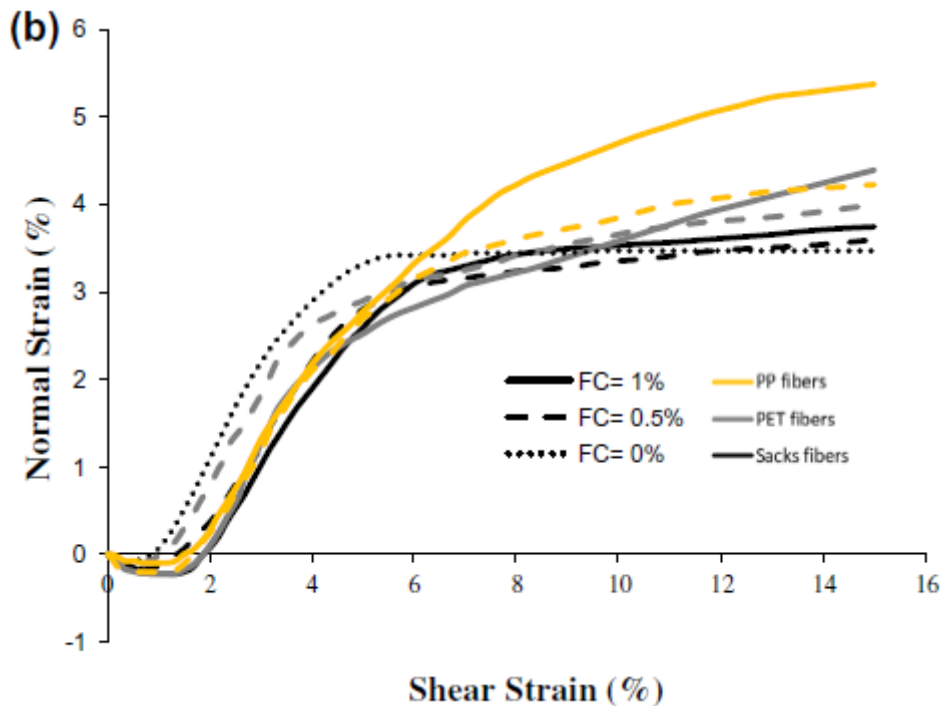
درصد بوده اند؛ بنابراین نمونه‌ی مسلح شده با نوارها نسبت به نمونه‌ی مسلح شده با خرده‌های پت، کمتر دچار اتساع شده است.

در تسلیح خاک با ۲٪ از خرده‌ها و نوارهای پت، حداکثر کرنش قائم در حین تراکم به ترتیب صفر و ۰/۰۵ درصد بوده است؛ یعنی نمونه‌ی مسلح شده با نوارها نسبت به نمونه‌ی مسلح شده با خرده‌های پت، رفتار تراکمی بهتری داشته است.

در ارزیابی رفتار اتساعی نمونه‌های مسلح شده با ابعاد مختلف پت نیز می‌توان گفت که نمونه‌های مسلح شده با ۲٪ از خرده‌ها و نوارهای پت به ترتیب دارای حداکثر کرنش قائم اتساعی ۱ و ۱/۶ درصد بوده اند؛ بنابراین نمونه‌ی مسلح شده با نوارها نسبت به نمونه‌ی مسلح شده با خرده‌های پت، کمتر دچار اتساع شده است.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های مسلح شده با ۰/۵ درصد الیاف تراکم بهتر و اتساع کمتری داشته اند.

در نمونه‌ی مشابه می‌توان به نتایج تحقیقات رنجبر در سال ۲۰۱۷ در زمینه‌ی تسلیح خاک با الیاف مختلف اشاره کرد. همان‌گونه که در فصل دوم بیان شده، افزودن الیاف پت با طول‌های ۱ سانتی‌متر به خاک تا کرنش ۱۰٪ منجر به بهبود رفتار تراکمی و کاهش اتساع نمونه‌ها شده است. همانطور که پیش‌تر گفته شد، در پژوهش این محقق به دلیل طول کم الیاف، امکان اختلاط الیاف با خاک تا مقدار ۱ درصد وزنی وجود داشته است. در شکل (۴-۳۳) نتایج تحقیقات این محقق بر روی رفتار کرنش قائم-کرنش برشی نمونه‌های مسلح شده با الیاف پت آورده شده است.



شکل ۴-۳۳ نمودار تأثیر افزایش درصد الیاف بر منحنی کرنش قائم-کرنش برشی در پژوهش نیما رنجبر(تحت سر بار ۱۰۰ کیلو پاسکال و تراکم نسبی ۷۰٪) [۴۱]

۴-۲-۴ مقایسه‌ی ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای مسلح‌شده با پت در

این پژوهش با نمونه‌ی خاک مسلح‌شده با ستون سنگی

در سال‌های اخیر، ستون‌های سنگی جهت افزایش ظرفیت باربری در رس‌های نرم و ماسه‌ها مورد استفاده‌ی گسترده قرار گرفته‌اند. این ستون‌ها غالباً در مواردی که حجم وسیعی از خاک نیازمند بهسازی باشد (مانند خاکریزها)، به کار گرفته می‌شوند.

در مورد عملکرد ستون‌های سنگی در خاک، به طور خلاصه می‌توان گفت افزایش ظرفیت باربری خاک بعد از اجرای ستون‌های سنگی، ناشی از اندرکنش میان ذرات خاک اطراف ستون و ستون

می‌باشد بنابراین در مواقعی که خاک موجود در سایت بسیار سست باشد، ستون سنگی نقش به‌سزایی در افزایش ظرفیت باربری خاک نخواهد داشت.

در این بخش مقایسه‌ای بین ظرفیت باربری خاک مسلح‌شده با پت در این پژوهش با ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای متراکم، مسلح‌شده با ستون‌های سنگی که طبق استاندارد^۱ FHWA(1983) در پژوهش آنیل کومار^۲ و ایشان^۳ انجام شده، صورت گرفته است. خاک از نوع بد دانه‌بندی شده بوده و دارای چگالی ویژه‌ی ۲/۶۲، ضریب یکنواختی ۰/۹۶، ضریب انحنای ۸/۶۵۶، ماکزیمم وزن مخصوص خشک ۱۷/۸۳ کیلو نیوتن بر متر مکعب، رطوبت بهینه‌ی ۱۲ درصد، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و فاقد چسبندگی بوده است. نمونه‌ها با ستون‌های سنگی به قطرهای ۲۰۰ و ۱۵۰ و طول ۶۰۰ میلی‌متر مسلح‌شده که طی آزمایش بارگذاری صفحه، تحت سربار قائم ۲۰۰۰ نیوتن قرار گرفته‌اند. در نهایت ظرفیت باربری با توجه به زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی معادل که از طریق میانگین-گیری بین زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک و ستون‌های شنی حاصل شده است؛ محاسبه گردیده است.

جدول (۴-۴) ظرفیت باربری خاک غیر مسلح و مسلح‌شده با ستون‌های سنگی در پژوهش کومار و ایشان را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴ مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ی غیر مسلح و نمونه‌های مسلح‌شده با ستون‌های سنگی در پژوهش آنیل کومار و ایشان

مشخصات نمونه	ستون سنگی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر	ستون سنگی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر
--------------	-------------------------------	-------------------------------

^۱ Design and Construction of Stone Columns(1983)

^۲Anil kumar

^۳ Ishan

ظرفیت باربری نهایی با توجه به معیار تنش مجاز (KN/m ²)	ظرفیت باربری نهایی با توجه به معیار تنش مجاز (KN/m ²)	درصد بهسازی (%)	درصد بهسازی (%)
خاک متراکم	۳/۴۶	-	۳/۲۴
خاک متراکم مسلح شده با ستون سنگی	۶/۸۳	۹۷/۳۴	۵/۲

در جدول (۴-۵) ظرفیت باربری نمونه‌ی غیر مسلح و نمونه‌های مسلح شده از ماسه‌ی بندر انزلی، با ابعاد و درصد‌های مختلف پت آورده شده است. لازم به ذکر است که چون نمونه‌ها در سه مرحله با ضربه زدن توسط چکش لاستیکی، متراکم شده اند و از ستون‌های شنی جهت تسلیح خاک استفاده نشده است، می‌توان گفت این روش بهسازی به روش تراکم لرزه‌ای^۱ نزدیک تر می‌باشد (روش ستون شنی و تراکم لرزه ای هر دو از روش‌های ارتعاشی جهت تسلیح خاک حساب می‌شوند). روش تراکم لرزه ای روشی شبیه به ستون شنی است با این تفاوت که در این روش از ستون‌های شنی جهت تسلیح خاک استفاده نمی‌شود. در این روش معمولاً توسط یک جت آب، نیروهای بین دانه ای کم شده تا دانه‌ها بتوانند نسبت به هم راحت تر حرکت کرده و در نتیجه در حالت متراکم تری قرار گیرند. در این پژوهش برای تسلیح، مسلح‌کننده‌ی پت به کار برده شده است. در نهایت ظرفیت باربری با استفاده از رابطه‌ی هنسن^۲ محاسبه شده است که در این رابطه برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری هر نمونه از زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مربوط به همان نمونه که در جدول (۴-۱) آورده شده؛ استفاده شده است.

^۱ Vibro compaction

^۲ Hansen

جدول ۴-۵ مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ی غیر مسلح و نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد و درصدهای وزنی مختلف پت در پژوهش حاضر

نام آزمایش	ظرفیت باربری نهایی با توجه به معیار تنش مجاز (KN/m^2)	درصد بهسازی (%)
نمونه‌ی مرجع	۴/۹۲	۰
CH-۱۵۰-۰/۷۵-۰/۱٪	۵/۹۲	۲۰
S-۱۵۰-۰/۷۵-۰/۱٪	۶/۷۸	۳۸
F-۱۵۰-۰/۷۵-۰/۱٪	۷/۶۵	۵۵
CH-۱۵۰-۰/۷۵-۰/۵٪	۷/۵۴	۵۳
S-۱۵۰-۰/۷۵-۰/۵٪	۸/۸۳	۸۰
F-۱۵۰-۰/۷۵-۰/۵٪	۱۴/۳۶	۱۹۱
CH-۱۵۰-۰/۷۵-۱٪	۸/۶	۷۵
S-۱۵۰-۰/۷۵-۱٪	۹/۴۳	۹۲
CH-۱۵۰-۰/۷۵-۲٪	۷/۱۵	۳۰
S-۱۵۰-۰/۷۵-۲٪	۷/۳۹	۵۰

همانطور که از جدول (۴-۵) دریافت می‌گردد، تسلیح خاک با پت منجر به افزایش ظرفیت باربری خاک شده است به طوری‌که در تسلیح خاک با خرده‌ها و نوارهای پت، بیشترین افزایش ظرفیت باربری در تسلیح با یک درصد مسلح‌کننده صورت گرفته است که این افزایش ظرفیت باربری به ترتیب ۷۵ و ۹۲ درصد بوده است. در تسلیح با ۰/۵ درصد الیاف نیز افزایش ظرفیت باربری ۱۹۱ درصد مشاهده

شده است. بنابراین تسلیح با ۰/۵ درصد الیاف بهترین عملکرد را در افزایش ظرفیت باربری داشته است.

از مقایسه‌ی فوق نتیجه گرفته می‌شود که با توجه به اقتضای پروژه می‌توان به جای روش‌های سخت و پرهزینه‌ای مانند ستون سنگی، از تسلیح خاک با الیاف پت استفاده نمود.

۳-۴ جمع‌بندی فصل

در این فصل، با توجه به موضوع پژوهش، نتایج به صورت بررسی تأثیرات تغییر ابعاد و درصد وزنی‌های مختلف پت بر پارامترهای متعدد خاک، تحلیل شدند. در ابتدای فصل، نمودار آزمایش مرجع ارائه شده و در بخش‌های بعدی تأثیر تغییر شرایط نمونه‌ی مسلح خاک با آن مقایسه شده اند. علاوه بر این، نتایج تحقیقاتی با نمودارهای مشابه نیز با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش مقایسه گردید. در بخش‌های ۴-۲-۲-۱ و ۴-۲-۳-۱ نشان داده شد که با افزایش درصد پت (تا ۱٪ برای خرده‌ها و نوارها و ۰/۵ درصد برای الیاف)، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش یافته و تأثیر الیاف بر افزایش مقاومت برشی بیشینه بیشتر از تأثیر دو شکل دیگر مسلح‌کننده بوده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت افزودن پت به خاک موجب افزایش شکل‌پذیری برشی و افزایش حداکثر تنش برشی که نمونه تحمل می‌کند شده است. در بخش‌های ۴-۲-۲-۴ و ۴-۲-۳-۴ تأثیر درصد وزنی و ابعاد مسلح‌کننده‌ها بر کنترل کرنش‌های قائم و تراکم‌پذیری و همچنین اتساع نمونه‌ها بررسی شده و نتایج نشان داد افزودن پت به خاک منجر به بروز رفتار تراکمی بهتر و کاهش اتساع از سوی نمونه‌ها شده است. در بخش‌های ۴-۲-۲-۳ و ۴-۲-۳-۳ نیز به بررسی تأثیر تسلیح با پت بر پارامترهای مقاومت برشی خاک پرداخته شده و نتایج نشان داد افزودن پت به خاک (تا ۱٪ برای خرده‌ها و نوارها و ۰/۵ درصد برای الیاف) منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی شده است.

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

فصل ۵ : جمع بندی نتایج و ارائه می پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

همان طور که در فصل‌های پیشین بیان شد، هدف از این پژوهش، بررسی رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای مسلح شده با درصد‌های وزنی و ابعاد گوناگون پت در تراکم نسبی ۷۵ درصد و تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال بوده است. خاک ماسه‌ای مورد مطالعه از سواحل بندر انزلی برداشت شده و به آزمایشگاه انتقال داده شد. طرح تسلیح موردنظر نیز می‌تواند به‌عنوان یک طرح عملیاتی بهسازی بر روی ماسه‌ی بندرانزلی انجام پذیرد. در قالب این پژوهش بنا بر این بود تا تأثیر عواملی همچون درصد وزنی و ابعاد مسلح‌کننده در نمونه‌های خاک مسلح شده، بر مقاومت برشی و شکل‌پذیری نمونه خاک مورد بررسی قرار گیرد. به منظور انجام تحلیل بر روی نمونه‌های مسلح شده و مقایسه‌ی آن با نمونه‌ی غیرمسلح، بر روی نمونه‌ی خاک آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس انجام گرفت و نتایج در قالب نمودارهای استاندارد با تحلیل تنش‌ها و کرنش‌های برشی کرنش‌های قائم و پارامترهای مقاومت برشی خاک، ارائه گردید. همچنین ظرفیت باربری نمونه‌ها محاسبه و بهترین درصد وزنی و شکل مسلح‌کننده‌ی پت معرفی شد.

۵-۲ نتیجه‌گیری

استفاده‌ی مجدد از پسماندهای جامد مصنوعی جهت تسلیح خاک در پروژه‌های عمرانی از دو حیث حائز اهمیت است؛ یکی کمک به حفظ محیط زیست از طریق کاهش ضایعات و دیگری بهبود رفتار مکانیکی خاک. از طرفی رشد جمعیت موجب شده است تا زمین‌های دارای خصوصیات ژئوتکنیکی مناسب کاهش یابند بنابراین امروزه نیاز به بهسازی خصوصیات مکانیکی خاک بیش از پیش احساس

می‌شود. از این رو استفاده از ضایعات جامد جهت تسلیح خاک محبوبیت بسیاری را در سرتاسر جهان به دست آورده است.

در این مطالعه با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی ماسه‌ی مسلح شده‌ی بندر انزلی با خرده‌ها، نوارها و الیاف پت مشاهده گردید که مقاومت برشی، ضریب اصطکاک داخلی، چسبندگی، شکل پذیری و ظرفیت باربری خاک با افزایش قابل توجهی نسبت به حالت غیر مسلح همراه بوده است. نتایج دقیق‌تر این بررسی در زیر آورده شده است:

- در آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال، افزودن تا ۱ درصد وزنی از خرده‌ها و نوارهای پت به ماسه (به طور جداگانه) به ترتیب موجب افزایش مقاومت برشی تا ۸ درصد و ۱۳ درصد نسبت به حالت غیر مسلح شده است، در حالی که در تسلیح با الیاف با افزودن تا ۰/۵ درصد پت به خاک مقاومت برشی ۳۰ درصد افزایش داشته است. به عبارتی خاک مسلح مقاومت بیشتری نسبت به خاک غیر مسلح از خود نشان داده و الیاف نقش بهتری در بهبود مقاومت برشی داشته اند؛ همچنین تسلیح با الیاف موجب کاهش افت مقاومت پس از نقطه‌ی گسیختگی شده است.
- در تسلیح خاک با انواع شکل‌های پت، پس از افزودن تا ۱ درصد وزنی از خرده‌ها و نوارهای پت به ماسه (به طور جداگانه)، کرنش گسیختگی نمونه‌های مسلح نسبت به نمونه‌ی غیر مسلح به ترتیب تا ۲۰ و ۲۸ درصد افزایش داشته است؛ این مقدار افزایش برای نمونه‌ی مسلح شده با ۰/۵ درصد وزنی از الیاف، ۸۰ درصد بوده است. یعنی تسلیح خاک با پت منجر به افزایش کرنش گسیختگی شده؛ اما تاثیر الیاف بر افزایش کرنش گسیختگی بیشتر بوده است. با توجه به نتیجه‌ی بند قبلی و این بند می‌توان گفت

تسلیح موجب شده است تا خاک در کرنش‌های بزرگتر، مقاومت بیشتری از خود نشان داده که این امر نشانگر شکل‌پذیر شدن خاک می‌باشد.

- تسلیح با پت، اثر فزاینده‌ای بر زاویه اصطکاک داخلی خاک داشته است. پس از اختلاط تا ۱ درصد وزنی از خرده‌ها و نوارهای پت با خاک، زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی غیر مسلح به ترتیب تا ۴ و ۷ درصد افزایش یافته است؛ حال آنکه در تسلیح ماسه با ۰/۵ درصد وزنی از الیاف، افزایش زاویه اصطکاک داخلی ۱۱ درصد بوده است.

- مشابه با اثر تسلیح بر زاویه اصطکاک داخلی ماسه، اختلاط پت با خاک موجب افزایش چسبندگی نیز شده است. با این تفاوت که با افزودن تا ۲ درصد از خرده‌ها و نوارهای پت به خاک، چسبندگی نسبت به حالت غیر مسلح تا ۷۰ درصد افزایش یافته است. در تسلیح خاک با ۰/۵ وزنی از الیاف، چسبندگی ۱۸۰ درصد نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است، یعنی تقریباً چسبندگی نمونه‌ی مسلح‌شده با ۰/۵ درصد الیاف، دو برابر چسبندگی نمونه‌ی غیر مسلح بوده است.

- در بحث اثر تسلیح با پت بر ظرفیت باربری خاک نیز همانطور که در بخش ۴-۲-۴ بیان شد، در تسلیح خاک با ۱ درصد از خرده‌ها و نوارهای پت، ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌ی مرجع به ترتیب ۷۵ و ۹۲ درصد بهبود یافته است که این افزایش ظرفیت باربری برای نمونه‌ی مسلح‌شده با ۰/۵ درصد از الیاف پت، ۱۹۱ درصد بوده است.

در مجموع طی آزمایش‌های برش مستقیم، بررسی عواملی همچون درصد و ابعاد مسلح‌کننده نشان داد که برای بهسازی خاک ماسه‌ی بندرانزلی، بهتر است در صورت استفاده از خرده‌ها یا نوارهای پت، بهسازی با ۱ درصد پت انجام گیرد؛ چرا که در این پژوهش مشخص شد که درصد پت بیشتر از ۱ درصد، علاوه بر این که تأثیر بهبود بر پارامترهای مقاومتی نداشت، بلکه موجب عدم‌تغییر یا کاهش

مقاومت حداکثر در نمونه‌ی مسلح‌شده با ۲ درصد پت شده و تراکم را سخت‌تر کرده است و صرفاً بار هزینه‌ی اضافی بر پروژه تحمیل می‌کرد. الیاف با وجود این که در درصدهای وزنی کمتر، افزایش مقاومت بیشتری برای خاک داشته اند اما همواره در نمونه‌سازی نسبت به نمونه‌سازی برای خاک مسلح‌شده با خرده‌ها و نوارها، محدودیت‌ها و دشواری‌هایی در حین اختلاط با خاک ایجاد کرده اند. در نهایت با توجه به نوع پروژه و امکانات موجود، می‌توان تصمیم گرفت که از کدام شکل مسلح‌کننده جهت تسلیح خاک استفاده نمود.

۳-۵ پیشنهادها

به‌عنوان پیشنهاد جهت گسترش تحقیقات در زمینه‌ی بهسازی خاک ماسه‌ای، می‌توان موارد زیر را ارائه کرد:

- ۱- انجام آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه‌ی مسلح شده با خرده پت با نمونه‌سازی مشابه این پایان‌نامه در حالت اشباع.
- ۲- سنجش پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌ی مسلح شده با پت در درصد رطوبت‌های مختلف و به دست آوردن درصد رطوبت بهینه برای انجام بهسازی.
- ۳- انجام آزمایش سه محوری بر روی نمونه‌ی مسلح شده با پت در درصد رطوبت بهینه.
- ۴- انجام آزمایشات دینامیکی از قبیل برش ساده‌ی سایکلک و سه محوری سایکلک بر روی نمونه‌های رسی یا ماسه‌ای مسلح شده با پت.
- ۵- اختلاط خاک ماسه‌ای با پت و افزودنی‌های دیگر از قبیل ژئولیت، آهک و غیره و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک تحت آزمایش‌های مختلف.

مراج

- [۱] F. Chebet, D. Kalumba, and L. Sobhee-Beetul, *Investigating Perforated Plastic Shopping Bags as Soil Reinforcement Material*. 2012, pp. 925-930.
- [۲] N. C. Consoli, M. A. Vendruscolo, A. Fonini, and F. Dalla Rosa, "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 3, pp. 196-203, 2009.
- [۳] J. G. Luwalaga, "Analysing the Behaviour of Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste," Stellenbosch: Stellenbosch University, 2016.
- [۴] N. Taly, H. V. GangaRao, and P. Vijay, *Reinforced concrete design with FRP composites*. CRC press, 2006.
- [۵] P. G. Nicholson, *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [۶] M. R. Hausmann, *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill New York, 1990.
- [۷] S. E. Manahan, *Hazardous waste chemistry, toxicology, and treatment*. CRC Press, 1990.
- [۸] G. Pritchard, *Plastics additives: an AZ reference*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [۹] F. R. McDougall, P. R. White, M. Franke, and P. Hindle, *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*. John Wiley & Sons, 2008.
- [۱۰] T. R. Curlee and S. Das, *Plastic waste: management, control, recycling, and disposal* (no. 201). Noyes Data Corporation. ۱۹۹۱ ,
- [۱۱] غ. شفاپخش، تسلیح خاکریز و بستر راهها با استفاده از ژئوگرید. وزارت راه و ترابری، پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۴.
- [۱۲] غ. شفاپخش، مبانی شناسایی ژئوسنتتیکها. چاپ اول: دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.
- [۱۳] W. Beckham and W. Mills, "Fng," *News Record, Oct*, vol. 3 ,p. 435, 1935.
- [۱۴] S. Luettich, J. Giroud, and R. Bachus, "Geotextile filter design guide," in *Geosynthetics in Filtration, Drainage and Erosion Control*: Elsevier, 1992, pp. 19-34.
- [۱۵] Y. Halse, J. Wiertz, and J. Rigo, "Chemical Identification Methods used to characterize Polymeric geomembranes," *IN: Geomembranes: Identification and Performance Testing. RILEM Report*, no. 4, 1991.
- [۱۶] O. Andersland, "Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture," in *Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement*, 19۷۹, vol. 1.
- [۱۷] D. H. Gray and H. Ohashi, "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 109, no. 3, pp. 335-353, 1983.

- [۱۸] M. H. Maher and Y.-C. Ho, *Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite*. 1994.
- [۱۹] J. Li and D. Ding, "Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 9-12, pp. 977-983, 2002.
- [۲۰] T. Yetimoglu and O. Salbas, "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 21, no. 2, pp. 103-110, 2003.
- [۲۱] T. Park and S. A. Tan, "Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 23, no. 4, pp. 348-361, 2005.
- [۲۲] S. Akbulut, S. Arasan, and E. Kalkan, "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers," *Applied Clay Science*, vol. 38, no. 1-2, pp. 23-32, 2007.
- [۲۳] C.-N. Liu, Y.-H. Ho, and J.-W. Huang, "Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 1, pp. 19-30, 2009.
- [۲۴] G. S. Babu and S. K. Chouksey, "Stress-strain response of plastic waste mixed soil," *Waste management*, vol. 31, no. 3, pp. 481-488, 2011.
- [۲۵] د. محمدی, "تاثیر افزایش براده های پلیمر پلی اتیلن and م. اژدرپور, م. ر. نیکودل, presented at the هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران, ۱۳۹۰. Available: https://www.civilica.com/Paper-ICEGE07-ICEGE07_152.html
- [۲۶] غ. کمالی, "بررسی آزمایشگاهی تسلیح ماسه با الیاف پلاستیک and سیم نگار ششمین کنگره ملی مهندسی presented at the اتیلن ترفتالات (پت), Available: https://www.civilica.com/Paper-NCCE06-NCCE06_0307.html, ۱۳۹۰.
- [۲۷] R. Acharyya, A. Lahiri, S. Mukherjee, and P. Raghu, "IMPROVEMENT OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF CLAYEY SOIL WITH PET BOTTLE STRIPS," 2013.
- [۲۸] C. A. Anagnostopoulos, D. Tzetzis, and K. Berketis, "Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils," *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 9, no. 3, pp. 241-251, 2014.
- [۲۹] D. Kalumba and F. Chebet, "Utilisation of polyethylene (plastic) shopping bags waste for soil improvement in sandy soils," *Proc. 18th ICSMGE*, 2013.
- [۳۰] E. Botero-Jaramillo, A. Ossa, G. Sherwell, and E. Ovando-Shelley, *Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)*. 2015.
- [۳۱] ا. نوری دلاور, "بررسی تاثیر پلی and م. دادوند, ن. رنجبر مالی دره, ج. برنجیان, presented at the اتیلن ترفتالات (پت) بر رفتار مهندسی خاک های ماسه ای,"

Available: کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، ۱۳۹۶.

https://www.civilica.com/Paper-CICEAUD01-CICEAUD01_0032.html

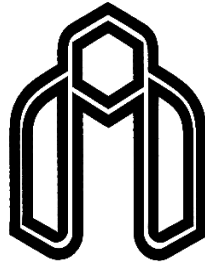
- [۳۲] S. Peddaiah, A. Burman, and S. Sreedeeep, "Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 36, no. 5, pp. 2907-2920, 2018.
- [۳۳] G. Ranjan, R. M. Vasan, and H. D. Charan, *Behaviour of plastic-fibre-reinforced sand*, ۱۹۹۴ .pp. 555-565.
- [۳۴] Y. Wang "Utilization of Recycled Carpet Waste Fibers for Reinforcement of Concrete and Soil AU - Wang, Youjiang," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 533-546, 1999/06/01 1999.
- [۳۵] N. C. Consoli, J. P. Montardo, P. D. M. Prietto, and G. S. Pasa, "Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, no. 6, pp. 462-472, 2002.
- [۳۶] C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen, and Y. Cai" ,Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, no. 3, pp. 194-202, 2007.
- [۳۷] S. Sadek, S. S. Najjar, and F. Freiha, "Shear strength of fiber-reinforced sands," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 136, no. 3, pp. 490-499, 2010.
- [۳۸] I. M. R. Martínez, N. D. S. L. Louzada, L. M. Repsold, M. D. T. Casagrande, and D. Folle, "Study of Clayey Soil Reinforced with Fine Crushed Polyethylene Terephthalate (PET)," *Revista de Engenharia Civil IMED*, vol. 1, no. 2, pp. 10-14, 2014.
- [40] S. Anil Kumar and Sh. Ishan, "Load-Carrying Capacity of Stone Column Encased with Geotextile" Civil engineering conference in the asian region , August30-September2, 2016.
Available at : <http://www.eventscribe.com/2016/CECAR7/presinfo.asp?pres=144948>
- [41] Malidarreh. N, I. Shooshpasha, SM. Mirhosseini, "Effects of reinforcement on mechanical behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests," *International Journal of geotechnical engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 491-499, 2017.

Abstract

Due to the increasing production of plastic materials, there is an international concern about disposal or recycling of plastic waste in the world. One of the ways to reuse plastic waste is to use it in the engineering works to modify mechanical properties of loose soils. The purpose of this research is to find a way to reuse a particular kind of plastics (bottles of dough, soft drinks, mineral water, etc.) in geotechnical works to improve soil.

In this paper, the mechanical behavior of Anzali Port sand, reinforced with 1×1 cm polyethylene terephthalate chips and 1×5cm strips, 0.1 , 0.5 , 1 and 2% and polyethylene terephthalate fibers to 0.1 and 0.5% of the dry weight of the soil which were arranged separately, was evaluated. Samples were prepared at the relative density of 75%. The effects of parameters such as dimensions, the weight percentage of reinforcers on mechanical behavior of the soil were investigated. The results of the experiments showed that although the polyethylene terephthalate chips and strips improve the mechanical behavior of sandy soil, but the effect of fiber reinforcers on soil mechanical properties has been much higher. Also, the optimum percentage of polyethylene terephthalate chips and strips reinforcers was 1% of sand dry weight and the optimum percentage of polyethylene terephthalate fibres was 0.5% of sand dry weight. The comparison between reinforced and unreinforced samples showed that reinforced specimens had more ductility and resistance. Also the maximum increasing in bearing capacity for samples reinforced with the optimum percentsge of chips, strips and fibers was 75, 92 and 191%.

Keywords: Sand, PolyethilenTerphhetelate, Large Scale Direct Shear Test, Reinforcement, Mechanical Behavior.



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

**Experimental Study on Mechanical
Behaviour of Anzali Sand, Reinforced with
Different Shapes and Contents of
Polyethylenetherphthalate**

By:

Zahra Hajiannezhad

Supervisors:

Dr. Reza Naderi

Dr. Mohsen Kermati

Spring 2019