

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش ژئوتکنیک

بررسی تأثیر تراکم نسبی و سربار قائم بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک
ماسه‌ای مسلح شده با پت در زمین‌های استحصالی بندرانزلی

نگارنده: مرتضی محمدعلی نژاد

اساتید راهنما

دکتر رضا نادری

دکتر محسن کرامتی

فروردین ۱۳۹۸

تقدیم بہ خدائی کہ آفرید

عشق را، معرفت را، علم را، عقل را، انسان را، جهان را

و بہ کسانی کہ عشقان را در وجودم دیدند

تسکرو قدردانی

در اینجلازم می‌دانم استادان عزیز و سخت‌کوش خود را پاس فراوان گویم؛ استاد ارجمند جناب آقای دکتر

نادری و استاد کران قدر جناب آقای دکتر کرامتی که با همت فراوان و از خودگذشتی در راستای تهنیز آزمایشگاه

کلیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود تلاش نمودند و زمینه‌ی گسترش تحقیقات آزمایشگاهی را پیش از پیش فراهم

آوردند و بادانش و تدبیرشان این پایان‌نامه به سرانجام رسید. پاس فراوان از استاد محترم جناب آقای دکتر عجمی

که از ابتدای این پایان‌نامه تا به انتها، بادانش به‌روز و محبت فراوان نسبت به این جانب، بنده را از راهمندی‌های

بی‌دیشان بهره‌مند ساختند.

تهدنامه

این جانب مرتضی محمدعلی نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر تراکم نسبی و سربار قائم بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای استحصال شده از بندرانزلی تحت راهنمایی دکتر رضا نادری و دکتر محسن کرامتی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده 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 است و مقالات مستخرج بانام "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 بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- 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 است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. 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

بهسازی خاک‌های مسئله‌دار و بهبود مشخصات مهندسی آن‌ها مانند ظرفیت باربری، مقاومت برشی و نفوذپذیری خاک را می‌توان با استفاده از روش‌های گوناگون انجام داد که مسلح کردن خاک با خرده‌های پلاستیک با توزیع تصادفی، یکی از این روش‌ها می‌باشد. زمین‌های استحصال‌شده از دریا یکی از ساخته‌های مهندسی نوین می‌باشند که باهدف بهره‌برداری بیشتر از نوار ساحلی ساخته می‌شوند و پارامترهای مقاومتی در آن‌ها باید با روش‌های مهندسی و بهسازی خاک بهبود پیدا کنند. پژوهش حاضر پیرو بهسازی یکی از زمین‌های استحصال‌شده در شمال ایران در بندر انزلی، با استفاده از خرده‌های بطری‌های نوشیدنی پت با ابعاد 1×1 سانتی‌متر و درصدهای مختلف و بررسی آن با انجام آزمایش برش مستقیم می‌باشد که طی آن تأثیر میزان تراکم نسبی نمونه‌ی مسلح شده و سربار قائم بر روی نمونه در آزمایش‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داده است که با افزایش میزان تراکم نسبی تا ۹۵ درصد، تنش برشی حداکثر تحمل شده در نمونه‌های مورد آزمایش بیشتر شده و زاویه اصطکاک داخلی از $32/8$ درجه در نمونه‌های غیرمسلح، به $43/85$ درجه در نمونه‌های مسلح شده با ۲ درصد پت و تراکم ۹۵ درصد، افزایش یافته است. همچنین با افزایش سربار قائم از ۵۰ به ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال، شکل‌پذیری نمونه افزایش پیدا کرده است؛ به طوری که کرنش متناظر با حداکثر تنش برشی از $1/5$ درصد در نمونه‌های غیرمسلح، به حدود ۵ درصد در نمونه‌های مسلح شده رسیده است. در پایان آزمایش‌ها درصد پت و تراکم بهینه برای بهسازی خاک ماسه‌ای بندرانزلی تعیین شده است.

کلید واژگان: بهسازی، ماسه، استحصال، پت، برش مستقیم، تراکم نسبی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- بررسی تأثیر درصد خرده‌های پت و سربار قائم بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌ی بندرانزلی. مرتضی محمدعلی نژاد، رضا نادری، محسن کرامتی

فهرست مطالب

خ	فهرست مطالب
ز	فهرست جداول
س	فهرست اشکال
غ	فهرست علائم
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ بیان مسئله و اهمیت موضوع
۴	۳-۱ ضرورت انجام تحقیق
۵	۴-۱ روش تحقیق
۶	۵-۱ ساختار پژوهش
۹	فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی
۱۰	۱-۲ مقدمه
۱۰	۲-۲ امکان استفاده از زمین‌های مسئله‌دار
۱۱	۱-۲-۲ بررسی محلی

۳-۲ راه‌حل‌های پیش رو برای حل مشکلات زمین با خاک نامناسب..... ۱۲

۱-۳-۲ بهسازی خاک..... ۱۳

۴-۲ مطالعات پیشین در زمینه‌ی تأثیر مسلح کننده بر خاک..... ۱۹

۱-۴-۲ بررسی افزایش مقاومت مخلوط خاک-مسلح کننده..... ۱۹

۲-۴-۲ بررسی افزایش شکل‌پذیری ترکیب خاک-مسلح کننده..... ۳۷

۵-۲ جمع‌بندی فصل..... ۴۴

۴۵ **فصل ۳: روش انجام تحقیق**

۱-۳ مقدمه..... ۴۶

۲-۳ زمین‌های استحصالی..... ۴۶

۱-۲-۳ روش استحصال اراضی..... ۴۸

۳-۳ بندر استحصالی انزلی..... ۵۰

۴-۳ ضایعات پلاستیکی..... ۵۴

۱-۴-۳ مقدمه‌های در مورد پلاستیکها..... ۵۴

۲-۴-۳ دسته‌بندی پلاستیک‌ها..... ۵۵

۳-۴-۳ پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)..... ۵۸

۴-۴-۳ کاربردهای پلاستیک در مهندسی عمران..... ۶۲

- ۶۴ ۵-۴-۳ مدیریت پسماندهای پلاستیکی
- ۶۷ ۶-۴-۳ بازیافت ضایعات پلاستیکی
- ۶۹ ۳-۵ مصالح مورد استفاده
- ۶۹ ۱-۵-۳ ماسه
- ۷۵ ۲-۵-۳ پت (PET)
- ۷۷ ۶-۳ آزمایش‌های برش مستقیم
- ۷۷ ۱-۶-۳ تعریف مقاومت برشی
- ۷۹ ۲-۶-۳ دستگاه و تجهیزات آزمایش برش مستقیم در این پژوهش
- ۸۲ ۳-۶-۳ کالیبراسیون سنسورها
- ۸۵ ۴-۶-۳ برنامه‌ی آزمایش‌های برش مستقیم

۱۸۹ فصل ۴: تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش‌ها

- ۹۰ ۱-۴ مقدمه
- ۹۰ ۲-۴ بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها
- ۹۰ ۱-۲-۴ آزمایش‌های مرجع
- ۹۷ ۲-۲-۴ تأثیر افزایش درصد پت بر بهبود پارامترهای مقاومتی
- ۱۰۲ ۳-۲-۴ تأثیر افزایش تراکم نسبی (Dr) بر بهبود پارامترهای مقاومتی

۴-۲-۴ تأثیر سربار قائم بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی ۱۱۳

۴-۲-۵ بررسی خردشدگی دانه‌های خاک ۱۲۴

۳-۴ جمع‌بندی فصل ۱۲۶

فصل ۵ جمع‌بندی نتایج و ارائه‌ی پیشنهادها ۱۲۷

۱-۵ مقدمه ۱۲۸

۲-۵ جمع‌بندی نتایج ۱۲۸

۳-۵ ارائه‌ی پیشنهادها ۱۲۹

مراجع ۱۳۱

Abstract ۱۳۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۳ معرفی و کاربردهای پلاستیک‌ها ۵۶
- جدول ۲-۳ مقادیر عددی خصوصیات پت ۶۰
- جدول ۳-۳ ویژگیهای پلاستیک در مقایسه با سایر مصالح ۶۲
- جدول ۴-۳ مشخصات فیزیکی ماسه‌ی مورد استفاده ۷۰
- جدول ۵-۳ مشخصات اندازه‌گیری شده برای ماسه‌ی استحصالی بندرانزلی ۷۵
- جدول ۶-۳ مشخصات پت به‌کاررفته در پژوهش حاضر ۷۶
- جدول ۷-۳ برخی پارامترهای مقاومتی تخمینی خاک و سنگ ۷۷
- جدول ۸-۳ مقادیر عددی کالیبراسیون لودسل ۱۰ تنی ۸۲
- جدول ۹-۳ مقادیر عددی کالیبراسیون LVDT ۵۰ میلی‌متری ۸۳
- جدول ۱۰-۳ مقادیر عددی کالیبراسیون LVDT ۱۰۰ میلی‌متری ۸۴
- جدول ۱۱-۳ چگالی حالت خشک خاک متناسب با تراکم نسبی هدف ۸۶
- جدول ۱۲-۳ جدول نام‌گذاری اختصاری آزمایش‌ها ۸۷
- جدول ۱-۴ تغییرات پارامترهای C و ϕ خاک در مقاله‌ی مرضیه دادوند و همکاران در سال ۱۳۹۶ ۱۰۲
- جدول ۲-۴ بررسی کیفی میزان تأثیرگذاری عوامل مختلف بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی ۱۲۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ کد شناسه‌ی پلیمر *PET* با نشان امکان یکبار بازیافت شدن ۵
- شکل ۱-۲ شکل (الف) روش ستون سنگی و شکل (ب) تراکم دینامیکی از روش‌های بهسازی مکانیکی خاک ۱۴
- شکل ۲-۲ شکل (الف) بهسازی فیزیکی به روش انجماد خاک و شکل (ب) بهسازی شیمیایی با آهک پاشی ۱۵
- شکل ۳-۲ کارگذاری فیلترهای تخلیه‌ی آب اضافه‌ی منفذی ۱۶
- شکل ۴-۲ نمایی از اجرای نیلینگ در شکل الف و اجرای انکراژ در شکل ب ۱۷
- شکل ۵-۲ روند اجرای میکروپایل ۱۸
- شکل ۶-۲ نمودارهای تنش انحرافی- کرنش حاصل تحقیقات *Li* و *Ding* در سال ۲۰۰۲ ۲۱
- شکل ۷-۲ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی خروجی تحقیقات یتیمقلو و سالباس ۲۲
- شکل ۸-۲ بارگذاری دیواره‌ی خاک مسلح در مجاورت ریل قطار با مقیاس واقعی در پژوهش تان و پارک در سال ۲۰۱۵ ۲۳
- شکل ۹-۲ نمودار تغییرات فشار جانبی وارد بر دیوار مسلح شده بر حسب تغییرات عمق (h) ارتفاع دیوار و H عمق خاک) ۲۴
- شکل ۱۰-۲ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نمونه‌ی غیرمسلح و مسلح ۲۵
- شکل ۱۱-۲ نمودار تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در خاک مسلح شده با الف) خرده تایر و ب) پلی اتیلن با ۳ طول ۲۵
- شکل ۱۲-۲ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی- کرنش محوری در بالا و تغییرات کرنش قائم-کرنش محوری در پایین ۲۶

- شکل ۱۳-۲ نمودارهای کرنش قائم-کرنش برشی برای چهار نوع خاک به کاررفته در تحقیقات *Lui* و همکاران ۲۸
- شکل ۱۴-۲ تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در درصدهای مختلف مسلح کننده برای الف) خاک ماسه‌ای و ب) خاک رس قرمز ۲۹
- شکل ۱۵-۲ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی برای دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی در درصدهای مختلف مسلح کننده ۳۰
- شکل ۱۶-۲ اثر تسلیح خاک بر نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی تحقیقات سیم نگار و کمالی ... ۳۱
- شکل ۱۷-۲ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی نمونه‌های مسلح شده با *PP* تحت سه سربار ۳۳
- شکل ۱۸-۲ نمودارهای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برحسب: الف) عرض مسلح کننده و ب) تراکم مسلح کننده در خاک ۳۴
- شکل ۱۹-۲ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش، در دو تنش محصورکننده ۳۵
- شکل ۲۰-۲ تغییرات تنش برشی برحسب تغییرات سربار قائم در نمونه‌های خاک با درصدهای مختلف مسلح کننده ۳۶
- شکل ۲۱-۲ نمودار تغییرات تنش برشی در درصد مسلح کننده‌های مختلف در پژوهش پدیا و همکاران ۳۷
- شکل ۲۲-۲ تأثیر درصد پت بر مقاومت نهایی ماسه‌ی مسلح شده در سه تنش محصورکننده در آزمایش سه محوری ۳۸
- شکل ۲۳-۲ منحنی‌های تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در دو حالت *a*) محصور نشده و *b*) محصور شده ۳۹
- شکل ۲۴-۲ تغییرات ظرفیت جذب انرژی نرمالیزه شده برحسب کرنش محوری برای ترکیبات مختلف خاک ۴۰

- شکل ۲-۲۵ 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 ۴۱
- شکل ۲-۲۶ 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 ۴۲
- شکل ۲-۲۷ نمودارهای تغییرات حجم و تغییرات تنش انحرافی بر حسب جابجایی محوری در پژوهش مارتینز و همکاران ۴۳
- شکل ۳-۱ در گذشته استحصال زمین به روش خاکریزی در دریا صورت می‌گرفت ۴۷
- شکل ۳-۲ مجمع‌الجزایر استحصالی در سواحل دوبی امارات ۴۸
- شکل ۳-۳ موج‌شکن بندر انزلی با به دام انداختن رسوبات، شرایط را برای استحصال زمین از دریا ایجاد میکند ۴۹
- شکل ۳-۴ استحصال به روش لایروبی از دریا با سیستم *Rainbow* در بندر روتردام هلند با استفاده از کشتی لایروب ۵۰
- شکل ۳-۵ پروژه‌ی جت گروتینگ در بندر انزلی ۵۱
- شکل ۳-۶ a) محدوده‌ی استحصال در مجاورت موج‌شکن شرقی بندر انزلی و b) موقعیت بندر انزلی در شمال کشور ۵۲
- شکل ۳-۷ نمونه کشتی لایروب تحت اختیار سازمان بنادر و دریانوردی بندر انزلی ۵۳
- شکل ۳-۸ زمین استحصال شده در مجاورت موج‌شکن شرقی ۵۴
- شکل ۳-۹ فرمول شیمیایی واکنش و فرایند تولید پلی‌اتیلن ترفتالات ۵۹
- شکل ۳-۱۰ تفکیک ۲۵۰ میلیون تن ضایعات *MSW* تولیدشده در دنیا در سال ۲۰۱۰ ۶۵
- شکل ۳-۱۱ فرایند بازیافت و تبدیل پت ضایعاتی به گرانول‌های پلیمری قابل ذوب مجدد ۶۷

- شکل ۳-۱۲ خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش ۷۰
- شکل ۳-۱۳ الک‌های به کاررفته جهت دانه‌بندی بر روی شیکر اتوماتیک ۷۲
- شکل ۳-۱۴ منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استحصالی استفاده شده در این پژوهش ۷۲
- شکل ۳-۱۵ آزمایش تعیین چگالی ویژه (G_s) خاک ماسه‌ای ۷۳
- شکل ۳-۱۶ پت‌های شسته شده برای برش و چپس‌های پت استفاده شده در این پژوهش ۷۵
- شکل ۳-۱۷ آزمایش تعیین چگالی روغن با آب مقطر ۷۶
- شکل ۳-۱۸ دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس آزمایشگاه خاک دانشگاه صنعتی شاهرود ۷۹
- شکل ۳-۱۹ دیتالاگر و سنسورهای به کاررفته در این پژوهش ۸۰
- شکل ۳-۲۰ نرم افزار جمع‌آوری اطلاعات از دیتالاگر ۸۱
- شکل ۳-۲۱ نمای شماتیک عملکرد دستگاه برش مستقیم و سنسورهای متصل به آن ۸۱
- شکل ۳-۲۲ نمودار کالیبراسیون لودسل ۱۰ تنی ۸۳
- شکل ۳-۲۳ نمودار کالیبراسیون $LVDT$ ۵۰ میلی متری ۸۴
- شکل ۳-۲۴ نمودار کالیبراسیون $LVDT$ ۱۰۰ میلی متری ۸۵
- شکل ۴-۱ نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای نمونه‌ی مرجع ۹۱
- شکل ۴-۲ نمودار تنش برشی - کرنش برشی دو نوع خاک غیرمسلح در آزمایش‌های اژدرپور و همکاران ۹۲
- شکل ۴-۳ نمودار مرجع تغییرات حداکثر تنش برشی در خاک غیرمسلح بر حسب تغییرات تراکم نسبی ۹۳
- شکل ۴-۴ نمودار تغییرات پارامترهای C و ϕ بر حسب تغییرات تراکم نسبی در نمونه‌های مرجع ۹۴
- شکل ۴-۵ تغییرات تنش برشی بر حسب درصد جابجایی برشی در نمونه‌های مرجع ۹۴
- شکل ۴-۶ نمودار تغییرات حداکثر تنش برشی بر حسب تغییرات تنش قائم در نمونه‌های مرجع ۹۵

- شکل ۷-۴ تغییرات جابجایی قائم بر حسب جابجایی برشی در نمونه‌های مرجع ۹۶
- شکل ۸-۴ نمودار تأثیر درصد پت بر مقاومت برشی نمونه‌های خاک در کرنش‌های ثابت ۹۷
- شکل ۹-۴ نمودار تأثیر درصد پت بر تنش برشی حداکثر ۹۹
- شکل ۱۰-۴ نمودار تأثیر درصد مسلح کننده بر تغییرات نسبت تنش حداکثر در حالت مسلح شده به غیرمسلح ۱۰۰
- شکل ۱۱-۴ نمودار تغییرات پارامترهای C و ϕ بر حسب تغییرات درصد پت ۱۰۱
- شکل ۱۲-۴ نمودار تنش برشی-کرنش برشی نمونه‌ی مسلح شده با ۱ درصد پت در سه تراکم نسبی تحت سربار ۵۰ کیلو پاسکال ۱۰۳
- شکل ۱۳-۴ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی تحقیقات *Liu* و همکاران در سال ۲۰۰۹، منتشر شده در نشریه‌ی *Geotextiles and Geomembranes* ۱۰۴
- شکل ۱۴-۴ نمودار تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات تنش برشی حداکثر نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در سربار ۵۰ کیلو پاسکال ۱۰۵
- شکل ۱۵-۴ نمودار تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات تنش برشی حداکثر نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۶
- شکل ۱۶-۴ نمودار تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات تنش برشی حداکثر نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال ۱۰۶
- شکل ۱۷-۴ نمودار تأثیر Dr بر تغییرات نسبت τ_{max} در حالت مسلح به حالت غیرمسلح در سربار ۵۰ کیلو پاسکال ۱۰۷
- شکل ۱۸-۴ نمودار تأثیر Dr بر تغییرات نسبت τ_{max} در حالت مسلح به حالت غیرمسلح در سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۸

- شکل ۴-۱۹ نمودار تأثیر Dr بر تغییرات نسبت τ_{max} در حالت مسلح به حالت غیرمسلح در سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال ۱۰۸
- شکل ۴-۲۰ تأثیر افزایش درصد مسلح کننده بر مقاومت ماسه‌ی مسلح، برگرفته از مقاله *Ranjan* وهمکاران ۱۱۰
- شکل ۴-۲۱ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش در تراکم ۵۵ درصد و درصد‌های پت مختلف ۱۱۱
- شکل ۴-۲۲ نمودار بررسی تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) در درصد پت‌های مختلف ۱۱۲
- شکل ۴-۲۳ نمودار بررسی تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات چسبندگی بین‌دانه‌ای (C) در درصد پت‌های مختلف ۱۱۲
- شکل ۴-۲۴ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی نمونه‌ی غیرمسلح در تراکم ۷۵ درصد و تحت سه سربار قائم ۱۱۴
- شکل ۴-۲۵ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی خاک مسلح در تراکم ۷۵ درصد و تحت سه سربار قائم ۱۱۵
- شکل ۴-۲۶ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش، در دو تنش محصورکننده ۱۱۶
- شکل ۴-۲۷ نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تغییرات تنش قائم در تراکم نسبی ۵۵ درصد ۱۱۷
- شکل ۴-۲۸ نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تغییرات تنش قائم در تراکم نسبی ۷۵ درصد ۱۱۷
- شکل ۴-۲۹ نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تغییرات تنش قائم در تراکم نسبی ۹۵ درصد ۱۱۸

- شکل ۴-۳۰: نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تنش نرمال از مقاله‌ی Liu و همکاران چاپ‌شده در مجله‌ی *Geotextile and Geomembranes* ۱۱۹
- شکل ۴-۳۱: نمودار تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر نمونه مسلح به غیرمسلح با Dr 55 ۱۲۰
- شکل ۴-۳۲: نمودار تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر نمونه مسلح به غیرمسلح با Dr 75 ۱۲۱
- شکل ۴-۳۳: نمودار تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر نمونه مسلح به غیرمسلح با Dr 95 ۱۲۱
- شکل ۴-۳۴: نمودار دانه‌بندی آزمایش‌های برش مستقیم انجام‌شده جهت بررسی خردشدگی خاک غیرمسلح ۱۲۴
- شکل ۴-۳۵: نمودار دانه‌بندی آزمایش‌های برش مستقیم انجام‌شده جهت بررسی خردشدگی خاک مسلح در تراکم ۷۵ درصد ۱۲۵

فهرست علائم

علائم لاتین

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

علائم یونانی

$\tau (kPa)$	تنش برشی
$\sigma (kPa)$	تنش قائم
$\gamma (\%)$	درصد جابجایی برشی
$\tau_{max} (kPa)$	تنش برشی حداکثر
$\tau_{min} (kPa)$	تنش برشی حداقل
$(\gamma_d)_{max}$	حداکثر وزن مخصوص حالت خشک
$(\gamma_d)_{min}$	حداقل وزن مخصوص حالت خشک

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

توسعه‌ی روزافزون ساخت‌وساز، بشر را ناگزیر به استفاده از زمین‌هایی با شرایط ژئوتکنیکی نامناسب کرده است. از جمله‌ی این زمین‌ها، زمین‌های استحصالی هستند که معمولاً در نزدیکی ساحل یا روی بستر دریا به‌عنوان بنادر استحصالی تأسیس می‌شوند و با توجه به موقعیت مجاورت دریا، معمولاً از خاک ماسه‌ای بستر دریا در ایجاد این زمین‌ها استفاده می‌شود. زمین‌های استحصالی به دلیل مصالح مورد استفاده که عمدتاً بدون تراکم و با درجه اشباع بالا هستند، به بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی نیاز دارند [۱]

برای اجرای یک زمین استحصالی مناسب، باید به‌نوعی پارامترهای مقاومتی خاک ارتقاء داده شوند تا در اثر نیروهای وارده، عملکرد مناسبی داشته باشد. یکی از این روش‌ها، تسلیح خاک می‌باشد که امروزه در زمینه‌ی بهسازی خاک در مهندسی ژئوتکنیک کاربردهای فراوانی دارد.

در روش تسلیح خاک، استفاده از مواد و مصالح با تکنولوژی روز، در جهت تقویت و بهبود خاک به کار می‌روند تا مشخصاتی همچون ظرفیت باربری، مقاومت برشی، کاهش نشست پذیری، تراکم‌پذیری، سختی، شکل‌پذیری و سایر خصوصیات خاک را بهبود بخشند. در بسیاری از پروژه‌ها، استفاده از مصالح مسلح‌کننده در خاک، کاهش هزینه‌ی اجرایی مانند خاک‌برداری و تعویض خاک نامرغوب با خاک مرغوب و کوبیدن و متراکم کردن آن‌ها را در پی دارد. از طرفی امروزه پلاستیک‌ها کاربردهای مختلفی در زمینه‌های بسته‌بندی، کشاورزی، ورزش، الکترونیک و... پیدا کرده‌اند. افزایش تولید محصولات پلاستیکی، منجر به تولید ضایعات پلاستیکی بیشتر شده و این مسئله، معضلی برای جوامع گسترده به‌حساب می‌آید. بنابراین اگر بتوان از این مواد ضایعاتی که محیط‌زیست را تهدید می‌کنند، برای تسلیح خاک استفاده نمود، عملاً دو هدف تسلیح خاک و حفظ محیط‌زیست محقق خواهد شد.

۲-۱ بیان مسئله و اهمیت موضوع

ضعف‌های ژئوتکنیکی در زمین‌های استحصال‌شده از دریا، می‌تواند ناشی از عوامل زیادی همچون مناسب نبودن خاک استحصال‌شده، آب شستگی، روانگرایی، عدم تراکم مناسب خاک و عواملی از این دست باشد؛ برای مثال در بندر *Brisbane* واقع در جزایر *Fisherman* استرالیا، در ناحیه‌ی شمالی بندر، استحصال زمین از دریا به روش لایروبی صورت گرفته است و خاک لایروبی شده و مورد استفاده در استحصال، ماسه‌ی ترکیب‌شده با رُس و گل‌ولای بوده که با مقاومت برشی بسیار کم و نشست پذیری بسیار زیاد، مهندسان را بر آن داشت تا با استفاده از زهکش‌های قائم و افقی و با استفاده از پمپ‌های تخلیه، اقدام به زهکشی این مصالح در محوطه‌ی دپو کرده و جهت کاهش پتانسیل روانگرایی خاک، اقدام به بهسازی آن با به‌کارگیری زهکش‌های مدفون در محوطه-ی استحصالی کنند. [۲]

با توجه به مورد ذکرشده و نیز موارد مشابه، زمین‌های استحصالی معمولاً پارامترهای مقاومتی ضعیفی دارند و جهت افزایش اطمینان به این زمین‌ها برای ایجاد یک محوطه با قابلیت بهره‌برداری، نیاز به بهسازی در زمین‌های استحصالی همواره وجود دارد. یکی از روش‌های پرکاربرد در بهسازی زمین‌های استحصالی، مسلح سازی خاک 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 هم‌روزه آن‌ها را به صورت بطری‌های نوشابه و آب‌معدنی و ... می‌بینیم، بطری‌های ضایعاتی پلی‌اتیلن ترفتالات^۱ 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]

۳-۱ ضرورت انجام تحقیق

تحقیقات نشان داده‌اند استفاده از ضایعات پلاستیکی به‌عنوان مسلح‌کننده، باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و بهبود مقاومت برشی خاک می‌شود. مسلح‌کننده‌های پلاستیکی در خاک، مقاومت حداکثر و کرنش محوری متناسب با آن را افزایش داده و میزان اتساع را کاهش می‌دهد. 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 می‌دهند. [۴] مشکل بزرگ *PET* ها که در شکل ۱-۱ در علامت شناسه‌ی آن مشخص است، محدودیت در دفعات بازیافت آن‌هاست

^۱ Polyethylene Terephthalate

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 روش تحقیق

پژوهش حاضر بر مبنای بهسازی بستر در بندر استحصالی با استفاده از خرده‌های پت جهت کاهش هزینه‌های بهسازی خاک جهت محوطه‌سازی بارانداز فله و بررسی امکان افزایش مقاومت و حذف یا بهینه‌سازی روش‌های 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 خرده پت و با تراکم‌های نسبی مختلف، تحت ۳ سربار قائم که معرف اعماق مختلف می‌باشند، انجام شده است و قصد بر این است که با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های مسلح شده با خرده‌های پت، تأثیر تغییر سربار قائم وارد بر نمونه و تراکم نسبی نمونه‌ی مسلح شده بر پارامترهای مقاومت برشی که نمونه از خود طی آزمایش نشان می‌دهد بررسی شود؛ تا در صورت امکان، بتوان علاوه بر ایجاد محل مصرف جدیدی برای ضایعات پلاستیکی پت، مَهر تأییدی بر مؤثر بودن استفاده از ضایعات پت بر پارامترهای

مقاومتی خاک در روش تسلیح زد. همچنین این پژوهش می‌تواند نشان دهد در چه سربار یا تراکم نسبی، بهترین تأثیر از تسلیح با خرده‌های پت بر روی نمونه خاک گرفته می‌شود تا بتوان از این روش تسلیح در انجام پروژه‌های مهندسی مسلح سازی خاک‌های ماسه‌ای با کاربرد مشابه مورد مطالعاتی این پژوهش بهره برد.

۵-۱ 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 مسئله‌دار مانند زمین‌های استحصالی پرداخته شده است.

در فصل دوم، ابتدا به معرفی زمین‌های استحصالی و روش‌های استحصال زمین از دریا و بهسازی این زمین‌ها و سپس بیان مسائلی در مورد نیاز به بازیافت ضایعات پلاستیکی، انواع ضایعات پلاستیکی مرسوم در دنیا و نحوه‌ی مدیریت این پسماندها و درنهایت به معرفی روش نوین بهسازی خاک‌های مسئله‌دار با استفاده از همین ضایعات پلاستیکی در راستای بهره‌وری دوجانبه‌ی مهندسی و زیست‌محیطی پرداخته شده است.

در فصل سوم، روش انجام تحقیق و آشنایی با مورد مطالعاتی، مصالح به‌کاررفته در آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر، آزمایش‌های شناسایی خاک و مسلح کننده 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، تحلیل و تفسیر نتایج و خروجی‌های آزمایش‌ها اعم از آزمایش‌های اولیه جهت شناسایی و آزمایش‌های برش مستقیم به صورت نمودارها و جداول استاندارد و شرح کامل نتایج، بیان شده است.

در فصل پنجم، تحت عنوان نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها، 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 پرداخته شده است.

فصل ۲ : مروری بر ادبیات فنی

۱-۲ مقدمه

در این فصل به بررسی ایجاد امکان برای استفاده از زمین‌های مسئله‌دار و راهکارهای مطرح‌شده در این زمینه از قبیل روش‌های مختلف بهسازی، انواع روش‌های تسلیح خاک و معرفی خاک مسلح شده با پلاستیک ضایعاتی و تحقیقات گذشته پیرامون این موضوع و نتایج آن تحقیقات بررسی‌شده و در پایان جمع‌بندی مختصری از این بخش صورت گرفته است.

۲-۲ امکان استفاده از زمین‌های مسئله‌دار

به علت گسترش شهرنشینی، افزایش مهاجرت از روستاها به شهرها و افزایش جمعیت جهان به بیش از هفت میلیارد نفر، ساخت شهرهای جدید افزایش یافته است تا پاسخی به نیازهای جامعه برای تأمین مسکن و زیرسازیهایی بهتر باشد. این امر منجر به کاهش مصالح بنایی و همچنین کاهش زمین‌هایی با خاک مناسب جهت ساخت ساختمان‌ها و دیگر پروژه‌های عمرانی شده است. [۱]

همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، استحصال زمین از دریا نیز در همین راستا و برای تأمین زمین بیشتر جهت بهره‌برداری صورت می‌گیرد؛ اما زمین‌های استحصالی به‌عنوان یکی از زمین‌های مسئله‌دار از نظر ژئوتکنیکی، نیازمند بهبود پارامترهای مقاومتی می‌باشند که در مواردی همچون زیرسازی محوطه‌ها، بهسازی این زمین‌ها به‌عنوان محل اجرای پروژه، مورد توجه می‌باشد.

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

اولین گام جهت تشخیص مناسب بودن محل برای هرگونه سازه یا پروژه‌ی عمرانی، انجام تحقیقات شناسایی زیرسطحی می‌باشد. عملیات شناسایی زیرسطحی، اطلاعات خوبی در زمینه‌ی خصوصیات خاک و سطح آب زیرزمینی، تاریخچه‌ی محل و میزان دسترسی به لوازم و تجهیزات لازم را در اختیار مهندسین قرار می‌دهد. این امر به‌خصوص در مورد زمین‌هایی با شرایط ژئوتکنیکی خاص، مانند زمین‌ها استحصالی اهمیت بیشتری دارد. برای بهره‌برداری از زمین‌های مسئله‌دار ابتدا باید مطالعات محلی و آزمایش‌های شناسایی بر روی خاک انجام گیرد تا بتوان مشکلات این زمین‌ها را رفع کرده و از آن‌ها بهره‌برداری نمود.

در ادامه توضیحات بیشتری در مورد اهداف مطالعات و بررسی‌های محلی داده‌شده است.

۲-۲-۱ بررسی محلی

بررسی محلی به کلیه‌ی اقداماتی اطلاق می‌شود که به بررسی مناسب بودن یا نبودن یک منطقه و محیط اطرافش برای پروژه‌های مهندسی می‌پردازد.

سیمونس^۱ و همکاران، اهداف مهم بررسی محلی را به‌صورت زیر بیان کردند: [۵]

الف) برای تعیین مناسب بودن یا نبودن یک منطقه و محیط اطرافش جهت اجرای پروژه‌های موردنظر.

ب) جهت کمک به اهداف اقتصادی طراحی پروژه، نظیر طراحی سازه‌های موقت، روش‌های بهسازی خاک و مدیریت سطح آب زیرزمینی.

ج) جهت شناسایی چالش‌های پیش رو که ممکن است مانع رسیدن به اهداف پروژه‌ی موردنظر شود.

^۱ Simons

- د) جهت مقابله با شکست‌های احتمالی در طول اجرای پروژه از طریق طراحی‌های چاره‌ساز.
- ه) جهت ارزیابی مناسب بودن مصالح مصرفی محلی.
- و) جهت ارزیابی ایمنی سازه‌های موجد مانند سدها و ساختمان‌ها.
- ز) جهت ارزیابی آثار زیست‌محیطی پروژه‌ی موردنظر.

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، شناسایی محلی، لزوماً به معنی مناسب بودن خصوصیات یک منطقه برای ساخت پروژه‌ی موردنظر نمی‌باشد؛ اما امکان استفاده و هزینه‌های استفاده از یک زمین مسئله‌دار را مشخص می‌کند. در ادامه به برخی اقدامات در راستای استفاده از زمین‌های مسئله‌دار پرداخته شده است.

۳-۲ راه‌حل‌های پیش رو برای حل مشکلات زمین با خاک

نامناسب

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- خاک‌برداری 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، 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. [۶]

از میان راه‌حل‌های استفاده از زمین‌های مسئله‌دار، یکی از بهترین و به‌صرفه‌ترین گزینه‌ها برای زمین‌های استحصالی، بهسازی خاک است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱ 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:

۲-۳-۱-۱ 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 شکل (الف) روش ستون سنگی و شکل (ب) تراکم دینامیکی از روش‌های بهسازی مکانیکی خاک

۲-۳-۱-۲ 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 تثبیت کننده‌ها 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 شکل (الف) بهسازی فیزیکی به روش انجماد خاک و شکل (ب) بهسازی شیمیایی با آهک پاشی

۲-۳-۱-۳ 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)^۳ که یا بارهای الکتریکی (تثبیت الکتروکینتیک)^۴ با ایجاد میدان الکتریکی توسط الکترودهای کار گذاشته شده در گمانه‌های خاک، استفاده می‌شود. در شکل ۳-۲ نمونه‌ای از بهسازی هیدرولیکی نشان داده شده است.

^۱ Polyacrylamide

^۲ Polyurethane

^۳ preloading

^۴ electrokinetic



شکل ۳-۲ کارگذاری فیلترهای تخلیه‌ی آب اضافه‌ی منفذی

در شکل ۳-۲ فیلترهای عمودی نشان داده شده‌اند که تا عمق موردنظر برای زهکشی در گمانه‌های خاک قرارگرفته و آب منفذی را تخلیه می‌کنند. این روش یکی از روش‌های پرکاربرد از زیرمجموعه‌های بهسازی هیدرولیکی به حساب می‌آید که بیشتر در خاک‌های دانه‌ای کاربرد دارد.

۴-۱-۳-۲ 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 پلی‌وینیل صورت گیرد. [۷]

از جمله‌ی مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تسلیح خاک، استفاده از سیستم‌های نیلینگ^۱ و انکراژ^۲ است که بیشتر در دیواره گودها و ترانشه‌ها استفاده می‌گردند. در روش نیلینگ المان‌های فلزی مثل میلگردها درون گمانه‌ای مورب در خاک قرار گرفته و اطراف آن با دوغاب سیمان پر می‌شود و قسمت رویه‌ی دیواره با بتن پاششی^۳ پوشانیده می‌شود.

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 ۴-۲ نشان داده شده است. [۸]



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

^۱ Nailing

^۲ Anchorage

^۳ Shotcrete

پی‌ها و ساختمان‌های موجود به کار گرفته می‌شد. 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 ۵-۲ اجرای میکروپایل نشان داده شده است.



شکل ۵-۲ روند اجرای میکروپایل

از حدود نیم‌قرن پیش، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح شروع گردیده است و در این میان استفاده از مواد باطله به‌عنوان مسلح کننده، به دلیل مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی، 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.

ایده‌ی استفاده از مسلح کننده‌هایی از این دست، اولین بار در سال ۱۹۷۹ توسط آندرسلند و ختاک^۱ مطرح شد. در ادامه پیشینه‌ی تسلیح خاک به تفصیل آورده شده است.

۴-۲ مطالعات پیشین در زمینه‌ی تأثیر مسلح کننده بر خاک

۱-۴-۲ بررسی افزایش مقاومت مخلوط خاک-مسلح کننده

اندرسلند و ختاک 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. [۹]

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 به صورت 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 گرانی،

^۱ Andresland & Khattak

^۲ Failure Strain

^۳ Gray & Ohashi

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

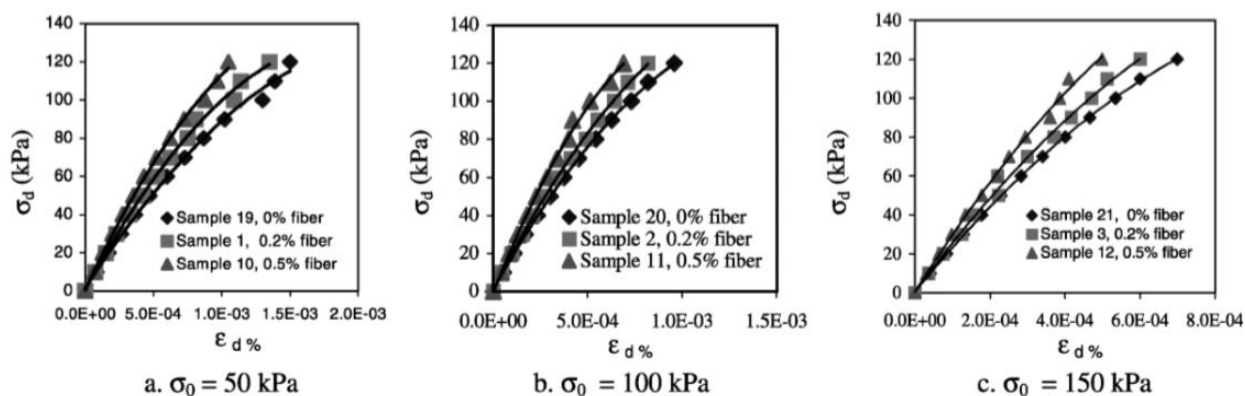
پایدارسازی سواحل توسط گیاهان پیش‌رونده و همچنین پایدارسازی خاک‌های با مدول پایین کمک می‌کند. [۱۰]

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 سیمانیت‌ه را افزایش می‌دهد. که این افزایش مقاومت با افزایش درصد الیاف و افزایش طول الیاف، بیشتر شد. 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 هم‌زمان با افزایش تردی مخلوط ماسه و سیمان، میزان ظرفیت سربار حداکثر را نیز افزایش داد. [۱۱]

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 محصورکننده‌ی ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه‌های مسلح شده، همان‌طور که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است، مشاهده کردند با افزایش درصد مسلح کننده 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. [۱۲]

^۱ Maher & Ho

^۲ Li & Ding

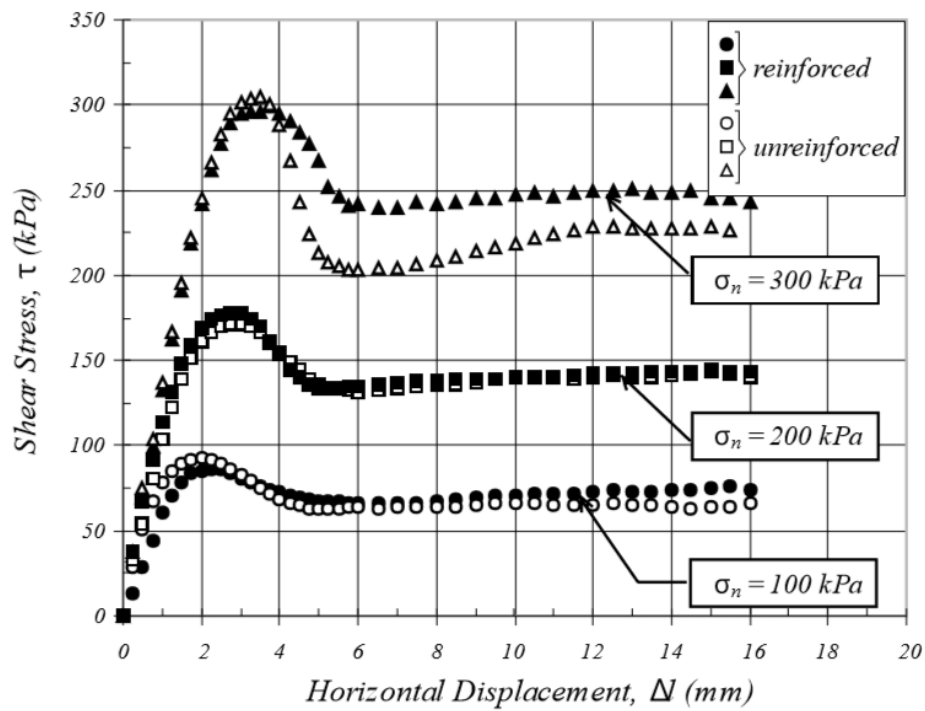


شکل ۶-۲ نمودارهای تنش انحرافی-کرنش حاصل تحقیقات *Ding* و *Li* در سال ۲۰۰۲

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 ۷-۲ در نمودارهای تنش برشی برحسب 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. [۱۳]

^۱ Yetimoglu & Salbas



شکل ۲-۷ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی خروجی تحقیقات یتیم اقلو و سالباس

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 میلی- متر و مقدار ۲٪ از وزن خاک صورت گرفت که در بالای دیواره، بارگذاری معادل بستر ریل قطار صورت گرفت. در شکل (۲-۸) فرایند بارگذاری نشان داده شده است.

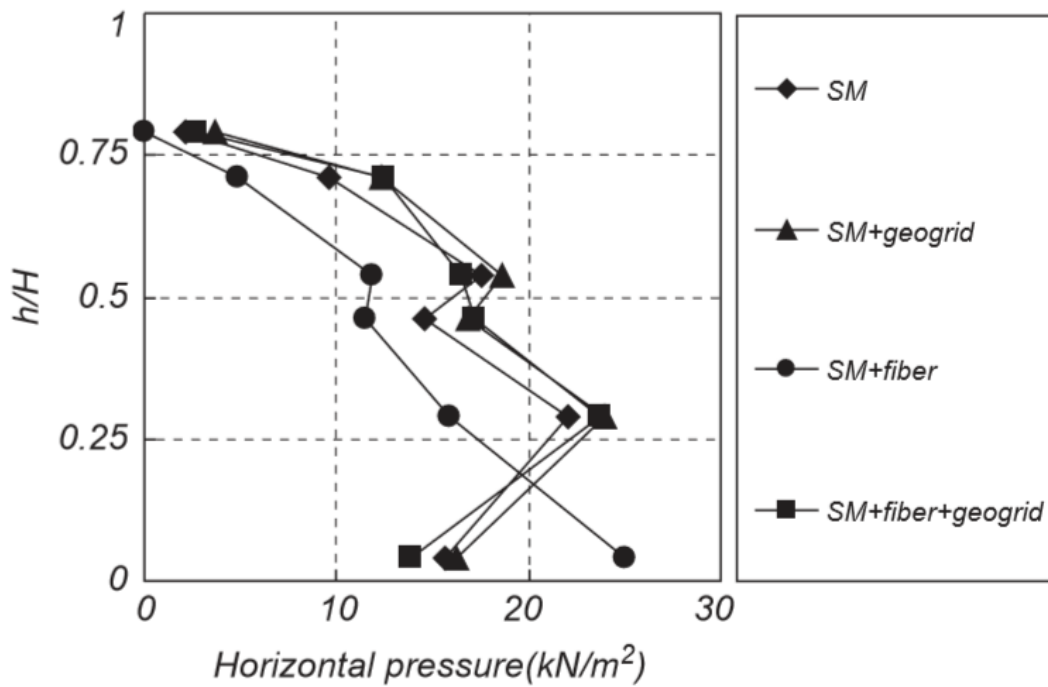
^۱ Tan & Park



شکل ۸-۲ بارگذاری دیواره‌ی خاک مسلح در مجاورت ریل قطار با مقیاس واقعی در پژوهش تان و پارک در سال

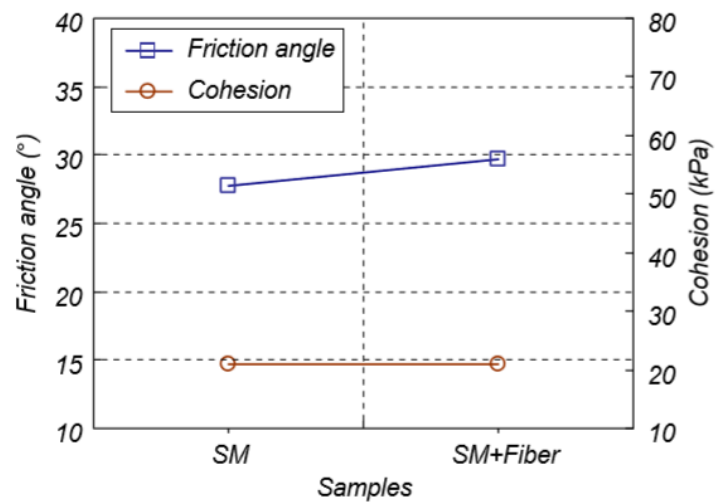
۲۰۱۵

همان‌طور که در شکل ۹-۲ 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 مسلح کننده‌ها، ترکیب ماسه و فایبر، فشار جانبی بیشتری نسبت به مسلح کننده‌های دیگر تحمل می‌کند. [۱۴]



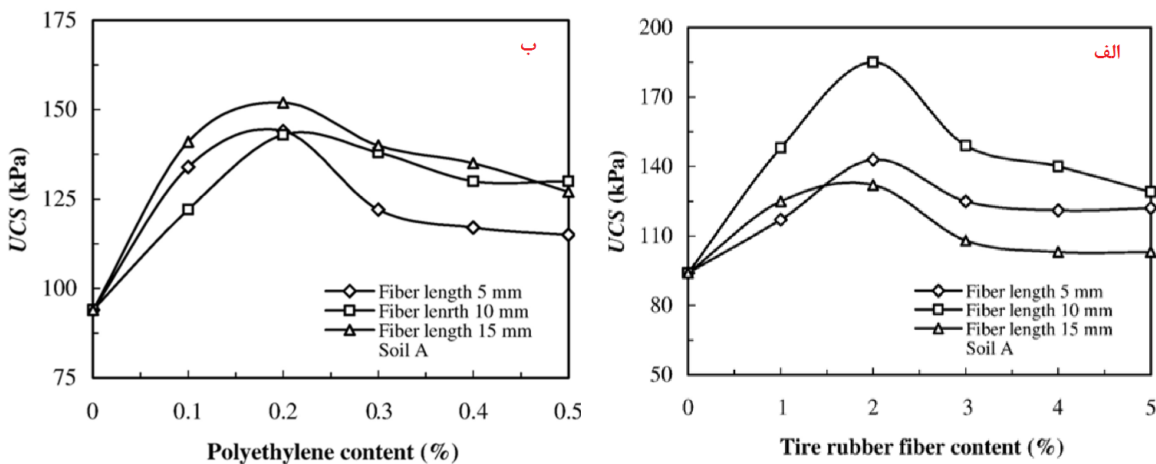
شکل ۹-۲ نمودار تغییرات فشار جانبی وارد بر دیوار مسلح شده بر حسب تغییرات عمق (h) ارتفاع دیوار و H عمق خاک)

نمودار خروجی دیگری از نتایج تحقیقات تان و پارک، در شکل ۱۰-۲ 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. [۱۴]



شکل ۱-۲ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نمونه‌ی غیر مسلح و مسلح

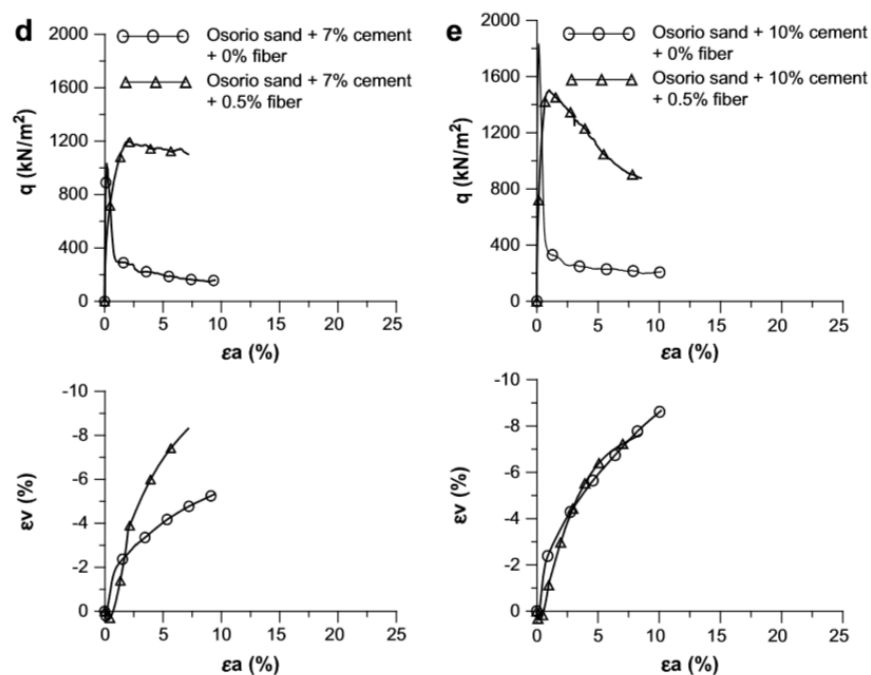
اکبولت و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۷، با استفاده از خرده‌های تایر و الیاف سنتتیک، موفق به بهبود خصوصیات خاک‌های رس شدند. این امر از طریق افزودن ۲٪ وزنی خرده تایر و ۰/۲٪ وزنی پلی‌اتیلن و الیاف پلی‌پروپیلن به قطر ۱ میلی‌متر و طول ۵ تا ۶۰ میلی‌متر صورت گرفت. به منظور تعیین خصوصیات مهندسی خرده تایر، پلی‌اتیلن 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 ۱-۲ 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 خرده تایرهای از طول ۵ به ۱۰ میلی-متر 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. [۱۵]



شکل ۱-۲ نمودار تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در خاک مسلح شده با الف) خرده تایر و ب) پلی‌اتیلن با ۳ طول

^۱ Akbultet et. al

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٪ 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 ۲-۱۲ آورده شده است.



شکل ۲-۱۲ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی- کرنش محوری در بالا و تغییرات کرنش قائم-کرنش محوری در پایین

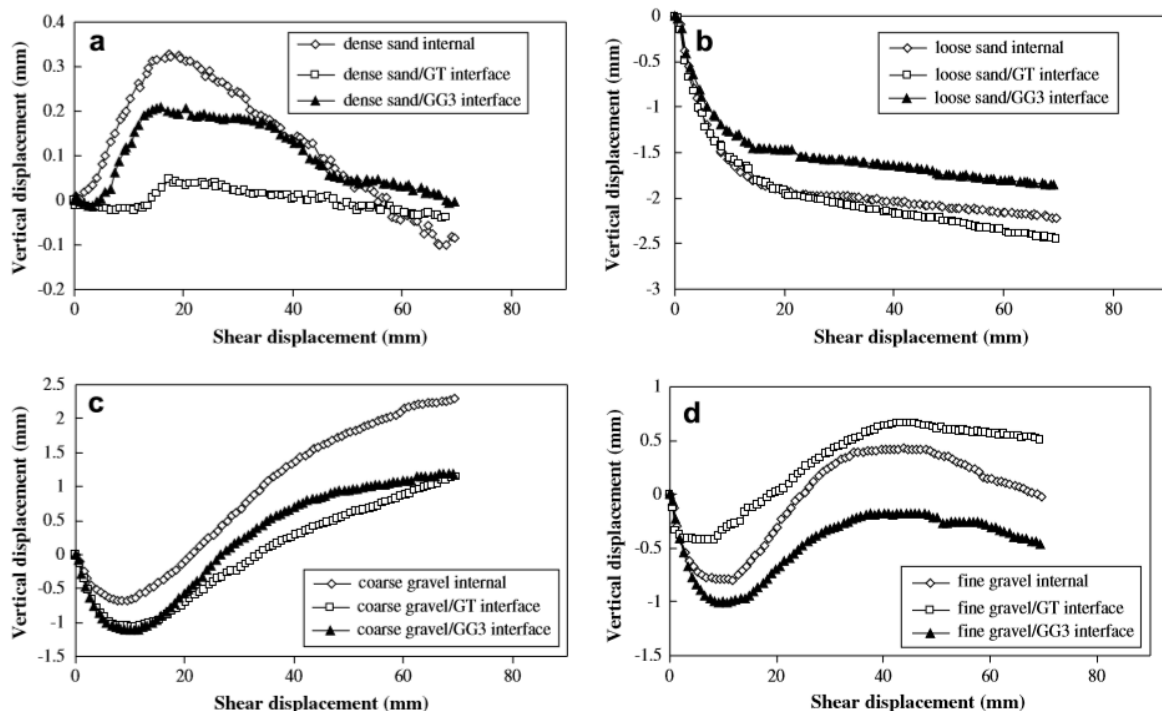
با توجه به نمودارهای شکل ۲-۱۲، نمونه‌های ترکیب ماسه و سیمان، مقاومت اولیه‌ی بالایی از خود نشان می‌دهند ولی با رفتار ترد، در کرنش پایین دچار گسیختگی می‌شوند. این در صورتی است که در حضور الیاف مسلح کننده، تنش انحرافی همواره کاهشی بوده و رفتار نمونه سست بوده

^۱ Consoli et.al

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. [۱۶]

لیو، هو و هوانگ^۱ در سال ۲۰۰۹، با استفاده از ژئوگریدهای مشبک *GT* از جنس پلی‌اتیلن ترفتالات (پت) و *GG3* از جنس پلی‌پروپیلن، 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 بزرگ‌مقیاس، کنترل کرده و پارامترهای مقاومت برشی بررسی کرده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۳ 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. [۱۷]

^۱ Liu & Ho & Huang

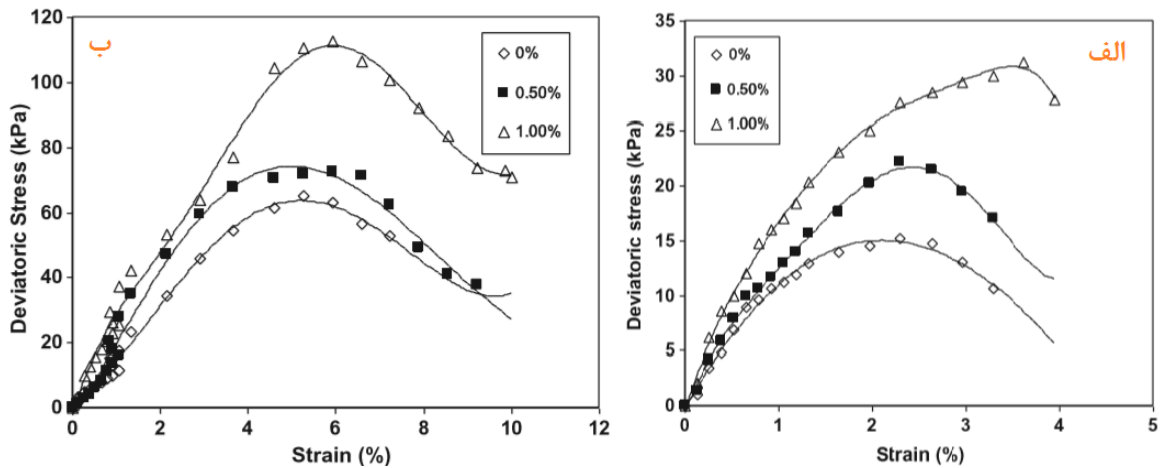


شکل ۲-۱۳ نمودارهای کرنش قائم-کرنش برشی برای چهار نوع خاک به کاررفته در تحقیقات *Lui* و همکاران

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 ات‌برگ، 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 ۲-۱۴ نشان داده شده است.

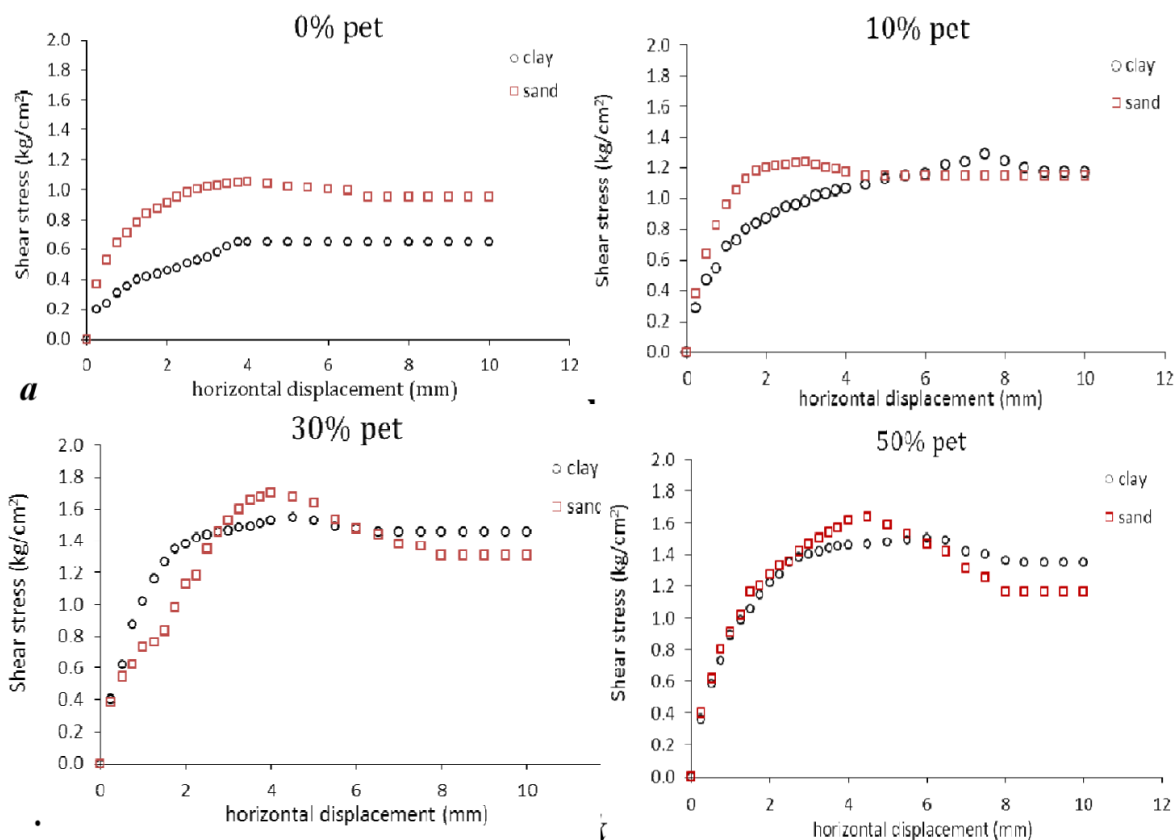
^۱ Sivakumar Babu & Chouksey



شکل ۲-۱۴ تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در درصد‌های مختلف مسلح کننده برای الف) خاک ماسه‌ای و ب) خاک رس قرمز

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. [۱۸]

اژدرپور، نیکودل و محمدی 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 ۲-۱۵ نشان داده شده است.



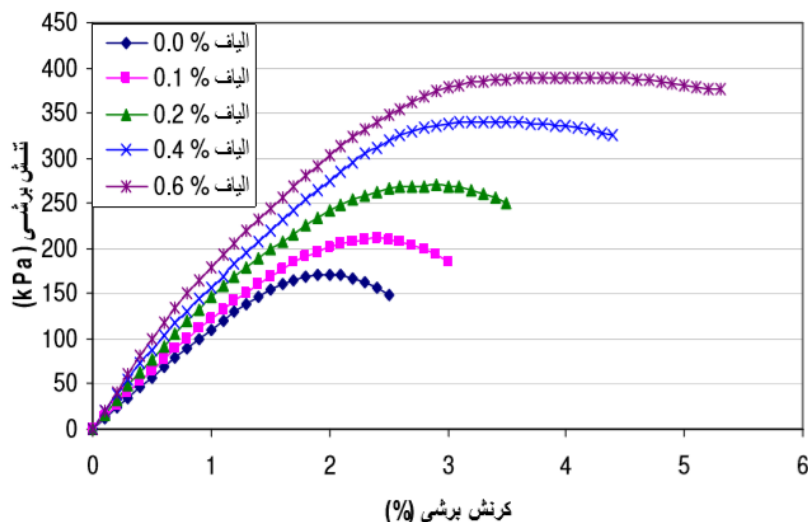
شکل ۲-۱۵ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی برای دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی در درصدهای مختلف مسلح کننده

کننده

همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ 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. [۱۹]

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 (تک محوری) ، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و برش مستقیم انجام دادند که نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم در شکل ۱۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۶-۲ اثر تسلیح خاک بر نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی تحقیقات سیم نگار و کمالی

با توجه به نمودار شکل ۱۶-۲، افزودن الیاف به خاک موجب افزایش مقاومت برشی خاک شده و رسیدن به تنش حداکثر در کرنش‌های بالاتر، نشان می‌دهد تسلیح موجب افزایش شکل-پذیری خاک شده است. [۲۰]

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. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی خاک و مخلوط خاک-الیاف، آزمایش‌های حدود اتربرگ، 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

^۱ Acharyya et.al

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. [۲۱]

آناگنوستو پلوس و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار مهندسی خاک مسلح شده با

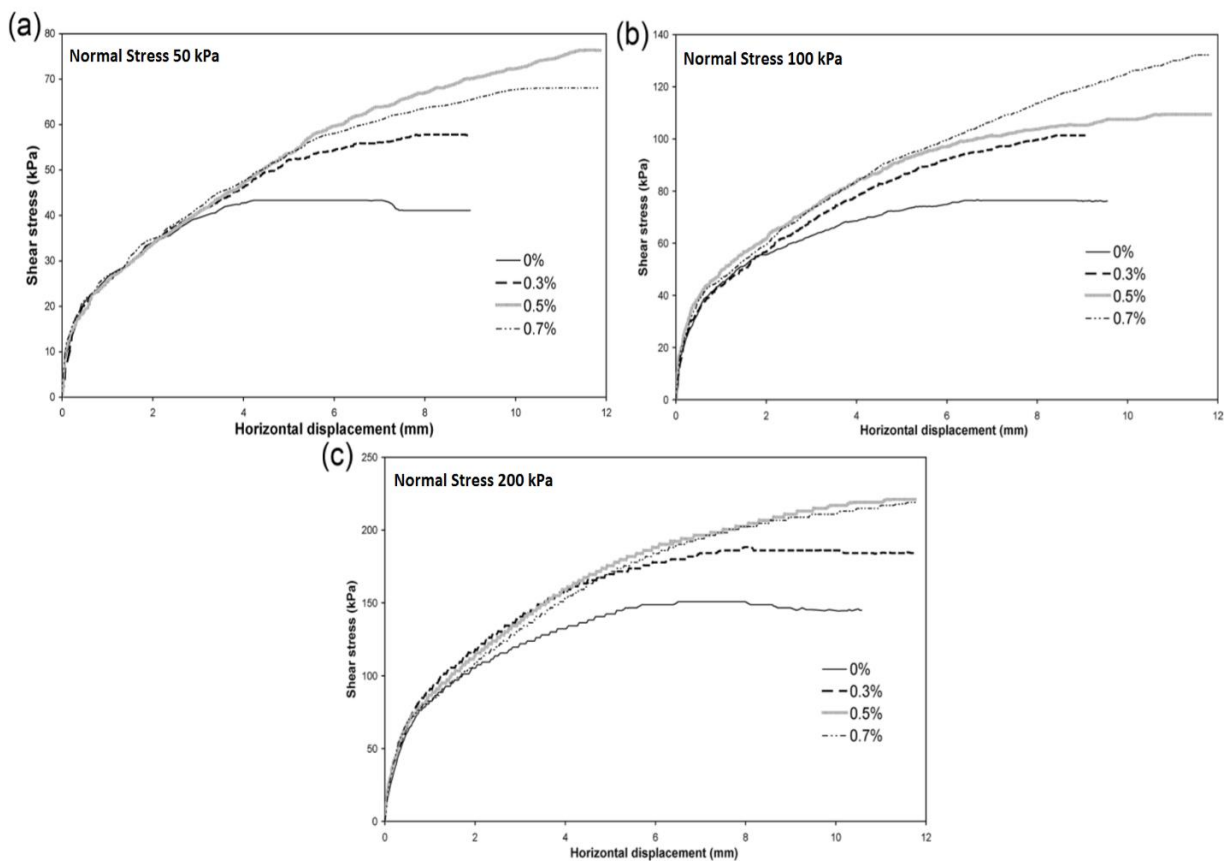
پلی‌پروپیلن پرداختند. خاک ماسه سیلتی با الیاف پلی‌پروپیلن به مقدار ۰/۳٪، ۰/۵٪ و ۰/۷٪

مسلح شده‌است. 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 ۲-۱۷ بر روی

خاک صورت گرفته است. [۲۲]



^۱ Anagnostopoulos

شکل ۱۷-۲ نمودارهای تنش برشی-کرنش برشی نمونه‌های مسلح شده با *PP* تحت سه سربار

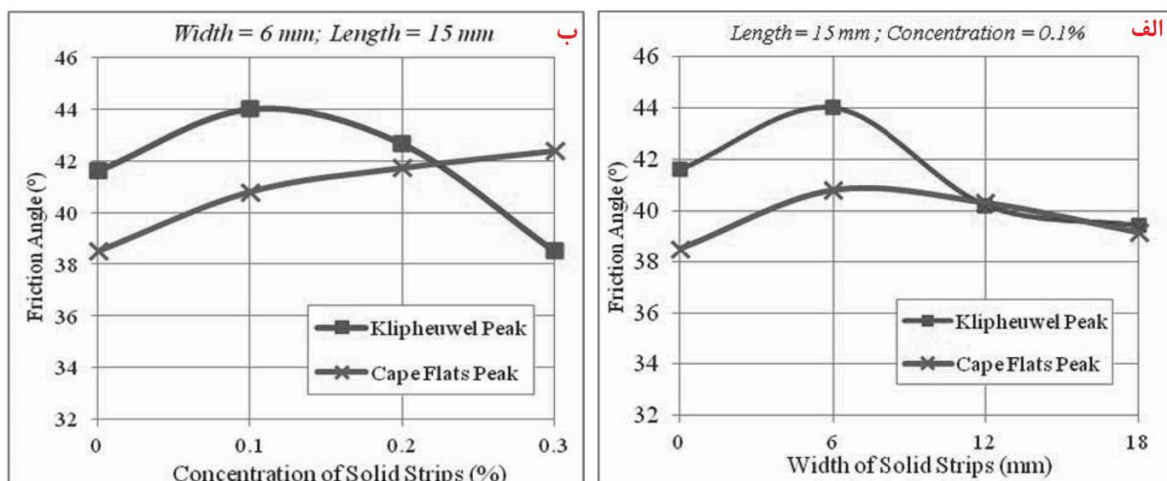
با توجه به شکل ۱۷-۲، در تمامی سربارها، افزایش درصد الیاف تا ۰/۵ درصد از وزن خاک ماسه سیلتی باعث بهبود مقاومت برشی بیشینه گردیده و مقاومت، در ۰/۷ درصد کاهش نسبی داشته است که نشان می‌دهد ۰/۵ درصد، مقدار بهینه‌ی مسلح کننده بوده است. [۲۲]

شِبِت و کالومبا^۱ در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار مهندسی خاک ماسه‌ی کلیفول^۲ و ماسه‌ی کیپ^۳ مسلح شده با پلاستیک‌های ضایعاتی پلی اتیلن با چگالی بالا (*HDPE*) به طول ۱۵، ۳۰ و ۴۵ میلی‌متر، عرض ۶ میلی‌متر تا ۱۸ میلی‌متر و مقادیر ۰/۱٪ و ۰/۲٪ و ۰/۳٪ پرداخته‌اند. خصوصیات مهندسی و 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 ۱۸-۲ نشان داده شده است. [۲۳]

^۱ *Chebet & Kalumba*

^۲ *klipheuwel Sand*

^۳ *Cape Sand*

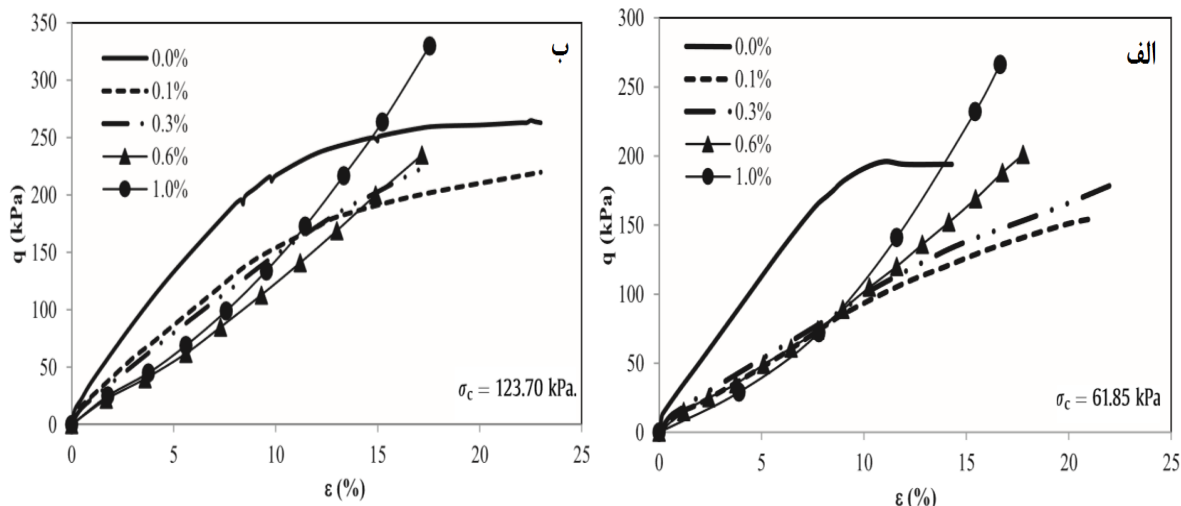


شکل ۲-۱۸ نمودارهای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برحسب: الف) عرض مسلح کننده و ب) تراکم مسلح کننده در خاک

با توجه به خروجی‌های آزمایش در شکل ۲-۱۸ 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 شده است، اما مقادیر ۰/۲٪ و ۰/۳٪ موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده‌اند و در خاک ماسه‌ی کیپ، افزایش زاویه اصطکاک داخلی، تا ۰/۳٪ پت ادامه داشته است. [۲۳]

بوٲرو 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 ۲-۱۹ نتایج آزمایش‌ها نشان داده شده است.

^۱ Botero.J



شکل ۱۹-۲ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش، در دو تنش محصورکننده

با توجه به نمودارهای شکل ۱۹-۲، افزودن مسلح کننده به خاک تا ۱ درصد، موجب

افزایش مقاومت نمونه خاک و شکل پذیری بیشتر شده است.

در تنش همه جانبه $۶۱/۸۵$ کیلو پاسکال، مقاومت نمونه در اثر تسلیح، به حدود

۲۵۰ کیلو پاسکال و در تنش همه جانبه $۱۲۳/۷$ کیلو پاسکال، مقاومت نمونه نزدیک به ۳۴۰ کیلو

پاسکال شده است.

همچنین در نمونه های غیرمسلح برخلاف نمونه های مسلح، شکست ترد رخ داد که این امر

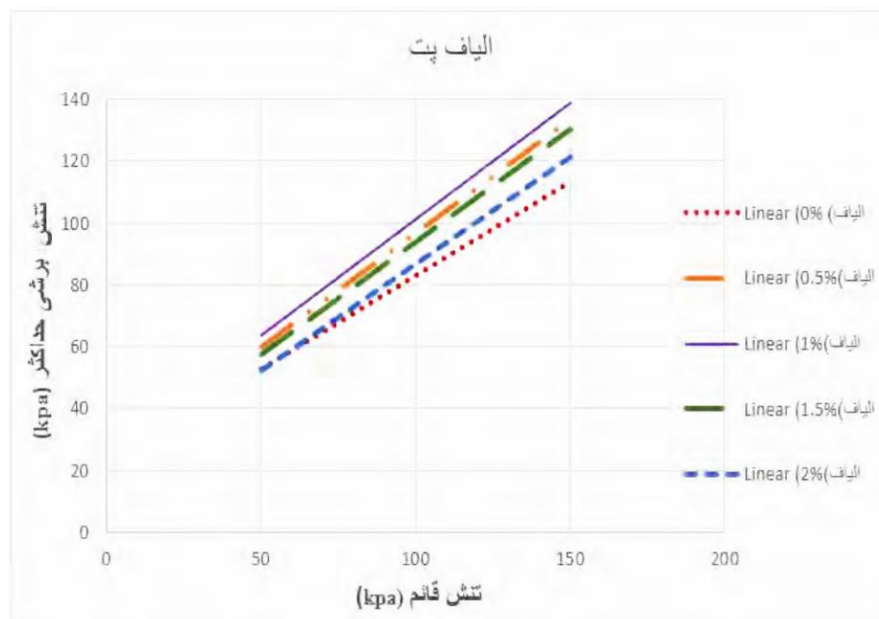
به دلیل افزایش شکل پذیری نمونه های مسلح بوده و شکل پذیری با افزایش سربار قائم، بیشتر شده-

است. [۲۴]

دادوند، رنجبر، برنجیان و نوری در سال ۲۰۱۷، پژوهشی بر روی ماسه ی بابلسر، مسلح شده

با الیاف بطری های ضایعاتی پت، انجام دادند و طی آن با انجام آزمایش های برش مستقیم و CBR ،

پارامترهای مقاومتی خاک را بررسی کردند. نتایج آزمایش برش مستقیم در شکل ۲-۲۰ آمده است.

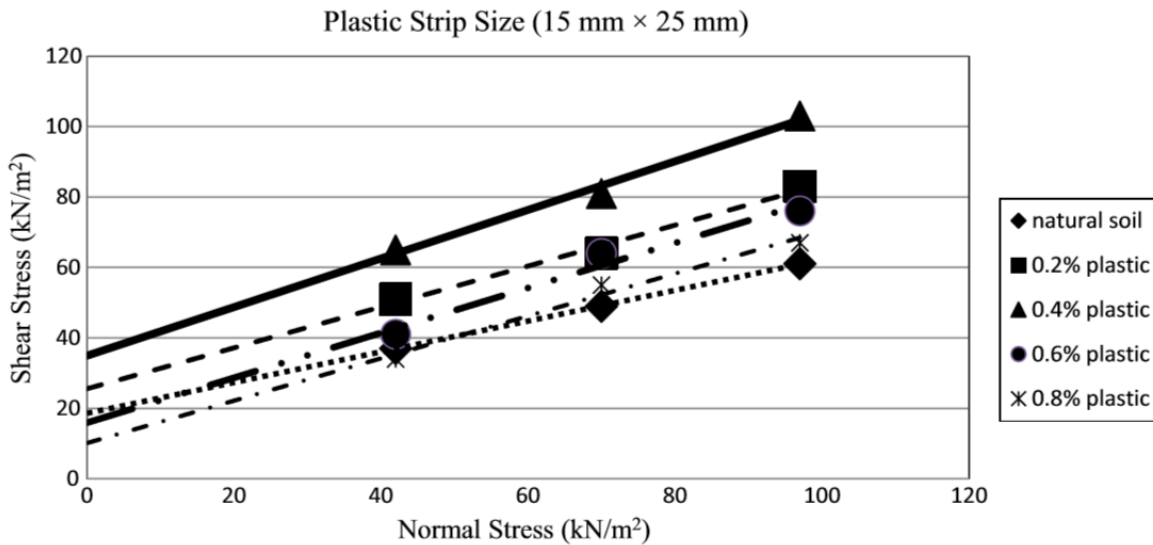


شکل ۲-۲۰ تغییرات تنش برشی برحسب تغییرات سربار قائم در نمونه‌های خاک با درصد‌های مختلف مسلح کننده

مطابق نمودار ارائه شده در شکل ۲-۲۰، 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. [۱]

همچنین در سال ۲۰۱۸، پدایا و همکاران^۱ با افزودن خرده پت 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 ۲-۲۱ نشان داده شده است.

^۱ Peddaiah et.al



شکل ۲-۲۱ نمودار تغییرات تنش برشی در درصد مسلح کننده‌های مختلف در پژوهش پدیا و همکاران

مطابق آنچه در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده‌است، تسلیح خاک سیلتی مورد آزمایش، موجب افزایش مقاومت برشی آن شده که با افزایش سربار قائم، تاثیر آن مشهودتر بوده و این افزایش مقاومت در ۰/۴ درصد پت، در بهترین حالت بوده‌است. [۲۵]

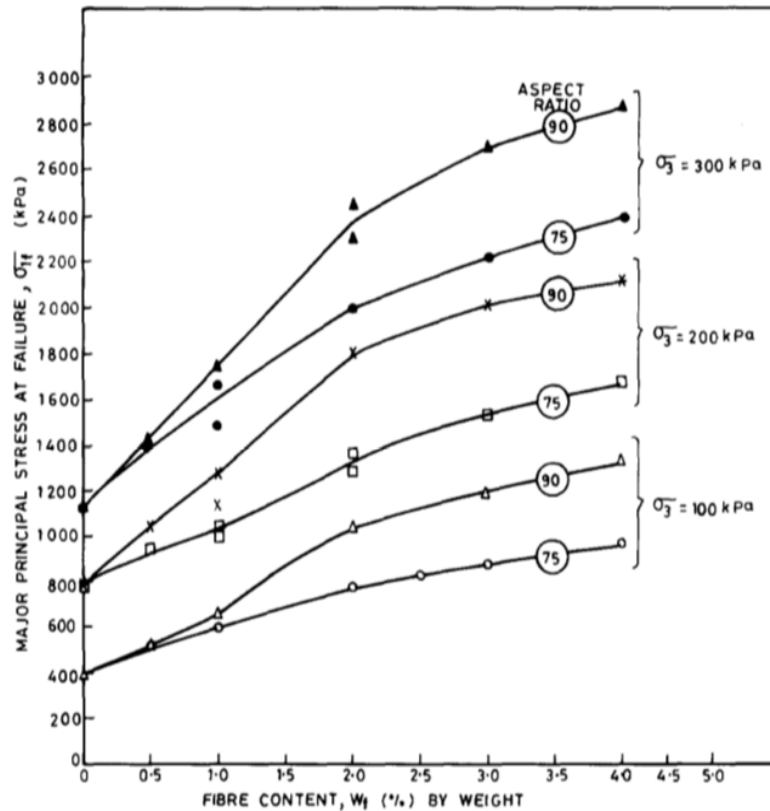
۲-۴-۲ بررسی افزایش شکل‌پذیری ترکیب خاک-مسلح کننده

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 به‌صورت 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 به‌منظور مطالعه‌ی تنش-

^۱ Ranjan et.al

تغییر شکل و رفتار گسیختگی نمونه‌های خاک-الیاف، مورد آنالیز قرار گرفت که در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است.

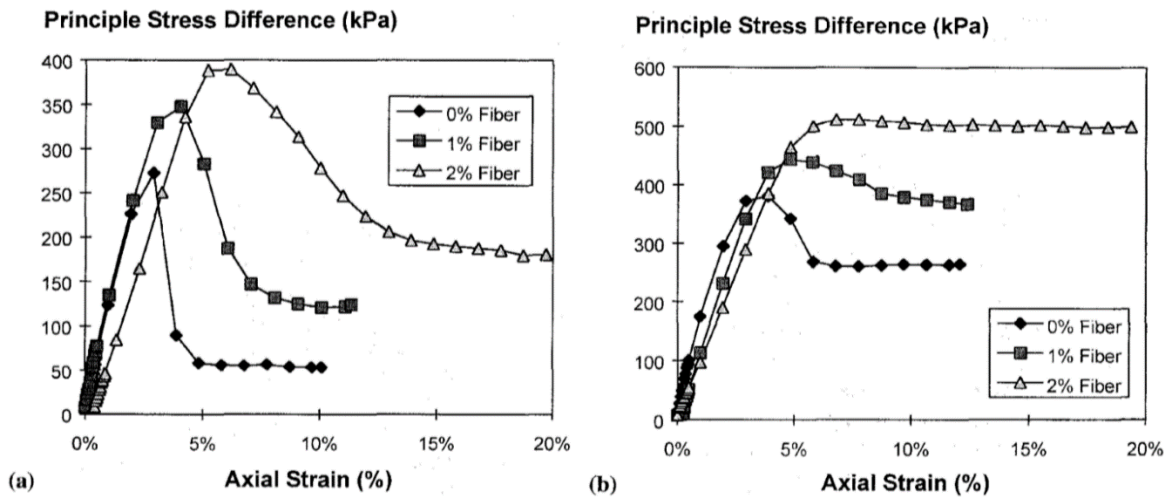


شکل ۲-۲۲ تأثیر درصد پت بر مقاومت نهایی ماسه‌ی مسلح شده در سه تنش محصورکننده در آزمایش سه محوری

مطابق نمودار شکل ۲-۲۲، 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 شده‌است. 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. [۲۶]

^۱ Aspect Ratio

وانگ^۱ در 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 مسلح کننده در این آزمایش‌های از ۰/۷ درصد تا ۲ درصد بود. نتایج آزمایش‌های سه محوری فشاری در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۳-۲ منحنی‌های تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش در دو حالت (a) محصور نشده و (b) محصور شده

با توجه به نتایج به دست آمده، تسلیح نمونه‌ها با الیاف ضایعات فرش، موجب افزایش

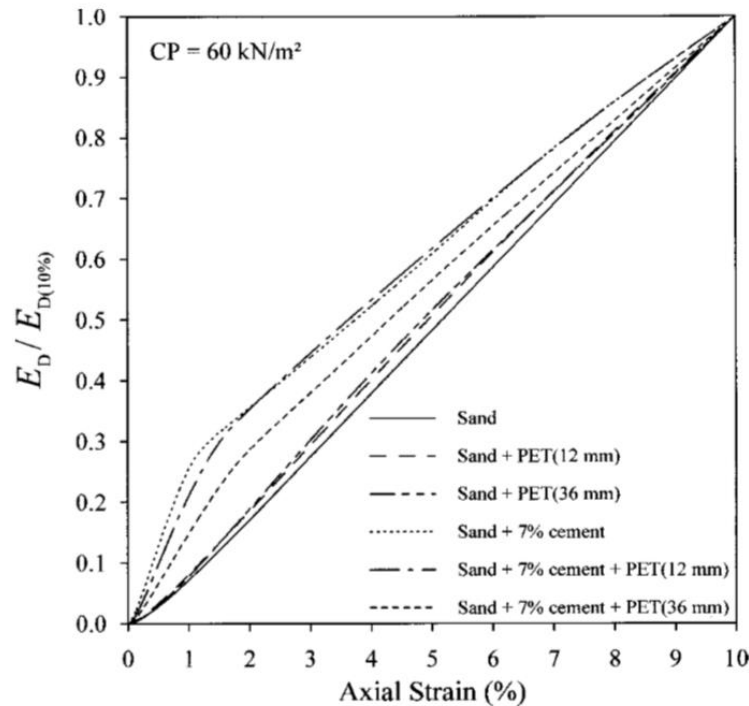
شکل پذیری و مقاومت در برابر خردشدگی در کرنش‌های بالا گردید. [۲۷]

کنسولی و همکاران^۲ 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

^۱ Wang Youjiang

^۲ Consoli et al. 2002

مهندسی خاک و پت و ترکیب خاک و پت و سیمان صورت گرفت. در شکل ۲-۲۴ نمونه‌ای از این ارزیابی نشان داده شده است.



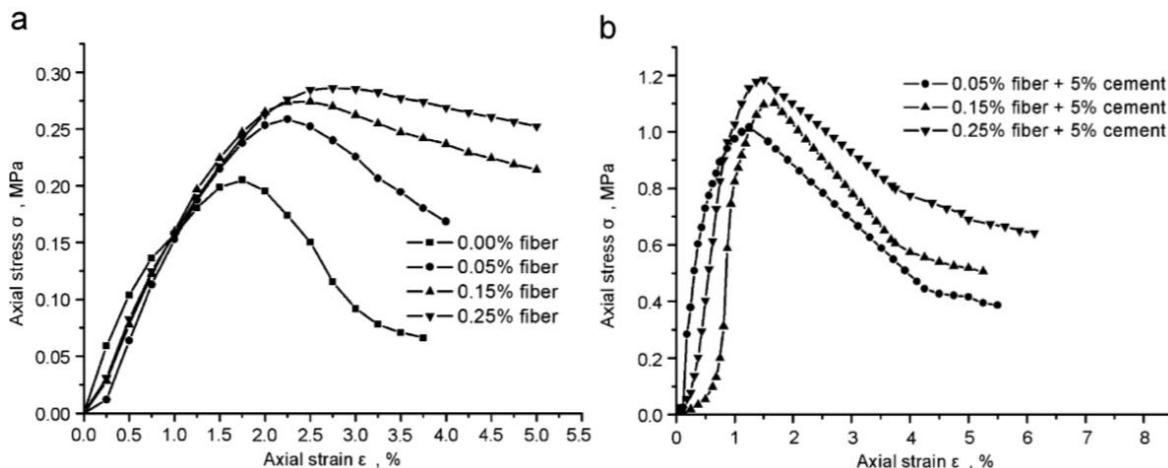
شکل ۲-۲۴ تغییرات ظرفیت جذب انرژی نرمالیزه شده برحسب کرنش محوری برای ترکیبات مختلف خاک

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. [۲۸]

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 ۰/۰۵٪ 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 پلی-

^۱ Tang et.al

پروپیلن انجام شد. سپس آزمایش‌های فشاری محصور نشده، برش مستقیم و اسکن الکترومیکروسکوپی (SEM^1) بر روی نمونه‌های مسلح انجام شد. نتایج بررسی نمونه‌های مسلح، در شکل ۲-۲۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۵ 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

با بررسی نتایج نمودارها مشاهده می‌شود که ترکیب الیاف با خاک سیمان‌دار و بدون سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده (UCS^2)، کرنش محوری در لحظه‌ی گسیختگی شده‌است؛ همچنین حضور الیاف موجب کاهش سختی و مقاومت بیشینه شده و رفتار ترد خاک را شکل‌پذیرتر کرده است. [۲۹]

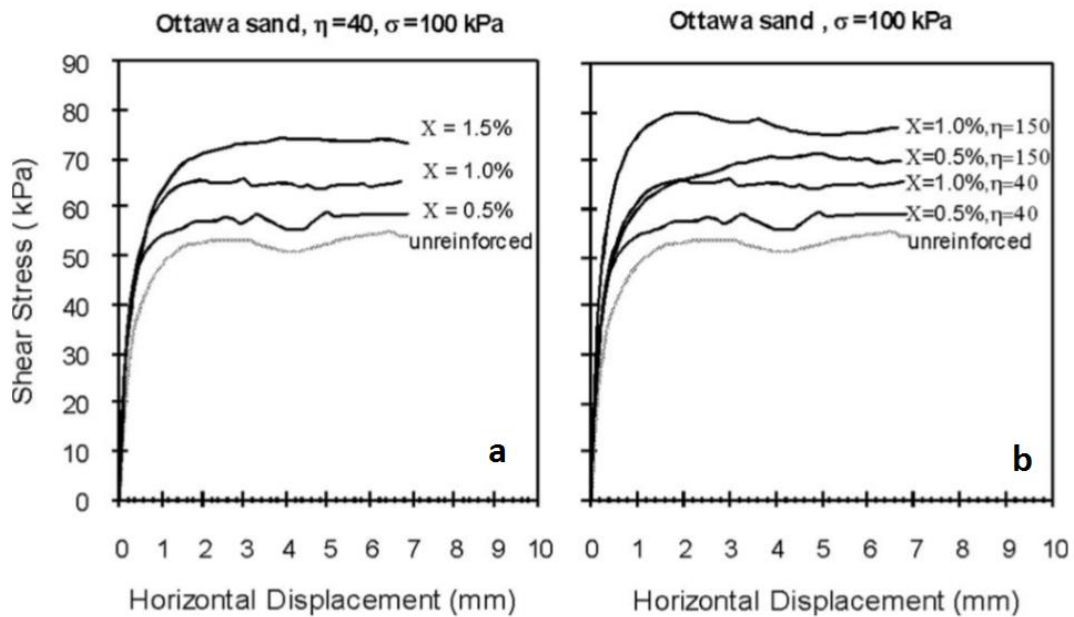
صادق و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۰، به بررسی مقاومت برشی ماسه‌ی مسلح شده با الیاف از طریق مخلوط کردن ماسه‌ی ریزدانه یا درشت‌دانه با سیم‌های نایلونی تور ماهیگیری به‌عنوان مسلح‌کننده پرداختند. قطر الیاف، ۰/۱۸ میلی‌متر و ۰/۷ میلی‌متر، طول آن‌ها از ۷ میلی‌متر تا ۲۷ میلی‌متر و مقدار آن‌ها در خاک از ۰٪ تا ۱/۵٪ از وزن ماسه‌ی خشک بوده است. آزمایش‌های چگالی

^۱ Scanning electron microscope

^۲ Unconfined Strength

^۳ Sadek et.al

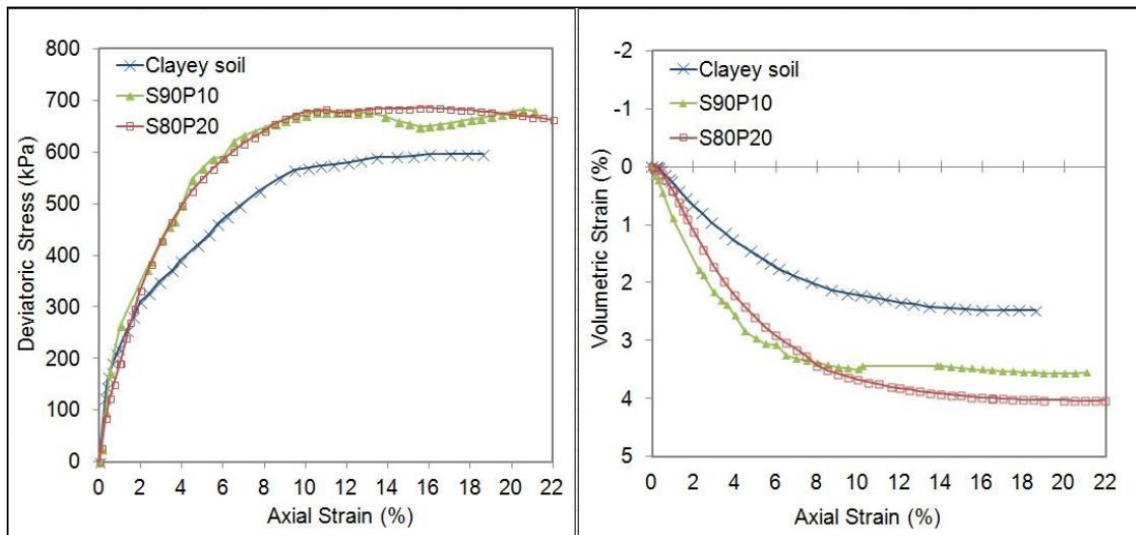
ویژه دانه‌های جامد خاک (G_s) و دانه‌بندی، جهت تعیین خصوصیات فیزیکی ماسه انجام شدند. در حالی که خصوصیات الیاف نایلونی تور ماهیگیری، نظیر طول، قطر، مدول یانگ، مقاومت کششی و چگالی ویژه هم معین شد. سپس ۱۵۰ آزمایش برش مستقیم بر روی ترکیب ماسه-الیاف در تنش-های نرمال ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال انجام شد. نمونه‌ای از بررسی تغییرات تنش برشی، تحت سربار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال، در شکل ۲-۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۶ 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

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 مسلح کننده با الیاف کوتاه‌تر و ۴۶٪ در اثر مسلح کننده با الیاف بلندتر شده است. [۳۰]

این‌گرید مارتینز و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۴، با افزودن خرده پت به خاک رسی و انجام آزمایش سه‌محوری به بررسی تأثیر خرده پت بر رفتار مقاومتی و تغییرشکل‌های نمونه‌ی مسلح شده پرداخته‌اند که نتایج آزمایش‌ها در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۲۷ نمودارهای تغییرات حجم و تغییرات تنش انحرافی بر حسب جابجایی محوری در پژوهش مارتینز و همکاران

مطابق نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۲-۲۷، مقایسه‌ی رفتار خاک رس غیرمسلح با حالت مسلح شده با ۱۰ و ۲۰ درصد پت، نشان داده که افزودن مسلح‌کننده‌ی پت، موجب افزایش تنش انحرافی مورد تحمل نمونه و افزایش شکل‌پذیری و جلوگیری از رفتار خردشونده‌ی نمونه خاک شده‌است. [۳۱]

^۱ Ingrid Melina Reyes Martinez et.al

۲-۵ جمع بندی فصل

آنچه در این فصل از پژوهش بیان شد، نگاهی جامع نیاز به بهسازی و روش‌های بهسازی خاک‌های مسئله‌دار و همچنین کاربرد مواد پلاستیکی ضایعاتی در بهسازی خاک‌ها و پیشینه‌ی انجام این کار و مروری بر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه بود. در تحقیقات انجام‌شده، 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 سبده، *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 از 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 تغییرشکل‌پذیری و جلوگیری از بروز ترک و خردشگی در خاک شد.

پژوهش حاضر نیز با محوریت بهسازی خاک به‌روش تسلیح و باهدف بهبود پارامترهای مقاومتی خاک و فراهم آوردن امکان استفاده مجدد از پلاستیک ضایعاتی انجام گردید. با بهره‌گیری از پژوهش‌های گذشته، استفاده از درصد پت در محدوده ۱ درصد مورد مطالعه قرار گرفته است و جزئیات بیشتر در مورد زمین مورد مطالعه، خاک و مسلح‌کننده و آزمایش‌های صورت گرفته، در فصل سوم بیان می‌شود.

فصل ۳ : روش انجام تحقیق

۳-۱ مقدمه

در پژوهش حاضر، تسلیح خاک ماسه‌ای بندر استحصالی انزلی با استفاده از ضایعات پلاستیکی پلی‌اتیلن ترفتالات (پت)، صورت گرفته است. در این فصل ابتدا به معرفی کامل زمین-های استحصالی و کاربری ضایعات پلاستیکی بخصوص پت پرداخته شده و سپس آزمایش‌های شناسایی که بر روی خاک انجام شده است، دانه‌بندی، 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 خصوصیات مسلح کننده‌ی پت از قبیل چگالی ویژه (G_s)، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بیان شده است. در انتها و پس از ترکیب مسلح کننده با خاک، نمونه‌های مسلح شده تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند.

۳-۲ زمین‌های استحصالی

توسعه‌ی روزافزون ساخت‌وساز و کاهش زمین‌های در دسترس، بشر را ناگزیر به استفاده از زمین‌هایی با شرایط ژئوتکنیکی نامناسب کرده است. از جمله‌ی این زمین‌ها، زمین‌های استحصال شده از دریا هستند. واژه استحصال به معنی حاصل شدن است و استحصال زمین از دریا، به معنی ایجاد ناحیه‌ی مرتفع (بالتر از سطح آب) به صورت جزیره در نزدیکی سواحل و ایجاد ساحل مصنوعی است. [۳۲]

زمین‌های استحصالی به منظور بهره‌برداری بیشتر از خط ساحلی برای ایجاد زمینه‌ی ساخت‌وساز و یا افزایش زمین‌های در دسترس نواحی بندری احداث می‌گردند. در شکل ۳-۱ نمونه‌ای از عملیات

استحصال که در گذشته انجام می‌شده و امروزه منسوخ شده یعنی استحصال به روش خاک‌ریزی در دریا نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ در گذشته استحصال زمین به روش خاک‌ریزی در دریا صورت می‌گرفت

بنادر استحصالی نیز از این دست زمین‌ها می‌باشند که جهت بهره‌برداری بیشتر از منطقه، مهندسی اقدام به استحصال زمین از دریا کرده و در حاشیه دریاها و لنگرگاه‌ها و در نزدیکی ساحل یا روی بستر دریا تأسیس می‌شوند و با توجه به موقعیت مجاورت دریا، معمولاً از خاک ماسه‌ای بستر دریا در ایجاد این زمین‌ها استفاده می‌شود. از سوی خاک ماسه‌ای اشباع منطقه همواره در مسیر دستیابی به زمین استحصالی مهندسی شده و قابل‌اعتماد، مشکل‌ساز بوده است. زمین‌های استحصال شده از دریا معمولاً از پارامترهای ژئوتکنیکی مناسب برخوردار نبوده و به دلایل مختلف از قبیل نسبت تخلخل بالا، قابلیت نشست پذیری زیاد، درصد رطوبت بالا و . . . در مواجهه با پدیده‌هایی مانند آب شستگی، زلزله، روانگرایی مشکلات زیادی ایجاد می‌کنند. سابقه استحصال زمین از دریا به سال ۱۸۴۰ میلادی بازمی‌گردد که در آن به توسعه‌ی اراضی بندر

ولینگتن^۱ پرداخته‌اند. همچنین کشورهای هلند، ژاپن و امارات از کشورهای موفق در این زمینه می‌باشند. در حال حاضر نیز بزرگ‌ترین پروژه‌ی استحصال زمین از دریا، پروژه‌ی پالم در کشور امارت است که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است؛ این پروژه برای ایجاد جاذبه‌های توریستی و افزایش خطوط ساحلی این کشور از ۷۰ کیلومتر به بیش از ۵۰۰ کیلومتر انجام شده است. [۳۲]



شکل ۲-۳ مجمع‌الجزایر استحصالی در سواحل دومی امارات

۳-۲-۱ روش استحصال اراضی

روش استحصال زمین، با استفاده لایروبی از کف دریا می‌باشد که با بهره‌گیری از محوطه‌ی آرام ایجاد شده توسط موج‌شکن‌های ساحلی و در برخی موارد حاصل از شمع یا سپرکوبی، انجام می‌شود که نمونه‌ای از محوطه لایروبی در شکل ۳-۳ نشان داده شده و در ادامه توضیح کامل آن آورده شده است.

^۱ Wellington port



شکل ۳-۳ موج شکن بندر انزلی با به دام انداختن رسوبات، شرایط را برای استحصال زمین از دریا ایجاد می کند

۳-۲-۱-۱ لایروبی از کف دریا

لایروبی^۱ عبارت است از استخراج یا جابجایی خاک یا سنگ که توسط کشتی لایروب انجام می شود. کشتی لایروب به کشتی هایی اطلاق می شود که شناور آن ها مجهز به تجهیزات استخراج و جابجایی خاک و سنگ باشد. لایروبی، روش نسبتاً جدیدی است که با ساخته شدن کشتی های لایروب در دهه های اخیر میسر شده است [۳۲]. بخش هایی از بندر روتردام هلند که استحصال آن در شکل ۳-۴ به همراه کشتی لایروب نشان داده شده است و جزایر مصنوعی پالم در خلیج فارس که در شکل ۳-۲ نشان داده شده اند، با روش لایروبی از کف دریا ساخته شده اند.

در ایران نیز بخش هایی از بندر انزلی در استان گیلان و بندر شهید رجایی بندرعباس به روش لایروبی استحصال شده اند. معمولاً برای بهبود انجام لایروبی از سازه هایی نظیر موج شکن های ساحلی برای جمع آوری رسوبات موازی ساحل به منظور ایجاد بستری مناسب و کم عمق برای لایروبی جهت استحصال زمین یا کند کردن آهنگ فرسایش ساحل استحصال شده و حفاظت از

^۱ Dredging

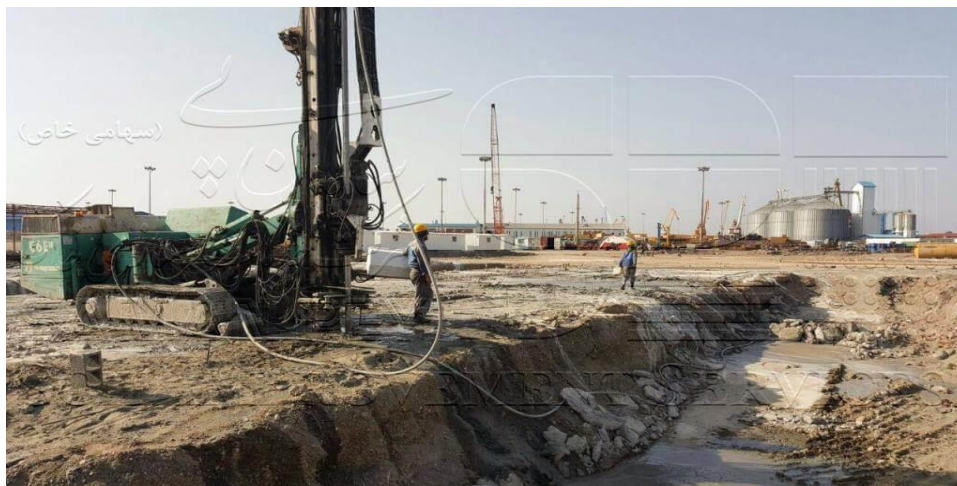
آن، عمود بر خط ساحلی استفاده می‌شود. [۳۳] نمونه‌ای از عملیات لایروبی با سیستم رنگین کمان در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ استحصال به روش لایروبی از دریا با سیستم *Rainbow* در بندر روتردام هلند با استفاده از کشتی لایروب

۳-۳ بندر استحصالی انزلی

بندر انزلی یکی از مهم‌ترین بنادر تجاری ایران و بزرگ‌ترین بندر شمال ایران، در استان گیلان و در فاصله‌ی ۴۰ کیلومتری رشت واقع شده است. عملیات بهسازی در بندرانزلی، در دو جبهه‌ی کاری شامل تراکم دینامیکی و بهسازی با تزریق به‌وسیله‌ی جت گروتینگ در زمین‌های استحصالی انجام گرفته است. در شکل ۳-۵ تصویری از تزریق به‌روش جت‌گروتینگ انجام شده توسط شرکت سامان پی آورده شده است.

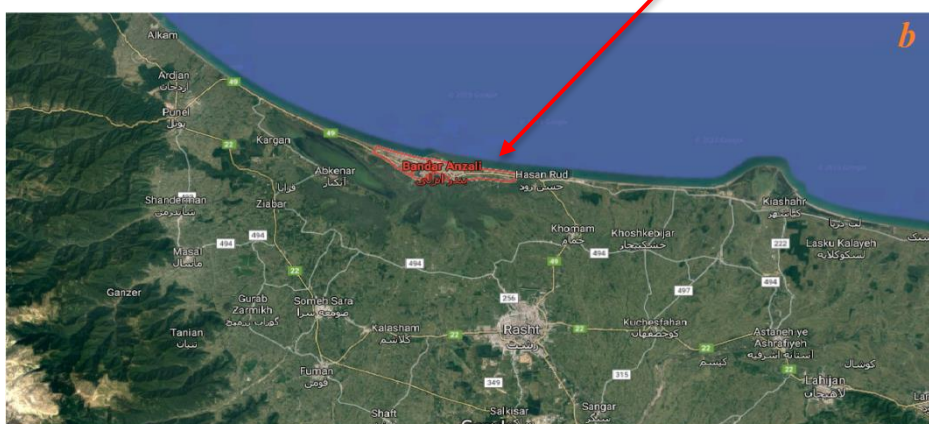


شکل ۵-۳ پروژه‌ی جت گروتینگ در بندر انزلی

پروژه‌ی استحصال زمین در مجاورت موج‌شکن شرقی بندر، بخشی از پروژه‌ی تکمیل موج‌شکن شرقی است که از سال ۱۳۹۱ آغاز گردید و تاکنون ادامه داشته است. هدف استحصال زمین از دریا در این بخش، افزایش سطح در دسترس محوطه‌ی مجاور موج‌شکن، محوطه‌سازی و روسازی آسفالتی برای عبور ماشین‌آلات سبک در این بخش‌ها می‌باشد. در شکل ۶-۳، موقعیت زمین استحصالی بندرانزلی نشان داده شده است.



37°28'48.7"N 49°28'49.3"E



شکل ۳-۶ (a) محدوده‌ی استحصال در مجاورت موج‌شکن شرقی بندر انزلی و (b) موقعیت بندر انزلی در شمال کشور

همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، مقدمه‌ی استحصال زمین از دریا، لایروبی است که برای استحصال زمین در بندر انزلی نیز از همین روش استفاده شد. معاونت عمرانی بندر انزلی با استفاده از کشتی‌های لایروب، در مجاورت موج‌شکن شرقی بندر عملیات لایروبی از کف دریا و انتقال به محل دیو با پمپ را انجام داده است. خاک لایروبی شده برای مدتی در نزدیکی محدوده‌ی موردنظر در سطح نسبتاً شیب‌دار وسیعی پخش‌شده و گل‌ولای و آب اضافی از آن جدا شده‌است. کشتی مجهز به پمپ لایروبی مورد استفاده در بندر انزلی، در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳ نمونه کشتی لایروب تحت اختیار سازمان بنادر و دریانوردی بندر انزلی

سپس برای برداشت ماسه‌ی بدون گل‌ولای، خاک از ابتدای محل دپو برداشت شد تا به انتها برسد. همان‌طور که پیش‌تر در توضیح روش استحصال لایروبی بیان شد، در این روش مصالح از محل قرضه‌ی دیگری تأمین نمی‌شود و از همان خاک لایروبی شده جهت استحصال استفاده‌شده و بر روی ماسه‌ی به‌کاررفته جهت محوطه‌سازی، عملیات بهسازی انجام‌شده است که در پژوهش حاضر استفاده از تسلیح با پت برای بهبود راندمان عملیات تراکم بررسی‌شده است. برای ایجاد ناحیه‌ی خشک در مجاورت آب جهت خاک‌ریزی، از شیت پایل^۱ استفاده‌شده است. محوطه‌ی دپو و محل کوبیدن شیت‌پایل‌ها در شکل ۸-۳ نشان داده‌شده است.

^۱ Sheet Pile



شکل ۳-۸ زمین استحصال شده در مجاورت موج شکن شرقی

همان‌طور که در شکل ۳-۸ مشخص شده، در پژوهش حاضر نیز ماسه‌ی مورد استفاده برای مطالعه، تماماً از محل دیوئ بندر تأمین شده و سپس به آزمایشگاه منتقل شده و مورد تسلیح و آزمایش‌های مورد نظر قرار گرفته است. پیش‌تر نیز بیان شد که هدف اصلی این پژوهش، بهسازی بستر بندر استحصال‌ی با استفاده از الیاف *PET*، جهت کاهش هزینه‌های بهسازی خاک در نواحی محوطه‌سازی بارانداز فله و بررسی امکان افزایش مقاومت خاک و حذف یا بهینه‌سازی روش‌های بهسازی دیگر با آزمایش برش مستقیم بر روی خاک مسلح می‌باشد. در ادامه به بررسی کامل مصالح مورد استفاده و روند آزمایش‌ها پرداخته شده است.

۳-۴ ضایعات پلاستیکی

۳-۴-۱ مقدمه‌ای در مورد پلاستیک‌ها

پلاستیک‌ها رزین‌ها یا پلیمرهای 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؛ 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: [۳۴]

۱- مقاومت بالا در برابر خوردگی

۲- وزن کم

۳- مقاومت در برابر خردشدگی

۳-۴-۲ دسته‌بندی پلاستیک‌ها

انجمن بازرگانی صنعت پلاستیک (*SPI*^۲) با همکاری متخصصان یک شرکت صنایع پلیمری (*Kaytech*^۳)، پلاستیک‌ها را بر اساس کاربری تقسیم‌بندی کرده است که در جدول (۳-۱) به‌طور مختصر نشان داده شده است. در این جدول، پلاستیک‌ها به هفت گروه تقسیم‌شده‌اند و نام علمی و

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


^۲ Society of the plastic industry: https://en.wikipedia.org/wiki/Society_of_the_Plastics_Industry

^۳ Engineered Fabrics Company : <http://kaytech.co.za>

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 (۳-۱)، 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 نام‌برده 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 *Error! Reference source not found.* بیان شده است. [۳۵]

جدول ۳-۱ معرفی و کاربردهای پلاستیک‌ها

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
			<ul style="list-style-type: none"> ساخت بطری برای محصولاتی که مصرف روزانه دارند؛ مانند آب‌میوه، نوشیدنی‌ها، سس‌ها،

<ul style="list-style-type: none"> سفیدکننده‌ها و شامپوها تولید در و محفظه‌ی بطری‌ها، شیشه‌ها، گلدان‌ها و جعبه‌ها پلاستیک ضایعاتی <i>HDPE</i>، می‌تواند بازیافت شود و تبدیل به انواع میزها، نیمکت‌ها، خودکار، گلدان، کف‌پوش و... شود 	<ul style="list-style-type: none"> پلی‌اتیلن با چگالی بالا 		۲
<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 <i>PVC</i> بازیافتی، می‌توان برای ساخت قاب موبایل، ناودانی‌ها، شیلنگ، گیره، کف‌پوش‌ها و کابل، استفاده کرد 	<ul style="list-style-type: none"> پلی‌وینیل کلراید 		۳
<ul style="list-style-type: none"> ساخت در و محفظه برای شیشه‌ها، بطری‌ها، گلدان‌ها و جعبه‌ها ساخت بطری‌های قابل فشردن ساخت کیف‌های حمل و خرید ساخت بسته‌های پلاستیکی برای بسته‌بندی غذا 	<ul style="list-style-type: none"> پلی‌اتیلن با چگالی پایین 		۴
<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 <i>PP</i> بازیافتی در ساخت سطل‌ها، بشکه‌های نفت، کابل باتری، برس‌ها، پوشش باطری موبایل و جاروها استفاده می‌شود 	<ul style="list-style-type: none"> پلی‌پروپیلن 		۵
<ul style="list-style-type: none"> تولید جعبه برای قنادی‌ها و محصولات روزانه 			

<ul style="list-style-type: none"> • 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 	پلی‌استایرن		۶
<ul style="list-style-type: none"> • از پلاستیک پلی‌کربنات در ساخت شیشه‌ی بچه، تانک‌های آب، دیسک‌های فشرده و محفظه‌های نگهداری دارو استفاده می‌شود. • پلاستیک پلی‌کربنات بازیافتی، می‌تواند تبدیل به تخته‌های پلاستیکی شود 	سایر موارد شامل: پلی‌استر، پلی‌آمیدها، پلی کربنات		۷

۳-۴-۳ پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)

۱-۳-۴-۳ فرایند تولید پلی‌اتیلن ترفتالات

پلی‌اتیلن ترفتالات (PET یا PETE)، یک فیبر مصنوعی و رزین محکم و خشک است. یکی از اعضای خانواده‌ی پلی‌استرها 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 زایلن^۳ تولید می‌گردد. ابتدا اتیلن گلیکول و ترفتالات اسید، تحت حرارت و تأثیر کاتالیزگر شیمیایی قرار می‌گیرند. نتیجه این فرایند، تولید پت

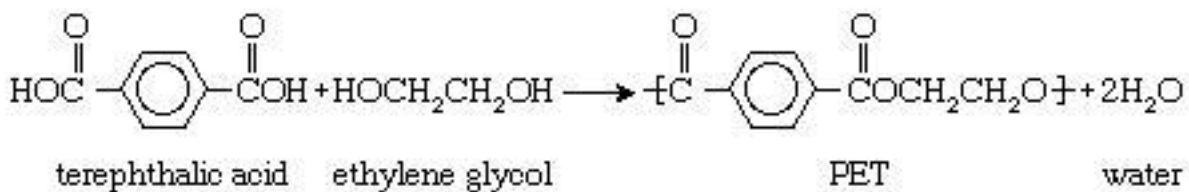
^۱ Ethylene glycol

^۲ Terephthalate acid

^۳ xylene

ویسکوز ذوب شده 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^۱، با ساختار مولکولی بوده که شامل یک کربن شش‌وجهی بزرگ یا حلقه‌ی آروماتیک و دو گروه کربوکسیل (CO_2H) می‌باشد.

تحت تأثیر گرما و کاتالیزورها، گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل تبدیل به گروه‌های استری ($CO-O$) می‌شوند؛ سپس از طریق پیوند شیمیایی بین واحدهای پت، زنجیرهای پلیمری طولی به وجود می‌آیند. واکنش شیمیایی به صورت شکل ۹-۳ است:



شکل ۹-۳ فرمول شیمیایی واکنش و فرایند تولید پلی‌اتیلن ترفتالات

۳-۴-۲ 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

^۱ dicarboxylic aromatic acid

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 تایر اتومبیل، کمربندهای ایمنی اتومبیل‌ها و بالابرها و تولید شیلنگ آب نیز از پت استفاده می‌شود. همچنین پت می‌تواند در تولید ژئوتکستایل‌هایی که برای زهکشی آب-روها، 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 نگه‌دارنده‌ی مایعات و گازها، بطری‌های نوشیدنی و تولید دیسک‌های فشرده، اشاره کرد. در جدول ۲-۳، خصوصیات فیزیکی پت، آورده شده‌است. [۴]

جدول ۲-۳ مقادیر عددی خصوصیات پت

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

۴×۱۰ ^۵	<i>Psi</i>	<i>D790</i>	مدول خمشی	و
۰/۷	<i>ft-lbs/in</i>	<i>D259</i>	استحکام ضربه‌ی ایزوتوپ	ز
<i>R117</i>	-	<i>D785</i>	سختی راک ول ^۱	ح
-۰/۲۵ ۰/۱۹	<i>Static- dynamic</i>	-	ضریب زاویه‌ی اصطکاک	ط
خصوصیات حرارتی				۳
۱۷۵	^{°F}	<i>D648</i>	انحراف گرمایی	الف
۴۹۰	^{°F}	-	نقطه‌ی ذوب	ب
-۵ ۳/۹×۱۰	<i>Iin./in./ °F</i>	<i>D696</i>	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
<i>HB</i>	-	<i>UL94</i>	اشتعال پذیری	و
خصوصیات الکتریکی				۴
۱۰ ^{۱۶}	<i>Ohm- cm</i>	<i>D257</i>	مقاومت در برابر صدا	الف
۳/۴	-	<i>D150</i>	ثابت دی الکتریک	ب

^۱ Rock well hardness

ج	ضریب اتلاف	D150	-	۰/۰۰۲
د	مقاومت دی الکتریک	D140	v/mil	۴۰۰

۳-۴-۴ کاربردهای پلاستیک در مهندسی عمران

پلاستیک کاربردهای بی‌شماری در زمینه‌های مختلف مانند بسته‌بندی، مبلمان، ورزش، الکترونیک، سلامتی و امنیت، وسایل منزل و خودروسازی دارد. در زمینه‌ی مهندسی عمران، پلاستیک به‌عنوان جزئی از ساختار پل‌ها، ساختمان‌ها، جاده‌ها، و بزرگراه‌ها، بنادر و پایانه‌ها، جاده‌های ریلی، مراکز دفن زباله، سازه‌های نگه‌دارنده آب و... استفاده می‌شود.

اجزای پلاستیکی در صنعت ساخت‌وساز، جهت ساخت مواردی از قبیل عایق‌های صدا، گارد ریل، شمع‌ها، موج‌شکن‌ها، رابط‌های ریل قطار، ماله‌ها، تیغه‌ها، اسکله‌ها، باربند و دنده‌ی دوچرخه‌ها، کنترل سایش، جداسازی مصالح و... به کار می‌روند. در مهندسی عمران، مصالح سازه‌ای خوب، باید بادوام، محکم، شکل‌پذیر، دارای نصب آسان، مقاوم در برابر حریق و نسبتاً ارزان‌قیمت باشند. [۳۶]

جدول ۳-۳ ویژگی‌های پلاستیک را در مقایسه با سایر مصالح سازه‌ای نشان می‌دهد. [۳۶] از آنجایی که این پژوهش، بر روی خاک مسلح شده با خرده‌های پت تمرکز دارد، خصوصیات مصالح پت به تفصیل به‌عنوان مصالح مورد استفاده در تحقیق، در فصل سوم آمده است.

جدول ۳-۳ ویژگی‌های پلاستیک در مقایسه با سایر مصالح

ویژگی	پلاستیک	فولاد	بتن	چوب
مقاومت در برابر اشعه‌ی	عالی (همراه با	عالی	عالی	عالی

			تثبیت کننده)	ماورا بنفش
خوب	خوب	عالی	عالی	مقاومت در برابر سایش و خراشیدگی
خوب	خوب	بسیار ضعیف	عالی	مقاومت شیمیایی
ابزار آلات دستی	قالب بندی	تجهیزات مخصوص	قابل ساخت با استانداردها و ابزارهای طراحی وسایل چوبی	ساخت
عالی	عالی	عالی	عالی	مقاومت در برابر اوزون
قابل احتراق	غیر قابل احتراق	غیر قابل احتراق	نیاز به قاب	مقاومت در برابر آتش
ضعیف	ضعیف	عالی	عالی	مقاومت در برابر ترک
افزایش رسانایی با افزایش رطوبت	رسانا به وسیله ی مسلح کننده ها	رسانا	نارسانا	هدایت الکتریکی
تجزیه پذیر	مقاومتش کم می شود	زنگ می زند	تجزیه ناپذیر	مقاومت در برابر پوسیدگی
ضعیف	عالی	عالی	عالی	مقاومت در برابر سوراخ شدن در کارهای دریایی
گیره های فلزی	قالب گیری	بولت ها و جوش ها	گیره های فلزی	مصالح مورد نیاز برای چفت و بست

در ادامه تعدادی از مزایای مصالح پلاستیکی سازه های به نقل از انجمن پلاستیک بریتانیا (BPF^1)

آمده است. [۳۶]

۱- پلاستیک ها محکم بوده و در برابر ضربه و خراش مقاوم هستند.

۲- پلاستیک ها در برابر آب و هوای نامساعد بادوام هستند.

۳- پلاستیک ها نصب آسانی دارند.

¹ British Plastic Federation : <http://www.bpf.co.uk/>

- ۴- در طراحی، پلاستیک‌ها قابلیت‌های زیادی دارند و می‌توانند به هر شکلی تبدیل شوند. محصولات پلاستیکی قابلیت رنگ شدن، مات شدن یا شفاف شدن و صلبیت و انعطاف‌پذیری را دارند.
- ۵- در سازه‌هایی که هدایت گرمایی پایینی دارند، پلاستیک‌ها به‌صورت عایق‌های خوبی عمل کرده و راندمان انرژی را بالا می‌برند.
- ۶- محصولات پلاستیکی، هزینه‌ی نگهداری پایینی داشته و به رنگ‌آمیزی احتیاج ندارند.
- ۷- محصولات پلاستیکی سازه‌ای، با انرژی کم، قابل بازیافت هستند.
- ۸- سازه‌هایی که در آن‌ها از پلاستیک استفاده می‌شود، به دلیل دوام، کیفیت بالا، هزینه و نیاز به نیروی انسانی کم، مقرون‌به‌صرفه هستند.

۳-۴-۵ مدیریت پسماندهای پلاستیکی

"مدیریت پسماندهای جامد به کلیه‌ی فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که برای کنترل، نگهداری، جمع‌آوری، انتقال، فرآوری و انهدام ضایعات انجام می‌شود. به‌نحوی 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 به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرده‌اند: [۳۷]

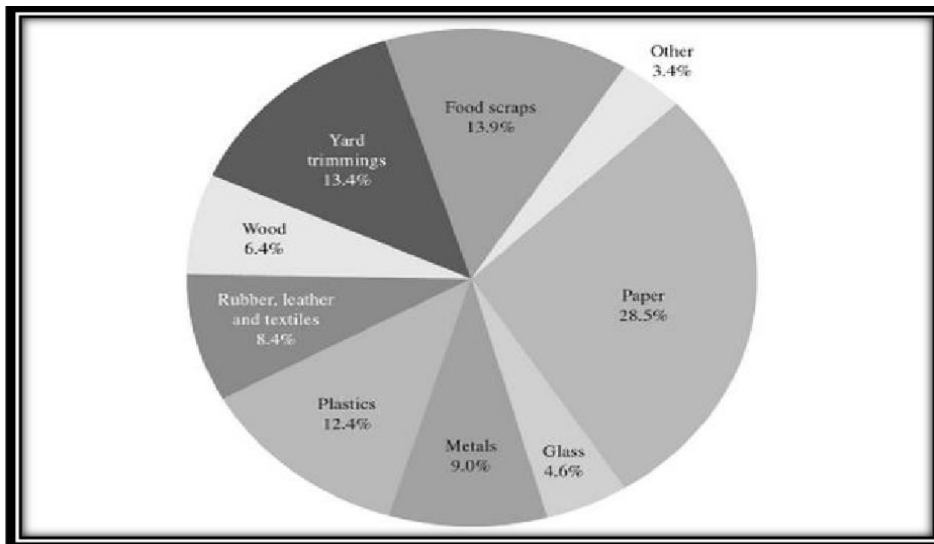
- ۱- از نظر فیزیکی (مانند جامد، مایع و گاز)
- ۲- از نظر مبدأ (مانند کشاورزی، معدن، صنعت، ساخت‌وساز، بازرگانی و...)
- ۳- از نظر خصوصیات فیزیکی (قابل احتراق، قابل پوسیدن و قابل بازیافت)
- ۴- از نظر سطح ایمنی (مانند خطرناک و بی‌خطر)

^۱ Mc Dougall et al 2008

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 به‌عنوان پسماندهای جامد یاد می‌شود. پسماندهای جامد بازرگانی و خانگی با هم پسماندهای جامد شهری (MSW^1) را تشکیل می‌دهند. MSW شامل پلاستیک‌ها، زباله‌های طبیعی، فلزات، کاغذ و شیشه می‌شود. انجمن بین‌المللی مدیریت پسماندهای جامد ($ISWA^2$)، وظیفه انهدام MSW را از طریق بازیافت، سوزاندن و دفن کردن به‌منظور جلوگیری از آلودگی طبیعت و زندگی بشر به عهده دارد. در شکل ۳-۱۰، تفکیک MSW تولیدشده در دنیا در سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که پلاستیک‌ها بخش عظیمی از آن را تشکیل می‌دهند. (حدود ۱۲/۵ درصد وزنی و ۱۴ درصد تا ۲۱ درصد حجمی). با توجه به آمارهای ارائه‌شده در شکل ۳-۱۰، پیش‌بینی می‌شود روند تولید زباله‌های پلاستیکی، رو به رشد باشد. [۳۵]



شکل ۳-۱۰ تفکیک ۲۵۰ میلیون تن ضایعات MSW تولیدشده در دنیا در سال ۲۰۱۰

¹ *Municipal Solid Waste*

² *International Solid Waste Association, <https://www.iswa.org/>*

۳-۴-۵-۱ 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.

۳-۴-۵-۲ مشکلات سوزاندن ضایعات پلاستیک‌ها در کوره

پلاستیک‌ها سهم مهمی در تولید گرمای احتراق در زباله‌های جامد شهری دارند؛ به طوری که 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. [۳۸]

^۱ Polyvinyl chloride

^۲ Furan dioxide

^۳ Lead

^۴ Cadmium

۳-۴-۵-۳ روش‌هایی جهت کاهش آسیب پسماندهای پلاستیکی

منظور از کاهش از مبدأ، کاهش مقدار ضایعات پلاستیکی تولیدشده یا کاهش سمّی بودن آن‌هاست؛ هدف کاهش از مبدأ، کمتر شدن میزان تولید زباله‌ها می‌باشد؛ زیرا کاهش مواد سمّی 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: [۳۴]

۱- بهبود طراحی محصولات یا بسته‌بندی به منظور کاهش مقدار مصالح مصرفی

۲- صرفه‌جویی اقتصادی از طریق بسته‌بندی در سایزهای بزرگ

۳- ساخت محصولات بادوام‌تر

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

۳-۴-۶ بازیافت ضایعات پلاستیکی



شکل ۳-۱۱ فرایند بازیافت و تبدیل پت ضایعاتی به گرانول‌های پلیمری قابل ذوب مجدد

^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.

مانند فرایند نشان داده شده برای پت در *Error! Reference source not found.* بازیافت فرایند تبدیل مواد ضایعاتی به محصولات قابل استفاده است. هفت گروه پلاستیک‌ها که در *Error! Reference source not found.* جدول ۳-۱ 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 *Error! Reference source not found.* 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 باکیفیت مشابه با رزین‌های استفاده نشده می‌شود. پلاستیک‌های همگن از جمله *PET* ها و *HDPE* ها می‌توانند برای استفاده مجدد بازیافت شوند؛ بنابراین نیاز به انهدام در این پلاستیک‌ها کاهش می‌یابد.

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 تولید شده 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. [۳۸]

۳-۴-۶-۱ عوامل محدودکننده‌ی بازیافت

۱- جمع‌آوری و آماده‌سازی: یکی از عوامل محدودکننده‌ی 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.

تا اینجا توضیحات کاملی در زمینه‌ی معرفی پلاستیک‌ها و اهمیت بازیافت و کاربردهای آن‌ها بیان شده است، در ادامه به بررسی استفاده از پلاستیک *PET* در پژوهش حاضر به‌عنوان یک طرح در مهندسی عمران، به‌خصوص ژئوتکنیک پرداخته می‌شود.

۳-۵ مصالح مورد استفاده

۳-۵-۱ ماسه

خاک ماسه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است، از نوع ماسه‌ی کربناته‌ی بدون ریزدانه، گرد گوشه، یکنواخت و بدانه‌بندی شده می‌باشد که در گروه-بندی بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (*USCS*) در گروه ماسه‌ی بدانه‌بندی شده (*SP*) قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر تمامی آزمایش‌ها بر روی این خاک در حالت خشک انجام شده است.

مطابق آزمایش دانه‌بندی خاک و ال‌های به‌کاربرده شده که بر اساس استاندارد -ASTM D 422 87 صورت گرفته است. متوسط اندازه‌ی ذرات خاک (D_{50}) ، ۰/۱۷ میلی‌متر است که در جدول ۴-۳ و در میان مشخصات فیزیکی ماسه آمده است.

جدول ۴-۳ 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	C_u	C_c
مقدار	۲/۶۵	۰/۶۵	۱/۱۲	۱/۶	۱/۲۵	۰/۱۷	۱/۲۵	۱/۰۷

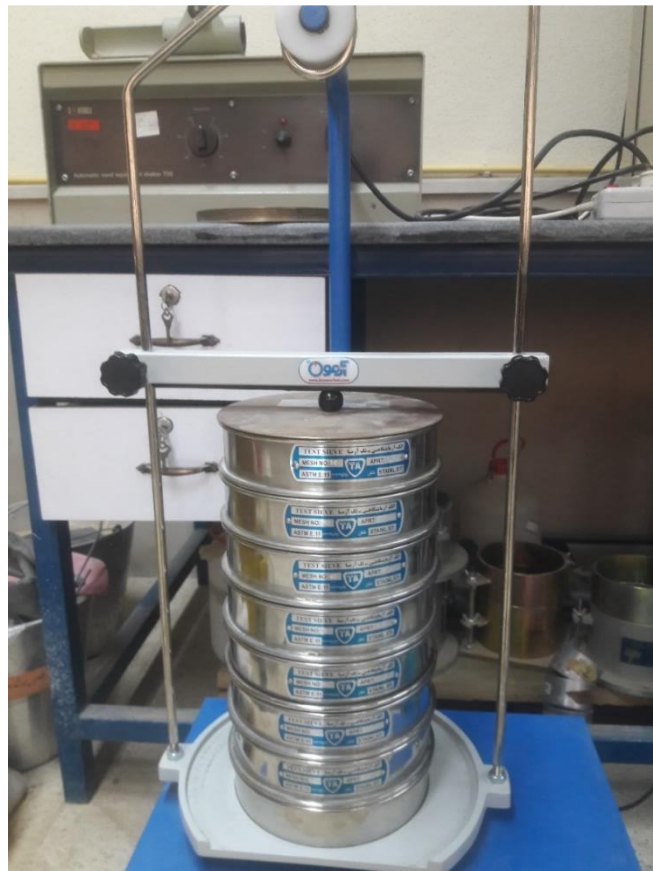


شکل ۱۲-۳ خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش

۱-۱-۵-۳ آزمایش دانه‌بندی خاک

خاک از مجموعه‌های مختلف از جمله شن، ماسه، لای و رس و مواد آلی تشکیل شده است که دارای ویژگی‌های مختلفی می‌باشد. یکی از این ویژگی‌ها اندازه‌ی ذرات تشکیل‌دهنده آن است که براساس آن خاک‌ها از یکدیگر متمایز می‌شوند. هدف از این آزمایش، تعیین کمی توزیع اندازه ذرات خاک می‌باشد. توزیع ذرات درشت‌تر از ۰/۰۷۵ 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 ۱٪ وزنی خاک)، لذا خاک فاقد ریزدانه محسوب شده و نیازی به انجام آزمایش هیدرومتری نبود. آزمایش دانه‌بندی عبارت است از لرزاندن نمونه خاک بر روی یک سری الک که اندازه ریزدانه‌های الک از بالا به پایین کاهش می‌یابد (شکل ۳-۸). براساس استاندارد *ASTM*، الک‌های به‌کاررفته در این آزمایش دانه‌بندی الک‌های شماره ۱۶#، ۲۰#، ۵۰#، ۸۰#، ۱۰۰# و ۲۰۰# و *Pan* بوده است. عمل الک کردن با حرکت جانبی و قائم الک همراه با تکان دادن الک انجام شده، به‌گونه‌ای که نمونه خاک همواره روی سطح الک حرکت می‌کند. مطابق استاندارد *ASTM D 422-87*، عمل الک کردن باید تا زمانی انجام شود که طی یک دقیقه کمتر از یک درصد از جرم مانده روی الک از آن عبور کند. میزان حداقل وزن نمونه انتخابی برای آزمایش دانه‌بندی بسته به قطر اسمی بزرگ‌ترین ذره دانه‌های خاک متغیر است. در شکل ۳-۱۳، تصویری از شیکر و الک‌های به‌کاررفته در این آزمایش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳ 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:

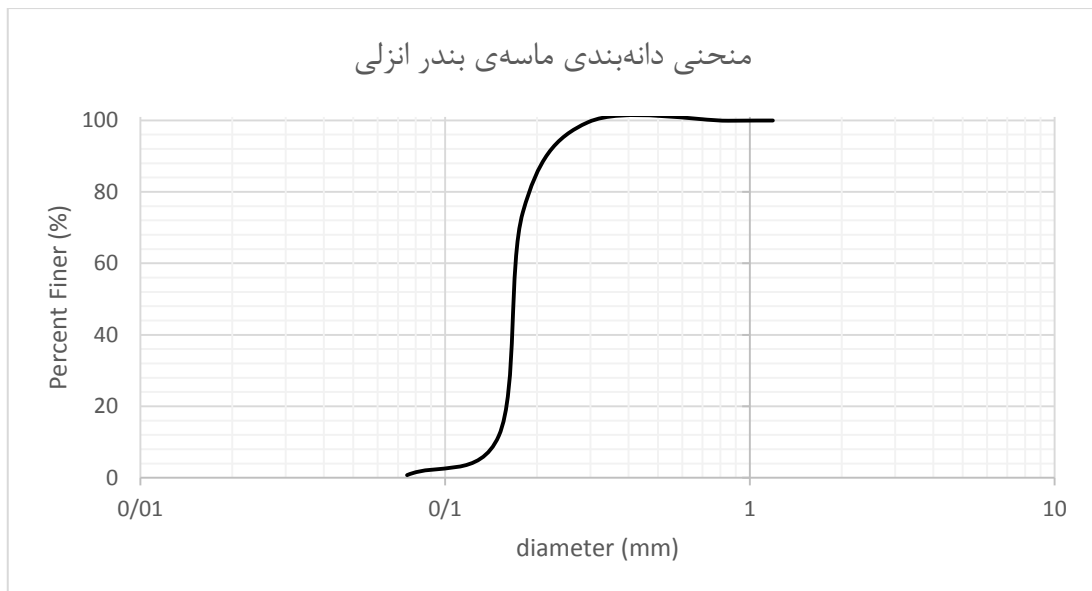
$$Cu=1/25$$

$$Cc=1/07$$

ماسه‌ای استفاده‌شده در این پژوهش، ماسه‌ی یکنواختی بوده و ذرات خاک محدوده‌ی ابعادی

محدودی دارند. این امر در بررسی منحنی دانه‌بندی خاک که در شکل (۳-۱۴) نشان داده‌شده،

مشهود است:



شکل ۳-۱۴ منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استحصالی 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. به‌عبارت‌دیگر این یک ماسه‌ی بد دانه-

بندی شده است که در گروه‌بندی یونیفاید^۱ یا متحد، در دسته‌ی *SP* قرار می‌گیرد.

^۱ *USCS : Unified Soil Classification System*

۳-۵-۱-۲ آزمایش تعیین چگالی ویژه ی خاک (G_s)

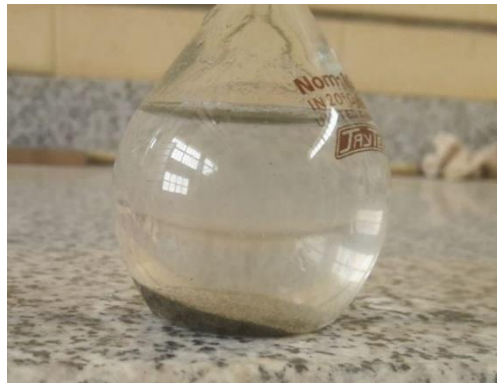
در تعریف چگالی ویژه بخش جامد خاک، به نسبت وزن حجمی واحد بخش جامد خاک به وزن همان حجم از آب مقطر بدون گاز در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد گفته می‌شود. چگالی ویژه-ی بخش جامد خاک در محاسبه‌ی روابط وزنی حجمی مانند نسبت تخلخل و درجه اشباع کاربرد دارد.

آزمایش تعیین چگالی ویژه، براساس استاندارد *ASTM D 854-87* و با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_3}{W_3 - W_1 + W_2} \quad \text{رابطه (۱-۳) چگالی دانه‌های جامد خاک (Gs)}$$

که در آن γ_s چگالی دانه‌های جامد خاک، γ_w چگالی آب، W_3 وزن خاک، W_2 وزن پیکنومتر+آب و W_1 وزن پیکنومتر+آب+خاک می‌باشد. G_s ماسه‌ی مورد آزمایش مطابق شکل ۱۵-۳ به صورت زیر به دست آمده است:

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



شکل ۱۵-۳ آزمایش تعیین چگالی ویژه (G_s) 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 ماسه-های کربناته بوده و کانی اصلی آن کوارتز می‌باشد. در رابطه (۳-۱)، G_s این ماسه ۲/۶۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی یک ماسه‌ی معمولی از نظر وزن مخصوص می‌باشد.

۳-۵-۱-۳ آزمایش‌های تجربی تعیین حداقل و حداکثر چگالی ماسه خشک (γ_d)

جهت اعمال تراکم نسبی (D_r) بر نمونه خاک

در پژوهش حاضر، جهت بررسی تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، نمونه‌های خاک مسلح با سه تراکم نسبی ۰.۵۵، ۰.۷۵ و ۰.۹۵ ساخته شدند. برای اعمال این تراکم‌های نسبی بر نمونه خاک در جعبه‌ی برش مستقیم، مطابق رابطه‌ی (۳-۶)، 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 رابطه ۳-۲، از بین چگالی‌های اعمال شده تعیین شدند.

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

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

در جدول (۳-۵)، مشخصات ماسه‌ی استفاده شده در این پژوهش آورده شده است.

جدول ۵-۳ مشخصات اندازه‌گیری شده برای ماسه‌ی استحصالی بندرانزلی

Cc	Cu	$(\gamma_d)_{max}$	$(\gamma_d)_{min}$	G_s
۱/۰۷	۱/۲۵	۱/۶	۱/۲۵	۲/۶۸

۳-۵-۲ پت (PET)

خرده پت‌های استفاده‌شده در آزمایش‌های پژوهش حاضر، حاصل از بریدن بطری‌های نوشابه و آب‌معدنی و دلستر و غیره به‌صورت خرده‌های چیپس ۱×۱ سانتی‌متری و با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بودند که به‌عنوان المان‌های مسلح‌کننده در خاک به کار گرفته‌شده است. پت‌ها بعد از شستن کامل، خشک‌کردن و سپس خرد کردن بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی به‌دست‌آمده‌اند. در شکل ۱۶-۳ پته‌ای مورد‌استفاده در این مطالعه نشان داده‌شده است.



شکل ۱۶-۳ پت‌های شسته شده برای برش و چیپس‌های پت استفاده‌شده در این پژوهش

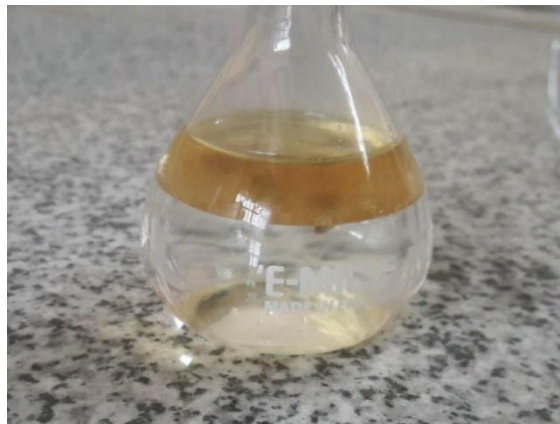
یکی از مشخصات فیزیکی پت که مورد ارزیابی قرار گرفته است، چگالی ویژه‌ی آن است که برای تعیین چگالی ویژه‌ی خرده‌های پت، از همان رابطه‌ی تعیین G_s خاک استفاده می‌شود، با این

تفاوت که به جای استفاده از سیال آب، درون پیکنومتر روغن ریخته شد تا خرده‌های پت به راحتی در آن فرو روند:

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

حجم مشخصی از پت وزن شد و γ_{pet} برابر $1/13 \text{ gr/cm}^3$ به دست آمد، همین‌طور γ_{oil} با استفاده از یک بالن حجمی مدرج مطابق شکل ۱۷-۳، برابر $0/8 \text{ gr/cm}^3$ به دست آمده و در صورت و مخرج کسر رابطه‌ی ۳-۵ قرار داده شد.

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



شکل ۱۷-۳ آزمایش تعیین چگالی روغن با آب مقطر

مشخصات اندازه‌گیری شده‌ی پت استفاده‌شده در پژوهش، در جدول ۶-۳ آمده است.

جدول ۶-۳ مشخصات پت به‌کاررفته در پژوهش حاضر

عرض (mm)	طول (mm)	ضخامت (mm)	Gs	فرمول شیمیایی
۱۰	۱۰	۰/۵	۱/۳۸	$(C_{10}H_8O_4)_n$

۳-۶ آزمایش‌های برش مستقیم

۳-۶-۱ 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 زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) آن خاک هستند.

اعداد تخمینی برای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و سنگ در جدول ۳-۷ آورده شده است:

جدول ۳-۷ برخی پارامترهای مقاومتی تخمینی خاک و سنگ

ردیف	دسته‌بندی نوع خاک	چسبندگی (C), (kPa)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) (deg),
ماسه			
۱	بسیار سست		کمتر از ۳۰

بین ۳۰ تا ۳۵		سست	۲
بین ۳۵ تا ۴۰		نسبتاً متراکم	۳
بین ۴۰ تا ۴۵		متراکم	۴
بیشتر از ۴۵		بسیار متراکم	۵
رس			
	۰ تا ۱۲	بسیار نرم	۱
	بین ۱۲ تا ۲۵	نرم	۲
	بین ۲۵ تا ۵۰	سفت	۳
	بین ۵۰ تا ۱۰۰	نسبتاً سخت	۴
	بین ۱۰۰ تا ۲۰۰	سخت	۵
	بیشتر از ۲۰۰	بسیار سخت	۶
شن			
بین ۳۵ تا ۴۰		شن ، ریگ و قلوه سنگ	۱

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 فصل 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.

۳-۶-۲ دستگاه و تجهیزات آزمایش برش مستقیم در این پژوهش

در پژوهش حاضر آزمایش‌های برش مستقیم جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت غیرمسلح و مسلح شده با خرده‌های پت بر روی ماسه‌ی استحصال‌شده از بندر انزلی انجام شده‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس نشان داده شده در شکل (۳-۱۸)، ساخت شرکت نیک آزما با ابعاد جعبه‌ی برش $30 \times 30 \times 17$ سانتی‌متر و جک بارگذاری قائم پنوماتیک متصل به یک کمپرسور هوا، انجام گرفته‌اند.



شکل ۳-۱۸ دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس آزمایشگاه خاک دانشگاه صنعتی شاهرود

در این آزمایش‌ها، کرنش برشی و کرنش قائم، به وسیله‌ی دو عدد سنسور $LVDT^1$ ، به ترتیب با کورس ۵۰ میلی‌متر و دیگری با کورس ۱۰۰ میلی‌متر، هر دو با دقت 0.01 میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌است. همچنین تنش برشی به وسیله‌ی یک لودسل ۱۰ تنی با دقت ۲ کیلوگرم-

¹ Linear Variable Differential Transformer Sensor

فوس^۱ اندازه‌گیری شده و اطلاعات از طریق یک دیتالاگر ۸ کاناله به کامپیوتر انتقال داده شده است. همهی ابزارهای ذکرشده، در شکل ۳-۱۹، نشان داده شده‌اند.

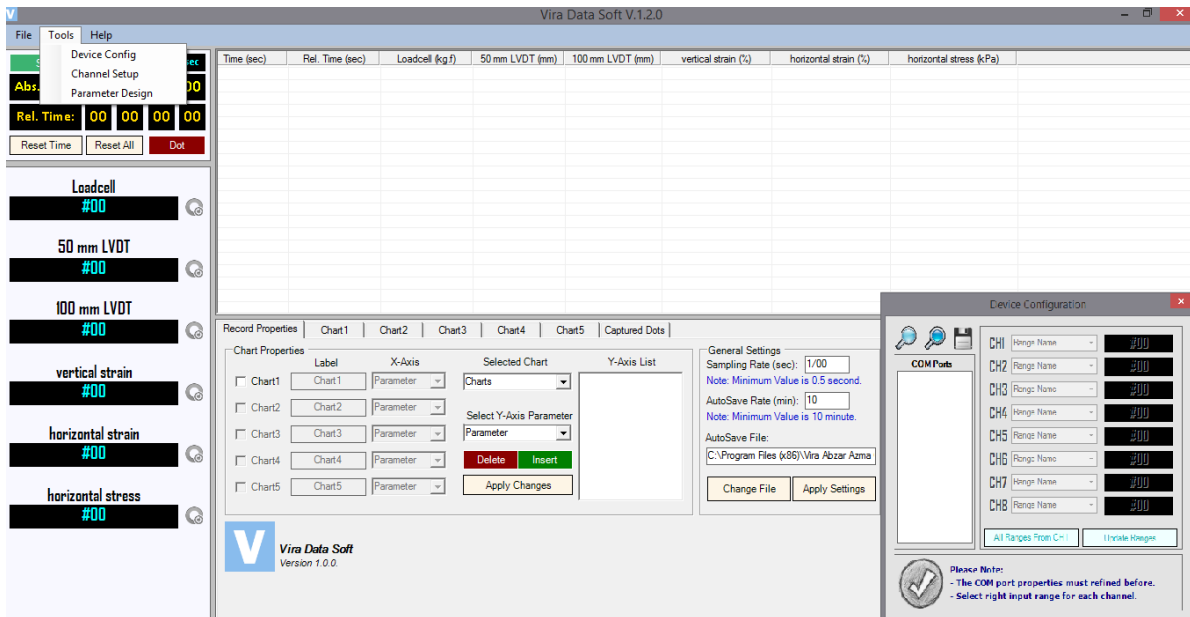


شکل ۳-۱۹ دیتالاگر و سنسورهای به‌کاررفته در این پژوهش

داده‌های خروجی در کامپیوتر، در محیط نرم‌افزار *Vira Data Soft* مطابق شکل ۳-۲۰، مربوط به دیتالاگر و برنامه‌نویسی شده توسط شرکت ویرا ابزار آزما^۲، جمع‌آوری و پردازش می‌شوند. در نرم‌افزار برای هریک از سنسورها، کانال مجزا تعریف‌شده که ابتدا در منوی *Tools*، زیرشاخه‌ی *Devise Config* شناسایی‌شده و در زیرشاخه‌ی *Channel Setup* کالیبراسیون سنسور بر روی آن کانال انجام‌شده است و پارامترهای مورد اندازه‌گیری نیز در زیرشاخه‌ی *Parameter Designe* تعریف‌شده‌اند. 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 سرعت هر ۵/۰ ثانیه یک دیتا را فراهم آورده‌است.

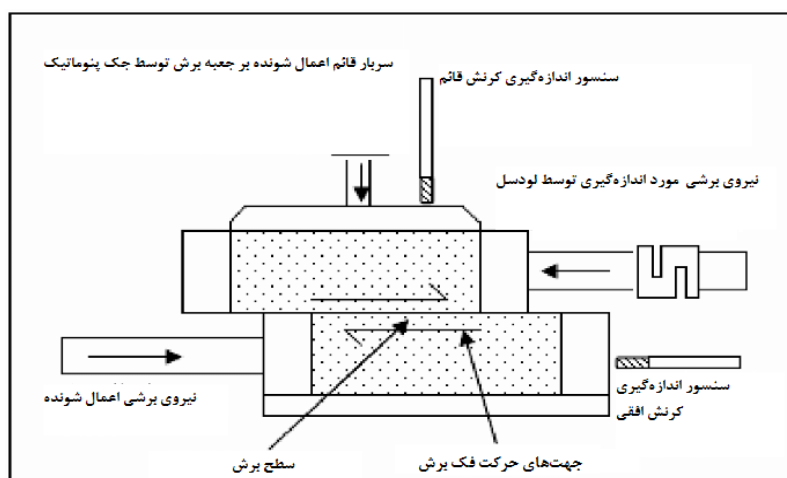
^۱ Kg.f

^۲ Vira Abzar Azma



شکل ۳-۲۰ نرم افزار جمع آوری اطلاعات از دیتالاگر

به منظور درک بهتر از نحوه عملکرد سنسورها، نمای شماتیک جعبه‌ی برش و سنسورهای متصل به آن در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. سنسور LVDT افقی، با کورس ۱۰۰ میلی‌متر در راستای حرکت برش، به فک محرک جعبه برش متصل بوده و میزان کرنش افقی و سنسور LVDT دیگری با کورس ۵۰ میلی‌متر در راستای قائم و در بالای جعبه‌ی برش، تغییرات کرنش قائم نمونه و لودسل ۱۰ تنی ک شکل نیز به فک بالایی متصل بوده و تنش برشی را اندازه‌گیری کرده‌اند.



شکل ۳-۲۱ نمای شماتیک عملکرد دستگاه برش مستقیم و سنسورهای متصل به آن

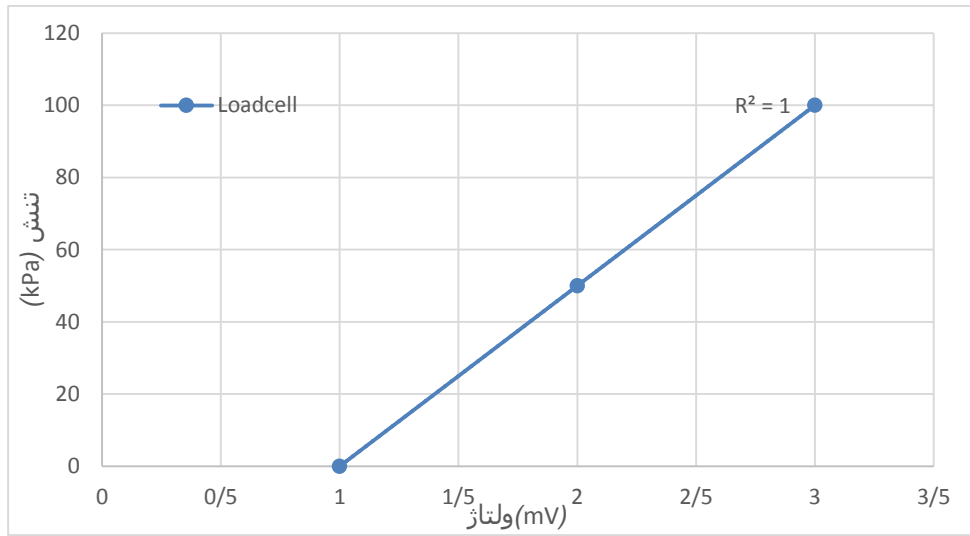
در ادامه، کالیبراسیون سنسورهای به کاررفته در آزمایش‌ها آورده شده است.

۳-۶-۳ کالیبراسیون سنسورها

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، سنسورهای به کاررفته در آزمایش‌های برش مستقیم، یک لودسل ۱۰ تنی برای اندازه‌گیری تنش برشی، یک *LVDT* با کورس ۵۰ میلی‌متر برای اندازه‌گیری کرنش قائم و یک *LVDT* با کورس ۱۰۰ میلی‌متر برای اندازه‌گیری کرنش برشی می‌باشند. کالیبراسیون این سنسورها جداگانه در جدول‌های ۳-۸ تا ۳-۱۰ و نمودارهای شکل ۳-۲۲ تا شکل ۳-۲۴ آورده شده است.

جدول ۳-۸ مقادیر عددی کالیبراسیون لودسل ۱۰ تنی

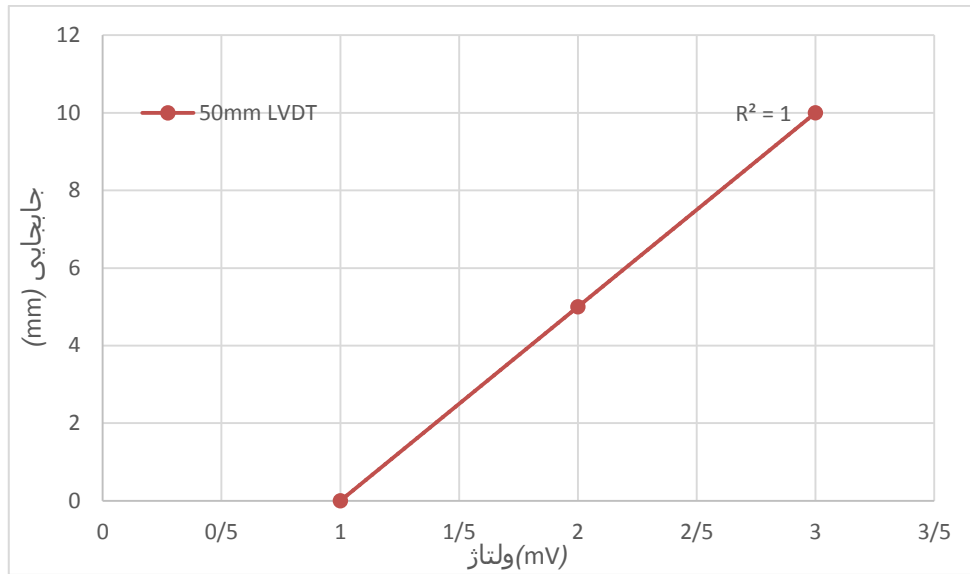
سنسور	ظرفیت	ولتاژ خروجی (<i>mV</i>)	مقدار	واحد
<i>Loadcell</i>	<i>10 Ton</i>	<i>-0.0391</i>	<i>0</i>	<i>kPa</i>
		<i>-0.1514</i>	<i>50</i>	
		<i>-0.2637</i>	<i>100</i>	



شکل ۲۲-۳ نمودار کالیبراسیون لودسل ۱۰ تنی

جدول ۹-۳ مقادیر عددی کالیبراسیون LVDT ۵۰ میلی متری

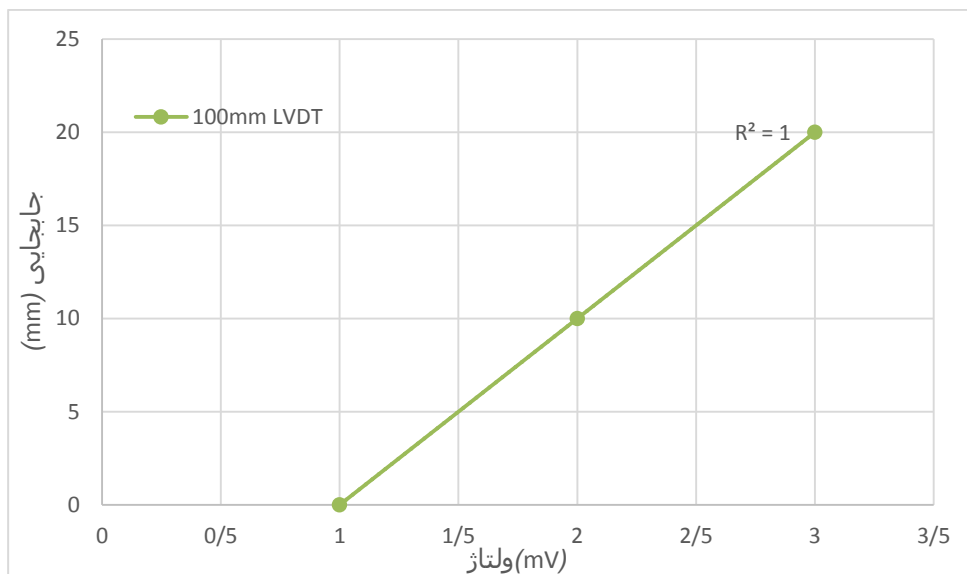
واحد	مقدار	ولتاژ خروجی (mV)	کورس	سنسور
mm	0	4.3371	50mm	LVDT
	5	8.1597		
	10	11.9824		



شکل ۳-۳ نمودار کالیبراسیون LVDT ۵۰ میلی متری

جدول ۳-۱۰ مقادیر عددی کالیبراسیون LVDT ۱۰۰ میلی متری

واحد	مقدار	ولتاژ خروجی (mV)	کورس	سنسور
mm	0	0.4673	100mm	LVDT
	10	1.5982		
	20	2.7292		



شکل ۳-۲۴ نمودار کالیبراسیون LVDT ۱۰۰ میلی متری

۳-۶-۴ برنامه‌ی آزمایش‌های برش مستقیم

آزمایش‌های برش مستقیم این پژوهش، مطابق استاندارد *ASTM D 3080-90* و تحت سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال که معرف ۳ عمق استحصال بوده و بر روی نمونه‌هایی با تراکم نسبی ۰.۵۵، ۰.۷۵ و ۰.۹۵ در حالت خشک، تا کرنش ۱۰ درصد و با سرعت برش ثابت ۲/۰۶۷ میلی متر بر دقیقه انجام شد.

به استناد نشریه‌ی ۶۳۷ معاونت راهبردی اداره کل مهندسی سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی، با توجه به عمق به کارگیری زمین استحصالی بندرانزلی، حداکثر تنش سربار برای منطقه‌ی استحصال‌شده‌ی مورد مطالعه، معادل تقریبی ۱۰۰ کیلو پاسکال و حداقل معادل ۱۰ کیلو پاسکال می‌باشد؛ لذا سربارهای مورد مطالعه بر روی این ماسه در آزمایش‌ها به درستی انتخاب شدند.

نمونه‌سازی درون جعبه‌ی برش مستقیم، با استفاده از ۱۸ کیلوگرم خاک که در ۳ لایه ۶ کیلوگرمی متراکم شدند، انجام گرفت. برای ساخت نمونه‌ها با سه تراکم نسبی ۵۵ و ۷۵ و ۹۵

درصد، متدهای آزمایشگاهی تجربی با تکرار بسیار و فقط برای همین یک نوع خاک ماسه‌ای تعبیه گردید و در بخش ۳-۱-۳-۳ با ذکر فرمول بیان شد و در جدول ۱۱-۳، نشان داده شده است.

جدول ۱۱-۳ چگالی حالت خشک خاک متناسب با تراکم نسبی هدف

Dr (%)	55%	75%	95%
γ_d (gr/cm^3)	1.42	1.5	1.58
ارتفاع خاک درون جعبه برش	14.08 cm	13.33 cm	12.66 cm
وزن خاک	18 kg	18 kg	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 خاک‌ریزی منطبق بر صفحه برش نگردد. مسلح کننده با درصدهای ۰/۵ و ۱ و ۲ درصد وزنی یعنی به ترتیب ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ گرم پت، برای نمونه‌سازی به خاک اضافه شده است. در هر مرحله نمونه‌های ۶ کیلوگرمی همراه با مسلح کننده‌ها با درصد مشخص درون جعبه ریخته شده و کوبیده شده است؛ برای اعمال سربار قائم، با استفاده از پمپ باد جک پنوماتیک جهت اعمال سربار قائم، شارژ شده و روی درپوش قرار گرفته است. پس از اعمال سربار، جهت کنترل چگالی خشک (γ_d) ارتفاع نمونه با کولیس اندازه‌گیری شده و سنسورها آماده‌ی شروع تست شده‌اند. قبل از روشن کردن موتور محرک برش، باید پیچ‌های 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 شده‌اند.

۳-۶-۴-۱ نام گذاری اختصاری آزمایش‌ها

جهت تسهیل تفکیک آزمایش‌های انجام‌شده، مطابق جدول ۳-۱۲ بر اساس ویژگی‌های نمونه مورد آزمایش شامل سربار قائم، درصد مسلح کننده و تراکم نسبی نام اختصاری هر آزمایش تعیین شده‌است.

جدول ۳-۱۲ جدول نام گذاری اختصاری آزمایش‌ها

تراکم نسبی (Dr)	سربار قائم (σ)	درصد PET (%)
55	50	0
	100	
	150	
75	50	0/5
	100	
	150	
95	50	1
	100	
	150	
55	50	2
	100	
	150	

برای مثال، $I-150-75$ نشان‌دهنده‌ی آزمایش با ۱ درصد پت، تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال و دارای تراکم نسبی ۷۵ درصد است.

فصل ۴ : تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش‌ها

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 خرده‌های پت، آزمایش‌های برش مستقیم با استفاده از سنسورهای جابجایی و نیرو ثبت شده است. در این بخش داده‌های خروجی پردازش شده تحت عنوان نتایج آزمایش‌های برش مستقیم به‌عنوان شاکله‌ی اصلی پژوهش حاضر، به‌صورت نمودارهای استاندارد، بررسی شده و 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، تراکم نسبی و سربار قائم بر پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های مسلح شده در مقایسه با نمونه‌های مسلح نشده تحت عنوان نمودارهای مرجع، پرداخته شده است.

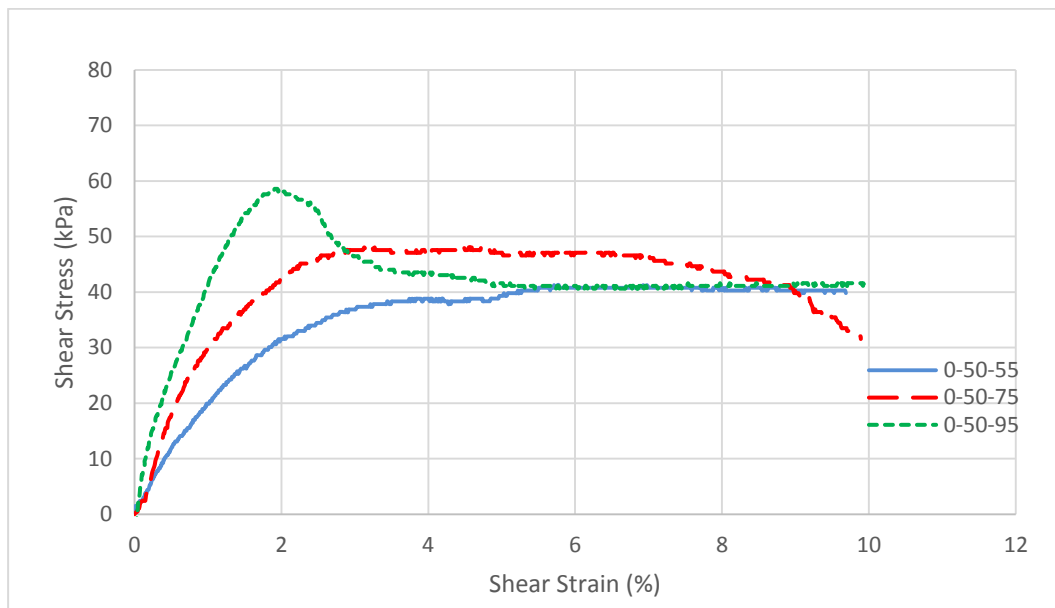
۴-۲-۱ آزمایش‌های مرجع

در این بخش تأثیر افزایش تراکم نسبی و سربار قائم بر روی ماسه‌ی بدون پت در نمودارهای تغییرات تنش برشی برحسب درصد جابجایی برشی $(\gamma - \tau)$ ، تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تغییرات تراکم نسبی $(\tau_{max} - Dr)$ تحت سربار ثابت، تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تغییرات تنش قائم $(\tau_{max} - \sigma)$ و تغییرات جابجایی قائم برحسب درصد جابجایی برشی $(\gamma - \xi_v)$ ، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱-۱-۲-۴ بررسی تأثیر افزایش تراکم نسبی (D_r) در نمودارهای مرجع

در شکل ۱-۴، تأثیر افزایش تراکم نسبی بر تغییرات تنش برشی بر حسب درصد جابجایی

برشی در نمونه‌های مرجع، نشان داده شده است:



شکل ۱-۴ نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای نمونه‌ی مرجع

در شکل ۱-۴، نمودارها براساس نام‌گذاری ارائه شده در فصل سوم، برای نمونه‌های خاک با

مشخصات صفر درصد پت، تحت تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال و با تراکم‌های نسبی ۵۵، ۷۵ و ۹۵

درصد، نشان می‌دهد افزایش تراکم نسبی، موجب افزایش سختی^۱ نمونه‌ها شده است. براساس این

نمودار، در نمونه‌ی 0-50-55، تا ۴ درصد جابجایی برشی، خاک رفتار مقاومتی داشته و تا تنش

۴۰ کیلوپاسکال را تحمل کرده است اما در کرنش‌های بالاتر مقاومت خاک تقریباً ثابت مانده است.

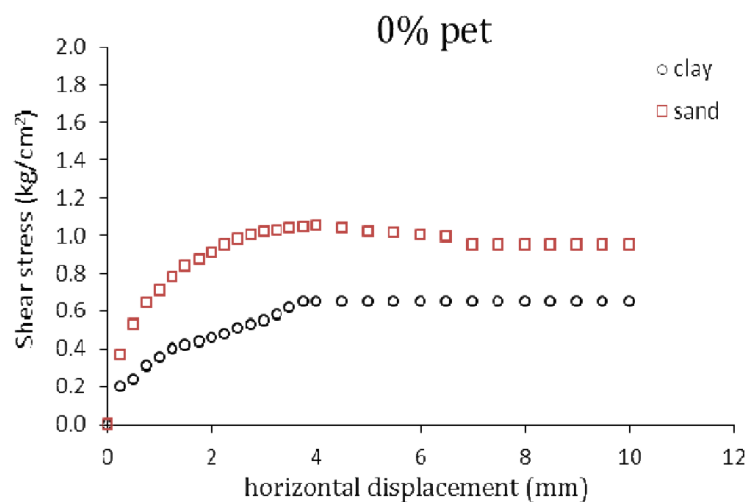
همچنین در نمونه‌ی 0-50-75، این الگوی رفتاری تا همان کرنش ۴ درصد، با مقاومت برشی بالاتر

نماین شده است به این گونه رفتار که در آن افزایش مقاومت با شیب کم صورت گرفته سپس ثابت

^۱ سختی خاک به معنی ترد بودن رفتار خاک و گسیختگی در تنش‌های بالاتر و کرنش‌های پایین‌تر است: *Hardness*

مانده یا کاهش یافته، اصطلاحاً رفتار سُست^۱ گفته می‌شود. اما در نمونه‌ی 0-50-95، تأثیر تراکم ۹۵ درصد به وضوح قابل مشاهده است، به طوری که در ابتدا تنش برشی با شیب زیاد افزایش یافته، در کرنش ۲ درصد به حداکثر تنش برشی رسیده و سپس گسیخته شده است. به این الگوی رفتاری، رفتار متراکم^۲ گفته می‌شود.

الگوی رفتار خاک سست را اژدرپور و همکاران نیز در سال ۱۳۹۰ در نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی دو نوع خاک غیرمسلح ماسه‌ای و رسی مشاهده کرده‌اند [۱۹] که در شکل ۲-۴ نمودار تنش برشی بر واحد سطح بر حسب کرنش برشی آزمایش آن‌ها نشان داده شده است:



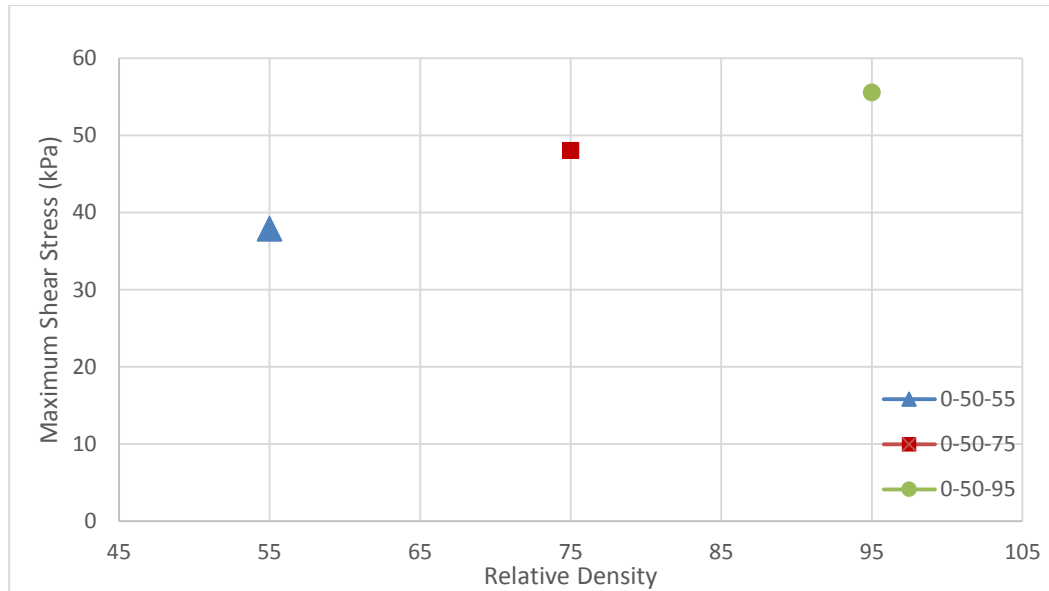
شکل ۲-۴ نمودار تنش برشی-کرنش برشی دو نوع خاک غیرمسلح در آزمایش‌های اژدرپور و همکاران

با توجه به نمودار شکل ۲-۴، رفتار سست ماسه‌ی غیرمسلح، قابل مشاهده است که این رفتار کاملاً مشابه رفتار نمونه‌ی 0-50-55 در نمودار شکل ۱-۴ بوده و نمونه خاک تقریباً در جابجایی برشی ۴ درصد، به حداکثر مقاومت برشی خود رسیده است.

^۱ Loose

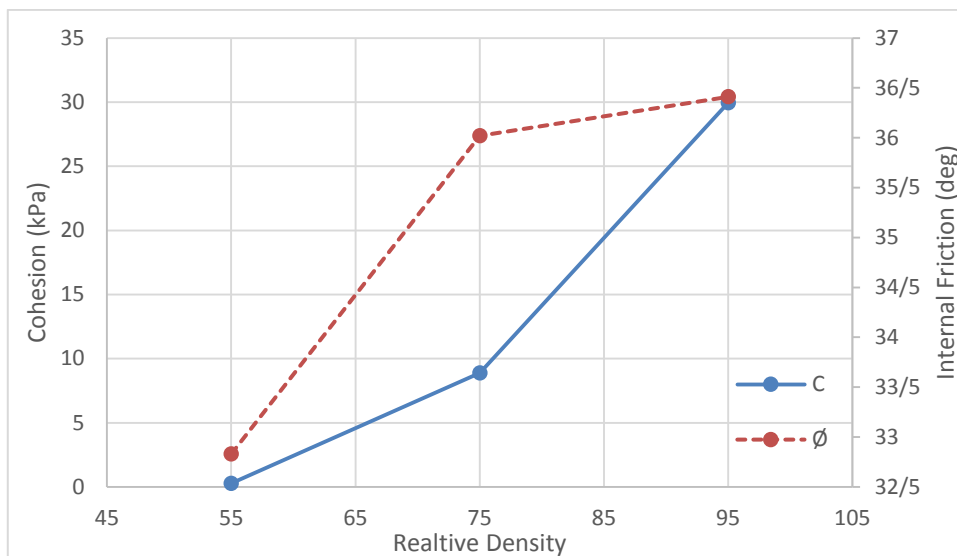
^۲ Dense

اما یکی دیگر از پارامترهای مهم که تحت تأثیر افزایش تراکم نسبی تغییر کرده است، حداکثر تنش برشی تحمل شده‌ی نمونه خاک است که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است:



شکل ۳-۴ نمودار مرجع تغییرات حداکثر تنش برشی در خاک غیرمسلح برحسب تغییرات تراکم نسبی

با توجه به نمودار شکل ۳-۴، با افزایش تراکم نسبی خاک، از ۵۵ درصد به ۷۵ درصد، حداکثر تنش برشی، از حدود ۳۸ کیلوپاسکال به حدود ۴۸ کیلوپاسکال و با افزایش تراکم از ۷۵ درصد به ۹۵ درصد، این مقدار از ۴۸ کیلوپاسکال به بیش از ۵۵ کیلوپاسکال افزایش پیدا کرده است. همچنین تأثیر تراکم نسبی بر چسبندگی بین‌دانه‌ای و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مرجع یعنی (0-50-55 و 0-50-75 و 0-50-95) در شکل ۴-۴، نشان داده شده است:

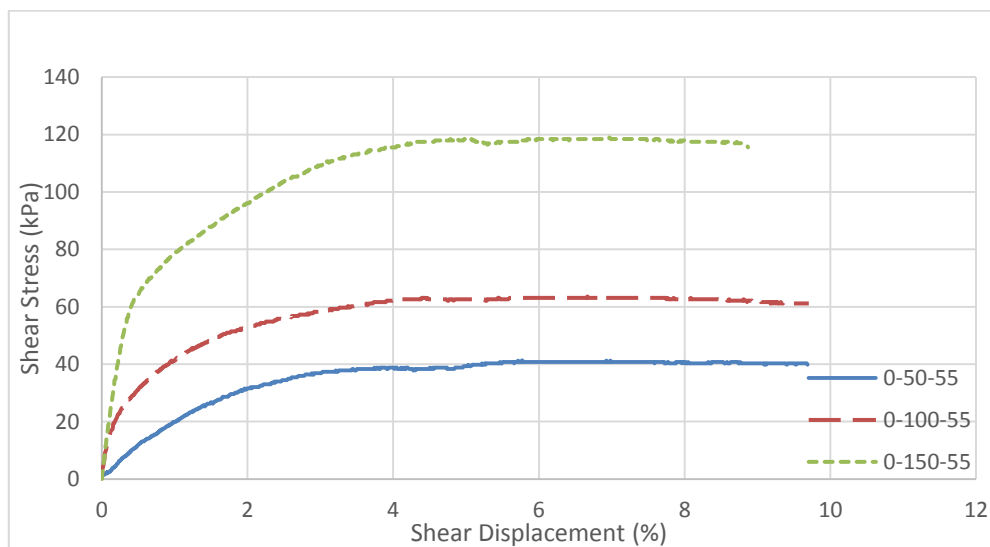


شکل ۴-۴ نمودار تغییرات پارامترهای C و ϕ برحسب تغییرات تراکم نسبی در نمونه‌های مرجع

۲-۱-۲-۴ بررسی تأثیر افزایش تنش قائم (σ) در نمودارهای مرجع

در شکل ۴-۵، تأثیر افزایش تنش قائم بر تغییرات تنش برشی برحسب درصد جابجایی

برشی در نمونه‌های مرجع نشان داده شده است:

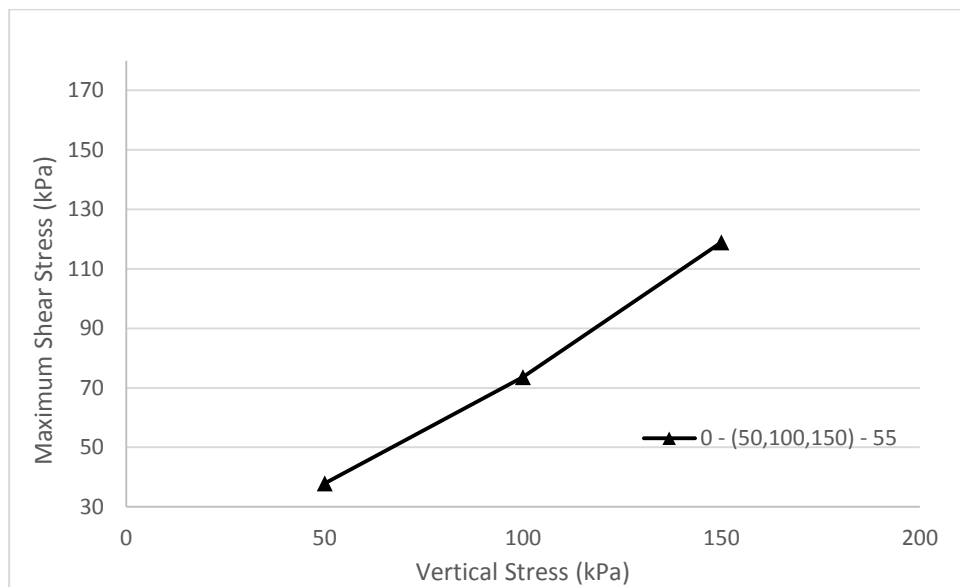


شکل ۴-۵ تغییرات تنش برشی برحسب درصد جابجایی برشی در نمونه‌های مرجع

براساس نمودارهای شکل ۴-۵، افزایش سربار قائم در نمونه‌های غیرمسلح، موجب افزایش مقاومت نمونه شده‌است؛ به آن معنی که نمونه خاک تنش‌های بیشتر را در کرنش‌های بالاتر متحمل شده‌است.

در نمونه‌ی 0-50-55، در جابجایی برشی ۴ درصد، تنش برشی به حداکثر مقدار ۴۰ کیلوپاسکال رسیده‌است و نمونه‌ی 0-100-55، در جابجایی برشی تقریباً ۴/۳ درصد، به حداکثر تنش برشی ۶۱ کیلو پاسکال و نمونه‌ی 0-150-55، نیز تقریباً در جابجایی برشی ۵ درصد، به حداکثر تنش برشی ۱۲۰ کیلو پاسکال رسیده است؛ که در تمامی این سه مورد، افزایش تنش برشی همراه با افزایش کرنش متناظر با آن مشاهده شده‌است.

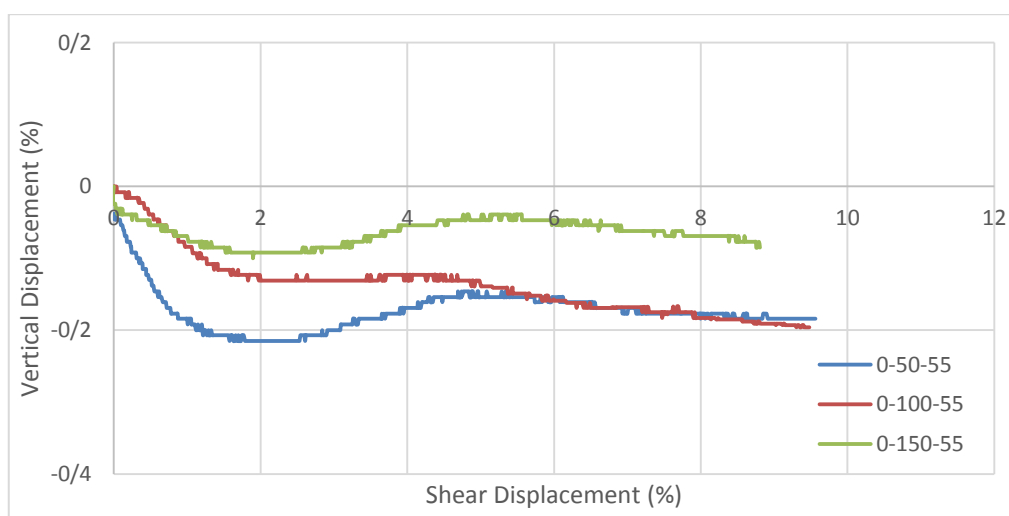
پارامتر دیگری از نمونه‌های مرجع که در آن تأثیر تنش قائم دیده شده‌است، حداکثر تنش برشی است که تحت سه تنش قائم و با حداقل تراکم نسبی ۵۵ درصد، در شکل ۴-۶ بررسی شده است:



شکل ۴-۶ نمودار تغییرات حداکثر تنش برشی برحسب تغییرات تنش قائم در نمونه‌های مرجع

مطابق نمودار ارائه شده در شکل ۴-۶، در نمونه‌های 0-50-55 و 0-100-55، با افزایش تنش قائم، حداکثر تنش برشی از ۳۷/۸۵ کیلوپاسکال، به ۷۳/۵۸ کیلوپاسکال و در نمونه‌ی 0-150-55، حداکثر تنش برشی به ۱۱۸/۹۱ کیلوپاسکال رسیده است.

یکی دیگر از نمودارهای مرجعی که تأثیر تنش قائم بر روی آن بررسی شده، نمودار تغییرات جابجایی قائم در نمونه‌های غیرمسلح برحسب جابجایی برشی است که برای سه تنش قائم، در شکل ۴-۷ نشان داده شده است:



شکل ۴-۷ تغییرات جابجایی قائم برحسب جابجایی برشی در نمونه‌های مرجع

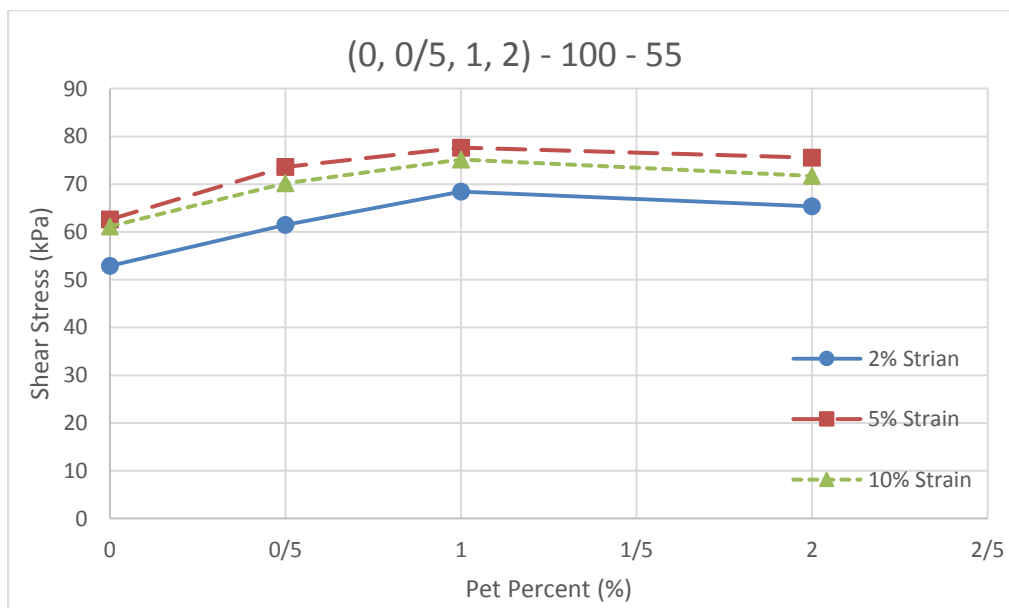
با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۴-۷، تغییرات جابجایی قائم در نمونه‌ی 0-50-55 که تحت کمترین تنش قائم و دارای کمترین تراکم نسبی بوده، از دو نمونه‌ی دیگر بیشتر بوده است؛ به طوری که از ابتدای آزمایش تا ۲ درصد کرنش برشی، ارتفاع نمونه ۰/۲۲ درصد افت داشته و از کرنش برشی ۲ درصد تا ۵ درصد، سطح خاک به میزان ۰/۰۷ درصد افزایش ارتفاع داشته جابجایی قائم به حدود ۰/۱۴ درصد رسیده است. این در حالی است که تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال، نمونه 0-100-55 در دو مرحله، ابتدا در جابجایی برشی اولیه و سپس در جابجایی برشی ۴/۵ درصد، افت ارتفاع داشته است. در نهایت اما با افزایش تنش قائم تا ۱۵۰ کیلو پاسکال، در نمونه-

ی 0-150-55، کنترل بیشتر جابجایی قائم و افت و خیز کمتر از ۰/۱ درصد را در دو جابجایی برشی ۲ درصد و ۵ درصد مشاهده شده است.

۲-۲-۴ تأثیر افزایش درصد پت بر بهبود پارامترهای مقاومتی

در این بخش با ارائه نمودارهای تغییرات پارامترهای مقاومت برشی مانند تنش برشی در چند کرنش ثابت و تغییرات پارامترهای C و ϕ ، بر حسب تغییرات درصد مسلح کننده پت، به بررسی تأثیر درصد مسلح کننده پرداخته شده است.

در شکل ۸-۴، برای نمونه‌های مسلح شده با درصدهای پت صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد، تغییرات تنش برشی در سه کرنش ۲ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد، تحت سربار و تراکم نسبی ثابت بررسی شده است تا صرفاً تأثیر درصد مسلح کننده بر تنش برشی نمونه‌ها تعیین گردد.

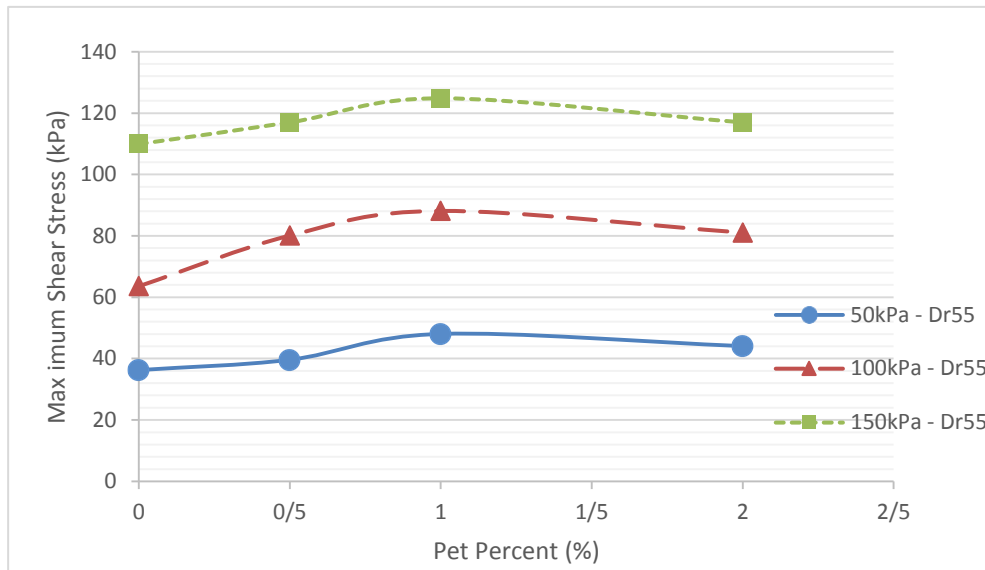


شکل ۸-۴ نمودار تأثیر درصد پت بر مقاومت برشی نمونه‌های خاک در کرنش‌های ثابت

در شکل ۸-۴، تنش برشی نمونه‌های 0-100-55 و 0.5-100-55 و 1-100-55 و 2-100-55، در سه جابجایی برشی ثابت اندازه‌گیری شده و تأثیر افزایش درصد پت از صفر تا ۲ درصد، نشان

داده شده است. مطابق نمودار، با افزایش درصد پت تا ۱ درصد، مقاومت برشی نمونه‌های خاک، افزایش یافته و در تمامی موارد در تراکم نسبی ۵۵ درصد و تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال، بیشترین مقامت برشی در ۱ درصد پت نشان داده شده و در ۲ درصد پت مقاومت برشی کاهش یافته است. این افزایش مقاومت به ازای افزایش مسلح کننده تا ۱ درصد، برای تراکم‌ها و تنش‌های قائم دیگر نیز صادق بوده است (که در ادامه در شکل ۴-۹)، با تراکم ۵۵ درصد و تحت تنش‌های قائم مختلف بررسی شده است). همچنین تغییرات جابجایی برشی نشان داده که با توجه به تراکم کم خاک، در ۲ درصد جابجایی برشی، نمونه‌ی خاک هنوز مقاومت زیادی از خود نشان نداده و کمترین مقدار تنش برشی ثبت شده است. اما با افزایش جابجایی برشی تا ۵ درصد، محدوده‌ی تنش‌های تحمل شده از سوی نمونه خاک، افزایش یافته و حداکثر مقاومت برشی در کرنش ۵ درصد به وقوع پیوسته و با بیشتر شدن جابجایی برشی تا ۱۰ درصد، تنش‌های برشی کاهش یافته‌اند. (در ادامه نشان داده شده است که با افزایش تراکم نسبی، خاک در کرنش‌های پایین‌تر مقاومت برشی بیشتری نشان داده است). کاهش مقاومت برشی در جابجایی برشی ۱۰ درصد، نشان‌دهنده‌ی افت مقاومت برشی پس از گسیختگی است که در این مورد با توجه به حضور مسلح کننده، نمونه افت مقاومتی بسیار کمی داشته که در ادامه، در مورد عوامل مؤثر بر بهبود تأثیر مسلح کننده‌ی پت بر جلوگیری از افت زیاد مقاومت برشی پس از گسیختگی بیشتر بحث شده است.

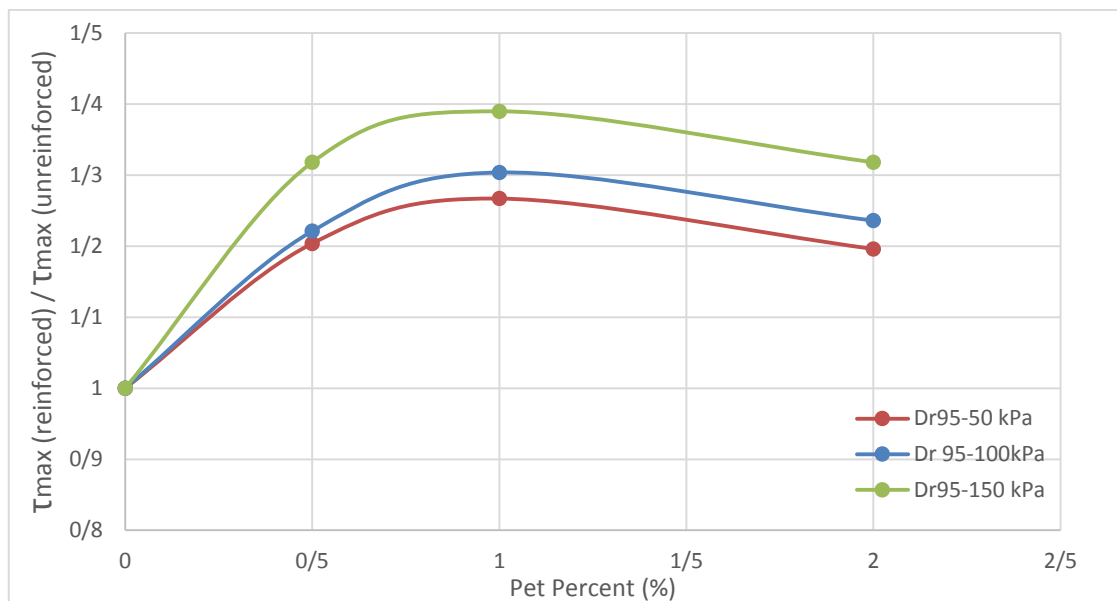
همچنین تأثیر افزایش درصد پت بر حداکثر تنش برشی در یک تراکم نسبی ثابت در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.



شکل ۹-۴ نمودار تأثیر درصد پت بر تنش برشی حداکثر

در شکل ۹-۴) در تراکم نسبی ثابت ۵۵ درصد و تحت سه سربار ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، با افزایش پت تا ۱ درصد، تنش برشی حداکثر افزایش یافته و در درصد پت بیشتر، کاهش یافته است. همان طور که پیش تر بیان شد، این روند برای تراکم نسبی های ۷۵ و ۹۵ درصد نیز تکرار شده است.

برای تشخیص میزان تأثیر تسلیح بر تنش برشی حداکثر تنش برشی نمونه های مسلح شده، نمودار تغییر نسبت حداکثر تنش برشی در حالت مسلح به غیرمسلح برای نمونه های با تراکم ۹۵ درصد و در درصدهای پت مختلف و تحت تنش های قائم ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۰-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰ نمودار تأثیر درصد مسلح کننده بر تغییرات نسبت تنش حداکثر در حالت مسلح شده به غیرمسلح

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۴-۱۰، با افزایش درصد پت تا ۱ درصد، بیشترین تأثیر

مسلح کننده بر افزایش حداکثر تنش برشی را داشته است و این نسبت را تا ۳۹ درصد افزایش

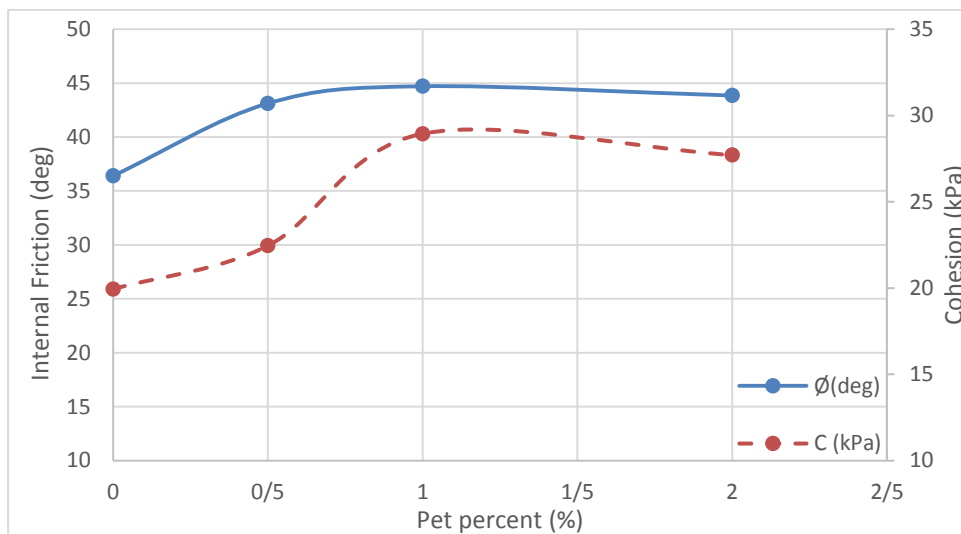
داده است.

همچنین یکی دیگر از موارد تأثیر درصد پت، تأثیر بر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک

داخلی خاک (ϕ) می باشد. با توجه به این که تراکم اجرا شده در مورد مطالعاتی این پژوهش در

بندرانزلی ۹۵ درصد بوده، لذا در شکل ۴-۱۱ بررسی بر روی نمونه های با تراکم ۹۵ درصد نشان

داده شده است.



شکل ۴-۱۱ نمودار تغییرات پارامترهای C و ϕ برحسب تغییرات درصد پت

نمودار ارائه شده در شکل ۴-۱۱، برای نمونه‌های با تراکم ۹۵ درصد و تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال ترسیم شده است و بیان‌گر این است که با افزایش درصد پت، زاویه اصطکاک داخلی نمونه از حدود ۳۵/۵ درجه در حالت غیرمسلح، به ۴۵ درجه در حالت مسلح شده با ۱ درصد پت، افزایش یافته و چسبندگی بین‌دانه‌ای، از حدود ۳۰ کیلوپاسکال به ۴۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است و با بیشتر شدن درصد پت، یعنی در ۲ درصد، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی کاهش یافته‌اند. بر این اساس و با بررسی نمودارهای ارائه شده در بخش تأثیر درصد پت بر پارامترهای مقاومتی، درصد پت بهینه نیز می‌تواند ۱ درصد تشخیص داده شود؛ که البته در ادامه با بررسی پارامترهای دیگر، جمع‌بندی کامل‌تری برای تعیین درصد پت بهینه صورت گرفته است.

در مورد مشابه، مرضیه 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 ϕ برحسب درصد پت در خاک ماسه‌ای مسلح شده با الیاف پت را گزارش کرده‌اند [۱]:

جدول ۴-۱ تغییرات پارامترهای C و ϕ خاک در مقاله‌ی مرضیه دادوند و همکاران در سال ۱۳۹۶

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 ۴-۱، 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 نتایجی مشابه این پژوهش داشته است. در ادامه به بررسی تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای مقاومتی پرداخته شده است.

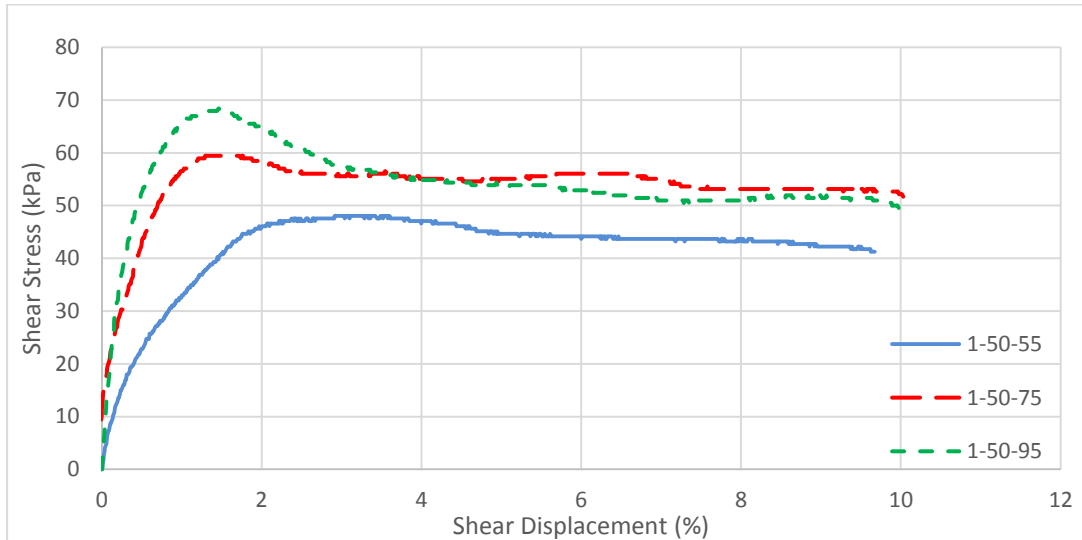
۴-۲-۳ تأثیر افزایش تراکم نسبی (Dr) بر بهبود پارامترهای

مقاومتی

منظور از افزایش تراکم نسبی خاک در محل، عملیات تراکم خاک است که در مورد مطالعاتی پژوهش حاضر در بندرانزلی با تراکم دینامیکی انجام گرفته و تراکم هدف، ۹۰ درصد بوده است. در پژوهش حاضر نیز سه تراکم ۵۵ و ۷۵ و ۹۵ درصد اعمال شده و برای بررسی تأثیر Dr نمونه خاک بر پارامترهای مقاومت برشی، نمودارهای تنش برشی-جابجایی برشی، نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر بر حسب تراکم نسبی و نمودار تأثیر مسلح کننده بر تنش برشی حداکثر، در این بخش تحلیل شده‌اند.

۴-۲-۳-۱ تأثیر افزایش D_r بر رفتار تنش- کرنش خاک

در نمودارهای زیر رفتار تنش کرنش نمونه خاک در دو حالت غیرمسلح و مسلح بررسی شده است:



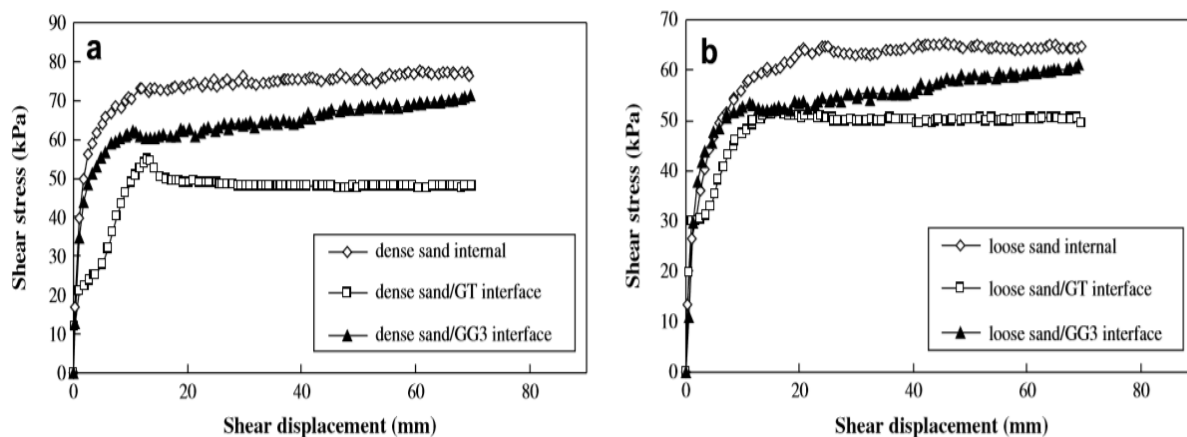
شکل ۴-۱۲ نمودار تنش برشی-کرنش برشی نمونه‌ی مسلح شده با ۱ درصد پت در سه تراکم نسبی تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال

در نمودار شکل ۴-۱۲، نمونه در حالت مسلح شده با ۱٪ پت تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال و در سه تراکم نسبی مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفته که دقیقاً شرایط مسلح شده‌ی نمونه‌ی مرجع بررسی شده در بخش (۴-۲-۱-۱)، در شکل ۴-۱ را نشان داده است. با توجه به نمودار، با افزایش تراکم نسبی، رفتار نمونه متراکم‌تر شده است؛ به این صورت که در تراکم ۵۵ درصد رفتار نمونه به صورت منحنی با شیب کم بوده و در تراکم‌های نسبی ۷۵ و ۹۵ درصد، این رفتار به صورت منحنی با یک اوج در قسمت ابتدایی و سپس کاهش بسیار آرام و با شیب کم بوده است. پیش‌تر بیان شده که این شکل رفتار نمونه‌ی متراکم است. در مقایسه نمودار شکل ۴-۱۲ با نمودار آزمایش مرجع در شکل ۴-۱، مشاهده می‌شود که شیب نمودارها در کرنش‌های اولیه افزایش پیدا کرده و در واقع رفتار نمونه متراکم‌تر شده است. همچنین با افزودن پت، در تراکم نسبی ثابت و تحت سربار ثابت، تنش ماکزیمم در منحنی‌ها بالاتر رفته و برای برش به تنش بیشتری نیاز شد.

این الگوی رفتاری در اثر افزایش تراکم نسبی برای تمامی سربارهای اعمال شده ی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال و درصدهای پت ۰/۵، ۱ و ۲ درصد ثابت بوده است.

در مقایسه با مورد مشابه انجام شده، می توان این نمودار را با تغییرات تراکم خاک در نتایج

Liu و همکاران در سال ۲۰۰۹ که پیش تر در ادبیات فنی بیان شد، مقایسه کرد.



شکل ۴-۱۳ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی تحقیقات *Liu* و همکاران در سال ۲۰۰۹، منتشر شده در نشریه ی *Geotextiles and Geomembranes*

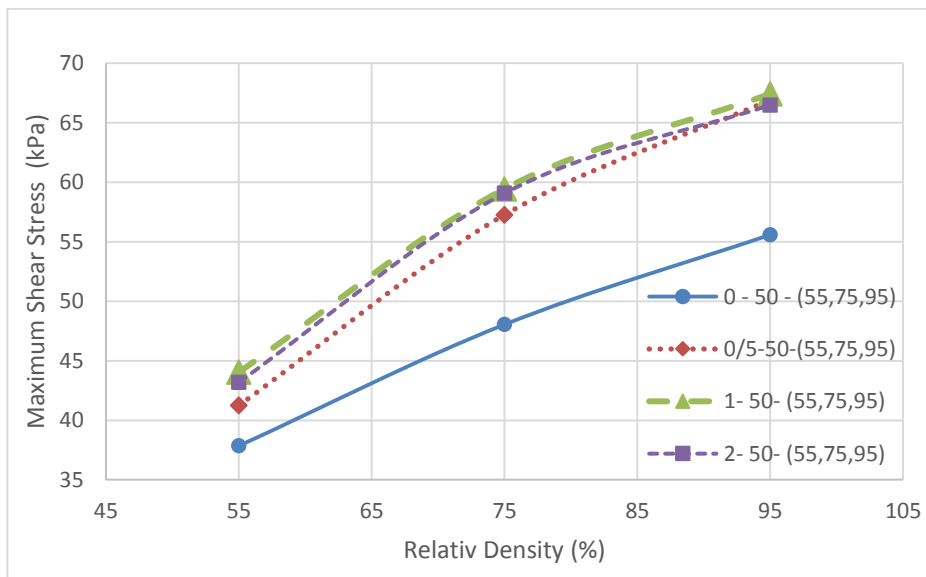
در نمودارهای خروجی مقاله ی *Liu* و همکاران، در شکل *b* رفتار تنش-کرنش ماسه ی

سست در سه حالت غیرمسلح، مسلح شده با ژئوگرید *GT*^۱ و مسلح شده با ژئوگرید *GG3* بررسی شده است و در شکل *a* رفتار همین ماسه با همین مسلح کننده ها فقط در حالت متراکم نشان داده شده است. با مقایسه ی این دو شکل، آن ها نیز مشاهده کردند که با افزایش تراکم نمونه، تنش برشی حداکثر نمونه بیشتر شده و رفتار خاک از *loose* به حالت *dense* درمی آید به طوری که در ابتدا در کرنش های اولیه، تنش برشی با شیب زیاد افزایش داشته و سپس این شیب کم شده است.

^۱ ژئوگریدهای *GT* و *GG3* از انواع ژئوگریدهای ساخته شده از جنس پلیمرهای *pvc* و پلی استر هستند

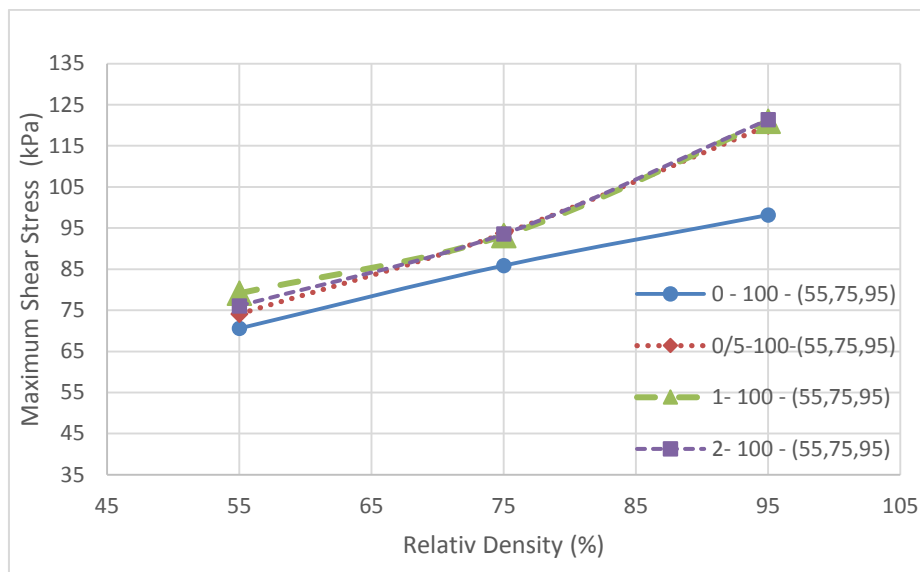
۲-۳-۲-۴ تأثیر تراکم نسبی بر حداکثر تنش برشی تحمل شده توسط نمونه (τ_{max})

در نمودارهای زیر تأثیر Dr های ۵۵ و ۷۵ و ۹۵ بر حداکثر مقاومت برشی (τ_{max}) نمونه‌های با درصد پت ۰، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد، تحت سه سربار ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال جداگانه نشان داده شده است.

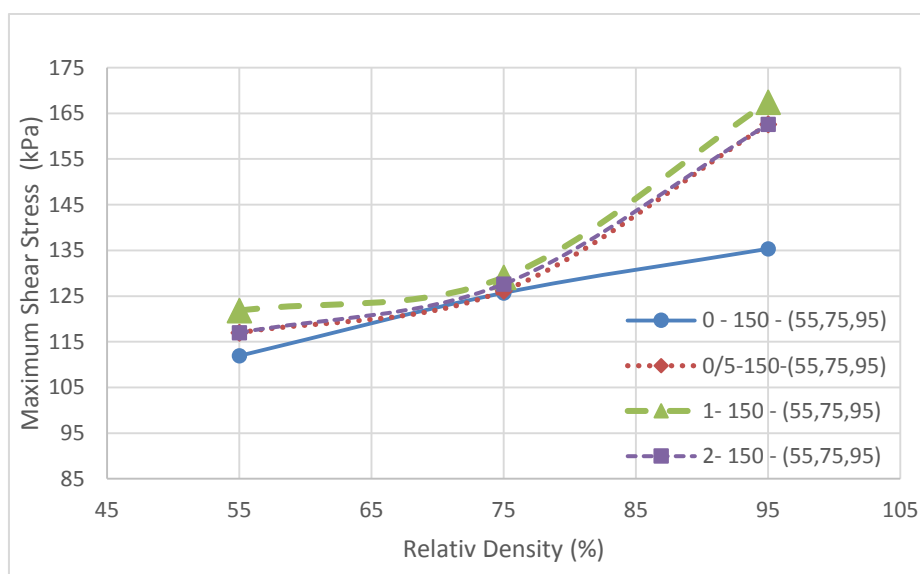


شکل ۴-۱۴ نمودار تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات تنش برشی حداکثر نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در سربار ۵۰ کیلو پاسکال

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۴-۱۴، در نگاه اول اثر تسلیح بر حداکثر مقاومت برشی خاک به وضوح قابل مشاهده است و نیز تأثیر افزایش تراکم نسبی بر افزایش مقاومت برشی یک نمونه در یک تراکم و سربار ثابت نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵ نمودار تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات تنش برشی حداکثر نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۴-۱۶ نمودار تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات تنش برشی حداکثر نمونه‌های مسلح و غیرمسلح در سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال

در نمودارهای شکل ۴-۱۴ تا شکل ۴-۱۶، تحت سربار ثابت با افزایش تراکم نسبی نمونه، تنش برشی حداکثر در نمونه افزایش می‌یابد. در این نمودارها برای هر تراکم نسبی ۴ نقطه تعریف شده که نشان‌دهنده درصد‌های پت ۰، ۰/۵ و ۱ و ۲ هستند. در ستون همگی تراکم‌ها

پایین‌ترین نقطه از نظر تنش برشی، مربوط به ۰٪ پت می‌باشد که نشان می‌دهد علاوه بر تراکم نسبی، مسلح کننده نیز خود موجب افزایش تنش برشی حداکثر نمونه شد.

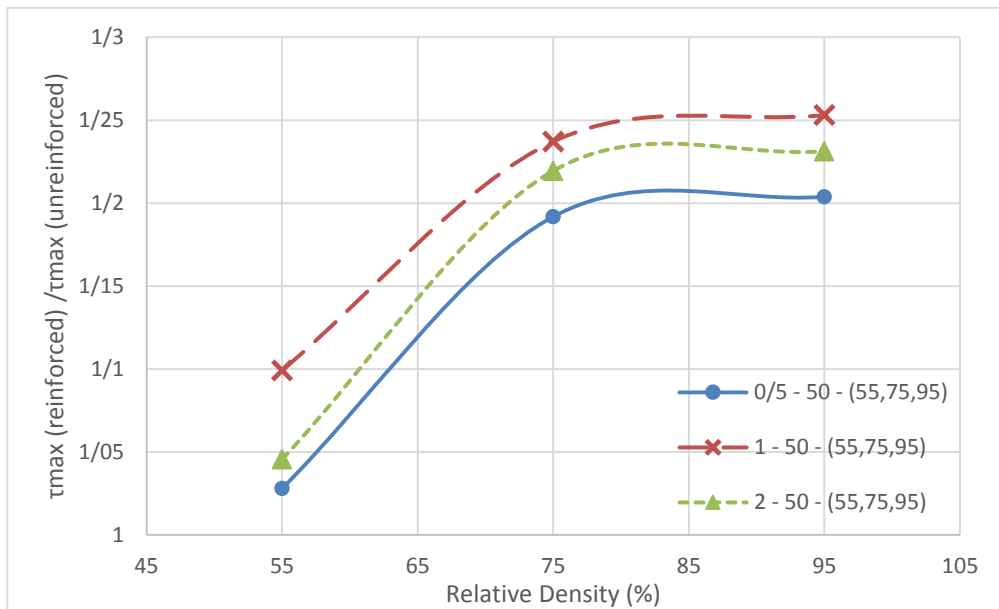
۳-۳-۲-۴ تأثیر افزایش Dr بر تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر در حالت

مسلح به تنش برشی حداکثر در حالت غیرمسلح

در نمودارهای زیر نسبت τ_{max} در حالت مسلح به حالت غیرمسلح بررسی می‌شود؛ این

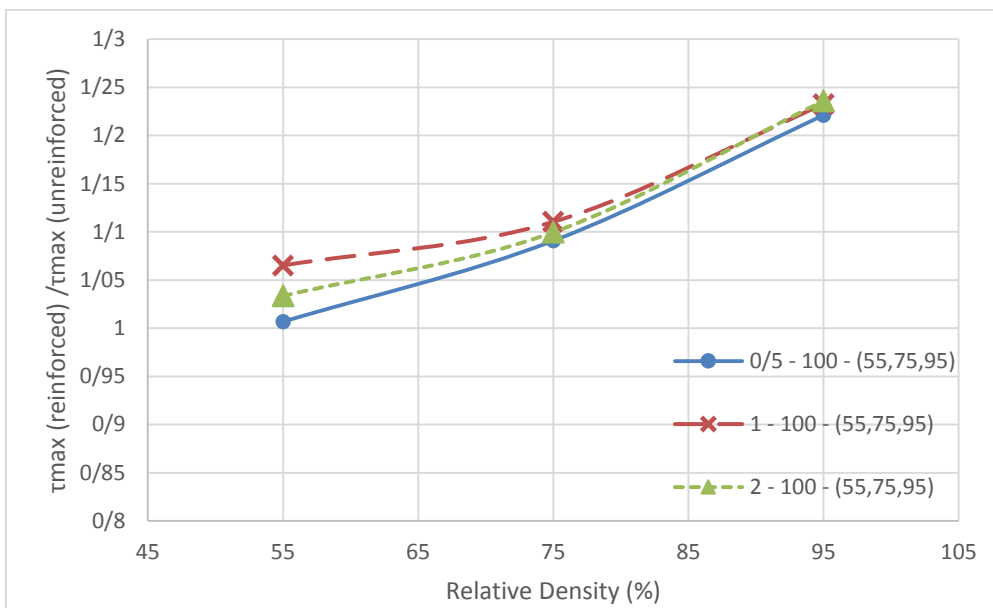
نمودارها در سربارهای ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال و برای مقایسه بین نمونه‌هایی با تراکم

نسبی‌های ۵۵ و ۷۵ و ۹۵ ترسیم شده‌اند.

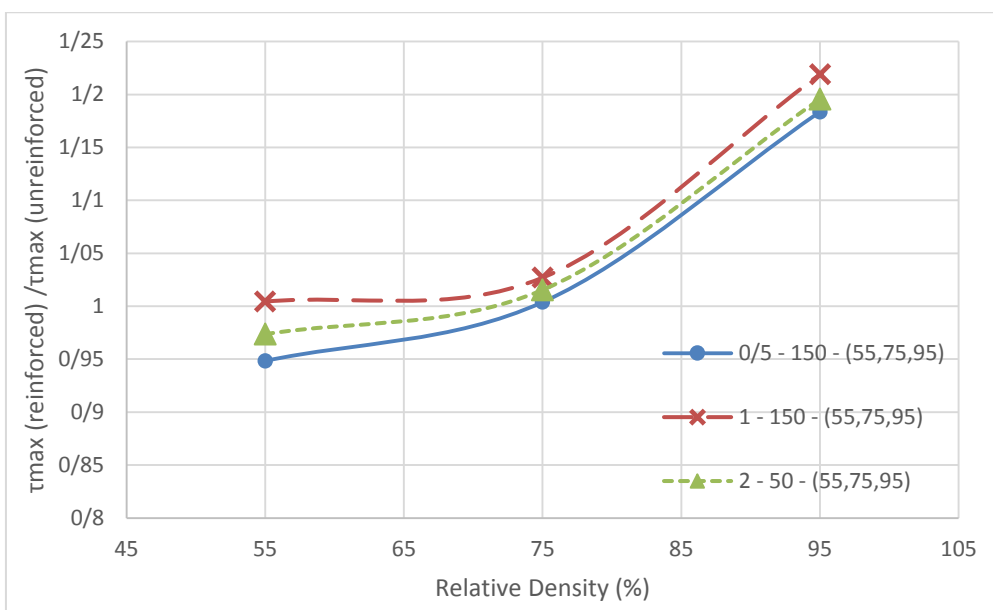


شکل ۱۷-۴ نمودار تأثیر Dr بر تغییرات نسبت τ_{max} در حالت مسلح به حالت غیرمسلح در سربار ۵۰ کیلو

پاسکال



شکل ۴-۱۸ نمودار تأثیر D_r بر تغییرات نسبت τ_{max} در حالت مسلح به حالت غیرمسلح در سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال



شکل ۴-۱۹ نمودار تأثیر D_r بر تغییرات نسبت τ_{max} در حالت مسلح به حالت غیرمسلح در سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال

نمودار نرمال شده و بسیار مهم تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر در حالت مسلح به حالت

غیرمسلح یا $\left(\frac{(\tau_{max})_{reinforced}}{(\tau_{max})_{unreinforced}} \right)$ ، نشان‌دهنده تغییرات تنش برشی حداکثر در اثر تغییر تراکم

نسبی نمونه تحت یک تنش قائم ثابت بوده و در واقع نشان‌دهنده‌ی اثر تسلیح بر مقدار تنش برشی حداکثر است. محور افقی این نمودار، تراکم نسبی و محور عمودی آن نسبت تغییرات تنش حداکثر را نشان داده است. هر یک از نمودارها در درصد پت و سربار ثابت، تغییرات در اثر افزایش تراکم نسبی را نشان داده‌اند و در ستون عمودی هر یک از تراکم نسبی‌ها، سه نقطه وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی نسبت تنش برشی برای درصدهای پت ۰/۵ و ۱ و ۲ به تنش برشی ۰٪ یا حالت غیرمسلح می‌باشد. بالاترین نسبت برای ۱ درصد پت و کمترین نسبت کمترین درصد پت یعنی ۰/۵ درصد است.

در سه نمودار ارائه‌شده در شکل ۴-۱۷ تا شکل ۴-۱۹، تحت هر سه سربار قائم، مشاهده شده‌است که افزایش تراکم نسبی موجب افزایش نسبت تنش‌ها شده و به بیان دیگر افزایش تراکم نسبی موجب بهبود عملکرد تسلیح و افزایش حداکثر تنش برشی نمونه‌های مسلح شده‌است.

در موردی مشابه، *Ranjan* و همکاران در سال ۱۹۹۴، در مقاله‌ای در مجله‌ی *Geotextiles and Geomembranes* که در فصل دوم نیز به آن اشاره شده‌است، نموداری مشابه نمودار شکل ۴-۱۷ تا شکل ۴-۱۹ ترسیم نموده‌اند و در آن تأثیر افزایش درصد پت بر نسبت کسر فوق را بررسی کرده‌اند [۲۶]:

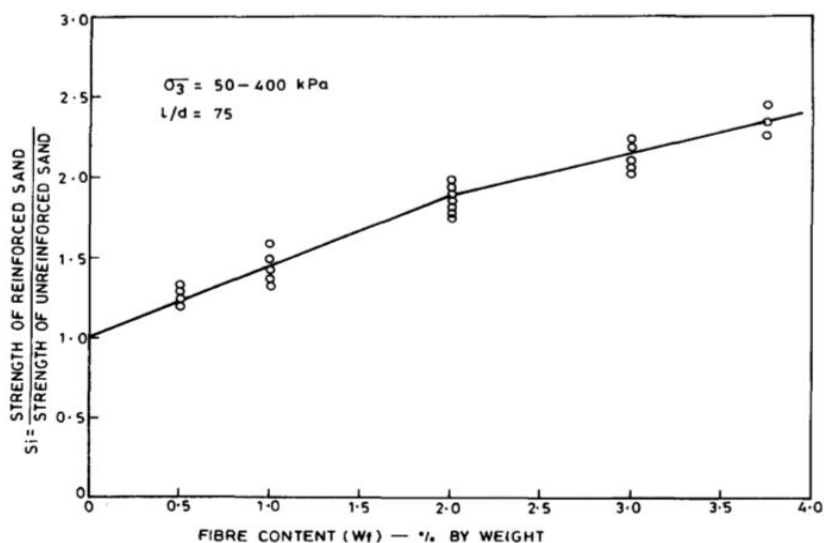


Fig. 6. Effect of fibre content on increase in strength of reinforced sand.

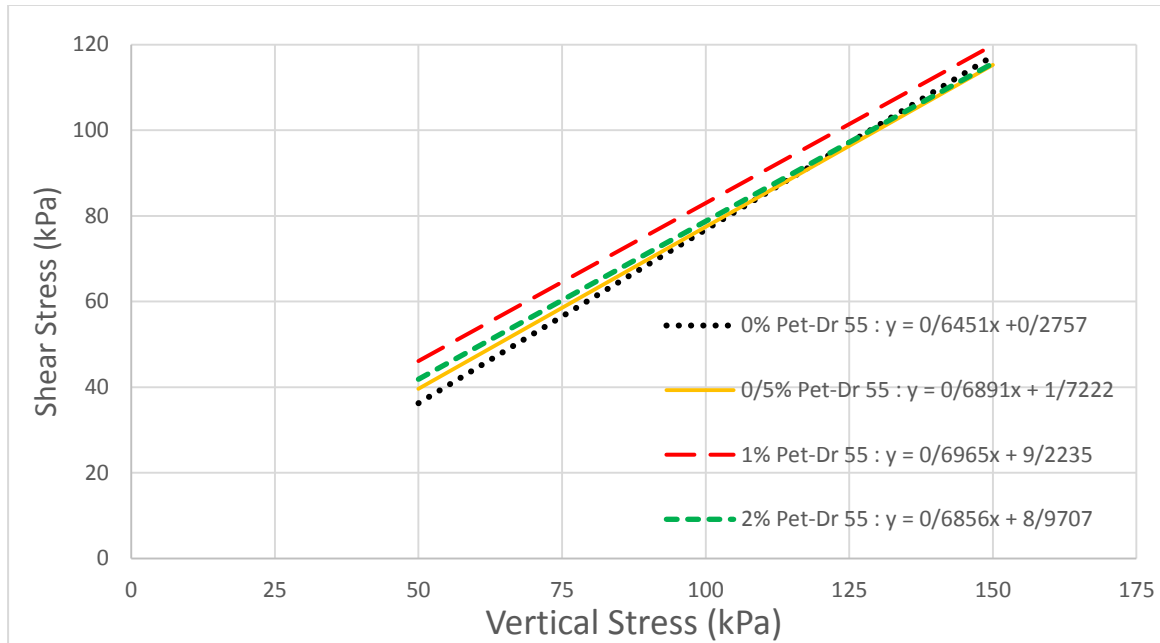
شکل ۴-۲۰ تأثیر افزایش درصد مسلح کننده بر مقاومت ماسه‌ی مسلح، برگرفته از مقاله *Ranjan* و همکاران (تنش محصورکننده در آزمایش سه محوری در محدوده ۵۰ تا ۴۰۰ کیلو پاسکال و نسبت ابعادی الیاف مسلح کننده ۷۵ بوده است)

همان‌طور که از نمودار فوق مشخص است، *Ranjan* و همکاران مشاهده کرده‌اند که با افزایش درصد مسلح کننده، در سربار ثابت مقاومت ماسه‌ی مسلح شده، افزایش یافته است. این مسئله در نمودار شکل ۴-۱۷ تا شکل ۴-۱۹ برای درصد پت‌های مسلح کننده در این پژوهش نیز مشهود بوده است.

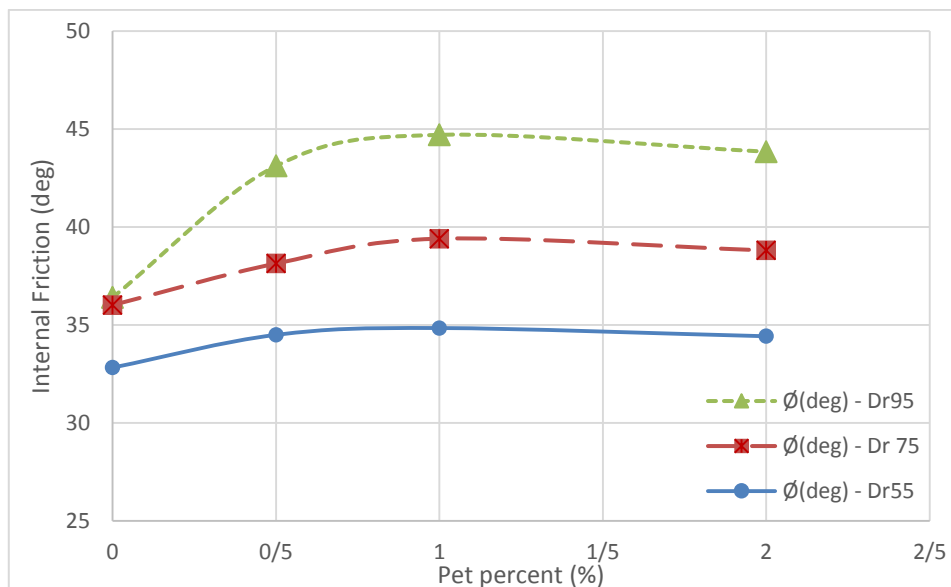
۴-۲-۳-۴ تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای C و ϕ خاک

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده‌ی مقاومت برشی خاک، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی خاک (C) است. در فصل دوم و تحقیقات پیشین نشان داد شده است که اغلب مسلح کننده‌ها موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک شده‌اند؛ اما تأثیر مسلح کننده‌ها بر چسبندگی، بیشتر تابع جنس خاک و شکل مسلح کننده بود. برای مثال، بیشتر در مورد مسلح کننده‌های الیافی افزایش چسبندگی مشاهده شد.

در پژوهش حاضر این پارامترها متأثر از مسلح کننده و میزان تراکم نسبی نمونه بودند که در نمودارهای زیر، تغییرات ϕ به عنوان شیب نمودارهای τ - σ و C به عنوان عرض از مبدأ، بررسی شده است:



شکل ۴-۲۱ نمودار پوش گسیختگی موهر-کولمب و معادله‌ی پوش در تراکم ۵۵ درصد و درصد‌های پت مختلف در شکل ۴-۲۱ در نمودارهای تنش برشی-تنش قائم، پوش گسیختگی به همراه معادله‌ی خط در تراکم ۵۵ درصد ترسیم شده است و مشخصات نمونه‌ها با درصد‌های مسلح کننده‌ی مختلف باهم مقایسه شده است و نشان داده‌اند که با افزایش درصد پت تا ۱ درصد، شیب نمودارها (ضریب x در معادله خط) که نشان دهنده‌ی زاویه اصطکاک داخلی و عرض از مبدأ نشان دهنده‌ی چسبندگی بین دانه‌ای، افزایش یافته و در ۲ درصد پت نسبت به ۱ درصد، کاهش یافته‌اند. این امر در نمودار شکل ۴-۲۲ نیز مشخص شده است.

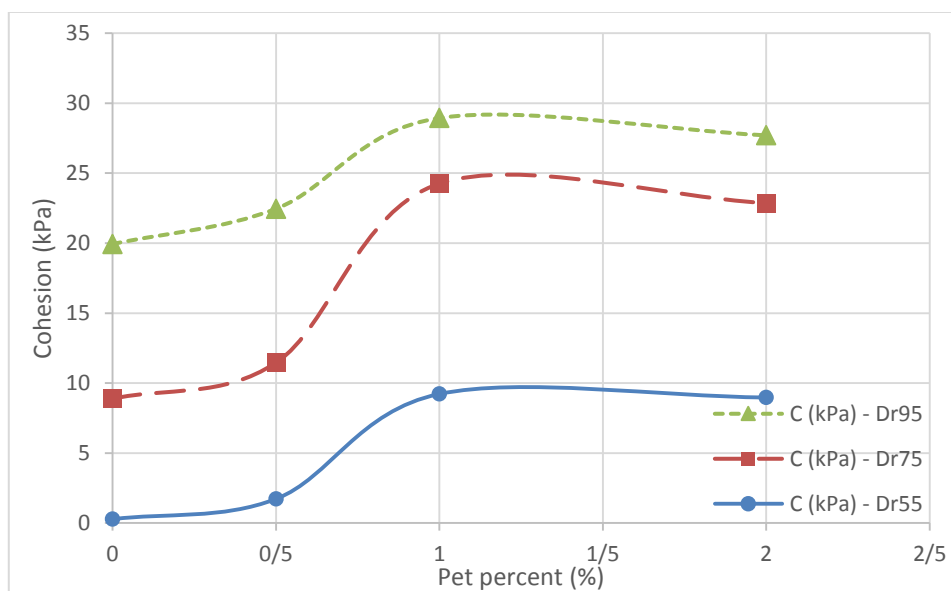


شکل ۴-۲۲ نمودار بررسی تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) در درصد پت‌های مختلف

در شکل ۴-۲۲، با افزایش تراکم نسبی از ۵۵ درصد به ۷۵ و ۹۵ درصد، زاویه اصطکاک

داخلی خاک در هر درصد پت، به‌طور میانگین حدود ۱۵ درصد، افزایش یافته‌است. همچنین در

تمامی تراکم‌ها بیشترین زاویه اصطکاک داخلی در ۱ درصد پت نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳ نمودار بررسی تأثیر تراکم نسبی بر تغییرات چسبندگی بین‌دانه‌ای (C) در درصد پت‌های مختلف

همان‌طور که در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است با افزایش تراکم نسبی، به‌مانند زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی بین‌دانه‌ای نمونه‌های خاک نیز افزایش یافته‌است. در تراکم ۵۵ درصد، ماسه‌ی غیرمسلح (۰٪ پت)، چسبندگی بسیار کمی نشان داده و با افزایش تراکم نسبی تا ۷۵ درصد، چسبندگی آن به حدود ۹ کیلوپاسکال رسیده و در تراکم ۹۵ درصد، به ۲۰ کیلوپاسکال رسیده‌است. با افزودن پت به خاک تا ۱ درصد، چسبندگی روند افزایشی داشته و در ۲ درصد روند کاهشی شده‌است.

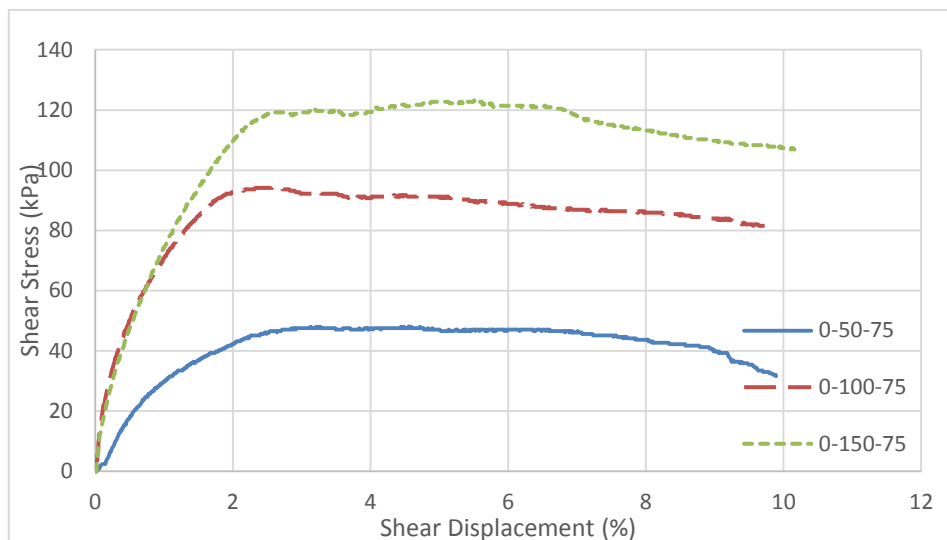
حداکثر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی داخلی در درصد پت بیشتر از ۱ درصد، بیان‌گر بهینه بودن ۱ درصد پت برای این آزمایش بوده است. افزودن بیشتر از این مقدار، علاوه بر بی‌تأثیر بودن در بهبود پارامترهای مقاومتی، صرفه‌ی اقتصادی نداشته و نسبت غیرمعقول خاک و پت را نیز در پی داشته است.

۴-۲-۴ تأثیر سربار قائم بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی

در این بخش، به بررسی تأثیر یکی دیگر از عوامل دخیل در آزمایش‌های برش مستقیم یعنی سربار قائم، بر پارامترهای مقاومتی نمونه خاک مسلح شده با خرده پت پرداخته می‌شود.

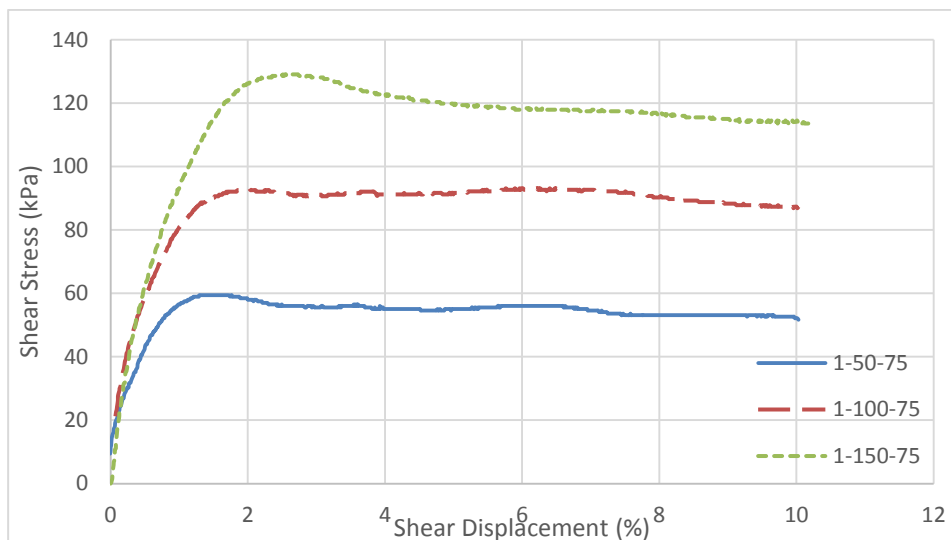
۴-۲-۴-۱ تأثیر افزایش سربار قائم بر رفتار تنش-کرنش خاک مسلح

در نمودارهای زیر رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها تحت تأثیر سه سربار ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال در Dr ثابت مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴-۲۴ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی نمونه‌ی غیرمسلح در تراکم ۷۵ درصد و تحت سه سربار قائم

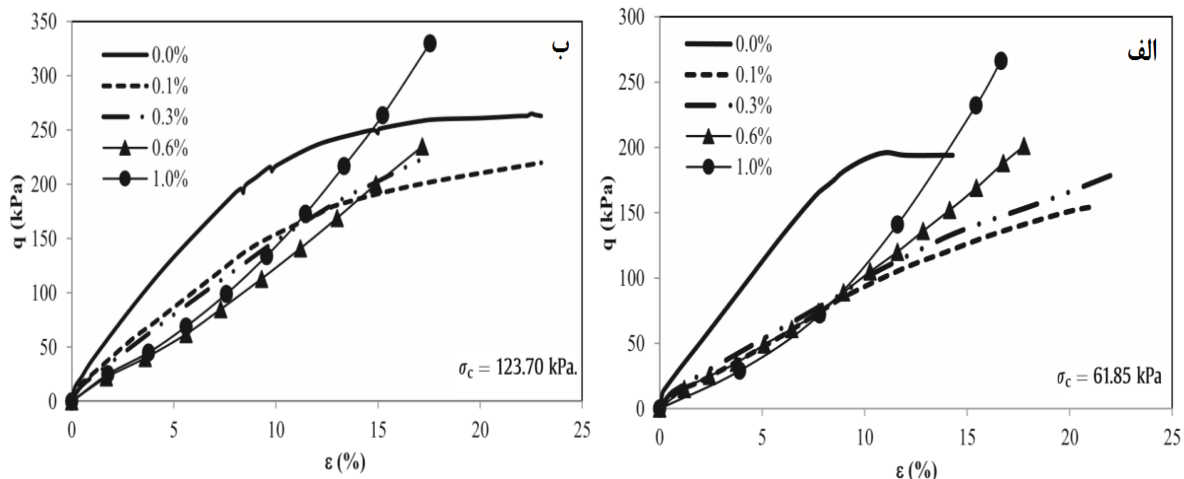
همان‌طور که در نمودارهای شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است، با افزایش تنش قائم از ۵۰ به ۱۰۰ و از ۱۰۰ به ۱۵۰ کیلوپاسکال، رفتار نمونه متراکم‌تر شده و محدوده‌ی تنش گسیختگی بالاتر رفته است. در سربار ۵۰ کیلوپاسکال تنش برشی ابتدا به صورت یک منحنی با شیب ملایم افزایش یافت و تقریباً در کرنش ۳ درصد، به حداکثر مقدار خود رسید و سپس با شیب بسیار کم کاهش پیدا کرد، به طوری که گسیختگی بسیار نامحسوسی داشت. در سربارهای ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال اما ابتدا شیب افزایش تنش برشی و رسیدن به تنش برش حداکثر، زیاد بوده و تقریباً تا کرنش ۳ درصد ادامه داشته است و پس از آن با شیب بسیار کم کاهش یافته است. در مقایسه با نمودار مرجع در شکل ۴-۵، در سربار و درصد پت یکسان، تراکم ۷۵ درصدی نمونه‌ی شکل ۴-۲۴، موجب افزایش تنش برشی شده است.



شکل ۴-۲۵ نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی خاک مسلح در تراکم ۷۵ درصد و تحت سه سربار قائم

در نمودارهای فوق، تغییرات تنش برشی-کرنش برشی در آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ی مسلح شده با ۱ درصد پت، تحت سه سربار ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در سربار ۵۰ کیلو پاسکال نمونه تقریباً در کرنش ۱ درصد به حداکثر تنش برشی می‌رسد ولی با افزایش سربار قائم، تحت تنش ۱۰۰ کیلو پاسکال تنش برشی حداکثر در کرنش نزدیک به ۲ درصد و در تنش سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال در کرنش تقریباً ۳ درصد رخ می‌دهد.

همان‌طور که در فصل دوم نیز بیان شد، بوترو و همکاران نیز پیرامون این مسئله پژوهشی با آزمایش سه محوری انجام دادند که می‌توان نتایج آن را که در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است، با نتایج شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ مقایسه کرد.

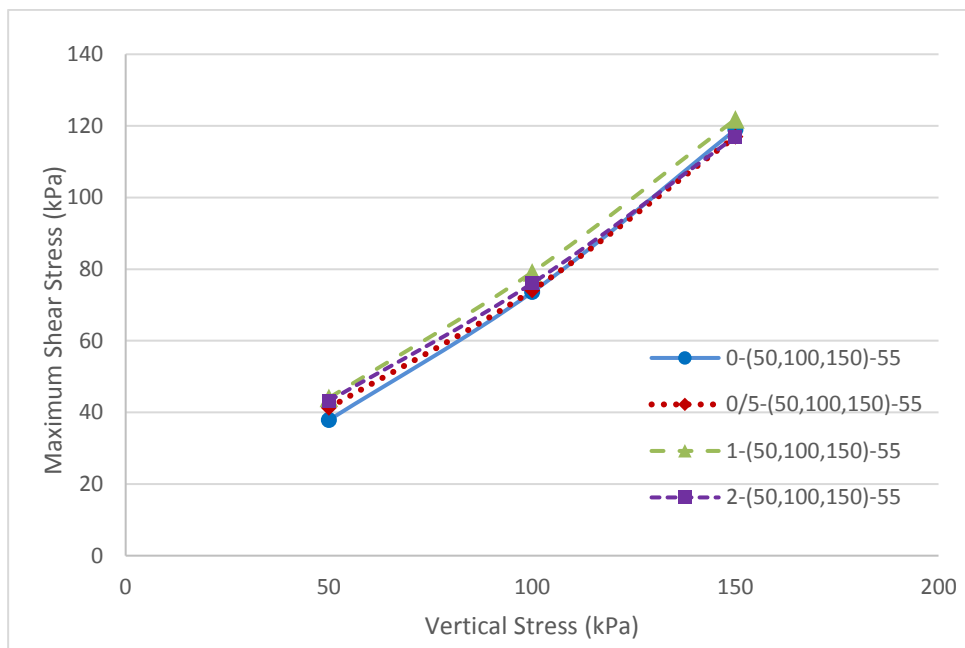


شکل ۴-۲۶ نمودارهای تغییرات تنش انحرافی برحسب کرنش، در دو تنش محصورکننده

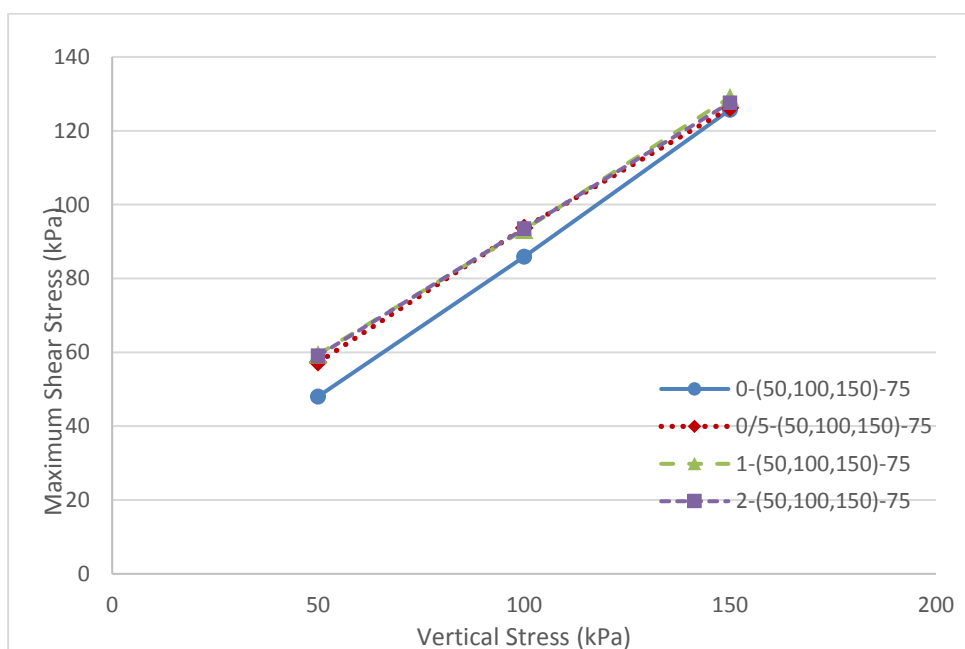
مقایسه‌ی نمودارهای (الف) و (ب) در شکل ۴-۲۶ نشان می‌دهد که افزایش تنش همه‌جانبه در آزمایش‌ها، موجب رسیدن نمونه به تنش حداکثر در کرنش‌های بالاتر گشته است؛ بدان معنی که شکل‌پذیری نمونه بیشتر شده است. این نتایج، مشابه نتایج آزمایش‌های نشان داده شده در شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ بوده‌اند.

۴-۲-۲-۴ تأثیر افزایش سربار قائم بر حداکثر تنش برشی (τ_{max})

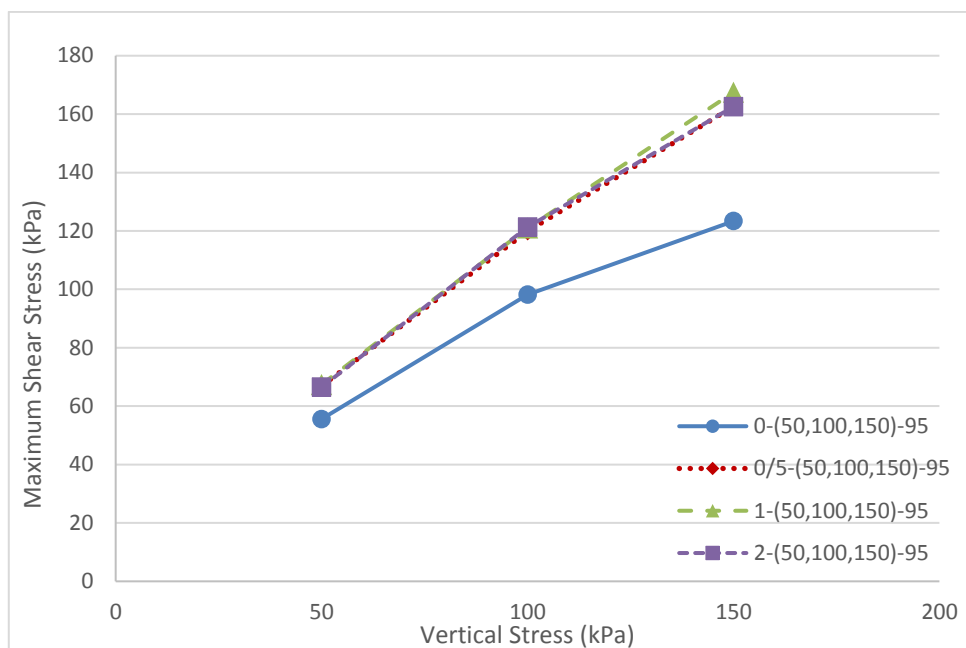
در شکل‌های ۴-۲۷ تا ۴-۲۸، نمودارهای تنش برشی-تنش قائم در تراکم نسبی ثابت، برای نمونه‌های مسلح و غیرمسلح تحت سه سربار قائم ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال ترسیم شده‌اند.



شکل ۴-۲۷ نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر بر حسب تغییرات تنش قائم در تراکم نسبی ۵۵ درصد



شکل ۴-۲۸ نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر بر حسب تغییرات تنش قائم در تراکم نسبی ۷۵ درصد



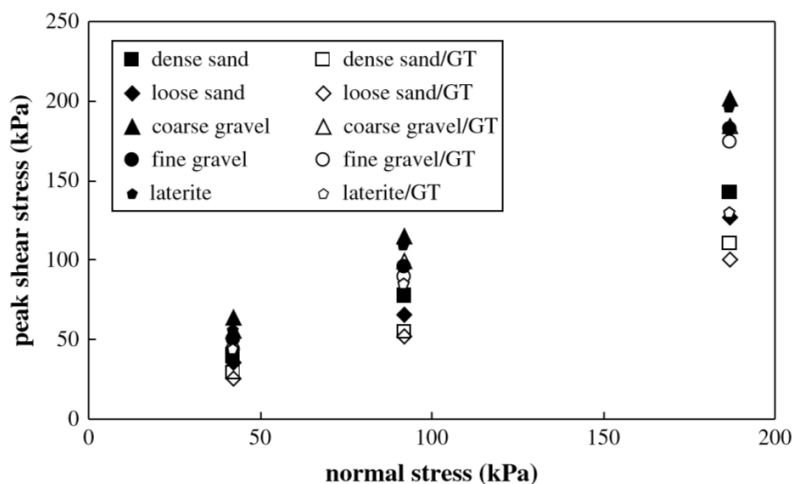
شکل ۴-۲۹ نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تغییرات تنش قائم در تراکم نسبی ۹۵ درصد

در نمودارهای شکل ۴-۲۷، در تراکم نسبی ۵۵ درصد مشاهده شده که در هریک از سربارها تنش برشی حداکثر در نمونه‌های مسلح و غیرمسلح مقادیر نزدیک به هم داشته‌اند ولی بیشترین مقدار تنش در ۱ درصد پت اتفاق افتاده است.

در نمودار شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ و آزمایش‌های با تراکم نسبی ۷۵ و ۹۵ درصد، تحت هر سربار کمترین تنش در نمونه غیرمسلح بوده و در نمونه‌های مسلح مقادیر تنش بسیار نزدیک به هم بوده است ولی در این تراکم‌ها هم بیشترین مقدار تنش برشی حداکثر، در ۱ درصد پت اتفاق افتاده است.

همچنین در نمودارهای ارائه شده در شکل ۴-۱۴ تا شکل ۴-۱۶، در بخش ۴-۲-۳-۳، با افزایش تنش قائم به ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، محدوده‌ی تنش‌های حداکثر از حدود ۳۸ تا ۶۸ کیلوپاسکال تحت سربار ۵۰ کیلو پاسکال، به ۷۵ تا ۱۲۲ کیلوپاسکال تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال و ۱۱۷ تا ۱۶۷ کیلوپاسکال تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال رسیده‌است؛ که نشان‌دهنده‌ی تأثیر سربار قائم بوده است.

پیش‌تر نیز *Liu* و همکاران در سال ۲۰۰۹، در مقاله‌ی خود، نمودار مشابهی در این مورد داشته‌اند که در آن تغییرات تنش برشی حداکثر تحت سه سربار ۴۲ و ۹۲ و ۱۸۷ کیلو پاسکال برای نمونه‌هایی از چند نوع خاک به‌علاوه‌ی خاک ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با ژئوگریدهای *GT* بررسی شده است [۱۷]:



تأثیر تراکم بر حداکثر تنش برشی خاک‌های غیر مسلح و مسلح شده با ژئوگریدهای *GT*

شکل ۴-۳۰: نمودار تغییرات تنش برشی حداکثر برحسب تنش نرمال از مقاله‌ی *Liu* و همکاران چاپ شده در

مجله‌ی *Geotextile and Geomembranes*

همان‌طور که از نمودار شکل ۴-۳۰ مشخص است، *Liu* و همکاران نیز مشابه نتایج ارائه شده

در شکل‌های ۴-۱۸ تا ۴-۲۰ مشاهده کردند که با افزایش سربار قائم، حداکثر تنش برشی نمونه-

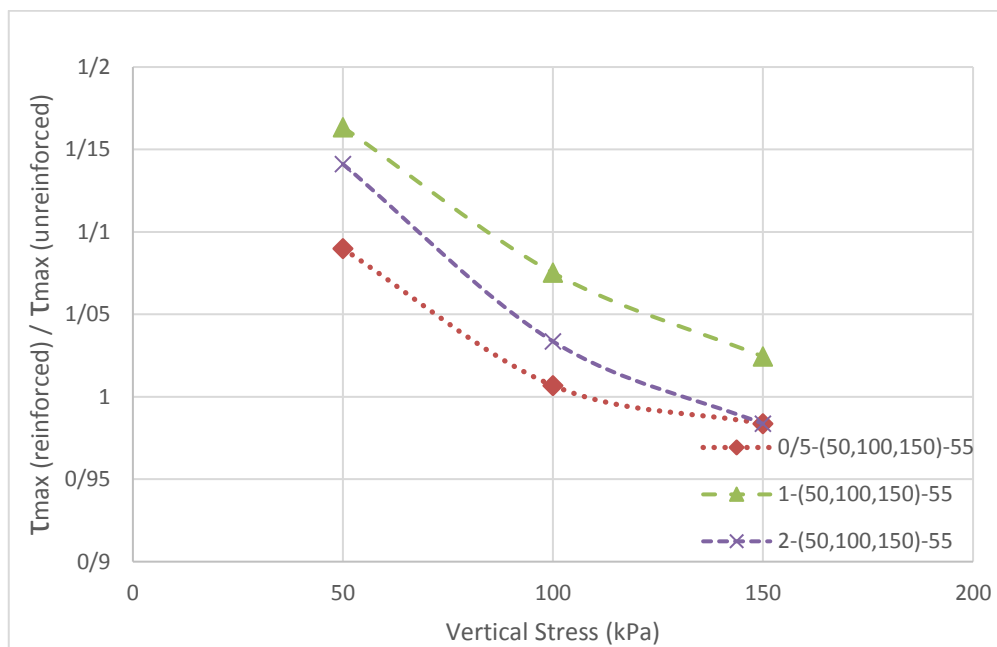
های مسلح و غیرمسلح افزایش پیدا کرد.

۳-۴-۲-۴ تأثیر افزایش سربار قائم بر نمودار تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر

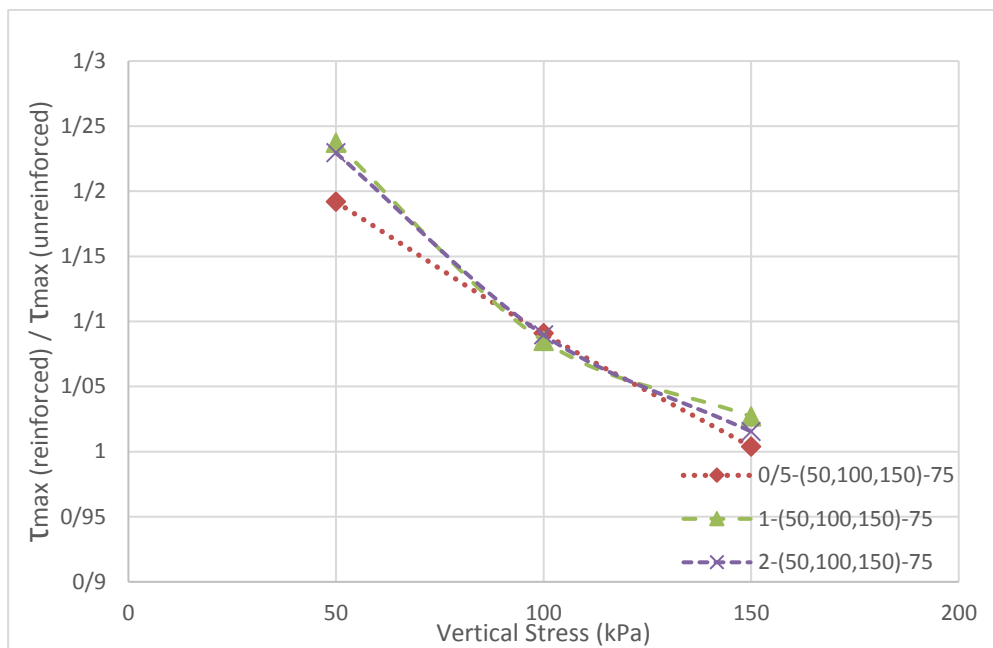
$$\frac{(\tau_{max})_R}{(\tau_{max})_{UR}} \text{ در نمونه مسلح به غیرمسلح}$$

یکی از مهم‌ترین نمودارهای خروجی آزمایش برش مستقیم در این پژوهش، نمودارهای

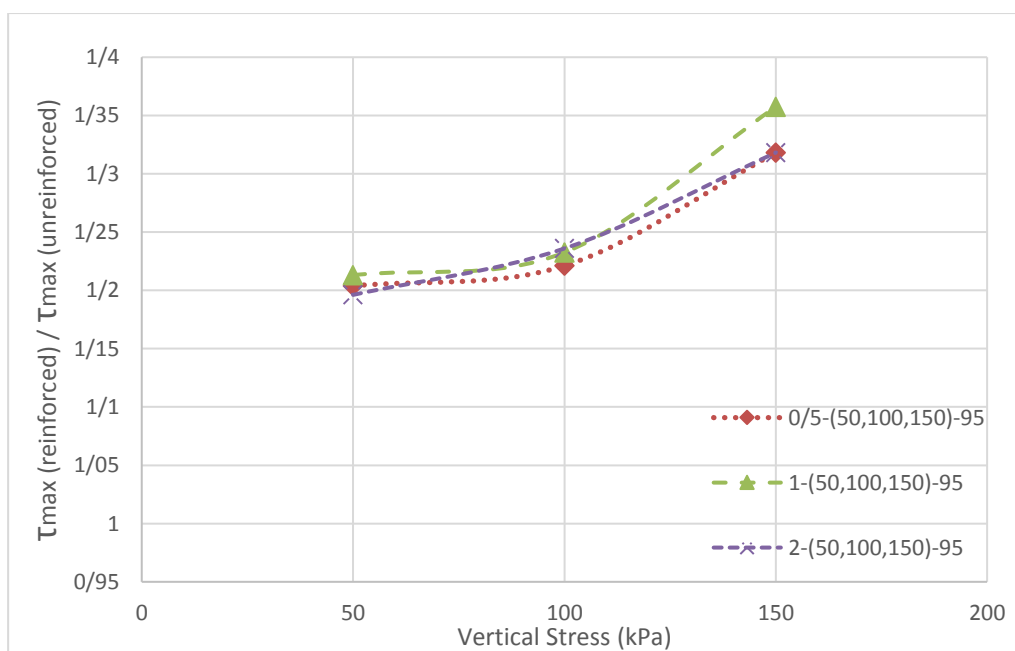
نرمال شده‌ی $\frac{(\tau_{max})_R}{(\tau_{max})_{UR}}$ هستند که تأثیر تسلیح را بهبود بر پارامترهای مقاومت برشی نشان می‌دهند و در ادامه آورده شدند:



شکل ۳۱-۴ نمودار تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر نمونه مسلح به غیرمسلح با $Dr 55$



شکل ۳۲-۴ نمودار تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر نمونه مسلح به غیرمسلح با $Dr 75$



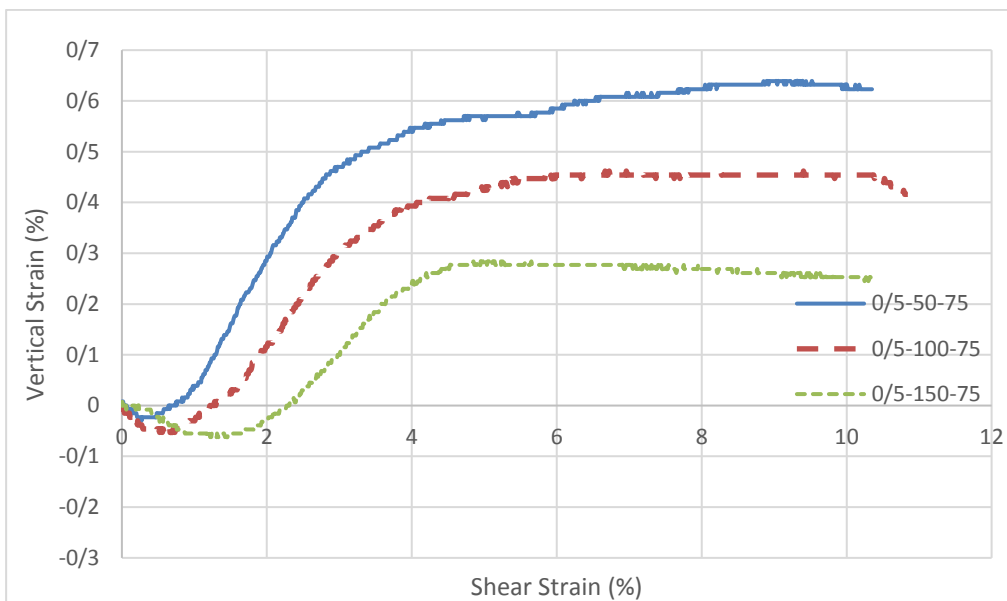
شکل ۳۳-۴ نمودار تغییرات نسبت تنش برشی حداکثر نمونه مسلح به غیرمسلح با $Dr 95$

در نمودارهای فوق نسبت تنش برشی حداکثر نمونه‌های مسلح شده با درصد پت‌های ۰/۵ و ۱ و ۲ بر تنش برشی حداکثر نمونه‌ی غیرمسلح، تحت سه سربار ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ نشان داده شده است. در نمودار با تراکم نسبی ۵۵ درصد مشاهده می‌شود که با افزایش سربار قائم اثر مسلح کننده، کاهش یافته و نسبت تنش (محور قائم) کاهش می‌یابد. در تراکم نسبی ۷۵ درصد، شیب این روند کاهش یافته، کمتر بوده و در کمترین حالت، تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال نسبت تنش‌های حداکثر، به ۱ نزدیک شده است؛ یعنی تحت این سربار تنش برشی حداکثر در نمونه‌ی مسلح تقریباً برابر تنش برشی حداکثر در نمونه‌ی غیرمسلح شد.

اما در تراکم نسبی ۹۵ درصد، اثر تسلیح بر نسبت تنش، اثر افزایشی است و با افزایش سربار قائم از ۵۰ تا ۱۵۰، نسبت تنش برشی افزایش می‌یابد و بیشترین اثر مثبت نیز در ۱ درصد پت رخ می‌دهد. در مجموع با افزایش سربار قائم، درگیری خاک و پت بیشتر شده و اثر تسلیح بیشتر شده است.

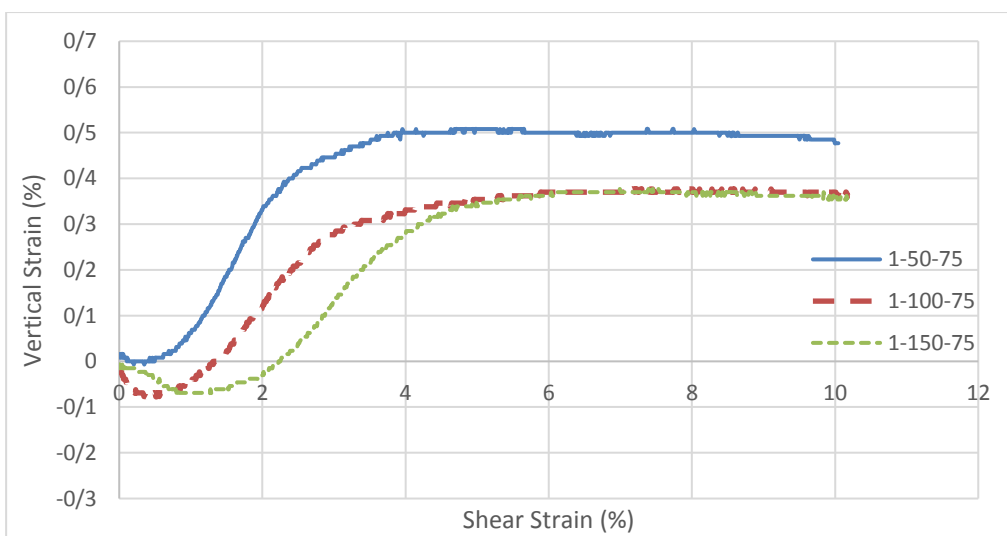
۴-۲-۴-۴ تأثیر سربار قائم بر تغییرات کرنش قائم نمونه خاک مسلح

در نمودارهای زیر، محور افقی، کرنش برشی و محور قائم کرنش قائم نمونه در طول آزمایش را نشان می‌دهد. این نمودارهای بسیار مهم می‌توانند در شناسایی رفتار اتساعی و تغییرات نشست خاک مسلح شده تحت تنش قائم و برشی کمک به سزایی کنند.



شکل ۴-۲۶ نمودار تغییرات کرنش قائم برحسب کرنش برشی در $Dr75$ با ۵ درصد پت

در نمودار فوق، نمونه‌های مسلح شده تحت سه سربار قائم مورد آزمایش قرار گرفته و تغییرات سطح خاک در هر سه سربار مشخص است، افزایش سربار قائم موجب کنترل تغییرات قائم نمونه خاک شده و با توجه به نقاط خیز در نمودار که با افزایش سربار در کرنش‌های برشی بیشتری با درصد کرنش‌های قائم پایین‌تر قرار دارند، در واقع در عین شکل‌پذیر شدن، از رفتار اتساعی خاک جلوگیری به‌عمل آمده است.



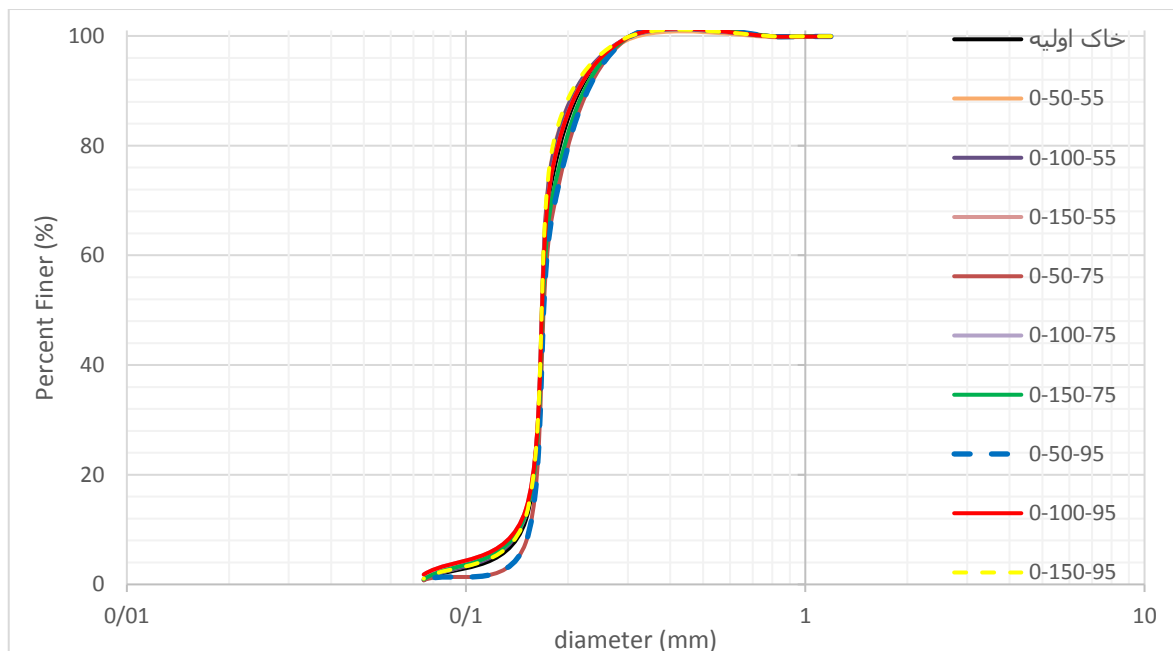
شکل ۴-۲۷ : نمودار تغییرات کرنش قائم برحسب کرنش برشی در $Dr75$ با ۱ درصد پت

با افزایش درصد پت نیز مشاهده می‌شود که کرنش قائم نمونه خاک، طی آزمایش کنترل شده و تغییرات ارتفاع کمتر می‌شود. همچنین در نمودار فوق، در تراکم نسبی و درصد پت ثابت نیز با افزایش سربار قائم، محدوده‌ی کرنش قائم کمتر در کرنش برشی بیشتری مشاهده می‌شود؛ این بدان معنی است که شکل‌پذیری نمونه افزایش یافته است.

۵-۲-۴ بررسی خردشدگی دانه‌های خاک

در تمامی آزمایش‌های انجام‌شده، خاک قبل و بعد از انجام آزمایش برش مستقیم دانه‌بندی شده و تأثیر افزایش تراکم نسبی و سربار قائم بر میزان خردشدگی دانه‌های خاک در دو حالت مسلح و غیرمسلح مورد بررسی قرار گرفته است.

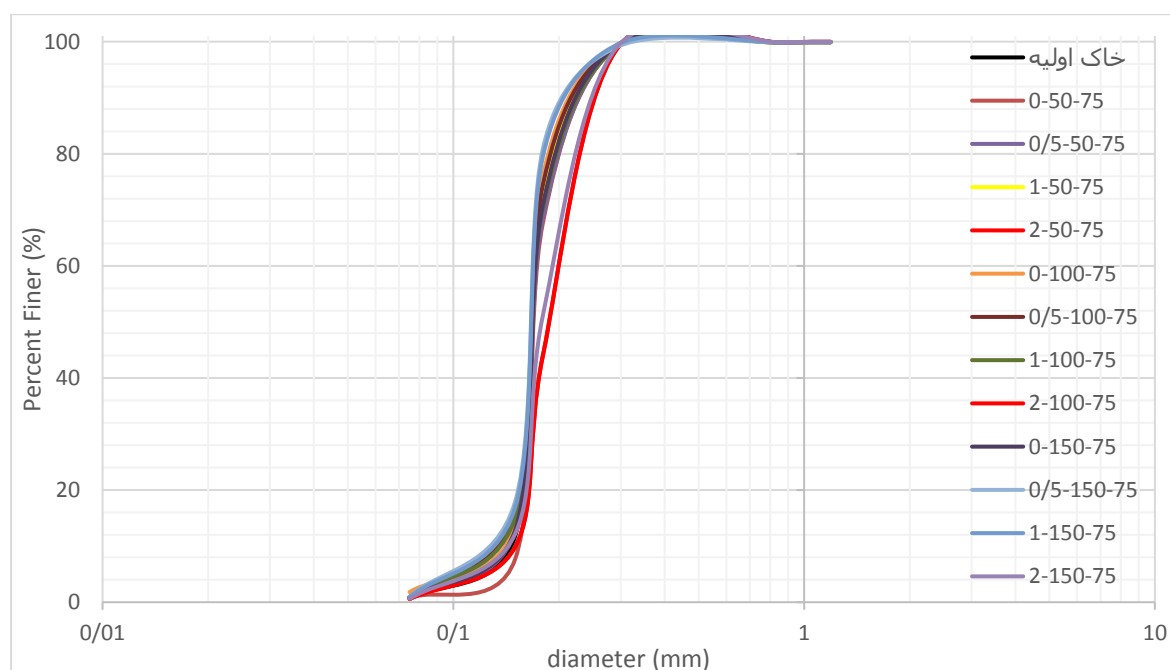
در شکل ۴-۳۴، مقایسه‌ی نمودار دانه‌بندی خاک غیرمسلح را قبل از آزمایش‌ها و بعد از هر آزمایش آورده شده است.



شکل ۴-۳۴ نمودار دانه‌بندی آزمایش‌های برش مستقیم انجام‌شده جهت بررسی خردشدگی خاک غیرمسلح

با توجه به شکل ۴-۳۴، افزایش تراکم نسبی و سربار قائم، تأثیر چندانی بر روی تغییر دانه-بندی خاک ماسه‌ای غیرمسلح مورد آزمایش نداشته است و محدوده‌ی قطر دانه‌ها تقریباً ثابت مانده است. در برخی موارد به دلیل عدم تغییر دانه‌بندی، نمودارهای مختلف بر روی هم منطبق شده‌اند.

برای بررسی میزان تأثیر مسلح کننده‌ی پت بر خردشدگی نیز تغییرات دانه‌بندی در نمونه‌های مسلح در سه تراکم و تحت سه سربار قائم ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ در ادامه بررسی شده که به‌عنوان مثال تغییرات در تراکم نسبی ۷۵ درصد در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۵ نمودار دانه‌بندی آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده جهت بررسی خردشدگی خاک مسلح در تراکم ۷۵ درصد

در نمودار دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۴-۳۵، نمونه‌ها با تراکم ثابت ۷۵ درصد و تحت سه سربار و با درصد پت‌های مخالف بررسی شده‌اند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، تغییرات دانه‌بندی بسیار کم و نامحسوس بوده‌اند و در روند کلی نمودار تغییر به‌خصوصی مشاهده نشده است.

۳-۴ جمع بندی فصل

در این فصل، با توجه به موضوع پژوهش، نتایج به دو دسته‌ی بررسی تأثیرات تغییر تراکم نسبی و بررسی تأثیر تغییرات سربار قائم تقسیم شده و مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدای فصل، نمودار آزمایش مرجع ارائه شده و در بخش‌های بعدی تأثیر تغییر شرایط نمونه خاک با آن‌ها مقایسه شد. علاوه بر این، نتایج تحقیقاتی با نمودارهای مشابه نیز با نتایج به دست آمده در این پژوهش مقایسه گردید. در بخش ۴-۲-۲، نشان داده شد که با افزایش درصد پت، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش یافته و در درصد‌های پت بالا، میزان افت مقاومت پس از گسیختگی بسیار کم بوده است. بررسی نتایج بخش ۴-۲-۳ نشان داد که افزایش تراکم نسبی، موجب افزایش سختی و مقاومت برشی بیشتر نمونه خاک در کرنش‌های کم شده است. با بررسی نمودارهای بخش ۴-۲-۲، نیز می‌توان نتیجه گرفت افزایش سربار موجب افزایش شکل‌پذیری برشی و افزایش حداکثر تنش برشی که نمونه تحمل می‌کند شده و همچنین افزایش توأم سربار و تراکم نسبی و درصد پت، موجب کنترل کرنش‌های قائم و نشست پذیر نمونه شده و از اتساع جلوگیری می‌کنند. میزان تأثیرگذاری عوامل مختلف بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک، در سه سطح " کم - متوسط - زیاد " در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. نتایج کلی حاصل از آزمایش‌ها و خروجی‌ها و نیز پیشنهادهایی در این زمینه، در فصل بعد ارائه شده است.

جدول ۴-۲ بررسی کیفی میزان تأثیرگذاری عوامل مختلف بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی

C	\emptyset	بهبود اثر تسلیح	افزایش شکل‌پذیری	حداکثر مقاومت برشی	پارامترهای مقاومتی
زیاد	زیاد	زیاد	کم	زیاد	تراکم نسبی (Dr)
زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	سربار قائم (σ)
زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	درصد پت

فصل ۵ جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

همان‌طور که در فصل‌های پیشین بیان شد، هدف از این پژوهش، بررسی رفتار مقاومتی خاک ماسه‌ای مسلح شده با پت تحت تراکم‌ها و سربارهای مختلف بوده و نیز بررسی بهبود پارامترهای مقاومتی خاک بعد از تسلیح با پت ضایعاتی بوده است. خاک ماسه‌ای مورد مطالعه از سواحل استحصالی بندر انزلی برداشت شده و به آزمایشگاه انتقال داده شد. طرح تسلیح مورد نظر نیز می‌تواند به‌عنوان یک طرح عملیاتی بهسازی بر روی ماسه‌ای استحصالی بندرانزلی انجام پذیرد. در قالب این پژوهش بنابراین بود تا تأثیر عواملی همچون تراکم نسبی نمونه خاک مسلح شده و سربار قائم روی آن، بر مقاومت برشی نمونه خاک مورد بررسی قرار گیرد. به‌منظور انجام تحلیل بر روی نمونه‌های مسلح شده و مقایسه‌ی آن با نمونه‌های غیرمسلح، بر روی نمونه‌ی خاک آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس انجام گرفت و نتایج در قالب نمودارهای استاندارد با تحلیل تنش‌ها و کرنش‌های برشی ارائه گردید.

۵-۲ جمع‌بندی نتایج

نتایج آزمایش‌ها مطابق موضوع، به دو دسته‌ی تأثیر تراکم نسبی و تأثیر سربار قائم بر خروجی آزمایش برش مستقیم، تقسیم شده و مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش تراکم نسبی در نمونه‌های مسلح و غیرمسلح موجب افزایش سختی و بالا رفتن تنش برشی حداکثری که نمونه تحمل می‌کند از حدود ۴۰ کیلو پاسکال در نمونه‌ی غیرمسلح در حداقل سربار و حداقل تراکم نسبی (نمونه‌ی مرجع) تا حدود ۱۲۰ کیلو پاسکال در سربار قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال

و تراکم نسبی ۹۵ درصد و ۱ درصد پت (درصد بهینه)، بهبود تأثیر مسلح کننده و کاهش افت مقاومت نمونه پس از گسیختگی می‌شود.

همچنین افزایش سربار قائم موجب افزایش شکل‌پذیری نمونه، وقوع حداکثر تنش برشی در کرنش‌های بالاتر شد که در نمونه‌ی مرجع با رفتار سست نمونه تقریباً تنش برشی حداکثر بی‌معنی بود و در تراکم‌های بالا به‌طور مثال تراکم ۷۵ درصد با ۱ درصد پت در نمودار شکل ۴-۱۸، با افزایش سربار از ۵۰ کیلو پاسکال به ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال، محدوده‌ی حداکثر تنش برشی از کرنش ۱ درصد به کرنش ۳/۵ درصد رسید. افزایش سربار همچنین موجب بهبود رفتار تنش-کرنش و کنترل کرنش قائم و نشست‌پذیری و کاهش رفتار اتساعی در نمونه‌های خاک شد که این امر در درصد پت‌های بیشتر، نمایان‌تر بود.

در مجموع طی آزمایش‌های برش مستقیم، بررسی عواملی همچون درصد مسلح کننده، میزان سربار قائم و تراکم نسبی نمونه نشان داد که برای بهسازی خاک ماسه‌ی استحصالی بندرانزلی، با توجه به نوع کاربرد، بهتر است بهسازی در تراکم نسبی ۹۵ درصد و 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 نمونه با ۱ درصد پت شد و تراکم را سخت‌تر کرده و صرفاً بار هزینه‌ی اضافی بر پروژه تحمیل می‌کرد.

۳-۵ ارائه‌ی 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- مسلح سازی خاک با دیگر شکل‌های پلی اتیلن ترفتالات، مثلاً شکل نواری یا به صورت الیاف.

مراجع

[۱] م. دادوند، ن. رنجبر مالی دره، ج. برنجیان، ا. نوری دلاور، "بررسی تاثیر پلی اتیلن ترفتالات (پت) بر رفتار مهندسی خاک های ماسه ای،" کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، "، ۱۳۹۶.

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

[۲] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, and A. Balasubramaniam, "Ground improvement at the Port of Brisbane, Australia using vertical drains and vacuum assisted preloading," in *Sound geotechnical research to practice: honoring Robert D. Holtz II*, 2013, pp. 539-549.

[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] N. E. Simons, B. K. Menzies, and M. C. Matthews, *A short course in geotechnical site investigation*. Thomas Telford, 2002.

[۶] P. G. Nicholson, *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann, 2014.

[۷] M. R. Hausmann, *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill New York, 1990.

[۸] ا. نوعی "عنوان: مروری اجمالی بر مهمترین روش های بهسازی و تثبیت خاک های مختلف".

[۹] O. Andersland, "Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture," in *Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement, 1979, vol. 1.*

[۱۰] D. H. Gray and H. Ohashi, "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand," *Journal of Geotechnical Engineering, vol. 109, no. 3, pp. 335-353, 1983.*

[۱۱] M. H. Maher and Y.-C. Ho, *Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite. 1994.*

[۱۲] 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. 977-983.۲۰۰۲ ,*

[۱۳] 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.*

[۱۴] 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.*

[۱۵] 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.*

[۱۶] 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.

[۱۷] 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.

[۱۸] 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.

[۱۹] ا. م. اژدرپور، م. ر. نیکودل، د. محمدی، "تاثیر افزایش براده های پلیمر پلی اتیلن ترفتالات (پت) بر روی ویژگی های مهندسی خاک های ماسه ای و رسی،" هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ۱۳۹۰.

Available: https://www.civilica.com/Paper-ICEGE07-ICEGE07_152.html

[۲۰] س. سیم نگار غ. کمالی، "بررسی آزمایشگاهی تسلیح ماسه با الیاف پلاستیک باطله پلی اتیلن ترفتالات (پت)،" ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۹۰.

Available: https://www.civilica.com/Paper-NCCE06-NCCE06_0307.html

[۲۱] R. Acharyya, A. Lahiri, S. Mukherjee, and P. Raghu, "IMPROVEMENT OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF CLAYEY SOIL WITH PET BOTTLE STRIPS," 2013.

[۲۲] 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.

[۲۳] D. Kalumba and F. Chebet, "Utilisation of polyethylene (plastic) shopping bags waste for soil improvement in sandy soils," *Proc. 18th ICSMGE*, 2013.

- [٢٤] E. Botero-Jaramillo, A. Ossa, G. Sherwell, and E. Ovando-Shelley, *Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)*. 2015.
- [٢٥] 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.
- [٢٦] G. Ranjan, R. M. Vasan, and H. D. Charan, *Behaviour of plastic-fibre-reinforced sand*. 1994, pp. 555-565.
- [٢٧] 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.
- [٢٨] 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.
- [٢٩] 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.
- [٣٠] 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.
- [٣١] 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.

[۳۲] م. عجمی، ا. جباری خامنه، س. عطایی، ا. خاکپور، "کاربرد روش استحصال زمین ازدیریا به شیوه خاکریزی و بهسازی آن با استفاده از روش تراکم دینامیکی،" همایش بین المللی معماری عمران وشهرسازی در آغاز هزاره سوم، ۱۳۹۴.

Available: https://www.civilica.com/Paper-IACUT01-IACUT01_1189.html

[۳۳] ه. پاک سرشت، م. شش پری، م. قهرمانی، م. نیکودل، "تراکم دینامیکی، روشی برای بهسازی خاکریز های عمیق در منطقه عسلویه،" هجدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، ۱۳۹۳.

Available: https://www.civilica.com/Paper-SGSII8-SGSII8_196.html

[۳۴] S. E. Manahan, *Hazardous waste chemistry, toxicology, and treatment*. CRC Press, 1990.

[۳۵] G. Pritchard, *Plastics additives: an AZ reference*. Springer Science & Business Media, 2012.

[۳۶] I. A. Ogundiran and Y. M. Adedeji, "Urban housing delivery: Expanded polystyrene panels initiative in Abuja, Nigeria," in *Procs 4th West Africa Built Environment Research (WABER) Conference, 2012*, pp. 1033-1042.

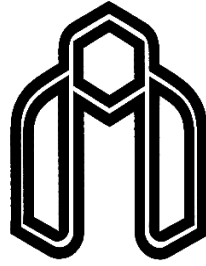
[۳۷] F. R. McDougall, P. R. White, M. Franke, and P. Hindle, *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*. John Wiley & Sons, 2008.

[۳۸] T. R. Curlee and S. Das, *Plastic waste: management, control, recycling ,and disposal (no. 201)*. Noyes Data Corporation, 1991.

Abstract

Improvement of problematic Soils and improvement of its engineering specifications such as bearing capacity, shear strength, and soil permeability can be done using different methods, which is soil preparation using plastic parts with a random distribution of one of these methods. Land extracted from the sea is one of the man-made engineering phenomena that is designed to exploit more of the coastal strip and its parametric resistance must be improved by engineering methods and soil improvement. The present research is aimed at the improvement of one of the crushed land in northern Iran in Bandar-e Anzali, using the sizes of 1×1 cm pet beverage bottles and its percentage by direct shear test, during which the effect of the relative density of the Reinforced sample and Normal stress on the sample has been analyzed in the experiments. The results showed that with increasing relative density, the shear stress of the maximum tolerance in the tested samples increased and with increasing vertical overhead, the formation of the sample increased. At the end of the experiment, the percentage of pet and optimum relative densities were determined for the improvement of Anzali port sandy sand.

Keywords : *Soil improvement, Sand, Extracted, Pet, Direct shear, Reltive density*



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

*Experimental study and Evaluation the Effects of
Relative Density and Normal Stress Increase on Shear
Parameters of Sandy Soil Reinforced With PET ,
Extracted in Anzali Port*

By:
Morteza M.Alinejad Omran

Supervisors:
Dr. Reza Naderi
Dr. Mohsen Kermati

April 2019