

کاربرد الیاف پلیمری تایر بازیافتی در بهسازی مقاومت برشی ماسه بابلسر

محمدحسن قائدشرفی^۱، پیلتن طباطبایی شوربچه^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز
^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

چکیده

بهسازی خاک‌های ضعیف در پروژه‌های عمرانی از جایگزینی آن‌ها با خاک مناسب مقرون به صرفه‌تر بوده و در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بهسازی و تسلیح با استفاده از الیاف با توزیع تصادفی روشی ساده، مؤثر و ارزان برای بهبود رفتارهای مقاومتی و تغییرشکلی خاک‌ها می‌باشد. در کاربرد الیاف برای بهسازی خاک می‌توان از الیاف بازیافتی بهره گرفت که در این صورت، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، راهکاری برای دفع مواد زائد نیز مهیا می‌شود. در این پژوهش، رفتارهای مقاومتی و تغییرشکلی ماسه بابلسر تسلیح شده با الیاف پلیمری تایر بازیافتی با استفاده از مجموعه‌ای از آزمون‌های برش مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته است. الیاف پلیمری تایر بازیافتی از فرآوری و بازیافت تایرهای (لاستیک‌های) مستعمل اتومبیل حاصل می‌شود. در این مقاله، مخلوط‌های الیاف-ماسه با مقدار وزنی ۲، ۴ و ۸٪ الیاف آماده شده و در تراکم‌های نسبی ۳۵، ۵۰، ۶۵ و ۸۰٪ در سه سربار عمودی ۳۲، ۵۷ و ۱۰۷ کیلوپاسکال مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند. نتایج تجربی حاصل نشان می‌دهد که ماسه مسلح شده با الیاف پلیمری تایر بازیافتی، در قیاس با ماسه مسلح نشده تمایل بیشتری به رفتار اتساعی نشان می‌دهد و همچنین مقاومت برشی بالاتری را تجربه می‌کند. ماسه مسلح شده با ۸٪ الیاف، تا ۲۵٪ افزایش مقاومت نشان می‌دهد. این روش بهسازی خاک ماسه‌ای در کاربری‌های متنوعی همچون سازه‌های حائل و خاکریزها تا پایدارسازی زیرساز راه‌ها و بستر پی‌ها قابل به کارگیری است.

کلیدواژه‌ها: بهسازی خاک، ماسه بابلسر، الیاف پلیمری تایر بازیافتی، مقاومت برشی، آزمون برش مستقیم.

۱- مقدمه

نظیر تراکم دینامیکی، پیش‌بارگذاری و غیره صورت می‌پذیرد (Han, ۲۰۱۵). از سوی دیگر، مسلح‌سازی مکانیکی خاک توسط ژئوسینتتیک‌ها^۱ (Koerner, ۲۰۱۲) یا افزودن الیاف با توزیع تصادفی انجام می‌شود (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲).

در دهه گذشته، کاربرد الیاف با توزیع تصادفی برای مسلح‌سازی خاک مورد توجه پژوهشگران متعددی قرار گرفته است (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲). برخی از مزایای به کارگیری الیاف با توزیع تصادفی در تسلیح خاک در قیاس با کاربرد ژئوسینتتیک‌ها عبارت‌اند از احتمال پایین‌تر تشکیل شدن صفحات ضعیف بزرگ، زوال کم مخاطره‌تر، سهولت اجرا در فضاهای کوچک و هندسه‌های پیچیده، انعطاف‌پذیری بیشتر و هزینه کمتر از بعد اقتصادی (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Yetimoglu و Salbas, ۲۰۰۳؛ Mirzababaei و همکاران، ۲۰۱۳).

در سال‌های اخیر بنا بر ملاحظات و نگرانی‌های مرتبط با پایداری محیط زیست و همچنین توسعه پایدار، پروژه‌های بهسازی و تسلیح خاک افزایش چشمگیری یافته‌اند. بدین ترتیب که برای خاک‌های ضعیف و نامناسب در پروژه‌های ژئوتکنیکی از رویکرد بهسازی، تثبیت یا تسلیح خاک استفاده شده و از جایگزینی خاک ضعیف به وسیله خاک‌های مناسب‌تر که می‌بایست از قرصه‌ها تملک و استحصال شده و به محل اجرای پروژه حمل گردند، پیشگیری می‌شود. از اصلی‌ترین اهداف بهسازی خاک می‌توان به افزایش مقاومت برشی و فشاری، کاهش نشست‌پذیری، افزایش ظرفیت باربری و کاهش نفوذپذیری خاک اشاره کرد (Bell و Kirsch, ۲۰۱۳).

تثبیت و بهسازی خاک معمولاً به وسیله اختلاط خاک با افزودنی‌ها (نظیر آهک، سیمان، خاکستر و ...) و یا به روش‌هایی

1. Geosynthetics

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۷۱-۳۷۳۵۴۵۰

و دوده‌های سمی غلیظ ناشی از آتش‌سوزی تایرها می‌تواند مشکلات جدی را برای ساکنین مناطق مسکونی نزدیک ایجاد نماید (Mohammadinia و همکاران، ۲۰۱۸)، بنابراین، مناطق دفع تایرهای بازیافتی باید از مناطق شهری فاصله زیادی داشته باشند. همچنین به دلیل مسائل زیست‌محیطی و برای مقابله با گرمایش زمین، تولید انرژی از طریق سوزاندن تایرها در کشورهای پیشرفته ممنوع شده است. نظر به موارد فوق، امروزه در اتحادیه اروپا نهادی با عنوان اتحادیه اروپایی بازیافت تایر^۴ برای مدیریت بازیافت تایرهای مستعمل ایجاد شده است. محصولات مختلف حاصل از تایرهای مستعمل، نظیر خرده لاستیک (Hataf و Rahimi، ۲۰۰۶)، تراشه لاستیک (Sabirian و همکاران، ۲۰۱۸) و رشته‌های لاستیک (Kalkan، ۲۰۱۳) برای مسلح‌سازی خاک‌ها استفاده شده‌اند.

دسته‌ای دیگر از محصولات مرتبط با بازیافت تایرهای مستعمل الیاف پلیمری تایر بازیافتی (RTPF)^۵ می‌باشند. این الیاف پلیمری به همراه سیم‌های فلزی، عامل اصلی تأمین مقاومت کششی در مصالح سازنده جداره تایر بوده و برای عملکرد صحیح تایر حیاتی هستند. الیاف پلیمری تایر بازیافتی به دلیل مقاومت کششی زیاد و اختلاط مناسب با خاک، گزینه مناسبی برای تسلیح خاک می‌باشند (Abbaspour و همکاران، ۲۰۱۹؛ Narani و همکاران، ۲۰۲۰؛ Valipour و همکاران، ۲۰۲۱).

ماسه‌های ساحلی (نظیر ماسه بابلسر) عموماً از مقاومت برشی و ظرفیت باربری اندکی برخوردار بوده و در شرایط اشباع مستعد پدیده روانگرایی می‌باشند. بهسازی ماسه‌های ساحلی با استفاده از مواد افزودنی یا تسلیح از راهکارهایی است که می‌تواند برای بهبود مقاومت ماسه‌های ریز و یکنواخت ساحلی به کار رود.

در این پژوهش، کاربرد الیاف پلیمری تایر بازیافتی (RTPF) برای بهسازی و تسلیح خاک ماسه بابلسر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، نخست ویژگی‌های الیاف و خاک معرفی شده و مشخصات مخلوط‌ها مورد بحث قرار گرفته است. سپس روش آزمون‌های برش مستقیم برای سنجش مقاومت برشی ماسه و مخلوط‌های الیاف-ماسه تشریح شده است. در ادامه، درباره نتایج آزمایش‌های برش مستقیم و تغییرات زاویه اصطکاک داخلی اوج و زاویه اتساع بیشینه بحث و بررسی شده است. سرانجام کارایی بهسازی ماسه با الیاف پلیمری تایر بازیافتی و همچنین مختصری از سازوکار تسلیح به واسطه الیاف بیان شده است.

انواع مختلفی از الیاف توسط پژوهشگران برای مسلح‌سازی خاک مورد استفاده قرار گرفته است. از میان الیاف طبیعی مناسب برای تسلیح خاک می‌توان به الیاف نارگیل (Sivakumar و Vasudevan، ۲۰۰۸)، نیشکر (Dang و همکاران، ۲۰۱۶)، کنف (Wang و همکاران، ۲۰۱۶) و نخل (Azadegan و همکاران، ۲۰۱۲) اشاره کرد. با وجود مقرون به صرفه بودن الیاف طبیعی، این گونه الیاف‌ها در قیاس با الیاف مصنوعی دوام کم‌تری دارند. الیاف مصنوعی به‌ویژه آن‌هایی که از مواد پلیمری ساخته شده‌اند، در محیط سازه‌های حاکی مقاومت بیشتری در برابر عوامل جوی و خورنده دارند. بدین ترتیب، طیف گسترده‌ای از الیاف مصنوعی برای مسلح‌سازی خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در این میان می‌توان به الیاف پلی‌اتیلن (Akbulut و همکاران، ۲۰۰۷؛ Tanzadeh و همکاران، ۲۰۱۷)، الیاف پلی‌پروپیلن (Consoli و همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۱۱، ۲۰۱۲، ۲۰۱۳؛ Le و Ple، ۲۰۱۲؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۵؛ Tang و همکاران، ۲۰۱۶؛ Wei و همکاران، ۲۰۱۸؛ Yang و همکاران، ۲۰۱۹؛ Roshan و همکاران، ۲۰۲۰)، الیاف پلی‌استر (Chaduvula و همکاران، ۲۰۱۷)، الیاف کویلر الفین حلقوی^۲ (Bahadori و Ghadr، ۲۰۱۹؛ Ghadr و همکاران، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰)، الیاف شیشه (Singh و Patel، ۲۰۱۹؛ Mishra و Mukherjee، ۲۰۱۹؛ Valipour و همکاران، ۲۰۲۱) و الیاف کربن (Gao و همکاران، ۲۰۱۷؛ Cui و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره کرد.

امروزه تمرکز پژوهشگران بر کاربرد الیاف بازیافتی و زائد برای مقاصد مسلح‌سازی خاک می‌باشد. پرواضح است که الیاف بازیافتی و زائد از الیاف نو و جدید ارزان‌تر بوده و از این دیدگاه کاربرد الیاف بازیافتی مقرون به صرفه است. از سوی دیگر با کاربرد الیاف بازیافتی و زائد، نیاز به دفع و انباشت مصالح مولد الیاف بازیافتی کمتر می‌شود که این کاهش بر سلامت محیط‌زیست تأثیرگذار بوده و در ضمن موجب کاستن هزینه‌ها نیز می‌شود. به‌عنوان نمونه، الیاف موکت بازیافتی برای تسلیح خاک به‌کاربرده شده‌اند (Mirzababaei و همکاران، ۲۰۱۳).

تایرهای (لاستیک) مستعمل اتومبیل بخش بزرگی از مواد زائد در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه هستند. افزایش روزافزون تایرهای مستعمل مشکلات جدی از بابت انباشت و مدیریت دفع این گونه زائدات را موجب شده است (Mohajerani و همکاران، ۲۰۲۰). تایرهای مستعمل به دلیل جنس خود عملاً تجزیه‌ناپذیر بوده و تا مدت‌های بسیار طولانی در محیط طبیعی باقی می‌مانند. به دلیل حجم و شکل تایرهای مستعمل اتومبیل، انباشت آن‌ها در خاکچال‌های^۳ مهندسی نیازمند فضای زیاد می‌باشد. از سوی دیگر، تایرها همواره در معرض آتش‌سوزی به‌ویژه در فصول گرم هستند

4. European Tire Recycling Association
5. Recycled Tire Polymer Fibers

2. Cyclic olefin copolymer
3. Landfills

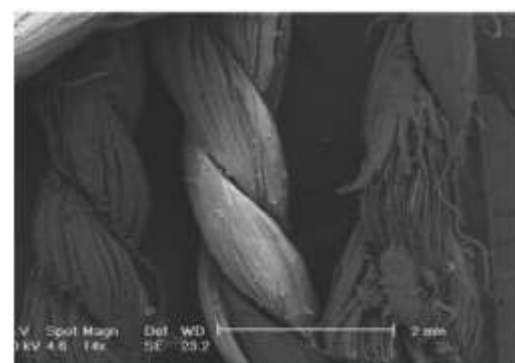
۲- ویژگی‌های مصالح

۲-۱- الیاف پلیمری تایر بازیافتی

الیاف پلیمری تایر بازیافتی مورد استفاده در این پژوهش از بازیافت و فرآوری تایرهای فرسوده اتومبیل حاصل شده‌اند. در شکل (۱- الف) تصویری از الیاف پلیمری تایر بازیافتی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقداری مواد لاستیک (سیاه‌رنگ) که در طی فرآیند بازیافت قابل جداسازی نیست، به این الیاف چسبیده است. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) ^۶ الیاف در شکل (۱- ب) نشان می‌دهد که هر الیاف پلیمری تایر بازیافتی به نوبه خود از تعداد زیادی رشته‌های پلیمری (از جنس نایلون ۶ یا ۶۶) بافته (تابیده) شده است. به علاوه پوشش مواد لاستیکی باقی‌مانده بر روی الیاف در شکل (۱- ب) به وضوح مشخص است. برخی ویژگی‌های فیزیکی الیاف پلیمری تایر بازیافتی در جدول (۱) ارائه شده‌اند. برای آزمایش‌های این پژوهش، الیاف بازیافتی به طول ۵ میلی‌متر بریده شده‌اند، که بدین ترتیب نسبت طول به قطر برای الیاف تقریباً ۷/۵ می‌باشد.



(الف)



(ب)

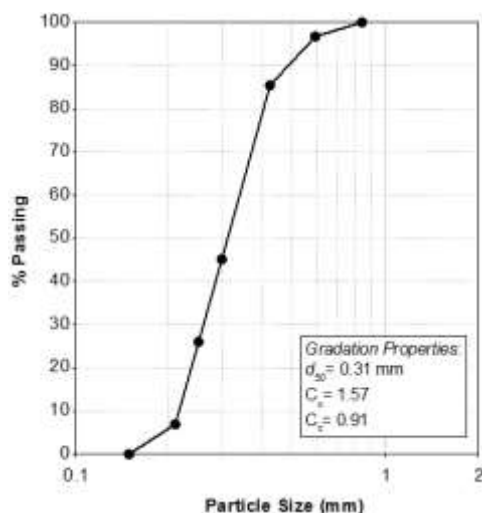
شکل ۱- الف) الیاف پلیمری تایر بازیافتی، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی الیاف تابیده از رشته‌های نایلون

۲-۲- خاک ماسه‌ای

در تمامی آزمایش‌ها از یک منحنی دانه‌بندی یکسان مطابق با شکل (۲)، برای خاک ماسه‌ای استفاده شده است. برپایه این شکل، دانه‌بندی ماسه به نسبت یکنواخت، عاری از ریزدانه (عبوری از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) و دربرگیرنده دامنه اندازه ریز تا متوسط می‌باشد. این ماسه بر اساس روش طبقه‌بندی متحد (USCS) ^۷ در گروه ماسه بدانه‌بندی شده (SP) ^۸ قرار می‌گیرد. برای بازتولید منحنی دانه-بندی ماسه (شکل (۲))، ماسه بابلسر پس از شستشو در آزمایشگاه بین نزدیک‌ترین الک‌های آزمایشگاهی تفکیک شده و مجدداً افزایش دانه‌ها به تناسب مخلوط شده‌اند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی الیاف پلیمری تایر بازیافتی

مقدار	ویژگی
۱/۱۴	توده ویژه
۰/۶۷ میلی‌متر	قطر متوسط
۶۰۰ مگاپاسکال	مقاومت کششی
۷۰ درجه سانتی‌گراد	نقطه اشتعال



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه بابلسر به کاررفته در این مقاله

ماسه بابلسر از نهشته‌های طبیعی ساحل دریای خزر نمونه-برداری شده، حاوی دانه‌های به نسبت گردگوشه بوده و در پژوهش‌های متعددی به کار رفته است (Mola-Abasi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ghadakpour و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lashkari و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lashkari و Jamali، ۲۰۲۱). در شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از دانه‌های ماسه بابلسر نشان داده شده است. همچنین بر پایه نتایج سنجش نیمه کمی پراش اشعه ایکس (XRD) ^۹ کانی‌های سازنده ماسه بابلسر عبارت‌اند از کوارتز

9. X-Ray Diffraction

6. Scanning Electron Microscope
7. Unified Soil Classification System
8. Poorly-graded Sand

میان شل، میانه تراکم و متراکم هستند. برای تعیین و سنجش تراکم نسبی (D_r)، لازم است که مقادیر نسبت تخلخل بیشینه (e_{max}) و کمینه (e_{min}) برای ماسه و همچنین مخلوط‌های الیاف-ماسه طبق روش‌های استاندارد (ASTM D4253) و (ASTM D4254) اندازه‌گیری شوند.

در شکل (۴)، تغییرات نسبت تخلخل بیشینه (e_{max}) و کمینه (e_{min}) برای ماسه و مخلوط‌های الیاف-ماسه نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار (درصد) الیاف (f_c) هر دو مقدار e_{min} و e_{max} افزایش می‌یابند که روند افزایشی نسبت تخلخل بیشینه مشهودتر است. افزایش نسبت تخلخل (که متناظر با کاهش وزن مخصوص خشک است) با بیشتر شدن مقدار الیاف به دلایل اصلی زیر می‌باشد:

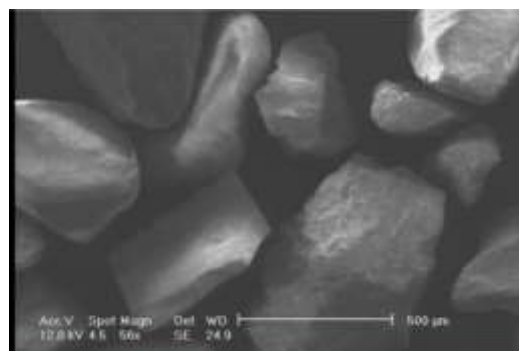
الف) با اضافه شدن الیاف، بخشی از خاک با الیاف جایگزین می‌شود، که به دلیل توده ویژه کم‌تر الیاف در قیاس با توده ویژه دانه‌های خاک، وزن مخصوص مخلوط کاهش و نسبت تخلخل افزایش می‌یابد.

ب) وجود الیاف موجب دشواری تراکم مخلوط شده و بخشی از انرژی اعمال شده برای تراکم توسط الیاف جذب می‌شود. این فرآیند در نهایت، باعث افزایش e_{min} می‌گردد. از سوی دیگر، وجود الیاف موجب می‌شود که تماس دانه‌های خاک کاهش یافته، منافذ بیشتری در مخلوط باقی‌مانده و e_{max} افزایش یابد.

۳- آزمایش‌های برش مستقیم

برای سنجش مقاومت برشی ماسه بابلسر و مخلوط‌های الیاف-ماسه بابلسر از آزمایش برش مستقیم استفاده شده است (ASTM D3080). دستگاه برش مستقیم دارای جعبه برش به ابعاد داخلی 100×100 میلی‌متر و ارتفاع ۲۲ میلی‌متر بود. تنش (سربار) عمودی (نرمال) به وسیله یک اهرم بارگذاری و وزنه‌ها تأمین شد، در حالی که تنش برشی (T) به روش کنترل جابه‌جایی برشی (u) توسط موتور الکتریکی اعمال گردید. نیروی برشی توسط نیروسنج (لودسل^{۱۵}) با دقت ۵ نیوتن و جابه‌جایی برشی و عمودی (v) توسط گیج‌های عقربه‌ای با دقت 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری شدند. بیشینه جابه‌جایی برشی قابل اعمال به نمونه در جعبه برش برابر با ۱۲ میلی‌متر بود که با نرخ بارگذاری ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد. در تمامی آزمایش‌های برش مستقیم، نمونه‌ها در سه تنش عمودی (σ_n) ۲۲، ۵۷ و ۱۰۷ کیلوپاسکال برش یافتند.

کلسیت^{۱۱} ($32/1$)، دولومیت^{۱۱} (13)، البیت^{۱۲} ($38/5$)، کلریت^{۱۳} (4) و مگنتیت^{۱۴} ($3/3$).



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی دانه‌های ماسه بابلسر

۳-۲- مخلوط‌های الیاف-ماسه

مخلوط‌های ماسه (مطابق با دانه‌بندی هدف ارائه شده در شکل (۲)) و مقادیر مختلف (f_c) الیاف پلیمری تاثیر بازیافتی مطابق با رابطه (۱) به صورت خشک مخلوط شده‌اند:

$$f_c(\%) = \frac{M_f}{M_f + M_s} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه بالا؛ f_c درصد جرمی الیاف در مخلوط الیاف-ماسه، M_f جرم الیاف و M_s جرم ماسه خشک می‌باشند. مخلوط‌های الیاف-ماسه با مقادیر الیاف (f_c) برابر با ۲٪، ۴٪ و ۸٪ جرمی در برنامه‌ریزی آزمایش‌های این مقاله مدنظر قرار گرفته‌اند. در اختلاط خشک الیاف و ماسه، نهایت دقت به کار برده شده تا از جداسازی الیاف و تجمع آن‌ها در یک بخش از نمونه پیشگیری شود. برای این مهم، الیاف تدریجاً به خاک افزوده شده است. رابطه (۱) که مقدار الیاف را نسبت به جرم کل نمونه آزمایشگاهی می‌سنجد، پیشتر توسط دیگر پژوهشگران در پژوهش‌های مرتبط با مخلوط‌های الیاف-خاک به کار رفته است (Kalkan, ۲۰۱۳؛ Valipour و همکاران، ۲۰۲۱).

۴-۲- نسبت تخلخل مخلوط‌های الیاف-ماسه

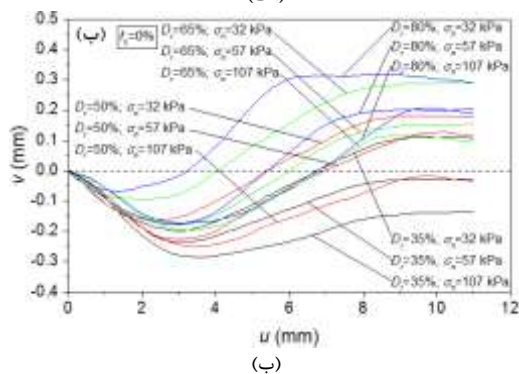
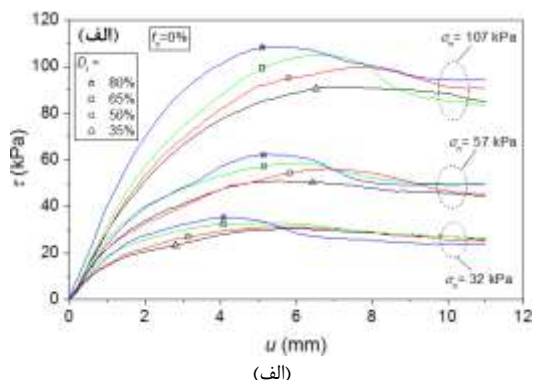
برای سنجش تاثیر الیاف در بهسازی مقاومت برشی ماسه‌ها نیاز است که نمونه‌های مختلف ماسه و مخلوط‌های الیاف-ماسه مورد آزمایش، در شرایط کنترل شده‌ای از تراکم نسبی (D_r) اولیه برش یابند. مقادیر منتخب برای تراکم نسبی ۳۵٪، ۵۰٪، ۶۵٪ و ۸۰٪ می‌باشند، که به ترتیب مبین تراکم نسبی نمونه‌های شل،

14. Magnetite
15. Loadcell

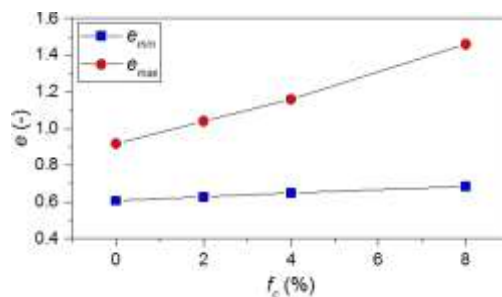
10. Calcite
11. Dolomite
12. Albite
13. Chlorite

برشی (u) متناظر با مقاومت برشی اوج کاهش می‌یابد (به عبارتی نمودار به سمت چپ کشیده می‌شود). ضمن این‌که اتساع با افزایش تنش عمودی در تراکم نسبی (D_r) اولیه ثابت کاهش می‌یابد (شکل ۵-ب)). بر پایه شکل (۵) مشاهده می‌شود که وقتی جابه‌جایی برشی (u) به اندازه کافی بزرگ باشد، مقاومت برشی در آزمایش‌های انجام‌شده در تنش عمودی (σ_n) برابر، مجانب‌وار به سمت یک مقدار مشابه مقاومت برشی یکسان همگرا می‌شوند. در این حالت، نمونه به صورت پیوسته در یک مقدار مقاومت برشی ثابت تغییر شکل می‌دهد و این مقدار ثابت مقاومت برشی مستقل از تراکم نسبی (D_r) اولیه نمونه می‌باشد. در این شرایط که حالت بحرانی یا پسماند نامیده می‌شود (Afzali-Nejad و همکاران، ۲۰۱۷؛ Lashkari و Jamali، ۲۰۲۱)، اتساع در نمونه متوقف شده (مماس بر منحنی تغییرات v برحسب u تقریباً افقی است) و مقاومت برشی پسماند (τ_r) کاملاً اصطکاکی بوده و تنها وابسته به دانه‌بندی خاک، شکل دانه‌ها و کانی‌های سازنده خاک است.

۴-۲- آزمایش‌های برش مستقیم مخلوط‌های الیاف- ماسه
نتایج آزمایش‌های برش مستقیم روی مخلوط‌های الیاف- ماسه با مقدار ۰.۲٪، ۰.۴٪، ۰.۸٪ الیاف به ترتیب در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند.



شکل ۵- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه:
الف) تغییرات تنش برشی (τ) برحسب جابه‌جایی برشی (u)،
ب) تغییرات جابه‌جایی عمودی (v) برحسب جابه‌جایی برشی (u)



شکل ۴- وابستگی نسبت تخلخل بیشینه (e_{max}) و کمینه (e_{min}) به مقدار الیاف برای مخلوط‌های الیاف- ماسه بابلسر

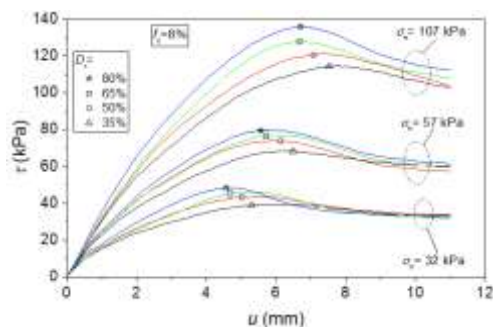
نمونه‌ها (اعم از ماسه یا مخلوط الیاف- ماسه) در سه لایه (هر یک به ضخامت تقریبی ۷ میلی‌متر) درون جعبه برش باسازی شدند. برای هر لایه، دانه‌بندی ماسه موردنیاز جداگانه (مطابق با شکل (۲)) مهیا شده و سپس بر پایه رابطه (۱) با مقدار موردنظر الیاف مخلوط می‌گردد. هر لایه مخلوط الیاف- ماسه توسط کیف درون جعبه برش ریخته شده و به وسیله کوبش (تا حد لازم) متراکم می‌شود. با توجه به این‌که بخشی از انرژی ناشی از کوبش هر لایه به لایه‌های زیرین منتقل می‌شود، برای دستیابی به تراکم یکنواخت در ارتفاع نمونه از روش تراکم کاهش یافته (Ladd، ۱۹۷۸) استفاده شد و میزان انرژی کوبشی هر لایه (که در حقیقت تعداد ضربات کوبه معرف آن است) به وسیله آزمون و خطا بر اساس تراکم هدف تعیین و تدقیق گردید.

درباره مقادیر تنش عمودی برگزیده شده برای آزمایش‌های برش مستقیم، لازم به گفتن است که بهسازی خاک‌ها با الیاف روشی برای بهبود ویژگی‌های خاک‌های به نسبت سطحی بوده و کمتر برای بهسازی لایه‌های عمیق به کار می‌رود. بدین ترتیب، بیشینه تنش عمودی (σ_n) برابر با ۱۰۷ کیلوپاسکال انتخاب شده که تقریباً معادل سربار ۵ تا ۶ متر خاک است.

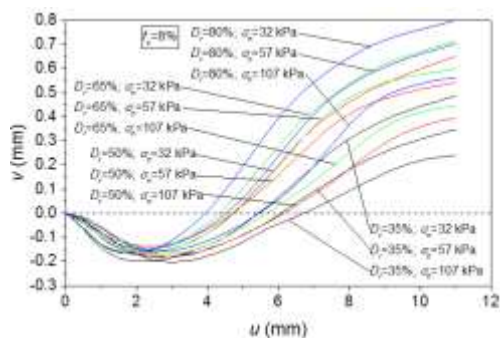
۴- یافته‌های آزمایشگاهی

۴-۱- آزمایش‌های برش مستقیم ماسه بابلسر

برای ماسه بابلسر تمیز (بدون الیاف)، نتایج آزمایش‌های برش مستقیم در شکل (۵) نشان داده شده است که در آن، رفتار مرسوم خاک‌های ماسه‌ای در برش مستقیم دیده می‌شود. مطابق شکل (۵-الف) با افزایش تنش عمودی (σ_n) در یک تراکم نسبی (D_r) اولیه ثابت، مقدار جابه‌جایی برشی (u) متناظر با مقاومت برشی اوج (τ_p) افزایش می‌یابد. در بررسی رفتار تغییر حجمی، مشاهده شد که با افزایش تنش عمودی، میزان اتساع کاهش می‌یابد و یا به عبارتی کم‌ترین مقدار تنش عمودی، متناظر با بیشترین گرایش به اتساع می‌باشد (شکل ۵-ب)). شکل (۵-الف) نشان می‌دهد که با افزایش تراکم نسبی (D_r) اولیه در یک تنش عمودی (σ_n) ثابت، مقاومت برشی اوج (τ_p) افزایش یافته و همچنین جابه‌جایی

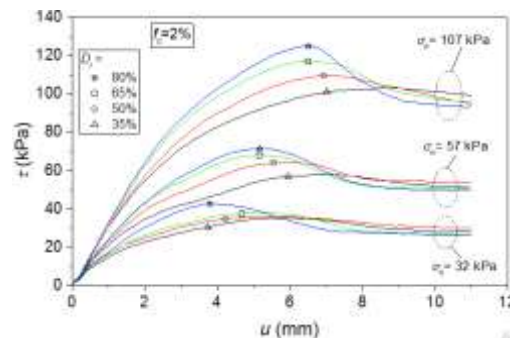


(الف)

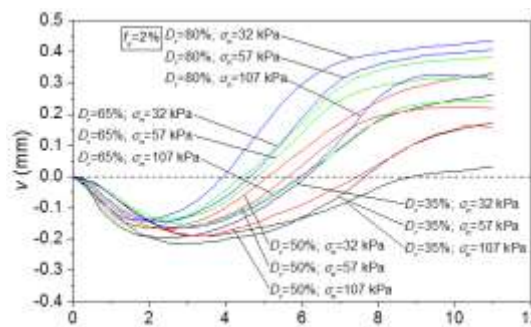


(ب)

شکل ۸- آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه مخلوط با ۸٪ الیاف: الف) تغییرات تنش برشی (τ) برحسب جابه‌جایی برشی (u)، ب) تغییرات جابه‌جایی عمودی (v) برحسب جابه‌جایی برشی (u)



(الف)



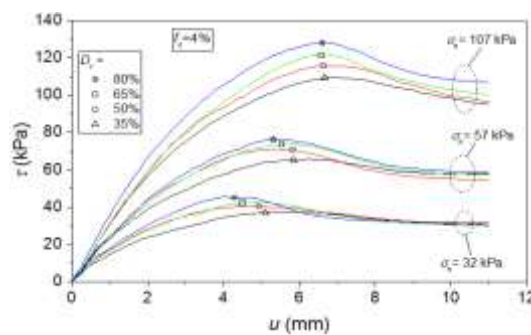
(ب)

شکل ۶- آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه مخلوط با ۲٪ الیاف: الف) تغییرات تنش برشی (τ) برحسب جابه‌جایی برشی (u)، ب) تغییرات جابه‌جایی عمودی (v) برحسب جابه‌جایی برشی (u)

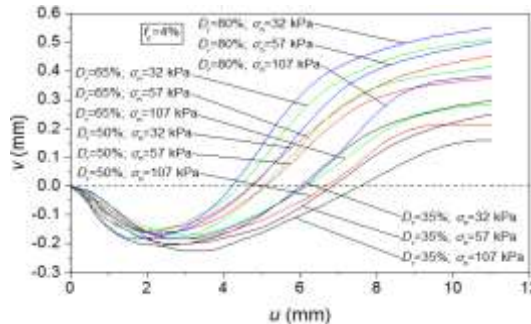
مشاهده می‌شود که الگوی کلی رفتارهای مقاومتی و تغییر حجمی مخلوط‌های الیاف-ماسه مشابه رفتار گزارش شده برای ماسه (شکل ۵)) می‌باشد. برپایه شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) می‌توان موارد زیر را بیان داشت:

الف) در یک مقدار الیاف (f_c) ثابت و تراکم نسبی (D_r) اولیه برابر، با افزایش سطح تنش عمودی (σ_n) مقاومت برشی اوج (τ_p) و پسماند (τ_r) افزایش می‌یابند. درباره تأثیر تراکم نسبی (D_r) اولیه می‌توان بیان داشت که در یک مقدار الیاف ثابت و سطح تنش عمودی برابر با افزایش تراکم نسبی اولیه، سختی اولیه، مقاومت برشی اوج (τ_p) و پسماند (τ_r) افزایش یافته و همچنین جابه‌جایی برشی (u) متناظر با مقاومت برشی اوج کاهش می‌یابد.

ب) در یک تراکم نسبی (D_r) اولیه ثابت و تنش عمودی (σ_n) برابر، با افزایش مقدار الیاف مقدار مقاومت برشی اوج (τ_p) و پسماند (τ_r) افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش مقدار الیاف، مقدار جابه‌جایی برشی (u) متناظر با مقاومت برشی اوج افزون می‌شود. به‌عنوان نمونه، در تراکم نسبی ۵۰٪ و سربار عمودی ۱۰۷ کیلوپاسکال، مقدار τ_p برای میزان الیاف ۲٪، ۴٪ و ۸٪ به ترتیب برابر با ۱۰۹/۸، ۱۱۵/۸ و ۱۲۱/۲ کیلوپاسکال است که در قیاس با ماسه بابلسر تمیز (شکل ۵)) حدود ۱۰٪، ۱۶٪ و ۲۱٪ بیشتر می‌باشد.

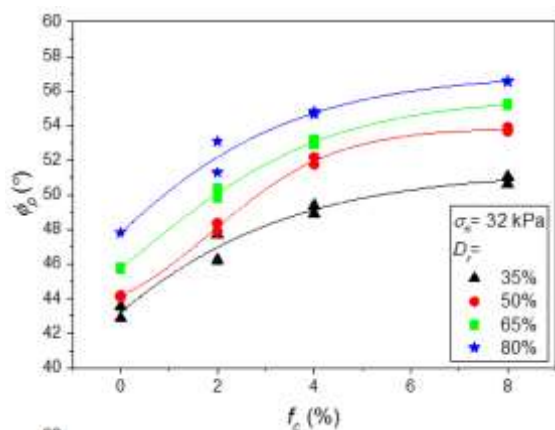


(الف)

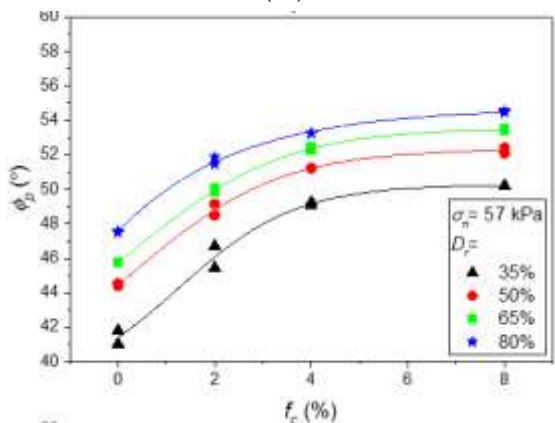


(ب)

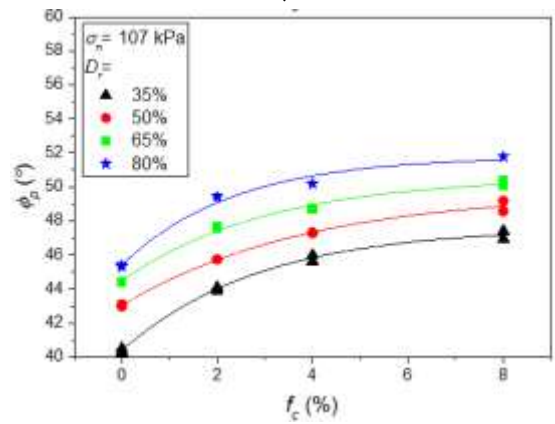
شکل ۷- آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه مخلوط با ۴٪ الیاف: الف) تغییرات تنش برشی (τ) برحسب جابه‌جایی برشی (u)، ب) تغییرات جابه‌جایی عمودی (v) برحسب جابه‌جایی برشی (u)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹- وابستگی زاویه اصطکاک داخلی اوج به مقدار الیاف

(f_c) در آزمایش‌های برش مستقیم با تنش عمودی (σ_n):

(الف) ۳۲ کیلوپاسکال، (ب) ۵۷ کیلوپاسکال، (ج) ۱۰۷ کیلوپاسکال

در رابطه با دقت نتایج آزمایشگاهی حاصل شده، مقایسه زاویه اصطکاک داخلی اوج با مقادیر گزارش شده در پژوهش‌های پیشین سودمند است. در این رابطه نورزاد و قریشی زرین کلایی (۱۳۹۳) برای ماسه بابلسر (با تراکم نسبی ۰.۷۰) مقدار زاویه اصطکاک داخلی اوج را برابر با ۴۰ درجه از آزمایش برش مستقیم و ۳۸

(ج) در بررسی رفتار تغییر حجمی، افزایش اتساع با افزایش الیاف دیده می‌شود. با افزایش مقدار الیاف (f_c) در جابه‌جایی برشی (u) پایین، میزان کاهش حجم به‌ویژه در تنش عمودی ۳۲ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار الیاف از صفر به ۸٪ در جابه‌جایی برشی بالا، افزایش جابه‌جایی عمودی (v) مشاهده می‌شود. در نمونه‌های ماسه تمیز، در پایان آزمایش اتساع متوقف شده و تغییرات v برحسب u تقریباً افقی می‌شود (شکل ۵)). با افزایش درصد الیاف از صفر به ۸٪ در جابه‌جایی برشی بالا، اتساع متوقف نشده و تغییرات v برحسب u شیب تندی دارد که این روند در تنش عمودی کمتر مشهودتر است (شکل ۸)).

۵- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی اوج

در آزمایش‌های برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی اوج (ϕ_p) از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\phi_p = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_p}{\sigma_n} \right) \quad (2)$$

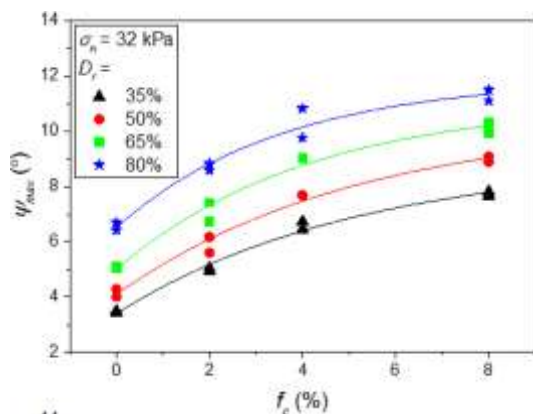
که در این رابطه، τ_p مقدار مقاومت برشی اوج و σ_n تنش عمودی می‌باشند. شکل (۹) نشان‌دهنده تغییرات زاویه اصطکاک داخلی اوج (ϕ_p) با افزایش مقدار الیاف (f_c) در مقادیر تراکم نسبی (D_r) اولیه ۳۵٪، ۵۰٪، ۶۵٪ و ۸۰٪ و تنش‌های عمودی (σ_n) مختلف می‌باشد. بر پایه شکل (۹) نتایج زیر قابل استنباط هستند:

(الف) در یک مقدار تراکم نسبی (D_r) اولیه ثابت، با افزایش مقدار الیاف (f_c) مقدار زاویه اصطکاک اوج (ϕ_p) افزایش می‌یابد. از نرخ افزایش ϕ_p با بیشتر شدن مقدار الیاف (f_c) کاسته می‌شود، به نحوی که افزایش ϕ_p نسبت به مقدار مربوط به ماسه تمیز تا ۲٪ الیاف چشمگیر بوده و از ۴٪ الیاف تا ۸٪ الیاف تغییرات ϕ_p ناچیز است.

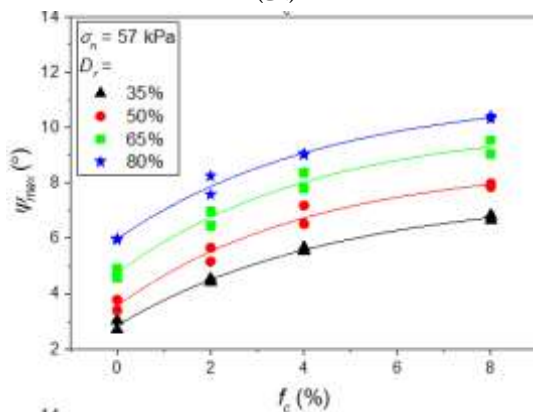
(ب) در یک مقدار الیاف (f_c) ثابت، با افزایش تراکم نسبی (D_r) اولیه مقدار ϕ_p بیشتر می‌شود. چنین رفتاری مشابه رفتار ماسه بدون الیاف بوده و دلیل آن این است که با بیشتر شدن مقدار D_r ، مقدار قفل و بست دانه‌های خاک بیشتر شده و زاویه اصطکاک اوج (ϕ_p) بیشتر می‌گردد.

(ج) با افزایش تنش عمودی (σ_n)، مقدار ϕ_p کاهش می‌یابد. برای σ_n برابر با ۳۲ کیلوپاسکال مقادیر ϕ_p محدود به ۵۶ درجه هستند. حال آنکه برای σ_n برابر با ۵۷ و ۱۰۷ کیلوپاسکال، مقدار ϕ_p به ترتیب در حدود ۵۴ درجه و ۵۱ درجه می‌باشد. کاهش مقدار ϕ_p با افزایش σ_n ناشی از رفتار غیرخطی پوش گسیختگی بر پایه مقاومت اوج در صفحه τ - σ_n می‌باشد.

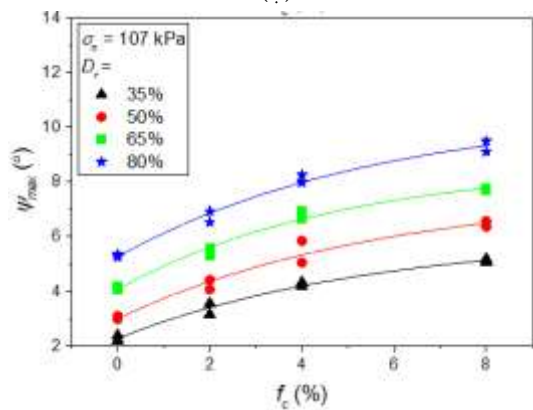
و مخلوط الیاف- ماسه باید مقدار ϕ_p در یک تراکم نسبی (D_r) اولیه یکسان سنجش شود. تغییرات کارایی اصطکاکی برای مخلوط‌های الیاف- ماسه با ۲٪، ۴٪، ۸٪ الیاف در شکل (۱۱) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به ازای هر مقدار از الیاف (f_c)، کارایی اصطکاکی (E_ϕ) با افزایش تنش عمودی کاهش می‌یابد. کاهش کارایی با افزایش تنش عمودی به دلیل افزایش مقدار ϕ_p ماسه با افزایش σ_n است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰- وابستگی زاویه اتساع بیشینه به مقدار الیاف (f_c) در آزمایش‌های برش مستقیم با تنش عمودی (σ_n): (الف) ۳۲ کیلوپاسکال، (ب) ۵۷ کیلوپاسکال، (ج) ۱۰۷ کیلوپاسکال

درجه از آزمایش سه‌محوری گزارش کرده‌اند، که با نتایج حاصل از پژوهش اخیر همخوانی قابل قبولی دارند.

۶- تغییرات زاویه اتساع بیشینه

در آزمایش‌های برش مستقیم، زاویه اتساع بیشینه (ψ_{max}) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\psi_{max} = \tan^{-1} \left(\frac{\delta v}{\delta u} \right)_{max} \quad (۳)$$

که در این رابطه؛ δu و δv به ترتیب نموهای متناظر جابه‌جایی برشی و عمودی حین برش بوده و $(\delta v / \delta u)_{max}$ مقدار بیشینه نسبت جابه‌جایی عمودی به برشی است. شکل (۱۰) نشان‌دهنده تغییرات زاویه اتساع بیشینه (ψ_{max}) با مقدار الیاف (f_c) در مقادیر تراکم نسبی (D_r) اولیه ۳۵، ۵۰، ۶۵ و ۸۰٪ و تنش‌های عمودی (σ_n) مختلف می‌باشد.

بر پایه شکل (۱۰) نتایج زیر قابل استنباط هستند:

الف) برای یک مقدار تراکم نسبی (D_r) اولیه ثابت، با افزایش مقدار الیاف (f_c) زاویه اتساع بیشینه (ψ_{max}) افزایش می‌یابد. شکل تغییرات ψ_{max} برحسب f_c گویای این مطلب است که نرخ افزایش ψ_{max} برای مقادیر کمتر f_c بیشتر بوده و با افزایش مقدار f_c از نرخ افزایش ψ_{max} کاسته می‌شود.

ب) در یک مقدار الیاف (f_c) ثابت، با افزایش تراکم نسبی (D_r) اولیه مقدار زاویه اتساع بیشینه (ψ_{max}) افزون می‌شود که این رفتار مشابه آنچه در ماسه تمیز روی می‌دهد است. بر پایه شکل (۹)، هرچه D_r بیشتر می‌شود، یک نقطه اوج مشخص‌تر در نمودار تغییرات τ برحسب u ایجاد می‌گردد، که ناشی از اتساع بوده و همراه با بیشتر شدن مقدار ϕ_p است.

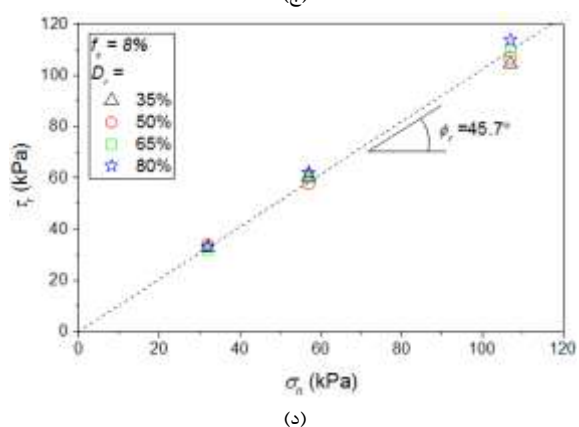
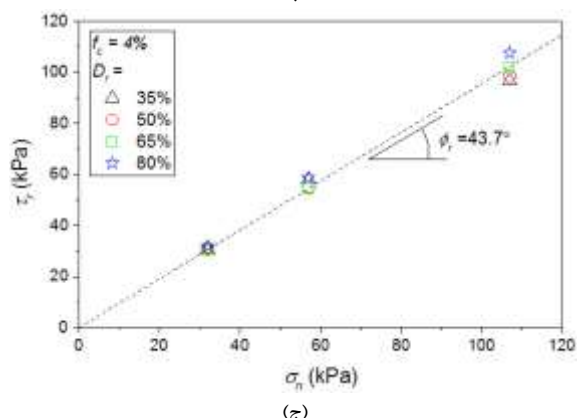
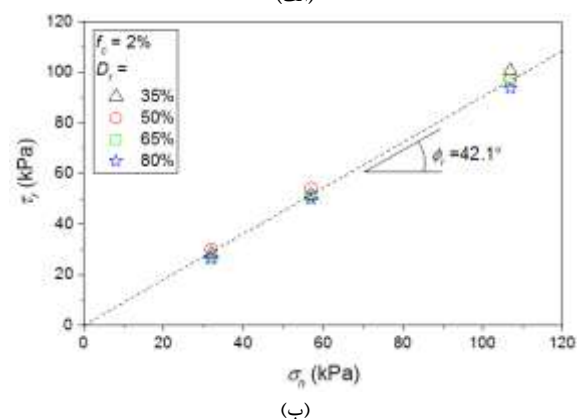
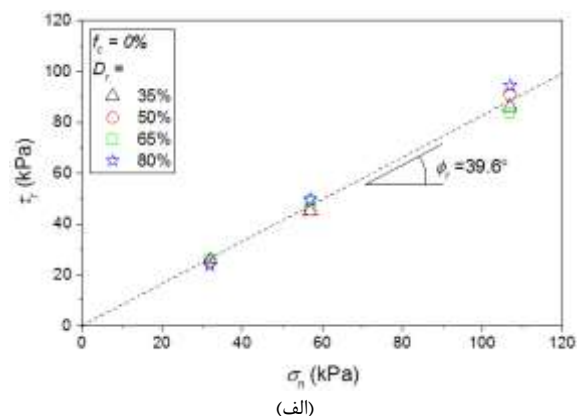
ج) با افزایش تنش عمودی، مقدار زاویه اتساع بیشینه (ψ_{max}) کاهش می‌یابد (شکل‌های (۶)، (۷) و (۸)).

۷- کارایی اصطکاکی

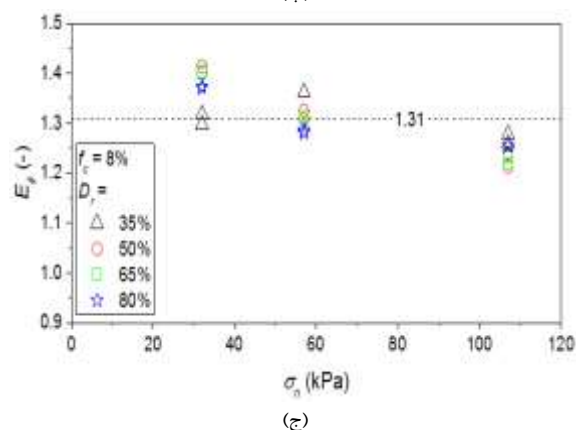
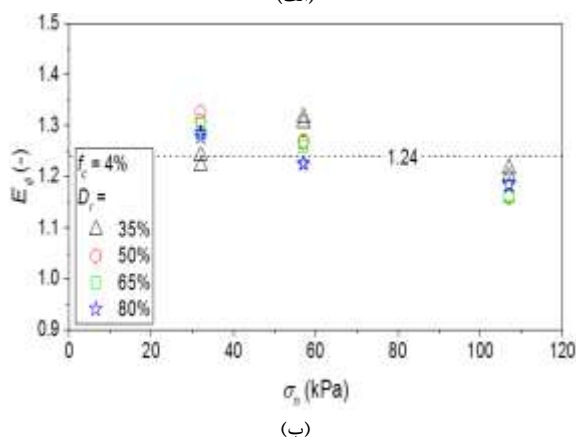
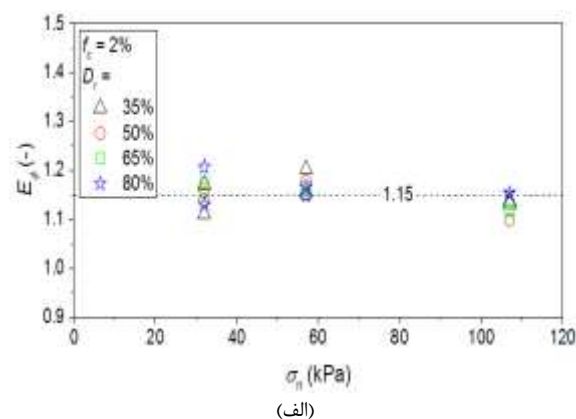
در بهسازی و تسلیح خاک‌های دانه‌ای، کارایی اصطکاکی مبین نسبت مقاومت برشی خاک بهسازی شده به مقاومت خاک بهسازی نشده است. بدین ترتیب کارایی اصطکاکی (E_ϕ) برای مخلوط‌های الیاف- ماسه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E_\phi = \frac{(\tan \phi_p)_{fiber-sand}}{(\tan \phi_p)_{sand}} \quad (۴)$$

که در این رابطه، $(\tan \phi_p)_{fiber-sand}$ ضریب اصطکاک ماسه مسلح شده با مقدار معینی از الیاف و $(\tan \phi_p)_{sand}$ ضریب اصطکاک ماسه مسلح نشده (تمیز) است. لازم به گفتن است که برای ماسه



به بیان دیگر، به دلیل بالا بودن ϕ_p ماسه در سربار ۱۰۷ کیلوپاسکال، تأثیر تسلیج با الیاف به نسبت دیگر مقادیر تنش عمودی (۳۲ و ۵۷ کیلوپاسکال) کمرنگ تر می شود. بر پایه شکل (۱۱) میانگین کارایی اصطکاکی (E_ϕ) برای مخلوط های الیاف- ماسه در مقادیر الیاف (۲٪، ۴٪، ۸٪) به ترتیب برابر با ۱/۱۵، ۱/۲۴ و ۱/۳۱ می باشد. بدین ترتیب، افزایش مقدار الیاف باعث افزایش میزان کارایی اصطکاکی می گردد.



شکل ۱۱- بررسی وابستگی کارایی اصطکاکی مخلوط های الیاف- ماسه به مقدار الیاف به ازای: الف) ۲٪ الیاف، ب) ۴٪ الیاف، ج) ۸٪ الیاف

شکل ۱۲- بررسی وابستگی زاویه اصطکاک داخلی پسماند (ϕ_r) به مقدار الیاف در مخلوط های الیاف- ماسه: الف) ماسه مسلح نشده، ب) ۲٪ الیاف، ج) ۴٪ الیاف، د) ۸٪ الیاف

۸- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی پسماند

در آزمایش‌های برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی پسماند (ϕ_r) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_r}{\sigma_n} \right) \quad (5)$$

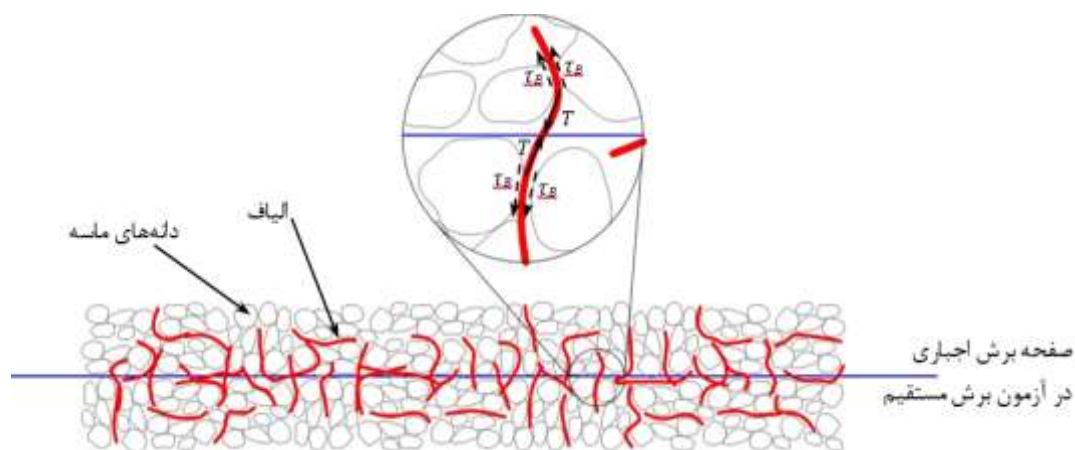
که در این رابطه، τ_r مقاومت برشی پسماند و σ_n تنش عمودی می‌باشند. در شکل (۱۲) مقادیر زاویه اصطکاک داخلی پسماند برای ماسه مسلح نشده (شکل (۱۲-الف)) و مخلوط‌های الیاف-ماسه با ۰.۲٪ (شکل (۱۲-ب))، ۰.۴٪ (شکل (۱۲-ج)) و ۰.۸٪ (شکل (۱۲-د)) الیاف نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار الیاف در مخلوط، زاویه اصطکاک داخلی پسماند افزایش یافته که نشان از مستحکم‌تر ساختار باربر خاک دارد. در قیاس با ماسه بدون الیاف (۳۹/۶ درجه)، بهسازی با ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۸٪ الیاف پلیمری تأثیر بازیافتی به ترتیب موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی پسماند به مقادیر ۴۲/۱، ۴۳/۷ و ۴۵/۷ درجه می‌شود. بدین ترتیب با ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۸٪ الیاف افزوده شده به ماسه مقدار زاویه اصطکاک داخلی پسماند به میزان حدود ۰.۶٪، ۱.۰٪ و ۱.۵٪ افزایش می‌یابد.

۹- سازوکار اندرکنش الیاف-ماسه

در پژوهش‌های پیشین درباره خاک‌های مسلح شده با الیاف، سازوکار اندرکنش الیاف و خاک به تفصیل مورد بحث قرار گرفته

است (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Tang و همکاران، ۲۰۰۷؛ Tang و همکاران، ۲۰۱۰؛ Tang و همکاران، ۲۰۱۶؛ Kalkan، ۲۰۱۳؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۷؛ Gray و Ohashi، ۱۹۸۳؛ Li، ۲۰۰۵). اثر مسلح‌سازی الیاف بیشتر به واسطه بسیج شدن مقاومت کششی در الیاف ایجاد می‌شود (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲). در شکل (۱۳) طرح‌واره قرارگیری الیاف در خاک در حین برش نمونه در آزمون برش مستقیم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با اعمال جابه‌جایی برشی نسبت به صفحه برش اجباری، الیاف دچار اعوجاج و کشیدگی می‌شوند، بنابراین مادامی‌که الیاف از خاک بیرون کشیده نشوند، در الیاف نیروی کششی (T) بسیج می‌شود که موجب مقاومت در برابر جابه‌جایی نسبی مماسی دو نیمه خاک در جعبه برش (شکل (۱۳)) شده و در نهایت مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد.

مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از خاک وابسته به مقاومت برشی (TB) در سطح تماس الیاف با دانه‌های خاک است، که به نوبه خود تابع اصطکاک و دگرچسبی بین الیاف با دانه‌های خاک و فرو رفتن دانه‌های خاک در بدنه الیاف می‌باشد (Tang و همکاران، ۲۰۰۷). عوامل مؤثر نام برده در بالا وابسته به ویژگی‌های الیاف (مانند ساختار و زبری سطحی، قطر، طول، مدول الاستیک و ...)، خاک (نظیر کانی‌شناسی، شکل دانه‌ها، زبری سطح دانه‌ها، ...) و همچنین محصورشدگی (Hejazi و همکاران، ۲۰۱۲) و تراکم (Wang و همکاران، ۲۰۱۷) خاک می‌باشند.



شکل ۱۳- طرح‌واره اندرکنش الیاف با دانه‌های ماسه در سطح برش

این‌گونه از پسماندها در زمین شده و از سوی دیگر با بهسازی ویژگی‌های مقاومتی خاک، می‌تواند باعث صرفه‌جویی اقتصادی در عملیات و هزینه‌های عمرانی گردد. مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش به قرار زیر هستند:

۱۰- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم به بررسی تأثیر مسلح‌سازی ماسه بابل‌س با الیاف پلیمری تأثیر بازیافتی (RTPF) بر رفتارهای مقاومتی و تغییر حجمی، پرداخته شد. تسلیح خاک به وسیله الیاف بازیافتی از یکسو موجب دفن هدفمند

Using a Vibratory Table", ASTM International, 2016, West Conshohocken, PA, www.astm.org

ASTM D4254-16, "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", ASTM International, 2016, West Conshohocken, PA, www.astm.org

ASTM D3080 / D3080M-11, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions", ASTM International, 2011, West Conshohocken, PA, www.astm.org

Azadegan O, Kaffash AE, Yaghoubi MJ, Pourebrahim GR, "Laboratory study on the swelling, cracking and mechanical characteristics of the palm fiber reinforced clay", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 17, 47-54.

Chaduvula U, Viswanadham BVS, Kodikara J, "A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay", *Applied Clay Science*, 2017, 142, 163-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.008>.

Chen M, Shen SL, Arulrajah A, Wu HN, Hou DW, Xu YS, "Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay", *Geotextiles & Geomembranes*, 2015, 43 (6), 515-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.05.004>.

Consoli NC, Montardo JP, Donato M, Prietto PD, "Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2004, 8 (2), 77-90. <https://doi.org/10.1680/grim.2004.8.2.77>.

Consoli NC, de Moraes RR, Festugato L, "Split tensile strength of monofilament polypropylene fiber-reinforced cemented sandy soils", *Geosynthetics International*, 2011, 18 (2), 57-62. doi: 10.1680/gein.2011.18.2.57.

Consoli NC, Bellaver Corte M, Festugato L, "Key parameter for tensile and compressive strength of fibre-reinforced soil-lime mixtures", *Geosynthetics International*, 2012, 19 (5), 409-414. <http://dx.doi.org/10.1680/gein.12.00026>.

Consoli NC, Rizzatti de Moraes R, Festugato L, "Variables controlling strength of fibre-reinforced cemented soils", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2013, 166 (4), 221-232. <http://dx.doi.org/10.1680/grim.12.00004>.

Cui H, Jin Z, Bao X, Tang W, Dong B, "Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms", *Construction & Building Materials*, 2018, 189, 286-95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>.

Dang LC, Fatahi B, Khabbaz H, "Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres", *Procedia Engineering*, 2016, 143, 658-665. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.093.

Gao L, Zhou Q, Yu X, Wu K, Mahfouz AH, "Experimental study on the unconfined compressive strength of carbon fiber reinforced clay soil", *Marine*

(۱) بهسازی ماسه بابلر با الیاف پلیمری تایر بازیافتی با الگوی پخش تصادفی در توده خاک باعث افزایش مقاومت برشی اوج به-واسطه افزایش زاویه اصطکاک داخلی بیشینه می‌شود.

(۲) مسلح‌سازی ماسه بابلر با الیاف پلیمری تایر بازیافتی زاویه اتساع بیشینه را افزایش می‌دهد. دیده شد که زاویه اتساع بیشینه با افزایش مقدار الیاف و همچنین کاهش تنش عمودی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار زاویه اتساع بیشینه در تنش عمودی ۳۲ کیلوپاسکال و مقدار الیاف ۸٪ اندازه‌گیری گردید.

(۳) با افزایش درصد جرمی الیاف در تراکم نسبی (D_r) اولیه یکسان، جابه‌جایی برشی (u) متناظر با مقاومت برشی اوج افزون می‌شود. با افزایش تراکم نسبی اولیه در درصد الیاف یکسان، جابه‌جایی برشی متناظر با مقاومت برشی اوج کاهش یافت.

(۴) از دیدگاه بهبود مقاومت برشی اوج و زاویه اتساع بیشینه، بیشترین تأثیر مسلح‌سازی ماسه بابلر با الیاف پلیمری تایر بازیافتی در کمترین مقدار تنش عمودی و بیشترین درصد الیاف دیده شد.

ماسه بابلر بهسازی شده با الیاف می‌تواند در سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر خاک‌ریز پشت دیوارهای نگهبان، سازه‌های خاک مسلح، زیرساز راه‌های فرعی و سبک به‌کاربرده شود.

۱۱- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از شرکت فرآور لاستیک ایساتیس برای تأمین الیاف پلیمری تایر بازیافتی تشکر می‌کنند.

۱۲- مراجع

نورزاد ر، قریشی زرین‌کلایی س ط، "مقایسه مشخصات مقاومتی ماسه مسلح شده با رشته‌های مجزا با توزیع تصادفی در دستگاه‌های سه‌محوری و برش مستقیم"، هشتمین کنگره ملی- مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت، ۱۳۹۳.

Abbaspour M, Aflaki E, Nejad FM, "Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement", *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207, 1059-1071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.253>.

Afzali-Nejad A, Lashkari A, Shourijeh, PT, "Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces", *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45 (1), 54-66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.07.005>.

Akbulut S, Arasan S, Kalkan E, "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", *Applied Clay Science*, 2007, 38 (1-2), 23-32. doi:10.1016/j.clay.2007.02.001.

ASTM D4253-16e1, "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils

- Li C, "Mechanical response of fiber-reinforced soil", PhD Thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin, 2005.
- Mirzababaei M, Miraftab M, Mohamed M, McMahon P, "Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139 (3), 483-493. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792.
- Mohajerani A, Burnett L, Smith JV, Markovski S, Rodwell G, Rahman MT, Kurmus H, Mirzababaei M, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Maghool F, "Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review", *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155, p. 104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>.
- Mohammadinia A, Disfani MM, Narsilio GA, Aye L, "Mechanical behaviour and load bearing mechanism of high porosity permeable pavements utilizing recycled tire aggregates", *Construction & Building Materials*, 2018, 168, 794-804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.179>.
- Mola-Abasi H, Khajeh A, Naderi Semsani S, "Effect of the ratio between porosity and SiO₂ and Al₂O₃ on tensile strength of zeolite-cemented sands", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30 (4), p.04018028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002197](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002197).
- Mukherjee K, Mishra AK, "Hydro-mechanical properties of sand-bentonite-glass fiber composite for landfill application", *KSCIE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23 (11), 4631-4640. doi: 10.1007/s12205-019-2015-9.
- Narani SS, Abbaspour M, Hosseini SMM, Aflaki E, Nejad FM, "Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers", *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247, p.119151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119151>.
- Patel SK, Singh B, "Shear strength and deformation behaviour of glass fibre-reinforced cohesive soil with varying dry unit weight", *Indian Geotechnical Journal*, 2019, 49 (3), 241-254. <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0323-5>.
- Ple O, L'e TNH, "Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay", *Geotextiles & Geomembranes*, 2012, 32, 111-116, doi:10.1016/j.geotexmem.2011.11.004.
- Roshan K, Janalizadeh Choobasti A, Soleimani Kutanaei S, "Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition", *Transportation Geotechnics*, 2020, 23. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100359>.
- Saberian M, Mehrinejad Khotbehsara M, Jahandari S, Vali R, Li J, "Experimental and phenomenological study of the effects of adding shredded tire chips on geotechnical properties of peat", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 12 (4), 347-356. doi:10.1080/19386362.2016.1277829.
- Georesources & Geotechnology, 2017, 35 (1), 143-148, doi: 10.1080/1064119X.2015.1102184.
- Ghadakpour M, Choobasti AJ, Kutanaei SS, "Investigation of the Kenaf fiber hybrid length on the properties of the cement-treated sandy soil", *Transportation Geotechnics*, 2020, 22, p.100301. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100301>.
- Ghadr S, Bahadori H, "Anisotropic behavior of fiber-reinforced sands", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31 (11), 04019270. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002917](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002917).
- Ghadr S, Bahadori H, Assadi-Langroudi A, "Anisotropy in sand-fibre composites and undrained stress-strain implications", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2019, 5 (3), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40891-019-0174-x>.
- Ghadr S, Samadzadeh A, Bahadori H, Assadi-Langroudi A, "Liquefaction resistance of fibre-reinforced silty sands under cyclic loading", *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48 (6), 812-827. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.07.002>.
- Gray H, Ohashi H, "Mechanics of fiber-reinforcement in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1983, 109, 335-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(335\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335)).
- Han J, "Principles and practice of ground improvement", John Wiley & Sons, 2015.
- Hataf N, Rahimi MM, "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds", *Construction & Building Materials*, 2006, 20 (10), 910-916. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.06.019.
- Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A, "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers", *Construction & Building Materials*, 2012, 30, 100-116. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045.
- Kalkan E, "Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils", *Applied Clay Science*, 2013, 80, 117-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.06.014>.
- Kirsch K, Bell A, "Ground improvement", 3rd ed. Boca Raton (Florida): CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- Koerner RM, "Designing with geosynthetics", 6th ed. (vol. 1). Xlibris Corporation, 2012.
- Ladd R, "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 1978, 1 (1), 16-23. doi: 10.1520/GTJ10364J.
- Lashkari A, Falsafizadeh SR, Shourijeh PT, Alipour MJ, "Instability of loose sand in constant volume direct simple shear tests in relation to particle shape", *Acta Geotechnica*, 2020, 15, 2507-2527. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00909-4>.
- Lashkari A, Jamali V, "Global and local sand-geosynthetic interface behavior", *Géotechnique*, 2021, 71 (4), 346-367, <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.P.109>.

- Sivakumar Babu GL, Vasudevan AK, "Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20 (9), 571-577. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:9\(571\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:9(571)).
- Tang C, Shi B, Gao W, Chen F, Cai Y, "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25 (3), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>.
- Tang, CS, Shi B, Zhao, LZ, "Interfacial shear strength of fiber reinforced soil", *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28 (1), 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.001>.
- Tang CS, Wang DY, Cui YJ, Shi B, Li J, "Tensile strength of fiber-reinforced soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28 (7), 04016031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546).
- Tanzadeh J, Vafaeian M, Yusefzadeh-Fard M, "Laboratory study on the performance of hybrid macro soil fiber reinforced mixture", *Construction & Building Materials*, 2017, 134, 50-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.053>.
- Valipour M, Shourijeh PT, Mohammadinia A, "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement", *Transportation Geotechnics*, 2021, 27, p.100474. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>.
- Wang YX, Guo PP, Shengbiao S, Haiping Y, Binxiang Y, "Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute", *Geotechnical & Geological Engineering*, 2016, 34 (4), 1079-88. doi: 10.1007/s10706-016-0028-4.
- Wang YX, Guo PP, Ren WX, Yuan BX, Yuan HP, Zhao YL, Shan S-B, Cao P, "Laboratory investigation on strength characteristics of expansive soil treated with jute fiber reinforcement", *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17 (11), 04017101. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000998.
- Wei L, Chai SX, Zhang HY, Shi Q, "Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber", *Construction & Building Materials*, 2018, 172, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248>.
- Yang KH, Wei SB, Adilehou WM, Ho HC, "Fiber-reinforced internally unstable soil against suffusion failure", *Construction & Building Materials*, 2019, 222, 458-73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.142>.
- Yetimoglu T, Salbas O, "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers", *Geotextiles & Geomembranes*, 2003, 21 (2), 103-110. doi:10.1016/S0266-1144(03)00003-7.

EXTENDED ABSTRACT

The Application of Recycled Tire Polymer Fibers for Shear Strength Improvement of Babolsar Sand

Mohammad Hassan Ghaedsharafi, Piltan Tabatabaie Shourijeh *

Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz 7155713876, Iran

Received: 08 February 2022; Review: 07 March 2022; Accepted: 17 March 2022

Keywords:

Soil improvement, Babolsar sand, Recycled Tire Polymer Fiber (RTPF), Shear strength, Direct shear test.

1. Introduction

In recent years soil reinforcement and improvement techniques have gained widespread applications in different aspects of geotechnical engineering. It is apparent that reinforcing/stabilizing a weak/problematic soil is more economical than replacing it with select fills. A contemporary method of soil reinforcement/improvement is the application of fibers-natural or synthetic (polymeric) with random distribution within the soil (Hejazi et al. 2012). More recently, there has been a trend in utilization of recycled fibers for soil reinforcement/improvement purposes (Valipour et al. 2021). This treatment dwells on the application of Recycled Tire Polymer Fibers (RTPFs) for enhancing the shear strength of Babolsar sand.

2. Material Properties and testing scheme

The Recycled Tire Polymer Fibers (RTPFs) are derived from the recycling of automobile tires. An image of the RTPFs is presented in Fig. 1. The RTPFs have a specific gravity of 1.14 and average diameter of 0.67 mm. For the testing program the fibers were cut into 5 mm long pieces; hence, the fiber length to diameter ratio is 7.5. Babolsar sand, that is type of sand sampled from the coast of the Caspian Sea, was implemented in the laboratory testing. The sand was washed and sieved into uniform fractions, from which the target gradation (see Fig. 2) was proportioned for testing. The sand comprises sub-rounded to rounded particles and is classified as SP according to USCS (Unified Soil Classification System).

The fiber-sand mixtures were admixed from dry fractions of the sand and fibers according to:

$$f_c(\%) = \frac{M_f}{M_f + M_s} \times 100 \quad (1)$$

Where; f_c is the fiber content (percent), and M_f and M_s are the dry mass of fibers and sand, respectively. The fiber contents of $f_c=2\%$, 4% and 8% were selected for the fiber-sand mixtures.

Direct shear tests on the sand and fiber-sand mixtures were conducted using a conventional direct shear apparatus in accordance with ASTM D3080. The direct shear box accommodates a specimen that is 100 mm × 100 mm in plane and 22 in height. Both the sand and fiber-sand mixtures were reconstituted using the dry tamping method in three layers (each ≈7 mm thick) with the initial (i.e. pre-shear) relative densities of $D_r=35\%$, 50% , 65% and 80% . The direct shear tests were performed with the shear displacement rate of 1 mm/min to the maximum shear displacement of 12 mm, under the normal stresses of $\sigma_n=32$, 57 and 107kPa.

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.ghaedsharafi@sutech.ac.ir (Mohammad Hassan Ghaedsharafi), piltan@sutech.ac.ir (Piltan Tabatabaie Shourijeh).

3. Results and discussion

3.1. Effect of fibers on peak internal friction angle

From the results of the direct shear tests the variations in peak internal friction angle (ϕ_p) are determined for the sand and fiber-sand mixtures. Accordingly, *i*) for any arbitrary initial relative density (D_r) the peak friction angle increases with the increase in fiber content (f_c), *ii*) at a constant fiber content (f_c) the increase in D_r results in higher peak internal friction angle, and *iii*) the increase in normal stress (σ_n) leads to lower ϕ_p (this outcome stems from the nonlinear peak failure envelope in the τ - σ_n plane).

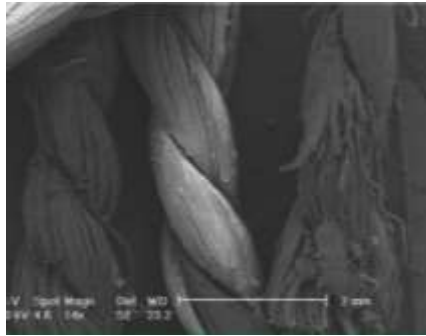


Fig. 1. Scanning Electron Microscope of Recycled Tire Polymer Fibers (RTPFs)

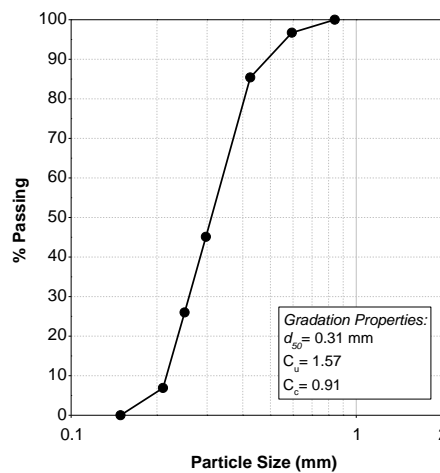


Fig. 2. Babolsar sand gradation implemented for testing program

3.2. Effect of fibers on maximum dilation angle

The results of direct shear tests enable the evaluation of changes in the maximum dilation angle (ψ_{max}) for sand and fiber-sand mixtures. Based on the experimental findings; *i*) for any arbitrary initial relative density (D_r) the maximum dilation angle increases with the increase in fiber content (f_c), *ii*) at a constant fiber content (f_c) the increase in D_r results in higher maximum dilation angle, and *iii*) the increase in normal stress (σ_n) leads to lower ψ_{max} .

3.3. Effect of fibers on frictional efficiency

In the reinforcement/stabilization of granular soils the frictional efficiency, E_ϕ , is defined as the ratio of peak strength for the reinforced soil to peak strength of the original soil, that is:

$$E_\phi = \frac{(\tan\phi_p)_{fiber-sand}}{(\tan\phi_p)_{sand}} \quad (2)$$

For the fiber-sand mixtures with $f_c= 2\%$, 4% and 8% , the average frictional efficiency is 1.15, 1.24 and 1.31, respectively. Hence, the increase in fiber content results in a stronger reinforced/stabilized sand with higher shear strength.

3.2. Effect of fibers on residual internal friction angle

Test results imply that the residual internal friction angle (ϕ_r) increases with the increase in fiber content (f_c); that is to say, fiber addition to the sand is conducive to a stronger load bearing structure for the mixture. In comparison to Babolsar sand with $\phi_r=39.6^\circ$, the fiber-sand mixtures with $f_c=2\%$, 4% and 8% have residual internal friction angles of 42.1° , 43.7° and 45.7° , respectively. Therefore, 2% , 4% and 8% fiber addition eventuates to $\approx 6\%$, $\approx 10\%$ and $\approx 15\%$ increase in the residual internal friction angle (ϕ_r), respectively.

4. Mechanism of fiber-soil interaction

A schematic illustration of the fiber-sand interaction is shown in Fig. 3. Accordingly, when the fiber-sand mixture is subject to shear displacement along the shear plane, the fibers undergo distortion. Hence, as long as the fibers are not pulled out of the sand the tensile stress (T) is mobilized within the fibers, which impedes the shear displacement along the shear plane and enhances the shear strength. The fiber pullout from the sand is amenable to the shear stress (τ_B) at fiber-sand contact that in turn depends on soil gradation, particle shape, relative density, etc.

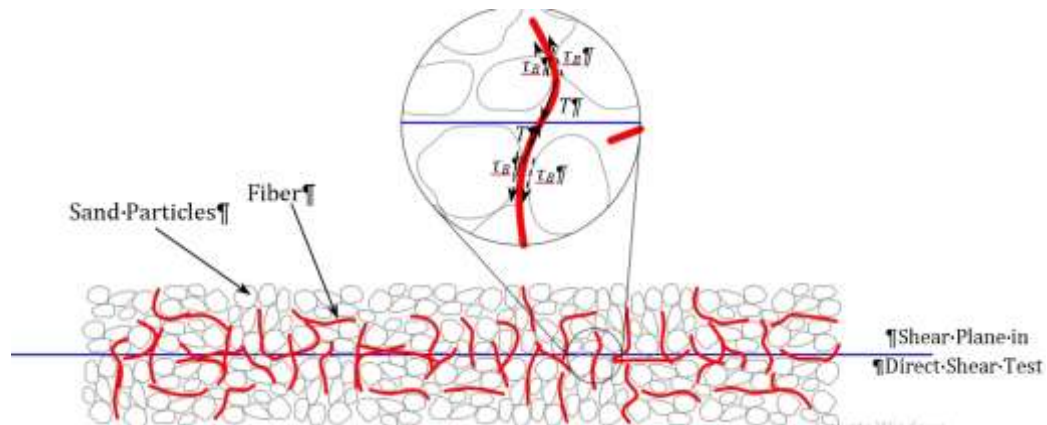


Fig. 3. Fiber-sand interaction at the shear plane in direct shear tests

5. Conclusions

Direct shear tests were performed on Babolsar sand and mixtures of Babolsar sand with Recycled Tire Polymer Fibers (RTPFs). The main conclusions drawn from the experimental results are as follows:

- 1- The introduction of RTPFs with random distribution to Babolsar sand results in the increase of peak shear strength as reflected by the increase in peak internal friction angle.
- 2- Reinforcement of Babolsar sand with RTPFs leads to an increase in the maximum dilation angle.
- 3- From the viewpoint of soil reinforcement/stabilization the addition of RTPFs is most effective at lower normal/vertical surcharge pressures and higher RTPF content.
- 4- The sand reinforced with RTPFs may be implemented in applications such as backfills behind retaining walls, reinforced soil walls, and sub-base layers in pavements with low traffic.

6. References

- ASTM D3080 / D3080M-11, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions", ASTM International, 2011, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A, "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers", *Construction & Building Materials*, 2012, 30, 100-116.
- Valipour M, Shourijeh PT, Mohammadinia A, "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement", *Transportation Geotechnics*, 2021, 27, p.100474.