

بررسی تأثیر طول و درصد وزنی الیاف بر مقاومت برشی خاک تثبیت شده با الیاف مصنوعی با توزیع تصادفی

احد اوریا*، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
سعید زرداری، دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

Email: aouria@mail.com, aouria@uma.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۴/۰۳ - پذیرش: ۹۶/۰۲/۱۸

چکیده

در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی و راه‌سازی، خاک محل دارای خواص مهندسی مورد نیاز مانند مقاومت برشی یا سختی کافی نبوده و نیاز به اصلاح و بهبود مشخصات آن دارد. روش‌های مختلف مکانیکی و شیمیایی برای تثبیت خاک وجود دارند که استفاده از الیاف مسلح کننده مانند ژئوتکستایل‌ها، ژئوگریدها و الیاف‌های طبیعی یا مصنوعی از روش‌های تثبیت مکانیکی خاک می‌باشد. در دهه‌های اخیر، استفاده از الیاف‌های مصنوعی منفصل با توزیع تصادفی برای بهبود خواص مکانیکی خاک، به دلیل سهولت استفاده از این الیاف‌ها، هزینه‌های کم تولید و زمان کوتاه اجرا متداول گردیده است. در این تحقیق، مقاومت برشی ماسه سیلت‌دار تثبیت شده با الیاف مصنوعی منفصل شیشه با توزیع تصادفی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. تمرکز این تحقیق بیشتر روی تأثیر طول و درصد وزنی الیاف بر پارامترهای مقاومتی خاک شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بوده است. نمونه‌های خاک تثبیت شده با الیاف به طول‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر با درصد‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در ۲۸ حالت مختلف تهیه شده و مقاومت برشی آنها با استفاده از دستگاه برش مستقیم تعیین گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌گردد. افزایش مقاومت برشی خاک اصلاح شده با الیاف مصنوعی در اثر افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بوده است. با افزایش درصد وزنی و طول الیاف، ابتدا مقاومت برشی خاک افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. ولی در هر حال، مقاومت برشی خاک تثبیت شده بیشتر از خاک غیر مسلح می‌باشد. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در شرایط بهینه به ترتیب حدود ۳۰ و ۴۰ درصد افزایش داشته است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مقدار بهینه درصد وزنی الیاف ۰/۴ درصد و طول بهینه آنها ۱۰ میلی‌متر بوده است.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، الیاف مصنوعی شیشه، مقاومت برشی، برش مستقیم

۱. مقدمه

استفاده از ورقه‌های ژئوتکستایل، ژئوگرید و مواد کامپوزیت، تسمه‌های فولادی، تراشه‌های فلزی و یا الیاف مصنوعی باعث افزایش تنش محصورکننده و در نتیجه افزایش مقاومت و کاهش تراکم‌پذیری توده خاک می‌شوند. در روش‌های مکانیکی که سیستم تسلیح شامل ورقه‌های پیوسته مسلح کننده مانند ژئوتکستایل، ژئوگرید یا الیاف پلیمری می‌باشد، توده خاک به‌عنوان یک محیط غیرهمگن که فصل مشترک متمایزی بین مصالح مسلح کننده و خاک ایجاد می‌شود، عمل می‌کند. در این روش‌ها، با توجه به مقاومت بسیار بالای ورقه-های مسلح کننده نسبت به خاک، تأمین طول مهاری مسلح کننده‌ها جهت جلوگیری از بیرون کشیدگی آنها از توده خاک از مهمترین عوامل کنترل کننده طراحی می‌باشد (اوریا و همکاران، ۲۰۱۶). در روش‌های تثبیت مکانیکی، که المان‌های مسلح کننده کوتاه بوده و به-صورت پراکنده و تصادفی در داخل توده خاک توزیع می‌شوند، رفتار مکانیکی توده خاک تثبیت شده را در مقیاس معمولی می‌توان همگن در نظر گرفت. تاریخچه استفاده از الیاف مسلح کننده با توزیع تصادفی در ساخت و سازها در ایران به عهد باستان برمی‌گردد که به‌صورت استفاده از ملات کاه و گل در بسیاری از آثار باستانی به جای مانده دیده می‌شود (توفیق و همکاران، ۲۰۱۲). این الیاف، برخلاف ژئوتکستایل‌ها و مسلح کننده‌های ورقه‌ای، به‌سادگی مانند آهک و سیمان با خاک مخلوط شده و باعث افزایش مقاومت برشی و شکل‌پذیری خاک می‌شوند (لی و همکاران، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر نیز استفاده از الیاف مصنوعی یا طبیعی برای تقویت خاک‌ها با توجه به مزیت‌های نسبی آنها افزایش چشمگیری داشته است که باعث شده مطالعات وسیعی در خصوص تعیین مشخصات این مصالح در جریان باشد.

الرفاعی (۱۹۹۱) و الرفاعی و السحبانی (۱۹۹۸) رفتار استاتیک و دینامیک ماسه مسلح شده با الیاف

خاک، اصلی‌ترین مصالح مورد استفاده در پروژه‌های ساختمانی می‌باشد که به‌عنوان بستر سازه اصلی در ساختمان‌ها و یا به‌عنوان خود سازه اصلی مانند سدهای خاکی، شیروانی‌ها و یا زیرسازی راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اکثر پروژه‌های ساختمانی و راه‌سازی، خاک محل پروژه دارای ویژگی‌های فنی و مکانیکی مورد نیاز نبوده و بهبود برخی پارامترهای خاک اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. ساده‌ترین روش تقویت مشخصات مکانیکی خاک‌ها متراکم کردن و افزایش وزن مخصوص خشک و کاهش تخلخل آنها می‌باشد. با توجه به اینکه توده خاک یک محیط سه فازی شامل ذرات جامد، فضای خالی بین ذرات جامد و آب می‌باشد، لذا مشخصات مکانیکی آن نیز تابع مشخصات مکانیکی تک تک این سه فاز، نحوه اندرکنش آنها و چگونگی تماس ذرات جامد می‌باشد. متراکم کردن خاک تنها باعث کاهش تخلخل و بهبود نحوه قفل و بست ذرات خاک می‌شود. لذا، در صورتی که بهبود خاک با متراکم کردن آن نتیجه مطلوب به همراه نداشته باشد، استفاده از سایر روش‌های تثبیت خاک اجتناب-ناپذیر خواهد بود. روش‌های تثبیت خاک را می‌توان به دو گروه عمده تثبیت شیمیایی و مکانیکی تقسیم‌بندی نمود. تثبیت شیمیایی که با استفاده از سیمان، آهک، گچ و سایر افزودنی‌های شیمیایی صورت می‌گیرد، در واقع تغییر مشخصات شیمیایی ذرات جامد و یا ایجاد پیوندهایی میان آنها که اغلب با سیمانته شدن ایجاد می‌شود باعث تقویت رفتار توده خاک می‌شود. از مشکلات روش‌های شیمیایی تثبیت خاک می‌توان به زمان نسبتاً طولانی لازم برای ایجاد این تغییرات و تبعات زیست‌محیطی آنها اشاره نمود (سریع السیری و موهانتان، ۲۰۰۹).

روش‌های تثبیت مکانیکی خاک‌ها با ایجاد نوعی پیوند مکانیکی بین ذرات و یا قسمتی از توده خاک با

کاهش یافته، ولی همچنان شکل‌پذیری خاک افزایش می‌یابد. شاه‌نظری و همکاران (۱۳۸۸) تأثیر افزودن الیاف بر مدول برشی خاک را بررسی نموده و نتیجه گرفتند که این تأثیر فقط در سطوح تنش زیاد قابل مشاهده می‌باشد. فروغی اصل و نادری زرنقی (۱۳۹۱) تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری و کششی بتن غلطکی را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که افزودن حدود ۱٪ الیاف باعث افزایش ۲۰٪ مقاومت کششی بتن غلطکی می‌شود. شوکلا و همکاران (۲۰۱۵) تراکم‌پذیری و نفوذپذیری خاک مسلح شده با الیاف را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که رفتار تراکم‌پذیری این خاک‌ها به درصد حجمی الیاف بستگی دارد. نورزاد و زرین-کلایی (۲۰۱۵) رفتار ماسه مسلح شده با الیاف را در شرایط برش مستقیم و سه محوره مقایسه نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که تأثیر افزودن الیاف بر مقاومت برشی خاک در آزمایش‌های سه محوره بیشتر از آزمایش‌های برش مستقیم مشهود می‌باشد که نتایج آنها دقیقاً برعکس نتایج مطالعات مشابه انجام شده توسط کلاریا و وتورلو (۲۰۱۶) بوده است. تنگ و همکاران (۲۰۱۶) نیز مقاومت کششی خاک چسبنده مسلح شده با الیاف را بررسی نموده و نتیجه گرفتند که اضافه نمودن الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و شکل‌پذیری خاک می‌شود.

بررسی نتایج تحقیقات انجام شده در زمینه مقاومت برشی خاک‌های مسلح شده با الیاف نشان می‌دهد که با توجه به تصادفی بودن توزیع الیاف در داخل توده خاک، عوامل بسیاری که در نحوه قرارگیری نسبی الیاف و ذرات جامد خاک دخالت می‌کنند، در مشخصات مکانیکی خاک اصلاح شده نیز تأثیر خواهند داشت. به نظر می‌رسد که مغایرت نتایج بعضی تحقیقات نیز ناشی از عدم کنترل این عوامل بوده باشد. لذا، در این تحقیق، تأثیر دو عامل بسیار مهم طول و نسبت وزنی الیاف به خاک در مقاومت برشی خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته

پلیمری را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفتند که گسیختگی این نوع مصالح را می‌توان به دو صورت گسیختگی خود الیاف یا لغزش بین الیاف و ذرات خاک بیان نمود که در نهایت مقاومت برشی خاک تثبیت شده با الیاف به مقاومت کششی الیاف و اصطکاک بین خاک و الیاف بستگی خواهد داشت. یتیم‌آغلو و سالباس (۲۰۰۳) مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف را در شرایط برش مستقیم مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که تأثیر این نوع مسلح‌کننده‌ها در خاک‌های سست بیشتر از خاک‌های متراکم می‌باشد. کنسولی و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر مسیر تنش در شرایط سه محوره را بر مقاومت برشی ماسه مسلح بررسی کرده و نتیجه گرفتند که معیار گسیختگی مورد استفاده برای این نوع خاک‌ها بایستی به صورت دو خطی باشد. صادق و همکاران (۲۰۱۰) مقاومت برشی ماسه ریز و درشت مسلح شده با الیاف را مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که نتایج این نوع مقاوم سازی و آزمایش‌های تعیین مشخصات این نوع خاک‌ها وابستگی زیادی به مقیاس نمونه‌ها و روش تهیه آنها دارد. العدیلی و همکاران (۲۰۱۲) استفاده از الیاف طبیعی تنباکو را برای تثبیت خاک بررسی نموده‌اند. نتایج مطالعات آنها نشان داده که برای حصول حداکثر مقاومت برشی و مدول الاستیک خاک، استفاده از مقدار معینی الیاف ضروری می‌باشد. لیرر و همکاران (۲۰۱۱) روشی تحلیلی برای تخمین مقاومت خاک مسلح شده با الیاف ارائه داده‌اند. کریشنا رائو و نصر (۲۰۱۲) مقاومت فشاری محدود نشده و نسبت باربری کالیفرنای (CBR) ماسه سیلت‌دار مسلح شده با الیاف را بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که افزودن الیاف باعث افزایش شکل‌پذیری و سختی خاک می‌شود. آناگنوستوپولوس و همکاران (۲۰۱۳) براساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم روی ماسه مسلح شده با الیاف نتیجه گرفتند که با افزایش تراکم خاک، افزایش مقاومت ناشی از افزودن الیاف

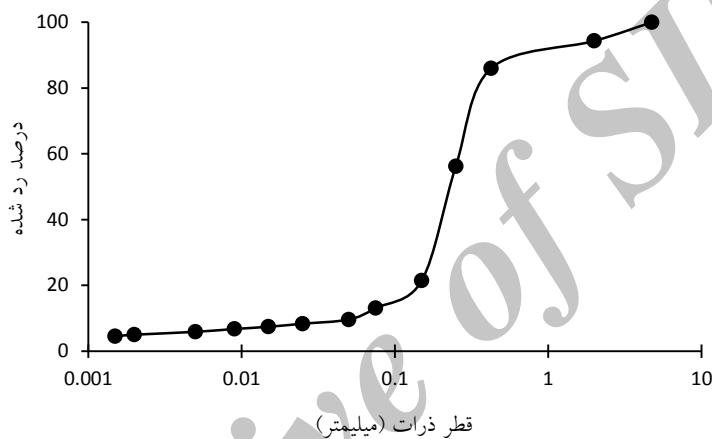
از انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری طبق طبقه-بندی سیستم متحده براساس استاندارد ASTM D2487 در رده ماسه سیلت‌دار (SM) قرار می‌گیرد. نمودار دانه-بندی این خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌های تعیین چگالی نسبی ذرات و پروکتور (برای تعیین حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه)، به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D854 و ASTM D1557 انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

است. در این بررسی آزمایشگاهی، از دستگاه برش مستقیم برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک اصلاح شده با الیاف مصنوعی با توزیع تصادفی استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق از محوطه دانشگاه محقق اردبیلی برداشته شده است. خاک مورد نظر پس



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده

جدول ۱. مشخصات خاک مورد استفاده

رطوبت	وزن مخصوص خشک	G_s	D_{60}	D_{30}	D_{10}	ریزدانه	ماسه
(%)	حداکثر (kN/m^3)		(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)
۱۵/۳	۱۹/۲۵	۲/۶۵	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۰۵۵	۱۳/۱	۸۶/۹

۲-۲. الیاف

الیاف مورد استفاده در این آزمایش از نوع الیاف مصنوعی پلیمری شیشه^۱ ساخت شرکت سی ان بی ام^۲ بوده است. این الیاف به صورت ورقه‌های طولی است که قبل از مخلوط کردن با خاک در طول‌های مورد نیاز بریده و به صورت رشته‌ای در آمده است. مشخصات این الیاف براساس اطلاعات سازنده آن طبق جدول ۲ می‌باشد.

^۱ - Glass fiber reinforcement polymer

^۲ - CNBM

جدول ۲. مشخصات الیاف شیشه‌ای مورد استفاده

چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیک (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش نهایی (%)
۱۶۰۰	۷۰	۲۲۰۰	۳

۲-۳. تهیه نمونه‌ها

در این تحقیق، نمونه‌های خاک مسلح شده با الیاف شیشه با درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ به طول‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر تهیه شده‌اند. منظور از درصد وزنی الیاف، نسبت وزن الیاف به وزن خاک خشک می‌باشد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا خاک کاملاً خشک گردیده و سپس با رطوبتی معادل ۵۰٪ رطوبت بهینه مرطوب شده است. مرطوب سازی اولیه نمونه به این دلیل صورت گرفت که مخلوط کردن

الیاف با خاک مرطوب و همگن‌سازی آن راحت‌تر از خاک خشک می‌باشد. سپس، به تدریج الیاف شیشه به خاک اضافه گردیده تا میزان درصد وزنی الیاف به مقدار مورد نظر برسد. در مرحله آخر، رطوبت خاک افزایش یافته و به رطوبت بهینه رسانده شده است. همگن بودن نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش به صورت بصری کنترل گردیده است. در شکل ۲، وضعیت خاک مخلوط شده با الیاف قبل و بعد از مخلوط شدن نشان داده شده است.



شکل ۲. مخلوط خاک و الیاف شیشه قبل (سمت راست) و بعد از مخلوط شدن (سمت چپ)

۲-۴. آزمایش‌های برش مستقیم

در این تحقیق، از دستگاه برش مستقیم حلقوی برای تعیین مقاومت برشی خاک مسلح شده با الیاف استفاده شده است (شکل ۳). در کارهای آزمایشگاهی، تهیه نمونه‌های مشابه که در شرایط یکسان تهیه شده و قابل مقایسه باشند بسیار مهم می‌باشد. وزن مخصوص خشک تمامی نمونه‌ها ثابت نگه داشته شده است. پس از تهیه نمونه‌ها و همگن کردن آنها، مخلوط خاک و

الیاف شیشه در جعبه برش قرار داده شده و متراکم شده تا وزن مخصوص خشک آن معادل ۸۵٪ حداکثر وزن مخصوص خشک تعیین شده با آزمایش پروکتور شود. تمامی آزمایش‌های برش مستقیم به صورت کرنش کنترل شده و با نرخ برش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد ASTM D3080 انجام شده است. تنش‌های قائم اعمال شده روی نمونه برابر ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بوده‌اند. پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها

۳. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم

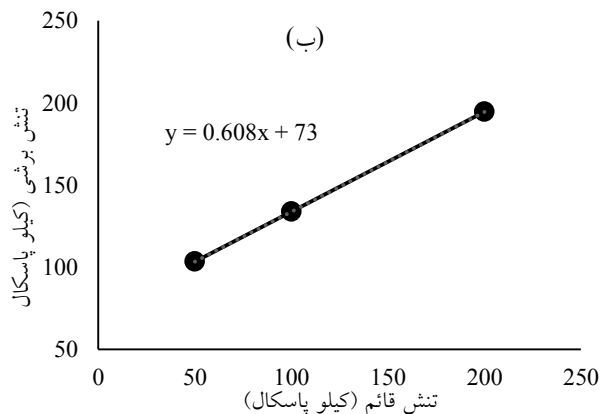
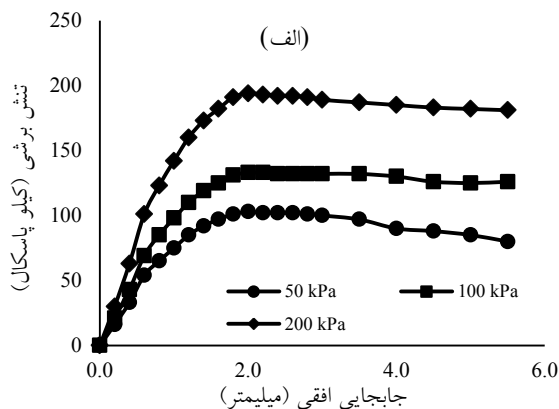
۳-۱. مقاومت برشی خاک غیر مسلح

نتایج آزمایش برش مستقیم روی خاک غیرمسلح در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، نمودارهای تغییر مکان افقی - تنش برشی تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده‌اند. همچنین، پوش گسیختگی به دست آمده از این سه آزمایش نیز در این شکل نشان داده شده است.

شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر اساس معیار گسیختگی مور کولمب بیان شده است.



شکل ۳. نمونه داخل دستگاه برش مستقیم



شکل ۴. الف) نتایج آزمایش برش مستقیم روی خاک غیر مسلح و ب) پوش گسیختگی خاک غیر مسلح

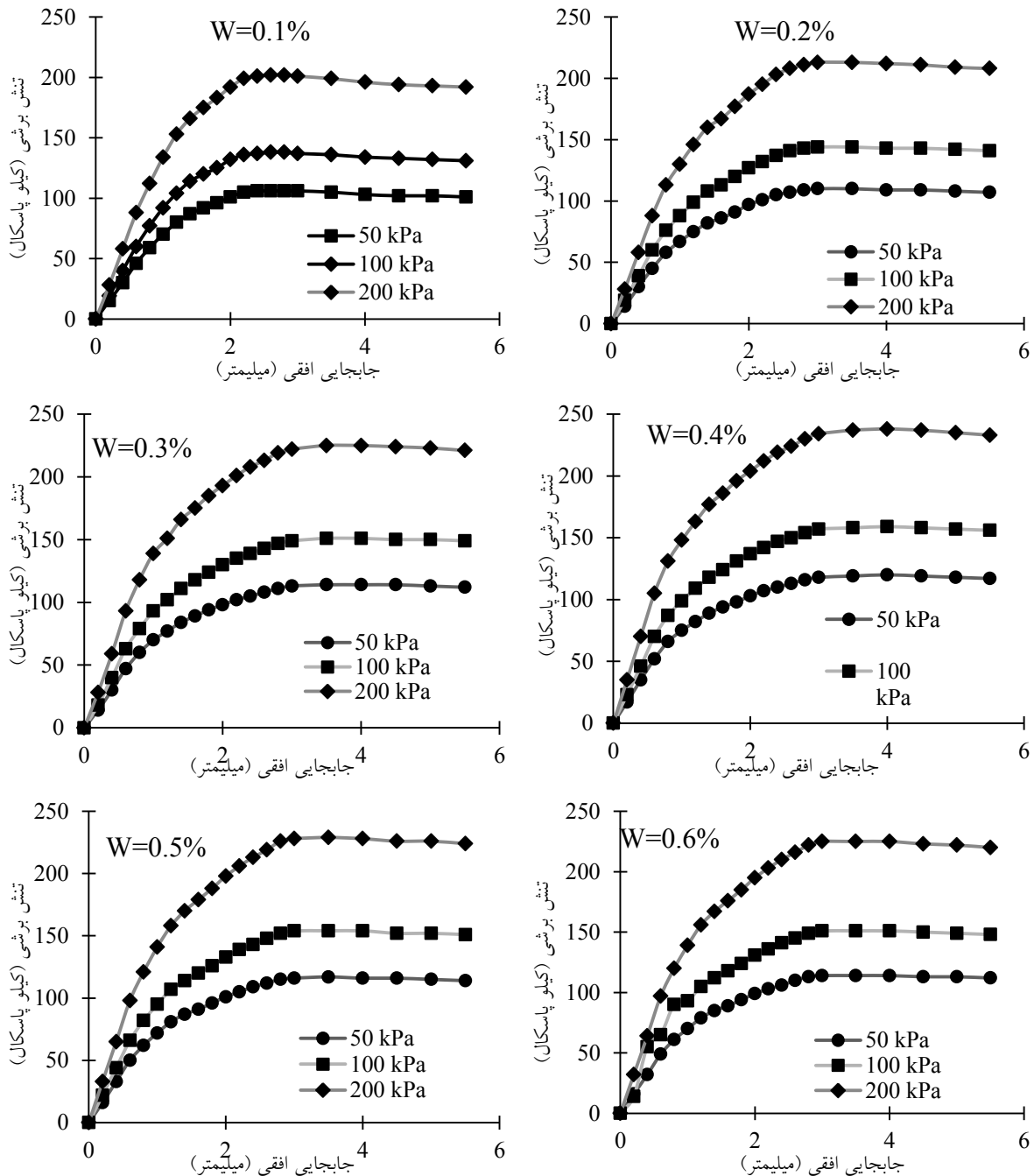
۳-۲. مقاومت برشی خاک مسلح

نتایج آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های مسلح شده با الیاف شیشه به طول ۵ میلی‌متر و درصد‌های وزنی مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد الیاف، ابتدا مقاومت برشی خاک افزایش و سپس کاهش یافته است. با این وجود، مقاومت برشی خاک مسلح شده به درصد‌های مختلف الیاف همیشه بیشتر از مقاومت برشی خاک غیر مسلح می‌باشد. کاهش دوباره مقاومت

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در نمودار تغییر مکان افقی - تنش برشی این نمونه‌ها مقداری کاهش مقاومت بعد از گسیختگی اولیه وجود داشته است که بیانگر تراکم متوسط به بالا می‌باشد. این کاهش مقاومت با افزایش سطح تنش قائم کاهش یافته است. مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک غیر مسلح به ترتیب ۷۳ کیلوپاسکال و ۳۱/۳ درجه بوده است.

می‌شود. نکته مهم دیگری که در این نمودارها مشاهده می‌شود، انتقال نمودارهای تنش-تغییرشکل برشی به سمت راست با افزایش میزان الیاف می‌باشد. به گونه‌ای که نمونه‌های با درصد الیاف بیشتر، در تغییرشکل‌های برشی بزرگ‌تری گسیخته شده‌اند.

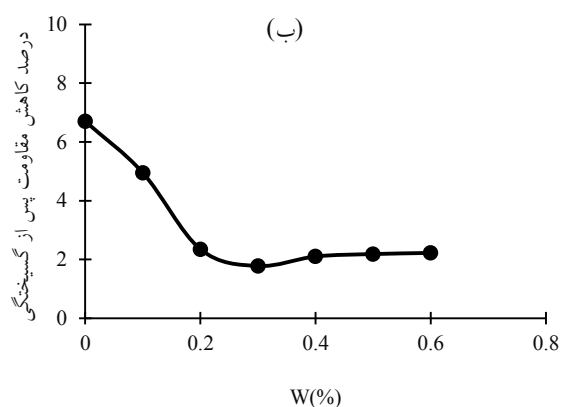
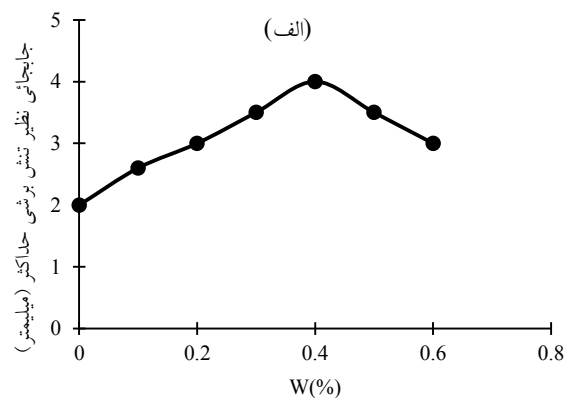
برشی خاک مسلح شده با الیاف می‌تواند ناشی از خمیدگی و پیچ‌خوردگی الیاف بلند باشد. با توجه به قطر کم الیاف، با افزایش طول، امکان قرارگیری آنها در راستای ثابت سخت‌تر شده و الیاف دچار خمیدگی و پیچ‌خوردگی می‌شوند. در واقع، در این حالت، عملکرد الیاف خمیده شده مشابه الیاف مستقیم با طول کوتاه‌تر



شکل ۵. نتایج آزمایش برش مستقیم روی خاک مسلح شده با الیاف ۵ میلی‌متری

۳-۳. اثر الیاف بر شکل پذیری خاک

در شکل ۶- الف، مقدار جابجایی لازم برای گسیختگی نمونه‌های خاک مسلح با درصدهای مختلف الیاف ۵ میلی‌متری تحت تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی الیاف تا ۰/۴ درصد، مقدار جابجایی نظیر



شکل ۶. الف) جابجایی افقی نظیر گسیختگی و ب) کاهش مقاومت بعد از گسیختگی نمونه‌های الیاف ۵ میلی‌متری تحت تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال

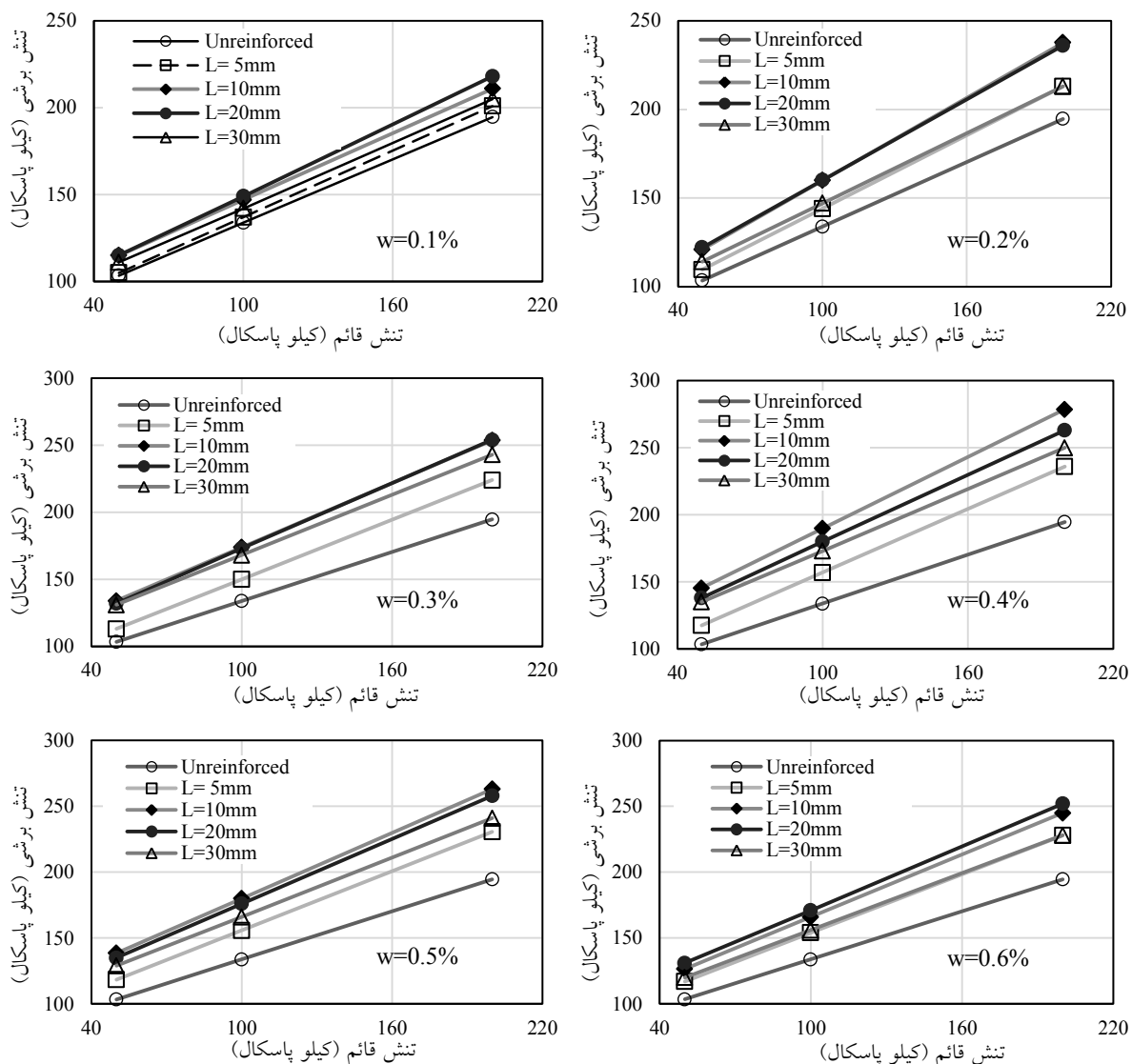
بیشترین شکل‌پذیری حین گسیختگی برشی، در نمونه‌های مسلح شده با الیاف ۵ میلی‌متری در درصد وزنی الیاف ۰/۳ اتفاق افتاده است. لذا، با توجه به این مطالب می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر شکل‌پذیری نمونه‌های مسلح شده با الیاف، در یک درصد وزنی مشخص الیاف اتفاق می‌افتد. العدیلی و همکاران (۲۰۱۲) و لیرر و همکاران (۲۰۱۱) نیز به نتایج مشابهی رسیده‌اند.

۳-۴. پوش گسیختگی خاک مسلح شده با الیاف

در شکل ۷، نمودار پوش گسیختگی مور-کولمب برای خاک مسلح شده با درصدهای وزنی و طول‌های متفاوت الیاف نشان داده شده است.

در شکل ۶- ب، درصد افت مقاومت بعد از گسیختگی برای نمونه‌های خاک مسلح با درصدهای مختلف الیاف ۵ میلی‌متری تحت تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. در این نمودار، منظور از درصد وزنی الیاف صفر، خاک غیر مسلح می‌باشد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، حداکثر افت مقاومت مربوط به نمونه غیرمسلح می‌باشد که با افزایش درصد الیاف مقدار افت مقاومت نیز کاهش یافته، ولی با افزایش بیشتر درصد الیاف، ثابت شده است. مقدار افت مقاومت را می‌توان به شکل‌پذیری نمونه ربط داد (آناگنوستوپولوس و همکاران، ۲۰۱۳). لذا، با توجه به نتایج این آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد الیاف به حد معینی، شکل‌پذیری نمونه‌ها افزایش یافته و سپس ثابت می‌ماند. کمترین افت مقاومت، یا

بررسی تأثیر طول و درصد وزنی الیاف بر مقاومت برشی خاک تثبیت شده با الیاف مصنوعی با توزیع تصادفی



شکل ۷. پوش گسیختگی نمونه‌های مسلح شده با درصدها و طول‌های مختلف الیاف

برشی خاک مسلح شده با الیاف ۱۰ میلی‌متری با مقدار الیاف ۴/۰ درصد به دست آمده است. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزودن الیاف باعث تغییر شیب و ارتفاع پوش گسیختگی شده است که بیانگر تأثیر الیاف بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد.

۳-۵. تأثیر الیاف بر پارامترهای مقاومت برشی خاک

در جدول ۳، مقادیر چسبندگی به دست آمده از

همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش طول الیاف مقاومت برشی خاک افزایش و سپس کاهش یافته است. اضافه نمودن الیاف باعث ایجاد ارتباط بین ذرات جامد خاک و افزایش مقاومت برشی می‌شود (گوموشر و شنول، ۲۰۱۴). افزایش بیش از حد طول الیاف، یا مقدار زیاد درصد وزنی الیاف، باعث پیچ‌خوردگی، خمیدگی و گلوله شدن آنها می‌شود که باعث توزیع غیر یکنواخت الیاف و ایجاد ساختار غیر همگن در خاک و در نتیجه کاهش مقاومت آن می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۱۶). بیشترین مقاومت

مختلف الیاف خلاصه شده است. این نتایج نشان می-دهد که حداکثر زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح با الیاف ۱۰ میلی متری و درصد وزنی ۰/۴ درصد ایجاد شده است. زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح نیز در مقایسه با خاک غیرمسلح حدود ۳۳٪ افزایش داشته است. با توجه به نتایج آزمایش‌های برش مستقیم روی خاک تثبیت شده با الیاف شیشه‌ای می‌توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف باعث افزایش هر دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌گردد. تأثیر افزودن الیاف روی چسبندگی خاک تا حدودی بیشتر از تأثیر آن روی زاویه اصطکاک داخلی خاک بوده است.

آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های خاک مسلح شده با الیاف به طول‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر و مقادیر وزنی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ درصد خلاصه شده است. همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، حداکثر چسبندگی برای الیاف ۱۰ میلی متری با درصد وزنی ۰/۴ درصد ایجاد شده است. در این شرایط، چسبندگی خاک مسلح در مقایسه با خاک غیر مسلح حدود ۳۸٪ افزایش داشته است.

در جدول ۴ نیز مقادیر زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های خاک مسلح شده با طول‌ها و درصدهای

جدول ۳. تأثیر طول و درصد وزنی الیاف بر چسبندگی خاک

وزن (%)	طول (م.م)					
	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
۰	۷۳	-	-	-	-	-
۵	-	۷۵	۷۶	۷۸	۸۱	۷۸
۱۰	-	۸۳	۸۲	۹۴	۱۰۱	۹۷
۲۰	-	۸۱	۸۵	۹۲	۹۷	۹۱
۳۰	-	۸۰	۸۲	۹۴	۹۱	۸۵

جدول ۴. تأثیر طول و درصد وزنی الیاف بر زاویه اصطکاک داخلی خاک

وزن (%)	طول (م.م)					
	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
۰	۳۱/۳	-	-	-	-	-
۵	-	۳۲/۶	۳۴/۶	۳۶/۵	۳۸/۳	۳۶/۵
۱۰	-	۳۲/۶	۳۷/۹	۳۸/۶	۴۱/۶	۳۸/۳
۲۰	-	۳۴/۶	۳۷/۲	۳۹/۱	۳۹/۷	۳۹/۰
۳۰	-	۳۳/۲	۳۳/۴	۳۳/۸	۳۶/۵	۳۵/۷

۴. نتیجه گیری

استفاده از دستگاه برش مستقیم انجام گرفت. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر طول و درصد وزنی الیاف در بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی آن بوده است. پس از

در این تحقیق، مقاومت برشی خاک ماسه سیلت دار مسلح شده با الیاف شیشه، با توزیع تصادفی، در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها با

درصد وزنی الیاف در این آزمایش‌ها حدود ۰/۴ درصد بوده است.

- طول الیاف مسلح کننده جهت ایجاد حداکثر مقاومت برشی خاک نیز دارای یک حالت بهینه می‌باشد که برای یک درصد وزنی مشخص با فاصله گرفتن از این طول، بهینه مقاومت برشی خاک نیز از حالت بیشینه خارج می‌گردد. طول بهینه الیاف در این آزمایش‌ها حدود ۱۰ میلی‌متر بوده است.

- با افزایش درصد الیاف، افت مقاومت برشی خاک پس از گسیختگی اولیه کاهش می‌یابد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف به خاک‌های مترکم باعث افزایش شکل‌پذیری آنها می‌شود.

تحلیل آزمایش‌های انجام شده، نتایج زیر حاصل شد:

- افزودن الیاف به خاک ماسه‌ای سیلت‌دار باعث افزایش مقاومت برشی آن گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در حالت بهینه، چسبندگی خاک مسلح شده در مقایسه با خاک غیرمسلح حدود ۴۰٪ و زاویه اصطکاک داخلی آن حدود ۳۰٪ افزایش داشته است.

- رابطه بین مقدار الیاف اضافه شده به خاک و افزایش مقاومت برشی آن ابتدا به صورت افزایشی و سپس بعد از رسیدن به مقدار بیشینه، به صورت کاهش می‌باشد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که برای حصول حداکثر افزایش مقاومت برشی خاک مسلح، مقدار بهینه الیاف مسلح کننده مورد نیاز است. مقدار بهینه

۵. مراجع

- شاه نظری، ح.، غیاثیان، ح.، نورزاد، ع.، شفیعی، ع.، طبرسا، ع. و جمشیدی چناری، ع. ۱۳۸۸. "مدول برشی ماسه لای‌دار مسلح شده با تریشه موکت". زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۱(۳): ۲۴-۳۶.
- فروغی اصل، ع. و نادری زرنقی، و. ۱۳۹۱. "بررسی عملکرد الیاف پلی‌پروپیلنی در ساختار بتن غلتکی". مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۴۲(۶۹): ۲-۱۵.
- Al-Adili, A., Azzam, R., Spagnoli, G. and Schrader, J. 2012. "Strength of soil reinforced with fiber materials (Papyrus)". *Soil Mech. Found. Eng.*, 48(6), 241-247.
- Al-Refeai, T. 1991. "Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotext. Geomechanics*, 10(3): 319-333.
- Al-Refeai, T. and Al-Suhaibani, A. 1998. "Dynamic and static characterization of polypropylene fiber-reinforced dune sand". *Geosynth. Int.* 5(5): 443-458.
- Anagnostopoulos, C. A., Papaliangas, T. T., Konstantinidis, D. and Patronis, C. 2013. "Shear strength of sands reinforced with polypropylene fibers". *Geotech. Geolog. Eng.*, 3: 401-423.
- ASTM D1557-12. 2012. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort". ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D1557.htm>.
- ASTM D2487-11. 2011. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D2487.htm>.
- ASTM D3080. 2004. "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions". *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <https://www.astm.org/Standards/D3080.htm>.
- ASTM D854-14. 2014. "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer". ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D854>.
- Chegenizadeh, A. and Nikraz, H. 2016. "Performance of fiber reinforced clayey sand composite". *Front. Struc. Civ. Eng.*, 6(2): 147-152.
- Claria, J. J. and Vettorelo, P. V. 2016. "Mechanical behavior of loose sand reinforced with synthetic fibers." *Soil Mech. Found. Eng.*, 53(1): 12-18.

- Consoli, N., Heineck, K., Casagrande, M. and Coop, M. 2007. "Shear strength behavior of fiber-reinforced sand considering triaxial tests under distinct stress paths". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133(11): 1466-1469.
- Gümüşer, C. and Şenol, A. 2014. "Effect of fly ash and different lengths of polypropylene fibers content on the soft soils". *Int. J. Civ. Eng.*, 12(2): 134-145.
- Krishna Rao, S. V. and Nasr, A. M. A. 2014. "Laboratory study on the relative performance of silty-sand soils reinforced with linen fiber". *Geotech. Geolog. Eng.*, 30: 63-74.
- Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X. and Shi, B. 2014. "Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 6(2): 133-137.
- Lirer, S., Flora, A. and Consoli, N.C. 2011. "On the strength of fibre-reinforced soils". *Soils Found.*, 51(4): 601-609.
- Noorzad, R. and Zarinkolaie, S. T. G. 2015. "Comparison of mechanical properties of fiber-reinforced sand under triaxial compression and direct shear". *Open Geosci.*, 1: 547-558.
- Ouria, A., Toufigh, V., Desai, C. S., Toufigh, V. and Saadatmanesh, H. 2016. "Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall". *Geomech. Eng.*, 10(6): 757-774.
- Sadek, S., Najjar, S. and Freiha, F. 2010. "Shear strength of fiber-reinforced sands". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(3): 490-499.
- Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. 2009. "Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils". *Eng. Geolog.*, 104(1-2): 119-125.
- Shukla, S. K., Shahin, M. A. and Abu-Taleb, H. 2015. "A note on void ratio of fibre-reinforced soils". *Int. J. Geosynth. Ground Eng.*, 1(29): 1-5.
- Tang, C., Wang, D., Cui, Y., Shi, B. and Li, J. 2016. "Tensile strength of fiber-reinforced soil". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(7): 04016031-1-04016031-13.
- Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C. S., Javid, N., Toufigh, V. and Saadatmanesh, H. 2016. "Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand". *J. Test. Eval.*, 44(1), 385-390.
- Toufigh, V., Saeid, F., Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C. S. and Saadatmanesh, H. 2012. "Laboratory study of soil-CFRP interaction using pull-out test". *Geomech. Geoenviron. Eng.*, 9(3): 208-214.
- Yetimoglu, T. and Salbas, O. 2003. "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers". *Geotext. Geomembranes*, 21: 103-110.
- Wang, Y., Guo, P., Shan, S., Yuan, H. and Yuan, B. 2016. "Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute". *Geotech. Geolog. Eng.*, 34: 1079.