

مطالعه‌ی آزمایشگاهی مقاومت برشی خاک مسلح با الیاف مصنوعی

حامد جاودانیان*، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد
پویا بهرامی سامانی، دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه
شهرکرد

Email: javdanian@sku.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۴ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۹

چکیده

در این مطالعه، رفتار خاک تثبیت شده با الیاف مصنوعی با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن با طول ۱۲ میلی‌متر انجام شد. نمونه‌های مورد آزمایش با توزیع تصادفی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد الیاف مصنوعی تثبیت شدند. آزمایش‌ها تحت تنش‌های نرمال مختلف انجام گرفت. نتایج حاکی از آن است که افزودن الیاف باعث بهبود حداکثر مقاومت برشی خاک و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود. نمونه‌های مسلح با ۰/۱ درصد الیاف دارای بیشترین مقاومت برشی بودند. همچنین، نتایج بیانگر آن است که در شرایط یکسان، نمونه‌های مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن دارای مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های مسلح با الیاف شیشه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، الیاف مصنوعی، مقاومت برشی، آزمایش برش مستقیم

۱. مقدمه

(جاودانیان و همکاران، ۲۰۱۲ a؛ مرنندی و جاودانیان، ۲۰۱۲؛ جاودانیان و لی، ۲۰۱۹).
مطالعات آزمایشگاهی تیم‌آغلو و سالباس (۲۰۰۳)
حاکی از آن است که خاک مسلح دارای رفتار شکل-پذیرتری نسبت به خاک غیرمسلح می‌باشد. اتوم و التمیم (۲۰۱۰) نشان دادند که الیاف باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و به دنبال آن افزایش مقاومت برشی نمونه‌های خاک مسلح می‌گردد (گری و اوهاشی، ۱۹۸۳).
ناتاراج و مک‌مانیس (۱۹۹۷) با انجام آزمایش‌های تک-محوری و CBR نتیجه گرفتند که افزودن الیاف باعث

در بسیاری از موارد، خاک موجود در محل برای زیرساخت‌های پروژه‌های عمرانی مناسب نمی‌باشد. بنابراین، با روش‌هایی از قبیل تثبیت و یا تسلیح خاک، می‌توان خواص مقاومتی نهشته‌های خاکی را بهبود بخشید. انتخاب مصالح مناسب و عملکرد مصالح تثبیت شده در شرایط مختلف، از موارد مورد بحث مهندسی ژئوتکنیک به‌شمار می‌آید (جاودانیان، ۲۰۱۷). محققین بسیاری به بررسی رفتار خاک‌های تثبیت شده پرداخته‌اند

مرور تحقیقات گذشته حاکی از آن است که رفتار برشی خاک‌های مسلح با الیاف مصنوعی نیازمند مطالعات بیشتر و دقیق‌تر می‌باشد.

در این مطالعه، رفتار خاک تثبیت شده با الیاف مصنوعی با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم بررسی شد. نمونه‌های خاک تثبیت شده با الیاف شیشه و پلی-پروپیلن مورد برش قرار گرفتند. نمونه‌های مورد آزمایش با ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد الیاف مصنوعی تثبیت شدند. نمونه‌های خاک مسلح با الیاف شیشه و پلی-پروپیلن تحت شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌ها تحت تنش‌های نرمال مختلف انجام شد.

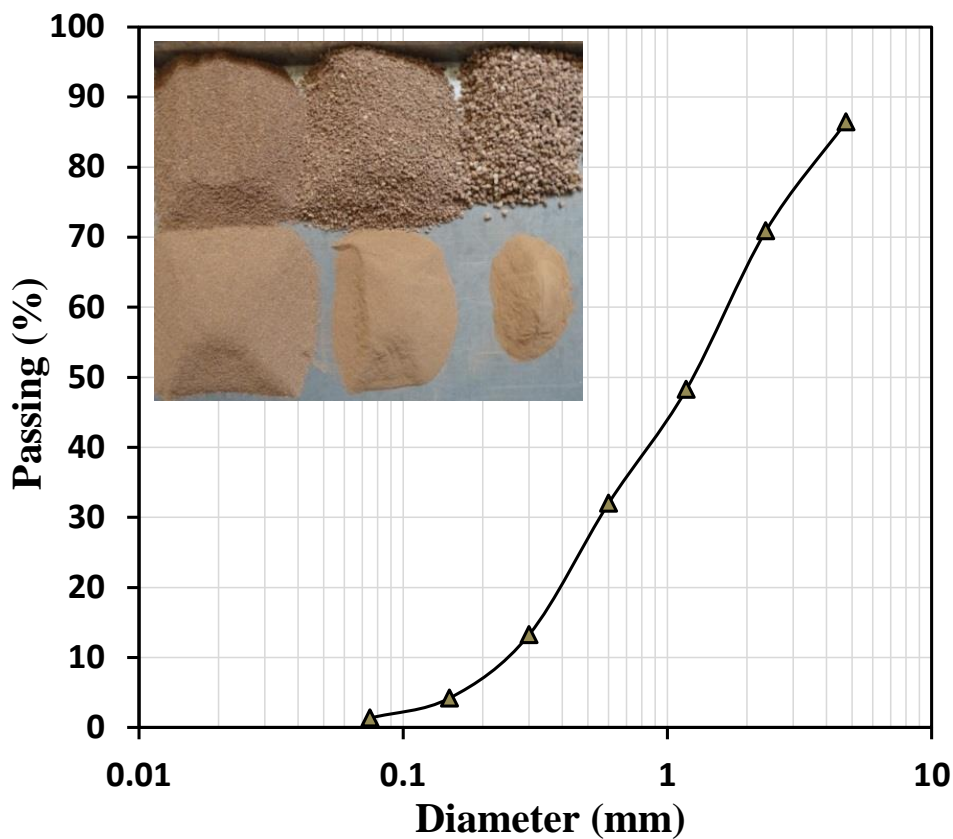
۲. مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱. خاک مورد استفاده

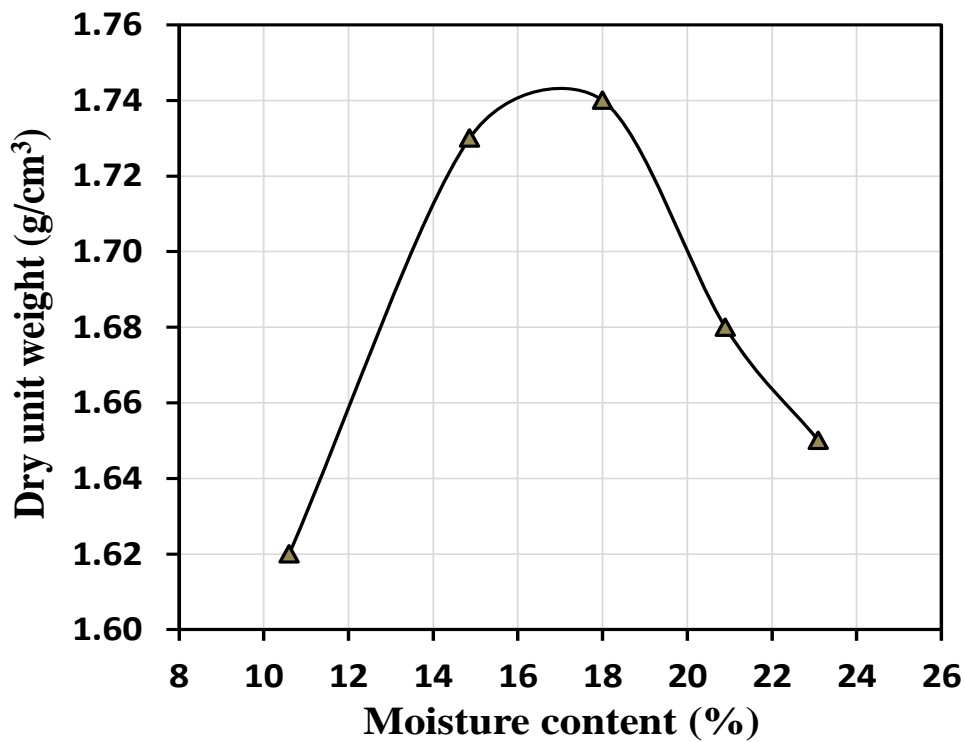
در این پژوهش، از خاک ماسه‌ای استفاده شده است. این خاک از منطقه‌ای واقع در شهرستان سامان تهیه شده است. منحنی دانه‌بندی خاک (ASTM C136) در شکل ۱ نشان داده شده است. تصویری از ذرات خاک در بازه‌های مختلف در شکل ارائه شده است. خاک مورد استفاده بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد (جعفریان و همکاران، ۲۰۱۵).

مشخصات خاک شامل ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب دانه‌بندی (C_c)، اندازه متوسط ذرات (D_{50}) و چگالی ویژه (G_s) در جدول ۱ ارائه شده است. برای محاسبه درصد رطوبت بهینه (ω_{opt}) و وزن مخصوص خشک ماکزیم ($\gamma_{d,max}$) خاک، آزمایش تراکم مطابق استاندارد ASTM D698 انجام شد (شکل ۲). مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر به ترتیب برابر با ۱۷٪ و $1/75 \text{ g/cm}^3$ حاصل شد (جدول ۱).

افزایش مقاومت تک‌محوری و همچنین افزایش CBR می‌شود. نتایج مطالعات آزمایشگاهی کومار و همکاران (۱۹۹۹) روی خاک ماسه‌ای لای‌دار تسلیح شده با توزیع تصادفی الیاف پلی‌استر نشانگر آن است که الیاف باعث افزایش مقاومت فشاری حداکثر، شکل‌پذیری نمونه‌ها و همچنین زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد. آن‌ها همچنین درصد بهینه الیاف برای تسلیح ماسه لای‌دار را ۰/۴ درصد وزن خاک ارائه دادند. نتایج مطالعات کُنسولی و همکاران (۱۹۹۸) و همچنین ونگ و همکاران (۲۰۱۶) نیز مؤید این موضوع است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی شائو و همکاران (۲۰۱۴) و همچنین نورزاد و همکاران (۲۰۱۵) بیانگر آن است که تسلیح نمونه‌های خاک با الیاف، افزایش مقاومت پسماند خاک را به دنبال خواهد داشت. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بن‌صلاح و همکاران (۲۰۱۵) روی ماسه‌ی یکی از نواحی الجزایر، که با الیاف شیشه مسلح شده بود، نشان از افزایش مقاومت خاک در برابر برش داشته است. کانیراج و گایاتری (۲۰۰۳) با انجام آزمایش‌های سه‌محوری روی خاک تسلیح شده با دو نوع الیاف پلی‌استر با نسبت ۱٪ وزن خاک خشک، گزارش کردند که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت و تغییر رفتار نمونه‌ها از حالت شکننده به حالت شکل‌پذیر می‌شود. آتس (۲۰۱۶) با انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده روی خاک تسلیح شده با سیمان پرتلند و الیاف شیشه گزارش دادند که بهترین نسبت برای بهبود مشخصات مکانیکی خاک مورد آزمایش، استفاده از ۱۵٪ سیمان و ۳٪ الیاف می‌باشد. لی و همکاران (۲۰۱۸) اثر سیکل‌های ذوب-یخبندان بر رفتار کششی خاک مسلح با الیاف را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که افزودن الیاف به میزان ۰/۲۵ درصد وزن خاک خشک در دوره‌ی ذوب و یخ باعث افزایش ۱۵۸/۲ درصد در مقاومت کششی نمونه نسبت به حالت غیرمسلح می‌شود.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک مورد آزمایش به همراه تصویری از اندازه‌های مختلف ذرات خاک



شکل ۲. منحنی تراکم خاک مورد آزمایش

جدول ۱. مشخصات خاک مورد آزمایش

مقدار	پارامتر
۷/۰۸	C_u
۰/۷۱	C_c
۱/۳	D_{50} (mm)
۲/۷	G_s
۱/۷۴	$\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)
۱۷	ω_{opt} (%)

۲-۲. الیاف

ظاهری سفید رنگ می‌باشند (شکل ۳). الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن به دلیل داشتن قیمت مناسب، از متداول‌ترین الیاف در بهسازی خاک می‌باشند. مشخصات فنی الیاف در جدول ۲ ارائه شده است.

الیاف شیشه (شکل ۳- الف) و پلی‌پروپیلن (شکل ۳- ب) با طول ۱۲ میلی‌متر استفاده شد. این الیاف دارای

جدول ۲. مشخصات الیاف مورد استفاده

مشخصات	الیاف شیشه	الیاف پلی‌پروپیلن
طول (mm)	۱۲	۱۲
قطر (mm)	۰/۰۱	۰/۰۲۳
چگالی (g/cm ³)	۱/۶	۰/۹۱
مقاومت کششی (MPa)	۲۱۰	۴۰۰

۲-۳. آزمایش برش مستقیم

قالب‌هایی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۲۰ mm ریخته شد و تا رسیدن به ۹۰٪ وزن مخصوص خشک حداکثر متراکم گردید. نمونه‌های ساخته شده را در جعبه برش قرار داده و وزن سربار اعمال شد. تنش‌های قائم (P_v) اعمال شده بر نمونه‌های مورد آزمایش برابر ۵۰ kPa و ۱۰۰ kPa بوده‌اند. آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM D3080 و به صورت کرنش- کنترل با سرعت بارگذاری ۲ mm/min صورت گرفتند. برنامه‌ی آزمایش‌های انجام شده طی این مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

در این پژوهش، نمونه‌ها با نسبت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزن خاک خشک با الیاف شیشه و الیاف پلی‌پروپیلن مسلح شده‌اند. پس از اختلاط تدریجی خاک و الیاف، رطوبت خاک تا رسیدن به میزان رطوبت بهینه افزایش یافت. پس از ساخت، نمونه تا حد امکان همگن و الیاف در تمام بافت خاک مشاهده گردید.

در این پژوهش، از دستگاه برش مستقیم آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد استفاده شده است (شکل ۴). پس از تهیه مخلوط همگن خاک و الیاف، مخلوط در



شکل ۳. الف) الیاف شیشه و ب) الیاف پلی پروپیلن



شکل ۴. دستگاه آزمایش برش مستقیم

جدول ۳. برنامه‌ی آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده در این مطالعه

آزمایش	نوع الیاف	میزان الیاف (%)	تنش نرمال (kPa)	ID
۱	-	-	۵۰	Unreinforced-۵۰
۲	-	-	۱۰۰	Unreinforced-۱۰۰
۳	G	۰/۰۵	۵۰	G-۰-۵۰/۰۵
۴	G	۰/۰۵	۱۰۰	G-۰-۱۰۰/۰۵
۵	P	۰/۰۵	۵۰	P-۰-۵۰/۰۵
۶	P	۰/۰۵	۱۰۰	P-۰-۱۰۰/۰۵
۷	G	۰/۱	۵۰	G-۰-۵۰/۱
۸	G	۰/۱	۱۰۰	G-۰-۱۰۰/۱
۹	P	۰/۱	۵۰	P-۰-۵۰/۱
۱۰	P	۰/۱	۱۰۰	P-۰-۱۰۰/۱
۱۱	G	۰/۲	۵۰	G-۰-۵۰/۲
۱۲	G	۰/۲	۱۰۰	G-۰-۱۰۰/۲
۱۳	P	۰/۲	۵۰	P-۰-۵۰/۲
۱۴	P	۰/۲	۱۰۰	P-۰-۱۰۰/۲
۱۵	G	۰/۵	۵۰	G-۰-۵۰/۵
۱۶	G	۰/۵	۱۰۰	G-۰-۱۰۰/۵
۱۷	P	۰/۵	۵۰	P-۰-۵۰/۵
۱۸	P	۰/۵	۱۰۰	P-۰-۱۰۰/۵

(شکل‌های ۶ الف و ب)، الیاف مانع این گسیختگی شده- اند. لازم به ذکر است که بررسی نمونه‌های مورد آزمایش حاکی از آن است که نمونه‌های مسلح شده با الیاف پلی- پروپیلن دارای بافتی همگن‌تر نسبت به نمونه‌های مسلح شده با الیاف شیشه بوده‌اند.

تصاویری از نمونه‌های خاک مورد آزمایش برش مستقیم در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نمونه‌ی غیرمسلح در شکل ۵ و نمونه‌های خاک مسلح با ۰/۲ درصد الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن در شکل‌های ۶ (الف و ب) ارائه شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در صفحه گسیختگی نمونه غیرمسلح، جداشدگی رخ داده است. اما در نمونه‌های مسلح شده



شکل ۵. نمونه‌ی غیر مسلح مورد آزمایش برش مستقیم



شکل ۶. نمونه‌ی مورد آزمایش مسلح با ۰/۲ درصد الیاف: الف) الیاف شیشه و ب) الیاف پلی‌پروپیلن

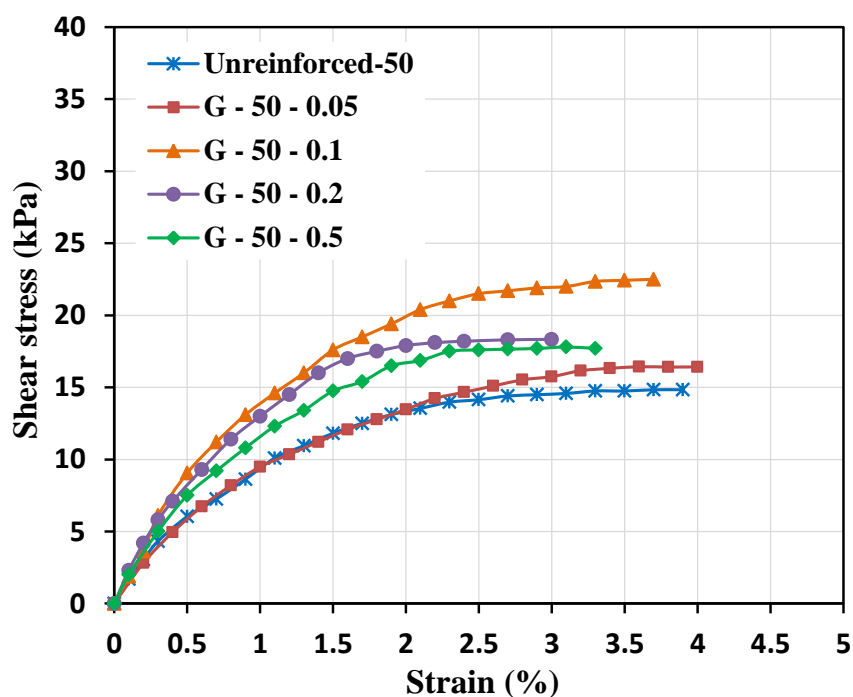
۳. نتایج

نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های غیرمسلح و همچنین نمونه‌های مسلح با الیاف شیشه حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم تحت سربارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش درصد الیاف شیشه، منحنی تنش- کرنش نمونه‌ی خاک بهبود یافته و مقاومت برشی خاک افزایش یافته است. با افزایش الیاف تا ۱٪، تنش برشی حداکثر افزایش یافته و فراتر از آن، کاهش تنش برشی را به دنبال داشته است.

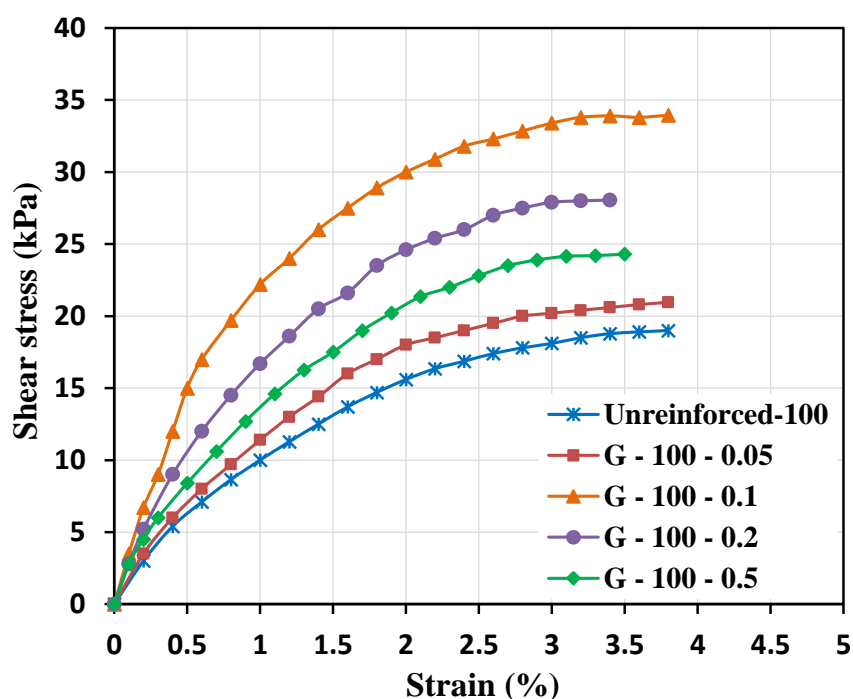
نتایج ارائه شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که در آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های مسلح تحت سربار ۵۰ kPa، افزودن الیاف به میزان ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد به ترتیب موجب افزایش مقاومت برشی حداکثر به میزان ۱۰/۶، ۵۱/۷، ۲۳/۵ و ۱۹/۳ درصد نسبت

به نمونه‌ی غیرمسلح شده است. در نمونه‌های تحت سربار ۱۰۰ kPa، تسلیح با ۱٪ الیاف شیشه، افزایش ۷۸/۷ درصدی مقاومت برشی حداکثر را به دنبال داشته است (شکل ۸). این امر بیانگر آن است که با افزایش تنش سربار، کارایی الیاف مصنوعی در افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها و به عبارتی بهبود رفتار برشی نمونه‌های خاک، افزایش یافته است.

لازم به ذکر است که افزودن الیاف به خاک مورد آزمایش، تأثیر قابل توجهی بر رفتار نمونه‌های تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال در کرنش‌های کوچکتر از ۰/۵ درصد نداشته است (شکل ۷). نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که کرنش‌های فراتر از ۱/۲ شروع اثر مثبت الیاف بر رفتار تنش- کرنش خاک می‌باشد (شکل‌های ۷ و ۸). از این‌رو، تسلیح با الیاف اثری بر سختی اولیه‌ی خاک ندارد.



شکل ۷. رفتار تنش- کرنش نمونه غیرمسلح و نمونه‌های مسلح با الیاف شیشه تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال



شکل ۸. رفتار تنش- کرنش نمونه غیرمسلح و نمونه‌های مسلح با الیاف شیشه تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

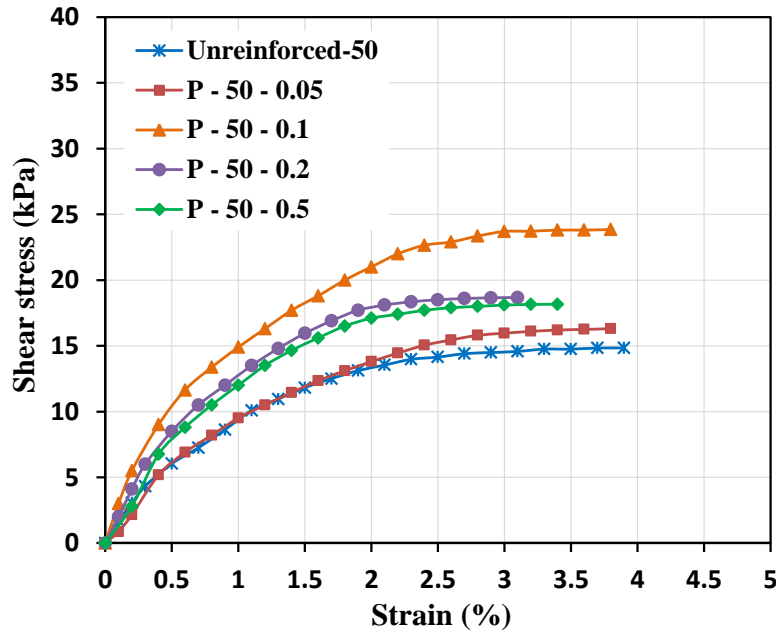
است. نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم بیانگر آن است که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به خاک موجب بهبود مقاومت برشی نمونه‌های مورد آزمایش شده است.

نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های خاکی مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن تحت سربارهای ۵۰ kPa و ۱۰۰ kPa در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. رفتار نمونه‌های غیرمسلح نیز جهت مقایسه در این شکل‌ها ارائه شده

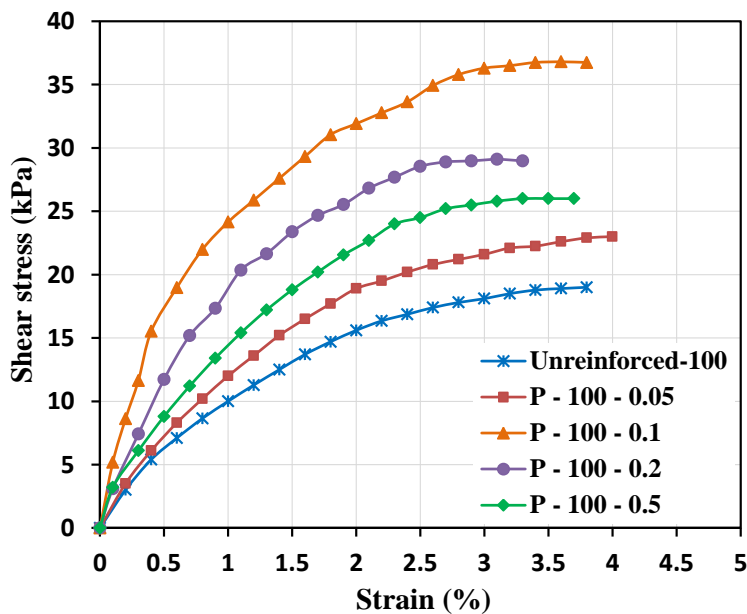
ترتیب موجب افزایش مقاومت برشی حداکثر به میزان ۲۱/۱، ۹۳/۴، ۵۲/۵ و ۳۶/۸ درصد نسبت به نمونه‌ی غیرمسلح شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار سربار، عملکرد الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت برشی خاک بهبود یافته است.

بیشترین مقاومت در نمونه‌های مسلح با ۱٪ الیاف پلی‌ پروپیلن به دست آمده است.

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم حاکی از آن است که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد تحت سربار ۵۰ kPa (شکل ۹) به ترتیب موجب افزایش مقاومت برشی حداکثر به میزان ۶۰/۸، ۹/۹، ۲۵/۹ و ۲۲/۴ درصد و تحت سربار ۱۰۰ kPa (شکل ۱۰) به



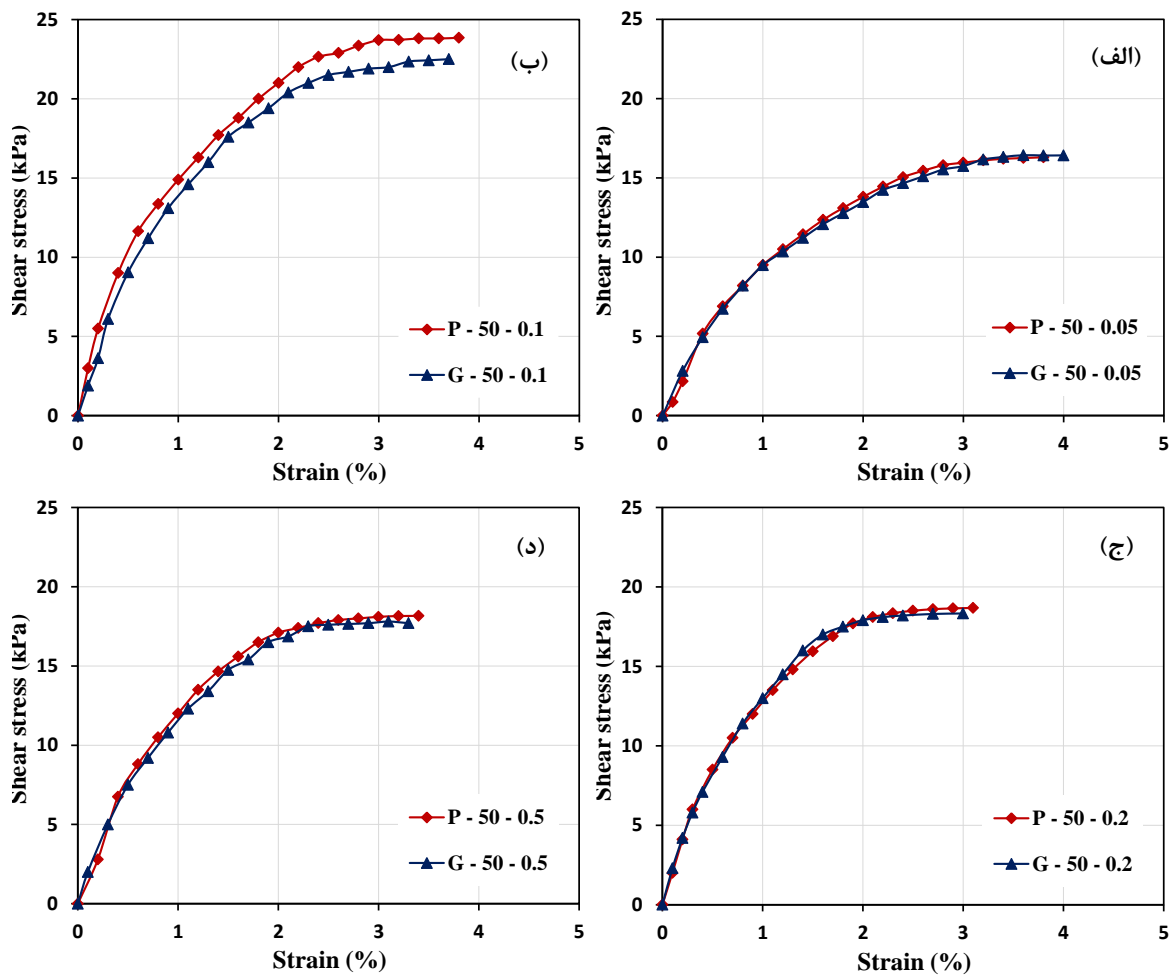
شکل ۹. رفتار تنش- کرنش نمونه غیرمسلح و نمونه‌های مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال



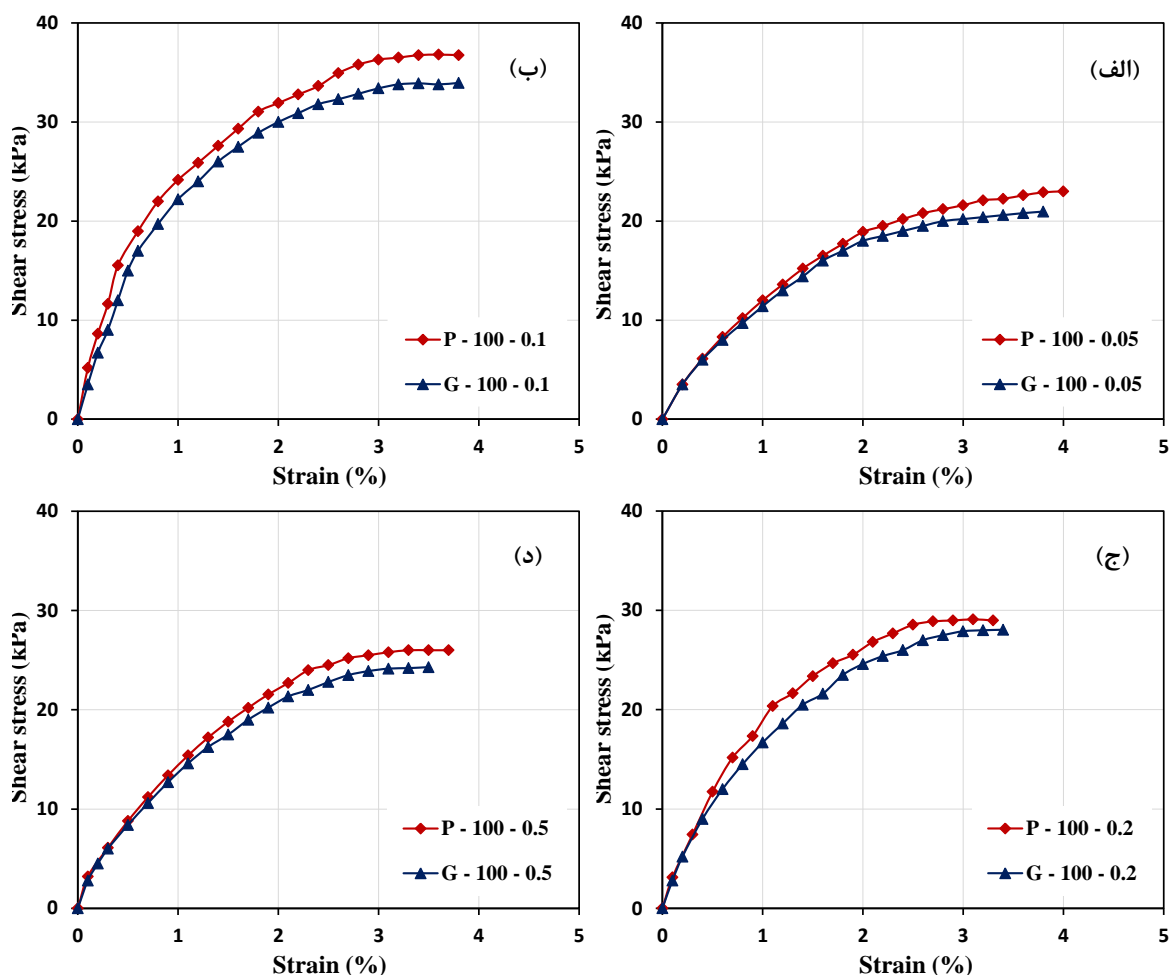
شکل ۱۰ رفتار تنش- کرنش نمونه غیرمسلح و نمونه‌های مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

سربار ۵۰ kPa قابل توجه نیست (شکل ۱۱)، اما با افزایش فشار سربار، این تفاوت رفتاری بیشتر شده است (شکل ۱۲). همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده، نمونه‌ی مسلح ۰/۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن تحت سربار ۱۰۰ kPa در آزمایش برش مستقیم دارای مقاومت حداکثری به میزان ۸/۴ درصد بیشتر از نمونه‌ی مسلح با الیاف شیشه می‌باشند.

رفتار تنش- کرنش نمونه‌های مسلح با الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه شده‌اند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نمونه‌های مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن از مقاومت بیشتری برخوردار هستند. در نمونه‌های خاک مسلح با ۱٪ الیاف و تحت سربار ۵۰ kPa، تنش برشی حداکثر نمونه‌ی مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن، ۶٪ بیشتر از نمونه‌ی مسلح با الیاف شیشه هستند (شکل ۱۱). اگر چه تفاوت رفتاری نمونه‌های مسلح با الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف شیشه تحت



شکل ۱۱. مقایسه رفتار تنش- کرنش نمونه‌های مسلح با الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال با میزان الیاف: (الف) ۰/۰۵، (ب) ۰/۱، (ج) ۰/۲ و (د) ۰/۵ درصد



شکل ۱۲. مقایسه رفتار تنش- کرنش نمونه‌های مسلح با الیاف شیشه و پلی پروپیلن تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال با میزان الیاف: (الف) ۰/۰۵، (ب) ۰/۱، (ج) ۰/۲ و (د) ۰/۵ درصد

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم، به بررسی رفتار خاک ماسه‌ای مسلح با الیاف شیشه و پلی- پروپیلن پرداخته شد. نمونه‌های خاک غیرمسلح و همچنین مسلح با ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد الیاف مصنوعی شیشه و پلی پروپیلن و تحت فشارهای سربار ۵۰ kPa و ۱۰۰ kPa تحت برش قرار گرفتند. بر اساس رفتار تنش- کرنش نمونه‌های خاک مسلح و غیرمسلح، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- تسلیح خاک با الیاف مصنوعی موجب بهبود رفتار تنش- کرنش و افزایش مقاومت برشی خاک ماسه‌ای شده است.

مقاومت برشی حداکثر یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر بر تئوری‌های تنش- کرنش محیط‌های خاکی می- باشد. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم در این مطالعه نشان داد که تسلیح خاک با الیاف مصنوعی شیشه و پلی پروپیلن می‌تواند رفتار تنش- کرنش خاک را بهبود بخشد. از این- رو لازم است اثر تسلیح با الیاف در مدل‌سازی رفتاری خاک مسلح لحاظ گردد. قطعاً، لحاظ کردن دقیق اثر تسلیح خاک با الیاف در مدل‌های رفتاری نیازمند مطالعات آزمایشگاهی بیشتر و تحت شرایط مختلف می- باشد.

۵- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار سربار، عملکرد الیاف در افزایش مقاومت برشی خاک بهبود یافته است. همچنین، با افزایش فشار سربار، تفاوت رفتاری نمونه‌های مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن با نمونه‌های مسلح به الیاف شیشه مشهودتر است.

۶- با افزودن الیاف به خاک، رفتار خاک از حالت شکننده به حالت شکل‌پذیر تغییر می‌کند و در صفحه گسیختگی تعیین شده در نمونه تسلیح شده، گسیختگی کامل رخ نمی‌دهد و الیاف مانع از جدا شدن لایه خاک می‌گردد.

۵. سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد 96GRD1M39422 از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد می‌باشد.

۲- نمونه‌های مسلح با ۱٪ الیاف دارای بیشترین مقاومت بوده است. از این رو، ۱٪ الیاف به عنوان مقدار بهینه جهت تسلیح خاک ماسه‌ای حاصل شده است.

۳- افزودن الیاف به خاک ماسه‌ای تأثیر قابل توجهی بر رفتار نمونه‌های مورد آزمایش در کرنش‌های کمتر از ۰/۵ درصد نداشته است. از این رو، سختی اولیه خاک ماسه‌ای چندان متأثر از تسلیح خاک با الیاف نمی‌باشد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که کرنش‌های فراتر از ۱٪ شروع اثر الیاف بر افزایش مقاومت برشی خاک می‌باشد.

۴- مقایسه رفتار تنش-کرنش حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم بیانگر آن است که الیاف پلی‌پروپیلن عملکرد بهتری نسبت به الیاف شیشه جهت تسلیح خاک داشته‌اند. علت این امر، مقاومت بالای الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف شیشه می‌باشد که تفاوت رفتار تنش-کرنش نمونه‌های مسلح در شرایط برش را به دنبال داشته است.

۶. منابع

- ASTM C136. 2006. "Standard test method for analysis of fine and coarse aggregates". ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D3080. 2004. "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions". ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D698. 2007. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort". ASTM International, West Conshohocken.
- Ates, A. 2016. "Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC)". *Composites- Part B: Eng.*, 96: 295-304.
- Attom, M. F. and Al-Tamimi, A. K. 2010. "Effects of polypropylene fibers on the shear strength of sandy soil". *Int. J. Geosci.*, 1(1): 44-50.
- Benessalah, I., Arab, A., Villard, P., Sadek, M. and Kadri, A. 2016. "Laboratory study on shear strength behaviour of reinforced sandy soil: Effect of glass-fibre content and other parameters". *Arab. J. Sci. Eng.*, 41(4): 1343-1353.
- Consoli, N. C., Prietto, P. D. and Ulbrich, L. A. 1998. "Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(12): 1211-1214.
- Gray, D. H. and Ohashi, H. 1983. "Mechanics of fiber reinforcement in sand". *J. Geotech. Eng.*, 109(3): 335-353.
- Jafarian, Y., Haddad, A. and Javdanian, H. 2015. "Comparing the shear stiffness of calcareous and silicate sands under dynamic and cyclic straining". 7th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran.
- Javdanian, H. 2017. "The effect of geopolymerization on the unconfined compressive strength of stabilized fine-grained soils". *Int. J. Eng. Trans. B: Appl.*, 30(11): 1673-1680.
- Javdanian, H., Haddad, A. and Mehrzad, B. 2012a. "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of adjacent footings on reinforced soil". *Electron. J. Geotech. Eng.* 17: 2597-2617.

- Javdanian, H., Haddad, A. and Mehrzad, B. 2012b. "Interference effect on bearing capacity of multiple shallow foundations supported by geosynthetic-reinforced sand". 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics, 13 December, Bangkok, Thailand.
- Javdanian, H. and Lee, S. 2019. "Evaluating unconfined compressive strength of cohesive soils stabilized with geopolymer: A computational intelligence approach". *Eng. Comput.*, 35(1): 191-199.
- Kaniraj, S. R. and Gayathri, V. 2003. "Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions". *Geotext. Geomembranes*, 21(3): 123-149.
- Kumar, R., Kanaujia, V. K. and Chandra, D. 1999. "Engineering behavior of fiber-reinforced pond ash and silty sand". *Geosynth. Int.*, 6(6): 509-518.
- Li, Y., Ling, X., Su, L., An, L., Li, P. and Zhao, Y. 2018. "Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition". *Cold Regions Sci. Technol.*, 146: 53-59.
- Marandi, S. M. and Javdanian, H. 2012. "Laboratory studies on bearing capacity of strip interfering shallow foundations supported by geogrid-reinforced sand". *Adv. Mater. Res.*, 472: 1856-1869.
- Nataraj, M. S. and McManis, K.L. 1997. "Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers". *Geosynth. Int.*, 4(1): 65-79.
- Noorzad, R. and Zarinkolaei, S. T. G. 2015. "Comparison of mechanical properties of fiber-reinforced sand under triaxial compression and direct shear". *Open Geosci.*, 7(1): 547-558.
- Shao, W., Cetin, B., Li, Y., Li, J. and Li, L. 2014. "Experimental investigation of mechanical properties of sands reinforced with discrete randomly distributed fiber". *Geotech. Geolog. Eng.*, 32(4): 901-910.
- Yetimoglu, T. and Salbas, O. 2003. "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers". *Geotext. Geomembranes*, 21(2): 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(4): 1079-1088.

