

مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر رطوبت و زاویه‌ی برش در مشخصات فصل مشترک خاک و ورقه‌ی الیاف بسپاری

وهب توفیق* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

وحید توفیق (دانشیار)

حسین قاسمی‌نژاد (کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۲، ص. ۹۱-۹۹

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی اندرکنش بین سطح الیاف بسپاری کربنی و خاک ماسه‌ی سیلتی تحت اثر رطوبت‌های مختلف در آزمایش برش مستقیم پرداخته شده است. ۴ نوع جهت‌گیری الیاف شامل الیاف تک‌جهته در راستای برش، تک‌جهته‌ی عمود بر راستای برش، دوجته‌ی عمود بر راستای برش و دوجته‌ی تحت زاویه‌ی ۴۵ درجه با راستای برش آزمایش شد. نتایج نشان داد که زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین ماسه و الیاف تابع جهت برش و رطوبت است. در حالت خشک زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و الیاف دوجته‌ی عمود بر راستای برش به ترتیب ۴/۳، ۷/۵ و ۲۹ درصد بزرگ‌تر از زاویه‌ی اصطکاک اندرکنش در سطح مشترک خاک به الیاف دوجته با زاویه‌ی ۴۵ درجه، الیاف تک‌جهته‌ی عمود و الیاف تک‌جهته‌ی موازی جهت برش است. علاوه بر این نتایج نشان داد که نسبت ضریب اصطکاک بین خاک و الیاف یک‌طرفه در جهت طولی نسب به خود خاک حدود ۷۳٪ و در جهت عمود بر امتداد الیاف ۸۸٪ بوده است. در مورد الیاف دوطرفه این نسبت‌ها به ترتیب ۹۱٪ با زاویه‌ی ۴۵ درجه و ۹۵٪ در امتداد عمود بر الیاف بوده است.

واژگان کلیدی: مقاومت برشی، ماسه، الیاف بسپاری، زاویه‌ی برش.

۱. مقدمه

مقاومت برشی مصالح دانه‌بی و خاک‌ها تابع عوامل متنوعی نظیر پوکی، اندازه‌ی قطر مؤثر ذرات، شکل و زاویه‌دار بودن ذرات، باندهای اتصال‌دهنده‌ی دانه‌ها و تنش محصورکننده (تنش اعمال شده بر لایه‌های خاک تحت سربارهای مختلف) است. استفاده از مسلح‌کننده‌های مکانیکی مانند تسمه‌های فولادی، ورقه‌های ژئوتکستایل و الیاف بسپاری باعث افزایش محصورشدگی و مقاومت برشی خاک می‌شود. به تازگی استفاده از ورقه‌های الیاف بسپاری کاربرد زیادی در پروژه‌های عمرانی یافته است. از مزیت‌های این نوع مسلح‌کننده‌ها می‌توان به مقاومت بالای آنها در مقابل خوردگی، مدول کشسانی و مقاومت کششی بالا به نسبت وزن و تغییر شکل‌های خزشی کم اشاره کرد.^[۱] الیاف بسپاری اولین بار در سال ۱۹۹۱ میلادی برای مقاوم‌سازی یک پل در کشور سوئیس استفاده شده است.^[۲] نتایج تحقیق‌های انجام شده روی دیوارهای حائل مسلح شده با الیاف بسپاری کاهش چشمگیر جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۹/۳، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۰.

DOI:10.24200/J30.2020.54723.2665

این دیوارها را در مقایسه با دیوارهای مسلح شده با ژئوتکستایل نشان می‌دهد.^[۳] تحلیل‌های عددی و مشاهدات واقعی دیوارهای حائل مسلح شده با ورقه‌های الیاف کربنی و مقایسه‌ی آنها با دیوارهای مسلح شده با ژئوتکستایل نشان می‌دهد که قرارگیری ورقه‌های مسلح‌کننده‌ی الیاف کربن در عمق مناسب که طول گرائی بهینه را تأمین کند، باعث کاهش تعداد لایه‌های مورد نیاز برای تأمین پایداری دیوار حائل می‌شود.^[۴] خاک مسلح شده با الیاف بسپاری نوعی محیط غیرهمگن با فصل مشترک متمایز بین خاک و ورقه‌ی بسپاری است. پس مشخصات مکانیکی خاک تقویت شده با این نوع الیاف تابع مشخصات فصل مشترک خاک با ورقه‌ی بسپاری خواهد بود.^[۱] در طراحی سازه‌های خاک مسلح، دو معیار گسیختگی و بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌ها تعیین‌کننده‌ی مقاومت و پایداری کل سیستم است. استفاده از الیاف کربن بر مقاومت مانع گسیختگی مسلح‌کننده‌ها می‌شود. با توجه به اینکه مقاومت کششی الیاف کربن در مقایسه با ژئوتکستایل‌ها به مراتب بیشتر است، برای استفاده از این مقاومت بالا، مهار مناسب این مصالح در داخل خاک ضروری است. با توجه به این موارد، برای طراحی صحیح سازه‌های خاک مسلح، مطالعه‌ی دقیق رفتار

فصل مشترک خاک با مسلح‌کننده‌ها ضروری است.

تسلیح‌کننده‌های مرسوم نظیر ژئوتکستایل، ژئوگرید و تسمه‌های فولادی دارای چند عیب بزرگ هستند. مطالعات شیو و جنگ^[۵] (۲۰۰۵) و سائوکی و همکاران^[۶] (۱۹۹۳) نشان داد که اولاً این مصالح با گذشت زمان به تدریج دچار خزش و از بین رفتگی می‌شوند. ثانیاً مصالحی نظیر تسمه‌های فلزی نیز با گذشت زمان ریسک خوردگی را دارند. پژوهش کاو^[۷] (۲۰۰۶) نشان داد که مقاومت کششی پلیمرهای کربنی ۵ برابر فلز است و این مواد در مقابل خوردگی و خزش دارای دوام به مراتب بالاتری از مواد مسلح‌کننده‌ی مرسوم هستند.

در سال ۱۹۹۹ فرست و هان^[۸]، با انجام آزمایش برش مستقیم رفتار فصل مشترک چند نوع ماسه شامل ماسه اتاوا (با ذرات گرد گوشه) و چند نوع ماسه با ذرات دارای زاویه (زبر گوشه) و ورقه‌های الیاف بسیاری را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که پارامترهایی چون اندازه‌ی متوسط دانه‌های ماسه، زبری سطح مشترک، تراکم اولیه‌ی ماسه، تنش نرمال و شکل ذرات ماسه در مقدار اصطکاک سطح مشترک تأثیری مستقیم دارد. هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که سرعت برش، تأثیری بر روی اصطکاک سطح مشترک ندارد. مطالعات انجام شده بر روی مقاومت بیرون‌کشیدگی ورقه‌های الیاف کربنی و الیاف شیشه تحت تنش‌های کم نشان می‌دهد که لغزش و بیرون‌کشیدگی ورقه‌های الیاف شیشه حالتی پیش‌رونده دارد و گسیختگی به‌صورت آنی اتفاق نمی‌افتد.^[۹]

ساکرو و همکاران^[۱۰] (۲۰۰۵) مشخصات فصل مشترک ماسه و الیاف بسیاری حاصل شده از نتایج آزمایش برش مستقیم را با نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی شمع با مقیاس واقعی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج آزمایش برش مستقیم روی فصل مشترک این مصالح تطابق خوبی با واقعیت دارد. توفیق و همکاران^[۱۱] (۲۰۱۳) مشخصات فصل مشترک ماسه با الیاف بسیاری را در شرایط بیرون‌کشیدگی مطالعه کردند و اثر استفاده از رزین به‌عنوان اتصال‌دهنده‌ی خاک با ورقه‌ی الیاف را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان می‌دهد که جای‌گذاری ورقه‌های الیاف در داخل خاک قبل از گیرش رزین باعث افزایش اصطکاک و جسیبندگی بین ورقه الیاف و خاک می‌شود. هم‌چنین نتایج آزمایش آنها نشان می‌دهد که رفتار لغزش و بیرون‌کشیدگی ورقه‌های الیاف کربنی که قبل از گیرش رزین در داخل خاک قرار داده شده بودند، شکل‌پذیرتر از حالتی بود که ورقه‌های الیاف بعد از گیرش رزین استفاده شده بودند.

بررسی‌های انجام شده روی اثر رطوبت بر مشخصات مکانیکی فصل مشترک خاک ریزدانه و ژئوتکستایل نشان می‌دهد که افزایش میزان رطوبت باعث کاهش اصطکاک بین خاک ریزدانه و ژئوتکستایل می‌شود.^[۱۲، ۱۳] حاتمی و همکاران (۲۰۱۱) رفتار مکانیکی فصل مشترک خاک غیراشباع با تکستایل را در آزمایشگاه با آزمایش pull-out بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که گرچه در خاک‌های غیراشباع وجود مکش یا فشار آب حفره‌ی منفی باعث افزایش نیروی اصطکاک بین خاک و ژئوتکستایل می‌شود، اما وجود رطوبت در حین گسیختگی باعث کاهش نیروی اصطکاک می‌شود. آن‌ها بر اساس مشاهداتشان یک ضریب کاهش مقاومت بیرون‌کشیدگی ژئوتکستایل ارائه کرده‌اند که تابع میزان رطوبت است.

ابوفرسخ و همکاران (۲۰۰۷)^[۱۴] اثر رطوبت و وزن مخصوص خشک خاک در مشخصات مکانیکی فصل مشترک خاک ریزدانه و درشت‌دانه را با چند نوع ژئوتکستایل بررسی کرده‌اند. آن‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌ها پیشنهاد کرده‌اند که برای محاسبات مربوط به خاک مسلح، مشخصات فصل مشترک خاک با مسلح‌کننده در رطوبتی حدود ۲ درصد بیشتر از رطوبت بهینه‌ی خاک تعیین گردد. این رطوبت افزوده باعث کاهش اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده می‌شود و به نفع اطمینان است.

دروسی و همکاران^[۱۵] (۲۰۱۸) با استفاده از ملات‌های ژئوبسپاری به همراه ضایعات، توانستند ظرفیت جلوگیری از ورود رطوبت را بالا ببرند. نامجو و همکاران^[۱۵] در سال (۲۰۱۹) به بررسی اندرکنش خاک‌های ماسه با الیاف بسیاری کربنی پرداخته‌اند. آنها نشان دادند که اندرکنش بین خاک و پلیمر کربنی وابسته به راستای برشی و زبری سطح مشترک خاک و این نوع الیاف است. کامستو و همکاران^[۱۶] (۲۰۱۹) نیز به بررسی ظرفیت کنترل رطوبت ترکیبات ژئوبسپاری پرداختند و همبستگی ترکیبات حجیم را با رفتار جاذب و دافع بررسی کردند.

محققان دیگری نیز رفتار انتقال حرارتی پلیمرهای کربنی را مطالعه کرده‌اند. کینگ و همکاران^[۱۷] در سال ۲۰۰۶ به مطالعه‌ی دو نوع الیاف کربن مبتنی بر پلی آکریلونیتریل، Fortafil ۲۴۳ و Panex ۳۰ و ماتریس ترموپلاستیک Vectra Crystal Polymer RX Liquid ۹۵۰ A پرداختند و رفتار انتقال حرارتی این نوع کامپوزیت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی در داخل صفحه‌ی کامپوزیت‌های حاوی پانکس ۳۰ نسبت به آن‌هایی که حاوی Fortafil ۲۴۳ مقدار بالاتری از خود نشان می‌دهد. جی‌میلر و همکاران^[۱۸] در سال ۲۰۰۵ به بررسی هدایت الکتریکی کامپوزیت‌های ساخته شده از ترکیب کربن و نایلون پرداخته‌اند. برای ساخت کامپوزیت مذکور آنها دو نوع کربن مختلف (ذرات گرافیتی مصنوعی و فیبر کربن) را به نایلون اضافه کرده‌اند و کامپوزیت مذکور را به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که نمونه‌ی ساخته شده از ۱۰ تا ۴۰ درصد گرافیت همان مقدار هدایت الکتریکی را دارد که کامپوزیت ساخته شده از ۵ تا ۴۰ درصد فیبر کربن ایجاد می‌کند.

ال‌ملاح و همکاران^[۱۹] در سال ۲۰۱۹ به بررسی اندرکنش خاک مسلح شده به الیاف بسیاری شیشه‌ی پوشیده شده با ماسه و انواع مختلف ماسه و رس پرداختند. آنها بیان داشتند که اندرکنش بین خاک و این نوع الیاف بسیاری تابعی از زبری سطح الیاف بسیاری و نوع خاک است.

جمع‌بندی نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار روی مشخصات مکانیکی فصل مشترک خاک با مسلح‌کننده، شکل ذرات خاک و تیز گوشه بودن آنها، میزان رطوبت خاک و زبری سطح ورقه‌ی مسلح‌کننده‌اند. در مطالعات انجام شده از ژئوتکستایل به‌عنوان مسلح‌کننده استفاده شده است. نفوذپذیری ورقه‌های الیاف بسیاری کمتر از ژئوتکستایل‌ها بوده است و علاوه بر آن استفاده از رزین در اجرای این ورقه‌ها باعث کاهش بیشتر نفوذپذیری این مصالح می‌شود. پس تأثیر وجود رطوبت بر مشخصات مکانیکی فصل مشترک الیاف بسیاری و خاک بیشتر خواهد بود. هم‌چنین اکثر مطالعات در مورد خاک مسلح بر روی ژئوتکستایل‌های بافته نشده و ژئوگرید انجام شده است که این گونه مصالح به صورت همسان‌گرد است. پس تاکنون مطالعاتی برای بررسی اثر غیرهمسان‌گرد بودن سطح مسلح‌کننده صورت نگرفته است. در این تحقیق اثر رطوبت و زاویه‌ی برش بر مشخصات مکانیکی فصل مشترک خاک ماسه‌ی سیلت‌دار و ورقه‌ی الیاف بسیاری بررسی شده است. بدین منظور نمونه‌های خاک با رطوبت‌های مختلف نزدیک به رطوبت بهینه تهیه شده است و اصطکاک بین آنها و دو نوع ورقه‌ی الیاف بسیاری بافته شده در یک و دو جهت بررسی شده است. برای انجام آزمایش‌ها، از دستگاه برش مستقیم استفاده شده است.

۲. مواد و مصالح مورد استفاده

۱.۲. ماسه

ماسه‌ی استفاده شده در این تحقیق از ابتدای جاده‌ی کرمان به جوبار تهیه شده است (عرض شمالی ۳۰/۱۹ و شرقی ۵۷/۰۶ درجه). این نوع ماسه به فراوانی در این

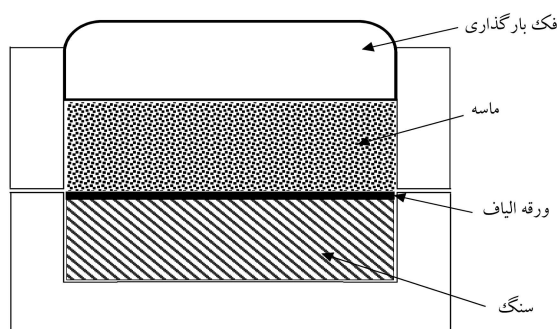
۳.۲. رزین و سخت‌کننده

الیاف کربن به‌طور معمول به‌صورت رشته‌یی هستند که از اپوکسی رزین برای به هم چسباندن این رشته‌ها استفاده می‌شود. رزین سخت شده باعث تکمیل مسیر انتقال نیرو بین رشته‌های الیاف می‌شود. معمولاً رزین با یک نوع سخت‌کننده ترکیب می‌شود. در این تحقیق از رزین RL۴۴۰ و سخت‌کننده‌ی HY۴۴۰ استفاده شده که با نسب ۲ واحد رزین و یک واحد سخت‌کننده (هاردنر) برای ساخت اپوکسی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳. تهیه‌ی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق مشخصات مکانیکی فصل مشترک دو نوع ورقه‌ی الیاف کربنی یک‌طرفه و دو طرفه که در شکل ۲ نشان داده شده است، در دو جهت متفاوت بررسی شده است. آزمایش‌ها برش برای الیاف یک‌طرفه در دو جهت امتداد طولی الیاف‌ها و عمود بر امتداد طولی الیاف و برای الیاف دوطرفه، در دو جهت امتداد طولی و زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به امتداد طولی الیاف‌ها انجام شده است. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه برش مستقیم با ابعاد 10×10 سانتی‌متر استفاده شده است. ورقه‌های الیاف اشباع‌شده با اپوکسی رزین بر روی یک قطعه سنگ گرانیتی $10 \times 10 \times 1$ سانتی‌متری آغشته به رزین چسبانده شده است و به مدت ۴۸ ساعت صبر شده است تا کاملاً سخت شود (مطابق با پژوهش توفیق و همکاران [۱] ۲۰۱۶، نامجو و همکاران [۱۵] ۲۰۱۹). برای انجام آزمایش‌ها، سنگ گرانیت در قسمت پایین جعبه‌ی برش به نحوی قرار داده شده است که ورقه‌ی الیاف کربنی دقیقاً در صفحه‌ی برش قرار گیرد. دیاگرام جعبه‌ی برش و نحوه‌ی قرارگیری ورقه‌ی الیاف کربنی در شکل ۳ نشان داده شده است.

نمونه‌های خاک با رطوبت‌های ۸٫۵، ۱۰٫۵، ۱۲٫۵ و ۱۴٫۵ درصد تهیه شده است و به گونه‌ی در داخل جعبه‌ی برش متراکم شده‌اند که وزن مخصوص خشک نمونه ۱۹٫۳ کیلونیوتن بر مترمکعب باشد. سپس آزمایش‌های برش مستقیم به‌صورت کرنش کنترل و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده‌اند. این سرعت طبق توصیه‌ی ASTM D۵۳۲۱-۱۴ انتخاب شد. در پژوهش‌های پیشین نیز این سرعت انتخابی استفاده شده است (عیدی و صفدری سگناباد [۲۵] ۲۰۱۸)، فریرا و همکاران [۲۶] ۲۰۱۵)) نحوه‌ی قرارگیری ورقه‌های الیاف کربن در داخل جعبه‌ی برش در چهار حالت متفاوت بوده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.



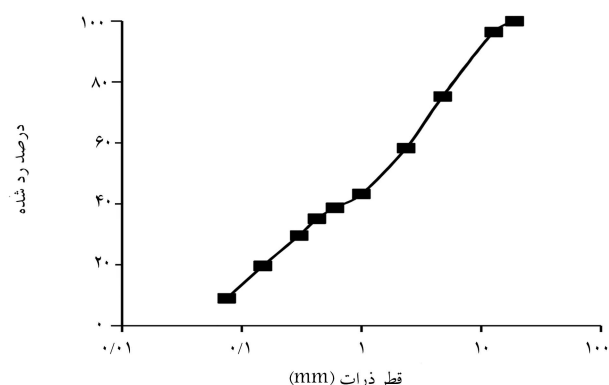
شکل ۳. جعبه‌ی برش و نحوه‌ی قرارگیری ورقه‌ی الیاف.

ناحیه از استان کرمان در دسترس قرار دارد و در پروژه‌های استانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماسه، ماسه‌ی نسبتاً ریزدانه بوده است و حاوی مقادیری سیلت نیز هست. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد استفاده، در شکل ۱ نشان داده شده است. ماسه‌ی مورد استفاده طبق سیستم طبقه‌بندی متحده در رده‌ی ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده سیلت‌دار (SM) قرار می‌گیرد. آزمایش‌های برش بر روی قسمت رد شده از الک شماره ۱۰ این خاک انجام شده است.

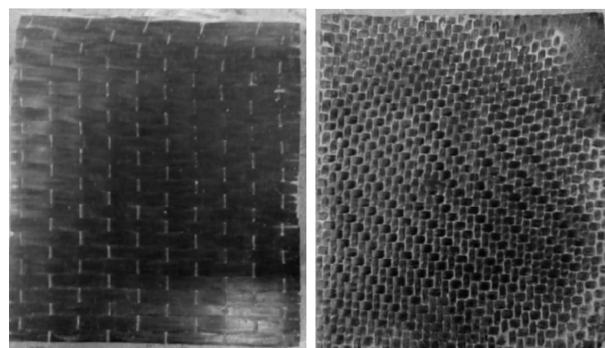
حد روانی قسمت ریزدانه $13/5$ رطوبت درجا و 5 رطوبت بهینه‌ی این ماسه $10/5$ درصد، چگالی نسبی ذرات جامد $2/65$ ، زاویه‌ی اصطکاک داخلی در حالت خشک 38 درجه (طبق استاندارد (ASTM D۳۰۸۰-۱۱) و در رطوبت $14/5$ درصد، 36 درجه و دارای چسبندگی معادل با $0/6$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است. کلیه‌ی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق مطابق با استانداردهای ASTM انجام گرفته است. [۲۴-۲۰] آزمایش‌های اندرکنش بین سطح مشترک خاک و الیاف بسپاری طبق استاندارد ASTM D۵۳۲۱-۱۴ صورت گرفته است.

۲.۲. الیاف بسپاری

ورقه‌های الیاف بسپاری مورد استفاده در این تحقیق از جنس کربنی (CFRP) بوده است و به دو صورت یک‌جهته و دو‌جهته بافته شده است. مقاومت کششی الیاف یک‌طرفه و دوطرفه به‌ترتیب 425 و 310 مگاپاسکال و وزن واحد سطح آنها 675 و 780 گرم بر مترمربع است. تصاویر الیاف مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. الیاف موردنظر تولید شده در کارخانه‌ی کواتوم کشور انگلیس است و خصوصیات آن از روی کانالوگ موجود به دست آمده است.



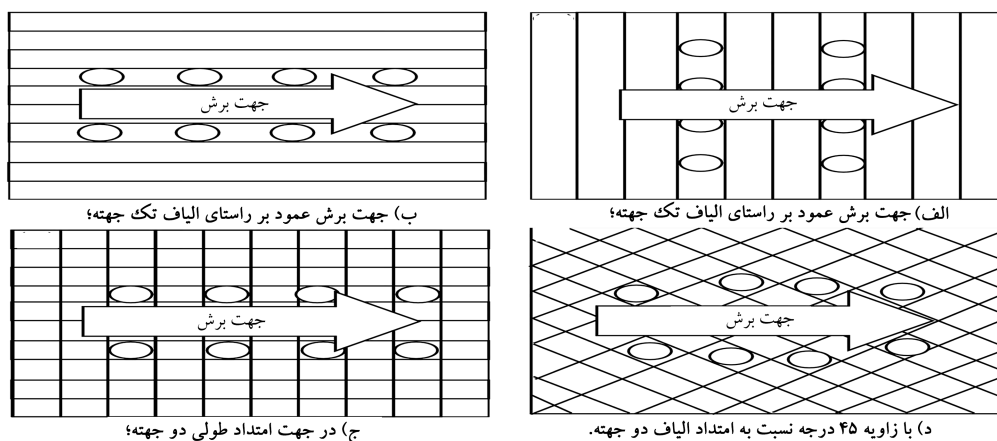
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک.



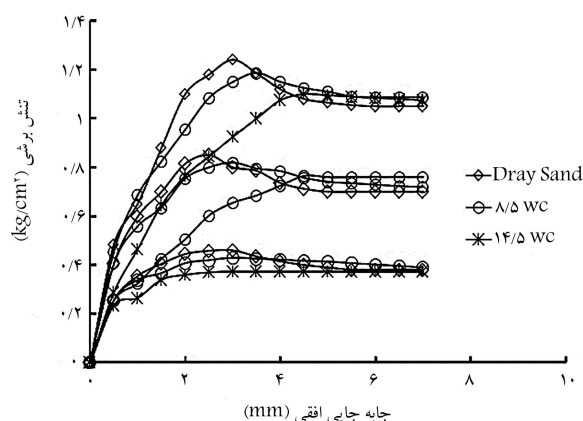
ب) تک جهته.

الف) دو جهته؛

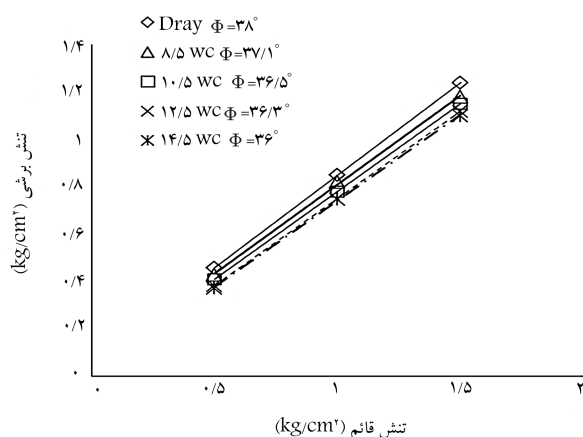
شکل ۲. ورقه‌های الیاف بسپاری مورد استفاده.



شکل ۴. آرایش ورقه‌های الیاف.



شکل ۵. نتایج برش خاک با رطوبت‌های مختلف خاک (خشک (Dry Sand)، ۸/۵ درصد و ۱۲/۵ درصد) تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.



شکل ۶. پوش گسیختگی خاک با رطوبت‌های مختلف خاک در حالت‌های مختلف رطوبتی.

در شکل ۸ پوش گسیختگی موهر - کولمب برای نمونه‌های الیاف یک‌طرفه‌ی آرایش الف نشان داده شده در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت برشی و زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورق الیاف کربنی مربوط به حالت خشک بوده و افزایش میزان رطوبت باعث کاهش مقاومت برشی فصل مشترک ماسه با ورقه الیاف کربنی شده است.

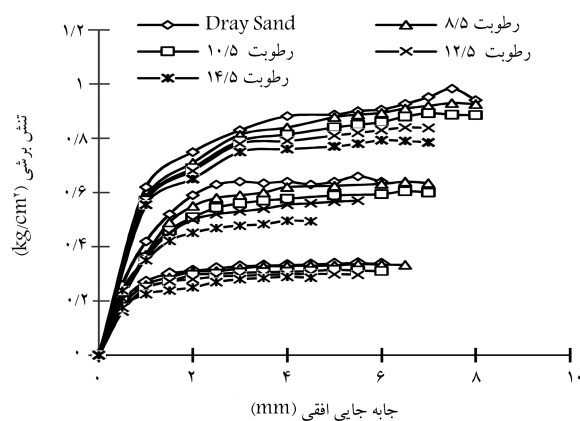
۴. نتایج آزمایش‌ها

۴.۱. مقاومت برشی خاک

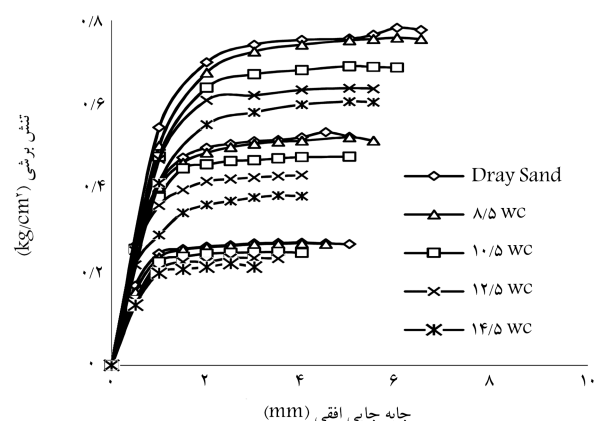
نمودار جابه‌جایی برشی افقی - تنش برش بیشینه و پوش گسیختگی خاک ماسه‌ی سیلتی تحت اثر رطوبت‌های مختلف (خشک ۸/۵ درصد و ۱۴/۵ درصد) به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. به دلیل اختلاف بسیار ناچیز بین نمودارهای ۸/۵ و ۱۰/۵ و ۱۲/۵ درصد، فقط نمودار تنش برشی - جابه‌جایی افقی در حالت خشک، ۸/۵ درصد و ۱۴/۵ درصد ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد رطوبت، میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک از خود کاهش نشان می‌دهد. این کاهش معادل ۵ درصد است که با نتایج تحقیق فریرا و همکاران در سال ۲۰۱۵^[۲۶] بر روی خاک ماسه سیلتی مطابقت دارد. دلیل این امر را می‌توان کاهش قفل و بست بین دانه‌های خاک در حالت با رطوبت بالاتر دانست. افزایش رطوبت باعث کاهش قفل‌شدگی بین ذرات خاک می‌شود و باعث افت در زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در حالت خشک نمونه‌ی خاک پس از رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت برشی با یک افت نسبی مواجه شده است. دلیل این امر را می‌توان تسلیم خاک و از بین رفتن چفت و بست بین ذرات خاک دانست. مشابه این نتایج در تحقیق نامجو و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۵] مشاهده شده است. آنها نشان دادند در حالت خشک، خاک پس از رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت برشی با یک افت نسبتاً شدید به سمت ناحیه‌ی تسلیم (ناحیه‌ی بحرانی) میل پیدا می‌کند. در حالت رطوبت ۱۴/۵ درصد خاک پس از رسیدن به مقاومت برشی بیشینه دیگر افتی از خود نشان نمی‌دهد و با افزایش جابه‌جایی کاهش یا افزایشی در مقاومت برشی بیشینه مشاهده نمی‌شود. خاک در حالت خشک از خود چسبندگی برابر ۰/۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داده است و با افزایش رطوبت این میزان چسبندگی تغییرات فاحشی از خود نشان نداده و در حالت رطوبت ۱۴/۵ درصد به ۰/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است.

۴.۲. اصطکاک سطح مشترک ماسه و ورقه‌ی الیاف یک‌طرفه

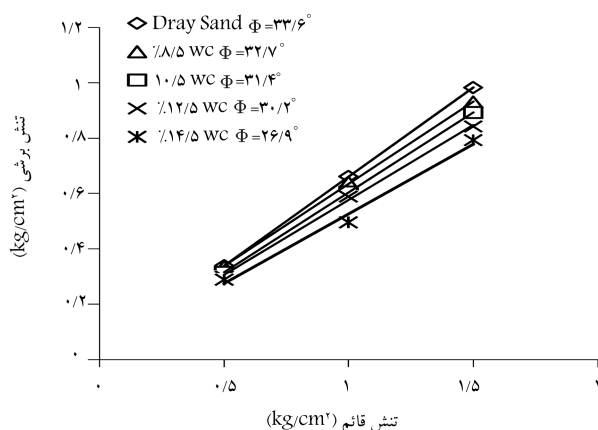
در شکل ۷ نتایج آزمایش برش فصل مشترک ماسه با ورقه‌ی الیاف کربنی یک‌طرفه که جهت برش مطابق آرایش الف به موازات طولی الیاف است، نشان داده شده است. کلیه‌ی آزمایش‌های برش انجام شده تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال صورت گرفته است.



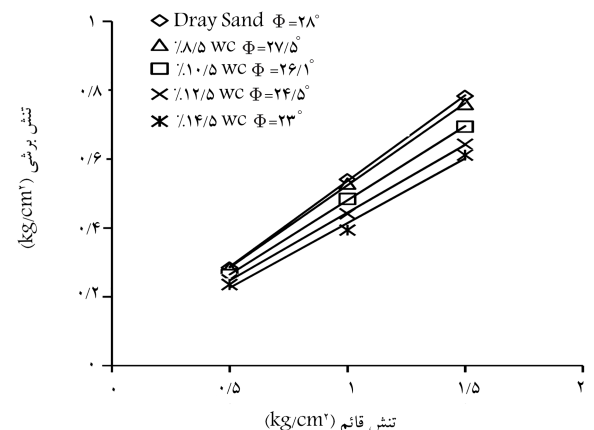
شکل ۹. نتایج برش در جهت عمود بر طول الیاف یک طرفه (آرایش ب) با رطوبت‌های مختلف خاک تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.



شکل ۷. نتایج برش در جهت طولی الیاف یک طرفه با رطوبت‌های مختلف خاک تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۰. پوش گسیختگی برای فصل مشترک خاک و الیاف یک طرفه در جهت عمود بر طول الیاف.

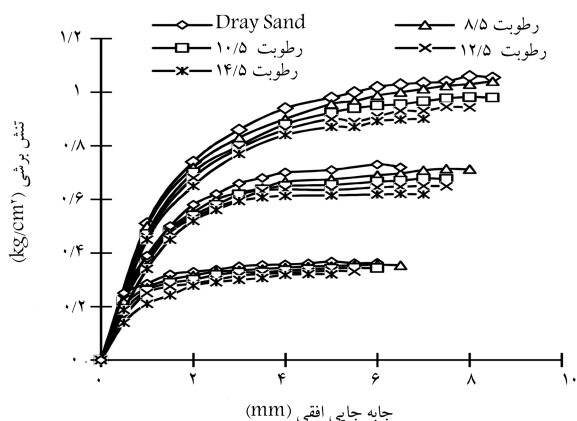


شکل ۸. پوش گسیختگی برای فصل مشترک خاک و الیاف یک طرفه‌ی آرایش.

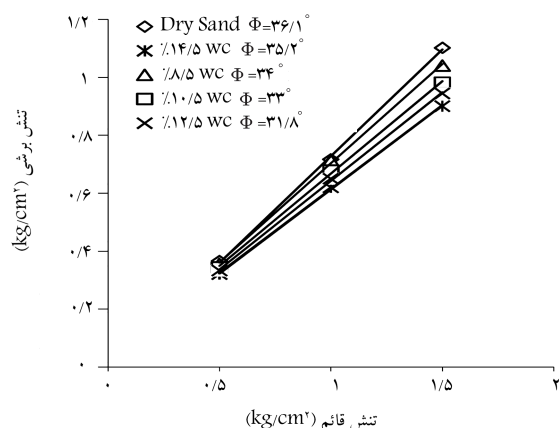
عمود بر امتداد طولی الیاف مطابق آرایش ب نشان داده شده است. شکل ۱۰ پوش گسیختگی موهر-کولمب را برای فصل مشترک خاک با الیاف یک طرفه در جهت عمود بر امتداد طولی الیاف را نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی پوش‌های گسیختگی که از نتایج آزمایش‌های برش فصل مشترک در جهت طولی و عمود بر جهت طولی، (آرایش‌های شماره‌ی الف و ب) که در شکل‌های ۸ و ۱۰ نشان داده شده است، بیانگر آن است که تغییر جهت برش باعث افزایش مقاومت برشی در محل فصل مشترک خاک و ورقه‌ی الیاف کربنی یک طرفه می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، مقاومت برشی در جهت عمود بر امتداد طولی الیاف (آرایش ب) بیشتر شده است. با توجه به نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۱۰، مقدار زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف کربن در شرایط خشک در جهت طولی و عمود بر امتداد الیاف به ترتیب ۳۳/۶ و ۲۸ درجه بوده‌اند. دلیل استفاده از این نوع الیاف اجرای لایه‌لایه‌ی خاک‌ریز و جلوگیری از ایجاد حالت گسیختگی برشی است. پالمیرا^[۲۷] (۲۰۰۹) نشان داد استفاده از مسلح‌کننده با طول تأثیر مؤثر و ارتفاع لایه‌های مناسب باعث ایجاد نیروهای مقاوم درون توده‌ی خاک و یکپارچه عمل کردن سازه‌ی خاکی مسلح شده با الیاف تسلیح می‌شود. استفاده از مسلح‌کننده‌ها باعث افزایش نیروهای مقاومتی در توده‌ی خاک از طریق نیروی کششی ایجاد شده توسط مسلح‌کننده می‌شود و در نتیجه

علاوه بر این دیده می‌شود که با افزایش تنش قائم، مقاومت برشی بیشینه‌ی نظیر این تنش قائم افزایش از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر دیده شد که در حالت خشک زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک خاک با الیاف ۲۸ درجه بوده و با افزایش رطوبت تا حالت رطوبت بهینه (۱۰/۵ درصد) زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک ۷ درصد کاهش از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین مشاهده شد در حالت رطوبت معادل ۱۴/۵ درصد زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک تا میزان ۲۳ درجه کاهش یافته است و این تأثیر منفی رطوبت بر اندرکنش خاک با الیاف با این نوع آرایش را نشان می‌دهد. در مقایسه‌ی حالت خشک نمونه‌ی خاک به‌تنهایی و خاک با الیاف با این نوع آرایش (موازی راستای برش) ۳۵ درصد کاهش در زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک مشاهده می‌شود. این نتیجه با مشاهدات توفیق و همکاران در سال ۲۰۱۶^[۱] مطابقت دارد. چسبندگی خاک و الیاف در این نوع آرایش در حالت خشک ۰/۰۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بود و با افزایش رطوبت این میزان چسبندگی در خاک با رطوبت ۱۴/۵ درصد تا میزان ۰/۰۶ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع از خود افزایش نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان افزایش چسبندگی بین سطح جزء تسلیح و خاک با افزایش رطوبت دانست. به‌دلیل ناچیز بودن این چسبندگی می‌توان از آن صرف نظر کرد. نامجو و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۵] و توفیق و همکاران (۲۰۱۶)^[۱] نشان دادند الیاف بسیاری کربنی با خاک تحت اثر حالت‌های رطوبتی متنوع (خشک و اشباع) چسبندگی ناچیزی ایجاد کرده است که قابل چشم‌پوشی است. در شکل ۹ نتایج آزمایش‌های برش فصل مشترک روی نمونه‌های الیاف یک طرفه در جهت



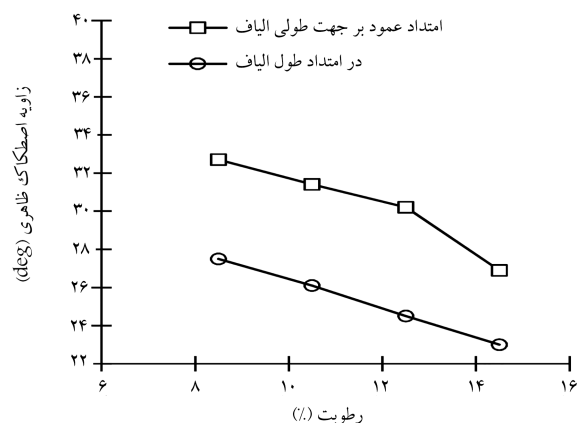
شکل ۱۲. نتایج برش در جهت عمودی الیاف دوطرفه با رطوبت‌های مختلف خاک تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۳. پوش گسیختگی موهر کولمب فصل مشترک الیاف دوطرفه با رطوبت‌های مختلف خاک در جهت عمودی.

درصد رطوبت از حالت خشک به خاک با درصد رطوبت معادل با ۱۴/۵ درصد، زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک خاک با الیاف دوجبه‌ای با آرایش ج با کاهش ۴/۳ درجه مواجه شده است. علاوه بر این با مقایسه‌ی حالت خشک این نوع آرایش و حالت خشک خود خاک می‌توان دریافت که زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک با این نوع الیاف ۵ درصد کمتر از زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است. علاوه بر این دیده می‌شود که در حالت رطوبت معادل ۱۴/۵ درصد، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ۱۳ درصد بیشتر از زاویه‌ی اصطکاک خاک با الیاف بوده است. با مقایسه‌ی شکل ۱۳ و ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که الیاف دوجبه‌ای در حالت خشک ۷/۵ درصد بیشتر از الیاف تک‌جبه‌ای عمود بر راستای برش مقاومت اصطکاکی ایجاد کرده است و این مقایسه نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر این نوع الیاف (دوجبه‌ای) نسبت به الیاف تک‌جبه‌ای در اندرکنش خاک و جزء تسلیح است. میزان چسبندگی به‌دست آمده در حالت خشک معادل با ۰/۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است و این میزان چسبندگی با افزایش رطوبت تا مقدار ۰/۰۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر افزایش می‌یابد. آزمایش‌های انجام شده روی ورقه‌های الیاف دوطرفه در جهت زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به الیاف طولی و عرضی (آرایش د) نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. پوش گسیختگی موهر - کولمب نیز برای این آزمایش‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به آزمایش برش فصل مشترک نشان داده شده در



شکل ۱۱. تأثیر میزان رطوبت در زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف بسیاری.

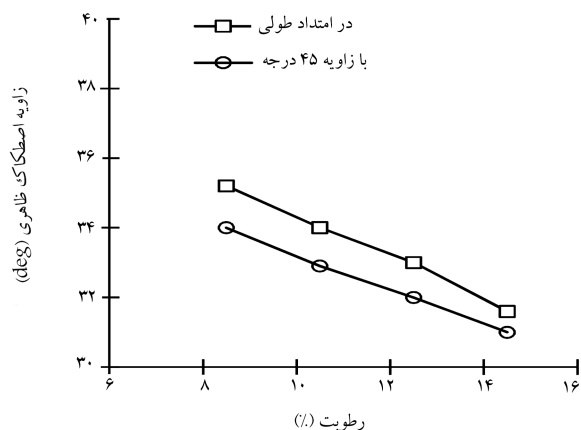
موجب کاهش تغییر شکل‌های افقی و افزایش پایداری کلی در سازه‌های خاکی می‌شود.

در شکل ۹ نیز تأثیر میزان رطوبت خاک در زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف کربنی نشان داده شده است. با توجه به نتایج مستخرج از شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت افزایش رطوبت از حالت خشک به خاک با درصد رطوبت معادل با ۱۴/۵ درصد، باعث کاهشی معادل با ۲۴/۹ درصد در زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک خاک با الیاف بسیاری کربنی در جهت عمود بر راستای برش (آرایش ب) می‌شود.

علاوه بر این در حالت خشک مشاهده گردید که زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک در آرایش عمود بر راستای برش (آرایش ب) افزایشی معادل با ۲۰ درصد نسبت به زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک در راستای موازی با جهت برش دارد. این نتیجه مطابق با نتیجه‌ی مستخرج از پژوهش نامجو و همکاران ۲۰۱۹ بوده است. آنها نشان دادند الیاف عمود بر راستای برش زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بیشتری نسبت به الیاف موازی در راستای برش دارند. دلیل این امر آن است که برخلاف حالتی که خاک در راستای برش بر روی المان می‌لغزد (آرایش الف)، در حالت الیاف در راستای عمود، بندهای الیاف مانع از جابه‌جایی خاک می‌شود و باعث افزایش مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک می‌شود. از مقایسه‌ی نتایج خاک در حالت خشک و اندرکنش خاک با الیاف عمود بر راستای برش می‌توان دریافت که زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک خاک با الیاف ۱۳ درصد از زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک کمتر است. نتایج نشان داد در حالت خشک چسبندگی بین این الیاف و ۰/۰۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است و با افزایش رطوبت تا درصد رطوبت معادل ۱۴/۵ درصد این میزان چسبندگی تا مقدار ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که وجود رطوبت باعث کاهش اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف می‌شود. این کاهش در هر دو نوع الیاف مشاهده می‌شود. نتایج مشابهی برای ژئوتکستایل بافته شده و نشده نیز گزارش شده است. [۱۲ و ۱۳]

۳.۴. اصطکاک سطح مشترک ماسه و ورقه‌ی الیاف دوطرفه

در شکل ۱۲ نتایج آزمایش‌های برش فصل مشترک بر روی الیاف دوطرفه در جهت الیاف (مطابق آرایش ج) و در شکل ۱۳ پوش گسیختگی مربوط به این آزمایش‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش



شکل ۱۶. تأثیر رطوبت بر زاویه اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف بسیاری دوطرفه.

موازی الیاف و زاویه‌ی ۴۵ درجه با امتداد الیاف به دست آمده، نشان داده شده است.

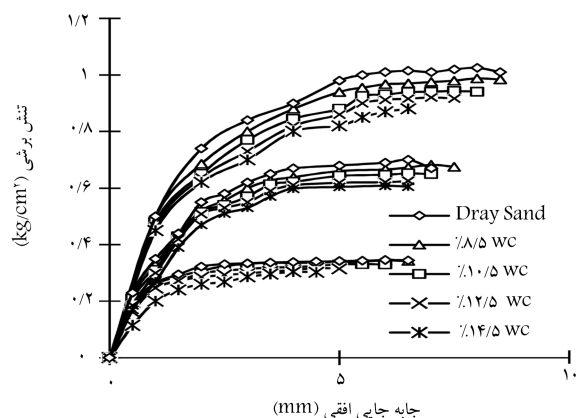
همان‌گونه که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، در الیاف دوطرفه نیز افزایش رطوبت باعث کاهش اصطکاک سطح مشترک بین الیاف و خاک می‌شود. از مقایسه‌ی این نتایج با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی الیاف یک‌طرفه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نتیجه می‌شود که تأثیر کاهش رطوبت بر اصطکاک سطح مشترک بین خاک و الیاف دوطرفه به مراتب کمتر از الیاف یک‌طرفه است.

همان‌گونه که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، مقاومت برشی فصل مشترک خاک با الیاف کربنی دوطرفه در جهت طولی یا عرضی الیاف‌ها بیشتر از مقاومت برشی فصل مشترک همان خاک با الیاف یک‌طرفه با جنس مشابه است. با توجه به شکل (د) و مقایسه‌ی آرایش‌های (الف و ب) با آرایش‌های (ج و د) می‌توان چنین نتیجه گرفت که در حالت دوطرفه امکان جابه‌جایی ذرات خاک کمتر است و وجود شیارهای طرف دیگر حرکت آزاد ذرات را مقید می‌کند. پس در چنین شرایطی نیروی بیشتری برای ایجاد لغزش بین خاک و الیاف مورد نیاز است.

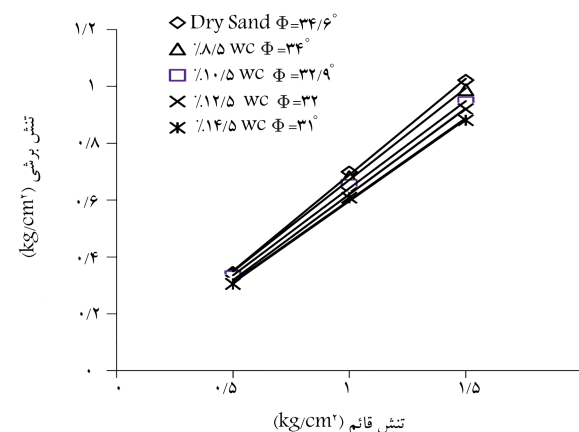
مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با رطوبت‌های مختلف که روی هر دو نوع الیاف انجام شده است، نشان می‌دهد که حساسیت مقاومت برشی فصل مشترک نسبت به جهت برش در الیاف دوطرفه کمتر از الیاف یک‌طرفه است. همچنین نرخ کاهش اصطکاک سطح مشترک بین خاک و الیاف نسبت به افزایش رطوبت در الیاف دوطرفه کمتر است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر میزان رطوبت و جهت برش بر زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک ماسه‌یی سیلت‌دار و ورقه‌های الیاف بسیاری کربنی بررسی شد. آزمایش‌های برش فصل مشترک برای هر دو نوع الیاف با دو جهت متفاوت انجام گرفت. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده می‌توان دید که زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف بسیاری دوطرفه به مراتب بیشتر از الیاف یک‌طرفه است. دلیل این امر را می‌توان به وجود شیارهای موازی در هر دو جهت نسبت داد که باعث ایجاد محدودیت حرکت ذرات خاک می‌شود. علاوه بر این مقاومت برشی فصل مشترک خاک با الیاف کربنی تابع جهت الیاف و درصد رطوبت است و



شکل ۱۴. نتایج برش در جهت ۴۵ درجه روی الیاف دوطرفه با رطوبت‌های مختلف خاک تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۵. پوش گسیختگی موهر کولمب فصل مشترک الیاف دوطرفه با رطوبت‌های مختلف خاک در جهت ۴۵ درجه.

اشکال ۱۳ و ۱۵ نشان می‌دهد که مقاومت برشی فصل مشترک خاک و ورقه‌های الیاف کربنی در جهت طولی یا عرضی الیاف بیشتر از مقاومت برشی فصل مشترک همان خاک و همان الیاف در جهت مورب با زاویه‌ی ۴۵ درجه است. دلیل این امر این نکته است که در راستای ۴۵ درجه سطح مقاوم کمتری مانع از جابه‌جایی ذرات می‌شود؛ در صورتی که در حالت ۹۰ درجه بندهای الیاف به عنوان یک مانع کامل عمل می‌کنند و با رسیدن دانه‌های ماسه به این بندها، نمونه از خود مقاومت برشی بیشتری نشان می‌دهد و چفت بست بیشتری بین بندهای الیاف ۹۰ درجه دوجته و خاک ایجاد می‌شود که سبب افزایش مقاومت برشی بیشینه و در نتیجه زاویه‌ی اصطکاک اندرکنشی می‌شود.

علاوه بر این مشاهده شد که استفاده از این آرایش الیاف در سطح مشترک خاک، باعث کاهش ۱۰ درصدی زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک در حالت خشک می‌شود. علاوه بر این می‌توان دید که میزان چسبندگی در سطح مشترک خاک با الیاف با زاویه‌ی ۴۵ درجه در حالت خشک معادل ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است و این نوع الیاف باعث ایجاد چسبندگی قابل ملاحظه‌یی در سطح مشترک خاک و الیاف نمی‌شود. همچنین نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای ورقه‌های الیاف دوطرفه نیز افزایش رطوبت خاک باعث کاهش مقاومت برشی فصل مشترک خاک و ورقه‌ی الیاف می‌شود. در شکل ۱۶ مقادیر زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف بسیاری دوطرفه که از آزمایش‌های برش در دو جهت

اصطکاک سطح مشترک بین خاک و الیاف دوجته‌ی عمود بر راستای برش به ترتیب ۴/۳، ۷/۵ و ۲۹ درصد بزرگ‌تر از زاویه‌ی اصطکاک اندرکنش در سطح مشترک خاک به الیاف دوجته با زاویه‌ی ۴۵ درجه، الیاف تک‌جته‌ی عمود و الیاف تک‌جته‌ی موازی جهت برش است. علاوه بر این مشاهده شد که چسبندگی بین خاک و جزء تسلیح دارای محدوده‌ی عددی بین ۰/۲ و ۰/۹ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و ۰/۹ و ۰/۹ کیلوگرم بر سانتی مترمربع بوده است که قابل چشم پوشی‌اند. علاوه بر این، می‌توان دید که افزایش میزان رطوبت خاک باعث کاهش اصطکاک بین خاک و ورقه‌ی الیاف کربنی می‌شود. بیشترین مقدار زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و الیاف کربن در هر دو نوع یک و دوطرفه در حالت خشک ایجاد می‌شود.

تغییر زاویه‌ی برش باعث تغییر مقاومت برشی فصل مشترک این مصالح می‌شود. بر اساس این نتایج می‌توان دریافت که نسبت ضریب اصطکاک بین خاک و الیاف یک‌طرفه در جهت طولی نسبت به خود خاک حدود ۰/۷۳ و در جهت عمود بر امتداد الیاف ۰/۸۸ بوده است که این اختلاف قابل ملاحظه است. در مورد الیاف دوطرفه این نسبت‌ها به ترتیب ۰/۹۱ با زاویه‌ی ۴۵ درجه و ۰/۹۵ در امتداد عمود بر الیاف بوده است. در حالت خاک با رطوبت معادل ۱۴/۵ درصد، ضریب اصطکاک الیاف دوجته عمود بر راستای برش ۰/۸۸ است. با توجه به این موارد می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت زاویه‌ی اصطکاک سطح مشترک بین خاک و ورقه‌ی الیاف کربنی یک‌طرفه نسبت به زاویه‌ی برش به مراتب بیشتر از حساسیت الیاف دوطرفه است. در حالت خشک نتایج نشان داد که زاویه‌ی

منابع (References)

1. Toufigh, V., Ouria, A. and Desai, C.S. "Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand", *Journal of Testing and Evaluation*, **44**(1), pp. 385-390 (2016).
2. Meier, U. "Carbon fiber reinforced polymers: Modern materials in bridge engineering", *Structural Engineering International*, **2**(1), pp. 7-12 (1992).
3. Miyata, K. "Walls reinforced with fiber reinforced plastic geogrids in Japan", *Geosynthetics International*, **3**(1), pp. 1-11 (1996).
4. Ouria, A., Toufigh, V., Desai, C. and et al. H. "Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall", *Geomechanics and Engineering*, **10**(6), pp. 757-774 (2016).
5. Shiu, H.Y. and Cheung, R. W. "Long-term durability of steel soil nails in Hong Kong", *HKIE Transactions*, **15**(3), pp. 24-32 (2008).
6. Sawicki, A. and Kazimierowicz-Frankowska, K. "Creep behaviour of geosynthetics", *Geotextiles and Geomembranes*, **16**(6), pp. 365-382 (1998).
7. Kaw, A.K., *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, London: CRC press (2005).
8. Frost, J.D. and Han, J. "Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(8), pp. 633-640 (1999).
9. Zhang, C., Zhu, H., Shi, B. and et al. "Experimental investigation of pullout behavior of fiber-reinforced polymer reinforcements in sand", *J. Compos. Constr.*, **19**(3), pp. 04014062, DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000526 (2015).
10. Sakr, M., El Naggar, M.H. and Nehdi, M. "Interface characteristics and laboratory constructability tests of novel fiber-reinforced polymer/concrete piles", *Journal of Composites for Construction*, **9**(3), pp. 274-283 (2005).
11. V. Saeid, F., Toufigh, V. and et al. Toufigh, "Laboratory study of Soil-CFRP interaction using pull-out test", *International Journal of Geomechanics and Geoengineering*, **9**(3), pp. 208-214 DOI:10.1080/17486025.2013.813650 (2014).
12. Hatami, K., Garcia, L. and Miller, G. "A Moisture reduction factor for pullout resistance of geotextile reinforcement in marginal soils", *Geo-Frontiers Congress*, 3576-3586 (2011).
13. Abu-Farsakh, M., Coronel, J. and Tao, M. "Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests", *J. Mater. Civ. Eng.*, **11**(7), pp. 540-549 (2007).
14. De Rossi, A., Carvalheiras, J., Novais, R.M. and et al. "Waste-based geopolymeric mortars with very high moisture buffering capacity", *Construction and Building Materials*, **191**, pp. 39-46 (2018).
15. Namjoo, A.M., Toufigh, M.M. and Toufigh, V. "Experimental investigation of interface behaviour between different types of sand and carbon fibre polymer", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-20 (2019).
16. Kamseu, E., Mohamed, H., Sofack, J.C. and et al. "Moisture control capacity of geopolymer composites: Correlation of the bulk composition-pore network with the absorption-desorption behavior", *Transport in Porous Media*, **122.1**, pp. 77-95 (2018).
17. King, Julia A., Faith A. Morrison, Jason M. and et al. "Electrical conductivity and rheology of carbon liquid crystal polymer composites", *Journal of applied polymer science*, **101**, pp. 42680-2688 (2006).
18. Miller, M.G., Keith, J.M., King, J.A. and et al. "Comparison of the filled source methods for carbon plane flow and transient heat the guarded nylon 6, 6 composites: Experiments and modeling", *Journal of Applied Polymer Science*, **99**(5), pp. 2144-2151 (2006).
19. Almallah, A., Sadeghian, P. and El Naggar, H. "Enhancing the interface friction between glass fiber-reinforced polymer sheets and sandy soils through sand coating", *Geomechanics and Geoengineering*, **15**(3), pp. 186-202 (2019).

20. ASTM D422-63: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
21. ASTM D2216-05: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2005).
22. ASTM D2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2011).
23. ASTM D3080-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2004).
24. ASTM D5321-14: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2007).
25. Abdi, M.R. and Safdari Seh Gonbad, M. "Enhancement of soil-geogrid interactions in direct shear mode using attached elements as anchors", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **22**, pp. 1-19 (2018).
26. Ferreira, F.B., Vieira, C.S. and Lopes, M. "Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type." *Geosynthetics International*, **22**(3), pp. 257-272 (2015).
27. Palmeira, E.M. "Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(5), 368-390 (2009).