



تاثیر الیاف طبیعی بازالت بر خصوصیات مکانیکی خاک رس شهر ری

نسترن خرم^۱، علی محمد رجبی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

^۲ گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۲۸

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۰۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۱۸

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک

الیاف بازالت

مقاومت تک محوری

مقاومت کششی

آزمایش میکروسکوپ الکترونی SEM

خلاصه: یکی از روش های مکانیکی تثبیت خاک، استفاده از الیاف مسطح کننده مانند ژئوتکستایل ها، ژئوگریدها و الیاف طبیعی یا مصنوعی می باشد. در سال های اخیر، استفاده از الیاف مصنوعی و یا طبیعی منفصل با توزیع تصادفی جهت بهبود خواص مکانیکی خاک متداول گردیده است. نوع جدیدی از الیاف که منشأ طبیعی داشته و تولید و کاربرد آن هیچ گونه آثار زیست محیطی ندارد، الیاف بازالت است. از مزایای برجسته این نوع الیاف، مقاومت بسیار بالا در محیط های اسیدی، قلیایی و نمکی و مشخصات مکانیکی قابل رقابت با سایر الیاف می باشد. بدین منظور در این تحقیق، علاوه بر آزمایش های شناسایی، مجموعه ای از آزمایش های تراکم اصلاح شده، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی و آزمایش میکروسکوپ الکترونی SEM بر روی خاک رس تثبیت شده با الیاف طبیعی بازالت با توزیع تصادفی انجام شده است. تمرکز این تحقیق عمدتاً بر روی تاثیر طول و درصد وزنی الیاف بر پارامترهای مقاومتی خاک بوده است. بدین منظور جهت ساخت نمونه ها، الیاف بازالت در درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲ و با سه طول مختلف ۶، ۱۲، ۲۵ میلیمتر با خاک مخلوط شده، سپس با درصد رطوبت بهینه متراکم گردیده است. نتایج نشان می دهد با افزایش درصد وزنی و طول الیاف، مقاومت فشاری و کششی، ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. اما در حالت کلی مقاومت فشاری و کششی خاک مسلح شده با الیاف بیشتر از خاک غیرمسلح می باشد و نمونه های مسلح شده، در تمامی حالت ها شکل پذیری بیشتری نسبت به نمونه های غیرمسلح دارند.

۱- مقدمه

جهت بهبود خواص مهندسی آن مطرح است، که از آن جمله می توان به روش تسلیح خاک اشاره نمود. با مسلح نمودن خاک، می توان تا حدود زیادی بر این ضعف غلبه کرد. خاک مسلح شامل دانه های خاک جهت تحمل تنش های فشاری و یکسری الیاف به منظور تحمل تنش کششی می باشد که از طرفی سبب افزایش مقاومت کششی و از سوی دیگر به دلیل اصطکاک موجود در سطح تماس خاک و مصالح مسلح کننده، منجر به افزایش مقاومت برشی خاک می شوند [۲].

از نظر ابعادی، الیاف مورد استفاده جهت تسلیح خاک را می توان به دو دسته میکروتسلیحات و ماکروتسلیحات تقسیم بندی کرد. روش ماکروتسلیحات بر مبنای استفاده از الیاف مسلح

برخی از خاک ها به علت دارا بودن ویژگی های فنی نامطلوب و یا دارا بودن مقادیر قابل توجهی رس یا لای برای برخی از پروژه های عمرانی مناسب نیستند. هرگاه به دلایلی، امکان تغییر مکان پروژه و تعویض خاک نبوده و یا اینکه هزینه تعویض خاک مقرون به صرفه نباشد باید روش اصلاح و بهبود خاک مورد بررسی قرار گیرد تا چنانچه این روش از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد مبادرت به انجام آن شود [۱]. هرچند خاک دارای مقاومت فشاری خوبی می باشد، اما به دلیل ضعف در مقاومت برشی و کششی، همواره روش های مختلفی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: amrajabi@ut.ac.ir



کننده ای است که ابعاد آن ها در مقایسه با اندازه و ذرات خاک بزرگ بوده و از قدرت کششی بالایی برخوردار می باشند. از جمله این مواد می توان به نوارهای فولادی و مواد مصنوعی پلیمری همچون ژئوتکستایل و صفحات مشبک اشاره کرد. روش میکروتسلیحات به استفاده از الیاف و تراشه های نازک و خرد شده نظیر الیاف پلاستیکی خرد شده، براده فلزات، الیاف پلیمری که با خاک مخلوط می گردد، اطلاق می شود. به دلیل تشکیل جرم همگن در روش مسلح سازی به کمک الیاف با توزیع تصادفی، مقاومت همگن و همسان در خاک ایجاد می شود. همچنین برخلاف سایر روش های تسلیح خاک که المان کششی افقی می باشند، در این روش صفحات ضعیف در توده خاک تشکیل نشده و نیاز به محاسبات پیچیده و در نظر گرفتن طول مدفون یا مهاری نمی باشد. به این دلیل در بسیاری از موارد مسلح سازی با توزیع تصادفی ترجیح داده می شود [۳].

در سال های اخیر استفاده از الیاف مصنوعی یا طبیعی برای تقویت خاک ها با توجه به مزیت های نسبی شان افزایش چشمگیری داشته است. این موضوع باعث شده مطالعات وسیعی در خصوص تعیین اثر این مصالح بر مشخصات مکانیکی خاک در جریان باشد. اهمیت فراوان جلوگیری از آلودگی محیط زیست به سبب تجزیه پذیری زمان بر ضایعات پلیمری دفع شده مانند پلی پروپیلن و از طرفی به دلیل کمبود زمین مناسب برای ساخت و ساز و اهمیت تثبیت خاک های سست، محققین را بر آن داشته است تا به بررسی استفاده از الیاف طبیعی و سازگار با محیط زیست در بهبود خواص مهندسی خاک و جایگزینی آنها با مواد معمول بپردازند.

در سال ۲۰۰۸ برخی از محققان نوعی خاک منبسط شونده را با استفاده از الیاف بازالت تقویت کردند. نتایج نشان داد با افزودن الیاف بازالت، مقاومت کششی افزایش یافته و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می یابد [۴]. در سال ۲۰۱۳ استفاده از الیاف بازالت جهت بهبود مشخصات مکانیکی آسفالت مورد توجه قرار گرفت و تاثیر الیاف بازالت بر ویژگی های آسفالت در دمای پایین مورد بررسی قرار گرفت. افزودن الیاف بازالت سبب افزایش مقاومت کششی شده و کرنش های نهایی را تقریباً ۴۵ درصد کاهش می دهد. نتایج آزمایش های خستگی نیز نشان داد افزودن الیاف بازالت، مقاومت آسفالت را در برابر خستگی افزایش می دهد [۵]. در سال ۲۰۱۵ مطالعه موردی بر روی تغییرات مشخصات مکانیکی خاک منبسط شونده منطقه نانیانگ با

افزودنی های آهک و الیاف بازالت انجام شد. بررسی ها نشان داد افزودن آهک به خاک، حداکثر چگالی خشک و شاخص خمیری را کاهش داده و رطوبت بهینه را افزایش می دهد. در نهایت افزودن الیاف بازالت سبب افزایش مقاومت کششی نمونه شده و و نمونه متحمل شکست نرم خواهد می شود [۶]. محققین دیگری در همان سال، مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس مسلح شده با الیاف بازالت با طول و درصد های مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند (الیاف بازالت به طول های ۰/۴، ۰/۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۵ میلیمتر و با نسبت وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵، ۰/۳۰ و ۰/۳۵ درصد). نتایج نشان داد الیاف بازالت سبب افزایش مقاومت فشاری تک محوری شده و مقدار بهینه به ازای ۰/۲۵ درصد و طول ۱۲ میلیمتر الیاف بازالت بدست می آید. همچنین شکل پذیری نمونه های مسلح شده به الیاف نسبت به نمونه های تقویت نشده افزایش یافت [۷]. شاهرضاگماسبی (۱۳۹۵) میزان تاثیر استفاده از الیاف بازالت و پلی پروپیلن را به عنوان تقویت کننده، بر مشخصات عملکردی بتن مورد بررسی قرار دادند. افزودن الیاف بازالت با درصدها و طول های مختلف به بتن، مقاومت خمشی، انرژی شکست و مقاومت سایشی بتن را افزایش داده و با افزودن پلی پروپیلن به بتن مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن افزایش می یابد [۸]. حاجتی مدارایی (۱۳۹۵) به منظور بهسازی خواص مقاومتی بتن، از الیاف بازالت به طول ۶ میلیمتر و به میزان ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ درصد از حجم کل مخلوط بتن، در بتن سبک استفاده کرده و نشان داد افزودن الیاف سبب بهبود مقاومت های مکانیکی به ازای کلیه درصدهای حجمی مصرفی و کاهش جزئی جذب آب در درصدهای ۰/۱ و ۰/۲ می شود [۹]. طهمورسی و همکاران (۱۳۹۵) اثر مقادیر مختلف دوده سیلیس و الیاف بازالت خرد شده بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت های سیمانی مسلح به الیاف را مورد بررسی قرار دادند. ایشان تأثیر دوده سیلیسی را با درصدهای مختلف ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بر عملکرد الیاف بازالت خرد شده با طول ۶ میلی متر و با درصدهای حجمی ۰، ۱ و ۱/۵ درصد در کامپوزیت های سیمانی مورد مطالعه قرار داده و مقاومت فشاری، مدول گسیختگی، جذب نهایی آب و چگالی کامپوزیت های سیمانی ساخته شده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده از سنجش نمونه های کامپوزیتی نشان داد که افزودن الیاف موجب افزایش قابل توجهی در مدول گسیختگی شده و حضور دوده سیلیس موجب افزایش خواص

۰/۷۵ درصد پلی پروپیلن مقاومت تا ۷۰ درصد افزایش یافت و با افزودن ۰/۷۵ الیاف بازالت مقاومت به اندازه ۴۱/۲ درصد و مقاومت بعد از ۱۵ دوره ذوب و یخبندان به اندازه ۲۷/۱ درصد افزایش نشان داد. همچنین مدول ارتجاعی تمامی نمونه ها بعد از دوره های ذوب و یخبندان کاهش یافت، در صورتیکه نمونه های مسلح شده به الیاف قبل و بعد از دوره های ذوب و یخبندان افزایش مدول ارتجاعی از خود نشان دادند [۱۴]. Wang et al (۲۰۱۹) اثر الیاف بازالت و پلی پروپیلن را بر میزان کنترل ترک و عملکرد مکانیکی بتن با عملکرد بالا (بتن توانمند یا HPC) مورد مطالعه قرار دادند. آنها به منظور بررسی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن مسلح از الیاف بازالت (با درصد حجمی ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲) و پلی پروپیلن (با درصد حجمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۴۲ درصد) و با طول ۱۲ میلیمتر استفاده کردند. نتایج نشان داد با افزایش درصد حجمی الیاف، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن مسلح شده افزایش یافته و حجم ترک ها کاهش می یابد. میزان تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت خمشی و کششی بیشتر از الیاف بازالت بوده و استفاده همزمان از آن ها با درصد حجمی به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۰۳۳ درصد، بهترین نسبت ترکیب الیاف بازالت و پلی پروپیلن می باشد. در این شرایط مقاومت فشاری، خمشی و کششی به ترتیب ۱۴/۱، ۲۲/۸ و ۴۸/۶ درصد نسبت به نمونه مقاومت فشاری، خمشی و کششی به ترتیب ۱۴/۱، ۲۲/۸ و ۴۸/۶ درصد نسبت به نمونه غیرمسلح افزایش یافت [۱۵].

فرایند تولید الیاف بازالت و الیاف شیشه نوع E بسیار شبیه یکدیگر می باشد اما برخلاف الیاف شیشه نوع E که از مخلوط پیچیده ای از مواد ساخته می شود، الیاف بازالت از ذوب سنگ بازالت و بدون هیچ افزودنی تولید شده و امکان دخالت در ترکیبات آن بسیار کم است. این موضوع سبب می شود که استفاده از این الیاف علاوه بر مزایای آن همچون مقاومت بالا در محیط های قلیایی و اسیدی، مشکلات زیست محیطی نداشته و زمان مورد نیاز جهت تولید الیاف بازالت نسبت به سایر الیاف کاهش یابد. در مطالعه حاضر، در ادامه تحقیقات انجام شده و به منظور برطرف نمودن برخی ابهامات موجود، رفتار خاک رس مسلح شده با الیاف بازالت مورد مطالعه قرار گرفته است.

مکانیکی می گردد. بعلاوه اینکه عملکرد پیوند بین سنگدانه و الیاف بازالت با ماتریس خمیر سیمان بهبود می یابد [۱۰].

براساس مطالعاتی که در سال ۲۰۱۶ بر روی خاک سیلتی و مسلح شده با الیاف بازالت با طول های ۶، ۱۲ و ۲۴ میلیمتر انجام شد، مقاومت برشی خاک با افزودن الیاف بازالت افزایش یافت. بطوریکه بالاترین مقاومت برشی در حالت الیاف با طول ۲۴ میلیمتر بدست آمد [۱۱]. به منظور بررسی و مقایسه تسلیح خاک رس به کمک الیاف بازالت و شیشه، خاک مسلح شده در شرایط دوره های انجماد مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی ها نشان داد در خاک های تقویت نشده مدول ارتجاعی با افزایش تعداد سیکل ها کاهش می یابد در حالیکه در خاک های تقویت شده با الیاف بازالت و شیشه این کاهش به جای ۴۰ درصد، به کاهش ۱۸ درصد تغییر می یابد. بررسی ها همچنین نشان داد توسعه سطح شکست در خاک های تقویت شده با بازالت پس از پانزدهمین دوره انجماد تقریباً یکسان است. نتیجه اینکه مقاومت گسیختگی خاک های تقویت شده قبل و بعد از سیکل های یخبندان افزایش می یابد [۱۲].

در سال ۲۰۱۷، محققان از الیاف بازالت و پلی پروپیلن با طول ۱۲ میلیمتر، جهت بهسازی خاک رس منطقه دهانوری استفاده کردند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد حداکثر چگالی خشک خاک کاهش و رطوبت بهینه افزایش می یابد (برای هر دو الیاف بازالت و پلی پروپیلن) و مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک افزایش می یابد (خاک مسلح شده با بازالت کمتر از خاک مسلح شده با پلی پروپیلن). افزایش ضریب نفوذپذیری، ضریب تغییر حجم (m_p) و ضریب تحکیم (C_p)، برای هردو خاک تقویت شده با الیاف بازالت و پلی پروپیلن یکسان است [۱۳]. براساس مطالعات آزمایشگاهی که در سال ۲۰۱۸ انجام شد، خواص خاک مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن و بازالت و با کمک دستگاه آزمایش سه محوری (در شرایط تحکیم نیافته زهکشی نشده) و در دوره های یخبندان مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نمونه های با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ درصد الیاف و نمونه خاک بدون الیاف ساخته شده و با دوره های ۰، ۲، ۵، ۸، ۱۰، ۱۵ در دستگاه سه محوری مورد آزمایش قرار گرفتند. بعد از ۱۵ دوره ذوب و یخبندان، کلیه نمونه ها کاهش مقاومتی حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد نشان دادند. بیشترین کاهش مقاومت در نمونه خاک بدون الیاف و با ۱۵ دوره ذوب و یخبندان مشاهده شد. با افزودن

جدول ۱. مشخصات مکانیکی رس مورد استفاده در این مطالعه

Table 1. Mechanical properties of Clayey Soil used in this study

استاندارد آزمایش	مشخصه فیزیکی	نوع یا مقدار
ASTM D 422	نوع خاک (طبقه بندی USCS)	CL
ASTM D 4318	حد روانی (LL)	٪ ۳۷
	حد خمیری (PL)	٪ ۲۰
	شاخص خمیری (PI)	٪ ۱۷
ASTM D 1557	وزن مخصوص خشک حداکثر (γ , KN/m ³)	۱۸
	رطوبت بهینه (ω)	٪ ۱۷

۲- مواد و روش ها

۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق از منطقه ای در شمال غرب شهر ری واقع در منطقه ۲۰ تهران تهیه شده است. نتایج آزمایش های حد روانی و حد خمیری نشان می دهد که این خاک اساسا رسی و براساس طبقه بندی یونیفاید از نوع رس با حد روانی کم (CL) می باشد. همچنین وزن واحد حجم خشک ماکزیمم در رطوبت بهینه ۱۷٪ برابر با 18 kN/m^3 به دست آمده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این خاک در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. نمونه ای از الیاف بازالت مورد استفاده در این مطالعه

Fig. 1. An example of Basalt fibers used in this study

۲-۲- الیاف بازالت

الیاف مورد استفاده در این تحقیق (به عنوان المان تسلیح) از نوع الیاف بازالت و از شرکت جی بی اف (GBF) چین تهیه شده است (شکل ۱). براساس تحقیقات انجام شده، نسبت قطر نمونه های استوانه ای به طول الیاف بایستی حداقل برابر ۲ باشد. اگرچه احتمال ناهمگنی و تجمع الیاف در لبه های نمونه وجود دارد، اما به دلیل تاثیر ناچیز مرزهای نمونه بر نتایج، می توان از این اثر صرف نظر نمود [۱۶]. بنابراین در این مطالعه از الیاف بازالت به صورت کوتاه (قیچی شده) به طول های ۶، ۱۲، ۲۵ میلی متر و با درصدهای وزنی (W_p) ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۲، ۱/۵، ۲ مورد استفاده قرار گرفته است. خواص فیزیکی و مکانیکی این الیاف در جدول (۲) و خواص شیمیایی آن در جدول (۳) نشان داده شده است.

۲-۳- آزمایش های آزمایشگاهی

۲-۳-۱- آزمایش تراکم اصلاح شده

به منظور تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه خاک مورد مطالعه، آزمایش تراکم اصلاح شده مطابق با استاندارد ASTM D 1557 انجام شده است. همچنین جهت بررسی اثر تسلیح خاک با الیاف بازالت، در درصدهای وزنی (W_p) ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲ آزمایش تراکم اصلاح شده انجام شد. لازم به ذکر است که ساخت نمونه ها در تمامی آزمایش ها به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی و مقاومتی، در وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه انجام شده است تا شرایط ساخت و بافت نمونه ها مشابه باشد.

جدول ۲. خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف بازالت مورد استفاده در این مطالعه
Table 2. Physical and mechanical properties of Basalt fibers used in this study

خواص فیزیکی و مکانیکی					
طول (mm)	قطر (μm)	دانسیته (gr/cm ³)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	جذب آب
۶	۱۰	۲/۵	۸۵۰۰	۳۲۰۰	۰/۵ < ۰
۱۲	۱۳	۲/۶۵			
۲۵	۱۵	۲/۶۷			

جدول ۳. خواص شیمیایی الیاف بازالت مورد استفاده در این مطالعه
Table 3. Chemical properties of Basalt fibers used in this study

خواص شیمیایی											
ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃
درصد	۵۱/۸	۱۶/۵	۷/۳	۷/۸۵	۱۰/۱	۳/۲	۱/۴۶	۱/۳	۰/۲۷	۰/۱۶	۰/۰۶

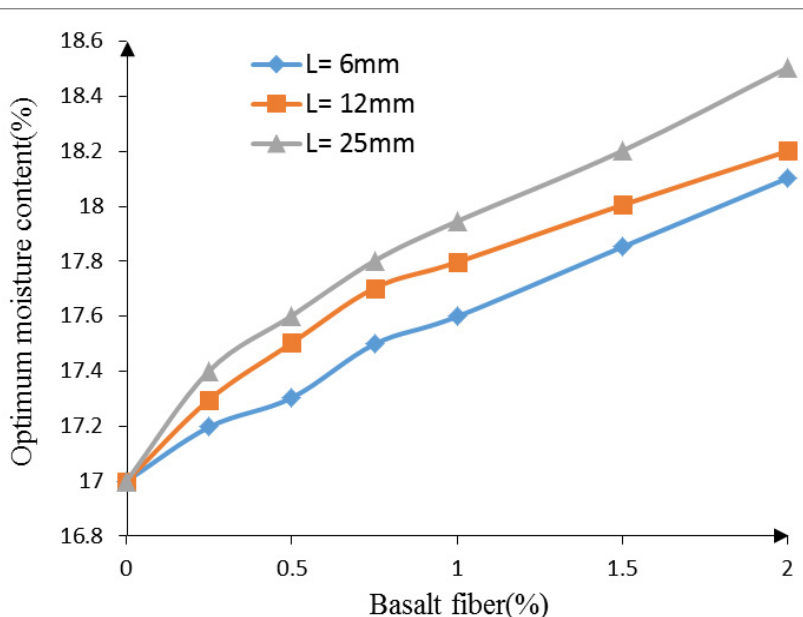
۲-۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یک روش سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده خاک است. این آزمایش برای خاک‌هایی قابل استفاده است که چسبندگی در آن‌ها به حدی باشد که نمونه‌های مورد آزمایش پایداری مقاومت خود را بعد از حذف فشار همه جانبه حفظ کنند. جهت ساخت نمونه به صورت استوانه ای، یک قالب فلزی به ارتفاع و قطر به ترتیب ۱۰ و ۵ سانتیمتر طراحی و یک چکش برای متراکم کردن نمونه درون قالب طراحی و ساخته شد. مطابق با استانداردهای موجود، نسبت ارتفاع به قطر نمونه بایستی برابر با ۲ تا ۲/۵ باشد. در این مطالعه اختلاط الیاف و نمونه خاک بصورت دستی انجام شد. به طوری که برای اختلاط مناسب نمونه‌ها، ابتدا خاک خشک شده و الیاف تا زمان رسیدن به مخلوطی یکنواخت و همگن با خاک مخلوط شدند. سپس آب به صورت تدریجی و با کمک آبپاش، تا رسیدن به رطوبت بهینه به مخلوط اضافه شد تا مخلوط یکپارچه ای به دست آید. برای جلوگیری از چسبیدن قسمت‌هایی از نمونه به جداره قالب، سطح داخلی قالب روغن کاری شد تا نمونه به راحتی از آن خارج شود. سپس نمونه‌ها در قالب مخصوص و در ۵ لایه و با ضخامت تقریباً یکسان کوبیده شد. در ادامه نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D 2166 مورد آزمایش مقاومت فشاری

تک محوری قرار گرفتند. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه، ۳ بار تکرار شده‌اند و در نهایت میانگین نمونه‌هایی که کمتر از ۱۰ درصد با یکدیگر اختلاف داشتند به عنوان مقاومت فشاری و کششی گزارش شده است.

۲-۳-۲- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

مقاومت کششی از جمله خصوصیات مهم مصالح، به خصوص هنگام مواجهه با بارهای کششی است. این ویژگی مصالح به خصوص در لایه‌های فوقانی روسازی راه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تنش‌های کششی در اثر عبور و مرور وسایل نقلیه بر روی روسازی راه، خزش در خاک‌ها، تغییرات درجه حرارت و همچنین در اثر سیکل‌های تر و خشک شدن متوالی در خاک به وجود می‌آیند. تاکنون روش استاندارد برای انجام آزمایش مقاومت کششی خاک ارائه نشده است. براساس تحقیقات انجام شده جهت تعیین مقاومت کششی خاک، روش کشش غیر مستقیم یا برزلی پیشنهاد شده است [۱۷، ۱۸]. بنابراین در این تحقیق، نمونه‌هایی مشابه با آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ساخته شده و طبق استاندارد ASTM C496 مورد آزمایش مقاومت کششی قرار گرفتند. براساس مطالعات گذشته که به منظور تعیین مقاومت کششی خاک به روش دو نیم شدن (برزلی)



شکل ۲. تاثیر طول و درصد الیاف بر درصد رطوبت بهینه

Fig. 2. Influence of fiber length and percentage on Optimum Moisture Content (OMC)

از دو متغیر درصد وزنی و طول الیاف بوده و با هر دو متغیر رابطه مستقیم دارد. بیشترین میزان افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر در نمونه حاوی ۲ درصد وزنی الیاف و با طول الیاف ۲۵ میلیمتر اتفاق افتاده است.

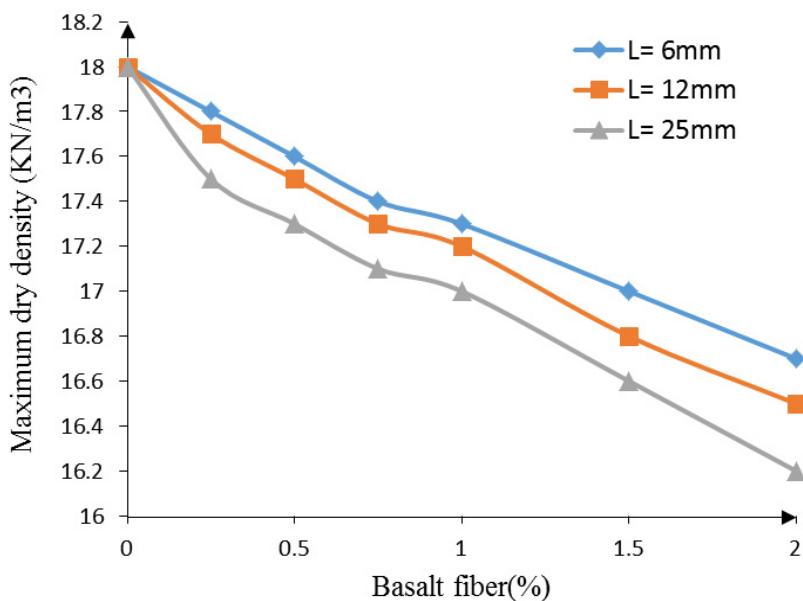
یکی از دلایل کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر را می توان به دلیل جایگزینی الیاف با دانه های خاک و کمتر بودن چگالی الیاف نسبت به خاک دانست. علاوه بر این در زمان حضور الیاف و مسلح سازی خاک، الیاف محیطی ارتجاعی در خاک ایجاد کرده و سبب پس زدن انرژی تراکم می شود و همین عامل سبب می شود که وزن مخصوص خشک حداکثر خاک مسلح شده با الیاف کاهش یابد. در اثر افزودن الیاف به خاک، به دلیل افزایش تخلخل در خاک، درصد رطوبت بهینه افزایش یافته و جهت رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر، به میزان آب بیشتری نیاز می باشد. به عبارت دیگر وجود الیاف در محیط و نحوه قرارگیری آن در خاک و اصطکاک الیاف با ذرات خاک وضعیتی را به وجود می آورد که وزن مخصوص خشک حداکثر خاک مسلح شده به الیاف در درصدهای بالاتری نسبت به حالت غیرمسلح رخ می دهد. همچنین جذب رطوبت توسط الیاف، یکی دیگر از عوامل افزایش درصد رطوبت بهینه خاک محسوب می شود.

انجام گرفته است، پیشنهاد شده که برای هر آزمایش مقاومت کششی یک تخته چندلایه نازک (با ضخامت ۳ تا ۵ میلی متر) بین نمونه و صفحات تکیه گاهی قرار گیرد تا بار اعمال شده در امتداد طول استوانه و بصورت یکنواخت پخش شده و نمونه بصورت قطری شکسته شود. طول این تخته باید حداقل برابر طول استوانه نمونه باشد و نوارهای تکیه گاهی نباید بیش از یکبار استفاده شوند [۱۷، ۱۸]. به منظور اعمال بار به صورت یکنواخت در امتداد استوانه، لازم است بارگذاری نمونه ها با سرعت پایین انجام شود [۱۹]. در واقع تست کشش غیرمستقیم، حالتی از مقاومت فشاری تک محوری است که گسیختگی نمونه در اثر ایجاد ترک های کششی افقی حاصل می شود.

۳- نتایج و بحث

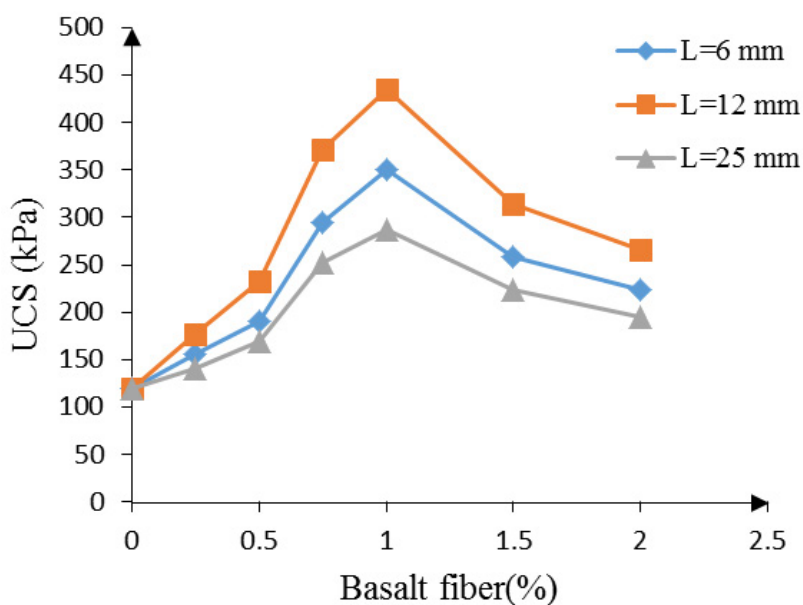
۳-۱- نتایج آزمایش تراکم

همانطور که پیش تر ذکر شد، در این مطالعه جهت بررسی تاثیر الیاف بر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر از آزمایش تراکم اصلاح شده مطابق با استاندارد ASTM D1557 استفاده شده است. مطابق با اشکال ۲ و ۳، افزودن الیاف موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می شود. افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر هر دو تابعی



شکل ۳. تاثیر طول و درصد الیاف بر وزن مخصوص خشک حداکثر

Fig. 3. Influence of fiber length and percentage on Maximum Dry Density (MDD)



شکل ۴. تاثیر طول و درصد الیاف بر مقاومت فشاری تکمحوری

Fig. 4. Influence of fiber length and percentage on Unconfined Compressive Strength (UCS)

نمونه های مسلح به الیاف بازالیت در درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲ و با سه طول مختلف ۶، ۱۲، ۲۵ میلیمتر انجام شد. نتایج این آزمایش ها در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ تاثیر طول و درصد الیاف بر مقاومت فشاری تک محوری خاک رس را نشان می دهد. با توجه به شکل می توان به این نکته

۳-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری آزمایش مقاومت تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D 2166-87 ابتدا بر روی نمونه غیرمسلح در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) انجام شد. بر این اساس مقاومت تراکم تک محوری خاک غیرمسلح ۱۲۰/۳۳ کیلوپاسکال بدست آمد. سپس آزمایش بر روی

کامل ساختار نمونه شده و سبب می شود تا نمونه حتی پس از تنش حداکثر، خاصیت باربری خود را بهتر از نمونه های غیرمسلح حفظ کند و شکستی نرم از خود نشان دهد و توسعه ترک ها آهسته و قابل پیش بینی باشد.

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (شکست برزلی)

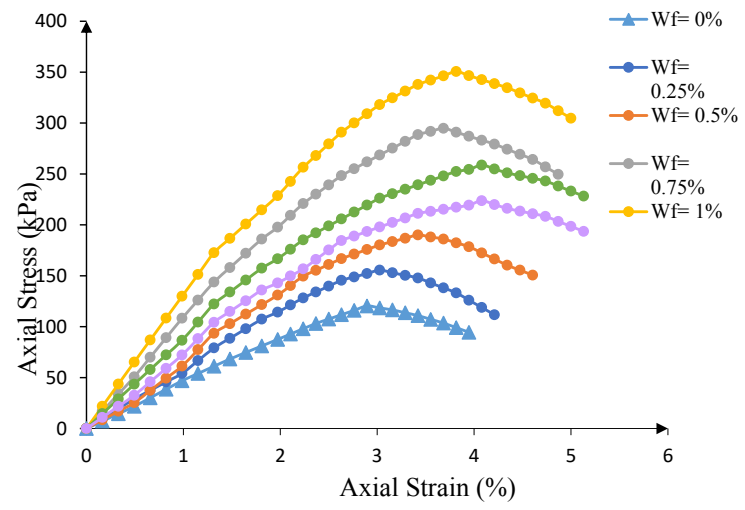
در ادامه بررسی ها آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق با استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه غیرمسلح و مشابه با آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) انجام شد. بر این اساس مقاومت کششی غیرمستقیم خاک غیر مسلح ۱۲/۵۵ کیلوپاسکال بدست آمد. سپس آزمایش بر روی نمونه های مسلح به الیاف بازالت در درصدهای وزنی (W_p) ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۵، ۲ و با سه طول مختلف ۶، ۱۲، ۲۵ میلیمتر انجام شد. نتایج این بررسی ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

مشابه آنچه که در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ذکر شد، با توجه به شکل ۶ تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم در طول ثابتی از الیاف با افزایش درصد وزنی الیاف تا ۰/۷۵ درصد، نمودار روندی صعودی داشته و در درصدهای وزنی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نمودار روندی نزولی خواهد داشت. همچنین زمانی که درصد وزنی الیاف یکسان می باشد، با افزایش طول الیاف از ۶ به ۱۲ میلیمتر، مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش و با ادامه روند افزایش طول تا ۲۵ میلیمتر، مقاومت کششی خاک کاهش می یابد به طوریکه میزان این کاهش منجر به حصول مقاومتی کمتر از مقاومت الیاف با طول ۶ میلیمتر می شود. به عبارت دیگر با افزودن الیاف، مقدار مقاومت تدریجاً به حداکثر ممکن رسیده و افزایش بیشتر الیاف تاثیر چندانی بر افزایش مقاومت نخواهد داشت. مطابق با شکل ۶، حداکثر و حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم در الیاف به طول ۱۲ و ۲۵ میلیمتر و با درصد وزنی ۰/۷۵، به ترتیب ۴۷/۰۸ و ۳۰/۲۲ کیلوپاسکال بدست آمد که نسبت به نمونه غیرمسلح به ترتیب افزایشی ۳/۷ و ۲/۳۸ برابر خواهد داشت.

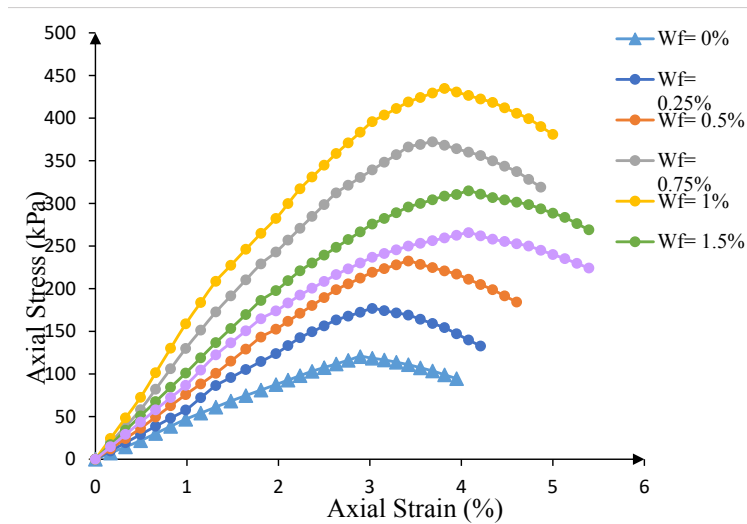
با توجه به شکل ۷ (الف)، نمونه مسلح نشده در برابر کشش مقاومت زیادی از خود نشان نمی دهد و همزمان با تشکیل ترکهای کششی، تنش کششی به شدت کاهش و کرنش کششی افزایش می یابد. با ادامه کرنش کششی، ترکهای ایجاد شده به هم می پیوندند

اشاره کرد که در طول ثابتی از الیاف با افزایش درصد وزنی الیاف تا ۱ درصد، نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک محوری خاک مسلح شده در ابتدا روندی صعودی داشته و در درصدهای وزنی ۱/۵ و ۲ درصد نمودار روندی نزولی خواهد داشت. علاوه بر این زمانی که درصد وزنی الیاف یکسان می باشد با افزایش طول الیاف از ۶ میلیمتر به ۱۲ میلیمتر، مقاومت فشاری تک محوری در ابتدا افزایش یافته و با افزایش طول الیاف به ۲۵ میلیمتر مقاومت کاهش می یابد. به طوری که حداکثر و حداقل مقاومت فشاری تک محوری به ترتیب در الیاف با طول ۱۲ میلیمتر و ۲۵ میلیمتر مشاهده می شود. بنابراین مقاومت فشاری تک محوری خاک مسلح شده با الیاف، تابعی از دو متغیر درصد وزنی و طول الیاف بوده و با هر دو متغیر رابطه مستقیم دارد. با توجه به شکل ۵-الف، زمانی که درصد وزنی الیاف ۰/۱ و با طول ۶ میلیمتر می باشد، مقاومت فشاری تک محوری به ۳۵۰/۵۶ کیلوپاسکال می رسد که نسبت به خاک غیرمسلح افزایشی ۲/۹ برابری را نشان می دهد. با افزایش طول الیاف به ۱۲ میلیمتر و در درصد وزنی ۰/۱، مقاومت فشاری تک محوری به مقدار حداکثر ۴۳۴/۷ کیلوپاسکال می رسد که نسبت به خاک غیرمسلح افزایشی ۳/۶ برابری خواهد داشت (شکل ۵-ب). این در حالیست که خاک مسلح شده با ۱ درصد الیاف و با طول ۲۵ میلیمتر، نسبت به خاک غیر مسلح افزایشی ۲/۳۸ برابری داشته و مقاومت فشاری تک محوری به ۲۸۷/۰۷ کیلوپاسکال رسیده است (شکل ۵-ج). در درصدهای وزنی کمتر از ۱ درصد، فاصله الیاف از یکدیگر زیاد بوده و توده یکپارچه خاک به وجود نمی آید در حالیکه در درصد وزنی بیشتر از ۱ درصد، الیاف اضافی بجای پیوستگی با خاک، توده مجزا با یکدیگر تشکیل می دهند. بنابراین مقدار بهینه الیاف در الیاف به طول ۱۲ میلیمتر و با درصد وزنی ۱ درصد رخ می دهد و حداکثر مقاومت حاصل می شود. علت این افزایش مقاومت، توزیع تصادفی رشته های مجزا در خاک می باشد. همچنین خاک مسلح بصورت یکپارچه عمل کرده و این عملکرد یکپارچه خاک و الیاف باعث قفل و بست دانه های خاک در بین الیاف می شوند.

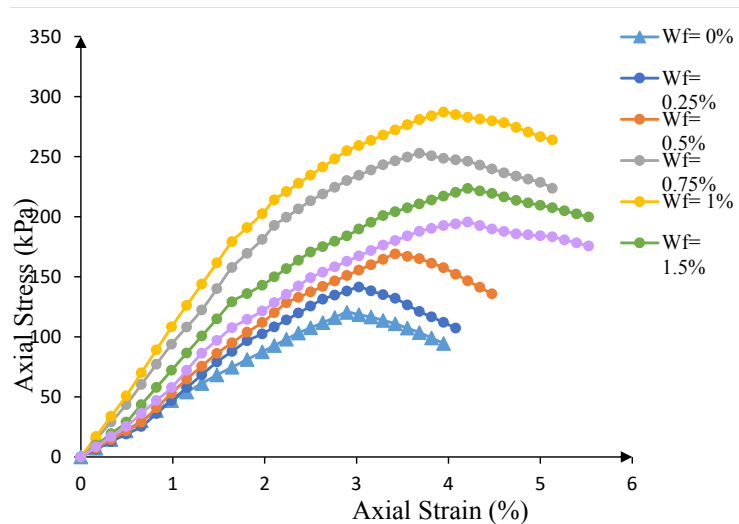
با توجه به شکل ۵ دیده می شود که در نمونه های مسلح شده پس از رسیدن به مقاومت نهایی، شیب منحنی به آرامی کاهش می یابد تا به مقدار ثابتی که معادل با مقاومت پس ماند است، می رسد. در این حالت در نمونه های مسلح شده پس از اینکه نمونه تنش حداکثر را تحمل کرد، الیاف موجود در خاک مانع به هم ریختن



(الف)



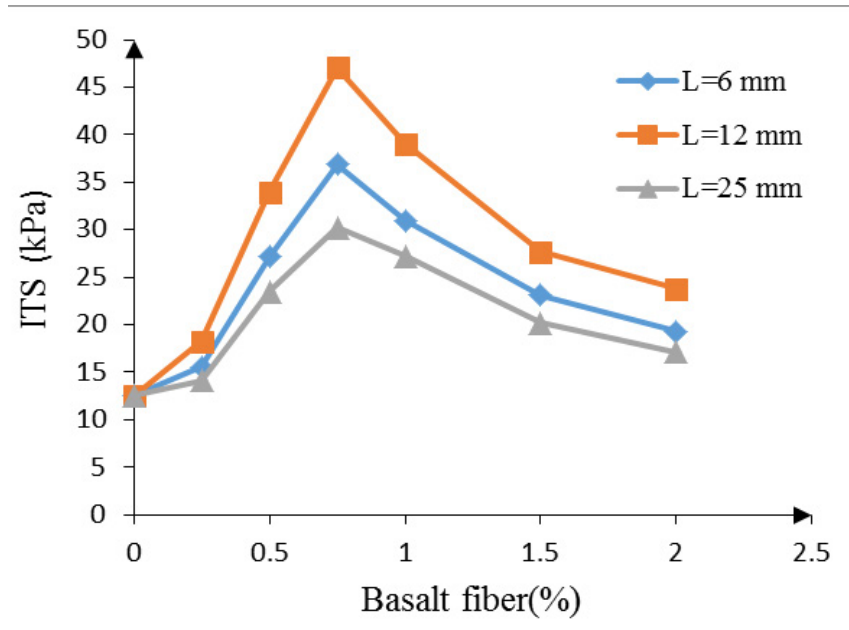
(ب)



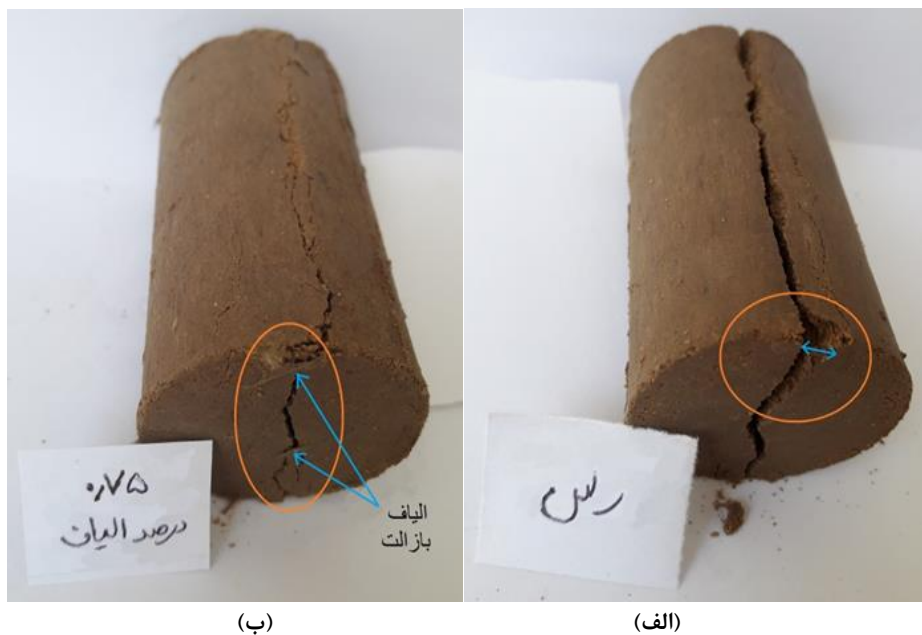
(ج)

شکل ۵. تغییرات تنش . کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در درصد های وزنی (W_f) مختلف الیاف و با الیاف به طول الف) ۶، ب) ۱۲ و ج) ۲۵ میلیمتر

Fig. 5. Changes Stress-Strain of unconfined compressive strength test at different weight percentages (W_f) of fibers and fibers with lengths a) 6 b) 12 c) 25mm



شکل ۶. تاثیر طول و درصد الیاف بر مقاومت کششی غیرمستقیم
 Fig. 6. Influence of fiber length and percentage on Indirect Tensile Strength (ITS)

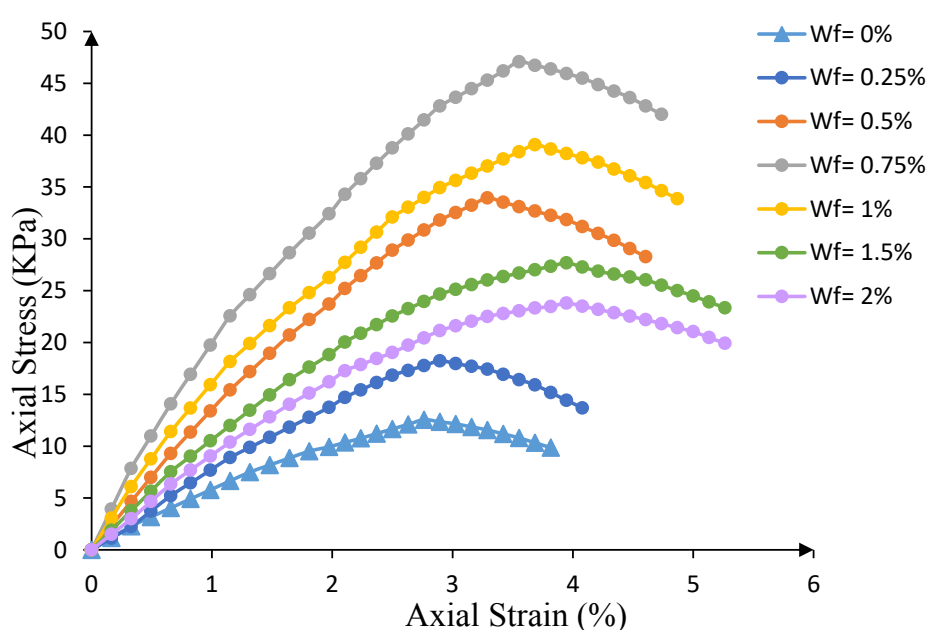


شکل ۷. سطح گسیختگی نمونه خاک رس تحت آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم الف) خاک مسلح نشده و ب) خاک مسلح شده با ۰/۷۵ درصد الیاف بازالیت

Fig. 7. The failure area of Clay sample in Indirect Tensile Strength test a) unreinforced soil and b) reinforced soil with 0.75 percent of basalt fiber

شده و تخلخل نمونه کاهش می یابد. این افزایش تراکم سبب می شود که سطح تماس الیاف و ذرات خاک افزایش یافته و بین الیاف و ذرات خاک اصطکاک ایجاد شود. این اصطکاک سبب یکپارچگی خاک و

و یک سطح گسیختگی واحد ایجاد می شود و نمونه به دو بخش مجزا تقسیم می شود. مطابق با شکل ۷ (ب)، با اعمال نیروی قطری بر نمونه های مسلح شده با الیاف بازالیت، ذرات خاک و الیاف متراکم تر



شکل ۸. تغییرات تنش و کرنش در آزمایش کشش غیرمستقیم در درصد‌های وزنی (W_f) مختلف الیاف و با الیاف به طول ۱۲ میلیمتر

Fig. 8. Changes Stress-Strain of indirect tensile strength test at different weight percentages (W_f) of fiber and fiber lengths of 12 mm

بنابراین یک نیروی مقاومت کششی در طول الیاف به وجود می‌آید. در نهایت به دلیل بالاتر بودن مقاومت کششی الیاف نسبت به ذرات خاک، مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌گردد.

در درصد‌های وزنی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد، شکست نمونه‌ها نسبت به درصد‌های وزنی بالاتر تردتر بوده و نمودارها بعد از تنش حداکثر با شیب تندتری کاهش می‌یابند. در الیاف با طول ۱۲ میلیمتر و درصد‌های وزنی ۱/۵، ۱ و ۲ میلیمتر با وجود کاهش مقاومت کششی نسبت به الیاف با طول ۱۲ میلیمتر و درصد وزنی ۰/۷۵، کرنش نمونه‌ها بیشتر بوده و نمونه‌ها حتی پس از تنش حداکثر، خاصیت باربری خود را حفظ می‌کنند. به عبارت دیگر وجود الیاف سبب قفل و بست ذرات خاک در بین الیاف شده و با اعمال تنش‌های بیشتر، گسترش ترک‌ها آهسته و نمونه‌ها شکستی نرم از خود نشان می‌دهند.

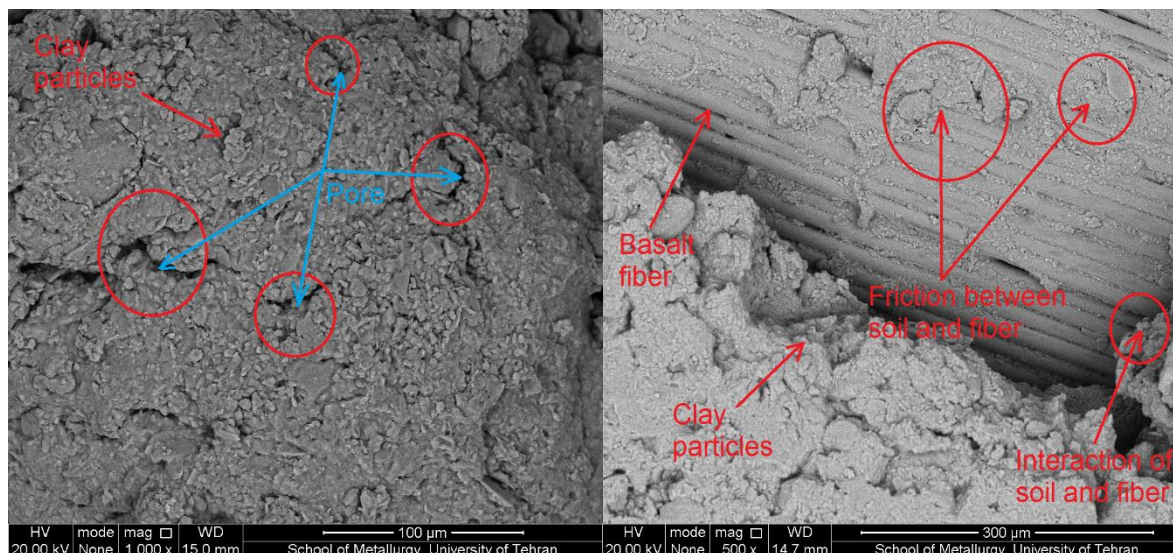
۳-۴- نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی SEM

در این مطالعه به منظور بررسی ریز ساختار و علل تغییر رفتار خاک رس مورد مطالعه تصویربرداری SEM از خاک به عمل آمده است. شکل ۹ (الف)، خاک مسلح نشده با الیاف بازالت را نشان می‌دهد. با اعمال بارگذاری، حفره‌های موجود در خاک موجب گسترش ترک‌ها

الیاف و ایجاد قفل و بست دانه‌های خاک در بین الیاف می‌شود و برخلاف نمونه‌های غیرمسلح با اعمال نیروی کششی و پس از ایجاد ترک در نمونه‌ها به دلیل یکپارچگی نمونه‌های مسلح شده با الیاف، نمونه‌ها به دو نیم مجزا تقسیم نمی‌شوند.

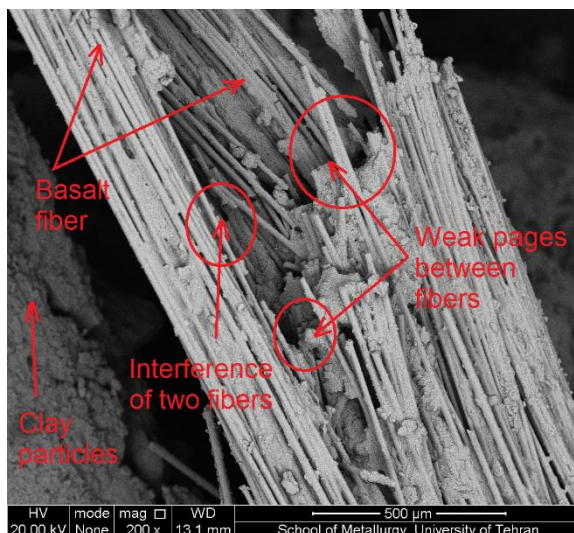
مطابق با شکل ۸، سطح زیر منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های مسلح شده بزرگتر از نمونه غیرمسلح می‌باشد. این موضوع موید این مطلب است که قابلیت جذب انرژی و توان باربری نمونه‌های مسلح از نمونه غیرمسلح بیشتر می‌باشد. در این حالت انرژی بیشتری جهت گسیختگی یا بیرون کشیدگی الیاف مصرف شده و سبب افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود.

با توجه به شکل، مقدار بهینه الیاف مربوط به الیاف با طول ۱۲ میلیمتر و با درصد وزنی ۰/۷۵ مشاهده می‌شود. در درصد‌های بالای الیاف (۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر) به تدریج با جایگزینی عناصر تسلیح به جای ذرات خاک، مقاومت نمونه مرکب بیشتر تحت تاثیر عناصر تسلیح قرار گرفته و به عبارتی الیاف کنترل کننده رفتار نمونه می‌شود. در طول و درصد وزنی بهینه الیاف، توزیع تصادفی الیاف در خاک، سبب اصطکاک و یکپارچگی توده خاک مسلح می‌شود و در زمان بارگذاری، این اصطکاک مانع از لغزش الیاف شده و نیرو به الیاف انتقال می‌یابد.



(ب)

(الف)



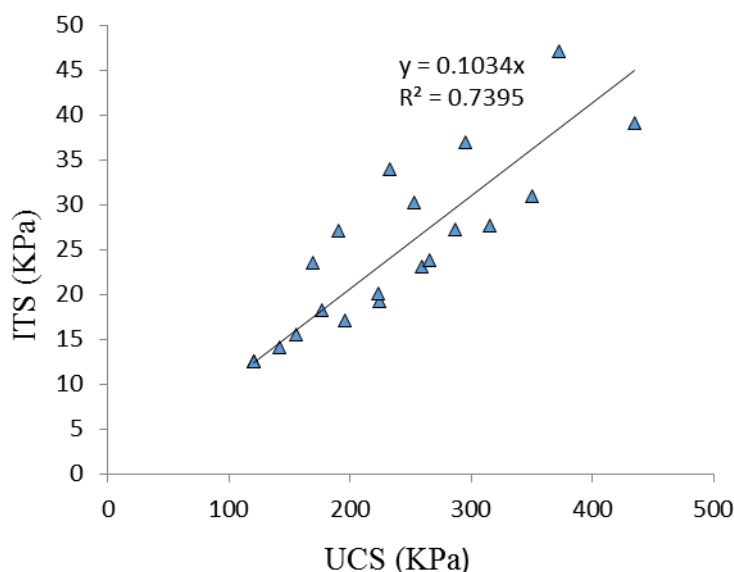
(ج)

شکل ۹. تصاویر SEM نمونه‌های خاک (الف) مسلح نشده، (ب) خاک مسلح شده در درصد وزنی بهینه الیاف بازالت و (ج) خاک مسلح شده در درصد وزنی بالای الیاف بازالت

Fig. 9. SEM images of soil samples a) unreinforced soil b) reinforced soil in optimum weight percentage of Basalt fibers and c) reinforced soil in high percentage of Basalt fibers

هم چسبیده است. در درصدهای پایین الیاف (کمتر از درصد وزنی بهینه)، فاصله الیاف از یکدیگر زیاد بوده و توده یکپارچه خاک به وجود نمی آید و ستون های خاک-الیاف بر یکدیگری اثری نخواهند داشت. در حالیکه با افزایش درصد الیاف و در درصد وزنی بهینه الیاف (شکل ۹(ب))، با اعمال نیرو بر نمونه های مسلح شده با الیاف بازالت، ذرات خاک و الیاف متراکم تر شده و تخلخل نمونه کاهش می یابد. در این حالت،

می شوند و یک سطح گسیختگی واحد ایجاد کرده و در نهایت موجب گسیختگی نمونه می شود. در روش تسلیح خاک به کمک الیاف با توزیع تصادفی، هر رشته الیاف توسط ذرات محدودی از خاک احاطه می شود و الیاف در شعاع خاصی ذرات خاک اطراف خود را تحت تاثیر قرار داده و ستون خاک-الیاف تشکیل می دهند [۷]. همانطور که در شکل ۹(ب) مشاهده می شود، الیاف بازالت مورد استفاده به صورت بریده شده می باشد که هر الیاف خود شامل تعدادی الیاف نازک به



شکل ۱۰. رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری

Fig. 10. Relationship between Tensile strength and Compressive strength

۴- اثر تسلیح با الیاف بر منحنی های تنش - کرنش

در شکل های (۵) و (۸) تغییرات تنش-کرنش خاک رس تثبیت شده در درصدهای مختلف الیاف و با طول های مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود منحنی تنش و کرنش نمونه غیرمسلح در مقایسه با نمونه های مسلح با شیب تندتر (یعنی سختی بیشتر) صعود کرده و در کرنش گسیختگی حدود ۲/۸ به حداکثر می رسد. با افزودن الیاف به خاک این خاصیت کاهش یافته و خاک حالت نرمتری به خود می گیرد و این روند در کاهش تدریجی ضریب کشسانی حداکثر (سختی) و افزایش کرنش گسیختگی متناسب با افزایش درصد الیاف دیده می شود.

۵- رابطه مقاومت کششی و فشاری خاک رس مسلح شده با

الیاف بازالت

همانطور که پیش تر ذکر شد مقاومت کششی نمونه های غیرمسلح و مسلح به الیاف بازالت مشابه با نمونه های آزمایش تک محوری، مورد ارزیابی قرار گرفتند. از آنجا که مقاومت فشاری و کششی نمونه ها هر دو به طور عمده به چسبندگی داخلی ذرات بستگی دارند، بنابراین تعیین ارتباط این دو مقاومت می تواند مورد توجه قرار گیرد. ارتباط بین این دو مقاومت برای نمونه های مسلح شده با الیاف بازالت، با انجام برآزش بین داده ها مطابق با شکل ۱۰ انجام شده است. رابطه بین این دو مقاومت با تقریب نسبتاً خوب

انسجام خاک و الیاف و سطح تماس ستون های الیاف-خاک افزایش یافته و بین الیاف و ذرات خاک اصطکاک ایجاد می شود. این اصطکاک سبب عملکرد یکپارچه خاک و الیاف و ایجاد قفل و بست دانه های خاک در بین الیاف می شود و نیروهای خارجی اعمال شده به خاک، توسط الیاف در بین ذرات خاک توزیع می شوند.

همانطور که در شکل ۹ (ج) مشاهده می شود، با افزایش الیاف بیشتر از درصد بهینه، الیاف اضافی بجای پیوستگی با خاک، توده مجزا با یکدیگر تشکیل می دهند و سطح تماس آنها با خاک کاهش می یابد. این موضوع موجب ایجاد صفحات ضعیف در نمونه ها شده و مقاومت خاک کاهش می یابد.

در الیاف با طول کمتر (۶ میلیمتر)، به علت فاصله زیاد بین الیاف، انتقال تنش ها بین ذرات خاک به سختی صورت می پذیرد و در مقایسه با طول بهینه (۱۲ میلیمتر)، تسلیح خاک تاثیر کمتری برافزایش مقاومت خواهد داشت. چنانچه طول الیاف افزایش یابد، مقاومت الیاف درخمش، کشش و پیچش کاهش می یابد. بخشی از تنش های اولیه، مانند تنش های کششی برای خاک مفید بوده و تراکم خاک را افزایش می دهند. اما تنش هایی که سبب خمش و پیچش می شوند، برای خاک مفید نبوده و سبب بروز ترک هایی در خاک می شوند. الیاف با طول زیاد، تنش های خمشی مداومی را در خاک توزیع می کنند که این تنش اولیه ناشی از خمش مداوم، سبب سرعت بخشیدن به تضعیف خاک می شود.

می کنند که این تنش اولیه ناشی از خمش مداوم، سبب سرعت بخشیدن به تضعیف خاک شده و مقاومت خاک را کاهش می دهد.

(دارای همبستگی $R^2 = 0.74$) از رابطه ۱ بدست می آید:

$$\sigma_t = 0.1034 \times q_u \quad (1)$$

که در آن σ_t مقاومت کششی، q_u مقاومت فشاری تک محوری است.

مراجع

- [1] B.a. Roshandel. (1378). "Investigating different methods of soil stabilization and stone materials pavement". Geotechnic and Materials Strength, No. 83(in Parsian).
- [2] P.K. Pradhan, R.K. Kar, A. Naik. (2012). "Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil". Geotechnical and Geological Engineering, 30(1) 15-25.
- [3] H. Ghiassian, D. Holtz. (2005). "Geosynthetic cellular systems (GCS) in coastal application". Report University of Washington, Department of Civil & Environment Engineering.
- [4] X.-p. ZHANG, B. SHI. (2008). "Experimental Study on Reinforced Fiber Expansive Soil". Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 4 60-62.
- [5] D. Wang, L. Wang, X. Gu, G. Zhou. (2013). "Effect of basalt fiber on the asphalt binder and mastic at low temperature". Journal of materials in civil engineering, 25(3) 355-364.
- [6] X.S. Zhuang, X.Y. Yu. (2015). "Experimental Study on Strength Characteristics of Lime-basalt Fiber Reinforced Expansive Soil". in: Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, pp. 495-498.
- [7] L. Gao, G. Hu, N. Xu, J. Fu, C. Xiang, C. Yang. (2015). "Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil". Advances in Materials Science and Engineering.
- [8] R. SHahreza Gamasayi, H. SHahreza Gamasayi. (1395). "Investigating the effect of using basalt and polypropylene fibers on concrete performance characteristics". International Congress on Civil, Architecture and Urban contemporary world (in Persian).
- [9] A.a. Hajati modarayi, M. sheykhi. (1395). "Investigating the effect of basalt fiber on the mechanical properties of light weight concrete". Third International

۶- نتیجه گیری

هدف این تحقیق بررسی اثر الیاف بازالت بر تراکم، درصد رطوبت بهینه، مقاومت تک محوری و مقاومت کششی خاک رس می باشد. به همین منظور در این مطالعه، مجموعه ای از آزمایش ها بر روی نمونه های مسلح به الیاف بازالت در درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲ و با سه طول مختلف ۶، ۱۲، ۲۵ میلیمتر انجام شده است. افزودن الیاف به خاک موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می شود. یکی از دلایل کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر را می توان جایگزینی الیاف با دانه های خاک و کمتر بودن چگالی الیاف نسبت به خاک دانست. در اثر افزودن الیاف به خاک، به دلیل افزایش تخلخل در خاک، درصد رطوبت بهینه افزایش یافته و جهت رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر، به میزان آب بیشتری نیاز می باشد. بررسی ها نشان می دهد با افزایش درصد الیاف بازالت، در تمامی نمونه ها و با طول های مختلف الیاف مقاومت خاک افزایش می یابد. افزایش درصد الیاف در تمامی نمونه ها و افزایش طول الیاف، موجب نرم شدن نمونه ها می شود بطوریکه نمونه ها در کرنش بیشتری به گسیختگی می رسند و نمونه های تسلیح شده نسبت به نمونه های غیرمسلح، رفتار شکل پذیری از خود نشان می دهند.

مقدار بهینه درصد الیاف برای مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی به ترتیب، ۱ و ۰/۷۵ درصد و با طول ۱۲ میلیمتر می باشد. با توجه به نتایج عکسبرداری SEM، در درصد وزنی بهینه الیاف انسجام خاک و الیاف زیاد بوده و رشته های مجزا توزیع شده در خاک موجب عملکرد یکپارچه خاک مسلح شده و نیروهای خارجی اعمال شده را بین ذرات خاک پخش می کنند و در نتیجه سبب افزایش مقاومت خاک می شوند. علاوه بر این، طول الیاف در حالت بهینه قرار داشته و سبب ایجاد ترک در خاک نمی شوند. با افزایش طول الیاف، مقاومت الیاف در خمش، کشش و پیچش کاهش می یابد. الیاف با طول زیاد، تنش های خمشی مداومی را در خاک توزیع

- subjected to freeze-thaw cycles”. *Cold Regions Science and Technology*, 153 18-24.
- [15] D. Wang, Y. Ju, H. Shen, L. Xu .(2019). “Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber”. *Construction and Building Materials*, 197 464-473.
- [16] A. Diambra, E. Ibraim, D.M. Wood, A. Russell. (2010). “Fibre reinforced sands: experiments and modelling”. *Journal of Geotextiles and geomembranes*, 28(3) 238-250.
- [17] N. Cristelo, V.M. Cunha, A.T. Gomes, N. Araújo, T. Miranda, M. de Lurdes Lopes. (2017). “Influence of fibre reinforcement on the post-cracking behaviour of a cement-stabilised sandy-clay subjected to indirect tensile stress”. *Construction and Building Materials*, 138 163-173.
- [18] Y. Yilmaz.(2009) “Experimental investigation of the strength properties of sand-clay mixtures reinforced with randomly distributed discrete polypropylene fibers”. *Geosynthetics International*, 16(5) 354-363.
- [19] B. Darvell. (1990). “Uniaxial compression tests and the validity of indirect tensile strength”. *Journal of Materials Science*, 25(2) 757-780.
- Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development(in Parsian).
- [10] B. Tahmuresi, M.s. Tahmuresi, A. Sadr momtazi, J. Baran doost. (1395). “Investigating the effect of different amounts of silica and chopped basalt fiber on the physical and mechanical properties of fiber reinforced cement composites”. *The National Seminar on Environmentally-Friendly Concretes* (in Parsian).
- [11] C. Ndepete, S. Sert. (2016). “Use of basalt fibers for soil improvement”. *Acta Physica Polonica A*, 130(1) 355-356.
- [12] M.E. Orakoglu, J. Liu. (2017). “Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil”. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6) 2128-2140.
- [13] R. Ayothiraman, A. Singh. (2017). “Improvement of soil properties by basalt fibre reinforcement”. in: *Proc., DFI-PFSF Joint Conf. on Piled Foundations & Ground Improvement Technology for the Modern Building and Infrastructure Sector*, pp. 403-412.
- [14] E. Kravchenko, J. Liu, W. Niu, S. Zhang.(2018). “Performance of clay soil reinforced with fibers

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Khorram, A.M. Rajabi, Effect of natural Basalt fibers on mechanical properties of clay Rey town, Amirkabir J. Civil Eng., 52(10) (2021) 2471-2486.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16360.6199](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16360.6199)



