بررسی خصوصیات تراکمی، هیدرولیکی و تحکیمی خاک رس مسلح‌شده با الیاف موکت

صادق قوامی جمال*، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
مهرشاد حسینی فانی، دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

Email: ghavamijamal@sut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶ – پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

چکیده

با توجه به اهمیت مسائل زیست‌محیطی و کاهش مصرف انرژی، استفاده از مصالح ضایعاتی برای بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌ها در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تحقیق، تأثیر الیاف ضایعات موکت بر خصوصیات تراکمی، هیدرولیکی و تحکیمی خاک رس کائولینیت بررسی شده است. آزمایش‌های تراکم استاندارد، نفوذپذیری و تحیکم یک‌بُعدی روی نمونه‌های خاک حاوی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد الیاف (نسبت به وزن خشک خاک) انجام شد. به منظور بررسی اثر طول الیاف‌ها بر نتایج، طول الیاف‌ها از ٦ تا ۳۰ میلی‌متر تغییر کرد. نتایج نشان داد که حضور الیاف ضایعات موکت موجب کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها می‌شود. همچنین، الیاف موکت، نفوذپذیری نمونه‌ها را افزایش و نشست‌پذیری خاک رس و شاخص تورم آن را کاهش داد. به طوری که شاخص فشردگی و شاخص تورم برای نمونه با ۲ درصد الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر به ترتیب ۳۵ و ٦٤ درصد کاهش یافت. وجود الیاف موکت در خاک موجب افزایش سرعت تحکیم خاک رس می‌شود. با بررسی نتایج به دست آمده مشخص شد که تغییرات خصوصیات تحکیمی خاک رس با مقدار الیاف نسبت به طول الیاف بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: خاک مسلح، الیاف موکت، پارامترهای تراکم، تحکیم، نفوذپذیری.

۱. مقدمه

با رشد شهرها و مناطق صنعتی، دسترسی به زمین مناسب برای احداث سازه‌ها و زیرساخت‌ها کاهش یافته است. خاک‌های مسأله‌دار مانند رس‌های نرم، به دلیل مقاومت برشی کم و تراکم‌پذیری زیاد، در صورت عدم اتخاذ تدابیر مناسب، می‌توانند باعث ایجاد مشکلات اساسی و نشست بیش از حد در سازه‌ها، راه‌ها و زیرساخت‌ها شوند (قوامی و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، خصوصیات مهندسی چنین خاک‌هایی باید ترجیحاً قبل از اجرای پروژه‌های عمرانی بهبود یابد. از روش‌های معمول برای تثبیت و بهسازی خاک می‌توان به جایگزینی خاک، تثبیت شیمیایی با مواد افزودنی، تراکم دینامیک، استفاده از ستون‌های سنگی و تسلیح خاک با الیاف‌های مختلف اشاره کرد (موسلی و کرش، ۲۰۰٤). انتخاب روش مناسب بهسازی به خصوصیات زمین، اثربخشی و عملی بودن روش بهسازی و هزینه‌های مرتبط با آن بستگی دارد.

تسلیح خاک با الیاف‌های طبیعی یا پلیمری به طور گسترده در پروژه‌های عمرانی، به منظور افزایش مقاومت خاک‌ها و شکل‌پذیری آن‌ها، استفاده شده است (تران و همکاران، ۲۰۱۸؛ سارلی و همکاران، ۲۰۲۰؛ قوامی و رجبی، ۲۰۲۱؛ حسن و همکاران، ۲۰۲۱). از جمله مزیت‌های تسلیح خاک با الیاف، توزیع تصادفی مسلح-کننده در خاک است که منجر به تقویت خاک در تمام جهت‌ها و حذف صفحات ضعیف می‌گردد (میتی و همکاران، ۲۰۱۷). از طرفی، با توجه به اهمیت مسائل زیست‌محیطی و کاهش مصرف انرژی، استفاده از مصالح ضایعاتی برای تسلیح خاک‌ها در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد توجه محققین قرار گرفته است. سارلی و همکاران (۲۰۲۰) با انجام مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک لُس در ترکیب با نانوسیلیس و الیاف بازیافتی پلی‌استر بهبود می‌یابد. به طوری که ٤ درصد الیاف–نانوسیلیس (با نسبت ترکیبی ۵۰ درصد) چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک لُس را به ترتیب ۲۱ و ۲۱۰ درصد افزایش می‌دهد. تحقیقات حسن و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که الیاف‌های به دست آمده از ضایعات پلی‌اتیلن ترفتالات (بطری‌های آب) و پلی‌پروپیلن (کیسه‌های پلی‌پروپیلن بافته شده) در ترکیب با خاک موجب افزایش مدول برجهندگی خاک بستر می‌شود و استفاده از آن‌ها در مقایسه با تثبیت شیمیایی خاک‌ها، مقرون به صرفه‌تر خواهد بود.

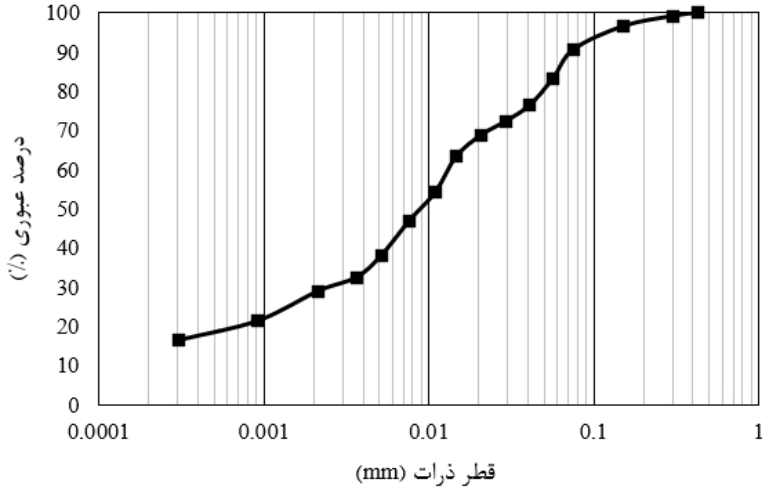
موکت‌ها مواد مرکب فشرده هستند که جداسازی و پردازش مجدد مواد آن‌ها دشوار و پرهزینه است. از طرفی دفن ضایعات موکت در محل‌های دفن زباله با مشکلاتی مانند هزینه زیاد، محدودیت‌های مکانی و انتشار سموم ناشی از تجزیه مواد روبه‌رو است. سوزاندن و استفاده از انرژی تولید شده ناشی از آن نیز با توجه به انتشار گازهای سمی و دیوکسین‌های ناشی از تجزیه مولکولی در برخی کشورها بحث‌برانگیز شده است (میرآفتاب و میرزابابایی، ۲۰۰۹). بنابراین، روش‌های نوآورانه برای استفاده از موکت‌ها پس از مصرف به یک نیاز نوظهور تبدیل شده است. از این رو، کاربرد ضایعات موکت در مصالح ساخت در مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته است. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که استفاده از الیاف موکت منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی و تغییرشکل بتن شده است (فشندی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ال‌عبدالجبار و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که الیاف موکت در بهبود خصوصیات مکانیکی خاک‌های مختلف نیز مؤثر بوده است. میرزابابایی و همکاران (۲۰۱۳) اثر الیاف ضایعات موکت بر مقاومت فشاری محصورنشده خاک‌های رسی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که الیاف موکت می‌تواند به طور قابل‌توجهی مقاومت فشاری محصورنشده را افزایش داده و میزان کاهش مقاومت پس از رسیدن به مقاومت حداکثر را کمتر کند که منجر به تغییر رفتار خاک از شکننده به شکل‌پذیر

می‌شود. پنج درصد الیاف موکت، کرنش محوری نمونه را از حدود ۱ درصد به ۱۵ درصد افزایش داد. مطالعات آزمایشگاهی و آنالیز آماری انجام شده توسط شهبازی و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که تسلیح مکانیکی با استفاده از الیاف موکت در کنار تثبیت شیمیایی روشی کارآمد برای بهبود خصوصیات مهندسی خاک رس متورم‌شونده است. نسبت ابعاد (طول به قطر) الیاف بیشترین تأثیر را در کاهش تورم و افزایش مقاومت داشت. در پژوهشی دیگر، چوب‌بستی و همکاران (۲۰۱۹) با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده، سه‌محوری زهکشی‌نشده و اولتراسونیک، به بررسی تغییرات مقاومت خاک رس تثبیت شده با نانوکلسیم کربنات در حضور درصدهای مختلف الیاف ضایعات موکت پرداختند. افزودن الیاف موکت تا ۰/۲ درصد (نسبت به وزن خشک خاک) باعث افزایش سختی و مقاومت خاک شد و سرعت امواج اولتراسونیک را افزایش داد. افزایش بیشتر از ۰/۲ درصد الیاف تأثیر زیادی بر مقاومت حداکثر نداشت. اما به طور قابل توجهی، مقاومت باقیمانده را بهبود بخشید. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش دوره عمل‌آوری بر مقاومت خاک مسلح‌شده با الیاف موکت (بدون حضور نانوکلسیم کربنات) تأثیری ندارد.

مرور ادبیات فنی در زمینه استفاده از الیاف ضایعات موکت در بهسازی خاک نشان می‌دهد که تمرکز بیشتر تحقیقات بر خصوصیات مقاومتی بوده و خصوصیات تحکیمی و هیدرولیکی خاک‌های رسی در حضور الیاف موکت مورد بررسی قرار نگرفته است. از این‌رو، در این تحقیق، با استفاده از آزمایش‌های تراکم استاندارد، نفوذپذیری و تحکیم یک‌بعدی، به ارزیابی خصوصیات تراکمی، هیدرولیکی و تحکیمی خاک رس تسلیح‌شده با الیاف موکت پرداخته خواهد شد و تأثیر پارامترهای مقدار و طول الیاف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

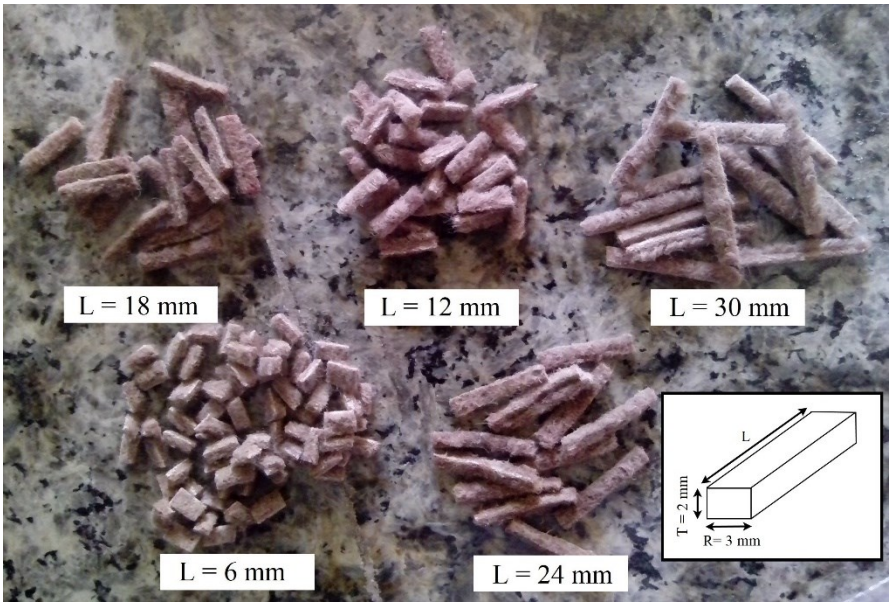
۲. مصالح

خاک مورد استفاده در این تحقیق، رس کائولینیت است که از شرکت صنایع خاک چینی ایران تهیه شده است. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی این خاک را بر اساس استاندارد ASTM D422-63 نشان می‌دهد. براساس نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ منطبق بر استاندارد ASTM D4318، حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک به ترتیب ۲۹/۵، ۲۱/۵ و ۸ به‌دست آمد. خاک مورد مطالعه براساس سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه خاک‌های رسی با پلاستیسیته کم (CL) قرار می‌گیرد. دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه خاک براساس استاندارد ASTM D698 به ترتیب ۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب و ۱۶/۲ درصد به‌دست آمد. چگالی ویژه دانه‌ها براساس استاندارد ASTM D854، ۲/۵۶ است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رس

المان مورد استفاده جهت تسلیح خاک، تریشه‌هایی با طول های مختلف است که از برش دادن و قیچی کردن ضایعات موکت تهیه گردیده است. مواد تشکیل‌دهنده این الیاف‌ها پلی‌اتیلن و پلی‌پروپلین بوده که مقاومت کششی حداکثر آن ۸۰۰ کیلوپاسکال و مدول الاستیسیته اولیه آن ۷۳۰ کیلوپاسکال طبق آیین‌نامه ASTM D4595 محاسبه شده است. مقطع تریشه‌ها مستطیل به ابعاد ۳ میلی‌متر (عرض الیاف) در ۲ میلی‌متر (ضخامت الیاف) و طول آن‌ها ٦، ۱۲، ۱۸، ۲٤ و ۳۰ میلی‌متر بود (شکل ۲) که با مقادیر وزنی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد با خاک مخلوط گردید. علت انتخاب این مقادیر وزنی این است که تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که الیاف، معمولاً با میزان ۰/۲ تا ۲ درصد وزنی، جهت تسلیح خاک‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (وانگ، ۱۹۹۹؛ میتی و همکاران، ۲۰۱۷؛ سارلی و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۲. تریشه‌های موکت با طول‌های مختلف

۳. آزمایش‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا خاک و الیاف را در آون خشک کرده، سپس این دو در ظرف دربسته قرار گرفته و با تکان دادن ظرف، مخلوط شدند. مقدار آب مورد نیاز از طریق پاشش تدریجی به مصالح اضافه گردید و عمل مخلوط کردن با دست انجام شد تا یک مخلوط یکنواخت از خاک و الیاف شکل بگیرد (شکل ۳). با توجه به تأثیر مشخصه‌های تراکمی (دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه) بر خصوصیات مهندسی خاک مانند مقاومت، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری، آزمایش تراکم استاندارد طبق ASTM D698 بر نمونه‌ها انجام شد.

نفوذپذیری، امکان جریان آب در خاک اشباع است که در خاک‌های ریزدانه با انجام آزمایش بار[1] اُفتان اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمایش، نمونه خاک در یک لوله قرار داده شده و اجازه داده می شود که آب در آن جریان پیدا کند. اختلاف بار اولیه در زمان $t=0$، مقدار h_1 ثبت می‌شود و با جریان آب در میان خاک، مقدار اختلاف بار در زمان $t=t$، h_2 ثبت می‌گردد. ضریب نفوذپذیری K به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K = 2.303\frac{al}{At}\log\frac{h_1}{h_2} \qquad (۱)$$

[1]- Head

که در آن، h اختلاف بار بر حسب سانتی‌متر در زمان t، A سطح مقطع نمونه خاک برحسب سانتی‌متر مربع، a سطح مقطع لوله قائم برحسب سانتی‌متر مربع و L طول نمونه خاک برحسب سانتی‌متر است. نفوذپذیری نمونه‌ها در این تحقیق با استفاده از آزمایش بار اُفتان براساس استاندارد ASTM D5084 محاسبه شد.

برای بررسی رفتار تحکیمی خاک رس تسلیح‌شده با الیاف موکت، آزمایش تحکیم یک‌بعدی طبق استاندارد ASTM D2435 انجام شد. در این مطالعه، روش بازسازی نمونه برای آماده‌سازی نمونه‌ها انتخاب شد. مخلوط خاک، الیاف موکت و آب (به میزان درصد رطوبت بهینه) در کیسه پلاستیکی دربسته در دمای اتاق در آزمایشگاه به مدت ٢٤ ساعت نگهداری شد و سپس نمونه‌ها جهت انجام آزمایش تحکیم ساخته شدند. نمونه‌ها در دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد آماده شدند (لاسکار و پال، ٢٠١٣). پس از انجام آزمایش تحکیم بر خاک غیرمسلح، نمونه‌های تسلیح‌شده با ٠/٥، ١ و ٢ درصد (نسبت به وزن خشک خاک) الیاف موکت با طول‌های مختلف ٦، ١٢، ١٨، ٢٤ و ٣٠ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند.

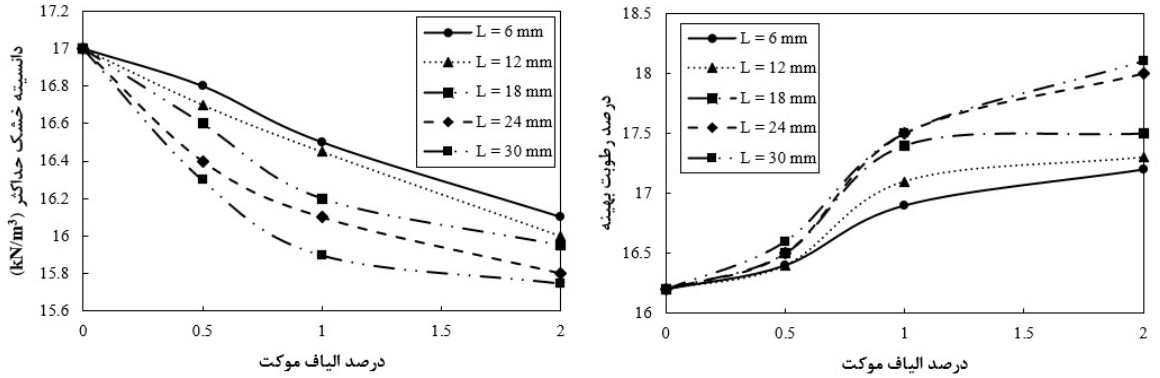
شکل ٣. اختلاط مصالح: الف) خاک رس کائولینیت، ب) الیاف موکت، ج) آب مورد نیاز برای مخلوط و د) مخلوط یکنواخت

٤. بیان و تحلیل نتایج

٤-١. آزمایش تراکم

تغییرات دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف موکت در شکل ٤ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار الیاف، دانسیته خشک حداکثر کاهش و درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها افزایش یافته است. به طوری که در نمونه با ٢ درصد الیاف (با طول ٣٠ میلی‌متر) نسبت به خاک غیرمسلح، دانسیته خشک حداکثر حدود ٧ درصد کاهش و درصد رطوبت بهینه حدود ١٢ درصد افزایش داشته است. علت کاهش پیوسته دانسیته خشک حداکثر با افزایش مقدار الیاف را می‌توان به جایگزینی دانه‌های خاک با الیاف موکت نسبت داد که در مقایسه با دانه‌های خاک وزن مخصوص کمتری دارند و موجب سبک‌تر

شدن نمونه‌ها می‌شوند. از طرفی، به علت جذب آب توسط الیاف موکت، با افزایش مقدار الیاف، درصد رطوبت بهینه افزایش داشته که اثر روان‌کنندگی آب جذب شده توسط الیاف، تأثیر تراکم را کاهش داده و دانسیته خشک حداکثر کاهش می‌یابد. در الیاف بلندتر، این نگهداشت آب در توده بزرگتری نسبت به الیاف کوچکتر رخ می‌دهد و جذب انرژی تراکم در این حالت توسط الیاف مرطوب بیشتر خواهد بود. به همین دلیل، دانسیته خشک حداکثر با افزایش طول الیاف کاهش داشته است.



شکل ٤. تغییرات دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها در حضور الیاف ضایعات موکت

٤-٢. آزمایش نفوذپذیری

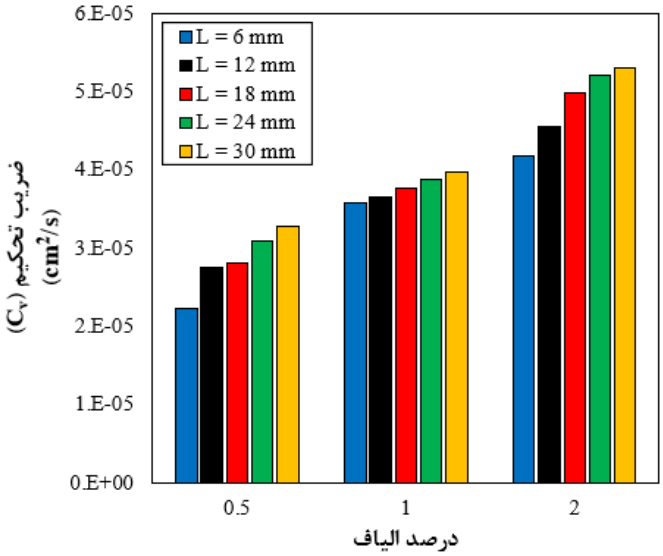
نفوذپذیری خاک رس کائولینیت در حالت غیرمسلح برابر با $۱/۷\times۱۰^{-۹}$ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد که نشان‌دهنده نفوذپذیری بسیار کم خاک مورد مطالعه است. مقدار نفوذپذیری نمونه‌های تسلیح‌شده با درصدهای مختلف الیاف براساس آزمون بار اُفتان در جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده شد که با افزودن الیاف به خاک رس، نفوذپذیری افزایش می‌یابد. از طرفی، افزایش طول الیاف نیز موجب افزایش نفوذپذیری می‌شود. نفوذپذیری نمونه حاوی ۲ درصد الیاف موکت به طول ۳۰ میلی‌متر حدود ۱/۸ برابر خاک غیرمسلح است. الیاف موکت که مرطوب و خیس شده‌اند جریان آب را نسبت به توده خاک رس راحت‌تر عبور می‌دهند. از طرفی، افزایش طول الیاف‌ها، مسیرهای بهتری برای خروج سریع‌تر آب فراهم می‌کند و در نتیجه نفوذپذیری نمونه‌ها بیشتر می‌شود. چنین روند مشابهی برای الیافی از جنس پلی‌پروپیلن در تحقیقات عبدی و همکاران (۲۰۰۸) و ملک‌زاده و بیلسل (۲۰۱۲) نیز مشاهده شده است. علی‌رغم روند افزایشی مشاهده شده، نفوذپذیری نمونه‌ها بسیار کم است. بنابراین، با توجه به هدف پروژه، باید مقادیر نفوذپذیری با حداقل مقادیر مورد نیاز ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ها کنترل شود.

جدول ۱. مقدار نفوذپذیری نمونه‌ها بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه

درصد الیاف	0.5	1	2
L = 6 mm	1.78E-09	2.27E-09	2.48E-09
L = 12 mm	2.17E-09	2.36E-09	2.67E-09
L = 18 mm	2.20E-09	2.39E-09	2.87E-09
L = 24 mm	2.39E-09	2.43E-09	2.89E-09
L = 30 mm	2.41E-09	2.56E-09	2.98E-09

٤-٣. آزمایش تحکیم

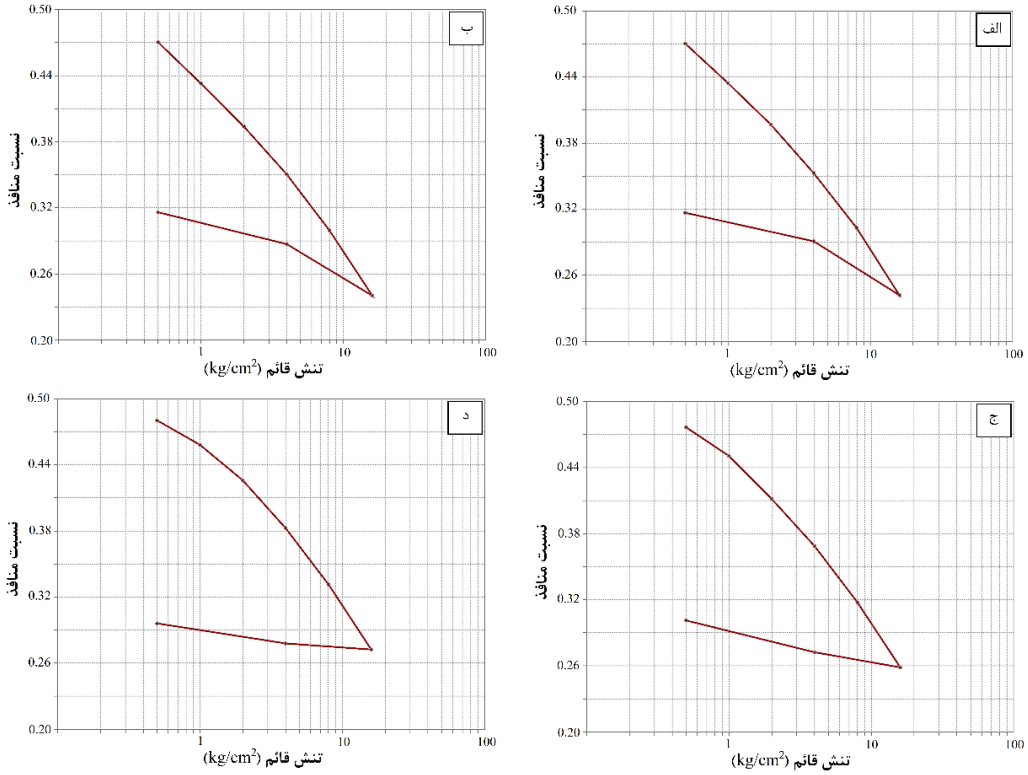
در این بخش، تغییرات پارامترهای ضریب تحکیم (C_v)، شاخص فشردگی (C_c) و شاخص تورم (C_s) در حضور مقادیر مختلف الیاف موکت بررسی می‌گردد. در این تحقیق، از روش جذر زمان که توسط تیلور (١٩٤٨) ارائه گردیده برای تعیین مقادیر ضریب تحکیم (C_v) استفاده شده است. ضریب تحکیم خاک رس کائولینیت برابر با $۱/۹۸\times۱۰^{-۵}$ سانتی‌متر مربع بر ثانیه به دست آمد. مقادیر ضریب تحکیم خاک مسلح در شکل ٥ ارائه شده است. با توجه به نتایج، می‌توان گفت که با افزایش طول الیاف، شاهد افزایش ضریب تحکیم در تمام درصدهای وزنی الیاف هستیم که بیشترین مقدار ضریب تحکیم مربوط به نمونه تسلیح‌شده با ٢ درصد الیاف با طول ٣٠ میلی‌متر می‌باشد. همان طور که در بخش قبل مشاهده شد، با افزایش الیاف در خاک، نفوذپذیری خاک‌های مسلح افزایش می‌یابد. بنابراین، با توجه به مفهوم تحکیم یک‌بعدی ترزاقی، می‌توان بیان کرد که با افزایش نفوذپذیری، مقدار ضریب تحکیم افزایش می‌یابد. با افزایش طول الیاف، مسیرهای بهتری برای خروج سریع‌تر آب فراهم می‌گردد و در نتیجه نفوذپذیری نمونه‌ها و به دنبال آن ضریب تحکیم افزایش خواهد یافت.



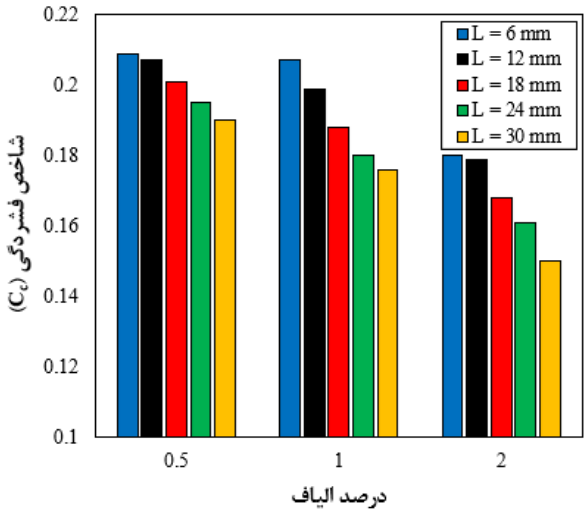
شکل ٥. تأثیر الیاف موکت بر ضریب تحکیم خاک رس کائولینیت

شاخص فشردگی نمونه‌ها براساس شیب نمودار آزمایشگاهی نسبت تخلخل- تنش قائم به دست آمد. این مقدار برای خاک رس کائولینیت غیرمسلح برابر با ٠/٢٣ بود. شکل ٦، تغییرات شاخص فشردگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار شاخص فشردگی با افزایش طول الیاف در یک مقدار مشخص الیاف کاهش می‌یابد و همچنین این کاهش با افزایش درصد الیاف ادامه‌دار است. کمترین مقدار شاخص فشردگی (C_c = ٠/١٥) برای نمونه تسلیح‌شده با ٢ درصد الیاف موکت با طول ٣٠ میلی‌متر می‌باشد. به منظور درک بهتر رفتار تحکیمی نمونه‌ها، نمودار نسبت منافذ-تنش قائم تعدادی از آنها در شکل ٧ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص است که با افزودن الیاف موکت به خاک رس، نشست نمونه کاهش می‌یابد. حضور الیاف باعث افزایش سختی خاک شده است که با افزایش میزان و طول الیاف این مقدار بیشتر می‌شود. در

واقع، حضور المان‌ها در خاک باعث می‌شود مقاومت کششی خاک رس به طور قابل‌توجهی افزایش یابد و از طرفی مقاومت خاک در مقابل فشار بیشتر گردد. به دلیل اینکه الیاف از نظر کششی بیشتر از ذرات خاک هستند، می‌توانند با بسیج کردن نیرو از طریق کشش، خاک را سخت‌تر کنند که با افزودن الیاف موکت، نتایج ارائه شده همین امر را نشان می‌دهد.

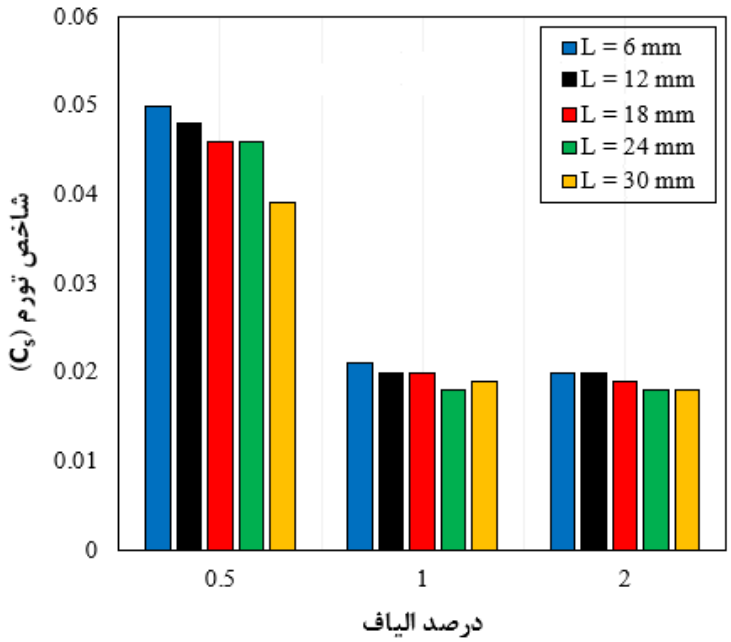


شکل ٦. نمودار نسبت مناقذ- تنش قائم: الف) خاک رس غیرمسلح، ب) خاک مسلح‌شده با ۰/۵ درصد الیاف موکت به طول ۱۲ میلی‌متر، ج) خاک مسلح‌شده با ۰/۵ درصد الیاف موکت به طول ۳۰ میلی‌متر و د) خاک مسلح‌شده با ۱ درصد الیاف موکت به طول ۱۲ میلی‌متر



شکل ۷. تأثیر الیاف موکت بر شاخص فشردگی خاک رس کائولینیت

شاخص تورم خاک رس کائولینیت غیرمسلح برابر با ۰/۰۵ به دست آمد. با توجه به شکل ۸ مشخص است که شاخص تورم نمونه‌ها با افزودن مقدار الیاف کاهش می‌یابد که این کاهش در درصدهای بیشتر الیاف، قابل‌توجه است. نمونه با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد الیاف به طول ۳۰ میلی‌متر به ترتیب باعث کاهش ۲۲، ٦۲ و ٦٤ درصدی شاخص تورم خاک می‌شود.



شکل ۸. تأثیر الیاف موکت بر شاخص تورم خاک رس کائولینیت

سازوکاری که باعث می‌شود الیاف از تورم خاک رسی جلوگیری کند ناشی از اندرکنش خاک- الیاف است. زمانی که تورم در نمونه رخ می‌دهد، الیاف موجود در خاک کشیده می‌شوند و در برابر تورم مقاومت نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که تأثیر طول الیاف در مقادیر بیشتر میزان الیاف در کاهش شاخص تورم محسوس‌تر است. علت می‌تواند ناشی از این باشد که نیروی کششی بیشتری به علت طول بیشتر در آنها بسیج می‌شود. نکته مهم دیگر این است که تأثیر تغییرات میزان الیاف در شاخص تورم بسیار بیشتر از این تأثیر بر تغییرات شاخص فشردگی است. به نحوی که برای شاخص تورم به نظر می‌رسد که حالت بهینه حدود یک درصد برای میزان الیاف باشد؛ ولی برای شاخص فشردگی چنین نیست. علت را شاید بتوان در این دانست که همین رفتار در حالت بدون تسلیح هم مشاهده می‌شود که شاخص تورم از شاخص فشردگی بسیار کمتر است (شاخص تورم معمولاً در حدود ۱۰ درصد شاخص فشردگی است) که ناشی از خاصیت خمیری در خاک می‌باشد.

۵. کارکردهای مهندسی استفاده از الیاف ضایعات موکت به عنوان مسلح‌کننده

امروزه، ضایعات موکت، با توجه به هزینه‌هایی که دفع آنها به همراه دارد، یک دغدغه قابل توجه برای محیط-زیست و اقتصاد کشور است. هر ساله، تنها بخش کوچکی از ضایعات موکت در سراسر جهان، بازیافت می‌شود (جین و همکاران، ۲۰۱۱). بازیافت ضایعات موکت نیازمند مراحل متعدد پردازش است که دشوار و

پرهزینه است (ریلف و همکاران، ۱۹۹۹). در نظر گرفتن ضایعات موکت به عنوان یکی از گزینه‌های دفن زباله به دلیل ماهیت غیرقابل تجزیه زیستی و افزایش هزینه‌های دفن زباله، غیراقتصادی است. سوزاندن این ضایعات دودهای سمی زیادی آزاد می‌کند که برای سلامت انسان خطرناک هستند. بنابراین، یافتن راه‌حلی برای تبدیل چنین زباله‌های جامد به شکلی مفید با کاربردهای متعدد ضروری است. بتن و خاک به مقدار زیادی در صنعت ساخت استفاده می‌شود. بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است. با این حال، دارای مقاومت کششی، شکل‌پذیری و جذب انرژی کمی است. یکی از دلایل ذاتی رفتار کششی ضعیف بتن، چقرمگی کم و وجود ترک است. بنابراین، بهبود چقرمگی بتن و کاهش اندازه و میزان ترک بتن منجر به عملکرد بهتر بتن می‌شود. یک راه مؤثر برای بهبود چقرمگی بتن و کاهش ترک‌ها، افزودن الیاف موکت به مخلوط بتن در طول اختلاط است. بتن مسلح‌شده با الیاف در حال حاضر در بسیاری از ساختمان‌ها، روسازی‌ها، پل‌ها و باند فرودگاه‌ها استفاده می‌شود (انجمن بتن آمریکا، ۱۹۸۲؛ بنتور و میندس، ۱۹۹۰؛ وانگ، ۱۹۹۹). خاک‌ها نیز دارای مقاومت کششی و برشی کمی هستند و ویژگی‌های آنها ممکن است به شدت به شرایط محیطی (به عنوان مثال، شرایط خشک و مرطوب) بستگی داشته باشد. تسلیح خاک با پارچه‌های ژئوتکستایل، یک فناوری جا افتاده است و به طور گسترده در راه‌سازی برای بهسازی، تثبیت، زهکشی و جداسازی خاک استفاده می‌شود. تسلیح خاک با الیاف توزیع شده به صورت تصادفی، روش دیگری است که می‌تواند خصوصیات خاک از جمله مقاومت برشی، مقاومت فشاری، ظرفیت باربری، مقاومت پس از اوج بارگذاری و مدول الاستیک را بهبود بخشد (وانگ، ۱۹۹۹). الیاف در خاک، به طور کلی، به عنوان اعضای تقویت کننده کششی عمل می‌کنند. حتی زمانی که خاک در اثر برش یا فشار تغییرشکل می‌دهد، کرنش‌های معمولی در جهات دیگر ممکن است کششی باشند. از آنجا که الیاف به طور کلی مقاوم‌تر و سخت‌تر از خاک هستند، تغییرشکل توسط الیاف در جهت کرنش‌های کششی از طریق فعل و انفعالات اصطکاکی الیاف- خاک مقاومت می‌کند. سطح کلی شکست به دلیل وجود الیاف، بزرگتر و غیرمسطح است و بار گسیختگی و انرژی افزایش می‌یابد. الیافی که تحت کشش قرار می‌گیرند، همچنان مقاومت دارند. بنابراین، مقاومت پس از اوج نیز افزایش می‌یابد و رفتار خاک را انعطاف‌پذیرتر می‌کند. از آنجا که تثبیت شیمیایی خاک‌ها یکی از روش‌های بهسازی است و ترک‌خوردگی کششی در این خاک‌های تثبیت‌شده، عامل اصلی گسیختگی می‌باشد (قوامی و رجبی، ۲۰۲۱)، افزودن الیاف در چنین مواردی می‌تواند به طور مؤثر انتشار ترک‌ها را از طریق پل زدن الیاف کنترل کند. همچنین، استفاده از الیاف می‌تواند باعث کاهش مصرف تثبیت‌کننده شیمیایی شود و بنابراین از جنبه زیست‌محیطی و توسعه پایدار نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. همان‌طور که مرور ادبیات فنی در بخش مقدمه نشان داد، الیاف ضایعات موکت از جمله تسلیح-کننده‌هایی است که عملکرد مثبت آن در بهبود مقاومت خاک‌ها گزارش شده است. در این تحقیق نیز تأثیر آن بر افزایش نفوذپذیری و کاهش نشست تحکیمی مشاهده شد. از این رو، الیاف موکت می‌تواند در بهسازی خاک بستر راه‌ها کارایی لازم را داشته باشد. از طرفی، با توجه به افزایش نفوذپذیری نمونه‌های حاوی الیاف ضایعات موکت، باید در استفاده از آنها در لندفیل‌ها تمهیدات لازم اندیشیده شود.

٦. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییرات خصوصیات تراکمی، هیدرولیکی و تحکیمی خاک رس کائولینیت در حضور الیاف ضایعات موکت با مقادیر مختلف (۰/۵، ۱ و ۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک)، با طول‌های ٦، ۱۲، ۱۸، ۲٤

و ۳۰ میلی‌متر، با انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد، نفوذپذیری بار اُفتان و تحکیم یک‌بُعدی، بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که:

- الیاف ضایعات موکت موجب کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها می‌شود. بنابراین، الیاف موکت را می‌توان به عنوان مصالح خاکریز سبک استفاده کرد.
- حضور الیاف موکت موجب افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود. با افزایش طول الیاف، مسیرهای بهتری برای خروج سریع‌تر آب فراهم می‌گردد و در نتیجه نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- با افزایش درصد وزنی الیاف با طول ثابت، مقدار ضریب تحکیم افزایش پیدا می‌کند که نشان می‌دهد الیاف موکت موجب افزایش سرعت تحکیم خاک رس می‌شوند. با افزایش طول الیاف، خروج آب از طریق آنها راحت‌تر صورت می‌گیرد و در نتیجه نفوذپذیری نمونه‌ها و به دنبال آن ضریب تحکیم افزایش خواهد یافت.
- با افزایش مقدار الیاف و همچنین افزایش طول آن‌ها مقدار نشست نمونه‌های تسلیح‌شده نسبت به نمونه غیرمسلح کاهش می‌یابد. افزایش مقدار الیاف با طول ثابت باعث کاهش قابل توجهی در مقدار شاخص فشردگی می‌شود. همچنین، افزایش طول الیاف منجر به کاهش شاخص فشردگی می‌گردد. حضور الیاف موکت در خاک رس باعث افزایش سختی آن شده و نشست‌پذیری آن را کاهش می‌دهد.
- ۰/۵ درصد الیاف موکت موجب کاهش اندکی در مقدار شاخص تورم می‌شود و زمانی که میزان الیاف از ۰/۵ درصد بیشتر می‌شود این کاهش در مقدار شاخص تورم قابل توجه است.
- تأثیر درصد وزنی الیاف نسبت به طول الیاف بر پارامترهای تحکیمی شامل شاخص فشردگی، شاخص تورم و ضریب تحکیم چشمگیرتر است.

۷. مراجع

Abdi, M. R., Parsapajouh, A. and Arjomand, M. A. 2008. “Effects of random fibre inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays”. Int. J. Civ. Eng., 6(4): 284-292.

ACI Committee 544. 1982. “State-of-the-art report on fiber reinforced concrete”. 544.1R-82 (reapproved 1986), American Concrete Institute, Detroit.

Alabduljabbar, H., Mohammadhosseini, H., Md. Tahir, M. and Alyousef, R. 2021. “Green and sustainable concrete production using carpet fibers waste and palm oil fuel ash”. Mater. Today: Proc., 39: 929-934.

Bentur, A. and Mindess, S. 1990. “Fiber reinforced cementitious composites”. Elsevier, London.

Choobbasti, A. J., Samakoosh, M. A. and Kutanaei, S. S. 2019. “Mechanical properties of soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers”. Constr. Build. Mater., 211: 1094-1104.

Fashandi, H., Pakravan, H. R., and Latifi, M. 2019. “Application of modified carpet waste cuttings for production of eco-efficient lightweight concrete”. Constr. Build. Mater., 198: 629-637.

Ghavami, S., Jahanbakhsh, H. and Moghadas Nejad, F. 2020. “Laboratory study on stabilization of kaolinite clay with cement and cement kiln dust”. Amirkabir J. Civ. Eng., 52(4): 935-948.

Ghavami, S. and Rajabi, M. 2021. “Investigating the influence of the combination of cement kiln dust and fly ash on compaction and strength characteristics of high-plasticity clays”. J. Civ. Eng. Mater. Appl., 5(1): 9-16.

Ghavami, S., Jahanbakhsh, H. and Moghadas Nejad, F. 2021. “Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength behavior of CKD-stabilized Soil”. Geotech. Geol., 17(1): 465-470.

Hassan, H. J. A., Rasul, J. and Samin, M. 2021. “Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil”. Transport. Infrastruct. Geotech., 8(3): 390-413.

Jain, A., Pandey, G., Singh, A. K., Rajagopalan, V., Vaidyanathan, R. and Singh, R. P. 2011. “Fabrication of structural composites from waste carpet”. Adv. Polym. Tech., 31(4): 380-389.

Laskar, A. and Pal, S. K. 2013. “Effects of waste plastic fibres on compaction and consolidation behavior of reinforced soil”. Electron. J. Geotech. Eng., 18: 1547-1558.
Maity, J., Chattopadhyay, B. C. and Mukherjee, S. P. 2017. “Improvement of characteristics of clayey soil mixed with randomly distributed natural fibers”. J. Institut. Eng. (India), Series A, 99(1): 55-65.
Malekzadeh, M. and Bilsel, H. 2012. “Swell and compressibility of fibre reinforced expansive soils”. Int. J. Adv. Tech. Civ. Eng., 1(2): 42-46.
Miraftab, M. and Mirzababaei, M. 2009. “Carpet waste utilisation, an awakening realisation: A review”. Second International Symposium on Fibre Recycling, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA.
Mirzababaei, M., Miraftab, M., Mohamed, M. and McMahon, P. 2013. “Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers”. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 139(3): 483-493.
Moseley, M. P. and Kirsch, K. 2004. “Ground improvement”. Second Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
Realff, M. J., Ammons, J. C. and Newton, D. 1999. “Carpet recycling: Determining the reverse production system design”. Polym-Plast. Tech. Eng., 38(3): 547-567.
Sarli, J. M., Hadadi, F. and Bagheri, R. A. 2020. “Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO_2”. Geotech. Geol. Eng. 38: 1151-1163.
Shahbazi, M., Rowshanzamir, M., Abtahi, S. M. and Hejazi, S. M. 2017. “Optimization of carpet waste fibers and steel slag particles to reinforce expansive soil using response surface methodology”. Appl. Clay Sci., 142: 185-192.
Taylor, D. W. 1942. “Research on consolidation of clays”. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Serial No. 82.
Tran, K. Q., Satomi, T. and Takahashi, H. 2018. “Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils”. Transport. Geotech., 16: 76-84.
Wang, Y. 1999. “Utilization of recycled carpet waste fibers for reinforcement of concrete and soil”. Polym-Plast. Tech. Eng., 38(3): 533-546.