تثبیت خاک نامرغوب ساحلی با استفاده از سیمان و الیاف نخل خرما برای بستر روسازی‌ها

امیر کاووسی*، دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
جواد صائبی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: kavussia@modares.ac.ir
دریافت: ۹۴/۱۱/۲۴ – پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۶

چکیده

تثبیت خاک روشی متداول است که توسط مهندسین به منظور ارتقاء خصوصیات خاک با استفاده از انواع مواد تثبیت‌کننده اجرا می‌شود. علاوه بر کاربرد مواد تثبیتی متعارف نظیر سیمان و آهک، از دیرباز، الیاف طبیعی به عنوان روشی مؤثر در بهبود خواص فیزیکی خاک به‌کار گرفته شده است. در این تحقیق، به بررسی اثر استفاده توأم الیاف درخت خرما و سیمان در خاک نامرغوب ساحلی جزیره قشم پرداخته شده است. سیمان به عنوان ماده اصلی تثبیت‌کننده و الیاف درخت خرما به عنوان بهبود دهنده خصوصیات مقاومت کششی خاک به‌کار رفته است. الیاف نخل، بافتی رشته‌ای داشته که در مناطق جنوبی کشور فراوان است و پارامترهایی از جمله دوام، وزن مخصوص کم، ظرفیت کششی و مقاومت نسبی زیاد در مقابل زوال دارد. نمونه‌های آزمایشگاهی از مخلوط خاک ساحلی حاوی دو درصد الیاف (۰/۵ و ۱ درصد) و مقدار معّینی سیمان تهیه و تحت آزمایش تراکم قرار گرفتند. آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) روی دو سری از این نمونه‌ها با دوره‌های زمانی عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. همچنین، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) روی نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ و ۲۸ روزه و در شرایط رطوبت بهینه و اشباع انجام و با نتایج دو آزمایش فوق مقایسه گردید. نتایج تحقیق نشان داد که افزودن الیاف، با ثابت نگهداشتن درصد سیمان، موجب کاهش حداکثر چگالی‌خشک خاک و همچنین افزایش رطوبت بهینه تراکم شد. نمونه تثبیت‌شده حاوی ۰/۵ درصد الیاف، بیشترین مقاومت فشاری را با اختلاف کم نسبت به سایر نمونه‌ها داشت. نتایج آزمایش ITS نشان‌دهنده افزایش بیش از ٤٨ درصدی مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف با عمل‌آوری ۲۸ روزه بود. همچنین، به‌کارگیری مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد الیاف در خاک، هم در نمونه‌های اشباع و هم در نمونه‌های با رطوبت بهینه، موجب ارتقاء قابل توجه مقادیر CBR شد.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، سیمان، الیاف درخت نخل

۱. مقدمه

بستر روسازی، سازه‌ای است که از خاک طبیعی در محل و یا از محل‌های قرضه تشکیل می‌شود تا دیگر لایه‌های دانه‌ای روسازی مانند قشرهای زیراساس، اساس و لایه‌های سطحی روی آن قرار گیرند. کیفیت و پایداری بستر عامل بسیار مهمی است که تضمین کننده

عملکرد و سرویس‌دهی مناسب سازه راه در طول عمر روسازی می‌شود. چالش همیشگی مهندسین در راه-سازی، مواجه شدن با خاک‌های نامرغوب است که توانایی سرویس‌دهی مناسب را در صورت به‌کارگیری ندارند.

خاک سواحل تعدادی از جزایر جنوبی کشور (از آن جمله جزیره قشم) از جنس ماسه‌های ساحلی و نهشته‌های مرجانی است که اغلب به خودی خود کیفیت لازم برای تحمل بارهای روسازی راه‌ها را ندارند. بنابراین، نیاز به خاک جایگزین یا بهسازی خاک موجود است. جزیره قشم در نواحی ساحلی خود دارای خاک‌های نامرغوب است. در این جزیره، مصالح پروژه-های عمرانی از سرزمین‌های اصلی کشور و با هزینه بالای حمل و نقل تأمین می‌شود. با این حال، در مناطقی از این جزیره، معادن قرضه‌ای وجود دارد که مستعد بوده و در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است تا امکان بهسازی آن‌ها و استفاده در سازه راه مورد بررسی قرار گیرد.

تثبیت شیمیایی با سیمان و یا آهک به عنوان روش‌هایی برای ارتقاء عملکرد (مقاومت و تثبیت) خاک موضوعی ثابت شده و مورد آزمون قرار گرفته است (اسماعیل و همکاران، ۲۰۰۲؛ آیبان، ۱۹۹٤). با این حال، این افزودنی‌ها معمولاً منجر به سختی[1] زیاد و رفتار شکننده[2] و مستعد ترک‌خوردگی می‌شوند (کولیاس و همکاران، ۲۰۰۵؛ ونگ و همکاران، ۲۰۰۳). استفاده از مسلح‌کننده‌ها در خاک نیز در بهبود خواص مهندسی مؤثر است. در مقایسه با ژئوسینتتیک‌های متداول (نظیر ژئوتکستایل و ژئوگرید)، استفاده از الیاف غیریکنواخت پخش‌شده هم به عنوان مسلح کننده خاک شناخته شده است. الیاف به سادگی به خاک اضافه شده و به صورت عمومی، همانند سیمان یا آهک، با خاک مخلوط می‌شوند. همچنین، الیاف پخش‌شده به‌صورت یکنواخت، پتانسیل صفحات ضعف را که می‌توانند تسلیح جهت‌دار یا موازی ایجاد کنند، محدود می‌کند. محققین آزمایش‌های مختلفی نظیر CBR، سه‌محوری، مقاومت فشاری محصورنشده و برش مستقیم را در دهه‌های اخیر انجام داده‌اند (حجازی و همکاران، ۲۰۱۲). بر اساس نتایج به‌دست آمده، استفاده از الیاف موجب کاهش ترک‌خوردگی روسازی‌ها شده و در همه مطالعات پیشین نشان داده شده است که افزودن الیاف مسلح‌کننده موجب بهبود قابل توجه در مقاومت و کاهش سختی خاک شده است (بنکی و همکاران، ۱۳۹۱؛ اسماعیلی و قلعه‌نوی، ۱۳۹۱).

درخت نخل که در مناطق وسیعی در جنوب کشور کشت می‌شود، هر ساله مقدار زیادی مواد دورریز در فصل هرس از خود باقی می‌گذارد که قریب به اکثر کشاورزان بعد از جمع‌آوری، شاخ و برگ و اضافات درخت را می‌سوزانند. در سال‌های اخیر، تحقیقات درباره استفاده از الیاف طبیعی افزایش یافته است. الیاف نخل خرما که از تنه این درخت استخراج می‌شود دارای بافتی رشته‌ای است. ویژگی‌هایی مانند ارزانی، فراوانی در منطقه، دوام، وزن مخصوص کم، توان کششی و مقاومت نسبی بالا در مقابل اضمحلال، این الیاف را گزینه مناسبی برای استفاده در تسلیح خاک می‌کند (مرندی و همکاران، ۲۰۰۸).

نتایج مطالعات انجام شده در رابطه با استفاده از الیاف نخل به‌منظور بهبود مشخصات فیزیکی خاک نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و همچنین مقاومت CBR نمونه‌های حاوی الیاف بوده است (یوسف و همکاران، ۲۰۱۰). استفاده از الیاف نخل، افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک (C و Ø) را در پی داشته است (جمال‌الدین و همکاران، ۲۰۱۰). طول بهینه رشته الیاف نخل مورد استفاده در خاک از بین طول‌های متفاوت مورد مطالعه (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ میلی‌متر)

[1]- Stiffness
[2]- Brittle

۳۰ میلی‌متر و درصد بهینه الیاف ۰/۵ درصد بوده است (احمد و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین، در مطالعه آجرهای کامپوزیت که در ساخت آن‌ها از الیاف نخل استفاده شده است، بهبود ۳ درصدی مقاومت فشاری گزارش شده است (صالحان و همکاران، ۲۰۱۱).

در این تحقیق، به منظور تثبیت خاک، دو ماده آهک و سیمان که جزو تثبیت‌کننده‌های شناخته شده و با کاربرد متداول بوده و در ایران در دسترس و فراوان هستند، مورد آزمایش قرار گرفته است. در تحقیقی (تامسون و رابنت، ۱۹۷۰) نشان داده شد که کاربرد آهک در تثبیت خاک‌های حاوی ذرات رس، با شاخص خمیری کمتر از ۱۰، به میزان ۷٪ مؤثر است. انجمن ملی آهک[1]، شاخص خمیری ۱۰ یا بیشتر را شرط پیشنهادی انتخاب آهک به عنوان ماده تثبیت‌کننده مؤثر می‌داند. در حالی که گروه مهندسین ارتش آمریکا[2] شاخص خمیری ۱۲ یا بیشتر را موفق می‌دانند (UFC، ۲۰۰۴). بر اساس طبقه‌بندی آشتو، انواع خاک‌های A-4، A-5، A-6، A-7 و برخی از خاک‌های A-2-6 و A-2-7 برای تثبیت با آهک مناسب هستند (ترل و همکاران، ۲۰۰۶).

راهبرد کلی برای تثبیت خاک با سیمان آن است که شاخص خمیری برای مصالح ماسه‌ای باید کمتر از ۳۰ باشد. در خاک‌های ریزدانه (خاک‌های با بیش از ۵۰٪ وزنی عبور کرده از الک ۷۵ mμ) راهبرد کلی پذیرفته شده این است که شاخص خمیری کمتر از ۲۰ و حد روانی (LL) کمتر از ۴۰ باشد تا اختلاط مطلوب حاصل شود (UFC، ۲۰۰۴). یک راهنمای کلی خاص در معادله زیر براساس درصد ریزدانه مشخص خاک ارائه شده است که حد بالای شاخص خمیری را برای آن خاک به منظور تثبیت با سیمان تعیین می‌کند (ترل و همکاران، ۲۰۰۶):

$$P.I \leq 20 + \frac{50 - (\% < 0.075mm)}{4} \qquad (۱)$$

سیمان برای تثبیت خاک‌های شنی با حداکثر ۴۵٪ وزنی مانده روی الک ۴ مناسب است. اداره راه‌های فدرال آمریکا استفاده از سیمان را برای مصالح دارای کمتر از ۳۵٪ وزنی عبور کرده از الک ۲۰۰ و شاخص خمیری (PI) کمتر از ۲۰ پیشنهاد می‌کند (اوگلسبی و هیوز، ۱۹۶۳). بر این اساس، خاک‌های با طبقه‌بندی آشتو A-2" و "A-3" برای تثبیت با سیمان ایده‌آل هستند. اما علاوه بر این، سیمان می‌تواند خاک‌های A-4 تا A-7 را نیز به خوبی تثبیت کند (طباطبایی، ۱۳۷۹).

۲. مواد و مصالح

مصالح این تحقیق شامل خاک، آب، سیمان و الیاف درخت نخل است که در ادامه در هر مورد توضیحاتی داده می‌شود.

۲-۱. خاک

خاک مورد ارزیابی از یکی از معادن جزیره قشم تهیه شده است. این نوع خاک دارای ظاهری به رنگ سفید روشن است و با بازرسی چشمی مقادیر زیادی از بقایای صدف‌های دریایی را می‌توان در آن مشاهده کرد که نشان از منشأ نهشته‌های دریایی خاک دارد.

جدول ۱. مشخصات خاک ساحلی مورد مطالعه

درصد شن	۳۵/۵
درصد ماسه	۶۲
درصد (<#200)	۲/۵
شاخص خمیری	غیر خمیری
D_{30} - D_{60} (م.م.)	۰/۵۹–۳/۵
C_u - C_c	۲۱–۰/۶۲
طبقه‌بندی متحد (یونیفاید)	SP
طبقه‌بندی آشتو	A-1-b(0)

[1]- The National Lime Association
[2]- US Army Corps of Engineers

با توجه به مشخصه‌های ذکر شده، خاک منشأ رسوبی آهکی دارد که ناشی از تجمع صدف‌ها و مرجان‌های دریایی است که به مرور زمان نهشته شده و سنگ‌های متخلخل و خرد شونده موسوم به لوماشل را ایجاد می‌کنند.

برای شناخت بهتر خاک، به منظور انتخاب ماده تثبیت کننده مناسب و مقدار آن، آزمایش‌های پراش پرتو X و اسپکتروفتومتری به ترتیب به منظور شناسایی ساختار آمورف خاک و میزان سولفات قابل حل موجود در خاک انجام شدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان دهنده آن است که خاک عمدتاً حاوی مقدار زیادی کلسیت ($CaCO_3$) بوده و عاری از کانی‌های رسی است. همچنین، آزمایش اسپکتروفتومتری، طبق معیار مرکز مطالعات حمل و نقل آمریکا (هریس و همکاران، ۲۰۰۲) که با توجه به مقدار سولفات قابل حل موجود در خاک، ریسک حمله سولفاتی را مطابق جدول ۲ طبقه‌بندی کرده است، حاکی از قرارگیری خاک مورد مطالعه در سطح ریسک کم است.

جدول ۲. سطح ریسک حمله سولفاتی در خاک (هریس و همکاران، ۲۰۰۲)

سطح ریسک	غلظت سولفات قابل حل	
	ppm	درصد وزنی
کم	<۳۰۰۰	<۰/۳
متوسط	۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰	۰/۳ تا ۰/۵
متوسط تا زیاد	۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰	۰/۵ تا ۰/۸
زیاد تا غیر قابل قبول	>۸۰۰۰	>۰/۸
غیر قابل قبول	>۱۱۰۰۰	>۱/۰

۲-۲. الیاف نخل خرما

الیاف نخل دارای طول‌های مختلف و همچنین قطرهای متفاوت هستند که در این تحقیق از نخلستان‌های استان بوشهر جمع‌آوری شدند. ویژگی‌های الیاف طبیعی درخت خرما به طور خلاصه در جدول ۳ ذکر گردیده است. طول بهینه الیاف در مطالعات پیشین ۳۰ میلی‌متر تعیین شده که در این تحقیق نیز به تبعیت از مطالعات پیشین همین طول الیاف انتخاب شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های الیاف نخل خرما (مرندی و همکاران، ۲۰۰۸)

جذب آب در ۲۴ ساعت	٪۱۷۸
افزایش مقطع عرضی (۲۴ ساعت)	٪۲/۵۱
افزایش طول (۲۴ ساعت)	٪۱۱/۱۱
مقاومت کششی حداکثر (MPa)	۶۳/۳۲
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۰/۹۲
مدول الاستیسیته (MPa)	۶۰۰/۸
قطر متوسط (mm)	۰/۳۵

این الیاف به صورت طبیعی، بافتی پارچه‌مانند دارند و دارای رشته‌های تار و پودی هستند (شکل ۱). ابتدا این رشته‌ها را از هم جدا می‌کنند تا بتوان آن‌ها را با به قطعات مجزا با طول مشخص ۳۰ میلی‌متر برید.

شکل ۱. بافت پارچه‌گونه الیاف نخل

الیاف نخل در حالتی که تازه از درخت بریده شده‌اند انعطاف‌پذیرند. اما بعد از رها شدن طی چند روز، مقداری از رطوبت خود را از دست داده و از انعطاف-پذیری آن‌ها کاسته می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که برخی از رشته‌های الیاف که قطر بیشتری دارند

حالت کاملاً شکننده‌ای به‌خود بگیرند. اگرچه عمده رشته‌های الیاف کماکان انعطاف‌پذیری خود را تا حد زیادی پس از افت رطوبت نیز حفظ می‌کنند.

۲-۳. سیمان و آب

با توجه به معیارهای ذکر شده در انتخاب ماده تثبیت-کننده و همچنین نتایج آزمایش پراش پرتو X و آزمایش اسپکتروفتومتری، که عدم وجود خاصیت خمیری و امکان حمله سولفاتی خاک را نشان می‌دهد، سیمان به عنوان ماده تثبیت‌کننده مناسب انتخاب شد. با توجه به موارد تشریح شده فوق، کاربرد سیمان تیپ ۲ مناسب تشخیص داده شد.

۳. تعیین طرح اختلاط

از بین مقادیر متفاوت استفاده شده در خاک، مقدار ۰/۵٪ الیاف به عنوان درصد بهینه الیاف گزارش شده است (مرندی و همکاران). در این تحقیق، علاوه بر ۰/۵ درصد الیاف، نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف به منظور بررسی اثر افزایش مقدار الیاف در خاک مورد مطالعه نیز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت.

آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳٤) به منظور ارائه شاخص تراکم خاک بستر، با توجه به نوع خاک و اهمیت راه، مقادیری را پیشنهاد کرده است. با فرض استفاده از خاک تثبیت شده در مسیرهای پر تردد مانند بزرگراه و راه اصلی و همچنین با توجه به اینکه خاک مورد مطالعه درشت‌دانه است، میزان تراکم ۱۰۰٪ برای متراکم کردن نمونه‌ها تعیین شد.

درصد مناسب سیمان بعد از طبقه‌بندی خاک با رجوع به معیارهای انجمن سیمان پرتلند (PCA، ۱۹۹۲) با توجه به طبقه‌بندی تعیین شده (A-b-1 یا SP) در محدوده ۸-۵، درصد وزنی ۶٪ تعیین شد. باید توجه داشت که این مقادیر بر اساس داده‌های مشخصات مخلوط‌های خاک- سیمان در آزمایش‌های دوام AASHTO T 135 و AASHTO T 136 و آزمایش‌های معادل آن‌ها ASTM D 559 و ASTM D 560 می‌باشد.

٤. آزمایش‌ها

در برنامه آزمایشگاهی و در ساخت نمونه‌ها، سیمان به عنوان ماده تثبیت کننده اصلی خاک و الیاف نخل خرما به عنوان ماده بهبوددهنده خصوصیات مقاومت کششی خاک در نظر گرفته شد. نمونه‌های آزمایشگاهی با درصدهای مختلف الیاف (۰/۵ و ۱ درصد) و ٦٪ سیمان ساخته شدند. توضیح آن که نمونه‌های با مقادیر کمتر سیمان (۲، ۳ و ٤ درصد) نیز ساخته شدند. اما مشاهده گردید که از آنجا که بخشی از دوغاب سیمان جذب الیاف نخل می‌شود، در این نمونه‌ها دوغاب سیمانی باقی‌مانده برای حصول انسجام مخلوط خاک مورد تثبیت کفایت نمی‌کرد.

به منظور سنجش مقاومت خاک تثبیت‌شده با سیمان و الیاف، آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) به روش ASTM C496-11، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) به روش ASTM D1883-16 و مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) به روش ASTM D2166-16 روی نمونه‌های متراکم شده انجام شد. نمونه‌های آزمایش ITS و UCS شامل نمونه‌های مرکب از خاک دارای ۶٪ سیمان و الیاف (۰/۵ و ۱ درصد) ساخته و پس از عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در شرایط اشباع تحت آزمایش قرار گرفتند. همچنین، نمونه‌های آزمایش‌های CBR نیز با ترکیبات مذکور برای آزمایش‌های قبل، در شرایط رطوبت بهینه و شرایط اشباع ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند.

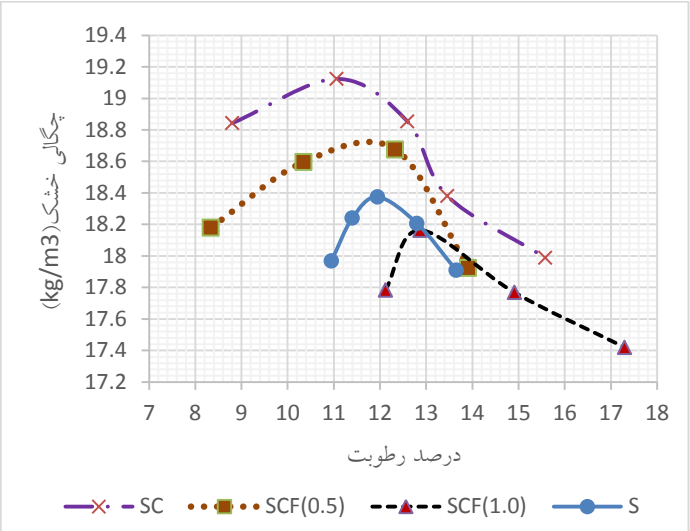
۵. نتایج و تحلیل

نتایج به‌دست آمده برای هر یک از آزمایش‌های ذکر شده به تفکیک به شرح زیر آورده شده و مورد بحث و

تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۵-۱. آزمایش تراکم

بر اساس تحقیقات گسترده آزمایشگاهی، میزان تراکم، چگالی نسبی و متعاقباً فضای خالی موجود در نمونه‌ها از جمله عوامل مؤثر در رفتار مکانیکی خاک می‌باشند. به این منظور، آزمایش تراکم روی خاک قرضه جزیره، با ترکیب ۳۵/۵ درصد شن، ۶۲٪ ماسه و ۲/۵ درصد فیلر مندرج در جدول ۱ و با درصدهای مختلف سیمان و الیاف نخل خرما انجام و نتایج برای درصدهای مختلف رطوبت در شکل ۲ آورده شد.

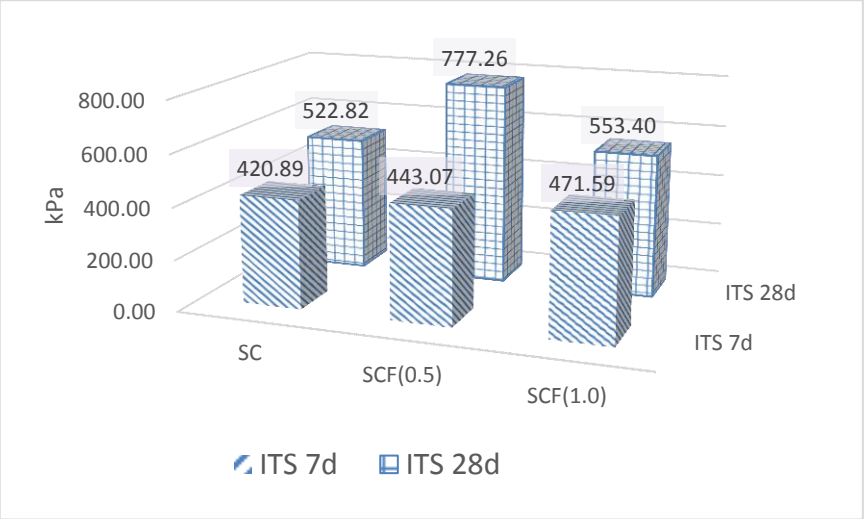


شکل ۲. منحنی‌های تراکم نمونه‌های خاک و سیمان حاوی درصدهای متفاوت الیاف

شکل ۲ تغییرات حداکثر چگالی خشک نمونه‌های مختلف خاک تثبیت‌شده را نشان می‌دهد. افزودن الیاف، با توجه به ثابت بودن درصد سیمان، موجب تغییر در حداکثر چگالی خشک خاک و همچنین رطوبت بهینه نمونه‌های متراکم شده می‌شود. با افزودن الیاف به خاک، چگالی خشک حداکثر کاهش یافته و مقدار رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. با افزایش درصد الیاف، این تغییرات با همین روند بیشتر می‌شود. در نمونه تثبیت-شده حاوی ۱٪ الیاف، حداکثر چگالی خشک خاک تا $18/2\ kN/m^3$ و کمتر از حداکثر چگالی خشک خاک بدون افزودنی است. این کاهش می‌تواند به دلیل تجمع الیاف نخل و عدم توزیع یکنواخت آن در خاک باشد. در حقیقت، توزیع غیر یکنواخت سبب جلوگیری از متراکم شدن دانه‌های خاک و ایجاد نقاط ضعف در محل‌های تجمع الیاف می‌شود.

۵-۲. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

نتایج این آزمایش می‌تواند نشان‌دهنده وجه تمایز تأثیر مثبت حضور الیاف در افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها باشد. بنابراین، آزمایش ITS در این تحقیق بسیار حائز اهمیت تشخیص داده شد. تمامی نمونه‌های این آزمایش قبل از انجام به مدت ٤ ساعت در آب غوطه‌ور شدند. با این شرایط، امکان انجام آزمایش روی نمونه‌هایی که صرفاً حاوی مخلوط خاک-الیاف بودند وجود نداشت؛ چرا که نمونه‌ها در حالت اشباع در آب مضمحل می-شدند و شکل منسجم شده خود را از دست می‌دادند. نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳. نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

نمونه‌های این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D6931 با استفاده از قالب تراکم ۴ اینچی ساخته شده و مانند نمونه‌های آزمایش UCS عمل‌آوری شدند. این آزمایش به منظور تعیین اثر الیاف مورد استفاده در افزایش مقاومت کششی خاک تثبیت‌شده با سیمان (بجای آزمایش ITS) در برنامه آزمایشگاهی قرار گرفت.

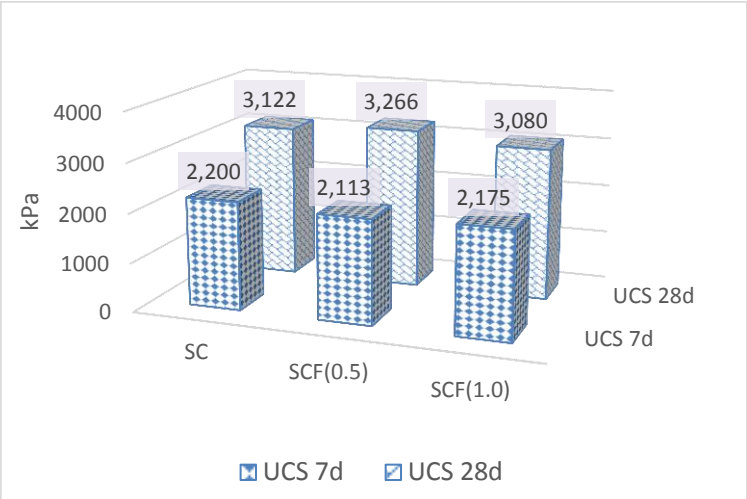
نتایج آزمایش ITS (شکل ۳) نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های بدون الیاف (با عمل‌آوری ۲۸ روزه و افزایش۴۸/۶ درصدی مقاومت کششی) است. همانند آزمایش UCS، در این آزمایش نیز مقاومت نمونه‌های ۷ روزه تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند. این اختلاف در دوره طولانی‌تر عمل‌آوری بروز کرده است. افزایش درصد الیاف از ۰/۵ درصد به ۱٪ سبب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده ۲۸ روزه شده است. گرچه با افزایش مقدار الیاف انتظار افزایش مقاومت کششی می‌رود، اما افزایش بیش از حد سبب افزایش فضای اشغال شده توسط الیاف شده است که نشان‌دهنده تجمع الیاف و کاهش اندرکنش اتصال الیاف به خاک و یا اتصال دانه‌های خاک به یکدیگر در توده خاک غالب شده است (انگرینی و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، ترکیب خاک، الیاف و سیمان تا آنجا که این اندرکنش‌ها در تعادل باشند هم افزایش مقاومت کششی و هم افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها را در پی دارد.

بررسی چشمی نمونه‌های ITS، خصوصاً نمونه‌های بدون الیاف (شکل ۴)، و دقت در صفحات شکست نمونه‌ها نشان از یکپارچگی ایجاد شده بین ذرات خاک تثبیت‌شده با سیمان دارد. چرا که صفحه شکست در مسیر خود از سنگدانه‌ها عبور کرده است (تکه‌های با رنگ متفاوت در صفحه شکست در شکل ۴). همچنین، بررسی نمونه‌های حاوی الیاف بعد از انجام آزمایش نشان‌دهنده بریده شدن رشته الیاف در صفحه شکست است (بدون اینکه دچار بیرون کشیدگی شده باشند). این امر نشانگر ایجاد چسبندگی مطلوب بین الیاف و ماتریس خاک- سیمان می‌باشد.

شکل ٤. صفحه شکست نمونه تثبیت‌شده بدون الیاف

۵-۳. آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده (UCS)

نتایج آزمایش‌های UCS (شکل ۵) نشان دهنده آن است که در نمونه‌های با عمل‌آوری ۷روزه در هریک از ترکیبات الیاف، اختلاف چندانی وجود ندارد. در بین نمونه‌های عمل‌آوری شده ۲۸روزه، نمونه تثبیت‌شده حاوی ۰/۵ درصد الیاف، بیشترین مقاومت (۳/۲۶ مگاپاسکال) اما با اختلاف ناچیز (۰/۱ تا ۰/۲ مگاپاسکال) را نسبت به سایر نمونه‌ها داراست. این نتایج نزدیک (تفاوت کمتر از ۶٪) برای درصدهای متفاوت الیاف حاکی از تأثیر کم الیاف در درصدهای انتخاب شده در این تحقیق در مقاومت فشاری محصور نشده است. با این حال، می‌توان کاهش مقاومت نمونه ۲۸ روزه دارای ۱٪ الیاف را به افزایش مقدار الیاف که باعث کاهش تماس ذرات خاک و اتصال سیمانی بین آنها، خصوصاً در محلی که الیاف کلوخه شده باشند، نسبت داد.



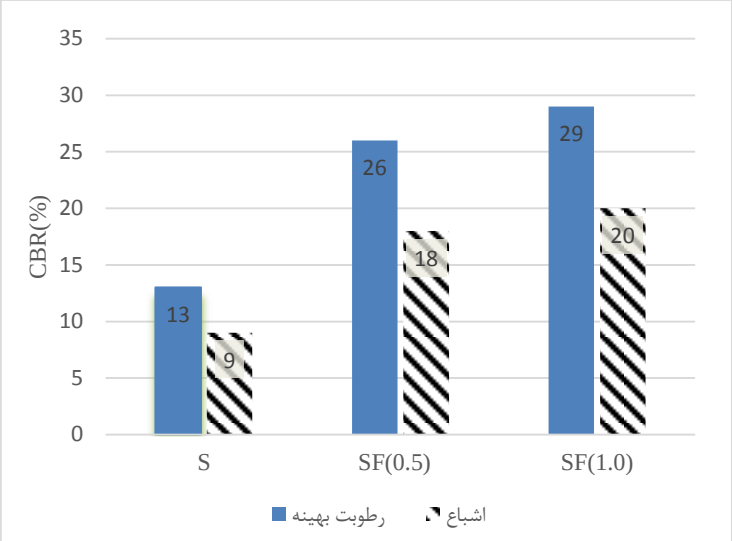
شکل ۵. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده (UCS)

به طور کلی، همانطور کـه از سـایر مطالعـات نیـز نتیجه گرفته شده است، حضور الیاف گرچه اثرهای قابل توجهی در افزایش مقاومت کششی نمونـه‌هـا دارد، امـا موجب کاهش حداکثر مقاومت فشـاری نمونـه هـا نیـز می‌شوند. به این صورت که مانع ایجـاد پیونـد سـیمانی قوی بین ذرات خاک شده و متعاقباً سـیمان در افـزایش مقاومت کمتر سـهیم خواهـد بـود (کوریـا و همکـاران، ۲۰۱۵).

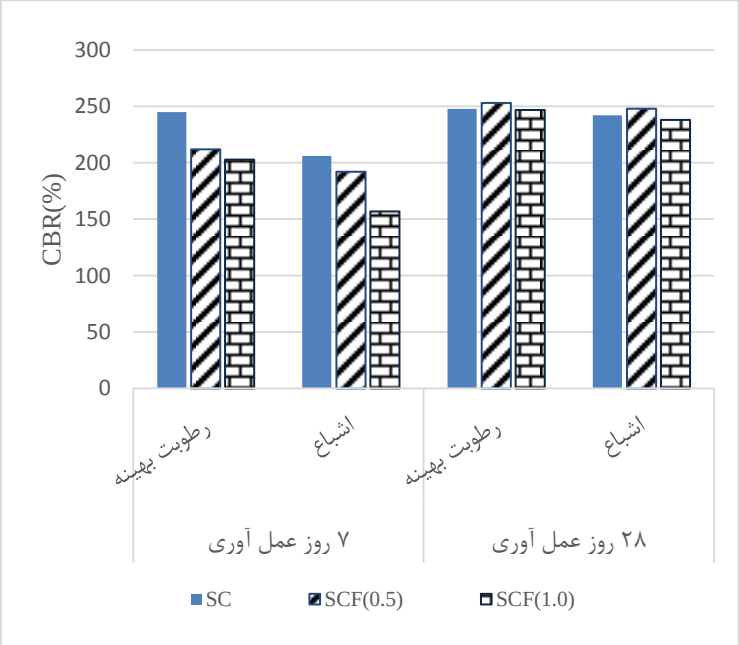
۵-٤. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

با توجه به نتایج نشان داده شده در شـکل ۶، اسـتفاده از الیاف به میزان قابل توجهی سبب بهبـود شـاخص CBR خاک شده است. به طوری که ۰/۵ درصد الیاف، افزایش ۱۳ و ۵ درصـدی بـه ترتیـب بـرای خـاک در شـرایط غیراشباع و شرایط اشباع داشته است. این افزایش بـرای نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف، ۱۵ و ۷ درصد (بـه ترتیـب برای نمونه‌های غیر اشـباع و نمونـه‌هـای اشـباع) بـوده است. بهبود CBR خاک حـاوی الیـاف را مـی‌تـوان بـه درگیر شدن الیاف در این آزمایش در تحمل تـنش‌هـای برشی نسبت داد.

در مورد نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، با و بدون الیاف، نتایج شکل ۷ نشان‌دهنده بهبود قابل توجه مقادیر CBR خاک تثبیت شده با سیمان است. مطابق این نتایج، تمامی نمونه‌ها مقادیر CBR بیشتر از ۱۰۰٪ داشته‌اند که نشان‌دهنده تأثیر به‌سزای سیمان در افزایش مقاومت خاک است. با اختصاص زمان بیشتر برای عمل‌آوری، در نمونه‌های ۲۸ روزه افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها مشاهده گردید.



شکل ٦. نمودار نتایج آزمایش CBR خاک و خاک- الیاف



شکل ۷. نتایج آزمایش CBR نمونه‌های تثبیت شده با سیمان

در آزمایش CBR، نمونه‌ها به دو شکل اشباع و غیر اشباع تحت آزمایش قرار گرفتند. گرچه این آزمایش برای مصالح با CBR بیشتر از ۱۰۰٪، مانند خاک تثبیت-شده با سیمان چندان معتبر نیست، اما به دلیل متداول بودن آن و همچنین به‌دست آوردن یک شاخص کیفی برای مقایسه خاک تثبیت‌شده با خاک تثبیت نشده و همچنین ارزیابی نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان، انجام و نتایج ارائه شد.

۵-۵. مشکلات اجرایی

در کنار مزایایی که استفاده از الیاف در تسلیح خاک به-دست می‌دهد، مسائلی هم وجود دارد که می‌تواند کار با آن را مشکل کند. اهم مشکلات اجرایی کاربرد الیاف نخل خرما در تسلیح خاک به شرح زیر است:

۱- اول اینکه، به رغم تحقیقات متعدد انجام شده در زمینه استفاده از الیاف و خصوصیات نهایی آن در بهبود خاک، همچنان یک استاندارد مشخص یا دستورالعمل تخصصی برای پروژه‌های میدانی ارائه نشده است.

۲- تجمع موضعی (انباشته شدن) و درهم آمیختن (گلوله شدن) الیاف دو مشکل مرتبط با مخلوطهای خاک حاوی الیاف است. الیاف بلندتر از ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) به طور قابل توجهی نمی‌توانند ویژگی‌های خاک را بهبود بخشند.

۳- طی مراحل اختلاط و تراکم مخلوط، طبیعت آب-دوست الیاف طبیعی می‌تواند منجر به جذب آب شده و ماتریس خاک، حاوی درصد رطوبتی بیش از حد متعارف شود. سپس، در زمان نزدیک به انتهای دوره عمل‌آوری (خشک شدن)، الیاف، آبی را که جذب کرده بودند از دست داده، منجر به برگشت انقباضی به حالت اولیه شود. از آنجا که در این دوره ماتریس خاک گیرش خود را انجام داده است، یک فضای خالی پیرامون الیاف ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به ایجاد پیوند ضعیف نهایی بین‌وجهی شود.

۶. نتیجه‌گیری

با استفاده از الیاف درخت خرما و سیمان و به منظور

تقویت و تثبیت خاک معدن سرسور جزیره قشم، آزمایش‌های مقاومتی شامل CBR، ITS و UCS روی نمونه‌های حاوی درصدهای متفاوتی از این دو ماده انجام گرفت که خلاصه نتایج تحقیق به شرح زیر است:

• شناسایی خاک مورد مطالعه مبین آن بود که از نوع لوماشل دارای منشأ رسوبات آهکی، در طبقه A-1-b آشتو، عاری از کانی‌های رسی و دارای نمک‌های سولفاته قابل حل ناچیز می‌باشد.

• با توجه به نتایج آزمایش‌ها، سیمان به عنوان اصلی‌ترین ماده تثبیت کننده خاک مورد مطالعه تشخیص داده شد.

• مقاومت فشاری محصورنشده تمامی نمونه‌های تثبیت‌شده، ارتقا یافته و نمونه‌های بهینه تا ۵۰٪ افزایش مقاومت از خود نشان دادند.

• در نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف، مقاومت کششی نمونه‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافت. افزایش درصد الیاف بیش از این مقدار، به دلیل عدم امکان توزیع یکنواخت آن در مخلوط سبب کاهش مقاومت نمونه‌ها شد.

• عدم توزیع یکنواخت الیاف می‌تواند به طور قابل توجهی چگالی و مقاومت‌های کششی و فشاری را در خاک تثبیت شده کاهش دهد.

• تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری نمونه‌ها چندان نبوده و حتی افزایش درصد الیاف از ۰/۵ به ۱ درصد، مانع ایجاد پیوندهای سیمانی بین ذرات خاک شده است. در این نمونه‌ها، سیمان نیز در افزایش مقاومت خاک سهم زیادی از خود نشان نداد.

• توزیع یکنواخت الیاف (بدون حضور سیمان) در خاک سبب بهبود قابل توجه مقادیر CBR خاک در نمونه‌های حاوی ۰/۵ و ۱ درصد الیاف در هر دو حالت اشباع و رطوبت بهینه گردید.

مطابق مشخصات استاندارد خاک تثبیت‌شده با سیمان و الیاف در این تحقیق، قابلیت استفاده در لایه زیراساس روسازی را (علاوه بر لایه‌های خاکریز) نیز دارا می‌باشد.

۷. مراجع

اسماعیلی، ع. و قلعه‌نوی، م. ۱۳۹۱. "اثر الیاف نخل خرما و آهک به عنوان تثبیت کننده طبیعی بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت)". مسکن و محیط روستا، ۱۳۸: ۶۲-۵۳.

بنکی، ر.، زارع، ر. و هوایی، غ. ۱۳۹۳. "تسلیح خاک با خاکستر الیاف نخل". اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید رجائی تهران، ۱۲ و ۱۳ آذرماه.

طباطبایی، ا. م. ۱۳۷۹. " روسازی راه". مرکز نشر دانشگاهی، چاپ نهم.

Ahmad, F., Bateni, F. and Azmi, M. 2010. "Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers". Geotext. Geomembranes, 28: 93-99.

Aiban, S. A. 1994. "A study of sand stabilization in Eastern Saudi Arabia". Eng. Geol. 38: 65-97.

Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B. B. K. and Nahazanan, H. 2015. "Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil". Measurement, 59: 372-381.

Correia, A. A. S., Venda Oliveira, P. J. and Custodio, D. G. 2015. "Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders". Geotext. Geomembranes 43: 97-106.

Harris, J. P., Scullion, T. and Sebesta, S. 2002. "Laboratory and field procedures for measuring the sulfate content of Texas soils". Report No. 4240-1, Texas Department of Transportation, Texas, USA.

Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H. and Randolph, M. 2002. "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 128(6): 520-529.

Jamellodin Z, Abu Talib, Z., Roslan, K. and Nurazuwa, M. N. 2010. “The effect of oil palm fibre on strength behaviour of soil”. *In:* 3rd SANREM Conf., 3-5 August, Kota Kinabalu, Malaysia;.

Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V. and Karahalios, A. 2005. “Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement”. Cement Concrete Comp., 27(2): 301-313.

Marandi, S. M., Bagheripour, H., Rahgozar, R. and Zare, H. 2008. “Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils”. Am. J. Appl. Sci., 5(3): 209-20.

Oglesby, C. H. and Hewes, L. I. 1963. “Highway Engineering”. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.

Portland Cement Association, 1992. “Soil-Cement Laboratory Handbook”. Portland Cement Association, Illinois, USA.

Institute of Transportation Studies. 2010. “Guidelines for the Stabilization of Subgrade Soils in California”. Research Report–UCD-ITS-RR-10-38, University of California, USA.

Salehan, I. and Yaacob, Z. 2011. “Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers”. Pertanika J. Sci. Technol., 19: 33-43.

Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M. and Zadhoush, A. 2012. “A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers”. Constr. Build. Mater., 30: 100-116.

Terrel, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J., Mitchell, J. K. and Thompson, M. R. 1979. “Soil Stabilization in Pavement Structures- A User Manual”. FHWA Research Report No. FHWA-IP-80-2, WA, USA.

Thompson, M. R. and Robnett, Q. L. 1970. “Second Air Force Stabilization Conference”. Kirtland Air Force Base, February.

United Facilities Criteria (3-250-11). 2004. “Soil Stabilization for Pavements”. TM 5-822-14/AFJMAN32/1019, http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_250_11.pdf (July 16, 2006).

Wang, Q., Chen, H. E. and Cai, K. Y. 2003. “Quantitative evaluation of microstructure features of soil contained some cement”. Rock and Soil Mech., 24 (S): 12-16. (In Chinese).

Yusoff, M. Z, M., Salit, M. Z., Ismail, N. and Wirawan, R. 2010. “Mechanical properties of short random oil palm fiber reinforced epoxy composites”. Sains Malaysiana, 39: 87-92.