مقایسه عملکرد ترکیب ضایعات صنعتی و الیاف نسبت به سیمان در شدت‌بخشی فرآیند تثبیت خاک برای مقابله با شرایط محیطی مهاجم

مظاهر روزبهانی [۱]، امیررضا گودرزی [۲*]، سید حمید لاجوردی [۳]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران (گرایش ژئوتکنیک)، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاداسلامی، اراک، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

(*نویسنده مسئول: Email: Amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk)

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

ACCEPTED MANUSCRIPT

چکیده

در مطالعه حاضر کارآیی ترکیبی جدید از ضایعات صنعتی شامل پسماند کاربید کلسیم (CCR) و سیلیکافوم (SF) در کنار الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با سیمان برای اصلاح رس‌های نرم و افزایش دوام آنها بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد در شرایط متداول عمل‌آوری (دما ۲۰°C و نگهداری تا ۲۸ روز) استفاده از CCR تنها، اثر محدودی در بهبود رفتار خاک دارد. از طرفی، با وجود عملکرد مطلوب اولیه فرآیند تثبیت با سیمان، ولی چرخه تر و خشک (W-D) با شکست نانوساختارهای سیمانی، می‌تواند سبب اختلال و حتی از دست رفتن کامل ظرفیت باربری خاک شود. در مقابل، ترکیب CCR با SF نقش برجسته‌ای بر فرآیند بهسازی (خصوصاً با افزایش دما) داشته و پتانسیل زوال به مراتب کمتری در حضور نسبت بهینه CCR-SF مشاهده گردید. بنابر آنالیزهای SEM-EDX و XRD، گسترش جامدشدگی ساختار و کاهش سهم حفرات، جزء عوامل اصلی پاسخ مناسب‌تر سیستم اخیر ارزیابی شد. از سوی دیگر، افزودن فیبر به این سری از نمونه‌ها، تاثیر بسزایی در رشد تاب کششی، جذب بهتر انرژی، کاهش قابلیت ترک‌خوردگی و در نتیجه بهبود پایایی ماتریکس خاک دارد. متعاقب این وضعیت، مقاومت نمونه مسلح‌شده و حاوی ۱۵٪ افزودنی، حدود ۱/۸ برابر آستانه مجاز برای موفقیت تثبیت بدست آمد. علت این رفتار، هم‌افزایی CCR-SF و الیاف در ارتقاء پیوستگی بین ذرات و کاهش فضای دسترسی برای اندرکنش خاک-آب تعیین شد. با استناد به مجموع نتایج حاصل، استفاده از ترکیب بهینه CCR-SF همراه فیبر به عنوان گزینه‌ای ارزان، دوست‌دار محیط‌زیست و کارآمد در اصلاح خاک‌های مسئله‌دار و کاهش پتانسیل پس‌گسیختگی آنها توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی

تثبیت پایه سیمانی، چرخه W-D، زوال پارامترهای مهندسی، CCR-SF، الیاف، افزایش دوام.

۱- مقدمه

امروزه به دلیل محدودیت در ساختگاه‌های با مشخصات ژئوتکنیکی مطلوب و البته افزایش سطح تنش سازه‌های مهندسی، استفاده از مواد تثبیت‌کننده (مانند سیمان) جزء راه‌کارهای متداول برای بهبود خصوصیات خاک محسوب می‌شود [۴-۱]. این فرآیند به واسطه یک سری واکنش‌های کوتاه مدت (مانند تبادل کاتیونی) و همچنین ایجاد پیوند دائمی بین ذرات می‌تواند سبب رشد ظرفیت باربری، کاهش پتانسیل نشست و محدود کردن جذب آب در خاک شود [۷-۵].

از سوی دیگر، با وجود کاربرد گسترده تثبیت پایه سیمانی، ولی نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد این روش با چالش‌های متعدد اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه بوده؛ بطوریکه تولید هر تن سیمان باعث رهاسازی یک تن گاز منواکسید کربن و در نتیجه آلودگی شدید طبیعت خواهد شد [۳ و ۱۰-۸]. همچنین، بروز یک سری مشکلات فنی می‌تواند سبب اخلال در واکنش‌های هیدراسیون، محدودیت در ایجاد پیوندهای سیمانی و نهایتاً کاهش عملکرد فرآیند بهسازی گردد. به عنوان مثال نتایج مطالعه صفا و همکاران [۱۱] نشان داد فرآیند ذوب و یخ متوالی، باعث افت حدود ۶۰ درصدی مقاومت رس تثبیت شده با سیمان خواهد شد. بنابراین، محققان به دنبال ترکیبات جایگزین با هزینه کمتر و تا حد امکان پایایی بیشتر هستند. در این راستا، استفاده از مواد زائد صنعتی ایده‌ای کارآمد با جنبه‌های مثبت فراوان زیست‌محیطی و اقتصادی برای تثبیت خاک، محسوب می‌شود [۱ و ۱۳-۱۲]. از جمله مطالعات جدید انجام شده در این زمینه می‌توان به کاربرد سرباره‌های فولادسازی [۸]، ته‌مانده تولید کربنات سدیم [۱۴]، پسماند کوره قوس الکتریکی [۱۵] و سرباه تولید لیتیم [۱۶] برای بهسازی انواع خاک‌های مسئله‌دار اشاره کرد. پسماند کاربید کلسیم (CCR)[1] از دیگر ضایعات صنعتی (طی تولید گاز استیلن) بوده که به دلیل حجم زیاد تولید سالانه در دنیا (حدود ۳۰ میلیون تن) و ترکیبات قلیایی تشکیل‌دهنده این پسماند، امروزه امکان بکارگیری آن در پروژه‌های عمرانی و زیست‌محیطی مورد توجه خاص قرار گرفته است [۲، ۱۷]. در این زمینه، می‌توان به نتایج تحقیقات الدوساری و همکاران [۵]، دو و یانگ [۶]، لیو و همکاران [۱۸]، شارانیا و همکاران [۱۹]، خو و همکاران [۲۰] و حسینی و همکاران [۲۱] مبنی بر قابلیت کاربرد CCR برای تثبیت خاک اشاره کرد.

سیلیکافوم (SF)[2] از دیگر پسماندهای صنعتی (طی تولید فرو آلیاژهای سیلیکون) بوده که به دلیل سطح مخصوص زیاد، اندازه ریز ذرات و سطوح فعال، از قابلیت بسیار مناسبی برای ترکیب با مواد قلیایی (مانند آهک و سیمان) و استفاده در اصلاح خاک برخوردار است [۲۲، ۲۳]. بنحویکه با وجود انجام مطالعات متعدد در خصوص عملکرد دو پسماند مورد اشاره؛ اما تحقیق جامعی در زمینه تاثیر استفاده توأم از سیلیکافوم و CCR برای تثبیت رس‌های نرم به ویژه افزایش دوام آنها صورت نگرفته است [۲۴]. از سوی دیگر بر اساس نتایج مطالعات اخیر، مسلح‌سازی خاک همزمان با تثبیت، روشی نوین برای شدت‌بخشی راندمان بهسازی محسوب می‌شود [۲۲]. در این رابطه، روزبهانی و همکاران [۳] نشان دادند استفاده از ترکیب سیمان، زئولیت و الیاف نقش بسزایی در بهبود عملکرد خاک‌های آلوده در برابر چرخه تر و خشک شدن دارد. نتیجه مطالعه وکیلی و همکاران [۲۵] نیز موید آنست که افزودن همزمان ماده زائد صنعتی لیگنوسولفات و الیاف سبب جلوگیری از زوال مشخصات مهندسی خاک‌های مارنی با گذشت زمان خواهد شد. با وجود مطالعات مشابه دیگر [۲۶]، ولی بررسی‌ها در مورد امکان جایگزینی کامل سیمان با پسماندهای CCR و SF و تاثیر ترکیب آنها همراه الیاف در بهبود فرآیند بهسازی خاک خصوصاً افزایش پایایی مصالح تثبیت شده در مقابل محیط مهاجم بسیار محدود است. بنابراین، در تحقیق حاضر طی شرایط مختلف عمل‌آوری و با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های متفاوت شامل تعیین مقاومت فشاری محدود نشده، کشش غیر مستقیم (ITS)[3]، تعیین هدایت الکتریکی، تهیه طیف‌های پراش اشعه ایکس و عکس‌برداری الکترونی به همراه آنالیز عنصری اهداف اصلی ذیل دنبال شد:

الف- تعیین قابلیت CCR و ترکیب آن با نسبت‌های متفاوت SF در بهبود پارامترهای ژئومکانیکی خاک (با نگرش ویژه بر شناسایی علل تغییر رفتار از نگاه ریزساختاری و اثر دما بر فرآیند تثبیت)

ب- بررسی ساز و کار عوامل کاهش مشخصات مهندسی خاک تثبیت شده ناشی از چرخه تر و خشک شدن

ج- ارزیابی عملکرد مخلوط CCR-SF همراه الیاف در مقایسه با سیمان برای ارتقاء پایایی خصوصیات خاک پس از فرآیند بهسازی

---

[1]. Calcium carbide residue (CCR)
[2]. Silica Fume (SF)
[3]. Indirect tensile strength

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی خصوصیات مواد مصرفی

برای تحقیق حاضر از یک نمونه خاک طبیعی با مشخصات رفتاری مطابق جدول ۱ استفاده شد. با توجه به مقاومت اندک بدست آمده در شرایط دانسیته حداکثر، این مصالح به عنوان یک نمونه نرم رسی مدنظر قرار گرفت. ترکیبات تشکیل‌دهنده مواد زائد صنعتی مصرفی نیز پس از مراحل آماده‌سازی اولیه و انجام آزمایش XRF[1] تعیین شد. مهمترین اجزای پسماند کاربید کلسیم شامل: ۴۴/۲ درصد اکسید کلسیم، ۲۷/۱ درصد اکسید سیلیس، ۱۵/۳ اکسید آهن، ۶/۴ درصد اکسید آلومینیوم، ۲/۷ درصد اکسید منیزیم، حدود ۲ درصد اکسید پتاسیم و برای سیلیکافوم شامل: ۸۶/۷ درصد اکسید سیلیس، ۴/۴۷ درصد اکسید آلومینیوم، ۲/۱۴ اکسید آهن، ۱/۵۵ اکسید کلسیم و حدود ۱ درصد اکسید منیزم بدست آمد. شایان ذکر است پسماند کاربید مورد استفاده در این پژوهش، از شرکت ساپرا گاز راگا واقع در کرج تهیه شد. با توجه به اهداف تحقیق حاضر، استفاده از CCR تنها و ترکیب آن با سیلیکافوم (CCR:SF) در چهار نسبت مختلف شامل ۹۰ به ۱۰، ۸۰ به ۲۰، ۷۰ به ۳۰ و ۵۰ به ۵۰ برای بهسازی مدنظر قرار گرفت. بطوریکه هر ترکیب به تفکیک در مقادیر صفر تا ۲۰ درصد وزنی به خاک خشک اضافه شد.

جدول ۱: مشخصات رفتاری نمونه خاک طبیعی مورد استفاده در پژوهش حاضر

مشخصه	مقدار/نوع	مرجع
ترکیبات کانی‌ساخت	کائولینیت (بیش از ۷۰٪)، کوارتز، کلسیت	طیف اشعه ایکس
حد روانی (%)	۳۸/۲	ASTM D4318
نشانه خمیری (%)	۱۹	ASTM D4318
نوع خاک (طبق روش طبقه‌بندی متحد)	CL	ASTM D2487
حداکثر دانسیته خشک (g/cm^3)	۱/۵۶	ASTM D698-12
رطوبت بهینه (%)	۲۸/۵	ASTM D698-12
مقاومت فشاری محدود نشده (MPa)	۰/۱۵	ASTM D2166

برای مسلح کردن خاک، الیاف پلی‌پروپیلن با مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر ۳۵۰MPa و ۲/۷ GPa، مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر و ابعاد مناسب توصیه شده الیاف برای این نوع از نمونه‌ها در پژوهش‌های مشابه [۳، ۲۵]، قطر و طول الیاف مصرفی به ترتیب برابر ۱۹ µm و ۱۲ میلی‌متر انتخاب شد. با انجام آزمایش‌های کشش غیرمستقیم مطابق توضیحات بخش ۲-۲، مقدار فیبر بهینه برابر ۰/۷۵ درصد وزن خشک خاک تعیین گردید. به منظور امکان مقایسه عملکرد فرآیندهای بهسازی فوق، اصلاح خاک با افزودن سیمان (به عنوان تثبیت‌کننده متداول) در مقادیر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی[2] نیز انجام شد.

۲-۲- نحوه نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها

با استناد به مطالعات گذشته [۴، ۱۱، ۲۶]، به منظور بررسی تأثیر اصلاح‌کننده‌های مورد مطالعه بر مشخصات ژئومکانیکی خاک، آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری محدود نشده (UCS) و کششی غیرمستقیم انجام شدند. تعیین UCS نمونه‌ها طبق دستورالعمل استاندارد ASTM به شماره D2166، به شرح ذیل صورت گرفت. ابتدا برای ساخت نمونه‌های فاقد الیاف، خاک با مقادیر مشخص ماده افزودنی (بازه صفر تا ۲۰ درصد وزن خشک خاک) کاملاً مخلوط شد. در ادامه با افزودن آب معادل رطوبت بهینه به نمونه و همگن کردن، آنرا درون استوانه فلزی به ارتفاع ۷۰ و قطر ۳۵ میلیمتر تخلیه و تا رسیدن به دانسیته خشک حداکثر به صورت استاتیکی متراکم شد. برای انجام مسلح‌سازی نیز قبل از تخلیه نمونه دورن قالب، الیاف به آن اضافه و پس از

---

[1]. X-ray fluorescence

[2]. در پژوهش‌های گذشته [مانند ۸، ۲۷ و ۲۸]، افزودن سیمان تا ۱۰٪ به عنوان یک محدود متعارف برای تثبیت خاک مدنظر قرار گرفته است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

اختلاط با همزن مکانیکی و اطمینان از توزیع یکنواخت الیاف در سیستم، این سری از نمونه‌ها نیز درون قالب متراکم شدند. بعد از بیرون آوردن نمونه‌ها از قالب، آنها را بوسیله پارافیلم بطور کامل پوشانده و در ژرمیناتور با رطوبت ۸۵٪، طی دوره‌های زمانی ۳، ۷ و ۲۸ روز در دو سطح دمای ۲۰˚C و ۴۰˚C نگهداری شدند. در ادامه مقدار UCS هر یک از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تک‌محوری مدل آرماتست و سرعت بارگذاری ۱/۲ mm/min تعیین گردید. نمونه‌های لازم برای آزمایش کشش غیرمستقیم، مشابه مراحل فوق تهیه و مقدار ITS بر اساس روش اکبری و همکاران [۴] اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است با هدف اطمینان از صحت نتایج، کلیه آزمایش‌های مکانیکی پژوهش حاضر برای هر حالت به صورت سه بار تکرار انجام و میانگین آن به عنوان نتیجه گزارش شد. بطوریکه به دلیل دقت فراوان در فرآیند ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، اختلاف بسیار محدودی (انحراف معیار کمتر از ۰/۰۵) در نتایج مربوط به تکرار هر آزمایش مشاهده شد.

یکی از روش‌های موثر برای ارزیابی پایایی فرآیند بهسازی خاک، بررسی تغییر مشخصات مکانیکی مصالح تحت چرخه متوالی تر و خشک (W-D)[۱] است [۱۱، ۲۰]. بر این اساس، انجام آزمایش W-D طبق استاندارد ASTM به شماره D559 در دستور کار پژوهش حاضر قرار گرفت. بدین‌منظور، نمونه‌های تهیه شده مطابق جزئیات آزمایش UCS، ابتدا به مدت ۵ ساعت بطور کامل درون آب مستغرق شدند. سپس به مدت ۴۸ ساعت درون آون با دمای ۷۰±۲˚C خشک و به مدت حداقل ۳ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند. مجموع فرآیند فوق به عنوان یک چرخه مدنظر و طی چرخه‌های ۱ تا ۱۲ مرتبه تغییر رفتار مصالح تعیین شد. با هدف بررسی ساز و کار فرآیند بهسازی با استفاده از مواد زائد مصرفی و الیاف و همچنین آگاهی از علل زوال خصوصیات خاک تثبیت شده طی چرخه‌های W-D، ضمن ارزیابی پاسخ ظاهری نمونه‌ها، تغییر ریزساختار آنها به کمک آزمایش‌های XRD و SEM-EDX نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه طیف‌های اشعه ایکس، تصاویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز عنصری، طبق روش روزبهانی و همکاران [۳] ابتدا فرآیند آماده‌سازی بر روی تکه‌های مناسب باقی‌مانده از آزمایش مقاومت فشاری انجام و سپس با دستگاه مدل VEGA3-TESCAN ضمن انجام آنالیز عنصری، عکس‌برداری از آنها صورت پذیرفت. با استفاده از دستگاه مدل بروکر D8، طیف‌های پراش اشعه ایکس در بازه 2θ برابر ۴ تا ۶۰ درجه نیز تهیه شدند.

۳- ارائه نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی عملکرد CCR تنها و ترکیب آن با سیلیکافوم در بهبود مشخصات مکانیکی خاک

به منظور بررسی تاثیر پسماندهای مورد مطالعه در بهبود مشخصات مکانیکی خاک، مقدار UCS نمونه‌ها بر حسب درصد افزودنی، ترکیبات مختلف CCR:SF و به تفکیک زمان‌های ۳، ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در دمای ۲۰˚C، اندازه‌گیری و نتایج آن در شکل یک ارائه گردید. با هدف مقایسه عملکرد بهسازی در این سری از نمونه‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده حاوی ۱۰ درصد سیمان (PC) نیز در این شکل اضافه شد. نتایج بیانگر آنست که استفاده از CCR تنها به ویژه در شرایط محدود نگهداری، تاثیر اندکی بر بهبود مقاومت فشاری خاک دارد. به عنوان مثال، پس از سه روز عمل‌آوری با افزودن ۱۰ درصد CCR، مقدار UCS حدود ۴۰ درصد کمتر از مقدار مشابه آن در نمونه تثبیت شده با سیمان است. با استناد به طیف‌های اشعه ایکس شکل ۲، پس از افزودن پسماند کاربید کلسیم تنها میزان تشکیل و توسعه ترکیبات هیدراته (ژل‌های سیمانی) به مراتب کمتر از نمونه تثبیت شده با سیمان بوده و در مقابل حضور پیک‌های CH (مربوط به اکسید کلسیم) در نمونه تثبیت شده با پسماند کاربید کاملاً مشهود است. این نتیجه با توجه به معادلات یک تا چهار [۱، ۵]، بیانگر باقی‌ماندن بخشی از CCR (معادله ۱ و ۲) به صورت آزاد در سیستم خاک-الکترولیت و به عبارتی اندرکنش محدود پوزولانی (معادله ۳ و ۴) در این نمونه است.

CaO (from calcium carbide residue) + $H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ (Calcium oxide hydration) (1)

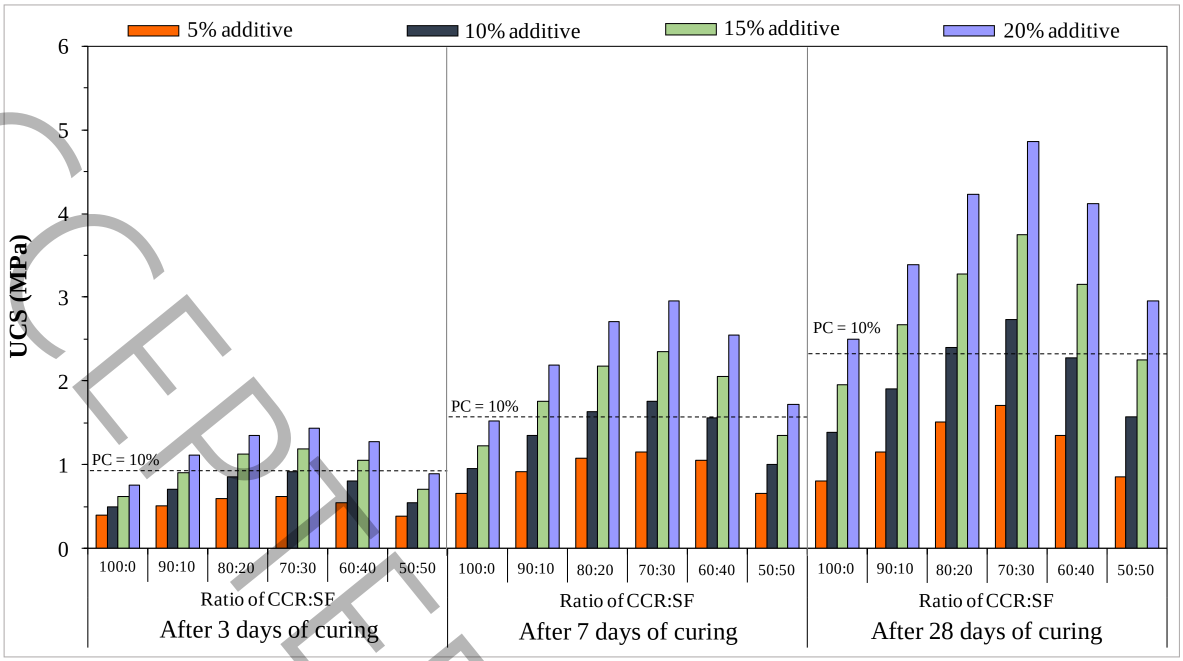
$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^-$ (Calcium hydroxide ionization, pH increase > 12.4) (2)

$Ca^{2+} + 2(OH)^- + SiO_2$ (from clay and/or additive) $\rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$ Calcium Silicate Hydrate (CSH) (3)

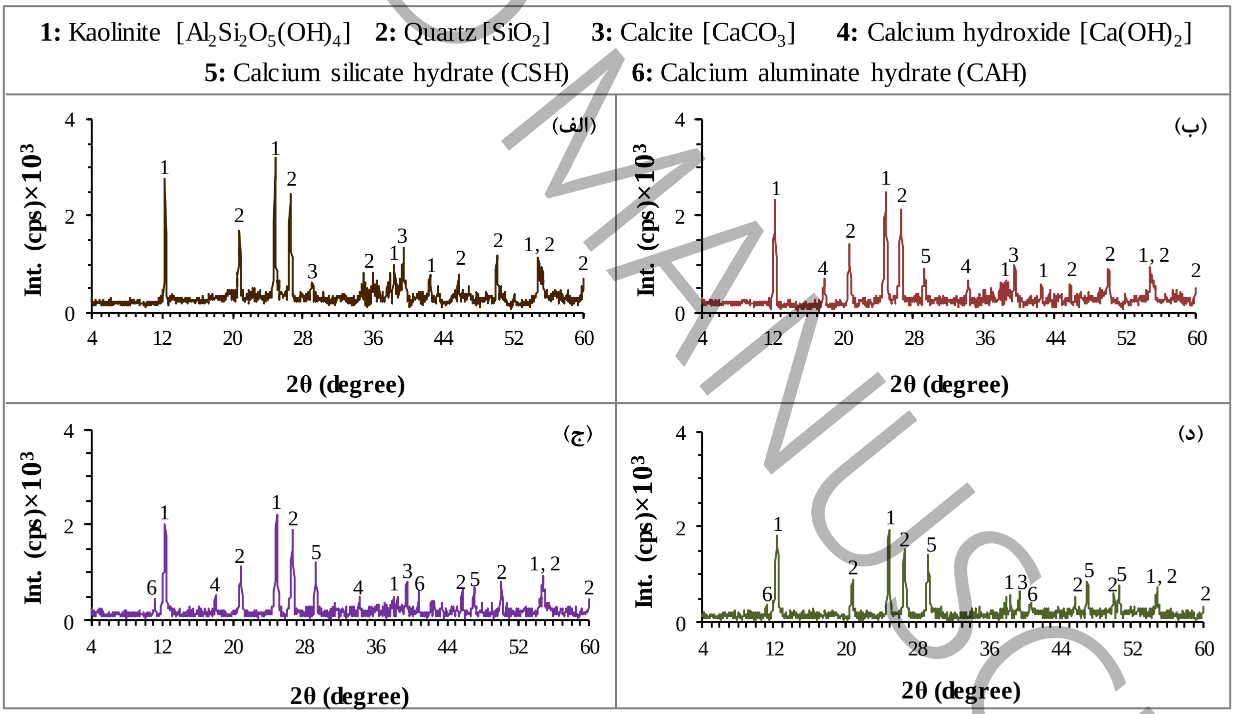
$Ca^{2+} + 2(OH)^- + Al_2O_3$ (from clay and/or additive) $\rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3H_2O$ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) (4)

[1]. Wetting-Drying

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱: تاثیر CCR و ترکیبات متفاوت آن با سیلیکافوم در بهبود مشخصات مکانیکی خاک تحت دمای عمل‌آوری ۲۰ °C و زمان‌های مختلف



شکل ۲: مقایسه تغییرات ریزساختار خاک در حضور سیمان، CCR تنها و ترکیب بهینه آن با سیلیکافوم

(الف- نمونه خاک طبیعی، ب- نمونه تثبیت شده با CCR، ج- نمونه تثبیت شده با سیمان، د- نمونه تثبیت شده با CCR-SF)

بنابراین، علت عملکرد نه چندان مطلوب پسماند کاربید کلسیم تنها را می‌توان ناشی از جامدشدگی ناکافی ذرات ارزیابی کرد. در واقع بنابر نتایج مطالعات قبل [۵، ۲۱، ۲۹، ۳۰، ۳۱]، تاثیر پسماند کاربید در اصلاح مشخصات مکانیکی خاک، مشابه آهک و عمدتاً در صورت انجام واکنش‌های هیدراسیون بر اثر فعالیت پوزولانی بین اکسید کلسیم مربوط به CCR و ترکیبات سیلیس و آلومینیوم موجود در محیط (ناشی از متلاشی شدن و تغییر فاز ذرات رسی به دلیل افزایش pH مایع منفذی و یا حضور این ترکیبات در سایر مواد افزودنی) خواهد داد. از سوی دیگر، در خاک‌های با کانی‌ساخت مستحکم (مانند کائولینیت) امکان تغییر فاز ذرات رسی محدود گزارش

ACCEPTED MANUSCRIPT

شده که یکی از علل آن تشکیل لایه‌ای از یون‌های کلسیم (تولید شده توسط اصلاح‌کننده) بر روی پولک‌ها و ممانعت از اندرکنش آنها با محیط قلیایی ارزیابی می‌شود [۳۵-۳۲]. بنابراین در نمونه خاک مورد مطالعه (عمدتاً حاوی کائولینیت طبق جدول ۱) و بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲، با افزودن CCR تنها عملاً شرایط مطلوب برای انجام واکنش‌های هیدراسیون و تولید گسترده ژل‌های سیمانی فراهم نیست. در نتیجه در مقادیر یکسان افزودنی، عملکرد آن به مراتب کمتر از سیمان است. ذکر این نکته ضرورت دارد که حضور کائولینیت به عنوان یک از کانی‌های متعارف در بسیاری از نهشته‌های نرم رسی گزارش شده است [۴، ۱۱]. لذا با توجه به نتایج پژوهش حاضر، کاربرد CCR تنها در بهسازی این گروه از خاک‌ها عملاً موفقیت چندانی نخواهد داشت.

در شکل یک مشاهده می‌شود با گذشت زمان خصوصاً در حضور CCR و سیلیکافوم، مقاومت نمونه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بطوریکه پس از ۲۸ روز عمل‌آوری برای نمونه حاوی ۱۰٪ افزودنی و با نسبت بهینه CCR-SF به صورت ۷۰ به ۳۰، مقاومت فشاری خاک حدود ۱/۲۵ برابر بیشتر از نمونه تثبیت شده با سیمان است. طبق نتایج آزمایش XRF (ارائه شده در بخش ۲-۱) و حضور فراوان ذرات SiO_2 در سیلیکافوم (بیش از ۸۶ درصد)، علت این رفتار را می‌توان ناشی از مهیا شدن شرایط لازم برای فعالیت پوزولانی (عمدتاً از طریق معادله سه) در این سری از نمونه‌ها به دلیل مجاورت مستقیم اکسید کلسیم موجود در کاربید با سیلیس موجود در سیلیکافوم و در نتیجه تسریع واکنش‌های هیدراسیون (تشکیل و رشد گسترده فازهای سیمانی مطابق نتایج XRD در شکل ۲-د) درون ماتریکس خاک نسبت داد. تولید گسترده مواد سیمانی، موجب اتصال بیشتر ذرات خاک به یکدیگر و افزایش استحکام ساختار شده که نقش کلیدی در بهبود پارامترهای مکانیکی مصالح ایفا می‌نماید [۲۶-۲۸]. متناسب با این وضعیت، مشاهده می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ترکیب بهینه CCR-SF بطور قابل ملاحظه‌ای (بیش از دو برابر) نسبت به حالت استفاده از CCR تنها افزایش یافته است. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش [۳۶] انجام شده در خصوص نقش مثبت نانو ذرات سیلیکا در شدت‌بخشی عملکرد آهک برای تثبیت خاک‌های تورمی انطباق مناسبی دارد. لازم به ذکر است بر اساس نتایج ارائه شده در شکل یک و با افزایش میزان سیلیکافوم نسبت به حالت بهینه (نسبت ۷۰ به ۳۰)، مجدداً مقاومت مصالح کاهش یافته که علت آنرا می‌توان ناشی از محدودیت میزان اکسید کلسیم موجود در سیستم، برای ادامه فعالیت پوزولانی ارزیابی کرد.

۳-۲- تاثیر چرخه تر و خشک بر پایایی رفتار نمونه‌ها بعد از فرآیند تثبیت

شکل ۳، تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر ۵ و ۱۰ درصد سیمان پس از آزمایش تر و خشک را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده بیانگر آنست که در حضور سیمان تا پنج درصد و قبل از مجاورت نمونه در برابر چرخه W-D، مقدار UCS آن در صورت عمل‌آوری مناسب بیش از هشت[۱] برابر افزایش خواهد یافت. با افزودن ۱۰ درصد سیمان نیز مقاومت خاک به حدود ۲/۳ MPa رسیده که طبق دستورالعمل ACI[۲]، این سطح مقاومت موید تثبیت موفق برای بستر سازه‌های سبک (مانند روسازی) است [۳۷]. از طرفی، در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود پس از اعمال ۱۲ چرخه تر و خشک، ظرفیت باربری نمونه‌های حاوی ۵ درصد سیمان بطور کامل از دست می‌رود. برای نمونه‌های با ۱۰ درصد سیمان نیز حتی بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، مقاومت حدود ۶۰٪ کاهش یافته و مقدار آن بسیار کمتر از سطح مجاز دستورالعمل ACI می‌باشد. این یافته با نتایج حاصل از مطالعه صفا و همکاران [۱۱] مبنی بر کاهش مقاومت فشاری خاک نرم تثبیت شده با سیمان در مجاورت چرخه یخ و ذوب همخوانی داشته؛ اگرچه مقایسه روند تغییرات در مطالعه ایشان با نتایج پژوهش حاضر، بیانگر تاثیر به مراتب مخرب‌تر فرآیند تر و خشک در زوال مشخصات مکانیکی مصالح بوده که در ادامه علت آن بر اساس نتایج آزمایش‌های ریزساختاری تحلیل خواهد شد.

از سوی دیگر در مجموع، بنابر نتایج ارائه شده در شکل ۳ می‌توان گفت رسیدن به آستانه مقاومت مطلوب بهسازی در نمونه مورد مطالعه، نیازمند مصرف مقادیر زیاد سیمان (بیش از ۱۰٪) بوده که بنابر ملاحظات اقتصادی و احتمال بروز یک سری مشکلات فنی (مانند رفتار ترد)، انجام آن توصیه نمی‌شود [۳، ۲۶، ۳۸]. بر این اساس، با توجه به ضعف مشهود پایایی فرآیند

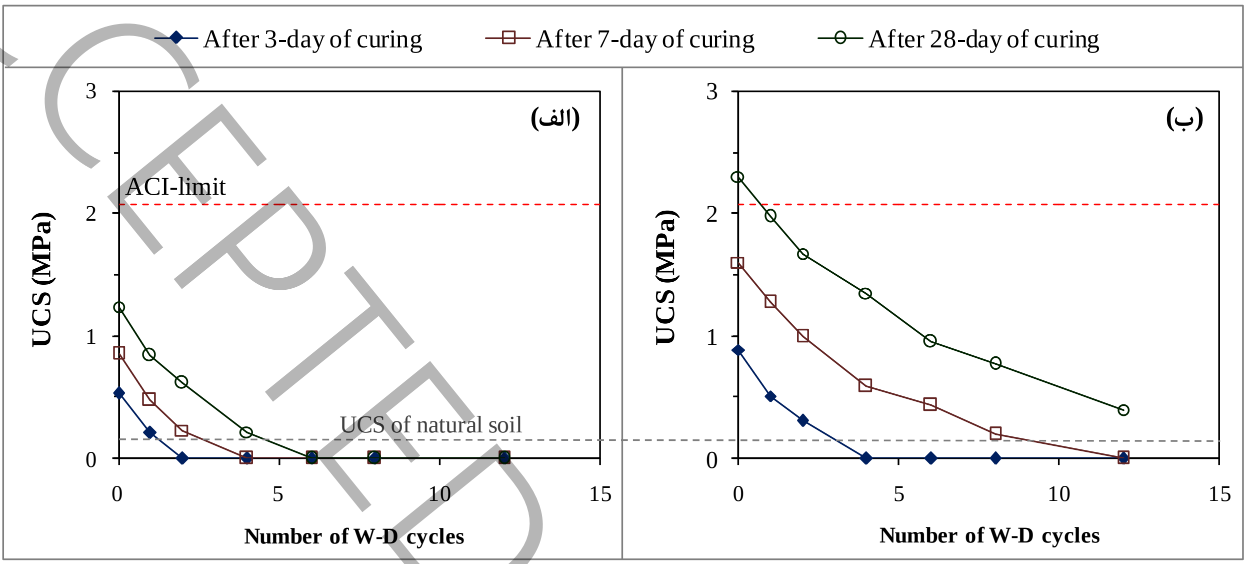
---

۱. طبق جدول ۱، مقاومت فشاری نمونه خاک قبل از بهسازی برابر ۰/۱۵ MPa بوده که بر اساس نتایج شکل ۳-الف پس از افزودن ۵ درصد سیمان و بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری مقاومت نمونه به ۱/۲۴ MPa رسیده که بیانگر رشد بیش از ۸ برابری آن است.

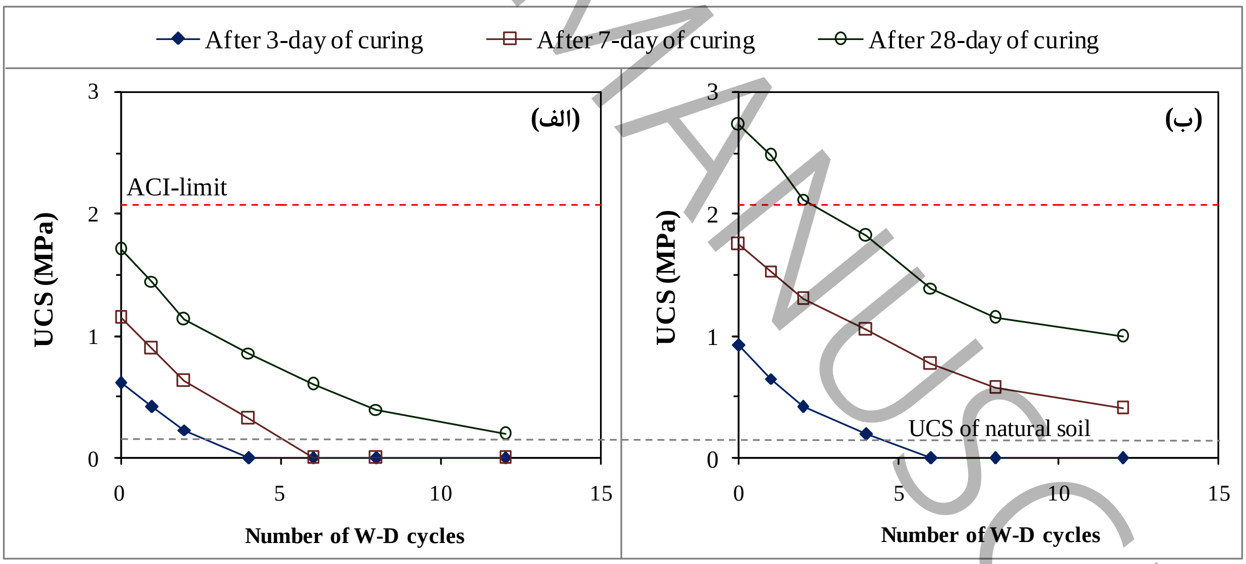
2. American Concrete Institute

ACCEPTED MANUSCRIPT

تثبیت خاک‌های نرم در سطوح متداول استفاده از سیمان، عملکرد سیستم حاوی ترکیب بهینه پسماند کاربید کلسیم و سیلیکافوم برای مواجهه با نیروهای مخرب محیطی مورد بررسی و نتایج آن در شکل ۴ ارائه شد. شایان ذکر است با توجه به شکل یک و مقاومت به مراتب کمتر سایر ترکیبات CCR-SF، از بررسی رفتار آنها تحت چرخه تر و خشک صرفه‌نظر شد.



شکل ۳: تاثیر چرخه تر و خشک بر مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان تحت دمای عمل‌آوری ۲۰ °C و زمان‌های مختلف
الف- نمونه حاوی ۵ درصد افزودنی، ب- نمونه حاوی ۱۰ درصد افزودنی

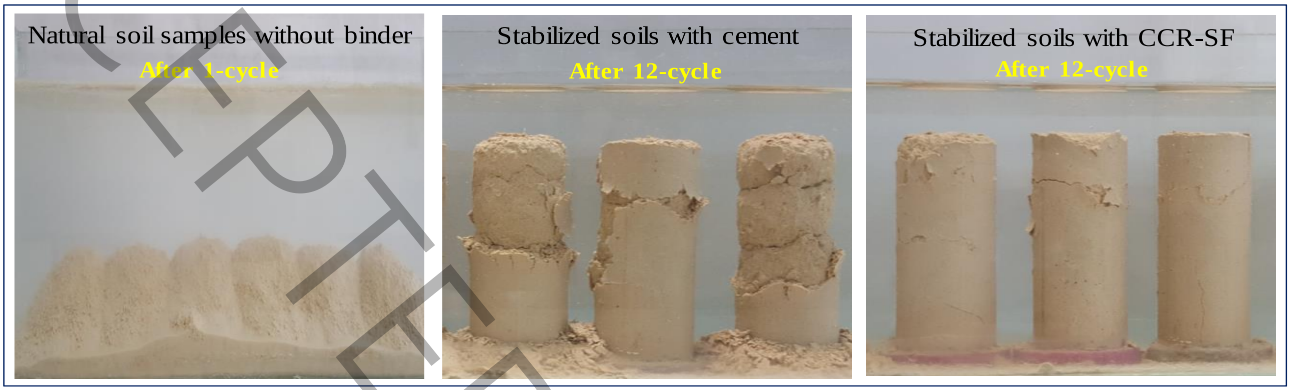


شکل ۴: تاثیر چرخه تر و خشک بر مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب بهینه CCR-SF تحت دمای عمل‌آوری ۲۰ °C و زمان‌های مختلف
الف- نمونه حاوی ۵ درصد افزودنی، ب- نمونه حاوی ۱۰ درصد افزودنی

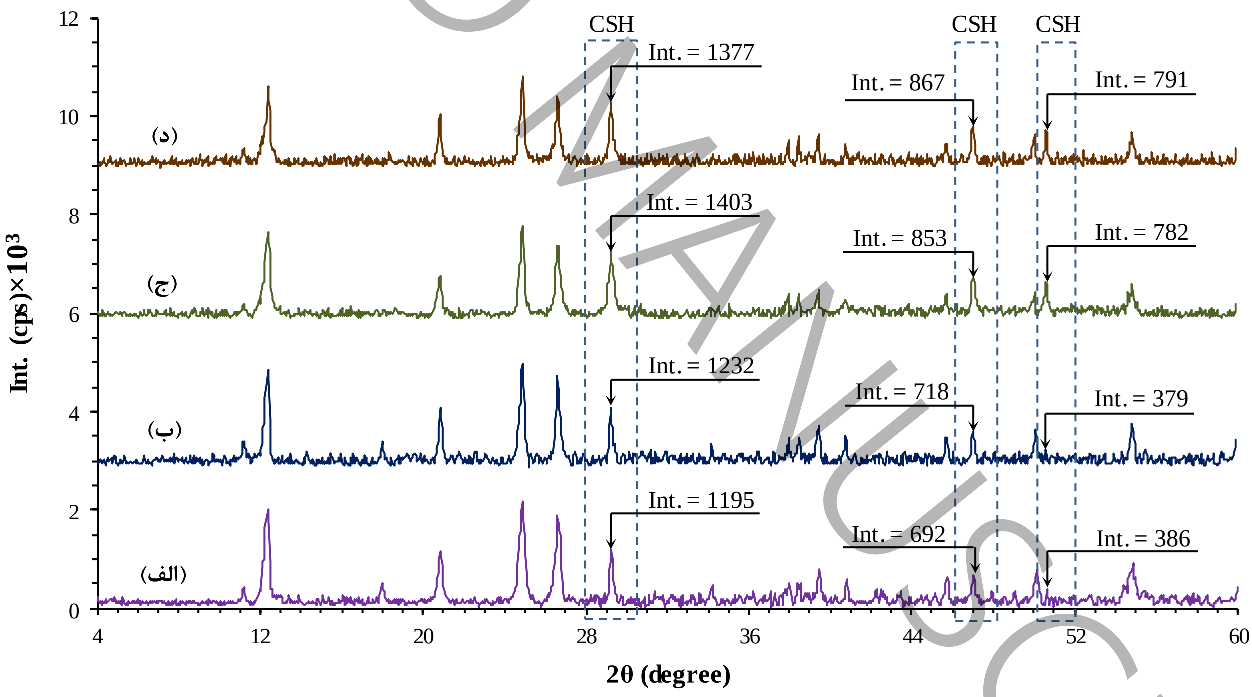
نتایج ارائه شده در شکل ۴ بیانگر آنست که همانند عملکرد نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، مجاورت نمونه‌های حاوی CCR-SF در برابر چرخه تر و خشک، سبب کاهش مقاومت مصالح خواهد شد. اگرچه میزان خرابی به مراتب کمتری در این سری از نمونه‌ها مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در نمونه حاوی ۱۰ درصد سیمان و عمل‌آوری شده به مدت ۲۸ روز، پس از ۱۲ چرخه، مقدار مقاومت فشاری از ۲/۳ به ۰/۴ مگاپاسکال رسیده که نشان‌دهنده زوال بیش از ۵/۷ برابری در مشخصات مکانیکی می‌باشد. از طرفی، در شرایط مشابه و برای نمونه حاوی CCR-SF، پس از ۱۲ چرخه، مقدار مقاومت فشاری از ۲/۷۳ به ۰/۹۹ مگاپاسکال رسیده که موید زوال حدود

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲/۷۵ برابری است. به عبارت دیگر، مقایسه نتایج حاصل (در شکل‌های ۳ و ۴) نشان می‌دهد استفاده از ترکیب CCR-SF نسبت به سیمان می‌تواند سبب بهبود پایایی رفتار طولانی مدت مصالح شود. بر اساس تصاویر شکل ۵، مقایسه وضعیت ظاهری این دو سری از نمونه‌ها پس از مجاورت با چرخه‌های تر و خشک به وضوح نتایج آزمایش مقاومت فشاری را تایید می‌نماید. بطوریکه تصاویر ارائه شده موید دوام بیشتر نمونه‌های حاوی CCR-SF است. با هدف ارزیابی دلایل رفتار فوق، طیف پراش اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی این نمونه‌ها تهیه و نتایج آن در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شد.



شکل ۵: مقایسه وضعیت ظاهری نمونه‌های فاقد ماده افزودنی، حاوی سیمان، و ترکیب بهینه CCR-SF پس از چرخه‌های W-D متوالی



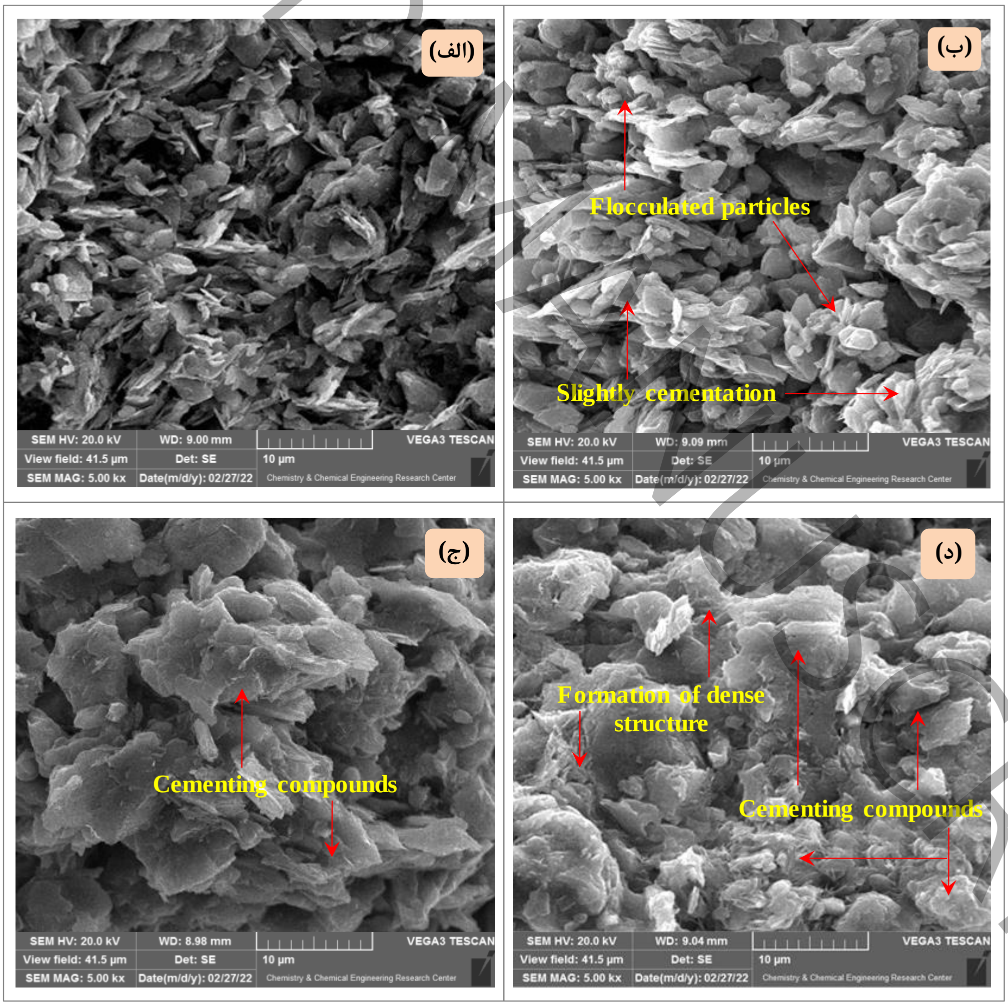
شکل ۶: تاثیر چرخه‌های W-D متوالی بر ریزساختار خاک در حضور سیمان و ترکیب بهینه پسماند کاربید کلسیم با سیلیکافوم

(الف و ب- نمونه حاوی ۱۰٪ سیمان به ترتیب قبل و بعد از ۱۲ چرخه W-D، ج و د- نمونه حاوی ۱۰٪ CCR-SF به ترتیب قبل و بعد از ۱۲ چرخه W-D)

نتایج ارائه شده در شکل ۶، حاوی دو نکته بسیار حائز اهمیت است. نخست آنکه، شدت پیک (به عبارتی میزان) ترکیبات سیمانی در نمونه حاوی CCR-SF به مراتب بیشتر از نمونه تثبیت شده با سیمان می‌باشد. بر این اساس، با توجه به نقش کلیدی این ترکیبات در بهبود خصوصیات ژئومکانیکی خاک [۵، ۲۹، ۳۹]، بخشی از مقاومت بهتر و به بیان دیگر پس‌گسیختگی کمتر نمونه در حضور CCR-SF را می‌توان ناشی از افزایش جامدشدگی ساختار و تاثیر آن بر کاهش قابلیت خرابی سیستم ارزیابی کرد. موضوع دیگر آنست که در هر دو حالت بهسازی (تثبیت با سیمان یا CCR-SF) اعمال چرخه W-D، تاثیر محسوسی بر شدت و موقعیت ترکیبات سیمانی

ACCEPTED MANUSCRIPT

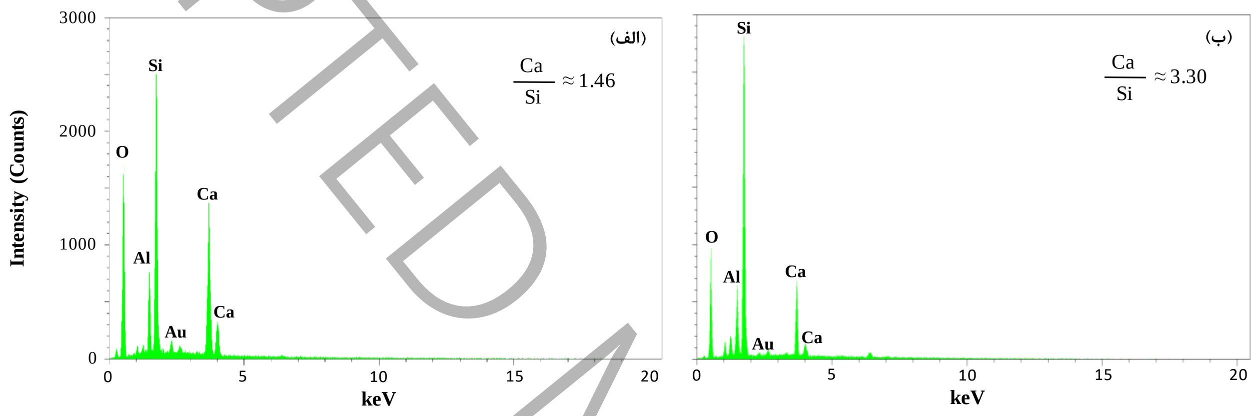
در خاک نداشته است. طبق این یافته و با توجه به کاهش محسوس مقاومت نمونه‌ها طی چرخه‌های W-D می‌توان گفت ساز و کار اصلی زوال مشاهده شده در رفتار نمونه‌ها، شکست پیوندهای سیمانی بین ذرات ناشی از ایجاد و توسعه ترک درون خاک بر اثر تکرار فرآیند تر و خشک شدن بوده که وقوع آن در شکل ۵ کاملاً مشهود است. در واقع با هر بار مستغرق شدن نمونه درون آب و سپس خشک شدن آن، عواملی مانند تغییر میزان نیروهای موئینگی، آرایش مجدد ساختار و تورم-انقباض سطوح رسی موجب افزایش سطح تنش در ماتریس خاک خواهند شد [۴، ۲۰، ۳۷]. وقوع این شرایط می‌تواند با تضعیف عملکرد پیوندهای سیمانی در اتصال ذرات به یکدیگر، سبب پیدایش میکروترک‌ها در سیستم شود [۲۷]. در ادامه با تکرار فرآیند تر و خشک، علاوه بر کاهش بیشتر قدرت پیوندهای سیمانی از طریق فرآیند فوق، به تدریج حجم حفرات در دسترس برای نفوذ آب و مشارکت آن در تخریب ساختار تحت W-D افزایش یافته که موجب رشد سطح تنش‌های داخلی و در نتیجه گسترش ابعاد ترک‌ها می‌شود. از طرفی با توجه به تصاویر SEM در شکل ۷، حضور CCR-SF نسبت به نمونه حاوی سیمان، سبب افزایش تراکم ریزساختار شده که با استناد به مطالعات گذشته [۲۴ و ۳۶] علت این بهبود عملکرد را می‌توان ناشی از دو عامل مختلف شامل: الف) توان مناسب ذرات کوچک و کروی سیلیکافوم در مسدود کردن حفرات و ب) امکان حضور بیشتر و توزیع یکنواخت‌تری از ترکیبات سیمانی درون خاک به علت حضور پراکنده ذرات ریز سیلیکافوم در سیستم ارزیابی کرد. این ساختار، ضمن افزایش استحکام اولیه خاک و کاهش قابلیت نفوذ آب درون آن، توزیع آب درون حفرات را نیز محدود خواهد ساخت [۳]. در این شرایط انتظار می‌رود افزایش تنش بر اثر چرخه W-D و متعاقب آن خرابی ساختار کاهش یافته که با نتایج شکل‌های ۳ و ۴ مبنی بر پایداری بیشتر مصالح تثبیت شده با CCR-SF، همخوانی مناسبی دارد.



شکل ۷: تصاویر SEM؛ الف- خاک طبیعی، ب- خاک تثبیت شده با CCR تنها، ج- خاک تثبیت شده با سیمان د- خاک تثبیت شده با ترکیب بهینه CCR-SF

ACCEPTED MANUSCRIPT

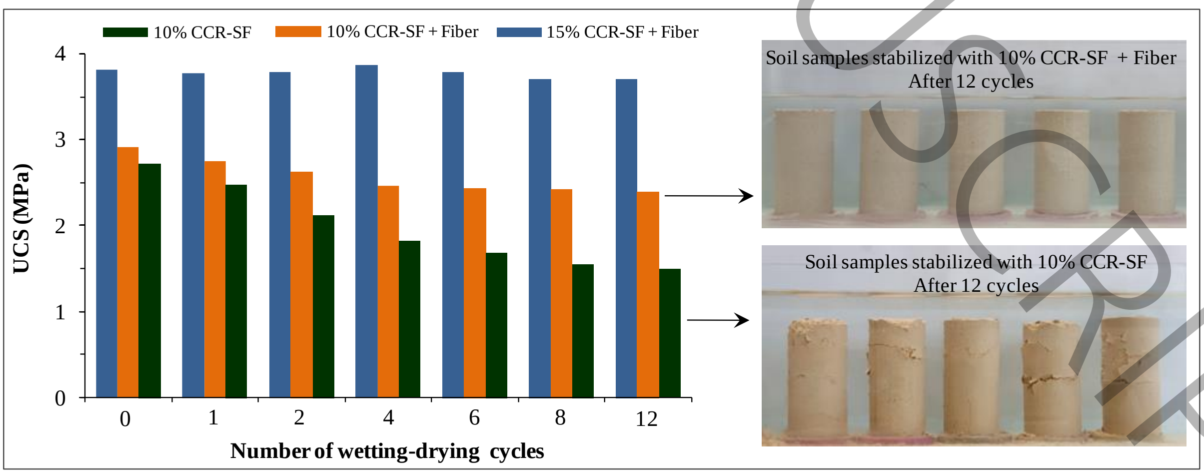
علاوه بر موارد فوق، تهیه طیف‌های آنالیز عنصری از نانوساختارهای سیمانی در شکل‌های ۷-ج و ۷-د و ارائه نتایج آن در شکل ۸ موید آنست که نسبت Si/Ca در نمونه حاوی CCR-SF به مراتب بیشتر از نمونه تثبیت شده با سیمان است. افزایش این نسبت نقش بسزایی در قدرت باندهای سیمانی برای اتصال ذرات به یکدیگر [۲۶، ۴۰] و در نتیجه افزایش پایایی مصالح در برابر شرایط مهاجم محیطی ایفا می‌نماید. لذا بخشی از عملکرد بهتر مصالح تثبیت شده با CCR-SF نسبت به سیمان را می‌توان به تفاوت قدرت جامدشدگی خاک در حضور این دو ماده اصلاح‌کننده نسبت داد. از سوی دیگر، ذکر این نکته ضرورت دارد که با وجود عملکرد به مراتب بهتر CCR-SF در مقابل چرخه تر و خشک، در این سری از نمونه‌ها نیز همچنان میزان کاهش مقاومت مصالح نسبتاً زیاد و مقدار UCS نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد افزودنی نیز از آستانه مجاز ACI کمتر می‌باشد. این نتیجه بیانگر نیاز به استفاده بیشتر از ماده افزودنی و یا تغییر ساز و کار بهسازی برای پایایی بهتر رفتار مصالح در مقابل نیروهای مهاجم محیطی است. لذا در ادامه پژوهش با تلفیق فرآیند تثبیت و مسلح‌سازی، این قابلیت مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۸: مقایسه طیف EDX در نمونه تثبیت شده با (الف) سیمان و (ب) ترکیب بهینه پسماند کاربید کلسیم با سیلیکافوم

۳-۳- ارزیابی عملکرد مخلوط بهینه CCR-SF همراه الیاف در ارتقاء پایایی رفتار خاک

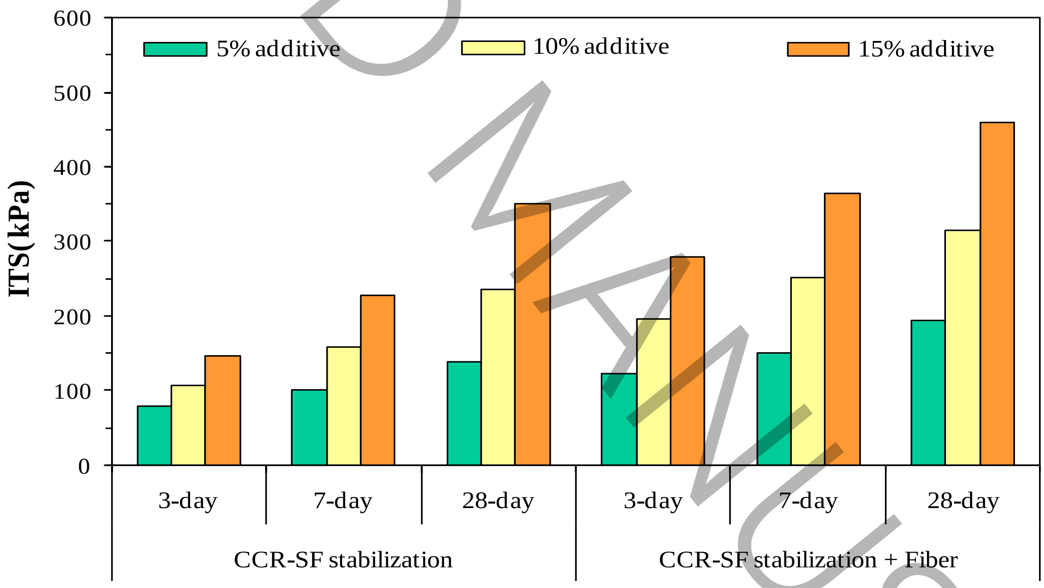
شکل ۹، تغییرات مقاومت فشاری تحت آزمایش تر و خشک برای نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد ترکیب بهینه CCR-SF به همراه الیاف را نشان می‌دهد. با هدف مقایسه، نتایج مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد افزودنی بدون الیاف نیز در این شکل ارائه شده است. مشاهده می‌شود میزان کاهش مقاومت (خرابی) بر اثر چرخه W-D در نمونه‌های مسلح شده به ویژه با افزایش ماده افزودنی، بسیار محدود است.



شکل ۹: تاثیر چرخه W-D بر مشخصات مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های حاوی CCR-SF در شرایط قبل و بعد از افزودن الیاف

ACCEPTED MANUSCRIPT

به عنوان مثال، در نمونه بدون الیاف حاوی ۱۰ درصد CCR-SF، پس از دوازده چرخه تر و خشک، مقدار UCS بیش از ۶۰ درصد کاهش یافته است. از طرفی، در شرایط مشابه و برای نمونه مسلح شده، مقدار افت UCS پس از دوازده چرخه به حدود بیست درصد رسیده است. به عبارت دیگر حضور توأم CCR-SF در کنار الیاف بطور موثری سبب افزایش پایایی مصالح شده بطوریکه مقایسه وضعیت ظاهری نمونه‌ها نیز در شکل ۹ به وضوح این نتیجه را تایید می‌نماید. این یافته با نتایج مطالعه وکیلی و همکاران [۲۵] مبنی بر نقش موثر حضور الیاف در افزایش دوام خاک‌های مارنی انطباق مناسبی دارد. دیگر مطالعات مشابه [۳ و ۲۶] نیز موید تاثیر قابل ملاحظه الیاف، در افزایش پایایی فرآیند بهسازی می‌باشد. در شکل ۹ ملاحظه می‌شود در حضور ۱۵ درصد افزودنی و به دلیل رشد کافی ترکیبات سیمانی و اتصال بهتر آنها با الیاف، میزان افت مقاومت بعد از ۱۲ چرخه تر و خشک بسیار ناچیز بوده که نشان دهنده پایایی بسیار مناسب این سری از نمونه‌ها است. با هدف ارزیابی دقیقتر دلایل رفتار فوق ضمن اندازه‌گیری مقاومت کشش غیرمستقیم مصالح، بررسی رفتار تنش-کرنش آنها نیز در دستور کار قرار گرفت. نتایج شکل ۱۰ بیانگر آنست که حضور الیاف بطور قابل ملاحظه‌ای سبب افزایش تاب کششی مصالح شده است. بطوریکه بعد از ۷ روز عمل‌آوری مقاومت کششی نمونه‌ها در حضور الیاف، بیش از ۱/۵ برابر نسبت به نمونه‌های غیرمسلح بیشتر می‌باشد. در این شرایط انتظار می‌رود به دلیل افزایش قدرت پیوستگی بین ذرات و اتصال بهتر آنها به یکدیگر، ساختار خاک از استحکام بیشتری برای تحمل تنش‌های داخلی برخوردار بوده که متعاقب آن، تاثیر فرآیند تر و خشک بر پیدایش ریز ترک‌ها و گسترش آنها کاهش خواهد یافت [۴، ۴۱]. این تغییر رفتار، با نتایج ارائه شده در شکل ۹ مبنی بر افزایش پایایی نمونه‌های مسلح شده در برابر چرخه تر و خشک، کاملاً همخوانی دارد.

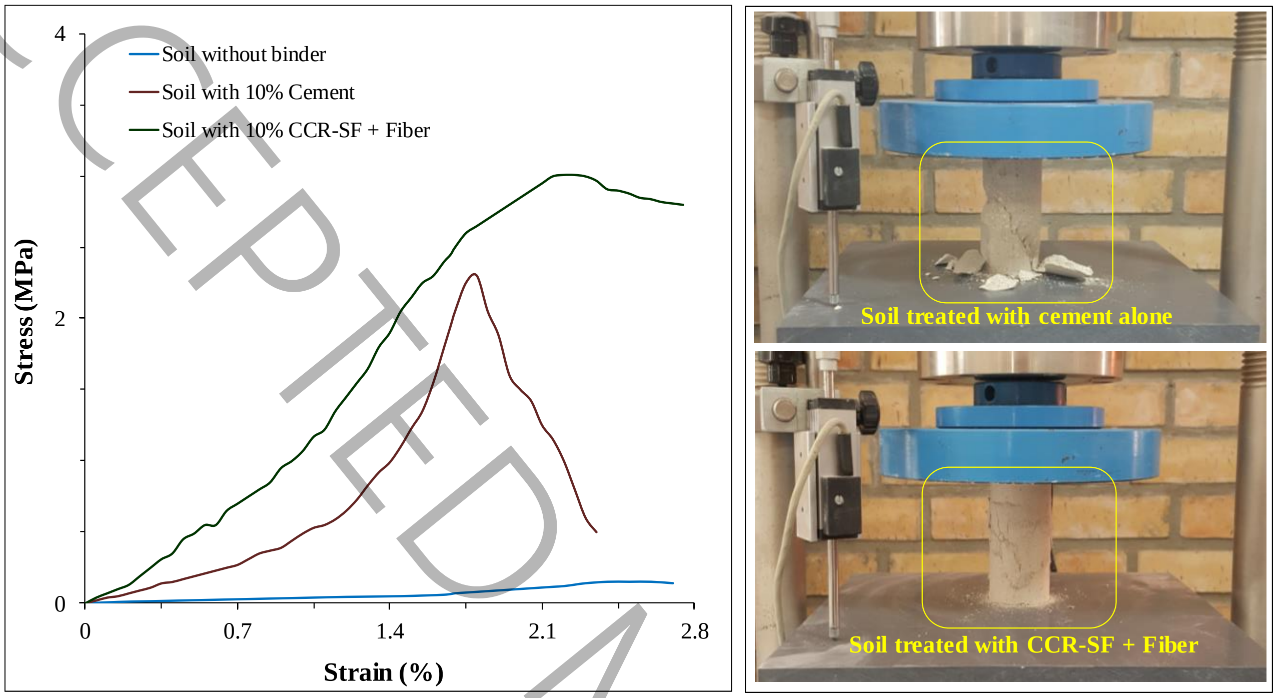


شکل ۱۰: تاثیر حضور الیاف بر مقاومت کششی نمونه‌های تثبیت شده با پسماند کاربید کلسیم و سیلیکافوم در زمان‌های مختلف نگهداری

در شکل ۱۱، مقایسه منحنی تنش-کرنش مصالح با حضور مقادیر یکسان سیمان و CCR-SF در کنار الیاف موید آنست که در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان رفتار مصالح تقریباً تردشکن بوده و بعد از مقاومت پیک، مقدار تنش قابل تحمل توسط نمونه به شدت کاهش یافته است. این نتیجه بیانگر گسترش سریع فرآیند خرابی در ساختار خاک بعد از شکست پیوندهای سیمانی بوده که وقوع آن در تصویر واقعی شکل ۱۱ کاملاً مشهود است. بنابراین در این سری از نمونه‌ها با افزایش سطح تنش‌های داخلی ناشی از شرایط مهاجم محیطی (مانند چرخه W-D) و بعد شکست نانوساختارهای سیمانی، عملاً بخش زیادی از پایایی نمونه از دست رفته و مشخصات مکانیکی افت خواهد کرد. متعاقب این رفتار، نتایج بخش ۳-۲ نشان‌دهنده زوال قابل ملاحظه مقدار UCS نمونه‌های تثبیت شده با سیمان تحت چرخه‌های متوالی تر و خشک است. در مقابل بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۱، پاسخ نمونه‌های حاوی CCR-SF و الیاف کاملاً متفاوت و میزان افت مقاومت بعد از مقدار پیک بسیار کمتر بوده که موید محدودیت خرابی ساختار خاک، حتی بعد از شکست پیوندهای سیمانی است. با استناد به نتایج پژوهش‌های گذشته [مانند: ۳، ۲۲، ۲۳، ۲۵]، در واقع توزیع الیاف در سیستم

ACCEPTED MANUSCRIPT

خاک-افزودنی موجب درهم‌تنیدگی نانوساختارهای سیمانی و تشکیل یک شبکه سه بعدی بهم پیوسته از ذرات شده که این ساختار با توجه به شکل ۱۱ می‌تواند بطور موثری از خرابی شدید ماتریکس خاک جلوگیری نماید. بنابراین تاثیر نیروهای مخرب چرخه W-D، بر عملکرد این نمونه‌ها محدودتر خواهد شد.



شکل ۱۱: مقایسه منحنی تنش-کرنش و پاسخ گسیختگی نمونه‌های حاوی سیمان و CCR-SF همراه الیاف پس از ۲۸ روز عمل‌آوری

به منظور درک بهتر تفاوت عملکرد فرآیند اصلاح در شکل ۱۱، ظرفیت جذب انرژی (E_u)[1] در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و CCR-SF + Fiber از طریق محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش آنها در آستانه تغییرشکل ۲/۳۵ درصد محاسبه و مقادیر آن به ترتیب برابر با ۱۹/۱ kJ/m^3 و ۴۰/۲ kJ/m^3 بدست آمد. طبق این محاسبات، مقدار E_u در نمونه‌های تثبیت شده با CCR-SF + Fiber حدود دو برابر بیش از نمونه حاوی سیمان می‌باشد. این نتیجه بیانگر آنست که هم‌افزایی اثر CCR-SF و الیاف، ایستادگی ماتریکس خاک در برابر تغییرشکل‌های داخلی را به شدت افزایش داده که تاثیر آن بر بهبود مشخصات مکانیکی مصالح در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ کاملاً مشهود است. از سوی دیگر نتایج مطالعات اخیر [۲۶، ۴۲] نشان‌دهنده آنست که حضور و توزیع الیاف درون توده خاک نقش بسزایی در کاهش اندازه موثر حفرات دارد. متعاقب این شرایط، فضای در دسترس برای نفوذ اولیه آب و توزیع آن در ساختار نمونه کاهش و در نتیجه سهم افزایش تنش‌های داخلی در اثر چرخه تر و خشک شدن به مراتب کمتر شده و لذا پتانسیل زوال به مراتب کمتری (حدود سه برابر) در این سری از نمونه‌ها مشاهده شد.

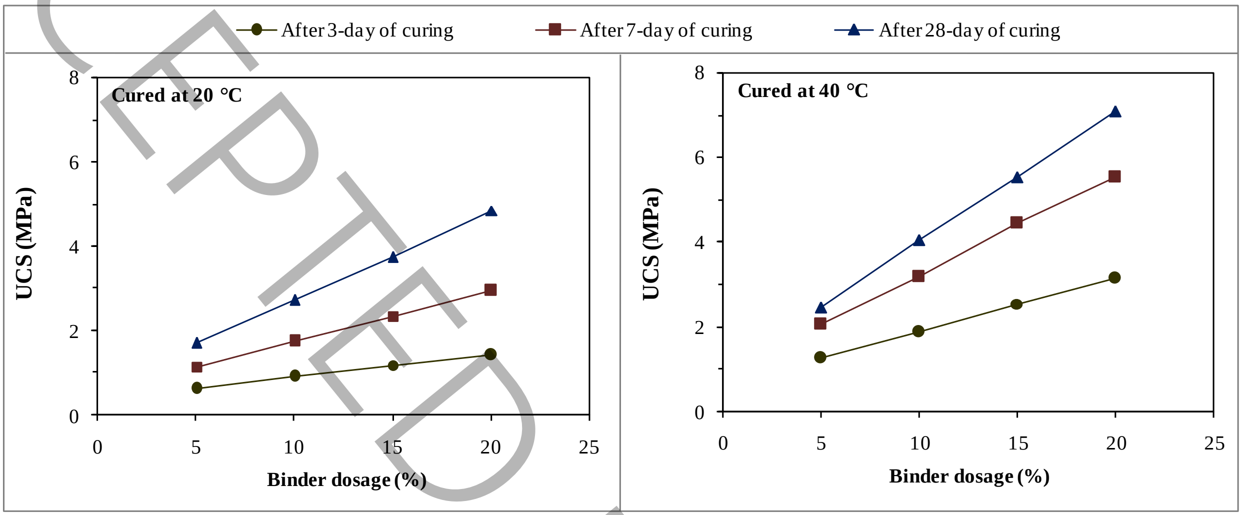
۳-۴- تاثیر دمای عمل‌آوری بر عملکرد مخلوط CCR-SF در بهبود مشخصات مکانیکی خاک

در ادامه پژوهش حاضر و با هدف شناخت بیشتر عوامل محیطی موثر بر فرآیند تثبیت خاک با پسماندهای صنعتی مورد مطالعه، تغییرات مشخصات مکانیکی نمونه‌های حاوی ترکیب بهینه CCR-SF تحت دمای عمل‌آوری ۲۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد با یکدیگر مقایسه و نتایج آن در شکل ۱۲ ارائه شد. مشاهده می‌شود افزایش دما سبب بهبود چشمگیر مقاومت فشاری مصالح شده؛ بنحویکه در زمان‌های ۳، ۷ و ۲۸ روز نگهداری، متوسط مقدار UCS نمونه‌ها تحت دمای ۴۰ °C به ترتیب حدود ۲/۲، ۱/۸ و ۱/۵ برابر نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۲۰ °C است. علت این تفاوت رفتار را با توجه به نتایج روند تغییرات هدایت الکتریکی ارائه شده در شکل ۱۳،

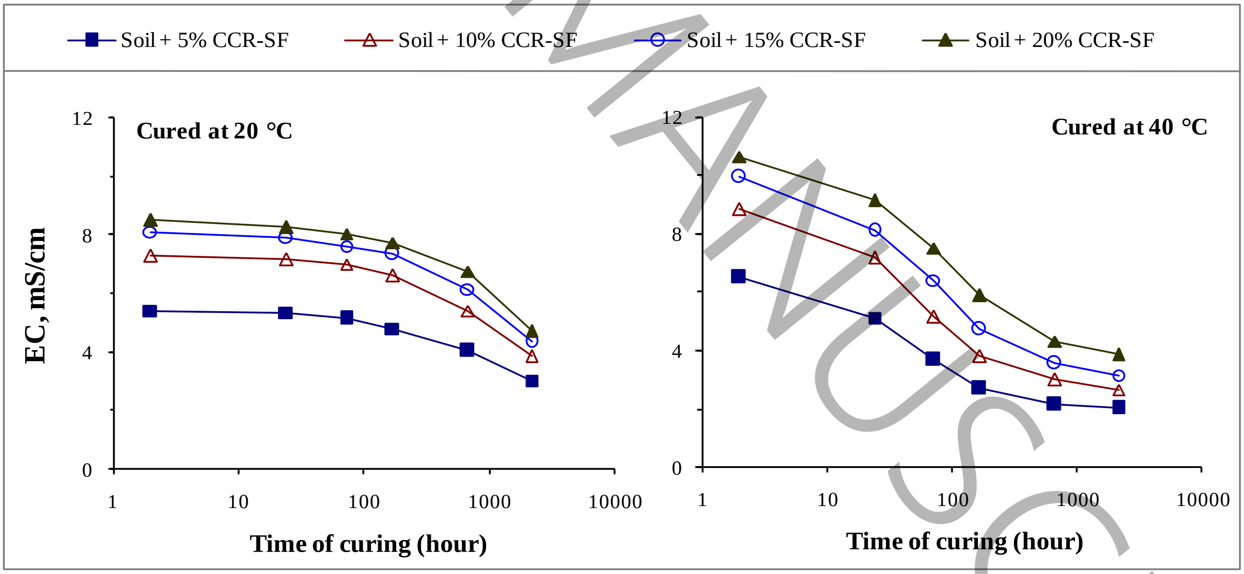
[1]. Energy absorption capacity

ACCEPTED MANUSCRIPT

می‌توان به دو عامل مختلف شامل الف- افزایش سرعت انحلال و تغییر فاز پسماند کاربید (معادلات ۱ و ۲) و ب- انجام بهتر فعالیت پوزولانی در سیستم رس-کاربیدکلسیم-سیلیکافوم (معادلات ۳ و ۴) برای ایجاد و گسترش نانوساختارهای سیمانی درون ماتریکس خاک و در نهایت افزایش جامدشدگی ذرات نسبت داد. طبق این فرضیات، در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود بیشترین تاثیر دما در بهبود رفتار مصالح مربوط به زمان‌های کم نگهداری بوده و در زمان‌های زیادتر به دلیل تکمیل تدریجی واکنش‌های خاک-افزودنی، تاثیر دما به تدریج کاهش یافته است.



شکل ۱۲: تاثیر دمای عمل‌آوری بر عملکرد ترکیب CCR-SF در بهبود مشخصات مکانیکی خاک تحت زمان‌های مختلف نگهداری



شکل ۱۳: تغییرات هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب CCR-SF تحت شرایط متفاوت عمل‌آوری

در واقع، بر اساس نتایج شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در شرایط یکسان ماده اصلاح‌کننده، مقدار اولیه EC[۱] برای نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۴۰ °C به مراتب (حدود ۲۰ درصد) بزرگتر است. این نتیجه را می‌توان ناشی از امکان حضور بیشتر یون‌های آزاد در سیستم، به دلیل قابلیت بهتر انحلال پسماند کاربید با افزایش دما ارزیابی کرد. شایان ذکر است نقش مثبت دما در افزایش واکنش

[۱]. لازم به ذکر است مقدار EC بیانگر میزان یون‌های آزاد در سیستم خاک-الکترولیت است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

سایر مواد افزودنی (مانند آهک)، در پژوهش‌های قبل مورد تایید قرار گرفته است [۳۶، ۴۳]. بر اساس معادله ۲ (بخش ۳-۱)، افزایش غلظت یون‌های آزاد در سیستم به معنای فراهم شدن بهتر شرایط برای انجام فعالیت پوزولانی و در نهایت ساخت بیشتر ترکیبات سیمانی خواهد بود. از طرفی مطابق شکل ۱۳ و با گذشت زمان، EC نمونه‌ها در دمای ۴۰ °C نسبت به دمای ۲۰ °C، روند کاهشی بیشتری نشان می‌دهد. به عنوان مثال بعد از ۷ روز عمل‌آوری در دمای ۲۰ °C، مقدار EC نمونه حاوی ۱۰ درصد CCR-SF برابر ۵/۴ mS/cm بوده و برای نمونه مشابه در دمای ۴۰ °C برابر ۳/۸ mS/cm است. این تفاوت رفتار نشان می‌دهد افزایش دما سبب تسریع فرآیند مصرف مواد افزودنی (کاهش بیشتر در مقدار EC) به دلیل مشارکت بهتر آن در واکنش‌های هیدراسیون (معادلات ۳ و ۴، بخش ۳-۱) شده که متعاقب این وضعیت انتظار می‌رود سهم ترکیبات سیمانی در این سری از نمونه‌ها افزایش و در نتیجه آن، مطابق شکل ۱۲ مشخصات مکانیکی خاک بهبود بیشتری نشان دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر امکان جایگزینی سیمان با ضایعات صنعتی شامل CCR و SF در کنار الیاف برای بهسازی خاک‌های سست و افزایش پایایی آنها بررسی شد. بدین‌منظور مجموعه‌ای از آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری در کنار آنالیزهای XRD و SEM-EDX در دو دمای ۲۰ و ۴۰ °C طی زمان‌های مختلف نگهداری صورت پذیرفت. مهمترین نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

الف- اثربخشی CCR تنها در بهبود مشخصات نمونه مورد مطالعه (عمدتاً حاوی کائولینیت) اندک بوده و در شرایط یکسان، عملکرد آن حدود ۵۰ درصد سیمان بدست آمد. علت این رفتار، تمایل کم مصالح برای مشارکت در فعالیت پوزولانی ارزیابی شد. با توجه به حضور کائولینیت به عنوان کانی متعارف نهشته‌های نرم رسی، لذا کاربرد CCR تنها در بهسازی این گروه از خاک‌ها عملاً موفقیت چندانی نخواهد داشت؛ اگرچه در مطالعات گذشته به این موضوع توجه نشده است.

ب- با وجود عملکرد مطلوب اولیه سیمان در بهسازی خاک، چرخه تر و خشک می‌تواند سبب اختلال و حتی از دست رفتن کامل ظرفیت باربری مصالح شود. با استناد به نتایج آزمایش‌های ریزساختاری مشخص شد تناوب W-D تاثیری چندانی بر کمیّت ترکیبات سیمانی نداشته؛ در مقابل، با شکست پیوند بین آنها و ذرات، تشکیل میکرو ترک و گسترش آن در ماتریکس خاک، سبب تضعیف جامدشدگی و زوال قابل ملاحظه در مشخصات مکانیکی خواهد شد.

ج- استفاده از ترکیب بهینه CCR با SF (به‌ویژه با افزایش دمای عمل‌آوری) نقش برجسته‌ای در گسترش نانوساختارهای سیمانی درون خاک، کاهش ابعاد حفرات و سهم کمتر آنها در ریزساختار دارد. لذا، پتانسیل زوال نمونه تثبیت شده با CCR-SF حدود ۲ برابر نسبت به سیمان کمتر بود. از طرفی طی شرایط متعارف عمل‌آوری، در سیستم اخیر نیز مقاومت (پس از چرخه W-D) کمتر از حد مطلوب توصیه شده ACI بدست آمد.

د- افزودن الیاف (برابر ۰/۷۵ درصد وزنی) به نمونه‌های حاوی CCR-SF، سبب افزایش بیش از ۱/۵ برابری تاب کششی، رشد ۱۱۰ درصدی جذب انرژی و در نتیجه کاهش قابلیت ترک‌خوردگی خواهد شد. متعاقب این وضعیت، پایایی مصالح مسلح‌شده در برابر محیط مهاجم حدود ۳ برابر بیشتر از نمونه فاقد الیاف بدست آمد.

ه- علت عملکرد مطلوب CCR-SF و الیاف در کاهش پس‌گسیختگی مصالح، هم‌افزایی آنها برای ایجاد یک ساختار درهم تنیده همزمان با محدود ساختن فضای دسترسی برای نفوذ آب به سیستم خاک-افزودنی تعیین شد. در کنار مزایای فنی فوق، هزینه این ترکیب بسیار اندک بوده که علاوه بر ارائه راهکاری مناسب برای پسمانداری زائدات صنعتی موردنظر، مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی مرتبط با استفاده از تثبیت‌کننده‌های متداول (مانند سیمان) را نیز مرتفع خواهد داد.

۵- مراجع

[1] J. Obeng, A. Andrews, M. Adom-Asamoah, S. Adjei, Effect of calcium carbide residue on the sulphate resistance of metakaolin-based geopolymer mortars. Cleaner Materials, 7, (2023) 100177.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[2] A. Lotero, C.J. Moncaleano, N.C. Consoli, Alkali-activated red ceramic wastes-carbide lime blend: An alternative alkaline cement manufactured at room temperature. Journal of Building Engineering, 65, (2023) 105663.
[3] M. Rozbahani, A.R. Goodarzi, S.H. Lajevardi, Coupling effect of superfine zeolite and fiber on enhancing the long-term performance of stabilized/solidified Pb-contaminated clayey soils. Environmental Science and Pollution Research 30, (2023) 1-16.
[4] H.R. Akbari, H. Sharafi, A.R. Goodarzi, Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles. Geotextiles and Geomembranes, 49, (2021) 1470-1482.
[5] A.A. Al-Dossary, A.M. Awed, A.R. Gabr, M.Y. Fattah, S.M. El-Badawy, Performance enhancement of road base material using calcium carbide residue and sulfonic acid dilution as a geopolymer stabilizer. Construction and Building Materials, 364, (2023) 129959.
[6] C. Du, Q. Yang, Freeze-thaw behavior of calcium carbide residue-plant ash stabilized marine soft clay. Cold Regions Science and Technology, 193, (2022) 103432.
[7] İ. Keskin, S. Kahraman, Stabilization of swelling soil by lime, fly ash, and calcium carbide residue. Arabian Journal of Geosciences, 15, (2022) 1009.
[8] Y. Zhang, Y.J. Ong, Y. Yi, Comparison between CaO-and MgO-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS) for stabilization/solidification of Zn-contaminated clay slurry. Chemosphere, 286, (2022) 131860.
[9] M.A. Pashabavandpouri, A.R. Goodarzi, S.H. Lajevardi, Enhancing the Mechanical and Microstructural Properties of Expansive Soils using Industrial Waste, Nano-material and Polypropylene Fibers: A Comparative Study, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 9(4) (2023) 54.
[10] A.R. Goodarzi, M. Salimi, Effect of iron industry slags on the geotechnical properties and mineralogy characteristics of expansive clayey soils, Modares Journal of Civil Engineering, 15(2) (2015) 161-170. (In Persian)
[11] M. Safa, A.R. Goodarzi, B. Lorestani, Effect of zeolite and fibers on the geo-mechanical properties of cemented soil under the freeze-thaw cycles. Modares Civil Engineering journal, 22, (2022) 1-16. (In Persian)
[12] Khayat, N., Nazarpour, A., Ganjipour, S.S., 2021. Application of lime Ground-Granulated Basic Furnace Slag (GGBS) in improving geotechnical properties of clayey soils in floodplain area, case study, Khuzestan Plain. Adv. Appl. Geol. 10(4), (2021), 669-682. (In Persian)
[13] Q. Jiang, Y. He, Y. Wu, B. Dian, J. Zhang, T. Li, M. Jiang, Solidification/stabilization of soil heavy metals by alkaline industrial wastes: A critical review. Environmental Pollution, (2022) 120094.
[14] J. Liu, F. Zha, L. Xu, B. Kang, C. Yang, Q. Feng, ... J. Zhang, Strength and microstructure characteristics of cement-soda residue solidified/stabilized zinc contaminated soil subjected to freezing-thawing cycles. Cold Regions Science and Technology, 172, (2020) 102992.
[15] S. Shahsavani, A.H. Vakili, M. Mokhberi, Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag. Cold Regions Science and Technology, 182, (2021) 103216.
[16] Z. Chen, S. Chen, L., Liu, Y. Zhou, Effects of Lithium Slag on the Frost Resistance of Cement-Soil. Materials, 15, (2022) 5531.
[17] D. He, J. Shu, X. Zeng, Y. Wei, M. Chen, D. Tan, Q. Liang, Synergistic solidification/stabilization of electrolytic manganese residue and carbide slag. Science of the Total Environment, 810, (2022) 152175.
[18] Y. Liu, C.W. Chang, A. Namdar, Y. She, C.H. Lin, X. Yuan, Q. Yang, Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. Construction and Building Materials, 221, (2019) 1-11.
[19] A.G. Sharanya, S. Mani Krishna, M. Heeralal, Finite Element Simulation of Rutting in Calcium Carbide Residue-Stabilized Expansive Subgrade. Arabian Journal for Science and Engineering, (2023) 1-15.
[20] H. Xu, Q. Wang, W. Zhou, M. Li, G. Cai, Study on Compressive Strength and Microstructure of Slag-Calcium Carbide Residue Solidified Mud Under Wetting-Drying Cycles. Arabian Journal for Science and Engineering, (2022) 1-10.
[21] S.E. Hosseini, A. Tabarsa, A. Bahmanpour, Experimental study of natural soil stabilization with geopolymer based on glass powder and carbide calcium. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(12), (2023) 20-20. (In Persian)
[22] A. Saygili, M. Dayan, Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. Cold Regions Science and Technology, 161, (2019) 107-114.
[23] A. Hasanzadeh, I. Shooshpasha, Influences of silica fume particles and polyethylene terephthalate fibers on the mechanical characteristics of cement-treated sandy soil using ultrasonic pulse velocity. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81, (2022) 1-17.
[24] P. Cong, L. Mei, Using silica fume for improvement of fly ash/slag based geopolymer activated with calcium carbide residue and gypsum. Construction and Building Materials, 275, (2021) 122171.
[25] A.H. Vakili, M. Salimi, Y. Lu, M. Shamsi, Z. Nazari, Strength and post-freeze-thaw behavior of a marl soil modified by lignosulfonate and polypropylene fiber: An environmentally friendly approach. Construction and Building Materials, 332, (2022) 127364.
[26] M. Safa, M., A.R. Goodarzi, B. Lorestani, Enhanced post freeze-thaw stability of Zn/Pb co-contaminated soil

ACCEPTED MANUSCRIPT

through MgO-activated steel slag and fiber treatment. Cold Regions Science and Technology, 210, (2023), 103826.
[27] S. Aryal, P.K. Kolay, Long-Term durability of ordinary Portland cement and polypropylene fibre stabilized kaolin soil using wetting-drying and freezing-thawing test. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 6, (2020) 1-15.
[28] J. de Jesús Arrieta Baldovino, R.L. dos Santos Izzo, J.L. Rose, Effects of freeze-thaw cycles and porosity/cement index on durability, strength and capillary rise of a stabilized silty soil under optimal compaction conditions. Geotechnical and Geological Engineering, 39(1), (2021) 481-498.
[29] Q. Wang, D. Ge, G. Cai, M. Li, L. Wu, H. Xu, Mechanical and Microscopic Properties of Copper-contaminated Soil Solidified with Calcium Carbide Residue, Metakaolin, and Desulfurization Gypsum under Freeze-thaw Cycles. KSCE Journal of Civil Engineering, (2022) 1-14.
[30] T. Yang, X. Gao, J. Zhang, X. Zhuang, H. Wang, Z. Zhang, Sulphate resistance of one-part geopolymer synthesized by calcium carbide residue-sodium carbonate-activation of slag. Composites Part B: Engineering, 242, (2022) 110024.
[31] S. Chen, H. Yuan, Characterization and optimization of eco-friendly cementitious materials based on titanium gypsum, fly ash, and calcium carbide residue. Construction and Building Materials, 349, (2022) 128635.
[32] Y.C. Chemeda, D. Deneele, G.E. Christidis, G. Ouvrard, Influence of hydrated lime on the surface properties and interaction of kaolinite particles. Applied Clay Science, 107 (2015) 1-13.
[33] Y.C. Chemeda, D. Deneele, G. Ouvrard, Short-term lime solution-kaolinite interfacial chemistry and its effect on long-term pozzolanic activity. Applied Clay Science, 161 (20180 419-426.
[34] H. Ali, M. Mohamed, Assessment of lime treatment of expansive clays with different mineralogy at low and high temperatures. Construction and building materials, 228, (2019) 116955.
[35] M. Movahedrad, A.R. Goodarzi, M. Salimi, Effect of basic oxygen furnace slag incorporation into calcium-based materials on solidification/stabilization of a zinc-contaminated kaolin clay. Environmental Earth Sciences, 81, (2022) 461.
[36] A.R. Goodarzi, A. Moradloo, Effect of curing temperature and SiO_2-nanoparticles on the engineering properties of lime treated expansive soil. Modares civil engineering journal, 17(3), (2017) 8-18. (In Persian)
[37] A. Kampala, S. Horpibulsuk, N. Prongmanee, A. Chinkulkijniwat, Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue–fly ash stabilized clay. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(4), (2014) 633-643.
[38] F. Soltani Afarani, N. Khayat, Experimental investigation of Strength and Microstructural behavior variations of oil contaminated clay (Area: Masjedsoleyman). Sharif Journal of Civil Engineering, 38, (2023), 73-81. (In Persian)
[39] X. Wang, S. Kim, Y. Wu, Y. Liu, T. Liu, Y. Wang, Study on the optimization and performance of GFC soil stabilizer based on response surface methodology in soft soil stabilization. Soils and Foundations, 63(2), (2023) 101278.
[40] M. Pourabbas Bilondi, M.M. Toufigh, V. Toufigh, Comparing the Effects of two alkaline activators of Sodium Hydroxide and Calcium Carbide Residue on geopolymeric stabilization of clay soils. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(10), (2022) 15-15. (In Persian)
[41] J. Xu, Z. Wu, H. Chen, L. Shao, X. Zhou, S. Wang, Influence of dry-wet cycles on the strength behavior of basalt-fiber reinforced loess. Engineering Geology, 302, (2022) 106645.
[42] F. Matalkah, A. Ababneh, R. Aqel, Effect of fiber type and content on the mechanical properties and shrinkage characteristics of alkali-activated kaolin. Structural Concrete, 23(1), (2022) 300-310.
[43] H. Ali, M. Mohamed, Assessment of lime treatment of expansive clays with different mineralogy at low and high temperatures. Construction and building materials, 228, (2019) 116955.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Performance of fiber and industrial wastes in enhancing soil stabilization process compared to cement

Mazaher Rozbahani[a], Amir Reza Goodarzi[b1], Seyed Hamid Lajevardi[a]

[a] Department of Civil Eng., College of Eng., Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
[b] Department of Civil Eng., College of Eng., Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

ABSTRACT

In the present study, the effectiveness of a new combination of industrial wastes including calcium carbide residue (CCR) and silica-fume (SF) along with polypropylene fiber was investigated in comparison with cement for improving soft clays and increasing their durability. The results showed that in the normal curing condition, the use of CCR alone has a little effect on the soil geo-mechanical performance. On the other hand, despite the initial favorable performance of cement, but the W-D cycle with the failure of cement nanostructures can lead to the disturbance and even complete loss of the soil bearing capacity. On the contrast, the combination of CCR with SF had a prominent role on the stabilization process and a much lower deterioration potential was observed in the presence of the optimal ratio of CCR-SF. According to SEM-EDX and XRD analysis, expansion of solidification and reduction of voids were evaluated as the main factors of the more appropriate response of the recent system. Adding fiber to this series of samples had a significant effect on the growth of tensile strength, better absorption of energy, reduction of cracking ability and, as a result, improving the stability of soil matrix. Following such a condition, the strength of reinforced sample containing 15% additive was found to be about 1.8 times the threshold allowed for successful stabilization. This can be attributed to the synergism of CCR-SF and fibers in improving the particles conjunction and reducing the access of voids for soil-water interaction. Based on the obtained results, the use of optimal combination of CCR-SF with fiber can be recommended as a low cost, environmentally friendly and efficient option in improving the behavior of problematic soils and reducing their post-failure potential.

KEYWORDS

Cement stabilization, W-D cycles, deterioration of soil properties, CCR-SF-Fibers, enhanced durability.

[1] Corresponding Author: Email: Amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk

ACCEPTED MANUSCRIPT