

تأثیر شرایط مختلف عمل‌آوری بر دوام خاک‌های رسی تثبیت‌شده با آهک (مطالعه‌ی ریزساختاری و درشت‌ساختاری)

ساناز سلطانی‌نژاد، دانشجوی دکترای عمران، مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید

باهنر کرمان

صلاح‌الدین حمیدی، دکترای مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی، دانشگاه

شهید باهنر کرمان

سید مرتضی مرندی*، استاد مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید

باهنر کرمان

Email: marandi@uk.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۶ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۵

چکیده

خاک‌های رسی عموماً در حالت خشک، سختی و مقاومت مناسب دارند. اما در حضور آب، دچار افت سختی و مقاومت زیاد شده، که موجب کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست و تراکم‌پذیری خاک می‌گردد. در پروژه‌های عمرانی، خاک‌های رسی، بخصوص رس‌های نرم، با استفاده از آهک تثبیت می‌شوند. در پژوهش حاضر، نمونه‌های خاک رسی کائولینیت، با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک تثبیت و در دمای ۲۷ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی 98 ± 2 درصد عمل‌آوری شدند. سه سری خاک مطالعه شد: نمونه‌های اول پس از ۱۴ روز، نمونه‌های دوم پس از ۲۸ روز و نمونه‌های سوم پس از ۱۴ روز عمل‌آوری در آب، مستغرق شده و سپس آزمایش گردیدند. در راستای مطالعه درشت‌ساختاری نمونه‌ها تحت آزمایش تک‌محوری و مطالعه ریزساختاری و ترکیبات سیمتاسیون حاصل از واکنش خاک-آهک، آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)، عکس‌های میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS یا EDX) انجام گردید. نتایج نشان داد که با استفاده از ۱۰٪ آهک، نمونه‌هایی که بعد از ۱۴ روز عمل‌آوری و ۱۴ روز در آب مستغرق شده‌اند، در مقایسه با نمونه‌ها ۲۸ روزه، به‌واسطه‌ی نفوذ آب و به دنبال آن شکسته و ضعیف شدن استحکام ترکیبات سیمتاسیون، ۶۵٪ کاهش مقاومت داشتند. همچنین، در هر دوی مطالعات درشت‌ساختاری و ریزساختاری، برای دست‌یابی به مقاومت مناسب، میزان آهک بهینه حدود ۱۰٪ است.

واژه‌های کلیدی: خاک رس، تثبیت خاک، آهک، مقاومت تک‌محوری، آزمایش‌های ریزساختاری

۱. مقدمه

راه را تأمین خواهد کرد (لفلایو و شافنر، ۱۹۷۹؛ لیتل و شافی، ۲۰۰۱). در همین راستا، مطالعه یک پروژه ی روسازی در پنسیلوانیا نشان داد که تثبیت با آهک موثرترین روش در بهسازی روسازی راه بوده است. مقاطع روسازی متناوب در آن با استفاده از دستورالعمل آیین نامه حمل و نقل و بزرگراه های ایالات متحده آمریکا طراحی شد. در این مطالعات، دو مقطع یکسان در برابر بارهای ترافیکی و بارهای در طول سرویس دهی طراحی شد که در یکی بستر با آهک تثبیت شد و در دیگری، بستر بدون تثبیت با آهک طراحی شد. نتایج مطالعات انجام شده نشان داد که تثبیت بستر با آهک نسبت به برداشتن و جایگزینی آن با مصالح دانه ای موجب صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه ها شد. همچنین، تثبیت با آهک موجب بهبود مقاومت بستر و دیگر ویژگی های مطلوب شده و علاوه بر آن ضخامت روسازی انعطاف پذیر که روی بستر تثبیت شده با آهک طراحی شد نازک تر از مقطع روسازی با بستر تثبیت نشده بود که موجب بیش از ۲۰٪ صرفه جویی در هزینه ها (مبلغی بالغ بر ۴ میلیون دلار) شد (کیوبین و همکاران، ۲۰۰۰).

تولید هیدرات ها به وسیله واکنش رس- آهک، واکنش پوزولانی نامیده شده است. پوزولان یک ماده سیلیکا یا آلومینا سیلیکا است که چسبندگی ناچیزی دارد اما با کلسیم هیدروکسید در حضور رطوبت برای تشکیل ترکیبات چسباننده واکنش می دهد (لی، ۱۹۳۹). بررسی تأثیر مفید آهک بر کارایی و مقاومت خاک های رسی سابقه ای طولانی دارد. با این حال، تنها در طول چند دهه اخیر مکانیزمی که به وسیله آن آهک مقاومت و کارایی به دست آمده را بهبود بخشیده، شناخته شده است. چهار واکنش در طول تثبیت رخ می دهد: (۱) تبادل کاتیونی، (۲) لخته شدن و تجمع ذرات، (۳) کربناته شدن آهک و (۴) واکنش پوزولانی بین آهک، سیلیکا و آلومینا (بل، ۱۹۹۶؛ المختار، ۲۰۱۲؛ محمدی و خمیسا، ۲۰۱۳؛ پوپالا و همکاران، ۲۰۱۳؛ الزبیدی و لفتا، ۲۰۱۳؛ ژائو و

خاک های رسی نرم در نقاط مختلف جهان وجود دارند و می توانند صدمات جدی به سازه های زیربنایی مهندسی عمران در گستره سازه های ساختمانی یا راه سازی برسانند (سکو و همکاران، ۲۰۱۱). نهشته های رسی نرم در مناطق پر باران جنگلی که تراز آب زیرزمینی همواره در معرض نهشته های خاک های رسی می باشد، مشاهده شده است. خاک های رس مصالحی با مقاومت کم بوده و هنگامی که در معرض رطوبت قرار می گیرند دچار افت شدید مقاومتی خواهند شد. این در حالی است که در حالت خشک، بسیار مستحکم می باشند (گودرزی و سلیمی، ۲۰۱۵). همچنین، به واسطه ی نفوذپذیری بسیار کم خاک های رسی، زایل شدن اضافه فشار آب حفره ای کند است (الحاجی و سدیکو، ۲۰۱۵؛ زوکری، ۲۰۱۳). برخی از مشکلات مهم رفتاری و مقاومتی خاک های رسی نرم عبارتست از: مقاومت کم، نشست های قابل توجه، خاصیت پلاستیسیته زیاد، تورم، واگرایی، فرسایش، فشردگی پذیری زیاد و حساسیت به شرایط محیطی (اوحدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ احمد، ۲۰۱۵). بنابراین، بهسازی خاک های رسی نرم و نشست پذیر ضروری به نظر می رسد. یکی از روش های مرسوم در بهسازی خاک های رسی، استفاده از افزودنی سنتی آهک است که به وفور در پروژه های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است. خاک های تثبیت شده با آهک به عنوان مصالح بستر، زیراساس و اساس بهسازی شده در روسازی راه ها استفاده شده اند (لیتل، ۱۹۹۶؛ هیئت تحقیقاتی حمل و نقل واشنگتن، ۱۹۸۷). تثبیت خاک های ریزدانه با آهک نه تنها موجب ایجاد بستر با کیفیت مکانیکی و عملکردی بسیار مناسب خواهد شد (کرجوت، ۲۰۰۱)، بلکه موجب استفاده ی آنها در بخش های سازه ای روسازی راه، حتی در جاده های با ترافیک زیاد، می شود (سترا، ۲۰۰۷). افزایش خصوصیات مقاومتی و رفتاری بلندمدت بستر تثبیت شده با آهک، بخشی از مقاومت سازه ای روسازی

مربوط به دوره‌های کوتاه‌مدت، در درازمدت با مواد حاصل از سم‌تاسیون پُر می‌شوند. بنابراین، حجم حفره‌های کوچک با زمان افزایش می‌یابد. اما به صورت کلی، حجم حفره‌های کل با افزایش زمان کاهش می‌یابد.

همانگونه که مشاهده شد، مطالعات قابل توجهی در خصوص تثبیت خاک‌های رسی با آهک انجام شده است. اما علی‌رغم آنکه خاک‌های رسی در مناطق مختلف، تحت شرایط مختلف آب و هوایی در فصول مختلف سال، شرایط متفاوت رطوبتی را تجربه می‌کنند، به صورتی که در مدت زمان‌های مختلف (بلندمدت و کوتاه‌مدت) اشباع، خشک و نیمه اشباع خواهند بود، مطالعات جامعی در خصوص تأثیر شرایط مختلف عمل-آوری بر مقاومت نمونه‌ی رسی تثبیت شده با آهک که به مدت طولانی در معرض رطوبت و خیس شدن قرار می‌گیرد انجام نشده است. از این رو، در پژوهش حاضر، نمونه‌هایی از خاک رس کائولینیت با صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری شدند. سپس، روی نمونه‌ها آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، یا آزمایش تک‌محوری، انجام شد. از دیدگاه ریزساختاری، از نکات ارزنده پژوهش حاضر آن است که به صورت کمی و همزمان نتایج آنالیز عنصری EDS با نتایج XRD در شناسایی کریستال‌های تشکیل شده در واکنش‌های کانی‌های رسی موجود در خاک رس با آهک مورد بررسی قرار گرفت که مطالعه‌ی همزمان و کمی این دو آنالیز در پژوهش‌های انجام شده‌ی پیشین توسط محققین بسیار محدود است. نتایج پژوهش حاضر در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیک، علی‌الخصوص در خاک‌های رسی اشباع و مرطوب و نیز در خاک‌های رسی که به صورت فصلی اشباع شده و در معرض سیکل‌های تر و خشک‌شدگی قرار دارند، کاربرد خواهد داشت.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد مصرفی و آزمایش‌های انجام شده

همکاران، ۲۰۱۴؛ کنسولی و همکاران، ۲۰۱۴؛ خمیسا و محمدی، ۲۰۱۴؛ ابوسیف، ۲۰۱۵؛ جها و سیواپولایه، ۲۰۱۵). هنگامی که مقادیر کافی آهک و آب اضافه می‌شود، pH خاک به سرعت از ۱۰/۵ بیشتر شده که ذرات رس را قادر می‌سازد تا شکسته شوند. سیلیکا و آلومینای آزاد شده با کلسیم موجود در آهک وارد واکنش شده و کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) تشکیل خواهد شد. این ترکیبات ماتریس‌هایی را تشکیل می‌دهند که در مقاومت لایه‌های خاک تثبیت‌شده با آهک مشارکت دارند. هنگام تشکیل این ماتریس‌ها، رفتار خاک رس از حالت خمیری و تورمی شدید و نامطلوب طبیعی به رفتار مصالحی دانه-ای و نسبتاً نشست‌ناپذیر تبدیل می‌شود که موجب افزایش ظرفیت باربری خاک خواهد شد (لوکت و همکاران، ۱۹۹۰؛ المختار و همکاران، ۲۰۱۰؛ چی توری و همکاران، ۲۰۱۱؛ دی سنیت و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعات انجام شده روی مخلوط‌های رس-آهک نشان می‌دهد که کلسیم سیلیکات هیدرات و کلسیم آلومینات هیدرات در فرم‌های مختلفی در گستره دمایی از دمای اتاق بیشتر تشکیل می‌شوند (گلن و هندی، ۱۹۳۶؛ هیل و دیویدسن، ۱۹۶۱؛ مک‌کالب، ۱۹۶۲). نوع و ساختار نانوکلسیم سیلیکات هیدرات و همچنین مقدار تشکیل شده‌ی آن، بر مقاومت ایجاد شده توسط چسباننده آهک-پوزولان سخت شده تأثیر مستقیم دارد (جامبو، ۱۹۶۳). مطالعات قابل توجهی در خصوص ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های بهسازی شده با آهک در مقیاس میکرو انجام شده است (متلکوا و همکاران، ۲۰۱۱؛ محمد و واناتوسکی، ۲۰۱۳). در همین راستا، هارپیولاسک و همکاران (۲۰۱۰) براساس آزمایش‌های ریزساختاری، به بررسی افزایش مقاومت خاک‌های رس سیلتی تثبیت شده با آهک پرداختند. نتایج آزمایش‌های SEM، آنالیزهای تزریق جیوه و توزین حرارتی برای آنالیزهای کمی و کیفی ساختار میکرونمونه‌ها نشان داد که حفرات بزرگ

دستورالعمل های استاندارد ASTM (۱۹۹۴) صورت گرفت. به منظور انجام آزمایش های ریزساختاری، نمونه های ۲۸ روزه شکسته شده در آزمایش تک محوری، در دمای ۴۰ درجه سلسیوس خشک شدند. سپس، نمونه ها پودر شده و از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و در ادامه، آزمایش های ریزساختاری روی ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ انجام شد. آزمایش های SEM و آنالیز EDS بر اساس دستورالعمل Jeol-Jsm 840A انجام شد. همچنین، آنالیز XRD براساس روش پیشنهاد شده توسط یانگ و اوحدی (۲۰۰۳) صورت گرفت.

در پژوهش حاضر، از نمونه ی رسی کائولینیت استفاده شد. کائولینیت مورد استفاده به صورت پودری قهوه ای رنگ متمایل به زرد است که از یک معدن واقع در زرنند کرمان، در جنوب شرق ایران، تهیه شد. بخشی از مشخصات ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه ی رسی کائولینیت در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به تولید و کاربرد فراوان آهک در تثبیت خاک های رسی، از آهک به عنوان تثبیت کننده استفاده شد. آهک مورد استفاده از کارخانه شادمان واقع در جاده زرنند کرمان تهیه شد.

آزمایش های انجام شده شامل چگالی ویژه، دانه بندی، حدود اتربرگ و درصد رطوبت بر اساس

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی کائولینیت

مقدار	ترکیب، مقدار	مشخصات
	کائولینیت، دیکیت، کوارتز و کلسیت	کانی های اصلی در آنالیز XRD
۳۰/۳		حد روانی (%)
۱۹		حد خمیری (%)
۱۱/۳		شاخص خمیری (%)
۳۶/۶		ماسه (%)
۴۴/۴		سیلت (%)
۱۹		رس (%)
CL		طبقه بندی (روش متحد)
قهوه ای		رنگ

نظر به ترکیب اضافه و به طور کامل مخلوط شد به صورتی که رطوبت نقاط مختلف نمونه یکسان و نمونه تقریباً همگن شود. پیش از فرایند تراکم، به منظور همگن ساختن نمونه ها و عدم وجود کلوخه های رسی، مخلوط از الک شماره ۱۰ عبور داده شد. نمونه ها در قالب تک محوری به ارتفاع ۷۶ و قطر ۳۸ میلی متر با روش دانسیته کنترل متراکم شدند، به طوری که دانسیته خشک و درصد رطوبت در تمامی نمونه ها یکسان در نظر گرفته شد. تمام

۲-۲. آماده سازی و عمل آوری نمونه ها و روند انجام آزمایش ها

برای آماده سازی نمونه ها، خاک کائولینیت با مقادیر صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک در حالت خشک کاملاً مخلوط شده تا زمانی که مخلوط ظاهری یکنواخت و همگن پیدا کند. تمامی نمونه ها با استفاده از روش جایگزینی تکمیلی (الدود، ۲۰۱۴) با هم مخلوط شده، سپس رطوبت مورد

شد. با افزودن ۱۵٪ آهک، مقاومت نمونه ۱۴/۵ درصد نسبت به نمونه با ۱۰٪ آهک و مقاومت نمونه‌ی تثبیت شده با ۲۰٪ آهک نسبت به نمونه با ۱۵٪ آهک به میزان ۳٪ افزایش داشته است. بنابراین، در عمل‌آوری ۱۴ روزه، افزودن آهک بیشتر از ۱۰٪ باعث افزایش ناچیزی در مقاومت تک‌محوری شده و از این‌رو میزان بهینه آهک در عمل‌آوری ۱۴ روزه، ۱۰٪ است. مطابق شکل ۷، در عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، مقاومت نمونه حاوی ۱۰٪ آهک ۲۵ برابر مقاومت نمونه‌ی تثبیت نشده است. افزایش مقاومت نمونه تثبیت شده با ۱۵٪ آهک نسبت به نمونه با ۱۰٪ آهک کمتر از ۱٪ و افزایش مقاومت نمونه حاوی ۲۰٪ آهک نسبت به نمونه حاوی ۱۰٪ آهک کمتر از ۴٪ است. بنابراین، در عمل‌آوری ۲۸ روزه نیز میزان بهینه آهک، ۱۰٪ است. مطابق شکل ۷، در نمونه‌هایی که در آب مستغرق نشده‌اند (گروه‌های A و C) مقاومت نمونه‌ی ۲۸ روزه نسبت به مقاومت نمونه‌ی ۱۴ روزه در نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک به ترتیب به میزان ۵۴، ۳۵ و ۳۶ درصد افزایش داشته است. با افزودن درصد آهک بیشتر از ۱۰٪، افزایش مقاومت نمونه ۲۸ روزه نسبت به ۱۴ روزه کمتر از نمونه با ۱۰٪ آهک است و این موضوع می‌تواند حاکی از آن باشد که احتمالاً آهک مازاد بر درصد بهینه که وارد واکنش نشده و احتمالاً در نمونه رسوب داده و در نمونه‌های با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، مانع از پیشرفت واکنش پوزولانی در درازمدت شده است. در میزان بهینه ۱۰٪، افزایش ۵۴ درصدی مقاومت بلندمدت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت میان‌مدت ۱۴ روزه حاکی از آن است که تقریباً حدود ۵۵٪ از افزایش مقاومت در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه‌ی دوم انجام شده است.

در گروه B، که در آن نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری ۱۴ روزه به مدت ۱۴ روز در ظرف آب مستغرق شده‌اند، همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود نمونه طبیعی بلافاصله پس از گذاشتن در آب فروپاشیده است. در

نمونه‌های کائولینیت با دانسیته ثابت $1/6 \text{ gr/cm}^3$ و رطوبت ۲۲٪ متراکم شدند. پس از ساخت نمونه‌ها، به منظور ثابت ماندن رطوبت آنها، دور آنها طلقی پیچیده و داخل زیپ‌کیپ قرار داده شدند. دمای عمل‌آوری نمونه‌ها تقریباً ثابت و برابر ۲۷ درجه سلسیوس بود. همچنین، رطوبت نسبی عمل‌آوری نمونه‌ها 98 ± 2 درصد بود که برای مدل‌سازی این شرایط از یک یخچال فریزر استفاده شد که به دلیل نوار لاستیکی درب یخچال، شرایط دسیکاتور به صورت تقریبی فراهم شد. از طرف دیگر، برای ثابت ماندن شرایط رطوبت نسبی نمونه‌ها، گونی‌های نخی روی زیپ‌کیپ‌هایی که نمونه‌های ساخته شده داخل آنها قرار داده شده بود، کشیده شد که به صورت مرتب خیس نگه داشته شدند تا شرایط رطوبت نسبی مورد نظر ایجاد شود (شکل ۱). در پژوهش حاضر، سه گروه نمونه ساخته شد: گروه A، به مدت ۱۴ روز عمل‌آوری شده و روی آنها آزمایش تک‌محوری انجام گرفت؛ گروه B، به مدت ۱۴ روز عمل‌آوری شد و سپس مطابق شکل‌های ۲ تا ۵ در یک ظرف آب به مدت ۱۴ روز مستغرق شده و در حالت اشباع تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند (کالیک و سدأغلو، ۲۰۱۴) و گروه C به مدت ۲۸ روز بدون مستغرق نمودن نمونه‌ها عمل‌آوری شده و سپس تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند. آزمایش‌های تک‌محوری انجام شده به صورت کرنش-کنترل و براساس روش ASTM D2166-87 (۱۹۸۷) بودند.

۳. تحلیل نتایج

۳-۱. آزمایش‌های تک‌محوری تحت شرایط

مختلف عمل‌آوری

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌هایی که تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند در شکل ۶ ارائه شده‌اند. مطابق شکل ۷، در عمل‌آوری ۱۴ روزه، با افزودن ۱۰٪ آهک، مقاومت نمونه ۱۶ برابر مقاومت نمونه طبیعی بدون آهک

نیز می باشد) می تواند به دلیل نفوذ آب و شکسته شدن و ضعیف شدن استحکام ترکیبات سمناسیون در واکنش- های پوزولانی خاک با آهک باشد.

به منظور بررسی پایداری نمونه ها براساس نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری که روی نمونه ها بعد از عمل آوری و در انتهای خیس شدن در ۱۴ روز انجام شد، از پارامتری به نام ضریب پایداری آب^۱ استفاده شد که به صورت رابطه (۱) است:

$$\text{Water stability coefficient} = 100 \quad (1)$$

$$= \frac{UCS_{14,28 \text{ day}} - UCS_{W-14 \text{ day}}}{UCS_{14,28 \text{ day}}}$$

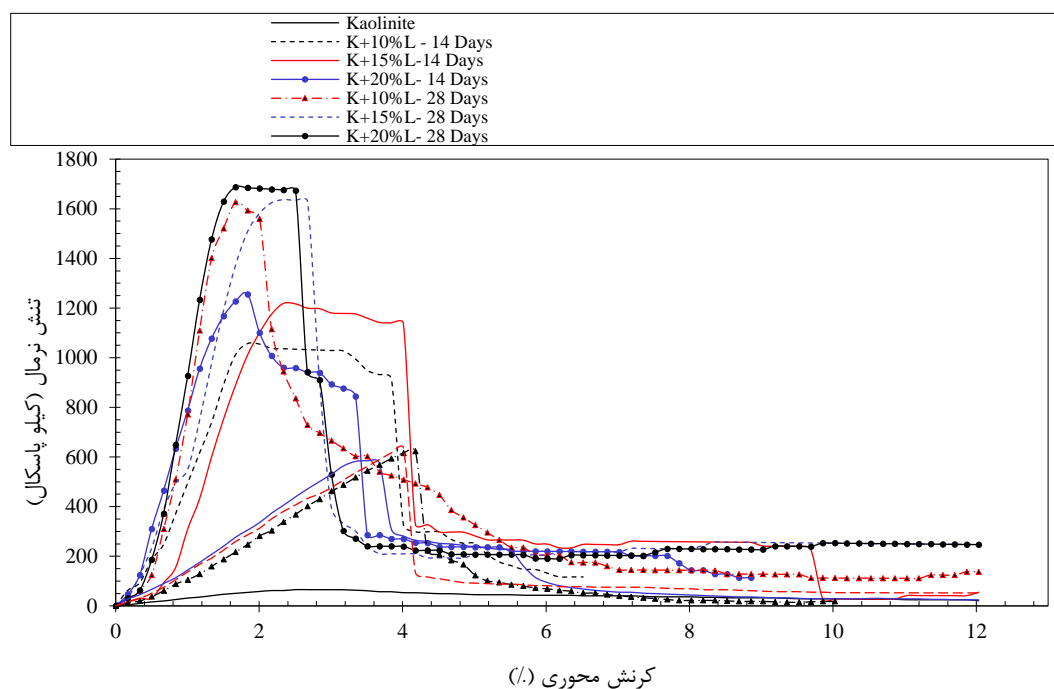
که $UCS_{14,28 \text{ day}}$ مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها پس از عمل آوری به مدت ۱۴ و ۲۸ روز بدون مستغرق نمودن نمونه ها در آب و $UCS_{W-14 \text{ day}}$ مقاومت فشاری تک محوری نمونه هایی است که پس از ۱۴ روز عمل- آوری به مدت ۱۴ روز در آب مستغرق شده و پس از آن در حالت اشباع تحت آزمایش تک محوری قرار گرفت.

با مقایسه ضریب پایداری در برابر آب در نمودارهای ارائه شده در شکل ۸ در نمونه های گروه A و B می توان بیان کرد که اختلاف ضریب پایداری نمونه های تثبیت شده با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک حدود ۱ تا ۵ درصد متغیر می باشد. همچنین، مقدار انحراف معیار نمونه های ۱۴ روزه و ۲۸ روزه به ترتیب ۱/۰۷ و ۱/۸۵ است که این مقدار تغییرات علی الخصوص در نمونه های ۱۴ روزه از دیدگاه آماری ناچیز و یا به عبارت بهتر معنی دار نمی- باشد. بنابراین، میزان بهینه آهک بر اساس ضرایب پایداری در برابر آب، با تکیه بر نکات آماری، ۱۰٪ می- باشد. در میزان بهینه ۱۰٪، وقتی نمونه های گروه B به مدت ۱۴ روز عمل آوری شده و سپس به مدت ۱۴ روز در آب مستغرق شدند، تقریباً حدود ۴۵٪ از مقاومت خود را، در مقایسه با نمونه هایی که بعد از ۱۴ روز عمل آوری شکسته شدند، از دست دادند. این مسئله می تواند ناشی

ادامه، با توجه به تصاویر نمونه ها در شکل ۴ مشاهده می شود که نمونه های تثبیت شده با آهک در آب فرونپاشیده و پایدار بوده اند. نمونه های مذکور پس از ۱۴ روز مستغرق شدن در آب، تحت آزمایش تک محوری قرار گرفتند. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، در نمونه های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، آهک مازاد بر درصد بهینه که با خاک رس وارد واکنش نشده در مدت ۱۴ روز مستغرق بودن جدا شده و به صورت ذرات معلق و شناور در سطح آب روی نمونه ها در ظرف جمع شده است. به طوری که در انتهای ۱۴ روز مستغرق شدن، لایه ای سفید از آهک، سطح آب در بالای نمونه ها را پوشانده است. آهک مازادی که وارد واکنش نشده و به صورت معلق روی سطح آب ظاهر شده دال بر بهینه بودن درصد آهک ۱۰٪ می باشد. این مسئله در تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نسبت به درصد آهک در شکل ۷ نیز مشاهده می شود. به طوری که افزایش مقاومت نمونه- های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد آهک نسبت به نمونه حاوی ۱۰٪ آهک ناچیز بود و بر همین اساس، ۵ و ۱۰ درصد آهک مازاد بر درصد بهینه در نمونه های مستغرق به صورت شناور سطح آب درون ظرف را پوشانده است. نتایج مقاومت های تک محوری در شکل ۷ در نمونه- های مربوط به گروه های A و B نشان می دهد که مستغرق نمودن نمونه های تثبیت شده با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، مقاومت تک محوری نمونه ها به ترتیب به میزان ۴۵/۱، ۴۷/۵ و ۴۵/۶ درصد کاهش یافته است. مقایسه نمونه های گروه های B و C حاکی از آن است که مستغرق نمودن نمونه ها سبب شده که مقاومت نمونه های حاوی ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درصد آهک به ترتیب به میزان ۶۴/۵، ۶۱/۲ و ۶۰ درصد نسبت به نمونه هایی که ۲۸ روز بدون مستغرق شدن عمل آوری شدند، کاهش یابد. کاهش مقاومت در گروه B نسبت به گروه های A و C که به صورت تقریبی حدود ۶۰٪ است (که عدد قابل توجهی

۱- Water stability coefficient

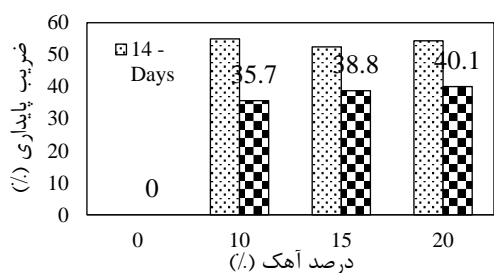
از نفوذ آب و سست و شکسته شدن ترکیبات سممتاسیون تشکیل شده از واکنش‌های پوزولانی خاک- آهک باشد.



شکل ۶. نمودار تنش- کرنش نمونه‌ی رسی کائولینیت تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک در شرایط مختلف عمل‌آوری



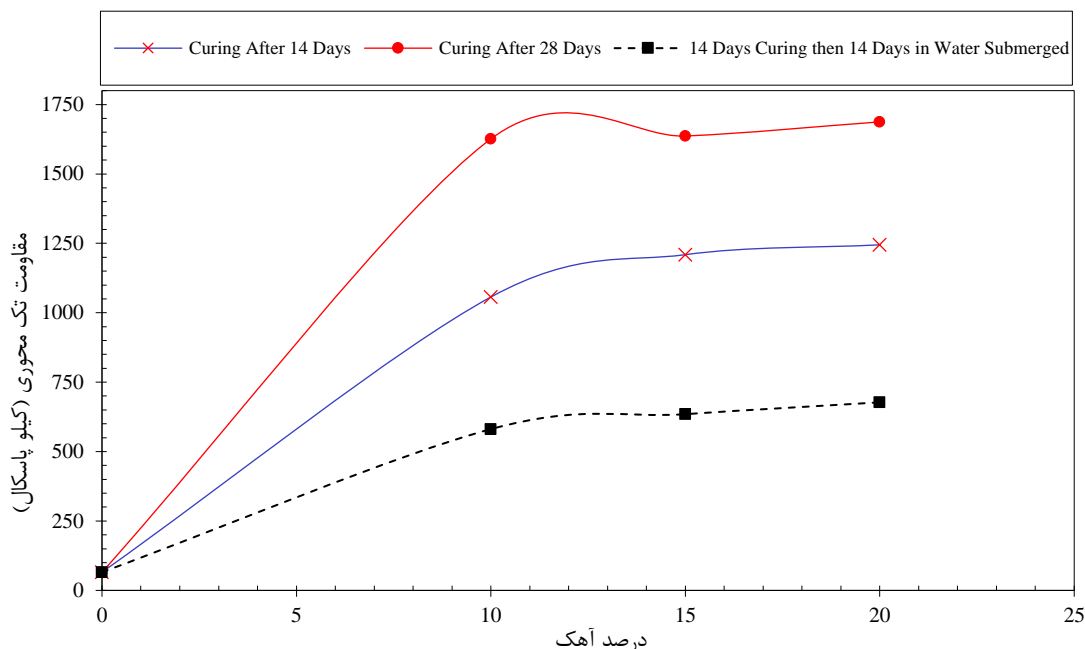
شکل ۱. نحوه‌ی عمل‌آوری نمونه‌ها
شکل ۲. نحوه مستغرق کردن نمونه‌ها
شکل ۳. نمونه‌ی رسی نمودن
شکل ۴. ایجاد لایه‌ی سفید رنگ آهک پس از ۱۴ روز استغراق



شکل ۸. تغییرات ضریب پایداری نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه بر حسب درصد آهک



شکل ۵. نمونه‌های ۱۴ روزه پس از برداشتن از آب



شکل ۷. نمودار مقاومت تک محوری با افزودن درصد آهک

۳-۲. تحلیل نتایج آزمایش های ریز ساختمانی

۳-۲-۱. تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی

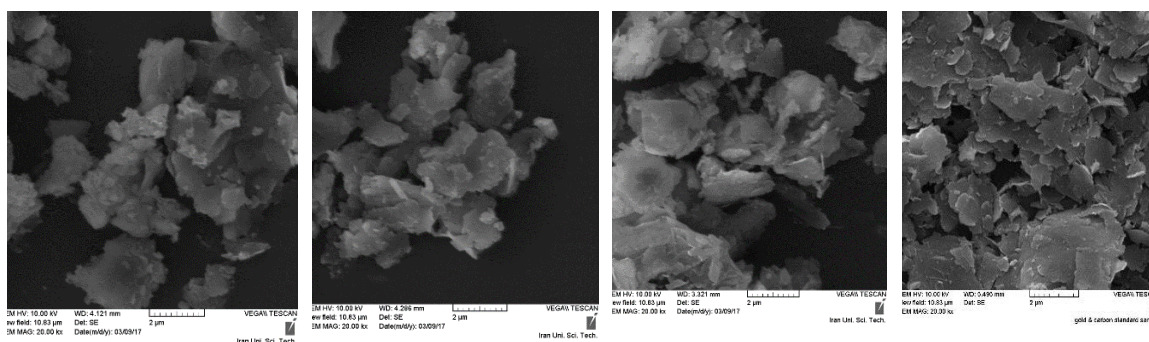
(SEM)

در شکل ۹، تصاویر SEM نمونه های کائولینیت تثبیت شده با درصد های مختلف آهک پس از ۲۸ روز عمل-آوری نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹-الف) می توان بیان نمود که نمونه خاک رس کائولینیت طبیعی، بدون اضافه نمودن آهک، بافت و ساختار ورقه ورقه ای از صفحات شش ضلعی کانی کائولینیت دارد. به عبارت دیگر، ساختار پولکی شکل از صفحاتی با لبه های سوزنی دارد. همچنین، خلل و فرج و حفرات بزرگ در خاک طبیعی قابل مشاهده است. مطابق شکل های (۹-ب) تا (۹-د)، در عمل آوری ۲۸ روزه، با افزودن ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، سطح نمونه به شدت از تراکم نسبی بیشتری در مقایسه با خاک بدون حضور ماده افزودنی آهک برخوردار است. ساختار خاک درهم تر و اندازه ذرات خاک ریزتر شد. بنابراین، با افزودن آهک، به واسطه ی انجام و تکمیل واکنش های پوزولانی، ساختار خاک از

با توجه به شکل ۸، با مقایسه ضریب پایداری نمونه های گروه B و C، افزایش ضریب پایداری در برابر آب نمونه با ۲۰٪ آهک نسبت به نمونه با ۱۰٪ آهک کمتر از ۵ است. بنابراین، با اضافه نمودن ۱۰٪ آهک، ضریب پایداری در برابر آب افزایش قابل توجهی نداشته و لذا میزان بهینه آهک ۱۰٪ است. در میزان بهینه ۱۰٪ نمونه های گروه B، در مقایسه با نمونه های گروه C، در حدود ۶۵٪ افت مقاومت مشاهده شده است. در بازه ی ۱۴ روزه دوم که نمونه های گروه B در آب مستغرق بود، نمونه های گروه C در دمای محیط عمل آوری شد. بنابراین، کاهش ۶۵ درصدی مقاومت نمونه های گروه B نسبت به نمونه هایی که به مدت ۲۸ روز عمل آوری شد به دلیل آن است که در مدت ۱۴ روزه که نمونه های گروه C در دمای محیط عمل آوری شدند، تثبیت پوزولانی و استحکام ترکیبات سمتاسیون انجام شد. ولی در نمونه های گروه B در ۱۴ روز دوم که در آب مستغرق بودند، نفوذ آب موجب شکسته و ضعیف شدن ترکیبات سمتاسیون شد. از نکات ضعف آهک در تثبیت خاک های رسی، عملکرد ضعیف آن در حالت اشباع است.

و به صورت رسوب در نمونه ظاهر خواهد شد. به عبارت بهتر، میزان بهینه آهک ۱۰٪ خواهد بود و مقادیر مازاد بر آن تأثیری در واکنش‌های شیمیایی پوزولانی خاک-آهک نخواهد داشت. بنابراین نتایج آزمایش‌های ریزساختاری عکس‌های میکروسکوپ الکترون روبشی هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایش‌های تک‌محوری داشته و به بیان دیگر دال بر صحت نتایج آزمایش‌های تک‌محوری انجام شده است.

حالت پراکنده به حالت لخته‌ای یا مجتمع تغییر یافته است که این مسئله بیانگر تکمیل واکنش‌های پوزولانی می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش میزان آهک از ۱۰ به ۱۵ و ۲۰ درصد، ساختار خاک مجتمع یا لخته‌ای است. بنابراین، واکنش‌های پوزولانی تکمیل شده است. نکته‌ی حائز اهمیت آن است که با افزایش مقدار آهک از ۱۰٪ به ۱۵٪ و ۲۰٪، ساختار خاک تغییرات ناچیزی داشته است. این مسئله بیانگر آن است که مقادیر مازاد بر ۱۰٪ قادر به تغییر ساختار نبوده و بنابراین وارد واکنش نشده



الف. کائولینیت طبیعی ب. ۱۰٪ آهک + کائولینیت ج. ۱۵٪ آهک + کائولینیت د. ۲۰٪ آهک + کائولینیت

شکل ۹. تصاویر SEM نمونه‌ی رسی کائولینیت ۲۸ روزه‌ی تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک

است. در نمونه‌های با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک نسبت به نمونه با ۱۰٪ آهک، تغییرات اندکی در ساختار کلوخه‌ای تشکیل شده مشاهده می‌شود.

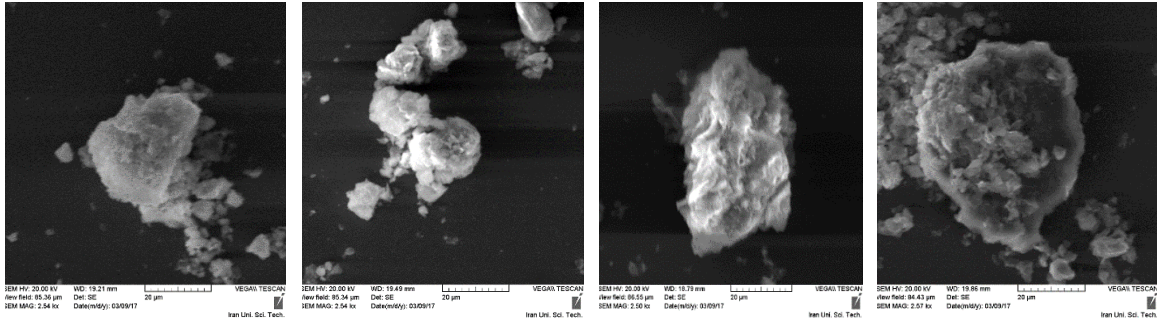
۲-۲-۳. آنالیز XRD و EDS

در شکل ۱۰، تصاویر SEM مربوط به نقاطی که آنالیز EDS روی آنها انجام شده و در جدول ۲ نتایج آنالیز EDS خلاصه شده است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، طیف حاصل از آنالیز EDS به ترتیب مربوط به نمونه‌ی کائولینیت تثبیت نشده و کائولینیت تثبیت شده با ۱۰٪ آهک ارائه شده است. همچنین، در ادامه، طیف XRD مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک به ترتیب در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ ارائه شده

در واقع، واکنش پوزولانی خاک با آهک موجب تشکیل ترکیبات سمتاسیون CSH و CAH شده که این مواد چسباننده ذرات خاک را به هم متصل نموده و سبب کاهش خلل و فرج خاک خواهند شد و حفرات موجود در خاک کمتر مشاهده می‌شوند. ترکیبات سمتاسیون مذکور به شکل توده یا کلوخه‌های سفید مطابق شکل‌های (۹-ب) تا (۹-د)، در حضور آهک، علی‌الخصوص در مقادیر ۱۵ و ۲۰ درصد، قابل مشاهده است. با اضافه نمودن مقادیر ۱۰٪ آهک و بیشتر، ذرات نمونه توپرتر و حتی نوع کانی مشاهده شده بسیار متفاوت می‌شود. با توجه به شکل ۹، در نمونه‌ی کائولینیت حاوی ۱۰٪ آهک نسبت به نمونه طبیعی، کانی‌های اولیه مشاهده نشده و به عبارت دیگر می‌توان گفت که نوع کانی‌ها نیز تغییر کرده

آنها درصد قابل توجهی سیلیکا وجود دارد. همچنین، با توجه به نمودار آنالیز عنصری شکل ۱۱ و جدول آنالیز عنصری ۲، عنصر غالب نمونه کائولینیت طبیعی، سیلیس با ۲۱٪ وزنی است.

است. با توجه به نمودار XRD در شکل ۱۳، در نمونه ی کائولینیت طبیعی، چهار کانی غالب کوارتز، کائولینیت، کلسیت و دیکیت شناسایی شده است. پیک های اصلی نمودار، کانی های کوارتز و کائولینیت است که در ترکیب



الف. کائولینیت طبیعی ب. Kaol + 10% Lime ج. Kaol + 15% Lime د. Kaol + 20% Lime

شکل ۱۰. تصاویر SEM نمونه ی رسی کائولینیت ۲۸ روزه ی تثبیت شده با درصد های مختلف آهک در آنالیز EDS

جدول ۲. آنالیز EDS از تصاویر SEM شکل ۱۰

Elt	O		Na		Mg		Al		Si		K		Ca		Fe		Other		
	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	W(%)	A(%)	
Kaolinite	۵۱/۶۸	۶۹/۴۶	۱/۵	۱/۴۱	۰/۸۸	۰/۷۸	۱۱/۱۶	۸/۸۹	۲۱/۴۷	۱۶/۴۴	۲/۲۶	۱/۲۴	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۶۷	۰/۲۹	۹/۸۲	۱/۲۴	
K+10%L	۵۹/۰۹	۷۶/۶۴	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۴۹	۰/۴۲	۷/۹۸	۶/۰۱	۱۰/۱۸	۵/۷	۲/۲۲	۱/۱۵	۱۶/۸۷	۸/۵۴	۰/۵۶	۰/۲	۱/۷۷	۰/۱۶	
K+15%L	۶۰/۹۳	۷۶/۸۸	۱/۳۵	۱/۱۸	۱/۱۳	۰/۹۴	۵/۵۹	۴/۱۸	۷/۶۵	۵/۵	۱/۳۱	۰/۶۸	۱۸/۶۱	۹/۳۷	۰/۵۵	۰/۲	۲/۸۸	۱/۰۷	
K+20%L	۵۷/۱۳	۷۳/۸۸	۱/۳۹	۱/۲۵	۰/۵۸	۰/۵	۵/۷۶	۴/۴۲	۹/۱۱	۶/۷۱	۱/۶۸	۰/۸۹	۲۲/۷۸	۱۱/۷۶	۰/۴۷	۰/۶	۱/۱	۰/۵۹	

Elt: عنصر، W(%) : درصد وزنی، A(%) : درصد مولی و K : کائولینیت

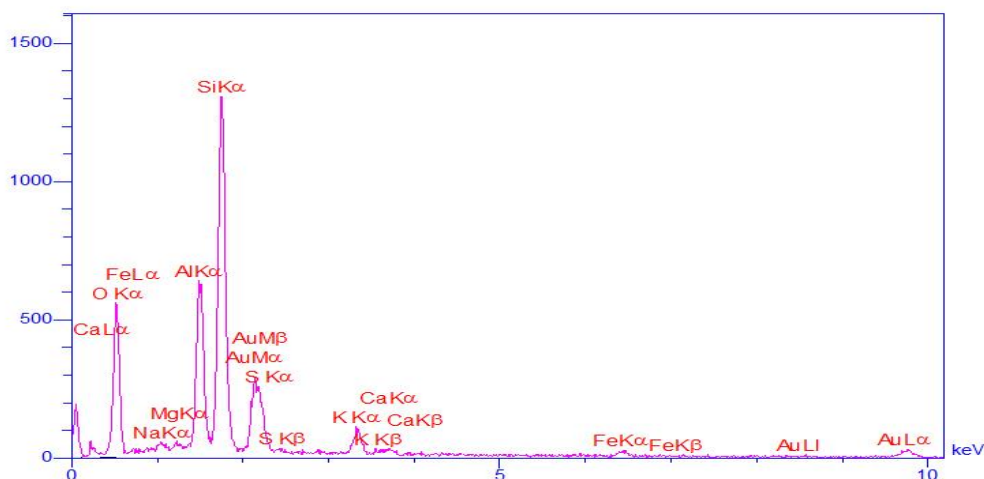
آهک، پیک های نانوساختار C-S-H و C-A-S-H مشاهده شده است. بنابراین، می توان اظهار داشت که تشکیل شدن ترکیبات سمنتاسیون C-S-H و C-A-S-H موجب افزایش مقاومت ۱۶ برابری نمونه ۲۸ روزه با ۱۰٪ آهک نسبت به نمونه کائولینیت طبیعی شده است. در عمل- آوری ۲۸ روزه، با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد آهک مطابق نمودارهای XRD شکل های ۱۴ الی ۱۶، همان پیک های C-S-H و C-A-S-H که با افزودن ۱۰٪ آهک تشکیل شد در نمونه های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد آهک نیز تشکیل شد. نکته ی حائز اهمیت آن است که با وجود افزودن ۵ و ۱۰ درصد آهک بیشتر از نمونه حاوی ۱۰٪ آهک، ۷ پیک C-S-H و ۳ پیک C-A-S-H مربوط به آنالیز XRD نمونه تثبیت شده با ۱۰٪ آهک، در طیف XRD نمونه های

با توجه به نمودار XRD شکل ۱۴، در عمل آوری ۲۸ روزه، با افزودن ۱۰٪ آهک به خاک، فاز کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) در پیک های 4.73 \AA ، 6.46 \AA ، 1.95 \AA ، 2.14 \AA ، 2.74 \AA ، 2.84 \AA ، 3.19 \AA تشکیل شد. در ترکیب C-S-H تشکیل شده در ترکیب شیمیایی این کریستال، نسبت Ca/Si، ۱/۵ می- باشد.

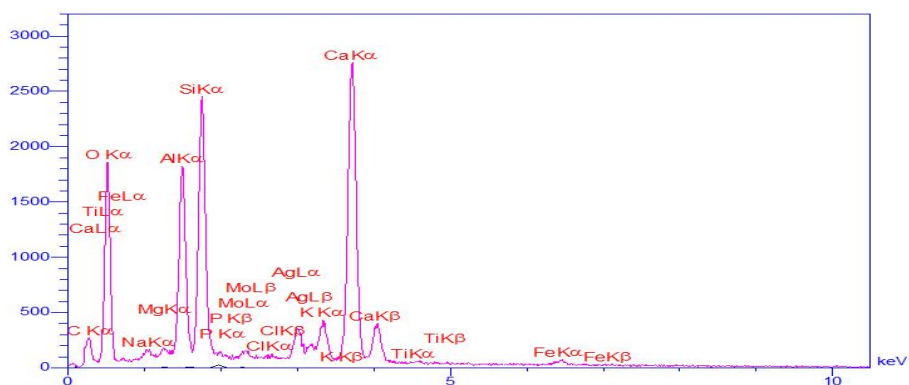
با توجه به نمودار آنالیز عنصری شکل ۱۲ و جدول ۲، نسبت Ca/Si با افزودن ۱۰٪ آهک ۱/۵ است. بنابراین، نتایج آنالیز EDS، نتایج پیک های شناسایی شده در XRD را تأیید می کند. در پیک های 2.7 \AA ، 4.25 \AA ، 7.25 \AA در 100 \AA ترکیب نانوساختار C-A-S-H تشکیل شده است. در نمودار XRD نمونه ی کائولینیت تثبیت شده با ۱۰٪

و مقادیر مازاد بر ۱۰٪ باعث تشکیل Ca اضافه شده است. بر همین اساس، پیک‌های کلسیت در این نمونه‌ها بیشتر شده است و موجب شده که نسبت Ca/Si در نمونه‌های تثبیت شده با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک به ترتیب به ۱/۷ و ۱/۷۵ برسد که عملاً وارد واکنش نشده و در نمونه رسوب کرده است. در ادامه، با توجه به طیف XRD نمونه‌ی تثبیت شده با ۲۰٪ آهک در شکل ۱۶، ترکیب کلسیت در پیک‌های $d_{100}=3.04 \text{ \AA}$, 2.285 \AA , 2.099 \AA ، 1.91 \AA , 1.875 \AA , 1.6 \AA , 1.44 \AA تشکیل شد. بنابراین، در نمونه‌ی رسی حاوی ۲۰٪ آهک نسبت به نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ آهک، ۵ پیک کلسیت اضافه‌تر تشکیل شده است که دال بر صحت موارد فوق است.

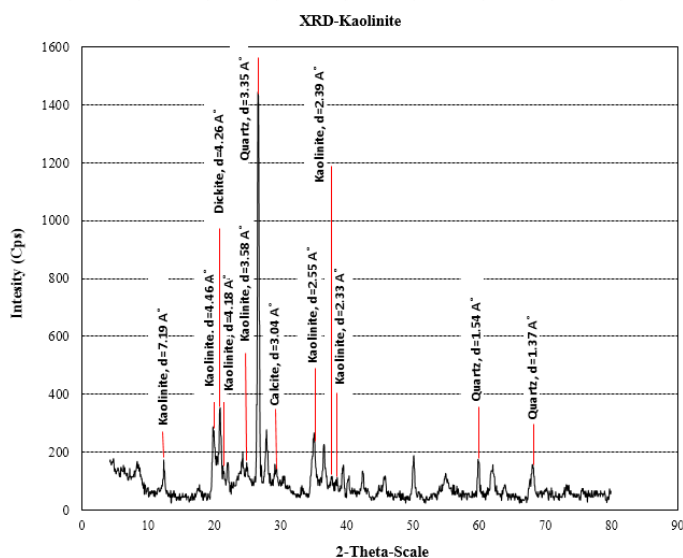
تثبیت شده با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک بدون اضافه شدن پیک‌های ترکیبات سممتاسیون جدید، مشاهده شد. بنابراین، در بخش ریزساختاری نیز با توجه به طیف‌های حاصل از آنالیز XRD، ۱۰٪ آهک بهینه می‌باشد. این مسئله بدین صورت قابل استنباط است که با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، ترکیبات سممتاسیون جدیدی در طیف آنالیز XRD مشاهده نشد. با توجه به جدول ۲، نسبت Ca/Si در نمونه‌های تثبیت شده با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک به ترتیب ۱/۷ و ۱/۷۵ است. لازم به ذکر است که پیک‌های نانوساختار C-S-H تشکیل شده در نمونه‌ی تثبیت شده با ۱۰٪ آهک که حاصل انجام واکنش‌های پوزولانی است و در آن نسبت Ca/Si، ۱/۵ است، در نمونه‌های تثبیت شده با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک نیز تشکیل شده است



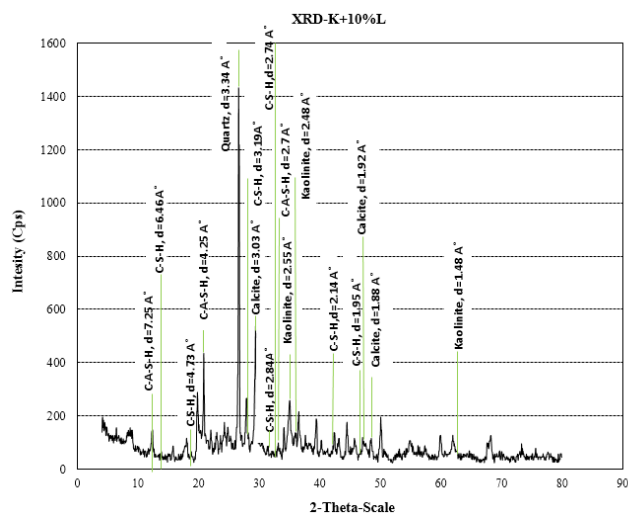
شکل ۱۱. نمودار آنالیز EDS نمونه‌ی Kaolinite از تصویر SEM شکل ۱۳



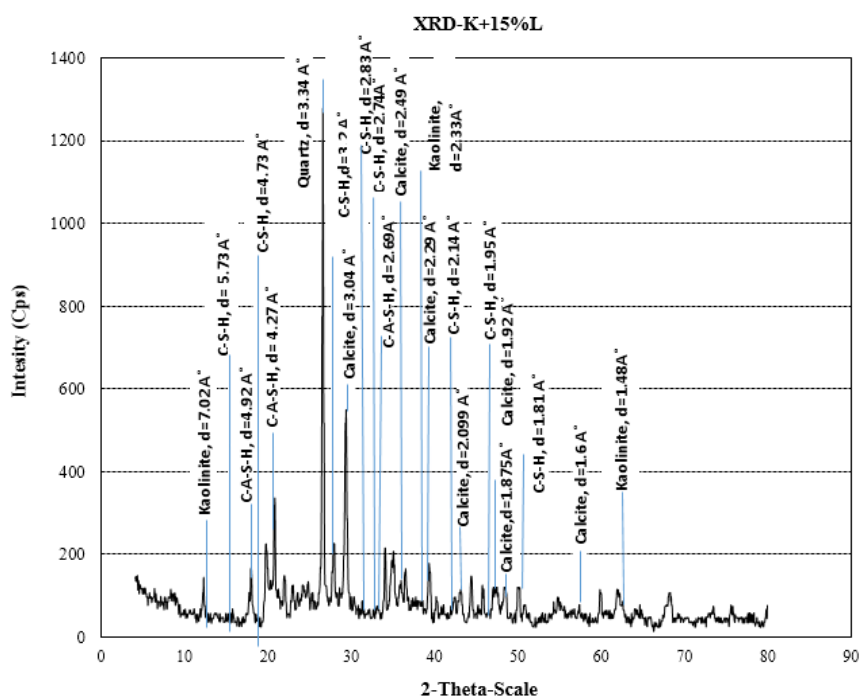
شکل ۱۲. نمودار آنالیز EDS نمونه ی K+10%L از تصویر SEM شکل ۱۴



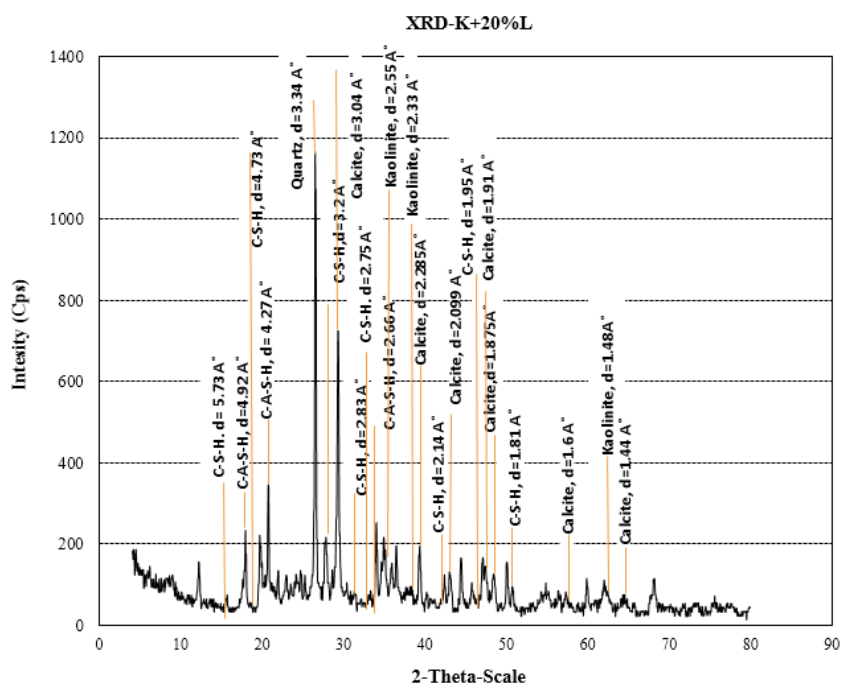
شکل ۱۳. نمودار XRD کائولینیت



شکل ۱۴. نمودار XRD نمونه ۲۸ روزه K+10%L



شکل ۱۵. نمودار XRD نمونه ۲۸ روزه K+15%L



شکل ۱۶. نمودار XRD نمونه ۲۸ روزه K+20%L

۴. نتیجه گیری

- با توجه به اینکه شاخص خمیری نمونه‌ی رسی کائولینیت مورد مطالعه ۱۱/۳ بوده و چسبندگی خاک قابل توجه نیست، نمونه‌ی طبیعی متراکم‌شده بدون آهک در مجاورت آب دوام نداشته و بلافاصله در آب فروپاشید.
- در تمام الگوهای مورد آزمایش، با افزودن میزان آهک بیش از ۱۰٪، افزایش مقاومت نمونه ناچیز بوده و لذا میزان بهینه آهک ۱۰٪ بود.
- در میزان بهینه ۱۰٪ در نمونه‌هایی که بعد از ۱۴ روز عمل‌آوری به مدت ۱۴ روز در آب مستغرق بودند، نسبت به نمونه‌هایی که بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند، به‌واسطه‌ی نفوذ آب و به دنبال آن شکسته و ضعیف شدن استحکام ترکیبات سمنتاسیون، ۶۵٪ کاهش مقاومت مشاهده شد. در نمونه‌های ۲۸ روزه که در دمای محیط عمل‌آوری شدند، تثبیت پوزولانی و استحکام ترکیبات سمنتاسیون رخ داده است.
- ثابت ماندن یا تغییرات ناچیز ساختار خاک با افزایش درصد افزودنی می‌تواند دال بر درصد بهینه ماده تثبیت کننده باشد. در همین راستا، در تصاویر SEM نمونه‌ی تثبیت شده ۱۰٪ آهک، ساختار اولیه خاک کاملاً تغییر یافته و کانی‌های اولیه در نمونه مشاهده نشد. این در حالی است که در نمونه‌های تثبیت شده با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، نسبت به نمونه تثبیت شده با ۱۰٪ آهک، تغییرات ناچیزی در تصاویر SEM مشاهده شد.
- در آنالیز XRD، ثابت شدن تعداد و شدت پیک‌های ترکیب‌های پوزولانی با افزایش درصد آهک می‌تواند دال بر درصد بهینه ماده آهک باشد.
- با توجه به جدول آنالیز عنصری EDS، در نمونه با ۱۰٪ آهک، نسبت Ca/Si، ۱/۵ بوده و همچنین در طیف حاصل از آنالیز XRD، در پیک‌های C-S-H تشکیل شده، نسبت Ca/Si، ۱/۵ است که دال بر تأیید تشکیل نوعی از ترکیب کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) در نمونه‌ی تثبیت شده با ۱۰٪ آهک می‌باشد. در نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، دقیقاً همان پیک‌های C-S-H نمونه‌ی تثبیت شده با ۱۰٪ آهک تشکیل شده که در آنها نسبت Ca/Si به ترتیب ۱/۷ و ۱/۷۵ بود.

۵. مراجع

- Abu Seif, E. S. S. 2015. "Efficiency of quicklime in reducing the swelling potential of pulverized expansive shale, northern Jeddah, Saudi Arabia". Bull. Eng. Geol. Environ., 74: 637-650.
- Ahmed, A. 2015. "Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite". Appl. Clay Sci., 104: 27-35.
- Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. 2014. "Impact of wetting-drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils". Eng. Geol., 174: 11-21.
- Alhaji, M. M. and Sadiku S. 2015. "Stabilization of clay soil using A-3 soil". Int. J. Geol. Environ. Eng., 9(10): 1272-1276.
- Al-Mukhtar, M., Khattab, S. and Alcover, J. F. 2012. "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil". Eng. Geol., 139: 17-27.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J. F. 2010. "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C". Appl. Clay Sci., 50: 191-198.
- Alzubaidi, R. and Lafta, S. 2013. "Effect of strain rate on the strength characteristics of soil-lime mixture". Geotech. Geol. Eng., 31: 1317-1327.
- ASTM, 2003. "Annual book of ASTM standards". American Society for Testing and Materials, 4.08.
- Bell, F. G. 1996. "Lime stabilization of clay minerals and soils. Eng. Geol., 42(4): 223-237.
- Calik, U. and Sadoglu, E. 2014. "Classification, shear strength and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite". Nat. Hazards, 71: 1289-1303.

- Chittoori, B. C. S., Pedarla, A., Puppala, A. J., Hoyos, L. R., Nazarian, S. and Saride, S. 2011. "Leachate studies on lime and Portland cement treated expansive clays". ASCE, GeoFront., pp. 4479-4488.
- Consoli, N. S., Prietto, P. D. M., da Silva Lopes, L. and Winter, D. 2014. "Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil". *Transport. Geotech.*, 1(3): 129-136.
- Di Sante, M., Fratolocchi, E., Mazzieri, F. and Pasqualini, E. 2014. "Time of reaction in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour". *Appl. Clay Sci.*, 99: 100-109.
- Glenn, G. R. and Handy, R. L. 1963. "Lime clay mineral reaction products". *Highway Res. Board Record*, 29: 70-83.
- Goodarzi, A. R. and Salimi, M. 2015. "Stabilization treatment of dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag". *Appl. Clay Sci.*, 108: 61-69.
- Hilt, G. H. and Davidson, D. T. 1961. "Isolation and investigation of lime-montmorillonite crystalline reaction product". *Highway Res. Board Bull.*, 304: 51-64.
- Jambor, J. 1963. "Relation between phase composition, over-all porosity and strength of hardened lime-pozzolana pastes". *Mag. Concrete Res.*, 15: 131-142.
- Jha, A. and Sivapullaiah, P. 2015. "Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil". *Eng Geol.* 198: 53-64.
- Kergoet, M. 2001. "Exemple de traitement pour déterminer l'emploi d'un sol en couche de forme". *Bull. des Labor. des Ponts et Chaussées*, 231: 19-24. (In French).
- Khemissa, M. and Mahamedi, A. 2014. "Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay". *Appl. Clay Sci.*, 95: 104-110.
- Lea, F. M. 1939. "The chemistry of pozzolanas". *Symposium on the Chemistry of Cement, Stockholm, Proceedings*, 1: 460-490.
- Leflaive, E. and Schaeffner, M. 1979. "Le traitement des sols fins à la chaux". *Bull. de Liaison des Labor. des Ponts et Chaussées*, 99: 110-118. (In French).
- Little, D. N., 1996. "Assessment of situ structural properties of lime stabilization clay subgrades". *Transport. Res. Record*, 1546: 13-23.
- Little, D. L. and Shafee Yusuf, F. A. M. 2001. "Example problem illustrating the application of the National Lime Association Mixture Design and Testing Protocol (MDTP) to ascertain engineering properties of lime-treated subgrades for mechanistic pavement design/analysis". *National Lime Association Report*, Arlington, VA.
- Locat, J., Berube, M. and Choquette, M. 1990. "Laboratory investigation on lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development". *Can Geotech. J.*, 27.
- Mahamedi, A. and Khemissa, M. 2013. "Cement stabilization of compacted expansive clay". *J. Sci. Technol.*, 3(1): 33-38.
- McCaleb, S. B. 1962. "Hydrothermal products formed from montmorillonite clay systems". *National Conference on Clays and Clay Minerals, Proceedings*, 9: 276-294.
- Metelkova, Z., Boháč, J., Sedlářova, I. and Příklad, R. 2011. "Changes of pore size and of hydraulic conductivity by adding lime in compacting clay liners". *Geotechnical Engineering: New Horizons, Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers' Conference*, Rotterdam.
- Muhmed, A. and Wanatowski, D. 2013. "Effect of lime stabilisation on the strength and microstructure of clay". *IOSR J. Mech. Civ. Eng. (IOSR-JMCE)*, 6(3): 87-94.
- Ouhadi, V. R. and Yong, R. N. 2003. "Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis". *Appl. Clay Sci.*, 23(1-4): 141-148.
- Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Amiri, M. and Ouhadi, M. H., 2014. "Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays". *Appl. Clay Sci.*, 95: 111-118.
- Puppala, A. J., Manosuthkij, M. and Chittoori, S. 2013. "Swell and shrinkage characterizations of unsaturated expansive clays from Texas". *Eng. Geol.*, 164: 187-194.
- Qubain, B. S., Saksinsky, E. J. and Li, J. 2000. "Incorporating subgrade lime stabilization into pavement design". *Transport. Res. Record*, 1721: 3-8.
- Seco, A., Ramirez, F., Miqueleiz, L. and Garcia, B. 2011. "Stabilization of expansive soils for use in construction". *Appl. Clay Sci.*, 51(3): 348-352.
- Setra, 2007. "Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques- Application à la réalisation des assises de chaussées". *Guide Technique, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Bagneux Cedex, France.* (In French).
- Transportation Research Board. 1987. "Lime stabilization". *National Research Council, Washington, D.C.*, pp. 1-54.

- Zhao, H., Liu, J., Guo, J., Zhao, C. and Gong, B. 2014. "Reexamination of lime stabilization mechanisms of expansive clay". ASCE, J. Mater. Civ. Eng., 27(1).
- Zukri, A. 2013. "Pekan soft clay treated with hydrated lime as a method of soil stabilizer". Proc. Eng., 53: 37-41.