

# تأثیر میزان نوع و درصد کانی رسی در خواص خاک‌های رسی تشبیت شده با آهک

ساناز سلطانی نژاد (کارشناس ارشد)

صلاح الدین حمیدی (دانشجوی دکتری)

سید مرتضی مرنندی\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۱۲-۳-۲)  
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۱/۴، ص. ۱۲-۳

یکی از پارامترهای مهم در نتایج تشبیت خاک‌های رسی، درصد و نوع کانی‌های رسی موجود در خاک است که در روش‌های متداول تشبیت با آهک، به آن توجه کمتری شده است و بنابراین، نتایج روش‌های مذکور مغایرت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. در همین راستا، در پژوهش حاضر به منظور انجام مطالعات ریزساختاری و درشت‌ساختاری فرایند تشبیت، ترکیب‌های مختلف بنتونیت و کائولینیت که حاوی انواع و درصدهای مختلف کانی‌های رسی هستند، با درصدهای مختلف آهک آزمایش شده‌اند. بر روی نمونه‌های مورد مطالعه پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری، آزمایش‌های تک‌محوری انجام شد. در راستای انجام مطالعه‌ی ریزساختاری، عکس‌های SEM مطالعه شدند. نتایج مطالعات انجام شده، بیانگر آن است که تشبیت با آهک موجب افزایش حدود ۲ تا ۱۰ برابری مقاومت تک‌محوری نمونه‌های رسی نرم می‌شود. لازم به ذکر است که اندرکنش خاک - افزودنی، میزان پیشرفت واکنش‌های پوزولانی طی زمان، ترکیب بهینه‌ی خاک و آهک و نیز بازدهی فرایند تشبیت به شدت وابسته به انواع و درصد کانی‌های رسی موجود در خاک است.

sanaz.soltaninejad86@yahoo.com  
s.hamidi@eng.uk.ac.ir  
marandi@uk.ac.ir

واژگان کلیدی: SEM آهک، کائولینیت، بنتونیت، مقاومت تک‌محوری.

## ۱. مقدمه

تجمع زیاد یون‌های  $Ca^{2+}$  در سیال منفذی، موجب کاهش ضخامت لایه‌ی دوگانه، مجتمع شدن و لخته‌شدن ذرات رسی می‌شود که در نتیجه دانه‌های رس مجتمع می‌شوند و به صورت کلوخه‌های بزرگ‌تر در می‌آیند و نشانه‌ی خمیری خاک بلافاصله کاهش می‌یابد. همچنین کارایی و مقاومت آنی خاک بهبود می‌یابد که کل فرایند مذکور موجب بهبود کوتاه‌مدت خصوصیات مقاومتی و رفتاری خاک خواهد شد.<sup>[۱۲-۱۴]</sup> به‌طور هم‌زمان pH مخلوط خاک - آهک به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد و به مقدار ۱۲٫۴ که نشان‌دهنده‌ی وقوع فرایندهای پوزولانی است، می‌رسد.<sup>[۱۳]</sup> شرایط pH قلیایی بالا منجر به انحلال یون‌های  $Si^{4+}$  واکنشی و یون‌های  $Al^{3+}$  موجود در کانی‌های خاک می‌شود.<sup>[۱۴]</sup> به دنبال آن واکنش‌های پوزولانی بین یون‌های  $Ca^{2+}$  آزاد از آهک و یون‌های  $Al^{3+}$  و  $Si^{4+}$  از خاک، تشکیل کلسیم سیلیکات و آلومینات می‌دهند که پس از آن ترکیب‌های مذکور هیدراته می‌شوند و در حضور آب کافی، تشکیل ترکیب‌های نانوساختار C-S-H، C-A-S-H و C-A-S-H می‌دهند.<sup>[۱۵-۱۹]</sup> واکنش‌های پوزولانی در یک مدت طولانی، بسته به ماهیت و میزان دسترسی به کانی‌های رسی واکنش‌دهنده در یک خاک، نهایتاً منجر به افزایش چشم‌گیری در مقاومت، سختی و دوام خاک‌های تشبیت شده می‌شوند.<sup>[۲۰-۲۱]</sup> درصد بهینه‌ی آهک افزوده شده به خاک در محل، در ابتدا به

از هنگام شروع احداث راه‌های مدرن، مهندسان پیوسته برای ایجاد رویه‌های بهتر با هزینه‌ی کمتر کوشش کرده‌اند و روش‌های گوناگونی در این خصوص به‌کار برده شده است. یکی از روش‌های ذکر شده‌ی موفقیت‌آمیز، تشبیت خاک‌های محلی با استفاده از مواد چسباننده است. آهک نسبتاً ارزان است و اغلب می‌تواند برای به وجود آوردن تغییراتی که خواص مهندسی خاک را بهبود بخشد، استفاده شود. از آنجایی که آهک محصولی است که می‌تواند در بسیاری از کشورها به صورت ارزان تولید شود، لذا روش تشبیت خاک با آهک می‌تواند صرفه‌جویی‌های اقتصادی در پروژه‌ها به وجود آورد.<sup>[۷-۱۱]</sup> زمانی که آهک هیدراته به شکل  $Ca(OH)_2$  با خاک در حضور رطوبت کافی ترکیب می‌شود، یون‌های  $Ca^{2+}$  و یون‌های  $OH^-$  در محلول منفذی جدا می‌شوند و در نتیجه pH محلول خاک زیاد می‌شود که منجر به تبادل کاتیون‌های  $Ca^{2+}$  از آهک با کاتیون‌های یک ظرفیتی  $Na^+$  و  $K^+$  موجود در لایه‌ی دوگانه‌ی کانی‌های رسی خاک با بار الکتریکی منفی می‌شود.<sup>[۸-۱۲]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۴/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۲/۲، پذیرش ۱۳۹۷/۱/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2018.2226.2139

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه‌های رسی بنتونیت و کاتولینیت مورد مطالعه.

مشخصات	کاتولینیت	بنتونیت
کانی‌های اصلی در آنالیز XRD	کاتولینیت، دیکیت، هالوزیت، کوارتز و کلسیت	مونت موریلونیت، کوارتز، کربنات و کاتولینیت
حد روانی (%)	۳۰٫۳	۹۹٫۱
حد خمیری (%)	۱۹	۲۷٫۳
شاخص خمیری (%)	۱۱٫۳	۷۱٫۸
ماسه (%)	۳۶٫۶	۶٫۸
سیلت (%)	۴۴٫۴	۲۶٫۲
رس (%)	۱۹	۶۷
طبقه‌بندی متحد	CL	CH
رنگ	قهوه‌یی	شیری

جدول ۲. مشخصات الگوهای ترکیبی خاک رس کاتولینیت و بنتونیت.

نام ترکیب	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	شاخص خمیری	طبقه‌بندی متحد
K	۳۰٫۳	۱۹	۱۱٫۳	CL
۸۰K+۲۰B	۴۵٫۵۶	۲۰	۲۵٫۵۶	CL
۶۰K+۴۰B	۵۷٫۱۴	۲۲٫۲۴	۳۴٫۹	CH
۶۰B+۴۰K	۷۲٫۳۴	۲۴	۴۸٫۳۴	CH
۸۰B+۲۰K	۸۵	۲۵	۶۰	CH
B	۹۹٫۱	۲۷٫۳	۷۱٫۸	CH

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. مواد مصرفی و روش انجام آزمایش

در پژوهش حاضر، از دو نمونه خاک رسی کاتولینیت و بنتونیت استفاده شده است. کاتولینیت مورد استفاده در پژوهش حاضر به صورت پودری قهوه‌یی رنگ متمایل به زرد است که از معدن واقع در جنوب شرق ایران واقع در زرنند کرمان تهیه شده است. نمونه‌ی رسی بنتونیت مورد استفاده، از معدن واقع در جنوب شرق ایران - کرمان تهیه شده است. بخشی از مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه‌های رسی کاتولینیت و بنتونیت در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به تولید و کاربرد فراوان آهک در تثبیت خاک‌های رسی از آهک به عنوان تثبیت کننده استفاده شده است. آهک مورد استفاده از جنوب شرق ایران، کارخانه‌ی شادمان واقع در جاده‌ی زرنند کرمان تهیه شده است.

آزمایش‌های انجام شده، شامل: چگالی ویژه، دانه‌بندی، حدود اتربرگ و درصد رطوبت براساس دستورالعمل‌های استاندارد ASTM انجام شد. (ASTM، ۱۹۹۴) به منظور مطالعه‌ی ریزساختاری فرایند تثبیت انجام شده، عکس‌های میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM) انجام شده است. آنالیز SEM براساس Jeol-۸۴۰A Jsm انجام شد. آنالیز SEM توسط دستگاه مربوط به دانشگاه علم و صنعت مدل TESCAN VEGA//XMU انجام شده است.

### ۲.۲. آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، خاک کاتولینیت با بنتونیت کلسیمی در نسبت‌های مختلف مطابق با جدول ۲، با هم ترکیب شدند. هر ترکیب یا به عبارت بهتر، هر الگو با مقادیر

عوامل مختلفی، همچون: درجه‌ی بهسازی مطلوب، نوع خاک و میزان رس، نوع آهک و شرایط آب و هوایی غالب بستگی دارد. همان‌گونه که ذکر شد، پژوهش‌های قابل توجهی توسط پژوهشگران مختلف درخصوص تثبیت خاک‌های رسی با آهک انجام شده است، همچنین فرمول‌های تجربی متفاوتی برای تعیین درصد آهک بهینه ارائه شده است، [۳۷-۳۲] اما علی‌رغم تأثیر قابل توجه نوع و درصد کانی‌های رسی موجود در خاک در رفتار خاک‌های تثبیت شده با آهک، مطالعات جامعی درخصوص تأثیر نوع و درصد کانی‌های رسی در فرایند تثبیت با آهک انجام نشده است، بنابراین در پژوهش حاضر در راستای انجام مطالعات جامع، ۲ نمونه خاک رسی بنتونیت و کاتولینیت که حاوی کانی‌های مختلف رسی بودند و نیز ترکیب‌های مختلف آن‌ها مطالعه شده است. در همین راستا، ترکیب‌های مختلف نمونه‌های رسی بنتونیت و کاتولینیت با یکدیگر ترکیب و با درصدهای مختلف آهک، شامل: ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد تثبیت شد. نتایج مطالعات انجام شده بیانگر آن است که الگوی  $60\text{Kaol}+40\text{Bent}$  با افزودن آهک حتی با کمترین درصد آهک مورد استفاده، مقاومت ۲۸ روزه‌ی آن نسبت به ۷ روزه، تقریباً به میزان ۱۰۰٪ افزایش نشان داده است. افزایش مقاومت ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه، حاکی از میزان پیشرفت قابل توجه واکنش پوزولانی الگوی خاک  $60\text{Kaol}+40\text{Bent}$  با کمترین درصد آهک است. ذکر این نکته ضروری است که هدف در پژوهش حاضر، تعیین الگوی اختلاطی بهینه نیست، بلکه همان‌طور که گفته شد، هدف، مطالعه‌ی تأثیر نوع و درصد کانی‌های رسی در فرایند تثبیت پوزولانی است. برای انجام مطالعات، مجموعه‌ی آزمایش‌های درشت‌ساختاری و ریزساختاری شامل آزمایش‌های تک‌محوری و عکس‌های میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) انجام و بازده روش تثبیت براساس نتایج مطالعه شده است.

جدول ۳. چگالی و درصد رطوبت نسبت‌های ترکیبی خاک رس کائولینیت و بنتونیت.

نام ترکیب	چگالی خشک	رطوبت
K	۱٫۳۵	۲۳
۸۰K+۲۰B	۱٫۲۵	۲۵
۶۰K+۴۰B	۱٫۲	۲۷
۶۰B+۴۰K	۱٫۱	۲۸
۸۰B+۲۰K	۱	۳۰
B	۰٫۹	۳۲

۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد آهک به صورت جداگانه در حالت خشک کاملاً مخلوط شدند، تا زمانی که مخلوط ظاهری یکنواخت و همگن پیدا کند. تمامی مواد با استفاده از روش جایگزینی تکمیلی<sup>[۳۸]</sup> با هم مخلوط شدند سپس رطوبت مورد نظر به ترکیب اضافه و کاملاً مخلوط شدند و تا زمانی که مخلوط نهایی یک توزیع رطوبتی یکنواخت به خود بگیرد، مخلوط کردن ادامه یافته است. سپس به منظور نرم شدن ترکیب، مخلوط با آهک به مدت ۱ ساعت و خاک بدون آهک به مدت ۳۶ ساعت قبل از کوبیدن در کیسه‌ی پلاستیکی زیپ‌دار قرار داده شد. قبل از فرایند تراکم، مخلوط داخل کیسه‌ی پلاستیکی زیپ‌دار از الک ۱۰ عبور داده شد. این کار هم سبب توزیع یکنواخت آهک و هم مانع از تشکیل ذرات به صورت کلوخه‌های بزرگ می‌شود. نمونه‌ها در قالب تک‌محوری به ارتفاع  $76\text{ mm}$  و قطر  $38\text{ mm}$  با روش چگالی کنترل ساخته شدند، به طوری که چگالی خشک و درصد رطوبت در تمامی نمونه‌های هر الگو براساس جدول ۳ یکسان در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که رطوبت نمونه‌ها در حدود حد خمیری الگوهای مورد مطالعه بوده است، همچنین چگالی خشک ارائه شده در جدول مذکور به صورت روش انرژی - کنترل به صورت جداگانه برای هر نمونه به دست آمد و چگالی خشک حاصل برای هر الگوی مورد مطالعه برای تمام درصد‌های آهک (به شرح جدول ۳) یکسان در نظر گرفته شد؛ به عبارت بهتر، پس از تعیین چگالی خشک با استفاده از روش انرژی - کنترل، نمونه‌ها با استفاده از روش چگالی - کنترل بازسازی شدند. استفاده از روش انرژی - کنترل هم‌خوانی مناسبی با شرایط واقعی تراکم در محل دارد. چگالی نمونه‌ها با انرژی تراکم برابر با انرژی تراکم آزمایش تراکم استاندارد به دست آمد. بعد از ساخت هر نمونه، به منظور جلوگیری از ثابت ماندن رطوبت نمونه، دور آن طلقی پیچیده و داخل کیسه‌ی پلاستیکی زیپ‌دار قرار داده شد. لازم به ذکر است که دمای عمل‌آوری نمونه‌ها در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، تقریباً ثابت و برابر با ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. همچنین رطوبت نسبی عمل‌آوری نمونه‌ها  $98 \pm 2$  بوده است که برای مدل‌سازی کردن 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 بر روی کیسه‌ی پلاستیکی زیپ‌دار که نمونه‌های ساخته شده داخل آن قرار داده شده بودند، کشیده و به صورت مرتب خیس شدند تا شرایط رطوبت نسبی مورد نظر ایجاد شود. این رویه به مدت ۷ و ۲۸ روز برای انجام آزمایش‌ها روی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. لازم به ذکر است که نمونه‌های شاهد نیز به مدت ۹۰ روز عمل‌آوری شدند. پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. آزمایش فشاری محدود نشده این مزیت را دارد که تنش‌ها و کرنش‌ها به شکل یکنواخت در نمونه ایجاد می‌شود و همچنین عموماً سطح شکست در ضعیف‌ترین قسمت نمونه‌ی رسی اتفاق می‌افتد. همچنین آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر،

به صورت کرنش - کنترل براساس ASTM D۲۱۶۶-۸۷ انجام شدند.<sup>[۳۹]</sup>

لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر به منظور اختصار و جلوگیری از تکرار، نمونه‌ی رسی بنتونیت با Bent و نمونه‌ی رسی کائولینیت با Kaol نشان داده شده است. الگوی نمونه‌های مورد آزمایش به این شرح است: ۱. Kaol ۱۰٪، ۲. Bent ۲۰٪، ۳. Kaol+۸۰٪ Bent ۴۰٪، ۴. Kaol+۶۰٪ Bent ۴۰٪، ۵. Bent ۸۰٪+Kaol ۲۰٪.

در اینجا توجه به این نکته ضروری است عواملی که در خواص مقاومتی و رفتاری خاک‌ها تأثیر می‌گذارند، در بیشتر موارد به طور هم‌زمان عمل می‌کنند و بنابراین ایزوله و جدا کردن اثر هر کدام از عوامل به تنهایی دشوار است. رس‌ها عموماً بیشتر از یک نوع کانی رسی را شامل می‌شوند. علاوه بر آن، حتی نمونه‌هایی که یک نوع کانی رسی دارند، اما سرمنشأ متفاوت دارند، ممکن است تغییرات قابل توجهی در خواص فیزیکی‌شان نشان دهند. لذا برای رفع مشکل ذکر شده، به دنبال ساخت مخلوط‌های آماده‌ی مصنوعی از کانی‌های رس خالص هستند. این موضوع اجازه می‌دهد تا یک ایده‌ی شفاف برای ارتباط بین نوع و درصد کانی رسی و خصوصیات رفتاری و مقاومتی خاک‌های رسی حاصل شود. بدیهی است که قرار نیست برای تثبیت رس با آهک، ترکیب کانی‌های آن با افزودن کائولینیت و بنتونیت تغییر داده شود، بلکه هدف آن است با درصد‌های مشخص از کانی‌های رسی، تعیین شود که درصد بهینه‌ی آهک چه مقدار است و درصد و نوع کانی‌های رسی چه تأثیری در درصد بهینه‌ی آهک مصرفی و بازدهی فرایند تثبیت دارد.

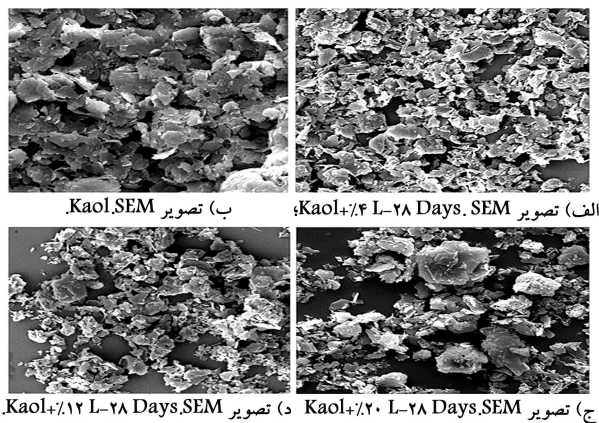
### ۳. تجزیه و تحلیل نتایج

تشکیل کریستال‌های بلوری C-A-H، C-S-H و C-A-S-H، در مقیاس میکرو و نانو، نشان‌دهنده‌ی انجام واکنش پوزولانی است. اما موارد مهمی که در مقیاس درشت ساختاری و پروژه‌های معمول ژئوتکنیکی، نشان‌دهنده‌ی انجام واکنش پوزولانی هستند، به این شرح است: ۱. افزایش مقاومت نمونه‌ی خاک تثبیت شده نسبت به نمونه‌ی تثبیت نشده، ۲. نرخ رشد مقاومت نمونه‌ی ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌ی ۷ روزه. لازم به ذکر است که در مطالعه‌ی اندرکنش ریزساختاری کانی‌های رسی و آهک، مطالعات عکس‌های SEM و خصوصاً انجام آنالیز پراش پرتو اشعه‌ی ایکس (XRD)، قابل اطمینان‌ترین آزمایش‌ها جهت تعیین نوع ترکیب‌های هیدراته شکل گرفته است. لازم به ذکر است که رفتار درشت ساختاری خاک‌های رسی، تابع خصوصیات و اندرکنش‌های ریزساختاری آن‌ها در مقیاس نانو و میکرو است.

#### ۳.۱. تجزیه و تحلیل نمونه‌ی رسی کائولینیت تثبیت شده با آهک

با توجه به زیاد بودن تعداد نمونه‌های مورد آزمایش، در پژوهش حاضر فقط نمودارهای تنش - کرنش کائولینیت و بنتونیت ارائه شده است. همچنین به منظور تجزیه و تحلیل هم‌زمان آزمایش‌های ریزساختاری و درشت ساختاری و نیز بررسی میزان هم‌خوانی و صحت نتایج به دست آمده در دو مقیاس ریزساختاری و درشت ساختاری پس از ارائه‌ی نتایج آزمایش‌های تک‌محوری، نتایج ریزساختاری بر پایه‌ی عکس‌های SEM نیز تجزیه و تحلیل شده‌اند.

در شکل‌های ۱ و ۲، به ترتیب نمودار تنش - کرنش نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه کائولینیت مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، در الگوی مذکور با افزودن ۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه، ۱۴ برابر و مقاومت ۷ روزه، ۸٫۵ برابر نسبت به مقاومت نمونه‌ی خاک تثبیت نشده افزایش پیدا کرده است. افزایش مقاومت نمونه‌ی مورد نظر می‌تواند

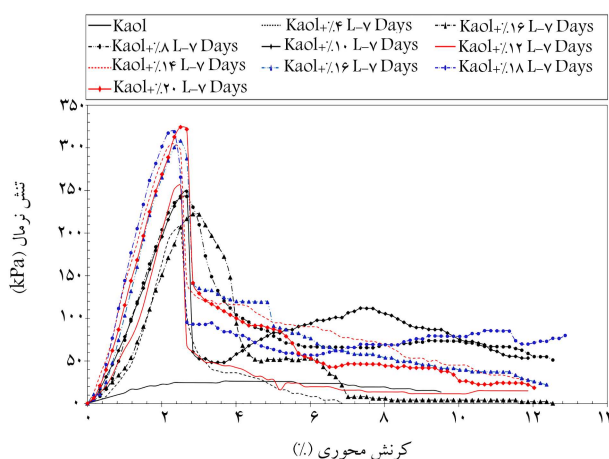


شکل ۳. عکس‌های SEM نمونه‌ی رسی کائولینیت.

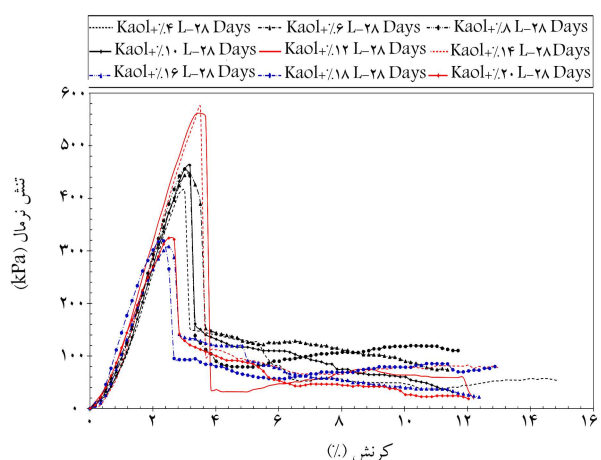
(CSH) و کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) شده است که این مواد چسباننده، ذرات خاک را به هم می‌چسبانند و سبب می‌شوند که خلل و فرج خاک کمتر شود و حفره‌های موجود در خاک کمتر مشاهده شود. با افزایش درصد آهک از ۰.۴٪ به درصد‌های بیشتر، ترکیب‌های مقاوم CSH و CAH در حضور یون کافی کلسیم تشکیل می‌شوند و افزایش مقاومت قابل توجه در درصد آهک بیشتر از ۰.۴٪ را می‌توان به حضور یون کافی کلسیم در واکنش‌ها نسبت داد. ترکیب‌های سیمانی شده‌ی مذکور به شکل توده یا کلوخه‌های سفید مطابق شکل (۳ج)، در درصد‌های بالاتر آهک قابل مشاهده است. با بیشتر شدن درصد آهک، ذرات نمونه توپ‌تر شده و با اضافه کردن آهک به میزان ۰.۲٪، مطابق شکل (۳د)، ساختار اولیه‌ی نمونه به دلیل تشکیل ترکیب‌های لخته شده‌ی حاصل از فرایندهای پوزولانی و ساختار کانی کاملاً تغییر یافته و تقریباً با ساختار مجتمع جایگزین شده است. می‌توان نتیجه گرفت که ویژگی‌های ریزساختاری خاک‌های رسی به‌طور مؤثری تابع درصد آهک است. مطابق شکل‌های ۱ و ۲، با افزودن ۰.۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به اندازه‌ی ۶۶.۷٪ افزایش داشته است که نشان‌دهنده‌ی پیشرفت واکنش پوزولانی و حاکی از واکنش دادن خاک با آهک است. با افزودن ۰.۶٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به مقاومت ۱۰۰٪ افزایش داشته است که مجدداً بیانگر پیشرفت واکنش پوزولانی خاک رسی مذکور با ۰.۶٪ آهک با گذشت زمان است. با افزودن ۰.۱۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به اندازه‌ی ۶۷.۹٪ و تقریباً به اندازه‌ی ۷۰٪ افزایش داشته و مقدار بیشینه‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری هم برای ۷ روزه و هم برای ۲۸ روزه اتفاق افتاده است. افزایش ۷۰ تا ۱۰۰ درصدی مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه حاکی از واکنش دادن خاک رسی مذکور با آهک و به عبارت بهتر، حاکی از واکنش دادن کانی اصلی آن یعنی کائولینیت با آهک و تشکیل کریستال‌های بلوری در نتیجه‌ی انجام شدن واکنش پوزولانی است. لازم به ذکر است که برای نمونه در مدت عمل‌آوری ۲۸ روز با افزودن ۰.۱۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه فقط ۰.۲٪ نسبت به نمونه‌ی تثبیت شده با ۰.۶٪ آهک افزایش داشت، یعنی با افزودن ۰.۸٪ آهک بیشتر، مقاومت به مقدار ۰.۲٪ افزایش یافته است که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست و بنابراین درصد بهینه‌ی آهک بهتر است ۰.۶٪ در نظر گرفته شود.

### ۲.۳. تجزیه و تحلیل نمونه‌ی رسی بنتونیت تثبیت شده با آهک

در شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب نمودار تنش - کرنش نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه بنتونیت مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه با



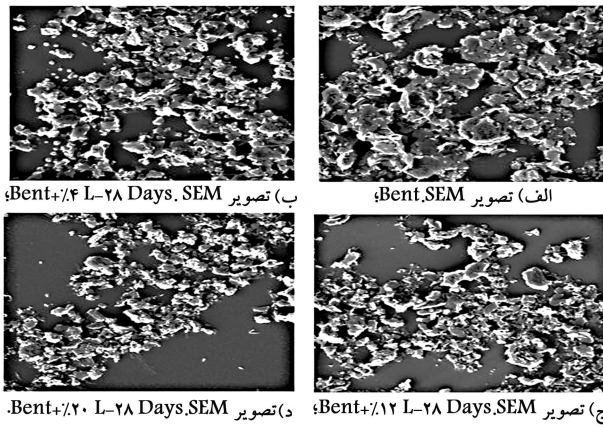
شکل ۱. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ی رسی کائولینیت حاوی درصد‌های مختلف آهک (۷ روزه).



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ی رسی کائولینیت حاوی درصد‌های مختلف آهک (۲۸ روزه).

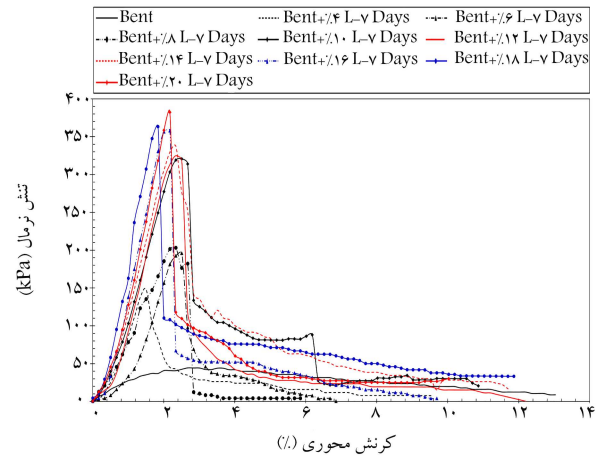
دال بر انجام شدن واکنش پوزولانی باشد. افزایش قابل توجه مقاومت نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ آهک، به واسطه‌ی شروع واکنش‌های پوزولانی ناشی از تشکیل ساختار لخته شده<sup>۱</sup> است. با افزایش درصد آهک، عملاً ضمن پیشرفت واکنش‌های پوزولانی، شامل شکل‌گیری ترکیب‌های هیدراته‌ی CSH و CAH، بخشی از خاک با مقاومت کم با آهک جایگزین می‌شود؛ لذا در درصد‌های آهک بیشتر، افزایش بیشتر مقاومت مشاهده می‌شود.

در ادامه، به منظور بررسی اندرکنش ریزساختاری خاک و افزودنی آهک، عکس‌های SEM نمونه‌ی رسی کائولینیت در شکل‌های (۳الف تا ۵د) مشاهده می‌شود. بررسی تصاویر SEM بیانگر آن است که نمونه‌ی خاک رس کائولینیت بدون اضافه کردن آهک، بافت و ساختار ورقه‌یی از صفحات شش ضلعی کانی کائولینیت دارد. یا به عبارت دیگر، ساختار پولکی شکل از صفحاتی با لبه‌های سوزنی دارد که خلل و فرج و حفره‌های بزرگ در خاک قابل مشاهده است. مطابق شکل (۳ب)، با افزودن ۰.۴٪ آهک، سطح نمونه دارای تراکم نسبی بیشتری در مقایسه با خاک بدون حضور ماده‌ی افزودنی آهک است. ساختار خاک به مراتب در هم‌تراز و اندازه‌ی ذرات خاک به مراتب ریزتر می‌شود، افزایش درصد آهک موجب نزدیک شدن فاصله‌ی بین پولک‌ها و تشکیل ساختار مجتمع یا لخته‌یی شده است. در واقع واکنش پوزولانی خاک با آهک موجب تشکیل ترکیب‌های سیمانی شده‌ی کلسیم سیلیکات هیدرات

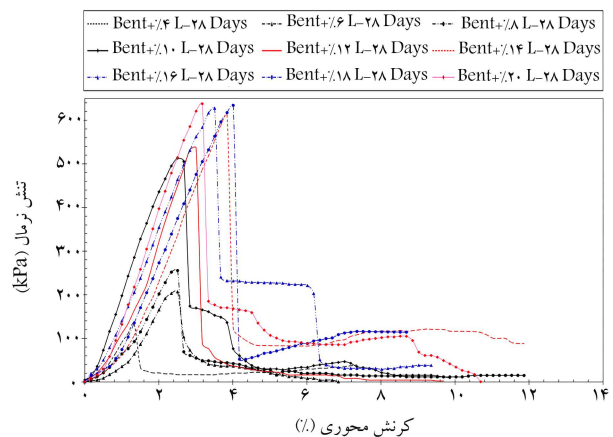


شکل ۶. عکس‌های SEM نمونه‌ی رسی بتونیت طبیعی و بتونیت حاوی ۴، ۱۲ و ۲۰ درصد آهک.

افزودن ۴٪ آهک، ساختار خاک به مراتب دره‌تر شده و اندازه‌ی ذرات خاک ریزتر شده است، اما نمونه‌ی بتونیت تثبیت شده با ۴٪ آهک هنوز همان آرایش ساختاری را دارد و از دیدگاه نوع کانی، همان ساختار نمونه‌ی رسی بتونیت تثبیت نشده را دارد، با این تفاوت که فقط ذرات ریزتر شده‌اند. همچنین با مشاهده‌ی تصاویر SEM در شکل‌های (الف و ب)، می‌توان اظهار داشت که هنوز کانی رسی دو نمونه‌ی بدون آهک و ۴٪ آهک تغییری نکرده و این مسئله حاکی از آن است که واکنش پوزولانی که منجر به تشکیل ترکیب‌های هیدراته‌ی آهک و خاک می‌شود، انجام نشده است. مطابق شکل‌های (ج و د)، در درصد آهک بیشتر از ۴٪ به دلیل حضور یون کافی کلسیم در واکنش‌ها، واکنش پوزولانی پیشرفت کرده است. در اینجا دو مسئله مطرح است: اول ریزش حفره‌ها به واسطه‌ی مجتمع یا لخته شدن مجموعه‌ی پولک‌های رسی و دوم پدیده‌ی میچاله شدن تک‌پولک رسی به واسطه‌ی واکنش‌های پوزولانی. در درصد‌های کم آهک، خلل و فرج و حفره‌های بزرگ در نمونه قابل مشاهده است. با افزودن آهک، به واسطه‌ی واکنش‌های پوزولانی و مجتمع شدن ذرات حفره‌های موجود بین ذرات مجتمع رسی ریزتر شده‌اند، همچنین به واسطه‌ی پدیده‌ی میچاله شدن پولک‌های رسی ریزتر به نظر می‌رسند. در مقیاس درشت‌ساختاری نیز در نمونه‌ی رسی بتونیت تثبیت شده با ۶٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه، ۴۰٪ و در ۸٪ آهک، ۲۵٪ افزایش یافته است که در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت شده با ۴٪ آهک، افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی ۶ و ۸ درصد آهک، نشان دهنده‌ی پیشرفت بیشتر واکنش پوزولانی است. در مقدار ۱۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به اندازه‌ی ۷۰٪ افزایش داشته است که احتمالاً به دلیل بیشتر فعال شدن عمل ترکیب‌های سیمانی شده در دوره‌ی طولانی‌تر گیرش و بنابراین انجام واکنش‌های پوزولانی خاک و آهک است. احتمال آن می‌رود تکمیل واکنش پوزولانی نمونه‌ی رسی بتونیت به واسطه‌ی سطح مخصوص زیاد و توانایی جذب قابل توجه آن، در مقدار ۱۴٪ با آهک انجام شده باشد. با توجه به نمودارهای تنش - کرنش در شکل‌های ۴ و ۵، علی‌رغم آنکه با افزودن ۱۴٪ آهک در ۷ و ۲۸ روز، زمان عمل‌آوری مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری بیشینه است ولی مقدار آن در ۷ روز زمان عمل‌آوری نسبت به نمونه با ۱۰٪ آهک به مقدار کمتر از ۱۷٪ و در ۲۸ روز زمان عمل‌آوری کمتر از ۱۷٪ افزایش نشان داده است. به عبارت دیگر، افزودن ۴٪ آهک بیشتر نسبت به نمونه‌ی تثبیت شده با ۱۰٪ آهک، مقاومت نمونه‌ی ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب به میزان تقریبی ۱۷/۵ و ۱۷ درصد افزایش نشان داده است. بنابراین مقادیر افزایش

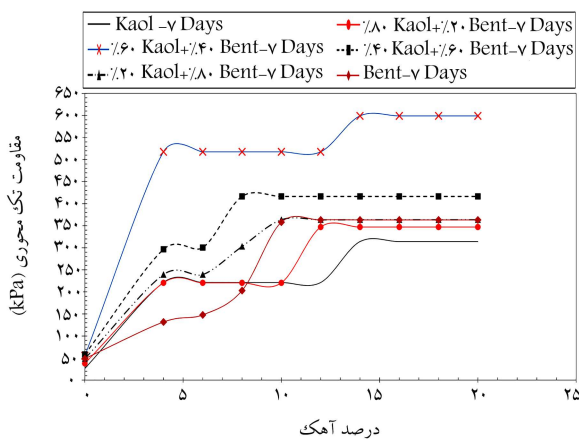


شکل ۴. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ی رسی بتونیت حاوی درصد‌های مختلف آهک (۷ روز).

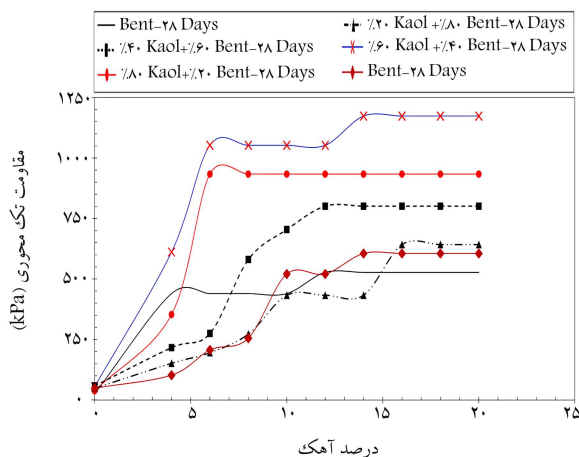


شکل ۵. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ی رسی بتونیت حاوی درصد‌های مختلف آهک (۲۸ روز).

۴٪ آهک، به ترتیب ۲۷/۱ و ۲۸/۱ برابر نمونه‌ی خاک طبیعی بدون آهک شده است. در نمونه‌ی تثبیت شده با ۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نه فقط نسبت به مقاومت ۷ روزه افزایش نداشته است، بلکه حتی کمتر هم شده است که خود حاکی از آن است که هنوز شرایط واکنش خاک و آهک فراهم نشده و احتمالاً واکنش‌های پوزولانی به صورت کامل در دمای اتاق صورت نگرفته است. زیرا واکنش پوزولانی خاک بتونیت با آهک در دمای ۵ تا ۲۳ درجه، در درصد‌های زیاد آهک انجام می‌شود و برای نمونه‌های بتونیت با نسبت های کم C/S در دماهای عمل‌آوری ۴۰ درجه و بالاتر بازدهی دارند.<sup>[۴۰]</sup> نتایج ریزساختاری حاصل از تصاویر SEM در شکل‌های (الف و ب)، تغییرات در مقاومت تک‌محوری نمونه‌ی حاوی ۴٪ آهک را تأیید می‌کند و هر دو حاکی از انجام نشدن واکنش‌های پوزولانی است. مطابق شکل ۶، در مقیاس ریزساختاری، نمونه‌ی خاک طبیعی بتونیت از توده‌هایی که بر روی هم قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. با مقایسه‌ی عکس‌های SEM نمونه‌ی رسی کاتولینیت حاوی ۴٪ آهک با نمونه‌ی رسی بتونیت حاوی ۴٪ آهک، می‌توان بیان کرد که در کاتولینیت، آنقدر ذرات رس مجتمع شده‌اند و آرایش ساختاری نمونه به دلیل انجام شدن واکنش پوزولانی و تشکیل ساختارهای کلوخه شده تغییر کرده است که حتی می‌توان گفت ساختار کانی رسی آن تا حد قابل توجهی تغییر کرده است، اما در نمونه‌ی رسی بتونیت مطابق با شکل‌های (الف و ب)، با



شکل ۷. نمودار تغییرات مقاومت تک محوری ۷ روزه برحسب تغییرات درصد آهک.



شکل ۸. نمودار تغییرات مقاومت تک محوری ۲۸ روزه برحسب تغییرات درصد آهک.

به ترتیب به اندازه‌ی ۳۶/۵، ۱۸ و ۸ درصد کاهش یافته است. با افزودن ۱۰٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به میزان ۲۰٪ افزایش یافته است. تثبیت نمونه‌ی مورد مطالعه با مقادیر آهک کمتر از ۱۶٪، پیشرفت قابل ملاحظه‌ی در واکنش الگوی اخیر خاک با آهک به همراه نداشته است؛ اما با افزودن ۱۶٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به میزان ۷۷٪ افزایش یافته است. در نمونه‌های ۷ روزه با افزودن بیشتر از ۱۰٪ آهک، مقاومت ۷ روزه تقریباً ثابت باقی مانده است. افزودن آهک بیشتر از ۱۰٪، باعث افزایش مقاومت کوتاه مدت نمونه‌ی ۷ روزه نشده است، اما در زمان گیرش طولانی‌تر یعنی ۲۸ روز، مقاومت افزایش یافته است. لازم به ذکر است با توجه به اهمیت مقاومت‌های بلندمدت در محاسبات ظرفیت باربری و نشست پی، از دیدگاه مهندسی مقاومت‌های بلندمدت معیار مناسب‌تری برای تعیین بازدهی روش‌های بهسازی است. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان اظهار داشت که افزودن ۲۰٪ خاک کائولینیت به نمونه‌ی رسی بنتونیت، تغییرات قابل توجهی در بهبود رفتار مقاومتی نمونه‌ی رسی بنتونیت نداشته و حتی در درصد‌های کم آهک، اثر منفی در مقاومت‌های بلندمدت آن داشته است. در ادامه، با مقایسه‌ی تصاویر SEM شکل‌های ۹الف و ۹ب، نمونه با ۱۶٪ آهک نسبت به نمونه‌ی طبیعی توپرتر و نوع کانی مشاهده شده تغییر کرده است که بیانگر موفقیت‌آمیز بودن تثبیت با میزان ۱۶٪ آهک است.

#### ۲.۴.۳. الگوی ۶۰٪ Kaol + ۴۰٪ Bent با آهک

مطابق شکل‌های ۷ و ۸، با افزودن ۴ و ۶ درصد آهک به نمونه‌ی Kaol ۴۰٪

مقاومت مذکور به ازاء افزایش درصد قابل توجه ۴٪ آهک، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست و بنابراین درصد بهینه‌ی آهک برای نمونه‌ی رسی بنتونیت، ۱۰٪ است.

#### ۳.۳. بررسی تأثیر نوع کانی رسی در نمونه‌های رسی کائولینیت و بنتونیت بر بازدهی تثبیت با آهک

با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، در نمونه‌ی رسی کائولینیت با افزودن ۴٪ آهک، واکنش پوزولانی آن در دوره‌ی طولانی‌تر عمل‌آوری به اندازه‌ی پیشرفت داشته است که مقاومت فشاری محدود نشده‌ی ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه به اندازه‌ی تقریباً ۷۰٪ افزایش یافته است، اما در نمونه‌ی رسی بنتونیت مطابق با شکل‌های ۴ و ۵، با افزودن ۴٪ آهک، نرخ رشد مقاومت در نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ روزه نه فقط افزایشی نداشته است، بلکه کاهش یافته است. در نمونه‌ی رسی بنتونیت با افزودن ۱۴٪ آهک و بیشتر، مقاومت ۷ روزه نسبت به ۲۸ روزه، ۷۰٪ افزایش یافته است؛ ولی در خاک کائولینیت با افزودن فقط ۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه به اندازه‌ی تقریباً ۷۰٪ افزایش یافته و حتی با افزودن ۶٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه به اندازه‌ی ۱۰۰٪ افزایش داشته است. بنابراین می‌توان بیان کرد که در خاک کائولینیت با افزودن ۴٪ آهک، واکنش پوزولانی انجام می‌شود، ولی در خاک بنتونیت با افزودن ۱۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به میزان ۷۰٪ افزایش نشان داده است. اختلاف ۱۰ درصدی آهک برای بیشتر فعال شدن واکنش پوزولانی آهک با دو خاک مذکور بسیار قابل توجه است که این نتیجه حاکی از آن است که کانی‌های رسی نمونه‌ی رسی کائولینیت که کانی غالب آن کائولینیت است، به بهترین صورت ممکن با آهک وارد واکنش می‌شود و با داشتن عناصر کافی مورد نیاز برای واکنش پوزولانی، درصد آهک را برای انجام شدن تثبیت شیمیایی به شدت کاهش می‌دهد. این در حالی است که در نمونه‌ی رسی بنتونیت با توجه به نوع کانی‌های رسی موجود در آن که کانی غالب آن مونت‌موریلونیت است، عناصر کافی برای انجام واکنش پوزولانی در آن وجود ندارد و بر همین اساس مقادیر قابل توجه آهک برای شروع واکنش‌های پوزولانی نیاز خواهد بود.

#### ۴.۳. تجزیه و تحلیل نتایج ترکیب‌های مختلف نمونه‌ی رسی

##### کائولینیت و بنتونیت تثبیت شده با آهک

با توجه به محدودیت تعداد صفحات نوشتار، از ارائه‌ی نمودارهای تنش - کرنش ترکیب نمونه‌های رسی بنتونیت و کائولینیت شامل ۲۰٪ Ben + ۸۰٪ Kaol، ۴۰٪ Bent + ۶۰٪ Kaol و ۴۰٪ Bent + ۶۰٪ Kaol و به تغییرات مقاومت فشاری محدود شده‌ی ترکیب‌های مذکور در زمان‌های کوتاه مدت ۷ روزه و بلندمدت ۲۸ روزه بر حسب درصد آهک مورد استفاده برای تثبیت خاک در شکل‌های ۷ و ۸ بسنده شده است. شکل‌های ۷ و ۸، مربوط به برازش منحنی غیرخطی حاصل از نرم‌افزار اکسل هستند که بیشتر به منظور متمایز ساختن نمودارها ارائه شده‌اند. همچنین در شکل‌های ۹الف الی ۹ح، تصاویر SEM مربوط به ترکیب‌های مذکور ارائه شده است.

##### ۱.۴.۳. الگوی ۲۰٪ Kaol + ۸۰٪ Bent با آهک

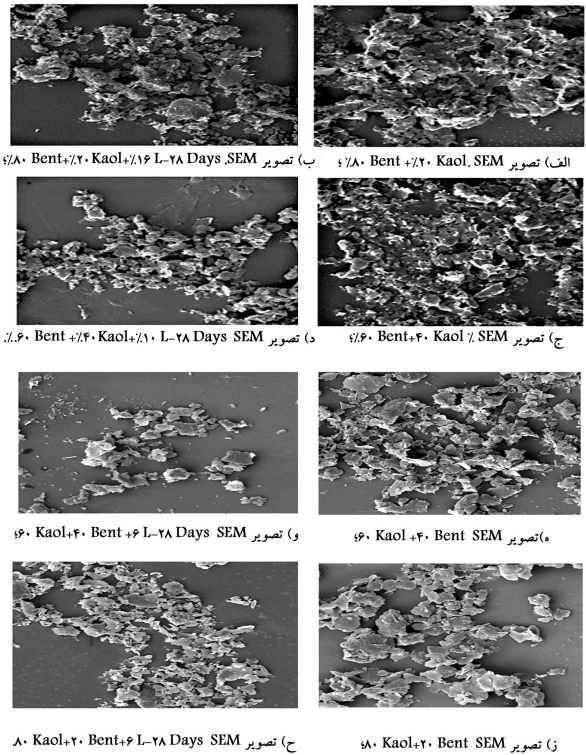
در شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب نمودارهای تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده‌ی ۷ و ۲۸ روزه‌ی ترکیب‌های مختلف کائولینیت و بنتونیت به ازاء درصد‌های مختلف آهک مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، در نمونه‌ی ۲۰٪ Kaol + ۸۰٪ Bent با افزودن ۴ و ۶ درصد آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه نه فقط بیشتر نشده است، بلکه حتی

۱۸٪ افزایش داشته است، که نمی‌تواند دلیلی بر انجام کامل واکنش پوزولانی باشد. با افزودن ۶٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به اندازه‌ی تقریباً ۱۰۴٪ افزایش داشته و با افزودن آهک بیشتر از ۶٪، شامل ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ درصد آهک، در تمام ترکیب‌های مورد مطالعه، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه تقریباً به میزان ۱۰۰٪ افزایش نشان داده است. این میزان قابل توجه افزایش مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه، حاکی از میزان پیشرفت قابل توجه واکنش پوزولانی الگوی خاک مذکور با آهک است و این بدین معناست ترکیب خاک کائولینیت و بنتونیت به صورت ۶۰٪ از نمونه‌ی رسی کائولینیت و ۴۰٪ از نمونه‌ی رسی بنتونیت، ترکیب بهینه‌ی است که باعث پیشرفت قابل توجه واکنش پوزولانی با آهک می‌شود. در عمل‌آوری ۷ روزه با افزایش درصد آهک از ۴ تا ۱۶ درصد، نرخ افزایش مقاومت کمتر از ۱۶٪ بوده است که میزان افزایش در مقایسه با افزایش ۱۲٪ آهک ناچیز است. بنابراین درصد بهینه در عمل‌آوری ۷ روزه، ۴٪ آهک است؛ اما مقاومت ۲۸ روزه در ۴٪ آهک نسبت به مقاومت ۷ روزه، ۱۸٪ افزایش داشته است که میزان افزایش مذکور به‌عنوان درصد بهینه، قابل توجه نیست. در ادامه، با افزودن ۶٪ آهک نسبت به مقاومت ۲۸ روزه نمونه نسبت به مقاومت پیشینه‌ی ۲۸ روزه که مربوط به نمونه‌ی تثبیت شده با ۱۴٪ آهک است، کمتر از ۱۲٪ است. همچنین مقاومت ۲۸ روزه آن نسبت به مقاومت ۷ روزه تا میزان ۱۰۴٪ افزایش نشان داده است، بنابراین درصد بهینه‌ی آهک، ۶٪ است. با مقایسه‌ی تصاویر SEM شکل (۹) با شکل‌های (۹ب)، (۹د) و (۹ج)، اختلاف چشم‌گیری در سطح الگوی ذکر شده با آهک بهینه‌ی ۶٪ با نمونه‌های بهینه‌ی دیگر الگوها وجود دارد. سطح کانی نمونه با الگوی ۶۰ Bent + ۴۰ Kaol با ۶٪ آهک بهینه نسبت به سطح کانی نمونه‌های بهینه‌ی دیگر الگوها، بسیار توده‌ی‌تر و متراکم‌تر شده و نسبت به سایر الگوها، اختلاف آن با نمونه‌ی تثبیت نشده از دیگر نمونه‌ها بیشتر است، به صورتی که سطح آن به شدت توده‌ی‌تر و متراکم‌تر شده است.

#### ۳.۴.۳. الگوی ۸۰ Kaol + ۲۰ Bent با آهک

در نمونه‌ی الگوی ۸۰ Kaol + ۲۰ Bent، با عمل‌آوری ۷ روزه، به دلیل کامل انجام نشدن واکنش‌های پوزولانی در دوره‌ی کوتاه‌مدت ۷ روزه نسبت به دوره‌ی طولانی‌مدت ۲۸ روزه، با افزایش آهک از ۴ تا ۱۲ درصد، مقاومت تقریباً در یک محدوده‌ی ثابت با میزان تغییرات ناچیز بوده است. مطابق شکل ۷، با افزودن ۱۲٪ آهک، مقدار مقاومت تک‌محوری نمونه‌ی ۷ روزه به اندازه‌ی ۵۷٪ نسبت به نمونه‌ی ۷ روزه‌ی تثبیت شده با ۴٪ آهک افزایش یافته است؛ این در حالی است که در نمونه‌ی ۲۸ روزه‌ی تثبیت شده با ۶٪ آهک، احتمالاً به دلیل کامل انجام شدن واکنش‌های پوزولانی، مقاومت نمونه به اندازه‌ی ۱۶۴٪ نسبت به نمونه‌ی ۲۸ روزه‌ی تثبیت شده با ۴٪ آهک افزایش یافته است. همچنین با افزایش درصد آهک بیشتر از ۶٪، مقاومت تک‌محوری تغییرات قابل توجهی نداشته است؛ بنابراین با توجه به اهمیت مقاومت‌های بلندمدت، درصد بهینه‌ی آهک برای الگوی ۸۰ Kaol + ۲۰ Bent، ۶٪ است.

جمع‌بندی مطالب مذکور بیانگر آن است که در الگوهای با نسبت ترکیبی غالب کائولینیت (Kaol, ۸۰ Kaol + ۲۰ Bent و ۶۰ Kaol + ۴۰ Bent) مطابق شکل‌های ۷ و ۸، مقاومت تک‌محوری الگوی ۶۰ Kaol + ۴۰ Bent برای تمام مقادیر درصد آهک هم در نمونه‌های ۷ روزه و هم در نمونه‌های ۲۸ روزه، بسیار بیشتر از الگوهای Kaol و ۸۰ Kaol + ۲۰ Bent است، به صورتی که در نمونه‌های ۷ روزه، مقدار مقاومت آن نسبت به مقاومت ۷ روزه‌ی الگوی Kaol، دست‌کم ۱/۹ برابر و نسبت به مقاومت ۲۸ روزه‌ی الگوی ۸۰ Kaol + ۲۰ Bent، دست‌کم ۱/۷ برابر است.



شکل ۹. تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های طبیعی سایر الگوها به غیر از کائولینیت و بنتونیت به همراه افزودن مقادیر بهینه آهک به هر کدام از این الگوها.

۶۰ Bent + مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه کاهش یافته است که این مسئله حاکی از عدم تکمیل واکنش‌های پوزولانی خاک با آهک تا ۶٪ آهک است. با افزودن ۸٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه تقریباً به اندازه‌ی ۴۰٪ نسبت به مقاومت ۷ روزه افزایش یافته و با افزودن ۱۰٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه به میزان ۷۰٪ افزایش یافته است. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۸، در ۲۸ روز عمل‌آوری، مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌ی تثبیت شده با ۸٪ آهک به میزان ۱۱۱٪ نسبت به مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌ی تثبیت شده با ۶٪ آهک افزایش یافته است، این در حالی است که با افزودن ۱۰٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌ی تثبیت شده با ۸٪ آهک، فقط ۱۳٪ افزایش یافته است. همچنین در نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر بیشتر از ۱۰٪ آهک، مقاومت نمونه تقریباً ثابت است. بنابراین از دیدگاه فنی و اقتصادی، درصد بهینه‌ی آهک حدود ۱۰٪ خواهد بود. در شکل‌های الف و ج، نمونه‌ی تثبیت نشده‌ی ۶۰ Bent + ۴۰ Kaol نسبت به نمونه‌ی تثبیت نشده‌ی ۸۰ Bent + ۲۰ Kaol سطح آن مجتمع‌تر شده و سطح نمونه‌ی ۸۰ Bent + ۲۰ Kaol پراکنده‌تر است. این موضوع حاکی از آن است که اختلاط دو خاک طبیعی کائولینیت و بنتونیت در حضور آب، فیزیکی نیستند و احتمالاً یک سری واکنش‌های پوزولانی در حضور آب به دلیل وجود کلسیمی که از خاک بنتونیت یا کائولینیت فراهم شده است، رخ داده است که سطح کانی‌هایشان تغییر کرده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ج و د، سطح توپرتر نمونه حاکی از انجام شدن واکنش پوزولانی در ۱۰٪ آهک است.

#### ۳.۴.۳. الگوی ۶۰ Kaol + ۴۰ Bent با آهک

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، با افزودن ۴٪ آهک، مقاومت ۷ روزه نسبت به نمونه‌ی تثبیت نشده، ۸/۵ برابر و مقاومت ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌ی تثبیت نشده، تقریباً ۱۱ برابر شده است. با افزودن ۴٪ آهک، مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه،

به صورت خطی تا ۲/۲۶ برابر افزایش یافته و تأثیر افزودن ۲۰٪ بنتونیت به نمونهی کائولینیت، باعث کاهش تأثیر آهک در کاهش خواص خمیری شده است، به طوری که با افزودن ۴٪ آهک، مقدار PI نمونهی کائولینیت و نمونهی ۲۰٪ Bent + ۸۰٪ Kaol با نسبت به حالت طبیعی به ترتیب به میزان ۳۸ و ۱۴ درصد کاهش یافته است. در ادامه با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می شود که با افزودن ۴٪ آهک، طبقه بندی خاک از CL به ML تغییر یافته و خاک رفتار خمیری خود را از دست داده است. در نمونهی ۲۰٪ Bent + ۸۰٪ Kaol با افزودن ۴٪ آهک، طبقه بندی خاک همان CL است. با افزودن ۴٪ بنتونیت نسبت به نمونهی حاوی ۲۰٪ بنتونیت، PI نمونه ۱۳۶ برابر شده است. همچنین تأثیر افزودن ۴۰٪ بنتونیت باعث کمتر شدن تأثیر آهک در خواص خمیری شده است، به طوری که با افزودن آهک تا میزان ۶٪ به الگوی ۲۰٪ Bent + ۴۰٪ Kaol همچون نمونهی فاقد افزودنی سیمان تا سیستم طبقه بندی متحد CH بوده و تغییرات خواص خمیری آن ناچیز بوده است. با افزودن ۱۲٪ آهک، PI نمونهی حاوی ۴۰٪ بنتونیت نسبت به نمونهی ۲۰٪ بنتونیت به میزان ۲۲٪ کاهش یافته و لذا افزودن ۱۲٪ آهک سبب شده است که الگوی ۲۰٪ Bent + ۴۰٪ Kaol نسبت به الگوی ۲۰٪ Bent + ۸۰٪ Kaol در کاهش خواص خمیری مطلوب تر عمل کند. در الگوهای ۶۰ و ۸۰ درصد بنتونیت، خصوصیات و رفتار خاک نمونهی رسی بنتونیت غالب بوده و در نتیجهی آن، تأثیر آهک در کاهش خواص خمیری به شدت کاهش یافته است. در همین راستا، با افزودن ۶۰ و ۸۰ درصد بنتونیت، PI نمونه ها نسبت به نمونهی حاوی ۴۰٪ بنتونیت به ترتیب به میزان ۶۲ و ۱۲۳ درصد افزایش داشت. لازم به ذکر است که در تمامی الگوها در نمونه های ۲۸ روزه با افزودن ۲۰٪ آهک، نمونه های رسی خواص خمیری خود را از دست داده و رفتار خاک از حالت خمیری به حالت غیرخمیری یا دانه یی متمایل شده است. به صورت کلی می توان اظهار داشت که نوع و درصد کانی رسی موجود در نمونه های رسی در تثبیت خاک رس به شدت تأثیرگذار بوده است، به نحوی که الگوی بهینه ی ۲۰٪ Bent + ۴۰٪ Kaol انتخاب شده است. لازم به ذکر است که نتیجه ی حاصل به میزانی که در بحث مقاومتی مطرح شد، آشکار نشده است.

#### ۴. نتیجه گیری

مهم ترین نتایج پژوهش حاضر به این شرح است:

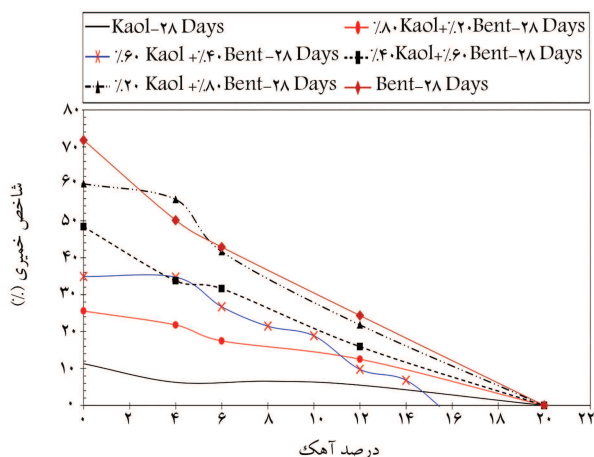
۱. درصد بهینه ی آهک در ترکیب های مختلف بین ۵ تا ۱۰ درصد متغیر است، اما مقدار آن به میزان قابل توجهی وابسته به درصد و نوع کانی های رسی موجود در خاک است. به طور کلی، کانی های رسی موجود در نمونه ی رسی کائولینیت که کانی غالب آن کائولینیت است، به بهترین صورت ممکن با آهک وارد واکنش می شود و با داشتن عناصر کافی مورد نیاز برای واکنش پوزولانی، درصد آهک را برای انجام شدن تثبیت شیمیایی به شدت کاهش می دهد. این در حالی است که در نمونه ی رسی بنتونیت با توجه به نوع کانی های رسی موجود در آن که کانی غالب آن مونت موریلونیت است، عناصر کافی برای انجام واکنش پوزولانی در آن وجود ندارد و بر همین اساس مقادیر قابل توجه آهک برای شروع واکنش های پوزولانی نیاز خواهد بود.

۲. در تثبیت نمونه ی رسی کائولینیت با آهک، نرخ افزایش مقاومت نمونه های ۲۸ روزه نسبت به مقاومت نمونه های ۷ روزه، ۷۰ تا ۱۰۰ درصد است که حاکی از عملکرد و واکنش مناسب کانی های اصلی کائولینیت با آهک و تشکیل کریستال های بلوری در نتیجه ی انجام شدن واکنش پوزولانی است. همچنین

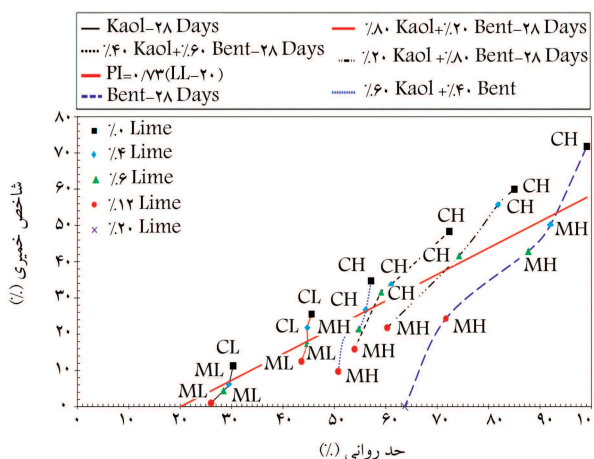
همچنین مقدار این نسبت در نمونه های ۲۸ روزه به ترتیب دست کم ۲/۲ برابر و ۱/۱ برابر است. نتایج مذکور بیانگر آن است که نسبت ترکیبی ۶۰٪ Kaol + ۴۰٪ Bent، نسبت بهینه برای ترکیب با آهک است که تثبیت الگوی مذکور با آهک منجر به بهبود واکنش های پوزولانی و بهتر عمل کردن آن با آهک برای تشکیل ترکیب های سیمانی شده می شود.

#### ۵.۳. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش های حدود اتربرگ

نمودار تغییرات شاخص خمیری (PI) به ازاء درصدهای مختلف آهک در شکل ۱۰ و نمودار شاخص خمیری - حد روانی (نمودار کاساگرانده) در شکل ۱۱ مشاهده می شود. با مخلوط کردن دو خاک کائولینیت و بنتونیت در الگوهای مورد مطالعه، PI مخلوط های حاصل در رگرسیون با معادله ی خطی  $R^2 = 0.9983$  منطبق می شوند. این موضوع نشان دهنده ی آن است که رفتار خمیری نمونه های خاک حاصل از اختلاط فیزیکی دو نوع خاک ذکر شده، به صورت خطی با افزایش درصد کائولینیت کاهش می یابد، تا جایی که وقتی درصد کائولینیت، ۱۰۰٪ می شود، PI نسبت به نمونه ی بنتونیت به میزان ۸۴٪ به صورت خطی کاهش می یابد. همچنان که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، با افزودن ۲۰٪ بنتونیت به خاک کائولینیت، PI



شکل ۱۰. نمودار تغییرات شاخص خمیری نمونه های مختلف به ازاء درصدهای مختلف آهک.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات شاخص خمیری - حد روانی (نمودار کاساگرانده) همراه با طبقه بندی خاک به ازاء درصدهای مختلف آهک.



خاک و آهک در درصد‌های کم آهک است، و تصاویر SEM نیز مؤید این مسئله هستند.

۵. با توجه به آنکه بیشترین میزان مقاومت تک‌محوری حاصل و نیز بیشترین نرخ افزایش مقاومت در نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ روزه در مقدار آهک مساوی و بیشتر از ۶٪ مربوط به نمونه  $40\% \text{Bent} + 60\% \text{Kaol}$  است، لذا نمونه مذکور بهینه‌ترین الگو در تثبیت و اندرکنش با آهک است.

۶. هم‌خوانی بین نتایج آزمایش‌های تک‌محوری و نتایج عکس‌های SEM بسیار مناسب است که این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم خصوصیات ریزساختاری در رفتار درشت‌ساختاری خاک است.

درصد بهینه‌ی آهک نمونه‌ی رسی کائولینیت و بنتونیت به ترتیب ۶ و ۱۰ درصد است.

۳. نتایج تصاویر مربوط به عکس‌های SEM نشانگر آن است که بازدهی مثبت تثبیت با آهک در عکس‌های SEM، با تغییر ساختار از ساختار ورقه‌بی به ساختار مجتمع و کاهش خلل و فرج و حفره‌های بزرگ و توده‌بی‌تر شدن در نمونه‌ی تثبیت‌شده بعد از تثبیت قابل استنباط است.

۴. در درصد‌های کم آهک همچون ۴٪، به واسطه‌ی سطح مخصوص زیاد نمونه‌ی رسی بنتونیت و به تبع آن عدم توانایی آهک در تثبیت سایت‌های فعال بنتونیت، نمونه‌ی تثبیت شده دچار کاهش مقاومت نسبت به افزایش زمان شده است، که این مسئله بیانگر عدم ایجاد شرایط مناسب برای انجام واکنش‌های پوزولانی

## پانویس

1. flocculated structure

## منابع (References)

- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A. and et al. "Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer", *Appl. Clay Sci.*, **127-128**, pp. 134-142 (2016).
- Modarres, A. and Nosoudy, Y.M. "Clay stabilization using coal waste and lime-Technical and environmental impact", *Appl. Clay Sci.*, **116-117**, pp. 281-288 (2015).
- Zaimoglu, A.S., Tan, O. and Akbulut, K.R. "Optimization of consistency limits and plasticity index of fine-grained soils modified with polypropylene fibers and additive materials", *KSCE J. Civ. Eng.*, **20**(2), pp. 1-8 (2015).
- Thyagaraj, T. and Zodinanga, S. "Laboratory investigations on in-situ stabilization of an expansive soil by lime precipitation technique", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**(7), 06014028 (2015).
- Di Sante, M., Fratolocchi, E., Mazziere, F. and et al. "Time of reaction in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour", *Appl. Clay Sci.*, **99**, pp. 100-109 (2014).
- Puppala, A.J., Manosuthkij, T., Nazarian, S. and et al. "Threshold moisture content and matric suction potentials in expansive clays prior to initiation of cracking in pavements", *Can Geotech. J.*, **48**(4), pp. 519-531 (2011).
- Puppala, A.J., Saride, S., Potturi, A. and et al. "Resilient behavior of cement-fiber treated reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates as bases", *Proc. Int. Found. Congr. Equip. Expo. ASCE GSP.*, **187**, pp. 433-440 (2009).
- Zhao, H., Liu, J., Guo, J. and et al. "Reexamination of lime stabilization mechanisms of expansive clay", *ASCE J. Mater. Civ. Eng.*, **27**(1), 04014108 (2014).
- Consoli, N., Prietto, P. and da Silva Lopes, L. "Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil", *Transp. Geotech.*, **1**(3), pp. 129-136 (2014).
- Saride, S., Puppala, A.J. and Chikyala, S.R. "Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays", *Appl. Clay Sci.*, **85**, pp. 39-45 (2013).
- Al-Mukhtar, M., Khattab, S. and Alcover, J.F. "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil", *Eng. Geol.*, **139-140**, pp. 17-27 (2012).
- Locat, J., Berube, M.A. and Choquette, M. "Laboratory investigations on the lime stabilisation of sensitive clays, shear strength development", *Canadian Geotechnical Journal*, **27**(3), pp. 294-304 (1990).
- Goodarzi, A.R. and Salimi, M. "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag", *Appl. Clay Sci.*, **108**, pp. 61-69 (2015).
- Jha, A. and Sivapullaiah, P. "Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil", *Eng. Geol.*, **198**, pp. 53-64 (2015).
- Abu Seif, E.S.S. "Efficiency of quicklime in reducing the swelling potential of pulverized expansive shale, northern Jeddah, Saudi Arabia", *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **74**(2), pp. 637-650 (2015).
- Khemissa, M. and Mahamedi, A. "Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay", *Appl. Clay Sci.*, **95**, pp. 104-110 (2014).
- Alzubaidi, R. and Lafta, S. "Effect of strain rate on the strength characteristics of soil-lime mixture", *Geotech. Geol. Eng.*, **31**(4), pp. 1317-1327 (2013).
- Mahamedi, A. and Khemissa, M. "Cement stabilization of compacted expansive clay", *J. Sci. Technol.*, **3**(1), pp. 33-38 (2013).

19. Puppala, A.J., Manosuthkij, M. and Chittoori, S. "Swell and shrinkage characterizations of unsaturated expansive clays from Texas", *Eng. Geol.*, **164**, pp. 187-194 (2013).
20. Vichan, S. and Rachan, R. "Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash", *Soils and Foundations*, **53**(2), pp. 272-281 (2013).
21. Mallela, J., Von Quintus, H. and Smith, K.L. "Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design", The National Lime Association, pp. 1-36 (2004).
22. Bell, F.G. "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Eng Geol.*, **42**, pp. 223-237 (1996).
23. Ciancio, D., Beckett, C.T.S. and Carraro, J.A.H. "Optimum limeContent identification for lime-stabilized rammed earth", *Constr. Build. Mater.*, **53**, pp. 59-65 (2014).
24. Rajasekaran, G. "Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays", *Ocean Engineering*, **32**(55), pp. 1133-1159 (2005).
25. Di Sante, M., Fratolocchi, E., Mazzeri, F. and et al. "Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil-lime mixtures", *Eng. Geol.*, **65**(10), pp. 866-868 (2015).
26. Chittoori, B.C.S., Pedarla, A., Puppala, A.J. and et al. "Leachate studies on lime and portland cement treated expansive clays", *ASCE GeoFront.*, pp. 4479-4488 (2011).
27. Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J.F. "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C", *Appl. Clay Sci.*, **50**, pp. 191-198 (2010).
28. Jung, C. and Bobet, A. "Post-construction evaluation of lime-treated soils", Joint Transport Research Program Technical Reports, pp. 1-231 (2008).
29. Ouhadi, V.R. and Yong, R.N. "Impact of clay microstructure and mass absorption coefficient on the quantitative mineral identification by XRD analysis", *Applied Clay Science*, **23**(1-4), pp. 141-148 (2003b).
30. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M. and et al. "Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays", *Applied Clay Science*, **95**, pp. 111-118 (2014).
31. Dash, S.K. and Hussain, M. "Lime stabilization of soils", *Reap-praisal. J. Mater. Civ. Eng.*, **24**(6), pp. 707-714 (2012).
32. Nelson, J.D. and Miller, D.J. "Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering", Wiley, New York (2012).
33. ASTM D2676-99a, "Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization", ASTM International, West Conshohocken (2006).
34. Ouhadi, V.R. and Yong, R.N. "The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure", *Engineering Geology Journal*, **70**(3-4), pp. 365-375 (2003a).
35. Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. "Soil stabilization: Principles and practice", Butterworths, Melbourne (1972).
36. Eades, J.L. and Grim, R.E. "A quick test to determine lime requirements for soil stabilization", *Highw. Res. Rec.*, **139**, pp. 61-72 (1966).
37. Hilt, G.H. and Davidson, D.T. "Lime fixation in clayey soils", *Highw. Res. Board Bull.*, **262**, pp. 20-32 (1960).
38. Aldaood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. "Impact Of wetting- drying cycles on microstructure and mechanical properties Of lime stabilized gypseous soils", *Engineering Geology*, **174**, pp. 11-21 (2014).
39. ASTM, *American Society for Testing and Materials*, Annual Book of ASTM Standards, 4.08 (2003).
40. Clarence Gerald, R. "Time-temperature-strength-reaction product relationships in lime-bentonite-water mixture", Retrospective Theses and Dissertations, 4022 (1965).