

# تأثیر دمای عمل آوری و نانوذرات سیلیکا بر ویژگی‌های مهندسی خاک تورمی اصلاح شده با آهک

امیررضا گودرزی<sup>۱\*</sup>، امیرحسین مرادلو<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

۲- کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

\*Amir\_r\_goodarzi@yahoo.co.uk

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۳/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۹/۲۱]

## چکیده

در پژوهش حاضر به طور همزمان تأثیر دمای عمل آوری و افزودن نانوذرات سیلیکا (NS) بر عملکرد آهک در اصلاح ویژگی‌های مهندسی خاک تورمی از طریق انجام آزمایش‌های مختلف بزرگ‌ساختاری و ریزساختاری تجزیه و تحلیل شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با کاهش دما (به‌ویژه دمای زیر  $20^{\circ}\text{C}$  و در زمان‌های نگهداری کمتر از ۲۸ روز)، فعالیت پوزولانی و رشد ترکیبات سیمانی (مانند نانوساختارهای CSH و CAH) دچار اختلال شده و فرآیند اصلاح خاک بعد از افزودن آهک بیشتر ناشی از واکنش‌های کوتاه‌مدت (تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمزی) رخ می‌دهد. در این شرایط علاوه بر افزایش مقدار افزودنی لازم برای کنترل تورم، مشخص شد بهبود سایر پارامترهای ژئومکانیکی خاک (از جمله ظرفیت باربری و پتانسیل نشست‌پذیری) بسیار اندک است. از طرفی، نتایج بیانگر آنست که در حضور ترکیب آهک-نانوذرات سیلیکا (LNS) اثر نامطلوب افت دما بر مشخصات مهندسی نمونه‌ها کاهش یافته و بر خلاف محدودیت عملکرد آهک، مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده با LNS متناسب با افزایش ماده افزودنی روند کاملاً صعودی دارد. بر اساس طیف‌های پراش اشعه ایکس و تصاویر SEM، علت حساسیت کمتر نمونه‌های حاوی LNS به دما و زمان نگهداری و رفتار بهتر در مقایسه با آهک تنها، به دلیل انجام سریع‌تر و بیشتر واکنش‌های پوزولانی و افزایش تراکم ساختار ارزیابی شد. بر پایه نتایج این مطالعه، استفاده از LNS (به خصوص در هوای سرد و زمان‌های محدود عمل آوری) ضمن شدت‌بخشی تأثیر آهک، مصرف افزودنی را تا ۵۰ درصد کاهش خواهد داد.

**واژگان کلیدی:** رس متورم‌شونده، آهک، دما، نانوذرات سیلیکا، فعالیت پوزولانی، خصوصیات مهندسی

## ۱- مقدمه

مصالح مناسب، اصلاح فیزیکی-شیمیایی و یا اجرای پی‌های خاص برای مواجهه و کنترل مشکلات ناشی از حضور خاک-های متورم‌شونده ارائه شده است [1, 7 و 10]. پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد تثبیت شیمیایی با آهک، جزء راهکارهای بسیار متداول و سنتی برای اصلاح تورم خاک بوده [11 - 14]؛ اگرچه وجود برخی از محدودیت‌های اجرایی در زمینه کاربرد آهک باعث شده که پژوهشگران به دنبال روشی برای ارتقاء تأثیرگذاری آن باشند [2, 4 و 15]. به عنوان نمونه، مطالعه ابودر

حضور رس‌های تورمی در بستر و یا مصالح ساخت سازه-های مهندسی، به دلیل امکان افزایش و کاهش حجم متناوب اینگونه از خاک‌ها، می‌تواند باعث آسیب و حتی تخریب کامل طرح شود [4-1] به گونه‌ای که در کشورهای واقع در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان (مانند آمریکا) سالانه میلیون‌ها دلار صرف تعمیر خسارات ناشی از تورم خاک می‌شود [5, 6]. بر این اساس تاکنون روش‌های مختلفی از جمله تعویض خاک با

که افزودن آهک به یک نمونه رس با پتانسیل تورم متوسط، سبب رشد مقاومت فشاری تا ۵ برابر و کاهش حدوداً ۷۵ درصدی قابلیت نگهداشت آب می‌شود. از سوی دیگر، نتایج پژوهش‌های موجود مانند المختار و همکارانش [5]، دی‌سانتی و همکارانش [8]، کانسولی و همکارانش [19]، سلمان و همکارانش [20]، راو و شیواناندا [21]، بل [22]، دی‌لوز و هتن [23] و کو و شو [24] بیانگر آنست که افزایش دما و زمان عمل‌آوری، موجب تشدید فعالیت‌های پوزولانی شده که در این شرایط، بهبود ظرفیت باربری بعضاً تا ۱۳۰٪، کاهش هدایت هیدرولیکی تا ۱۰۰ برابر و افزایش بیش از ۴ برابری کرنش گسیختگی برای مصالح گزارش شده است. به گونه‌ای که با وجود گستردگی مطالعات انجام شده در این زمینه، ولی تاکنون به موضوع امکان افزایش بهره‌وری طرح تثبیت خاک با آهک (به ویژه در هوای سرد و زمان‌های محدود نگهداری) و به عبارتی شدت بخشی واکنش‌های بین سطوح رسی و آهک، کمتر پرداخته شده است. همچنین در بسیاری از پژوهش‌های گذشته، مطالعه تأثیر دما بیشتر برپایه ارزیابی رفتار مهندسی خاک بوده و از دیدگاه ریزساختاری این موضوع بطور جامع بررسی نشده است. پس، در این پژوهش تحت یک بازه دمایی گسترده (۱۰، ۲۰، ۴۰°C) و در زمان‌های متفاوت ۱ تا ۹۰ روز نگهداری، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مختلف شامل اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) <sup>۴</sup>، جذب، قابلیت تورم، مقاومت فشاری، تحکیم، عکس‌برداری الکترونی (SEM) <sup>۵</sup> و تهیه طیف‌های اشعه ایکس (XRD) <sup>۶</sup> با هدف مطالعه دقیق سازوکار اندرکنش رس تورمی مونت‌موریلونیت با آهک از دیدگاه بزرگ‌ساختاری و ریزساختاری انجام شد. علاوه بر این، بطور همزمان با افزودن نانوذرات سیلیکا به سیستم خاک-آهک، امکان شدت بخشی فرآیند طرح تثبیت (از طریق کم کردن وابستگی رفتار نمونه‌ها به دما و زمان نگهداری و کاهش مصرف ماده افزودنی) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

و همکارانش [13] موید آنست که ترکیب آهک با مواد پوزولانی مانند سرباره‌های صنعتی، ظرفیت باربری خاک را نسبت به آهک تنها تا ۲ برابر افزایش داده و قابلیت آبستگي را به شدت کاهش می‌دهد.

از طرفی، در سال‌های اخیر به فن‌آوری نانو با هدف حفظ منابع و افزایش بهره‌وری، بسیار توجه شده است. در این راستا، نانوذرات سیلیکا<sup>۱</sup> (نانو اکسید سیلیس) از جمله موادی است که به دلیل اندازه ریز ذرات و سطوح فعال (در مقایسه با سایر ترکیبات حاوی سیلیس که پیوند Si-O آنها به راحتی شکسته نمی‌شود)، از قابلیت ویژه‌ای برای استفاده در پروژه‌های عمرانی برخوردار است [16]. در این راستا و بر اساس نتایج پژوهش‌های گذشته [17، 18]، حضور نانوذرات سیلیکا می‌تواند مقاومت بتن را تا ۲ برابر افزایش داده و سبب کاهش قابل ملاحظه نفوذپذیری آن شود. به شکلی که با وجود مطالعات زیاد در زمینه کاربرد این ماده در اختلاط با سیمان، ولی مطالعات محدودی در رابطه با استفاده از ترکیب نانوذرات سیلیکا و آهک برای اصلاح خاک صورت گرفته است.

بطور کلی و بر پایه نتایج پژوهش‌های موجود، ساز و کار واکنش بین خاک و افزودنی به مشخصات کانی‌ساخت، نوع و مقدار افزودنی و شرایط محیطی بستگی دارد [7، 10]. معمولاً اضافه کردن موادی مانند آهک به خاک‌های تورمی، با افزایش pH سبب انحلال ترکیبات سازنده ذرات رسی (شامل واحدهای سیلیکا و آلومینا) شده که در صورت وجود یون کلسیم آزاد کافی در سیستم می‌تواند سبب تشکیل ژل‌هایی با خاصیت سیمان‌کنندگی از جمله کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH)<sup>۲</sup>، کلسیم آلومینات هیدراته (CAH)<sup>۳</sup> و کلسیم آلومینات-سیلیکات هیدراته (CASH) شده که با عنوان فعالیت پوزولانی شناخته می‌شود. تشکیل این مواد، باعث اتصال ذرات به یکدیگر و جامدشدگی توده خاک شده که در نهایت موجب بهبود مشخصات ژئومکانیکی مصالح خواهد شد [2، 4، 9]. برای نمونه نتایج حاصل از مطالعه جها و سیواپولیا [7] نشان می‌دهد

4. Electrical conductivity  
5. Scanning electron microscope  
6. X-ray diffraction

1. SiO<sub>2</sub>-nanoparticles: NS  
2. Calcium Silicate Hydrates  
3. Calcium Aluminate Hydrates

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲- مشخصات مصالح مورد استفاده

حضور کانی مونت‌موریلونیت یکی از مهمترین دلایل ایجاد تورم و پتانسیل تغییر حجم در رس‌ها محسوب می‌شود [5,2]. پس در این پژوهش از یک نمونه رس تقریباً خالص (عمدتاً حاوی مونت‌موریلونیت) با قابلیت تورم بسیار زیاد (حدود ۱۴۰٪) استفاده شد.

برای کنترل تورم خاک از آهک هیدراته خالص (مرک آلمان) استفاده شد. با توجه به اهداف پژوهش، از ترکیب آهک-نانوذرات سیلیکا (LNS) با جایگزینی ۱۰ درصد ذرات سیلیکا به جای آهک نیز برای اصلاح خاک استفاده شد. به گونه‌ای که نتایج آزمایشگاهی و بررسی‌های صورت گرفته به وسیله سایر پژوهشگران [16, 27] نشان می‌دهد افزودن مقادیر بیشتر ذرات سیلیکا باعث تاثیر منفی بر رفتار افزودنی خواهد شد. لازم به گفتن است کلیه افزودنی‌ها در یک بازه گسترده صفر تا ۳۰ درصد وزنی به خاک توری مطالعه شده اضافه شدند.

### ۲-۲- انجام آزمایش‌ها

به منظور ارزیابی تاثیر مواد افزودنی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک، ابتدا مقادیر ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد وزن خشک هر نمونه، آهک و یا ترکیب LNS بطور مجزا به آنها اضافه و سپس سوسپانسیون‌های خاک به همراه افزودنی با نسبت ۱ به ۲۰ (خاک-آب) در تیوپ‌های سانتریفیوژ تهیه شدند. بعد از ایجاد تعادل (قرارگیری به مدت ۲ ساعت روی دستگاه لرزاننده)، مقدار هدایت الکتریکی هر نمونه تحت سه شرایط دمایی ۱۰، ۲۰ و ۴۰°C پس از گذشت زمان‌های ۲ ساعت تا ۹۰ روز تعیین شد. همچنین، فاز مایع هر نمونه جداسازی و با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل GBC-XplorAA، تغییرات غلظت کاتیون تبادل‌پذیر سدیم واقع بر سطوح رسی ناشی از جایگزینی با یون کلسیم (به دلیل افزودن آهک به خاک) اندازه‌گیری شد. برای جدا کردن فاز جامد و مایع نمونه‌ها، از دستگاه سانتریفیوژ با سرعت چرخش ۵۰۰۰ rpm استفاده شد.

میزان تورم خاک در شرایط قبل و بعد از اندرکنش با افزودنی، مطابق روش A استاندارد ASTM-D4546 اندازه‌گیری شد. بدین‌منظور، پس از ساخت نمونه‌های همگن خاک با مقادیر صفر تا ۳۰٪ ماده اصلاح‌کننده، هر نمونه با وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه درون رینگ دستگاه ادنومتر متراکم می‌شد. در مرحله بعد آنها را به وسیله پوشش مخصوص پلاستیکی بسته‌بندی و در ژرمیناتور تحت سه شرایط دمایی ۱۰، ۲۰ و ۴۰°C و رطوبت محیطی ۸۵٪، بر حسب زمان موردنظر نگهداری و سپس مشخصات توری اندازه‌گیری شد. با تعیین مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)<sup>۱</sup> و انجام آزمایش تحکیم، تاثیر نوع ماده افزودنی و شرایط محیطی بر سایر مشخصات ژئومکانیکی مصالح نیز بررسی شد. اندازه‌گیری مقاومت، طبق دستورالعمل ASTM-D2166 صورت گرفت. در این روش، ابتدا نمونه‌های همگن رس توری به همراه مقدار موردنظر از ماده افزودنی تهیه و با وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه درون استوانه‌ای فلزی به ارتفاع ۷۰ و قطر ۳۵ mm متراکم می‌شدند. در ادامه پس از بیرون آوردن هر نمونه از قالب، آنها را به وسیله پارافیلیم پوشش داده و در ژرمیناتور تحت شرایط دمایی و دوره‌های زمانی موردنظر نگهداری شدند. در نهایت مقاومت فشاری هر نمونه با استفاده از دستگاه تک‌محوری و با سرعت بارگذاری ۱/۲ mm/min تعیین شد. برای اندازه‌گیری پتانسیل نشست‌پذیری رس توری مورد مطالعه، آزمایش تحکیم مطابق روش ASTM-D2435 صورت گرفت. در این سری از آزمایش‌ها، پس از تهیه مخلوط همگن خاک به همراه افزودنی، نمونه‌ها مطابق روش آزمایش تورم درون رینگ دستگاه ادنومتر آماده و پس از عمل‌آوری لازم، مشخصات تحکیمی تعیین شد.

علاوه بر آزمایش‌های فیزیکی-مکانیکی و با هدف بررسی تغییر آرایش سطوح رسی و شرایط کانی ساخت خاک در اثر اندرکنش با مواد افزودنی، آزمایش‌های ریزساختاری نیز انجام شدند. نمونه‌های لازم برای تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی از تکه‌های باقی‌مانده پس از انجام آزمایش مقاومت

1. Unconfined compression strength

با توجه به اهداف این پژوهش و به منظور ارزیابی تأثیر دمای عمل‌آوری بر کارایی آهک در اصلاح ویژگی‌های رفتاری خاک، یک سری آزمایش تورم انجام و نتایج آن در شکل (۱) ارائه شده است. مشاهده می‌شود آهک سبب کاهش پتانسیل تورم خاک شده به گونه‌ای که روند تغییرات تابعی از مقدار افزودنی، دما و زمان نگهداری است.

شکل ۱. تأثیر مقدار افزودنی، دما و زمان عمل‌آوری بر کاهش پتانسیل تورم خاک اصلاح شده با آهک

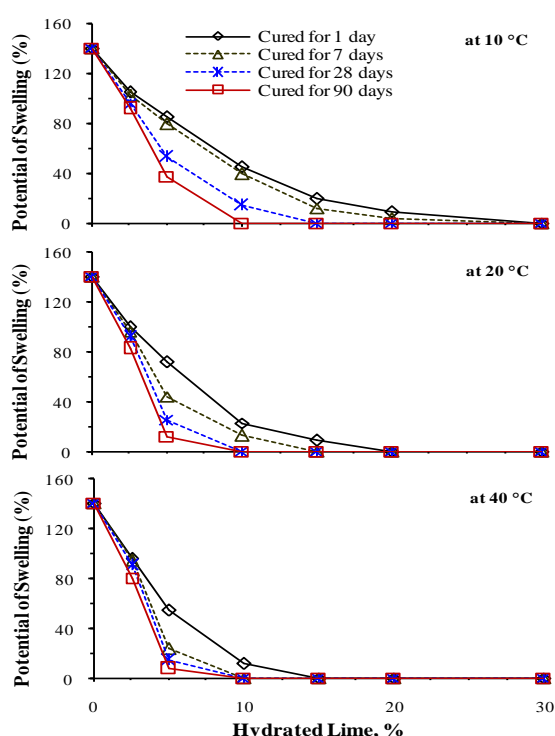


Fig. 1. Effect of additive, temperature and curing time on the swelling potential of lime-treated soil.

بر پایه نتایج مطالعات قبلی [28, 6, 2]، و روابط تئوریک لایه دوگانه، فرآیند کاهش تورم نمونه‌ها را می‌توان به دلیل مجموعه‌ای از واکنش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت ارزیابی کرد. واکنش‌های کوتاه‌مدت مربوط به افزایش فشار اسمز (ناشی از انحلال آهک و رشد غلظت الکترولیت در سیال منفذی خاک) و همچنین جایگزینی یون‌های کلسیم آهک با سدیم‌های تبدلی جدول (۱) واقع بر صفحات رسی بوده که با نزدیک کردن ذرات به یکدیگر و ایجاد ساختار مجتمع [۴]

فشاری اخذ و با استفاده از دستگاه VEGA3-TESCAN با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر عکس‌برداری شدند. در ادامه این نمونه‌ها را کاملاً پودر کرده و با استفاده از دستگاه XRD مدل بروکر D8، طیف پراش اشعه ایکس آنها تهیه شد. لازم به گفتن است مجموعه آزمایش‌های ریزساختاری این پژوهش در پژوهشکده شیمی و مهندسی شیمی ایران و بخشی از آنها در دانشگاه بوعلی سینا انجام شدند.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

پس از انجام آزمایش‌های شناسایی مطابق آئین‌نامه ASTM [25] و دستورالعمل EPA [26]، مشخصات رفتاری خاک مطالعه شده و ویژگی‌های نانوذرات سیلیکا مصرفی مطابق جداول (۱ و ۲) بدست آمد.

جدول ۱. مشخصات رفتاری خاک تورمی مطالعه شده

Characteristics	Quantity measured
Mineral composition	Mainly Montmorillonite
CEC, cmol/kg	75
Exchangeable cations	Mainly Sodium
Plasticity index (PI), %	311
Soil classification	CH
Maximum dry density, gr/cm <sup>3</sup>	1.2
Optimum moisture content, %	50

Table 1. Physico-chemical properties of soil sample.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیکا مصرفی

Characteristics	Quantity measured
Mineral composition	SiO <sub>2</sub> =97.1, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.9, CaO=0.8, MgO=0.5, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.2
EC, mS/cm	0.07
pH (in 1:20 ratio)	7.9
Specific surface area, m <sup>2</sup> /g	620
Average particle size, nm	34

Table 2. Physico-chemical properties of used Nano-silica.

شکل ۳ نیز نشان‌دهنده رشد هدایت الکتریکی خاک، بلافاصله (۲ ساعت) بعد از افزودن آهک بوده که بیانگر افزایش غلظت الکترولیت (بیشتر شدن فشار اسمز) در مجاورت سطوح رسی است. این شرایط باعث تجمع ذرات در کنار یکدیگر و کاهش قابلیت هیدراته شدن آنها شده [7, 3, 5] که در نهایت پتانسیل تورم خاک را کم خواهد کرد. در واقع نتایج شکل‌های (۲ و ۳)، درستی انجام واکنش‌های کوتاه‌مدت (تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمز) پس از افزودن آهک را تایید می‌نمایند.

شکل ۳. تغییرات هدایت الکتریکی خاک در اثر افزودن آهک و اعمال شرایط مختلف محیطی

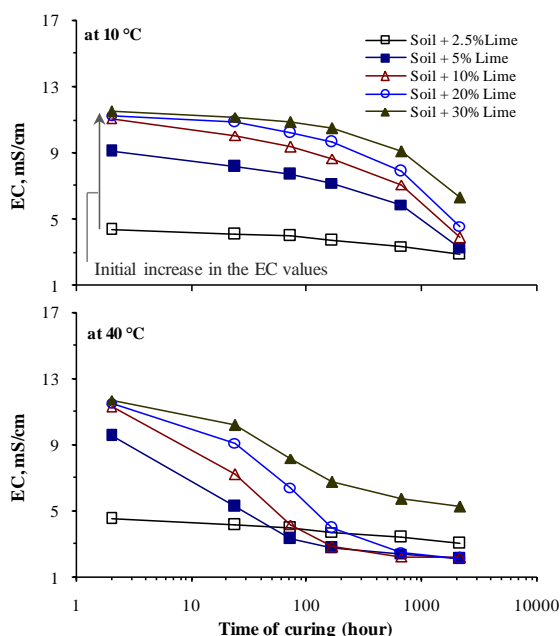


Fig. 3. Effect of lime addition and different ambient conditions on the EC values of soil sample.

از سوی دیگر، نکته حائز اهمیت در نتایج شکل‌های (۲ و ۳)، وابستگی کم و واکنش‌های کوتاه‌مدت خاک-آهک به شرایط محیطی است. بنابراین انتظار می‌رود روند تغییرات مشاهده شده در شکل (۱) بیشتر به دلیل تاثیر دما بر واکنش‌های بلندمدت (فعالیت پوزولانی و جامدشدگی توده خاک) باشد. پس در ادامه، به منظور تحلیل بیشتر این یافته، ضمن بررسی دقیق‌تر نتایج شکل (۳) (تفاوت روند کاهش EC با گذشت زمان)، تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها نیز با

[9]، سبب محدودیت قابلیت بازشدگی بین لایه‌ای و در نتیجه کنترل تورم شده است. از طرفی، بخشی از فرآیند کاهش تورم (به ویژه با افزایش زمان نگهداری) به دلیل واکنش‌های پوزولانی خاک-آهک بوده که با استناد به پژوهش‌های گذشته [7, 12, 29, 30]، موجب رشد ترکیبات سیمانی، چسباندن ذرات رسی به یکدیگر و در نهایت کاهش تغییر حجم خاک شده است. بر اساس مطالب گفته شده، تحلیل نتایج ارائه شده در شکل (۱) نیازمند آگاهی از چگونگی تاثیر دما و زمان عمل‌آوری بر واکنش‌های کوتاه-مدت و بلندمدت است. در این راستا و با هدف ارزیابی واکنش‌های کوتاه‌مدت، تغییرات غلظت یون سدیم ناشی از تبادل با کلسیم و همچنین مقدار هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها در شرایط قبل و بعد از اندرکنش با آهک تحت شرایط محیطی مختلف تعیین و نتایج آن در شکل‌های (۲ و ۳) ارائه شد. بر اساس نتایج شکل (۲)، نمونه رس طبیعی حاوی ۷۱٪ یون سدیم تبادلی بوده که پس از افزودن آهک و متناسب با افزایش غلظت آن، جذب سدیم کاهش یافته است. این نتیجه به معنای خروج کاتیون‌های  $Na^+$  از فضای مابین سطوح رسی بر اثر جایگزینی با کاتیون‌های  $Ca^{+2}$  آهک و در نتیجه کاهش ضخامت لایه دوگانه [4, 14, 31] و به عبارتی کنترل تورم خاک به دلیل شعاع هیدراته کمتر و ظرفیت بیشتر کلسیم نسبت به سدیم است [2, 28].

شکل ۲. تغییرات غلظت یون سدیم تبادلی در اثر افزودن آهک و اعمال شرایط مختلف محیطی

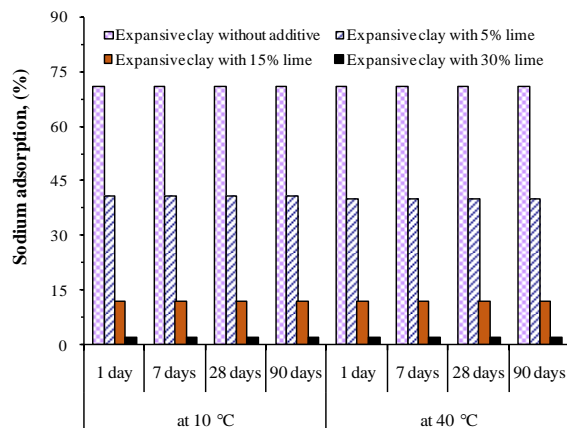


Fig. 2. Effect of lime addition and different ambient conditions on the sodium ions adsorption of soil sample.

مقایسه و تغییرات آنها در شکل (۵) ارائه شد. نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که رشد مواد سیمانی در خاک و به عبارتی تکمیل واکنش‌های بلندمدت به شدت تابعی از دما و زمان نگهداری بوده که همپوشانی مناسبی با تغییرات هدایت الکتریکی نمونه‌ها در شکل (۳) دارد. به شکلی که بلافاصله پس از افزودن آهک، EC خاک به شدت افزایش و از  $2/80$  (مربوط به نمونه اولیه) به حدود  $11/5$  mS/cm در نمونه حاوی  $30\%$  افزودنی می‌رسد. با افزایش زمان در شکل (۳) مشاهده می‌شود مقدار EC روند نزولی داشته که علت آنرا می‌توان به مصرف املاح برای انجام واکنش‌های پوزولانی ارتباط داد [28, 5]. در واقع با توجه به انحلال آهک و پس از افزودن به خاک، ابتدا غلظت املاح در مایع منفذی بیشتر شده که سبب افزایش EC می‌شود. با گذشت زمان و انجام فعالیت پوزولانی، آهک به تدریج مصرف و در نتیجه غلظت املاح و به تبع آن مقدار EC کاهش یافته است. به گونه‌ای که روند کاهش EC با گذشت زمان و به عبارتی تکمیل واکنش‌های پوزولانی، به شدت تابعی از دمای نگهداری بوده که با نتایج شکل (۵) کاملاً هماهنگی دارد.

شکل ۵. تاثیر دما و زمان نگهداری بر روند تغییرات پیک کلسیم سیلیکات

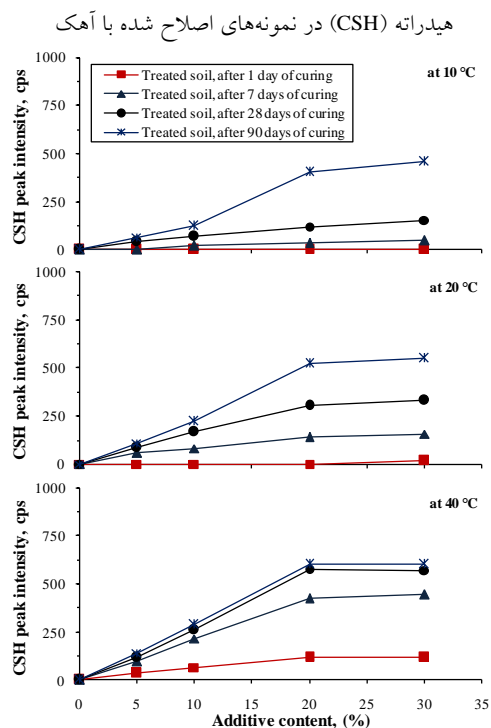


Fig. 5. Effect of temperature and time of curing on the CSH variations of lime-treated soil.

استناد به طیف‌های پراش اشعه ایکس مطالعه شده قرار گرفت. به عنوان نمونه طیف‌های اشعه ایکس نمونه اولیه در شکل (۴-الف و ۴-ب) مربوط به خاک حاوی  $20\%$  آهک پس از ۲۸ روز نگهداری در دمای  $10^\circ\text{C}$ ، شکل (۴-ج) مربوط به خاک حاوی  $20\%$  آهک پس از ۲۸ روز نگهداری در دمای  $20^\circ\text{C}$  و طیف اشعه ایکس خاک حاوی  $20\%$  آهک پس از ۲۸ روز نگهداری در دمای  $40^\circ\text{C}$  در شکل (۴-د) ارائه شده است.

شکل ۴. طیف‌های پراش اشعه ایکس، الف) نمونه طبیعی، ب، ج و د) نمونه‌های حاوی  $20\%$  آهک پس از ۲۸ روز نگهداری به ترتیب در دمای  $10^\circ\text{C}$ ،  $20^\circ\text{C}$  و  $40^\circ\text{C}$

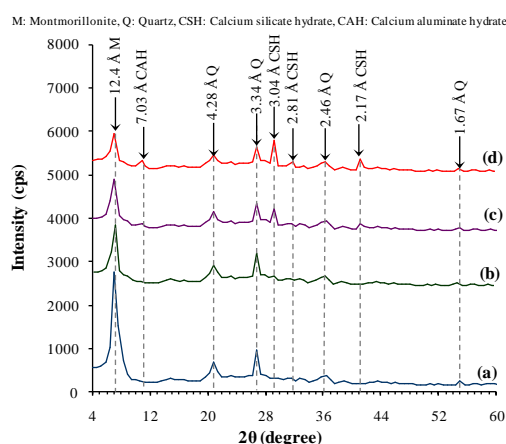


Fig. 4. XRD patterns; (a) natural soil sample, (b), (c) and (d) samples + 20% lime after 28 days cured at  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ , and  $40^\circ\text{C}$ , respectively.

نتایج شکل (۴) بیانگر کاهش قابل ملاحظه پیک اصلی رس سدیم مونت‌موریلونیت ( $12/4 \text{ \AA}$ ) و ایجاد یک سری ترکیبات جدید سیمانی (مانند نانو ساختارهای CSH و CAH) پس از اندرکنش خاک-آهک است. بر اساس نتایج مطالعات قبلی [9, 3]، علت کاهش پیک اصلی را می‌توان به دلیل ترکیبی از واکنش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت ارزیابی کرد. در واقع تشکیل ساختار مجتمع ذرات (ناشی از تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمز) و همچنین مصرف ذرات رسی در واکنش‌های پوزولانی و پوشیده شدن آنها به وسیله مواد سیمانی، میزان بازتابش اشعه را کاهش داده [7, 11] که در نهایت پیک اصلی کانی رسی کمتر شده است. از طرفی، با توجه به توضیحات قبل و انتظار وابستگی فعالیت پوزولانی به شرایط محیطی، روند ایجاد ترکیب سیمانی CSH (بطور خاص پیک  $3/04 \text{ \AA}$ ) بر اساس طیف‌های پراش اشعه ایکس نمونه‌ها با یکدیگر

(کمتر از ۲۸ روز) دچار اختلال شده و فرآیند اصلاح خاک بیشتر ناشی از انجام واکنش‌های کوتاه‌مدت (تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمز) است. در این وضعیت با توجه به شکل (۱)، حدوداً ۵۰٪ افزودنی بیشتری برای کنترل تورم لازم بوده اگرچه با وجود مصرف زیاد آهک، ولی بهبود ظرفیت باربری شکل (۶) همچنان اندک خواهد بود.

علاوه بر تاثیر زمان و دمای عمل‌آوری بر عملکرد آهک، نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که مقاومت نمونه‌ها ابتدا با حضور آهک روند صعودی داشته و سپس کاهش یافته است. با استناد به نتایج مطالعات قبلی [4, 22]، علت کاهش مقاومت خاک در حضور مقادیر زیاد آهک، بر اثر انحلال کامل ذرات رسی و عدم وجود سیلیکا و آلومینای کافی در سیستم برای تداوم واکنش‌های پوزولانی است. در این شرایط، آهک به صورت آزاد در محیط باقی مانده و ناشی از اصطکاک و چسبندگی کم آن، سبب کاهش مقاومت می‌شود. بنابراین، افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با آهک عملاً تا یک مرتز مشخص امکان‌پذیر بوده و افزایش آهک تاثیری در رشد بیشتر مقاومت نخواهد داشت. بنابراین با توجه به ضعف‌های مشاهده شده در عملکرد آهک و توجه به این نکته که در محدوده دمای محیطی متداول (۲۰°C) حتی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، همچنان مقدار زیادی آهک (حدود ۱۰ درصد) برای کنترل تورم مونت‌موریلونیت لازم است، در ادامه این پژوهش سعی شد با افزودن NS به سیستم خاک-آهک، ضمن بررسی امکان شدت‌بخشی فرآیند تثبیت (کاهش وابستگی رفتار نمونه‌ها به شرایط نگهداری و کم کردن مصرف افزودنی)، قابلیت ارتقاء تاثیر آهک بر مشخصات مهندسی مصالح نیز مطالعه شود.

در این راستا، نتایج آزمایش‌های تورم در شکل (۷) نشان می‌دهد حضور نانوذرات سیلیکا اثر نامطلوب افت دما بر عملکرد آهک را کاهش داده و حساسیت رفتار نمونه‌ها به زمان عمل‌آوری را کمتر می‌نماید. به عبارت دیگر در شرایط یکسان به ویژه در دمای کم و زمان‌های محدود عمل‌آوری، ترکیب LNS باعث شده که میزان تورم در مقایسه با آهک تنها به مراتب کمتر باشد. به عنوان نمونه پتانسیل تورم نمونه حاوی

بر اساس نتایج بدست آمده پیش‌بینی می‌شود با افزایش دما و تکمیل فرآیند جامدشدگی ذرات (به دلیل رشد مواد سیمانی)، علاوه بر کاهش قابل ملاحظه تورم شکل (۱) سایر مشخصات ژئومکانیکی مصالح نیز بهبود یابند. پس، مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط قبل و بعد از اندرکنش با مواد افزودنی تحت زمان و دماهای مختلف عمل‌آوری تعیین و نتایج آن در شکل (۶) ارائه شده است.

شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری خاک در اثر افزودن آهک

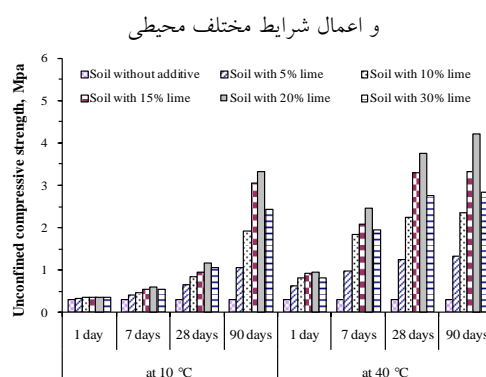


Fig. 6. Effect of lime addition and different ambient conditions on the compressive strength of soil sample.

مشاهده می‌شود با افزایش دما به‌ویژه در زمان‌های محدود عمل‌آوری (کمتر از ۲۸ روز)، مقاومت نمونه‌ها رشد زیادی دارد. به عنوان نمونه، UCS نمونه حاوی ۲۰٪ آهک پس از ۷ روز نگهداری در دمای ۴۰°C، حدود ۳ برابر بیشتر از نمونه مشابه در دمای ۱۰°C است. اگرچه با افزایش زمان، تاثیر دما بر مقاومت کاهش یافته که علت آن را می‌توان تکمیل واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه اتصال بیشتر ذرات رسی به یکدیگر ارزیابی کرد [19, 21]. در واقع با توجه به نتایج شکل (۵) ملاحظه می‌شود در دمای ۱۰°C برای زمان‌های کم عمل‌آوری، رشد مواد سیمانی اندک بوده که پس از گذشت زمان کافی، این روند افزایش یافته است. به شکلی که برای نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۴۰°C به دلیل سرعت بیشتر واکنش‌های پوزولانی، رشد مواد سیمانی پس از هفت روز تقریباً معادل نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۱۰°C پس از ۹۰ روز است. به عبارت دیگر، با کاهش دما اندرکنش خاک-آهک به ویژه در زمان‌های کم عمل‌آوری

ارائه شد. نتایج شکل (۸)، به وضوح موید رشد سریع‌تر و بیشتر مواد سیمانی در شرایط یکسان به ویژه در دمای کم و زمان‌های محدود عمل‌آوری، در نمونه‌های تثبیت شده با LNS نسبت به آهک بوده که با نتایج آزمایش‌های تورم در شکل (۷) هماهنگی دارد. در این وضعیت انتظار می‌رود سایر ویژگی‌های مهندسی نمونه‌ها نیز در حضور ذرات سیلیکا بهبود نشان دهند.

شکل ۸. مقایسه تاثیر LNS و آهک بر روند تشکیل ترکیبات سیمانی در

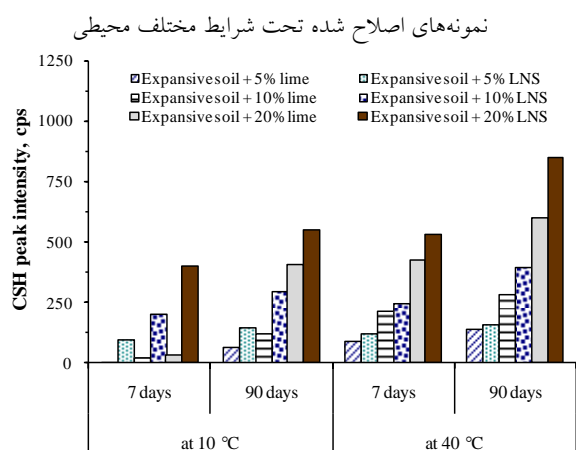


Fig. 8. Effect of lime and LNS addition on the formation of cementing compounds in the treated soil at different ambient conditions.

شکل ۹. مقایسه تاثیر LNS و آهک بر مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح

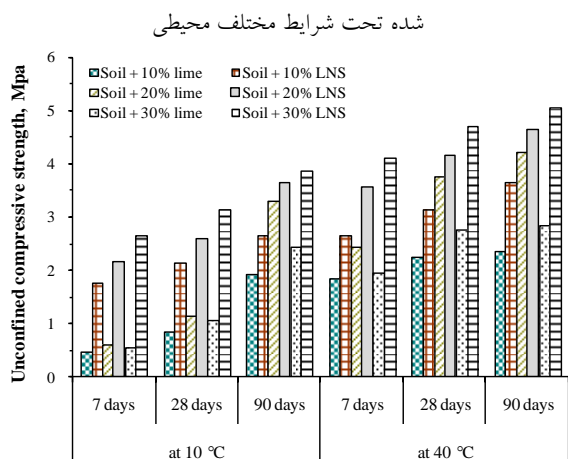


Fig. 9. Effect of lime and LNS addition on the compressive strength of treated soil at different ambient conditions.

در این راستا، شکل (۹) بیانگر آنست که مقاومت خاک پس از افزودن ترکیب آهک-نانو سیلیکا در مقایسه با آهک تنها، بیش از ۶۰ درصد افزایش یافته و حساسیت رفتار نمونه‌ها

۱۰ درصد LNS پس از ۷ روز نگهداری در دمای ۱۰°C، حدود ۸ برابر کمتر از نمونه تثبیت شده با آهک است. با توجه به تحلیل‌های ارائه شده در مورد فرآیند تاثیر دما و زمان نگهداری بر اندرکنش خاک-آهک، عملکرد بهتر نمونه‌های حاوی LNS نسبت به آهک را می‌توان بیشتر به دلیل تغییر در سطح واکنش‌های پوزولانی دانست.

شکل ۷. مقایسه تاثیر LNS و آهک بر پتانسیل تورم خاک تحت شرایط

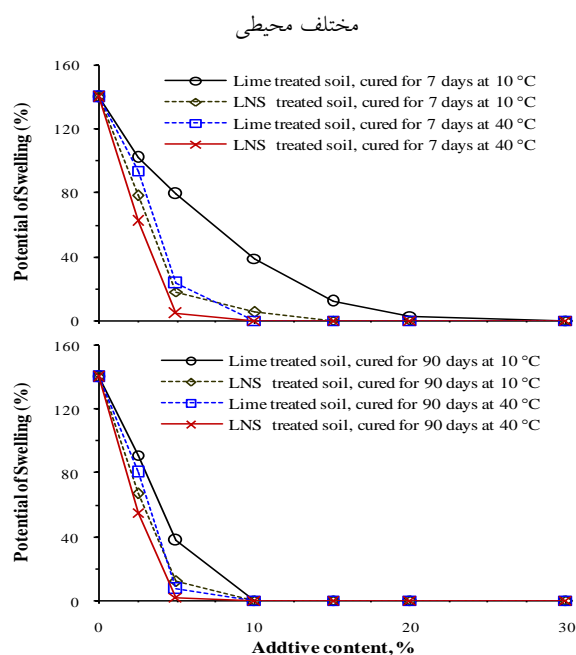


Fig. 7. Effect of lime and LNS addition on the swelling power of soil at different ambient conditions.

در واقع بر اساس نتایج مطالعات قبلی [18, 27, 32]، برای نمونه‌های حاوی آهک تنها، رشد مواد سیمانی پس از افزایش pH محیط و انحلال تدریجی ذرات رسی رخ داده که در این حالت بخشی از آهک نیز صرف واکنش‌های کوتاه‌مدت می‌شود، در صورتی که برای نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب LNS، مجاورت مستقیم آهک با ذرات سیلیکا می‌تواند سبب تسریع در ایجاد ماده سیمانی CSH شده که با توجه به نتایج شکل (۷)، این قابلیت باعث کاهش افزودنی برای کنترل تورم و به عبارتی شدت بخشی عملکرد آهک شده است. در ادامه به منظور تایید این یافته مبنی بر انجام بیشتر واکنش پوزولانی در نمونه‌های حاوی LNS، روند تشکیل CSH بر اساس طیف‌های اشعه ایکس نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه و نتایج آن در شکل (۸)



پوزولانی و رشد مواد سیمانی نسبت داد. وقوع این شرایط، روند سخت‌شدگی ذرات رسی را کاهش داده، پس بر اساس نتایج شکل (۱۰) امکان تغییر شکل نمونه‌های خاک-آهک با افت دما به ویژه در زمان‌های اولیه نگهداری بیشتر (حدود ۲/۵ برابر) بوده که با روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل (۶) هماهنگی دارد.

شکل ۱۱. مقایسه تاثیر LNS و آهک بر میزان تراکم‌پذیری نمونه‌های اصلاح

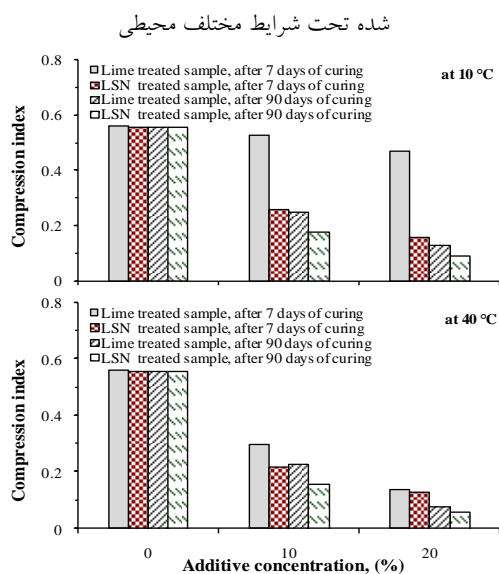


Fig. 11. Effect of lime and LNS addition on the compression index of treated soil at different ambient conditions.

از سوی دیگر، محاسبه ضریب قابلیت فشرده‌گی ( $C_c$ ) خاک بر اساس نمودارهای تحکیم و ارائه تغییرات آن در شکل (۱۱)، بیانگر آنست که قابلیت تراکم‌پذیری نمونه‌های حاوی LNS به مراتب از نمونه‌های تثبیت شده با آهک کمتر است. بر پایه تفسیر آزمایش‌های تورم و مقاومت فشاری، در واقع حضور ذرات سیلیکا می‌تواند سبب رشد بیشتر ترکیبات سیمانی شکل (۸) و سخت‌شدگی بهتر ذرات شده که در نتیجه آن نشست-پذیری توده خاک کاهش یافته است. علاوه بر این، با توجه به جدول ۳ انتظار می‌رود حضور ذرات بسیار ریز سیلیکا، موجب کاهش اندازه حفرات درون توده خاک و بعضاً مسدود شدن آنها شده و همچنین سبب توزیع یکنواخت‌تری از ترکیبات سیمانی بین سطوح رسی شود [16, 17, 31, 32]. به گونه‌ای که در نهایت، مجموع این واکنش‌ها باعث افزایش تراکم ساختار خاک خواهد شد (درستی این رفتار در ادامه و بر اساس تصاویر SEM مورد تایید قرار گرفت). پس در شرایط یکسان، با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۱)، نشست خاک در

به دما و زمان نگهداری نیز کم شده است. همچنین مقاومت فشاری بر خلاف محدودیت آهک، با افزایش مقدار LNS روند صعودی دارد. این موضوع را می‌توان ناشی از مصرف کامل آهک به دلیل اندرکنش مستقیم با ذرات سیلیکا و در نتیجه عدم باقی ماندن آهک آزاد در سیستم ارزیابی کرد که در نهایت بر اساس نتایج شکل (۸) باعث تشکیل بیشتر مواد سیمانی و افزایش بهتر ظرفیت باربری در این سری از نمونه‌ها شکل (۹) شده است.

شکل ۱۰. تغییرات رفتار تحکیمی خاک در اثر افزودن آهک

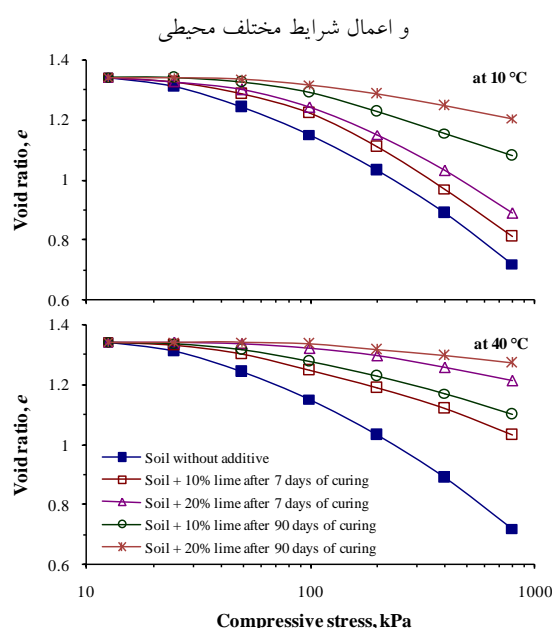


Fig. 10. The compersibility behavior of lime-treated soil cured at different ambient conditions.

علاوه بر شاخص مقاومت، قابلیت تراکم‌پذیری خاک پس از تثبیت، نیز تاثیر زیادی بر پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی ساخته شده روی آن دارد. پس در ادامه پژوهش حاضر، پتانسیل نشست‌پذیری نمونه‌ها از طریق انجام آزمایش تحکیم اندازه-گیری شد. نتایج شکل (۱۰) بیانگر آنست که با اضافه کردن آهک به خاک و افزایش زمان نگهداری، میزان نشست کاهش یافته که روند تغییرات با نتایج ارائه شده به وسیله سایر پژوهشگران [7, 9, 11] همپوشانی مناسبی دارد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد کاهش دما، تاثیری منفی بر مشخصات تحکیمی نمونه‌های اصلاح شده با آهک دارد. بر اساس توضیحات قبل و با استناد به نتایج مطالعات موجود [5, 19, 21]، علت این رفتار را می‌توان به اثر نامطلوب کاهش دما بر تکمیل واکنش‌های

از طرفی، با استناد به تفسیر آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری انتظار می‌رود حضور ذرات سیلیکا در سیستم خاک-آهک، از طریق یک سری سازوکارهای مختلف فیزیکی-شیمیایی از جمله رشد بیشتر و سریع‌تر مواد سیمانی، کاهش اندازه حفرات درون توده خاک، و توزیع یکنواخت‌تری از ترکیبات سیمانی مابین سطوح رسی، باعث افزایش تراکم ساختار و در نتیجه شدت-بخشی تاثیر آهک در تثبیت خاک شود. در این راستا، مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل‌های (۱۲-ب و ۱۲-ج) به وضوح بیانگر تفاوت ساختار نمونه‌های حاوی LNS نسبت به آهک تنها است. مشاهده می‌شود در شرایط یکسان نگهداری، نمونه تثبیت شده با ترکیب LNS از ساختار متراکم-تری برخوردار است. در این وضعیت به دلیل فشردگی بیشتر ذرات رسی و کاهش فضای خالی مابین آنها، پتانسیل نشست-پذیری کاهش و ظرفیت باربری خاک افزایش خواهد یافت. به گونه‌ای که روند تغییرات ریزساختاری مشاهده شده، با نتایج آزمایش‌های مکانیکی همخوانی دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- نتایج این پژوهش موید آنست که دمای عمل‌آوری نقش زیادی در اندرکنش خاک منبسط‌شونده و آهک دارد. کاهش دما (به ویژه دمای زیر  $20^{\circ}\text{C}$  و در زمان‌های نگهداری کمتر از ۲۸ روز) باعث اختلال در فعالیت پوزولانی شده و فرآیند اصلاح خاک پس از افزودن آهک، بیشتر ناشی از واکنش‌های کوتاه-مدت (تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمز) و ایجاد ساختار مجتمع رخ می‌دهد. این شرایط حدود دو برابر مصرف آهک برای کنترل تورم را افزایش داده و مانع از بهبود قابل ملاحظه سایر پارامترهای ژئومکانیکی خاک از جمله مقاومت فشاری و پتانسیل نشست‌پذیری می‌شود.

- مشخص شد در حضور نانوذرات سیلیکا اثر نامطلوب افت دما بر رشد مواد سیمانی در ترکیب خاک-آهک کاهش یافته و حساسیت رفتار نمونه‌ها به شرایط نگهداری کمتر می‌شود. به شکلی که در وضعیت یکسان، UCS نمونه‌های حاوی آهک-نانوذرات سیلیکا (LNS) بطور متوسط حدود ۱/۵ برابر بیشتر از نمونه‌های اصلاح شده با آهک تنها بوده و قابلیت فشردگی آنها تا ۶۵ درصد کمتر است. علاوه بر این، بهبود ظرفیت مکانیکی

حضور آهک-نانو سیلیکا کمتر شده است. این یافته تاکید دیگری بر شدت بخشی تاثیر آهک در تثبیت خاک، پس از افزودن نانوذرات سیلیکا به سیستم است.

علاوه بر آنالیزهای اشعه ایکس و با هدف بررسی بیشتر تغییرات ساختار خاک بعد از اندرکنش با مواد افزودنی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها در بزرگ‌نمایی یکسان (به منظور امکان مقایسه آرایش ذرات با یکدیگر) تهیه و در شکل (۱۲) ارائه شده است. تصاویر SEM نشان می‌دهد که افزودن آهک به خاک سبب ایجاد ساختار مجتمع و جامدشدگی ذرات شده که در نتیجه آن پیش‌بینی می‌شود پتانسیل تورم خاک کاهش و سایر ویژگی‌های ژئومکانیکی از جمله مقاومت و تراکم‌پذیری بهبود یابند. به گونه‌ای که این تغییرات با نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱، ۶ و ۱۰) هماهنگی مناسبی دارد.

شکل ۱۲. تصاویر SEM، الف) نمونه تورمی اولیه، ب) نمونه اصلاح شده با ۲۰٪ آهک پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ، ج) نمونه حاوی ۲۰ درصد LNS پس از ۲۸ روز نگهداری در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ .

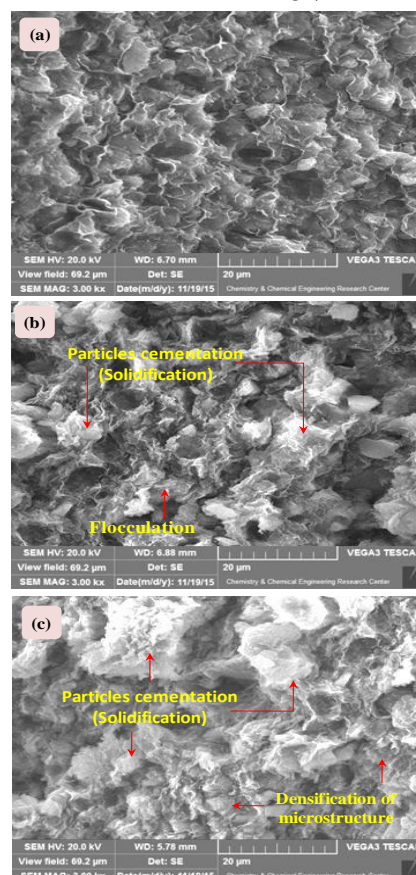


Fig. 12. SEM micrographs; (a) natural soil, (b) treated soil with 20% lime after 28 d of curing at  $20^{\circ}\text{C}$ , (c) treated soil with 20% LNS after 28 d of curing at  $20^{\circ}\text{C}$ .

mixtures. *Eng. Geology*, 185, 131-138.

9. Saeed K.H., Kassim K. & Nur H. 2014 Physicochemical characterization of cement treated kaolin clay. *Gradevinar*; 6, 513-521.

10. Hashemi M.A., Massart T.J., Salager S., Herrier G. & François B. 2015 Pore scale characterization of lime-treated sand-bentonite mixtures. *Appl. Clay Sci.*, 111, 50-60.

11. Ouhadi V.R., Yong R.N., Amiri M. & Ouhadi M.H. 2014 Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. *Appl. Clay Sci.*, 95, 111-118.

12. Aldaood A., Bouasker M. & Al-Mukhtar M. 2014 geotechnical properties of lime-treated gypseous soils. *Appl. Clay Sci.*, 88, 39-48.

13. Obuzor G.N., Kinuthia J. M. & Robinson R.B. 2011 Enhancing the durability of flooded low-capacity soils by utilizing lime-activated ground granulated blastfurnace slag (GGBS). *Eng. Geology*, 123, 179-186.

14. Zhang X., Mavroulidou M. & Gunn M.J. 2015 Mechanical properties and behaviour of a partially saturated lime-treated, high plasticity clay. *Eng. Geology*, 193, 320-336.

15. Gu K., Jin F., Al-Tabbaa A., Shi B., Liu C. & Gao L. 2015 Incorporation of reactive magnesia and quicklime in sustainable binders for soil stabilization. *Eng. Geology*, 195, 53-62.

16. Li X., Chen Q., Zhou Y., Tyrer M. & Yu Y. 2014 Stabilization of heavy metals in MSWI fly ash using silica fume. *Waste Management*, 34, 2494-2504.

17. Nazari A. & Riahi S. 2011 The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Composites*, 42, 570-578.

18. Hou P., Cheng X., Qian J., Zhang R., Cao W. & Shah S.P. 2015 Characteristics of surface-treatment of nano-SiO<sub>2</sub> on the transport properties of hardened cement pastes with different water-to-cement ratios. *Cement and Concrete Composites*, 55, 26-33.

19. Consoli N.C., Prietto P.D.M., da Silva Lopes L. & Winter D. 2014 Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. *Transportation Geotech.*, 1, 129-136.

20. Salman M., Cizer Ö., Pontikes Y., Vandewalle L., Blanpain, B. & Van Balen K. 2014 Effect of curing temperatures on the alkali activation of crystalline continuous casting stainless steel slag. *Construction and Building Materials*, 71, 308-316.

21. Rao S.M. & Shivananda P. 2005 Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. *Geotech. and Geological Eng.*, 23, 79-85.

مصالح در سیستم خاک-آهک (به دلیل عدم توانایی در تداوم واکنش پوزولانی) تا آستانه مشخصی امکان پذیر بوده که با افزودن نانوذرات سیلیکا این محدودیت برطرف خواهد شد.

- بر اساس طیف‌های اشعه ایکس و تصاویر SEM، علت عملکرد بهتر نمونه‌های حاوی LNS نسبت به آهک، ناشی از انجام سریع‌تر و بیشتر واکنش‌های پوزولانی به ویژه تشکیل ترکیب سیمانی CSH (به دلیل اندرکنش مستقیم آهک و ذرات سیلیکا) و افزایش تراکم ساختار (بر اثر کاهش اندازه حفرات و توزیع یکنواختی از مواد سیمانی بین سطوح رسی) است.

- نتایج آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری و ریزساختاری این مطالعه بیانگر آنست که استفاده از ترکیب LNS (به‌ویژه در هوای سرد و زمان محدود نگهداری) ضمن شدت‌بخشی فرآیند تاثیر آهک در تثبیت خاک، می‌تواند مصرف افزودنی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد.

## References

## ۵- منابع

- Hotineanu A., Bouasker M., Aldaood A. & Al-Mukhtar M. 2015 Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays. *Cold Regions Science and Technology*, 119, 151-157.
- Seco A., Ramírez F., Miqueleiz L. & García B. 2011 Stabilization of expansive soils for use in construction. *Appl. Clay Sci.*, 51, 348-352.
- Goodarzi A.R. & Akbari H.R. 2014 Assessing the anion type effect on the hydro-mechanical properties of smectite. *Geomechanics and Engineering*, 7, 183-200.
- Khemissa M. & Mahamedi A. 2014 Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. *Appl. Clay Sci.*, 95, 104-110.
- Al-Mukhtar M., Lasledj A. & Alcover J.F. 2010 Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C. *Appl. Clay Sci.*, 50, 199-203.
- Rao M.R., Rao, A.S. & Babu R.D. 2008 Efficacy of cement-stabilized fly Ash cushion in arresting heave of expansive soils. *Geotech Geol Eng.*, 26, 189-197.
- Jha A.K., & Sivapullaiah P.V. 2015 Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil. *Eng. Geology*, 198, 2015, 53-64.
- Di Sante M., Fratolocchi E., Mazzieri F. & Brianzoni V. 2015 Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil-lime

29. Di Sante M., Fratalocchi E., Mazzieri F. & Pasqualini E. 2014 Time of reactions in a lime treated clay soil and influence of curing conditions on its microstructure and behavior. *Appl. Clay Sci.*, 99, 100-109.
30. Tran T.D., Cui Y.J., Tang A.M., Audiguier M., & Cojean R. 2014 Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay. *Rock Mechanics and Geotech. Eng.*, 6, 399-404.
31. McCarthy M.J., Csetenyi L.J., Sachdeva A. & Dhir R.K. 2012 Identifying the role of fly ash properties for minimizing sulfate-have in lime-stabilized soils. *Fule*, 92, 27-36.
32. Kalkan E. 2011 Impact of wetting-drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume. *Appl. Clay Sci.*, 52, 345-352.
22. Bell F.G. 1996 Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geology*, 42, 223-237.
23. da Luz C.A. & Hooton R.D. 2015 Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. *Cement and Concrete Research*, 77, 69-75.
24. Kuo W.T. & Shu C.Y. 2015 Effect of particle size and curing temperature on expansion reaction in electric arc furnace oxidizing slag aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 488-493.
25. ASTM 2006 American Society for Testing and Materials. *Philadelphia*, 4.08.
26. EPA 1983 Process design manual: land application of municipal sludge. *Res. Lab. EPA-625/1-83-016*.
27. Asavapisita S., Nanthamontry W. & Polprasert C. 2001. Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. *Cement and Concrete Res.*, 31, 1147-1152.
28. Goodarzi A.R. & Salimi M. 2015 Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. *Appl. Clay Sci.*, 108, 61-69.

# Effect of Curing Temperature and SiO<sub>2</sub>-Nanoparticles on Engineering Properties of Lime Treated Expansive Soil

A.R. Goodarzi<sup>1\*</sup>, A.M. Moradloo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Associate Prof., Faculty of Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>M.Sc. of Civil Engineering, Faculty of Eng., Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

\*amir\_r\_goodarzi@yahoo.co.uk

## Abstract:

Expansive clayey soils can undergo periodic volumetric changes in the form of ground heave and settlement when subjected to moisture fluctuations. Such changes exert stress and serious problems to geotechnical structures, if not adequately taken care of. Lime continues to be commonly used for treatment of these soil types; however, some restrictions are associated with its application. In the present study, series of macro and micro level tests are carried out to assess the effects of environmental condition and SiO<sub>2</sub>-nanoparticles (NS) on the performance of lime treatment. Tests include swelling potential, unconfined compression strength (UCS), consolidation, pH and electrical conductivity (EC), adsorption, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) analyses and are performed at various curing periods (1, 7, 28 and 90 days) and different temperatures (10, 20, and 40 °C). To achieve the stated aim, lime and lime/NS (LNS) mixtures are separately added to highly expandable clay at wide ranges from 0% to 30% by mass, respectively. The results show that temperature, especially in the initial time of curing, has a prominent role on the geo-mechanical properties of lime treated soil samples. It is also found out that the reduction in the temperature -particularly at inadequate curing (lower than 28 days)- provides a deleterious impact on the pozzolanic activity and decreases the formation of cementing compounds such as Calcium-Silicate-Hydrate (CSH) and Calcium-Aluminate-Hydrate (CAH) gels. In this case, the process of soil modification is mainly due to the short-term reactions (i.e. cation exchange and increase in osmotic pressure), increasing the amount of additives (up to two times) to control the swelling power. On the other hand, corporation of SiO<sub>2</sub>-nanoparticles in the binder system causes a reduction in the detrimental effects of low temperature on the engineering parameters of lime-treated products and decreases their sensitivity to the time of curing. The samples amended with the LNS blend exhibit a continuous development of soil mechanical capacity as the additive content increased. They are less deformable and show a decrease in their compression index by nearly 40% as compared to sole lime. Based on the XRD and SEM test results, the superior influences of LNS are mainly ascribed to the higher and faster formation of cementitious compounds. In fact, at the presence of LNS, the silicate gel can be immediately formed to coat and bind the clay particles together; as a result of direct interaction of lime and silica from NS. Whereas, by addition of lime alone, the gel is produced only by the removal of silica from the clay minerals that needs further time to complete its formation; thus, the lower modification is occurred, especially at curing times shorter than 28 days. Moreover, NS reduces the pore sizes and serves to distribute the new crystalline phase (e.g. CSH gel) in a more homogenous fashion in the available space. This micro-structural reorganization - due to the LNS treatment - could rapidly block off the soil voids and greatly interlock the clay particles together. This will provide higher environmentally-stable materials with lower cost and energy as compared to standalone lime. According to the results and discussions, utilization of LNS mixture gives a promising way for increasing the efficiency of lime stabilization and decreasing additive consumption.

**Keywords:** Expansive clays, Lime, Temperature, SiO<sub>2</sub>-nanoparticles, Pozzolanic activity, Engineering properties.