

تأثیر استفاده از نانوسیلیس بر بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های مارنی اصلاح‌شده با آهک*

محمد امیری^(۱) عادل عساکره^(۲) امین حسین فرخدل^(۳)

چکیده خاک‌های مارنی از خاک‌های مسئله‌دار هستند که در صورت قرار گرفتن در معرض جریان آب به سهولت فرسایش می‌یابند و مشکلاتی را در پایداری بستر پروژه‌های عمرانی ایجاد می‌نمایند. یکی از روش‌های اصلاح شیمیایی خاک استفاده از مواد افزودنی مانند آهک، سیمان و نانوذرات است. در پژوهش حاضر تأثیر افزودن نانوسیلیس بر عملکرد آهک در بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های مارنی و تشکیل ترکیبات جدید ناشی از فرایند تثبیت بررسی شده‌است. در این راستا پس از تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مارن، بهبود ویژگی‌های مهندسی نمونه‌های تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف آهک شکفته و نانوسیلیس بعد از پایان دوره عمل‌آوری از طریق انجام آزمایش‌های مختلف مکانیکی (حدود اتربرگ، دانه‌بندی، رسوب و مقاومت فشاری محدودنشده (UCS)) و ریزساختاری (pH، پراش اشعه ایکس (XRD)) تجزیه و تحلیل شد. براساس نتایج پژوهش حاضر حضور نانوسیلیس در سیستم خاک مارنی-آهک، منجر به افزایش فعالیت‌های پوزولانی و رشد نانوساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) و توزیع یکنواخت این نانوساختارها می‌شود. هم‌چنین مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح‌شده با ترکیب نانوسیلیس و آهک متناسب با افزایش ماده افزودنی نانوسیلیس روند کاملاً صعودی دارد. براساس نتایج پژوهش حاضر خصوصیات مهندسی خاک‌های مارنی در نمونه اصلاح‌شده با ۶٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس، میزان مقاومت فشاری در ۷ روز اول به 18.45 kg/cm^2 افزایش یافته و نسبت به نمونه مرجع مقاومت فشاری ۱۸ برابر افزایش یافته‌است.

واژه‌های کلیدی مارن، نانوسیلیس، مقاومت فشاری محدودنشده، XRD، C-S-H.

The Effect of Combined Nanosilica and Lime on the Improvement of the Marl Soil Engineering Properties

M. Amiri

A. Asakereh

A.H. Farokhdell

Abstract Marls are problematic soils, which easily erode if they are exposed to water flow and problems in the stability of the bedding of construction projects can be occurred. One of the methods for soil chemical modification is the use of additives such as lime, cement and nanoparticles. The effect of adding nano-SiO₂ on the lime performance on the enhancement of the improvement process of the marl soil engineering properties and the formation of new compounds due to the stabilization process has been investigated in the present study. In this regard, after determining the geotechnical properties of Marl soil, improvement of engineering properties of samples stabilized with various percentages of lime and nano-SiO₂ after the end of the curing period was analyzed by performing large-scale experiments (Atterberg limits, aggregation, deposition and unconstrained compressive strength (UCS), and microstructure (pH) and X-ray diffraction (XRD)). According to the results of this study, the presence of nano-SiO₂ in the marl-lime soils system has led to increased pozzolanic activities and growth of calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminate hydrate (C-A-H) nanostructures and uniform distribution of these nanostructures. The compressive strength of the modified samples with the combination of nano-silica and lime proportional to the increased nano-silica additive has a quite ascending trend. Based on the results of the present study, the development rate of improvement of marl soil engineering properties in a modified specimen with 6% lime and 1% nano-SiO₂ increased the compressive strength in the first 7 days by 18.45 kg/cm^2 and the compressive strength increased by 18 times compared to the reference specimen.

Key Words Marl, Lime, Nano-SiO₂, UCS, C-S-H, XRD.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۴/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۳/۲۹ می‌باشد.

Email: amirii@chmail.ir

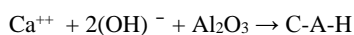
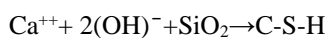
(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

(۲) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

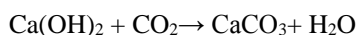
(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

(۲) لخته شدن (فولکوله شدن).

(۳) واکنش پوزولانی:



(۴) کربناسیون:



تبادل کاتیونی و کلوخه شدن جزء واکنش‌های اولیه هستند که بلافاصله بعد از اختلاط رخ می‌دهند. در جریان این واکنش‌ها، کاتیون‌های یک ظرفیتی موجود در لایه دوگانه رسی با کاتیون دو ظرفیتی کلسیم جایگزین می‌شوند. این واکنش‌ها موجب تغییرات سریع در نشانه خمیری، کارپذیری و کسب مقاومت می‌شوند [9-13].



شکل ۱ گسیختگی در پی‌ها و ترک‌های کششی به دلیل خاک‌برداری و هوازگی خاک مارن در جزیره قشم

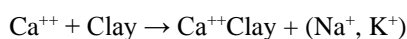
مقدمه

خاک‌های مارنی، خاک‌هایی با رفتار بسیار پیچیده هستند که در بسیاری از مناطق جهان مانند ایتالیا، اسپانیا، آمریکا، بریتانیا، کانادا، فرانسه، کشورهای حاشیه خلیج-فارس و ایران (از شمال و شمال غربی تا جنوب شرقی و در شرق و مرکز ایران)، مشاهده شده است [1-6]. در ایران، در شرق و مرکز در مناطق حاشیه‌ای خلیج فارس، استان آذربایجان شرقی، هرمزگان و جزیره قشم به وفور می‌توان خاک‌های مارنی را مشاهده کرد [3, 4, 6].

مشخصات مارن تابع مقدار کربنات و نوع و مقدار کانی‌ها در بخش رسی است [7]. عموماً بخش رسی مارن شامل پالی گورسکایت (Palygorskite) و سپیولایت (Sepiolite) است که عملکرد مارن را کنترل می‌کند. این دو کانی، برخلاف سایر کانی‌های رسی، دارای ساختار زنجیره‌ای هستند و معمولاً با سایر کانی‌های غیرسیلیکاتی هم‌چون کربنات‌ها و سولفات‌ها همراه‌اند [8-11]. مارن‌ها رفتار رَمبند، و اگرآ و تورمی را در حضور آب بروز می‌دهند [3-6]. در خلیج فارس و جزیره قشم، وقوع گسترده گسیختگی‌ها، از جمله فرسایش، گسیختگی در پی‌ها و شیب‌ها، ترک‌های کششی، ناپایداری وسیع در شیب‌های طبیعی و مصنوعی و در نهایت شستشوی خاک، مشاهده شده است [1, 6]. در شکل (۱) نمونه‌ای از گسیختگی در پی‌ها و ترک‌های کششی به دلیل خاک‌برداری و هوازگی مارن در جزیره قشم ارائه شده است.

در بسیاری از مناطق گرم جهان برای پایدارسازی و غلبه بر مشکلات مارن از سیمان و آهک استفاده می‌شود. هنگامی که آهک و خاک رسی باهم مخلوط شوند و در معرض رطوبت قرار بگیرند، واکنش‌های شیمیایی زیادی رخ می‌دهد که شامل تبادل کاتیون، کلوخه شدن (Flocculation-agglomeration)، واکنش پوزولانی و کربناسیون است [11-12].

(۱) تبادل کاتیونی:



تشکیل ترکیبات متورم‌شونده‌ای مانند اترینگایت و توموسایت در فرایند تثبیت با آهک در خاک‌های مارنی موجب شکست فرایند تثبیت شده‌است [10]. هم‌چنین تأثیر نانوسیلیس بر اثربخشی فرایند تثبیت به‌صورت جامع مورد ارزیابی قرار نگرفته‌است. بر این اساس اهداف این پژوهش تعیین تأثیر نانوسیلیس بر شدت‌بخشی فرایند تثبیت خاک‌های مارنی در فرایند تثبیت و تعیین میزان آهک و نانوسیلیس مورد نیاز برای انجام فرایند تبادل کاتیونی (واکنش کوتاه‌مدت) و نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی (واکنش بلندمدت) مارن-آهک در کوتاه‌مدت و بلندمدت از منظر ریزساختاری در طی زمان است.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش، نمونه مارن غرب شهر قشم است. این نمونه‌ها از نظر زمین‌شناسی متعلق به سازند آغاچاری است که در ناحیه، تناوبی از لایه‌های ماسه‌سنگ آهکی و مارن می‌باشد و با سازند زیرین آن هم‌بری عادی دارد و هم‌بری آن ناپیوستگی زاویه‌داری با نهشته‌های جوان‌تر دارد. سازند فوق، بدنه اصلی ساخت تکنیکی جزیره قشم را به‌وجود آورده‌است [4]. در محل مورد مطالعه شکست‌های گسترده‌ای در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی از قبیل گسیختگی در فونداسیون-ها، شیب‌ها و ترک‌های کششی گزارش شده‌است (شکل ۱). ساختار و کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک مارن را می‌توان عامل اصلی بروز چنین مشکلاتی دانست [10]. مشاهدات انجام‌شده در منطقه حاکی از آن است که بیشتر خرابی‌ها پس از بارندگی یا هوازگی خاک‌های مارنی رخ داده‌است. براساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS)، خاک مارن مورد مطالعه از نوع خاک رس با خصوصیات خمیری زیاد (CH) است و ۹۵٪ وزنی آن از الک شماره ۲۰۰ (کوچک‌تر از ۷۵ میکرون) عبور کرده‌است. آهک مورد استفاده بسیار نرم بوده و از الک ۸۰ میکرومتری گذرانده شده‌است. آنالیز شیمیایی

آنچه باعث افزایش قابل توجه مقاومت در ترکیب خاک و آهک می‌شود، واکنش پوزولانی است. در طی فرایند واکنش پوزولانی محیط بسیار قلیایی ($\text{pH}=12.4$) که با اضافه کردن آهک ایجاد شده‌است، باعث تجزیه سیلیکا و آلومینای کانی‌های رسی می‌شود و ترکیب با کلسیم باعث ایجاد ترکیبات سیمانی جدید نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)، نانوساختار هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) و هیدرات آلومینو-سیلیکات کلسیم (CSAH) می‌شود [11, 13, 16].

افزایش آهک، سبب به حداقل رساندن یا از بین بردن اثر ترشدگی در مارن می‌شود. اگرچه پس از گذشت مدت زمانی، گسیختگی‌های شدید در بسیاری از این خاک‌های پایدارشده، هم‌چنان گزارش می‌شود [1-3]. عمدتاً عوامل مکانیکی صرف برای توضیح این گسیختگی‌ها چندان جامع نیست [1,3]. در مارن‌های تثبیت‌شده، عموماً گسیختگی‌های غیرمنتظره در اثر شکل‌گیری کانی‌های متورم‌شونده اترینگایت (Ettringite) و تاموسایت رخ می‌دهد. اترینگایت یا هگزاکلسیم آلومینات تری سولفات هیدرات یک کانی با ترکیب شیمیایی $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26(\text{H}_2\text{O})$ است، این کانی دارای ساختار سوزنی است و به‌شدت تورم-پذیر می‌باشد [9-10].

ذرات نانو به‌علت دارا بودن سطح مخصوص بزرگ قادر به اندرکنش وسیعی با خاک هستند. حتی وجود مقدار کمی از آنها ممکن است تأثیرات اساسی روی رفتار فیزیکی، شیمیایی و مهندسی خاک‌ها بگذارد [17-19].

اصلاح خاک با آهک به‌دلیل مؤثر و اقتصادی بودن آن روشی متداول برای بهبود خصوصیات مقاومتی خاک به‌شمار می‌رود [20-21]. مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهند که تثبیت با آهک، ساختار خاک، خصوصیات خمیری خاک، روانی، پراکندگی، تورم و انقباض، رفتار نشست و نفوذپذیری را تغییر می‌دهد و موجب بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک می‌شود؛ اما از سوی دیگر

پراش پرتوی ایکس خاک مورد مطالعه در شکل (۲) ارائه شده است. براساس منحنی پراش پرتوی ایکس حدود ۳۳ درصد این خاک از کانی‌های رسی است، قله‌های ($d_{400}=3.17$ ، $d_{121}=4.26$ A° ، $d_{110}=10.34$ A°) مربوط به کانی پالی‌گورسکایت (۲۰ درصد)، قله ($d_{001}=2.19$ A°) مربوط به کانی سپیولایت (۷ درصد)، قله ($d_{001}=2.02$ A°) مربوط به کانی کانولینیت (۶ درصد) و حدود ۶۷٪ کانی‌های غیررسی (۳۷ درصد کوارتز و ۳۰٪ کانی کلسیت) تشکیل شده است [11,22].

به منظور تعیین درصد آهک و نانوسیلیس مورد نیاز برای تثبیت خاک، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی در مقادیر مختلف آهک و نانوسیلیس انجام شده است. برای تعیین مقدار آهک بهینه برای بهبود خصوصیات مهندسی، آزمایش‌های مکانیکی و فیزیکی انجام شد. ابتدا pH خاک و آهک به‌طور جداگانه تعیین شد [22]. سپس درصدهای مختلف ۲ تا ۱۰ درصد آهک و ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس به خاک اضافه شد. بر این اساس ۴ گرم خاک رد شده از الک شماره ۴۰ و خشک شده در هوا با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شد و درون بطری پلاستیکی حاوی درپوش به ظرفیت ۵۰ میلی‌لیتر (بیشتر) ریخته شد. سپس به مقدار ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی خاک، آهک و ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس توزین شد. خاک، آهک و نانوسیلیس به درون بطری پلاستیکی ریخته و با هم مخلوط شدند. سپس ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر به بطری اضافه و به مدت دو ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. pH محلول‌ها بعد از ۱، ۲، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۵ و ۹۹ روز نگهداری اندازه‌گیری شدند. مقادیر pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل (Istek-Ecomet) اندازه‌گیری شد.

به منظور انجام آزمایش‌ها بر روی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و نانوسیلیس، مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک و ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس به صورت خشک به خاک اضافه شده است. بعد از اختلاط کامل در حالت خشک، آب برای رساندن نمونه‌ها به درصد رطوبت بهینه (۲۰ درصد) به نمونه‌ها

آهک مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش به صورت پودری سفید رنگ و با خلوص ۹۸٪ از شرکت نانو ساو تهیه شده است. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس در جدول (۲) و آنالیز شیمیایی نانوسیلیس در جدول (۳) ارائه شده است.

بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق براساس استاندارد ASTM صورت گرفته است [22]. اندازه‌گیری سطح مخصوص خاک (SSA) نیز با استفاده از محلول EGME انجام شده است [23]. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده است [24].

برای تهیه نمونه‌های اشعه ایکس (XRD) از کلیه نمونه‌ها، یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شد و داخل تیوپ سانتیفریوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر) به خاک، این سوسپانسیون به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت برای اطمینان از حصول شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شد تا سیستم کاملاً همگن شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه توسط لرزاننده مجدداً هم زده شدند. در نهایت بین ۵ تا ۷ قطره از این سوسپانسیون بر روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شد و پس از خشک شدن، با دستگاه پراش پرتوی ایکس مدل (D8-ADVANCE X-Ray Diffractometer) مورد آزمایش قرار گرفتند [25].

برای تعیین میزان زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و میزان چسبندگی (c) نیز آزمایش برش مستقیم براساس استاندارد ASTM D 3080-90 انجام شده است [22]. در جدول (۴) برخی مشخصات ژئوتکنیکی و فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش ارائه شده است.

ارزیابی پراش پرتوی ایکس به عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک‌ها شناخته شده است. منحنی

درون قالب‌های استوانه‌ای (به قطر ۴/۶۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۹/۵ سانتی‌متر) با بیشینه وزن واحد حجم خشک برابر با ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده و به منظور سپری شدن دوره عمل‌آوری (برای زمان‌های ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) نمونه‌ها در حمام رطوبت نگهداری شده و در انتهای زمان عمل‌آوری، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

اضافه شد، سپس نمونه‌ها به منظور توزیع یکنواخت رطوبت، ترکیب شدند تا به صورت همگن درآیند. بر این اساس آزمایش تعیین حدود ات‌برگ (برای زمان عمل‌آوری ۷ روز) و آزمایش پراش پرتوی ایکس (برای زمان عمل‌آوری ۲۸ روز) بر روی ترکیب‌های مختلف خاک- آهک- نانوسیلیس به ترتیب براساس استاندارد ASTM D4318 و ASTM 2216 صورت گرفته است [22]. هم‌چنین نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری

جدول ۱ مشخصات شیمیایی آهک هیدراته براساس آنالیز XRF

Parameters Product type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	T.ALK	SO ₃	LOI	SrO	MnO
Hydrated Lime	1.71	0.7	0.20	72.4	0.83	0.1	0.1	-----	0.1	23.66	0.1	0.1

جدول ۲ مشخصه‌های فیزیکی نانوسیلیس

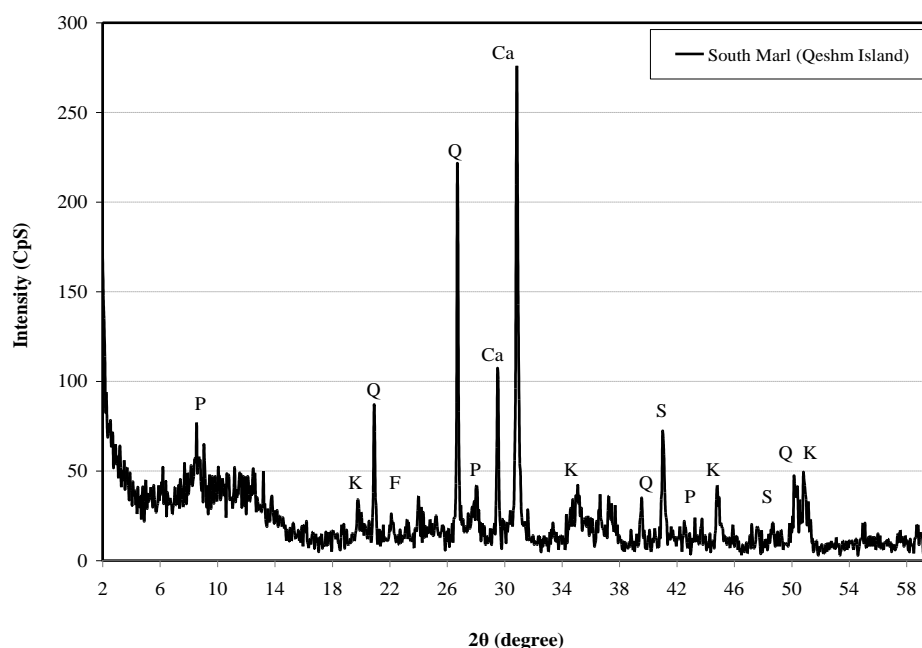
Color	Purity	Special surface area (m ² /g)	Particle Size (nm)	Density (kg/m ³)
white	> 98%	193	20-30	170

جدول ۳ آنالیز شیمیایی نانوسیلیس

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₂	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
98.95	0.042	0.16	0.075	0.041	<0.01	0.07	0.01	0.42

جدول ۴ برخی از مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه رسی مارن قشم

Physical properties of South Marl (Qeshm Island)	Quantity measured	References
Diameter less than 0.075 mm (%)	95	ASTM D422, [22]
Clay (%)	40	ASTM, D422-63 [22]
Silt (%)	55	ASTM, D422-63 [22]
Sand (%)	5	ASTM, D422-63 [22]
Liquid Limit (%)	58.6	ASTM, D4318 [22]
Plastic Limit (%)	28.0	ASTM, D4318 [22]
Plasticity Index (%)	30.6	ASTM, D4318 [22]
pH (1:10 ; soil : water)	6.93	
Surface area (m ² / kg*10 ⁻³)	44.2±3	Elthantaway & Arnold, 1973, [23]
Carbonate content (%)	33	[24]
Color	Brown	
Classification	CH	ASTM, D3282 [22]
Maximum dry density. γ _d (gr/cm ³)	1.67	ASTM D698 [22]
Optimum water content (%)	19.5	ASTM D698 [22]
Mineral composition	Palygorskite, Sepiolite, Calcite, Quartz	ASTM, D2216 [22]



شکل ۲. پراش اشعه ایکس نمونه مارن مورد مطالعه (مارن جزیره قشم)

P: پالی گورسکایت، S: سیپولایت، K: کائولینیت، M: مونت موریلونیت، Ca: کلسیت، Q: کوارتز

افزایش در میزان آهک باعث افزایش در میزان pH خاک شده و در واقع با افزایش آهک شکفته ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)، در مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی انجام شده- است؛ بنابراین کاتیون دوظرفیتی کلسیم (Ca^{++}) موجود در آهک جایگزین کاتیون تک ظرفیتی سدیم (Na^+) در خاک می‌شود و با افزایش غلظت یون هیدروکسید (OH^-) ناشی از یونیزه شدن آهک شکفته، pH محیط خاک افزایش می‌یابد [20, 26]. pH نمونه‌های خاک مارن حاوی نانوسیلیس بدون ماده اصلاح‌کننده آهک حدود ۰/۷ تا ۰/۹ افزایش یافته‌است. باتوجه به این‌که براساس روش pH، حداقل درصد آهک لازم برای تثبیت خاک، درصد آهکی است که pH محیط را به ۱۲/۴ برساند [20]، بنابراین مطابق با نتایج، حداقل درصد آهک مورد استفاده باید در حدود یا بیش از ۰/۴ وزنی خاک باشد.

براساس نتایج ارائه‌شده در نمونه حاوی ۰/۲ آهک و ۰/۵ نانوسیلیس pH محیط واکنش حدود ۱۱/۹۶ است که نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس تغییر معناداری ندارد.

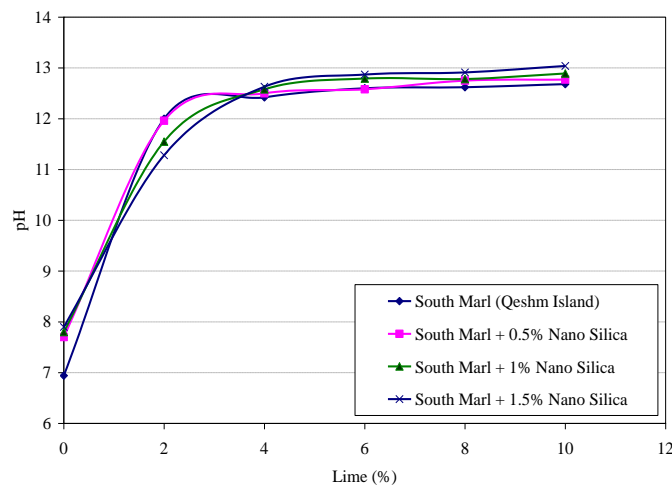
بحث و بررسی

تغییرات pH محیط واکنش در فرایند تثبیت

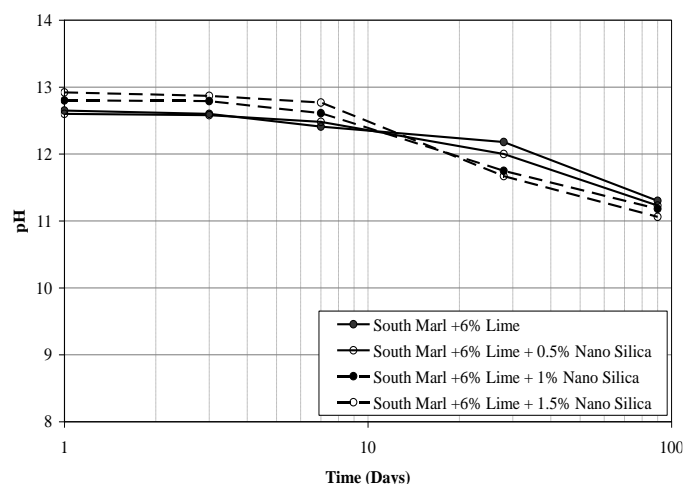
میزان حداقل آهکی که باید به خاک اضافه شود تا تبادل کاتیونی (تبادل Ca^{++} و Na^+) صورت بگیرد و در نتیجه یک تغییر گسترده در خواص خاک در کوتاه مدت رخ دهد را نقطه تثبیت آهک می‌گویند [5, 11, 20-21]. در این پژوهش تعیین این حداقل میزان آهک بر طبق اندازه‌گیری‌های pH و اعتباربخشی توسط آزمایش‌های پراش پرتوی ایکس و مقاومت فشاری تک‌محوری صورت گرفته‌است. pH یک شاخص مهم برای اثربخشی تثبیت آهک است. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۳)، pH خاک طبیعی ۶/۹۳ است و با افزودن تنها ۰/۲ آهک pH مخلوط خاک- آهک پس از ۷۲ ساعت تا ۱۱/۸۵ افزایش یافته‌است و با ۰/۴ آهک pH محیط به ۱۲/۳۴ رسیده‌است. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۳) در نمونه‌های حاوی ۰/۱۰ آهک، pH محیط سوسپانسیون بعد از ۷۲ ساعت به ۱۲/۶۸ افزایش یافته‌است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود

به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری و تأثیر درصدهای مختلف آهک و نانوسیلیس بر واکنش‌های بلندمدت (واکنش‌های پوزولانی)، تغییرات pH نمونه‌ها پس از اختلاط، تعیین و نتایج در شکل (۴) ارائه شده‌است. براساس تغییرات pH محیط واکنش، می‌توان شروع واکنش‌های پوزولانی را ارزیابی کرد. با افزایش زمان نگهداری میزان واکنش‌های پوزولانی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر کاهش مقدار pH در طول دوره عمل‌آوری بیانگر مصرف آهک برای انجام واکنش‌های پوزولانی است.

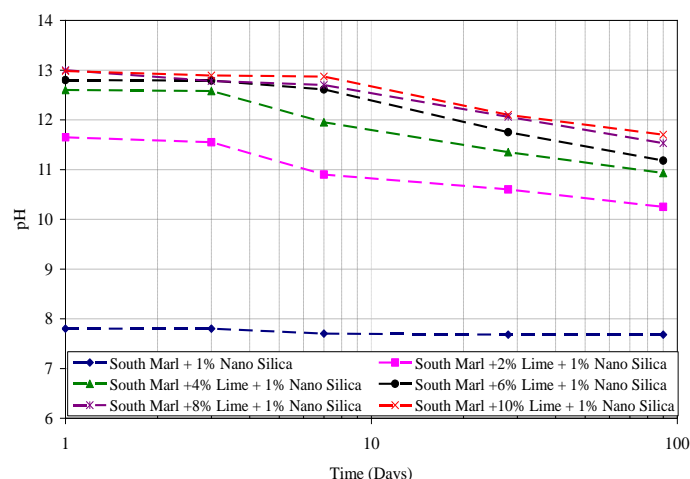
از سوی دیگر در نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس و ۲٪ آهک pH محیط واکنش به حدود ۱۱/۳ واحد رسیده‌است که کاهش ۰/۷ واحدی را نشان می‌دهد. در نمونه‌های اصلاح‌شده با ۱۰٪ آهک و درصدهای مختلف نانوسیلیس pH محیط سوسپانسیون نسبت به نمونه‌های فاقد نانوسیلیس افزایش یافته‌است؛ به‌نحوی که در نمونه حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس pH محیط واکنش حدود ۰/۴ واحد افزایش یافته‌است. برای بررسی دقیق این تغییرات نمودار تغییرات pH محیط واکنش در طی زمان در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده‌است.



شکل ۳ روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک و نانوسیلیس پس از ۷۲ ساعت



شکل ۴ روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با ۶٪ آهک و نانوسیلیس طی زمان (دوره عمل‌آوری ۹۰ روزه)



شکل (۵) روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با ۱٪ نانوسیلیس و آهک طی زمان (دوره عمل‌آوری ۹۰ روزه)

در شکل (۴) تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با ۶٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس ارائه شده است. براساس تغییرات pH محیط واکنش می‌توان شروع واکنش پوزولانی را ارزیابی کرد. براساس نتایج ارائه‌شده در تمام نمونه‌ها pH محیط واکنش در طی زمان کاهش می‌یابد؛ به نحوی که در نمونه اصلاح‌شده با ۶٪ آهک در طی زمان pH محیط واکنش حدود ۱/۳ واحد کاهش یافته و از ۱۲/۶۵ به ۱۱/۳ بعد از ۹۹ روز کاهش رسیده است. از سوی دیگر در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس اولیه pH محیط واکنش نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس در طی ۱۰ روز اول افزایش یافته اما پس از ۱۰ روز pH محیط واکنش نمونه‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس کمتر شده است.

در حقیقت در نمونه حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس و ۶٪ آهک pH محیط واکنش حدود ۱/۹ واحد طی ۹۹ روز کاهش یافته از ۱۲/۹۲ به ۱۱/۰۶ کاهش رسیده است. در حقیقت می‌توان بیان کرد نانوسیلیس در کوتاه‌مدت موجب افزایش pH محیط واکنش شده است، یا به عبارتی نانوسیلیس در کوتاه‌مدت (کمتر از ۱۴ روز) موجب شدت بخشی واکنش‌های پوزولانی شده است. در حقیقت تا زمانی که یون هیدروکسید ناشی از فرایند یونیزاسیون در محیط انتشار یابد، pH محیط خاک-آهک-نانوسیلیس افزایش می‌یابد [20, 26]. با افزایش زمان نگهداری، pH نمونه‌ها کاهش یافته است به گونه‌ای که

سرعت کاهش pH، با افزایش در مقدار آهک، افزایش می‌یابد. در واقع کاهش سریع‌تر pH در نمونه‌های حاوی درصد‌های بیشتر آهک و درصد‌های بیشتر نانوسیلیس نشان از افزایش سرعت ایجاد واکنش‌های پوزولانی در خاک است.

در شکل (۵) بررسی تأثیر درصد آهک در نمونه‌های حاوی ۱٪ نانوسیلیس ارائه شده است. در این شکل تغییرات pH در زمان عمل‌آوری ۱۰۰ روزه برای مقادیر مختلف ترکیبات خاک-آهک (۲٪ تا ۱۰٪)- نانوسیلیس (۱٪) ارائه شده است. براساس نتایج ارائه‌شده در کلیه نمونه‌ها افزایش درصد آهک موجب افزایش pH محیط واکنش شده است. برای نمونه‌هایی که حاوی ۲٪ آهک هستند، pH بعد از ۳ روز به آهستگی کاهش یافته است. در نمونه‌های حاوی ۴٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس pH محیط واکنش در ۴ روز اول بیش از pH نمونه اصلاح‌شده با ۴٪ آهک است اما بعد از ۴ روز pH محیط کمتر می‌شود. در نمونه حاوی ۶٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس در ۱۰ روز ابتدایی pH محیط واکنش بیش از ۱۲/۴ و بیش از نمونه حاوی ۶٪ آهک است که این امر نشان‌دهنده شدت بخشی واکنش‌های پوزولانی در ابتدای زمان عمل‌آوری است، برای نمونه حاوی ۸٪ و ۱۰٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس نیز همین روند مشاهده می‌شود. در حقیقت آهک برای انجام واکنش‌های پوزولانی در حضور نانوسیلیس به دلیل واکنش کلسیم با

پالی گورسکایت و سپیولایت شده است [11]. در واقع تشکیل ساختار مجتمع ذرات خاک (تبادل کاتیونی) و هم‌چنین مصرف ذرات رسی در واکنش‌های پوزولانی (به دلیل حلالیت سیلیس و آلومینا در محیط با pH بالا) و پوشیده شدن آنها به وسیله ترکیبات نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)، میزان بازتابش پرتوی ایکس را کاهش داده که در نهایت باعث کاهش یافتن شدت قلّه کانی‌های رسی (پالی گورسکایت، کائولینیت و سپیولایت) شده است.

از سوی دیگر الگوهای پراش پرتوی ایکس، بازتاب‌هایی را برای کریستال‌های هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در نمونه‌های اصلاح شده با ۶٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس نشان می‌دهد. این بازتاب‌ها با افزایش آهک، افزایش نانوسیلیس و زمان عمل‌آوری افزایش داشته است. ترکیبات تشکیل شده شامل نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات کلسیم آلومینات (C-A-H) است [22]. این مواد معمولاً حفرات خاک را پر کرده و یا این که ذرات آن را می‌پوشانند. در نتیجه تخلخل و نفوذپذیری بسته به درصد آهک کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش درصد نانوسیلیس هر چند که روند رشد نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) به صورت نسبی مشاهده می‌شود، اما به وضوح میزان رشد قابل مشاهده نیست. از سوی دیگر براساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) بازتاب‌هایی نیز در 3.87 \AA ، 3.49 \AA ، 2.71 \AA و 2.20 \AA مشاهده می‌شود که مربوط به کانی اترینگایت است. درحقیقت آزاد شدن آلومینا از کانی‌های پالی گورسکایت و سپیولایت و کائولینیت موجود در خاک مارن و یون کلسیم ناشی از آهک و سولفات موجود در آب منفذی منجر به ایجاد کانی اترینگایت می‌شود. از سوی دیگر براساس پراش‌های ارائه شده در شکل (۶) به وضوح مشاهده می‌شود که حضور نانوسیلیس به شدت موجب کاهش رشد کانی اترینگایت در نمونه‌ها شده است. در حقیقت با افزایش درصد نانوسیلیس شدت قلّه کانی اترینگایت کاهش می‌یابد و به دلیل اتصال ذرات خاک به یکدیگر، ساختاری بسیار متراکم

ذرات نانوسیلیس سریع‌تر به مصرف رسیده و در نتیجه منجر به کاهش pH محیط واکنش شده است.

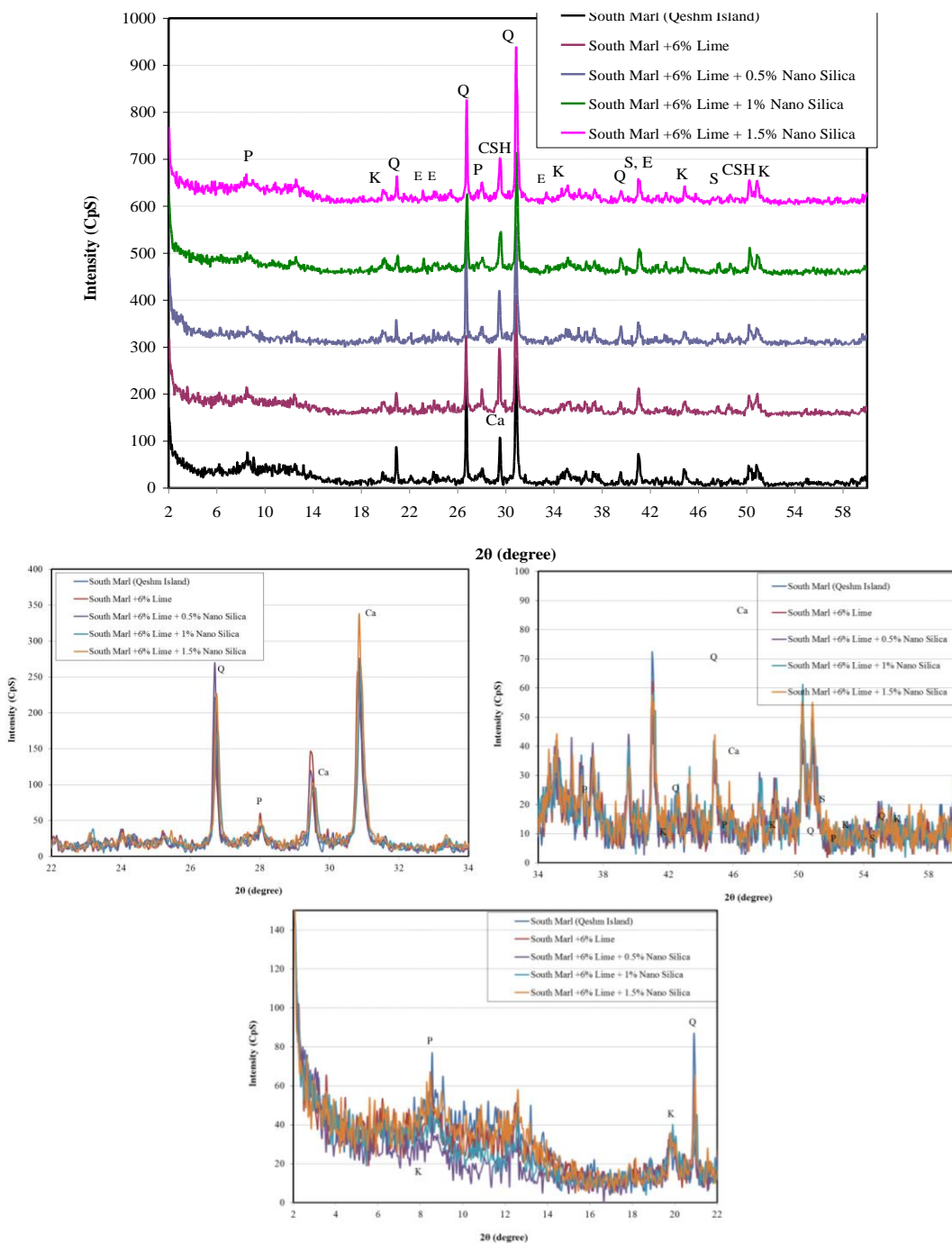
کاهش pH در طول دوره عمل‌آوری را می‌توان با مصرف آهک برای واکنش پوزولانی توضیح داد؛ زیرا تبادل یون مثبت (تبادل کاتیونی) بر غلظت یون هیدروکسید (OH^-) تأثیر می‌گذارد. کاهش آهسته pH مربوط به نمونه‌های اصلاح شده، به علت فعالیت آهسته واکنش پوزولانی است. به علاوه برای نمونه‌های اصلاح شده با ۲٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس (در حدود مصرف اولیه آهک $\text{pH} \leq 12$) کاهش کم در مقدار pH، عدم رخداد واکنش پوزولانی یا واکنش بسیار کم پوزولانی را نشان می‌دهد. در حقیقت در تمام نمونه‌های حاوی آهک و ۱٪ نانوسیلیس pH محیط واکنش در طی ۹۰ روز حدود $1/3$ تا $1/6$ واحد کاهش یافته است.

آنالیز ریزساختاری فرایند تثبیت

فرایند تثبیت خاک مارن-آهک-نانوسیلیس به واسطه تأثیر نهادن بر نیروهای بین پولک‌ها سبب تغییر در ریزساختار خاک‌های مارنی می‌شود [9,25]. ارزیابی طیف اشعه ایکس به عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک‌ها شناخته شده است؛ به طوری که طیف اشعه ایکس نمونه‌های رسی دارای ساختار پراکنده دارای شدت بیشتری در مقایسه با قلّه طیف اشعه ایکس نمونه‌های رسی دارای ساختار درهم است. به منظور امکان تفسیر رفتار مشاهده شده از دیدگاه ریزساختاری، پراش پرتوی اشعه ایکس نمونه‌های مارن و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف آهک و نانوسیلیس تهیه شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

شکل (۶) منحنی پراش پرتوی ایکس نمونه‌های مارن و مارن اصلاح شده با ۶٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) را پس از دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) در نمونه حاوی ۶٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس، افزایش آهک هیدراته موجب افزایش pH محیط واکنش (شکل ۴) به بیش از ۱۲ و حل‌شدگی قلّه‌های کانی‌های رسی کائولینیت،

تشکیل شده و منافذ خاک به شدت پر شده است. هم‌چنین افزودن نانوسیلیس به مخلوط خاک مارن-آهک منجر به افزایش پایداری نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) می‌شود. در این حالت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به دلیل توزیع گسترده و یکنواخت CSH در سطح ذرات خاک، تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافته است. شایان ذکر است محتوای کربنات بالا در مارن‌ها می‌تواند بر پایداری C-(A)-S-H که بر تثبیت آهک شکل گرفته است، تأثیر بگذارد.



شکل ۶ منحنی پراش اشعه ایکس نمونه رسی مارن و مارن اصلاح شده با ۶٪ آهک و درصدهای مختلف نانوسیلیس P: پالی گورسکایت، S: سپیولایت، K: کائولینیت، M: مونت موریلونیت، Ca: کلسیت، Q: کوارتز، C-S-H: هیدرات سیلیکات کلسیم

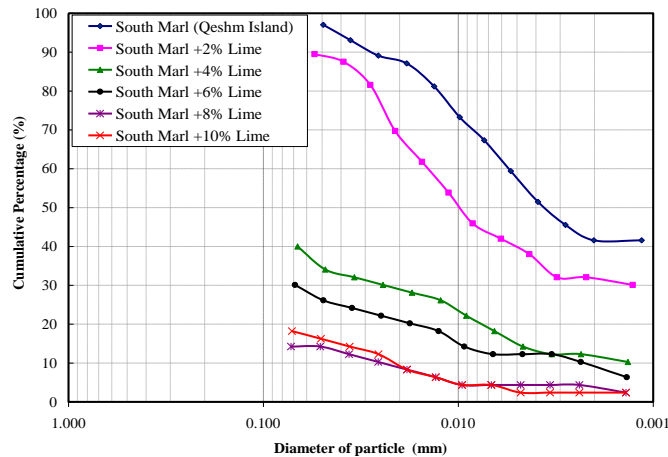
تغییرات بافت خاک مارنی در طی فرایند تثبیت با آهک توسط افزایش اندازه ذرات منعکس می‌شود. به‌طور معمول، مبادله کاتیون و فولوکس شدن، عمدتاً برای بهبود کوتاه‌مدت خواص ژئوتکنیکی قابل قبول است. در مقابل واکنش‌های پوزولانی که منجر به تشکیل C-(A)-S-H می‌شوند، فرایندهای آهسته‌ای هستند که به‌طور چشم‌گیری در بهبود کوتاه‌مدت [26] تأثیری نخواهند داشت و در درازمدت مؤثر هستند. نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که اثر فولوکس شدن فوری باعث افزایش محدودی در اندازه ذرات می‌شود. براساس نتایج پراش اشعه ایکس (شکل ۶) تشکیل نانو ساختارهای C-S-H حدود یک هفته از تثبیت شناسایی شد و در افزایش اندازه ذرات تأثیر چندانی ندارد.

براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۸) برای نمونه-های اصلاح‌شده با آهک، درحالی‌که در نمونه خالص پس از ۱۰ دقیقه حدود ۱۰٪ رسوب مشاهده می‌شود، این مقدار با افزایش ۲٪ آهک به ۸۰٪ رسیده‌است. با افزایش میزان آهک به نمونه‌ها فرایند رسوب در نمونه-ها به دلیل افزایش جایگزینی کاتیون‌های دوظرفیتی به جای کاتیون‌های تک‌ظرفیتی، فرایند تبادل کاتیونی و کلوخه شدن به سرعت صورت می‌پذیرد. به عبارتی در نمونه‌های حاوی ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ آهک در زمانی کمتر از ۱۰ دقیقه فرایند رسوب به‌طور کامل صورت پذیرفته-است.

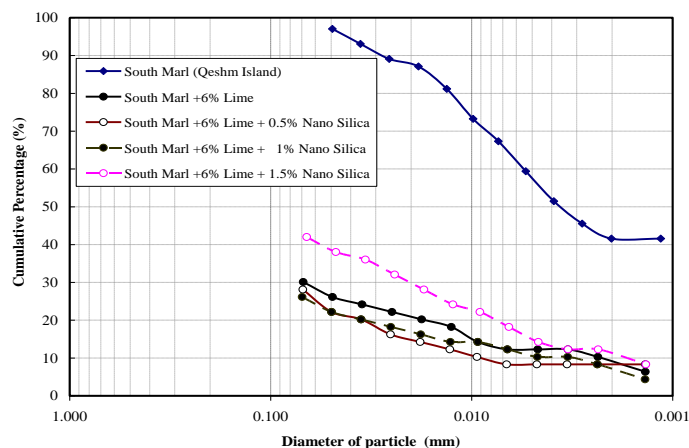
درحقیقت با افزایش Ca(OH)_2 به نمونه، همراه با جایگزینی کاتیون‌های دوظرفیتی کلسیم به جای کاتیون تک‌ظرفیتی سدیم در محیط، واکنش‌های یونیزاسیون آهک موجب آزاد شدن یون‌های هیدروکسید (OH^-) می‌شود که این امر افزایش pH محیط را نتیجه می‌دهد (شکل‌های ۳ و ۴). با توجه به حدود سرعت قابل توجه رسوب نمونه‌ها می‌توان بیان کرد که در فرایند رسوب نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک، فاز تبادل کاتیونی نقش اساسی را ایفا کرده‌است. این امر را بررسی نتایج pH نیز

بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی در فرایند تثبیت
شکل (۷-الف) منحنی هیدرومتری نمونه‌های اصلاح‌شده با درصد‌های متفاوت آهک را پس از ۷ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۷-الف) با افزایش آهک به دلیل واکنش‌های شیمیایی و تشکیل پیوند بین ذرات، فرایند فولوکوله شدن صورت می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ۲٪ آهک، درصد ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرون از ۶۰٪ به حدود ۳۸٪ کاهش یافته‌است. این در حالی است که این مقدار با افزایش ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ آهک به حدود ۱۲٪، ۴٪ و ۳٪ کاهش یافته‌است. به عبارت دیگر به دلیل چسبیدن ذرات لای و رس به یکدیگر توسط ترکیبات سیمانی به‌وجودآمده در نتیجه واکنش‌های پوزولانی خاک-آهک، افزایش قطر ذرات مشاهده می‌شود. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۷-ب) افزودن درصد‌های مختلف نانو سیلیس به نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک از نظر تغییر اندازه ذرات چندان مؤثر نبوده‌است. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۷-الف) و (۷-ب) با افزایش درصد آهک و نانو سیلیس به دلیل تغییرات ضخامت لایه دوگانه نمونه مارن و تغییر ریخت‌شناسی، فرایند کلوخه شدن صورت گرفته‌است. شایان ذکر است که فولوکس شدن ذرات خاک بلافاصله پس از تثبیت آهک اتفاق می‌افتد و موجب کاهش شدید مساحت سطح و افزایش اندازه ذرات می‌شود. درحقیقت حضور الکترولیت، تلورانس ذرات کلوئیدی رس را تسهیل می‌کند که باعث انباشته شدن آنها و در نتیجه کاهش مساحت سطح می‌شود [20-21]. با توجه به نظریه ون اولفن (۱۹۸۷)، ضخامت لایه دوگانه بین ذرات با افزایش غلظت الکترولیت کاهش می‌یابد [27]. این یافته‌ها در نمونه‌های تثبیت‌شده با مارن نشان داده شده‌است، که نشان‌دهنده کاهش قابل توجهی در مساحت سطح در غلظت‌های زیاد آهک است [6]. به عبارت دیگر به دلیل تغییرات ضخامت لایه دوگانه و تشکیل ساختار مجتمع در نتیجه حضور آهک، افزایش قطر ذرات مشاهده می‌شود. داده‌های اخذشده از آزمایش رسوب نتایج این بخش را تأیید می‌کند.

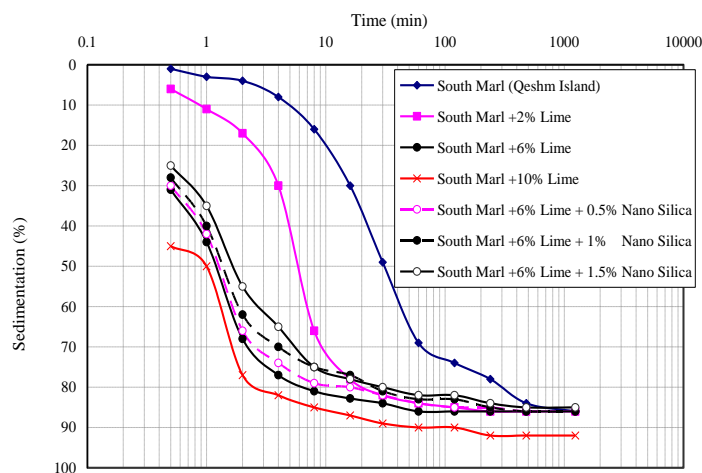
تأیید می‌کند (شکل ۴). شایان ذکر است افزایش نداشته‌است، در حقیقت تأثیر آهک بر حضور نانوسیلیس تأثیر قابل توجهی بر فرایند رسوب نانوسیلیس غالب است.



شکل ۷ الف) منحنی هیدرومتری خاک مارن به همراه منحنی هیدرومتری نمونه‌های اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف آهک



شکل ۷ ب) منحنی هیدرومتری خاک و اگر به همراه منحنی هیدرومتری نمونه‌های اصلاح‌شده با ۶٪ آهک و درصد‌های متفاوت نانوسیلیس



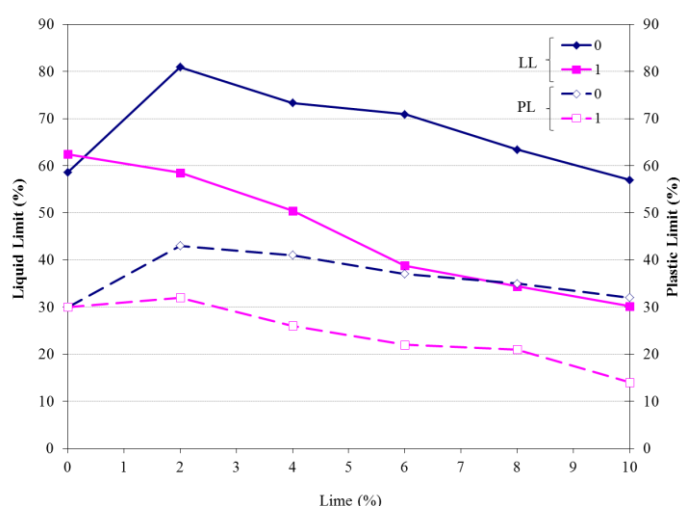
شکل ۸ منحنی رسوب خاک مارن به همراه نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک

پراش اشعه ایکس و تغییرات حد روانی و حد خمیری می‌توان بیان نمود که حضور کانی تورمی اترینگایت در نمونه خاک مارنی موجب می‌شود که بررسی درشت‌ساختاری تثبیت خاک که بر جنبه‌های مکانیکی و فیزیکی عملکرد خاک توجه دارد، قادر به ارزیابی بی-ثباتی خاک مارن تثبیت شده نباشد.

از سوی دیگر براساس نتایج ارائه شده در شکل (۹)، در نمونه اصلاح شده با درصد‌های مختلف آهک و ۱٪ نانوسیلیس، حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها کاهش یافته است. درحقیقت براساس نتایج پراش اشعه ایکس ارائه شده در شکل (۶)، حضور نانوسیلیس باعث کاهش شدت قله اترینگایت شده است. از سوی دیگر فرایند لخته شدن در خاک تثبیت شده با آهک باعث بهم پیوستن ذرات خاک می‌شود، این امر سطح تماس خاک با آب را کاهش می‌دهد، در نتیجه حد روانی نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان آهک به ۱۰٪ حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. از سوی دیگر به دلیل مرز کرناته ایجاد شده ناشی از ساختار لخته شدن، مقدار آب در ساختار خاک افزایش می‌یابد و منجر به افزایش بیشتر حد روانی می‌شود [20].

خواص فیزیکی خاک عمدتاً تحت تأثیر نوع و مقدار مواد معدنی خاک رس است [21-6]. باتوجه به حضور حدود ۳۳٪ کانی‌های رسی کائولینیت، سپیولایت و پالی‌گورسکایت در خاک مارنی مورد مطالعه، مقادیر حد روانی و شاخص خمیری به ترتیب ۵۸/۶ و ۲۸ (جدول ۴) حاصل شده است [3-1]. در شکل (۹) نتایج مربوط به تغییرات حد روانی و حد خمیری خاک مارن اصلاح شده با درصد‌های مختلف (۲ تا ۱۰ درصد) و نانوسیلیس (۱٪) در دوره عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است. براساس نتایج، با افزودن آهک مقدار حد روانی و حد خمیری در دوره عمل‌آوری ۷ روزه افزایش پیدا می‌کند؛ به گونه‌ای که در حالت افزودن ۲٪ آهک به خاک مارن، حد روانی و حد خمیری خاک به ترتیب به ۸۰ و ۳۹/۶ واحد رسیده است و افزایش ۳۸٪ و ۳۲٪ را نشان می‌دهد. در نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک حد روانی ۲۱٪ و حد خمیری ۹٪ افزایش را نشان می‌دهد.

براساس نتایج پراش اشعه ایکس (شکل ۶)، حضور کانی تورمی اترینگایت در نمونه خاک مارن پس از تثبیت با آهک موجب افزایش حد روانی و حد خمیری خاک مارنی می‌شود. به‌طور کلی براساس نتایج



شکل ۹ منحنی تغییرات حد روانی و شاخص خمیری نمونه‌های اصلاح شده با آهک طی دوره عمل‌آوری ۷ روزه

رسیده است. بر این اساس رفتار مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) را می‌توان به تغییرات ساختار ذرات که در اثر واکنش‌های کوتاه‌مدت ایجاد شده‌اند نیز نسبت داد. تبادل کاتیونی به وسیله کلسیم یک ساختار پایدارتر (غیرمترم) و فشرده‌تر ایجاد می‌کند که به نمونه رسی استحکام بیشتری می‌دهد. به علاوه تشکیل نانوساختار هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) و هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در این رفتار نقشی تعیین‌کننده داشته‌است [10-13].

در نمونه اصلاح‌شده با ۶٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری نسبت به نمونه اصلاح‌شده با ۶٪ آهک تقریباً دو برابر افزایش یافته‌است، این افزایش می‌تواند به دلیل افزایش تشکیل نانوساختار C-S-H و همچنین تشکیل ساختار متراکم‌تر باشد. از سوی دیگر افزایش نانوسیلیس به ترکیب خاک مارن و آهک منجر به پایداری بیشتر نانوساختار C-S-H می‌شود. شایان ذکر است با افزایش میزان نانوسیلیس به ۱/۵٪ روند افزایش مقاومت ادامه می‌یابد. در نمونه اصلاح‌شده با ۱۰٪ آهک مقاومت فشاری مارن به حدود $14/2 \text{ kg/cm}^2$ رسیده‌است، افزایش ۰/۵٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری را حدود 20 kg/cm^2 افزایش داده‌است و به رسانده‌است. شایان ذکر است در نمونه اصلاح‌شده با ۱۰٪ آهک و ۱/۵٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری محدود نشده به حدود $44/8 \text{ kg/cm}^2$ افزایش یافته‌است.

شکل (۱۱) روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف آهک و ۱٪ نانوسیلیس را طی زمان ارائه داده‌است. روند افزایش مقاومت نمونه‌های اصلاح‌شده با ۱٪ نانوسیلیس در فقدان آهک در طی زمان نشان می‌دهد که حضور نانوسیلیس در طی زمان تأثیرگذار نیست. از سوی دیگر در نمونه اصلاح‌شده با ۲٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس میزان مقاومت فشاری پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری به حدود $6/5 \text{ kg/cm}^2$ رسیده‌است و پس از ۷ روز به $9/07 \text{ kg/cm}^2$ رسیده‌است، این رفتار را می‌توان به ماهیت کلوخه

شکل (۱۰) روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک و نانوسیلیس را بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه شده حضور نانوسیلیس در فقدان آهک تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری خاک مارنی نداشته‌است، هرچند که در حضور ۱/۵٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز عمل‌آوری حدود $0/8 \text{ kg/cm}^2$ افزایش یافته‌است. این افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس باشد، از سوی دیگر درصد بالای کربنات موجود در خاک مارن (جدول ۴) و میزان فعالیت زیاد نانوسیلیس می‌تواند منجر به واکنش‌های محدود شیمیایی نیز شده باشد.

افزایش ۲٪ آهک مقاومت فشاری خاک مارنی را بیش از $5/5 \text{ kg/cm}^2$ افزایش داده‌است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۰) در نمونه حاوی ۲٪ آهک، افزایش مقاومت فشاری به مقدار ناچیزی وابسته به واکنش‌های پوزولانی است و به عامل اصلی افزایش مقاومت ماهیت کلوخه‌ای شدن خاک اصلاح‌شده که با واکنش سریع آهک با خاک رس (تبادل کاتیونی و کلوخه شدن) ایجاد می‌شود، نسبت داده می‌شود. همچنین براساس منحنی پراش پرتوی ایکس ارائه شده در شکل (۶) در نمونه اصلاح‌شده با آهک، قله‌های بسیار ضعیف نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) مشاهده می‌شود. از سوی دیگر افزایش ۰/۵٪ نانوسیلیس به ۲٪ آهک مقاومت فشاری را به بیش از $7/8 \text{ kg/cm}^2$ می‌رساند و افزایش ۰/۴٪ مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. با افزایش نانوسیلیس به ۱/۵٪ در حضور ۲٪ آهک مقاومت فشاری خاک مارنی اصلاح‌شده به حدود $14/4 \text{ kg/cm}^2$ رسیده‌است. این افزایش مقاومت را می‌توان به دلیل فعل و انفعالات شیمیایی ذرات نانوسیلیس و آهک دانست.

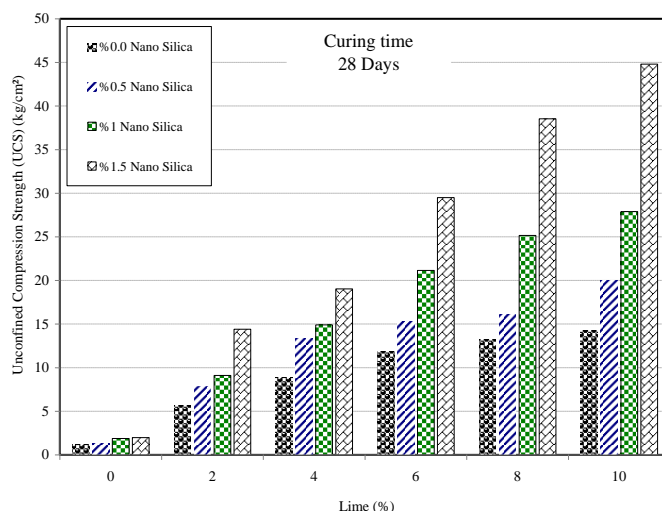
در نمونه اصلاح‌شده با ۶٪ آهک در فقدان نانوسیلیس مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع حدود ۱۰ برابر افزایش یافته‌است و به حدود $11/8 \text{ kg/cm}^2$

فشاری در ۷ روز اول به $18/45 \text{ kg/cm}^2$ افزایش یافته است، در واقع نسبت به نمونه مرجع مقاومت فشاری ۱۸ برابر افزایش یافته است و نسبت به نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک مقاومت فشاری بعد از ۷ روز عمل آوری حدود 10 kg/cm^2 افزایش یافته است. براساس نتایج تغییرات pH ارائه شده در شکل (۵)، pH نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس در ۱۰ روز اول بیش از ۱۲ واحد است، درحقیقت حضور ۱٪ نانوسیلیس موجب شده است که pH محیط واکنش در مدت بیشتری بیش از ۱۲ واحد باشد و افزایش مقاومت به دلیل ادامه واکنش های پوزولانی است. در واقع حضور نانوسیلیس و تداوم $\text{pH} \geq 12$ موجب توسعه واکنش های پوزولانی در کوتاه مدت شده است و میزان رشد مقاومت در کوتاه مدت افزایش یافته است.

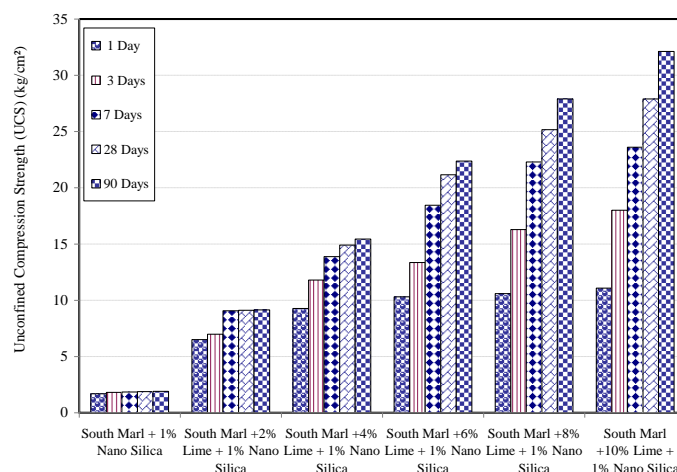
شایان ذکر است نرخ رشد واکنش های پوزولانی بعد از ۲۸ روز نمی تواند قابل توجه باشد ($\text{pH} \leq 12$) افزایش مقاومت فشاری محدود است. با افزایش مقدار آهک به ۸٪ و ۱۰٪ برای مقدار ثابت ۱٪ نانوسیلیس براساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، pH محیط واکنش در ۳۰ روز اول بیش از ۱۲ واحد است. از این رو شرایط رشد واکنش های پوزولانی فراهم می شود. نتایج مقاومت فشاری محدود نشده نیز این امر را تأیید می کند. براساس نتایج ارائه شده در نمونه اصلاح شده با ۱۰٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری محدود نشده به kg/cm^2 ۲۷/۹ رسیده است که افزایش ۲۵ برابری مقاومت فشاری را نشان می دهد. شایان ذکر است بعد از ۲۸ روز به دلیل کاهش نرخ واکنش های پوزولانی ($\text{pH} \leq 12$) کاهش نرخ رشد مقاومت مشاهده می شود. از سوی دیگر مقایسه نمونه اصلاح شده با ۱۰٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس نسبت به نمونه اصلاح شده با ۱۰٪ آهک افزایش kg/cm^2 ۱۳ تا kg/cm^2 ۱۵ مقاومت فشاری را در طی زمان نشان می دهد.

شدن خاک اصلاح شده که با واکنش سریع آهک و خاک ایجاد شده و تشکیل محدود نانوساختار C-S-H نسبت داد. بعد از ۷ روز عمل آوری افزایش مقاومت مشاهده نمی شود. در حقیقت بخش اعظم آهک اضافه شده به نمونه در طی ۷ روز اول به مصرف واکنش های پوزولانی رسیده است. بررسی منحنی تغییرات pH در شکل (۵) این نتیجه را تأیید می کند. در حقیقت یون هیدروکسید (OH^-) که موجب افزایش pH شده است پس از ۱۴ روز به مقدار قابل توجهی مصرف شده است. برای مقادیر کم آهک (۲ و ۴ درصد) که به نمونه خالص اضافه شده است مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) در طول ۱۴ روز به مقدار بیشینه می رسد و به نظر می رسد این مقادیر آهک به طور کامل برای واکنش کوتاه مدت مورد استفاده قرار گرفته است؛ بنابراین میزان واکنش های پوزولانی در خاک اصلاح شده نمی تواند قابل توجه باشد یا به عبارتی واکنش های پوزولانی پیشرفت نمی کنند. شایان ذکر است در تمام نمونه های اصلاح شده با ۲٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس نسبت به نمونه اصلاح شده با ۲٪ آهک مقاومت فشاری بین $3/5 \text{ kg/cm}^2$ تا 4 kg/cm^2 افزایش یافته است.

بررسی مقاومت فشاری محدود نشده نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک نیز نشان می دهد درحالی که مقاومت فشاری نمونه در ۷ روز اول حدود ۷ برابر افزایش یافته است، اما پس از ۱۴ روز نرخ رشد مقاومت فشاری بسیار کند شده است و به حدود ۷٪ رسیده است. برای یک نمونه اصلاح شده با ۶ درصد آهک، افزایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) بعد از ۲۸ و ۹۹ روز به ترتیب ۹ و ۱۰ برابر بوده است. ارزیابی pH محیط واکنش (شکل ۵) نیز نشان می دهد که در طی ۲۸ روز اول $\text{pH} \geq 12$ بوده است. درحقیقت $\text{pH} \leq 12$ موجب عدم تداوم واکنش های پوزولانی شده و نرخ افزایش مقاومت فشاری بسیار محدود شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۱) در نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس میزان مقاومت



شکل ۱۰ روند تغییرات مقاومت فشاری محدودنشده (UCS) نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک پس از ۲۸ روز عمل‌آوری



شکل ۱۱ روند تغییرات مقاومت فشاری محدودنشده (UCS) نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک و ۱٪ نانوسیلیس در طی زمان

فشاری محدودنشده خاک مارن ندارد، اما به‌عنوان ذرات فعال زمانی که با ذرات آهک ترکیب می‌شوند به‌دلیل توسعه واکنش‌های پوزولانی و تشکیل نانوساختار C-S-H مقاومت فشاری نمونه خاک مارن را به‌میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. هم‌چنین مقدار کم نانوسیلیس مقاومت خاک تثبیت‌شده با آهک را تا حد زیادی افزایش می‌دهد.

درحقیقت نانوسیلیس به‌دلیل بالا بودن مساحت سطح مخصوص و واکنش سطحی، با کلسیم هیدروکسید آزادشده ناشی از آهک وارد واکنش می‌شود

مقاومت فشاری، با افزایش مقدار (آهک- نانوسیلیس) روند صعودی دارد، که این موضوع را می‌توان به‌دلیل فعل و انفعالات شیمیایی ذرات نانوسیلیس و آهک ارزیابی کرد. درواقع مصرف کامل آهک توسط نانوسیلیس موجب توسعه واکنش‌های پوزولانی و تقویت پیوند بین ذرات شده‌است و درنهایت افزایش مقاومت فشاری محدودنشده نمونه‌ها را به‌همراه داشته‌است.

همان‌گونه که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شد نانوسیلیس به‌تنهایی تأثیر چندانی بر مقاومت

پیوستن ذرات خاک می‌شود، این امر سطح تماس خاک با آب را کاهش می‌دهد، در نتیجه حد روانی نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش میزان آهک به ۱۰٪ حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۴. با افزایش درصد نانوسیلیس شدت قلّه کانیترینگایت کاهش می‌یابد و به دلیل اتصال ذرات خاک به یکدیگر، ساختاری بسیار متراکم تشکیل شده و منافذ خاک به شدت پر شده‌است. هم‌چنین افزودن نانوسیلیس به مخلوط خاک مارن-آهک منجر به افزایش فعالیت‌های پوزولانی و رشد و افزایش پایداری نانوساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و توزیع یکنواخت این نانوساختارها می‌شود. در این حالت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به دلیل توزیع گسترده و یکنواخت CSH در سطح ذرات خاک، تخلخل و نفوذپذیری کاهش و مقاومت فشاری افزایش یافته‌است.

۵. در نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک و ۱٪ نانوسیلیس میزان مقاومت فشاری در ۷ روز اول به 10 kg/cm^2 و ۱۸/۴۵ افزایش یافته‌است، در واقع نسبت به نمونه مرجع مقاومت فشاری ۱۸ برابر افزایش یافته‌است و نسبت به نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک مقاومت فشاری بعد از ۷ روز عمل‌آوری حدود 10 kg/cm^2 افزایش یافته‌است. درحقیقت حضور ۱٪ نانوسیلیس موجب شده‌است که pH محیط واکنش در مدت بیشتری بیش از ۱۲ واحد باشد و افزایش مقاومت به دلیل ادامه واکنش‌های پوزولانی، تشکیل نانوساختار C-S-H و هم‌چنین تشکیل ساختار متراکم‌تر است. در واقع حضور نانوسیلیس و تداوم $\text{pH} \geq 12$ موجب توسعه واکنش‌های پوزولانی در کوتاه‌مدت شده‌است و میزان رشد مقاومت در کوتاه‌مدت افزایش یافته‌است.

و باعث متراکم شدن نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) می‌شود. خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس، تخلخل موجود درون ترکیبات سیمانی تشکیل شده را پر می‌کند. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که افزودن نانوسیلیس منجر به بهبود مقاومت خاک می‌شود.

نتیجه‌گیری

براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، نتایج ذیل قابل استخراج است:

۱. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس pH اولیه محیط واکنش نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس در طی ۱۰ روز اول افزایش یافته‌است اما پس از ۱۰ روز pH محیط واکنش نمونه‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس کمتر بوده‌است. درحقیقت می‌توان بیان کرد نانوسیلیس در کوتاه‌مدت موجب افزایش pH محیط واکنش شده‌است، یا به عبارتی نانوسیلیس در کوتاه‌مدت (کمتر از ۱۴ روز) موجب شدت بخشی واکنش‌های پوزولانی شده‌است.
۲. در حالت افزودن ۲٪ آهک به خاک مارن، حد روانی و حد خمیری خاک به ترتیب به ۸۰ و ۳۹/۶ واحد رسیده‌است و افزایش ۳۸٪ و ۳۲٪ را نشان می‌دهد. در نمونه اصلاح شده با ۶٪ آهک حد روانی ۲۱٪ و حد خمیری ۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. براساس نتایج پراش اشعه ایکس، حضور کانی تورمی اترینگایت در نمونه خاک مارن پس از تثبیت با آهک موجب افزایش حد روانی و حد خمیری خاک مارنی می‌شود.
۳. در نمونه اصلاح شده با درصدهای مختلف آهک و ۱٪ نانوسیلیس، حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها کاهش یافته‌است. درحقیقت براساس نتایج پراش اشعه ایکس حضور نانوسیلیس باعث کاهش شدت قلّه اترینگایت شده‌است. از سوی دیگر فرایند لخته شدن در خاک تثبیت شده با آهک باعث به هم

قدردانی

وسایل این تحقیق تشکر نمایند.

مؤلفان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه هرمزگان برای تهیه بخشی از مواد و

مراجع

1. Ouhadi, V. R., and Yong, R. N., "The Role of Clay Fractions of Marly Soils on their Post Stabilization Failure", *J. Engineering Geology*, Vol. 70, Pp. 365-375, (2003).
2. Oostwoud Wijdenes, D. J., Ergenzinger, P., "Erosion and Sediment Transport on Steep Marly Hillslopes", Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study. *J. Catena*, Vol. 33, Pp. 179-200, (1998).
3. Ouhadi, V. R., Yong, R. N., "The Role of Clay Fractions of Marly Soils on their Post Stabilization Failure", Vol. 70, Pp. 365–375, (2003).
4. Rezaee, P., Zarezadeh. R., "Carbonate Marine Terraces of Qeshm Island, a Symbol of Sea Level Changes of the Persian Gulf in the Quaternary", *Geosciences - Scientific Quarterly Journal*, Vol. 23, Pp. 67-74, (2014).
5. KerstinElert, J., Miguel, A., Fernando, N., "Smectite Formation upon Lime Stabilization of Expansive Marls", *Applied Clay Science*, Pp. 29-36, (2018).
6. Majidi, A., Lashkaripour, G., Shoaie, Z., "Prediction of Swelling Potential of Marl Soils of Salt Lake Watershed Basin", *Watershed Engineering and Management*, Vol. 9, Pp. 292-307, (2017).
7. Lamas, F., Irigaray, C., Chacón, J., "Geotechnical Characterization of Carbonate Marls for Construction of Impermeable Dam Cores", *Eng. Geol.* Vol. 66, Pp. 283–294, (2002).
8. Ouhadi, V.R., "The Role of Marl Components and Ettringite on the Stability of Stabilized Marl", Ph.D thesis, Department of Civil Engineering and applied mechanics, McGill University, Montreal, Canada, (1997).
9. Yong, R. N., and Ouhadi, V. R., "Experimental Study on Instability of Bases on Natural and Lime/cement- stabilized Clayey Soils", *J. Applied Clay Science*, Vol. 35, Pp. 238-249, (2007).
10. Ouhadi, V. R., Yong, R. N. and Mohamed, A. M. O., "Formation of Ettringite as a Swelling Mineral on Stabilized Marl Soil", *Proceeding of the 1st conference on civil engineering by Iranian students in Canada*, Montreal, Pp. 131-138, (1996).
11. Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Amiri, M., Ouhadi, M. H., "Pozzolanic Consolidation of Stabilized Soft Clays", *Appl. Clay Sci.* Vol. 95, Pp. 111–118, (2014).
12. Al-Rawas, A. A., Hago, A.W., Al-Sarmi, H., "Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman", *Building and Environment*, 40 (5), Pp. 681–687, (2005).

13. Ouhadi, V. R., Amiri, M., "Dispersive sSoil Improvement with Lime, Special Attention to the Reduction of Peak Intensity of Clay Minerals in XRD Analysis", *modares civil Engineering journal*, Vol. 14, Pp. 13-25, (2014).
14. Richardson, I. G., "The Calcium Silicate Hydrates", *Cem. Concr. Res.* Vol. 38, Pp. 137–158, (2008).
15. Richardson, I. G., "Model Structures for C-(A)-S-H (I)", *Acta Crystallographica Section B B70*, Pp. 903–923, (2014).
16. Abdelzahergend, E. A., Mostafa, M. S., Ouf, Mokhtar, F. Elgendy, "Stabilization of Subgrade Pavement Layer Using Silica Fume and Nano Silica", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 7, Pp 35-45, (2016).
17. Goodarzi, A., Moradloo, A., "Effect of Curing Temperature and SiO₂-nanoparticles on the Engineering Properties of Lime Treated Expansive Soil", *Modares Civil Engineering Journal*, Vol. 17, No. 3, Pp. 8-18, (2017). (In Persian)
18. Changizi, F., Haddad, A., "Strength Properties of Soft Clay Treated with Mixture of Nano-SiO₂ and Recycled Polyesterfiber", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, No. 7, Pp. 367-378, (2015).
19. Ghasabkolaei, N., Janalizade, A., Roshan, N., Ghasemi, S. E., "Geotechnical properties of the Soils Modified whit Nanomaterials: A Comprehensive Review", No. 17, Pp. 639-650, (2017).
20. Fu, J. and Naguib, H. E., "Nanocomposite Foams Effect of Nanoclay on the Mechanical Properties of PMMA /Clay", *Journal of Cellular Plastics*, No. 42, Pp. 325, (2006).
21. Maubec, N., Deneele, D., Ouvrardb, G., "Influence of the Clay Type on the Strength Evolution of Lime Treated Material", *Applied Clay Science*, Vol. 137, Pp. 107-114, (2017).
22. American Society for Testing and Materials, "ASTM, 2014, American Society for Testing and Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards", P.A., Philadelphia V.4, 08, (2014).
23. Cerato, A. B., Lutenegeger, A. J., "Determination of Surface are of Fine-grained Soils by the Ethylene Glycol Monoethyl Ether (EGME) Method", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 3, Pp. 1–7, (2002).
24. Hesse, P. R., "A Textbook of Soil Chemical Analysis", William Clowes and Sons, 519p, (1971).
25. Ouhadi, V. R., Yong, R. N., "Experimental and Theoretical Evaluation of Impact of Clay Microstructure on the Quantitative Mineral Evaluation by XRD Analysis", *Elsevier Appl. Clay Sci. J.* 23. Pp 141, (2003).
26. Ouhadi, V. R., Amiri, M., Zangene, M., "Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized Dispersive Soil", *Modares Journal of Technical & Civil Engineering*, Pp. 11-22, (2016).
27. Van Olphen, H., "An Introduction to Clay Colloid Chemistry", Wiley Interscience; Pp. 187, (1977).

