

مطالعه ریزساختاری تثبیت خاک مارن جنوب با استفاده از آهک و نانوسیلیس

عادل عساکره^{۱*}، محمد امیری^۲، حلیمه زارعی^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه هرمزگان

*asakereh@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰]

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

چکیده

مارن‌ها از خاک‌های مساله‌دار 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. پژوهش حاضر به بررسی تاثیر آهک و نانوسیلیس بر ویژگی‌های مهندسی خاک مارن و تشکیل ترکیبات جدید ناشی از فرآیند تثبیت می‌پردازد. در این راستا پس از تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مارن، بهبود ویژگی‌های مهندسی نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک شکفته (۲ تا ۱۰ درصد) و نانوسیلیس (صفر تا ۲٪) بعد از پایان دوره عمل‌آوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش پراش پرتو ایکس (XDR) برای شناسایی کانی‌های موجود در خاک و بررسی تشکیل ترکیبات هیدرات سیلیکات کلسیم در واکنش خاک با آهک و نانوسیلیس انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور نانوسیلیس در سیستم خاک-آهک، منجر به توزیع یکنواخت ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) در خاک شده است. بر اساس نتایج، با افزایش زمان عمل‌آوری، مشارکت آهک در انجام واکنش‌های پوزولانی افزایش یافته، همچنین، نتایج بدست آمده از آزمایش حدود ات‌ربرگ، کاهش در شاخص خمیری نمونه مارن را با افزایش در مقادیر آهک و نانوسیلیس نشان داده است. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، افزایش ۶٪ آهک با ۰/۷٪ نانوسیلیس در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، موجب افزایش ۹۲/۶۷ درصدی مقاومت فشاری تک محوری نمونه مارن شده است.

کلیدواژگان: مارن، آهک، نانوسیلیس، تثبیت شیمیایی، XRD

۱- مقدمه

خاک‌ها هنگامی که در معرض آب و رطوبت قرار می‌گیرند، دچار فروریزش، تورم، واگرایی و کاهش مقاومت می‌شوند. نهشته‌های مارنی به دلیل ماهیت ساختمانی، مانند وجود ذرات تخریبی و مواد شیمیایی (کربنات کلسیم، ژپس، انیدریت و نمک) نسبت به سایر نهشته‌ها از فرسایش‌پذیری بیشتری

به ترکیبی از رس و کربنات کلسیم که میزان کربنات آن بین ۳۵ تا ۶۵ درصد است، مارن اطلاق می‌شود. خاک‌های مارنی ویژگی‌های متغیری داشته و رفتار مهندسی آن‌ها در حالت خشک و اشباع ممکن است بسیار متفاوت باشد. این‌گونه از

بیشتر، از دوام بیشتری نیز برخوردارند. ذرات نانو به علت دارا بودن سطح مخصوص بزرگ و ظرفیت تبادل کاتیونی قابل توجه، 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. خاک‌هایی که شامل نانوذرات با حفرات درون ذره‌ای در مقیاس نانو هستند، معمولاً حد روانی و خمیری بیشتری را نشان می‌دهند، که معمولاً با خشک شدن نیز این تغییرات برگشت ناپذیر است [10]. در سال‌های اخیر از نانوسیلیس برای بهبود خصوصیات پلاستیسیته، پارامترهای برشی و مقاومت تک‌محوری خاک رس و به عبارتی برای تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها استفاده شده است [10-13]. در حقیقت مقدار نانومواد افزوده شده به خاک، پیوند-های ایجاد شده بین ذرات، چگونگی توزیع و اندازه ذرات نانومواد از عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌هایی خاک است [14]. همچنین با افزودن نانوسیلیس به ترکیب خاک-آهک، واکنش-های ایجاد شده میان ذرات خاک و آهک تسریع می‌یابند، در واقع افزایش نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی، موجب افزایش مقاومت در خاک می‌شود [15].

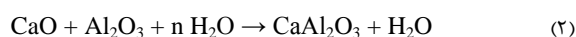
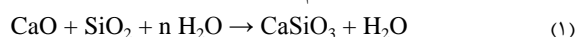
بهبودی شیمیایی خاک با استفاده از آهک و نانوسیلیس به دلیل بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی و همچنین فرآیند تثبیت برای طولانی مدت، امروزه مورد استقبال قرار گرفته است. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر بررسی ویژگی ریزساختاری و مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های مارن و ارائه راهکار برای بهبود خواص و خصوصیات مهندسی این خاک‌ها است. در این راستا برای دست یافتن به اهداف این پژوهش، به بررسی تأثیر افزودن آهک و ترکیب آهک و نانوسیلیس بر ویژگی‌های ریزساختاری و ژئوتکنیکی خاک با توجه به زمان عمل‌آوری نمونه‌ها پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش، نمونه مارن غرب شهر بندرعباس است که در محدوده گنبد نمکی گچین و در حاشیه شمالی خلیج فارس قرار دارد. در این منطقه شیب‌های طبیعی و مصنوعی دچار ناپایداری می‌شوند. همچنین شکست‌های

برخوردارند. پالی‌گورسکایت و سپیولایت کانی‌های رسی تشکیل دهنده خاک مارن هستند، که منجر به بی‌ثباتی، کاهش ظرفیت باربری و تورم در خاک می‌شوند [1].

در خاک‌های رس‌دار، افزایش درصد آهک و زمان عمل-آوری منجر به کاهش وزن واحد حجم خشک خاک، کاهش تورم، افزایش درصد رطوبت بهینه، افزایش مقاومت برشی و افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود. در اثر اختلاط با آهک، واکنش‌های متعددی انجام می‌شود که شامل: الف) واکنش‌های تبادل کاتیونی یا کوتاه‌مدت. ب) واکنش‌های پوزولانی یا درازمدت است [2]. تقریباً تمام خاک‌های ریزدانه زمانی که با آهک و آب مخلوط می‌شوند، در مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی را انجام می‌دهند [3]. در تبادل کاتیونی، کاتیون-های قابل مبادله خاک رس با کاتیون‌های کلسیم موجود در آهک جایگزین می‌شوند. در این حالت کاتیون‌های تک ظرفیتی که همراه رس هستند با یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و یا یون‌های چند ظرفیتی جایگزین می‌شوند. آنچه باعث افزایش قابل توجه مقاومت در ترکیب خاک و آهک می‌شود، واکنش پوزولانی است. افزودن آهک هیدراته به خاک و افزایش pH محیط واکنش به بیش از ۱۲ واحد، باعث حل‌شدگی سیلیکات و آلومینات موجود در خاک شده و با آزاد شدن این ترکیب‌ها از خاک رس، ترکیب آن‌ها با کلسیم ممکن می‌شود [4]. ترکیب سیلیکات و آلومینات با آهک تشکیل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و آلومینات کلسیم هیدراته (C-A-H) را می‌دهد. واکنش‌های پوزولانی تابع زمان بوده و تا هنگامی که سیلیکات و آلومینات در خاک موجود باشند ادامه می‌یابند و کریستال‌های جدید را به وجود می‌آورند [5]. واکنش‌های پوزولانی علاوه بر زمان، تابع درجه حرارت و رطوبت نیز هستند. با افزایش درجه حرارت، واکنش‌های پوزولانی سرعت می‌یابند [6]. این واکنش-ها مطابق با روابط (۱ و ۲) انجام می‌شوند [7-9].



فناوری نانو به دلیل توانایی دگرگون کردن ویژگی‌های بنیادین مواد و حل مشکلات ساختاری، زمینه‌ساز ایجاد مصالح جدید با ویژگی‌های نوین شده که افزون بر کارایی و بازدهی

گسترده‌ای در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی از قبیل گسیختگی در فونداسیون‌ها، شیب‌ها و ترک‌های کششی در جاده‌ها گزارش شده‌است. ساختار و کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک مارن را می‌توان عامل اصلی بروز چنین مشکلاتی دانست. مشاهدات حاکی از آن است که بیشتر خرابی‌ها پس از بارندگی رخ داده‌است. این نمونه‌ها از نظر زمین‌شناسی متعلق به سازند میشان و سن آن‌ها میوسن زیرین تا میانی است [16]. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS)، مارن از نوع خاک رس با ویژگی خمیری کم (CL) است و ۹۵٪ وزنی آن از الک شماره ۲۰۰ عبور کرده‌است. آهک شکفته‌ای که در این پژوهش مورد

استفاده قرار گرفته از الک شماره ۱۰۰ گذرانده شده‌است. pH آهک معادل ۱۲/۸۱ است. آنالیز شیمیایی آهک در جدول (۱) ارائه شده است. نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش به صورت پودری با خلوص ۹۸٪ مورد استفاده قرار گرفته و برای مطالعه تاثیر نانوسیلیس بر رفتار خاک درصدهای مختلفی از آن به خاک اضافه شده‌است. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس در جدول (۲) و آنالیز شیمیایی نانوسیلیس در جدول (۳) ارائه شده است. به منظور تعیین ویژگی و رده‌بندی خاک، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری محدودنشده روی خاک مینا انجام شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی آهک

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Alkali (K ₂ O, Na ₂ O)	Others
1.71	72.26	0.7	0.2	1.2	0.1	23.83

Table 1. The chemical analysis of lime

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

Table 2. The physical characteristics of nano-SiO₂

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

Table 3. The chemical analysis of nano-SiO₂

جدول ۴. برخی از مشخصات ژئوتکنیکی نمونه خاک مارن

Physical properties of Marly Soil	Quantity measured	References for method of measurement
Diameter less than 0.075 mm (%)	95	[17], ASTM D422
C (kg/cm ²)	0.9	[17], ASTM D3080
φ ^o	19	
Unconfined Compression Strength (UCS) (kg/cm ²)	1.1	[17], ASTM D2166
Liquid limit (%)	41	[17], ASTM D4318
Plastic Limit (%)	20	[17], ASTM D4318
Plasticity Index (%)	21	[17], ASTM D4318
Maximum dry density. γ _d (gr/cm ³)	1.7	[17], ASTM D698
Optimum water content (%)	19.5	[17], ASTM D698
Classification	CL	[17], ASTM D3282

Table 4. Geotechnical characteristics of the marl soil sample

جدول ۵. برخی از مشخصات ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه خاک مارن

Geo- environmental properties of Marly Soil	Quantity measured
pH (1:10, Soil:water)	7.8
Carbonate content (%)	49
Ec (1:10, Soil:water)	5.13
Color	Green
Mineral composition	Palygorskite, Calcite, Quartz, Chlorite, Kaolinite, Feldspars

Table 5. Geo-environmental characteristics of the marl soil sample

برای تعیین درصد آهک و نانوسیلیس مورد نیاز برای تثبیت خاک، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی در مقادیر مختلف آهک و نانوسیلیس انجام شده است. در ابتدا مقادیر pH خاک و آهک با استفاده از دستگاه pH متر (Istek-Ecomet) در نسبت خاک به آب ۱ به ۱۰ (۴ گرم خاک و ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر) به طور جداگانه اندازه‌گیری شده و سپس درصدهای مختلف آهک (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی خشک خاک) و درصدهای مختلف نانوسیلیس (۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ درصد وزنی خشک خاک) به خاک اضافه شده است. ترکیب خاک-آهک-نانوسیلیس به درون فالکون (بطری‌های پلاستیکی ۵۰ میلی‌لیتر) ریخته و با هم مخلوط شده، سپس آب مقطر به بطری اضافه شده و مخلوط به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده الکتریکی هم زده شده است، و در انتها pH نمونه‌ها بعد از ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری، اندازه‌گیری شدند.

به منظور انجام آزمایش‌ها روی خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک و نانوسیلیس، مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک و ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ 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 اضافه شده، سپس نمونه‌ها به منظور توزیع یکنواخت رطوبت، ترکیب شدند تا به صورت همگن درآیند. بر این اساس آزمایش تعیین حدود اتربرگ (برای زمان عمل-آوری ۷ روز) و آزمایش پراش پرتو ایکس (برای زمان عمل-آوری ۲۸ روز) روی ترکیب‌های مختلف خاک-آهک-نانوسیلیس به ترتیب بر اساس استاندارد ASTM D4318 و ASTM D2216 صورت گرفته است. همچنین نمونه‌های

همچنین برای تعیین میزان زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) نیز آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D3080 استفاده شده است [17]. برخی از ویژگی‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی در جدول (۴) و جدول (۵) ارائه شده است.

اندازه‌گیری درصد آهک و کربنات به دو روش تیتراسیون و حجم سنجی انجام می‌شود. در روش تیتراسیون روی وزن معینی از خاک اسید کلریدریک ریخته شده و با محاسبه اسید مصرفی برای خنثی شدن آهک، درصد آهک موجود در خاک بدست آمده است [18]. در این پژوهش نیز از روش تیتراسیون استفاده شده که میزان کربنات موجود در خاک ۴۹ درصد بدست آمده است [19].

از دستگاه X-Ray Diffractometer (D8-ADVANCE) با تابش Cu-K α برای بدست آوردن الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها استفاده شده است. برای تهیه نمونه‌های پراش پرتو ایکس (XRD) از کلیه نمونه‌های یک گرم خاک خشک شده در مجاورت هوا با دقت ۰/۰۰۱، وزن شده و در تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته، سپس محلول مورد نظر توسط لرزاننده الکتریکی هم زده شده است. برای اطمینان از بدست آمدن شرایط تعادل، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. دوباره محلول خاک و آب مقطر قبل از انجام آزمایش هم زده شده و در نهایت با استفاده از یک میکروپیپت، ۵ تا ۷ قطره از محلول روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شده است. ضخامت پوشش روی اسلاید برای تمامی نمونه‌ها یکسان است [20-21]. طیف XRD با اسکن در 2θ و محدوده ۲ تا ۶۰ درجه ارزیابی شده است.

به منظور بررسی تاثیر زمان عمل‌آوری و تاثیر درصدهای مختلف آهک و نانوسیلیس بر واکنش‌های بلندمدت (واکنش-های پوزولانی)، تغییرات pH نمونه‌ها پس از اختلاط، تعیین و نتایج در شکل (۲) ارائه شد. بر اساس تغییرات pH محیط واکنش، می‌توان شروع واکنش‌های پوزولانی را ارزیابی کرد. با افزایش زمان نگهداری میزان واکنش‌های پوزولانی افزایش می‌یابد. در واقع کاهش مقدار pH در طول دوره عمل‌آوری بیانگر مصرف آهک برای انجام واکنش‌های پوزولانی است. شکل (۲) روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با درصدهای مختلف آهک (۲ تا ۱۰ درصد) و نانوسیلیس (۰/۷ درصد) را طی دوره عمل‌آوری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده pH محیط واکنش در مدت زمان ۳ روز، افزایش یافته است در حقیقت تا زمانی که یون هیدروکسید ناشی از فرآیند یونیزاسیون در محیط انتشار یابد، pH محیط خاک-آهک-نانوسیلیس افزایش می‌یابد [9]. 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 نشان از افزایش سرعت ایجاد واکنش-های پوزولانی در خاک است. در شکل (۲) نشان داده شده pH نمونه‌های حاوی ۶٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس در دوره‌های عمل‌آوری ۱ روز، ۳ روز، ۷ روز، ۲۸ روز و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۱۲/۴۵، ۱۲/۵۸، ۱۲/۱، ۱۱/۹۶ و ۱۱/۷ است.

شکل ۱. روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک پس از ۷۲ ساعت

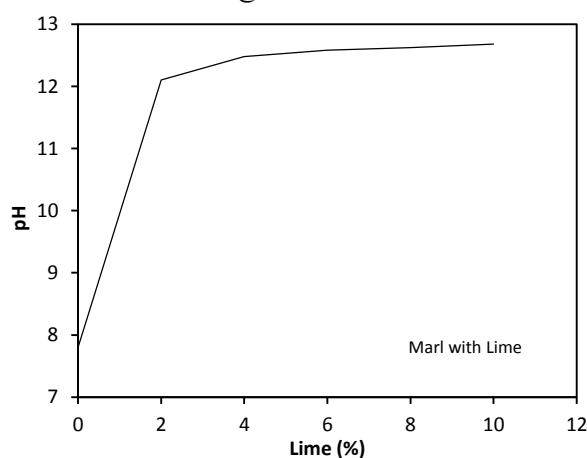


Fig. 1. The trend of pH changes of the samples stabilized with lime after 72 hours

آزمایش مقاومت فشاری 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 برای 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 گرفته است.

۳- بحث و بررسی نتایج

بررسی pH یکی از معیارهای رایج ارزیابی میزان آهک به عنوان ماده تثبیت‌کننده است. در واقع بر اساس تغییرات pH محیط واکنش، کم‌ترین میزان آهکی که منجر به بروز تبادل کاتیونی در خاک می‌شود را می‌توان تعیین کرد [9]. این مقدار از مواد تثبیت‌کننده (آهک)، ویژگی خاک را به میزان قابل توجهی تغییر می‌دهد. با استناد به نتایج حاصل از آزمایش‌های حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و مطالعات ریزساختاری (SEM و XRD) می‌توان روند تغییرات خصوصیات خاک را در حضور درصدهای مختلف مواد تثبیت‌کننده (آهک و نانوسیلیس) مورد بررسی قرار داد.

شکل (۱) تغییرات pH محیط واکنش در حضور آهک بعد از ۳ روز نگهداری را نشان می‌دهد. pH خاک طبیعی ۷/۸ است و با افزودن تنها ۲٪ آهک pH مخلوط خاک-آهک تا ۱۲/۱ افزایش یافته است و با ۴٪ آهک pH محیط به ۱۲/۴۸ رسیده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود افزایش در میزان آهک باعث افزایش در میزان pH خاک شده و در واقع با افزایش آهک شکفته (Ca(OH)_2), در مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی انجام شده است. بنابراین کاتیون دو ظرفیتی 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. با توجه به اینکه بر اساس روش pH، کمترین درصد آهک لازم برای تثبیت خاک، درصد آهکی است که pH محیط را به ۱۲/۴ برساند [22]. بنابراین مطابق با نتایج، کمترین درصد آهک مورد استفاده بیش از ۴٪ وزنی خاک است.

در آزمایش تعیین حد روانی نمونه‌ها، فرآیند 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. از سوی دیگر به دلیل مرز کربناته ایجاد شده ناشی از ساختار لخته شدن، مقدار آب در ساختار خاک افزایش می‌یابد و منجر به افزایش بیشتر حد روانی می‌شود [23]. در حالی که برای خاک با حد روانی بسیار زیاد می‌توان انتظار داشت که با افزودن آهک حد روانی کاهش قابل توجهی پیدا کند، اما در خاک با حد روانی متوسط تا کم، افزودن آهک نه تنها حد روانی را کاهش نداده حتی همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، افزایش یافته است.

نتایج ارائه شده در شکل (۴) نشان می‌دهد که نانوسیلیس (۰/۷٪) به تنهایی منجر به افزایش حد روانی و حد خمیری خاک مارن شده و در صورت افزودن درصد‌های مختلف آهک (۲ تا ۱۰ درصد)، حد روانی و حد خمیری به مراتب کاهش یافته است. به گونه‌ای که حد روانی در بیشترین مقدار برای نمونه حاوی ۰/۷٪ نانوسیلیس برابر با ۴۹/۶ درصد و کم‌ترین مقدار حد روانی نیز مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس برابر با ۳۴/۲۶ درصد است.

شکل (۵) نتایج مربوط به شاخص خمیری (PI) برای زمان عمل‌آوری ۷ روزه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده شاخص خمیری خاک با افزایش آهک، کاهش یافته است، بطوریکه این شاخص با افزایش ۲٪ آهک به ۳۰/۲ و با افزایش ۶٪ آهک به کمتر از ۲۰/۴ رسیده است. این روند کاهش را می‌توان در حضور ۰/۷٪ نانوسیلیس با درصد‌های مختلف آهک نیز مشاهده کرد. به گونه‌ای که افزایش ۲٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس، شاخص خمیری نمونه خالص را به ۱۳/۵ رسانده و افزودن ۶٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس مقدار این شاخص را به ۷/۷ رسانده است. بطوری که در حالت تثبیت خاک با ۶٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس، شاخص خمیری نسبت به خاک اصلاح شده با ۰/۷٪ نانوسیلیس حدود ۶۰/۶۱٪ کاهش یافته است. علت کاهش پلاستیسیته خاک را می‌توان با رفتار دانه‌ای خاک ناشی از واکنش‌های کوتاه مدت (تبادل کاتیونی و

شکل ۲. روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح شده با آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس طی دوره عمل‌آوری

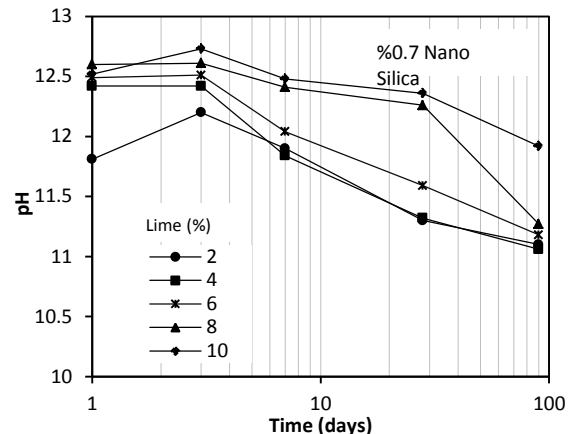


Fig. 2. Variations of pH of the samples stabilized with different percentage of lime and 0.7% Nano silica whit curing time

شکل ۳. روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح شده با آهک و نانوسیلیس (دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه)

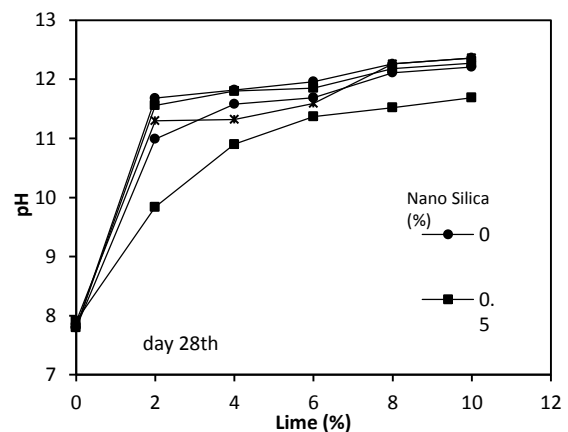


Fig. 3. Variations of pH of the samples stabilized with different percentage of lime and Nano silica after 28 days of curing

نتایج ارائه شده در شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش در میزان نانوسیلیس منجر به کاهش pH نمونه‌ها شده است.

آزمایش حدود اتربرگ (PL و LL) روی خاک مارن طبیعی و خاک مارن تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک (۲ تا ۱۰ درصد) و نانوسیلیس (۰/۷ درصد) انجام شد. در شکل (۴) نتایج مربوط به تغییرات حد روانی و حد خمیری خاک مارن اصلاح شده در دوره عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است. بر اساس نتایج، با افزودن آهک مقدار حد روانی و حد خمیری در دوره عمل‌آوری ۷ روزه افزایش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که در حالت افزودن ۶٪ آهک به خاک مارن، حد روانی و حد خمیری خاک به ترتیب به ۵۸ و ۳۷/۵ واحد رسیده است.

انفعالات شیمیایی ذرات نانوسیلیس و آهک در حضور خاک رسی ارزیابی کرد.

همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شد نانوسیلیس به تنهایی تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن ندارد، اما به عنوان ذرات فعال زمانی که با ذرات آهک ترکیب می‌شوند مقاومت فشاری نمونه خاک مارن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین مقدار کم نانوسیلیس مقاومت خاک تثبیت شده با آهک را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. طبق نتایج ارائه شده در شکل (۶)، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف نانوسیلیس (۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ درصد) در حضور ۶٪ آهک به ترتیب ۸/۹۵، ۱۱/۳، ۱۴/۲، ۱۵/۷۲ و $20/8 \text{ kg/cm}^2$ است. در حقیقت نانوسیلیس به دلیل زیاد بودن مساحت سطح مخصوص و واکنش سطحی، با کلسیم هیدروکسید آزاد شده ناشی از آهک وارد واکنش شده و باعث متراکم شدن ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) می‌شود. خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس، تداخل موجود درون ژل تشکیل شده را پر می‌کند. به طور کلی می‌توان بیان کرد که افزودن نانوسیلیس منجر به بهبود مقاومت خاک می‌شود. شکل (۷) نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی ۰/۷٪ نانوسیلیس و درصد‌های مختلف آهک (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد) را طی دوره عمل‌آوری (۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز) نشان می‌دهد. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه مارن در حضور ۰/۷٪ نانوسیلیس در دوره عمل‌آوری ۱ روزه، ۱/۱۵ برابر شده است. این میزان از افزایش در مقاومت فشاری خاک مارن، به نوع خاک، شرایط عمل‌آوری نمونه و درصد خلوص ماده افزودنی (نانوسیلیس) به کار رفته در نمونه بستگی دارد. با افزایش میزان آهک مقاومت فشاری افزایش یافته است. به گونه‌ای که پس از سپری شدن مدت زمان ۱ روز، مقاومت همه نمونه‌ها بیش از ۴ برابر مقاومت اولیه خاک شده است. مقاومت ۱ روزه نمونه‌های تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد آهک، نسبت به مقاومت اولیه به ترتیب ۳/۷۸، ۴/۴۲ و ۴/۶۷ برابر شده است. این رفتار را می‌توان به واکنش‌های کوتاه مدت (تبادل کاتیونی و فولوکوله شدن) نسبت داد.

فولوکوله شدن) توضیح داد که در نتیجه قابلیت اجرایی خاک را بهبود می‌بخشد [22].

شکل ۴. منحنی حد روانی و حد خمیری نمونه‌های اصلاح شده با صفر و ۰/۷ درصد نانوسیلیس در درصد‌های مختلف آهک (دوره عمل‌آوری ۷ روز)

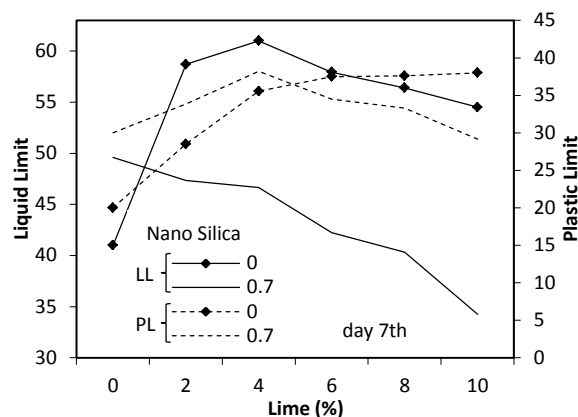


Fig. 4. Liquid limit and plastic limit variations of the samples stabilized with Nano silica (0%, 0.7%) and different percentage of lime after 7 days of curing

شکل ۵. منحنی شاخص خمیری نمونه‌های اصلاح شده با درصد‌های مختلف آهک و ۰/۷ درصد نانوسیلیس (دوره عمل‌آوری ۷ روز)

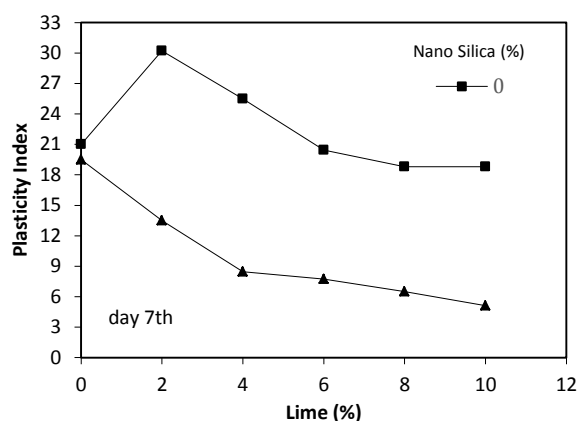


Fig. 5. Plasticity index variations of the samples stabilized with different percentage of lime and Nano silica (0.7%) after 7 days of curing

از سوی دیگر تثبیت خاک مارن مورد مطالعه با آهک و نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت خاک می‌شود. نتایج مربوط به مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های اصلاح شده با آهک و نانوسیلیس پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شکل (۶) نشان داده شده است. مقاومت فشاری، با افزایش مقدار آهک- نانوسیلیس روند صعودی دارد، که این موضوع را می‌توان به دلیل فعل و

شکل ۶. روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح شده با آهک و نانوسیلیس (دوره عمل‌آوری ۲۸ روز)

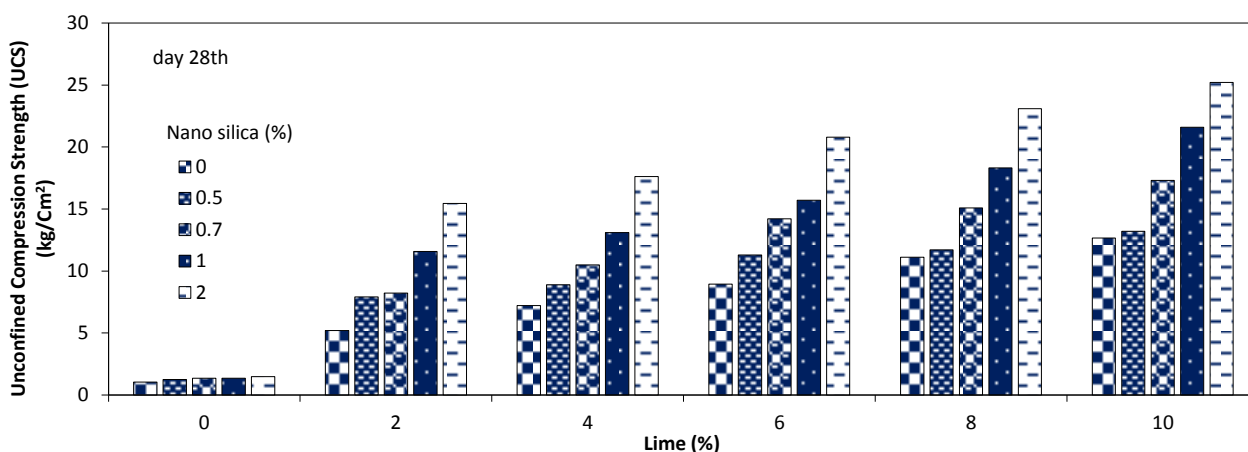


Fig. 6. Unconfined compressive strength (UCS) of marl with different percentage of lime and nano silica after 28 days of curing

شکل ۷. روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح شده با آهک و ۰.۷٪ نانوسیلیس در طی زمان

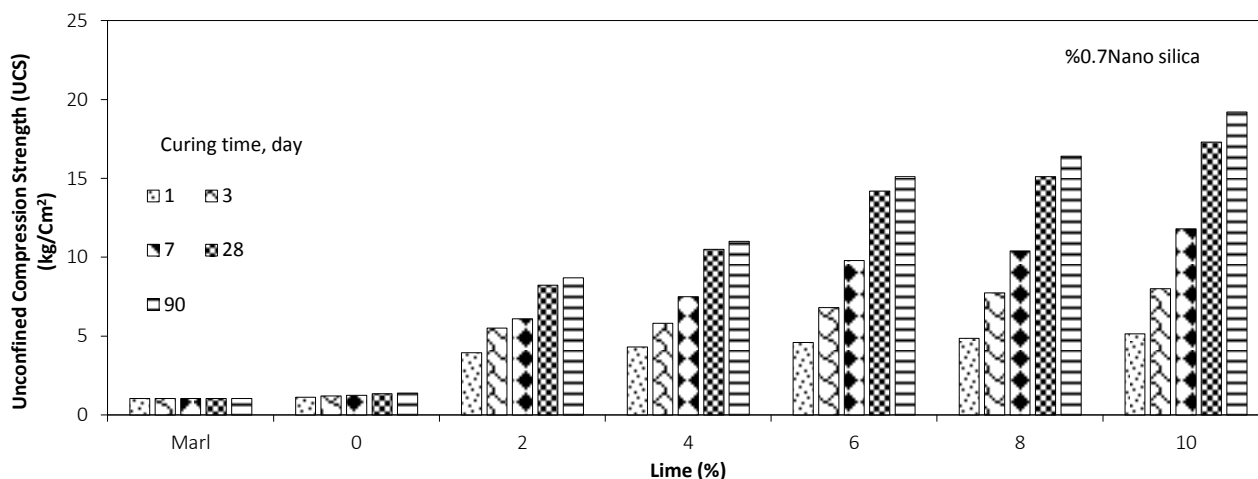


Fig. 7. Unconfined compressive strength (UCS) of Marl with curing time for various amounts of lime and 0.7% nano silica

عمل‌آوری در حضور درصد بالای آهک (۶ تا ۱۰ درصد) پیشرفت واکنش‌های پوزولانی همچنان ادامه دارد. همچنین روند تغییرات pH محیط واکنش در شکل (۳) برای نمونه‌های حاوی ۶ تا ۱۰ درصد آهک در حضور درصدهای مختلف نانوسیلیس (۰/۵ تا ۲ درصد) تاییدی بر این نتایج است. به گونه‌ای که در نمونه‌های حاوی ۸ تا ۱۰ درصد آهک و ۰/۵ تا ۱ درصد نانوسیلیس مقدار pH سیستم خاک-آهک-نانوسیلیس بیش از ۱۲/۱ است و برای نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد آهک در حضور درصدهای مختلف نانوسیلیس، مقدار pH کمتر از ۱۲

برای درصدهای کم آهک (۲ و ۴ درصد)، مقاومت ۲۸ روزه خاک تقریباً به بیشترین مقدار خود رسیده است. و با افزایش زمان عمل‌آوری تغییر محسوسی در واکنش‌های پوزولانی ایجاد نمی‌شود، در صورتی که برای درصدهای بالای آهک (۶ تا ۱۰ درصد)، افزایش در مقاومت خاک، طی دوره عمل‌آوری مشاهده شده است. بطوریکه برای نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس مقاومت خاک در زمان‌های ۲۸ و ۹۰ روز در مقایسه با مقاومت اولیه خاک (۱/۱ kg/cm²) به ترتیب ۱۶/۶۳ و ۱۸/۴۶ برابر شده است. در واقع می‌توان گفت با افزایش زمان

است در حقیقت نشان می‌دهد که نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی کند شده یا کاهش یافته است. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، حدود اتربرگ و تغییرات pH می‌توان مشاهده کرد که ذرات نانوسیلیس منجر به تسریع در ایجاد ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) می‌شود. بر این اساس با هدف تفسیر نتایج به دست آمده از دیدگاه ریزساختاری و بررسی دقیق‌تر انجام واکنش‌های پوزولانی در حضور نانوسیلیس و روند تشکیل مواد سیمانی، منحنی‌های پراش پرتو ایکس نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های اصلاح‌شده با ۶ درصد آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس مورد مطالعه قرار گرفته است.

شکل (۸) منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌های حاوی ۶٪ آهک و درصد‌های مختلف نانو سیلیس (۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ درصد) در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در شکل (۸)، بازتاب‌های جدید در فواصل $4/24^\circ A$ و $1/62^\circ A$ را نشان می‌دهد، که هر کدام از این بازتاب‌ها به کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و بازتاب‌های جدید در فاصله $7/16^\circ A$ با ترکیب کلسیم آلومینیم هیدراته (C-A-H) هماهنگی دارد [3]. تغییرات در شدت قله دوم کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) با فاصله $1/67^\circ A$ ، فرآیند شکل‌گیری C-S-H را تایید می‌کند [3].

شکل (۸) منحنی پراش پرتو ایکس نمونه مارن مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز XRD انجام گرفته روی خاک طبیعی نشان می‌دهد که پالی‌گورسکایت، کائولینیت، مونت موریلونیت و سیپولایت کانی اصلی رسی و کوآرتز، فلدسپات و کلسیت کانی‌های غیر رسی موجود در خاک مارن است. در شکل (۸) قله‌های اصلی کانی‌های رسی، در فاصله $3/17^\circ A$ و

شکل ۸. منحنی پراش پرتو ایکس خاک مورد مطالعه. P: پالیگورسکایت، K: کائولینیت، C: کلسیت، Q: کوآرتز، G: ژپس، F: فلدسپات، H: هالیت.

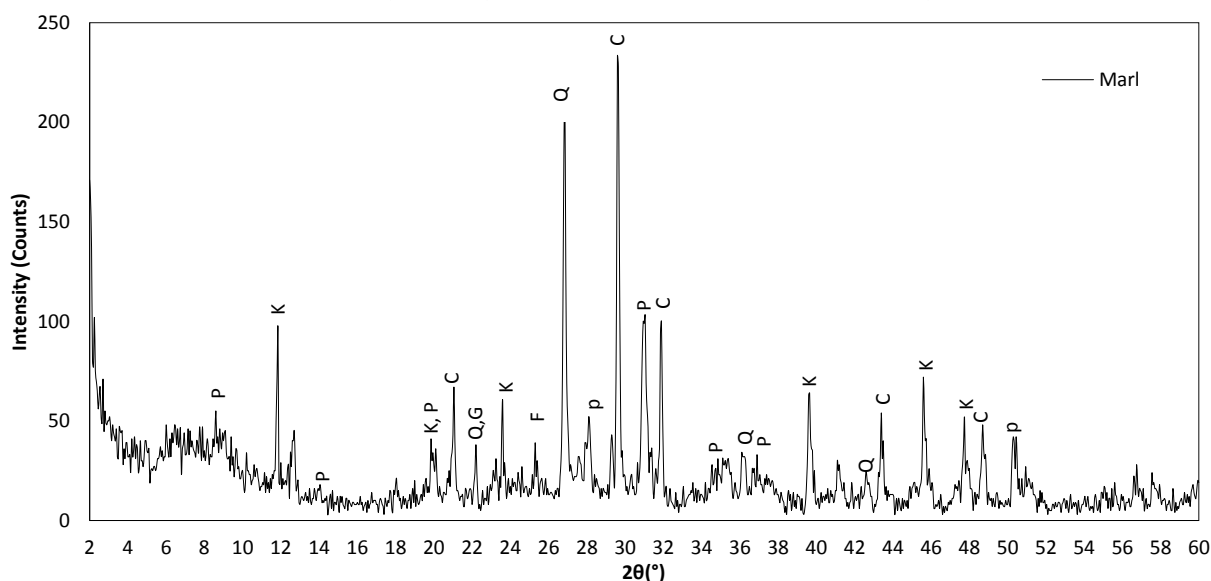


Fig. 8. XRD pattern of Marl soil sample.

P: Palygorskite, K: Kaolinite, C: Calcite, Q: Quartz, G: Gypse, F: Feldspath,

شکل ۹. منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بهسازی شده با ۶٪ آهک و درصدهای مختلف نانوسیلیس، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری.

P: پالیگورسکایت، K: کائولینیت، C: کلسیت، Q: کوآرتز، G: ژپس، F: فلدسپات، Et: اترینگایت، C-S-H: کلسیم سیلیکات هیدراته، C-A-H: کلسیم آلومینات هیدراته

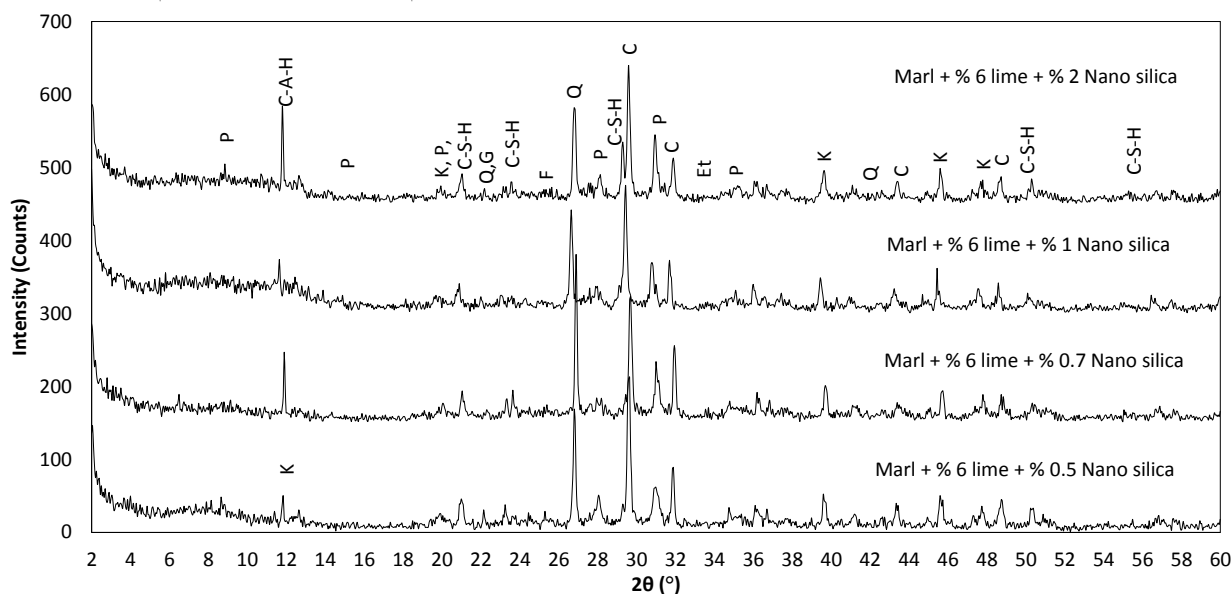


Fig. 9. Diagram of the x-ray diffraction of the samples stabilized with 6% lime and various percentages of nano-SiO₂ after 28 days of curing

P: palygorskite, K: kaolinite, M: montmorillonite, C: Calcite, Q: Quartz, G: Gypse, F: Feldspath, C-S-H, C-A-H

رشد شدت قله و میزان کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) می‌شود، این روند با افزایش میزان مقاومت فشاری با افزایش درصد نانوسیلیس نیز همخوانی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان این‌گونه خلاصه کرد:

۱) افزودن آهک به خاک مارن منجر به شکل‌گیری کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) می‌شود، که با افزایش زمان عمل‌آوری و افزایش درصد آهک افزودنی رشد ترکیبات سیمانی افزایش می‌یابد. نانوسیلیس به دلیل بالا بودن مساحت سطح مخصوص و واکنش سطحی، با کلسیم هیدروکسید آزاد شده ناشی از آهک وارد واکنش شده و باعث متراکم شدن ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) می‌شود. خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس، تخلخل موجود درون ژل تشکیل شده را پر می‌کند. به طور کلی می‌توان بیان کرد که افزودن نانوسیلیس منجر به بهبود مقاومت خاک می‌شود.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که شدت قله پالیگورسکایت و کائولینیت در حضور ۶٪ آهک و ۰/۵ تا ۲ درصد نانوسیلیس کاهش یافته‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود قله ۳/۱۷ Å مربوط به کانی پالیگورسکایت از ۴۱/۱۱ Cps با افزایش ۶٪ آهک در حضور ۰/۷٪ نانوسیلیس به حدود ۲۴/۵۷ Cps رسیده‌است. الگوی کاهش شدت قله پالیگورسکایت را می‌توان به حلالیت سیلیس و آلومینا در محیط با pH بالا (بیش از ۱۲/۴) نسبت داد [4]. 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 بوسیله ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و کلسیم آلومینیم هیدراته (C-A-H)، میزان بازتابش پرتو ایکس را کاهش داده که در نهایت شدت قله کانی رسی (پالیگورسکایت) کاهش یافته است (شکل ۹). از سوی دیگر بر اساس نتایج ارائه شده افزایش درصد نانوسیلیس موجب افزایش میزان شدت قله کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) شده است. در واقع افزایش میزان ذرات نانوسیلیس در محیط واکنش با فعالیت‌پذیری زیاد موجب

Dispersive Soil. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(1), 11-22. (In Persian)

[10] Zhang G. 2007 Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils. *Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior*, New Peaks in Geotechnics, ASCE.

[11] Zhang G.T., Germaine A.J., Whittle C. & Ladd C.C. 2004 Index properties of a highly weathered old alluvium. *Geotechnique*, 54(7), 441-451.

[12] Changizi F. & Haddad A. 2015 Strength Properties of Soft Clay Treated with Mixture of Nano-SiO₂ and Recycled Polyesterfiber. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7, 367-378.

[13] Ghasabkolaei N., Janalizadeh Choobbasti A., Roshan N. & Ghasemi S.E. 2017 Geotechnical properties of the soils modified whit nanomaterials: A comprehensive review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3), 639-650.

[14] Abdelzaher E. A. Mostafa, Mohamed. S. Ouf. & Mokhtar F. Elgendy. 2016 Stabilization of Subgrade Pavement Layer Using Silica Fume and Nano Silica. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(3), 573-581.

[15] Fu J. & Naguib H. E. 2006 Effect of Nanoclay on the Mechanical Properties of PMMA/Clay Nanocomposite Foams. *Journal of Cellular Plastics*, 42(4), 325-342.

[16] Aghanabati A. 2004 Geological Engineering. Geological Survey and Mineral Exploration, Tehran, Iran. (In Persian)

[17] Annual Book of ASTM Standards, in: American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 1992.

[18] Nelson D. W. & Sommers L. E. 1996 Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 961-1010.

[19] ASTM C25-99, 1999 Quicklime and Hydrated Lime. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone.

[20] Ouhadi V. R. & Yong R. N. 2003 Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis. *Applied Clay Science*, 23(1), 141-148.

[21] Ouhadi V. R. 2002 Study of Transformation of Clay Minerals in the Interaction Process with Additives by use of Scanning Electron Microscope and XRD and its Relation to Mechanical Behaviour of Soil. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 10(1), 87-97. (In Persian)

[22] Al-Mukhtar M., Lasledj A. & Alcover J. 2010 "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C", *Applied Clay Science*, 50(2), 191-198.

[23] Ouhadi, V. R. & Yong, R. N. 2007 Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. *Applied Clay Science*, 35, 238-249.

(۲) بر اساس نتایج این پژوهش در حضور ۰.۶٪ آهک و ۰.۷٪ نانوسیلیس خاک مارن تثبیت شده بهترین ویژگی مقاومتی فشاری را نشان می‌دهد.

(۳) بر اساس نتایج آزمایش‌های درشت ساختاری، ریزساختاری و تغییرات pH محیط واکنش می‌توان بیان نمود که در $pH \geq 12/1$ واکنش‌های پوزولانی آغاز و موجب بهبود رفتار ژئوتکنیکی خاک مارنی می‌شود.

(۴) حضور نانوسیلیس به همراه آهک موجب افزایش رشد ساختار کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) شده است، که این افزایش موجب بهبود پارامترهای مقاومتی خاک مارنی می‌شود. (۵) با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، حدود اتربرگ و تغییرات pH می‌توان مشاهده کرد که ذرات نانوسیلیس منجر به تسریع در ایجاد ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) می‌شود.

(۶) بر اساس نتایج حدود اتربرگ، حضور نانوسیلیس در فرایند تثبیت با آهک موجب کاهش ϵ واحدی شاخص خمیری خاک نسبت به حالت تثبیت شده دارد.

۵- مراجع

- [1] Pettijohn F. J. Sedimentary rock. 1975 Harper and Row, New York.
- [2] Al-Rawas A. A., Hago A. W. & Al-Sarmi H. 2005 Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40(5), 681-687.
- [3] Ouhadi V. R., Yong R. N., Amiri M. & Ouhadi, M. H. 2014 Pozzolanic Consolidation of Stabilized Soft Clays. *Applied Clay Science*, 95, 111-118.
- [4] Eades J. L. & Grim R. E. 1960 Reaction of hydrate lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Board Bulletin*, 262, 51-63.
- [5] Broms B. & Bengt. 1993 Ground Improvement. John Wiley and Sons publishing company.
- [6] Goodarzi A. & Moradloo A. 2017 Effect of curing temperature and SiO₂-nanoparticles on the engineering properties of lime treated expansive soil. *Modares Civil Engineering Journal*, 17(3), 132-144. (In Persian)
- [7] Oates J. A. H. 1998 Lime and Limestone. John Wiley and Sons publishing company.
- [8] Ouhadi V. R., Amiri M. & Hamidi S., 2014 Dispersive soil improvement with lime, special attention to the reduction of peak intensity of clay minerals in XRD analysis. *Modares Civil Engineering Journal*, 14(2), 13-25. (In Persian)
- [9] Ouhadi V. R., Amiri M. & Zangeneh M. 2016 Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized

Microstructural Study of Soil Stabilization of the Southern Marl Using Lime and Nano-SiO₂

A. Asakereh*¹, M. Amiri², H. Zarei³

1Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3Master Student, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

*asakereh@semnan.ac.ir

Abstract

Marl is a combination of clay and calcium carbonate which its carbonate content is between 35 to 65 %. Marl soils have variable characteristics and their engineering behavior may be highly different in dry and saturated conditions. Such soils suffer from falling, swelling, divergence, and loss of resistance when exposed to water and moisture. Marl deposits have higher erosionability than other deposits due to the structural nature such as the presence of destructive particles and chemicals (carbonate Calcium, Gypsum, Anhydrite and Salt). Palygorskite and sepiolite are clayey minerals forming the marl soil, which leads to instability, load capacity reduction and swelling in the soil. Microstructural study of soil stabilization of the Southern Marl using lime and Nano-SiO₂. Using additives such as lime, cement and nanoparticles is one of the methods for soil chemical modification. The present study investigates the effect of lime and Nano-SiO₂ on the engineering properties of marl soil and the formation of new compounds due to the stabilization process. The soil used in this study was the marl sample of the west of the Bandar Abbas I on the northern margin of the Persian Gulf. In this area, natural and artificial slopes are instable. Also, extensive failures in many of geotechnical projects such as failure in the foundations, tensile cracks and slopes on the roads have been reported. The structure and minerals of the marl soil can be considered as the main cause of such problems. Observations indicate that most of failures have occurred after rainfall. Based on the Unified Soil Classification System (USCS), Marl is a clay with low compressibility (CL) in which 95% passed through the No. 200 sieve. The hydrated lime used in this study was passed through the No. 100 sieve. The pH of lime is 12.81. In this regard, after determining the geotechnical properties of Marl soil, the improvement of engineering properties of the samples stabilized with different percentages of lime and Nano-SiO₂ has been evaluated at the end of the treatment period. In order to identify present minerals in the soil and investigate the formation of calcium silicate hydrate compounds in the reaction of soil with lime and Nano-SiO₂, the XDR test was conducted. Also, SEM was used to evaluate the impact of adding lime and Nano-SiO₂ on the structure and morphology of the soil. The results showed that the presence of Nano-SiO₂ in the limestone system led to the uniform distribution of cement (C-S-H) compounds in the soil. Based on the results, with increasing the treatment time, lime participation in pozzolanic reactions was increased, also the results obtained from the Atterberg limits test showed a diminution in the paste limit of the marl sample with increasing lime and Nano-SiO₂ values. Based on the results of the Atterberg limits, compared to the outline of stabilization with increasing lime, the presence of Nano-SiO₂ in the process of stabilizing with lime led to 4 units' reduction of the plastic limit. Based on the results of the present study, the stabilized marl soil showed best geotechnical properties in the presence of 6% of lime and 0.7 % of Nano-SiO₂.

Key Words: Marl, Lime, Nano-SiO₂, Chemical stabilization, XRD.