

تأثیر فرایند تثبیت ترکیب آهک و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری و وارفتگی خاک- های مارنی در حالت اشباع

عادل عساکره*^۱، محمد امیری^۱ و حلیمه زارعی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان
^۲ کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان

(دریافت: ۹۸/۱/۵، پذیرش: ۹۹/۴/۷، نشر آنلاین: ۹۹/۴/۷)

چکیده

خاک‌های مارنی در حالت خشک دارای مقاومت نسبتاً خوبی هستند اما این خصوصیات در تماس با آب دچار افت زیادی می‌شود. عدم شناخت رفتار خاک‌های ریزدانه رسی و به‌خصوص مارن‌ها می‌تواند سازه‌ها و بناهای ساخته‌شده بر روی چنین خاک‌هایی را دچار چالش اساسی نماید. براین اساس هدف از پژوهش حاضر بررسی مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های مارن و ارائه راهکار جهت بهبود رفتار وارفتگی و خصوصیات مهندسی این خاک‌ها در حالت اشباع است. در این راستا برای یافتن به اهداف این پژوهش، به بررسی تأثیر افزودن آهک و ترکیب آهک و نانوسیلیس بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک (حدود اتربرگ، مقاومت فشاری، رسوب و وارفتگی) با توجه به زمان عمل‌آوری نمونه‌ها پرداخته شده است. براساس نتایج مقاله حاضر افزودن آهک و نانوسیلیس به خاک مارن منجر به کاهش شاخص پلاستیسیته خاک مارن شده است. با توجه به نتایج آزمایش وارفتگی، افزودن بیش از ۰/۷٪ نانوسیلیس به خاک مارن حاوی ۲٪ آهک، مانع فروپاشی و گسیختگی نمونه در آب شده است. همچنین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده نشان می‌دهد، حضور ۶ درصد آهک با ۰/۷ درصد نانوسیلیس در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه را به $14/2 \text{ kg/cm}^2$ رسانده است که نسبت به خاک طبیعی حدود ۹۰٪ افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: مارن، آهک، نانوسیلیس، وارفتگی، مقاومت فشاری محدود نشده.

۱- مقدمه

در سازه‌های احداث‌شده در این خاک‌ها پس از بارندگی رخ داده- است. ساختار زنجیره‌ای مانند این کانی‌ها با ساختار صفحه‌ای شکل کانی‌های رسی متفاوت است، همچنین بسته به منشأ تشکیل- دهنده مارن (سنگ مادر) یک یا هر دوی این ساختارهای زنجیره- ای، می‌توانند به عنوان کانی غالب در مارن در نظر گرفته شوند (Yong و Ouhadi, ۲۰۰۳).

خاک‌های مارنی پس از غوطه‌وری در آب تمایل به جذب آب و نرم شدن دارند که این امر باعث ایجاد تغییر شکل‌های زیاد و در نتیجه تخریب ساختار اولیه می‌گردد (Soroush و Fahimifar, ۲۰۰۲). در واقع دوام خاک‌های مارنی در برابر وارفتگی علاوه بر ترکیبات شیمیایی، ترکیب کانی‌شناسی، اندازه ذرات، بافت و ساختار نمونه‌ها، تابع میزان درصد کربنات کلسیم و کانی‌های رسی موجود در خاک بوده و با افزایش درصد کربنات کلسیم موجود در خاک، دوام در برابر وارفتگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش

رسوبات مارنی متشکل از کانی‌های رسی و کربنات کلسیم با نسبت‌های مختلف بین ۳۵ تا ۶۵ درصد است که در بسیاری از مناطق جهان مانند ایران، عراق، کانادا، یونان و آلمان گسترش یافته‌اند. در واقع سنگ‌های مارنی، دانه ریزترین رسوبات تخریبی را شامل می‌شوند، به طوری که ۴۵ تا ۵۵ درصد توالی رسوبی در سطح پوسته زمین را تشکیل می‌دهند (Pettijohn, ۱۹۷۵؛ Vakili و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mahouti و Katebi, ۲۰۱۸؛ Hosseini و همکاران، ۲۰۱۲).

این در حالی است که ویژگی‌های آن‌ها به دلیل تفاوت در درصد کربنات و کانی‌های تشکیل‌دهنده ساختار خاک، ممکن است متغیر باشد. دو کانی اصلی تشکیل‌دهنده خاک مارن که منجر به بی‌ثباتی، کاهش ظرفیت باربری و تورم در خاک می‌شود، پالیگورسکایت^۱ و سپیولایت^۲ است. بیشتر خرابی‌های مشاهده شده

2. Sepiolite

1. Palygorskite

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۳۵۸۹۳۹۸

آدرس ایمیل: asakereh@hormozgan.ac.ir (ع. عساکره)، amirii@hormozgan.ac.ir (م. امیری)، zarei.halimeh@yahoo.com (ح. زارعی).

بالاتری را نشان می‌دهند، که معمولاً با خشک شدن نیز این تغییرات برگشت‌ناپذیر است (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر از نانوسیلیس برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی و خصوصیات مهندسی خاک‌ها استفاده شده است (Zhang، ۲۰۰۷؛ Zhang، ۲۰۰۴؛ Changizi و Haddad، ۲۰۱۵؛ Abdelzاهر و Ghasabkolaei، ۲۰۱۷؛ Janalizadeh و Razagi، ۲۰۱۵).

تثبیت شیمیایی خاک با آهک سبب بهبود کیفیت و مشخصات فنی خاک و تسریع در عملیات اجرایی نیز می‌شود، در اثر تثبیت خاک‌های رسی با آهک، واکنش‌های متعددی انجام می‌شود که شامل واکنش‌های تبادل کاتیونی، لخته شدن (کوتاه-مدت)، واکنش‌های پوزولانی (درازمدت) و واکنش‌های کربناسیون است (Al-Rawas و همکاران، ۲۰۰۵).

در واکنش‌های تبادل کاتیونی، کاتیون‌های قابل مبادله خاک رس با کاتیون‌های کلسیم جایگزین می‌شوند. در این حالت کاتیون‌های تک‌ظرفیتی سدیم و پتاسیم خاک با یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و یابون‌های چند ظرفیتی جایگزین می‌شوند. اما افزایش قابل توجه مقاومت به دلیلی واکنش‌های پوزولانی است (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Grim و Eades، ۱۹۶۰). در واقع افزایش آهک موجب افزایش pH محیط خاک و باعث حل‌شدگی سیلیکات و آلومینات موجود در خاک می‌شود. با آزاد شدن ترکیبات آلومینات و سیلیکات خاک رس و ترکیب آن‌ها با کلسیم، ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و کلسیم آلومینات هیدراته (C-A-H) تشکیل می‌شود. 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 (Broms، Beng، ۱۹۹۳؛ Sol-Sanchez و همکاران، ۲۰۱۶؛ Elert و همکاران، ۲۰۱۷؛ Goodarzi و Moradloo، ۲۰۱۷). این واکنش‌ها مطابق با روابط (۱) و (۲) انجام می‌شوند (Oates، ۱۹۹۸؛ Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۶).

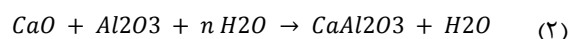
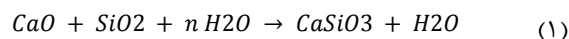
۲- مواد و روش‌ها

در این مقاله، از خاک مارن غرب شهر بندرعباس استفاده شده است که در محدوده گنبد نمکی گچین و در حاشیه شمالی خلیج-فارس قرار دارد. در این منطقه شیب‌های طبیعی و مصنوعی به دلیل بارندگی یا وجود آب‌های سطحی دچار ناپایداری شده است. خاک مارن این منطقه از نظر زمین‌شناسی متعلق به سازند میشان^۲ و سن آن‌ها میوسن^۳ زیرین تا میانی است (Aghanabati، ۲۰۰۴). خاک مارن مورد مطالعه دارای خواص خمیری کم (CL) است و حدود ۹۵٪ آن از الک ۲۰۰ عبور کرده است. آهک مورد استفاده در این پژوهش از شرکت اهوراد تهیه شده است. آنالیز شیمیایی آهک در جدول (۱) ارائه شده است. نانوسیلیس استفاده شده در این مقاله از شرکت نانوسا تهیه شده است و به صورت پودری با خلوص ۹۸٪ مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس در جدول (۲) و آنالیز شیمیایی نانوسیلیس در جدول (۳) ارائه شده است. به منظور تعیین خصوصیات خاک مارن، حدود اتربرگ (ASTM D 4318)، تراکم (ASTM D 698) و مقاومت فشاری محدود نشده (ASTM D 2166) بر روی خاک مینا انجام شده است. همچنین جهت تعیین میزان زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) نیز آزمایش برش مستقیم براساس استاندارد ASTM D3080 انجام شده است (Annual Book of ASTM Standards، ۱۹۹۲). برخی از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مارن مورد مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است.

میزان کانی‌های رسی (پالی‌گورسکایت و سپیولایت) در خاک مارن، خاصیت خمیری افزایش می‌یابد که در نتیجه کاهش دوام و شاخص‌های مقاومتی را منجر می‌شود که در پی آن کاهش مقاومت برشی، نشست‌های ناهمسان، رمبندگی^۱ و تورم را در منطقه به وجود می‌آورد (Ghobadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Sokouti و Razagi، ۲۰۱۵).

تثبیت شیمیایی خاک با آهک سبب بهبود کیفیت و مشخصات فنی خاک و تسریع در عملیات اجرایی نیز می‌شود، در اثر تثبیت خاک‌های رسی با آهک، واکنش‌های متعددی انجام می‌شود که شامل واکنش‌های تبادل کاتیونی، لخته شدن (کوتاه-مدت)، واکنش‌های پوزولانی (درازمدت) و واکنش‌های کربناسیون است (Al-Rawas و همکاران، ۲۰۰۵).

در واکنش‌های تبادل کاتیونی، کاتیون‌های قابل مبادله خاک رس با کاتیون‌های کلسیم جایگزین می‌شوند. در این حالت کاتیون‌های تک‌ظرفیتی سدیم و پتاسیم خاک با یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و یابون‌های چند ظرفیتی جایگزین می‌شوند. اما افزایش قابل توجه مقاومت به دلیلی واکنش‌های پوزولانی است (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Grim و Eades، ۱۹۶۰). در واقع افزایش آهک موجب افزایش pH محیط خاک و باعث حل‌شدگی سیلیکات و آلومینات موجود در خاک می‌شود. با آزاد شدن ترکیبات آلومینات و سیلیکات خاک رس و ترکیب آن‌ها با کلسیم، ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و کلسیم آلومینات هیدراته (C-A-H) تشکیل می‌شود. 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 (Broms، Beng، ۱۹۹۳؛ Sol-Sanchez و همکاران، ۲۰۱۶؛ Elert و همکاران، ۲۰۱۷؛ Goodarzi و Moradloo، ۲۰۱۷). این واکنش‌ها مطابق با روابط (۱) و (۲) انجام می‌شوند (Oates، ۱۹۹۸؛ Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۶).



یکی از روش‌های دیگر برای بهبود خواص خاک که در گذشته مورد بررسی قرار نگرفته بود، استفاده از نانو مواد است. ذرات نانو به دلیل سطح ویژه زیاد خود، بسیار واکنش‌پذیرتر از ذرات خاک است و به دلیل همین سطح ویژه بسیار زیاد و بارهای سطحی، با استفاده از درصد کمی از این ذرات می‌توان به درصد بالایی از بهبود خواص دست یافت. خاک‌هایی که شامل نانوذرات با حفرات درون ذره‌ای در مقیاس نانو هستند، معمولاً حد روانی و خمیری

آهک با استفاده از دستگاه pH متر (Istek-Ecomet) در نسبت خاک به آب ۱ به ۱۰ (۴ گرم خاک و ۴۰ میلی لیتر آب مقطر) اندازه گیری شده است.

اندازه گیری درصد کربنات به روش تیتراسیون انجام شده است (Nelson و Sommers, ۱۹۹۶). میزان کربنات خاک مارن موجود حدود ۴۹٪ است (ASTM C25-99, ۱۹۹۹). مقادیر pH خاک و

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
۱/۷۱	۷۲/۲۶	۰/۷	۰/۲	۱/۲	۰/۱	۲۳/۸۳

جدول ۲- مشخصه های فیزیکی نانوسیلیس

Color	Purity	Special surface area (m ² /g)	Particle Size (nm)	Density (kg/m ³)
white	>۹۸	۱۹۳	۲۰-۳۰	۱۷۰

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
۹۸/۹۵	۰/۴۲	۰/۱۶	۰/۰۷۵	۰/۰۴۱	<۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۴۲

و نانوسیلیس (۰/۷٪) انجام شده است. جهت انجام آزمایش رسوب، نمونه ها با نسبت ۱ به ۱۰ (۱۰۰ گرم خاک و ۱۰۰۰ میلی لیتر آب مقطر) درون استوانه های شیشه ای به حجم ۱۰۰۰ میلی لیتر ریخته شده و برای انجام آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. جهت آماده سازی نمونه ها برای آزمایش وارفتگی آزاد، ابتدا مارن-آهک-نانوسیلیس ترکیب و سپس با درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک در قالب نمونه تک محوری، متراکم شده اند. زمان عمل آوری نمونه ها ۱، ۷ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است. بعد از سپری شدن دوره عمل آوری نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف از مواد افزودنی، نمونه های تثبیت شده به همراه نمونه مارن تثبیت نشده به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار داده شدند (Deo و Wood, ۲۰۰۷, Yong, و Ouhadi, ۱۹۷۵).

برای تهیه نمونه های پراش پرتو ایکس (XRD) از خاک مارن^۸ یک گرم خاک خشک شده در مجاورت هوا با دقت ۰/۰۰۱ وزن شده و در تیوپ سانتیفریوژ^۹ ۵۰ میلی لیتر ریخته، سپس محلول مورد نظر توسط لرزاننده الکتریکی هم زده شده است. جهت اطمینان از به دست آمدن شرایط تعادل، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. مجدداً 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 بر روی اسلاید شیشه ای ریخته شده است. ضخامت پوشش روی اسلاید برای تمامی نمونه ها یکسان است (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Ouhadi, ۲۰۰۲). پراش اشعه ایکس توسط دستگاه (X-Ray (D8-ADVANCE) Diffractometer انجام شده است. براساس نتایج پراش اشعه ایکس (شکل (۱)) پالی گورسکایت، کائولینیت و سپیولایت کانی اصلی

سپس درصد های مختلف آهک (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی خشک خاک) و درصد های مختلف نانوسیلیس (۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ درصد وزنی خشک خاک) به خاک اضافه شده است. خاک، آهک و نانوسیلیس به درون بطری های پلاستیکی ۵۰ میلی لیتر ریخته و با هم مخلوط شدند. سپس ۴۰ میلی لیتر آب مقطر به بطری اضافه و به مدت دو ساعت به وسیله لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شده است و در نهایت pH محلول ها بعد از ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری اندازه گیری شدند.

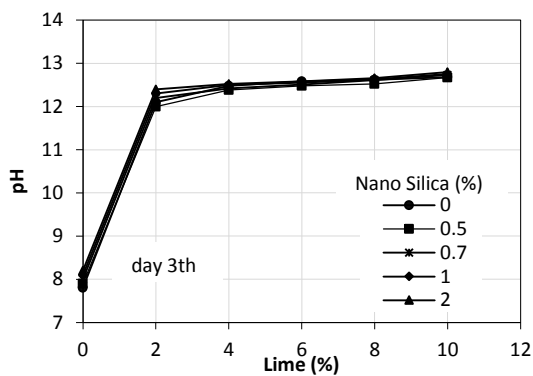
به منظور انجام آزمایش ها بر روی خاک تثبیت شده با درصد های مختلف آهک و نانوسیلیس، مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک و ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ درصد نانوسیلیس به صورت خشک به خاک اضافه شده است. بعد از اختلاط کامل به اندازه درصد رطوبت بهینه آب افزوده می شود. نمونه ها به منظور توزیع یکنواخت رطوبت، ترکیب شدند تا به صورت همگن در آیند. آزمایش تعیین حدود اتبرگ بعد از ۷ روز عمل آوری بر روی ترکیب های مختلف خاک-آهک-نانوسیلیس انجام شده است. همچنین نمونه های آزمایش مقاومت فشاری درون قالب های استوانه ای (به قطر ۴/۶۳ سانتی متر و ارتفاع ۹/۵ سانتی متر) با بیشینه وزن واحد حجم خشک برابر با ۱/۷ گرم بر سانتی متر مکعب ساخته شده و جهت سپری شدن دوره عمل آوری (زمان های ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) نمونه ها در محفظه های پلاستیکی با رطوبت ثابت نگهداری شده و در انتهای زمان عمل آوری، مورد آزمایش قرار گرفته است. به منظور بررسی اثربخشی افزودنی ها بر رفتار کوتاه مدت خاک، آزمایش رسوب بر روی نمونه های حاوی درصد های مختلف آهک (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد) و ترکیب درصد های مختلف آهک

8. Marly soil
9. Centrifuge tube

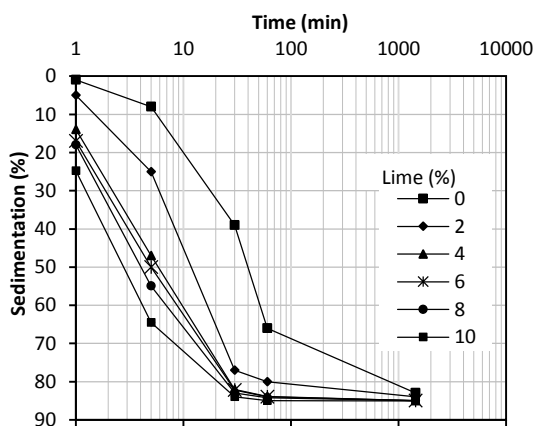
6. Slake
7. X Ray Diffraction

کم‌تری را نشان می‌دهد. به گونه‌ای که با افزودن ۰.۴٪ آهک و ۰.۵٪ نانوسیلیس به خاک pH نمونه به ۱۲/۳۸ رسیده و با افزودن ۰.۴٪ آهک و ۰.۷٪ نانوسیلیس به خاک مارن مورد مطالعه، pH نمونه به ۱۲/۴۲ رسیده است. مطابق با نتایج، حداقل مقدار آهک (۰.۴٪) و نانوسیلیس (۰.۷٪) استفاده شد.

میزان رسوب نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف آهک در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش میزان آهک به خاک مارن به دلیل جایگزینی کاتیون‌های دو ظرفیتی به جای کاتیون‌های تک‌ظرفیتی، فرآیند تبادل کاتیونی و کلوخه شدن به سرعت صورت می‌پذیرد. به عبارتی میزان رسوب در مارن حاوی ۰.۶، ۰.۸ و ۱.۰ درصد آهک در مدت زمان ۵ دقیقه به بیش از ۵۰٪ رسیده است، همچنین با افزودن ۰.۷٪ نانوسیلیس به ترکیب مارن- آهک سرعت رسوب نمونه‌ها افزایش یافته است، به گونه‌ای که در نمونه‌های ۰.۶، ۰.۸ و ۱.۰ درصد آهک در حضور ۰.۷٪ نانوسیلیس پس از سپری شدن مدت زمان ۵ دقیقه، میزان رسوب به بیش از ۶۰٪ رسیده است (شکل (۴)).



شکل ۲- روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح شده با آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس پس از ۷۲ ساعت

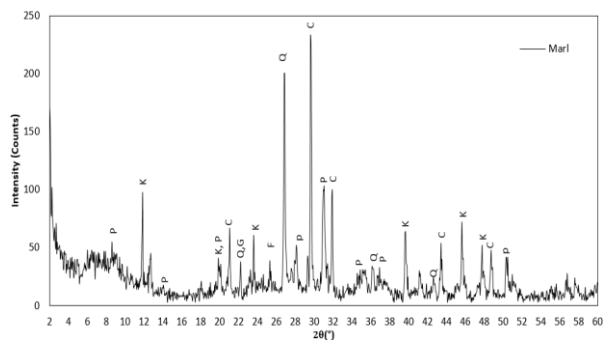


شکل ۳- منحنی رسوب نمونه‌های مارن با درصد‌های مختلف آهک

رسی و کوارتز، فلدسپات و کلسیت کانی‌های غیر رسی موجود در خاک مارن است.

جدول ۴- برخی از مشخصات ژئوتکنیکی نمونه خاک مارن

پارامترهای خاک مارن	مقدار	مرجع
درصد ذرات کوچک‌تر از 0.075 mm (%)	۹۵	ASTM D422
چسبندگی (kg/cm ²)	۰/۹	ASTM D3080
زاویه اصطکاک داخلی (φ ^o)	۱۹	
مقاومت تک‌محوری (UCS) (kg/cm ²)	۱/۱	ASTM D2166
حد روانی (I _p)	۴۱	ASTM D4318
حد خمیری (I _L)	۲۰	ASTM D4318
نشانه خمیری (I _p)	۲۱	ASTM D4318
وزن مخصوص خشک γ _d (gr/cm ³)	۱/۷	ASTM D698
میزان رطوبت بهینه (w _p)	۱۹/۵	ASTM D698
نام خاک (طبقه‌بندی متحد)	CL	ASTM D3282
pH (1:10, Soil: water)	۷/۸	



شکل ۱- منحنی پراش پرتو ایکس خاک مورد مطالعه:

(P) پالیگورسکایت، (K: کائولینیت، (C) کلسیت، (Q) کوارتز، (G) ژپیس، (F) فلدسپات، (H) هالیت

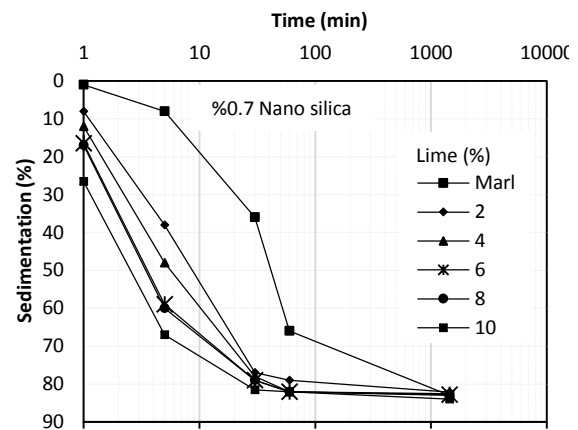
۳- بحث و بررسی نتایج

شکل (۲) تغییرات pH محیط واکنش در حضور آهک و نانوسیلیس بعد از ۳ روز نگهداری را نشان می‌دهد. pH خاک طبیعی ۷/۸ است و با افزودن تنها ۰.۲٪ آهک مخلوط خاک- آهک تا ۱۲/۱ افزایش یافته است و با ۰.۴٪ آهک محیط به ۱۲/۴۸ رسیده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده کاتیون دو ظرفیتی کلسیم (Ca⁺⁺) موجود در آهک جایگزین کاتیون تک‌ظرفیتی سدیم (Na⁺) در خاک می‌شود و با افزایش غلظت یون هیدروکسید (OH⁻) ناشی از یونیزه شدن آهک شکفته، pH محیط خاک افزایش می‌یابد. همچنین افزایش در میزان آهک در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، منجر به افزایش pH خاک شده است. pH خاک حاوی آهک در حضور نانوسیلیس در مقایسه با نمونه حاوی آهک بدون نانوسیلیس به‌ویژه برای نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ نانوسیلیس مقدار

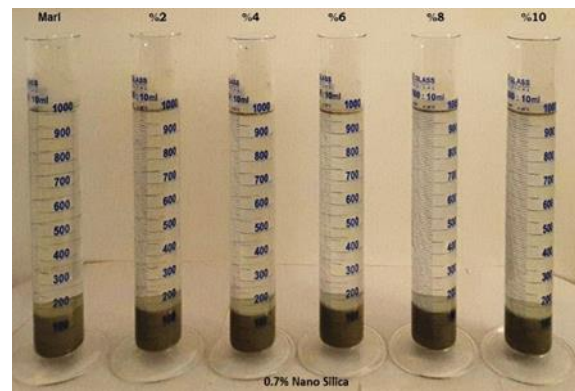
طور کامل صورت گرفته است (شکل ۵). فرآیند تثبیت با آهک بر روی رفتار خمیری خاک‌های مارنی تأثیرگذار است. در شکل (۶) تغییرات حد روانی و شاخص خمیری خاک اصلاح شده در دوره عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است. بر اساس نتایج، با افزودن آهک مقدار حد روانی و حد خمیری در دوره عمل‌آوری ۷ روزه افزایش پیدا می‌کند، به گونه‌ای که در حالت افزودن ۶٪ آهک به خاک مارنی، حد روانی خاک به حدود ۵۸ واحد رسیده است. براساس نتایج پراش اشعه ایکس، افزایش حد روانی پس از افزودن مواد افزودنی در مقایسه با نمونه مارن طبیعی را می‌توان به حضور کانی توری اترینگایت^{۱۱} در نمونه خاک مارن پس از تثبیت با آهک نسبت داد.

در فرآیند تثبیت با آهک، فرآیند لخته‌شدن باعث به هم 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 لخته‌شدن، مقدار آب در ساختار خاک افزایش می‌یابد و منجر به افزایش بیشتر حد روانی می‌شود (Al-Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۰).

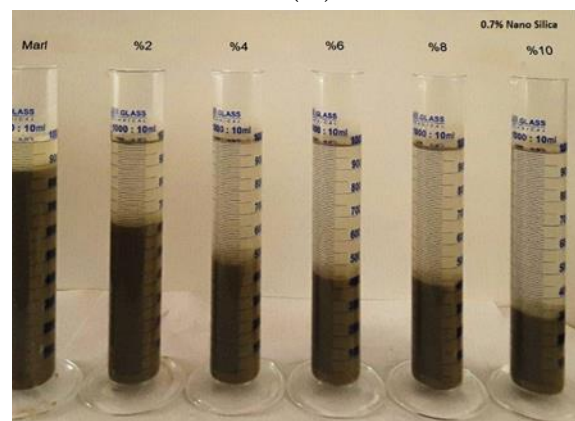
براساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) افزودن نانوسیلیس (۰.۷٪) به‌تنهایی منجر به افزایش حد روانی و کاهش شاخص خمیری خاک شده و در صورت افزودن درصد‌های مختلف آهک (۲ تا ۱۰ درصد)، حد روانی به‌مراتب کاهش یافته است (Abdelzaher و همکاران، ۲۰۱۶؛ Amiri و همکاران، ۲۰۱۹). به گونه‌ای که حد روانی در بیشترین مقدار برای نمونه حاوی ۰.۷٪ نانوسیلیس برابر با ۴۹/۶ واحد و کم‌ترین مقدار حد روانی نیز مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ آهک و ۰.۷٪ نانوسیلیس برابر با ۳۴/۲۶ واحد است. شکل (۶) نتایج مربوط به شاخص خمیری (PI) برای زمان عمل‌آوری ۷ روزه را نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه شده شاخص خمیری خاک با افزایش آهک، کاهش یافته است، به طوری که 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. به طوری که در حالت تثبیت خاک با ۶٪ آهک و ۰.۷٪ نانوسیلیس، شاخص خمیری نسبت به خاک اصلاح شده با ۶٪ آهک ۶۲/۳٪ کاهش یافته است. علت کاهش پلاستیسیته خاک را می‌توان با رفتار دانه‌ای خاک ناشی از واکنش‌های کوتاه‌مدت (تبادل کاتیونی و فولوکوله^{۱۱} شدن) توضیح داد که در نتیجه قابلیت اجرایی خاک را بهبود می‌بخشد (Al-mukhtar و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۴- منحنی رسوب نمونه‌های مارن با درصد‌های مختلف آهک و ۰.۷٪ نانوسیلیس



(الف)



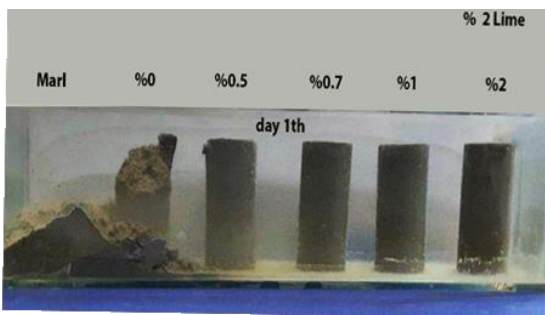
(ب)

شکل ۵- فرآیند رسوب نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف آهک و ۰.۷٪ نانوسیلیس: (الف) پس از گذشت ۵ دقیقه، (ب) پس از گذشت ۱۴۴۰ دقیقه

فرآیند رسوب برای مارن با درصد‌های مختلف آهک در حضور ۰.۷٪ نانوسیلیس، پس از سپری شدن مدت زمان ۲۴ ساعت به

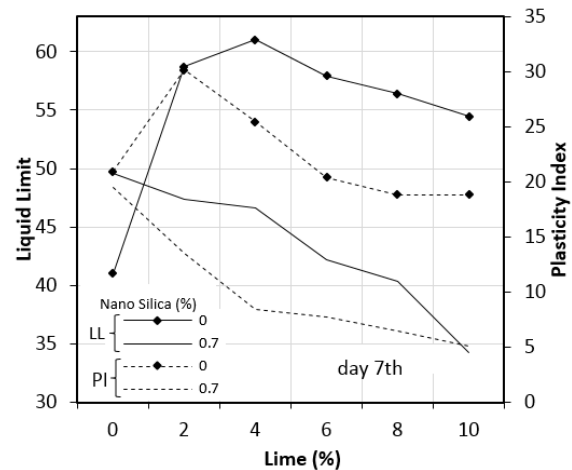
آهک، سرعت وارفتگی نمونه تا حد زیادی کاهش یافته و ترک‌های سطحی در نمونه مشاهده شده است. در حالی که افزودن بیش از ۰/۷٪ نانوسیلیس به خاک مارن، از فروپاشی، گسیختگی و ایجاد ترک در نمونه جلوگیری کرده و انسجام و پایداری نمونه را در آب حفظ کرده است (شکل ۷).

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش حد روانی در این مقاله، می‌توان نشان داد که با کاهش حد روانی و شاخص خمیری خاک مارن در حضور نانوسیلیس، سرعت وارفتگی نمونه تثبیت شده با آهک و نانوسیلیس در مقایسه با نمونه مارن فاقد نانوسیلیس کم‌تر است. به طوری که سرعت وارفتگی نمونه حاوی ۲٪ آهک که در مقایسه با نمونه حاوی ۲٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس حد روانی بیشتری دارد، سست‌شدگی شدیدتری را نشان داده است. در واقع به دلیل تشکیل ساختار مجتمع خاک، تبادل کاتیونی و به دلیل حلالیت سیلیس و آلومینای موجود در کانی‌های رسی خاک مارن، تشکیل ترکیبات کلسیم سیلیکات هیدراته C-S-H و کلسیم آلومینات هیدراته C-A-H (واکنش‌های پوزولانی) مقاومت نمونه‌ها در برابر وارفتگی افزایش یافته است.



شکل ۷- وارفتگی نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس، طی دوره عمل‌آوری

شکل (۸) نمونه‌های اصلاح شده با ۰/۷٪ نانوسیلیس و درصد‌های مختلف آهک را نشان می‌دهد. نمونه حاوی ۰/۷٪ نانوسیلیس بدون آهک در زمان‌های عمل‌آوری ۱ روزه، ۷ روزه و ۲۸ روزه به طور کامل دچار وارفتگی شده است. با افزایش آهک و افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت خاک مارن در برابر وارفتگی افزایش یافته است. از سوی دیگر تثبیت خاک مارن مورد مطالعه با آهک و نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود. در این مقاله، تأثیر آهک و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) خاک، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه‌های مرطوب در درصد رطوبت بهینه و زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است.



شکل ۶- منحنی حد روانی و شاخص خمیری نمونه‌های اصلاح شده با صفر و ۰/۷ درصد نانوسیلیس در درصد‌های مختلف آهک (دوره عمل‌آوری ۷ روز)

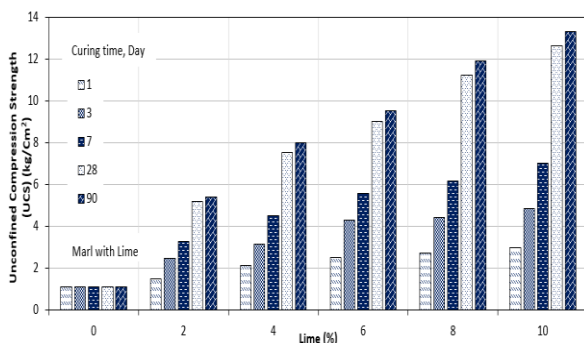
فرآیندهای هوازدگی مانند اکسیداسیون، انحلال، هیدراسیون، فرسایش و وارفتگی از جمله عواملی هستند که باعث تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های مارنی شده و ظرفیت باربری آن‌ها را کاهش می‌دهد. یکی از مشکلات اساسی سنگ‌ها و خاک‌های حاوی کانی‌های رسی به‌ویژه خاک‌های مارنی در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی وارفتگی و شکفتگی خاک تحت شرایط اشباع است.

در این مقاله به منظور بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف آهک (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد) و درصد‌های مختلف نانوسیلیس (۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ درصد) به خاک مارن بر وارفتگی نمونه درون آب، از آزمایش وارفتگی آزاد استفاده شده است. به گونه‌ای که پس از اختلاط خاک مارن با مواد افزودنی (آهک و نانوسیلیس) و بعد از سپری شدن دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور شده و رفتار نمونه تحت شرایط اشباع به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۷) نمونه‌های اصلاح شده با ۲٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس (۰ تا ۲ درصد) طی دوره عمل‌آوری ۱ روزه را نشان می‌دهد. پس از قرار دادن نمونه مارن فاقد افزودنی درون آب، با گذشت مدت زمان کم‌تر از ۶۰ دقیقه، نمونه به طور کامل دچار وارفتگی شده و به انباشته‌ای از گل تبدیل شده است. همچنین افزودن ۲٪ آهک به خاک مارن، پس از سپری شدن مدت زمان ۲۴ ساعت، بخشی از نمونه دچار وارفتگی شده است. نتایج وارفتگی نشان می‌دهد که افزودن ۲٪ آهک جهت تثبیت خاک با دوره عمل‌آوری ۱ روزه، امکان‌پذیر نیست و تنها سرعت وارفتگی نمونه درون آب را در مقایسه با خاک مارن کاهش داده است. با افزودن ۰/۵٪ نانوسیلیس به خاک مارن حاوی ۲٪

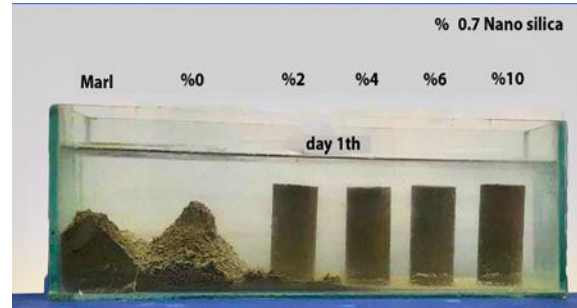
نتایج مربوط به مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک و نانوسیلیس پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقاومت فشاری، با افزایش درصد آهک- نانوسیلیس روند صعودی دارد، که این موضوع را می‌توان به دلیل فعل‌وانفعالات شیمیایی ذرات نانوسیلیس و آهک ارزیابی کرد، در واقع حضور نانوسیلیس موجب مصرف کامل آهک می‌شود و این امر موجب تقویت پیوند بین ذرات شده و در نهایت افزایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها را به همراه داشته است.

همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده، نانوسیلیس به- تنهایی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن ندارد، اما به‌عنوان ذرات فعال، زمانی که با ذرات آهک ترکیب می‌شوند، مقاومت فشاری نمونه خاک مارن را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. همچنین مقدار کم نانوسیلیس، مقاومت خاک تثبیت‌شده با آهک را تا حد زیادی افزایش داده است. طبق نتایج ارائه شده در شکل (۸)، مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف نانوسیلیس (۰، ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ درصد) در حضور ۰/۶ آهک به ترتیب ۹، ۱۱/۳، ۱۴/۲، ۱۵/۷۲ و ۲۰/۸ kg/cm^2 است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نانوسیلیس به‌دلیل بالا بودن مساحت سطح مخصوص و واکنش سطحی، با کلسیم هیدروکسید آزادشده ناشی از آهک وارد واکنش شده و باعث متراکم شدن ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (GSH) می‌شود. خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس، تخلخل موجود درون ژل تشکیل شده را پر می‌کند. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که افزودن نانوسیلیس منجر به بهبود مقاومت خاک می‌شود.

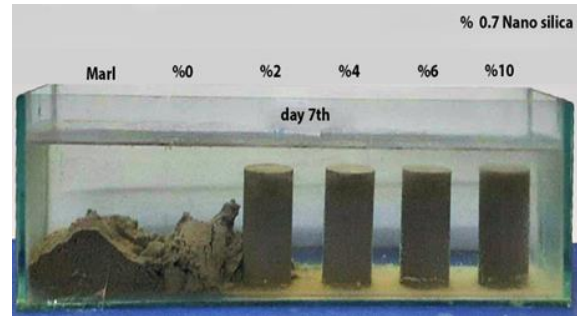
در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارتباط بین تنش و کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف آهک و ترکیب آهک و نانوسیلیس در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱۱) مقاومت فشاری بیشینه برای مارن حاوی ۰/۲ آهک معادل با ۵/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و برای نمونه تثبیت‌شده با ۰/۶ آهک برابر با ۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.



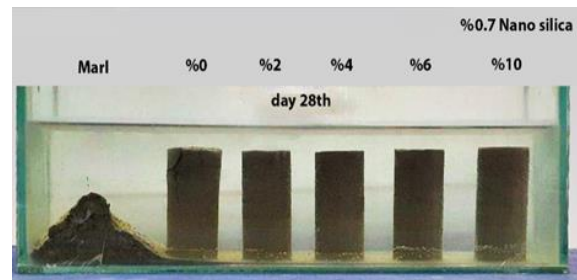
شکل ۹- تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک طی دوره عمل‌آوری



(الف)



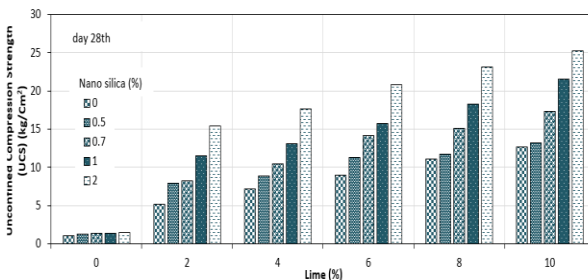
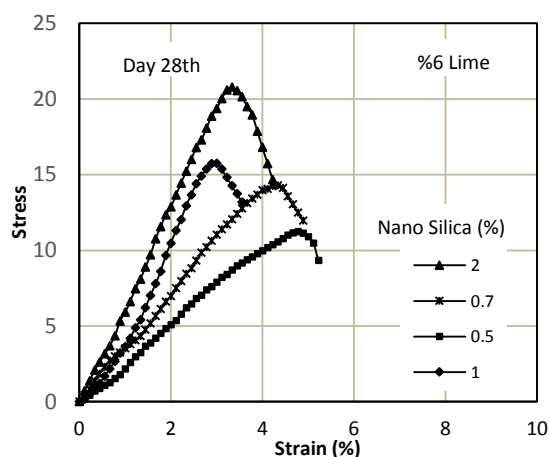
(ب)



(ج)

شکل ۸- وارفنگی نمونه‌های تثبیت‌شده با ۰/۷ نانوسیلیس و درصد‌های مختلف آهک: (الف) ۱ روزه، (ب) ۷ روزه، (ج) ۲۸ روزه

نتایج مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف آهک طی دوره عمل‌آوری در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن تنها ۰/۲ آهک مقاومت فشاری ۱ روزه خاک مارن را حدود ۱/۵ برابر افزایش داده است، همچنین مقاومت ۱ روزه خاک اصلاح‌شده با ۰/۶ و ۰/۸ آهک به ترتیب نسبت به مقاومت اولیه ۲/۳ و ۲/۵ برابر افزایش یافته است. علت این افزایش مقاومت را می‌توان به تبادل کاتیونی و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی نسبت داد. در شکل (۹) مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک طی زمان ارائه شده است، به گونه‌ای که در نمونه حاوی ۰/۶ آهک مقاومت ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۲/۵، ۴/۳، ۵/۶، ۹ و ۹/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع شده است. با افزایش زمان‌های عمل‌آوری مقاومت نمونه‌ها رشد زیادی دارد. که با توجه به نتایج پژوهش‌های گذشته، علت آن را می‌توان تکمیل واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه اتصال بیشتر ذرات رسی به یکدیگر ارزیابی کرد (Goodarzi و Moradloo، ۲۰۱۷؛ Consoli و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک و نانوسیلیس (دوره عمل‌آوری ۲۸ روز)

شکل ۱۲- منحنی تغییرات تنش- کرنش نمونه‌های اصلاح‌شده با ۶٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس (دوره عمل‌آوری ۲۸ روز)

با توجه به نتایج آزمایش‌های وارفتگی آزاد، مقاومت فشاری، حدود اتربرگ و تغییرات pH می‌توان مشاهده کرد که ذرات نانوسیلیس منجر به تسریع در ایجاد مواد سیمانی (CSH) می‌شود. همچنین براساس نتایج این پژوهش افزودن نانوسیلیس بدون حضور آهک تأثیری بر مقدار pH، مقاومت فشاری خاک و استحکام نمونه در برابر وارفتگی ندارد و نیاز به ماده فعال کننده‌ای مانند آهک است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان این‌گونه خلاصه کرد: (۱) نتایج نشان می‌دهد خاک مارن پس از قرارگیری در آب دچار وارفتگی شده‌است، که علت آن را می‌توان به فراوانی کانی پالی-گورسکایت در خاک مارن مورد مطالعه نسبت داد، همچنین انحلال نمک موجود در خاک نیز بر کاهش مقاومت خاک مارن در برابر وارفتگی تأثیرگذار است.

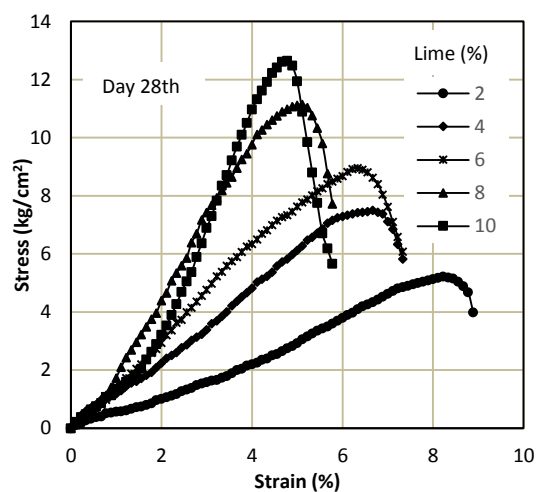
(۲) با افزودن نانوسیلیس به خاک مارن حاوی آهک، مقاومت فشاری نمونه افزایش یافته است در واقع ذرات نانوسیلیس با پر کردن فضای خالی بین ذرات خاک و ایجاد ساختار متراکم‌تر از فروپاشی نمونه تحت شرایط اشباع جلوگیری می‌کند.

(۳) با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و pH می‌توان نشان داد که حضور نانوسیلیس به‌تنهایی تأثیر چندانی بر ویژگی‌های مقاومتی و وارفتگی خاک مارن نداشته است.

(۴) حلالیت کانی‌های رسی در محیط با pH بالا و تشکیل ترکیبات C-S-H و C-A-H در خاک مارن به دلیل واکنش با آهک و نانوسیلیس، مانع از فرسایش و فروپاشی نمونه مارنی در آب شده است.

این در حالی است که کرنش مربوط به مقاومت بیشینه نمونه‌های حاوی ۲ و ۶ درصد آهک به ترتیب برابر با ۸ و ۶ درصد است. نتایج ارائه شده در شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، کرنش مربوط به مقاومت حداکثر، کاهش یافته و در واقع خاک اصلاح‌شده با آهک رفتار شکننده از خود نشان می‌دهد که روند تغییرات، با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین همپوشانی مناسبی دارد (Ouhadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Anagnostopoulos، ۲۰۱۵).

با توجه به شکل (۱۲)، با زیاد شدن مقدار نانوسیلیس به خاک تثبیت‌شده با ۶٪ آهک، مقاومت فشاری حداکثر افزایش یافته و شیب نمودار تنش-کرنش زیاد می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه حاوی ۰/۵٪ نانوسیلیس برابر با ۱۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و نمونه حاوی ۱٪ نانوسیلیس برابر با ۱۵/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. همچنین کرنش نظیر مقاومت بیشینه نمونه‌های تثبیت‌شده با ۰/۵ و ۱ درصد نانوسیلیس به ترتیب برابر با ۴/۷ و ۳ درصد است.



شکل ۱۱- منحنی تغییرات تنش- کرنش نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک (دوره عمل‌آوری ۲۸ روز)

- comprehensive review", Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17 (3), 639-650.
- Ghobadi MH, Mohseni H, Karami R, "Study of geological engineering characteristics of Gachsaran Formation in Ramhormoz area, East of Khuzestan", Journal of Advanced Applied Geology, 2014, 3 (1), 1-12, (In Persian).
- Hosseini M, Ali Panahi B, Senmari S, "Estimation of marl stone engineering properties using punch test", Quarterly Journal of Applied Geology, 2012, 8 (4) 309-322 (In Persian).
- Mahouti M, Katebi H, "Classification of Carbonated Soils from Geotechnical Point of View (Case study: Marly Soils of Tabriz)", Journal of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz, 2018, 48 (3), 51-59 (In Persian).
- Manual Book of ASTM Standards, in: American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
- Nelson DW and Sommers LE, "Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter", American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1996, 961-1010.
- Ouhadi VR, Yong RN, "The Role of Clay Fractions of Marly Soils on their Post Stabilization Failure", Engineering Geology, 2003, 70 (3), 365-375.
- Ouhadi VR, Yong RN, Amiri M and Ouhadi MH, "Pozzolanic Consolidation of Stabilized Soft Clays", Applied Clay Science, 2014, 95, 111-118.
- Oates AH, "Lime and Limestone", John Wiley and Sons publishing company, 1998.
- Ouhadi VR, Amiri M, and Hamidi S, "Dispersive soil improvement with lime, special attention to the reduction of peak intensity of clay minerals in XRD analysis", Modares Civil Engineering Journal, 2014, 14 (2) 13-25 (In Persian).
- Ouhadi VR, Amiri M, Zangeneh M, "Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized Dispersive Soil", Modares Civil Engineering Journal, 2016, 16 (1) 11-22 (In Persian).
- Ouhadi VR, Yong RN, "Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement- stabilized clayey soils", Applied Clay Science, 2007, 35 (3-4), 238-249.
- Ouhadi VR, "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, 2002, 10 (1), 87-97 (In Persian).
- Ouhadi VR, Hamidi S, Amiri M, "Impact of Heavy Metal Contaminants on Coefficient of Variations of Compression Index, Expansion Index and Permeability Coefficient of Bentonite from Micro-Structural Point of View", Journal of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz, 2016, 45 (4), 7-17, (In Persian).
- Pettijohn FJ, "Sedimentary rock", Harper and Row, New York, 1975.
- Sol-Sánchez M, Castro J, Ureña CG, Azañón JM, "Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators", Engineering Geology, 2016, 200, 10-17.
- (۵) تثبیت مارن با ۶ درصد آهک در حضور ۰/۷ درصد نانوسیلیس منجر به کاهش ۱۳ واحدی شاخص خمیری خاک مارن و افزایش مقاومت فشاری مارن طی دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به میزان $14/2 \text{ kg/cm}^2$ شده است.

۵- مراجع

- Abdelzaher EA, Mostafa, Mohamed S, Ouf and Mokhtar F Elgendy, "Stabilization of Subgrade Pavement Layer Using Silica Fume and Nano Silica", International Journal of Scientific & Engineering Research, 2016, 7 (3), 573-581.
- Aghanabati A, "Geological Engineering", Geological Survey and Mineral Exploration, Tehran, Iran, 2004, (In Persian).
- Al-Mukhtar M, Lasledj A and Alcover J, "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C", Applied Clay Science, 2010, 50 (2), 191-198.
- Al-Rawas AA, Hago AW, Al-Sarmi H, "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", Building and Environment, 2005, 40 (5), 681-687.
- Amiri M, Asakereh A, Farokhdell AH, "The Effect of Combined Nanosilica and Lime on the Improvement of the Marl Soil Engineering Properties", Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 2019, 32 (1), 35-54. (In Persian).
- Anagnostopoulos CA, "Strength properties of an epoxy resin and cement-stabilized silty clay soil", Applied Clay Science, 2015, 114, 517-529.
- ASTM C25-99, "Quicklime and Hydrated Lime", Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, 1999.
- Broms B, Bengt, "Ground Improvement", John Wiley and Sons publishing company, 1993.
- 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, 2015, 7, 367-378.
- Consoli NC, Prietto PDM, da Silva Lopes L & Winter D, "Control factors for the long-term compressive strength of lime treated sandy clay soil", Transportation Geotech, 2014, 1, 129-136.
- Eades JL, Grim RE, "Reaction of hydrate lime with pure clay minerals in soil stabilization", Highway Research Board Bulletin, 1960, 262, 51-63.
- Elert K, Nieto F, Azañón JM, "Effects of lime treatments on marls", Applied Clay Science, 2017, 135, 611-619.
- Fahimifar A, Soroush H, "Rock Technics Test", Theoretical Aspects and Standards, Tehran, Iran, 2002, Volume 1 (In Persian).
- Goodarzi A, Moradloo A, "Effect of curing temperature and SiO₂-nanoparticles on the engineering properties of lime treated expansive soil", Modares Civil Engineering Journal, 2017, 17 (3), 132-144, (In Persian).
- Ghasabkolaei N, Janalizadeh Choobbasti A, Roshan N, and Ghasemi SE, "Geotechnical properties of the soils modified whit nanomaterials: A

- Sokouti R, Razagi S, "Erodibility and loss of marly driven soil", Eurasian Journal of Soil Science, 2015, 4 (4), 279-286.
- Vakili A, Narimousa R, Salimi M, Farhadi MS, "Effect of freeze-thaw cycles on characteristics of marl soil treated by electro osmosis application", Cold Regions Science and Technology, 2019, 167, 102861.
- Wood LE, Deo P, "Observation on orientation and hardness variations", Am Miner, 1975, 31 (3-4), 149-152.
- Zhang G, "Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils", Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, New Peaks in Geotechnics, ASCE, 2007.
- Zhang GT, Germaine AJ, Whittle C, Ladd CC, "Index properties of a highly weathered old alluvium", Geotechnique, 2004, 54 (7), 441-451.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Lime and Nanosilica Stabilization Process on Compressive Strength and Slake of Marly Soils in Saturated State

Adel Asakereh*, Mohammad Amiri, Halimeh zarei

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandarabbas, Iran

Received: 26 March 2019; Accepted: 28 June 2020

Keywords:

Marl, Lime, Nanosilica, Macrostructural behavior, Unconfined compression strength.

1. Introduction

Marly soils have a relatively good resistance in the dry state, but these characteristics tend to significant degradation in contact with water (Ouhadi & Yong, 2003, Hosseini et al. 2012). The Failure to identify the behavior of clayey fine-grained soils, and especially marls, can challenge the structures constructed on such soils. Because of the extent and distribution of this type of soil in many regions of Iran, especially in southern Iran, and the high potential for the construction of hydraulic structures in these areas, it is necessary to study the behavior of these soils. Accordingly, the purpose of this study is to investigate the geotechnical characteristics of marl soils and provide a solution for improving the engineering properties of these soils.

2. Methodology

In order to achieve the objectives of this research, the effect of adding lime and adding lime and nanosilica on soil geotechnical properties (such as Atterberg limits, compressive strength) with regard to the time of curing of the marl has been investigated.

In order to determine the percentage of lime and nano-SiO₂ required for soil stabilization, physical and mechanical experiments were conducted in various amounts of lime and nano-SiO₂. First, the pH of soil and lime were measured separately using pH meter (Istek-Ecomet) in 1:4 soil-to-water ratio (4 gr soil and 40 ml distilled water) and then different percentages of lime (2, 4, 6, 8 and 10 % of dry soil weight) and various percentages of nano-SiO₂ (0.5, 0.7, 1 and 2 % of dry soil weight) were added to the soil.

Also, in order to further evaluate the effects of additives on soil properties, sediment and slake tests have been carried out

X-Ray Diffractometer (D8-ADVANCE) with Cu-K α radiation was applied to achieve the x-ray diffraction pattern of the Marl sample. Fig. 1. shows the x-ray diffraction diagram for the studied marl sample. Results of XRD analysis conducted on natural soil indicated palygorskite, kaolinite and sepiolite as main clayey minerals and quartz, feldspath and calcite as non-clayey minerals in the marl soil.

* Corresponding Author

E-mail addresses: asakereh@hormozgan.ac.ir (Adel Asakereh), zarei.halimeh@yahoo.com (Halimeh Zarei), amirii@hormozgan.ac.ir (Mohammad Amiri).

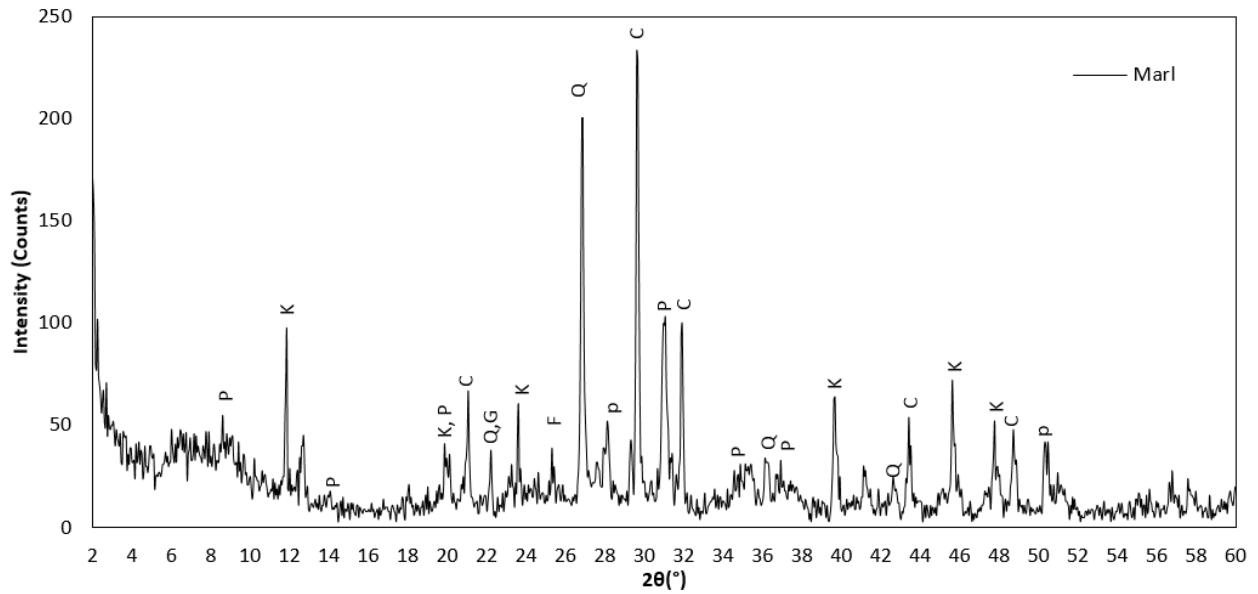


Fig. 1. XRD pattern of Marl soil sample: P) Palygorskite, K) Kaolinite, C) Calcite, Q) Quartz, G) Gypse, F) Feldspath

3. Results and discussion

pH is one of the common criteria for evaluating lime content as a stabilizer agent. In fact, the minimum amount of lime that causes cationic exchange in the soil can be identified based on changes in the pH of the reaction medium. This amount of the stabilizer agent (lime) changes soil properties significantly (Ouhadi et al. 2014; Al-Mukhtar et al. 2010) Based on the results obtained from LL, PL, PI tests, unconfined compressive strength, sediment and slake tests, the process of soil specifications changing can be investigated in the presence of different percentages of stabilizer materials (lime and nano-SiO₂).

stabilization of the studied marl soil with lime and nano-SiO₂ increases soil resistance. The results for the unconfined compressive strength of the samples modified with lime and nano-SiO₂ after 28 days of treatment are represented in Fig. 2. The compressive strength had an increasing trend with an increasing amount of lime-nano-SiO₂ which can be due to the chemical interaction of lime and nano-SiO₂ particles. Then, the complete consumption of lime by nano-SiO₂ improved the bond between particles and eventually enhanced the unconfined compressive strength of samples.

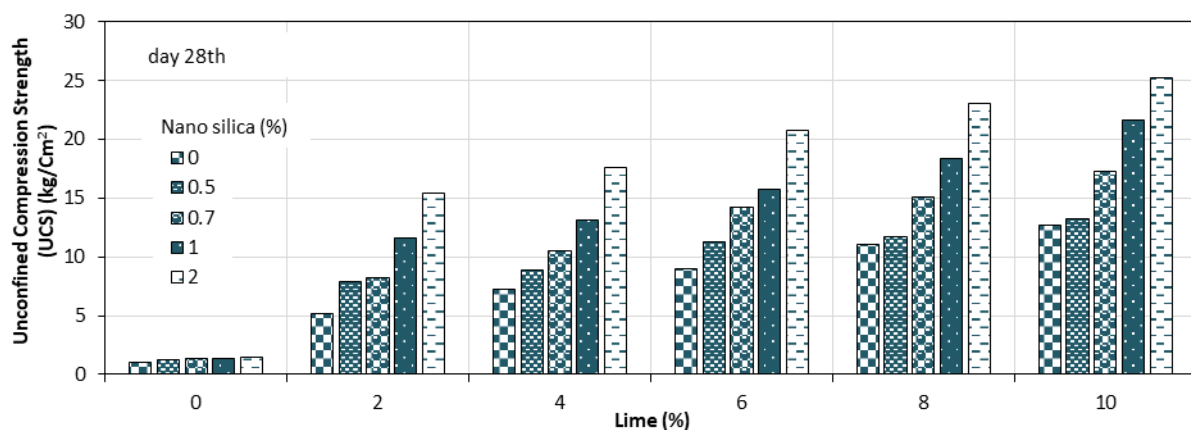


Fig. 2. Trend of changes of the unconfined compressive strength (UCS) for samples stabilized with lime and nano-SiO₂ (28-days treatment)

4. Conclusions

The results show that the Sedimentation rate of Stabilized marl with 6% lime and 0.7% nanosilica is about 60% compared to non-additive soil. The results obtained from the Atterberg Limit test showed a decrease in

the plastic index of the marl with an increase in lime and nanosilica values; also, the results of unconfined compressive strength tests showed that 6% lime with 0.7% nanosilica in the 28-day curing increased the compressive strength of soil by 92.67%. 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.

5. References

- Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover J, "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C", *Applied Clay Science*, 2010, 50 (2), 191-198.
- Hosseini M, Ali Panahi B, Senmari S, "Estimation of marl stone engineering properties using punch test", *Quarterly Journal of Applied Geology*, 2012, 8 (4) 309-322 (In Persian).
- Ouhadi VR, Yong RN, "The Role of Clay Fractions of Marly Soils on their Post Stabilization Failure", *Engineering Geology*, 2003, 70 (3), 365-375.
- Ouhadi VR, Yong RN, Amiri M and Ouhadi MH, "Pozzolanic Consolidation of Stabilized Soft Clays", *Applied Clay Science*, 2014, 95, 111-118.