



بررسی بزرگ‌ساختاری و ریزساختاری تاثیر آب دریا بر فرآیند تثبیت خاک‌های رُسی با آهک و نانوسیلیس

عادل عساکره^{۱*}، محمد امیری^۲، ریحانه السادات بحرینی^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۲ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه هرمزگان

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۷

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

کلمات کلیدی:

تثبیت

آب حفره‌ای

کائولینیت

آهک

نانوسیلیس

خلاصه: در بسیاری از مناطق ساحلی به علت کمبود آب شیرین محدودیت‌های فراوانی برای استفاده در فرآیند تثبیت خاک وجود دارد. از سوی دیگر به علت گستردگی آب‌های شور در سطح زمین نیاز به مطالعات بیشتری در مورد اثرات استفاده از آب شور در بهسازی خاک است. از این رو در این مقاله با انجام آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری و ریزساختاری به مطالعه اثر یون‌های موجود در آب دریا، بر فرآیند تثبیت شیمیایی خاک‌های رُسی با آهک و نانوسیلیس پرداخته شده است. برای تثبیت خاک رُس کائولینیت از مقادیر مختلف آهک، نانوسیلیس، آب مقطر و آب دریای خلیج فارس استفاده شده است. نمونه رُسی کائولینیت با مقادیر مختلف آهک و نانوسیلیس اصلاح و عمل آوری شده است. در این راستا آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تغییرات pH نمونه‌ها، تغییرات مقاومت فشاری در طی زمان مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین برای ارزیابی ریزساختاری از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شده است. براساس نتایج حاصل شده مقاومت تک‌محوری نمونه‌های فاقد مواد افزودنی که با آب دریا ساخته شده‌اند نسبت به نمونه‌های حاوی آب مقطر بهبود یافته است. همچنین در حالتی که نمونه‌ها توسط ۶٪ آهک اصلاح شده‌اند، مقاومت نمونه‌های حاوی آب دریا نسبت به نمونه‌های آب مقطر در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه ۴ درصد افزایش یافته است.

۱- مقدمه

خاک‌های رُسی رفتارهای متفاوتی با توجه به کانی‌ها و ترکیبات شیمیایی خود نشان می‌دهد و از سوی دیگر مایع منفذی شیمیایی با ایجاد تبادل کاتیونی، باعث تغییر قابل توجه خواص مهندسی خاک رُس می‌شود [۱]. همچنین تغییر در کیفیت شیمیایی آب منفذی، یا به عبارت دیگر، تغییر در میزان و نوع نمک‌های موجود در خاک (کاهش یا افزایش)، پدیده‌ای است که وقوع آن، در اثر فعالیت‌های مختلف انسان یا به‌طور طبیعی، اجتناب‌ناپذیر است [۲]. در مناطق ساحلی به علت کمبود آب شیرین محدودیت‌های فراوانی برای استفاده در فرآیند تثبیت خاک وجود دارد. از سوی دیگر لازم است به دلیل گستردگی و دست‌رسی آسان به آب شور در آن مناطق، مطالعات

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: asakereh@hormozgan.ac.ir

بیشتری بر روی تاثیر آب دریا بر فرآیند تثبیت خاک انجام شود.

کاتیون‌ها و آنیون‌های عمده موجود در آب دریا شامل یون‌های سدیم، کلسیم و سولفات است. که نمک‌های سدیم کلرید و کلسیم کلرید در تثبیت خاک با آهک مانند کاتالیزور و شتاب دهنده عمل می‌کنند. این واکنش باعث تسریع در گیرش و سخت شدگی خاک می‌شوند. حضور یون‌های سدیم، رویه‌ی تجزیه و انحلال سیلیکا را در برهم کنش خاک-آهک تسریع می‌کند. تاثیر کلرید کلسیم مشابه کلرید سدیم است. اما برخی آثار متفاوت مانند افزایش نفوذپذیری در تثبیت خاک دیده می‌شود [۳]. نمک کلرید سدیم بسیار انحلال‌پذیر است و در خاک به سرعت هیدرولیز (آبکافت) می‌شود و یون‌های Na^+ و Cl^- را ایجاد می‌کند. یون کلر پس از ترکیب شدن با کلسیم موجود در محلول خاک، نمک بسیار انحلال‌پذیر کلرید کلسیم

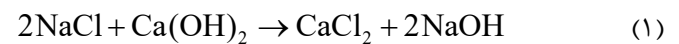
همچنین ترکیب سیلیکات و آلومینات با آهک باعث خرد شدن لیه ذرات کائولینیت شده و تشکیل کلسیم سیلیکات هیدراته و کلسیم آلومینات هیدراته را می‌دهد [۱۰]، با افزودن نانوسیلیس به ترکیب خاک-آهک، واکنش‌های ایجاد شده میان ذرات خاک و آهک تسریع یافته و در واقع با افزایش نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی، مقاومت خاک افزایش می‌یابد [۱۱]، پیوندهای ایجاد شده بین ذرات، نحوه توزیع و اندازه ذرات نانو مواد از عوامل تاثیر گذار بر خصوصیات خاک است [۱۲].

بهادری و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تثبیت خاک مارن با سه نوع پوزولان طبیعی پرداختند و در ادامه با انجام آزمایش‌های XRF، XRD و اندازه‌گیری بیشترین وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت بهینه، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری و مدول الاستیک بیان داشتند که خاکستر آتش‌فشان به عنوان یک نوع پوزولان طبیعی، ماده‌ای مناسب برای تثبیت خاک مارن است [۱۳]. چوبستی و همکاران در سال ۲۰۱۹ با آزمایش بر روی تاثیر افزودن نانو کلسیم کربنات و الیاف فرش به خاک رُس بیان داشتند که بیشینه مقاومت فشاری محدود نشده مربوط به نمونه با افزودن ۱/۲٪ نانو کلسیم کربنات پس از ۴۲ روز دوره‌ی عمل‌آوری می‌باشد و همچنین افزودن ترکیبی از نانو کلسیم کربنات و الیاف فرش باعث افزایش مقاومت نمونه می‌شود [۱۴]. شهیدی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ به بررسی تغییرات فیزیکی و مکانیکی ماسه رُسی آلوده به نفت گاز با افزودن نانو ذرات رُسی پرداختند و در ادامه با توجه به مقاومت اولیه کم نمونه‌های آلوده به نفت گاز بیان داشتند که افزودن دو نوع نانو ذرات رُس باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود [۱۵].

در مناطق ساحلی به علت کمبود آب شیرین محدودیت‌های فراوانی برای استفاده در فرآیند تثبیت خاک وجود دارد. از سوی دیگر لازم است به دلیل گستردگی و دسترسی آسان به آب شور در آن مناطق، مطالعات بیشتری بر روی تاثیر آب دریا بر فرآیند تثبیت خاک انجام شود. شایان ذکر است با وجود مطالعاتی که در خصوص تاثیر املاح آب منفذی بر مشخصه‌های خاک‌های ریزدانه صورت گرفته لکن در مورد خاک‌هایی که با آب‌های محلی حاوی املاح مانند آب دریا و افزودن آهک توام با نانوسیلیس تثبیت می‌شوند مطالعات چندانی صورت نگرفته است. در این راستا در این مطالعه آزمایشگاهی برای تثبیت خاک رُس کائولینیت از مقادیر مختلف آهک، نانو سیلیس، آب

($CaCl_2$) را به وجود می‌آورد. بدین ترتیب در اثر افزایش کلرید سدیم به خاک، نمک حاصل از واکنش، کلرید کلسیم خواهد بود که انحلال‌پذیری بالایی دارد و سریعاً هیدرولیز می‌شود و به فاز محلول باز می‌گردد. به علت باقی‌ماندن محصولات واکنش در فاز محلول، غلظت محلول خاک افزایش و در نهایت باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و ایجاد ساختمان فولوکوله در خاک می‌شود [۴].

افزایش مقاومت مشاهده شده در خاک تثبیت شده با آهک در حضور کلرید سدیم، ناشی از افزایش pH و حضور نمک سدیمی NaCl است و می‌توان آن واکنش را به کمک رابطه‌ی ۱ توصیف کرد [۵].



محصول به دست آمده از واکنش رابطه ۱، با ترکیب سیلیکات موجود در خاک، موجب ایجاد واکنش پوزولانی و تولید اجزای سیمانی می‌شود. با افزایش مقاومت خاک بهسازی شده در حضور کلرید سدیم، این دلیل توجیه می‌شود که مخلوط شدن ژل سیلیکات سدیم سریعتر از ژل سیلیکات کلسیم است و کیفیت اجزای سیمانی سریعتر بهبود می‌یابد [۶]. از طرف دیگر نمک‌ها باعث مجتمع شدن ساختار خاک می‌شوند. به دنبال این رفتار، مخلوط آهک-نمک مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که نمک در کاهش فضای حفره ای بین ذرات رُسی تنش موثری دارد [۲، ۷].

در صورتی که خاک دارای سولفات باشد و یا در معرض آب سولفات قرار بگیرد، واکنش‌های آهک و خاک رُس را تحت تاثیر قرار می‌دهد. طبیعت این واکنش‌ها به تمرکز یون‌های فلزی موجود در سولفات‌ها و همچنین میزان آلومینا و سیلیکای موجود در خاک بستگی دارد و می‌تواند بر رفتار مهندسی خاک‌های رُسی تثبیت شده با آهک تاثیر بگذارد [۶]. به همین دلیل تاثیر املاح آب بر مشخصه‌های مهندسی خاک‌های ریز دانه نیز از مواردی است که مطالعه شده است. از جمله عوامل بررسی شده می‌توان به مقاومت برشی، حدود اتربرگ و آثار تحکیم اسمزی بر میزان تغییر حجم و پتانسیل تورم و همچنین تغییرات نفوذپذیری خاک اشاره کرد. نتایج حاصل از این مطالعات نشانگر آن است که خواص مهندسی رُس‌ها به ویژه مقاومت و تراکم پذیری آنها تحت تاثیر ترکیبات سیال حفره ای است [۶، ۸، ۹].

جدول ۱. برخی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه رُسی کائولینیت

Table 1. Geotechnical and Geo-Environmental Characteristics of Kaolinite Sample

Physical properties Soil	Quantity measured	References for method of measurement
Liquid Limit (%)	40	ASTM, D4318
Plastic Limit (%)	28	ASTM, D4318
Plasticity Index (%)	12	ASTM, D4318
Specific Gravity (G_s)	2.66	ASTM, D854, Method A
Maximum dry density (kN/m^3)	15.5	ASTM D698
Soil Classification	CL	ASTM, D3282
pH (Soil:water,1:10)	7.76	ASTM D4972
E_c (mS/cm)	0.0367	ASTM D1125-95

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های مشخصات املاح آب

Table 2. The test results of salts properties of water

Water Properties	Distilled	Persian Golf
pH	7.16	7.9
SO_4^{-2} (mg/L)	14	2541
Cl(mg/L)	-	23491.77
NaCl	-	40.7%
TDS(g/L)	91.3	39
E_c (ms/cm)	152.7×10^{-3}	59

این پژوهش ارائه شده است.

آهک مصرفی در این پروژه، آهک صنعتی است که از نوع شکفته که از شرکت پودرآفرین تهیه شده و قبل از استفاده از الک شماره ۱۰۰ عبور داده شده است. نانو سیلیس استفاده شده در این تحقیق به صورت پودری با خلوص ۹۸٪ از شرک فدک اصفهان تهیه شده است. آب مورد استفاده در این پروژه آب مقطر و آب حاوی املاح است که از دریای خلیج فارس (بندرعباس) تهیه شده‌اند. برخی مشخصات آب مقطر و آب دریا در جدول ۲ نشان داده شده است.

آزمایش pH با استفاده از دستگاه pHسنج مدل Lovibond PH110 بر روی نمونه‌ها با نسبت خاک به آب ۱ به ۱۰ اندازه گیری شده است. برای انجام آزمایش هیدرومتری پس اختلاط خاک با مواد تثبیت کننده و افزودن آب به مدت ۷ روز زمان عمل آوری در شرایط

مقطر و همچنین آب دارای املاح آب خلیج فارس استفاده شده و در دوره‌های عمل آوری ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پروژه برای انجام آزمایش‌ها از خاک رُسی کائولینیت استفاده شده است. این خاک از کارخانه کائولین خراسان تهیه شده است. از آنجا که ۱۰۰ درصد خاک تهیه شده از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند، برای تعیین دانه بندی آن از آزمایش هیدرومتری (02-ASTM-D422) استفاده شده است.

بخش بزرگ آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است. در جدول ۱ برخی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه خاک مطالعه شده در



(ج)



(ب)

(الف)

شکل ۱. الف و ب) نمونه‌های تثبیت شده با آهک و نانوسیلیس ج) خاک کائولینیت به همراه آهک و نانوسیلیس

Fig. 1. a and b) samples stabilized with lime and nanosilica c) kaolinite soil with lime and nanosilica

لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شده و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شده 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 کردن، با دستگاه پراش پرتو ایکس مورد آزمایش قرار گرفتند. طیف XRD از اسکن در محدوده 2θ و زوایای ۲ تا ۶۰ درجه به دست آمده است که در شکل ۲ منحنی پراش پرتو ایکس خاک مورد مطالعه ارائه شده است. نتایج آنالیز XRD انجام گرفته بر روی خاک طبیعی نشان می‌دهد که کائولینیت، مونت موریلونیت کانی‌های اصلی رُسی و کوآرتز و کلسیت کانی‌های غیر رُسی موجود در خاک کائولینیت می‌باشد. قله‌های اصلی کانی‌های رُسی در مقادیر حدود ($d_{001}=7.1 \text{ \AA}$, $d_{001}=3.5 \text{ \AA}$, $d_{001}=1.8 \text{ \AA}$) مربوط به کانی کائولینیت و قله‌های ($d_{001}=9.2 \text{ \AA}$, $d_{001}=9.9 \text{ \AA}$) مربوط به کانی مونت‌موریلونیت قابل مشاهده است.

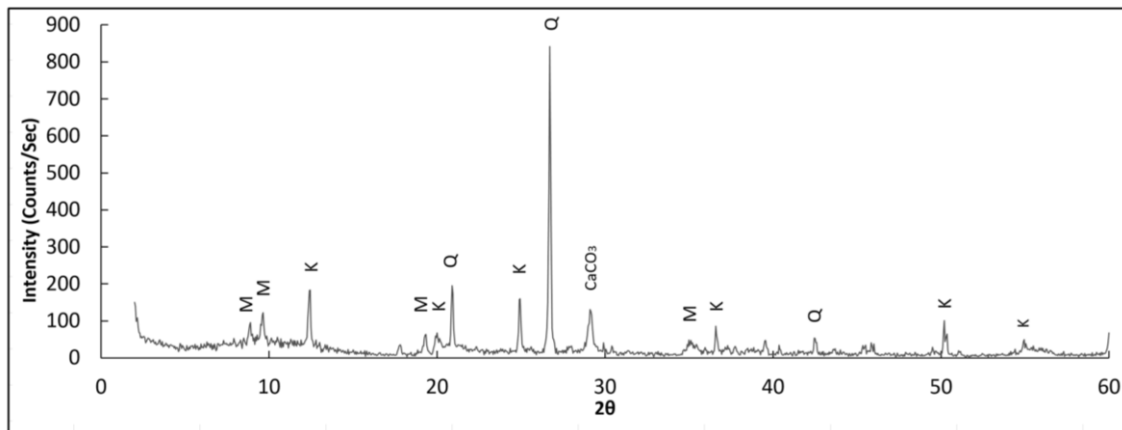
۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بررسی دانه بندی

در شکل ۳ نتایج آزمایش هیدرومتری برای نمونه رُسی کائولینیت و نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک پس از دوره عمل آوری ۷ روزه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آهک به دلیل وقوع واکنش‌های تبادل کاتیونی و شروع واکنش‌های پوزولانی، فرآیند کلوخه شدن صورت می‌گیرد. همانگونه

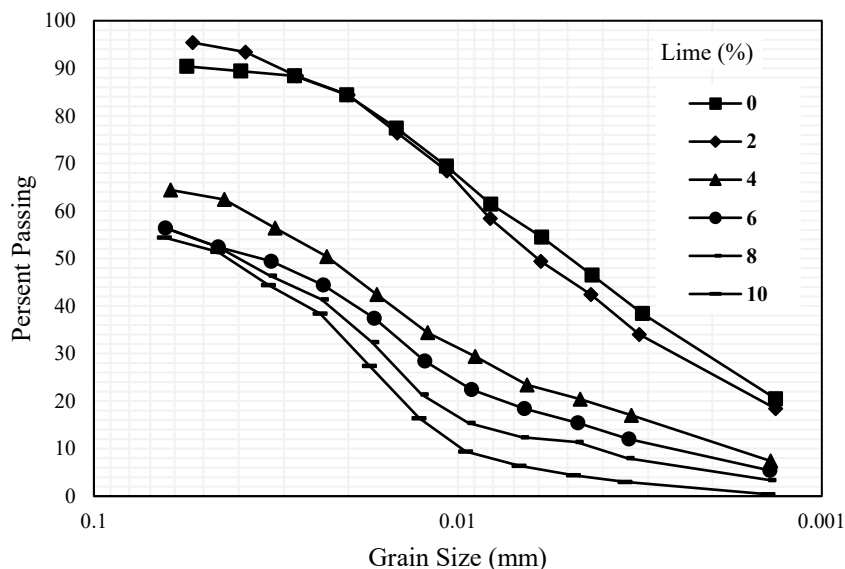
مرطوب نگهداری شده و پس از طی دوره‌ی عمل‌آوری از الک عبور داده شده و سپس آزمایش هیدرومتری بر روی آن انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به صورت کرنش-کنترل است، که روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر (ASTM D2166-87) انجام شده است. به منظور آماده کردن نمونه‌ها برای هر ترکیب ابتدا وزن خاک رُسی و ماده افزودنی با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک و ۰، ۵، ۱، ۷ و ۱ درصد نانوسیلیس و با توجه به بیشینه وزن مخصوص خشک خاک (به دست آمده از آزمایش تراکم) تعیین شده پس از آن خاک و ماده افزودنی به خوبی با یکدیگر مخلوط شده است که در شکل ۱ قسمت الف و ب نمونه‌های تثبیت شده برای آزمایش مقاومت فشاری و در قسمت ج خاک رُسی کائولینیت به همراه آهک و نانوسیلیس را نشان داده شده است.

علاوه بر آزمایش‌های فیزیکی- مکانیکی با هدف بررسی تغییر آرایش سطوح رُسی و شرایط کانی‌های خاک در اثر اندرکنش با مواد افزودنی، آزمایش‌های ریزساختاری نیز انجام شدند. برای تهیه نمونه‌های اشعه ایکس از نمونه‌های مقاومت فشاری به مقدار یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر و آب دریا) به خاک، این سوسپانسیون به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با هدف اطمینان از حصول شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به مدت سه ساعت توسط



شکل ۲. منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی خاک کائولینیت (K: کائولینیت، M: مونت‌موریلونیت، Q: کوارتز، CaCO_3 : کلسیت).

Fig. 2. X-ray diffraction curve of kaolinite soil sample (K: kaolinite, M: montmorillonite, Q: quartz, CaCO_3 : calcite.)



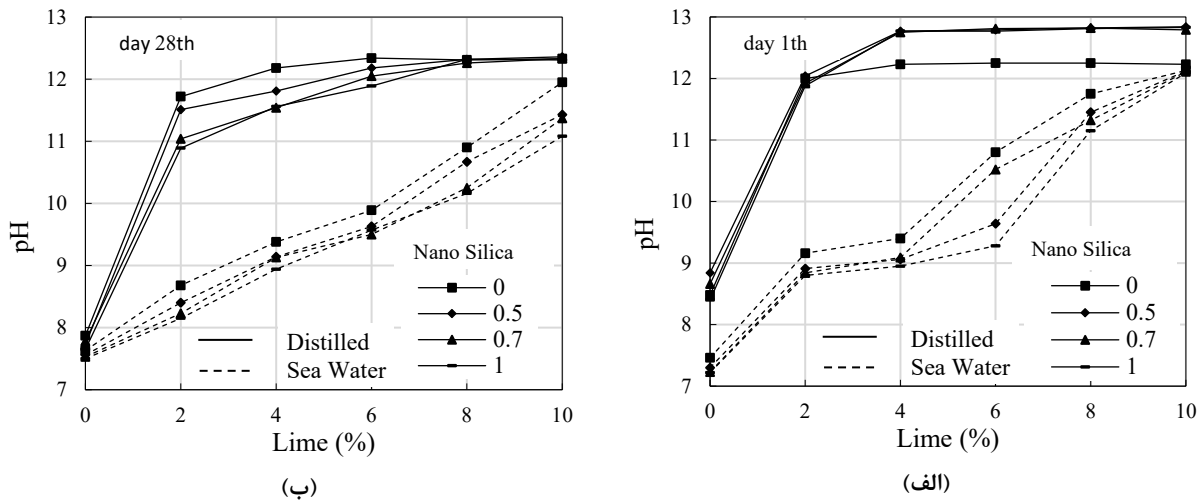
شکل ۳. آزمایش هیدرومتری برای درصد‌های متفاوت آهک با زمان عمل‌آوری ۷ روزه

Fig. 3. Hydrometric test for different percentages of lime for -7days curing time

۲۱٪ کاهش یافته است، در حالیکه با افزودن ۶، ۸ و ۱۰٪ به ترتیب به حدود ۱۶، ۱۲ و ۴ درصد کاهش یافته است.

اوحدی و همکاران نشان دادند در آزمایش هیدرومتری نمونه‌های تثبیت و عمل‌آوری شده با درصد‌های مختلف آهک در مقایسه با منحنی هیدرومتری نمونه غیرتثبیت شده به دلیل وقوع واکنش‌های تبادل کاتیونی و شروع واکنش‌های پوزولانی با افزایش درصد آهک، فرآیند کلوخه شدن صورت گرفته است. به عبارت دیگر به دلیل پیوستگی ذرات رُس به یکدیگر، در نتیجه‌ی ترکیبات سیمانی به وجود

که دیده می‌شود با افزودن ۲٪ آهک، درصد ذرات کوچکتر از 0.075 میلی‌متر از ۹۴٪ به حدود ۹۰٪ کاهش یافته است، در حقیقت با افزودن ۲٪ آهک تبادل کاتیونی و کلوخه شدن به میزان اندکی در ساختار خاک تاثیر گذاشته است. این در حالی است که این مقدار با افزایش ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک به حدود $62/5$ ، 53 ، 52 و 52 کاهش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش میزان آهک شرایط هیدراتاسیون فراهم شده و تغییرات بیشتری در ساختار خاک می‌گذارد. همچنین با افزودن ۴٪ آهک، درصد ذرات کوچکتر از 0.075 میلی‌متر از ۵۰٪ به



شکل ۴. نمودار pH برای نمونه‌های حاوی آب مقطر و آب دریا با درصد‌های متفاوت آهک در دوره‌های عمل آوری الف) ۱ روز ب) ۲۸ روزه
Fig. 4. PH diagram for samples containing distilled water and seawater with different percentages of lime for curing time (a) 1 day b) 28 days

درصد آهک طی زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه ۲/۴۵ واحد می‌باشد، در حقیقت حضور سولفات سدیم در خاک باعث کاهش pH در طی کاهش آهک موجود در سیستم خاک می‌شود [۲۰].

با مقایسه‌ی منحنی‌های pH با دوره عمل‌آوری ۱ و ۲۸ روزه مشاهده می‌شود با افزایش زمان عمل‌آوری مقادیر pH کاهش می‌یابد. به طور مثال مقدار pH برای نمونه‌ی حاوی ۲ درصد آهک حاوی آب مقطر بعد از ۱ روز عمل‌آوری ۱۲/۳ می‌باشد و مقدار pH همان نمونه بعد از گذشت ۲۸ روز عمل‌آوری به مقدار ۱۲/۰۲ می‌رسد که به مقدار ۰/۲۸ واحد کاهش یافته است. کاهش یون کلسیم و هیدروکسید در طی انجام واکنش پوزولانی بین اجزا نمونه باعث کاهش pH می‌شود [۲۱].

۳-۳- مقاومت فشاری محدود نشده

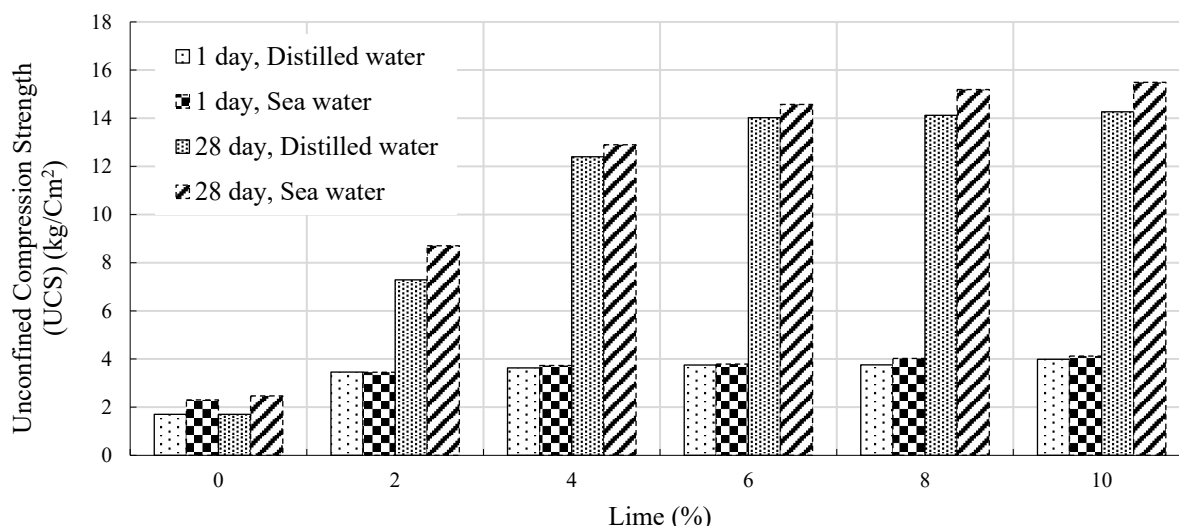
در شکل ۵ منحنی‌های مقاومت فشاری برای نمونه‌های تثبیت شده با آهک آورده شده است. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در حالتی که از تثبیت کننده استفاده نمی‌شود، مقاومت نمونه‌هایی که در آن‌ها از آب حاوی املاح استفاده می‌شود بیشتر از زمانی است که از آب مقطر استفاده شده است. در این حالت مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها به ترتیب برای نمونه حاوی آب دریا ۲/۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و برای آب مقطر ۱/۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. با توجه به این مقادیر نمونه حاوی آب دریا نسبت

آمده از واکنش‌های پوزولانی خاک و آهک، افزایش قطر ذرات مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از پژوهش اوحدی با نتایج هیدرومتری این پژوهش انطباق دارد [۱۶].

۳-۲- بررسی تغییرات pH

بررسی pH یکی از معیارهای رایج ارزیابی میزان آهک بعنوان ماده تثبیت کننده است. در واقع بر اساس تغییرات pH محیط واکنش، می‌توان کمترین میزان آهک که منجر به بروز تبادل کاتیونی در خاک می‌شود را تعیین کرد. نتایج آزمایش pH در شکل ۴ برای زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۲۸ روزه و مقادیر مختلف ۲ تا ۱۰ درصد آهک ارائه شده است. مقدار pH برای خاک بدون افزودنی و حاوی آب دریا با دوره‌ی عمل‌آوری ۱ روزه ۷/۷۶ بوده است که با افزایش مقدار آهک به ۱۰ درصد، pH نمونه با افزایش ۳/۷۵ واحدی به مقدار ۱۲/۲۳ رسیده است. افزایش در میزان آهک باعث افزایش در میزان pH خاک می‌شود. در واقع طی افزودن آهک آنیون OH^- و کاتیون Ca^+ وارد محیط شده و جذب بار الکتریکی منفی سطح ذرات رسی خاک می‌شوند. نیروی دافعه‌ی بین ذرات خاک کاهش یافته و سپس سطح pH مایع منفذی افزایش می‌یابد [۱۷-۱۹].

مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود که pH نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر به مراتب بیشتر از نمونه‌های حاوی آب دریا است. اختلاف مقدار pH نمونه‌های بهسازی شده حاوی آب مقطر و آب دریا با ۶



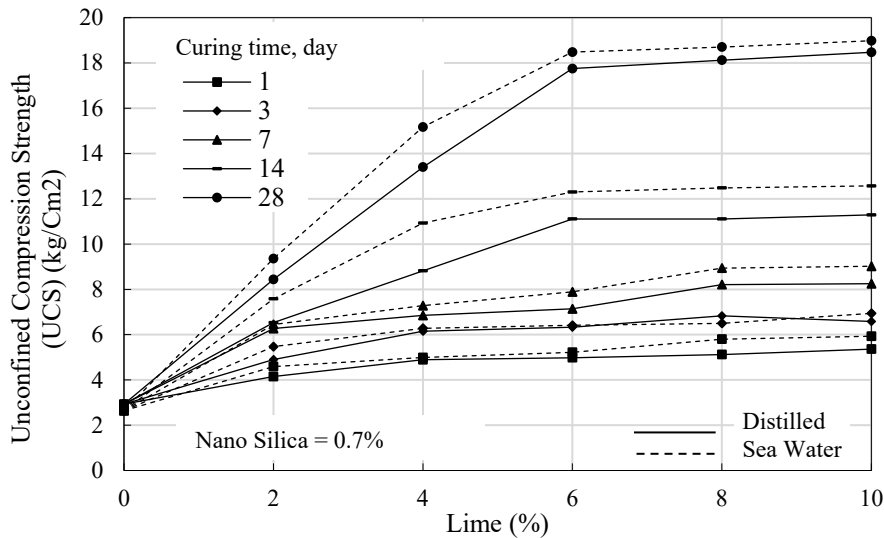
شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده برای نمونه‌های حاوی آب مقطر و آب دریا با درصد‌های متفاوت آهک طی دوره‌ی عمل آوری
Fig. 5. Unconfined compressive strength vs. for samples containing distilled water and seawater with different percentages of lime for curing time.

تبادل پذیرند و توسعه لایه دوگانه سبب تورم و واگرایی ذرات شده و در نتیجه سبب کاهش چسبندگی بین ذرات می‌شود نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش احمدی و همکاران ۲۰۱۷ همخوانی دارد [۲، ۲۲].

همان‌گونه که دیده می‌شود با افزودن ۲٪ آهک مقدار مقاومت فشاری طی دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه از ۱/۷ به ۷/۲۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است. این درحالی است که این مقدار با افزایش ۴٪، ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ آهک به ۱۲/۴، ۱۴/۰۲، ۱۴/۱۲ و ۱۴/۲۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است. که این مقادیر با افزودن ۲٪، ۴٪، ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ از مقدار ۲/۳ به ۸/۷، ۱۲/۹، ۱۴/۵۷، ۱۵/۱۹، ۱۵/۴۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش درصد آهک، pH محیط افزایش یافته، محیط قلیایی ایجاد شده توسط یون‌های کلسیم، باعث حل شدن سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها شده، این ترکیب‌ها با یون‌های OH⁻ ترکیب شده و $Al(OH)_3$ و $Si(OH)_3$ را تولید می‌کنند. سپس این هیدروکسیدها با یون‌های کلسیم ترکیب شده و سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته را تشکیل می‌دهند که باعث سخت‌شدن و افزایش مقاومت مخلوط می‌شود [۲، ۲۳]. همانطور که نتایج نشان می‌دهد در تمامی نمونه‌ها تا ۶ درصد آهک افزایش چشمگیری مشاهده شده‌است و با افزایش بیشتر درصد آهک، روند افزایشی مقاومت

به نمونه آب مقطر بدون افزودن آهک افزایش ۳۵ درصدی مقاومت داشته است.

نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با آب دریا در تمام مدت‌های عمل‌آوری تقریباً بیشتر از نمونه‌های تثبیت شده با آب مقطر است. براساس نتایج ارائه شده، مقاومت فشاری محدود نشده برای نمونه‌ی تثبیت شده با ۶ درصد آهک به ترتیب برای نمونه‌ی حاوی آب مقطر و آب دریا با دوره‌ی عمل‌آوری ۲۸ روزه ۱۴/۰۲ و ۱۴/۵۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است، که استفاده از آب دریا باعث افزایش ۰/۵۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربعی مقاومت فشاری تک محوری شده‌است. در حقیقت افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی آب دریا نسبت به نمونه ساخته شده با آب مقطر را می‌توان اینگونه بیان کرد که هنگام تماس خاک با آب‌های دارای غلظت زیاد نمک با کاتیون چند ظرفیتی، بسته به میزان تخلخل رُس و غلظت آب و نوع کاتیون‌های آن، رفتار رُس حالت غشای تراوا و نیمه تراوا داشته و دو پدیده می‌توانند همزمان اتفاق بیفتند. یکی انتشار یون‌ها به داخل رُس و دیگری خروج آب ذرات خاک به دلیل گرادیان اسمزی، که منجر به تحکیم اسمزی می‌شود. در نتیجه، کاهش ضخامت لایه دوگانه و میزان آب جذب شده به کانی‌ها سبب ایجاد پیوند یونی قوی بین ذرات رُسی شده و چسبندگی شدیدی به وجود می‌آید. هنگامی که آب منفذی رقیق باشد، پیوندهای شیمیایی ضعیف‌تر بوده و احتمالاً



شکل ۶. نمودار مقاومت فشاری محدود نشده برای نمونه‌های حاوی آب مقطر و آب دریا با درصد‌های متفاوت آهک و ۰/۷ درصد نانوسیلیس طی دوره عمل آوری ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه

Fig. 6. Unconfined compressive strength vs. for samples containing distilled water and seawater with different percentages of lime and %0.7 nanosilica for 1,3,7,14,28days curing time.

عمل آوری ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه‌های آب مقطر در مقایسه با آب دریا به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۷۵، ۱/۱۹ و ۰/۷۳ واحد افزایش یافته است. زیرا با وجود نمک‌ها، کاتیون‌های موجود در ساختار خاک لخته‌ای شده و به رُس اجازه انجام بهتر واکنش‌های پوزولانی با آهک را می‌دهند. از طرف دیگر نمک‌ها باعث مجتمع شدن ساختار خاک می‌شوند. به دنبال این دو رفتار، مخلوط آهک-نمک مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که نمک در کاهش فضای حفره‌ای بین ذرات رُسی تاثیر دارد [۲۴].

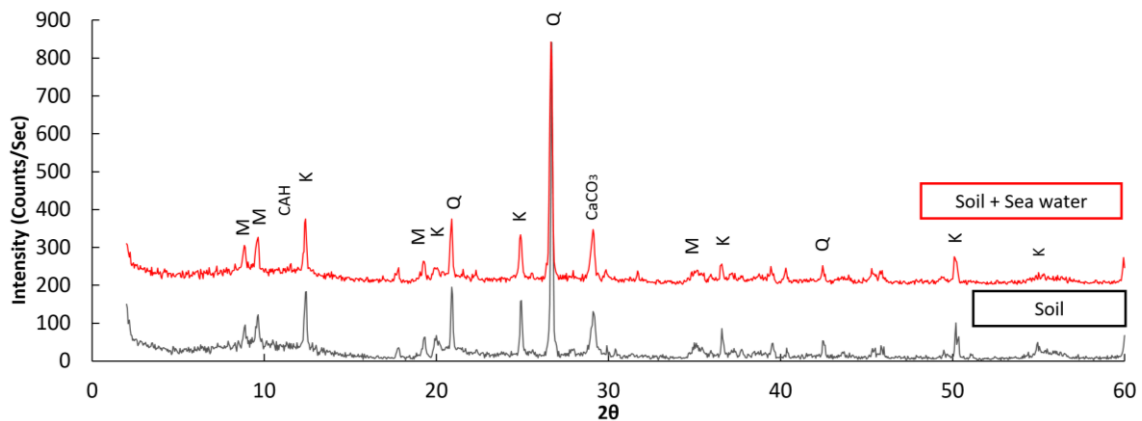
۳-۴- ارزیابی ریزساختاری

شکل ۷ پراش پرتو ایکس نمونه خاک کائولینیت و نمونه‌ی خاک کائولینیت حاوی آب دریا را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج آنالیز XRD انجام گرفته بر روی خاک طبیعی نشان می‌دهد که کائولینیت و مونت‌موریلونیت کانی‌های اصلی رُسی و کوارتز و کلسیت کانی‌های غیر رُسی موجود در خاک مطالعه شده‌است (شکل ۷). قله‌های نظیر کانی‌های ذکر شده به تفکیک قابل رویت است. نتایج آنالیز XRD انجام شده بر روی خاک ترکیب شده با آب دریا در شکل ۷ نشان می‌دهد، که شدت قله کائولینیت با افزودن آب دریا کاهش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، قله $d_{001}=7.1 \text{ \AA}$ مربوط به کانی کائولینیت از ۱۸۲ Cps با افزودن آب دریا به حدود ۱۷۵ Cps و در

به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. براساس این مقدار ۶ درصد که بیشترین افزایش در مقاومت فشاری را داشته به عنوان درصد بهینه انتخاب می‌شود.

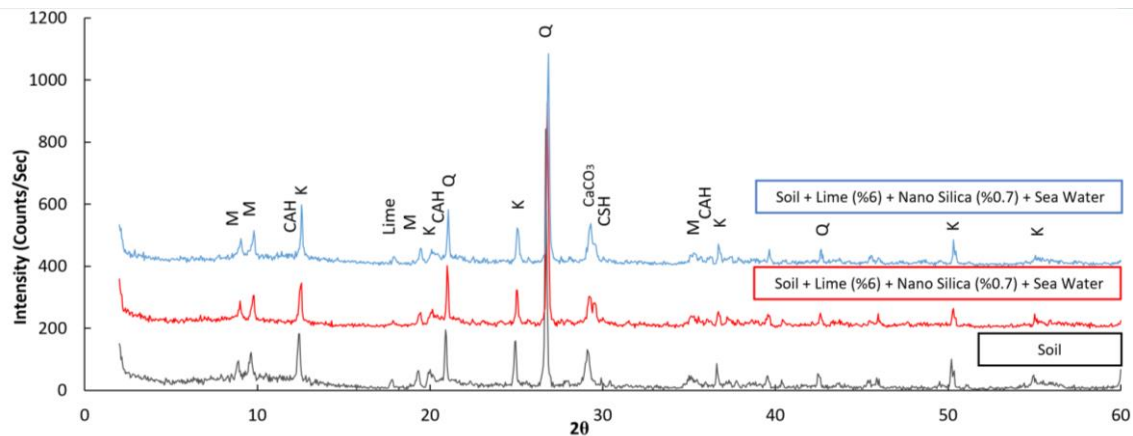
در شکل ۶ تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌های ساخته شده با ۰/۷ درصد نانوسیلیس آورده شده‌است. با افزودن ۰/۷٪ نانوسیلیس به خاک تثبیت شده با ۶٪ آهک مقاومت فشاری طی دوره‌ی عمل آوری ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز از ۱/۷ به ۴/۹۸، ۶/۳۳، ۷/۱۴، ۱۱/۱۱ و ۱۷/۷۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزایش نانوسیلیس در خاک تثبیت شده با آهک منجر به افزایش مقاومت فشاری محدود نشده می‌شود. در واقع با افزودن نانوسیلیس به ترکیب خاک-آهک، واکنش‌های ایجاد شده میان ذرات خاک و آهک تسریع می‌یابند و افزایش نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی، موجب افزایش مقاومت در خاک می‌شود [۱۱]. مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۷٪ نانوسیلیس و درصد‌های مختلف آهک ۲ تا ۱۰ درصد نسبت به مقاومت خاک اولیه که ۱/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر است به ترتیب ۴/۹۶، ۷/۸۸، ۱۰/۴۴، ۱۰/۶۵ و ۱۰/۸۶ برابر شده‌است.

با افزودن آب دریا به نمونه‌های تثبیت شده با ۶٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس مقاومت فشاری طی ۲۸ روز عمل آوری از مقدار ۱۷/۷۵ به ۱۸/۴۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است. طی دوره



شکل ۷. منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی خاک کائولینیت و خاک کائولینیت حاوی آب دریا (K: کائولینیت، M: مونت‌موریلونیت، Q: کوارتز، CAH: کلسیم آلومینات هیدراته، CaCO_3 : کلسیت).

Fig. 7. X-ray diffraction curve of kaolinite and kaolinite soil containing seawater (K: kaolinite, M: montmorillonite, Q: quartz, CAH: hydrated calcium aluminate, CaCO_3 : calcite.)



شکل ۸. منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی خاک کائولینیت و خاک بهسازی شده با ۶٪ آهک و درصد‌های مختلف نانوسیلیس حاوی آب مقطر و آب دریا (پس از ۲۸ روز عملآوری الف) ۵٪ نانوسیلیس ب) ۷٪ نانوسیلیس ج) ۱٪ نانوسیلیس. (K: کائولینیت، M: مونت‌موریلونیت، Q: کوارتز، CSH: کلسیم سیلیکات هیدراته، CAH: کلسیم آلومینات هیدراته، CaCO_3 : کلسیت).

Fig. 8. X-ray diffraction curve of kaolinite and soil stabilized samples with 6% lime and different percentages of nanosilica containing distilled water and seawater after 28 days curing time a) 0.5% nanosilica b) 0.7% nanosilica c) 1% Nanosilica. (K: kaolinite, M: montmorillonite, Q: quartz, CSH: hydrated calcium silicate, CAH: hydrated calcium aluminate, CaCO_3 : calcite.)

شده مربوط به نمونه‌ی تثبیت شده حاوی نانوسیلیس می‌باشد. با شروع واکنش‌های هیدراتاسیون، اکسید کلسیم آزاد شده در سیستم می‌تواند با ذرات SiO_2 به صورت مجزا ترکیب و موجب تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شود [۲۶]. با افزودن نانوسیلیس به خاک تثبیت شده با آهک شدت قله $d_{001}=3.05 \text{ \AA}$ که مربوط به کانی کلسیت از ۱۳۱ Cps با افزودن ۶٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس به حدود ۸۱ Cps کاهش یافته است، که بیانگر افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی و مصرف کربنات موجود در خاک می‌باشد.

قله $d_{001}=3.5 \text{ \AA}$ از ۱۵۷ Cps به حدود ۱۱۸ Cps رسیده است. در نمونه‌ی حاوی آب دریا ساختار بسیار کم سیمانی مشاهده می‌شود زیرا مقدار Ca^{2+} بسیار کم بوده و برای انجام واکنش پوزولانی کافی نمی‌باشد [۲۵].

شکل ۸ منحنی پراش پرتو ایکس نمونه خاک کائولینیت و کائولینیت تثبیت شده با ۶ درصد آهک و ۰/۷ درصد نانوسیلیس را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش شدت قله‌های کانی کائولینیت در نمونه‌های خاک تثبیت

نسبت به خاک طبیعی به ترتیب برای دوره‌ی عمل آوری ۱، ۲۸ روزه ۲/۲ و ۸/۲۵ کیلو گرم بر سانتی متر مربع افزایش یافته و همچنین این افزایش برای نمونه ۶ درصد آهک حاوی آب شور نسبت به خاک طبیعی به ترتیب ۲/۲ و ۸/۶۸ کیلو گرم بر سانتی متر مربع می باشد. ۶. در دوره‌ی عمل آوری ۱ روزه اختلاف ناچیزی در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی آب مقطر و آب دریا وجود دارد ولی با دوره‌ی عمل آوری ۲۸ روزه مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی آب دریا، به مقدار ۰/۵۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع افزایش یافته است.

۷. افزایش زمان عمل آوری، باعث افزایش قابل توجه مقاومت تک محوری نمونه‌ها به ویژه در نمونه‌های با مقادیر آهک بیشتر می‌شود، این موضوع به علت فعل و انفعالات انجام گرفته بین خاک، آهک و تشکیل ژل‌های سیمانی است که در زمان‌های عمل آوری مختلف به وجود می‌آید.

۸. مقدار ۶ درصد آهک و ۰/۷ درصد نانوسیلیس که بیشترین افزایش در مقاومت فشاری را داشته به عنوان درصد بهینه انتخاب می‌شود.

۹. افزایش زمان عمل آوری و افزودن آب دریا، باعث افزایش قابل توجه مقاومت تک محوری نمونه‌ها به ویژه در نمونه‌های تثبیت شده با آهک و نانوسیلیس می‌شود.

۱۰. نتایج آزمایش‌های بزرگ ساختاری و ریز ساختاری این مطالعه بیانگر آنست که استفاده از ترکیب خاک کائولینیت، آهک و نانوسیلیس (به ویژه در حضور آب دریا) ضمن شدت بخشی به فرآیند تثبیت خاک با آهک، می‌تواند مصرف افزودنی را بسیار کاهش دهد.

مراجع

- [1] Y. Yukselen-Aksoy, A. Kaya, A.H. Ören, Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays, *Engineering Geology*, 102(1-2) (2008) 54-61.
- [2] Esnaashari, E. Ahmadi, Effect of sea water on unconfined compressive strength of clayey soil stabilized with lime and pozzolan, *Modares Civil Engineering journal*, 17(5) (2017) 1-13, In Persian.
- [3] O.G. Ingles, J.B. Metcalf, *Soil stabilization principles and practice*, 1972.
- [4] H. Mojallali, Salt mineralogy in a selected salorthid of texas high plains as a function of seasonal temperature

همچنین شدت قله $d_{001}=7.1 \text{ \AA}$ کانی کائولینیت نیز از ۱۸۲ با افزودن ۶٪ آهک و ۰/۷٪ نانوسیلیس به حدود ۱۴۶ Cps کاهش یافته همچنین افزایش شدت قله را در فاصله $d_{001}=3.02 \text{ \AA}$ در نمونه‌های اصلاح شده نشان می‌دهد. این بازتاب مربوط به ترکیب کلسیم سیلیکات هیدراته می‌باشد. می‌توان بیان کرد، با افزودن نانوسیلیس به خاک تثبیت شده با آهک نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته ناشی از این واکنش، افزایش یافته که باعث افزایش مقاومت می‌شود و می‌توان بیان کرد که حضور یون‌های سدیم، رویه‌ی تجزیه و انحلال سیلیکا را در برهم کنش خاک-آهک تسریع می‌کند [۲].

۴- نتیجه‌گیری

در مناطق ساحلی به علت کمبود آب شیرین محدودیت‌های فراوانی برای استفاده در فرآیند تثبیت خاک وجود دارد. از سوی دیگر لازم است به دلیل گستردگی و دسترسی آسان به آب شور در آن مناطق، مطالعات بر روی تاثیر آب دریا بر فرآیند تثبیت خاک انجام شده است که نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های ساخته شده با مقادیر مختلف آهک و استفاده از آب مقطر، آب دریای خلیج فارس را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱. در حالتی که نمونه‌ها با ۶ درصد آهک طی ۲۸ روز عمل آوری شده‌اند، اختلاف بین نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر و آب دریا ۲/۴۵ واحد می‌باشد، که کاهش محسوسی در pH نمونه‌های حاوی آب دریا مشاهده می‌شود.

۲. مقدار pH برای خاک بدون افزودنی و حاوی آب دریا با دوره‌ی عمل آوری ۱ روزه ۸/۴۸ بوده است که با افزایش مقدار آهک به ۱۰ درصد pH نمونه با افزایش ۳/۷۵ واحدی به مقدار ۱۲/۲۳ رسیده است.

۳. مقدار pH برای نمونه‌ی حاوی دو درصد آهک بعد از ۱ روز عمل آوری ۱۲ می‌باشد و مقدار pH همان نمونه بعد از گذشت ۲۸ روز عمل آوری به مقدار ۱۱/۷۲ می‌رسد که به مقدار ۰/۲۸ واحد کاهش یافته است.

۴. در نمونه‌هایی که از افزودنی آهک استفاده نشده، نمونه آب دریا نسبت به آب مقطر افزایش مقاومت فشاری ۳۵ درصدی داشته است.

۵. مقاومت تک محوری نمونه با ۶ درصد آهک حاوی آب مقطر

- of Environmental Engineering, 145(4) (2019) 04019004.
- [16] Ouhadi, M. Amiri, S. Hamidi, Dispersive soil improvement with lime, special attention to the reduction of peak intensity of clay minerals in XRD analysis, Modares Journal of Civil Engineering, 14(2) (2014), In Persian.
- [17] S. George, D. Ponniah, J. Little, Effect of temperature on lime-soil stabilization, Construction and Building Materials, 6(4) (1992) 247-252.
- [18] J. Kinuthia, S. Wild, G. Jones, Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite, Applied Clay Science, 14(1-3) (1999) 27-45.
- [19] J. Mallela, H.V. Quintus, K. Smith, Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design, The National Lime Association, 200 (2004).
- [20] J.K. Mitchell, K. Soga, Fundamentals of soil behavior, Number, 2 (1976) 111-130.
- [21] A. Aldaood, M. Bouasker, M. Al-Mukhtar, Impact of freeze-thaw cycles on mechanical behaviour of lime stabilized gypseous soils, Cold Regions Science and Technology, 99 (2014) 38-45.
- [22] S. Long term effect of salty water on clayey soil, M.S.C thesis, Tarbiat Modares Univ, (1398), In Persian.
- [23] Ouhadi, Microstructural assessment of lime consumption rate and pozzolanic reaction progress of a lime-stabilized dispersive soil, Modares Civil Engineering journal, 16(1) (2016) 11-22, In Persian.
- [24] S. Koslanant, Influence of storage conditions on geotechnical properties of Ariake clay and on its chemical stabilization, Dissertation, Saga University, Japan, 2006.
- [25] A.K.A. El-Aal, Effect of salinity of groundwater on the geotechnical properties of some Egyptian clay, Egyptian journal of petroleum, 26(3) (2017) 643-648.
- [26] A. Goodarzi, S. Goodarzi, H. Akbari, Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste, Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering, 39(C2) (2015) 333-350.
- [27] N. Khalid, M.F. Arshad, M. Mukri, K. Mohamad, F. Kamarudin, The Properties of Nano-Kaolin Mixed variations, Iran Agricultural Research, 13(2) (1994) 111-124.
- [5] D. Davidson, M. Mateos, H. Barnes, Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soils with chemical additives, Highway Research Board Bulletin, (262) (1960).
- [6] A, Effect of calcium chloride on unconfined compressive strength of fine grained soil with calcium choioride, M.S.c thesis, Islamic Azad Univ, (2008), In Persian.
- [7] S. Koslanant, K. Onitsuka, T. Negami, Influence of salt additive in lime stabilization on organic clay, Geotechnical Engineering, 37(2) (2006) 95.
- [8] V. Ouhadi, R. Yong, M. Amiri, M. Ouhadi, Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays, Applied Clay Science, 95 (2014) 111-118.
- [9] J.L. Eades, R.E. Grim, Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization, Highway Research Board Bulletin, (262) (1960).
- [10] G.A.a.M. A, Effect of Curing Temperature and SiO₂-Nanoparticles on Engineering Properties of Lime Treated Expansive Soil, Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J), 17 (2017) 131-143, In Persian.
- [11] J. Fu, H. Naguib, Nanocomposite Foams Effect of Nanoclay on the Mechanical Properties of PMMA/Clay, Journal of Cellular Plastics, 42 (2006) 325.
- [12] A. Mostafa, M. Ouf, M. Elgendy, Stabilization of subgrade pavement layer using silica fume and nano silica, International Journal of Scientific & Engineering Research, 7(3) (2016) 573-581.
- [13] H. Bahadori, A. Hasheminezhad, F. Taghizadeh, Experimental Study on Marl Soil Stabilization Using Natural Pozzolans, Journal of Materials in Civil Engineering, 31(2) (2018) 04018363.
- [14] A.J. Choobbasti, M.A. Samakoosh, S.S. Kutanaei, Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers, Construction and Building Materials, 211 (2019) 1094-1104.
- [15] M. Shahidi, F. Farrokhi, F. Asemi, Changes in Physical and Mechanical Properties of Gas Oil-Contaminated Clayey Sand after Addition of Clay Nanoparticles, Journal

- [30] N.Z. Mohd Yunus, D. Wanatowski, A. Marto, S.N. Jusoh, Strength improvement of lime-treated clay with sodium chloride, *Geotechnical Research*, 4(4) (2017) 192-202.
- [31] M. Al-Mukhtar, S. Khattab, J.-F. Alcover, Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil, *Engineering Geology*, 139 (2012) 17-27.
- [32] S.H. Bahmani, B.B. Huat, A. Asadi, N. Farzadnia, Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement, *Construction and Building Materials*, 64 (2014) 350-359.
- with Kaolin, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, (2005).
- [28] A. al-Swaidani, I. Hammoud, A. Meziab, Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5) (2016) 714-725.
- [29] S. Jahandari, J. Li, M. Saberian, M. Shahsavarigoughari, Experimental study of the effects of geogrids on elasticity modulus, brittleness, strength, and stress-strain behavior of lime stabilized kaolinitic clay, *GeoResJ*, 13 (2017) 49-58.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Asakreh, M. Amiri, R. A. Bahreni, *Macro/Micro Structural Study of the Seawater Effect on the Process of Stabilizing Clay Soils with Lime and Nano-SiO₂*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(2) (2021) 675-686.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16500.6256](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16500.6256)

