

مطالعه ریزساختاری تثبیت سطحی بستر با اختلاط نانو رس و آهک در خاک‌های ریزدانه

مقاله علمی - پژوهشی

امید توسلی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
عادل عساکره، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
ایمان صفرزاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: o.tavasoli@iauet.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۲۰۲-۱۸۷

چکیده

احداث راه‌های مختلف روی بسترهای خاکی متشکل از مصالح ریزدانه، غالباً امری اجتناب ناپذیر بوده و در این میان، انتخاب روش‌های مناسب جهت بهسازی آنها و بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک ضروری می‌باشد. یکی از این روش‌ها، تثبیت خاک با استفاده از انواع مواد افزودنی همچون اختلاط نانورس و آهک است. بطوریکه می‌توانند خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را تا حد امکان بهبود بخشیده و تغییرات در مقیاس میکروسکوپی را ایجاد نمایند. در این مقاله، به بررسی تثبیت سطحی بستر از خاک ریزدانه و تغییرات خصوصیات مقاومتی آن در اثر افزودن اختلاط نانو رس و آهک پرداخته شده است. بدین منظور، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده، حدود اتبربرگ، تراکم، PH و آزمایش‌های ریزساختاری شامل پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) بر روی خاک ریزدانه تثبیت شده با اختلاط نانو رس و آهک به ازای درصدهای مختلف آنها در زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که بیشترین افزایش مقاومت در خاک ریزدانه تثبیت شده با افزودن ۳ درصد آهک و ۳ درصد نانو رس در زمان عمل آوری ۲۸ روزه به دست آمده و با توجه به نتایج آنالیز ریزساختاری نمونه‌های حاوی آهک و نانورس، مشخص گردید که به دلیل تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدرات، از فضای حفرات کاسته شده و با بیشتر شدن اتصال بین ذرات خاک، مقاومت آن افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: تثبیت سطحی خاک، خاک ریزدانه بستر، نانو رس، آهک، آزمایش‌های ریزساختاری

۱- مقدمه

مصالح برای ایجاد خاکریز، لایه‌های اساس، زیراساس، خاک بستر و روسازی استفاده می‌گردد. همچنین برای جلوگیری از فرسایش خاک و مهار ماسه‌های روان و پایداری شیب‌های خاکی از تثبیت خاک استفاده می‌شود (ابطحی و همکاران، ۲۰۰۸). تثبیت شیمیایی خاک‌های تورم‌پذیر، یکی از روش‌های بسیار موثر و قابل قبول از نظر فنی و اقتصادی تلقی شده، که از مواد شیمیایی مختلف برای خنثی کردن بار الکتریکی منفی سطح

تثبیت خاک به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و مهندسی خاک بویژه در ساختگاه سازه‌های مختلف گفته شده، که به روش‌های گوناگون مکانیکی، بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی انجام می‌گردد و یکی از راهکارهای مناسب برای بهره‌برداری و اجرای سریع‌تر پروژه‌های مختلف می‌باشد. در راه‌سازی تثبیت خاک به منظور تحکیم و تقویت بستر و افزایش خصوصیات مقاومتی مصالح انجام شده و از این

نشده بر روی دو نوع خاک چسبنده (رس کائولینیت تجاری و رس لای دار شهر رشت) با درصدهای مختلف نانو رس، گزارش نمودند که با افزایش مقدار نانو رس، حد خمیری افزایش کمی در دو نوع خاک رس آزمایش شده داشته و همچنین با افزایش مقدار نانو رس در خاک‌های چسبنده مورد آزمایش، حد روانی، دامنه خمیری و مقاومت تک محوری افزایش چشمگیری یافته است. گنجی و همکاران (۱۳۹۱) نیز به بررسی اثر نانو رس‌ها بر روی تغییرات تنش برشی پرداخته و با مقایسه نتایج آزمایش فشار تک محوری در دو حالت افزودن و عدم افزودن نانو رس نشان دادند که تنش برشی خاک با استفاده از نانو رس‌ها افزایش خواهد یافت. فخری و همکاران (۱۳۹۱) نیز با بررسی اثر نانو رس بر خصوصیات ژئوتکنیکی پایه‌ای خاک رس کائولینیت، بیان کردند که دامنه خمیری با اضافه کردن مقدار کمی از نانو رس مونت موریلونیت اصلاح شده به طور قابل توجهی افزایش و خواص خاک رس کائولینیت بهبود یافته است. ماجد و طاه‌ها (۲۰۱۲) با بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک نرم را با افزودن ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد نانو رس، نشان دادند که حدود اتربرگ و شاخص خمیری کاهش یافته و وزن مخصوص خشک خاک در تراکم بیشتر شده است. همچنین طاه‌ها و طاه‌ها (۲۰۱۲) نیز اثر درصدهای مختلف ترکیب نانوذرات مختلف شامل نانورس، نانوالومینا و نانومس را بر رفتارهای انبساط و انقباض خاک بررسی کرده و نتیجه گرفتند که افزودن درصد مطلوب نانومواد، رفتار انقباضی و انبساطی خاک ریزدانه را کاهش داده و ضریب شاخص ترک را بدون هیچ گونه کاهش در ضریب هدایت هیدرولیکی کاهش می‌دهد، ولی ذرات نانورس تاثیر بسیار کمی بر خواص خاک داشته و گاهی اثر آنها بر روی برخی خصوصیات به صورت منفی بوده است. در سال‌های اخیر استفاده از نانوذرات در مسائل ژئوتکنیکی بویژه تثبیت سطحی خاک افزایش چشمگیری داشته و این مساله نیازمند بررسی دقیق و ریزساختاری با توجه به نوع و ساختار خاک و کانی‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد. همانطور که اشاره شد، پژوهش‌های وسیعی به صورت مطالعه موردی بر روی ترکیب نانورس و خاکهای ریزدانه انجام گردیده و زمینه تحقیقاتی گسترده‌ای نیز در این خصوص وجود دارد. هدف از انجام پژوهش حاضر و جنبه نوآوری آن، بررسی اثر افزودن ترکیب نانورس و آهک بر خصوصیات مقاومتی خاک‌های ریزدانه

ذرات رس (عامل اصلی جذب رطوبت و افزایش حجم) و یا افزایش نیروی چسبندگی ذرات به یکدیگر (برای مقابله با نیروی دافعه ذرات) استفاده می‌گردد. تثبیت خاک با آهک اساساً دارای ماهیت شیمیایی است، بطوریکه طی این فرآیند در اثر تبادل کاتیونی، خواص خاک تغییر می‌کند. از میان کاتیون‌های مختلف، کلسیم دارای پتانسیل بسیار خوبی برای جایگزینی کاتیون‌های تک ظرفیتی جذب شده مانند سدیم در اطراف خاک رس و خنثی نمودن بارهای الکتریکی منفی روی سطح ذرات رس می‌باشد (سیدی گلسفیدی و همکاران، ۱۳۹۰). طبق تحقیقات صورت گرفته، به طور کلی عوامل موثر بر شدت واکنش آهک با خاک شامل PH، درصد کربن آلی خاک، میزان ضریب نفوذپذیری خاک، درصد آهک خود خاک، ترکیبات سولفات و آهن خاک، و وجود گچ و سولفات در خاک می‌باشند (لیتل، ۱۹۹۵). نانو رس یا نانوکامپوزیت خاک رس از جمله افزودنی‌هایی بوده که خواص فیزیکی و هندسی پلیمرهایی که بعنوان ماده اصلی استفاده شده‌اند، را بهبود می‌بخشد. از جمله کاربردهای نانو رس‌ها در عمران، افزودن درصد کمی از آن در بهبود عملکرد دراز مدت روسازی‌های آسفالتی در اثر خستگی و افزایش طول عمر رویه‌ی آن می‌باشد. با توجه به جدید بودن علم نانو و کاربری آن، می‌توان انتظار داشت که در آینده‌ای نزدیک، پیشرفتهای قابل قبولی در زمینه کاربرد وسیع‌تر نانو رس‌ها در علوم مهندسی از جمله عمران محقق گردد (نشریه شماره ۲۶۸، ۱۳۸۲). تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی تاثیر افزودنی نانو رس بر روی پارامترهای رفتاری خاک انجام گردیده است. ژانگ (۲۰۰۷) نشان داد که وجود نانو ساختار در خاک باعث افزایش حدود اتربرگ می‌شود. قاضی (۱۳۸۹) گزارش نمود که نانو رس مونت موریلونیت اصلاح شده (MMN)، حد روانی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده و موجب افزایش دامنه خمیری خاک تا ۶۸ درصد شده است، که می‌تواند در سدهای خاکی با هسته رسی بسیار مفید باشد. ایشان همچنین تاثیر مقادیر مختلف MMN بر مقاومت فشاری تک محوره خاک رسی را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافته و در بیشترین مقدار خود، ۳۴/۲ درصد نسبت به حالت بدون افزودنی بهبود یافته است. خسروانی مقدم و قربانی (۱۳۹۰) نیز با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های حدود اتربرگ و آزمایش مقاومت فشاری محدود

رفتاری خاک ریزدانه با ترکیب آهک و نانورس جهت بهسازی سطحی آن بطور دقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است.

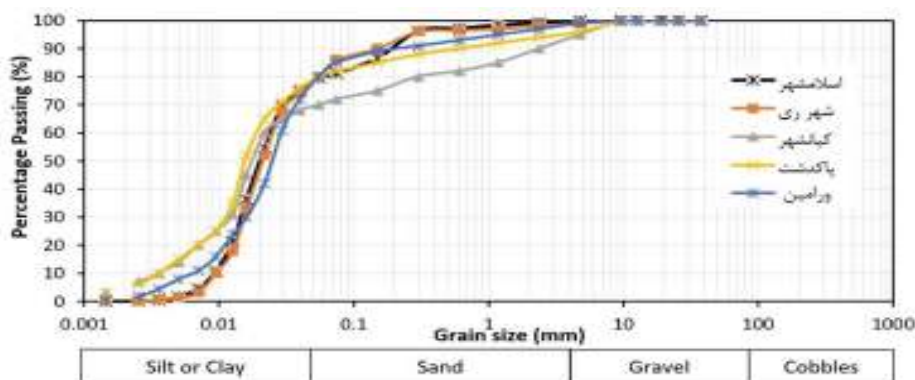
۲- معرفی مشخصات مصالح و آزمایش‌های انجام شده

به منظور انتخاب نمونه خاک ریزدانه مناسب برای این تحقیق، از خاک مناطق مختلف جنوب استان تهران (شکل ۱) نمونه‌گیری شده، که پس از آزمایش دانه‌بندی و بررسی‌های لازم بر روی نمونه‌های اولیه، مشخص گردید که تعداد ۵ نمونه از آنها مطابق منحنی دانه‌بندی شکل ۲، از نوع خاک ریزدانه رسی با خاصیت خمیری پایین (CL) بوده و با توجه به یکسان بودن مشخصات خاک این مناطق و همچنین وجود مشکلات عدیده در خاک رس محدوده اسلامشهر، نمونه‌هایی از این خاک جهت انجام آزمایش‌های لازم و بررسی تاثیر افزودن آهک و نانو رس انتخاب و برداشت گردیده است.

جهت تثبیت سطحی آنها برای ایجاد بستر مقاوم بوده، که بدین منظور مجموعه‌ای از آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محدود نشده، PH و آزمایش‌های ریزساختاری شامل پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) بر روی نمونه‌های خاک رس جنوب استان تهران به ازای ترکیب آن با درصد‌های مختلف نانورس مونت موریلونیت و آهک مشتمل بر ۲۴۵ آزمایش با در نظر گرفتن تکرارپذیری آنها انجام گردیده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. علت انتخاب نمونه خاک ریزدانه جنوب استان تهران برای انجام این تحقیق، خاصیت خمیری پایین آن بوده، که مشکلات عدیده را در حین اجرای پروژه‌ها ایجاد نموده و با انجام این پژوهش، خصوصیات



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه در جنوب استان تهران



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مناطق مختلف جنوب استان تهران

دست‌خورده تا عمق یک و نیم متری تهیه گردیده است. سپس آزمایش‌های لازم نظیر حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محدود نشده و برش مستقیم به منظور طبقه‌بندی و تعیین خصوصیات خاک مبنای انجام گردیده (ASTM, ۲۰۰۷) و

برای نمونه‌گیری خاک جهت شناسایی و تثبیت آن و انجام آزمایش‌های مکانیکی و ریزساختاری، حدود پنجاه سانتی‌متر از خاک سطحی به علت هوازدگی و رعایت عمق یخبندان کنار زده شده و نمونه‌های لازم از خاک مناطق به صورت

مصرفی در این تحقیق نیز به صورت پودری با خلوص بیش از ۹۸٪ از شرکت سیگما (SIGMA) تهیه شده، که برای مطالعه تاثیر نانو رس بر رفتار خاک، درصد‌های مختلفی از آن به خاک اضافه گردیده است. مشخصات فیزیکی و آنالیز شیمیایی نانو رس به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است.

(۱۹۹۵)، که مشخصات مقاومتی و مکانیکی خاک ریزدانه مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. آهک مورد استفاده در این پژوهش نیز از الک شماره ۱۰۰ گذرانده شده و آنالیز شیمیایی آن با استفاده از آزمایش XRF تعیین گردیده، که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. PH اندازه گیری شده برای آهک مورد استفاده معادل ۱۲/۸۱ می‌باشد. نانو رس

جدول ۱. مشخصات مقاومتی و مکانیکی خاک ریزدانه در این پژوهش

ویژگی	مقادیر و توصیفات	استاندارد آزمایش
طبقه بندی خاک	CL	ASTM D421
درصد ریزدانه (silt & clay)	۸۱/۳۳	ASTM D421
درصد درشت دانه (Gravel & sand)	۱۸/۶۷	ASTM D421
حد خمیری (Plastic Limit)	۱۵/۲۸	ASTM D4318
حد روانی (Liqued Limit)	۲۲/۸	ASTM D4318-93
شاخص خمیری (Plastic Index)	۷/۵۲	ASTM D4318
وزن واحد حجم بیشینه (gr/cm^3)	۱/۷۲	ASTM D698
درصد رطوبت بهینه (Optimum moisture)	۱۴/۲۰	ASTM D698
مقاومت فشاری تک محوری (kPa)	۲۱/۶	ASTM D2166
مدول الاستیسیته (MPa)	۱	ASTM D2166
ضریب فشردگی (C_c)	۰/۱۵	ASTM D2435
ضریب تورم (C_s)	۰/۰۱۴	ASTM D2435
چسبندگی (kg/cm^2)	۰/۲۴	ASTM D3080
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۸	ASTM D3080
PH	۸/۴	ASTM D4972

جدول ۲. آنالیز شیمیایی آهک (درصد وزنی موجود در آهک)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Alkali (K ₂ O ,Na ₂ O)
۰/۹۳	۸۹/۲۶	۰/۹۱	۰/۸۸	۲/۷۴	۴/۳۶

جدول ۳. مشخصه‌های فیزیکی نانو رس

چگالی (kg/m^3)	اندازه ذرات (nm)	مساحت سطح ویژه (m^2/g)	خلوص	رنگ
۱۷۰	۲۰-۳۰	۱۹۳	بیش از ۹۸٪	قهوه‌ای روشن

جدول ۴. آنالیز شیمیایی نانو رس (درصد وزنی موجود در نانو رس)

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	۰/۰۴۲	۰/۱۶	۰/۰۷۵	۰/۰۴۱	< ۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۴۲

روی خاک تثبیت شده با ترکیب آهک و نانو رس، درصد‌های مختلف آهک اضافه شده معادل ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد وزنی خشک خاک بوده و نانو رس نیز به نسبت ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی خشک خاک به خاک ریزدانه مینا افزوده شده است. میزان PH خاک منطقه در حالت طبیعی مطابق با استاندارد ASTM D4972 با استفاده از دستگاه PHسنج معادل ۸/۴ اندازه‌گیری شده و این شاخص پس از ترکیب خاک و آهک و همچنین مخلوط خاک و آهک و نانو رس در نسبت خاک به آب ۱ به ۱۰ (۴ گرم خاک و ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر) به طور جداگانه نیز اندازه‌گیری گردیده است. لازم به توضیح می‌باشد که به منظور بررسی و کنترل تکرارپذیری نتایج، برخی از آزمایش‌ها در درصد‌های مختلف ترکیب آهک و نانو رس تکرار شده، که پس از مقایسه نتایج بدست آمده مشخص گردید که اختلاف نتایج آنها در حد قابل قبولی قرار دارد.

با توجه به اینکه تثبیت سطحی خاک با استفاده از افزودن آهک کاربرد وسیعی در ایران دارد، لذا در این پژوهش تثبیت خاک ریزدانه به صورت افزودن فقط آهک و ترکیب آهک و نانو رس با درصد‌های وزنی مختلف در طی دوره‌های عمل‌آوری متفاوت صورت پذیرفته و جهت تعیین و بررسی خصوصیات خاک تثبیت شده با آهک و نانو رس، کلیه آزمایش‌ها و آنالیزهای ریزساختاری اشاره شده بر روی نمونه‌های مختلف خاک طبیعی و بهسازی شده، انجام و با یکدیگر مقایسه شده است. از آنجا که انتظار می‌رود زمان بر خواص خاک تثبیت شده تاثیرگذار باشد، لذا تاثیر دوره عمل‌آوری نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت بررسی تغییرات ایجاد شده ناشی از تغییرات کانی‌های موجود در خاک، عمل‌آوری در دوره‌های زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه لحاظ گردیده و نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها در شرایط خلاء و در دمای یکسان نگهداری شده است. همچنین برای انجام آزمایش‌های لازم

۳- بررسی آزمایشگاهی مشخصات خاک ریزدانه تثبیت شده با اختلاط آهک و نانو رس و تفسیر نتایج

۳-۱- آزمایش حدود اتربرگ

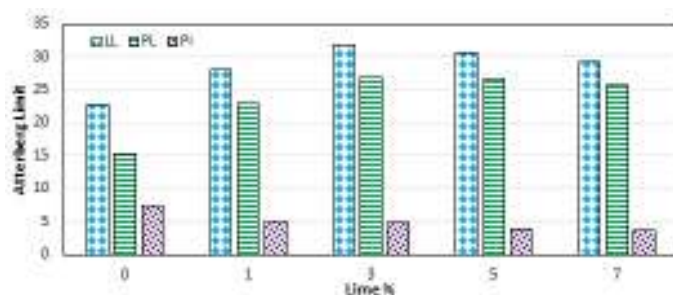
خمیری به صورت کاهشی بوده است. البته قابل ذکر است که با افزودن بیش از ۵ درصد آهک به نمونه‌ها، تغییرات حد روانی و حد خمیری نمونه‌های خاک به صورت ثابت یا کم بوده و بیش از این درصد، تاثیر چندان دیگری بر روی این پارامترها نداشته است. این مساله را بدین صورت می‌توان توجیه نمود که فرآیند لخته شدن خاک تثبیت شده با آهک، باعث بهم پیوستن ذرات خاک شده و سطح تماس خاک با آب را کاهش داده و در نتیجه حد روانی کاهش یافته است. 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 موجب کاهش حد روانی نشده، بلکه حد روانی را افزایش می‌دهد و میزان این افزایش، حتی بیشتر از مقدار اولیه می‌باشد.

شکل ۵، نتایج مربوط به تغییرات حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک

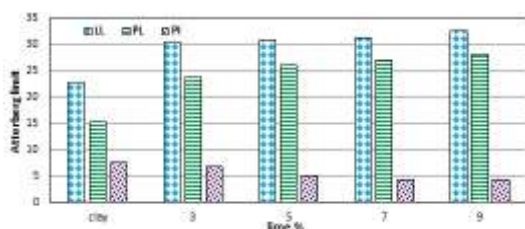
هنگامی که درصد‌های مختلفی از مواد جهت تثبیت خاک با آن ترکیب می‌شوند، یافتن حدود اتربرگ می‌تواند کمک قابل توجهی جهت مقایسه تاثیر عملکرد هر یک از مواد افزودنی و مقایسه درصد‌های مختلف افزودن آنها نماید. لذا در این تحقیق بعد از تعیین حدود اتربرگ خاک در حالت طبیعی، آهک و ترکیب آهک و نانو رس با درصد‌های مختلف به خاک اضافه شده و حدود اتربرگ نمونه‌ها تعیین گردیده است. بدین منظور، آهک به میزان ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی خاک به خاک طبیعی مورد مطالعه که از الک شماره ۴۰ رد شده، اضافه و ترکیب گردیده است. با توجه به نمودار شکل ۴، که نشان دهنده تغییرات حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های اصلاح شده با درصد‌های مختلف آهک می‌باشد، می‌توان بیان کرد که با افزودن آهک، حد روانی و حد خمیری خاک افزایش پیدا کرده است، ولی با توجه به اینکه نرخ تغییرات حد خمیری بیشتر از حد روانی بوده است، لذا روند تغییرات شاخص

همچنین حد روانی در بیشترین و کمترین مقدار برای ترکیب ۳ درصد نانو رس با ۹ درصد و ۳ درصد آهک بوجود آمده، که این مقادیر به ترتیب برابر ۲۷/۹ و ۲۷ است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که با افزایش میزان آهک، حد روانی افزایش یافته و همچنین افزایش آهک، منجر به کاهش شاخص خمیری خاک شده، که نشان‌دهنده بهبود خصوصیات خمیری خاک می‌باشد.

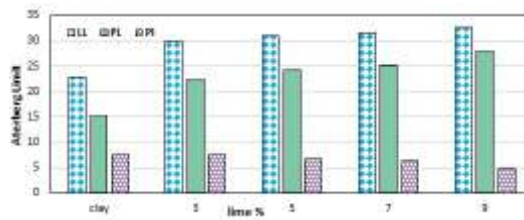
و نانو رس را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزودن ۰/۵ درصد نانو رس به ترکیب خاک، بیشترین و کمترین مقدار شاخص خمیری به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۳ و ۹ درصد آهک بوده و در هنگام اضافه شدن ۱ درصد نانو رس، حد روانی در بیشینه مقدار خود برای نمونه حاوی ۹ درصد آهک برابر با ۳۲/۵۸ و کمینه مقدار آن با ترکیب ۳ درصد آهک برابر ۳۰/۵۰ اندازه‌گیری شده است.



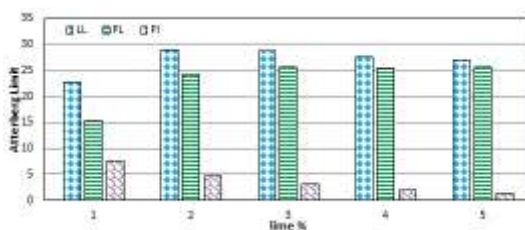
شکل ۴. تغییرات حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های خاک بهسازی شده با درصد‌های مختلف آهک



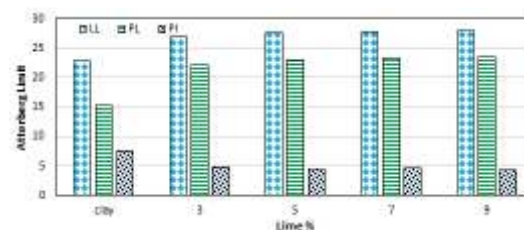
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

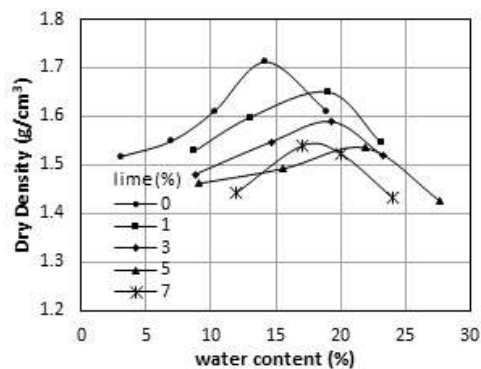
شکل ۵. نمودار تغییرات حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و نانو رس به

میزان (الف) ۰/۵ درصد، (ب) ۱ درصد، (ج) ۳ درصد و (د) ۵ درصد

۳-۲- آزمایش تراکم خاک

نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش درصد ترکیب آهک با خاک، وزن مخصوص خشک کاهش یافته و درصد رطوبت بهینه بیشتر شده است.

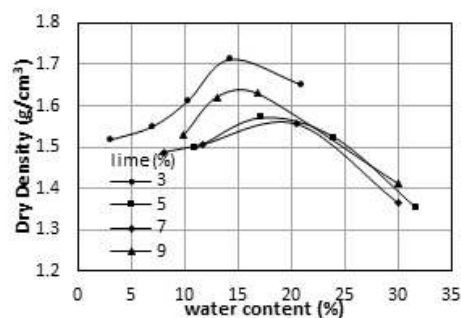
به منظور بررسی تاثیر افزودن آهک بر روی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه، آزمایش تراکم استاندارد طبق استاندارد ASTM D698 با افزودن آهک در درصد‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی خاک انجام گرفته، که نتایج آن در شکل ۶



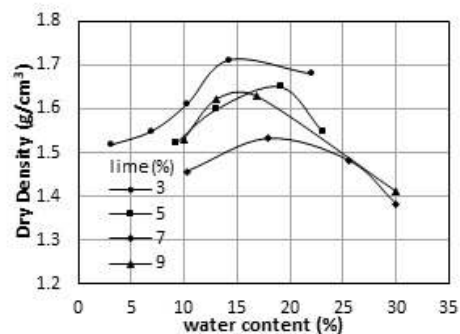
شکل ۶. منحنی تراکم استاندارد خاک رس ترکیب شده با درصد‌های مختلف آهک

آورده شده است. با بررسی این نمودارها می‌توان استنباط کرد که با افزودن درصد‌های مختلف وزنی نانو رس و آهک تا ۷ درصد، بیشینه وزن مخصوص خشک روندی کاهشی داشته و همچنین درصد رطوبت بهینه نیز با افزودن آهک، روندی افزایشی داشته است.

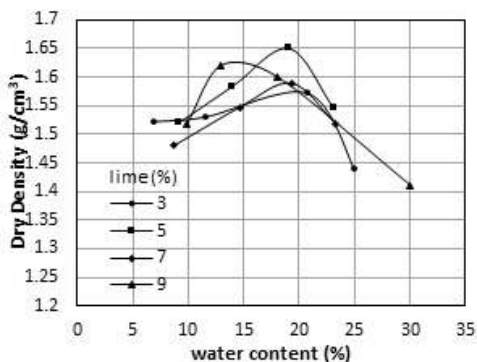
جهت بررسی تاثیر افزودن مخلوط نانو رس و آهک بر روی تراکم استاندارد خاک ریزدانه مورد مطالعه که با افزودن ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ درصد نانو رس و آهک با درصد‌های مختلف ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ درصد تثبیت شده است، آزمایش تراکم استاندارد بر روی این ترکیب‌های متفاوت نیز انجام گرفته و نتایج آن در شکل ۷



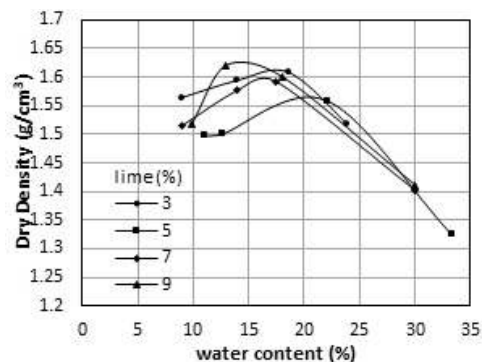
(ب)



(الف)



(د)

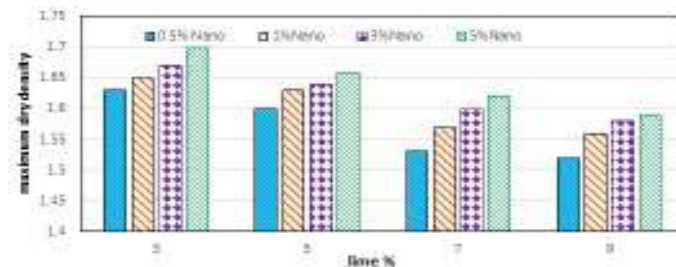


(ج)

شکل ۷. نمودار تغییرات منحنی تراکم نمونه‌های خاک بهسازی شده با درصد‌های مختلف آهک و نانو رس

به میزان (الف) ۰/۵ درصد، (ب) ۱ درصد، (ج) ۳ درصد و (د) ۵ درصد

خشک خاک به ازای ترکیب درصدی مشخصی از آهک با نانو رس ۵ درصد حاصل شده و بیشینه مقدار وزن مخصوص در اختلاط ۳ درصد آهک و ۵ درصد نانو رس با خاک منطقه مورد مطالعه بدست آمده و همچنین با افزایش درصد آهک، از بیشینه وزن مخصوص خشک آن کاسته شده است.

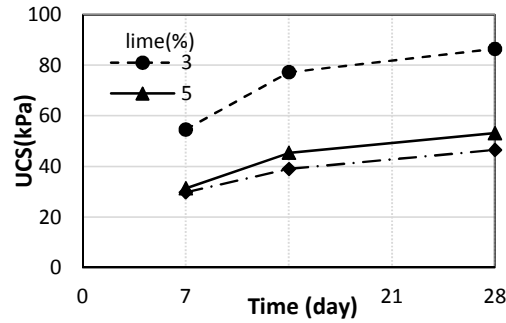


شکل ۸. تغییرات بیشینه وزن مخصوص خشک خاک ریزدانه تثبیت شده منطقه مورد مطالعه با درصدیهای مختلف آهک و نانو رس

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)

در این قسمت، جهت بررسی تاثیر آهک بر رفتار مقاومتی خاک ریزدانه، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) بر روی نمونه‌های خاک مورد مطالعه انجام شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. نکته حائز اهمیت در نظر گرفته شده، مقایسه بین مقاومت نمونه‌های خاک تثبیت شده با افزودنی‌های مختلف بوده و این مقایسه در صورتی امکان‌پذیر و قابل قبول است که علاوه بر تغییر در درصدیهای مواد افزودنی، شرایط نمونه‌ها از جمله دمای محل عمل‌آوری آنها نیز کاملاً یکسان باشد. رطوبت نمونه‌های خاک در همان رطوبت بهینه برای درصدیهای مختلف آهک در طی زمان عمل‌آوری آنها معادل ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و برای درصدیهای مختلف ترکیب آهک و نانو رس ۷ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح شده با آهک در طی زمان در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در نمونه حاوی ۳ درصد آهک مقاومت ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۵۴/۵۳، ۷۷/۲ و ۸۶/۴۱ کیلوپاسکال و در نمونه حاوی ۵ درصد آهک، میزان این مقاومت در دوره‌های زمانی مختلف به ترتیب برابر با ۳۱/۳، ۴۵/۳۲ و ۵۳/۱۲ کیلوپاسکال و در نمونه حاوی

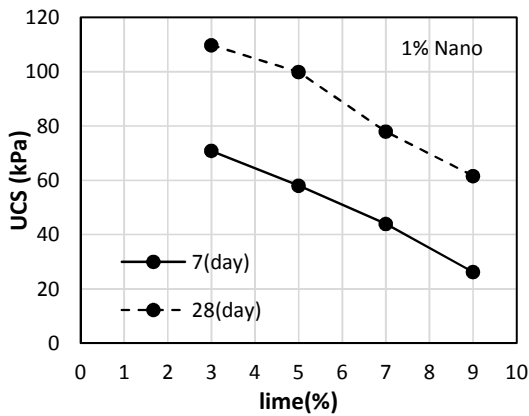
۷ درصد آهک مقاومت ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۲۹/۷۴، ۳۸/۹۵ و ۴۶/۵۳ کیلوپاسکال است. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه خاک تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک نسبت به مقاومت اولیه خاک طبیعی به ترتیب ۲/۵۲، ۳/۵۷ و ۴ برابر افزایش یافته و با افزودن ۵ و ۷ درصد آهک، میزان افزایش مقاومت فشاری نسبی خاک به ترتیب تا ۲۴۵ و ۲۱۵ درصد بیشتر شده است. علت این افزایش مقاومت را می‌توان به تبادل کاتیونی و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی نسبت داد. به بیان دیگر، واکنش میان آهک و کانی‌های رسی موجب حل شدگی کانی‌های رسی و تشکیل ترکیباتی همچون ژل آلومینات کلسیم هیدراته (CAH) و سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) شده، که منجر به متبلور و سخت شدن این ژل‌ها و افزایش مقاومت گردیده است. همچنین نتایج تعیین و مقایسه میزان تغییرشکل نمونه‌ها در لحظه گسیختگی نشان داد که با افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، کرنش مربوط به مقاومت بیشینه کاهش یافته و در واقع خاک اصلاح شده با آهک، رفتار شکننده از خود نشان داده است.



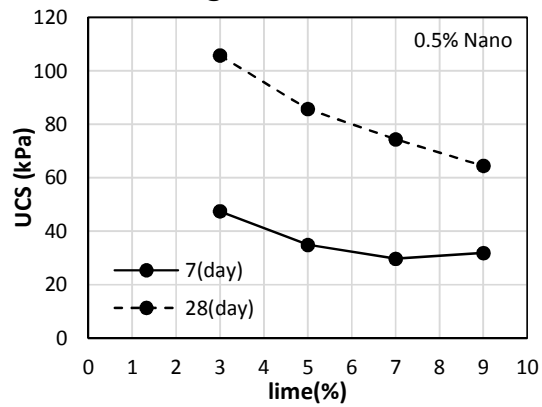
شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با آهک

مقاومت فشاری محصور نشده در خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و ۰/۵ درصد نانو رس، می‌توان استنباط کرد که مقاومت ۷ روزه نسبت به مقاومت اولیه خاک به ترتیب ۲/۱۹، ۱/۶۱، ۱/۳۷ و ۱/۴۷ برابر شده و با افزایش زمان عمل‌آوری نیز، مقاومت فشاری خاک افزایش یافته است، به طوری که مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف نانو رس تا حدود ۳۰۰ درصد بیشتر شده است.

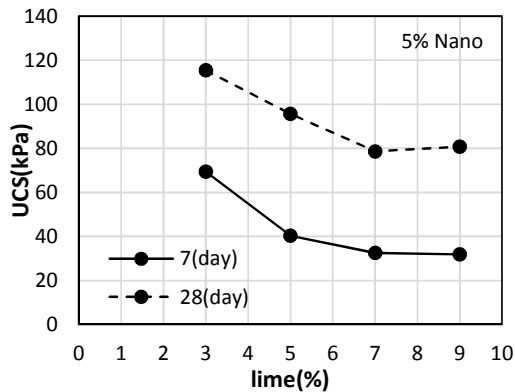
شکل ۱۰، مقاومت فشاری محدود نشده خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک شامل ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد و نانو رس با درصد‌های ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ در دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در هر نمودار، مقدار نانو رس افزوده شده به تمامی نمونه‌ها یکسان است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزایش نانو رس در خاک تثبیت شده با آهک، منجر به افزایش مقاومت فشاری محدود نشده شده است. همچنین از نتایج بدست آمده برای



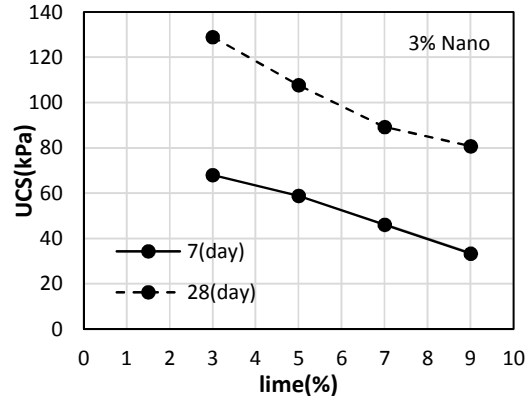
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۰. نمودار تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و نانو رس به میزان

(الف) ۰/۵ درصد، (ب) ۱ درصد، (ج) ۳ درصد و (د) ۵ درصد

۳-۴- آزمایش تعیین میزان PH

غلظت یون هیدروکسید (OH^-) در محلول آب مقطر و خاک اصلاح شده با آهک، افزایش پیدا کرده و با جایگزینی یون کلسیم آزاد شده ناشی از فرآیند یونیزاسیون آهک با کاتیون تک ظرفیتی سدیم در لایه دوگانه رسی، PH محیط خاک بیشتر شده است. شایان ذکر است که آزمایش PH بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف اختلاط آهک و نانو رس نیز انجام گردیده، که نتایج آنها در جدول ۴ آورده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که PH نمونه‌های خاک بهسازی شده، با افزودن آهک و نانو رس نسبت به حالتی که فقط آهک اضافه شده، تغییرات چندانی نداشته است. علت این مساله این است که در این حالت آهک به عنوان ماده فعال عمل کرده و نانو رس به تنهایی غیرفعال می‌باشد و تاثیر چندانی بر روی PH نمونه‌ها نداشته است.

یکی از معیارهای رایج جهت ارزیابی میزان آهک مورد نیاز در فرآیند تثبیت خاک، بررسی تغییرات PH محیط واکنش در حضور درصد‌های مختلفی از آهک است. مطابق نتایج آزمایش‌های انجام شده، با اضافه نمودن ۱ درصد آهک، PH محیط به حدود ۹ رسیده و در حالت استفاده از ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد آهک، مقادیر PH نمونه‌ها به ترتیب در حدود ۱۲/۵۰، ۱۲/۷۰، ۱۲/۷۵ و ۱۲/۹۰ اندازه‌گیری شده است. با توجه به اینکه بر اساس روش PH، حداقل درصد آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک، درصد آهکی است که PH محیط را به ۱۲/۴۰ برساند، بنابراین حداقل درصد آهک مورد استفاده بیش از ۳ درصد وزنی خاک است. بنابراین، با افزایش میزان آهک در خاک مورد مطالعه، میزان PH خاک بیشتر شده است. در واقع، با افزایش میزان آهک شکفته (Ca(OH)_2) و یونیزه شدن آن،

جدول ۴. مقادیر تغییرات PH نمونه‌های خاک اصلاح شده ریزدانه مورد مطالعه با آهک و نانو رس

درصد آهک	۳				۵				۷				۹			
درصد نانو رس	۰/۵	۱	۳	۵	۰/۵	۱	۳	۵	۰/۵	۱	۳	۵	۰/۵	۱	۳	۵
PH	۱۲/۴۵	۱۲/۴۱	۱۲/۴۰	۱۲/۳۷	۱۲/۳۷	۱۲/۳۴	۱۲/۳۱	۱۲/۲۸	۱۲/۲۷	۱۲/۲۴	۱۲/۲۱	۱۲/۱۸	۱۲/۱۶	۱۲/۱۳	۱۲/۱۰	۱۲/۷

الگوهای مبنای شناسایی شده مطابقت داده می‌شود. در این مطالعه، تابش $\text{Cu-K}\alpha$ برای بدست آوردن الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های خاکی مورد استفاده قرار گرفت. روش انجام کار برای تهیه نمونه‌های لازم جهت آزمایش پراش پرتو ایکس بدین صورت بوده، که از کلیه نمونه‌های آزمایش شده، یک گرم خاک خشک در مجاورت هوا با دقت یک هزارم توزین و در تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شده است. سپس محلول مورد نظر توسط لرزاننده الکتریکی هم زده شده و جهت اطمینان از بدست آمدن شرایط تعادل، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت نگهداری گردیده و مجدداً محلول خاک و آب مقطر قبل از انجام آزمایش همزده شده است. در نهایت با استفاده از یک میکروپیپت، ۵ تا ۷ قطره از محلول بر روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شده، که ضخامت پوشش روی اسلاید برای تمامی نمونه‌ها یکسان است (اوحدی (۲۰۰۲)، اوحدی و یانگ (۲۰۰۳)). در نهایت، طیف XRD با اسکن در 2θ و محدوده

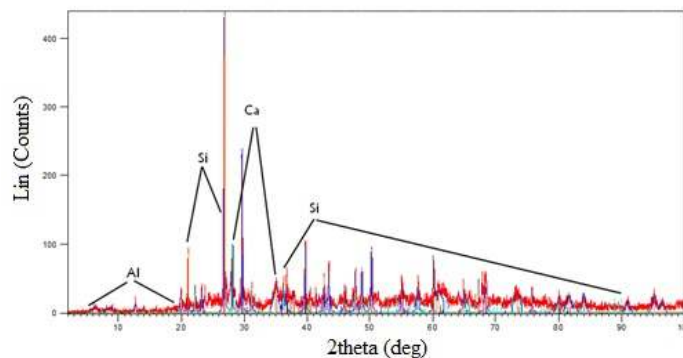
بنابراین، با وجود اینکه در بسیاری از تحقیقات انجام شده گذشته، اضافه کردن نانو رس به خاک با درصدی مقادیر بسیار کمی انجام شده و جنبه‌های اقتصادی، به عنوان عامل مهم در تعیین درصد بهینه مد نظر بوده است، ولی در این تحقیق، با توجه به آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و PH بر روی نمونه‌های خاک ریزدانه جنوب استان تهران، افزودن ۳ درصد آهک و ۳ درصد نانو رس به عنوان درصد بهینه اختلاط، بدست آمده است.

۳-۵- آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD)

آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) جهت طبقه‌بندی خاک و بررسی نقش کانی‌های خاک در رفتار آن دارای اهمیت فراوانی است. با توجه به ساختار بلوری کانی‌های تشکیل دهنده خاک، منحنی پراش پرتو ایکس برای هر نمونه ممکن است متفاوت باشد، زیرا هر کانی یک الگوی یکتا برجای می‌گذارد، که با

در عمل‌آوری ۲۸ روزه، با تمرکز بر طیف‌های پراش پرتو ایکس مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۱۱، نتیجه آزمایش XRD خاک پایه نشان داده شده، که بر اساس آنالیزهای صورت گرفته و نتایج به دست آمده، این نمونه دارای مقادیر فراوانی عناصر سیلیسیم (Si) در فازهای مختلف کریستالی (چه به صورت کوآرتز و چه به صورت کریستوبالیت) بوده است.

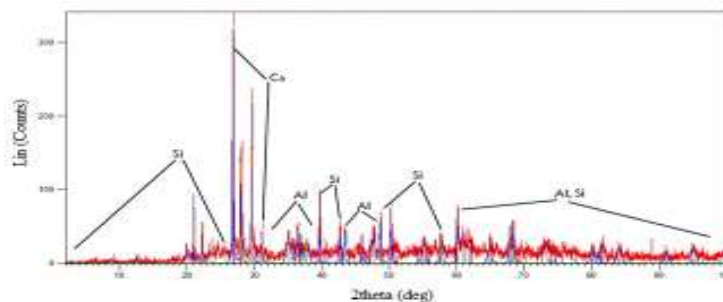
۲ تا ۶۰ درجه مورد ارزیابی قرار گرفته و جهت تحلیل منحنی‌های حاصل از پراش پرتو ایکس از نرم افزار Xpert استفاده گردیده است. به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج ارایه شده در بخش‌های قبل، تغییرات ریزساختاری نمونه‌های حاوی خاک ریزدانه طبیعی مورد مطالعه به همراه خاک تثبیت شده با آهک در درصد بهینه ۳ درصد و خاک بهسازی شده با آهک و نانو رس در درصد بهینه ۳ درصد آهک و ۳ درصد نانو رس



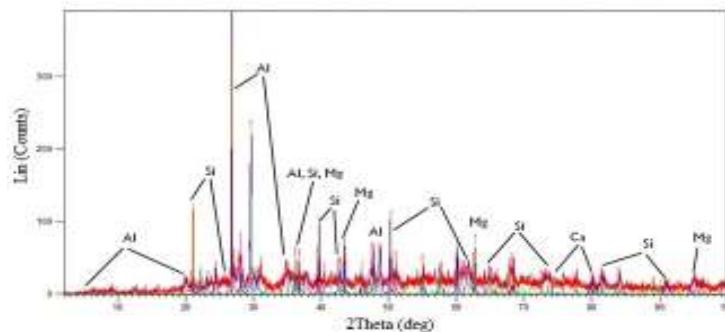
شکل ۱۱. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای خاک ریزدانه در این تحقیق

برای نمونه خاک تثبیت شده با آهک و نانو رس، می‌توان بیان نمود که اضافه کردن آهک به خاک، از یک سو منجر به افزایش PH خاک گردیده و با افزایش PH به مقدار بیش از ۱۲/۴، بخشی از کانی‌های رسی موجود در خاک حل شده و زمینه تشکیل واکنش‌های پوزولانی را ایجاد کرده است (ایدس و گریم، ۱۹۶۰). همچنین سرعت تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته ناشی واکنش‌های پوزولانی، در حضور نانو رس افزایش یافته است.

نتیجه آزمایش XRD خاک بهسازی شده با ۳ درصد آهک و اختلاط ۳ درصد نانو رس و آهک برای زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نمونه خاک تثبیت شده با ۳ درصد آهک دارای مقادیر فراوانی عنصر کلسیم (Ca) در فازهای مختلف کریستالی (چه به صورت کلسیتی و چه به صورت آهکی) می‌باشد. همچنین، نمونه خاک ترکیب شده با ۳ درصد آهک و نانو رس، دارای مقادیر فراوانی عنصر آلومینیوم (Al) و سیلیسیم (Si) بوده است. در تفسیر نتایج بدست آمده



شکل ۱۲. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای خاک ریزدانه تثبیت شده با ۳ درصد آهک در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه

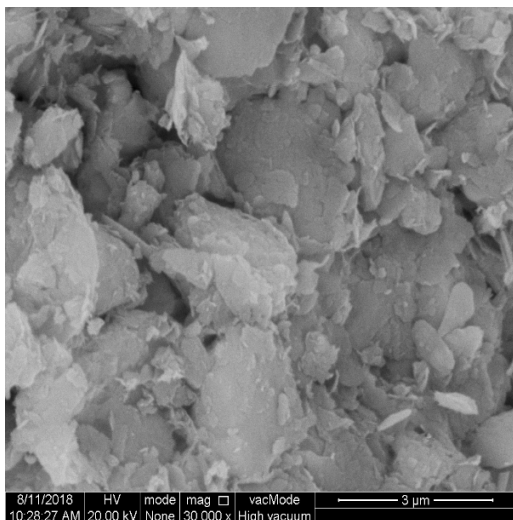


شکل ۱۳. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای خاک ریزدانه تثبیت شده با ۳ درصد آهک و نانو رس در زمان عمل آوری ۲۸ روزه

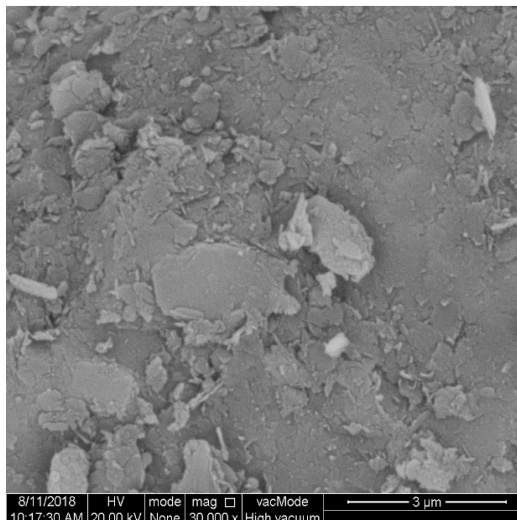
۳-۶- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

توضیح داده شد، بیانگر همین موضوع می باشند. تصویر نتیجه آزمایش SEM بر روی نمونه خاک ریزدانه مورد بررسی با ترکیب بهینه ۳ درصد آهک و ۳ درصد نانو رس در دوره عمل آوری ۲۸ روزه در شکل ۱۴-ج ارائه شده است. ذرات نانو رس در سطح وسیعی با ذرات رس وارد واکنش شده و در نتیجه، علاوه بر بهبود خصوصیات مهندسی خاک، سبب ایجاد سطح یکنواخت در خاک گردیده و همچنین ذرات خاک به علت واکنش با نانو رس منسجم تر شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده قبلی انتظار می‌رود، که حضور نانو رس در ترکیب خاک و آهک نیز، از طریق فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی از جمله رشد سریع تر مواد سیمانی (CSH)، کاهش اندازه حفرات درون توده خاک، کاهش نانو تخلخل‌های درون ذره‌ای خاک و توزیع یکنواخت تر ترکیبات سیمانی بین سطوح رسی، باعث افزایش تراکم ساختار و بیشتر شدن اثربخشی تاثیر آهک در تثبیت خاک شود (اوحدی ۲۰۰۲)، قصاب کلایی و همکاران (۲۰۱۶ و ۲۰۱۷)، گودرزی و مرادلو (۱۳۹۶)). در نتیجه، حضور نانو رس در ترکیب خاک و آهک، موجب تشکیل ساختاری بسیار متراکم شده و منافذ خاک به شدت پر شده است.

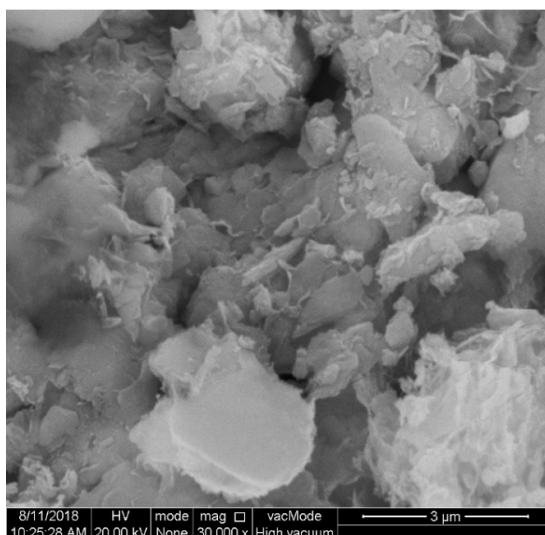
علاوه بر آنالیزهای پراش پرتو ایکس و با هدف بررسی بیشتر تغییرات ساختار خاک ریزدانه مورد مطالعه بعد از ترکیب با مواد افزودنی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها (SEM) نیز تهیه شده است. ریخت‌شناسی نمونه‌های خاک رس طبیعی منطقه و همچنین نمونه خاک بهسازی شده با درصد بهینه آهک (۳ درصد) در شکل ۱۴ نشان داده شده است. بر اساس تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده در شکل ۱۴-الف، می‌توان ساختار پراکنده را برای خاک ریزدانه مشاهده نمود، که از اتصال ذرات رس به یکدیگر توسط آب، ذرات کلوخه‌ای شکل درون ساختار خاک طبیعی نیز دیده شده است. از سوی دیگر، افزایش ۳ درصد آهک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه، منجر به کاهش منافذ ساختار خاک گردیده است (شکل ۱۴-ب). به عبارتی دیگر، ترکیبات تشکیل شده، حفرات خاک را پر کرده و یا اینکه ذرات آن را پوشانده است. در نتیجه می‌توان استنباط نمود که تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافته است (ایدس و گریم، ۱۹۶۰). همچنین به سبب ایجاد ساختار مجتمع و جامدشدگی ذرات ناشی از افزودن آهک به خاک، پیش‌بینی می‌شود که برخی از ویژگی‌های مکانیکی خاک از جمله مقاومت بهبود یابند، که نتایج حاصل از مقاومت فشاری محصور نشده و تراکم خاک نیز که در قبل



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه خاک ریزدانه (الف) خاک طبیعی،

(ب) خاک تثبیت شده با ۳ درصد آهک و (ج) خاک تثبیت شده با ۳ درصد آهک و نانو رس پس از عمل آوری ۲۸ روزه

۴- نتیجه گیری

خاک رس و ترکیب‌های متفاوت آن با درصدهای مختلف نانو رس مونت موریلونیت و آهک در زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام گردیده است، که نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشند.

با افزودن آهک در حالت کلی حد روانی و حد خمیری خاک مورد مطالعه افزایش پیدا کرده است، ولی با توجه به اینکه نرخ تغییرات حد خمیری بیشتر از حد روانی بوده و تغییرات

در این پژوهش به بررسی ریزساختاری تاثیر افزودن نانو رس و آهک بر خصوصیات مقاومتی خاک‌های ریزدانه پرداخته شده است. پس از تهیه نمونه‌های خاک از مناطق مختلف محدوده جنوب استان تهران، مجموعه‌ای از آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محدود نشده، PH و آزمایش‌های ریزساختاری شامل پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) بر روی نمونه‌های

سیلیکات هیدراته ناشی واکنش‌های پوزولانی، در حضور نانوکربنات کلسیم افزایش یافته است.

بررسی خصوصیات ریزساختاری خاک از طریق آزمایش SEM، نشان می‌دهد که افزودن آهک و نانو رس به خاک ریزدانه مورد مطالعه در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، منجر به کاهش منافذ ساختار خاک و در نتیجه، کاهش تخلخل و نفوذپذیری شده است. به عبارتی ترکیبات تشکیل شده شامل هیدروکسید کلسیم سیلیکات، حفره‌های خاک را پر کرده و یا اینکه ذرات آن را پوشانده است. بنابراین، به سبب ایجاد ساختار مجتمع و جامدشدگی ذرات ناشی از افزودن آهک و نانو رس به خاک، می‌توان استنباط کرد که برخی از ویژگی‌های مکانیکی خاک از جمله پارامترهای مقاومتی آن بهبود یافته است.

با توجه به آزمایش‌های ریزساختاری، مقاومت فشاری تک محوری و PH انجام شده بر روی خاک ریزدانه، اختلاط ۳ درصد نانو رس و ۳ درصد آهک در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه به عنوان درصد ترکیب بهینه جهت تثبیت آن بدست آمده است.

شاخص خمیری دارای روند کاهشی بوده است. البته قابل ذکر است که با افزودن ۵ درصد آهک بیشتر، حد روانی و حد خمیری نمونه‌های خاک کاهش پیدا کرده و یا تغییرات آن بسیار کم بوده است و بیش از این درصد، دیگر تاثیر چندانی بر روی حدود اتربرگ نداشته است.

با افزودن درصدهای مختلف آهک به خاک ریزدانه تثبیت شده با نانو رس، حد روانی کاهش یافته، به گونه‌ای که کم‌ترین مقدار حد روانی مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد نانو رس در حضور ۹ درصد آهک می‌باشد. همچنین با اضافه کردن ترکیب آهک و نانو رس به خاک ریزدانه، از مقادیر بیشینه وزن مخصوص خشک کاسته شده و درصد رطوبت بهینه نیز با افزودن آهک، روند افزایشی داشته است.

با توجه به منحنی‌های پراش پرتو ایکس (XRD) می‌توان بیان نمود که اضافه کردن آهک و نانو رس به خاک ریزدانه، علاوه بر افزایش PH، منجر به حل شدن بخشی از کانی‌های رسی موجود در خاک شده، که موجب تشکیل واکنش‌های پوزولانی گردیده است. همچنین سرعت تشکیل ژل کلسیم

۵-مراجع

کائولینیت"، نهمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، اردیبهشت.

-گنجی، ه.، فضل‌اولی، ر. و نورنژاد، ا.، (۱۳۹۱)، "بررسی تغییرات تنش برشی خاک قبل و بعد از بکارگیری نانو رس‌ها"، نهمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، اردیبهشت.

-گودرزی، الف.، و مرادلو، الف.، (۱۳۹۶)، "تاثیر دمای عمل-آوری و نانوذرات سیلیکا بر ویژگی‌های مهندسی خاک تورمی اصلاح‌شده با آهک"، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره هفدهم، شماره ۳.

-سیدی گلسفیدی، س.ع.، بازیار، م.ح.، میرکاظمی، س.م. و قاضی، ح.، (۱۳۹۰)، "کاربردهای فناوری نانو در مهندسی ژئوتکنیک"، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار.

-قاضی، ح.، (۱۳۸۹)، "بررسی تاثیر میزان مصالح در ابعاد نانو بر خواص مهندسی-ژئوتکنیکی خاک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت.

-"دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه‌ها"، (۱۳۸۲)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، نشریه شماره ۲۶۸.

-خسروانی مقدم، ع. و قربانی، ع.، (۱۳۹۰)، "بررسی اثر نانو رس بر خواص مهندسی خاکهای چسبنده"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، اردیبهشت.

-فخری، ز.، پورحسینی، ر. و فخری، م.ح.، (۱۳۹۱)، "بررسی تاثیر نانو رس بر خصوصیات ژئوتکنیکی پایه‌ای خاک رس

-Abtahi, M., Ebadi Ahsan, F., Hejazi, S.M. and Sheikhzadeh, M., (2008), "On the Use of Textile Fibers to Achieve Mechanical Soil Stabilization," 4th International Textile,

- Zhang, G., (2007), "Soil Nanoparticles and Their Influence on Engineering Properties of Soils", GSP 173 Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, New Peaks in Geotechnics, ASCE.
- ASTM, D. 421, (2007), "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-size Analysis and Determination of Soil Constant", Annual book of ASTM standards, ASTM.
- ASTM, D., (1995), "4546-90, One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, 4, pp.693-699.
- Eades, J.L., Grim, R.E., (1960), "Reaction of hydrate lime with pure clay minerals in soil stabilization", Highway Research Board Bulletin, No.262, pp. 51-63.
- 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 Behavior", Iran. J. Crystallogr, Mineral, Vol. 10, No. 1, pp. 87-97.
- Ouhadi. V.R., Yong. R.N., (2003), "Experimental and Theoretical Evaluation of Impact of Clay Microstructure on the Quantitative Mineral Evaluation by XRD Analysis", Elsevier Appl. Clay Sci. J., 23, pp. 141-148.
- Clothing & Design Conference – Magic World of Textiles, Dubrovnik, Croatia.
- Ghasabkolaei, N., Jahanshahi, M., Janalizade, A., Roshan, N., Ghasemi, S. E., (2016), "Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study", The European Physical Journal Plus, 131, pp.134.
- Ghasabkolaei, N., Janalizade, A., Roshan, N., Ghasemi, S. E., (2017), "Geotechnical Properties of the Soils Modified with Nanomaterials: A comprehensive review", No. 17, pp.639-650.
- Little, D.N., (1995), "Handbook of stabilization of pavement subgrades and base courses with lime" The lime Association of Texas, USA.
- Majeed, Z. H., & Taha, M. R., (2012), "Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil", Journal of Asian Scientific Research, 2(11), pp.587.
- 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 behavior", Iran, J. Crystallogr, Mineral, No.10, Vol. 1, pp. 87-97.
- Taha, M. R., & Taha, O. M. E., (2012), "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior", Journal of Nanoparticle Research, 14(10), 1190.

Microstructural Investigation of Fine-Grained Soil Improvement by Mixing of Nano-Clay and Lime

Adel Asakareh, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Omid Tavasoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Iman Safarzadeh, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: o.tavasoli@iauet.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

The construction of different paths on fine-grained soil beds is often inevitable and, it is necessary to select and design suitable methods of soil improvement. One of these methods is shallow soil mixing with different additives such as lime and Nano-clay. These particles can improve the physical and chemical properties of the soil as much as possible and make changes on a microscopic scale. In this paper, the stabilization of fine-grained soil beds and their strength properties due to the addition of Nano-clay and lime mixing are investigated. For this purpose, the series of unrestricted compressive strength tests, Atterberg limits, density, PH and microstructural tests including X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) have been performed on the mixture of soil with Nano-clay and lime with different adding percentages at 7, 14 and 28-day curing period. The obtained results indicate that the optimum soil properties were obtained by adding 3% lime and 3% Nano-clay during the 28-day curing period and according to the results of microstructural analysis, it was found that soil resistance increased due to the formation of calcium silicate hydrated gel with reducing the voids and increasing the contacts between soil particles.

Keywords: Soil Improvement, Fine-Grained Soil Subgrades, Nano-Clay, Lime, Microstructural Tests