

خصوصیات ژئوتکنیکی و خودترمیمی ماسه رس دار تثبیت شده با نانواکسید آهن

عیسی شوش‌پاشا، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
 پروین زیبارتی، کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی

محدث نوری (ره)، نور

مصطفی محمدی، دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه قم
 مهدی آشتیانی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

Email: m.ashtiani@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳

چکیده

در سال‌های اخیر، فن آوری نانو به‌طور قابل توجهی در مهندسی ژئوتکنیک و به‌خصوص در بهسازی خاک به‌کار گرفته شده است. استفاده از این فن آوری توانسته است پارامترهای مقاومتی خاک را بهبود بخشیده و منجر به تثبیت بسیاری از خاک‌های مسئله‌دار شود. در این تحقیق، به منظور بررسی اثر نانوذرات اکسید آهن بر خصوصیات خاک ماسه رس‌دار، سه نوع خاک ماسه‌ای با مقادیر مختلف رس (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) آزمایش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانواکسید آهن به خاک باعث افزایش مقاومت حداکثر، به‌خصوص در نمونه‌های خاک ماسه‌ای با درصد رس کمتر می‌شود. علاوه بر این، گذشت زمان، تأثیر این افزایش مقاومت در روند ترمیم ترک ایجاد شده در نمونه‌ها را کاملاً نمایان می‌کند. تأثیر نانواکسید آهن نیز به عنوان یک افزودنی مؤثر به منظور افزایش مقاومت حداکثر و خاصیت خودترمیمی ماسه‌رس‌دار، با استفاده از یک سری عکس‌های SEM، نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای مقاومتی خاک، تثبیت خاک، خودترمیمی، افزودنی‌ها

۱. مقدمه

شرایط موجود، برداشت خاک ضعیف و جایگزینی آن با خاک مناسب و همچنین بهبود خواص مهندسی خاک قابل به‌کارگیری هستند. تثبیت خاک یکی از روش‌های اصلاح خواص مهندسی خاک است که تکنیک‌هایی از قبیل افزودن سیمان، آهک و افزودنی‌های طبیعی و شیمیایی به خاک را شامل می‌شود. در این ارتباط، مواد نانو به‌عنوان مواد افزودنی استفاده می‌شوند و هدف اصلی به‌کارگیری آن‌ها در مهندسی ژئوتکنیک، بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک با استفاده از این مواد است. بایستی اشاره نمود که تثبیت خاک در گذشته اغلب با

وجود خاک با کیفیت نامناسب در محل پروژه‌ها می‌تواند پیامدهای منفی برای سازه‌ها به همراه داشته و خسارت‌های زیادی را از نقطه نظر فنی و اقتصادی به پروژه تحمیل نماید. در برخی موارد حتی ممکن است خاک کیفیت نسبتاً خوبی داشته باشد اما با توجه به شرایط حاکم بر یک پروژه خاص (از قبیل ابعاد بارگذاری و مقدار بار وارده)، نیاز به بهسازی وجود داشته باشد. در مواجهه با شرایط نامطلوب برای خاک، راهکارهایی شامل تغییر محل ساخت‌وساز، طراحی مجدد سازه براساس

کرنش انقباضی و تورمی می‌شود. همچنین، این نوع نانومواد، گسترش ترک‌های خشک سطح نمونه متراکم را کاهش می‌دهند. نتایج بررسی این محققین نشان داد که برخلاف نانورس، نانومس و نانوالومین تأثیر زیادی بر کرنش انقباضی و تورمی خاک دارند. بوترون و همکاران (۲۰۰۹) با انجام آزمایش‌های تک‌محوری، سه‌محوری، تحکیم و نفوذپذیری، تأثیر نانوسیلیس را بر ویژگی‌های ژئوتکنیک خاک ارزیابی نمودند. نتایج حاکی از آن بود که مخلوط خاک و نانوسیلیس در مراحل اولیه عمل‌آوری، رفتار انعطاف‌پذیر داشته و با گذشت زمان رفتار مخلوط خاک و نانوسیلیس خمیری می‌گردد. همچنین، نفوذپذیری خاک حاوی نانوسیلیس به طور پیوسته با افزایش تراکم خاک کاهش می‌یابد و هنگامی که فشار محصورکننده کافی برای خاک ترکیب شده با نانوسیلیس فراهم شود، خاک تثبیت شده مقاومت بالایی در مقابل بارهای استاتیک و سیکنی از خود نشان می‌دهد. حیدری (۱۳۹۵) به بررسی اثر نانوسیلیس و نانو اکسید آهن بر خصوصیات مقاومتی و تحکیمی خاک رسی کرج پرداختند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن بود که افزودن این مواد به خاک تا درصد بهینه افزودنی (۲٪) موجب افزایش پارامترهای مقاومتی و تحکیمی خاک گردیده و بعد از آن کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. در مقایسه با نوع افزودنی مورد مطالعه، به ازای درصد ثابت افزودنی، نانو اکسید آهن باعث بهبود بیشتری در پارامترهای مقاومتی و ضرایب تحکیم خاک شده است. مطالعات مشابه دیگری نیز در خصوص استفاده از نانومواد (از قبیل نانورس، نانولوله‌های کربنی، نانوسیلیس، نانوکامپوزیت، نانومس، نانوالومینا و نانوسیلیکا) روی خاک‌های ریزدانه و رُمنده انجام شده است تا بتوان تأثیر این مواد بر پارامترهایی از قبیل حدود اتربرگ، نسبت باربری کالیفرنیا و مقاومت فشاری محصور نشده را مورد بررسی قرار داد (دانیل و همکاران، ۱۹۹۳؛ گالگر و فینسترل، ۲۰۰۴؛ بازیار و همکاران، ۲۰۱۰؛ تاها و بینگ، ۲۰۱۰؛ اعظم، ۲۰۱۴؛ خالد و همکاران، ۲۰۱۴؛ چنگیزی و حداد، ۲۰۱۵؛ خالد و همکاران، ۲۰۱۵؛ ایرانپور، ۲۰۱۶؛ چنگیزی و حداد، ۲۰۱۷). مرور پیشینه تحقیق در خصوص استفاده از فن‌آوری نانو در بخش ژئوتکنیک نشان می‌دهد که اکثر مطالعات انجام شده در این حوزه معطوف به فعالیت‌های

استفاده از سیمان و آهک صورت می‌گرفته است. اما مقدار مصرف تقریبی آن‌ها در خاک‌های ریزدانه در حدود ۲۰-۷ درصد وزن خاک بوده است که حجم بسیار زیادی مصالح تثبیت‌کننده نیاز می‌باشد. امروزه، تحقیقات جدید به سمت استفاده از نانومواد سوق پیدا کرده است تا استفاده از سیمان را به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای در حین تولید آن، کاهش دهد. همچنین، بسیاری از خاک‌ها و کانی‌های سنگی در زمره‌ی نانومواد هستند که در طبیعت موجود می‌باشند و از آن‌ها می‌توان در تثبیت خاک استفاده نمود.

در مقیاس نانو، نسبت‌های بیشتری از سطح به حجم (یعنی سطح ویژه) در ذره ایجاد می‌شوند و این موضوع به نوبه‌ی خود موجب ایجاد ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتری می‌گردد. به عبارت دیگر، رفتار سطحی ماده بر رفتار توده‌ای آن غلبه می‌کند. بنابراین، مواد نانو به گونه‌ای بسیار فعال با سایر ذرات تمایل به واکنش دارند، به نحوی که مقادیر بسیار اندکی از آن‌ها می‌توانند منتج به ایجاد تأثیراتی قابل ملاحظه در رفتار فیزیکی- شیمیایی و مشخصات مهندسی خاک شوند (قاضی، ۱۳۸۹). به‌طور مثال، لُمب و ویتمن (۲۰۰۸) علت تغییر رفتار خاک در مقیاس نانومتر را با دو عامل افزایش سطح ویژه و غالب بودن اثرات کوانتومی بیان کردند. یونکورا و میوا (۱۹۹۳) از نانوذرات به منظور بررسی تأثیر آن‌ها بر افزایش مقاومت فشاری خاک استفاده کردند. نول و همکاران (۱۹۹۲) به بررسی اثر نانوذرات سیلیکاتی بر کاهش نفوذپذیری و میزان نشست تحکیمی خاک پرداختند. ژانگ و همکاران (۲۰۰۴) با افزودن ۹٪ ذرات اکسید آهن به خاک سیلتی نشان دادند که این ذرات باعث ایجاد یک شبکه ارتباطی بین ذرات لای و اکسید آهن شده و باعث چسبندگی و سیمانی شدن خاک می‌شوند. گالگر و فینسترل (۲۰۰۴) از نانوذرات برای افزایش چسبندگی و کاهش ویسکوزیته استفاده کرده و طبق نتایج به‌دست آمده، مقدار چسبندگی را به درصد نانوذرات سیلیکاتی نسبت دادند. تاها و تاها (۲۰۱۲) با افزودن نانورس، نانوالومین و نانومس با نسبت‌های وزنی ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد به خاک، تأثیر این نوع مواد را بر رفتار تورمی و انقباضی خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن نانومواد در نسبت وزنی بهینه موجب کاهش

باستیانس و همکاران، ۲۰۰۷؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۳). در این خصوص، به دلیل وجود رس در خاک مورد بررسی، این امکان وجود دارد که لایه‌های خاک در طول زمان، دچار ترک خوردگی شوند که این ترک‌ها موجب افزایش نفوذپذیری لایه و کاهش کارایی آن می‌گردند. بنابراین، در این پژوهش، ضمن بررسی تأثیر نانوآکسید آهن بر خصوصیات مقاومتی خاک ماسه‌ای رس‌دار، خاصیت خودترمیمی این نوع افزودنی به خاک نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مصالح مورد استفاده

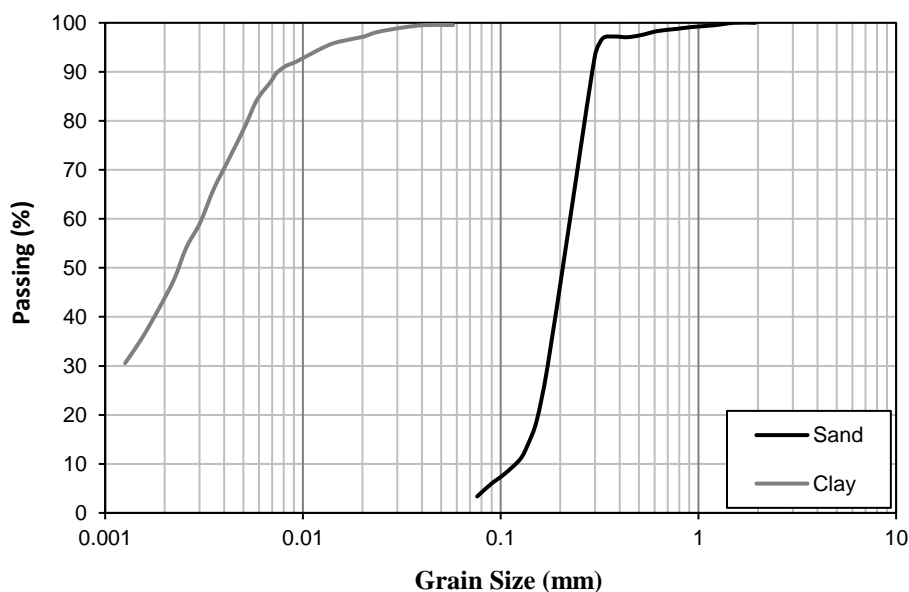
مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل خاک و نانوآکسید آهن بوده که در ادامه به تشریح مشخصات آن‌ها پرداخته شده است.

۲-۱. خاک

برای تهیه نمونه‌های خاکی جهت انجام آزمایش‌ها، از ترکیب ماسه انزلی و رس کائولینیتی با درصدهای مشخص استفاده شده است. خاک رسی مورد استفاده در این تحقیق، بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد، در رده خاک CL قرار می‌گیرد. همچنین، اندازه متوسط دانه‌های خاک ماسه‌ای (D_{50}) برابر $0/۲۱$ می‌باشد. نمودار دانه‌بندی ماسه و رس مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است.

آزمایشگاهی روی برخی از نانومواد (از جمله نانوسیلیس و نانورس) بوده و تاکنون مطالعات زیادی روی نانوآکسید آهن از دیدگاه مکانیکی و ریزساختاری به عنوان تثبیت‌کننده انجام نشده است. لذا، در این تحقیق، ضمن انجام آزمون‌های آزمایشگاهی روی خاک ماسه رس‌دار، مطالعات ریزساختاری نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) روی نمونه‌های تثبیت شده انجام شده است.

همچنین، بحث خودترمیمی خاک‌های رسی به عنوان یکی از ویژگی‌های خاک رسی در چند سال اخیر مورد توجه محققین بوده است که برای ارزیابی این موضوع روش‌های متفاوتی را انتخاب و مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند (کلانتری و همکاران، ۱۳۸۸). بحث ترمیم ترک در رس، مربوط به بسته شدن ترک‌های ایجاد شده در آن است. البته این ترک‌ها به شکل قبل از ترک خوردگی‌شان باز نمی‌گردند و در هر صورت در خصوصیات لایه رسی تغییراتی به وجود می‌آید. به‌طور مثال، نفوذپذیری لایه رسی مقداری افزایش خواهد یافت (میچل و سوگا، ۱۹۹۳). بخش عمده بررسی‌ها در خصوص خاصیت خودترمیمی رس‌ها، در ارتباط با بحث تغییر نفوذپذیری خاک، ترک‌های ایجاد شده از انقباض و انبساط در مراکز دفن زباله و همچنین ترک‌های ناشی از فرسایش داخلی در سدهای خاکی بوده‌اند (هوشیار، ۱۳۸۵؛ اسکندری نژاد، ۱۳۹۱؛ دانیل و همکاران، ۱۹۹۳؛



شکل ۱. دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای و رسی مورد استفاده در این تحقیق

است. اصولاً با افزایش میزان درصد رس در خاک ماسه‌ای، رفتار خاک از حالت دانه‌ای به حالت ریزدانه تغییر یافته و تأثیر میزان ریزدانه را می‌توان در نتایج مشاهده نمود. همچنین، از آنجایی که امکان انجام آزمایش تک‌محوری روی نمونه‌های ماسه خالص وجود نداشت، نمونه‌های خاک ماسه‌ای با حداقل ۱۰٪ رس مخلوط شده‌اند.

پارامترهای فیزیکی خاک‌های مورد استفاده به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. این پارامترها با انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ و تراکم استاندارد تعیین شده‌اند. همانطور که در این جدول نشان داده شده، سه نوع خاک SC1، SC2 و SC3 به ترتیب با درصد‌های رس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جهت انجام آزمایش‌ها تهیه شده

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده

نام ترکیب‌ها			پارامتر
SC3	SC2	SC1	
۳۰	۲۰	۱۰	رس (%)
۲/۶۲	۲/۶۴	۲/۶۶	وزن مخصوص (g/cm ³)
۱/۹۹	۲/۰۱	۲/۰۴	حداکثر جرم حجمی خشک (g/cm ³)
۲۲	۱۹	۱۸	حد روانی (LL)
۶	۵	۴	شاخص خمیری (PI)
۱۷	۱۴	۱۲	رطوبت بهینه (%)
SC-SM	SC-SM	SC-SM	نام خاک براساس طبقه بندی یونیفاید

استفاده در جدول ۲ آورده شده است. همچنین، تصاویر میکروسکوپی از نانواکسید آهن که توسط میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری^۱ (TEM) و روبشی^۲ (SEM) گرفته شده است در شکل ۲ ارائه شده است. ساختار کروی نانواکسید آهن در این شکل به وضوح قابل مشاهده است.

۲-۲. نانواکسید آهن

اکسید آهن ترکیبی شیمیایی است که از آهن و اکسیژن تشکیل شده است. این نوع اکسید در بسیاری از فرآیندهای طبیعی بیولوژیک نقش مهمی را ایفا می‌کند و به عنوان سنگ آهن، رنگ‌دانه، کاتالیزور در ترمیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات نانواکسید آهن مورد

جدول ۲. مشخصات نانواکسید آهن

چگالی واقعی (g/cm ³)	چگالی حجمی (g/cm ³)	pH	شکل ذرات	رنگ	سطح ویژه (m ² /g)	اندازه ذرات (nm)	درجه خلوص (%)
۵/۲۴	۱/۲۰	۷-۵	کروی	قهوه‌ای مایل به قرمز	۶۰-۴۰	۴۰-۲۰	۹۸

آهن (۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ درصد) و تهیه مخلوط همگن، خاک در ۵ لایه، درون قالب استوانه‌ای که جداره آن روغن کاری شده بود، متراکم شده است. آماده‌سازی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D2166 انجام شده

۳. آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

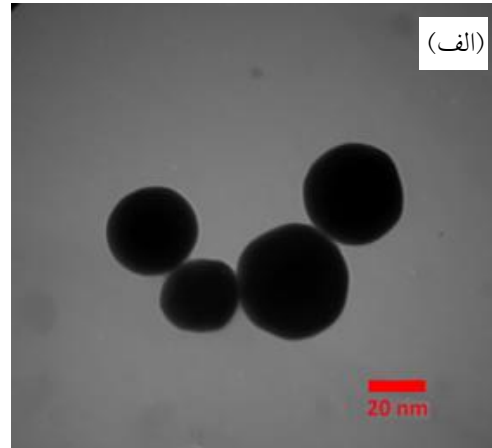
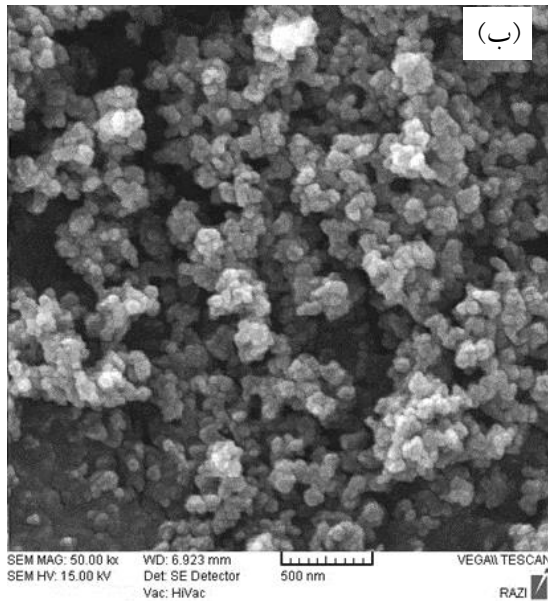
جهت تهیه نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌ها، پس از مخلوط نمودن خاک‌ها (یعنی نمونه‌های SC1، SC2 و SC3 اشاره شده در جدول ۱) با درصد‌های مشخصی از نانواکسید

۱- Transmission Electron Microscope

۲- Scanning Electron Microscope

کوبش ۲۰ ضربه از فاصله‌ای حدود ۴ سانتی‌متر از سطح خاک بوده است. در نهایت، پس از خارج نمودن نمونه از قالب و توزین آن، ابعاد نمونه توسط کولیس اندازه‌گیری می‌گردید. شکل ۳، یک مورد از نمونه تهیه شده به روش تراکم مرطوب خاک را نشان می‌دهد.

است. شایان ذکر است که در مرحله اول، خاک با نیمی از مقدار آب مورد نیاز (نصف درصد رطوبت بهینه خاک مورد نظر) مخلوط می‌شود و سپس نانوآکسید آهن مورد نظر به باقیمانده آب اضافه شده و با خاک مخلوط می‌گردد. میزان انرژی وارده بر هر لایه، تقریباً ثابت و برابر با انرژی کوبیدن چکش استوانه‌ای به وزن ۲/۵ کیلوگرم و تعداد



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نانوآکسید آهن: (الف) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری و (ب) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی



شکل ۳. نمونه آماده شده به روش تراکم مرطوب

۱-۴. تأثیر نانو اکسید آهن بر مقاومت حداکثر و

کرنش گسیختگی

تغییرات مقاومت فشاری تک محوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای نمونه های خاک SC1، SC2 و SC3 در نتیجه افزودن نانو اکسید آهن به ترتیب در شکل های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، با توجه به اینکه خاک SC1 مقدار زیادی ماسه دارد، انتظار می رفت که مقاومت فشاری تک محوری آن بسیار کم باشد. لذا، با مشاهده نتایج نیز مشخص است که در نمونه خاک طبیعی، مقاومت حداکثر فشار تک محوری در حدود 0.1 kg/cm^2 است. اگرچه با اضافه نمودن ماده افزودنی، مقاومت نهایی خاک از نظر مقدار تغییرچندانی نداشته است، اما نسبت افزایش مقاومت خاک تثبیت شده به خاک طبیعی (بدون افزودنی)، قابل توجه بوده است. در این خصوص، مقدار حداکثر مقاومت خاک بین نمونه های تثبیت شده 0.2 kg/cm^2 می باشد. اما نسبت افزایش در حدود ۲ برابر است که افزایش قابل توجهی می باشد. همچنین، با بررسی کلی نمودارهای این بخش می توان پی برد که با افزودن نانو اکسید آهن، کرنش گسیختگی خاک تا حدودی کاهش می یابد. لذا، می توان بیان نمود که با افزودن نانو و واکنش با ذرات خاک و در نتیجه افزایش سیمانتاسیون خاک، گسیختگی نمونه رفتار نسبتاً تردتری از خاک طبیعی نشان می دهد. این موضوع در اکثر تحقیقات تثبیت خاک با استفاده از افزودنی ها مشاهده شده است و در صورتی که قرار است از این مواد در عمل به کار گرفته شود باید به این مسئله توجه کافی داشت.

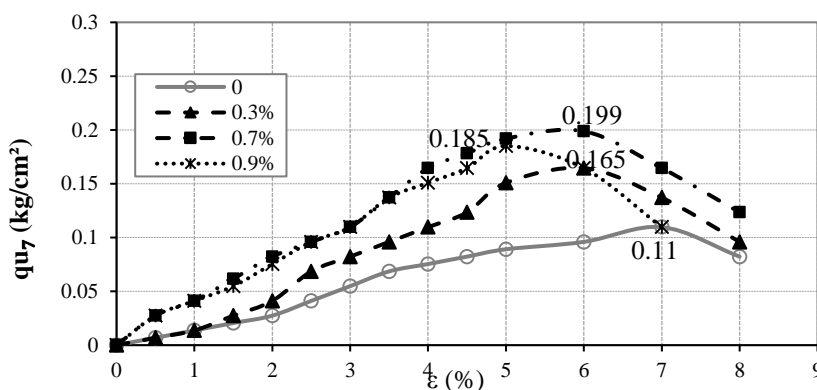
جهت بررسی تأثیر نانو اکسید آهن بر مشخصات مقاومتی خاک ها، ۷۲ آزمایش تک محوری روی نمونه هایی با سه زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام پذیرفت. همچنین، به منظور بررسی میزان تأثیر این افزودنی بر پیشرفت فرایند خودترمیمی در خاک، علاوه بر انجام آزمایش تک محوری روی نمونه های ترک خورده و ترمیم شده طی زمان، یک سری عکس SEM نیز از محل ترک های ایجاد شده گرفته شد و نتایج آن ها مورد بررسی قرار گرفتند. بایستی اشاره نمود که برای حصول اطمینان از تکرارپذیری و صحت نتایج آزمایش ها، برای هر آزمایش دو نمونه ساخته شده است.

۴. نتایج

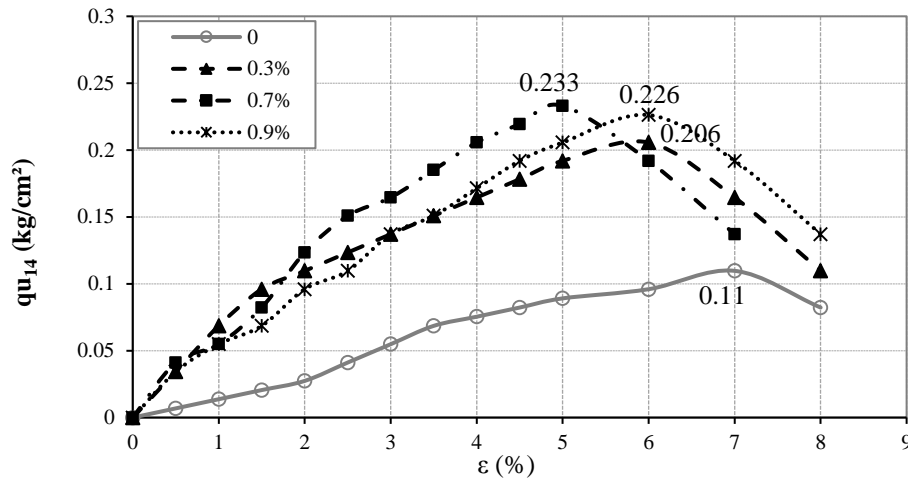
به منظور نشان دادن تأثیر افزودنی نانو اکسید آهن بر رفتار مقاومتی خاک های ماسه ای دارای ریزدانه چسبنده، نتایج آزمایش های مقاومت فشاری محصور نشده (تک محوری) در این بخش ارائه شده اند. شایان ذکر است که آزمایش های تک محوری براساس کنترل کرنش انجام شده اند. همچنین، برای بررسی تأثیر افزودنی فوق بر میزان خودترمیمی در این نوع خاک ها، نتایج آزمایش های انجام شده روی نمونه های ترک خورده و نتایج SEM روی بخش های ترک خورده خاک نیز آورده شده اند.

۱-۴. مقاومت فشاری محصور نشده

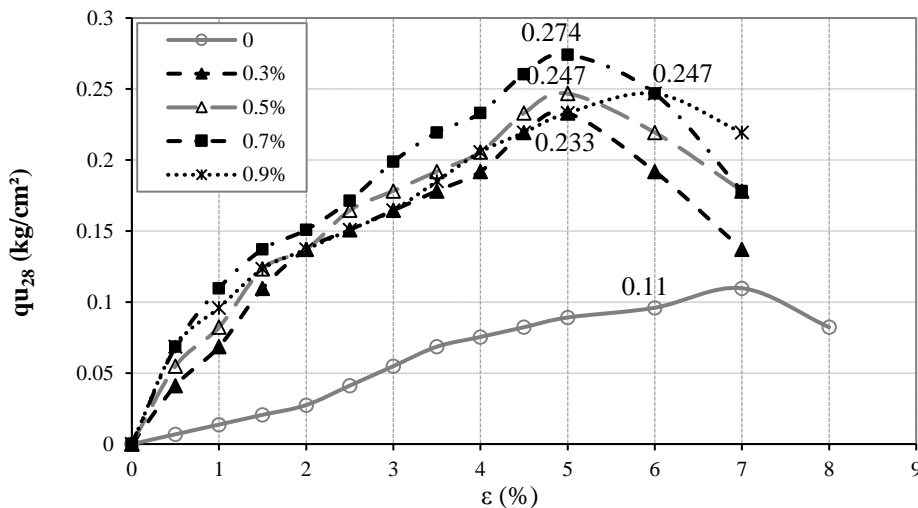
با انجام آزمایش های متعدد، تأثیر نانو اکسید آهن بر مقاومت فشاری محصور نشده خاک ماسه ای رس دار مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه، نتایج به دست آمده در این بخش ارائه شده است.



(الف) ۷ روزه



(ب) ۱۴ روزه



(ج) ۲۸ روزه

شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده برای خاک SC1 به ازای درصدهای مختلف نانو اکسید آهن برای زمان عمل آوری: الف) ۷ روزه، ب) ۱۴ روزه و ج) ۲۸ روزه

در نتیجه گیری نمود که برای این خاک (یعنی SC1) مقدار درصد بهینه افزودنی نانو اکسید آهن، در حدود ۰/۷ است. این مقدار بهینه در تمامی زمان های عمل آوری نمونه ثابت باقی مانده است. پس از بررسی تأثیر افزودنی نانو اکسید آهن در سه درصد مختلف ۰/۳، ۰/۷ و ۰/۹، جهت حصول اطمینان از درصد نانوی بهینه، درصد جدید ۰/۵ درصد افزودنی نیز برای نمونه خاک SC1 در زمان عمل آوری ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت. با بررسی شکل ۴-ج مشخص می گردد که همچنان میزان افزودنی بهینه، ۰/۷ درصد بوده و پس از این مقدار، مقاومت حداکثر نمونه روند کاهشی خواهد داشت.

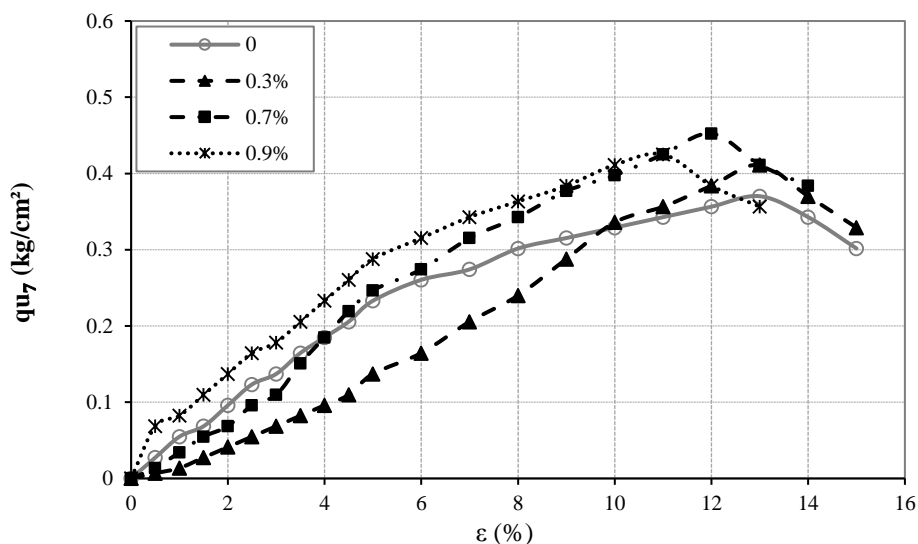
به طور کلی، در نمونه های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه خاک SC1 با درصدهای مختلف افزودنی، سختی و مقاومت نسبت به نمونه های شاهد تثبیت نشده افزایش می یابد. از

در شکل ۴-الف می توان مشاهده نمود که پس از گذشت ۷ روز از ساخت نمونه، در نمونه های با ۰/۳ درصد افزودنی، مشابه خاک بدون افزودنی، سختی خاک کم می باشد؛ اما مقاومت خاک بیشتر شده است. اما این موضوع در نمونه های ۱۴ و ۲۸ روزه نسبتاً متفاوت است (شکل های ۴-ب و ج) و تفاوت سختی خاک های تثبیت شده و نشده کاملاً مشخص است. همانطور که در شکل ها مشخص است، سختی خاک در نمونه با ۰/۷ درصد افزودنی زیاد شده و شاهد افزایش ۲-۲/۵ برابری مقاومت خاک نیز هستیم. این در حالی است که در نمونه با مقدار ۰/۹ درصد نانو اکسید آهن، با وجود ثابت ماندن نسبی سختی، مقاومت خاک تثبیت شده نسبت به خاک با ۰/۷ درصد افزودنی کاهش یافته است. اما همچنان مقاومت خاک از نمونه با ۰/۳ درصد افزودنی بیشتر است. لذا، می توان

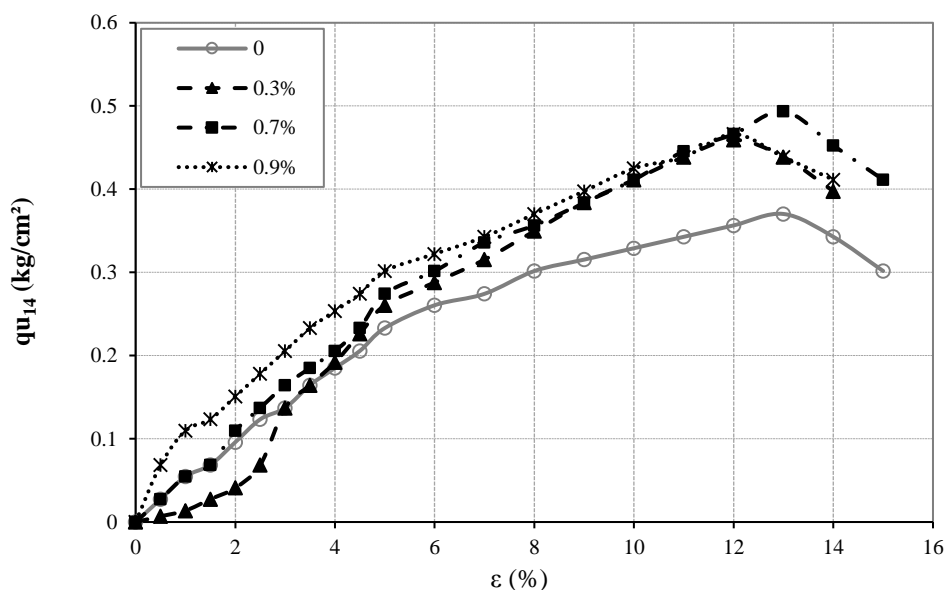
و تثبیت نشده برابر می باشد. مقدار سختی اولیه نمونه ۷ و ۱۴ روزه نیز تفاوت چندانی با نمونه تثبیت نشده نداشته و حتی در برخی موارد کمتر است. اما برای نمونه ۲۸ روزه، سختی و مقاومت نمونه تثبیت شده به طور مشخص افزایش می یابد. بایستی اشاره نمود که مقدار مقاومت خاک تثبیت شده در حدود ۱/۴ برابر خاک تثبیت نشده است. مشابه نمونه SC1، میزان درصد بهینه افزودنی در این نمونه نیز برابر ۰/۷ درصد می باشد. جهت حصول اطمینان از درصد نانوی بهینه، درصد جدید ۰/۵ درصد افزودنی نیز برای این نمونه در زمان عمل آوری ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت. با بررسی شکل ۵- ج مشخص می گردد که میزان افزودنی بهینه ۰/۷ درصد است.

این رو، می توان نتیجه گرفت که با افزایش سن نمونه و کامل شدن واکنش بین افزودنی و ذرات خاک، سختی خاک و مقاومت خاک تثبیت شده با نانو اکسید آهن افزایش می یابد. همچنین، اگرچه مقدار کرنش گسیختگی برای نمونه های تثبیت شده نسبت به نمونه های تثبیت نشده کاهش داشته است اما افزایش سن نمونه تأثیر چندانی بر این کرنش نداشته است.

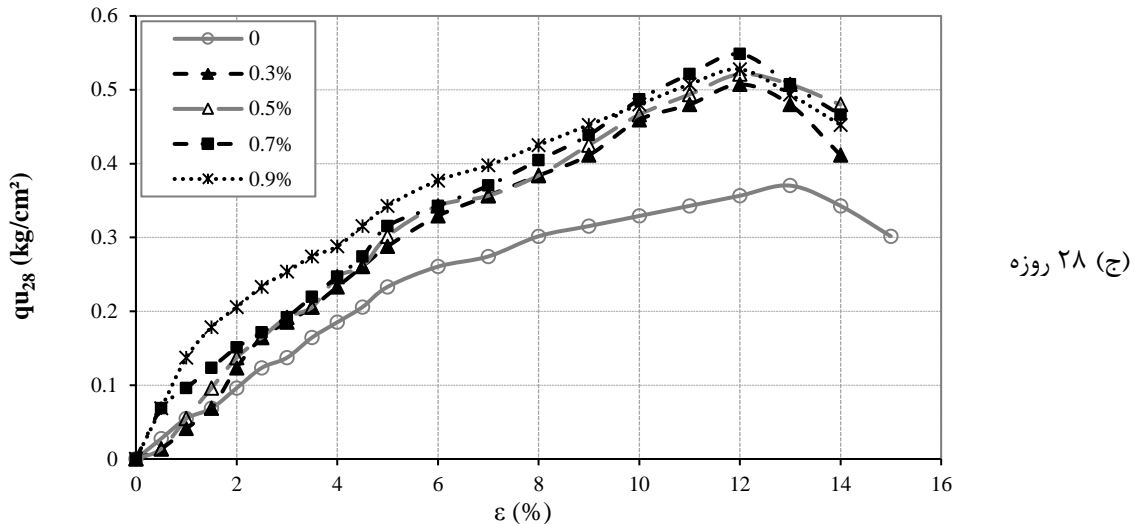
با بررسی شکل ۵ برای خاک SC2 نیز مشخص می شود که با افزایش مقدار درصد افزودنی و گذشت زمان عمل آوری، مقاومت حداکثر نمونه افزایش می یابد. مقدار کرنش گسیختگی تفاوت چندانی با خاک تثبیت شده نداشته و در برخی موارد این مقدار برای خاک تثبیت شده



(الف) ۷ روزه



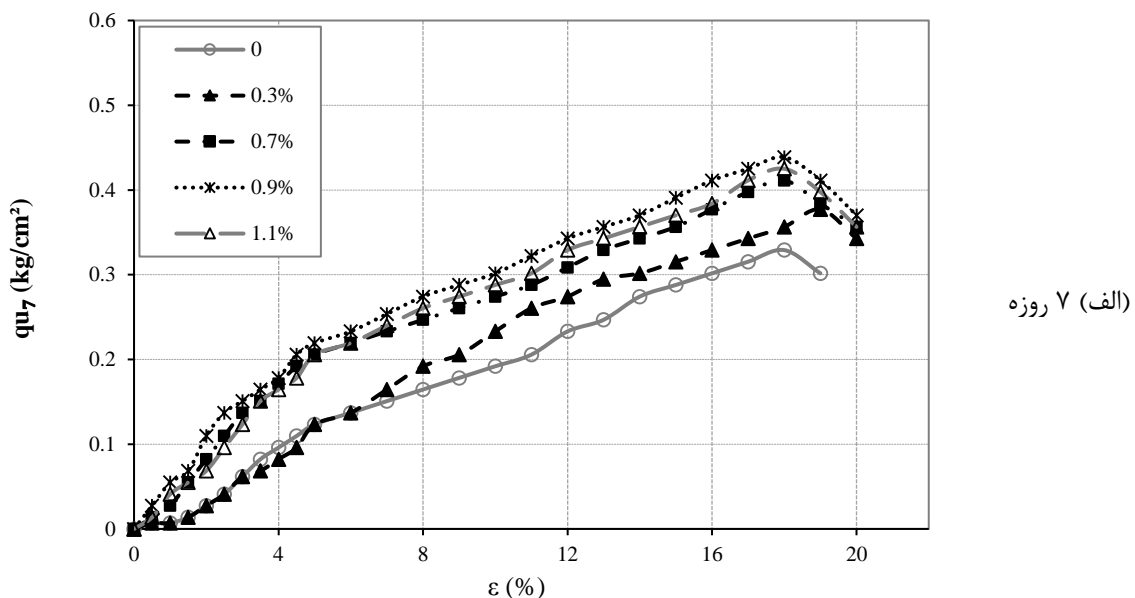
(ب) ۱۴ روزه

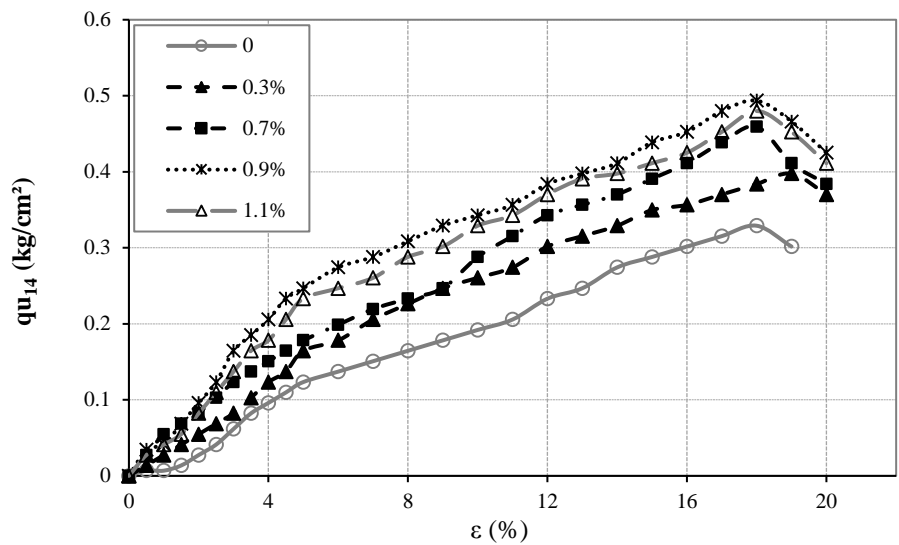


شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده برای خاک SC2 به ازای درصدهای مختلف نانو اکسید آهن برای زمان عمل آوری: الف) ۷ روزه، ب) ۱۴ روزه و ج) ۲۸ روزه

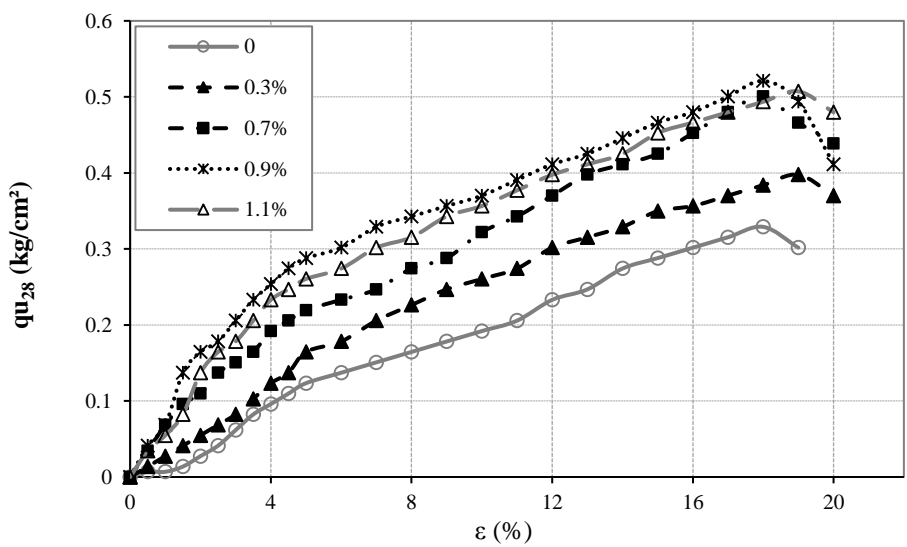
است و مقاومت خاک در این درصد بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. لذا، به منظور حصول اطمینان از این درصد، نمونه خاک با ۱/۱ درصد افزودنی نانو اکسید آهن مورد آزمایش قرار گرفت. با بررسی شکل ۶- ج مشخص است که مقدار بهینه افزودنی همان ۰/۹ درصد بوده و پس از آن مقاومت روند کاهشی خواهد داشت. با مقایسه درصد بهینه افزودنی برای نمونه‌های SC1 و SC3 می‌توان بیان نمود که با افزایش میزان ریزدانه رسی و به دلیل سطح ویژه بزرگتر خاک‌های رسی، مقدار افزودنی بیشتری جهت انجام واکنش و افزایش مقاومت خاک مورد نیاز است.

در ادامه، با بررسی تأثیر مقدار افزودنی‌ها برای نمونه خاک SC3 نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. مشابه دو نمونه قبلی (SC1 و SC2)، مقدار مقاومت حداکثر خاک افزایش یافته و برای نمونه ۲۸ روزه، مقاومت خاک تثبیت شده در حدود ۱/۶ برابر خاک تثبیت نشده است. همچنین، با افزایش سن نمونه و تکمیل واکنش، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. اگرچه مقدار سختی خاک تغییر خاصی نداشته و تقریباً روند مشابهی از جنبه تغییرات سختی برای نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده مشاهده می‌گردد. با افزایش مقدار خاک رس در نمونه SC3 به میزان ۰/۳۰٪، میزان بهینه افزودنی در حدود ۰/۹ درصد





(ب) ۱۴ روزه



(ج) ۲۸ روزه

شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده برای خاک SC3 به ازای درصدهای مختلف نانواکسید آهن برای زمان عمل آوری: (الف) ۷ روزه، (ب) ۱۴ روزه و (ج) ۲۸ روزه

شکل پذیری نمونه نخواهد داشت. همچنین، روند تغییرات مقاومت نسبت به افزایش کرنش در نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده تقریباً مشابه می‌باشد و به دلیل افزایش میزان کرنش گسیختگی در نمونه خاک SC3 نسبت به دو نمونه SC1 و SC2، مدول الاستیسیته و تری این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر کمتر می‌باشد.

در ادامه، به منظور مقایسه نتایج تحقیقات دیگران با نتایج این تحقیق، در جدول ۳ مقایسه‌ای بین مقاومت تک‌محوری خاک‌های مختلف تثبیت شده با نانومواد برای درصدهای متفاوت افزودنی انجام شده است.

همچنین، مشاهده می‌شود به دلیل افزایش مقدار درصد رس در نمونه خاک SC3 نسبت به دو نمونه SC1 و SC2، این نمونه خاک (یعنی SC3) کرنش گسیختگی بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر داشته و نسبت به آن‌ها شکل‌پذیرتر است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزودن نانواکسید آهن به خاک، مقدار کرنش گسیختگی نمونه تثبیت شده تقریباً برابر مقدار متناظر برای نمونه تثبیت نشده است. دلیل این موضوع و تفاوت تأثیر افزودنی بر مقدار کرنش گسیختگی با نمونه‌های SC1 و SC2 را می‌توان به مقدار خاک رس نسبت داد که به دلیل افزایش مقدار آن، افزودنی تأثیر خاصی روی

جدول ۳. مقایسه مقاومت تک محوری خاک‌های مختلف تثبیت شده با نانومواد برای درصد‌های متفاوت افزودنی

مقاومت ماسه رس دار تثبیت شده با نانواکسید آهن (kPa)	مقاومت رس کائولینیتی تثبیت شده با نانورس (kPa) (خسروانی مقدم و قربانی، ۱۳۹۰)	مقاومت رس لای دار تثبیت شده با نانورس (kPa) (خسروانی مقدم و قربانی، ۱۳۹۰)	مقاومت ماسه رس دار تثبیت شده با نانورس (محمدی و همکاران، ۱۳۹۳)	درصد افزودنی
۱۱	۱۲۵	۲۰۰	۲۸	تثبیت نشده
[۱۲۴٪] ۲۴/۷	[۱۲٪] ۱۴۰	*[۳۰٪] ۲۶۰	-	۰/۵
[۱۴۹٪] ۲۷/۴	-	-	-	۰/۷
[۱۲۴٪] ۲۴/۷	-	-	-	۰/۹
-	[۲۶٪] ۱۵۸	[۵۳٪] ۳۰۵	[۱۸٪] ۳۳	۱/۰
-	-	-	[۱۰۷٪] ۵۸	۲/۵

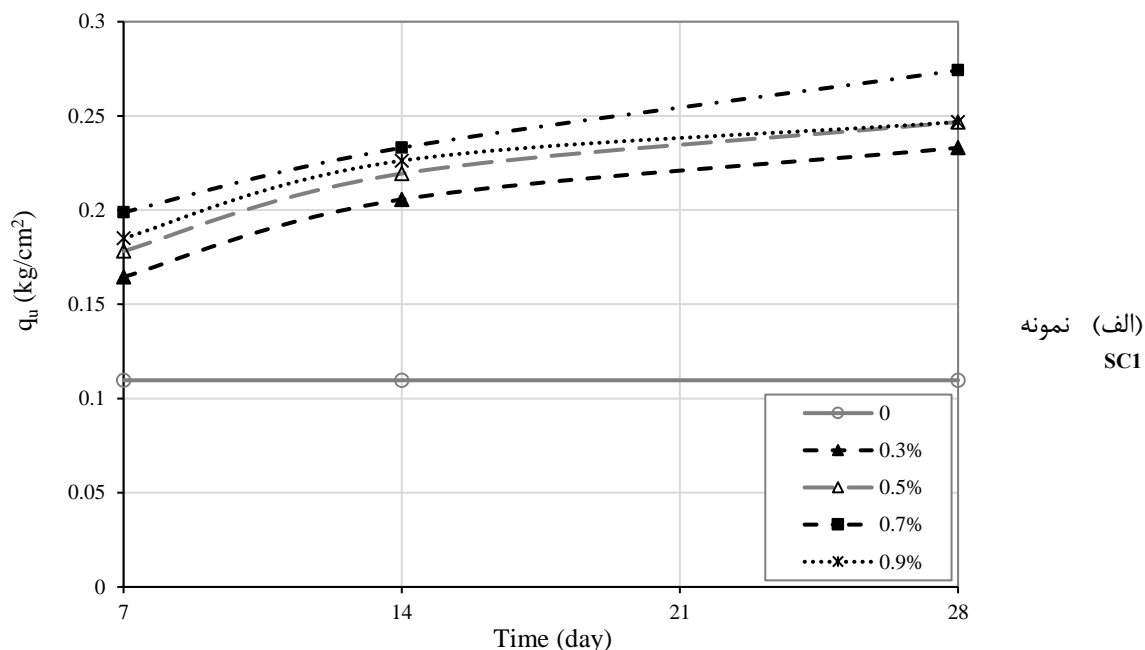
* اعداد داخل کروشه، درصد افزایش مقاومت خاک تثبیت شده نسبت به خاک تثبیت نشده را نشان می‌دهند.

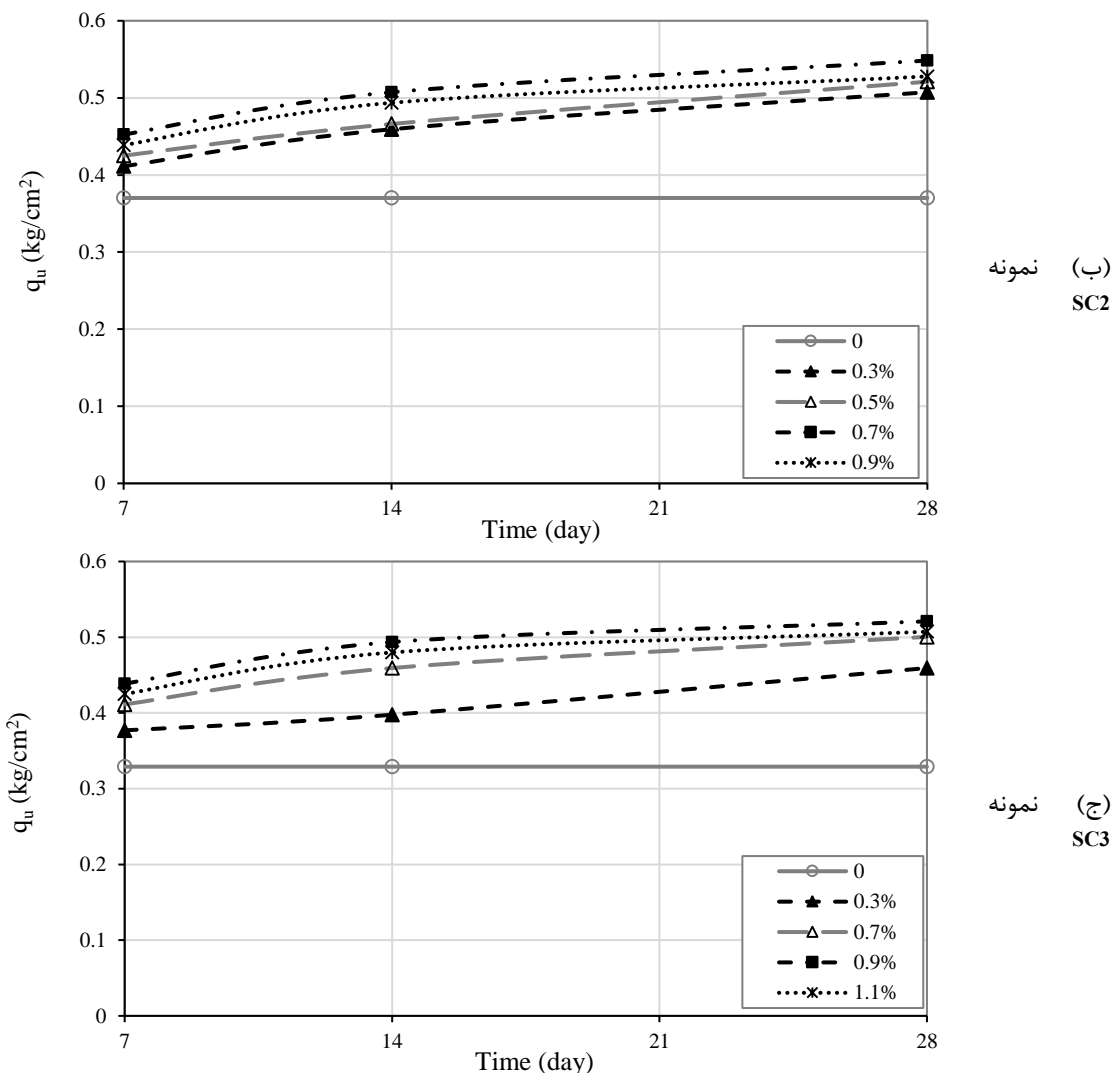
۷ ارائه شده است. تفاوت بین مقاومت حداکثر نمونه تثبیت نشده (بدون افزودنی) و نمونه‌های تثبیت شده نشان می‌دهد که تأثیر افزودنی نانواکسید آهن بر نمونه خاک با درصد درشت‌دانه بیشتر (یعنی SC1)، از سایر نمونه‌ها بیشتر است و سیمان‌تاسیون ناشی از این افزودنی، تأثیر بیشتری بر پارامترهای خاک دارد. همچنین، به ازای افزایش زمان عمل‌آوری، درصد افزایش مقاومت حداکثر خاک تثبیت شده نسبت به تثبیت نشده بیشتر می‌گردد.

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، با وجود تثبیت خاک با درصد‌های کمتر نانواکسید آهن نسبت به نانورس، درصد افزایش مقاومت بیشتری در خاک مشاهده می‌شود.

۲-۱-۴. تغییرات مقاومت حداکثر نمونه‌های خاک

نمودار تغییرات مقاومت حداکثر نمونه‌های خاک SC1، SC2 و SC3 برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل





شکل ۷. تغییرات در طول زمان مقاومت حداکثر خاک‌های تثبیت شده به ازای درصدهای مختلف نانو اکسید آهن

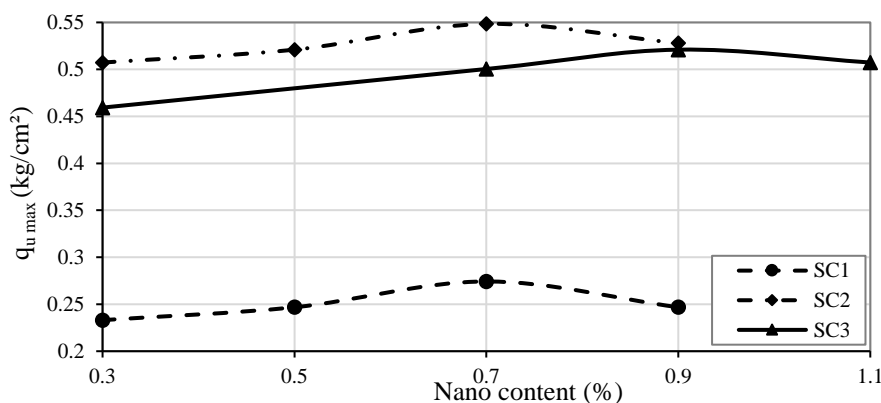
برای خاک با درصد درشت‌دانه بیشتر، تغییرات افزایش مقاومت حداکثر ۲۸ روزه خاک‌ها در درصد افزودنی بهینه، بیشتر از سایر نمونه‌ها است اگرچه از نظر مقدار این خاک مقاومت کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. دلیل این موضوع هم ناشی از ساختار خاک دانه‌ای است که مقاومت تک‌محوری کمتری نسبت به خاک ریزدانه دارد.

شکل ۸، تغییرات مقاومت حداکثر ۲۸ روزه نمونه‌های خاک SC1، SC2 و SC3 را با توجه به درصدهای مختلف نانو اکسید آهن نشان می‌دهد. همانطور که پیش‌تر نیز بیان گردید، مقدار درصد بهینه افزودنی برای خاک‌های SC1 و SC2 برابر ۰/۷ درصد و برای خاک SC3 برابر ۰/۹ درصد می‌باشد. دلیل این تفاوت را می‌توان به مقدار رس موجود در نمونه‌ها نسبت داد. هرچه

در نمونه خاک SC1، با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز همچنان افزایش مقاومت در خاک مشاهده می‌گردد. اما هر چه بر میزان درصد رس نمونه خاک افزوده می‌شود (یعنی نمونه SC3) با افزایش زمان عمل‌آوری از ۱۴ روز به بعد، تغییرات مقاومت خاک زیاد نبوده و از شیب تقریباً ثابتی برخوردار است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزودن نانو اکسید آهن به خاک ریزدانه، مقاومت نمونه خاک در هفته‌های اولیه عمل‌آوری تقریباً به حداکثر خود خواهد رسید و بعد از آن تغییرات چندانی در خاک مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که برای خاک‌های درشت‌دانه مانند ماسه، با افزایش زمان عمل‌آوری، سیمان‌تاسیون ناشی از افزودنی همچنان در حال شکل‌گیری و تکمیل شدن است. همچنین، با بررسی شکل ۴ مشخص می‌شود که تنها برای خاک SC1، یعنی

و کمترین تأثیر منفی را بر اصطکاک بین دانه‌های خاک خواهد گذاشت. اما با توجه به اینکه بررسی خاصی روی اسکلت خاک انجام نشده است، شاید نتوان نمونه‌های حاکی را از جنبه مقاومت با یکدیگر مقایسه نمود. همچنین، با افزایش درصد نانو اکسید آهن از میزان درصد بهینه، مقاومت تک‌محوری خاک‌ها کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد خلل و فرج خاک با میزان بهینه نانو اکسید آهن پر شده و بیشینه تبادل کاتیونی و اندرکنش بین نانومواد خاک در این درصدها اتفاق می‌افتد و پس از آن با افزایش درصد افزودنی، نمونه با کاهش مقاومت همراه خواهد بود.

مقدار خاک رس افزایش یابد، با توجه به افزایش سطح ویژه خاک، درصد بیشتر افزودنی برای تأثیرگذاری بر ساختار خاک مورد نیاز است و این مسئله برای نمونه خاک SC3 با ۳۰٪ رس مشهود می‌باشد. همچنین، این نمودار نشان می‌دهد که خاک SC2 (با ۸۰٪ ماسه و ۲۰٪ رس) بیشترین مقاومت را در بین نمونه‌های حاکی از خود نشان داده است. این موضوع را احتمالاً می‌توان به درصد رس و پرکنندگی حداکثری فضای خالی بین دانه‌های ماسه‌ای نسبت داد. به عبارت دیگر، خاک رس بیشترین مشارکت را در پر نمودن فضای خالی موجود بین دانه‌های ماسه داشته و موجب فاصله گرفتن دانه‌ها از یکدیگر نشده

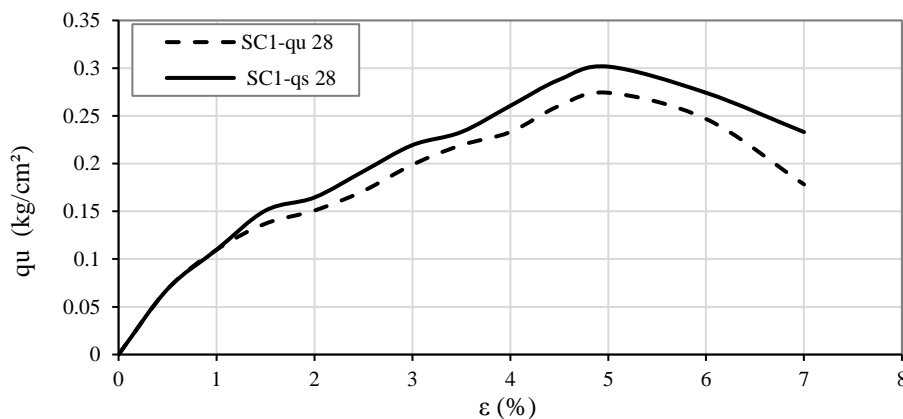


شکل ۸. تغییرات مقاومت حداکثر ۲۸ روزه برای نمونه‌های مختلف خاک به ازای درصدهای مختلف نانو اکسید آهن

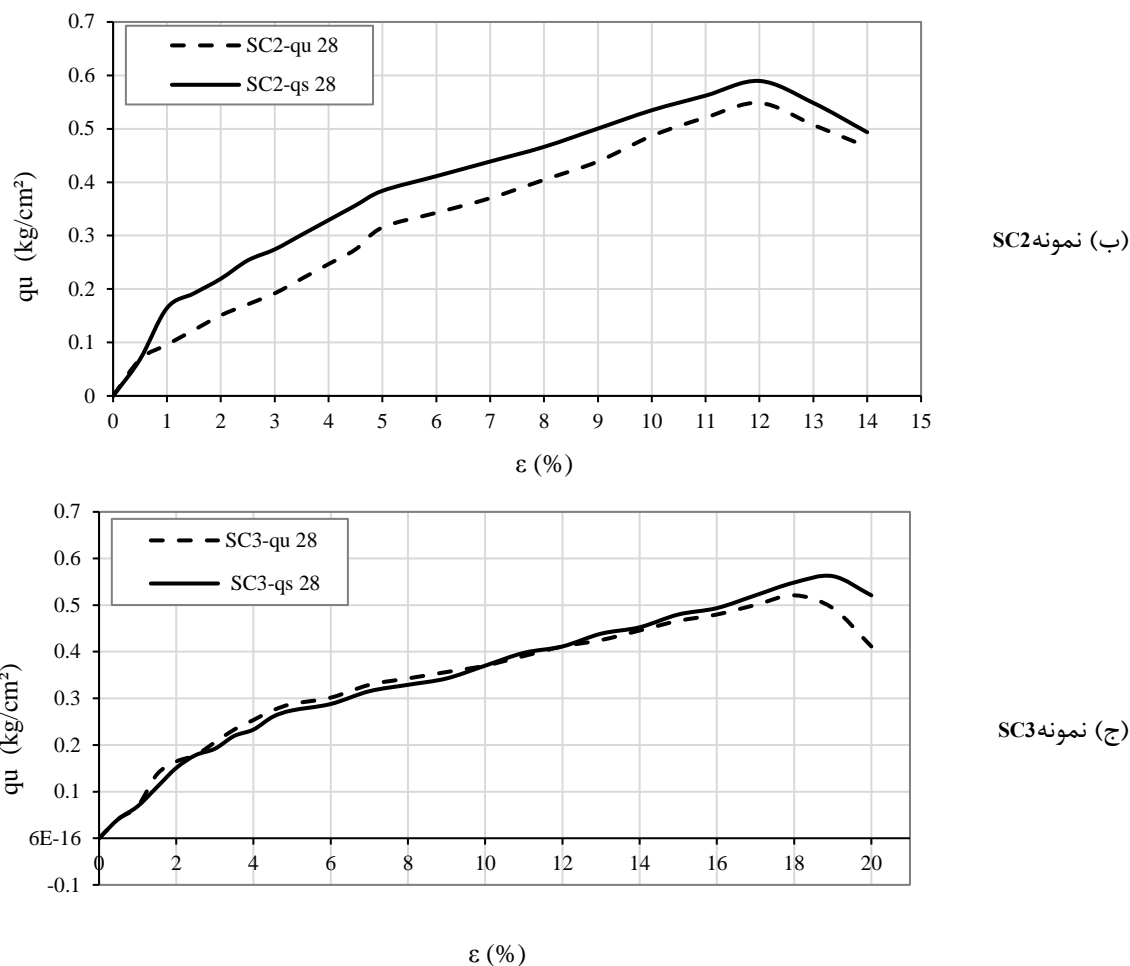
سپس به منظور انجام واکنش‌های جدید و شکل‌گیری سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک و افزودنی، بعد از گذشت ۲۸ روز دیگر، نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت تک‌محوری قرار گرفتند تا بتوان خاصیت خودترمیمی این نوع افزودنی روی نمونه‌های ماسه‌ای با درصدهای مختلف رس را مورد بررسی قرار داد. نتایج تنش-کرنش ۲۸ روزه و ترمیم‌یافته ۲۸ روزه برای نمونه‌های خاک SC1، SC2 و SC3 در شکل ۹ ارائه شده است.

۲-۴. بررسی خاصیت خودترمیمی

به منظور بررسی خاصیت خودترمیمی نانو اکسید آهن، ابتدا نمونه‌های حاکی با درصد بهینه افزودنی (یعنی ۰/۷ درصد برای نمونه‌های SC1 و SC2 و ۰/۹ درصد برای نمونه SC3) تهیه شدند. از آنجایی که مقاومت ۲۸ روزه این نمونه‌ها حداکثر مقدار مقاومت خاک را نتیجه دادند، پس از گذشت این مدت زمان، نمونه‌های تهیه شده تحت کرنش ۲۰٪ قرار داده شدند تا ترک در آنها ایجاد شود.



الف) نمونه SC1

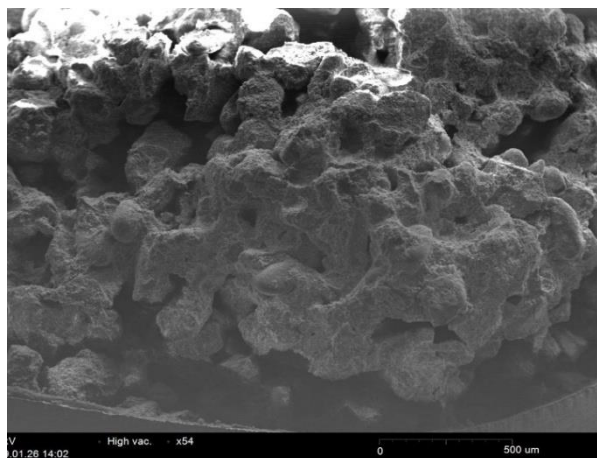


شکل ۹. مقایسه مقاومت ۲۸ روزه (qu₂₈) و خودترمیمی (qs₂₈) نمونه‌های خاکی برای درصد بهینه نانواکسید آهن

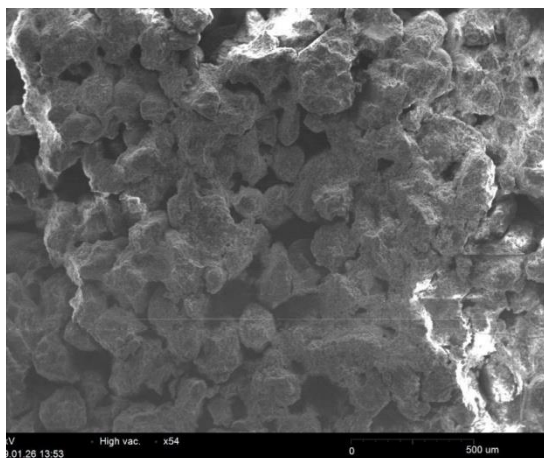
۳-۴. بررسی‌های ریزساختاری

به منظور تأیید خاصیت خودترمیمی ناشی از نانواکسید آهن در نمونه‌های خاکی، از برخی نمونه‌ها در شرایط مختلف عکس SEM تهیه شد. برای اینکار یک نمونه خاک SC1 بدون افزودنی و سه نمونه تثبیت شده نیز با ۰/۷ درصد نانواکسید آهن ساخته شد. در این ارتباط، عکس‌های SEM از نمونه ۷ روزه بدون افزودنی و با افزودنی گرفته شد که در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب نشان داده شده‌اند. همچنین، پس از گذشت ۲۸ روز، عکس SEM دیگری از نمونه خاک تهیه شده که در شکل ۱۰-ج آورده شده است. نمونه تثبیت شده نهایی نیز پس از ۲۸ روز تحت کرنش ۲۰٪ قرار گرفته و پس از گذشت ۲۸ روز پس از ایجاد ترک، عکس SEM مربوط به محل ترک در شکل ۱۰-د ارائه شده است.

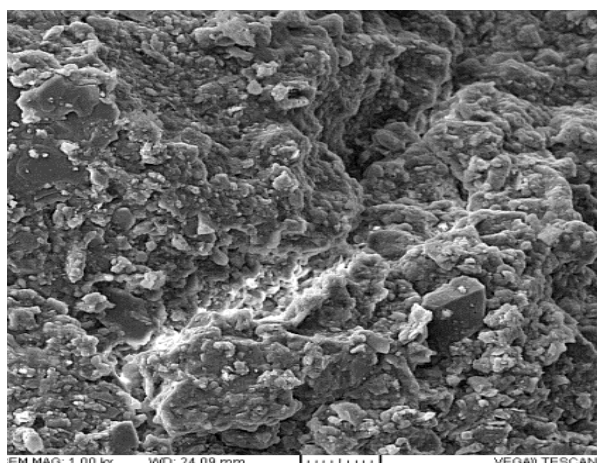
شکل ۹ نشان می‌دهد که نمونه‌های خودترمیمی (یعنی نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه نانواکسید آهن که پس از ۲۸ روز، کرنش محوری ۲۰٪ به آن‌ها اعمال شده و سپس بعد از گذشت ۲۸ روز، دوباره آزمایش مقاومت روی آن‌ها انجام شده است) مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه نانواکسید آهن پس از ۲۸ روز دارند. این موضوع بیانگر این مطلب است که خاصیت خودترمیمی نانواکسید آهن بسیار زیاد بوده و حتی پس از ایجاد ترک در نمونه‌های خاکی و گذشت یک مدت زمان، مقاومت حداکثر نمونه‌های خودترمیمی از مقاومت ۲۸ روزه نمونه اولیه بیشتر می‌گردد. اگرچه درصد افزایش مقاومت حداکثر در نمونه‌های ترمیم یافته نسبت به نمونه‌های اولیه ناچیز بوده و در حدود ۱۰-۸ درصد می‌باشد، اما بایستی به این نکته توجه نمود که نمونه ترک خورده اولیه بعد از مدت زمانی توانسته مقاومت اولیه خود را بازیابی کند.



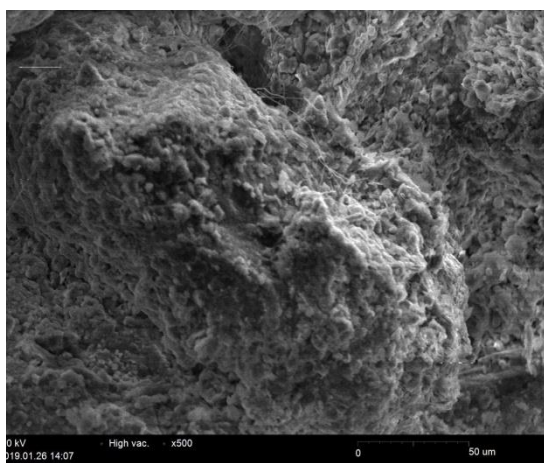
(ب) با نانو اکسید آهن پس از ۷ روز



(الف) بدون نانو اکسید آهن پس از ۷ روز



(د) نمونه خودترمیمی با نانو اکسید آهن پس از ۲۸ روز



(ج) با نانو اکسید آهن پس از ۲۸ روز

شکل ۱۰. تصاویر SEM از نمونه‌های خاک SCI در شرایط مختلف

ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، به دلیل وجود خاک رسی در نمونه‌ها، فرایند خودترمیمی آن‌ها در نتیجه اضافه نمودن افزودنی فوق نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، در ابتدا افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده نسبت به حالت بدون افزودنی (تثبیت نشده) در زمان‌های مختلف عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مقایسه شده‌اند. سپس، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده بعد از ایجاد ترک (با اعمال کرنش حدود ۰.۲٪) و گذشت زمان مشخصی تعیین شده است. در این ارتباط، مقاومت مجدد نمونه در برابر سربار اعمال شده به‌عنوان ترمیم ناشی از افزودنی نانو اکسید آهن و خاک رس در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مقایسه رفتار نمونه‌های مختلف به شرح زیر می‌باشد:

- با اضافه نمودن نانو اکسید آهن به سه خاک مختلف

با مقایسه عکس نمونه‌های حاکی ارائه شده در شکل‌های ۱۰- الف تا ۱۰- ج، فرایند تأثیرگذاری نانو اکسید آهن بر پیوندهای جدید بین ذرات و همچنین شکل‌گیری سیمان‌تاسیون کاملاً مشهود است. همچنین، ساختار خاک از حالت ناپیوسته (با فضای خالی نسبتاً زیاد) به شکل کاملاً پیوسته تغییر یافته است. از شکل ۱۰- د نیز مشخص است که نمونه ترمیم یافته خاک بعد از گذشت ۲۸ روز تا حدودی در محل ترک ترمیم شده و سیمانته شدن ذرات انجام شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر افزودنی نانو اکسید آهن بر خواص مقاومتی سه نوع خاک با درصد‌های مختلف ماسه و رس با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مورد

ماسه‌ای، مقاومت حداکثر بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر داشته است که این موضوع را می‌توان به درصد رس و پراکنندگی حداکثری فضای خالی بین دانه‌های ماسه‌ای نسبت داد. به عبارت دیگر، خاک رس بیشترین مشارکت را در پر نمودن فضای خالی موجود بین دانه‌های ماسه داشته و موجب فاصله گرفتن دانه‌ها از یکدیگر نشده و کمترین تأثیر منفی را بر اصطکاک بین‌دانه‌ای خاک خواهد گذاشت.

- رفتار خودترمیمی تمامی نمونه‌ها به گونه‌ای بوده که پس از ایجاد ترک در نمونه، بعد از گذشت ۲۸ روز، خاک دوباره مقاومت اولیه خود را بازیابی نموده است و حتی مقاومت آن نیز در حدود ۱۰-۸ درصد بیشتر از حالت قبل از ترک خوردگی شده است. این موضوع را می‌توان به ادامه داشتن واکنش‌های ناشی از نانواکسید آهن و شکل‌گیری سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک و افزودنی نسبت داد. حتی این موضوع ممکن است به دلیل خاصیت خودترمیمی کانی‌های رسی موجود در نمونه‌ها باشد. اما با توجه به اینکه درصد رس موجود در نمونه‌ها بخصوص در نمونه SC1 کم است شاید نقش اصلی را بتوان به نانواکسید آهن نسبت داد. همچنین، بررسی‌های ریزساختاری نمونه با استفاده از عکس‌های SEM نیز می‌توان فرایند تأثیرگذاری نانواکسید آهن بر پیوندهای جدید بین ذرات و همچنین شکل‌گیری سیمان‌تاسیون را مشاهده نمود. با استفاده از نانواکسید آهن، ساختار خاک از حالت ناپیوسته به شکل کاملاً پیوسته تغییر یافته است و نمونه ترمیمی مورد بررسی بعد از گذشت ۲۸ روز تا حدودی در محل ترک ترمیم شده است.

SC1 (۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ رس)، SC2 (۸۰٪ ماسه + ۲۰٪ رس) و SC3 (۷۰٪ ماسه + ۳۰٪ رس) مقاومت حداکثر نمونه‌ها افزایش یافت. به طوری که برای نمونه‌های SC1 و SC2 میزان بهینه افزودنی ۰/۷ درصد و برای نمونه SC3 برابر ۰/۹ درصد است. دلیل افزایش میزان نانواکسید آهن برای نمونه SC3 را می‌توان به مقدار بیشتر خاک رس آن نسبت داد که با توجه به سطح ویژه بزرگتر، میزان افزودنی بیشتری برای تأثیر بر مقاومت خاک مورد نیاز است. همچنین، در تمامی نمونه‌ها، با افزایش سن نمونه، مقدار مقاومت حداکثر افزایش خواهد یافت. در خصوص کرنش گسیختگی نیز باید اذعان نمود که خاک SC1 با توجه به ماهیت دانه‌ای، کمترین مقدار کرنش گسیختگی (رفتار ترد) را دارد و با افزودن نانواکسید آهن به خاک نیز این مقدار کاهش می‌یابد. اما با افزایش میزان رس موجود در نمونه‌ها، کرنش گسیختگی افزایش می‌یابد که با اضافه نمودن افزودنی مورد نظر، تغییر چندانی در این مقدار ایجاد نمی‌شود.

- اگرچه نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده SC1 به دلیل ماهیت دانه‌ای‌تر آن نسبت به دو نمونه دیگر، مقاومت حداکثر کمتری از خود نشان داده است اما میزان تأثیر نانواکسید آهن بر افزایش مقاومت آن بیشتر بوده است. به طوری که میزان افزایش مقاومت حداکثر در نمونه‌های SC1 در حدود ۲ برابر و برای نمونه‌های SC2 و SC3 در حدود ۱/۴-۱/۶ برابر می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر نانواکسید آهن بر خاک‌های دانه‌ای بیشتر از خاک‌های با درصد ریزدانه زیادتر است. در این میان، خاک SC2 با توجه به درصد رس موجود در خاک

۶. مراجع

- اسکندری نژاد، ر. ۱۳۹۱. "بررسی خاصیت خودترمیمی در لایه‌های رسی و تأثیر پارامترهای گوناگون بر آن". نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، اردیبهشت، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- حیدری، ع. ۱۳۹۵. "بررسی آزمایشگاهی اثر نانوسیلیس و نانواکسید آهن بر روی پارامترهای مقاومتی و تحکیم خاک‌های رسی کرج". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم.
- خسروانی مقدم، ع. و قربانی، ع. ۱۳۹۰. "بررسی اثر نانورس بر خواص مهندسی خاک‌های چسبنده". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- قاضی، ح. ۱۳۸۹. "بررسی تأثیر میزان مصالح در ابعاد نانو بر خواص مهندسی - ژئوتکنیکی خاک". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- کلانتری، ف.، هوشیار، ی. و حامد، س. ۱۳۸۸. "بررسی خودترمیمی خاک‌های رسی با استفاده از آزمایش پین هول". هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، اردیبهشت، دانشگاه شیراز.
- محمدی، م.، جانعلیزاده چوببستی، ع.، فرخزاد، ف. و محمدی، م. ۱۳۹۳. "بررسی تأثیر افزایش مقاومت محصور نشده بر خودترمیمی خاک‌های رسی". پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، انجمن علمی دانشجویی عمران دانشگاه ارومیه.
- هوشیار، ی. ۱۳۸۵. "شناسایی خاک‌های خودترمیم به منظور کنترل رگاب در هسته سدهای خاکی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.
- Azzam, W. R. 2014. "Durability of expansive soil using advanced nanocomposite stabilization". *Int. J. GEOMATE*, 7(1): 927-937.
- Bastiaens, W., Bernier, F. and Li, X. L. 2007. "Experiments and conclusions on fracturing, self-healing and self-sealing processes in clays". *Phys. Chem. Earth*, 32: 600-615.
- Baziar, M. H., Ghazi, H. and Mirkazemi, S. M. 2010. "Effect of nanoclay additives on the properties of engineering geotechnical soil". *Proceedings of the 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Iran.
- Butron, C., Axelsson, M. and Gustafson, G. 2009. "Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behavior and hydraulic conductivity". *Tunn. Underg. Sp. Tech.*, 24(6): 603-607.
- Changizi, F. and Haddad, A. 2015. "Strength properties of soft clay treated with a mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 7(4): 367-378.
- Changizi, F. and Haddad, A. 2017. "Effect of nanocomposite on the strength parameters of the soil". *KSCE J. Civ. Eng.*, 21(3): 676-686.
- Daniel, D. E., Shan, H. Y. and Anderson, J. D. 1993. "Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of geosynthetic clay liners". *Proceedings of Geosynthetics '93*, IFAI, March, 3: 1483-1496.
- Gallagher, P. M. and Finsterle, S. 2004. "Physical and numerical model of colloidal silica injection for passive site stabilization". *Vadose Zone J.*, 3(3): 917-925.
- Iranpour, B. 2016. "The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment". *Eng. Geol.*, 205: 40-53.
- Khalid, N., Arshad, M. F., Mukri, M., Mohamad, K. and Kamarudin, F. 2014. "The properties of nano-kaolin mixed with kaolin". *Electronic J. Geotech. Eng.*, 19: 4247-4255.
- Khalid, N., Arshad, M. F., Mukri, M., Mohamad, K. and Kamarudin, F. 2015. "Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization". *Electronic J. Geotech. Eng.*, 20(2): 731-738.
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. 2008. "Soil Mechanics". SI version, John Wiley and Sons, New York.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (Eds.). 1993. "Fundamentals of Soil Behavior". John Wiley and Sons, New York.
- Noll, M. R., Bartlett, C. and Dochat, T. M. 1992. "In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica". *Proceedings of the Sixth National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring, and Geophysical Methods*, National Ground Water Association, Las Vegas, Nevada, pp. 443-457.
- Taha, M. R. and Ying, T. 2010. "Effects of carbon nanotube on kaolinite: Basic geotechnical behavior". *World J. Eng.*, 7(2): 472-473.
- Taha, M. R. and Taha, F. O. M. E. 2012. "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior". *J. Nanopart. Res.*, 14(10): 1-13.
- Wang, J. J., Zhang, H. P., Zhang, L. and Liang, Y. 2013. "Experimental study on self-healing of the crack in clay seepage barrier". *Eng. Geol.*, 159: 31-35.
- Yonekura, R. and Miwa, M. 1993. "Fundamental properties of sodium silicate based grout". 11th Southeast Asia Geotechnical Conference, Singapore, pp. 439-444.
- Zhang, G., Germaine, J. T., Whittle, A. J. and Ladd, C. C. 2004. Index properties of a highly weathered old alluvium". *Geotech.*, 54(7): 441-451.

Arc