تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۳، مهر و آبان ۱۳۹۶ (ص ۵۲۴-۵۱۵)

بررسی امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی

نادر عباسی[1*]، آرش فرجاد [2]

۱. دانشیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج
۲. دانش‌آموخته کارشناشی ارشد، رشته مهندسی عمران خاک‌وپی، دانشگاه ازاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱ – تاریخ بازنگری: ۲۲/ ۸/ ۱۳۹۵- تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۹/۱۶)

چکیده

با توجه به پیشرفت‌های حاصل در تهیه و کاربرد نانومواد، استفاده از این نوع مواد در علوم مختلف به‌ویژه مهندسی ژئوتکنیک موردتوجه قرار گرفته است. در این پژوهش، اثر افزودن مقادیر مختلف نانورس بر روی پتانسیل واگرایی دو نوع خاک رسی با خاصیت خمیری کم و زیاد بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا آزمایش‌های شناسایی بر روی دو نوع خاک رس و نانورس و سپس آزمایش‌های پین هول بر روی نمونه‌های خاک با مقادیر مختلفی نانورس شامل؛ صفر (خاک طبیعی)، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی خاک با در نظر گرفتن سنین عمل‌آوری ۱، ۳ و ۷ روز انجام گردید. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان دادند که افزودن نانورس به خاک رس واگرا به‌طور کلی موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌گردد. در بررسی تأثیر این ذرات بر روی دو نوع خاک با خمیرایی مختلف نتیجه گردید که تأثیر آن بر هر دو نوع خاک یکسان بوده و خمیرایی خاک نقش مهمی در تأثیر این ذرات بر پتانسیل واگرایی ندارند. همچنین مشخص گردید زمان عمل‌آوری نقش قابل‌ملاحظه‌ای در تثبیت خاک با نانوذرات رس داشته و برای انجام فعل انفعالات شیمیایی موردنیاز برای تثبیت حدود سه روز زمان لازم است.

واژه‌های کلیدی: پین هول، تثبیت خاک، واگرایی، نانورس

مقدمه

خاک تکیه‌گاه تمام سازه‌های عمرانی و در بسیاری موارد بخشی از سازه است. لذا اگر دارای خصوصیاتی باشد که به لحاظ ژئوتکنیکی ایجاد مشکل نماید، می‌تواند تهدیدی جدی برای پایداری بسیاری از سازه‌های ساخت بشر باشد. خاک‌های مشکل‌آفرین خاک‌هایی هستند که در صورت استفاده در سازه‌های خاکی یا به‌عنوان تکیه‌گاه سازه‌ها، مسائل و مشکلاتی را در طول دوران ساخت یا بهره‌برداری ایجاد می‌کنند. از جمله خاک‌های مشکل‌آفرین می‌توان به خاک‌های واگرا، روانگرا، رمبنده، انحلال‌پذیر، آلی و رس‌های روان اشاره کرد (Rahimi and Abbasi, 2015).

واگرایی خاک به این معنی است که ذرات خاک در تماس با آب به حالت شناور درآمده و همراه با جریان نشت از محیط خاک خارج می‌شود و در پی آن فرسایش درونی رخ می‌دهد. ازآنجایی‌که واگرایی خاک در شرایط وجود آب نمود پیدا می‌کند، لذا مشکلات این نوع خاک بیشتر در سازه‌های آبی از قبیل سدها و مخازن آب، کانال‌های انتقال آب، زهکش‌ها و دایک‌های حفاظتی به وجود می‌آیند (Rahimi *et al.*, 2015).

نخستین بار، میدلتون واگرایی را یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک‌های ریزدانه معرفی کرد (Middleton, 1930). فولک وجود خاک‌های رسی واگرا را به‌عنوان علت اصلی خرابی‌های خاکریزها و سدهای خاکی مطرح نمود (Volk, 1937). این پدیده عامل وقوع حوادث فاجعه‌آمیز و ایجاد خسارت‌های قابل‌توجه به تعداد زیادی سد خاکی در سطح جهان شده و طبق برخی گزارش‌ها، بیش از نیمی از سدهای تخریب‌شده جهان به علت واگرایی خاک اتفاق افتاده است (Richards, 2012). در سدهای خاکی، مهاجرت ذرات خاک واگرا در توده پایین دست‌سازه آغاز شده و با پیشروی مسیر فرسایش به سمت بالادست، معبر جدیدی برای خروج سریع‌تر آب ایجاد می‌گردد. افزایش سرعت فرسایش خاک در طول مجرای تراوش، موجب رسیدن مجرا به منبع آب شده که در نتیجه می‌تواند باعث تخریب سازه گردد.

در خاکریزهای متشکل از خاک‌های واگرا، در محل ترک‌ها و درزهای بوجود آمده، در محل تماس خاکریز با پی و در محل ترک‌های انقباضی، فرسایش و آبشستگی رخ می‌دهد. در سازه‌هایی نظیر کانال‌های انتقال آب، فرسایش خاک ممکن است در زیر جداره کانال، داخل خاکریز بدنه و یا زهکش‌ها آغاز

* نویسنده مسئول : Nader_iaeri@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

شده و در نهایت موجب تخریب سازه شود (Rahimi and Abbasi, 2008). لذا شناخت خاک‌های با پتانسیل واگرایی بالا در محل ساختگاه و انتخاب روش‌مناسب برای اصلاح آن از اهمیت بالایی برخوردار است. خاک‌های واگرا اغلب در کشورهای دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک یافت می‌شوند و در ایران در مناطق متعددی نظیر استان‌های خوزستان، سیستان و بلوچستان، مغان و آذربایجان گزارش شده است (Rahimi and Delfi, 1993). با این حال در سال‌های اخیر، خاک‌های واگرا در بسیاری مناطق مرطوب مانند استرالیا، مکزیک، ویتنام، تایلند، برزیل و ونزوئلا نیز مشاهده شده‌اند (Askari and Fakher, 1993).

واگرایی خاک‌های رسی ماهیتی فیزیکی-شیمیایی دارد و در اثر غلبه نیروهای دافعه بین ذرات بر نیروی‌های جاذبه به وقوع می‌پیوندد، در حالی که شسته شدن خاک‌های غیر واگرا ناشی از بالا بودن سرعت جریان آب بوده و ماهیتی فیزیکی-مکانیکی دارد. به‌طور کلی در رس‌های واگرا یون سدیم غالب است، اما در رس‌های غیر واگرا کاتیون‌های با ظرفیت بالاتر کلسیم و منیزیم غالب هستند (Sherard *et al.*, 1976). البته حضور آنیون کلرید در خاک‌های واگرای حاوی کاتیون سدیم موجب کاهش پتانسیل واگرایی و تشکیل ساختمان فلوکوله می‌شود (Abbasi, 2011).

تاکنون روش‌های متعددی برای اصلاح خاک‌های واگرا از قبیل تعویض محل پروژه، تعویض خاک محل اجرای پروژه، تثبیت شیمیایی خاک (با موادی چون آهک، سولفات آلومینیوم، سیمان پرتلند و دیگر مواد افزودنی)، روش الکترواسمز، کنترل فیزیکی واگرایی و استفاده از ژئوسنتتیک‌ها مورد استفاده بوده اند. در سال‌های اخیر نیز استفاده از فناوری‌های نوین از جمله کاربرد مواد پلیمری نظیر پلی وینیل استات و نانوذرات برای تثبیت خاک موردتوجه قرار گرفته است (Rahimi and Abbasi, 2015).

البته انتخاب یک ماده مناسب برای تثبیت و یا تقویت ویژگی خاصی از یک خاک، تابع عوامل متعددی نظیر؛ حجم عملیات موردنیاز، نوع و اهمیت پروژه، هزینه ماده تثبیت‌کننده شرایط و روش‌های اجرایی و حتی مسائل خاص هر پروژه است (Movahedan *et al.*, 2012). این موضوع در مورد استفاده از نانورس نیز صادق بوده و در طرح تثبیت خاک با این ماده ضروری است مسائل فنی و اقتصادی آن با توجه به شرایط و مقتضیات خاص پروژه مورد ارزیابی و در صورت تأمین نیازها و الزامات فنی و اقتصادی نسبت به انتخاب آن به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده اقدام شود.

فناوری نانو از فناوری‌های پیشرفته در سال‌های اخیر می‌باشد که حدود نیم‌قرن پیش به دنیا معرفی شد. ازجمله مسائل و مشکلاتی که افزودنی‌های مختلف به خاک به وجود می‌آورند، آلودگی محیط‌زیست می‌باشد، درحالی‌که نانورس‌ها در عین سازگاری با محیط‌زیست، اثرات بسیار مطلوبی بر روی فرآیندهای مخرب زیست‌محیطی و جذب آلاینده‌های زیست‌محیطی دارند (Ouhadi and Amiri, 2011).

نانورس‌ها جزء نانو ذرات سیلیکاتی هستند که عموماً از خاک رس مونت‌موریلونیت یا اسکمتیت تهیه می‌شوند. سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، دو خصوصیت مهم برای نانورس‌ها به شمار می‌رود. همچنین به‌کارگیری نانورس‌ها در تثبیت خاک نسبت بهروش‌های دیگر به لحاظ فنی و صرفه اقتصادی بسیار مطلوب می‌باشد. امروزه به دلیل شناخت تأثیرات مفید این فناوری در حوزه‌های مختلف محیط‌زیست، مواد، انرژی و امنیت ملی، گرایش به تولید نانومواد و همچنین سرمایه‌گذاری در این حوزه رو به افزایش است. طبق آمار، سالیانه در حدود ۵/۵ بیلیون دلار در زمینه نانوتکنولوژی در سرتاسر جهان سرمایه‌گذاری می‌شود و لذا مطالعه و پژوهش در این زمینه می‌تواند موجب تولید هدفمند محصولات نانومواد گردد.

در زمینه بهسازی خاک‌های مشکل‌آفرین با استفاده از نانورس و همچنین تثبیت خاک‌های واگرا پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر صورت گرفته است. Goodarzi and Salimi (2015) با انجام مطالعات آزمایشگاهی تأثیر دو محصول از زباله‌های صنعتی کارخانجات ذوب‌آهن یعنی سرباره دانه‌ای کوره[1] (GBFS) و سرباره کوره اکسیژنی[2] (BOFS) را بر تثبیت خاک رس واگرا (CH) مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که پتانسیل واگرایی خاک رسی واگرا می‌تواند با افزودن ٪۱۰ BOFS و ٪۲۰-۲۵ GBFS و عمل‌آوری مخلوط به مدت ۷ روز، کاهش یابد. Ouhadi and Goodarzi, (2006) جنبه‌های بنیادین اندرکنش بین خاک رس واگرا و آلوم (آلومینیوم سولفات) را بررسی و نشان دادند که با افزودن آلومینیوم سولفات به خاک رس بنتونیت واگرا، پتانسیل واگرایی کاهش یافته و مقدار بهینه آن ٪۱/۵ است.

Turkoz *et al* (2014) با بررسی اثر محلول منیزیم کلرید را بر روی خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی در سنین مختلف عمل‌آوری بررسی و نشان دادند که افزودن ٪۵ منیزیم کلرید به خاک واگرا، واگرایی خاک را کاهش می‌دهد. Neethu and Remya (2013) با انجام آزمایش‌هایی بر روی مخلوط خاک

1 .Granulated blast furnace slag
2 .Basic oxygen furnace slag

Archive of SID

www.SID.ir

رس CL و CH با نانورس نشان دادند که افزایش نانورس باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و کاهش ضریب تحکیم خاک می‌شود. Majeed *et al* (2014) با انجام آزمایش‌های جمع شدگی الاستیک، خصوصیات تراکمی و مقاومت فشاری محدود نشده بر روی مخلوط خاک و نانو مواد (نانو مس، نانورس، نانو منیزیم) نشان دادند که استفاده از نانورس در تثبیت خاک‌های ریزدانه در افزایش سختی و بهبود مقاومت نمونه خاک، نسبت به دیگر نانومواد تأثیر بیشتری داشته است. Mohammadi and Niazian (2013) به‌منظور ارزیابی تأثیر نانورس بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس، آزمایش‌های تراکم، برش مستقیم، فشاری محدود نشده، CBR و حدود اتربرگ بر روی خاک رس CL و مخلوط شده با درصدهای مختلف نانورس انجام و دریافتند که مقاومت برشی، مقاومت فشاری و CBR خاک با افزایش درصد نانورس تا ٪۱/۵، افزایش یافته و در درصدهای بالاتر کاهش یافته است. Taha and Taha (2012) نشان دادند که افزایش درصد نانورس باعث افزایش کرنش‌های تورمی و انقباضی و حجم کلی خاک شده است و مقدار بهینه نانورس ٪۰/۱ است. Majeed and Taha (2012) با بررسی اثر نانومواد مختلف بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه، دریافتند که از بین نانو ذرات مورد بررسی بیشترین تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری توسط نانورس بوجود آمده است.

بدین ترتیب با عنایت به بررسی منابع و نتایج تحقیقات اتجام شده قبلی ملاحظه می‌گردد که اغلب تحقیقات قبلی در خصوص استفاده از نانو ذرات رس برای بهسازی بر روی خواص مقاومتی آن متمرکز بوده است. همچنین در ارزیابی روش‌ها و مواد مورداستفاده برای کنترل واگرایی خاک استفاده از مصالح ساختمانی مختلفی نظیر سیمان، آهک و غیره و نیز محلول‌های شیمیایی متعددی از جمله سولفات آلومینیوم و کلرید منیزیم موردتوجه بوده است. لذا علیرغم استفاده از نانو رس برای اصلاح خواص مقاومتی خاک و نیز استفاده از مواد متعدد برای کنترل واگرایی، تاکنون استفاده از نانورس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاک موردبررسی و آزمون قرار نگرفته است. از این رو با توجه به پیشرفت‌های فنی حاصل‌شده در زمینه تولید و عرضه مواد نانویی به‌ویژه نانو ذرات رس و جهت‌گیری‌های به وجود آمده جهت استفاده از این مواد در پروژه‌های بهسازی خاک، در این پژوهش چگونگی تأثیر نانورس بر پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی با خواص خمیرایی مختلف که در تحقیقات قبلی مغفول بوده است، به‌عنوان فرضیه اصلی پژوهشی تعریف و مورد آزمون قرار گرفت. علاوه بر این در تحقیقات قبلی زمان عمل‌آوری نمونه‌های تیمار شده نیز، موردتوجه نبوده است. بنابراین، در این پژوهش اثر مقادیر مختلف نانورس بر روی پتانسیل واگرایی دو نوع خاک رسی واگرا با خمیرایی کم و خمیرایی زیاد و همچنین تأثیر زمان‌های عمل‌آوری در فرآیند اصلاح نمونه‌ها نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

معرفی نمونه خاک

در پژوهش حاضر از دو نمونه خاک با خواص خمیرایی مختلف استفاده گردید. نمونه اول از منطقه ایوانکی-شهرری با خمیرایی کم و نمونه دوم و با خمیرایی بیشتر از منطقه مغان در استان اردبیل تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردیدند. نمونه‌ها پس از خشک و آماده‌سازی مورد آزمایش‌های مختلف شناسایی شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم استاندارد پراکتور، طبقه‌بندی بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید و آزمایش تعیین پتانسیل واگرایی به روش پین هول[1] گرفتند.

آزمایش‌های شناسایی خاک

آزمایش دانه‌بندی یکی از آزمایش‌های پایه در مطالعات ژئوتکنیک و روشی کمی برای توزیع دانه‌های یک نمونه خاک است. در این پژوهش آزمایش دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D422 انجام شده است. آزمایش تعیین حدود اتربرگ شامل تعیین حد روانی و حد خمیری خاک مطابق با استاندارد ASTM D4318 انجام شد. آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد طبق استاندارد ASTM D698 انجام شده است.

خاک‌های رسی مورد بررسی جهت شناسایی دقیق‌تر و تعیین میزان کاتیون‌ها، آنیون‌ها، هدایت الکتریکی و اسیدیته، مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه شیمی خاک موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی انجام گرفت.

معرفی نانورس

نانورس[2] مورد استفاده از نوع کلوزایت A۱۵[3] پودری سفیدرنگ با خلوص ٪۹۵/۵ می‌باشد که تولید شرکت پنتا[4] در کشور جمهوری چک بوده است. تمام مشخصات نانورس استفاده‌شده که توسط شرکت تولیدکننده ارائه شده در جداول (۱) و (۲)

1. Pinhole Test
2. Nanoclay
3. Closite 15A
4. PENTA

Archive of SID

www.SID.ir

نشان داده شده است. لازم است قبل از افزودن ماده افزودنی به خاک، میزان خالص بودن آن کنترل گردد. این مهم با انجام آزمایش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) انجام شد.

طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس[1] (XRD)

آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی نمونه نانورس در آزمایشگاه کانی‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور وابسته به وزارت صنعت، معدن و تجارت طبق استاندارد BS EN 13925-1 به‌وسیله دستگاه با مدل Bruker D4 Endeavor انجام شد. دامنه زاویه طیف‌سنجی (Theta۲ یا 2θ) بازه ۷۰°-۴ بوده است.

جدول ۱. مشخصات نانورس

مشخصات	مقدار
اصلاح‌کننده آلی	2M2HT:dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium
غلظت اصلاح‌کننده (meq/100g)	۱۲۵
رطوبت	٪ ۲ >
افت وزنی	۴۳٪
چگالی	۱/۶۶
رنگ	سفید

جدول ۲. اندازه ذرات

۱۰٪ کوچکتر از:	۵۰٪ کوچکتر از:	۹۰٪ کوچکتر از:
2µm	6µm	13µm

آزمایش ارزیابی پتانسیل واگرایی

به لحاظ ژئوتکنیکی، خاک واگرا به آن دسته از خاک‌هایی گفته می‌شود که به دلیل کیفیت یا شرایط خاص فیزیکی یا شیمیائی ذرات آن در مجاورت آب به حالت پراکنده و شناور در آمده و همراه با جریان از محیط خارج می‌گردند. علت اصلی این جدائی یا واگرائی ذرات خاک، غلبه نیروی دافعه بین ذرات بر نیروی جاذبه بین آنها، کاهش یا فقدان چسبندگی و بالاخره کوچکی و سبکی آنها می‌باشد. آزمایش هیدرومتری دوگانه، روش‌های شیمیایی تجزیه عصاره اشباع و آزمایش پین هول از متداول‌ترین آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشند. ازآنجایی‌که واگرایی خاک یک پدیده فیزیکوشیمیایی است که در اثر ترکیب‌های خاصی از نوع و میزان آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در خاک حاصل می‌شود. به دلیل عدم توجه و استفاده از مقادیر آنیون‌های موجود در خاک در ارزیابی مربوط به روش‌های شیمیایی، این روش‌ها قادر به تشخیص صحیح پتانسیل واگرائی نبوده و نتایج حاصل از این روش با تردیدها جدی مواجه است (Abbasi and Nazifi, 2013 & Abbasi, 2011). همچنین بررسی دیگر انجام شده وجود تناقض و خطای فراوان در روش هیدرومتری مضاعف بوده و از میان آزمایش‌های مختلف ارزیابی پتانسیل واگرایی، روش پین هول معتبرترین و قابل اعتمادترین آنهاست (Rahimi and Abbasi, 2015).

معرفی آزمایش سوراخ سوزنی

آزمایش سوراخ سوزنی که در سال ۱۹۷۶ میلادی توسط شرارد[2] و همکاران ابداع شده است، یکی از روش‌های شناسایی خاک‌های واگرا در پروژه‌های خاکی می‌باشد. این آزمایش با استفاده از روشی مستقیم و کیفی طبق استاندارد ASTM D4647، پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی را توسط عبور جریان آب از سوراخ ایجاد نموده در نمونه رده‌بندی می‌کند. رده‌بندی واگرایی خاک‌ها به سه روش A، B و C انجام می‌شود. در روش‌های A و C خاک‌ها به شش رده واگرا (D1, D2)، واگرای کم تا متوسط (ND3, ND4) و غیر واگرا (ND1, ND2) تقسیم می‌شوند. در روش B خاک‌ها به سه رده واگرا (D)، کمی واگرا (SD) و غیر واگرا (ND) تقسیم می‌شوند.

آزمایش تعیین پتانسیل واگرایی خاک توسط دستگاهی موسوم به پین هول انجام می‌شود. این دستگاه شامل یک لوله استوانه به طول ۱۰۰ میلی‌متر، ضخامت جدار ۳ میلی‌متر و قطر ۳۸ میلی‌متر می‌باشد که نمونه آزمایش با مشخصات مشخصی داخل آن متراکم می‌شود. در ابتدا و انتهای نمونه آزمایش، فیلتر ماسه‌ای با دانه‌بندی معین قرار داده می‌شود. سپس از داخل نمونه سوراخی به قطر یک میلی‌متر توسط سوزن مخصوص ایجاد می‌گردد که جریان با ارتفاع هیدرولیکی مختلف شامل ۵۰، ۱۸۰، ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلی‌متر از داخل سوراخ ایجادشده، عبور داده می‌شود.

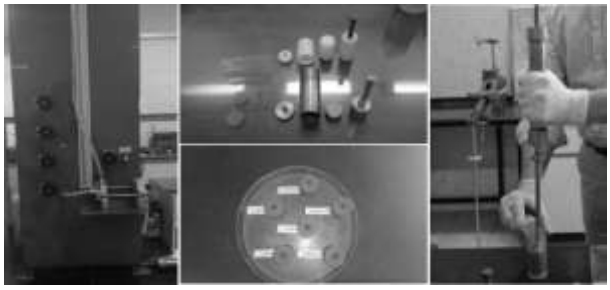
نمایی از دستگاه سوراخ سوزنی، لوازم موردنیاز جهت ساخت نمونه‌های آزمایش، نحوه متراکم نمودن نمونه در قالب دستگاه و نمونه‌های ساخته‌شده با مقادیر مختلف نانورس در شکل (۱) نشان داده شده است.

1. X-Ray Diffraction

2. Sherard

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. دستگاه آزمایش پین هول و تجهیزات ضمیمه (الف- شمای کلی دستگاه، ب- لوازم موردنیاز برای ساخت نمونه آزمایش، ج- نحوه متراکم نمودن نمونه در قالب دستگاه آزمایش، د- نمونه‌های ساخته‌شده با مقادیر مختلف نانورس)

تهیه تیمارهای آزمایش

هدف اصلی پژوهش، ارزیابی تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانورس بر پتانسیل واگرایی مخلوط است. لذا بدین منظور، تیمارهای آزمایش با در نظر گرفتن درصدهای مختلف نانورس آماده شد. جهت ساخت تیمارهای آزمایش، ابتدا خاک رس که در محیط آزمایشگاه خشک شده بود، با چکش لاستیکی و هاون کوبیده شد و پس از عبور دادن از الک ۱۰# (۲ میلی‌متر)، نمونه‌های خاک موردنیاز با وزن نمودن تهیه شد. درصد وزنی به‌صورت نسبت وزن نانورس به وزن خاک خشک در نظر گرفته شد. ۶ سطح نانورس شامل صفر (خاک شاهد)، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی در نظر گرفته شد. در نتیجه، ۶ نوع تیمار آزمایشی برای هر یک از نمونه خاک‌های CL و CH و جمعاً ۱۲ نوع تیمار آزمایشی تهیه شد.

روش آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش

برای ساخت نمونه‌های آزمایش ابتدا نانورس با مقادیر مختلف درصد وزنی در مقداری آب موردنیاز جهت رساندن رطوبت نمونه‌های خاک به محدوده دو درصد رطوبت بهینه متناظر با حالت تراکم در زمان اجرا، مخلوط و به حدی هم زده شد تا مخلوط یکنواختی حاصل گردید. سپس جهت تهیه نمونه‌های آزمایش، مخلوط آب و نانورس به نمونه‌های خاک اضافه شد. نمونه در قالب دستگاه با استفاده از روش و تجهیزات تراکم هاروارد در ۵ لایه و هر لایه با استفاده از چکش فنری ۶/۸ کیلوگرمی که ماهیت تراکم آن استاتیکی است، با ۱۶ ضربه، متراکم شد تا طول نمونه ۳۸ میلی‌متر شود. از هر تیمار ۳ نمونه برای آزمایش پین هول تهیه گردید. قبل از سوراخ نمودن نمونه، طول و وزن نمونه‌ها برای محاسبه میزان تراکم، تعیین و ثبت شد. سپس هدایت‌گر با فشار دست درون نمونه فرو برده شد و با سوزن به قطر ۱ میلی‌متر، سوراخی در مرکز نمونه عمود بر سطح مقطع آن ایجاد شد. به‌منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر واگرایی، نمونه‌های تهیه‌شده از قالب بیرون آورده شد و به مدت ۱، ۳ و ۷ روز در کیسه‌های پلاستیکی در داخل یک محفظه بسته در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شدند.

روش انجام آزمایش

همان‌طور که اشاره گردید، نمونه به همراه ماسه درشت و توری سیمی در قالب دستگاه قرار داده شده و پس از بستن در قالب، تجهیزات مربوط به اعمال هد (آب مقطر) و اندازه‌گیری آن (لوله قائم) وصل می‌شود. در این مرحله از آزمایش، شیر ورود آب به نمونه باید بسته باشد و شیر اندازه‌گیری هد (در صورت وجود) باید باز شود. آزمایش با جریان افقی آب مقطر با هد ۵۰ میلی‌متر نسبت به تراز سوراخ ایجادشده آغاز می‌گردد. نمونه خاک در هد ۵۰ میلی‌متر، دو مرحله ۵ دقیقه‌ای و جمعاً ۱۰ دقیقه و در هدهای بالاتر هرکدام ۵ دقیقه، تحت هد قرار می‌گیرد. در هر مرحله از آزمایش اگر بر اساس کدری و دبی آب خروجی امکان تعیین پتانسیل واگرایی بر اساس معیار ارزیابی باشد، آزمایش تمام‌شده تلقی می‌گردد و پس از بازنمودن قالب، قطر سوراخ اندازه‌گیری و نسبت قطر سوراخ در انتهای آزمایش به قطر سوزن، به همراه دیگر داده‌های آزمایش ثبت می‌گردد. در غیر این صورت مراحل اعمال هد ادامه می‌یابد. آزمایش تحت هد ۱۰۲۰ میلی‌متر اختیاری بوده و غالباً در پروژه‌ها موردنیاز نیست (Anon,2000). با ثبت زمان شروع و انتقال آب خروجی به بشر مدرج می‌توان دبی آب خروجی را در زمان‌های مختلف محاسبه نمود. بر اساس میزان کدری و دبی آب خروجی و همچنین قطر نهایی سوراخ در انتهای آزمایش، خاک از لحاظ میزان پتانسیل واگرایی رده‌بندی می‌شود. در خاک‌های واگرا در هد ۵۰ میلی‌متر قطر سوراخ افزایش یافته و در نتیجه آب خروجی کدر بوده و میزان دبی افزایش می یابد. در خاک‌های واگرای متوسط در هد ۱۸۰ میلی‌متر قطر سوراخ افزایش اندک دارد و آب خروجی نسبتاً شفاف بوده و دبی نیز افزایش اندک می‌یابد. در خاک‌های غیر واگرا تحت هد ۵۰ میلی متر یا ۱۸۰ میلی‌متر قطر سوراخ و دبی ثابت بوده و آب خروجی کاملاً شفاف است. پس از طی شدن مدت زمان لازم جهت عمل‌آوری، آزمایش‌های سوراخ سوزنی طبق استاندارد ASTM D4647 بر روی نمونه‌ها انجام گردید.

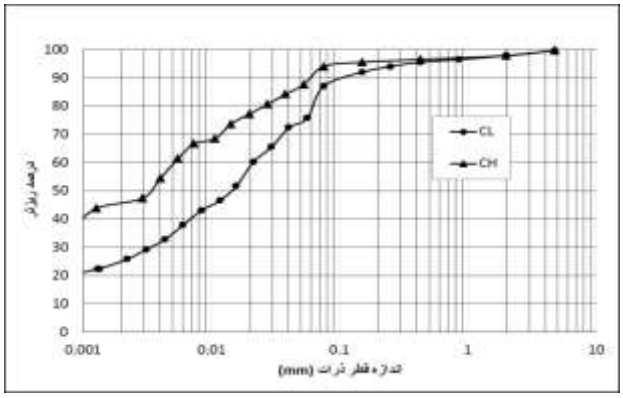
نتایج و بحث

آزمایش‌های شناسایی مطابق با مواردی که در قسمت مواد و روش‌ها بیان گردید انجام گرفت و نتایج آن به شرح زیر ارائه می‌گردد:

نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی بر روی نمونه خاک‌های CL و CH به‌صورت منحنی دانه‌بندی در شکل (۲) ارائه شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی نمونه خاک‌های CL و CH

نتایج کلیه آزمایش‌های شناسایی فیزیکی شامل حدود اتربرگ (حد روانی و حد خمیری) مشخصات تراکمی (رسوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم) و شیمیایی شامل اسیدیته، هدایت الکتریکی، آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در عصاره اشباع نمونه خاک‌های مورد آزمایش مطابق با جدول (۳) ارائه گردیده‌اند.

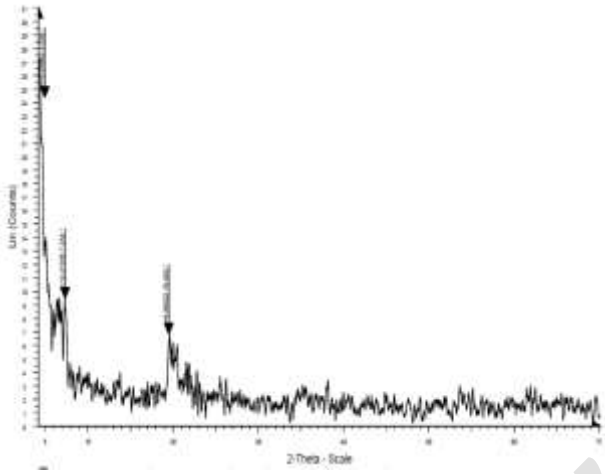
بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ، طبقه‌بندی نمونه خاک‌های موردمطالعه منطقه ایوانکی و مغان طبق سیستم طبقه‌بندی متحد[1] به ترتیب در رده رس با خاصیت خمیری کم (CL) و رس با خاصیت خمیری زیاد (CH) قرار گرفت. همچنین بر اساس نتایج آزمایش‌های تجزیه شیمیایی نمونه خاک CL در رده شوری کم و نمونه خاک CH در رده شوری متوسط قرار دارند.

جدول ۳. نتایج حدود مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها

مشخصه	رس منطقه ایوانکی	رس منطقه مغان
حد روانی LL(%)	۲۸	۵۷
حد خمیری PL(%)	۱۶	۲۲
شاخص خمیری PI(%)	۱۲	۳۵
رطوبت بهینه (%)	۱۶	۲۸
دانسیته خشک ماکزیمم (gr/cm^3)	۱/۷۹	۱/۳۹
طبقه‌بندی خاک طبق سیستم طبقه‌بندی متحد	CL	CH
pH	۷/۷۲	۷/۶۸
EC(dS/m)	۷/۸۵	۱۲/۰۸
(meq/lit) Ca^{2+}	۳۳/۷۵	۱۵
(meq/lit) Mg^{2+}	۱۸/۷۵	۶/۲۵
(meq/lit) Na^{+}	۲۵/۶۵	۸۶/۹۵
(meq/lit) HCo_3^{-}	۵	۱۶/۲۵
(meq/lit) CL^{-}	۱۶/۲۵	۳۲/۵
(meq/lit) So_4^{2-}	۳۲/۲۳	۴۴/۷۵

1. Unified Soil Classification System

نتیجه طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) توسط آزمایشگاه کانی‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور وابسته به وزارت صنعت، معدن و تجارت بر روی نمونه نانورس انجام گرفت که نتیجه در شکل (۳) ارائه گردیده است. بر این اساس نوع کانی‌های رسی آن مونت‌موریلونیت و مطابق شکل (۳) زوایای مربوط به پیک مونت‌موریلونیت به ترتیب از راست به چپ در حدود زوایای °۲θ=۴/۸، °۲θ=۷/۲ و °۲θ=۱۹/۵ می‌باشد. نتیجه نشان داده‌شده در نمودار XRD به‌طور مشخصی خالص بودن نانورس در حدود خلوص ارائه‌شده توسط شرکت سازنده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودار طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس XRD مربوط به نانورس

به دلیل اینکه هدف اصلی از این پژوهش، بررسی تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانورس بر پتانسیل واگرایی دو نوع خاک رسی واگرا با طبقه‌بندی مختلف بود، لذا ابتدا بر روی نمونه‌های خاک CL و CH بدون افزودن نانورس آزمایش پین هول انجام گردید تا از واگرا بودن آن‌ها اطمینان حاصل شود. نتایج مربوط به آزمایش پین هول بر روی نمونه‌های خاک بدون افزودن نانورس و با استفاده از محلول هگزا متافسفات سدیم در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج پین هول بر روی نمونه خاک بدون افزودن نانورس

مشخصه	CL	CH
رده‌بندی پتانسیل واگرایی	**D1**	**D1**
میزان واگرایی	**شدیداً واگرا**	**شدیداً واگرا**

آزمایش‌های پین هول بر روی مخلوط خاک رس با درصدهای مختلف نانورس در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۳ و ۷ روز انجام گردید که نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه خاک‌های CL و CH و نحوه تغییر رده‌بندی واگرایی با افزایش درصد نانورس مطابق جداول (۵) و (۶) می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵. نتایج آزمایش پین هول بر روی نمونه خاک CL

درصد وزنی نانورس	ردەبندی واگرایی			
	بدون عمل‌آوری	۱ روز عمل‌آوری	۳ روز عمل‌آوری	۷ روز عمل‌آوری
۰	D1	D1	D1	D1
۰/۲۵	D1	D2	D2	D2
۰/۵	D1	ND3	ND4	ND4
۱	D1	ND3	ND3	ND3
۲	D1	D2	ND3	ND3
۴	D1	D2	ND3	ND3

جدول ۶. نتایج آزمایش پین هول بر روی نمونه خاک CH

درصد وزنی نانورس	ردەبندی واگرایی			
	بدون عمل‌آوری	۱ روز عمل‌آوری	۳ روز عمل‌آوری	۷ روز عمل‌آوری
۰	D1	D1	D1	D1
۰/۲۵	D1	D2	D2	D2
۰/۵	D1	ND3	ND4	ND4
۱	D1	ND3	ND3	ND3
۲	D1	D2	ND3	ND3
۴	D1	D2	ND3	ND3

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جداول مذکور ملاحظه می‌گردد که به‌طورکلی با افزایش درصد نانورس، پتانسیل واگرایی خاک کاهش یافته است. این کاهش تدریجی بوده و در مقدار ۱ درصد نانورس، پتانسیل خاک شدیداً واگرا (D1) به رده نسبتاً واگرا (ND3) تغییر یافته است؛ به عبارت دیگر افزودن نانورس به خاک واگرا باعث کنترل پتانسیل واگرایی خاک و تثبیت آن می‌گردد. این امر را می‌توان به تغییر ماهیت شیمیایی خاک در اثر تبادل کاتیونی و آنیونی در خاک نسبت داد. به‌طوری‌که ذرات نانورس به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و در نتیجه ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد باعث انسجام و چسبندگی خاک می گردند (Borchardt, 1984). در این رابطه نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن نانورس به خاک رس باعث تغییر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی رفتار فیزیکی-شیمیایی و خواص مهندسی خاک و افزایش سختی و بهبود مقاومت آن می‌شود (Majeed and Taha, 2013& Majeed *et al*., 2014).

تأثیر ذرات نانو رس بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های رسی به‌طور اعم و تأثیر آن بر کاهش پتانسیل واگرایی به‌طور اخص با مفاهیم مربوط به تئوری لایه دوگانه پخشیده[1] مطابقت داشته و قابل تفسیر است. بدین‌صورت که هرچه ضخامت لایه دوگانه بیشتر شود ذرات رس از هم دورتر و موجب کاهش جاذبه بین ذرات می‌شوند (Hieu and Nguyen, 2014& Sparks,2000). لذا هر عاملی که باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه شود باعث افزایش نیروی‌های جاذبه بین ذرات نسبت به نیروی‌های دافعه بین آنها خواهد شد. همچنین غلظت و نسبت جذب سدیم (SAR) محلول خاک از مهمترین عوامل مؤثر در ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه تورم پذیری خاک هستند. به‌طوری‌که ضخامت لایه دوگانه با افزایش غلظت محلول کمتر ولی با افزایش نسبت جذب سدیم بیشتر می‌شود (Sparks,2000). از طرفی یون‌هایی نظیر پتاسیم، کلسیم، آمونیوم و هیدروژن موجب کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده و یون سدیم به دلیل شعاع هیدراته بیشتر موجب افزایش آن می‌شوند (Majeed and Taha, 2013). وقتی‌که ذرات نانورس با سطح ویژه خیلی زیاد به خاک رسی افزوده می‌شود باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و جایگزینی سریع یون سدیم با سایر کاتیون‌های تشکیل‌دهنده نانو رس می‌گردد. بدین ترتیب با خارج شدن سدیم از فاز تبادلی نسبت سدیم به سایر کاتیون‌ها و به عبارتی نسبت جذب سدیم (SAR)، کاهش و از سوی دیگر غلظت محلول خاک افزایش می‌یابد. این عوامل نهایتاً باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده و درنتیجه کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌گردد.

همچنین با مقایسه نتایج آزمایش‌های پین هول در جداول (۵) و (۶) می‌توان مشاهده نمود که افزودن نانورس به هر دو خاک رس CL و CH واگرا، تأثیر مشابهی بر روی پتانسیل واگرایی در روزهای عمل‌آوری مختلف داشته است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت نحوه عمل ذرات نانو رس در هر دو نمونه خاک تقریباً یکسان بوده است. همان‌طوری‌که اشاره گردید مکانیزیم عمل و تأثیر نانو رس به خاطر تبادل کاتیونی بین ذرات رس و ماده نانورس است. لذا با توجه به اینکه هر دو نوع خاک از نوع رسی بوده و دارای مقادیر کافی ذرات رس برای انجام این فرآیند را داشته‌اند، مکانیزیم یادشده در هر دو خاک امکان‌پذیر بوده است. نکته قابل‌ذکر در اینجا این است که خاصیت خمیرایی رس‌ها نقش مهمی در وقوع این مکانیزم نداشته‌اند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در هر خاک ریزدانه رسی که به مقدار کافی ذرات رس با قابلیت تبادل کاتیونی داشته باشند این پدیده صورت گرفته و موجب کاهش پتانسیل واگرایی آن خواهد شد.

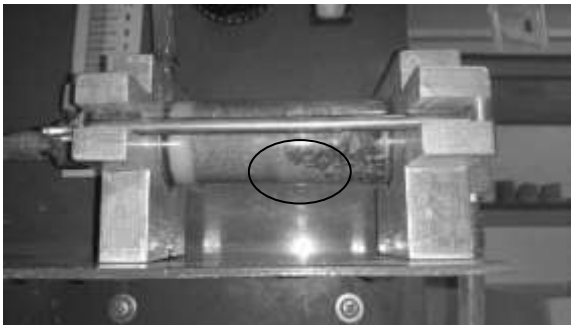
نکته حائز اهمیت دیگر در نتایج ارائه‌شده در جداول (۵ و ۶) تأثیر زمان عمل‌آوری در کاهش پتانسیل واگرایی است. مطابق جداول مذکور افزودن نانورس با مقادیر مختلف در نمونه‌های بدون عمل‌آوری (انجام آزمایش بلافاصله بعد از

1. Diffussed Double Layer

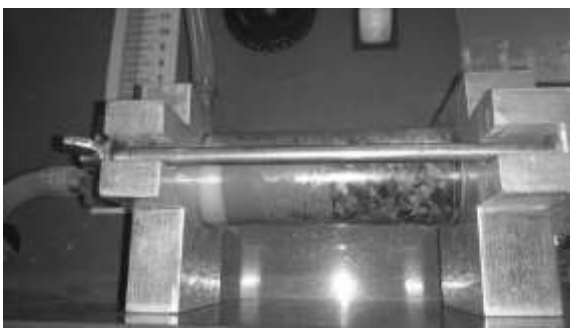
Archive of SID

www.SID.ir

افزودن نانورس) تأثیری در پتانسیل واگرایی نداشته‌اند. درحالی‌که با یک روز عمل‌آوری تأثیر آن مشهود بوده و با افزایش زمان عمل‌آوری بر میزان این تأثیر نیز افزوده گردیده است. دلیل این امر نیز به پدیده شیمیایی و مکانیزم تأثیر نانورس بر رفتار خاک رسی است. بدین معنی که برای وقوع فعل‌وانفعالات شیمیایی و تبادل یونی بین ذرات و به تعادل رسیدن تبادل کاتیونی و آنیونی نیاز به فرصت و زمان کافی است. به‌طورکلی در مقایسه بین زمان‌های عمل‌آوری می‌توان بیان نمود که مدت زمان ۱ روز و کمتر از آن فرصت کافی جهت انجام فعل‌وانفعالات شیمیایی لازم و تبادل کاتیونی به مخلوط داده نمی‌شود ولی زمان‌های ۳ و ۷ روز در این خصوص کافی به نظر می‌رسد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده برای مدت‌زمان عمل‌آوری ۳ و ۷ روز مشابه یکدیگر می‌باشد و تفاوتی در این زمینه مشاهده نمی‌شود. این بدان معنی است که سه روز زمان کافی برای وقوع فعل انفعالات شیمیایی بوده است. چگونگی انجام فرسایش و ورود ذرات خاک به داخل فیلتر ماسه‌ای برای نمونه خاک بدون افزودن نانورس در ۵ دقیقه ابتدای آزمایش در هد ۵۰ میلی‌متر در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۵) نمونه خاک با ۴٪ نانورس را حین آزمایش در هد ۵۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، هیچ‌گونه شستگی در ابتدای آزمایش در نمونه به وجود نیامده است.

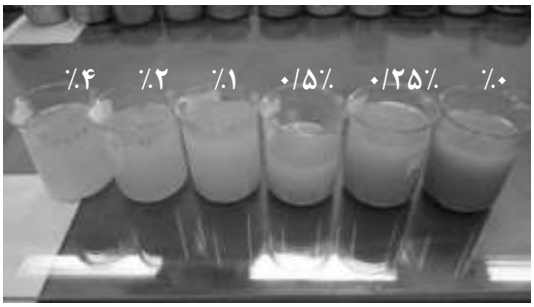


شکل ۴. شستگی خاک واگرا بدون نانورس در هد ۵۰ میلی‌متر



شکل ۵. عدم شستگی خاک واگرا با ۴٪ نانورس در هد ۵۰ میلی‌متر

شکل (۶) آب خروجی تحت هد ۵۰ میلی‌متر در ۵ دقیقه ابتدای آزمایش بر روی نمونه‌های هفت روز عمل‌آوری را نشان می‌دهد. یکی از معیارهای ارزیابی میزان واگرایی کدری آب خروجی می‌باشد و این معیار گواهی بر مقدار ذرات شسته شده است. لذا همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، تیرگی آب خروجی با افزایش درصد نانورس کاهش یافته است، علت این موضوع این است که افزایش درصد نانورس و عمل‌آوری مناسب نمونه‌ها، موجب افزایش چسبندگی ساختاری خاک و به وجود آمدن ساختار فلوکوله و در نتیجه باعث کاهش فرسایش ذرات شده است.



شکل ۶. آب خروجی نمونه‌های ۷ روز عمل‌آوری شده با درصدهای مختلف نانورس در هد ۵۰ میلی‌متر

مطابق شکل (۷) چون تیرگی آب خروجی در نمونه‌های با نانورس بیشتر از ٪۰/۲۵، کم بوده است، افزایش هد طبق روند استاندارد آزمایش در این نمونه‌ها ادامه یافته و قطر سوراخ، دبی و تیرگی آب در انتها، ملاک ارزیابی واگرایی قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر افزودن نانورس بر پتانسیل واگرایی دو نمونه خاک ریزدانه رسی با خاصیت خمیری کم و زیاد مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده، نتیجه‌گیری‌ها و یافته این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌گردد:

نتایج آزمایش پین هول نشان داد که افزودن نانورس به خاک‌های رسی با پلاستیسیته کم و زیاد واگرا، به‌طورکلی سبب کاهش پتانسیل واگرایی می‌شود. لذا با در نظر گرفتن سایر شرایط فنی و اقتصادی پروژه‌ها می‌توان از این مواد در کنترل واگرایی خاک استفاده نمود.

مدت‌زمان عمل‌آوری نمونه و حفظ شرایط تراکم، تأثیر قابل‌توجهی در نتایج آزمایش دارد. به‌طوری‌که افزودن نانورس به خاک بدون عمل‌آوری، تأثیری بر پتانسیل واگرایی نداشته است.

مدت‌زمان لازم برای انجام فعل انفعالات شیمیایی

Archive of SID

www.SID.ir

موردنیاز برای تثبیت خاک بسته به میزان ماده نانو رس متفاوت بوده و این زمان برای مقادیر نانورس کمتر از یک درصد حدود یک روز و برای مقادیر بیشتر از یک درصد حدود سه روز است.

نتایج آزمایش پین هول در شرایط عمل‌آوری یک روز نشان داد که درصدهای مطلوب نانورس ۰/۵ و ۱ درصد وزنی می‌باشد که در این شرایط پتانسیل واگرایی خاک از رده‌بندی شدیداً واگرا به رده‌بندی نسبتاً واگرا تغییر یافته است. مقادیر بیشتر از ۱ درصد نانورس، تأثیر کمی بر پتانسیل واگرایی خاک واگرا دارد و رده‌بندی واگرایی خاک را از شدیداً واگرا (D1) به واگرا (D2) تغییر داده است. این مسئله حاکی از آن است که با عمل‌آوری ۱ روزه، فرصت کافی به انجام فعل‌وانفعالات شیمیایی در درصدهای بیش از یک درصد را فراهم نمی‌سازد.

در نمونه‌هایی که سنین عمل‌آوری آن‌ها بیشتر از یک روز (۳ و ۷ روز) می‌باشد، ملاحظه گردید که با افزایش درصد نانورس، پتانسیل واگرایی خاک کاهش می‌یابد

از نتایج آزمایش‌های پین هول بر روی دو نمونه خاک رسی واگرا با خاصیت خمیری متفاوت مشاهده شد که در دو نمونه خاک، تأثیر افزودن درصدهای مختلف نانورس و همچنین عمل‌آوری نمونه‌ها در سنین عمل‌آوری ۱، ۳ و ۷ روز، به‌جز تفاوت‌های اندک در میزان دبی خروجی، رفتار مشابهی در تغییر پتانسیل واگرایی دارند. لذا چنین نتیجه‌گیری گردید که تأثیر نانورس بر هر دو نوع خاک یکسان بوده و خمیرایی خاک نقش مهمی در تأثیر این ذرات بر پتانسیل واگرایی ندارند.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان این مقاله از مدیریت و کارکنان موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی جهت مساعدت و ارائه امکانات موردنیاز برای انجام این پژوهش، قدردانی و سپاسگزاری می‌نمایند.

REFERENCES

Abbasi, N. (2011). The role of anions in dispersion potential of clayey soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12(3), IAERI, pp. 15-30 (In Farsi)

Abbasi, N. and Nazifi, M.H., (2013), "Assessment and modification of Sherard chemical method for evaluation of dispersion potential of soils", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 31(1), 337-346.

Anon, (2000). *Annual Book of ASTM Standards*. Vol. 04.08, Soil and Rock, ASTM D4647

Askari, F. and Fakher, A. (1993). *Swelling and dispersivity of soils: from geotechnical engineer point of view*. University of Tehran Press. (In Farsi)

Hieu, P. and Nguyen, Q. P., (2014). Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions. *Journal of Nanoparticle Research.* 16(1).

Huang, T. (2011).Clay Stabilization with Nanoparticles. Patent No. US 20110000672 A1. US 12/277,825

Goodarzi, A.R. and Salimi, M. (2015). Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. *Journal of Applied Clay Science*, Vol. 108, 61-69.

Majeed, Z.H. and Taha, M.R. (2012). Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a penang soil. *Journal of Asian Scientific Research*, 2(11), 587-592.

Majeed, Z.H. and Taha, M.R. (2013). A review of stabilization of soils by using nanomaterials. Australian. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(2), 576-581.

Majeed, Z.H., Taha, M.R. and Jawad, I.T. (2014). Stabilization of soft soil using nanomaterials. *Research Journal of Applied Sciences*, 8(4), 503-509.

Makusa, G. P. (2013). *Soil Stabilization methods and materials in engineering practice*. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Lulea University of Technology.

Middleton, H.E. (1930). *Properties of soils which influence soil erosion*. United States Department of Agriculture. Bulletin. 178.

Mohammadi, M. and Niazian, M. (2013). Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of rasht clay. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, 3(3). 37-46.

Movahedan, M., Abbasi, N., and M. Keramati. 2011. Experimental investigation of polyvinyl acetate polymer application for wind erosion control of soils. *Journal of Water and soil (Agricultural Science and Technology)* , 25(2), 606-616.

Movahedan, M., Abbasi, N., and M. Keramati. 2012. Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science*. 1(2), 81 –86.

Neethu, S.V. and Remya, S. (2013). Engineering behaviour of nanoclays stabilized soil. In: *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, 22-24 December, Roorkee University, 17 4 TH-13.

Ouhadi, V.R. and Amiri, M. (2011). Geo-environmental behavior of nanoclays in interaction with heavy metal contaminants. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 42(3), 29-36.

Ouhadi, V.R. and Goodarzi, A.R. (2006). Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum. *Journal of Engineering Geology*, Vol. 85, 91-101.

Archive of SID

www.SID.ir

Rahimi H., N. Abbasi. (2008). Failure of Concrete Canal Lining on Fine Sandy Soils (A case study for Saveh Project). *J Irrig Drain Eng*. 57, 83-92

Rahimi H., Abbasi, N., H. Shantia. (2011). Application of geomembrane to control piping of sandy soil under concrete canal lining (case study: Moghan irrigation project, Iran). *J Irrig Drain Eng*. 60, 330-337

Rahimi, H. and Abbasi, N. (2015). *Geotechnical engineering: problematic soils*. University of Tehran Press. (In Farsi)

Rahimi, H. and Delfi, M. (1993). New chemical method for valuation of soil dispersivity. *2nd. Int. Conf. of soil Mech. and Found. Eng*., Tehran, Iran.

Richards, K.S. (2012). Internal erosion-potential failure modes. Federal Energy Regulatory Commission Report, Feb., No. 31.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Decker, R.S. (1976). Identification and nature of dispersive soils. *Journal of Geotechnical Division, Proceeding* ASCE, 102, 287-301.

Sparks, Donald. 2000. *Soil Physical Chemistry*. CRC Press, Florida, 33431.

Taha, M.R. and Taha, O.M.E. (2012). Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. *Journal of Nanopart Res*, 14(10), 1190.

Turkoz, M., Savas, H., Acaz, A. and Tosum, H. (2014). The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. *Applied Clay Science*, 101, 1-9.

Volk, G.M. (1937). Method of Determination of Degree of Dispersion of the Clay Fraction of Soils. In*: Proceedings of Soil Science Society of America*, 2, 561-567.

Archive of SID

www.SID.ir