

استفاده از نانو ذرات رس برای تثبیت خاک‌های رسی متورم شونده

آرش فرجاد^۱ و نادر عباسی^{۲*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۷/۱۰)

چکیده

برای مقابله با تأثیرات مخرب خاک‌های تورم پذیر، روش‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده است. تثبیت شیمیایی خاک‌های متورم شونده یکی از روش‌های مؤثر می‌باشد که به لحاظ اقتصادی و فنی، کم هزینه و کارآمد می‌باشد. اخیراً با پیشرفت علم نانو در زمینه تهیه و کاربرد نانومواد، استفاده از این نوع مواد در علوم مختلف به‌ویژه مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه خاصی قرار گرفته است. در این پژوهش، اثر افزودن مقادیر مختلف نانورس بر روی اصلاح خصوصیات تورمی دو نوع خاک رسی با خاصیت خمیری کم و زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا آزمایش‌های شناسایی بر روی دو نوع خاک رس و نانورس و سپس آزمایش‌های پتانسیل تورم بر روی نمونه‌های خاک با مقادیر مختلفی نانورس (شامل ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی) با در نظر گرفتن سنین عمل آوری ۳ و ۱۰ روز انجام گردید. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان دادند که تأثیر افزودن نانورس بر پتانسیل تورم خاک رسی با خمیرایی زیاد (CH) بیشتر از خاک با خمیرایی کم (CL) است. به طوری که با افزودن حدود ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد وزنی از نانورس، پتانسیل تورم در خاک‌های رسی با خمیرایی زیاد حدود ۶۷ درصد و در خاک رسی با خمیرایی کم نزدیک به ۳۰ درصد پتانسیل تورم خاک کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید بیشترین تأثیر نانو رس بر پتانسیل خاک با افزودن نانورس به میزان تا ۰/۵ درصد حاصل می‌شود و با افزایش مقدار نانورس از این مقدار، از میزان تأثیر در پتانسیل تورمی خاک کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل تورم، تثبیت، فشار تورم، نانورس

۱. گروه خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
۲. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: nader_iaeri@yahoo.com

مقدمه

پیش مرطوب سازی، تعویض خاک محل اجرای پروژه، تثبیت شیمیایی خاک (با موادی چون آهک، سیمان پرتلند، قیر و دیگر مواد افزودنی)، روش الکتروشیمیایی، ایجاد مانع رطوبتی در پژوهش‌های قبلی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۱۱، ۱۸). نانورس‌ها جزء نانو ذرات سیلیکاتی هستند که عموماً از خاک رس مونت موریلونیت یا اسکمتیت تهیه می‌شوند. سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، دو خصوصیت مهم برای نانورس‌ها به شمار می‌رود. همچنین به کارگیری نانورس‌ها در تثبیت خاک نسبت به روش‌های دیگر به لحاظ فنی و صرفه اقتصادی بسیار مطلوب می‌باشد. امروزه به دلیل شناخت تأثیرات مفید این فناوری در حوزه‌های مختلف محیط زیست، 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 بلیون دلار در زمینه نانو تکنولوژی در سرتاسر جهان سرمایه‌گذاری می‌شود و لذا مطالعه و پژوهش در این زمینه می‌تواند موجب تولید هدفمند محصولات نانومواد گردد. فناوری نانو از فناوری‌های پیشرفته در سال‌های اخیر می‌باشد که حدود نیم قرن پیش به دنیا معرفی شد. از جمله مسائل و مشکلاتی که افزودنی‌های مختلف به خاک به وجود می‌آورند، آلودگی محیط زیست می‌باشد، در حالی که نانورس‌ها در عین سازگاری با محیط زیست، اثرات بسیار مطلوبی بر روی فرآیندهای مخرب زیست محیطی و جذب آلاینده‌های زیست محیطی دارند (۱۶).

در سال‌های اخیر، در زمینه بهسازی خاک‌های مشکل آفرین و همچنین تثبیت خاک‌های تورم پذیر با استفاده از تثبیت کننده‌های مدرن نظیر مواد پلیمری، پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است (۱۳، ۱۴). یادو و تریپاتی با انجام مطالعات آزمایشگاهی تأثیر سرباره دانه ای کوره (GBS) را بر تثبیت خاک رس متورم شونده مورد بررسی قرار دادند (۲۲). نتایج آزمایش پتانسیل تورم نشان داد که با افزودن ۹٪ (GBS) تورم آزاد به مقدار ۶۷٪ و فشار تورم نیز به مقدار ۲۱٪ کاهش می‌یابد. همچنین همین مقدار (GBS)، موجب افزایش مقاومت فشاری خاک شده است. ژانگ و همکاران تأثیر ژئوپلیمر بدون کلسیم

خاک متورم شونده خاکی است که در اثر تغییر رطوبت، دچار افزایش (تورم) و یا کاهش حجم (انقباض) می‌شود. پراکنش خاک‌های متورم شونده تقریباً بی‌ارتباط با شرایط اقلیمی بوده و تقریباً در همه مناطق جهان، اعم از خشک، نیمه‌خشک، گرم و مرطوب به چشم می‌خورد (۱). پدیده تورم عبارتست از واکنش فیزیکوشیمیایی خاک و محیط که مقدار تغییر شکل ناشی از آن بستگی به شدت نیروهای جاذبه و دافعه فیزیکی و شیمیایی دارد (۲). خاک‌های متورم شونده یکی از انواع خاک‌های مشکل آفرین می‌باشد که باعث ایجاد خسارات زیادی در بهره برداری از سازه‌های بنا شده بر روی آنها می‌شوند (۱۷). مشکل وجود خاک متورم شونده، ایجاد خسارت‌هایی نظیر ترک خوردگی، جابه‌جایی، کج شدگی، بالا زدگی و حتی تخریب سازه در اثر تولید فشار و تغییر شکل می‌باشد. در مورد خاک‌های متورم شونده و مشکلات ناشی از آن نیز می‌توان به این مطلب اشاره نمود که طبق بررسی‌های صورت گرفته، خساراتی که این پدیده برای سازه‌های مختلف به وجود آورده، از کل حوادث طبیعی مانند زمین لرزه و سیل بیشتر است. نوع عوارض ناشی از پدیده تورم ممکن است بسته به نوع خاک و نوع سازه متفاوت باشد. از جمله خسارت‌های به وجود آمده در اثر تورم خاک می‌توان به ترک‌های قطری در دیوار، جدا شدگی دیوار از کف سازه، گیر کردن درب‌ها، ترک در پوشش کف، بالا آمدن دال کف و قوس برداشتن دیوارها اشاره نمود (۱). مقدار تورم و انقباض خاک‌ها بستگی کامل به نوع کانی‌های رسی، نوع و مقدار کاتیون‌های جذبی و پیوند مولکولی بین آنها دارد (۳، ۴). به گونه‌ای که کانی مونت موریلونیت به‌عنوان متورم شونده‌ترین نوع کانی‌های رس در مقایسه با ایلیت و کائولینیت شناخته شده است (۲). اگر چه مقدار تورم خاک‌های حاوی کانی‌های ایلیت و کائولینیت نسبت به خاک‌های حاوی کانی مونت موریلونیت کمتر است، اما پتانسیل تورم پنهان این کانی‌ها در صورت فراهم بودن شرایط مورد نیاز، می‌تواند قابل توجه و خطر آفرین باشد (۱۹). روش‌های معمول اصلاح خاک‌های متورم شونده از قبیل

بررسی اثر نانومواد بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه، آزمایش های تراکم، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری را بر روی نمونه های مخلوط خاک ریزدانه و درصد های مختلفی از Nanoclay و Nano MgO و Nano CuO انجام داده اند و مشاهده نمودند که بیشترین تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری توسط نانورس به وجود آمده است (۹).

بررسی سوابق تحقیقات محققین پیشین در رابطه با تثبیت خاک های متورم شونده و استفاده از نانومواد به خصوص نانورس در بهسازی خاک های مشکل آفرین رسی، نشان داد که تحقیقات در زمینه تأثیر نانورس بر خصوصیات تورمی خاک های رسی با طبقه بندی مختلف محدود است. لذا، در این پژوهش اثر افزودن مقادیر مختلف نانورس بر روی خصوصیات تورمی دو نوع خاک رس با پلاستیسیته کم (CL) و پلاستیسیته زیاد (CH) و همچنین تأثیر زمان های عمل آوری نمونه ها در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش ها

معرفی نمونه خاک

برای انجام این پژوهش، دو نمونه خاک از منطقه ایوانکی - شهر ری و منطقه مغان تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید. ابتدا آزمایش های شناسایی بر روی نمونه های خاک انجام گرفت. پس از حصول اطمینان از مناسب بودن نمونه های خاک، تیمارهای آزمایش مختلفی ساخته شد و آزمایش های پتانسیل تورم بر روی تیمارها انجام گرفت.

آزمایش های شناسایی خاک

آزمایش دانه بندی یکی از آزمایش های پایه در مطالعات ژئوتکنیک و روشی کمی برای توزیع دانه های یک نمونه خاک است. در این پژوهش آزمایش دانه بندی به روش الک و هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D۴۲۲ انجام شده است. آزمایش تعیین حدود اتربرگ شامل تعیین حد روانی و حد خمیری خاک مطابق با استاندارد ASTM D۴۳۱۸ انجام شد. آزمایش تراکم به دو روش

را بر روی خاک های با سولفات زیاد مورد ارزیابی قرار دادند و بدین منظور آزمایش های مقاومت فشاری و پتانسیل تورم بر روی نمونه های خاک با ژئوپلیمر پایه متاکائولین انجام دادند (۲۳). نتایج آزمایش پتانسیل تورم نشان می دهد که با افزودن ژئوپلیمر به خاک رس، درصد تورم کاهش یافته است. کلکان اثر سیکل های تر و خشک شدگی بر رفتار تورمی خاک های رسی با خاصیت خمیری بالا (CH) را مورد بررسی قرار داد (۸). بدین منظور آزمایش های مکانیکی و پتانسیل تورم را بر روی خاک رسی با خاصیت خمیری بالا (CH) با استفاده از سیلیکا فوم با مقادیر مختلف انجام دادند. نتایج آزمایش ها حاکی از آن است که فشار تورم و درصد تورم با افزایش سیکل های تر - خشک شدگی و همچنین افزایش درصد سیلیکا فوم کاهش یافته است. عباسی و همکاران با انجام آزمایش پین هول بر روی دو نوع خاک رسی نشان دادند افزودن نانورس موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک های رسی می شود (۵). نیتو و رمیا با انجام آزمایش هایی بر روی مخلوط خاک رس CL و CH با نانورس نشان دادند که افزایش نانورس باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری و کاهش ضریب تحکیم خاک می شود (۱۵). مجید و همکاران با انجام آزمایش های جمع شدگی الاستیک، خصوصیات تراکمی و مقاومت فشاری محدود نشده بر روی مخلوط خاک و نانو مواد نشان دادند که استفاده از نانورس در تثبیت خاک های ریزدانه در افزایش سختی و بهبود مقاومت نمونه خاک، نسبت به دیگر نانومواد تأثیر بیشتری داشته است (۱۱). محمدی و نیازیان به منظور ارزیابی تأثیر نانورس بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس، آزمایش های تراکم، برش مستقیم، فشار محدود نشده، CBR و حدود اتربرگ بر روی خاک رس CL و مخلوط شده با درصد های مختلف نانورس انجام دادند و دریافتند که مقاومت برشی، مقاومت فشاری و CBR خاک با افزایش درصد نانورس تا ۱/۵٪، افزایش یافته و در درصد های بالاتر کاهش یافته است (۱۲). طاهای و طاهای با انجام آزمایش هایی به منظور بررسی تأثیر نانو مواد بر رفتار تورمی و انقباضی خاک، آزمایش هایی بر روی خاک رس، نشان دادند که افزایش درصد نانورس باعث افزایش کرنش های تورمی و انقباضی و حجم کلی خاک شده است و مقدار بهینه نانورس ۰/۱٪ بوده است (۲۱). مجید و طاهای جهت

جدول ۲. نتایج حدود اتربرگ نمونه‌های خاک			جدول ۱. مشخصات نانورس مورد استفاده	
رس منطقه	رس منطقه	مشخصه	مقدار	مشخصات
مغان	ایوانکی	حد روانی LL(%)	۲M۲HT:dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium	اصلاح کننده آلی
۷۰	۳۲	حد خمیری PL(%)	۱۲۵	غلظت اصلاح کننده (meq/۱۰۰g)
۳۰	۲۰	شاخص خمیری PI(%)	< ۲ %	رطوبت
۴۰	۱۲	حد انقباض SL(%)	۴۳ %	افت وزنی
۱۶	۱۷	طبقه بندی خاک طبق سیستم طبقه بندی متحد	۱/۶۶	چگالی
CH	CL	توده ویژه (Gs)	سفید	رنگ
۲/۷	۲/۶۵	عدد فعالیت (A)	۷۵۰	سطح ویژه (m ² /g)
۰/۹	۰/۴۸		۹۰ درصد کوچکتر از ۱۳ μm	اندازه ذرات

استاندارد ۱-۱۳۹۲۵ BS EN به وسیله دستگاه Bruker مدل Endeavor D۴- انجام شد. دامنه زاویه طیف سنجی (۲θ) یا (۲Theta) بازه ۷۰° - ۴ بوده است.

آزمایش تعیین پتانسیل تورم

معرفی آزمایش پتانسیل تورم

در این آزمایش، پتانسیل تورمی خاک با استفاده از دستگاه تحکیم یک بعدی یا ادومتر براساس استاندارد ASTM D۴۵۴۶ ارزیابی می‌گردد. برای انجام آزمایش، نمونه دست نخورده و یا بازسازی شده خاک مورد نظر در حلقه فلزی دستگاه تحکیم قرار داده شده و آزمایش در یکی از سه حالت زیر انجام می‌گیرد:

۱) در حالت اول، نمونه در ابتدا تحت سربار کوچک (۷ کیلو پاسکال) قرار داده شده و سپس غرقاب می‌شود و به نمونه اجازه داده می‌شود تا آزادانه متورم شود. پس از کامل شدن تورم، مقدار تغییر ضخامت نمونه تعیین و به صورت درصدی از ارتفاع اولیه، به عنوان درصد تورم آزاد ثبت می‌شود. در این پژوهش از این روش استفاده شده است.

۲) در حالت دوم، نمونه در ابتدا تحت فشار سربار معینی قرار داده شده و سپس غرقاب می‌گردد و همانند روش قبل پس از کامل شدن تورم، مقدار آن به صورت درصدی از ارتفاع اولیه نمونه بیان می‌شود، با این تفاوت که در روش اخیر،

پراکتور استاندارد طبق استاندارد ASTM D۶۹۸ روش اصلاح شده طبق استاندارد STM D۱۵۵۷ 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 مورد استفاده از نوع کلوزایت ۱۵A (Closite ۱۵A) پودری سفید رنگ با خلوص ۹۵/۵٪ می‌باشد که تولید شرکت پنتا (PENTA) در کشور جمهوری چک بوده است. مشخصات نانورس استفاده شده که توسط شرکت تولید کننده ارائه شده، در جدول (۱) نشان داده شده است.

لازم است قبل از افزودن ماده افزودنی به خاک، میزان خالص بودن آن کنترل گردد. این مهم با انجام آزمایش طیف سنجی پراش اشعه ایکس (X-Ray Diffraction) انجام شد.

طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)

آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی نمونه نانورس در آزمایشگاه کانی شناسی سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور وابسته به وزارت صنعت، معدن و تجارت طبق



شکل ۱. مراحل آماده سازی نمونه آزمایش پتانسیل تورم

برابر انرژی استاندارد پراکتور بوده و دارای دانسیته خشک ماکزیمم و پتانسیل تورمی زیادتری نیز است، ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌های آزمایش ابتدا نانورس با مقادیر مختلف درصد وزنی در مقداری آب مورد نیاز جهت رساندن رطوبت نمونه‌های خاک به محدوده رطوبتی در طرف خشک منحنی رطوبت، مخلوط و به حدی هم‌زده شد تا مخلوط یکنواختی حاصل گردید. سپس جهت تهیه نمونه‌های آزمایش، مخلوط آب و نانورس به نمونه‌های خاک اضافه شد. به‌منظور بررسی تأثیر زمان عمل آوری بر نتایج آزمایش، نمونه‌های تهیه شده به مدت ۳ و ۱۰ روز در کیسه پلاستیکی در دمای آزمایشگاه عمل آوری شدند. نمونه‌ها پس از گذراندن دوره عمل آوری، از کیسه پلاستیکی بیرون آورده شده و با استفاده از روش و تجهیزات استاندارد ASTM D1557 متراکم شد. سپس از نمونه متراکم با استفاده از حلقه فلزی آزمایش و جک مخصوص، نمونه‌گیری انجام گرفت و نمونه‌ها جهت انجام آزمایش در دستگاه تحکیم یک بعدی قرار داده شد. مراحل تهیه نمونه آزمایش تعیین پتانسیل تورم و تعدادی از نمونه‌های ساخته شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

روش انجام آزمایش

حلقه آزمایش همراه با نمونه دارای سطح فرو رفته، کاغذهای صافی (در صورت لزوم) و سنگ‌های متخلخل خشک شده در هوا در تجهیزات بارگذاری قرار داده می‌شود. برای حداقل کردن

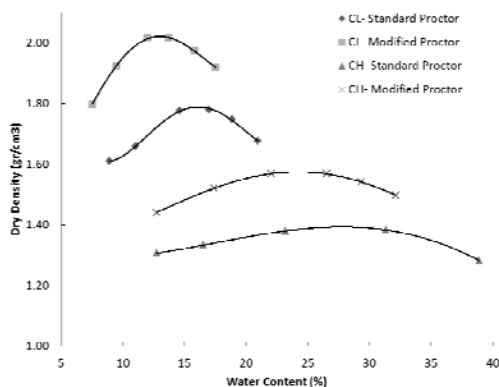
تورم نمونه تحت فشار سربار خاصی رخ داده است. (۳) در حالت سوم، نمونه همانند حالت اول به‌صورت غرقاب در آمده و هم‌زمان با افزایش حجم، به تدریج فشار سربار آن افزایش داده می‌شود، به گونه‌ای که حجم آن ثابت مانده و افزایش نیابد. بیشترین فشار لازم برای ثابت نگهداشتن حجم نمونه و رساندن نسبت پوکی به نسبت پوکی اولیه، برابر فشار تورمی خاک مورد آزمایش است.

تهیه تیمار های آزمایش

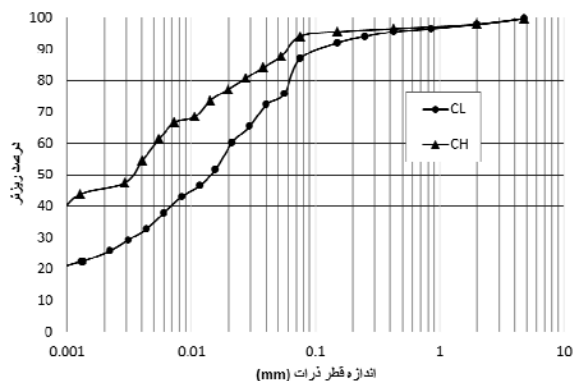
هدف اصلی پژوهش، ارزیابی تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانورس بر خصوصیات تورمی مخلوط است. لذا بدین‌منظور، تیمارهای آزمایش با در نظر گرفتن درصدهای مختلف نانورس آماده شد. جهت ساخت تیمارهای آزمایش، ابتدا خاک رس که در محیط آزمایشگاه خشک شده بود، با چکش لاستیکی و هاون کوبیده شد و پس از عبور دادن از الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر)، نمونه‌های خاک مورد نیاز با وزن نمودن تهیه شد. درصد وزنی به‌صورت نسبت وزن نانورس به وزن خاک خشک در نظر گرفته شد. ۵ سطح نانورس شامل ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی در نظر گرفته شد. در نتیجه، ۵ نوع تیمار آزمایشی برای هر یک از نمونه خاک‌های CL و CH و جمعاً ۱۰ نوع تیمار آزمایشی تهیه شد.

روش آماده سازی نمونه‌های آزمایش

در این پژوهش برای انجام آزمایش تورم از نمونه‌های بازسازی شده استفاده گردید. نمونه‌های بازسازی شده با استفاده از قالب دستگاه آزمایش تحکیم با استاندارد ASTM D1557 تهیه گردید. با توجه به اینکه میزان تورم خاک متأثر از میزان تراکم آن نیز است، هرچه درجه تراکم خاک بیشتر باشد تورم پذیری آن نیز بیشتر خواهد بود. لذا در این پژوهش به‌منظور زیاده‌تر شدن پتانسیل تورمی نمونه‌های مورد بررسی و در نتیجه ملموس‌تر شدن تغییرات این پارامتر در اثر افزودن نانورس، نمونه‌های آزمایشی با مشخصات تراکمی به‌دست آمده از روش تراکم اصلاح شده که انرژی مورد استفاده در آن حدود ۴/۵



شکل ۳. منحنی تراکم پراکتور استاندارد نمونه خاک‌های CL و CH



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی نمونه خاک‌های CL و CH

جدول ۳. مشخصات تراکمی نمونه‌های مورد بررسی

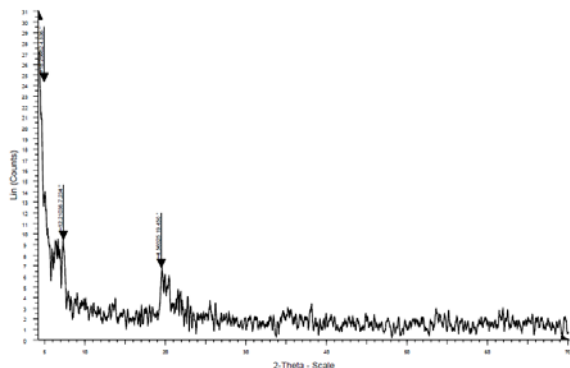
نمونه خاک	رطوبت بهینه (درصد)		دانسیته خشک ماکزیمم (gr/cm ³)	
	استاندارد	اصلاح شده	استاندارد	اصلاح شده
رس منطقه ایوانکی (CL)	۱۶	۱۲/۵	۱/۷۹	۲/۱۰
رس منطقه مغان (CH)	۲۸	۲۵	۱/۳	۱/۶۰

نتایج و بحث

آزمایش‌های شناسایی مطابق با مواردی که در قسمت مواد و روش‌ها بیان گردید انجام گرفت. نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی بر روی نمونه خاک‌های CL و CH به صورت منحنی دانه‌بندی در شکل (۲) ارائه شده است. همچنین نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ، طبقه‌بندی و سایر ویژگی‌های خمیری آنها مطابق با جدول (۲) است.

بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ، طبقه‌بندی نمونه خاک‌های مورد مطالعه منطقه ایوانکی و مغان طبق سیستم طبقه‌بندی متحد به ترتیب در رده رس با خاصیت خمیری کم (CL) و رس با خاصیت خمیری زیاد (CH) قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های تراکم به روش پراکتور استاندارد و اصلاح شده که بر روی دو نمونه خاک CL و CH انجام گرفت، منحنی تراکم به دست آمده از این آزمایش‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین رطوبت بهینه و دانسیته خشک ماکزیمم هر یک از نمونه‌ها به تفکیک آزمایش‌های پراکتور استاندارد و اصلاح شده مطابق جدول (۳) ارائه شده است.

تغییرات رطوبت و حجم نمونه به علت تبخیر، تجهیزات یاد شده توسط غشاء لاستیکی، فویل آلومینیوم یا حوله کاغذی مرطوب نگه داشته می‌شود. این پوشش در لحظه غرقاب کردن نمونه برداشته می‌شود. در ادامه آزمایش، تنش اولیه σ_{se} به مقدار حداقل ۱ کیلوپاسکال اعمال می‌شود. در مدت زمان ۵ دقیقه پس از اعمال بار، گنج تغییر مکان قائم برای قرائت صفر تنظیم می‌شود. پس از قرائت صفر متناظر با تنش اولیه، نمونه غرقاب شده و تغییر شکل آن در زمان‌های مختلف قرائت می‌شود. قرائت در زمان‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه و سپس ۱، ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت مناسب است. قرائت‌ها تا پایان تورم اولیه ادامه می‌یابد. پس از پایان تورم، تنش‌های قائمی به مقدار تقریبی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ ... کیلو پاسکال بر روی نمونه وارد می‌شود. هر گام بارگذاری مشابه با آزمایش تحکیم بر روی نمونه اعمال خواهد شد. بارگذاری تا زمانی ادامه پیدا خواهد کرد که نمونه به واسطه فشرده شدن به نسبت منافذ (ارتفاع اولیه) خود بازگردد. تداوم بارگذاری‌ها باید برابر باشد و زمان هر بارگذاری باید در حدی باشد که ۱۰۰٪ تحکیم اولیه ایجاد شود.



شکل ۴. نمودار طیف سنجی پراش اشعه ایکس XRD مربوط به نانورس

جدول ۴. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه های خاک

مشخصه	CH	CL
pH	۷/۶۸	۷/۷۲
EC(dS/m)	۱۲/۰۸	۷/۸۵
(meq/lit) Ca ²⁺	۱۵	۳۳/۷۵
(meq/lit) Mg ²⁺	۶/۲۵	۱۸/۷۵
(meq/lit) Na ⁺	۸۶/۹۵	۲۵/۶۵
(meq/lit) HCO ₃ ⁻	۱۶/۲۵	۵
(meq/lit) CL ⁻	۳۲/۵	۱۶/۲۵
(meq/lit) SO ₄ ²⁻	۴۴/۷۵	۳۲/۲۳

جدول ۵. درصد تورم نمونه خاک CL با تغییر نانورس و عمل آوری ۳ روزه

درصد نانورس	درصد تورم	دانسیته خشک (gr/cm ³)	رطوبت
۰	۸/۵۵	۲/۰	۱۳/۶
۰/۲۵	۵/۹۵	۱/۹	۱۲/۷
۰/۵	۴/۶۰	۱/۹	۱۳/۳
۱	۴/۳۰	۲/۰	۱۲/۲
۲	۳/۶۵	۱/۹	۱۲/۷

جدول ۶. درصد تورم نمونه خاک CL با تغییر نانورس و عمل آوری ۱۰ روزه

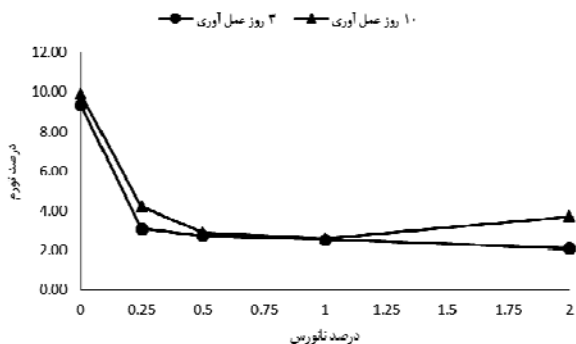
درصد نانورس	درصد تورم	دانسیته خشک (gr/cm ³)	رطوبت
۰	۹/۲۳	۲/۱	۱۳/۱
۰/۲۵	۶/۴۰	۱/۹	۱۱/۶
۰/۵	۵/۱۰	۲/۰	۱۲/۴
۱	۵/۸۰	۱/۹	۱۱/۴
۲	۵/۳۸	۲/۰	۱۱/۹

خالص بودن نانورس در حدود خلوص ارائه شده توسط شرکت سازنده را نشان می دهد.

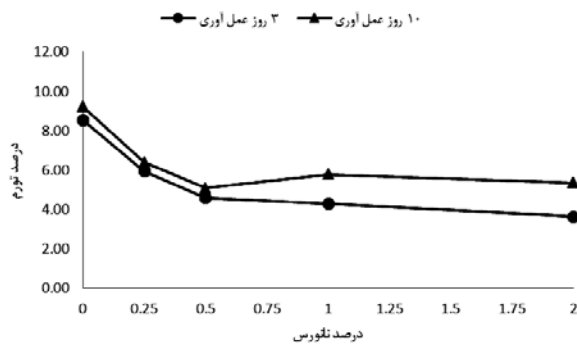
آزمایش های پتانسیل تورم بر روی مخلوط خاک رس با درصدهای مختلف نانورس در زمان های عمل آوری ۳ و ۱۰ روز انجام گردید که نتایج آزمایش ها بر روی نمونه خاک CL مطابق جداول (۵) و (۶) و شکل (۵) می باشد. با توجه به نتایج نشان داده شده در جداول ملاحظه می گردد که به طور کلی با افزایش درصد نانورس، درصد تورم خاک کاهش یافته است. با توجه به اینکه تغییر رطوبت نمونه ها در هنگام آزمایش بر درصد تورم آن تأثیر قابل توجهی دارد و همچنین یکسان نمودن

نتایج مربوط به آزمایش های تجزیه شیمیایی بر روی نمونه های خاک CH و CL در جدول (۴) نشان داده شده است. طبق طبقه بندی های ارائه شده جهت قضاوت در مورد میزان شوری خاک بر اساس مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع، می توان بیان نمود که نمونه خاک CL در رده شوری کم و نمونه خاک CH در رده شوری متوسط قرار داشته اند.

نتیجه طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) که بر روی نمونه نانورس انجام گرفت، به صورت مونت موریلونیت گزارش شد. در شکل (۴) نمودار طیف سنجی نشان داده شده است. نتیجه مشاهده شده از نمودار XRD به طور مشخصی



شکل ۶. نمودار تأثیر درصد نانوسیل بر درصد تورم نمونه خاک CH



شکل ۵. نمودار تأثیر درصد نانوسیل بر درصد تورم نمونه خاک CL

جدول ۷. درصد تورم نمونه خاک CH با تغییر نانوسیل و عمل آوری ۳ روزه

رطوبت	دانسیتته خشک (gr/cm ³)	درصد تورم	درصد نانوسیل
۲۴/۰	۱/۶	۹/۳۵	۰
۲۴/۹	۱/۶	۳/۰۸	۰/۲۵
۲۴/۷	۱/۶	۲/۷۳	۰/۵
۲۴/۲	۱/۶	۲/۵۳	۱
۲۴/۲	۱/۶	۲/۰۸	۲

جدول ۸. درصد تورم نمونه خاک CH با تغییر نانوسیل و عمل آوری ۱۰ روزه

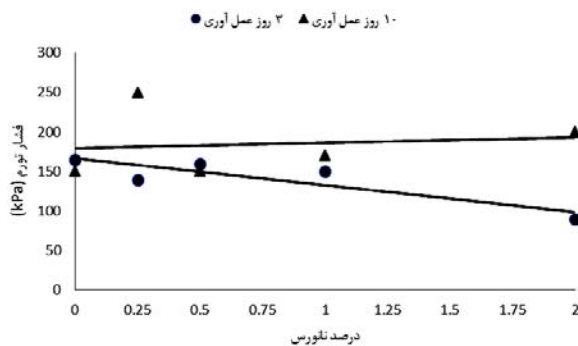
رطوبت	دانسیتته خشک (gr/cm ³)	درصد تورم	درصد نانوسیل
۲۳/۳	۱/۶	۹/۸۹	۰
۲۳/۶	۱/۷	۴/۲۰	۰/۲۵
۲۳/۸	۱/۷	۲/۸۷	۰/۵
۲۴	۱/۶	۲/۵۸	۱
۲۳/۶	۱/۶	۳/۷۰	۲

است. افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانوسیل به خاک رس CH، درصد تورم را در حدود ۶۷٪ کاهش داده است. نکته دیگر که از نتایج به دست می آید این است که عمل آوری هر دو نمونه های خاک CL و CH، تأثیر قابل ملاحظه ای در کاهش مقدار درصد تورم نداشته است.

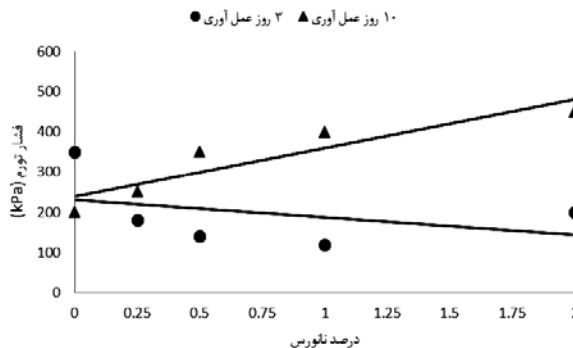
تأثیر افزودن نانوسیل بر روی فشار تورم براساس نتایج آزمایش های پتانسیل تورم برای دو نمونه خاک رس CL و CH در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده است. مطابق نتایج در نمونه خاک CL افزودن نانوسیل و عمل آوری ۳ روزه موجب کاهش فشار تورم شده است در حالی که در نمونه هایی که ۱۰ روز عمل آوری شده اند، افزایش درصد نانوسیل موجب افزایش فشار تورم شده است. در نمونه خاک CH افزودن

رطوبت نمونه ها به طور دقیقاً یکسان غیر ممکن می باشد. لذا اندکی افزایش درصد تورم در نمونه های ۱۰ روز عمل آوری شده را می توان به علت کم بودن رطوبت آن نمونه دانست.

نتایج آزمایش های پتانسیل تورم بر روی نمونه خاک CH مطابق جداول (۷) و (۸) و شکل (۶) می باشد. طبق نتایج نشان داده شده در جداول (۷) و (۸) و شکل (۶) به طور کلی افزودن نانوسیل به خاک رس CH نیز با کاهش درصد تورم همراه بوده است. بیشترین تأثیر کاهش در ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی نانوسیل رخ داده است و در درصدهای بالاتر روند کاهش درصد تورم با شیب ملایم پیش رفته است. در اینجا نیز متذکر می گردد که افزایش اندک درصد تورم در ۲ درصد وزنی نانوسیل به علت این می باشد که نمونه مذکور کمترین درصد رطوبت را دارا بوده



شکل ۸. نمودار تأثیر درصد نانورس بر فشار تورم نمونه خاک CH



شکل ۷. نمودار تأثیر درصد نانورس بر فشار تورم نمونه خاک CL

می یابد. این عوامل نهایتاً باعث کاهش ضخامت لایه دو گانه پخشیده و در نتیجه کاهش پتانسیل تورمی خاک می گردد.

نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر افزودن نانورس بر خصوصیات تورمی دو نمونه خاک ریزدانه رسی با خاصیت خمیری کم و زیاد مورد ارزیابی قرار گرفته است. براساس بررسی نتایج آزمایش ها، نتیجه گیری هایی انجام گردید که به شرح زیر ارائه می گردد:

- نتایج آزمایش تعیین پتانسیل تورم نشان داد که افزودن نانورس به خاک های رسی با پلاستیسیته کم و زیاد، به طور کلی موجب کاهش درصد تورم خاک می شود. بیشترین تأثیر در درصد های ۲۵٪ و ۵٪ درصد وزنی نانورس رخ داده است و با افزایش درصد نانورس، میزان کاهش درصد تورم کمتر می شود.
- مدت زمان عمل آوری نمونه ها، تأثیر قابل توجهی در نتایج آزمایش های مربوط به درصد تورم ندارد و صرفاً به دلیل اینکه در طی مدت عمل آوری، ممکن است به میزان جزئی رطوبت کاهش یابد لذا منحنی درصد تورم نمونه های ۱۰ روز عمل آوری شده کمی بالاتر از نمونه های ۳ روز عمل آوری شده قرار می گیرد.
- نتایج آزمایش پتانسیل تورم بر روی خاک CL نشان داد که در نمونه های ۳ روز عمل آوری شده، افزایش درصد نانورس موجب کاهش فشار تورم می شود، در حالی که فشار تورم نمونه های ۱۰ روز عمل آوری شده با افزایش

نانورس و عمل آوری ۳ روزه موجب کاهش فشار تورم شده است و در مورد نمونه هایی که ۱۰ روز عمل آوری شده اند، افزایش درصد نانورس تأثیر چندانی بر فشار تورم نداشته است.

تأثیر ذرات نانو رس بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک های رسی به طور اعم و تأثیر آن بر کاهش پتانسیل تورم پذیری به طور اخص با مفاهیم مربوط به تئوری لایه دو گانه پخشیده مطابقت داشته و قابل تفسیر است. بدین صورت که هرچه ضخامت لایه دو گانه بیشتر شود ذرات رس از هم دورتر و موجب افزایش حجم می شوند (۶، ۲۰). لذا هر عاملی که باعث کاهش ضخامت لایه دو گانه شود پتانسیل افزایش حجم و تورم خاک را کاهش خواهد داد. همچنین غلظت و نسبت جذب سدیم (SAR) محلول خاک از مهمترین عوامل مؤثر در ضخامت لایه دو گانه و در نتیجه تورم پذیری خاک هستند. به طوری که ضخامت لایه دو گانه با افزایش غلظت محلول کمتر ولی با افزایش نسبت جذب سدیم بیشتر می شود (۴، ۲۰). از طرفی یون هایی نظیر پتاسیم، کلسیم، آمونیوم و هیدروژن موجب کاهش ضخامت لایه دو گانه پخشیده و یون سدیم به دلیل شعاع هیدراته بیشتر موجب افزایش آن می شوند (۱۰). وقتی که ذرات نانورس با سطح ویژه خیلی زیاد به خاک رسی افزوده می شود باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و جایگزینی سریع یون سدیم با سایر کاتیون های تشکیل دهنده نانورس می گردد (۷). بدین ترتیب با خارج شدن سدیم از فاز تبدالی نسبت سدیم به سایر کاتیون ها و به عبارتی نسبت جذب سدیم (SAR)، کاهش و از سوی دیگر غلظت محلول خاک افزایش

سپاسگزاری

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

درصد نانورس، افزایش یافته است. همچنین مطابق نتایج آزمایش پتانسیل تورم بر روی خاک CH مشخص گردید که در نمونه‌های ۳ روز عمل آوری شده، افزایش درصد نانورس موجب کاهش فشار تورم می‌شود، در حالی که فشار تورم نمونه‌های ۱۰ روز عمل آوری شده با افزایش درصد نانورس، تغییر چندانی نکرده است.

منابع مورد استفاده

۱. رحیمی، ح. و ن. عباسی. ۱۳۹۴. مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های مشکل آفرین. چاپ اول، فصل دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
۲. عسکری، ف. و ع. فاخر. ۱۳۷۲. تورم و واگرایی خاکها از دید مهندس ژئوتکنیک. چاپ اول، فصل اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
3. Abbasi, N. 2011. The role of anions in dispersion potential of clayey soil. *J. Agri. Eng. Res.* 12(3) : 15-30.
4. Abbasi, N. and M. H. Nazifi. 2013. Assessment and modification of Shrdard chemical method for evaluation of dispersion potential of soils. *J. Geotech Geol. Eng.* 31: 337-346.
5. Abbasi, N., A. Farjad and S. Sepehri. 2017. The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils. *J. Geotech Geol. Eng.* 35: 1-9. doi.org/10.1007/s10706-017-0330-9
6. Hieu, P. and P. Quoc Nguyen. 2014. Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions. *J. Nanopart Res.* 16(1): 2137. doi: 10.1007/s11051-013-2137-9
7. Huang, T. 2011. Clay Stabilization with Nanoparticles. Patent No. US 20110000672 A1. US 12/277,825
8. Kalkan, E. 2011. Impact of wetting-drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume. *J. Appl. Clay Sci.* 52: 345-352.
9. Majeed, Z. H. and M. R. Taha. 2012. Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a penang soil. *J. Asian Scientific Res.* 2: 587-592.
10. Majeed, Z. and M. Taha. 2013. A review of stabilization of soils by using Nanomaterial. *Australian J. Basic and Appl. Sci.* 7: 576-581
11. Majeed, Z. H., M. R. Taha and I. T. Jawad. 2014. Stabilization of soft soil using nanomaterials. *Australian J. Basic and Appl. Sci.* 8: 503-509.
12. Mohammadi, M. and M. Niazian. 2013. Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. *International J. of Advanced Sci. and Tech. Res.* 3(3): 37-46.
13. Movahedan, M., N. Abbasi and M. Keramati. 2012. Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian J. of Soil Sci.* 1(2): 81-86.
14. Movahedan, M., N. Abbasi and M. Keramati. 2011. Experimental investigation of polyvinyl acetate polymer application for wind erosion control of soils. *J. of Water and soil (Agric. Sci. and Technol.)* 25: 606-616
15. Neethu, S. V. and S. Remya. 2013. Engineering behaviour of nanoclays stabilized soil. *In: Proceedings of Indian Geotechnical Conference.* 22-24 December, India.
16. Ouhadi, V. R. and M. Amiri. 2011. Geo-environmental behavior of nanoclays in interaction with heavy metal contaminants. *J. of Civil and Environ. Eng.* 42(3): 29-36.
17. Rahimi H., N. Abbasi, 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. doi: 10.1002/ird.574
18. Rahimi H., N. Abbasi. 2007. Failure of Concrete Canal Lining on Fine Sandy Soils (A case study for Saveh Project). *J. Irrig. Drain Eng.* 57: 83-92. doi: 10.1002/ird.350
19. Rahimi, H. and S. H. Barootkoob. 2002. Concrete canal lining cracking in low to medium plastic soils. *J. Irrig. Drain. Eng.* 51: 141-153.
20. Sparks, Donald. 2000. *Soil Physical Chemistry.* CRC Press, Florida, 33431
21. Taha, M. R. and O. M. E. Taha. 2012. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. *J. Nanopart Res.* 14: 1190. doi: 10.1007/s11051-012-1190-0

22. Yadu, L. and R. K. Tripathi. 2013. Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behavior of stabilized soft soil. *Procedia Eng.* 51: 125-131.
23. Zhang, M, M. Zhao, G. Zhang, P. Nowak, A. Coen and M. Tao. 2015. Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils. *J. Appl. Clay Sci.* 108: 199-207.

Application of Nanoclay Particles for Stabilization of Expansive Clayey Soils

A. Farjad¹ and N. Abbasi^{2*}

(Received: June 11-2016 ; Accepted: Oct. 01-2016)

Abstract

To deal with the destructive effects of swelling soils, different methods have been proposed by researchers. Chemical stabilization of expansive soils is one of the effective methods that are low-cost and efficient economically and technically. Recently, with the improvements of nano science in nanomaterials production and application, using this type of materials has been considered in different sciences especially geotechnical engineering. In this research, the effect of adding different amounts of nanoclay on swelling behavior modification of two types of clayey soils with low plasticity and high plasticity has been studied. For this purpose, first, identification tests were implemented on two types of clayey soils and nanoclay. Then, swelling potential tests were conducted on samples of soils with different amounts of nanoclay including (0, 0.25, 0.5, 1 and 2 weight percent) considering curing ages of 3 and 10 days. The results showed that the effect of adding nanoclay to the high plastic soils swelling potential is more than adding it to that of low plastic soils. So, adding 0.25 to 0.5 weight percent of nanoclay reduces the swelling potential of high plastic soils about 67 percent, and that of low plastic soils about 3 percent. Furthermore, the maximum reduction in swelling potential increases by adding up to 0.5 percent nanoclay; and decreases for adding amounts more than 0.5 percent.

Keywords: Swelling potential, Stabilization, Swelling pressure, Nanoclay.

1. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
2. Dept. of Geotechnical Eng. College of Civil Eng. Central Branch of Islamic Azad University., Tehran, Iran.
*: Corresponding Author, Email: nader_iaeri@yahoo.com