

تأثیر نانورس بر تحکیم‌پذیری و نفوذپذیری بنتونیت در حضور آلاینده‌ی فلز سنگین

وحیدرضا اوحدی،^{۱*} امیر نوری^۲

۱- استاد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

۲- کارشناس ارشد، گروه عمران؛ دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

vahidouhadi@yahoo.ca

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۵/۲۰

چکیده- در سال‌های اخیر، مطالعه‌ی رفتار نانومواد در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی از دامنه‌ی وسیعی برخوردار بوده است. در واقع مطالعه‌ی تأثیر نانومواد در ترکیب با دیگر مصالح از زمینه‌های نوین تحقیق، در علوم مهندسی است. در این مقاله به منظور مطالعه‌ی تأثیر بخش نانورس خاک بر رفتار تحکیم‌پذیری آن، با افزودن نانورس صنعتی به خاک، تأثیر نانورس بر خصوصیات تحکیم‌پذیری بنتونیت در حضور آلاینده‌های فلز سنگین بررسی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی شده است. به این منظور درصدهای مختلف نانورس صنعتی با بنتونیت، مخلوط شده و پس از اضافه نمودن غلظت‌های مختلف نیترات مس، نمونه‌های همگن برای انجام آزمایش تحکیم تهیه شد. سپس رفتار تحکیم‌پذیری و تغییر شکل‌پذیری خاک در فرایند اندرکنش خاک آلودگی مطالعه شد. علاوه بر آن، تغییرات نفوذپذیری خاک در این فرایند نیز مطالعه شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، حضور نانورس صنعتی در بنتونیت سبب افزایش نشست‌های اسمزی در غلظت‌های تا ۳۰ سانتی‌مول کیلوگرم نیترات مس در مقایسه با نشست‌های اسمزی بنتونیت می‌شود. هم‌چنین افزایش مقدار نانورس صنعتی در بنتونیت سبب افزایش نفوذپذیری آن در مقایسه با نفوذپذیری بنتونیت شد. این تفاوت در نفوذپذیری در غلظت‌های زیاد آلودگی مشهودتر بوده است. ضمن آن‌که با افزایش تنش‌های خارجی نفوذپذیری نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانورس و بنتونیت هم‌گرا شده است. تغییر رفتار مشاهده شده به ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و سطح مخصوص (SSA) نمونه‌ها به حضور نانورس صنعتی نسبت داده شده است.

واژگان کلیدی: نانورس، بنتونیت، تحکیم اسمزی، نفوذپذیری، آلاینده‌ی فلز سنگین.

۱- مقدمه

که می‌توانند در محدوده‌ی وسیعی از دما و شرایط محیطی مختلف و بدون آن‌که از لحاظ مکانیکی، شیمیایی یا حرارتی در خصوصیات مهندسی آن‌ها تغییری به وجود آید کارایی داشته باشند. امروزه بررسی تأثیر حضور مواد نانورس در جذب و نگهداری آلاینده‌های زیست‌محیطی از زمینه‌های نوین در علم ژئوتکنیک زیست‌محیطی است.

در سال‌های اخیر با توسعه‌ی علم مکانیک، مواد و مهندسی، تولید مواد با ابعاد در مقیاس نانو در سطح وسیعی انجام شده است. این موضوع سبب گسترش علم فناوری نانو در علوم مختلف شده است. با توسعه‌ی نانومواد پیشرفته، مصالح مختلف به نحوی اصلاح شده‌اند

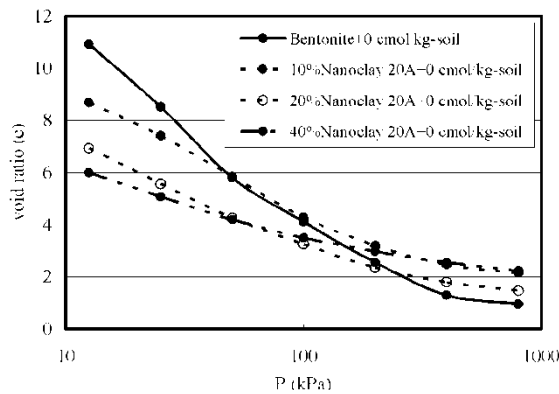
۲- مواد و روش‌ها

خاک بتونیت قابل استفاده در این تحقیق از کارخانه‌ی ایران باریت تهیه شده‌است. خصوصیات فیزیکی هم‌چون وزن مخصوص، توزیع اندازه‌ی ذرات، حدود اتربرگ، مقدار مواد آلی و درصد رطوبت طبق روش‌های استاندارد ASTM [۱۱] اندازه‌گیری شد. سایر مشخصات ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک در مراجع معتبر قابل دسترس است [۱۲]. نانورس استفاده شده با نام تجاری Cloisite® 20A است که از "شرکت تولید رس جنوب آمریکا" تهیه شد. برای مطالعه‌ی تأثیر مواد نانورس بر رفتار ژئوتکنیک زیست‌محیطی بتونیت، درصدهای مختلف نانورس به بتونیت اضافه شد و سپس رفتار تحکیم‌پذیری خاک مطالعه شد. برای بررسی تأثیر حضور نانورس در رفتار تحکیم‌پذیری بتونیت، از نسبت‌های ۱۰۰:۰، ۱۰۰:۲۰، ۱۰۰:۴۰ و ۱۰۰:۶۰ نانورس به بتونیت استفاده شد. علاوه بر این به منظور مطالعه‌ی اندرکنش یون‌های فلز سنگین در ترکیب بتونیت و نانورس، از فلز سنگین نیترات مس $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ در غلظت‌های مختلف ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک استفاده شد.

برای آماده‌سازی نمونه‌های هم‌گن بتونیت و اشباع آن، از روش‌های ارائه شده به‌وسیله‌ی مراجع معتبر استفاده شده است [۱۴-۱۲]. بر اساس این روش‌ها، مخلوط بتونیت-نانورس در نسبت آب به خاک ۱۰:۱ با آب مقطر یا آب مقطر حاوی آلاینده‌ی فلز سنگین مخلوط شده و نمونه‌های دوغابی (سوسپانسیون) استفاده شد. به منظور برقراری شرایط تعادل اندرکنش خاک الکترولیت، سوسپانسیون به دست آمده در مدت ۲۴ ساعت دو بار و هر بار به مدت ۲ ساعت روی دستگاه لرزاننده‌ی افقی با سرعت ۲۵۰rpm لرزانده شدند. پس از این مرحله برای اطمینان بیش‌تر از انجام اندرکنش خاک الکترولیت، نمونه‌ها

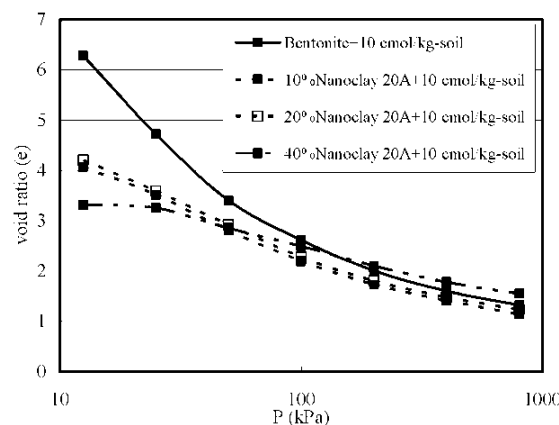
در دهه‌ی اخیر بررسی تأثیر نانومواد در رفتار مصالح نشان داده است که نانومواد به تغییر قابل‌توجه در خصوصیات فیزیکی مصالح [۳-۱]، مقاومت در برابر حرارت [۴] و مقاومت در برابر فرسایش آن‌ها منجر می‌شود [۵-۶]. تأثیر این مصالح به اندازه آن‌ها، مقدار حضور مواد نانوی پیوندهایی که بین آن‌ها اتفاق می‌افتد و نحوه‌ی توزیع ذرات بستگی دارد [۷].

از سوی دیگر مونت‌موریلونیت به عنوان کانی رسی اصلی در بتونیت شناخته شده است به طوری که به عنوان نمونه در بتونیت MX80 بیش از ۸۷٪ بتونیت از مونت‌موریلونیت تشکیل شده است [۸]. در نتیجه، این نوع مصالح رسی می‌تواند به عنوان موانع مهندسی مناسبی برای نگهداری آلاینده‌های فلز سنگین استفاده شوند. در رس‌هایی که حاوی مقدار قابل توجه مونت‌موریلونیت باشند (هم‌چون بتونیت)، ظرفیت تبادل کاتیونی زیادی که مونت‌موریلونیت دارد سبب می‌شود که این مصالح برای نگهداری و جذب آلاینده‌های فلز سنگین، مصالح مناسبی تلقی شوند [۹]. خصوصیات تورمی مونت‌موریلونیت نیز به کاهش نفوذپذیری آن و ممانعت از انتقال آلودگی در آن کمک ویژه‌ای می‌کند [۱۰]. با وجود این که تحقیقات وسیعی در زمینه‌های مختلف رفتار کانی‌های رسی در اندرکنش با آلودگی و نیز در زمینه‌ی کاربرد نانورس‌ها در پروژه‌های مختلف مهندسی انجام شده؛ اما به موضوع تأثیر بخش بسیار ریزدانه‌ی خاک در رفتار مهندسی آن و به بیانی تأثیر حضور نانورس بر خصوصیات مکانیکی و تغییر شکل‌پذیری و تغییرات نفوذپذیری خاک توجه کم‌تری شده است. بر این اساس هدف اصلی این مقاله، مطالعه‌ی تأثیر نانورس بر خصوصیات تحکیم‌پذیری و نفوذپذیری بتونیت در حضور آلاینده‌ی فلزات سنگین است.



شکل (۱) مقایسه‌ی رفتار تحکیم‌پذیری بنتونیت و نمونه‌های بنتونیت حاوی درصد‌های مختلف نانورس

بر اساس نتایج شکل ۱، در تنش‌های تا ۱۰۰ کیلوپاسکال، بنتونیت مقاومت بیش‌تری در وقوع نشست‌های تحکیمی در مقایسه با نمونه‌های بنتونیت_نانورس داشته است. در حالی‌که با افزایش تنش‌های اعمال شده، حضور نانورس در بنتونیت سبب مقاومت آن در مقابل نشست شده است. به‌منظور امکان تفسیر نتایج بالا، نمونه‌های مخلوط بنتونیت و درصد‌های مختلف نانورس با غلظت 10 cmol/kg-soil نیترات مس تهیه شده و پس از پیش‌بارگذاری و تهیه‌ی نمونه هم‌گن، آزمایش تحکیم شدند [شکل ۲]. براساس نتایج شکل ۲ رفتار مشابهی با آنچه در حالت نمونه‌های فاقد آلودگی مشاهده شد باردیگر رخ داده است.



شکل (۲) تحکیم‌پذیری بنتونیت و نمونه‌های بنتونیت حاوی درصد‌های مختلف نانورس در حضور غلظت 10 cmol/kg-soil نیترات مس

به مدت ۹۶ ساعت به حال خود رها شده و پس از گذشت این زمان، سوسپانسیون بالا درون سلول‌های پیش‌تحکیمی به قطر ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر ریخته شده و با افزایش بار به وسیله وزنه‌هایی که روی این سوسپانسیون قرار می‌گرفت خاک به تنش پیش‌تحکیمی ۲۵ kPa رسانده می‌شد. پس از زهکشی آب حفره‌ای که از نمونه‌ی خاک داخل سلول انجام می‌شد، خاک هم‌گن اشباع و دست‌نخورده برای نمونه‌گیری آماده می‌شد.

هم‌چنین برای مطالعه تأثیر نانورس بر رفتار بنتونیت، آزمایش تحکیم در غلظت‌های مختلف آلاینده‌ی نیترات مس انجام گرفت. به این منظور برای نمونه‌گیری، از رینگ فلزی تحکیم، با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش تحکیم روی نمونه‌ی به دست آمده بر اساس استاندارد ASTM انجام شد و تغییرات تنش ثابت نشست برای نمونه‌های مختلف قرائت شد. در طول آزمایش برای حفظ شرایط اولیه‌ی آزمایش، نمونه‌ها درون سلول تحکیم به‌وسیله‌ی محلول آلاینده‌ای که سوسپانسیون با آن ساخته شده‌بود به صورت اشباع نگه داشته می‌شد. برای جبران آب بخار شده و اشباع ماندن نمونه‌ها، همواره آب مقطر در اطراف سلول تحکیم اضافه می‌شد.

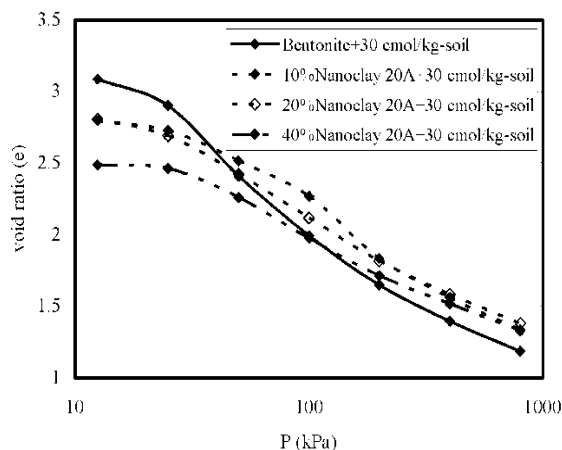
ضرایب نفوذپذیری دستاورد انجام محاسبات از نتایج آزمایش تحکیم است. برای محاسبه‌ی ضریب تحکیم از روش کاساگرانده استفاده و سپس از روابط موجود مقادیر ضریب نفوذپذیری محاسبه شده است.

۳- بحث و بررسی

۳-۱- مطالعه‌ی رفتار تحکیم‌پذیری

شکل ۱ نشانگر رفتار تحکیم‌پذیری نمونه‌ی بنتونیت و نمونه‌های مخلوط بنتونیت نانورس در درصد‌های مختلف نانورس است.

حاوی نانورس کم‌تر این نمونه‌ها جذب آب کم‌تری نیز داشته و در تنش‌های تا ۱۰۰ کیلوپاسکال تحت بارهای وارده نشست‌پذیری بیشتری در مقایسه با نمونه‌ی بتونیت نشان داده‌اند (شکل ۱). در همین حال در دو سری آزمایش‌های بالا (شکل‌های ۱ و ۲) با افزایش بارهای وارده، آب حفره‌ای از نمونه خارج شده و بنابراین تأثیر ظرفیت تبادل کاتیونی در رفتار نمونه‌ها به شدت کاهش یافته است. در تنش‌های بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال، نمونه‌های مخلوط بتونیت و نانورس در مقایسه با نمونه‌ی بتونیت فاقد نانورس، نشست‌پذیری کم‌تری از خود نشان داده‌اند. هم‌چنین سطح مخصوص بیش‌تر در نمونه‌های مخلوط بتونیت-نانورس و نیز تخلخل بیش‌تر این نمونه‌ها در تنش‌های بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال سبب می‌شود، در چنین حالتی انتظار وقوع تحکیم ثانویه در این نمونه‌ها در تنش‌های بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال بیش‌تر باشد. آزمایش‌های سری سوم بر نمونه‌های بتونیت و مخلوط بتونیت-نانورس در غلظت 30 cmol/kg-soil نیترات مس نیز انجام شد (شکل ۳).



شکل (۳) تحکیم‌پذیری بتونیت و نمونه‌های بتونیت حاوی درصد‌های مختلف نانورس در حضور غلظت 30 cmol/kg-soil نیترات مس

بر اساس نتایج در شکل ۳ با افزایش غلظت آلاینده در

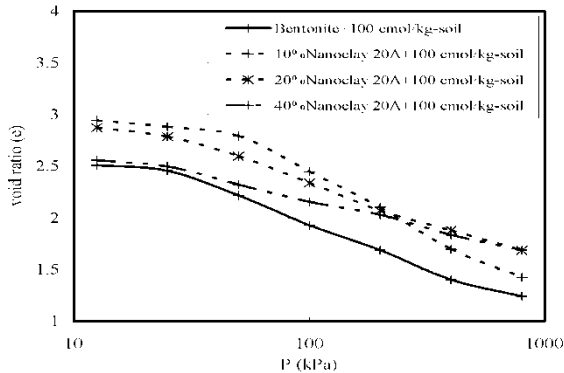
تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، حضور آلودگی در خاک سبب وقوع نشست‌های تحکیم‌اسمزی شده و بر این اساس در تنش‌های مشابه، نمونه‌های حاوی آلودگی (شکل ۲) نشانه‌ی خلاء کم‌تری در مقایسه با نمونه‌های فاقد آلودگی (و بدون تحکیم‌اسمزی) (شکل ۱) دارند. از آنجا که رفتار بالا در حالت بود و نبود آلودگی مشاهده شده است می‌توان نتیجه‌گیری کرد، نه تنها وجود تحکیم‌اسمزی سبب مشاهده‌ی رفتار صلب‌تر نمونه‌های مخلوط بتونیت-نانورس در حضور آلاینده‌ی فلزی شده است، بلکه عامل دیگری نیز مؤثر بوده است. رفتار بالا را می‌توان بر اساس نتایج آزمایش‌های سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی تفسیر نمود. تحقیقات [۱۵] نشان می‌دهد، بتونیت و نانورس Cloisite 20A دارای سطح مخصوص (SSA) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) هستند [جدول ۱].

جدول (۱) مقایسه‌ی مقادیر CEC و SSA نمونه‌های مورد مطالعه [۱۵]

| نمونه خاک | CEC (cmol/kg-soil) | SSA (m ² /g) | درصد کربنات |
|-------------|--------------------|-------------------------|-------------|
| بتونیت | ۶۲.۵۱ | ۴۱۶.۵ | ۸ |
| کلوزایت 20A | ۱۹.۷۶ | ۶۱۸.۵ | ۰ |

بر اساس نتایج جدول ۱ در حالی که ظرفیت تبادل کاتیونی بتونیت بیش از ۳۱۶٪ از ظرفیت تبادل کاتیونی نانورس Cloisite 20A بزرگ‌تر است، مقدار سطح مخصوص نانورس قابل استفاده بیش از ۴۸٪ بزرگ‌تر از سطح مخصوص نمونه‌ی بتونیت است. در نمونه‌های حاوی نانورس، وجود ظرفیت تبادل کاتیونی کم‌تر، از یک سو، درصد کربنات کم‌تر آن‌ها، از سوی دیگر ظرفیت کم‌تر بافرینگ این نمونه‌ها را سبب می‌شود و بنابراین در حضور آلودگی، تحکیم‌اسمزی بیش‌تری داشته باشند (شکل ۲). از سوی دیگر در نمونه‌های فاقد آلودگی نیز به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه‌های

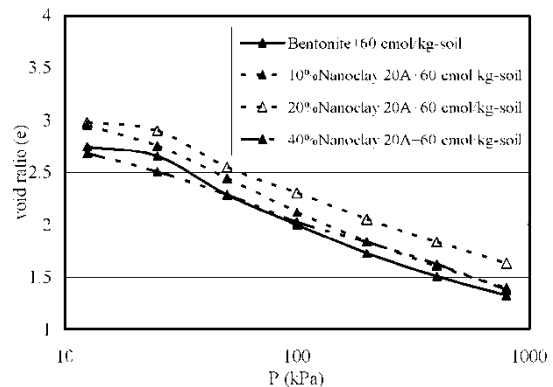
عملاً بزرگ‌تر بودن سطح مخصوص در نمونه‌های حاوی نانورس تأثیر خود را در رفتار تحکیم‌پذیری به طور مشخص‌تری نشان داده است. به‌طوری‌که در این حالت همان مکانیزمی که در تنش‌های زیاد مشاهده می‌شد در تنش‌های کم نیز مشاهده شده است.



شکل (۵) تحکیم‌پذیری بتونیت و نمونه‌های بتونیت حاوی درصد‌های مختلف نانورس در حضور غلظت 100 cmol/kg-soil نیترات مس

به بیان دیگر در این محدوده از غلظت آلودگی، به دلیل ختشی شدن بارهای منفی در حضور آلایندگی فلزی، عملاً تأثیر بیش‌تر CEC بتونیت در مقایسه با نمونه‌های بتونیت حاوی نانورس حذف شده و بزرگ‌تر بودن سطح مخصوص نمونه‌های حاوی نانورس در رفتار تحکیم‌پذیری، در تنش‌های کم‌تر از ۱۰۰ کیلوپاسکال نیز تأثیر خود را نشان داده است. براین اساس پس از غلبه‌ی غلظت آلودگی بر ظرفیت بافرینگ خاک پیش از آن‌که نیاز به بار بیش‌تر برای خروج آب از خاک بر اثر ختشی شدن بارهای منفی باشد، تمایل خاک به جذب و نگهداری آب کاهش یافته و در این شرایط نمونه‌های نانورس با SSA بیش‌تر تمایل کم‌تری برای نشست‌پذیری تحت بار وارده نسبت به نمونه‌ی بتونیت نشان داده‌اند. نمونه‌های بتونیت به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بزرگ‌تر (CEC بزرگ‌تر)، تمایل بیش‌تری برای جذب آلایندگی نسبت به نمونه‌های نانورس داشته‌اند. این قابلیت جذب بیش‌تر سبب امکان تغییر بیش‌تر در ساختار خاک

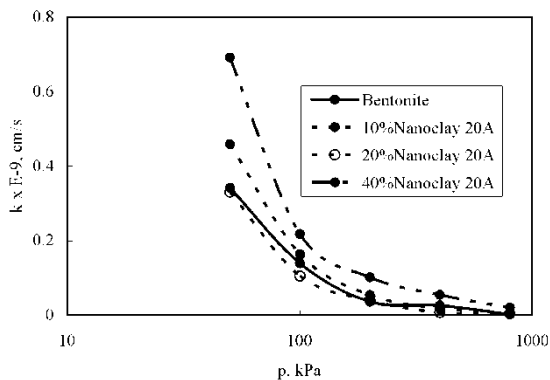
نمونه‌ها، مقدار نشانه‌ی خلاء در ابتدای آزمایش تحکیم کاهش بیش‌تری در مقایسه با سری اول و دوم آزمایش‌ها (شکل‌های ۱ و ۲) داشته که این رفتار را می‌توان به تحکیم اسمزی ناشی از غلظت زیاد آلودگی نسبت داد. ضمن آن‌که رفتار مورد انتظار در این حالت نیز به نحو مناسبی مشاهده می‌شود. به منظور مطالعه‌ی رفتار تحکیم‌پذیری نمونه‌های بتونیت حاوی نانورس در غلظت‌های زیاد آلودگی، آزمایش‌های یاد شده در بالا بر نمونه‌های ساخته شده دارای غلظت آلودگی 60 و 100 cmol/kg-soil نیترات مس انجام شد (شکل‌های ۴ و ۵).



شکل (۴) تحکیم‌پذیری بتونیت و نمونه‌های بتونیت حاوی درصد‌های مختلف نانورس در حضور غلظت 60 cmol/kg-soil نیترات مس

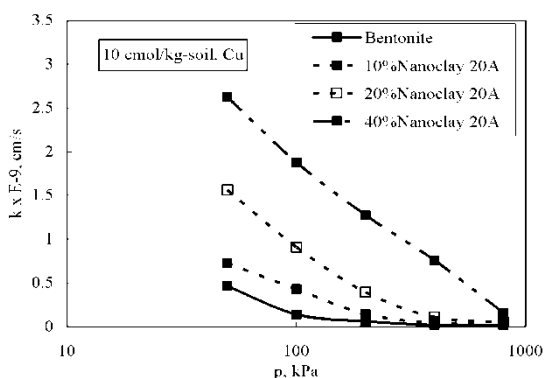
از مقایسه نتایج در شکل‌های ۴ و ۵ با شکل‌های ۱ تا ۳ می‌توان استنباط نمود که با افزایش غلظت آلودگی، رفتار تنش‌های بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال، در تنش‌های کم‌تر از ۱۰۰ کیلوپاسکال نیز تکرار شده است به‌طوری‌که با افزایش غلظت نیترات مس فاصله‌ی مقادیر نشانه‌ی خلاء نمونه‌های حاوی نانورس از نمونه‌ی بتونیت بیش‌تر شده است (نمونه‌های حاوی نانورس نشانه خلاء بزرگ‌تری نشان داده‌اند).

نتایج را می‌توان به‌صورت ذیل تفسیر نمود. هنگامی که افزایش غلظت آلودگی و مقدار افزایش آن غلبه‌ی غلظت آلودگی بر ظرفیت بافرینگ بتونیت را سبب شده است،



شکل (۶) تغییرات ضریب نفوذپذیری بتونیت حاوی درصدهای مختلف نانورس در تنش‌های مختلف (نمونه‌های فاقد آلودگی)

به منظور مطالعه‌ی جامع‌تر در خصوص تأثیر حضور نانورس صنعتی بر تغییرات نفوذپذیری بتونیت، مقدار نفوذپذیری خاک در غلظت آلایندگی 10 cmol/kg-soil نیز بررسی شده است (شکل ۷). بر اساس نتایج در شکل ۷، با افزایش غلظت آلایندگی در نمونه‌های مورد مطالعه، ضریب نفوذپذیری خاک افزایش یافته است. در واقع با جذب آلایندگی به سطوح باردار رسی، نیروهای دافعه بین پولک‌ها کاهش یافته و ساختار خاک از ساختار پراکنده به ساختار درهم تبدیل شده است. در نتیجه قابلیت خاک به انتقال آب (ضریب نفوذپذیری خاک) افزایش یافته است. این نتیجه‌گیری با تحقیقات دیگر محققین نیز انطباق مناسبی دارد.



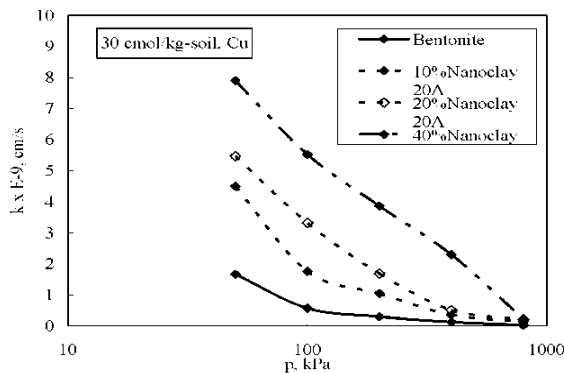
شکل (۷) تغییرات ضریب نفوذپذیری در مقابل تنش در نمونه‌ی بتونیت حاوی درصدهای مختلف نانورس (غلظت آلایندگی 10 cmol/kg-soil نیترا ت مس)

می‌شود، به طوری که در غلظت‌های زیاد آلودگی، میزان تغییر در ساختار بتونیت بسیار بیش‌تر از ساختار بتونیت حاوی نانورس بوده است. همین موضوع سبب بیش‌تر بودن نشست‌های اسمزی بتونیت حاوی آلایندگی نسبت به نشست اسمزی مخلوط بتونیت و نانورس حاوی آلایندگی است. در همین حال نمونه‌ی بتونیت حاوی نانورس از یک سو به دلیل اثرپذیری کم‌تر ساختار بخش نانو آن پس از اندرکنش با آلایندگی و از سوی دیگر به واسطه‌ی سطح مخصوص بیش‌تر آن، پس از اندرکنش با آلودگی رفتار شکل‌پذیری بیش‌تر و تحکیم ثانویه بیش‌تری داشته است. ممکن است در ابتدا مشاهده‌ی نشست کم‌تر در نمونه‌های حاوی درصدهای زیادتر نانورس (شکل ۱ تا ۵) به عنوان تناقض در رفتار تصور شود، اما باید به این نکته توجه نمود که در انتهای اعمال تنش‌های پیش‌بارگذاری، نمونه‌های حاوی درصدهای زیادتر نانورس به واسطه‌ی CEC کم‌تر، طبق اصول نشانه‌ی خلاء اولیه کم‌تری داشته که سبب استمرار این تغییرات با افزایش غلظت آلودگی بوده است. این که در تنش‌های بزرگ‌تر تا حدودی در تمامی آزمایش‌های انجام شده، کاهش نرخ تقلیل نشانه‌ی خلاء نمونه‌های مخلوط بتونیت-نانورس حاوی ۴۰٪ نانورس در مقایسه با دیگر نمونه‌ها را شاهد بوده‌ایم صحت این نکته را تایید می‌کند.

۳-۲- مطالعه‌ی رفتار نفوذپذیری

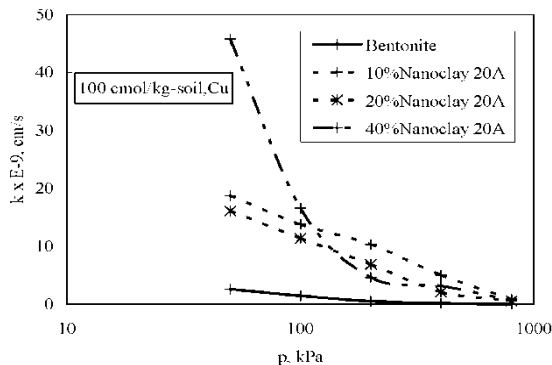
شکل ۶ نشانگر اثر تغییر درصد نانورس در نفوذپذیری نمونه‌های مورد مطالعه (بدون حضور آلایندگی) است. مشاهده می‌شود با افزایش درصد نانورس در نمونه، مقدار نفوذپذیری خاک افزایش پیدا کرده است. هم‌چنین نتایج ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که تا قبل از تنش 100 kPa مقدار نفوذپذیری برای نمونه‌های بتونیت حاوی نانورس بسیار بیش‌تر از بتونیت فاقد نانورس است. در حالی که در تنش‌های بعد از 100 kPa این تغییرات کاهش یافته است.

رفتار مشابه نمودارهای قبلی مشاهده می‌شود (شکل ۸). از مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های ۷ و ۸، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش غلظت آلاینده در نمونه‌های خاک حاوی درصد‌های یکسان نانورس و تنش‌های یکسان خارجی، نفوذپذیری خاک افزایش یافته‌است. تأثیر افزایش غلظت آلاینده و اعمال غلظت 100 cmol/kg-soil بر رفتار نفوذپذیری بنتونیت حاوی درصد‌های مختلف نانورس در شکل ۹ ارائه شده‌است. اگرچه الگوی ظاهری رفتار، مشابه رفتار مشاهده شده در دیگر غلظت‌های آلاینده است، اما در این حالت بواسطه افزایش غلظت آلاینده خارجی و غلبه نسبی آن بر ظرفیت بافرینگ خاک، انطباق تغییرات نفوذپذیری نمونه‌ها در تنش‌های کم‌تر مشاهده می‌شود.



شکل (۸) تغییرات ضریب نفوذپذیری در نمونه‌ی بنتونیت حاوی

درصد‌های مختلف نانورس (غلظت آلاینده‌ی 30 cmol/kg-soil نیترات مس)



شکل (۹) نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری برای نمونه‌های بنتونیت حاوی

درصد‌های مختلف نانورس (غلظت آلاینده‌ی 100 cmol/kg-soil نیترات مس)

در نتایج شکل ۷، رفتاری مشابه با نتایج در شکل ۶ مشاهده می‌شود. با افزایش درصد نانورس در بنتونیت، عملاً میزان تأثیر خصوصیات رفتاری نانورس $20A \text{ colosite}$ در نمونه‌های مخلوط بنتونیت و نانورس بیش‌تر می‌شود. با وجود این افزایش ضریب نفوذپذیری نمونه‌های بنتونیت حاوی نانورس را می‌توان به خصوصیات رفتاری نانورس (جدول ۱) ارتباط داد. به بیان دیگر، با کم‌تر بودن SSA بنتونیت نسبت به نانورس، مقدار CEC بنتونیت حدود 316% بیش از CEC نانورس است. با توجه به کم بودن CEC نانورس، افزایش مقدار نانورس در نمونه‌ی بنتونیت به کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی سیستم مخلوط بنتونیت و نانورس منجر می‌شود. بنابراین نمونه بنتونیت حاوی نانورس رفتار دانه‌ای‌تری نسبت به نمونه بنتونیت حاوی نانورس کم‌تر خواهد داشت. در نتیجه نفوذپذیری نمونه بنتونیت حاوی نانورس بیش‌تر، افزایش بیش‌تری در مقایسه با نمونه بنتونیت فاقد نانورس داشته‌است. هم‌چنین برای نمونه‌های فاقد آلاینده، با افزایش نانورس، ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه در این حالت نیز رفتار خاک، نزدیکی بیش‌تری به سمت رفتار مصالح دانه‌ای داشته‌است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، در تنش‌های کم‌تر از 400 kPa به دلیل غالب بودن تأثیر مشخصات آب حفره‌ای در رفتار خاک، نفوذپذیری به مقدار زیادی افزایش پیدا کرده‌است. ولی با افزایش مقدار تنش به بیش از 400 kPa ، تأثیر تنش خارجی بر تأثیر مشخصات آب حفره‌ای غلبه کرده‌است. در نمونه فاقد آلاینده نیز (شکل ۶) این رفتار مشاهده می‌شود به این معنی که با افزایش مقدار بار و خارج شدن آب حفره‌ای از سیستم در تنش‌های بیش از 400 kPa مشخصات آب حفره‌ای در تغییرات نفوذپذیری خاک، تأثیر کم‌تری نسبت به تأثیر تنش خارجی داشته‌است. در نمونه‌های حاوی غلظت آلاینده 30 cmol/kg-soil نیز

- [2] Messersmith, P. B. and Giannelis, E. P., *Synthesis and Characterization of Layered Silicate-Epoxy Nanocomposites*, Chem. Mater., 6(10): 1719, 1994.
- [3] Messersmith, P. B., and Giannelis, E. P., *Synthesis and Barrier Properties of Poly (caprolactone)-Layered Silicate Nanocomposite*, J. Polym. Sci., Polym. Chem., 33: 1047-1053, 1995.
- [4] Gilman, J. W., *Flammability and Thermal Stability Studies of Polymer Layered-Silicate (Clay) Nanocomposites*, Appl. Clay Sci., 15(1): 31-49, 1999.
- [5] Vaia, R. A., Price, G., Ruth, P. N., Nguyen, H. T., and Lichtenhan, J., *Polymer/layered Silicate Nanocomposites as High Performance Abrasive Materials*, Appl. Clay. Sci., 15(1): 67-92, 1999.
- [6] Yung, K. C., Wang, J., and Yue, T. M., *Modeling Young's Modulus of Polymer-layered Silicate Nanocomposites Using a Modified Halpin-Tsai Micromechanical Model*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 25; 847, 2006.
- [7] Fu, J. and Naguib, H.E., *Nanocomposite Foams Effect of Nanoclay on the Mechanical Properties of PMMA/Clay*, Journal of Cellular Plastics, 42; 325, 2006.
- [8] Sauzeat E., Guillaume D., Neaman A., Dubessy J., Francois M., Pfeiffert C., Pelletier M., Ruch R., Barres O., Yvon J., Ville'ras F. et Cathelineau M., *Caracté'risation mine'ralogique, cristalochimique et texturale de l'argile MX80*. Rapport ANDRA No. CRP0ENG 01-001, p. 82., 2001.
- [9] Yong, R.N., *Geoenvironmental Engineering, Contaminated Soils, Pollutant Fate and Mitigation*. CRC Press, Boca Raton, p. 307, 2001.
- [10] Montes-Ha.G, Fritza.B., Clementa. A., Michaub, N., *Modelling of geochemical reactions and experimental cation exchange in MX80 bentonite*, Journal of Environmental Management 77, 35-46, 2005.
- [11] American Society for Testing and Materials, ASTM, *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, V.4, 08, 1992.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد، در فرایند نشست‌پذیری نمونه‌های بتونیت و نانورس در بود و نبود آلایندگی فلز سنگین دو پارامتر ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح مخصوص خاک نقش تعیین‌کننده دارند. در غلظت‌های آلودگی کم در تنش‌های کم‌تر از ۱۰۰ کیلوپاسکال، ظرفیت تبادل کاتیونی و در تنش‌های بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال سطح مخصوص خاک عامل تعیین‌کننده در رفتار خاک است. با افزایش غلظت آلودگی و غالب‌شدن غلظت آلودگی بر ظرفیت بافرینگ خاک، بارهای منفی خاک در حضور آلودگی خنثی می‌شود، بنابراین از تأثیر عامل ظرفیت تبادل کاتیونی کاسته و عامل سطح مخصوص در فرایند خاک_آلودگی حاکم شده است. در این حالت به‌واسطه‌ی سطح مخصوص بیش‌تر نمونه‌های حاوی نانورس، امکان وقوع تحکیم ثانویه در آن‌ها افزایش می‌یابد.

بر اساس نتایج، با افزایش غلظت آلودگی در خاک رسی، نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. به‌واسطه‌ی کم‌تریودن ظرفیت تبادل کاتیونی در نانورس در مقایسه با بتونیت، نمونه‌های حاوی نانورس صنعتی، ضریب نفوذپذیری بیش‌تری در مقایسه با نمونه‌های فاقد نانورس دارند. با افزایش سطح تنش خارجی، تأثیر تنش خارجی بر مشخصات آب حفره‌ای غلبه کرده و عملاً نفوذپذیری نمونه‌های مختلف مورد مطالعه، در غلظت‌های مختلف آلاینده، به نسبت مشابه می‌شود.

۵- مراجع

- [1] LeBaron, P. C., Wang, Z., and Pinnavaia, T. J., *Polymer-layered Silicate Nanocomposites: an Overview*, App. Clay Sci., 15(1): 11-29, 1999.

- [14] Smith, C.C. ,Pearce C.L., The Influence of physicochemical Stresses on Sorption and Volume Change Behaviours of Bentonite., R.N. Yong Geoenvironment Eng, pp. 95-101, 2001.
- [15] Ouhadi, V.R., and Amiri, M., *Geo-Environmental behaviour of nano-clays in interaction with heavy metal contaminants*, Proceedings of the Fourth Conference on Nano-Technology, Razi University, Kermanshah, 2008.
- [12] Ouhadi, V.R. Yong, R.N. Sedighi, M., *Desorption response and degradation of buffering capability of bentonite, subjected to heavy metal contaminants*, Engineering Geology 85, pp. 102-110, 2006.
- [13] Hird, C.C., Smith, C.C. and Prakash, V.J., *The Influence of physico-chemical stresses on permeability and volume change behaviour of bentonite*. Proceedings, 1st BGS GeoEnvironmental Engineering conference, Cardiff, pp. 331-336, 1997.