تأثیر تغییر خصوصیات مایع منفذی و افزایش درجه حرارت بر پارامترهای ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی رس اسمکتیت

وحیدرضا اوحدی*[۱] و امیررضا گودرزی [۲]
[۱] استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا
[۲] استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

چکیده

اسمکتیت به واسطه داشتن یک سری خصوصیات مهندسی ویژه، در بسیاری از پروژه‌های عمرانی و زیست‌محیطی همچون دفن مهندسی زباله‌های اتمی، مراکز دفن زباله صنعتی و شهری، و دیواره‌های آب بند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. علی‌رغم تحقیقات وسیعی که در زمینه رفتار مهندسی رس اسمکتیت انجام شده‌است، به موضوع تأثیر تغییر خصوصیات مایع منفذی و افزایش حرارت بر پارامترهای ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی اسمکتیت در تحقیقات قبلی، توجه کمتری معطوف شده است. در تحقیق حاضر، تأثیر تغییر مایع منفذی و گرادیان حرارتی بر رفتار فیزیکی- مکانیکی اسمکتیت مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. این مطالعات در مقیاس درشت‌ساختاری و ریزساختاری انجام شده است. برای تغییر مشخصات محیطی مجاور خاک از الکترولیت‌های حاوی کاتیون سدیم و کلسیم و تغییر شرایط گرمایی تا محدوده ۲۰۰°C استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که بر اثر مجاورت خاک با رژیم آبی حاوی املاح و همچنین تغییرات دمایی، قابلیت جذب و نگهداری آب توسط اسمکتیت و رفتار مکانیکی آن تغییر می‌کند. دامنه این تغییرات در برخی از موارد مورد مطالعه بیش از ۵۰٪ بوده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های ریزساختاری، علت تغییر در رفتار اسمکتیت بعد از اندرکنش با الکترولیت‌های مختلف و افزایش درجه حرارت، ناشی از تغییر مورفولوژی، تغییر در نیروهای بین پولک‌ها و ایجاد آرایش جدید پولک‌های رسی بوده که سبب تغییر در رفتار بزرگ‌ساختاری خاک می‌شود.

واژگان کلیدی: اسمکتیت، مایع منفذی، حرارت، تغییر ریزساختار، تغییر خصوصیات مهندسی.

۱- مقدمه

اسمکتیت به دلیل خصوصیات رفتاری خاصی که دارد از جمله ظرفیت زیاد جذب آب، هدایت هیدرولیکی بسیار کم، شکل‌پذیری مناسب، خاصیت خود درزگیری[۱] و قابلیت زیاد در نگهداشت مواد آلاینده، به‌عنوان یک مصالح آب‌بند در ساخت پروژه‌های عمرانی (مانند هسته سدهای خاکی) و پروژه‌های زیست‌محیطی (مانند سیستم محافظ[۲] مراکز دفن زباله هسته‌ای) به صورت فراگیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۳]. از طرفی توجه به وابستگی خصوصیات مهندسی رس‌ها به عوامل مختلفی شامل شرایط بارگذاری خارجی و نیروهای بین ذره‌ای، می‌تواند مانع از تکرار شکست پروژه‌هایی مانند احداث اتوبان اوکلاهاما [۴] و صدها مرکز دفن زباله که عموماً پس از ساخت سبب آلودگی محیط زیست شده‌اند، گردد [۵]. در واقع بر پایه مباحث تئوریک لایه دوگانه و با توجه به معادله (۱) در شرایط یکسان تنش‌های خارجی، رفتار رس‌ها تابعی از نیروهای دافعه (R_{ep}) و نیروهای جاذبه (A_{tt}) بین صفحات رسی است [۶].

$$\sigma' = \sigma_{tot} - u_0 - (R_{ep} - A_{tt}) \quad (۱)$$

در معادله فوق، u_0 فشار آب حفره‌ای، σ_{tot} تنش کل، و σ' تنش مؤثر است. با توجه به مطالعات انجام شده، نیروهای جاذبه و دافعه بین پولک‌های رسی خود تابع تغییر شرایط محیطی اطراف رس هستند [۷]. بر این اساس انتظار می‌رود با تغییر شرایط محیطی از جمله تغییر خصوصیات الکترولیت مایع منفذی، نیروهای داخلی بین پولک‌ها تغییر کرده و در نتیجه ویژگی‌های پارامترهای بزرگ‌ساختاری رس نظیر هدایت هیدرولیکی و جذب آب آن دچار نوسانات عمده‌ای شوند [۸-۱۰]. در شرایط اجرایی، تغییر در نوع مایع منفذی خاک ممکن است ناشی از نفوذ شیرابه آلاینده به درون لایه‌های محافظ مراکز دفن زباله، نشت مواد شیمیایی (مانند گازوئیل) از انبارهای نگهداری بوده و یا به دلیل تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و پساب معادن در رودخانه‌ها و مجاورت خاک با این آب‌ها اتفاق افتد. در مراکز مهندسی دفن زباله هسته‌ای از یک سو، بر اثر حل شدگی پوسته فلزی نگهدارنده زباله هسته‌ای، تغییر در خصوصیات مایع

1- Self-sealing
2- Engineering Barrier System: EBS

* نویسنده مسئول
دریافت ۹۱/۱۱/۱۰ پذیرش ۹۳/۶/۳

منفذی صورت می‌گیرد. از سوی دیگر، حرارت ناشی از زوال گرمایی زباله‌های رادیواکتیو[1]، سبب تغییر در شرایط محیطی خاک می‌شود [۱۱]. سطح گرمای تولید شده بر حسب شرایط مرکز دفن و نوع زباله‌ها متغیر بوده و در محدوده ۱۰۰°C تا ۲۵۰°C گزارش شده است [۱۲، ۱۳].

علی‌رغم اهمیت این موضوع، در رابطه با تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر اثر تغییر در شرایط حرارتی اسمکتیت تاکنون تحقیقات محدودی انجام شده است. بر این اساس در مطالعه حاضر سعی شده است رفتار فیزیکی- مکانیکی اسمکتیت در شرایط متنوعی (شامل رژیم آبی متغیر و افزایش حرارت) مورد بررسی قرار گیرد. هدف این تحقیق، مطالعه امکان تغییر پارامترهای مهندسی و ماندگاری[2] رفتار اسمکتیت در اثر تغییر شرایط محیطی می‌باشد. از آن‌جا که یکی از کاربردهای اسمکتیت به عنوان مانع رسی در دفن زباله‌های هسته‌ای است، از نتایج این تحقیق می‌توان در تعیین ریسک تغییر مشخصات مهندسی اسمکتیت در پروژه‌های دفن زباله‌های هسته‌ای استفاده نمود.

۲- مواد و روش‌ها

به دلیل کاربرد فراوان اسمکتیت در پروژه‌های عمرانی و زیست‌محیطی، کلیه مطالعات این پژوهش نیز بر روی این نوع خاک صورت گرفته است. خصوصیات ژئوتکنیکی اسمکتیت مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM [۱۴] اندازه‌گیری شده‌است. خصوصیات ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک نیز بر اساس روش Yong و همکاران [۱۵] تعیین و برای آنالیز مایع منفذی از دستگاه جذب اتمی مدل GBC 932 Plus استفاده شد. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده با سه بار تکرار، خصوصیات خاک مورد مطالعه مطابق جداول (۱) و (۲) به دست آمد. به منظور مطالعه امکان تغییر رفتار اسمکتیت ناشی از تغییر نوع مایع منفذی، ابتدا تأثیر کاتیون‌های کلسیم و سدیم بر رفتار اسمکتیت مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی اسمکتیت مورد مطالعه

خصوصیت	مقدار اندازه‌گیری شده
Liquid Limit, %	۳۱۴/۵
Plasticity Index, %	۲۸۳
Soil classification	CH
Clay fraction, %	۷۷
Silt fraction, %	۲۳

1- β-decay of the fission products
2- Stability

جدول ۲- پارامترهای ژئوتکنیک زیست‌محیطی اسمکتیت

خصوصیت	مقدار اندازه‌گیری شده
EC, (dS/m)	۰/۶۴
pH	۹/۰۱
Na^{+}, (cmol /kg)	۵۰/۹
Ca^{2+}, (cmol /kg)	۱۲/۲
Mg^{2+}, (cmol /kg)	۳/۱
K^{+}, (cmol /kg)	۲/۱
CEC, (cmol /kg)	۶۸/۳
SSA, (m^2/g)	۴۱۸

انتخاب کاتیون‌های فوق از آن‌جا صورت گرفته است که مهم‌ترین کاتیون‌های آلاینده غیر ارگانیک که در شرایط اجرایی ممکن است سبب تغییر مایع منفذی خاک گردند، شامل کلسیم و سدیم می‌باشند [۱۲، ۱۶]، در این راستا از نمک‌های سولفات-کلسیم و سولفات‌سدیم در غلظت‌های صفر تا ۱ نرمال استفاده شد. از آن‌جا که بیشترین تأثیرپذیری بافت خاک ناشی از تغییر نوع مایع منفذی، در شرایط کلوئید خاک- آب رخ می‌دهد [۱۷]، با اضافه کردن اسمکتیت به هر محلول نمونه‌هایی در نسبت ۱:۱۰ خاک- الکترولیت آماده شد. نمونه‌ها پس از نگهداری به مدت ۹۶ ساعت تحت شرایط تعادل‌سازی قرار گرفتند. برای حصول شرایط تعادل، نمونه‌ها هر روز به مدت ۱۵ دقیقه بهم زده می‌شدند. سپس نمونه‌ها درون لوله‌های پلاستیکی توخالی به قطر ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تخلیه و با استفاده از یک پیستون و بارگذاری مرحله‌ای تا تنش ۲۵ kPa، پیش-بارگذاری شده‌اند. پس از خروج کامل آب حفره‌ای اضافی، نمونه-ها را به ترتیب از درون لوله‌ها بیرون آورده و با تعیین درصد رطوبت، دانسیته و نسبت تخلخل هر نمونه، رفتار تغییر حجمی خاک ناشی از اندرکنش با الکترولیت‌های مختلف مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. در هنگام بیرون آوردن نمونه‌های خاک از درون لوله‌های پیش‌بارگذاری، نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش ادئومتری و اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری، به وسیله رینگ تحکیم با قطر ۵ و ارتفاع ۲ سانتی‌متر مغزه‌گیری شد.

همچنین با توجه به اهمیت حفظ خصوصیات تورمی و نگهداشت آب توسط اسمکتیت به عنوان لایه آب‌بند [۱۸]، بخشی از آزمایش‌ها به مطالعه تغییرات قابلیت تورم نمونه‌های خاک اختصاص داده شد. بر این اساس با انجام یک سری آزمایش‌های مرتبط با شرایط اندرکنش خاک- آب شامل آزمایش مکش و آزمایش تورم، فرایند تغییر رفتار خاک بر اثر مجاورت با حرارت مورد مطالعه قرار گرفته‌است. بدین منظور نمونه‌های اشباع شده اسمکتیت در چهار سطح حرارتی مختلف شامل

۲۵°C، ۱۰۰°C، ۱۵۰°C و ۲۰۰°C به مدت ۷۲۰۰ ساعت بر حسب نوع آزمایش نگهداری و سپس مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌های اسمکتیت مورد نیاز برای آزمایش مکش، ابتدا در نسبت آب به خاک برابر ۱ تهیه، و در سلول‌های پیش‌بارگذاری تا تنش ۸۰ کیلوپاسکال تحت تحکیم یک بُعدی قرار گرفتند. سپس با استفاده از رینگ‌های برنجی با قطر ۵ سانتیمتر از نمونه خاک‌های فوق نمونه‌گیری شده و پس از ایجاد شرایط حرارتی مورد نظر، آزمایش‌های مربوطه انجام گرفته‌اند.

در بخش مطالعات تورم، تغییرات قابلیت تورم خاک، تورم آزاد[1] نمونه‌های اسمکتیت، در شرایط قبل و پس از اعمال حرارت، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور بر اساس روش توصیه شده در استاندارد ASTM، پس از قرار دادن نمونه‌ها در دماهای مورد نظر، مقدار ۲ گرم خاک خشک اسمکتیت را درون استوانه مدرج ۱۰۰ میلی‌لیتری تخلیه کرده و سپس تا انتهای قسمت مدرج با آب مقطر پُر شده‌اند. پس از گذشت زمان ۲۴ ساعت میزان افزایش حجم هر نمونه قرائت و مقدار تورم آزاد خاک مطابق معادله (۲) محاسبه شده‌است [۱۴، ۱۹]. در معادله (۲)، V حجم نمونه برحسب میلی‌لیتر و S جرم خاک برحسب گرم است.

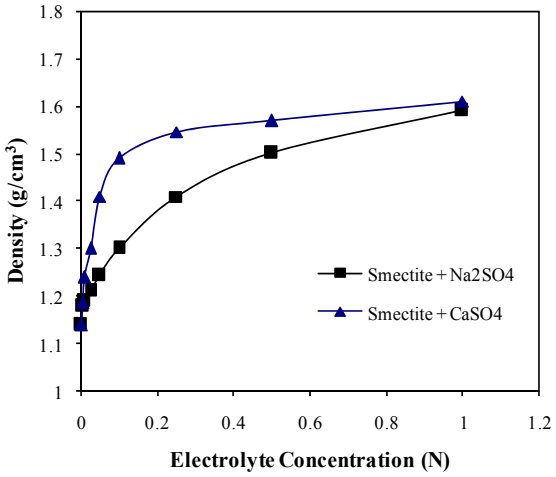
$$Free\ swell\ [ml/g] = V/S \qquad (۲)$$

برای مطالعه ریزساختار (میکروفابریک) اسمکتیت و تحلیل تأثیر تغییر شرایط محیطی بر رفتار مهندسی خاک در مقیاس میکروسکوپی، در هر مرحله متناسب با تغییرات اعمال شده، نمونه‌هایی برای آنالیز X-ray تهیه [۲۰] و با استفاده از دستگاه مدل Siemens-Diffraktometer-D5000 آنالیز شده‌اند.

۳- بررسی و تحلیل داده‌های اخذ شده

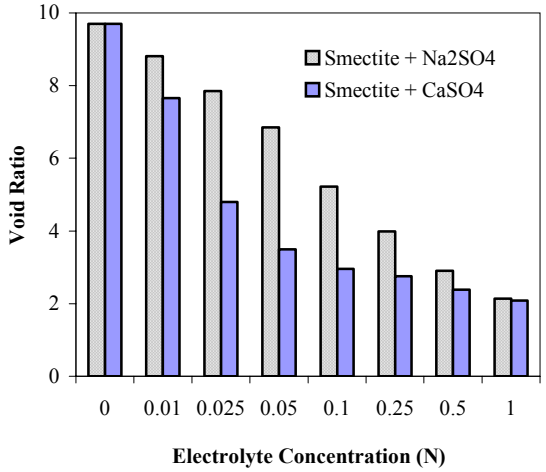
۳-۱- ارزیابی تأثیر خصوصیات مایع منفذی بر پارامترهای مهندسی اسمکتیت

در شکل‌های (۱) و (۲)، مقادیر دانسیته و نسبت تخلخل نمونه‌های اسمکتیت برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف الکترولیت، پس از اتمام مرحله پیش‌بارگذاری و خارج کردن خاک از قالب‌های پیش‌بارگذاری ارائه شده است.



شکل ۱- افزایش دانسیته خاک ناشی از تغییر نوع مایع منفذی (شرایط یکسان بارگذاری خارجی)

نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱) و (۲) نشان می‌دهند که به واسطه فرایند اندرکنش اسمکتیت با الکترولیت‌های مختلف و با افزایش غلظت الکترولیت، دانسیته نمونه‌ها افزایش و مقدار نسبت تخلخل خاک کاهش یافته است. با توجه به یکسان بودن شرایط بارگذاری خارجی برای کلیه نمونه‌ها، علت تغییر خصوصیات مهندسی خاک در این نمونه‌ها را می‌توان به تفاوت خصوصیات الکترولیت در اندرکنش با اسمکتیت نسبت داد. در واقع با افزایش غلظت املاح موجود در مایع منفذی اطراف پولک‌های رسی و به دلیل کاهش نیروی دافعه بین ذرات، نحوه آرایش سطوح رسی تغییر می‌کند [۲۱] و با فشردن شدن پولک‌ها به یکدیگر، کاهش فضای خالی بین ذرات (کاهش نسبت تخلخل) و در نتیجه افزایش دانسیته خاک صورت می‌گیرد [۱۹، ۲۲].



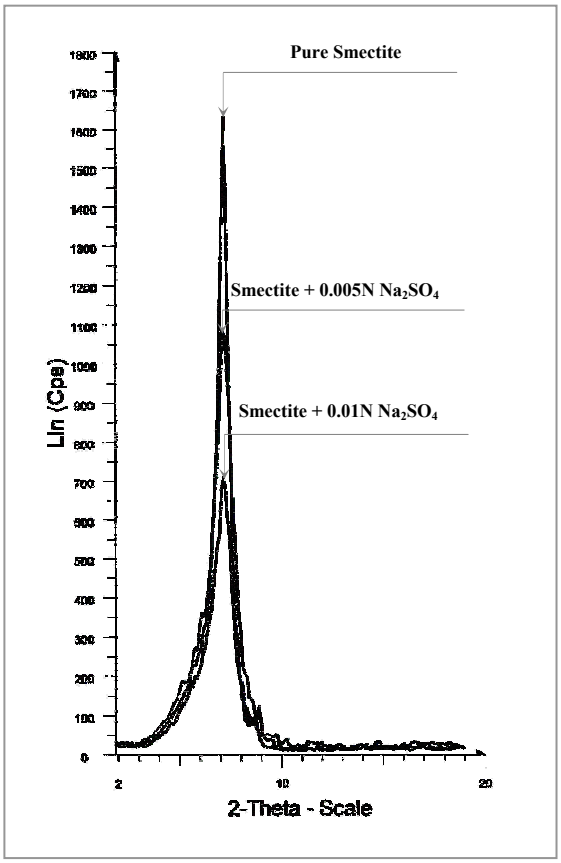
شکل ۲- کاهش نسبت تخلخل خاک ناشی از تغییر مایع منفذی (شرایط یکسان بارگذاری خارجی)

1- Free swell

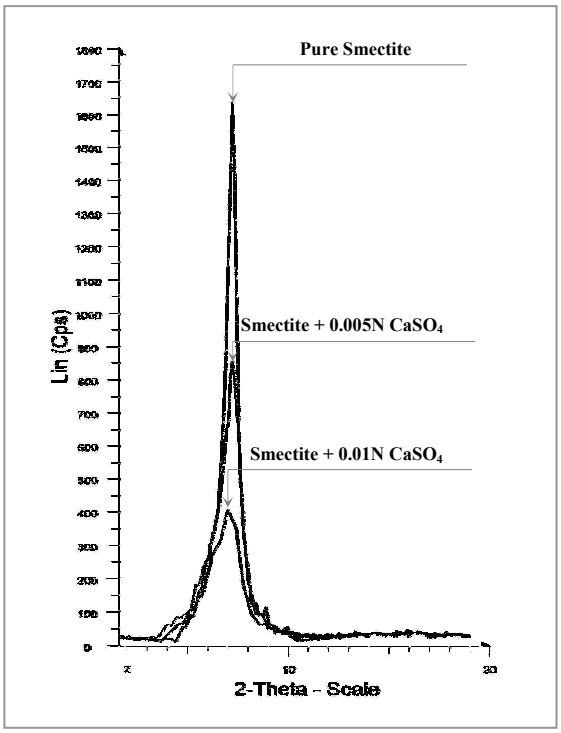
بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل‌ها می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در غلظت یکسان الکترولیت، میزان تغییر رفتار خاک برای اسمکتیت حاوی الکترولیت سولفات کلسیم به مراتب نسبت به اسمکتیت حاوی الکترولیت سولفات سدیم بیشتر است. این موضوع مرتبط با دو ظرفیتی بودن کاتیون کلسیم در مقایسه با سدیم تک ظرفیتی بوده که بر اساس نظریه لایه دوگانه، حضور کاتیون دو ظرفیتی سبب فشردگی بیشتر لایه دوگانه و در نهایت فشردگی بیشتر پولک‌ها به یکدیگر شده‌است [۲۱]. در عین حال، با افزایش غلظت الکترولیت، (محدوده غلظت یک نرمال) و به دلیل ایجاد حداکثر تغییرات رفتاری در نمونه‌ها، اثر والانس کاتیون به حداقل ممکن کاهش یافته است. به طوری که مشخصات دانسیته و نسبت تخلخل دو نمونه به مقدار تقریباً یکسانی نزدیک شده است.

نتایج فوق نشان می‌دهند که بر اثر مجاورت اسمکتیت با رژیم آبی متغیر، حتی با وجود عدم تغییر در میزان تنش‌های خارجی، رفتار مهندسی خاک تغییر می‌کند. از طرفی کاهش فضای خالی و افزایش تراکم‌پذیری اسمکتیت در اثر تغییر مشخصات مایع منفذی، در شرایط واقعی به دلیل امکان توزیع غیر یکنواخت خصوصیات سیال در تماس با خاک و در نتیجه عدم یکسان بودن روند تغییرات در نقاط مختلف پوشش رسی، می‌تواند سبب ایجاد نشست‌های نامتقارن و ترک در لایه آب‌بند و بروز اشکال در عملکرد آن شود. زیرا در این حالت افزایش قابلیت تراوش آب از درون خاک، سبب کاهش کارآیی و سطح ایمنی پروژه خصوصاً در مراکز دفن زباله (با توجه به امکان انتشار مواد آلاینده به محیط اطراف و توسعه آلودگی) خواهد شد.

بر پایه تحقیقات انجام شده، مطالعه ارتفاع و موقعیت قله اصلی در پراش پرتو X خاک، به عنوان یک معیار مناسب برای مطالعه تغییر ریزساختار سطوح رسی قابل استفاده است [۲۳، ۲۴، ۲۵]. بر این اساس در پژوهش حاضر نیز با انجام یک سری آزمایش XRD بر روی نمونه‌های اسمکتیت حاوی الکترولیت، تغییرات ریزساختاری خاک بر اثر فرایند اندرکنش الکترولیت-اسمکتیت مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل (۳) پراش پرتو X مربوط به نمونه‌های اسمکتیت حاوی غلظت‌های متفاوت الکترولیت سولفات‌سدیم و در شکل (۴) پراش پرتو X مربوط به نمونه‌های اسمکتیت حاوی غلظت‌های مختلف الکترولیت سولفات‌کلسیم نشان داده شده است.



شکل ۳- پراش پرتو X مربوط به نمونه‌های اسمکتیت حاوی غلظت‌های مختلف الکترولیت سولفات سدیم



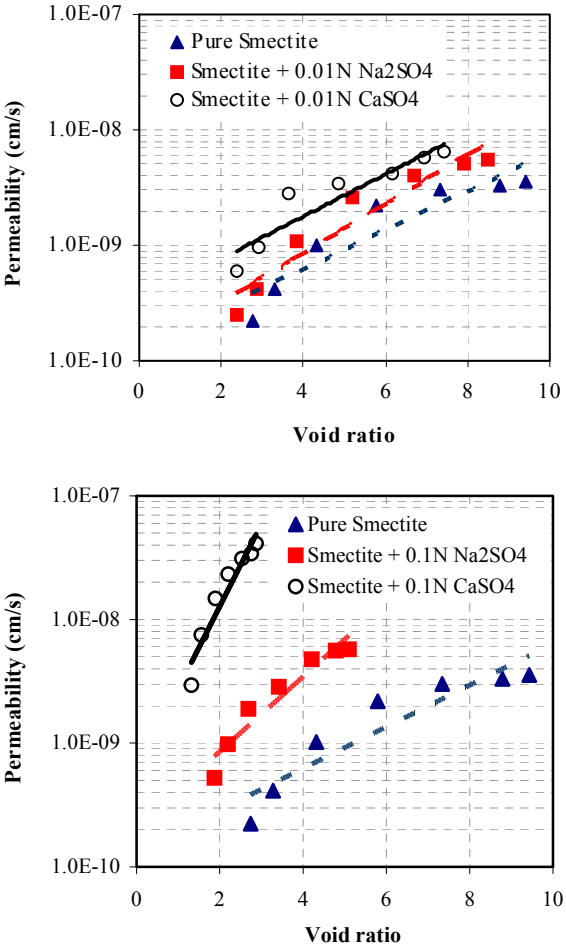
شکل ۴- پراش پرتو X مربوط به نمونه‌های اسمکتیت حاوی غلظت‌های مختلف الکترولیت سولفات کلسیم

با توجه به نمودارهای آنالیز X-ray، مشاهده می‌شود در کلیه نمونه‌ها بر اثر افزایش میزان غلظت الکترولیت، موقعیت قله اصلی ثابت، ولی شدت آن کاهش یافته است. علت کاهش شدت قله در پراش پرتو X در شرایط کانی ساخت ثابت (عدم تغییر موقعیت قله)، ناشی از تغییر میکروفابریک خاک و جمع‌شدگی پولک‌های رسی در کنار یکدیگر است [۲۳].

در واقع بر اثر اندرکنش الکترولیت حاوی غلظت‌های مختلف کاتیون‌های سدیم و کلسیم، لایه دوگانه رسی فشرده شده که این فشردگی در افزایش دانسیته و کاهش نسبت تخلخل نمونه‌ها در شکل‌های (۱) و (۲) مورد تأیید قرار گرفت. در واقع نتایج طیف اشعه ایکس، همخوانی قابل توجهی با نتایج شکل‌های (۱) و (۲) نشان می‌دهند. علاوه بر این با مقایسه شکل‌های (۳) و (۴) ملاحظه می‌شود در شرایط غلظت یکسان الکترولیت، میزان کاهش شدت قله برای نمونه‌های اسمکتیت حاوی کلسیم نسبت به سدیم بیشتر بوده که این موضوع به دلیل توانمندی و انرژی بیشتر کاتیون کلسیم در ایجاد ساختار مجتمع نسبت به کاتیون سدیم است.

از آن‌جا که مطالعات متعدد، بیانگر آن است که هدایت هیدرولیکی رس‌ها تابعی از نحوه آرایش سطوح رسی در کنار یکدیگر است [۵، ۱۹]، با توجه به نتایج آنالیز X-ray، مبنی بر تغییر ریزساختار خاک به علت تغییر مشخصات الکترولیت مایع منفذی، انتظار می‌رود بعد از اندرکنش خاک- الکترولیت هدایت هیدرولیکی اسمکتیت تغییر یابد. در این راستا با استفاده از آزمایش ادئومتری، ضریب نفوذپذیری اسمکتیت در غلظت‌های مختلف الکترولیت حاوی کاتیون سدیم و کلسیم محاسبه و نتایج آن در شکل (۵) ارائه شده‌اند.

بر اساس نتایج شکل (۵) ملاحظه می‌شود با افزایش والانس کاتیون و افزایش غلظت الکترولیت مایع منفذی مجاور پولک‌های اسمکتیت، نفوذپذیری نمونه خاک افزایش یافته است. به طوری که در نمونه اسمکتیت حاوی غلظت ۰/۱ نرمال سولفات کلسیم نسبت به نمونه اسمکتیت تهیه شده با آب مقطر، ضریب نفوذپذیری در حدود ۱۰۰ برابر بیشتر شده است. این افزیش در ضریب نفوذپذیری خاک را می‌توان به اندرکنش پولک‌های اسمکتیت با الکترولیت حاوی غلظت‌های مختلف نمک نسبت داد. در واقع با توجه به نتایج آزمایش‌های ریزساختاری، علت تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک را می‌توان به دلیل کاهش نیروی دافعه بین پولک‌های رسی و تبدیل میکروفابریک خاک از حالت ساختار پراکنده به ساختار مجتمع و تشکیل یک سری حفرات ماکروسکوپی نسبت داد.



شکل ۵- تغییرات هدایت هیدرولیکی اسمکتیت در اثر تغییر خصوصیات سیال منفذی اطراف پولک‌های رسی

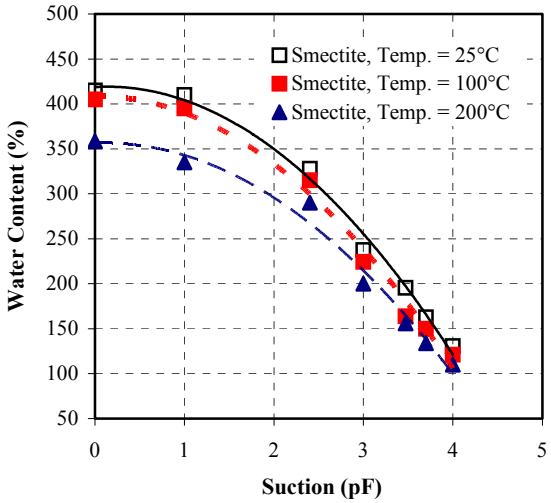
این تغییر در ریزساختار عملاً سبب می‌شود جریان از درون خاک به سهولت صورت گرفته و در نتیجه نفوذپذیری خاک افزایش یابد [۵، ۷]. مسأله امکان تغییر هدایت هیدرولیکی خاک بر اثر تغییر مشخصات مایع منفذی اطراف آن، در پروژه‌های زیست‌محیطی به دلیل حتمی بودن تغییر نوع مایع منفذی خاک (ناشی از نشت شیرابه حاوی املاح مختلف) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا طبق توصیه سازمان EPA[1] افزایش نفوذپذیری پوشش رسی در مراکز دفن زباله خطرناک به بیش از 10^{-9} cm/s، سبب می‌شود عملکرد مرکز دفن زباله به سمت حالت مخاطره‌انگیز میل کند [۲۶]. بر این اساس یکی از موارد حائز اهمیت در پایایی سازه‌های خاکی- آبی، توجه به قابلیت تغییر ریزساختار رس (بر اثر تغییر خصوصیات مایع منفذی) و در نتیجه امکان افزایش ضریب گذردهی جریان از درون لایه آب‌بند رسی است.

1- Environmental Protection Agency

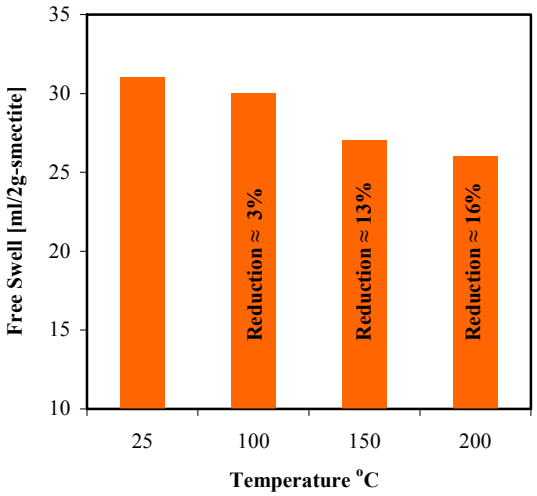
۳-۲- تأثیر حرارت بر ماندگاری رفتار اسمکتیت

در طراحی لایه‌های آب‌بند، استفاده از مصالحی با ظرفیت زیاد در نگهداشت آب با هدف مسدود کردن تراوش و یا جلوگیری از انتقال مواد آلاینده، از جمله شروط اصلی مصالح مورد استفاده است. به طوری که در طراحی پوشش رسی مراکز دفن زباله اتمی اطمینان از حفظ این قابلیت خاک در شرایط مجاورت طولانی مدت با گرمای ناشی از زوال زباله‌های رادیواکتیو، نقش بسیار مهمی در جلوگیری از انتشار تشعشعات هسته‌ای دارد [۱۸]. بر این اساس با توجه به ارتباط نزدیک نتایج آزمایش مکش با ظرفیت نگهداشت آب توسط خاک [۲۷، ۲۸]، با انجام چندین آزمایش مکش بر روی نمونه‌های اسمکتیت در شرایط حرارتی مختلف، تأثیر گرما بر قابلیت نگهداری آب توسط خاک از طریق مطالعه منحنی نگهداشت خاک (SWCC[1]) مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن در شکل (۶) ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که منحنی نگهداشت آب توسط خاک در شرایط یکسان فشار، در اثر افزایش حرارت اسمکتیت تغییر می‌کند. به‌طوری‌که ظرفیت نگهداشت آب در نمونه حرارت داده شده تا ۲۰۰°C نسبت به نمونه اولیه، حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است.

از سوی دیگر، بر اساس نتایج تحقیقات سایر محققین، عملکرد مطلوب اسمکتیت به‌عنوان مصالح مناسب محصور کننده جریان، علاوه بر نحوه نگهداشت آب توسط خاک، تابعی از قابلیت تورم خاک است [۱۸، ۲۴]. به بیان دیگر، تورم بین لایه‌ای و بین پولکی اسمکتیت سبب خواهد شد تا ریزترک‌های ایجاد شده در اسمکتیت متراکم، مسدود شوند که به این ویژگی اصطلاحاً قابلیت خودترمیمی گفته شده و سبب بهبود در عملکرد طولانی-مدت پوشش آب‌بند رسی می‌شود. به منظور مطالعه این رفتار، در تحقیق حاضر علاوه بر آزمایش‌های مکش، رفتار تورمی نمونه-های اسمکتیت قبل و پس از افزایش حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل (۷) تغییرات قابلیت تورم اسمکتیت در مقابل تغییرات درجه حرارت بر اساس نتایج آزمایش تورم آزاد ارائه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش درجه حرارت بر نمونه اسمکتیت، تورم خاک کاهش یافته، به نحوی که میزان کاهش تورم نمونه اسمکتیت حرارت داده شده تا ۲۰۰°C نسبت به نمونه اسمکتیت اولیه، حدود ۱۶ درصد است.



شکل ۶- تغییرات منحنی نگهداشت آب نمونه‌های اسمکتیت ناشی از اعمال حرارت به خاک



شکل ۷- تغییرات قابلیت تورم اسمکتیت بر اثر مجاورت با گرما

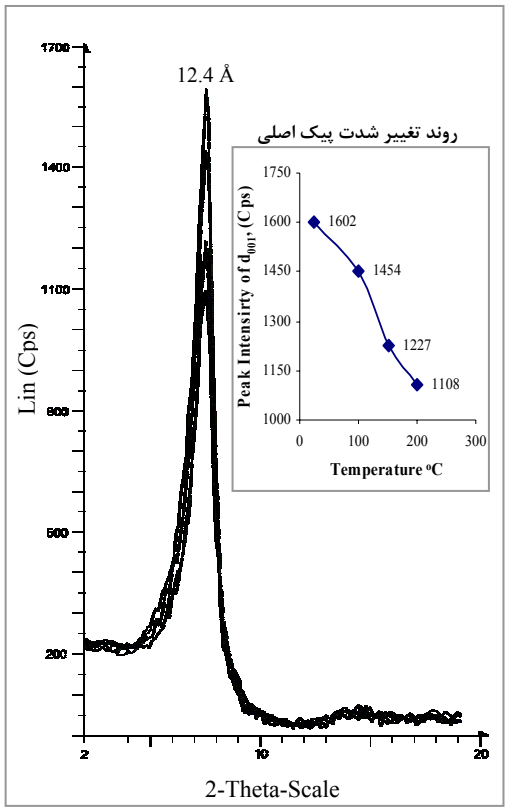
با توجه به یکسان بودن شرایط آماده‌سازی نمونه‌ها و مشخصات مایع منفذی (آب مقطر)، علت تغییرات رفتاری مشاهده شده در نتایج شکل‌های (۶) و (۷)، می‌تواند ناشی از دو عامل متفاوت باشد. عامل اول، فرض تغییر در کانی‌های تشکیل-دهنده خاک در اثر اعمال حرارت است. با فرض عدم تغییر در کانی‌های تشکیل دهنده اسمکتیت، دومین عامل ممکن در تغییر روند منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های (۶) و (۷) را می‌توان به تغییر آرایش و نحوه قرارگیری پولک‌های رسی در اثر تغییرات درجه حرارت نسبت داد. زیرا در شرایط عدم تغییر نیروهای خارجی، تغییر آرایش و نحوه قرارگیری پولک‌های رسی در اثر تغییر شرایط نیروهای داخلی به عنوان یک عامل اصلی در تغییر رفتار خاک‌های ریزدانه شناخته شده است [۶]. در شرایط مورد

1- Soil-water characteristic curve

بحث و با فرض عدم تغییر در نوع کانی‌های تشکیل دهنده، افزایش حرارت و دی‌هیدراته شدن پولک‌های رسی سبب افزایش غلظت الکترولیت‌های لایه دوگانه در اطراف پولک رسی، کاهش نیروهای دافعه بین پولک‌های رسی و در نتیجه کاهش پراکندگی قابل توجه در ساختار اولیه اسمکتیت شده است [۲۰]. به‌طوری‌که علت کاهش قابلیت نگهداشت آب و میزان تورم خاک را می‌توان به دلیل جمع‌شدگی ماندگار ساختار و کاهش فضای مابین پولک‌های رسی نسبت داد.

به منظور تعیین قطعی علت تغییر خصوصیات مهندسی اسمکتیت در اثر افزایش حرارت، با انجام آنالیز X-ray مشخصات ریزساختاری نمونه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج آن در شکل (۸) ارائه شده‌است.

تغییرات پراش پرتو X نمونه‌ها در شکل (۸) بیانگر آن است که با افزایش حرارت، موقعیت قله اصلی معرف اسمکتیت (12.4Å) تغییری نشان نداده ولی شدت قله اصلی اسمکتیت متناسب با افزایش گرما، کاهش یافته است. عدم تغییر موقعیت قله بر اثر افزایش حرارت، بیانگر عدم تغییر در کانی‌های تشکیل دهنده نمونه خاک است.



شکل ۸- تغییرات ریزساختاری اسمکتیت با افزایش حرارت

به طوری‌که پس از اشباع مجدد نمونه با آب مقطر، امکان برگشت بخشی از تغییر ساختار ایجاد شده به دلیل تغییر شرایط بار روی پولک‌های رسی، مهیا نبوده است. این نتیجه‌گیری با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققین انطباق مناسبی دارد [۱۳، ۱۸، ۲۵]. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸)، با تغییر ریزساختار خاک حرارت داده شده و شکل‌گیری توزیع جدیدی از فضای مابین سطوح رسی، انتظار می‌رود رفتار فیزیکی- مکانیکی خاک تغییر کند که نتایج آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری در شکل‌های (۶) و (۷) تاییدکننده این موضوع است.

با توجه به نتایج شکل‌های (۶) و (۷)، افزایش حرارت سبب کاهش اندرکنش آب و اسمکتیت شده که این تغییرات در شرایط واقعی مراکز دفن زباله اتمی، سبب کاهش اتصال بین لایه محافظ رسی و ظروف نگهدارنده زباله و همچنین کاهش خصوصیات خود ترمیمی اسمکتیت می‌شود [۲۹، ۳۰]. در این حالت، احتمال حضور جریان آب‌های زیرزمینی در مجاورت ظروف فلزی نگهدارنده زباله هسته‌ای و درنتیجه پوسیدگی این ظروف افزایش یافته و در نهایت تهدیدی جدّی در راستای امکان انتشار آلودگی رادیواکتیو از طریق چرخه آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود.

یکی از نکات حائز اهمیت در مجموعه نتایج آزمایش‌های مطالعه تأثیر حرارت بر رفتار خاک، آن است که روند تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مهندسی اسمکتیت، در دو محدوده متمایز، قابل تفکیک است. مشاهده می‌شود، عمده تغییرات رفتاری خاک در محدوده دماهای بالاتر از ۱۰۰°C بوده و در محدوده دماهای کمتر از ۱۰۰°C خصوصیات مهندسی خاک تغییرات کمتری داشته است. بر این اساس کنترل زمان لازم برای خنک‌سازی زباله‌های اتمی قبل از انتقال به مرکز دفن (به منظور کنترل سطح دمای ظروف نگهدارنده زباله در زمان دفن آن‌ها) می‌تواند یکی از روش‌های مؤثر در افزایش ضریب اطمینان طراحی و عملکرد مطلوب لایه محافظ رسی مراکز دفن زباله هسته‌ای محسوب شود. لازم به ذکر است تغییرات رفتاری مشاهده شده در دماهای بالاتر از ۱۰۰°C نیز محدود بوده که این موضوع بیانگر خصوصیات ویژه اسمکتیت به عنوان یکی از مناسب‌ترین مصالح برای ایزوله کردن محیط پیرامون مراکز دفن مهندسی زباله‌های اتمی است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- پارامترهای مهندسی خاک مانند تراکم‌پذیری و ضریب گذردهی جریان در مصالح اسمکتیتی، بر اثر اندرکنش خاک با

الکترولیت و متناسب با افزایش والانس کاتیون و غلظت الکترولیت در شرایط تنش‌های خارجی یکسان، افزایش نشان می‌دهند.

۲- قابلیت نگهداشت آب در نمونه رسی اسمکتیت در اثر افزایش درجه حرارت، کاهش می‌یابد. روند تغییرات ایجاد شده به دلیل تأثیر کاهشی بر تمایل اندرکنش خاک- آب و قابلیت تورم پولک‌های رسی، تهدیدی در راستای عملکرد مطلوب اسمکتیت به عنوان مصالح ایزوله کننده اطراف مراکز دفن زباله محسوب می‌شود.

۳- بر اساس نتایج آزمایش‌های ریز ساختاری پژوهش حاضر، تغییر خصوصیات مهندسی اسمکتیت در اثر تغییر شرایط محیطی، ناشی از تغییر آرایش پولک‌های رسی و جمع‌شدگی ماندگار ساختار است. تغییرات ایجاد شده سبب شکل‌گیری توزیع جدیدی از فضای مابین سطوح رسی شده که بر اثر آن، قابلیت اندرکنش خاک با آب تغییر می‌کند.

۴- با افزایش درجه حرارت، روند تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مهندسی اسمکتیت، تابعی از میزان تغییر درجه حرارت بوده و عمدتاً در دماهای بالاتر از ۱۰۰°C اتفاق می‌افتد. در محدوده دماهای کمتر از ۱۰۰°C، تغییر خصوصیات مهندسی خاک اندک است.

۵- مراجع

[1] Koch, D., "Bentonite as a Basic Materials for Technical Base Liners and Site Encapsulation Cut-off Walls", Applied Clay Science, 2002, 21, 1-11.

[2] Yong, R. N., Ouhadi, V. R., Goodarzi, A. R., "Effect of Cu^{2+} Ions and Buffering Capacity on Smectite Microstructure and Performance", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135, 1981-1985.

[3] Ahn, H. S., Jo, H. Y., "Influence of Exchangeable Cations on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite", Applied Clay Science, 2009, 44, 144-150.

[4] Nevels, J. B., "Dispersive Clay Embankment Erosion: A Case History", National Academy Press, Washington D. C., 1993, studied the 50-57.

[5] Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B., Lin, L., "Evaluation the Hydraulic Conductivity of GCLs Permeated with Non-standard Liquids", Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18, 133-161.

[6] Kaya, A., Fang, H. Y., "The Effects of Organic Fluids on Physicochemical Parameter of Fine-grained Soils", Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37, 943-950.

[7] Casás, M., Pozo, M., Gómez, C. P., Pozo, E., Bessières, L. D., Plantier, F., Legido, J. L., "Thermal Behavior of Mixtures of Bentonitic Clay and Saline Solutions", Applied Clay Science, 2013, 72, 18-25.

[8] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Sedighi, M., "Influence of Heavy Metal Contaminants at Variable pH Regimes on Rheological Behaviour of Bentonite", Applied Clay Science, 2006, 3, 217-231.

[9] Di Maio, V., Santoli, L., Schiavone, P., "Volume Change Behaviour of Clays: the Influence of Mineral Composition, Pore Fluid Composition and Stress State", Mechanics of Materials, 2004, 36, 435-451.

[10] Ye, W. M., Borrell, N. C., Zhu, J. Y., Chen, B., Chen, Y. G., "Advances on the Investigation of the Hydraulic Behavior of Compacted GMZ Bentonite", Engineering Geology, 2014, 169, 41-49.

[11] Pusch, R., "Geological Storage of Highly Radioactive Waste", Springer, 2008.

[12] Bennett, D. G., Gens, R., "Overview of European Voncepts for High-level Waste and Spent Fuel Disposal with Special Reference Waste Container Corrosion", Nuclear Materials, 2008, 379, 1-8.

[13] Gu, B. X., Wang, L. M., Minc, L. D., Ewing, R. C., "Temperature Effects on the Radiation Stability and Ion Exchange Capacity of Smectites", Nuclear Materials, 2001, 297, 345-354.

[14] ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", Philadelphia, 2003.

[15] Yong, R. N., Mohamed, A. M. O., Warkentin, B. P., "Principles of Contaminant Transport in Soils", Elsevier, 1992.

[16] Dananaj, I., Frankovska´, J., Janotka, I., "The Influence of Smectite Content on Microstructure and Geotechnical Properties of Calcium and Sodium Bentonites", Applied Clay Science, 2005, 28, 223-232.

[17] Mitchell, J. K., Madsen, F. T., "Chemical Effects on Clay Hydraulic Conductivity", Geotechnique, 1987, 13, 87-116.

[18] Wersin, P., Johnson, L. H., McKinley, I. G., "Performance of the Bentonite Barrier at Temperatures Beyond 100 °C: A Critical Review", Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32, 780-788.

[19] Suzuki, S., Sazarashi, M., Akimoto, T., Haginuma, M., Suzuki, K., "A Study of the Mineralogical Alteration of Bentonite in Saline Water", Applied Clay Science, 2008, 41, 190-198.

[20] Ouhadi, V. R, Yong, R. N., Goodarzi, A. R., Safari-Zanjani, M., "Effect of Temperature on the Re-structuring of the Microstructure and Geo-environmental Behaviour of Smectite", Applied Clay Science, 2010, 47, 2-9.

[21] Ouhadi, V. R., Goodarzi, A. R., "Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum", Engineering Geology, 2006, 85, 91-101.

[22] Alawaji, A. H., "Swell and Compressibility Characteristics of Sand-bentonite Mixtures Inundated with Liquids", Applied Clay Science, 1999, 15, 411-430.

[23] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Bayesteh, H., and Goodarzi, A. R., "Influence of Potential Determining Ions on the Microstructural Performance and Contaminant Adsorption of A Homoionic Illitic Clay", Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 181, 77-93.

[24] Manjanna, J., Kozaki, T., Sato, S., "Fe (III)-Montmorillonite: Basic Properties and Diffusion of Tracers Relevant to Alteration of Bentonite in Deep Geological Disposal", Applied Clay Science, 2009, 43, 208-217.

[25] Herbert, H. J., Moog, H. C., "Cation Exchange, Interlayer Spacing, and Water Content of MX-80 Bentonite in High Molar Saline Solution", Engineering Geology, 1999, 54, 55-65.

[26] EPA530-F-97-002, "Geosynthetic Clay Liners Used in Municipal Solid Waste Landfills", United States Environmental Protection Agency, Solid Waste and Emergency Response, (5306W), 1997.

[27] Lloret, A., Villar, M. V., "Advances on the Knowledge of the Thermo-hydro-mechanical Behaviour of Heavily Compacted "FEBEX", bentonite", Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32, 701-715.

[28] Fredlund, D. G., Rahardjo, H., "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons, Ltd., 1993.

[29] Rosborg, B., Werme, L., "The Swedish Nuclear Waste Program and the Long-term Corrosion Behaviour of Copper", Journal of Nuclear Materials, 2008, 379, 142-153.

[30] SKB, SR-97, "Waste, Repository Design and Sites", Technical Report TR-99-08, Stockholm, Sweden, 1999.

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 44, Issue 3, Autumn 2014

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Pore Fluid Properties and the Increase of Temperature on Geotechnical and Geo-Environmental Parameters of Smectite

Vahid Reza Ouhadi[a,*] and Amir Reza Goodarzi[b]

[a] *Faculty of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Iran*
[b] *Faculty of Civil Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran*

Received: 30 January 2013; **Accepted:** 25 August 2014

Keywords:
Smectite, Pore fluid, Temperature, Microstructure change, Engineering properties change

1. Introduction

Researchers use smectite in different geotechnical and geo-environmental projects, such as industrial/municipal waste disposal sites and cut-off walls due to its specific properties. On the other hand, previous researches show that the load conditions, and pore fluid properties may significantly affect the behaviour of clayey soils. In spite of several researches that have been conducted on the engineering behaviour of smectite clays, there has been little attention to the influence of pore fluid changes and temperature increase on the geotechnical and geo-environmental properties of smectite. In this research, the influence of pore fluid properties changes and temperature on the physico-mechanical behaviour of smectite has been Experimentally investigated. This study has been performed from micro-and macro-structural points of view.

2. Methodology

Due to the vast applications of smectite in geotechnical and geo-environmental engineering projects, this study focuses on a smectitic soil sample behaviour. The geotechnical properties of soil were determined based on the ASTM Standard [1]. The geo-environmental engineering properties of soil were measured by the method presented by Yong et al. [2]. The pore fluid analysis was performed by GBC 932 Plus atomic absorption spectrophotometer. Tables 1 and 2 show the geotechnical and geo-environmental engineering parameters of smectite sample.

Table 1. Geotechnical properties of smectite sample

Characteristics	Quantity Measured
Liquid Limit, %	314.5
Plasticity Index, %	283
Soil classification	CH
Clay fraction, %	77
Silt fraction, %	23

To investigate the possibility of changes of smectite behaviour due to the changes of pore fluid properties, the influence of calcium and sodium ions upon smectite behaviour was studied. These two cations are the most common cations that might be found in different sites. For this purpose, calcium sulfate and sodium sulfate in concentration of 0 to 1 normal was used. In addition, due to the importance of swelling and water retention properties of smectite in its application as barrier in geotechnical and geo-environmental projects, a part of experiments has focused upon swelling properties change of smectite sample. Finally, by performing a series of experiments related to the interaction process of soil-water including suction and swelling, the change in smectite behaviour due to the temperature effect was investigated. For this purpose, saturated smectite samples were kept in four different

* Corresponding Author
E-mail addresses: vahidouhadi@yahoo.ca (Vahid Reza Ouhadi), amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk (Amir Reza Goodarzi).

temperature levels including 25, 100, 150, and 200 ^{o}C for 7200 hours. Then, several different experiments were performed on these samples.

Table 2. Geo-environmental engineering properties of smectite sample

Characteristics	Quantity Measured
EC, (dS/m)	0.64
pH	9.01
Na^{+}, (cmol /kg)	50.9
Ca^{2+}, (cmol /kg)	12.2
Mg^{2+}, (cmol /kg)	3.1
K^{+}, (cmol /kg)	2.1
CEC, (cmol /kg)	68.3
SSA, (m^2/g)	418

3. Results and discussion

The achieved results indicate that due to the interaction of smectite with different electrolytes and with increasing the electrolyte concentration, the density of samples increase while the external load kept constant. This increase in density is attributed to the smectite-electrolyte interaction. A reduction in repulsive forces among clay particles was responsible for such a decrease in soil void ratio at constant external loading.

Furthermore, the achieved XRD results indicate that after the interaction of clay particles with electrolyte, with increasing the electrolyte concentration, the position of basal spacing of smectite remains constant while the intensity of major smectite's peak decreases. This is attributed to the flocculated fabric due to the change in electrostatic forces among clay particles [3]. On the other hand, since hydraulic conductivity in clayey soils is a function of such a force among particles, the permeability of different smectite sample at different electrolyte concentration was evaluated. According to the results of Figure 1, the permeability may increase as much as 100 times after exposure of sample to different electrolyte concentration.

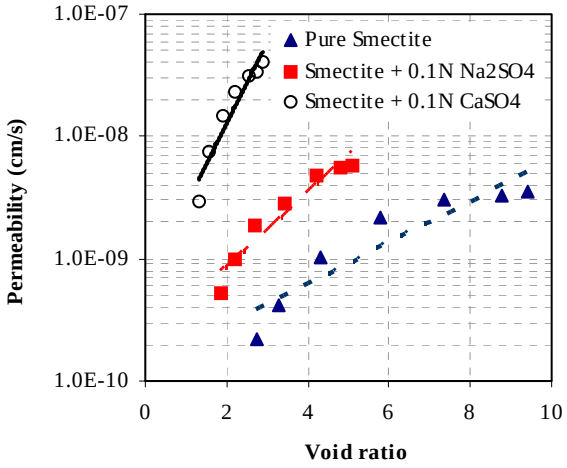


Fig. 1. Hydraulic conductivity variations of smectite at different electrolyte types and concentrations

In the last section of this research, the free swelling of smectite samples was measured after different levels of heat treatment from 25 to 200 ^{o}C. The results show a 16% reduction in swelling percentage of smectite after heat treatment.

4. Conclusions

The achieved results of this study show that due to the interaction of different electrolytes and due to the temperature change, the water retention of smectite and its mechanical behaviour will be changed. This change in some cases was more than 50%. The results of micro-structural experiments show that the main reason for these changes in smectite behaviour after the interaction with electrolyte and temperature rise, was due to the change in morphology and new soil structure of smectite particles. In fact, the micro-structural change has affected the macro-behaviour of smectite.

5. References

[1] ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", Philadelphia, 2003.
[2] Yong, R. N., Mohamed, A. M. O., Warkentin, B. P., “Principles of Contaminant Transport in Soils”, Elsevier, 1992.
[3] Yong, R. N., Ouhadi, V. R., Goodarzi, A. R., “Effect of Cu^{2+} ions and Buffering Capacity on Smectite Microstructure and Performance”, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2009, 135, 1981-1985.