

تأثیر حرارت بر مقاومت فشاری محدود نشده و میزان جذب آب مخلوط ماسه - بنتونیت در حضور کربنات

وحیدرضا اوحدی^{۱*}، مصطفی پورزعفرانی^۲

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

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

vahidouhadi@yahoo.ca

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۱۹

چکیده- مشخصات خاک‌ها به ویژه کانی‌های ناشی از هوازدگی شیمیایی از جمله خاک‌های رسی به شدت متأثر از حرارت است. این موضوع در کنار وجود کربنات به عنوان یکی از اجزای اصلی خاک‌های رسی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، می‌تواند موجب تغییر در رفتار مهندسی خاک شود. در پژوهش حاضر تأثیر حرارت بر فرایند اندرکنش مخلوط ماسه-بنتونیت و کربنات کلسیم با استفاده از آزمایش‌های مختلف از جمله انقباض خطی، مقاومت فشاری محدود نشده و جذب آب، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور مقادیر ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کربنات به همراه ۲۰ و ۴۰ درصد ماسه با بنتونیت ترکیب و در معرض سطوح حرارتی متفاوت بین ۲۵ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. نتایج نشان دهنده آن است که افزایش حرارت سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها تا دمای دی‌هیدروکسیلاسیون شده ولی در حرارت‌های بیش از دمای دی‌هیدروکسیلاسیون، مقاومت به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. از سوی دیگر، افزایش درصد کربنات در یک دمای مشخص، باعث کاهش مقاومت و انقباض خطی شده است. همچنین تغییرات جذب آب نمونه‌ها، در اثر افزایش حرارت، تابعی از درصد کربنات موجود در خاک و محدوده حرارت اعمال شده است.

واژگان کلیدی: حرارت، بنتونیت، کربنات، مقاومت فشاری محدود نشده، جذب آب.

۱- مقدمه

فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری خاک‌ها به ویژه خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی می‌شود و میزان این تغییرات تابعی از نوع کانی‌های موجود در خاک، ترکیبات شیمیایی، دانسیته و درصد رطوبت است [۱، ۲]. خروج آب و تشکیل کانی‌های جدید دو واکنش اصلی است که بر اثر اعمال حرارت انجام می‌شود. خروج آب شامل دو مرحله، دی‌هیدراسیون (خروج آب حفره‌ای، جذبی و بین‌لایه‌ای) و

خاک متشکل از کانی‌های ناشی از هوازدگی فیزیکی و شیمیایی سنگ مادر است. به طور کلی کانی‌های به دست آمده از هوازدگی شیمیایی در مقایسه با کانی‌های حاصل از هوازدگی فیزیکی، نسبت به تغییرات حرارتی حساسیت و تأثیرپذیری بیشتری را نشان می‌دهند. حرارت چه در حالت گذرا و چه در شرایط پایدار موجب تغییر در مشخصات

اطراف آن به وسیله‌ی مصالح بافر محافظت می‌شود [۹-۱۱]. در بیشتر موارد مصالح بافر شامل بنتونیت و یا مخلوطی از بنتونیت و ماسه است. بنتونیت علاوه بر ایجاد شرایط مناسب ژئوتکنیکی در اطراف محفظه‌های فلزی، با توجه به هدایت هیدرولیکی بسیار کم، خصوصیات تورمی بالا، نفوذپذیری کم و خاصیت خود ترمیمی موجب کاهش دسترسی آب‌های زیرزمینی و محدود کردن احتمال پوسیدگی سطح محفظه‌های فلزی می‌شود [۷، ۱۲-۱۴]. با این وجود، رژیم حرارتی تولیدی به وسیله‌ی زباله‌های هسته‌ای موجب تغییر بسیاری از خصوصیات رفتاری مصالح بافر و خاک مجاور آن از جمله تورم، نفوذپذیری و ظرفیت تبادل کاتیونی می‌شود [۸، ۱۵، ۱۶].

بنتونیت مصالحی با پلاستیسیته و تورم بسیار زیاد است [۱۷] که خصوصیات ویژه‌ای از جمله خاصیت ژله‌ای مانند و تیکسوتروپیک در معرض آب، قابلیت جذب مقادیر فراوان آب، افزایش حجم به میزان ۱۲ تا ۱۵ برابر حجم اولیه و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد است. بنتونیت دارای کاربردهای گوناگونی است و به طور گسترده از آن در گل حفاری، سرامیک، مصالح پرکننده و تثبیت کننده و مصالح آب‌بند در پروژه‌های عمرانی از جمله سایت‌های دفن زباله، مراکز دفن زباله‌های هسته‌ای و حوضچه‌ها استفاده می‌شود [۱۸]. مونت‌موریلونیت، جزء اصلی تشکیل دهنده بنتونیت است که بر اثر عمل هیدروترمال و تغییرات شیمیایی خاکستر آتشفشانی در محیط دریایی تشکیل می‌شود [۱۹].

مرور پژوهش‌های گذشته نشان دهنده تأثیر حرارت بر خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی از جمله مقاومت، حدود اتربرگ، نفوذپذیری، توده‌ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی و اندازه ذرات است [۱۵، ۱۹-۲۱]. وجود مقادیر فراوان کربنات به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک [۲۲]، و تأثیر آن بر خصوصیات مهندسی از جمله چسبندگی،

دی‌هیدروکسیلاسیون (خروج یون هیدروکسیل از ساختار کریستالی کانی رسی) می‌شود. به طور کلی با توجه به نوع کانی رسی، دی‌هیدراسیون بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و دی‌هیدروکسیلاسیون بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. اعمال حرارت بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث تخریب کانی‌ها و تشکیل سیلیکات‌های کریستالی جدید می‌شود. همچنین با اعمال حرارت بیشتر، خاک ذوب شده و مصالح گداخته شکل می‌گیرد [۲].

از حرارت به طور کاربردی در تثبیت حرارتی خاک‌ها، زیر اساس جاده‌ها، تثبیت شیروانی‌ها، اصلاح خصوصیات مهندسی خاک‌های متورم شونده و خاک‌های فروریزی استفاده می‌شود [۲]. علاوه بر آن استفاده از حرارت در ساخت مصالح ساختمانی به طور قابل ملاحظه‌ای بسیار اهمیت دارد. اعمال حرارت‌های زیاد به خاک‌های ریزدانه می‌تواند این مصالح را به مصالحی مفید تبدیل کرده و از آن در راه تولید مصالح ساختمانی، مصالح دانه‌ای و سنگ‌دانه‌های سبک مصنوعی استفاده کند [۳]. اعمال حرارت علاوه بر اصلاح قابل توجه مشخصات ژئوتکنیکی در اصلاح خاک‌های آلوده به نفت خام، فلزات سنگین و مواد رادیواکتیو مورد استفاده است [۴-۶]. همچنین رژیم حرارتی تولید شده در مراکز دفن زباله‌های سطح بالا (HLW) و تأثیر حرارت ناشی از آن بر مشخصات مهندسی و کارایی خاک یکی از مواردی است که در آن مسئله تأثیر حرارت بر رفتار مهندسی خاک موضوعیت پیدا کرده و اهمیت بسیار دارد [۷، ۸]. در این مراکز برای دفن ایمن و کنترل تشعشعات رادیواکتیو زباله‌های هسته‌ای از روش دفن عمیق با تمهیدات خاص استفاده می‌شود. علاوه بر آن با استفاده از سیستم لایه محافظ مهندسی (EBS)، زباله‌های سطح بالا داخل محفظه‌های فلزی ویژه‌ای قرار گرفته و

بد دانه‌بندی شده با نام SP در سیستم طبقه‌بندی متحد است و دارای ضریب یکنواختی (Cu) برابر ۲/۰۴ و ضریب خمیدگی (Cc) برابر ۱/۱۳ می‌باشد. در این تحقیق از کربنات کلسیم (CaCO₃)، با نام تجاری مرک (Merck) استفاده شده است.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی بتونیت مورد استفاده

مشخصات فیزیکی	بتونیت
آنالیز XRD	مونت موریلونیت، کلسیت
حد روانی (LL)، %	۳۰۲/۶
حد خمیری (PL)، %	۳۵/۳
شاخص خمیری (PI)، %	۲۶۷/۳
طبقه بندی خاک	CH
توده ویژه (Gs)	۲/۷۹
ظرفیت کاتیون تبادل (CEC)، (Cmol/Kg-Soil)	۶۸/۳
سطح مخصوص (SSA)، (m ² /g)	۴۱۸
درصد کربنات	۸

۲-۲- روش ساخت نمونه و انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش مقادیر ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کربنات کلسیم همراه ۲۰ و ۴۰ درصد ماسه با بتونیت ترکیب و نمونه‌های ساخته شده در معرض حرارت بین ۲۵ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و انقباض خطی، مقاومت فشاری محدود نشده و میزان جذب آب نمونه‌ها بررسی شد. مخلوط ماسه - بتونیت و کربنات با نسبت‌های مختلف تهیه و تا رسیدن به یکنواختی کامل، مخلوط شدند. سپس به نمونه‌ها تا رسیدن به حد خمیری آب اضافه شد، و به مدت ۷۲ ساعت برای یکنواختی درصد رطوبت، درون کیسه نایلونی گذاشته شدند. در مرحله بعد به منظور حصول اطمینان از ساخت نمونه‌های همگن، نمونه‌های فوق ابتدا از الک شماره ۱۰ عبور داده شده و سپس در سه

نفوذپذیری و حدود اتبرگ [۲۳]، ضرورت مطالعه تاثیر با هم حرارت و کربنات را بر رفتار مهندسی خاک‌های رسی ثابت می‌کند.

رایج‌ترین کانی کربناتی یافت شده در خاک، کلسیت یا کربنات کلسیم (CaCO₃) است که از مصالح کربناتی مادر حاصل می‌شود [۲۴]. کربنات کلسیم و به طور کلی تمام کربنات‌ها به مقدار ناچیز در آب حل می‌شوند [۲۵] ولی در مقایسه با کانی‌های سیلیکاتی، قابل حل در نظر گرفته می‌شوند. نقش کربنات در کنترل بافت و ساختار خاک به مقدار آن بستگی دارد و تأثیر آن بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک وابسته به اندرکنش آن در حضور آب است. به ویژه تشکیل پیوند بین ذرات خاک و پوشش ذرات خاک، خصوصیتی هستند که می‌توانند تأثیر زیادی بر خصوصیات خاک داشته باشند [۲۴].

با وجود تحقیقات وسیعی که در خصوص مطالعه تأثیر حرارت بر رفتار مهندسی خاک‌ها صورت گرفته است، به موضوع تأثیر حرارت بر رفتار مهندسی کانی‌های رسی و اندرکنش آن با کربنات توجه کمتری شده و بر این اساس در پژوهش حاضر تأثیر با هم حرارت و کربنات کلسیم بر انقباض خطی، مقاومت فشاری و میزان جذب آب مخلوط ماسه - بتونیت مطالعه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خاک استفاده شده

خاک رس بتونیت استفاده شده در این پژوهش با نام تجاری بتونیت فلات ایران از شرکت ایران باریت تهیه شد. مشخصات بتونیت مورد استفاده بر طبق استانداردهای ASTM به دست آمد و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد CH تعیین شد. برخی مشخصات فیزیکی بتونیت در جدول (۱) ارائه شده است. ماسه مورد استفاده از نوع سیلیسی و

نمونه در لحظه شکست و A سطح مقطع نمونه است. میزان جذب آب نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C 67 به دست آمد. بدین منظور نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت غرقاب شدند و میزان جذب آب با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد.

$$Absorption, \% = 100(W_s - W_d) / W_d \quad (2)$$

که در آن W_d وزن خشک نمونه‌ها و W_s وزن اشباع نمونه‌ها پس از غرقاب است.

همچنین انقباض خطی و تغییرات وزن برای تمامی نمونه‌ها پس از اعمال حرارت اندازه‌گیری و محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انقباض خطی و تغییرات وزن

برای تعیین حساسیت نمونه‌ها بر اثر اعمال حرارت و مطالعه تأثیر آن بر خصوصیات فیزیکی خاک، انقباض خطی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تغییر این پارامتر در ارتباطی تنگاتنگ از مشخصات خاک است، تعیین و سنجش شدت این تغییرات برای درک مکانیزم تأثیر با هم حرارت و کرنات بر خصوصیات خاک ضروری است. در شکل‌های ۱ و ۲ تأثیر حرارت و درصد کرنات بر تغییرات انقباض خطی نمونه‌ها ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش حرارت تا دمای ۳۰۰ درجه منجر به افزایش انقباض خطی به میزان ۳/۵ تا ۱۰/۲۱ درصد شده است، که دلیل آن را می‌توان به دی‌هیدراسیون و خروج آب‌های حفره‌ای، جذبی و بین لایه‌ای و در نتیجه کاهش حجم نمونه‌ها نسبت داد. ولی با افزایش حرارت تا دمای ۷۰۰ درجه، انقباض خطی به میزان ۰/۱۳ تا ۱/۸۷ کاهش می‌یابد. این کاهش در انقباض خطی می‌تواند به دلیل حضور ماسه و افزایش حجم دانه‌های ماسه در این محدوده دمایی باشد. از طرفی با ادامه افزایش حرارت تا دمای ۹۰۰

لایه درون قالب ریخته و کوبیده شدند. ارتفاع و قطر نمونه‌های ساخته شده به ترتیب ۷۰ و ۳۵ میلی‌متر بوده است. نمونه‌های ساخته شده برای خشک شدن به مدت ۱۰ روز در دمای محیط نگهداری شدند. به دلیل پتانسیل زیاد ترک خوردگی نمونه‌های بتونیت در مرحله خشک شدن و جلوگیری از این اتفاق، نمونه‌ها داخل پاکت‌های نایلونی در باز قرار داده شدند تا روند خشک شدن به تدریج رخ داده و منجر به ترک خوردن نمونه‌ها نشود. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت داخل گرم‌خانه (آون) در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در پایان نمونه‌ها با استفاده از کوره ساخت شرکت کربولایت (Carbolite) در معرض حرارت‌های ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. حرارت کوره با نرخ ۳ درجه بر دقیقه به طور اتوماتیک افزایش یافته و پس از رسیدن به دمای مورد نظر به مدت ۲ ساعت در این دما باقی ماندند و کوره خاموش شد. سپس به نمونه‌ها درون کوره در بسته اجازه خنک شدن داده شد. همچنین به منظور مقایسه، نمونه‌هایی بدون آن که در معرض حرارت قرار داده شوند نیز تهیه و آزمایش شدند.

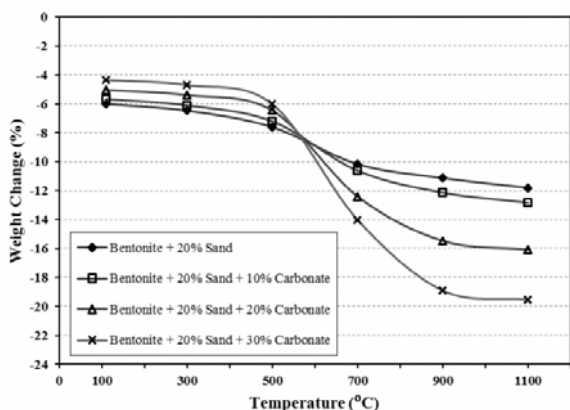
آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C 773 با استفاده از جک تک محوری ساخت شرکت (Wykeham Farrance) روی نمونه‌های با تاریخچه حرارتی ۱۱۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌هایی که در معرض حرارت قرار نگرفتند، انجام شد. تمام آزمایش‌ها به صورت کرنش ثابت و با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از معادله ۱ محاسبه شده است.

$$C = P / A \quad (1)$$

که در آن C مقاومت فشاری محدود نشده، P نیروی وارد بر

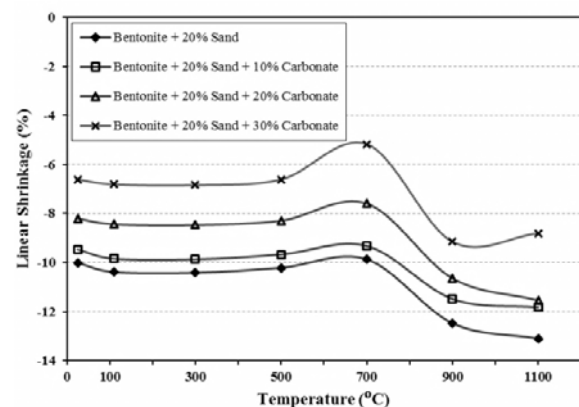
همچنین با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل های ۱ و ۲ می توان نتیجه گیری کرد به طور کلی افزایش درصد کربنات و همچنین درصد ماسه به میزان قابل ملاحظه ای منجر به کاهش انقباض خطی نمونه های بتونیت می شود. به طوری که در دمای ۱۱۰۰ درجه مقدار آن از ۱۳/۱ درصد برای نمونه حاوی ۲۰ درصد ماسه به ۱/۵۲ درصد برای نمونه حاوی ۴۰ درصد ماسه به علاوه ۳۰ درصد کربنات، کاهش پیدا کرده است.

کاهش ناگهانی وزن نمونه خاک، معیار مناسبی برای تشخیص دمای دی هیدروکسیلاسیون است [۳]، به همین منظور تغییرات وزنی نمونه ها در مقابل حرارت اندازه گیری شد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های ۳ و ۴، دیده می شود که افزایش حرارت به کاهش وزن نمونه ها می انجامد. کاهش وزن تا دمای ۵۰۰ درجه به کندی صورت گرفته، ولی با افزایش حرارت تا دمای ۷۰۰ درجه، وزن نمونه ها به صورت ناگهانی به میزان ۸ تا ۱۴ درصد کاهش یافته است. این دما منطبق بر دمای دی هیدروکسیلاسیون بتونیت است و نشان دهنده شروع فرایند دی هیدروکسیلاسیون و تخریب ساختار کانی رسی است [۳، ۲۶]. در دمای ۹۰۰ درجه، با افزایش درصد کربنات، میزان کاهش وزن افزایش یافته که این امر به دلیل تجزیه کربنات کلسیم و آزاد شدن CO₂ در دمای حدود ۸۳۰ تا ۸۷۰ درجه رخ می دهد [۲۷].

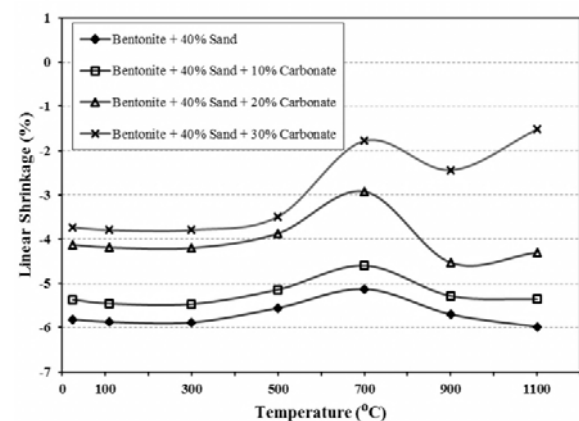


شکل (۳) تغییرات وزنی نمونه های بتونیت حاوی درصد های مختلف کربنات و ۲۰٪ ماسه تحت تأثیر حرارت

درجه، انقباض خطی نمونه های بتونیت، نسبت به دمای ۷۰۰ درجه به میزان قابل ملاحظه ای در حدود ۰/۶ تا ۴ درصد افزایش می یابد. در دمای ۱۱۰۰ درجه، تغییرات انقباض خطی نمونه ها وابسته به درصد کربنات و ماسه موجود در نمونه ها است به طوری که مقدار آن با افزایش این دو به تدریج کاهش می یابد. همچنین بررسی تأثیر کربنات در فرایند فوق نشان دهنده کاهش انقباض خطی با افزایش درصد کربنات است. این امر به دلیل جایگزینی سهم رس با کربنات و کمتر بودن انقباض خطی کربنات نسبت به رس است.

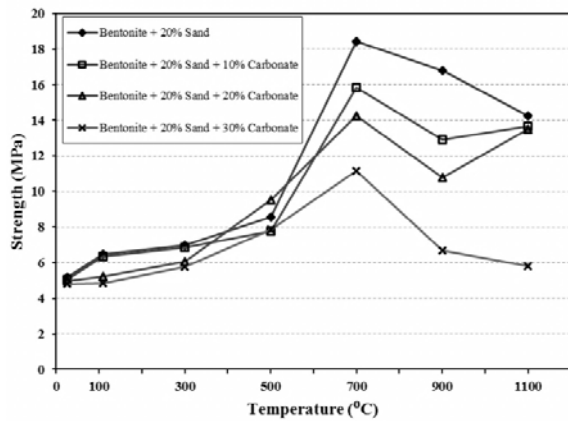


شکل (۴) تغییرات انقباض خطی نمونه های بتونیت حاوی درصد های مختلف کربنات و ۲۰٪ ماسه تحت تأثیر حرارت

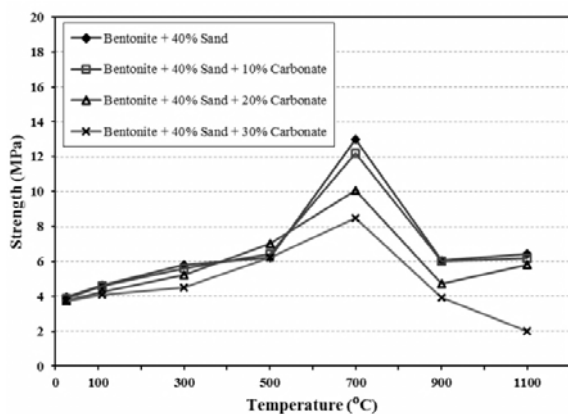


شکل (۵) تغییرات انقباض خطی نمونه های بتونیت حاوی درصد های مختلف کربنات و ۴۰٪ ماسه تحت تأثیر حرارت

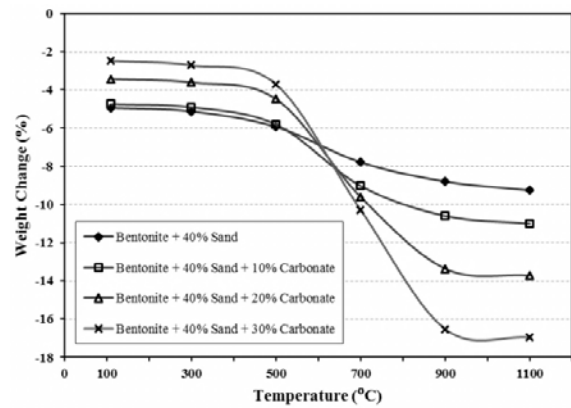
خطی در این دما و در نتیجه آن افزایش تخلخل و تغییر ساختار نمونه‌های بتونیت در دمایی بیش از دمای دی‌هیدروکسیلاسیون رخ می‌دهد. در دمای ۱۱۰۰ نیز، تغییرات مقاومت وابسته به درصد کربنات موجود در نمونه‌ها است، به طوری که در نمونه‌های حاوی درصد کربنات طبیعی مقاومت به طور نسبی کاهش یافته و در مقابل برای نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد کربنات، مقاومت اندکی افزایش (حدود ۲۵٪) نشان می‌دهد. در مورد نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد کربنات نیز کاهش قابل ملاحظه مقاومت مشاهده می‌شود که در بخش بعدی به علت آن پرداخته خواهد شد.



شکل (۵) تأثیر حرارت بر مقاومت نمونه‌های بتونیت حاوی درصد‌های مختلف کربنات و ۲۰٪ ماسه



شکل (۶) تأثیر حرارت بر مقاومت نمونه‌های بتونیت حاوی درصد‌های مختلف کربنات و ۴۰٪ ماسه



شکل (۴) تغییرات وزنی نمونه‌های بتونیت حاوی درصد‌های مختلف کربنات و ۴۰٪ ماسه تحت تأثیر حرارت

۳-۲- مقاومت فشاری محدود نشده

۳-۲-۱- تأثیر حرارت

نتایج مرتبط با مطالعه تأثیر حرارت بر مقاومت فشاری محدود نشده بتونیت در حضور درصد‌های مختلف کربنات در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش حرارت، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها افزایش یافته‌است. این افزایش مقاومت تا دمای ۵۰۰ درجه به تدریج رخ می‌دهد، ولی با رسیدن به دمای ۷۰۰ درجه، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت در حدود ۳ تا ۴ برابر (18.44 MPa) مشاهده می‌شود. این افزایش مقاومت انطباق خوبی با نتایج شکل‌های ۳ و ۴ دارد. با توجه به وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۷۰۰ درجه، این افزایش مقاومت را می‌توان به فرایند دی‌هیدروکسیلاسیون نسبت داد. به بیان دیگر، آرایش اتمی حاصل شده از دی‌هیدروکسیلاسیون منجر به افزایش پیوند پولک‌های رسی و در نتیجه، افزایش مقاومت نمونه‌ها شده‌است [۳]. با افزایش حرارت تا دمای ۹۰۰ درجه، بر خلاف آنچه که تا دمای ۷۰۰ درجه مشاهده شد، نمونه‌های بتونیت با افت مقاومت شدیدی (به میزان حداکثر ۵۴٪) روبرو می‌شوند. این موضوع با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، به موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای انقباض

۳-۲-۲- تأثیر کربنات

کربنات در دمای ۱۱۰۰ درجه شده است.

بر اساس نتایج داده شده در شکل های ۵ و ۶ مشاهده می شود که افزایش درصد کربنات تا دمای ۵۰۰ درجه، موجب تغییرات کمی در مقاومت نمونه ها شده است و به طور کلی می توان تأثیر آن را بر مقاومت منفی ارزیابی نمود. در دمای ۷۰۰ درجه مشاهده می شود که با افزایش درصد کربنات، مقاومت به میزان قابل ملاحظه ای (۳۵٪ تا ۴۰٪) کاهش یافته است. این موضوع به دلیل جایگزینی رس به وسیله ی کربنات و پوشش پولک های رسی و کاهش اندرکنش آن ها و در نتیجه کاهش پیوند ذرات ناشی از دی هیدروکسیلاسیون رخ می دهد.

در دمای ۹۰۰ درجه نیز نسبت تغییرات مقاومت با افزایش درصد کربنات، مشابه با دمای ۷۰۰ درجه می باشد. در دمای ۱۱۰۰ درجه، افزایش درصد کربنات تا ۲۰ درصد، تغییرات چندانی را در مقاومت موجب نشده است ولی افزایش آن به میزان ۳۰ درصد، افت شدید مقاومت به میزان ۶۰ تا ۷۰ درصد را سبب شده است. در این دما با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های ۳ و ۴ مشاهده می شود که میزان تغییرات وزن نمونه ها برابر با روند تغییرات وزن نمونه ها در دمای ۹۰۰ درجه است. از طرف دیگر با توجه به شکل های ۱ و ۲ مشاهده می شود که با افزایش درصد کربنات، شیب تغییرات انقباض خطی بین دمای ۹۰۰ و ۱۱۰۰ درجه کاهش یافته تا جایی که در مورد نمونه های با ۳۰ درصد کربنات، انقباض خطی در دمای ۱۱۰۰ درجه، کمتر از مقدار آن در دمای ۹۰۰ درجه می شود. این موضوع بدان معناست که نمونه های حاوی ۳۰ درصد کربنات نسبت به دیگر نمونه ها با افزایش تخلخل شدیدی مواجه بوده است، که دلیل آن تجزیه کربنات کلسیم و آزاد شدن CO₂ و در نتیجه ایجاد ساختاری متخلخل است. این امر منجر به کاهش قابل توجه مقاومت در نمونه های حاوی ۳۰ درصد

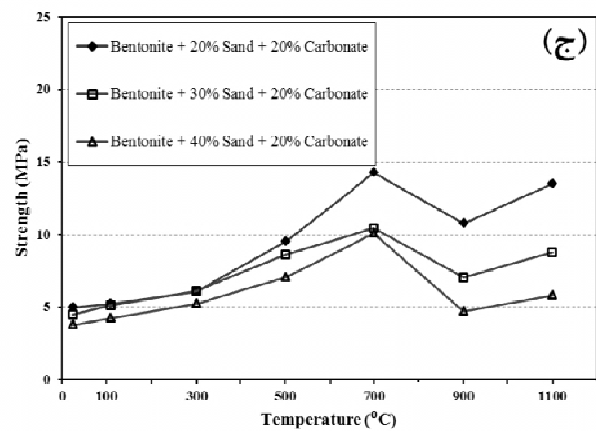
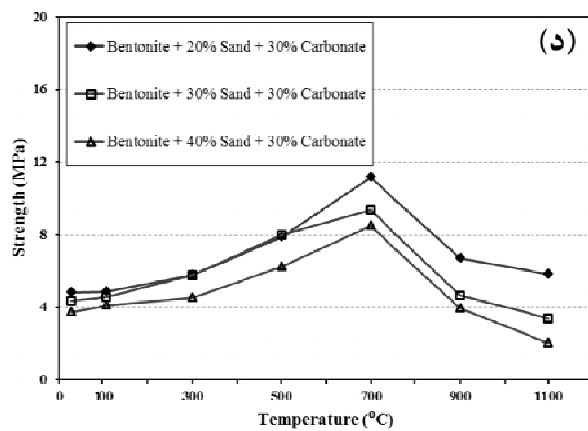
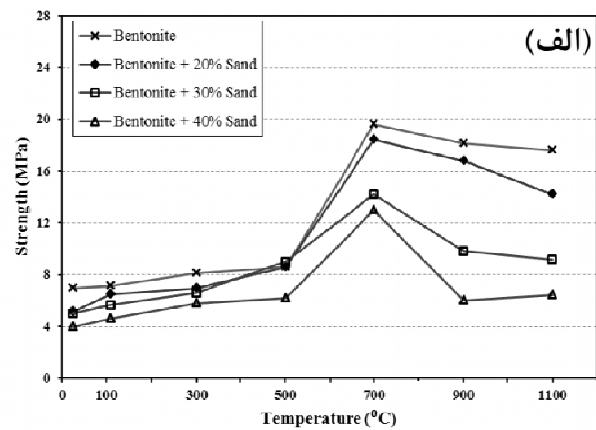
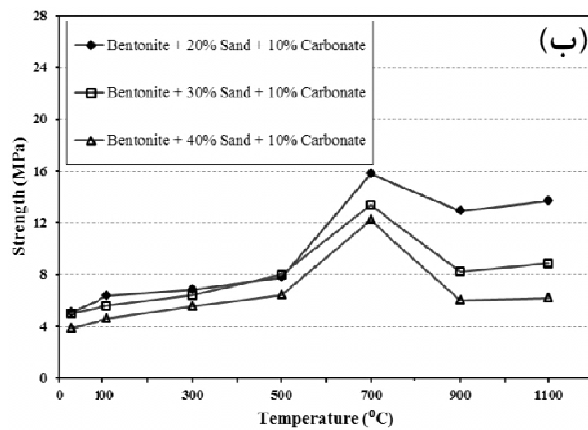
۳-۲-۳- تأثیر ماسه

بر اساس آزمایش های صورت گرفته، نتایج تأثیر حضور ماسه بر مقاومت فشاری نمونه های بتونیت با توجه به شکل ۷ بیانگر آن است که افزایش درصد ماسه موجب افت مقاومت فشاری نمونه ها می شود. دلیل این مشاهده را می توان به اختلاف تغییرات حجمی ماسه و بتونیت در اثر حرارت نسبت داد. به طوری که با توجه به نتایج انقباض خطی، مشاهده می شود که بتونیت به شدت نسبت به حرارت حساس بوده و با کاهش حجم زیادی همراه است، در مقابل تغییرات حجم ماسه بر اثر اعمال حرارت بسیار ناچیز و حتی افزایشی می باشد. این موضوع منجر به ایجاد تنش های کششی و در نتیجه گسترش ترک های کششی در نمونه شده که موجب کاهش مقاومت می شود. همان گونه که از نتایج ارائه شده در شکل ۷ قابل دریافت است، با افزایش حرارت این موضوع شدت گرفته و در یک دمای مشخص، مقاومت، کاهش بیشتری نشان داده است.

به طوری که مقاومت نمونه ها با افزایش مقدار ماسه از ۲۰ به ۴۰ درصد در دمای ۱۱۰ درجه به میزان ۱۰ تا ۲۹ درصد و در دمای ۱۱۰۰ درجه به میزان ۵۴ تا ۶۵ درصد کاهش یافته است.

۳-۳- جذب آب

با هدف ارزیابی تأثیر حرارت بر میزان جذب آب، پس از اعمال حرارت های مختلف، نمونه های بتونیت به مدت ۲۴ ساعت غرقاب شدند. همان گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است نمونه های در معرض دمای کمتر از ۵۰۰ درجه، پس از غرقاب شدن به شدت متورم شده و به صورت ژلاتینی تغییر شکل دادند.

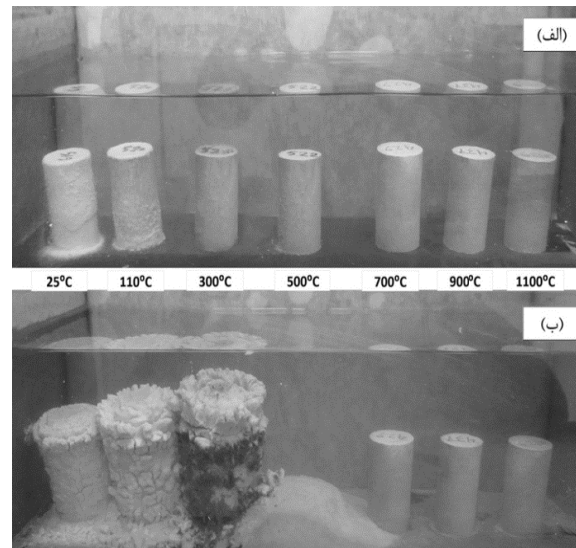


شکل (۷) تأثیر درصد ماسه و اعمال حرارت بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتونیت حاوی کربنات طبیعی،

(ب) ۱۰٪ کربنات، (ج) ۲۰٪ کربنات، (د) ۳۰٪ کربنات

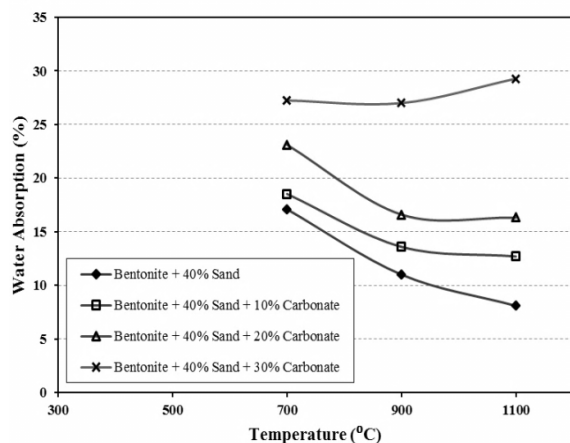
نمونه‌های در معرض دمای ۵۰۰ درجه به طور کامل متلاشی شده و تنها نمونه‌های در معرض دمای ۷۰۰ درجه و بیش تر بدون تغییر باقی ماندند. این موضوع نشان دهنده آن است که با وجود افزایش نسبی مقاومت نمونه‌های در معرض دمای کمتر از ۷۰۰ درجه، این مقاومت همیشگی نبوده و در اثر غرقاب شدن از بین می‌روند و تنها نمونه‌هایی که در معرض دمای دی‌هیدروکسیلاسیون و بالاتر قرار داشته‌اند، به دلیل تخریب ساختار رس و در نتیجه پیوند ذرات در برابر غرقاب شدن مقاوم هستند.

به این ترتیب اندازه‌گیری میزان جذب آب تنها برای نمونه‌های با تاریخچه حرارتی ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۱۰۰ درجه امکان پذیر بوده است. با توجه به نتایج ارائه شده در



شکل (۸) نمونه‌های غرقاب شده بتونیت پس از اعمال حرارت (الف)

در شروع غرقاب، (ب) پس از ۲۴ ساعت غرقاب شدن



شکل (۱۰) تأثیر حرارت و درصد کربنات بر جذب آب نمونه‌های بتونیت حاوی ۴۰٪ ماسه

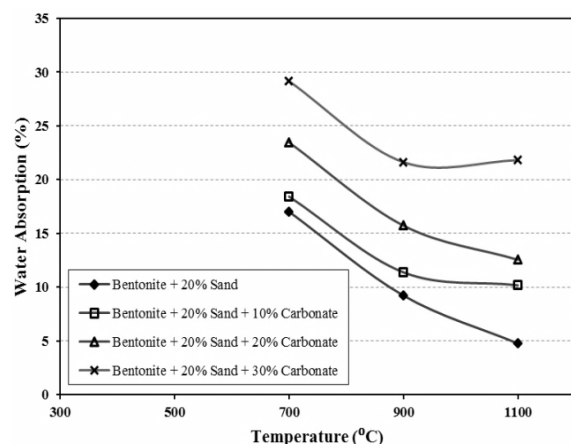
۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تأثیر حرارت بر فرایند اندرکنش مخلوط ماسه-بتونیت و کربنات با استفاده از آزمایش‌های مختلف از جمله انقباض خطی، مقاومت فشاری محدود نشده و جذب آب مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج اخذ شده از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- نتایج بررسی اندرکنش رس و کربنات بر انقباض خطی نشان می‌دهد که افزایش درصد کربنات در نمونه‌های بتونیت در تمامی سطوح حرارتی، منجر به کاهش انقباض خطی و در نتیجه کاهش حساسیت خاک نسبت به تغییرات حرارتی می‌شود.
- به دلیل حساسیت بسیار کم ماسه نسبت به تغییرات حرارتی، افزایش درصد ماسه در نمونه‌ها سبب کاهش قابل توجه انقباض خطی در نمونه‌ها شده است. همچنین افزایش درصد ماسه برای تمامی سطوح حرارتی منجر به کاهش مقاومت به ویژه در حرارت‌های بیش از ۵۰۰ درجه شده است.
- نتایج اخذ شده از این پژوهش بیانگر آن است که

شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش حرارت، جذب آب نمونه‌های بتونیت روندی نزولی دارد. با افزایش حرارت از دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه به دلیل تخریب کامل بتونیت که عاملی برای جذب آب بوده و تکمیل فرایند دی‌هیدروکسیلاسیون، مقدار جذب آب نمونه‌ها به طور میانگین به میزان ۷ درصد در این دما کاهش پیدا می‌کند. در دمای ۱۱۰۰ درجه روند تغییرات جذب آب، تابعی از درصد کربنات موجود در نمونه‌ها است، به طوری که جذب آب نمونه‌های حاوی درصد کربنات طبیعی به میزان ۳ تا ۴/۵ درصد کاهش یافته و دلیل آن کاهش تخلخل، پیوند ذرات و شکل‌گیری کانی‌های سیلیکاتی است.

در مقابل با افزایش درصد کربنات، جذب آب نمونه‌ها افزایش یافته است. دلیل افزایش جذب آب در نمونه‌های پایانی را این‌گونه می‌توان بیان کرد که در این محدوده حرارتی، کربنات تجزیه شده و با آزاد شدن CO_2 ، تخلخل نمونه‌ها افزایش یافته است. دوم اکسید کلسیم یا آهک زنده (CaO) حاصل از تجزیه کربنات کلسیم در حضور آب، هیدراته شده و این دو پدیده، سبب افزایش جذب آب نمونه‌ها شده‌اند.



شکل (۹) تأثیر حرارت و درصد کربنات بر جذب آب نمونه‌های بتونیت حاوی ۲۰٪ ماسه

۵- منابع

- افزایش حرارت سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها به میزان ۳ تا ۴ برابر شده و بیشتر مقدار آن (18.44 MPa) در دمای ۷۰۰ درجه، در نتیجه‌ی دی‌هیدروکسیلاسیون و پیوند ذرات حاصل شده است. در مقابل اعمال حرارت بیش از این دما منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ی مقاومت می‌شود که این کاهش مقاومت به دلیل تغییر ساختار خاک و افزایش تخلخل در دمای بیش از ۷۰۰ درجه رخ می‌دهد.
- بررسی تأثیر با هم حرارت و کربنات بر مقاومت نشان دهنده آن است که در یک دمای مشخص، افزایش درصد کربنات منجر به کاهش مقاومت شده و در حرارت‌های مختلف میزان کاهش ایجاد شده، متفاوت است. این موضوع به دلیل پوشش پولک‌های رسی به وسیله‌ی کربنات و کاهش اندرکنش و تماس آن‌ها در حرارت‌های کم و افزایش تخلخل در ساختار خاک در حرارت‌های زیاد، صورت می‌پذیرد.
 - همچنین فقط نمونه‌هایی که در معرض دمایی بیشتر از دمای دی‌هیدروکسیلاسیون قرار داشتند، در اثر غرقاب شدن پایدار ماندند. دلیل این امر، تخریب ساختار کانی رسی و تغییر آرایش اتمی و پیوند بین پولک‌های رسی است.
 - بر اساس نتایج این پژوهش، افزایش حرارت موجب کاهش جذب آب نمونه‌های بنتونیت شده و در مقابل در یک دمای مشخص، افزایش درصد کربنات منجر به افزایش جذب آب می‌شود.
 - با وجود آنکه کربنات موجب کاهش مقاومت می‌شود ولی تأثیر مثبتی بر کاهش انقباض خطی و در نتیجه کاهش حساسیت خاک نسبت به تغییرات حرارتی داشته است. همچنین با توجه به اهمیت نگه‌داشت و جذب آب در مصالح بافر، که در معرض حرارت خصوصیات ضروری خود را از دست می‌دهند، افزایش کربنات تأثیر مثبتی در افزایش و حفظ این خصوصیات ایفا می‌کند.
- [1] Jefferson, I., "Temperature effects on clay soils," Loughborough University, 1994.
- [2] Wang, M., Benway, J. M., and Arayssi, A. M., "The effect of heating on engineering properties of clays", *ASTM Special Technical Publication*, pp. 139-158, 1990.
- [3] Joshi, R. C., Achari, G., Horsfield, D., and Nagaraj, T., "Effect of heat treatment on strength of clays", *Journal of geotechnical engineering*, vol. 120, p. 1080, 1994.
- [4] Alcocer, C. and Chowdhury, H., "Experimental Study of an Environmental Remediation of Gulf Coast Crude-Oil-Contaminated Soil Using Low-Temperature Thermal Treatment", in *Proceedings of the 1993 Western Regional Meeting*, Louisiana, p. 723, 1993.
- [5] Morris, P. H. and Wong, L., *Modification of Dredged Sediments to Produce Useful Product by Heating to High Temperatures: Sustainable Tourism CRC*, 2005.
- [6] Varlakov, A., Sobolev, I., Barinov, A., Dmitriev, S., Karlin, S., and Flit, V., "Method of treatment of radioactive silts and soils", in *Materials Research Society*, pp. 591-594, 1997.
- [7] Gu, B., Wang, L., Minc, L., and Ewing, R., "Temperature effects on the radiation stability and ion exchange capacity of smectites", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 297, pp. 345-354, 2001.
- [8] Ouhadi, V., Yong, R., Goodarzi, A., and Safari-Zanjani, M., "Effect of temperature on the restructuring of the microstructure and geo-environmental behaviour of smectite", *Applied Clay Science*, vol. 47, pp. 2-9, 2010.
- [9] Akesson, M., Jacinto, A., Gatabin, C., Sanchez, M., and Ledesma, A., "Bentonite THM behaviour at high temperatures: experimental and numerical analysis", *Geotechnique*, vol. 59, pp. 307-318, 2009.
- [10] Bennett, D. G. and Gens, R., "Overview of European concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 379, pp. 1-8, 2008.

- [20] Tan, Ö., Yilmaz, L., and Zaimoğlu, A. S., "Variation of some engineering properties of clays with heat treatment", *Materials Letters*, vol. 58, pp. 1176-1179, 2004.
- [21] Wang, M., Jao, M., and Ghazal, M., "Heating effect on swelling behaviour of expansive soils", *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, vol. 3, pp. 121-127, 2008.
- [22] Durand, N., Monger, H. C., and Canti, M. G., "Calcium carbonate features", *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier, Amsterdam*, pp. 149-194, 2010.
- [23] Lamas, F., Irigaray, C., and Chacón, J., "Geotechnical characterization of carbonate marls for the construction of impermeable dam cores", *Engineering geology*, vol. 66, pp. 283-294, 2002.
- [24] Yong, R. N., *Geoenvironmental Engineering. Contaminated soils, pollutant fate, and mitigation*: CRC Press, 2001.
- [25] Yong, R. N. and Mulligan, C. N., *Natural attenuation of contaminated soils* vol. 30: CRC Press, 2004.
- [26] Habert, G., Choupay, N., Escadeillas, G., Guillaume, D., and Montel, J., "Clay content of argillites: Influence on cement based mortars", *Applied Clay Science*, vol. 43, pp. 322-330, 2009.
- [27] Cultrone, G., Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., Cazalla, O., and De La Torre, M. J., "Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing", *European Journal of Mineralogy*, vol. 13, pp. 621-634, 2001.
- [11] Plötze, M., Kahr, G., Dohrmann, R., and Weber, H., "Hydro-mechanical, geochemical and mineralogical characteristics of the bentonite buffer in a heater experiment: The HE-B project at the Mont Terri Rock Laboratory", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 32, pp. 730-740, 2007.
- [12] Dixon, D., Gray, M., and Thomas, A., "A study of the compaction properties of potential clay--sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal", *Engineering geology*, vol. 21, pp. 247-255, 1985.
- [13] Tien, Y., Wu, P., Chuang, W., and Wu, L., "Micromechanical model for compaction characteristics of bentonite-sand mixtures", *Applied Clay Science*, vol. 26, pp. 489-498, 2004.
- [14] Wersin, P., Johnson, L., and McKinley, I., "Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 C: A critical review", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 32, pp. 780-788, 2007.
- [15] Abu-Zreig, M. M., Al-Akhras, N. M., and Attom, M. F., "Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils", *Applied Clay Science*, vol. 20, pp. 129-135, 2001.
- [16] Sarikaya, Y., Önal, M., Baran, B., and Alemdaroğlu, T., "The effect of thermal treatment on some of the physicochemical properties of a bentonite", *Clays and Clay Minerals*, vol. 48, pp. 557-562, 2000.
- [17] Mitchell, J. and Soga, K., "Fundamentals of soil behavior," ed: John Wiley & Sons, 2005.
- [18] Adamis, Z. and Williams, R. B., *Bentonite, kaolin, and selected clay minerals* vol. 231: World Health Organization, 2005.
- [19] Towhata, I., Kuntiwattanukul, P., and Kobayashi, H., "A preliminary study on heating of clays to examine possible effects of temperature on soil-mechanical properties", *Soil and Foundation*, vol. 33, pp. 184-190, 1993.

«Research Note»

Influence of Temperature on Unconfined Compressive Strength and Water Absorption of Sand-Bentonite Mixture in the Presence of Carbonate

V.R. Ouhadi^{1*}, M. PourZafarani²

1- Professor of Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- M.Sc. Student of Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

vahidouhadi@yahoo.ca

Abstract:

Soil properties, especially chemical weathering minerals such as clayey soils, are strongly influenced by temperature. On the other hands, the existing of carbonate as one of the major components of clayey soils in arid and semi-arid lands, and its effect on engineering properties of the soils prove the necessity to study the simultaneous influence of carbonate and temperature on the engineering behavior of clayey soils. In the present work, the interaction between clay and carbonate in high temperatures has been investigated. Bentonite were mixed with different percentages of carbonate and sand. The variations of added carbonate were 0% (natural carbonate content), 10%, 20%, and 30%, respectively, and added sand were 20% and 40%. The soil samples were carefully mixed with enough water to bring them to their plastic limit and were kept in plastic bag for uniform-moisture distribution for a period of 24 h. It was then sieved through a #10 mesh to ensure to achieve a uniform mixture. Samples for testing were then prepared by compacting soil mixtures into cylinder mold in three layers. The test specimen dimensions were 35 mm in diameter and 70 mm in height. The clay specimens were allowed to air dry at room temperature for 24 h. Bentonite specimens were kept in plastic bag to prevent development of cracks during air drying due to high crack potential. The samples were then oven dried at 110 °C for a period of 24 h. The test specimens were heated to temperatures of 300, 500, 700, 900 and 1100 °C, using programmable Carbolite electric furnace. The specimens were placed in the electric furnace at room temperature and then the temperature was increased at a rate of 3°C/min until the desired temperature was reached. Once the treatment temperature was reached, it was held at that stage for 2 h, then the furnace was turned off. The specimens were then allowed to cool overnight in the closed furnace. After this curing condition, samples with different levels of temperature including 25°C (laboratory temperature), 110, 300, 500, 700, 900 and 1100 °C were used for experiments. The changes of physical and engineering properties of the soil were studied by performing macro-structural tests such as linear shrinkage, water absorption and unconfined compression.

The results show that as temperature increases close to the de-hydroxylation temperature, strength gradually increases. At de-hydroxylation temperature, the strength significantly increases, so that the strength of bentonite specimens increases 3 to 4 times. The strength of

bentonite specimens significantly decreased with increasing the heat over de-hydroxylation temperature. This strength reduction was due to the formation of microscopic voids and pores in the specimen. Analyzing the simultaneous influence of carbonate percentage and heating indicate that the increase of carbonate percentage in a given temperature results in the decrease of strength and the amount of this reduction is different in different temperatures. In bentonite specimens, heating causes the water absorption to be decreased, however, the increase of carbonate percentage results in the increase of water absorption in a given temperature.

Keywords: Temperature, Bentonite, Calcium carbonate, water absorption, Unconfined compressive strength.