

ارزیابی ریزساختاری تثبیت حرارتی خاک‌های مارنی؛ مطالعه موردی: مارن غرب بندرعباس*

محمد امیری^(۱) مسعود دهقانی^(۲) مائده پاپی^(۳)

چکیده مارن‌ها از جمله نهشته‌های رسوبی هستند که به‌طورکلی از کانی‌های رسی و کربنات کلسیم به نسبت‌های بین ۳۵٪ تا ۶۵٪ تشکیل شده‌اند. وجود کانی‌های رسی در خاک‌های مارن به مقدار قابل‌توجهی در کاهش شاخص دوام و در نتیجه وارفتگی خاک مارن نقش دارد. از این رو، تثبیت خاک‌های مارنی حائز اهمیت است. از سوی دیگر، وجود کربنات به‌عنوان یکی از اجزای اصلی خاک‌های مارنی در رفتار مهندسی خاک، به‌شدت تأثیرگذار است. حرارت چه در حالت گذرا و چه در حالت پایدار موجب تغییر در مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری خاک‌ها به‌ویژه خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی می‌شود. بر این اساس، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر حرارت بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های مارنی از منظر ریزساختاری است. در پژوهش حاضر تأثیر حرارت بر فرایند رفتاری خاک مارنی با استفاده از آزمایش‌های درشت‌ساختار (مقاومت فشاری محدود نشده، حدود اتزیرگ، دانه‌بندی، وارفتگی، جذب آب و انقباض خطی) و آزمایش‌های ریزساختاری (pH و پراش اشعه ایکس (XRD)) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌ها در معرض سطوح حرارتی (۲۵ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس) قرار گرفته است. آزمایش‌ها با تأکید بر تغییرات ریزساختاری خاک مارن در دماهای معین و تأثیر تغییرات حرارت بر خصوصیات مکانیکی و مقاومتی خاک از منظر ریزساختاری انجام شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده خاک‌های مارنی در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس دارای بیشترین مقاومت فشاری به میزان ۲۷/۶۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و دوام در مقابل رطوبت هستند.

واژه‌های کلیدی مارن، تثبیت حرارتی، مقاومت فشاری، XRD.

Microstructure Evaluation of Thermal Stabilization Marls Case Study: Marl West Bandar Abbas

M. Amiri M. Dehghani M. Papi

Abstract Marls are among sedimentary deposits that generally contain 35 to 65 percent of clay minerals and calcium carbonate. The presence of clay minerals in marls has significant effect on reduction of slake durability index of marls. Hence, marls stabilization is important. Furthermore, the presence of carbonate as one of the main components of marls has drastic influence on engineering behavior of soils. Heat, both in transient or constant forms, results in physical, mechanical and microstructural alternation of soils, especially the engineering properties of clay soils. Accordingly, the purpose of this study is to investigate the effect of heat treatment on strengthening parameters of marls, microstructural perspective. Impression of heat treatment on behaviors of marls, using macrostructure tests (Unconfined Compressive Strength, Atterberg Limit, Granularity, Slaking, Water Absorption and Linear Shrinkage) and microstructural tests (pH and X-ray diffraction) have been assessed. For this purpose, the specimens are exposed to heating surfaces (25 to 900 °C). examinations with emphasize on microstructural alternations of marls on specified temperatures and effect of temperature variations on mechanical and strengthening specifications of soil, have been conducted. According to the results, on 700°C marl soils have the best compressive strength of 27.69 Kg/cm² and durability against moisture.

Key Words Marls, Thermal Stabilization, Compressive Strength, XRD.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱۰/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱۰/۱۸ می‌باشد.

Email: amirii@hormozgan.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

(۲) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

مقدمه

خاک‌های رسی می‌شود و میزان این تغییرات تابعی از نوع کانی‌های موجود در خاک، ترکیبات شیمیایی، دانسیته و درصد رطوبت است [8,9]. 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 دی‌هیدروکسیلاسیون (خروج یون هیدروکسیل از ساختار کریستالی کانی رسی) می‌شود [10]. به‌طورکلی با توجه به نوع کانی رسی، دی‌هیدراسیون بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس و دی‌هیدروکسیلاسیون بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. اعمال حرارت بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس باعث تخریب کانی‌ها و تشکیل سیلیکات‌های کریستالی جدید می‌شود [11,12]. همچنین با اعمال حرارت بیشتر، خاک ذوب شده و مصالح گداخته شکل می‌گیرد. از حرارت به‌طور کاربردی در تثبیت حرارتی خاک‌ها، زیراساس جاده‌ها، تثبیت شیروانی‌ها، اصلاح خصوصیات مهندسی خاک‌های متورم شونده و خاک‌های فروریزی استفاده می‌شود [13]. روش‌های متعددی به‌منظور فعال‌سازی مصالح پوزولانی از جمله روش‌های حرارتی و شیمیایی وجود دارد. در روش‌های حرارتی اعمال حرارت موجب فعال‌سازی مصالح خام می‌شود و در روش شیمیایی اسید یا باز این نقش را به عهده دارند [14].

حضور کربنات‌ها یکی از فاکتورهای اصلی تغییر بافت در خاک است. حضور کربنات‌ها به‌شدت ساختار، درصد تخلخل و نفوذپذیری خاک‌های مارنی را تحت تأثیر قرار می‌دهد در حقیقت درصد زیاد کربنات نفوذپذیری خاک را افزایش می‌دهد [1,15]. رایج‌ترین کانی کربناتی یافت شده در خاک‌های مارنی، کلسیت یا کربنات کلسیم (CaCO_3) است [11]. 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 [1]. سنگ آهکی به‌صورت معمول در آب خالص محلول نیست اما در حضور CO_2 ، کربنات یک تعادل شیمیایی را تشکیل

خاک‌های مسئله‌دار به‌عنوان یکی از عوامل تخریب سازه‌های خاکی به شمار می‌روند. خاک‌های مارن حاوی مواد معدنی رس و کربنات در نسبت‌های مختلف از ۳۵٪ تا ۶۵٪ هستند [1-3]. نهشته‌های مارنی به دلیل ماهیت ساختمانی، نظیر وجود ذرات تخریبی و مواد شیمیایی (کربنات کلسیم، ژپس، انیدریت و نمک) نسبت به سایر نهشته‌ها از فرسایش‌پذیری بیشتری برخوردارند. پالی‌گورسکایت و سیپولایت کانی‌های رسی تشکیل‌دهنده خاک مارن هستند که منجر به بی‌ثباتی، کاهش ظرفیت باربری و تورم در خاک می‌شوند [1-4]. فرسایش داخلی و پایداری خاک‌های مارنی به عوامل همچون (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ترکیبات تشکیل‌دهنده خاک؛ (۲) حساسیت و پلاستیسیته خاک، خصوصاً محتوای اسمکتیت؛ (۳) محتوای کربنات خاک که در کوتاه‌مدت ممکن است باعث ایجاد چسبندگی در خاک‌ها و در درازمدت موجب اثر سیمان‌شدگی و تغییر ساختار خاک می‌شود؛ و (۴) نسبت تخلخل متفاوت در نمونه‌ها وابسته است [1-3,5].

مارن‌ها به‌طورکلی با معیارهای مشابه طبقه‌بندی خاک رس و سیلت طبقه‌بندی شده‌اند درحالی‌که حضور کربنات‌ها در نظر گرفته نشده است. اگرچه، حضور کربنات‌ها در این خاک‌ها برای رفتار ژئوتکنیکی آن‌ها بسیار مهم به نظر می‌رسد [3]. لاماس و همکاران (۲۰۰۲) مشخصات خصوصیات ژئوتکنیکی مارن در اهداف مهندسی عمران به‌عنوان عملکرد محتوای کربنات (درصد کربنات) را پیشنهاد کردند [1]. آنالیز خواص مهندسی و رفتار خاک‌های حاوی کربنات نیاز به اطلاعات صحیح در مورد مقدار کربنات دارد. نتایج مطالعات انجام شده پژوهشگران، رابطه قوی بین افزایش پلاستیسیته و واکنش‌پذیری با محتوای کربنات و رس در مارن طبیعی را نشان می‌دهد [6,7].

حرارت چه در حالت گذرا و چه در حالت پایدار موجب تغییر در مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری خاک‌ها به‌ویژه خصوصیات مهندسی

ژئوتکنیکی از قبیل گسیختگی در فونداسیون‌ها، شیب‌ها و ترک‌های کششی در جاده‌ها گزارش شده است. ساختار و کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک مارن را می‌توان عامل اصلی بروز چنین مشکلاتی دانست [16]. مشاهدات حاکی از آن است که بیشتر خرابی‌ها پس از بارندگی رخ داده است. این نمونه‌ها از نظر زمین‌شناسی متعلق به سازند میشان و سن آن‌ها میوسن زیرین تا میانی است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS)، مارن از نوع خاک رس با خصوصیات خمیری کم (CL) است و ۹۵٪ وزنی آن از الک شماره ۲۰۰ عبور کرده است.

بخش اعظم آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است [17]. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده است [18]. برای تهیه نمونه‌های اشعه ایکس (XRD) از کلیه نمونه‌ها، یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتیفریوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر) به خاک، این سوسپانسیون به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت برای اطمینان از حصول شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شد تا سیستم کاملاً همگن شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه توسط لرزاننده مجدداً هم زده شدند. در نهایت بین ۵ تا ۷ قطره از این سوسپانسیون بر روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شد و پس از خشک شدن، با دستگاه پراش پرتو ایکس مدل (PHILIPS-PW1730) مورد آزمایش قرار گرفتند [19,20].

برای تعیین میزان زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و میزان چسبندگی (c) نیز آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D 3080-90 انجام شده است [17]. ارزیابی پراش پرتو ایکس به‌عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک‌ها شناخته شده است. منحنی پراش

می‌دهد و به‌آرامی در یک فرم بی‌کربنات که به‌راحتی در آب انحلال‌پذیر است حل می‌شود؛ بنابراین، تشکیلات آهکی در بعضی موارد ساختاری متخلخل و نفوذپذیر دارند [12]. کربنات‌ها به‌ویژه با تشکیل پیوند بین ذرات خاک و پوشش ذرات خاک می‌توانند تأثیر زیادی بر خصوصیات خاک داشته باشند [11]. وجود حدود ۲۰ تا ۶۵٪ کربنات در خاک‌های مارنی در منطقه جنوب ایران و تأثیر کربنات بر خصوصیات مهندسی خاک‌ها از جمله چسبندگی، نفوذپذیری و حدود اتربرگ [10]، ضرورت مطالعه تأثیر تثبیت حرارتی خاک‌های مارنی غنی از کربنات را بر رفتار مهندسی خاک‌های ضروری می‌کند. همچنین حرارت تولیدشده 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 [۴]، از سوی دیگر خاک رس یک ماده ترمودینامیکی مناسب است و در مواردی مثل کنترل نشت، جلوگیری از آلودگی، عایق حرارتی و محافظت در برابر تشعشع کاربرد دارد؛ بنابراین بررسی و پیش‌بینی خواص مهندسی خاک‌های مارنی هنگامی که در معرض حرارت قرار می‌گیرد، از اهمیت خاصی برخوردار است [3,4,15]. بر این اساس در این مقاله تلاش شده است تا تأثیر حرارت بر خصوصیات مهندسی مارن جنوب از منظر ریزساختاری با نگرش بر بررسی مقاومت فشاری و خصوصیات مهندسی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، در بخش آزمایش‌های رفتاری از خاک مارن غرب شهر بندرعباس در محدوده ایستگاه راه‌آهن و در حاشیه شمالی خلیج فارس استفاده شده است. هدف از این انتخاب بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی از منظر ریزساختاری و ارائه راهکار برای فرایند تثبیت خاک مارن منطقه بوده است. در این منطقه شیب‌های طبیعی و مصنوعی دچار ناپایداری می‌شوند. همچنین شکست‌های گسترده‌ای در بسیاری از پروژه‌های

حرارت بالا به مدت ۲۴ ساعت داخل گرم‌خانه (آون) در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. قابل ذکر است حرارت کوره با نرخ ۵ درجه بر دقیقه به‌طور اتوماتیک افزایش یافته و پس از رسیدن به دمای موردنظر به مدت ۲ ساعت در این دما باقی ماندند و کوره خاموش شد.

نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در قالب‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر اساس استاندارد ASTM D2166 با رطوبت بهینه ۱۶٪ و دانسیته خشک $\gamma_d = 1/65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ساخته شده و برای رسیدن به حالت تعادل به مدت ۴۸ ساعت در ظروف پلاستیکی با رطوبت ثابت نگهداری شدند. سپس به مدت ۲۴ ساعت داخل گرم‌خانه (آون) در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و پس از آن به مدت ۲ ساعت تحت تأثیر حرارت‌های (۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس) قرار گرفته است. شایان ذکر است نمونه مرجع در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شده است.

رسانایی الکتریکی و pH خاک به صورت سوسپانسیون (نسبت ۱ خاک به ۱۰ آب مقطر) تهیه شده است. سپس نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. مقادیر pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل (Lovi Bond-pH110) اندازه‌گیری شد. همچنین رسانایی الکتریکی (EC) کلیه نمونه‌ها توسط دستگاه (Lovi Bond) اندازه‌گیری شدند.

تغییرات وزن برای تمامی نمونه‌ها پس از اعمال حرارت اندازه‌گیری و محاسبه شد. همچنین برای ارزیابی تأثیر حرارت بر پایداری خاک مارن، آزمایش وارفنگی انجام شد. به همین منظور، نمونه‌هایی مشابه نمونه‌های تک‌محوری ساخته شدند و در معرض حرارت‌های مختلف قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها برای انجام آزمایش وارفنگی، به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب قرار داده شدند، به طوری که نمونه‌ها به‌طور کامل در آب قرار گرفته شدند.

پرتو ایکس خاک مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است. نتایج آنالیز XRD انجام گرفته بر روی خاک مارن طبیعی نشان می‌دهد که پالی‌گورسکایت، کائولینیت و سپیولایت کانی اصلی رسی و کوارتز، کلسیت و دولومیت کانی‌های غیر رسی موجود در خاک مارن است. در شکل (۱) قله‌های اصلی کانی‌های رسی، در فاصله ($3/17 \text{ \AA}$ و $2/88 \text{ \AA}$) مربوط به کانی پالی‌گورسکایت (۱۵/۴ درصد)، فاصله ($7/04 \text{ \AA}$) مربوط به کانی کائولینیت (۹/۶ درصد) و فاصله ($1/87 \text{ \AA}$) مربوط به کانی سپیولایت به تفکیک قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با توجه به منحنی پراش پرتو ایکس (XRD)، قله‌های مربوط به پالی‌گورسکایت که کانی اصلی تشکیل‌دهنده خاک مارن است به‌وفور مشاهده شده است. حدود $72/8\%$ خاک مارنی از کانی‌های غیر رسی (۳۶ درصد کوارتز و $36/8\%$ کانی کلسیت) تشکیل شده است.

در جدول (۱) آنالیز شیمیایی (XRF) مارن مورد مطالعه ارائه شده است، بر اساس آنالیز ارائه شده میزان اکسید کلسیم موجود در خاک حدود $19/86$ درصد است. در جدول (۲) برخی مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک مارنی مورد مطالعه در این مقاله ارائه شده است.

برای انجام دیگر آزمایش‌ها، نمونه‌های تهیه شده از منطقه توسط چکش پلاستیکی خرد شده و سپس در معرض حرارت بین ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شده است و تغییرات وزنی، دانه‌بندی، وارفنگی و مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها بررسی شد.

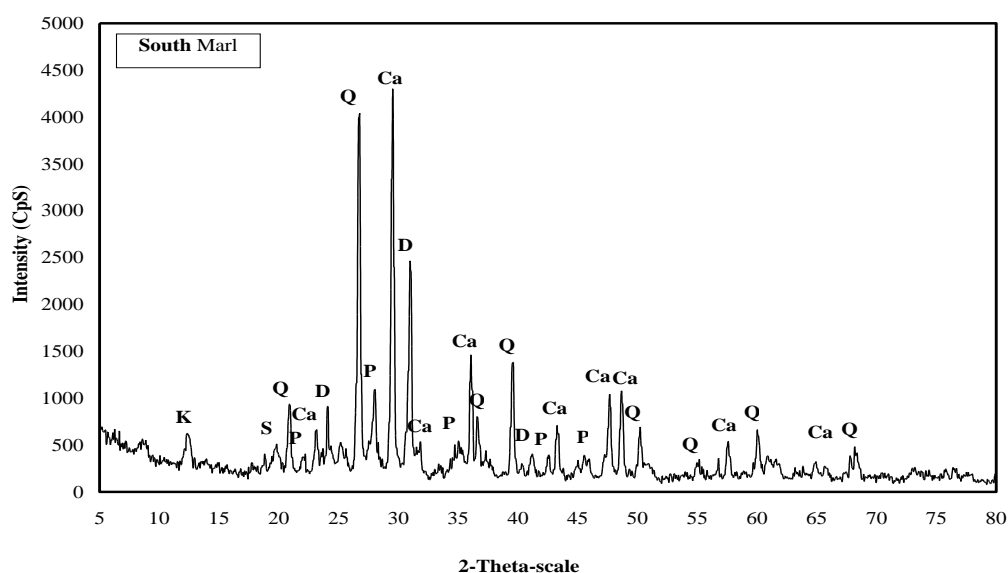
بر این اساس آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، دانه‌بندی، هیدرومتری، تغییرات وزنی، وارفنگی، مقاومت فشاری محدود نشده، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) و pH بر روی خاک‌ها تحت تأثیر حرارت‌های (۲۵، ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس) بر اساس استاندارد ASTM انجام شدند [17]. شایان ذکر است نمونه‌های ساخته شده در

جدول (۱): مشخصات شیمیایی خاک مارن مورد مطالعه

Parameters Product type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI
South Marl	35.555	8.341	5.222	19.863	1.688	6.597	1.605	0.475	0.085	0.124	19.51

جدول (۲): برخی از مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه خاک مارن مورد مطالعه

Physical properties of South Marl	Quantity measured	References for method of measurement
Clay (%)	34.12	[17], ASTM, D422-63
pH (1:10; soil: water)	8.74	[17], ASTM D4972
Carbonate content (%)	38.5	Hesse, 1971
Strength Parameters	C (kg/cm ²)	[17], ASTM D3080-90
	φ°	[17], ASTM D3080-90
Unconfined Compression Strength (UCS) (kg/cm ²)	0.7	[17], ASTM D2166-06
Liquid limit (%)	28	[17], ASTM, D4318
Plastic Limit (%)	18	[17], ASTM, D4318
Plasticity Index (%)	10	[17], ASTM, D4318
Maximum dry density (g/cm ³)	1.65	[17], ASTM D698
Optimum water content (%)	16	[17], ASTM D698
Maximum free -swelling (%)		
permeability coefficient (k) (cm/s)	1.1e-07	
G _s	2.77	[17] ASTM, D85487
Classification	CL	[17], ASTM, D3282
Color		
Soil composition	Palygorskite, Sepiolite, Kaolinite, Calcite, Dolomite, Quartz	ASTM D2216



شکل (۱): منحنی پراش پرتو ایکس خاک مارن جنوب مورد مطالعه

(P: پالیگورسکایت، S: سپیولایت، K: کائولینیت، Ca: کلسیت، Q: کوآرتز، D: دولومیت)

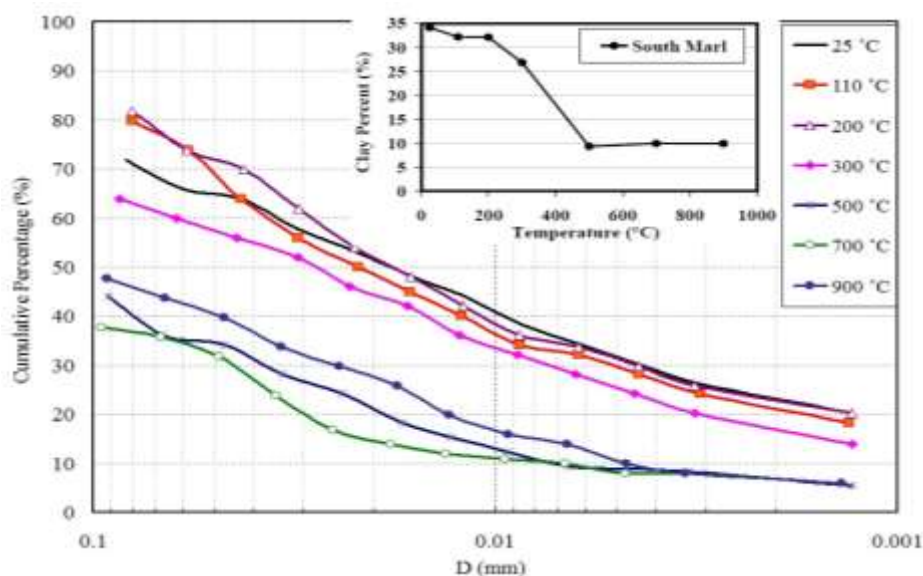
بحث و بررسی

بررسی تغییرات دانه‌بندی و خواص خمیری

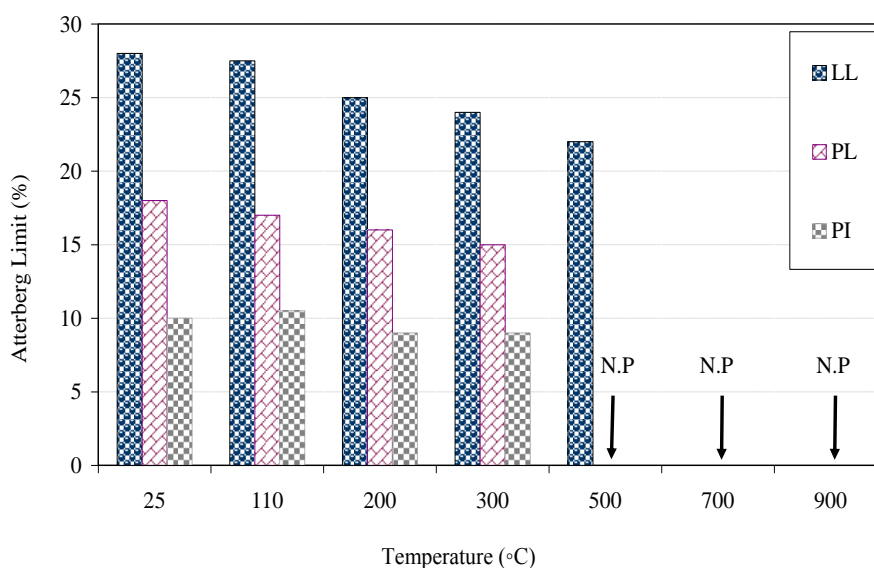
حرارت خواص فیزیکوشیمیایی، ساختاری و ترکیب خاک را به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌دهد. اعمال حرارت خصوصیات خاک از جمله دانه‌بندی و در بعضی مواقع رفتار و طبقه‌بندی خاک را تغییر می‌دهد.

به یکدیگر می‌کنند و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهد که این امر موجب کاهش ۱۵٪ ذرات هم‌اندازه رس شده است. از سوی دیگر می‌توان بیان کرد که حرارت به علت سیمان‌تاسیون ذرات در نتیجه شکل‌گیری برخی نمک‌ها و اکسیدهای موجود در خاک موجب ترکیب و چسباندن ذرات به یکدیگر و تغییر ویژگی‌های خاک می‌شوند، این فرآیند نیز می‌تواند بر دانه‌بندی خاک و ویژگی‌های مهندسی خاک تأثیرگذار باشد. با افزایش دما به بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس دانه‌بندی خاک دچار تغییرات محسوسی نشده است، به‌نحوی که در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس درصد ذرات هم‌اندازه رس نسبت به دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس تغییر خاصی نیافته است. در شکل (۳) تغییرات حدود اتربرگ خاک مارن مورد مطالعه در دماهای مختلف ارائه شده است. حد روانی خاک مارن طبیعی مورد بررسی ۲۸ واحد و حد خمیری آن ۱۸ واحد است. بر اساس نتایج ارائه شده با افزایش دما به ۱۱۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس میزان حد روانی به ترتیب ۰/۵، ۳ و ۴ واحد کاهش یافته است که مقادیر قابل‌توجهی نیست. از سوی دیگر نشانه خمیری با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس تنها حدود یک واحد کاهش یافته است.

منحنی دانه‌بندی و میزان تغییرات ذرات هم‌اندازه رس خاک مارن مورد مطالعه در شکل (۲) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲) با افزایش دما به ۱۱۰ درجه سلسیوس میزان تغییرات منحنی دانه‌بندی چندان قابل‌توجه نیست. با افزایش دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس قطر ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۱ میلی‌متر حدود ۸٪ کاهش یافته است و قطر ذرات کوچک‌تر ۰/۰۰۲ میلی‌متر حدود ۶٪ کاهش یافته است. با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سلسیوس، اندازه ذرات افزایش قابل‌توجهی داشته است و درصد ذرات هم‌اندازه رس (۰/۰۰۲ میلی‌متر) از ۳۴٪ به ۹/۴٪ کاهش یافته است. در حقیقت می‌توان بیان کرد آغاز فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون و تخریب ساختار کانی رسی منجر به افزایش اندازه ذرات شده است. در واقع ساختارهای کریستالی کانی‌های رسی موجود در خاک شکسته شده و با پیوندهای شیمیایی شروع به پیوستن



شکل (۲): منحنی هیدرومتری خاک مارنی اصلاح‌شده با حرارت



شکل (۳): تغییرات حد روانی و حد خمیری خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

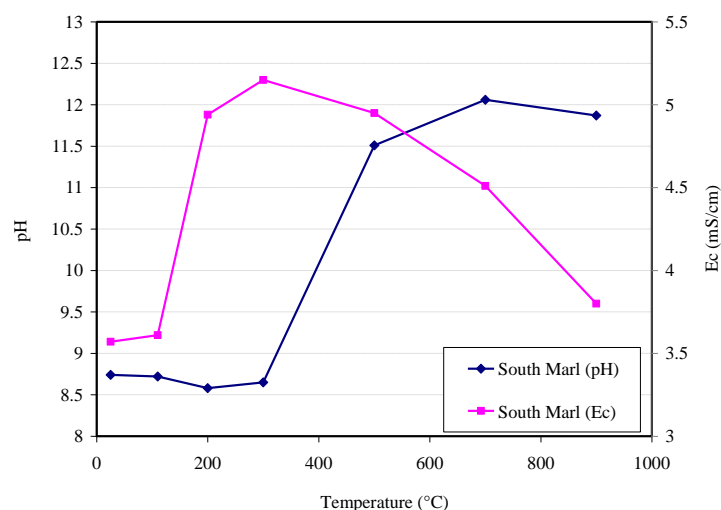
کاهش در حدود اتربرگ، ناشی از تغییر ساختار خاک تحت تأثیر حرارت اعمالی و تغییر رفتار خاک است [21].

تغییرات روند pH و EC خاک با افزایش دما

شکل (۴) تأثیر حرارت بر pH خاک را نشان می‌دهد. با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس تغییرات قابل توجهی در مقدار pH خاک مشاهده نمی‌شود و به مقدار ناچیزی (حدود ۰/۱) واحد کاهش می‌یابد که با نتایج دیگر محققان همخوانی دارد [22,23]. این کاهش احتمالاً به دلیل وقوع برخی واکنش‌های اکسیداسیون است. اما با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سلسیوس pH محیط ۲/۸ واحد افزایش یافته است. روند افزایشی تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس ادامه می‌یابد و pH محیط به مقدار ۱۲/۰۶ افزایش یافته است، تشکیل ترکیبات سیمانی در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس و واکنش‌های پوزولانی در حضور آب عامل اصلی افزایش pH محیط است. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس pH به مقدار ناچیزی کاهش یافته و به حدود ۱۱/۸۷ واحد رسیده است.

با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سلسیوس، حد روانی و حد خمیری کاهش قابل توجهی می‌یابد. در حقیقت در دمای ۵۰۰ درجه حد روانی حدود ۷ واحد کاهش یافته و خاک دیگر رفتار خمیری ندارد و رفتار (طبقه‌بندی) خاک از دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به بالا تغییر کرده و رفتار دانه‌ای به خود می‌گیرد. شایان‌ذکر است در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نمونه‌ها به محض مرطوب شدن دچار گیرش می‌شود که به دلیل تشکیل ترکیبات سیمانی در خاک است.

تغییرات حدود اتربرگ خاک‌ها در معرض حرارت، وابسته به نوع کانی رسی و میزان حرارت اعمال شده است. وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون سبب تخریب ساختار کانی‌های رسی خاک مارن شده و حدود اتربرگ خاک را تحت تأثیر قرار داده است. مقدار حد خمیری نیز با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه که دی‌هیدراسیون اتفاق می‌افتد، کاهش می‌یابد و به مقدار ۱۵ درصد می‌رسد. قابل توجه است که با ادامه روند گرمادهی خاک غیر پلاستیک شده است و انجام آزمایش فیتله غیرممکن شد، دلیل این تغییر رفتار در نتایج پراش اشعه ایکس مورد بررسی قرار می‌گیرد. این



شکل (۴): تغییرات pH و هدایت الکتریکی (Ec) خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

رسید و حدود (mS/cm) ۵ می‌شود. با افزایش دما به ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس هدایت الکتریکی خاک کاهش یافته و در نهایت به مقدار (mS/cm) ۳/۸ رسیده است. تشکیل ساختار شیشه‌ای در دماهای زیاد از علل کاهش هدایت الکتریکی در دماهای بالا است.

آنالیز ریزساختاری خاک مارن تحت تأثیر

حرارت با استفاده از آنالیز XRD

جهت تعیین ترکیب کانی‌شناسی خاک مارن مورد مطالعه و همچنین به منظور بررسی تغییرات ریزساختاری نمونه‌های مارن تحت حرارت‌های مختلف، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شده است. منحنی پراش پرتو ایکس خاک مارنی تحت اعمال حرارت‌های مختلف در شکل (۵) ارائه شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) شدت قله اصلی کانی پالی‌گورسکایت (Å) ۳/۱۷ با افزایش حرارت به ۱۱۰ درجه سلسیوس تغییر محسوسی نداشته است و حدود ۷۳ Cps کاهش یافته است که دلیل آن می‌تواند حذف آب فیزیکی خاک باشد. با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سلسیوس قله اصلی کانی پالی‌گورسکایت تغییر محسوسی نداشته است. با افزایش

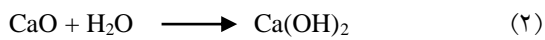
از دیگر دلایل افزایش pH در حرارت‌های بالا، مربوط به آزاد شدن کاتیون‌ها و همچنین کاهش افت گروه‌های OH در زمان دی‌هیدروکسیلاسیون است [22]. از سوی دیگر تجزیه‌ی کربنات (بر اساس نتایج آزمایش تعیین میزان کربنات، خاک مارن موجود حاوی ۳۸٪ کربنات است). در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، موجب کاهش اسیدیته‌ی خاک و افزایش pH می‌شود که در شکل (۴) مشاهده می‌شود [23]. در واقع در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس محیط مناسب برای انجام واکنش‌های پوزولانی در خاک ایجاد می‌شود.

در شکل (۴) روند تغییرات هدایت الکتریکی خاک مارن تحت حرارت‌های مختلف نیز ارائه شده است. کاهش میزان هدایت الکتریکی با افزایش دما، می‌تواند به تخریب کانی‌های رسی، تشکیل اکسیدها و تشکیل ذرات درشت نسبت داده شود [22]. با افزایش دما به ۱۱۰ درجه سلسیوس، میزان هدایت الکتریکی تغییر قابل توجهی نداشته است. از سوی دیگر با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سلسیوس هدایت الکتریکی حدود (mS/cm) ۱/۳۷ افزایش و به مقدار (mS/cm) ۴/۹۵ رسیده است. با افزایش دما به ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس میزان هدایت الکتریکی به میزان بیشینه خود

به صورت کامل تجزیه می شود [25]. در واقع کربنات کلسیم در اثر حرارت تجزیه می شود و در نتیجه آن مطابق با واکنش رابطه (۱) دی اکسید کربن آزاد شده و به اکسید کلسیم یا آهک زنده تبدیل می شود [25].

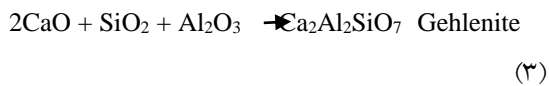


بر این اساس اکسید کلسیم آزاد شده در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس در صورتی که در معرض آب قرار گیرند، با آب واکنش داده و بر طبق رابطه (۲) هیدروکسید کلسیم یا آهک شکفته را تشکیل می دهد.

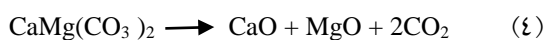


هیدروکسید کلسیم حاصل از واکنش رابطه (۲) با وجود مصالح سیلیسی و آلومینوسیلیسی ها و رطوبت مناسب با انجام واکنش های پوزولانی می تواند موجب تشکیل نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) شود [26,27].

در حقیقت در خاک مارن حاوی درصد کربنات بالا (۳۸/۵٪)، هنگامی که در معرض حرارت های بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار می گیرد، پس از تجزیه کربنات کلسیم، اکسید کلسیم با فازهای حاصل از تخریب فیلوسیلیکات های موجود واکنش داده و بر طبق رابطه (۳) تشکیل سیلیکات های کربناتی از جمله ژلنیت می دهد.

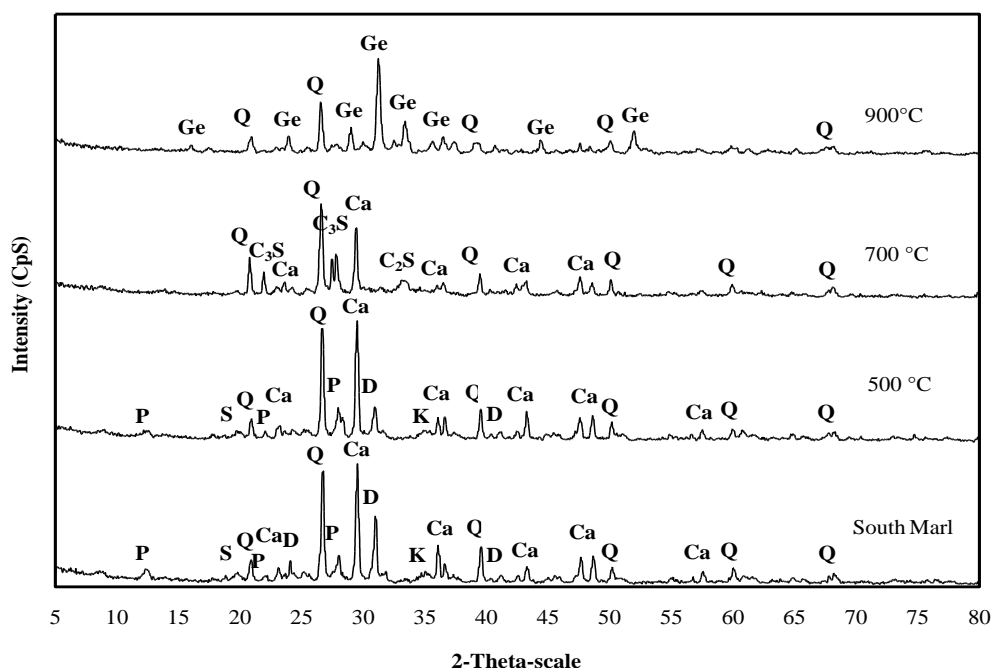


همچنین دولومیت در اثر حرارت کمتری نسبت به کلسیت و در حدود ۷۰۰ درجه تجزیه شده و مطابق با واکنش رابطه (۴) با آزاد شدن دی اکسید کربن به اکسید منیزیم و اکسید کلسیم تبدیل می شود [25].



دما به ۷۰۰ درجه سلسیوس شدت قله اصلی کانی پالی گورسکایت با افت مواجه شده است، به نحوی که قله این کانی از ۱۰۸۲ CpS به ۶۷۰ CpS کاهش یافته است و کاهش ۳۷٪ را تجربه می کند. در واقع افزایش دما موجب از دست رفتن آب بین لایه ها می شود که این فرایند باعث کاهش در شدت قله کانی های رسی می شود [23,24]. با افزایش دما به ۹۰۰ درجه قله اصلی کانی پالی گورسکایت به ۳۰۱ CpS کاهش یافته است. این روند برای قله های دیگر کانی پالی گورسکایت نیز وجود دارد، به نحوی که در فاصله ۷/۰۹ Å نیز قله کانی پالی گورسکایت از ۶۰۸ CpS به ۲۳۰ CpS کاهش یافته است. در حقیقت می توان بیان نمود که کانی پالی گورسکایت تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس پایدار است و پس از آن پایداری خود را از دست می دهد. بر این اساس می توان بیان نمود که فرآیند دیفرانسیل گیری در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس آغاز می شود و منجر به تخریب کانی های رسی مارن می شود. شایان ذکر است در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس قله های جدیدی در پراش اشعه ایکس نمونه های مورد مطالعه مشاهده می شود که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.

قله اصلی کلسیت در فاصله ۳/۰۳ Å مشاهده می شود، بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) تغییرات شدت قله اصلی کلسیت در دمای ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس تغییرات محسوسی نداشته است به نحوی که میزان تغییرات قله اصلی در دماهای ۲۵ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس بین ۰/۵٪ تا ۰/۸٪ است. با افزایش دما به ۷۰۰ درجه سلسیوس شدت قله کلسیت با کاهش ۸۲۰ CpS مواجه شده است. این روند کاهش تا دمای ۹۰۰ درجه ادامه یافته و در این دما قله کلسیت به طور کامل حذف شده است و کانی کلسیت به صورت کامل از بین رفته است. بر اساس مطالعات دیگر پژوهشگران کربنات کلسیم در دمای ۸۰۰ تا ۸۷۰ درجه سلسیوس



شکل (۵): منحنی پراش اشعه ایکس خاک ماری تحت فرآیند تثبیت حرارتی (P: پالیگورسکایت، S: سیپولایت، K: کائولینیت، Ca: کلسیت، Q: کوارتز، D: دولومیت، Ge: ژلنیت، C₃S: آلیت، C₂S: بلیت)

بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس قله‌های ضعیف در فواصل \AA ۳/۲ و \AA ۳/۲۵ و \AA ۲/۶۹ مشاهده می‌شود که مربوط به ترکیبات سیمانی آلیت (C₃S) و بلیت (C₂S) است. تشکیل این ترکیبات می‌تواند عامل اصلی گیرش نمونه مورد مطالعه در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس باشد که موجب می‌شود که امکان انجام آزمایش حدود اتربرگ در این دما نباشد.

همچنین کانی دولومیت در اثر حرارت کمتری نسبت به کلسیت و در دمای ۷۰۰ درجه تجزیه می‌شود. قله‌های دولومیت نیز در دمای ۷۰۰ درجه به طور کامل حذف شده‌اند. با افزایش دما تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، شدت پیک‌های کوارتز کاهش می‌یابد اما حذف نمی‌شود.

تغییرات وزنی و دمای دی‌هیدروکسیلاسیون

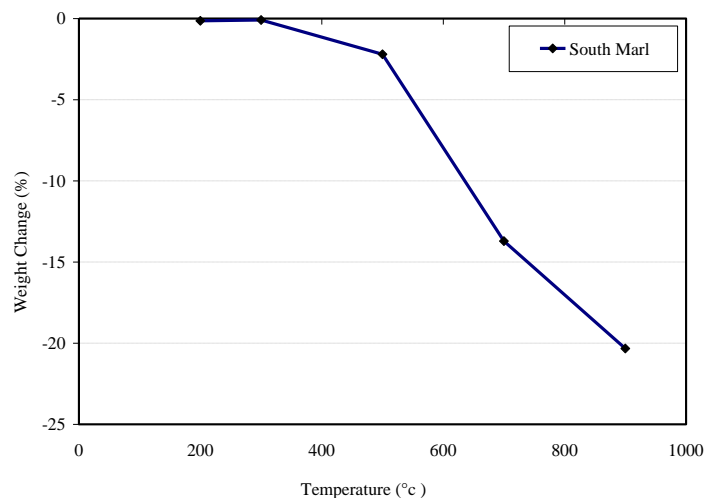
دی‌هیدروکسیلاسیون به خروج یون هیدروکسیل از

بر اساس بررسی منحنی پراش اشعه ایکس شکل (۵) در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس قله‌های ترکیبات ژلنیت در فواصل \AA ۲/۸۵ و \AA ۱/۷۵ مشاهده می‌شود. با افزایش دما تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، شدت قله‌های کلسیت، کاهش می‌یابد و در دمای ۹۰۰ درجه به طور کامل حذف شده‌اند و قله‌های جدیدی که مربوط به کانی ژلنیت است، تشکیل شده‌اند. ژلنیت جز آلومینوسیلیکات‌های کلسیم طبقه‌بندی می‌شود که بر اثر واکنش اکسید کلسیم حاصل از تجزیه کلسیت با فازهای آمورف موجود از جمله سیلیس و آلومین تشکیل می‌گردد [25]. در حقیقت زمانی که دما به ۸۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد کلسیم کربنات به کلسیم اکسید تجزیه می‌شود و ژلنیت نیمه پایدار ظاهر می‌شود. همچنان که دما افزایش می‌یابد مقدار ژلنیت کاهش می‌یابد. فازهای ایجاد شده در تشکیل فاز شیشه‌ای نقش دارند [27]. علت حضور ژلنیت را می‌توان به نسبت بالای کلسیت به سایر کانی‌ها مرتبط دانست [28].

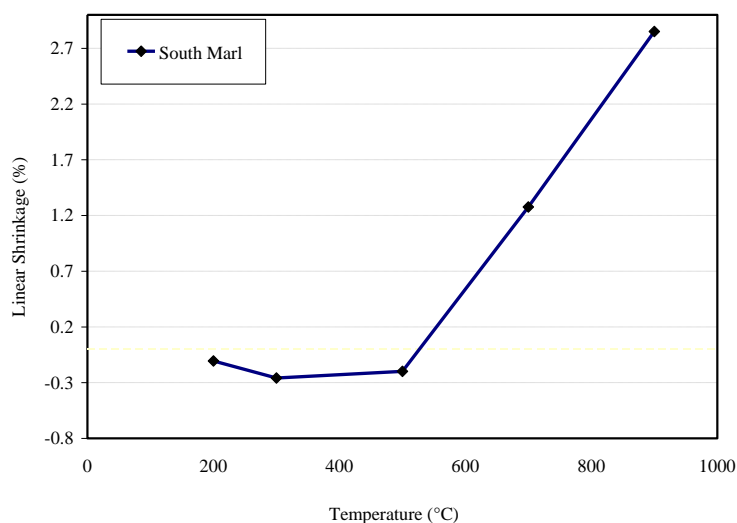
مارن و تخریب ساختار کانی‌های رسی مارن است؛ بنابراین می‌توان بیان نمود دمای بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، دمای شروع دی‌هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی خاک مارنی است که این نتایج صحت تحلیل‌های صورت گرفته در نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس را تأیید می‌کند. دی‌هیدروکسیله شدن پالی‌گورسکایت که کانی رسی اصلی خاک مارنی است و تخریب آن در دمایی بیش از ۵۰۰ درجه شروع می‌شود، این روند برای کانی رسی کائولینیت هم مشاهده می‌شود. روند تغییرات ریزساختاری مارن، تحت حرارت با آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) که در شکل (۵) ارائه شده است، صحت این مطلب را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که روند افزایش افت وزن تا دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس نیز ادامه پیدا می‌کند و به میزان ۲۰/۵٪ می‌رسد.

درواقع علت افت وزن در دو بخش رسی و بخش کربناتی خاک مارن است. در حقیقت میزان افت وزنی ۱۴٪ تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس را می‌توان به دلیل دی‌هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی موجود در خاک مارنی مرتبط دانست و افت وزنی ۶/۵ درصدی از دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه را به تجزیه کربنات و آزادسازی دی‌اکسید کربن ارتباط دارد.

ساختار کانی‌های رسی خاک به شکل آب اطلاق می‌شود که به تبع آن، وزن نمونه خاک به شکل ناگهانی کاهش می‌یابد؛ بنابراین افت ناگهانی وزن، معیار مناسبی برای تشخیص دمای دی‌هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی است. بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، پیش‌بینی شد که دمای دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک مارن حادث می‌شود. بر این اساس در این بخش تغییرات وزنی نمونه‌های مارن مورد مطالعه در دماهای مختلف ارائه شده است. شایان‌ذکر است برای بررسی تغییرات وزنی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد (قطر ۴/۴ و ارتفاع ۸/۸ سانتی‌متر) ساخته و بعد از قرار گرفتن در حمام رطوبت به مدت ۳ روز ابتدا در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) در دمای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس میزان افت وزنی قابل‌توجه نیست. با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سلسیوس میزان افت وزنی نمونه‌ها به حدود ۲/۲٪ رسیده است. با افزایش دما تا ۷۰۰ درجه سلسیوس، وزن نمونه‌های مارن به صورت ناگهانی به میزان ۱۴٪ کاهش می‌یابد. این افت وزن چشمگیر به علت شروع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون در



شکل (۶): تغییرات وزنی نمونه‌های مارن تحت فرآیند تثبیت حرارتی



شکل (۷): تغییرات انقباض خطی نمونه‌های مارن تحت فرآیند تثبیت حرارتی

می‌یابد. اما در دمای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب، ۱/۲۷٪ و ۲/۸٪ انبساط و افزایش تخلخل مشاهده می‌شود. علت انبساط نمونه‌ها را می‌توان به مقدار زیاد کربنات کلسیم و تجزیه کربنات و آزادسازی دی‌اکسید کربن در دماهای زیاد دانست، از سوی دیگر بر اساس مطالعات دیگر پژوهشگران کلسیت و دولومیت موجود در خاک‌های مارنی، جمع شدگی ناشی از گرمایش را کاهش می‌دهند [31]، به‌طورکلی کربنات‌ها منجر به کاهش انقباض می‌شوند [32,33].

بررسی مقاومت فشاری خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

برای بررسی مقاومت فشاری خاک مارن تحت تأثیر حرارت، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های مارن در حرارت‌های ۲۵، ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. در شکل (۸) منحنی تأثیر حرارت بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن جنوب در حرارت‌های مختلف نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل شده مقاومت خاک مارن طبیعی ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است. بر

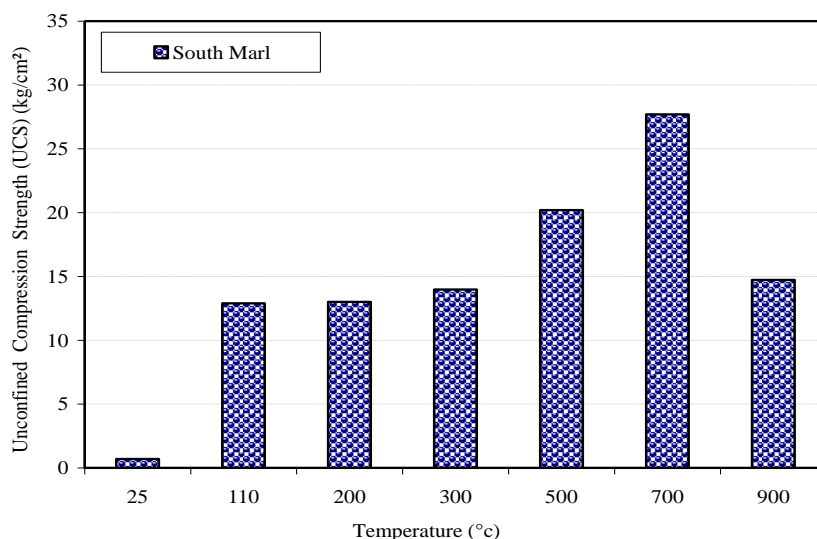
تغییرات انقباض خطی نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر حرارت بر خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مارن، انقباض خطی نمونه‌ها تحت حرارت‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس تعیین شده است. انقباض خطی از تغییرات طول ارزیابی می‌شود. مقادیر انقباض خطی با استفاده از کولیس دیجیتال بعد از مراحل خشک شدن و حرارت دهی در کوره، اندازه‌گیری می‌شود [29]. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، انقباض نمونه‌ها در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، ۰/۱٪ است که با اعمال حرارت تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، انقباض افزایش می‌یابد و به مقدار ۰/۳٪ می‌رسد. این امر در نتیجه دی‌هیدراسیون اتفاق می‌افتد، درواقع به دلیل خروج آب حفره‌ای، جذبی و بین‌لایه‌ای نمونه با کاهش حجم و ابعاد مواجه است. شایان‌ذکر است مقدار و میزان انقباض در طی خشک شدن بستگی به پراکندگی اندازه ذرات، مقدار آبی که برای ایجاد حالت خمیری استفاده می‌شود، ترکیب، حضور و یا عدم حضور ناخالصی‌ها و مقدار آب تشکیل‌دهنده ساختار دارد [30]. با افزایش حرارت تا دمای ۵۰۰ درجه، انقباض خطی نمونه‌ها کاهش

سلسیوس، این افزایش مقاومت را می‌توان به فرایند دی‌هیدروکسیلاسیون نسبت داد. به عبارتی، آرایش اتمی حاصل شده از دی‌هیدروکسیلاسیون منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است [35]. علت این امر وقوع پدیده دی‌هیدروکسیلاسیون در این محدوده دمایی، تغییر ساختار خاک و تشکیل ترکیبات سیمانی است. ارزیابی نتایج پراش اشعه ایکس (شکل ۵) در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نیز کاهش میزان کانی‌های رسی و تشکیل ترکیبات جدید را نشان می‌داد. بر اساس نتایج پراش اشعه ایکس در دمای ۷۰۰ درجه قله اصلی کانی پالی‌گورسکایت حدود ۴۰۰ Cps کاهش یافت و ترکیبات جدید سیمانی نیز تشکیل شده است که می‌تواند یکی از عوامل اصلی افزایش مقاومت باشد. در حقیقت کانی‌های رسی خاک مارنی دی‌هیدروکسیله می‌شوند، ساختار چین‌خورده ذرات و پولک‌های رسی، جای خود را به ذرات چسبیده به یکدیگر و همگن می‌دهند و در نتیجه ساختار همگن، مقاومت را افزایش داده است.

اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸)، مقاومت فشاری محدود نشده مارن در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس، ۱۲/۸۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است که این مقدار ۱۸ برابر مقاومت مارن طبیعی است. دلیل این افزایش مقاومت می‌تواند از دست دادن رطوبت نمونه باشد. روند افزایش مقاومت از ۱۱۰ درجه تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به‌کندی رخ می‌دهد و میزان مقاومت در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به حدود ۱۳/۹۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع افزایش یافته است. در واقع در این مرحله به دلیل فرایند دی‌هیدراسیون با گرم شدن خاک، مقدار آب بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین کاهش دافعه الکتریکی بین ذرات رس باعث افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود [34].

در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس میزان مقاومت فشاری به حدود ۲۷/۶۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسیده است که افزایش ۳۹/۵ برابر نسبت به خاک مارن طبیعی را نشان می‌دهد. با توجه به وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۵۰۰ درجه



شکل (۸): تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن جنوب تحت فرآیند تثبیت حرارتی

درصد کربنات بالا (خاک مارن) به‌ویژه خاک‌هایی که دارای کلسیت هستند، تأثیر مثبت بر مقاومت مکانیکی دارند، زیرا کربنات‌ها عامل تشکیل منافذ هستند و فازهای بلورین در طول پخت ایجاد می‌کنند که مقاومت مکانیکی را افزایش می‌دهد [36]. از سوی دیگر ترکیب ژلنیت به دلیل ضعف خصوصیات مقاومتی، باعث کاهش مقاومت خاک در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌شود. شایان‌ذکر است با استفاده از چارچوب عمومی مکانیک حالت بحرانی، می‌توان مدل رفتاری حرارتی برای پیش‌بینی رفتار هم‌دمای مارن‌ها در دماهای مختلف را ارائه نمودند [37].

وارفتگی و جذب آب

از مشکلات اصلی خاک‌های مارنی عدم دوام، وارفتگی و جذب آب در معرض رطوبت است بر این اساس در این بخش به بررسی تأثیر حرارت بر پایداری نمونه‌های خاک مارن که تحت حرارت تثبیت شده‌اند، پرداخته شده است. بر این اساس نمونه‌ها بعد از گرمایش، توزین شده و بعد به مدت ۲۴ ساعت غرقاب شدند. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود نمونه‌های با تاریخچه حرارتی کمتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس، بلافاصله پس از غرقاب شدن به‌طور کامل متلاشی شدند و تنها نمونه‌های که در معرض دمای ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس قرار داشته‌اند بدون تغییر باقی ماندند. بر اساس نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس (شکل ۵) تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس کانی پالی‌گورسکایت که به‌عنوان یکی از عوامل وارفتگی در خاک‌های مارنی است، پایدار است و عامل اصلی وارفتگی است. بر این اساس درحالی‌که با وجود افزایش نسبی مقاومت نمونه‌های در معرض دمای کمتر از ۵۰۰ درجه مشاهده می‌شود، این مقاومت همیشگی نبوده و در اثر غرقاب شدن از بین می‌رود و فقط

با افزایش دما تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری به مقدار $14/73$ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌رسد، در این دما میزان مقاومت فشاری حدود $46/8\%$ کاهش یافته است. در واقع می‌توان بیان نمود که به دلیل اینکه کربنات کلسیم در اثر حرارت در دمایی حدود ۸۳۰ تا ۸۷۰ درجه تجزیه می‌شود و در نتیجه، دی‌اکسید کربن آزاد شده و به اکسید کلسیم یا آهک زنده تبدیل می‌شود [25]، بنابراین می‌توان بیان نمود افت مقاومت به علت تغییر ساختار خاک در دمایی بیشتر از دمای دی‌هیدروکسیلاسیون و افزایش تخلخل مارن است. خاک مارنی مورد مطالعه دارای $38/5\%$ کربنات است، از طرفی کربنات کلسیم در محدوده حرارتی ۸۳۰ تا ۸۷۰ درجه سلسیوس تجزیه شده و گاز دی‌اکسید کربن تولید می‌کند که ساختار خاک را متخلخل می‌کند و در نتیجه مقاومت خاک را کاهش می‌دهد. هر چه کربنات مارن بیشتر باشد، در اثر تجزیه حرارتی، تولید گاز دی‌اکسید کربن بیشتر شده و مقاومت بیشتر کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس (شکل ۵) در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس ترکیبات جدید ژلنیت در فواصل $2/85 \text{ \AA}$ و $1/75 \text{ \AA}$ تشکیل می‌شود. ژلنیت دارای ساختاری شیشه‌ای و متخلخل است که موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در این دما می‌شود. بر این اساس می‌توان بیان نمود که ضعف خصوصیات مقاومتی ترکیب ژلنیت تشکیل شده، مقاومت خاک مارنی را کاهش می‌دهد. با این وجود شایان‌ذکر است که مقاومت نمونه در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس، نسبت به نمونه طبیعی حدود ۲۱ برابر شده است. بر اساس نتایج تغییرات انقباض خطی در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به دلیل تجزیه حرارتی و تولید گاز دی‌اکسید کربن نمونه‌ها دچار ترک، افزایش تخلخل و انبساط حجمی می‌شوند که باعث کاهش مقاومت می‌شود. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که رس‌های حاوی

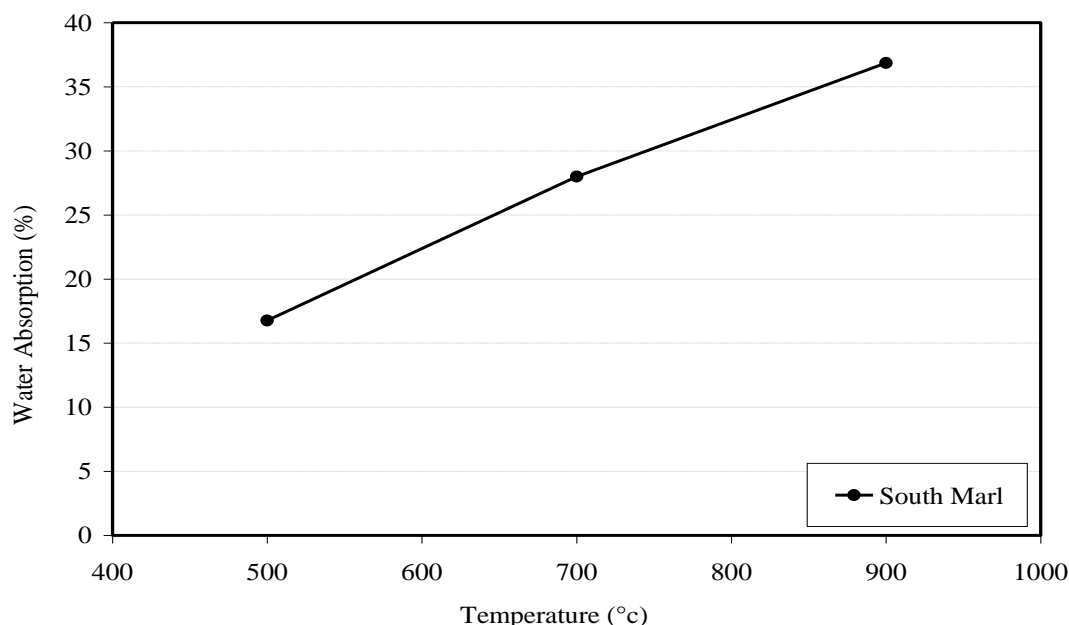
نمونه‌هایی که در معرض دمای دی‌هیدروکسیلاسیون و بالاتر قرار داشته‌اند (تخریب کانی‌های رسی پالی‌گورسکایت)، به دلیل تخریب ساختار رس و در نتیجه پیوند ذرات، در برابر غرقاب شدن مقاوم هستند [4].

جذب آب تنها برای نمونه‌های با تاریخچه حرارتی ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس امکان پذیر است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با افزایش دما، میزان جذب آب افزایش یافته است. مقدار جذب آب نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس، $\frac{36}{8}\%$ است که دو برابر جذب آب در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس است. در حقیقت تجزیه کربنات، باعث افزایش تخلخل می‌شود. بر این اساس در صورت افزایش درصد کربنات پیش‌بینی می‌شود میزان جذب آب نیز افزایش یابد. می‌توان استدلال کرد که در این محدوده حرارتی به تدریج کربنات تجزیه شده و گاز دی‌اکسید کربن آزاد شده است و در نتیجه تخلخل نمونه‌ها و در پی آن جذب آب افزایش یافته است. همچنین می‌توان استدلال کرد که با تجزیه کربنات، اکسید کلسیم حاصل می‌شود که با قرارگیری نمونه‌ها در آب، هیدراته می‌شود و به این ترتیب، میزان جذب آب را بالا می‌برد [3].



شکل (۹): تصویر نمونه‌های خاک مارن تثبیت حرارتی شده، پس از ۲۴ ساعت غرقاب شدن

با توجه به وارفتگی نمونه‌های تثبیت شده با حرارت کمتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس، انجام آزمایش



شکل (۱۰): تغییرات جذب آب نمونه‌های خاک مارنی تحت فرآیند تثبیت حرارتی

نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده در این پژوهش، نتایج ذیل قابل‌استخراج است:

۱- تغییرات ایجاد شده در خصوصیات خاک‌ها هم از لحاظ ریزساختار و هم درشت ساختار تابعی از حرارت اعمالی، نوع کانی رسی و اجزا تشکیل‌دهنده خاک به‌ویژه درصد کربنات موجود است.

۲- حرارت به علت فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون و تخریب ساختار کانی رسی و همچنین سیمانتاسیون ذرات خاک موجب ترکیب و چسباندن ذرات به یکدیگر و کاهش ۱۵٪ ذرات هم‌اندازه رس شده است.

۳- در دمای ۵۰۰ درجه حد روانی حدود ۷ واحد کاهش یافته و خاک دیگر رفتار خمیری ندارد و خاک از دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به بالا رفتار دانه‌ای به خود می‌گیرد. در دماهای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس خاک به‌طور کامل پلاستیسیته خود را از دست می‌دهد. وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون و تخریب ساختار کانی‌های رسی عامل اصلی این روند است.

۴- تشکیل ترکیبات سیمانی در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس و واکنش‌های پوزولانی در حضور آب عامل اصلی افزایش pH محیط در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس (pH=۱۲/۰۶) است، از دیگر دلایل افزایش pH در حرارت‌های بالا، مربوط به آزاد شدن کاتیون‌ها و تجزیه کربنات در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس است.

۵- کانی پالی‌گورسکایت تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس پایدار است و پس‌از آن پایداری خود را از دست می‌دهد.

مراجع

1. Lamas, F., Irigaray, C., Chacón, J., "Geotechnical characterization of carbonate marls for construction of impermeable dam cores". *Eng. Geol.* 66, 283–294, (2002).

۶- با افزایش دما تا ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس، وزن نمونه‌های مارنی به ترتیب به ۱۴٪ و ۲۰/۵٪ کاهش می‌یابد. علت افت وزن در دو بخش رسی و بخش کربناتی خاک مارن است. در حقیقت میزان افت وزنی ۱۴٪ تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس را می‌توان به دلیل دی‌هیدروکسیلاسیون کانی‌های رسی و تخریب ساختار کانی‌های رسی مارن و افت وزنی ۶/۵ درصدی از دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه را به تجزیه کربنات و آزادسازی دی‌اکسید کربن ارتباط داد.

۷- در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس میزان مقاومت فشاری به حدود ۲۷/۶۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است. وقوع دی‌هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس و تغییر آرایش اتمی حاصل شده از دی‌هیدروکسیلاسیون منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است.

۸- در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس تشکیل ژل‌نیت با ساختاری شیشه‌ای و متخلخل موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در این دما شده است.

۹- در تثبیت حرارتی خاک‌های رسی، حرارت اعمالی می‌بایست بیش از دمای دی‌هیدروکسیلاسیون خاک باشد تا مقاومت حاصله در برابر خیس شدگی حفظ شود. به‌طوری‌که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده تنها نمونه‌هایی از مارن پس از غرقاب شدن پایدار ماندند که در دمایی برابر با ۵۰۰ درجه سلسیوس و بیش از آن قرار گرفته‌اند.

قدردانی

مؤلفین این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه هرمزگان برای تهیه بخشی از مواد و وسایل این تحقیق تشکر نمایند.

2. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., "The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure". Vol. 70, No. 4, pp. 365-375, (2003).
3. Ouhadi, V. R., "The role of marl components and ettringite on the stability of stabilized marl". PhD thesis, Department of Civil Engineering and applied mechanics, McGill University, Montreal, Canada, (1997).
4. Ouhadi, V., PourZafarani, M., "Influence of Temperature on Unconfined Compressive Strength and Water Absorption of Sand-Bentonite Mixture in the Presence of Carbonate", *Modares Civil Engineering journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 147-157, (2014).
5. Oostwoud Wijdenes, D. J., and Ergenzinger, P., "Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes", Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study. *J. Catena*, Vol. 33, No. 3, pp. 179-200, (1998).
6. Lamas, F., Irigaray, C., Oteo, C., and Chacón, J., "Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls". *J. Engineering Geology*, Vol. 81, No.1, pp. 32-41, (2005).
7. KerstinElert, J., Miguel, A., Fernando, N., "Smectite formation upon lime stabilization of expansive marls", *Applied Clay Science*, Vol. 158, No.3, pp. 29-36, (2018).
8. Jefferson, I., "Temperature effects on clay soils". Loughborough University, (1994).
9. Wang, M., Benway, J. M., Arayssi, A. M., "The effect of heating on engineering properties of clays", *ASTM Special Technical Publication*, Vol. 6, No. 9, pp. 139-158, (1990).
10. Brindley, G., "Thermal transformations of clays and layer silicates". *Proceedings of the International Clay Conference*, Mexico City. Applied Publishing, Wilmette, Illinois, Vol. 50, No. 2, pp. 119-129, (2015).
11. Morris, P. H. & Wong, L., "Modification of Dredged Sediments to Produce Useful Product by Heating to High Temperatures", Sustainable Tourism CRC, (2005).
12. 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).
13. Chandrasekhran EC., Boominathan S., Sadayan E., Narayanaswami KR., "Influence of heat treatment on the pulverization and stabilization characteristics of typical tropical soils". Special Report No, Highway Research Board, Washington, DC, *ASCE*; Vol. 121, No.10, pp. 1497-1506, (1995).
14. Vizcayno, C., De Gutiérrez, R. M., Castello, R., Rodriguez, E. & Guerrero, C. E., "Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin". *Applied Clay Science*, Vol. 49, No. 2, pp. 405-413, (2010).
15. Ouhadi, V. R, PourZafarani, M., "Characteristics change of kaolinite and bentonite due to heat treatment from micro structural aspects". *Sharif Civil Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 65-72, (2015).

16. Little, D.N., "Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates", Summary and findings. Prepared for National Lime Association, 3, (1999).
17. American Society for Testing and Materials, "ASTM, 2014, American Society for Testing and Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards", P.A., Philadelphia V.4, 08, (2014).
18. Hesse, P. R., "A textbook of soil chemical analysis", William Clowes and Sons, 519p, (1971).
19. Ouhadi. V.R., Yong. R. N., "Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis". *Elsevier Appl. Clay Sci. J.* Vol. 23, No. 1. pp 141, (2003).
20. Ouhadi. V.R., Amiri. M., Zangene. M., "Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized Dispersive Soil", *Modares Journal of Technical & Civil Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp 11-22, (2016).
21. Abu-Zreig. Majed M., Al-Akhras. Nabil M., & Attom. Mousa F., "Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils", *Applied Clay Science*, Vol. 20, No. 3, pp. 132-133, (2001).
22. Zhang, F., Kong, R., & Peng, J., "Effects of heating on compositional, structural, and physicochemical properties of loess under laboratory conditions". *Applied Clay Science*, 152 (1), pp. 259-266, (2018).
23. Vidonish. Julia E., Zygourakis. Kyriacos., Masiello. Caroline A., Sabadell. Gabriel., & Alvarez. Pedro J. J., "Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: A review of technology innovation for sustainable remediation", *Engineering journal*. Vol. 2, No. 4, pp. 426-437, (2016).
24. Dellisanti, F. and Valdre, G., "Study of structural properties of ion treated and mechanically deformed commercial bentonite". *Applied clay science*, Vol. 28, No. 4, pp. 233-244, (2004).
25. Cultrone, G., Rodriguez -Navarro, C., Sebastian, E., Cazalla, O. & De La Torre, M. J., "Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing". *European Journal of Mineralogy*, Vol. 13, No. 2, pp. 621-634, (2001).
26. Singh, M. & Garg, M., "Reactive pozzolana from Indian clays—their use in cement mortars". *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 1903-1907, (2006).
27. Trindade, M.J., Dias, M.I., Coroado, J., Rocha, F., "Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: a comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal". *Applied Clay Science*. Vol. 42, No. 2, 345–355, (2009).
28. Jordan, M.M., Boix, A., Sanfeliu, T., de la Fuente, C., "Firing transformations of cretaceous clays used in the manufacturing of ceramic tiles". *Applied Clay*. Vol. 20, No. 1, pp. 225- 234, (1999).
29. Seynou, M., Millogo, Y., Ouedraogo, R., Traore, K., Tirlocq, J., "Firing transformations and properties of tiles from a clay from Burkina Faso". *Applied Clay Science*. Vol. 51, No. 4, pp. 499–502, (2011).

30. Bender, W., Hundle, F., "Brick and Tile Making", Berlin: Bauverlag, (1982).
31. Schellbach, G., Jung, E., "Statically and thermally optimized lightweight clay brick of blocks for prefabricated wall panels". *Zi-Annual*, Vol. 24, No. 11, pp.122-135, (1991).
32. Cultrone, G., Sebastian, E., Cazalla, O., De la Torre López, M. J., "Physical, mineralogical and textural features of ceramic clays from Granada Province (Spain)", in: C.S.F. Gomes (Ed.), *Proceedings of the Second Mediterranean Clay Meeting*, Aveiro, Portugal, 16–19 September. pp. 298–303, (1998).
33. Elert, K., Cultrone, G., Navaro, C. R., Sebastian Pardo, E., "Durability of bricks used in the conservation of historic buildings". *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 4, No.2, pp. 91- 99, (2003).
34. Afrin. Habiba., "A review on different types soil stabilization techniques", *International journal of transportation engineering and technology*, Vol.3, No. 2, pp. 19-24, (2017).
35. Joshi, R. C., Achari, G., Horsfield, D., and Nagaraj, T., "Effect of heat treatment on strength of clays", *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 120, No. 4, p. 1080, (1994).
36. Gualtieri, M. L., Gultieri, A.F., Gagliardi, S., Ruffini, P., Ferrari, R., Hanuskova, M., "Thermal conductivity of fired clays: Effects of mineralogical and physical properties of the raw materials". *Applied Clay Science*. Vol. 49, No.2, pp. 269- 275, (2010).
37. Hamidi, A., Tourchi, S., & Khazaei, C., "Thermomechanical constitutive model for saturated clays based on critical state theory". *International Journal of Geomechanics*, Vol. 15, No.1, pp. 401-418, (2014).

