



مطالعه‌ی تغییرات ضریب نفوذپذیری و میزان نشست پذیری خاک های مارنی در اثر اعمال حرارت از دیدگاه ریزساختاری

محمد امیری^{۱*}، مسعود دهقانی^۱، مائده پاپی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۱۰

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۰۸

کلمات کلیدی:

مارن

حرارت

ضریب نفوذپذیری

نشست پذیری

XRD

SEM

خلاصه: حرارت سبب ایجاد تغییرات در رفتار مهندسی خاک های رسی می شود. استفاده از خاک های رسی به عنوان پوشش محافظ در دفن زباله های سطح بالا از جمله مواردی است که رس تحت رژیم های حرارتی متوسط تا زیاد قرار می گیرد. مارن ها از جمله نهشته های رسوبی هستند که از کانی های رسی و کربنات کلسیم تشکیل شده اند. وجود کانی های رسی و کربنات کلسیم در خاک های مارن به شدت در رفتار مهندسی خاک ها تأثیرگذار است. پژوهش حاضر به مطالعه خصوصیات مهندسی خاک های مارنی تحت رژیم های حرارتی با نگرش ویژه به تغییرات ضریب نفوذپذیری، نشست پذیری و مقاومت فشاری از منظر ریز ساختاری می پردازد. در این راستا پس از تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مارن، نمونه های خاک در معرض سطوح حرارتی بین 25°C تا 900°C قرار داده شده است. تغییر مشخصات خاک های مارنی در اثر اعمال حرارت از طریق انجام آزمایش های مختلف مکانیکی (نفوذپذیری، تحکیم، مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)) و آزمایش های ریزساختاری (pH، پراش اشعه ایکس (XRD) و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)) تجزیه و تحلیل شد. پایش ریزساختار خاک های مارنی نشان می دهد که به دلیل تخریب و شکل گیری کانی های جدید و همچنین آرایش ذرات خاک و بافت میکروسکوپی تحت رژیم های حرارتی، ضریب نفوذپذیری روند افزایشی دارد به نحوی که در دمای 500°C میزان ضریب نفوذپذیری حدود 245% برابر افزایش یافته است اما در دمای 700°C به دلیل تشکیل ترکیبات سیمانی ضریب نفوذپذیری حدود 85% کاهش می یابد. شایان ذکر است با افزایش اعمال حرارت در حالی که میزان تخلخل روند صعودی دارد اما میزان نشست پذیری کاهش می یابد.

از این رو درک رفتار مهندسی خاک تحت تاثیر حرارت به منظور به

حداقل رساندن تاثیرات نامطلوب حرارت ضروری است [۱].

خاک های مارنی، خاک های با رفتار بسیار ویژه هستند که در بسیاری از مناطق جهان، مانند ایتالیا، اسپانیا، آمریکا، بریتانیا، کانادا، فرانسه، کشور های حاشیه خلیج فارس و ایران (از شمال و شمال غربی تا جنوب شرقی)، مشاهده شده است [۲، ۳]. نهشته های مارنی به دلیل ماهیت ساختمانی، نظیر وجود ذرات تخریبی و مواد شیمیایی (کربنات کلسیم، ژپس، انیدریت و نمک) نسبت به سایر نهشته ها از

۱- مقدمه

افزایش استفاده جهانی از سیستم های انرژی زمین گرمایی (ژئوترمال) کم عمق از جمله تاسیسات دفع زباله های هسته ای، پمپ های زمین گرمایی^۱ (GSHP)، پمپ های آب زیرزمینی گرمایشی^۲ (GWHP) و سیستم های ذخیره انرژی گرمایی آبخوان ها باعث نگرانی از اثرات دما بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک شده است.

1 Ground Source Heat Pumps (GSHP)

2 Groundwater Heat Pumps (GWHP)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: amirrii@hormozgan.ac.ir



اعمال حرارت بین 500°C تا 1000°C باعث تخریب کانی ها و تشکیل سیلیکات های کریستالی جدید می شود، همچنین با اعمال حرارت بیشتر، خاک ذوب شده و مصالح گداخته شکل می گیرد [۹]. افزایش حرارت منجر به تغییر اساس خاک های رسی، ایجاد حفرات بزرگتر بین ذرات رس، تغییر مساحت سطح مقطع جریان موثر در خلل و فرج های کانال و تبدیل آب جذب شده به آب آزاد می شود [۱۱]. در طراحی های پروژه های ژئوتکنیک زیست محیطی، استفاده از نتایج آزمایش های مکانیک خاک و به طور خاص ضریب نفوذپذیری و نشست پذیری به طور مستقیم بر نتایج طراحی اثرگذار است [۱۲]. در حقیقت درک رفتار مهندسی خاک تحت تاثیر دما به منظور به حداقل رساندن اثرات ناخواسته ناشی از اختلافات حرارتی ضروری است [۱۳]. در حقیقت از مهم ترین پارامترهای مورد نظر در طراحی مراکز دفن زباله، نشست پذیری، نفوذپذیری و میزان انتقال آب در خاک است. نفوذپذیری خاک ها به عوامل متعددی از جمله ویسکوزیته سیال، اندازه و توزیع حفرات، منحنی دانه بندی، نسبت تخلخل و درجه اشباع خاک بستگی دارد. در خاک های رسی علاوه بر عوامل فوق، ساختار خاک، تمرکز یونی و ضخامت لایه دوگانه نیز تاثیر چشمگیری بر روی نفوذ پذیری دارند [۱۴].

با توجه به گرمای تولید شده توسط زباله های سطح بالا (HLW)، انتظار می رود که دمای رس حائل شده، پس از نصب سلول های مدفن زباله افزایش یابد [۱۱]. هوستن و لین هدایت هیدرولیکی کانی رسی ایلیت را در دمای متفاوت اندازه گیری کردند، همچنین ویلار و لورت آزمایش هدایت هیدرولیکی بنتونیت را در دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش هدایت هیدرولیکی ناشی از تغییر دما، نسبت به پیش بینی تغییرات ویسکوزیته آب کمتر بود. آن ها پیشنهاد کردند که تراکم پذیری خاک با تثبیت حرارتی و تغییر پذیری ضریب هیدرولیکی با درجه حرارت ممکن است به نوع مواد بستگی داشته باشد [۱۵، ۱۶].

دفع عمیق زباله های سطح بالا^۳ (HLW) در خاک های رسی یکی از روش های امیدوارکننده است. خاک های رسی به دلیل خاصیت جذب قوی، نفوذپذیری کم، خاصیت خودترمیمی - عایق بودن^۴ و خواص خزشی مطلوب میزبان مناسبی برای زباله های سطح بالا محسوب می شوند [11]. از سوی دیگر خاک رس یک ماده

فرسایش پذیری بیشتری برخوردارند. پالی گورسکایت^۱ و سپیولایت^۲ کانی های رسی تشکیل دهنده خاک مارن هستند، که منجر به بی ثباتی، کاهش ظرفیت باربری و تورم در خاک می شوند [۴، ۵]. این دو کانی، برخلاف سایر کانی های رسی، دارای ساختار زنجیره ای بوده و معمولاً با سایر کانی های غیر سیلیکاتی، همچون کربنات ها و سولفات ها همراه هستند [۶، ۷].

ساختار خاک تابع مستقیم نوع و توزیع سطوح فعال و گروه های عملکردی در دسترس و روند هیدراسیون بخش های مختلف است. مشخصه های اصلی ساختار خاک که مستقیماً بر مطالعه رفتار ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی خاک اثرگذار است، مشخصه هایی می باشند که مستقیماً به مشخصه های سطحی و انتقال مرتبطند که اصلی ترین آنها شامل ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح مخصوص و هدایت هیدرولیکی خاک است. کلیه این ویژگی ها به نظر می رسد که وابسته به ریزساختار و درشت ساختار و نحوه توزیع بخش های مختلف در خاک است [۸].

حرارت چه در حالت گذرا و چه در شرایط پایدار، موجب تغییر در مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری خاک ها به ویژه خصوصیات مهندسی خاک های رسی می شود و میزان این تغییرات، تابعی از نوع کانی های موجود در خاک، ترکیبات شیمیایی، دانسیته و درصد رطوبت است [۹]. حرارت دادن تا دماهای زیاد، پلاستیسیته ی خاک ها را کاهش می دهد، مقدار کاهش پلاستیسیته با افزایش دما افزایش می یابد و در خاک های ریزدانه، دارای بیشترین مقدار است. در دماهای تا 400°C ، تغییرات نسبتاً کوچک هستند. اثر حرارت به کانی رسی غالب نیز وابسته است. اکثر خاک ها زمانی که تا حدود 400°C تا 600°C حرارت داده شوند، غیرپلاستیک می شوند. دمای دقیق یا محدوده ی دمایی که این اتفاق می افتد، به وجود کانی های رسی وابسته است [۱۰]. خروج آب و تشکیل کانی های جدید دو واکنش اصلی است که بر اثر اعمال حرارت انجام می شود. خروج آب شامل دو مرحله، دی هیدراسیون (خروج آب حفره ای، جذبی و بین لایه ای) و دی هیدروکسیلاسیون (خروج یون هیدروکسیل از ساختار کریستالی کانی رسی) می شود. به طور کلی با توجه به نوع کانی رسی، دی هیدراسیون بین 100°C تا 200°C و دی هیدروکسیلاسیون بین 500°C تا 1000°C رخ می دهد.

3 High-Level Waste (HLW)

4 Self-sealing Capacity

1 . Palygorskite

2 . Sepiolite



شکل ۱. محل برداشت خاک مارن در شهر بندرعباس (حوالی ایستگاه راه آهن)
 Fig. 1. Marl soil harvesting place in Bandar Abbas

نمونه های اشعه ایکس (XRD) از کلیه نمونه ها، یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر) به خاک، این سوسپانسیون به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از نگهداری نمونه ها 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 نمونه ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شد تا سیستم کاملاً همگن شود. سپس نمونه ها به مدت ۶۰ دقیقه توسط لرزاننده مجدداً هم زده شدند. در نهایت بین ۵ تا ۷ قطره از این سوسپانسیون بر روی اسلاید شیشه ای ریخته شد و پس از خشک شدن، با دستگاه پراش پرتو ایکس مدل PHILIPS-PW1730 مورد آزمایش قرار گرفتند [۲۱].

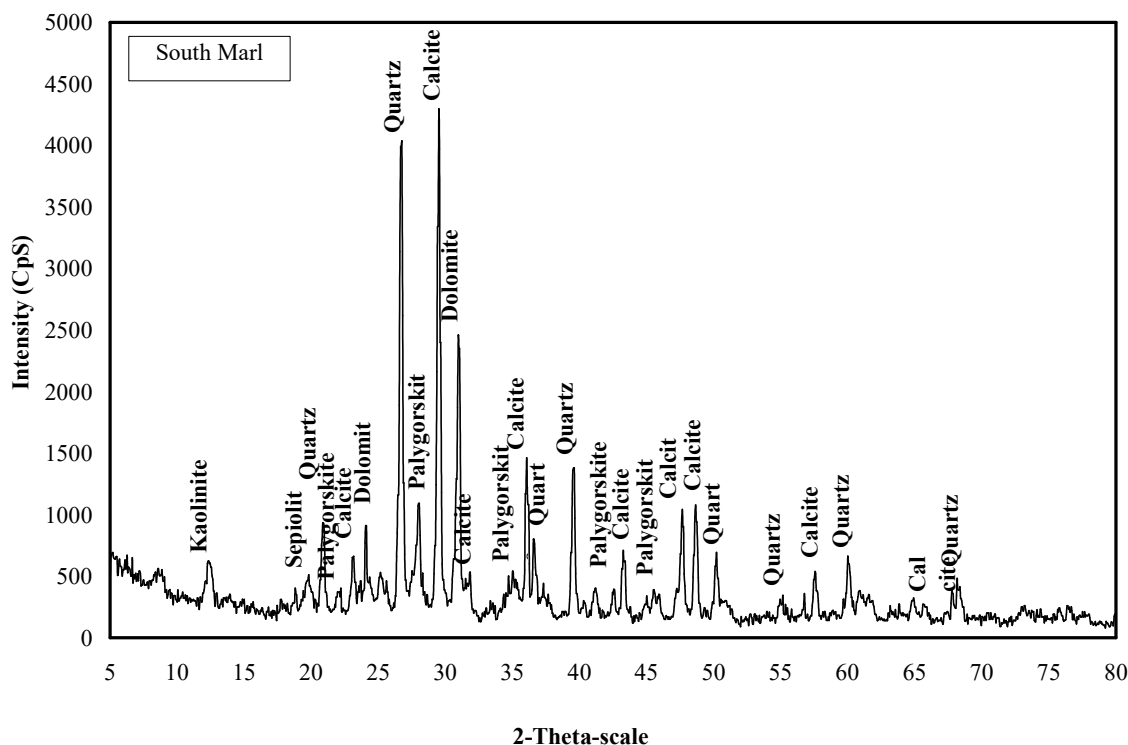
ارزیابی پراش پرتو ایکس به عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک ها شناخته شده است. منحنی پراش پرتو ایکس خاک مورد مطالعه در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج آنالیز XRD انجام گرفته بر روی خاک مارن طبیعی نشان می دهد که پالی گورسکایت، کائولینیت و سپیولایت کانی اصلی رسی و کوارتز، کلسیت و دولومیت کانی های غیر رسی موجود در خاک مارن است. در شکل (۲) قله های اصلی کانی های رسی، در فاصله (3.17 Å و 2.88 Å) مربوط به کانی پالی گورسکایت (۱۵/۴ درصد)، فاصله (7.04 Å) مربوط به کانی کائولینیت (۹/۶ درصد) و فاصله (1.87 Å) مربوط به کانی سپیولایت به تفکیک قابل مشاهده است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود حدود ۷۲/۸٪ خاک مارنی از کانی های غیر رسی (۳۶ درصد کوارتز و ۳۶/۸٪ کانی کلسیت) تشکیل شده است. در جدول (۱) آنالیز شیمیایی (XRF) مارن مورد مطالعه ارائه شده است، بر اساس آنالیز

ترمودینامیکی مناسب است و در مواردی مثل کنترل نشت، جلوگیری از آلودگی، عایق حرارتی و محافظت در برابر تشعشع کاربرد دارد [۱۷]. تغییرات دما باعث تغییر هدایت هیدرولیکی خاک رس و تغییر رفتار این خاک ها می شود و در نتیجه خواص مطلوب خاک های رسی به عنوان یک مانع طبیعی در برابر انتقال زباله های سطح بالا تغییر می کند [۱۱]. بنابراین بررسی و پیش بینی خواص مهندسی خاک های مارنی هنگامی که در معرض حرارت قرار می گیرد، از اهمیت خاصی برخوردار است. از این رو هدف از این پژوهش بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری، میزان نشت پذیری و خواص مهندسی خاک های مارنی از منظر ریزساختاری در دماهای متفاوت است.

۲- مواد و روش ها

در این پژوهش، در بخش آزمایش های رفتاری از خاک مارن غرب شهر بندرعباس در محدوده ایستگاه راه آهن و در حاشیه شمالی خلیج فارس استفاده شده است. هدف از این انتخاب بررسی ضریب نفوذپذیری، نشت پذیری و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک های مارنی از منظر ریزساختاری و ارائه راهکار برای استفاده از خاک های مارنی در مسائل ژئوتکنیک زیست محیطی منطقه بوده است. این نمونه ها از نظر زمین شناسی متعلق به سازند میشان و سن آن ها میوسن زیرین تا میانی است [۱۸]. بر اساس سیستم طبقه بندی 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. در شکل (۱) تصویری از محل برداشت خاک ارائه شده است.

بخش اعظم آزمایش های انجام شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است [۱۹]. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده است [۲۰]. برای تهیه



شکل ۲. منحنی پراش پرتو ایکس خاک مارن سازند میشان واقع در شهر بندر عباس
 Fig. 2. X-ray diffraction pattern of natural marl soil

جدول ۱. مشخصات شیمیایی خاک مارن مورد مطالعه بر اساس آزمایش XRF (اعداد بر اساس درصد)
 Table 1. Chemical properties of the South Marl

Parameters	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
Product type											
South Marl	۳۵.۵۵۵	۸.۳۴۱	۵.۳۲۲	۱۹.۸۶۳	۱.۶۸۸	۶.۵۹۷	۱.۶۰۵	۰.۴۷۵	۰.۰۸۵	۰.۱۲۴	۱۹.۵۱

حرارت کوره با نرخ ۵ درجه بر دقیقه به طور اتوماتیک افزایش یافته و پس از رسیدن به دمای موردنظر به مدت ۲ ساعت در این دما باقی ماندند و کوره خاموش شد.

ضریب نفوذ پذیری به روش بار افتان بر اساس استاندارد ASTM D2434-87 اندازه گیری شده است. نمونه‌ها با رطوبت بهینه و دانسیته خشک ماکزیمم در قالب‌هایی با ابعاد ۵×۱۰ سانتیمتر در ۵ لایه کوبیده شدند، درگام بعد نمونه‌ها اشباع شده است. پس از اطمینان از اشباع شدن نمونه‌ها بعد از گذشت یک هفته، آزمون نفوذپذیری بر روی تمام خاک‌ها انجام گرفت. آزمایش تحکیم برای بررسی میزان نشست پذیری خاک مارن تحت حرارت‌های مختلف مطابق استاندارد

ارائه شده میزان اکسید کلسیم موجود در خاک حدود ۱۹/۸۶ درصد و میزان اکسید آهن حدود ۵/۲۲ درصد است. در جدول (۲) برخی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی خاک مارنی مورد مطالعه در این مقاله ارائه شده است.

برای بررسی تاثیر حرارت بر پارامترهای ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی آزمایش‌های تعیین نفوذپذیری، تحکیم، دانه بندی، مقاومت فشاری محدود نشده، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و pH بر روی خاک‌ها تحت تاثیر حرارت‌های ۲۵، ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است [۱۹].

جدول ۲. برخی از مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه خاک مارن مورد مطالعه

Table 2. Geotechnical properties of the South Marl

Physical properties of South Marl	Quantity measured	References for method of measurement
Clay (%)	۳۴.۱۲	[19], ASTM, D422-63
pH (1:10; soil: water)	۸.۷۴	[19], ASTM D4972
Carbonate content (%)	۳۸.۵	[20], Hesse, 1971
Unconfined Compression Strength (UCS) (kg/cm ²)	۰.۷	[19], ASTM D2166-06
Liquid limit (%)	۲۸	[19], ASTM, D4318
Plastic Limit (%)	۱۸	[19], ASTM, D4318
Plasticity Index (%)	۱۰	[19], ASTM, D4318
Maximum dry density (g/cm ³)	۱.۶۵	[19], ASTM D698
Optimum water content (%)	۱۶	[19], ASTM D698
Permeability coefficient (k) (cm/s)	۱.۱*۱۰ ^{-۷}	[19], ASTM D2434-87
G _s	۲.۷۷	[19], ASTM, D85487
Classification	CL	[19], ASTM, D3282
Color	Green	[19]
Soil composition	Palygorskite, Sepiolite, Kaolinite, Calcite, Dolomite, Quartz	[19], ASTM, D2216

نمونه مرجع در دمای °C ۲۵ نگهداری شده است. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه نگه داشته شدند. برای اندازه گیری تغییرات pH بر اساس استاندارد (ASTM D4972 - 18)، خاک به صورت سوسپانسیون (نسبت ۱ خاک به ۱۰ آب مقطر) تهیه شده است. سپس نمونه ها به مدت ۷۲ ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. مقادیر pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل Lovi Bond-pH110 اندازه گیری شد. در شکل (۳) تصاویری مربوط به آزمایش های انجام شده و دستگاه های مورد استفاده ارائه شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بررسی تغییرات pH خاک در معرض حرارت

شکل (۴) تغییرات pH خاک مارنی را تحت تاثیر حرارت های متفاوت نشان می دهد. بر اساس نتایج ارائه شده pH خاک طبیعی

ASTM D2435-90 انجام شده است. در راستای مطالعه ساختار میکروسکوپی خاک و مشاهده آرایش ذرات رسی و همچنین تغییر ساختار آن پس از اعمال حرارت های مختلف، از نمونه ها تصویری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Tescan Vega3 تهیه شده است. آزمایش های SEM در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز انجام شده است.

آزمایش های مقاومت فشاری محدود نشده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM D2166 انجام شده است. ابتدا خاک مارن مورد مطالعه به مدت ۲ ساعت در حرارت های مختلف ۱۱۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس در کوره الکتریکی قرار داده شد و سپس با تعیین وزن مخصوص بیشینه و درصد رطوبت بهینه خاک های حرارت داده شده نمونه های تک محوری ساخته شده است. برای رسیدن به حالت تعادل نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در ظروف پلاستیکی با رطوبت ثابت نگهداری شدند. شایان ذکر است

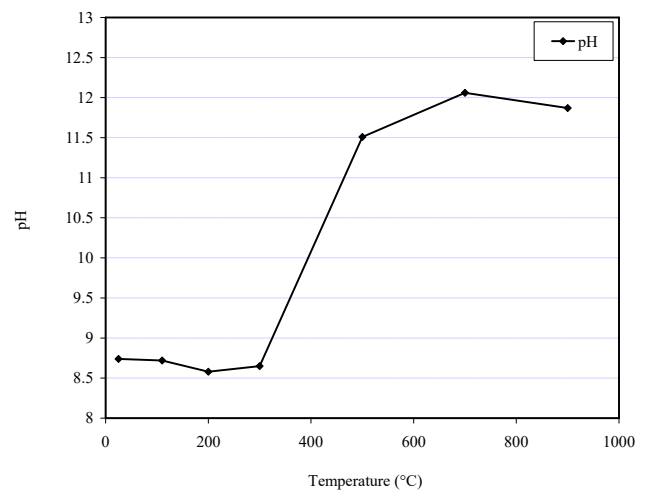


شکل ۳. تصویر برخی از دستگاه‌های استفاده شده و نحوه انجام آزمایش‌ها در این تحقیق (دستگاه نفوذپذیری، کوره الکتریکی، تیتراسیون خاک و دستگاه ادنومتر)

Fig. 3. Picture of some of the devices used and how the experiments were performed in this research

دلایل اصلی افزایش pH خاک باشد. از دیگر دلایل افزایش pH می‌توان به آزاد شدن کاتیون‌ها و همچنین کاهش افت گروه‌های OH⁻ در زمان دی‌هیدروکسیلاسیون اشاره نمود [۲۲]. قابل توجه است که خاک مارن مورد مطالعه دارای ۳۸٪ کربنات طبیعی است که تجزیه دولومیت در دمای ۳۷۰ C° و کربنات کلسیم در دمای حدود ۷۰۰ C° عوامل اصلی افزایش pH خاک در معرض افزایش حرارت است [۲۲]. بر اساس نتایج ارائه شده با افزایش دما به ۹۰۰ C° به دلیل تشکیل ساختارهای شیشه‌ای pH خاک به مقدار ناچیزی کاهش یافته است. شایان ذکر است نتایج ارائه شده با نتایج دیگر محققین همخوانی مناسبی دارد، بر اساس مطالعات یی^۱ و همکاران (۲۰۱۶) و ابرایان^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، تغییرات pH خاک در طول پروژه‌های اصلاح حرارتی تحت تأثیر زمان حرارت دهی و درجه‌ی حرارت هستند. در بسیاری از موارد، به ویژه در درجه‌ی حرارت‌های پائین (کمتر از ۲۵۰ C°)، pH خاک بدون تغییر باقی می‌ماند یا این که با اصلاح حرارتی، اندکی کاهش می‌یابد، اما در حرارت‌های بیشتر، pH خاک‌های حاوی کربنات افزایش می‌یابد [۲۴].

۲-۳- ارزیابی تغییرات پراش اشعه ایکس خاک مارن در معرض حرارت
شکل (۵) منحنی پراش اشعه ایکس خاک مارن طبیعی و خاک‌های مارن در معرض دمای ۵۰۰ C°، ۷۰۰ C° و ۹۰۰ C° را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده قله اصلی کلسیت در Å



شکل ۴. تغییرات pH خاک مارن در معرض حرارت
Fig. 4. pH changes of marl soil stabilized at different temperatures

حدود ۸/۷۴ واحد است که با افزایش دما به ۱۰۰ C° تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود. با افزایش دما تا ۳۰۰ C° میزان pH خاک مارنی به حدود ۸/۶۵ واحد رسیده است که تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود. با افزایش دما به ۵۰۰ C°، pH خاک حرارت دیده حدود ۳ واحد افزایش یافته و به ۱۱/۵۱ واحد رسیده است. تجزیه دولومیت در دمای حدود ۳۷۰ C° می‌تواند دلیل اصلی افزایش pH محیط واکنش در این محدوده دمایی باشد. [22, 23] با افزایش دما به ۷۰۰ C°، pH خاک مارن مورد مطالعه به حدود ۱۲/۰۶ واحد رسیده است، آزادسازی کربنات در دمای حدود ۷۰۰ C°، تشکیل ترکیبات سیمانی در این دما و انجام واکنش‌های پوزولانی در حضور آب می‌تواند از

1 Yi et al.,
2 O'Brien et al.,

قله کانی های رسی می شود [۲۱]. با افزایش دما به 900°C قله اصلی کانی پالی گورسکایت به 301 Cps کاهش یافته است. این روند برای قله های دیگر کانی پالی گورسکایت نیز وجود دارد، به نحوی که در فاصله $7/09\text{ \AA}$ نیز قله کانی پالی گورسکایت از 608 Cps به 230 Cps کاهش یافته است. در حقیقت می توان بیان نمود که کانی پالی گورسکایت تا دمای 500°C پایدار است و پس از آن پایداری خود را از دست می دهد. بر این اساس می توان بیان نمود که فرآیند دی هیدروکسیلاسیون در دمای بیش از 500°C آغاز می شود و منجر به تخریب کانی های رسی مارن می شود. شایان ذکر است در دماهای 700°C و 900°C قله های جدیدی در پراش اشعه ایکس نمونه های مورد مطالعه مشاهده می شود که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.

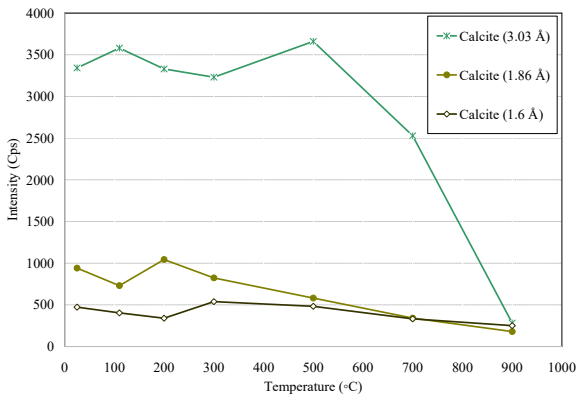
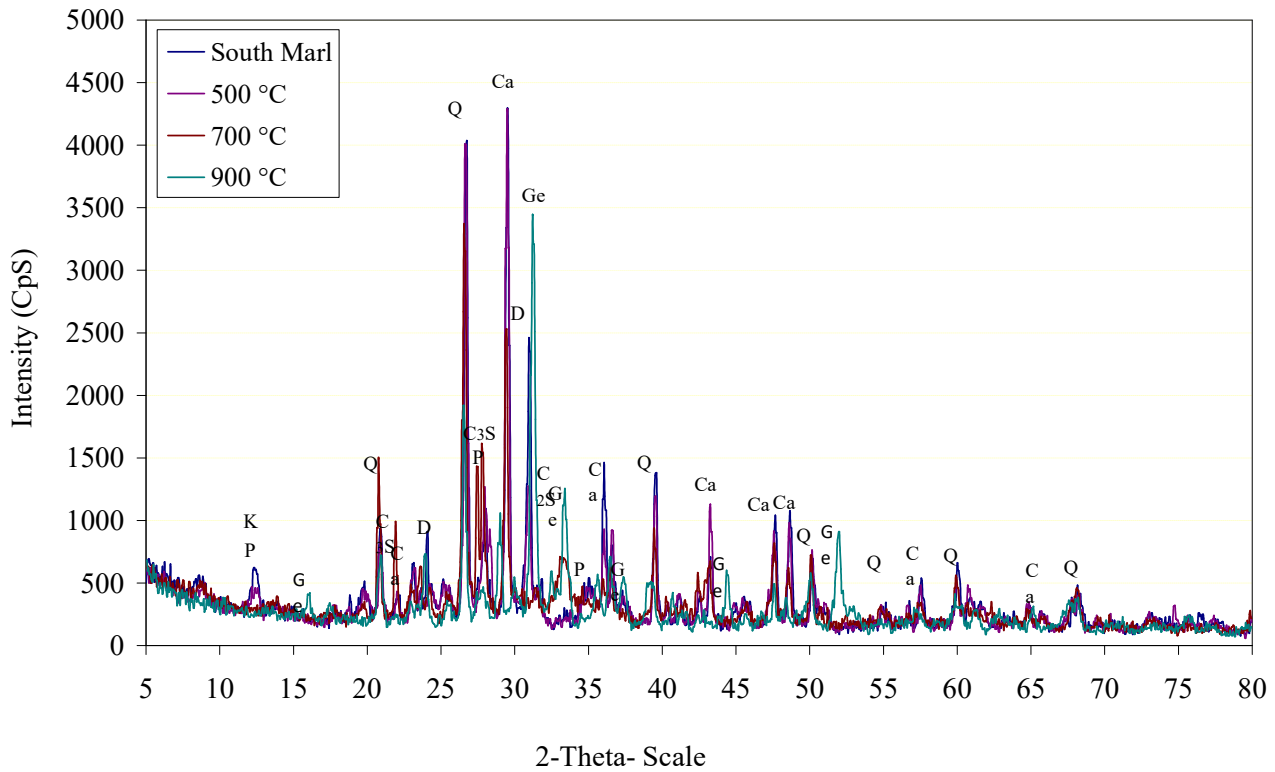
بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس در دمای 700°C قله های ضعیف در فواصل $3/2\text{ \AA}$ و $3/25\text{ \AA}$ و $2/69\text{ \AA}$ مشاهده می شود که مربوط به ترکیبات سیمانی آلایت (C_3S) و بلیت (C_2S) است. تشکیل این ترکیبات سیمانی می تواند عامل اصلی گیرش خاک مارن مورد مطالعه در دمای 700°C باشد که می تواند موجب افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری و افزایش pH نمونه شود. در واقع تشکیل ترکیبات سیمانی و وقوع واکنش های پوزولانی می تواند عامل افزایش pH محیط واکنش (شکل (۴)) باشد. شایان ذکر است که حضور $5/22\%$ اکسید آهن موجب کاهش دمای ذوب و تشکیل ترکیبات سیمانی می شود و یکی از علل مشاهده ترکیبات سیمانی در دمای 700°C حضور اکسید آهن در خاک است [۱۵، ۱۷].

با افزایش دما تا 700°C ، شدت قله های کلسیت کاهش می یابد و در دمای 900°C به طور کامل حذف شده اند و قله های جدیدی که مربوط به کانی ژلنیت است، تشکیل شده اند. بر اساس بررسی منحنی پراش اشعه ایکس در شکل های (۵) و (۵-ه) در دمای 900°C قله های ترکیبات ژلنیت در فواصل $2/85\text{ \AA}$ و $1/75\text{ \AA}$ به ترتیب با شدت 1902 Cps و 548 Cps مشاهده می شود. ژلنیت جز آلومینوسیلیکات های کلسیم طبقه بندی می شود که بر اثر واکنش اکسید کلسیم حاصل از تجزیه کلسیت با فازهای آمورف موجود از جمله سیلیس و آلومین تشکیل می شود [۲۵]. در حقیقت زمانی که دما به 800°C می رسد کربنات کلسیم به اکسید کلسیم تجزیه می شود و ژلنیت نیمه پایدار ظاهر می شود. همچنانکه دما

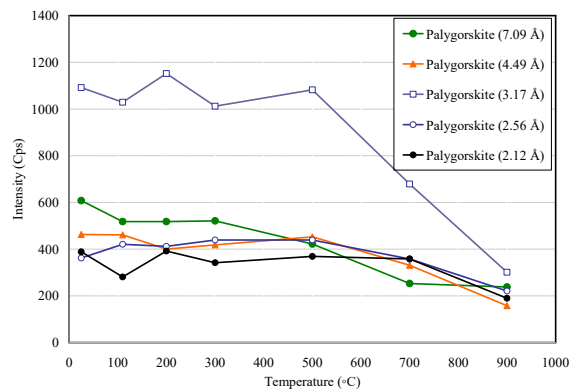
و قله های دیگر کلسیت در فاصله $1/86\text{ \AA}$ و $1/86\text{ \AA}$ مشاهده می شود. همانطور که در شکل (۵-ب) مشاهده می شود با افزایش دما تا 500°C قله اصلی کانی کلسیت تغییر محسوسی نداشته است و محدوده تغییرات حدود 5% است. در حقیقت قله $3/03\text{ \AA}$ از حدود 2068 Cps به 1979 Cps در دمای 500°C تغییر کرده است. این روند برای قله $1/86\text{ \AA}$ نیز وجود دارد و از 539 Cps به حدود 483 Cps در دمای 500°C کاهش یافته است. شایان ذکر است که قله های دولومیت در فواصل $3/69\text{ \AA}$ و $2/88\text{ \AA}$ در دمای 500°C به شدت کاهش یافته است. دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) در اثر حرارت در حدود 370°C تجزیه شده و با آزاد شدن دی اکسید کربن (CO_2) به اکسید منیزیم (MgO) و اکسید کلسیم (CaO) تبدیل می شود [۲۵]. این فرآیند موجب افزایش pH خاک در دمای 500°C شده است که در شکل (۴) مشاهده می شود.

با افزایش دما به 700°C قله اصلی کلسیت در فاصله $3/03\text{ \AA}$ از 2068 Cps به 1728 Cps کاهش یافته است. این روند کاهش در دمای 900°C به شدت افزایش می یابد و قله اصلی کلسیت در فاصله $3/03\text{ \AA}$ از 2068 Cps به 177 Cps کاهش یافته است. در حقیقت کلسیت به صورت کامل تجزیه شده است. در حقیقت کربنات کلسیم (CaCO_3) در دمای حدود 700°C تا 870°C به صورت کامل تجزیه و اکسید کلسیم یا آهک زنده (CaO) و گاز دی اکسید کربن (CO_2) تولید می شود [۲۵]. بر این اساس می توان بیان نمود که یکی از دلایل اصلی افزایش pH در دمای 700°C و 900°C (شکل (۴)) ترکیب اکسید کلسیم آزاد شده و آب و تشکیل هیدروکسید کلسیم یا آهک شکفته ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) است.

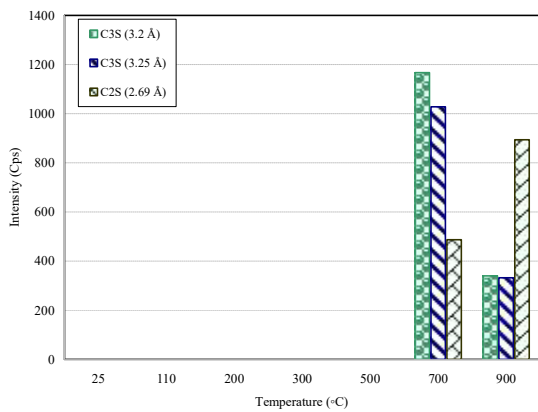
تغییرات شدت قله های کانی رسی پالی گورسکایت در شکل (۵-ج) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) شدت قله اصلی کانی پالی گورسکایت در فاصله $3/17\text{ \AA}$ با افزایش حرارت به 110°C تغییر محسوسی نداشته است و حدود 37 Cps کاهش یافته است که دلیل آن می تواند حذف آب فیزیکی خاک باشد. با افزایش دما تا 500°C قله اصلی کانی پالی گورسکایت تغییر محسوسی نداشته است. در دمای 500°C شدت قله اصلی کانی پالی گورسکایت با افت 37% مواجه شده است، به نحوی که قله این کانی از 1082 Cps به 670 Cps کاهش یافته است. در واقع افزایش دما موجب از دست رفتن آب بین لایه ها می شود که این فرآیند باعث کاهش در شدت



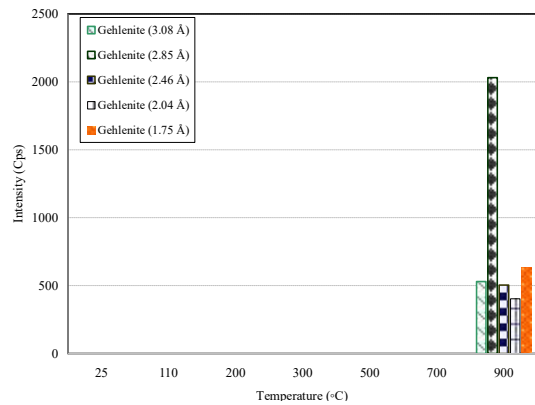
(ب)



(ج)



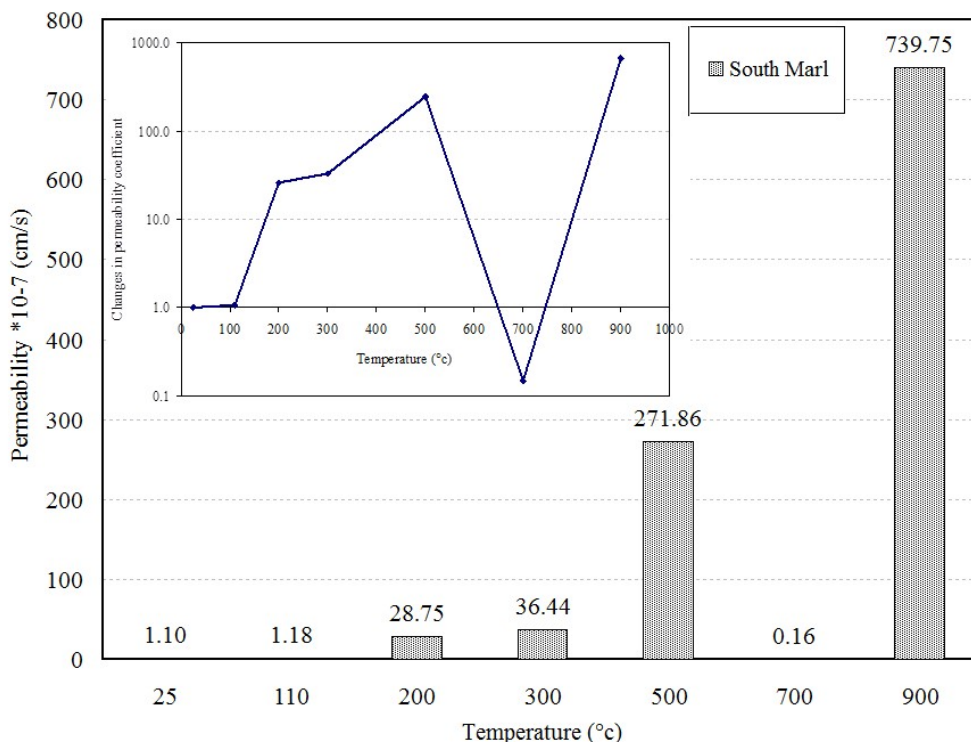
(د)



(ه)

شکل ۵. آنالیز پراش اشعه ایکس خاک مارن در معرض حرارت (P: پالیگورسکایت، K: کائولینیت، Ca: کلسیت، Q: کوارتز، D: دولومیت، Ge: ژلنیت)

Fig. 5. The XRD pattern of the marl soil stabilized at different temperatures



شکل ۶. تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک مارن در معرض حرارت و تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک مارن حرارت دیده نسبت به خاک مارن طبیعی
 Fig. 6. The permeability coefficient of the marl soil heated to different temperatures

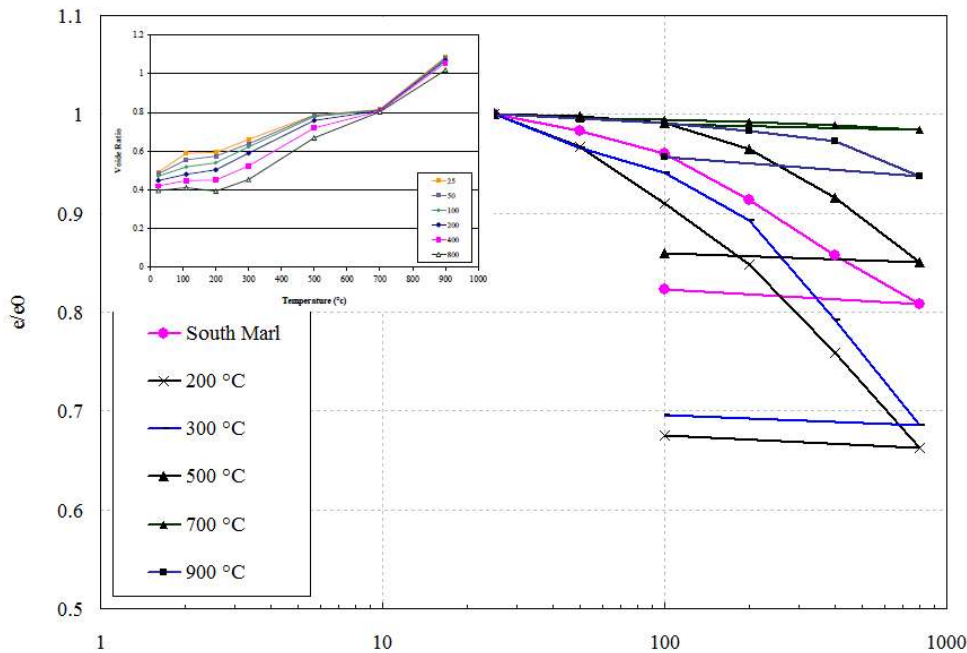
نفوذپذیری نسبت به خاک مارن طبیعی در شکل (۶) -
 ب) ارائه شده است. ضریب نفوذپذیری خاک مارن طبیعی حدود 10^{-7} cm/s است که برای استفاده در پروژه های ژئوتکنیک زیست محیطی قابل قبول است [۲۷]. بر اساس نتایج ارائه شده با افزایش دما به 110°C میزان ضریب نفوذپذیری به مقدار ناچیزی حدود ۵٪ افزایش می یابد. افزایش دما به 200°C موجب ایجاد میکروترک های جدید و یا گسترش میکروترک های موجود می شوند که به طور طبیعی موجب تغییر خواص فیزیکی و به تبع آن افزایش میزان ضریب نفوذپذیری می شود [۲۸]. بر اساس نتایج ارائه شده در دمای 200°C میزان ضریب نفوذپذیری ۲۶ برابر افزایش یافته و به حدود $2.87 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ رسیده است. اعمال حرارت تا دمای 200°C منجر به حذف آب بین لایه ای گردیده و تغییرات غیرقابل برگشتی را در ساختار خاک باعث می شود. حذف آب بین لایه ای موجب افزایش غلظت نمک های اطراف رس شده و به تبع آن ضخامت لایه دوگانه کاهش می یابد که این موضوع کاهش نیروی دافعه را به همراه دارد. این امر شرایط را برای تغییر ریزساختار خاک فراهم کرده و متعاقب آن میزان حفرات ماکروسکوپی در ساختار خاک افزایش می یابد. در چنین

افزایش می یابد مقدار ژلنیت کاهش می یابد. فازهای ایجاد شده در تشکیل فاز شیشه ای نقش دارند [۲۶]. علت حضور ژلنیت را می توان به نسبت بالای کلسیت به سایر کانی ها مرتبط دانست، بر اساس نتایج XRF (جدول (۱)) میزان اکسید کلسیم موجود در خاک مورد مطالعه ۱۹/۸۶٪ است [۲۶]. شایان ذکر است با افزایش دما تا 900°C شدت قله های کوارتز کاهش می یابد اما به طور کامل حذف نمی شود.

۳-۳- بررسی ضریب نفوذپذیری و نشست خاک در معرض حرارت

در پروژه های ژئوتکنیک زیست محیطی و به خصوص فرایندهای زمین گرمایی تغییرات ضریب نفوذپذیری و نشست پذیری، به طور مستقیم بر عملکرد تاثیرگذار است. تغییرات دما باعث تغییر هدایت هیدرولیکی خاک رس می شود و در نتیجه خواص مطلوب خاک های رسی به عنوان یک مانع طبیعی در برابر انتقال زباله های خطرناک با اختلال روبرو می شود [۱۱].

میزان ضریب نفوذپذیری خاک مارن مورد مطالعه در معرض حرارت در شکل (۶) ارائه شده است. همچنین تغییرات ضریب



شکل ۷. تغییرات تخلخل خاک مارن در معرض حرارت
Fig. 7. Changes in the void ratio of marl soils exposed to heat

گیرش ترکیبات سیمانی تشکیل شده در دمای $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ موجب کاهش نفوذپذیری می شود. در دمای $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ با تشکیل ساختار به شدت متخلخل ژلنیت (شکل ۵)) ضریب نفوذپذیری نسبت به خاک مارن طبیعی حدود 672 برابر افزایش و به $7/39 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$ رسیده است.

شکل (۷) منحنی تحکیم خاک های مارن تحت تاثیر دماهای مختلف را نشان می دهد. بر اساس نتایج ارائه شده میزان تخلخل اولیه خاک مارن طبیعی در دانسیته خشک $\gamma_d = 1/65\text{ gr/cm}^3$ برابر $0/49$ است و میزان فشار پیش تحکیمی حدود 120 kPa است. با افزایش دما به $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ میزان تخلخل افزایش و به مقدار $0/59$ رسیده است. حذف آب فیزیکی و انجام فرآیند هیدراسیون موجب افزایش میزان تخلخل شده است. از سوی دیگر میزان تنش پیش تحکیمی به مقدار ناچیزی افزایش و به حدود 140 kPa افزایش یافته است. همین روند برای دمای $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ نیز مشاهده می شود، تجزیه دولومیت و رشد میکرو ترک ها میزان تخلخل را حدود $0/17$ افزایش داده و به $0/66$ رسیده است. از سوی دیگر به دلیل تغییر ریخت شناسی خاک در این دما میزان تنش پیش تحکیمی به حدود 280 kPa افزایش یافته است. در دمای $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ با توجه به وقوع پدیده دی هیدروکسیلاسیون و شروع تجزیه کلسیت میزان تخلخل

شرایطی مسیره های دسترسی برای عبور جریان آب بیشتر شده و منجر به افزایش ضریب نفوذپذیری خاک می شود [۲۹].

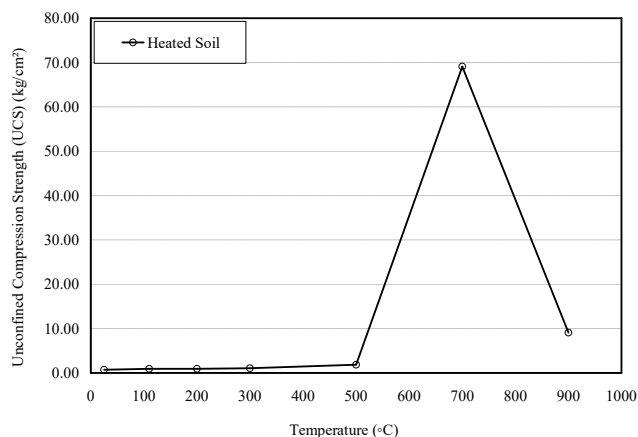
با افزایش دما به $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ و افزایش رشد میکرو ترک ها، ضریب نفوذپذیری نیز افزایش یافته و به حدود $3/6 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$ رسیده است. خاک های رسی به دلیل انتقال آب های ساختاری در محدوده دمایی $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ تا $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ تغییرات فیزیکی قابل توجهی را نشان می دهند. در دمای $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ میزان نفوذپذیری نسبت به خاک مارن طبیعی حدود 245 برابر افزایش و به $2/71 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$ رسیده است. در واقع افزایش حرارت منجر به تغییر اساس ساختار خاک رسی، ایجاد حفرات بزرگتر بین ذرات، تغییر مساحت سطح مقطع جریان موثر در خلل و فرج های کانال و تبدیل آب جذب شده به آب آزاد شده است [۱۱].

در دمای $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ رفتار خاک به صورت کامل تغییر کرده و میزان ضریب نفوذپذیری به شدت کاهش یافته و به $1/63 \times 10^{-8}\text{ cm/s}$ رسیده است و نسبت به خاک طبیعی حدود 85% کاهش یافته است. بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس در شکل (۵) تشکیل ترکیبات سیمانی (C_2S) و (C_3S) در دمای $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ و در نتیجه واکنش های پوزولانی و گیرش نمونه در هنگام اشباع شدن و تشکیل نانوساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم $(C-S-H)$ و نانوساختارهای هیدرات آلومینات کلسیم $(C-A-H)$ به شدت ضریب نفوذپذیری را کاهش می دهد. در واقع

است. شایان ذکر است که ضریب تورم پذیری C_s برای خاک مارن طبیعی و اصلاح شده در دماهای مختلف اکثر نمونه ها حدود $0/008$ است و برای خاک در دمای $700^\circ C$ حدود $0/004$ بدست آمده است که کمترین میزان ضریب تورم پذیری C_s مربوط به این دما است. از این رو نمونه ها قطعاً تورم قابل توجهی نخواهند داشت.

۳-۴- بررسی تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن در معرض حرارت

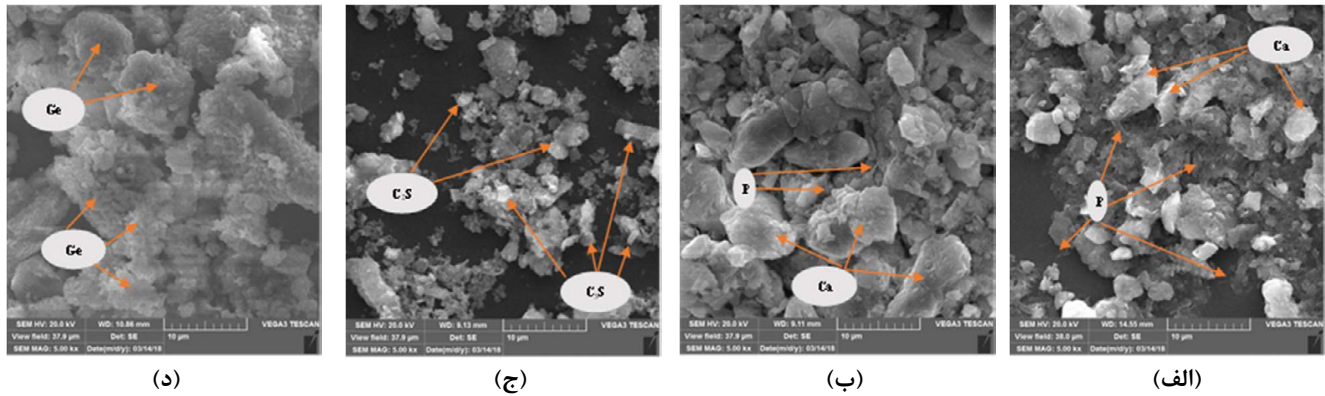
شکل (۸) منحنی مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن را تحت حرارت های مختلف نشان می دهد. بر اساس نتایج ارائه شده مقاومت مارن طبیعی $0/7 \text{ kg/cm}^2$ است. با افزایش دما به $500^\circ C$ ، 200 ، مقاومت خاک $1/31$ برابر شده و به مقدار $0/92 \text{ kg/cm}^2$ رسیده است. مقاومت فشاری در دماهای $300^\circ C$ و $500^\circ C$ به ترتیب $1/5$ و $2/6$ برابر شده و به مقادیر $1/05 \text{ kg/cm}^2$ و $1/84 \text{ cm}^2$ رسیده است. در این محدوده دمایی خاک دهیدراته شده و مقاومت فشاری افزایش یافته است. در دمای $700^\circ C$ مقاومت به $69/1 \text{ kg/cm}^2$ می رسد که $37/5$ برابر مقاومت خاک در دمای $500^\circ C$ و حدود 100 برابر مقاومت خاک طبیعی است. علت این امر وقوع پدیده دی هیدروکسیلاسیون در این محدوده دمایی، تغییر ساختار خاک و تشکیل ترکیبات سیمانی آلایت (C_3S) و بلیت (C_2S) است. در حقیقت کانی های رسی مارن دی هیدروکسیله می شوند، ساختار چین خورده ذرات، جای خود را به ذرات چسبیده به یکدیگر و همگن می دهند و در نتیجه ساختار همگن، مقاومت فشاری را افزایش داده است [۹]. در این دما حرارت اعمالی منجر به تشکیل ترکیبات سیمانی می شود و با افزودن رطوبت به خاک به منظور ساخت نمونه تک محوری، گیرش و سخت شوندگی خاک مشاهده می شود. واکنش های پوزولانی و تشکیل ترکیبات نانوساختارهای C-S-H و C-A-H عامل اصلی افزایش مقاومت فشاری هستند. در حقیقت ترکیبات C-S-H و C-A-H که شامل پیوندهای هیدروژنی پیچیده و قوی هستند، باعث افزایش مقاومت فشاری در نمونه های اصلاح شده در دمای $700^\circ C$ می شود. با افزایش حرارت تا دمای $900^\circ C$ مقاومت فشاری خاک، نسبت به نمونه اصلاح شده در دمای $700^\circ C$ به شدت کاهش می یابد و به مقدار 9 kg/cm^2 می رسد. خاک مارنی مورد مطالعه دارای $38/5\%$ کربنات است. کربنات کلسیم



شکل ۸. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارن در معرض حرارت

Fig. 8. The UCS variations of the South Iran Marl treated at different temperatures

به شدت افزایش یافته است و به حدود $0/81$ رسیده و حدود $0/66$ افزایش یافته است. در حالی که انتظار می رود با افزایش شدید میزان تخلخل، میزان تنش پیش تحکیمی کاهش یابد اما تشکیل ترکیبات سیمانی (C_2S) و (C_3S) و وقوع واکنش های پوزولانی موجب افزایش قابل توجه میزان تنش پیش تحکیمی می شود. در حقیقت در این دما با وقوع پدیده تحکیم پوزولانی مشاهده می شود که تنش پیش تحکیمی به بیش از 800 kPa افزایش یافته است [۳۰]. تشکیل ترکیبات سیمانی نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات سیلیکات آلومینیوم (C-A-H) از عوامل اصلی افزایش میزان تنش پیش تحکیمی است. در دمای $730^\circ C$ تا $870^\circ C$ با تجزیه کلسیت ساختار به صورت کامل متخلخل شده و با افزایش 120% ، تخلخل نمونه به $1/08$ افزایش یافته است. از سوی دیگر تشکیل ترکیبات با ساختار شیشه ای (ژلنیت) باعث افزایش میزان تنش پیش تحکیمی نسبت به خاک طبیعی شده است و میزان تنش پیش تحکیمی به حدود 440 kPa رسیده است. قابل توجه است که افزایش 120% تخلخل در نمونه موجب شده که در دمای $900^\circ C$ میزان تنش پیش تحکیمی نسبت به دمای $700^\circ C$ به شدت کاهش یابد. به طور کلی می توان بیان نمود که در حالی که با اعمال حرارت میزان تخلخل افزایش می یابد اما به دلیل افزایش تنش پیش تحکیمی میزان نشست پذیری به شدت کاهش می یابد. به طور کلی ضریب فشردگی C_c برای دمای 25 ، 300 ، 500 ، 700 و 900 درجه سلسیوس به ترتیب حدود $0/3$ ، $0/3$ ، $0/19$ ، $0/1$ و $0/1$ است که کمترین میزان ضریب فشردگی C_c در دمای $700^\circ C$ بدست آمده



شکل (۹). تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه، الف) خاک طبیعی، ب) در حرارت 500°C ، ج) 700°C و د) 900°C با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر (P: پالیگورسکایت، Ca: کلسیت، Ge: ژلنیت، C_3S : آلیت، C_2S : بلیت)

شروع شده و تا قبل از دمای 700°C به پایان می رسد. تغییر آرایش ذرات، تخریب کانی های رسی و تشکیل ترکیبات بزرگتر در این دما می تواند عامل اصلی افزایش ۲۴۶ برابری ضریب نفوذپذیری خاک باشد. با توجه به شکل های (۹-ج) و (۹-د)، پالی گورسکایت در دماهای 700°C و 900°C کاملاً از بین رفته است و ذرات فیبری و سوزنی شکل در تصاویر مشاهده نمی شود. در دمای 700°C بر اساس شکل (۹-ج) ملاحظه می شود که ذوب اولیه خاک رخ داده و تجزیه کربنات کلسیم موجب کاهش شدید این کانی شده است، از سوی دیگر می توان تشکیل ترکیبات سیمانی آلیت و بلیت را در تصویر مشاهده کرد. تشکیل ترکیبات سیمانی در دمای 700°C می تواند موجب افزایش مقاومت فشاری شود که در منحنی شکل (۸) قابل مشاهده است. شایان ذکر است نتایج تصاویر SEM با نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) ارائه شده در شکل (۵) همخوانی مناسبی دارد.

پس از اعمال حرارت در دمای 900°C (شکل ۹-د)، تشکیل کانی جدید ژلنیت مشاهده می شود. در این دما ساختار خاک متخلخل شده و حفرات میکروسکوپی و خلل و فرج متعددی در ساختار نمونه (ژلنیت) مشاهده می شود. همچنین می توان استدلال کرد به علت تجزیه کربنات کلسیم و خروج گاز دی اکسید کربن از بافت خاک این اتفاق رخ داده است. این امر موجب کاهش مقاومت نمونه ها در دمای 900°C می شود (شکل ۸). همچنین بافت خاک شیشه ای شده است که بیانگر تغییر فاز خاک و تشکیل کانی های جدید است. این ساختار میزان ضریب نفوذپذیری را نسبت به خاک طبیعی حدود

در محدوده حرارتی 700°C تا 870°C تجزیه شده و گاز دی اکسید کربن تولید می کند که ساختار خاک را متخلخل می کند، از سوی دیگر ترکیبات شیشه ای شکل و به شدت متخلخل ژلنیت (شکل ۵)) باعث کاهش مقاومت فشاری خاک می شود [۲۵].

۳-۵- ریخت شناسی خاک مارن در معرض حرارت

به منظور بررسی تغییرات ریزساختار خاک علاوه بر آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آرایش ذرات خاک و بافت میکروسکوپی نمونه های مارن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تجزیه و تحلیل شده است و روند تغییرات بافت نمونه ها در حرارت های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل (۹-الف)، بافت خاک مارن طبیعی را نشان می دهد و کانی های پالیگورسکایت با توجه به مورفولوژی فیبری شکل آن در تصویر مشاهده می شود. همچنین توده های سفید رنگ موجود، نمایان گر وجود محتوای کربنات کلسیم زیادی خاک مورد مطالعه است. کانی های پالیگورسکایت تا قبل از شروع فرآیند دی هیدروکسیلاسیون، در خاک موجود هستند و در تصاویر میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده هستند، اما با افزایش حرارت، رفته رفته از مقدار آن کاسته می شود. مشاهده می شود که با اعمال حرارت تا دمای 500°C شکل (۹-ب)، پالیگورسکایت در خاک حضور کمتری دارد که به علت شروع فرآیند دی هیدروکسیلاسیون در این دما است، دی هیدروکسیلاسیون منجر به تخریب کانی های رسی و تشکیل ذرات بزرگتر می شود. این فرآیند از دمای 500°C

خاک های مارنی به شدت تحت تأثیر تاریخچه دمایی، به خصوص دمای بیشینه ای است که در معرض آن قرار گرفته است.

۶۷۲ (شکل (۶)) برابر افزایش داده است.

۴- نتیجه گیری

بر اساس مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته مهمترین نتایج به شرح ذیل است.

۱. ضریب نفوذپذیری خاک مارن طبیعی حدود $1/1 \times 10^{-7}$ cm/s است که برای استفاده در پروژه های ژئوتکنیک زیست محیطی قابل قبول است. از سوی دیگر ضریب نفوذپذیری خاک های مارنی به شدت متأثر از حرارت است به نحوی که با افزایش دما به 200°C و 500°C به دلیل رشد میکرو ترک ها و تغییر اساسی ساختار خاک مارنی ضریب نفوذپذیری به ترتیب حدود ۲۶ و ۲۴۵ برابر افزایش می یابد.

۲. در دمای 700°C قله های ضعیف در فواصل $3/2 \text{ \AA}$ و $2/2 \text{ \AA}$ آلیت (C_3S) و بلیت (C_2S) است، تشکیل این ترکیبات سیمانی در دمای 700°C موجب کاهش ۸۵٪ درصدی میزان نفوذپذیری و افزایش مقاومت فشاری خاک به میزان $69/1 \text{ kg/cm}^2$ شده است.

۳. تشکیل کانی جدید ژلنیت و ایجاد ساختار متخلخل در اثر حرارت 900°C منجر به افزایش ۶۷۲ برابری ضریب نفوذپذیری خاک مارنی شده و ضریب نفوذپذیری به $7/39 \times 10^{-5}$ cm/s است.

۴. در دمای 700°C به دلیل وقوع پدیده دی هیدروکسیلاسیون و با شروع تجزیه کلسیت میزان تخلخل به شدت افزایش یافته است و به حدود $0/81$ رسیده است. اما تشکیل ترکیبات سیمانی (C_2S) و (C_3S) و وقوع واکنش های پوزولانی و پدیده تحکیم پوزولانی میزان تنش پیش تحکیمی را به بیش از 800 kPa افزایش داده است. از اینرو در حالی که میزان نسبت تخلخل افزایش یافته است ولی میزان نشست پذیری کاهش یافته است.

۵. بر اساس پایش ریزساختاری خاک های مارنی توسط آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به دلیل تخریب کانی های رسی و شکل گیری کانی های جدید و همچنین تغییر آرایش ذرات و بافت میکروسکوپی خاک تحت رژیم های حرارتی خصوصیات مهندسی خاک تغییر می کند و ضریب نفوذپذیری روند افزایشی دارد.

۶. به طور کلی خواص ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی

مراجع

- [1] E.E. Mon, S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Komatsu, P. Moldrup, Temperature effects on geotechnical properties of kaolin clay: simultaneous measurements of consolidation characteristics, shear stiffness, and permeability using a modified oedometer, GSTF International Journal of Geological Sciences (JGS), 1(1) (2013) 1-10.
- [2] H. Ramezanzpour, L. Smaelnejad, Study of relationships between different type of erosion and soil properties of marls in Southern Guilan Province, Iran, in: The 15th International Congress of ISCO, Budapest, Hungary, 2008.
- [3] D.O. Wijdenes, P. Ergenzinger, Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes, Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study, Catena, 33(3-4) (1998) 179-200.
- [4] F. Lamas, C. Irigaray, J. Chacón, Geotechnical characterization of carbonate marls for the construction of impermeable dam cores, Engineering geology, 66(3-4) (2002) 283-294.
- [5] V.R. Ouhadi, The role of marl components and ettringite on the stability of stabilized marl, McGill University, Montreal, Canada, 1997.
- [6] B. Velde, Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significance, Chapman and Hall Ltd, 1992.
- [7] P. Kassler, The structural and geomorphic evolution of the Persian Gulf, in: The Persian Gulf, Springer, 1973, pp. 11-32.
- [8] R.N. Yong, Geoenvironmental engineering: Contaminated soils, pollutant fate, and mitigation, CRC press, 2000.
- [9] V.R. Ouhadi, M. PourZafarani, Characteristics change of kaolinite and bentonite due to heat treatment from micro structural aspects, Sharif Civil Engineering, 30(2) (2015) 65-72. (In Persian)

- [21] V.R. Ouhadi, R. Yong, Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis, *Applied Clay Science*, 23(1-4) (2003) 141-148.
- [22] F. Zhang, R. Kong, J. Peng, Effects of heating on compositional, structural, and physicochemical properties of loess under laboratory conditions, *Applied Clay Science*, 152 (2018) 259-266.
- [23] J.E. Vidonish, P.J. Alvarez, K. Zygourakis, Pyrolytic remediation of oil-contaminated soils: reaction mechanisms, soil changes, and implications for treated soil fertility, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(10) (2018) 3489-3500
- [24] P.L. O'Brien, T.M. DeSutter, F.X. Casey, E. Khan, A.F. Wick, Thermal remediation alters soil properties—a review, *Journal of environmental management*, 206 (2018) 826-835.
- [25] G. Cultrone, C. Rodriguez-Navarro, E. Sebastian, O. Cazalla, M.J. De La Torre, Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing, *European Journal of Mineralogy*, 13(3) (2001) 621-634.
- [26] M. Trindade, M. Dias, J. Coroado, F. Rocha, Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: a comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal, *Applied Clay Science*, 42(3-4) (2009) 345-355.
- [27] K.R. Reddy, H. Hettiarachchi, N. Parakalla, J. Gangathulasi, J. Bogner, T. Lagier, Hydraulic conductivity of MSW in landfills, *Journal of Environmental Engineering*, 135(8) (2009) 677-683.
- [28] Q. Sun, W. Zhang, H. Qian, Effects of high temperature thermal treatment on the physical properties of clay, *Environmental Earth Sciences*, 75(7) (2016) 610.
- [29] V.R. Ouhadi, R. Yong, A. Goodarzi, M. Safari-Zanjani, Effect of temperature on the re-structuring of the microstructure and geo-environmental behaviour of smectite, *Applied Clay Science*, 47(1-2) (2010) 2-9.
- [30] V.R. Ouhadi, R. Yong, M. Amiri, M. Ouhadi, Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays, *Applied Clay Science*, 95 (2014) 111-118.
- [10] P.H. Morris, L. Wong, Modification of dredged sediments to produce useful product by heating to high temperatures: Literature review, *CRC for Sustainable Tourism*, 2005.
- [11] W. Chen, Y. Ma, H. Yu, F. Li, X. Li, X. Sillen, Effects of temperature and thermally-induced microstructure change on hydraulic conductivity of Boom Clay, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(3) (2017) 383-395.
- [12] V.R. Ouhadi, S. Hamidi, M. Amiri, Impact of heavy metal contaminants on coefficient of variations of compression index, expansion index and permeability coefficient of bentonite from micro-structural point of view, *Civil Engineering and Environmental Engineering Journal of Tabriz University*, 45 (81) (2016) 7-17. (In Persian)
- [13] C. Cekerevac, L. Laloui, Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(3) (2004) 209-228.
- [14] S. Alamdar, The long-term effects of saline water on fine-grained soils, *Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran*, 1999. (In Persian)
- [15] S.L. Houston, H.D. Lin, A thermal consolidation model for pelagic clays, *Marine Georesources & Geotechnology*, 7(2) (1987) 79-98.
- [16] M.V. Villar, A. Lloret, Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite, *Applied Clay Science*, 26(1-4) (2004) 337-350.
- [17] J. Han, Q. Sun, H. Xing, Y. Zhang, H. Sun, Experimental study on thermophysical properties of clay after high temperature, *Applied Thermal Engineering*, 111 (2017) 847-854.
- [18] G. James, J. Wynd, Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area, *AAPG bulletin*, 49(12) (1965) 2182-2245.
- [19] ASTM, American Society for Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, in: V.4 (Ed.), P.A., Philadelphia, 1992.
- [20] P.R. Hesse, *A Textbook of Soil Chemical Analysis*, William Clowes and Sons, 1971.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Amiri, M. Deghani, M. Papi, Microstructural Analysis of Thermally Induced Changes in Permeability Coefficient and Settlement of Marl Soils, Amirkabir J. Civil Eng., 52(11) (2021) 2727-2742.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16118.6131](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16118.6131)



