

The Effect of Temperature on the Settlement Behavior of Fine-Grained Soil Stabilized with Cement

SEYEDEH SHOKOOFEH YOUSEFI¹, ALIREZA TABARSA^{1*}, YOUNES BAGHERI²

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.

2. Department of Engineering, Mirdamad Institute of Higher Education, Gorgan, Iran.

(Received: Sep. 13, 2020- Revised: Oct. 6, 2020- Accepted: Oct. 20, 2020)

ABSTRACT

In this research, heat effects on settlement characteristics of cement-stabilized fine-grained soil have been considered in laboratory using standard compaction and thermal consolidation tests. Thermal consolidation tests were conducted by designing a consolidation cell instrument equipped with thermocouple and thermometer on different cement-stabilized samples at various curing times. Samples were tested at temperatures of 30, 45 and 60 °C; cement contents of 4, 6 and 8 percent; and curing times of 7 and 28 days. According to the results, consolidation will be improved in cement-stabilized soils if heat is used. Moreover, settlement time decreases and consolidation speed increases. The results also show that increasing temperature from 20 °C (room temperature) to 60 °C may increase soil settlement. This is while increasing cement content from 4 to 8 percent leads to decrease soil settlement. Besides, increasing curing time from 7 to 28 days under specific temperature and cement content, causes a significant decrease in soil compression index. Among different samples investigated in this research, the minimum compression index was observed in 28 day-cured specimens reinforced with 8 percent cement at temperature of 30 °C while the maximum swelling index was observed in natural soil. The findings also revealed that in 7 day-cured specimens under temperature of 30 °C with increasing cement content from 4 to 8 percent, compression and swelling index values have been decreased to 14 and 30 percent, respectively.

Keywords: Soil Improvement, Thermal Consolidation, Cement, Compression Index, Swelling Index.

* Corresponding Author's Email: a.tabarsa@gu.ac.ir

تأثیر دما بر رفتار نشست پذیری خاک ریزدانه تثبیت شده با سیمان

سیده شکوفه یوسفی^۱، علیرضا طبرسا*^۲، یونس باقری^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیر انتفاعی میرداماد، گرگان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۷/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۷/۲۹)

چکیده

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر خصوصیات نشست پذیری خاک ریزدانه بهسازی شده با سیمان پرداخته شده است. بدین منظور آزمون‌های آزمایشگاهی از قبیل آزمایش تراکم استاندارد و آزمایش تحکیم حرارتی انجام گردیده است. آزمایش تحکیم حرارتی با طراحی و ساخت سلول دستگاه تحکیم حاوی ترموکوپل حرارتی و دماسنج جهت انجام آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف حاوی سیمان تحت زمان‌های عمل‌آوری متفاوت صورت پذیرفت. نمونه‌ها تحت دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد با مقادیر مختلف سیمان شامل ۴، ۶ و ۸ درصد تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان دادند تحکیم حرارتی بر روی مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان باعث بهبود شرایط نشست پذیری خاک شده است. در این ارتباط با افزایش دما از ۲۰ (دمای محیط) به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، نشست خاک افزایش یافته و با افزایش مقدار سیمان از ۴ به ۸ درصد نشست خاک نیز کاهش یافته است. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز تحت دما و درصد سیمان مشخص، شاخص فشردگی کاهش معناداری یافته است. همچنین می‌توان پی برد کمترین مقدار شاخص فشردگی نمونه‌ها مربوط به نمونه حاوی ۸ درصد سیمان با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده و بیشترین شاخص تورم نیز در نمونه خاک طبیعی رخ داده است. نتایج نشان دادند که در نمونه‌های تحت زمان عمل‌آوری ۷ روز و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش مقدار سیمان از ۴ به ۸ درصد، مقادیر شاخص فشردگی و تورم نمونه‌ها به ترتیب در حدود ۱۴ و ۳۰ درصد کاهش یافته‌اند.

واژه‌های کلیدی: بهسازی خاک، تحکیم حرارتی، سیمان، شاخص فشردگی، شاخص تورم.

مقدمه

ناشی از آن باعث شده تا عامل دما بر روی ویژگی‌های مهندسی خاک این مناطق نقش و تأثیر به‌سزایی داشته باشد، به‌طوری‌که در خاک‌های اشباع باعث انبساط آب حفره‌ای و مواد جامد آن شده که این عوامل منجر به ایجاد فشار آب منفذی و کاهش تنش موثر خواهد شد (Saeedi Jam, 2011). از آنجایی که عملکرد خاک رس در محل دفن زباله حائز اهمیت است، چنانچه تغییری در خصوصیات خاک رس صورت گیرد مشکلات زیست محیطی بسیاری به وجود خواهد آمد. دمای زباله در اثر واکنش‌های شیمیایی هوازی و غیر هوازی گاهی تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز بالا رفته است. این افزایش دما اثراتی در پی خواهد داشت و موجب تغییراتی در خاک رس موجود در پوشش می‌شود. بالا رفتن دما موجب افزایش نفوذپذیری خاک رس و همچنین افزایش قابلیت هیدرولیکی آن می‌شود و در نتیجه یکی از مهم‌ترین نقش‌های این خاک در محل دفن زباله را که جلوگیری از خروج شیرابه و گازهای سمی به محیط و آب‌های زیرزمینی است، را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Delfan Azari et al., 2013). همچنین

در سال‌های اخیر با افزایش سریع ساخت و ساز و اهمیت پروژه‌های عمرانی، لزوم بررسی تأثیر عوامل محیطی بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌ها به ویژه در خاک‌های ریزدانه ضعیف با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه از اهمیت زیادی برخوردار گردیده است. در این ارتباط وجود مسائل متعدد، موجب گردیده تا تأثیر دما بر خاک، آب و عملکرد آن بر خصوصیات نشست‌پذیری خاک-ها مورد بررسی قرار گرفته و آگاهی از رفتار خاک به عنوان تابعی از دما، می‌تواند زمینه‌ای برای مطالعه کنترل مکانیزم‌های جریان و تغییر شکل در خصوصیات خاک‌ها فراهم نماید. در این راستا با توجه به اهمیت شرایط زیست‌محیطی بر رفتار خاک‌ها و وقوع عواملی از قبیل افزایش آتش سوزی بوته‌زارها و جنگل‌ها و همچنین افزایش میانگین دمای آب و هوایی و نیز تغییرات درجه حرارت ایجاد شده در مجاورت پروژه‌هایی از قبیل محل دفن زباله-های هسته‌ای و مرکز دفن بهداشتی زباله و وجود سازه‌های ژئوترمال و لوله‌های نفت و گاز مدفون در خاک و انتقال حرارت

برخوردار بوده‌اند. در بررسی مکانیسم اثر دما بر خاک باید تأثیر آن بر آب، ذرات جامد و اندرکنش میان آن‌ها را نیز در نظر گرفت. برخی محققان انبساط حرارتی ذرات جامد خاک و آب را به عنوان دو عامل مهم تأثیرگذار بر رفتار خاک معرفی کرده‌اند. یون‌های موجود در آب به علت نیروهای جذب سطحی شدیداً به سطح کانی‌های رسی متصل می‌باشند و در واقع آب، نقش تعیین کننده‌ای در رفتار خاک‌های رسی ایفا می‌کند. اثر دما در خاک-های ریزدانه اشباع از اهمیت بیشتری نسبت به خاک‌های درشت دانه خشک برخوردارند زیرا تأثیر طبیعت نیروهای سطحی و نقش آب در رفتار خاک‌های ریزدانه بسیار قابل توجه می‌باشد.

خاک اشباع دارای دو فاز جامد و مایع بوده که فاز جامد آن شامل اسکلت و ساختار ذرات تشکیل دهنده خاک و فاز مایع آن شامل آب موجود در فضاهای خالی بین ذرات خاک می‌باشد. وجود آب در خاک‌های رسی به صورتی است که چنانچه خاک به شکل متراکم باشد آب موجود در آن نیز به صورت جذب سطحی دیده می‌شود و اگر خاک رسی دارای تخلخل باشد، آب به شکل آزاد در بین ذرات قرار می‌گیرد. در اثر حرارت در خاک‌های رسی متراکم، آبی که به صورت سطحی جذب شده توسط کانی‌های رسی از دست داده شده و به صورت آب آزاد تبدیل می‌گردد. همچنین در اثر افزایش میزان آب آزاد و کاهش ویسکوزیته آن، سرعت تراوش و تغییرات حجم افزایش یافته، به طوری که تأثیر حرارت باعث افزایش میزان قابلیت حل شونده کانی‌ها شده که در نتیجه منجر به تسریع در تغییرات شیمیایی خاک می‌شود (Leroueil and Soares Marques, 1996). نتایج مطالعات نشان داد که حرارت دادن تحت بار ثابت باعث انبساط خاک رسی و آب حفره‌ای می‌شود. اما با توجه به ضریب انبساط حرارتی متفاوت آب و خاک، باعث تولید فشار آب حفره‌ای شده و این امر منجر به بروز پدیده تحکیم حرارتی در خاک خواهد شد. در بررسی تغییرات حجم خاک با اعمال سیکل‌های حرارتی، بخش عمده تغییر حجم غیر قابل برگشت در خلال سیکل اول حرارت روی میدهد و سیکل‌های بعدی، موجب تغییر حجم دائمی به مراتب کمتری می‌شود. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری با هد ثابت بر روی نمونه‌های رس تحکیم عادی یافته در دماهای بین ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد نشان دادند که نفوذپذیری نمونه‌ها با افزایش دما زیاد گردیده و با افزایش تنش مؤثر، کاهش می‌یابند. همچنین می‌توان دریافت که فشار پیش تحکیمی با افزایش دما نیز کاهش یافته به طوری که مقدار آن بستگی به حد روانی نمونه‌ها خواهد داشت. نتایج مطالعات ریز ساختاری نیز بر روی نمونه‌های تحت دماهای متفاوت نشان داد که به دلیل تخریب و شکل‌گیری کانی‌های جدید و همچنین آرایش ذرات خاک و بافت میکروسکوپی تحت رژیم‌های حرارتی،

در عملیات حفاری‌های نفت و گاز و کابل‌های فشار قوی مدفون در خاک منجر به افزایش دما تا حدود ۹۰ درجه سانتی‌گراد نیز شده است (Mitchel *et al.*, 1982). تغییرات دما در بستر اقیانوس‌ها با محدوده دمایی حدود ۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد نیز بر روی فرایند عملیات نمونه برداری و نتایج داده‌های فنی خاک حاصل از انجام آزمایش‌های برجا موثر بوده است.

درجه تراکم خاک‌ها با هدایت گرمایی نسبت مستقیم داشته و هرچه میزان تراکم خاک بیشتر باشد، ذرات خاک به هم نزدیک‌تر و فضای خالی کمتری بین ذرات به وجود آمده و در نتیجه موجب افزایش هدایت گرمایی در خاک خواهد شد (Morin and Silva, 1984). در تحقیق دیگری مشخص گردید که با افزایش دانسیته خشک خاک و افزایش رطوبت، میزان هدایت گرمایی افزایش می‌یابد (Rao and Singh, 1999). تأثیر پارامتر تخلخل در هدایت گرمایی توسط محققان مختلف بررسی شده و به این نتیجه رسیدند که وجود حجم فاز هوا با هدایت گرمایی مرتبط است. به طور کلی هدایت گرمایی فاز هوا نسبت به فاز مایع و جامد کمتر بوده و وجود حجم هوا در خاک نسبت عکس با هدایت گرمایی خواهد داشت (Ochsner *et al.*, 2001). تأثیر دما بر خصوصیات مقاومت برشی زهکشی نشده خاک‌های رسی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد بطوریکه در این زمینه رفتار تنش- کرنش خاک‌های ریزدانه تحت تأثیر حرارت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است (Kuntiwattanukul *et al.*, 1995; Tanaka *et al.*, 1997). تأثیر افزایش دما بر خصوصیات مکانیکی، هیدرولیکی، ریزساختاری و شیمیایی خاک‌ها یکی از مسائل مطرح در حوزه ژئومکانیک زیست محیطی بوده است. با انجام آزمایش سه محوری در مسیر تنش- دماهای مختلف مشخص گردید که افزایش دما موجب تغییر رفتار مکانیکی خاک‌ها شده، به طوری که در یک دمای یکسان، نمونه‌های پیش حرارت دیده شده، مقاومت بیشتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر از خود نشان می‌دهند (Saeedi Jam, 2011).

Arabani *et al.*, (2006) با انجام آزمایش‌های مختلفی از قبیل حدود اتربرگ، مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم بر روی نمونه‌های خاک رس بیش تحکیم یافته و کائولینیت تحت دماهای ۱۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتیگراد دریافتند که با افزایش دما خاصیت چسبندگی و خمیری نمونه‌ها از بین رفته و نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد به گونه‌ای که نشست تحکیمی چندانی در نمونه‌ها نیز مشاهده نشده است. همچنین مقاومت فشاری تک محوری تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به طور خطی افزایش یافته و پس از آن ثابت باقی مانده است. در این ارتباط نمونه‌های رسی در مقایسه با نمونه‌های کائولینیت، از تغییرات بیشتری نسبت به دما

ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها روند افزایشی خواهد داشت (Rajabnezhad and Rajabnezhad, 2010; Hamidi and Khazayi 2012; Amiri *et al.*, 2019)

خواص مکانیکی خاک رسی متورم‌شونده تحت تأثیر شرایط دمای ثابت و متغیر در چرخه‌های خشک و تر متوالی مورد بررسی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های چرخه‌های خشک و تر بر روی نمونه‌های خاک رسی متورم‌شونده در دو دستگاه تحکیم اصلاح شده تحت تأثیر سربار ثابت ۱۰ کیلوپاسکال مشخص گردید که در حالت دمای ثابت پتانسیل تورمی نمونه‌ها با مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید در چرخه‌های اولیه بیشتر از حالت دمای متغیر است (Amini Keleahroudi *et al.*, 2017). تحکیم حرارتی خاک رس نرم در دماهای نسبتاً بالا و همچنین روشی اصلاح شده برای ارزیابی هدایت گرمایی خاک‌های ماسه‌ای با کمک آزمون تحکیم و مدلسازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که میزان حرارت القا شده به صورت تابعی از تغییر حجم خاک می باشد (Yarahmadi and Ghaffarpour Jahromi, 2019)

همچنین طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری با هد ثابت بر نمونه‌های رس عادی تحکیم یافته در دماهای ۲۰ الی ۹۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که میزان نفوذپذیری با دما رابطه مستقیم داشته و با افزایش دما، نفوذپذیری نیز افزایش یافته و همینطور با افزایش تنش مؤثر میزان نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد (Delage and Sultan, 2012). در این زمینه با توجه به نتایج آزمایش تحکیم حرارتی بر روی خاک مناطق بانکوک مشخص گردید که رس‌های تحکیم عادی یافته به شکل برگشت-ناپذیر و غیرخطی کاهش حجم می‌دهند. این کاهش حجم با افزایش نسبت بیش تحکیمی کاهش یافته تا جایی که رس‌های بسیار بیش تحکیم یافته به صورت برگشت‌پذیر افزایش حجم می‌دهند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که رفتار حجمی رس‌ها متأثر از میزان و مقدار تنش نبوده بلکه به تاریخچه تنش وابسته بوده است (Abuel-Naga *et al.*, 2005, 2007, 2009). تأثیر همزمان دما و نرخ کرنش بر روی رفتار تحکیم پذیری خاک‌های رسی نیز نشان داد که با افزایش دما به دلیل کاهش ویسکوزیته فشار آب حفره ای، منجر به افزایش مقدار نفوذپذیری خاک‌های رسی می‌گردد و با در نظر گرفتن تأثیر همزمان دماهای بالاتر و نرخ کرنش‌های کمتر، نمونه رسی از رفتار ویسکوز معمولی تبعیت نخواهد نمود (Tsutsumi and Tanaka, 2012). طی آزمایش‌هایی در خصوص اثر دما بر پارامترهای تحکیمی خاکها در بازه دمایی ۲۰ الی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مشخص گردید که روند تحکیم در دماهای بالاتر، از تأثیر گذاری به مراتب بیشتری بر رفتار خاک‌ها

برخوردار بوده است. همچنین نتایج مطالعات نیز نشان داد که میزان گرمایش تأثیر مهمی در تغییر حجم حرارتی خاک‌ها ایجاد نکرده اما بر میزان تولید فشار آب منفذی مؤثر بوده و باعث افزایش میزان انقباض خاک‌ها می‌گردد. همچنین نتایج نشان دادند که با افزایش دما در فرایند تحکیم خاک، منجر به افزایش فشار تورمی و شاخص فشردگی نمونه‌ها می‌گردد و نرخ استهلاک فشار آب حفره ای یا نرخ تحکیم با در نظر گرفتن تأثیر دما و تحکیم ثانویه بیشتر از حالتی است که فقط اثر تحکیم ثانویه لحاظ شده باشد (Pietrak and Tomasz, 2014; Bag and Rabbani, 2017; Liu *et al.*, 2018).

در این ارتباط مدل‌های ریاضی و نظری برای ارزیابی خصوصیات خاک در برابر حرارت نیز مطرح گردیده است. اما واقعیت این است که رفتار حرارتی خاک یک پدیده پیچیده بوده که بستگی به پارامترهای مختلفی از قبیل نوع خاک، توزیع اندازه ذرات و خصوصیات تراکمی خاک‌ها دارد (Yashima *et al.*, 1998; Park, 2018). در این زمینه مدل رفتاری ترمو-ویسکوپلاستیک بر اساس مدل سخت‌شوندگی برای خاکهای رسی تحکیم عادی یافته و بیش تحکیم یافته بر پایه تأثیر همزمان دما و حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است (Kong *et al.*, 2020). نتایج آزمایش‌های سه محوری حرارتی انجام شده بر روی نمونه‌های رسی و مخلوط رس-ماسه به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر تحت دماهای ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد با زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۳ و ۵ روز نشان داد که با افزایش دما ضرایب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌ها-ها به دلیل کاهش ویسکوزیته آب افزایش یافته و همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری، به دلیل کاهش نسبت منافذ منجر به کاهش مقادیر ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌ها گردیده است. همچنین در یک تنش همه جانبه ثابت، با افزایش دما در مقایسه با دمای محیط نمونه‌ها (۲۰ درجه سانتی‌گراد)، نسبت منافذ نرمالیزه شده نمونه‌ها کاهش یافته است (Shirasb *et al.*, 2020). رفتار حرارتی و مکانیکی بلوکهای خاک رسی و ماسه ای بهسازی شده با ۶ درصد آهک، ۱۰ درصد سیمان و ۴ درصد سیلیکات سدیم به منظور تعیین ضریب هدایت حرارتی و رفتار مقاومتی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان دادند که افزودن سیمان نقش بسیار مهمی در رفتار هدایت حرارتی نمونه‌ها خواهد داشت (Castro Ferreira and Carvalho Ulhoa 2016; Balaji *et al.*, 2016).

همچنین نتایج مطالعات انجام شده در خصوص رفتار مقاومتی و حرارتی خاک‌های تثبیت شده با مواد افزودنی شیمیایی نشان داد مخلوط‌های خاک-سیمان از عملکرد حرارتی بهتری در مقایسه با بتن داشته و به دلیل حذف درزه و ترک‌ها از

خاک‌ها کاربرد فراوانی داشته است (Pongsivasathit *et al.*, 2019).

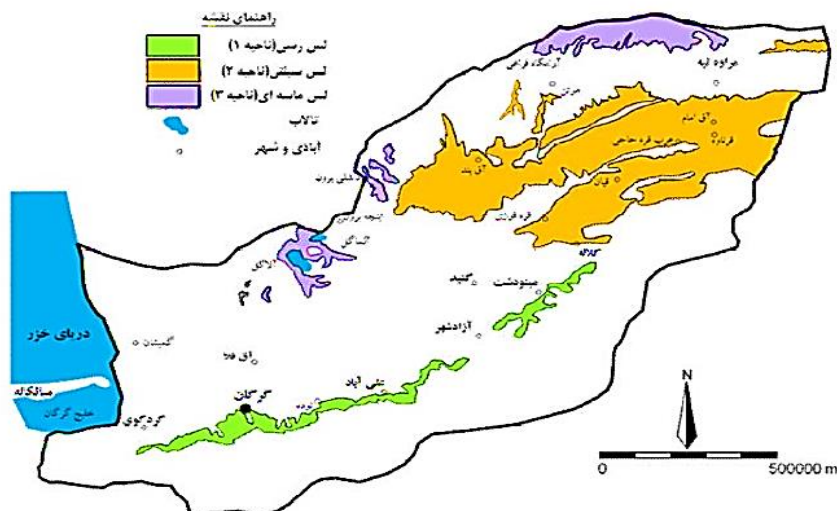
با توجه به موارد مطرحه و لزوم بررسی تغییرات دمایی به صورت بارگذاری حرارتی در رفتار تغییر شکل‌پذیری خاک‌ها و عدم انجام تحقیقات جامع در خصوص رفتار تحکیم حرارتی خاک‌های لسی بهسازی شده با سیمان، این پژوهش بر روی خاک‌های رمل‌بند واقع در استان گلستان انجام گردیده است. در این تحقیق سعی شده است تا تأثیر اضافه نمودن مقادیر مختلف سیمان بر روی رفتار نشست‌پذیری حرارتی خاک ریزدانه تحت زمان‌های عمل‌آوری مختلف با کمک مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است با عنایت به گستردگی زیاد خاک‌های لسی در نواحی شمال و شمال شرق استان گلستان و ضرورت استفاده از تثبیت شیمیایی در بهسازی خاک‌های رمل‌بند واقع در محدوده مورد مطالعه، می‌توان از نتایج و یافته‌های این مطالعه در پروژه‌های عمرانی نیز بهره جست.

مواد و روش‌ها

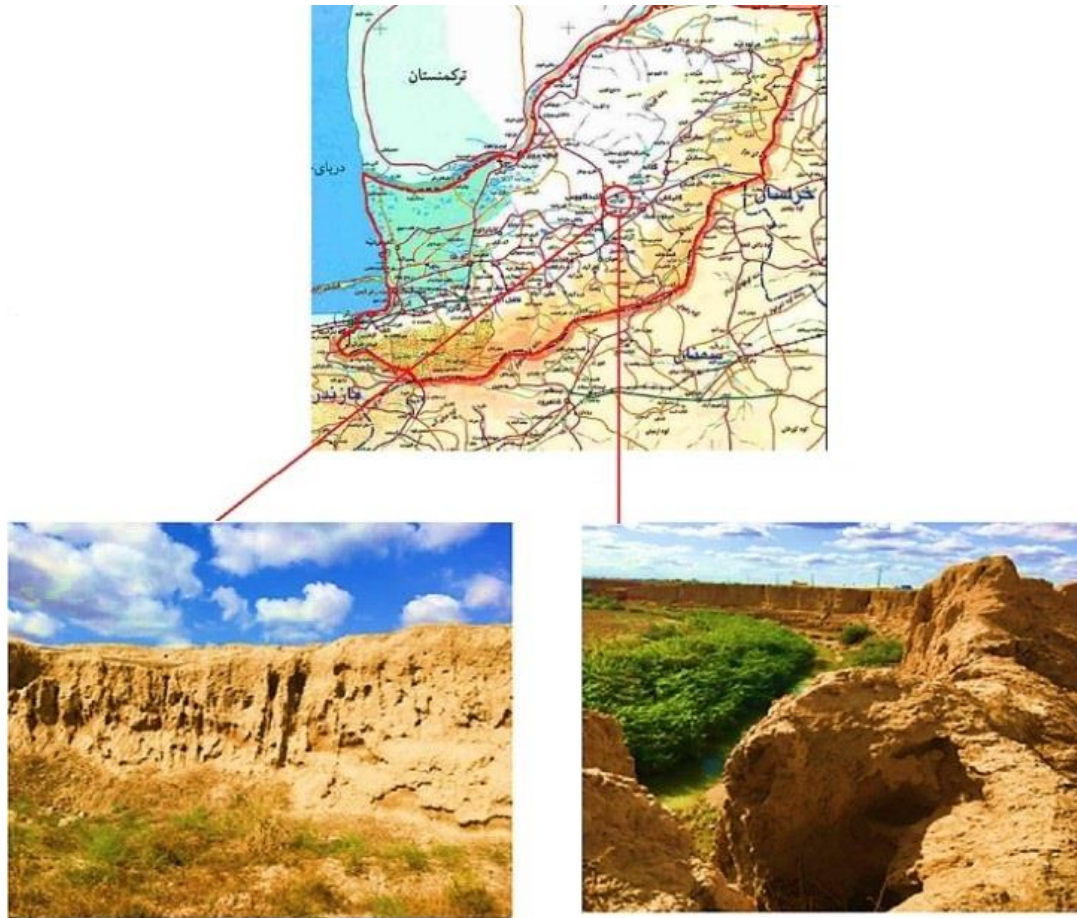
مصالح مورد استفاده

خاک مورد مطالعه، از اراضی لسی شمال ایران واقع در شمال شرق استان گلستان در محدوده شهرستان گنبدکاووس گرفته شده است. ترکیب اصلی لسی‌های استان گلستان عمدتاً کوارتز، فلدسپات، میکا، کلسیت و کانی‌های رسی است. در شکل‌های (۱) و (۲) گسترش نهشته‌های لسی و موقعیت جغرافیایی خاک در استان را به ترتیب نشان می‌دهد.

قابلیت بالایی جهت استفاده در روسازی صلب برخوردار می‌باشد (El-Raw and Al-Wash, 1995). نتایج مطالعات Sametzadeh *et al.*, 2006 نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های نظیر در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد از افزایش قابل توجهی برخوردار بوده‌اند. در این زمینه تحت یک مقاومت فشاری مشخص، مقدار سیمان در نمونه‌های تثبیت شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نمونه‌های تحت دما ۲۷ درجه سانتی‌گراد، ۲ درصد کمتر بوده است. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تأثیر بارگذاری حرارتی نقش بسیار مهمی در خواص مهندسی خاک‌ها داشته و با توجه به اهمیت کاربرد نتایج در پروژه‌های عمرانی، لزوم تعیین رفتار تغییر شکل‌پذیری خاک‌ها ناشی از تغییرات درجه حرارت بایستی مورد بررسی قرار گیرد. در این زمینه بارگذاری سیکلی حرارتی موجب بروز تغییر شکل‌های بزرگ در خاک شده و در این راستا مقدار درصد وزنی ریزدانه، نسبت بیش تحکیمی، روش نمونه‌سازی و ساختار خاک مورد آزمایش از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (Joshaghani and Ghasemi, 2020). نتایج مطالعات (Fare, 2019; Rotta Loria and Coulibaly 2020) خاک‌ها با نفوذپذیری کم هنگامی که تحت فشار قرار می‌گیرند پس از مدت زمانی که بستگی به قابلیت نفوذپذیری آن دارد تحکیم نهایی می‌یابند. در این ارتباط مشخصات نشست‌پذیری خاک بایستی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. لذا با انجام آزمایش تحکیم و محاسبه مقدار نشست خاک می‌توان با انجام عملیات بهسازی خاک از نشست نامتعارف خاک جلوگیری نمود (Sultan *et al.*, 2002). در این ارتباط افزودن سیمان به خاک رواج بسیار زیادی در علم مهندسی ژئوتکنیک داشته و در بهسازی و اصلاح خواص



شکل ۱- گسترش نهشته‌های لسی در استان گلستان (Tabarsa *et al.*, 2016)

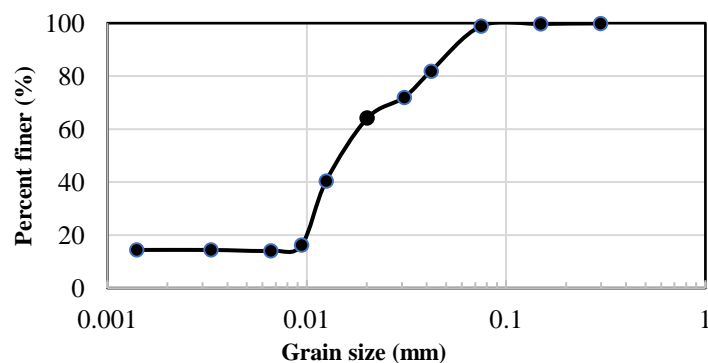


شکل ۲- موقعیت جغرافیایی خاک منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات خاک لسی تحت آزمایش

مقدار	عنوان
CL-ML	طبقه بندی خاک
۱/۱۰	ماسه (%)
۸۴/۵۰	سیلت (%)
۱۴/۴۰	رس (%)
۲/۶۸	چگالی ویژه (Gs), (%)
۱۹	حد خمیری (PL), (%)
۲۵	حد روانی (LL), (%)
۶	شاخص خمیری (PI), (%)
۹	پتانسیل رمیندگی (CP), (%)

نتایج آزمایش‌های اولیه حاکی از آن است که خاک مورد نظر از نوع خاک ریزدانه رسی- سیلتی با خاصیت خمیری کم (CL-ML) و دارای مشخصاتی به شرح جدول (۱) می باشد. شکل (۳) نیز منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه را نشان می دهد. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر افزودن سیمان بر خواص تحکیمی خاک مورد مطالعه تحت دماهای مختلف از سیمان تیپ ۲ استفاده شده است. سیمان به کار رفته در این مطالعه از کارخانه سیمان بجنورد تهیه شده است. اجزای تشکیل دهنده سیمان شامل مصالح آهکی، رس، سیلیس و اکسیدهای معدنی بوده که خواص شیمیایی آن در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه در تحقیق

جدول ۲- مشخصات سیمان مصرفی مورد آزمایش

Total	LOI*	K ₂ O	NaO ₂	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Component
۹۸/۰۳	۲/۱۳	۰/۶۷	۰/۳۱	۲/۳۰	۱/۶۴	۶۴/۷۵	۳/۷۹	۴/۲۳	۲۰/۳۴	Content (%)

Loss on Ignition*

بررسی های آزمایشگاهی

آماده سازی نمونه ها و مراحل انجام آزمایش

پس از جمع آوری نمونه های خاک از منطقه مورد مطالعه و انتقال آن به آزمایشگاه، در ابتدا نمونه ها درون گرمخانه به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و پس از خشک شدن، خاک از الک شماره ۱۰ عبور داده می شود. از سیمان به عنوان ماده ای برای بهبود شرایط خاک و کاهش نشست آن با مقادیر مختلفی به صورت درصد وزنی خاک خشک استفاده شده است. قبل از شروع آزمایش، مشخصات فیزیکی خاک بایستی تعیین گردد تا بتوان از نتایج آن در محاسبه و پردازش آزمایش تحکیم استفاده نمود. به منظور بررسی تأثیر تثبیت شیمیایی بر روی رفتار تحکیم پذیری نمونه ها تحت دما و حرارت، از سیمان با مقادیر مختلف شامل ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی خاک خشک استفاده شده است. بدین ترتیب به منظور ساخت نمونه های مورد نیاز در آزمایش تحکیم پس از محاسبات حجم قالب نمونه دستگاه تحکیم و محاسبه میزان وزنی خاک مورد نیاز با دانسیته مورد نظر، از طریق این داده ها وزن سیمان مورد استفاده برای بهسازی خاک با سیمان محاسبه خواهد شد. همچنین با توجه به اهمیت زمان عمل آوری در مکانیسم تثبیت شیمیایی خاک ها، در این پژوهش زمان عمل آوری نمونه های خاک حاوی سیمان در زمان های ۷ و ۲۸ روز در نظر گرفته شده است. عمل آوری نمونه ها در دمای محیط آزمایشگاه در حدود ۲۰ درجه سانتیگراد تحت رطوبت نسبی ۵۰ تا ۶۰ درصد صورت گرفته است. سطحی از ذرات که تحت اثر واکنش شیمیایی با سیمان قرار گرفته، تماس با آب ذرات را کاهش داده و بنابراین میزان ظرفیت نگهداری آب رس کم گردیده و در این حالت امکان تورم خاک کمتر می شود. در این راستا واکنش پوزولانی بین خاک و ماده چسبنده می تواند پس از اختلاط ادامه یافته و در نتیجه سبب افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با افزایش زمان عمل آوری گردد.

پس از مخلوط کردن سیمان با خاک، نمونه ها را در محیطی مناسب به دور از دست خوردگی طبق مدت زمان عمل آوری مربوطه قرار داده و پس از پایان زمان عمل آوری آزمایش تحکیم بر روی نمونه انجام می شود. با استفاده از دستگاه ساخته شده برای اعمال گرما، هنگام انجام آزمایش تحکیم به نمونه ها دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد اعمال می شود تا تأثیر افزودن

سیمان بر رفتار تحکیم پذیری حرارتی خاک مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد. شکل (۴) وسایل و تجهیزات مورد استفاده در مراحل ساخت نمونه ها را نشان می دهد.



شکل ۴- وسایل مورد نیاز برای ساخت نمونه

با توجه به ضرورت تعیین رفتار تراکم پذیری نمونه های خاک مورد مطالعه و استفاده از نتایج آن در مراحل ساخت نمونه ها، آزمایش تراکم استاندارد بروی نمونه های مورد مطالعه انجام گردید. در این مطالعه آزمایش تراکم استاندارد بر اساس استاندارد ASTM D698 بر روی خاک طبیعی و خاک تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان صورت پذیرفت. در ادامه با توجه به اهمیت بررسی تأثیر درجه حرارت بر رفتار نشست پذیری نمونه های خاک بهسازی نشده (خاک محل) و بهسازی شده، آزمایش اودنومتر بر اساس استاندارد ASTM D2435 با کمک ساخت دستگاه تامین دمای مورد نیاز در بازه حرارتی مورد مطالعه، انجام گردید.

ساخت دستگاه تامین دمای مورد نیاز آزمایش تحکیم حرارتی دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایشهای تحکیم شامل منبع اصلی، ترموکوپل حرارتی ضد آب و دما سنج مدادی بوده که توان ایجاد دما تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد در آب را داشته است. ترموکوپل و دما سنج از طریق ایجاد سوراخهایی به اندازه قطر آن ها در قسمت بالایی سلول دستگاه تحکیم، در پیرامون نمونه خاک در دستگاه قرار گرفته و با گرم کردن آب تا دمای مورد نظر باعث انتقال گرما به خاک می شود. با قرار دادن دماسنج های چسبی در دور تا دور منبع آب، توزیع یکنواخت حرارت در آب کنترل شد. عملکرد این دستگاه به گونه ای است که ابتدا از طریق

است. قرائت‌های تغییر ضخامت با زمان در هر دوره بارگذاری آن قدر باید ادامه یابد تا شیب منحنی تغییر ضخامت-لگاریتم زمان، در قسمت تحکیم ثانویه آشکار شود. پس از خاتمه آزمایش و قبل از بیرون آوردن نمونه، برای به حداقل رساندن تورم ناشی از باربرداری، نمونه تحت یک فشار کم قرار گرفته و به محض برداشتن فشار، نمونه خارج شده است. پس از ۲۴ ساعت مجدداً وزن خشک نمونه را جهت تعیین درصد رطوبت نهایی خاک اندازه گیری گردید. در ادامه با انجام محاسبات روابط وزنی- حجمی و تعیین رطوبت مورد نیاز و نسبت منافذ در پایان آزمایش، کنترل لازم جهت اشباع بودن نمونه انجام گردیده است. شکل (۶) زیر دستگاه آزمایش مورد استفاده به همراه چگونگی اعمال حرارت بر روی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۶- دستگاه تحکیم نمونه‌های خاک با قابلیت اعمال حرارت بر روی نمونه‌های مورد آزمایش

منبع اصلی و توسط دکمه‌ها تعبیه شده روی آن دمای مورد نظر را تنظیم نموده و منبع بلافاصله شروع به تامین دمای مورد نظر م‌کند به گونه‌ای که ترموکوپل با ایجاد حرارت آب را داغ کرده و همزمان دماسنج با تشخیص دما و نمایش آن روی نمایشگر، منبع اقدام به سنجیدن دما کرده و زمانی که دمای آب به دمای مورد نظر برسد از طریق دما سنج تشخیص داده شده و فرمان قطع خودکار را به منبع داده و منبع ترموکوپل را متوقف می‌کند. زمانی که آب موجود در سلول دستگاه از دمای مورد نظر سردتر شود بار دیگر ترموکوپل شروع به گرم کردن آب تا دمای تنظیم شده می‌کند. این عمل باعث می‌شود دمای آب همواره در محدوده مورد نظر ثابت باقی بماند (شکل ۵). در این ارتباط به منظور بررسی تأثیر مقادیر مختلف حرارت بر رفتار نشست پذیری مخلوط‌های خاک-سیمان، با ساخت دستگاه مذکور اقدام به تامین دماهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های مورد آزمایش گردید.



شکل ۵- دستگاه طراحی شده به منظور تامین دمای مورد نیاز برای انجام آزمایش تحکیم حرارتی

نتایج و بحث

آزمایش تراکم استاندارد

با انجام آزمایش تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های خاک بهسازی نشده و نمونه‌های حاوی ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان مشاهده گردید که با افزایش درصد سیمان، وزن مخصوص خشک نمونه‌ها و رطوبت بهینه نمونه‌ها به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. به طوری که با اضافه نمودن ۸٪ سیمان به خاک مورد مطالعه میزان رطوبت بهینه نمونه‌ها (OMC) از ۱۱/۹۱ به ۱۳/۵۸ درصد افزایش یافته است. همچنین وزن مخصوص خشک خاک (MDD) از ۱/۸۷ گرم بر سانتیمتر مکعب برای خاک طبیعی به ۱/۸۰ گرم بر سانتیمتر مکعب برای نمونه‌های حاوی ۸ درصد سیمان رسیده است (شکل ۷). علت کاهش دانسیته را می‌توان به لخته‌ای شدن

در این آزمایش ابتدا نمونه خاک در دستگاه تحکیم قرار گرفته و سپس داخل سلول تحکیم از آب پر شده تا نمونه خاک در آب غوطه‌ور گردیده و حداقل ۲۴ ساعت زمان لازم جهت رسیدن به مرحله اشباع با توجه به ضخامت کم نمونه مورد آزمایش تحت دمای محیط آزمایشگاه لحاظ گردیده است. در ادامه فشار قائم به تدریج افزایش داده می‌شود. در اثر بارگذاری-های مرحله‌ای، تغییر شکل خاک در اثر فرونشست ثبت می‌گردد. قابل ذکر است در این آزمایش از فشارهای قائم ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در مرحله بارگذاری استفاده شده و آنگاه باربرداری به صورت تدریجی با مقادیر فشارهای ۸، ۴ و ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در بازه‌های زمانی ۲۴ ساعت بر روی نمونه‌های آزمایش انجام پذیرفته

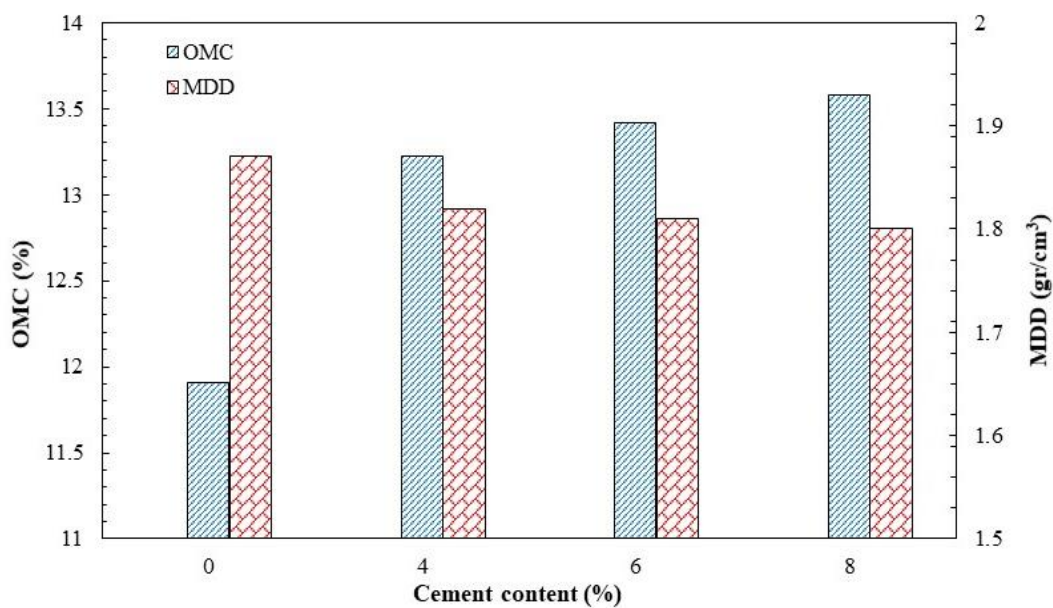
آزمایش تحکیم، در یک مقدار درصد سیمان (C) و زمان عمل-آوری (D) یکسان و درجه حرارت مختلف می توان دریافت که با افزایش حرارت در بازه های دمایی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی گراد نشست خاک افزایش می یابد. در کلیه آزمایشها دمای محیط معادل ۲۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. به طور نمونه اشکال (۸) و (۹) تأثیر افزایش درجه حرارت بر نتایج تغییرات نسبت منافذ خاکها با اعمال فشار سربار برای نمونه های خاک بهسازی نشده و بهسازی شده با ۴ درصد سیمان را نشان می دهد.

و تغییر فابریک خاکها در اثر افزودن سیمان و تشکیل ذرات بزرگتر به علت واکنش های تبادل کاتیونی بین ذرات سیمان و خاک ریزدانه مرتبط دانست که در این حالت از قابلیت جذب آب بالایی برخوردار می باشند که منجر به افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه ها می گردد.

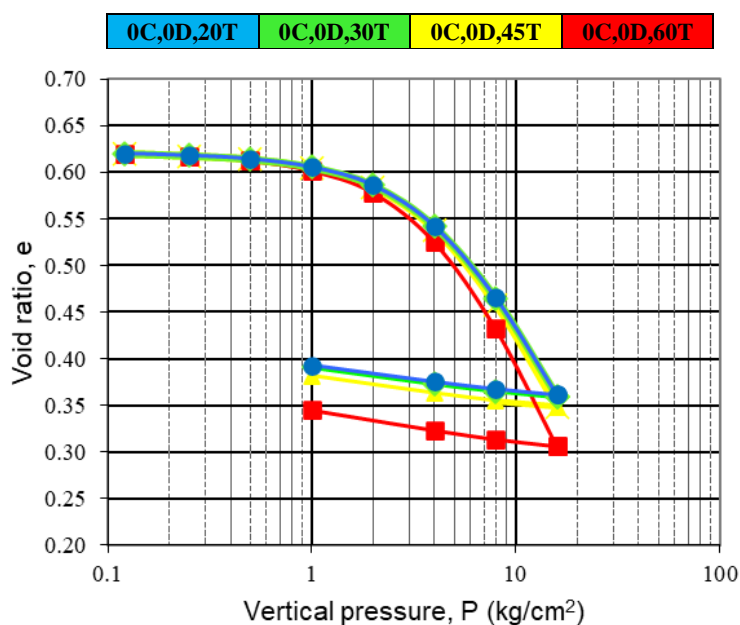
آزمایش تحکیم حرارتی

تأثیر تغییرات دما

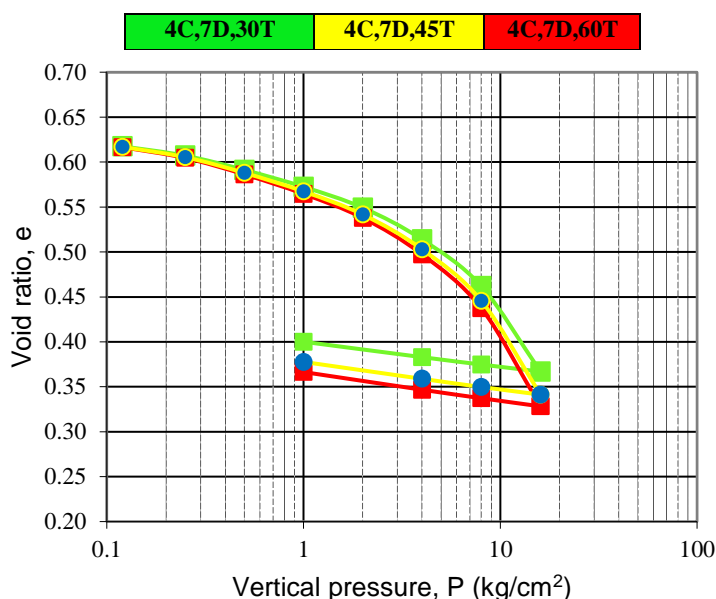
طبق پژوهش انجام شده به منظور بررسی اثر دما (T) بر روند



شکل ۷- تأثیر افزودن سیمان بر مقادیر OMC و MDD نمونه ها



شکل ۸- تأثیر دما بر نتایج آزمایش تحکیم نمونه های خاک بهسازی نشده



شکل ۹- تأثیر دما بر نتایج آزمایش تحکیم نمونه‌های خاک بهسازی شده با ۴ درصد سیمان تحت زمان عمل‌آوری ۷ روز

تأثیر افزودن سیمان

با افزودن سیمان به خاک مورد مطالعه، تأثیر مهمی در روند تغییرات نسبت منافذ نمونه‌های آزمایش مشاهده شده است. در این خصوص داده‌های حاصل از آزمایش نشان دادند که به علت واکنش‌های پوزولانی و قفل و بست بهتر ذرات، تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها در طول فرایند تحکیم با افزودن مقدار سیمان، کاهش یافته که در نتیجه منجر به نشست‌های کمتری گردیده است. شایان ذکر است با افزایش دما و خروج بیشتر آب حفره‌ای مقدار نشست از روند افزایشی بیشتر و محسوس‌تری برخوردار بوده است. هرچند در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، روند این تغییرات، نسبتاً نامحسوس بوده است. به عنوان نمونه جداول ۳ الی ۵ تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها برای دماهای مختلف تحت زمان عمل‌آوری ۷ روز در مراحل مختلف فشار قائم بارگذاری و باربرداری (P) برای ۳ مرحله بارگذاری و ۱ مرحله باربرداری تنش را نشان می‌دهد.

تأثیر تغییرات زمان عمل‌آوری

به منظور بررسی تأثیر سن و مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌های مخلوط خاک-سیمان در روند آزمایش تحکیم، تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها در طول مراحل بارگذاری و باربرداری تحت مقادیر سیمان و دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های پژوهش نشان دادند که در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در مقایسه با سایر زمان‌های عمل‌آوری دیگر، از گیرش سیمان بالاتری برخوردار بوده که در نتیجه فعل و انفعالات شیمیایی، تکمیل واکنش‌های پوزولانی و سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک

با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان دریافت که تغییرات نسبت منافذ و تنش اعمالی در خاک بهسازی نشده، در دماهای ۳۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد و دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) تفاوت‌های اندکی داشته، اما در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، این تفاوت معنادارتر و محسوس‌تر بوده که این موضوع بیانگر این مطلب است که با افزایش دما نشست خاک به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به انبساط بیشتر نمونه‌ها تحت حرارت بیشتر و خروج آب حفره‌ای بیشتر از بین ذرات خاک و افزایش تغییر شکل‌های ناشی از بارگذاری حرارتی تحت محدوده تنش‌های مورد آزمایش مرتبط دانست. همچنین نتایج آزمایش تحکیم حرارتی بر روی نمونه‌های حاوی ۴ درصد سیمان تحت زمان عمل‌آوری ۷ روز نشان داد که با افزایش دما، تحت یک فشار ثابت منجر به کاهش بیشتر نسبت منافذ خاک می‌گردد که این عمل را می‌توان به خروج بیشتر آب حفره‌ای ناشی از حرکت سریع‌تر ذرات آب از بین توده خاک مرتبط دانست. شایان ذکر است در نمونه‌های تثبیت شده با ۴ درصد سیمان، تأثیر افزایش دما از ۴۵ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر عملکرد رفتار تحکیم پذیری نمونه‌ها، در تغییرات نسبت منافذ خاک در مرحله باربرداری در محدوده تنش‌های مورد آزمایش محسوس‌تر و چشمگیرتر بوده است. همچنین می‌توان دریافت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل نزدیک بودن به دمای محیط میزان اختلاف کاهش در نسبت منافذ خاک تقریباً نامحسوس بوده است. در این خصوص، نتایج مطالعات انجام شده *Shirasb et al., 2020* موید کاهش نسبت منافذ نمونه‌ها با افزایش دما تحت یک تنش قائم ثابت نیز بوده است.

ترک خوردن و کاهش مقاومت نمونه‌ها نیز خواهد گردید. شکل (۱۰) تأثیر زمان عمل‌آوری در تغییرات نسبت منافذ نمونه‌های حاوی ۴ درصد سیمان تحت دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

ضمن کاهش میزان تخلخل، مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته که این مهم منجر به کاهش نشست نمونه‌های مورد مطالعه در طی آزمایش شده است. همچنین میزان گرمایش بر افزایش انقباض خاک‌ها تأثیر بسیار مهمی داشته به طوری‌که این امر منجر به روند

جدول ۳- تأثیر افزودن سیمان بر تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها تحت زمان عمل‌آوری ۷ روز در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد

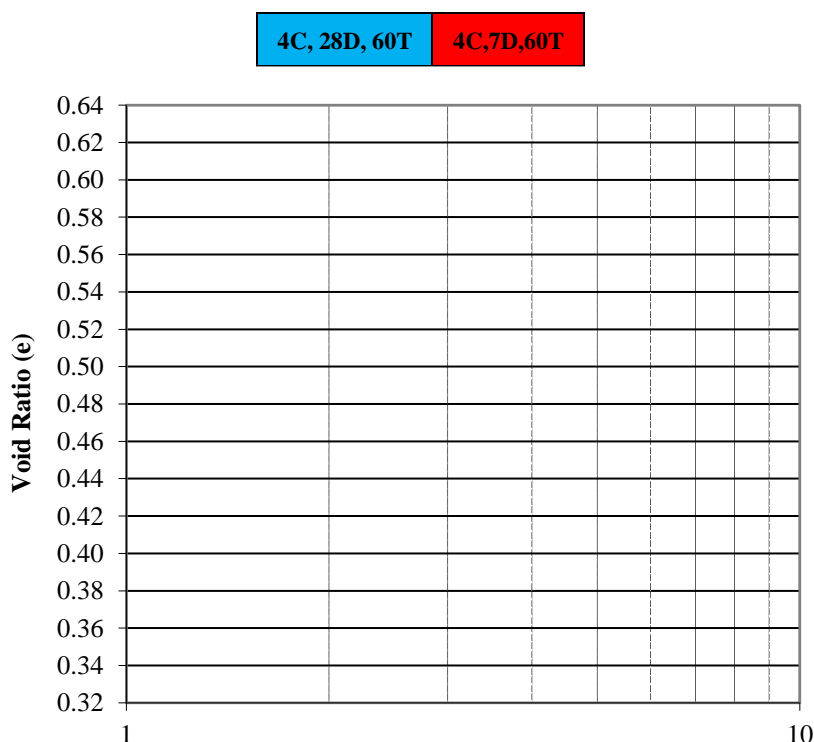
Void ratio (e)				P (kg/cm ²) = ۰/۱۲۵	
P=۱	P=۱۶	P=۴			
۰/۳۹۱	۰/۳۵۹	۰/۵۴۲	۰/۶۲۳	0% C, 0D, 30T	
۰/۴۰۰	۰/۳۶۷	۰/۵۱۴	۰/۶۱۸	4% C, 7D, 30T	
۰/۴۲۵	۰/۳۸۸	۰/۵۰۸	۰/۶۱۶	6% C, 7D, 30T	
۰/۴۴۱	۰/۴۱۳	۰/۵۲۷	۰/۶۱۹	8% C, 7D, 30T	

جدول ۴- تأثیر افزودن سیمان بر تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها تحت زمان عمل‌آوری ۷ روز در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد

Void ratio (e)				P (kg/cm ²) = ۰/۱۲۵	
P=۱	P=۱۶	P=۴			
۰/۳۸۱	۰/۳۴۸	۰/۵۳۸	۰/۶۲۰	0% C, 0D, 45T	
۰/۳۷۸	۰/۳۴۱	۰/۵۰۳	۰/۶۱۷	4% C, 7D, 45T	
۰/۴۰۵	۰/۳۶۵	۰/۴۹۷	۰/۶۱۵	6% C, 7D, 45T	
۰/۴۳۸	۰/۴۰۹	۰/۵۲۵	۰/۶۱۹	8% C, 7D, 45T	

جدول ۵- تأثیر افزودن سیمان بر تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها تحت زمان عمل‌آوری ۷ روز در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

Void ratio (e)				P (kg/cm ²) = ۰/۱۲۵	
P=۱	P=۱۶	P=۴			
۰/۳۴۵	۰/۳۰۶	۰/۵۲۶	۰/۶۲۰	0% C, 0D, 60T	
۰/۳۶۶	۰/۳۲۸	۰/۴۹۷	۰/۶۱۷	4% C, 7D, 60T	
۰/۳۸۵	۰/۳۴۱	۰/۴۸۶	۰/۶۱۴	6% C, 7D, 60T	
۰/۴۲۳	۰/۳۹۲	۰/۵۱۸	۰/۶۱۹	8% C, 7D, 60T	



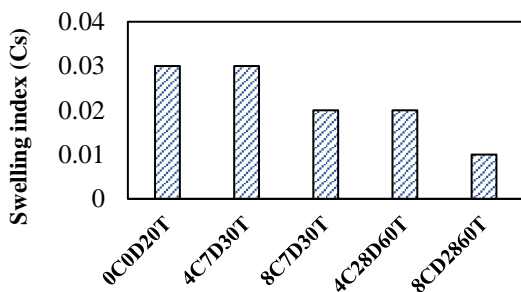
شکل ۱۰- تأثیر زمان عمل‌آوری در نمونه‌های حاوی ۴ درصد سیمان تحت دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

شاخص فشردگی (C_c)

به منظور تعیین میزان نشست پذیری نمونه‌های مورد مطالعه، نقش پارامترهای دما، زمان عمل‌آوری و مقدار سیمان بر شاخص فشردگی مخلوط‌های خاک-سیمان تعیین گردید. در این راستا می‌توان پی برد که در خاک بهسازی نشده با افزایش دما مقدار شاخص فشردگی افزایش یافته به طوری که افزایش حدود ۱۸ درصد در مقدار شاخص فشردگی نمونه‌ها تحت دمای ۶۰ درجه سانتی-گراد در مقایسه با دمای محیط مبین این مطلب بوده است. همچنین مقدار شاخص فشردگی نمونه‌ها با افزایش سیمان کاهش یافته به طوری که در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۷ روز و دمای ۳۰ درجه سانتی گراد، با افزایش مقدار سیمان از ۴ به ۸ درصد، مقدار شاخص فشردگی در حدود ۱۴ درصد کاهش یافته است. از نتایج آزمایش‌ها می‌توان دریافت که زمان عمل‌آوری نقش بسیار مهمی در مقدار شاخص فشردگی نمونه‌ها داشته به-طوری که کمترین مقدار شاخص فشردگی در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز مشاهده گردیده که در مقایسه با خاک فاقد سیمان، کاهش در حدود ۵۰ درصد را نشان داده است. جدول (۶) بیانگر مطالب فوق الذکر می باشد. نتایج مذکور از مطابقت خوبی با سایر یافته‌های مرتبط در این خصوص نیز برخوردار بوده است (Bag and Rabbani, 2017).

شاخص تورم (C_s)

به منظور بررسی رفتار تورم پذیری نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده تنش‌های باربرداری و تأثیر آن بر مقادیر تغییرشکل خاک ناشی از پارامترهای مختلف مورد بررسی، شاخص تورم نمونه‌ها با کمک نتایج آزمایش‌های تحکیم حرارتی تعیین گردید. در این زمینه یافته‌های تحقیق نشان دادند که با افزایش درصد سیمان و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقدار شاخص تورم نمونه‌ها کاهش یافته و نرخ این کاهش در دماهای کم بسیار محسوس تر بوده است. در این ارتباط در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۷ روز و دمای ۳۰ درجه سانتی گراد، با افزایش مقدار سیمان از ۴ به ۸ درصد، مقدار شاخص تورم نمونه‌ها در حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است. شایان ذکر است تأثیر تغییرات دما و مقدار سیمان افزودنی بر شاخص تورم نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به دلیل افزایش مقاومت، گیرش و سیماناسیون بهتر بین ذرات خاک ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی تغییر چندان محسوس نیافته است. شکل (۱۱) به عنوان نمونه تغییرات شاخص تورم نمونه‌های تثبیت شده با ۴ و ۸ درصد سیمان را تحت مقادیر مختلف دما و زمان عمل‌آوری نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- تغییرات شاخص تورم نمونه‌های مورد آزمایش

بررسی ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌ها

با توجه به اهمیت رفتار هیدرولیکی مصالح بهسازی شده با سیمان ناشی از تغییرات درجه حرارت، با استفاده از نتایج آزمایش تحکیم و تعیین تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها در طی مراحل بارگذاری، اقدام به تعیین ضریب تغییر حجم (mv) گردید. در ادامه ضریب نفوذپذیری (k) به روش غیرمستقیم با تعیین ضریب تحکیم (C_v) برای نمونه‌های مورد مطالعه تحت دماهای متفاوت به شرح روابط زیر محاسبه گردید.

$$m_v = \frac{\Delta e / \Delta p}{1 + e_0} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$c_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

جدول ۶- تغییرات شاخص فشردگی نمونه‌های مورد آزمایش

Compression Index (C _c)	T (OC)	D (day)	C (%)
۰/۱۷	۲۰	.	.
۰/۱۷	۳۰	.	.
۰/۱۸	۴۵	.	.
۰/۲۰	۶۰	.	.
۰/۱۵	۳۰	۷	۴
۰/۱۶	۴۵	۷	۴
۰/۱۷	۶۰	۷	۴
۰/۱۴	۳۰	۷	۶
۰/۱۵	۴۵	۷	۶
۰/۱۷	۶۰	۷	۶
۰/۱۳	۳۰	۷	۸
۰/۱۳	۴۵	۷	۸
۰/۱۴	۶۰	۲۸	۸
۰/۱۱	۳۰	۲۸	۴
۰/۱۱	۴۵	۲۸	۴
۰/۱۱	۶۰	۲۸	۴
۰/۱۰	۳۰	۲۸	۶
۰/۱۰	۴۵	۲۸	۶
۰/۱۱	۶۰	۲۸	۶
۰/۰۹	۳۰	۲۸	۸
۰/۱۰	۴۵	۲۸	۸
۰/۱۰	۶۰	۲۸	۸

جدول ۷- تأثیر زمان عمل‌آوری بر تغییرات ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌های تثبیت شده با ۴ درصد سیمان در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

C_v (cm ² /s)	K (cm/s) * 10 ⁻⁹	D (day)
۰/۰۰۱	۱/۲۴	۷
۰/۰۰۹	۰/۵۶	۲۸

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به اهمیت بررسی رفتار نشست پذیری خاکهای ریزدانه تحت تغییرات دمایی مختلف و عملکرد آن در بهسازی خاک‌های مشکل دار منطقه مورد مطالعه، بررسی‌های آزمایشگاهی با کمک آزمون‌های تراکم استاندارد و تحکیم حرارتی بر روی نمونه‌ها تحت دماهای مختلف ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی-گراد با مقادیر مختلف سیمان شامل ۴، ۶ و ۸ درصد و زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز انجام و بر اساس داده‌های دریافت شده، نتایج زیر حاصل شده است.

۱- با انجام آزمایش تراکم استاندارد بر روی خاک بهسازی نشده (خاک محل) و خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان نظیر ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی خاک خشک مورد مطالعه مشاهده شد که با افزایش درصد سیمان، وزن مخصوص خشک خاک و رطوبت بهینه نمونه‌ها به ترتیب کاهش و افزایش یافته‌اند.

۲- با انجام آزمایش‌های تحکیم حرارتی در دماهای مختلف ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد مشخص گردید که با افزایش دما نشست خاک افزایش می‌یابد. در این ارتباط می‌توان گفت افزایش دما منجر به کاهش فضاهای خالی بین ذرات خاک شده که این امر موجب خروج سریع‌تر آب موجود در بین ذرات خاک گردیده که در نهایت موجب افزایش نشست خاک شده است. شایان ذکر است روند تغییرات نسبت منافذ نمونه‌ها در مرحله باربرداری در نمونه‌های خاک بهسازی نشده تحت دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نمونه‌های دیگر محسوس‌تر و چشمگیرتر بوده است.

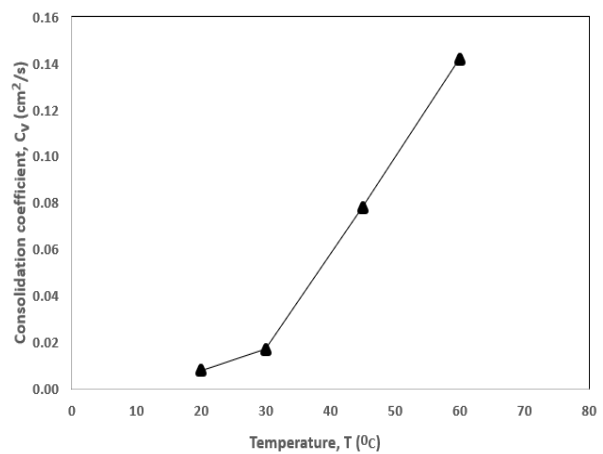
۳- با افزایش درصد سیمان به خاک به دلیل انجام واکنش‌های پوزولانی خاک و سیمان و پر شدن خلل و فرج ذرات خاک توسط سیمان مشاهده شد که نمونه‌ها از مقدار نشست کمتری برخوردار و با افزایش دما و خروج بیشتر آب حفره‌ای مقدار نشست از افزایش بیشتر و محسوس‌تری برخوردار بوده است. در نمونه‌های تثبیت شده با ۴ درصد سیمان، تأثیر افزایش دما از ۴۵ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر عملکرد رفتار تحکیم پذیری نمونه‌ها، در تغییرات نسبت منافذ خاک در مرحله باربرداری در محدوده تنش‌های مورد آزمایش محسوس‌تر و چشمگیرتر می‌باشد.

۴- نتایج نشان دادند که مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها نقش بسیار مهمی در رفتار تحکیمی خاک در حالات دمای محیط و دماهای ۳۰ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد داشته است. روند تغییرات

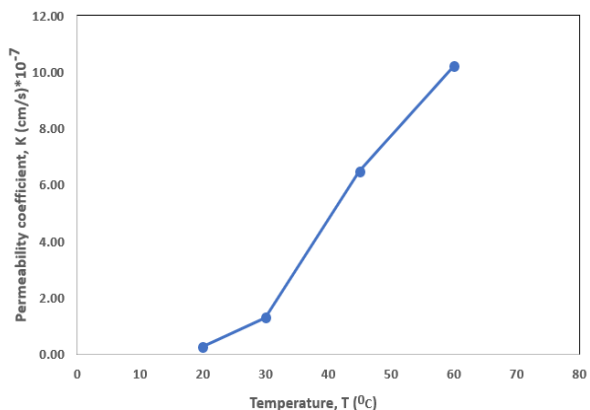
$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (\text{رابطه ۳})$$

در روابط فوق Δp و Δe تغییرات نسبت منافذ و فشار در مدت زمان مراحل تحکیم، e_0 نسبت منافذ اولیه نمونه‌ها، H طول مسیر زهکشی، t_{90} زمان مربوط به ۹۰ درصد تحکیم نمونه‌ها γ_w وزن مخصوص آب می‌باشد. در این ارتباط اشکال (۱۲) و (۱۳) به ترتیب تأثیر حرارت بر مقادیر ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

نتایج نشان دادند با افزایش دما به دلیل کاهش ویسکوزیته آب، مقادیر ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابند. همچنین می‌توان پی برد با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، به دلیل کاهش نسبت منافذ ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی، تکمیل واکنش‌های پوزولانی و سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک منجر به کاهش مقادیر ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌ها گردیده است. در این راستا جدول (۷) بیانگر این مطلب می‌باشد. شایان ذکر است نتایج مذکور از مطابقت خوبی با نتایج سایر محققین دیگر نیز برخوردار بوده است (Tsutsumi and Tanaka, 2012; Amiri et al., 2019; Shirasb et al., 2020)



شکل ۱۲- تأثیر دما بر ضریب تحکیم نمونه‌های خاک بهسازی نشده



شکل ۱۳- تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های خاک بهسازی نشده

شاخص تورم نمونه‌ها کاهش و نرخ این کاهش در دماهای پایین بسیار چشمگیرتر بوده است. در این راستا در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۷ روز و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش مقدار سیمان از ۴ به ۸ درصد، مقدار شاخص تورم نمونه‌ها در حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است.

۷- با افزایش دما به دلیل کاهش ویسکوزیته آب، مقادیر ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش یافته و همچنین نتایج نشان دادند که با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقادیر ضریب تحکیم و نفوذپذیری نمونه‌ها از روند کاهشی برخوردار بوده است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abuel-Naga, H.M. and Bergado D.T., Sorulump, S. and Rujivipat, P. (2005). Thermal consolidation of soft Bangkok clay, *Lowland Technology International Journal*, 7, 13-22.
- Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T. and Bouazza, A. (2007). Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok Clay, *Engineering Geology*, 89, 144-154.
- Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Bouazza, A. and Pender, M. (2009). Thermal conductivity of soft Bangkok clay from laboratory and field measurements, *Engineering Geology*, 105, 211-219.
- Amini Keleahroudi, M., Raeesi Estabragh, A. and Abdolahi Baik, J. (2017). Effect of Temperature on the Behavior of an Expansive Soil during Drying and Wetting Cycles. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 677-686. (In Persian)
- Amiri, M., Dehghani, M. and Papi, M. (2019). Microstructural analysis of thermally induced changes in permeability coefficient and settlement of marl soils. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.
- Arabani, M., Nikpayam, Y. and Khosravi, M. (2006). Investigation of temperature on the engineering characteristics of kaolinite and Rasht clay. *7th International Congress on Civil Engineering*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Bag, R. and Rabbani, A. (2017). Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil, *Applied Clay Science*, 136, 1-7.
- Balaji, N.C., Mani, M. and Reddy, B.V.V. (2016). Thermal conductivity studies on cement-stabilized soil blocks, *Construction Materials, Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1500032.
- Castro Ferreira, R.C. and Carvalho Ulhôa, M.L. (2016). Mechanical and thermal behaviors of stabilized compressed earth blocks, *Science and Engineering Journal*, 25 (1), 125 – 135.
- Delage, P. and Sultan, N. (2012) On the thermal consolidation of Boom clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37 (2), 343-354.
- Delfan Azari, M., Noorzad, A. and Mahbobi Ardakani, M. (2013). Review on Thermal effect of clay characteristics. *The 1st Iranian Conference on Geotechnical Engineering*, October, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. (In Persian)
- El-Raw, N.M. and Al-Wash, A.A. (1995). Strength and thermal properties of plain and reinforced soil-cement, *Journal of Islamic Academy of Sciences*, 8(3), 107-118.
- Hamidi, A and Khazayi, S. (2012). Investigation of temperature on the behavior characteristics of clay soils. *Jaddeh*, 28 (72). (In Persian)
- Joshaghani, M. and Ghasemi-Fare, O. (2019). A study on thermal consolidation of fine-grained soils using modified consolidometer, *Geo-Congress*, GSP 309.
- Kong, L., Yao, Y. and Qi, J. (2020). Modeling the combined effect of time and temperature on normally consolidated and overconsolidated clay, *Acta Geotechnica*.
- Kuntiwattanakul, P., Towhata, I., Ohishi, K., and Seko, I. (1995). Temperature effects on thermal effects on undrained shear characteristics of clay, *Soils and Foundations*, 35, 147-162.
- Leroueil, S., Soares Marques, M.E. (1996). Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering, *Measuring and modeling time dependent soil behavior*, 61.
- Liu, Q., Deng, Y.B. and Wang, Y. (2018). One-dimensional nonlinear consolidation theory for soft ground considering secondary consolidation and the thermal effect, *Computers and Geotechnics*, 104, 22-28.
- Morin, R., Silva, A. J. (1984). The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments, *Journal of Geophysical Research*, 89, No. B1, 511-526.
- Ochsner, T.E., Robert, H. and Tusheng, R. (2001). A

نسبت منافذ خاک برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان تحت دماهای متفاوت در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، تقریباً از رفتار یکسانی برخوردار بوده‌اند.

۵- مقدار شاخص فشردگی نمونه‌ها با افزایش سیمان کاهش یافته به طوری که در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۷ روز و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش مقدار سیمان از ۴ به ۸ درصد، مقدار شاخص فشردگی در حدود ۱۴ درصد کاهش یافته است. در خاک فاقد مواد افزودنی سیمان، با افزایش دما مقدار شاخص فشردگی نمونه‌ها نیز افزایش یافته است.

۶- نتایج شاخص تورم نمونه‌های حاصل از آزمایش نشان دادند که با افزایش درصد سیمان و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقدار

- new perspective on soil thermal properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1641-1647.
- Park, M. (2018). A study on the improvement effect and field applicability of the deep soft ground by ground heating method, *Applied Sciences*, 8.
- Pietrak, K. and Tomasz, S.W. (2014). A review of models for effective thermal conductivity of composite materials, *Journal of Power Technologies*, 95,14-24.
- Pongsivasathit, S., Horpibulsuk, S. and Piyaphipat, S. (2019). Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils, *Case Studies in Construction Materials*,11.
- Rajabnezhad, Y. and Rajabnezhad, H. (2010). Investigation of temperature variations on the physical characteristics of and clay soil. *1th Regional Conference on Civil Engineering*, Iran. (In Persian)
- Rao, M.G. and Singh, D.N. (1999). A generalized relationship to estimate thermal conductivity of soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 767-773.
- Rotta Loria, A.F. and Coulibaly, J.B. (2020). Thermally induced deformation of soils: A critical overview of phenomena, challenges and opportunities, *Geomechanics for Energy and the Environment*, GETE 100193.
- Saeedi Jam, S. (2011). Temperature effect on the mechanical- thermal behavior of sand-bentonite mixtures. *Ph.D. dissertation, Iran University of Science and Technology*, Tehran, Iran.
- Sametzadeh, A., Khaloo, A. and Zarfam, P. (2006). Investigation of thermal effect on the strength of soil-cement mixtures. 9th International Congress on Civil Engineering, Esfahan, Iran. (In Persian)
- Shirasb, A., Hamidi, A. and Ahmadi, M.M. (2020). Consolidation characteristics of a thermally cured sand-bentonite mixture, *SN Applied Sciences*, 2(6):1116.
- Sultan, N., Delage, P. and Cui, Y.J. (2002). Temperature effects on the volume change behavior of Boom clay, *Engineering Geology*, 64.
- Tabarsa, A.R., Rezaie, H., Mazandarani, M., Kaveh, F. and Hosseini, S.J. (2016). Feasibility Study of Soil Stabilization Using Nanotechnology and Applications in Swamp Areas of Golestan. *Final Research Report*, Golestan Regional Water Co., Iran.
- Tanaka, N., Graham, J., Crilly, T. (1997). Stress-strain behavior of reconstituted illitic clay at different temperatures, *Engineering Geology*, 47, 339-350.
- Tsutsumi, A. and Tanaka, T. (2012). Combined effects of strain rate and temperature on consolidation behavior of clayey soils, *Soils and Foundations*,52, 207-215.
- Yarahmadi, S. and Ghaffarpour Jahromi, S. (2019) Effect of Temperature on the clay consolidation and hydraulic conductivity of sand. *6th National Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, December, Tehran, Iran. (In Persian)
- Yashima, A., Leroueil, S., Oka, F. and Guntoro, I. (1998). Modeling temperature and strain rate dependent behavior of clays one dimensional consolidation, *Soils and Foundations*, 38, 63-73.