



بررسی تأثیر دما بر مقاومت برشی زهکش نشده رس کائولینیت

اکبر چشمی^{۱*}، فریبرز محمدی^۲، علی محمد رجبی^۳

^۱ دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران

^۲ دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران

^۳ دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۱۴

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۱۸

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۰۹

کلمات کلیدی:

دما

کائولینیت

مقاومت برشی زهکش نشده

خاک رس

گسیختگی

خلاصه: بررسی تغییر دما بر مقاومت خاک یکی از موضوعاتی است که در دهه های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر دما بر مقاومت برشی زهکش نشده^۱ (Cu) خاکهای رسی، ابتدا سلولی با قابلیت تغییر و ثابت نگه داشتن دمای نمونه در طول بارگذاری، طراحی و ساخته شد. پس از تعیین ویژگی های شاخص نمونه ای از خاک رس کائولینیت، آزمایش تعیین مقاومت برشی زهکش نشده بر روی خاک اشباع در دماهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد انجام گردید. با تکرار آزمایش بر روی نمونه هایی با ویژگی های ثابت و در دمای مشخص تکرارپذیری نتایج تأیید شد. نتایج نشان می دهد با افزایش دما، Cu کائولینیت کاهش یافته بطوریکه افزایش دما از ۱۰ درجه به ۷۰ درجه سانتی گراد باعث کاهش مقدار Cu از ۲۶/۶ به ۱۰/۹۴ کیلوپاسکال شده است. بر این اساس، در محدوده دمایی مورد مطالعه رابطه ای تجربی بین دما و Cu (با ضریب تعیین ۰/۹۶) برای رس مورد مطالعه پیشنهاد شد. شکل کلی منحنیهای تنش - کرنش نمونه ها در دماهای مختلف یکسان بوده و در کرنش ۲۰٪ بصورت خطی در میآیند. افزایش دما باعث کاهش محدوده تغییر شکل الاستیک و افزایش محدوده تغییر شکل پلاستیک نمونه ها شده و زاویه صفحه گسیختگی با افق، با افزایش دما کاهش می یابد. اندازه گیری تنش ناشی از انبساط محوری نمونه^۲ (AES) نشان دهنده افزایش آن با افزایش دما است.

1-Undrained Shear Strength
2-Axial Expansion Stress

۱. مقدمه

اشباع را می توان با انبساط حرارتی اجزاء خاک، تراکم پذیری و اثرات فیزیکی شیمیایی آن توضیح داد [۱]. پس از آنها محققان زیادی با روش های مختلف تأثیر این پدیده را بر پارامترهای خاک بررسی کردند. سکرواک و لالوئی^۴ (۲۰۰۴) تأثیر دما بر رفتار کائولینیت در حالت اشباع را با استفاده از سلول آزمایش سه محوره در محدوده دمایی ۲۲ تا ۹۰ درجه سانتی گراد در شرایط تحکیم یافته و زهکشی شده بررسی کرده و نشان دادند مقاومت برشی و مدول الاستیسیته اولیه با افزایش دما افزایش می یابد [۲]. از طرفی انقباض حرارتی در نمونه های عادی تحکیم یافته نسبت به نمونه های با درجه پیش

ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک به طور قابل توجهی متأثر از دما است. در دهه های گذشته مطالعاتی در مورد نحوه رفتار خاک رس در دماهای مختلف انجام شده است. اولین برنامه های تحقیقاتی مربوط به تأثیر دما بر خاک در دهه ۱۹۶۰، توسط کامپانلا و میشل^۳ (۱۹۶۸) در محدوده دمایی صفر تا ۶۰ درجه سانتی گراد انجام شد. آنها ضمن بررسی تأثیر دما بر ویژگی های خاک، نشان دادند تغییرات حجم و فشار منفذی وابسته به تغییر دما در خاک های

3 Campanella and Mitchell

* نویسنده عهده دار مکاتبات: a.cheshomi@ut.ac.ir

4 Cekerevac and Laloui



کردند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری رس منجمد با کاهش دما به صورت خطی افزایش یافته و با افزایش نرخ کرنش به صورت نمایی افزایش می یابد. همچنین با افزایش چگالی خشک، مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می یابد [۷]. شیرازی^۷ (۲۰۱۴) تأثیر دما بر رفتار هیدرومکانیکی رس های منبسط شونده^۸ با درجه اشباع بیشتر از ۸۵ درصد در دماهای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد را بررسی کرده و نشان داد افزایش دما باعث افزایش پتانسیل تورم، انقباض، قابلیت تراکم پذیری و هدایت هیدرولیکی می شود [۸]. هیوکل و پلگرینی^۹ (۱۹۹۲) ضمن اعمال سیکل های گرمایش و سرمایش، آزمایش های مقاومت برشی زهکشی نشده ای را روی رس اشباع انجام دادند. نتایج نشان داد که حرارت موجب افزایش فشار آب منفذی و کرنش بزرگ غیر قابل برگشت در نمونه شده و سرمایش باعث کاهش فشار آب منفذی می شود [۹]. چن^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تغییر هدایت هیدرولیکی بر روی رس در اثر تغییر دما پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که اندازه گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی عمودی و افقی نشان می دهد که هدایت هیدرولیکی در ۸۰ درجه سانتی گراد حدود ۲/۴ برابر بزرگتر از هدایت هیدرولیکی در دمای اتاق (۲۳ درجه سانتی گراد) است و تغییرات هدایت هیدرولیکی با دما در حین گرمایش و سرمایش برگشت پذیر است. همچنین نتایج آزمایش NMR نشان داد که گرمایش حجم بزرگتری از منافذ را تولید کرده و ریزساختار را تضعیف می کند [۱۰]. تغییر دما در رس های عادی تحکیم یافته باعث تغییر حجم انقباضی و در رس های پیش تحکیم یافته منجر به تغییر حجم برگشت پذیر آماسی^{۱۱} می شود [۱۱-۱۳]. لی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تاثیر حرارت بر رفتار و مقاومت برشی برخی خاکهای رسی در محدوده دمایی ۲، ۱۵ و ۳۸ درجه سانتی گراد پرداخته و نشان دادند، دما بر زاویه اصطکاک تأثیر گذار بوده و تابع تنش نرمال و تاریخچه بارگذاری است [۱۴]. یو^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از دستگاه سه محوری، آزمایش های تحکیم یافته زهکش نشده بر روی خاک رس منطقه ای مشخص در دماهای ۲۲، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد و فشارهای محصور

تحکیمی بالا، کمتر بوده و پوش مقاومت در حالت بحرانی و زاویه اصطکاک مستقل از دما می باشد. دی براین و تیموس^۱ (۱۹۹۶) با انجام آزمایش سه محوره روی رس کم کلی^۲ اشباع در دماهای مختلف (۲۰، ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ درجه سانتی گراد) و با فشارهای محصور کننده متفاوت (۲/۱، ۳/۱ و ۴/۱ مگاپاسکال)، نشان دادند با افزایش دما فشار منفذی و مدول الاستیسیته افزایش ولی در نهایت مقاومت خاک کاهش می یابد [۳]. لالویی^۳ (۲۰۰۱) با در نظر گرفتن بازه دمایی ۴ تا ۹۰ درجه سانتی گراد آزمایش های سه محوره بر روی خاک رس انجام داد. نتایج این بررسی ها نشان داد زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت بحرانی در بعضی از آزمایش ها افزایش و در بعضی دیگر کاهش می یابد. بر این اساس پیشنهاد کرد که زاویه اصطکاک داخلی خاک به طبیعت خاک آزمایش شده بستگی داشته و متاثر از تغییرات دما نیست. بررسی ها نشان داده است در شرایط زهکش نشده، افزایش دما باعث افزایش فشار منفذی قابل ملاحظه ای شده و منجر به گسیختگی نمونه می گردد. با افزایش دمای خاک، تمام اجزای آن، شامل بخش های جامد و سیال، انبساط پیدا می کنند. در مورد خاک های رسی این انبساط باعث کاهش مقاومت لایه های جذب سطحی و تغییر در فاصله بین ذرات می شود [۴]. یاور^۴ و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از دستگاه برش مستقیم مجهز به یک سیستم کنترل دما، رفتار برشی در محل تماس ماسه - رس و رس - بتن را در دماهای مختلف (۵، ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد) مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند تأثیر تغییر دما در این محدوده حرارتی روی مقاومت برشی ماسه- رس و رس- بتن ناچیز است [۵]. دی دوناه^۵ و لالویی (۲۰۱۵) با انجام آزمایش تحکیم با قابلیت تغییر دما (نمونه ها اشباع و نرخ گرمایش ۲ درجه سانتی گراد در ساعت) روی رس سیلتی تحکیم عادی یافته با پلاستیسیته متوسط نشان دادند که در محدوده دمایی ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی گراد، با افزایش دما محدوده الاستیک کاهش یافته و اکثر نمونه ها مدول الاستیسیته پایینی را نشان می دهند [۶]. لی^۶ و همکاران (۲۰۰۴) آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری بر روی رس منجمد بازسازی شده با چگالی خشک مختلف در دماها و نرخ کرنش های مختلف را بررسی

7 Shirazi
8 Expansive clays
9 Hueckel and Pellegrini
10 Chen
11 Reversible dilation
12 Li
13 Yu

1 De Bruyn and Thimus
2 Cam-clay
3 Lалуie
4 Yavari
5 Di Donna
6 Li

زهکش نشده رس ها، ابتدا نسبت به طراحی و ساخت دستگاهی اقدام گردید. دستگاه های متداول اندازه گیری پارامترهای مقاومتی خاک توانایی اعمال حرارت و ثابت نگهداشتن آن در حین بارگذاری را نداشته لذا برای این تحقیق نیاز به طراحی و ساخت دستگاهی با قابلیت مذکور بود. در ادامه به معرفی بخش های اصلی این دستگاه پرداخته شده است.

- بخش حرارت دهی نمونه؛ به منظور تأمین حرارت نمونه، سلولی مشابه سلول دستگاه آزمایش سه محوره ساخته شد. تفاوت سلول مذکور با سلول دستگاه سه محوری قابلیت تحمل حرارت و تعبیه گرمکن داخل آن می باشد. برای تحمل تغییرات دمایی و دماهای بالا، از نوعی پلکسی گلاس با ضریب مقاومتی حرارتی و شکنندگی بالا استفاده شده است. با توجه به شفاف بودن این سلول، امکان رؤیت نمونه در طول آزمایش و نحوه تغییر شکل آن در دماهای مختلف وجود دارد. تأمین حرارت نمونه از طریق گرم شدن آب اطراف نمونه در داخل سلول و با استفاده از یک المنت انجام شده است. به منظور اطمینان یافتن از گرم شدن آب داخل سلول و متعاقب آن گرم شدن همگن نمونه ها، المنت به صورت حلقوی و در قاعده سلول جانمایی شده است. این موضوع ضمن ایجاد یک جریان همرفتی آب داخل سلول همزمان با گرم شدن المنت، باعث می شود آب داخل سلول و گرمای آن به صورت همگن، در تمام سلول و در نتیجه به تمام سطوح نمونه منتقل شود. کنترل و قرائت دما توسط یک ترموکوپل که در بالای سلول قرار گرفته است، انجام می شود. مجموعه المنت و ترموکوپل به دستگاهی متصل هستند که توانایی لازم برای ثابت نگه داشتن دما را دارا بوده و دما را با دقت ۰/۱ درجه سانتی گراد نشان می دهد. با تنظیم دستگاه بر روی دمای مورد نظر، به محض رسیدن به آن دما، سیستم به صورت اتوماتیک خاموش شده و با کم شدن دمای آب داخل سلول، دستگاه مجدداً روشن شده و مجدداً دمای آب داخل سلول ثابت نگه داشته می شود. شکل ۱ الف و ب سلول طراحی شده به همراه سیستم اعمال حرارت و ثابت نگه داشتن آن را نشان می دهد.

- بخش اعمال نیرو؛ این بخش شامل یک جک مشابه دستگاه مقاومت فشاری تک محوره با سرعت بارگذاری ۱ میلیمتر در دقیقه می باشد.

- بخش اندازه گیری نیرو؛ شامل یک سلول اندازه گیری نیرو^۸ با

کننده ۲/۵، ۳/۷ و ۴/۷ مگاپاسکال انجام داده و نشان دادند افزایش دما باعث کاهش چسبندگی شده و تاثیر آن بر زاویه اصطکاک داخلی روشن نیست [۱۵]. باگ^۱ و رابانی (۲۰۱۷) اثر حرارت بر فشار تورم و رفتار تراکم پذیری بنتونیت با حدروانی ۱۳۹ را با خاک رسی دیگری با حدروانی ۳۵ با استفاده از دستگاه تحکیم یک بعدی در محدوده دمایی ۲۵ تا ۹۰ درجه سانتی گراد را بررسی و مقایسه کرده و نشان دادند فشار تورمی و شاخص تراکم پذیری بنتونیت با افزایش دما افزایش یافته در حالی که اثر تغییر دما بر خاک رس دیگر ناچیز بوده است [۱۶].

محققین مختلف به بررسی مقاومت خاکها در دماهای مختلف پرداخته و نتایج متفاوتی گرفته اند. کنتی و اتاناکییول^۲ و همکاران (۱۹۹۵)، گراهام^۳ و همکاران (۲۰۰۱)، سکر واک و لالوی (۲۰۰۴) و ابیول نگا^۴ و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند با افزایش دما مقاومت رسها افزایش می یابد [۲، ۱۳، ۱۷ و ۱۸]. هوستن^۵ و همکاران (۱۹۹۵) و هیوکل و بلدی^۶ (۱۹۹۰) نشان دادند با افزایش دما، مقاومت رسها کاهش می یابد [۱۹ و ۱۹]. بورگیگنولی^۷ و همکاران (۱۹۹۲) نشان دادند که دما بر مقاومت رسها بدون تاثیر است [۲۰]. تفاوت در کانی شناسی رس ها، ویژگیهای فیزیکی، شرایط متفاوت آزمایش و محدوده دمایی آزمایش ها عوامل اصلی نتایج متفاوت است.

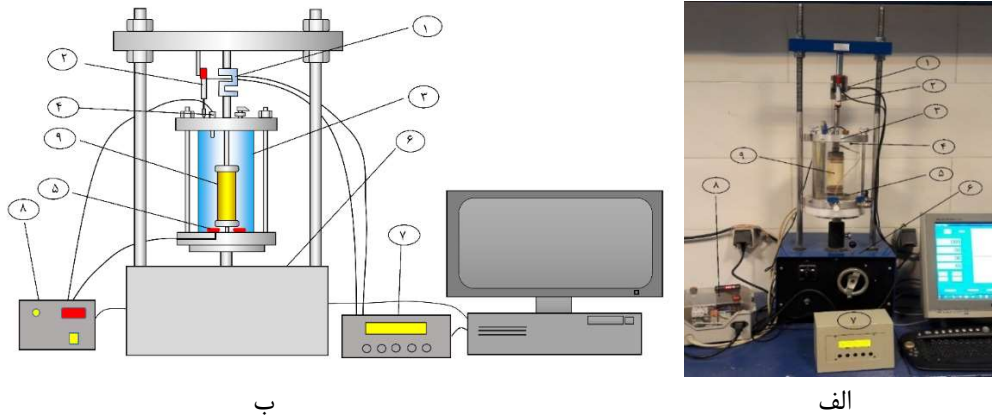
با توجه به نتایج متفاوت تاثیر دما بر مقاومت رس ها در تحقیق حاضر، نمونه هایی از یک نوع کانی رسی با ویژگیهای فیزیکی کاملاً یکسان ساخته و به منظور بررسی تاثیر دما بر مقاومت برشی زهکش نشده، مقاومت خاک در دماهای مختلف اندازه گیری شد. بدین منظور ابتدا دستگاهی با قابلیت تغییر و ثابت نگه داشتن دمای نمونه در طول زمان بارگذاری طراحی و ساخته شد. سپس ضمن بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایش ها، تأثیر تغییر دما بر مقاومت برشی زهکش نشده نوعی خاک رس کائولینیت مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- طراحی و ساخت دستگاه

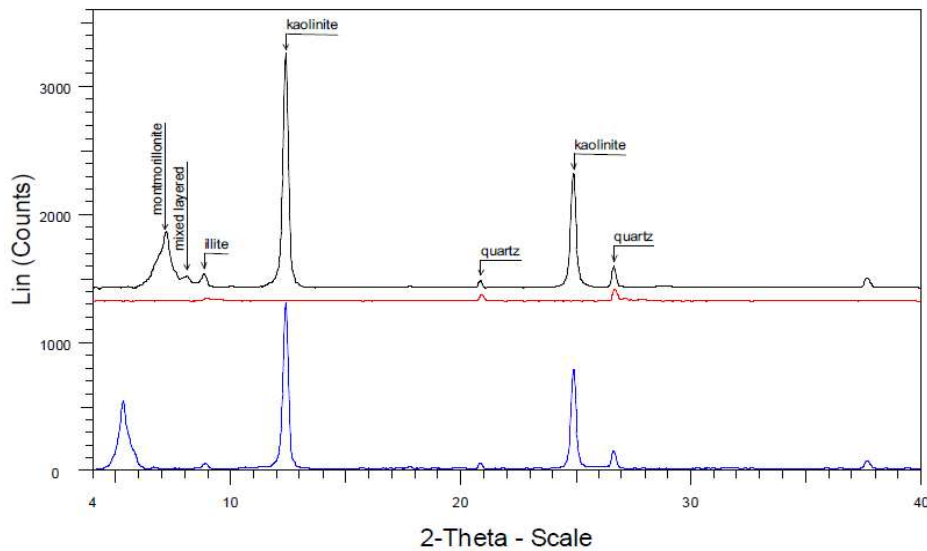
در این مطالعه و به منظور بررسی تأثیر دما بر مقاومت برشی

- 1 Bag
- 2 Kuntiwattanukul
- 3 Graham
- 4 Abuel-Naga
- 5 Houston
- 6 Hueckle and Baldi
- 7 Burghignoli



شکل ۱. الف و ب - دستگاه مورد استفاده در تحقیق؛ (۱) سلول اندازه گیری نیرو، (۲) کرنش سنج، (۳) سلول نمونه، (۴) ترموکوپل، (۵) المنت، (۶) جک بارگذاری، (۷) دیتالاگر، (۸) دستگاه تنظیم دما و (۹) نمونه

Fig. 1. a and b. The device used in the research 1) Load cell, 2) Strain gauge, 3) Sample cell, 4) Thermocouple, 5) Element, 6) Loading jack, 7) Data logger 8) Temperature regulator and 9) Sample



شکل ۲. نمودار XRD نمونه

Fig. 2. XRD graph

جابجایی اندازه گیری شده توسط کرنش سنج با دقت ۰/۱ میلیمتر را ثبت و بر روی کامپیوتر نمایش می دهد. با برنامه نویسی انجام شده دیتالاگر، امکان ثبت پیوسته تغییرات نیرو-جابجایی با زمان در حین آزمایش وجود دارد.

۲-۲- خاک مورد استفاده

برای تحقیق حاضر از یک نمونه خاک رس که کانی غالب آن کائولینیت است استفاده شده است. آنالیز نمونه بر اساس آزمایش XRD انجام شده و نمودار آن در شکل ۲ ارائه گردیده است. کانی

ظرفیت اندازه گیری ۲۵ کیلوگرم و با دقت ۱ گرم است. با این سلول امکان اندازه گیری بار وارده به نمونه فراهم می گردد.

- بخش اندازه گیری جابجایی، شامل یک کرنش سنج^۱ با سوزن ۵ سانتی متری و با دقت ۰/۰۱ میلیمتر برای اندازه گیری میزان کرنش نمونه می باشد.

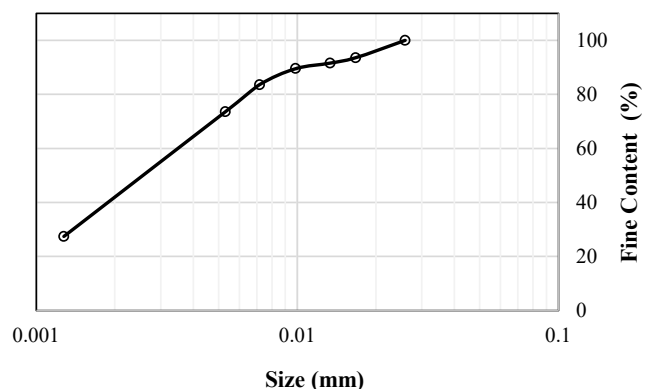
- بخش ثبت و نمایش داده ها؛ شامل یک دیتالاگر^۲ است که نیروی اندازه گیری شده توسط سلول اندازه گیر با دقت ۱ گرم و

1 LVDT
2 Data-logger



شکل ۴. قالب نمونه گیری مورد استفاده در این مطالعه (نمونه در استوانه داخلی ساخته شده و استوانه بیرونی پر از آب میگردد)

Fig. 4. Sampling mold used in the present study (sample is made in the inner cylinder and the outer cylinder is filled with water)



شکل ۳. نمودار هیدرومتری نمونه

Fig. 3. Sample hydrometric diagram



شکل ۵. مراحل آماده سازی نمونه الف) نمونه خشک ب) افزودن آب به نمونه ج) خروج حبابهای هوا با اعمال ضربه به ظرف نمونه د) ریختن نمونه داخل قالب استوانه ای شکل ه) پر کردن استوانه خارجی با آب و نصب دریوش و سنگ متخلخل روی استوانه

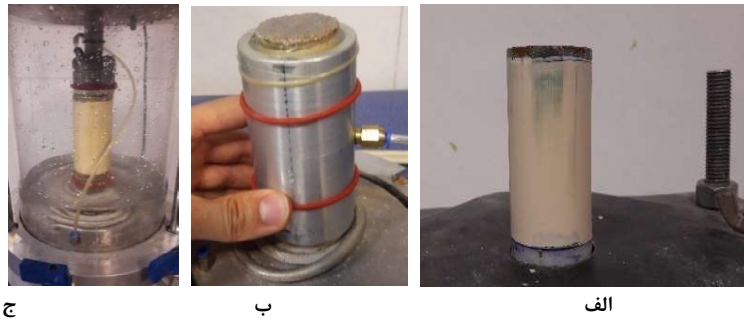
Fig. 5. Preparation steps of sample a) dry sample, b) adding water to sample, c) exit of air bubbles by hitting the sample container, d) purring the sample into the cylindrical mold, e) filling the outer cylinder with water and installing the lid and stone porous on the cylinder.

آزمایش لازم است نمونه ها اشباع گردند. مطابق با پیشنهاد هد و ایپس^۱ (۱۹۸۰) به منظور اشباع کردن نمونه، ۱/۵ برابر حد روانی کائولینیت، به نمونه آب اضافه گردید [۲۱]، استفاده از روابط وزنی - حجمی نیز اشباع شدن نمونه با این روش را تایید نمود. سپس نمونه گیر استوانه ای (شکل ۴)، با وزن مشخصی از نمونه اشباع به وسیله کاردک پر شد تا از ایجاد هر گونه حباب در نمونه جلوگیری شود. بالا و پایین نمونه، سنگ متخلخل و کاغذ صافی قرار گرفت تا هنگام بارگذاری جهت تحکیم نمونه، آب اضافی بتواند از نمونه زهکش شود. قالب ساخته شده در شکل ۴، شامل دو استوانه بزرگ و کوچک به قطر ۱۱۰ و ۳۸ میلیمتر و ارتفاع ۱۳۰ و ۱۱۰ میلیمتر می باشد. استوانه بزرگتر نقش نگهدارنده استوانه کوچکتر را داشته و در حین تحکیم نمونه، پر از آب می باشد. نمونه گیر داخل استوانه بزرگتر قرار

غالب که حدود ۶۰ درصد نمونه را تشکیل می دهد کانی کائولینیت است. بر اساس آزمایش شناسایی انجام شده، توده ویژه خاک مورد بررسی ۲/۶۴، حدود روانی و خمیری به ترتیب ۴۷ و ۲۷ و نشانه خمیری آن ۲۰ می باشند. شکل ۳ نمودار هیدرومتری نمونه را نشان می دهد.

۲-۳- روش انجام آزمایش

همانطور که پیش تر ذکر شد در این مطالعه، آزمایش تعیین مقاومت برشی زهکش نشده (Cu) بر روی نمونه هایی از خاک رس کائولینیت اشباع در دماهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد انجام گردید. مراحل انجام این آزمایش ها به شرح است. مرحله اول: آماده سازی نمونه؛ با توجه به اینکه هدف تعیین مقاومت برشی زهکش نشده است، لذا قبل از بارگذاری نمونه و شروع



الف ب ج

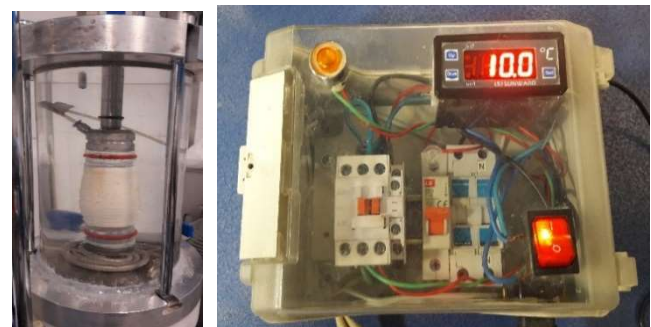
شکل ۶. مراحل آماده سازی نمونه ها جهت انجام آزمایش، الف) خارج کردن نمونه از داخل نمونه گیر توسط جک، ب) نصب غشا در اطراف نمونه به منظور جلوگیری از تماس آب با نمونه، ج) قرار دادن نمونه داخل سلول جهت گرم کردن و اعمال بار

Fig. 6. Steps of preparing samples for testing a) remove the sample from the sampler with the jack, b) Install the membrane on the sample, c) Insert the sample into the cell

گرفته و برای مطمئن شدن از اینکه نمونه در تماس با هوا نیست، داخل استوانه بزرگ پر از آب شد، به طوری که بالای نمونه گیر را آب بپوشاند. مراحل آماده سازی نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است. بعد از وارد کردن نمونه به داخل نمونه گیر استوانه ای، نمونه برای مدت ۲۴ ساعت تحت بار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفته تا به دانسیته مورد نظر برسد. در انتهای بارگذاری با توجه به مشخص بودن ابعاد و وزن نمونه و با استفاده از روابط وزنی- حجمی، دانسیته و درجه اشباع نمونه محاسبه گردید. با توجه به اینکه متغیر تحقیق حاضر دما و تأثیر آن بر Cu است لذا باید متغیرهای مربوط به خاک شامل دانسیته، درصد رطوبت، درجه اشباع و نوع خاک ثابت باشد تا امکان بررسی اثر تغییر دما بر Cu میسر باشد. بارگذاری نمونه مشابه آزمایش تحکیم یک بعدی می باشد. با استفاده از این سیستم ساده امکان تولید نمونه ای استوانه ای به قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلیمتر فراهم گردید.

مرحله دوم: نمونه پس از پایان مرحله اول توسط جک از داخل نمونه گیر خارج شده و پس از نصب غشا، داخل سلول آزمایش که پر از آب است قرار داده می شود. غشا از تماس آب با نمونه جلوگیری می نماید (شکل ۶).

مرحله سوم: پس از قرار دادن نمونه داخل سلول و پر کردن آب، آب داخل سلول توسط المنت و دستگاه کنترل دما تا دمای مورد نظر گرم می شود. در زمان تغییر دما، شیرهای تخلیه بسته بوده لذا شرایط در هنگام اعمال حرارت و بارگذاری، زهکشی نشده است. در این مطالعه به منظور بررسی اثر دما روی مقاومت برشی زهکشی نشده از نرخ افزایش حرارت ۵ درجه سانتی گراد در ساعت استفاده



الف ب

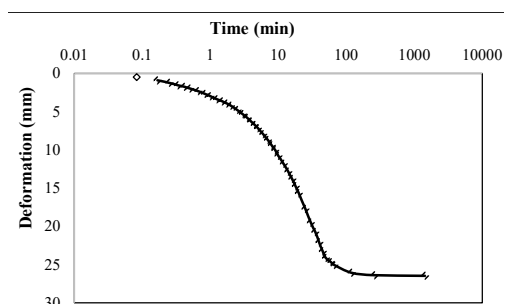
شکل ۷. مرحله اعمال دما و بارگذاری الف) تنظیم دما و ب) اعمال بار محوری

Fig. 7. Steps of temperature application and loading a) temperature adjustment, b) Apply axial load

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی نمونه مورد بررسی

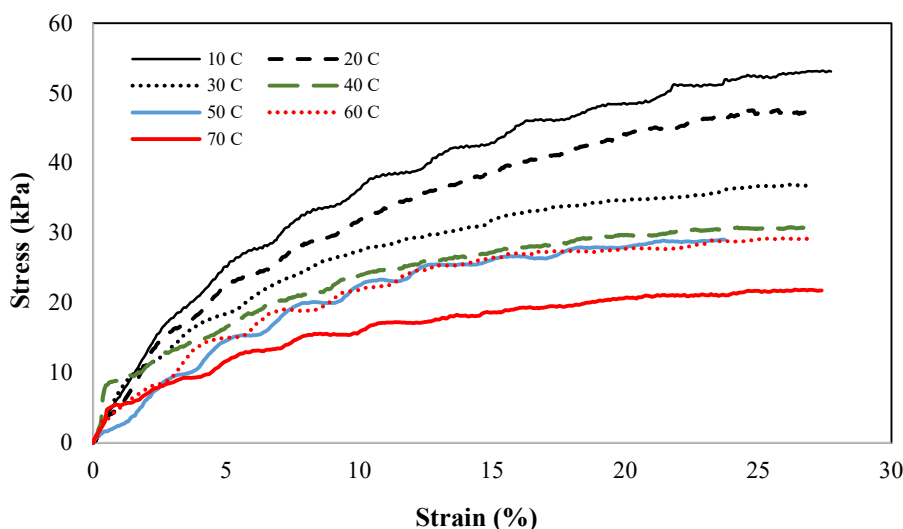
Table 1. The physical parameters of the sample

	ω (%)	γ (kN/m ³)	درجه اشباع (%)	تخلخل (%)
قبل از تحکیم	70	15/60	100	64/50
بعد از تحکیم	41	17/60	100	51/90



شکل ۸. نمودار تغییر شکل قائم با زمان به ازای سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال در مرحله آماده سازی نمونه

Fig. 8. Vertical deformation diagram with overhead base time of 150 kPa in sample preparation stage



شکل ۹. نمودار تنش - کرنش خاک رس کائولینیت به ازای دماهای مختلف
 Fig. 9. Stress - strain curve of Kaolinite for different temperatures

مختلف به شرح جدول ۱ است.

۲-۳- اندازه گیری تغییر شکل نمونه در مرحله تحکیم یک بعدی در مرحله آماده سازی نمونه، برای اینکه نمونه به ارتفاع و دانسیته مشخص برسد، بار ۱۵۰ کیلوپاسکال به مدت ۲۴ ساعت به آن اعمال گردید. طی این مدت نمونه در راستای قائم به دلیل خروج آب از آن تغییر شکل پیدا کرده است. در شکل ۸ نمودار تغییر شکل قائم نمونه با زمان به ازای بار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. این مرحله از آزمایش برای تولید نمونه هایی با ویژگی های فیزیکی یکسان و برای همه نمونه ها انجام گردید. نمودارهای تولید شده برای نمونه های مختلف شبیه به همدیگر هستند.

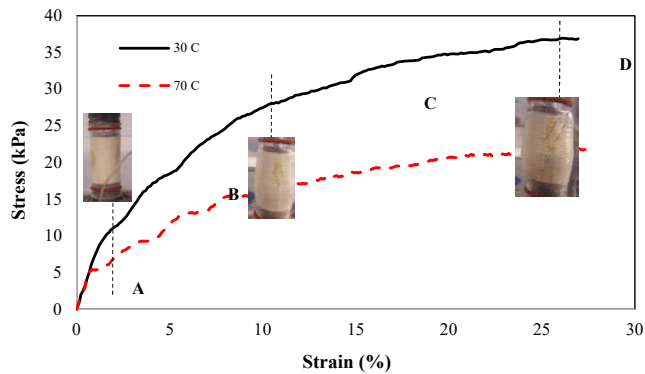
با توجه به شکل ۸ ملاحظه می شود که در ابتدای بارگذاری تغییر شکل های قائم نمونه زیاد است لیکن بعد از ۱۰۰ دقیقه تغییر شکل ثابت می شود که نشان می دهد نمونه تحکیم لازم را پیدا کرده است. همانطور که قبلا ذکر شد برای تمام نمونه های آزمایش شده در دماهای مختلف، آماده سازی نمونه با شرایط یکسان انجام شده و نمودار تغییر شکل قائم در مقابل زمان یکسانی تولید شده است. ارتفاع اولیه نمونه داخل نمونه گیر به گونه ای انتخاب شده که پس از تحکیم مذکور و در پایان مرحله بارگذاری به ارتفاع ۷۶ میلیمتر (که توصیه استاندارد برای انجام آزمایش است) برسد.

شد. بنا به پیشنهاد چن و همکاران (۲۰۱۷)، برای مطمئن شدن از گرم شدن یکنواخت نمونه، دمای نهایی به مدت ۲ ساعت ثابت نگه داشته شده [۱۰] و سپس بارگذاری محوری در شرایط زهکش نشده انجام و میزان نیرو و جابجایی توسط دیتالاگر ثبت گردید. شرایط آزمایش به گونه ای است که فشار همه جانبه وارد به نمونه صفر بوده و بدلیل اشباع بودن نمونه و عدم امکان زهکشی در هنگام اعمال بار محوری و با توجه به سرعت بارگذاری بالا، نمونه در شرایط زهکش نشده شکسته شده است. جزئیات مربوط به این مرحله در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳- نتایج

۳-۱- پارامترهای فیزیکی

همانطور که پیشتر ذکر شد، هدف مقاله حاضر بررسی تأثیر دما بر مقاومت برشی زهکش نشده کائولینیت است، لذا سایر پارامترهای مربوط به خاک ثابت در نظر گرفته شده و تنها دمای نمونه تغییر یافته است. با اندازه گیری وزن خاک خشک، وزن آب، توده ویژه خاک، حجم و وزن نمونه قبل و بعد از اعمال سربار و با استفاده از روابط وزنی و حجمی، درجه اشباع نمونه قبل و بعد از تحکیم محاسبه و مشخص شد که معادل ۱۰۰ درصد می باشد. با توجه به یکسان بوده شرایط آماده سازی همه نمونه ها تخلخل و درجه اشباع نمونه ها یکسان می باشد. پارامترهای فیزیکی نمونه برای آزمایش در حرارت های



شکل ۱۱. منحنی تنش - کرنش مربوط به نمونه در دمای ۳۰ و ۷۰ درجه و تفکیک محدوده های رفتاری متفاوت نمونه در سطوح مختلف کرنش

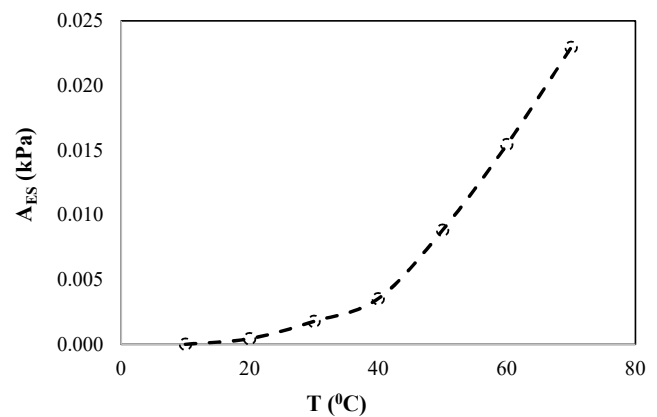
Fig. 11. The stress-strain curve of the sample at 30 and 70 degrees and the separation of different behavioral ranges of the sample at different levels of strain

تغییر دما نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۱۰، با افزایش دما، A_{ES} افزایش می یابد. در دما های نزدیک به دمای محیط (حدود ۲۰ درجه سانتی گراد) مقدار این تنش ناچیز بوده و با افزایش دما این مقدار افزایش پیدا کرده است.

۴- تجزیه و تحلیل

در شکل ۹ منحنی های تنش - کرنش مربوط به نمونه ها در دما های مختلف نشان داده شده است. برای تحلیل منحنی مذکور، نمونه مربوط به دمای ۳۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد انتخاب و در شکل ۱۱ مقایسه شده است. در این منحنی ۴ بخش A, B, C, و D با شیب های متفاوت قابل تفکیک است. ابتدای آزمایش، نمونه مقاومت زیادی از خود نشان داده و به همین جهت شیب نمودار نسبتاً زیاد و نمونه رفتاری الاستیک نشان داده است. با توجه به اینکه نمونه در مرحله آماده سازی تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفته، وجود چنین رفتاری در ابتدای بارگذاری طبیعی است. این محدوده برای نمونه ای که در دمای ۳۰ درجه آزمایش شده بیشتر از نمونه ای است که در دمای ۷۰ درجه آزمایش شده است. بنابر این با افزایش دما محدوده الاستیک کمتر می شود (بخش A). پس از این مرحله، نمونه همچنان مقاومت زیادی از خود نشان داده اما به علت به وجود آمدن ریز ترک ها، شیب نمودار کاهش یافته و نمونه وارد مرحله پلاستیک می شود (بخش B). نمونه ای که در دمای ۷۰ درجه آزمایش شده در سطح کرنش کمتری نسبت



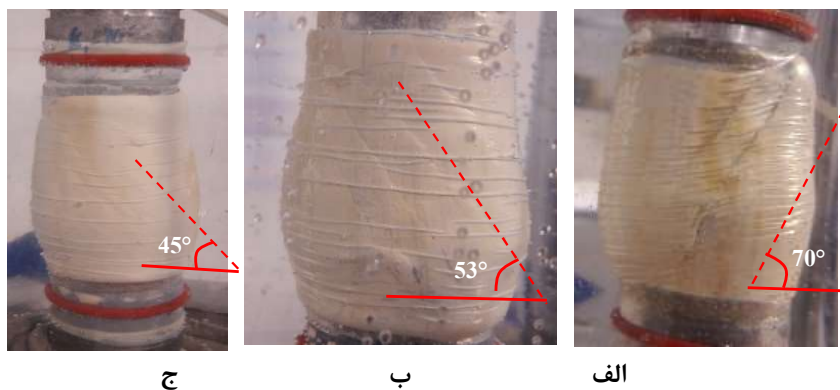
شکل ۱۰. تغییرات تنش محوری ناشی از انبساط نمونه (A_{ES}) با تغییر دما
Fig. 10. Axial stress expansion (A_{ES}) due to sample expansion with temperature change

۳-۳- آزمایش اندازه گیری Cu در دماهای مختلف

با توجه به قابلیت سیستم ساخته شده محدوده دمایی مورد بررسی بین ۱۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. از طرف دیگر برای اینکه روند یکسانی در مقایسه نتایج وجود داشته باشد، تغییرات دما در پله های ۱۰ درجه سانتیگراد اعمال شد. به منظور اطمینان از تکرارپذیری نتایج، در هر دما آزمایش بطور متوسط ۳ بار تکرار و نتایج به صورت نمودارهای تنش-کرنش نشان داده شد. با تکرار آزمایش تغییرات جزئی در نمودار تنش - کرنش و مقاومت نهایی اندازه گیری شده مشاهده می شود بر این اساس می توان گفت که نتایج آزمایش تکرارپذیر هستند. نمودارهای تنش - کرنش برای دماهای مختلف که بصورت میانگینی از آزمایش های انجام شده در آن دما است در شکل ۹ ارائه شده است. منحنی دماهای مختلف از لحاظ شکل کلی مشابه بوده اما نقطه حداکثر آنها متفاوت است.

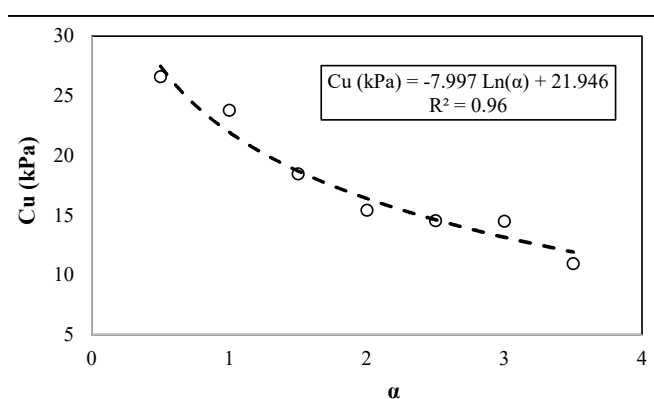
۳-۴- اندازه گیری تنش محوری ناشی از انبساط نمونه (A_{ES}) با دما

با توجه به اینکه کلیه نمونه های مورد مطالعه در شرایط اشباع هستند لذا زمانیکه در داخل سلول قرار گرفته و تحت تأثیر حرارت واقع می شوند، منبسط می شوند. با توجه به دو فازه بودن محیط (ذرات جامد خاک و آب)، امکان انبساط هر دو این فازها وجود دارد. انبساط نمونه باعث اعمال نیرو در راستای محوری به لودسل شده که با اندازه گیری آن می توان تنش محوری ناشی از انبساط نمونه (A_{ES}) در اثر تغییر دما را ثبت کرد. در شکل ۱۰ تغییرات این تنش در اثر



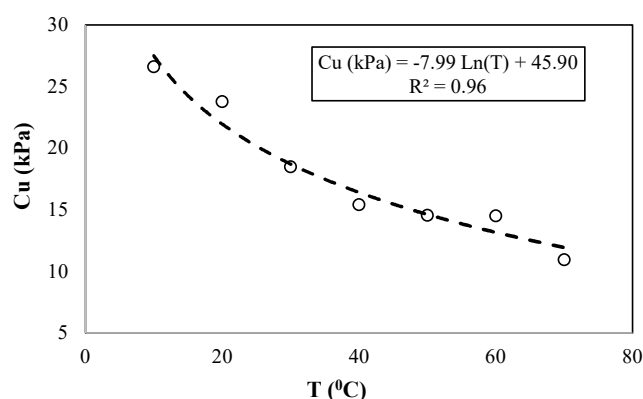
شکل ۱۲. مقایسه شکل گسیختگی نمونه ها در دماهای مختلف الف) ۱۰، ب) ۴۰ و ج) ۷۰ درجه سانتیگراد

Fig. 12. Comparison of rupture patterns of samples at different temperatures a) 10, b) 40 and c) 70 degrees celsius.



شکل ۱۴. تغییرات Cu با پارامتر α

Fig. 14. Changes Cu versus α



شکل ۱۳. تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده (Cu) در مقابل دما برای رس کائولینیت

Fig. 13. Changes in the undrained shear strength versus temperature for kaolinite

در ادامه بررسی ها، زاویه سطح گسیختگی و تغییر شکل نهایی نمونه در دماهای ۱۰، ۴۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد در شکل ۱۲ مورد بررسی قرار گرفته است. در نمونه گسیخته شده در دماهای پایین (۱۰ درجه سانتیگراد) ایجاد ترک و سطح گسیختگی در نمونه کاملاً مشخص بوده و زاویه سطح گسیختگی با افق حدود ۷۰ درجه اندازه گیری شده است. در دماهای بالاتر، تعداد صفحات شکست همانطور که در شکل ۱۲ ب نشان داده شده است بیشتر شده و زاویه این صفحات با افق نسبت به دمای پایین تر کاهش قابل ملاحظه ای دارد. در نمونه آزمایش شده در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد این زاویه با افق حدود ۵۳ درجه اندازه گیری شده است. با افزایش بیشتر دما و رسیدن به ۷۰ درجه سانتیگراد همانطور که در شکل ۱۲ ج نشان داده شده است، ضمن اینکه کاهش قابل ملاحظه ای در زاویه سطح

به نمونه ای که در دمای ۳۰ درجه آزمایش شده وارد این مرحله شده است. بنابر این با افزایش دما نمونه سریعتر وارد مرحله پلاستیک شده است. با افزایش بارگذاری، کرنش بیشتر شده و سطح گسیختگی های اصلی از به هم پیوستن ریز ترک ها به وجود می آیند. این موضوع سبب می شود شیب نمودار کم شده و نمونه مقاومت خود را از دست بدهد (بخش C). نمونه ای که در دمای ۷۰ درجه آزمایش شده نسبت به نمونه ای که در دمای ۳۰ درجه آزمایش شده بازای تنش کمتری وارد این بخش شده است. پس از به وجود آمدن شکستگی های اصلی، تغییر شکل های ایجاد شده در نمونه در سطح ثابتی از تنش ادامه یافته و شیب نمودار تنش - کرنش به حداقل می رسد (بخش D). بطور کلی با افزایش دما محدوده تغییر شکل الاستیک کاهش یافته و نمونه سریعتر وارد محدوده تغییر شکل پلاستیک شده است.

جدول ۲- مقادیر مقاومت نهایی و مقاومت برشی زهکش نشده بدست آمده از منحنیهای تنش - کرنش

Table 2. Final strength and undrained shear strength values obtained from stress-strain curves

70	60	50	40	30	20	10	T (°C)
21/89	29/00	29/07	30/83	36/94	47/55	53/21	q _u (kPa)
10/94	14/5	14/53	15/41	18/47	23/77	26/6	C _u (kPa)

جدول ۳- رده بندی خاک بر اساس مقاومت برشی زهکشی نشده

Table 3. Soil classification based on undrained shear strength

توصیف سفتی	C _u (kPa)		
	Tschebotarioff, 1973 [22]	Parcher and Means, 1968 [23]	Terzaghi and Peck, 1967 [24]
خیلی نرم	15	<12	<12/5
نرم	15-30	12-25	12-25/5
متوسط	30-60	25-50	25-50
سفت	60-120	50-100	50-100
خلی سفت	120-225	100-200	100-200
سخت	225<	200<	200<

خیلی نرم^۲ تغییر وضعیت دهد.

کاهش C_u با افزایش دما در نمونه ها ناشی از تغییر دو عامل در اثر تغییر دما است. عامل اول به نیروهای بین صفحات در ساختمان رس و عامل دوم به فشار آب منفذی در نمونه مربوط می شود. با توجه به ساختمان کانی کائولینیت که در آن صفحات گیبسیت و سیلیکا با پیوند هیدروژنی و نیروهای واندروالس ثانویه به هم متصل می شوند [۲۵]، افزایش دما باعث کاهش تاثیر پیوند مذکور شده و C_u نمونه را کاهش داده که مطابق با یافته های دی دونا و لالویی (۲۰۱۵) و دی براین و تیموس (۱۹۹۶) است [۳ و ۶]. از طرف دیگر از آنجا که نمونه اشباع است، با افزایش دما، فشار آب منفذی داخل نمونه افزایش یافته و این موضوع باعث کاهش C_u نمونه شده است. این موضوع با نتایج بدست آمده از تحقیقات دی براین و تیموس (۱۹۹۶)، لالویی (۲۰۰۱) و کامپانلا و میشل (۱۹۶۸) که بر روی رس ها در شرایط اشباع انجام شده مطابقت دارد [۴ و ۳ و ۱].

از آنجا که دمای معمول و متداول در آزمایشگاه حدود ۲۰ دمای مورد نظر است، در این مطالعه به منظور بدون بعد کردن دما، پارامتری به نام α به شرح رابطه ۱ تعریف شد.

شکستگی با افق بوجود آمده، تشخیص سطح گسیختگی نسبت به دماهای پایین تر دشوار شده است. برای نمونه آزمایش شده در این دما زاویه سطح گسیختگی با افق حدود ۴۵ درجه اندازه گیری شده است. این موضوع بخوبی نشان می دهد با افزایش دما ضمن کاهش زاویه سطح گسیختگی بدلیل شکل پذیرتر شدن رفتار نمونه ها سطوح گسیختگی بوضوح قابل رؤیت نیستند.

مقادیر تنش اصلی حداکثر از نمودارهای تنش - کرنش به ازای دماهای مختلف از شکل ۹ استخراج شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به شرایط آزمایش تنش اصلی حداقل در کلیه آزمایش ها برابر صفر است. با استفاده از داده های جدول ۲، تغییرات C_u با دما مطابق با شکل ۱۳ رسم شده است.

مطابق با شکل ۱۳، با افزایش دما، C_u کاهش می یابد، بطوری که مقدار آن از ۲۶/۶ کیلوپاسکال در دمای ۱۰ درجه سانتی گراد به ۱۰/۹۴ کیلوپاسکال در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد رسیده است. یعنی افزایش دما باعث کاهش ۲/۵ برابری در مقدار C_u نمونه شده است. طبقه بندی های مختلفی برای خاکهای ریزدانه بر اساس C_u توسط محققین مختلف ارائه شده است (جدول ۳). تغییرات دما در محدوده تحقیق حاضر باعث شده خاک از رده ی متوسط^۱ به رده ی

2 Very soft

1 Medium

مختلف یکسان بوده و منحنی مذکور بعد از تحمل کرنش حدود ۲۰٪ حالت خطی و ثابت پیدا می کند.

- مقاومت برشی زهکش نشده با افزایش دما کاهش می یابد بطوری که برای کائولینیت آزمایش شده Cu از حدود ۲۶/۶ دردمای ۱۰ درجه به ۱۰/۹۴ در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد می رسد. این بدان معنی است که خاک از رده متوسط به رده خیلی نرم کاهش مقاومت داده است. امکان ارائه یک رابطه تجربی لگاریتمی بین دما و Cu برای خاک مورد مطالعه در محدوده دمایی مورد نظر با ضریب تعیین ۰/۹۶ وجود دارد.

- دلیل کاهش Cu نمونه افزایش فشار آب منفذی بدلیل بالا رفتن دما و کاهش پیوندهای بین صفحات کانی رسی می باشد.

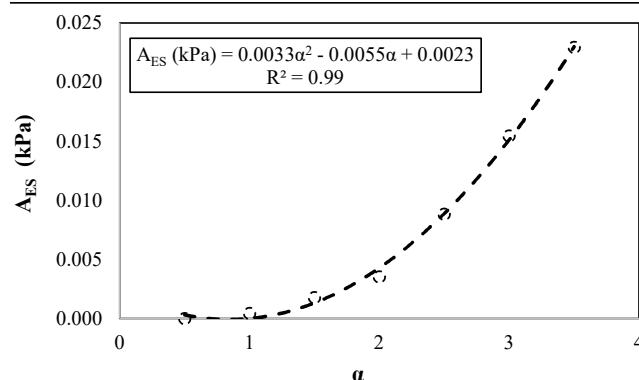
- بررسی نمونه ها در حین بارگذاری و زمان شکست نشان می دهد که زاویه سطح شکست نمونه ها با افزایش دما کاهش می یابد. صفحات شکست در نمونه هایی که در دمای ۱۰ درجه سانتیگراد آزمایش شده اند عموماً با افق زاویه ۷۰ درجه و نمونه هایی که در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد آزمایش شده اند، زاویه ۴۵ درجه می باشد.

- افزایش دما باعث افزایش محدوده تغییرشکل پلاستیک نمونه شده و انرژی پیوندهای بین لایه ای نمونه را کاهش داده، بطوریکه سطوح گسیختگی در دماهای بالا به سختی قابل رؤیت است.

- افزایش دما در شرایطی که بار محوری اعمال نشده، باعث انبساط نمونه می گردد. تغییرات تنش لازم برای جلوگیری از انبساط نمونه (A_{ES}) با افزایش دما روند خطی نداشته و شیب این تغییرات در دماهای بالا بیشتر است. امکان پیشنهاد رابطه تجربی بین دما و A_{ES} برای نمونه مطالعه شده وجود دارد.

۶- منابع

- [1] R.G. Campanella, J.K. Mitchell, Influence of temperature variations on soil behavior, Journal of Soil Mechanics & Foundations Div. 1968.
- [2] 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, 3(28) (2004) 228-209.
- [3] D. De Bruyn, J.F. Thimus, The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: the results of an initial laboratory programme, Engineering Geology, -1)41



شکل ۱۵- تغییرات تنش انبساطی با پارامتر α

(۱)

در شکل ۱۴ تغییرات Cu با پارامتر α نشان داده شده است. بر این اساس امکان ارائه رابطه ای تجربی (رابطه ۲) بین این دو متغیر وجود دارد.

$$Cu \text{ (kPa)} = -۷/۹۹ \ln \alpha + ۲۱/۹۵ \quad R^2 = ۰/۹۶ \quad (۲)$$

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شد، با افزایش دما، A_{ES} افزایش می یابد. در اینجا، با تعریف پارامتر α امکان بررسی تغییرات A_{ES} با پارامتر مذکور به شرح شکل ۱۵ وجود دارد. با توجه به این شکل رابطه ۳ بین A_{ES} و α نمونه وجود دارد.

$$A_{ES} \text{ (kPa)} = ۰/۰۰۳۳\alpha^2 - ۰/۰۰۵۵\alpha + ۰/۰۰۲۳ \quad R^2 = ۰/۹۹ \quad (۳)$$

۵- نتیجه گیری

به منظور بررسی تأثیر تغییر دما بر مقاومت برشی خاکهای رسی، سلولی با قابلیت تغییر دمای نمونه ساخته شد. نتایج آزمایش های انجام شده بر روی یک نمونه خاک رس کائولینیت قابلیت دستگاه در انجام آزمایش و تکرارپذیر بودن نتایج آنرا ثابت نمود. از طرف دیگر برای بررسی تأثیر تغییر دما بر Cu رس کائولینیت، نمونه هایی اشباع از این خاک با ویژگی های فیزیکی ثابت آماده و آزمایش جهت تعیین Cu در دماهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی گراد روی آنها انجام شد و نتایج زیر بدست آمد:

- شکل کلی منحنی های تنش کرنش نمونه ها در دماهای

- [13] H.M. Abuel-Naga, D.T. Bergado, A., Bouazza, Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay, *Engineering Geology*, 2-1(89) (2007) 154-144.
- [14] C. Li, G. Kong, H. Liu, H. Abuel-Naga, Effect of temperature on behavior of red clay–structure interface. *Canadian Geotechnical Journal*, 1)56) (2018) 134-126.
- [15] H. Yu, W. Chen, Z. Gong, Y. Ma, G. Chen, X. Li, Influence of temperature on the hydro-mechanical behavior of Boom Clay. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108, (2018)197-189 .
- [16] R. Bag, A. Rabbani, A., Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil. *Applied Clay Science*, (2017)136 , 7-1.
- [17] J. Graham, N. Tanaka, T. Crilly, M. Alfaro, Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays, *Canadian geotechnical journal*, 3)38) (2007) 621-608.
- [18] P. Kuntiwattanakul, I. Towhata, K.hishi, I., Seko, Temperature effects on undrained shear characteristics of clay, *Soils and Foundations*, 1)35) (1995) 162-147.
- [19] S.L. Houston, W.N. Houston, N.D. Williams, Thermo-mechanical behavior of seafloor sediments, *Journal of Geotechnical Engineering*, 11)111) (1995) 1263-1249.
- [20] A. Burghignoli, A. Desideri, S., Miliziano, Deformability of clays under non isothermal conditions, *RIG*, 4 (1992).
- [21] K.H. Head, R., Epps, *Manual of soil laboratory testing 1*, (2) (1980), London: Pentech Press.
- [22] G.P. Tschebotarioff, *Foundations, retaining and earth structures*, (1973) McGraw-Hill Book.
- [23] J.V. Parcher, R.E. Means, *Soil mechanics and foundations*, (1968) Charles E. Merrill, Columbus, Ohio.
- [24] K. Terzaghi, R.B. Peck, G. Mesri, *Soil mechanics in engineering practice*, (1996) John Wiley & Sons.
- [25] M.D. Braja, *Advanced soil mechanics*, (2008) Taylor & Francis, 270, pp.180-170.
- 4) (1996) 126-117.
- [4] L. Laloui, Thermo-mechanical behaviour of soils, *Revue française de génie civil*, 6)5) (2001) 843-809.
- [5] N. Yavari, A.M. Tang, J.M. Pereira, G. Hassen, Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil–structure interface, *Canadian Geotechnical Journal*, 7)53) (2016), 1194-1186.
- [6] A. Di Donna, A. Ferrari, L. Laloui, Experimental investigations of the soil–concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures, *Canadian Geotechnical Journal*, 4)53) (2015) 672-659.
- [7] Li, H., Zhu, Y., Zhang, J. and Lin, C., 2004. “Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay” *Cold regions science and technology*, 1)39), pp.45-39.
- [8] M.R. Shirazi, Effect of Temperature on hydro-mechanical behavior of compacted expansive soil, *Doctoral dissertation, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)* (2014).
- [9] T. Hueckel, R. Pellegrini, Effective stress and water pressure in saturated clays during heating–cooling cycles, *Canadian Geotechnical Journal*, 6)29) (1992) 1102-1095.
- [10] W.Z. Chen, Y.S. Ma, H.D. Yu, F.F. Li, X.L. Li, X., Sillen, Effects of temperature and thermally-induced microstructure change on hydraulic conductivity of Boom Clay, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3)9) (2017) 395-383.
- [11] G. Baldi, T. Hueckel, R. Pellegrini Thermal volume changes of the mineral–water system in low-porosity clay soils, *Canadian geotechnical journal*, 4)25) (1988) -807 825.
- [12] YJ. Cui, N. Sultan, P. Delage, A thermomechanical model for saturated clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, 3)37) (2000) 620-607.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Cheshomi, F. Mohammadi, A.M. Rajabi, *Investigation of the Effect of Temperature on the Undrained Shear Strength of Kaolinite*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(8) (2020) 1971-1982.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15768.6021](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15768.6021)

