نشریه علمی– پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دوره چهل وهفت، شماره ۱، تابستان ۱۳۹٤، صفحه ۹۹ تا ۱۰۸
Vol. 47, No. 1, Summer 2015, pp. 99-108

ارتقاء دستگاه آزمایش سه محوری جهت مطالعه رفتار مکانیکی- هیدرولیکی- حرارتی خاکها در دمای بالا

سعید سعیدی جم[1*]، نادر شریعتمداری[2]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، ایران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم وصنعت ایران،تهران، ایران

(دریافت۱۳۹۲/۱۱/۱۵، پذیرش۱۳۹٤/۱/۱۵)

چکیده

امروزه مطالعه رفتار مکانیکی- هیدرولیکی خاکها در دمای بالا مورد توجه محققین رشته ژئومکانیک قرار گرفته است. به خصوص بررسی رفتار موانع رسی و بستر طبیعی موجود در مراکز دفن عمیق ضایعات هسته ای که خاک در معرض دمای تا حدود ۱۲۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرد نیاز به ارتقاء دستگاههای معمول آزمایشهای مکانیک خاک را روزافزون نموده است. این مقاله روند طراحی، ساخت و کالیبراسیون سلول و اجزا دستگاه سه محوری که با نوآوری در حداکثر دمای قابل حصول، برای اولین بار در ایران انجام پذیرفته است مرور می کند. نتایج یک مطالعه بر رفتار مخلوط بنتونیت- ماسه به عنوان مانع مهندسی مرکز دفن، که با این دستگاه انجام شده ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی

رفتار مکانیکی- هیدرولیکی- حرارتی خاکها، آزمایش سه محوری، دمای بالا.

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: saeidijam@iust.ac.ir

۱- مقدمه

تغییرات دمایی در بسیاری از مسائل مهندسی ژئوتکنیک رخ می دهد وتاثیر این تغییرات در رفتار مهندسی خاک و سنگ یکی از موضوعات مورد توجه در این حوزه دانش خصوصا محدوده ژئومکانیک زیست محیطی[1] است. تاریخچه علاقه به تاثیر حرارت بر مسائل ژئوتکنیکی به دهه ۶۰ میلادی برمی گردد که اولین کنفرانس مربوط به ((تاثیر دما و حرارت بر رفتار مهندسی خاکها)) در واشنگتن برگزار شد. تولد این حیطه جدید در ژئوتکنیک به طور عمده به نیاز مهندسین راه به فهم و ارزیابی تاثیر دما بر رفتار مکانیکی خاکهای زیراساس بر می گردد. اما بعدا با توجه به نیازهای دیگر ژئوتکنیکی فهم نسبتا جامعی از رفتار مکانیکی- حرارتی انواع خاکها نیاز شد. به خصوص مطالعه امکان سنجی مراکز دفن ضایعات هسته ای در توده های زمین شناسی عمیق شامل بررسی تاثیر دما بر اجزاء مختلف اطراف سلولهای حاوی این ضایعات شامل لایه مهندسی خاکی و سنگ بستر و مرزهای این دو محیط یکی از اصلی ترین نیازهای بسط این شاخه از ژئوتکنیک بوده است.

یکی از اصلی ترین چالشها در این نوع مطالعات دستگاههای آزمایشگاهی است که قابلیت ایجاد و کنترل دماهای بالا را داشته باشد. بی تردید در مطالعات مکانیکی – هیدرولیکی خاکها آزمایش سه محوری از جمله شناخته شده ترین و عملی ترین ابزار موجود در دست محققین مکانیک خاک می باشد. اما از آنجا که دستگاههای معمول سه محوری تنها قابلیت تحمل دما تا حدود ۵۰ درجه را دارند نیاز به طراحی و ساخت دستگاه با قابلیت کنترل دماهای بالا می باشد که شرحی از تجربیات سایر محققین و روند طراحی، ساخت و کالیبراسیون دستگاه سه محوری در دانشگاه علم و صنعت ایران در این مقاله ارائه می شود.

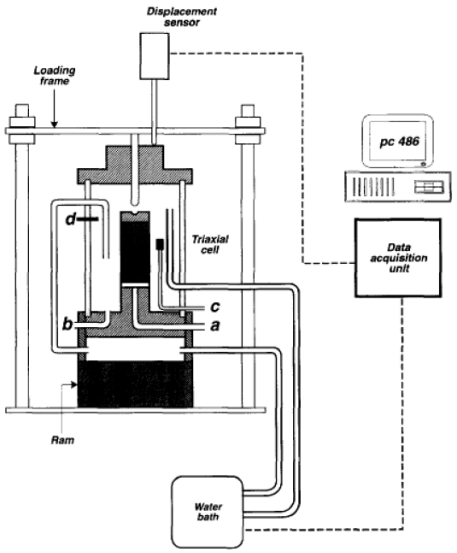
۲- مروری بر تجربیات سایر محققین

به منظور انجام آزمایشهای مکانیکی در دمای بالا و تحلیل رفتار مکانیکی- حرارتی خاکها نیاز به ابزار آزمایشگاهی متناسب است که قابلیت تغییر دما و اعمال حرارت و ثبت قرائتهای مربوط به دما را علاوه بر مکانیسم و تجهیزات در دمای معمول داشته باشد. از آنجا که به این منظور دستگاه استانداردی تولید نشده است معمولا طراحی و ساخت به صورت ابتکاری توسط محقق انجام می شود به گونه ای که اثرات نامطلوب دمای بالا بر اجزاء سیستم به حداقل رسیده و امکان اعمال دمای هدف به نمونه در حداقل زمان ممکن فراهم شود. اولین دستگاههای مکانیکی- حرارتی با قابلیت تغییر دما مربوط به دستگاههای تحکیم بود که معمولا تا دمای ۶۰ درجه امکان افزایش دما وجود داشت. در این دستگاهها معمولا با افزایش دمای آب اطراف نمونه در سلول تحکیم اعمال حرارت به نمونه انجام می شد. سپس دستگاههای سه محوری با قابلیت کنترل دما طراحی و ساخته شد که اولین مورد آن توسط کمپنلا و میچل [۱] گزارش شده است. از آن زمان تاکنون دستگاههای سه محوری معدودی در بعضی از دانشگاهها و مراکز تحقیقاتی ساخته شده است که قابلیت اعمال حرارت به نمونه را داشته است.

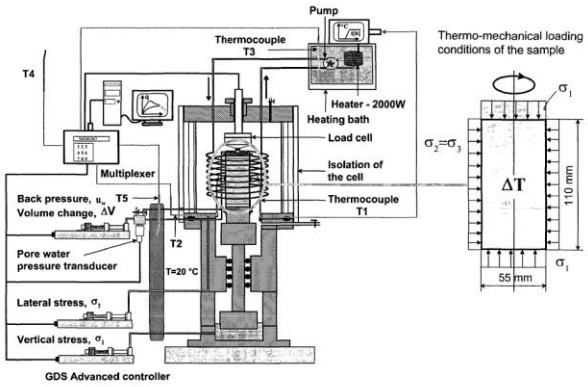
در مقایسه دستگاههای آزمایشگاهی با قابلیت افزایش دما، آنچه سلولهای سه محوری و تجهیزات مربوط به آنها را از یکدیگر متمایز می کند روش اعمال حرارت به نمونه است. این روشها را در یک نگاه کلی به سه دسته اصلی می توان تقسیم بندی کرد: اول اعمال حرارت به وسیله سیال در حال دوران، دوم اعمال حرارت با هیترهای داخلی و سوم اعمال حرارت با هیترهای جانبی.

۲-۱- روش اعمال حرارت به وسیله سیال در حال دوران

سلول سه محوری مکانیکی- حرارتی که توسط بعضی از محققین از جمله برایان و تیموس [۲] و سکروواک [۳] طراحی شد از یک سیستم آب چرخان حول نمونه به عنوان یک هیتر خارجی نمونه استفاده می کند. اجزاء اصلی این سیستم حرارت دهی عبارتند از: یک کنترل کننده دما، یک پمپ سانتریفوژ و یک مبدل حرارتی[2]. حرارت به وسیله یک هیتر ترموستاتیک تامین می شود. سیستم در این حالت معمولا قادر به ایجاد دمای بین ۲۰ تا ۹۰ درجه است. در بعضی موارد مانند دستگاه برایان و تیموس (شکل ۱) آب داغ در حال چرخش وارد سلول شده و به عنوان سیال محصور کننده هم استفاده می شود. در این حالت مشخص نیست که چگونه فشار همه جانبه اعمال می شود. سنسورهای حرارتی نیمه هادی دمای نمونه و آب سلول را اندازه می گیرند. مولفین گزارش داده اند که سلول سه محوری فوق الذکر اجازه حرارت دهی سریع به سیال نمونه را می دهد که می تواند یک دمای ثابت و یکنواخت حاصل شود. این موضوع در آزمایشهای مکانیکی- حرارتی که در شرایط زهکشی نشده انجام شده به عنوان یک نکته مثبت به حساب می آید. اگر آب در حال چرخش هم وظیفه تبادل حرارتی و هم سیال محصور کننده را بر عهده داشته باشد عملا باید فشار پمپ سانتریفوژ و فشار سلول یکسان باشد که حصول این امر



شکل (۱): سلول سه محوری برایان و تیموس

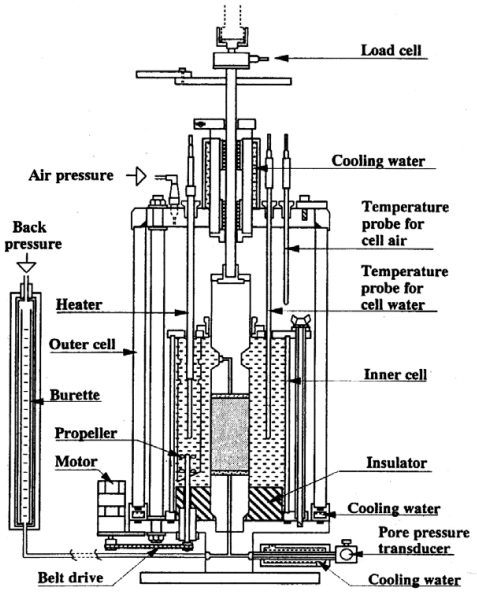


شکل (۲): سلول سه محوری سکروواک در دانشگاه لوزان

آسان نیست. لذا ابهاماتی در ساخت با این شرایط وجـود دارد. اما اگر چنانکه در سیستم سکروواک (شکل ۲) استفاده شده است این دو سیال از یکدیگر جدا شوند این مشکلات حل خواهد شـد. الگوی اصلی مورد استفاده در طراحی دسـتگاه ایـن تحقیـق نیـز همین روش می باشد.

۲-۲- روش اعمال حرارت با هیترهای داخلی

کانتی واتاناکول و همکاران [۴] یک دستگاه سه محوری با سیستم حرارت دهی با هیترهای داخلی استفاده کردند (شکل ۳). این دستگاه شامل دو سلول است: یک سلول داخلی و یک سلول خارجی. سلول داخلی با آب پر شده است که یک هیتر با توان متغیر مستقیما در آب غرق شده تا دمای آن را کنترل



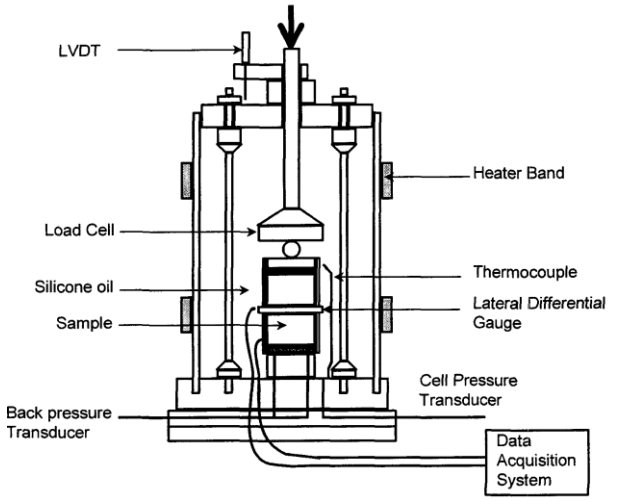
شکل (۳): دستگاه سه محوری با کنترل دما ساخت کانتی واتاناکول و همکاران

نماید. جهت یکنواخت کردن دمای آب یک پروانه کوچک درون سلول قرار گرفت. سلولهای داخلی و خارجی با هوا از یکدیگر جدا شدند تا به عنوان یک عایق، مانع تماس سلول خارجی با آب داغ سلول داخلی شود. فشار سلول با فشار هوا کنترل می شد. کانتی واتاناکول گزارش کرد که یک نکته منفی این روش طراحی، حل شدن هوا در آب داخل سلول و سرانجام انتشار آن در غشای نمونه است. دمای سلول تا ۹۰ درجه بالا رفته و فشار جانبی تا ۵۰۰ کیلوپاسکال را تحمل می کرد. سیستم حرارت دهی مشابهی توسط موریتز [۵] و دمارس و چارلز [۶] استفاده شد. موریتز جهت افزایش دما در سلول سه محوری از سه صفحه فویل داخل سلول استفاده کرد. به این ترتیب دما تا ۷۰ درجه با دقت ±۰/۱ درجه سانتی گراد قابل افزایش بود. البته به نظر می رسد یکنواختی میدان دما مورد سوال است.

۲-۳- روش اعمال حرارت با هیترهای جانبی

بالدی و همکاران [۷] یک سلول سه محوری طراحی کردند که دما از خارج از سلول اعمال می شد. در طراحی ایشان سیستم حرارت دهی شامل یک نوار هیتر انعطاف پذیر سیلیکونی متصل به سلول و دو المنت در پایین پدستال سلول بود. دمای این هیترها به صورت هوشمند به وسیله ترموکوپل هایی در مجاورت هر هیتر تنظیم می شد. به این ترتیب دما از ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد قابل افزایش بود. اما عدم یکنواختی میدان

حرارتی مشکل این سیستم بود. لینگ نائو و همکاران [۸] نیز طراحی مشابهی استفاده کردند به جز آنکه فقط نوارهای هیتر جانبی را داشته اند (شکل ۴). دیلیگ و همکاران [۹] نیز از سیستم مشابهی استفاده کردند.



شکل (۴): سلول سه محوری با کنترل دما ساخت لینگ نائو و همکاران

اولین بار کمپنلا و میچل [۱] نیز دستگاه سه محوری با قابلیت کنترل دما را با همین الگو برای مطالعات خزش در رسهای اشباع ساختند. سلول استاندارد سه محوری در یک اطاق گرم کننده حاوی هوا در دمای بالا قرار گرفت. دمای هوای داخل اطاق با استفاده از ترموستات کنترل دمای هوا تنظیم شد. این تجهیزات قادر به کنترل دمای نمونه بین ۵ تا ۶۰ درجه با دقت ۰/۳ درجه سانتی گراد بود.

در مجموع با مروری بر روشهای مختلف ساخت دستگاه سه محوری با قابلیت کنترل دما به نظر می رسد روش اول یعنی اعمال حرارت با سیال در حال دوران، بهترین عملکرد را در ایجاد یک میدان حرارتی یکنواخت دارد. ملاحظه می گردد که بهترین سیستم حرارت دهی آن است که مستقل از بخشهای دیگر سلول و مکانیسمهای اعمال فشار باشد. امکان انتشار هوا در نمونه با این روش بسیار کم و زمان رسیدن نمونه به یک دمای معین نسبت به هیترهای جانبی یا خارجی کمتر است. محدودیت اصلی در این سیستمها رسیدن به دمای بالاتر از ۱۰۰ درجه بوده که عملا عمده مطالعات را تا دمای ۹۰ درجه سانتی گراد محدود کرده است. این محدودیت بیشتر مربوط به حرکت آب داغ در سایر اجزاء سیستم که تحمل دمای بالا را نداشته اند می باشد. ضمنا استفاده از آب به عنوان عامل انتقال حرارت از حمام آبی به سلول، همواره با مشکل تبخیر و نرخ کند افزایش دما همراه بوده است.

۳- طراحی، ساخت و کالیبراسیون دستگاه سه محوری با قابلیت کنترل دما در ایران

مشکل اصلی دستگاههای سه محوری با قابلیت کنترل دما که در بخش ۲ بررسی شد عدم امکان افزایش دما به دلیل محدودیتهای سایر بخشهای مجموعه سه محوری به جز سلول اصلی شامل دستگاه اعمال فشارها و کنترل کننده ها و نیز وجود تبخیر در سیستم آب داغ مجموعه است. به منظور افزایش سطح دما تا حد ۱۲۰ درجه سانتی گراد تغییری در سیستم سیال در حال دوران و نیز ورودی آب داغ مجموعه سلول به بخشهای اعمال فشار و کنترل کننده ها با عمل خنک کردن سریع انجام گردید. در این بخش اجزاء سیستم ساخته شده در مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت تشریح و عملیات کالیبراسیون خاص این مجموعه توضیح داده می شود.

۳-۱- تشریح دستگاه

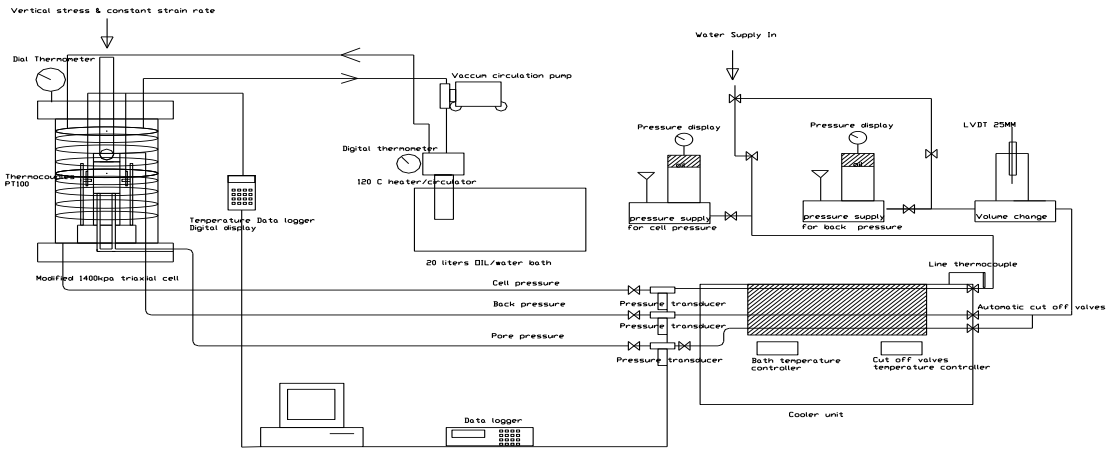
در طراحی سیستم این پروژه تحقیقاتی، اجزاء دستگاه سه محوری با قابلیت کنترل دما (شکل ۵) عبارتند از:

سیستم تامین، کنترل و قرائت دما
سیستم تامین،کنترل و قرائت فشار
سیستم خنک کننده تجهیزات حساس به دما
سیستم بارگذاری و قرائت نیرو و تغییر مکان
سلول با قابلیت تحمل دما تا ۱۲۰درجه سانتی گراد

سیستم تامین، کنترل و قرائت دما شامل حمام روغن دیجیتال جهت گرم کردن سیال تا دمای مورد نظر و گردش روغن در داخل مجموعه گرمکن تعبیه شده در سلول سه محوری، به عنوان سیستم تامین کننده و کنترل دما می باشد. حجم حمام ۲۰ لیتر، جنس آن فولاد ضد زنگ و دارای شیر تخلیه می باشد و همچنین یک مقسم از جنس پلکسی گلاس جهت تفکیک فضای حمام به دوبخش جهت کم کردن فضای گرمکن در نظر گرفته شده است. جهت تسریع عمل انتقال گرما ازیک پمپ مکنده درمسیرانتقال سیال به مجموعه لوله های مدور (کندانسور) استفاده شده است.

حداکثر دمای قابل تولید توسط این حمام ۱۲۰ درجه و با دقت ۰/۱ درجه سانتی گراد می باشد و می توان از آب یا روغن هیدرولیک یا سیلیکون با ویسکوزیته حداکثر ۱۰۰ سانتی استوکس استفاده کرد.

گرمای ایجاد شده توسط حمام به وسیله کندانسور به آب داخل سلول سه محوری انتقال می یابد. قطر لوله کندانسور ۸ میلی متر و جنس آن از فولاد زنگ نزن می باشد. قسمت بیرونی آن توسط اتصال آسان بازشو به سایز ۶ میلی متر به شیلنگهای انتقال دهنده روغن داغ متصل شده است. لوله کندانسور و



شکل (۵): ترکیب دستگاه سه محوری با قابلیت کنترل دما تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد آزمایشگاه تحقیقاتی ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران

شیلنگها تحمل دما تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد و قابلیت تحمل فشار تا ۳/۵ مگاپاسکال را دارند. قرائت دما توسط دو حسگر حساس PT100 که کنار نمونه داخل سلول به فاصله ۴ میلی متر از لبه نمونه، روی دوپایه آلومینیومی نصب شده انجام می گیرد و اطلاعات نهایتا به دستگاه دیجیتال قرائت و ثبت داده ها[۳] با دقت ۰/۱ سانتی گراد و در نهایت به رایانه منتقل می گردد. با توجه به دما و فشار داخل سلول برای جلوگیری از نشت آب، داخل حسگر با رزین مخصوص پر شده است. کابل متصل به حسگر از نوع پی وی سی و دارای پوشش فلزی می باشد تا جلوی نفوذ آب به داخل کابل گرفته شود. هم چنین جهت اطمینان بیشتر، یک لایه پلاستیک جمع شونده روی قسمت انتهایی کپسول PT100 و نیز ۷۳ سانتی متر از طول کابل که داخل سلول قرار می گیرد کشیده شده است. روغن استفاده شده در سیستم حرارت دهی که به کندانسور ارسال می گردد روغن هیدرولیک دارای ویسکوزیته ۵ سانتی استوکس و قابلیت تحمل دما تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد است.

سیستم تامین، کنترل و قرائت فشار شامل دو دستگاه فشارآب- روغن با حداکثر ظرفیت ایجاد فشار ۳/۵ مگاپاسکال می باشد. دقت کنترل فشار آن کمتر از ۲± کیلوپاسکال است. روغن استفاده شده در این تجهیزات، روغن IP HYDRUS HI68 می باشد. این دستگاهها قادر به ثابت نگهداشتن فشار روی مقدار تعیین شده می باشند و در صورت افزایش یا کاهش فشار در مجموعه سیستم تا حد امکان با جابجایی روغن به داخل مخزن یا خارج ازمخزن، فشار را ثابت نگه می دارند. از این تجهیزات توسط سیستم خنک کننده، حفاظت به عمل می آید.

قرائت فشارها توسط سه حسگر الکترونیک ۱/۷ مگاپاسکال که به ترتیب در مسیر لوله های فشار محفظه، فشار ثانوی و فشار منفذی قرار گرفته اند قرائت می گردد و به دستگاه ثبت داده ها انتقال می یابد. محدوده دمایی کارکرد این حسگرها ۲۰- تا۱۲۰+ درجه سانتی گراد می باشد و این حسگرها طبق استانداردIP65 وIP66/68 آب بندی شده اند و در برابر مواد ساینده و شیمیایی مقاوم می باشند.

سیستم خنک کننده تجهیزات حساس به دمای بالا، دارای حمام آبی است که توسط یک کمپرسور یخچالی خنک می شود. لوله های مسی که سلول سه محوری را به دستگاههای اعمال فشار متصل می کنند داخل این حمام آب قرار دارند. یک پمپ چرخاننده[۴] مستغرق، دمای داخل حمام را یکنواخت می کند. سه شیر برقی توسط کنترل کننده دیجیتال تنظیم شده تا در صورت بالا رفتن دما از محدوده ایمن (۵۰ درجه) مانع از انتقال آب گرم به سمت دستگاههای کنترل فشار و سلول اندازه گیری تغییر حجم می گردند. یک کنترل کننده دیجیتال دیگر مسوولیت تنظیم سرمای حمام آب را دارد. این سیستم از لحاظ تحمل فشار تا ۱/۵ مگاپاسکال مقاومت دارد.

حسگرهای اندازه گیری فشار با توجه به مقاومت در برابر دما تا ۱۲۰ درجه، بین این سیستم و سلول سه محوری قرار گرفته اند. شیرهای اتوماتیک پنل راست دستگاه خنک کننده توسط ترموکوپل کنترل می شوند و کاربر، امکان تعریف دما جهت سیال خروجی را دارد. در پنل سمت چپ سه حسگر قرائت فشار نصب شده که قابلیت تحمل دما تا ۱۲۰ درجه را دارند.

سیستم اعمال بار و قرائت نیرو و تغییر مکان شامل قاب بارگذاری ۵۰ کیلو نیوتنی همراه حسگرهای نیرو و تغییر مکان می باشد. این قاب، بارگذاری را با نرخ جابجایی مشخص انجام می دهد. حسگرهای نیرو و تغییر مکان، قرائت خود را به دستگاه ثبت داده ها و در نهایت به رایانه انتقال می دهند. این دستگاه قادر است درمحدوده ۰/۰۰۰۰۱ تا ۵۰/۸ میلی متر بردقیقه بارگذاری نماید و دارای عملکرد تغییرمکان سریع و مجهز به

سوئیچهای خودکار محدودکننده حرکت فک بارگذاری می باشد.

سلول با قابلیت تحمل دما تا ۱۲۰درجه سانتی گراد از جنس آلومینیمی با ده پیچ نگهدارنده می باشد و جداره آن ازجنس پرسپکس به ضخامت ۲۵ میلی متر می باشد و می تواند در دمای عادی، بدون گارد تا ۱/۴ مگاپاسکال فشار را تحمل نماید و در دمای۱۲۰درجه با

گارد، تا ۱ مگاپاسکال تحمل فشار دارد. جهت افزایش مقاومت سلول در دماهای بالا و جلوگیری از تغییر شکل آن، گارد محافظی از ورق فولادی به ضخامت یک میلی متر دور جداره نصب گردیده که توسط جوش آرگون و پرچ فولادی به دو نبشی نمره ۳ متصل شده است. جهت اعمال نیروی پیش تنیدگی ۳ عدد پیچ و مهره فولادی در۳ نقطه دو نبشی را به هم نزدیک می کنند. فاصله بین جداره سلول و ورق فولادی توسط یک لایه نسوز پرکن پر می شود. از این لایه، جهت توزیع یکنواخت فشار گارد فولادی و نیز عایق کردن بدنه سلول استفاده می شود.

قرائت دما در اطراف نمونه با فاصله قابل تنظیم بین حداقل۴ میلی متر و حداکثر ۱۰ سانتی متر توسط دو عدد ترموکوپل انجام می شود. ترموکوپلها روی دو پایه که دارای گیره های قابل تنظیم می باشند نصب می گردند که خود پایه ها روی پله پداستال قرار دارند. محل ورود ترموکوپلها بالای سلول است که این محل به سایز یک چهارم اینچ سوراخ شده که توسط گلند فولادی مجهز به جمع کن لوله و چسب پی وی سی مقاوم در برابر حرارت از داخل سلول آب بندی شده است.

جهت نظارت بیشتر و امکان کنترل دما بدون مراجعه به رایانه یا دستگاههای الکترونیک و به عنوان ضریب اطمینان، یک دماسنج عقربه ای ۲۵۰ درجه در قسمت بالای سلول نصب شده تا دمای قسمت فوقانی سلول را نمایش دهد. پایه این دماسنج داخل آب سلول است و برای عملکرد سریع آن حد فاصل کپسول بیرونی و میله قرائت کننده دما با آب خالص مقطر پر شده تا دمای واقعی سریعتر به میله قرائت دماسنج منتقل گردد.

جهت حذف اصطکاک بین میله بارگذاری و کلاهک نمونه از گلوله فولادی استفاده شده است تا فقط نیرو در راستای محوری به نمونه وارد شود. جهت آب بند کردن میله بارگذاری در دمای بالا یک عدد حلقه لاستیکی مقاوم در برابر حرارت بین بوش اصلی و میله بارگذاری نصب گردیده وحد فاصل بوش اصلی و حلقه فسفر برنز با چسب پی وی سی مقاوم در برابر حرارت پر شده است. هم چنین برای جلوگیری از خروج حلقه فسفر برنز در حرارت و فشار بالا این حلقه از بیرون توسط دو عدد گیره فولادی آلن خور مهار گردیده است.

جهت بازدید داخل سلول، در دیواره گارد و لایه پرکن سه سوراخ به قطر۴۰ میلی متر تعبیه شده و می توان توسط منبع روشنایی نصب شده در صورت نیاز داخل سلول را بازرسی نمود.

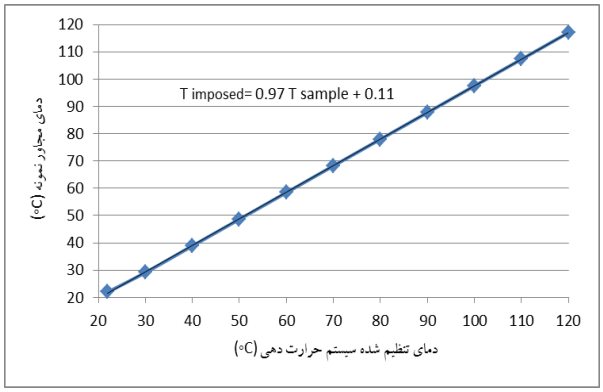
در این دستگاه سه محوری از انواع حلقه لاستیکی دور نمونه (o-ring) سیلیکون با قابلیت تحمل دمای تا ۱۳۰ درجه سانتی گراد استفاده شده و غشاء دور نمونه از جنس نئوپرن مقاوم تا دمای ۱۳۰ درجه، به قطر ۴۷ میلی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر و به ضخامت ۰/۴ میلی متر می باشد.

۳- ۲- روند کالیبراسیون

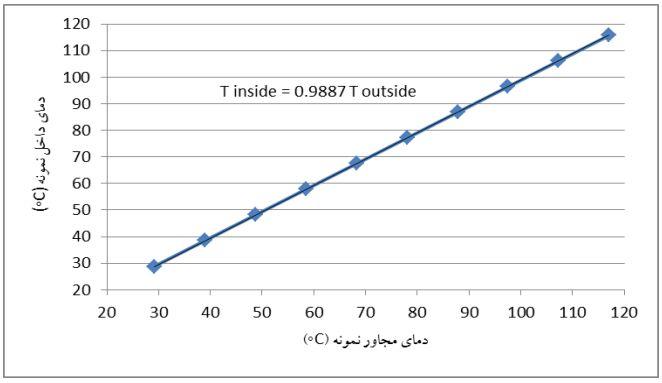
پیش از استفاده از دستگاه سه محوری و پس از کالیبره نمودن حسگرها، حلقه بارگذاری و LVDTها، با عنایت به خاص بودن این سیستم لازم است عملیات کالیبراسیون قرائت دما و تاثیر دمای بالا بر اجزاء مختلف سیستم به عمل آید. به عنوان اولین گام رابطه میان دمای داخل نمونه خاکی با دمای قرائت شده توسط حسگر قرار گرفته در فاصله ۴ میلی متری آن استخراج شد. به این منظور یکی از حسگرهای داخل سلول در هسته یک نمونه بنتونیت- ماسه قرار گرفت و حسگر دیگر در حداقل فاصله (۴ میلی متر) نمونه قرار گرفت. دمای سیستم در گامهای ۱۰ درجه افزایش و در هر مرحله، پس از ثبات دما، قرائت هر دو ترموکوپل انجام شد. هم چنین رابطه دمای تنظیم شده در سیستم حرارت دهی با دمای قرائت شده در مجاور نمونه قرائت شد تا معیاری جهت تنظیم دما در آزمایشهای اصلی به دست آید. نمودارهای شکلهای ۶ و ۷ به ترتیب رابطه دمای سیستم حرارت دهی با دمای مجاور نمونه و تغییرات دما در داخل نمونه را با دمای مجاور نمونه نشان می دهد. بر این اساس رابطه های ۱ و ۲ جهت تصحیح لازم در آزمایشهای اصلی استخراج شد.

$$T_{outsample} = 1.03T_{imposed} - 0.11 \qquad (۱)$$

که در آن Timposed دمای تنظیم شده در سیستم اعمال حرارت و Tout sample دمای قرائت شده در مجاورت نمونه بر حسب



شکل (۶): رابطه دمای تنظیم شده در سیستم حرارت دهی و دمای قرائت شده مجاور نمونه



شکل (۷): رابطه دمای مجاور و دمای قرائت شده در داخل نمونه

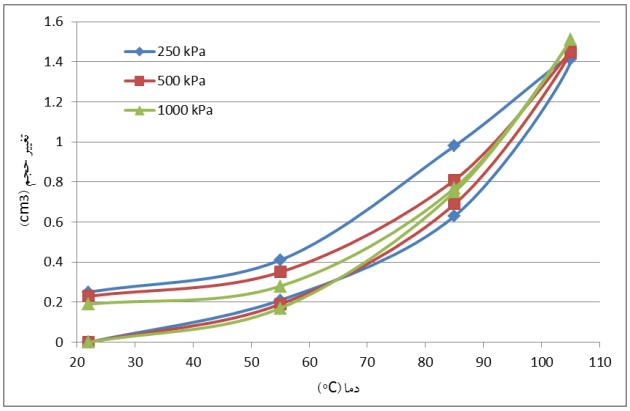
سانتی گراد است.

$$T_{in\,sample} = 0.9887\,T_{outsample} \qquad (۲)$$

که در آن Tin sample دمای داخل نمونه است.

به این ترتیب در حین آزمایش بر اساس دمای هدف در داخل نمونه، دمای سیستم حرارت دهی بر اساس معادلات ۱ و ۲ تنظیم می شود. ضمنا به طور متناوب دما در اطراف نمونه با دو ترموکوپل و در سیستم حرارت دهی ضبط و ثبت می شود. قرائتهای دما نشان داد که در گامهای ۱۰ درجه از زمان تنظیم یک دمای معین در سیستم حرارت دهی تا رسیدن دمای داخل نمونه به تعادل، حداقل ۳۰ دقیقه زمان لازم است. یکی از نکات مثبت سیستم روغنی در حرارت دهی، همین بازده بالای مشاهده شده در اعمال دما، در مقایسه با دستگاههای با سیستم حرارت دهی آبی است.

مهمترین بخش کالیبراسیون دمایی سیستم، تغییر حجم بر اثر اعمال فشار همه جانبه و دما می باشد که علاوه بر تغییر حجم نمونه، شامل تغییر حجم سلول، شیلنگها و سایر اجزاء سیستم می باشد. در این قسمت با استفاده از یک نمونه برنجی به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر مقادیر تغییر حجم سیستم



شکل (۸): تغییر حجم سیستم در دما و فشارهای همه جانبه مختلف

در فشار همه جانبه ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال و دماهای ۲۲، ۵۵، ۸۵

و ۱۰۵ درجه سانتی گراد وسپس کاهش دما در همان گامها اندازه گیری شد. تغییر حجم نمونه برنجی با درنظر گرفتن مدول الاستیسیته ۹۷ GPa، نسبت پواسن ۰/۳۵ و ضریب انبساط حرارتی ۲/۰۹E-۵ بر درجه سانتی گراد و استفاده از رابطه ۳ محاسبه و در رابطه ۴ لحاظ و نهایتا رابطه ۵ با اغماض از اثر تفاوت فشار همه جانبه، جهت تغییر شکل سیستم استخراج شد. شکل ۸ تغییرات حجم در فشارهای همه جانبه مختلف بر حسب دما را نشان می دهد.

$$\Delta V_d = V[\frac{3\sigma_c}{E}(1-2\nu) - 3\beta\Delta T] \qquad (۳)$$

$$\Delta V = \Delta V_d + \Delta V_{cell} \qquad (۴)$$

$$\Delta V_{cell} = 2\times10^{-6}T^3 - 0.0001T^2 + 0.003T + 0.06 \qquad (۵)$$

که در این روابط ΔVd تغییر حجم نمونه برنجی، V حجم نمونه، σc فشار همه جانبه، E مدول الاستیسیته، υ نسبت پواسن، β ضریب انبساط حرارتی نمونه، ΔT تغییر دما، ΔV تغییر حجم کل سیستم، ΔVcell تغییر حجم سلول و سایر اجزاء سیستم و T دمای مجاور نمونه بر حسب سانتی گراد است.

۴- مصالح و روشها

در مرکز دفن ضایعات هسته ای از دو نوع مانع ژئوتکنیکی جهت کنترل انتشار آلودگی رادیواکتیو بهره برداری می شود. اول بستر میزبان سنگی (به طور مثال توف در کوهستان یوکا[۵] در مرکز دفن ضایعات هسته ای نوادا آمریکا) یا گنبد نمکی (به طور مثال مرکز دفن آزمایشی آسه[۶] آلمان) یا رس سخت (به عنوان نمونه توده رس اپالینوس[۷] در سوئیس). دوم لایه مانع مهندسی که تاکنون از بنتونیت [۱۰] (به طور مثال فی بیکس[۸] در اسپانیا) یا مخلوط بنتونیت و ماسه [۱۱] (به طور مثال در کانادا، سوئد، سوئیس، بلژیک) یا حتی مخلوط بنتونیت و خرده سنگ

گرانیت [۱۲] (به طور نمونه در آمریکا) استفاده شده است. به طور خلاصه آنچه در هر دو لایه اهمیت دارد نفوذپذیری کم به منظور جلوگیری از انتشار رادیونوکلوئیدها،

مشخصات فیزیکی و شیمیایی	مقدار
آنالیز XRD	مونت موریلونیت- کوارتز- کلسیت
نام خاک	CH
حد روانی (٪)	۳۲۱
دامنه خمیری (٪)	۲۸۵
حداکثر وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	۱/۵۱
رطوبت بهینه (٪)	۲۴
CEC (cmol/kg soil)	۶۸/۵
G_s	۲/۷۸
pH (1:10 soil:water)	۹/۵
SSA (m^2/gr)	۴۲۰

جدول (۱): مشخصات بنتونیت باریت

قابلیت جذب و نگهداشت بالای یونهای آزاد شده، جلوگیری از ورود آبهای زیرزمینی به محدوده محفظه های فولادی حاوی ضایعات، قابلیت خود ترمیمی، نفوذپذیری کم در برابر گازها و البته مقاومت مناسب مکانیکی به منظور تامین پایداری مرکز در برابر تنشهای قائم و نیز ناشی از زلزله یا سایر نیروهای زمین ساختی است. در خصوص لایه مهندسی که موضوع این تحقیق می باشد گزینه بنتونیت خالص به دلیل داشتن نفوذپذیری کم البته گزینه مناسبی بوده است اما به دلیل مقاومت نسبتا کم خصوصا در شرایط اشباع و عدم امکان تراکم تا درجات بالا، امروزه در بسیاری از کشورها از مطلوبیت کافی برخوردار نیست. در حال حاضر به عنوان بهترین گزینه مخلوط بنتونیت- ماسه ۱:۱ به عنوان لایه مهندسی مراکز دفن ضایعات هسته ای شناخته می شود.

در این تحقیق از یکی از مشهورترین بنتونیتهای موجود در ایران که در پروژه های صنعت نفت، در آب بندی و به عنوان لایه مانع مهندسی استفاده می شود به نام بنتونیت شرکت باریت فلات ایران بهره برداری شد. مشخصات عمومی این خاک در جدول شماره ۱ ارائه شده است. در تعیین CEC از روش هندرشوت [۱۳] استفاده شد. جهت تعیین سطح مخصوص ویژه از روش اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر (EGME) که توسط دنتل ارائه شده است استفاده گردید [۱۴].

ماسه مورد استفاده در این تحقیق، ماسه استاندارد فیروزکوه ۱۶۱ با Gs، ۲/۶۶ می باشد. D50 این ماسه ۰/۳ میلی متر است. پس از اختلاط ۱:۱ مشخصات مخلوط که کاملا تحت تاثیر رفتار بنتونیت می باشد به شرح جدول ۲ ارائه شده است. جهت نمونه سازی بر اساس محاسبه، میزان خاک و آب

جدول (۲): مشخصات مخلوط بنتونیت- ماسه ۱:۱

مشخصات فیزیکی و شیمیایی	مقدار
حد روانی (٪)	۲۹۰
دامنه خمیری (٪)	۲۵۵
حداکثر وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	۱/۷۸
رطوبت بهینه (٪)	۲۱/۵
مشخصات فیزیکی و شیمیایی	مقدار
حد روانی (٪)	۲۹۰
دامنه خمیری (٪)	۲۵۵
حداکثر وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	۱/۷۸
رطوبت بهینه (٪)	۲۱/۵

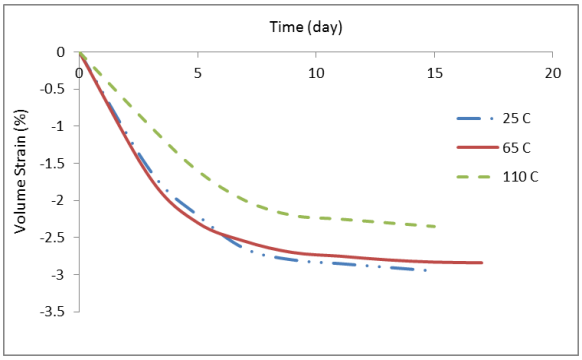
مقطر لازم جهت رسیدن به یک نمونه به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر حالت اشباع در وزن مخصوص مورد نظر (۹۵ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر) تعیین می گردد. سپس آب مقطر به ماسه اضافه و به تدریج، بنتونیت به مخلوط آنها افزوده می گردد. پس از هم زدن مکانیکی و همگن کردن مخلوط، به مدت دو هفته در کیسه پلاستیکی بسته و جهت رسیدن به تعادل رها می گردد. در این مدت نیز چندین بار مخلوط به هم زده شده و همگن می شود بدون آنکه درب کیسه باز شود. سپس در لوله فولادی به قطر ۵۰ میلی متر ریخته و با فشار استاتیکی پیستون تا ارتفاع ۱۰۰ میلی متر متراکم می شود.

۵- نتایج آزمایش سه محوری در دماهای مختلف

در این بخش نتایج یک سری آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) بر نمونه بنتونیت- ماسه که توسط این دستگاه انجام شده ارائه گردیده است. انجام این آزمایشها شامل دو مرحله بوده است: اول تحکیم (یا تورم) در فشار همه جانبه ۶۰۰ کیلوپاسکال در دمای تعیین شده و دوم برش نمونه در شرایط زهکشی نشده و دما وفشار همه جانبه ثابت. افزایش دما هم زمان با اعمال فشار تحکیم با نرخ ۵ درجه سانتی گراد بر ساعت انجام گردید. به این ترتیب عملا افزایش دما تا به طور مثال تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد در ۲۴ ساعت اول به اتمام رسید. تغییر حجم کمتر از ۰/۲ سانتی متر مکعب طی ۲۴ ساعت به $(\Delta\varepsilon_V \le 0.1\%/day)$ عنوان معیار تعادل تحکیم (یا تورم) در نظر گرفته شد؛ زیرا در خاکهای خیلی خمیری آنچه بیش از انزال فشار آب حفره ای اهمیت دارد به تعادل رسیدن تغییر شکل خمیری ناشی از بارگذاری مکانیکی یا حرارتی است. در مرحله دوم نیز انجام برش با نرخ کرنش ۰/۵ میلی متر بر دقیقه انجام گردید. از نتایج آزمایش اندازه گیری فشار تورم در ادومتر که

توسط مولفین بر نمونه بنتونیت- ماسه با نسبت تخلخل ۰/۶۶ انجام شد این فشار به میزان حدود ۱ مگاپاسکال برآورد می شود. لذا در این سری آزمایشها با فشار سلول ۶۰۰ کیلوپاسکال، نمونه دچار تورمی به میزان حدود ۳ درصد گردید (شکل ۹). چنانکه در نمودار ملاحظه می شود با افزایش دما از میزان تورم نمونه کاسته شده است.

بر اساس تئوری لایه دوگانه هلموتز- اسمولوچوفسکی[۱۵]،

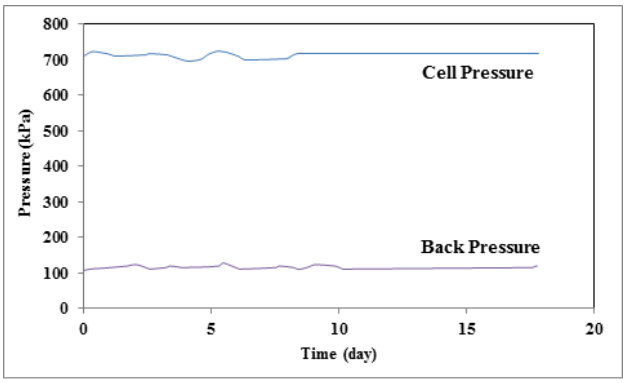


شکل (۹): تغییر حجم نمونه در مرحله تحکیم تحت فشار همه جانبه ۶۰۰ کیلوپاسکال در دماهای مختلف

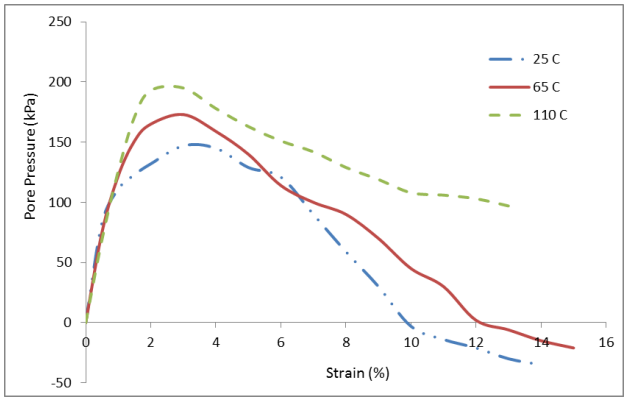
ضخامت لایه دوگانه با افزایش دما افزایش می یابد و لذا افزایش حجم نمونه انتظار می رود اما در عین حال ثابت دی الکتریک (D) با افزایش دما، کاهش می یابد و در نتیجه افزایش دما بر حاصلضرب DT تقریبا کم اثر است. از طرف دیگر افزایش دما باعث خروج آب میان لایه ای شده که الزاما باعث انقباض ساختار ذره رس می شود و کاهش سطح مخصوص ذره رسی (SSA) نیز در اثر این انقباض حادث می گردد. کاهش سطح مخصوص رس خود می تواند نشانی از کاهش خصوصیات خمیری با سیکل اول افزایش دماست.

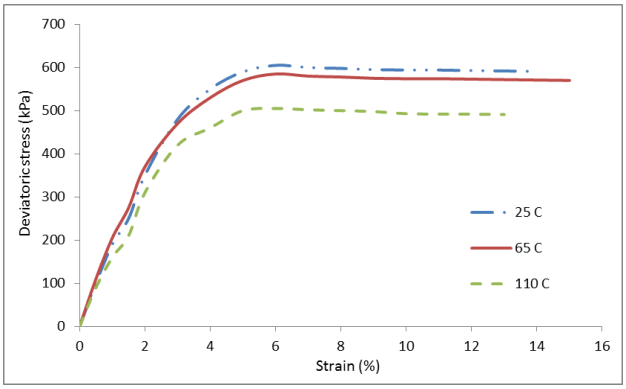
نمودارهای شکل ۱۰ تغییرات فشار همه جانبه سلول و پس فشار اعمال شده در طی روند تحکیم را نشان می دهد. چنانکه ملاحظه می گردد سیستم اعمال فشار به خوبی توانسته است این فشارها را تقریبا ثابت نگهدارد.

پس از تعادل تورم، نمونه با نرخ کرنش تعیین شده، برش داده شد. چنانکه در شکل ۱۱ دیده می شود نمونه ها به حالت نرم، گسیخته شده و پس از رسیدن به حداکثر مقاومت، دچار نرم شوندگی کرنش شده اند. حداکثر مقاومت در کرنش محوری حدود ۵ درصد حاصل گردید اما برش تا حدود ۱۵ درصد ادامه یافت تا شرایط مقاومت حالت بحرانی حاصل شود. از نمودار می توان افت حداکثر مقاومت و مقاومت حالت بحرانی را با افزایش دما ملاحظه کرد. به این ترتیب افزایش دما از ۲۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد، سبب کاهش حدود ۲۰ درصدی در حداکثر مقاومت نمونه بنتونیت- ماسه شده است



شکل (۱۰): تغییرات فشار همه جانبه سلول و پس فشار در مرحله تحکیم تحت فشار ۶۰۰ کیلوپاسکال در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد





شکل (۱۱): تغییرات تنش انحرافی و فشار آب حفره ای در مرحله برش در دماهای مختلف (فشار تحکیم: ۶۰۰ کیلوپاسکال)

از نمودار پایین شکل ۱۱ دیده می شود که تغییر فشار آب حفره ای در دماهای بالاتر بیشتر است. رفتار نمونه در دمای بالاتر کاملا انقباضی بوده در حالی که در دماهای کمتر، ابتدا انقباضی و سپس به سمت رفتار انبساطی متمایل شده است.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

مروری بر روشهای مختلف ساخت دستگاههای سه محوری با قابلیت کنترل دما انجام شد. با جمع بندی این روشها، مناسبترین روش در ایجاد یک میدان حرارتی یکنواخت، استفاده از روش سیال در حال دوران انتخاب شد.

۱- با استقرار یک دستگاه خنک کننده در مدار چینش دستگاه سه محوری امکان حصول دمای تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد در سلول و در نتیجه نمونه خاک فراهم شد بدون آنکه سنسورها یا سیستمهای اعمال فشار نیاز به تحمل دماهای بالا داشته باشند.

۲- استفاده از روغن هیدرولیک در سیستم حرارت دهی دستگاه، عملکرد مناسبی در افزایش دمای نمونه داشته است.

۳- انجام آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده بر یک نمونه بنتونیت- ماسه نشان دهنده آن است که با افزایش دما از ۲۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد تا حدود ۲۰ درصد از مقاومت حداکثر نمونه کاسته می شود. رفتار نرم شوندگی کرنش در نمودارهای تنش- کرنش این مصالح مشهود است. رفتار نمونه در دمای بالاتر کاملا انقباضی بوده در حالی که در دماهای کمتر، ابتدا انقباضی و سپس به سمت رفتار انبساطی متمایل شده است.

۷- مراجع

[۱] Campanella R.G.; Mitchell J.K.; "Influence of Temperature Variations in Soil Behavior", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, vol. 94, no.SM3, pp. 709- 734, 1968.

[۲] De-Bruyn D.; Thimus J. F.; "The Influence of Temperature on Mechanical Characteristics of Boom Clay: The results of an Initial Laboratory Programme", Engineering Geology, vol. 41, pp. 117- 126, 1996.

[۳] Cekerevac C.; Laloui L.; "Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 28, pp. 209- 228, 2004.

[۴] Kuntiwattanakul P.; Towhata I.; Ohishi K.; Seko I.; "Temperature Effects on Undrained Shear Characteristics of Clay", Soils and Foundations, vol. 35, no.1, pp. 147- 162, 1995.

[۵] Moritz L.; "Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperature", Swedish Geotechnical Institute, no. 47, Linkoping, 1995.

[۶] Demars K.R.; Charles R.D.; "Soil Volume Changes Induced by Temperature Cycling", Canadian Geotechnical Journal, vol. 19, pp. 188-194, 1982.

[۷] Baldi G.; Hueckel T.; Pellegrini R.; "Thermal Volume Changes of the Mineral-Water System in Low-Porosity Clay Soils", Canadian Geotechnical Journal, vol. 25, pp. 807- 825, 1988.

[۸] Lingnau B.E.; Graham J.; Tanaka N.; "Isothermal Modelling of Sand-Bentonite Mixtures at Elevated Temperatures", Canadian Geotechnical Journal, vol. 32, pp. 78- 88, 1995.

[۹] Delage P.; Sultan N.; Jun Cui Y.; "On Thermal Consolidation of Boom Clay", Canadian Geotechnical Journal, vol. 37, p.p. 343-354, 2000.

[۱۰] Villar M.V.; Sanchez M.; Gens A.; "Behaviour of a Bentonite Barrier in the Laboratory: Experimental Results up to 8 Years and Numerical Simulation", Journal of Physics and Chemistry of the Earth, vol. 33, pp. 5476- 5485, 2008.

[۷] Komine H.; "Simplified Evaluation on Hydraulic Conductivities of Sand-Bentonite Mixture Backfill", Applied Clay Science, vol. 26, pp. 13-19, 2004.

[۱۲] Mata C.; Guimaraes L.; Ledesma A.; Gens A.; Olivella S.; "A Hydro-geochemical Analysis of Saturation Process with Salt Water of a Bentonite Crushed Granite Rock Mixture in an Engineered Nuclear Barrier", Engineering geology, vol. 81, pp. 227- 245, 2005.

[۱۳] Hendershot W. H.; Duquette M.; "A Simple Baruim Chloride Method for Determining Cation Exchange Capacity and Exchangeable Cations", American Journal of Soil Sciences Society, no. 50, pp. 605- 608, 1986.

[۱۴] Dentel S. K.; Use of Organic-Clay Adsorbent Materials for Groundwater Treatment Applications, Final Report for Delaware State Water Research Institute, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, Newark, DE, 168, 1996.

[۱۵] Mitchell J. K.; Soga K.; "Fundamentals of Soil Behavior", 3nd Ed., Wiley, New York, 558 p, 2005.

۸- زیرنویس ها

۱ Environmental Geomechanics
۲ Heat exchanger
۳ Data logger
٤ Circulator
٥ Yucca Mountain
٦ Asse
۷ Opalinus clay
۸ FEBEX