



پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک

توسعه حرارتی مدل هیدرومکانیک خاک های غیر اشباع

توسط:

زهرا محمدی

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم زاده

زمستان ۱۳۹۹

بسم الله الرحمن الرحيم

تأییدیه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم : زهرا محمدی

را با عنوان: توسعه حرارتی مدل هیدرومکانیک خاک های غیر اشباع

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما			
۲- استاد مشاور			
۳- استاد مشاور			
۴- استاد ممتحن			
۵- استاد ممتحن			
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی			

پدر و مادر عزیزم

به پاس محبت های بی درنشان که هرگز فروکش نمیکند.

هزار شکر و هزاران پاس نردوان را...

تلاشی است کوچک در ادامه مسیری ارزشمند

که به پاس راهنمایی های استاد کرامت قدرم دکتر حسن قاسم زاده آن را اینگونه به سرانجام می رسانم

تا همیشه قدردان زحمات ایشان خواهیم بود.

باشد که عمری به یادگار بماند...

چکیده

قرار گرفتن رس اشباع در دماهای بالا سبب تغییراتی در حجم، رفتار هیدرولیکی و نیز مقاومت برشی خاک می‌شود. دفن زباله‌های هسته‌ای در اعماق زمین، سازه‌های ژئوترمال، حفاری‌های نفتی، روش‌های حرارتی بهبود خواص خاک و ... مواردی از دلایل بررسی و مطالعه رفتار حرارتی خاک می‌باشند. در مخازن زیرزمینی دفع زباله‌های هسته‌ای، جهت جلوگیری از نشت آلاینده‌های هسته‌ای شناخت واکنش‌ها و رفتار هیدرولیکی خاک ضرورت پیدا می‌کند. مطالعات گسترده‌ای از تأثیرات دما بر رفتار خاک وجود دارد. اما واقعیت این است که رفتار و واکنش خاک در برابر تغییرات دمایی دشوار و پیچیده است، بنابراین نیاز به شناخت بهتر و وسیع‌تر از مکانیسم خاک به صورت یکپارچه وجود دارد. در این پایان‌نامه یک مدل رفتاری ترمو هیدرو مکانیک برای پیش‌بینی رفتار خاک‌های رسی غیراشباع در دماهای مختلف ارائه شده است. این مدل بر پایه مدل ارائه شده توسط قاسم‌زاده و همکاران می‌باشد. در این تحقیق مدل مذکور توسعه حرارتی یافته است و می‌تواند تأثیرات متقابل دما را بر رفتار تنش- کرنش و نیز رفتار هیدرولیکی بررسی نماید. پلاستیسیته سطوح زیر بارگذاری و سطوح مرزی با وارد کردن مفهوم حرارت در مدل به ترتیب جهت بیان رفتار ترمو مکانیکی و ترمو هیدرولیکی در خاک‌های غیراشباع بیان شده‌اند و با استفاده از قوانین سخت شوندگی توأم رفتار ترمو هیدرو مکانیک موجود مدل شده است. مدل بیان شده می‌تواند تغییرات حرارتی منحنی‌های مرزی هیدرولیکی را نشان دهد و می‌تواند تأثیر کرنش پلاستیک حرارتی را بر رفتار مکانیکی خاک‌های عادی تحکیم و بیش تحکیم یافته بررسی نماید و نیز تأثیر توأم دما و مکش و در نتیجه رفتار ترمو هیدرولیکی موجود در خاک را بیان کند. در انتها نتایج به دست آمده از پیش‌بینی مدل با داده‌های به دست آمده از انجام آزمایش‌ها بر روی خاک‌های غیراشباع صحت سنجی گردید که نتایج قابل قبولی حاصل شد.

کلیدواژه: مدل رفتاری ، ترمو هیدرو مکانیک، خاک غیراشباع، رفتار الاستو پلاستیک، تسلیم حرارتی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها.....	ج
فهرست شکل‌ها.....	د
فصل ۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- تعریف مسئله.....	۲
۲-۱- هدف تحقیق.....	۲
۳-۱- روش تحقیق.....	۳
۴-۱- ساختار تحقیق.....	۳
فصل ۲- مروری بر تاریخچه تحقیقات.....	۴
۱-۲- مقدمه.....	۵
۲-۲- تأثیر درجه حرارت بر هدایت هیدرولیکی.....	۵
۳-۲- تأثیر درجه حرارت بر منحنی مشخصه آب SWCC.....	۷
۴-۲- تأثیر درجه حرارت بر رفتار تغییر حجم.....	۱۱
۵-۲- تأثیر درجه حرارت بر فشار پیش تحکیمی.....	۱۲
۶-۲- سایر مدل‌های ترمو هیدرو مکانیک برای خاک‌های غیراشباع.....	۱۵
۷-۲- جمع‌بندی.....	۱۹
فصل ۳- الگوی ترمو هیدرو مکانیک پیشنهادی.....	۲۱
۱-۳- مقدمه.....	۲۲
۲-۳- کلیات سطح زیر بارگذاری.....	۲۲
۱-۲-۳- معادلات رفتاری الاستو پلاستیک.....	۲۴
۳-۳- کلیات پلاستیسیته سطوح مرزی.....	۲۷
۱-۳-۳- ساختار مدل.....	۲۸
۴-۳- اساس مدل ترمو هیدرو مکانیک پیشنهادی.....	۲۹
۱-۴-۳- متغیرهای تنش در خاک‌های غیراشباع.....	۳۰

۳۱	کرنش‌های الاستیک و پلاستیک.....	۳-۴-۲
۳۱	سطوح تسلیم.....	۳-۴-۳
۳۴	رفتار ترمو هیدرو مکانیک مدل پیشنهادی.....	۳-۴-۴
۳۴	رفتار هیدرولیکی مدل موجود.....	۳-۴-۴-۱
۳۷	رفتار حرارتی خاک غیراشباع.....	۳-۴-۴-۲
۳۹	رفتار ترموهیدرولیکی مدل پیشنهادی.....	۳-۴-۴-۳
۴۰	رفتار ترمو مکانیکی.....	۳-۴-۴-۴
۴۲	قوانین سخت شوندگی توأم.....	۳-۴-۴-۵
۴۳	روابط الاستو پلاستیک.....	۳-۴-۵
۴۳	کرنش حجمی الاستیک، کرنش برشی الاستیک و سهم حجمی آب الاستیک.....	۳-۴-۵-۱
۴۳	کرنش حجمی و برشی پلاستیک.....	۳-۴-۵-۲
۴۶	سهم حجمی آب پلاستیک.....	۳-۴-۵-۳
۴۹	نتیجه گیری.....	۳-۵

فصل ۴- کالبراسیون و صحت بخشی‌شدهای..... ۵۰

۵۱	مقدمه.....	۴-۱
۵۱	تعیین فراسنج های مورد استفاده در مدل.....	۴-۲
۵۲	کالبراسیون.....	۴-۳
۵۲	صحت سنجی قسمت ترمو هیدرولیکی با خاک Pear Clay.....	۴-۴
۵۷	مقایسه نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی خاک رس بورک.....	۴-۵
۶۹	شبه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی خاک رس بوم.....	۴-۵-۱
۷۱	آنالیز حساسیت.....	۴-۶
۷۴	نتیجه گیری.....	۴-۷

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهاد..... ۷۵

۷۶	نتیجه گیری.....	۵-۱
۷۷	پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق.....	۵-۲
۷۸	فهرست مراجع.....	

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳ روابط A,B,C,D,E.....	۴۵
جدول ۱-۴: فراسنج‌های مکانیکی و هیدرولیکی و حرارتی.....	۵۳
جدول ۲-۴ فراسنج‌های شبیه‌سازی مدل با داده‌های آزمایشگاهی.....	۵۸
جدول ۳-۴ پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی.....	۷۰

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ تغییرات هدایت هیدرولیکی افقی با دما [۴].....	۶
شکل ۲-۲ تغییرات نفوذپذیری ذاتی با دما [۴].....	۷
شکل ۳-۲ منحنی مشخصه آب و خاک در حجم ثابت و در دماهای مختلف در مسیرهای خشک شدن و تر شدن برای بنتونیت متراکم در دانسیته ثابت [۳].....	۸
شکل ۴-۲ تغییرات مکش اندازه‌گیری شده برای بنتونیت FEBEX (نقاط و خطوط ممتد) و مقادیر محاسباتی با در نظرگیری تغییرات در کشش سطحی آب (خطوط خط‌چین) [۳].....	۹
شکل ۵-۲ تغییرات حجم برای خطوط عادی تحکیم یافته در دماهای مختلف برای خاک‌های اشباع [۷].....	۱۰
شکل ۶-۲ نمودار SWRC برای خاک‌های عادی تحکیم یافته تحت دماهای مختلف [۷].....	۱۰
شکل ۷-۲ تغییرات حجم حرارتی رس تحت حرارت دهی سیکلی با سه نسبت پیش تحکیمی مختلف [۱۲].....	۱۲
شکل ۸-۲ پاسخ مکانیکی مواد در مسیر حرارت دهی در نسبت‌های پیش تحکیمی مختلف [۱۷].....	۱۴
شکل ۹-۲ تغییرات فشار پیش تحکیمی با دما که با آزمایش‌های ادمتری در دماهای مختلف [۱۸].....	۱۵
شکل ۱۰-۲ تغییرات ضرایب λ و κ در مکش‌ها و دماهای مختلف [۲۲].....	۱۶
شکل ۱۱-۲ منحنی بارگذاری-فروریزش در صفحه p-s در دماهای مختلف [۲۲].....	۱۷
شکل ۱۲-۲ شبیه‌سازی کرنش حجمی ایجادشده توسط تنش اصلی و تنش معادل ناشی از تغییر دما [۳۲].....	۱۹
شکل ۱-۳ سطوح تسلیم نرمال و زیر بارگذاری [۳۵].....	۲۳
شکل ۲-۳ تغییرات تابع U با تغییرات R.....	۲۶
شکل ۳-۳ منحنی هیستریزیس ماده تحت شرایط بارگذاری و باربرداری [۳۷].....	۲۸
شکل ۴-۳ نمای شماتیک از سطوح تسلیم در فضای تنش‌های $p^* - q - s$	۳۳
شکل ۵-۳ نمای شماتیک از سطح تسلیم حرارتی.....	۳۳
شکل ۶-۳ مدل SWCC ارائه‌شده توسط ویلر و همکاران [۴۰].....	۳۴
شکل ۷-۳ اندازه‌گیری منحنی SWCC برای ماسه خوب دانه‌بندی شده.....	۳۵
شکل ۸-۳ منحنی SWCC.....	۳۶

- شکل ۹-۳ مقایسه شیب خط حالت بحرانی در دمای ۲۲ و ۹۰ درجه سانتی گراد [۴۳]..... ۴۲
- شکل ۱۱-۳ رابطه بین حرارت و کرنش الاستیک حرارتی [۴۵]..... ۴۸
- شکل ۱-۴ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه محوری و مرطوب شونده میان تغییرات کرنش محوری و کرنش حجمی..... ۵۴
- شکل ۲-۴ مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه محوری مرطوب شونده میان تغییرات کرنش و نسبت تنش محوری به جانبی..... ۵۴
- شکل ۳-۴ مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه محوری و مرطوب شونده و خشک‌شوندگی میان تغییرات درجه اشباع و نسبت تنش محوری به جانبی..... ۵۵
- شکل ۴-۴ مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی و مدل ارائه‌شده توسط مورالیتاران و همکاران..... ۵۶
- شکل ۵-۴ بررسی اثرات دما بر منحنی‌های مرزی..... ۵۷
- شکل ۶-۴ نمودار سطح تسلیم گسیختگی در دماهای مختلف..... ۵۹
- شکل ۷-۴ تغییرات سطح تسلیم در دماهای مختلف..... ۶۱
- شکل ۸-۴ کالیبره کردن پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه‌جانبه (تنش خالص - حجم مخصوص) در دماهای مختلف..... ۶۳
- شکل ۹-۴ کالیبره کردن پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه‌جانبه (تنش خالص - حجم مخصوص) در مکش‌های مختلف..... ۶۵
- شکل ۱۰-۴ منحنی مشخصه آب و خاک در دماهای مختلف..... ۶۷
- شکل ۱۱-۴ تغییرات حجم مخصوص در برابر دما در مکش‌های مختلف..... ۶۹
- شکل ۱۲-۴ تغییرات کرنش حجمی حرارتی در برابر تغییرات دما در نسبت‌های پیش تحکیمی مختلف [۴۹]..... ۷۱
- شکل ۱۳-۴ تأثیر تغییرات ضریب انبساط حرارتی در پیش‌بینی مدل و مقایسه با داده آزمایشگاهی..... ۷۱
- شکل ۱۴-۴ تأثیر پارامتر β در پیش‌بینی مدل و مقایسه با داده آزمایشگاهی..... ۷۲
- شکل ۱۵-۴ تأثیر پارامتر η بر رفتار خاک غیراشباع و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ($T=60$)..... ۷۳
- شکل ۱۶-۴ تأثیر پارامتر γ و α بر شبیه‌سازی خاک و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی..... ۷۴

فصل ۱-

مقدمه

۱-۱- تعریف مسئله

با پیشرفت صنعتی کشورها، مسائل گوناگونی که فهم دقیقی از رفتار خاک در دمای بالاتر از دمای محیط را نیاز خواهد داشت پدید آمده است. تحقیقات نشان می‌دهد که قرار گرفتن رس اشباع در دماهای بالا سبب تغییراتی در حجم و همچنین در مقاومت برشی می‌شود. دفن پسماندهای هسته‌ای در اعماق زمین، فناوری ذخیره و بازیافت انرژی، ذخیره انرژی گرمایی در سفره‌های آب زیرزمینی و چاه‌ها، سازه‌های ژئوترمال، حفاری‌های نفتی و فعالیت‌های تزریق و تولید، حرارت ایجادشده در اطراف کابل‌های فشارقوی، تغییر دمای خاک با تغییر دمای محیط، القای حرارت در اثر حرکات زمین، روش‌های حرارتی برای بهبود خواص خاک و یا پاک‌سازی خاک از آلاینده همگی از مواردی هستند که لزوم بررسی دقیق رفتار خاک‌ها را در دماهای بالا به اثبات می‌رسانند. تحقیق پیرامون اثر افزایش دما بر رفتار مهندسی خاک‌ها به دهه ۳۰ بازمی‌گردد، اما در دهه‌های اخیر رفتار ترمو هیدرو مکانیکی خاک موضوع بسیاری از مطالعات بوده است. تحقیقات اخیر بیشتر به دفن زباله‌های هسته‌ای و سازه‌های ژئوترمال مربوط می‌شوند. از میان موارد بالا، کاربرد و رفتار شمع‌های حرارتی به‌طور ویژه در کتاب ساختمان‌های مدرن و انرژی تجدید پذیر شمع‌های حرارتی [۱] بیان شده است که برای تحلیل رفتار این شمع‌ها فهم رفتار ترمو هیدرو مکانیکی خاک‌ها موردنیاز می‌باشد.

همچنین در سال‌های اخیر، محققان به‌خوبی متوجه اهمیت تأثیرات دما بر ویژگی‌های هیدرو مکانیکی محیط‌های متخلخل شده‌اند. تلاش‌های زیادی برای درک عمیق از رفتار خاک در ابعاد و جنبه‌های مختلف انجام شده است. یکی از جنبه‌های مهم برای مطالعه کمی رفتار تنیده ترمو هیدرو مکانیک در محیط متخلخل ایجاد یک مدل ریاضی THM^۱ کارآمد است.

۱-۲- هدف تحقیق

در دو دهه گذشته تحقیقات بسیاری بر روی رفتار ترمو هیدرو مکانیکی خاک‌های ریزدانه اشباع در دماهای تا 100°C صورت گرفته است. این مطالعات به‌وضوح نشان می‌دهد که افزایش دمای خاک‌های ریزدانه اشباع بر رفتار مهندسی خاک تأثیر می‌گذارد. اما باوجود مطالعات گسترده انجام‌شده تاکنون هنوز نکات مجهول زیادی در ارتباط با رفتار ترمو هیدرو مکانیک خاک‌های غیراشباع وجود دارد که لازم است با انجام تحقیقات بیشتر روشن شوند. لذا در این تحقیق تلاش شده است یک مدل تنیده ترمو هیدرو مکانیک در فضای تنش‌های سه محوری برای پیش‌بینی رفتار رس‌های غیراشباع ارائه شود.

1 Thermo Hydro Mechanic

از آنجایی که طبق نتایج تجربی و نظری تاریخچه تنش خاک‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر رفتار حرارتی تأثیر می‌گذارد مطالعات بر روی اثرات حرارتی خاک‌های عادی تحکیم یافته و بیش تحکیم یافته شروعی برای توسعه یک مدل ترمو الاستو پلاستیک معتبر می‌باشد.

بدین منظور در این تحقیق از یک مدل هیدرو مکانیک معتبر جهت اضافه کردن اثر حرارت و نیز در نظر گرفتن اثرات OCR در تغییرات حجمی استفاده شده است و عملکرد مدل در شرایط زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

(۱) تغییرات حجمی در اثر حرارت دهی و خنک کردن (یعنی مکانیسم تغییر شکل حرارتی همه‌جانبه)

(۲) پاسخ خاک در تحکیم سه محوری در دمای ثابت

(۳) تغییرات حرارتی منحنی‌های مرزی

(۴) تغییرات حرارتی سطوح تسلیم

۱-۳- روش تحقیق

در این تحقیق بر اساس جستجو در مقالات و پایگاه‌های اطلاعاتی، کتاب‌های مرجع و پایان‌نامه‌ها، اقدام به مطالعه و بررسی پیرامون مدل‌های موجود نموده و پس از انتخاب مدل هیدرو مکانیک مناسب جهت تعمیم و توسعه آن، برنامه کامپیوتری روابط حاصل نوشته شده و در پایان به مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

پس از آن با استفاده از پلاستیسیته‌های سطح زیر بارگذاری و مشابه‌سازی مفهوم افزایش حرارت با برداشتن تنش رفتار ترمو مکانیکی بررسی می‌نماییم، برای بیان رفتار توأم ترمو هیدرولیکی نیز از پلاستیسیته سطوح مرزی با وارد کردن روابط دما استفاده می‌کنیم و بدین صورت اقدام به توسعه حرارتی مدل مبنا نموده و با نوشتن برنامه کامپیوتری مدل ترمو هیدرو مکانیک ارائه شده به صحت سنجی آن می‌پردازیم.

۱-۴- ساختار تحقیق

این تحقیق به‌طور کلی دارای ۶ فصل می‌باشد:

فصل اول شامل کلیات تحقیق می‌باشد. در فصل دوم به آشنایی با اثرات حرارت در خاک‌های غیراشباع در مدل‌های رفتاری ترمو هیدرو مکانیک و تاریخچه‌ای از تحقیقات انجام شده تاکنون پرداخته می‌شود. در فصل سوم الگوی مدل‌سازی رفتار ترمو هیدرو مکانیک خاک‌های رسی غیراشباع ارائه شده است. در فصل چهارم به نحوه‌ی کالیبراسیون مدل پیشنهادی و صحت سنجی آن توسط مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی پرداخته‌ایم و در فصل پنجم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای تحقیقات بعدی را بیان نموده‌ایم.

مروری بر تاریخچه تحقیقات

۲-۱- مقدمه

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد تغییرات دما اثرات بسزایی در رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌ها دارد. هرگونه تغییر در درجه حرارت خاک می‌تواند منجر به تغییرات اساسی رفتار خاک و تأثیرگذار در طراحی‌های مخازن زیرزمین گردد. لذا از گذشته‌های دور بررسی عملکرد خاک در دماهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در این فصل اثرات حرارت بر عوامل تأثیرگذار در رفتار خاک‌های غیراشباع و نیز گزیده‌ای از مطالعات انجام‌گرفته توسط محققین مختلف پیرامون موضوع بررسی می‌گردد. در پژوهش حاضر، سعی بر استفاده از فرضیات صحیح و منطقی این مطالعات و نیز رفع نواقص مذکور شده است.

۲-۲- تأثیر درجه حرارت بر هدایت هیدرولیکی

تحقیقات زیادی روی تأثیر درجه حرارت بر هدایت هیدرولیکی انجام‌شده است از جمله آن‌ها می‌تواند به موارد زیر اشاره کرد.

رومرو^۱ [۲] مطالعه‌ای تجربی را باهدف بررسی تأثیر دما بر خواص هیدرولیکی خاک از جمله نفوذپذیری انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر دما بر روی نفوذپذیری آب در مکش‌های ماتریسی کمتر، بیشتر است و در درجه اشباع کمتر از ۷۵٪ تقریباً اثری دیده نمی‌شود. همچنین تأثیر دما بر روی نفوذپذیری در درجه اشباع ثابت و نسبت تخلخل ثابت، کمتر از مقداری است که از تغییر دما بر ویسکوزیته آب حاصل می‌شود که این رفتار نشان‌دهنده پدیده‌هایی همچون توزیع تخلخل و تعاملات حرارتی - شیمیایی است که باعث تغییر ساختار حفرات رس می‌شوند.

ویلار و لورت^۲ [۳] در سال ۲۰۰۴ تأثیر دما را بر روی خواص هیدرولیکی مکانیکی بنتونیت مطالعه کردند. افزایش هدایت هیدرولیکی با درجه حرارت، اغلب به تغییرات در ویسکوزیته سینماتیکی نسبت داده شده است. این افزایش ناشی از کاهش ویسکوزیته در اثر درجه حرارت است و مشاهده شده که افزایش اندازه‌گیری شده در نفوذپذیری با تغییرات دما کمتر از تغییرات مقدار ویسکوزیته سینماتیکی با دما است و انتقال صورت گرفته توسط دما بین آب جذبی درون دانه‌ای و آب آزاد بین دانه‌ای با توجه به اینکه ویژگی‌های فیزیکی مانند چگالی و ویسکوزیته آب که در هریک از این دو حالت متفاوت است، می‌تواند پاسخگوی این رفتارها باشد. زمانی که درجه حرارت افزایش می‌یابد با خروج مولکول‌های آب ضخامت لایه آب مرزی کاهش می‌یابد و در نتیجه ذرات رس می‌توانند به یکدیگر نزدیک‌تر شوند که باعث کاهش حجم پلاستیک می‌شود.

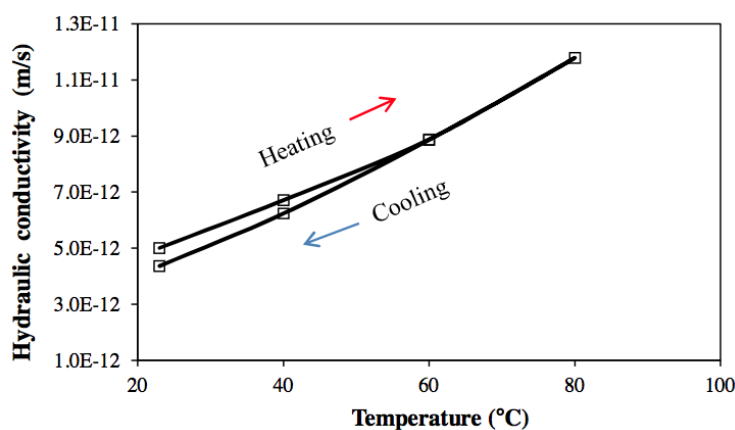
¹ Romero

² Villar and Lloret, 2004

چن و همکاران^۱ [۴] در سال ۲۰۱۷ آزمایش‌های نفوذپذیری را بر روی نمونه‌های رس بوم انجام دادند، آن‌ها مدل کلی از هدایت هیدرولیکی ارائه کردند و نتایج آن را در نرم‌افزار آباکوس اجرا کردند. نتایج نشان داد که هدایت هیدرولیکی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۲/۴ برابر بزرگ‌تر از زمانی است که در دمای اتاق این مقدار اندازه‌گیری شده است (۲۳°C) و تغییرات هدایت هیدرولیکی با دما در طول دوره حرارت دهی و خشک کردن برگشت‌پذیر است. وقتی تغییرات دما صرفاً بر روی ویسکوزیته سینماتیکی و دانسیته آب در نظر گرفته می‌شود، میزان محاسباتی افزایش هدایت هیدرولیکی ناشی از تغییرات درجه حرارت بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده است.

همچنین آن‌ها آزمایش تشدید مغناطیسی هسته‌ای را برای بررسی تأثیر تغییرات میکرو ساختارها بر روی خواص THM رس‌ها انجام دادند و نتایج نشان داد که حرارت دهی تحت شرایط مرزی محدود نشده، حفرات با سایز بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند و در نتیجه ساختار ضعیف‌تری را در پی دارد و همین باعث فشردگی نمونه‌ها در آزمایش نفوذپذیری در حالت THM می‌شود. آن‌ها اختلاف هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌ها و مقادیر محاسباتی را (با در نظر گرفتن تغییرات ویسکوزیته آب و چگالی با دما) به ضعیف شدن ساختار میکرو بر اثر رفتار تغییر حجم حرارتی رس یعنی اثر تغییر تخلخل ناشی از حرارت نسبت دادند.

با توجه به شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود که با افزایش دما هدایت هیدرولیکی افزایش می‌یابد و بر اثر کاهش دما، کاسته می‌شود.



شکل ۱-۲ تغییرات هدایت هیدرولیکی افقی با دما [۴]

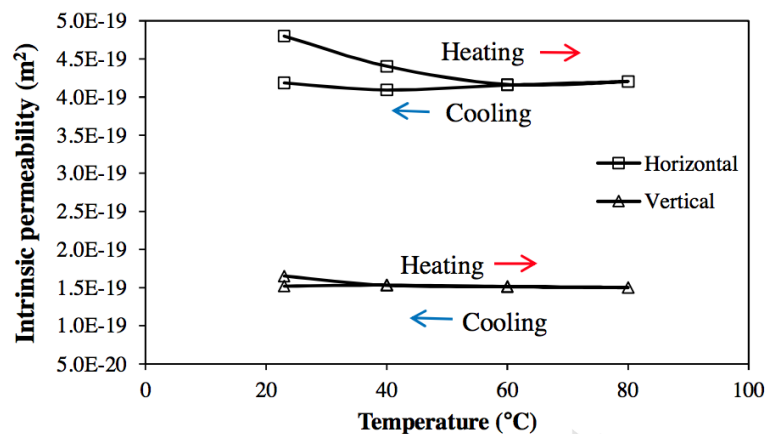
به‌منظور جداسازی اثر تغییرات خواص آب با دما از سایر عوامل مؤثر بر نفوذپذیری رس هنگام حرارت دهی و خنک کردن تعریف نفوذپذیری ذاتی (k) مطابق فرمول زیر در نظر گرفته می‌شود:

¹ Chen et al., 2017

$$k = \frac{\kappa \mu_w}{\rho_w g}$$

۱-۲

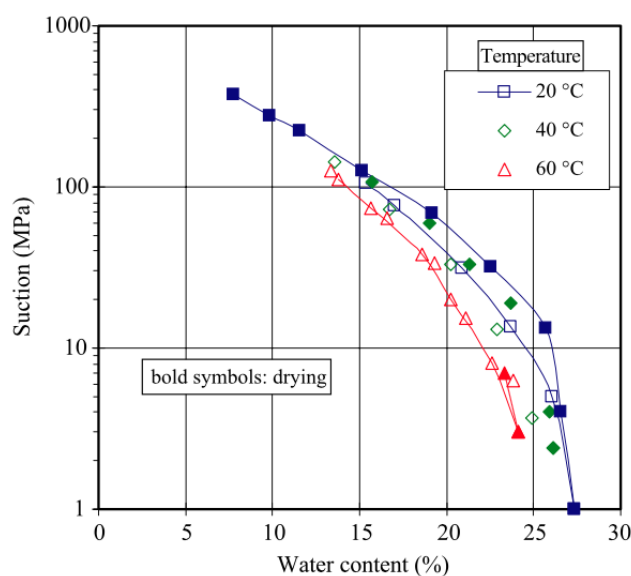
که در آن κ هدایت هیدرولیکی، μ_w و ρ_w به ترتیب ویسکوزیته و دانسیته آب هستند، آن‌ها با توجه به تغییرات ویسکوزیته و دانسیته آب خالص با تغییرات دما شکل ۲-۲ را ارائه کردند که هردو نفوذپذیری ذاتی عمودی و افقی حدود ۱۰٪ هنگام حرارت دهی، کاهش می‌یابند و فقط مقدار کمی افزایش در مسیر خنک کردن دیده می‌شود همچنین این پدیده را می‌توان به رفتار تغییر حجم حرارتی هم نسبت داد.



شکل ۲-۲ تغییرات نفوذپذیری ذاتی با دما [۴]

۲-۳ - تأثیر درجه حرارت بر منحنی مشخصه آب SWCC

با توجه به تحقیقات ویلار و لورت [۳] مقدار منحنی مشخصه آب در دماهای بسیار زیاد، مخصوصاً در مکش‌های پایین، کمتر است. به بیان دیگر افزایش حرارت باعث کاهش توانایی رس‌ها در نگهداری آب می‌شود. شکل ۳-۲ منحنی مشخصه آب را در حجم ثابت برای مسیرهای تر شدن و خشک شدن در دماهای ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. منحنی از مکش ۱۳۰ MPa به مکش ۰/۱ MPa در مسیر تر شدن قرار می‌گیرد و بعد از آن تا مکش ۱۳۰ MPa مسیر خشک شدن را می‌پیماید.



شکل ۳-۲ منحنی مشخصه آب و خاک در حجم ثابت و در دماهای مختلف در مسیرهای خشک شدن و تر شدن برای بنتونیت متراکم در دانسیته ثابت [۳]

تغییرات خواص آب حفرات در اثر تغییرات دما بدون شک بر روی خواص هیدرو مکانیکی خاک‌ها اثر می‌گذارد. خاصیتی از آب که بیشترین اثر را بر روی منحنی SWCC هر خاک دارد، کشش سطحی است به علت تأثیراتی که در پدیده موینگی دارد. اگرچه باخمن و همکاران^۱ [۵] در سال ۲۰۰۲ متوجه شدند که وابستگی منحنی SWCC خاک‌ها به درجه حرارت بسیار بزرگ‌تر از چیزی است که از تغییرات کشش سطحی انتظار می‌رود. آن‌ها تأثیر تغییر زاویه تماسی با تغییرات درجه حرارت را هم در نظر گرفتند و اهمیت آن را همانند کشش سطحی بیان نمودند.

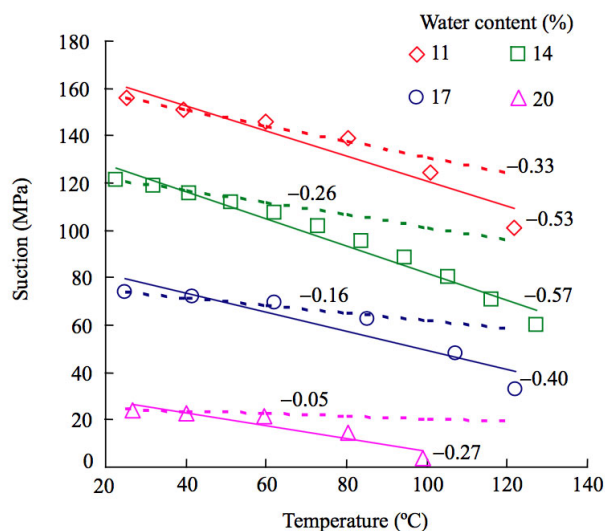
رومرو [۲]، منحنی‌های مشخصه آب را برای دماهای مختلف نشان دادند که در محتوای حجمی ثابت، با افزایش دما مقدار مکش کل کاهش می‌یابد. اگرچه اثر دما بر منحنی را نمی‌توان تنها به تغییرات دما وابسته به کشش سطحی نسبت داد، علاوه بر این اختلالات حرارتی باعث تغییر ساختار هندسی و شیمی درونی رس‌ها می‌شود.

ویلار و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۰ نیز این موضوع را مورد بررسی قرار دادند. شکل ۴-۲ اندازه‌گیری‌های مکش را در اثر تغییر درجه حرارت نشان می‌دهد و در آن مقدار مکش‌ها با در نظر گرفتن تغییر در کشش سطحی به هنگام افزایش دما محاسبه شده است و شیب خطوط مربوطه هم محاسبه شده که در شکل مشاهده می‌شود. اختلافی بین خطوط مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی وجود دارد و این

¹ Bachmann et al., 2002

² Villar et al., 2010

اختلاف برای دماهای بالاتر، بیشتر است و این نشان می‌دهد که موپینگ مکانیسم اصلی نگهداری آب نیست بلکه علاوه بر آن اندرکنش‌های فیزیکی و شیمیایی ذرات رس و آب، پاسخگوی ظرفیت نگهداری آب بخصوص در مکش‌های بالاتر هستند.



شکل ۴-۲ تغییرات مکش اندازه‌گیری شده برای بنتونیت FEBEX (نقاط و خطوط ممتد) و مقادیر محاسباتی با در نظرگیری تغییرات در کشش سطحی آب (خطوط خط‌چین) [۳]

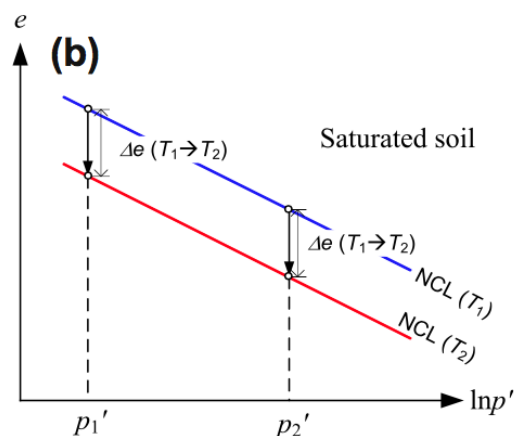
بر اساس تحقیقات جاسینتو^۱ [۶] در سال ۲۰۱۰ از آنجایی که دانسیته آب پیوند محکم بین لایه‌ای در اسمکتیت‌ها از یک MPa/m^3 بیشتر است، حجم اشغال‌شده توسط آب بین لایه‌ای که به حفرات ماکرو انتقال می‌یابد، بیشتر است و در نتیجه درجه اشباع نمونه‌ها افزایش می‌یابد و باعث دامن زدن کاهش مکش به هنگام افزایش دما می‌شود.

بر اساس نتایج تحقیقاتی ژو و همکاران^۲ [۷] در سال ۲۰۱۴ تغییرات درجه حرارت علاوه بر تأثیر بر کشش سطحی باعث تغییر شکل‌های حرارتی نیز می‌شود که این تغییر شکل‌ها رفتار هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مطابق شکل ۲-۵ همان‌گونه که در خاک‌های اشباع در اثر تغییرات درجه حرارت، خط عادی تحکیم یافته به‌صورت موازی پایین می‌یابد و این یعنی تغییر حجم ناشی از تغییرات دما مستقل از تنش است، همچنین می‌توان فرض کرد که در خاک‌های غیراشباع مکش هم همانند تنش داخلی عمل می‌کند و با این فرض نشان دادند که دما به‌صورت مستقل از مکش باعث تغییر حجم می‌شود و نشان دادند که در خاک‌های عادی تحکیم یافته با افزایش دما در اثر تغییر حجم‌های حرارتی و در مکش‌های

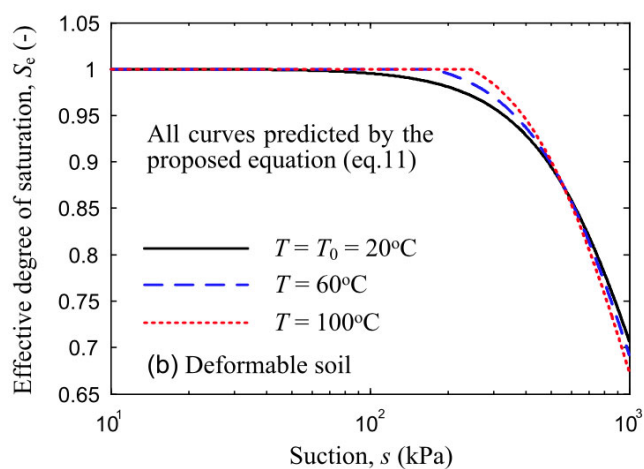
¹ Jacinto, 2010

² Zhou et al., 2014

پایین منحنی SWCC می‌تواند به سمت بالا صعود کند و این یعنی در مکش‌های اولیه، تأثیر تغییر حجم‌های حرارتی که باعث کاهش حجم و در نتیجه افزایش درجه اشباع می‌شود، بیشتر از تأثیر دما بر روی کشش سطحی است و در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲ تغییرات حجم برای خطوط عادی تحکیم یافته در دماهای مختلف برای خاک‌های اشباع [۷]



شکل ۶-۲ نمودار SWRC برای خاک‌های عادی تحکیم یافته تحت دماهای مختلف [۷]

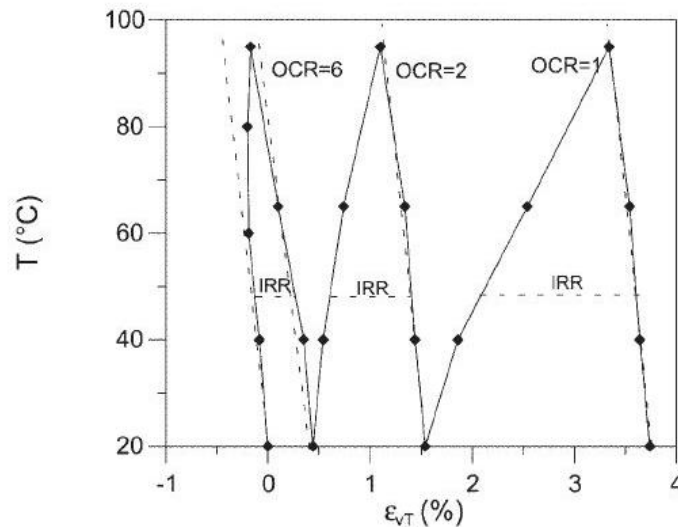
در مخازن زیرزمینی برای دفع زباله‌های رادیواکتیو سطح بالا، آگاهی به قابلیت نگهداشت آب در خاک در هنگام افزایش دما به منظور پیش‌گیری از عدم نشت آلاینده‌های هسته‌ای امری ضروری است [۸]. علاوه بر موارد فوق چنگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۰ تحقیقاتی در همین پیرامون بر روی خاک‌های فروریزی انجام دادند و بیان کردند که با کاهش مکش در مسیر تر شدن نسبت تخلخل کاهش می‌یابد و این به دلیل کاهش آب منیسک است که می‌تواند اثر پایداری بر روی اسکلت خاک را فراهم کند. بنابراین تر شدن باعث کاهش تنش تسلیم می‌شود که این اثر با افزایش دما بیشتر است. درواقع نرم شوندگی ناشی از تر شدن در دماهای بالا منجر به تسلیم و فروریزش در این خاک‌ها می‌شود.

۲-۴ - تأثیر درجه حرارت بر رفتار تغییر حجم

بر اساس تحقیقات ویلار و لورت [۳]، کرنش‌های تورمی تابعی از دما و تنش قائم هستند و در درجه حرارت‌های بالا، توانایی تورم رس کاهش می‌یابد. اگرچه اثر دما زمانی که تنش قائم زیاد است، کمتر مشهود است اما کاهش فشار تورم به‌عنوان تابعی از دما مشاهده شده است. آن‌ها برای یک رس پیش تحکیم یافته، کاهش کرنش‌های تورمی را با افزایش درجه حرارت مشاهده کردند و آن‌ها این موضوع را نتیجه غلبه پدیده انتقال آب بین ساختار ماکرو و میکرو ذرات در اثر تغییرات حرارت توضیح دادند.

عوامل مختلفی از جمله تأثیرات مکش، نسبت تخلخل اولیه، درجه اشباع اولیه، شرایط تراکم خاک، ناهمسانی تنش‌ها و نیز تاریخچه تنش (خاک‌های عادی تحکیم و بیش تحکیم یافته) بر روی تغییر حجم حرارتی خاک می‌توانند تأثیرگذار باشند. در تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۶ این عوامل به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند [۱۰] که از موارد مذکور تأثیرات مکش و نیز تاریخچه تنش قابل توجه می‌باشند. اثرات تاریخچه تنش بر تغییر حجم نشان می‌دهد که در OCR های پایین از ابتدا انقباض مشاهده می‌شود و در OCR های بالاتر در ابتدا انبساط و بعد انقباض دیده می‌شود. هرچه خاک بیش تحکیم یافته تر باشد در دمای بالاتری به حالت انقباض می‌رسد و این نشان می‌دهد که هرچه نسبت پیش تحکیمی افزایش یابد، مقدار دمای بیانگر انتقال بین حالت انبساط و انقباض بالاتر می‌رود (شکل ۲-۵) [۱۱].

همان‌طور که در شکل ۲-۷ نشان داده می‌شود تشابه خوبی بین شیب‌های فاز خنک کردن دیده می‌شود که با شیب انبساط حرارتی اولیه سازگاری دارد. در OCR های پایین تنها انقباض دیده می‌شود و با افزایش OCR در دماهای بالاتر انقباض مشهود است. در حقیقت هر افزایش دمایی بیشتر از دمای ماکزیممی که خاک می‌تواند تحمل کند باعث ایجاد کرنش پلاستیک می‌شود.



شکل ۷-۲ تغییرات حجم حرارتی رس تحت حرارت دهی سیکلی با سه نسبت پیش تحکیمی مختلف [۱۲] (IRR= irreversible)

تأثیر تنش مؤثر میانگین اولیه بر تغییر حجم‌های حرارتی در شرایط زهکشی شده در خاک‌های عادی تحکیم یافته در سال ۲۰۲۰ انجام گرفت [۱۳]. و بیان شد که تغییر حجم انقباضی ناشی از حرارت دهی با افزایش تنش مؤثر میانگین اولیه افزایش می‌یابد که البته این نتایج در تضاد با نتایج [۱۴] در سال ۲۰۱۸ است. آن‌ها نشان دادند که چرخه گرم کردن-خنک کردن در خاک عادی تحکیم یافته همانند یک عملکرد بهبود حرارتی است و اثر مثبت آن در افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده دیده می‌شود و علت آن را به کاهش حجم پلاستیک در هنگام حرارت دهی و کاهش حجم الاستیک در هنگام خنک کردن نسبت دادند که این اثر برای خاک‌های با تنش مؤثر میانگین اولیه کمتر، بیشتر است.

علاوه بر موارد گفته شده می‌توان عوامل مؤثر بر تغییر شکل‌ها را در مقیاس میکروسکوپی نیز مورد بررسی قرار داد اما به علت فقدان نتایج تجربی و عدم اطمینان از میزان تأثیر آن‌ها بررسی این موضوعات دشوار است [۱۵].

۲-۵- تأثیر درجه حرارت بر فشار پیش تحکیمی

کمپنلا و میچل [۱۶] در سال ۱۹۶۸ توسط دستگاه سه محوری یکسری آزمایش‌ها تحکیم همه‌جانبه بر روی رس اشباع در دماهای مختلف انجام دادند و نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که فشار پیش تحکیمی با افزایش دما کاهش می‌یابد. این اثر باعث جابجایی کل منحنی تحکیم به سمت تنش‌های مؤثر کمتر می‌شود و به این معنی است که با افزایش دما، خاک در ناحیه باربرداری و بارگذاری مجدد فشرده‌تر می‌شود.

سایر محققین نشان داده‌اند که حرارت دهی خاک‌های عادی تحکیم یافته و بسیار پیش تحکیم یافته تحت تنش مؤثر ثابت، به ترتیب باعث انقباض‌ها و انبساط‌های حجمی می‌شود درحالی‌که سرد کردن آن‌ها باعث تورم می‌شود. هرچه افزایش دما بیشتر باشد، تحت تنش مؤثر ثابتی انقباضات حجمی نیز بیشتر است. با افزایش نسبت پیش تحکیمی انقباضات حجمی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در نسبت‌های پیش تحکیمی زیاد خاک دچار انبساط می‌شود.

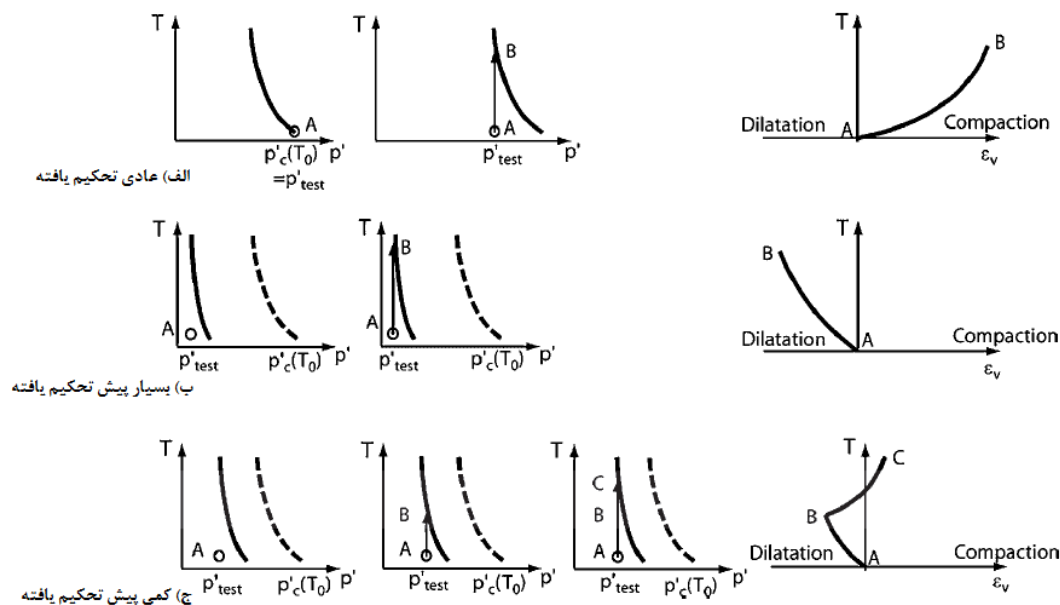
تمایل خاک برای تغییرات الاستیک و پلاستیک در هنگام تغییرات دمایی بستگی به نوع خاک، پلاستیسیته و همچنین نسبت پیش تحکیمی دارد درواقع با افزایش دما تنش پیش تحکیمی کاهش می‌یابد.

می‌دانیم که کاهش مکش باعث افت تنش مؤثر و سطح تسلیم می‌شود و کاهش سطح تسلیم سریع‌تر از تنش مؤثر رخ می‌دهد؛ در شرایط عادی تحکیم یافته تنش تمایل به عبور از سطح تسلیم دارد (در هنگام خیس شدن) که برای ارضا شرایط پایداری منجر به سخت شوندگی می‌شود و باعث فشردگی می‌شود^۱ و برای خاک‌های پیش تحکیم یافته کاهش سریع تنش مؤثر نسبت به سطح تسلیم در محدوده داخلی عادی تحکیم یافته رخ می‌دهد که فرایند الاستیک دارد و منجر به سخت شوندگی و فشردگی نمی‌شود^۲. در هنگام حرارت دهی نیز فرایندی مشابه با آنچه گفته شد وجود دارد. در خاک‌های عادی تحکیم یافته در اثر افزایش دما کاهش حرارتی که در تنش پیش تحکیمی رخ می‌دهد باید با فعال شدن سطح تسلیم در جهت ارضا شرایط پایداری مقابله کند که باعث سخت شوندگی حرارتی می‌شود (انقباض) درنتیجه در خاک‌های عادی تحکیم یافته به هنگام حرارت دهی انقباض پلاستیک داریم (شکل ۲-۸-الف).

وقتی خاک بسیار پیش تحکیم یافته است یعنی اگر محدوده تنش خیلی داخل حد عادی تحکیم یافته قرار گیرد نقطه تنش در ناحیه الاستیک باقی می‌ماند و فقط اتساع حرارتی رخ می‌دهد (شکل ۲-۸-ب). در حالت بینابین (کمی پیش تحکیم یافته) در اثر افزایش دما در ابتدا از هسته ناحیه الاستیک دور می‌شویم اما همچنان رفتار الاستیک است و هنوز دچار فشردگی نشده است بعداز آن با افزایش بیشتر دما و به هنگام فعال شدن سطح تسلیم سخت شوندگی حرارتی جایگزین می‌شود که کرنش‌های پلاستیک حجمی ایجاد می‌کند (انقباض). درنتیجه در خاک‌هایی به نسبت پیش تحکیمی کم در ابتدا اتساع الاستیک داریم و بعداز آن انقباض پلاستیک (شکل ۲-۸-ج).

¹ wetting collapse

² swelling



شکل ۸-۲ پاسخ مکانیکی مواد در مسیر حرارت دهی در نسبت‌های پیش تحکیمی مختلف [۱۷]

هواکل و بلدی [۱۸] این شکل منحنی را به عنوان منحنی تسلیم در صفحه $P' - T$ معرفی کردند. که در واقع اندازه ناحیه الاستیک را نشان می‌دهد که با افزایش دما این ناحیه کاهش می‌یابد. در سمت چپ سطح تسلیم تغییرات دما و تنش باعث کرنش‌های حرارتی یا مکانیکی بازگشت‌پذیر می‌شود. اگر در اثر افزایش تنش و یا دما و یا ترکیبی از هر دو به سطح تسلیم برسیم کرنش‌های پلاستیک رخ می‌دهند و سطح تسلیم برای ارضا سخت شوندگی به سمت راست جابه‌جا می‌شود که باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه الاستیک می‌شود.