



مقاله پژوهشی

ارائه یک مدل رفتاری الاستو-ترمو-ویسکوپلاستیک برای پیش‌بینی رفتار زیرساخت‌های مدفون
زیرزمینی در رس دارای ساختار

امیر حمیدی^{۱*}؛ فرهاد عاصمی^۲؛ توحید تاجیک^۲

۱- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.
۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2025.525202.1253

واژگان کلیدی	چکیده
مدل رفتاری الاستو-ترمو-ویسکوپلاستیک، رفتار برشی، خزش، رس دارای ساختار، سازه‌های زیرزمینی مدفون	در بسیاری از کاربردهای ژئوتکنیکی، لایه‌های خاک رس دارای ساختار، ممکن است در معرض بارگذاری طولانی مدت و تغییرات دما قرار گیرند. بنابراین سه عامل دما، خزش و ساختار بر رفتار سازه‌های مورد احداث در این خاک‌ها موثر خواهند بود. بررسی متون فنی نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های رفتاری موجود قادر هستند تنها به صورت جداگانه تأثیر ساختار، تغییر شکل‌های خزشی و تغییرات دما یا به صورت توأمان اثر دو پدیده از این سه پدیده را در نظر بگیرند. در پژوهش حاضر، پس از مرور مطالعات گذشته در ارتباط با اثر دما و خزش بر رفتار ترمومکانیکی خاک‌های رس دارای ساختار، یک مدل رفتاری جدید برای در نظر گرفتن همزمان هر سه عامل ارائه شده است. بر این اساس در ابتدا، تغییرات هر یک از سه پارامتر در صفحه تراکم $e - \ln p'$ به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته و در ادامه اثرات این سه فاکتور برای ارائه فرمولاسیون نهایی مدل با هم ترکیب شده است. روش مشابه توسط <i>Hamidi, 2020</i> مبتنی بر حالت حدی خاک برای در نظر گرفتن اثر سه فاکتور دما، زمان و ساختار جهت بررسی رفتار خاک حین اعمال فشار ایزوتروپ خاک در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، این سه فاکتور برای تبیین رفتار برشی رس‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، سعی شده که از کمترین تعداد پارامترهای ممکن در مقایسه با مدل <i>Modified Cam-Clay (MCC)</i> استفاده شود و اطمینان حاصل گردد که پارامترهای جدید تفسیرهای فیزیکی یا مکانیکی واضحی دارند. نتایج تحقیق حاضر، درک جامع‌تری از رفتار پیچیده حاکم بر پاسخ مکانیکی رس‌های دارای ساختار، تحت شرایط محیطی و بارگذاری متغیر ارائه می‌دهد.

پیش‌گفتار

انرژی، ذخیره انرژی گرمایی در سفره‌های آب زیرزمینی و چاه‌ها، سازه‌های ژئوترمال، حرارت ایجاد شده در اطراف کابل‌های فشار قوی، القای حرارت در اثر حرکات زمین، آتش‌سوزی تونل و... که استانداردهایی بالایی را در طراحی می‌طلبند، لازم است تأثیر تحکیم خاک تحت بارگذاری ترمومکانیکی و توسعه مدل‌های رفتاری دقیق و علمی مورد توجه قرار گیرد. از اواسط قرن بیستم، محققان به طور آزمایشگاهی و تئوریکال اثر دما بر خواص مکانیکی رس‌ها را مورد توجه قرار دادند [۷-۱]. علاوه بر این، رس‌ها در معرض تغییر شکل‌های وابسته به زمان در اثر بارگذاری ترمومکانیکی

خاک‌های رسی به طور گسترده در لایه‌های رسوبی در سراسر جهان پراکنده شده‌اند که عمدتاً پس از بین رفتن فشار آب حفره‌ای، نشست‌های خزشی طولانی مدتی را تجربه می‌کنند. پریودهای طولانی بارگذاری و تغییرات در دمای زمین می‌تواند تغییر شکل‌های قابل توجه و غیرقابل جبرانی را در خاک‌های رسی ایجاد کند. در طرح‌های ژئوتکنیکی متعارف، تأثیر دما در رفتار خاک‌های رسی به ندرت در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که با توسعه تکنولوژی‌های مدرن همچون دفن زباله‌های هسته‌ای در اعماق زمین، فناوری ذخیره و بازیافت

* رایانامه نویسنده مسئول: امیر حمیدی hamidi@khu.ac.ir

به دلیل خاصیت ویسکوز ذرات رس و آب جذب شده بین ذرات نیز قرار می‌گیرند. مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌های رفتاری زیادی در مورد رفتار ویسکوپلاستیک خاک‌های رسی انجام شده است [۸-۱۱]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های مختلفی به صورت آزمایشگاهی به منظور در نظر گرفتن اثرات ترکیبی دما و زمان بر رفتار تنش-کرنش خاک‌های رسی نرم و توسعه مدل‌های رفتاری رفتار الاستو ترمو ویسکوپلاستیک خاک‌های رسی نرم انجام شده است [۱۶-۱۲].

در اغلب مطالعات گذشته، رفتار خاک رس بازسازی شده در پنج دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌های رفتاری خانواده *MCC* به طور گسترده برای توصیف رفتار خاک رس در حالت بازسازی شده استفاده شده است. این مدل‌ها توافق خوبی با نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهند. با این حال، مطالعات نشان داده است که خاک رس طبیعی، دارای ساختار است و رفتار آن با رفتار خاک رس بازسازی شده، متفاوت است [۱۷-۱۹]. منظور از ساختار خاک، نیروهای اتصال دهنده‌ی طبیعی بین ذرات خاک می‌باشد. ساختار خاک توسط فرآیندهای زمین شناسی، تیکسوتروپی، سیمان‌تاسیون و سالخوردگی ایجاد می‌شود. معمولاً ساختار را به عنوان ترکیبی از بافت (نحوه آرایش ذرات) و پیوندهای بین ذرات (نیروهای بین ذرات) تعریف می‌کنند. رس‌های طبیعی معمولاً دارای منحنی فشردگی هستند که به دلیل وجود ساختار در آنها، در فضای تنش-تخلخل بالاتر از نمونه‌های بازسازی شده متناظر خود قرار می‌گیرند. این موضوع سبب بروز خطا در پیش‌بینی رفتار این خاک‌ها می‌شود. رفتار تحکیمی رس دارای ساختار توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. *Liu and Carter, 2002* مدل رفتاری مبتنی بر کم کلی اصلاح شده را برای در نظر گرفتن رفتار مکانیکی رس دارای ساختار توسعه دادند. آنها در این مدل سه پارامتر اضافی نسبت به کم کلی اصلاح شده استفاده کردند [۱۷]. این مدل بعدها توسط محققین مختلفی همچون *Suebsuk et al., 2010* با استفاده از در نظر گرفتن ۸ پارامتر اضافی بهبود یافت [۱۸]. در کنار تحقیقاتی که برای ارزیابی اثر ساختار انجام شده است، برخی از محققین اثر توأمان دما و ساختار را مورد بررسی قرار داده‌اند. *Sultan et al., 2010* با ارائه یک فرمولاسیون جدید بر پایه مدل کم کلی اصلاح شده تغییرات شکل، اندازه و جهت سطح تسلیم را با توجه به

تاریخچه تنش توصیف کرد. این مدل دارای هشت پارامتر بوده و قادر به توصیف رفتار ناهمسانی رس بوم در معرض بارگذاری ترمومکانیکی در هر دو حالت فشار و برش بود [۲۰]. مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که برخی از این تحقیقات به صورت توأمان اثر یک یا دو مؤلفه دما، ساختار و خزش را به صورت آزمایشگاهی و یا تئوری مورد ارزیابی قرار داده‌اند. *Laloui et al. [21]* اثر خزش و دما را بر روی فشار پیش تحکیمی مطابق *Cekerevac and Laloui [22]* در نظر گرفتند. *Yin and Graham [10]* و *Yin et al. [23]* مدل‌های الاستو ویسکو پلاستیک که توانایی خوبی را برای شبیه‌سازی رفتار وابسته به زمان خاک‌های رس عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته با در نظر گرفتن فرمولاسیون غیرخطی خزش توسعه دادند. *Kurz et al. [12]* با استفاده از مدل رفتاری ارائه شده توسط *Kelln et al. [24]* برای شبیه‌سازی خزش، مدلی را برای توصیف اثر ترکیبی خزش و دما در رفتار رس ارائه کردند. *Fathalikhani et al. [15]* سعی کرده‌اند با اصلاح مدل *Kurz et al. [12]* قابلیت آن را برای رنج وسیعی از نرخ کرنش و دما بالا ببرند. در کنار این تحقیقات، *Amini et al. [25]* با تکیه بر مدل‌های قبلی، یک مدل رفتاری جدید برای ارزیابی تغییرشکل خزشی-حرارتی خاک‌های منجمد ارائه نمودند. همچنین *Song et al. [26]* عملکرد مدل رفتاری الاستو ترمو ویسکو پلاستیک را در خاک‌های لایه‌ای مورد بحث و بررسی قرار دادند.

با این وجود در تحقیقات اندکی اثر توأمان هر سه مؤلفه تاثیرگذار در رفتار خاک رس، مورد ارزیابی قرار گرفته است. *Hamidi, 2020* اثر ترکیبی نرخ کرنش، دما و ساختار را در رفتار فشار ایزوتروپ رس در نظر گرفته است.

از آنجایی که اغلب پروژه‌های دفن زباله‌های هسته‌ای و شمع‌های حرارتی در لایه‌های رسی طبیعی و دارای ساختار قرار دارند و به دلیل ماهیت این پروژه‌ها در معرض بارگذاری حرارتی و مکانیکی برای مدت زمان طولانی قرار دارند. بر این اساس در این مقاله ضمن مرور پیشینه تحقیق حاضر به ارائه مدل رفتاری جدید برای در نظر گرفتن اثر ساختار، نرخ کرنش و دما هم در فشار و هم در برش پرداخته شده است. در این تحقیق از مدل رفتاری پایه *Hamidi [14]* استفاده شده است.

۲. ضرورت توسعه مدل‌های رفتاری ترموالاستو

ویسکوپلاستیک

امروزه استفاده از مدل‌های الاستو پلاستیک مانند MCC در تحلیل‌های المان محدود در طراحی ژئوتکنیکی سازه‌های بزرگ رایج است (Roscoe and Burland [27]). با این حال، این مدل‌ها نمی‌توانند به درستی برخی از جنبه‌های پیچیده رفتار خاک را توصیف نمایند. برای مثال، در بسیاری از کاربردهای مهندسی همچون شمع‌های انرژی و مدافن زباله‌های هسته‌ای، لایه‌های رس طبیعی و دارای ساختار در معرض بارگذاری بلندمدت و تغییرات دمایی قرار می‌گیرند. در برخی از خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های ریزدانه، وابستگی به زمان ممکن است نقش مهمی در تغییر شکل کل داشته باشد (Bjerrum [8]). اگر در چنین شرایطی مدل‌های الاستوپلاستیک معمول به کار گرفته شوند این احتمال وجود دارد که نشست و فشار آب حفره‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر پیش بینی گردد؛ چراکه رفتار وابسته به زمان خاک در نظر گرفته نشده است. از طرفی در خاک‌های دارای ساختار منحنی فشردگی به دلیل وجود پیوندهای ساختاری در آنها، در فضای تنش-تخلخل بالاتر از نمونه‌های بازسازی شده متناظر خود قرار می‌گیرد. این موضوع نیز در صورت استفاده از مدل MCC سبب بروز خطا در پیش‌بینی رفتار این خاک‌ها می‌شود.

۲. فرضیات اساسی مدل

مدل پیشنهادی در این تحقیق بر پایه مدل پیشنهادی توسط Hamidi [14] ارائه شده است. در این مدل اثر ترکیبی خزش و دما بر روی رفتار فشار و برش رس دارای ساختار در نظر گرفته شده است. بر این اساس در ابتدا، تغییرات هر یک از سه پارامتر در صفحه تراکم $e - \ln p'$ به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته و در ادامه اثرات این سه فاکتور برای ارائه فرمولاسیون نهایی مدل با هم ترکیب خواهند شد. روش مشابه توسط Hamidi [14] مبتنی بر حالت حدی خاک برای در نظر گرفتن اثر سه فاکتور دما، زمان و ساختار در رفتار فشار ایزوتروپ خاک در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، این سه فاکتور در رفتار برش رس‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، فرضیات مدل پیشنهادی به صورت زیر است:

۱. با افزایش دما، خط تحکیم ایزوتروپ (NCL) به

مقادیر کمتر نسبت تخلخل یعنی سمت چپ و

پایین حرکت می‌کند.

۲. ساختار رس منجر به افزایش نسبت تخلخل و جابه جایی NCL به بالا در فضای $e - \ln p'$ می‌شود.

۳. شیب خط حالت بحرانی (CSL) در صفحه تراکم ($e - \ln p'$) وابسته به دما نیست.

۴. شیب خط تحکیم ایزوتروپ (NCL) بیشتر یا برابر با شیب خط حالت بحرانی (CSL) در صفحه تراکم است و با افزایش دما از شیب NCL کاسته می‌شود و در بالاترین دمای قابل تحمل خاک به شیب CSL همگرا می‌شود.

۵. در یک دمای ثابت تنش موثر میانگین در خاک‌های دارای ساختار، بزرگتر از خاک بازسازی شده است.

۶. در اثر رفتار وابسته به زمان خط تحکیم ایزوتروپ (NCL) تحت تنش موثر میانگین ثابت به سمت نسبت‌های تخلخل پایینتر حرکت می‌کند.

در ادامه اثر جداگانه هر یک از سه فاکتور دما، زمان و ساختار در رفتار رس مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳. تأثیر ساختار بر فشردگی رس

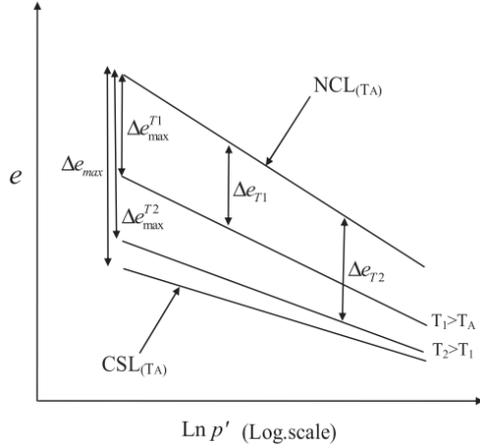
Error! Reference source not found. رفتار فشردگی

ایزوتروپیک ایده آل برای خاک دارای ساختار در مقایسه با خاک رس بازسازی شده نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشخص است که خاک دارای ساختار در سطح تنش مشابه با خاک بدون ساختار نسبت تخلخل بزرگتری را دارا خواهد بود. Liu and Carter [17] بیان کردند که نسبت تخلخل رس دارای ساختار را در یک تنش موثر قائم یکسان می‌توان به وسیله رابطه ۱ به نسبت تخلخل رس بازسازی شده از همان خاک و در همان تنش وابسته ساخت:

$$e_{str} = e_r + \Delta e_{str} \quad (1)$$

در این رابطه e_r ، e_{str} و Δe_{str} به ترتیب نسبت تخلخل رس دارای ساختار، نسبت تخلخل رس بازسازی شده و اختلاف نسبت تخلخل خاک بازسازی شده و دارای ساختار در یک تنش موثر قائم یکسان می‌باشد. Δe_{str} در یک تنش موثر قائم یکسان همیشه بزرگتر از صفر است و نشان دهنده اثر ساختار بر تخلخل اولیه رس دارای ساختار است.

تفاوت نسبت تخلخل بین NCL و CSL در دمای محیط نخواهد بود.



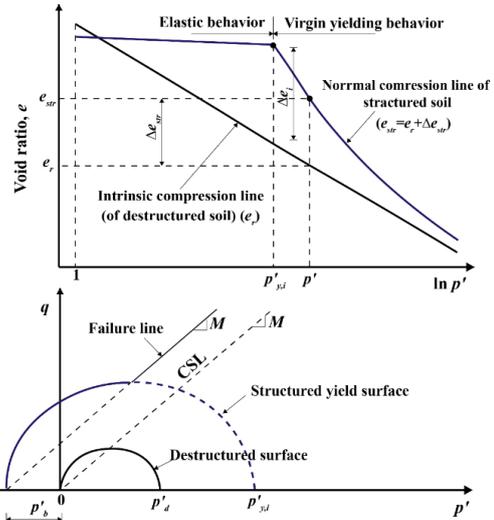
شکل ۲. شبیه‌سازی رفتار خط تحکیم ایزوتروپ و خط حالت بحرانی در دماهای بالا [۵]

با توجه به *Error! Reference source not found.* و فرضیات بیان شده برای تعیین نسبت تخلخل در دمای بالا مطابق رابطه ۳ خواهیم داشت:

$$e_T = e_A - \Delta e_T \quad (3)$$

در این رابطه e_A و e_T به ترتیب نسبت تخلخل در دمای مرجع و دمای بالا و Δe_T اختلاف بین نسبت تخلخل در دمای محیط و دمای بالا هستند. Δe_T برابر با درصدی از تفاوت نسبت تخلخل بین NCL و CSL در دمای محیط است. مطابق با فرضیات بیان شده بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی پژوهشگران پیشین شیب NCL در دماهای بالا کاهش می‌یابد. کاهش NCL در دمای بالا نسبت به NCL در دمای محیط به معنای کاهش Δe_T با افزایش p' می‌باشد. این موضوع در *Error! Reference source not found.* نمایش داده شده است. بر این اساس در این تحقیق با هدف عمومی‌سازی مدل برای تغییر یا ثابت ماندن شیب NCL ارتباط آن با تنش موثر میانگین نیز در نظر گرفته می‌شود، به صورتی که با افزایش تنش موثر میانگین از مقدار اولیه آن که برابر با p'_0 می‌باشد، اختلاف نسبت تخلخل بین NCL در دمای محیط و دمای بالا کم می‌گردد. لذا برای تعیین Δe_T مطابق رابطه ۴ می‌توان نوشت:

$$\Delta e_T = \omega \Delta e_{max} \left(\frac{p'_0}{p'_{CT}} \right)^n \quad (4)$$



شکل ۱. رفتار فشار ایزوتروپ ایده‌آل رس دارای ساختار در قیاس با خاک بدون ساختار بازسازی شده (پارامتر $p'_{y,i}$ برابر با تنش تسلیم خاک مورد نظر است)

Liu and Carter [17] رابطه ۲ را برای تعیین نسبت تخلخل اضافی ناشی از ساختار خاک Δe_{str} ارائه دادند:

$$\Delta e_{str} = \Delta e_i \left(\frac{p'_{y,i}}{p'} \right)^b \quad (2)$$

که در آن $p' = p'_{y,i} + \Delta p'$ و حداکثر مقدار نسبت تخلخل اضافی ناشی از ساختار نسبت به نمونه بازسازی شده برابر Δe_i است. در این رابطه b پارامتری تحت عنوان شاخص تخریب می‌باشد. این پارامتر وابسته به ویژگی‌های خاک است و باید محاسبه شود. مقادیر b توسط لیو و کارتر برای انواع خاک‌های مورد مطالعه را در محدوده صفر تا ۳۰ محاسبه کرده‌اند.

۴. تأثیر دما بر رفتار فشردگی رس

در این تحقیق از مدل ترموالاستو پلاستیک حمیدی و همکاران، ۲۰۱۵ برای در نظر گرفتن تاثیرات حرارت بر رفتار خاک و پیش بینی پاسخ خاک به تغییر دما از ایده تفاوت میان منحنی تحکیم ایزوتروپ در دمای مرجع و دماهای بالا استفاده نمودند. بر این اساس مطابق *Error! Reference source not found.* فرض شد که با افزایش دما، خط تحکیم ایزوتروپ (NCL) به مقادیر کمتر نسبت تخلخل یعنی به سمت چپ و پایین حرکت می‌کند و در حالت حدی یعنی در حداکثر دمایی که خاک می‌تواند تحمل کند، شیب NCL برابر با شیب CSL می‌گردد. بر این اساس حداکثر کاهش نسبت تخلخل در اثر افزایش دما، هرگز بیشتر از حداکثر

که در آن ρ^p تابع ضریب انبساط حرارتی بوده و *Bolzon* و *Sultana* و همکاران [۳] مقدار آن برای رس بوم برابر $H_0 = \nu_0/\lambda - \kappa_T$ $10^{-4} K^{-1}$ بدست آمد. در این رابطه λ شیب خط *NCL* و κ_T شیب خط باربرداری بوده که در آن λ شیب خط *NCL* و κ_T شیب خط باربرداری و بارگذاری (*URL*) در دمای بالا می‌باشد. مطابق فرض گرفته شده در مدل حمیدی و خزائی، ۲۰۱۰، κ_T به دما وابسته می‌باشد و با استفاده از رابطه ۸ بدست می‌آید [۲۶]:

$$\frac{\kappa_T}{\kappa_A} = 1 + C \ln\left(\frac{T}{T_A}\right) \quad (۸)$$

که در آن، κ_A شیب *URL* در دمای محیط (T_A) و C پارامتر مدل می‌باشد که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید.

با جایگذاری Δe_T و e_A در رابطه ۳ نسبت تخلخل در دمای بالا از رابطه ۹ بدست خواهد آمد:

$$e_T = N - \kappa_T \ln p' - (\lambda - \kappa_T) \ln p'_{cT} - \omega \Delta e_{max} \left(\frac{p'_0}{p'_{cT}}\right)^n \quad (۹)$$

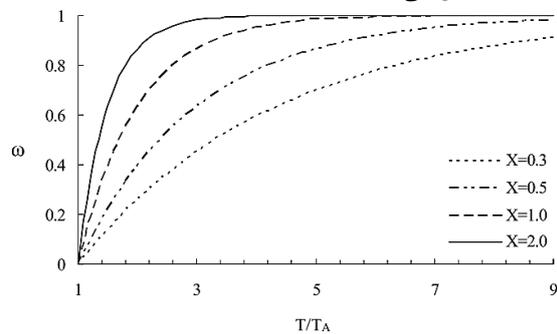
۵. تأثیر خزش بر رفتار فشردگی رس

خزش در واقع به تغییرشکل‌های برشی و یا حجمی وابسته به زمان تحت نیرو یا تنش ثابت اطلاق می‌شود. ارتباط کرنش متغیر با زمان در آزمایش تحکیم یک بعدی در *Error! Reference source not found.* آورده شده است. مرحله اول نشان دهنده تغییرشکل‌های الاستیک ذرات می‌باشد. مرحله دوم تحکیم اولیه نام دارد که در یک سری تغییرشکل‌ها بر اثر زایل شدن فشار آب حفره‌ای در طول بارگذاری پله‌ای اتفاق می‌افتد. به طوری که سرعت تحکیم اولیه از طریق سرعت خروج آب از درون منافذ خاک کنترل می‌شود. مرحله سوم تحکیم ثانویه یا خزش نام دارد که در آن تغییرشکل‌های حجمی تحت یک تنش ثابت اتفاق می‌افتد. سرعت تحکیم ثانویه از طریق مقاومت ویسکوز ساختار خاک کنترل می‌شود.

که در آن n پارامتری بی بعد است که با کالیبراسیون تعیین می‌شود. در صورتی که شیب *NCL* با تغییر دما ثابت بماند، مقدار n برابر با صفر خواهد بود. از طرفی مطابق فرضیات مدل، موقعیت *NCL* در دماهای بالا تابعی از اختلاف نسبت تخلخل بین *NCL* و *CSL* است و در حداکثر دمای قابل تحمل خاک (حالت حدی) دو خط *NCL* و *CSL* بر هم منطبق می‌گردند. پارامتر ω برای در نظر گرفتن این موضوع در رابطه ۴ بکار برده شده است. به طوری که در دمای محیط یعنی در حالتی که $T = T_A$ مقدار آن برابر با صفر بوده و با افزایش دما مقدار آن به سمت یک میل می‌کند. بر این اساس رابطه ۵ برای تعیین ω پیشنهاد می‌شود:

$$\omega = 1 - \exp\left[\chi\left(1 - \frac{T}{T_A}\right)\right] \quad (۵)$$

که در آن T_A و T به ترتیب برابر با دمای محیط و دمای بالا می‌باشند. χ پارامتری بی بعد است که با کالیبراسیون تعیین می‌گردد. از رابطه ۵ مشخص است که همواره $0 \leq \omega < 1$ خواهد بود. *Error! Reference source not found.* تغییرات ω را با تغییر نسبت T/T_A در مقادیر مختلف χ به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



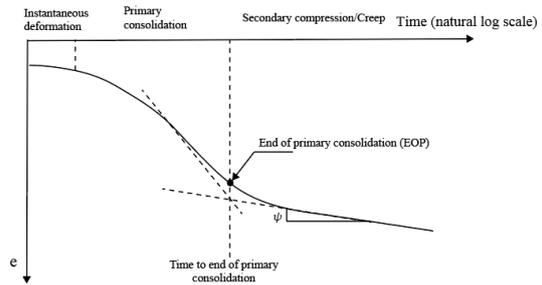
شکل ۳. تغییرات پارامتر ω با تغییر نسبت T/T_A به ازای مقادیر مختلف χ

در رابطه ۴، p'_{cT} فشار پیش تحکیمی در دمای بالا می‌باشد. مطابق با نتایج تحقیقات محققین مختلف، این پارامتر با دما متغیر است [۲۲]. آنها رابطه ۶ را برای تعیین تغییرات فشار پیش تحکیمی با دما پیشنهاد دادند:

$$p'_{cT} = p'_c e^{(-\rho \Delta T)} \quad (۶)$$

که در آن p'_c فشار پیش تحکیمی در دمای محیط، ρ پارامتر ماده و ΔT تغییرات دما می‌باشد. بر پایه نتایج آزمایشگاهی ρ را می‌توان با استفاده از رابطه ۷ با دقت خوبی بدست آورد:

$$\rho = \frac{3\rho^p \nu_0}{\lambda - \kappa_T} = 3\rho^p H_0 \quad (۷)$$



شکل ۴. ارتباط کرنش - زمان در آزمایش تحکیم یک بعدی

خزش در واقع به تغییر شکل‌های برشی و یا حجمی وابسته به زمان تحت نیرو یا تنش ثابت اطلاق می‌شود. **Error!** *Reference source not found.* فرآیند ترمو-الاستو-ویسکوپلاستیک تیبیکال را در رس دارای ساختار نشان می‌دهد که در آن $NCL(T_0, t_0)$ خط تحکیم نرمال متناظر با حالت ایزوترمال (در دمای مرجع T_0 و زمان بارگذاری مرجع t_0) است. خط $NCL(T, t_0)$ حالتی را نشان می‌دهد که در آن دما T افزایش یافته است ولی در یک نرخ برابر نسبت به حالت قبلی (در یک زمان بارگذاری مرجع t_0). این در حالی است که خط $NCL(T, t)$ نشان دهنده خط متناظر با حالتی است که تحت دمای دلخواه T ، دوره بارگذاری نیز به t افزایش یافته است. مطابق این شکل، زمانی که خاک رس برای مدت طولانی در نقطه A تحت فشار قرار بگیرد، نسبت تخلخل از e_A به e_C کاهش می‌یابد. این موضوع منجر به افزایش آشکار فشار پیش تحکیمی از p'_A به p'_C می‌شود که معادل BC است. علاوه بر این ساختار منجر به افزایش بیشتر فشار پیش تحکیمی از p'_C به p'_Y می‌شود.

تغییرات نسبت تخلخل در طی خزش با استفاده از رابطه استفاده شده توسط حمیدی، ۲۰۲۰ به صورت رابطه زیر قابل بیان است:

$$e_{cr} = e_{EOP} - \Delta e_{cr} \quad (10)$$

که در آن e_{cr} ، e_{EOP} و Δe_{cr} به ترتیب نسبت تخلخل در اثر خزش، نسبت تخلخل در پایان تحکیم اولیه و کاهش نسبت تخلخل در اثر فرآیند خزش است. با استفاده از روش پیشنهادی توسط Kelln و همکاران [۲۴] برای تعیین Δe_{cr} رابطه ۱۰ را می‌توان به صورت رابطه ۱۱ نوشت. در این رابطه پارامتر ψ شیب خط تحکیم ثانویه مطابق شکل ۴ می‌باشد.

$$e_{cr} = e_{EOP} - \psi \ln \left(\frac{t_0 + t}{t_0} \right) \quad (11)$$

که در آن t_0 زمان اولیه که متناظر با زمان پایان تحکیم اولیه یا بازه زمانی ۲۴ ساعته برای بارگذاری رایج بوده و t مدت زمان بارگذاری می‌باشد. در $t = 0$ نسبت تخلخل معادل خواهد بود با نسبت تخلخل متناظر با خط تحکیم نرمال: $e_{cr} = e_{EOP}$. ضریب خزش بوده و ثابت ماده بوده و مستقل از حالت تنش یا نسبت پیش تحکیمی می‌باشد [۲۴]. با مشتق گیری از رابطه ۱۱ نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$de = -\frac{\psi}{t_0 + t} \delta t \quad (12)$$

از طرفی می‌دانیم رابطه بین نسبت تخلخل و کرنش حجمی به صورت زیر است:

$$de = -d\varepsilon_v(1 + e) \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه ۱۳ در رابطه ۱۲ خواهیم داشت:

$$\frac{d\varepsilon_v^{cr}}{dt} = \varepsilon_v^{cr} = \frac{\psi}{(t_0 + t)(1 + e)} \quad (14)$$

از طرفی رابطه ۱۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$e_{cr} = N - \lambda \ln p' - \psi \ln \left(\frac{t_0 + t}{t_0} \right) \quad (15)$$

با استفاده از رابطه ۱۵ می‌توان رابطه زمان (t) را به صورت زیر نوشت:

$$t = -t_0 + t_0 e^{\left(\frac{N - e_{cr}}{\psi} \right) (p')^{-\frac{\lambda}{\psi}}} \quad (16)$$

با جایگذاری رابطه ۱۶ در رابطه ۱۴ نرخ کرنش حجمی ویسکوپلاستیک برای تحکیم ایزوتروپ به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{\varepsilon}_v^{cr} = \frac{\delta \varepsilon_v^{cr}}{\delta t} = -t_0 + t_0 e^{\left(\frac{N - e_{cr}}{\psi} \right) (p')^{-\frac{\lambda}{\psi}}} \quad (17)$$

$$0 \leq \delta \leq \frac{1}{\Delta e_i} \quad (19)$$

نمایشد، $\theta = 1$ ، با افزایش دما افزایش یابد، $\theta = 1 - \omega$ یا با افزایش دما، کاهش یابد $\theta = 1 + \omega$ خواهد بود [۲۹]. در رابطه ۱۸، β پارامتر فابریک خاک بوده و با برآزش منحنی داده‌های آزمایشگاهی در فضای $q-p'$ بدست می‌آید. مطابق مقاله Hamidi و همکاران [۵] رابطه زیر برای بدست آوردن β در دماهای بالا ارائه شده است:

$$\beta(T) = \beta(T_0) - f \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (20)$$

که در آن $\beta(T)$ و $\beta(T_0)$ مقادیر β در دمای بالا و دمای محیط بوده و f پارامتری بی بعد است که تغییرات β در دمای بالاتر از دمای محیط کنترل می‌کند.

۷. سطح تسلیم

با فرض مفهوم بقای انرژی در حین تسلیم، انتگرال زیر به تعیین سطح تسلیم منجر می‌شود:

$$\int_{P'_{CT}}^{P'} \frac{dP'}{P'} + \int_0^\eta \frac{d\eta}{\eta + \psi} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\ln P'_{CT}}{\ln P'} - \int_0^\eta \frac{d\eta}{\eta + \frac{(1 - \delta \Delta e_i)[M_T^2(\beta - 1) - \eta^2]}{2\theta\eta c}} \quad (22)$$

پس از انتگرال گیری مطابق رابطه ۲۳ خواهیم داشت:

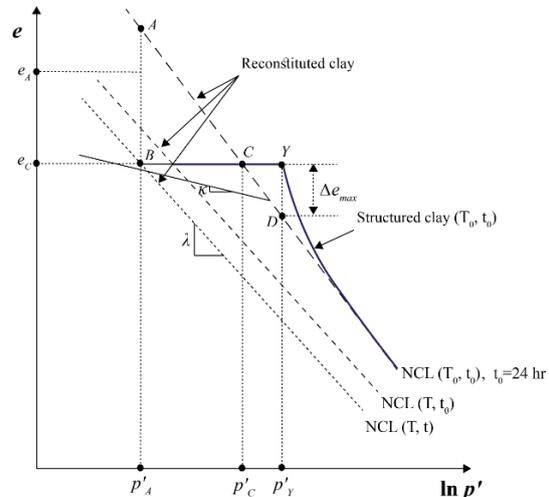
$$\int_0^\eta \frac{d\eta}{\eta + \frac{(1 - \delta \Delta e_i)[M_T^2(\beta - 1) - \eta^2]}{2\theta\eta c}} \quad (23)$$

$$= \frac{c\theta \ln \left(\frac{(-2c\theta - \delta \Delta e_i + 1)\eta^2 + (\delta \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2}{2c\theta + \delta \Delta e_i - 1} \right) \Big|_{\eta=0}}{\eta} \quad (24)$$

$$\frac{P'_{CT}}{P'} = \left(\frac{(-2c\theta - \delta \Delta e_i + 1)\eta^2 + (\delta \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2}{(\delta \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2} \right)^{\frac{c\theta}{2c\theta + \delta \Delta e_i - 1}} \quad (25)$$

بر این اساس، سطح تسلیم مطابق رابطه ۲۶ بدست خواهد آمد:

$$f = \frac{P'_{CT}}{P'} - \left(\frac{(-2c\theta - \delta \Delta e_i + 1)\eta^2 + (\delta \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2}{(\delta \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2} \right)^{\frac{c\theta}{2c\theta + \delta \Delta e_i - 1}} = 0 \quad (26)$$



شکل ۵. فرآیند رفتار فشردگی ترمو-الاستو-ویسکوپلاستیک در رس دارای ساختار

در ادامه اثر جداگانه هر یک از سه فاکتور دما، زمان و ساختار در رفتار رس مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۶. قانون جریان

مطالعات پیشین بر روی رفتار رس تحت دماهای مختلف نشان داده‌اند که افزایش دما منجر به مقدار بزرگتر، کوچکتر یا ثابت نسبت $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p$ در نسبت تنش مشخص می‌شود. از طرفی ساختار خاک بر روی قانون جریان تاثیر گذاشته و منجر به نسبت $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p$ بزرگتر در مقایسه با خاک دست خورده در سطح تنش تسلیم یکسان می‌شود [۳۰].

برای نشان دادن تاثیر خزش در قانون جریان از پارامتر c استفاده شد. این پارامتر ویژگی خزشی ماده بوده و با کالیبراسیون از نتایج آزمایشگاهی بدست می‌آید.

$$\psi = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{(1 - \delta \Delta e_i)[M_T^2(\beta - 1) - \eta^2]}{2\theta\eta c} \quad (18)$$

در این رابطه δ پارامتر مدل است که تاثیر ساختار خاک را در قانون جریان نشان می‌دهد و θ نیز پارامتر مدل می‌باشد. پارامتر θ و c نباید منفی باشد، در غیراینصورت بردار جزء کرنش پلاستیک به سمت داخل سطح تسلیم خواهد شد. از این رو، برای برآورده شدن این شرط در همه زمانها، از جمله شروع تسلیم بکر، محدودیت زیر اعمال می‌شود:

$$\delta \varepsilon_s^p = \chi \frac{\partial Q}{\partial q} \quad (35)$$

در روابط بالا χ یک ضریب است که بر اساس پارامترهای سخت شوندهگی مفروض برای خاک قابل استخراج است. با فرض تغییر در اندازه تابع تسلیم با تغییر در تنش تحکیمی p'_0 ، نرخ تغییرات آن با نمو کرنش حجمی پلاستیک و کرنش برشی پلاستیک که بیانگر قانون سخت شوندهگی کرنشی است، تعیین می‌شود.

$$Q = \left(\frac{P'_c}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} - \left(\frac{((-2c\theta - \partial \Delta e_i + 1)q^2 + (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2)}{(\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2} \right) \quad (36)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P'} = - \frac{(2c\theta + \partial \Delta e_i - 1)((\partial \Delta e_i - 1)\beta - \partial \Delta e_i + 1)M_T^2 \left(\frac{P'_c}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} P'^2 + 2cq^2\theta}{(\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)cM_T^2 \theta P'^3} \quad (37)$$

پارامتر χ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\chi = \frac{\delta \varepsilon_v^p (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)cM_T^2 \theta P'^3}{((2c\theta + \partial \Delta e_i - 1)((\partial \Delta e_i - 1)\beta - \partial \Delta e_i + 1)M_T^2 \left(\frac{P'_c}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} P'^2 + 2cq^2\theta} \quad (38)$$

$$\delta \varepsilon_v^p = \frac{\lambda - K_T \frac{dP'_c}{P'_c} - \frac{n\Delta e_T}{1+e} \left(\frac{M}{M-\eta} \right) \frac{dP'_c}{P'_c} + \frac{b\Delta e_s}{1+e} \left(\frac{M}{M-\eta} \right) \frac{dP'_c}{P'_c} - \frac{\psi}{u_0(t_0 + t)} \delta t$$

$$\frac{\partial Q}{\partial q} = \frac{2(1 - \partial \Delta e_i - 2c\theta)}{(1 - \partial \Delta e_i)(\beta - 1)M_T^2} \quad (39)$$

$$\delta \varepsilon_s^p = \frac{\delta \varepsilon_v^p (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)cM_T^2 \theta P'^3}{((2c\theta + \partial \Delta e_i - 1)((\partial \Delta e_i - 1)\beta - \partial \Delta e_i + 1)M_T^2 \left(\frac{P'_c}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} P'^2 + 2cq^2\theta) \times \frac{2(1 - \partial \Delta e_i - 2c\theta)}{(1 - \partial \Delta e_i)(\beta - 1)M_T^2}} \quad (40)$$

۹. نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی همزمان تأثیر ساختار، تغییرشکل‌های خزشی و تغییرات دما بر رفتار ترمومکانیکی خاک‌های رسی پرداخته شد. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که مدل‌های رفتاری موجود به طور معمول قادر به در نظر

با جایگذاری $\eta = \frac{q}{p'}$ در رابطه ۲۵، برای بدست آوردن تنش انحرافی به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\frac{P'_{ct}}{P'} = \left(\frac{((-2c\theta - \partial \Delta e_i + 1) \left(\frac{q}{p'} \right)^2 + (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2)}{(\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2} \right)^{\frac{c\theta}{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}} \quad (27)$$

$$\left(\frac{P'_{ct}}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} = \left(\frac{((-2c\theta - \partial \Delta e_i + 1)q^2 + (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2)}{(\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2} \right) \quad (28)$$

$$\begin{aligned} (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2 \left(\frac{P'_{ct}}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} &= (-2c\theta - \partial \Delta e_i + 1)q^2 \\ &+ (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2 \left(\frac{P'_{ct}}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} &= (\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)M_T^2 P'^2 \\ &- (-2c\theta - \partial \Delta e_i + 1)q^2 \end{aligned} \quad (30)$$

$$q = M_T P' \left(\frac{(\partial \Delta e_i - 1)(\beta - 1)}{-2c\theta - \partial \Delta e_i + 1} \left[\left(\frac{P'_{ct}}{P'} \right)^{\frac{2c\theta + \partial \Delta e_i - 1}{c\theta}} - 1 \right] \right)^{0.5} \quad (31)$$

لازم به ذکر است که در صورتی که در رابطه ۲۶، $\beta = 2$ ، $\theta = 0$ و $\delta \Delta e_i = 0$ باشد، در این صورت، سطح تسلیم مدل کم کلی اصلاح شده بدست خواهد آمد.

۸. تعیین کرنش حجمی و برشی پلاستیک

فرض می‌شود که تابع تسلیم خاک به صورت زیر تعریف شود:

$$f(P', q, P'_0) = 0 \quad (32)$$

همچنین تابع پتانسیل خاک به صورت رابطه ۳۳ در نظر گرفته می‌شود:

$$Q(P', q, \xi) = 0 \quad (33)$$

در این رابطه ξ پارامتر کنترل کننده اندازه تابع پتانسیل پلاستیک است. باتوجه به قانون تعامد نمو کرنش حجمی پلاستیک و کرنش برشی پلاستیک برابر خواهد بود با:

$$\delta \varepsilon_v^p = \chi \frac{\partial Q}{\partial P'} \quad (34)$$

Mechanics and Geotechnical Engineering, 7(2), 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.jmge.2015.02.004>

[7] Li, Y., Dijkstra, J., & Karstunen, M. (2018). Thermomechanical creep in sensitive clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11), 04018085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001965](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001965)

[8] Bjerrum, L. (1967). Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Geotechnique*, 17(2), 83-118. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.2.83>

[9] Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., & Bouchard, R. (1985). Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. *Géotechnique*, 35(2), 159-180. <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.2.159>

[10] Yin, J. H., & Graham, J. (1989). Viscous-elastic-plastic modelling of one-dimensional time-dependent behaviour of clays. *Canadian geotechnical journal*, 26(2), 199-209. <https://doi.org/10.1139/t89-029>

[11] Yin, Z. Y., Chang, C. S., Karstunen, M., & Hicher, P. Y. (2010). An anisotropic elastic-viscoplastic model for soft clays. *International Journal of Solids and Structures*, 47(5), 665-677. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.11.004>

[12] Kurz, D., Sharma, J., Alfaro, M., & Graham, J. (2016). Semi-empirical elastic-thermoviscoplastic model for clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1583-1599. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0598>

[13] Zhu, Q. Y., & Qi, P. (2018). Numerical Modeling of Thermal-Dependent Creep Behavior of Soft Clays under One-Dimensional Condition. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), 9827673. <https://doi.org/10.1155/2018/9827673>

[14] Hamidi, A. (2020). A novel elasto-thermoviscoplastic model for the isotropic compression of structured clays. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(4), 06020003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000528](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000528)

[15] Fathalikhani, M., Graham, J., Kurz, D., & Maghoul, P. (2022). Investigation and modification of a CSSM-based elastic-thermoviscoplastic model for clay. *International Journal of Geomechanics*, 22(10), 04022161. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002480](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002480)

گرفتن اثرات این عوامل به صورت توأمان نیستند. در این تحقیق، با مرور مطالعات گذشته، یک مدل جدید ارائه شد که قابلیت در نظر گرفتن همزمان این سه عامل را دارد. در ابتدا، تأثیر هر یک از عوامل ساختار، خزش و تغییرات دما، در صفحه تراکم $e - \ln p'$ به تفکیک مورد بررسی قرار گرفت و سپس نتایج این ارزیابی‌ها برای ترکیب و ایجاد فرمولاسیون نهایی مدل استفاده شد. همچنین، با توجه به روش Hamidi [۱۴] که بر پایه حالت حدی خاک بنا شده است، این تحقیق به بررسی اثرات دما، زمان و ساختار بر رفتار برش خاک‌های رس پرداخت. این یافته‌ها می‌تواند به بهبود درک ما از رفتار خاک‌های رسی در شرایط واقعی کمک کند و راهگشای طراحی‌های بهینه در پروژه‌های ژئوتکنیکی باشد.

۱۰. مراجع

[1] Paaswell, R. E. (1967). Temperature effects on clay soil consolidation. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(3), 9-22. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000982>

[2] Modaressi, H., & Laloui, L. (1997). A thermo-viscoplastic constitutive model for clays. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 21(5), 313-335. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9853\(199705\)21:5%3C313::AID-NAG872%3E3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9853(199705)21:5%3C313::AID-NAG872%3E3.0.CO;2-5)

[3] Sultan, N., Delage, P., & Cui, Y. J. (2002). Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Engineering Geology*, 64(2-3), 135-145. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00143-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00143-0)

[4] Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Ramana, G. V., Grino, L., Rujivipat, P., & Thet, Y. (2006). Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(7), 902-910. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:7\(902\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:7(902))

[5] Hamidi, A., Tourchi, S., & Khazaei, C. (2015). Thermomechanical constitutive model for saturated clays based on critical state theory. *International Journal of Geomechanics*, 15(1), 04014038. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000402](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000402)

[6] Tourchi, S., & Hamidi, A. (2015). Thermo-mechanical constitutive modeling of unsaturated clays based on the critical state concepts. *Journal of Rock*

- [26] Song, D. B., Chen, W. B., Yin, Z. Y., & Yin, J. H. (2025). Thermo-consolidation of layered soils under finite strain: performance evaluation of thermal elastic-viscoplastic constitutive models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 247, 127117. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127117>
- [27] Roscoe, K., & Burland, J. B. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. *Engineering Plasticity* Cambridge, UK, pp 535–609
- [28] Bolzon, G., & Schrefler, B. A. (2005). Thermal effects in partially saturated soils: a constitutive model. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 29(9), 861-877. <https://doi.org/10.1002/nag.437>
- [29] Hamidi, A., & Khazaei, C. (2010). A thermo-mechanical constitutive model for saturated clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4(4), 445-459. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.04.445-459>
- [30] Hamidi, A., Tourchi, S., & Karadooni, F. (2017). A critical state based thermo-elasto-plastic constitutive model for structured clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(6), 1094-1103. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.09.002>
- [16] Chen, Z. J., Feng, W. Q., Chen, W. B., & Yin, J. H. (2023). A thermal elastic visco-plastic model for soft clayey soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 61(2), 208-227. <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0279>
- [17] Liu, M. D., & Carter, J. P. (2002). A structured Cam Clay model. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6), 1313-1332. <https://doi.org/10.1139/t02-069>
- [18] Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., & Liu, M. D. (2010). Modified Structured Cam Clay: A generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays. *Computers and Geotechnics*, 37(7-8), 956-968. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.08.002>
- [19] Shirasb, A., Karimi, A. H., Hamidi, A., & Ahmadi, M. M. (2019). A critical state constitutive model for the isotropic thermal compression of structured sand-bentonite buffers. *Indian Geotechnical Journal*, 49(4), 398-408. <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0325-3>
- [20] Sultan, N., Cui, Y. J., & Delage, P. (2010). Yielding and plastic behaviour of Boom clay. *Géotechnique*, 60(9), 657-666. <https://doi.org/10.1680/geot.7.00142>
- [21] Laloui, L., Leroueil, S., & Chalindar, S. (2008). Modelling the combined effect of strain rate and temperature on one-dimensional compression of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(12), 1765-1777. <https://doi.org/10.1139/T08-093>
- [22] Cekerevac, C., & Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(3), 209-228. <https://doi.org/10.1002/nag.332>
- [23] Yin, J. H., Zhu, J. G., & Graham, J. (2002). A new elastic viscoplastic model for time-dependent behaviour of normally and overconsolidated clays: theory and verification. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 157-173. <https://doi.org/10.1139/t01-074>
- [24] Kelln, C., Sharma, J., Hughes, D., & Graham, J. (2008). An improved elastic-viscoplastic soil model. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10), 1356-1376. <https://doi.org/10.1139/T08-057>
- [25] Amini, D., Maghoul, P., Holländer, H., & Bilodeau, J. P. (2024). A critical state-based thermo-elasto-viscoplastic constitutive model for thermal creep deformation of frozen soils. *Acta Geotechnica*, 19(5), 2955-2973. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02058-1>