

مدل‌سازی رفتار خاک یخ‌زده در چرخه‌های انجماد/ذوب با تأکید بر پارامترهای عمق و نرخ تغییرات دما

آرمیتا حاجی‌زاده^۱؛ احسان طاهری^۲

۱- دانشجوی دکتری رشته معدن گرایش مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- استادیار مکانیک سنگ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

(نویسنده مسئول: e_taheri@modares.ac.ir)

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی رفتار مکانیکی خاک‌های یخ‌زده تحت تأثیر چرخه‌های متناوب انجماد/ذوب با استفاده از مدل رفتاری قریشیان امیری (۲۰۱۶) پرداخته است. این تحقیق با به کارگیری روش اجزای محدود در نرم‌افزار پلکسیس، تأثیر پارامترهای کلیدی شامل عمق نمونه و نرخ تغییرات دمایی را بر پاسخ حجمی خاک مورد تحلیل قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد که خاک در طول چرخه‌های حرارتی از الگوی رفتاری پیچیده‌ای پیروی می‌کند که شامل فازهای انقباض الاستیک اولیه، تورم ناشی از تفکیک یخ و تحکیم پلاستیک در مرحله ذوب می‌باشد. بررسی‌ها حاکی از آن است که لایه‌های سطحی در مقایسه با عمق میانی، تغییرات کرنشی شدیدتری را تجربه می‌کنند و افزایش زمان چرخه‌های حرارتی منجر به کاهش دامنه بالازدگی و افزایش نشست باقی‌مانده می‌گردد. مدل مورد استفاده که بر اساس تئوری تنش فاز جامد و مکش برودتی توسعه یافته است، توانسته رفتار غیرخطی خاک را تحت شرایط مختلف دمایی به خوبی شبیه‌سازی نماید. یافته‌های این تحقیق می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی‌های ژئوتکنیکی در مناطق سردسیر و همچنین توسعه مدل‌های عددی آینده فراهم آورد. نتایج به دست آمده اهمیت در نظر گرفتن اثرات عمق و نرخ تغییرات دما را در ارزیابی پایداری سازه‌های احداث شده بر روی خاک‌های مستعد انجماد مورد تأکید قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی

مدل رفتاری، خاک یخ‌زده، بالازدگی، فرونشست، نرم‌افزار پلکسیس

۱- مقدمه

قرار گرفته است [۱]، [۲]. خاک یخ‌زده ساختاری پیچیده دارد و از ترکیب ذرات خاک، آب و یخ تشکیل شده است. هنگامی که دمای خاک به زیر صفر می‌رسد، آب موجود در منافذ خاک منجمد می‌شود و ساختاری شامل لندهای یخی ایجاد می‌کند. این تغییر حالت از غیر یخ‌زده به یخ‌زده، تأثیرات عمیقی بر رفتار مکانیکی خاک می‌گذارد و ویژگی‌هایی مانند مقاومت، سختی، قابلیت تراکم و نفوذپذیری را دست‌خوش تغییر

طی دهه‌های اخیر، شاخه‌های تخصصی‌تری برای بررسی دقیق‌تر رفتار خاک در شرایط مختلف شکل گرفته‌اند. یکی از این شاخه‌ها که اهمیت فزاینده‌ای یافته، مطالعه خاک‌های یخ‌زده است. این نوع خاک به دلیل کاربردهای گسترده در پروژه‌های معدن‌کاری، ژئوتکنیکی و محیط‌زیست در مناطق سردسیر و مناطقی با انجماد فصلی، مورد توجه ویژه محققان

تا اثرات بارگذاری مکانیکی و تغییرات مکش را بهتر بررسی کنند [۱۴]، [۱۵]. همچنین، متغیرهای جدیدی مانند تنش مؤثر (تفاوت بین تنش کل و فشار آب) و نسبت یخ منافذی (نسبت حجم یخ به حجم ذرات جامد) به مدل اضافه شدند. با این حال، یکی از نقاط ضعف این مدل، در نظر گرفتن فشار محصورکننده مؤثر غیرواقعی در شرایط نزدیک به صفر بودن محتوای یخ بود [۱۶]، [۱۷].

در سال ۲۰۱۶، یک مدل دو متغیره تنشی دیگر معرفی شد که تنش فاز جامد و مکش برودتی را به عنوان متغیرهای اصلی در نظر می‌گرفت. در این مدل، تنش فاز جامد به عنوان ترکیبی از تنش‌های وارد بر دانه‌های خاک و یخ تعریف می‌شد و سهم یخ در مقاومت برشی خاک به طور غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شد. این مدل توانست رفتار میکرومکانیکی خاک را در اثر تغییرات محتوای یخ و دما به خوبی توصیف کند و مکانیزم‌هایی مانند پیش‌ذوب و پیش‌ذوب سطحی را به دقت بررسی کند [۱۸]، [۱۹]. نسخه پیشرفته‌تری از این مدل، یعنی نسخه الاستیک-ویسکوپلاستیک، نیز توسط قریشیان امیری و همکاران در سال ۲۰۱۶ ارائه شد که نتایج قابل قبولی از آن به دست آمد [۲۰].

در این پژوهش، از مدل رفتاری ارائه‌شده توسط قریشیان امیری و همکاران در سال ۲۰۱۶ استفاده شده است که به عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌های موجود در این حوزه شناخته می‌شود. در این مطالعه، رفتار خاک یخ‌زده تحت سناریوهای مختلف انجماد در دو عمق مختلف (سطح نمونه خاک و میانه عمق نمونه) مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. هدف این تحقیق، بررسی تأثیر عمق به عنوان یک عامل کلیدی و غیرمستقیم بر رفتار خاک یخ‌زده است که در این مدل رفتاری به خوبی لحاظ شده است. این تحلیل می‌تواند بینش‌های جدیدی را برای بهبود مدل‌های آینده و کاربردهای عملی در پروژه‌های مرتبط با خاک‌های یخ‌زده فراهم کند.

۲- مدل رفتاری خاک یخ‌زده

در این مطالعه، از مدل رفتاری پیشرفته‌ای که توسط قریشیان امیری و همکاران در سال ۲۰۱۶ ارائه شده است، برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار خاک‌های یخ‌زده استفاده شده

می‌کند. در واقع، خاک یخ‌زده یک سیستم چندفازی است که در آن تبدیل تدریجی آب به یخ تحت تأثیر نیروهای مویبندی، اسمزی و جذبی رخ می‌دهد. فرآیندهای انجماد و ذوب آب در منافذ خاک، تعاملات پیچیده‌ای بین عوامل حرارتی، هیدرولیکی و مکانیکی ایجاد می‌کنند [۳]، [۴]، [۵]، [۶].

یکی از چالش‌های اصلی در مواجهه با خاک‌های یخ‌زده، مسئله پایداری سازه‌هایی است که بر روی این نوع زمین‌ها احداث می‌شوند. تغییرات دما می‌تواند باعث جابجایی خاک و تغییر شکل زمین شود؛ که این موضوع تأثیر مستقیمی بر ایمنی و پایداری سازه‌ها دارد. به همین دلیل، پدیده‌هایی مانند بالازدگی و نشست ناشی از انجماد و ذوب باید در هر پروژه‌ای به دقت بررسی شوند. علاوه بر این، با توجه به پدیده گرمایش جهانی و ذوب یخ‌ها، خطرات ناشی از تغییرات زمین‌برودتی به یک تهدید جدی برای مناطق شمالی کره زمین تبدیل شده و چالش‌های بزرگی را برای پروژه‌های عمرانی و توسعه شهری ایجاد کرده است [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]. بنابراین، انجام مطالعات مهندسی دقیق بر روی خاک‌های یخ‌زده قبل از اجرای هر پروژه‌ای ضروری است و باید از مدل‌های رفتاری پیشرفته برای مدیریت چالش‌های ژئوتکنیکی و ژئومورفولوژیکی استفاده شود [۱]، [۱۱].

در طول سال‌ها، مدل‌های رفتاری متعددی برای تحلیل رفتار خاک‌های یخ‌زده توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۰۸، مدل‌هایی ارائه شدند که از فشار آب و یخ برای ارزیابی شرایط یخ‌زدگی استفاده می‌کردند. این مدل‌ها برای مطالعه پدیده تفکیک یخ در طول فرآیند انجماد مفید بودند، اما در پیش‌بینی دقیق مقاومت خاک پس از تفکیک یخ ضعف داشتند [۱۲]. در سال ۲۰۰۹، یک مدل جدید مبتنی بر دو متغیر تنشی معرفی شد که رفتار الاستیک-پلاستیک خاک را بررسی می‌کرد. این مدل از تنش خالص (تفاوت بین تنش کل و فشار یخ) و مکش برودتی به عنوان متغیرهای کلیدی استفاده می‌کرد و بر پایه مدل آلونزو برای خاک‌های اشباع یخ‌زده توسعه یافته بود. با این حال، این مدل در توصیف کامل فرآیندهای میکروسکوپی انجماد و ذوب با محدودیت‌هایی مواجه بود [۱۳]. این مدل در سال‌های بعد بهبود یافت و در سال ۲۰۱۵، مفاهیم جدیدی مانند تنش فاز جامد، منحنی‌های تسلیم و قوانین سخت‌شوندگی به آن اضافه شدند

ترکیبی از تنش‌های وارد بر دانه‌های خاک و یخ است (۱)، در حالی که مکش برودتی اختلاف فشار بین فاز آب و یخ را نشان می‌دهد (۲).

$$\sigma^* = \sigma - S_{uw}p_w I \quad (1)$$

$$s_c = p_w - p_{ice} \approx -\rho_{ice} L \frac{T}{T_f} \quad (2)$$

در رابطه (۱)، فشار به کار رفته منفی در نظر گرفته می‌شود. همچنین در رابطه (۲)، فشار آب و فشار یخ هر دو منفی هستند. از این روابط می‌توان دریافت که خاک یخزده یک سیستم متخلخل است که از دانه‌های خاک و یخ به عنوان بخش جامد و فضاها خالی بین آن‌ها که با آب پر می‌شوند، تشکیل شده است. حضور یخ در بخش جامد خاک نشان می‌دهد که یخ قادر به تحمل تنش‌های برشی است. تنش فاز جامد در این مدل عملکردی مشابه تنش مؤثر بیشاپ دارد و تأثیر آب بر رفتار مکانیکی خاک را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، مکش برودتی به عنوان متغیر دوم حالت، یک چارچوب هیدرومکانیکی کامل ایجاد می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود تأثیر محتوای یخ و متغیرهای دما به‌وضوح قابل مشاهده و تحلیل باشد.

۲-۲- تجزیه کرنش

تغییرات کرنش ($d\epsilon$) به چهار جزء تقسیم می‌شود: کرنش الاستیک فاز جامد ($d\epsilon^{me}$)، کرنش الاستیک ناشی از تغییرات مکش ($d\epsilon^{se}$)، کرنش پلاستیک فاز جامد ($d\epsilon^{mp}$) و کرنش پلاستیک ناشی از تغییرات مکش ($d\epsilon^{sp}$) تغییرات کرنش کل از جمع این چهار جزء به‌دست می‌آید (۳).

$$d\epsilon = d\epsilon^{me} + d\epsilon^{se} + d\epsilon^{mp} + d\epsilon^{sp} \quad (3)$$

۲-۳- رفتار الاستیک

کرنش الاستیک فاز جامد با استفاده از پارامترهای الاستیک مانند مدول برشی (G)، مدول بالک (K) (۵) و مدول یانگ (E_{ij}) (۶) محاسبه می‌شود.

است. این مدل نه تنها برای خاک‌های یخزده کاربرد دارد، بلکه در شرایطی که محتوای یخ صفر است، می‌تواند برای خاک‌های غیر یخزده نیز مورد استفاده قرار گیرد. این قابلیت، مدل را برای بررسی خاک قبل از انجماد یا پس از ذوب کامل یخ، بسیار ارزشمند می‌کند. این مدل قادر است رفتار خاک را در حالت‌های الاستیک-پلاستیک و تحت شرایط مختلف بارگذاری به‌طور دقیق توصیف کند. همچنین، این مدل به عنوان یک ابزار قابل اعتماد و با دقت بالا، در نرم‌افزار پلکسیس پیاده‌سازی شده و به کاربران ارائه شده است [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۳].

رفتار خاک یخزده در مقایسه با خاک‌های خشک، اشباع یا نیمه‌اشباع، بسیار پیچیده‌تر است. به همین دلیل، مدل رفتاری خاک یخزده شامل فرمول‌بندی‌های پیچیده‌ای است که تلاش می‌کند رفتار خاک را در حالت‌های مختلف پیش‌بینی کند.

مدل رفتاری قریشیان بر پایه نظریه آلونزو (۱۹۹۰) توسعه یافته است. برخلاف مدل‌های قدیمی‌تر که بر اساس نظریه تنش مؤثر بیشاپ و با استفاده از پارامتر χ (مرتبط با درجه اشباع خاک) عمل می‌کردند، این مدل از تنش خالص و مکش به عنوان متغیرهای اصلی برای توصیف درجه اشباع و میزان انجماد استفاده می‌کند [۲۴]، [۲۵]. این مدل از هفت بخش اصلی تشکیل شده است که هر کدام ویژگی‌های خاصی از خاک را بررسی می‌کنند که عبارتند از: تنش مؤثر، تجزیه کرنش، رفتار الاستیک، سطوح تسلیم، قوانین سخت‌شوندگی، قوانین جریان و دمای انجماد/ذوب آب محتوا. در ادامه، هر یک از این بخش‌ها به‌طور مختصر توضیح داده می‌شوند [۲۶].

۲-۱- تنش مؤثر

در این مدل، تنش مؤثر به‌صورت دو متغیر حالت تنش، یعنی تنش فاز جامد و مکش برودتی، تعریف می‌شود. تنش فاز جامد

$$G = (1 - S_i)G_0 + \frac{S_i E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad (4)$$

$$K = -(1 - S_i) \frac{(1 + e)p_{y0}^*}{\kappa_0} + \frac{S_i E_f}{3(1 - 2\nu_f)} \quad (5)$$

$$E_f = E_{f,ref} - E_{f,inc}(T - T_{ref}) \quad (6)$$

تسلیم بارگذاری شکست و سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها (۸) استفاده می‌شوند.

۲-۴- سطوح تسلیم

سطوح تسلیم برای خاک‌های یخ‌زده و غیر یخ‌زده به‌طور جداگانه تعریف می‌شوند. برای خاک‌های یخ‌زده، سطح

$$F_1 = (p^* - k_t s_c) [(p^* - k_t s_c) S_{uw}^m - (p_y^* - k_t s_c)] + \left(\frac{q^*}{M}\right)^2 \quad (7)$$

$$F_2 = s_c - s_{c,seg} = 0 \quad (8)$$

شکل ۲- تاثیر پارامتر تسلیم در شکل سطح تسلیم در صفحه $S_{uw}=0.01$ با p^*-q^* از محورهای q^* و s_c برای پارامتر تسلیم m در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. همچنین، تأثیر پارامتر تسلیم بر روی شکل سطح تسلیم در صفحه p^*-q^* با فرض ثابت بودن درجه اشباع آب (S_{uw}) و مقدار 0.01 برای آن، در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۲-۵- قوانین سخت‌شوندگی

سخت‌شوندگی خاک در اثر فشردگی پلاستیک با استفاده از رابطه (۹) توصیف می‌شود.

$$\frac{dp_{y0}^*}{p_{y0}^*} = -\frac{1+e}{\lambda_0 - \kappa_0} d\epsilon_v^{mp} - \frac{1+e}{\lambda_0 - \kappa_0} d\epsilon_v^{sp} \quad (9)$$

با رخ دادن پدیده تفکیک یخ، تغییر شکل پلاستیک و اتساع خاک سبب می‌شود که سطح تسلیم مربوط به تفکیک دانه‌ها به سمت بالا جابجا شود. از سوی دیگر، در حالت‌هایی که خاک رفتار نرم‌شونده‌تری دارد، این فرآیند منجر به پایین آمدن سطح تسلیم بارگذاری شکست می‌شود.

۲-۶- قوانین جریان

برای سطح تسلیم بارگذاری شکست، قانون جریان ناهمراه (۱۰) و برای سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها، قانون جریان همراه (۱۱) استفاده می‌شوند.

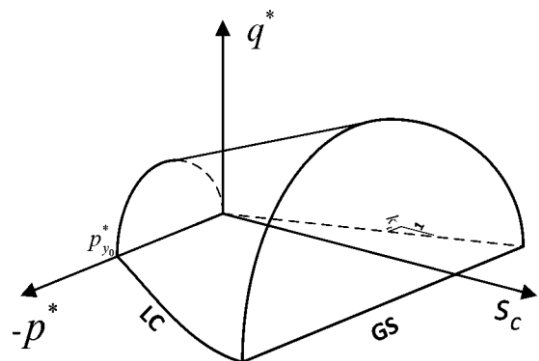
$$d\epsilon^{mp} = d\lambda_1 \frac{\partial Q_1}{\partial \sigma^*} \quad (10)$$

$$d\epsilon^{sp} = d\lambda_2 \frac{\partial F_2}{\partial s_c} I \quad (11)$$

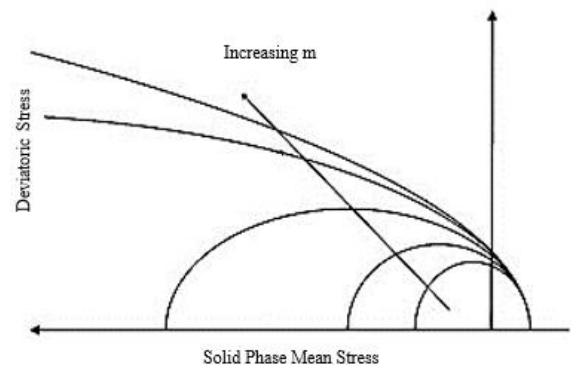
۲-۷- دمای ذوب-انجماد و اشباع آب

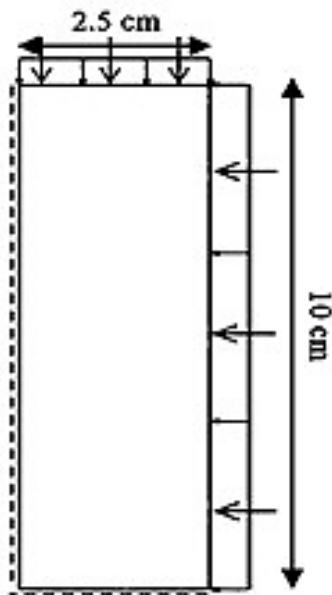
دمای ذوب/انجماد و اشباع آب یخ‌زده به ترتیب با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شوند.

$$T_f = T_{ref} \left(\frac{p_{ice}}{-p_{ref}} + 1 \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (12)$$



شکل ۱- سطح تسلیم در فضای سه بعدی $p^*-q^*-s_c$ برای $m=0$ [۲۶]





شکل ۳- هندسه نمونه مورد مطالعه

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل [۲۳]

پارامترهای کلی	
Drainage type	Drained
γ_{unsat} (N/m ³)	20×10^3
γ_{sat} (N/m ³)	20×10^3
e_0 (-)	۰/۹
پارامترهای دمایی	
c_s (J/kg/K)	۹۴۵
λ_{s1} (W/m/K)	۱/۵
ρ_s (kg/m ³)	۲۶۰۰
α_x (1/K)	$5/2 \times 10^{-6}$
α_y (1/K)	$5/2 \times 10^{-6}$
α_z (1/K)	$5/2 \times 10^{-6}$
پارامترهای آب زیرزمینی	
k_x (m/s)	$1/396 \times 10^{-6}$
K_y (m/s)	$1/396 \times 10^{-6}$

پس از تعیین هندسه و مشخصات خاک، شرایط مرزی و بارهای خارجی اعمالی به شرح زیر تعریف می‌شوند:

- فشار محصورکننده: برای نزدیک کردن شرایط مدل به وضعیت واقعی زمین، فشاری معادل ۹۰ کیلوپاسکال به مرزهای راست و بالایی مدل اعمال گردید. این فشار به

$$S_{uw} = \left[1 + \left(\frac{S_c}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_r}} \right]^{-\lambda_r} \quad (13)$$

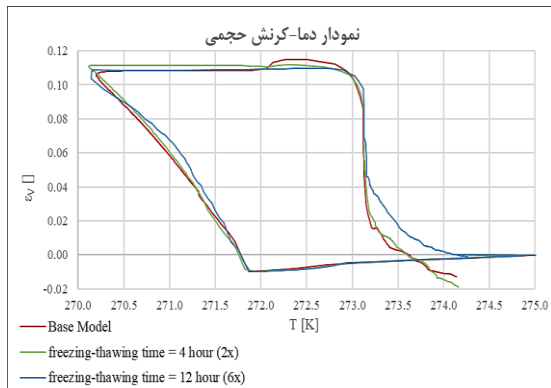
این مدل رفتاری با در نظر گرفتن تمامی این بخش‌ها، ابزاری قدرتمند برای تحلیل رفتار خاک‌های یخزده و غیر یخزده در شرایط مختلف فراهم می‌کند.

۳- مطالعه موردی

تحقیق حاضر به بررسی رفتار خاک یخزده از طریق شبیه‌سازی عددی پرداخته است. مطالعه موردی روی نمونه‌ای از این خاک با استفاده از مدل رفتاری ارائه شده در بخش‌های قبلی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار پلکسیس در چارچوب روش اجزای محدود انجام شده است. برای اعتبارسنجی مدل، از نتایج شبیه‌سازی‌های اولیه‌ای که پیش‌تر توسط دکتر قریشیان امیری انجام شده بود، استفاده گردید [۲۳].

مشخصات اصلی فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه مورد نظر به شکل یک ستون استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به ویژگی تقارن محوری نمونه و برای کاهش حجم محاسبات، شبیه‌سازی تنها بر روی یک چهارم مقطع نمونه انجام گرفت. در نتیجه، مدل نهایی به صورت یک مستطیل دویبعدهی با ابعاد ۲/۵ سانتی‌متر عرض و ۱۰ سانتی‌متر طول تعریف شد. نمای نمونه مورد مطالعه در شکل ۳ قابل مشاهده است.

consolidation همراه است. در فاز ذوب، هنگامی که تنش موثر به بارگذاری شکست می‌رسد، پدیده‌های فشرده‌گی پلاستیک و تثبیت ناشی از ذوب منجر به نشست خاک می‌شوند. مدل‌ها بعد از انقباضی کوچک، دچار انبساط شده و دوباره منقبض می‌شوند اما در انتهای چرخه انجماد/ذوب، در حجم کمی بزرگ‌تر از حجم اولیه متوقف می‌شود. سپس با ادامه تغییر دما و شروع چرخه بعدی، مجدداً خاک دچار انقباضی کوچک شده و چرخه بعدی را با حجم کمتری شروع می‌کند. در ادامه خروجی‌های مربوط به مدل با تغییر عامل بیرونی سرعت تغییر دما نشان داده شده‌اند و تاثیر این پارامتر با حالت اولیه مدل مقایسه می‌شود.



شکل ۴- نمودار دما-کرنش حجمی با تغییر زمان انجماد/ذوب برای یک نقطه فوقانی مدل

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، رفتار کرنش حجمی خاک در چرخه‌های انجماد و ذوب، یک روند رفت و برگشتی را نشان می‌دهد. در فاز اول چرخه، با کاهش دما از ۲۷۴/۹ به ۲۷۲/۵ کلوین، نمونه منقبض شده و ذرات به صورت کشسان یا الاستیک به هم نزدیک می‌شوند. با ادامه کاهش دما تا ۲۷۰/۲۵ کلوین، تنش‌های ناشی از سرمایش از سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها فراتر رفته و فرآیند تفکیک یخ آغاز می‌شود که منجر به افزایش ناگهانی حجم خاک می‌گردد. این مکانیسم، علت اصلی پدیده بالازدگی محسوب می‌شود. در فاز گرمایش، با افزایش دما ابتدا تا ۲۷۲/۷۵ و سپس تا ۲۷۴ کلوین، حجم خاک مجدداً کاهش می‌یابد، اما دقیقاً به حالت اولیه باز نمی‌گردد. این پدیده نشان‌دهنده تأثیرات ماندگار

مرزهای چپ و پایینی وارد نشد، چرا که این سطوح متناظر با محورهای تقارن هندسی نمونه بودند.

- بارگذاری حرارتی (چرخه انجماد-ذوب): به منظور شبیه‌سازی پدیده یخ‌زدگی و اثرات مرتبط با آن نظیر تفکیک یخ، تورم ناشی از انجماد و نشست در اثر ذوب، یک چرخه دمایی سینوسی بر روی نمونه اعمال شد. در این چرخه، دما به صورت متناوب زیر صفر (برای انجماد) و بالای صفر (برای ذوب) تغییر می‌کند. مدت زمان هر چرخه کامل ۲ ساعت در نظر گرفته شد. تابع تغییرات دما نسبت به زمان به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌گردد.

$$T = 1 - 5 \sin\left(\frac{2\pi}{14400} t\right) \quad (14)$$

در مرحله اول مدلسازی مدل فوق اجرا گردیده و نتایج حاصله از آن ثبت شد. در مرحله بعد زمان وقوع چرخه انجماد/ذوب به ترتیب ۲ و ۶ برابر و معادل ۴ و ۱۲ ساعت تعیین شد. تابع زمانی اعمال گرما به مدل در این دو حالت تغییر کرده و به ترتیب برابر رابطه (۱۵) و (۱۶) شده است.

$$T = 1 - 5 \sin\left(\frac{\pi}{28800} t\right) \quad (15)$$

$$T = 1 - 5 \sin\left(\frac{\pi}{86400} t\right) \quad (16)$$

پس از اجرای هر سه مدل، خروجی‌های کلیدی شامل کرنش حجمی و درجه اشباع یخ استخراج و در قالب نمودارهای مقایسه‌ای ارائه شدند. برای سهولت در اشاره، مدل‌ها بر اساس زمان چرخه به ترتیب به عنوان مدل ۱ (۲ ساعت)، مدل ۲ (۴ ساعت) و مدل ۳ (۱۲ ساعت) نام‌گذاری شدند.

در شکل ۴، در مدل ۱، فرآیند تغییر حجم خاک از مکانیسم‌های پیچیده‌ای تبعیت می‌کند. در مرحله اولیه کاهش دما، رفتار الاستیک (k_s) غالب می‌شود که از طریق ایجاد پیوند بین ذرات خاک موجب کاهش حجم نمونه می‌گردد. با تداوم کاهش دما و رسیدن مکش برودتی (s_c) به آستانه تسلیم تفکیک دانه‌ها، پدیده تفکیک یخ فعال شده و منجر به تورم قابل توجه خاک (بالازدگی در اثر انجماد) می‌شود. این فرآیند با جابجایی مرز تسلیم بارگذاری شکست به سمت داخل و کاهش تنش پیش تثبیت (*pre-*)

بررسی رفتار خاک در عمق در شکل ۵ نشان‌دهنده تأخیر تغییر فاز قابل توجهی نسبت به سطح خاک است و چرخه انجماد/ذوب به طور کامل در عمق طی نمی‌شود. هر سه منحنی رفتار کلی مشابهی دارند اما مدل ۳ که دارای کمترین نرخ تغییر دما است، بیشترین مسیر تغییرات کرنش را با مقادیر $10^{-2} \times 1/0.6$ و $10^{-1} \times 1/2.6$ طی می‌کند که در مقایسه با دو مدل دیگر، کمترین افزایش حجم را نسبت به سطح دارد. در عمق، کرنش مدل ۱ بین $10^{-3} \times 9/14$ تا $10^{-1} \times 1/16$ در تغییر است که نشان‌دهنده افزایش ۱ درصدی در کرنش تورمی و ۵/۶ درصدی در کرنش انقباضی نسبت به سطح می‌باشد. این اختلاف مقادیر عمدتاً ناشی از عوامل متعددی از جمله میزان یکنواختی توزیع دما در عمق، ابعاد رشد بلورهای یخ، تأخیر زمانی در انتقال حرارت و اثرات اندرکنش تنش-کرنش در ماتریس خاک است. این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که نرخ تغییر دما و عمق نمونه تأثیر معناداری بر دامنه و الگوی تغییرات حجمی خاک یخزده دارد.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی رفتار پیچیده خاک‌های یخزده تحت چرخه‌های انجماد-ذوب با استفاده از مدل پیشرفته رفتاری ارائه شده توسط قریشیان امیری و همکاران (۲۰۱۶) پرداخت. شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، پاسخ کرنش حجمی خاک را در اعماق مختلف و تحت نرخ‌های متفاوت چرخه‌های حرارتی مورد تحلیل قرار داد. نتایج نشان داد که خاک یخزده در طول چرخه‌های انجماد-ذوب دچار تغییر شکل‌های قابل توجه و اغلب غیرقابل بازگشت می‌شود. در فاز انجماد، انقباض اولیه الاستیک به تدریج به بالادگی ناشی از تشکیل لایه‌های یخی تبدیل شده و منجر به افزایش حجم خاک می‌گردد. در فاز ذوب، خاک تحت تحکیم ناشی از ذوب قرار می‌گیرد اما هرگز به حجم اولیه خود بازمی‌گردد که این امر نشان‌دهنده تغییرات دائمی در ساختار میکروسکوپی خاک است.

مطالعه همچنین تفاوت‌های رفتاری خاک را در اعماق مختلف آشکار ساخت. لایه‌های سطحی نوسانات کرنشی شدیدتری را نسبت به لایه‌های میانی نشان دادند، جایی که تأخیر حرارتی و کاهش کارایی تفکیک یخ منجر به تغییر شکل‌های با تأخیر و کمتر شد. علاوه بر این، مدت زمان چرخه‌های انجماد-ذوب

چرخه‌های انجماد/ذوب بر ساختار خاک است که ناشی از کاهش تنش پیش‌تحکیمی و تغییر موقعیت منحنی تسلیم به سمت داخل می‌باشد. در واقع، برخورد منحنی رفتار خاک با سطح تسلیم، منجر به فشردگی پلاستیکی مشابه فرآیند ذوب تحکیمی می‌شود.

نتایج کمی حاصل از مدل ۱ و مدل‌های ۲ و ۳ در شکل ۴ نشان‌دهنده الگوی مشخصی در رفتار خاک است. در یک چرخه حرارتی کامل، در مدل ۱ کرنش حجمی ابتدا از مقدار اولیه $10^{-3} \times 9/68$ تا $10^{-1} \times 1/15$ واحد افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تورم ناشی از یخ‌زدگی است. پس از تکمیل فرآیند ذوب، کرنش باقیمانده در حدود $10^{-3} \times 3/65$ ثبت شده است که حاکی از انقباض دائمی نمونه می‌باشد. مقایسه بین مدل‌های مختلف در شکل ۴ نشان می‌دهد که اگرچه تمامی مدل‌ها الگوی رفتاری مشابهی از خود نشان می‌دهند، اما مقادیر کرنش در آنها متفاوت است. به عنوان مثال، مدل ۲ دامنه کرنشی بین $10^{-3} \times 9/50$ تا $10^{-1} \times 1/12$ و مدل ۳ دامنه‌ای بین $10^{-3} \times 9/91$ تا $10^{-1} \times 1/10$ را تجربه می‌کنند. مدل ۳ کمترین انقباض و بیشترین انقباض را نشان می‌دهد.

در شکل ۵ نمودار تغییرات کرنش حجمی خاک در اثر تغییر دما در عمق میانی نمونه مشاهده می‌شود. مقایسه نمودارهای رسم شده در شکل ۴ و شکل ۵ می‌تواند درک خوبی از تغییر رفتار خاک در عمق نسبت به سطح به وجود آورد.



شکل ۵- نمودار دما-کرنش حجمی با تغییر زمان انجماد/ذوب برای یک نقطه میانی مدل

۵- فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد
ظرفیت گرمایی مخصوص	$J/kg/K$	c_s
نسبت پوکی	-	e
نسبت پوکی اولیه	-	e_0
نرخ تغییرات چسبندگی ظاهری با مکش	-	k_t
رسانایی نفوذپذیری در جهات x , y و z	m/s	$k_{x,y}$
تنش موثر اصلی	N/m^2	p^*
فشار یخ	N/m^2	p_{ice}
پارامتر وابستگی فشار به دمای ذوب یخ	N/m^2	p_{ref}
فشار آب منفذی	N/m^2	p_w
تنش شبه پیش تحکیمی برای شرایط انجماد	N/m^2	p^*_y

نقش مهمی در رفتار خاک ایفا کرد. چرخه‌های کندتر باعث کاهش بالازدگی اما افزایش نشست باقی‌مانده می‌شدند که نشان‌دهنده اهمیت خزش وابسته به زمان و سرعت پایین تغییر تنش در رفتار بلندمدت خاک در مقیاس آزمایشگاهی است.

مدل رفتاری مورد استفاده در این تحقیق که تنش فاز جامد و مکش برودتی را در نظر می‌گیرد، توانست تعاملات ترموهیدرومکانیکی خاک‌های یخ‌زده را به خوبی شبیه‌سازی کند. قابلیت این مدل در شبیه‌سازی تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک تحت شرایط مختلف، آن را به ابزاری ارزشمند برای پیش‌بینی رفتار خاک در کاربردهای مهندسی تبدیل می‌کند. با این حال، اعتبارسنجی بیشتر با داده‌های میدانی و توسعه مدل برای خاک‌های ناهمگن می‌تواند کاربرد عملی آن را افزایش دهد.

در نهایت، این تحقیق به درک عمیق‌تری از مکانیک خاک‌های یخ‌زده کمک کرده و پایه‌ای برای بهبود مقاومت سازه‌ها در مناطق دارای خاک‌های منجمد دائمی یا فصلی فراهم می‌کند. با توجه به تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر رژیم‌های حرارتی، یافته‌های این تحقیق برای توسعه راهبردهای انطباقی به منظور کاهش مخاطرات ناشی از انجماد در پروژه‌های عمرانی حیاتی خواهد بود. تحقیقات آینده باید بر روی ادغام دینامیک جریان در خاک‌های غیراشباع و اعتبارسنجی پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های پایش واقعی متمرکز شود تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد.

شرح	واحد	نماد	شرح	واحد	نماد
ضریب تراکم الاستیک برای تغییرات مکش	-	κ_s	تنش پیش تحکیمی برای شرایط غیر یخزده	N/m^2	\mathbf{p}^*_{y0}
ضریب تراکم پذیری الاستیک-پلاستیک برای حالت یخزده	-	λ	تنش انحرافی مکش برودتی	N/m^2	q^*
ضریب تراکم پذیری الاستیک-پلاستیک برای حالت غیر یخزده	-	λ_0	آستانه تفکیک زمان	N/m^2	$s_{c,seg}$
پارامتر برای برازش منحنی اشباع آب غیر منجمد	-	λ_r	مدول یانگ خاک یخزده	N/m^2	t
رسانایی حرارتی	W/mK	λ_{st}	نرخ تغییرات مدول یانگ با دما	N/m^2K	E_f
ضریب پلاستیک در رابطه با سطح تسلیم بارگذاری-فروپاشی	-	$d\lambda_1$	مدول یانگ خاک یخزده در یک دمای مرجع	N/m^2	$E_{f,inc}$
ضریب پلاستیک در رابطه با سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها	-	$d\lambda_2$	معیار شکست	-	$E_{f,ref}$
نسبت پوآسون خاک یخزده	-	ν_f	مدول برشی	N/m^2	F
دانسیتة یخ	kg/m^3	ρ_{ice}	مدول برشی برای شرایط غیر یخزده	N/m^2	G
پارامتر برای برازش منحنی اشباع آب غیر یخزده	N/m^2	ρ_r	مدول بالک	N/m^2	G_0
دانسیتة مواد جامد	kg/m^3	ρ_s	گرمای نهان همجوشی آب	J/kg	K
تنش خالص	N/m^2	σ	شیب خط بحرانی	-	L
تنش فاز جامد	N/m^2	σ^*	تابع پتانسیل پلاستیک	-	M
			اشباع یخ	-	Q_1
			اشباع آب	-	S_i
			دمان کنونی	K	S_{uw}
			دمای ذوب/انجماد	K	T
			دمای مرجع	K	T_f
			پارامتر وابستگی فشار به دمای ذوب یخ	-	T_{ref}
			ضریب انبساط گرمایی در جهات x, y و z	$1/K$	α
			وزن مخصوص خاک اشباع	N/m^3	$\alpha_{x,y,z}$
			وزن مخصوص خاک غیر اشباع	N/m^3	γ_{sat}
			افزایش کرنش	-	γ_{unsat}
			افزایش کرنش حجمی پلاستیک با توجه به تغییرات تنش فاز جامد	-	$d\epsilon$
			افزایش کرنش حجمی پلاستیک با توجه به تغییرات مکش	-	$d\epsilon^{mp}_v$
			ضریب تراکم پذیری الاستیک خاک غیر یخزده	-	$d\epsilon^{sp}_v$
				-	κ_0

۶- منبع‌ها

- [1] S. A. Ghoreishian Amiri and G. Grimstad, "Constitutive Model for Long-Term Behavior of Saturated Frozen Soil," in *Poromechanics VI*, 2017, pp. 1005–1012. doi: 10.1061/9780784480779.125.
- [2] H. Zhang *et al.*, "Measurement and modeling of excess pore-water pressure in warm saturated frozen soil based on dynamic loading effect," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 110, pp. 132–144, 2025, doi: 10.1016/j.aej.2024.10.007.
- [3] C. Lyu, S. A. Ghoreishian Amiri, H. Gao, T. Ingeman-Nielsen, and G. Grimstad, "Joint Acoustic and Electrical Measurements for Unfrozen Water Saturation Estimate—A Review," in *Cold Regions Engineering 2019*, 2019, pp. 26–34. doi: 10.1061/9780784482599.004.
- [4] S. Nishimura, A. Gens, S. Olivella, and R. J. Jardine, "THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application," *Géotechnique*, vol. 59, no. 3, pp. 159–171, 2009, doi: 10.1680/geot.2009.59.3.159.
- [5] H. Zheng, N. Yang, J. Si, C. Ma, and S. Kanie, "Influence of ice skeleton on the mechanical behavior of frozen soil under uniaxial compression," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 228, p. 104327, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104327>.
- [6] Z. Yao, X. Fu, and N. Li, "Mechanical behavior and improved hypoplastic constitutive model for saturated frozen sand," *Research in Cold and Arid Regions*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2024.12.005>.
- [7] L. Cicchetti, "Thermo-Hydro-Mechanical simulations of artificial ground freezing," 2018. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56068144>
- [8] Z. Wen, Y. Sheng, H. Jin, S. Li, G. Li, and Y. Niu, "Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 64, no. 3, pp. 248–255, 2010, doi: 10.1016/j.coldregions.2010.01.009.
- [9] T. Wang, H. Jia, Q. Sun, and G. Li, "Effect of the frozen layer on the stability of cut soil slopes during seasonal freezing and thawing," *Research in Cold and Arid Regions*, vol. 14, no. 5, pp. 281–292, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2022.12.001>.
- [10] M. Shen, Z. Zhou, W. Ma, Z. Wen, F. Liu, and J. Zheng, "A new measurement method of volumetric frost heave deformation of freezing soil under complex pressure and constraint conditions," *Measurement*, vol. 231, p. 114627, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114627>.
- [11] K. Huang *et al.*, "Mechanical properties and constitutive model of artificial frozen sandy soils under true triaxial stress state conditions," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, p. 105026, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.105026.
- [12] D. Nicolsky, V. Romanovsky, G. Tipenko, and D. Walker, "Modeling biogeophysical interactions in nonsorted circles in the Low Arctic," *J Geophys Res*, vol. 113, May 2008, doi: 10.1029/2007JG000565.
- [13] H. Thomas, P. Cleall, Y.-C. Li, C. Harris, and M. Kern-Luetschg, "Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils," *Geotechnique*, vol. 59, pp. 173–184, Jan. 2009, doi: 10.1680/geot.2009.59.3.173.
- [14] S. A. Ghoreishian Amiri, M. Kadivar, and G. Grimstad, *A thermo-hydro-mechanical constitutive model for saturated frozen soils*. 2015. doi: 10.3233/978-1-61499-601-9-1024.
- [15] K.-Q. Li and Z.-Y. Yin, "State of the Art of Coupled Thermo–hydro–Mechanical–Chemical Modelling for Frozen Soils," *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2024, doi: 10.1007/s11831-024-10164-w.
- [16] Z. Yao and M. R. L., "Thermal-Hydro-Mechanical Analysis of Frost Heave and Thaw Settlement," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 141, no. 7, p. 04015027, Jul. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001305.
- [17] R. Tian, X. Huang, R. Zhao, and H. Luo, "Research on the Geosynthetic-Encased Gravel Pile Composite Highway Foundation in Low-Temperature Stable Permafrost Regions," *Buildings*, 2024, doi: 10.3390/buildings14113612.
- [18] M. M. Kebria and S. Na, "A coupled phase-field method (PFM) and thermo-hydro-mechanics

- (THM) based framework for analyzing saturated ice-rich porous materials,” *Int J Numer Anal Methods Geomech*, vol. 48, no. 5, pp. 1245–1277, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/nag.3685>.
- [19] S. Nishimura, M. Liang, and C. Lyu, “Analysis of freezing and thawing processes in clay with freeze-induced compression (FIC) model,” *Soils and Foundations*, vol. 65, no. 1, p. 101559, 2025, doi: 10.1016/j.sandf.2024.101559.
- [20] S. A. Ghoreishian Amiri, G. Grimstad, and M. Kadivar, “An elastic-viscoplastic model for saturated frozen soils,” *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 26, no. 7, pp. 2537–2553, May 2022, doi: 10.1080/19648189.2016.1271361.
- [21] D. Amini, P. Maghoul, H. Holländer, and J.-P. Bilodeau, “A critical state-based thermo-elasto-viscoplastic constitutive model for thermal creep deformation of frozen soils,” *Acta Geotech*, vol. 19, no. 5, pp. 2955–2973, 2024, doi: 10.1007/s11440-023-02058-1.
- [22] B. Wang, X. Xu, X. Wang, Q. Gu, and T. Chen, “Mechanical behavior and strength criterion of frozen silty clay under complex stress paths,” *Geoderma*, vol. 435, p. 116506, 2023, doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116506.
- [23] S. A. Ghoreishian Amiri, G. Grimstad, M. Aukenthaler, S. Panagoulas, R. B. J. Brinkgreve, and A. Haxaire, “The frozen and unfrozen soil model,” 2016. Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/556409594/3113-PLAXIS-The-Frozen-and-Unfrozen-Soil-Model-2016>
- [24] E. Alonso, A. Gens, and A. Josa, “Constitutive Model for Partially Saturated Soils,” *Géotechnique*, vol. 40, Jan. 1990, doi: 10.1680/geot.1990.40.3.405.
- [25] M. Nuth and L. Laloui, “Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework,” *Int J Numer Anal Methods Geomech*, vol. 32, no. 7, pp. 771–801, May 2008, doi: 10.1002/nag.645.
- [26] S. A. Ghoreishian Amiri, G. Grimstad, M. Kadivar, and S. Nordal, “Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 53, pp. 1646–1657, Jun. 2016, doi: 10.1139/cgj-2015-0467.



Modeling the Behavior of Frozen Soil Under Freeze/Thaw Cycles with Emphasis on Depth and Temperature Change Rate Parameters

Armita Hajizadeh¹; Ehsan Taheri^{2*}

1- PhD student in Mining, Rock Mechanics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor of Rock Mechanics, Faculty of Engineering and Technology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received: 28 July 2025 Accepted: 22 September 2025
(*Corresponding author: e_taheri@modares.ac.ir)

Keywords

Constitutive Model
Frozen Soil
Frost Heave
Thaw Settlement
Plaxis Software

Final English Extended Abstract

Summary

This study investigates the mechanical behavior of frozen soils under freeze/thaw cycles, focusing on the effects of depth and temperature change rates. Employing the Ghoreishian Amiri (2016) constitutive model and finite element simulations in PLAXIS, the research analyzes volumetric strain

responses in soil layers. Key findings reveal complex behavioral phases: initial elastic contraction, ice-lens-induced swelling, and plastic consolidation during thawing. Surface layers exhibit more severe strain fluctuations than deeper layers, while longer thermal cycles reduce frost heave but increase residual settlement. The model successfully captures nonlinear soil behavior under varying thermal conditions, offering insights for geotechnical designs in cold regions.

Introduction

Frozen soils, critical for infrastructure in cold climates, undergo significant mechanical changes during freeze-thaw cycles, posing challenges for engineering stability. This research addresses the gap in understanding depth-dependent behavior and thermal rate effects, which are often overlooked in existing models. The study leverages the Ghoreishian Amiri model (a robust framework integrating solid-phase stress and cryogenic suction) to simulate these dynamics. Objectives include quantifying strain variations across depths, validating the model's predictive accuracy, and providing practical recommendations for mitigating frost-related deformations in construction projects.

Methodology and Approaches

The study employs a cylindrical soil sample (5 cm diameter, 20 cm height) simulated in PLAXIS using axisymmetric finite element analysis. Key parameters include soil porosity, thermal conductivity, and cryogenic suction, calibrated from experimental data. The model applies sinusoidal thermal cycles (2-12 hours) to mimic natural freeze/thaw processes, with boundary conditions reflecting in-situ confining pressures (90 kPa). The Ghoreishian Amiri model's elastic-viscoelastic formulation accounts for phase transitions, ice-lens formation, and plastic hardening, enabling precise strain prediction under thermal loading.

Results and Conclusions

1. Depth Effects: Surface layers experience 5.6% higher volumetric strain than mid-depth layers due to delayed heat transfer and reduced ice segregation efficiency.
2. Thermal Rate Dependence: Slower cycles (12 hours) decrease heave amplitude by 15% but increase residual settlement by 20%, highlighting time-dependent creep effects.

Conclusions emphasize the necessity of depth-specific designs and thermal rate considerations in cold-region



engineering. Future work should integrate field data and heterogeneous soil properties to enhance model robustness.
