



مقاله پژوهشی

بررسی تطبیقی رفتار خاک و سنگ تحت چرخه‌های ذوب و انجماد با نگرشی بر کاربرد در سازه‌ها و تأسیسات مهندسی نفت در مناطق سردسیری

آرمیتا حاجی‌زاده^{۱*}؛ احسان طاهری^۲

۱- دانشجوی دکتری گرایش مکانیک سنگ رشته معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2026.594987.1270

چکیده

واژگان کلیدی

اهمیت مطالعه چرخه‌های ذوب و انجماد ناشی از تأثیر قابل توجه آن بر پایداری سازه‌های احداث شده در مناطق سردسیر است. با وجود مدل‌های متعدد برای پیش‌بینی رفتار خاک و سنگ، تاکنون مطالعه‌ای به مقایسه تطبیقی این دو محیط تحت شرایط حرارتی یکسان نپرداخته است. هدف این پژوهش، بر کردن این شکاف با استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته است. بدین منظور، خاک با مدل *NTNU* در نرم‌افزار *Plaxis* و سنگ با

چرخه ذوب و انجماد، سنگ
یخ‌زده، خاک یخ‌زده، اشباع
یخ، مطالعه تطبیقی

مدل اجزای مجزا در نرم‌افزار *PFC2D* تحت یک چرخه حرارتی مشترک (۱+ تا ۴- درجه سانتی‌گراد، مدت ۲ ساعت) شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که علی‌رغم رفتار غیرقابل‌بازگشت در هر دو محیط، مکانیزم‌های حاکم بر تغییر شکل کاملاً متفاوت است؛ در خاک، پدیده غالب تفکیک یخ و تشکیل عدسی‌های یخی است که منجر به بالازدگی ناگهانی (حدود ۲ درصد کرنش حجمی) در دمای ۲- درجه سانتی‌گراد می‌شود، در حالی که در سنگ، رشد تدریجی ریزترک‌ها در اثر انجماد آب منافذ، کاهش مقاومت را به دنبال دارد. دامنه تغییرات در خاک به مراتب بیشتر از سنگ بوده و نقاط عطف دمایی در سنگ در دمای پایین‌تری (۳- درجه سانتی‌گراد) رخ می‌دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های رفتاری خاک با کالیبراسیون مناسب، قابلیت پیش‌بینی رفتار سنگ‌های بسیار متخلخل را داشته و کاربرد مستقیمی در تحلیل پایداری سازه‌های نفتی مناطق سردسیر دارند.

۱. پیش‌گفتار

ایران، تحت تأثیر چرخه‌های فصلی ذوب و انجماد قرار دارند و فعالیت‌های مهندسی در این مناطق با چالش‌های جدی مواجه است [۳]، [۴].

تاریخچه مطالعه خاک‌ها و سنگ‌های یخ‌زده به اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد؛ زمانی که مهندسان راه‌سازی در مناطق سردسیر با پدیده‌های بالازدگی (*Frost Heave*) و نشست ناشی از ذوب (*Thaw Settlement*) مواجه شدند [۵]. با توسعه پروژه‌های عمرانی، معدنی و نفتی در مناطق قطبی و یخ‌زده و سردسیر در دهه‌های اخیر، نیاز به درک عمیق‌تر از رفتار مکانیکی این محیط‌ها بیش از پیش احساس شده است [۶].

پدیده چرخه‌های متناوب ذوب و انجماد یکی از مهم‌ترین فرآیندهای طبیعی مؤثر بر رفتار مکانیکی محیط‌های متخلخل در مناطق سردسیر و نیمه‌سردسیر جهان به‌شمار می‌رود. این پدیده که ناشی از نوسانات دمایی فصلی و روزانه است، با ایجاد تنش‌های حجمی ناشی از تغییر فاز آب به یخ (با افزایش حجم حدود ۹ درصد) و بالعکس، موجب تخریب تدریجی ساختار داخلی خاک‌ها و سنگ‌ها می‌شود [۱]، [۲]. اهمیت مطالعه این پدیده از آن جهت است که مناطق وسیعی از کره زمین، از جمله بخش‌های بزرگی از روسیه، کانادا، آلاسکا، چین و

به‌ویژه در صنعت نفت، استخراج از سنگ مخزن در محیط‌های سردسیر، احداث خطوط لوله، سکوها حفاری و تأسیسات سطحی بر روی خاک‌های یخ‌زده یا در معرض چرخه‌های ذوب و انجماد، همواره با ریسک‌های قابل‌توجهی همراه بوده است [۷]، [۸]، [۹].

به دلیل پیچیدگی رفتار حاصل از چرخه‌های ذوب و انجماد و تأثیر پارامترهای متعدد بر آن، پژوهش‌های اولیه در این حوزه عمدتاً بر پایه مشاهدات تجربی و آزمایش‌های صحرایی استوار بود [۵]. اما با پیشرفت روش‌های عددی در دهه‌های اخیر، مدل‌های رفتاری پیچیده‌ای برای شبیه‌سازی رفتار ترموهیدرومکانیکی (THM) خاک‌ها و سنگ‌های یخ‌زده توسعه یافته است [۹]، [۱۰]، [۱۱].

در حوزه مکانیک خاک، مدل‌های ساختاری متعددی برای پیش‌بینی رفتار خاک‌های یخ‌زده ارائه شده است که از مدل‌های بنیادی در این حوزه می‌توان به مدل آلونزو در سال ۱۹۹۰ برای خاک‌های غیراشباع [۱۲]، مدل مبتنی بر تنش موثر بیشاپ [۱۳]، [۱۴] و مدل پیشرفته $NTNU$ در سال ۲۰۱۶ اشاره کرد که بر پایه متغیرهای تنش فاز جامد و مکش برودتی فرمول‌بندی و در نرم‌افزار پلکسیس^۳ پیاده‌سازی شده است. این مدل توانسته رفتار پیچیده خاک را تحت چرخه‌های ذوب و انجماد با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی کند و تأثیر پارامترهایی نظیر عمق و نرخ تغییر دما را بر پاسخ حجمی خاک آشکار سازد [۱۵]، [۱۶].

این مدل، که توسط قریشیان امیری و همکاران [۱۶] توسعه یافته، ریشه در مدل‌های پیشین برای خاک‌های غیراشباع دارد. به‌عنوان مثال، مدل الاستوپلاستیک کوپل ارائه‌شده توسط قاسم‌زاده و همکاران [۱۷] برای خاک‌های غیراشباع، با استفاده از چارچوب سطوح تسلیم زیربارگذاری^۴ و مرزدار^۵، نشان داد که چگونه می‌توان کوپلینگ بین رفتار هیدرولیکی و مکانیکی را با استفاده از مفهوم تنش بین‌دانه‌ای^۶ و قوانین سخت‌شوندگی همبسته مدل‌سازی کرد [۱۷]. این رویکرد، پایه‌ای برای توسعه مدل‌های مشابه در خاک‌های یخ‌زده فراهم آورد.

از سوی دیگر، مطالعات گسترده‌ای بر روی مدل‌سازی رفتار وابسته به زمان خاک‌های یخ‌زده انجام شده است. مدل الاستوویسکوپلاستیک ارائه‌شده توسط قریشیان امیری و همکاران [۱۸]، با در نظر گرفتن رفتار وابسته به نرخ کرنش یخ، نشان داد که خاک‌های یخ‌زده رفتار حساس به نرخ کرنش از خود نشان می‌دهند. این مدل با تقسیم تنش کل به فشار سیال و تنش فاز جامد و همچنین در نظر گرفتن مکش برودتی، در چارچوب دو متغیر حالت تنش فرمول‌بندی شده است [۱۸]. همچنین، پژوهش‌های مرتبط با ضرایب انتقال و شرایط فشار برای رشد عدسی‌های یخ در خاک‌های یخ‌زده [۱۹]، با استفاده از ترمودینامیک غیرتعادلی نشان داده است که شار آب ناشی از گرادیان دما (پدیده ترمواسموز) منبع اصلی بالازدگی بوده و با استفاده از ضرایب ترمودینامیکی قابل مدل‌سازی است. این مطالعات، درک ما را از مکانیزم‌های حاکم بر پدیده بالازدگی در خاک عمیق‌تر کرده است [۱۹]. در حوزه مکانیک سنگ نیز پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد بر خواص مکانیکی سنگ‌ها انجام شده است [۲۰]، [۲۱]. این مطالعات نشان داده‌اند که انجماد و ذوب متناوب آب درون منافذ و ریزترک‌های سنگ، با ایجاد تنش‌های کششی و برشی، موجب رشد و گسترش ریزترک‌ها، افزایش تخلخل و در نهایت کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ می‌شود [۲۲]، [۲۳]. مطالعات تجربی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM)، تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و انتشار آکوستیک (AE) به‌خوبی سیر تکامل آسیب در سنگ تحت چرخه‌های ذوب و انجماد را نشان داده‌اند [۱]، [۲۱]. همچنین، مدل‌های عددی متعددی با استفاده از روش اجزای مجزا (DEM) برای شبیه‌سازی رشد ریزترک‌ها و تغییر الگوی شکست سنگ‌های ترک‌دار تحت چرخه‌های ذوب/انجماد توسعه یافته است [۲۰]. این مدل‌ها نشان داده‌اند که حضور چرخه‌های ذوب و انجماد، تأثیر چشمگیری بر الگوی شکست و میزان کاهش مقاومت سنگ دارند.

در این راستا، مطالعات انجام‌شده بر روی اثرات چرخه‌های

⁶ Intergranular Stress

⁷ Scanning Electron Microscope

⁸ Nuclear Magnetic Resonance

⁹ Acoustic Emission

¹⁰ Discrete Element Method

¹ Thermo-Hydro-Mechanical

² Norwegian University of Science and Technology

³ Plaxis Software

⁴ Subloading Surface

⁵ Bounding Surface

متعدد برای خاک و سنگ به طور مجزا، پژوهشی که به مقایسه تطبیقی رفتار این دو محیط تحت یک چرخه حرارتی مشترک با استفاده از شاخص‌های کمی پرداخته باشد، یافت نشد. دوم آنکه این پژوهش با تعریف شاخص‌های مقایسه‌ای نظیر نسبت بالازدگی، نسبت نشست باقیمانده و ضریب پسماند، چارچوبی منسجم برای مقایسه کمی رفتار خاک و سنگ ارائه می‌دهد. سوم آنکه با نشان دادن قابلیت تطبیق مدل رفتاری خاک برای پیش‌بینی رفتار سنگ‌های بسیار متخلخل، افق جدیدی برای استفاده از مدل‌های توسعه‌یافته در مهندسی نفت گشوده می‌شود.

در این مقاله، ابتدا به تشریح مبانی نظری پرداخته شده و سپس فرمول‌بندی مدل‌های مورد استفاده در تحقیق ارائه شده‌اند. در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای خاک و سنگ تحت سناریوهای مختلف مقایسه و تحلیل می‌شود. در نهایت، کاربرد نتایج در مهندسی و طراحی سازه‌های سردسیری مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲. مبانی نظری و روش‌شناسی

در این بخش ابتدا مبانی نظری و فرمول‌بندی دو مدل عددی مورد استفاده در این پژوهش شامل مدل رفتاری *NTNU* برای خاک‌های یخ‌زده و مدل اجزای مجزا برای سنگ‌های ترک‌دار ارائه می‌شود.

۱.۲. مبانی نظری مدل رفتاری خاک یخ‌زده

مدل رفتاری *NTNU* که در سال ۲۰۱۶ توسعه یافت، یک مدل ساختاری پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار ترموهیدرومکانیکی خاک‌های یخ‌زده اشباع می‌باشد. این مدل بر پایه تئوری آلونزو برای خاک‌های غیراشباع بنا شده و با استفاده از متغیرهای حالت تنش شامل تنش فاز جامد^{۱۳} و مکش برودتی^{۱۴}، می‌تواند رفتار الاستوپلاستیک خاک را تحت چرخه‌های ذوب و انجماد توصیف کند [۱۰]، [۱۶]. کد برنامه‌نویسی شده این مدل در نرم‌افزار پلکسیس به عنوان «مدل خاک یخ‌زده و غیر یخ‌زده»^{۱۴} پیاده‌سازی شده و برای کاربردهای مهندسی در دسترس است [۲۷].

متغیرهای حالت تنش

در این مدل، تنش فاز جامد به عنوان برآیند تنش دانه‌های

حرارتی بر خواص ریزساختاری و عملکردی خاک‌های رسی تقویت‌شده با نانوذرات نشان داده است که تنش‌های حرارتی ناشی از چرخه‌های ذوب و انجماد می‌تواند با رشد خطوط نانوذرات کنار هم^{۱۱}، موجب بهبود مقاومت خاک شود [۲۴]. همچنین، ارزیابی مقاومت خاک‌های رسی تقویت‌شده با نانوسیلیس تحت چرخه‌های ذوب و انجماد نشان داده است که نانوسیلیس می‌تواند از کاهش مقاومت خاک جلوگیری کرده و با ایجاد شبکه‌های فیلامانتری، استحکام خاک را افزایش دهد [۲۵]. به علاوه، مطالعات بر افزودنی‌های کم‌کربن مانند الیاف شیشه نشان داده است که این مواد با انتشار بسیار کم کربن‌دی‌اکسید، گزینه‌های مناسبی برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های ریزدانه در مناطق سردسیر هستند [۲۶]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌سازی رفتار خاک و سنگ به‌طور مجزا، پژوهش‌های اندکی به مقایسه تطبیقی رفتار این دو محیط تحت شرایط مشابه چرخه‌های ذوب و انجماد پرداخته‌اند. این شکاف پژوهشی از آن جهت حائز اهمیت است که در بسیاری از پروژه‌های مهندسی نفت، تعامل بین لایه‌های خاک سطحی و سنگ مخزن در اعماق مختلف، تحت تأثیر چرخه‌های دمایی قرار دارد و درک تفاوت‌های رفتاری این دو محیط می‌تواند به طراحی بهینه‌تر و پایدارتر سازه‌ها کمک کند. از سوی دیگر، شباهت‌های ساختاری خاک‌های درشت‌دانه و سنگ‌های بسیار متخلخل ماسه‌ای از یک سو و تفاوت‌های اساسی در میزان سیمانده شدگی و مقاومت کششی از سوی دیگر، لزوم بررسی تطبیقی این دو محیط را دو چندان می‌سازد.

پژوهش حاضر با هدف بررسی تطبیقی رفتار حجمی و مکانیکی خاک و سنگ تحت چرخه‌های ذوب و انجماد با استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته انجام شده است. برای خاک، از مدل رفتاری *NTNU* و پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار پلکسیس [۱۶] استفاده شده است و برای سنگ از مدل عددی مبتنی بر روش اجزای مجزا (*DEM*) و مطالعه موردی ارائه شده با استفاده از این مدل در سال ۲۰۲۵ [۲۰]، بهره گرفته شده است.

نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین در سه جنبه قابل تبیین است. نخست آنکه با وجود مدل‌سازی‌های

¹³ Cryogenic Suction

¹⁴ Frozen and Unfrozen Soil

¹¹ Whiskers

¹² Solid Phase Stress

خاک و یخ تعریف می‌شود و با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

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

که در آن σ^* تنش فاز جامد، σ تنش کل، S_{uw} درجه اشباع آب یخ‌زده، p_w فشار آب منفذی و I ماتریس واحد می‌باشد. لازم به ذکر است که فشار آب منفذی در این مدل منفی در نظر گرفته می‌شود.

مکش برودتی نیز به عنوان اختلاف فشار بین فاز آب و فاز یخ تعریف شده و از معادله (۲) به نام کلاوزیوس-کلاپیرون^{۱۵} به دست می‌آید:

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

که در آن s_c مکش برودتی، p_{ice} فشار یخ، L گرمای نهان همجوشی آب، T دمای فعلی و T_f دمای ذوب و انجماد هستند. فشار یخ در این مدل منفی در نظر گرفته می‌شود.

تجزیه کرنش

تغییرات کرنش کل شامل الاستیک و پلاستیک در این مدل به چهار جزء تفکیک می‌شود که عبارتند از: کرنش الاستیک ناشی از تنش فاز جامد، کرنش الاستیک ناشی از تغییرات مکش، کرنش پلاستیک ناشی از تنش فاز جامد و کرنش پلاستیک ناشی از تغییرات مکش. معادله (۳) جمع این چهار جزء را نشان می‌دهد.

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

که در آن $d\epsilon^{me}$ تغییرات کرنش الاستیک ناشی از تنش فاز جامد، $d\epsilon^{se}$ تغییرات کرنش الاستیک ناشی از تغییرات مکش، $d\epsilon^{mp}$ تغییرات کرنش پلاستیک ناشی از تنش فاز جامد، $d\epsilon^{sp}$ تغییرات کرنش پلاستیک ناشی از تغییرات مکش و $d\epsilon$ تغییرات کرنش کل را نشان می‌دهند.

رفتار الاستیک

بخش الاستیک کرنش با استفاده از پارامترهای مدول برشی و مدول بالک محاسبه می‌شود که به ترتیب از معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آیند.

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

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

که در این روابط G مدول برشی، S_i درجه اشباع یخ، G_0 مدول برشی خاک در حالت غیر یخ‌زده، E_f مدول یانگ خاک یخ‌زده، ν_f نسبت پواسون خاک یخ‌زده، K مدول بالک، e نسبت پوکی، p_{y0}^* تنش پیش‌تحکیمی و κ_0 ضریب تراکم‌پذیری الاستیک هستند.

مدول یانگ خاک یخ‌زده نیز تابعی از دما بوده و از معادله (۶) محاسبه می‌شود.

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

که در آن $E_{f,ref}$ مدول یانگ در دمای مرجع و $E_{f,inc}$ نرخ تغییر مدول یانگ با دما می‌باشد.

سطوح تسلیم

این مدل شامل دو سطح تسلیم اصلی است: سطح تسلیم بارگذاری شکست (LC^{16}) و سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها (GS^{17}). معیار شکست برای سطح تسلیم بارگذاری شکست در معادله (۷) ارائه شده است:

$$F_1 = (p^* - k_t s_c) [(p^* - k_t s_c) S_{uw}^m - (p_y^* - k_t s_c)] + \left(\frac{q^*}{M}\right)^2 = 0 \quad (7)$$

که در این رابطه p^* تنش موثر میانگین، q^* تنش انحرافی، k_t نرخ تغییر چسبندگی ظاهری با مکش، M شیب خط حالت بحرانی و m پارامتر شکل‌دهنده سطح تسلیم هستند.

سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها که برای شبیه‌سازی پدیده بالازدگی ناشی از تشکیل عدسی‌های یخی تعریف شده است، در معادله (۸) نشان داده شده است.

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

که در آن $s_{c,seg}$ آستانه مکش برودتی برای شروع تفکیک دانه‌ها می‌باشد.

قوانین سخت‌شوندگی و جریان

قانون سخت‌شوندگی تنیده‌سازی شده^{۱۸} برای سطح تسلیم

¹⁷ Grain Segregation

¹⁸ Coupled

¹⁵ Clausius-Clapeyron Relation

¹⁶ Loading Collapse

بارگذاری شکست در معادله (۹) ارائه شده است.

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

که $d\epsilon_v^{mp}$ تغییرات کرنش حجمی پلاستیک ناشی از تنش فاز جامد و $d\epsilon_v^{sp}$ تغییرات کرنش حجمی پلاستیک ناشی از مکش می‌باشد.

برای سطح تسلیم بارگذاری شکست از قانون جریان ناهمراه (غیر همبسته) و برای سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها از قانون جریان همراه (همبسته) استفاده می‌شود که به ترتیب در معادلات (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند.

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

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

که Q_1 تابع پتانسیل پلاستیک می‌باشد و از معادله (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$Q_1 = S_{uw}^r \left(p^* - \frac{p_y^* + k_t s_c}{2} \right)^2 + \left(\frac{q^*}{M} \right)^2 \quad (12)$$

دمای ذوب و انجماد و اشباع آب یخ‌زده

دمای ذوب و انجماد در فشار یخ به دست آمده، با استفاده از معادله (۱۳) با نام معادله اصلاح شده کلاوزیوس-کلاپیرون^{۱۹} محاسبه می‌شود.

$$T_f = T_{ref} \left(\frac{p_{ice}}{-p_{ref}} + 1 \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (13)$$

که در آن α و p_{ref} پارامترهای ثابت هستند.

درجه اشباع آب یخ‌زده نیز از معادله (۱۴) به دست می‌آید.

$$S_{uw} = \left[1 + \left(\frac{s_c}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_r}} \right]^{-\lambda_r} \quad (14)$$

که در آن ρ_r و λ_r پارامترهای برازش منحنی اشباع آب هستند.

۲.۲. مبانی نظری مدل اجزاء مجزا برای سنگ

مدل عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی سنگ‌های ترک‌دار تحت چرخه‌های ذوب و انجماد در بخش مورد توجهی از مطالعات مکانیک سنگ بر پایه روش اجزاء مجزا و با استفاده

از نرم‌افزار پی‌اف‌سی دو بعدی (PFC2D) توسعه یافته است [۲۰]، [۲۸].

شبیه‌سازی چرخه‌های ذوب و انجماد در مدل اجزاء مجزا

در این مدل، سنگ به صورت یک مجموعه از ذرات ماتریکس سنگی و ذرات آب منفذی شبیه‌سازی شده است. فرض اساسی و ساده‌سازی در مدل این است که سنگ اشباع مجموعه‌ای از ذرات آب منفذی و ذرات ماتریکس سنگ است؛ فرآیند انتقال حرارت نادیده گرفته شده و زمان رسیدن ذرات آب به دمای مشخص یکنواخت در نظر گرفته شده است؛ اثرات نفوذ آب و حرارت ذرات سنگ در طول چرخه نادیده گرفته شده است. تغییرات دما بر اساس تابع سینوسی در معادله (۱۵) در طول زمان اعمال می‌شود.

$$T = 20 \cos\left(\frac{\pi t}{30}\right) \quad (15)$$

حجم یک ذره آب منفذی در طول چرخه بر اساس نسبت آب یخ‌زده، از معادله (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$V = V_0 + \Delta V_w (1 - W_u) \quad (16)$$

که V_0 حجم اولیه ذره آب، ΔV_w افزایش حجم پس از تبدیل کامل آب به یخ و W_u نسبت آب یخ‌زده می‌باشد. نسبت آب یخ‌زده نیز از معادله (۱۷) به دست می‌آید.

$$W_u = \begin{cases} 1 - \left[1 + 0.139 \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^{1/3} \ln \left(\frac{1 + e^{-0.268 \Delta T}}{2} \right) \right] & (\Delta T > 0) \\ (1 - e^{-0.268 \Delta T}), & (\Delta T \leq 0) \end{cases} \quad (17)$$

که در آن $\Delta T = T_m - T$ دمای انجماد آب آزاد در فشار استاندارد (دمای ۲۷۳/۱۵ کلوین) و T دما در هر لحظه می‌باشند.

مدل تماس موازی خطی

برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی سنگ، از مدل تماس موازی خطی^{۲۰} استفاده شده است. مدل مذکور شامل دو بخش خطی و چسبنده است که به صورت موازی عمل می‌کنند. نمونه این مدل در شکل ۱ قابل مشاهده است.

²⁰ Linear Parallel Model

¹⁹ Modified Clausius-Clapeyron Relation

(۲۱) عمل می‌کند.

$$R = \frac{tr(M)}{(|tr(M)| + \sum |m_i^*|)} \times 100\% \quad (21)$$

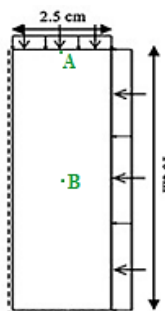
که $tr(M)$ نشان‌دهنده تغییر حجم نمونه است. بر این اساس، اگر مقدار R بیشتر از ۳۰ درصد باشد، شکست کششی، اگر بین ۳۰- درصد و ۳۰ درصد باشد، شکست برشی و اگر کمتر از ۳۰- درصد باشد، شکست فشاری طبقه‌بندی می‌شوند.

۳. شبیه‌سازی‌های عددی

در این بخش، مشخصات هندسی، شرایط مرزی، پارامترهای ورودی و سناریوهای تحلیل برای دو مدل عددی خاک در نرم‌افزار پلکسیس و سنگ در نرم‌افزار پی‌اف‌سی دو بعدی تشریح می‌شود. هدف از این شبیه‌سازی‌ها، ایجاد بستری قابل مقایسه برای بررسی رفتار هر دو محیط تحت یک چرخه حرارتی مشترک است.

۱.۳. شبیه‌سازی خاک در نرم‌افزار پلکسیس

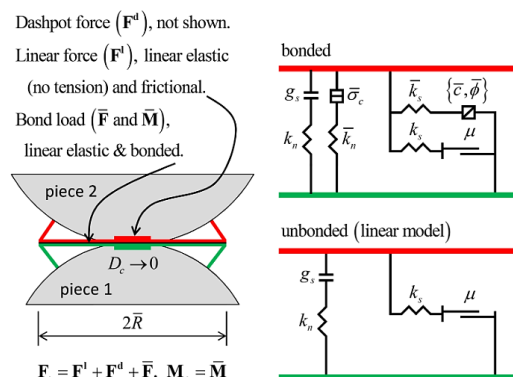
در این پژوهش، مدل $NTNU$ در نرم‌افزار پلکسیس برای شبیه‌سازی خاک به کار گرفته شده است. مقادیر و ویژگی‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی، از مطالعه انجام شده در سال ۲۰۱۶ [۱۶] اقتباس شده‌اند.



شکل ۲. هندسه نمونه مورد مطالعه [۳۰]

هندسه مدل خاک

نمونه خاک به صورت یک استوانه با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن محوری نمونه، به منظور کاهش حجم محاسبات، تنها یک‌چهارم هندسه آن (معادل یک مستطیل به ابعاد ۲/۵ در ۱۰ سانتی‌متر) شبیه‌سازی شده است که در شکل ۲ قابل



شکل ۱. رفتار و مؤلفه‌های رئولوژیکی مدل پیوند موازی خطی با میراگر (ضربه‌گیر^{۲۱})های غیرفعال [۲۹]

مهم‌ترین پارامترهای میکروسکوپی مورد استفاده در مدل تماس موازی خطی علاوه بر چگالی، حداقل و حداکثر شعاع ذرات شامل تخلخل، نسبت صلیبیت، مقاومت کششی، مقاومت برشی، ضریب اصطکاک و زاویه اصطکاک داخلی هستند.

شبیه‌سازی انتشار آکوستیک با روش تانسور ممان

یکی از نوآوری‌های مدل استفاده شده در این پژوهش استفاده از روش تانسور ممان^{۲۲} برای شبیه‌سازی پدیده انتشار آکوستیک در طول فرآیند بارگذاری است. این روش قادر است علاوه بر توزیع مکانی-زمانی این پدیده، نوع شکست (کششی، برشی یا مخلوط) را نیز شناسایی کند. تانسور ممان از معادله (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$M_{ij} = \sum_s \Delta F_i R_j \quad (18)$$

که ΔF_i تغییرات نیروی تماسی بین ذرات و R_j فاصله نقطه تماس تا مرکز انتشار آکوستیک می‌باشند. بزرگی انتشار آکوستیک از معادله (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6 \quad (19)$$

که M_0 اسکالر تانسور ممان است. انرژی انتشار آکوستیک نیز از معادله (۲۰) به دست می‌آید.

$$\lg E = 1.5 M_w + 4.8 \quad (20)$$

برای تشخیص نوع شکست، از معیار فینیر و یانگ (۱۹۹۲) [۲۰] استفاده شده است که بر اساس پارامتر R در معادله

²² Moment Tensor

²¹ Dashpot

مشاهده است.

شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی مدل به منظور شبیه‌سازی شرایط طبیعی، شامل اعمال فشار محدودکننده ۹۰ کیلوپاسکال به مرزهای راست و بالای نمونه و همچنین اعمال چرخه دمایی سینوسی مطابق معادله (۲۲) به همین مرزها می‌باشد. زمان چرخه‌های حرارتی در سه حالت ۲، ۶ و ۱۲ ساعت به‌عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شده است.

$$T = 1 - 5 \sin\left(\frac{2\pi}{14400} t\right) \quad (22)$$

انتخاب سه بازه زمانی ۲، ۶ و ۱۲ ساعت بر اساس دو معیار اصلی صورت گرفته است: نخست، شبیه‌سازی محدوده نرخ‌های سرمایه‌گذاری و گرمایش طبیعی در مناطق سردسیر که چرخه‌های روزانه (۲۴ ساعته) و نیمه‌روزانه (۱۲ ساعته) را شامل می‌شود؛ دوم، بررسی تأثیر سرعت تغییر دما بر پاسخ حجمی خاک در مقیاس آزمایشگاهی (۲ ساعت) تا مقیاس نیمه‌میدانی (۱۲ ساعت). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نرخ تغییر دما تأثیر قابل‌توجهی بر میزان بالازدگی و نشست باقی‌مانده در خاک‌های یخ‌زده دارد [۱۵]، [۱۶]. بر این اساس، زمان‌های ۲ ساعت (نرخ سریع)، ۶ ساعت (نرخ متوسط) و ۱۲ ساعت (نرخ کند) برای پوشش طیف گسترده‌ای از شرایط حرارتی انتخاب شده‌اند.

خروجی‌های اصلی مدل شامل کرنش حجمی و درجه اشباع یخ در اعماق مختلف نمونه می‌باشند. همچنین پارامترهای ورودی مدل خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۳. شبیه‌سازی سنگ در نرم‌افزار پی‌اف‌سی

شبیه‌سازی سنگ به کار گرفته شده در این پژوهش از مطالعه انجام شده در سال ۲۰۲۵ [۲۰] دریافت شده است. این شبیه‌سازی با استفاده از مدل اجزاء مجزا در نرم‌افزار پی‌اف‌سی دوبعدی انجام شده است.

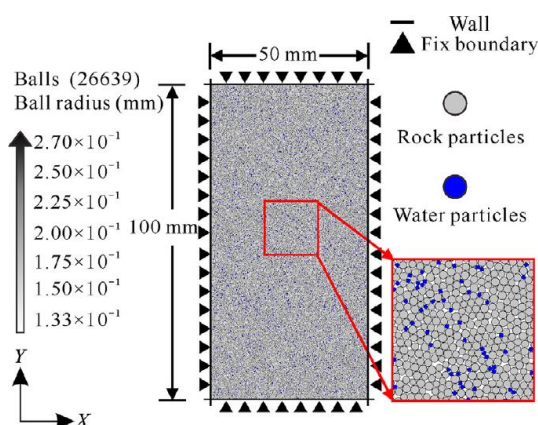
جدول ۱. پارامترهای ورودی مدل خاک [۲۷]

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_{sl} (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)	$1/396 \times 10^{-6}$

هندسه مدل سنگ

هندسه نمونه سنگ شامل یک استوانه به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر است که در حالت‌های مختلف، درزه‌های مصنوعی با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق در نمونه ایجاد شده است. اطراف نمونه در نرم‌افزار بسته است تا فیزیک صلب سنگ را در نظر بگیرد. نمایی از نمونه در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳. هندسه نمونه مورد مطالعه [۲۰]

پارامترهای مکانیکی به کار گرفته شده در مدل میکروسکوپی سنگ نیز در جدول ۲ قابل ارائه شده‌اند. کالیبراسیون پارامترهای میکروسکوپی مدل بر اساس منحنی تنش-کرنش آزمایشگاهی در شرایط بدون چرخه ذوب و انجماد (۰ چرخه) و با استفاده از روش سعی و خطا انجام شده است. صحت کالیبراسیون با مقایسه منحنی تنش-کرنش شبیه‌سازی شده با داده‌های آزمایشگاهی تأیید شده است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی مدل سنگ [۲۰]

خواص فیزیکی ذرات	
چگالی (kg/m^3)	۲۴۴۹
حداقل شعاع ذرات (mm)	۰/۳۳
حداکثر شعاع ذرات (mm)	۰/۴۵
پارامترهای مدل تماس موازی خطی	
تخلخل (-)	۰/۱۵
مدول (GPa)	۲/۴۵
نسبت سختی (-)	۱/۳
مقاومت کششی (MPa)	۱۹/۴
مقاومت برشی (MPa)	۲۳/۶
ضریب اصطکاک (-)	۰/۳۵
زاویه اصطکاک داخلی ($^{\circ}$)	۳۷

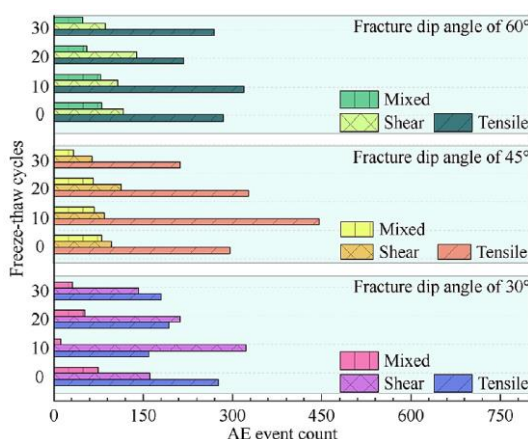
مراحل ساخت مدل

مراحل ساخت مدل عددی سنگ بر اساس روش ارائه شده شامل پنج مرحله اصلی می‌باشد. در مرحله اول، نمونه با ایجاد مجموعه‌ای از ذرات با تخلخل مشخص (شامل ۹۵/۵ درصد ذرات سنگ و ۴/۵ درصد ذرات آب) آماده‌سازی می‌شود. در مرحله دوم، پیش‌بارگذاری با کنترل حرکت دیواره و اعمال تنش هدف ۱ مگاپاسکال انجام می‌گیرد.

مرحله سوم به سیمانی شدن اختصاص دارد که در آن مدل تماس موازی خطی بین ذرات تعریف می‌شود. در مرحله چهارم، چرخه‌های ذوب و انجماد با استفاده از روش تنیده‌سازی تغییر فاز آب-یخ به نمونه اعمال می‌گردد. در نهایت، مرحله پنجم شامل بارگذاری فشاری با سرعت ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه تا رسیدن به ۷۰ درصد تنش اوج می‌باشد. خروجی‌های اصلی مدل شامل منحنی تنش-کرنش و مقاومت فشاری تک‌محوره، تعداد و توزیع ریزترک‌ها و تخلخل، الگوی شکست ماکروسکوپی و همچنین رویدادهای انتشار آکوستیک (شامل نوع، بزرگی و انرژی) می‌باشند.

نتایج شبیه‌سازی انتشار آکوستیک در نمونه‌های سنگ تحت بارگذاری فشاری (شکل ۴) نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های ذوب و انجماد، تعداد رویدادهای انتشار آکوستیک کاهش یافته و انرژی متوسط هر رویداد نیز کمتر می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که با افزایش چرخه‌ها، آسیب داخلی سنگ به‌صورت تدریجی و با ریزترک‌های پراکنده (کم‌انرژی) به‌جای ترک‌های بزرگ و ناگهانی (پرانرژی) گسترش می‌یابد.

همچنین، بررسی نوع رویدادهای انتشار آکوستیک بر اساس پارامتر R (معادله ۲۱) نشان می‌دهد که در نمونه‌های با درجه ۳۰ درجه، رویدادهای کششی ($R > 0.3$) غالب هستند، در حالی که در نمونه‌های با درجه ۶۰ درجه، رویدادهای برشی ($0.3 < R < 0.7$) فراوانی بیشتری دارند [۲۰]. این یافته با تغییر الگوی شکست مشاهده‌شده در شکل ۷ همخوانی دارد. با افزایش چرخه‌های ذوب و انجماد، نسبت رویدادهای کششی کاهش یافته و رویدادهای برشی و مخلوط افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده تغییر مکانیزم غالب شکست از کششی به برشی-کششی است.



شکل ۴. توزیع آماری انواع انتشار آکوستیک در تعداد مختلف چرخه‌های انجماد و ذوب [۲۰]

۳.۳. تحلیل و مقایسه تطبیقی نتایج شبیه‌سازی‌ها

برای دستیابی به هدف پژوهش یعنی بررسی تطبیقی رفتار حجمی و مکانیکی خاک و سنگ تحت یک چرخه ذوب و انجماد، سناریوها بر اساس متغیرهای مشترک و قابل‌قیاس در هر دو محیط تعریف شده‌اند.

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی دو محیط خاک و سنگ تحت چرخه ذوب و انجماد، به صورت تطبیقی مورد تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرند. به‌منظور قابلیت مقایسه‌پذیری، هر دو مدل تحت یک چرخه حرارتی مشترک با دمای بیشینه ۱+ درجه سانتی‌گراد، دمای کمینه ۴- درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۲ ساعت تحلیل شده‌اند.

خروجی‌های مورد بررسی شامل تغییرات کرنش حجمی، نقاط عطف دمایی، رفتار پسماند، کرنش پلاستیک باقیمانده و همچنین تأثیر پارامترهای ساختاری (عمق در خاک و زاویه

سانتی‌گراد)، خاک تحت نشست ناشی از ذوب قرار گرفته و حجم آن کاهش می‌یابد. با این حال، کرنش حجمی به مقدار اولیه باز نمی‌گردد و کرنش پلاستیک باقیمانده در حدود 0.003 تا 0.004 ثبت می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر دائمی چرخه حرارتی بر ساختار خاک است.

نکته قابل توجه در رفتار خاک، وجود پسماند حرارتی^{۲۳} بین مسیر انجماد و ذوب است. به گونه‌ای که در یک دمای ثابت، کرنش حجمی در فاز ذوب بیشتر از فاز انجماد است. همچنین با افزایش زمان چرخه از ۲ به ۱۲ ساعت، دامنه بالادگی کاهش یافته اما کرنش پلاستیک باقیمانده افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده اهمیت نرخ تغییر دما در رفتار بلندمدت خاک است. مقایسه نتایج در اعماق مختلف نمونه نیز حاکی از آن است که نقاط سطحی نوسانات کرنشی شدیدتری (حدود $6/5$ درصد بیشتر) را نسبت به نقاط میانی تجربه می‌کنند که به تأخیر حرارتی در انتقال دما به عمق نمونه نسبت داده می‌شود.

رفتار مکانیکی سنگ در طول چرخه ذوب و انجماد

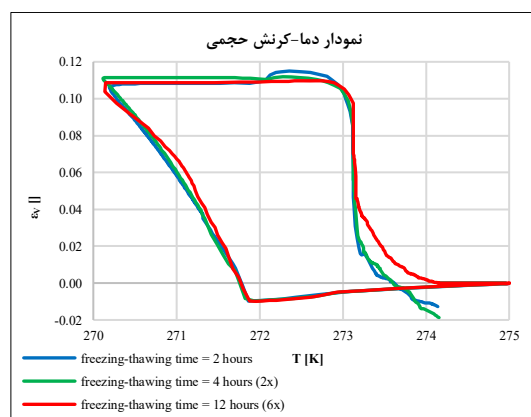
شکل ۶ تغییرات منحنی تنش-کرنش ماسه سنگ رسی را برای نمونه تحت ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ چرخه‌های ذوب و انجماد نشان می‌دهد. برخلاف خاک که در یک چرخه رفتار حجمی مشخصی از خود نشان می‌دهد، در سنگ بررسی همزمان اثر یک چرخه بر روی نمونه‌هایی با تاریخچه تنش مختلف (۰ تا ۳۰ چرخه قبلی) امکان‌پذیر است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌های ذوب و انجماد، مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول الاستیسیته سنگ به‌طور نمایی کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت ناشی از رشد و گسترش ریزترک‌ها در اثر تنش‌های ناشی از انجماد آب درون منافذ و سست شدن ساختار کانی‌های رسی است [۲۰].

شکل ۷ تغییرات روند گسترش درزه‌ها در نمونه سنگ تحت تنش مشابه تا آستانه شکست، قبل و بعد از یک چرخه ذوب و انجماد را نشان می‌دهد. الگوی شکست سنگ نیز با افزایش چرخه‌ها دستخوش تغییر می‌شود. به گونه‌ای که شکست از حالت ترد^{۲۴} در نمونه‌های بدون چرخه، به شکست ترد-پلاستیک و نهایتاً پلاستیک تبدیل می‌شود. همچنین تعداد ریزترک‌ها در لحظه شکست با افزایش چرخه‌ها کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تجمع آسیب قبلی و کاهش ظرفیت جذب

درزه در سنگ) بر پاسخ حرارتی می‌باشند. در ادامه، ابتدا رفتار هر محیط به‌طور مجزا بررسی شده و سپس مقایسه تطبیقی آنها ارائه می‌گردد.

رفتار حجمی خاک در طول چرخه ذوب و انجماد

شکل ۵ تغییرات کرنش حجمی خاک را بر حسب دما در طول یک چرخه کامل ذوب و انجماد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار خاک در طول چرخه از الگوی پیچیده‌ای پیروی می‌کند که به چهار مرحله قابل تفکیک است.



شکل ۵. نمودار تغییرات کرنش بر حسب دما در نمونه خاک

روند تغییرات هر سه منحنی مشابه است. در منحنی مربوط به بازه زمانی ۲ ساعته، در مرحله اول (کاهش دما از $+1$ به -2 درجه سانتی‌گراد)، خاک تحت انقباض الاستیک قرار گرفته و حجم نمونه کاهش می‌یابد. این رفتار ناشی از نزدیک شدن ذرات خاک به یکدیگر در اثر سرمایش و همچنین شروع اولیه انجماد آب منفذی است.

در مرحله دوم (دمای -2 تا -3 درجه سانتی‌گراد)، پدیده بالادگی به صورت ناگهانی رخ می‌دهد و کرنش حجمی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این پدیده ناشی از تشکیل عدسی‌های یخ و تفکیک دانه‌ها در اثر رسیدن مکش برودتی به آستانه تسلیم است.

در مرحله سوم (دمای -3 تا -4 درجه سانتی‌گراد)، تغییرات کرنش حجمی اندک بوده و خاک در حالت انجماد پایدار قرار می‌گیرد.

در مرحله چهارم (فاز ذوب با افزایش دما از -4 به $+1$ درجه

²⁴ Brittle

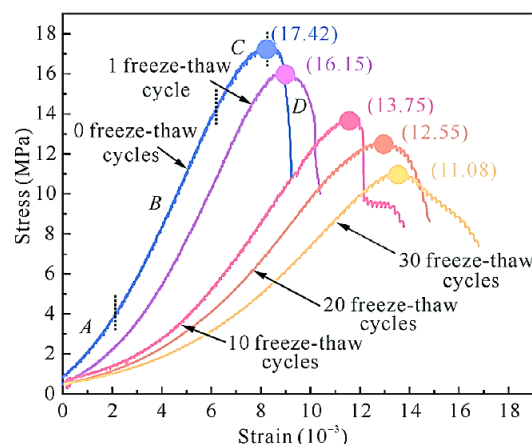
²³ Hysteresis

انرژی نمونه است [۲۰].

جدول ۳. مقایسه تطبیقی شاخص‌های کلیدی رفتار خاک و سنگ در چرخه ذوب و انجماد

شاخص	خاک (مدل NTNU)	سنگ (مدل DEM)
دامنه تغییرات کرنش حجمی	تا -۰.۰۰۰۹	متناسب با کاهش مقاومت (۶۰-۷۰٪)
نقطه عطف دمایی اصلی	شروع بالازدگی در ۲- درجه	کاهش شدید خواص در ۳- درجه
رفتار پسماند	حلقه پسماند مشخص	کاهش غیر قابل بازگشت خواص
کرنش پلاستیک باقی‌مانده	تا -۰.۰۰۰۳	افزایش تخلخل و ریز ترک‌های باقی‌مانده
تأثیر نرخ تغییر دما	بالازدگی کمتر، نشست بیشتر	نیازمند بررسی با زمان‌های مختلف
تأثیر ساختار اولیه	عمق: تفاوت	زاویه درزه: تغییر الگوی شکست

در راستای تفسیر تفاوت مشاهدات بین خاک و سنگ با توجه به جدول ۳ می‌توان ادعان داشت که خاک تغییرات حجمی مستقیم و محسوس‌تری دارد؛ سنگ در دمای پایین‌تری دچار تغییرات شدید می‌شود؛ هر دو محیط رفتار غیرقابل بازگشت نشان می‌دهند؛ در خاک به‌صورت کرنش حجمی و در سنگ به‌صورت آسیب داخلی ظاهر می‌شود؛ خاک حساسیت بیشتری به نرخ تغییر دما نشان می‌دهد؛ همچنین در خاک ساختار تأثیر بر دامنه و در سنگ تأثیر بر مکانیزم دارد. مقایسه تطبیقی نشان می‌دهد که اگرچه هر دو محیط خاک و سنگ در مواجهه با چرخه‌های ذوب و انجماد رفتار غیر قابل بازگشت و وابسته به تاریخچه از خود نشان می‌دهند، اما مکانیزم‌های حاکم بر این رفتار تفاوت اساسی دارد. در خاک، مکانیزم اصلی تفکیک یخ و تشکیل عدسی‌های یخی است که منجر به بالازدگی ناگهانی و تغییرات حجمی محسوس می‌شود. این پدیده در دمای حدود ۲- درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و به مهاجرت آب به سمت جبهه انجماد وابسته است. در مقابل، در سنگ، مکانیزم اصلی رشد ریز ترک‌ها در اثر تنش ناشی از انجماد آب درون منافذ و سست شدن ساختار کانی‌ها است که به صورت تدریجی و با کاهش مقاومت ظاهر می‌شود. این فرآیند در دمای پایین‌تری، حدود ۳- درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و شدت آن در سنگ‌های با درزه کم‌زاویه بیشتر



شکل ۶. نمودار تنش-کرنش در نمونه سنگ [۲۰]



شکل ۷. تغییرات درزه‌ها در نمونه سنگ تحت تنش بعد از یک چرخه ذوب و انجماد [۲۰]

اما در نمونه‌ها می‌توان شاهد یک چرخه ذوب و انجماد نیز بود که فارغ از باقی عوامل محیطی تأثیرگذار بر رفتار سنگ در طبیعت، تأثیرگذار است. از سوی دیگر، زاویه درزه اولیه تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار سنگ دارد. به‌گونه‌ای که در زاویه ۳۰ درجه، شکست عمدتاً از نوع کششی بوده و نمونه مستعد شکست بزرگ‌مقیاس است؛ در حالی که در زاویه ۶۰ درجه، مکانیزم برشی غالب بوده و خطر شکست موضعی افزایش می‌یابد.

مقایسه رفتار خاک و سنگ در چرخه ذوب و انجماد

به منظور مقایسه مستقیم رفتار خاک و سنگ، خروجی‌های کلیدی هر دو محیط در جدول ۳ گردآوری شده است. این مقایسه بر اساس شاخص‌های کمی تعریف‌شده در بخش ۲ انجام شده است.

است.

۴. نتیجه‌گیری

از منظر مهندسی، تفاوت‌های شناسایی شده در رفتار خاک و سنگ تحت چرخه‌های ذوب و انجماد، پیامدهای مهمی برای طراحی سازه‌های واقع در مناطق سردسیر به همراه دارد. در خاک، خطر اصلی ناشی از پدیده بالازدگی و نشست‌های ناهموار است که می‌تواند به سازه‌های سطحی مانند سکوه‌های حفاری، خطوط لوله و تأسیسات نفتی آسیب جدی وارد کند [۱۹]، [۳۱]. چرا که تغییرات حجمی ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی در لایه‌های خاک، تنش‌های مضاعفی به پی و شالوده سازه‌ها تحمیل می‌کند. در مقابل، در سنگ مخزن، خطر اصلی ناشی از کاهش تدریجی مقاومت مکانیکی و تغییر الگوی شکست در اثر تجمعی چرخه‌های حرارتی است که می‌تواند پایداری بلندمدت مخزن و یکپارچگی چاه‌های نفتی را به مخاطره بیاندازد [۲۰]. این تفاوت در ماهیت آسیب (ناگهانی و مبتنی بر تغییرات حجمی در خاک در برابر تدریجی و مبتنی بر رشد ریزترک‌ها در سنگ) ضرورت رویکردهای طراحی متمایز برای هر یک از این محیط‌ها را آشکار می‌سازد.

مطالعات پیشین در حوزه مکانیک خاک‌های یخ‌زده نشان داده‌اند که پدیده بالازدگی ناشی از رشد عدسی‌های یخ، نتیجه مستقیم انتقال آب سردشده در طی یک گرادیان دمایی در منطقه انجماد است [۱۹]. از سوی دیگر، مدل‌سازی رفتار وابسته به زمان خاک‌های یخ‌زده توسط قریشیان امیری و همکاران [۱۶] نشان داد که در نظر گرفتن مکش برودتی و تنش فاز جامد به‌عنوان متغیرهای حالت تنش، امکان شبیه‌سازی رفتار خزشی و وابسته به نرخ کرنش خاک را در دماهای مختلف فراهم می‌آورد. این مدل با استفاده از روش اضافه تنش^{۲۵}، رفتار وابسته به نرخ کرنش را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده و در حالت غیر یخ‌زده به یک مدل حالت بحرانی کاهش می‌یابد [۱۶]. همچنین، مدل الاستوپلاستیک کوپل ارائه‌شده توسط قاسم‌زاده و همکاران [۱۷] برای خاک‌های غیراشباع، با استفاده از چارچوب سطوح تسلیم زیربارگذاری و مرزدار، نشان داد که چگونه رفتار هیدرولیکی و مکانیکی می‌تواند با استفاده از مفهوم تنش بین‌دانه‌ای و

قوانین سخت‌شوندگی همبسته مدل‌سازی شود [۱۷]. در خاک، تمرکز طراحی باید بر مدیریت تغییرات حجمی ناگهانی و جلوگیری از بالازدگی باشد، در حالی که در سنگ، توجه اصلی باید به کاهش تدریجی مقاومت و تغییر الگوی شکست معطوف گردد. با وجود این تفاوت‌ها، شباهت‌های ساختاری میان خاک‌های درشت‌دانه و سنگ‌های بسیار متخلخل، این ایده را مطرح می‌سازد که مدل‌های رفتاری توسعه‌یافته برای خاک، با کالیبراسیون مناسب پارامترهای مقاومتی و صلبیت، قابلیت پیش‌بینی رفتار سنگ‌های متخلخل را نیز داشته باشند. به گونه‌ای که پس از اعتبارسنجی و مطالعات تکمیلی، بتوان از این مدل‌ها در تحلیل پایداری سازه‌های سطحی مخازن نفتی در مناطق سردسیر بهره گرفت.

با وجود این تفاوت‌ها، شباهت‌های ساختاری میان خاک‌های درشت‌دانه و سنگ‌های بسیار متخلخل، این ایده را مطرح می‌سازد که مدل‌های رفتاری توسعه‌یافته برای خاک، با کالیبراسیون مناسب پارامترهای مقاومتی و صلبیت، قابلیت پیش‌بینی رفتار سنگ‌های متخلخل را نیز داشته باشند. به گونه‌ای که پس از اعتبارسنجی و مطالعات تکمیلی، بتوان از این مدل‌ها در تحلیل پایداری سازه‌های سطحی مخازن نفتی در مناطق سردسیر بهره گرفت. این موضوع با نتایج مدل‌های الاستوویسکوپلاستیک [۱۶] که با یک مجموعه پارامتر واحد قادر به شبیه‌سازی رفتار خاک از حالت یخ‌زده به غیر یخ‌زده هستند، همخوانی دارد.

یافته‌های این پژوهش کاربردهای مستقیمی در مهندسی نفت و طراحی سازه‌های سردسیری دارد. در مخازن نفتی واقع در مناطق سردسیر، چرخه‌های فصلی ذوب و انجماد می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر پایداری چاه‌ها و تأسیسات سطحی داشته باشد. مدل خاک *NTNU* با پیش‌بینی بالازدگی و نشست در اطراف چاه، می‌تواند به طراحی پوشش سیمانی و لوله‌های جداری کمک کند. از سوی دیگر، مدل سنگ اجزاء مجزا با شبیه‌سازی رشد ریزترک‌ها و کاهش مقاومت مخزن در اثر تزریق سیال سرد، می‌تواند در ارزیابی پایداری بلندمدت مخزن و جلوگیری از ریزش ذرات و تولید ماسه مؤثر باشد. همچنین، ترکیب این دو مدل می‌تواند ابزاری قدرتمند برای تحلیل اندرکنش خاک-سنگ در مخازن سردسیری فراهم

²⁵ Over-stress

آورد.

اما لازم به ذکر است که پژوهش حاضر با وجود نتایج ارزشمند، با محدودیت‌هایی همراه است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. نخست آنکه مقایسه ارائه شده بر پایه دو مدل عددی مستقل با فرضیات و شرایط مرزی متفاوت انجام شده است. مدل $NTNU$ برای خاک بر پایه تئوری الاستوپلاستیسیته و با فرض خاک اشباع و همگن فرمول‌بندی شده، در حالی که مدل DEM برای سنگ بر پایه روش اجزای مجزا و با در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های ساختاری (درزه) توسعه یافته است. این تفاوت در رویکردهای مدل‌سازی می‌تواند بر قابلیت تعمیم نتایج تأثیرگذار باشد. دوم آنکه شرایط مرزی و بارگذاری در دو مدل کاملاً یکسان نیست؛ به‌عنوان مثال، مدل خاک تحت بارگذاری حرارتی سینوسی با فشار محدودکننده ثابت تحلیل شده، در حالی که مدل سنگ تحت چرخه‌های حرارتی متوالی و سپس بارگذاری فشاری تک‌محوره قرار گرفته است. سوم آنکه نتایج سنگ عمدتاً از مطالعه مرجع [۲۰] استخراج شده و شبیه‌سازی مستقل با همان فرضیات برای راستی‌آزمایی بیشتر انجام نشده است. با وجود این محدودیت‌ها، مقاله حاضر به عنوان یک مطالعه تطبیقی مقدماتی، چارچوبی برای پژوهش‌های آینده با رویکرد مدل‌سازی یکپارچه ارائه می‌دهد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی، هر دو محیط با استفاده از یک پلتفرم مدل‌سازی واحد و با شرایط مرزی کاملاً مشابه شبیه‌سازی شوند تا مقایسه‌ای دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر حاصل شود. همچنین، با توجه به توانایی مدل‌های الاستوویسکوپلاستیک [۱۶] در شبیه‌سازی رفتار وابسته به زمان خاک‌های یخ‌زده، توسعه یک مدل یکپارچه که بتواند رفتار هر دو محیط خاک و سنگ را با یک مجموعه پارامتر واحد پیش‌بینی کند، می‌تواند گام بعدی در این حوزه باشد.

۵. فهرست نمادها

نمادهای مورد استفاده در مقاله در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
c_s	$J/kg/K$	ظرفیت گرمایی مخصوص
e	-	نسبت پوکی
e_0	-	نسبت پوکی اولیه
k_t	-	نرخ تغییرات چسبندگی ظاهری با مکش
$k_{x,y}$	m/s	رسانایی نفوذپذیری در جهات x و y و z
p^*	N/m^2	تنش موثر اصلی
p_{ice}	N/m^2	فشار یخ
p_{ref}	N/m^2	پارامتر وابستگی فشار به دمای ذوب یخ
p_w	N/m^2	فشار آب منفذی
p_y^*	N/m^2	تنش شبه پیش تحکیمی برای شرایط انجماد
p_{y0}^*	N/m^2	تنش پیش تحکیمی برای شرایط غیر یخ‌زده
q^*	N/m^2	تنش انحرافی
s_c	N/m^2	مکش برودتی
$s_{c,seg}$	N/m^2	آستانه تفکیک
t	s	زمان
$tr(M)$	mm^3	جمع درایه‌های قطر اصلی ماتریس ممان
E_f	N/m^2	مدول یانگ خاک یخ‌زده
$E_{f,inc}$	$N/m^2 K$	نرخ تغییرات مدول یانگ با دما
$E_{f,ref}$	N/m^2	مدول یانگ خاک یخ‌زده در یک دمای مرجع
F	-	معیار شکست
F_i	N	نیروی تماسی بین ذرات
G	N/m^2	مدول برشی
G	N/m^2	مدول برشی برای شرایط غیر یخ‌زده
K	N/m^2	مدول بالک
L	J/kg	گرمای نهان همجوشی آب
M	-	شیب خط بحرانی
M_{ij}	$N.mm$	تانسور ممان یک انتشار آکوستیک
Q_l	-	تابع پتانسیل پلاستیک
R	%	پارامتر شکست
R_j	mm	فاصله نقطه تماس تا مرکز انتشار آکوستیک
S_i	-	اشباع یخ
S_{uw}	-	اشباع آب
T	K	دمان کنونی
T_f	K	دمای ذوب/انجماد
T_{ref}	K	دمای مرجع

۶. مراجع

- [1] Liu, J., Yang, P., Li, L., & Zhang, T. (2020). Characterizing the pore size distribution of a chloride silt soil during freeze-thaw processes via nuclear magnetic resonance relaxometry. *Soil Science Society of America Journal*, 84. doi: 10.1002/saj2.20087
- [2] Deprez, M., De Kock, T., De Schutter, G., & Cnudde, V. (2020). A review on freeze-thaw action and weathering of rocks. *Earth-Science Reviews*, 203, 103143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103143>
- [3] Zhang, X., et al. (2025). Effects of Changes in Freeze-Thaw Cycles on Soil Hydrothermal Dynamics and Erosion Degradation Under Global Warming in the Black Soil Region. *Water Resources Research*, 61(3), e2024WR038318. doi: <https://doi.org/10.1029/2024WR038318>
- [4] Mousavi, S. Z. S., Tavakoli, H., Moarefvand, P., & Rezaei, M. (2020). Micro-structural, petro-graphical and mechanical studies of schist rocks under the freezing-thawing cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 174, 103039. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103039>
- [5] Stephen, T. (1929). Frost Heaving. *Journal of Geology*, 37(5), 428–461. doi: 10.1086/623637
- [6] Gyu-Hyun, G., Soo-Woong, Y., Gi-Eun, K., & Seok-Yoon, W. (2025). Evaluation of Freezing Behavior of Artificial Ground Freezing System under Groundwater Flow Conditions and Determination of Critical Flow Velocity for Window Formation. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 41(6), 99–105. doi: 10.7843/KGS.2025.41.6.99
- [7] Zhao, W., Ji, G., Yi, L., Li, X., & Li, K. (2026). Research on the Interaction Laws between Hydraulic Fractures and Bedding Planes in Heterogeneous Reservoirs under Various Combined Conditions Based on the Phase-Field Method. *Computers and Geotechnics*, 197, 108201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2026.108201>
- [8] Zheng, H., Yang, N., Si, J., Ma, C., & Kanie, S. (2024). Influence of ice skeleton on the mechanical behavior of frozen soil under uniaxial compression. *Cold Regions Science and Technology*, 228, 104327. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104327>
- [9] Taheri, E., & Ghoreishian, A. (2022). Treatment of relative permeability term in two-phase flow problems in porous media. *Geomechanics and Geoenergy Journal*, 5(3), 84–91. doi: 10.22107/jpg.2022.362663.1179
- [10] Nishimura, S., Gens, A., Olivella, S., & Jardine, R. J. (2009). THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Géotechnique*, 59(3), 159–171. doi: 10.1680/geot.2009.59.3.159
- [11] Liu, N., Liang, S., Wang, S., & Song, Z. (2024). THM model of rock tunnels in cold regions and numerical simulation. *Scientific Reports*, 14(1), 3465. doi: 10.1038/s41598-024-53418-0

ادامه جدول ۴. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
V	mm^3	حجم ذرات در مدل
V_0	mm^3	حجم اولیه ذرات آب در مدل
V_w	mm^3	حجم ذرات آب بعد از انجماد در مدل
W_u	-	نسبت آب یخزده به غیر یخزده
α	-	پارامتر وابستگی فشار به دمای ذوب یخ
$\alpha_{x,y,z}$	$1/K$	ضریب انبساط گرمایی در جهت x, y, z
γ_{sat}	N/m^3	وزن مخصوص خاک اشباع
γ_{unsat}	N/m^3	وزن مخصوص خاک غیر اشباع
$d\epsilon$	-	افزایش کرنش
$d\epsilon^{mp}_v$	-	افزایش کرنش حجمی پلاستیک با توجه به تغییرات تنش فاز جامد
$d\epsilon^{sp}_v$	-	افزایش کرنش حجمی پلاستیک با توجه به تغییرات مکش
κ_i	-	ضریب تراکم پذیری الاستیک خاک غیر یخزده
κ_s	-	ضریب تراکم الاستیک برای تغییرات مکش
λ	-	ضریب تراکم پذیری الاستیک-پلاستیک برای حالت یخزده
λ_i	-	ضریب تراکم پذیری الاستیک-پلاستیک برای حالت غیر یخزده
λ_r	-	پارامتر برای برازش منحنی اشباع آب غیر منجمد
λ_{s1}	W/mK	رسانایی حرارتی
$d\lambda_1$	-	ضریب پلاستیک در رابطه با سطح تسلیم بارگذاری شکست
$d\lambda_2$	-	ضریب پلاستیک در رابطه با سطح تسلیم تفکیک دانه‌ها
n_f	-	نسبت پوآسون خاک یخزده
ρ_{ice}	kg/m^3	دانسیته یخ
ρ_r	N/m^2	پارامتر برای برازش منحنی اشباع آب غیر یخزده
ρ_s	kg/m^3	دانسیته مواد جامد
σ	N/m^2	تنش خالص
σ^*	N/m^2	تنش فاز جامد

- M., & Sepahi, A. A. (2016). The effect of freeze–thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), 1649–1656. doi: 10.1007/s10064-015-0787-9
- [24] Ahmadi, S., Ghasemzadeh, H., & Changizi, F. (2021). Effects of thermal cycles on microstructural and functional properties of nano treated clayey soil. *Engineering Geology*, 280, 105929. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105929>
- [25] Changizi, F., Ghasemzadeh, H., & Ahmadi, S. (2022). Evaluation of strength properties of clay treated by nano-SiO₂ subjected to freeze–thaw cycles. *Road Materials and Pavement Design*, 23(6), 1221–1238. doi: 10.1080/14680629.2021.1883466
- [26] Ahmadi, S., Ghasemzadeh, H., & Changizi, F. (2021). Effects of A low-carbon emission additive on mechanical properties of fine-grained soil under freeze–thaw cycles. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127157>
- [27] Ghoreishian Amiri, S. A., Grimstad, G., Aukenthaler, M., Panagoulas, S., Brinkgreve, R. B. J., & Haxaire, A. (2016). *The frozen and unfrozen soil model*. Delft.
- [28] Zhu, T., Chen, J., Huang, D., Luo, Y., Li, Y., & Xu, L. (2021). A DEM-Based Approach for Modeling the Damage of Rock Under Freeze–Thaw Cycles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54. doi: 10.1007/s00603-021-02465-4
- [29] Itasca. (2019). *PFC 6.0 documentation*. PFC 6.0 © 2019.
- [30] Hajizadeh, A., & Taheri, E. (1404/2025). Modeling the Behavior of Frozen Soil Under Freeze/Thaw Cycles with Emphasis on Depth and Temperature Change Rate Parameters. *Journal of Rock Mechanics of Iran*, 2(9). doi: 10.22034/irsrm.2025.299387.1547 (in Persian)
- [31] Wen, Z., Sheng, Y., Jin, H., Li, S., Li, G., & Niu, Y. (2010). Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground. *Cold Regions Science and Technology*, 64(3), 248–255. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.01.009
- [12] Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405–430. doi: 10.1680/geot.1990.40.3.405
- [13] Bishop, A. W., & Blight, G. E. (1963). Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils. *Géotechnique*, 13(3), 177–197. doi: 10.1680/geot.1963.13.3.177
- [14] Nuth, M., & Laloui, L. (2008). Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(7), 771–801. doi: <https://doi.org/10.1002/nag.645>
- [15] Tuohino, M., Sołowski, W., Abed, A., Koivisto, K., & Lei, X. (2021). Application of the Frozen and Unfrozen Soil model to modelling effects of freeze–thaw on low-volume roads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 710, 012067. doi: 10.1088/1755-1315/710/1/012067
- [16] Ghoreishian Amiri, S. A., Grimstad, G., Kadivar, M., & Nordal, S. (2016). Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1646–1657. doi: 10.1139/cgj-2015-0467
- [17] Ghasemzadeh, H., Sojoudi, M. H., Ghoreishian Amiri, S. A., & Karami, M. H. (2017). Elastoplastic model for hydro-mechanical behavior of unsaturated soils. *Soils and Foundations*, 57(3), 371–383. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.05.005>
- [18] Ghoreishian Amiri, S. A., Grimstad, G., & Kadivar, M. (2022). An elastic-viscoplastic model for saturated frozen soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(7), 2537–2553. doi: 10.1080/19648189.2016.1271361
- [19] Kjelstrup, S., Ghoreishian Amiri, S. A., Loranger, B., Gao, H., & Grimstad, G. (2021). Transport coefficients and pressure conditions for growth of ice lens in frozen soil. *Acta Geotechnica*, 16(7), 2231–2239. doi: 10.1007/s11440-021-01158-0
- [20] Zhao, Y., Zhao, Q., Yang, T., Chen, Y., Zhang, P., & Liu, H. (2025). Investigation of crack propagation and acoustic emission characteristics in jointed rock under freeze–thaw cycles based on DEM. *International Journal of Mining Science and Technology*, 35(7), 1171–1195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.05.008>
- [21] Jia, H., Ding, S., Wang, Y., Zi, F., Sun, Q., & Yang, G. (2019). An NMR-based investigation of pore water freezing process in sandstone. *Cold Regions Science and Technology*, 168, 102893. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102893>
- [22] Zhang, H., Meng, X., & Yang, G. (2020). A study on mechanical properties and damage model of rock subjected to freeze–thaw cycles and confining pressure. *Cold Regions Science and Technology*, 174, 103056. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103056>
- [23] Momeni, A., Abdilor, Y., Khanlari, G. R., Heidari,