

## Investigating the stress-strain behavior of frozen clay using triaxial test

Mahzad Esmaeili-Falak<sup>1\*</sup>, Reza Sarkhani Benemaran<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, dept. of Civil Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Ph.D. Candidate, dept. of Civil Engineering, Zanzan University, Zanzan, Iran

### ABSTRACT

Temporary soil improvement methods have always been a concern of geotechnical engineers. Today, the use of methods such as nailing and anchorage are the common methods in Iran, while in developed countries, new methods such as artificial ground freezing are also used. The reason for the increasing use of artificial ground freezing, in addition to technical, economic, and environmental benefits, is its ability to be used in all boundary conditions and all types of soils. Due to the insignificant laboratory study on the behavior of frozen clay, in this paper, after conducting initial experiments, over 130 unconsolidated-undrained triaxial experiments have been performed on clay samples prepared from the Shurabil Lake site (located in Ardabil). In these triaxial experiments, the effect of freezing, temperature decline, strain rate increment, and confining pressure raise on stress-strain behavior of saturated clay samples have been thoroughly investigated. The results of this study show that decreasing the temperature significantly increases the shear strength and modulus of elasticity of frozen clay samples. Also, due to the presence of ice matrix in the structure of frozen clay, the effect of strain rate is to a large extent, which leads to a rise in shear strength and modulus of elasticity of the samples. Also, all samples showed strain hardening behavior, and none of the samples showed brittle rupture. Therefore, the use of the artificial ground freezing method in clay soils can be used.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 06 March 2022

**Revise Date:** 07 June 2022

**Accept Date:** 28 June 2022

### Keywords:

Soil Improvement

Frozen soil

Frozen clay

Stress-strain behavior

Triaxial test

Artificial Ground Freezing

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.332406.2747>

\*Corresponding author: Mahzad Esmaeili-Falak.

Email address: Mahzad.ef@tabrizu.ac.ir

## بررسی رفتار تنش-کرنش خاک رس منجمد با بهره‌گیری از آزمایش سه‌محوری

مهزاد اسمعیلی فلک<sup>۱\*</sup>، رضا سرخانی بنماران<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- فارغ‌التحصیل مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

روش‌های غیردائمی بهسازی خاک، همواره جزء دغدغه‌های مهندسین ژئوتکنیک بوده است. امروزه استفاده از روش‌هایی همچون میخکوبی و مهارکوبی جزء روش‌های متداول در کشور ایران است، در حالی که در کشورهای پیشرفته از روش‌های نوینی همچون انجماد مصنوعی خاک نیز استفاده می‌شود. دلیل گسترش روزافزون استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین علاوه بر مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، قابلیت استفاده از آن در تمامی شرایط مرزی و تمامی انواع خاک‌ها است. با توجه به مطالعه ناچیز آزمایشگاهی بر روی رفتار رس منجمد، در این مقاله پس از انجام آزمایش‌های اولیه، بالغ بر ۱۳۰ آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی نشده بر روی نمونه‌های رسی تهیه شده از ساختگاه دریاچه شورابیل (واقع در شهرستان اردبیل)، انجام شده است. در این آزمایش‌های سه‌محوری تأثیر انجماد، کاهش دما، افزایش سرعت بارگذاری و افزایش فشار محدود کننده بر رفتار تنش - کرنش نمونه‌های رسی اشباع به طور کامل بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که کاهش دما به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت برشی و مدول الاستیسیته نمونه‌های رسی منجمد را افزایش می‌دهد. همچنین به دلیل حضور ماتریس یخ در ساختار رس منجمد، سرعت بارگذاری تا حدود زیادی بر مقاومت برشی رس منجمد تأثیرگذار است، به طوری که منجر به افزایش مقاومت برشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها می‌گردد. همچنین تمامی نمونه‌ها رفتار سخت‌شوندگی کرنشی از خود نشان داده و در هیچ کدام از نمونه‌ها گسیختگی ترد مشاهده نمی‌شود. بنابراین استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین در خاک‌های رسی قابل استفاده است.

کلمات کلیدی: بهسازی خاک، رس منجمد، آزمایش سه‌محوری، رفتار تنش-کرنش، انجماد مصنوعی زمین

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.332406.2747">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.332406.2747</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.332406.2747	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۰۷	۱۴۰۱/۰۴/۰۷	۱۴۰۱/۰۳/۱۷	۱۴۰۰/۱۲/۱۵
			مهزاد اسمعیلی فلک		*نویسنده مسئول:	
			m.esmaeilifalak@iau-tnb.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

با توجه به موقعیت جغرافیایی، ساختار زمین‌شناسی و وضعیت ژئوتکنیکی موجود در ساختگاه پروژه‌ها، امروزه بهسازی خاک به جزء جدایی‌ناپذیر اغلب پروژه‌ها بدل گشته است. روش‌های بهسازی خاک را می‌توان به دو دسته موقت و دائم طبقه‌بندی نمود که هر دوی آن‌ها کاربردهای گسترده‌ای در پروژه‌های ساختمانی دارند [1-3]. بهسازی موقت معمولاً پیش از نصب نگهدارنده‌های دائمی در پروژه‌هایی همچون تونل‌سازی و گودبرداری مورد استفاده قرار می‌گیرند [4]. روش انجماد مصنوعی زمین یکی از روش‌های بهسازی موقت خاک است که به دلیل مزایای فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی غیرقابل‌انکاری که دارد، در یک دهه اخیر بیش از گذشته مورد ملاحظه قرار گرفته است [5]. به منظور طراحی صحیح یک سازه ژئوتکنیکی متشکل از خاک منجمد، شناخت ویژگی‌های مکانیکی و رفتار آن ضروری است. هرچند شناخت رفتار مصالح خاکی منجمد در نواحی سردسیر و منجمد نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. چرا که در چنین ساختگاه‌هایی، مواجهه با خاک منجمد ناگزیر است [6].

انجماد مصنوعی زمین عبارت است از پایین آوردن دمای خاک تا دماهای زیر صفر، به طوری که آب منفذی موجود در خاک منجمد گردد. این انجماد به عنوان یک عامل پیوندی، باعث سیمان‌تاسیون موقتی خاک می‌شود، که منجر به بهبود پارامترهای مکانیکی خاک شده و نفوذپذیری آن را به صفر می‌رساند و مقاومت فشاری و برشی خاک افزایش می‌یابد. روش انجماد مصنوعی زمین برای اولین بار در اواسط قرن هیجدهم میلادی به صورت کاملاً تصادفی و در یک روز سرد زمستانی به هنگام حفاری زمین مورد توجه قرار گرفت. از آن زمان تا اواخر قرن بیستم، این روش بهسازی موقت خاک به عنوان یک هنر، نه به دید علم و به صورت کاملاً تجربی مورد استفاده قرار می‌گرفت. اما تقریباً با آغاز قرن بیست و یکم و به ویژه در دهه اخیر با پیشرفت دستگاه‌های آزمایشگاهی که دارای قابلیت‌های کنترل دقیق مطالعات پارامتریک در دماهای زیر صفر هستند که منجر به شناخت صحیح مشخصه‌های مکانیکی رفتار خاک منجمد گردیده است، استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین مبتنی بر طراحی‌های با دقت قابل قبول و بر اساس مدلسازی عددی انجام می‌گردد. بیشترین کاربرد روش انجماد مصنوعی زمین به پروژه‌های تونلسازی محدود می‌شود، هرچند مطالعاتی که اخیراً صورت گرفته است نشان می‌دهند که استفاده از آن در گودبرداری (به عنوان سیستم تکیه‌گاهی و نگهدارنده موقت خاک) نیز به لحاظ فنی و اقتصادی یک گزینه منطقی خواهد بود [7-11].

تلاش‌ها در این زمینه به دو بخش مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات عددی تقسیم می‌گردد. آگاهی از علم خواص مکانیکی خاک منجمد، پیش از شبیه‌سازی عددی انجماد مصنوعی خاک ضروری است. مطالعات آزمایشگاهی شامل انجام آزمایش‌های متعارف (مانند آزمایش‌های تک‌محوری، سه‌محوری و برش مستقیم) و آزمایش‌های مدلسازی فیزیکی (به منظور مطالعه رفتار مکانیکی خاک منجمد، تأثیر جریان آب زیرزمینی بر رفتار سازه خاک منجمد و غیره) قابل تقسیم است. البته به هنگام اجرای پروژه‌های واقعی انجماد مصنوعی زمین نیز مطالعات و مشاهداتی در قالب مطالعات میدانی در ادبیات فنی گزارش شده‌اند. با توجه به این که دستگاه فشار تک محوری جزء ساده‌ترین ابزار آزمایشگاهی به منظور بررسی رفتار مصالح ژئوتکنیکی همچون خاک منجمد می‌باشد، عمده مطالعات بر روی خاک منجمد توسط این دستگاه انجام شده است.

در پژوهشی، نمونه‌های مختلف از خاک‌های منجمد پس از آماده‌سازی توسط نرخ جابجایی ثابت  $10^{-3} \text{ mm/s}$  که با نرخ کرنش  $10^{-5} / \text{s}$  متناظر است، تحت بارگذاری انحرافی قرار گرفت [12]. تغییرشکل‌های محوری و جانبی به ترتیب توسط LVDTهای محوری و جانبی اندازه‌گیری شدند. نمونه‌های آماده‌سازی شده بین کلاهدک استوانه‌ای با قطر تحتانی و فوقانی یکسان قرار گرفته و نمونه‌ها تا کرنش محوری ۵ تا ۶٪ تحت بارگذاری قرار گرفتند. بر خلاف شکست ترد مشاهده شده در سنگ، نمونه‌های خاک منجمد به صورت انعطاف‌پذیر و بدون حضور تنش اوج (peak) گسیخته شدند. بنابراین، مقاومت فشاری تک‌محوری خاک منجمد به طور مستقیم قابل محاسبه نبود. در عوض، اتساع به عنوان معیاری برای تنش که در آن گسیختگی خاک منجمد رخ می‌دهد، در نظر گرفته شد. در مطالعه‌ای، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری تحت نرخ‌های کرنش و دماهای مختلف بر روی سیلت لانژو انجام شدند [13]. نتایج نشان دادند که مقاومت

فشاری تک‌محوری نسبت به دما بسیار حساس است و مطابق یک تابع توانی با کاهش دما، افزایش می‌یابد. همچنین ثابت شد که مقاومت فشاری نسبت به نرخ کرنش نیز حساس است و مقاومت فشاری مطابق با یک تابع توانی با نرخ کرنش در ارتباط است.

در سال‌های اخیر در رابطه با مطالعات انجام شده پیرامون بررسی رفتار مکانیکی خاک منجمد، وابستگی مقاومت فشاری محدود نشده تک‌محوری به نرخ کرنش، دما و شوری خاک در یک پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است [14]. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که یک رابطه تابع توانی بین مقاومت فشاری محدود نشده تک‌محوری ماسه شور منجمد و سایر پارامترهای مستقل (شوری، نرخ کرنش و دما) برقرار است. در مطالعه آزمایشگاهی دیگری، نمونه‌های خاک دانه‌ای منجمد اشباع تحت آزمایش فشار تک‌محوری محدود نشده قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان دادند که با کاهش دما، افزایش مدت زمان انجماد و ریزتر شدن ابعاد دانه‌های خاک غیرچسبنده، مقاومت فشاری محدود نشده خاک منجمد در نرخ کرنش یکسان، افزایش می‌یابد. هر دوی گسیختگی ترد و شکل‌پذیر در این آزمایش‌ها مشاهده شدند به طوری که هر چه خاک دانه‌ای ریزتر می‌گردد، شکل‌پذیری به هنگام گسیختگی افزایش می‌یابد. در شن‌های منجمد اشباع، با افزایش سرعت بارگذاری از ۰٫۱ میلی‌متر بر دقیقه تا ۱ میلی‌متر بر دقیقه، گسیختگی از حالت شکل‌پذیر به حالت ترد تبدیل می‌شود به طوری که در سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه، می‌توان گسیختگی ترد و خردشدگی را ملاحظه نمود [15]. در یک مطالعه دیگر به بررسی رفتار تنش-کرنش یخ خالص، خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده منجمد و خاک مارن (تبریز) منجمد که از نوع رس با خاصیت خمیری پایین بوده، مطالعات گسترده‌ای انجام گردیده است که در نهایت روش انجماد مصنوعی زمین برای خاک‌های ماسه‌ای (حتی بد دانه‌بندی شده) توصیه شده است در حالی که در مورد خاک‌های چسبنده همچون مارن منجمد، علی‌رغم رشد قابل توجه مقاومت برشی، به احتیاط و بررسی بیشتر در استفاده از آن توصیه شده است. دلیل این امر پایین بودن مقاومت برشی خاک رس منجمد حتی در دماهای پایین می‌باشد که ممکن است به عدم رفتار صلب‌گونه و در نهایت گسیختگی سازه‌ای دیوار خاک منجمد منجر شود [16].

در ادامه مباحث مربوط به مطالعات پیشین، می‌توان مطالعاتی که بر روی خاک رس، سیلت یا ترکیبات خاکی دیگر صورت گرفته است، اشاره نمود. از روش انجماد مصنوعی زمین در معدن دریاچه Cigar برای کاهش نفوذ آب‌های زیرزمینی به عملیات معدن‌کاری زیرزمینی و تثبیت زمین ناهمگن و ضعیف استفاده شده است. این امر مستلزم ایجاد مدل‌های مناسب است که بتواند به درستی رفتار مکانیکی خاک‌های اشباع را در دماهای پایین تداعی کند. برای دستیابی به این هدف، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های متاپلیت (Metapelite) طبیعی منجمد شده، تحت نرخ‌های کرنش مختلف (۱، ۵ و ۹ مگاپاسکال) انجام گردید. مطابق نتایج، نمونه‌های (۱۰-، ۲۰- و ۳۰- درجه سانتی‌گراد) و فشارهای محدودکننده متفاوت (۱، ۵ و ۹ مگاپاسکال) انجام گردید. مطابق نتایج، نمونه‌های آزمایشی رفتار تنش-کرنش الاستو ویسکوپلاستیک و سخت‌شونده‌گی کرنشی از خود نشان دادند که بسیار حساس به دما و نسبتاً حساس به سطح تنش محدودکننده گزارش شدند [17].

در یک پژوهش، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی خاک رس منجمد اشباع با چگالی خشک متفاوت در نرخ‌های کرنش و دماهای مختلف انجام شد. نتایج آزمایش نشان دادند که مقاومت فشاری خاک رس منجمد به صورت خطی با کاهش دما افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش نرخ کرنش مقاومت فشاری تک‌محوری به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد. در محدوده خاصی از چگالی خاک خشک، مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس منجمد با افزایش چگالی خشک، افزایش می‌یابد [18].

برای مقایسه رفتار مکانیکی شن سیلتی منجمد طبیعی آزمایش‌های فشاری سه‌محوری تحت فشارهای محدودکننده از ۰٫۳ تا ۳ مگاپاسکال و در دماهای ۲-، ۴- و ۶- درجه سانتی‌گراد انجام شد. در محدوده‌های مورد مطالعه، ماسه سیلتی منجمد دچار شکست پلاستیک و سخت‌شوندگی کرنشی گردیده است، در حالی که ماسه سیلتی نمک‌زدایی شده با میزان رطوبت یکسان، گسیختگی ترد از خود نشان داده است. در نهایت بر اساس نتایج تجربی قابل ملاحظه است که وجود نمک به منجر به شکل‌پذیری رفتار گسیختگی خاک منجمد می‌گردد. مقاومت شن سیلتی طبیعی منجمد و نمک‌زدایی شده با افزایش فشار محدودکننده افزایش، اما با کاهش دما افزایش می‌یابد. بعلاوه، مقاومت خاک طبیعی در تمام آزمایش‌ها کمتر از خاک نمک‌زدایی شده است که نشان می‌دهد وجود نمک می‌تواند مقاومت ماسه سیلتی منجمد را نیز کاهش دهد [19].

به منظور توسعه یک مدل مکانیکی، برنامه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری منجمد - غیرمنجمد در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف انجام شد. خطوط حالت بحرانی برای نمونه‌های رسی منجمد زهکشی نشده با اشاره به رفتار برشی نمونه‌های غیرمنجمد که تاریخچه کرنش مشابهی دارند، استخراج گردید. در شرایط مشابه، با کاهش دما از ۱۰ به ۲ درجه سلسیوس، مقاومت برشی به طور خطی و با افزایش نرخ کرنش به صورت لگاریتمی افزایش یافته است. مقایسه مستقیم اثرات کرنش بین نمونه‌های منجمد و غیرمنجمد با مسیرهای کرنش و حالت‌های یکسان در اسکلت خاک به وضوح نشان می‌دهد که ویسکوپلاستیسیته از وجود یخ منفذی ناشی می‌شود [9].

در مقاله‌ای به ارزیابی ویژگی‌های تغییرشکلی و رفتار مقاومتی خاک‌های منجمد در دماهای مختلف در شرایط سه‌محوری همسانگرد و سیکی پرداخته شده است. با کاهش دما در هر دو حالت بارگذاری همسانگرد و سیکی، الگوهای تغییر شکلی و گسیختگی نمونه‌ها از شکل‌پذیری به تردشکنی تغییر می‌کند. الگوهای منحنی تنش-کرنش نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری همسانگرد، با کاهش دمای انجماد تغییر می‌کنند. نمونه‌هایی که در دمای پایین‌تر مورد آزمایش قرار گرفتند، تردشکنی بالاتری داشتند و مقاومت اوج و سختی با کاهش دما افزایش می‌یابد. فرآیند لغزش اصطکاکی نمونه‌های با تردشکنی بالا، مشابه گسیختگی مواد صلب است و هنگامی که ترک در سراسر نمونه رشد می‌کند و یک نوار برشی پیوسته ایجاد می‌شود، مقاومت اصطکاکی به سرعت از بین می‌رود که منجر به افزایش سریع کرنش محوری و کاهش سریع سختی می‌شود [20].

در مطالعه‌ای دیگر، نتایج آزمایشگاهی رفتار مکانیکی خاک‌های منجمد آلاسکا مورد بحث قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های منجمد طبیعی نشان دادند که کاهش دما به همراه افزایش تنش میانگین، منجر به افزایش سختی و مقاومت برشی خاک می‌گردد. بر اساس نتایج این مطالعه، مدل‌سازی گرم شدن خاک منجمد در زیر پی ساختمان نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی می‌تواند یکی دیگر از ویژگی‌های کلیدی رفتار خاک منجمد مربوط به مهندسی ژئوتکنیک در مناطق سردسیر را به تصویر بکشد، زیرا فشار حجمی گسیختگی مشاهده شده در طول ذوب خاک منجمد، بیشترین اختلال را در ساختارهای سطحی ایجاد می‌کند [21].

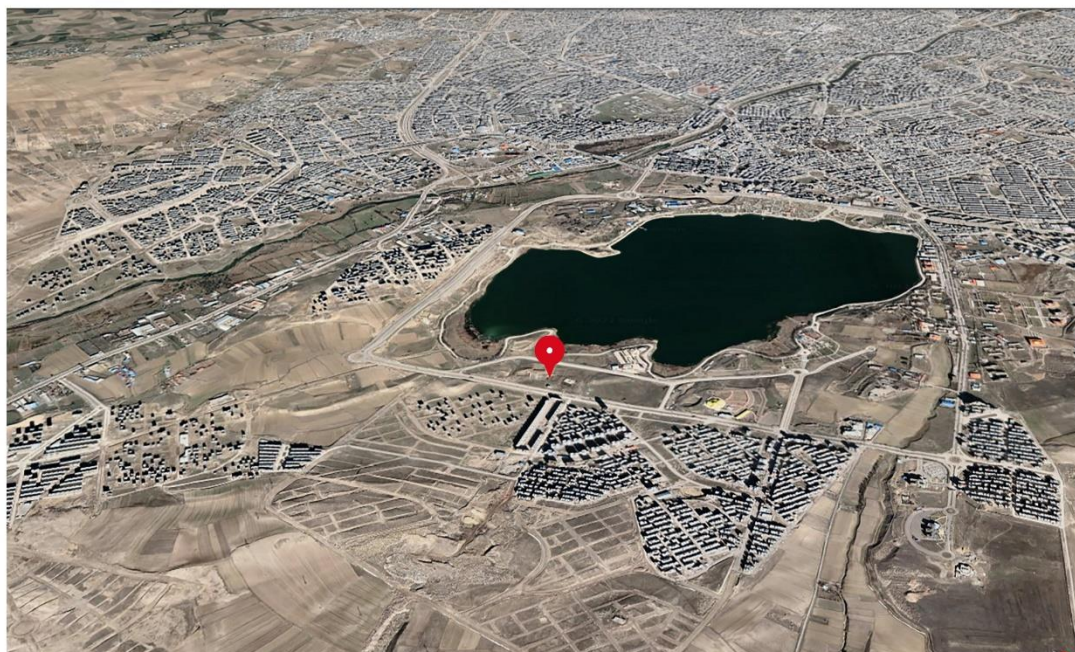
مطالعه دیگری آزمایش‌های فشاری سه‌محوری را برای مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی سیلت منجمد تحت فشارهای محدودکننده و در دماهای ۲-، ۴-، ۶- و ۸- درجه سلسیوس بررسی می‌کند. مدل‌های سازنده، که برای توصیف رفتارهای پاسخ مصالح طبیعی و مصنوعی تحت شرایط بارگذاری و شرایط محیطی مختلف استفاده می‌شوند، به‌عنوان پایه‌ای برای توصیف رفتار مکانیکی این سیلت منجمد تحت بارهای خارجی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهند که ویژگی‌های مکانیکی سیلت منجمد تا حدود زیادی تحت تأثیر فشار محصورکننده و دما قرار می‌گیرند. منحنی تنش-کرنش نشان‌دهنده نرم‌شوندگی کرنشی در طول فرآیند برش تحت فشار محدودکننده پایین است. با این حال، با افزایش فشار محصورکننده، پدیده نرم‌شوندگی کرنشی کاهش می‌یابد و منحنی تنش-کرنش، سخت‌شوندگی کرنشی را تحت فشار محدود بالا نشان می‌دهد. تحت فشار محدودکننده پایین ( $\sigma_3 = 1.0 \text{ MPa}$ )، با کاهش دما از ۲- درجه سلسیوس به ۸- درجه سلسیوس، مقاومت از  $4.7 \text{ MPa}$  به  $11.7 \text{ MPa}$  (تقریباً ۲۵۰٪) افزایش می‌یابد. تحت فشار محدودکننده بالا ( $\sigma_3 = 8.0 \text{ MP}$ )، مقاومت از  $9.0 \text{ MPa}$  به  $16.3 \text{ MPa}$  (تقریباً ۱۸۰٪) افزایش می‌یابد [22].

ملاحظه می‌گردد که در مطالعات پیشین، استفاده از تکنیک انجماد مصنوعی زمین بیشتر در خاک‌های دانه‌ای توصیه شده است. از طرف دیگر مطالعات کمتری بر روی رس‌های منجمد انجام شده است که در نتیجه منجر به عدم وجود پایگاه داده کافی برای خاک‌های چسبنده منجمد گردیده است. در این تحقیق به انجام مطالعات گسترده‌ای پیرامون خاک‌های رسی منجمد در دماها، فشارهای محدودکننده و نرخ‌های کرنش متفاوت پرداخته شده است و جنس خاک مورد استفاده، درجه اشباع و وزن واحد خاک جزء پارامترهای ثابت بوده و در هیچ یک از آزمایش‌ها تغییر نخواهند کرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

روش انجام مطالعه حاضر، یک مطالعه آزمایشگاهی است که در آن قدم اول تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. بدین منظور از خاک‌های رسی واقع در ساختگاه دریاچه شورابیل، شهرستان اردبیل واقع در کشور ایران استفاده شده است (شکل ۱). همان‌گونه که پیش‌تر

نیز اشاره گردید دلیل انتخاب این نوع خاک رسی، غالب بودن آن در محدوده استان اردبیل است. همچنین مطابق بررسی ادبیات فنی، مطالعات آزمایشگاهی بر روی خاک‌های رسی منجمد کمتر انجام شده است. نمونه‌برداری به صورت دست‌خورده انجام شده و سپس نمونه‌ها بر اساس شرایط برجای خاک و با بهره‌گیری از روابط وزنی-حجمی بازسازی شده است.

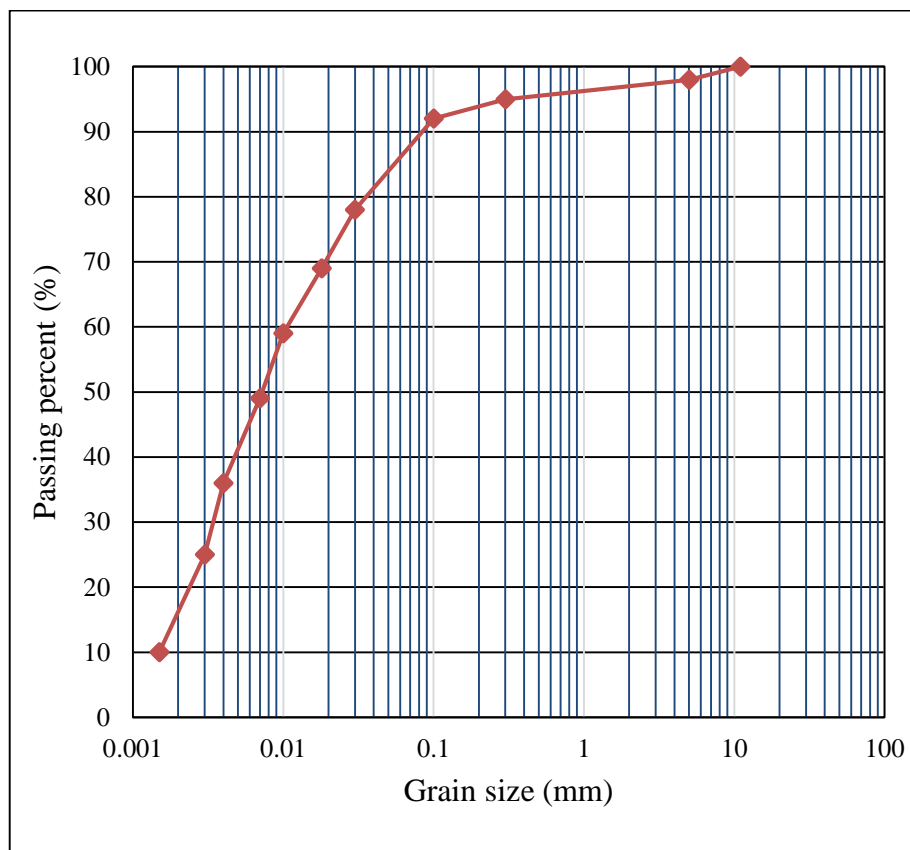


شکل ۱: تصویر ماهواره‌ای از محدوده مورد مطالعه، ساختگاه دریاچه شورابیل، اردبیل، ایران

آزمون‌های آزمایشگاهی در این مطالعه به دو دسته‌ی آزمایش‌های اولیه و آزمایش‌های پیشرفته تقسیم‌بندی می‌شوند. ابتدا نمونه‌های خاک تحت آزمایش‌های اولیه همچون دانه‌بندی به روش هیدرومتري، تعیین وزن واحد حجم خاک، تعیین سنگینی ویژه دانه‌های



خاک و در نهایت تعیین حدود اتربرگ انجام شدند که نتایج آن‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. همچنین، نتیجه آزمایش دانه‌بندی توسط سری الک‌ها و هیدرومتری نیز در شکل ۲ نمایش داده شده است.



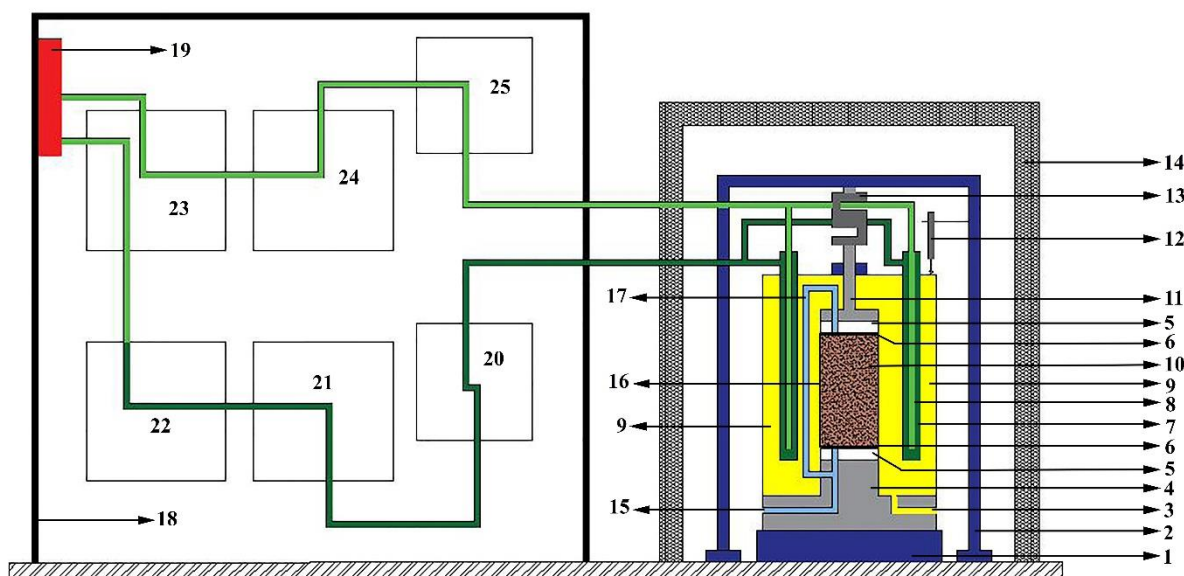
شکل ۲: منحنی دانه‌بندی حاصل از آزمایش هیدرومتری بر روی نمونه خاک رسی مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصه‌های فیزیکی نمونه‌های استحصال شده برای مطالعه حاضر

پارامتر اندازه‌گیری شده (واحد)	مقدار
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	۲۰/۹
$G_s$	۲/۶۷
$S_r$ (%)	۱۰۰
LL (%)	۶۲
PL (%)	۳۰
PI (%)	۳۲

در ادامه، آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های بازسازی‌شده در آزمایشگاه انجام گردید. پارامترهای متغیر در مطالعه حاضر عبارتند از منجمد یا غیرمنجمد بودن نمونه‌ها، دما (غیرمنجمد، صفر و دماهای زیر صفر)، فشار محدودکننده و سرعت بارگذاری؛ که تاثیرات این پارامترها بر رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای درجه اشباع و وزن واحد حجم خاک در این مطالعه جزء پارامترهای ثابت انتخاب شده‌اند. در نهایت مقاومت برشی هر یک از نمونه‌ها ارائه و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین منظور از یک دستگاه آزمایش سه‌محوری استفاده شده است که پیشتر به عنوان یک اختراع در سازمان ثبت اختراع ایران به شماره ۹۱۴۶۷ و به تاریخ

۱۳۹۵/۱۲/۱۵ ثبت گردیده و مطالعات آزمایشگاهی متعدد با آن انجام شده و نتایج آن در مجلات معتبری منتشر شده است که نشان دهنده صحت عملکرد این دستگاه می باشد [4,5,8,16,23]. شکل شماتیک دستگاه آزمایش سه محوری استفاده شده در مطالعه حاضر و قسمت های مختلف آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که دستگاه مذکور به لحاظ تجهیزات تبرید و مسیر میرد بهینه سازی شده است و قابلیت پایین آوردن دما در آن نسبت به گذشته بهبود یافته است.



شکل ۳: تصویر شماتیک دستگاه آزمایش سه محوری برای خاک های منجمد: ۱-جک الکترونیکی؛ ۲-شاسی صلب؛ ۳-اندازه گیری فشار محدودکننده؛ ۴-ستونک؛ ۵-جداگر حرارتی؛ ۶-صفحه متخلخل؛ ۷-شیر خروجی سلول سه محوری؛ ۸-شیر ورودی سلول سه محوری؛ ۹-اتانول؛ ۱۰-نمونه خاک؛ ۱۱-پیستون بارگذاری؛ ۱۲-جابجایی سنج؛ ۱۳-لودسل؛ ۱۴-جعبه عایق حرارتی؛ ۱۵-شیر کنترل فشار منفذی و پس فشار؛ ۱۶-غشای لاتکس؛ ۱۷-مسیر زهکشی؛ ۱۸-دستگاه تبرید؛ ۱۹-فن معکوس؛ ۲۰-پمپ؛ ۲۱-تبخیرکننده؛ ۲۲-کمپرسور؛ ۲۳-پمپ چگالنده؛ ۲۴-چگالنده؛ ۲۵-ترموستات-ترمو متر.

همچنین برنامه ریزی انجام آزمایش ها برای این پژوهش در جدول ۲ نمایش داده شده اند. با توجه به هزینه بالا و زمان بر بودن آزمایش ها، امکان استفاده از خط مشی فاکتوریل ساده در این مطالعه امکان پذیر نیست، بنابراین از روش فاکتوریل تک عاملی استفاده خواهد شد که در آن پارامترهای ثابت بر اساس یک استدلال منطقی انتخاب شده و پارامتر متغیر در یک بازه کامل (فاکتوریل) بررسی می گردد. در مجموع ۴۲ حالت مختلف برای آزمایش ها مدنظر قرار گرفته است که به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل، هر آزمایش حداقل ۳ مرتبه تکرار شده است. علی رغم وجود آب غیرمنجمد در ساختار خاک منجمد (حتی در دماهای زیر صفر)، با توجه به ناچیز بودن مقدار آن از یک طرف و همچنین نرخ زهکشی بسیار پایین خاک مورد استفاده از طرف دیگر، تمامی آزمایش های انجام شده در این پژوهش از نوع تحکیم نیافته زهکشی نشده هستند. به منظور انجام آزمایش های سه محوری، مدت زمان عمل آوری نمونه ها به صورت کاملاً استاندارد و یکسان انجام می شدند. با توجه به ثابت بودن پارامتر نسبت تخلخل و تراکم نمونه ها، این امر توسط روابط وزنی - حجمی در تمامی نمونه ها کنترل شده و سپس بر اساس درجه اشباع ۱۰۰ درصد در خارج از دستگاه سه محوری و به کمک همزن مخصوص تهیه می شدند. دلیل عدم استفاده از خود سلول سه محوری و ضرایب اسکمپتون به منظور اشباع سازی نمونه ها، بالا بودن زمان اشباع سازی بود که زمان انجام آزمایش ها را به صورت غیرمنطقی بالا می برد. پس از این امر، نمونه ها تحت فشارهای محدودکننده مورد نظر قرار گرفته و سپس تحت انجماد تا رسیدن به دمای مورد نظر قرار می گرفتند. دلیل این نحوه از عملکرد شبیه سازی دقیق یک پروژه صحرائی مطابق با واقعیت بود، چرا که در عمل نمونه های خاک در اعماق مختلف تحت فشار محدودکننده لایه های فوقانی قرار دارند و سپس انجماد به آن ها اعمال و در نهایت گودبرداری انجام می شود. بسته به دمای مورد نظر آماده سازی نمونه ها از ۲ تا ۹ ساعت متفاوت بودند. همچنین انجام مرحله اعمال



تنش انحرافی به دلیل سرعت‌های مختلف اعمال بارگذاری برای هر نمونه متفاوت بودند که در نهایت رفتار تنش-کرنش آن‌ها بر اساس شرایط هر آزمون، ثبت می‌گردد.

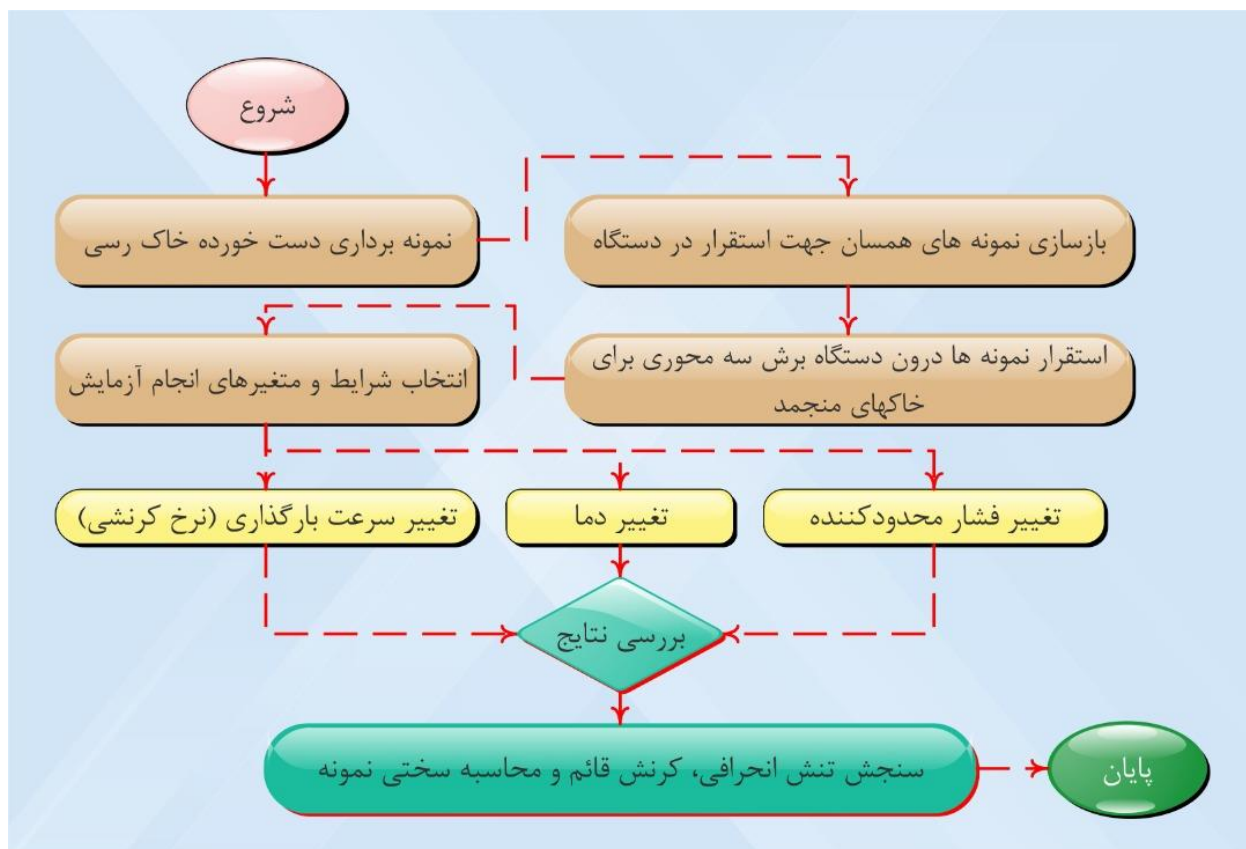
محدودیت‌های مطالعه حاضر را می‌توان در سه مورد ارائه نمود. به مانند سایر مطالعات آزمایشگاهی و با توجه به آزمایش سه‌محوری بر روی خاک منجمد که زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد، امکان انجام مطالعات بیشتر مقدور نبود و در مجموع حدود ۱۳۰ آزمایش سه‌محوری بر روی رس منجمد انجام گردید. حداکثر توان دستگاه تبرید در ایجاد دمای منفی، ۱۸- درجه سلسیوس است که هرچند نسبت به گذشته حدود ۷ درجه بهبود یافته است اما هنوز هم می‌توان به عنوان یک محدودیت آن را بیان نمود. محدودیت آخر توان پمپ هیدرولیکی به منظور ایجاد فشار محدودکننده است که حداکثر توان آن ۱۲۵۰ کیلوپاسکال است. حال آن که برای بررسی فشارهای چند مگاپاسکال، پمپ‌های قوی‌تری نیاز است. شکل ۴ تصویری از سلول آزمایش فشاری سه‌محوری برای خاک‌های منجمد، پیش از شروع آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین، فلوجارت فرآیند انجام مطالعه آزمایشگاهی حاضر در شکل ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۲: مشخصه‌های فیزیکی نمونه‌های استحصال شده برای مطالعه حاضر

متغیرهای آزمایش	محدوده مورد مطالعه متغیرهای در پژوهش حاضر
فشار محدودکننده (کیلوپاسکال)	صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰
سرعت بارگذاری (میلیمتر بر دقیقه)	۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۷، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۷، ۱/۰، ۱/۵ و ۲
دما (درجه سلسیوس)	غیرمنجمد (+۱)، -۱، -۲، -۳، -۴، -۵، -۶، -۷، -۸، -۹، -۱۰، -۱۱، -۱۲، -۱۳، -۱۴، -۱۵، -۱۶ و -۱۷



شکل ۴: تصویری از محیط آزمایشگاه و سلول سه‌محوری برای خاک‌های منجمد



شکل ۵: شکل شماتیک فرآیند انجام مطالعه آزمایشگاهی حاضر

### ۳- بحث و نتایج

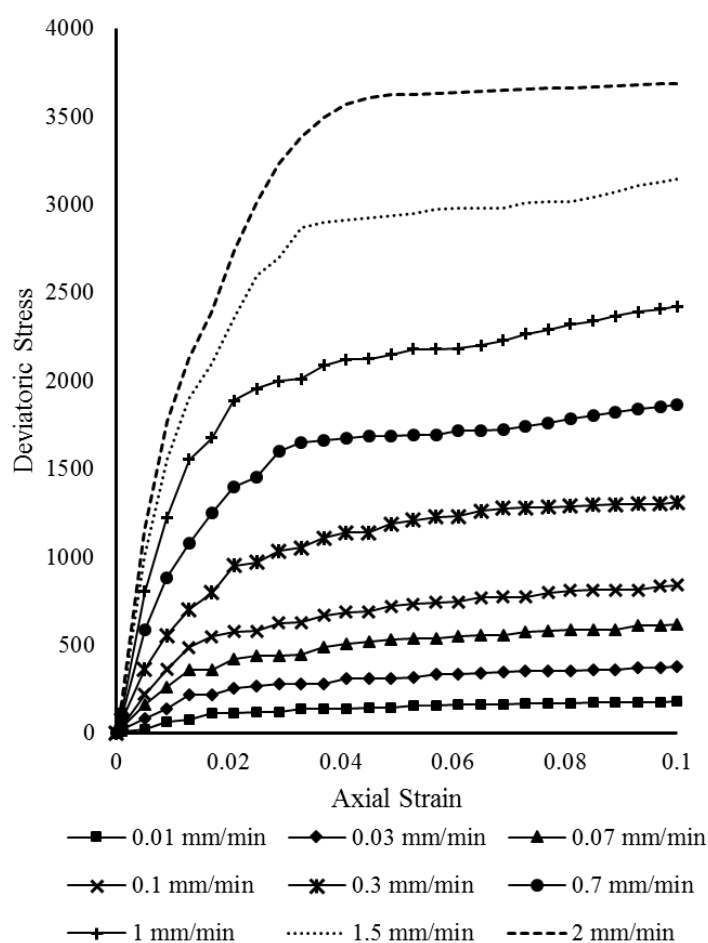
همان‌گونه که اشاره گردید، مشخصه‌های وزن واحد حجم، درجه اشباع و جنس خاک جزء پارامترهای ثابت مطالعه حاضر می‌باشند. در حالی که دما، فشار محدودکننده و سرعت بارگذاری به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شده و تأثیر آن‌ها بر رفتار تنش-کرنش خاک رسی منجمد مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که نتایج مطالعه حاضر صرفاً برای خاک‌های تهیه شده از این ساختگاه معتبر بوده و در صورت نیاز با استفاده از فن‌آوری انجماد مصنوعی زمین در خاک‌های مشابه، انجام آزمایش‌های کنترلی ضروری است. نکته قابل توجه که در تمامی آزمایش‌ها صادق بود، علی‌رغم انتظار مشاهده رفتار ترد و شکننده نمونه‌های رسی منجمد در انتهای آزمایش، گسیختگی تمامی نمونه‌ها صرفاً بر اساس وقوع تغییرشکل‌های بزرگ بود که منجر به خمره‌شدگی در نمونه‌ها می‌گردید و در هیچ کدام از نمونه‌ها، گسیختگی برشی ترد ملاحظه نشد.

شکل ۶ تأثیر سرعت بارگذاری بر رفتار تنش-کرنش نمونه‌های رس منجمد تحت فشار محدودکننده ۴۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵- درجه سلسیوس به‌زای سرعت‌های بارگذاری مختلف را نشان می‌دهد. در کلیه مطالعات مکانیکی در حوزه مهندسی عمران اعم از خاک و بتن و ...، همواره تأثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت مورد بررسی، از چالش‌های پیش روی پژوهشگران بوده است. تعیین این موضوع در خاک‌های دانه‌ای و به ویژه خاک‌های ماسه‌ای همواره چالش‌انگیز بوده است در حالی که در خاک‌های رسی امکان بررسی دقیق‌تری وجود دارد و معمولاً مدل‌های رفتاری ویسکو الاستیک و ویسکو الاستوپلاستیک توانایی و دقت قابل قبولی در مدلسازی رفتار خاک‌های رسی دارند که نشان‌دهنده این امر است. هرچند در مورد خاک‌های منجمد اوضاع به کلی متفاوت است. در خاک‌های دانه‌ای منجمد نیز تأثیر سرعت

بارگذاری بر مقاومت برشی بدون پیچیدگی خاصی قابل تعیین است. چرا که ماتریس یخ به عنوان یک عامل سیمانتاسیونی مطرح است و تا حدودی نسبت به رفتار کاملاً اصطکاکی تفاوت ایجاد می‌شود. در مورد رس منجمد نیز تأثیر سرعت بارگذاری قابل ملاحظه است چرا که ماتریس یخ، رفتار ویسکوز رس را تشدید می‌کند [16].

لازم به ذکر است مطابق آیین‌نامه ASTM D2850-15 که روش انجام آزمایش سه‌محوری بر روی خاک‌های رسی به صورت تحکیم نیافته زهکشی نشده در آن تشریح شده است، سرعت مناسب بارگذاری بر روی نمونه‌های شکل‌پذیر ۱ میلی‌متر بر دقیقه (معادل نرخ کرنش 1%/min) و بر روی نمونه‌های تردشکن ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه (معادل نرخ کرنش 0.3%/min) توصیه شده است [24]. هرچند این آیین‌نامه و اعداد پیشنهادی برای خاک رس غیرمنجمد بوده و به دلیل مقدار آب غیرمنجمد احاطه شده بین ماتریس یخ و پولک‌های رسی آنقدر ناچیز است که استفاده از این اعداد برای رس منجمد ممکن است صحیح نباشد. بنابراین در این مطالعه، سرعت‌های مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است تا پژوهشگران و مهندسين مشاور مرتبط با این حوزه نرخ مورد نظر را بر اساس پروژه مورد نظر انتخاب و مورد بررسی دقیق‌تری قرار دهند.

مطابق شکل ۶ مشاهده می‌شود که افزایش سرعت بارگذاری حتی تا ۲ میلی‌متر بر دقیقه نیز رفتار نمونه‌های رس منجمد را تغییر نمی‌دهد و آن‌ها همچنان رفتار سخت‌شوندگی کرنشی از خود بروز می‌دهند. رفتار نمونه‌های رس منجمد تقریباً در تمامی نرخ‌های کرنش بسیار مشابه حالت الاستیک-کاملاً پلاستیک است. افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۱، ۰/۰۳، ۰/۰۷، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۷، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب منجر به ۱۱۲٪، ۲۴۴٪، ۳۶۹٪، ۶۳۳٪، ۹۴۳٪، ۱۲۵۴٪، ۱۶۵۸٪ و ۱۹۶۹٪ افزایش در مقاومت برشی می‌گردد که این امر ناشی از اثر دوگانه خاصیت ویسکوزی خاک رس و ماتریس یخ می‌باشد که هر دو ماده مذکور به سرعت بارگذاری وابسته هستند. همچنین افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۱ به ۰/۳، ۰/۷، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ میلی‌متر بر دقیقه مقاومت برشی را به میزان ۵۶٪، ۱۲۲٪، ۱۸۹٪، ۲۷۵٪ و ۳۳۹٪ بالا می‌برد. در نهایت، افزایش سرعت بارگذاری اعمال تنش انحرافی از ۱/۰ به ۱/۵ و ۲/۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقاومت برشی رس منجمد را به ترتیب ۳۰٪ و ۵۲٪ افزایش می‌دهد. افزایش سرعت بارگذاری تا ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه منجر به افزایش بزرگی در مدول الاستیسیته نمونه رسی منجمد می‌شود، در حالی که با افزایش بیشتر سرعت بارگذاری، آهنگ رشد مدول الاستیسیته کندتر می‌گردد.

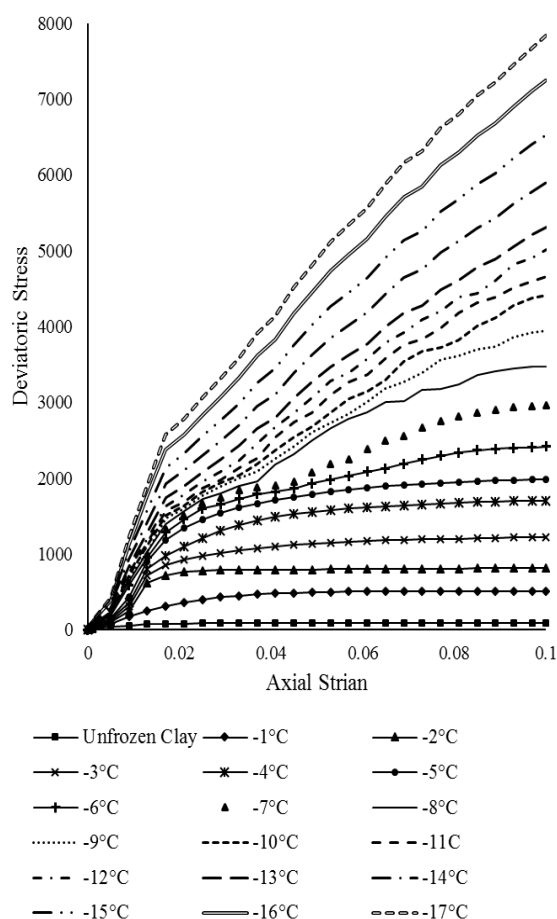


شکل ۶: تأثیر سرعت بارگذاری بر رفتار رس منجمد تحت فشار محدودکننده ۴۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵- درجه سلسیوس

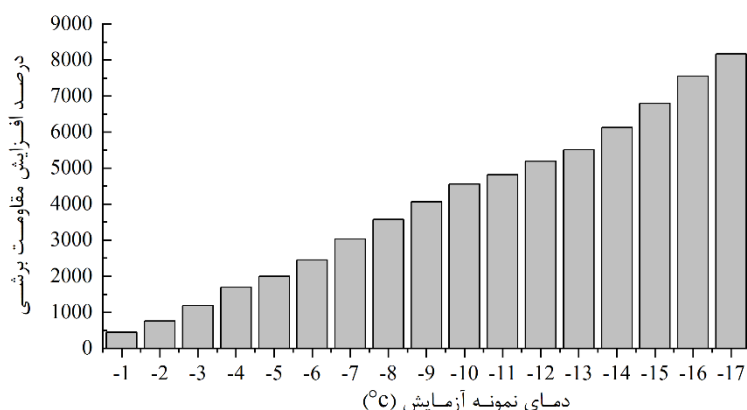
شکل ۷ در وهله اول تأثیر انجماد و در ادامه تأثیر کاهش دما را بر رفتار تنش-کرنش رس منجمد تحت فشار محدودکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال و سرعت بارگذاری ۱ میلیمتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. نکته‌ی قابل ملاحظه، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی تمامی نمونه‌ها می‌باشد که حتی با کاهش دما تا ۱۷- درجه سلسیوس نیز ملاحظه می‌گردد. بررسی رفتار نمونه‌ها نشان می‌دهد که در نمونه رس غیرمنجمد و نمونه‌های رس منجمد تا دمای ۵- درجه سلسیوس، خیلی نزدیک به حالت الاستیک-کاملاً پلاستیک بوده و پس از وقوع تسلیم، سخت‌شدگی آنچنانی در رفتار نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. در حالی که در دماهای پایین‌تر به نظر می‌رسد در یک نقطه تسلیم اتفاق می‌افتد، ولی نمونه‌ها کماکان تنش قابل ملاحظه‌ای را تحمل می‌کنند و با یک تقریب مناسب می‌توان چنین رفتاری را سخت‌شوندگی با دو خط راست در نظر گرفت و مدل نمود. دلیل تحمل تنش قابل ملاحظه پس از تسلیم در دماهای پایین‌تر، تشکیل باند منجمد در نواحی ذوب شده (اطراف سطح گسیختگی) می‌باشد، چرا که به دلیل بالا رفتن فشار آب حفره‌ای و گرمای اصطکاک ناشی از فشار محدودکننده، دمای انجماد به دماهای پایین‌تر از صفر درجه سلسیوس رسیده و ذوب‌شدگی موضعی در وجه مشترک فیلم آب غیرمنجمد و ماتریس یخ در محل اتصال ذرات رسی به وقوع می‌پیوندد. همچنین مطابق رفتار تنش-کرنش نمونه‌های رس منجمد که در شکل ۷ نمایش داده شده است، به نظر می‌رسد رفتار نمونه‌های رس منجمد در دماهای پایین‌تر (سردتر) نامنظم‌تر از رفتار نمونه‌های رس منجمد نزدیک صفر درجه سلسیوس است که می‌تواند ناشی از باز تبلور بلورهای یخی در نواحی ذوب‌شده ناشی از انرژی آزاد شده از جذب تنش و وقوع تغییر شکل

باشد. بررسی کلی شکل ۵ نشان دهنده افزایش قابل ملاحظه مدول الاستیسیته رس منجمد به ویژه در دماهای کمتر از ۴- درجه سلسیوس است که می تواند به عنوان یک عامل موثر در طراحی ها و مدلسازی های عددی مورد ملاحظه قرار گیرد.

بررسی نمودار شکل ۷ نشان می دهد که انجماد تا دمای ۱- درجه سلسیوس مقاومت برشی نمونه رسی منجمد را نسبت به نمونه رسی غیرمنجمد به اندازه ۴۴۱٪ افزایش می دهد. این مقادیر برای نمونه های ۲-، ۳-، ۴- و ۵- درجه سلسیوس به ترتیب ۷۵۶٪، ۱۱۸۳٪، ۱۶۹۱٪ و ۱۹۹۰٪ است. در نهایت انجماد تا دمای ۱۷- درجه سلسیوس مقاومت برشی نمونه رسی منجمد را نسبت به نمونه رسی غیرمنجمد به اندازه ۸۱۴۳٪ افزایش می دهد. در صورت معیار قرار دادن نمونه خاک رس منجمد در دمای ۱- درجه سلسیوس، کاهش دما تا ۳-، ۵-، ۷-، ۱۰-، ۱۳-، ۱۵- و ۱۷- به ترتیب منجر به افزایش مقاومت برشی به اندازه ۱۳۷٪، ۲۸۶٪، ۴۷۷٪، ۷۵۸٪، ۹۳۳٪، ۱۱۷۱٪ و ۱۴۲۴٪ می گردد. شکل ۸ میزان افزایش مقاومت برشی نمونه های رس منجمد را به ازای افزایش دما نسبت به نمونه غیرمنجمد را نشان می دهد.



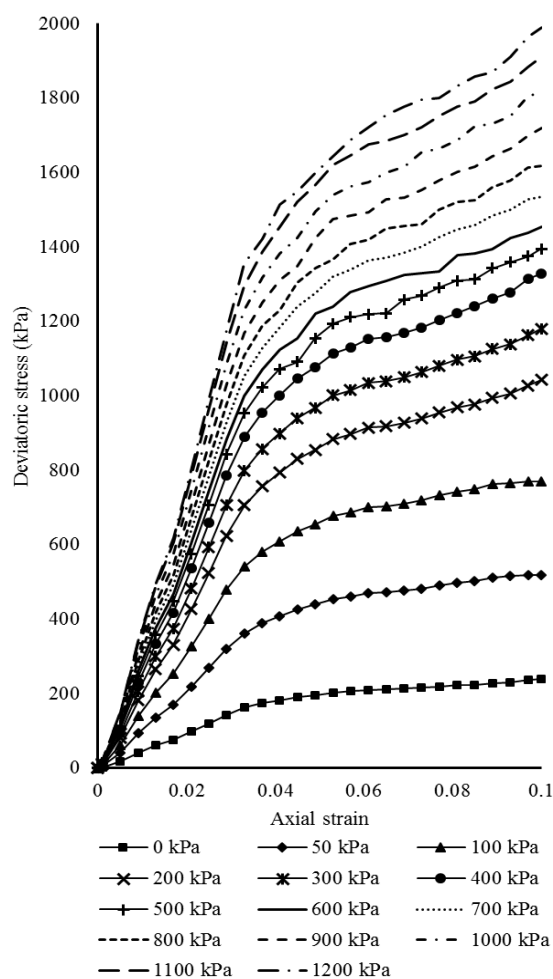
شکل ۷: تأثیر کاهش دما بر رفتار رس منجمد تحت فشار محدودکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال و سرعت بارگذاری ۱ میلیمتر بر دقیقه



شکل ۸: مقایسه میزان افزایش مقاومت برشی سه محوری رس منجمد نسبت به نمونه‌ی غیر منجمد تحت دماهای مختلف

شکل ۹ تأثیر فشار محدودکننده بر رفتار تنش-کرنش رس منجمد در دمای ۵- درجه سلسیوس و سرعت بارگذاری ۰,۳ میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که تمامی نمونه‌های رس منجمد تحت فشارهای محدودکننده مختلف، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی از خود نشان می‌دهند و افزایش فشار محدودکننده حتی تا میزان ۱۲۰۰ کیلوپاسکال نیز این رفتار را تغییر نمی‌دهد. همچنین، تمامی نمونه‌ها حتی تحت بالاترین فشار محدودکننده گسیختگی انعطاف‌پذیر داشتند و هیچ گسیختگی تردی ملاحظه نشد. در فشارهای محدودکننده پایین (از صفر تا ۲۰۰ کیلوپاسکال) رفتار نمونه‌ها مشابه حالت الاستیک-کاملاً پلاستیک است و با افزایش بیشتر فشار محدودکننده رفتار سخت‌شوندگی دو مرحله‌ای قابل مشاهده است. مرحله اول که در آن نمونه تا رسیدن به تسلیم رفتار الاستیک خطی از خود نشان می‌دهد و مرحله دوم که پس از تسلیم نیز مقاومت قابل توجهی از خود نشان داده و سخت‌شوندگی ادامه می‌یابد. در فشارهای محدودکننده بالا به دلیل شکست شدیدتر باندهای ماتریس یخ درون ساختار خاک منجمد به هنگام اعمال تنش انحرافی، نامنظمی و نوسان جزئی در رفتار قابل مشاهده است. افزایش فشار محدودکننده تا حدود ۳۰۰ کیلوپاسکال منجر به افزایش قابل ملاحظه در مدول الاستیسیته رس منجمد می‌گردد. افزایش بیشتر فشار محدودکننده نیز منجر به افزایش مدول الاستیسیته نمونه‌های رسی منجمد می‌گردد، با این تفاوت که نرخ افزایش و آهنگ رشد مدول الاستیسیته در قیاس با فشارهای محدودکننده کوچکتر، کندتر است. دلیل این امر نرخ پایین تحکیم در فشارهای محدودکننده پایین و نرخ بالای تحکیم در فشارهای محدودکننده بالا ارزیابی می‌شود.





شکل ۹: تأثیر فشار محدودکننده بر رفتار رس منجمد در دمای ۵- درجه سلسیوس و سرعت بارگذاری سرعت بارگذاری ۰,۳ میلیمتر بر دقیقه

در نهایت، مطابق رفتار مشاهده شده از نتایج آزمایش‌هایی که در مطالعه حاضر گزارش شده است نسبت به مطالعات پیشین مطابقت قابل قبولی داشته و استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین با توجه به رشد قابل ملاحظه مقاومت برشی نمونه‌های رسی منجمد تهیه شده از ساختگاه دریاچه شورابیل به ویژه در دماهای زیر ۱۰- درجه سلسیوس می‌گردد. در صورت انجام آزمایش‌های کنترلی و تکمیلی استفاده از روش انجماد مصنوعی زمین به منظور بهسازی موقت خاک (نگهدارنده موقت) برای پروژه‌هایی چون گودبرداری و تونل-سازی توصیه می‌شود.

#### ۴- نتیجه گیری

به دلیل عدم انجام مطالعات کافی بر روی رفتار رس منجمد، در این پژوهش رفتار نمونه‌های رس منجمد تحت دماها، نرخ‌های کرنش و فشارهای محدودکننده متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که:

۱. نمونه‌های رس منجمد تحت آزمایش سه‌محوری در تمامی محدوده‌های دمایی مورد بررسی، گسیختگی انعطاف‌پذیر (غیر ترد) از خود نشان می‌دهند.

۲. نمونه‌های رس منجمد تحت آزمایش سه‌محوری در تمامی محدوده‌های دمایی مورد بررسی، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی از خود نشان می‌دهند.
۳. نمونه‌های رس منجمد تحت آزمایش سه‌محوری در تمامی محدوده‌های سرعت بارگذاری مورد بررسی، گسیختگی انعطاف‌پذیر (غیر ترد) از خود نشان می‌دهند.
۴. نمونه‌های رس منجمد تحت آزمایش سه‌محوری در تمامی محدوده‌های سرعت بارگذاری مورد بررسی، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی از خود نشان می‌دهند.
۵. افزایش سرعت بارگذاری و فشار محدودکننده در محدوده مورد بررسی، منجر به افزایش مقاومت برشی و مدول الاستیسیته نمونه رس منجمد می‌گردد.
۶. کاهش دما تا ۱۷- درجه سلسیوس منجر به افزایش قابل ملاحظه مدول الاستیسیته و مقاومت برشی نمونه رس منجمد می‌گردد.
۷. روش انجماد مصنوعی زمین به عنوان یک روش بهسازی موقت خاک در نمونه‌های خاک رسی مورد مطالعه، به صورت معقولی قابل استفاده است.

## مراجع

- [1] Sarkhani Benemaran R, Esmaeili-Falak M, Katebi H. Physical and numerical modelling of pile-stabilised saturated layered slopes. *Proc Inst Civ Eng Eng* 2020;1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00152>.
- [2] Sarkhani Benemaran R. Experimental and analytical study of pile-stabilized layered slopes. Thesis, University of Tabriz, 2017.
- [3] Esmaeili-Falak M. Effect of System's Geometry on the Stability of Frozen Wall in Excavation of Saturated Granular Soils. Doctoral Dissertation, University of Tabriz, 2017.
- [4] Esmaeili-Falak M, Katebi H, Javadi A. Experimental study of the mechanical behavior of frozen soils-A case study of tabriz subway. *Period Polytech Civ Eng* 2018;62:117–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.3311/PPci.10960>.
- [5] Esmaeili-Falak M, Katebi H, Javadi A, Rahimi S. Experimental investigation of stress and strain characteristics of frozen sandy soils-A case study of Tabriz subway. *Modares Civ Eng J* 2017;17:13–23.
- [6] Andersland OB, Ladanyi B. Frozen ground engineering. John Wiley & Sons; 2003.
- [7] Benemaran RS, Esmaeili-Falak M. Optimization of cost and mechanical properties of concrete with admixtures using MARS and PSO. *Comput Concr* 2020;26:309–16. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12989/cac.2020.26.4.309>.
- [8] Esmaeili-Falak M, Katebi H, Vadiati M, Adamowski J. Predicting triaxial compressive strength and Young's modulus of frozen sand using artificial intelligence methods. *J Cold Reg Eng* 2019;33:4019007. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000188](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000188).
- [9] Wang J, Nishimura S, Tokoro T. Laboratory study and interpretation of mechanical behavior of frozen clay through state concept. *Soils Found* 2017;57:194–210.
- [10] Evirgen B. Comparison of individual and sequential copper piping systems in an experimental artificial ground freezing model. *Arab J Geosci* 2021;14:1–12.
- [11] Zhang Y, Liu S, Lu Y, Li Z. Experimental study of the mechanical behavior of frozen clay-gravel composite. *Cold Reg Sci Technol* 2021;189:103340.
- [12] Lee MY, FOSSUM AF, Costin LS, BRONOWSKI DR, JUNG J. Frozen soil material testing and constitutive modeling. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia ...; 2002.
- [13] Li HP, Zhu YL, Pan WD. Uniaxial compressive strength of saturated frozen silt. 8th Int. Conf. Permafr., 2003, p. 679–84.
- [14] Nguyen AD, Sego CD, Arenson UL, Biggar WK. The dependence of strength and modulus of frozen saline sand on temperature, strain rate and salinity. *Proc. 63rd Can. Geotech. Conf.*, 2010, p. 467–75.
- [15] Evirgen B, Onur MI, Tuncan M, Tuncan A. Determination of the freezing effect on unconfined compression strength and permeability of saturated granular soils. *GEOMATE J* 2015;8:1283–7.
- [16] Esmaeili-Falak M, Katebi H, Javadi AA. Effect of Freezing on Stress-Strain Characteristics of Granular and Cohesive Soils. *J Cold Reg Eng* 2020;34:5020001. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000205](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000205).

- [17] Tounsi H, Rouabhi A, Jahangir E, Guérin F. Mechanical behavior of frozen metapelite: Laboratory investigation and constitutive modeling. *Cold Reg Sci Technol* 2020;175:103058.
- [18] Li H, Zhu Y, Zhang J, Lin C. Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay. *Cold Reg Sci Technol* 2004;39:39–45.
- [19] Xu X, Wang Y, Bai R, Fan C, Hua S. Comparative studies on mechanical behavior of frozen natural saline silty sand and frozen desalted silty sand. *Cold Reg Sci Technol* 2016;132:81–8.
- [20] Xu X, Li Q, Xu G. Investigation on the behavior of frozen silty clay subjected to monotonic and cyclic triaxial loading. *Acta Geotech* 2020;15:1289–302.
- [21] Shastri A, Sánchez M, Gai X, Lee MY, Dewers T. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling. *Comput Geotech* 2021;138:104361.
- [22] Yugui Y, Feng G, Yuanming L, Hongmei C. Experimental and theoretical investigations on the mechanical behavior of frozen silt. *Cold Reg Sci Technol* 2016;130:59–65.
- [23] Nassr A, Esmaili-Falak M, Katebi H, Javadi A. A new approach to modeling the behavior of frozen soils. *Eng Geol* 2018;246:82–90.
- [24] ASTM D2850-15. Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils. ASTM International; 2016.