



بررسی رفتار خاک منجمد تحت آزمایش فشاری محدود نشده

علیرضا نگهدار*، علیرضا احمدی، میر مهدی سید رحیمی نیارق

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

کلمات کلیدی:

خاک منجمد
مقاومت فشاری
خاک ماسه‌ای

خلاصه: در ساخت و سازه‌های زیرزمینی شهری و مناطق سردسیری، اغلب خاک‌های ماسه‌ای منجمد مشاهده می‌شود. از طرف دیگر انجماد مصنوعی خاک به عنوان یکی از روش‌های بهسازی خاک شناخته می‌شود. همچنین می‌دانیم بیشتر خاک مناطق ساحلی از نوع ماسه بدانه‌بندی شده است و این نوع خاک‌ها با رطوبت بالا و در معرض دمای پایین می‌باشند، در چنین مواقعی ضروری است تاثیر عوامل مختلف بر مقاومت خاک منجمد بررسی شود. از این رو برای شناخت دقیق، مدت زمان لازم انجماد برای رسیدن خاک مورد نظر به مقاومت کافی نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. خاک مورد مطالعه، ماسه برداشت شده از اطراف دریاچه شورابیل شهر اردبیل است که تعداد بالای روزهای یخبندان اردبیل (۱۳۰ روز) در سال گویای ضرورت تحقیق می‌باشد. برای بررسی تاثیر اندازه ذرات خاک، از دو اندازه مختلف ماسه، شامل اندازه ۰/۲۵ mm و ۰/۱۵ mm که با نسبت‌های مشخص با خاک رس مخلوط می‌شود استفاده شده است. در این پژوهش، از آزمایش فشاری تک محوره برای بررسی مقاومت فشاری محصور نشده ۱۰ ترکیب خاک مختلف و ۴ درصد رطوبت متفاوت استفاده شده است. ۴۰ ترکیب در ۳ مدت زمان انجماد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در خروجی نتایج آزمایش، منحنی‌های تنش-کرنش به طور کلی حالت نرم شدن کرنش را نشان می‌دهند. مقاومت نمونه‌ها در مدت زمان کوتاه‌تر، مقدار تقریباً مشابهی دارند. با افزایش سن انجماد، تنش ناشی از وجود رس، مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد. به طوری که با افزایش سن انجماد، نمونه با درصد کم رس رشدی نداشته و از یک مقدار ثابت، دیگر بیش تر نمی‌شود به عنوان مثال، نمونه با ۵۰٪ رس در با سن انجماد ۲۴ ساعت و رطوبت ۱۵٪ تنش برابر با ۲۰/۸۵ kPa و در مدت انجماد ۷۲ ساعت، ۲۸۳/۸ kPa را تحمل می‌کند، در حالی که این ارقام برای نمونه با ۱۰٪ رس با رطوبت مشابه برابر با ۲۶۵/۴ kPa برای سن انجماد ۲۴ ساعت و ۲۸۳/۸ kPa برای سن انجماد ۷۲ ساعت می‌باشد. در آخر اینکه، با کوچک‌تر شدن اندازه ماسه مصرفی، مقاومت تا حدود ۳۶٪ در برخی نمونه‌ها کاهش می‌یابد اما همچنان روال آزمایش حفظ می‌شود و نمونه با ۳۰٪ رس در اغلب موارد بیش‌ترین مقاومت را دارا هستند.

۱- مقدمه

در مناطق سرد و زمانی که سرمای شدیدی در محیط حاکم باشد آب موجود در میان ذرات خاک، یخ زده و به اصطلاح خاک منجمد را تشکیل می‌دهد. از دیدگاه علم مواد، خاک منجمد از چهار بخش تشکیل شده است: ذرات جامد خاک، یخ، آب مایع و گاز. خاک رس منجمد می‌تواند تا دمای 110°C حاوی آب مایع باشد از طرف دیگر یخ وقتی بیشتر منافذ خاک را پر می‌کند، رفتار مکانیکی خاک منجمد، منعکس کننده رفتار یخ خواهد بود. رفتار یک خاک منجمد با افزایش فشار هیدرواستاتیک، تحت تاثیر ترکیبی از اثرات مکانیکی و ترمودینامیکی است که اولی بر تقسیم تنش و دومی بر

پدیده ذوب و فشار دلالت دارد [۱ و ۲].

یخ زدن آب باعث افزایش فشار یخ و کاهش فشار آب حفره‌ای می‌شود. به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای در جبهه یخ زده، آب از لایه‌های زیرین به طرف مرزهای یخ زده حرکت می‌کند. حتی اگر خاک هیچ راه دسترسی به آب خارجی نداشته باشد، فشار آب حفره‌ای منفی بزرگ و حرکت آب باعث می‌شود ترک‌های انقباضی قائم در خاک زیر جبهه یخ زده شکل بگیرند. با پیش‌روی جبهه یخ زده این ترک‌ها با یخ پر شده و وقتی یخ‌ها ذوب می‌شوند ترک‌ها مجرای برای جریان آب شده و نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد [۳-۵].

مقاومت خاک‌های منجمد یکی از مباحث بسیار گسترده در زمینه مکانیک

خاک است که به عنوان یکی از پارامترهای مهم در توسعه زیرساخت‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Negahdar@uma.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



برشی ممکن است پنج برابر کاهش یابد [۱۱]. مشکلی که در انجماد سنگ و خاک وجود دارد این است که در انواع خاک‌های ریزدانه، تحت شرایط مشخصی و در طول فرایند ذوب شدن، علی‌رغم تغییر در شرایط بارگذاری بیرونی، تمایل زیادی به ایجاد فشار منفذی بیش از حد وجود دارد. در برخی مواقع، این عوامل می‌تواند شرایط پیش‌تحکیم یافته‌ای را برای توده خاک بعد از چرخه ذوب و انجماد فراهم کند [۱۲].

مقاومت خاک منجمد تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد، و این پیش‌بینی رفتار آن را بسیار پیچیده می‌کند [۱۳]. مقاومت خاک منجمد از پیوند مولکولی، پیوند ساختار و پیوند یخ تشکیل شده است. این مقاومت عمدتاً از مقاومت یخ، مقاومت ذرات خاک و اندرکنش بین ذرات آب-خاک و یخ نشأت می‌گیرد. به طور کلی مشخص شده است که یخ، نقش اصلی در مقاومت خاک‌های منجمد دارد. مقاومت فشاری تک محوری (UCS) خاک‌های یخ زده به راحتی به دست می‌آید و بنابراین توسط تعداد زیادی از مطالعات تجربی این موضوع بررسی شده است. مشخص شده است که دما و نرخ کرنش مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر UCS (مقاومت فشاری تک محوری) خاک‌های منجمد اشباع هستند [۱۴].

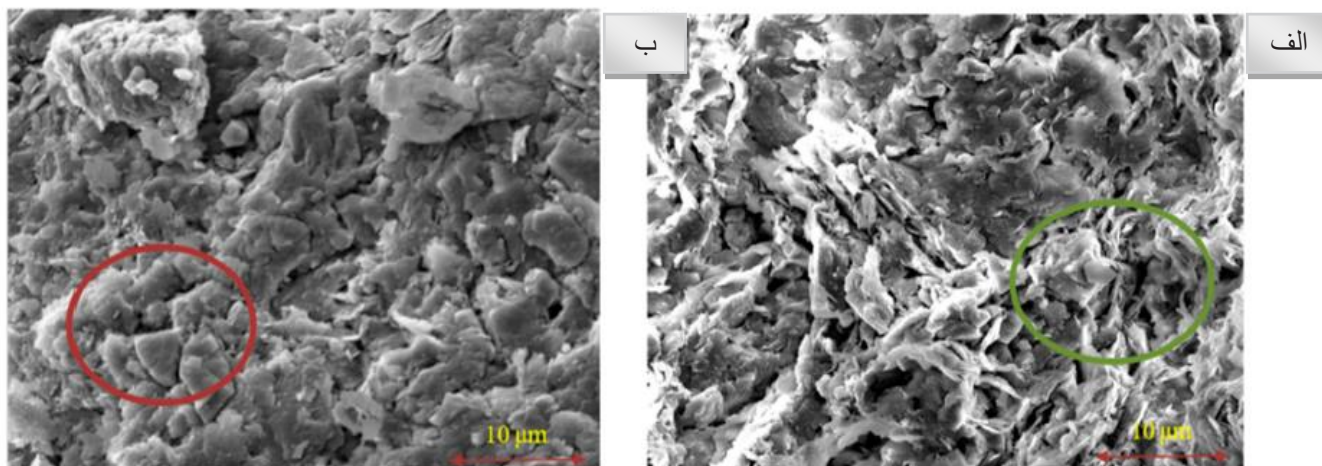
در اثر انجماد و با رشد کریستال‌های یخ، پیوند بین ذرات خاک از بین می‌رود. بنابراین حفره‌های خاک به هم چسبیده و منافذ بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند و ساختار جدید خاک شکل می‌گیرد. در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی از خاک منجمد نشان می‌دهد که پیش از انجماد، بخش‌های مترامک (دایره قرمز رنگ) نقش غالب در ساختار خاک را دارند و بخش‌های قطعه قطعه شده (دایره سبز رنگ) نقش مهم را بعد از ذوب بازی می‌کنند. در هر صورت ذوب کریستال‌های یخ، نمی‌تواند ساختار اصلی خاک را به طور کامل بازسازی کند [۱۵].

در مقایسه مقاومت خاک‌های منجمد، به راحتی می‌توان فهمید که دما اولین عامل تأثیرگذار بر مقاومت خاک‌های منجمد است. مقاومت فشاری تک محوری (UCS) خاک رس منجمد، لای و ماسه همه با کاهش دما افزایش می‌یابد [۱۶ و ۱۷] هم‌چنین اثرات دما و نرخ کرنش را بر خاک لای منجمد فربنکس (شهری در آلاسکا) بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸]. با توسعه گسترده مناطق سردسیر و توسعه ساخت و ساز زیرزمینی شهری، نیازهای تحقیقاتی برای شناخت خواص مکانیکی خاک‌های منجمد بیشتر شده است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی در خصوص مقاومت سه محوری شن‌های ماسه‌ای منجمد انجام شده است که شامل بررسی

پروژه‌های عمرانی در نظر گرفته می‌شود. خاک‌های منجمد اغلب نه تنها در تونل‌ها، خطوط لوله و معادن زغال سنگ در مناطق سردسیر بلکه در انجماد مصنوعی برای بهسازی خاک در توسعه شهری نیز وجود دارد [۶]. بنابراین، درک ویژگی‌های مکانیکی، مانند مقاومت خاک‌های منجمد ضروری به نظر می‌رسد. می‌دانیم مقاومت به عنوان معیاری برای تعیین ظرفیت باربری خاک شناخته می‌شود. مقاومت خاک منجمد با توجه به زمان شکست آن به سه دسته مقاومت آبی، مقاومت بلند مدت و مقاومت بلند مدت حدی تقسیم می‌شود. مقاومت آبی، مقاومتی است که در آن شکست فوری رخ می‌دهد. مقاومت بلند مدت، همان مقاومت یا تنش است که در آن شکست تحت زمان طولانی به وقوع می‌پیوندد و مقاومت بلند مدت حدی، مقاومتی است که اگر تنش واقعی وارد بر خاک کمتر از آن باشد، هرگز شکست یا گسیختگی ایجاد نمی‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که مقاومت خاک منجمد، تحت تأثیر عوامل مختلفی چون میزان رطوبت، میزان نمک موجود در خاک، دما، نرخ کرنش، دانسیته خشک خاک و نوع خاک قرار دارد. در ضمن، نرخ کرنش تأثیر زیادی بر مقاومت خاک‌های منجمد دارد به طور کلی مشخص شده است که مقاومت فشاری تک محوری خاک‌های یخ زده با افزایش نرخ کرنش به شکل نمایی افزایش می‌یابد [۸ و ۷].

هنگام طراحی سازه‌های یخی در خاک رس، رسیدن به دمای پایین‌تر جهت افزایش مقاومت مورد نظر ضروری است، به طور مثال رسیدن به دمای 7°C - ممکن است برای زمین ماسه‌ای کافی باشد در حالی که برای رس نرم دمای کم‌تر از 29°C - نیاز است. برخی پژوهشگران تأکید کرده‌اند که مقاومت خاک منجمد به چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی اجزاء تشکیل دهنده آن بستگی دارد. میزان چسبندگی به ماتریس یخ نسبت داده شده است که به مقدار، مقاومت یخ و ناحیه‌ی تماس بین یخ و خاک بستگی دارد و هر کدام تابعی از دما هستند [۹]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حتی در دماهای پایین‌تر از صفر درجه و بدون حضور هیچ‌گونه آلاینده‌ای، مقداری آب غیرمنجمد در خاک منجمد باقی می‌ماند و به صورت نواری باریک، پیرامون ذرات خاک را احاطه می‌کند و مانع از تماس مستقیم و اندرکنش خاک و ماتریس یخ می‌شود [۱۰].

خاک‌های منجمد با ساختار لایه‌ای مقاومت‌هایی چندین برابر بیش‌تر از خاک‌های غیرمنجمد از همان نوع دارند. پس از ذوب شدن، ظرفیت باربری خاک‌های منجمد با ساختار لایه‌ای به شدت کاهش می‌یابد و خواص مقاومت این خاک‌ها در مقایسه با خواص مقاومت همان خاک‌هایی که تحت انجماد قرار نگرفته‌اند، به طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند. برای مثال، مقاومت



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی خاک: الف) خاک منجمد در دمای 10°C - (ب) خاک غیرمنجمد (زی و همکاران، ۲۰۱۹)

Fig. 1. Microscopic image of soil a) Frozen soil at- 10°C , b) Non-frozen soil

مقاومت خاک‌ها، از شرایط ساده و قابل کنترل برای شروع مدل استفاده شده است. به عبارتی آزمایشات فشاری تک محوری، بر روی یک سری خاک‌های ترکیب شده با درصد‌های مختلف ماسه و رس در حالت منجمد انجام شد.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

مصالح مصرفی از نوع ماسه و رس است که با ترکیب‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مشخصات خاک‌ها در جدول ۱ آورده شده است. ماسه با دانه‌بندی یکنواخت با مقادیر ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ رس مخلوط گردیده و نمونه‌های حاصل با رطوبت‌های متفاوت آماده شده است. دانه‌بندی نمونه‌ها مطابق استاندارد AASHTO-T27 انجام و در جدول ۲، مشخصات ترکیب خاک‌ها و نام‌گذاری آن‌ها آمده است همچنین نمودار دانه‌بندی در شکل ۲ آورده شده است.

در شکل ۲-الف، نمودار دانه‌بندی مربوط به پنج نوع خاک A، B، C، D و E که حاصل اختلاط رس با ماسه ۰/۲۵ mm است مشاهده می‌شود. مطابق شکل، خط مستقیم در نمودار مربوط به ماسه یکنواخت بوده که پس از افزودن رس، مقداری به سمت چپ نمودار انحنایافته است و نقطه شروع این انحنایافته بیانگر درصد رس افزوده شده است. در شکل ۲-ب نیز نمودار دانه‌بندی پنج نوع خاک F، G، H، I و J که حاصل اختلاط با ماسه ۰/۱۵ mm می‌باشد، نشان داده شده است. در این نمودار نیز، به طور کلی قسمتی

ویژگی‌های منحنی تنش- کرنش، تغییر مقاومت با دما و فشارهای محدود کننده می‌باشد. آزمایشات بر روی نمونه منجمد مخلوط درشت‌دانه با ابعاد ۱۰ mm الی ۲۰ mm و ماسه کوچک‌تر از ۲ mm، نشان می‌دهد که نمودار تنش و کرنش با حالت نرم شونده‌گی کرنش همراه بوده و مقاومتی تا حدود ۱۰ MPa، بسته به دمای انجماد و میزان ذرات درشت‌دانه خواهد داشت [۲۰ و ۱۹]. این در حالی است که آزمایش بر روی خاک عبوری از الک ۲ mm با درصد‌های مختلف رطوبت و نسبت آب به سیمان متغیر حالت سخت شونده‌گی کرنش را نشان می‌دهد و مقاومت خاک زمانی که سیمانی استفاده نشود تا حدود ۰/۷ MPa افزایش می‌یابد [۲۱].

مطالعات بیانگر آن است که با کاهش دمای انجماد در نرخ کرنش ثابت، مقاومت خاک افزایش می‌یابد چرا که با افزایش لندهای یخ در خاک، پیوند بین دانه‌های خاک توسط یخ بیشتر شده و خاک مستحکم‌تر می‌شود. نرخ کرنش نیز از عوامل موثر بر مقاومت خاک منجمد می‌باشد طوری که با کاهش نرخ کرنش یخ‌های موجود در خاک فرصت ذوب شدن یافته و مقاومت خاک منجمد کاهش می‌یابد و با افزایش نرخ کرنش نیز عکس این مسئله اتفاق می‌افتد [۲۲].

در این مقاله، از ماسه یکنواخت در حاشیه دریاچه شورابیل شهر اردبیل که در روزهای یخبندان به حالت منجمد است با ترکیب رس در درصد‌های مختلف استفاده شده، تا در حالت نزدیک به واقعیت، تغییرات تنش و کرنش خاک منجمد، تحت آزمایش تک محوره مورد بررسی قرار گیرد. برای بررسی

جدول ۱. خصوصیات خاک مصرفی

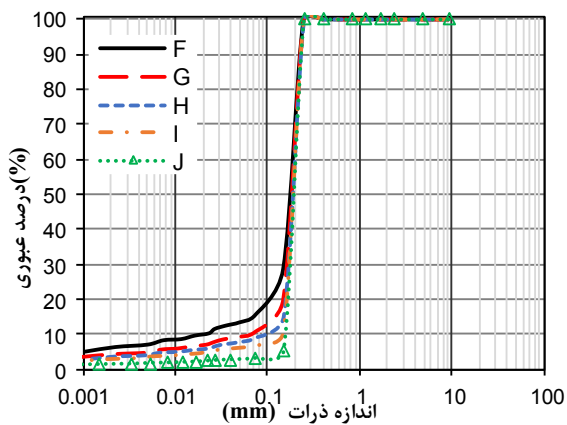
Table 1. Soil properties consumed in the study

نوع خاک	LL	PL	PI	Gs	γ_d
ماسه	-	-	-	۲/۶۵	۲/۱۴
رس	۳۳	۳۰	۲۰	۲/۵	۱/۸

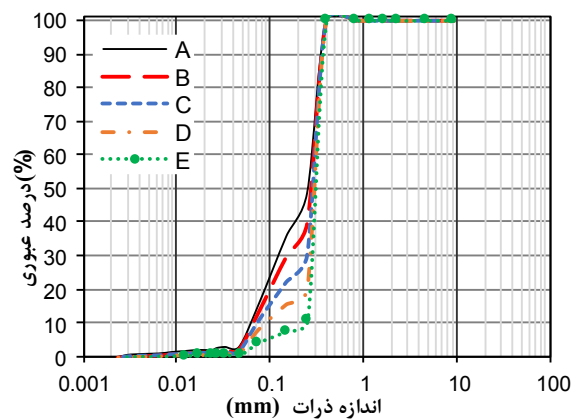
جدول ۲. مشخصات نوع خاک مصرفی

Table 2. Characteristics of the type of soil consumed in the study

نام خاک	نوع خاک	C_U	C_C
A	مخلوط ۵۰ درصد رس و ۵۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۲۵ mm	۴/۵۲	۰/۸۲
B	مخلوط ۴۰ درصد رس و ۶۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۲۵ mm	۴/۴۸	۱/۱۹
C	مخلوط ۳۰ درصد رس و ۷۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۲۵ mm	۴/۱۴	۲/۷۷
D	مخلوط ۲۰ درصد رس و ۸۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۲۵ mm	۳/۴۳	۲/۴۱
E	مخلوط ۱۰ درصد رس و ۹۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۲۵ mm	۱/۳۸	۱/۰۱
F	مخلوط ۵۰ درصد رس و ۵۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۱۵ mm	۱۰/۱۴	۶/۶۰
G	مخلوط ۴۰ درصد رس و ۶۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۱۵ mm	۳/۳۶	۲/۲۹
H	مخلوط ۳۰ درصد رس و ۷۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۱۵ mm	۲/۳۹	۱/۶۷
I	مخلوط ۲۰ درصد رس و ۸۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۱۵ mm	۱/۴۷	۱/۰۴
J	مخلوط ۱۰ درصد رس و ۹۰ درصد ماسه با اندازه ۰/۱۵ mm	۱/۳۱	۰/۹۵



(ب)



(الف)

شکل ۲. نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده

Fig. 2. Soil grading diagram used in the study



شکل ۳. تصویر چهار نوع مصالح مخلوط شده شامل الف) ۵۰٪ ماسه + ۱۵ mm و ۵۰٪ رس، ب) ۸۰٪ ماسه + ۱۵ mm و ۲۰٪ رس، پ) ۵۰٪ ماسه + ۲۵ mm و ۵۰٪ رس و ت) ۸۰٪ ماسه + ۲۵ mm و ۲۰٪ رس

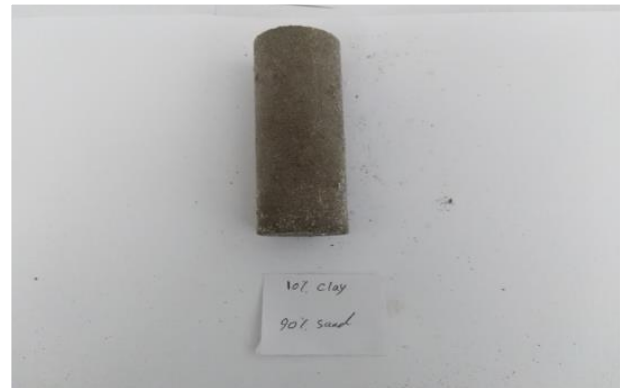
Fig. 3. Picture of four types of mixed materials, a) 50% clay and 50% sand with size 0.15 mm, b) 20% clay and 80% sand with size 0.15 mm, c) 50% clay and 50% sand with size 0.25 mm and d) 20% clay and 80% sand with size 0.25 mm

شدن با ۸٪، ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۵٪ رطوبت به شکل استوانه‌هایی با نسبت طول به قطر حدوداً ۳ (این نسبت در استاندارد آزمایش تک‌محوره بین ۲ الی ۳ قرار دارد) که در شکل ۴ مشخص است، تهیه شده و پس از آن در دمای 22°C به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده‌اند. دمای انجماد خاک، در مطالعات و تحقیقات صورت گرفته حدود 20°C می‌باشد که بنا به میزان رس می‌تواند کمی متغیر باشد. البته خارج کردن خاک از قالب پس از ۱۲ ساعت صورت گرفت. سطح نمونه‌ها تا حد ممکن صاف شده و مدت زمان خارج کردن نمونه از فریزر و انجام آزمایش کم‌تر از ۲ دقیقه بوده است. این موضوع حائز اهمیت است که به دلیل یکنواخت بودن ماسه و قابلیت نفوذپذیری و ضریب انتقال حرارت زیاد آن نسبت به رس، چنانچه طول مدت خارج کردن نمونه از فریزر و آزمایش آن زیاد باشد نمونه گسیخته و از حالت متراکم خارج می‌شود. ابعاد نمونه‌ها با قطر متغیر ۳۳ mm تا ۳۵ mm و با طول ۹۲ mm تا ۹۶ mm است. پیش از انجماد، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای 110°C در اون نگهداری شدند تا مقدار رطوبت‌های مختلف به طور دقیق محاسبه شوند. برای بررسی اثر انجماد از آزمایش فشاری محدود نشده استفاده شد. این آزمایش برای تعیین مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌های چسبیده استفاده می‌شود که در طول مدت آزمایش

از منحنی تقریباً مستقیم بوده که مربوط به ماسه است و قسمت دیگر به میزان رس مربوط است. البته در این میان لازم به توضیح است که خاک ماسه‌ای یکنواخت در نواحی ساحلی و کنار دریاچه‌ها قابل مشاهده است که در دماهای زیر صفر درجه در معرض یخ زدگی قرار می‌گیرد، و از روش انجماد مصنوعی در مناطق نزدیک به آب‌های سطحی، برای ایجاد نوعی آب‌بند موقت استفاده می‌گردد. پس از مخلوط شدن خاک با درصدهای مختلف رطوبت، نمونه‌ها در سه لایه داخل قالب متراکم شده‌اند. نمونه‌های استوانه‌ای داخل فریزر قرار گرفته و در سنین مختلف آزمایش شده‌اند. در شکل ۳ تصویر ۴ نوع از ۱۰ مصالح مخلوط خاک نشان داده شده است که مربوط به ترکیب ۵۰٪ رس با ۵۰٪ ماسه اندازه ۱۵ mm، ۲۰٪ رس با ۸۰٪ ماسه اندازه ۱۵ mm، ۵۰٪ رس با ۵۰٪ ماسه اندازه ۲۵ mm و ۲۰٪ رس با ۸۰٪ ماسه اندازه ۲۵ mm می‌باشد.

۱-۲- مدل آزمایشگاهی

به دلیل وجود ماسه یکنواخت، در رطوبت کمتر از ۸٪، نمونه تراکم کافی را نداشته و گسیخته می‌شود. در رطوبت‌های بالای ۱۵٪ نیز در اثر تراکم، آب از انتهای نمونه خارج می‌گردد. بنابراین نمونه‌ها پس از مخلوط



شکل ۴. تصویر دو نمونه آماده برای آزمایش

Fig. 4. Picture of two samples ready for testing

$$s_t = \frac{q'_u}{q_u} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، q'_u مقاومت فشاری نمونه دست خورده و q_u مقاومت فشاری نمونه دست نخورده شده است.

۳- آماده سازی نمونه ها

پس از قرار دادن نمونه ها در دستگاه، اعمال نیرو با نرخ کرنش ۱ mm/min انجام گرفت سپس نمودارهای تنش محوری نسبت به نشست ترسیم گردید. نتایج بیانگر آن است که نمونه با ترکیب ۳۰٪ رس در اغلب موارد تنش بیش تری را تحمل کرده و نمونه با ترکیب ۱۰٪ رس حداقل تنش را داراست و پس از آن نمونه با ۲۰٪ رس قرار دارد. اما در رطوبت ۱۵٪ این موازنه برهم خورده و نمونه ۱۰٪ رس، بیش ترین تنش را دارد. باید به این نکته توجه داشت که نمونه با رس کم تر، با سرعت بیش تری منجمد شده و در مدت ۲۴ ساعت لنزهای یخ بیش تری در این نمونه ها تشکیل می شود. اما در زمان تست نیز نمونه ها با رس بیش تر، انتقال حرارت کم تری داشته و لنزهای یخ با سرعت کم تری ذوب می شوند. اکثر نمونه های با ۱۰٪ و ۲۰٪ رس در مدت زمان ۷ دقیقه پس از خارج کردن از فریزر کاملاً خرد شده و دیگر امکان تست بر روی آن ها ممکن نبوده است. بیانگر آن است که ضریب انتقال حرارت بالای ماسه باعث سریع تر ذوب شدن تکه های یخ شده و پیش از انجام تست، دانه ها از هم جدا می شوند. در

رطوبت خاک از آن خارج نمی شود ولی با در نظر گرفتن نکات فنی می توان برای سایر خاک ها که پایداری و قوام خود را حفظ کنند استفاده نمود. در آزمایش تک محوره می توان مقاومت فشاری محصور نشده (q_u)، مقاومت برشی (S_u) و حساسیت خاک (S_t) را محاسبه کرد. مقاومت فشاری محدود نشده، تنش فشاری است که در آن یک نمونه استوانه ای خاک در آزمایش دچار گسیختگی می شود. روابط زیر در این آزمایش حاکم است.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

در رابطه بالا τ_f تنش برشی خاک، c چسبندگی خاک، σ تنش قائم وارد بر خاک و ϕ زاویه اصطکاک خاک می باشد.

$$c = \frac{q_u}{2} \quad (2)$$

با توجه به این که این آزمایش اغلب برای رس های اشباع به کار می رود بنابراین ϕ برابر صفر می شود و مقاومت برشی خاک از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد.

برای محاسبه میزان حساسیت خاک نیز باید دو نمونه دست خورده و دست نخورده مورد آزمایش قرار گیرد و از نسبت مقاومت فشاری محصور نشده آن ها میزان حساسیت به دست می آید.



شکل ۵. نمونه در حال آزمایش

Fig. 5. Sample during tested



شکل ۶. نمونه هنگام گسیختگی

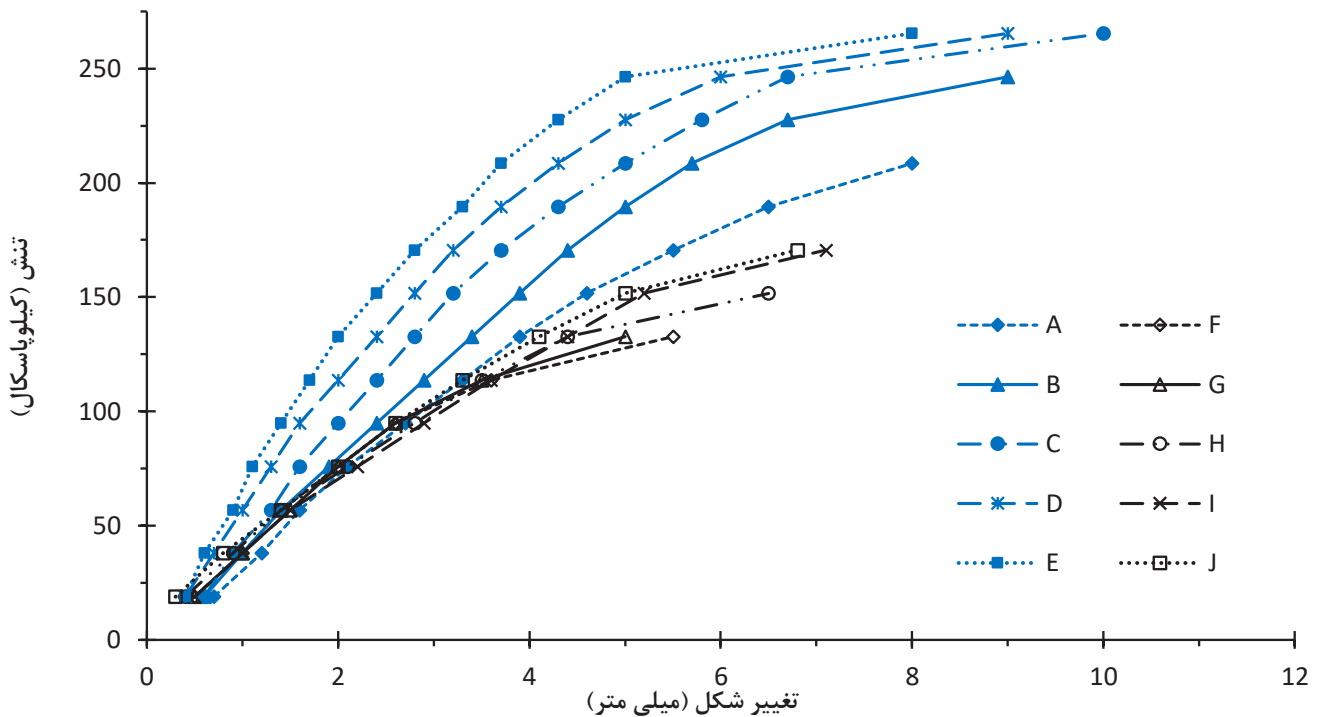
Fig. 6. Sample during failure

۴- آنالیز نتایج آزمایش

۴-۱- تأثیر اندازه ماسه

با ثابت نگه داشتن درصد رطوبت موجود در نمونه‌ها و مدت زمان انجماد، تغییرات مقاومت تک محوری نمونه‌ها با مقادیر مختلف ماسه مورد سنجش قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۷ آورده شده است. به طور کلی هر چه اندازه و میزان مصالح ماسه‌ای مورد استفاده بیشتر شود، منحنی‌ها روند صعودی بیشتری داشته و به عبارتی افزایش مقدار درشت‌دانه باعث افزایش

رطوبت‌های متفاوت واضح است که هر چه میزان آب در خاک بیش‌تر باشد لنگه‌های یخ بیش‌تری تشکیل شده و تنش بیش‌تری تحمل می‌کند. از طرفی این نمونه‌ها به علت یکنواخت بودن، نفوذپذیری زیادی دارند و هر مقدار میزان ماسه بیش‌تر باشد نفوذپذیری نمونه نیز افزایش یافته و ممکن است در رطوبت‌های بالاتر در هنگام تراکم در قالب آزمایش، مقداری از رطوبت این نمونه‌ها از قالب خارج گردد. شکل‌های ۵ و ۶ نمونه‌ی استوانه‌ای منجمد در حین بارگذاری و پس از گسیختگی را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار تنش کرنش برای مقایسه و تأثیر اندازه ماسه، برای مدت زمان انجماد ۲۴ ساعت در رطوبت ۱۵٪

Fig. 7. Strain stress diagram for comparison and effect of sand size, for 24 hours freezing time at 15% moisture

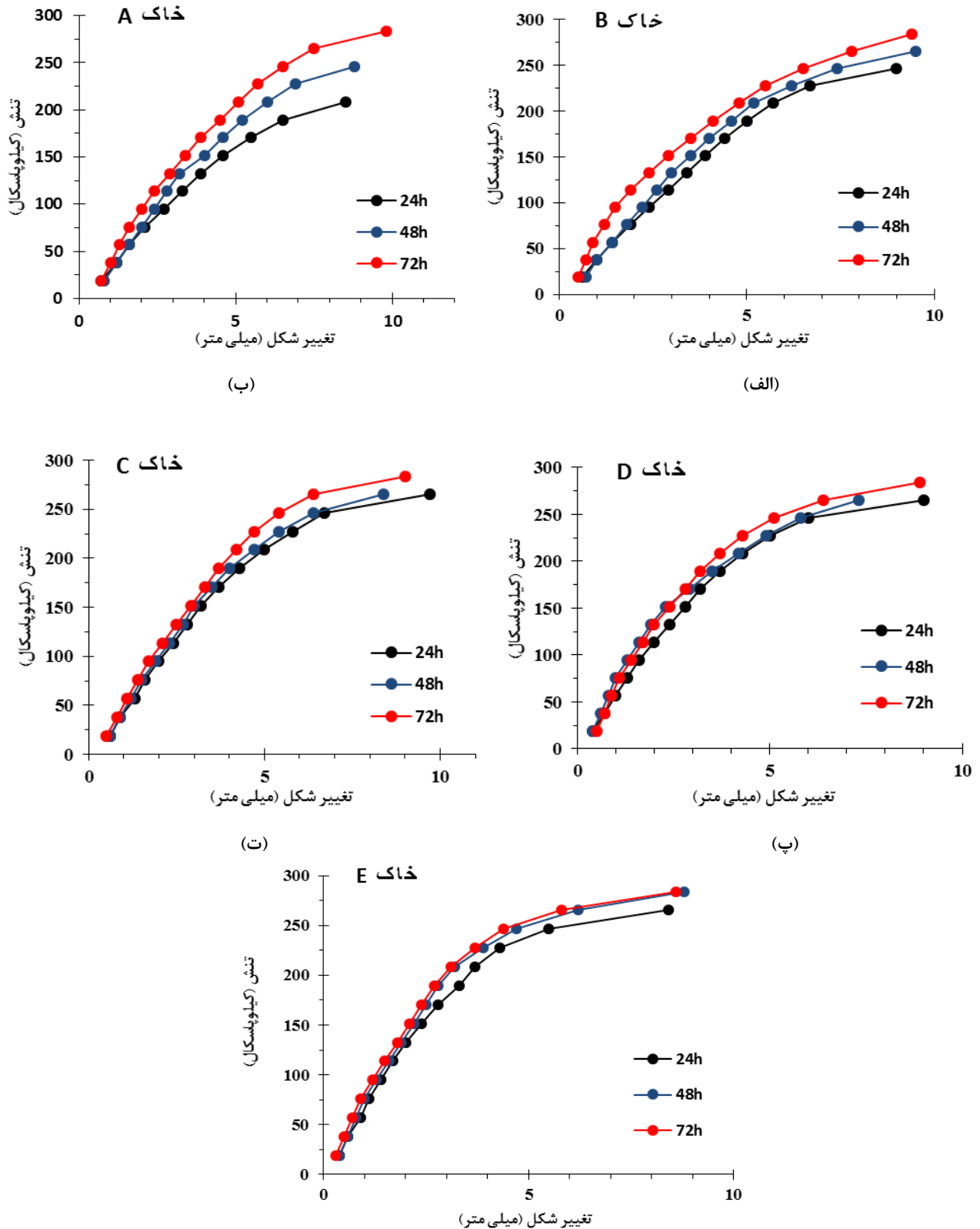
کاهش می‌یابد. در خاک A که بیشترین میزان رس را داراست، رشد مقاومت با افزایش سن انجماد از ۲۴ به ۷۲ ساعت (در رطوبت ۱۵٪) در حدود ۳۶٪ است و این رقم برای خاک نوع E برابر ۷٪ است. با توجه به پایین بودن ضریب انتقال حرارت خاک رس نسبت به ماسه این مسئله قابل توجه است و خاک رس برای انجماد و از دست دادن دما به مدت زمان بیشتری نسبت به خاک ماسه نیاز دارد. بنابراین در خاک رسی برای افزایش تعداد لnzهای یخ به مدت زمان بیشتری نسبت به خاک ماسه‌ای احتیاج است.

با مقایسه‌ی درصد رطوبت و مقاومت هر یک از نمونه‌ها در سنین ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته، به طور کلی مشخص می‌شود که هر چه میزان ماسه‌ی مورد استفاده افزایش می‌یابد افزایش رطوبت، تأثیر بیشتری دارد ولی در مقابل تأثیرپذیری از افزایش سن انجماد کاهش می‌یابد به طوری که در حالت E می‌توان گفت مقاومت نمونه در طی روزهای مختلف ثابت باقی مانده و در حالت A مقاومت نمونه به تدریج افزایش یافته است.

انرژی کرنش و افزایش مقاومت تک محوره نمونه می‌شود. با کوچک‌تر شدن اندازه ماسه، مقاومت نمونه‌ها حدود ۳۶٪ کاهش یافته است که در نمونه‌های مختلف تا ۲٪ متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه آب بین ذرات در انجماد بیشترین تأثیر را دارد، با کوچک شدن اندازه ذرات، فاصله بین آن‌ها کمتر شده و میزان آب موجود نیز کاهش می‌یابد به همین دلیل لnzهای یخ کمتری تشکیل شده و در پی آن مقاومت خاک افت می‌کند.

۴-۲- تأثیر سن انجماد

با توجه به شکل ۸ و نتایج آزمایش مشاهده می‌کنیم که مقاومت نمونه‌ی خاک منجمد با افزایش مدت زمان انجماد، افزایش پیدا می‌کند. زمانی که خاک، مدت بیش‌تری در فریزر قرار داشته باشد شعاع انجماد به وجود آمده بیشتر شده و در نتیجه مقاومت تک محوره افزایش می‌یابد. اما تأثیر سن انجماد در نمونه‌هایی که دارای درصد رس بالایی هستند بیشتر نمایان است چرا که هر چه میزان ماسه‌ی مصرفی کمتر باشد، سرعت تشکیل لnzهای یخ



شکل ۸. تأثیر مدت زمان انجماد نمونه برای خاک نوع الف) A، ب) B، پ) C، ت) D و ث) E در رطوبت ۱۵٪

Fig.8. Effect of sample freezing time for soil types a) A, b) B, c) C, d) D and e) E at 15% moisture

۳-۴- تأثیر درصد رطوبت

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، افزایش مقاومت در نمونه‌ها با توجه به مدت انجماد، متفاوت می‌باشد به هر میزانی که رطوبت نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند سن انجماد تأثیر بیشتری دارد زیرا میزان رطوبتی که منجمد می‌شود بیش‌تر می‌شود. از طرفی هر چه مخلوط خاک دارای سطح ویژه بزرگ‌تری باشد مقاومت بیشتری خواهد داشت و با افزایش رطوبت این سطح ویژه افزایش می‌یابد، در این حالت تعامل بین ذرات خاک و یخ در بهترین وضعیت ممکن بوده و در نتیجه مقاومت نمونه‌ی منجمد رشد بیشتری می‌یابد. برای در شکل ۱۰، نمودار با استفاده از داده‌های آماری و بدون کمیت رسم شده است تا دید جامع‌تری را القاء نماید. این نمودار صرفاً برای نمونه A ترسیم شده است تا تغییرات و تفاوت آن با نمودار اصلی نشان داده شود.

افزایش رطوبت در نمونه‌های شامل ماسه بیشتر در کمترین زمان موجب افزایش مقاومت می‌شود اما در نمونه با ماسه کمتر این روند به کندی پیش می‌رود زیرا مقدار آب منجمد به علت بالا بودن میزان رس، کمتر است. به نظر می‌رسد برای مدت زمان ۷۲ ساعت و رطوبت ۱۵٪، حداکثر میزان تنش، $283/8 \text{ kPa}$ باشد و افزایش مدت زمان، دیگر تأثیری بر روی تنش ندارد. به طور کلی افزایش رطوبت در خاک‌های رسی زمانی تأثیرگذار خواهد بود که مدت انجماد نیز افزایش یابد در حالی که در خاک‌های ماسه‌ای مدت انجماد کمتری نیاز است همچنین به علت عدم چسبندگی ماسه، برای منجمد شدن و ایجاد انسجام، باید رطوبت بیشتری نسبت به رس داشته باشد تا با افزایش لنزهای یخ از گسیختگی زودهنگام جلوگیری شود.

۱-۱- تأثیر میزان رس

با توجه به عدم چسبندگی ماسه که باعث گسیختگی سریع آن می‌شود، افزایش هر چه بیشتر رس دوام آن را افزایش می‌دهد. اما تأثیر رطوبت بر روی نمونه ماسه بیشتر از رس خواهد بود. بنابراین با افزایش میزان ماسه می‌توان در رطوبت‌های کمتر گسیختگی را به تأخیر انداخته و مقاومت را افزایش داد چرا که با وجود رس، قسمتی از چسبندگی توسط آن و بخش دیگر توسط پیوند یخ و ذرات خاک تأمین می‌شود. از طرفی وجود رس انجماد کامل را به تأخیر انداخته و نیازمند مدت زمان بیشتری برای انجماد است. بنابراین نسبت رس موجود در خاک باید به گونه‌ای تنظیم شود که هم در کمترین رطوبت و هم در کمترین مدت زمان، انجماد به صورت کامل به وقوع بپیوندد و مقاومت کافی را حاصل نماید. در مطالعه حاضر به نظر می‌رسد نمونه C که شامل ۳۰٪ رس و ۷۰٪ ماسه است در بهینه‌ترین حالت

قرار گرفته است و در مدت زمان ۲۴ و ۴۸ ساعت در رطوبت‌های ۸٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ بیشترین مقاومت را داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از آزمایش فشاری محدود نشده، تحت ۴ درصد رطوبت مختلف و ۳ مدت زمان انجماد، مقاومت فشاری تک محوره‌های رس منجمد با ۵ مقدار مختلف ماسه مورد بررسی قرار گرفت که به نتایج زیر می‌توان اشاره کرد:

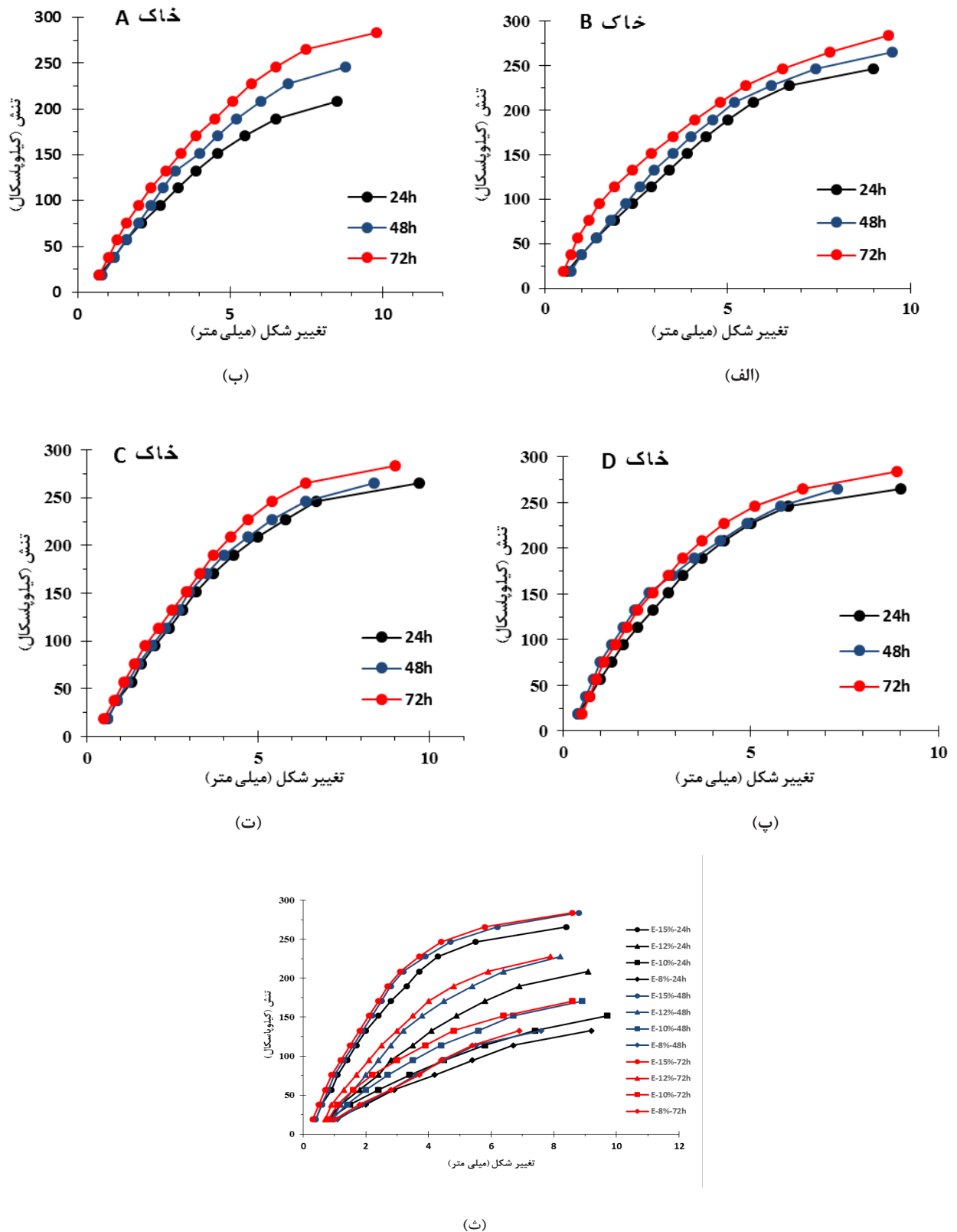
۱- منحنی تنش- کرنش در تمامی نمونه‌ها، حالت نرم شدگی در کرنش را نشان می‌دهد. در یک سن انجماد، افزایش میزان ماسه باعث کاهش انرژی کرنش می‌شود.

۲- مقاومت خاک منجمد آزمایش شده تحت تأثیر میزان رطوبت مصرفی، نشان دهنده‌ی افزایش مقاومت نمونه‌ها با افزایش میزان درصد رطوبت موجود می‌باشد. به گونه‌ای که افزایش رطوبت از کمترین مقدار آن یعنی ۸٪ به بیشترین مقدار ۱۵٪، رشد مقاومت برای خاک A در مدت ۲۴ ساعت در حدود ۵۷٪ و برای خاک E برابر ۱۰۰٪ است. اما در مدت ۷۲ ساعت این ارقام برای خاک A، ۶۷٪ و برای خاک E، ۱۱۳٪ می‌باشد. تفسیر آن را می‌توان به این صورت بیان کرد، افزایش رطوبت منجر به افزایش مقدار لنزهای یخ گردیده و چون یخ عامل چسبندگی ذرات خاک است، در نهایت افزایش مقاومت را در پی دارد.

۳- بر اساس میزان مقاومت بررسی شده در طول سنین مختلف انجماد هر چه نمونه‌ی خاک در معرض رطوبت بیش‌تر باشد، میزان پیوند تشکیل شده بین یخ و ذرات خاک بیش‌تر و در نهایت مقاومت موجود افزایش پیدا می‌کند.

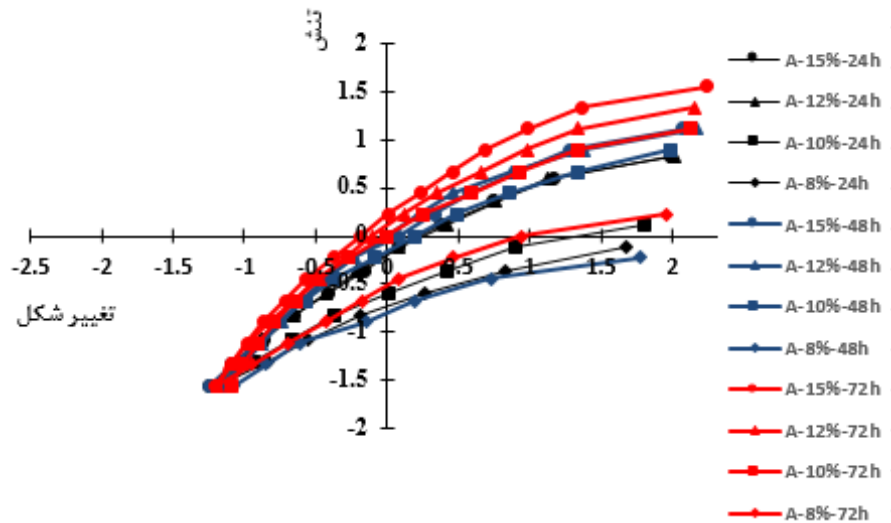
۴- ترکیب ۳۰٪ رس، ترکیب مناسبی در رطوبت‌های ۸٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ به نظر می‌رسد و در رطوبت ۱۵٪ نمونه با رس کم‌تر مقاومت بهتری نشان می‌دهد. خاک C، در رطوبت پایین‌تر عملکرد بهتری داشته است از طرفی برای انجماد مناسب و رسیدن به مقاومت کافی، به مدت زمان کمتری نسبت به خاک‌های E و D (مقدار رس، به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪) دارد.

۵- هر چه مقدار ماسه بیش‌تر باشد انجماد با سرعت بیش‌تری صورت می‌گیرد و با افزایش مدت انجماد، نمونه‌ها با رس بیشتر، عملکرد بهتر دارند. به طوری نمونه A که بیشترین میزان رس را دارد، از مقاوم $20/8 \text{ kPa}$ در مدت ۲۴ ساعت، به مقاومت $283/8 \text{ kPa}$ در مدت ۷۲ ساعت رسیده است (در بیشترین رطوبت) به بیان دیگر در حدود ۳۶٪ افزایش مقاومت را



شکل ۹. نمودار تنش کرنش برای درصدهای مختلف رطوبت در سه سن انجماد، الف) خاک A، ب) خاک B، ج) خاک C، د) خاک D و ه) خاک E

Fig. 9. Strain stress diagram for different amounts of moisture at three freezing ages: a) soil A, b) soil B, c) soil C, d) soil D and e) soil E



شکل ۱۰. نمودار نرمالیز شده برای نمونه A

Fig. 10. Normalized diagram for sample A.

- states, Cold Regions Science and Technology, 176 (2020) 103089.
- [2] N. Girgis, B. Li, S. Akhtar, B. Courcelles, Experimental study of rate-dependent uniaxial compressive behaviors of two artificial frozen sandy clay soils, Cold Regions Science and Technology, 180 (2020) 103166.
- [3] W. Fei, Z.J. Yang, Modeling unconfined compression behavior of frozen Fairbanks silt considering effects of temperature, strain rate and dry density, Cold Regions Science and Technology, 158 (2019) 252-263.
- [4] F. Hou, Y. Lai, E. Liu, H. Luo, X. Liu, A creep constitutive model for frozen soils with different contents of coarse grains, Cold Regions Science and Technology, 145 (2018) 119-126.
- [5] Z. Zhou, W. Ma, S. Zhang, Y. Mu, G. Li, Experimental investigation of the path-dependent strength and deformation behaviours of frozen loess, Engineering Geology, 265 (2020) 105449.
- [6] Z.-y. Zhu, X.-z. Ling, S.-j. Chen, F. Zhang, L.-n. Wang, Z.-y. Wang, Z.-y. Zou, Experimental investigation on the train-induced subsidence prediction model of Beiluhe

داشته است.

۶- به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت ماسه، تنش حرارتی زیادی در نمونه‌های با ماسه بیشتر به وجود می‌آید که همین موضوع موجب گسیخته شدن سریع آن می‌شود.

۷- با کوچک‌تر شدن اندازه ماسه مصرفی، مقاومت کاهش می‌یابد اما همچنان روال آزمایش حفظ می‌شود و نمونه با ۳۰٪ رس در اغلب موارد بیش‌ترین مقاومت را دارد.

به طور کلی در نواحی شامل ماسه یکدست برای انجماد کامل، نیاز به رطوبت بیشتری نسبت به مصالح رسی است اما برای انجماد، مدت زمان کمتری نیاز است و پیشنهاد می‌شود، در مواقع مورد نیاز با روش انجماد مصنوعی در کمترین زمان ممکن، پرده آب‌بند موقت در چنین نواحی ایجاد نمود. البته لازم به یادآوری است در نواحی خاکی شامل رس، برای انجماد کامل نیاز به دمای پایین‌تری می‌باشد اما می‌توان با افزایش مدت زمان انجماد، چسبندگی لازم را ایجاد نموده و مقاومت مورد نیاز را به دست آورد.

منابع

- [1] D. Chen, W. Ma, G. Li, Z. Zhou, Y. Mu, A long-term strength criterion for frozen clay under complex stress

- Laboratory testing to research the micro-structure and dynamic characteristics of frozen-thawed marine soft soil, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(4) (2019) 85.
- [16] R.A. Bragg, O. Andersland, Strain rate, temperature, and sample size effects on compression and tensile properties of frozen sand, *Engineering Geology*, 18(1-4) (1981) 35-46.
- [17] F. Sayles, N. Epanchin, Rate of strain compression tests on frozen Ottawa sand and ice, US Army CREEL, Tech. Note, Hanover, (1966).
- [18] H. Li, Y. Zhu, J. Zhang, C. Lin, Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay, *Cold regions science and technology*, 39(1) (2004) 39-45.
- [19] X. Liu, E. Liu, D. Zhang, G. Zhang, X. Yin, B. Song, Study on effect of coarse-grained content on the mechanical properties of frozen mixed soils, *Cold Regions Science and Technology*, 158 (2019) 237-251.
- [20] J. Zhao, P. Zhang, X. Yang, J. Qi, On the uniaxial compression strength of frozen gravelly soils, *Cold Regions Science and Technology*, 171 (2020) 102965.
- [21] M. Chai, H. Zhang, J. Zhang, Z. Zhang, Effect of cement additives on unconfined compressive strength of warm and ice-rich frozen soil, *Construction and Building Materials*, 149 (2017) 861-868.
- [22] A. Shastri, M. Sanchez, Mechanical modeling of frozen soils incorporating the effect of cryogenic suction and temperature, in: *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 2012, pp. 2492-2501.
- permafrost subgrade along the Qinghai-Tibet railway in China, *Cold regions science and technology*, 62(1) (2010) 67-75.
- [7] M. Esmaeili-Falak, H. Katebi, A. Javadi, Experimental study of the mechanical behavior of frozen soils-A case study of tabriz subway, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1) (2018) 117-125. (in Persian)
- [8] Y. Lai, X. Xu, Y. Dong, S. Li, Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China, *Cold Regions Science and Technology*, 87 (2013) 6-18.
- [9] D. Chen, W. Ma, G. Li, Z. Zhou, Y. Mu, S. Chen, Definition of failure criterion for frozen soil under directional shear-stress path, *Sciences in Cold and Arid Regions*, 11(6) (2020) 428-434.
- [10] L. WuQingbai, A review of recent frozen soil engineering in permafrost regions a long Qinghai-Tibet Highway, *China*, 13(3) (2002) 199-205.
- [11] S. Quanbin, Y. Ping, W. Guoliang, Experimental research on adfreezing strengths at the interface between frozen fine sand and structures, *Scientia Iranica*, 25(2) (2018) 663-674.
- [12] Z. Chen, X. Guo, L. Shao, S. Li, L. Gao, Sensitivity analysis of thermal factors affecting the nonlinear freezing process of soil, *Soils and Foundations*, 61(3) (2021) 886-900.
- [13] D.B. QI JL, A state of the art for strength of frozen soils, *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 32(3) (2016) 89-95.
- [14] N.A. Tsyтович, *Mechanics of frozen ground*, Scripta Book Co., 1975.
- [15] Z. Ding, B. Kong, X. Wei, M. Zhang, B. Xu, F. Zhao,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Negahdar, A. R. Ahmadi, M. M. Seyedrahimi-Niaraq, *Investigation of Frozen Soil Behavior under Unconfined Compression Test*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(8) (2022) 3083-3096.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20113.7374](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20113.7374)



