



Investigation of Frozen Soil Behavior under Unconfined Compression Test

A. R. Negahdar*, A. R. Ahmadi, M. M. Seyedrahimi-Niaraq

Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT: Frozen sand soils are often observed in underground urban and engineering constructions in cold climates. Artificial ground freezing is a soil improvement technique, and soils in coastal areas are mostly comprised of poorly-graded sand with low moisture and temperature. Thus, it is required to explore the effects of different factors on the strength of frozen soils in such areas. In addition, the freezing age required to obtain sufficient strength is studied. The present study investigates sand from the Shorabil Lake shore in Ardabil, Iran, frozen in cold seasons. To evaluate the effects of the soil grain size, sands with grain sizes of 0.15 and 0.25 mm mixed with clay in different ratios were employed. Uniaxial compressive testing was implemented to measure the unconfined compressive strength of ten soil mixtures with four moisture contents. Thus, a total of 40 mixtures were studied at three freezing ages. The stress-strain curves showed strain softening. The specimens had almost the same strength at shorter freezing ages. As the freezing age increased, different stresses were observed due to the clay content; the strength of a specimen with a low clay content remained almost unchanged as the freezing age increased. The specimen with a clay content of 50% and a moisture content of 15% had a strength of 205.5 kPa at a freezing age of 24 h and 283.8 kPa at a freezing age of 72 h. Also, the specimen with a clay content of 10% and a moisture of 15% was found to have strengths of 265.4 and 283.8 kPa at the freezing ages of 24 and 72 h, respectively. Several specimens underwent an up to 36% decline in strength as the sand grain size decreased; however, the trend was still the case, and the specimen with 30% clay showed the highest strength in most cases.

Review History:

Received: Jul. 04, 2021
Revised: Jan. 09, 2022
Accepted: Jan. 10, 2022
Available Online: Feb. 06, 2022

Keywords:

Frozen soil
Compression strength
Clay soil
Moisture
Sandy soil

1- Introduction

In cold regions and in severe cold, the water among the soil particles is frozen. From a material science perspective, frozen soil consists of four parts: solid soil particles, ice, liquid water and gas. Frozen clay can contain liquid water up to -110°C . On the other hand, when ice fills most of the pores, the mechanical behavior of frozen soil will reflect the behavior of ice. The behavior of frozen soil with increased hydrostatic pressure is influenced by a combination of mechanical and thermodynamic effects, the first of which implies the division of stress and the latter on melting and pressure phenomenon [1, 2].

Freezing water increases ice pressure and reduces the cavity pressure. Due to the reduction of water pressure digging on the frozen front, the water moves from the underlying layers to the frozen borders. Even if the soil has no access to shallow water, the pressure of large harmful cavities and movement of water causes vertical contractile cracks to form in the soil beneath the frozen front. As the frozen front moves forward, these cracks are filled with ice. When the ice melts,

the cracks become a conduit for the flow of water and the permeability of the soil increases [3-5].

2- Methodology

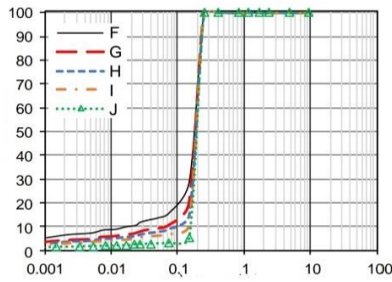
The used materials are sand and clay with different combinations. Soil specifications are listed in "Table (1)". Sand is mixed with uniform aggregation with 11%, 21%, 31%, 41% and 21% clay and the obtained samples are mixed with moisture content and prepared differently. The aggregation of the samples is carried out according to T27-AASHTO standard. The composition of the soils and grading diagram are in Figure 1.

Table 1. Soil properties consumed in the study.

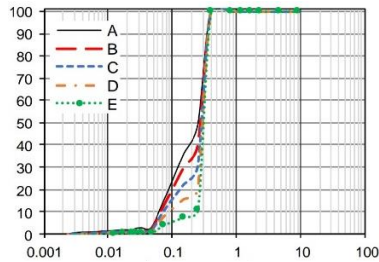
Soil type	LL	PL	PI	G _s	γ _d
sand	-	-	-	2.65	2.14
clay	33	30	20	2.5	1.8

*Corresponding author's email: Negahdar@uma.ac.ir





(A)



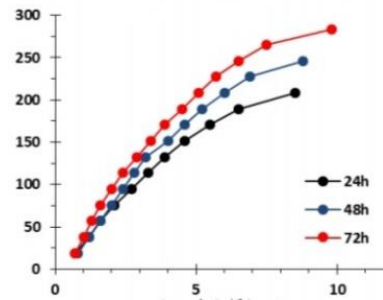
(B)

Fig. 1. Grain size distribution curves in two combinations A, B.

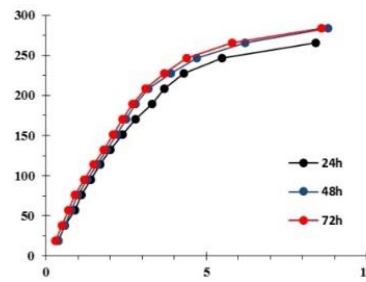
In the “Form (1-A)”, the aggregation diagram of five types of soils A, B, C, D and E resulting from the mixing of clay with 1.22 mm sand is observed. According to the figure, the straight line in the diagram related to the sand is uniform, which after adding clay, some to the left of the diagram has been curvy and the starting point of this curvature indicates the percentage of clay added. In the “Form of (1-B)” the aggregation diagram of five types of soils F, G, H, I and J, which is the result of mixing with 1.12 mm sand, is also shown in this diagram. In general, a part of the curve is almost direct which is related to sand and the other part is related to clay. In the meantime, it is explained that the sandy soil is uniform in coastal areas. Beside the Shorabil lake, it is observed and it is exposed to frost at temperatures below zero degrees, and we also know the artificial freezing method is used in areas close to surface waters to create a type of temporary soil treatment.

2- 1- Laboratory Model

Due to uniform sand, in moisture less than 8%, the sample does not have sufficient density and is disintegrated. In humidity above 15% due to condensation, water is drained from the end of the sample. Therefore, after mixing with 8%, 10%, 12% and 18% moisture in the form of cylinders with a length to diameter ratio of about 3 (this ratio in the uniaxial test standard between 2 and 3 (which is specified in Figure 4, prepared and then stored at -22°C for 24 hours. Soil freezing temperature is about -2.0°C in studies and researches. It can vary slightly according to the amount of clay. However, the soil was removed from the mold after 12 hours.



Soil A



Soil

Fig. 2. Effect of freezing time for soil type A and E at 15% moisture content.

3- Preparation of samples

After placing the samples in the device, the force was applied with a strain rate of 1 min/mm, then the axial stress diagrams were compared to the meeting was drawn. The results indicate that the sample with a combination of 30% clay, in most cases tolerates more stress, the sample with a combination of 10% clay has the minimum stress and then the sample is located with 20% clay. However, in 15% humidity, this rate is disturbed and the sample of 10% clay has the highest stress. It should be noted that the frozen sample is more quickly with less clay and more ice lenses are formed within 24 hours. Nevertheless, at the time of testing, the samples with more clay, less heat transfer and ice lenses melt a slower. Most samples with 10% and 20% clay were crushed within 2 minutes (after removing from the freezer), it is not possible to test on them.

4- Results and Discussion

4- 1- Effect of sand size

By keeping the moisture content and freezing time in soil samples, changes of uniaxial resistance with different percentages of sand were measured and the results are shown in Figure 2. In general, in the bigger size and amount of sand materials, the more upward curves are. In other words, increasing the amount of coarseness increases strain energy and the uniaxial resistance of the sample. As the sand size is smaller, the resistance of the samples has decreased by about 36%. This value, varies by 2% in different samples.

4- 2- Effect of freezing age

According to the experiment results, the resistance of frozen soil samples increases with increasing freezing age. However, the effect of freezing age on samples with high clay percentage is because the lower the amount of sand consumed, the lower the speed of ice lens formation. In soil A, with the highest clay content, the growth of resistance with increasing freezing ages 24, 42 and 22 hours, it is generally known that the amount of sand used increases. However, in the case of the effect of aging, the freezing age decreases so that in E mode, it can be said that the resistance of the sample has remained constant during different days and in A state, the resistance of the sample has gradually increased.

4- 3- Effect of moisture percentage

The increase of the resistance in samples varies according to the freezing period. The more the moisture of the samples increases, the more influential the freezing age is because of the amount of moisture that freezes increases. On the other hand, the larger the soil mixture has a higher specific surface area, the more resistance will be made, and with increasing moisture of this specific surface, in this case, the interaction between soil and ice particles is in the best possible condition, and as a result, the resistance of frozen samples grows more. Increasing moisture in samples containing more sand in the shortest time increases resistance, but in samples with less sand, this process is slow because the amount of frozen water with high clay is lower.

5- Conclusion

The main results of this study are as follows:

1- Stress-axial strain curve in all samples shows strain softening state. In an age of freezing, as the amount of sand increases, the strain energy decreases.

2- As the humidity increases, the number of ice lenses also increases, and because ice is the cause of soil particle adhesion, therefore soil resistance increases.

3- Based on the resistance during different ages of freezing, the higher the soil sample exposed to moisture, the higher the bonding rate. The formation between ice and soil particles increases, and eventually, the existing resistance increases

4- The higher the amount of sand, the faster the freezing takes place, and with the increase in the freezing duration, the more clay samples, the yield. They have better. So that the sample A has the highest clay content, from 212.2 kPa resistance for 24 hours to 2 kPa/223 resistance in the period of 22 hours has arrived (in the highest humidity); in other words, about 36% increase in resistance.

References

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

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 629-632.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20113.7374





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 ۱۱۰°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].

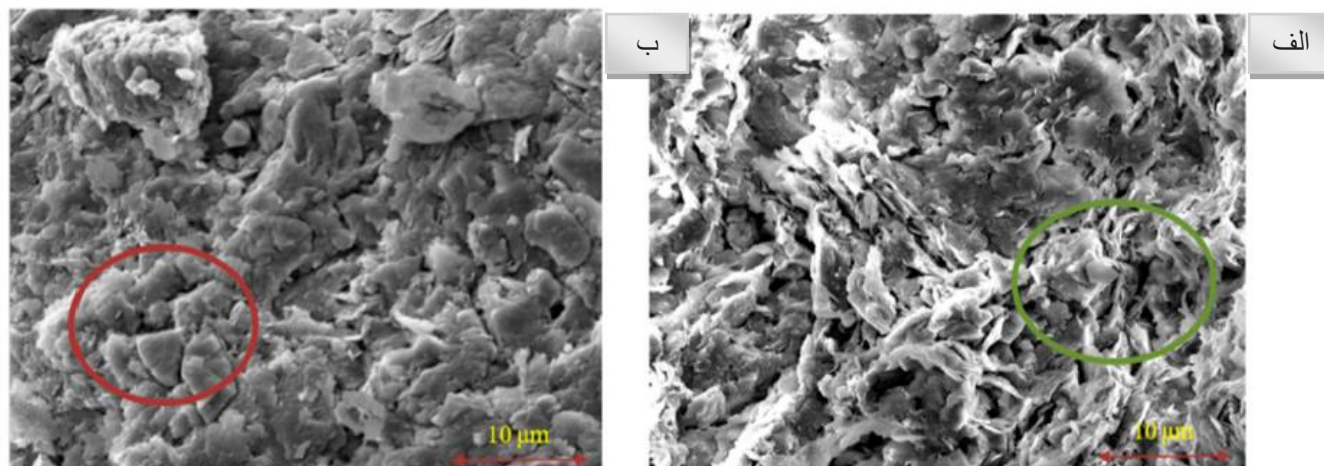
در اثر انجماد و با رشد کریستال‌های یخ، پیوند بین ذرات خاک از بین می‌رود. بنابراین حفره‌های خاک به هم چسبیده و منافذ بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند و ساختار جدید خاک شکل می‌گیرد. در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی از خاک منجمد نشان می‌دهد که پیش از انجماد، بخش‌های متراکم (دایره قرمز رنگ) نقش غالب در ساختار خاک را دارند 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 انحنای 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

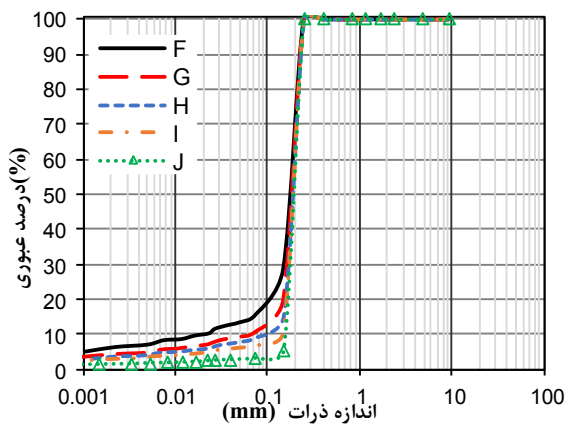
Table 1. Soil properties consumed in the study

نوع خاک	LL	PL	PI	G _s	γ _d
ماسه	-	-	-	۲/۶۵	۲/۱۴
رس	۳۳	۳۰	۲۰	۲/۵	۱/۸

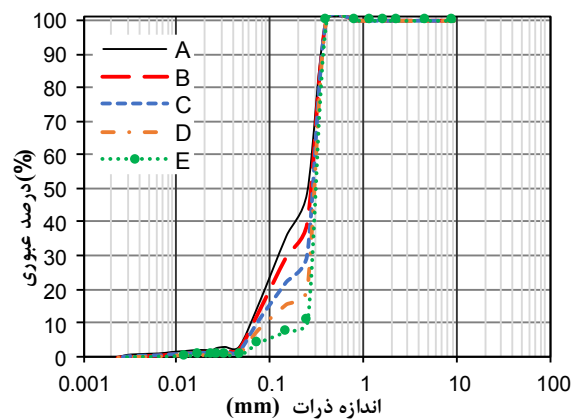
جدول ۲. مشخصات نوع خاک مصرفی

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- آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از قرار دادن نمونه‌ها 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 بیش‌تری 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، بیش‌ترین تنش را دارد. باید به این نکته توجه داشت که نمونه با رس کم‌تر، با سرعت بیش‌تری منجمد شده و در مدت ۲۴ ساعت لنزهای یخ بیش‌تری در این نمونه‌ها تشکیل می‌شود. اما در زمان تست نیز نمونه‌ها با رس بیش‌تر، انتقال حرارت کم‌تری داشته و لنزهای یخ با سرعت کم‌تری ذوب می‌شوند. اکثر نمونه‌های 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 آن‌ها ممکن نبوده است. بیانگر آن است که ضریب انتقال حرارت بالای ماسه باعث سریع‌تر ذوب شدن تکه‌های یخ شده و پیش از انجام تست، دانه‌ها از هم جدا می‌شوند. در

رطوبت خاک از آن خارج نمی‌شود ولی با در نظر گرفتن نکات فنی می‌توان برای سایر خاک‌ها که پایداری و قوام خود را حفظ کنند استفاده نمود. در آزمایش تک محوره می‌توان 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 استوانه‌ای خاک در آزمایش دچار گسیختگی می‌شود. 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 می‌باشد.

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

با توجه به این که این آزمایش اغلب برای رس‌های اشباع به کار می‌رود بنابراین ϕ برابر صفر می‌شود و مقاومت برشی خاک از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

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 آن‌ها میزان حساسیت به دست می‌آید.



شکل ۵. نمونه در حال آزمایش

Fig. 5. Sample during tested



شکل ۶. نمونه هنگام گسیختگی

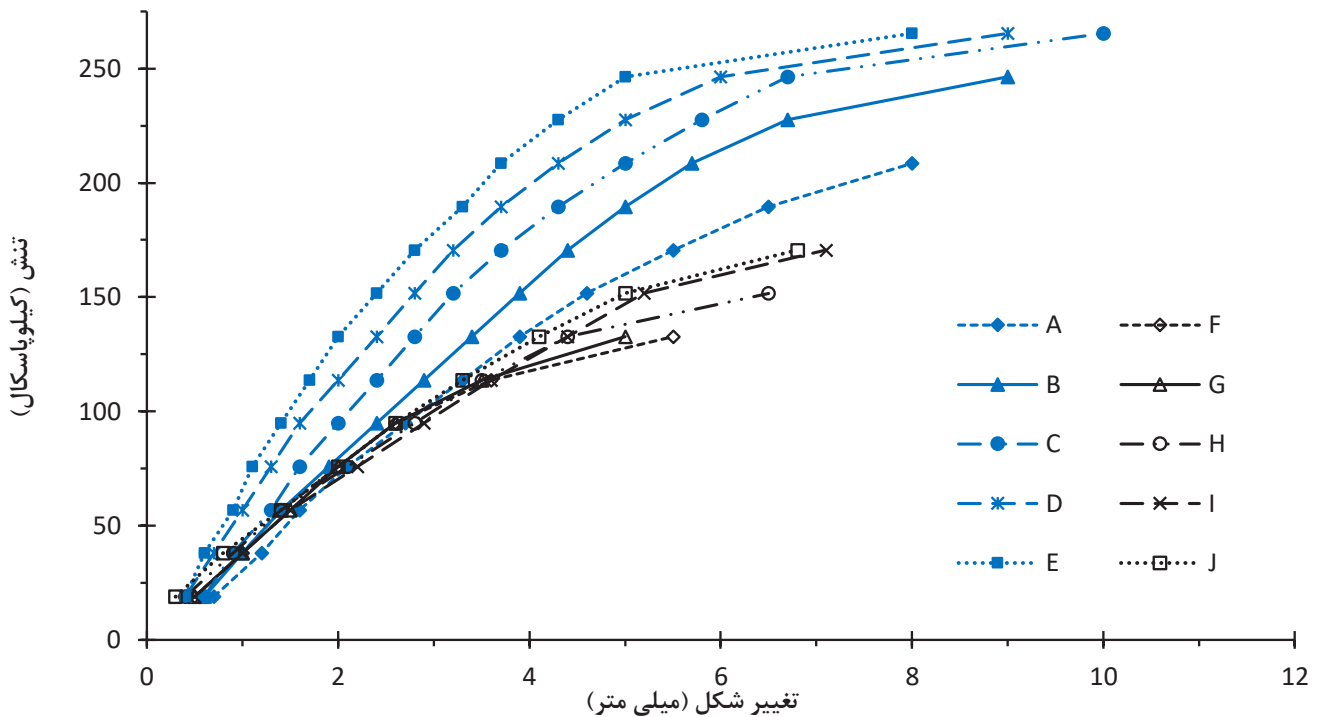
Fig. 6. Sample during failure

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

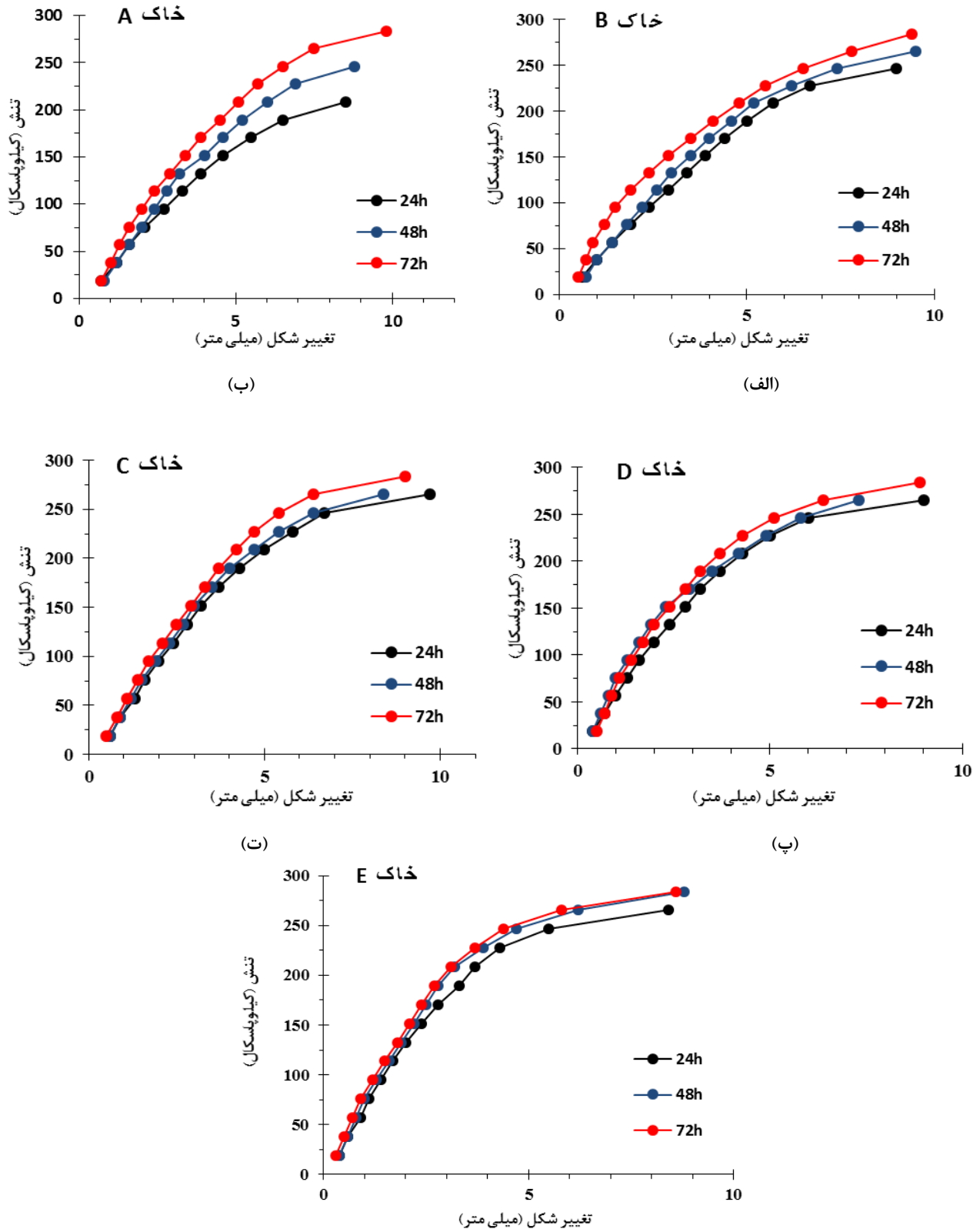
کاهش می‌یابد. در خاک A که بیشترین میزان رس را داراست، رشد مقاومت با افزایش سن انجماد از ۲۴ به ۷۲ ساعت (در رطوبت ۱۵٪) در حدود ۳۶٪ است و این رقم برای خاک نوع E برابر ۷٪ است. با توجه به پایین بودن ضریب انتقال حرارت خاک رس نسبت به ماسه این مسئله قابل توجه است و خاک رس برای انجماد و از دست دادن دما به مدت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

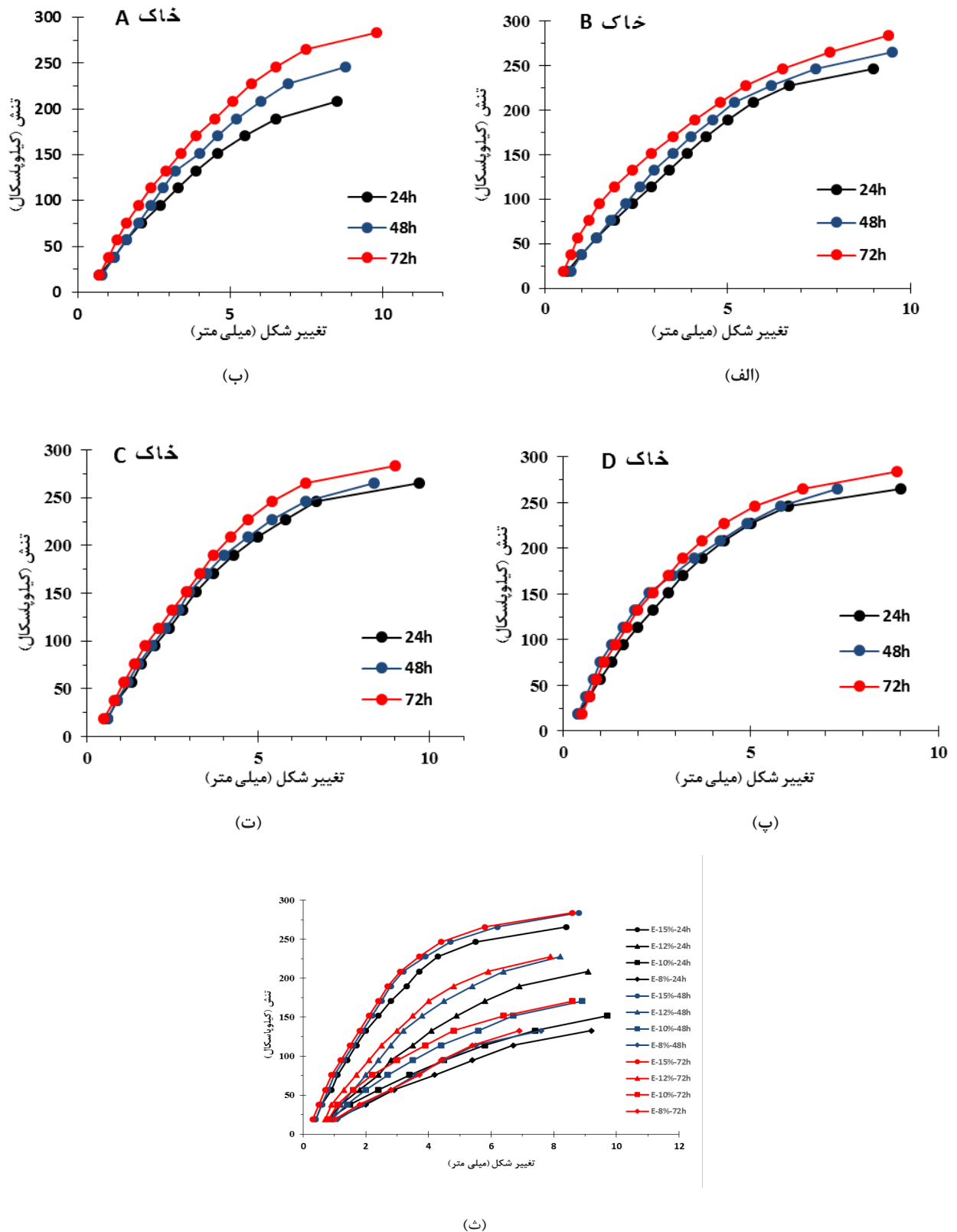
۱- منحنی تنش- کرنش در تمامی نمونه‌ها، حالت نرم شدگی در کرنش را نشان می‌دهد. در یک سن انجماد، افزایش میزان ماسه باعث کاهش انرژی کرنش می‌شود.

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.

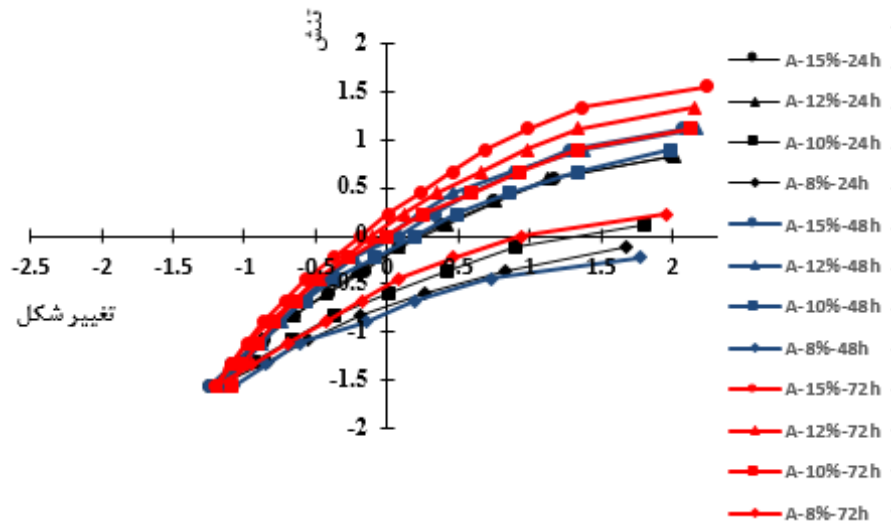
۴- ترکیب ۳۰٪ رس، ترکیب مناسبی در رطوبت‌های ۸٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ به نظر می‌رسد و در رطوبت ۱۵٪ نمونه با رس کم‌تر مقاومت بهتری نشان می‌دهد. خاک C، در رطوبت پایین‌تر عملکرد بهتری داشته است از طرفی برای انجماد مناسب و رسیدن به مقاومت کافی، به مدت زمان کمتری نسبت به خاک‌های E و D (مقدار رس، به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪) دارد.

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)



