Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 127-145

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of the Effect of Strain Rate and Moisture on the Direct Tensile Strength of Clay Soils Stabilized with Bentonite, Lime, and Cement

M. Oulapour[1]*, M. Ghareineh[2] and S. A. Hosseini Dehdashti[3]

1*- *Corresponding Author*,Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (oulapour_m@scu.ac.ir)
2- Master's Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz. Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 24 July 2024
Revised: 04 December 2024
Accepted: 08 December 2024

Keywords:
Tensile strength, Strain rate, cracking, bentonite, lime, cement, optimal moisture content.

TO CITE THIS ARTICLE:

Oulapour, M., Gharineh, M., Hosseini Dehdashti, S. A. (2025). 'Investigation of the Effect of Strain Rate and Moisture on the Direct Tensile Strength of Clay Soils Stabilized with Bentonite, Lime, and Cement', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 127-145. doi: 10.22055/jise.2024.47522.2129.

Introduction

In civil engineering projects, we often encounter soils that naturally do not possess the required load-bearing capacity during construction and operation (Naeini et al., 2012, Indiramma et al., 2020). The mechanical properties of clay soils can change drastically when exposed to moisture (Hosseinpour Babaei et al., 2023). Suggested solutions for improving the soil at the project site include soil stabilization (Causarano, 1993; Tang et al., 2015, Adhikari, 2017). Without adequate tensile strength, soil is prone to sliding and failure, leading to potential damage and safety hazards (He et al., 2018; Kim & Hwang, 2003). Developing a suitable method for determining soil tensile strength in the laboratory is necessary. In the past, the tensile strength of soils was generally considered negligible. Due to the importance of soil tensile strength, it has been studied using direct tensile tests, Brazilian tensile tests, bending tests, and double punch tests (Wei et al., 2022; Zhou et al., 2016). Xiu et al. (2021) investigated the uniaxial strength of five tailing samples using five different loading rates (0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 mm/min) and found that increasing the loading rate within that range had an increasing effect on uniaxial strength, and the relationship between them conformed to an exponential function. These results were confirmed by previous findings (Cao et al., 2019; Wisetsaen et al., 2015). Chen et al. (2020) evaluated the effect of adding xanthan gum to sandy soil. Their results showed that 2% xanthan gum increased the tensile strength of the sand to 400 kPa by enhancing contact bonding and adhesion. Dagar & Cokca (2021) found that the ratio of direct tensile strength to indirect tensile strength to uniaxial compressive strength was 1.9 and 2, respectively. They also found that the ratio of indirect tensile (splitting) strength to uniaxial compressive strength was 0.4. This study focused on evaluating factors influencing the tensile strength of soil and investigating the effects of soil

 DOI: 10.22055/jise.2024.47522.2129

stabilization using lime and cement on soil tensile strength. The experiments were conducted using a direct tensile testing apparatus specifically designed for this purpose**.**

Methodology

A device similar to that described by Tamarakar et al. (2005) was constructed for the experiments (Figure 1). Four types of materials were used for the experiments: natural soil, bentonite, lime, and cement. The soil used is classified as CL according to the Unified Soil Classification System. The bentonite used in this study has a plastic limit of PL=36 and a liquid limit of LL=155. Also, hydrated lime and Type 2 Portland cement were used for soil stabilization. Specimens prepared include: natural soil, soil-bentonite with 5%, 10%, and 15% bentonite, soil-lime mixture with 2%, 4%, and 6% lime, and soil-cement-lime mixture according to Table (1). To ensure the repeatability of results, two samples were prepared and tested for each experiment.

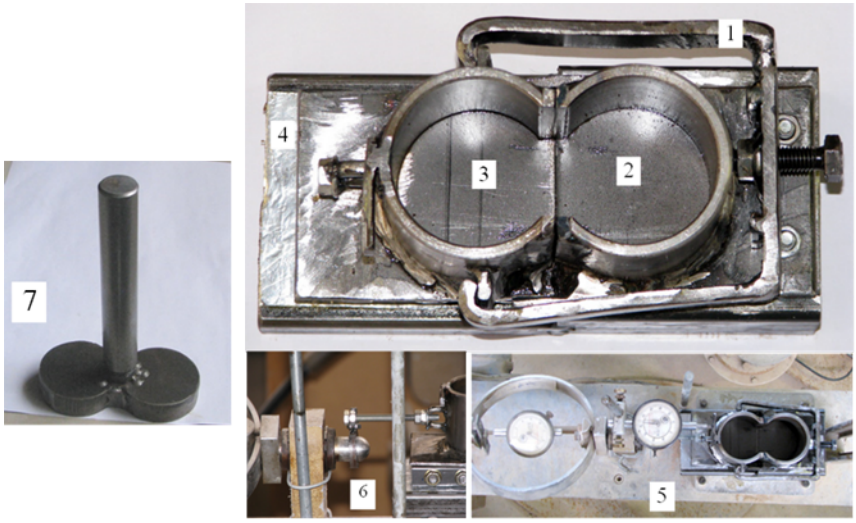


Fig. 1- Different parts of the tensile device and their connection to the direct shear apparatus lever: 1) Holding clamp, 2) Fixed mold, 3) Movable mold, 4) Horizontal platform, 5) Placement on the direct shear apparatus platform, 6) Connection of the movable mold to the force application lever, 7) Rammer for compaction of specimens

Table 1- Weight percentages of lime and cement in samples made of soil-cement-lime mixture

lime(%)	2			4			6		
Cement(%)	7	5	3	7	5	3	7	5	3

The specimens were prepared at 15%, 18%, 20%, and 24% moisture contents and cured for 28 days. Also, the natural soil specimens were prepared at dry densities of 1.58 g/cm³, 1.62 g/cm³, and 1.66 g/cm³. But the treated soil specimens were prepared at a dry density of 1.62 g/cm³ only. First the soil and the additive were mixed and water was added. The mixture was cured for 28 days and then poured into compaction molds in five layers, each compacted with 4 blows of the standard compaction hammer. The tests were conducted at different strain rates of 0.06, 0.12, 0.24, 0.48, 0.72, and 1.44 mm/min.

Results Analysis

Figure (2) depicts the failure mode of an specimens. It can be observed that the tensile cracks are nearly straight and perpendicular to the direction of applied force, indicating the movement of the shear molds in the direction of tensile force application. In stiffer specimens, cracks appeared almost instantaneously across the entire surface of the specimen, whereas in softer specimens, cracks initially

appeared at the edges and propagated towards the center, consistent with other studies (Tamrakar et al., 2005, Wei et al., 2022).

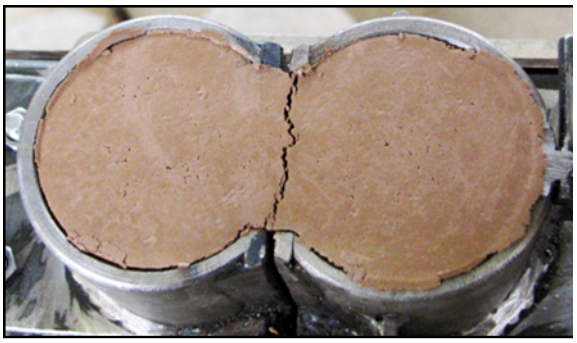


Fig. 2- Failure of a typical samples prepared with 20% moisture content and $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$,

The experiments conducted on soil with 20% moisture content and a dry density of γ_d = 1.62 g/cm³ showed that initially the tensile strength increased as strain rate was increased, reaching its peak at a strain rate of mm/min 0.24. Consistent with Xiu et al. (2021) and Wisetsaen et al. (2015).

Also, it was observed that the tensile strength initially increases with increasing moisture content, peaks at 18% moisture, and then decreases at higher moisture contents. These results are consistent with the theory of unsaturated soil mechanics (Pande & Pietruszczak, 2015).

The effect of addition of bentonite on the tensile strength of soil is nearly linearly, where each 1% increase in bentonite increases the tensile strength by approximately 1.5 kPa. It appears that the mineralogy of clays significantly influences the tensile strength of compacted soils.

Lime stabilized specimens were tested after curing periods of 3, 7, 14, and 28 days. The soil strength increases primarily due to the occurrence of pozzolanic reactions between lime, water, silicates, and aluminates present in the clay minerals. The reactions are time-dependent and gradually increase the soil's strength over time.

It appears that for soils stabilized with 6% lime, the increase in tensile strength due to longer curing time is higher than the same for 2% and 4%. Also, the tensile strength of samples with the same curing time increases by 10% for each 1% increment in lime content.

The tensile strength of the specimens treated by different amounts of lime and cement exhibits a fairly consistent trend with curing time. Also, the tensile strength of samples with the same curing time increases by an average of 5% for each 2% increment in cement content. However, there is a noticeable difference for samples stabilized with 6% lime and 7% cement, which show a steeper increase.

Conclusions

Based on the experiments and observations conducted, the following conclusions can be drawn:

- The performance of apparatus used for testing was satisfactory and reliable.
- The cracking pattern in softer samples initially appeared at the edges and propagated towards the center, whereas in denser samples, cracking occurred suddenly throughout the specimen. Samples with higher density exhibited larger crack openings.
- Increasing strain rate initially increases tensile strength, but up to a certain point., it decreases. This is due to the inability to form cohesive bonds between particles.
- Moisture content significantly affects the tensile strength of compacted soils. In general, at a constant dry density, increasing moisture content initially increases tensile strength, followed by a decrease. This behavior is attributed to transitioning from low to higher degrees of saturation beyond the threshold moisture content.

- Adding bentonite significantly affects tensile strength due to the increase in clay minerals in the soil.
- Increasing curing time results in higher tensile strength. This is attributed to the progressive pozzolanic reaction over time. However, it is expected that the rate of increase in tensile strength may decrease over time.

Acknowledgments

This article is extracted from the dissertation of the Msc course in the Faculty of Civil Engineering and Architecture of Shahid Chamran University of Ahvaz. The financial support of the Vice Chancellor for Research of Shahid Chamran University of Ahvaz in the form of grant GN: SCU.EC96.824 is hereby thanked and appreciated.

References

1- Adhikari, S., 2017. *Mechanical properties of soil-rap-geopolymer for the stabilization of road base/subbase*. University of Louisiana at Lafayette.

2- Cao, S., Yilmaz, E., Song, W., Yilmaz, E., Xue, G., 2019 Loading rate effect on uniaxial compressive strength behavior and acoustic emission properties of cemented tailings backfill, Construction and Building Materials, Volume 213, 2019, Pages 313-324. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.082.

3- Causarano, H., 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil and tillage research*, *28*(1), pp.15-25. https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90052-Q.

4- Chen, C., Peng, Z., Gu, J., Peng, Y., Huang, X. and Wu, L., 2020. Exploring environmentally friendly biopolymer material effect on soil tensile and compressive behavior. *International journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(23), p.9032.

5- Dagar, V. and Cokca, E., 2021. A Study on Tensile Strength of Compacted Fine-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, *39*(4-5), pp. 751–764. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01519-8

6- He, S., Bai, H. and Xu, Z., 2018. Evaluation on tensile behavior characteristics of undisturbed loess. *Energies*, *11*(8), p.1974. https://doi.org/10.3390/en11081974.

7- Hosseinpour Babaei, I., Rizvani Tochahi, R. and Kavesh Meli, M., 2023. Laboratory investigation of the behavior of clay stabilized with cement and reinforced with geotextile sheets. *Structural and Construction Engineering*, 10(7), pp. 74-91. Doi: 10.22065/jsce.2023.365452.2949 (in Persian).

8- Indiramma, P., Sudharani, C. and Needhidasan, S., 2020. Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment–an experimental study. *Materials Today: Proceedings*, *22*, pp.694-700. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.147.

9- Kim, T.H., and Hwang, C., 2003, Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content. *Engineering Geology*, 69(2), pp:233–244. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00284-3.

10- Naeini, S.A., Naderinia, B. and Izadi, E., 2012. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *16*, pp.943-949.

11- Pande, G.N., and Pietruszczak, S., (2015). On unsaturated soil mechanics. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *37*(3): pp. 73-84. https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0035.

12- Tamrakar, S.B., Toyosawa, Y., Mitachi, T. and Itoh, K., 2005. Tensile strength of compacted and saturated soils using newly developed tensile strength measuring apparatus. *Soils and Foundations*, *45*(6), pp.103-110. https://doi.org/10.3208/sandf.45.103

13- Tang, C.S., Pei, X.J., Wang, D.Y., Shi, B. and Li, J., 2015. Tensile strength of compacted clayey soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(4), p.04014122. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001267.

14- Wei, X., Yang, Z., Fleureau, J.M., Hattab, M., Taibi, S. and Xu, L., 2022. Tensile strength identification of remolded clayey soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *81*(10), p.405.https://doi.org/10.1007/s10064-022-02879-6.

15- Wisetsaen, S., Walsri, C., Fuenkajorn, K., 2015, Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, pp:10-14. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.10.005.

16- Xiu, Z., Wang, S., Ji, Y., Wang, F., Ren, F. and Nguyen, V.T., 2021. Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB). *Construction and Building Materials*, *271*, p.121526. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121526.

17- Zhou, W., Li, S.L., Ma, G., Chang, X.L., Cheng, Y.G. and Ma, X., 2016. Assessment of the crest cracks of the Pubugou rockfill dam based on parameters back analysis. *Geomechanics & engineering*, *11*(4), pp.571-585.https://doi.org/10.12989/.2016.11.4.571

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٨، شماره‌ی۱، بهار ١٤٠٤، مقاله پژوهشی، ص. ١٤٥-١٢٧

بررسی تأثیر سرعتِ کرنش و رطوبت بر مقاومت کششی مستقیم خاک‌های رسی تثبیت شده با بنتونیت، آهک و سیمان

مسعود اولی پور[1*]، مجید قرینه[2] و سید عبدالله حسینی دهدشتی[3]

۱*- نویسنده مسئول، عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز
oulapour_m@scu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸

چکیده

رفتار کششی مصالح خاکی، نقش مهمی در کاربردهای مهندسی ایفا می‌کند. لایه‌های متراکم خاک، از جمله در سدهای خاکی و پوشش‌های رسی می‌توانند از ترک‌های ناشی از گسیختگی کششی متحمل آسیب شوند. در این مطالعه به بررسی مقاومت کششی خاک‌های رسی و تثبیت‌شده با استفاده از یک دستگاه جدید آزمایش کشش مستقیم خاک می‌پردازیم. دستگاه مذکور، که برای انواع خاک‌های متراکم، سخت، اشباع و نرم تا سفتی متوسط قابل استفاده است، توسعه یافته و روش انجام آزمایش‌ها با آن تشریح شده است. نمونه‌های خاک در قالب‌های ویژه آماده شده و به دستگاه منتقل شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده تکرارپذیری و دقت بالای دستگاه بود. تأثیر نرخ کرنش (از۰/۰٦ تا ۱/٤٤ میلی‌متر در دقیقه)، میزان رطوبت (۱۵درصد تا ٢٤ درصد) و دانسیته خشک بر مقاومت کششی خاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، اثر افزودن بنتونیت (پنج درصد ، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد)، آهک (دو درصد ، چهار درصد و شش درصد) و ترکیب سیمان و آهک (با درصدهای وزنی مختلف) بر مقاومت کششی خاک مطالعه شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد بنتونیت، آهک و سیمان، مقاومت کششی خاک به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌ویژه، ترکیب سیمان و آهک با نسبت‌های مختلف باعث بهبود ۳۷ درصد در مقاومت کششی خاک شد.

کلید واژه‌ها: مقاومت کششی خاک، سرعت کرنش، ترک‌خوردگی، بنتونیت، آهک، سیمان، رطوبت بهینه.

مقدمه

در خِلال اجرای پروژه‌های عمرانی گاهی با خاک‌هایی مواجه می‌شویم که ظرفیت تحمل بار وارده از طرف سازه را به‌صورت طبیعی در حین ساخت و بهره‌برداری ندارند (Naeini et al., 2012). در بسیاری از این پروژه‌ها خاک محل پروژه جزء خاک‌های مسئله‌دار است. مهندسین تلاش می‌کنند تا حد امکان از خاک مسئله‌دار اجتناب کرده و در صورت امکان محل دیگری را برای پروژه خود انتخاب نمایند و یا خاک نامناسب را با خاک مناسب‌تر جایگزین نمایند. در دهه‌های اخیر با توسعه صنعت و شهرها، با توجه به محدودیت در مکان و زمان و هزینه، نیاز به احداث زیرساخت‌ها روی بسترهای نامرغوب و مسئله‌دار شدیداً احساس می‌شود. خاک رس با خصوصیات خمیری بالا یکی از انواع خاک‌ها ی مسئله‌دار است که نسبت به رطوبت حساسیت بالایی داشته و در صورت مرطوب شدن به شدت متورم می‌شود و با از دست دادن رطوبت دچار انقباض و کاهش حجم می‌گردد. این رفتار خاک را برای استفاده‌های مهندسی نامناسب می‌سازد .(Indiramma et al., 2020) یکی از دلایل اصلی وقوع گسیختگی در این خاک‌ها، مقاومت فشاری و کششی پایین آن‌ها است. همچنین تغییر خصوصیات مکانیکی خاک‌های مسئله‌دار مانند خاک‌های رسی در هنگام قرارگیری در معرض رطوبت هم می‌تواند از طریق انبساط جانبی و کاهش شدید مقاومت، باعث بروز چنین مشکلاتی شود (Hosseinpour Babaei et al., 2023). از راهکارهای پیشنهاد شده برای بهبود وضعیت خاک محل پروژه می‌توان به جایگزینی خاک نامرغوب با خاک مناسب، طراحی شالوده‌های عمیق و یا استفاده از شیوه‌های بهسازی خاک اشاره نمود.(Mirzaei et al., 2021) تثبیت یکی از این شیوه‌های بهسازی خاک است که به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. تثبیت کننده‌های معمول خاک شامل سیمان و آهک می‌باشند که با اضافه شدن به خاک، خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک را برای دست‌یابی به مقاومت، سختی و توانایی مقابله با انقباض خاک، افزایش می‌دهند (Adhikari, 2017). خاک به‌طور معمول در معرض انواع تنش‌های برشی، فشاری و کششی قرار می‌گیرد. تثبیت و بهسازی خاک به‌منظور بهبود خواص مکانیکی آن، همچون افزایش مقاومت کششی، یکی از حیطه‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک به‌شمار می‌آید. .(Causarano, 1993; Tang et al., 2015)

پایداری و مقاومت خاک یکی از ملاحظات مهم در پروژه‌های عمرانی و گسترش زیرساخت‌ها به شمار می‌آیند. مقاومت کششی به‌عنوان پارامتر مهم در کنترل گسترش ترک و تغییر شکل در اثر تنش تحمیل شده، تأثیر ویژه‌ای در پایداری و ظرفیت باربری خاک دارد. بدون مقاومت کششی مناسب، خاک مستعد لغزش و گسیختگی بوده و خسارات و خطراتی جانبی را به‌همراه خواهد داشت (He et al., 2018, Kim and Hwang 2003).

به‌منظور داشتن درک مناسبی از ایجاد و توسعه ترک‌های کششی که منجر به گسیختگی شیب‌ها، خاک‌ریزها، سدهای خاکی، پوشش‌های رسی و ... می شود، لازم است مقاومت کششی که یک خاک به‌خصوص از خود نشان می‌دهد را بدانیم. به همین منظور توسعه روشی آسان و مناسب به‌منظور تعیین مقاومت کششی خاک در آزمایشگاه ضروری است. در گذشته به طور کلی از مقاومت کششی خاک‌ها صرف‌نظر می‌شد، زیرا مقاومت کششی خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های نرم و اشباع، صفر فرض می‌شد و یا در مقایسه با مقاومت فشاری بسیار کم در نظر گرفته می‌شد. به‌علاوه اینکه به سختی می‌شد مقاومت کششی را به‌طور مستقیم در آزمایشگاه اندازه‌گیری نمود. با توجه به اهمیت مقاومت کششی خاک، این مسئله همیشه به کمک آزمایش‌هایی مانند کشش مستقیم، کشش برزیلی، تیر خمشی و دابل پانچ (Double Punch test) مورد بررسی قرار می‌گرفته است.(Wei et al. 2022; Zhou et al. 2016) در ادامه برخی از مطالعه‌های انجام شده قبلی در زمینه مقاومت کششی خاک ارائه می‌گردد.

برای اولین بار Tschebatorioff (1953) آزمایش‌های اولیه برای بررسی مقاومت کششی چهار رس مختلف را با روشی معین انجام داد تا تاثیر نوع کانی‌های رس را روی خصوصیات تنش– کرنش مطالعه کند. خاک‌های رسی در قالب‌هایی به طول ۱۳۲ سانتی‌متر و با یک مقطع مستطیلی متراکم شده بودند. در این مطالعه، اثر کانی رس، درصد رطوبت تراکم، مدت زمان اختلاط، مدت زمان انجام آزمایش و نرخ کرنش بر مقاومت کششی و کرنش خاک‌های رسی مورد بررسی قرار گرفت. سه نوع از چهار نوع خاکی که در مطالعه استفاده شدند کانی‌های رسی خالص مونت‌موریلونیت، ایلیت و کائولینیت بودند. نتایج آزمایش نشان داد که مقادیر مقاومت کششی و کرنش رس‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای به ماهیت کانی‌های خاک رس بستگی دارد.

Hasegawa و Ikeuti (1966) دستگاهی ساده‌تر از Tschebatorioff (1953) برای آزمایش کشش مستقیم رس متراکم معرفی کردند، اما با مشکل تنش‌های برشی روی سطح مرزی پایین نمونه مواجه بودند. Ajaz و Parry (1974) دستگاه جدیدی برای مطالعه رفتار تنش–کرنش رس‌های متراکم توسعه دادند که در آزمایش‌های کشش مستقیم و خمش استفاده شد. Peters و Leavell (1988) دستگاه پیشرفته‌ای را معرفی کردند که مشکلات دستگاه‌های قبلی، مانند تغییرات ناهمگن بار و اندازه‌گیری کرنش، را حل نموده و رابطه بین مقاومت کششی و پتانسیل مکش خاک را بررسی می‌کرد.

Tamrakar et al و Nahlawi et al. (2004) (2005) دستگاه سنجش مقاومت کششی معرفی کرده‌اند که مستقیماً مقاومت کششی را اندازه می‌گیرد. اما دستگاهی که توسط Nahlawi et al (2004) توسعه یافته اساساً می‌تواند برای خاک‌های رسی متراکم و خاک‌های سخت مورد استفاده قرار گیرد در حالی‌که به نظر می‌رسد دستگاه توسعه یافته توسط Tamrakar et al (2005) می‌تواند هم برای خاک‌های متراکم غیر اشباع و هم برای خاک‌های کاملاً اشباع مورد استفاده قرار گیرد.

Abbasi et al. (2017) در تحقیقی زئولیت را به‌عنوان یکی از مواد افزودنی به سیمان و آثار آن در مقاومت کششی ماسه مورد ارزیابی قرار دادند. در آن تحقیق، ابتدا اختلاط براساس وزن خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد روی اختلاط‌های مختلف انجام شده و سپس نمونه‌ها ساخته و در شرایط مطلوب رطوبتی و دمایی به مدت ۲۸ روز نگهداری می‌شدند و نهایتاً آزمایش مقاومت کششی برزیلی انجام شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داده که با جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان، مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت به میزان ۴۰ درصد افزایش یافته است.

Yin و Vanapalli (2018) یک مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی تغییر مقاومت کششی خاک‌های غیرچسبنده غیر اشباع بر اساس درجه اشباع، و با استفاده از منحنی مشخصه آب و خاک (SWCC) پیشنهاد دادند. مدل پیشنهادی قادر به پیش‌بینی مقاومت کششی ناشی از مکش زمینه و کشش سطحی بوده که به‌ترتیب مربوط به منافذ اشباع شده و رابط هوا–آب مرتبط با پل‌های آبی در نقاط تماس ذرات در منافذ غیراشباع است. برای به کارگیری این مدل، اطلاعاتی نظیر ۱- مکش زمینه (matric-suction) ($u_a - u_w$)، درجه اشباع موییننگی (Sc) ، درجه اشباع باقی‌مانده (Sr) حاصل از منحنی SWCC، ۲- اندازه متوسط ذرات (d_{50}) و ضریب یکنواختی (C_u) از منحنی دانه‌بندی، ۳-نسبت پوکی و ۴- زاویه اصطکاک داخلی (φ) در سطح تنش نرمال پایین مورد نیاز است. مدل پیشنهادی با مقایسه نتایج پیش‌بینی با مقاومت کششی اندازه‌گیری شده از ۱۰ خاک غیرچسبنده و غیر اشباع مختلف تأیید گردید. نتایج مشابهی توسط Bulolo et al (2021) گزارش شده است.

Xiu et al. (2021) مقاومت تک‌محوری پنج نمونه‌های باطله را با استفاده از پنج سرعت بارگذاری مختلف (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر بر دقیقه) بررسی کردند و یافته‌ها نشان داد که افزایش سرعت بارگذاری در آن حدود اثر افزایشی بر مقاومت تک‌محوری داشته و رابطه بین آن‌ها با یک تابع نمایی مطابقت دارد. هم‌چنین رهنمودهایی در انتخاب سرعت بارگذاری مناسب برای ارزیابی مقاومت تک‌محوری ارائه دادند. این نتایج با نتایج

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

قبلی تأیید شد. (Wisetsaen et al. ; Cao et al. 2019 2015).

Chen et al. (2020) طی تحقیقی تأثیر افزودن صمغ ژانتان (Xanthan gum) به خاک ماسه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو درصد صمغ با افزایش پیوند تماسی و چسبندگی باعث افزایش مقاومت کششی ماسه تا ۴۰۰ کیلوپاسکال می‌شود.

Ghalandarzadeh et al. (2021) در تحقیقی یک دستگاه استوانه توخالی با قابلیت اندازه‌گیری خصوصیات کششی خاک طراحی، ساخت و راه‌اندازی کردند. دستگاه قادر بود تنش کششی را به‌طور یکنواخت به کل توده خاک اعمال نماید و به‌طوری که تمرکز تنش در هیچ نقطه‌ای از نمونه رخ ندهد. نتایج آزمایش تکرارپذیری نشان داد که عملکرد دستگاه دقیق و مطلوب است. همچنین اثر شاخص خمیری خاک رسی (کائولینیت) بر رفتار کششی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شاخص خمیری خاک‌ها ۱۰ و ۲۴ درصد انتخاب گردید. نتایج نشان داد که برای خاک‌های رسی با یک منشاء مشخص، با افزایش شاخص خمیری، مقاومت کششی افزایش و کرنش گسیختگی کششی کاهش پیدا می‌کند. این نتایج با اندازه‌گیری‌های Trabelsi et al (2012) تطابق خوبی داشت.

Mirzaei et al. (2021) در تحقیقی به ارزیابی مشخصات مقاومتی خاک رس تثبیت شده با ضایعات صنعتی از جمله سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت به‌ترتیب با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خشک خاک پرداختند. نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه متراکم شدند. نتایج نشان داد که سرباره به‌عنوان تثبیت کننده نسبت به خاکستربادی و دیاتومیت عملکرد بسیار مناسبتری داشته است.

Rezaei Moghadam et al. (2021) در یک مطالعه سعی بر آن داشتند تا با بهبود مقاومت فشاری و کششی ماسه بادی موجود در سواحل دریاها و بیابان‌ها، امکان استفاده از این مصالح در لایه‌های خاک بستر، زیراساس و اساس راه‌ها به‌صورت تثبیت شده با سیمان مورد بررسی قرار دهند. آن‌ها ۲۰۰ نمونه با سه درصد، شش درصد و ۱۲ درصد سیمان به‌همراه ۰/۳ درصد، ۰/۶ درصد و ۱/۲ درصد نیکوفلاک از مصالح ماسه بادی نمونه‌برداری شده، ساختند. مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم هفت روزه و ۲۸ روزه نمونه‌ها محاسبه شد و میزان افت مقاومت آن‌ها در ۴۵ سیکل ذوب و یخ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد تثبیت مصالح ماسه بادی با سیمان به همراه افزودنی نیکوفلاک، به دلیل افزایش مقاومت فشاری و کششی این مصالح، امکان استفاده از آن در لایه‌های روسازی راه‌ها فراهم می‌آورد.

Dagar و Cokca (2021) با انجام آزمایش‌های کشش مستقیم و کشش غیرمستقیم (شکافتن) و نیز فشار تک‌محوری خاک رس متراکم تثبیت شده با مواد مختلف و مقایسه آن‌ها دریافتند که نسبت مقاومت کششی مستقیم و مقاومت کششی غیرمستقیم نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری به‌ترتیب برابر ۱/۹ و دو است. همچنین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (شکافتن) به مقاومت فشاری تک‌محوری برابر ۴/۰ می‌باشد. آنها سه معادله برای تخمین مقاومت کششی خاک‌های دانه‌ای ریزدانه بر اساس حدود آتربرگ و مشخصات تراکمی آن‌ها پیشنهاد کردند.

Ji et al. (2020) مجموعه‌ای از آزمایش‌های کشش تک محوره و آزمایش‌های برش سه محوره تحکیم یافته زهکشی شده برای بررسی روابط بین مقاومت کششی و شاخص‌های مقاومت برشی خاک‌های قلوه سنگی با درصد قلوه‌سنگ از صفر درصد تا ۵۰ درصد انجام داده و نتیجه گرفتند که در نمونه‌های خاک در حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه، مقاومت کششی با افزایش درصد قلوه‌سنگ به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

Zhang et al. (2022) آزمایش‌های مشابهی روی مقاومت کششی درشت دانه تثبیت شده با الیاف پلی‌پروپیلن انجام دادند. بررسی نتایج ظرفیت جذب انرژی نشان داد که هرچه میزان شن در خاک کمتر باشد، میزان بهبود در ظرفیت جذب انرژی بیشتر است .در عمل توصیه می‌شود برای طراحی ضد ترک دیواره هسته سد سنگ‌ریزه‌ای بلند با هسته ریزدانه از خاک قلوه سنگی با محتوای شن کم و الیاف بالا استفاده شود. همچنین یک مدل برازشی با در نظر گرفتن میزان شن و محتوای الیاف برای پیش‌بینی سریع مقاومت کششی خاک پیشنهاد شد.

Gao et al. (2023) تأثیر نسبت خلاء اولیه روی مقاومت کششی یک خاک رسی لاغر و غیر اشباع را در طیف وسیعی از نسبت خلاء اولیه و میزان رطوبت را با استفاده از آزمایش کشش برزیلی بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که برای نمونه‌هایی با نسبت حفره‌ای مختلف، می‌توان درجه بحرانی اشباع را مشاهده کرد که در آن مقاومت کششی خاک به حداکثر می‌رسد. علاوه بر این، مدل پیش‌بینی کننده مقاومت کششی با در نظر گرفتن تأثیر نسبت خلاء اولیه، برای هر دو نوع خاک درشت دانه و ریزدانه غیر اشباع و بر اساس اندرکنش مکانیسم‌های جذب رطوبت و خاصیت مویینگی خاک، پیشنهاد داده‌اند.

Mohseninia و Salehzadeh (2023) در یک مطالعه آزمایشگاهی، قابلیت کششی ماسه بهسازی شده با صمغ فارسی (Persian gum) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اضافه کردن محلول یکنواخت صمغ–آب (شامل دو درصد وزنی صمغ و ۱۶ درصد وزنی آب نسبت به وزن خاک خشک) به خاک خشک بهترین شیوه اختلاط و تراکم اولیه نسبی۵۰ درصد برای خاک، تراکم بهینه برای کسب بیشترین مقاومت کششی بوده است. همچنین ارتباط مستقیمی بین افزایش دما و کاهش رطوبت با افزایش مقاومت کششی برقرار است.

Hosseinpour Babaei et al. (2023) در پژوهشی تأثیر ژئوتکستایل بر رفتار زهکشی‌نشده نمونه‌های رسی تثبیت‌شده با سیمان را بررسی می‌کردند. نمونه‌ها با سه، پنج و هفت درصد

سیمان و سه درصد رطوبت مختلف آماده شدند و با ژئوتکستایل‌های بافته‌نشده در حالت‌های یک‌لایه، دولایه و سه‌لایه مسلح شدند. نتایج نشان داد تسلیح با سه‌لایه ژئوتکستایل مقاومت را به‌طور متوسط ۳۷ درصد افزایش داد. همچنین، ژئوتکستایل باعث کاهش سختی و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها شد و از انتشار ترک‌ها جلوگیری کرد.

Wang et al. (2024) بر اساس یافته‌های تجربی نشان دادند که مقاومت کششی تک محوره و مقاومت فشاری تک محوره با افزایش درجه اشباع روند مشابهی را دنبال می‌کنند و وابستگی قابل توجهی به تغییرات مکش زمینه دارند. همچنین با استفاده از نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری و بعد فراکتالی سطح منافذ مدل‌های پیش‌بینی مقاومت کششی به توسعه دادند. این مدل‌ها دارای مفاهیم فیزیکی خاصی هستند که محدودیت‌های مدل‌های برازش یافته را جبران می‌کنند.

در این تحقیق، دستگاه جدید آزمایش کشش مستقیم که می‌تواند هم برای خاک‌های متراکم و سخت و هم خاک‌های اشباع و نرم تا متوسط مورد استفاده قرار گیرد، و همچنین روش انجام آزمایش به‌وسیله آن شرح داده شده است. نمونه خاک‌ها درون قالب‌هایی که به این منظور ساخته شده بودند، آماده و سپس به درون دستگاه آزمایش کشش منتقل می‌شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این تست‌ها تکرار پذیر و قابل اطمینان هستند. اثر نرخ کرنش، میزان رطوبت، دانسیته خشک و اثر اضافه کردن بنتونیت، آهک، سیمان و همچنین ترکیب سیمان و آهک بر مقاومت کششی خاک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

دستگاه آزمایش

مشابه دستگاه Tamrakar et al. (2005) دستگاهی جهت انجام آزمایش‌ها ساخته شد (شکل ۱). این دستگاه از دو قالب مجزا که یکی ثابت و دیگری متحرک است تشکیل شده است. این دو قالب روی یک سکوی افقی قرار می‌گیرند. قالب ثابت توسط پیچ و مهره به سکوی افقی زیر آن بسته می‌شود. به‌منظور کاهش اصطکاک بین قالب متحرک و سکو، از چند بلبرینگ که بین قالب و سکو قرار می‌گیرند، استفاده شد. سطح داخلی این قالب‌ها در همه جا به جز در قسمتی که به هم متصل می‌شوند دایروی است. برای جلوگیری از تکان خوردن قالب‌های کشش به هنگام جای‌گذاری نمونه، دو قالب توسط یک گیره نگه‌دارنده به هم متصل می‌شوند تا نمونه درون دستگاه قرار گیرد. پس از قرار گیری نمونه و پیش از اعمال نیرو این گیره باز میشود. قالب متحرک در جهت افقی کشیده می‌شود تا وقتی که ترک‌های کششی در قسمت وسط نمونه، جایی که دو قالب به هم متصل شده‌اند، ظاهر شوند. اعمال نیرو با استفاده از اهرم دستگاه برش مستقیم و اندازه‌گیری نیرو توسط گیج متصل به دستگاه برش مستقیم صورت می‌گرفت. مقاومت کششی از تقسیم حداکثر بار نشان داده شده توسط گیج نیرو بر مساحت ترک کششی عمود بر جهت کشش به‌دست می‌آید. مساحت سطح قالب‌ها ۳۹/۲۴ سانتی‌متر مربع و حجم آن ۱۹۶/۲ سانتی‌متر مکعب می‌باشد. حداقل عرض قالب‌ها سه و ارتفاع آن پنج سانتی‌متر است.

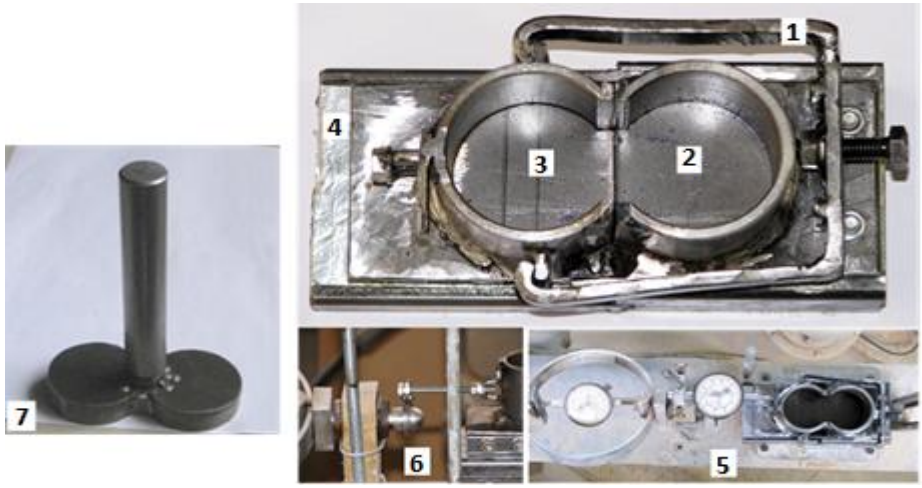


Fig. 1- Different parts of the tensile device and their connection to the direct shear apparatus lever: 1) Holding clamp, 2) Fixed mold, 3) Movable mold, 4) Horizontal platform, 5) Placement on the direct shear apparatus platform, 6) Connection of the movable mold to the force application lever, 7) Rammer made for compaction of specimens.

شکل ۱- بخش‌های مختلف دستگاه کشش و نحوه اتصال به اهرم دستگاه برش مستقیم: ۱) گیره نگه‌دارنده، ۲) قالب ثابت، ۳) قالب متحرک، ٤) سکوی افقی، ٥) قرار گیری روی سکوی دستگاه برش مستقیم، ٦) اتصال قالب متحرک به اهرم اعمال نیرو، ۷) کوبه ساخته شده کمکی برای تراکم

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

مصالح مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌ها از چهار نوع مصالح استفاده شد: خاک طبیعی، بنتونیت، آهک و سیمان. خاک استفاده شده بر اساس سیستم طبقه بندی متحد در رسته CL قرار می گیرد. حد خمیری و روانی این خاک به ترتیب برابر است با PL=۱۳ و LL= ۴۳. منحنی دانه‌بندی این خاک را می توان در شکل (۲) مشاهده نمود.

بنتونیت مصرفی در این تحقیق نیز دارای حد خمیری PL=۳۶ و حد روانی LL=۱۵۵ بود. با توجه به حضور گسترده خاک‌های ریزدانه رسی در سطح کشورمان، مشکلات زیادی در پایداری برخی پروژه‌ها ناشی از وجود این خاک‌ها ایجاد شده است. یکی از راه‌حل‌های این مشکلات، تثبیت خاک با استفاده از مصالح تثبیت کننده، از جمله آهک، سیمان و یا ترکیب هردو می‌باشد. در این پژوهش جهت تثبیت خاک، از آهک هیدراته و سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شد.

مشخصات آزمایش‌ها و نمونه‌ها

در بسیاری موارد، عوامل مؤثر بر مصالح سازه‌های خاکی عبارتند از توزیع اندازه دانه‌ها، حدود اتربرگ، ضخامت هر لایه خاک برای تراکم، میزان رطوبت و میزان تراکم. به‌منظور در نظر گرفتن این عوامل، نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش‌های کشش مستقیم تحت شرایط مختلف که در ادامه آمده است، آماده شدند.

نوع خاک

نمونه‌ها از ترکیب چهار نوع مصالح، به‌صورت خاک طبیعی، مخلوط خاک و بنتونیت، مخلوط خاک و آهک و مخلوط خاک – سیمان – آهک ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. مخلوط خاک و بنتونیت از سه ترکیب خاک به علاوه درصدهای وزنی پنج درصد، ۱۰درصد و ۱۵درصد بنتونیت، مخلوط خاک و آهک نیز از سه ترکیب خاک به‌علاوه درصدهای وزنی دو درصد، چهار درصد و شش درصد آهک و مخلوط خاک–سیمان–آهک از نه ترکیب خاک به‌علاوه درصدهای وزنی آهک و سیمان که در جدول (۱) آورده شده است، تهیه شدند. در شکل (۳) نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

میزان رطوبت تراکم

یکی از عوامل مؤثر بر مقاومت، نفوذپذیری و شکل‌پذیری خاک‌های متراکم، میزان رطوبت است. برای بررسی اثر میزان رطوبت بر مقاومت کششی خاک، تنها نمونه‌های ساخته شده از خاک طبیعی با چهار میزان رطوبت مختلف شامل ۱۵درصد، ۱۸درصد، ۲۰درصد و ۲۴درصد ساخته شده‌اند. لیکن پس از حصول بهترین میزان رطوبت، مابقی نمونه‌ها تنها با رطوبت ۲۴درصد تهیه شدند.

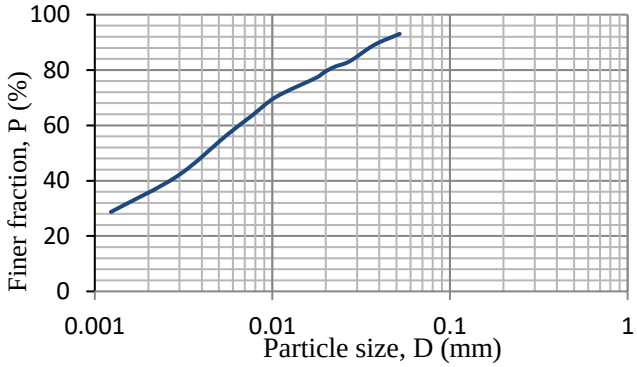


Fig. 2- Gradation curve of used soil.

شکل ۲- منحنی دانه بندی خاک استفاده شده

جدول ۱- درصدهای وزنی آهک و سیمان در نمونه‌های ساخته شده از مخلوط خاک–سیمان–آهک

Table 1- Weight percentages of lime and cement in samples made of soil-cement-lime mixture

(%) lime	2			4			6		
(%) Cement	3	5	7	3	5	7	3	5	7



Fig. 3- Prepared specimens

شکل ۳- نمونه‌های ساخته شده

نرخ (سرعت) اعمال کرنش

همان‌طور که قبلاً گفته شد یکی از عوامل مؤثر بر رفتار مصالح اعم از مدول الاستیسیته و برشی و بخصوص مقاومت سرعت بارگذاری است. در این خصوص تست‌ها با سرعت‌های مختلف اعمال کرنش یا تنش تکرار شده و نتایج مقایسه می‌گردند. برای تعیین تأثیر احتمالی سرعت کرنش روی نتایج مقاومتی در این پژوهش از سرعت‌های mm/min ۰/۰۶، ۰/۱۲، ۰/۲۴، ۰/۴۸، ۰/۷۲ و ۱/۴۴ استفاده شده است.

میزان تراکم

برای بررسی اثر تراکم، نمونه‌های خاک طبیعی با سه دانسیته خشک ۱/۵۸، ۱/۶۲ و ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب آماده شدند. دانسیته خشک بقیه نمونه‌ها ۱/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد.

آماده سازی نمونه‌ها

به‌منظور ساخت نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط خاک و بنتونیت، با توجه به دانسیته خشک و درصد رطوبت مورد نظر، مقدار مشخصی خاک و آب با هم مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت در یک کیسه پلاستیکی بدون منفذ نگهداری می‌شدند تا آب بطور یکنواخت درون مصالح توزیع شود. سپس مخلوط در پنج لایه به درون قالب‌های مخصوص ساخت نمونه ریخته می‌شد. پس از ریختن هر لایه در قالب مخصوص، یک کوبه شکل (۱) به شکل سطح مقطع نمونه، روی لایه خاک قرار داده شده و با استفاده از چکش آزمایش تراکم استاندارد، چهار ضربه به آن وارد میشد. نمونه‌ها در رطوبت‌های ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۲۴ درصد و دانسیته خشک ۱/۵۸، ۱/۶۲ و ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شدند.

به‌منظور ساخت نمونه‌های تثبیت شده با آهک، ابتدا با توجه به دانسیته خشک انتخابی ($\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$) و درصد وزنی آهک، خاک و آهک به میزان مناسب با هم مخلوط می‌شدند و پس از یکدست شدن، برای رسیدن به رطوبت ۲۴ درصد، آب به آن‌ها اضافه می‌شد. برای ساخت نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان نیز ابتدا خاک و آهک با هم مخلوط و سپس سیمان و بعد آب به آن‌ها اضافه می‌شد. پس از اختلاط، به همان ترتیبی که پیش‌تر ذکر شد نمونه‌ها ساخته و درون کیسه پلاستیکی بدون منفذ قرار می‌گرفتند. نمونه‌های تثبیت شده، پس از ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز (در برخی موارد ۳۱ یا ۳۲ روز) مورد آزمایش قرار می‌گرفتند.

برای انجام آزمایش، ابتدا قالب‌های کشش و بقیه قطعات به‌هم متصل شدند. سپس قالب متحرک به اهرم اعمال نیرو دستگاه برش مستقیم متصل گشت. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی درون قالب‌های کشش قرار می‌گرفتند. سپس سرعت اعمال نیروی کششی به نمونه تنظیم و گیره نگه‌دارنده دو قالب از هم باز می‌شد. با روشن کردن دستگاه برش مستقیم، نمونه تحت کشش قرار می‌گرفت. اعمال نیرو تا رسیدن به گسیختگی کامل نمونه ادامه پیدا می‌کرد. در شکل (۴) نمونه آماده شده نهایی قبل از انجام تست کشش نشان داده شده است.

بررسی نتایج

شکل (۵)، دو نمونه را پس از گسیختگی کششی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ترک‌های کششی تقریباً مستقیم و عمود بر جهت اعمال نیرو هستند که نشان می‌دهد حرکت قالب‌های کشش در جهت اعمال نیروی کششی است.

به نظر می‌رسد حداکثر مقاومت کششی مشاهده شده، حداکثر تنش کششی است که برای شکستن بیشتر پیوندهای ذرات خاک لازم است. هنگامی که بیشتر پیوندهای ذرات خاک شکسته شد، تنش کششی شروع به کاهش میکند تا تقریباً تمام پیوندها شکسته شوند. Ohkubo (2002) و Ono (2003) نیز به‌طور مشابه کاهش تنش کششی بعد از حداکثر مقدارش را متذکر شده‌اند. پس از شروع به کاهش تنش کششی و بیشتر شکسته شدن پیوندهای بین ذرات خاک، می‌توان توسعه ترک کششی را در سطح بالای نمونه مشاهده کرد. در نمونه‌های سفت و سخت‌تر، ترک تقریباً در یک لحظه در سرتاسر سطح نمونه ایجاد می‌شد و در نمونه‌های نرم‌تر، ترک ابتدا در کناره‌ها ظاهر و به سمت وسط گسترش می‌یابد که مشابه دیگر پژوهش‌ها است (Tamrakar et al., 2005). همچنین مشاهده شد که بازشدگی ترک در نمونه‌های سخت‌تر بزرگتر است. به‌منظور اطمینان از تکرار پذیر بودن نتایج، برای هر تست، دو نمونه ساخته و آزمایش شد. اگرچه تفاوت اندکی در مقاومت‌های کششی به‌دست آمده از تست‌های تکرار شده وجود دارد، با این حال می‌توان گفت که نتایج حاصل شده تکرار پذیر هستند.

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

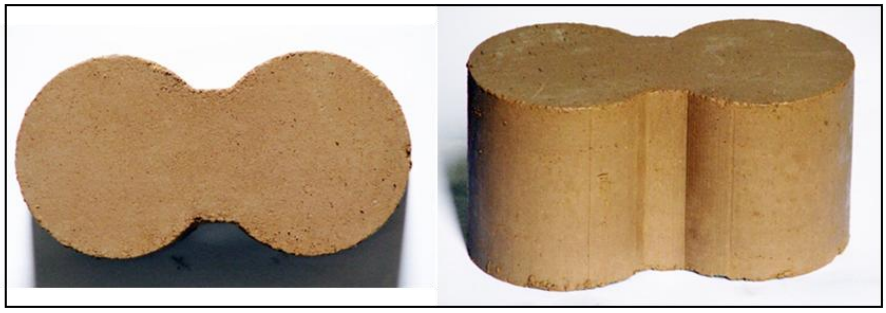
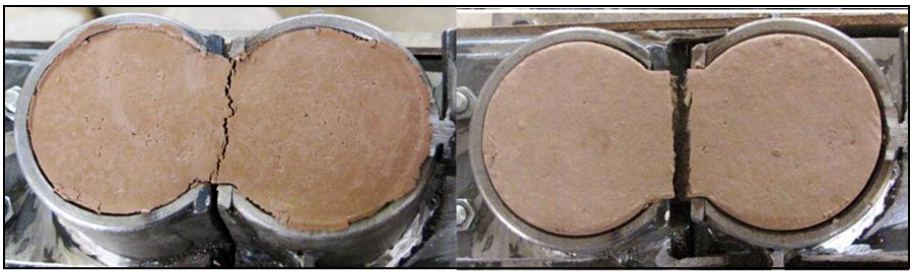


Fig. 4- Sample made for testing
شکل ٤- نمونه ساخته شده جهت انجام آزمایش



a b

Fig. 5- Breakage of some samples; (a) sample made from soil with 20% humidity and $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$, (b) 7-day sample stabilized with 2% lime and 3% cement
شکل ٥- گسیختگی برخی نمونه‌ها؛ (a) نمونه ساخته شده از خاک با رطوبت ۲۰ درصد و $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$، (b) نمونه هفت روزه تثبیت شده با دو درصد آهک و سه درصد سیمان

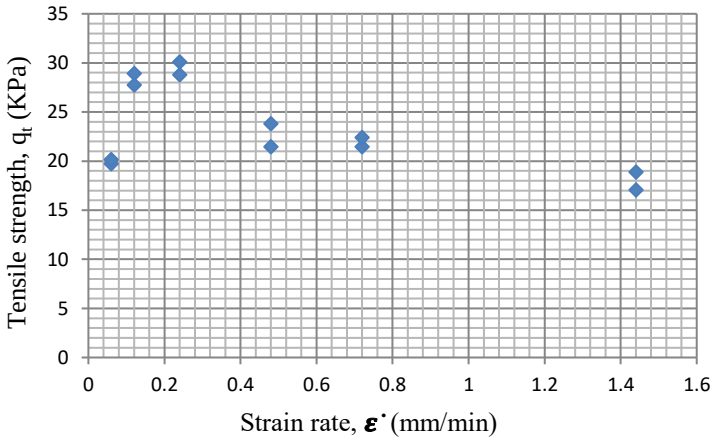


Fig. 6- Changes in soil tensile strength with strain rate
شکل ٦- تغییرات مقاومت کششی خاک با نرخ کرنش

اثر نرخ کرنش

شکل (۶) نتیجه آزمایش‌های بررسی اثر نرخ کرنش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های بررسی اثر نرخ کرنش روی خاک با درصد رطوبت ۲۰ درصد و γ_d=1.62 gr/cm^3 انجام گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ کرنش مقاومت کششی افزایش می‌یابد و در نرخ کرنش ۰/۲۴ mm/min، مقاومت کششی به اوج خود می‌رسد. پس از آن کاهش مقاومت مشاهده می‌شود که این کاهش تا سرعت ۰/۴۸ mm/min، زیاد و پس از آن کاهش

مقاومت کمتر است. نتایج این تست‌ها در تحقیقات قبلی نیز مشاهده شده است. (Xiu et al. 2021 و Wisetsaen et al. 2015). همچنین با توجه Alzubaidi و Lafta (2013) برای خاک طبیعی، نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت برشی زهکشی نشده و نیز چسبندگی با افزایش سرعت کرنش به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که برای مخلوط خاک-آهک در دوره‌های عمل آوری مختلف، این مقادیر ابتداء به حداکثر رسیده و سپس با افزایش نرخ کرنش با وجود افزایش میزان آهک کاهش می‌یابد. این کاهش که در سرعت کرنش ۰/۲ mm/min اتفاق افتاده است. همچنین Zarei, et al (2023) در آزمایش‌های خود نشان دادند که در نرخ کرنش ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه نسبت به نمونه‌هایی که در نرخ‌های کرنش ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شده بودند، مقاومت بالاتری از خود نشان دادند. Hu et al. (2023) با بررسی خاک‌های رسی سیلتی متراکم غیر اشباع، با نرخ کرنش و فشارهای محصورکننده مختلف نشان دادند که نرخ کرنش بحرانی برابر ۰/۱ mm/min در فشارهای محصورکننده پایین وجود دارد که در سرعت کرنش کمتر از آن مقاومت با افزایش سرعت کرنش کاهش می‌یابد و بالاتر از آن با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. در این شکل تکرار پذیری آزمایش‌ها نیز نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است که در این نمودار تاثیر سرعت کرنش بررسی اجمالی شده و تشابه ظاهری این نمودار با نمودارهای تنش-کرنش دلیلی بر بروز کرنشهای بزرگ و مقاومت باقی‌مانده (Residual strength) فرق می‌کند. زیرا نقاط مقاومت حداکثر (Peak strength) در هر سرعت کرنش در این نمودار ارتباطی با میزان کرنش متناظر با آن مقاومت ندارد.

اثر دانسیته خشک و میزان رطوبت

رابطه بین مقاومت کششی، دانسیته خشک و درصد رطوبت در شکل (۷) نشان داده شده است. سه منحنی مجزا برای سه دانسیته خشک نشان داده شده است. میزان رطوبت تراکم، عامل مهمی در تعیین رفتار مهندسی خاک‌های متراکم است، به این دلیل که درصد رطوبت تراکم، تجدید آرایش ذرات خاک تحت انرژی تراکم را کنترل می‌کند و موجب افزایش مقاومت و نفوذپذیری خاک‌های متراکم می‌شود. در این نمونه ها میزان درصد اشباع بین ۹۰ الی ۹۶ درصد می‌باشد. می توان دید که در $\gamma_d = 1.58 \frac{gr}{cm^3}$ و $\gamma_d = 1.66 \frac{gr}{cm^3}$ رفتار نسبتا مشابهی وجود دارد. اما در $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$ چنین رفتاری قابل مشاهده نیست. برای $\gamma_d = 1.58 \frac{gr}{cm^3}$، مقاومت کششی با افزایش رطوبت ابتدا افزایش و پس از رسیدن به حداکثر مقاومت در رطوبت ۱۸ درصد، کاهش می‌یابد. برای $\gamma_d = 1.66 \frac{gr}{cm^3}$ با افزایش رطوبت ابتدا افزایش اندکی در مقاومت کششی دیده می‌شود و پس از رسیدن به حداکثر مقاومت در رطوبت ۱۸ درصد، مقاومت شروع به کاهش می‌کند. برای $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$ مشاهده شد که با افزایش رطوبت مقاومت کششی کاهش می‌یابد. این نتایج با نظریه مکانیک خاک‌های نیمه اشباع هماهنگی دارد. (Pande and Pietruszczak, 2015).

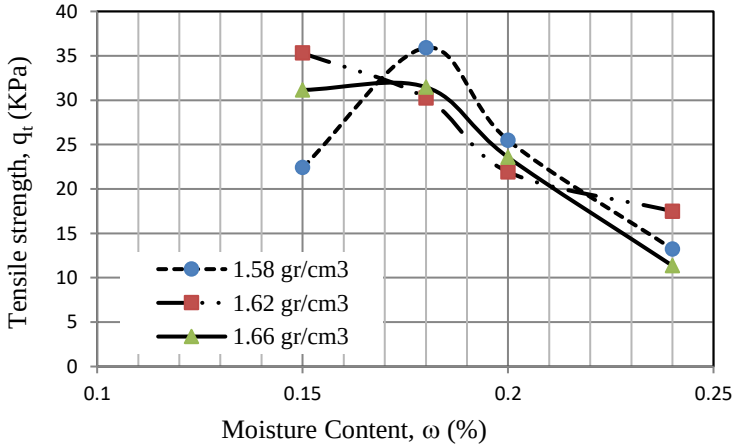


Fig. 7- Changes in soil tensile strength with moisture content and dry density

شکل ۷- تغییرات مقاومت کششی خاک با میزان رطوبت و دانسیته خشک

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

اثر افزودن بنتونیت به خاک

نمونه‌های تعیین اثر بنتونیت، با اضافه کردن بنتونیت به میزان ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۱۵درصد وزنی خاک خشک، رطوبت ۲۴ درصد و $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$ ساخته شدند. اثر اضافه کردن بنتونیت بر مقاومت کششی خاک در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن بنتونیت، مقاومت کششی تقریباً به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که هر افزایش پنج درصدی بنتونیت، با افزایش ۱/۵ برابری مقاومت کششی خاک همراه است. به نظر می‌رسد مقدار کانی‌های رسی تأثیر به‌سزایی بر مقاومت کششی خاک‌های متراکم دارد. در واقع، کانی‌شناسی یک عامل کنترل کننده اساسی برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی نظیر شکل پذیری، تورم، تراکم، مقاومت و قابلیت هدایت سیال است (Mitchell and Soga.,1993). در شکل (۸) باز هم تکرار پذیری نتایج نشان داده شده است.

خاک تثبیت شده با آهک

نمونه‌های تثبیت شده با آهک، با سه درصد وزنی دو درصد، چهار درصد و شش درصد آهک ساخته و پس از ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آن در شکل (۹) قابل مشاهده است. عمده علت افزایش مقاومت خاک با افزودن آهک به آن، بروز واکنش پوزولانی است که بین آهک، آب، سیلیکات و آلومینات موجود در کانی‌های رسی رخ می‌دهد که واکنشی زمان‌بر بوده و به مرور زمان مقاومت خاک را افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد برای خاک‌های تثبیت شده با شش درصد آهک، رابطه مقاومت کششی با زمان عمل‌آوری، روند صعودی تری نسبت به خاک‌های تثبیت شده با دو درصد و چهار درصد آهک دارد. همچنین می‌توان گفت که به غیر از نمونه‌های سه روزه که با درصدهای مختلف آهک، مقاومت کششی تقریباً یکسانی دارند، مقاومت کششی نمونه‌های با زمان عمل‌آوری یکسان، با هر افزایش دو درصدی آهک از دو درصد تا شش درصد ، به‌طور میانگین ۱/۲ برابر افزایش می‌یابد.

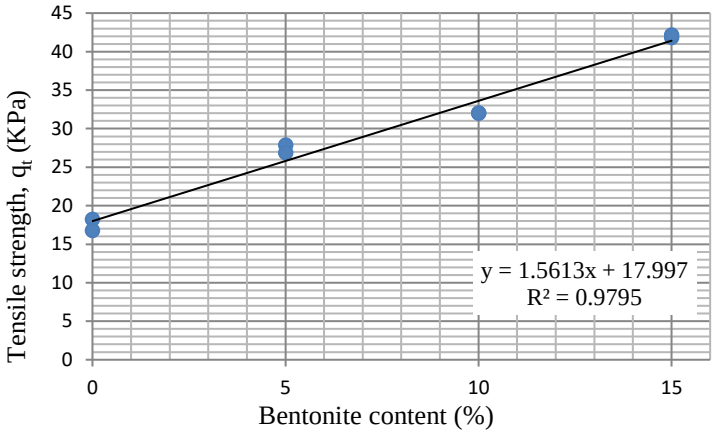


Fig. 8- Changes in soil tensile strength with bentonite content

شکل ۸- تغییرات مقاومت کششی خاک با میزان بنتونیت

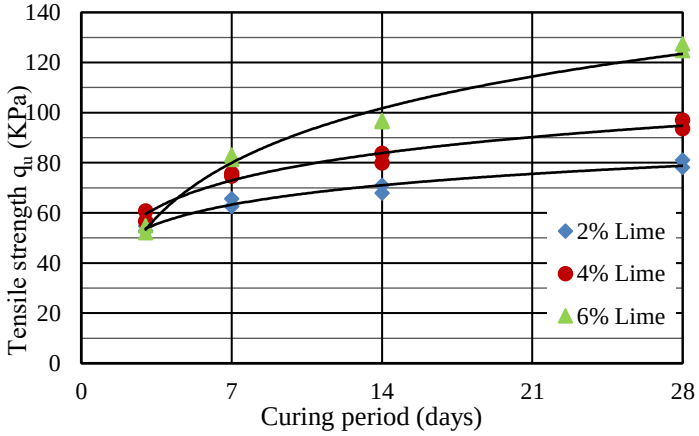


Fig. 9- Tensile strength changes of lime-stabilized soil with curing time for different lime content.

شکل ۹- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با آهک با گذشت زمان برای درصدهای مختلف آهک.

خاک تثبیت شده با سیمان و آهک

برای ساخت نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان، نه ترکیب مطابق جدول (۱) مورد استفاده قرار گرفت. نمونه ۲۸ روزه دو درصد آهک و هفت درصد سیمان، پس از ۳۱ روز و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت شده با چهار درصد و شش درصد آهک به‌علاوه مقادیر مختلف سیمان، پس از ۳۲ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های ساخته شده با دو درصد آهک و درصدهای مختلف سیمان در شکل (۱۰) مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، مقاومت کششی این نمونه‌ها روند تقریباً مشابهی با زمان عمل‌آوری دارند. همچنین می‌توان گفت که در نمونه‌های ساخته شده با دو درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، مقاومت کششی نمونه‌های با زمان عمل‌آوری یکسان (به غیر از نمونه‌های ۳ روزه)، با هر افزایش دو درصدی سیمان از سه درصد تا هفت درصد، به‌طور میانگین ۱/۰۵ برابر افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱) نتایج آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با چهار درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان را می‌توان مشاهده نمود. نحوه تغییرات مقاومت کششی این نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری، شبیه به هم و همچنین روند نسبتاً مشابهی با نمونه‌های ساخته شده با دو درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان نشان می‌دهند. در این نمونه‌ها، برای زمان عمل آوری‌های یکسان (به جز نمونه‌های سه روزه)، بیشترین مقاومت برای نمونه‌های تثبیت شده با چهار درصد آهک و پنج درصد سیمان به‌دست آمد.

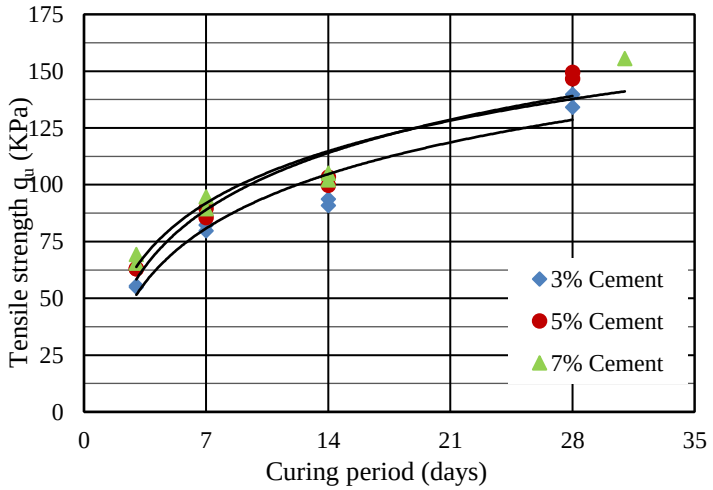


Fig. 10- Tensile strength changes of soil stabilized with 2% lime and different amounts of cement, with time

شکل ۱۰- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با دو درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، با گذشت زمان

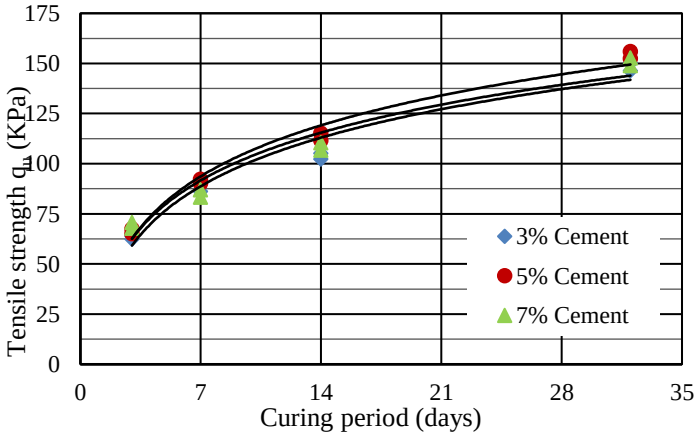


Fig. 11- Tensile strength changes of soil stabilized with 4% lime and different amounts of cement, with time

شکل ۱۱- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با چهار درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، با گذشت زمان

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

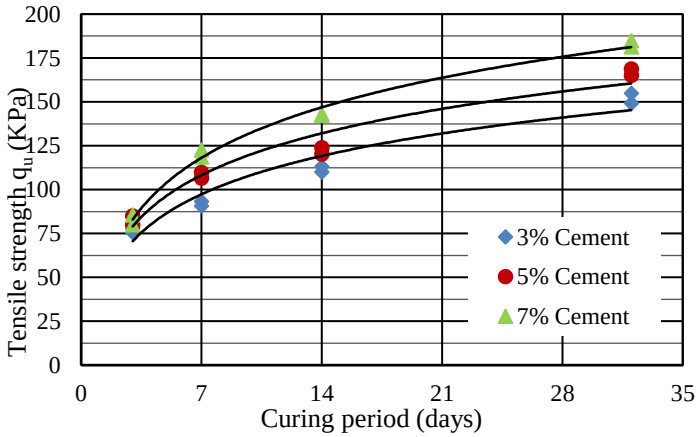


Fig. 12- Tensile strength changes of soil stabilized with 6% lime and different amounts of cement, with time

شکل ۱۲- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با شش درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، با گذشت زمان

شکل (۱۲) نتایج آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با شش درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی این نمونه‌ها نشان می‌دهند که روند تغییرات مقاومت کششی این نمونه‌ها در مقابل زمان عمل‌آوری، تقریباً شبیه به‌هم و مشابه نمونه‌های تثبیت شده با دو درصد و چهار درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان بوده، البته به‌جز برای نمونه‌های تثبیت شده با شش درصد آهک و هفت درصد سیمان که روند صعودی بیشتری دارند. همچنین مقاومت کششی این نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری یکسان (به غیر از نمونه‌های سه روزه)، با هر افزایش دو درصدی سیمان از سه درصد تا هفت درصد، ۱/۱ برابر افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش بر روی ارزیابی عوامل مؤثر بر مقاومت کششی خاک و همچنین بررسی اثر تثبیت خاک با استفاده از آهک و سیمان بر مقاومت کششی خاک متمرکز شده بود. آزمایش‌ها در دستگاه کشش مستقیمی که برای انجام آزمایش‌ها ساخته شده بود، انجام گرفت. در کل، بر اساس آزمایش‌ها و همچنین مشاهدات به‌عمل آمده، می‌توان به نتایجی که در ادامه آمده است اشاره کرد:

- ✓ با توجه به تکرار نتایج تست‌ها برای نمونه‌های با شرایط مختلف، عملکرد وسیله ساخته شده برای بررسی مقاومت کششی انواع نمونه‌های خاک‌های مناسب بود است.
- ✓ ترک خوردگی نمونه‌های نرم‌تر بدین صورت بود که ابتدا در کناره‌ها ترک ظاهر می‌شد و به سمت وسط نمونه گسترش می‌یافت. در نمونه‌های متراکم و سخت ترک به‌صورت ناگهانی در سرتاسر نمونه ظاهر می‌شد. نمونه‌های سخت‌تر دارای بازشدگی ترک بزرگتری بودند. این شکلهای بروز ترک با نتایج Wei et al (2022) تأیید شده است.
- ✓ با افزایش سرعت کرنش اعمال شده مقاومت کششی ابتدا افزایش یافته ولی بعد از آن کاهش می‌یابد. دلیل آن سرعت تغییرشکل‌ها و عدم امکان ایجاد اتصالات الکتریکی در بین ذرات می باشد. در سرعت بارگذاری ۰/۲۴ میلی‌متر در دقیقه بیشترین مقاومت کششی حاصل شده است. از این سرعت بارگذاری در تست‌ها استفاده شد.
- ✓ میزان رطوبت اثر قابل‌توجهی بر مقاومت کششی خاک‌های متراکم دارد که می‌تواند به‌دلیل تغییر ساختار خاک به‌علت تجدید آرایش ذرات خاک باشد. همچنین در یک دانسیته خشک ثابت، با افزایش رطوبت، مقاومت کششی ابتدا افزایش و بعد کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در وزن مخصوص خشک (gr/cm^3) ۱/۵۸ با سه درصد افزایش رطوبت، مقاومت کششی حدود ۷۰ درصد افزایش یافته است. با افزایش وزن مخصوص خشک تأثیر آن کمتر شده، به‌گونه‌ایی که در وزن مخصوص خشک (gr/cm^3) ۱/۶۶ افزایش رطوبت، تأثیر خاصی روی مقاومت کششی نداشته است. این نتیجه به‌وضوح در Trabelsi et al (2012) گزارش شده است. دلیل این پدیده گذر از حالت اشباع پایین به حالت اشباع بالاتر از حد رطوبت آستانه است. در اشباع پایین با تشکیل کشش سطحی و فشار آب منفی مقاومت افزایش می‌یابد. لیکن در درجه اشباع بالا و افزایش آب منفذی در کرنش‌های حجمی فشار آب در نمونه تولید شده و باعث افت مقاومت می‌شود.
- ✓ افزودن بنتونیت اثر قابل‌توجهی بر مقاومت کششی دارد. به‌طوری‌که هر افزایش پنج درصدی بنتونیت، با افزایش ۱/۵ برابری مقاومت کششی خاک همراه است. به نظر می‌رسد مقدار کانی‌های رسی تاثیر بسزایی بر مقاومت کششی خاک‌های متراکم دارد.
- ✓ در بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری روی مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و آهک مشاهده شد که با افزایش زمان

عمل‌آوری، مقاومت کششی نمونه‌های تثبیت شده نیز افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در نمونه‌های تثبیت شده با چهار درصد آهک مقاومت نمونه‌ها با افزایش زمان از هفت روز به ۱۴ روز ۲۵ درصد افزایش یافته است. و با گذشت زمان نرخ افزایش مقاومت کششی کاهش یافته است. دلیل این امر پیشرفت واکنش پوزولانی به مرور زمان است. که البته می‌توان انتظار داشت میزان افزایش مقاومت کششی با گذشت زمان عمل‌آوری روند کاهشی داشته باشد. این مطلب به‌طور مشابهی برای هر دو نوع مواد تثبیت کننده صادق بوده، ولی سرعت افزایش در نمونه های با شش درصد آهک و هفت درصد سیمان بیشتر و سریع‌تر بوده است. این امر می‌تواند به‌دلیل وجود مواد افزودنی بیشتر باشد.

تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشکده مهندسی عمران و معماری دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه SCU.EC96.824 تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

1- Abbasi, M., Shooshpasha, E., and Molaabasi, H. 2017. Investigation of zeolite effect on tensile strength of Babolsar sand stabilized with cement. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(1.1), pp. 117-120. Doi: 10.24200/j30.2017.1104 (in Persian).

2- Adhikari, S., 2017. *Mechanical properties of soil-rap-geopolymer for the stabilization of road base/subbase*. University of Louisiana at Lafayette.

3- Ajaz, A. and Parry, R.H.G., 1974. An unconfined direct tension test for compacted clays. *Journal of Testing and Evaluation*, *2*(3), pp.163-172. https://doi.org/10.1520/JTE10093J

4- Alzubaidi, R. and Lafta, S.H., 2013. Effect of strain rate on the strength characteristics of soil–lime mixture. *Geotechnical and Geological Engineering*, *31*, pp.1317-1327.https://doi.org/10.1007/s10706-013-9653-3.

5- Bulolo, S., Leong, E.C., and Kizza, R., 2021. Tensile strength of unsaturated coarse and fine-grained soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80(3), pp. 2727-2750. https://doi.org/10.1007/s10064-020-02073-6.

6- Cao, S., Yilmaz, E., Song, W., Yilmaz, E. and Xue, G., 2019. Loading rate effect on uniaxial compressive strength behavior and acoustic emission properties of cemented tailings backfill. *Construction and Building Materials*, *213*, pp.313-324. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.082.

7- Causarano, H., 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*, *28*(1), pp.15-25. https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90052-Q

8- Chen, C., Peng, Z., Gu, J., Peng, Y., Huang, X. and Wu, L., 2020. Exploring environmentally friendly biopolymer material effect on soil tensile and compressive behavior. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(23), p.9032.

9- Dagar, V. and Cokca, E., 2021. A Study on Tensile Strength of Compacted Fine-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering, 39*(4-5), pp. 751–764. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01519-8

10- Gao, Y., Li, Z., Cui, W., Sun, D. & Yu, H., 2023. Effect of initial void ratio on the tensile strength of unsaturated silty soils, *Acta Geotechnica, 18(7), pp. 3609-3622.* https://doi.org/10.1007/s11440-023-01800-z

11- Ghalandarzadeh, A., Abdi, M.R. and Shafiei Chafi, L., 2021. Construction of a new hollow cylinder apparatus to study the tensile behavior of clay with different plasticity indices. *Civil Infrastructure Researches*, *7*(1), pp.153-171.

12- Hasegawa, H. and Ikeuti, M., 1966. On the tensile strength test of disturbed soils. In *rheology and soil mechanics/Rhéologie et Mécanique des Sols: Symposium Grenoble, April 1–8, 1964/Symposium Grenoble, 1er–8 avril 1964* (pp. 405-412). Berlin, heidelberg: springer berlin heidelberg.

13- He, S., Bai, H. and Xu, Z., 2018. Evaluation on tensile behavior characteristics of undisturbed loess. *Energies*, *11*(8), p.1974. https://doi.org/10.3390/en11081974.

14- Hosseinpour Babaei, I., Rizvani Tochahi, R. and Kavesh Meli, M., 2023. Laboratory investigation of the behavior of clay stabilized with cement and reinforced with geotextile sheets. *Structural and Construction Engineering*, 10(7), pp. 74-91. Doi: 10.22065/jsce.2023.365452.2949 (in Persian).

15- Hu, T., Liu, D. and Chang, J., 2020. Experimental study on strain rate effect of strength characteristics of unsaturated silty clay. *Case Studies in Construction Materials*, *12*, p.e00332.https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00332

16- Indiramma, P., Sudharani, C. and Needhidasan, S., 2020. Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment–an experimental study. *Materials Today: Proceedings*, *22*, pp.694-700. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.147

17- Ji, E., Chen, S., Fu, Z., 2020. A Simple Method to Predict Tensile Strength of Gravelly Soil Using Shear Strength Indexes. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57(4), pp. 312–315. https://doi.org/10.1007/s11204-020-09671-2

18- Kim, T.H., and Hwang, C., 2003, Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content. *Engineering Geology*, 69(2), pp:233–244. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00284-3

19- Mirzaei, K., Ghanizadeh, a. and Bakhtiari, S., 2021. Resistance characteristics of clay bed with high pasty properties stabilized with iron smelting furnace slag, fly ash and diatomite. *Civil Infrastructure Research*, 6(2), pp. 67-78. Doi: 10.22091/cer.2021.6858.1241 (in Persian).

20- Mitchell, J.K. and Soga, K., 1993. Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons. *Inc., New York*, *422*.

21- Mohseninia, M. and Salehzadeh, H., 2023. Effect of initial conditions of soil and its environment on the tensile strength of sandy soil improved with Persian gum. *Transportation Infrastructure Engineering*, 9(2), pp. 51-62. Doi: 10.22075/jtie.2023.31178.1644 (in Persian).

22- Naeini, S.A., Naderinia, B. and Izadi, E., 2012. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *16*, pp.943-949.

23- Nahlawi, H., Chakrabarti, S. and Kodikara, J., 2004. A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials. *Geotechnical Testing Journal*, *27*(4), pp.356-361. https://doi.org/10.1520/GTJ11767

24- Ohkubo, S., 2002. Dynamic quality and constitution equation for dotan soil. *Tunnel and Underground*, *33*(1), pp.45-50.

25- Ono, N., 2003. Trial tests with compressive and tensile strength measuring apparatus. *58th Annu. Meet. Jpn. Soc. Civil Engineers, 2003*.

26- Peters, J.F. and Leavell, D.A., 1988. Relationship between tensile and compressive strengths of compacted soils. In *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP29077S

27- Pande, G.N., and Pietruszczak, S., 2015. On unsaturated soil mechanics. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *37*(3): pp. 73-84. https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0035.

28- Rezaei Moghadam, F., Jafari Nader, B. and Rezaei Moghadam, T., 2021. Laboratory investigation of the effect of polymer additive "Nicoflak" on the compressive and tensile strength of desert and coastal sandblasts in pavement layers. *Amirkabir Engineering Journal*, 53(2), pp. 733-748. doi: 10.22060/ceej.2020.16612.6288 (in Persian).

29- Tamrakar, S.B., Toyosawa, Y., Mitachi, T. and Itoh, K., 2005. Tensile strength of compacted and saturated soils using newly developed tensile strength measuring apparatus. *Soils and Foundations*, *45*(6), pp.103-110. https://doi.org/10.3208/sandf.45.103.

30- Tang, C.S., Pei, X.J., Wang, D.Y., Shi, B. and Li, J., 2015. Tensile strength of compacted clayey soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(4), p.04014122. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001267

31- Trabelsi, H., Jamei, M., Zenzri, H. and Olivella, S., 2012. Crack patterns in clayey soils: Experiments and modeling. *International Journal for Numerical and Analytical methods in geomechanics*, *36*(11), pp.1410-1433. https://doi.org/10.1002/nag.1060

32- Tschebatorioff, F.P., 1953. The tensile strength of disturbed and recompacted soils. *Proc. 3rd ICSMFE, 1953, 1*, pp.207-210.

33- Wang, A., Xu, S. and Xu, Y., 2024. The Uniaxial Tensile Strength of Compacted Expansive Soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *28*(6), pp.2189-2200.https://doi.org/10.1007/s12205-024-0660-0

34- Wei, X., Yang, Z., Fleureau, J.M., Hattab, M., Taibi, S. and Xu, L., 2022. Tensile strength identification of remolded clayey soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *81*(10), p.405.https://doi.org/10.1007/s10064-022-02879-6

35- Wisetsaen, S., Walsri, C., Fuenkajorn, K., 2015, Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, pp:10-14. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.10.005

36- Xiu, Z., Wang, S., Ji, Y., Wang, F., Ren, F. and Nguyen, V.T., 2021. Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB). *Construction and Building Materials*, *271*, p.121526. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121526

37- Yin, P., Vanapalli, S.K. 2018. Model for predicting tensile strength of unsaturated cohesionless soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(9):1313–1333, https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0376.

38- Zarei, C., Soltani-Jigheh, H. and Liu, Y., 2023. Effects of strain rate and specimen size on the Behavior of Fine-Grained soils. *Arabian Journal of Geosciences*, *16*(4), p.244. https://doi.org/10.1007/s12517-023-11344-x.

39- Zhang, Z., Ji, E. and Fu, Z., 2022. Study on the tensile properties and application of gravelly soil reinforced by polypropylene fiber. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *26*(8), pp.3265-3274.https://doi.org/10.1007/s12205-022-0923-6.

40- Zhou, W., Li, S.L., Ma, G., Chang, X.L., Cheng, Y.G. and Ma, X., 2016. Assessment of the crest cracks of the Pubugou rockfill dam based on parameters back analysis. *Geomechanics & Engineering*, *11*(4), pp.571-585.https://doi.org/10.12989/.2016.11.4.571.