Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 349-352
DOI: 10.22060/ceej.2023.22162.7916

Effect of zeolite and cement additives on the mechanical behavior and dispersion characteristics of clay soil

S. Ghaffarpour Jahormi [1]* , M. Payan [2], Z. Amraee [1]

[1] Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.
[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

ABSTRACT: Due to their weak characteristics and low strength properties, dispersive soils can cause great damages to various geo-structures. Therefore, geotechnical engineers have attempted to modify and stabilize these soils in different ways. Although chemical stabilization with cement or lime is the most common method to improve the dispersion and swelling features of problematic soils, various environmental issues such as the emission of greenhouse gases for the production of cement or lime have made engineers replace them with sustainable and eco-friendly stabilizers. In this paper, the effect of replacing a part of cement with zeolite (as an environmentally-friendly additive) to stabilize a type of clay and modify its dispersion potential has been evaluated. The results of this study showed that by replacing a part of cement with zeolite, the maximum dry density increases and the optimum moisture content decreases; the trends which are different compared to the conventional cement stabilization. Also, the behavior of the sample in the unconfined compressive test was observed to be highly influenced by the percentage of replacement of cement with zeolite. The results of the double hydrometer test also showed that the combination of cement and zeolite reduces the potential of soil dispersion. It was also observed in the sedimentation experiments that with the increase in the zeolite portion, the sedimentation rate increases, which can be justified by the decrease in the thickness of the diffuse double layer (DDL) of clay and confirms the decrease in the dispersion potential. SEM microstructural analysis also indicated the formation of hydrated calcium silicate gel in the mixture, which improved the mechanical and strength characteristics and reduced the dispersion potential of clay soil.

Review History:

Received: Feb. 04, 2023
Revised: May, 03, 2023
Accepted: Jun, 17, 2023
Available Online: Aug. 08, 2023

Keywords:

Chemical Stabilization
dispersion potential
zeolite
cement
clay

1- Introduction

Soils that easily and quickly separate and disperse when exposed to low salt water known as divergent soils. These soils usually contain sodium cations and have high surface absorption. Divergent soils generally have high shrinkage and swelling potential, low permeability, and high erosion potential.

Adding cement and lime to clay by changing the Atterberg limits, reduces swelling and shrinkage, changes the surface texture, and increases the shear strength as well as the durability of the soil [1]. The main components of cement include calcium oxide (CaO), silicon oxide (SiO_2), iron oxide (Fe_2O_3), and aluminum oxide (Al_2O_3), In proper processing conditions, the phenomenon of cementation and growth of compressive strength occurs [2]. Chemical reactions between cement and water compounds, which are called hydration, by producing calcium silicate hydrate (C-S-H) gel, improve the properties of the soil mixture [3]. On the other hand, zeolite has large amounts of aluminum, silicon, and oxygen, which loses its water with heat, and it, can predicted that the alkaline compounds of the soil will have a reaction and a suitable replacement with zeolite and cement [4].

By adding zeolite and cement to the swelling clay, Turkoz and Vural colleagues found that by adding 3% of cement and zeolite between 6 and 10% of the dry weight of the soil, the swelling potential as well as the divergence of the soil decreased significantly and the uniaxial compressive strength increased [5]. Iswarya and Beulah showed that zeolite due to its high porosity, can reduce the density of the mixture and increase the time setting of cement [6]. Kriptavičius et al. showed that zeolite is effective in controlling destructive expansion and swelling caused by the silicate-alkaline reaction of aggregates [7]. Soil divergence is a physicochemical process that is mainly influenced by mineral substances and the chemical properties of water in soil holes [8]. Savas investigated the effect of two percentages of lime by replacing different percentages of zeolite on the swelling and divergence potential of clay. The results of the research showed that by adding these additives, a significant improvement in the swelling and divergence potential of the stabilized samples was achieved [9].

*Corresponding author's email: Saeed_ghf@sru.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

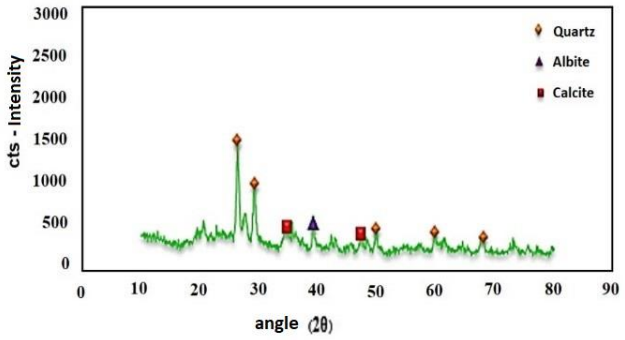


Fig. 1. X-ray diffraction graph of clay

Table 1. Chemical Compositions of clay, cement and zeolite

Chemical compounds	Zeolite	cement	Clay
LOI	6.89	24	12.11
P_2O_5	0.052	0.329	0.239
TiO_2	0.015	0.162	0.664
MnO	0.188	0.086	0.114
MgO	0.56	2.437	3.8
K_2O	2.68	0.989	2.569
Na_2O	1.89	0.783	1.805
CaO	1.53	45.654	12.371
Fe_2O_3	1.29	1.918	5.387
Al_2O_3	11.63	3.646	11.803
SiO_2	72.98	19.031	49.062

The results of a study show that sodium cations are the main factor in the divergence process. Negatively charged sodium cations are in equilibrium on the clay particles, and the clay particles surrounded by these cations and increase the thickness of the double layers. Therefore, the repulsive forces between the clay particles exceed the attractive forces and this causes the soil to diverge [10].

Another research shows that pozzolan reactions between lime and clay particles increase soil resistance and reduce soil divergence [11]. The research of Mohanty et al. colleagues showed that it is possible to improve the characteristics of soil dispersion by adding 15% fly ash and 2% lime [12]. Zhu et al. showed that soil mineralogical composition and alkaline environment are important for the chemical stabilization of divergent soils on convertible cations [13].

2- Material

The soil investigated in this study is in the CL category based on the unified classification system, which was sampled from a mine in the Shahriar area of Tehran. This soil has low plasticity, and the X-ray diffraction diagram of the soil sample is available. The chemical composition of the soil using spectroscopic analysis (XRF) was determined.

Table 2. Mixing plan and weight ratio of materials (weight percentage)

The replacement ratio of zeolite with cement	Cement	Soil
0	0	100
0, 15, 30, 60	2.5	97.5
0, 15, 30, 60	5	95

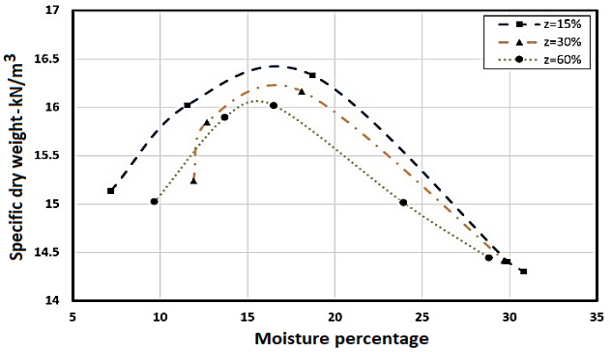


Fig. 2. Compaction curve of soil stabilized with 5% cement and different replacement ratios of zeolite

The cement used in this research is cement type 2 of Tehran Cement Factory. The used zeolite is Clinoptilolite zeolite with 98% purity and sampled from a mine in Semnan The chemical characteristics are reported in Table 1 are based on XRF analysis.

3- Making samples and testing program

In this research, first by conducting preliminary tests, the optimal soil moisture was determined by dry method. Since chemical stabilization with cement requires moisture, the amount of moisture needed in the soil-cement and soil-cement-zeolite mixture was added to the optimum moisture, proportional to the weight percentage of cement with a ratio of 50% (w/c=0.50).

Adding cement increases the optimal moisture content and decreases the maximum density. In the compaction test, due to the presence of false, initial, and final setting effects of cement during the test period, causes errors in the soil compaction process. Meanwhile, part of the moisture is involved in the chemical reaction of cement (about 25% of cement weight). Therefore, in this research, the optimal moisture percentage increased by half the weight of cement (the ratio of water to cement is about 50%).

Stabilization and mixing of materials done by the dry method, and the plan of weight ratios in mixture preparation and prototyping, including weight percentage of clay, percentage of cement, and percentage of zeolite, are reported in Table 2.

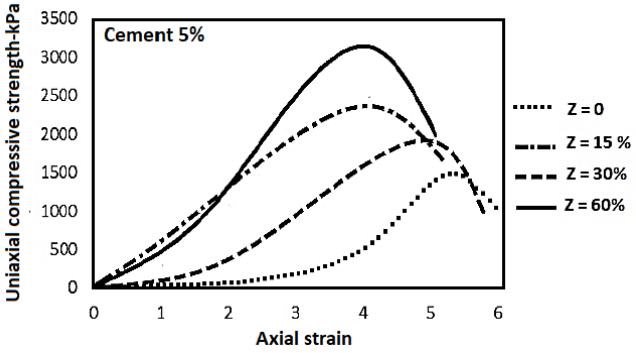


Fig. 3. Stress-strain behavior of clay-cement-zeolite mixtures after 7 days of curing

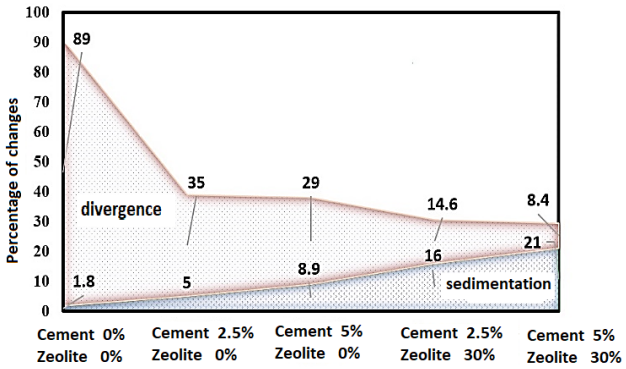


Fig. 4. Effect of sedimentation percentage on the reduction of dispersion potential

The tests carried out in this research included uniaxial compressive strength (to evaluate mechanical characteristics), standard Proctor (to determine optimal moisture and maximum density), double hydrometric, and sedimentation (to evaluate divergence), which was followed by the interpretation of electron microscope photos. (SEM), gel formation structure and chemical bonds were also investigated.

4- Discussion and interpretation of results

The results show that, in general, adding cement to the soil will increase the dry specific gravity and increase the optimum humidity. This behavior can be justified by considering the process of cementation and consolidation of the mixture along with the effect of the higher specific weight of cement compared to the base soil. The increase in optimum humidity also caused by the need of cement to absorb more water for hydration reactions and the homogeneous structure of the soil and cement mixture. The heat of hydration reaction is influential in this process (Figure 2).

The results of the uniaxial test on stabilized and unsterilized samples are given in Figure 3. These results show that the combination of cement and zeolite increases the strength of the sample, and the most suitable result was obtained in 5% cement with 30% zeolite replacement.

In samples stabilized with cement and zeolite up to 30%, the mechanism of lateral deformations of the sample was observed in the condition of rupture and failure (like a barrel); while increasing the amount of zeolite more than 30%, the appearance of several wide vertical cracks was observed with a decrease in lateral expansion.

The results of the double hydrometric test on the base soil and soil-cement-zeolite combination show that by adding 2.5% of cement to the base soil, the divergence potential of the soil decreases. Although this mixture failed to meet the "Sherrard" criterion for non-divergence, the decrease in the percentage of divergence is significant. It is worth mentioning that according to the "Bell" criterion, this soil has medium divergence. In addition, the results of this study show that replacing 30% of zeolite instead of cement in the mixture has reduced soil divergence, which classified as non-divergent soil based on both "Sherard" and "Bell" criteria. This change in failure mode confirms the downward trend of brittleness and reduction of failure strain of the sample with increasing percentage of zeolite replacement.

By sedimentation test to evaluate the potential of soil divergence, found that adding cement increases the percentage of sedimentation. Substitution of part of cement with zeolite shows that this replacement causes a further increase in sedimentation. This behavior can be attributed to the reduction of the thickness of the double layer of clay, which provides more reactive conditions. Chemical stabilization causes clay particles to approach each other and change their structural nature from dispersed to aggregated state. This issue will reduce the potential of divergence.

5- Summary and conclusion

- Chemical stabilization of clay with cement and cement-zeolite combination increases the density and decreases the optimal humidity, which is due to the high density of the additive compared to soil, as well as the need for water for chemical reactions.
- Chemical stabilization by cement or cement-zeolite combination will increase the uniaxial strength, reduce the fracture strain and change the behavior of the sample to a brittle state.
- Adding a small percentage of cement or cement-zeolite combination leads to the reduction of soil divergence potential in the double hydrometric test.
- By increasing the amount of cement and zeolite, the settling percentage of the mixture increases and then the divergence potential decreases by 90%.
- The results of the research showed that in chemical stabilization with cement at the rate of 5% by weight of the soil and replacing zeolite at the rate of 30%, the soil becomes non-divergent. The divergence index reduced by 90% based on standard criteria.
- Chemical stabilization of cement-zeolite with the formation of C-S-H gel reduces the volume of pores and cavities, and the soil particles take on a unified state, which results in the improvement of mechanical characteristics and also the reduction or elimination of divergence potential.

- Substituting 30% of zeolite causes the $Ca(OH)_2$ compound to form a pozzolan reaction with silica and alumina, and these compounds are used to produce C-S-H and C-A-H gels, and the result is improved mechanical properties.

-

References

[1] L. Bakaiyang, J. Madjadoumbaye, Y. Boussafir, F. Szymkiewicz and M. Duc, Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes, Case Studies in Construction Materials, 15, (2021) e00626.

[2] Chiu, (2016). Hydration of tricalcium silicate. Project No. PHASM201, University College London, London.

[3] M. S. Mamlouk and J. P. Zaniewski, Materials for civil and construction engineers, Upper Saddle River, NJ, USA (2006) Pearson Prentice Hall.

[4] Y. Kocak, E. Tascı and U. Kaya, The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements, Construction and Building Materials, 47 (2013) 720-727.

[5] M. Turkoz and P. Vural, The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils, Science and Engineering of Composite Materials, 20(4) (2013) 395-405.

[6] G. Iswarya and M. Beulah, Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete –A review, Materials Today: Proceedings, 46 (2021) 116-123.

[7] D. Kriptavičius, G. Girskas and G. Skripkiūnas, Use of Natural Zeolite and Glass Powder Mixture as Partial Replacement of Portland Cement: The Effect on Hydration, Properties and Porosity. Materials, 15(12) (2022) 4219.

[8] M. Shoaib, N. Cruz and E. R. Bobicki, Effect of pH-modifiers on the rheological behaviour of clay slurries: Difference between a swelling and non-swelling clay, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 643 (2022) 128699.

[9] H. Savas, Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite, Science and Engineering of Composite Materials, 23(6) (2016) 589-598.

[10] L. Wang and X. Song, Engineering geological characteristics and failures of dispersive clays in Northeast China, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(3) (2022) 1-18.

[11] H. Mola-Abasi, A. Khajeh and S. Naderi Semsani, Effect of the ratio between porosity and SiO2 and Al2O3 on tensile strength of zeolite-cemented sands, Journal of Materials in Civil Engineering, 30(4) (2018) 04018028.

[12] S. Mohanty, N. Roy, S. P. Singh and P. Sihag, Strength and durability of flyash, GGBS and cement clinker stabilized dispersive soil, Cold Regions Science and Technology, 191 (2021) 103358.

[13] Y. Zhu, A. Ali, A. Dang, A. P. Wandel and J. M. Bennett, Re-examining the flocculating power of sodium, potassium, magnesium and calcium for a broad range of soils, Geoderma, 352 (2019) 422-428.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Ghaffarpour Jahormi , M. Payan , Z. Amraee , Effect of zeolite and cement additives on the mechanical behavior and dispersion characteristics of clay soil, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 349-352.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22162.7916

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۸، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۶۴۵ تا ۱۶۶۰
DOI: 10.22060/ceej.2023.22162.7916

تاثیر افزودنی‌های زئولیت و سیمان بر رفتار مکانیکی و شاخص واگرایی خاک رسی

سعید غفارپور جهرمی[۱*]، مقداد پایان[۲]، زینب امرایی[۱]

۱-دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران ، ایران
۲-گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

خلاصه: خاک‌های واگرا عموما دارای پتانسیل بالای انقباض و تورم، نفوذپذیری کم و مقاومت اندک در برابر فرسایش بوده و لذا از نوع خاکهای مسئله دار شناخته می شوند. در این تحقیق تغییر در پتانسیل واگرایی به روش تثبیت شیمیایی با سیمان و جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت (به عنوان یک افزودنی دوستدار محیطزیست) در تثبیت نوعی خاک رس مورد ارزیابی قرار گرفته است چرا که استفاده از سیمان مشکلات زیست محیطی متعددی دارد. نتایج این بررسی نشان داد با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، حداکثر وزن مخصوص خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد که روند متفاوتی در مقایسه با تثبیت سیمانی است. همچنین رفتار نمونه در آزمایش تک محوری تحت تاثیر درصد جایگزینی سیمان با زئولیت است. نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف نیز نشان داد ترکیب ۵ ٪ سیمان و جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت پتانسیل واگرایی خاک را کاهش می‌دهد. همچنین در آزمایش‌های ته‌نشینی مشاهده شد با افزایش نسبت جایگزینی زئولیت، میزان ته‌نشینی افزایش می‌یابد که با کاهش ضخامت لایه دوگانه رس قابل توجیه است و کاهش پتانسیل واگرایی را تایید می‌نماید. آنالیزهای ریزساختاری SEM نیز بیانگر تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته در مخلوط بوده که باعث بهبود مشخصات مکانیکی و مقاومتی و کاهش پتانسیل واگرایی خاک رس متورم‌شونده شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

کلمات کلیدی:
تثبیت شیمیایی
واگرایی
سیمان
زئولیت
رس

۱- مقدمه

خاک‌هایی که در معرض آب کم نمک به سهولت و به سرعت جدا و پراکنده شوند، به عنوان خاک واگرا معرفی می‌شوند. این خاک‌ها معمولا همراه با کاتیون سدیم و دارای ضریب جذب سطحی بالا هستند. خاک‌های واگرا عموما دارای پتانسیل بالای انقباض و تورم، نفوذپذیری کم و مقاومت اندک در برابر فرسایش هستند. وجود برخی ترکیبات شیمیایی و املاح در خاک‌های ریزدانه رسی می‌تواند موجب پدیده واگرایی و خسارات و خرابی‌های مختلف شود؛ زیرا ذرات خاک تحت شرایط خاص متفرق و به سرعت با جریان آب شسته می‌شوند. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی وجود خاک رس به عنوان یک مشکل دیده می‌شود؛ چرا که جذب رطوبت بالا، تورم و تغییرات حجم، واگرایی، عدم زهکشی مناسب، مشکلات یخزدگی در سرما و غیره شرایط طراحی و بهره برداری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این راستا، مهندسین با استفاده از تکنیک‌های مختلف به دنبال بهبود خصوصیات رفتاری خاک بوده که در این میان تثبیت شیمیایی از روش‌های رایج، اقتصادی و مورد استقبال در اغلب پروژه‌ها می‌باشد. از جمله مواد شیمیایی مورد استفاده سیمان و آهک هستند که با واکنش شیمیایی مناسب باعث بهبود چشم‌گیری در کارایی، مشخصات فنی و مقاومت برشی خاک‌های رسی می‌شوند. افزودن این مواد به خاک منجر به کاهش خصوصیات خمیری، کاهش تورم و انقباض، تغییر بافت سطحی و افزایش مقاومت برشی و همچنین دوام خاک می‌گردد [۱]. ترکیبات اصلی سیمان شامل کلسیم اکسید (CaO)، سیلیسیوم اکسید (SiO_2)، آهن اکسید (Fe_2O_3) و آلومینیوم اکسید(Al_2O_3) هستند و با وجود این ترکیبات در شرایط عمل‌آوری مناسب، پدیده سیمانی شدن و کسب مقاومت اتفاق می افتد[۲]. واکنش‌های شیمیایی بین ترکیبات سیمان و آب که هیدراتاسیون نامیده می‌شود با تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C–S–H) ویژگی‌های مورد نظر مخلوط را منجر می شود[۳]. از طرف دیگر، زئولیت ماده‌ای است عمدتا دارای آلومینیوم، سیلیسیم و اکسیژن بوده و با حرارت، آب خود را از دست می‌دهد و با آنالیز ساختاری می‌توان پیش‌بینی کرد که ترکیبات قلیایی خاک بتوانند واکنش و جایگزینی مناسبی با زئولیت و سیمان داشته باشند[۴].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saeed_ghf@sru.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 فرمائید.

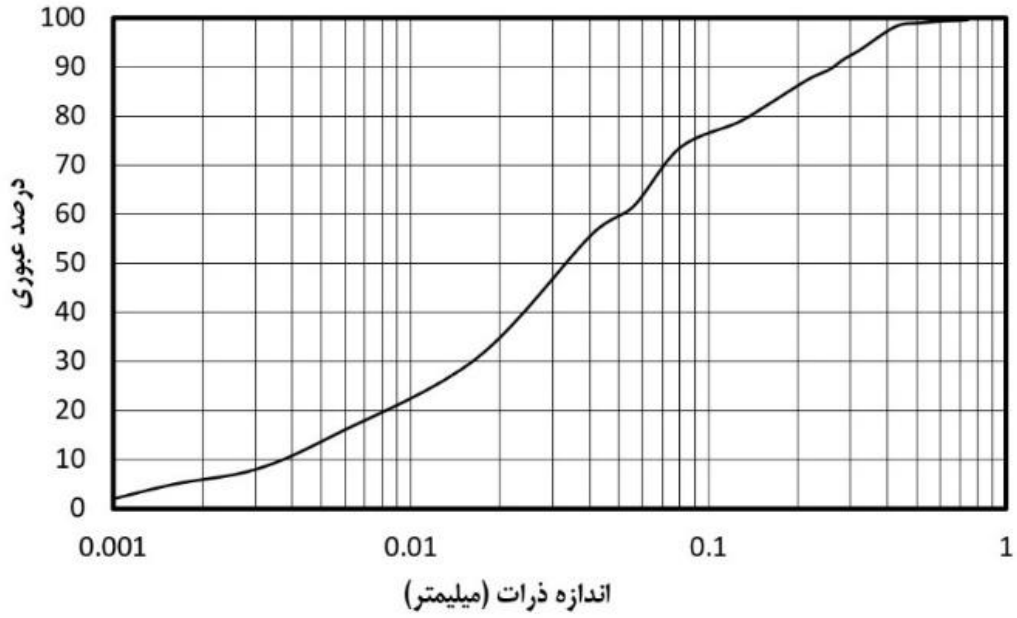
کوردنائیجی و همکارانش در تحقیقی اظهار داشتند که تعادل و موازنه ترکیبات SiO_2 و Al_2O_3 با CaO در مخلوط سیمان-زئولیت، باعث افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه ها شده است[۵]. جعفرپور و همکارانش اثر زئولیت بر ماسه سیمانی را مورد بررسی قرار دادند که نتایج انها نشان داد جایگزینی سیمان با زئولیت تا ۵۰ ٪ باعث بهبود رفتار نمونه در آزمایش سه محوری می‌گردد[۶]. ملاعباسی و همکارانش نشان دادند در مخلوط شن و ماسه با دانسیته پایین، زئولیت با مقدار سیمان بالا تأثیر محسوسی بر مقاومت دارد[۷]. همچنین در تحقیق دیگری، ملاعباسی و همکارانش نشان دادند با کاهش تخلخل خاک، افزایش قابل توجهی در استحکام و مقاومت مخلوط خاک و سیمان و زئولیت ایجاد خواهد شد؛ با این حال جایگزینی بیش از حد زئولیت با سیمان در مخلوط چنین روندی را کاهش می‌دهد[۸].

تورکوز و همکارانش با اضافه کردن ترکیبی از زئولیت و سیمان به خاک رس متورم شونده دریافتند که با افزودن ۳٪ سیمان و زئولیت بین ۶ تا ۱۰٪ وزن خشک خاک، پتانسیل تورمی و همچنین واگرایی خاک کاهش چشمگیری یافته و مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد[۹]. ایسواریا و همکارانش نشان دادند که زئولیت به دلیل تخلخل زیاد باعث کاهش چگالی مخلوط و افزایش زمان گیرش خمیر سیمان می‌شود[۱۰]. کریپتاویکوس و همکارانش در تحقیقی نشان دادند زئولیت در کنترل انبساط و تورم مخرب ناشی از واکنش سیلیکاتی قلیایی سنگدانه‌ها موثر است[۱۱]. واگرایی خاک یک فرآیند فیزیکی- شیمیایی است که عمدتا تحت تاثیر مواد معدنی و خصوصیات شیمیایی آب حفره‌ای خاک قرار دارد[۱۲]. ساواس تاثیر دو درصد آهک با درصد های مختلف جایگزینی زئولیت طبیعی را بر تحکیم، تورم و پتانسیل واگرایی خاک رسی مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد که با اضافه کردن این افزودنی ها بهبود قابل توجهی در پتانسیل تورم و واگرایی نمونه‌های تثبیت شده حاصل شد[۱۳]. نتایج یک بررسی نشان می‌دهد که کاتیون‌های سدیم عامل اصلی فرآیند واگرایی هستند. کاتیون‌های سدیم با بار منفی بر روی ذرات خاک رس در تعادل هستند و ذرات خاک رس، توسط این کاتیون‌های سدیم احاطه شده‌اند و ضخامت لایه‌های دوگانه را افزایش می‌دهند. بنابراین نیروهای دافعه بین ذرات خاک رس از نیروهای جاذبه تجاوز می‌کنند و این موضوع باعث واگرایی خاک می‌گردد[۱۴]. تحقیقات دیگری نشان می‌دهد واکنش‌های پوزولانی بین آهک و ذرات رس باعث افزایش مقاومت خاک و کاهش واگرایی خاک می‌شود[۱۵]. تحقیقات موهنتی و همکارانش نشان دادند که می‌توان خصوصیات واگرایی خاک را با افزودن ۱۵ ٪ خاکستر بادی و ۲ ٪ آهک بهبود داد[۱۶]. ژو و همکارانش نشان دادند ترکیبات کانی شناسی خاک و محیط قلیایی بر کاتین های قابل تبدیل جهت تثبیت شیمیایی خاکهای واگرا حائز اهمیت است[۱۷].

نتایج مطالعات فوق نشان می‌دهد تحقیقات بسیاری در حوزه تثبیت شیمیایی خاک رس با هدف بهبود خصوصیات تورمی، واگرایی و مقاومتی انجام شده است؛ با این حال، موضوع استفاده از پوزولان و جایگزینی مواد دوستدار محیط زیست کمتر مورد تحقیق قرار گرفته است. تولید سیمان به دلیل گازهای گلخانه ای مشکلات زیست محیطی متعددی دارد و لذا امروز استفاده از سیمانهای پوزولانی یا جایگزین سازی در ساخت و سازهای عمرانی جهت توسعه پایدار مورد تحقیق محققان بسیاری در کشورهای مختلف قرار گرفته است. جایگزینی زئولیت با بخشی از سیمان در افزایش مقاومت و کاهش پتانسل واگرایی در این مقاله مورد تحقیق قرار گرفته است. لذا در این پژوهش موضوع جایگزینی بخش از سیمان مصرفی با ژئولیت به عنوان نوعی پوزولان طبیعی جهت تثبیت شیمیایی خاک رس و با هدف کاهش اثرات زیست محیطی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است.

۲- مواد و مصالح

خاک مورد تحقیق در این مطالعه در رده CL بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد بوده که از معدنی در منطقه شهریار تهران نمونه‌برداری شده است. این خاک دارای پلاستیسیته پایین بوده که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۱ گزارش شده است. همچنین نمودار پراش پرتو X نمونه خاک نیز در شکل ۲ آمده است. ترکیب شیمیایی خاک با استفاده از آنالیز طیف سنجی فلوئورسانس پرتو X (XRF) در جدول ۲ نشان داده شده است. سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان تهران بوده که مشخصات شیمیایی آن با استفاده از آنالیز XRF در جدول ۲ آمده است. همچنین زئولیت مورد تحقیق از نوع زئولیت کلینوپتیلولیت با خلوص ۹۸ ٪ از معدنی در شهر سمنان نمونه‌برداری و استخراج شده که مشخصات شیمیایی آن بر اساس آنالیز XRF در جدول ۲ گزارش شده است.



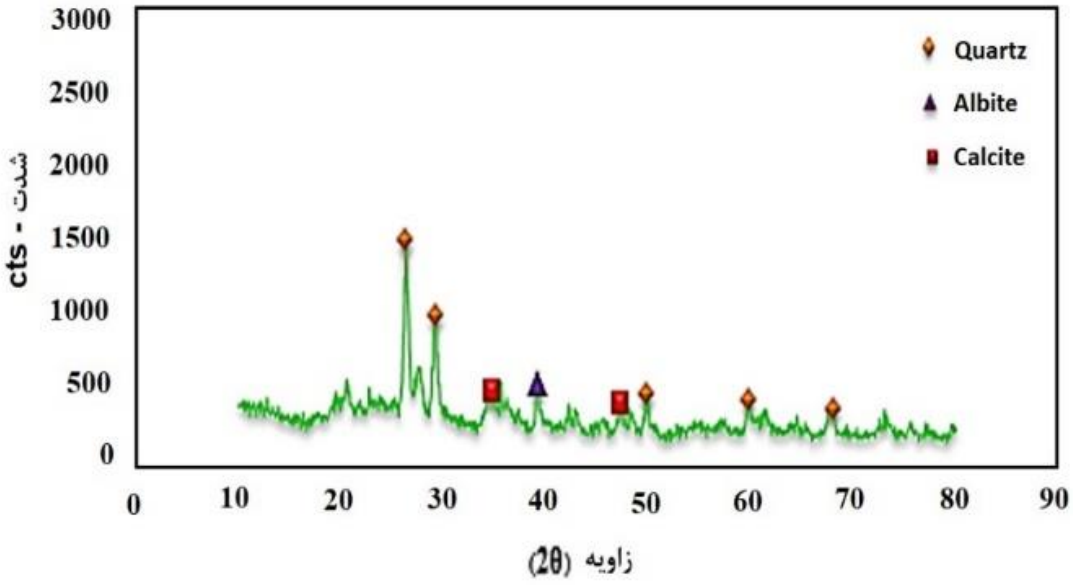
شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک پایه بر اساس آزمایش‌های دانه بندی و هیدرومتری

Fig. 1. Soil grain size distribution curve based on sieve analysis and hydrometric test

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و پلاستیسیته خاک مورد استفاده

Table 1. Physical characteristics and plasticity of clay

مشخصه	مقدار	استاندارد
چگالی دانه های جامد G_s	۲/۷۱	ASTM D854
حد روانی	۲۹٪/۱	ASTM D4318
حد خمیری	۲۱٪/۲	ASTM D4318
دامنه خمیری	۷٪/۹	ASTM D4318
وزن مخصوص خشک حداکثر	۱۷/۱ kN/m^3	ASTM D698
رطوبت بهینه	۲۰٪/۳۴	ASTM D698
نوع خاک در طبقه‌بندی یونیفاید	CL	ASTM D2487
عبوری از الک ۲۰۰- ریزدانه	۷۲٪	ASTM D2487



شکل ۲. گراف پراش پرتو X خاک رس

Fig. 2. X-ray diffraction graph of clay

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی رس، سیمان و زئولیت

Table 2. Chemical compositions of clay, cement and zeolite

ترکیب شیمیایی	رس	سیمان	زئولیت
LOI	12.11	24	6.89
P_2O_5	0.239	0.329	0.052
TiO_2	0.664	0.162	0.015
MnO	0.114	0.086	0.188
MgO	3.8	2.437	0.56
K_2O	2.569	0.989	2.68
Na_2O	1.805	0.783	1.89
CaO	12.371	45.654	1.53
Fe_2O_3	5.387	1.918	1.29
Al_2O_3	11.803	3.646	11.63
SiO_2	49.062	19.031	72.98

جدول ۳. طرح اختلاط و نسبت وزنی مواد و مصالح (درصد وزنی)

Table 3. Mixing plan and weight ratios of materials

مقدار خاک	سیمان	نسبت جایگزینی زئولیت با سیمان
٪ ۱۰۰	۰	۰
٪ ۹۷/۵	٪ ۲/۵	۰، ٪ ۱۵ ، ٪ ۳۰ ، ٪ ۶۰
٪ ۹۵	٪ ۵	۰، ٪ ۱۵ ، ٪ ۳۰ ، ٪ ۶۰

۳- نحوه نمونه‌سازی و برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق ابتدا با انجام آزمایشهای مقدماتی، رطوبت بهینه خاک به روش خشک تعیین شد. از آنجا که تثبیت شیمیایی با سیمان نیازمند رطوبت است، مقدار رطوبت موردنیاز در مخلوط خاک–سیمان و خاک–سیمان–زئولیت، متناسب با درصد وزنی سیمان با نسبت ۵۰ ٪ (W/C=۰/۵)، به رطوبت بهینه اضافه گردید. افزودن سیمان باعث افزایش رطوبت بهینه و گاها کاهش دانسیته حداکثر می شود. در آزمایش تراکم به دلیل وجود اثر گیرش کاذب، اولیه و نهایی سیمان در فرآیند تراکم خاک در طول مدت زمان آزمایش تراکم، این موضوع همواره ایجاد خطا می کند. ضمن اینکه بخشی از رطوبت درگیر واکنش شیمیایی سیمان می شود (حدود ۲۵ درصد وزن سیمان). لذا در این تحقیق درصد رطوبت بهینه به میزان نصف وزن سیمان افزایش داده شد (نسبت آب به سیمان حدود ۵۰ درصد). تثبیت و اختلاط مصالح به روش خشک بوده که طرح نسبت های وزنی در آماده سازی مخلوط و نمونه سازی شامل درصد وزنی خاک رس، درصد سیمان و درصد زئولیت در جدول ۳ گزارش شده است. لازم به توضیح است نسبت‌های جدول با استناد به برخی تحقیقات قبلی برای سیمان و زئولیت انتخاب شده‌اند.

آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق شامل مقاومت تک محوری (برای ارزیابی مشخصات مکانیکی)، تراکم استاندارد (تعیین رطوبت بهینه و دانسیته حداکثر)، هیدرومتری مضاعف و ته نشینی (جهت ارزیابی واگرایی) بوده است که در ادامه با تفسیر عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM)، ساختار تشکیل ژل و پیوندهای شیمیایی نیز مورد تحقیق قرار گرفت.

در ابتدای نمونه سازی و قبل از اختلاط، مواد و مصالح شامل خاک، سیمان و زئولیت پس از خشک کردن از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده تا نخاله و ناخالصی‌های درشت و احتمالی آن تفکیک شوند. آزمایش تراکم مبنای آزمایش پراکتور استاندارد مطابق استاندارد ASTM D698 از نوع استانداردB و آزمایش تک محوری به روش استاندارد ASTM D 2166 با نرخ کرنش ثابت یک میلیمتر بر دقیقه انجام شده است.

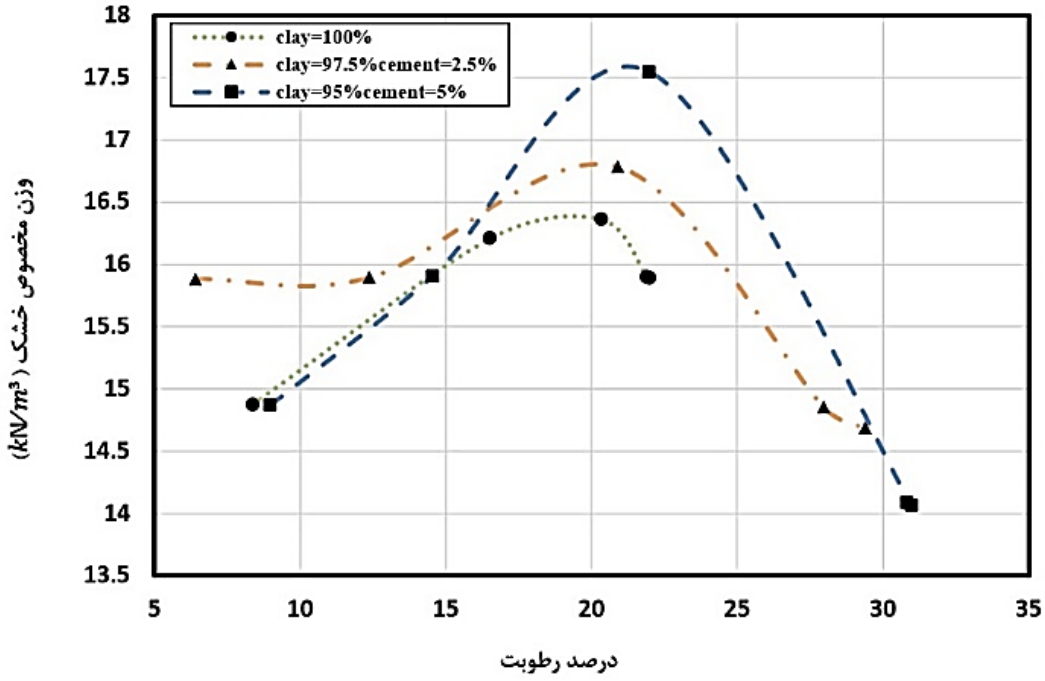
برای ارزیابی واگرایی خاک، روش‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی وجود دارد که رایج‌ترین آن‌ها آزمایش پین‌هول، کرامب و هیدرومتری مضاعف است. از آن‌جا که روش پین هول و کرامب نوعی ارزیابی‌های کیفی هستند، برای بررسی تاثیر کمی افزودنی بر واگرایی دارای محدودیت می‌باشند. لذا در این پژوهش از روش هیدرومتری مضاعف بر اساس استاندارد ASTM D4221 استفاده گردید.

لازم به توضیح است که یکی از اهداف اصلی این تحقیق ارزیابی تاثیر افزودنی شیمیایی بر تغییر شاخص واگرایی خاک مورد پژوهش در شرایط تثبیت شده و تثبیت نشده است. تفاوت بارز آزمایش هیدرومتری با هیدرومتری مضاعف در عدم استفاده از ماده پراکنش‌ساز (هگزا متافسفات سدیم) و همزن مکانیکی است.

همچنین برای درک بهتر نحوه جابجایی یون‌های تبادلی با کاتیون‌های موجود در مواد افزودنی، می‌توان از آزمایش ته‌نشینی بهره گرفت. به عبارتی تغییر در رفتار ته‌نشینی خاک رس می‌تواند ناشی از تغییرات در آرایش ذرات خاک رس باشد[۱۷]. لذا در این تحقیق از این روش نیز برای ارزیابی تاثیر افزودنی بر تغییر شاخص پتانسیل واگرایی استفاده گردید. برای این هدف مخلوط ناهمگن رس، رس– سیمان و رس– سیمان– زئولیت به نسبت ۱ به ۱۰ (خاک به آب) درون ظرف مدرج روی یک لرزاننده[1] افقی تا رسیدن به تعادل قرار گرفتند. پس از آن محلول به استوانه شیشه‌ای مدرج منتقل و برای آزمایش هیدرومتری استفاده شدند. با قرائت سطح مخلوط ناهمگن خاک در هر محلول در فواصل زمانی مختلف، درصد ته‌نشینی مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$SP = \frac{h_1 - h_2}{h_2} \qquad (۱)$$

1 Shaker



شکل ۳. منحنی تراکم خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف وزنی سیمان

Fig. 3. Compaction curve of stabilized soil with different weight percentages of cement

در این رابطه h_1 ارتفاع اولیه مخلوط ناهمگن و h_2 ارتفاع نهایی مخلوط ناهمگن می‌باشند.

همچنین به منظور بررسی ریزساختاری تثبیت و تشکل ژل سیمانی، عکس‌برداری از برخی نمونه‌ها شامل خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت شده با سیمان و خاک تثبیت شده با سیمان و زئولیت پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه SEM با بزرگ نمایی ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ انجام شدند.

۴- بحث و تفسیر نتایج

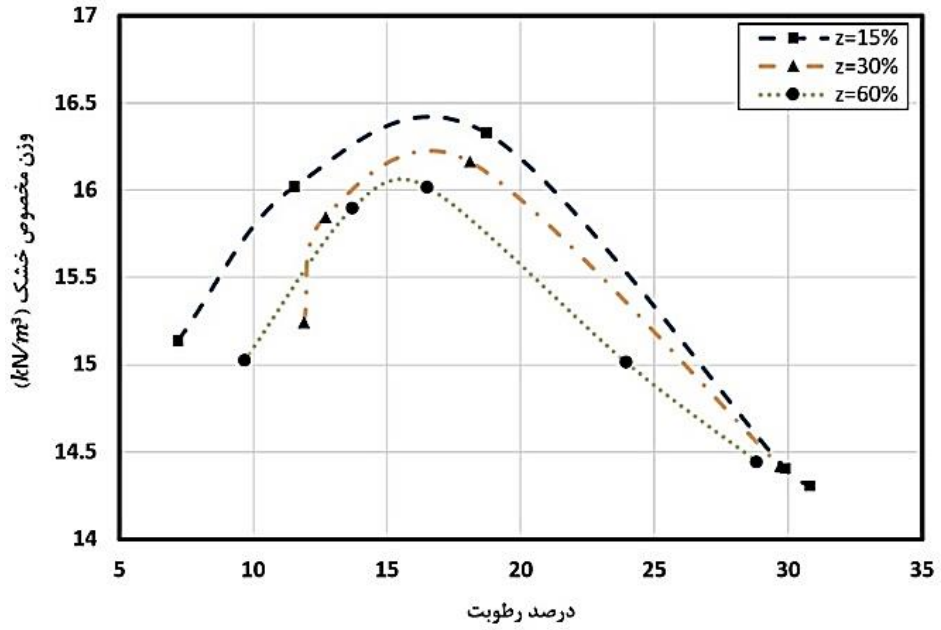
۴- ۱- آزمایش تراکم استاندارد

نتایج این تحقیق در شکل ۳ نشان می‌دهد به طورکلی افزودن سیمان به خاک باعث افزایش وزن مخصوص خشک و افزایش رطوبت بهینه خواهد شد. این رفتار با در نظر گرفتن فرآیند سیمانی شدن و تجمیع مخلوط همراه با تأثیر وزن مخصوص بالاتر سیمان نسبت به خاک پایه قابل توجیه است. افزایش رطوبت بهینه نیز ناشی از نیاز سیمان به جذب آب بیش‌تر به منظور واکنش‌های هیدراتاسیون و ساختار همگن مخلوط خاک و سیمان می‌باشد. گرمای واکنش هیدراتاسیون در این فرآیند تأثیرگذار است.

همچنین در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که جایگزینی زئولیت با سیمان باعث کاهش تدریجی در مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه مخلوط رس- سیمان- زئولیت می‌شود؛ به طوریکه این تاثیر با افزایش درصد زئولیت محسوس‌تر است. کاهش وزن مخصوص خشک می‌تواند ناشی از چگالی پایین زئولیت در مقایسه با سیمان باشد. کاهش رطوبت بهینه با افزایش جایگزینی زئولیت نیز با کاهش مقدار سیمان به عنوان عامل افزایش رطوبت بهینه ارتباط دارد. علاوه بر این، افزایش جایگزینی زئولیت منجر به افزایش توزیع اندازه ذرات در مخلوط شده که این امر می‌تواند در کاهش رطوبت بهینه نیز موثر باشد.

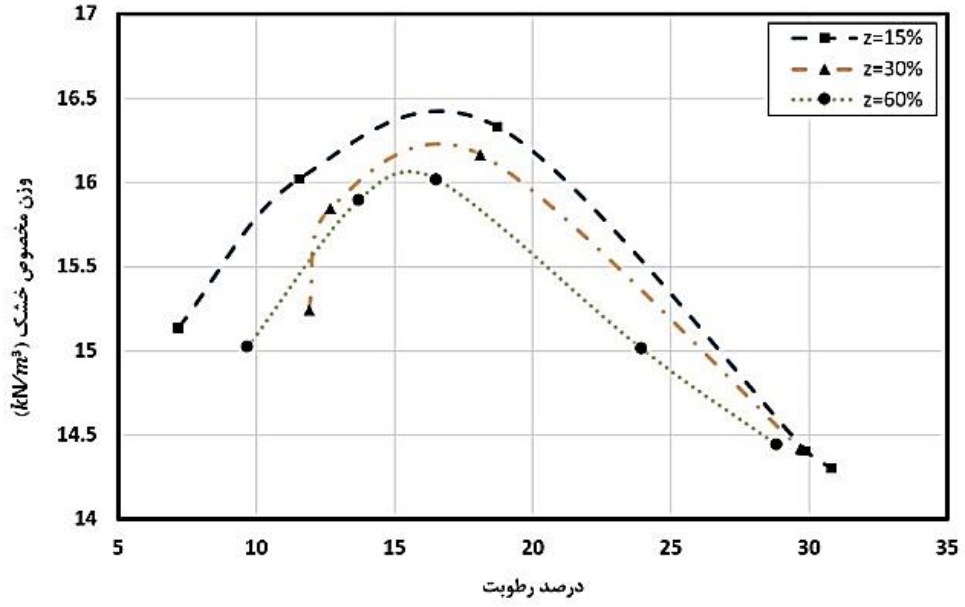
۴- ۲- آزمایش مقاومت تک محوری محصور نشده

نتایج آزمایش تک محوری روی نمونه‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده در شکل ۶ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند ترکیب سیمان و زئولیت باعث افزایش مقاومت نمونه می‌شود و مناسب‌ترین نتیجه در ۵ ٪ سیمان با جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت حاصل می‌شود. وجود ترکیب $Ca(OH)_2$، موجب واکنش با سیلیس و آلومینای موجود در زئولیت به صورت یک واکنش پوزولانی شده و به تولید ژل C-S-H و ژل C-A-H کمک می‌کند و در



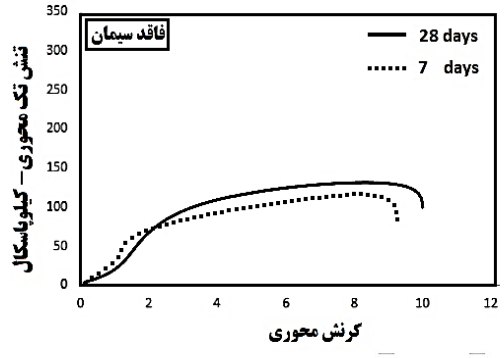
شکل ۴. منحنی تراکم خاک تثبیت شده با ۲/۵ ٪ سیمان و نسبت‌های جایگزینی مختلف زئولیت

Fig. 4. Compaction curve of soil stabilized with 2.5% cement and different replacement ratios of zeolite

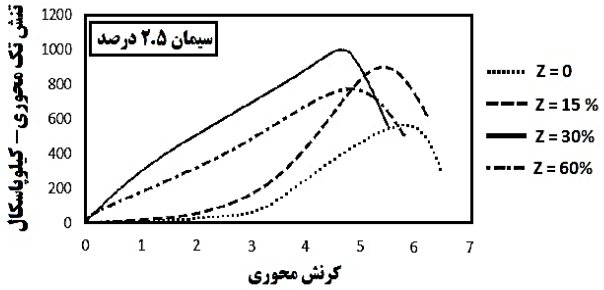


شکل ۵. منحنی تراکم خاک تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان و نسبت‌های جایگزینی مختلف زئولیت

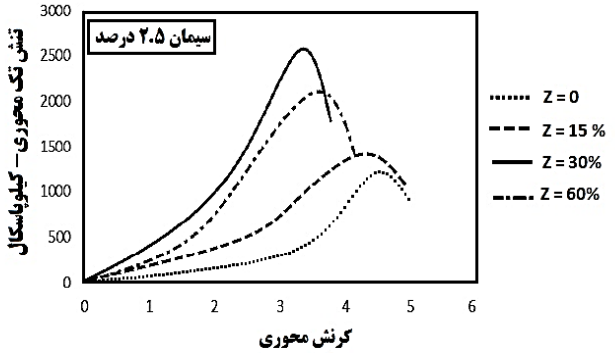
Fig. 5. Compaction curve of soil stabilized with 5% cement and different replacement ratios of zeolite



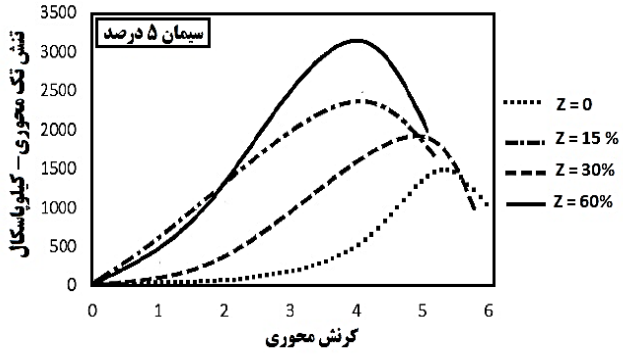
الف: رس تثبیت نشده تحت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه



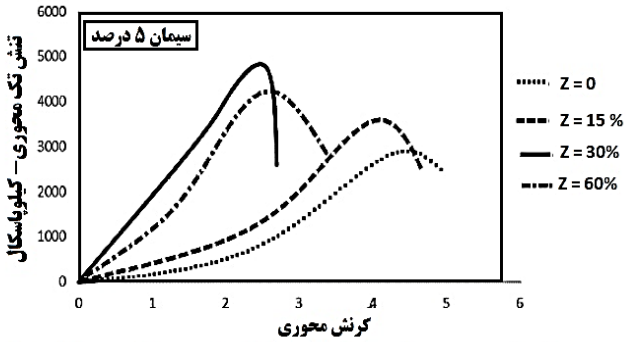
ب: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۲/۵ درصد- عمل‌آوری ۷ روزه)



ج: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۲/۵ درصد - عمل‌آوری ۲۸ روزه)



د: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۵ درصد - عمل‌آوری ۷ روزه)



و: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۵ درصد - عمل‌آوری ۲۸ روزه)

شکل ۶. نمودار رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها در آزمایش بارگذاری تک محوری

Fig. 6. Stress-strain behavior of samples in uniaxial loading test

نتیجه مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. با افزایش جایگزینی زئولیت بیش از ۳۰ ٪ مقاومت کاهش می‌یابد؛ زیرا مقدار $Ca(OH)_2$ کافی برای واکنش پوزولانی در دسترس نیست؛ لذا بخشی از مواد پوزولانی بدون واکنش و بی‌تأثیر باقی می‌مانند که این مساله توسط برخی محققین نیز گزارش شده است [۱۸].

همچنین نتایج این تحقیق نشان می دهد که در تثبیت شیمیایی با سیمان، رفتار نمونه ترد و شکننده و کرنش شکست کوچک است؛ اما با جایگزین شدن زئولیت (۳۰ ٪)، کرنش شکست افزایش یافته و رفتار نمونه از حالت شکست ترد دور می شود. از طرف دیگر، در نمونه های تثبیت

جدول ۴. تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری مضاعف بر اساس معیار شرارد[۱۹]

Table 4. Dispersion potential in the double hydrometer test based on Sherrard criterion [19]

پتانسیل واگرایی خاک	واگرایی
غیر واگرا	٪۱۵ ≥
متوسط	٪ ۱۵ - ٪ ۳۵
واگرا	٪۳۵ ≤

جدول ۵. تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری مضاعف بر اساس معیار بل[۲۰]

Table 5. Dispersion potential in the double hydrometer test based on the Bell criterion [20]

پتانسیل واگرایی خاک	واگرایی
غیر واگرا	٪۱۵ ≥
واگرایی ناچیز	٪۱۵ - ٪۳۰
واگرایی ملایم	٪ ۳۰ - ٪ ۵۰
واگرایی شدید	٪۵۰ ≤

جدول ۶. نتایج حاصل از آزمایش هیدرومتری مضاعف

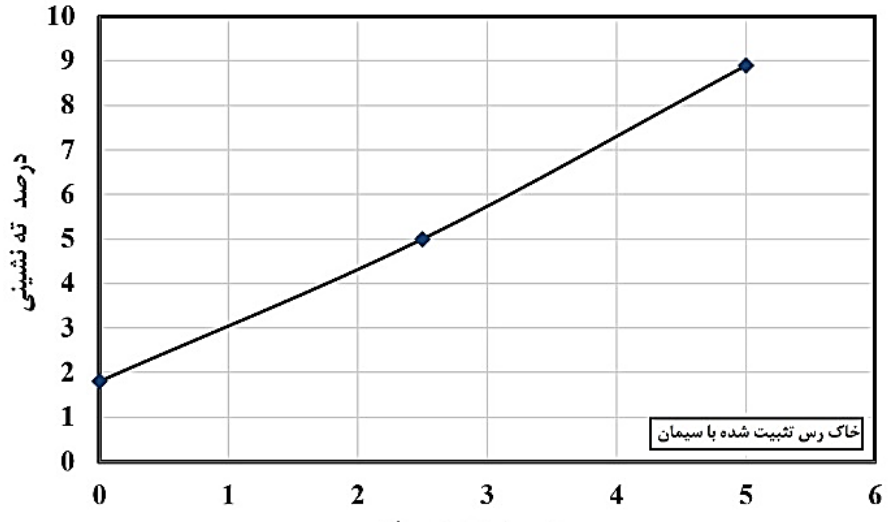
Table 6. Results of the double hydrometer tests

نسبت وزنی خاک	نسبت وزنی سیمان	نسبت جایگزینی زئولیت با سیمان	پتانسیل واگرایی	واگرایی(٪)
۱۰۰	۰	۰	شدید	۸۹
۹۷/۵	۲/۵	۰	متوسط	۳۵
۹۷/۵	۲/۵	۳۰	غیر واگرا	۱۴/۶
۹۵	۵	۰	ناچیز	۲۹
۹۵	۵	۳۰	غیر واگرا	۸/۴

شده با سیمان و زئولیت تا ۳۰ ٪، مکانیزم تغییرشکل‌های جانبی نمونه در شرایط گسیختگی و شکست (بشکه‌ای شدن) مشاهده شد؛ در حالیکه با افزایش میزان زئولیت بیش از ۳۰ ٪ ظهور چندین ترک عمودی گسترده با کاهش انبساط جانبی مشاهده گردید. این تغییر در حالت خرابی، روند نزولی شکنندگی و کاهش کرنش شکست نمونه با افزایش درصد جایگزینی زئولیت را تأیید می‌نماید.

۴- ۳- آزمایش هیدرومتری مضاعف

ارزیابی پتانسیل واگرایی بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف بر طبق معیار «شرارد» در جدول ۴ و بر طبق معیار «بل» در جدول ۵ آمده است[۱۹ و۲۰]. همچنین نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف روی خاک پایه و ترکیب خاک- سیمان- زئولیت در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۷. تاثیر درصد وزنی سیمان در آزمایش ته‌نشینی خاک رس

Fig. 7. Effect of weight percentage of cement on the result of clay sedimentation test

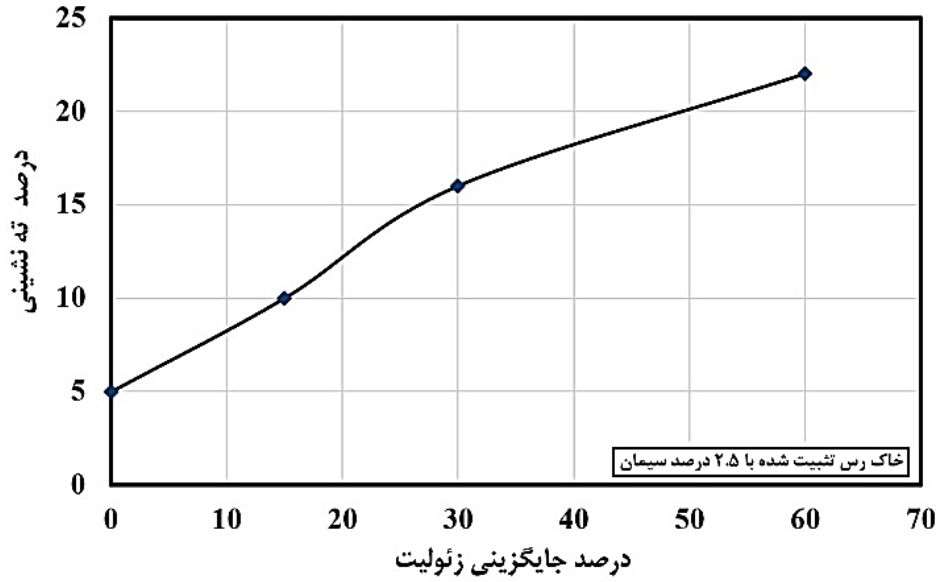
نتایج این بررسی نشان می‌دهد با افزودن ۲/۵ درصد سیمان به خاک پایه، پتانسیل واگرایی خاک کاهش می‌یابد. با وجود اینکه این مخلوط نتواسته معیار «شرارد» را برای غیرواگرا شدن تامین نماید، اما کاهش درصد واگرایی قابل‌توجه است. شایان ذکر است بر اساس معیار «بل» این خاک دارای واگرایی متوسط است. همچنین نتایج این بررسی نشان می‌دهد جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت به جای سیمان در مخلوط سبب کاهش واگرایی خاک شده که بر اساس هر دو معیار «شرارد» و «بل» در زمره خاک‌های غیرواگرا قرار می‌گیرد.

با افزایش سیمان از ۲/۵ ٪ به ۵ ٪، کاهش نسبی ۶ درصدی در واگرایی مشاهده می‌شود؛ اما با جایگزینی زئولیت تا ۳۰ ٪ سیمان، بیش‌ترین کاهش در پتانسیل واگرایی اتفاق می‌افتد. درصد واگرایی در این حالت ۸/۴ ٪ اندازه‌گیری شد که مطابق با معیار «شرارد» و «بل»، این خاک در زمره خاک‌های غیرواگرا قرار می‌گیرد.

افزودن سیمان با واکنش شیمیایی موجب تشکیل ژل سیمان بین دانه‌های خاک شده و بافت پیوسته‌ای بین ذرات به وجود می‌آورد. این واکنش با ایجاد پیوستگی مناسب بین ذرات، منجر به کاهش خصوصیات خمیری و افزایش مقاومت برشی می‌شود؛ چرا که جایگزینی یون‌های کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان و واکنش با سدیم موجود در خاک واگرا اتفاق افتاده است. از سوی دیگر، زئولیت از واکنش با بخشی از کانی‌های رسی، آن‌ها را از حالت ورقه‌ای خارج ساخته و سبب کلوخه‌ای شدن ذرات رس می‌گردد؛ زیرا با وجود سیمان واکنش پوزولانی در نمونه رخ داده است. در این شرایط در خاک‌های واگرا بخشی از یون‌های کلسیم حاصل از واکنش‌های پوزولانی جایگزین یون‌های سدیم موجود در خاک واگرا می‌گردند. با کاهش سطح ویژه ایجاد شده در ذرات، جذب آب ذرات رس نیز کاهش یافته و کاهش خصوصیات خمیری و افزایش سختی نمونه را به همراه خواهد داشت که این امر منجر به کاهش پتانسیل واگرایی شده است.

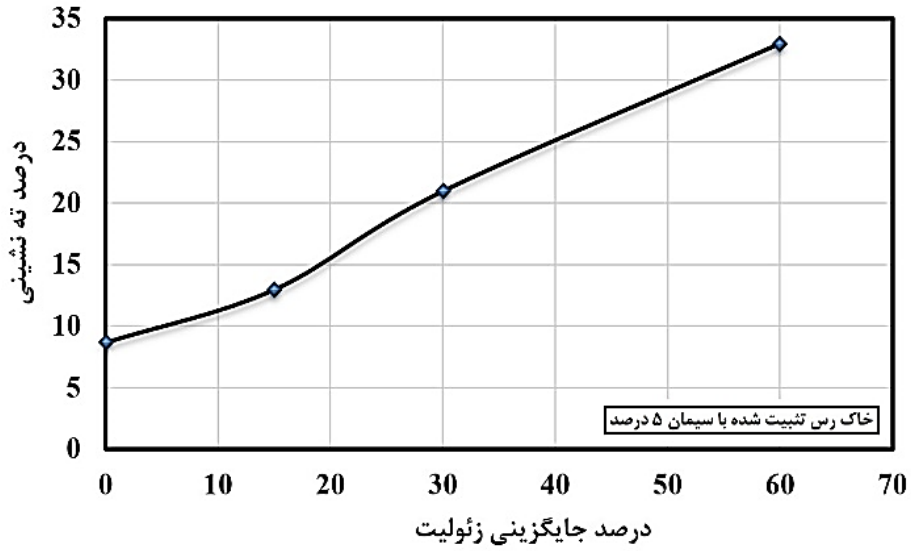
۴- ۴- آزمایش ته‌نشینی

تحقیقات بسیاری نشان می‌دهد که تغییر در رفتار ته‌نشینی خاک رس را می‌توان به تغییرات در آرایش ذرات آن نسبت داد[۱۷]. لذا می‌توان با انجام آزمایش ته نشینی نیز پتانسیل واگرایی خاکها را ارزیابی کرد. شکل ۷ بیانگر درصد ته‌نشینی خاک مورد مطالعه در مقادیر متفاوت سیمان است که نشان می‌دهد افزودن سیمان باعث افزایش درصد ته نشینی می‌شود. همچنین شکل‌های ۸ و ۹ بیانگر جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت هستند که نشان می دهند این جایگزینی موجب افزایش بیشتر ته‌نشینی می‌گردد. این رفتار را می‌توان به کاهش ضخامت لایه مضاعف رس نسبت داد که شرایط واکنش‌پذیری بیشتری را فراهم می‌کند. تثبیت شیمیایی موجب می‌شود ذرات رس به یکدیگر نزدیک شده و از حالت پراکنده به حالت تجمعی تغییر ماهیت ساختاری پیدا کنند. همین موضوع کاهش پتانسیل واگرایی را به دنبال خواهد داشت. در حضور مقدار کمی یون سدیم، ذرات خاک آب‌دار



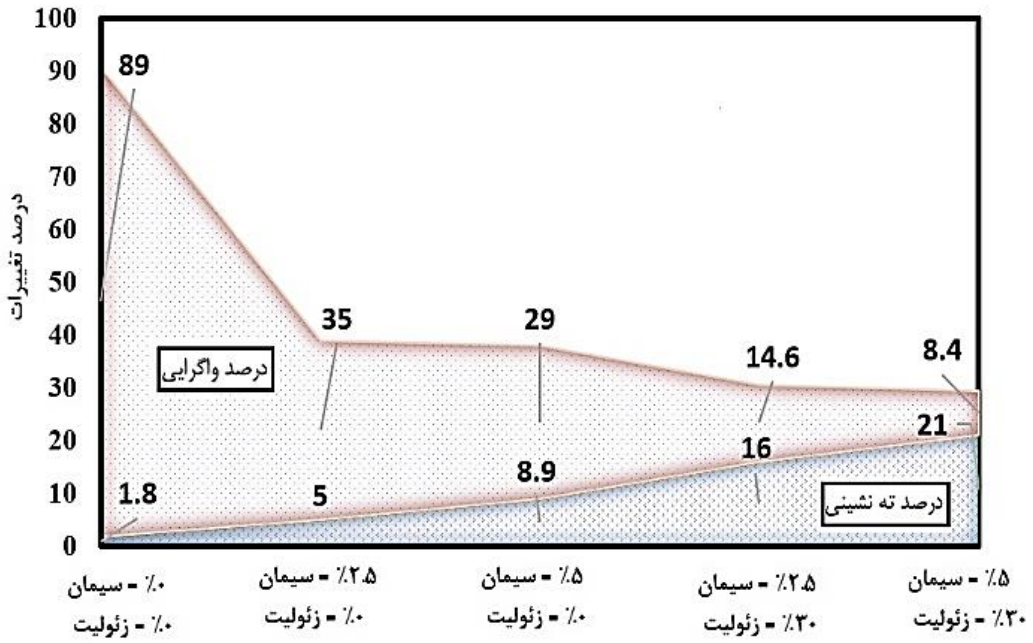
شکل ۸. تاثیر درصد جایگزینی زئولیت با سیمان در آزمایش ته‌نشینی خاک رس تثبیت شده با ۲/۵ ٪ سیمان

Fig. 8. Effect of replacing zeolite with cement on the result of sedimentation test on clay stabilized with 2.5% cement



شکل ۹. تاثیر درصد جایگزینی زئولیت با سیمان در آزمون ته‌نشینی خاک رس تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان

Fig. 9. Effect of replacing zeolite with cement on the result of sedimentation test on clay stabilized with 5% cement



شکل ۱۰. مقایسه تاثیر درصد ته‌نشینی بر کاهش پتانسیل واگرایی

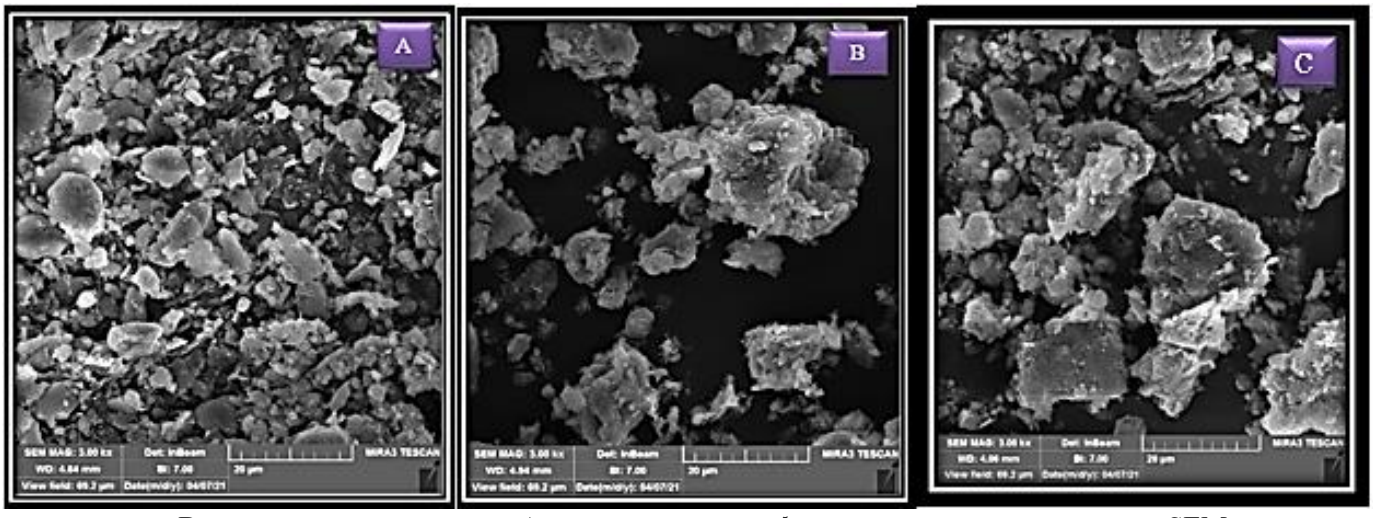
Fig. 10. Effect of sedimentation percentage on the reduction of dispersion potential

شده و در نتیجه پتانسیل واگرایی افزایش می‌یابد؛ در حالی که وجود سیمان و زئولیت با جایگزینی بخشی از یون‌های سدیم در واکنش پوزولانی باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف شده و در نتیجه فاصله بین ذرات خاک رس را کاهش می‌دهند.

نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهند که با افزایش درصد ته‌نشینی ناشی از افزودن سیمان و زئولیت، پتانسیل واگرایی خاک کاهش می‌یابد. سیمان پیوستگی مناسبی بین ذرات رس ایجاد می‌کند و زئولیت موجب تجمیع بافتی و کاهش سطح ویژه می‌گردد. این فرآیند ضمن افزایش سختی و کاهش خصوصیات خمیری، با جایگزینی یون کلسیم و آلومینیوم با یون سدیم و پتاسیم موجود در خاک، کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی را موجب می‌شوند.

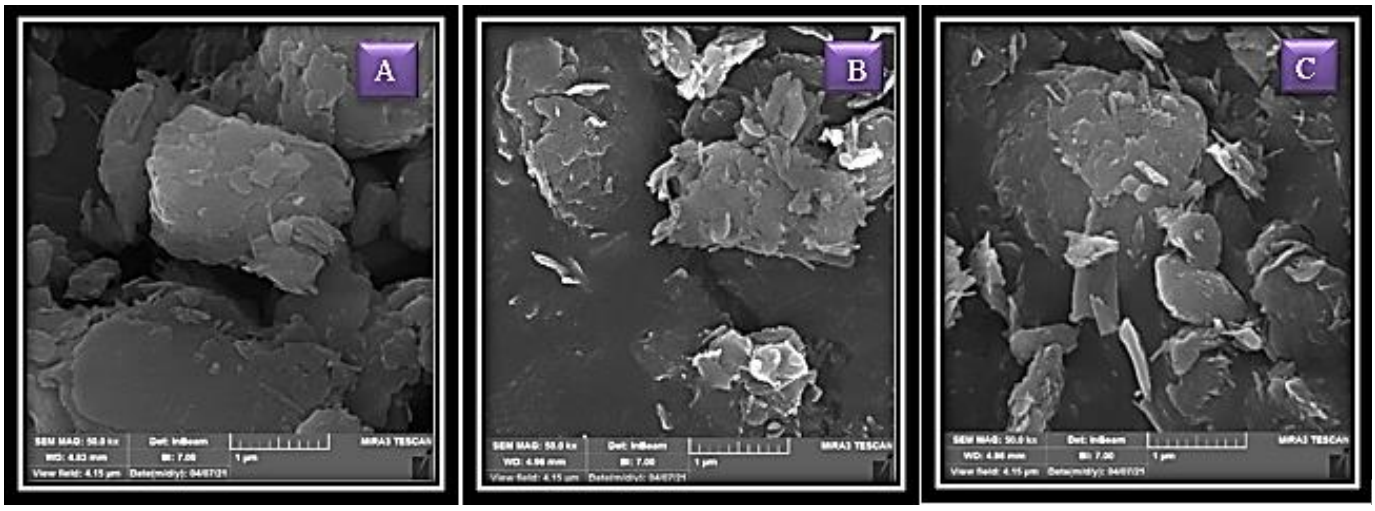
۴- ۵- آزمایش‌های ریزساختاری (SEM)

در این پژوهش، به منظور بررسی واکنش‌های پوزولانی در تثبیت شیمیایی و توجیه نتایج حاصل، از تفسیر عکس میکروسکوپ الکترنی (SEM) استفاده شده است. این تصاویر با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر در شکل ۱۱ و با بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ برابر در شکل ۱۲ به تفکیک برای نمونه تثبیت نشده، تثبیت‌شده با ۵ ٪ سیمان و تثبیت‌شده با ۵ ٪ سیمان- جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، ساختار خاک نمونه تثبیت نشده، پیوسته و منسجم مشاهده نمی‌شود. در خاک تثبیت‌شده با سیمان، ذرات خاک منسجم و در نمونه تثبیت‌شده با سیمان- زئولیت، ساختاری یکپارچه نسبت به حالات قبلی مشاهده می‌شود. این موضوع ناشی از واکنش‌های شیمیایی پوزولانی و تبادل یونی در واکنش سیمان - زئولیت و تولید ژل‌های کلسیم سیلیکات هیدراته می‌باشد. این واکنش‌ها باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و تبدیل ساختار خاک به یک وضعیت یکپارچه و پیوسته می‌شوند. اضافه شدن زئولیت منجر به کاهش تخلخل و بهبود خواص سطحی میکرو ذرات شده است. این موضوع با نتایج تحقیقات قبلی تطابق دارد؛ یعنی افزودن زئولیت با تغییر ساختار ناشی از واکنش پوزولانی، حجم حفرات را کاهش می‌دهد که این امر با عمل‌آوری مناسب پیشرفت دارد[۲۱]. سیمان با ایجاد پیوستگی مناسب ناشی از ژل سیمانی بین ذرات رس و زئولیت و تجمیع بافتی به کاهش سطح ویژه و افزایش سختی و کاهش خصوصیات خمیری خاک منجر می‌شود؛ زیرا با جایگزینی یون کلسیم و آلومینیوم سیمان با یون سدیم و پتاسیم خاک، کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی را نتیجه داده است. لذا این عملکرد با کاهش تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌های تثبیت شده و همچنین تولید ترکیبات شیمیایی نظیر C-S-H که منجر به افزایش مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده و کاهش پتانسیل واگرایی خاک شده، قابل توجیه است.



شکل ۱۱. تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر پس از ۲۸ روز عمل آوری، رس تثبیت نشده (نمونه A)، رس تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان (نمونه B) و رس تثبت شده با ۵ ٪ سیمان با ۳۰ ٪ جایگزینی زئولیت (نمونه C).

Fig. 11. SEM images with 3000 magnification after 28 days of curing: unstabilized clay (A), clay stabilized with 5% cement (B) and clay stabilized with 5% cement and 30% zeolite replacement (C)



شکل ۱۲. تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰۰ برابر پس از ۲۸ روز عمل آوری، رس تثبیت نشده (نمونه A)، رس تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان (نمونه B) و رس تثبت شده با ۵ ٪ سیمان با ۳۰ ٪ جایگزینی زئولیت (نمونه C)

Fig. 12. SEM images with a magnification of 50,000 after 28 days of curing: unstabilized clay (A), clay stabilized with 5% cement (B) and clay stabilized with 5% cement and 30% replacement of zeolite (C)

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، ارزیابی جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت در راستای تثبیت شیمیایی به منظور کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی نوعی خاک رس می‌باشد. در تثبیت شیمیایی خاک رس، درصدهای مختلف از سیمان با نسبت‌های مختلف زئولیت جایگزین و با ارزیابی آزمایشگاهی، تغییر در مقاومت و پتانسیل واگرایی مورد تحقیق قرار گرفت. خلاصه نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

به طور کلی تثبیت شیمیایی خاک رس با سیمان و ترکیب سیمان- زئولیت، باعث افزایش چگالی و کاهش رطوبت بهینه می‌شود که علت آن چگالی بالای افزودنی در مقایسه با خاک و همچنین نیاز آب جهت واکنش‌های شیمیایی است.

تثبیت شیمیایی توسط سیمان یا ترکیب سیمان- زئولیت باعث افزایش مقاومت تک محوری، کاهش کرنش شکست و تغییر رفتار نمونه به حالت ترد خواهد شد. افزودن درصد کمی سیمان یا ترکیب سیمان- زئولیت به نمونه، منجر به کاهش پتانسیل واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری مضاعف می‌گردد.

با افزایش مقدار سیمان و زئولیت جهت تثبیت شیمیایی، درصد ته‌نشینی مخلوط افزایش و به دنبال آن پتانسیل واگرایی را تا ۹۰ درصد کاهش می‌یابد.

نتایج این تحقیق نشان داد که در تثبیت شیمیایی ۵ ٪ وزنی خاک با سیمان، جایگزین کردن زئولیت به میزان ۳۰ ٪، می‌تواند خاک را غیرواگرا نماید. شاخص واگرایی بر اساس معیارهای استاندارد تا ۹۰ درصد کاهش یافت.

تثبیت شیمیایی سیمان- زئولیت با تشکیل ژل C–S–H موجب کاهش حجم منافذ و حفرات شده و ذرات خاک حالت یکپارچه به خود می‌گیرند که نتیجه آن بهبود مشخصات مکانیکی و همچنین کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی خواهد بود.

جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت موجب می‌شود ترکیب Ca(OH)۲ یک واکنش پوزولانی با سیلیس و آلومینای موجود در زئولیت شکل -گیرد و این ترکیبات برای تولید ژل‌های C–S–H و C–A–H مصرف می‌شوند و در نتیجه آن بهبود خواص مکانیکی ایجاد می‌شود.

منابع

[1] Bakaiyang, L., Madjadoumbaye, J., Boussafir, Y., Szymkiewicz, F., & Duc, M. (2021). Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes. Case Studies in Construction Materials, 15, e00626.

[2] Chiu, A. (2016). Hydration of tricalcium silicate. Project No. PHASM201, University College London, London.

[3] Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2006). Materials for civil and construction engineers. Upper Saddle River, NJ, USA:: Pearson Prentice Hall.

[4] Kocak, Y., Tascı, E., & Kaya, U. (2013). The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. Construction and Building Materials, 47, 720-727.

[5] Kordnaeij, A., Moayed, R. Z., & Soleimani, M. (2019). Unconfined compressive strength of loose sandy soils grouted with zeolite and cement. Soils and Foundations, 59(4), 905-919.

[6] Jafarpour, P., Moayed, R. Z., & Kordnaeij, A. (2020). Behavior of zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 12(1), 149-159.

[7] Mola-Abasi, H., Kordtabar, B., & Kordnaeij, A. (2016). Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand. Geotechnical and Geological Engineering, 34(5), 1539-1551.

[8] Mola-Abasi, H., & Shooshpasha, I. (2016). Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(5), 746-752.

[9] Turkoz, M., & Vural, P. (2013). The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils. Science and Engineering of Composite Materials, 20(4), 395-405.

[10] Iswarya, G., & Beulah, M. (2021). Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete–A review. Materials Today: Proceedings, 46, 116-123.

[11] Kriptavičius, D., Girskas, G., & Skripkiūnas, G. (2022). Use of Natural Zeolite and Glass Powder Mixture as Partial Replacement of Portland Cement: The Effect on Hydration, Properties and Porosity. Materials, 15(12), 4219.

[12] Shoaib, M., Cruz, N., & Bobicki, E. R. (2022). Effect of pH-modifiers on the rheological behaviour of clay slurries: Difference between a swelling and non-swelling clay. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 643, 128699.

[13] Savaş, H. (2016). Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite. Science and Engineering of Composite Materials, 23(6), 589-598.

[14] Wang, L., & Song, X. (2022). Engineering geological characteristics and failures of dispersive clays in Northeast China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(3), 1-18.

[15] Mola-Abasi, H., Khajeh, A., & Naderi Semsani, S. (2018). Effect of the ratio between porosity and SiO 2 and Al 2 O 3 on tensile strength of zeolite-cemented sands. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(4), 04018028.

[16] Mohanty, S., Roy, N., Singh, S. P., & Sihag, P. (2021). Strength and durability of flyash, GGBS and cement clinker stabilized dispersive soil. Cold Regions Science and Technology, 191, 103358.

[17] Zhu, Y., Ali, A., Dang, A., Wandel, A. P., & Bennett, J. M. (2019). Re-examining the flocculating power of sodium, potassium, magnesium and calcium for a broad range of soils. Geoderma, 352, 422-428.

[18] Salimi, M., Dordsheykhtorkamani, A., Afrasiabian, A., & Khajeh, A. (2021). Incorporation of volcanic ash for enhanced treatment of a cement-stabilized clayey soil. Journal of Materials in Civil Engineering, 33(2), 04020465.

[19] Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., & Decker, R. S. (1976). Identification and nature of dispersive soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102(4), 287-301.

[20] Bell, F. G., & Maud, R. R. (1994). Dispersive soils: a review from a South African perspective. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 27(3), 195-210.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Ghaffarpour Jahormi, M. Payan , Z. Amraee ,Effect of zeolite and cement additives on the mechanical behavior and dispersion characteristics of clay soil, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1645-1660.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22162.7916

این صفحه عمداً خالی است