



Stabilization of sandy soil with geopolymers based on nanomaterials and Taftan pozzolan

R. Baghban Shokatabad ¹, V. Toufigh ^{2*}, M.M. Toufigh ³

¹ M.Sc. Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

² Associate Professor, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

³ Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

ABSTRACT: In this study, geopolymers based on Taftan natural pozzolan and nanomaterials (nanoclay and nanosilica) were used to stabilize sandy soil. Various parameters such as type of nanomaterial, amount of nanomaterial, alkaline activator solution ratio and curing time were taken into account as the affecting factors on the behavior of stabilized specimens. The unconfined compressive strength (UCS) tests were performed to evaluate the effect of geopolymer and nanomaterials on sandy soil stabilization. Then, the X-ray diffraction and scanning electron microscopy were performed to verify the microstructure of the stabilized soil. The results showed that the addition of pozzolan and nanomaterials to soil and increasing the amount of alkaline solution caused an increase in the compressive strength of the soil. Additionally, the strength of geopolymer specimens increased with the addition of nanomaterials up to 2%, and subsequently due to the accumulation of nanomaterials decreased. The microstructural analysis indicates a strong reaction of chemical additives and the formation of aluminosilicate gel in geopolymer compounds, which itself increases the load-bearing capacity of the soil and stabilized. Based on this study, natural Taftan pozzolan and nanomaterials are appropriate and beneficial alternative materials in the stabilization of earth structures.

Review History:

Received: 2019-04-025

Revised: 2019-06-11

Accepted: 2019-06-16

Available Online: 2019-07-10

Keywords:

Soil stabilization

Geopolymer

Taftan pozzolan

Nanomaterials

Alkaline solution

1. INTRODUCTION

Many construction sites have soft and quite compressible soils, whose resistance to applied loads during construction or throughout their useful lifetime is not sufficient and experience failure or excessive settlement [1,2]. The durability and natural resistance of soil can be improved through the process of soil stabilization [3]. One of the most common methods for stabilizing and improving the mechanical properties of soils is the use of chemical stabilizers such as Portland cement. Today, Portland cement produces approximately 5-8 % of the carbon dioxide gas in the world. Approximately, 121 liters of fossil fuels and 111 kilowatt-hours of electricity are consumed per ton of cement on average. [4-6]. Additionally, a large percentage of the raw materials in cement manufacturing comes from the extraction of natural resources which has an adverse effect on the environment and increases the cost, time and energy consumption [5,6]. Hence, researchers are always searching for environmentally friendly replacements for cement.

Geopolymers have been considered to be a proper substitute for cement [7]. Geopolymers were initially developed by mixing geopolymer precursors with an alkaline activator. Geopolymer precursors include a wide range of low-cost aluminosilicate materials, even including such

*Corresponding author's email: vahiddavis@gmail.com

industrial waste as fly ash (class C and class F) and natural pozzolans. Alkaline activators include alkaline solutions of sodium silicate, potassium silicate, calcium carbide and sodium hydroxide [8]. The use of industrial waste as a progression for geopolymers has been evaluated by several geotechnical researchers [9]. Additionally, according to the McLellan report, the cost of geopolymers could be less than that of cement [10].

Furthermore, nanomaterials have been increasingly used in geopolymers with the development of nanotechnology. However, the research on the effects of nanomaterials is scarce on the properties of geopolymer in soil stabilization. In this study, Taftan pozzolan as an eco-friendly material and nanomaterial were used to stabilize weak soils. For this purpose, factors affecting the compressive strength of the stabilized soil were experimented and evaluated, which included the curing time, the amount of alkaline solution and application and amount of nanomaterials. Alkaline solution with two different ratios of 0.3 and 0.45 to the total pozzolan weight and nanomaterial (nanosilica or nanoclay) content of 1, 2, 3% of the total soil weight were examined to determine the optimum mix design. Scanning electron microscope (SEM) and X-ray Powder Diffraction (XRD) microstructure analyses were used to evaluate and interpret the results of the stabilized specimens.



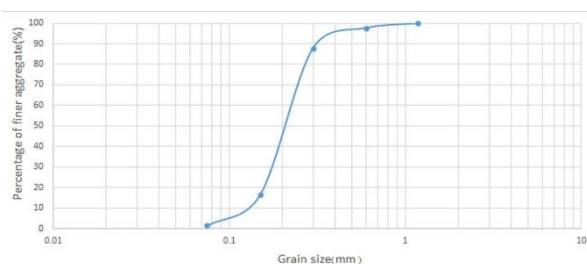


Fig. 1. The particle size distribution of the investigated soil.

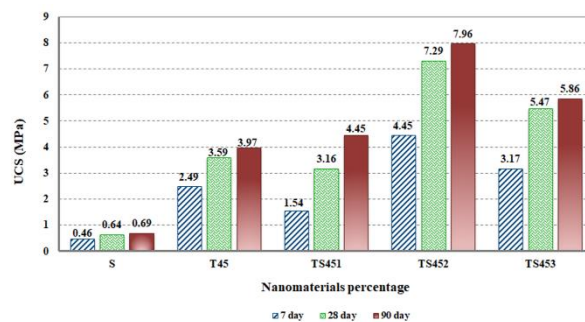


Fig. 2. Comparison of the effect of a different nanosilica percent on UCS of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.45.

Table 1. Chemical properties of Taftan pozzolan, nanoclay and nanosilica

Chemical Composition (%)	Taftan Pozzolan	Nanoclay	Nanosilica
SiO ₂	60.90	50.95	>99%
Al ₂ O ₃	18.45	19.6	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	84.45	70.55	>99%

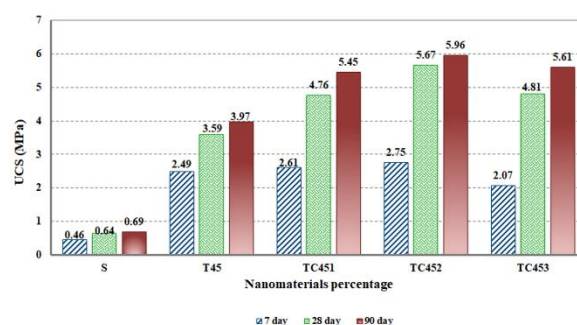


Fig. 3. Comparison of the effect of different nanoclay percent on UCS of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.45.

2-MATERIALS

2-1- Soil

Considering the particle size distribution (PSD), as shown in Figure 1, the soil is classified as poorly graded sand (SP). The optimum moisture content was determined 13 % after standard compaction test.

2-2- Natural Taftan pozzolan

Natural Taftan pozzolan collected from Taftan volcano district in Sistan and Baluchestan province, Iran as illustrated in Table 1.

2-3- Nanomaterials and Alkaline Activator

The nanomaterials used in this investigation has been nanoclay and nanosilica as presented in Table 1. The alkaline solution used in this study is a sodium hydroxide solution (NaOH).

3-METHODOLOGY

The water and the sodium hydroxide solution were weighed and the soil and pozzolan were then dry-mixed by hand until uniformity was reached. The amount of water in the sodium hydroxide solution was determined for each mixture. Then, the amount of water required to reach the optimum moisture for the soil was determined. A part of this water was used for making the alkaline solution, and the other part (extra water) was added to the homogeneous soil and pozzolan composition. The sodium hydroxide solution and nanomaterials were mixed slowly for eight minutes to obtain a homogeneous solution. Then, the solution was added to the initial mixture (homogeneous soil and pozzolan mixture) and mixed. The resulting mixture was poured into three layers of a mold, with each layer compacted four times with a standard

hammer, having a weight of 4 kg and a height of 30 cm.

The specimens were removed from the mold and treated in room temperature until they reached their desired treatment period (7, 28 and 90 days). Three specimens were made from each stabilized soil specimen. The specimens are classified into three general groups of Taftan pozzolan, soil and cement. They are divided group 1 (specimens containing Taftan pozzolan with an alkaline solution and pozzolan percentages of either 0.3 or 0.45, 1-3% of nanosilica or nanoclay, and specimens without nanomaterials (pozzolan only)), group 2 (pure soil) and group 3 (stabilized with cement percentage of 7% and 15% of soil weight).

4- RESULTS AND DISCUSSION

4-1- Mechanical properties

The compressive strength of specimens for different curing time is obtained as shown in Figures 2 and 3 for some groups 1 specimens. The compressive strength was increased for all specimens by an increase in curing time. However, the rate of increase was not constant over time and was more significant during the first 28 days. After 90-days treating, for different nanomaterial percentages and in cases of NaOH solution ratio of 0.3 or 0.45, the optimum percentage of nanomaterial was 2%

After 90-days treating, for different nanomaterial percentages and in cases of NaOH solution ratio of 0.3 or 0.45, the optimum percentage of nanomaterial was 2%. The 90-day

compressive strength of specimens stabilized with nanosilica higher than nanoclay specimens. According to the chemical properties of materials as stipulated in Table 1, nanosilica contains 99% silica, while nanoclay only contains 50.95% silica. Since silica is the main cause of strength in geopolymer products, the high strength of specimens with nanosilica can be justified [11]. The compressive strength of specimens with 0.3 alkaline solution was 10-20 % lower than that of the specimens with 0.45 alkaline solution. Comparison of cementitious and geopolymer specimens shows that the addition of nanomaterials, especially nanosilica to geopolymer specimens shows a significant increase in strength compared with cement stabilized specimens.

4-2-Microstructural analysis (XRD and SEM)

The XRD analysis showed that the severity of peaks in stabilized specimens with pozzolan and nanosilica (the optimum percentage) was decreased compared to pozzolan and pure soil specimens. The SEM analysis showed that the soil stabilized with pozzolan and nanosilica (the optimum percentage) had a more homogeneous structure, less porosity and more uniform surface than the other specimens confirming the obtained optimum mixture.

5- CONCLUSION

Natural pozzolans and nanomaterials are effective stabilizers for sandy soils with a brilliant increase in the compressive strength. For appropriate geo-polymerization and enhanced the mechanical behavior of stabilized soils the optimum amount of nanomaterial (in this study 2%) was necessary. The microstructural analyses (XRD and SEM) confirmed the formation of geopolymer and effectiveness of using pozzolan and nanomaterial to stabilizing soils.

REFERENCES

[1] L. Barden, G. Sides, Sample Disturbance in the Investigation of Clay Structure, *Géotechnique*.. doi:10.1680/geot.1971.21.3.211.

[2] Z. Zhang, M. Tao, Durability of Cement Stabilized Low Plasticity Soils, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 134 (2008) 203–213. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2008)134:2(203).

[3] O.S.B. Al-Amoudi, K. Khan, N.S. Al-Kahtani, Stabilization of a Saudi calcareous marl soil, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1848–1854. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.019.

[4] K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick, Innovation in use and research on cementitious material, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 128–136. doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.025.

[5] A.M. Mustafa, A. Bakri, O.A. Abdulkareem, A.R. Rafiza, Y. Zarina, M.N. Norazian, H. Kamarudin, Review on Processing of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete, *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 7 (2013) 342–349.

[6] A. Islam, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, I.I. Bashar, S.M.A. Kabir, Engineering properties and carbon footprint of ground granulated blast-furnace slag-palm oil fuel ash-based structural geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 503–521. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.026.

[7] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1468–1478. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017.

[8] J. L. Provis and J. S. J. Van Deventer, *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. 2009: Elsevier, DOI: 10.1680/jadcr.17.00170.

[9] P. De Silva and K. Sagoe-Crenstil, The effect of Al₂O₃ and SiO₂ on setting and hardening of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O geopolymer systems. *J Aust Ceram Soc.* 2008. 44(1): p. 39-46, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.003>.

[10] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, and G. D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of cleaner production*, 2011. 19(9-10): p. 1080-1090, DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.02.010.

[11] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, Medium-term phase stability of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O geopolymer systems, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 870–876. doi:10.1016/j.cemconres.2007.10.003.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Baghban Shokatabad, V. Toufigh, M.M. Toufigh, *Stabilization of sandy soil with geopolymers based on nanomaterials and Taftan pozzolan*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(9) (2020) 579-582.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16205.6155](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16205.6155)





تثبیت خاک ماسه ای با ژئوپلیمر بر پایه نانو مواد و پوزولان تفتان

ریحانه باغبان شوکت آباد^۱، وحید توفیق^{۲*}، محمدمحسن توفیق^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
^۳ استاد، دانشکده فنی، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۰۵
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۲۱
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۱۹

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک
ژئوپلیمر
پوزولان تفتان
نانومواد
محلول قلیایی

خلاصه: امروزه سیمان به عنوان پرمصرف ترین و رایج ترین تثبیت کننده خاک، مورد استفاده قرار گرفته است. ولی با توجه به آثار نامطلوب زیست محیطی سیمان، ضرورت استفاده از ژئوپلیمرها بدلیل جنبه های مطلوب زیست محیطی به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان حائز اهمیت می باشد. در این مطالعه از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی تفتان و نانومواد که شامل نانوسیلیس و نانورس می باشد، برای تثبیت خاک ماسه ای استفاده شده است. پارامترهای مختلف مانند نوع نانومواد، مقدار نانومواد، نسبت محلول فعال کننده قلیایی و زمان عمل آوری به عنوان عوامل موثر بر رفتار نمونه های تثبیت شده مورد توجه قرار گرفت. برای ارزیابی تاثیر ژئوپلیمر و نانومواد بر رفتار مکانیکی نمونه ها، آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده و مقاومت کششی که معیار اصلی مقایسه نمونه ها بوده اند، انجام شده است. از طرفی تحلیل XRD و SEM جهت بررسی ریزساختاری خاک تثبیت شده، انجام گرفت. نتایج نشان می دهد که ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی و نانومواد، جایگزین مناسبی برای مواد سیمانی در تثبیت خاک هستند، به طوری که افزودن پوزولان و نانومواد به خاک باعث افزایش مقاومت و بهبود رفتار مکانیکی نمونه ها می شود. از طرفی با افزایش میزان نانومواد (تا ۲ درصد) و محلول قلیایی، مقاومت فشاری و کششی نمونه ها افزایش می یابد. مقاومت های به دست آمده، با مقاومت نمونه های تثبیت شده با سیمان مورد مقایسه قرار گرفته شده است. همچنین نتایج تحلیل ریزساختاری نشان دهنده واکنش شدید افزودنی های شیمیایی و تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی در ترکیبات ژئوپلیمری است که خود باعث افزایش ظرفیت باربری خاک و تثبیت آن می شود.

۱- مقدمه

شیمیایی خاک، سیمان پرتلند است که مهندسی به دلیل معایب چشمگیر آن ها به دنبال جایگزینی مناسب برای این مواد هستند. امروزه سیمان پرتلند حدود ۸-۵٪ گاز کربن دی اکسید در دنیا را تولید می کند. از طرفی در فرآیند تولید هر تن سیمان، به طور متوسط ۱۲۱ لیتر سوخت فسیلی و ۱۱۱ کیلو وات ساعت برق مصرف می شود که بعد از فولاد و آلومینیوم بیشترین مصرف انرژی در فرآیند تولید را دارد. از دیگر سو، درصد زیادی از مواد اولیه سیمان از استخراج منابع طبیعی مانند سنگ گچ، آهک، سیلیس و ... بدست می آید که استخراج این مواد علاوه بر مصرف منابع طبیعی تجدیدناپذیر، هزینه، زمان و نیروی انسانی بر محیط زیست اثرات مخرب دارد [۷-۹]. از این

در بسیاری از سایت های مهندسی عمران، خاک های نرم و با مشخصات فنی نامطلوب وجود دارند که مقاومت آنها برای باربری سازه کافی نیست [۱، ۲]. دوام و مقاومت طبیعی خاک می تواند از طریق فرآیند تثبیت خاک با استفاده از انواع مختلف تثبیت کننده ها، بهبود یابد. تثبیت خاک های با ظرفیت باربری کم یک روش اقتصادی برای تقویت زمین برای ساختن اهداف عمرانی است [۳-۶]. یکی از روش های تثبیت و بهبود خواص مکانیکی خاک استفاده از تثبیت کننده های شیمیایی می باشد. یکی از سنتی ترین تثبیت کننده های

* نویسنده عهده دار مکاتبات: vahiddavis@gmail.com



عمران توسط چندین محقق ژئوتکنیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین بر اساس گزارش مک‌لن^۳ در سال ۲۰۱۱، هزینه ژئوپلیمرها نسبت به سیمان از لحاظ اقتصادی می‌تواند کمتر باشد [۲۵]. دیاز^۴ و همکاران دریافته‌اند که توزیع اندازه ذرات تاثیر قابل توجهی در واکنش پذیری ژئوپلیمرها دارد. مقدار بیشتر ذرات ریز، باعث افزایش سطح ویژه و واکنش پذیری بالاتر و در نتیجه منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۲۶].

همچنین توفیق و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی بهبود خواص مکانیکی خاک با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان تفتان، میکروسیلیس و محلول قلیایی سدیم هیدروکسید پرداختند و به مقاومتی بیشتر از نمونه های کنترل (خاک خالص) دست یافتند [۲۷].

از طرفی صباغ و توفیق در سال ۲۰۱۷ با ژئوپلیمر بر پایه پوزولان تفتان و پودر شیشه خاک ماسه ای را تثبیت کردند و به این نتیجه دست یافتند که با افزودن پوزولان و محلول قلیایی به خاک، مقاومت فشاری محدود نشده خاک افزایش می‌یابد. از طرفی سیلیس موجود در پودر شیشه می‌تواند به کمک محلول قلیایی به خوبی واکنش بدهد. بنابراین استفاده و جایگزینی درصدی پودر شیشه با پوزولان در پروژه های تثبیت بجای ماده اولیه آن، با توجه به حجم بالای تولید شیشه، کمک زیادی به دفع مطلوب شیشه از محیط زیست می‌کند [۲۸].

نجفی و اله وردی در سال ۲۰۰۹ به مطالعه ترکیبات شیمیایی مختلف روی خواص مهندسی پوزولان تفتان فعال شده در بتن پرداختند. متغیرها را بصورت نسبت های مولی در نظر گرفتند و با فعال سازی قلیایی پوزولان تفتان، ملات ژئوپلیمری ساختند. نتایج کار آنها نشان داد بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نسبت های مولی $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ فعال کننده، نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ کل و $\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ کل، به ترتیب برابر با ۰/۷۵، ۰/۹۲ و ۷/۵ حاصل شده است [۲۹].

بونداری^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۳، پنج نوع پوزولان طبیعی ایران را مورد بررسی های شیمیایی و فیزیکی قرار دادند. با توجه به نتایج و با در نظر گرفتن مقاومت فشاری و حلالیت قلیایی بعنوان میزان فعالیت پوزولانی ماده، از میان پوزولان های تفتان، رفسنجان، سیرجان، سهند و شاهین دژ، پوزولان تفتان بعلت داشتن LOI کم و مقدار کلسیم قابل حل زیاد، بیشترین واکنش پذیری و بهترین رفتار

رو محققان همواره بدنبال جایگزین مناسب دوستدار محیط زیستی برای سیمان می‌باشند. ژئوپلیمرها یک طبقه نسبتاً جدید از مصالح ساختمانی هستند [۱۰]. این مصالح در سال ۱۹۷۰ توسط دانشمند و مهندس فرانسوی داویدوویچ^۱ ابداع شد که از مخلوط کردن پیش ماده‌های ژئوپلیمر با فعال ساز قلیایی حاصل می‌شود. پیش ماده‌های ژئوپلیمر شامل طیف وسیعی از مواد آلومیناسیلیکات کم هزینه و حتی زباله های صنعتی مانند خاکستر بادی (طبقه C و طبقه F)، پوزولان های طبیعی، متاکائولین، سرباره کوره، لجن قرمز^۲ و خاکستر پوسته برنج می‌باشد. در عین حال فعال ساز قلیایی محلول های سدیم سیلیکات قلیایی، پتاسیم سیلیکات قلیایی، کلسیم کاربید و سدیم هیدروکسید یا ترکیبی از اینها را شامل می‌شوند [۱۱-۱۸]. در سال ۱۹۹۱ داویدوویچ ژئوپلیمر را به مواد آلومینوسیلیکاتی با ساختار آمورف تا شبه کریستالی که طی بسپارش آلومین و سیلیس در یک محیط قلیایی شدید و سپس تشکیل پیوندهای Si-O- و Si-O-Al Si مختلف وابسته به نسبت Si/Al مواد اولیه، اطلاق کرد [۱۰]. علاوه بر وجود سیلیس و آلومین فراوان، در تاریخچه تولید یا فرآوری ماده خام ژئوپلیمر، تجربه حرارت های بالا، بسیار مهم است. زیرا مواد با قرار گرفتن در دماهای بالا، دچار تغییر ساختار مولکولی می‌شوند. استحکام سیمان ژئوپلیمری به عوامل مختلف مانند نوع مواد پایه، مقدار مواد پایه، ساختار و نوع فعال کننده قلیایی، زمان، نسبت آب به جامد، pH مخلوط و دمای سنتز اولیه بستگی دارد [۱۹، ۲۰]. حرارت بالا موجب از بین بردن رطوبت درون ساختاری پیش ماده ژئوپلیمر و تغییر ساختار منظم و کریستالی ماده به حالت آمورف (غیر کریستالی) می‌شود که واکنش پذیری را به شدت افزایش می‌دهد. این فرآیند برای پوزولان طبیعی و خاکستر آتشفشانی به صورت طبیعی و برای خاکستر بادی و سرباره های صنعتی به شکل مصنوعی اتفاق می‌افتد [۱۰]. دمای معین ساخت ژئوپلیمر در محدوده ۸۰-۲۵^oC است [۲۱]. بنابراین مصرف انرژی و انتشار CO₂ در زمینه ژئوپلیمریزاسیون بسیار کم است [۲۲]. علاوه بر این، ژئوپلیمرها دارای پتانسیل انقباض کم، چسبندگی عالی، خواص مکانیکی عالی (مثل مقاومت فشاری و سختی) و مقاومت استثنایی به گرما، حلال های آلی و اسید هستند [۲۳، ۲۴]. استفاده از مواد زائد به عنوان یک پیشرونده برای ساخت ژئوپلیمرها، در برنامه های مهندسی

3 McLellan

4 Diaz

5 Bondar

6 کاهش وزن نمونه (%) طی یک ساعت فرارگیری درون کوره در دمای ۱۰۳۰^oC

1 Joseph Davidovits

2 red mud

را نشان داد [۳۰].

که تحقیقات کمی در مورد اصلاح خاک توسط ژئوپلیمرها وجود دارد [۳۶، ۳۷]. همچنین اثرات نانوسیلیس در سیستم های سیمانی به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان یک افزودنی موثر در زمینه توسعه مکانیکی و میکروساختار و به دست آوردن سریعتر مقاومت قابل قبول، یافت شده است [۳۸]. با این حال، تحقیق در مورد اثرات نانوسیلیس و نانورس بر خواص ژئوپلیمر در تثبیت خاک کمیاب است. از طرفی پوزولان طبیعی به طور فراوانی در مناطق آتشفشانی یافت می شود و استفاده از آن به عنوان تثبیت کننده در تثبیت خاک می تواند منجر به هزینه کم ساخت و ساز شود و ماده ای دوستدار با محیط زیست را در اختیار آنها قرار دهد [۳۹]. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی تاثیر افزودن نانومواد به ژئوپلیمرهای پوزولان طبیعی در تثبیت خاک انجام شده است.

در این مطالعه تلاش شده است تا با استفاده از نانوسیلیس، نانورس و پوزولان تفتان، طرح اختلاط بهینه ای برای جایگزینی سیمان پرتلند در تثبیت خاک و افزایش مقاومت و ظرفیت باربری آن بررسی شود. بدین منظور، عوامل موثر در افزایش مقاومت فشاری و کششی نمونه های خاک از جمله دوره عمل آوری، تاثیر افزایش میزان محلول قلیایی و افزودن درصدهای مختلف نانومواد به خاک مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه NaOH بعنوان یک فعال کننده قلیایی به علت pH بالا، سهولت دسترسی، قیمت پایین و مقدار تخلخل بیشتر جهت ورود مایع به داخل ملات های ژئوپلیمری انتخاب شده است [۲۴، ۴۰]. محلول قلیایی سدیم هیدروکسید با دو مقدار مختلف نسبت به وزن پوزولان، نانومواد (نانوسیلیس یا نانورس) در ۳ درصد وزنی مختلف نسبت به خاک برای سه دوره عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به منظور تعیین طرح اختلاط بهینه که بیشترین مقاومت طولانی مدت را ایجاد می کند، بررسی شدند. همچنین برای مقایسه تاثیر ژئوپلیمر، نمونه های شاهد سیمانی با دوره های عمل آوری مشابه با ۲ درصد وزنی مختلف نسبت به خاک، ساخته شدند و در نهایت برای ارزیابی و تفسیر نتایج حاصل از این مطالعه، از آنالیز ریزساختاری SEM و XRD استفاده شد.

۲- مواد

۲-۱- خاک

خاک مورد نیاز این تحقیق از منطقه ای واقع در اتوبان هفت

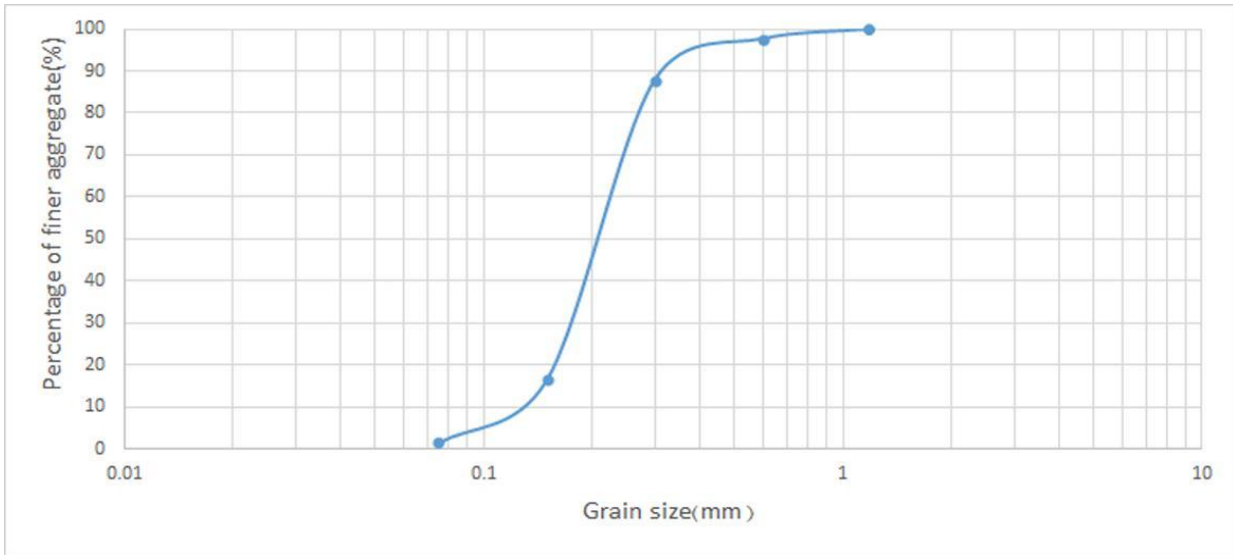
امروزه با توسعه علم نانو تکنولوژی، نانومواد نیز بطور فزاینده ای در ژئوپلیمرها مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله که پژوهشگران دریافتند، نانوسیلیس و نانوالومین باعث کاهش نفوذپذیری و جذب آب در ژل های ژئوپلیمر می باشند. همچنین ذرات نانوسیلیس و نانوالومین در ماتریس ژئوپلیمر نقش بسیار سازنده ای داشته و باعث افزایش قابلیت های مکانیکی ژئوپلیمر می شوند [۳۱]. در سال ۲۰۱۵، ساراتی^۱ و همکارانش تاثیر نانوسیلیس روی افزایش مقاومت ژئوپلیمرها در دمای اتاق را مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که نانوسیلیس باعث ایجاد یک ژئوپلیمر متراکم تر و تعداد ذرات غیر فعال کمتری می شود [۳۲].

در سال ۲۰۱۶، نسکار^۲ و همکارانش تاثیر افزودن انواع نانو مواد به بتن ژئوپلیمری را بررسی کردند. برپایه این مطالعه، نتیجه گیری شد که نانوسیلیس و تیتانیوم دی اکسید روی بتن ژئوپلیمری با خاکستربادی کم کلسیم، اثر مطلوب تری نسبت به بقیه نانو ها دارند. همچنین آزمایش های بررسی کیفیت بتن نشان داد که تمامی نمونه ها طبق استاندارد، کیفیت خوبی دارند [۳۳].

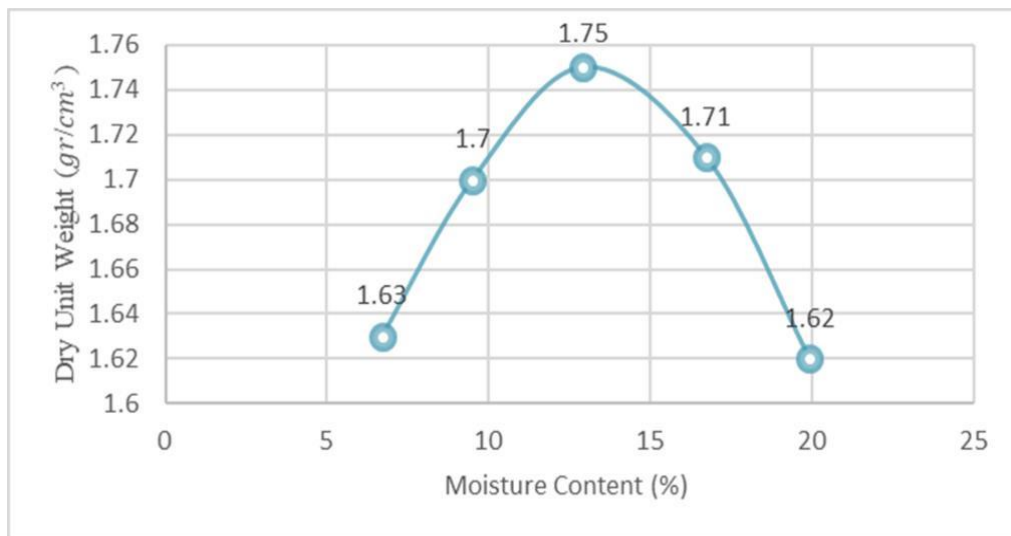
در سال ۲۰۱۷، آداک^۳ و همکارانش به بررسی کارایی سازه ای ژئوپلیمر خاکستربادی اصلاح شده توسط نانوسیلیس پرداختند. این پژوهشگران دریافتند در صورت جایگزین کردن ۶٪ از خاکستربادی با نانوسیلیس، نیاز خاکستربادی به حرارت اولیه برای فعال سازی رفع شده و مقاومت فشاری و خمشی افزایش می یابد [۳۴]. اساعدی^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به بررسی تاثیر نانورس روی ویژگی های مکانیکی و گرمایی ژئوپلیمرها پرداختند. نتایج نشان داد که میزان بهینه نانورس که باعث افزایش مقاومت می شود، ۲٪ می باشد. همچنین نتایج آنالیز ریزساختارها نشان می دهد که نانورس نه تنها باعث کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار شده، بلکه بعنوان یک فعال ساز برای فرآیندهای تشکیل ژئوپلیمر نیز عمل می کند [۳۵].

با وجود اینکه مکانیزم ژئوپلیمر بیش از چندین دهه قبل توسعه یافت و دارای ویژگی های سودمند بسیاری است، هنوز به گستردگی سیمان پرتلند مورد استفاده قرار نگرفته است. بررسی ها نشان می دهد

- 1 Sarathi Deb
- 2 Naskar
- 3 Adak
- 4 Assaedi



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک اتوبان هفت باغ علوی کرمان
 Fig. 1. The particle size distribution of Haft Bagh Alavi expressway' soil



شکل ۲. منحنی درصد رطوبت برای خاک اتوبان هفت باغ علوی کرمان-ایران
 Fig. 2. The moisture curve of Haft Bagh Alavi expressway' soil

نمونه ای از خاک مورد نظر انجام شد که نمودار آن مطابق شکل ۲ است. طبق منحنی ۲، درصد رطوبت بهینه برای ساخت نمونه ها در حدود ۱۳ درصد بدست آمد [۴۲]. جهت بدست آوردن زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک مورد مطالعه در این آزمایش، آزمایش برش مستقیم براساس استاندارد ASTM D3080-11 صورت پذیرفت [۴۳]. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

باغ علوی کرمان بعنوان یک منطقه در حال رشد به مختصات $30^{\circ}09'24.4''N$ $57^{\circ}09'29.5''E$ تهیه شده است. در مرحله اول دانه بندی خاک مورد نظر بررسی شد. با توجه به نتایج استخراج شده از منحنی ۱ و مطابق استاندارد ASTM- D7928-17، خاک مورد نظر در دسته ماسه بدانه بندی شده (SP) طبقه بندی می شود [۴۱]. همچنین به منظور مشخص شدن رطوبت بهینه خاک، با توجه به استاندارد ASTM D-698، آزمایش تراکم روی

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه
Table 1. Physical and chemical properties of the studied soil

G _s	نسبت تخلخل (e)	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (kPa)	ضریب یکنواختی (Cu)	ضریب انحنای (Cc)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	رطوبت بهینه (%)	وزن مخصوص حداکثر (kN/m ³)	شرح
۲/۶۷	۰/۴	۳۵°	۰	۱/۷۷	۱/۰۸	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۱۳	۱۳	۱۷/۵	مقدار

جدول ۲. خصوصیات ترکیب شیمیایی پوزولان طبیعی تفتان، نانورس و نانوسیلیس
Table 2. Chemical compounds of Taftan natural pozzolan, nanoclay, and nanosilica

ترکیبات شیمیایی (%)	پوزولان تفتان	نانورس	نانوسیلیس
SiO ₂	۶۰/۹۰	۵۰/۹۵	>۹۹%
Al ₂ O ₃	۱۸/۴۵	۱۹/۶	-
Fe ₂ O ₃	۵/۱	۵/۶۲	-
CaO	۶/۵۸	۱/۹۷	-
MgO	۲/۵۳	۳/۲۹	-
SO ₃	۰/۱۴	-	-
Na ₂ O	۱/۵۱	۰/۹۸	-
K ₂ O	۱/۸۵	۰/۸۶	-
TiO ₂	-	۰/۶۲	-
LOI	۴/۱۸	۱۵/۴۵	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	۸۴/۴۵	۷۰/۵۵	>۹۹%

جدول ۳. مشخصات نانورس و نانوسیلیس
Table 3. Properties of nanoclay and nanosilica

رنگ	چگالی	اندازه ذرات	مساحت ویژه	SiO ₂	ماده متشکله	نام نانومواد
زرد	$0.15-0.17 \frac{gr}{cm^3}$	۱-۲nm	$220-270 \frac{M^2}{gr}$	۵۰/۹۵%	مونتموریلینیت	نانورس
سفید	$2/4 \frac{gr}{cm^3}$	۱۱-۱۳nm	$200 \frac{M^2}{gr}$	>۹۹%	سیلیکون اکسید	نانوسیلیس

پوزولان تفتان می‌باشد. پوزولان تفتان از منطقه کوه آتشفشانی تفتان استان سیستان و بلوچستان تهیه شده است. در جدول ۲ ساختار شیمیایی پوزولان تفتان مشاهده می‌شود. برای این پوزولان نسبت

۲-۲- پوزولان تفتان یکی از پوزولان‌های طبیعی موجود در جنوب شرق ایران که به فراوانی قابل دسترس و جزء مواد ضایعاتی ارزان قیمت است،

قرار گرفته است. سدیم هیدروکسید را بصورت پودر یا پولک های جامد سفید رنگ می توان تهیه کرد. شکل پولکی آن کاربرد بسزایی در صنعت دارد و استفاده از آن در تحقیقات مهندسی رایج است. روش ساخت محلول قلیایی شامل سدیم هیدروکسید بدین صورت است: ابتدا وزن مشخصی از تکه های سدیم هیدروکسید را با آب داخل یک ظرف پلاستیکی به آرامی حل کرده تا محلول سدیم هیدروکسید یکنواختی حاصل شود و برای اینکه محلول مذکور به دمای محیط برسد و یکنواخت تر شود پس از گذشت یک روز برای ساخت نمونه از آن استفاده می شود [۴۶].

۳- آزمایش های انجام شده

با توجه به عوامل موثر بر مقاومت فشاری، نمونه های مختلفی با میزان متفاوت نانومواد (نانورس یا نانوسیلیس) و دو نسبت محلول قلیایی به پوزولان برابر ۰/۳ و ۰/۴۵ ساخته شده اند. توجه شود که در همه ی نمونه های ژئوپلیمری، نسبت پوزولان به خاک ثابت و برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد. جدول ۴ ترکیب انواع نمونه های ساخته شده در این مطالعه را نشان می دهد.

همانطور که در جدول مشاهده می شود نمونه ها در ۳ گروه کلی نمونه های ژئوپلیمری، نمونه های خاک و نمونه های سیمانی تقسیم بندی شده اند. نمونه ها در چند گروه شامل گروه ۱ (نمونه های حاوی پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی به پوزولان ۰/۳ و ۰/۴۵ و ۱-۳٪ نانوسیلیس یا نانورس، نمونه های بدون نانومواد) فقط پوزولان))، گروه ۲ (خاک خالص) و گروه ۳ (نمونه های سیمانی با درصد های ۷ و ۱۵ درصد) ساخته شده اند. بررسی اثر تغییر میزان محلول قلیایی و اثر افزودن نانومواد برای نمونه های گروه ۱ انجام گرفت. تمامی این گروه ها در ۳ دوره ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه عمل آوری شده اند و پس از عمل آوری شکسته شده و مقاومت فشاری و کششی آنها بدست آمده است. باتوجه به حجم نمونه ها و آزمایش های مختلف، شکل ۳ مراحل این مطالعه را نشان می دهد.

۴- آماده سازی نمونه

پس از تهیه مواد اولیه و قبل از شروع به نمونه سازی باید ۲۴ ساعت قبل محلول قلیایی سدیم هیدروکسید تهیه شود. پوزولان تفتان، نانومواد (نانورس یا نانوسیلیس)، آب و محلول سدیم هیدروکسید را

Al_2O_3/SiO_2 برابر ۳/۳ و مقدار مجموع $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$ نیز برابر ۸۴/۴۵ است. طبق استاندارد ASTM C618، میزان آلومینا سیلیکات باید حداقل ۷۰ درصد میزان کل ترکیب را تشکیل دهد و با توجه به اینکه این مقدار برای پوزولان تفتان بالای ۷۰ درصد است، میزان قابل قبولی برای ایجاد ژل ژئوپلیمر می باشد [۴۴].

۲-۳- نانورس

به دلیل سطح ویژه بسیار بالای نانومواد، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و دوستدار محیط زیست بودن نانومواد [۴۵] از این ماده بعنوان یکی از مواد اولیه ساخت ژئوپلیمر استفاده شده است. یکی از مواد مورد استفاده در این مطالعه نانورس مونتموریلنیت می باشد. این ماده به صورت صفحه های و با مساحت ویژه بسیار بالا با اندازه ذرات ۱-۲ نانومتر انتخاب شد. جدول ۳ مشخصات اساسی نانورس را نشان می دهد.

یکی از مهم ترین معیارها برای انتخاب یک ماده برای استفاده در ترکیبات ژئوپلیمری، بررسی آنالیز شیمیایی آن می باشد. در جدول ۲ آنالیز شیمیایی نانورس آورده شده است. با توجه به اینکه مقدار مجموع $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$ نیز برابر ۷۶/۱۷ درصد است و اینکه مقادیر بالای ۷۰ درصد، میزان قابل قبولی برای ایجاد ژل ژئوپلیمر طبق مطالعات می باشد، در این مطالعه تاثیر نانورس روی بهبود مقاومت خاک بررسی شده است.

۲-۴- نانوسیلیس

نانوسیلیس با ابعاد ۱۱-۱۳ نانومتر یکی دیگر از انواع موادی است که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از دلایل مهمی که از این ماده استفاده شده است، درجه خلوص بالای ۹۹ درصد SiO_2 آن می باشد که با توجه به فعالیت خوب پوزولانی آن، می توان از آن در تهیه ژئوپلیمر استفاده کرد. در جدول ۲ و ۳ به ترتیب ترکیبات شیمیایی و ویژگی های نانوسیلیس (سیلیکون اکسید) مشاهده می شود.

۲-۵- محلول سدیم هیدروکسید

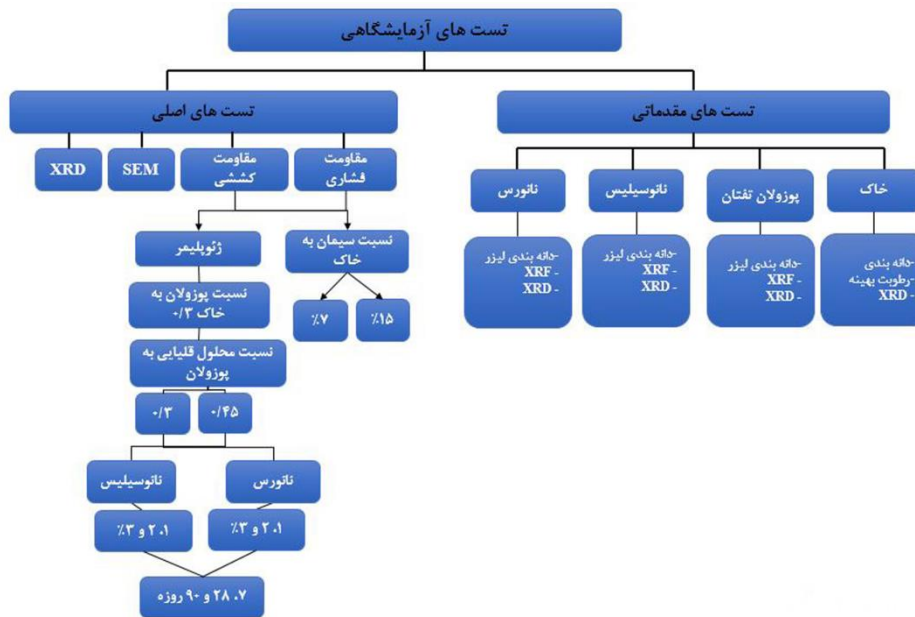
سدیم هیدروکسید (SH) یا سود سوز آور با فرمول شیمیایی NaOH به عنوان یک ماده پرمصرف در صنایع، همواره مورد استفاده

جدول ۴. آزمایش های انجام شده
Table 4. Performed tests

نام	پوزولان	نانوسیلیس	نانو رس	نسبت محلول قلیایی به پوزولان	نسبت پوزولان به خاک	دوره زمانی
گروه ۱: خاک تثبیت شده با پوزولان (نمونه های ژئوپلیمری)	T3	تفتان	-	-	۰/۳	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	T45	تفتان	-	-	۰/۴۵	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TS31	تفتان	۱٪	-	۰/۳	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TS32	تفتان	۲٪	-	۰/۳	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TS33	تفتان	۳٪	-	۰/۳	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TS451	تفتان	۱٪	-	۰/۴۵	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TS452	تفتان	۲٪	-	۰/۴۵	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TS453	تفتان	۳٪	-	۰/۴۵	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TC31	تفتان	-	۱٪	۰/۳	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TC32	تفتان	-	۲٪	۰/۳	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TC33	تفتان	-	۳٪	۰/۳	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TC451	تفتان	-	۱٪	۰/۴۵	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	TC452	تفتان	-	۲٪	۰/۴۵	۲۸،۷ و ۹۰ روز
TC453	تفتان	-	۳٪	۰/۴۵	۲۸،۷ و ۹۰ روز	
گروه ۲: خاک تثبیت نشده	S	بدون پوزولان	-	-	-	۲۸،۷ و ۹۰ روز
گروه ۳: سیمان	OPC7	سیمان ۷٪	-	-	-	۲۸،۷ و ۹۰ روز
	OPC15	سیمان ۱۵٪	-	-	-	۲۸،۷ و ۹۰ روز

خاک به رطوبت بهینه، بعنوان "آب اضافی" تعیین شده و به ترکیب همگن خاک و پوزولان افزوده شد. توجه شود که به دلیل یکسان بودن نرخ جذب آب دانه های پوزولان و نانومواد با خاک، همه ی نمونه ها با انرژی تراکم یکسان و رطوبت بهینه ۱۳٪ ساخته شدند. در ابتدا

با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن کرده، سپس خاک و پوزولان را به صورت خشک با دست مخلوط کرده تا یکنواخت شوند. جهت تعیین میزان آب، برای هر مخلوط، مقدار آب موجود در محلول سدیم هیدروکسید تعیین شده است. سپس مقدار آب لازم جهت رسیدن



شکل ۳. شماتیک مراحل و روند مطالعه
Fig. 3. Schematic chart of the investigation's steps

آنها دیرتر کاسته شود و مدت بیشتری به رطوبت دسترسی داشته باشند. در نهایت ۳۰۶ نمونه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

۵- نتایج و بحث

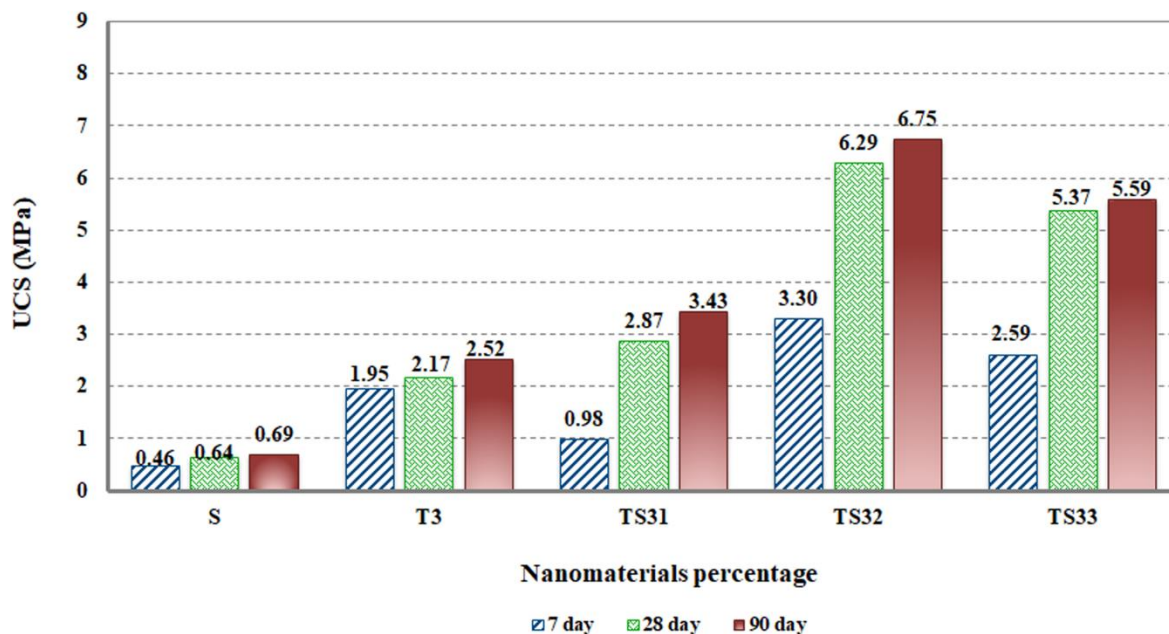
۵-۱- مقاومت فشاری محصور نشده

اندازه گیری مقاومت فشاری محدود نشده توسط تعداد زیادی از محققان به عنوان ابزاری برای ارزیابی عملکرد تثبیت کننده های شیمیایی استفاده شده است که هزینه کم و سرعت زیاد علت اصلی این انتخاب بوده است. علاوه بر آن، کسب مقاومت می تواند یک معیار مناسب برای انتخاب مواد جهت کاربردهای عمرانی باشد [۴۷]. کلیه نمونه ها پس از ساخت و گذراندن دوره عمل آوری مدنظر، برای تست مقاومت فشاری و کششی با استفاده از دستگاه CBR Marshal شکسته شدند.

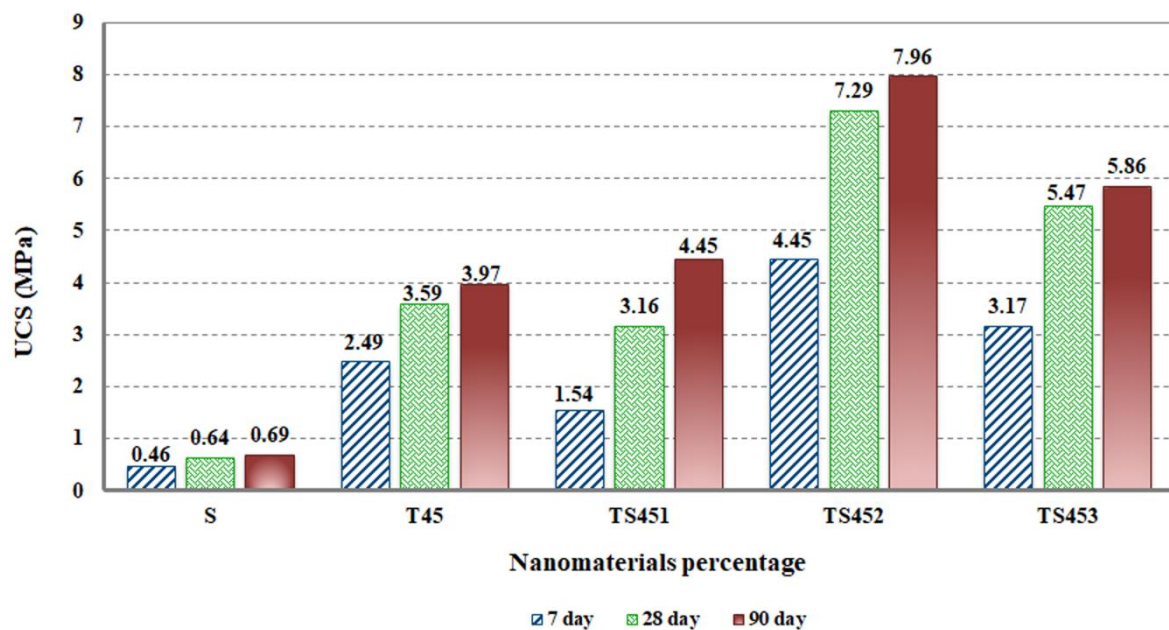
۵-۱-۱- تاثیر افزودن نانوسیلیس و نانورس

مقاومت فشاری محدود نشده برای خاک خالص و نمونه های با درصدهای مختلف نانوسیلیس و نانورس به ترتیب در شکل های ۴-۵ و ۶-۷ آورده شده است. بر اساس نمودارها مقاومت خاک از ۷ تا ۹۰ روزه ۱/۴ برابر شده است. افزایش مقاومت خاک را می توان

آب اضافی، محلول سدیم هیدروکسید و نانومواد را درون لیوان همزن هیدرومتری ریخته و این مخلوط به مدت ۲ دقیقه با دور کند و ۶ دقیقه با دور تند مخلوط می شوند تا محلول همگنی به دست آید، چرا که افزایش درجه اسیدیته محیط تاثیر بسیار زیادی بر آماده سازی نانومواد داشته و باعث همگنی بیشتر نانومواد و مشارکت حداکثری در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می شود [۴۵]. سپس این محلول را به مخلوط اولیه (مخلوط همگن خاک و پوزولان) اضافه کرده و خوب هم زده تا مخلوط کاملاً همگنی حاصل شود. مخلوط حاصل را در قالب استوانه ای (۵cm*۱۰) و در سه لایه ریخته و به صورت تراکم استاندارد با استفاده از چکشی به وزن ۴ کیلوگرم متراکم کرده و هر لایه از قالب با ۴ بار رها کردن چکش از ارتفاع ۳۰ سانتی متری متراکم می گردد. سپس با استفاده از جک نمونه ها از قالب بیرون آورده شده و بدون پوشش در دما و رطوبت اتاق عمل آوری می شوند تا اینکه پس از گذشت دوره عمل آوری مورد نظر بر اساس D2166 ASTM [۴۱]، به صورت نیرو-کنترل مورد آزمایش قرار گیرند. از هر نمونه خاک تثبیت شده سه نمونه ساخته شد و میانگین آنها به عنوان مقاومت (فشاری یا کششی) نمونه در نظر گرفته شد. با توجه به مبنای هیدراتاسیونی واکنش سیمان پرتلند، تنها نمونه های ساخته شده با سیمان پرتلند به مدت ۳ روز در پلاستیک آب بند شده تا از رطوبت



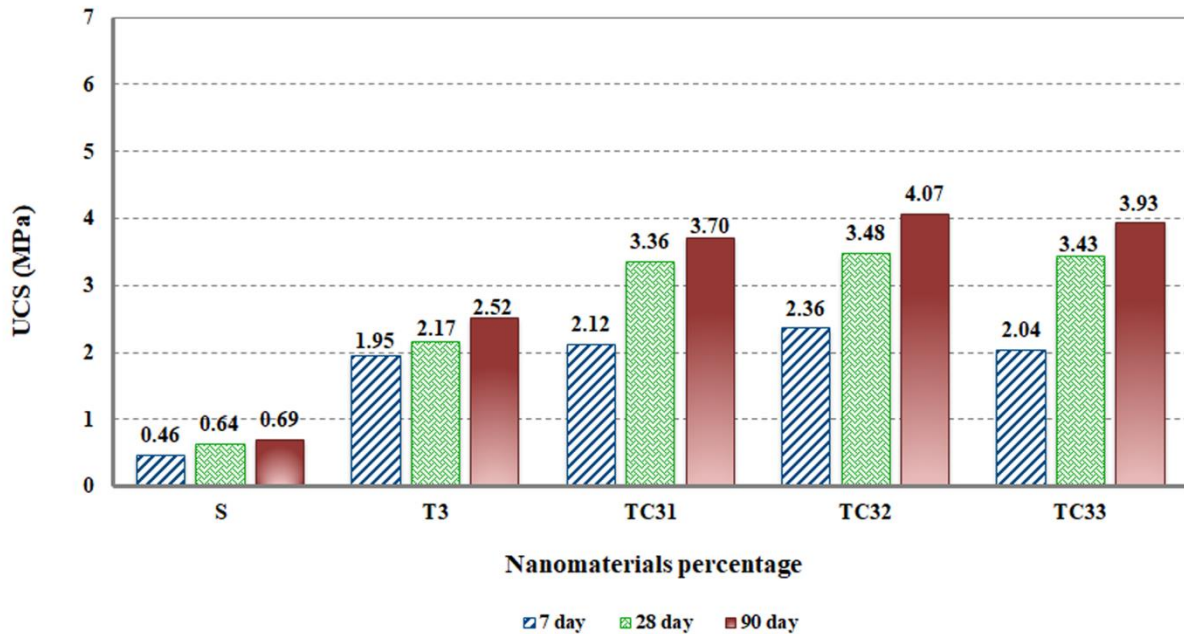
شکل ۴. مقایسه تاثیر درصد های مختلف نانوسیلیس روی مقاومت فشاری پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۳
 Fig. 4. Comparison of the effect of different percentages of nanosilica on the compressive strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.3



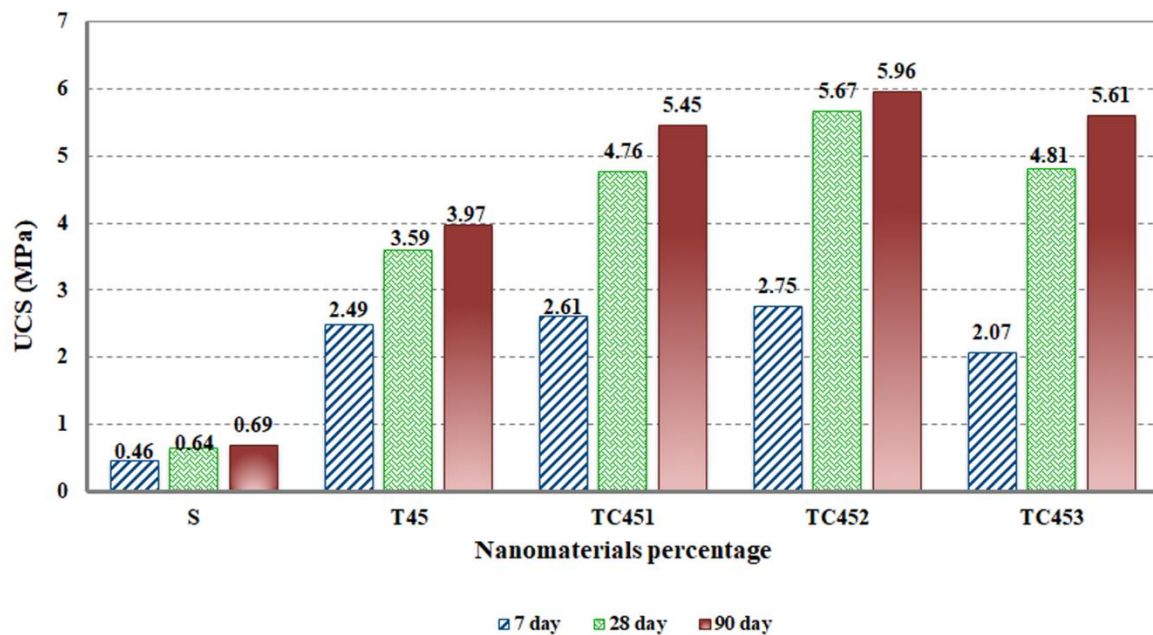
شکل ۵. مقایسه تاثیر درصد های مختلف نانوسیلیس روی مقاومت فشاری پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵
 Fig. 5. Comparison of the effect of different percentages of nanosilica on the compressive strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.45

مطابق مطالعات پیشین و انتظار اولیه می باشد [۴۸]. با این حال این افزایش، در طول زمان ثابت نیست و برای ۲۸ روز اول عمل آوری بیشتر می باشد، بنابراین بخش اصلی فرآیند ژئوپلیمراسیون در ۲۸ روز اول انجام شده است. مطابق نمودار ۴ (برای درصد های مختلف نانوسیلیس و نسبت محلول قلیایی ۰/۳)، ۲٪ نانوسیلیس دارای

به چسبندگی بیشتر بخش ریزدانه خاک به مرور زمان نسبت داد. همان گونه که از تمامی نمودارها مشخص است، با افزایش دوره عمل آوری، مقاومت نمونه های با درصد های مختلف نانو افزایش یافته است. به طوری که به دلیل تکمیل واکنش های پوزولانی مقاومت ۹۰ روزه به طور قابل توجهی بالاتر از مقاومت ۷ روزه است که کاملاً



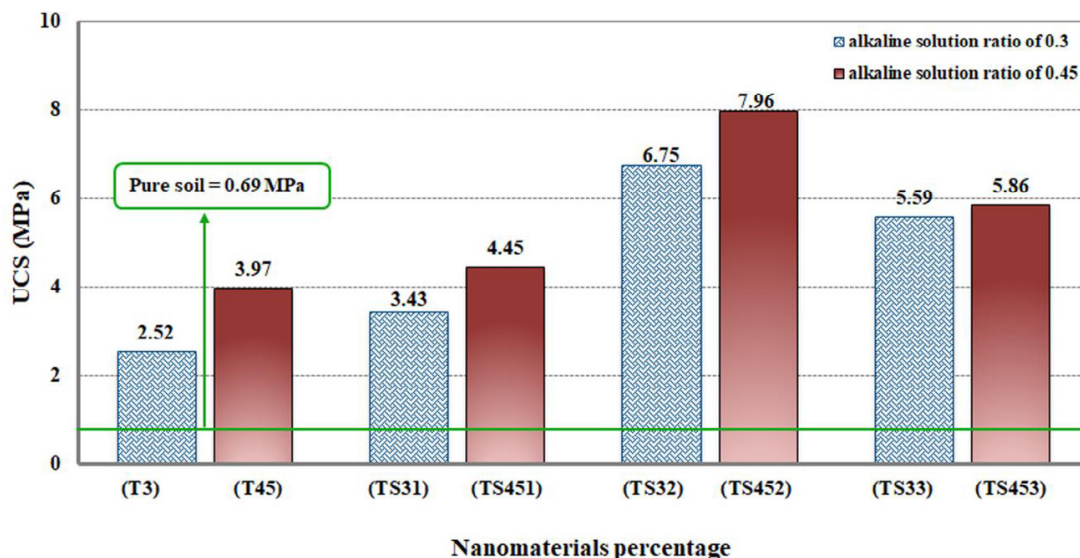
شکل ۶. مقایسه تاثیر درصدهای مختلف نانورس روی مقاومت فشاری پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۳
 Fig. 6. Comparison of the effect of different percentages of nano clay on the compressive strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.3



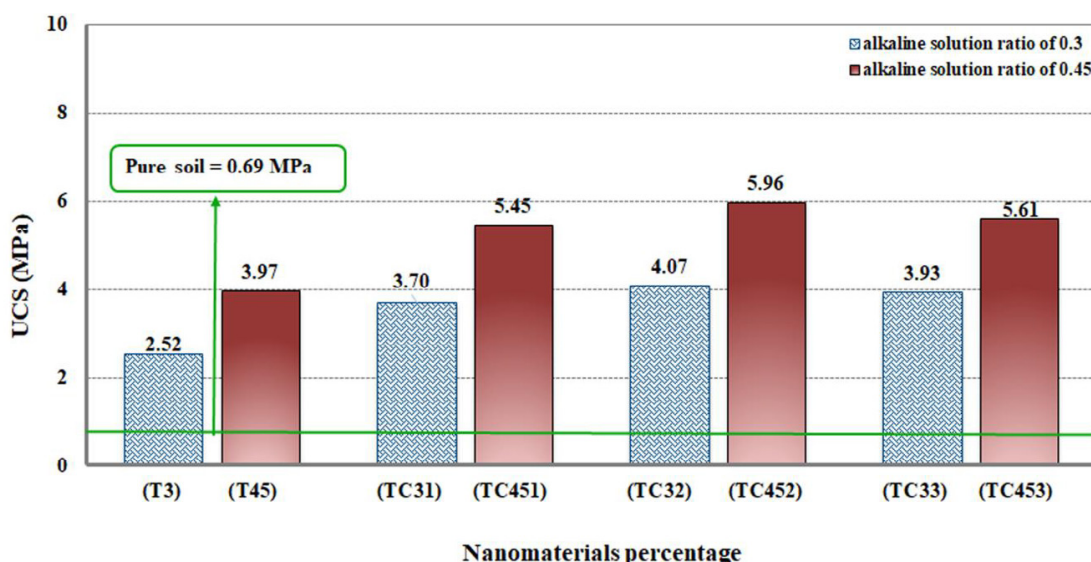
شکل ۷. مقایسه تاثیر درصدهای مختلف نانورس روی مقاومت فشاری پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵
 Fig. 7. Comparison of the effect of different percentages of nano clay on the compressive strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.45

مشابه نمودار ۴، بازم ۲٪ نانوسیلیس دارای بیشترین مقاومت شده است که برای دوره ۹۰ روزه ۱۰۵۴ درصد افزایش مقاومت نسبت به خاک خالص و ۱۰۱ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه های بدون نانو مشهود است. به همین ترتیب برای نمونه های مشابه نانورس

بیشترین مقاومت شده است که برای دوره ۹۰ روزه، ۸۷۸ درصد افزایش مقاومت نسبت به خاک خالص و ۱۶۸ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه های بدون نانو مشاهده می شود. براساس نمودار ۵ (برای درصدهای مختلف نانوسیلیس و نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵)



شکل ۸. مقایسه تاثیر افزایش غلظت محلول قلیایی بر مقاومت فشاری ۹۰ روزه پوزولان تفتان با درصدهای مختلف نانوسیلیس
 Fig. 8. Comparison of the effect of increasing alkaline solution concentration on the 90-day compressive strength of Taftan pozzolan with different percentages of nanosilica

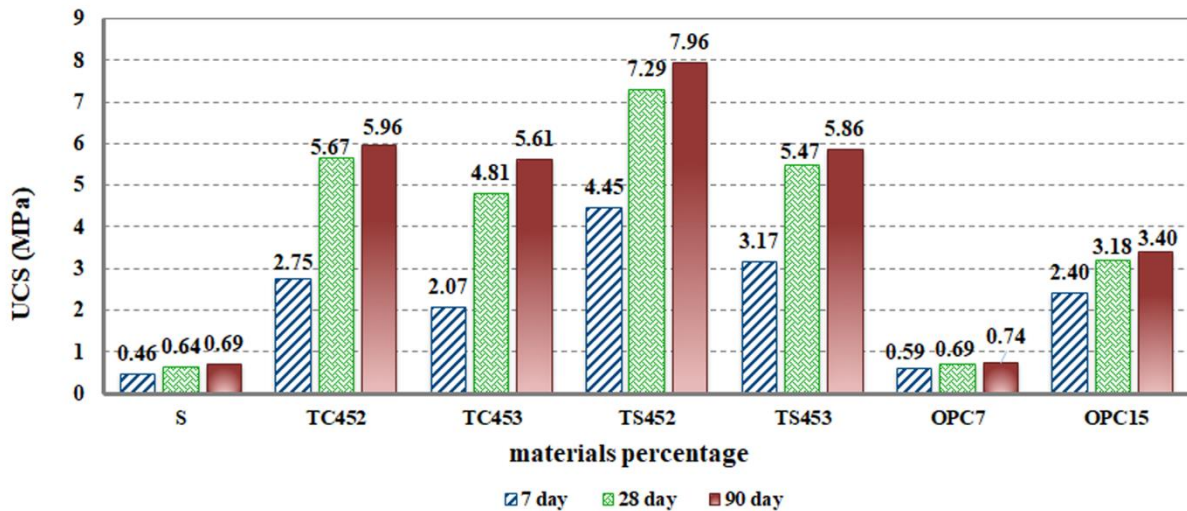


شکل ۹. مقایسه تاثیر افزایش غلظت محلول قلیایی بر مقاومت فشاری ۹۰ روزه پوزولان تفتان با درصدهای مختلف نانوکلس
 Fig. 9. Comparison of the effect of increasing alkaline solution concentration on the 90-day compressive strength of Taftan pozzolan with different percentages of nanoclay

ژئوپلیمری حاوی پوزولان تفتان با افزودن نانومواد (تا میزان ۲٪) به طور صعودی افزایش مقاومت داشتند. توجه شود که افزودن مقدار بیشتر نانومواد (میزان ۳٪) باعث تجمع، کاهش کارایی نانومواد و ایجاد مراکز هسته زایی می شود به نحوی که ژل ژئوپلیمری در اطراف این مراکز شروع به متمرکز شدن می کند و به طور کامل پخش نمی شود و از این رو مقاومت روند نزولی می گیرد. خاتر^۱ نیز به نتیجه مشابه

مطابق نمودار ۶ و نمودار ۷ نیز ۲٪ نانورس بیشترین مقاومت را کسب کرده که برای دوره ۹۰ روزه به ترتیب ۴۹۰ و ۷۶۴ درصد افزایش مقاومت نسبت به خاک خالص و ۶۲ و ۵۰ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه های بدون نانو مشاهده می شود. بنابراین با توجه به مقادیر بالای سیلیس و آلومین نانومواد و همچنین سطح ویژه بالا و ریزدانه بودن آن ها (ابعادی در حد نانومتر) که فاکتورهای اساسی در کسب مقاومت نمونه های ژئوپلیمری می باشند [۴۸]، نمونه های

1 Khater



شکل ۱۰ مقایسه تاثیر افزودن نانورس و نانوسیلیس به ژئوپلیمر بر پایه پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵ و نمونه های سیمانی
 Fig. 10. Comparison of the effect of nanoclay and nanosilica addition to the Taftan pozzolan-based geopolymer with an alkaline solution ratio of 0.45 and cement specimens

فرآیند لیچینگ^۱ (استخراج مایع-جامد) آلومینیوم و سیلیکات از پیش مواد مختل گردد. مقدار زیاد محلول فعال کننده قلیایی به دو دلیل عمده اثر منفی بر تشکیل ژئوپلیمر می گذارد. اول آنکه موجب تشکیل هیدروکسید فلزی از واکنش یون های منفی NaOH با کاتیون های مواد معدنی خاک شده و ساختار خاک را تخریب می کند. همچنین از فرآیند استخراج مایع-جامد ذرات آلومینیوم سیلیکات در این حالت جلوگیری می شود و فرآیند ژئوپلیمری به تاخیر می افتد.

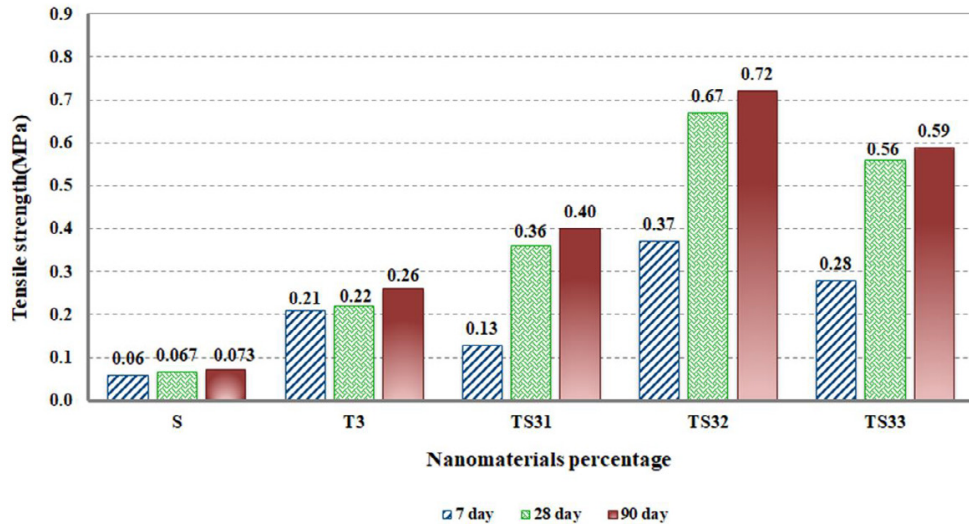
۵-۱-۳- مقایسه رفتار نمونه های تثبیت شده با پوزولان و نمونه های تثبیت شده با سیمان

مقایسه بین نمونه های سیمانی حاوی ۷ و ۱۵ درصد سیمان و همچنین نمونه های ژئوپلیمر بر پایه پوزولان تفتان و ۲ و ۳٪ نانورس و نانوسیلیس با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵ در نمودار ۱۰ مشاهده می شود. همانطور که از نمودار بر می آید در دوره های عمل آوری مختلف مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری از نمونه های حاوی ۷ درصد سیمان بیشتر است. همچنین مقاومت فشاری بلندمدت (۲۸ و ۹۰ روزه) نمونه های ژئوپلیمری از مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه های حاوی ۱۵ درصد سیمان بیشتر است به نحوی که مقاومت فشاری نمونه منتخب (۲٪ نانوسیلیس و نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵) ۷/۹۶ مگاپاسکال بدست آمد که نسبت به مقاومت فشاری نمونه

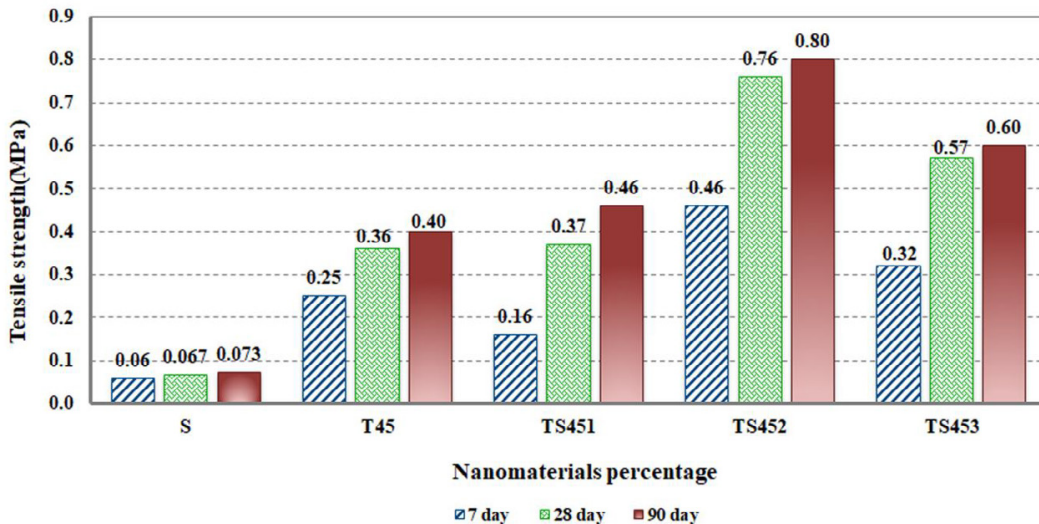
با این مورد دست یافت [۴۸]. از این رو در بین کلیه نمونه های ژئوپلیمری، نمونه های حاوی ۲٪ نانوسیلیس با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵ (TS452) به عنوان نمونه منتخب برگزیده شدند.

۵-۱-۲- تاثیر نسبت محلول قلیایی به پوزولان (میزان محلول قلیایی)
 تاثیر افزایش میزان محلول قلیایی سدیم هیدروکسید برای درصدهای مختلف نانوسیلیس و نانورس برای دوره عمل آوری ۹۰ روزه به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ آورده شده است. مطابق نمودارهای ۸ و ۹ مشخص است که با افزایش نسبت محلول قلیایی سدیم هیدروکسید از ۰/۳ به ۰/۴۵ مقاومت فشاری نمونه های با درصدهای مختلف نانو نیز افزایش می یابد. این افزایش مقاومت به دلیل انجام واکنش پلیمری بیشتر به واسطه فعال کننده بیشتر می باشد. در پیکره بندی ژئوپلیمرها، چهاروجهی های SiO_4 و AlO_4 نقش اساسی دارند که در چهار وجهی AlO_4 به دلیل اینکه ظرفیت آلومینیوم ۳ می باشد یک بار منفی ظاهر می شود، در این میان فلز قلیایی نقش تعدیل کننده بار را دارد که این نقش توسط محلول قلیایی مورد استفاده که در اینجا NaOH می باشد، ایفا شده است. به عبارتی فعال کننده بیشتر (در اینجا نسبت ۰/۴۵)، باعث تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی بیشتر و در نتیجه مقاومت بیشتر می شود [۴۹]. مقدار فعال کننده در این تحقیق به میزانی بالا نبوده است که

1 leaching



شکل ۱۱. مقایسه تاثیر درصدهای مختلف نانوسیلیس روی مقاومت کششی پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۳
 Fig. 11. Comparison of the effect of different percentages of nanosilica on the tensile strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.3



شکل ۱۲. مقایسه تاثیر درصدهای مختلف نانوسیلیس روی مقاومت کششی پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵
 Fig. 12. Comparison of the effect of different percentages of nanosilica on the tensile strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.45

موثر باعث کاهش شکنندگی خاک می شود. از این رو، اثربخشی پایداری خاک باید با مقایسه مقاومت کششی خاک های تثبیت شده با خاک خالی، مورد ارزیابی قرار گیرد.

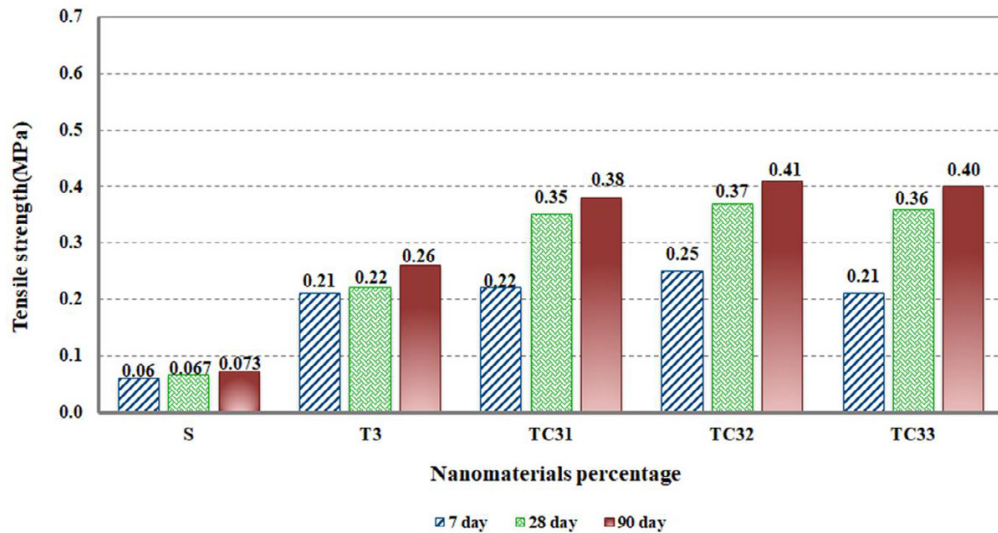
در این مطالعه از آزمایش کشش غیرمستقیم یا تست برزیلی بر اساس استاندارد ASTM C496-11 برای پیدا کردن مقاومت کششی نمونه ها استفاده گردید [۵۰]. این روش کاربرد بسیار مناسبی در تحلیل مقاومت کششی مواد ترد مانند بتن، خاک کوبیده^۱ و نمونه های خاکی تثبیت شده داشته و در تحقیقات بسیار زیادی در

حاوی ۱۵ درصد سیمان که ۳/۴ مگاپاسکال بدست آمد، ۱۳۴ درصد افزایش مقاومت را نشان می دهد. بنابراین می توان گفت با استفاده از میزان مناسب محلول قلیایی و منبع سیلیکا مقاومت قابل قبول و بالاتری نسبت به نمونه های سیمانی حاصل می شود.

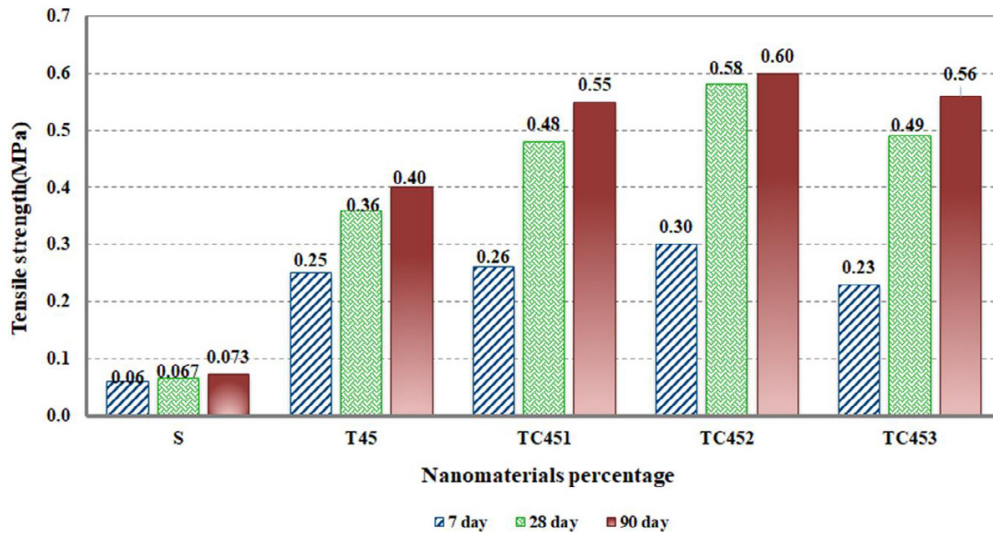
۲-۵- مقاومت کششی

اهمیت مقاومت کششی خاک در ساخت و طراحی سازه ها آشکار است. ترک های کششی در شیب های زمین می تواند به طور قابل توجهی بر پایداری تاثیر گذارد. مقاومت کششی بالاتر به طور

1 Rammed Earth



شکل ۱۳. مقایسه تاثیر درصدهای مختلف نانورس روی مقاومت کششی پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۳
 Fig. 13. Comparison of the effect of different percentages of nanoclay on the tensile strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.3



شکل ۱۴. مقایسه تاثیر درصدهای مختلف نانورس روی مقاومت کششی پوزولان تفتان با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵
 Fig. 14. Comparison of the effect of different percentages of nanoclay on the tensile strength of Taftan pozzolan with an alkaline solution ratio of 0.45

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (1)$$

که T مقاومت کششی (MPa)، P حداکثر نیروی فشاری اعمال شده توسط دستگاه (N)، l طول نمونه (mm) و d قطر نمونه (mm) است.

این نتایج برای دوره های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه های ژئوپلیمری با نانوسیلیس و نانورس و مقایسه آن با خاک خالی به ترتیب در شکل های ۱۲-۱۱ و ۱۴-۱۳ آورده شده است. همانطور که در

این حوزه بکار رفته است [۵۱-۶۱]. برای انجام این تست نمونه ها به صورت افقی در زیر دستگاه تک محوری قرار گرفتند. به طوری که خط تقارن نمونه بر خط تقارن صفحه بارگذاری دستگاه منطبق باشد. سپس، اعمال نیرو توسط دستگاه آغاز می شود تا زمانی که نمونه ترک خورده و گسیخته شود. بیشترین نیروی فشاری که به نمونه اعمال شده به عنوان نیروی P در رابطه ۱ (فرمول ذکر شده در استاندارد) قرار داده می شود تا مقاومت کششی نمونه حاصل شود:

جدول ۵. مقایسه مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها بعد از ۹۰ روز عمل آوری
Table 5. Comparison of the compressive and tensile strength of specimens after 90 days of curing

نمونه	مقاومت کششی (f_t) (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری (f_c) (مگاپاسکال)	f_t/f_c	$f_t/(f_c^{0.5})$
S	۰.۰۷	۰.۶۹	۰.۱۱	۰.۰۹
T3	۰.۲۶	۲.۵۲	۰.۱۰	۰.۱۶
TS31	۰.۳۸	۳.۴۳	۰.۱۱	۰.۲۱
TS32	۰.۴۱	۶.۷۵	۰.۰۶	۰.۱۶
TS33	۰.۴۰	۵.۵۹	۰.۰۷	۰.۱۷
T45	۰.۴۰	۳.۹۷	۰.۱۰	۰.۲۰
TS451	۰.۵۵	۴.۴۵	۰.۱۲	۰.۲۶
TS452	۰.۶۰	۷.۹۶	۰.۰۸	۰.۲۱
TS453	۰.۵۶	۵.۸۶	۰.۱۰	۰.۲۳
TC31	۰.۴۰	۳.۷۰	۰.۱۱	۰.۲۱
TC32	۰.۷۲	۴.۰۷	۰.۱۸	۰.۳۶
TC33	۰.۵۹	۳.۹۳	۰.۱۵	۰.۳۰
TC451	۰.۴۶	۵.۴۵	۰.۰۸	۰.۲۰
TC452	۰.۸۰	۵.۹۶	۰.۱۳	۰.۳۳
TC453	۰.۶۰	۵.۶۱	۰.۱۱	۰.۲۵
		میانگین	۰.۱۱	۰.۲۲
		انحراف از معیار	۰.۰۰۰۹۲	۰.۰۰۴۸۳
		ضریب انحراف	۰.۸۶٪	۲.۱۷٪

نمودارها مشاهده می شود، مشابه مقاومت فشاری با افزایش زمان، مقاومت کششی نیز افزایش یافته است و بیشتر مقاومت در ۲۸ روز اول عمل آوری کسب شده است. همچنین با افزایش درصد نانومواد تا میزان ۲٪ مقاومت کششی نیز افزایش می یابد و پس از آن کاهش می یابد. مقاومت کششی ۹۰ روزه خاک خالی نیز ۰/۰۷۳ مگاپاسکال است که با افزودن ۲٪ نانوسیلیس با نسبت محلول قلیایی ۰/۳ و ۰/۴۵ به ترتیب ۸۸۶ و ۹۹۶ درصد افزایش مقاومت یافته است. مشابه نمودارهای مقاومت فشاری برای مقاومت کششی نیز نمونه منتخب، نمونه با ۲٪ نانومواد بدست آمد که نمونه با ۲٪ نانوسیلیس و نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵ بیشترین مقاومت کششی را حاصل نمود.

گونه رابطه معرفی می شود. رابطه ۲، ارتباط خطی مستقیم بین این دو متغیر را بیان می کند که در نمونه‌های خاک کوبیده و خاک تثبیت شده [۵۴، ۵۵] این رابطه نتیجه بهتری را بدست می دهد:

$$f'_t = a f'_c \quad (2)$$

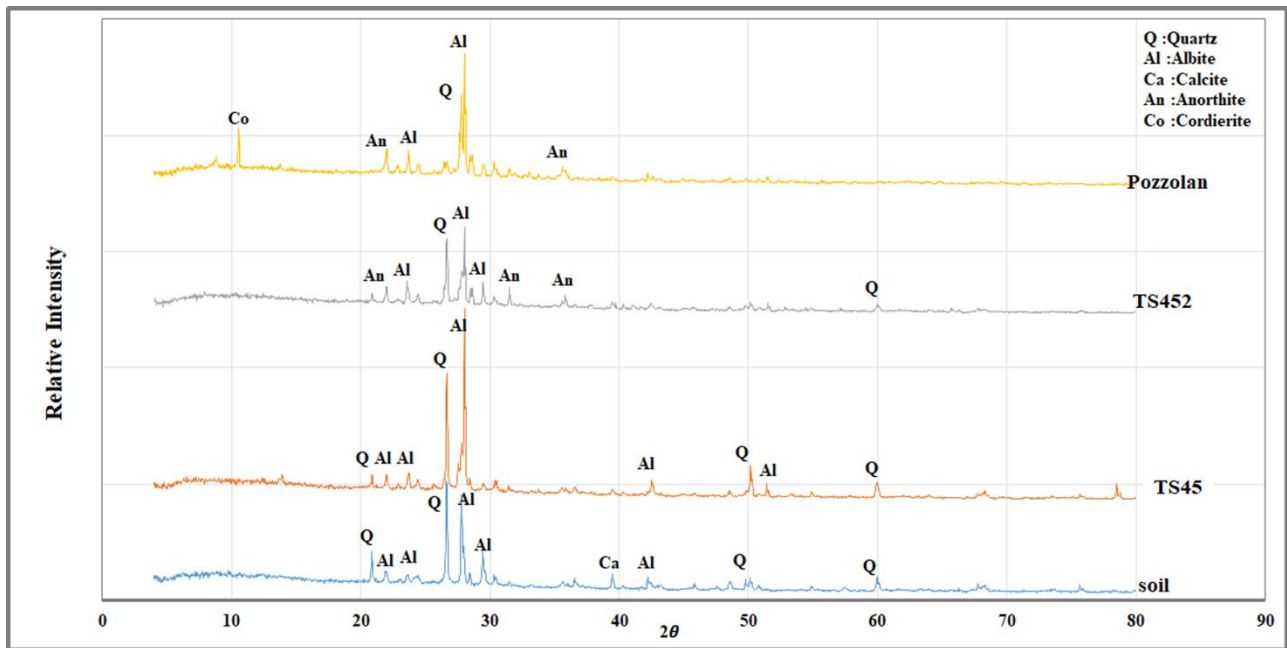
که در آن f'_t و f'_c به ترتیب مقاومت کششی و فشاری و a ثابت عددی می باشد.

در عین حال آیین نامه‌های بتن مانند آیین نامه بتن آمریکا [۶۱] رابطه بین این دو پارامتر را غیرخطی و به صورت رابطه ۳ معرفی می کنند:

$$f'_t = b \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

که در آن b ثابت عددی می باشد.

در ارتباط با رابطه بین مقاومت کششی و فشاری نمونه‌ها، جدول ۵ بر اساس داده های موجود بعد از دوره عمل آوری ۹۰ روزه تهیه شد. در مراجع و مقالات برای رابطه بین مقاومت کششی و فشاری دو



شکل ۱۵. الگوهای XRD خاک خالص، TS45، TS452، و پوزولان تفتان
 Fig. 15. The XRD patterns of soil, TS45, TS452, and Taftan pozzolan

در بازه 2θ بین ۴ تا ۸۰ درجه انجام شده است. با مشاهده این الگوها می توان عناصر تشکیل دهنده هر یک از نمونه ها را به شرح زیر استخراج نمود.

• خاک مورد استفاده دارای کوارتز (Q)، کلسیت (C) و آلبایت (Al) است.
 • پوزولان تفتان دارای کوارتز (Q)، آلبایت (Al)، آنورتایت (An) و کوردرایت (Co) است.

• نمونه های TS45 دارای کوارتز (Q) و آلبایت (Al) است.
 • نمونه های TS452 دارای کوارتز (Q)، آلبایت (Al) و آنورتایت (An) است.

در تحلیل پراش اشعه ایکس، مکان، شدت قله ها و تغییرات آنها در طی واکنش مبنای تحلیل نتایج قرار می گیرد. به نحوی که حذف یک قله یا کاهش شدید آن، بیانگر واکنش دادن و از بین رفتن کانی مربوطه است [۴۰]. مطابق الگوهای به دست آمده عمده تغییرات در ساختار کانی های خاک در بازه 2θ بین ۲۰ تا ۳۰ درجه از پراش اشعه ایکس اتفاق افتاده است.

با مقایسه بین نمودار خاک و نمونه TS452 مشاهده می شود که شدت پیک های خاک به وضوح کاسته شده است. همچنین برخی از کریستال های خاک در 2θ برابر ۲۲ و ۳۹ در نمونه های ژئوپلیمری از

بر اساس نتایج جدول ۵ و مقایسه میانگین، انحراف از معیار و ضریب تغییرات داده های برازش شده بر اساس روابط ۲ و ۳، رابطه خطی مطابق آنچه در تحقیقات نمونه خاک های کوبیده شده [۵۴، ۵۵] مورد استفاده قرار گرفته است، نتیجه بهتری ارائه می دهد. بر اساس این دو تحقیق ضریب a در محدوده ۰/۱ تا ۰/۱۲ بوده (در این مطالعه $a=0.11$) که با نتایج این مطالعه در تطابق بسیار خوبی می باشد.

۳-۵- آنالیزهای ریزساختاری

۳-۵-۱- تحلیل پراش اشعه ایکس XRD

تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) جهت شناسایی ترکیبات مواد و نحوه قرارگیری عناصر کنار یکدیگر به کار می رود. الگوهای به دست آمده توسط نرم افزار X'Pert HighScore و با اعمال پایگاه اطلاعاتی PDF2 به آن تحلیل شده است. الگوهای XRD خاک مورد استفاده، پوزولان تفتان، نمونه TS45 (خاک تثبیت شده با پوزولان تفتان و نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵) و نمونه منتخب TS452 (خاک تثبیت شده با پوزولان تفتان و ۲٪ نانوسیلیس با نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵) بعد از ۹۰ روز عمل آوری بدست آمده اند که جهت مقایسه بهتر، همه الگوها در یک شکل نشان داده شده اند (شکل ۱۵). آنالیز



شکل ۱۶. تصویر SEM نمونه های ۹۰ روزه (۱) TS452 و (۲) TS45 با بزرگ نمایی $10 \times$.
 Fig. 16. The SEM images of 90-day specimens (1) TS452 and (2) TS45 with 10 kx magnification

پوزولان و از بین رفتن کریستال های موجود در فاز بین ۲۰-۴۰ درجه و کاهش شدیدتر پیک های موجود در خاک و پوزولان شده است که این امر موجب افزایش ساختار منظم بلوک های آلومیناسیلیکات و افزایش مقاومت در این نمونه تا ۷/۹۶ مگاپاسکال شده است. از طرفی با دقت بیشتر در الگوهای بدست آمده مشاهده می شود که در نمونه TS45 در $\theta 2$ برابر ۵۲ و ۷۸ درجه دو قله جدید دیده می شوند که نه در پوزولان و نه در خاک وجود نداشتند. با توجه به اینکه تحلیل XRD در ۹۰ روزگی انجام شده است، بنابراین امکان تشکیل مادهی کریستالی جدید وجود دارد. فلچر و همکاران^۱ با بررسی ترکیبات ژئوپلیمری مشاهده کردند که ترکیبات با سیلیکای بیشتر، مقادیر کمتری فاز کریستالی نشان دادند [۶۲]. بنابراین می توان نتیجه گرفت که عدم تشکیل قله مشابه در نمونه ی TS452 می تواند به خاطر وجود نانوسیلیس و در نتیجه سیلیکای بیشتر آن باشد.

۲-۳-۵- عکسبرداری الکترونی روبشی (SEM):

نمونه های انتخاب شده برای این آنالیز همانند آنالیز XRD، نمونه های TS45 و TS452 با دوره عمل آوری ۹۰ روز می باشند. این دو سری نمونه ها دارای نسبت محلول قلیایی ۰/۴۵ می باشند و تنها تفاوت آن ها در داشتن نانوسیلیس در نمونه ی TS453 است

بین رفته اند که این مساله بیانگر واکنش مقداری از خاک طی فرآیند فعالسازی قلیایی و شرکت خاک در فرآیند ژئوپلیمراسیون است. از آنجا که رس (موجود در ریزدانه خاک) می تواند خاصیت پوزولانی داشته باشد، به نظر می رسد بخشی از ریزدانه خاک با فعال کننده واکنش داده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که خود خاک نیز در فرآیند ژئوپلیمراسیون شرکت می کند و روی نتایج نهایی اثر می گذارد. ولی با مقایسه نمونه TS45، خاک و پوزولان مشاهده می شود که برخی از پیک های پوزولان و خاک خصوصا پیک های موجود در ۲۰-۳۰ درجه در نمونه TS45 افزایش داشته اند که این موضوع نشان دهنده این است که خاک و پوزولان به طور کامل نتوانسته اند با یکدیگر وارد واکنش و با فرآیند فعال سازی قلیایی موجب کاهش کریستال های موجود شوند. در رابطه با عملکرد پوزولان در نمونه ی TS452 نیز می توان گفت که این ماده به مقدار زیادی واکنش داده است و از بین رفتن قله های آلبایت آن در ۲۰-۳۰ درجه در این نمونه، نشان دهنده مشارکت آن در واکنش ها است. از دیگر سو با توجه به نمودار مشاهده می شود که برای نمونه ی TS452 افزایش پیک اتفاق نیفتاده است و از شدت پیک های پوزولان و خاک در این نمونه کاسته شده است و برخی از پیک های پوزولان مانند پیک موجود در $\theta 2$ برابر ۱۱ که مربوط به کوردرایت (Co) می باشد، کاملا از بین رفته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که وجود نانوسیلیس باعث انحلال بیشتر

1 R. A. Fletcher et al.

که بیشترین مقاومت را به دست داد. در شکل ۱۶ تصاویر SEM این نمونه ها با بزرگ نمایی $10 \times kx$ آورده شده است.

همانطور که از تصاویر مشاهده می شود نمونه TS452 دارای ساختار متراکم تر و خلل و فرج کمتری نسبت به نمونه TS45 می باشد. از طرفی به وضوح قابل رویت است که در نمونه TS45 ذرات به درستی باهم واکنش نداده اند و از این رو ساختار ناهمگنی را ایجاد کرده اند. از آنجایی که تنها تفاوت این دو نمونه در داشتن ۲٪ نانوسیلیس نمونه TS452 است، می توان نتیجه گرفت که وجود نانوسیلیس باعث ایجاد ساختار متراکم تر و همگن تر می شود و همچنین به دلیل سطح جانبی بالا و نانو ذره بودن آن، خلل و فرج را نیز پر می کند و در نتیجه ژل ژئوپلیمری به طور گسترده در داخل ذرات خاک پراکنده می شود. به عبارتی وجود نانوسیلیس و خواص منحصر به فرد آن، باعث واکنش پذیری بالاتر و در نتیجه توسعه بهتر ژل ژئوپلیمر و ایجاد سطحی همگن تر می شود. از طرفی در دوره عمل آوری بالا با توجه به تکمیل واکنش پوزولانی، زنجیرهای Si-O-Si و Si-O-Al تشکیل می شود که زنجیره Si-O-Si قدرت پیوندی بیشتری نسبت به زنجیره Si-O-Al دارد. با اضافه کردن نانوسیلیس و با توجه به خواص ویژه این نانوماده (از جمله درصد بالای SiO_2 آن)، چگالی تشکیل پیوند Si-O-Si بالا می رود و بدلیل قدرت بالاتر این پیوند، ژل ژئوپلیمری قوی تری شکل می گیرد و در نتیجه مقاومت افزایش می یابد. همچنین دلیل دیگر کم بودن مقاومت نمونه TS45 می تواند تشکیل کریستال های سوزنی باشد که این کریستال های سوزنی شکل باعث می شود ذرات خاک و ژئوپلیمر به خوبی باهم ترکیب نشوند. تصویر این کریستال ها به وضوح در دایره قرمز شکل ۱۶-۲ قابل مشاهده است. بنابراین نتایجی مشابه با الگوهای XRD به دست آمد و بار دیگر تاثیر چشمگیر نانومواد بر بهبود خواص خاک چه از لحاظ مقاومتی و چه از لحاظ ریزساختاری اثبات گردید.

مقاومت فشاری و کششی می تواند به عنوان یک تثبیت کننده مؤثر برای خاک های ماسه استفاده شود.

(۲) با افزایش دوره عمل آوری، مقاومت فشاری و کششی خاک تثبیت شده افزایش می یابد که در ۲۸ روز اول عمل آوری این افزایش بیشتر است.

(۳) با افزایش میزان محلول فعال ساز قلیایی از ۰/۳ به ۰/۴۵، مقاومت فشاری و کششی افزایش می یابد که این افزایش به دلیل انجام واکنش بیشتر به واسطه فعال کننده بیشتر می باشد.

(۴) استفاده از درصد های مختلف نانوسیلیس و نانورس باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی نسبت به خاک خالص و نمونه های ژئوپلیمری بدون نانو می شود که در این میان بیشترین مقاومت برای ۲٪ نانومواد اتفاق افتاد.

(۵) با مقایسه نمونه های ژئوپلیمری حاوی نانوسیلیس و نانورس مشاهده می شود که نمونه های با درصد های مختلف نانوسیلیس به دلیل داشتن سیلیس و اثر پوزولانی بیشتر نسبت به نمونه های مشابه نانورس، مقاومت بالاتری را نشان می دهند.

(۶) با مقایسه نمونه های سیمانی و ژئوپلیمری مشاهده می شود که افزودن نانومواد باعث افزایش مقاومت نسبت به نمونه های سیمانی می شود. خصوصا افزودن نانوسیلیس به نمونه های ژئوپلیمری، افزایش مقاومت چشمگیری را نسبت به نمونه های تثبیت شده با سیمان نشان می دهد.

(۷) تجزیه و تحلیل میکروساختاری (SEM و XRD)، تشکیل ژئوپلیمر و اثربخشی استفاده از پوزولان و نانومواد را برای تثبیت خاک تایید کرد. تجزیه و تحلیل SEM نشان داد که خاک تثبیت شده با پوزولان و نانوسیلیس (درصد مطلوب) دارای ساختار همگن بیشتر، تخلخل کمتر و سطح یکنواخت تر نسبت به نمونه های دیگر است.

علائم انگلیسی

T	مقاومت کششی، MPa
P	حداکثر نیروی فشاری اعمال شده توسط دستگاه، N
l	طول نمونه، mm
D	قطر نمونه، mm

بالانویس

* شرایط مرجع

۶- نتیجه گیری

امروزه مواد ژئوپلیمری به دلیل در دسترس بودن، کاهش مصرف منابع انرژی و گازهای گلخانه ای به عنوان بهترین ماده دوستدار محیط زیست جایگزین سیمان مطرح است. مهمترین نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

(۱) ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی تفتان و نانومواد با افزایش

- Engineering, 22(2) (2009) 196-203.
- [13] C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, M.M. Disfani, Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*, 69 (2014) 285-294.
- [14] J. Geng, M. Zhou, T. Zhang, W. Wang, T. Wang, X. Zhou, X. Wang, H. Hou, Preparation of blended geopolymer from red mud and coal gangue with mechanical co-grinding preactivation, *Materials and Structures*, 50(2) (2017) 109.
- [15] I. Giannopoulou, D. Dimas, I. Maragkos, D. Pantias, Utilization of metallurgical solid by-products for the development of inorganic polymeric construction materials, *Global NEST Journal*, 11(2) (2009) 127-136.
- [16] V.A. Mymrin, A.J. Vázquez-Vaamonde, Red mud of aluminium production waste as basic component of new construction materials, *Waste Management & Research*, 19(5) (2001) 465-469.
- [17] Z. Pan, D. Li, J. Yu, N. Yang, Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 33(9) (2003) 1437-1441.
- [18] S. Detphan, P. Chindaprasirt, Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(6) (2009) 720-726.
- [19] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of materials science*, 42(9) (2007) 2917-2933.
- [20] P. Sukmak, S. Horpibulsuk, S.-L. Shen, Strength development in clay-fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 566-574.
- [21] Sindhunata, J. Van Deventer, G. Lukey, H. Xu, Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(10) (2006) 3559-3568.
- [22] J. Davidovits, Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: proceedings of the world congress geopolymer 2005, Geopolymer Institute,
- [1] L. Barden, G. Sides, Sample disturbance in the investigation of clay structure, *Geotechnique*, 21(3) (1971) 211-222.
- [2] Z. Zhang, M. Tao, Durability of cement stabilized low plasticity soils, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(2) (2008) 203-213.
- [3] O.S.B. Al-Amoudi, K. Khan, N.S. Al-Kahtani, Stabilization of a Saudi calcareous marl soil, *Construction and Building Materials*, 24(10) (2010) 1848-1854.
- [4] D.H. Moon, D.G. Grubb, T.L. Reilly, Stabilization/solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust, *Journal of hazardous materials*, 168(2-3) (2009) 944-951.
- [5] T. Edil, C. Benson, M. Bin-Shafique, B. Tanyu, W.-H. Kim, A. Senol, Field evaluation of construction alternatives for roadways over soft subgrade, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1786) (2002) 36-48.
- [6] H. Kukko, Stabilization of clay with inorganic by-products, *Journal of materials in civil engineering*, 12(4) (2000) 307-309.
- [7] K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick, Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and concrete research*, 38(2) (2008) 128-136.
- [8] A.M. Al Bakri, O.A. Abdulkareem, A. Rafiza, Y. Zarina, M. Norazian, H. Kamarudin, Review on Processing of low calcium fly ash geopolymer concrete, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(5) (2013) 342-349.
- [9] A. Islam, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, I.I. Bashar, S.A. Kabir, Engineering properties and carbon footprint of ground granulated blast-furnace slag-palm oil fuel ash-based structural geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 503-521.
- [10] J. Davidovits, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8) (1991) 1633-1656.
- [11] J.L. Provis, J.S.J. Van Deventer, Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications, Elsevier, 2009.
- [12] I. Maragkos, I.P. Giannopoulou, D. Pantias, Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers, *Minerals*

- 273-275.
- [34] D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal, Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 135 (2017) 430-439.
- [35] H. Assaedi, F. Shaikh, I.M. Low, Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4(1) (2016) 19-28.
- [36] I. Phummiphan, S. Horpibulsuk, P. Sukmak, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, S.-L. Shen, Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer, *Road Materials and Pavement Design*, 17(4) (2016) 877-891.
- [37] A. Standard, D422, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, in.
- [38] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan, S. Hatanaka, The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Materials & Design*, 55 (2014) 58-65.
- [39] K. Hossain, L. Mol, Structural performance of stabilized Papua New Guinea soil blocks, in: *Proc., 7th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction (EASEC7)*, Social System Institute Tokyo, 1999, pp. 1454-1459.
- [40] M.P. Bilondi, M.M. Toufigh, V. Toufigh, Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, *Construction and Building Materials*, 170 (2018) 302-313.
- [41] D. ASTM, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, in, *American Society for Testing and Materials West Conshohocken, Pa*, 2006.
- [42] A.C.D.-o. Soil, Rock, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³)) 1, ASTM International, 2007.
- [43] A. Standard, D3080-11 (2011), Standard Test Method for Direct.
- [44] A. Standard, C618-08a: Standard Specification for Coal 2005.
- [23] F. Pacheco-Torgal, D. Moura, Y. Ding, S. Jalali, Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars, *Construction and Building Materials*, 25(9) (2011) 3732-3745.
- [24] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Zongjin, Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement, *Applied Clay Science*, 47(3-4) (2010) 271-275.
- [25] B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, G.D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, *Journal of cleaner production*, 19(9-10) (2011) 1080-1090.
- [26] E. Diaz, E. Allouche, S. Eklund, Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers, *Fuel*, 89(5) (2010) 992-996.
- [27] V. Toufigh, M. Barzegari Dehaji, K. Jafari, Experimental investigation of stabilisation of soils with Taftan pozzolan, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2018) 1-24.
- [28] M. Sabbagh Gol, V. Toufigh, Feasibility Study of Sandy Soil Stabilization with Glass Powder and Natural Pozzolan Based Geopolymer, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(1) (2019) 169-182.
- [29] E.N. Kani, A. Allahverdi, Effect of chemical composition on basic engineering properties of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan, *Ceramics-Silikaty*, 53(3) (2009) 195-204.
- [30] D. Bondar, C.J. Lynsdale, N.B. Milestone, Alkali-activated natural pozzolan concrete as new construction material, *ACI Materials Journal*, 110(3) (2013) 331.
- [31] H.M. Khater, Effect of nano-silica on microstructure formation of low-cost geopolymer binder, *Nanocomposites*, 2(2) (2016) 84-97.
- [32] P.S. Deb, P.K. Sarker, S. Barbhuiya, Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature, *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 675-683.
- [33] S. Naskar, A.K. Chakraborty, Effect of nano materials in geopolymer concrete, *Perspectives in Science*, 8 (2016)

- reinforcement on the post-cracking behaviour of a cement-stabilised sandy-clay subjected to indirect tensile stress, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 163-173.
- [54] T.-T. Bui, Q.-B. Bui, A. Limam, S. Maximilien, Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications, *Construction and Building Materials*, 51 (2014) 295-302.
- [55] V. Toufigh, E. Kianfar, The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts, *Construction and Building Materials*, 200 (2019) 616-629.
- [56] H. Danso, D.B. Martinson, M. Ali, J. Williams, Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks, *Construction and Building Materials*, 83 (2015) 314-319.
- [57] M.J. Khattak, M. Alrashidi, Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures, *The International Journal of Pavement Engineering*, 7(1) (2006) 53-62.
- [58] A. Krishnaya, Z. Eisenstein, Brazilian tensile test for soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 11(4) (1974) 632-642.
- [59] A. Abrishambaf, J.A. Barros, V.M. Cunha, Tensile stress-crack width law for steel fibre reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests, *Cement and Concrete Composites*, 57 (2015) 153-165.
- [60] I.B. Topcu, M. Canbaz, Properties of concrete containing waste glass, *Cement and concrete research*, 34(2) (2004) 267-274.
- [61] A.C. Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14): an ACI Report, American Concrete Institute. ACI, 2014.
- [62] R.A. Fletcher, K.J. MacKenzie, C.L. Nicholson, S. Shimada, The composition range of aluminosilicate geopolymers, *Journal of the European Ceramic Society*, 25(9) (2005) 1471-1477.
- Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, (2008).
- [45] A. Bagheri, T. Parhizkar, H. Madani, A. Raisghasemi, The influence of different preparation methods on the aggregation status of pyrogenic nanosilicas used in concrete, *Materials and structures*, 46(1-2) (2013) 135-143.
- [46] S. Ahmari, K. Parameswaran, L. Zhang, Alkali activation of copper mine tailings and low-calcium flash-furnace copper smelter slag, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6) (2014) 04014193
- [47] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials*, 24(7) (2010) 1309-1312.
- [48] D. Bondar, C. Lynsdale, N. Milestone, N. Hassani, A. Ramezaniapour, Effect of adding mineral additives to alkali-activated natural pozzolan paste, *Construction and Building Materials*, 25(6) (2011) 2906-2910.
- [49] V.F. Barbosa, K.J. MacKenzie, C. Thaumaturgo, Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers, *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4) (2000) 309-317.
- [50] A.S. Muntohar, A. Widiyanti, E. Hartono, W. Diana, Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9) (2012) 1260-1270.
- [51] A. Dexter, C.W. Watts, Tensile strength and friability, Soil and environmental analysis: Physical methods, 2 (2000) 405-433.
- [52] A.A. Correia, P.J.V. Oliveira, D.G. Custódio, Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2) (2015) 97-106.
- [53] N. Cristelo, V.M. Cunha, A.T. Gomes, N. Araújo, T. Miranda, M. de Lurdes Lopes, Influence of fibre

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Baghban Shokatabad, V. Toufigh, M.M. Toufigh, Stabilization of sandy soil with geopolymers based on nanomaterials and Taftan pozzolan, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(9) (2020) 2357-2378.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16205.6155](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16205.6155)



