Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 57(11) (2026) 1875-1896
DOI: 10.22060/ceej.2026.25076.8381

Laboratory Study of Stabilization and Solidification of Lead and Zinc Contaminated Soil Using Geopolymer Cement

Mojtaba Gholamrezaei, Mohammad Delnavaz *, Hadi Shahir

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: This research investigates the capabilities of geopolymer cement in the stabilization and solidification of heavy metal-contaminated soils, particularly those contaminated with lead and zinc. One of the key aspects of this research is the use of steel and blast furnace slags, considered as industrial waste, as raw materials in the production of geopolymer cement. To this end, contaminated soil samples were stabilized using both types of binders, and various tests, including compaction, uniaxial compressive strength (UCS), toxicity characteristic leaching procedure (TCLP), and scanning electron microscopy (SEM), were conducted to evaluate the performance of the binders. The results of the uniaxial compressive strength tests showed that the samples stabilized with geopolymer cement exhibited higher strength at all curing times compared to those stabilized with Portland cement, with a strength increase of approximately 100 to 200 kPa. Moreover, the leaching test results indicated that steel slag significantly reduced the concentration of lead ions from 26,000 ppm to less than 1 ppm. In the case of zinc, the concentration was reduced from 16,000 ppm to 0.3 ppm, demonstrating the high potential of this material in the stabilization of heavy metals. However, despite the high compressive strength of sodium silicate-containing samples, they were less effective in reducing the concentrations of heavy metals in the leaching tests. This research also showed that increasing the binder content improved the mechanical strength of the samples and enhanced the stabilization of contaminants.

Review History:

Received: Nov. 10, 2025
Revised: Dec. 27, 2025
Accepted: Jan. 17, 2026
Available Online: Feb. 17, 2026

Keywords:

Geopolymer Cement
Soil Stabilization
Leaching
Lead and Zinc
Compressive Strength

1- Introduction

Various technologies have been developed to transform hazardous wastes into non-toxic materials or reduce the potential release of toxic species into the environment. Examples include chemical precipitation, electrolysis, biological treatment, and stabilization/solidification (S/S) [1]. Remediation technologies can be classified based on in situ or ex situ immobilization or extraction (the action applied to metals) and other types of technologies. Remediation of heavy metal contaminated soils is limited to two main strategies: immobilization and extraction [2]. Generally, stabilization is a process in which additives are mixed with waste to minimize the rate of movement of contaminants from the waste and reduce the toxicity of the waste. Therefore, stabilization can be described as a process in which contaminants are completely or partially confined by the addition of supporting agents, binders, or other modifiers. Similarly, solidification is a process that uses additives to change the physical nature of the waste (measured by engineering properties such as strength, compressibility, or permeability) during the process. Therefore, the goals of stabilization and solidification include both reducing the toxicity and mobility of the waste and improving the engineering properties of the stabilized material [3]. The S/S method is considered to be one of the effective methods for removing heavy metal contamination from contaminated soils. This method has high efficiency and can reduce the leaching of hazardous substances from waste disposed of in landfills and contaminated soils [4]. In the S/S method, various materials are used as binders, the most common and widely used of which is ordinary Portland cement. Other materials that can be used as binders include lime, gypsum, pozzolans, and fly ash. In some cases, several stabilizing agents are used in combination and the effect of each of these materials on stabilization is studied [5]. Usually, ordinary Portland cement is used for the S/S method; however, the degree of reduction in the strength of cement-contaminated soils depends strongly on the type and concentration of heavy metals. On the other hand, considering the environmental challenges associated with the production of Portland cement, including high carbon dioxide emissions and high energy consumption, the need to find sustainable and environmentally friendly alternatives is essential. In this regard, geopolymer cement has been proposed as a suitable alternative due to its high potential in reducing environmental

*Corresponding author's email: delnavaz@khu.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.

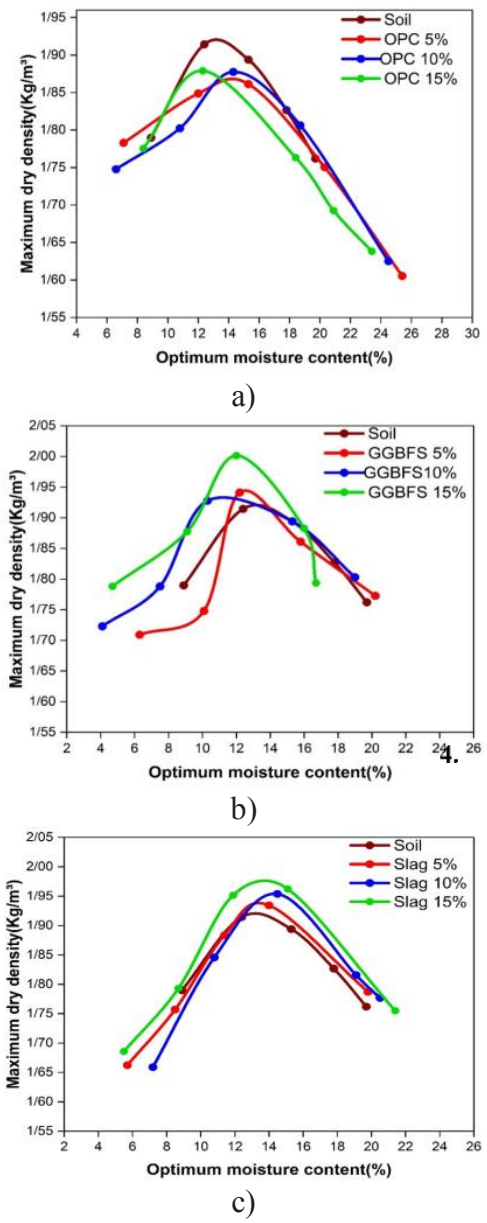


Fig. 1. Compaction of contaminated soil a) mixed with cement b) mixed with GGBFS c) mixed with slag.

impacts, significant mechanical properties, and resistance to corrosive conditions [6].

Geopolymer cement, which is known as a new type of adhesive, is a type of inorganic cement obtained by combining aluminosilicate raw materials with alkaline solutions.

Considering other studies conducted on the use of geopolymer cements for the removal of heavy metals from soil, the main objective of this study is to compare the performance of geopolymer cement with two separate types of slags, iron and steel smelting, as well as ordinary Portland cement as a binder. In this study, two types of alkaline solutions, including sodium hydroxide and sodium metasilicate, were used in different ratios to activate the slag. Also, the efficiency of these compounds in controlling the release of metal ions and the effect of curing conditions and time on the mechanical strength of the samples and the stabilization of contaminants were evaluated.

2- Methodology

In this study, a contaminated soil sample from a lead and zinc mine waste site located in Buin Zahra County was used. Due to mining activities, this area contains significant amounts of mineral waste that have been improperly disposed of in a landfill. Improper accumulation of this waste has increased the risk of heavy metal contamination in the surrounding soils and has become a potential source of environmental pollution. To investigate this issue in detail, completely random sampling was carried out from different parts of this site. Two separate types of slag were used to produce geopolymer cement in this study: iron smelting slag and steel slag. For sample preparation the soil, slag and cement were dried in an oven for 24 hours at 110 degrees Celsius to ensure that no moisture remained in the materials. This step was necessary to accurately control the moisture content of the samples, as residual moisture could change the results. The alkaline solution was also prepared one day before the samples were prepared. This was done because the alkaline solution generates heat during production and there must be enough time to reduce this heat so that it does not affect the final properties of the samples when mixed with other materials. To investigate the effect of curing time on the properties of the samples, four different time periods were considered, including 3, 7, 28 and 90 days.

3- Discussion and Results

The graphs related to the compaction test are shown in Figure 1. The results indicate that the addition of cement, iron smelting slag and steel have different effects on compaction parameters. These changes are clearly observed in the graphs of optimum moisture content and dry specific gravity. The soil compaction graphs show significant differences in the mechanical behavior of soil with the use of different additives. Adding cement to the soil increased the optimum moisture content. This increase may be due to the water absorption characteristics of cement and the need for more moisture for better compaction. However, the addition of cement led to a decrease in the dry specific gravity. This decrease may be due to the change in the internal structure of soil and cement and its effect on soil compaction.

According to the standards of the Environmental Protection Agency (EPA), all industrial and mining waste accumulations must be monitored for heavy metal concentrations by leakage tests (TCLP). The TCLP test simulates acid rain conditions over a long period of time (approximately 100 years). This test uses a weak acidic solution (usually acetic acid) to model the long-term effects of acid rain on the samples and measures the amount of pollutants that may be released from the samples during this period. The results of this test can help determine the long-term stability and safety of stabilizing materials in the face of environmental conditions. EPA Method 1311 was

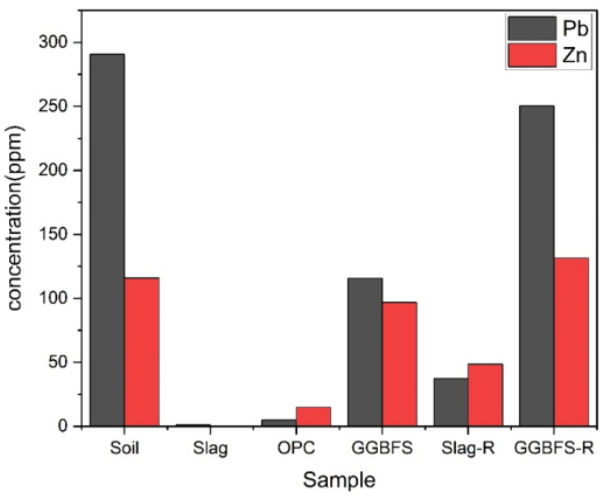


Fig. 2. Concentration of heavy metals extracted from TCLP test

used to conduct a deep leaching test of mineral tailings and to evaluate the potential for heavy metal release from stabilized samples after 28 days of curing. The TCLP test results (Figure 2) showed that steel slag effectively prevented the leakage of pollutants, and the levels of pollutants were within the desired range and below the established standards. Portland cement also performed similarly and prevented the leakage of pollutants well. However, iron and steel slag performed worse than the other two options, and the amount of leaked pollutants was higher than the standard limit.

4- Conclusions

The results of the tests showed that the addition of cement caused a slight increase in the optimal moisture content but a decrease in the maximum dry specific gravity. These changes indicate that cement, due to its nature, requires more water to achieve optimal compaction, but at the same time, it makes the soil structure less dense. In the case of iron smelting slag, the increase in specific gravity and optimum moisture content indicates that this material contributes to greater soil compaction and requires more water to achieve optimum compaction. In general, these results indicate that each material has different effects on soil compact ability and optimum moisture content due to its physical and chemical properties. The results of this study show that geopolymer cement shows higher initial strength compared to Portland cement and can be a suitable option for situations where there is a need for rapid stabilization of soil contamination.

References

[1] M.Niu, G.Li, Y.Wang, Q. Li, L.Han, and Z. Song, Comparative study of immobilization and mechanical properties of sulfoaluminate cement and ordinary Portland cement with different heavy metals. Construction and Building Materials, 193 (2018): 332–343.

[2] G. Dermont, M. Bergeron, G. Mercier, and M. Richer-Laflèche, Metal-Contaminated soils: Remediation practices and treatment technologies. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 12(3) (2008): 188–209.

[3] D. Dermatas, et al. Stabilization or solidification of lead-contaminated soil using RHA. Journal of Hazardous Materials, 271(4) (2018): 238-243.

[4] N. Phanija, and R.V.P. Chavali, Solidification/ stabilization of copper-contaminated soil using phosphogypsum. Innovative Infrastructure Solutions. 6, 145 (2021).

[5] V. Illera, F. Garrido, S. Serrano, and M.T. García-González, Immobilization of the heavy metals Cd, Cu and Pb in an acid soil amended with gypsum- and lime-rich industrial by-products. European Journal of Soil Science, 55(1) (2004): 135–145.

[6] N.B. Singh, and B. Middendorf, Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. Construction and Building Materials, 237 (2020): 117455.

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱۸۷۵ تا ۱۸۹۶
DOI: 10.22060/ceej.2026.25076.8381

مطالعه آزمایشگاهی تثبیت و جامدسازی خاک‌آلوده به سرب و روی توسط سیمان ژئوپلیمری

مجتبی غلامرضایی، محمد دلنواز *، هادی شهیر

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

خلاصه: این تحقیق به بررسی قابلیت‌های سیمان ژئوپلیمری در تثبیت و جامدسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین سرب و روی پرداخته است. ماده اولیه استفاده شده در سیمان ژئوپلیمری سرباره‌های ذوب‌آهن و فولاد بود. در این راستا، نمونه‌های خاک‌آلوده با استفاده از دو نوع چسب تثبیت شدند و آزمایش‌های تراکم خاک، ICP، مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش نشت (TCLP) و میکروسکوپ الکترونی روبشی برای ارزیابی عملکرد انجام شد. نتایج تست مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان ژئوپلیمری در تمامی دوره‌های عمل‌آوری، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند داشته‌اند، به‌طوری که مقاومت آن‌ها حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال بیشتر از نمونه‌های سیمان معمولی بود. از سوی دیگر، نتایج آزمایش نشت نشان داد که سرباره فولاد به‌طور قابل توجهی قادر است غلظت یون سرب را از ۲۶۰۰۰ ppm به کمتر از ۱ ppm کاهش دهد. همچنین، در تثبیت یون روی، غلظت این یون از ۱۶۰۰۰ ppm به ۰/۳ ppm کاهش یافت که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این ماده در کنترل و تثبیت فلزات سنگین است. علی‌رغم این‌که نمونه‌های حاوی سیلیکات سدیم مقاومت بالایی در آزمایش‌های تک‌محوری داشتند، در آزمایش نشت نتوانستند غلظت فلزات سنگین را به زیر حد آستانه برسانند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد چسب، مقاومت مکانیکی نمونه‌ها بهبود یافته و فرآیند تثبیت آلاینده‌ها به‌طور مؤثرتری انجام می‌شود. در نهایت، سیمان ژئوپلیمری به‌عنوان یک گزینه مناسب برای تثبیت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، نه تنها به دلیل کارایی بالا در تثبیت آلاینده‌ها، بلکه به‌دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی خود می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

کلمات کلیدی:
سیمان ژئوپلیمری
تثبیت خاک
نشت
سرب و روی
مقاومت فشاری

۱- مقدمه

آلودگی خاک مشکل بزرگی است که می‌تواند اثرات مخربی بر محیط‌زیست و سلامت انسان داشته باشد. امروزه با رشد فناوری و سرعت توسعهٔ شهری و صنعتی‌شدن و استفادهٔ بیشتر از مواد شیمیایی و پسماندهای تولید شده، حضور آلاینده‌ها در خاک‌ها به طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته و تبدیل به یکی از مشکلات متداول زیست‌محیطی در سراسر جهان شده است [۱]. به‌طورکلی آلاینده‌های خاک را می‌توان به دو دسته آلاینده‌های آلی و غیرآلی تقسیم‌بندی کرد. مهم‌ترین آلاینده‌های آلی عبارتند از: ترکیبات فنل، هیدروکربن‌های آروماتیک (حشره‌کش‌ها)، هیدروکربن‌های کلردار (آفت‌کش‌های زراعی)، بنزین و سایر مشتقات نفتی. مهم‌ترین آلاینده‌های غیرآلی در خاک نیز عبارت‌اند از: آرسنیک، آزبست، سیانیدها، سولفات‌ها، نیترات‌ها، فسفات‌ها و فلزات سنگین نظیر کادمیوم، جیوه، سرب، روی، مس، کروم، نیکل و سلنیم [۲]. آلودگی خاک به فلزات سنگین یک مشکل رایج در سراسر جهان است. فلزات سنگین به علت سمی بودن، تجمع و حضور در پسماندها یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی هستند. در میان فلزات سنگین یون سرب به‌صورت ویژه مورد توجه بوده و این به دلیل سمیت و استفادهٔ گسترده از آن در صنایع مختلف است [۳]. منابع اصلی آلودگی سرب شامل انتشار آن از صنایع شیمیایی، پتروشیمی و متالورژی، دفع رنگ مبتنی بر سرب، انتشار گازهای گلخانه‌ای از نفت، زباله‌سوزهای جامد، عملیات معدن و ذوب فلزات می‌باشد. وجود سطوح بالای فلزات سنگین از جمله سرب، روی و کادمیوم در خاک‌های صنعتی مناطق متروکه عمدتاً به دلیل روش‌های نامناسب دفع زباله، نقص در فرایندهای تصفیه فنی و نشت‌های شیمیایی است [۴]. آلوده بودن خاک‌ها، باعث می‌شود زمانی که خاک‌آلوده در تماس با جریان‌های آب سطحی قرار می‌گیرد، این آلاینده‌ها در جریان سطحی شسته شده و با آب حل‌شده و ضمن ورود به آب‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: delnavaz@khu.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.

زیرزمینی باعث آلودگی آبخوان‌ها شود. تاکنون فناوری‌های مختلفی برای تبدیل زباله‌های خطرناک[1] به مواد غیرسمی یا کاهش انتشار بالقوه گونه‌های سمی در محیط توسعه یافته‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به ترسیب شیمیایی[2]، الکترولیز[3]، تصفیه بیولوژیکی[4] و تثبیت/جامد سازی[5] (S/S)اشاره نمود [۵]. فناوری‌های اصلاحی را می‌توان بر اساس بی حرکتی یا استخراج (عملی که روی فلزات اعمال می‌شود) درجا یا خارج از محل و انواع دیگر فناوری‌ها طبقه‌بندی کرد. تصفیه خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به دو راهبرد اصلی بی حرکتی و استخراج محدود می‌شود [۶].

به‌طورکلی، تثبیت فرایندی است که در آن مواد افزودنی با ضایعات مخلوط می‌شوند تا نرخ حرکت آلاینده‌ها از زباله به حداقل برسد و سمیت زباله کاهش یابد. بنابراین، تثبیت را می‌توان به‌عنوان فرایندی توصیف کرد که در آن آلاینده‌ها به طور کامل یا جزئی با افزودن معرف‌های پشتیبانی‌کننده، چسباننده‌ها یا سایر اصلاح‌کننده‌ها محدود می‌شوند. به همین ترتیب، جامد سازی فرایندی است که از مواد افزودنی استفاده می‌کند که به‌وسیله آن ماهیت فیزیکی زباله (که با خواص مهندسی مقاومت، تراکم‌پذیری و یا نفوذپذیری اندازه‌گیری می‌شود) در طول فرایند تغییر کند. بنابراین، اهداف تثبیت و جامد سازی هم شامل کاهش سمیت و تحرک زباله و هم بهبود خواص مهندسی مواد تثبیت‌شده است [۷]. روش S/S به عنوان یکی از روش‌های موثر در رفع آلودگی فلزات سنگین خاک‌های آلوده مطرح است. این روش دارای راندمان بالایی است و می‌تواند شسته شدن مواد خطرناک را از زباله‌های دفع شده در محل‌های دفن زباله و خاک‌های آلوده کاهش دهد [۸]. در روش S/S از مواد مختلفی به‌عنوان چسب[6] استفاده می‌شود که رایج‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها سیمان پرتلند معمولی[7] است. از سایر موادی که به عنوان عامل چسباننده قابل استفاده هستند، می‌توان به آهک، گچ، پوزولان‌ها و خاکستر بادی اشاره نمود. در برخی موارد از چندین عامل تثبیت‌کننده به‌صورت ترکیبی استفاده می‌شود و تأثیر هر یک از این مواد در تثبیت مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۹]. معمولاً برای روش S/S از سیمان پرتلند معمولی استفاده می‌شود؛ اما میزان کاهش مقاومت خاک‌های آلوده با سیمان به شدت به نوع و غلظت فلزات سنگین بستگی دارد. از طرفی با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با تولید سیمان پرتلند، از جمله انتشار بالای دی‌اکسیدکربن و مصرف انرژی زیاد، نیاز به یافتن جایگزین‌های پایدار و دوستدار محیط‌زیست امری ضروری است. در این راستا، سیمان ژئوپلیمری به دلیل پتانسیل بالا در کاهش اثرات زیست‌محیطی، خواص مکانیکی قابل‌توجه و مقاومت در برابر شرایط خورنده، به‌عنوان یک جایگزین مناسب مطرح شده است [۱۰].

سیمان ژئوپلیمری که به‌عنوان یک نوع چسب جدید شناخته می‌شود، نوعی سیمان غیرآلی است که از ترکیب مواد اولیه آلومینوسیلیکاتی با محلول‌های قلیایی به دست می‌آید. برخلاف سیمان پرتلند که از ترکیب کلینکر و گچ تولید می‌شود و طی فرایند تولید آن مقادیر زیادی دی‌اکسیدکربن منتشر می‌شود، سیمان ژئوپلیمری با استفاده از مواد ضایعاتی و پسماندهای صنعتی ساخته می‌شود و از این رو، به‌عنوان یک گزینه پایدار و دوستدار محیط‌زیست مطرح است. چسب‌های فعال‌شده با قلیا با استفاده از فرآیند فعال‌سازی قلیایی مواد اولیه آلومینوسیلیکاتی، از جمله خاکستر بادی، سرباره کوره بلند آهن گدازی، متاکائولین، زئولیت و خاکستر پوسته برنج تولید می‌شوند. این مواد معمولاً ضایعات صنعتی یا طبیعی با محتوای بالای آلومینا و سیلیکا هستند. فرایند ژئوپلیمریزاسیون ممکن است با حل شدن مواد اولیه حاوی آلومینو سیلیکات در محلول‌های قلیایی انجام شود که منجر به تشکیل مونومرهای آلومینات و سیلیکات خواهد شد. این مواد سپس به الیگومرها و در نهایت به ژئوپلیمرها تبدیل می‌شوند [۱۱].

در سال های اخیر تحقیقات متنوعی در زمینه استفاده از فرایند تثبیت/جامدسازی برای حذف فلزات سنگین انجام شده است. Pan و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی چگونگی تأثیر عواملی مانند غلظت سیمان، غلظت سرب، محتوای اسید هیومیک و اسید فولویک و سن پخت بر مقاومت فشاری و رفتار عناصرسمی بالقوه پرداختند [۱۲]. نتایج این تحقیق نشان داد که اسید هیومیک و اسید فولویک اثرات تثبیت فلزات سنگین در خاک تثبیت‌شده با سیمان را تضعیف می‌کنند. اگرچه این اسیدها می‌توانند سیمان‌سازی را در خاک تثبیت‌شده با سیمان تضعیف کنند، اما می‌توانند فلزات سنگینی مانند سرب را از طریق واکنش‌های شیمیایی مختلف تثبیت کنند. Huang و همکاران در سال ۲۰۲۰، در تحقیقی ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان مناسب را به‌عنوان یک روش مؤثر برای تصفیه خاک‌آلوده به فلزات سنگین پیشنهاد کردند. هدف این تحقیق بررسی اثرات محتوای الیاف، طول الیاف، میزان سیمان، زمان پخت، انواع فلزات سنگین و غلظت بر خواص مکانیکی خاک بود. نتایج نشان داد که وجود سرب باعث کاهش مقاومت فشاری تک محوره و چسبندگی نمونه‌های خاک می‌شود و غلظت بالاتر سرب تأثیر

1. Hazardous Waste
2. Chemical Precipitation
3. Electrolysis
4. Biological Treatment
5. Solidification/Stabilization
6. Binder
7. Ordinary Portland Cement

بیشتری بر کاهش مقاومت دارد. با این حال، زاویه اصطکاک داخلی تحت‌تأثیر غلظت سرب قرار نمی‌گیرد. همچنین راندمان حذف سرب نسبت به روی و مس به دلیل محلولیت کمتر آن در خاک کمتر است [۱۳]. Ouhadi و همکاران در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی با هدف بررسی تأثیر الگوهای حلالیت سرب وابسته به pH، به بررسی تثبیت رس آلوده و غلبه بر مشکلات مرتبط با هیدراتاسیون سیمان در این فرایند از طریق تصفیه NaOH پرداختند. نتایج نشان داد که برای یک فرایند تثبیت/جامدسازی موفق در رس آلوده حاوی غلظت بالای یون‌های سرب محلول، اگر pH اولیه نمونه در محدوده ۱۳ یا بیشتر باقی بماند، مشکل رسوب‌دهی یون‌های سرب روی سطح ذرات سیمان برطرف خواهد شد. زیرا در این محدوده pH، بیشتر یون‌های سرب به‌صورت محلول خواهند بود. بهبود رس آلوده با NaOH باعث افزایش حلالیت یون‌های سرب شده و در نتیجه از رسوب اجزای سرب روی ذرات سیمان جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، نتایج آزمون نشت کاهش قابل‌توجهی در قابلیت نشت سرب را تأیید می‌کند. این امر به رفع اثر تأخیری سرب بر هیدراتاسیون سیمان و پیشرفت چشمگیر در واکنش پوزولانی CSH نسبت داده می‌شود. در واقع، تشکیل CSH یون‌های سرب محلول را کپسوله می‌کند. در نتیجه، در نمونه‌های بهبودیافته، میزان سیمان موردنیاز برای فرایند تثبیت/جامدسازی تا ۶۰٪ کاهش‌یافته است [۳]. Chiu و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی اثرات خاکستر پوسته برنج (RHA) بر تثبیت سرب و مس در دوغاب تیمار شده با محتوای چسب بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پرداختند. هدف این مطالعه، ارزیابی توان بالقوه RHA به‌عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان در فرآیند تثبیت و کاهش قابلیت تحرک فلزات سنگین مس و سرب می‌باشد. افزایش محتوای RHA در مخلوط سیمانی باعث بهبود تثبیت سرب و مس در ماتریس سخت شده و درعین‌حال، تأثیرات pH و ترکیبات موجود بر فرایند تثبیت و شستشوی فلزات را نشان داده است، با تأکید بر اینکه جایگزینی سیمان با RHA می‌تواند هزینه‌های بازسازی سایت‌های آلوده را به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه کاهش دهد [۱۴]. در سال ۲۰۱۹، Liu و همکاران در تحقیقی بررسی ریز مکانیسم S/S برای تصفیه خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با روش مقاومت الکتریکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقاومت الکتریکی با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافت و با افزایش غلظت فلزات سنگین کاهش یافت. مقاومت فشاری ارتباط نمایی با مقاومت الکتریکی داشت. تغییرات پارامترهای مقاومت الکتریکی نشان داد که افزایش زمان عمل‌آوری منجر به کاهش تخلخل و افزایش درجه سیمان‌کاری شد که به نوبه خود منجر به ساختاری متراکم‌تر و مقاومت بیشتر نمونه‌ها می‌شود [۱۵]. در تحقیقی که توسط Li و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شد ویژگی‌های ژئومحیطی یک خاک غنی از آرسنیک بررسی و سرباره کوره آهن گدازی و مخلوط سیمان برای S/S خاک حاوی آرسنیک بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بیش از ۸۰٪ از آرسنیک در خاک‌های بدون تصفیه به‌صورت اکسیدهای هیدراته کریستالی آهن و آلومینیوم و فازهای باقیمانده قرار دارد که باعث کاهش نشت آرسنیک به روش آزمون نشت و خطرات محیطی محدود می‌شود. محتوای رطوبت خاک عامل کنترلی در تأثیر بر درجه فشرده‌سازی و توسعه مقاومت محصولات خاک S/S بود. محتوای رطوبت خاک ۲۰٪ منجر به بیشترین مقاومت و نشت آرسنیک نسبتاً پایین‌تری شد. افزودن سرباره کوره آهن گدازی به سیستم چسباننده تأثیر کمی بر مقاومت ۷ روزه داشت، اما مقاومت ۲۸ روزه را به دلیل فعالیت پوزولانی به طور قابل‌توجهی افزایش داد. در مقایسه با تصفیه با سیمان پرتلند معمولی، استفاده بیش از حد از سرباره کوره آهن گدازی تأثیر منفی بر نشت آرسنیک خواهد داشت؛ بنابراین، درصد جایگزینی توصیه شده سیمان پرتلند معمولی با سرباره کوره آهن گدازی باید در فرایند S/S خاک‌های آلوده به آرسنیک به ۲۵٪ محدود شود [۱۶]. Karakoç و همکاران در تحقیقی به بررسی تأثیر میزان قلیا و مدول سیلیس در استفاده از محلول متا سیلیکات سدیم در شرایط مختلف عمل‌آوری بر ژئوپلیمریزاسیون سرباره فِرُوکروم پرداختند. برای فعال‌سازی قلیا در فرایند ژئوپلیمریزاسیون از محلول‌های NaOH و Na_2SiO_3 استفاده شد. سیمان ژئوپلیمری با استفاده از سرباره فِرُوکروم به‌عنوان ماده خام با سه مدول سیلیس مختلف (۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷) و ۴ غلظت مختلف Na_2O (۴، ۷، ۱۰ و ۱۲ درصد) تولید شد. زمان‌گیرش، حرارت هیدراتاسیون و مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر ژئوپلیمری و مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از مخلوط متناسبی از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به‌عنوان فعال‌کننده قلیا، سیمان ژئوپلیمری تولید کرد. زمان‌های گیرش اولیه و نهایی خمیر فعال‌شده بسیار زودتر از خمیر سیمان پرتلند رخ می‌دهد و حرارت هیدراتاسیون نمونه‌های خمیر ژئوپلیمری کمتر از سیمان‌های پرتلند معمولی است [۱۷]. Suwan و همکاران در سال ۲۰۱۸ مطالعه جامعی بر روی سیمان ژئوپلیمری انجام دادند که هدف این مطالعه، جمع‌بندی و تحلیل اطلاعات موجود درباره مواد اولیه مورد استفاده در تولید ژئوپلیمر است و این مواد را بر اساس نوع و منبع آن‌ها دسته‌بندی می‌کند. ازآنجاکه تشکیل ژئوپلیمر زمانی رخ می‌دهد که منابع آلومینوسیلیکاتی با محلول قلیایی قوی واکنش می‌دهند، هر ماده‌ای که حاوی سیلیکا و آلومینا

باشد، می‌تواند در سنتز ژئوپلیمر استفاده شود. عواملی مانند نسبت Si/Al، نوع نمونه، سن آزمایش، نوع فعال‌کننده قلیایی، شرایط پخت و اندازه نمونه می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نهایی داشته باشند [۱۸]. در سال ۲۰۱۸، Kishar و همکاران به تهیه سیمان ژئوپلیمری از طریق مخلوط کردن مقادیر مختلف سرباره دانه‌ای کوره بلند با خاکستر بادی و غبار کوره سیمان پرداختند. اندازه‌گیری‌های پراش اشعه ایکس نشان داد که سیلیکات کلسیم هیدراته به‌عنوان ترکیب اصلی هیدراتاسیون در ساختار ژئوپلیمر به‌صورت آمورف و شیشه‌ای است. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط حاوی ۸۵ درصد سرباره + ۱۵ درصد خاکستر بادی بهترین خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی را در سیمان ژئوپلیمری ارائه می‌دهد. مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر سرباره کوره بلند فعال‌شده با سدیم هیدروکسید تا ۱۸۰ روز به طور تدریجی افزایش می‌یابد. محتوای آب ترکیبی و چگالی حجمی افزایش می‌یابد، درحالی‌که تخلخل کل باگذشت زمان پخت کاهش می‌یابد [۱۹]. Nikolić و همکاران با انجام تحقیقی به بررسی تأثیر افزودن مقدار زیادی سرب بر ساختار، مقاومت و رفتار انحلال (موفقیت در تثبیت سرب) ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی، با توجه به شرایط پخت ژئوپلیمرها، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که شرایط پخت انتخاب شده بر ساختار و مقاومت ژئوپلیمرها و همچنین بر اثربخشی تثبیت سرب تأثیر گذاشت. افزودن مقدار زیاد سرب بدون توجه به شرایط پخت مورد استفاده باعث اختلال قابل توجهی در ساختار ژئوپلیمر شد که منجر به کاهش قابل‌توجه مقاومت ژئوپلیمر نیز گردید. نتایج این تحقیق تأیید کرد که با انتخاب مناسب پیش‌ساز جامد و شرایط سنتز، غلظت بالای سرب اضافه شده به فرم بسیار محلول می‌تواند به طور موفقیت‌آمیز در ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی تثبیت شود. با توجه به اینکه افزودن مقدار زیاد سرب باعث تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی فاقد آلومینیوم شد، انتظار می‌رود که تثبیت غلظت‌های بالای سرب و سایر فلزات سنگین، با استفاده از خاکستر بادی فعال‌شده با قلیا و فعال‌کننده‌های قلیایی مبتنی بر آلومینات سدیم یا ترکیبات سیلیکات/آلومینات سدیم، به شکل مؤثرتری انجام گیرد. این موضوع باید در کانون تحقیقات آینده قرار گیرد [۲۰]. در مطالعه‌ای که Reddy و همکاران انجام دادند، تغییرات ویژگی‌های شاخص، ویژگی‌های مهندسی، ویژگی‌های معدنی و مورفولوژیکی خاک‌های غیرآلوده و آلوده به مس که با چسب سرباره فعال شده با منیزیا تصفیه شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاومت فشاری بدون محدودیت خاک‌های غیرآلوده به طور متناسب با افزایش محتوای چسب از ۳ به ۱۵ درصد افزایش یافته است که نشان‌دهنده توسعه ژل‌های با فرایندهای هیدراسیون است که توسط تحلیل‌های XRD تأیید می‌شود. بر اساس ویژگی‌های تنش-کرنش این ترکیبات، محتوای چسب بهینه شش درصد برای تصفیه خاک‌های آلوده به مس انتخاب شد. در خاک‌های آلوده به مس تثبیت شده/سخت شده، تحلیل XRD ظهور تنوریت (اکسید مس) را نشان داد که نشان‌دهنده رسوب و کاهش حلالیت مس است. به‌طورکلی، GGBS فعال شده با منیزیا نشان‌دهنده پتانسیل بالای خود در بهبود خاک‌های آلوده به مس است.

با توجه به سایر مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از سیمان‌های ژئو پلیمری برای حذف فلزات سنگین از خاک، هدف اصلی این مطالعه، مقایسه عملکرد سیمان ژئوپلیمری با دو نوع سرباره مجزای ذوب‌آهن و فولاد و همچنین سیمان پرتلند معمولی به‌عنوان چسب است. در این بررسی، دو نوع محلول قلیایی، شامل سدیم هیدروکسید و متاسیلیکات سدیم، در نسبت‌های مختلف برای فعال‌سازی سرباره مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، کارایی این ترکیبات در کنترل انتشار یون‌های فلزی و تأثیر شرایط و زمان عمل‌آوری بر مقاومت مکانیکی نمونه‌ها و تثبیت آلاینده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- نمونه خاک و مواد آزمایشگاهی استفاده شده

در این تحقیق از نمونه خاک آلوده از محل پسماند معدن سرب و روی معدنی واقع در شهرستان بوئین‌زهرا استفاده شد. این منطقه به دلیل فعالیت‌های معدنی، حاوی مقادیر قابل‌توجهی از پسماندهای معدنی است که به شکل نامناسبی در محیط دپو شده‌اند. انباشت نادرست این پسماندها منجر به افزایش خطر آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف شده و به یک منبع بالقوه آلودگی زیست‌محیطی تبدیل گردیده است. برای بررسی دقیق این موضوع، نمونه‌برداری به‌صورت کاملاً تصادفی از نقاط مختلف این محل انجام شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها و به‌منظور افزایش یکنواختی و کاهش اثرات متغیرهای محلی، نمونه‌ها با یکدیگر ترکیب و سپس از الک شماره ۱۰ عبور داده شدند تا نمونه‌ای همگن و مناسب برای انجام آزمایش‌های بعدی حاصل شود. این رویکرد امکان بررسی دقیق‌تر میزان آلودگی فلزات سنگین و اثرات زیست‌محیطی این پسماندها را فراهم می‌آورد.

جهت تثبیت آلودگی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در این تحقیق، از سیمان ژئوپلیمری و سیمان پرتلند تولیدی شرکت سیمان آبیک به عنوان نمونه شاهد استفاده شد. برای تولید سیمان ژئوپلیمری در این تحقیق، از دو نوع سرباره مجزا استفاده شده است: سرباره ذوب‌آهن و سرباره فولاد. سرباره ذوب‌آهن از نوع سرباره دانه‌ای کوره بلند (GGBFS) از کارخانه ذوب‌آهن

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سرباره ذوب‌آهن و سرباره فولاد.

Table 1. Chemical analysis of GGBFS and steel slag.

ترکیب شیمیایی	GGBFS (%)	SLAG (%)
CaO	۳۷/۹	۴۵/۲
SiO_2	۳۵/۹	۱۷/۸
MgO	۸/۹	۹/۵
Al_2O_3	۸/۴	۳/۲
BaO	۲/۱	–
TiO_2	۱/۹	۰/۹
MnO_2	۱/۵	۶/۱
SO_3	۰/۷	۱/۱
K_2O	۰/۷	۰/۶
FeO	۰/۷	۲۵/۴
SrO	۰/۳	–
Na_2O	–	۰/۳
LOI	۰/۹	۲/۴

اصفهان و سرباره فولاد (Slag) نیز از سرباره کوره قوس الکتریکی شرکت ایران سرباره در استان اصفهان تهیه شد. سرباره دانه‌ای کوره بلند به طور عمده در فرایند تولید آهن خام به‌عنوان یک محصول جانبی تولید می‌شود. این سرباره با سرد شدن سریع در آب به شکل دانه‌ای در می‌آید که حاوی مقادیر بالایی از سیلیکا و آلومینا است. این ترکیبات باعث می‌شوند که سرباره کوره بلند پتانسیل بالایی در تولید سیمان ژئوپلیمری داشته باشد و به‌عنوان یک ماده پوزولانی قوی عمل کند. از سوی دیگر، سرباره قوس الکتریکی در فرایند ذوب مجدد فلزات و بازیافت فولاد به وجود می‌آید. این سرباره معمولاً دارای ترکیبات متفاوتی از جمله اکسیدهای کلسیم، سیلیکا و آهن است که به آن خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی می‌بخشد. ساختار این سرباره به دلیل فرایند تولید آن به‌گونه‌ای است که ممکن است در ترکیب با سایر مواد، خواص ژئوپلیمری متفاوتی ایجاد کند. هدف استفاده از این دو نوع سرباره متفاوت (جدول ۱)، بررسی تأثیر ساختار و ترکیب شیمیایی آن‌ها در تثبیت آلودگی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بود. با توجه به اختلافات موجود در ترکیب و ساختار این دو سرباره، عملکرد هریک در فرایند تولید سیمان ژئوپلیمری و تثبیت آلودگی‌های خاک بررسی شد. این ارزیابی می‌تواند به انتخاب سرباره مناسب‌تر برای استفاده در پروژه‌های پاک‌سازی محیط‌زیست و تولید مصالح ساختمانی پایدار کمک کند.

در این تحقیق، از دو نوع محلول قلیایی سدیم هیدروکسید با درجه خلوص ۹۸ درصد و همچنین ترکیبی از سدیم هیدروکسید و متا سیلیکات سدیم در نسبت‌های مختلف برای فعال‌سازی سرباره استفاده شد. برای تهیه محلول سدیم هیدروکسید، ابتدا مقدار سدیم هیدروکسید لازم برای تهیه محلول با غلظت مشخص طبق معادله ۱ محاسبه شد.

$$G = \frac{N \times V \times M_m}{1000} \qquad (۱)$$

در این معادله N نرمالیته مورد نیاز بر حسب گرم بر مول، V حجمی دلخواه از محلول بر حسب میلی لیتر، Mm جرم مولی سدیم هیدروکسید بر حسب گرم بر مول و G مقدار مورد نیاز از سدیم هیدروکسید بر حسب گرم می باشد. محاسبات به این صورت است که برای تهیه ۱ لیتر محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، باید ۳۲۰ گرم سدیم هیدروکسید جامد را در آب حل کرد. برای تهیه محلول ابتدا مقدار دقیق سدیم هیدروکسید جامد با استفاده از ترازو وزن شد. سپس مقدار مشخصی آب مقطر (کمتر از حجم نهایی) در ظرف شیشه‌ای ریخته شد. سدیم هیدروکسید به‌آرامی به آب مقطر اضافه گردید. باید توجه داشت که افزودن سدیم هیدروکسید به آب باعث آزادشدن حرارت و تولید گاز می‌شود. بنابراین، این مرحله باید با احتیاط و به‌آرامی انجام شود و از دستکش و ماسک استفاده شود تا از بروز هرگونه خطر جلوگیری شود. پس از انحلال کامل سدیم هیدروکسید، محلول هم

زده شد تا اطمینان حاصل شود که تمام ذرات به طور یکنواخت در آب حل شده‌اند. در نهایت، حجم محلول با افزودن آب مقطر به میزان لازم، به حجم نهایی رسانده شد. محلول سدیم هیدروکسید تهیه‌شده در یک ظرف شیشه‌ای درب‌دار نگهداری شد و برای استفاده‌های بعدی در آزمایش‌ها استفاده شد. در این مطالعه طبق نتایج تحقیقات گذشته از محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار که یک غلظت بهینه می باشد استفاده شده است.

سیلیکات سدیم که به‌عنوان چسب شیشه نیز شناخته می‌شود، یک ترکیب شیمیایی است که شامل سیلیکات‌های سدیم و آب است. سیلیکات سدیم یک ترکیب قلیایی است که pH بالایی دارد. این ویژگی به‌ویژه در فرایندهای ژئوپلیمری بسیار مهم است، زیرا شرایط قلیایی لازم برای فعال‌سازی مواد سیلیکاتی و تشکیل ژل ژئوپلیمر را فراهم می‌کند. سیلیکات سدیم به‌صورت جامد (پودر یا دانه‌ای) و مایع موجود است. شکل مایع آن معمولاً به‌عنوان چسب یا ماده اتصال‌دهنده به کار می‌رود و به دلیل خواص قلیایی و چسبندگی بالا، در بسیاری از فرایندهای شیمیایی و صنعتی استفاده می‌شود. در این تحقیق، از متا سیلیکات سدیم به‌صورت مایع استفاده شده است. سیلیکات سدیم مایع به دلیل قابلیت انحلال در آب و خاصیت چسبندگی بالا، به‌عنوان یک ماده اتصال‌دهنده در فرمولاسیون ژئوپلیمرها و برای تثبیت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورداستفاده قرار گرفته است.

در این تحقیق، نسبت سدیم هیدروکسید به متاسیلیکات سدیم در محدوده ۰/۵ تا ۲ انتخاب شد تا بهینه‌ترین شرایط فعال‌سازی قلیایی برای تثبیت فلزات سنگین فراهم شود. انتخاب این محدوده بر اساس مطالعات پیشین و اصول شیمیایی ژئوپلیمرها انجام گرفت، زیرا نسبت‌های کمتر از ۰/۵ موجب تشکیل ناکافی ژل آلومینوسیلیکاتی و کاهش کارایی تثبیت می‌شوند، در حالی که نسبت‌های بالاتر از ۲ می‌توانند باعث افزایش بیش از حد قلیاییت، ترک‌خوردگی و کاهش کارایی نمونه‌ها گردند. این محدوده همچنین امکان کنترل ویسکوزیته، سرعت واکنش و زمان عمل‌آوری را فراهم می‌کند تا نمونه‌ها به‌راحتی قالب‌گیری و متراکم شوند و همزمان مقاومت مکانیکی و عملکرد تثبیت فلزات حفظ گردد.

۲- ۲- طرح اختلاط و روش ساخت نمونه‌ها

ابتدا خاک، سرباره و سیمان به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس در آون خشک شدند تا اطمینان حاصل شود که هیچ رطوبتی در مواد باقی نمانده است. این مرحله برای کنترل دقیق درصد رطوبت نمونه‌ها ضروری بود، زیرا رطوبت باقی‌مانده می‌توانست نتایج را تغییر دهد. محلول قلیایی نیز یک روز قبل از ساخت نمونه‌ها تهیه شد. این اقدام به این دلیل انجام شد که محلول قلیایی در زمان تولید حرارت تولید می‌کند و باید فرصت کافی برای کاهش این حرارت وجود داشته باشد تا در زمان اختلاط با دیگر مواد، هیچ تأثیری بر خواص نهایی نمونه‌ها نگذارد.

در فرایند ساخت نمونه‌های سیمان ژئوپلیمری، ابتدا محلول قلیایی با سرباره به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد تا واکنش اولیه به طور یکنواخت آغاز شود. سپس خاک‌آلوده به مخلوط اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه دیگر هم زده شد تا تمامی اجزا به‌صورت همگن در نمونه توزیع شوند. این مدت زمان برای اطمینان از تشکیل ساختارهای ژئوپلیمری مناسب و توزیع یکنواخت آلودگی در نمونه‌ها انتخاب شد. برای ساخت نمونه‌های سیمان پرتلند، ابتدا سیمان پرتلند با آب مخلوط شد و پس از رسیدن به خمیری یکنواخت، خاک‌آلوده به مخلوط اضافه و به‌دقت هم زده شد. در این مرحله، از آب مقطر استفاده شد تا اطمینان حاصل شود که هیچ‌گونه مواد محلول در آب معمولی نتایج را تحت‌تأثیر قرار ندهد. این موضوع به‌خصوص در مطالعات میکروسکوپی ریزساختار نمونه‌ها اهمیت داشت، چرا که هرگونه ناخالصی می‌توانست منجر به انحراف در نتایج شود.

برای ساخت نمونه‌ها از قالب‌های فولادی به ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر استفاده شد. این قالب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر تغییر شکل و دوام در برابر فشارهای بالا انتخاب شدند. ابتدا داخل قالب‌ها یک‌لایه نازک از طلق قرار داده شد تا نمونه‌ها به راحتی از قالب جدا شوند. نمونه‌ها به‌صورت لایه‌لایه ساخته شدند، به این صورت که مخلوط در سه لایه مساوی درون قالب قرار گرفت. هر لایه به کمک جک هیدرولیکی فشرده شد تا به تراکم مطلوب برسد. فشرده‌سازی در هر لایه با دقت انجام شد تا از یکنواختی تراکم و حذف هوا درون نمونه اطمینان حاصل شود. پس از پر شدن قالب‌ها، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج شده، سطح آن‌ها صاف شد و به مدت معین در شرایط عمل‌آوری مختلف (دما و رطوبت کنترل‌شده) نگهداری شدند.

انتخاب و تنظیم نسبت‌های مختلف مواد مانند خاک، سیمان و سرباره نیازمند آزمایش‌های دقیقی بود. تغییرات جزئی در نسبت‌های مواد می‌توانستند خواص نهایی نمونه‌ها را به طور چشمگیری تغییر دهند. ابتدا محتوای مواد آلی موجود در خاک اندازه‌گیری شد و سپس بر اساس استانداردهای نشریه ۲۶۸، درصد استفاده از چسب تعیین گردید. طبق این نشریه، هر خاکی که حاوی کمتر از ۲ درصد مواد آلی بوده و مقدار سولفات قابل‌حل در آب آن از مقادیر مشخص‌شده تجاوز نکند، قابلیت تثبیت با سیمان پرتلند را دارد.

شکل ۱. تصاویر آزمایشگاهی آزمایش تراکم خاک‌آلوده در ترکیب با تثبیت‌کننده‌ها.

Fig. 1. Laboratory images of soil compaction testing in combination with stabilizers.

به‌طورکلی، اگر دامنه خمیری خاک بیشتر از ۳۰ باشد، عمل اختلاط خاک با سیمان دشوار می‌شود و فرایند تثبیت به‌خوبی انجام نمی‌گیرد. همچنین، سیمان بر خاک‌های ماسه‌ای که حاوی بیش از ۲ درصد مواد آلی هستند یا pH آن‌ها کمتر از ۳/۵ است، اثر چندانی ندارد.

در این تحقیق، از چسب در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد استفاده شد تا هم میزان تأثیر افزودن چسب ارزیابی شود و هم درصد بهینه برای تثبیت خاک به‌دست آید. این درصدها به عنوان نقاط مرجع انتخاب شدند تا تأثیر افزایش مقدار چسب بر خواص مکانیکی و شیمیایی نمونه‌ها مشخص شود.

یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها، تنظیم دقیق درصد رطوبت مواد اولیه بود. عدم دستیابی به درصد رطوبت مناسب می‌توانست منجر به تراکم ناکافی یا غیریکنواخت نمونه‌ها شود که تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی و پایداری نمونه‌ها داشت؛ بنابراین، برای هر ترکیب، آزمایش تراکم به‌صورت مجزا انجام شد تا درصد رطوبت بهینه آن ترکیب مشخص شود. بر این اساس، نمونه‌ها با توجه به درصد رطوبت بهینه مخصوص هر ترکیب ساخته شدند.

این روش اجازه داد تا تأثیر اضافه‌کردن تثبیت‌کننده‌ها بر روی پارامترهای آزمایش تراکم نیز مورد بررسی قرار داده شود. نکته‌ای که در نمونه‌های مربوط به سیمان ژئوپلیمری وجود داشت این بود که این نمونه‌ها به‌جای آب با محلول قلیایی ساخته می‌شدند و این ممکن بود نتایج آزمایش تراکم را دچار خطا کند؛ بنابراین، برای انجام آزمایش تراکم این نمونه‌ها به‌جای آب از محلول قلیایی سدیم هیدروکسید استفاده شد. تصاویر آزمایشگاهی آزمایش تراکم خاک‌آلوده در ترکیب با تثبیت‌کننده‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای ساخت نمونه‌های تک‌محوری، دو روش متراکم‌سازی دینامیکی و متراکم‌سازی استاتیکی استفاده می‌شود. در این تحقیق، روش استاتیکی به‌عنوان روش اصلی متراکم‌سازی انتخاب شد. استفاده از این روش باعث کاهش خطاهای ناشی از عدم یکنواختی تراکم در نمونه‌ها می‌شود و به نتایج دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری منجر می‌گردد. استفاده از جک هیدرولیکی برای فشرده‌سازی نمونه‌ها نیازمند دقت بالا در تنظیم فشار و حفظ یکنواختی تراکم در هر لایه بود. هرگونه ناهماهنگی در فشرده‌سازی لایه‌ها می‌توانست

منجر به ناپایداری و تفاوت در نتایج آزمایش‌های تک‌محوری شود.

شرایط محیطی مانند دما و رطوبت در طول فرایند ساخت و نگهداری نمونه‌ها باید به‌دقت کنترل می‌شد. تغییرات کوچک در این شرایط می‌توانستند فرایند گیرش و سخت‌شدن مواد را تحت‌تأثیر قرار دهند. برای بررسی تأثیر شرایط مختلف بر کیفیت نمونه‌ها، دو نوع عمل‌آوری متفاوت در نظر گرفته شد. در روش عمل‌آوری تر نمونه‌ها در اتاقی با رطوبت نسبی ۹۸ درصد قرار داده شدند. این شرایط به‌منظور شبیه‌سازی محیط‌های مرطوب و ارزیابی تأثیر رطوبت بالا بر خواص نمونه‌ها طراحی شد. در روش عمل‌آوری خشک نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس درون آون قرار گرفتند. سپس، برای بقیه مدت‌زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در دمای محیط نگهداری شدند. این روش به‌منظور شبیه‌سازی شرایط خشک مورد استفاده قرار گرفت. این دو روش عمل‌آوری کمک کرد تا تأثیرات مختلف شرایط محیطی بر روی خصوصیات نهایی نمونه‌ها بررسی و تحلیل شود.

برای بررسی تأثیر مدت‌زمان عمل‌آوری بر خواص نمونه‌ها، چهار دوره زمانی مختلف شامل ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در نظر گرفته شد. مدت ۳ روز به تحلیل تغییرات اولیه و تأثیرات فوری عمل‌آوری بر خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها اختصاص یافت. دوره ۷ روزه به بررسی روند تغییرات و پیشرفت فرایند سیمانی شدن پرداخت. مدت ۲۸ روز، معادل یک ماه، به‌عنوان نقطه مرجع برای تحلیل تغییرات بلندمدت و تثبیت خواص نمونه‌ها انتخاب شد. در نهایت، مدت ۹۰ روز به‌منظور ارزیابی تأثیرات طولانی‌مدت عمل‌آوری و بررسی نهایی خواص و پایداری نمونه‌ها در نظر گرفته شد. این زمان‌های مختلف عمل‌آوری امکان تحلیل تأثیر زمان بر عملکرد و کیفیت نمونه‌ها در مراحل مختلف فرایند را فراهم ساخت.

۳- نتایج و بحث

۳- ۱- نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه خاک اولیه

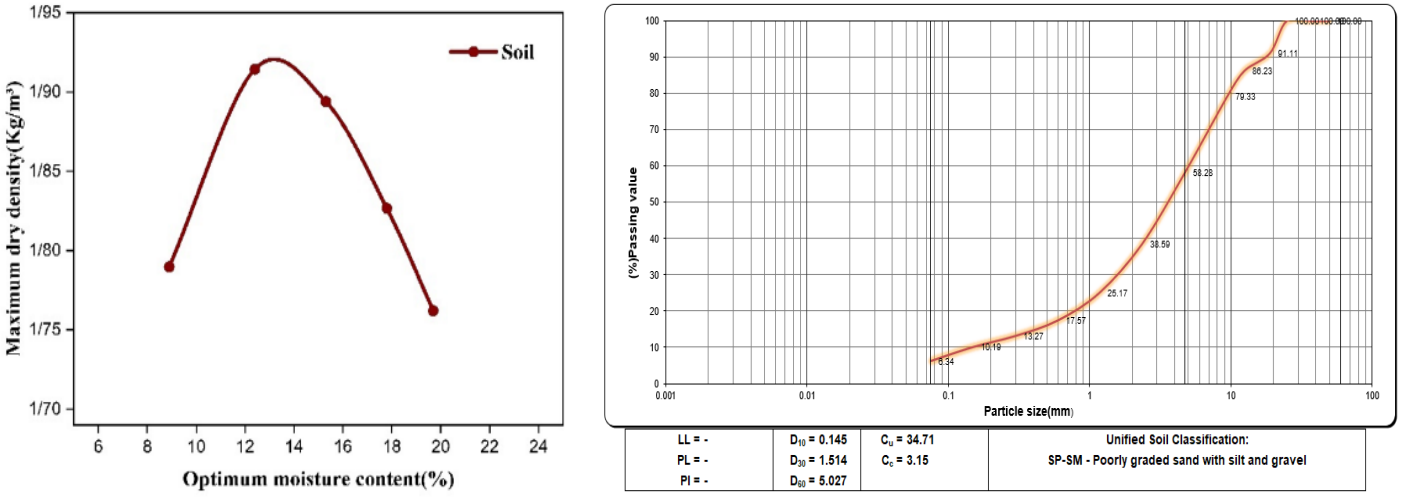
در این تحقیق، درصد رطوبت خاک با استفاده از روش استاندارد ASTM D2216 تعیین شد. برای تعیین نوع و طبقه‌بندی خاک، آزمایش دانه‌بندی به روش الک مطابق با استاندارد ASTM D6913-04 انجام شد. جهت تعیین وزن مخصوص نسبی ذرات خاک (Gs)، از آزمایش وزن مخصوص نسبی مطابق با استاندارد ASTM D854 استفاده شد. آزمایش تراکم خاک به‌منظور تعیین چگالی خشک حداکثر و رطوبت بهینه خاک طبق استاندارد ASTM D698 انجام شد. برای تعیین میزان pH خاک، آزمایش مربوطه طبق استاندارد ASTM D4972 انجام شد. برای تعیین میزان مواد آلی موجود در خاک از روش احتراق استفاده شد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D2974 انجام گردید. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش دانه‌بندی به روش الک و تحلیل نمودار دانه‌بندی، مشخص شد که خاک مورد بررسی طبق طبقه‌بندی یونیفاید[1] از نوع ماسه – سیلت (SP-SM) است. این طبقه‌بندی به معنای آن است که خاک عمدتاً از ذرات ماسه‌ای با محتوای مشخصی از ذرات ریز سیلت تشکیل شده است. خاک SP-SM به طور خاص به‌عنوان ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده با مقادیر قابل‌توجهی از سیلت توصیف می‌شود که می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک تأثیر بگذارد. نتایج دانه بندی خاک و تراکم استاندارد آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور تعیین میزان فلزات سنگین بر روی نمونه اولیه خاک، آزمایش طیف سنجی پلاسمای جفت شده القایی(ICP) انجام شد. آزمایش ICP یک تکنیک تحلیلی قدرتمند برای شناسایی و تعیین غلظت عناصر در نمونه‌ها است. این روش به دلیل دقت بالا و قابلیت اندازه‌گیری همزمان چندین عنصر به طور گسترده‌ای در علوم محیطی، شیمی، مواد و دیگر حوزه‌های تحقیقاتی استفاده می‌شود. همانطور که عنوان شد، به‌منظور افزایش دقت و قابلیت اعتماد نتایج، نمونه‌ها به‌صورت تصادفی از مکان‌های مختلف انتخاب شدند. این روش تصادفی‌سازی به اطمینان از نمایندگی جامع و دقیق از وضعیت واقعی آلودگی خاک کمک کرد. این آزمایش به‌خصوص بر روی اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین مانند سرب و روی متمرکز شد. میانگین نتایج غلظت سرب به میزان ۲۵۰۷۷ ppm و غلظت روی به میزان mg/kg ۱۶۷۲۱ بدست آمد. نتایج آزمایش ICP نشان می‌دهد که غلظت سرب در نمونه‌های خاک به طور معناداری بالاتر از حد استانداردهای زیست‌محیطی موجود است. این افزایش غلظت سرب می‌تواند نشان‌دهندهٔ آلودگی محیطی و نیاز به بررسی‌های بیشتری باشد. در مقابل، غلظت روی در نمونه‌ها در محدوده قابل‌قبول و مطابق با استانداردهای تعیین‌شده قرار داشت.

۳- ۲- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم یکی از روش‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک برای تعیین ویژگی‌های تراکمی خاک است. هدف اصلی این آزمایش، تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه خاک است که برای دستیابی به تراکم مطلوب در پروژه‌های مهندسی مورداستفاده قرار می‌گیرد. نمودارهای مرتبط با آزمایش تراکم در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که افزودن سیمان، سرباره ذوب‌آهن و فولاد تأثیرات مختلفی

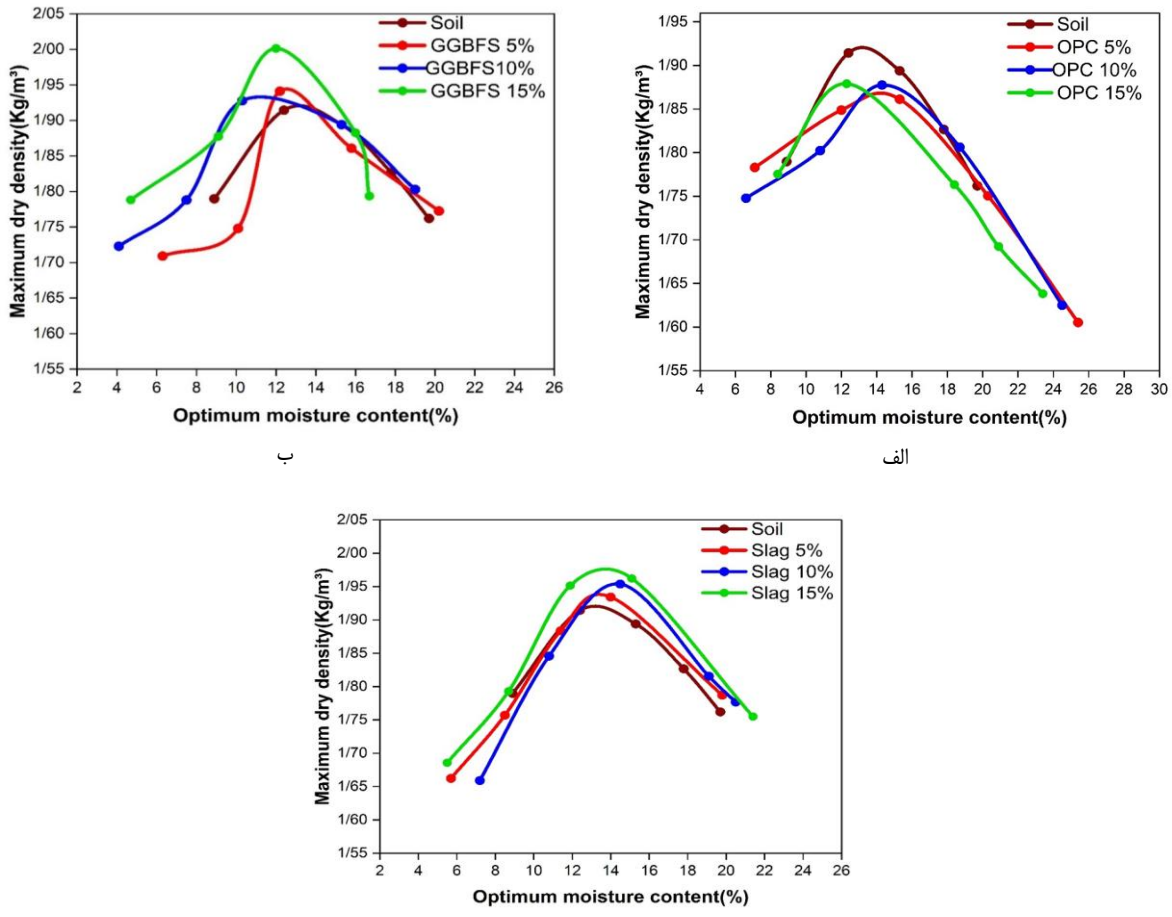
1. Unified Soil Classification System - USCS



ب)　　الف)

شکل ۲. الف) نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه، ب)تراکم استاندارد خاک.

Fig. 2. a) Grading diagram of the studied soil, b) Standard soil compaction



ب　　الف

ج

شکل ۳. تراکم مربوط به خاک‌آلوده الف) مخلوط با سیمان ب) مخلوط با سرباره ذوب‌آهن ج) مخلوط با سرباره فولاد.

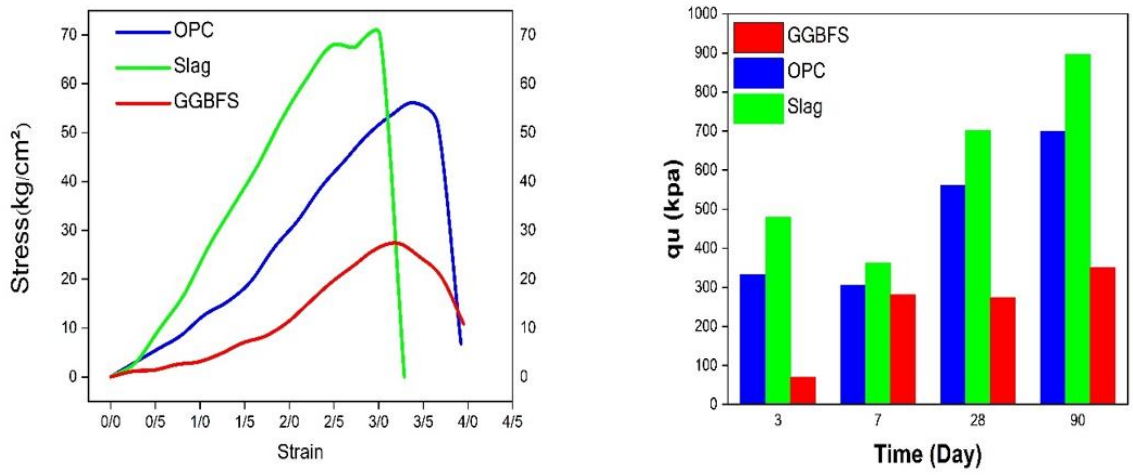
Fig. 3. Compaction of contaminated soil a) mixed with cement b) mixed with GGBFS c) mixed with slag.

بر پارامترهای تراکم دارد. این تغییرات به‌وضوح در نمودارهای درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک مشاهده می‌شود. نمودارهای تراکم‌پذیری خاک نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در رفتار مکانیکی خاک با استفاده از افزودنی‌های مختلف است. افزودن سیمان به خاک باعث افزایش درصد رطوبت بهینه شد. این افزایش ممکن است به دلیل ویژگی‌های جذب آب توسط سیمان و نیاز بیشتر به رطوبت برای تراکم بهتر باشد. با این حال، افزودن سیمان منجر به کاهش وزن مخصوص خشک شد. این کاهش ممکن است به دلیل تغییر در ساختار داخلی خاک و سیمان و تأثیر آن بر تراکم‌پذیری خاک باشد. استفاده از سرباره ذوب‌آهن باعث افزایش درصد رطوبت بهینه شد. این افزایش می‌تواند به دلیل واکنش‌های شیمیایی سرباره با خاک و افزایش نیاز به رطوبت باشد. سرباره ذوب‌آهن همچنین باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک شد. این افزایش احتمالاً به دلیل خصوصیات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره است که موجب بهبود تراکم خاک می‌شود. افزودن سرباره فولاد به خاک تأثیر ناچیزی بر درصد رطوبت بهینه داشت که نشان می‌دهد این افزودنی تأثیر کمی بر نیاز رطوبت خاک دارد. با این حال، افزودن سرباره فولاد به طور چشمگیری باعث افزایش وزن مخصوص خشک شد. این افزایش ممکن است به دلیل خواص فیزیکی سرباره قوس الکتریکی و تأثیر آن بر تراکم‌پذیری بهتر خاک باشد.

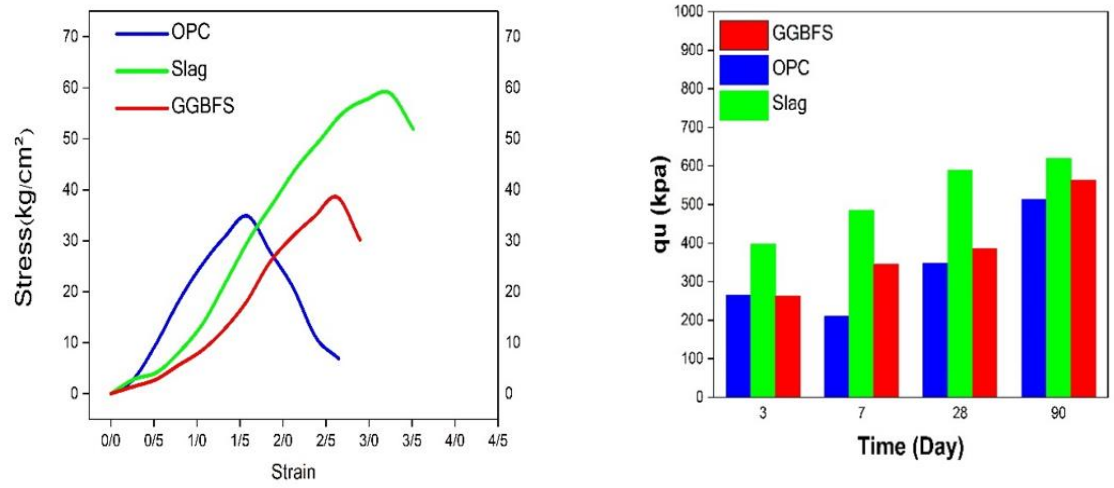
۳- ۳- آزمایش تک‌محوری

آزمایش تک محوری به منظور تعیین مقاومت فشاری و ویژگی‌های مکانیکی مواد به کار می‌رود. در این آزمایش، نمونه‌های استوانه‌ای یا مکعبی با ابعاد استاندارد آماده شده و در دستگاه تعیین مقاومت فشاری قرار می‌گیرند. بار به طور یکنواخت در امتداد یک محور به نمونه وارد می‌شود تا به حد شکست یا بار نهایی برسد. تغییرات بار و تغییر شکل نمونه در طول آزمایش ثبت شده و به کمک آن منحنی تنش – کرنش رسم می‌شود. این منحنی امکان تعیین مقاومت فشاری نهایی، مدول الاستیسیته و تحلیل رفتار شکست مواد را فراهم می‌آورد. آزمایش تک‌محوری به دلیل دقت بالا و سادگی، برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی مواد و مقایسه آنها به کار می‌رود و اطلاعات ارزشمندی درباره توانایی مواد در تحمل بارهای فشاری ارائه می‌دهد. استفاده از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده برای ارزیابی اثربخشی تثبیت و جامدسازی به یک استاندارد بین‌المللی تبدیل‌شده است. مواد تثبیت‌شده و جامد شده باید از استحکام کافی برخوردار باشند تا بتوانند بارهای موادی را که روی آن‌ها قرار می‌گیرد تحمل کنند. علاوه بر این، انتظار می‌رود که نتایج آزمایش با اثربخشی تثبیت ضایعات معدنی مرتبط باشد، زیرا مواد معدنی در ماتریس هیدراتاسیون گره خورده‌اند. بنابراین، مقاومت فشاری اغلب به‌عنوان پارامتر شاخص اثربخشی تثبیت استفاده می‌شود. در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیرات مختلف بر مقاومت فشاری، نمونه‌های خاک با استفاده از تثبیت‌کننده‌های متفاوت و تحت شرایط مختلف عمل‌آوری تهیه شدند. هدف از این آزمایش، بررسی تأثیر پنج پارامتر اصلی بر مقاومت فشاری نهایی و رفتار تنش – کرنش نمونه‌ها شامل زمان عمل‌آوری، شرایط عمل‌آوری، نوع تثبیت‌کننده، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و درصد بهینه مواد بود. تاثیر مدت عمل آوری و درصد تثبیت کننده در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به طور چشمگیری افزایش یافت. در مورد نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند، مشاهده شد که مقاومت تک‌محوری به طور مستقیم با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش پیدا می‌کند. نمونه‌هایی که به مدت ۳ روز عمل‌آوری شدند، کمترین مقاومت را داشتند، اما نمونه‌هایی که به مدت ۷، ۲۸، و ۹۰ روز عمل‌آوری شدند، به‌ترتیب مقاومت فشاری بالاتری نشان دادند. این روند نشان‌دهنده تأثیر مثبت زمان عمل‌آوری بر فرایند هیدراسیون و تقویت ساختار سیمان است. نمونه‌های ژئوپلیمری مقاومت تک‌محوری بسیار بالاتری نسبت به نمونه‌های سیمان پرتلند در مدت‌زمان ۳ روز عمل‌آوری نشان دادند. این نشان‌دهنده عملکرد برتر اولیه ژئوپلیمرها در مقایسه با سیمان پرتلند در مراحل ابتدایی عمل‌آوری است. با این حال، باگذشت زمان و افزایش مدت عمل‌آوری، افزایش مقاومت در هر دو نوع نمونه مشاهده شد، اما روند افزایش مقاومت در نمونه‌های ژئوپلیمری به‌طورکلی سریع‌تر و بیشتر از سیمان پرتلند بود. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری نشان داد که نوع تثبیت‌کننده تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت نمونه‌ها دارد. در میان مواد مختلف، سرباره فولاد با ارائه بالاترین مقاومت فشاری عملکرد برتری نسبت به سایر مواد داشت. علت آن ترکیب شیمیایی غنی از کلسیم و آلومینات‌ها، ریزدانه بودن و سطح تماس بالای ذرات و همچنین تراکم بهتر نمونه‌ها است. این نتایج تأکید می‌کند که انتخاب نوع تثبیت‌کننده می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر عملکرد مکانیکی نمونه‌ها تأثیر بگذارد.

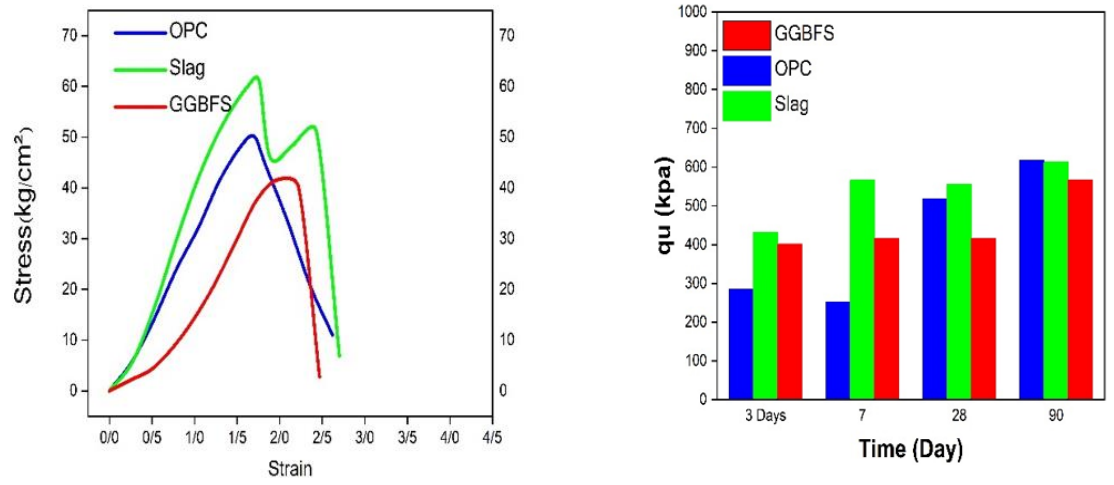
با توجه به نتایج آزمایش‌های تک‌محوری، مشاهده شد که افزودن تثبیت‌کننده در مقدار ۱۰ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. این درصد از مواد افزودنی توانسته است به بهبود عملکرد مکانیکی نمونه‌ها کمک کند و نتایج مقاومتی مطلوبی را ارائه دهد. این امر نشان‌دهنده این است که ۱۰ درصد برای افزودن مواد، به‌ویژه در زمینه



الف)



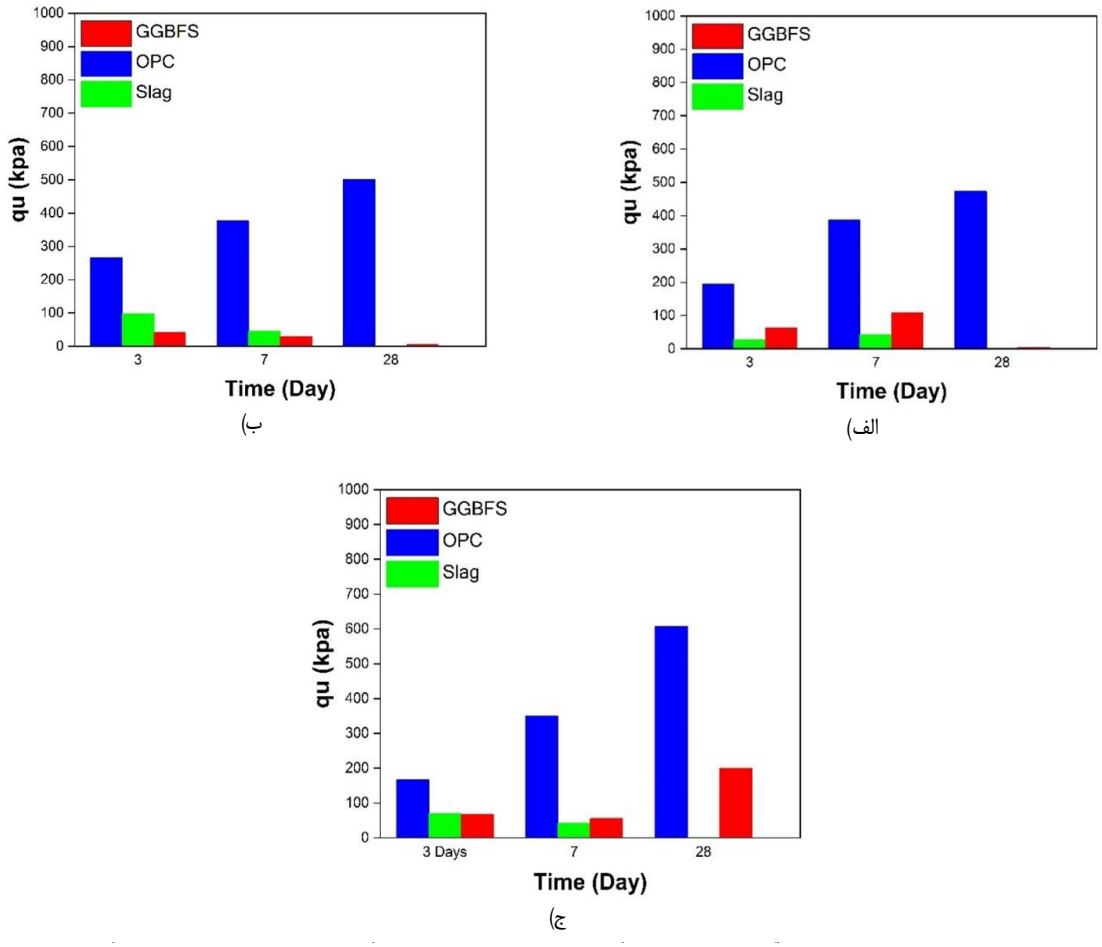
ب)



ج)

شکل ۴. مقاومت تک محوری و رفتار تنش-کرنش نمونه های ۲۸ روزه و عمل آوری خشک، الف) با میزان تثبیت‌کننده ۵٪ ب) با میزان تثبیت‌کننده ۱۰٪ ج) با میزان تثبیت‌کننده ۱۵٪

Fig. 4. Uniaxial strength and stress-strain behavior of 28-day and dry-cured specimens, a) with 5% stabilizer content b) with 10% stabilizer content c) with 15% stabilizer content

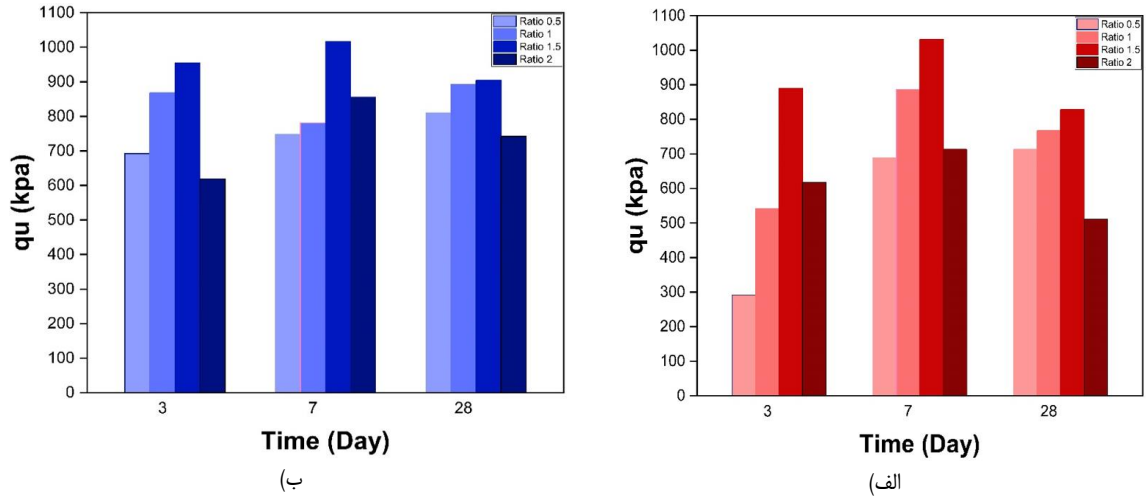


شکل ۳. تراکم مربوط به خاک‌آلوده الف) مخلوط با سیمان ب) مخلوط با سرباره ذوب‌آهن ج) مخلوط با سرباره فولاد.

Fig. 3. Compaction of contaminated soil a) mixed with cement b) mixed with GGBFS c) mixed with slag.

بهینه‌سازی مقاومت فشاری، به‌عنوان یک مقدار قابل‌قبول و مؤثر در فرایند تثبیت شناخته شده است.

مقاومت تک محوری در درصدهای مختلف تثبیت کننده در شرایط عمل آوری مرطوب در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که شرایط عمل‌آوری تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد مکانیکی نمونه‌ها دارد. برای نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند، مشاهده شد که عمل‌آوری در شرایط مرطوب به طور مؤثرتری بر مقاومت تک‌محوری تأثیر می‌گذارد. نمونه‌های سیمان پرتلند که تحت شرایط مرطوب عمل‌آوری شدند، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط خشک نشان دادند. بااین‌حال، نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط خشک نیز مقاومت قابل‌قبولی داشتند و به‌طورکلی ضعیف نبودند. در مورد نمونه‌های ژئوپلیمری، وضعیت به طور قابل‌توجهی متفاوت بود. این نمونه‌ها در شرایط خشک عملکرد بسیار خوبی داشتند و مقاومت تک‌محوری بالاتری نسبت به شرایط مرطوب نشان دادند. برعکس، در شرایط مرطوب، عملکرد ژئوپلیمرها ضعیف‌تر بود و برخی از نمونه‌های ۲۸ روزه حتی تخریب شده و مقاومت خود را به طور کامل از دست داده بودند. این تخریب ممکن است به دلیل عدم پایداری مناسب در برابر رطوبت یا واکنش‌های شیمیایی غیر بهینه در شرایط مرطوب باشد. رطوبت زیاد موجب رقیق شدن و تخریب ژل‌های آلومینوسیلیکاتی (N-A-S-H یا C-A-S-H) شد. این فرآیند باعث کاهش چسبندگی بین ذرات، شسته شدن بخش‌هایی از مواد ژل و کاهش مقاومت مکانیکی نمونه‌ها گردید. در نتیجه، حساسیت ژئوپلیمر به شرایط محیطی مرطوب عامل اصلی کاهش عملکرد مکانیکی آن‌ها بود. این نتایج نشان‌دهنده این است که شرایط عمل‌آوری تأثیر زیادی بر مقاومت نهایی نمونه‌ها دارد و انتخاب مناسب شرایط عمل‌آوری می‌تواند به بهبود عملکرد مکانیکی و دوام نمونه‌ها کمک کند. درحالی‌که سیمان پرتلند به‌خوبی در شرایط مرطوب عمل می‌کند، ژئوپلیمرها ممکن است نیاز به شرایط خاصی برای حفظ و بهبود عملکرد خود



شکل ۶. مقاومت تک محوری با نسبت های مختلف $NaOH/Na_2SiO_3$ الف) نمونه های سرباره ذوب‌آهن ب) نمونه های سرباره فولاد.

Fig. 6. Uniaxial strength with different $NaOH/Na_2SiO_3$ ratios a) GGBFS samples b) Steel slag samples.

داشته باشند.

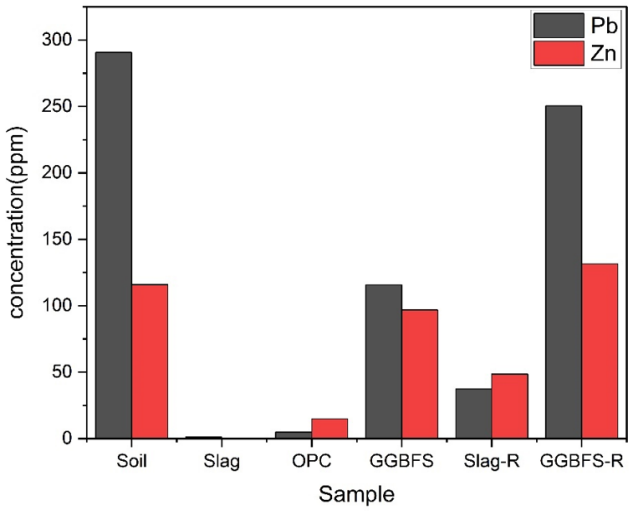
در آزمایش‌های تک‌محوری، نسبت بهینه متا سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید برای به‌دست‌آوردن حداکثر مقاومت فشاری به میزان ۱/۵ بدست آمد (شکل ۶). این نسبت بهینه بیانگر ایجاد تعادل مناسب میان تأمین یون‌های سیلیکات و قلیاییت محیط واکنش است، به‌گونه‌ای که فرآیند حل‌شدن و پلیمریزاسیون مؤلفه‌های آلومینوسیلیکاتی به‌طور مؤثر انجام می‌گیرد و ساختار ژلی متراکم‌تری شکل می‌گیرد. در این شرایط، تشکیل ژل‌های پایدار آلومینوسیلیکاتی موجب افزایش پیوستگی بین ذرات و بهبود انتقال تنش در نمونه‌ها می‌شود. در مقابل، نسبت‌های بالاتر متاسیلیکات سدیم می‌توانند باعث افزایش ویسکوزیته مخلوط و پراکندگی نامناسب مواد شوند که این امر به توزیع غیریکنواخت فعال‌کننده‌ها، تضعیف پیوندهای بین ذرات و کاهش کارایی مکانیکی منجر می‌گردد. همچنین، نسبت‌های غیربهینه می‌توانند واکنش‌های شیمیایی را دچار اختلال کرده و به تشکیل فازهای ضعیف‌تر یا واکنش‌های ناقص منجر شوند که در نهایت مقاومت نهایی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، نسبت ۱/۵ به‌عنوان نسبت بهینه، تعادل مناسبی میان متاسیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید ایجاد کرده و بهترین عملکرد مکانیکی را در فرآیند تثبیت فراهم می‌آورد.

۳- ۴- نتایج آزمایش تراوش آلودگی

بر اساس استانداردهای سازمان حفاظت از محیط زیست (EPA)، تمامی انباشت‌های پسماند صنایع و معادن باید از لحاظ غلظت فلزات سنگین توسط آزمایشات نشت (TCLP)[1] کنترل گردد. همچنین اگر از این پسماندها در ساخت مصالح و مواد مختلف استفاده شود، باید تراوش آلودگی در مصالح و مواد ساخته شده از پسماندها نیز کنترل گردد. آزمایش TCLP شبیه‌سازی شرایط باران اسیدی در یک دوره زمانی طولانی (تقریباً ۱۰۰ سال) را انجام می‌دهد. این آزمایش با استفاده از یک محلول اسیدی ضعیف (معمولاً اسید استیک)، تأثیرات طولانی‌مدت بارش اسیدی را بر روی نمونه‌ها مدل‌سازی می‌کند و میزان آلاینده‌هایی که ممکن است در طول این مدت از نمونه‌ها آزاد شوند را اندازه‌گیری می‌کند. نتایج این آزمایش می‌تواند به تعیین پایداری و ایمنی بلندمدت مواد تثبیت‌کننده در مواجهه با شرایط محیطی کمک کند. برای انجام آزمایش تراوش آلودگی عمیق باطله معدنی از روش EPA 1311 و جهت ارزیابی پتانسیل انتشار فلزات سنگین از نمونه‌های تثبیت‌شده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری استفاده شد. انتخاب دوره ۲۸ روزه برای نمونه‌ها بر اساس استانداردهای معمول در مطالعات مهندسی ژئوتکنیک و محیط زیست انجام شده است که مدت‌زمان کافی را برای تکمیل فرایندهای تثبیت و واکنش‌های شیمیایی در مواد فراهم می‌کند. در این آزمایش، ابتدا نمونه‌های تثبیت‌شده و شاهد به قطعات کوچک‌تر خرد شده و pH اولیه آن‌ها اندازه‌گیری شد. pH اولیه همه نمونه‌ها بالای ۵ بود، بنابراین برای آن‌ها از محلول استات استفاده شد. نمونه‌ها در محلول استات قرار گرفتند و به مدت ۱۸ تا ۲۴ ساعت در یک دستگاه همزن چرخشی نگهداری شدند. پس از این مدت، pH ثانویه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در این بررسی مشخص شد که pH ثانویه نمونه

1. Toxicity characteristic leaching procedure

خاک شاهد و نمونه مربوط به سرباره فولاد فعال شده یا محلول متا سیلیکات سدیم هیدروکسید به کمتر از ۵ کاهش یافته است، بنابراین محلول استخراج این نمونه‌ها متفاوت بود. این تغییر در pH نشان‌دهنده تغییرات شیمیایی نمونه شاهد در طول آزمایش است. نتایج آزمایش TCLP (شکل ۷) نشان داد که سرباره فولاد به طور مؤثری توانسته از نشت آلودگی جلوگیری کند و مقادیر آلاینده‌ها در حد مطلوب و کمتر از استانداردهای تعیین‌شده بودند. سیمان پرتلند نیز عملکرد مشابهی داشت و به‌خوبی از نشت آلودگی جلوگیری کرد. با این حال، سرباره ذوب آهن ضعیف‌تر از دو گزینه دیگر عمل کرد و میزان آلودگی نشت شده از حد استاندارد بیشتر بود. علاوه بر این، هنگامی که متا سیلیکات به ترکیب اضافه شد، نتایج بدتر شدند و میزان نشت آلودگی افزایش یافت که نشان می‌دهد استفاده از این ماده ممکن است اثرات نامطلوبی بر روی کارایی تثبیت خاک داشته باشد. افزایش غلظت آلاینده‌ها در شیرابه را می‌توان به برهم‌خوردن تعادل شیمیایی و ساختاری ماتریس تثبیت‌شده نسبت داد. افزودن متاسیلیکات سدیم، به‌ویژه در نسبت‌های بالاتر از مقدار بهینه، موجب افزایش قابل توجه pH محیط می‌شود که این امر می‌تواند حلالیت برخی فلزات سنگین را افزایش داده و پیوندهای شیمیایی ایجادشده میان یون‌های فلزی و فازهای ژلی را تضعیف کند. از سوی دیگر، افزایش مقدار متاسیلیکات باعث بالا رفتن ویسکوزیته مخلوط و توزیع غیریکنواخت فعال‌کننده‌ها در ماتریس می‌شود، که این مسئله به تشکیل ساختارهای ناهمگن و افزایش تخلخل و نفوذپذیری منجر می‌گردد. افزایش نفوذپذیری، مسیرهای ترجیحی برای عبور شیرابه ایجاد کرده و امکان شستشوی یون‌های فلزی محبوس‌شده را فراهم می‌سازد. همچنین، تغییر در نوع و پایداری ژل‌های آلومینوسیلیکاتی در اثر نسبت‌های غیربهینه فعال‌کننده می‌تواند منجر به تشکیل فازهای ضعیف‌تر یا ناپایدار شود که در برابر تماس با محلول مهاجم، مقاومت کمتری داشته و در نتیجه آزادسازی آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که مقدار آلودگی در نمونه خاک شاهد کمتر از حد انتظار بود که احتمالاً به دلیل انتخاب نمونه از بخشی از خاک با آلودگی کمتر بوده است. این مسئله می‌تواند نشان‌دهنده تنوع در توزیع آلودگی در خاک مورد بررسی باشد.

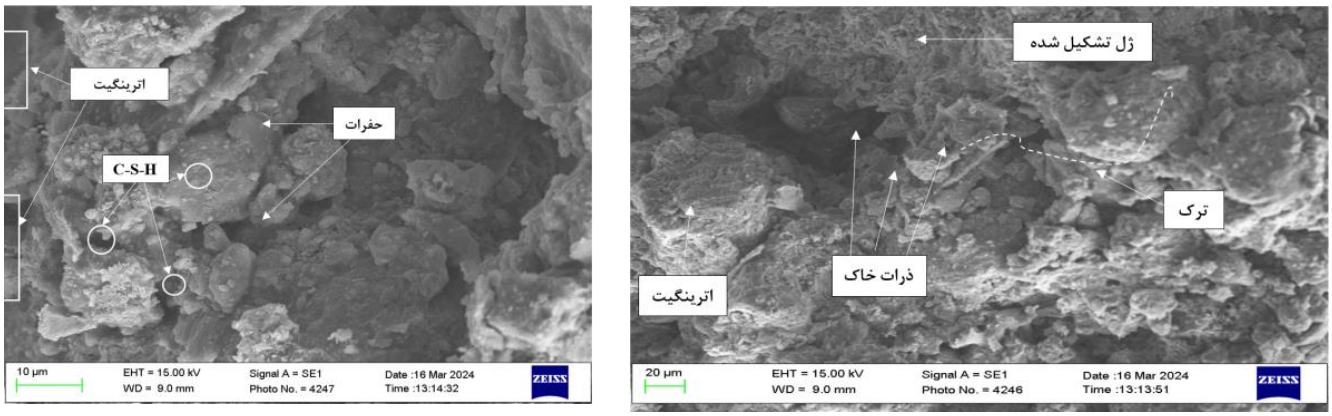


شکل ۷. غلظت فلزات سنگین خارج شده از آزمایش TCLP

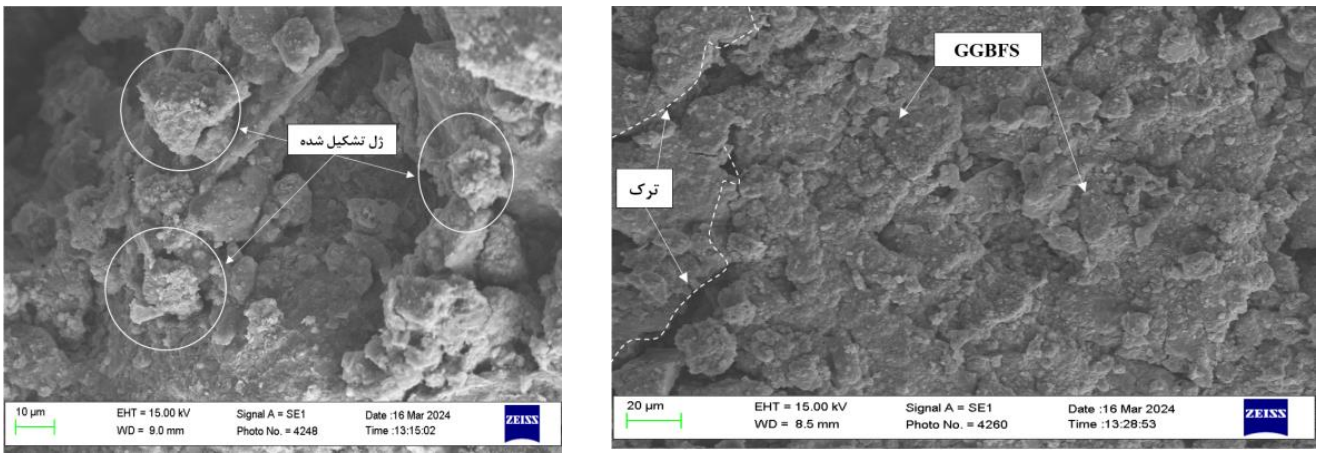
Fig. 7. Concentration of heavy metals extracted from TCLP test.

۳- ۵- بررسی ریزساختار نمونه‌های تثبیت‌شده

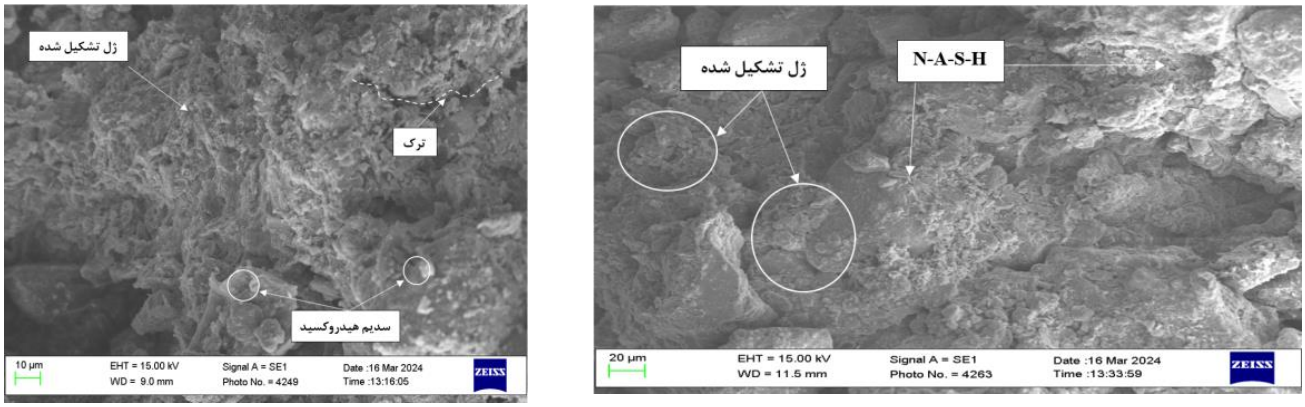
برای بررسی ریزساختار نمونه‌های تثبیت‌شده، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. این تصاویر اطلاعات دقیقی در مورد نحوه توزیع فازها، نحوه پیوند ذرات خاک و تشکیل فازهای جدید در اثر استفاده از تثبیت‌کننده‌ها ارائه می‌دهند. به‌منظور انجام عکس‌برداری SEM قسمتی از نمونه‌ها که یکنواختی بیشتری داشته انتخاب شده و عکس‌برداری در مقیاس‌های متفاوت انجام گردید (شکل ۸). تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند نشان‌دهنده تشکیل فازهای هیدراته مانند C-S-H (کلسیم سیلیکات هیدرات) است. این فازها به‌عنوان چسب بین ذرات خاک عمل کرده و منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شوند. همچنین، فضاهای خالی بین ذرات خاک تا حد زیادی پر شده‌اند که نشان‌دهنده تراکم بهتر و کاهش تخلخل است. مطابق تصاویر خلل‌وفرج و درزهایی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تبخیر آب باشد. در تصاویر SEM نمونه‌های مربوط به سرباره ذوب‌آهن، تشکیل فازهای شیشه‌ای و غیر بلوری مشاهده شد که از ویژگی‌های معمول سرباره‌های فعال شده به‌صورت قلیایی است. این فازها به دلیل خاصیت پیونددهی قوی خود، منجر به بهبود قابل‌توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌ها شده‌اند. همچنین، مشاهده می‌شود که ذرات سرباره به‌خوبی با خاک ترکیب شده و در سطح تماس آن‌ها، پیوندهای قوی ایجاد شده است. تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های سرباره فولاد نشان می‌دهند که ذرات سرباره فولاد به دلیل ساختار خاص خود، توانسته‌اند با ذرات خاک پیوندهای قوی ایجاد کنند. همچنین، تشکیل فازهای هیدراته در این نمونه‌ها کمتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند است، اما به دلیل پیوند قوی بین ذرات، مقاومت فشاری همچنان



الف)



ب)



ج)

شکل ۸. تصاویر SEM نمونه‌ها در مقیاس ۲۰ و ۱۰ میکرومتر، الف) خاک تثبیت شده با سیمان ب) خاک تثبیت شده با سرباره ذوب‌آهن ج) خاک تثبیت شده با سرباره فولاد.

Fig. 8. SEM images of samples at 20 and 10 µm scales, a) cement-stabilized soil b) GGBFS-stabilized soil c) steel slag-stabilized soil.

بالا است. وجود ذرات فلزی در ساختار سرباره فولاد نیز در تصاویر مشخص است که می‌تواند تأثیری در خواص مکانیکی نهایی داشته باشد. مقایسه تصاویر SEM از نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که نوع تثبیت‌کننده تأثیر مستقیم بر ریزساختار خاک دارد. نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند فازهای هیدراته بیشتری دارند و تخلخل بیشتری نشان می‌دهند، درحالی‌که نمونه‌های تثبیت‌شده با سرباره ذوب‌آهن و سرباره قوس الکتریکی دارای فازهای غیر بلوری و تخلخل کمتری هستند که موجب بهبود پیوند بین ذرات و افزایش مقاومت فشاری شده‌اند. میزان تخلخل در نمونه‌های تثبیت‌شده با GGBFS و سرباره کمتر از نمونه‌های خاک رس بهبود یافته با سیمان است که به تفاوت در ماهیت مواد و محصولات هیدراتاسیونی تولید شده برمی‌گردد. در نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با سرباره، به دلیل واکنش‌های هیدراتاسیونی، منافذ بزرگ‌تر پر شده و به منافذ کوچک‌تر تبدیل شده‌اند. این امر را می‌توان با بررسی تعداد و اندازه خلل‌وفرج در سطح نمونه‌ها مشاهده کرد. تصاویر SEM نشان می‌دهند که تخلخل در نمونه‌های تثبیت‌شده با ژئوپلیمر یکنواخت‌تر و کوچک‌تر است، درحالی‌که در نمونه‌های سیمان پرتلند، حفرات بزرگ و غیر یکنواختی وجود دارد که موجب تمرکز شکست در این نواحی می‌شود. همچنین، اندازه حفره‌ها در نمونه‌های تثبیت‌شده با ژئوپلیمر تقریباً یکنواخت و کوچک است، درحالی‌که در نمونه‌های سیمان پرتلند ابعاد این حفره‌ها یکسان نبوده و حفره‌های بزرگی قابل‌مشاهده است. تصاویر همچنین نشان‌دهنده سطحی پیوسته هستند که ذرات روی آن توزیع شده‌اند و جدایی در سطح احساس نمی‌شود، درحالی‌که در تصویر سطح پیوستگی کمتری مشاهده می‌شود. یکی از دلایل ایجاد این سطح یکنواخت در نمونه‌های تثبیت‌شده ممکن است حضور آهن باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تثبیت آلودگی خاک به فلزات سنگین سرب و روی با استفاده از دو نوع چسب سیمان ژئوپلیمری و سیمان پرتلند معمولی پرداخته است. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی پتانسیل سیمان ژئوپلیمری به‌عنوان جایگزینی پایدار برای سیمان پرتلند در فرایند تثبیت آلاینده‌ها بود. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش ICP نشان‌دهنده سطح بالایی از آلودگی در نمونه‌های خاک مورد بررسی است. این مقادیر به طور قابل‌توجهی بالاتر از حد استانداردهای محیط‌زیستی هستند. در این تحقیق، باتوجه‌به غلظت بالای سرب، تثبیت‌کننده‌های مورداستفاده با چالش مواجه شدند تا توانایی خود را در تثبیت آلاینده‌ها در غلظت‌های بالا نشان دهند.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن سیمان باعث افزایش جزئی در درصد رطوبت بهینه شده اما وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات نشان می‌دهد که سیمان به دلیل ماهیت خود، نیاز به آب بیشتری برای رسیدن به تراکم بهینه دارد، اما درعین‌حال، ساختار خاک را کمتر متراکم می‌کند. در مورد سرباره ذوب‌آهن، افزایش وزن مخصوص و درصد رطوبت بهینه نشان می‌دهد که این ماده به تراکم بیشتر خاک کمک کرده و نیاز به آب بیشتری برای دستیابی به تراکم بهینه دارد. به‌طورکلی، این نتایج نشان می‌دهد که هر ماده به‌واسطهٔ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود تأثیرات متفاوتی بر تراکم‌پذیری و درصد رطوبت بهینه خاک دارد.

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تک‌محوری، مشخص شد که سیمان پرتلند در مقایسه با سیمان ژئوپلیمری مقاومت کمتری در تثبیت خاک‌های آلوده به یون سرب از خود نشان می‌دهد. این نتایج به‌ویژه به دلیل غلظت بالای یون سرب در خاک‌های مورد مطالعه است که می‌تواند فرایند سیمانی‌شدن خاک را مختل کند. این یافته‌ها به تأیید نتایج تحقیقات گذشته پرداخته و نشان می‌دهد که یون سرب می‌تواند به طور قابل‌توجهی در فرایند سیمانی‌شدن اختلال ایجاد کند که در نهایت منجر به کاهش مقاومت و کارایی سیمان پرتلند در تثبیت این نوع خاک‌ها می‌شود. از سوی دیگر، سیمان ژئوپلیمری با ساختار شیمیایی متفاوت و ویژگی‌های مکانیکی برتر، به نظر می‌رسد که به طور مؤثری در مقابله با چالش‌های مرتبط با یون سرب و تثبیت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین عملکرد بهتری داشته باشد. این ویژگی‌های مثبت سیمان ژئوپلیمری می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای سیمان پرتلند در فرایند تثبیت و جامدسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورداستفاده قرار گیرد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیمان ژئوپلیمری در مقایسه با سیمان پرتلند، مقاومت اولیه بالاتری از خود نشان می‌دهد و می‌تواند گزینه مناسبی برای مواقعی باشد که نیاز به تثبیت سریع آلودگی خاک وجود دارد. شرایط عمل‌آوری نشان داد که سیمان ژئوپلیمری به‌ویژه در محیط‌های مرطوب ممکن است عملکرد بهینه‌ای نداشته باشد و نتایج نشت آلاینده‌ها از آن به حد استاندارد نرسید. در این شرایط، سیمان معمولی با توجه به مقاومت بالاتر و عملکرد بهتری که در محیط‌های مرطوب از خود نشان می‌دهد، می‌تواند گزینه بهتری برای تثبیت آلودگی باشد. بنابراین، انتخاب بین سیمان ژئوپلیمری و سیمان پرتلند باید بر اساس شرایط خاص محیطی و نیاز به‌سرعت تثبیت انجام شود. درحالی‌که سیمان ژئوپلیمری برای تثبیت سریع مناسب است، سیمان پرتلند به دلیل عملکرد بهتر در محیط‌های

مرطوب ممکن است انتخاب بهتری در چنین شرایطی باشد.

نتایج نشان داد که سیمان ژئوپلیمری تولید شده با سرباره فولاد توانست به طور قابل‌توجهی یون‌های فلزات سنگین مانند سرب و روی را در ساختار جامد تثبیت کند. آزمایش‌ها نشان دادند که این چسب پتانسیل بالایی در کاهش انتشار آلاینده‌ها دارد. همچنین باید توجه داشت که نشت آلاینده‌ها از نمونه‌های حاوی سیمان ژئوپلیمری با سرباره ذوب‌آهن از حد استاندارد بیشتر بود. این مسئله نشان‌دهنده اهمیت انتخاب دقیق مواد پایه برای تولید سیمان ژئوپلیمری است. استفاده از سرباره ذوب‌آهن به‌عنوان ماده پایه ممکن است تأثیر منفی بر عملکرد و نشت آلاینده‌ها داشته باشد؛ لذا، انتخاب مواد پایه مناسب برای تولید سیمان ژئوپلیمری، به‌ویژه در زمینه استفاده از سرباره‌ها و سایر مواد افزودنی، برای دستیابی به عملکرد و مقاومت مطلوب و کاهش نشت آلاینده‌ها ضروری است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه خوارزمی به جهت پشتیبانی در انجام این تحقیق صمیمانه تشکر می‌نماییم.

منابع

[1] A.R.Goodarzi, and M.H. Zandi, Assessing geo-mechanical and leaching behavior of cement–silica-fume-stabilized heavy metal-contaminated clayey soil, Environmental Earth Sciences, 75 (2016).

[2] H. M. Cota, and D. Wallenstein, Hazardous waste management. Second Edition (2004).

[3]V.R Ouhadi, R.N. Yong, and M. Deiranlou, Enhancement of Cement-Based Solidification/Stabilizationcement-based solidification/stabilization of a lead-contaminated smectite clay. Journal of Hazardous Materials, 403 (2021).

[4] Y.J. Du, , M.L. Wei, K.R. Reddy, and H.L. Wu, Effect of carbonation on leachability, strength and microstructural characteristics of KMP binder stabilized Zn and Pb contaminated soils. Chemosphere, 144 (2016): 1033–1042.

[5] M.Niu, G.Li, Y.Wang, Q. Li, L.Han, and Z. Song, Comparative study of immobilization and mechanical properties of sulfoaluminate cement and ordinary Portland cement with different heavy metals. Construction and Building Materials, 193 (2018): 332–343.

[6] G. Dermont, M. Bergeron, G. Mercier, and M. Richer-Laflèche, Metal-Contaminated soils: Remediation practices and treatment technologies. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 12(3) (2008): 188–209.

[7] D. Dermatas, et al. Stabilization or solidification of lead-contaminated soil using RHA. Journal of Hazardous Materials, 271(4) (2018): 238-243.

[8] N. Phanija, and R.V.P. Chavali, Solidification/stabilization of copper-contaminated soil using phosphogypsum. Innovative Infrastructure Solutions. 6, 145 (2021).

[9] V. Illera, F. Garrido, S. Serrano, and M.T. García-González, Immobilization of the heavy metals Cd, Cu and Pb in an acid soil amended with gypsum- and lime-rich industrial by-products. European Journal of Soil Science, 55(1) (2004): 135–145.

[10] N.B. Singh, and B. Middendorf, Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. Construction and Building Materials, 237 (2020): 117455.

[11] Y.H.M., Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and M. El-Zeadani, Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. Journal of Cleaner Production, 251 (2020).

[12] Y. Pan, J. Rossabi, C. Pan, and X. Xie, Stabilization/solidification characteristics of organic clay contaminated by lead when using cement. Journal of Hazardous Materials, 362 (2019): 132–139.

[13] Y.C. Huang, J., Chen, A.R. Tian, H.L. Wu, Y.Q. Zhang, and Q. Tang, Mechanical properties of fiber and cement reinforced heavy metal-contaminated soils as roadbed filling. Journal of Central South University, 27(7) (2020): 2003–2016.

[14] A.C.F. Chiu, R. Akesseh, , I.M. Moumouni, and Y. Xiao, Laboratory assessment of rice husk ash (RHA) in the solidification/stabilization of heavy metal contaminated slurry. Journal of Hazardous Materials, 371 (2019) 62-

71.

[15] J. Liu, F. Zha, L. Xu, B. Kang, X. Tan, Y. Deng, and C. Yang, Mechanism of stabilized/solidified heavy metal contaminated soils with cement-fly ash based on electrical resistivity measurements. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 141 (2019): 85-94.

[16] J. Li, shan, L. Chen, B. Zhan, L. Wang, C.S. Poon, and D.C.W. Tsang, Sustainable stabilization/solidification of arsenic-containing soil by blast slag and cement blends. Chemosphere, 271 (2021): 129868.

[17] M.B. Karakoç, I. Türkmen, M.M., Maraş, F. Kantarci. R. Demirboła, and M.U. Toprak, Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. Construction and Building Materials, 72 (2014) 283-292.

[18] T. Suwan, Categories and types of raw materials using in geopolymer cement production: An overview. Solid State Phenomena, 280 (2018): 481–486.

[19] E. Kishar, D. Ahmed, and N. Nabil, Geopolymer Cement Based on Alkali Activated Slag. Journal of Scientific Research in Science, 34 (2018): 538–552.

[20] V. Nikolić, M. Komljenović, N. Džunuzović, and Z. Miladinović, The influence of Pb addition on the properties of fly ash-based geopolymers. Journal of Hazardous Materials, 350 (2018): 98-107.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Gholamrezaei, M. Delnavaz , H. Shahir, Laboratory Study of Stabilization and Solidification of Lead and Zinc Contaminated Soil Using Geopolymer Cement, Amirkabir J. Civil Eng., 57(11) (2026) 1875-1896.

DOI: 10.22060/ceej.2026.25076.8381

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۷، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۴، صفحه ۱۸۷۵ تا ۱۸۹۶