



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir



Comparison of the Effect of Cement, Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS), and Activated GGBS on Stabilization of a Clay Soil*

Research Article

Amir Jahani¹, Ali Raeesi Estabragh², Hossein Khajepour³, Mohadeseh Amini⁴

DOI: [10.22067/jfeci.2022.74908.1115](https://doi.org/10.22067/jfeci.2022.74908.1115)

1. Introduction

Soft clay soils commonly have high compressibility, excessive settlement, low shear strength, and high volume change properties. Stabilization of these types of soil is needed for reducing the volume change and increasing their strength. Many researchers have reported that the properties of a soil can be changed by mixing with a chemical agent. The behaviors that can be affected are plasticity, strength, and volume change. The chemical agents that are used are lime, cement, fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), and activated GGBS. The degree of improvement depends on the type of clay minerals, the percentage of clay fraction in the soil, chemical agent type and percentage, temperature, moisture content, curing time and conditions, and the organic content.

Lime stabilization has a long history all over the world especially in warm countries, as it needs a relatively high temperature to react with clay particles. Lime stabilization using quicklime is more effective than hydrated lime. Lime used in soil stabilization may be in many forms such as quicklime (CaO) or hydrated lime (Ca(OH)₂). Cement has been used successfully as a stabilizing agent for a long time. However, the production of cement requires a significant amount of energy, and also during its production a large amount of CO₂ is emitted to the environment. To address these shortcomings, in recent years many researchers have examined the use of other stabilizing agents such as GGBS or MgO to replace the cement. GGBS can be used as cementitious materials to modify and improve certain properties of clay soils. The use of GGBS is well known in many applications where it provides good durability, high resistance to chloride penetration, resistance to sulphate attack, and protection against alkali silica reaction (ASR). GGBS on its own has only mild cementitious properties so it needs an alkali to be fully activated. GGBS can be activated in different ways but the most common is chemical activation. Many activators have been suggested to activate GGBS. The

most commonly used activators are lime, calcium sulphate, ordinary portland cement, and magnesium oxide. In this study, the stabilization of a clay soil is studied with cement, GGBS, and activated GGBS (mixture of GGBS and MgO) through performing different experimental tests. The tests consisted of Atterberg limits, compaction, and Unconfined Compressive Strength (UCS). The impacts of the used agents on the behaviors of soil were studied at different curing times and various percentages of these agents. This study also helps to find the chemical reactions and mechanisms that are happened in the improving engineering properties of a clay soil.

2. Material and method

The main materials that were used in this work were soil, cement, GGBS, and MgO. A brief description is as follows:

A clay soil was used in this work consisted of 27% sand, 33% silt, and 40% clay. The liquid limit, plastic limit, and plastic index of it were determined as 46.4, 23.8, and 22.6 respectively. According to the standard compaction test, the optimum water content and maximum dry unit weight of it were 17.5% and 17.7 kN/m³. Based on the grain size distribution and consistency results it was classified as a clay soil with low plasticity (CL). Table 1 summarizes the chemical compositions of it. Based on the results of XRD tests, the minerals were quartz, calcite, feldspar (Na, Ca), feldspar (K), and clay minerals. The clay minerals of the soil were composed of Illite, Chlorite, and Montmorillonite.

Table 1. Chemical composition of soil

Chemical component	Amount	Chemical component	Amount
pH	8.2	Cl ⁻ (meq/L)	26.2
EC (dS/m)	5.03	HCO ₃ ⁻	3.7
Na ⁺ (meq/L)	42	SO ₄ ²⁻ (meq/L)	19.2
Ca ²⁺ (meq/L)	46	CaCO ₃ (%)	4.2
Mg ²⁺ (meq/L)	2.2	O.C. (%)	0.2

*Manuscript received: 23 January 2022, Revised, 01 June 2022, Accepted, 13 August 2022.

¹. Corresponding author. MSc in Hydraulic Structures, Tehran University, Tehran, Iran. Email: amir.jahani73@ut.ac.ir

². Professor in Geotechnical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

³. MSc in Hydraulic Structures, Tehran University, Tehran, Iran.

⁴. PhD Candidate in Hydraulic Structures, Tehran University, Tehran, Iran.

Portland Cement Type 1 was used in this work. Its specific gravity and Blaine fineness were 3.15 and 4100 cm^2/g , respectively. GGBS was supplied from Isfahan Melting Iron Company in Iran and its chemical composition, according to the information from the company, was $\text{CaO} = 41.5\%$, $\text{SiO}_2 = 35.5\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.5\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.5\%$, $\text{MgO} = 8.0\%$, $\text{K}_2\text{O} = 0.3\%$, $\text{TiO}_2 = 0.4\%$, and $\text{Na}_2\text{O} = 0.2\%$. A commercial MgO was bought from a local chemical supplier. According to the information from supplier it was composed of 94.2% MgO, 1.7% CaO, 0.85% SiO_2 , 0.62% Fe_2O_3 , and 0.16% Al_2O_3 . The specific gravity, specific surface and mean size of its particles were 3.55, 250–300 m^2/g , and 60 μm , respectively.

Samples of natural soil and soil with cement, GGBS, and a mixture of GGBS: MgO were prepared. The ratios of 3 to 1 by weight were considered for the combination GGBS:MgO. The percentage weights of 5, 10, and 15% of cement, GGBS, or a mixture of GGBS:MgO (relative to the weight of air-dried soil) were considered in this work. The desired amounts of these agents were weighed, added to the air-dried soil, and mixed by hand. Standard compaction tests were conducted on the natural soil and mixtures of soil with each of the agents. The optimum water content and maximum dry unit weight were determined for each of them from corresponding compaction curves. Samples for UCS tests were also prepared by static compaction for the natural soil and the mixture of soil with each of the agents. The soil, desired agent, and water (according to the corresponding optimum water content) were weighted. First, the soil and agent were mixed, and then water was added gradually to it and mixed thoroughly. The prepared mixtures were compacted by the static compaction method. The prepared samples with different agents were stored in a curing cabinet according to the ASTM D1632-07 standard for curing times of 7, 14, and 28 days.

3. Results and discussion

Table 2 presents the results of the Atterberg limits and standard compaction tests for the natural soil and mixtures of soil with different percentages of agents. As shown in this table, adding 5% of cement, GGBS, or activated GGBS to the soil increases LL and PL compared to natural soil. By adding agents to the soil, the pH of pore fluid increases, which causes additional negative charges on the edges of clay particles. In this process, clay particles are attracted to each other in the form of edge-to-face attraction, resulting in a flocculated structure. In this form, the open structure can hold more water, which increases the LL. The results also show that by increasing the percentage of each agent (10 and 15%), the Atterberg limits are decreased in comparison with the mixture of 5% of them. The reason for this is that the soil mass has flocculated more, which causes the particles to paste each other and reduce the spacing between the particles and the specific surface. As shown in Table 2, the value of PL increases by adding 5% of these agents, particularly for 5% cement after that the reduction in the value of it happened in comparison with the natural soil. This may

be due to the more exchange ions that occurred between the soil and agents at 10% and 15% than at the 5%.

Table 2. Atterberg limits and compaction parameters for natural soil and soil stabilized with different percentages of agents

Soil	Agent (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)	W_{opt} (%)
Natural	0	46.4	23.8	22.6	17.7	17.5
Soil+ cement	5	51	31	20	16.85	23.4
	10	48.4	28.7	19.7	16.83	22.8
	15	45.5	26.5	19	16.81	22.6
Soil+ GGBS	5	53	25.7	28	17.7	19
	10	49.6	24	25.6	17	19.8
	15	47	23	23.6	16.6	21
Soil+ GGBS:MgO	5	54	28	26	16.4	22.6
	10	52	26	26	16.2	21.6
	15	48	24	24	16.1	21

The results of the standard compression tests (Table 2) indicate that mixing these agents with the soil causes increasing and decreasing in the values of optimum water content and maximum dry unit weight in comparison with the natural soil. Addition of these agents to the soil causes an exchange of ions between agent and soil (based on the cationic exchange capacity of the soil), thus pasting the particles with strong bonds to each other and increasing the degree of flocculated structure in the mass of soil and used agent. In this case, soil particles are connected to each other with stronger bonds than the natural soil. According to the ASTM standard for the compaction test, the applied energy for each layer is constant. When this test is used for the mixture of soil and agents, the standard energy of it is not able to destroy the bonds between particles. This results in the reduction in the maximum dry unit weight. It is also observed in this table that the optimum water content of the stabilized soil increases in comparison with the natural soil. This is due to the existence of more space between the particles in comparison with the natural soil.

Figure 1 shows the stress-strain curves for natural soil and soil-cement with different percentages of cement at a curing time of 28 days. It is seen that by adding different percentages of cement to the soil, more increase in the final strength of them happens in comparison with the natural soil. By adding cement to the soil, calcium ions are released during the initial hydration of cement, and cation exchange with soil particles is formed. In the hydration phase of cement, the pH of the solution increases, which causes the destruction of silicate and aluminate bonds and solve them in the pore liquid solution. From the chemical reactions of these materials with each other, cementitious materials such as Calcium Silicate Hydrate (CSH) and Calcium Aluminate Hydrate (CAH) are produced. These produced materials cause the soil particles to paste with each other and form a solid mass, which results in increasing the strength of the soil.

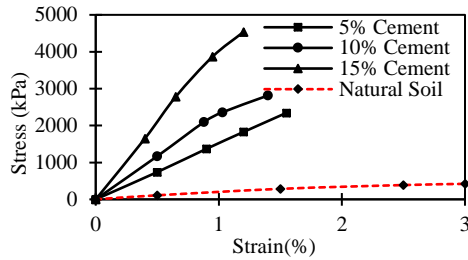


Figure 1. Stress-strain curves for natural soil and soil with different percentages of cement at curing time of 28 days

Figure 2 presents results for the soil stabilized with 5, 10, and 15% GGBS at 28 days of curing time. As shown in this figure, adding GGBS causes an increase in the strength of samples in comparison with the natural soil. Regarding this issue, many researchers reported that the reaction between clay soil and GGBS can be a cementation process, similar to the cementation of clay soil with portland cement.

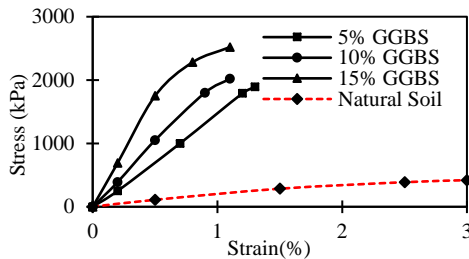


Figure 2. Stress-strain curves for natural soil and soil with different percentages of GGBS at curing time of 28 days

Figure 3 shows the results for the soil stabilized with different percentages of the mixture of GGBS and MgO for a curing time of 28 days. The figure shows that the samples with 5, 10, and 15% of the agent have higher strength than the natural soil. As explained by Jin et al. (2015), in the mixture of GGBS and MgO that was used as a soil agent, the first action is to break down the GGBS bonds such as Ca-O, Mg-O, Si-O-Si, and Al-O-Si. After that, Mg ions react with Si-O or Al-O and form a gel. The produced gel pastes the particles to each other and fills the pore between the particles which increases the strength of the soil.

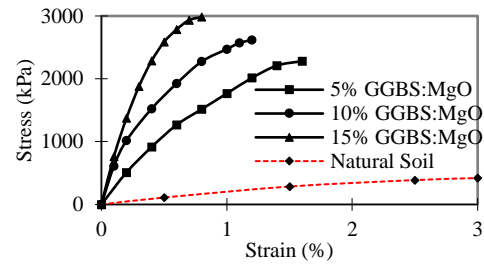


Figure 3. Stress-strain curves for natural soil and soil with different percentages of GGBS:MgO at curing time of 28 days

4. Conclusion

The stabilization of a clay soil was studied using different percentages of cement, GGBS, and mixtures of GGBS:MgO at different curing times and the following results can be drawn from this work:

1. The Atterberg limits and compaction parameters of the soil change using cement, GGBS, and activated GGBS as agents. Their variations depend on the kind of agent;
2. The strength of soil increases using the used stabilizing agents. The amount of strength increasing depends on the type and percentage of the used agent and the curing time;
3. All mixtures examined in this work are effective in the stabilization of the soil. GGBS can increase the strength of soil but activating by MgO is more effective in increasing the strength for different percentages of agents at various curing times;
4. The comparison of the results reveals that the impact of cement on the stabilization of the soil is more than other used agents.



مقایسه عملکرد سیمان، سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) و GGBS فعال شده در بهسازی یک خاک رسی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfeci.2022.74908.1115

امیر جهانی^۱  علی ریسی استبرق^۲ حسین خواجه پور^۳ محدثه امینی^۴

چکیده در این کار پژوهشی، اثر سیمان، سرباره دانه‌ای کوره ذوب آهن (GGBS) و سرباره فعال شده با اکسید منیزیم (MgO) به عنوان مواد افزودنی در بهسازی یک خاک رسی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند. برای فعال سازی GGBS از اکسید منیزیم با نسبت اختلاط ۳ (سرباره) به ۱ (اکسید منیزیم) استفاده گردید. بهسازی خاک در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ از مواد افزودنی مذکور انجام شد. آزمایش‌های حدود اتربرگ و تراکم استاندارد روی خاک‌های اختلاط یافته با مواد افزودنی مذکور انجام شد. هم‌چنین نمونه‌های لازم از این مواد اختلاط یافته برای تعیین مقاومت تک‌محوری و بررسی ریزساختار خاک با انجام آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه گردید. مقاومت نمونه‌های تهیه شده در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تعیین گردیدند. نتایج نشان داد که مقاومت نمونه‌ها تابعی از درصد مواد افزودنی مورد استفاده و زمان عمل‌آوری می‌باشد. علاوه بر این مقایسه نتایج نشان داد که در درصد مشخص و زمان عمل‌آوری معین، مقاومت نمونه‌های بهسازی شده با سرباره از نمونه‌های حاوی سرباره فعال شده کمتر می‌باشد. هم‌چنین با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش SEM مشخص شد که با افزودن مواد افزودنی مذکور به خاک رسی، مواد سیمانته‌کننده‌ای در اثر عمل متقابل آنها با خاک طی فرایند شیمیایی تشکیل می‌شود که منجر به اتصال ذرات خاک و مواد افزودنی به یکدیگر و در نتیجه تشکیل جسمی با مقاومت بالا می‌گردد. هم‌چنین در این پژوهش ارزیابی اقتصادی برای بهسازی خاک با مواد افزودنی مذکور انجام شد و مناسب‌ترین ماده افزودنی برای این امر پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی بهسازی خاک رسی، سیمان، سرباره کوره ذوب آهن، اکسید منیزیم، سرباره فعال شده.

Comparison of the Effect of Cement, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), and Activated GGBS on the Improvement of the Behaviors of a Clay Soil

Amir Jahani

Ali Raeesi Estabragh

Hossin Khajepour

Mohadeseh Amini

Abstract In this research work, the effect of cement, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), and activated GGBS with MgO on the treatment of a clay soil was studied through conducting the experimental tests. The ratios of 1:3 was considered for making the mixtures GGBS: MgO. The used percentages of additives were 5, 10, and 15%. Various experimental tests such as Atterberg limits, standard compaction, compressive strength (UCS), and Scanning Electron Microscopy (SEM) tests were performed on the samples with different percentages of additives. Also, UCS tests were conducted on the compacted samples at curing times of 7, 14, and 28 days. The results of UCS indicated that all used additives are effective in improving the behaviors of soil, and their amount is dependent on the percentage of used additives and curing time. In addition, a comparison of the results showed that in a given percentage of additives and curing time, activated GGBS is more effective than GGBS alone in improving soil samples. Based on the SEM results, it was found that the increasing strength of stabilized soil is resulted from the interaction between soil particles and additives materials. An economical evaluation of soil improvement with used additives was also carried out and the best one was proposed for conducting in the field.

Keywords Clay soil improvement, Cement, GGBS, MgO, activated GGBS.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۵/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۱/۳ می‌باشد.

Email: amir.jahani73@ut.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

(۲) استاد، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

(۳) کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

(۴) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

مقدمه

خاک‌های رسی دارای مقاومت و نفوذپذیری کم، تراکم‌پذیری و قدرت تورمی زیاد می‌باشند. بنابراین خواص فیزیکی و مکانیکی آنها قبل از کاربرد آنها در پروژه‌های عمرانی می‌بایست اصلاح گردد. روش‌های گوناگون فیزیکی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی برای بهسازی این خاک‌ها وجود دارد. در بهسازی آنها، استفاده از روش شیمیایی بیشتر مورد توجه پژوهشگران می‌باشد [1]. در این روش با افزودن درصد مشخصی از مواد افزودنی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و... به خاک، عمل بهسازی صورت می‌گیرد. این مواد با انجام یک سری واکنش‌های شیمیایی در مخلوط خاک و ماده افزودنی، سبب تثبیت و بهسازی آنها می‌گردند [2].

امروزه یکی از رایج‌ترین مواد شیمیایی افزودنی به منظور بهسازی خاک‌ها، سیمان پرتلند می‌باشد. بهسازی خاک با استفاده از سیمان سابقه‌ای طولانی دارد و پژوهشگران متعددی به بررسی اثر این ماده بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک پرداخته‌اند. به عنوان مثال جونز و جفرسون [3] و آلراواس و همکاران [4] در خصوص اثرات سیمان در بهسازی خاک به مواردی شامل کاهش پتانسیل انقباض و تورم، افزایش مقاومت و ضریب الاستیک، افزایش پایداری در برابر اثر رطوبت، یخ‌زدگی و ذوب در مقایسه با خاک طبیعی اشاره کردند. خمیسا و محمدی [5]، لیتل و نیر [6] و ابوفرسخ و همکاران [7] گزارش کردند که از واکنش‌های موادی مانند کلسیم سیلیکات و کلسیم آلومینات موجود در سیمان پرتلند با ذرات خاک منجر به تشکیل محصولات شده که تأثیر قابل-توجهی در افزایش مقاومت خاک و کاهش فشار تورمی آن دارد. اگرچه سیمان از مواد افزودنی مناسب در بهسازی خاک محسوب می‌گردد، لیکن تولید آن با مصرف بالای انرژی و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی قابل توجهی همراه است که می‌توان به مصرف بالای انرژی (۵۰۰۰ مگاژول انرژی به‌ازای تولید هر تن سیمان)، مصرف منابع تجدیدناپذیر (۱/۵ تن سنگ آهک و ۱ تن خاک رس به‌ازای تولید هر تن سیمان) و هم‌چنین انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ (۰/۹۵ تن گاز CO₂ به‌ازای تولید هر تن سیمان) اشاره کرد [8, 9]. پژوهشگران مطالعاتی در خصوص ماده جایگزین سیمان انجام داده‌اند به طوری که در سال‌های اخیر استفاده از محصولات جانبی واحدهای صنعتی به منظور جایگزینی نسبی یا کامل با سیمان بسیار مورد توجه واقع شده است. سرباره کوره ذوب آهن (Ground Granulated Blast Furnace Slag) (GGBS) یکی از این مواد است و برای چنین کاربردهایی با موفقیت مورد استفاده

قرار گرفته است. در تولید هر تن سرباره کوره ذوب آهن، ۱۳۰۰ مگاژول انرژی مصرف می‌شود و منجر به انتشار ۰/۰۷ تن گاز CO₂ به محیط می‌شود که این مقادیر کمتر از مقادیر معادل در تولید سیمان می‌باشد [8].

در صنایع ذوب آهن طی فرایند تولید آهن، محصول فرعی به نام سرباره تولید می‌شود که مواد تشکیل دهنده آن شامل سیلیکا، آلومینا و اکسید کلسیم می‌باشد. با توجه به روش خنک نمودن آن، انواع مختلفی از سرباره تولید می‌شود. این محصولات شامل سرباره خنک شده در هوای آزاد، سرباره دمیده شده یا پف کرده (Expanded or Foamed Blast Furnace Slag) و سرباره دانه‌ای کوره ذوب آهن است. اگر سرباره مذاب به وسیله آب، به سرعت خنک شود، به صورت ذرات شیشه‌ای درآمده و قطعاتی ترد و شکننده به اندازه ماسه تشکیل می‌شوند. ساختار فیزیکی و اندازه دانه‌ها به ترکیب شیمیایی سرباره و دمای آن در زمان خنک شدن بستگی دارد. هنگامی که این محصول خرد و آسیاب شود، به ذرات بسیار ریز تبدیل می‌شوند که سرباره دانه‌ای کوره ذوب آهن نامیده می‌شود [10]. لازم به ذکر است که در ادامه به جای سرباره دانه‌ای کوره ذوب آهن، به اختصار از واژه سرباره استفاده می‌شود.

استفاده از سرباره در بسیاری از پروژه‌های عمرانی به دلایل افزایش دوام در برابر عوامل جوی، مقاومت بالا در برابر نفوذ کلریدها و حمله سولفات‌های موجود در خاک عملکرد مؤثری داشته است [8]. لی [11] گزارش کرد که این ماده در جاده‌سازی و بهسازی خاک در آفریقای جنوبی و انگلستان برای مدت طولانی مورد استفاده قرار گرفته است. ویلد و همکاران [12] گزارش کردند که مواد سیمانته تولید شده توسط سرباره که به وسیله آنها فرایند سیمانی شدن و پیوند ذرات خاک به یکدیگر فراهم می‌گردد، مشابه مواد تولید شده توسط سیمان و آهک می‌باشد. یادو و تریپاتی [13] در پژوهش خود در خصوص تأثیر سرباره بر روی خواص مهندسی خاک نرم، شاهد افزایش قابل-ملاحظه مقاومت تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) آن بودند. یادو و تریپاتی هم‌چنین گزارش کردند که با افزودن سرباره به خاک، پتانسیل تورمی و شاخص خمیری خاک نیز کاهش می‌یابد. پاتاک و همکاران [14] نیز از نتایج آزمایش‌های خود دریافتند که با افزودن سرباره به خاک، مقاومت فشاری و CBR افزایش چشمگیری می‌یابد. شالابی و همکاران [15] در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که افزایش مقدار سرباره سبب

آزمایش‌های لازم مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده و مقایسه آنها با یکدیگر، بهترین ماده افزودنی با منظور نمودن مسائل اقتصادی برای عملیات اجرایی پیشنهاد گردیده است.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک رسی، آب، سیمان، سرباره و اکسیدمنیزیم می‌باشد که در ادامه ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی هر یک از آنها ارائه می‌گردد.

خاک

در این پژوهش از یک نوع خاک رسی که شامل ۲۷٪ ماسه، ۳۳٪ سیلت و ۴۰٪ رس می‌باشد، استفاده گردید. نتایج به دست آمده از آزمایش حدود اتربرگ نشان داد که حدود روانی، خمیری و انقباض این خاک به ترتیب برابر ۴۶/۴، ۲۳/۸ و ۱۳٪ و شاخص خمیری آن ۲۲/۶٪ می‌باشد. وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه نیز بر اساس آزمایش تراکم استاندارد به ترتیب برابر $17/7$ و $17/5$ ٪ تعیین گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های حدود اتربرگ و دانه‌بندی، این خاک بر اساس سامانه طبقه‌بندی متحد (USCS)، رس با خاصیت خمیری (پلاستیسیته) پایین (CL) طبقه‌بندی گردید. هم‌چنین آزمایش‌های شیمیایی نیز روی خاک صورت گرفت که نتایج آنها در جدول (۱) آورده شده است. علاوه بر این، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD (X-Ray Diffraction)) روی خاک انجام شد و نتایج نشان داد که کانی‌های این خاک شامل کوارتز، کلسیت و فلدسپار (سدیم، کلسیم و پتاسیم) و کانی‌های رسی آن نیز شامل ایلیت، کلریت و مونت‌موریلونیت می‌باشد.

کاهش خاصیت خمیری، پتانسیل تورمی و چسبندگی ذرات خاک و افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد.

پژوهش‌های انجام شده به وسیله پژوهشگران مختلف نشان داده است که اگر سرباره به تنهایی برای بهسازی خاک به کار رود، به علت آن‌که سرعت فرایند هیدراسیون آن بسیار آهسته و کند است، افزایش قابل توجهی در مقاومت و سایر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک مشاهده نمی‌شود [16, 17]. آنها توصیه کردند که برای غلبه بر این مسئله، فعال‌سازی سرباره قبل از افزودن به خاک مد نظر قرار گیرد. برای فعال‌سازی سرباره معمولاً سیمان، آهک و یا خاکستر بادی را با نسبت خاصی با آن مخلوط می‌کنند و سپس درصد لازم از مخلوط حاصل را برای بهسازی به خاک اضافه می‌کنند. در سال‌های اخیر اکسیدمنیزیم به عنوان ماده فعال کننده سرباره پیشنهاد شده است. جاگاندن و همکاران [18] و یی و همکاران [19] نشان دادند که مقاومت ۷ و ۲۸ روزه خاک ماسه-ای بهسازی شده با استفاده از سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم بیشتر از مقاومت ایجاد شده توسط مواد فعال کننده سیمان و آهک می‌باشد.

ضرورت انجام این پژوهش

همان‌طور که بیان گردید، خاک‌های رسی نرم دارای مقاومت کم، تراکم‌پذیری و قدرت تورمی بالایی می‌باشند. بنابراین اگر از آنها در اجرای یک پروژه عمرانی به عنوان منبع قرضه مورد استفاده قرار گیرند و یا سازه‌ای بر روی آنها بنا شود، با توجه به خواص ذکر شده مشکلاتی در پایداری پروژه اجرا شده به وجود می‌آید. بنابراین به منظور اطمینان از پایداری این ابنیه‌ها می‌بایست بهسازی این خاک‌ها قبل از هر اقدامی، صورت پذیرد. هدف از این کار پژوهشی، بهسازی شیمیایی یک خاک رسی می‌باشد که با افزودن سیمان، سرباره (به تنهایی) و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در درصدها و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون با انجام

جدول ۱ ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد استفاده

O.C.	CaCO ₃	So ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	EC	pH	مشخصه
(%)	(%)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(dS/m)	-	واحد اندازه‌گیری
۰/۲	۴/۲	۱۹/۲	۳/۷	۲۶/۲	۲/۲	۴۶	۴۲	۵/۰۳	۸/۲	مقدار

آب

آب مورد استفاده در این پژوهش، از نوع شرب است و میزان اسیدته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) آن به ترتیب برابر ۷/۷۲ و (ds/m) ۱/۲ اندازه‌گیری گردید.

سیمان

در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع ۱ با وزن مخصوص ۳/۱۵ و درجه نرمی بلین (cm²/g) ۴۱۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن بر اساس استاندارد ASTM تعیین گردید که نتایج آزمایش‌ها نشان داد که غلظت نرمال، زمان گیرش اولیه و نهایی آنها به ترتیب معادل ۲۵٪، ۱۶۰ و ۲۲۰ دقیقه تعیین گردید. هم‌چنین آزمایش‌های لازم نشان دادند که میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ۷ روزه آن نیز به ترتیب برابر مقادیر ۱۹/۲، ۲/۷ و ۴/۳ مگاپاسکال می‌باشد.

سرباره

سرباره مورد استفاده از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه گردید. براساس اطلاعات کسب شده از تولیدکننده، ترکیبات شیمیایی آن عبارتند از ۴۱/۵٪ اکسید کلسیم، ۳۵/۵٪ اکسید سیلیسیم، ۱۱/۵٪ اکسید آلومینیوم، ۰/۵٪ اکسید آهن، ۸٪ اکسید منیزیم، ۰/۳٪ اکسید پتاسیم، ۲/۲٪ دی‌اکسید تیتانیوم و ۰/۲٪ اکسید سدیم. میانگین اندازه ذرات سرباره نیز، ۵۰ میکرومتر با سطح ویژه حدود (m²/g) ۶-۲۸ می‌باشد.

اکسید منیزیم (MgO)

اکسید منیزیم به کار رفته در این کار پژوهشی، محصولی از شرکت شیمی دارویی نوترون بوده و شامل ۹۴/۲٪ اکسید منیزیم، ۱٪/۷ اکسید کلسیم، ۰/۸۵٪ اکسید سیلیسیم و ۰/۶۲٪ اکسید آهن و ۰/۱۶٪ اکسید آلومینیوم می‌باشد. وزن مخصوص، میانگین اندازه ذرات و سطح ویژه آن نیز به ترتیب معادل ۳/۵۵ (μm) و ۶۰ و (m²/g) ۲۵۰-۳۰۰ می‌باشد.

تهیه نمونه آزمایشی

برای تهیه مخلوط سرباره فعال شده با اکسید منیزیم، نسبت ۳ (سرباره) به ۱ (اکسید منیزیم) انتخاب گردید. سپس درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از مخلوط حاصل برای بهسازی خاک استفاده شد [17]. هم‌چنین از سیمان و سرباره به‌تنهایی نیز در درصد‌های

ذکر شده مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های لازم برای تعیین مقاومت، ابتدا خاک طبیعی با هر یک از مواد افزودنی مخلوط شد. سپس آزمایش تراکم استاندارد جهت به‌دست آوردن وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه روی مخلوط‌های تهیه شده صورت پذیرفت. رطوبت‌های اولیه مخلوط‌های یاد شده ابتدا با افزودن آب به مقدار رطوبت بهینه رسانده شد، سپس با استفاده از روش تراکم استاتیکی اقدام به تهیه نمونه‌های مورد نیاز گردید. در این روش، مخلوط‌های یاد شده در یک قالب ویژه ریخته شد و هر لایه خاک به وسیله دستگاه بارگذاری تک-محوری با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، در سه لایه متراکم گردید به طوری که وزن واحد حجم خشک بیشینه آن با وزن واحد حجم خشک بیشینه منحنی تراکمی مربوطه برابر شد. لازم به ذکر است که میزان بار وارده به هر لایه از مخلوط‌های خاک به روش سعی و خطا تعیین گردید. نمونه‌های ساخته شده دارای طول و قطر به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر بودند. نمونه‌های تهیه شده بر اساس استاندارد ASTM-D1632-07 در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بالای ۹۵٪ در اتاقک مخصوصی نگهداری شدند و آزمایش مقاومت تک‌محوری در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بر روی آنها صورت گرفت. لازم به ذکر است که برای مقایسه دقیق‌تر نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت تک‌محوری، از هر حالت از مخلوط‌های خاک سه نمونه مقاومتی تهیه گردید و آزمایش مقاومت تک‌محوری بر روی آنها صورت پذیرفت. سپس نتایج حاصل از سه تکرار آنها با یکدیگر مقایسه و از نتایج نزدیک بهم، میانگین‌گیری شد و به‌عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

آزمایش‌ها

آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسید منیزیم شامل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری و SEM (Scanning Electron Microscopy) می‌باشد. به‌منظور ارزیابی اضافه کردن هر یک از مواد افزودنی ذکر شده با درصد‌های مختلف به خاک رسی، آزمایش حدود اتربرگ جهت تعیین مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری و آزمایش تراکم استاندارد جهت تعیین پارامترهای تراکمی بر روی نمونه‌های یاد شده بر اساس استاندارد ASTM انجام گردید. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها، آزمایش مقاومت تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM-D1633-00 با سرعت

آزمایش حدود اتربرگ

نتایج آزمایش حدود اتربرگ و تراکم برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ در جدول (۲) ارائه شده است. همان گونه که در جدول (۲) مشاهده می‌گردد، با افزودن سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به میزان ۵٪ وزنی به خاک رس، حد روانی (LL) خاک از ۴۶٪ در خاک طبیعی به ترتیب به مقادیر ۵۱، ۵۳ و ۵۴٪ تغییر یافته است. هم‌چنین نتایج مندرج در این جدول نشان می‌دهد که با افزایش درصد ماده افزودنی، روند کاهشی در مقادیر حد روانی مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که حد روانی در مخلوط خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با ۱۰٪ وزنی به ترتیب به مقادیر برابر ۴۸/۴، ۴۹/۶ و ۵۲٪ و برای ۱۵٪ وزنی از آنها به ترتیب به مقادیر برابر ۴۵/۵، ۴۷ و ۴۸٪ رسیده است. همین روند نیز برای حد خمیری (PL) مخلوط‌های خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم نیز مشاهده می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که با افزودن سیمان به خاک، شاخص خمیری در مقایسه با نمونه خاک طبیعی کاهش داشته که با افزایش درصد وزنی سیمان، مقدار این کاهش بیشتر شده است. در مقابل، افزودن سرباره و سرباره فعال شده به خاک سبب افزایش شاخص خمیری (PI) در مقایسه با خاک طبیعی شده که با افزایش درصد ماده افزودنی، مقادیر مربوط به این شاخص روند کاهشی پیدا کرده است.

بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی، مخلوط‌های خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم اعمال شد. عمل بارگذاری تا وقوع گسیختگی در نمونه مورد آزمایش ادامه یافت. در طول آزمایش، میزان بار وارد شده و تغییر شکل ایجاد شده در نمونه به صورت پیوسته ثبت گردید و در نهایت با توجه به داده‌های به دست آمده اقدام به تعیین منحنی تنش-کرنش هر یک از نمونه‌ها گردید. هم‌چنین به منظور بررسی و تحلیل ریزساختار نمونه‌های خاک در ابعاد میکرونی، اقدام به تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شد. در این پژوهش، آزمایش SEM روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم با درصد وزنی ۱۰ در زمان عمل‌آوری ۷ روز صورت گرفته است. این آزمایش در آزمایشگاه نانوالکترونیک دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران انجام شد.

نتایج

در این پژوهش تعداد ۱۰ آزمایش حدود اتربرگ، ۱۰ آزمایش تراکم استاندارد، ۴ آزمایش SEM و ۸۴ آزمایش مقاومت تک-محوری (با در نظر گرفتن ۳ تکرار) بر روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم انجام پذیرفت که نتایج آنها به شرح زیر می‌باشد:

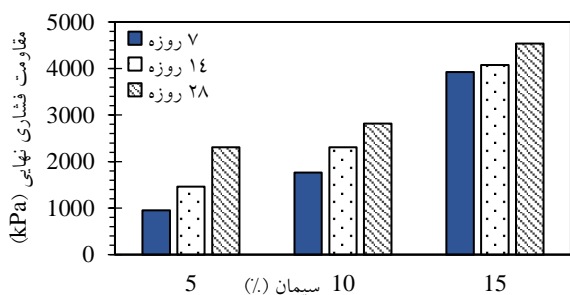
جدول ۲ نتایج آزمایش حدود اتربرگ و تراکم نمونه‌های مختلف خاک

خاک	ماده افزودنی (%)	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	شاخص خمیری (%)	رطوبت بهینه (%)	وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m ³)
خاک طبیعی	۰	۴۶/۴	۲۳/۸	۲۲/۶	۱۷/۵	۱۷/۷
خاک-سیمان	۵	۵۱	۳۱	۲۰	۲۳/۴	۱۶/۸۵
	۱۰	۴۸/۴	۲۸/۷	۱۹/۷	۲۲/۸	۱۶/۸۳
	۱۵	۴۵/۵	۲۶/۵	۱۹	۲۲/۶	۱۶/۸۱
خاک-سرباره	۵	۵۳	۲۵/۷	۲۸	۱۹	۱۷/۷
	۱۰	۴۹/۶	۲۴	۲۵/۶	۱۹/۸	۱۷
	۱۵	۴۷	۲۳	۲۳/۶	۲۱	۱۶/۶
خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم	۵	۵۴	۲۸	۲۶	۲۲/۶	۱۶/۴
	۱۰	۵۲	۲۶	۲۶	۲۱/۶	۱۶/۲
	۱۵	۴۸	۲۴	۲۴	۲۱	۱۶/۱

آزمایش تراکم استاندارد

جدول (۲) نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد را برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در درصد‌های وزنی مختلف نشان می‌دهد. برای خاک طبیعی وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه $(17/7 \text{ kN/m}^3)$ و $17/5\%$ به دست آمده است. مقایسه نتایج آورده شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که با افزودن سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک، مقادیر وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه در مقایسه با خاک طبیعی به ترتیب کاهش و افزایش یافته است که میزان این تغییرات با افزایش درصد مواد افزودنی بیشتر شده است. به عنوان مثال با افزودن 5% وزنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک طبیعی، مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه از $17/7$ کیلونیوتن بر متر مکعب (در خاک طبیعی) به ترتیب برابر مقادیر $16/85$ ، $17/7$ و $16/4$ کیلونیوتن بر متر مکعب شده است که با افزایش درصد ماده افزودنی به 15% این پارامتر به مقادیر $16/81$ ، $16/6$ و $16/1$ کیلونیوتن بر متر مکعب رسیده است. هم‌چنین مقادیر رطوبت بهینه به ازای اضافه کردن 5% سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک، از $17/5\%$ (در خاک طبیعی) به ترتیب به $23/4$ ، 19 و $22/6\%$ افزایش یافته است. با افزایش درصد ماده افزودنی به 10% و 15% ، روند تغییرات درصد رطوبت بهینه برای ماده افزودنی سیمان و سرباره فعال شده کاهش و برای ماده افزودنی سرباره افزایش می‌باشد.

به منظور مقایسه بهتر مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک حاوی مواد افزودنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در زمان‌های عمل‌آوری مختلف، تمامی نتایج آنها در قالب نمودارهای ستونی در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) آورده شده است. شکل (۲) نشان‌دهنده چگونگی روند تغییرات مقاومت نهایی نمونه‌های خاک-سیمان در درصد‌های وزنی و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزودن سیمان به خاک سبب افزایش مقاومت در نمونه‌ها می‌شود که میزان این افزایش رابطه مستقیمی با درصد سیمان مخلوط شده و زمان عمل‌آوری آن دارد. به عنوان مثال با توجه به شکل (۲)، با افزودن 5 ، 10 و 15% سیمان به خاک در زمان عمل‌آوری 28 روز، مقاومت نهایی نمونه‌ها به ترتیب برابر 2305 ، 2815 و 4535 کیلوپاسکال تعیین گردید، به بیانی دیگر افزودن 5 ، 10 و 15% سیمان به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها در حدود $5/5$ ، 7 و 11 برابر مقاومت خاک طبیعی شده است. هم‌چنین به ازای افزودن مقدار ثابت سیمان به خاک، مقادیر مقاومت نهایی نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش داشته است. به عنوان مثال به ازای افزودن 5% سیمان به خاک، مقدار مقاومت فشاری نهایی از 952 کیلوپاسکال در زمان عمل‌آوری 7 روز به 2305 کیلوپاسکال در زمان عمل‌آوری 28 روز رسیده است به عبارت دیگر با افزایش زمان عمل‌آوری از 7 به 28 روز، مقاومت نمونه $2/4$ برابر افزایش یافته است.

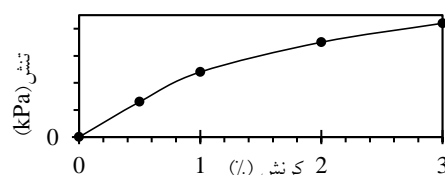


شکل ۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان

شکل (۳) نشان‌دهنده روند تغییرات مقاومت نهایی نمونه‌های خاک-سرباره در درصد‌های وزنی و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، افزودن سرباره به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است

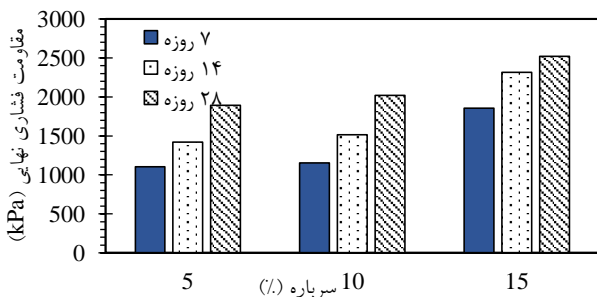
آزمایش مقاومت تک‌محوری

شکل (۱) منحنی تنش-کرنش نمونه خاک طبیعی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نهایی این نمونه برابر 420 کیلوپاسکال در کرنش 3% اندازه‌گیری شده است.



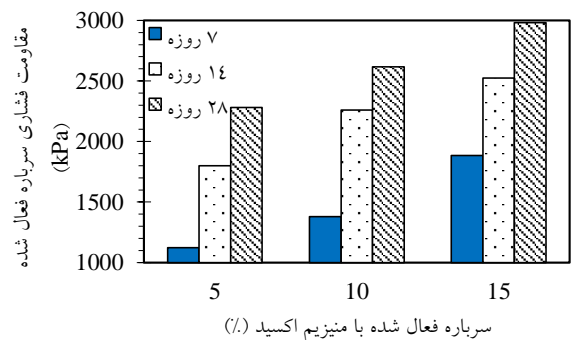
شکل ۱ منحنی تنش-کرنش خاک طبیعی

سرباره و خاک - سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم با درصد وزنی ۱۰ و زمان عمل آوری ۷ روز با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که شکل (۵-الف) نشان می‌دهد، خاک طبیعی دارای ساختار مجتمع (floculated) بوده و فضاهای خالی بسیار کمی بین ذرات مشاهده می‌شود. هم‌چنین در این شکل (شکل ۵-الف) مشاهده می‌شود که ذرات خاک بدون هیچ‌گونه اتصالی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. با افزودن سیمان (شکل ۵-ب) و سرباره (شکل ۵-ج) به خاک طبیعی، ساختار خاک مجتمع‌تر شده و میزان فضاهای خالی بین ذرات نیز در مقایسه با خاک طبیعی تغییر پیدا کرده است. علاوه بر این مقایسه تصاویر با یکدیگر نشان می‌دهد که ذرات خاک در نمونه‌های حاوی مواد افزودنی سیمان و سرباره، توسط اتصالاتی به یکدیگر متصل شده‌اند. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که افزودن سرباره فعال شده به خاک (شکل ۵-د) سبب لختگی بیشتر ساختار خاک، تشکیل ماده سیمان‌کننده و ژل مانند نظیر ژل کلسیم‌سیلیکات‌هیدراته (CSH) و در نتیجه پر شدن فضاهای خالی به وسیله آن شده است.



شکل ۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم

که میزان این افزایش (مشابه سیمان) تابعی از درصد وزنی سرباره مورد استفاده و زمان عمل آوری می‌باشد. به عنوان مثال با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵٪ سرباره به خاک، مقاومت نهایی نمونه‌ها در زمان عمل آوری ۲۸ روز به ترتیب برابر ۱۸۹۱، ۲۰۲۰ و ۲۵۲۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری گردیدند که این امر نشان‌دهنده افزایش مقاومت نمونه‌های خاک بهسازی شده در حدود ۴/۵، ۵ و ۶ برابر نمونه خاک طبیعی می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که به ازای افزودن درصد ثابت سرباره به خاک، مقادیر مقاومت فشاری نهایی نمونه‌ها با افزایش زمان عمل آوری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال به ازای افزودن ۱۵٪ سرباره به خاک، مقدار مقاومت فشاری نهایی از ۱۸۵۵ کیلوپاسکال در زمان عمل آوری ۷ روز به ۲۵۲۰ کیلوپاسکال در زمان عمل آوری ۲۸ روز رسیده است.

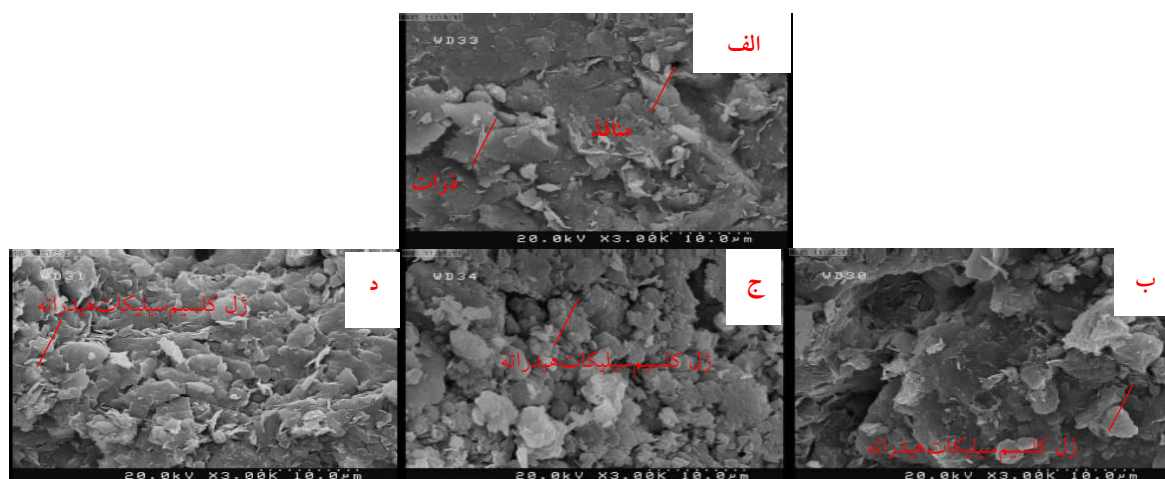


شکل ۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سرباره

نتایج مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های بهسازی شده با سرباره فعال شده به ازای درصد‌های مختلف ماده افزودنی و زمان‌های عمل آوری گوناگون در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات مقاومت نمونه‌های مذکور مشابه تغییرات ایجاد شده در شکل‌های (۲) و (۳) می‌باشد. به عنوان مثال با افزودن ۱۵٪ سرباره فعال شده به خاک، مقاومت نهایی نمونه‌ها در زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب حدود ۴/۵، ۶ و ۷ برابر افزایش مقاومت را در مقایسه با نمونه خاک طبیعی نشان می‌دهد.

آزمایش SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy) نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-



شکل ۵ نتایج عکس برداری SEM مربوط به نمونه‌های (الف) خاک طبیعی، (ب) خاک + ۱۰٪ سیمان، (ج) خاک + ۱۰٪ سرباره و (د) خاک + ۱۰٪ سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در زمان عمل‌آوری ۷ روز

اثر افزودن مواد افزودنی مذکور تأیید می‌کند. هم‌چنین مقایسه نتایج مندرج در جدول (۲) نشان می‌دهد که با اضافه نمودن مواد افزودنی ذکر شده به خاک، مقدار حد خمیری مخلوط نیز در مقایسه با خاک طبیعی افزایش یافته‌است. این تغییرات ممکن است به دلیل تغییر در لزجت مایع منفذی در مقایسه با آب معمولی و تبادل یونی باشد که منجر به افزایش مقاومت برشی بین ذرات و افزایش حد خمیری می‌شود. این نتایج با یافته‌های منتشر شده توسط پژوهشگران دیگر مطابقت دارد [22, 23, 24, 25].

مقایسه نتایج مندرج در جدول (۲) نشان می‌دهد که در تمامی درصدهای استفاده شده، تأثیر سرباره فعال شده در افزایش حد روانی بیشتر از دو ماده افزودنی دیگر بوده‌است. هم‌چنین مقایسه نتایج شاخص خمیری سه ماده افزودنی استفاده شده نشان می‌دهد که سرباره و سرباره فعال شده دارای نتایج تقریباً نزدیکی در مقایسه با یکدیگر بوده و هر دوی آنها تأثیر بیشتری را در افزایش شاخص خمیری در مقایسه با سیمان داشته‌اند. با توجه به مقایسه تصاویر SEM در شکل (۵) می‌توان گفت که درجه مجتمع شدن مخلوط خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم بیشتر از مخلوط خاک-سیمان بوده‌است که این امر ناشی از آن است که سطح ویژه آنها بیشتر از سیمان است که این امر در جذب آب و در نتیجه افزایش حد روانی و شاخص خمیری نقش مهمی را ایفا کرده‌است.

بحث

نتایج آزمایش حدود اتربرگ (جدول ۲) نشان داد که اضافه نمودن سه ماده افزودنی مورد استفاده در این پژوهش (سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم) به میزان ۵٪ به خاک رسی، سبب افزایش حدود روانی (LL) و خمیری (PL) در مقایسه با خاک طبیعی شده‌است. این امر را می‌توان چنین توجیه کرد که وقتی مواد افزودنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک اضافه می‌شوند با توجه به ماهیت قلیایی بودن ترکیبات شیمیایی این مواد، pH مایع منفذی افزایش می‌یابد و باعث افزایش غلظت بار منفی در لبه ذرات رس می‌شود [20]. ذره ورقه‌ای شکل دیگر شده، در نتیجه سبب تشکیل ساختار مجتمع می‌شود. این ساختار در این حالت به علت افزایش فضای بین ذرات، می‌تواند آب بیشتری را در خود نگه دارد که این امر منجر به افزایش حد روانی می‌شود [21]. هم‌چنین نتایج نشان داد که با افزایش درصد مواد افزودنی از ۵ به ۱۰ و ۱۵٪، روند کاهش (در مقایسه با اضافه کردن ۵٪ از مواد افزودنی) برای این دو پارامتر مشاهده می‌شود. دلیل این موضوع آن است که با افزایش درصد مواد افزودنی، درجه مجتمع شدن ساختار خاک افزایش یافته‌است که این امر سبب چسبیدن ذرات به یکدیگر، کاهش فضای بین ذرات (در مقایسه با اضافه کردن ۵٪ ماده افزودنی) و نیز کاهش سطح ویژه می‌شود که این موضوع در نهایت حد روانی مخلوط را کاهش می‌دهد. تصاویر SEM (شکل ۵) نیز مجتمع تر شدن ساختار خاک و تغییر فضاهای بین ذرات را در

مقایسه با خاک طبیعی می شود که این افزایش تابعی از درصد ماده افزودنی به کار رفته و زمان عمل آوری می باشد. [24] کزدی دلیل این افزایش مقاومت را به واکنش های صورت گرفته بین ماده افزودنی سیمان با ذرات خاک نسبت داد. وی بیان نمود که این واکنش ها عبارتند از: (۱) هیدراسیون سیمان که باعث تولید کلسیم هیدروکسید می شود، (۲) جذب کلسیم هیدروکسید توسط ذرات رس و (۳) واکنش های پوزولانی خاک رس با کلسیم-هیدروکسید بین ذرات مخلوط. بنابراین با اضافه کردن سیمان به خاک، یون های کلسیم در طی فرایند هیدراسیون اولیه سیمان آزاد می گردد و تبادل کاتیونی با ذرات خاک صورت می گیرد. در مرحله هیدراسیون سیمان، pH محلول نیز افزایش می یابد که این امر سبب از بین رفتن پیوندهای سیلیکات ها و آلومینات های موجود در خاک رس و حل شدن آنها در محلول مایع منفذی می شود. این مواد حل شده با یون های کلسیم واکنش شیمیایی می دهند و مواد سیمانته کننده ای تولید می کنند. مواد تولید شده مانند کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) و کلسیم آلومینات هیدراته (CAH) سبب چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل توده جامد می شود که این امر منجر به افزایش مقاومت خاک می گردد [27]. تصویر SEM نمونه حاوی سیمان (شکل ۵-ب) تشکیل ذرات CSH که عامل افزایش مقاومت نمونه ها می باشد را نشان می دهد.

نتایج آزمایش مقاوت فشاری نهایی برای نمونه های تهیه شده از مخلوط خاک-سرباره که حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵٪ ماده افزودنی در زمان های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در شکل (۳) ارائه شده است. در این شکل مشاهده می گردد که با افزودن سرباره به خاک، مقاومت نمونه ها افزایش می یابد و همچنین روند تغییر مقاومت با افزایش درصد وزنی سرباره و زمان عمل آوری نمونه ها متناسب است. در خصوص تأثیر سرباره در بهسازی خاک رس دلایل متفاوتی گزارش شده است. به عنوان مثال ویلد و همکاران [22] گزارش کردند که سرباره در زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روز، تأثیری در مقاومت رس کائولینیت نداشته است، لیکن این امر با نتایج پژوهش حاضر مطابقت ندارد. اوتی و همکاران [28, 29] در پژوهش خود، افزایش مقاومت را با افزودن سرباره به خاک مشاهده کردند و دلیل این امر را به وجود گچ نسبت دادند. آنها استدلال کردند که گچ به عنوان فعال

نتایج آزمایش تراکم استاندارد (جدول ۲) نشان داد که افزودن سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم به خاک، سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه در مقایسه با خاک طبیعی شده است. افزودن مواد افزودنی مذکور به خاک سبب پیدایش تبادل یونی بین مواد افزودنی و خاک (براساس ظرفیت تبادل کاتیونی خاک مورد استفاده) و در نتیجه سبب اتصال ذرات با پیوندهای قوی تر به یکدیگر و در نهایت تشکیل ساختار مجتمع در خاک می شود. در این حالت ذرات خاک با پیوندهای قوی تری در مقایسه با خاک طبیعی به یکدیگر متصل می شوند. از آنجا که عمل تراکم تحت تأثیر انرژی ثابت انجام می شود، این انرژی ثابت نمی تواند پیوندهای بین ذرات را در نمونه های حاوی مواد افزودنی همانند پیوندهای بین ذرات در خاک طبیعی از بین ببرد که این فرایند منجر به کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه شده است. همچنین این پدیده سبب افزایش فضاهای خالی بین ذرات در نمونه های حاوی مواد افزودنی شده است که در این فضاها میزان آب بیشتری می تواند وارد و نگهداری شود که این امر سبب افزایش رطوبت بهینه شده اند (تغییر فضاهای خالی در نمونه های حاوی مواد افزودنی بر اساس تصاویر SEM (شکل های ۵-ب، ج و د) نیز قابل مشاهده می باشد). این نتایج به دست آمده با نتایج پژوهشگران دیگر هماهنگ می باشد [22, 25, 26, 27].

مقایسه نتایج آزمایش تراکم (جدول ۲) نشان می دهد که به ازای افزودن ۵٪ ماده افزودنی، وزن واحد حجم خشک نمونه خاک حاوی سرباره بیشتر از دو ماده افزودنی دیگر بوده است. دلیل این امر آن است که سرباره دارای سرعت هیدراسیون پایینی می باشد، در نتیجه پیوند و اتصالاتی که در اثر تبادل کاتیونی تولید می کند در مقایسه با سیمان و سرباره فعال شده به اندازه ای نیست که بتواند در برابر انرژی ثابت تراکمی مقاومت کند که این امر سبب جابه جایی ذرات و کاهش فضاهای بین آنها می شود. با فعال کردن سرباره توسط اکسیدمنیزیم، سرعت هیدراسیون افزایش یافته و سبب افزایش اتصالات بین ذرات و در نتیجه کاهش وزن واحد حجم خشک و افزایش رطوبت بهینه می شود. با افزایش درصد ماده افزودنی سرباره، محصولات هیدراسیون تولید شده افزایش پیدا می کند که این امر سبب افزایش پیوندهای بین ذرات، افزایش مقاومت و در نتیجه کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می شود. نتایج آزمایش مقاومت تک محوری در شکل (۲) نشان داد که افزودن سیمان به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه ها در

که در تماس سرباره با آب، در مراحل اولیه هیدراسیون، یک لایه ضخیم کریستالی متخلخل شامل Si-Al-O در سطح ذرات سرباره شکل می‌گیرد [32]. ریچاردسون و همکاران [33] اظهار داشتند که این لایه پوششی در برابر آب نفوذناپذیر است و از واکنش‌های هیدراسیون بیشتر جلوگیری می‌کند. لایه یادشده با جذب یون‌های H^+ باعث افزایش OH⁻ و در نتیجه افزایش pH و خاصیت قلیایی محیط شود. لیکن این مقدار از خاصیت قلیایی سامانه هم‌چنان برای شکستن پیوندهای Si-O و Al-O خاک رس به‌منظور تشکیل ترکیبات CSH، CAH و کلسیم سیلیکات-آلومینات هیدراته (CASH) کافی نیست و هیدراسیون با سرعت بسیار آهسته‌ای انجام می‌گیرد. آنها هم‌چنین مشاهده کردند که تنها مقدار کمی از ژل CSH پس از 150 روز در معرض آب بودن سرباره، تشکیل شده‌است. طبق نظر آنها به‌منظور افزایش سرعت هیدراسیون سرباره و در نتیجه بهبود عملکرد آن می‌توان یک ماده افزودنی با خاصیت قلیایی بالا به آن اضافه کرد. در این پژوهش برای فعال‌سازی سرباره، از ماده افزودنی اکسیدمنیزیم با نسبت وزنی ۳ به ۱ در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ استفاده گردید و نتایج آزمایش مقاومت آن با ماده افزودنی سرباره مقایسه شد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، مخلوط سرباره-اکسیدمنیزیم (همانند سیمان و سرباره) سبب افزایش مقاومت می‌شود که میزان افزایش آن متناسب با درصد وزنی ماده افزودنی سرباره-اکسیدمنیزیم و زمان عمل‌آوری می‌باشد. هم‌چنین شکل (۶) نشان می‌دهد که در درصد و زمان عمل‌آوری یکسان، نمونه‌های بهسازی شده با سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم دارای مقاومت بیشتری در مقایسه با سرباره دارا می‌باشند. این موضوع نشان می‌دهد که عمل هیدراسیون در سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم سریع‌تر رخ می‌دهد و سبب تولید مواد سیمانته‌کننده و در نتیجه سبب افزایش مقاومت می‌شود [17, 18]. جین و همکاران [34] بیان کردند در صورت استفاده از سرباره فعال شده به‌وسیله اکسید منیزیم در بهسازی خاک، در گام اول از فرایند هیدراسیون، پیوندهای موجود در واحدهای سازنده سرباره نظیر Ca-O، Mg-O، Si-O-Si و Al-O-Si از بین می‌روند. سپس یون منیزیم با Si-O و Al-O ترکیب می‌گردد و ماده سیمانته‌کننده‌ای تولید می‌شود که سبب پر کردن فضاهای خالی بین ذرات و چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر

کننده سرباره موجود در خاک رس، باعث افزایش مقاومت می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با نتایجی که توسط نیدزم و همکاران [30] گزارش شده‌است، مطابقت دارد. آنها آزمایش‌های متعددی در خصوص بهسازی خاک رس با سرباره انجام دادند و بیان کردند که افزودن سرباره منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود. نیدزم و همکاران [30] در نهایت به این نتیجه رسیدند که یک فرایند بهسازی مشابه آنچه در بهسازی خاک-سیمان مطرح است، رخ می‌دهد که باعث تشکیل مواد سیمانته‌کننده و در نتیجه افزایش مقاومت خاک می‌شود.

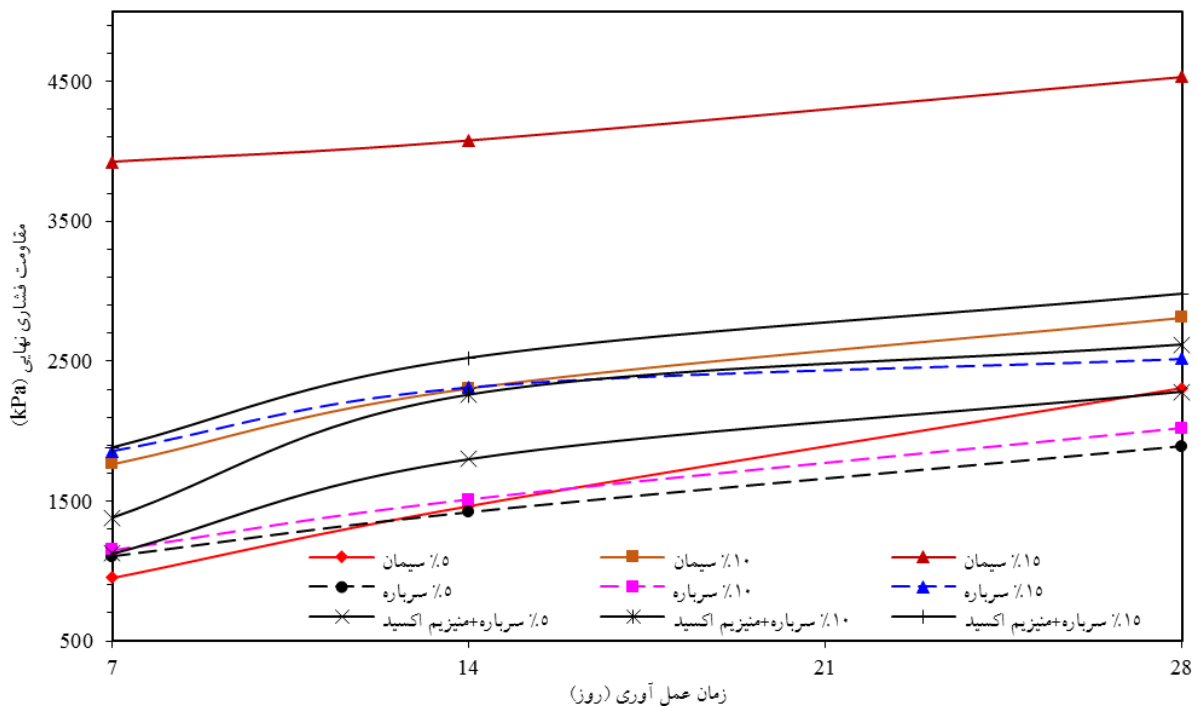
به‌منظور بررسی تأثیر سرباره بر ساختار خاک رسی طی فرایند بهسازی، آزمایش SEM بر روی نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی سرباره در زمان عمل‌آوری ۷ روزه صورت گرفت و جهت مقایسه با ساختار خاک طبیعی، در شکل (۵) ارائه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پس از گذشت ۷ روز، مواد سیمانته‌کننده‌ای تولید شده که عامل افزایش مقاومت نمونه‌ها و چسبیدن ذرات مخلوط می‌باشد، که در این تصویر نیز دیده می‌شود. نیدزم و همکاران [30] نیز وجود این مواد سیمانته‌کننده را عامل افزایش مقاومت گزارش کردند.

برای مقایسه عملکرد دو ماده افزودنی سیمان و سرباره در بهسازی خاک رسی مورد استفاده، نتایج مقاومت فشاری نهایی این دو ماده افزودنی برای زمان‌های عمل‌آوری متفاوت در شکل (۶) آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی درصدهای وزنی به‌کار رفته در این پژوهش (به‌غیر از ۵٪ ماده افزودنی در زمان عمل‌آوری ۷ روز)، سرباره عملکرد ضعیف‌تری را در بهسازی خاک رسی در مقایسه با سیمان داشته‌است. اگرچه سرباره سبب افزایش مقاومت خاک اختلاط‌یافته با آن می‌شود، لیکن اثر آن در افزایش مقاومت در مقایسه با سیمان زیاد نمی‌باشد. به هر حال افزایش مقاومت ایجاد شده به‌وسیله آن ناشی از فرایند هیدراسیون می‌باشد. لیکن در مقایسه با سیمان این عمل که منجر به تشکیل مواد سیمانته شده می‌گردد، محدود است. کینوتیا [31] بیان نمود که فرایند هیدراسیون سرباره به عواملی مانند ترکیبات شیمیایی آن، غلظت مایع موجود در بین ذرات مخلوط، سطح ویژه سرباره و درجه حرارت محیط بستگی دارد. به هر حال عدم ایجاد هیدراسیون زیاد سرباره را که در تولید مواد سیمانته شده مؤثر است را می‌توان به این صورت بیان کرد

می‌شود که این امر افزایش مقاومت نمونه‌های بهسازی شده خاک را سبب می‌گردد. نتایج به دست آمده با نتایج پژوهشگران دیگر مطابقت دارد [17, 35]. معمولاً استفاده از اکسیدمنیزیم به عنوان فعال کننده می‌بایست در حد معقول باشد در غیر این صورت اگر از حدی کمتر باشد، مواد سیمانته کننده به اندازه کافی تولید نمی‌شود و اگر هم از حدی زیادتر باشد ممکن است درصدی از اکسیدمنیزیم بدون هیداته شدن در مخلوط باقی بماند و با گذشت زمان سبب ایجاد ترک در نمونه و در نتیجه سبب کاهش مقاومت گردد.

مقایسه نتایج در شکل (۶) نیز نشان می‌دهد که در زمان عمل آوری ۱۴ روز نمونه‌های خاک حاوی ۱۰٪ سیمان، ۱۰٪ سرباره-اکسیدمنیزیم و ۱۵٪ سرباره، دارای مقاومت تقریباً یکسانی به ترتیب معادل ۲۳۰۸، ۲۲۶۰ و ۲۳۱۴ کیلوپاسکال می‌باشند. برآورد اقتصادی برای بهسازی خاک رسی با استفاده از درصدهای مذکور صورت پذیرفت و هزینه هر یک از مواد افزودنی مصرفی برای یک متر مکعب از خاک محاسبه گردید. نتایج نشان داد که هزینه‌ها به ازای استفاده از سیمان، سرباره-اکسیدمنیزیم و سرباره به ترتیب برابر ۱۷۰۰۰۰، ۱۵۵۰۰۰ و

۱۹۹۰۰۰ تومان می‌باشد که این موضوع مقرون به صرفه بودن استفاده از سرباره-اکسیدمنیزیم را نشان می‌دهد (محاسبه هزینه‌ها با فرض یکسان بودن هزینه عملیات اجرایی برای سه ماده افزودنی مورد استفاده و بر اساس قیمت هر یک از آنها در دی ماه سال ۱۴۰۰ انجام گردیده است). از طرف دیگر اگر خاک مورد نظر برای بهسازی حاوی کلریدها و سولفات‌ها باشد، برای جلوگیری از نفوذ کلریدها و حمله سولفات‌ها می‌بایست از سیمان ویژه استفاده کرد که هزینه تهیه آن بیشتر از سیمان پرتلند معمولی می‌باشد. در این حالت، در صورت تأمین مقاومت مورد نظر پروژه، می‌توان از سرباره-اکسیدمنیزیم استفاده کرد که در مقایسه با دو ماده افزودنی سیمان و سرباره مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که از آنجا که سرباره از محصولات فرعی تولید شده در صنایع ذوب آهن می‌باشد و با توجه به مسائل اقتصادی و زیست محیطی که در تولید سیمان وجود دارد، استفاده از سرباره به تنهایی و به خصوص به صورت فعال شده در پروژه‌های بهسازی می‌تواند گزینه مناسبی باشد.



شکل ۶ نتایج مقادیر مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان و خاک-سرباره در زمان‌های عمل آوری متفاوت

نتیجه گیری

در این پژوهش بهسازی یک خاک رسی با استفاده از مواد افزودنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در درصد‌های وزنی و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون صورت پذیرفت. برای بررسی این هدف، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و SEM روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم صورت گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- با افزودن ۵٪ سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم به خاک رسی مورد استفاده، حدود روانی و خمیری مخلوط‌های حاصل در مقایسه با خاک طبیعی افزایش می‌یابد لیکن با افزایش درصد مواد افزودنی روند کاهش مشاهده می‌شود. همچنین مقایسه نتایج حدود اتربرگ سه ماده افزودنی نشان داد که سرباره و سرباره فعال شده دارای حد روانی و شاخص خمیری بیشتر و حد خمیری کمتری در مقایسه با سیمان می‌باشند.

مراجع

1. Parsons, R. L. and Milburn, J. P., "Engineering behavior of stabilized soils", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1837, No. 1, pp. 20-29, (2003).
2. Sherwood, P., "Soil stabilization with cement and lime: State of the Art Review", HMSO, London, (1993).
3. Jones LD. and Jefferson I., "Expansive soils", ICE Publishing, London, pp. 413-441, (2012).
4. Al-Rawas, A. A., Hago, A. W. and Al-Sarmi, H., "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", *Building and Environment*, Vol. 40, No. 5, pp. 681-687, (2005).
5. Khemissa, M. and Mahamedi, A., "Cement and lime mixture stabilization of an expansive over consolidated clay", *Applied Clay Science*, Vol. 95, pp. 104-110, (2014).
6. Little, D.N. and Nair, S., "Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials", The National Academies Press, Washington, DC., (2009).
7. Abu-Farsakh, M., Dhakal, S. and Chen, Q., "Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading", *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 3, pp. 504-516, (2015).
8. Higgins, D., "Briefing: GGBS and sustainability", *Construction Materials*, Vol. 160, No. 3, pp. 99-101, (2015).
9. Yi, Y., Liska, M. and Al-Tabbaa, A., "Properties of Two Model Soils Stabilized with Different Blends and Contents of GGBS, MgO, Lime, and PC", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 267-274, (2014).
10. Makarchian, M. and Naderi, H., "Effect of moisture on the CBR resistance of stabilized soil with lime and Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) in the vicinity of sulfate", *Proceedings of the 5th National Congress on Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, (2010).

11. Lee, A. R., "Blastfurnace and Steel Slag. Production properties and uses", Edward Arnold Publishers Ltd., London, (1974).
12. Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I. and Higgins, D., "Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils", *Engineering Geology*, Vol. 51, No. 1, pp. 37-53, (1998).
13. Yadu, L. and Tripathi, R. K., "Effects of Granulated Blast Furnace Slag in the Engineering Behaviour of Stabilized Soft Soil", *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 125–131, (2013).
14. Pathak, A. K., Pandey, V., Murari, K. and Singh, J. P., "Soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag", *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, No. 5, pp. 164-171, (2014).
15. Shalabi, F. I., Asi, I. M. and Qasrawi, H. Y., "Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 29, No. 4, pp. 394–399, (2017).
16. Shi, C., Krivenko, P.V. and Roy, D., "Alkali-activated cements and concretes", Taylor and Francis, London, (2006).
17. Yi, Y., Liska, M. and Al-Tabbaa, A., "Properties and microstructure of GGBS-MgO pastes", *Advances in Cement Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 114–122, (2014).
18. Jegandan, S., Liska, M., Osman, A. A-M. and Al-Tabbaa, A., "Sustainable binders for soil stabilization", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*, Vol. 163, No. 1, pp. 53–61, (2010).
19. Yi, Y., Liska, M. and Al-Tabbaa, A., "Initial Investigation into the Use of GGBS-MgO in Soil Stabilisation", *Proceedings of the 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, New Orleans, pp. 444–453, (2012).
20. Taylor, A. W., "Physico-Chemical Properties of Soils: Ion Exchange Phenomena", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 85, No. 2, pp. 19–30, (1959).
21. Dash, S. K. and Hussain, M., "Lime Stabilization of Soils: Reappraisal", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 707–714, (2012).
22. Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B. and Humphreys, I., "Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates", *Clay Minerals*, Vol. 31, No. 3, pp. 423–433, (1996).
23. Akinmusuru, J. O., "Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 5, No. 1, pp. 73–80, (1991).
24. Kézdi, A., "Stabilized earth roads (development in geotechnical engineering)", Elsevier Scientific, New York, (1979).
25. Deng, S. P. and Tabatabai, M. A., "Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase", *Biology and Fertility of Soils*, Vol. 24, No. 2, pp. 141–146, (1997).
26. Estabragh, A. R., Beytolahpour, I. and Javadi, A. A., "Effect of Resin on the Strength of Soil-Cement Mixture", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 969-976, (2011).
27. Estabragh, A. R., Khatibi, M. and Javadi, A. A., "Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 04015157-10, (2016).
28. Oti, J. E., Kinuthia, J. M. and Bai, J., "Using slag for unfired-clay masonry-bricks", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Construction Materials*, Vol. 161, No. 4, pp. 147–155, (2008).

29. Oti, J. E., Kinuthia, J. M. and Bai, J., "Developing unfired stabilised building materials in the UK", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers- Engineering Sustainability*, Vol. 161, No. 4, pp. 211–218, (2008).
30. Nidzam, R. M. and Kinuthia, J. M., "Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag – a review", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, Vol. 163, No. 3, pp. 157–165, (2010).
31. Kinuthia, J.M., "Property changes and mechanisms in lime-stabilised kaolinite in the presence of metal sulphates", PhD thesis, University of Glamorgan, UK, (1997).
32. Shi, C. and Day, R. L., "Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans", *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 6, pp. 1389–1396, (1993).
33. Richardson, I. G., Brough, A. R., Groves, G. W. and Dobson, C. M., "The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 813–829, (1994).
34. Jin, F., Gu, K. and Al-Tabbaa, A., "Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 57, pp. 8–16, (2015).
35. Gu, K., Jin, F., Al-Tabbaa, A., Shi, B., Liu, C. and Gao L., "Incorporation of reactive magnesia and quicklime in sustainable binders for soil stabilization", *Engineering Geology*, Vol. 195, pp. 53–62, (2015).