

# Application of lime Ground-Granulated Basic Furnace Slag (GGBS) in improving geotechnical properties of clayey soils in floodplain area, case study, Khuzestan Plain

Navid Khayat<sup>1\*</sup>, Ahad Nazarpour<sup>2</sup>, Seyed Sepahdar Ganjipour<sup>3</sup>

1-Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2-Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

3-Department of Civil Engineering, Institute for Higher Education ACECR Khuzestan, Ahvaz, Iran

**Keywords:** Problematic soil, Melting Furnace Slag, Lime, Soil improvement, Flood areas

## 1. Introduction

Roads constructed on problematic soils may have adversely influenced by the behavior of their geotechnical properties. These soils are undergoing a high degree of compressibility, low permeability, low compressive strength (lower than 40kpa), and high potential to swell with high water content as it comprises minerals, including montmorillonite which can absorb water that causes heaving, cracking and the breakup of the road pavement. Improvement of these soils is essential to improve the strength of the soil and thus partly decrease the thickness of road layers (Amhadi and Assaf, 2018). Where road constructions through floodplains encounter troublesome materials, one of the available classical options had always been to excavate and import suitable materials for replacement as they were either weak subgrades soil layers with weak geotechnical materials. Current limits cause assists geotechnical engineers to improve the in site soils by applying the usage of stabilizer materials.

The main objectives of this research were to investigate the effect of GGBS, with and without lime, on the engineering behavior unconfined compressive strength (UCS) of the test soil and to identify the reaction products of the stabilized materials to determine the mechanisms by which changes in engineering properties are obtained by using SEM images.

## 2. Material and methods

To accomplish these aims, laboratory examinations were taken. Different mixtures of test soil with lime and GGBS by dry weight of the soil and replace by quick lime were organized and cured under laboratory conditions. The mixture program of soil with additives was applied as indicated in the literature (%16 lime), (%16 GGBS), (%12 lime - %4 GGBS), (%8 lime - %8 GGBS) (%4 lime - %12 GGBS) in three conditions including not soaked, completely soaked, and partially soaked in curing ages including 7, 14, 28, 56 and 90 days.

## 3. Results and discussion

In general, the effects of the stabilization of problematic soils with additives such as lime on soil properties can be divided into two parts of the immediate and long term. Some of these changes, such as inter-lime and clay reactions, are due to the quick changes in soil properties, ion-exchange reactions, and chemical reactions in contact with lime without treatment. Long-term changes occur during and after the mixture of clay and lime, and they are more critical in terms of resistance and durability, which often include a series of pozzolanic reactions. In this study, various lime, slag, and lime-slag mixing scenarios have been investigated separately.

Results indicated that up to 28 days of curing aging, it could be seen that compressive strength increased in all three states is dry, partially soaked, and completely soaked samples. On the other hand, increasing the percentage of lime in the same treatment periods can be seen to decrease compressive strength. This condition is due to the

\*Corresponding author: navid.khayat@gmail.com; Khayat@iauahvaz.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2020.31309.2045

Received 2019-10-12

Accepted 2020-12-15

saturation of the soil's free space from the lime, which results in the presence of more limestone in the increasing strength while increasing costs and environmental impacts.

In samples with a mixture of clay and GGBS, the amount of compressive strength increased significantly with an increasing amount of slag. This behavior can be examined from two separate aspects. The first aspect is for specimens before 28 days, and the second aspect is the values after 28 days. The slope of the samples up to 28 days is significantly higher, but with increasing processing time after 28-90, the compressive strength diagram is slightly increased with slope, which could be due to chemical reactions occur especially with increasing reaction time to complete low-speed reactions. It is also due to pozzolanic reactions and the formation of a small amount of C-A-S-H, especially by increasing the curing time and the proper time for low-dose pozzolan reactions and crystallization of forming gels. Wild et al. (1998) showed that slag alone could be activated in the presence of some natural compounds such as CaO and MnO in the soil.

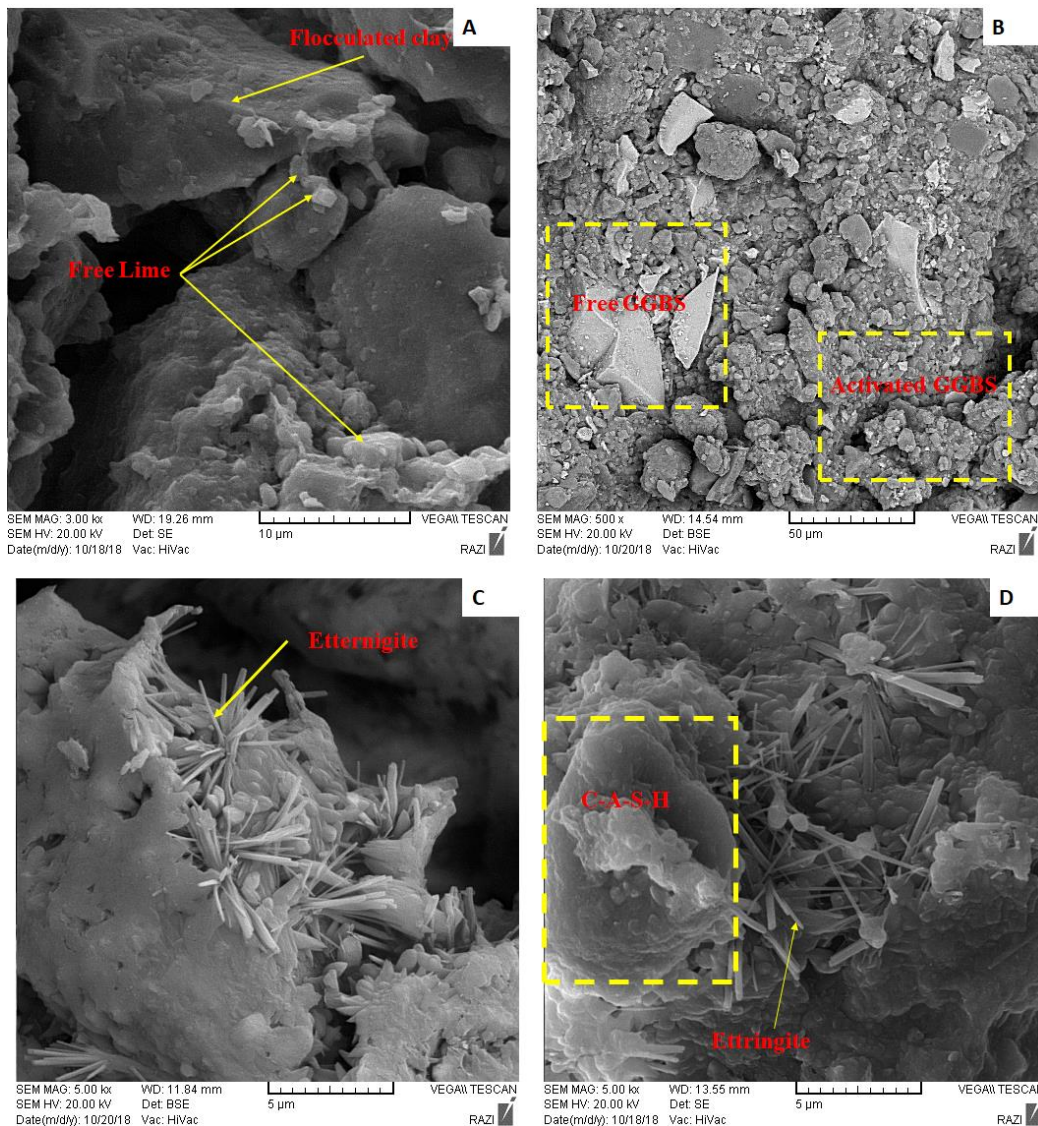


Fig. 1. SEM image of test samples; (a) flocculated clay particles and free lime , (b) The view of free and activated GGBS, (c) formation of ettringite and C-A-H minerals, and (Dd) formation of C-A-S-H gel and ettringite minerals.

The SEM images of the slag used are shown in Fig. 1. This image represents a part of the free slag in the system that is inactive. Also, part of the activated slag is visible in the system due to the reaction between the slag and the natural amount of lime in the soil used to form a small amount of gel.

In the most important scenario of this study, which includes the clay-slag-limestone mixing plan, two main reactions occur, the hydration of the lime-activated slag to prepare the C-A-S-H hydrate-magnesium phase C-A-S-H gel, as well as the addition of ettringite (Fig. 1c). The hydration of the slag causes water to be consumed in large quantities and a lesser amount of lime. The amount of free lime depends on the mixing plan, which requires less lime to activate the slag. According to experiments, samples with less lime percentage showed higher resistance. As can be seen in SEM images, there will be some free lime in the system, which in turn will reduce resistance (Figs. 1c and d). SEM image analysis established that two main phases in the mixture of GGBS and lime were mixed with clay soil. (1) Formation hydration of calcium aluminosilicate hydrate gel (C-A-S-H) by activation of GGBS by lime and (2) hydrotalcite type phase, and the clay-lime reaction to produce calcium silicate hydrate (C-S-H), (C-A-H) and (C-A-S-H) (Obuzor et al., 2012). The SEM results indicated that activated GGBS by lime can produce ettringite minerals and crystalline C-S-H (Fig. 1). The results also confirm that the use of GGBS, or preferably with lime, could have a significant effect on the UCS of problematic soils.

#### 4. Conclusions

The result of addition alone lime and alone GGBS and the mixture of lime and GGBS could be reviewed at the following:

- (1) The UCS of a Lime–GGBS–soil mixture increased with a reduction in lime content, and under soaking condition, the strength increasing was not critically compromised.
- (2) After long curing periods, the UCS of the soil developed significantly with an increase in the GGBS percent and with an increase in curing periods.
- (3) The UCS of the soil increased significantly with an increase in the activated GGBS by lime. The UCS also decreased with an increasing lime/GGBS ratio and increased with increases in the curing period.
- (4) Two major reactions were detected when GGBS and lime were mixed to the base soil, hydration of GGBS, activated by lime, to produce C-A-S-H gel and hydrotalcite type phase containing C-A-S-H gel. The SEM results also indicated the formation of two major amorphous phases, including C-S-H, C-A-S-H, and crystalline ettringite mineral.

#### Acknowledgments

This research was conducted in Advanced Soil Mechanics Laboratory, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

#### References

- Amhadi, T.S., Assaf, G.J., 2018. Overview of Soil Stabilization Methods in Road Construction. In International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology" pp. 21-33. Springer, Cham.
- Obuzor, G.N., Kinuthia, J.M., Robinson, R.B., 2012. Soil stabilization with lime-activated-GGBS-A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains. *Engineering Geology* 151, 112-119.
- Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., 1998. 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* 51, 37–53.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Khayat, N., Nazarpour, A., Ganjipour, S.S., 2021. Application of lime Ground-Granulated Basic Furnace Slag (GGBS) in improving geotechnical properties of clayey soils in floodplain area, case study, Khuzestan Plain. *Adv. Appl. Geol.* 10(4), 669-682.

DOI: 10.22055/AAG.2020.31309.2045

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_16214.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_16214.html?lang=en)

## کاربرد آهک شکفته شده و سرباره کوره فولادسازی (GGBS) در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رس

### در مناطق سیلابی (مطالعه موردی دشت خوزستان)

نوید خیاط\*

گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

احمد نظر پور

گروه زمین شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

سید سپهدار گنجی پور

موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۲

\*Navid.khayat@gmail.com; Khayat@iauhvaz.ac.ir

### چکیده

از دیرباز مسئله بهسازی خاک‌های مشکل آفرین جهت بهبود خواص ژئوتکنیکی آنها یکی از مهمترین مسائل پیش روی متخصصین ژئوتکنیک در پروژه‌های عمرانی، به ویژه در زیرسازی راه‌ها می‌باشد. کاهش ارتفاع خاکریز جاده، به ویژه در مناطق کم‌ارتفاع که در سطح سیلاب طراحی قرار دارند، باعث کاهش هزینه کلی پروژه‌های راهسازی خواهد شد. در این راستا استفاده از محصولات فرعی صنایع از جمله سرباره کوره فولاد سازی (GGBS) و آهک برای اصلاح ویژگی‌های مهندسی مصالح محلی می‌تواند مفید باشد. در این پژوهش آزمون‌های آزمایشگاهی مقاومت فشاری تک محوره (UCS) برای شبیه سازی - اثرات سیل بر روی لایه‌های جسم جاده در سه حالت خشک، نیمه غرقابی و غرقابی در طول دوره عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه انجام شده است. نتایج نشان دادند که لایه‌های ساختار جاده که شامل طرح اختلاطی از آهک - سرباره - خاک رس که در دشت‌های سیلابی مانند استان خوزستان ساخته شده‌اند را می‌توان با کاربرد مواد جانبی صنعتی مانند سرباره فولاد سازی (GGBS) که توسط آهک فعال می‌شوند پایدار ساخت. مهم‌ترین واکنش‌های، همراه آهک و سرباره شامل هیدراسیون سرباره فعال شده توسط آهک، برای تشکیل ژل C-A-S-H و فاز هیدروتالکیت می‌باشد، که شامل ژل C-A-S-H می‌باشد. نتایج SEM نیز نشان دهنده تشکیل دو فاز اصلی ژلی C-S-H و C-A-S-H و تشکیل کانی اترینگایت می‌باشند. این امر کاربرد ترکیب هزینه با کیفیت بهبود یافته مواد فرموله شده را دارد، در نتیجه، سهولت فرایندهای ساخت‌وساز به همراه توسعه پایدار را در دشت‌های سیلابی افزایش می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** خاک مسئله دار، سرباره کوره ذوب، آهک، بهسازی خاک، مناطق سیلابی

### مقدمه

زیست یکی از عوامل تاثیرگذار در انتخاب روش بهسازی در این گونه خاک‌ها می‌باشد (Modarres and Nosoudy, 2015; Sharma et al., 2018). هدف اصلی از انجام عملیات تثبیت خاک‌های مشکل آفرین آن است که لایه تثبیت شده بتواند با کمترین تغییر شکل، بارهای وارده را تحمل نماید (Celauro et al., 2012).

به طور کلی انتخاب روش تثبیت خاک و ماده تثبیت کننده به صورت طبقه بندی شده امری مشکل است. لذا مهندسين ژئوتکنیک باید با توجه به کلیه مسائل فنی، اقتصادی، نیروی انسانی و ماشین‌آلات، تجربه شخصی و نتایج آزمایش‌ها، روش تثبیت بهینه را انتخاب کنند. انتخاب نوع ماده تثبیت کننده و خاک مورد نظر جهت تثبیت به عواملی چون خواص ژئوشیمیایی، دانه بندی، شاخص خمیری، صرفه اقتصادی، شرایط جوی منطقه، و هدف انجام تثبیت، بستگی دارد (James and Pandian, 2016). در این راستا یکی از رایج ترین روش‌های افزایش مقاومت خاک، افزودن آهک

خاک‌ها با توجه به فراوانی و دسترسی آسان یکی از مصالح ساختمانی مهم محسوب می‌شوند. کم بودن میزان مقاومت برخی از خاک‌ها از جمله خاک‌های رسی یکی از بزرگترین نقطه ضعف آنها به حساب می‌آید که در طی زمان باعث بروز مشکلاتی در پروژه‌های مهندسی شده است. به همین دلیل این نوع خاک‌ها را در زمره خاک‌های مشکل آفرین قرار می‌دهند (Al-Mukhtar et al., 2012). لذا به منظور ایمنی و پایدار کردن سازه‌هایی که بر روی این نوع خاک‌ها ساخته می‌شوند معمولاً از روش‌های اصلاح و تثبیت خاک استفاده می‌شود (Modarres and Nosoudy, 2015; Sadrmomtazi and Tahmouresi, 2015). به دلیل توسعه شهرسازی در ساختگاه‌های رسوبی دارای خاک مشکل آفرین، به منظور افزایش ظرفیت باربری، اصلاح و بهسازی خاک امری ضروری می‌باشد (Amhadi and Assaf, 2018). کاهش در این راستا علاوه بر حصول اطمینان از بهسازی موثر، انطباق پذیری با محیط

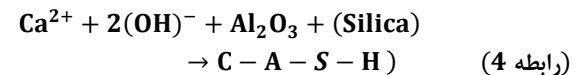
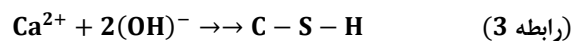
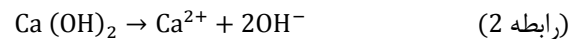
واکنش‌های پوزولانی در دمای بالاتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند و در سطوح بالاتر، این واکنش باعث افزایش مقاومت فشاری خاک مورد آزمایش می‌شوند. این افزایش مقاومت از طریق شکل‌گیری ژل‌های CSH و CASH از واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی می‌باشند، که شکل‌گیری این ترکیبات باعث افزایش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده می‌شوند (Jawad et al., 2014; Yi et al., 2013). علاوه بر اثرات فیزیکی از آهک در پایداری خاک رس، آهک خام نیز در افزایش انحلال‌پذیری  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  موجود در خاک رس برای افزایش pH محیط و تولید بیشتر آلومینیوم کلسیم سیلیکات هیدراته نقش دارد (Obuzor et al., 2012). این ویژگی‌ها، که در اثر افزودن مقدار بهینه به خاک رسی صورت می‌پذیرد اگر روش صحیح انجام شود، باعث افزایش مقاومت، کاهش خلل و فرج، ثبات حجم و در نهایت افزایش تراکم خاک‌های مشکل‌آفرین می‌شود (Choobbasti, Nagaraj et al., 2014; et al., 2010).

از سوی دیگر، امروزه همراستا با پیشرفت جامعه بشری، بحث مدیریت بهینه و امکان استفاده از پسماندهای صنعتی در راستای توسعه پایدار (با هدف حفظ منابع و کاهش آلودگی محیط زیست) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طوری که نظر به گسترش جهانی صنعت فولاد و حجم زیاد ترکیبات زائد تولید شده در این فرآیند، امکان بکارگیری این مواد در بخش‌های مختلف از جمله پروژه‌های عمرانی مورد توجه خاصی می‌باشد (Cristelo et al., 2012). در این راستا استفاده از ترکیب سرباره کوره فولاد سازی (GGBS) و مواد قلیایی موجب کاهش پتانسیل فرسایش پذیری، افزایش مقاومت فشاری و بهبود عملکرد خاک‌های ریز دانه به ویژه خاک‌های مشکل‌آفرین خواهد شد. سرباره‌های کوره فولاد سازی از اکسیدهای فلزی یا شبه فلزی تشکیل شده‌اند و به هنگام استفاده شبیه به آنها عمل می‌کنند. طبق تعریف ASTM سرباره‌های فولاد سازی ترکیبی غیر فلزی حاوی سیلیکات‌های کلسیم، فریت کلسیم و اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منگنر، کلسیم و منیزیم است و به طور همزمان با فولاد تولید می‌شوند (Shi, 2004). نتایج مطالعه برخی از پژوهشگران نشان داده است که واکنش‌ها به ترکیبات کانی شناسی، فاز معدنی و مقدار قلیایی و نیز توانایی هیدراته شدن سرباره بستگی دارد و گزارش شده است که قلیایی بیشتر باعث بهبود مشخصات هیدرولیکی و افزایش واکنش‌های سرباره می‌شود (Altun, and Yilmaz, 2002). در پژوهش دیگری نیز تاثیر آهک و سرباره در خصوصیات کاتولینیت مطالعه و مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از سه نوع سرباره‌ی فولاد، یک نوع سرباره آهن، آهک زنده و سیمان پرتلند استفاده شده و نتایج نشان داده است که افزایش مقاومت نمونه به ترکیبات و مقدار سرباره، حضور آهک به عنوان فعال کننده، زمان عمل آوری و ترکیبات خاک بستگی دارد (Poh et al., 2006). همچنین پژوهشگران دیگری تاثیر جایگزینی سرباره با آهک را در

به خاک رس در درصد‌های مختلف می‌باشد. این روش به طور گسترده‌ای در بهبود کیفیت خاک در زیر اساس و اساس و جسم جاده در راهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Eisazadeh et al., 2017; Soltani et al., 2012). آهک به دو حالت آهک زنده  $\text{CaO}$  و دوغاب آهک (آهک شکفته)  $(\text{Ca}[\text{OH}]_2)$  در طبیعت وجود دارد (Alavez-Ramirez et al., 2012). در واقع مطابق واکنش زیر آهک زنده با آب باعث تولید آهک شکفته می‌شود (رابطه ۱).



این واکنش باعث تولید گرما (گرمازا) و بالا رفتن pH حدود ۱۲ می‌شود، که شرایط مناسب برای انجام واکنش‌های پوزولانی در خاک‌های مشکل‌آفرین را فراهم می‌کند (James and Pandian, 2016). واکنش‌های پوزولانی بین سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) و آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) در ساختار رس با آهک و آب مطابق با واکنش‌های شیمیایی (۲ تا ۴) منجر به تشکیل ژل‌های کلسیم - سیلیکا - هیدرات (C-S-H) و هیدرات کلسیم آلومینات (C-A-S-H) می‌شوند (Obuzor et al., 2012). این ترکیبات در نهایت پس از تبلور مجدد بلوری شده، و منجر به چسبندگی بیشتر ساختارها به یکدیگر و در نهایت افزایش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده می‌شوند (Mishara, 2012).



به طور کلی مهمترین واکنش‌های آهک با خاک را می‌توان به چهار دسته تقسیم بندی نمود: الف) فولکوله شدن، ب) کربناته شدن، ۳) تبادل یونی و د) واکنش‌های پوزولانی. هر کدام از این تغییرات را می‌توان حتی در مدت زمان کوتاهی طی واکنش‌های آبی در خاک مشاهده نمود (Sharma et al., 2012). در صورت وقوع هر یک از واکنش‌های فوق می‌توان تغییراتی در مقدار رطوبت بهینه، وزن مخصوص، کاهش شاخص‌های پلاستیسیته، افزایش مقاومت فشاری محصور نشده، مشاهده نمود (Harichane et al., 2011). مخلوط آهک و رس با واکنش تبادل کاتیونی مواد معدنی خاک رس و در نتیجه لخته سازی ذرات ریز آن، شرایط مناسبی را مهیا می‌کند که به وسیله آن ذرات خاک رس فولکوله شده، و ذرات بزرگتر رس تشکیل شوند (Harichane et al., 2011; Yi et al., 2013). پس از واکنش هیدراتاسیون آهک خام، واکنش‌های ماندگارتری مانند واکنش پوزولانی با عملکرد بهتر در نمونه‌های عمل آورده در زمان طولانی تر رخ می‌دهند (Amiralian et al., 2012; Brooks et al., 2009).

در این پژوهش به دلیل شبیه سازی هدفی که از قبل مشخص گردید از خاک های مشکل آفرین موجود در محل پروژه های راه سازی با شرایط سیلابی در استان خوزستان در محور آبادان - ماهشهر دارای خاکریز مرتفع استفاده شده است. نمونه هایی از خاک جهت آنالیز XRF جهت تشخیص اکسیدهای اصلی موجود و XRD به جهت شناسایی کانی های اصلی تشکیل دهنده مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج آنالیز XRF وجود اکسیدهای اصلی از جمله کربنات، سولفات، کلرید و سیلیکا مشاهده شد، همچنین نتایج حاصل از آنالیز XRD حاکی از وجود فازهای (کانی های) از جمله کانی های رسی از جمله مونت مورینیت، ایلیت، کائولینیت، کلسیت، کوارتز و فلدسپار در خاک بود (جدول ۱). بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری حدود ۶۰ درصد ذرات لای و ۳۰ درصد رس می باشند، و بر طبق طبقه بندی یونیفاد در گروه رس با خاصیت خمیری کم (CL) می باشد.

### آهک

آهک زنده به علت دارا بودن CaO بیشتر، تاثیر بیشتری در تثبیت و اصلاح خاک نسبت به آهک هیدراته دارد و از طرفی کار کردن آن در صنعت مرسوم تر است. آهک شکفته پودری ( $Ca(OH)_2$ ) خاصیت جذب رطوبت بیشتری نسبت به آهک زنده دارد و به همین دلیل کار کردن با آن آسان تر بوده و براحتی انبار و نگهداری می شود. لذا آهک مصرفی در این تحقیق از نوع آهک شکفته پودری با وزن مخصوص ۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب است.

### سرباره کوره فولاد سازی (GGBS)

سرباره حاصل از ضایعات کارخانه فولاد سازی و سنگدانه مصنوعی محسوب می شود. این محصول از خصوصیات مکانیکی مطلوبی برخوردار است. سرباره مورد استفاده در این تحقیق از صنایع فولاد استان خوزستان - اهواز تهیه شد. اندازه دانه های سرباره، به منظور همگن شدن با اندازه دانه های خاک ابتدا با استفاده از چکش خرد شدند و سپس از الک نمره ۴۰ رد شدند. نتایج آنالیز XRD سرباره مورد استفاده نشان دهنده حضور کانی های، آلومینا، مگنتیت، دولومیت، سیلیکا مورد استفاده می باشند (شکل ۱). همچنین نتایج آنالیز XRF موید حضور اکسید سیلیسیم، آهن و اکسید کلسیم در سرباره مورد استفاده می باشد (جدول ۱).

کائولینیت تثبیت شده با آهک در حضور گچ را بررسی کرده و نتایج مطالعات آنها نشان داد که در حضور گچ، جایگزینی سرباره با آهک، تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت خواهد داشت (Wild et al., 1998). تاثیر آهک و سرباره ی فولاد سازی در دوام (یخبندان- ذوب یخ) و مقاومت فشاری کائولینیت در مطالعه دیگری مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که استفاده از آهک و سرباره به تنهایی یا توأم باعث افزایش مقاومت در یخبندان-ذوب یخ (دوام) نمونه ها می - شود. استان خوزستان بویژه در قسمت جنوبی و جنوب غربی استان، در عملیات راه سازی با زیرسازی بسیار بی کیفیتی روبه رو است. از طرفی، با وجود مرتفع بودن جاده (برای عدم جمع شدن سیلاب روی مسیر)، شاهد تخریب جسم جاده در بلند مدت به ویژه در شرایطی رخداد سیلاب و ماند آب شدن سیلاب در حاشیه آن به علت عدم نفوذ آب به لایه های زیرین می باشیم. همچنین، با توجه عدم دسترس نبودن مصالح با کیفیت در محل پروژه، فواصل حمل طولانی مصالح به این مناطق (در قسمت جنوبی استان خوزستان) راهکارهایی در جهت تثبیت بیشتر زمین و کاهش هزینه ها با در نظر گرفتن شرایط زیست محیطی، در عملیات راه سازی امری ضروری است. لذا توجه به وجود محصولات جانبی صناعی مانند فولاد در استان خوزستان و در دسترس بودن اینگونه مصالح ارزان، در کاهش هزینه ها و نیز مطالعاتی که تاکنون در دنیا در این گونه مواد به عنوان تثبیت کننده، صورت پذیرفته است، در پیشبرد عملیات راه سازی در این مناطق می تواند چشم اندازی مناسبی در راستای توسعه پایدار در این منطقه باشد.

در این تحقیق به منظور بررسی و شبیه سازی مصالح تشکیل دهنده خاکریز جاده ها به هنگام وقوع سیلاب، نمونه های مختلف آزمایشگاهی (استوانه ای) متشکل از مخلوط های مختلف آهک، سرباره کوره فولاد سازی (GGBS) و همچنین ترکیب آهک و سرباره در طرح اختلاط های مختلف، مترکم و در سه حالت خشک، نیمه در آب و غوطه ور در آب، از منظر ژئوتکنیکی (مقاومت فشاری) مورد مطالعه قرار گرفته اند. سپس جهت تایید یافته ها با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) سازوکار اندرکنش خاک با مواد افزودنی و فازهای تشکیل شده در نمونه های منتخب صورت خواهد گرفت.

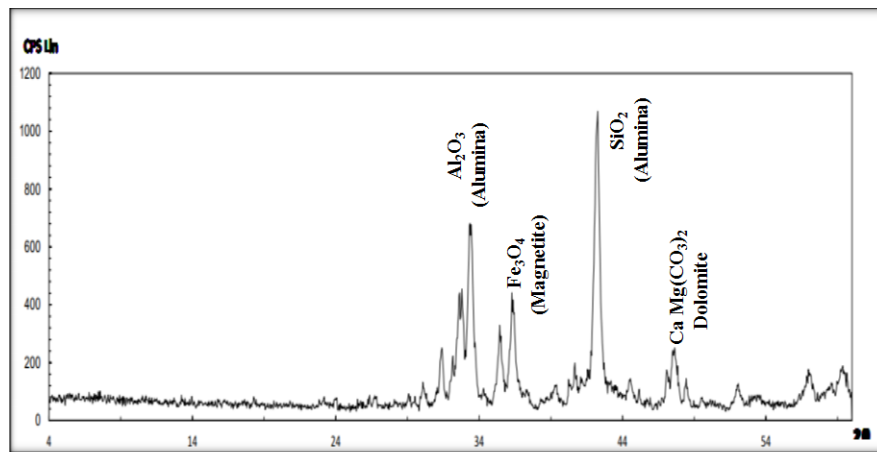
### مشخصات مصالح مورد استفاده

#### خاک

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF خاک رس و سرباره کوره فولاد سازی.

Table 1. XRF analytical results of the clay soil and GGBS.

Major Oxide	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Clay Soil	23.43	6.12	32.12	2.8	1.25	3.55	0.05	0.67	0.29
GGBS (Current Study)	17.16	3.57	31.84	32.39	0.06	13.07	0.47	0.37	0.11



شکل ۱- آنالیز XRD سرباره مورد استفاده.  
Fig. 1. XRD analysis of applied GGBS.

### آماده سازی نمونه‌ها

#### آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یکی از پرکاربردترین آزمایش‌های مورد استفاده در روسازی و آزمایشات بهسازی خاک می‌باشد. مقاومت فشاری تک محوری اغلب به عنوان یک شاخص برای تعیین کیفیت بهسازی است که مقاومت فشاری مناسب در حدود ۳۴۵ کیلوپاسکال (50 psi) یا بیشتر برای بهسازی مؤثر لازم است. در این تحقیق به منظور بررسی مشخصات خاک‌های تثبیت شده با آهک و سرباره کوره فولاد سازی از آزمایش مقاومت تک محوری مطابق استاندارد ASTM D1633 استفاده شده است.

#### روش انجام آزمایش تک محوری بر خاک تثبیت شده

در این تحقیق برای بهسازی سازی خاک مورد مطالعه از تثبیت کننده‌های آهک (با علامت اختصاری L) و سرباره (با علامت اختصاری G) بر اساس سناریوهای طرح اختلاط (L<sub>16</sub>), (L<sub>2</sub>-G<sub>4</sub>), (L<sub>8</sub>-G<sub>8</sub>), (L<sub>4</sub>-G<sub>12</sub>), و (G<sub>16</sub>)، استفاده شده است. جهت انجام آزمایش ابتدا خاک و سرباره از الک شماره ۴۰ عبور داده، سپس مخلوط خاک

و تثبیت کننده با مقدار رطوبت بهینه که از آزمایش تراکم برای هر ترکیب بدست آمده مخلوط شده، تا مخلوطی همگن حاصل شود. سپس نمونه‌ها به روش تراکم پراکتور استاندارد متراکم شده و قبل از خارج کردن نمونه جهت مغزه‌گیری از قالب سه لوله فلزی که هر کدام قطری معادل ۳۸ میلی‌متر و سطح داخلی آنها با کمی روغن آغشته ( جهت سهولت خروج نمونه) را در بالای نمونه متراکم شده قرار داده تا هنگام خروج نمونه وارد این لوله‌ها شوند. در مرحله بعد مغزه مورد نظر از لوله بیرون آورده شده و جهت جلوگیری از تبادل گرمایی با محیط بیرون و حفظ رطوبت موجود (جهت انجام واکنش-های هیدراسیون)، نمونه‌ها در چندین لایه سلفون پیچیده شده‌اند. عمل آوری نمونه‌های در طی بازه‌های زمانی ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز صورت گرفته است. از هر طرح اختلاط موجود تا پایان دوره عمل آوری، سه نمونه ساخته شده است، دو نمونه جهت شبیه سازی حالت سیل در حالت کم (نیمه در آب) و شدید (غوطه‌ور در آب) و نمونه سوم در شرایط خشک در محیط آزمایشگاه تحت آزمایش تک محوره قرار گرفتند (شکل ۲).



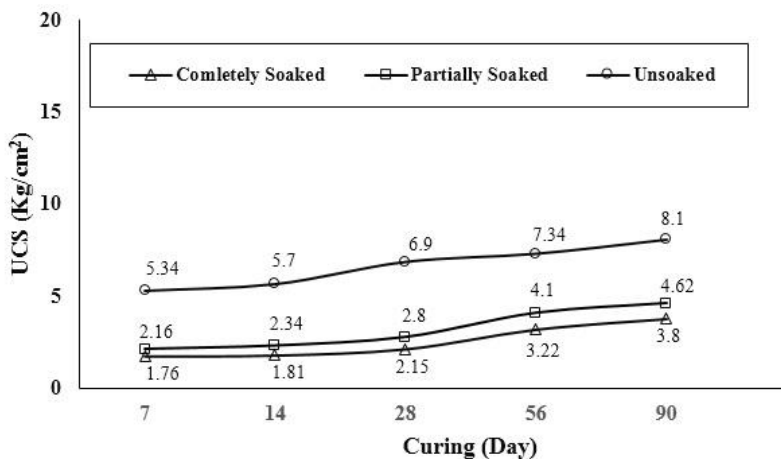
شکل ۲- مراحل نمونه‌های آماده شده برای عمل آوری.  
Fig. 2. Sample preparation for processing.

## نتایج و بحث

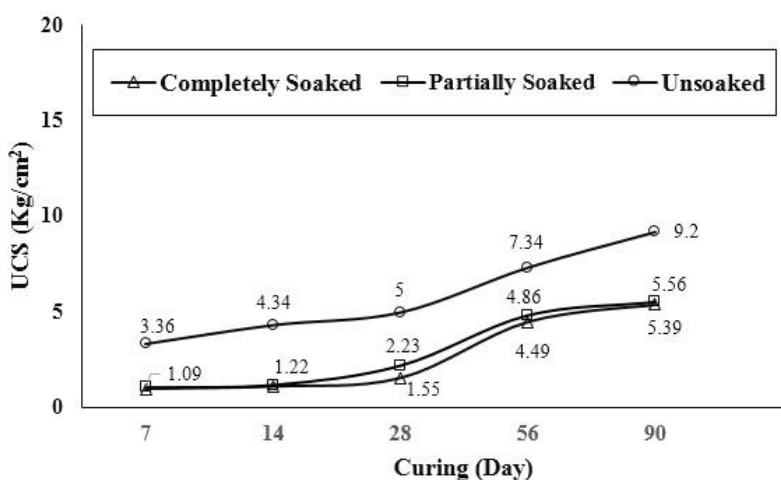
## اثر استفاده مجزا از آهک و سرباره

هدف از طرح بهسازی خاک دستیابی به ترکیب بهینه برای محیطی با شرایط خاص (سیلابی) با بالاترین مقاومت فشاری است ضمناً درصد‌های انتخاب شده در طرح‌های اختلاط مورد آزمایش، علاوه بر تامین هدف بهسازی باید از نظر اقتصادی نیز توجیه پذیر باشند. منحنی تغییرات مقاومت فشاری بر حسب طرح اختلاط آهک (L16) در دو حالت نیمه غوطه ور و غوطه‌ور در شکل ۳ ترسیم شده است. مقاومت این طرح اختلاط پس از ۷ روز عمل آوری ۵/۳۶ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در حالت خشک به ۲/۱۶ و ۱/۷۶ کیلوگرم بر سانتی- نشان داد که در طرح اختلاط (L16)، آهک موجب افزایش قابل

توجهی در نرخ مقاومت فشاری با افزایش دوره عمل آوری نمی‌شود. از طرفی نمونه‌های نیمه غوطه ور و کاملاً غوطه ور نسبت به حالت خشک، کاهش چشم گیری در کاهش مقاومت را نشان می‌دهند. اثر سرباره کوره فولادسازی به تنهایی بر مقاومت فشاری خاک مورد مطالعه در حالت خشک، نیمه در آب و کامل در آب در شکل ۴ ارائه شده است. نتیجه طرح اختلاط (G16) نشان می‌دهد که در نمونه‌های ۷ روزه، مقادیر مقاومت فشاری به مقادیر ۰/۹۹، ۱/۰۹ و ۳/۳۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ترتیب برای نمونه‌های غوطه ور، نیمه غوطه ور و خشک، افزایش یافته است. همچنین در نمونه‌های ۹۰ روزه، مقادیر ۵/۳۹، ۵/۵۶ و ۹/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ترتیب برای نمونه- های غوطه ور، نیمه غوطه ور و خشک بدست آمده است، که حاکی از افزایش نرخ مقاومت با گذشت زمان و تاثیر دوره‌های زمانی عمل آوری است.



شکل ۳- نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در طرح اختلاط (L16).  
Fig.3. Unconfined compressive strength values at mixture (L16).



شکل ۴- نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک محوری در طرح اختلاط (G16).  
Fig.4. Unconfined compressive strength values at mixture.



## اثر ترکیب آهک و سرباره بطور همزمان بر مقاومت تک محوری خاک رس

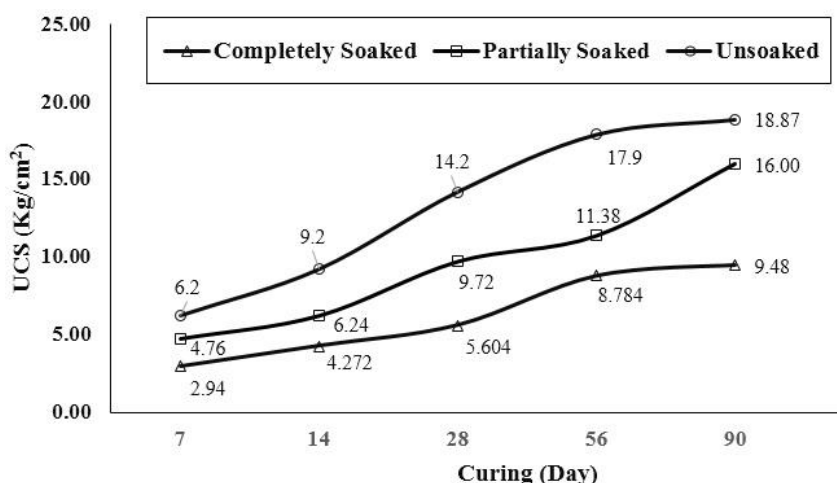
شکل‌های ۵ تا ۷ اثر استفاده همزمان آهک و سرباره بر خاک رس را در حالت خشک، نیمه و غوطه‌ور در آب را نشان می‌دهند. همانطور که مشخص است طرح اختلاط (L<sub>4</sub>-G<sub>12</sub>) عملکرد بهتری از نظر افزایش مقاومت فشاری را نسبت به طرح اختلاط‌های (L<sub>8</sub>-G<sub>8</sub>) و (L<sub>12</sub>-G<sub>4</sub>) نشان داده است.

به طور کلی اثرات تثبیت خاک‌های مشکل آفرین با مواد افزودنی از جمله آهک بر خواص خاک را می‌توان به دو بخش آبی و بلند مدت تقسیم کرد (Celik and Nalbantoglu, 2013). برخی از این تغییرات مانند واکنش‌های بین آهک و خاک رس ناشی از تغییرات آبی خواص خاک، واکنش تبادل یون و واکنش تجمع - تراکم ذرات رس در اندرکنش با آهک بدون عمل آوری زمانی می‌باشند (Obuzor et al., 2012). تغییرات دراز مدت بعد از عمل‌آوری مخلوط رس و آهک ایجاد می‌شوند و از نظر مقاومت و ماندگاری حائز اهمیت بوده، که اغلب شامل مجموعه‌ای از واکنش‌های پوزولانی می‌باشند.

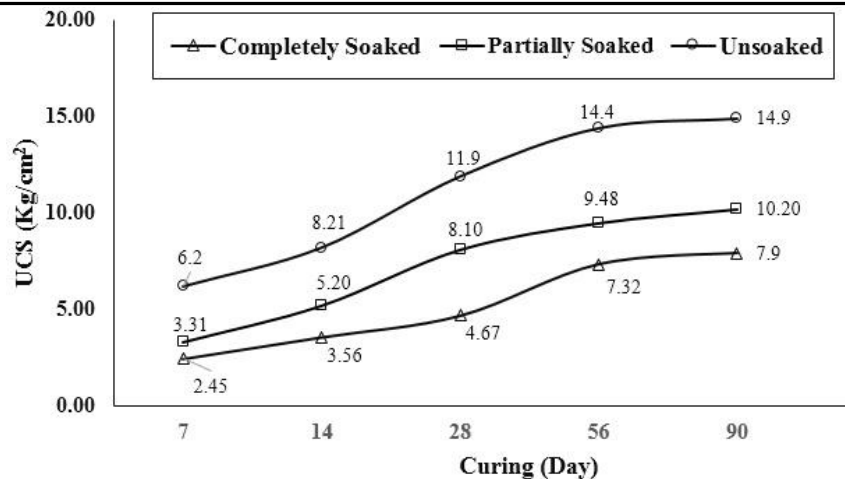
در سیستم آهک - رس، تبادل کاتیونی بین بار منفی رس و یون‌های مثبت آهک صورت می‌پذیرد. افزایش غلظت کاتیون‌ها در منافذ موجود در ذرات خاک، منجر به خنثی شدن بار ذرات رس می‌شود. محققان بسیاری در مورد نقش تبادل کاتیونی رس در بهسازی خاک توسط آهک تحقیق کرده‌اند و همگی بر این عقیده هستند که مقدار درصد معین و پایینی از آهک در جهت خنثی‌سازی بار یونی خاک رس کافی می‌باشد (Cetin and Wang et al., 2012) (Aydilek, 2010; خنثی سازی ذرات با بار منفی منجر به نزدیک

شدن ذرات رس به یکدیگر و فولکوله شدن ذرات (افزایش اندازه ذرات) می‌گردد. شکل ۳، افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های با ترکیب آهک و رس را نشان می‌دهد. فرآیند فولکوله شدن باعث افزایش مقاومت خاک در حالت‌های خشک، نیمه غوطه‌ور و غوطه‌ور شده است.

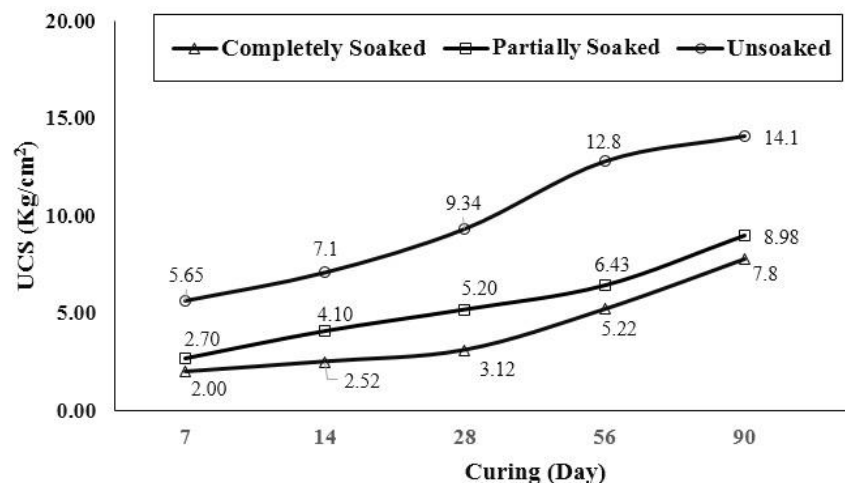
بررسی نتایج مقاومت فشاری تحت زمان‌های عمل آوری در طرح اختلاط‌های بررسی شده، نشان می‌دهد که تا دوره زمانی ۲۸ روزه، افزایش مقاومت فشاری در هر سه حالت خشک، نیمه غوطه‌ور و غوطه‌ور در آب با نرخ رشد‌های مختلف قابل مشاهده است. این افزایش مقاومت ناشی از واکنش‌های انجام شده بین آهک و خاک، چسبیدن ذرات به یکدیگر، و گیرش آهک می‌باشد. از طرف دیگر، با افزایش درصد آهک در دوره‌های عمل آوری یکسان کاهش نرخ رشد مقاومت فشاری قابل مشاهده است. این حالت به علت اشباع شدن فضای خالی خاک از آهک، و در نهایت منجر به کاهش نرخ مقاومت فشاری می‌باشد. لذا وجود آهک بیشتر در روند افزایشی مقاومت فشاری، ضمن افزایش هزینه و اثرات زیست محیطی در پروژه‌های عمرانی بیشتر از حد معین، کارساز نمی‌باشد. نتایج آنالیز SEM (شکل ۸a) نشان دهنده فولکوله شدن ذرات خاک رس در واکنش تبادل یونی با ذرات آهک را نشان می‌دهد. در این حالت ذرات رس از حالت ورقه‌ای خارج شده و به حالت فولکوله قابل مشاهده می‌باشند. همچنین در همین حالت بخشی از کانی‌های کلسیت (CaCO<sub>3</sub>) با حالت ریموند قابل رویت می‌باشند که نشان دهنده عدم شرکت بخشی از آهک در واکنش بین آهک و رس بوده و به صورت آزاد در نمونه‌ها حضور دارد. وجود آهک فعال نشده که اصطلاحاً آهک آزاد نامیده می‌شود (آهکی که در ساختار رس قرار نگرفته است)، منجر به کاهش مقاومت فشاری خواهد شد (Obuzor et al., 2012).



شکل ۵- مقایسه اثر همزمان آهک شکفته و سرباره (L<sub>4</sub>-G<sub>12</sub>) بر مقاومت فشاری تک محوره در سه حالت خشک، نیمه و کامل غوطه‌ور در آب.  
 Fig.5. Comparison of the simultaneous effect of hydrated lime and slag (L<sub>4</sub>-G<sub>12</sub>) on unconfined compressive strength in three states of dry, partially soaked, and completely soaked samples.



شکل ۶- مقایسه اثر همزمان آهک شکفته و سرباره (L<sub>8</sub>-G<sub>8</sub>) بر مقاومت فشاری تک محوره در سه حالت خشک، نیمه و کامل غوطه‌ور در آب.  
 Fig.6. Comparison of the simultaneous effect of hydrated lime and slag (L<sub>8</sub>-G<sub>8</sub>) on unconfined compressive strength in three states of dry, partially soaked, and completely soaked samples.



شکل ۷- مقایسه اثر همزمان آهک شکفته و سرباره (L<sub>12</sub>-G<sub>4</sub>) بر مقاومت فشاری تک محوره در سه حالت خشک، نیمه و کامل غوطه‌ور در آب.  
 Fig.7. Comparison of the simultaneous effect of hydrated lime and slag (L<sub>12</sub>-G<sub>4</sub>) on unconfined compressive strength in three states of dry, partially soaked, and completely soaked samples.

مناسب جهت انجام واکنش‌های پوزولانی با نرخ پایین و کریستاله شدن ژل‌های تشکیل شده نیز می‌باشد. همچنین Wild و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که سرباره به تنهایی در حضور برخی از ترکیبات طبیعی از جمله CaO و MnO موجود در خاک می‌تواند فعال شود. در شکل ۸ تصاویر SEM مربوط به برخی ترکیبات مورد آزمایش در این تحقیق را نشان می‌دهد. در شکل ۸b مشاهده می‌شود که بخشی از سرباره آزاد در سیستم، بصورت غیر فعال وجود دارد. در نمونه خاک مورد بررسی در این پژوهش بر اساس آنالیزهای XRF نمونه‌های مورد آزمایش در حدود، ۳۱/۱۲٪ اکسید کلسیم (CaO) وجود دارد. این مقدار بالای اکسید کلسیم که خاک اولیه بدون هیچ گونه افزودنی با خاصیت بازی خود می‌تواند باعث فعال شدن سرباره شود (Obuzor et al., 2012). در پژوهشی که توسط Celik و Nalbantoglu (۲۰۱۳) انجام شد، نشان دادند که

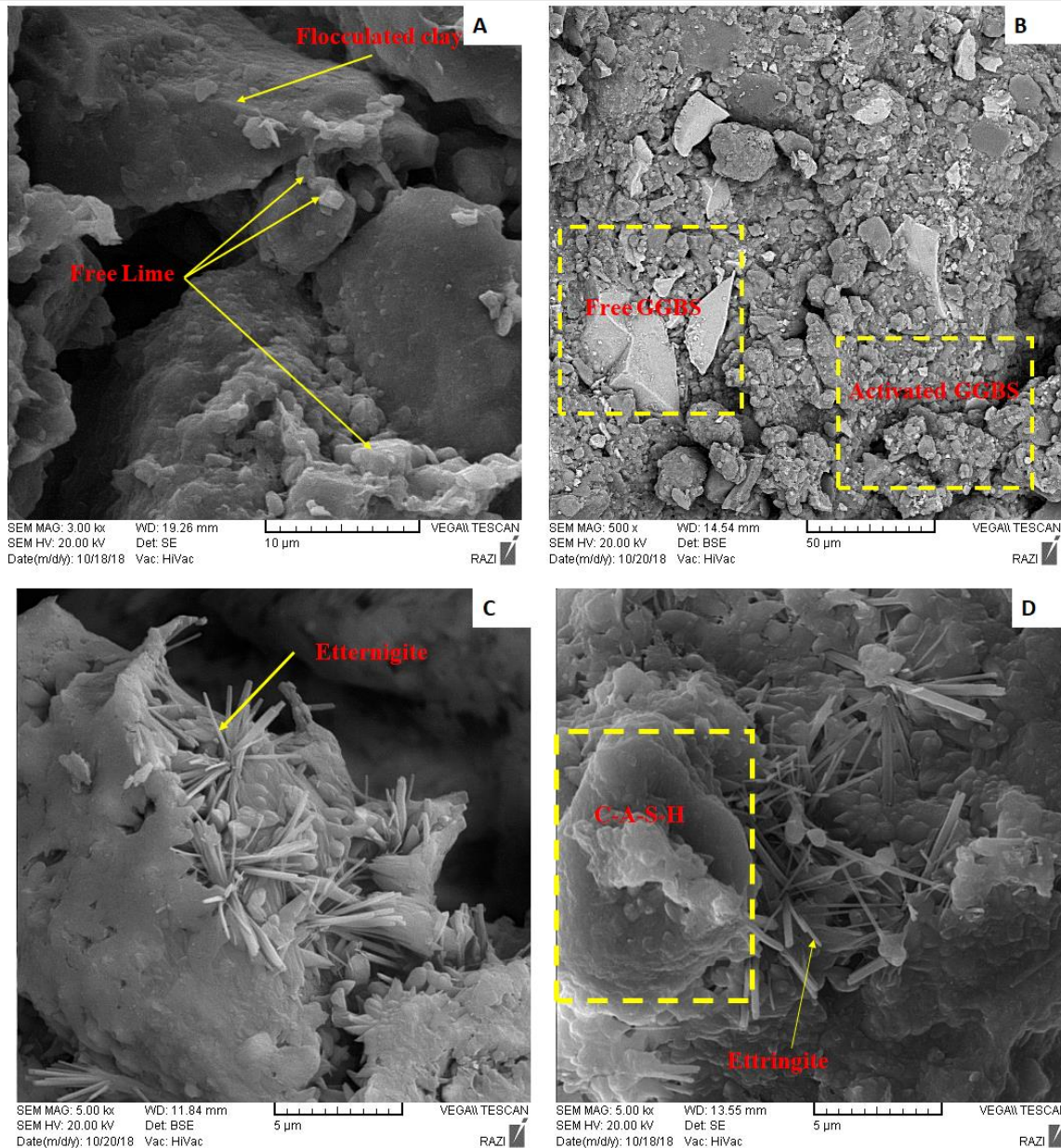
در نمونه‌های که سرباره به تنهایی مورد آزمایش قرار گرفته (G16) ، مقدار مقاومت فشاری نسبت به حالتی که آهک به تنهایی استفاده شده است (L16)، نرخ مقاومت فشاری به طور معنی‌داری افزایش یافته است. این رفتار را می‌توان از دو جنبه جداگانه بررسی نمود. جنبه نخست، مربوط به نمونه‌های قبل از ۲۸ روز می‌باشد و جنبه دوم مقادیر بعد از ۲۸ روز می‌باشند. شیب افزایش نمونه‌ها تا قبل از ۲۸ روز به طور معنی‌داری بالا می‌باشد، ولی با افزایش دوره زمان عمل آوری بعد از ۲۸ تا ۹۰ روزه نمودار مقاومت فشاری با شیب به نسبت کمتری افزایش می‌یابد این افزایش می‌تواند ناشی از واکنش‌های شیمیایی به ویژه با افزایش زمان واکنش در جهت کامل شدن واکنش‌های با سرعت پایین رخ بدهد (Salih Yi et al., 2013) et al., 2015. همچنین به دلیل واکنش‌های پوزولانی و تشکیل مقدار کمی C-A-S-H به ویژه با افزایش زمان عمل آوری و زمان

خاصیت بازی اولیه خاک خود به تنهایی می‌تواند در تشکیل مقدار اندکی ژل C-A-H-S در خاک باعث افزایش مقاومت فشاری خاک گردد. همانطور که از شکل ۸b قابل مشاهده است، بخشی از سرباره فعال شده نیز در سیستم وجود دارد که به علت واکنش بین سرباره با مقدار طبیعی آهک موجود در خاک مورد استفاده موجب تشکیل مقدار اندکی ژل شده است.

در مهمترین سناریو این پژوهش که شامل طرح اختلاط رس - سرباره - آهک است دو واکنش اصلی رخ می‌دهد، هیدراسیون سرباره فعال شده با آهک برای تهیه ژل C-A-S-H فاز هیدروتالکیت که حاوی منیزیم می‌باشد، و همچنین تشکیل اترینگایت می‌باشد (شکل ۸c). هیدراسیون سرباره باعث مصرف آب به مقدار زیاد و به مقدار کمتری آهک می‌شود (Wild et al., 1998). مقدار آهک آزاد بستگی به طرح اختلاط داد، بطوری که جهت فعالسازی سرباره مقدار کم آهک لازم است. زیرا همانطور که در تصاویر SEM مشاهده می‌شود، مقداری از آهک آزاد در سیستم باقی می‌ماند که خود باعث کاهش مقاومت فشاری خواهد شد (شکل‌های ۸c و d). در مطالعه‌ای که توسط Tasong و همکاران (۱۹۹۹) انجام شد، مکانیسم اندرکنش سولفات با کائولینیت آهک تثبیت شده را مورد بررسی قرار داد و بیان داشت که جایگزینی آهک با سرباره منجر به تغییر و تبدیل پیشرونده‌ای در ریز ساختارها با توجه به مورفولوژی اترینگایت می‌شود (شکل ۸c). در همین راستا، Wild (۱۹۹۸) گزارش کرد که جایگزینی آهک با سرباره بیشترین تغییر مقاومت در نمونه‌های ۲۸ روزه را موجب می‌شود. در آزمایشات این پژوهش، بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷، نمونه‌هایی که دارای مقدار آهک بالایی هستند، مقاومت فشاری کمتری را نشان می‌دهند. در حالی که نمونه‌های با مقدار آهک کمتر، که در آنها آهک با سرباره جایگزین شده است، حتی نمونه‌هایی که کاملاً در آب هستند، مقاومت بالاتری را نشان می‌دهند. این افزایش در مقاومت در واقع مربوط به افزایش سرباره است که منجر به افزایش تشکیل ژل کلسیم سیلیکا هیدراته CSH توسط آهک آزاد و تشکیل کانی اترینگایت به صورت همزمان و پیوسته به هم در سیستم می‌باشد (شکل ۸c). این ژل از حل شدن یون‌های سیلیکا و آلومینای خاک در شرایط قلیایی ناشی از وجود آهک تشکیل می‌شود. اضافه شدن سرباره باعث افزایش سیلیکا و آلومینا محیط شده و به تشکیل ژل‌های اشاره شده و کسب مقاومت بالاتر کمک می‌کند. در واقع آهک آزاد منجر به افزایش pH محیط شده و فعال شدن سرباره و در نهایت تشکیل بلورهای اترینگایت (شکل‌های ۸c و d) در حضور سولفور می‌شود. در واقع آهک آزاد موجود در سیستم منجر به متعادل شدن pH محیط شده در هنگامی رسیدن مقدار اسیدیته به مقدار بهینه می‌شود.

با قرار گرفتن ذرات سرباره در مقابل آب، لایه‌ای با ترکیب Al-O و Si-O بر روی ذرات سرباره تشکیل می‌شود. این لایه با جذب یون H فعال از آب، باعث آزاد شدن OH در محیط شده و موجب افزایش pH محیط شده، به طوری که مقدار آن به اندازه مقدار آهک اشباع می‌رسد (Salih et al., 2015). در این مقدار pH قلیایی پیوند Si-O و Al-O شکسته شده و بلورهای آمورف C-A-S-H و بلور هیدرات کلسیم آلومینات (C-A-H) تشکیل می‌شوند (Obuzor et al., 2012). در واقع افزایش pH منجر به تشکیل ترکیباتی می‌شود که باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شوند. از جمله مهمترین این ترکیبات، کانی اترینگایت می‌باشد، که با وجود اینکه باعث افزایش خاصیت تورمی خاک می‌شود، مزیت اصلی آن افزایش مقاومت فشاری نیز می‌باشد (Wild et al., 1998; Obuzor et al., 2012).

Wild و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که با افزایش نسبت آهک به سرباره در قبل از ۲۸ روز مقاومت افزایش می‌یابد اما پس از این مدت نرخ افزایش مقاومت کمتر می‌شود، لذا در این مطالعه نیز این روند قابل مشاهده است. به طوری که مقدار بهینه افزایش مقاومت فشاری در ترکیب ۱۲٪ سرباره و ۴٪ آهک دیده می‌شود. نتایج تحقیق حاضر توسط مطالعه Obuzor و همکاران (۲۰۱۲) نیز تایید گردیده است. البته بر اساس نظر Wild و همکاران (۱۹۹۸) مقدار درصد بهینه ترکیب آهک و سرباره بستگی به پارامترهایی همچون نوع خاک، درصد رس، شرایط عمل آوری و طول دوره زمان عمل آوری می‌باشد. افزایش مقاومت همراه با افزایش زمان عمل آوری در هر سه سناریو آهک، سرباره و ترکیب آهک - سرباره هم در نمونه‌های خشک، نیمه و کامل در آب دیده می‌شود. نمونه‌های کامل در آب در تمامی سن‌های عمل آوری نسبت به انواع خشک کاهش محسوسی را نشان می‌دهند. در نمونه‌های با زمان عمل آوری تا قبل از ۲۸ روز که سیستم جهت فعال سازی آهک، فعال کردن آهک - سرباره، واکنش - های پوزولانی و هیدراسیون نیاز به رطوبت دارد. از این رو تا روز ۲۸ می‌توان افزایش مقاومت در نمونه‌های نیمه و کامل در آب را در همه سناریوهای مورد نظر مشاهده کرد و کاهش چشمگیری دیده نمی‌شود. در این مدت با افزایش زمان عمل آوری، زمانی که واکنش‌های هیدراسیون و پوزولانی نزدیک به کامل شدن می‌رسند، مقدار رطوبت اضافه موجود در سیستم، در فضاهای خالی قرار گرفته و باعث کاهش نرخ رشد مقاومت فشاری نمونه می‌شود. بر اساس Wild و همکاران (۱۹۹۸) در حضور سرباره واکنش‌های شیمیایی بیشتری انجام می‌شوند که باعث کاهش نفوذپذیری خاک به دلیل تشکیل ژل C-S-H و تغییر در ریزساختارها می‌گردد.



شکل ۸- تصاویر SEM ترکیب خاک رس با آهک و سرباره؛ (a) فولکوله شدن ذرات خاک رس و بخشی از آهک آزاد، (b) سرباره فعال شده و بخش غیر فعال سرباره، (c) تشکیل کانی اترینگایت در ماتریکس کانی C-A-H و تشکیل ژل C-A-S-H و کانی اترینگایت در اختلاط آهک- سرباره - رس.

Fig. 8. SEM images of the mixture of clay with lime and GGBS; (a) floculated clay particles and segments of free lime, (b) The view of free and activated GGBS, (c) formation of Ettringite in C-A-H mineral matrix, and (d) formation of C-A-S-H gel and Ettringite mineral in clay-lime-GGBS matrix.

### نتیجه گیری

۱- در نمونه‌هایی که آهک به تنهایی مورد استفاده قرار گرفته است، تا مرحله قبل از ۲۸ روز افزایش قابل محسوسی در مقاومت فشاری قابل مشاهده است. این فرآیند همچنین در نمونه‌های نیمه در آب و کامل در آب نیز نمایان است، که ناشی از واکنش‌های انجام شده بین آهک و خاک، چسبیدن ذرات به یکدیگر، و گیرش آهک می‌باشد. از طرفی با افزایش درصد آهک در دوره‌های عمل آوری یکسان کاهش مقاومت فشاری قابل مشاهده است.

نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در سه سناریوی به کار گرفته شده در این پژوهش که شامل اختلاط آهک- خاک رس، سرباره - خاک رس و آهک - سرباره - خاک رس در درصدهای مختلف می‌باشند را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود.

۴- مهمترین واکنش‌های، همراهی آهک و سرباره شامل هیدراسیون سرباره فعال شده توسط آهک، برای تشکیل ژل C-A-S-H و فاز هیدروتالکیت می‌باشد که شامل ژل C-A-S-H می‌باشد. نتایج SEM نشان دهنده تشکیل دو فاز اصلی ژلی C-S-H و C-A-S-H و تشکیل کانی اترینگایت می‌باشند.

### تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد سید سپهدار گنجی‌پور دانشجوی موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان می‌باشد و کلیه آزمایشات در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز انجام پذیرفته است

۲- در نمونه‌هایی که سرباره به تنهایی مورد استفاده قرار گرفته است، مقاومت فشاری با افزایش مقدار سرباره به ویژه قبل از ۲۸ روز به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند ناشی از واکنش‌های شیمیایی به ویژه با افزایش زمان واکنش در جهت تکمیل واکنش‌های با سرعت پایین رخ بدهد. به دلیل واکنش‌های پوزولانی و تشکیل مقدار کمی C-A-S-H به ویژه با افزایش زمان عمل‌آوری و زمان مناسب جهت انجام واکنش‌های پوزولانی با نرخ پایین و کریستاله شدن ژل‌های تشکیل شده نیز می‌باشد.

۳- مقدار مقاومت فشاری در سیستم رس - سرباره - آهک با کاهش مقدار درصد آهک افزایش می‌یابد که با شرایطی که نمونه‌ها در آب هستند قابل مقایسه نمی‌باشد. مقدار بهینه افزایش مقاومت فشاری در ترکیب ۱۲٪ سرباره و ۴٪ آهک می‌باشد.

### منابع

- Alavez-Ramirez, R., Montes-Garcia, P., Martinez-Reyes, J., Altamirano-Juarez, D. C., Gochi-Ponce, Y. ., 2012. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials* 34, 296-305.
- Al-Mukhtar, M., Khatat, S., Alcover, J. F., 2012. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology* 139, 17-27.
- Altun, I. A., Yilmaz, I., 2002. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. *Cement and Concrete Research* 32(8), 1247-1249.
- Amhadi, T. S., Assaf, G. J., 2018. November. Overview of Soil Stabilization Methods in Road Construction. In *International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"* 21-33. Springer, Cham.
- Amiralian, S., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., 2012. A review on the lime and fly ash application in soil stabilization. *International Journal of Biological, Ecological and Environmental Sciences* 1(3), 124-126.
- Brooks, R. M., 2009. Soil stabilization with fly ash and rice husk ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* 1(3), 209-217.
- Celauro, B., Bevilacqua, A., Bosco, D. L., Celauro, C., 2012. Design procedures for soil-lime stabilization for road and railway embankments. Part 1-review of design methods. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 53, 754-763.
- Celik, E., Nalbantoglu, Z., 2013. Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils. *Engineering Geology* 163, 20-25.
- Cetin, B., Aydilek, A. H., Guney, Y., 2010. Stabilization of recycled base materials with high carbon fly ash. *Resources, Conservation and Recycling* 54(11), 878-892.
- Choobasti, A. J., Ghodrat, H., Vahdatirad, M. J., Firouzian, S., Barari, A., Torabi, M., Bagherian, A., 2010. Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime. *Frontiers of Earth Science in China* 4(4), 471-480.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., Pinto, A. T., 2012. Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. *Construction and Building Materials* 29, 167-174.
- Eisazadeh, A., Kassim, K. A., Nur, H., 2012. Solid-state NMR and FTIR studies of lime stabilized montmorillonitic and lateritic clays. *Applied Clay Science* 67, 5-10.
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K., 2011. Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils. *Geotechnical and Geological Engineering* 29(5), 759-769.
- James, J., Pandian, P. K., 2016. Industrial wastes as auxiliary additives to cement/lime stabilization of soils. *Advances in Civil Engineering*.
- Jawad, I. T., Taha, M. R., Majeed, Z. H., Khan, T. A., 2014. Soil stabilization using lime: Advantages, disadvantages and proposing a potential alternative. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 8(4), 510-520.

- Mishra, E. N. K., 2012. Strength characteristics of clayey sub-grade soil stabilized with fly ash and lime for road works. *Indian Geotechnical Journal* 42(3), 206-211.
- Modarres, A., Nosoudy, Y. M., 2015. Clay stabilization using coal waste and lime—Technical and environmental impacts. *Applied clay science* 116, 281-288.
- Nagaraj, H.B., Sravan, M.V., Arun, T.G., Jagadish, K. S., 2014. Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment* 3(1), 54-61.
- Obuzor, G.N., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B., 2012. Soil stabilisation with lime-activated-GGBS—A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains. *Engineering Geology* 151, 112-119.
- Poh, H. Y., Ghataora, G. S., Ghazireh, N., 2006. Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(2), 29-240.
- Ramaji, A. E., 2012. A review on the soil stabilization using low-cost methods. *Journal of Applied Sciences Research* 8(4), 2193-2196.
- Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, b., 2018. Assessment of aggregates-cement paste border in concretes containing silica fume and fly ash. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)* 4, 136-154.
- Salih, M. A., Farzadnia, N., Ali, A. A. A., Demirboga, R., 2015. Development of high strength alkali activated binder using palm oil fuel ash and GGBS at ambient temperature. *Construction and Building Materials* 93, 289-300.
- Sharma, N.K., Swain, S.K., Sahoo, U.C., 2012. Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. *Geotechnical and geological engineering* 30(5), 1197-1205.
- Shi, C., 2004. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering* 16(3), 230-236.
- Soltani, A., Tarighat, A., Rostami, R.A., 2017. Effects of calcined clay minerals and silica fume on the compressive strength of concrete, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)* 4, 33-50.
- Tasong, W. A., Wild, S., Tilley, R. J., 1999. Mechanisms by which ground granulated blastfurnace slag prevents sulphate attack of lime-stabilised kaolinite. *Cement and concrete research* 29(7), 975-982.
- Wang, D. X., Abriak, N. E., Zentar, R., Xu, W., 2012. Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction. *Environmental Technology* 33(1), 95-101.
- Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., 1998. 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* 51, 37-53.
- Yi, Y., Liska, M., Al-Tabbaa, A., 2013. Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC. *Journal of Materials in Civil Engineering* 26 (2), 267-27.

