

Laboratory Investigation of Biological and Chemical Stabilization of Sandy Soil in the Presence of Fine-Grained Soil

Halimeh Namdari¹, Mohsen Keramati^{1*}, Fahime Rafiee²

¹ Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran.

² Department of Civil Engineering, School of Engineering, Damghan University, Semnan, Iran.

ABSTRACT: Chemical stabilization is a conventional method for improving the geotechnical properties of problematic soils, such as by increasing bearing capacity and reducing permeability. However, due to environmental concerns associated with this method, researchers have been encouraged to investigate more eco-friendly alternatives. This study compares the effectiveness of biopolymers, guar gum and xanthan gum, as biological stabilizers with traditional chemical stabilizers including cement and lime. Unconfined compressive strength (UCS) tests were performed on sandy soil samples mixed with different proportions of kaolin clay (0, 10, 15, 20, and 25% by weight). The samples were stabilized with varying concentrations of guar gum and xanthan gum (0.5%, 1%, 1.5%, and 2% by weight), as well as cement 5%, 10%, and 15% by weight and lime (4%, 6%, 8%, and 10% by weight). The influence of curing time (7, 14, and 28 days) on compressive strength was also examined. The results demonstrated that increasing the concentration of cement, guar gum, and xanthan gum led to improved compressive strength. However, for lime-treated samples, the maximum strength was achieved at 8% lime content. Furthermore, in biopolymer-stabilized samples, both increased biopolymer concentration and longer curing times resulted in higher strength, with guar gum outperforming xanthan gum. The biopolymers significantly enhanced the soil's unconfined compressive strength, indicating their potential as sustainable alternatives to chemical stabilizers. Nevertheless, although higher clay and additive contents improved strength in biological stabilization, the rate of strength gain decreased with increasing clay percentage.

Review History:

Received: Jan. 12, 2025

Revised: Sep. 08, 2025

Accepted: Jan. 17, 2026

Available Online: Jan. 30, 2026

Keywords:

Soil Stabilization

Clayey Sand

Guar Gum

Xanthan Gum

Unconfined Compressive Strength

1- Introduction

With the expansion of construction projects on problematic soils, the demand for soil improvement techniques has increased substantially [1]. Traditional chemical stabilization methods using cement and lime, although effective, are associated with environmental concerns, including greenhouse gas emissions [2, 3]. In recent years, bio-stabilization using biopolymers such as guar gum and xanthan gum has been introduced as an environmentally compatible alternative. These materials enhance the mechanical properties of soil by forming inter-particle bonds and developing a network-like structure.

Chang et al. (2015) investigated the role of xanthan gum in improving coarse- and fine-grained soils, reporting that its effectiveness in fine-grained soils is higher than in sandy soils. This behavior is attributed to hydrogen bonding between xanthan gum and the charged surfaces of clayey soils [4]. The effects of xanthan and guar gums on the shear behavior of granular soils were studied by Latifi et al., who reported that increasing the biopolymer content and curing time significantly enhances soil shear strength [5]. In addition,

Bouziget et al. (2021) examined the influence of xanthan and guar gums on the mechanical behavior of kaolinite clay. They found that both biopolymers increase the liquid limit, dry density, and unconfined compressive strength of the soil while decreasing the optimum moisture content [6]. Oliveira and Cabral (2023) demonstrated that bio-stabilization of silty sand with xanthan gum improves compressive strength, stress-strain behavior, and one-dimensional compressibility, with such improvements intensifying at higher xanthan contents [7].

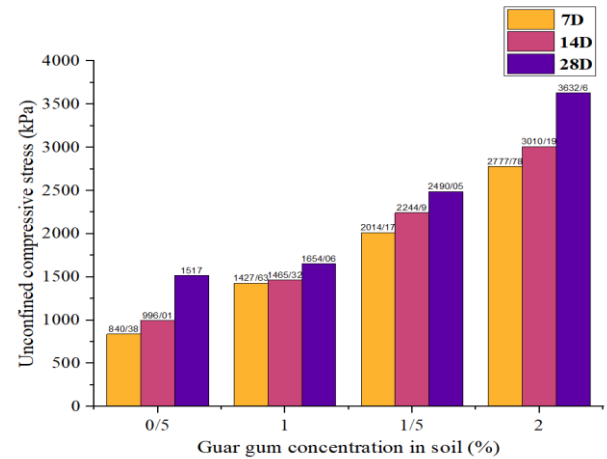
Yang et al. (2025) reported that the addition of xanthan gum to red clay increases shear strength almost linearly with increasing normal stress [8]. Baldobino et al. (2025) concluded that the incorporation of xanthan gum and polypropylene fibers significantly increases the strength and stiffness of clay, with curing time and specimen density playing key roles in these improvements [9].

Despite numerous studies on pure fine- or coarse-grained soils, limited attention has been devoted to simultaneous biological and chemical stabilization of sandy soils containing various clay contents. The objective of the present study is

*Corresponding author's email: keramati@shahroodut.ac.ir

Table 1. Rate of Change in Maximum UCS of Guar Gum–Stabilized Mixed Soil Relative to the Base Sample.

Clay Content (%)	Biopolymer Content (%)	Growth Rate of Maximum UCS (%)
0	0.5	Base Sample
10		46.54
15		75.37
20		108.63
25		210.58
0	2	Base Sample
10		28.30
15		46.12
20		88.95
25		101.52

**Fig. 1. Effect of Curing Time on 20% Clay Sandy Soil Stabilized with Guar Gum.**

to systematically evaluate the performance of chemical and biological stabilizers and assess the combined effects of clay content, stabilizer concentration, and curing time on the unconfined compressive strength of sandy soils.

2- Methodology

In this study, siliceous sand from Babolsar was used as the granular material and kaolinite clay as the fine-grained fraction. Clay contents of 0, 10, 15, 20, and 25% (by dry weight) were added to the sand. The specimens were stabilized using chemical additives, including Type II Portland cement (5, 10, and 15% by weight) and lime (6, 8, and 10% by weight), as well as biopolymers of xanthan gum and guar gum at concentrations of 0.5, 1, 1.5, and 2% by weight.

After preparation, the specimens were molded into standard cylindrical samples for unconfined compressive strength (UCS) testing and cured for 7, 14, and 28 days. UCS tests were carried out according to ASTM D2166. In addition, scanning electron microscopy (SEM) was conducted to investigate the microstructural mechanisms associated with biopolymer stabilization.

3- Results and Discussion

In the chemical stabilization of sand–clay mixtures, increasing cement content enhances compressive strength. However, increasing the clay content beyond 20% results in strength reduction, indicating the presence of an optimal clay content for cement-stabilized soils. Among specimens with different clay contents, those stabilized with 8% lime exhibited the highest compressive strength. Increasing lime content beyond 8% reduced strength due to the saturation of soil reactivity. Conversely, increasing clay content up to 25% had a positive effect on strength. In addition to stabilizer content, longer curing periods (7 to 28 days) also significantly improved compressive strength.

The results also showed that increasing guar and xanthan gum contents up to 2% enhances the UCS of the mixtures.

The network structure formed by the biopolymers reinforces inter-particle bonding [10]. Furthermore, increasing clay content leads to higher UCS values; however, this trend diminishes at higher biopolymer concentrations. In other words, although clay contributes to strength improvement, excessive biopolymer concentrations increase viscosity and restrict optimal compaction, thus preventing continuous strength gains [5]. For comparison purposes, the maximum UCS values of guar-stabilized specimens and their strength improvement ratios relative to the baseline soil (sand with 0% clay) are presented in Table 1.

UCS test results further indicated that curing time, along with biopolymer concentration and clay content, plays an important role in strength development. For comparison, the UCS behavior of guar-stabilized sand containing 20% clay is illustrated in Figure 1. Increasing guar concentration in combination with extended curing time promotes stronger inter-particle bonding and consequently improves mechanical performance.

Results further demonstrated that in most clay–sand mixtures, guar gum performs more efficiently than xanthan gum, although xanthan gum forms denser network structures at higher concentrations. SEM images confirmed the formation of polymeric bonding networks and reduced pore spaces in biopolymer-stabilized specimens.

4- Conclusion

The findings of this study indicate that for projects with environmental considerations and in soils with low to moderate clay contents, bio-stabilization using guar and xanthan gums can serve as a suitable alternative to traditional chemical stabilizers. Although increasing clay content enhances compressive strength, optimal clay content and stabilizer concentration are required to achieve maximum performance. These results may guide engineers and researchers in selecting appropriate stabilization strategies considering soil conditions as well as economic and

environmental constraints.

References

- [1] R.H. Karol, Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded, Crc Press, 2003.
- [2] I. Chang, M. Lee, G.-C. Cho, Global CO₂ emission-related geotechnical engineering hazards and the mission for sustainable geotechnical engineering, *Energies*, 12(13) (2019) 2567.
- [3] R. Etim, A.O. Eberemu, K. Osinubi, Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture, *Transportation Geotechnics*, 10 (2017) 85-95.
- [4] I. Chang, J. Im, A.K. Prasidhi, G.-C. Cho, Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening, *Construction and Building Materials*, 74 (2015) 65-72.
- [5] N. Latifi, S. Horpibulsuk, C.L. Meehan, M.Z. Abd Majid, M.M. Tahir, E.T. Mohamad, Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2) (2017) 04016204.
- [6] I. Bozyigit, A. Javadi, S. Altun, Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5) (2021) 1160-1172.
- [7] P.J. Venda Oliveira, D.J. Cabral, Behaviour of sand stabilised with xanthan gum under unconfined and confined conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 176(1) (2023) 3-13.
- [8] F. Yang, Z. Zhao, Z. Jia, W. Niu, Y. Liu, F. Song, H. Dong, H. Deng, Study on the mechanical properties and microscopic mechanism of xanthan gum improved red clay, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 31842.
- [9] J.d.J.A. Baldovino, Y.E.N. de la Rosa, O.P. Calabokis, J.A.A. Vergara, L.C.S. López, Geotechnical Behavior of Xanthan Gum-Stabilized Clay Reinforced with Polypropylene Fibers, *Polymers*, 17(3) (2025) 363.
- [10] X. Rong, S. Deng, B. Liang, J. Zhuang, Y. Yu, Z. Wu, Mechanical behavior and strengthening mechanism of loess stabilized with xanthan gum and guar gum biopolymers, *Materials Research Express*, 11(10) (2024) 105305.



بررسی آزمایشگاهی تثبیت زیستی و شیمیایی بر روی خاک ماسه‌های در حضور خاک ریزدانه

حلیمه نامداری^۱، محسن کرامتی^{۱*}، فهیمه رفیعی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران.

۲- دانشکده فنی و مهندسی دامغان، دامغان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک

ماسه رسدار

گوارگام

زانتان گام

مقاومت فشاری محصور نشده

خلاصه: تثبیت شیمیایی خاک یکی از روش‌های متداول برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌های مسئله‌دار، از جمله افزایش ظرفیت باربری و کاهش نفوذپذیری، محسوب می‌شود. با این حال، نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با این روش، پژوهشگران را به سمت استفاده از روش‌های سازگارتر با محیط زیست سوق داده است. در این پژوهش، عملکرد بیوپلیمرهای گوارگام و زانتان گام به‌عنوان روش‌های تثبیت زیستی، در مقایسه با تثبیت شیمیایی با سیمان و آهک، بررسی شد. آزمایش تک‌محوری برای تعیین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های ماسه مخلوط با درصد‌های وزنی مختلف خاک رس کائولن (۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) انجام شد. نمونه‌ها با غلظت‌های مختلف گوارگام و زانتان گام (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی) و همچنین سیمان (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) و آهک (۴، ۶ و ۸ درصد وزنی) تثبیت شدند. تاثیر زمان عمل‌آوری (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) نیز بر مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سیمان، گوارگام و زانتان گام، مقاومت فشاری بهبود می‌یابد، درحالی‌که در تثبیت با آهک، حداکثر مقاومت فشاری در غلظت ۸ درصد مشاهده شد. همچنین، در نمونه‌های تثبیت‌شده با گوارگام و زانتان گام، افزایش غلظت و زمان عمل‌آوری منجر به افزایش مقاومت فشاری شد، به‌طوری‌که گوارگام عملکرد بهتری نسبت به زانتان گام نشان داد. به‌کارگیری بیوپلیمرهای گوارگام و زانتان گام به‌طور مؤثری موجب افزایش مقاومت فشاری محصور نشده خاک شده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای مواد شیمیایی باشد. با این حال، نتایج نشان داد که در روش تثبیت زیستی، هرچند افزایش میزان رس و غلظت افزودنی موجب افزایش مقاومت می‌شود، اما نرخ رشد مقاومت با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

ماکرومولکول‌های زیستی هستند که از واحدهای تکرارشونده‌ای به نام مونومر تشکیل شده و به سه دسته اصلی شامل نوکلئیک اسیدها، پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها تقسیم می‌شوند [۵]. این مواد با ویژگی‌هایی نظیر چسبندگی و توانایی لخته‌سازی، نقش مؤثری در بهبود خواص مکانیکی خاک دارند. تحقیقات گسترده‌ای درباره تثبیت شیمیایی و زیستی انواع خاک انجام شده است. در یکی از این مطالعات، عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری طولانی مدت خاک رس ماسه‌ای تثبیت شده با آهک بررسی شده و نتایج نشان داده است که افزایش میزان آهک، مقاومت فشاری محصور نشده خاک را به‌طور غیرخطی در طول دوره عمل‌آوری افزایش می‌دهد [۶]. در سال ۲۰۰۸، جانگ و بابت، کارایی و قابلیت تراکم پس از تثبیت خاک‌های آهکی را ارزیابی کردند و تأثیر مثبت این روش را تأیید نمودند [۷]. بیلماز و جیولکوغلو نیز نشان دادند که استفاده از آهک در خاک‌های رسی موجب کاهش پتانسیل انقباض و بهبود خواص این نوع خاک‌ها می‌شود [۸].

با گسترش شهرنشینی و توسعه صنعتی، بسیاری از مناطقی که پیش‌تر نامناسب یا حاشیه‌ای محسوب می‌شدند، برای اهدافی همچون ساخت شالوده، مسیرهای حمل‌ونقل و پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، به‌منظور تثبیت و بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک در این مناطق، استفاده از روش‌های مختلف بهسازی ضرورت دارد [۱]. یکی از رایج‌ترین این روش‌ها، تثبیت شیمیایی است که به‌طور سنتی از موادی مانند آهک و سیمان بهره می‌گیرد. با وجود اثربخشی این مواد، استفاده از آن‌ها مشکلات زیست‌محیطی متعددی، از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات مخرب بر تغییرات آب‌وهوایی، به همراه دارد [۲]. از این‌رو، ضرورت استفاده از روش‌های بهینه و سازگار با محیط زیست بیش از پیش احساس می‌شود [۳، ۴]. یکی از روش‌های جایگزین و پایدار، استفاده از بیوپلیمرهاست. بیوپلیمرها

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Keramati@shahroodut.ac.ir



[۱۹]. مطالعه اولویرا و کابرال در سال ۲۰۲۳ نشان داد که تثبیت زیستی خاک ماسه‌ای سیلتی با زانتان گام می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری، بهبود رفتار تنش-کرنش و تراکم‌پذیری یک‌بعدی شود و این تأثیرات با افزایش مقدار زانتان گام بیشتر می‌شود [۲۰].

یافته‌های رونگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ نشان داد که استفاده از بیوپلیمرهای زانتان گام و گوارگام با غلظت ۲٪ و زمان عمل‌آوری ۱۴ روز، به‌طور قابل‌توجهی مقاومت فشاری، مقاومت برشی و پایداری آبی خاک لئوس را از طریق تشکیل ساختار شبکه‌ای تقویت‌کننده بین ذرات، بهبود می‌بخشد [۲۱]. از سوی دیگر، وان و همکاران در سال ۲۰۲۴ تأثیر منفرد و ترکیبی این دو بیوپلیمر را بر خاک رس مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که افزودن ترکیب ۲٪ آن‌ها منجر به افزایش حد مایع و حد پلاستیک خاک، تغییر پارامترهای تراکم و افزایش معنادار مقاومت برشی در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده با بیوپلیمر منفرد شد [۲۲].

در همان سال ما و همکاران، تأثیر افزودن زانتان گام را بر خواص مکانیکی خاک شنی تقویت‌شده با الیاف را مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. نتایج تحقیق آنها نشان داد که افزایش درصد بیوپلیمر و زمان خشک شدن به‌طور قابل‌توجهی مقاومت فشاری، مقاومت برشی و مقاومت کششی خاک را افزایش می‌دهد. مقدار بهینه زانتان گام برای افزایش مقاومت فشاری برابر ۴٪ و برای مقاومت برشی و کششی ۳٪ تعیین شد. زمان خشک شدن ۱۴ روز نیز به عنوان زمان بهینه گزارش گردید.

مطالعه کاربرد بیوپلیمرهای زانتان گام و گوارگام بر تثبیت خاک در سال ۲۰۲۵ نیز ادامه یافت. الجابوبی و بیلسل، افزایش استحکام و کاهش نفوذپذیری، مخلوط شنی و بنتونیت به کمک این دو بیوپلیمر مورد مطالعه قرار دادند [۲۴]. آنها گزارش کردند، افزودن ۲٪ بیوپلیمر باعث افزایش قابل توجه (حدود ۳ برابر) در مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد زانتان گام به دلیل خواص ژل‌سازی قوی‌تر، عملکرد بهتری نسبت به گوارگام دارد.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۵ نشان دادند که افزودن بیوپلیمر زانتان گام به خاک رس قرمز باعث افزایش تقریباً خطی مقاومت برشی با افزایش تنش نرمال می‌شود [۲۵]. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ابتدا با افزایش غلظت زانتان گام افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری و مدول تغییرشکل خاک نیز در بازه ۱۴ تا ۲۸ روز بیشترین افزایش را داشته‌اند و پس از ۲۸ روز مدول تغییرشکل تا ۷/۷۱٪ کاهش رشد را نشان داده است. همچنین شاخص باربری کالیفرنیا (CBR) به بیشینه ۲۴/۱٪

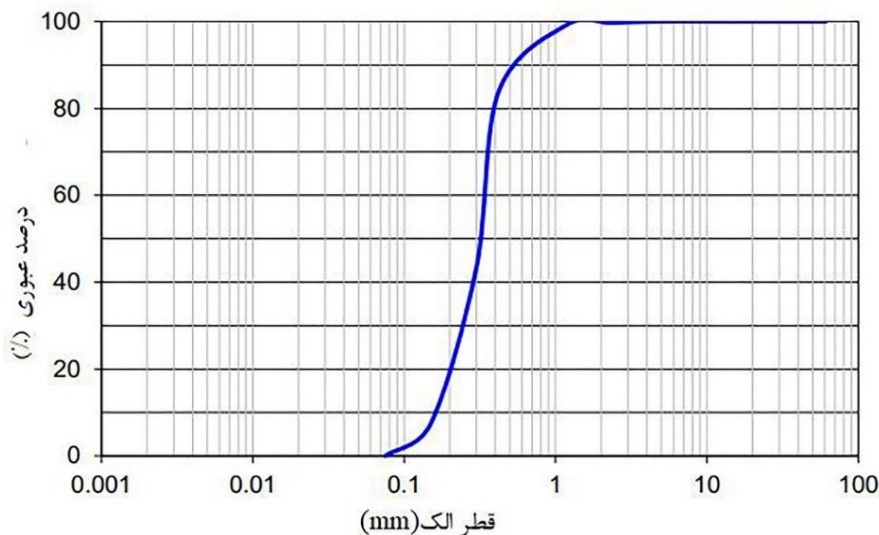
مطالعاتی درباره تثبیت خاک دانه‌ای با سیمان نیز انجام شده است. این مطالعات گزارش کرده‌اند که تثبیت با سیمان موجب افزایش قابل‌توجه حداکثر تنش محوری شده، اما کرنش متناظر با حداکثر تنش محوری کاهش می‌یابد [۹]. همچنین، درصد ذرات ریزدانه تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان دارد، به طوری که حتی درصدهای کم ریزدانه نیز می‌تواند مقاومت و سختی خاک را افزایش دهد [۱۰].

با وجود موفقیت روش‌های شیمیایی در بهبود رفتار خاک، چالش‌هایی همچون مصرف زیاد انرژی، مصرف بالای آب و تأثیرات منفی زیست‌محیطی مانند انتشار گاز CO₂، استفاده از این روش‌ها را محدود می‌کند [۱۱]. از این‌رو، مواد جایگزین سازگار با محیط زیست، مانند بیوپلیمرها، به عنوان راه حلی نوین مطرح شده‌اند. در تثبیت زیستی، از بیوپلیمرهایی با خاصیت چسبندگی و ژل‌کنندگی استفاده می‌شود [۱۲]. این مواد از طریق واکنش‌های شیمیایی میان گروه‌های عاملی بیوپلیمر و مولکول‌های خاک، پیوندهای یونی یا کووالانسی ایجاد کرده و ذرات خاک را به یکدیگر متصل می‌کند [۱۳]. به عنوان مثال، زانتان گام و گوارگام از جمله بیوپلیمرهایی هستند که در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد به دلیل راندمان بالا و هزینه اقتصادی مناسب، کارایی خود را در تثبیت خاک نشان داده‌اند [۱۴، ۱۵].

چانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر حضور زانتان گام بر بهبود خواص خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه را مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند، اثر تقویتی زانتان گام در حضور ریزدانه افزایش می‌یابد که این امر به دلیل پیوندهای هیدروژنی میان زانتان گام و سطوح باردار خاک‌های رسی می‌باشد. با این حال این پیوند و تعامل به معنای این نیست که زانتان گام در تثبیت ماسه ضعیف بی اثر است [۱۶].

لطیفی و همکاران نیز تأثیر زانتان گام و گوارگام را در بهبود رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای بررسی کرده و دریافته‌اند که افزایش غلظت این بیوپلیمرها و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت برشی خاک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [۱۷].

در سال ۲۰۲۱، بوزیگیت و همکاران به بررسی تأثیر بیوپلیمرهای زانتان گام و گوارگام بر رفتار مکانیکی خاک رس کائولن پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که این بیوپلیمرها حد مایع، وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری خاک را افزایش داده و رطوبت بهینه را کاهش می‌دهند [۱۸]. همچنین، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که افزودن مقدار کمی از این بیوپلیمرها به خاک باقیمانده رسوبی موجب افزایش pH و بهبود مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک ماسه بابلسر.

Fig. 1. Grain size distribution curve of Babolsar sand.

و با هم مقایسه شده است.

۲- مصالح مصرفی

۲-۱- خاک

در این پژوهش ماسه سیلیکاتی بابلسر، به عنوان خاک درشت‌دانه مورد استفاده قرار گرفت که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس مقادیر C_U و C_C و طبقه‌بندی سیستم یونیفاید (USCS)، این ماسه در گروه ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. ویژگی‌های فیزیکی ماسه در جدول ۱ ارائه شده است. وزن مخصوص کمینه و بیشینه ماسه با بابلسر مطابق با روش استاندارد ASTM-D4253 اندازه‌گیری شد و به ترتیب برابر با $1/5$ و $1/73$ تن بر متر مکعب به دست آمده است. چگالی دانه‌های جامد آن مطابق با استاندارد ASTM-D854-92، $2/72$ اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد ترکیب خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه، از رس کائولن به عنوان خاک ریزدانه استفاده شد. این خاک که از کارخانه رس چینی مرند تهیه شده، مطابق با سیستم طبقه‌بندی یونیفاید در رده CL قرار دارد. آزمایش تعیین حدود اتربرگ مطابق با استاندارد ASTM4318 روی خاک کائولن مورد استفاده انجام شد و حد روانی و شاخص خمیری آن به ترتیب برابر با $49/7\%$ و $18/2\%$ اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش، مقادیر مختلفی از رس کائولن، 10 ، 15 ، 20 و 25 درصد وزنی به ماسه اضافه شده است.

رسید و پس از آن کاهش یافت. بالدوینو و همکاران در سال ۲۰۲۵ در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر بیوپلیمر زانتان‌گام و الیاف پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی خاک رس پرداخته‌اند [۲۶]. نتایج نشان داد افزودن این مواد باعث بهبود قابل توجه مقاومت و سختی خاک می‌شود و زمان عمل‌آوری و چگالی نمونه نقش مهمی در این بهبودها دارند. افزایش 90 روزه زمان عمل‌آوری تا 37% و افزودن الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت و سختی را به ترتیب تا $53/93\%$ و $63/55\%$ افزایش داد.

اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه صرفاً مربوط به خاک درشت‌دانه یا ریزدانه می‌باشد و تثبیت زیستی در خاک درشت‌دانه ترکیب شده با درصد‌های مختلف ریزدانه و مقایسه آن با تثبیت شیمیایی آن، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از سویی، استفاده از بیوپلیمرها با توجه به منشا زیستی و کاربردهای بسیاری که در زمینه‌های گوناگون مهندسی دارند، از جمله بهبود خواص مهندسی خاک‌ها، در سال‌های اخیر از استقبال چشمگیری برخوردار بوده است. از این رو، در این پژوهش، به منظور ارزیابی پارامترهای مقاومتی خاک مخلوط ماسه رس‌دار با استفاده از تثبیت‌کننده‌های آهک، سیمان، بیوپلیمر زانتان‌گام و گوارگام مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک ماسه رس‌دار تثبیت شده با غلظت‌های مختلف آهک و سیمان و نمونه‌های خاک تثبیت شده با زانتان‌گام و گوارگام در دستگاه تک محوری مورد آزمایش قرار گرفته و مقاومت آنها در سه زمان عمل‌آوری 7 ، 14 و 28 روزه، بررسی

جدول ۱. مشخصات و ضرایب دانه‌بندی خاک ماسه‌ای.

Table 1. Characteristics and grain-size distribution coefficients of the sandy soil.

نام خاک در سیستم یونیفاید	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	γ_{dmax} (t/m ³)	γ_{dmin} (t/m ³)
SP	۰/۱۶۳	۰/۱۸۱	۰/۲۲۱	۰/۲۲۹	۰/۳۹۸	۰/۸۸۱	۱/۷۳	۱/۵

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپلیمرهای مصرفی در این پژوهش

Table 2. Physicochemical properties of the biopolymers used in this study.

نوع بیوپلیمر	وزن مولی (g/mol)	ویسکوزیته (pa.s)	PH	اندازه دانه (mm)	E	شکل ظاهری
زانتان گام	۲۴۱/۱۲	۱۵۵۱	۸/۳	۸۰	E415	پودر
گوار گام	۵۳۵/۱۵	۵۷۵۰	۶/۴	۲۰۰	E412	پودر

۲-۲- مصالح تثبیت کننده شیمیایی

همچنان که در بخش قبل ذکر شد، در این پژوهش از آهک و سیمان به عنوان یکی از متداول‌ترین مواد تثبیت کننده شیمیایی با قابلیت بهبود پارامترهای مقاومتی خاک مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که درصد بهینه آهک عموماً در بازه ۳ تا ۱۰ درصد و سیمان در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد وزنی خاک قرار می‌گیرد تا بهبود مطلوبی در خواص مکانیکی خاک حاصل شود، بدون آنکه مسائل اقتصادی یا زیست محیطی تشدید گردد [۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۱]. در این پژوهش، درصدهای وزنی ۸ و ۱۰ از آهک نسبت به وزن خشک خاک مخلوط، انتخاب شد. سیمان مصرفی در این پژوهش نیز سیمان پرتلند نوع ۲ تولید کارخانه سیمان شاهرود است که در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ نسبت به وزن خشک خاک به مخلوط اضافه شد.

۲-۳- مصالح تثبیت کننده بیوپلیمر

زانتان گام، به عنوان یکی از بیوپلیمرهای پر کاربرد در تثبیت خاک، نوعی پلی ساکارید آنیونی با فرمول شیمیایی $C_{35}H_{49}O_{29}$ است که در این پژوهش به کار گرفته شده است. همچنین در این پژوهش برای بررسی اثر تثبیت بر روی خاک، از بیوپلیمر گوار گام نیز استفاده شده است. این پلی ساکارید با

فرمول شیمیایی $C_{10}H_{14}N_5Na_2O_{12}P_3$ ، در غلظت‌های مختلف به خاک مخلوط افزوده شد.

بررسی‌های متعدد نشان می‌دهد که استفاده از درصدهای کم تا متوسط بیوپلیمرها، عموماً در بازه ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی خاک، افزایش قابل توجه مقاومت و بهبود خواص مکانیکی را موجب می‌شود. به علاوه استفاده از بیوپلیمرها در این محدوده، معایب غلظت‌های بسیار بالا مانند نفوذپذیری بیش از حد یا عدم صرفه اقتصادی را به دنبال نخواهد داشت [۲، ۱۸ و ۲۱]. در واقع مطابق با نتایج پژوهش‌های صورت گرفته این محدوده، نقطه تعادلی بین کارایی و صرفه اقتصادی ایجاد می‌کند. از این رو هر کدام از این بیوپلیمرها در غلظت‌های وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نسبت به وزن خشک خاک مخلوط، استفاده شد.

۳- روش انجام آزمایش‌ها

۳-۱- آماده سازی نمونه‌ها

در ابتدا رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه برای نمونه‌های مخلوط ماسه و رس به روش استاندارد در آزمایشگاه اندازه گیری شد (جدول ۳). و تمامی نمونه های با میزان ماسه و رس مشابه بر اساس رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه حاصله، تهیه شدند. طبق یافته‌های

جدول ۳. درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه مخلوط خاک ماسه و رس

Table 3. Optimum moisture content and maximum dry unit weight of sand-clay mixtures.

شماره نمونه	مشخصات مخلوط خاک	درصد رطوبت بهینه (%)	وزن مخصوص خشک (t/m^3)
۱	ماسه	۱۶	۱/۶۵
۲	ماسه + ۱۰٪ رس کائولن	۱۷/۲	۱/۶۲
۳	ماسه + ۱۵٪ رس کائولن	۱۸/۲	۱/۶۰
۴	ماسه + ۲۰٪ رس کائولن	۱۹/۲	۱/۵۸
۵	ماسه + ۲۵٪ رس کائولن	۲۰	۱/۵۵

مطالعات پیشین [۲، ۱۸ و ۲۱]، آب مورد نیاز برای هیدراته شدن و ایجاد پیوند بیوپلیمرهای گوارگام و زانتان گام، معادل ۵۰ تا ۶۰ درصد وزن خشک بیوپلیمر است. این مقدار آب به صورت هم‌زمان با آب مورد نیاز خاک به عنوان رطوبت بهینه لحاظ شده است. سپس فرآیند اختلاط خاک با مواد تثبیت‌کننده بیوپلیمری (زانتان گام و گوارگام) به صورت دستی و با دقت بالا به مدت ۵ دقیقه انجام شد. مخلوط در جهت‌های مختلف هم زده شد تا مواد به‌طور یکنواخت ترکیب شوند. برای تضمین یکنواختی اختلاط، نمونه‌هایی از مخلوط از نواحی مختلف برداشت شده و وضعیت ظاهری آن از نظر توزیع یکنواخت مواد بررسی گردید. در صورت مشاهده هرگونه ناهم‌آهنگی یا تجمع مواد، فرآیند اختلاط اصلاح و تکرار شد. روش اختلاط دستی یا مکانیکی در بازه زمانی مشابه (۵ تا ۱۰ دقیقه) در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است [۲، ۱۸ و ۲۱]. پس از تکمیل اختلاط، نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌ای به ابعاد 10×5 سانتی‌متر (ویژه آزمایش تک‌محوری) شکل داده شده و در شرایط ویژه جهت حفظ رطوبت نمونه نگهداری شدند. نمونه‌ها با حفظ رطوبت، به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در دمای محیط برای عمل‌آوری نگهداری شدند.

۳-۲- آزمایش فشاری تک‌محوری

آزمایش فشاری تک‌محوری یکی از رایج‌ترین آزمایش‌های مکانیک خاک است که به طور گسترده در بررسی پایداری و تثبیت خاک در روسازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D-2166 برای تعیین مقاومت فشاری محصورنشده انجام شد. نمونه‌ها شامل ترکیبات مختلفی از ماسه، رس و مواد تثبیت‌کننده شیمیایی آهک یا سیمان و یا مواد تثبیت‌کننده بیوپلیمری زانتان گام یا گوارگام بودند. پس از دوره عمل‌آوری،

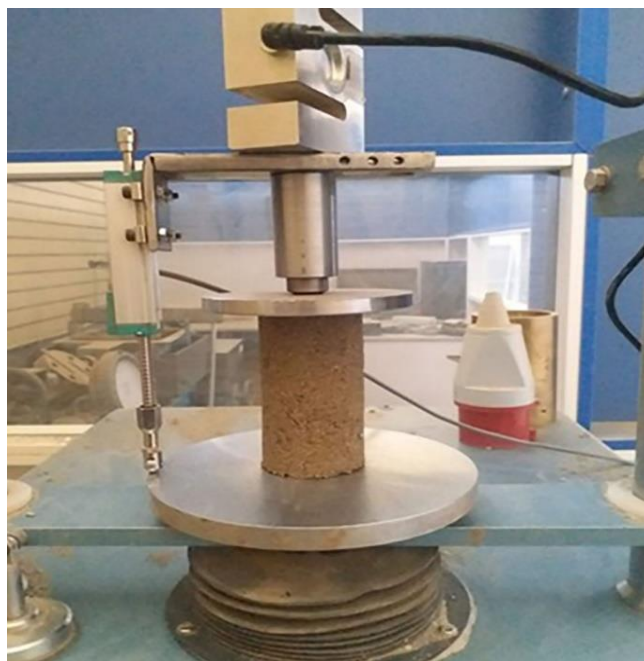
نمونه‌ها در دستگاه آزمایش فشاری قرار گرفتند.

بارگذاری با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای محیط و رطوبت نسبی کنترل شده، تا جایی ادامه یافت که مقدار نیرو به دلیل افزایش کرنش کاهش یابد. برای قرائت دقیق جابجایی و نیروی اعمالی از نرم‌افزار ثبت داده‌ها متصل به رایانه استفاده شد. شکل ۲ دستگاه مورد استفاده به همراه یکی از نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده شده است.

برای تسهیل در ارائه نتایج آزمایش بر روی نمونه‌ها با ترکیب‌های متفاوت از افزودنی‌های متنوع، نمونه‌ها با علائم اختصاری نام‌گذاری شده‌اند که این علائم برای پارامترهای مورد آزمایش، در جدول ۴ نشان داده شده است. مشخصات دقیق و ترکیب برخی از نمونه‌های مورد آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است. بدین ترتیب، بر اساس نشانه مصالح، درصد حضور آنها در ترکیب و تعداد روز عمل‌آوری، نام‌گذاری نمونه‌ها انجام شده است.

۳-۳- آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از دستگاه Zeiss مدل HV300Sig-ma ساخت آلمان، مستقر در دانشگاه شاهرود، انجام شد. این دستگاه قابلیت تصویربرداری از ذرات، سطوح، ساختارهای نانویی، لایه‌های نازک و پوشش‌ها را دارد. در این پژوهش، تصاویر سطحی برخی از نمونه‌های آزمایش شده در بزرگنمایی‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ برابر تهیه شد. این سری از آزمایش‌ها روی نمونه خاک‌های تثبیت‌شده با بیوپلیمر پس از دوره عمل‌آوری ۷ روزه انجام شده است. برای تصویربرداری از نمونه‌ها، اجازه داده شد تا نمونه‌ها در دمای اتاق خشک شده و رطوبت سطحی آن‌ها حذف شود. پس از آن با تقسیم نمونه‌ها به قطعات کوچک‌تر، بر روی بستری از



شکل ۲. نحوه قرار گرفتن نمونه در دستگاه.

Fig. 2. Configuration of the sample in the apparatus.

جدول ۴. نشانه‌های مورد استفاده در نام‌گذاری نمونه‌ها.

Table 4. Symbols used for sample labeling.

زمان عمل آوری	گوار (Guar)	زانتان (Xanthan)	آهک (Lime)	سیمان (Cement)	رس (Clay)	ماسه (Sand)	مصالح مصرفی
D	G	X	L	Ce	C	S	نشانه

خاک ماسه‌ای با درصد رس‌های مختلف برای نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ و ۱۵٪ سیمان در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، به ترتیب در شکل ۳(الف) و ۳(ب) نشان داده شده است.

همچنان‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد رس از ۰٪ تا ۲۰٪، مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر دو حالت ۵٪ و ۱۵٪ سیمان به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به طوری‌که که مقاومت نمونه‌های مخلوط شده با رس ۲۰٪ و سیمان ۵٪ در مقایسه با نمونه‌ای با رس ۰٪ و سیمان ۵٪، نرخ رشدی برابر ۲۱۴/۶۶٪ نشان می‌دهد. این روند صعودی نشان‌دهنده بهبود ساختار داخلی خاک و افزایش چسبندگی بین ذرات خاک

چسب کربنی قرار داده شدند. در ادامه، جهت افزایش رسانایی سطح نمونه‌ها و کاهش اثرات بارگذاری الکتریکی، نمونه‌ها با پوشش‌دهی فلزی طلا با ضخامت تقریبی ۱۰ نانومتر تحت روش اسپاترینگ پوشانده شدند.

۴- تحلیل و تفسیر نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش تک محوری

خاک ماسه رس‌دار مورد آزمایش با استفاده از آهک و سیمان و بیوپلیمرهای گوارگام و زانتان‌گام تثبیت و مقاومت فشاری آن در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه تاثیر ترکیب

جدول ۵. مشخصات دقیق و ترکیب برخی از نمونه‌های تست شده در آزمایش تک محوری.

Table 5. Detailed properties and composition of selected samples tested in the uniaxial compression test.

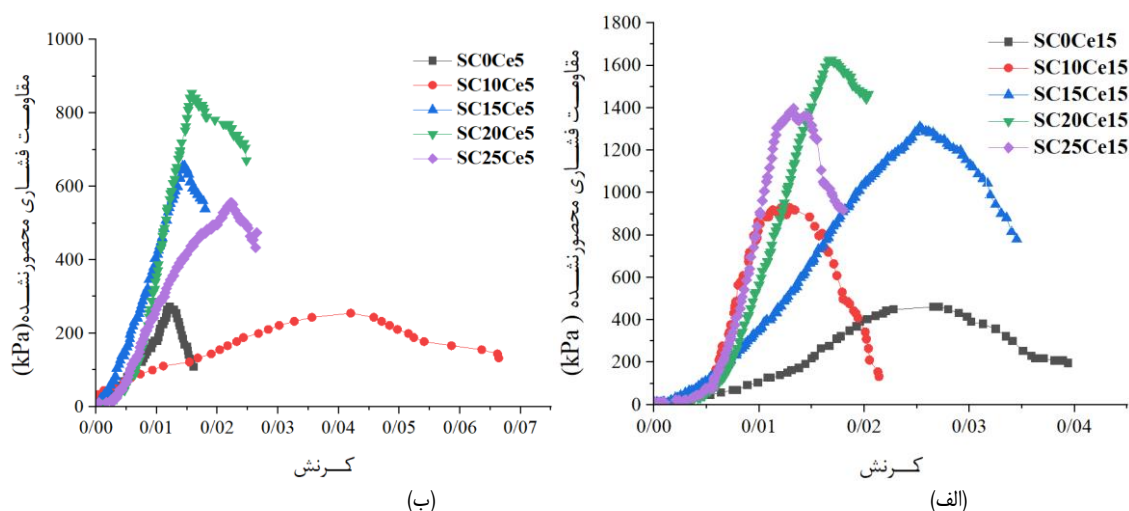
نام نمونه	رس C (%)	سیمان Ce (%)	آهک L (%)	زانتان X (%)	گوار G (%)	زمان عمل‌آوری (روز)
SC0Ce5-28D	۰	۵	-	-	-	۲۸
SC10Ce5-28D	۱۰	۵	-	-	-	۲۸
SC15Ce5-28D	۱۵	۵	-	-	-	۲۸
SC0Ce15-28D	۰	۱۵	-	-	-	۲۸
SC10Ce15-28D	۱۰	۱۵	-	-	-	۲۸
SC20Ce10-7D	۲۰	۱۰	-	-	-	۷
SC20Ce10-14D	۲۰	۱۰	-	-	-	۱۴
SC20Ce10-28D	۲۰	۱۰	-	-	-	۲۸
SC25L6-7D	۲۵	-	۶	-	-	۷
SC25L6-14D	۲۵	-	۶	-	-	۱۴
SC10X0.5-28D	۱۰	-	-	۰/۵	-	۲۸
SC15X0.5-7D	۱۵	-	-	۰/۵	-	۷
SC15X0.5-14D	۱۵	-	-	۰/۵	-	۱۴
SC15X0.5-28D	۱۵	-	-	۰/۵	-	۲۸
SC0G0.5-28D	۰	-	-	-	۰/۵	۲۸
SC10G0.5-28D	۱۰	-	-	-	۰/۵	۲۸

و ترکیبات سیمانی است که منجر به افزایش ظرفیت تحمل بار می‌شود. همچنین در شکل ۳ قابل مشاهده است که با افزایش درصد رس از ۲۰٪ به ۲۵٪، مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر دو غلظت سیمان کاهش یافته است. این کاهش قابل توجه می‌تواند ناشی از اثرات منفی افزایش بیش از حد رس بر تخلخل و ساختار خاک باشد که موجب کاهش کارایی تثبیت سیمانی و ایجاد نواحی ضعیف‌تر در نمونه می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان بیان کرد که درصد رس بهینه برای افزایش مقاومت فشاری در محدوده ۲۰٪ قرار دارد و افزایش بیش از این مقدار منجر به کاهش عملکرد تثبیت سیمانی می‌گردد. نتایج پژوهش شاکر و همکاران نیز نشان داده است که حضور بیش از ۳۰٪ درصد رس در ترکیب خاک، کارایی سیمان در تثبیت خاک را کاهش داده و تغییرات مقاومت خاک، روند نزولی می‌یابد [۲۷].

همچنین مقایسه میزان مقاومت فشاری به دست آمده در شکل ۳(الف) و ۳(ب) نشان می‌دهد که با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری خاک نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، مقاومت فشاری نمونه خاک ماسه‌ای ترکیب

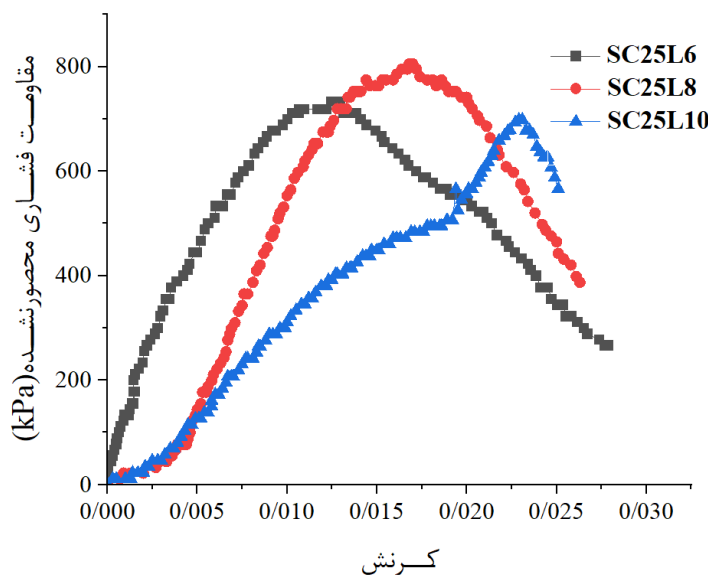
شده با ۲۰٪ رس و ۵٪ سیمان (شکل ۳(الف)) برابر با ۸۵۵ kPa می‌باشد، درحالی‌که نمونه با درصد رس مشابه ۲۰٪ و ۱۵٪ سیمان (شکل ۳(ب)) مقاومتی برابر با ۱۶۲۶ kPa را داراست.

همانطور که اشاره شد در این پژوهش، تغییرات مقاومت فشاری خاک در حضور آهک به عنوان یکی از رایج‌ترین تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نیز مورد آزمایش قرار گرفت. در فرآیند تثبیت آهکی، هنگامی که آهک با خاک در حضور آب مخلوط می‌شود، در نتیجه تجزیه CaO، غلظت یون‌های کلسیم و هیدروکسید محیط افزایش می‌یابد. بین یون‌های کلسیم و سیلیکات‌های حل شده خاک، واکنش پوزولانی صورت می‌گیرد و ایجاد عناصر پایدار از جمله سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم و در نهایت تولید ژل‌های هیدراته، مانند چسب طبیعی، منجر به افزایش مقاومت و سیمانی شدن خاک تثبیت شده با آهک می‌گردد. شکل ۴، تغییرات مقاومت فشاری خاک ماسه ای در حضور ۲۵٪ وزنی رس، تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک، ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، خاک تثبیت



شکل ۳. اثر میزان رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده ماسه رسدار در ترکیب با (الف) ۵ درصد وزنی سیمان و (ب) ۱۵ درصد وزنی سیمان.

Fig. 3. Effect of clay content on the 28-day strength of stabilized clayey sand samples with (a) 5 wt.% cement and (b) 15 wt.% cement.

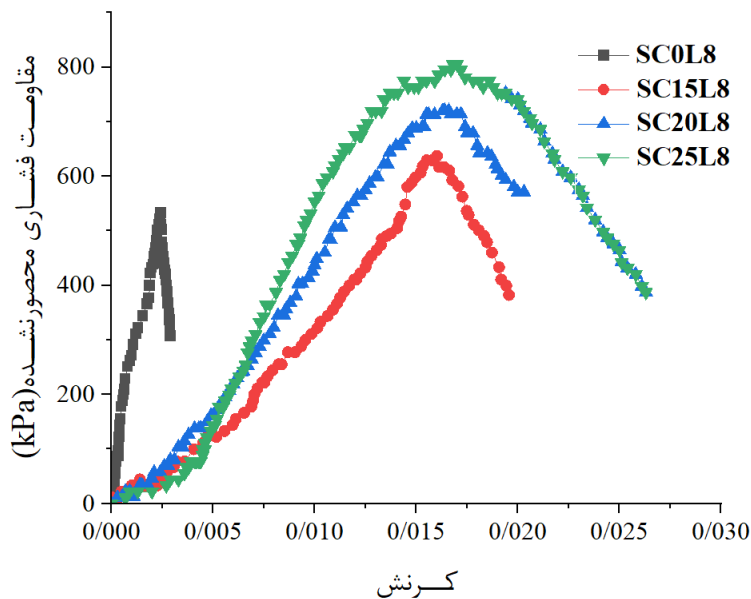


شکل ۴. اثر غلظت‌های مختلف آهک بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده مخلوط ماسه با ۲۵ درصد رس.

Fig. 4. Effect of different lime contents on the 28-day strength of stabilized sand-clay mixture containing 25% clay.

تمامی نمونه‌ها افزایش مقاومت را نشان می‌دهند. مطابق با نتایج، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۸٪ آهک و میزان رس ۲۵٪ نسبت به نمونه مشابه با میزان رس ۰٪، نرخ رشدی برابر با ۳۹/۷۶٪ را نشان می‌دهد. این افزایش قابل توجه به بهینه بودن این مقدار آهک برای فعال‌سازی واکنش‌های پوزولانی و تشکیل فازهای پایدار مانند سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم

شده با ۸٪ آهک بیشترین مقاومت فشاری را نشان داده است. با توجه به درصد بهینه آهک به دست آمده از شکل ۴، اثر حضور رس در خاک ماسه‌ای بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ۸٪ آهک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه در شکل ۵ ارائه شده است. مطابق شکل ۵ در غلظت ثابت آهک، ۸٪ وزنی، با افزایش درصد رس در خاک ماسه‌ای تا ۲۵٪،



شکل ۵. اثر میزان رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده مخلوط ماسه رسدار تثبیت شده با ۸٪ آهک (درصد بهینه آهک).

Fig. 5. Effect of clay content on the 28-day strength of sand-clay mixtures stabilized with 8% lime (optimum lime content).

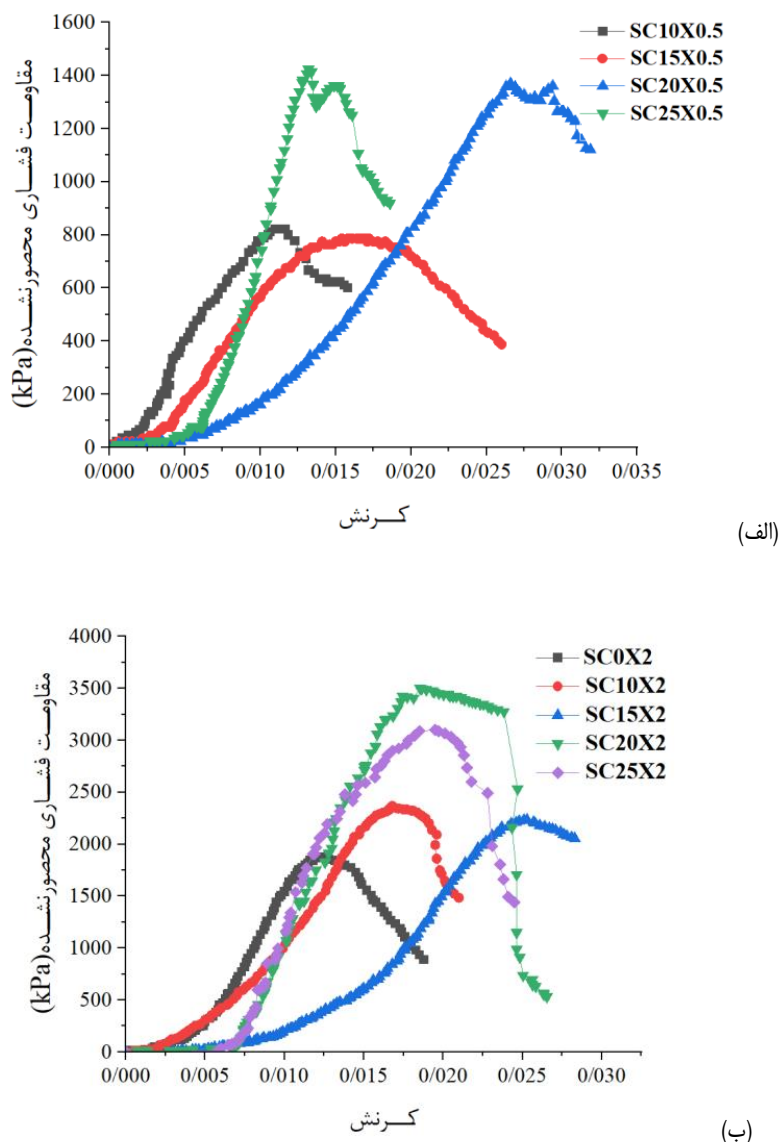
خاک، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ زانتان گام، حاوی ۱۰٪ رس و ۲۵٪ رس به ترتیب مقاومت فشاری حداکثری برابر با ۸۲۱/۵ کیلوپاسکال و ۱۴۲۳/۴ کیلوپاسکال را نشان می‌دهند.

نتیجه مشابهی در شکل ۶(ب) برای نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ زانتان گام نیز قابل مشاهده است. برای نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ زانتان گام، حداکثر مقاومت فشاری نمونه ماسه‌ای (بدون حضور رس) حدود ۱۸۷۶/۵ کیلوپاسکال به دست آمده است، در حالی که برای نمونه خاک ماسه‌ای مخلوط با ۲۵٪ رس به ۳۰۹۸/۷ کیلوپاسکال رسید. به معنای دیگر مقاومت فشاری نمونه به میزان ۶۵٪ رشد داشته است. به علاوه در شکل ۶(ب) مشاهده می‌شود، با افزایش میزان رس تا ۲۰٪ وزنی ماسه، مقاومت فشاری افزایش یافته است، حال آنکه درصد رس ۲۵٪، کاهش مقاومت فشاری را در پی دارد. به بیانی دیگر، افزایش درصد حضور رس موجب درگیری بیشتر ذرات خاک مخلوط و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری آن شده است. تاثیر مثبت حضور رس بر عملکرد زانتان گام در تثبیت خاک در پژوهش ونگ و همکاران نیز دیده شد [۲۸]. اما با افزایش غلظت زانتان گام، این روند کاهشی بوده است و تاثیر حضور رس بر مقاومت فشاری خاک مخلوط کاهش یافته است. زانتان گام در غلظت‌های بالاتر، به تنهایی با ایجاد پیوستگی و افزایش سختی، ساختار خاک را تقویت می‌کند و نقش رس در

نسبت داده می‌شود که موجب استحکام بخشی به ساختار خاک می‌گردد. حال آنکه، افزایش درصد آهک به ۱۰٪، کاهش مقاومت فشاری را منجر می‌شود که می‌تواند ناشی از اشباع ظرفیت واکنش پذیری خاک و باقی ماندن آهک آزاد در سیستم باشد که باعث افزایش تخلخل و کاهش یکنواختی پیوندهای خاک می‌گردد.

در ادامه پژوهش، تاثیر حضور رس بر میزان مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده با بیوپلیمر زانتان گام نیز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این بررسی در شکل ۶ ارائه شده است. شکل‌های ۶(الف) و ۶(ب) به ترتیب، تاثیر حضور رس با درصدهای مختلف بر مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده با ۵٪ و ۲٪ زانتان گام را نشان می‌دهند. همچنانکه از مقایسه دو شکل قابل مشاهده است، مقادیر حداکثر مقاومت فشاری برای تمامی نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با ۲٪ زانتان گام، بیش از نمونه‌های با ۵٪ زانتان گام می‌باشد. مطابق با مطالعات پیشین افزایش میزان بیوپلیمر در خاک، مقاومت فشاری خاک را بهبود می‌بخشد. افزایش غلظت بیوپلیمر زانتان گام منجر به افزایش چسبندگی و قفل‌شدگی ذرات و در نتیجه افزایش مقاومت خاک می‌شود.

همچنین با مقایسه منحنی‌های شکل ۶(الف) می‌توان دریافت، برای نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ زانتان گام، افزایش مقدار رس در مخلوط



شکل ۶. اثر حضور رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده ماسه رسدار (الف) ۰/۵ درصد وزنی زانتان گام و (ب) ۲ درصد وزنی زانتان گام.

Fig. 6. Effect of clay presence on the 28-day strength of sand samples stabilized with (a) 0.5 wt.% xanthan gum and (b) 2 wt.% xanthan gum.

مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای مخلوط با درصدهای مختلف رس، تثبیت شده با ۰/۵٪ گوارگام (شکل ۷(الف)) بیانگر آن است که با افزایش میزان رس، حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده نیز افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ گوارگام، حاوی ۰٪ رس و ۲۵٪ رس به ترتیب حدود ۶۸۲ کیلوپاسکال و ۲۱۲۰ کیلوپاسکال به دست آمده است. بدین ترتیب با حضور ۲۵٪ رس در خاک، مقاومت فشاری بیش از ۲۱۰٪ رشد کرده است. در واقع حضور به عنوان خاک چسبنده، عامل عملکرد بهتر فرآیند تثبیت می‌شود و مقاومت

افزایش مقاومت، کمتر بارز است. در جدول ۶، مقادیر بیشتری از حداکثر مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش تک محوری و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا (خاک ماسه‌ای حاوی ۰٪ رس) برای نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با ۲٪ زانتان گام، ارائه شده است. تاثیر حضور رس و بیوپلیمر گوارگام به عنوان تثبیت کننده خاک به طور همزمان، بر میزان مقاومت فشاری محصور نشده ۲۸ روزه خاک ماسه‌ای نیز مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه

جدول ۶. حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با بیوپلیمر و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مینا (خاک ماسه‌ای حاوی ۰٪ رس).

Table 5. Maximum unconfined compressive strength of soil-mixture samples stabilized with biopolymer and the percentage change in maximum strength relative to the reference sample (sandy soil containing 0% clay).

بیوپلیمر	درصد رس (%)	درصد بیوپلیمر (%)	تعداد روز عمل آوری	حداکثر مقاومت فشاری (kPa)	نرخ رشد حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مینا (%)
زانتان گام	۰			۱۸۷۶/۴۸	نمونه مینا
	۱۰			۲۳۶۸/۳۱	۲۶/۲۱
	۱۵	۲	۲۸	۲۲۳۳/۶۳	۱۹/۰۳
	۲۰			۳۵۰۰/۷۸	۸۶/۵۶
	۲۵			۳۰۹۸/۷۳	۶۵/۱
گوار گام	۰			۶۸۲/۷	نمونه مینا
	۱۰			۱۰۰۰/۴۱	۴۶/۵۴
	۱۵	۰/۵	۲۸	۱۱۹۷/۲۶	۷۵/۳۷
	۲۰			۱۴۲۴/۳	۱۰۸/۶۳
	۲۵			۲۱۲۰/۳۱	۲۱۰/۵۸
گوار گام	۰			۱۹۲۲/۵۳	نمونه مینا
	۱۰			۲۴۶۶/۶۲	۲۸/۳۰
	۱۵	۲	۲۸	۲۸۰۹/۱۵	۴۶/۱۲
	۲۰			۳۶۳۲/۵۶	۸۸/۹۵
	۲۵			۳۸۷۴/۲۴	۱۰۱/۵۲

نسبت به نمونه مشابه با ۰٪ رس بیش از ۱۰۰٪ می‌باشد. روند تغییرات نشان می‌دهد که با افزایش رس تا ۲۵٪، مقاومت بیش از دو برابر شده است. این افزایش ناشی از اثر هم‌زمان گوار و رس در بهبود تراکم، کاهش تخلخل و افزایش پیوستگی ساختار خاک می‌باشد.

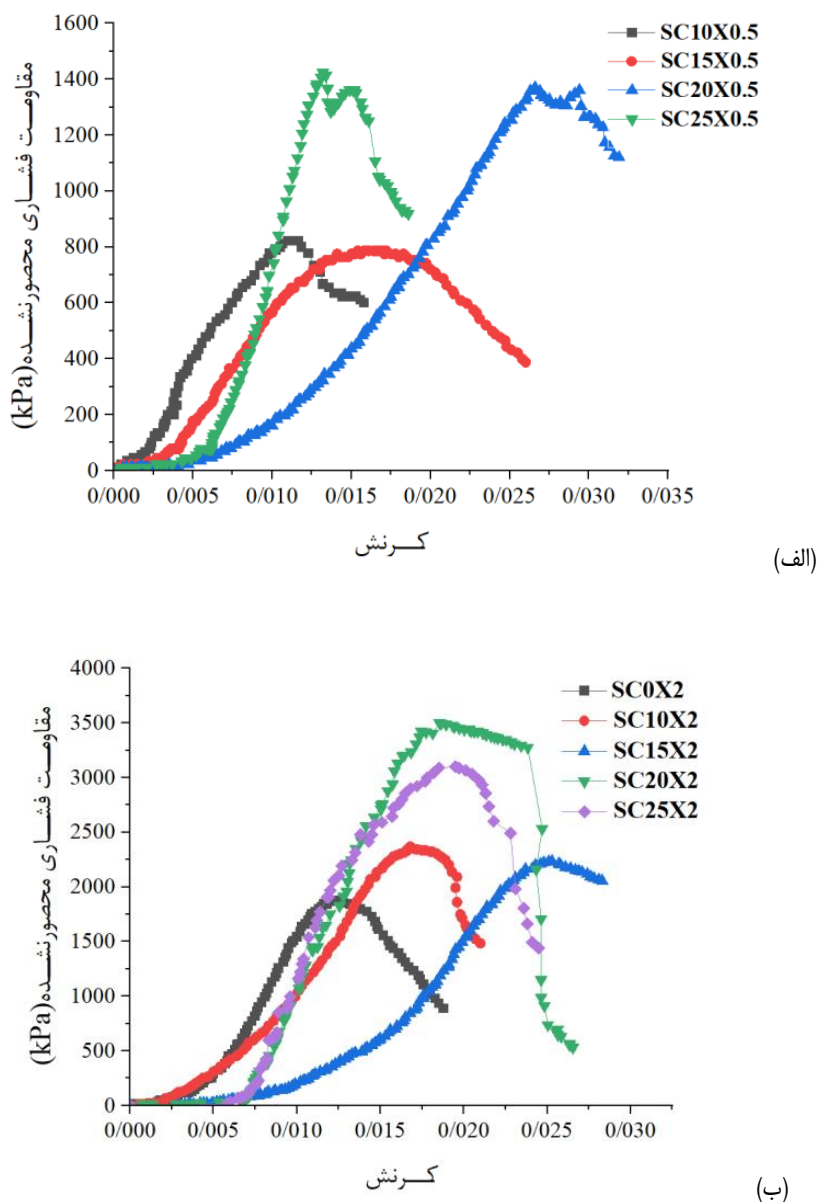
از سوی دیگر، مشابه یافته‌های به دست آمده از نمونه‌های تثبیت شده با زانتان گام، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد رس موجب افزایش مقاومت فشاری شده است اما این روند افزایشی در غلظت‌های بالاتر گوار گام، تعدیل می‌گردد. به عبارت دیگر، گرچه حضور رس به تقویت مقاومت کمک می‌کند، غلظت‌های بسیار بالای گوار گام ممکن است با افزایش ویسکوزیته و ایجاد محدودیت در تراکم‌پذیری بهینه، مانع از افزایش چشمگیر و مداوم مقاومت گردد [۱۷].

مطالعه اثر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک ماسه‌ای در ترکیب با رس و غلظت‌های مختلف مواد تثبیت کننده

خاک را بهبود می‌بخشد.

مقاومت فشاری محصور نشده ۲۸ روزه خاک مخلوط تثبیت شده با ۲٪ گوار گام نیز در شکل ۷(ب) نشان داده شده است. همچنان که از مقایسه میزان در شکل‌های ۷(الف) و ۷(ب) مشاهده می‌شود، افزایش میزان تثبیت کننده بیوپلیمری گوار گام تا ۲٪، حداکثر مقاومت فشاری خاک مخلوط را افزایش می‌دهد. همانند نمونه‌های تثبیت شده با زانتان گام، ساختار شبکه‌ای ایجاد شده توسط بیوپلیمرها باعث تقویت اتصال بین ذرات خاک می‌شود [۲۱].

مقادیر حداکثر مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش تک محوری و نرخ تغییرات مقاومت فشاری نسبت به نمونه مینا (خاک ماسه‌ای حاوی ۰٪ رس) برای نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با ۰/۵٪ و ۲٪ گوار گام، در جدول ۶ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که نرخ رشد مقاومت فشاری برای نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ گوار گام، در حضور ۲۵٪ رس



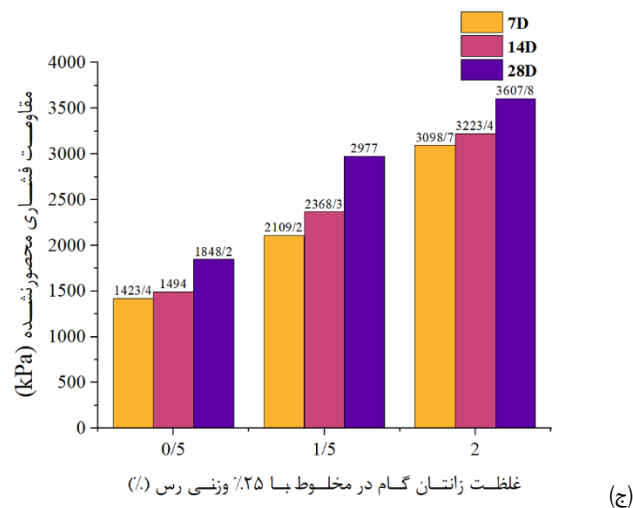
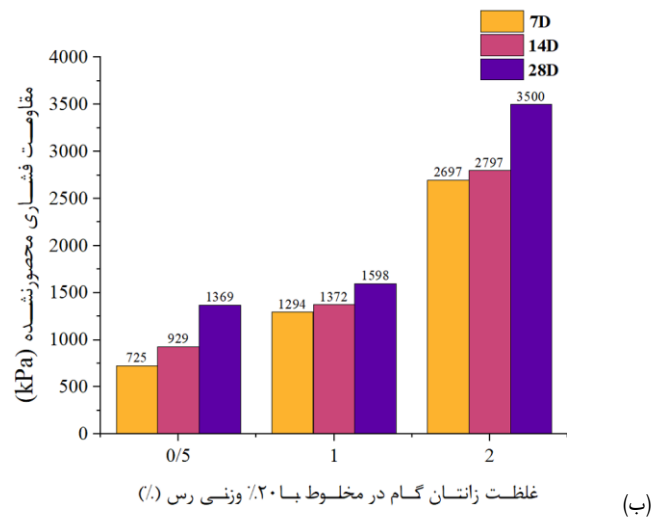
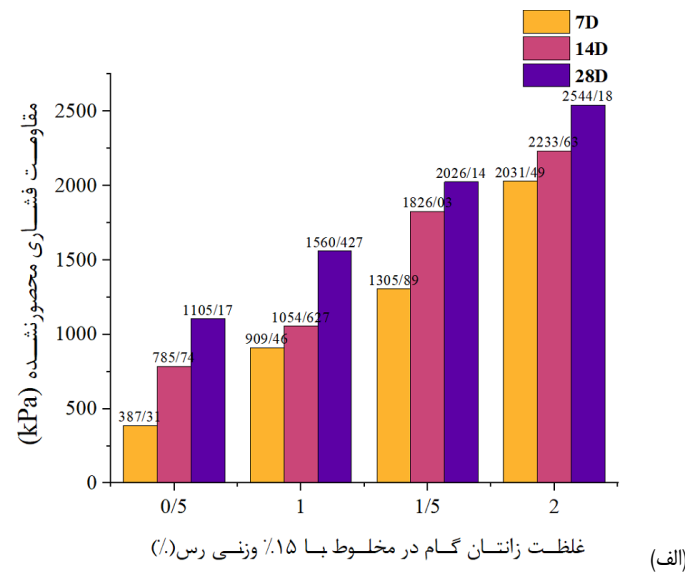
شکل ۷. اثر حضور رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس دار (الف) ۵/۰ درصد وزنی گوارگام و (ب) ۲ درصد وزنی گوارگام.

Fig. 7. Effect of clay presence on the 28-day strength of stabilized clayey sand samples with (a) 0.5 wt.% guar gum and (b) 2 wt.% guar gum.

نشان می‌دهد، حداکثر مقاومت فشاری برای نمونه‌های ماسه حاوی ۲۰٪ رس، تثبیت شده با ۲٪ زانتان گام پس از ۷ روز عمل‌آوری برابر با ۲۶۹۷/۵ کیلوپاسکال به دست آمده است. در حالی که این مقدار برای نمونه با درصد افزودنی مشابه، با فرآیند عمل‌آوری ۲۸ روزه برابر با ۳۵۰۰/۷۸ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شده است. به بیان دیگر مقدار حداکثر مقاومت فشاری حدود ۳۰٪ رشد را نشان می‌دهد. مشابه با نتایج مطالعات پیشین [۱۷ و ۲۵]، افزایش زمان عمل‌آوری تثبیت زیستی خاک با زانتان گام، موجب

زیستی و شیمیایی نیز بخشی از پژوهش حاضر بوده است. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای مخلوط شده با درصد‌های مختلف رس، تثبیت شده با غلظت‌های مختلف زانتان گام در شکل ۸ قابل مشاهده است.

نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد، علاوه بر غلظت بیوپلیمر زانتان گام، زمان عمل‌آوری نیز تاثیر فزاینده بر حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده خاک دارد. برای مقایسه، مقادیر ثبت شده در شکل ۸(ب)



شکل ۸. اثر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس‌دار با غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد زانتان گام حاوی (الف) ۱۵ درصد رس، (ب) ۲۰ درصد رس و (ج) ۲۵ درصد رس.

Fig. 8. Effect of curing time on clayey sand samples stabilized with xanthan gum at concentrations of 0.5, 1, 1.5, and 2%: (a) 15% clay, (b) 20% clay, and (c) 25% clay.

جدول ۷. حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با زانتانگام در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل‌آوری ۷ روزه).

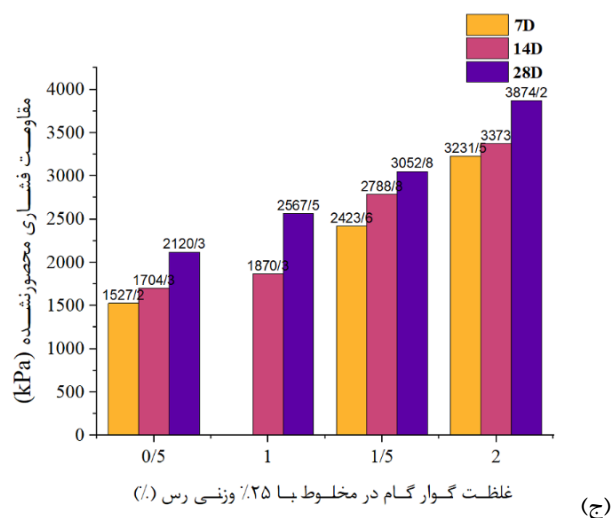
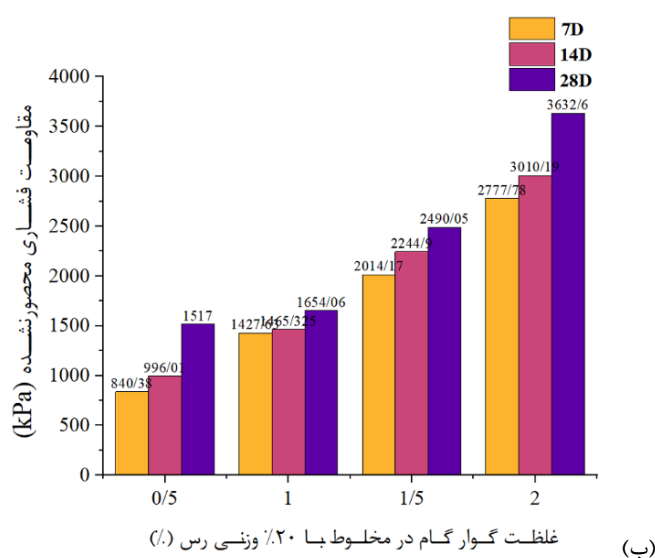
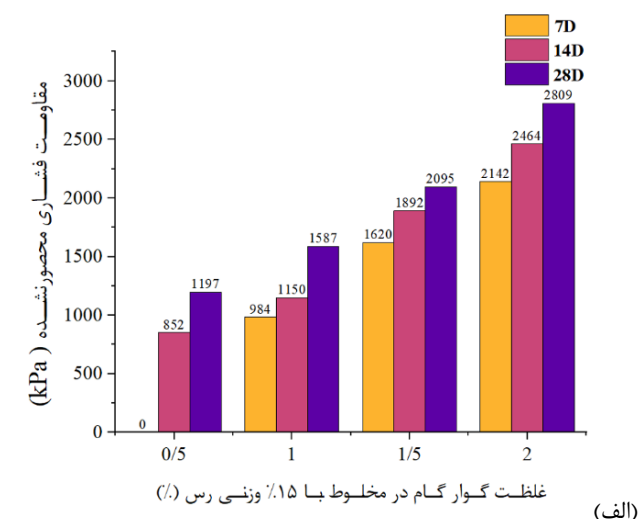
Table 7. Maximum unconfined compressive strength of soil-mixture samples stabilized with xanthan gum at curing times of 7, 14, and 28 days, and the percentage change in maximum strength compared to the reference sample (7-day curing).

بیوپلیمر	درصد رس (%)	درصد بیوپلیمر (%)	تعداد روز عمل‌آوری	حداکثر مقاومت فشاری (kPa)	نرخ رشد حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا (%)
زانتان گام	۱۵		۷	۳۸۷/۳۱	نمونه مبنا
			۱۴	۷۸۵/۷۵	۱۰۲/۸۷
			۲۸	۱۱۰۵/۱۷	۱۸۵/۳۵
	۲۰	۰/۵	۷	۷۲۵/۲۷	نمونه مبنا
			۱۴	۹۲۹/۹۲	۲۸/۲
			۲۸	۱۳۶۹/۹۴	۸۸/۸۹
	۲۵		۷	۱۳۶۱/۲۲	نمونه مبنا
			۱۴	۱۴۹۴/۰۳	۹/۷۶
			۲۸	۱۸۴۸/۴۸	۳۵/۸
	۱۵		۷	۲۰۳۱/۴۹	نمونه مبنا
			۱۴	۲۲۳۳/۶۳	۹/۹۵
			۲۸	۲۵۴۴/۱۸	۲۵/۲۴
	۲۰	۲	۷	۲۶۹۷/۵	نمونه مبنا
			۱۴	۲۷۹۷/۴۵	۳/۷
			۲۸	۳۵۰۰/۷۸	۲۹/۷۸
	۲۵		۷	۳۰۹۸/۷۳	نمونه مبنا
			۱۴	۳۲۲۳/۴	۴/۰۲
			۲۸	۳۶۰۷/۸	۱۶/۴۳

رس، بر نرخ اثرگذاری زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری خاک مخلوط تثبیت شده، موثر است. به بیان دیگر، حضور رس بیشتر در خاک ماسه‌ای، میزان تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. در ادامه، اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای مخلوط با درصد‌های مختلف رس و تثبیت شده با غلظت‌های مختلف گوارگام مورد مطالعه قرار گرفت. همچنان که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، افزایش زمان عمل‌آوری منجر به افزایش حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها می‌گردد. در عملکردی مشابه با بیوپلیمر زانتان گام، افزایش غلظت گوارگام هم‌زمان با افزایش زمان عمل‌آوری، باعث تقویت چسبندگی ذرات و در نتیجه بهبود مقاومت مکانیکی خاک می‌گردد.

شده تا مقدار مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها، افزایش قابل توجهی را نشان دهد. افزایش غلظت زانتان گام باعث تقویت چسبندگی ذرات و ایجاد شبکه‌ای پایدار بین ماسه و رس می‌شود. زمان عمل‌آوری طولانی‌تر موجب تثبیت بیشتر این شبکه و رشد پایدار مقاومت فشاری می‌گردد. نمونه‌های با درصد رس بالاتر بیشترین افزایش مقاومت را نشان دادند، زیرا ذرات ریز رس نقش پرکننده و پشتیبان ساختار خاک را دارند.

مقاومت فشاری محصور نشده برخی از نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با زانتان گام در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل‌آوری ۷ روزه)، جهت مقایسه، در جدول ۷ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد میزان



شکل ۹. اثر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس‌دار با غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد گوارگام حاوی (الف) ۱۵ درصد رس، (ب) ۲۰ درصد رس و (ج) ۲۵ درصد رس.

Fig. 9. Effect of curing time on clayey sand samples stabilized with guar gum at concentrations of 0.5, 1, 1.5, and 2%: (a) 15% clay, (b) 20% clay, and (c) 25% clay.

جدول ۸. حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با گوارگام در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل‌آوری ۷ روزه).

Table 8. Maximum unconfined compressive strength of soil-mixture samples stabilized with guar gum at curing times of 7, 14, and 28 days, and the percentage change in maximum strength relative to the reference sample (7-day curing).

بیوپلیمر	درصد رس (%)	درصد بیوپلیمر (%)	تعداد روز عمل‌آوری	حداکثر مقاومت فشاری (kPa)	نرخ رشد حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا (%)
گوارگام	۲۰	۰/۵	۷	۸۴۰/۳۹	نمونه مبنا
			۱۴	۹۹۶/۰۱	۱۸/۵۲
			۲۸	۱۵۱۷	۸۰/۵۱
	۲۵	۲	۷	۱۵۲۷/۲۳	نمونه مبنا
			۱۴	۱۷۰۴/۳	۱۱/۵۹
			۲۸	۲۰۰۹/۲۷	۳۱/۵۶
گوارگام	۲۰	۲	۷	۲۷۷۷/۷۹	نمونه مبنا
			۱۴	۳۰۱۰/۱۹	۸/۳۷
			۲۸	۳۶۳۲/۲۶	۳۰/۷۶
	۲۵	۲	۷	۳۱۵۳	نمونه مبنا
			۱۴	۳۳۷۳/۰۶	۶/۹۸
			۲۸	۳۸۷۴/۲۴	۲۲/۸۷

افزایش می‌یابد.

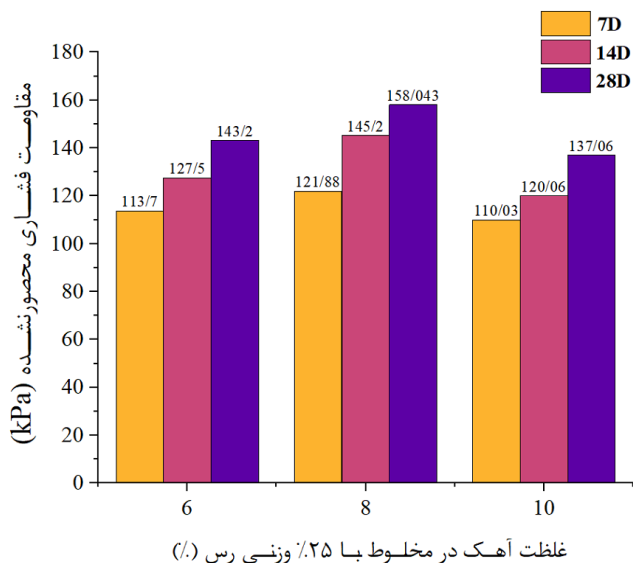
نتیجه آزمایش‌های مشابه برای نمونه خاک حاوی ماسه مخلوط شده با ۲۵ درصد وزنی رس، تثبیت شده با غلظت‌های مختلف آهک در شکل ۱۱ ارائه شده است. آنچنان که نتایج نشان می‌دهند، علاوه بر افزایش درصد تثبیت‌کننده، طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری نیز به‌طور فزاینده‌ای بر مقاومت فشاری خاک تأثیرگذار است. تاثیر افزایشی زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز بر مقاومت فشاری محصورنشده خاک رسی تثبیت شده با آهک در مطالعه جهاننداری و همکاران نیز دیده شد [۲۹].

۴-۲- نتایج آزمایش SEM

شکل ۱۲ تصاویر بزرگنمایی از نمونه‌های ۷ روزه شامل ۰/۵ و ۲ درصد گوارگام در مخلوط خاک ماسه‌ای و ۱۵ درصد خاک رسی را نشان می‌دهد. با بررسی تصاویر می‌توان نتیجه گرفت که افزودن گوارگام به خاک، به‌طور کلی ماتریس خاک رس-گوارگام را قادر ساخته است تا فضاهای خالی بین ذرات ماسه را به‌طور کامل یا جزئی پر کند. پس از تبخیر و خشک‌شدن آب،

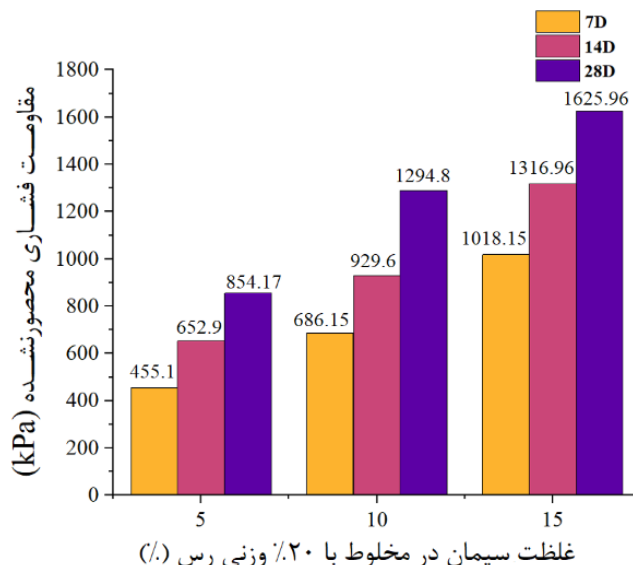
همچنین در جدول ۸، مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده تعدادی از نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با گوارگام در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل‌آوری ۷ روزه) آورده شده است. نتایج آزمایش تک‌محوری نشان می‌دهد، وجود رس و افزایش زمان عمل‌آوری، به‌طور همزمان موجب افزایش مقاومت فشاری محصورنشده در خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده می‌گردد. از سوی دیگر، مشابه با نتایج پیشین، افزایش درصد رس، تاثیر زمان عمل‌آوری بر افزایش مقاومت فشاری را تضعیف می‌نماید [۱۸].

در ادامه، اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌های ماسه رس‌دار تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان و آهک نیز مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۰ نتایج مرتبط با نمونه‌های خاک ماسه‌ای مخلوط با ۲۰ درصد رس با ترکیبی از درصد‌های مختلف سیمان را نشان می‌دهد. همچنان که در شکل مشاهده می‌شود، در زمان‌های مختلف عمل‌آوری، افزایش درصد سیمان تا ۱۵ درصد، موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه شده است. از طرف دیگر، با گذشت زمان از شروع اختلاط خاک و سیمان، مقاومت فشاری نمونه نیز



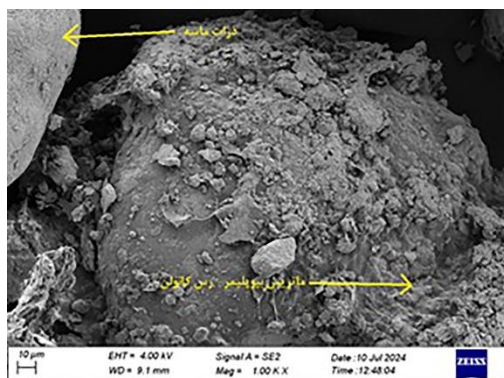
شکل ۱۱. اثر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس‌دار با غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک حاوی ۲۵ درصد وزنی رس.

Fig. 11. Effect of curing time on stabilized clayey sand samples containing 25 wt.% clay with 6, 8, and 10% lime.

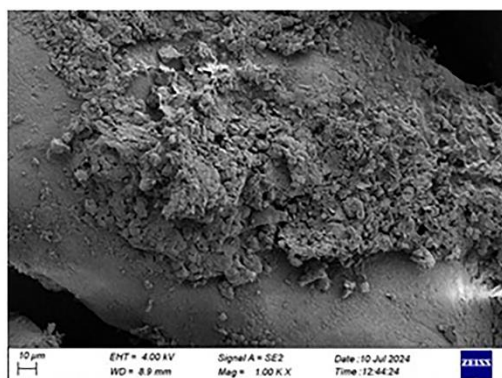


شکل ۱۰. اثر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس‌دار با غلظت‌های ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ سیمان حاوی ۲۰٪ وزنی رس

Fig. 10. Effect of curing time on clayey sand samples containing 20 wt.% clay stabilized with 5%, 10%, and 15% cement.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر برای نمونه ۷ روزه نمونه‌های (الف) SC15G0.5 و (ب) SC15G2

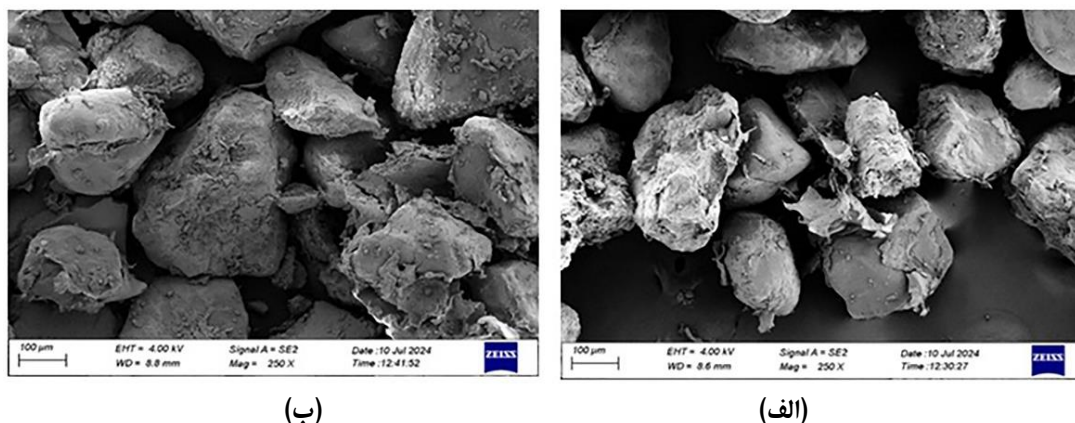
Fig. 12. 1000× magnification of the 7-day samples: (a) SC15G0.5 and (b) SC15G2.

فضاهای خالی بیشتری را نسبت به غلظت ۵٪ درصد پر کرده و سطح بیشتری از ماتریس بیوپلیمر-رس را پوشش داده است. این امر باعث بهبود قابل توجه مقاومت مخلوط شده است.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تصاویری از نمونه خاک‌های ماسه‌ای (بدون حضور رس) و ۵٪ و ۲ درصد زانتان گام و گوارگام را نشان می‌دهد. همچنان

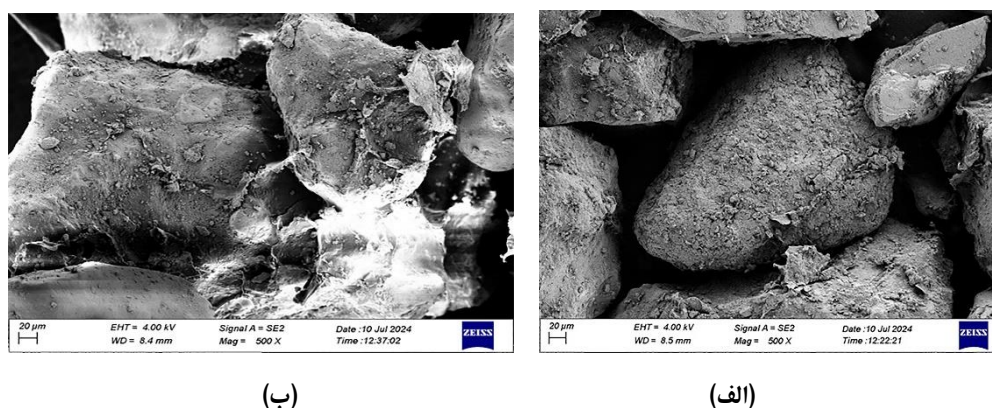
ماتریس خاک رس-گوارگام به تدریج رسوب کرده و منقبض می‌شود و به عنوان پل‌هایی برای ایجاد پیوند بین ذرات ماسه عمل می‌کند. ترکیب حاصل از مخلوط ذرات غیر یکنواخت ماسه با ماتریس خاک رس-گوارگام، مقاومت بالاتری از خود نشان داده است.

مقایسه تصاویر همچنین نشان می‌دهد که استفاده از ۲ درصد بیوپلیمر،



شکل ۱۳. بزرگنمایی ۲۵۰ برابری نمونه ۷ روزه نمونه‌های (الف) SC0X0.5 (ب) SC0X2.

Fig. 13. 250× magnification of the 7-day samples: (a) SC0X0.5 and (b) SC0X2.



شکل ۱۴. بزرگنمایی ۵۰۰ برابری نمونه ۷ روزه نمونه‌های (الف) SC0G0.5 (ب) SC0G2.

Fig. 14. 500× magnification of the 7-day samples: (a) SC0G0.5 and (b) SC0G2.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش، به مقایسه تاثیر تثبیت شیمیایی و تثبیت زیستی بر مقاومت فشاری محصورنشده خاک ماسه‌ای حاوی مقادیر مختلف رس پرداخت. به این منظور، از آهک و سیمان به عنوان تثبیت‌کننده‌های شیمیایی و از گوارگام و زانتان گام به عنوان تثبیت‌کننده‌های زیستی استفاده شد. مهم‌ترین یافته‌های حاصل از آزمایش تک محوری و SEM به شرح زیر می‌باشد:

- در تثبیت شیمیایی خاک ماسه‌ای مخلوط با رس، افزایش درصد سیمان منجر به بهبود مقاومت فشاری می‌شود. بیشترین مقاومت در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ رس و ۱۵٪ سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری قابل مشاهده است

که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت بیوپلیمرها (گوارگام و زانتان گام)، هیدروژل‌ها به طور کامل تشکیل شده و با بستن حفره‌های موجود، نفوذپذیری خاک تثبیت‌شده کاهش یافته است. از این نظر، زانتان گام عملکرد بهتری نسبت به گوارگام دارد. به بیان دیگر، غلظت‌های بالاتر بیوپلیمر منجر به ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین ذرات خاک شده و اتصال بهتری را فراهم می‌کند. ماهیت آنیونی زانتان گام به تجمع و اتصال بیشتر ذرات کمک کرده و به دلیل جذب سطحی بالاتر، نفوذپذیری خاک را حتی در غلظت‌های پایین‌تر نیز کاهش می‌دهد. این در حالی است که ویسکوزیته پایین در این شرایط نقش کمتری در کاهش نفوذپذیری ایفا می‌کند.

برشی خاک‌های مخلوط می‌تواند دارای اهمیت باشد. همچنین مطالعات مشابه بر سایر انواع خاک‌های ریزدانه (رس‌های فعال مانند مونت‌موریلونیت) به درک بهتر اثر خواص شیمیایی رس بر کارایی تثبیت زیستی، کمک خواهد نمود.

منابع

- [1] R.H. Karol, Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded, Crc Press, 2003.
- [2] P. Bagheri, I. Gratchev, M. Rybachuk, Effects of xanthan gum biopolymer on soil mechanical properties, Applied Sciences, 13(2) (2023) 887.
- [3] I. Chang, M. Lee, G.-C. Cho, Global CO2 emission-related geotechnical engineering hazards and the mission for sustainable geotechnical engineering, Energies, 12(13) (2019) 2567.
- [4] R. Etim, A.O. Eberemu, K. Osinubi, Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture, Transportation Geotechnics, 10 (2017) 85-95.
- [5] J.R. Van der Maarel, Introduction to biopolymer physics, World Scientific Publishing Company, 2007.
- [6] N.C. Consoli, P.D.M. Prietto, L. da Silva Lopes Jr, D. Winter, Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil, Transportation Geotechnics, 1(3) (2014) 129-136.
- [7] C. Jung, A. Bobet, Post-construction evaluation of lime-treated soils, Joint Transportation Research Program, (2008) 319.
- [8] I. Yilmaz, B. Civelekoglu, Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils, Applied clay science, 44(1-2) (2009) 166-172.
- [9] I. Shooshpasha, R.A. Shirvani, Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils, Geomech Eng, 8(1) (2015) 17-31.
- [10] S.-W. Moon, G. Vinoth, S. Subramanian, J. Kim, T. Ku, Effect of fine particles on strength and stiffness of cement treated sand, Granular Matter, 22(1) (2020) 9.
- [11] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, L.O. Meida, Carbon dioxide emissions from the global cement

(حدود ۱۶۲۶ کیلوپاسکال). با این حال، افزایش رس بیش از ۲۰٪ اثر منفی بر مقاومت داشته که نشان‌دهنده وجود یک حد بهینه برای درصد رس در تثبیت خاک با سیمان است.

- در حضور درصدهای مختلفی از رس در خاک ماسه‌ای، نمونه‌های تثبیت‌شده با ۸٪ آهک بیشترین مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. افزایش درصد رس تا ۲۵٪ تاثیر مثبتی بر مقاومت دارد. از سوی دیگر، افزایش آهک بیش از ۸٪ به دلیل اشباع ظرفیت واکنش‌پذیری خاک، منجر به کاهش مقاومت فشاری خاک مخلوط می‌شود.

- هر دو بیوپلیمر گوارگام و زانتان‌گام به‌طور قابل توجهی مقاومت فشاری خاک را افزایش می‌دهند. افزایش غلظت بیوپلیمر تا ۲٪ و افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز، منجر به بهبود مستمر مقاومت می‌شود. نتیجه قابل توجه اینکه برای خاک ماسه رس‌دار، گوارگام عملکرد بهتری نسبت به زانتان‌گام برای تثبیت خاک از خود، نشان داده است. به‌طور خاص، برای نمونه‌های حاوی ۵/۰٪ گوارگام و ۲۵٪ رس پس از ۲۸ روز، مقاومتی حدود ۲۱۲۰ کیلوپاسکال به دست آمده است.

- نتایج این پژوهش به وضوح بیانگر آن است که اگرچه افزایش درصد رس در ترکیب با بیوپلیمرها به‌طور کلی منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود، اما نرخ افزایش مقاومت در درصدهای بالاتر رس، کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش زمان عمل‌آوری اثر مثبتی بر مقاومت داشته، اما این اثر در نمونه‌های با درصد رس بالا کمتر است.

- نتایج حاصل از آزمایشات میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان دهنده آن است که افزایش غلظت بیوپلیمرها، باعث پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک می‌شود. این امر به ویژه در غلظت‌های بالاتر بیوپلیمر، موجب بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد.

نتایج به دست آمده در این پژوهش بیانگر آن است که برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ای حاوی مقدار رس کم تا متوسط در پروژه‌های عمرانی، می‌توان از بیوپلیمرها به عنوان جایگزینی سازگار با محیط‌زیست استفاده کرد. برای خاک‌های با درصد رس بالا، استفاده از تثبیت شیمیایی با سیمان یا آهک در درصدهای بهینه می‌تواند گزینه موثرتری باشد. این یافته‌ها می‌تواند راهنمای مهندسان و محققان در انتخاب روش بهینه تثبیت خاک با توجه به شرایط خاک و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی باشد.

در راستای ارزیابی کارایی بیوپلیمرها در بهسازی خاک در پروژه‌های عمرانی، انجام مطالعات اقتصادی برای استفاده از بیوپلیمرها در مقیاس بزرگ و تاثیر این تثبیت‌کننده‌ها بر سایر پارامترهای مهم ژئوتکنیکی مانند مقاومت

- [21] X. Rong, S. Deng, B. Liang, J. Zhuang, Y. Yu, Z. Wu, Mechanical behavior and strengthening mechanism of loess stabilized with xanthan gum and guar gum biopolymers, *Materials Research Express*, 11(10) (2024) 105305.
- [22] J. Wan, F. Ouyang, H. Xiao, L. Wang, G. Tao, Experimental study on the physical and mechanical properties of modified clay using xanthan gum and guar gum composite materials, *Sustainability*, 16(13) (2024) 5432.
- [23] Q. Ma, J. Wu, Y. Bai, H. Xiao, Effect of Xanthan Gum on the mechanical properties of fiber-reinforced sandy soil, *Bulletin of engineering geology and the environment*, 83(5) (2024) 177.
- [24] A. Al-Jabobi, H. Bilsel, The Effects of Xanthan Gum and Guar Gum on the Mechanical Properties of Sand–Bentonite Mixtures, *Sustainability* (2071-1050), 17(12) (2025).
- [25] F. Yang, Z. Zhao, Z. Jia, W. Niu, Y. Liu, F. Song, H. Dong, H. Deng, Study on the mechanical properties and microscopic mechanism of xanthan gum improved red clay, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 31842.
- [26] J.d.J.A. Baldovino, Y.E.N. de la Rosa, O.P. Calabokis, J.A.A. Vergara, L.C.S. López, Geotechnical Behavior of Xanthan Gum-Stabilized Clay Reinforced with Polypropylene Fibers, *Polymers*, 17(3) (2025) 363.
- [27] A.A. Shaker, M. Dafalla, Introducing Cement-Enhanced Clay-Sand Columns under Footings Placed on Expansive Soils, *Applied Sciences*, 14(18) (2024) 8152.
- [28] Z.-y. Weng, J. Yu, Y.-f. Deng, Y.-y. Cai, L.-n. Wang, Mechanical behavior and strengthening mechanism of red clay solidified by xanthan gum biopolymer, *Journal of Central South University*, 30(6) (2023) 1948-1963.
- [29] S. Jahandari, M. Saberian, F. Zivari, J. Li, M. Ghasemi, R. Vali, Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(2) (2019) 172-183.
- industry, *Annual review of energy and the environment*, 26(1) (2001) 303-329.
- [12] M. Ayeldeen, A. Negm, M. El-Sawwaf, M. Kitazume, Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers, *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 9(2) (2017) 329-339.
- [13] A. Becker, F. Katzen, A. Pühler, L. Ielpi, Xanthan gum biosynthesis and application: a biochemical/genetic perspective, *Applied microbiology and biotechnology*, 50 (1998) 145-152.
- [14] M.K. Ayeldeen, A.M. Negm, M.A. El Sawwaf, Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures, *Arabian Journal of Geosciences*, 9 (2016) 1-13.
- [15] I. Chang, Y.-M. Kwon, J. Im, G.-C. Cho, Soil consistency and interparticle characteristics of xanthan gum biopolymer-containing soils with pore-fluid variation, *Canadian Geotechnical Journal*, 56(8) (2019) 1206-1213.
- [16] I. Chang, J. Im, A.K. Prasadhi, G.-C. Cho, Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening, *Construction and Building Materials*, 74 (2015) 65-72.
- [17] N. Latifi, S. Horpibulsuk, C.L. Meehan, M.Z. Abd Majid, M.M. Tahir, E.T. Mohamad, Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2) (2017) 04016204.
- [18] I. Bozyigit, A. Javadi, S. Altun, Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5) (2021) 1160-1172.
- [19] H. Sulaiman, M.R. Taha, N. Abd Rahman, A.M. Taib, Performance of soil stabilized with biopolymer materials—xanthan gum and guar gum, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128 (2022) 103276.
- [20] P.J. Venda Oliveira, D.J. Cabral, Behaviour of sand stabilised with xanthan gum under unconfined and confined conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 176(1) (2023) 3-13.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Namdari, M. Keramati, F. Rafiee, Laboratory Investigation of Biological and Chemical Stabilization of Sandy Soil in the Presence of Fine-Grained Soil, Amirkabir J. Civil Eng., 57(9) (2025) 1643-1666.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23805.8224](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23805.8224)

