Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 659-662
DOI: 10.22060/ceej.2022.18917.6997

Improvement and stabilization of soft and loose fine-grained soils by Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) method (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture)

S. Karami[1], J. Khazaei[1*], M. Sharifipour[1], R. Sharifi[2]

[1]Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran¬
[2]Department of Plant Protection Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran¬

ABSTRACT: The process of biomineralization as a method of biological soil improvement refers to a set of biochemical reactions in which the sediment formed by bacteria causes the grains of soil to graft and thus improve its properties. In each of the previous researches in the field of biomineralization, one of the methods of mixing, adsorption and injection have been used to add cementation solution to the soil and so far, no comparison has been made on these methods. What is very important in the biomineralization process as a soil remediation method and in fact, one of the most important challenges of this method is the uniform penetration of the biocementation solution and, consequently the proportional distribution of sediments formed in the soil matrix. In the present study, after optimizing the precipitation conditions, the effect of the sample-making method on the biological improvement of Kermanshah clay fine-grained soil with two bacteria Bacillus megaterium and Lysinibacillus boronitolerans was studied. The results show that the method of sample making (in terms of adding biocementation solutions) has a significant effect on the improvement of the compressive strength of samples. The maximum improvement of soil compressive strength (up to 2.68) occurred for Bacillus megaterium in the adsorption method. In general, the addition of solution to the soil by adsorption method has been more effective in the proper placement of sediment between soil grains than the mixing and injection method. It has been more effective and in fact the solutions have been allowed to move between the soil grains to the corners where the grains join, thus resulting in the formation of effective sediment at the grains joint. Also, biological stabilization of the consolidation test sample reduced the soil void ratio change from 0.584 to 0.354 and the compression index from 0.077 to 0.038. The addition of biocementation solutions to the sample of atterberg limits test sample reduced the plasticity index from 26 to 19.

Review History:

Received: Aug. 26, 2020
Revised: Sep. 28, 2021
Accepted: Dec. 17, 2021
Available Online: Feb. 21, 2022

Keywords:

Biological Soil improvement
Microbial induced calcite precipitation
unconfined compression strength
Soil plasticity and Environmental geotechnics

1- Introduction

Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) method is a new and interdisciplinary method that is formed from the link between biotechnology and geotechnical engineering. In this method, during a series of chemical reactions in the presence of bacteria, calcium carbonate precipitate is formed between the soil particles.

MICP, by increasing soil strength and hardness can be used as a cost-effective soil improvement method.

Many environmental factors affect the efficiency of MICP process. These factors include temperature, the concentration of additives, humidity, pH, culture medium, water salinity, type of mineral and soil particle size, injection pressure, duration of treatment, etc.

What is significant in the biomineralization process as a soil remediation method which is in fact one of the most important challenges of this method, is the uniform penetration of the cementation reagent and consequently the proportional distribution of sediments in the volume of soil [1].

In the present study, after determining the optimal conditions of biocementation reaction according to the type of soil and selected bacteria, the importance of the method of making UCS samples was studied. This issue has not been studied in any of the previous studies.

2- Methodology

Soil

The soil used in this study was taken from the Faculty of Agriculture of Razi University located in the east of Kermanshah from a depth of approximately one meter above the ground. Based on the tests performed, this soil is mainly evaluated as fine-grained, soft and loose.

Microorganism

*Corresponding author's email: j.khazaie@razi.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. results of UCS test to investigate the effect of cementation reagent concentration

Strain (%)	Stress (kg/cm²)	Bacteria	Parameter under study: cementation reagent concentration
1.78	1.15	___	Control sample
2.29	1.8	B.m	0.25 M
1.52	1.38	B.124	
2.29	1.63	B.m	0. 5 M
1.78	1.55	B.124	
2.29	1.4	B.m	0.75 M
1.73	1.35	B.124	

Table 2. Results of UCS test to investigate the effect of the sample-making method

Strain (%)	Stress (kg/cm²)	Bacteria	Parameter under study: sample-making method
1.78	1.5	untreatment	mixing
2.29	1.8	B.m	
1.78	1.55	B.124	
2.29	1.07	untreatment	adsorption
2.23	2.87	B.m	
2.32	2.24	B.124	
2.29	1.11	untreatment	injection
2.01	1.73	B.m	
2.28	1.58	B.124	

In this study, two bacteria Bacillus megaterium (B.m) and Lysinibacillus boronitolerans (B.124) were used to compare the performance of efficient microorganisms in biological improvement.

Cementation reagent

The precipitating solution cementation reagent contains urea and water-soluble homolar calcium chloride. In this study, three concentrations of 0.25, 0.5 and 0.75 M were examined based on previous research in order to find the most appropriate concentration of urea-calcium chloride solution in relation to the selected bacteria and soil.

pH value of cementation reagent

The pH value of the additives as well as the pH value of the treated soil are the factors that control the biomineralization process. The pH value of the soil of the project site is equal to a constant value of 7, but the pH value of the cementation reagent will be used in two values of 7 and 9 to be able to compare the performance of bacteria in these two pHs and its relationship with the selected soil type.

Sample making method

In this study, different modes of adding biocementation solution including three methods of mixing, adsorption, and injection by pressure were studied to compare the differences in the effect of each method.

Unconfined Compressive Strength (UCS) was performed according to ASTM D2166 standard on cylindrical specimens with a diameter of 5.5 cm and a height of 11 cm.

In the mixing method, additives including bacterial suspension and urea-calcium chloride solution were added to the soil and mixed thoroughly, then the soil containing the necessary solutions to prepare a UCS test sample in the form of the prepared sample was kept in a zippered bag for the required time and then the UCS test was prepared.

In the adsorption method, first the soil with the desired density was pounded into the mold and then the necessary additives were added to the sample as adsorption. In the pressure injection method, after making the soil sample in the mold, additives were added to the soil with the pressure of 2 bars.

3- Results and discussion

3- 1- Investigation of the effect of cementation reagent concentration

The compressive strength of samples improved with cementation solution with different concentrations, can be seen in Table 1. According to this table, in all improved specimens, an increase in unconfined Compressive Strength occurred, but the magnitude of this increase varies with the concentration of the cementation reagent.

In biological improvement using B.124 bacteria, the greatest improvement in compressive strength is observed in the concentration of 0.5M of the cementation reagent. While the highest increase in resistance occurred with B.megaterium in the concentration of 0.25M cementation reagent. Previous studies investigating the effect of cementation reagent concentration on sandy soil improvement with B. megaterium reported the best MICP performance at 0.5M concentration of cementation reagent [2], this distinction indicates the effect of soil type and the reaction conditions on the function of the bacterium are known.

3- 2- Investigating the effect of sample making method

In order to evaluate the performance of sample making method, UCS tests were performed on samples prepared by mixing, adsorption and injection methods. The results of these experiments are shown in Table 2.

Obviously, the results of the UCS test, it is clear that the addition of biocementation solution to the soil after making the sample in their proper placement between the grains is “more” effective than the mixing method. Only those sediments are effective in the MICP that cause the aggregation of soil grains, and the formation of sediment in voids or grain surfaces has almost no effect on improving soil properties. In adsorption and injection methods, the solutions are actually allowed to move between the soil grains to the corners where the grains join, thus resulting in the formation of effective sediment at the joint seeds. Among the methods of adding solutions after making the sample, the adsorption method has a better performance than the injection method, which

apparently refers to the excessive injection pressure relative to the density of the sample, and in fact the penetration of the solution as adsorption The surface due to gravity has a better performance for the density of samples in this study. In fact, the solution has less opportunity to settle between the soils and may require more injections.

4- Conclusions

In this study, for specific optimization of concentration and pH value of cementation reagent in clay fine-grained soil, three concentrations of 0.25, 0.5 and 0.75 M at two pH value, 7 and 9 were investigated. The results of this study show that the highest compressive strength of the sample stabilized with B. megaterium occurred at a concentration of 0.25 M at pH9. Previous research on the effect of cementation reagent concentration on the improvement of sandy soil with B.megaterium reported the best MICP performance at 0.5 M concentration of cementation reagent. This distinction indicates the effect of soil type and reaction conditions on bacterial function is known.

The samples improved by the adsorption method showed more resistance than the mixing and injection method. In fact, adding biocementation solution to the soil after making the sample in their proper placement between the soil grains has been more effective than the mixing method, and in fact the solutions have been allowed to Move between the soil grains to the corners where the grains join, resulting in the formation of effective sediment at the grains junction.

To evaluate the time parameter treatment duration in the soil improvement process studied in this study, the compressive strength of the samples at 10 days and 40 days after construction were compared. The results showed a significant increase in pressure over time. In fact, by the tenth day of treatment, approximately 60% of the forty-day recovery of the sample has occurred.

the addition of biocementation solution to the sample of consolidation test and the Atterberg Limit test reduced the soil void ratio changes from 0.584 to 0.354 and the plastic index from 26 to 17.

References

[1] B. Krajewska, 2018. “Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review”. Journal of Advanced Research, 13, September, pp. 59-67.

[2] A. Sharma, R. Ramkrishnan, 2016. “Study on effect of microbial induced calcite precipitates on strength of fine grained soils”. Perspectives in Science, 8, April, pp. 198-202.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Karami, J. Khazaei, M. Sharifipour, R. Sharifi, Improvement and stabilization of soft and loose fine-grained soils by Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) method (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture) , Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 659-662.

DOI: 10.22060/ceej.2022.18917.6997

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۹، سال ۱۴۰۱، صفحات ۳۲۱۷ تا ۳۲۴۲
DOI: 10.22060/ceej.2022.18917.6997

بهسازی و تثبیت خاک‌های نرم و سست ریزدانه به روش رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم (مطالعه‌ی موردی: خاک ریزدانه دانشکده کشاورزی کرمانشاه)

سارا کرمی[۱]، جهانگیر خزائی[۱*]، محمد شریفی پور[۱]، روح الله شریفی[۲]

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
بهسازی بیولوژیکی خاک
رسوب گذاری زیستی
مقاومت فشاری محصور نشده
پلاستیسیته خاک
ژئوتکنیک زیست محیطی

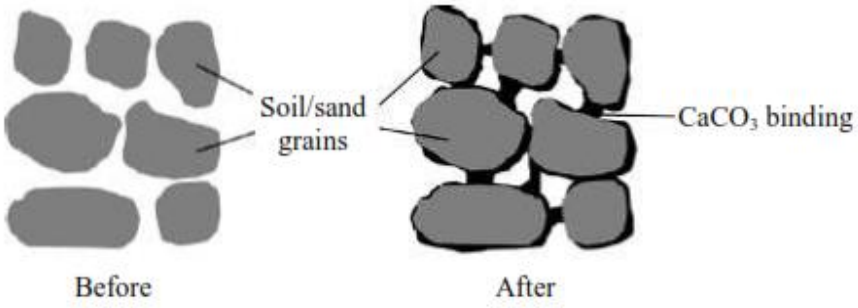
خلاصه: فرآیند رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک روش بهسازی بیولوژیکی خاک به مجموعه‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی اشاره دارد که طی آن، رسوب تشکیل شده توسط باکتری‌ها موجب پیوند دانه‌های خاک و در نتیجه بهبود خواص آن می‌شود. در هر کدام از تحقیقات قبلی در زمینه‌ی رسوبزایی زیستی، یکی از روش‌های اختلاط، جذب سطحی و تزریق جهت افزودن مواد رسوب‌زا به خاک استفاده شده است و تا به حال مقایسه‌ای بر این روش‌ها صورت نگرفته است. آنچه در فرآیند رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک روش بهسازی خاک بسیار حائز اهمیت است و در واقع یکی از مهم‌ترین چالش‌های این روش محسوب می‌شود، نفوذِ یکنواختِ محلول رسوب‌زا و به تبع آن توزیع متناسب رسوبات تشکیل شده در حجم خاک است. در پژوهش حاضر پس از بهینه‌سازی شرایط رسوب‌زایی، تأثیر روش ساخت نمونه‌های آزمایش تک محوری در بهسازی بیولوژیکی خاک ریزدانه رسی کرمانشاه با دو باکتری Bacillus megaterium و Lysinibacillus boronitolerans مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که روش ساخت نمونه (از نظر اضافه کردن مواد رسوب‌زا) بر میزان بهبود مقاومت فشاری نمونه ها تأثیر قابل توجهی دارد و بیشترین بهبود مقاومت تا ۲/۶۸ برابر برای باکتری Bacillus megaterium در روش جذب سطحی اتفاق افتاده است و به طور کلی افزودن مواد رسوب‌زا به خاک به روش جذب سطحی در جای‌گیری مناسب رسوب بین دانه‌های خاک، به نسبت روش اختلاط و تزریق، مؤثرتر عمل کرده است و در واقع به محلول‌ها اجازه داده شده که بین دانه‌های خاک به سمت کنج‌ها که محل اتصال دانه‌هاست حرکت کنند و در نتیجه منجر به تشکیل رسوب مؤثر در محل اتصال دانه‌ها شوند. همچنین تثبیت بیولوژیکی نمونه‌ی آزمایش تحکیم، تغییرات نسبت منافذ خاک را از ۰/۵۸۴ به ۰/۳۵۴ و شاخص فشردگی را از ۰/۰۷۷ به ۰/۰۳۸ کاهش داده است و افزودن مواد رسوب‌زا به نمونه‌ی آزمایش حدود اتربرگ موجب کاهش شاخص خمیری از ۲۶ به ۱۹ شده است.

۱- مقدمه

استفاده از روش‌های متداول بهسازی خاک نظیر تسلیح خاک و یا روش‌های مکانیکی مثل انواع تراکم و عملیات خاکی مستلزم انرژی و هزینه‌ی قابل توجهی برای ساخت و نصب‌اند و با محدودیت‌هایی در عمق و گستره‌ی مساحت و ملزومات دسترسی به محل مواجه‌اند. در روش‌های تزریقی نیز اکثر ملات‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند سمی و زیان‌آور هستند (به جز سیلیکات سدیم) و آسیب جدی به محیط زیست وارد می‌کنند [۱]. همچنین استفاده از سیمان به عنوان جزءِ اصلی بیشتر ملات‌ها موجب تولید و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید می‌شود [۲]. جزءِ اجتناب ناپذیر اکثر روش‌های متداولِ بهسازی خاک، تغییر اکوسیستم و تأثیر مخرب بر آن است. در سال‌های اخیر مقوله حفاظت از محیط‌زیست و تلاش برای حفظ و نگهداری از زیستگاه‌ها، بیش از قبل مورد توجه قرار گرفته است و لذا بایستی توجه نمود که تخریب‌های زیست محیطیِ روش‌های متداول بهسازی می‌تواند از جمله معایب عمده آن‌ها محسوب گردد. به تازگی تکنیک‌های جدیدی در قالب بهسازی بیولوژیکی خاک معرفی شده‌اند که با استفاده از رسوب‌گذاری زیستی، خواص مکانیکی خاک را بهبود می‌بخشند. در این تکنیک‌ها از رسوب تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها طی فرآیندهای بیولوژیکی به عنوان پیوند دهنده‌ی دانه‌های خاک استفاده می‌شود. استفاده از روش رسوب‌زایی زیستی جهت بهسازی خاک در مقایسه با دیگر روش‌های بهسازی خاک دارای مزایایی از جمله هزینه کمتر، شعاع نفوذ بیشتر و سازگاری با محیط‌زیست است. یکی از روش‌های بهسازی بیولوژیکی خاک،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.khazaie@razi.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. شبیه‌سازی توده خاک بهسازی شده با رسوب کربنات کلسیم

Fig. 1. Simulation of soil improved by calcium carbonate Precipitation

روش رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم است. در این روش طی یک سری واکنش شیمیایی در حضور باکتری‌ها، رسوب کربنات کلسیم در بین دانه‌های خاک تشکیل می‌شود. نقش باکتری در فرآیند رسوب‌زایی، تولید آنزیم اوره‌آز (کاتالیزور واکنش) و بالا بردن pH محیط واکنش می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که روند تشکیل رسوب زیستی کربنات‌کلسیم در pH=۸/۳ شروع و در pH=۹ کامل می‌شود [۳]. واکنش‌های زیادی جهت تشکیل کربنات کلسیم توسط باکتری‌ها وجود دارد که پرکاربردترین این واکنش‌ها، تشکیل رسوب کربنات کلسیم از واکنش هیدرولیز اوره است. هیدرولیز اوره در حضور باکتری اوره‌آز مثبت و یون کلسیم انجام می‌شود. بدین صورت که باکتری که قادر به تجزیه اوره باشد همراه با محلولی از اوره و کلسیم کلرید به خاک اضافه می‌شود. اوره مطابق واکنش رابطه (۱)، توسط باکتری به آمونیوم، کربنات و هیدروکسیل تجزیه می‌شود. افزایش pH محیط به دلیل حضور هیدروکسیلِ ناشی از تولید آمونیوم اتفاق می‌افتد.

$$CO(NH_2)_2 + 3H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + HCO_3^- + OH^- \qquad (1)$$

سپس یون کلسیم با کربنات حاصل از واکنش فوق، وارد واکنش می‌شود و مطابق رابطه (۲) کربنات کلسیم تولید می‌کند:

$$Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (2)$$

رسوب کریستالی کربنات کلسیم به صورت یک پوشش دور دانه‌های خاک به خصوص در محل اتصال دانه‌ها را در بر می‌گیرد. این پوشش و اتصال موجب تقویت خاک و تغییر خواص مکانیکی آن می‌شود (شکل ۱).

رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم با افزایش مقاومت و سختیِ خاک می‌تواند به عنوان یک روش بهسازی مقرون به صرفه در مقاوم‌سازی خاک بستر ساختمان‌ها، پایدار کردن شیروانی‌ها، تسهیل حفاری و تونل‌زنی، مقابله با لغزش زمین و کاهش پتانسیل روانگرایی ماسه به کار برده شود [۴-۷]. همچنین کاهش نفوذپذیری خاک به واسطه‌ی تشکیل رسوب در بین دانه‌های خاک و تشکیل محفظه‌ی نفوذناپذیر جهت کاربرهای مختلف مانند ایزوله کردن خاکِ محل دفن زباله حائز اهمیت است [۸]. رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک فرآیند طبیعی، شامل اثر فعالیت متابولیکی باکتری‌ها بر یک سری واکنش‌های شیمیایی است و طبیعتاً عوامل محیطی بسیاری بر بازدهی این روند تأثیر گذارند. از جمله این عوامل می‌توان به دما، غلظت مواد افزودنی، رطوبت، pH، محیط کشت، شوری آب، نوع کانی و اندازه‌ی ذرات خاک، فشار تزریق، زمان انجام واکنش و.. اشاره کرد. غلظت محلول رسوب‌زا که عمدتاً شامل اوره و کلسیم کلرید می‌باشد، از جمله پارامترهای مؤثر بر عملکرد رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم در خاک است که بارها توسط محققان در خاک‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. آنچه از نتایج این تحقیقات برمی‌آید این است که با افزایش غلظت اوره و یون کلسیم، مقدار رسوب کربنات کلسیم تولید شده افزایش پیدا می‌کند اما این افزایش تا غلظت بهینه ادامه دارد و با افزایش غلظت بیش از آن، به علت شوری بالا، تولید کربنات کلسیم با مشکل مواجه می‌شود [۹-۱۲]. همچنین تحقیقات کارمونا[1] و چیت[2] نشان داد که غلظت بهینه‌ی اوره-کلسیم کلرید،

1 Carmona
2 Chiet

بسته به نوع خاک، نوع باکتری و شرایط محیطی و زیستیِ باکتری متغیر است [۱۴ و ۱۳]. این مطلب در مورد دیگر پارامترهای مؤثر بر واکنش رسوب‌زایی نظیر pH محلول، دما و.. صدق می‌کند. پس بهتر است که عوامل دخیل بر واکنش رسوب‌زایی در هر پروژه با توجه به شرایطِ خاصِ آن، اختصاصاً مورد بررسی قرار گیرد و یا دستِ‌کم می‌توان گفت برای دستیابی به یک روش جامع که تمام متغیرها را تحت پوشش قرار دهد مطالعات کامل‌تری مورد نیاز است. آنچه در فرآیند رسوب‌زایی زیستی به عنوان یک روش بهسازی خاک بسیار حائز اهمیت است و در واقع یکی از مهم‌ترین چالش‌های این روش محسوب می‌شود، نفوذِ یکنواختِ محلول رسوب‌زا و به تبع آن توزیع متناسب رسوبات تشکیل شده در حجم خاک است [۲]. به نظر می‌رسد عواملی همچون غلظتِ بالای محلول‌های رسوب‌زا و فشار تزریق نامناسب آن‌ها به خاک، می‌تواند مانعی برای توزیع یکنواخت رسوب در بدنه‌ی خاک محسوب شوند. همچنین میزان تراکم خاک می‌تواند بر توزیع متناسب محلول‌های رسوب‌زا در بدنه‌ی خاک و محل تشکیل رسوب اثرگذار باشد. در دهه‌ی اخیر عواملی چون دانه‌بندی، تراکم و درجه اشباع خاک و غلظت و فشار تزریق محلول‌های رسوب‌زا که بر توزیع متناسب رسوب در بدنه‌ی خاک اثرگذارند توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۱۲ سون[1] و همکارانش در پژوهشی اثرگذاری تراکم خاک بر عملکرد رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم را برای دو نوع خاک ماسه‌ای و برجا مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. نتایج این بررسی، وجود رابطه‌ی عکس بین تراکم و میزان بهبود مقاومت خاک ماسه‌ای را اثبات کرد. در حالی که برای خاک‌های برجا میزان بهبود در مقاومت با افزایش تراکم افزایش یافت. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که پیچیدگی ساختار خاک در مقیاس میکروسکوپی و توزیع مکانی رسوب در فضای خالی خاک موجب می‌شود که تراکم خاک، در خاک‌های مختلف اثر متفاوتی بر روند رسوب‌زایی زیستی داشته باشد. جهت جابجایی و توزیع متناسب محلول رسوب‌زا در حجم خاک، تراکم و آرایش دانه‌های خاک باید به گونه‌ای باشد که فضای کافی برای حرکت محلول با سرعت مناسب وجود داشته باشد و از طرفی دانه‌ها به اندازه‌ی کافی به هم اتصال داشته باشند. در این میان روش اضافه کردن محلول‌ها و فشار تزریق نیز پارامترهای اثرگذارند که باید در هر پروژه بسته به شرایط خاصِ آن، بهینه‌سازی شوند. سون و همکارانش در سال ۲۰۱۴ این بار به مطالعه اثر سرعت تزریق مواد رسوب‌زا به خاک به عنوان یکی از عوامل اثرگذار بر توزیع یکنواخت و مؤثر رسوب در بدنه خاک پرداختند [۱۶].

نتایج این پژوهش نشان داد که میزان رسوب تولید شده لزوماً با افزایش مقاومت رابطه‌ی مستقیم ندارد و در واقع بهبود مقاومت خاک به آن دسته از رسوب‌هایی بر می‌گردد که در محل اتصال دانه‌ها با سرعت مناسبِ محلول رسوب‌زا شکل گرفته‌اند. درجه‌ی اشباع خاک نیز می‌تواند بر محل تشکیل رسوب و در نتیجه عملکرد بهسازی بیولوژیکی تأثیرگذار باشد. در درجات اشباعِ کم، فضای بین منافذ را هوا اشغال می‌کند و محلول رسوب‌زا بیشتر در گوشه‌ها و در محل اتصال دانه‌های خاک جای می‌گیرد. در نتیجه رسوب در محل اتصال دانه‌ها تشکیل می‌شود و پیوند دانه‌های خاک را افزایش می‌دهد. در حالی که در نمونه اشباع شده، محلول رسوب‌زا این امکان را دارد که در منافذ بین دانه‌ها و روی سطح دانه‌ها همچنین به صورت معلق در آب تشکیل بشود که این بخش از رسوبات عملاً اثری بر پیوند دانه‌ها و در نتیجه بهبود مقاومت ندارد. در واقع هر چه درجه اشباع خاک کمتر باشد رسوبات تولید شده مؤثرتر عمل می‌کنند و در واقع در محل اتصال دانه‌ها تشکیل می‌شوند [۱۷]. با این وجود وِن[2] و همکارانش در سال ۲۰۱۸ روش غوطه‌وری را جهت تثبیت بیولوژیکی نمونه‌های ماسه اوتاوا در قالب‌های منعطف به کار بردند و به بهبود قابل قبولی در مقاومت فشاری دست یافتند [۱۸].

به طور کلی نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که عملکرد مؤثرتر رسوب‌زایی زیستی نیازمند درصدی از تراکم، آرایشی از دانه‌ها و درجه‌ی اشباعی است که در عین این که فضای کافی برای حرکت محلول با سرعت مناسب در فضای خاک وجود داشته باشد، دانه‌ها به اندازه‌ی کافی به هم اتصال داشته باشند و فعالیت باکتری‌ها به سمت محل اتصال دانه‌ها هدایت شود زیرا تنها رسوباتی در بهسازی خاک نقش دارند که موجب اتصال دانه‌ها شوند. بدیهی است روش اضافه کردن محلول‌های رسوب‌زا به خاک نیز بر توزیع مکانی رسوب در بدنه خاک اثرگذار است. در هر کدام از تحقیقات قبلی یکی از روش‌های اختلاط، جذب سطحی و تزریق جهت افزودن مواد رسوب‌زا به خاک استفاده شده است و تا به حال مقایسه‌ای بر این روش‌ها صورت نگرفته است. بر همین اساس در پژوهش حاضر، به بررسی اثر روش ساخت نمونه در بهسازی خاک رس به روش رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم پرداخته شده است و سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق با فشار جهت افزودن مواد رسوب‌زا به خاک مورد مقایسه قرار گرفته است. این موضوع در هیچ یک از تحقیقات قبلی مورد بررسی قرار نگرفته و در هر کدام از این تحقیقات یکی از سه روش ذکر شده مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی و مقایسه‌ی روش‌های اضافه کردن مواد افزودنی به خاک جهت

1 Soon

2 Wen

جدول ۱. مشخصات خاک

Table 1. Soil Properties

خصوصیات نمونه‌های خاک		
درصد شن	G	۱/۳
درصد ماسه	S	۶/۷
درصد لای	M	۴۸
درصد رس	C	۴۴
حد خمیری	PL	۲۳
حد روانی	LL	۴۹
شاخص خمیری	PI	۲۶
درصد رطوبت بهینه	OMC	۲۳/۲
حداکثر وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	γ_{dmax}	۱/۶۲
pH	pH	۷

بهره‌گیری مناسب از نتایج تحقیقات موجود و همچنین دستیابی به یک روش کاربردی و جامعِ بهسازی بیولوژیکی حائز اهمیت است. همچنین جهت بهینه‌سازی شرایط رسوب‌زایی، پارامترهای pH و غلظت محلول رسوب‌زا، نوع باکتری و زمان عمل آوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. زیرا همانطور که ذکر شد، پیچیدگی عملکرد باکتری‌ها در رسوب‌زایی زیستی و شرایط خاک در مقیاس میکروسکوپی موجب می‌شود که عوامل مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی در شرایط خاصِ هر پروژه متفاوت باشد.

۲- مواد و روش کار

۲- ۱- خاک

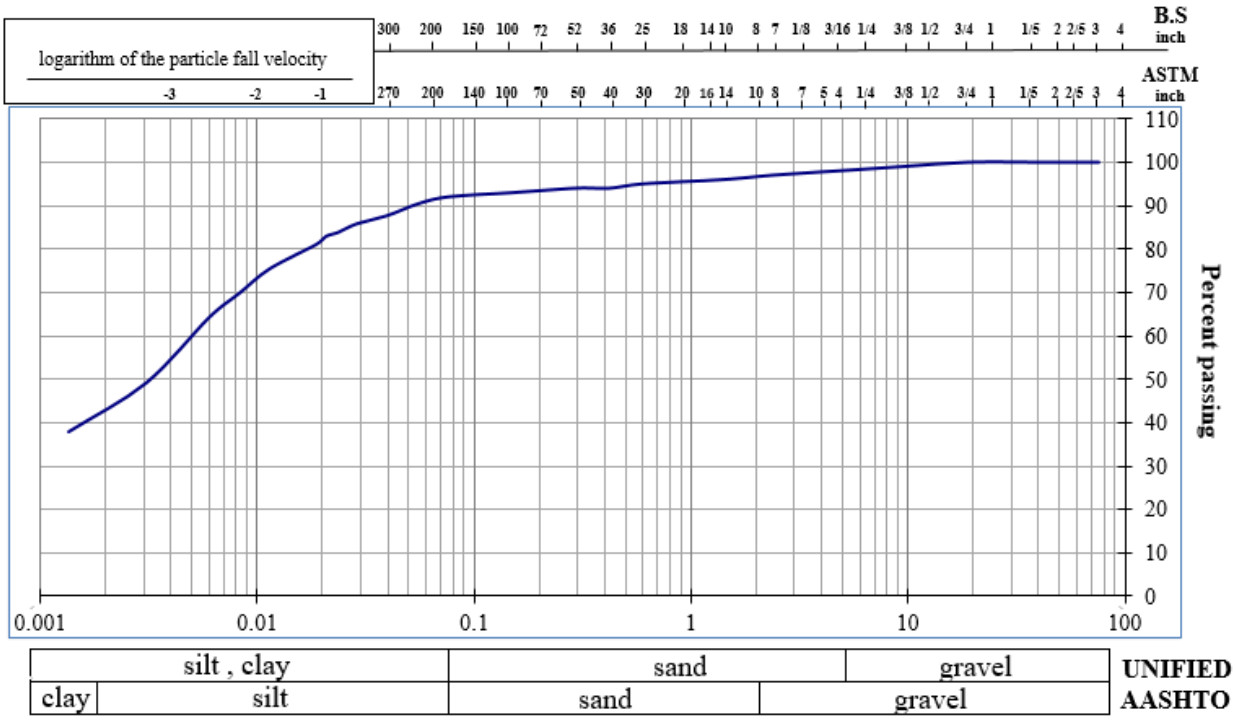
خاک مورد استفاده در این پژوهش، از محل دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی واقع در شرق شهر کرمانشاه از عمق تقریبی یک متری سطح زمین برداشت شده است. این خاک بر اساس آزمایش‌های انجام شده عمدتاً ریزدانه و نرم و سست ارزیابی گردیده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مذکور در جدول ۱ خلاصه شده است و منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۲- ۲- باکتری

در این پژوهش جهت مقایسه‌ی عملکرد میکروارگانیسم‌های کارآمد در بهسازی بیولوژیکی، دو باکتری Bacillus megaterium و Lysini-bacillus boronitolerans مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات این دو باکتری درجدول ۲ ارائه شده است.

۲- ۳- محلول رسوب‌زا

محلول رسوب‌زا شامل اوره و کلسیم کلرید هم مولار محلول در آب می‌باشد. در این پژوهش از اوره با فرمول شیمیایی (CH_4N_2O) با وزن مولکولی ۶۰/۰۶ گرم بر مول و کلسیم کلرید با فرمول شیمیایی ($CaCl_2$) و وزن مولکولی ۱۴۷/۰۲ گرم بر مول استفاده شد. تعیین غلظت بهینه‌ی افزودنی‌ها در هر پروژه با توجه به نوع باکتری و نوع خاک و شرایط منحصر به فرد آن در مقیاس میکروسکوپی ضروری است. زیرا ممکن است با تغییر نوع خاک و باکتری‌های مورد استفاده متفاوت باشد. بر همین اساس، سه غلظت ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار بر اساس تحقیقات قبلی به منظور یافتن مناسب‌ترین غلظت محلول اوره-کلسیم کلرید در ارتباط با باکتری و خاک



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک

Fig. 2. Particle Size Distributions of the Soil Specimens

جدول ۲. مشخصات باکتری

Table 2. Bacteria Characteristics

باکتری	اسم کامل	مشخصات
Bacteria. B.m	Bacillus.Megaterium	Ureas+, From honey
Bacteria. B.124	Lysinibacillus boronitolerans	Ureas+,from Tomato fields

انتخابی مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۳ جزئیات سه محلول رسوب‌زای انتخابی ارائه شده است.

۲- ۴- pH

همانگونه که پیش‌تر اشاره شد باکتری‌هایی در فرآیند رسوب‌زایی مؤثر واقع می‌شوند که قادر به بالا بردن محیط تا مقادیر قلیایی باشند. افزایش محیط شرایط لازم جهت تولید رسوب کربنات کلسیم را فراهم می‌کند. باکتری‌های مورد استفاده در فرآیند هیدرولیز اوره قلیادوست هستند و در محیط‌های قلیایی هنگام مواجهه با pH کمتر، برای بالا بردن pH تا مقدار مطلوب فعالیت اوره‌آزی بیشتری انجام می‌دهند در نتیجه رسوب بیشتری تولید خواهد شد. در محیط‌های اسیدی فعالیت باکتری‌ها مختل می‌شود و روند تشکیل رسوب به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر روند تغییرات pHدر پی فعالیت باکتری‌ها، pH مواد افزودنی و همچنین pH خاک موردِ درمان از عوامل کنترل کننده‌ی روند رسوب‌زایی زیستی می‌باشند. در پژوهش حاضر pH خاک محل پروژه برابر با مقدار ثابت ۷ بود لیکن pH محلول رسوب‌زا در دو مقدار ۷ و ۹ مورد استفاده قرار گرفت تا امکان مقایسه‌ی عملکرد

جدول ۳. مشخصات شیمیایی محلول‌های رسوب‌زا

Table 3. Chemical composition of cementation reagents

غلظت محلول اوره-کلسیم کلرید	مقدار اوره (گرم بر لیتر)	مقدار کلسیم کلرید (گرم بر لیتر)
۰/۲۵ مولار	۱۵/۰۱۵	۳۶/۷۵
۰/۵ مولار	۳۰/۰۳	۷۳/۵۱
۰/۷۵ مولار	۴۵/۰۴۵	۱۱۰/۳

شکل ۳. نمونه‌ی آزمایش تک محوری

Fig. 3. Sample prepared for uniaxial test (UCS)

باکتری‌ها در این دو pH و ارتباط آن با نوع خاک انتخابی وجود داشته باشد.

۲- ۵- روش ساخت نمونه

آزمایش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D 2166 بر نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در قالب‌های تهیه شده از لوله پولیکا با همین ابعاد ساخته شدند. جهت سهولت خارج شدن نمونه بدون تخریب احتمالی، لوله‌ها قبل از ساخت نمونه، در امتداد ارتفاع برش خوردند و با بست‌های فلزی مهار شدند (شکل ۳).

در تهیه نمونه‌ها از جهت نحوه‌ی اضافه کردن مواد افزودنی، از سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق با فشار استفاده شد که در ادامه هر کدام به صورت جداگانه توضیح داده شده است.

۲- ۵- ۱- ساخت نمونه به روش اختلاط

در روش اختلاط، مواد افزودنی شامل محلول باکتری و محلول اوره- کلسیم کلرید با فاصله زمانی به خاک اضافه شد. در مرحله‌ی اول مقدار ۲۳ میلی‌لیتر از محلول باکتری به خاک خشک عبوری از الک ۸ اضافه گردید و کاملاً مخلوط شد سپس در کیسه‌ی پلاستیکی زیپ‌دار به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد. این کار به لانه‌گزینی باکتری‌ها در خاک و وفق‌پذیری آن‌ها با محیط جدید کمک می‌کند. در مرحله بعد به خاکِ حاوی محلول باکتری، ۲۳ میلی‌لیتر محلول رسوب‌زا شامل اوره و کلسیم کلرید هم‌مولار (هر بار به غلظت مورد نظر با توجه به جدول ۳) اضافه شد و کاملا مخلوط گردید. سپس خاک حاوی محلول‌های لازم، جهت تهیه‌ی نمونه آزمایش تک محوری در قالب کوبیده شد. نمونه‌ی آماده شده در کیسه زیپ‌دار به مدت زمان لازم نگهداری گردید و پس از آن، آماده‌ی انجام آزمایش تک محوری شد (شکل ۴).

۲- ۵- ۲- ساخت نمونه به روش جذب سطحی

در روش جذب سطحی ابتدا خاک با تراکم مورد نظر درون قالب کوبیده شد و سپس مواد افزودنی لازم، به صورت جذب سطحی به نمونه اضافه

شکل ۴. مراحل ساخت نمونه به روش اختلاط

Fig. 4. Sample making by mixing method

شکل ۵. مراحل ساخت نمونه به روش جذب سطحی

Fig. 5. Sample making by adsorption method

گردید. برای جلوگیری از به هم خوردگی سطح نمونه و شستگی خاک، از توری فلزی و کاغذ صافی در بالا و پایین نمونه استفاده شد. نمونه در ظرفی حاوی شن قرار داده شد که امکان خروج محلول از زیر نمونه فراهم باشد. مواد افزودنی در مراحل جداگانه به نمونه‌ی خاک اضافه شدند. در مرحله‌ی اول مقدار محلول باکتری مورد نظر به ظرف فوقانی اضافه شد و بالای نمونه کاملا عایق شد تا هدر رفت رطوبت از سطح نمونه در محاسبات درصد رطوبت ایجاد خطا نکند. بعد از گذشت ۲۴ساعت، محلول اوره–کلسیم کلرید در چند مرحله به خاک اضافه شد. پس از افزودن محلول‌های لازم، به مدت ۱۰ روز به نمونه فرصت رسوب‌زایی داده شد (شکل ۵).

۲– ۵– ۳– ساخت نمونه به روش تزریق با فشار

در این روش مانند روش جذب سطحی، ابتدا خاک با درصد تراکم مورد نظر در قالب کوبیده شد و برای جلوگیری از بهم ریختگی سطح نمونه در هنگام تزریق، از یک لایه ماسه در بالای نمونه و توری فلزی و کاغذ صافی در بالا و پایین نمونه استفاده شد.

برای ایجاد جریان با فشار، از ستآپ نشان داده شده در شکل ۶ استفاده شد که شامل قالبی برای جای‌گیری نمونه است که با شلنگ به مخزن متصل است. محلول باکتری و محلول اوره–کلسیم کلرید در دو مرحله با فاصله زمانی ۲۴ ساعت با فشار ۲ بار به خاک اضافه شدند.

شکل ۶. ساخت نمونه به روش تزریق با فشار

Fig. 6. Sample making by pressure injection method

۲- ۵- ۴- نمونه‌های شاهد

تحقیقات نشان داده است که رفتار خاک تا حد زیادی متأثر از روش نمونه‌سازی می‌باشد. در مورد خاک رس میزان رطوبت نمونه هنگام آزمایش اثر بسزایی بر نتایج آزمایش دارد همچنین میزان تراکم نمونه و همگنی و یکنواختی آن تأثیر مسقیمی بر نتایج دارد. لذا در این تحقیق علاوه بر ساخت نمونه‌ها با تراکم یکسان و سعی بر همگن بودن هر نمونه، به منظور مقایسه‌ی صحیح درصد بهسازیِ هر روش، یک یا چند نمونه‌ی شاهد همراه با نمونه‌های بهسازی شده در هر روش (و در شرایطی مشابه با شرایط آن‌ها) به صورت جداگانه تهیه شد. نتایج هر سری از آزمایش‌ها با نمونه‌ی شاهد خودش که از نظر درصد رطوبت نهایی و مراحل رطوبت دهی و شرایط نگهداری یکسان بود مقایسه شد تا خطاهای احتمالی کاهش یابد.

۳- طراحی آزمایش‌ها

پژوهش حاضر بر اساس مطالعه‌ی اثر "روش ساخت نمونه" بر بهبود مقاومت فشاری در بهسازی به روش رسوب‌زایی زیستی کربنات کلسیم شکل گرفته است. دیگر پارامترهای مورد بررسی شامل اثرِ غلظت و pH محلول رسوب‌زا و زمان درمان، جهت بهینه‌سازی اختصاصی شرایط رسوب‌زایی در خاک رس مورد مطالعه با دو باکتری مختلف، انجام پذیرفته است. در بخش دیگری از پژوهش اثر رسوب‌زایی زیستی بر نتایج آزمایش تحکیم و حدود اتربرگ مورد مطالعه قرار گرفته است. برای هر سری از آزمایش‌های فوق، نمونه‌ی شاهد بهسازی نشده با شرایط مشابه، جهت به حداقل رساندن خطاهای احتمالی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. جهت سهولت مطالعه این تحقیق و ارائه بهتر نتایج، جزئیاتِ آزمایش‌های انجام گرفته به تفکیک نوع آزمایش در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

۴- ۱- مقاومت فشاری تک محوری خاک

۴- ۱- ۱- اثر گونه‌ی باکتری

جهت بررسی و مقایسه‌ی اثر گونه‌ی باکتری بر مقاومت فشاری خاک، آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده با دو گونه باکتریِ Bacillus.Megaterium (B.m)و Lysinibacillus boronitolerans (124.B)، مطابق با آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ جدول ۴ انجام پذیرفته و با نمونه‌ی شاهد مطابق با آزمایش شماره ۱ مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۷ ارائه شده است.

در ادامه به منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر نتایج، منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از این آزمایش‌ها، در یک نمودار ارائه گردیده است (شکل ۷).

طبق نمودار شکل ۷، بهسازی بیولوژیکی خاک مورد نظر برای هر دو

جدول ۴. جزئیات و شماره‌گذاری آزمایش‌های تک محوری انجام شده

Table 4. Details and numbering of UCS test

شماره تست	وضعیت بهسازی	مشخصات محصولات واکنش				زمان درمان (روز)
		نوع باکتری	غلظت محلول سیمانتاسیون (مولار)	pH محلول سیمانتاسیون	روش ساخت	
۱	بهسازی نشده	—	—	—	اختلاط	۱۰
۲	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	اختلاط	۱۰
۳	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۹	اختلاط	۱۰
۴	بهسازی شده	B.m	۰/۵	۹	اختلاط	۱۰
۵	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۷	اختلاط	۱۰
۶	بهسازی شده	B.124	۰/۲۵	۹	اختلاط	۱۰
۷	بهسازی شده	B.m	۰/۷۵	۹	اختلاط	۱۰
۸	بهسازی شده	B.124	۰/۷۵	۹	اختلاط	۱۰
۹	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۷	اختلاط	۱۰
۱۰	بهسازی نشده	—	—	—	جذب سطحی	۱۰
۱۱	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	جذب سطحی	۱۰
۱۲	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۹	جذب سطحی	۱۰
۱۳	بهسازی نشده	—	—	—	تزریق	۱۰
۱۴	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	تزریق	۱۰
۱۵	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۹	تزریق	۱۰
۱۶	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	اختلاط	۴۰

جدول ۵. جزئیات و شماره‌گذاری آزمایش‌های حدود اتربرگ انجام شده

Table 5. Details and numbering of Atterberg Limits Test

شماره تست	وضعیت بهسازی	مشخصات محصولات واکنش			زمان درمان (روز)
		نوع باکتری	غلظت محلول سیمانتاسیون (مولار)	pH محلول سیمانتاسیون	
۱۷	بهسازی نشده	—	—	—	۲
۱۸	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	۲
۱۹	بهسازی شده	B.124	۰/۵	۹	۲

جدول ۶. جزئیات و شماره گذاری آزمایش های تحکیم انجام شده

Table 6. Details and numbering of Consolidation Test

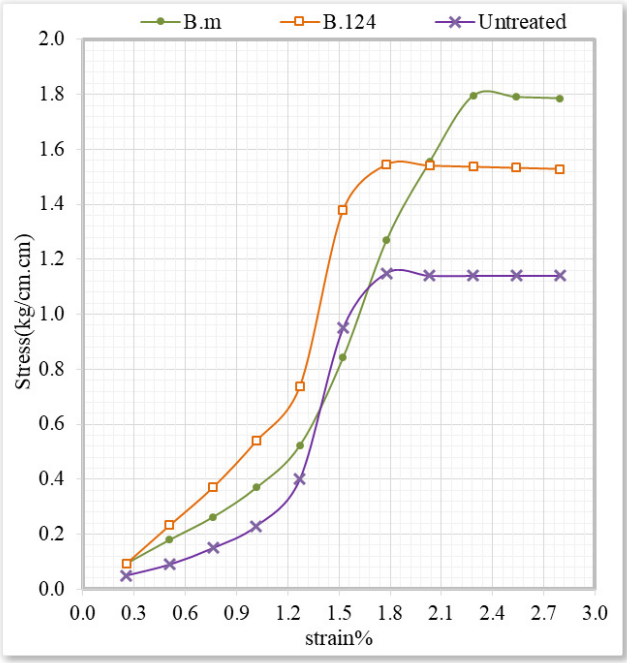
شماره تست	وضعیت بهسازی	مشخصات محصولات واکنش			زمان درمان (روز)
		نوع باکتری	غلظت محلول سیمانتاسیون (مولار)	pH محلول سیمانتاسیون	
۲۰	بهسازی نشده	—	—	—	۷
۲۱	بهسازی شده	B.m	۰/۲۵	۹	۷

جدول ۷. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر نوع باکتری

Table 7. Details and results of uniaxial test to evaluate the effect of bacterial type

مشخصات نمونه	سطح اولیه:	cm^2	۲۳/۷۶	مشخصات دستگاه	سرعت دستگاه:	mm/min	۰/۵
	رطوبت:		٪۱۵				
	دانسیته خشک:	gr/cm^3	۱/۲۳		ضریب نیروسنج:	kg/n	۰/۳۷

پارامتر مورد بررسی: نوع باکتری	شماره آزمایش	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	کرنش گسیختگی (٪)
نمونه‌ی شاهد	۱	۱/۱۵	۱/۷۸
B.m	۲	۱/۸۰	۲/۲۹
B.124	۳	۱/۵۵	۱/۷۸



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری Bacillus.Megaterium(B.m) و Lysinibacillus boronitolerans(B.124) در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱ تا ۳ جدول ۴)

Fig. 7. Stress-strain diagram of samples stabilized with Bacillus.Megaterium(B.m) and boronitolerans (B.124) comparison with unstabilized sample (According to experiments 1 to 3 in Table 4)

گونه‌ی باکتری، با افزایش مقاومت فشاری همراه بوده اما میزان این افزایش متفاوت بوده است. بهبود مقاومت فشاری ۱۰ روزه‌ی نمونه خاک بهسازی شده با باکتری B.124 چیزی حدود ۳۴ درصد بوده در حالی که این مقدار برای باکتری B.megaterium چیزی حدود ۵۶ درصد است.

۴- ۱- ۲- اثر غلظت محلول رسوب‌زا

جهت تعیین مناسب‌ترین غلظت محلول رسوب‌زا از بین سه غلظتِ انتخابی، نتایج آزمایش‌های ۲ تا ۴ و ۶ تا ۸ جدول ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. این آزمایش‌ها شامل آزمایش تک محوری بر حالت‌های مختلفی از نمونه‌های بهسازی شده با دو نوع باکتری و محلول رسوب‌زا با سه غلظت ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار است که نتایج آن‌ها در جدول ۸ و شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد.

در بهسازی بیولوژیکی با استفاده از باکتری B.124 ، بیشترین بهبود مقاومت فشاری در غلظت ۰/۵ M محلول رسوب‌زا مشاهده می‌شود، در حالی که بیشترین افزایش مقاومت در بهسازی با باکتری B.megaterium در غلظت ۰/۲۵ M محلول رسوب‌زا اتفاق افتاده است. در تحقیقات قبلی در زمینه‌ی بررسی اثر غلظت محلول رسوب‌زا بر بهسازی خاک ماسه‌ای با باکتری B.megaterium، بهترین عملکرد رسوب‌زایی را در غلظت ۰/۵ M محلول رسوب‌زا گزارش شد. این تمایز نشان دهنده‌ی تأثیر نوع خاک و شرایط واکنش بر عملکرد باکتریِ مشخص است. همچنین از میزان بهبود مقاومت نمونه‌ها در غلظت ۰/۷۵ M محلول رسوب‌زا مشاهده می‌شود که بر خلاف تصور، افزایش غلظت محلول رسوب‌زا اثر مثبتی بر رسوب‌زایی بیولوژیکی نداشته و حتی عاملی محدود کننده بوده است.

۴- ۱- ۳- اثر pH محلول رسوب‌زا

در این پژوهش، pH محلولِ اوره-کلسیم کلرید در دو مقدار خنثی ۷ و قلیایی ۹ در بهسازی بیولوژیکی به کار برده شده است. جهت بررسی و مقایسه‌ی اثر این دو pH ، آزمایش تک محوری بر نمونه‌های بهسازی شده برای pH=۷ مطابق آزمایش‌های شماره ۵ و ۹ جدول ۴ و برای pH=۹ مطابق تست‌های ۲ و ۳ جدول ۴ انجام شده است. در جدول ۹ مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی حاصل از این آزمایش‌ها مشاهده می‌شود.

در ادامه، نمودارهای تنش-کرنش آزمایش‌ها با متغیر pH، به تفکیک نوع باکتری ارائه شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

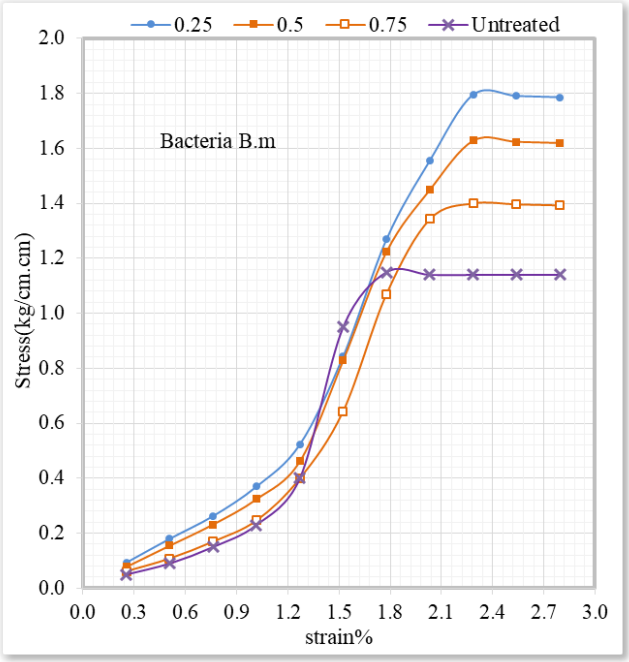
همانطور که مشاهده می‌شود بهترین عملکرد باکتری‌ها در pH=۹

جدول ۸. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر غلظت محلول رسوب‌زا

Table 8. Details and results of uniaxial test to evaluate the effect of Cementation reagent

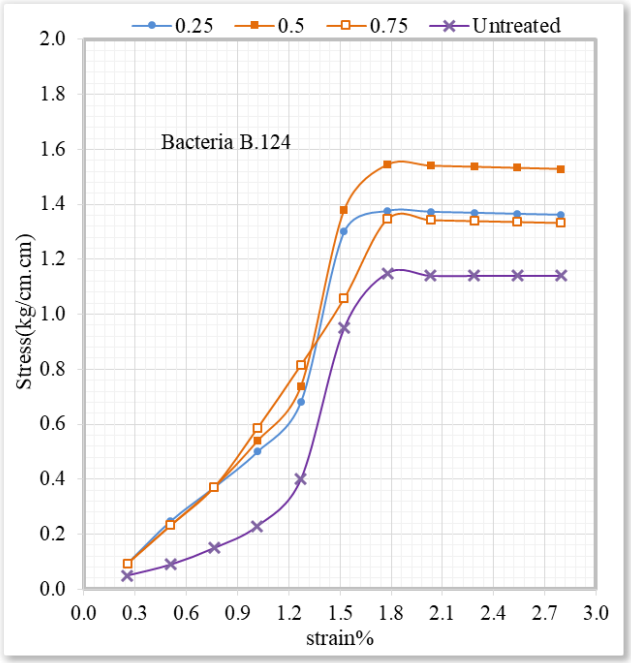
مشخصات نمونه	سطح اولیه:	cm^2	۲۳/۷۶	مشخصات دستگاه	سرعت دستگاه:	mm/min	۰/۵
	رطوبت:		٪۱۵				
	دانسیته خشک:	gr/cm^3	۱/۲۳		ضریب نیروسنج:	kg/n	۰/۳۷

پارامتر مورد بررسی: غلظت محلول رسوب‌زا	شماره آزمایش	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	کرنش گسیختگی (٪)
نمونه‌ی شاهد	۱	۱/۱۵	۱/۷۸
۰/۲۵ مولار	۲	۱/۸	۲/۲۹
	۶	۱/۳۸	۱/۵۲
۰/۵ مولار	۳	۱/۵۵	۱/۷۸
	۴	۱/۶۳	۲/۲۹
۰/۷۵ مولار	۷	۱/۴	۲/۲۹
	۸	۱/۳۵	۱/۷۳



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری Bacillus.Megaterium(B.m) در سه غلظت محلول رسوب‌زا ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱، ۲، ٤ و ۷ جدول ٤)

Fig. 8. Stress-strain diagram of samples stabilized with Bacillus.Megaterium(B.m) and three concentrations of cementation reagent 0.25, 0.5 and 0.75 M comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,2,4 and 7 in Table 4)



شکل ۹. نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری (Lysinibacillus boronitolerans(B.124 در سه غلظت محلول رسوب‌زا ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با تست‌های ۱، ۳، ۶ و ۸ جدول ۴)

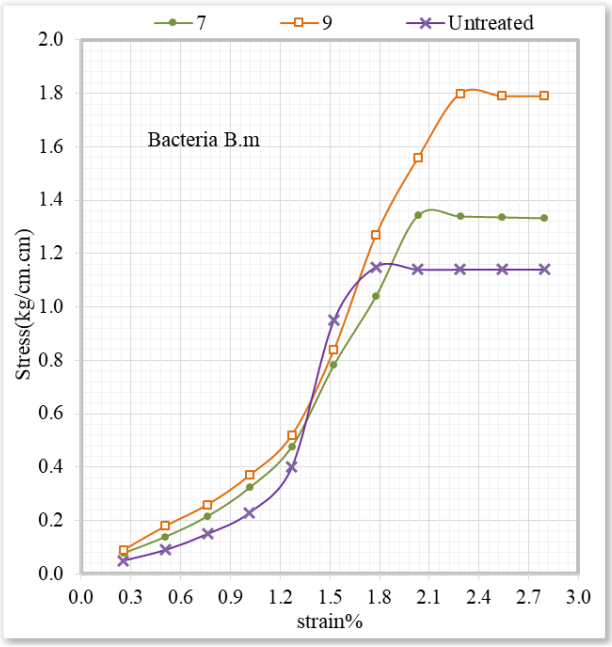
Fig. 9. Stress-strain diagram of samples stabilized with Lysinibacillus boronitolerans (B.124) and three concentrations of cementation reagent 0.25, 0.5 and 0.75 M comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,3,6 and 8 in Table 4)

جدول ۹. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر pH محلول رسوب‌زا

Table 9. Details and results of uniaxial test to evaluate the effect of pH of the precipitate solution

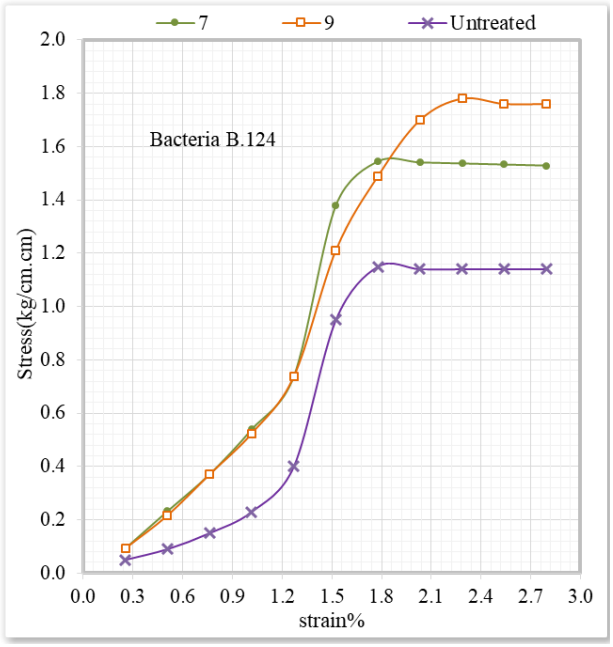
مشخصات نمونه	سطح اولیه:	cm^2	۲۳/۷۶	مشخصات دستگاه	سرعت دستگاه:	mm/min	۰/۵
	رطوبت:		٪۱۵				
	دانسیته خشک:	gr/cm^3	۱/۲۳		ضریب نیروسنج:	kg/n	۰/۳۷

پارامتر مورد بررسی: pH محلول رسوب‌زا	شماره آزمایش	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	کرنش گسیختگی (٪)
نمونه‌ی شاهد	۱	۱/۱۵	۱/۷۸
pH=۷	۹	۱/۳۴	۲/۰۳
	۵	۱/۳۶	۱/۹۱
pH=۹	۲	۱/۸	۲/۲۹
	۳	۱/۵۵	۱/۷۸



شکل ۱۰. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری Bacillus.Megaterium(B.m) و محلول رسوب‌زا در دو مقدار pH=۷ و pH=۹ در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱، ۲ و ۹ جدول ۴)

Fig. 10. Stress-strain diagram of samples stabilized with Bacillus.Megaterium(B.m) and two pH value of cementation reagent 7 and 9 comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,2 and 9 in Table 4)



شکل ۱۱. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری Lysinibacillus boronitolerans(B.124) و محلول رسوب‌زا در دو مقدارpH=۷ و pH=۹ در مقایسه با نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی تثبیت نشده (مطابق با آزمایش‌های ۱، ۳ و ۵ جدول۴)

Fig. 11. Stress-strain diagram of samples stabilized Lysinibacillus boronitolerans (B.124) and two pH value of cementation reagent 7 and 9. comparison with unstabilized sample (According to experiments 1,3 and 5 in Table 4)

جدول ۱۰. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر روش ساخت نمونه

Table 10. Details and results of uniaxial test to evaluate effect of sample making method

مشخصات نمونه	سطح اولیه:	۲۳/۷۶	cm^2	مشخصات دستگاه	سرعت دستگاه:	۰/۵ mm/min
	رطوبت:	٪۱۵				
	دانسیته خشک:	۱/۲۳	gr/cm^3		ضریب نیروسنج:	۰/۳۷ kg/n

پارامتر مورد بررسی: روش ساخت نمونه	شماره آزمایش	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	کرنش گسیختگی (٪)
روش اختلاط	۱	۱/۱۵	۱/۷۸
	۲	۱/۸	۲/۲۹
	۳	۱/۵۵	۱/۷۸
روش جذب سطحی	۱۰	۱/۰۷	۲/۲۹
	۱۱	۲/۸۷	۲/۲۳
	۱۲	۲/۲۴	۲/۳۱
روش تزریق	۱۳	۱/۱۱	۲/۲۹
	۱۴	۱/۷۳	۲/۰۱
	۱۵	۱/۵۸	۲/۲۸

اتفاق افتاده است و در واقع باکتری‌ها در محدوده‌ی قلیایی عملکرد بهتری داشتند.

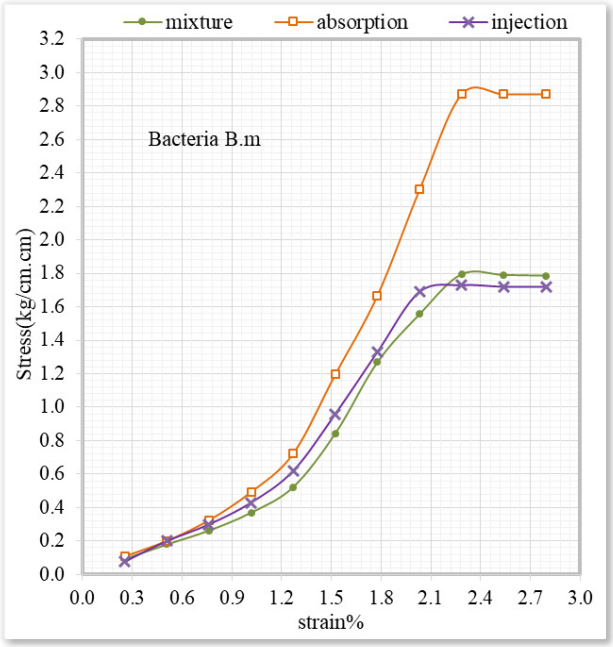
۴- ۱- ۴- اثر روش ساخت نمونه

جهت بررسی اثر روش ساخت نمونه، نتایج آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ جدول ۴ مربوط به روش اختلاط، آزمایش‌های ۱۱ و ۱۲ جدول ۴ مربوط به روش جذب سطحی و آزمایش‌های ۱۴ و ۱۵ جدول ۴ مربوط به روش تزریق مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در هر روش نمونه‌ی شاهد با شرایط مشابه (مقدار و زمان رطوبت‌دهی مشابه با این تفاوت که در نمونه شاهد، آب جایگزین محلول‌های رسوب‌ساز شده است) طبق آزمایش‌های ۱، ۱۰ و ۱۳ جدول ۴ ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱۰ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

نتایج حاکی از آن است که نمونه‌های بهسازی شده به روش جذب سطحی، نسبت به روش اختلاط و تزریق مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند. تفسیر این نتایج بدون بررسی‌های دقیق میکروسکوپی قطعی نمی‌باشد اما آنچه از مقایسه‌ی نتایج آزمایش تک محوری واضح است این است که اضافه کردن محلول‌های رسوب‌ساز به خاک پس از ساخت نمونه، در جای‌گیری مناسب آن‌ها بین دانه‌های خاک، به نسبت روش اختلاط، مؤثرتر عمل می‌کند.

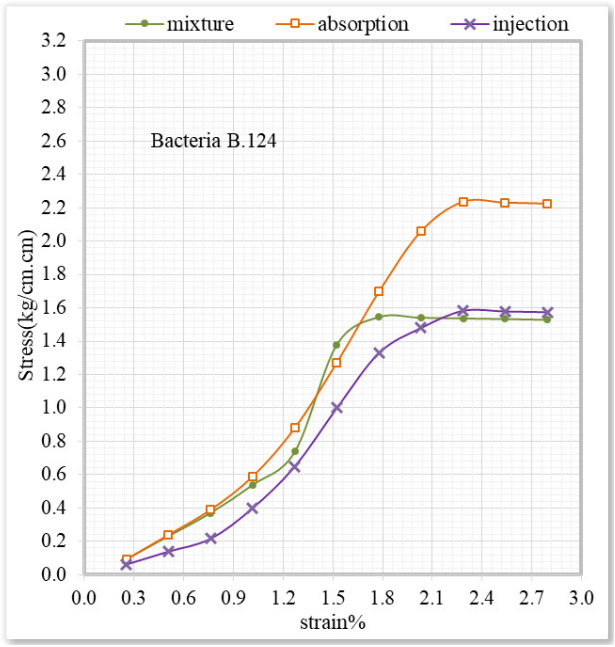
تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که فقط آن دسته از رسوبات در بهسازی بیولوژیکی مؤثر واقع می‌شوند که موجب پیوند دانه‌های خاک شوند و شکل‌گیری رسوب در فضاهای خالی یا سطوح دانه‌ها تقریباً اثری بر بهبود خواص خاک ندارد. در روش‌های جذب سطحی و تزریق، در واقع به محلول‌ها اجازه داده می‌شود که بین دانه‌های خاک به سمت کنج‌ها که محل اتصال دانه‌هاست حرکت کنند و در نتیجه منجر به تشکیل رسوب مؤثر در محل اتصال دانه‌ها شوند.

از بین روش‌های افزودن محلول‌ها پس از ساخت نمونه، روش جذب سطحی عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش تزریق داشته است که ظاهراً به فشار تزریق بیش از حد به نسبت تراکم نمونه برمی‌گردد و در واقع نفوذ محلول به صورت جذب سطحی بر اثر گرانش، برای میزان تراکم نمونه‌های این پژوهش عملکرد مناسب‌تری داشته است. خارج شدن سریع‌تر و بیشتر محلول‌ها از ته نمونه در حین انجام تزریق تأیید کننده‌ی این موضوع بود. در



شکل ۱۲. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری(Bacillus.Megaterium(B.m به سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق (مطابق با آزمایش‌های ۲ ، ۱۱ و ۱٤ جدول۴)

Fig. 12. Stress-strain diagram of samples stabilized with Bacillus.Megaterium(B.m) by three methods of mixing, adsorption, and injection (According to experiments 2,11 and 14 in Table 4)



شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری (Lysinibacillus boronitolerans(B.124 به سه روش اختلاط، جذب سطحی و تزریق (مطابق با آزمایش‌های ۳، ۱۲ و ۱۵ جدول۴)

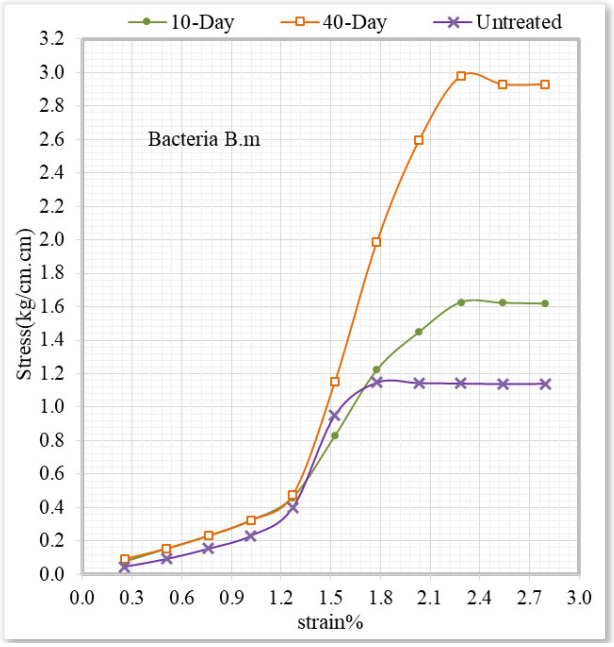
Fig. 13. Stress-strain diagram of samples stabilized with Lysinibacillus boronitolerans (B.124) by three methods of mixing, adsorption, and injection (According to experiments 3,12 and 15 in Table 4)

جدول ۱۱. جزئیات و نتایج آزمایش تک محوری جهت بررسی اثر زمان

Table 11. Details and results of uniaxial test to evaluate effect of of treatment duration

مشخصات نمونه	سطح اولیه:	cm^2	۲۳/۷۶	مشخصات دستگاه	سرعت دستگاه:	mm/min	۰/۵
	رطوبت:		٪۱۵				
	دانسیته خشک:	gr/cm^3	۱/۲۳		ضریب نیروسنج:	Kg/n	۰/۳۷

پارامتر مورد بررسی: زمان	شماره تست	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	کرنش گسیختگی (٪)
۱۰ روز	۱	۱/۱۵	۱/۷۸
	۲	۱/۸۰	۲/۲۹
۴۰ روز	۱۶	۲/۹۸	۲/۳۷



شکل ۱۴. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با باکتری Bacillus.Megaterium(B.m) در دو زمان ۱۰ و ۴۰ روز (مطابق با آزمایش‌های ۲ ، ۱ و ۱۶ جدول ۴)

Fig. 14. Stress-strain diagram of samples stabilized with Bacillus.Megaterium(B.m) in 10 and 40 days (According to experiments 1,2 and16 in Table 4)

واقع محلول فرصت کمتری برای جای‌گیری بین خاک داشته است و شاید تعداد دفعات تزریق بیشتری مورد نیاز بوده است.

۴- ۱- ۵- اثر زمان عمل‌آوری

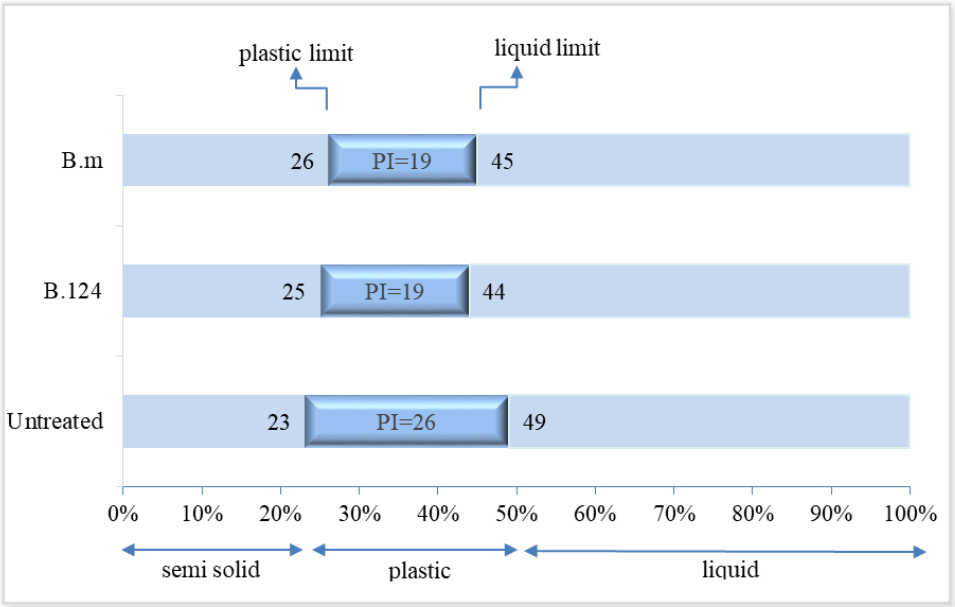
جهت بررسی اثر زمان بر بهبود مقاومت فشاری خاک، نتایج آزمایش‌های ۱، ۲ و ۱۶ جدول ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. این آزمایش‌ها شامل آزمایش تک محوری بر خاک بهسازی نشده و بهسازی شده با باکتری B.megaterium در دو زمان ده و چهل روز می‌باشد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول ۱۱ و شکل ۱۴ ارائه شده است.

با گذشت زمان درمان از ده روز به چهل روز، افزایش قابل ملاحظه در مقاومت فشاری محصور نشده مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی ادامه‌ی روند رسوب‌زایی توسط باکتری در حضور مواد واکنش تا چهل روز پس از افزودن مواد رسوب‌زا به نمونه خاک است. مقاومت ده روزه‌ی نمونه چیزی حدود ۱/۵۶ برابر و مقاومت چهل روزه‌ی آن حدود ۲/۶ برابر بهبود یافته است

جدول ۱۲. نتایج آزمایش حدود اتربرگ مطابق با آزمایش‌های جدول ۵

Table 12. Test results of the Atterberg Limit (According to Table 5)

نوع باکتری	شماره آزمایش	حد خمیری	حد روانی	شاخص خمیری
نمونه‌ی شاهد	۱۷	۲۳	۴۹	۲۶
B.m	۱۸	۲۶	۴۵	۱۹
B.124	۱۹	۲۵	۴۴	۱۹



شکل ۱۵. شاخص خمیری نمونه‌های حاوی محلول‌های رسوب‌ساز با دو باکتری Bacillus.Megaterium(B.m) و (Lysinibacillus boronitolerans(B.124 و نمونه‌ی شاهد

Fig. 15. Plasticty index of samples containing biocementation solution with two bacteria Bacillus. Megaterium(B.m) and Lysinibacillus boronitolerans (B.124)

و در واقع تا روز دهم درمان تقریباً ۶۰ درصد از بهبود چهل روزه‌ی نمونه اتفاق افتاده است.

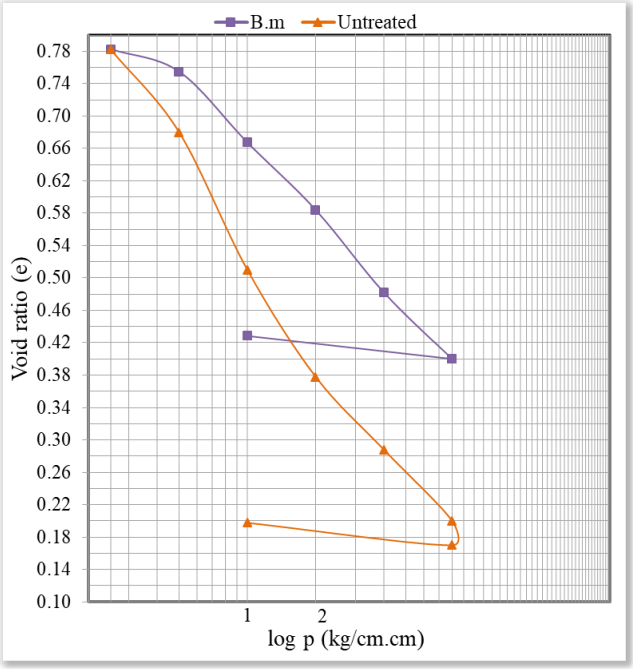
۴- ۲- حدود اتربرگ

جهت بررسی اثر محلول‌های رسوب‌زا بر حدود اتربرگ خاک، نتایج آزمایش‌های جدول ۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. این آزمایش‌ها شامل آزمایش حدود اتربرگ بر نمونه خاک بدون تثبیت و نمونه‌های حاوی محلول رسوب‌زا با باکتری‌های B.megaterium و B.124 می‌باشد. نتایج این آزمایش‌ها به صورتِ میانگینِ دو تکرار، در جدول ۱۲ و نمودار شماتیک شکل ۱۵ ارائه شده است.

مشاهده می‌شود حضور مواد رسوب‌ساز و باکتری، موجب کاهش شاخص خمیری از ۲۶ به ۱۹ شده است.

۴- ۳- تحکیم

جهت بررسی اثر محلول‌های رسوب‌ساز بر نسبت منافذ خاک، آزمایش تحکیم با تنش یکسان مطابقِ آزمایش‌های جدول ۶ بر نمونه‌های بهسازی



شکل ۱۶. نمودار "نسبت تخلخل-لگاریتم فشار" حاصل از آزمایش تحکیم نمونه‌ی بهسازی نشده مطابق آزمایش شماره ۲۰ جدول ۶ و نمونه بهسازی شده با باکتری Bacillus.Megaterium(B.m) مطابق آزمایش شماره ۲۱ جدول ۶

Fig. 16. Void ratio-logarithm of pressure" diagram obtained from the consolidation test of an untreated sample and sample treated with Bacillus.Megaterium(B.m) (According to experiments 21 in Table 6).

جدول ۱۳. شاخص فشردگی و تورم دو نمونه‌ی تثبیت نشده و تثبیت شده با باکتری Bacillus.Megaterium(B.m)

Table 13. Cc and Cs Index of an untreated sample and a sample treated with Bacillus.Megaterium(B.m)

وضعیت بهسازی	شاخص فشردگی (C_c)	شاخص تورم (C_s)
تثبیت نشده	۰/۰۷۷	۰/۰۰۴۷
تثبیت شده با باکتری B.m	۰/۰۳۸	۰/۰۰۴

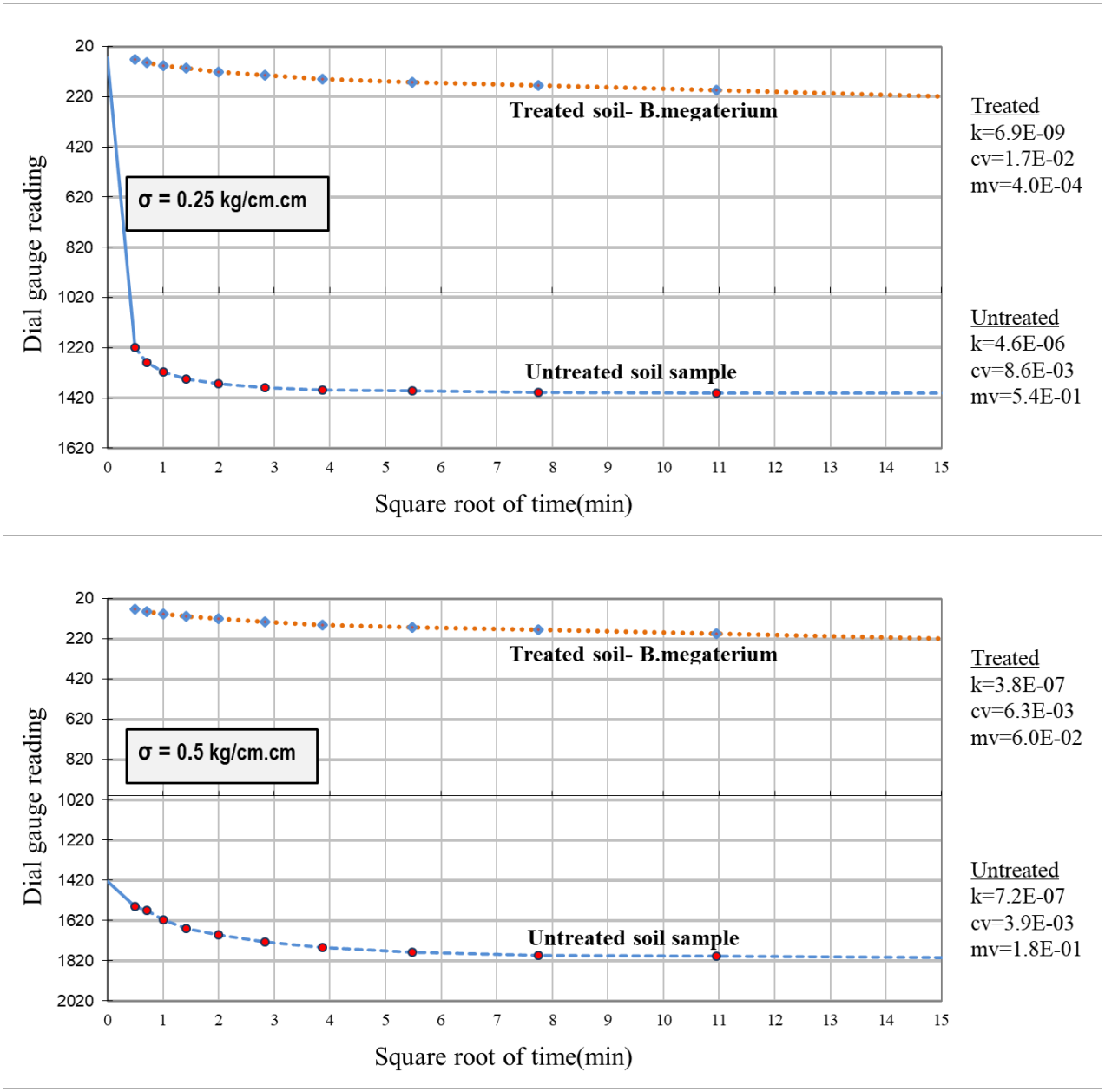
نشده و بهسازی شده با باکتری B.megaterium انجام گرفت. در شکل ۱۶ نمودار نسبت تخلخل-لگاریتم فشار برای خاک بهسازی شده در مقایسه با نمونه طبیعی قابل مشاهده است.

در نمونه‌ی بهسازی نشده، تغییرات نسبت منافذ در ابتدا و انتهای آزمایش بسیار زیاد است در نتیجه نمونه نشست زیادی داشته است (در حدود Cm ۰/۶۶)، به طوری که رفتار خاک عادی تحکیم یافته است. اما در نمونه‌ی بهسازی شده، این اختلاف بسیار کمتر است (در حدود Cm ۰/۴) و رفتار خاک تا حدود فشار ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع پیش تحکیم یافته و با افزایش فشار، رفتار عادی تحکیم می‌شود.

مقادیر ضرایب C_c و C_s قبل و بعد از تثبیت در جدول ۱۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد شاخص فشردگی خاک پس از تثبیت به نصف کاهش یافته است. این بدان معنی است که نمونه خاک بهسازی شده از نظر نشست‌پذیری، مشابه خاک پیش تحکیم یافته عمل می‌کند.

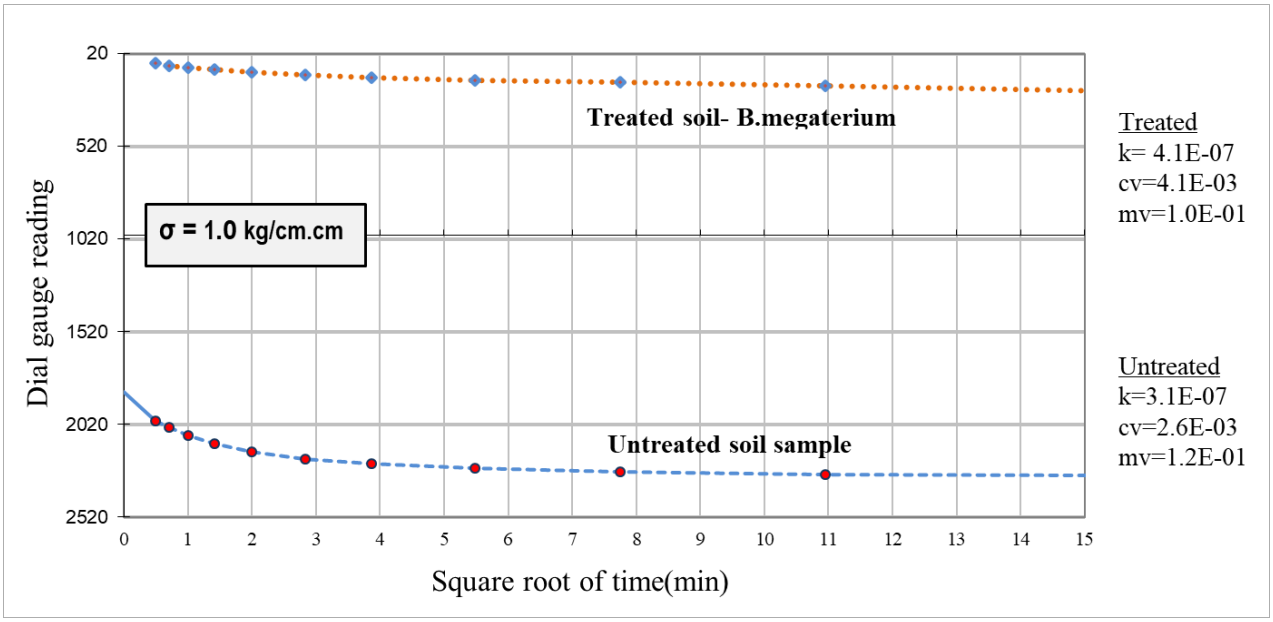
بنابراین وجود محلول‌های رسوب‌زا و در نتیجه رسوب‌زایی زیستی بین دانه‌های خاک، موجب بهبود شرایط خاک و افزایش مقاومت آن در برابر نشست‌پذیری گردیده است.

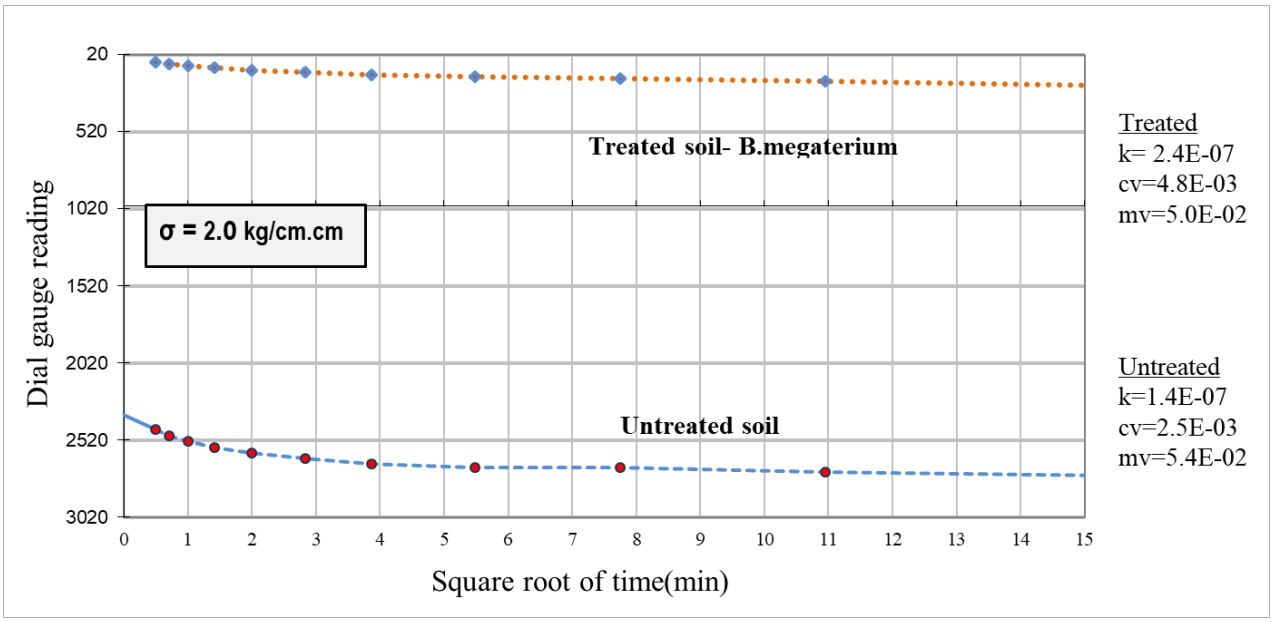
شکل ۱۷ منحنی نشست – جذر زمان را در تنش‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای دو حالت تثبیت نشده و تثبیت شده با



شکل ۱۷. منحنی تغییرات گیج قائم نسبت به جذر زمان در تنش‌های مختلف (ادامه دارد)

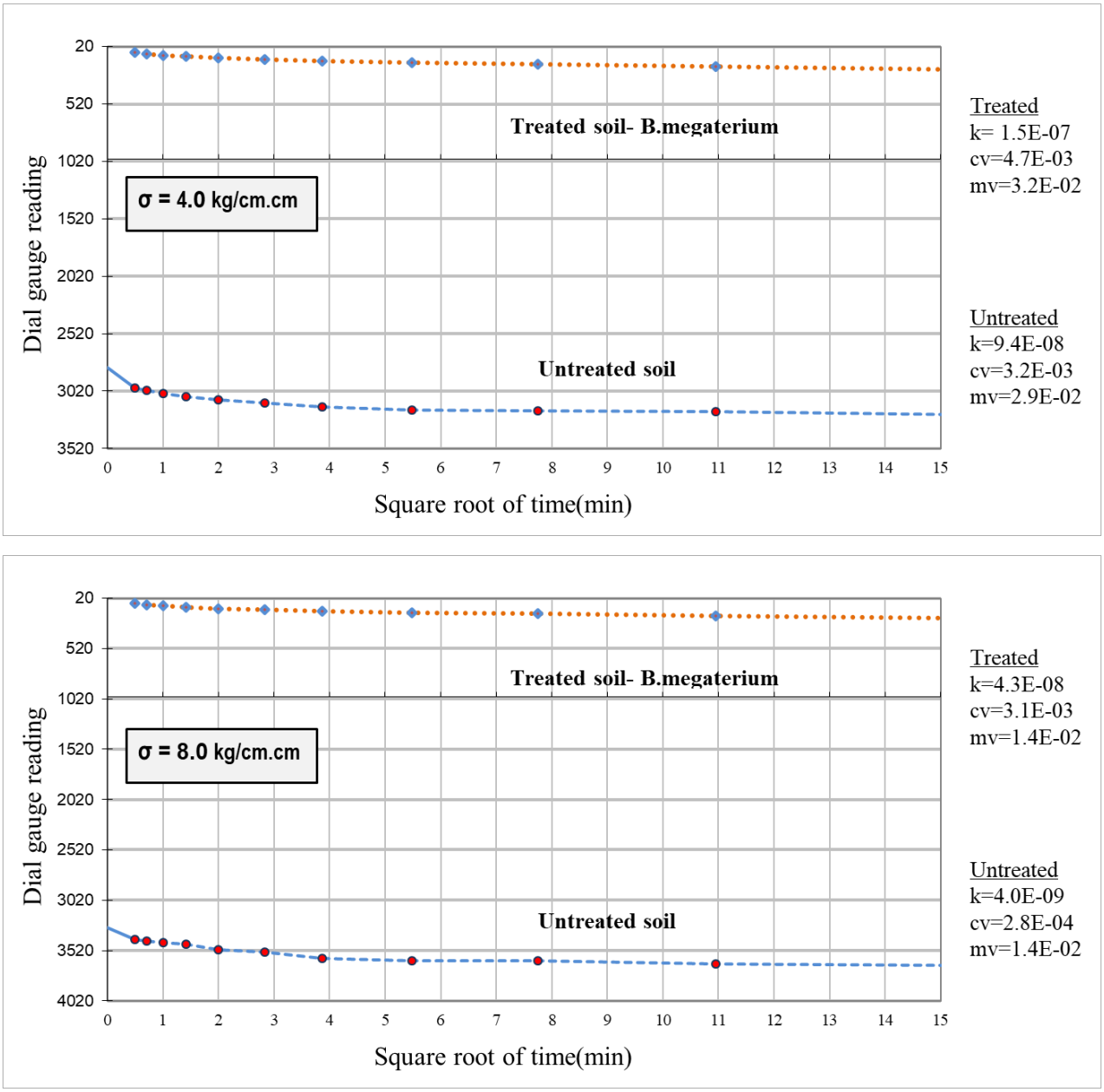
Fig. 17. Dial gauge reading / Square root of time (min) curve at different stresses (Continude)





شکل ۱۷. منحنی تغییرات گیج قائم نسبت به جذر زمان در تنش‌های مختلف (ادامه دارد)

Fig. 17. Dial gauge reading / Square root of time (min) curve at different stresses (Continude)



شکل ۱۷. منحنی تغییرات گیج قائم نسبت به جذر زمان در تنش‌های مختلف

Fig. 17. Dial gauge reading / Square root of time (min) curve at different stresses.

باکتری B.megaterium نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد بهسازی و تثبیت خاک به روش MICP باعث کاهش ضریب نفوذپذیری و افزایش ضریب تحکیم می‌گردد. همچنین کاهش قابل ملاحظه‌ای در شیب منحنی نشست- جذر زمان به خصوص در بخش ابتدای نمودار مشاهده می‌شود.

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش جهت مطالعه‌ی برخی از پارامترهای مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی خاک ریزدانه رسی کرمانشاه از دو باکتری B.megaterium و B.124 استفاده شد و عملکرد این باکتری‌ها برای تمام پارامترها مورد مقایسه قرار گرفت. برخی از نتایج حاصله عبارتند از:

- نتایج آزمایش‌های تک محوری بر نمونه‌های بهسازی شده با هر دو باکتری به کار رفته در شرایط یکسان، حاکی از افزایش مقاومت فشاری ۱۰ روزه‌ی نمونه‌ها بود. این افزایش برای باکتری B.megaterium چیزی حدود ۱/۵۶ برابر و برای باکتری B.124 حدود ۱/۳۴ برابر بود.
- در این پژوهش جهت بهینه‌سازی اختصاصی غلظت و pH محلول رسوب‌زا در خاک ریزدانه رسی، سه غلظت ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مولار در دو pH، ۷ و ۹ مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج این مطالعات بیشترین بهبود در مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با باکتری B.124، در غلظت ۰/۵ مولار محلول رسوب‌زا و در pH=۹ اتفاق افتاد اما بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌ی تثبیت شده با باکتری B.megaterium در غلظت ۰/۲۵ مولار و در pH=۹ اتفاق افتاد. تحقیقات قبلی در زمینه‌ی بررسی اثر غلظت محلول رسوب‌زا بر بهسازی خاک ماسه‌ای با باکتری B.megaterium، بهترین عملکرد رسوب‌زایی را در غلظت ۰/۵ مولار محلول رسوب‌زا گزارش کردند، این تمایز نشان دهنده‌ی تأثیر نوع خاک و شرایط واکنش بر عملکرد باکتریِ مشخص است. مطلب دیگر آن که افزایش غلظت محلول رسوب‌زا تا ۰/۷۵ مولار بر خلاف انتظار، اثر مثبتی بر رسوب‌زایی بیولوژیکی نداشت و حتی عاملی محدود کننده بود.
- نمونه‌های بهسازی شده به روش جذب سطحی، نسبت به روش اختلاط و تزریق مقاومت بیشتری از خود نشان دادند. در واقع اضافه کردن محلول‌های رسوب‌زا به خاک پس از ساخت نمونه در جای‌گیری مناسب آن‌ها بین دانه‌های خاک، به نسبت روش اختلاط، مؤثرتر عمل کرده است و در واقع به محلول‌ها اجازه داده شده که بین دانه‌های خاک به سمت کنج‌ها که محل اتصال دانه‌هاست حرکت کنند و در نتیجه منجر به تشکیل رسوب مؤثر در محل اتصال دانه‌ها شوند. عملکرد نه چندان مناسب روش تزریق به نسبت روش جذب سطحی به فشار تزریق بیش از حد محلول‌ها نسبت به تراکم نمونه برمی‌گردد و در واقع نفوذ محلول به صورت جذب سطحی بر اثر گرانش، برای میزان تراکم نمونه‌های این پژوهش عملکرد مناسب‌تری داشته است.
- جهت بررسی پارامتر زمان در روند بهسازی خاک مورد مطالعه در این پژوهش، مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با باکتری B.megaterium در ۱۰ روز و ۴۰ روز پس از ساخت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری با گذشت زمان بود. مقاومت ده روزه‌ی نمونه چیزی حدود ۱/۵۶ برابر و مقاومت چهل روزه‌ی آن حدود ۲/۶ برابر بهبود یافته است و در واقع تا روز دهم درمان تقریباً ۶۰ درصد از بهبود چهل روزه‌ی نمونه اتفاق افتاده است.
- تثبیت بیولوژیکی نمونه‌ی آزمایش تحکیم، تغییرات نسبت منافذ خاک را از ۰/۵۸۴ به ۰/۳۵۴ و شاخص فشردگی را از ۰/۰۷۷ به ۰/۰۳۸ کاهش داده است در نتیجه وضعیت نشست‌پذیری خاک بهبود یافته است.
- افزودن مواد رسوب‌زا به نمونه‌ی آزمایش حدود اتربرگ موجب کاهش شاخص خمیری را از ۲۶ به ۱۹ شده است.

تقدیر و تشکر

عمده آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در آزمایشگاه مکانیک خاک و مقاومت مصالح شرکت مهندسین مشاور جاهد انجام شده است. همچنین لازم است از همکاری صمیمانه جناب آقای دکتر فاضل مدیر شرکت و سرکار خانم مصطفی‌خانی کارشناس آزمایشگاه تقدیر و تشکر گردد.

منابع

[1] R.H. Karol, Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded, Crc Press, 2003.

[2] B. Krajewska, Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review, Journal of advanced research, 13 (2018) 59-67.

[3] J.T. DeJong, M.B. Fritzges, K. Nu¨sslein, Microbial induced cementation to control sand response to

undrained shear,132 (11) (2006)1381-1392.

[4] J.T. DeJong, B.M. Mortensen, B.C. Martinez, D.C. Nelson, Bio-mediated soil improvement, Ecological Engineering, 36(2) (2010) 197-210.

[5] V. Ivanov, J. Chu, Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 7(2) (2008) 139-153.

[6] A.J. Phillips, R. Gerlach, E. Lauchnor, A.C. Mitchell, A.B. Cunningham, L. Spangler, Engineered applications of ureolytic biomineralization: a review, Biofouling, 29(6) (2013) 715-733.

[7] M.S. Reddy, Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review, Frontiers in microbiology, 4 (2013) 314.

[8] N. Hataf, A. Baharifard, Reducing Soil Permeability Using Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) Method: A Case Study of Shiraz Landfill Soil, Geomicrobiology Journal, 37(2) (2020) 147-158.

[9] W. De Muynck, K. Verbeken, N. De Belie, W. Verstraete, Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone, Ecological Engineering, 36(2) (2010) 99-111.

[10] G.D. Okwadha, J. Li, Optimum conditions for microbial carbonate precipitation, Chemosphere, 81(9) (2010) 1143-1148.

[11] S.-S. Park, S.-G. Choi, I.-H. Nam, Effect of plant-induced calcite precipitation on the strength of sand, Journal of Materials in Civil Engineering, 26(8) (2014) 06014017.

[12] X. Sun, L. Miao, T. Tong, C. Wang, Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation, Acta Geotechnica, 14(3) (2019) 627-638.

[13] J.P. Carmona, P.J.V. Oliveira, L.J. Lemos, Biostabilization of a sandy soil using enzymatic calcium carbonate precipitation, Procedia engineering, 143 (2016) 1301-1308.

[14] K. Chiet, K. Kassim, K. Chen, U. Martula, C. Yah, A. Arefnia, Effect of reagents concentration on biocementation of tropical residual soil, in: IOP conference series: materials science and engineering, 2016.

[15] N.W. Soon, L.M. Lee, T.C. Khun, H.S. Ling, Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation, KSCE Journal of Civil Engineering, 17(4) (2013) 718-728.

[16] N.W. Soon, L.M. Lee, T.C. Khun, H.S. Ling, Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(5) (2014) 04014006.

[17] L. Cheng, R. Cord-Ruwisch, M.A. Shahin, Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation, Canadian Geotechnical Journal, 50(1) (2013) 81-90.

[18] K. Wen, Y. Li, S. Liu, C. Bu, L. Li, Development of an improved immersing method to enhance microbial induced calcite precipitation treated sandy soil through multiple treatments in low cementation media concentration, Geotechnical and Geological Engineering, 37(2) (2019) 1015-1027.

[19] H. Katebi, A. Fahmi, A. Ouria, A. Babaeian Amini, H.S. Kafil, Microbial Surface Treatment of Sand with Sporosarcina pasteurii to Improve the Wind Erosion Resistance in Urmia Lake, Applied and Environmental Soil Science 2021 (2021).

[20] S. Babakhani, A. Fahmi, H. Katebi, A. Ouria, A. Majnouni-Toutakhane, K. Ganbarov, H.S. Kafil, Non-sterile corn steep liquor a novel, cost effective and powerful culture media for Sporosarcina pasteurii cultivation for sand improvement, Journal of Applied Microbiology, 130(4) (2021) 1232-1244.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Karami, J. Khazaei , M. Sharifipour, R. Sharifi, Improvement and stabilization of soft and loose fine-grained soils by Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) method (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture) , Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3217-3242.

DOI: 10.22060/ceej.2022.18917.6997

این صفحه عمداً خالی است