University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 56 (2026), Issue 3, 27-39

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Biocementation Effects on the Settlement Behavior of Circular Footing on Sandy Soils under Cyclic Loading

Farzad Naji [a], Behnam Adhami [b,*], Ahad Bagherzadeh Khalkhali [c]

[a] *PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, CT.C., Tehran, Iran*
[b] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, CT.C., Tehran, Iran*
[c] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran*

Received: 19 January 2026; **Reviewed:** 25 October 2026; **Accepted:** 10 November 2026

Keywords:
Biological soil improvement, Microbial calcium carbonate precipitation, Physical modeling, Numerical modeling, Bearing capacity of foundation.

1. Introduction

In recent decades, improving the mechanical properties of soil, particularly in weak and unstable soils, has become a fundamental and critical challenge in geotechnical engineering and structural design. Weak soils, often characterized by unfavorable physical properties such as high porosity, low density, and low strength, can create significant problems in various projects, especially concerning foundation construction. These issues can lead to unacceptable settlements, structural cracks, and serious damage to structures, ultimately potentially resulting in catastrophic failures and high costs. In this context, the use of soil improvement methods to enhance its mechanical properties is essential, especially in civil and infrastructure projects requiring land with stable and resistant characteristics. Recognizing the importance of this matter, various soil improvement techniques have been employed, each with its own advantages and limitations. One of the innovative and effective methods in this field, which has garnered considerable attention in recent years, is bioscementation. This method utilizes the precipitation of calcium carbonate by bacteria to strengthen soil properties. Bioscementation not only effectively reinforces the bonds between soil particles but also reduces soil porosity, increases its compressive and tensile strength, and significantly improves the soil's bearing capacity. The use of this technique allows weak soils to improve their mechanical properties cost-effectively and in an environmentally friendly manner, making them more resistant to unauthorized settlements and other problems. Consequently, bioscementation has gained attention as a novel and effective solution for enhancing the mechanical properties of soil in numerous civil and infrastructure projects.

Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) is a biomimetic technology where specific bacteria, such as Bacillus pasteurii, decompose urea, producing carbon dioxide and ammonia. The carbon dioxide is converted to carbonate in an alkaline environment and precipitates calcium carbonate in the presence of calcium cations. This process is effectively used to strengthen soil, reduce the risk of landslides, and produce green building materials. Since MICP is less expensive and less damaging to the environment than traditional methods, it is recognized as a sustainable and effective solution in geotechnical, construction, and environmental engineering.

A primary application of MICP is the hydrolysis of urea by bacteria producing the enzyme urease, which causes calcium carbonate precipitation in the presence of calcium chloride and urea. To initiate this process,

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.71210.2485
Online ISSN: 2717-4077
* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0001-7877-1970
E-mail addresses: farzad.naji@iau.ac.ir (Farzad Naji), dr.adhami@iau.ac.ir (Behnam Adhami), a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir (Ahad Bagherzadeh Khalkhali).

these bacteria are grown aerobically in nutrient-rich environments and harvested during the late exponential growth phase. The bacterial solution is then added to the soil and combined with a cementation solution containing urea and calcium chloride. According to Equation 1, the urease enzyme decomposes urea into ammonium and carbonate, which increases the pH of the environment. The bacterial cell surface, which carries a negative charge, acts as a nucleation center for the deposition of positive calcium ions. As shown in Equation 2, Ca^{2+} and CO_3^{2-} ions precipitate as calcium carbonate crystals, forming cementitious bridges between soil particles.

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (2)$$

2. Methodology

In this research, laboratory experiments utilizing physical modeling under natural gravity (1g) were conducted to simulate soil behavior under realistic conditions. Physical modeling offers significant advantages, including lower cost, high repeatability, and the ability to precisely control influencing variables. These features allow researchers to investigate various parameters under controlled conditions, which is often challenging in field environments. To assess the impact of biosementation on the settlement behavior of circular footings, a calcium carbonate precipitation process was employed. This process utilized ureolytic bacteria Bacillus megaterium and Bacillus pasteurii, which hydrolyze urea by producing the urease enzyme, leading to calcium carbonate precipitation within the soil pores. The deposition of calcite strengthens inter-particle bonds, reduces porosity, and increases the mechanical resistance of the soil. The MICP process, as a method for soil improvement, offers numerous advantages, including low cost, environmental compatibility, and scalability across different scales. Key parameters influencing the biosementation process, such as temperature, pH, and concentrations of urea and calcium, were carefully controlled. Subsequently, this technique was applied to improve the settlement behavior of circular footings in sandy soil under cyclic loading. Physical modeling was performed with careful adherence to geometric similarity conditions and precise stress control to accurately evaluate the impact of biosementation on soil settlement and mechanical behavior.

3. Results and discussion

The loading test results indicate that the use of biosementation with microbial calcium carbonate precipitation significantly reduces the settlement of circular footings. This reduction in settlement is attributed to the calcium carbonate precipitation and porosity reduction in the soil, which increases the soil's stiffness modulus and resistance to deformation under cyclic loading. Comparison of the two bacterial types revealed that Bacillus megaterium had a greater impact on settlement reduction and soil strength enhancement compared to Bacillus pasteurii. Furthermore, the depth and position of the treated layer influence the reduction in settlement; layers closer to the underside of the foundation have the greatest effect on stress distribution. These results can serve as guidance for improving the design of circular footings in sandy soils using calcium carbonate precipitation.

Under a cyclic loading of 70kPa, in test number 1, where no bacterial injection was performed, the footing settlement was 11.59mm. Significant reductions in settlement were observed in the tests using Bacillus megaterium and Bacillus pasteurii. Specifically, in test number 2, which used Bacillus megaterium without a thin layer injection, the settlement decreased to 6.84mm (a 41% reduction). In test number 3, where the bacterial injection depth was increased to B/2, the settlement reached 7.14mm. In tests number 4 and 5, which used Bacillus pasteurii, the settlement was 17.7mm and 45.9mm, respectively, demonstrating the influence of injection depth and bacterial type on settlement reduction. In tests number 6 to 8, which used a thin layer D/2, the settlement was 25.35mm (without bacterial injection), 39.7mm (with Bacillus megaterium), and 8.00mm (with Bacillus pasteurii), respectively.

Reviewing the results of the physical model experiments for improved bearing piles under cyclic and static loads, it is observed that in the Bacillus megaterium-treated sample under cyclic loading, the settlement decreased by 13%. However, in the Bacillus megaterium-treated sample under static loading, in addition to settlement reduction, the bearing capacity increased by 200%, indicating the influence of the loading type on these tests.

The results demonstrate the influence of bacterial type and injection depth on the settlement of circular footings under cyclic loading. In all tests, injecting bacteria at the soil surface resulted in greater reduction in footing settlement compared to injection at a depth of B/2. In tests where injection was performed at the surface, settlement was significantly reduced, while in tests where injection was at a depth of B/2, settlement

was higher. The percentage of settlement reduction, for Bacillus megaterium at the surface, compared to Bacillus pasteurii at the surface, was 4.6%, for Bacillus megaterium at depth compared to Bacillus pasteurii at depth, was 24.4%, and for Bacillus megaterium at the surface with a thin clay layer compared to Bacillus pasteurii at the surface with a clay layer, was 72.6%. These results suggest that surface injection effectively promotes better distribution of calcium carbonate and strengthens the inter-particle bonds in the soil, which improves the soil's mechanical properties and reduces footing settlement under cyclic loading. Furthermore, in all tests, Bacillus pasteurii had a lesser effect on settlement reduction than Bacillus megaterium.

4. Conclusions

This research evaluated the impact of biosementation on the settlement behavior of circular footings in sandy soil under cyclic loading. The results from the physical and numerical modeling are as follows:

• The use of Bacillus megaterium and Bacillus pasteurii bacteria effectively reduces footing settlement. This reduction in settlement is due to calcium carbonate precipitation and porosity reduction in the soil, which increases the soil's stiffness modulus and improves its resistance to deformation under cyclic loading. These findings demonstrate the positive effect of biosementation on improving soil mechanical properties and strengthening the footing's bearing capacity.

• Comparing the effect of the two bacterial types showed that Bacillus megaterium had a greater impact on settlement reduction and improvement of soil mechanical properties than Bacillus pasteurii. Specifically, biosementation with Bacillus megaterium resulted in a 41% reduction in settlement, while biosementation with Bacillus pasteurii resulted in a 38% reduction in settlement. This difference may be due to the higher production of urease enzyme by Bacillus megaterium and a faster rate of calcium carbonate precipitation. This bacterium is able to absorb calcium at a greater scale, promoting the strengthening of inter-particle bonds, which ultimately contributes to reducing settlement and increasing soil resistance.

• The depth of bacterial injection also significantly impacted settlement reduction. Results showed that increasing the injection depth led to a greater reduction in footing settlement. Furthermore, the settlement in tests with surface injection was significantly lower than in tests with injection at a depth of B/2. Biosementation at depth with Bacillus megaterium resulted in approximately 38% settlement reduction, while biosementation at depth with Bacillus pasteurii resulted in an 18.5% reduction in settlement. This indicates that the injection depth acts as a key factor in improving soil structure and mechanical properties, and results in a better distribution of calcium carbonate throughout the soil.

• Physical and numerical modeling were used simultaneously to evaluate the impact of biosementation on footing settlement behavior. The results from numerical modeling using Abaqus software and the Drucker-Prager constitutive model, which simulates soil behavior nonlinearly and plastically, were consistent with the experimental results. These results demonstrate the accuracy of numerical models in simulating soil behavior under cyclic loading and the impact of the biosementation process on footing settlement. Numerical modeling also assisted in a more detailed analysis of the effects of changes in various soil parameters, such as the internal friction angle and modulus of elasticity, in the biosementation process.

The results of this research demonstrate that biosementation using the calcium carbonate precipitation process can effectively reduce the settlement of circular footings in sandy soils. The calcium carbonate precipitation process, by strengthening particle bonds and reducing porosity, increases soil resistance and reduces settlement under cyclic loads. Furthermore, the type of bacterium and its injection depth have a significant impact on the amount of settlement reduction, with Bacillus megaterium and greater injection depth showing better performance.

ارزیابی تأثیر بهسازی بیولوژیکی خاک بر رفتار نشست پی دایره‌ای در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری سیکلی

فرزاد ناجی[1]، بهنام ادهمی[*2]، احد باقرزاده خلخالی[3]

[1] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
[2] استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
[3] استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

دریافت: 1404/10/29، بازنگری: 1405/8/3، پذیرش: 1405/8/19، نشر آنلاین: 1405/8/19

چکیده

در این پژوهش، تأثیر بهسازی زیستی خاک ماسه‌ای با استفاده از باکتری‌های باسیلوس مگاتریوم (Bacillus megaterium) و باسیلوس پاستوری (Bacillus pasteurii) بر نشست تجمعی پی دایره‌ای تحت بارگذاری سیکلی، به‌روش آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. در آزمایش‌های فیزیکی، لایه بهسازی‌شده در تراز سطحی یا عمق B/2 قرار گرفت و نمونه‌ها پس از 14 روز عمل‌آوری تحت بارگذاری تکراری قرار گرفتند. با توجه به نزدیک‌شدن منحنی نشست به وضعیت تقریباً پایدار در محدوده 55 تا 65 سیکل در آزمایش‌های مقدماتی، 60 سیکل مبنای آزمایش‌های اصلی انتخاب شد. نتایج نشان داد که بهسازی سطحی با باسیلوس مگاتریوم و اسپورسارسینا پاستوری، به‌ترتیب موجب کاهش حدود 41 و 38 درصدی نشست پی نسبت به بستر بدون بهسازی شد و عملکرد بهسازی سطحی از بهسازی در عمق B/2 مطلوب‌تر بود. همچنین، آزمایش‌های فشاری تک‌محوری مکمل نشان دادند که در محدوده شرایط بررسی‌شده، بیشترین مقاومت فشاری در pH اولیه برابر با 9 و غلظت یک مولار محلول رسوب‌زا حاصل شد. در مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مدل رفتاری دراکر- پراگر (Darger-Pragher)، تحت تنش 70 کیلوپاسکال و پس از 60 سیکل بارگذاری، نشست نهایی عددی برابر با 10/12 میلی‌متر و نشست آزمایشگاهی برابر با 11/59 میلی‌متر به‌دست آمد که نشان‌دهنده اختلاف نسبی 12/7 درصدی است. در مجموع، نتایج بیانگر نقش مؤثر نوع باکتری، موقعیت لایه بهسازی‌شده و شرایط شیمیایی محلول رسوب‌زا در بهبود عملکرد مکانیکی بستر ماسه‌ای و کنترل نشست پی دایره‌ای تحت بارگذاری سیکلی است.

کلیدواژه‌ها: بهسازی بیولوژیکی خاک، رسوب میکروبی کلسیم کربنات، مدل‌سازی فیزیکی، مدل‌سازی عددی، ظرفیت باربری پی.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک، به‌ویژه در خاک‌های ضعیف و غیرمستحکم، به یکی از چالش‌های اساسی و مهم در مهندسی ژئوتکنیک و طراحی سازه‌ها تبدیل شده است. خاک‌های ضعیف که معمولاً دارای ویژگی‌های فیزیکی نامناسبی مانند تخلخل بالا، چگالی پایین و مقاومت کم هستند، می‌توانند مشکلات فراوانی را در پروژه‌های مختلف به‌ویژه در زمینه پی‌گذاری و فونداسیون‌ها ایجاد کنند. این مشکلات می‌توانند موجب نشست‌های غیرقابل قبول، ترک‌های ساختاری و آسیب‌های جدی به سازه‌ها شوند که درنهایت ممکن است به خرابی‌های فاجعه‌آمیز و هزینه‌های بالا منجر گردند. در این زمینه، استفاده از روش‌های بهبود خاک برای تقویت ویژگی‌های مکانیکی آن امری ضروری است، به‌ویژه در پروژه‌های عمرانی و زیرساختی که نیاز به زمین‌هایی با ویژگی‌های پایدار و مقاوم دارند. با توجه به اهمیت این موضوع، روش‌های مختلفی برای بهبود خاک به‌کار گرفته شده‌اند که هرکدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. یکی از روش‌های نوین و کارآمد در این زمینه که به‌ویژه در سال‌های اخیر توجه زیادی را جلب کرده، روش بیوسمنتاسیون[1] است. این

1. Bioscementation

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.71210.2485

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 09121787883
* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0001-7877-1970
آدرس ایمیل: farzad.naji@iau.ac.ir (ف. ناجی)، dr.adhami@iau.ac.ir (ب. ادهمی)، a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir (ا. باقرزاده خلخالی).

روش از فرآیند رسوب کربنات کلسیم توسط باکتری‌ها برای تقویت خواص خاک استفاده می‌کند. بیوسمنتاسیون نه‌تنها به‌طور مؤثر پیوندهای میان ذرات خاک را تقویت می‌کند، بلکه تخلخل خاک را کاهش داده، مقاومت فشاری و کششی آن را افزایش می‌دهد و درنهایت، ظرفیت باربری خاک را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. بر این اساس، بیوسمنتاسیون به‌عنوان یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک، برای کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک و پروژه‌های عمرانی مورد توجه قرار گرفته است (Ivanov و Chu، 2008).

روش رسوب‌گذاری کربنات میکروبی- القایی یک تکنولوژی بیومینرالیزه[2] است که در آن باکتری‌های خاص مانند باسیلوس پاستوری اوره را تجزیه کرده و دی‌اکسیدکربن و آمونیاک تولید می‌کنند. دی‌اکسیدکربن در محیط قلیایی به کربنات تبدیل می‌شود و با کاتیون‌های کلسیم موجود رسوب کربنات کلسیم ایجاد می‌کند. این فرآیند برای تقویت استحکام خاک و کاهش خطر روانگرایی به‌کار می‌رود. روش MICP به‌عنوان یکی از رویکردهای زیستی نوین در کاربردهای ژئوتکنیکی مورد توجه قرار گرفته است (Zhang و همکاران، 2023).

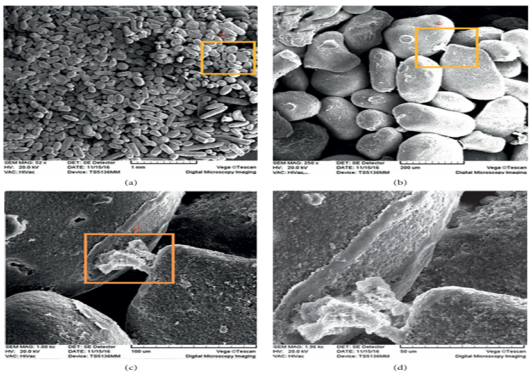
یک کاربرد اصلی روش رسوب‌گذاری کربنات میکروبی- القایی، هیدرولیز اوره توسط باکتری‌های تولیدکننده آنزیم اوره‌آز است که باعث رسوب کربنات کلسیم در حضور کلرید کلسیم و اوره می‌شود (Whiffin و همکاران، 2007). همان‌طورکه در رابطه (2) نشان داده شده است، یون‌های Ca^{2+} و CO_3^{2-} به‌عنوان بلورهای کربنات کلسیم رسوب می‌کنند و پل‌های سیمانی بین ذرات خاک را تشکیل می‌دهند(Dejong و همکاران، 2006).

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (2)$$

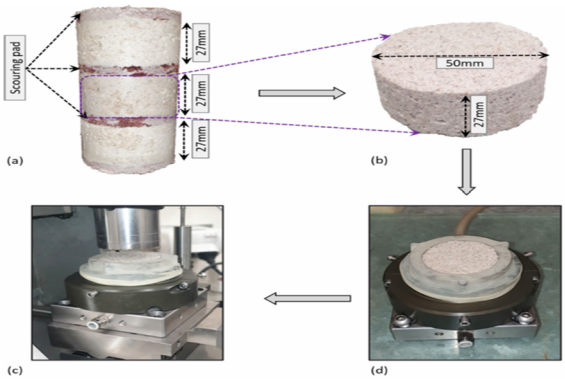
2- مرور بر ادبیات پیشین

Katebi و همکاران در سال 2021، نشان دادند که روش رسوب‌گذاری کربنات میکروبی- القایی موجب بهبود قابل توجه مقاومت شن‌های درمان‌شده در برابر فرسایش باد و نفوذ شد. نتایج مطابق شکل (1) نشان داد که با افزایش غلظت محلول سیمانی و تعداد چرخه‌های درمانی، ضخامت لایه و مقاومت آن افزایش یافت. در نمونه‌های درمان‌شده با 4 چرخه و غلظت 1 مولار سیمان، ضخامت لایه به 11 میلی‌متر و مقاومت نفوذ به 250 کیلوپاسکال رسید. آزمایش تونل باد نشان داد که شن‌های درمان‌شده مقاومت بیشتری در برابر فرسایش باد داشتند و میزان کاهش جرم و مدول فرسایش باد در این نمونه‌ها به صفر رسید. این روش می‌تواند برای تثبیت شن‌های روان در پروژه‌های ژئوتکنیکی به‌ویژه در مناطق خشک، مؤثر باشد.



شکل 1- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ماسه تیمارشده میکروبی (لایه ماسه‌ای پایدار) با بزرگ‌نمایی‌های مختلف (Katebi و همکاران، 2021)

Ahenkorah و همکاران (2024) به بررسی رفتار چرخه‌ای و مقاومت در برابر روانگرایی شن‌های درمان‌شده با روش‌های رسوب‌گذاری کربنات میکروبی- القایی و رسوب‌گذاری کربنات القایی با آنزیم در شرایط برش مستقیم پرداختند. نتایج نشان داد که شن‌های درمان‌شده با رسوب میکروبی کلسیم کربنات و رسوب‌گذاری کربنات القایی با آنزیم به‌طور قابل‌توجهی در مقایسه با شن‌های غیردرمان‌شده به تعداد بیشتری چرخه نیاز داشتند تا به روانگرایی برسند. برای نمونه‌های درمان‌شده با رسوب میکروبی کلسیم کربنات که کربنات کلسیم بالاتری داشتند (12/90%)، تعداد چرخه‌های مورد نیاز برای روانگرایی تا 21 برابر بیشتر از شن‌های غیردرمان‌شده بود.



شکل 2- نمونه ماسه بهبود یافته بیولوژیکی برای آزمایش‌های DSS: الف) ستون ماسه‌ای (ارتفاع 100 میلی‌متر)، ب) یک نمونه منفرد (ارتفاع 27 میلی‌متر)، ج) نمونه داخل غشاء لاستیکی در قالب، د) نمونه آزمایشی نصب شده بر روی دستگاه DSS (Ahenkorah و همکاران، 2024)

2. Biominralizeh

Lee و همکاران در سال 2022 به بررسی تأثیر بیوسمنتاسیون سبک بر رفتار روانگرایی شن‌های نرم پرداختند. نتایج نشان داد که بیوسمنتاسیون سبک با افزایش سرعت امواج برشی کمتر از 100 متر برثانیه و محتوای کربنات کلسیم کمتر از 0/9% می‌تواند مقاومت شن‌ها در برابر روانگرایی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. بااین‌حال، پس از شروع روانگرایی، هیچ بهبودی قابل‌توجهی در رفتارهای جمع‌شدگی کرنش و بازسازی پس از چرخه مشاهده نشد. این نتایج نشان‌دهنده اثربخشی بیوسمنتاسیون سبک در بهبود مقاومت شن‌ها در برابر روانگرایی است، اما تأثیر آن در رفتارهای پس از روانگرایی محدود بود.

Banik و Sarkar در سال 2025 به بررسی تأثیر نوع باکتری و چرخه‌های ترشدن- خشک‌شدن بر رفتار چرخه‌ای ماسه‌های بهسازی‌شده با روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم پرداختند. در این مطالعه، از باکتری‌های اسپورسارسینا پاستوری و باسیلوس سوبتیلیس[3] استفاده شد و نمونه‌ها تحت آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیوسمنتاسیون موجب کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی و افزایش سختی برشی ماسه می‌شود.

Sadeghi و همکاران در سال 2025، در تحقیقی به بررسی اثرات بارگذاری غیرمحوری بر پی‌های دایره‌ای مستقر بر بستر ماسه‌ای با لایه نازک ضعیف پرداختند. آن‌ها نشان دادند که وجود لایه ضعیف و بارگذاری‌های غیرمحوری باعث افزایش چرخش و کاهش ظرفیت باربری پی می‌شود. نتایج نشان داد که لایه نازک ضعیف به طور قابل‌توجهی بر پایداری و ظرفیت باربری پی‌ها تأثیرگذار است.

Hosseini و همکاران (2024) نشان داده‌اند که لایه‌های ضعیف و فشار بار اضافی نامتقارن تأثیر قابل توجهی بر کاهش ظرفیت باربری فونداسیون‌های نواری دارند. نتایج نشان می‌دهند که ضخامت لایه ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شود و افزایش عمق این لایه به بهبود ظرفیت کمک می‌کند. همچنین، فشار بار اضافی نامتقارن باعث افزایش ظرفیت باربری فونداسیون می‌شود.

Tao و همکاران در سال 2025 به بررسی تأثیر رسوب‌گذاری کربنات میکروبی- القایی بر تثبیت شن‌های بیابانی در شرایط میدانی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این روش باعث افزایش مقاومت سطحی خاک به 346/67 کیلوپاسکال و کاهش 95 درصدی فرسایش بادی شد. همچنین، ضخامت لایه رسوبی کربنات کلسیم ایجاد شده به 21/02 میلی‌متر رسید. این تحقیق نشان می‌دهد که رسوب میکروبی کلسیم کربنات در شرایط محیطی سخت بیابانی، به‌ویژه در برابر طوفان‌های شن و نوسانات دما، به‌طور مؤثر عمل می‌کند و به تثبیت شن‌های بیابانی کمک می‌کند.

Hang و همکاران (2022) به بررسی تأثیر رسوب‌گذاری کربنات میکروبی- القایی بر مقاومت شن‌های بیابانی در برابر فرسایش باد پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش دما و غلظت محلول بیوسمنت باعث افزایش مقاومت نفوذ سطحی و محتوای کربنات کلسیم در شن‌ها می‌شود. به‌ویژه، با افزایش دما از 10 به 40 درجه سانتی‌گراد، مقاومت نفوذ سطحی از 130 کیلوپاسکال به 285 کیلوپاسکال افزایش یافت.

Zamani و همکاران در سال 2021 به بررسی تأثیر بهسازی خاک به‌روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم بر کاهش نشست پی‌های سطحی ناشی از روانگرایی پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از آزمایش سانتریفیوژ، عملکرد نواحی بهسازی‌نشده با نواحی بهسازی‌شده تا عمق‌های 6 و 13 متر تحت پنج مرحله بارگذاری سینوسی مقایسه شد. نتایج نشان داد که بهسازی با روش MICP موجب کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی و نشست پی‌ها می‌شود.

Alam و Motamed در سال 2026 به بررسی تأثیر عمق و ابعاد ناحیه بهسازی‌شده با روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم بر نشست پی سطحی در خاک مستعد روانگرایی پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از آزمایش میز لرزان در مقیاس 1g، بلوک‌های بهسازی‌شده با عمق‌ها و سطوح جانبی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش عمق ناحیه بهسازی، میزان کاهش نشست پی از 44 به 66 و 80 درصد افزایش یافت.

Sun و همکاران (2019) به بررسی تأثیر دما بر فرآیند رسوب‌گذاری کربنات کلسیم میکروبی با استفاده از باکتری‌های اسپورسارسینا پاستوری و باسیلوس مگاتریوم پرداختند. در این مطالعه، سویه‌های اسپورسارسینا پاستوری ATCC 11859 و باسیلوس مگاتریوم ATCC 14581 از نظر رشد باکتری، فعالیت آنزیم اوره‌آز و میزان رسوب کربنات کلسیم در دماهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که دما تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد این دو باکتری دارد؛ به‌طوری‌که در دماهای بالاتر، فعالیت آنزیم اوره‌آز باسیلوس مگاتریوم کمتر از اسپورسارسینا پاستوری بود.

استفاده از روش‌های نوین بهسازی زیستی، از جمله بیوسمنتاسیون، می‌تواند موجب بهبود پاسخ مکانیکی خاک و کاهش نشست پی‌های سطحی تحت شرایط بارگذاری دینامیکی شود (Zamani و همکاران،2021).

3. Bacillus subtilis

3- روش تحقیق

در این تحقیق، آزمایش‌های آزمایشگاهی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی تحت شتاب گرانشی طبیعی (1g) به‌منظور شبیه‌سازی رفتار خاک در شرایط واقعی انجام شد. به‌منظور ارزیابی تأثیر بیوسمنتاسیون بر رفتار نشست پی‌های دایره‌ای، از فرآیند رسوب کلسیم کربنات استفاده شد. در این فرآیند، از باکتری‌های اورئولیتیک[4] باسیلوس مگاتریوم و باسیلوس پاستوری استفاده گردید که با تولید آنزیم اوره‌آز، اوره را هیدرولیز کرده و موجب رسوب کربنات کلسیم در منافذ خاک می‌شوند. رسوب کلسیت باعث تقویت پیوندهای میان ذرات خاک، کاهش تخلخل و افزایش مقاومت مکانیکی آن می‌گردد. در مجموعه آزمایش‌های این پژوهش، شرایط آماده‌سازی و کشت باکتری‌ها بر اساس پروتکل آزمایشگاهی مشخص تنظیم شد. همچنین، برای بررسی حساسیت عملکرد مقاومتی نمونه‌ها به شرایط شیمیایی محیط، تأثیر pH اولیه و غلظت محلول رسوب‌زا در مجموعه‌ای از آزمایش‌های تک‌محوری مکمل ارزیابی گردید. شماتیک دستگاه مدل‌سازی و پی دایره‌ای مدل فیزیکی مطابق با شکل (3) می باشد.



(الف)



(ب)

شکل 3- دستگاه مدل سازی فیزیکی: الف) شماتیک کلی دستگاه مدل سازی فیزیکی، ب) پی دایره‌ای مدل فیزیکی

ابتدا نمونه‌های خاک ماسه‌ای به‌عنوان محیط آزمایشی انتخاب شدند. سپس فرآیند بیوسمنتاسیون با استفاده از باسیلوس مگاتریوم و باسیلوس پاستوری که قادر به تولید آنزیم اوره‌آز و رسوب کربنات کلسیم در خاک هستند، اعمال گردید.

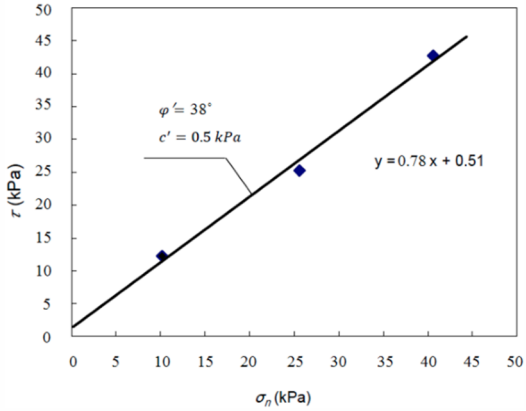
3-1- خاک مورد استفاده

در این مطالعه، از ماسه سیلیسی کارخانه فیروزکوه برای تهیه بستر ماسه‌ای استفاده شد. از تکنیک بارش ماسه به‌دلیل دقت و کارایی آن بهره‌برداری شد. این روش بسترهای یکنواخت و همگن با چگالی کنترل‌شده ایجاد می‌کند که مزایای بیشتری نسبت به فشرده‌سازی دستی از جمله چگالی بالاتر، تکرارپذیری، جلوگیری از شکست ذرات، کاهش زمان آماده‌سازی نمونه‌ها و شبیه‌سازی دقیق‌تر رسوبات طبیعی ماسه‌ای را دارد. برای بررسی تأثیر لایه نازک بر رفتار نشست پی دایره‌ای، یک لایه رس در عمق مشخصی از بستر ماسه‌ای قرار داده شد. مشخصات ماسه استفاده‌شده در شکل (4) و جدول (1) آورده شده است.

جدول 1- خواص فیزیکی بستر ماسه‌ای

خصوصیات	مقدار	استاندارد
حداکثر اندازه دانه D_{max}(mm)	2/38	ASTM D C136
اندازه متناظر با 60 درصد ریزتر D_{60} (mm)	1/45	
اندازه متوسط دانه D_{50} (mm)	1/20	
اندازه متناظر با 30 درصد ریزتر D_{30} (mm)	0/9	
اندازه مؤثر D_{10} (mm)	0/61	
ضریب یکنواختی C_u	2/38	
ضریب خمیدگی C_c	0/92	
چگالی ویژه G_s	2/66	ASTM D 854
وزن مخصوص خشک حداکثر γ_{dmax} (kN/m3)	19/85	ASTM D 4254
وزن مخصوص خشک حداقل γ_{dmin} (kN/m3)	13/73	ASTM D 4253
وزن مخصوص خشک γ_d (kN/m3)	15/71	
دانسیته نسبی D_r (%)	41	
طبقه‌بندی خاک (USCS)	SP	ASTM D 2487

4. Urolithic bacteris



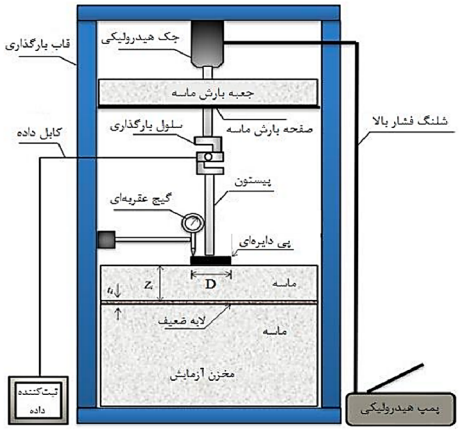
شکل 4- نتایج آزمایش برش مستقیم روی بستر ماسه‌ای

2-3- باکتری مورد استفاده

رسوب میکروبی کلسیم کربنات، که فرآیند اصلی مورد استفاده است، ویژگی‌های مکانیکی خاک را با تقویت پیوندهای بین ذرات و کاهش تخلخل بهبود می‌بخشد. میکروارگانیسم‌های مؤثر باید تغییرات اسمزی رایج در ساخت‌وساز و احیای زمین را تحمل کنند و باکتری‌های اورئولیتیک مانند باسیلوس مگاتریوم و باسیلوس پاستوری به‌دلیل توانایی تولید آنزیم اوره‌آز، برای فرآیند بیوسمنتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. این باکتری‌های گرم مثبت، کلسیت را در داخل منافذ خاک از طریق واکنش‌های بیوشیمیایی رسوب می‌دهند، جایی که سطح سلولی منفی آن‌ها یون‌های کلسیم را جذب کرده و رسوب کربنات را پس از هیدرولیز اوره تشویق می‌کند. کارایی رسوب کلسیم کربنات به عواملی مانند دما، pH و غلظت‌های اوره و کلسیم بستگی دارد و باکتری‌های گرم مثبت به‌دلیل مقاومت بالای خود و دیواره‌های سلولی غنی از پپتیدوگلیکان مؤثرتر هستند. محلول‌های سیمانی حاوی اوره و کلرید کلسیم به‌عنوان مؤثرترین راهکارها در نظر گرفته می‌شوند، زیرا فعالیت اوره آز را افزایش داده، pH را بالا می‌برند و رسوب کربنات کلسیم را تسریع می‌کنند. در این زمینه، Sun و همکاران (2019) با مقایسه دوسویه اسپورسارسینا پاستوری و باسیلوس مگاتریوم نشان دادند که تغییر دما بر فعالیت آنزیم اوره‌آز و میزان رسوب کربنات کلسیم تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که در دماهای بالاتر، فعالیت آنزیمی و رسوب‌گذاری در اسپورسارسینا پاستوری بیشتر بوده، درحالی‌که در دماهای پایین‌تر، باسیلوس مگاتریوم عملکرد بالاتری نشان داده است.

3-3- مدل‌سازی فیزیکی

فرآیند مدل‌سازی فیزیکی شامل چندین مرحله متوالی می‌باشد. شکل (6)، دستگاه مدل‌سازی استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. پی دایره‌ای به صورت صلب بوده و بر روی سطح بستر قرار می‌گیرد. جعبه آزمایش به‌صورت مخزن استوانه‌ای با ابعاد قطر داخلی 70 سانتی‌متر و ارتفاع 70 سانتی‌متر از جنس فولاد می‌باشد. برای پی دایره صلب، از یک پی دایره‌ای فلزی با قطر 7 سانتی‌متر استفاده گردید. خاک در جعبه به‌طور لایه‌به‌لایه به‌ضخامت 5 سانتی‌متر قرار داده شد، هرلایه به‌طور مؤثر فشرده‌سازی شد تا چگالی نسبی مورد نظر به‌دست آید. این فرآیند ادامه یافت تا سطح خاک به‌طور دقیق زیر سطح فونداسیون قرار گرفت، به‌نحوی‌که شرایط واقعی برای آزمایش فراهم گردید. شماتیک کلی مدل‌سازی فیزیکی در شکل (5) آورده شده است.



شکل 5- نمای دستگاه مدل فیزیکی ساخته‌شده

4-3- مدل‌سازی عددی

در این تحقیق، از نرم‌افزار آباکوس، یکی از ابزارهای پیشرفته تحلیل اجزای محدود، به‌دلیل کتابخانه جامع المان‌ها، رابط کاربری ساده و قابلیت‌های قوی آن در شبیه‌سازی رفتارهای پیچیده ژئوتکنیکی استفاده شد. خاک به‌عنوان یک ماده غیرخطی و پلاستیک با استفاده از مدل تنش- کرنش دراکر- پراگر مدل‌سازی شد که پاسخ نرم‌شدگی تنش- کرنش و واکنش پلاستیک خاک‌های ماسه‌ای تحت بارگذاری سیکلی و چندمحوری را شبیه‌سازی می‌کند. تعامل بین فونداسیون و خاک به‌عنوان تماس سطحی با ضریب اصطکاک مشخص تعریف شد و شرایط مرزی و پروتکل‌های بارگذاری سیکلی با آزمایش‌های فیزیکی هماهنگ شد تا تطابق نتایج عددی و آزمایشگاهی حفظ گردد. لازم به توضیح است که به‌منظور لحاظ‌کردن آثار بهسازی زیستی در مدل‌سازی عددی، پارامترهای مکانیکی نواحی بهسازی‌شده بر مبنای ویژگی‌های مکانیکی تعیین‌شده برای نمونه‌های آزمایشگاهی تیمارشده تعریف شدند. بر این اساس، مقادیر چسبندگی معادل (c)، مدول الاستیسیته (E) و زاویه اصطکاک داخلی (φ)، با توجه به تغییرات ایجادشده در مقاومت و سختی خاک بر اثر فرآیند بیوسمنتاسیون، تعیین و به‌عنوان پارامترهای مکانیکی ناحیه بهسازی‌شده در مدل عددی دراکر- پراگر مورد استفاده قرار

گرفتند. مدل دراکر- پراگر تحلیل سه‌بعدی دقیق تعامل خاک و فونداسیون تحت بارگذاری‌های مختلف را فراهم کرد و ارزیابی جامعی از عمق، ضخامت و ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های درمان‌شده رسوب کلسیم کربنات ارائه داد. این رویکرد پیش‌بینی قابل‌اعتمادی از نشست تجمعی به‌دست داد و بینش‌های ارزشمندی از عملکرد فرآیند بیوسمنتاسیون فراهم کرد.

برای بررسی تأثیر بارگذاری سیکلی بر رفتار نشست پی دایره‌ای قرار گرفته بر روی خاک ماسه‌ای، دو متغیر اصلی انتخاب شدند: تعداد سیکل‌های بارگذاری و اندازه بار محوری وارد شده (P). بارگذاری در چندین سیکل مختلف (10، 20، 30، 40، 50، 60، 70) و در سطوح مختلف بار محوری (10، 20، 45، 50، 60، 70 کیلوپاسکال) اعمال شد. این طرح بارگذاری به‌منظور ارزیابی نشست تجمعی و تحلیل پدیده‌های خستگی در خاک تحت بارگذاری‌های تکراری و استاتیک در یک چارچوب عددی کنترل‌شده طراحی شد. مدل عددی ایجاد شده در نرم‌افزار ABAQUS/CAE 2023 شامل یک بستر ماسه‌ای با ابعاد قطر 70 سانتی‌متر و ارتفاع 70 سانتی‌متر و یک فونداسیون دایره‌ای به قطر 7 سانتی‌متر بود که به‌طور مرکزی بر روی سطح بالای بستر قرار گرفته بود. برای شبیه‌سازی دقیق رفتار مواد دانه‌ای از مدل تنش- کرنش دراکر- پراگر استفاده شد. تعامل بین فونداسیون و خاک به‌عنوان تماس سطحی با ضریب اصطکاک $\mu = 0.6$ مدل‌سازی شد که نمایشی واقعی از تعامل خاک و سازه فراهم می‌آورد.

در تعریف شرایط مرزی مدل، سطح تحتانی بستر در برابر جابه‌جایی مقید و حرکت افقی مرزهای جانبی محدود در نظر گرفته شد تا ضمن جلوگیری از جابه‌جایی صلب بستر، امکان تغییرشکل قائم خاک تحت بارگذاری فراهم شود. برای شبکه‌بندی مدل سه‌بعدی، استفاده از المان‌های حجمی هشت‌گره‌ای (C3D8) درنظر گرفته شد. همچنین، بارگذاری در چارچوب تحلیل شبه‌استاتیکی انجام گرفت تا پاسخ غیرخطی خاک و اندرکنش میان پی و بستر ماسه‌ای قابل بررسی باشد. خواص مکانیکی بستر ماسه‌ای بهسازی نشده از طریق آزمایش‌های برش مستقیم و سه‌محوری تعیین شد تا مقادیر دقیق پارامترهای زیر به‌دست آید:

- زاویه اصطکاک داخلی (φ): 38°
- چسبندگی (c): 0.5 کیلوپاسکال
- مدول الاستیسیته (E): 150,000 پاسکال
- نسبت پواسون (ν): 0.25
- چگالی (ρ): 1500 کیلوگرم بر مترمکعب

به‌منظور ارزیابی میزان انطباق مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، نشست قائم پی دایره‌ای تحت تنش بارگذاری 70 کیلوپاسکال و در پایان 60 سیکل بارگذاری بررسی شد.

3-5- آماده‌سازی باکتری و لایه بهسازی‌شده

در این پژوهش، از باکتری اسپورسارسینا پاستوری با کد ATCC 11859 و باسیلوس مگاتریوم با کد ATCC 14581 استفاده شد که از مرکز ملی ذخایر زیستی و ژنتیکی ایران تهیه شدند. ابتدا محیط کشت تریپتیک[5] سوی براث[6] به مقدار مشخص تهیه شده و به‌منظور استریلیزاسیون، به‌مدت 15 دقیقه در دمای 121 درجه سانتی‌گراد در دستگاه اتوکلاو قرار داده شد. پس از استریلیزاسیون، محیط کشت به داخل هود لامینار[7] منتقل گردید و پس از رسیدن به‌دمای محیط، مراحل تلقیح باکتری انجام شد. با استفاده از سمپلر استریل، مقدار 1 میلی‌لیتر از محیط کشت اولیه حاوی باکتری باسیلوس مگاتریوم به محیط کشت تازه منتقل و سپس به‌مدت 24 ساعت در دمای 30 درجه سانتی‌گراد در انکوباتور انکوبه شد. برای باکتری باسیلوس پاستوری نیز پس از اضافه‌کردن 20 گرم در لیتر اوره (تحت شرایط استریل در زیر هود لامینار با استفاده از فیلتر)، انکوباسیون در دمای 30 درجه به‌مدت 24 ساعت انجام گرفت.

در پژوهش Katebi و همکاران (2021) نیز برای آماده‌سازی سوسپانسیون باکتریایی اسپورسارسینا پاستوری، محیط کشت در دمای 121 درجه سانتی‌گراد به‌مدت 15 دقیقه استریل و اوره پس از استریلیزاسیون، با استفاده از فیلتر غشایی به محیط کشت افزوده شد. در این مطالعه، رشد باکتری از طریق اندازه‌گیری جذب نوری در طول موج 600 نانومتر مورد ارزیابی قرار گرفت. این مراحل از نظر اصول آماده‌سازی و کنترل کشت باکتریایی با روش پژوهش حاضر هم‌خوانی دارند. همچنین، جهت تهیه محلول سیمانی مورد استفاده در فرآیند رسوب کلسیم کربنات، از ترکیب اوره با کلرید کلسیم استفاده شد؛ به‌طوری‌که محلولی با غلظت 3 مولار اوره و 1/5 مولار کلرید کلسیم آماده گردید. این محلول طی سه مرحله به نمونه‌های خاک اضافه شد. فرآیند سمنتاسیون زیستی از طریق رسوب میکروبی کربنات کلسیم منجربه تشکیل لایه‌ای مستحکم در سطح نمونه شده و موجب بهبود خواص مکانیکی خاک گردید. در ادامه، ابتدا ماسه بستر که به‌عنوان خاک پایه استفاده می‌شود، از طریق روش بارش در جعبه آزمایش ریخته می‌شود تا چگالی یکنواخت در سرتاسر نمونه ایجاد گردد. پس‌از آماده‌سازی ماسه بستر، محلول بیوسیمانتاسیون به‌همراه باکتری، به خاک تزریق می‌شود. پس‌از تزریق و توزیع یکنواخت محلول، نمونه‌ها به‌مدت 14 روز برای تشکیل رسوب کربنات کلسیم عمل‌آوری می‌شوند. پس‌از عمل‌آوری، پی روی سطح بستر ماسه قرار گرفت و بارگذاری سیکلی به‌صورت یک‌طرفه و فشاری توسط جک هیدرولیکی دستی و با نرخ جابه‌جایی 1 میلی‌متر بر دقیقه

5. Tryptic medium
6. Broth
7. Laminar flood hood

اعمال شد. با توجه به شبه‌استاتیکی بودن بارگذاری و کنترل آن براساس نرخ جابه‌جایی، فرکانس ثابت برحسب هرتز برای آزمایش‌ها تعریف نشد. در آزمایش‌های اصلی، بارگذاری تا 60 سیکل ادامه یافت که انتخاب این تعداد بر اساس نتایج آزمایش‌های مقدماتی انجام شد.

3-6- انجام آزمایش مدل‌سازی

با توجه به انجام آزمایش‌ها بر روی پی دایره‌ای، در شرایطی که لایه سطحی خاک به دوصورت بهسازی‌شده و بهسازی‌نشده درنظر گرفته شده است، برنامه آزمایش‌ها مطابق جدول (2)، تنظیم گردیده است. در این آزمایش‌ها، تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر فاصله عمقی لایه سطحی از تراز بستر، ضخامت لایه بهسازی‌شده و نوع (جنس) لایه سطحی بر رفتار باربری پی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این پارامترها با هدف تحلیل اثرات بهسازی زیستی بر بهبود ظرفیت باربری و عملکرد مکانیکی خاک ماسه‌ای انتخاب شده‌اند.

جدول 2- برنامه تعداد آزمایش

پارامتر مورد نظر	تعداد	حالت‌های مورد بررسی
عمق قرارگیری لایه	2	B/2 – 0
نوع باکتری	2	پاستوری- مگاتریوم
سطوح تنش (kpa)	3	70 - 60 - 50
لایه نازک	2	وجود لایه نازک- عدم وجود لایه نازک

در نخستین نمونه، ماسه بدون هیچ‌گونه بهسازی مورد آزمایش قرار گرفت. بار قائم معادل 70 کیلوپاسکال به پی اعمال شد و مقدار نشست نهایی برابر 11/59 میلی‌متر به‌دست آمد. این نمونه به‌عنوان مرجع برای مقایسه سایر شرایط بهسازی درنظر گرفته شده است. در نمونه دوم، مطابق با شکل (6)، لایه‌ای نازک از ماسه در سطح، به‌صورت زیستی سمنته شد و بهسازی با استفاده از باکتری باسیلوس مگاتریوم و محلول سیمانی حاوی 180 گرم کلرید کلسیم و 180 گرم اوره در هر لیتر آب انجام شد. دوره عمل‌آوری به‌مدت 14 روز ادامه داشت و پس از آن، آزمایش بارگذاری مشابه صورت گرفت. در این حالت، نشست نهایی برابر 6/84 میلی‌متر ثبت شد که نسبت به نمونه فاقد بهسازی، کاهشی معادل 41 درصد را نشان می‌دهد. مشخصات سایر نمونه‌های آزمایش‌شده، شامل موقعیت‌های مختلف لایه‌های بهسازی‌شده و انواع باکتری‌های استفاده‌شده، در سیکل‌های بارگذاری متفاوت در ادامه بیان شده است.



شکل 6- نمونه بهسازی‌شده با باکتری مگاتریوم در سطح

3-7- آزمایش‌های تک‌محوری مکمل برای بررسی اثر pH و غلظت محلول رسوب‌زا

به‌منظور بررسی تأثیر شرایط شیمیایی محلول رسوب‌زا بر عملکرد مقاومتی خاک بهسازی‌شده، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های تیمارشده با دو باکتری باسیلوس مگاتریوم و اسپورسارسینا پاستوری انجام شد. در این آزمایش‌ها، تأثیر دو پارامتر pH اولیه و غلظت محلول رسوب‌زا به‌صورت مجزا بررسی گردید. برای ارزیابی اثر غلظت، سه مقدار 0/5، 1 و 1/5 مولار در شرایط pH برابر با 9 در نظر گرفته شد. همچنین، برای بررسی اثرpH، نمونه‌های بهسازی‌شده با محلول یک مولار در دو مقدار pH برابر با 7 و 9 مورد آزمایش قرار گرفتند. سطح اولیه مقطع نمونه‌ها برابر با 25/1 سانتی‌متر مربع و سرعت بارگذاری برابر با 0/5 میلی‌متر بر دقیقه بود. نتایج آن‌ها که در بخش 4-2 ارائه شده است، نشان می‌دهد در محدوده شرایط آزمایش‌شده، افزایش pH اولیه از 7 به 9 موجب بهبود مقاومت فشاری هر دو گروه باکتریایی شده و بیشترین مقاومت نیز در غلظت یک مولار مشاهده شده است.

4- ارزیابی نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های بارگذاری نشان می‌دهد که استفاده از روش بیوسمنتاسیون با فرآیند رسوب میکروبی کلسیم کربنات باعث کاهش قابل‌توجه نشست پی‌های دایره‌ای می‌شود. کاهش نشست مشاهده‌شده می‌تواند با سازوکار بیوسمنتاسیون و تشکیل پیوندهای سیمانی میان ذرات خاک مرتبط باشد؛ با این حال، مقدار رسوب کربنات کلسیم و تغییرات تخلخل در پژوهش حاضر به‌صورت مستقل اندازه‌گیری نشده است. مقایسه دو نوع باکتری نشان داد که باسیلوس مگاتریوم تأثیر بیشتری در کاهش نشست و افزایش استحکام خاک نسبت به باسیلوس پاستوری دارد. همچنین، عمق و موقعیت لایه بهسازی‌شده نیز بر عملکرد کاهش نشست تأثیرگذار است، به‌طوری که لایه‌های نزدیک به سطح

زیرین فونداسیون بیشترین اثر را در توزیع تنش‌ها دارند. این نتایج می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای بهبود طراحی پی‌های دایره‌ای در خاک‌های ماسه‌ای به کمک رسوب کلسیم کربنات استفاده شود.

4-1- نتایج مدل‌سازی فیزیکی

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش مدل‌سازی فیزیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و تأثیر فرآیند بیوسمنتاسیون بر رفتار نشست پی‌های دایره‌ای در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری سیکلی مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرد.

4-1-1- اثر بارگذاری

برای بررسی تأثیر تعداد سیکل‌های بارگذاری بر رفتار مکانیکی پی، نتایج نشست در شرایط مختلف بارگذاری سیکلی استخراج شده و به‌صورت مقایسه‌ای در قالب جداول و نمودارهای زیر ارائه گردیده است. مطابق با جدول (3)، نتایج آزمایش‌ها تحت بارگذاری سیکلی 50 کیلوپاسکال نشان می‌دهد که تزریق باکتری‌های باسیلوس مگاتریوم و باسیلوس پاستوری به‌طور مؤثری باعث کاهش نشست پی‌های دایره‌ای می‌شود. در آزمایش شماره 2 با استفاده از باسیلوس مگاتریوم، نشست به 5/63 میلی‌متر کاهش یافت که کاهش 41/1 درصدی را نشان می‌دهد. همچنین، در آزمایش شماره 3 با عمق تزریق B/2، نشست به 5/87 میلی‌متر رسید. در آزمایش‌های شماره 4 و 5 که از باسیلوس پاستوری استفاده شد، نشست به‌ترتیب به 5/90 و 7/77 میلی‌متر کاهش یافت. آزمایش‌های بعدی که لایه نازک D/2 داشتند، کاهش نشست کمتری نشان دادند، به‌طوری که نشست در آزمایش شماره 7 به 5/98 میلی‌متر و در آزمایش شماره 8 به 6/59 میلی‌متر رسید. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت تزریق باکتری‌ها و تأثیر عمق تزریق در کاهش نشست پی‌ها است.

جدول (4) نشست پی‌های دایره‌ای تحت بارگذاری سیکلی با 60 کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. در آزمایش شماره 1 که هیچ تزریق باکتری انجام نشده، نشست پی برابر با 10/57 میلی‌متر بود. در آزمایش‌های بعدی، تزریق باکتری‌ها باعث کاهش قابل‌توجه نشست گردید. به‌طور خاص، در آزمایش شماره 2 که از باسیلوس مگاتریوم استفاده شده، نشست به 6/22 میلی‌متر کاهش یافت (کاهش 41/1 درصدی نسبت به آزمایش مرجع). همچنین، در آزمایش شماره 3 که عمق تزریق باکتری به B/2 افزایش یافته، نشست به 6/49 میلی‌متر رسید. در آزمایش‌های شماره 4 و 5 که از باکتری اسپورسارسینا پاستوری استفاده شد، نشست پی به‌ترتیب به 6/54 و 8/62 میلی‌متر کاهش یافت. در آزمایش‌های شماره 6 تا 8 که از لایه نازک D/2 استفاده شد، نشست به‌ترتیب به 22/55 میلی‌متر (بدون تزریق باکتری)، 6/67 میلی‌متر (با باسیلوس مگاتریوم) و 7/27 میلی‌متر (با باسیلوس پاستوری) رسید. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت تزریق باکتری‌ها و تأثیر عمق تزریق بر کاهش نشست پی‌ها است.

نتایج جدول (5)، نشست پی‌های دایره‌ای تحت بارگذاری سیکلی با 70 کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. در آزمایش شماره 1 که هیچ‌گونه تزریق باکتری انجام نشده، نشست پی برابر با 11/59 میلی‌متر بود. در آزمایش‌هایی که از باسیلوس مگاتریوم و باسیلوس پاستوری استفاده شده، کاهش قابل‌توجهی در نشست مشاهده گردید. به‌طور خاص، در آزمایش شماره 2 که از باسیلوس مگاتریوم بدون تزریق عمق لایه نازک استفاده شده، نشست به 6/84 میلی‌متر کاهش یافت (کاهش 41 درصدی). همچنین در آزمایش شماره 3 که عمق تزریق باکتری به B/2 افزایش یافته، نشست به 7/14 میلی‌متر رسید. در آزمایش‌های شماره 4 و 5 که از باسیلوس پاستوری استفاده شد، نشست به‌ترتیب به 7/17 و 9/45 میلی‌متر رسید که نشان‌دهنده تأثیر عمق تزریق و نوع باکتری بر کاهش نشست است. در آزمایش‌های شماره 6 تا 8 که از لایه نازک D/2 استفاده شده، نشست به‌ترتیب به 25/35 میلی‌متر (بدون تزریق باکتری)، 7/39 میلی‌متر (با باسیلوس مگاتریوم) و 8/00 میلی‌متر (با باسیلوس پاستوری) رسید.

جدول 3- نتایج آزمایش‌ها تحت بارگذاری سیکلی با تنش 50 کیلوپاسکال

شماره آزمایش	نوع باکتری	شکل پی	عمق لایه نازک	عمق تزریق باکتری	نشست (mm0/01)	درصد تغییر نشست
1	ندارد	دایره‌ای	ندارد	0	956	0
2	مگاتریوم	دایره‌ای	ندارد	0	563	-41/1
3	مگاتریوم	دایره‌ای	ندارد	B/2	587	-38/6
4	پاستوری	دایره‌ای	ندارد	0	590	-38/28
5	پاستوری	دایره‌ای	ندارد	B/2	777	-18/7
6	ندارد	دایره‌ای	D/2	0	1905	0
7	مگاتریوم	دایره‌ای	D/2	0	598	-68/6
8	پاستوری	دایره‌ای	D/2	0	659	-65/4

جدول 4- نتایج آزمایش‌ها تحت بارگذاری سیکلی با تنش 60 کیلوپاسکال

شماره آزمایش	نوع باکتری	شکل پی	عمق لایه نازک	عمق تزریق باکتری	نشست (mm0/01)	درصد تغییر نشست
1	ندارد	دایره‌ای	ندارد	0	1057	0
2	مگاتریوم	دایره‌ای	ندارد	0	622	-41/1
3	مگاتریوم	دایره‌ای	ندارد	B/2	649	-38/5
4	پاستوری	دایره‌ای	ندارد	0	654	-38/1
5	پاستوری	دایره‌ای	ندارد	B/2	862	-18/4
6	ندارد	دایره‌ای	D/2	0	2255	0
7	مگاتریوم	دایره‌ای	D/2	0	667	-70/4
8	پاستوری	دایره‌ای	D/2	0	727	-67/7

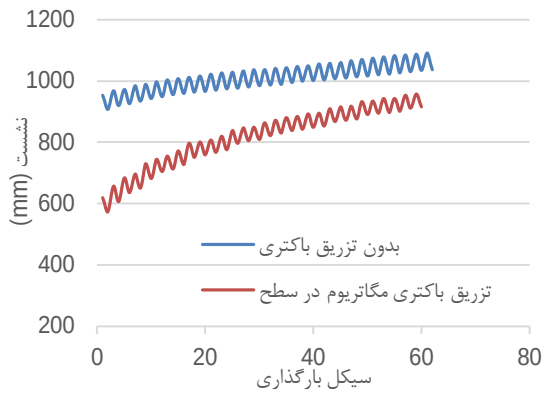
جدول 5- نتایج آزمایش‌ها تحت بارگذاری سیکلی با تنش 70 کیلوپاسکال

شماره آزمایش	نوع باکتری	شکل پی	عمق لایه نازک	عمق تزریق باکتری	نشست (mm0/01)	درصد تغییر نشست
1	ندارد	دایره‌ای	ندارد	0	1159	0
2	مگاتریوم	دایره‌ای	ندارد	0	684	-41
3	مگاتریوم	دایره‌ای	ندارد	B/2	714	-38/4
4	پاستوری	دایره‌ای	ندارد	0	717	-38/2
5	پاستوری	دایره‌ای	ندارد	B/2	945	-18/5
6	ندارد	دایره‌ای	D/2	0	2535	0
7	مگاتریوم	دایره‌ای	D/2	0	739	-70/8
8	پاستوری	دایره‌ای	D/2	0	800	-68/4

به‌منظور بررسی سازگاری روند کاهش نشست در شرایط مختلف بارگذاری، درصد تغییر نشست نمونه‌های بهسازی‌شده نسبت به نمونه‌های بدون بهسازی در سه سطح تنش 50، 60 و 70 کیلوپاسکال مقایسه شد. نتایج نشان داد که در شرایط بهسازی سطحی با باسیلوس مگاتریوم، کاهش نشست به‌ترتیب برابر با 41/11، 41/15 و 40/98 درصد بوده است. مقادیر متناظر برای نمونه‌های تیمارشده با اسپورسارسینا پاستوری نیز به‌ترتیب برابر با 38/28، 38/13 و 38/14 درصد به‌دست آمد. نزدیکی درصدهای گزارش‌شده بیانگر سازگاری روند کاهش نشست در محدوده تنش‌های بررسی شده است.

به‌منظور ارزیابی تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی، سه مدل فیزیکی اصلی مورد بررسی قرار گرفتند و برای هر مدل، آزمایش‌ها در سه نوبت مستقل، از مرحله آماده‌سازی نمونه تا پایان فرآیند بارگذاری، تکرار شدند. در اجرای بازآزمون‌ها، شرایط آماده‌سازی بستر، هندسه پی، تجهیزات آزمایشگاهی و عوامل اجرایی ثابت نگه‌داشته شدند تا تأثیر عوامل انسانی و تجهیزات بر پراکندگی نتایج به حداقل برسد. همچنین، در آزمایش‌های استاتیکی مرتبط نیز کنترل مشابهی برای بررسی یکنواختی عملکرد سامانه بارگذاری انجام شد. در مجموع تفاوت در نتایج آزمون‌های تکرارپذیری محدود به 2/5 تا 9/5 درصد بوده است.

پس‌از انجام آزمایش‌ها مدل‌سازی فیزیکی برروی پی دایره‌ای، آزمایش‌ها مدل‌سازی فیزیکی ظرفیت باربری برروی پی نواری نیز انجام شد. نتایج نشان داد، در آزمایش با تزریق باکتری مگاتریوم در سطح و زیر پی نواری تحت بار سیکلی 70 کیلوپاسکال، نشست پی از 10/92 میلی‌متر به 9/58 میلی‌متر و به‌میزان 12/3% کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت بهسازی ماسه می‌باشد. نتایج آزمایشات بر روی پی نواری در نمودار شکل (7) قابل مشاهده است.



شکل 7- منحنی سیکل بارگذاری- نشست آزمایش مدل‌سازی پی نواری تحت بار سیکلی

به‌منظور بررسی اثر بارگذاری، نتایج آزمایشات مدل‌سازی فیزیکی این پژوهش، با مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی فیزیکی با بار استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. در این زمینه،

Bidgoli و همکاران در سال 2025، به مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر بهسازی بیولوژیکی خاک بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی نواری، تحت اثر بار استاتیکی پرداختند. مطابق با شکل (8)، نتایج نشان داد بهسازی بیولوژیکی ماسه، باعث افزایش ظرفیت باربری پی نواری می‌شود به‌طوری‌که، ظرفیت باربری پی نواری بدون بهسازی، برابر با 95 کیلوپاسکال و نشست آن برابر با 8/7 میلی‌متر و ظرفیت باربری پی نواری بهسازی‌شده با باکتری مگاتریوم در سطح و زیر پی، 285 کیلوپاسکال و نشست آن برابر با 8/8 میلی‌متر به‌دست آمد.

4-1-2- ارزیابی تأثیر باکتری

نتایج نشان‌دهنده تأثیر نوع باکتری و عمق تزریق بر نشست پی‌های دایره‌ای تحت بارگذاری سیکلی است. در تمامی آزمایش‌ها، تزریق باکتری به سطح خاک باعث کاهش بیشتری در نشست پی‌ها نسبت به تزریق در عمق B/2 شد. در آزمایش‌هایی که تزریق در سطح انجام شد، کاهش بیشتری در نشست مشاهده شد، درحالی‌که در آزمایش‌هایی که تزریق در عمق B/2 قرار داشت، نشست بیشتر بود. میزان کاهش نشست، در نمونه مگاتریوم در سطح، نسبت به پاستوری در سطح، 4/6%، نمونه مگاتریوم در عمق نسبت به پاستوری در عمق، 24/4% و نمونه مگاتریوم در سطح با لایه نازک (خاک رس) نسبت به پاستوری در سطح با لایه نازک رس، 7/62% بیشتر به‌دست آمد.

4-1-3- مقایسه کمی و کیفی بیوسمنتاسیون با سایر روش‌های بهسازی خاک

Farouk و Shahien (2013) در بررسی آزمایشگاهی بهسازی خاک با ستون‌های خاک- سیمان نشان دادند که استفاده از این ستون‌ها می‌تواند موجب کاهش قابل‌توجه نشست پی نواری شود؛ به‌طوری‌که میزان کاهش نشست، بسته به تعداد و طول ستون‌ها، تا حدود 80 درصد گزارش شد. نتایج این پژوهش بیانگر نقش هندسه و آرایش ستون‌های بهسازی در کنترل تغییرشکل بستر است.

Hu و همکاران در سال 2022 به بررسی ترکیب روش رسوب‌گذاری کربنات میکروبی- القایی با فرآیند پیش‌درمانی برای تثبیت خاک‌های زیربنای جاده پرداختند. نتایج نشان داد که این ترکیب تأثیر قابل توجهی بر بهبود خواص مهندسی خاک دارد. بهترین پارامترهای آماده‌سازی برای تقویت خاک شامل رطوبت 9%، غلظت کلسیم کلرید 3 مولار و نسبت کلسیم کلرید به اوره 1:1 بود. آزمایش‌های استحکام فشاری تک‌محوری نشان داد که نمونه‌های تقویت‌شده با رسوب میکروبی کلسیم کربنات و پیش‌درمانی 198% استحکام بیشتری نسبت به خاک خالص و 78% بیشتر از نمونه‌های تقویت‌شده با رسوب میکروبی کلسیم کربنات ساده داشتند. همچنین، نتایج بررسی توزیع کربنات کلسیم نشان داد که رسوب این ماده به‌طور غیریکنواخت در خاک توزیع شده است، که این امر تأثیرات زیادی بر بهبود خواص مهندسی خاک و تقویت آن دارد.

Hajitaheriha و همکاران (2021) با آزمایش‌های فیزیکی و مدل‌سازی عددی، بهبود رفتار بار- نشست پی نواری روی خاک ضعیف با ترانشه دانه‌ای مسلح با ژئوگرید را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جایگزینی ماسه با مصالح دانه‌ای ظرفیت باربری را تا سه برابر افزایش می‌دهد و افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید موجب بهبود قابل‌توجه نسبت ظرفیت باربری می‌شود. ابعاد بهینه ترانشه برای دستیابی به بیشینه ظرفیت باربری، عرضی معادل 1/5 برابر عرض پی و عمقی معادل 3/5 برابر عرض پی تعیین شد.

Nouri و همکاران (2019) به بهبود ظرفیت باربری رابط خاک رس و ماسه با ژئوتکستایل پرداختند. استفاده از ژئوسنتتیک‌ها، به‌ویژه ژئوتکستایل، موجب افزایش 53٪ ظرفیت باربری، بهبود مقاومت نفوذ و کاهش نشست گردید.

درمیان مطالعات مرتبط با بهسازی خاک با ژئوسنتتیک، پژوهش Fakhari و همکاران (2026) ازنظر برخی شرایط آزمایشگاهی به پژوهش حاضر نزدیک‌تر است. در این پژوهش، استفاده از ژئوگرید در اعماق مختلف موجب افزایش حدود 53 تا 65 درصدی ظرفیت باربری نسبت به بستر دارای لایه ضعیف شد. این منحنی‌ها، رفتار پی مربعی را در حالت بستر ماسه‌ای یکنواخت، بستر دارای لایه ضعیف بدون مسلح‌کننده و بستر مسلح‌شده با ژئوگرید در اعماق مختلف نشان می‌دهند. مقایسه منحنی‌ها بیانگر تأثیر موقعیت قرارگیری ژئوگرید بر ظرفیت باربری و رفتار بار- نشست پی در شرایط آزمایش‌شده است.

نتایج مطالعات Farouk و Shahien (2013)، Hajitaheriha و همکاران (2021) و Nouri و همکاران (2019) عمدتاً بر اساس تغییرات ظرفیت باربری و رفتار بار- نشست گزارش شده است، در حالی که Hu و همکاران عملکرد MICP همراه با پیش‌تیمار را بر مبنای مقاومت فشاری تک‌محوری ارزیابی کرده‌اند. ازاین‌رو، به‌دلیل تفاوت در نوع پی، شرایط بستر، نوع بارگذاری و شاخص ارزیابی، مقایسه مستقیم مقادیر گزارش‌شده در این مطالعات با نتایج پژوهش حاضر مناسب نیست. با این وجود، نتایج نشان می‌دهد که هر یک از روش‌های بهسازی از طریق سازوکار متفاوتی موجب بهبود رفتار مکانیکی خاک می‌شوند؛ در پژوهش حاضر این بهبود به‌صورت کاهش نشست پی دایره‌ای تحت بارگذاری سیکلی بررسی شده است.

2-4- بررسی تأثیر PH و غلظت محلول رسوب‌زا بر مقاومت فشاری خاک بهسازی‌شده

4-2-1- تأثیرpH

به‌منظور بررسی نقش شرایط شیمیایی محیط در عملکرد بهسازی زیستی خاک، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تیمارشده با دو باکتری در مقادیر مختلف pH مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در غلظت یک مولار محلول رسوب‌زا، افزایش pH اولیه از 7 به 9 با افزایش مقاومت فشاری هردو گروه از نمونه‌های بهسازی‌شده همراه بوده است. مقاومت فشاری نمونه‌های تیمارشده با باسیلوس مگاتریوم از 1/55 به 1/90 کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع افزایش یافت؛ درحالی‌که این مقدار برای نمونه‌های تیمارشده با اسپورسارسینا پاستوری از 1/38 به 1/73 کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسید. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش‌های انجام‌شده، عملکرد مقاومتی نمونه‌های بهسازی‌شده به pH اولیه محیط وابسته بوده و شرایط قلیایی مورد بررسی، پاسخ مقاومتی مطلوب‌تری نسبت به شرایط خنثی ایجاد کرده است.

4-2-2- تأثیر غلظت محلول

بررسی تأثیر غلظت محلول رسوب‌زا نیز نشان داد که افزایش غلظت لزوماً موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی‌شده نمی‌شود. در شرایط pH برابر با 9، مقاومت فشاری نمونه‌های تیمارشده با باسیلوس مگاتریوم در غلظت‌های 0/5، 1 و 1/5 مولار به‌ترتیب برابر با 1/65، 1/90 و 1/50 کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع به‌دست آمد. مقادیر متناظر برای نمونه‌های بهسازی‌شده با اسپورسارسینا پاستوری به‌ترتیب برابر با 1/48، 1/73 و 1/45 کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بود. بنابراین، در محدوده غلظت‌های بررسی‌شده، بیشترین مقاومت فشاری برای هردو باکتری در غلظت یک مولار مشاهده شد. این رفتار بیانگر اهمیت انتخاب مناسب شرایط شیمیایی محلول رسوب‌زا در دستیابی به عملکرد مقاومتی مطلوب است. مقادیر مقاومت فشاری متناظر با شرایط مختلف pH اولیه در جدول (6) ارائه شده است.

جدول6- تأثیر pH اولیه و غلظت محلول رسوب‌زا بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های بهسازی‌شده با دو باکتری

Ph اولیه	غلظت محلول رسوب‌زا (مولار)	مقاومت فشاری مگاتریوم (kg/cm^2)	مقاومت فشاری پاستوری (kg/cm^2)
7	1	1/55	1/38
9	0/5	1/65	1/48
9	1	1/90	1/73
9	1/5	1/50	1/45

5- نتیجه‌گیری

این تحقیق، تأثیر فرآیند بیوسمنتاسیون بر رفتار نشست پی‌های دایره‌ای در خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری سیکلی را ارزیابی کرد. نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی و عددی به شرح زیر است:

1) نتایج آزمایش‌های نشست سیکلی نشان داد که در شرایط بررسی‌شده، نوع باکتری مورد استفاده بر عملکرد بهسازی زیستی تأثیرگذار بوده است؛ به‌طوری‌که بهسازی با باسیلوس مگاتریوم و اسپورسارسینا پاستوری به‌ترتیب موجب کاهش 41 و 38 درصدی نشست پی دایره‌ای شد. همچنین، نتایج آزمایش‌های تک‌محوری مکمل نشان داد که در شرایط شیمیایی متناظر، نمونه‌های بهسازی‌شده با مگاتریوم مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های تیمارشده با پاستوری داشته‌اند.

2) عمق تزریق باکتری نیز به‌طور قابل‌توجهی بر کاهش نشست تأثیرگذار بود، به‌طوری‌که در شرایط آزمایش حاضر، بهسازی در سطح خاک نسبت به بهسازی در عمق B/2 کاهش نشست بیشتری ایجاد کرد. بهسازی در عمق با باکتری مگاتریوم موجب کاهش حدود 38% و بهسازی در عمق با باکتری پاستوری موجب کاهش 18/5 نشست شده‌است و این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش حاضر، موقعیت ناحیه بهسازی‌شده بر میزان کاهش نشست مؤثر بوده است. مدل‌سازی فیزیکی و عددی به‌طور هم‌زمان برای ارزیابی تأثیر بیوسمنتاسیون بر رفتار نشست پی‌ها استفاده شد. نتایج مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مدل رفتاری دراکر-پراگر، که ویژگی‌های خاک را به‌صورت غیرخطی و پلاستیک شبیه‌سازی می‌کند، با نتایج آزمایش‌های فیزیکی هم‌خوانی داشت. این نتایج نشان‌دهنده دقت مدل‌های عددی در شبیه‌سازی رفتار خاک تحت بارگذاری سیکلی و تأثیر فرآیند بیوسمنتاسیون بر نشست پی‌ها است. مدل‌سازی عددی همچنین به تحلیل دقیق‌تر اثرات تغییرات پارامترهای مختلف خاک، مانند زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستسیته، در فرآیند بیوسمنتاسیون کمک کرده است.

3) مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات مربوط به بهسازی خاک با استفاده از ژئوگرید و سایر ژئوسنتتیک‌ها نشان می‌دهد که این روش‌ها از طریق سازوکارهای متفاوت می‌توانند موجب بهبود رفتار مکانیکی بستر شوند. برای نمونه، Fakhari و همکاران (2026) افزایش 53 تا 65 درصدی ظرفیت باربری پی مربعی تحت بارگذاری استاتیکی را در اثر استفاده از ژئوگرید گزارش کردند؛ درحالی‌که در پژوهش حاضر، بهسازی زیستی با باسیلوس مگاتریوم و اسپورسارسینا پاستوری به‌ترتیب موجب کاهش 41 و 38 درصدی نشست تجمعی پی دایره‌ای تحت بارگذاری سیکلی شد.

6- مراجع

Ahenkorah I, Rahman MM, Karim MR, "Cyclic liquefaction resistance of MICP- and EICP-treated sand in simple shear conditions: a benchmarking with the critical state of untreated sand", Acta Geotechnica, 2024, 19, 5891-5913. https://doi.org/10.1007/s11440-023-02222-7

Alam M K, Motamed R, "Role of MICP treatment area in mitigating liquefaction-induced settlements for shallow foundation", Biogeotechnics, 2026, 4 (1), 100187. https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2025.100187

Banik N, Sarkar R, "Effects of bacterial strains on undrained cyclic behavior of bio-cemented sand considering wetting and drying cycles", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17 (1), 432-452. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.035

Bidgoli J, Bagherzadeh Khalkhali A, Derakhshani A, Bahmanpour A, "Experimental and numerical assessment of biological soil improvement on the bearing capacity of shallow foundations", Geomechanics and Engineering, 2025, 43 (5), 391-403. https://doi.org/10.12989/gae.2025.43.5.391

DeJong JT, Fritzges MB, Nüsslein K, "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132 (11), 1381-1392. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241 (2006) 132:11(1381)

Fakhari Y, Baghrazadeh Khalkhali A, Derakhshani A, Nazari Afshar J, "Application of geogrid reinforcement for the improvement and stabilization of desert and arid soils (Case study: Enhancement of the bearing capacity of foundation subgrades)", Journal of Geography, 2026, 24 (90), Autumn 2026. 10.22034/jgeoq.2026.595654.4522

Farouk A, Shahien MM, "Ground improvement using soil-cement columns: Experimental investigation", Alexandria Engineering Journal, 2013, 52 (4), 733-740. https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.08.009

Feng K, Montoya BM, "Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142 (1), 04015057. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606. 0001379

Fu T, Clarà Saracho A, Haigh SK, "Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: A comprehensive review", Biogeotechnics, 2023, 1, 100002. https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100002

Hajitaheriha MM, Akbarimehr D, Hasani Motlagh A, Damerchilou H, "Bearing capacity improvement of shallow foundations using a trench filled with granular materials and reinforced with geogrids", Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14 (15), Article 1431. https://doi.org/10.1007/s12517-021-07679-y

Hang L, Yang E, Zhou Y, Song W, He J, "Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Stabilization of Desert Sand against the Wind-induced Erosion: A Parametric Study", Sustainability Journal, 2022, 14 (18), 11409. https://doi.org/10.3390/su141811409

Hosseini Fani M, Bagherzadeh Khalkhali A, Ganjian N, "Experimental and numerical investigation of strip footing behavior on sand with a weak layer of varying thicknesses and overburden loads", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2024, 48 (5), 3607-3620. https://doi.org/10.1007/s40996-024-01417-6

Hu X, Fu X, Pan P, Lin L, Sun Y, "Incorporation of Mixing Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) with Pretreatment Procedure for Road Soil Subgrade Stabilization", Materials, 2022, 15 (19), 6529. https://doi.org/10.3390/ma15196529

Katebi H, Fahmi A, Ouria A, Babaeian Amini A, Kafil HS, "Microbial surface treatment of sand with Sporosarcina pasteurii to improve the wind erosion resistance in Urmia Lake", Applied and Environmental Soil Science, 2021, Article 8893115. https://doi.org/10.1155/2021/8893115

Lee M, Gomez MG, El Kortbawi M, Ziotopoulou K, "Effect of light biocementation on the liquefaction triggering and post-triggering behavior of loose sands", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148 (1), Article 04021170. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606. 0002707

Liu L, Liu H, Stuedlein AW, Evans TM, Xiao Y, "Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand", Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56 (10), 1502-1513. https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0007

Nouri S, Nechnech A, de Lurdes Costa Lopes M, "Bearing capacity behavior of the clay and sand interface reinforced with geotextiles", In A. Kallel, Z. A. Erguler, Z.-D. Cui, A. Karrech, M. Karakus, P. Kulatilake, & S. K. Shukla (Eds.), Recent advances in Geo-Environmental Engineering, Geomechanics and Geotechnics, and Geohazards, 2019, 301-303, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01665-4_69

Sadeghi J, Bagherzadeh Khalkhali A, Nazariafshar J, Ganjian N, "Experimental investigation of eccentric loading effect on circular footing located on sandy bed with a weak thin layer", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2025, 57 (1), 3-24. https://doi.org/10.22060/ceej.2024.23365.8150

Su F, Yang Y, Qi Y, Zhang H, "Combining Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) with zeolite: A new technique to reduce ammonia emission and enhance soil treatment ability of MICP technology", Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10 (3), Article 107770. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107770

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

https://doi.org/10.1007/s11440-018-0758-y
Tao H, Jiang P, Qu J, Huang Y, "An investigation into enhancing sand stability and minimizing dust emissions through bacterial treatment in arid regions", Scientific Reports, 2025, 15 (1), Article 29862. https://doi.org/10.1038/s41598-025-15531-6
Whiffin VS, Van Paassen LA, Harkes MP, "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", Geomicrobiology Journal, 2007, 24 (5), 417-423. https://doi.org/10.1080/01490450701436505
Zamani A, Xiao P, DeJong JT, Boulanger RW, Wilson DW, Carey TJ, "Mitigation of liquefaction triggering and foundation settlement by MICP Treatment", I Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 308-317. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002596
Zhang K, Tang C-S, Jiang N-J, Pan X-H, Liu B, Wang Y-J, Shi B, "Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) technology: A review on the fundamentals and engineering applications", Environmental Earth Sciences, 2023, 82 (9), 229. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10899-y