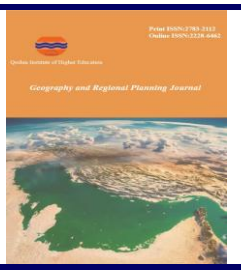
Iranian Association of Geopolitical

Geography and Regional Planning

ISSN (Print): 2783-2112 - ISSN (Online): 2228-6462

Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/



The role of biological processes in soil improvement and sustainability of Iranian desert lands (Case study: Feasibility study of using urolytic bacteria)

Javad Bidgoli[1], Ahad Bagherzadeh Khalkhali[2]✉

1. Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: javad_bidgoli@gmail.com
2. Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:
Received: 25 June 2025
Revised: 29 July 2025
Accepted: 29 November 2025
Published: 29 November 2025

Keywords:
Urolytic
bacteria soil improvement
MICP
finite element modeling
biocement

Abstract

Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) is an innovative and eco-friendly technology that has recently gained significant attention in bioremediation, dust control, desertification mitigation, and geotechnical engineering. This study aims to evaluate the efficiency of the MICP process in improving desert soils and to assess the effect of bio-treated layers on the ultimate bearing capacity and failure mode of strip footings on sandy soils. Ureolytic bacteria were obtained from the National Genetic Resources Center of Iran, and the selected strains were confirmed through biochemical and molecular tests. These bacteria were used to induce calcium carbonate precipitation and to form a thin biogenic layer within a sandy medium. To analyze the mechanical behavior, a physical model of sandy soil with a bio-improved layer was designed, and bearing capacity was tested under different bacterial strains and layer depths. Experimental data were compared with numerical modeling using PLAXIS software based on the Finite Element Method (FEM) and the Coulomb–Mohr failure criterion, and validated with field data. Results showed that MICP significantly enhanced the cohesion and strength of sandy soils, increasing them up to three times compared to untreated samples. The highest calcium carbonate concentration of 33.78 g/L was achieved under optimal conditions with OD_{600} = 2 and a cementation solution containing 1 M $CaCl_2$ and 1 M urea, which represents the highest reported value. Moreover, Bacillus megaterium showed superior performance to Sporosarcina pasteurii, improving shear strength parameters and increasing footing bearing capacity by 50%. Numerical and experimental results showed less than 10% deviation.

How to cite: Bidgoli,J. and Bagherzadeh Khalkhali,A. (2025). The role of biological processes in soil improvement and sustainability of Iranian desert lands (Case study: Feasibility study of using urolytic bacteria). *Geography and Regional Planning*, 15 (61),154-168.
https://doi.org/10.22034/jgeoq.2025.555090.4352

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
DOI: https://doi.org/10.22034/jgeoq.2025.555090.4352

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) is a novel and eco-friendly technology that has recently attracted significant attention in the fields of bioremediation, dust control, desertification mitigation, and geotechnical engineering. The main objective of this study is to investigate the potential of MICP in the improvement of desert soils and to evaluate the effect of a thin biogenic layer on the ultimate bearing capacity and failure mode of a strip footing on sandy soil.

Methodology

Ureolytic bacteria were obtained from the National Genetic Resources Center of Iran. The selected strains were confirmed using standard biochemical and molecular tests. These bacteria were then used to induce calcium carbonate precipitation and to form a thin biogenic layer in sandy soil. To investigate mechanical behavior, a physical model consisting of sandy soil with a biogenic layer was designed, on which a rectangular footing was placed.

The bearing capacity was purposefully examined under different conditions, including various bacterial strains and different depths of biogenic layers. Laboratory data were compared with numerical modeling performed in PLAXIS software based on the finite element method (FEM) and the Coulomb–Mohr failure criterion, and the results were validated against field tests.

Results and Discussion

The results of this study indicate that a biogenic layer produced by the MICP process can significantly increase the cohesion and strength of sandy soils, up to threefold. The maximum calcium carbonate concentration of 33.78 g/L was obtained under optimal conditions (OD600=2, cementation solution of 1 M calcium chloride and 1 M urea), which represents the highest concentration reported in the literature. Bacillus megaterium demonstrated superior performance compared to Sporosarcina pasteurii in improving the shear strength parameters of soil (cohesion c and friction angle φ), increasing the bearing capacity of the footing by an additional 50%. Numerical simulations using PLAXIS, based on the Coulomb–Mohr constitutive model, showed good agreement with the experimental results, with less than 10% deviation.

Conclusion

The findings of this study indicate that MICP represents a sustainable and effective approach for the improvement of desert soils. However, the development of standardized design protocols and long-term performance evaluation under natural conditions remain essentialCreating green roofs to moderate the microclimate and provide pleasant and refreshing spaces.

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article.

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article.

Ethical Considerations

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

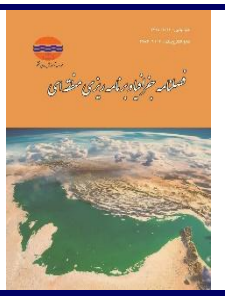
The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای

شاپا چاپی: ۶۴۶۲- ۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲ -۲۷۸۳

Journal Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/

انجمن ژئوپلیتیک ایران

نقش فرآیندهای زیستی در بهسازی خاک و پایداری سرزمین‌های بیابانی ایران (مطالعه موردی: امکان‌سنجی استفاده از باکتری‌های اورئولیتیک)

جواد بیدگلی[۱]، احد باقرزاده خلخالی[۲]✉

۱.گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه:javad_bidgoli@gmail.com

۲.گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه:a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۴ تیر ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۷ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۸ آذر ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۸ آذر ۱۴۰۴

کلیدواژه ها:

باکتری‌های اورئولیتیک

بهسازی خاک

MICP

مدل‌سازی المان محدود

سیمان زیستی

چکیده

رسوب کربنات کلسیم القاشده توسط میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان فناوری‌ای نوین و زیست‌سازگار، در سال‌های اخیر جایگاه مهمی در حوزه‌های زیست‌پالایی، کنترل ریزگردها، بیابان‌زدایی و مهندسی ژئوتکنیک یافته است. هدف این پژوهش، بررسی کارایی فرآیند MICP در بهسازی خاک‌های کویری و ارزیابی اثر لایه‌های بهسازی‌شده زیستی بر ظرفیت باربری نهایی و مود گسیختگی پی نواری بر روی خاک ماسه‌ای است. در این راستا، باکتری‌های اورئولیتیک از مرکز ملی ذخایر ژنتیکی ایران تهیه و سویه‌های منتخب با آزمون‌های بیوشیمیایی و مولکولی تأیید شدند. از این باکتری‌ها برای القای رسوب کربنات کلسیم و ایجاد لایه‌ای نازک در محیط شنی استفاده گردید. به‌منظور تحلیل رفتار مکانیکی، یک مدل فیزیکی شامل خاک ماسه‌ای با لایه زیستی طراحی شد و ظرفیت باربری تحت شرایط مختلف شامل نوع سویه و عمق لایه بررسی گردید. داده‌های تجربی با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار PLAXIS بر پایه تئوری المان محدود و معیار شکست کولمب–موهر تطبیق داده شدند و نتایج برای اعتبارسنجی با داده‌های میدانی مقایسه شد. یافته‌ها نشان داد لایه‌های زیستی ایجادشده توسط فناوری MICP انسجام و استحکام خاک شنی را تا سه برابر افزایش می‌دهند. بیشترین غلظت کربنات کلسیم، ۳۳.۷۸ گرم در لیتر، در شرایط بهینه با $OD_{600}=2$ و محلول سیمانی حاوی ۱ مولار کلرید کلسیم و ۱ مولار اوره به دست آمد که بالاترین مقدار گزارش‌شده در پژوهش‌های مشابه است. همچنین، Bacillus megaterium در مقایسه با Sporosarcina pasteurii عملکرد بهتری در بهبود پارامترهای مقاومت برشی داشته و ظرفیت باربری پی را تا ۵۰ درصد افزایش داده است. نتایج عددی با داده‌های تجربی کمتر از ۱۰ درصد انحراف داشتند.

استناد: بیدگلی، جواد و باقرزاده خلخالی، احد. (۱۴۰۴). نقش فرآیندهای زیستی در بهسازی خاک و پایداری سرزمین‌های بیابانی ایران (مطالعه موردی: امکان‌سنجی استفاده از باکتری‌های اورئولیتیک). *جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۱۵(۶۱)، ۱۵۴-۱۶۸.
https://doi.org/10.22034/jgeoq.2025.555090.43522

ناشر: موسسه آموزش عالی قشم

© نویسندگان.

مقدمه

فرسایش خاک، طوفان‌های گرد و غبار و بیابان‌زایی از چالش‌های زیست محیطی جدی هستند که پایداری اکوسیستم‌ها را در مناطق خشک و نیمه خشک تهدید می‌کنند و با فعالیت‌های انسانی مانند صنعتی‌سازی، کشاورزی ناپایدار و شهرنشینی تشدید می‌شوند. این پدیده‌ها منجر به از دست رفتن لایه‌های حاصلخیز خاک، کاهش بهره‌وری کشاورزی، تنوع زیستی و افزایش آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی می‌گردند و بیش از ۲ میلیارد نفر در مناطق خشک که ۴۰ درصد سطح زمین را پوشش می‌دهند را تحت تأثیر قرار می‌دهند(Motallebirad et al., 2024). برای نمونه، فرسایش بادی و آبی مواد مغذی را از بین می‌برد، در حالی که طوفان‌های گرد و غبار ذرات ریز را حمل کرده و کیفیت هوا و منابع آب را آلوده می‌سازد، همانند آنچه در ساحل آفریقا و خاورمیانه رخ می‌دهد و بیابان‌زایی از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۵، ۶ درصد زمین‌های تخریب‌شده را افزایش داده است(Spinoni et al., 2021). در زمینه ژئوتکنیک، چنین فرسایشی ظرفیت باربری خاک را کاهش می‌دهد و ناپایداری زیرساخت‌ها و زیان‌های اقتصادی سالانه به ارزش میلیاردها دلار را به بار می‌آورد(Silander et al., 2024). در ایران، مناطق کویری مرکزی با خطرات حاد روبرو هستند و طوفان‌های گرد و غبار ناشی از خشک شدن دریاچه ارومیه و چرای بیش از حد، سالانه ۳۰ هزار هکتار زمین را از دست می‌دهد(Talaie et al., 2024).

روش‌های سنتی بهسازی خاک، مانند تثبیت شیمیایی (تزریق آهک یا سیمان) و تقویت مکانیکی (ژئوسنتتیک‌ها یا فشرده‌سازی)، راه‌حل‌های کوتاه‌مدت ارائه می‌دهند اما اغلب معایب زیست‌محیطی مانند انتشار کربن بالا، آلودگی آب‌های زیرزمینی و اختلال زیستگاه‌ها را به همراه دارند(Hosseini et al., 2023). رویکردهای گیاهی مانند جنگل‌کاری و بادشکن‌ها فرسایش را کاهش می‌دهند اما در مناطق خشک به دلیل کمبود آب محدود هستند(Qattan, 2025). جایگزین‌های پایدار نوظهور، از جمله تکنیک‌های بیوانجینری، عوامل بیولوژیکی را با مهندسی ژئوتکنیک ترکیب می‌کنند تا استحکام و انعطاف‌پذیری خاک را افزایش دهند. در میان این‌ها، رسوب کربنات کلسیم القایی میکروبی(MICP) یک فرآیند بیوسمنتاسیون به دلیل پروفایل اکوفرندلی برجسته است و از باکتری‌های اورئولیتیک برای رسوب کریستال‌های کلسیت استفاده می‌کند که ذرات خاک را متصل می‌سازد و مقاومت برشی و نفوذپذیری را بدون افزودنی‌های مصنوعی بهبود می‌بخشد(Fazelikia et al., 2023).

MICP شامل هیدرولیز آنزیمی اوره توسط باکتری‌های تولیدکننده اوره‌آز (مانند *Sporosarcina pasteurii* یا *Lysinibacillus sphaericus*) است که آمونیوم و یون‌های کربنات تولید می‌کند و با یون‌های کلسیم واکنش می‌دهد تا رسوب کربنات کلسیم ($CaCO_3$) در منافذ خاک تشکیل شود(Bibi et al., 2018). این فرآیند نه تنها شن‌های سست را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌سازد-کاهش انتشار گرد و غبار تا ۹۰ درصد در خاک‌های کویری درمان‌شده بلکه ظرفیت باربری را ۲–۴ برابر افزایش می‌دهد و آن را برای کاربردهای ژئوتکنیکی مانند تقویت فونداسیون در مناطق خشک مناسب می‌کند(Boruah et al., 2025). مزایای آن شامل مصرف انرژی پایین، قابلیت in situ ، و سازگاری با میکروبیوتای بومی است که اختلال اکولوژیکی را به حداقل می‌رساند در مقایسه با روش‌های شیمیایی . کاربردها به بیورمدیشن گسترش می‌یابد، جایی که MICP فلزات سنگین (مانند Cd, Pb) را از طریق هم‌رسوبی، با دستیابی به ۷۰–۸۰ درصد حذف در سایت‌های آلوده، و به کنترل بیابان‌زایی، همانند آزمایش‌های صحرای گبی چین که تپه‌های درمان‌شده با MICP بیش از دو سال در برابر فرسایش مقاوم بودند، می‌رسد. در مناطق کویری ایران، MICPنویدبخش کاهش طوفان‌های گرد و غبار و بازسازی زمین است و چالش‌های محلی مانند دشت کویر را حل می‌کند(Kalkan, 2020).

با توجه به موارد فوق هدف از مطالعه حاضر بررسی توانایی MICP توسط باکتری‌های اورئولیتیک و کاربردهای آن را در بیورمدیشن، کنترل ریزگردها، بیابان‌زدایی و مهندسی ژئوتکنیک خاکهای ایران می باشد. نتایج این مطالعه چارچوبی کم‌هزینه و

دوستدار محیط زیست برای بازسازی پایدار زمین‌های خشک ارائه می‌دهد و سیاست‌ها و کاربردها را برای مناطقی مانند دشت کویر آگاه می‌سازد، و به تلاش‌های جهانی برای مبارزه با بیابان‌زایی کمک می‌کند .

مواد و روش‌ها

هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر وجود یک لایه بهسازی شده زیستی بر ظرفیت باربری نهایی و مود گسیختگی پی نواری بر روی خاک ماسه‌ای با استفاده از مدل‌سازی المان محدود (FEM) و اعتبارسنجی داده‌های محاسباتی بر اساس آزمایش‌های میدانی است که شامل ساخت یک مدل فیزیکی از خاک شنی با یک لایه نازک بیولوژیکی است که یک پایه مستطیلی روی آن قرار گرفته است. ظرفیت باربری به‌طور هدفمند تحت شرایط مختلف، ازجمله سویه‌های باکتریایی و عمق لایه‌های بهسازی شده بررسی می‌شود.

مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق برای انجام آزمون‌های عملی از یک ظرف فولادی با ابعاد داخلی ۱۰۰ سانتی‌متر طول، ۷۰ سانتی‌متر ارتفاع و ۷۰ سانتی‌متر عرض مطابق شکل ۶ استفاده شده است. یک جعبه بارش در بالای قاب بارگیری برای دستیابی به تراکم خاک مورد نظر نصب گردید که امکان سقوط آزادانه شن از ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری را فراهم می‌سازد. فونداسیون هم با ورق فولادی به ابعاد ۷ سانتی‌متر عرض و ۱ سانتی‌متر ضخامت مدل شد. جهت بارگذاری از جک هیدرولیکی دستی با سرعت کنترل شده ۱ mm/min و برای اندازه‌گیری نشست فونداسیون از یک گیج با دقت ۰.۰۱ mm استفاده گردیده است.

مشخصات خاک مورد استفاده

در این تحقیق از رسوبات ماسه سیلتی واقع در استان همدان به علت مقاومت دانه‌ها در برابر خردشدگی طی آزمایش‌های متوالی، جذب آب تقریباً صفر، یکدستی و عدم حضور مواد زائد استفاده گردیده است که بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک (USCS)، به‌عنوان ماسه با درجه‌بندی ضعیف (SP) طبقه‌بندی می‌شود. در جدول ۱پارامترهای فیزیکی ماسه مورد استفاده شامل: توزیع اندازه ذرات (D)، ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب دانه‌بندی (C_c)، وزن مخصوص ویژه (G_s)، تراکم نسبی (D_r) و وزن مخصوص خشک (γ_d) بر اساس ASTM D4253-00 ارائه شده است.

جدول (۱) : خواص فیزیکی ماسه مورد استفاده در آزمایش.

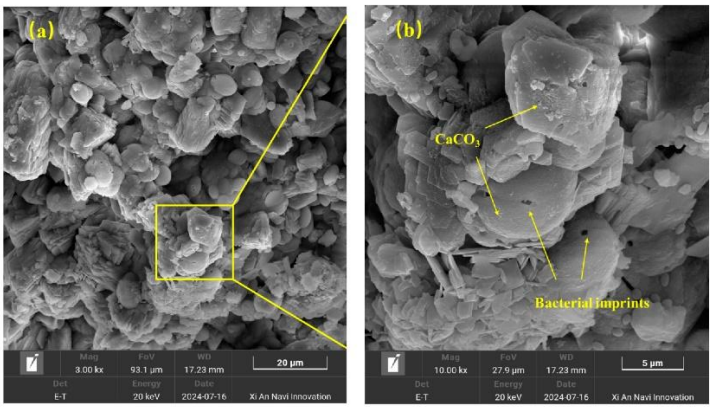
D_{max} (mm)	2.38	C_u	2.16	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m^3)	19.85
D_{60} (mm)	1.45	C_c	0.83	$\gamma_{d\ min}$ (kN/m^3)	13.73
D_{30} (mm)	0.90	G_s	2.66	γ_d (kN/m^3)	15.71
D_{10} (mm)	0.67	D_r (%)	41.00	Soil classification	SP (USCS)

سویه باکتری، غلظت واکنش‌گرها و نحوه تزریق

در این پژوهش از باکتری‌های گرم مثبت *اسپورسارسینا* پاستوری با کدATCC11859 و *باسیلوس مگاتریوم* با کد ATCC14581 استفاده شده است. محیط رشد ATCC 1376 NH4-YE، شامل ۱ لیتر آب دیونیزه (DI)، ۲۰ گرم عصاره مخمر، ۱۰ گرم $(NH_4)_2SO_4$ و ۰.۱۳ مولار بافر Tris بود. پودر باکتری‌های خشک‌شده به روش انجمادی، فعال‌سازی و با

نسبت حجمی ۱:۱۰۰ به محلول کشت تلقیح و با استفاده از یک ظرف استریلیزاسیون بخار با فشار بالا در دمای ۱۲۱ درجه سانتیگراد استریل شد. سپس به طور مداوم روی یک انکوباتور نوسانی با دمای ثابت انکوبه شد. جهت تعیین نقطه بهینه تراکم غلظت باکتری‌ها، هر ۲ ساعت در طول فرآیند کشت با استفاده از اسپکتروفتومتر فرابنفش، نانودراپ و دستگاه میکروپلیت ریدر، چگالی نوری در ۶۰۰ نانومتر (OD_{600}) اندازه‌گیری شد تا منحنی رشد باکتری به دست آید. پس از انکوباسیون به مدت ۴۸ ساعت، محلول باکتریایی OD_{600} به ۲.۰ رسید که مقدار مورد نیاز برای آماده‌سازی نمونه خاک بود. در این تحقیق، از محلولی مخلوط با $CaCl_2$ و CH_4N_2O به عنوان محلول سیمانی استفاده شد که هر لیتر از این محلول حاوی ۱ لیتر آب دیونیزه، ۱ مول $CaCl_2$ و ۱ مول CH_4N_2O بود و در سه مرحله به خاک اضافه گردید.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مشاهده میکرومورفولوژی سطح RA که با تکنیک MICP اصلاح شده است، استفاده شد. تصاویر ذرات $CaCO_3$ روی سطح به شکل‌های کروی و مربعی منظمی با قطرهای مختلف از ۱ میکرومتر تا ۱۰ میکرومتر و توزیع نسبتاً یکنواخت می‌باشد. علاوه بر این، منافذی با قطر حدود ۰.۵ میکرومتر روی سطح ذرات کروی مشاهده شد که ردپاهایی بودند که توسط باکتری در طول فرآیند کانی‌سازی ایجاد شده بودند. جهت اندازه‌گیری محصول رسوب $CaCO_3$ از آنالیز XRD استفاده گردید. حداکثر غلظت کربنات کلسیم ۳۳.۷۸ گرم در لیتر در شرایط بهینه حاصل شد.



شکل (۱): تصویر SEM از ماسه بهسازی شده با MICP: (a) بزرگنمایی ۳۰۰۰ و (b) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰.

مشخصات مکانیکی ماسه نرمال و بهسازی‌شده توسط آزمایش برشی مستقیم بر اساس ASTM در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): مشخصات مکانیکی خاک نرمال و بهسازشده.

مصالح	مشخصات					
	مدل رفتاری	ضریب پواسون	ضریب ارتجاعی (kPa)	وزن مخصوص (Kg/m^3)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kPa)
ماسه سیلیسی (SP)	موهر ـ کولمب	۰.۲۵	۱۵۰	۱۵.۷	۴۸	۰
ماسه بهسازی شده با مگاتریوم	موهر ـ کولمب	۰.۳۵	۲۵۰	۱۸.۲	۴۵	۳۵۰
ماسه بهسازی شده با پاستوری	موهر ـ کولمب	۰.۳	۲۰۰	۱۶.۳	۴۰	۲۰۰

جهت ارزیابی تأثیر محل قرارگیری لایه بهسازی شده و همچنین ظرفیت باربری خاک برای دو سویه باکتری، ۵ سری آزمایش مطابق جدول ۳ انجام گردید.

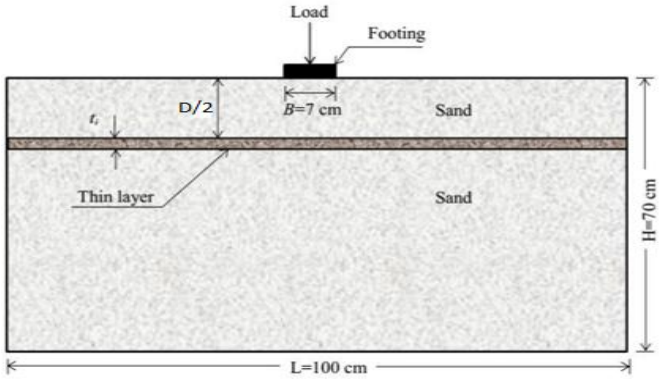
جدول (۳): پارامترهای آزمایش با توجه به سویه باکتری و عمق قرارگیری لایه بهسازی شده.

شماره مدل	حالت	نوع پی	نوع باکتری	محل قرارگیری لایه بهسازی شده
۱	مدل ساده (بدون بهسازی)	نواری	–	–
۲	مدل بهسازی شده (در سطح)	نواری	مگاتریوم	0
۳	مدل بهسازی شده	نواری	مگاتریوم	D/2=3.5 cm
۴	مدل بهسازی شده (در سطح)	نواری	پاستوری	0
۵	مدل بهسازی شده	نواری	پاستوری	D/2=3.5 cm

مدل المان محدود

به‌منظور ساخت مدل مطالعه حاضر و بررسی تأثیر بهبود بیولوژیکی خاک با هندسه دوبعدی بر ظرفیت باربری پی سطحی تحت بارگذاری قائم توأم با نیروی برشی از نرم‌افزار المان محدود Plaxis استفاده شده است. مدل رفتار خاک بر اساس معیار گسیختگی موهر ـ کولمب و شرایط کرنش ساده می‌باشد(Aligholi, 2018).

در شکل ۲ ابعاد هندسی مدل (مطابق نمونه میدانی ۱۰۰×۷ cm و لایه خاک بهسازی شده به ضخامت ۵ cm) نشان داده شده است. جهت مش‌بندی از المان‌های ۱۵ گره‌ای مثلثی استفاده گردیده که با در نظر گرفتن دو مسئله زمان و دقت نتایج، تعداد المان‌ها در نواحی نزدیک به پی و محل قرارگیری لایه نازک، ریزتر و در سایر قسمت‌ها، به‌صورت درشت‌تر ایجاد شده است. از المان Plate به‌منظور مدل‌سازی پی نواری با مشخصات: B=0.07m (عرض پی)، D=0.07m (عمق لایه بهسازی)، $\gamma=2400kN/m^3$ (وزن مخصوص مصالح پی)، $E=2\times10^7kN/m^3$ (مدول الاستیک مصالح پی) و $\nu=0.2$ (ضریب پواسون) استفاده شده است.

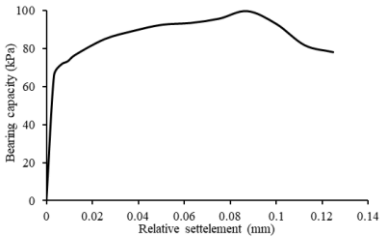


شکل ۲. هندسه مدل جهت آنالیز المان محدود.

نتایج و بحث

نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی

(الف)



(ب)

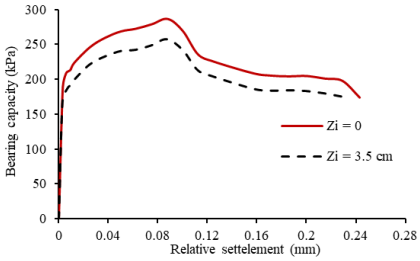
شکل (۳): (الف) تشکیل ناحیه گسیختگی و (ب) منحنی ظرفیت باربری ـ نشست برای آزمایش شماره ۱.

در آزمایش ۲ ، لایه با تزریق محلول سیمانی حاوی *B. megaterium* که با حل کردن ۱۸۰ گرم کلرید کلسیم و ۱۸۰ گرم اوره در یک لیتر آب تهیه شده بود، تثبیت شد. پس از بازه ۲۸ روزه، مقاومت اندازه‌گیری شده ۱۳۸۰ کیلو پاسکال بود که نشان دهنده افزایش ۲۰۰ درصدی نسبت به حالت ۱ است و همچنین شکست در نشست ۸.۸ میلی متری رخ داد.

در آزمایش ۳، لایه تقویت شده با باسیلوس مگاتریوم در عمق ۳.۵ سانتی‌متر زیر سطح پی قرار گرفت. پس از گذشت ۲۸ روز، ظرفیت باربری اندازه گیری شده ۱۱۷۰ کیلو پاسکال و نشست ۸.۷ میلی‌متری بود که نشان‌دهنده افزایش تقریبی ۱۵۴ درصدی مقاومت در مقایسه با نمونه اولیه است. دیاگرام بار ـ نشست در شکل ۴ برای هر دو آزمون نشان داده شده است.

(الف)

(ب)



(ج)

شکل (٤): (الف) الگوی شکست در خاک ماسه‌ای بهسازی شده با B. megaterium در زیر سطح فونداسیون؛ (ب) ناحیه شکست هنگامی که لایه عمل‌آوری‌شده در نصف عمق مؤثر قرار می‌گیرد؛ (ج) منحنی ظرفیت باربر ـ نشست آزمون‌های ۲ و ۳.

نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط بهینه (OD_{600}=2، غلظت ۱ مولار $CaCl_2$ و ۱ مولار اوره)، بیشترین غلظت رسوب کربنات کلسیم معادل ۳۳.۷۸ g/L به دست آمد که از بالاترین مقادیر گزارش‌شده در مطالعات مشابه به شمار می‌رود. این میزان بیانگر کارایی بالای سویه‌های مورد استفاده، به‌ویژه *B. megaterium* در فرایند بیومینرالیزاسیون است. در مقایسه، کاپا و همکاران (۲۰۲۵) و دی سان و همکاران (۲۰۲۰) حداکثر غلظت‌های ۲۰ تا ۲۵ g/L را گزارش کرده‌اند که نشان می‌دهد شرایط واکنشی و نوع سویه به‌شدت بر بازده رسوب تأثیرگذار است(Cappa et al., 2025). این تفاوت احتمالاً ناشی از توان آنزیمی بیشتر *B. megaterium* در تولید اوره‌آز و به‌تبع آن افزایش نرخ تشکیل یون‌های کربنات می‌باشد. این یافته‌ها اهمیت بهینه‌سازی شرایط زیستی و واکنشی را در افزایش راندمان MICP نشان می‌دهد و بر انتخاب سویه‌های بومی سازگار با محیط تأکید دارد(Sun & Miao, 2020).

در آزمون‌های ۴ و ۵ از Sporosarcina pasteurii برای بهبود خواص مکانیکی خاک شنی استفاده گردید. پس از یک بازه ۲۸ روزه، برای حالتی که لایه بیولوژیکی مستقیماً در سطح زیر فونداسیون ایجاد شد، ظرفیت باربری به ۹۰۰ کیلو پاسکال افزایش یافت که نشان دهنده بهبود ۹۶ درصدی نسبت به شرایط آزمون ۱ و به مراتب کمتر نسبت به B. megaterium بود. در آزمون ۵ ظرفیت باربری نهایی به ۸۱۳ کیلو پاسکال رسید که نشان دهنده افزایش ۷۷ درصدی در مقایسه با ماسه نرمال است. خرابی در نشست ۸.۷ میلی‌متری برای هر دو نمونه ثبت گردید. دیاگرام بار ـ نشست در شکل ۵ برای هر دو آزمون نشان داده شده است.

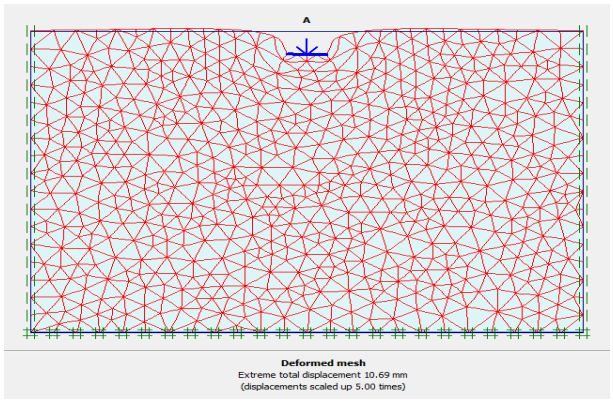
(ج) (ب) (الف)

شکل ۵: (الف) الگوی شکست در خاک ماسه‌ای بهسازی شده با *S. pasteurii* در زیر سطح فونداسیون؛ (ب) ناحیه شکست هنگامی که لایه بهسازی‌شده در نصف عمق مؤثر قرار می‌گیرد؛ (ج) منحنی ظرفیت باربر ـ نشست آزمون‌های ٤ و ٥.

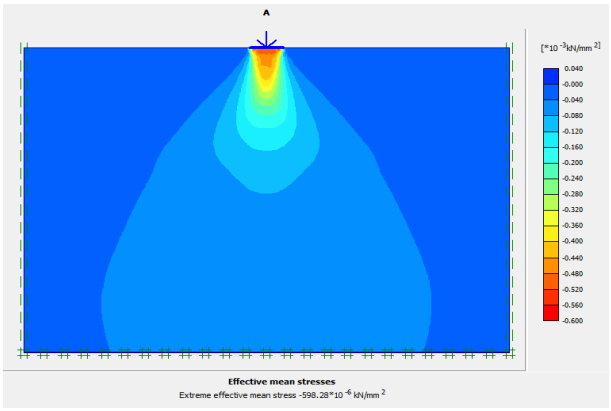
افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک پس از تیمار MICP از برجسته‌ترین نتایج تحقیق حاضر است. داده‌ها نشان دادند که مقاومت خاک بهسازی‌شده با *B. megaterium* تا ۳ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت و ظرفیت باربری پی نواری تا ۵۰٪ بیشتر از نمونه‌های تیمارشده با *Sporosarcina pasteurii* بود. نتایج شبیه‌سازی عددی نیز افزایش مشابهی در چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (φ) را تأیید کرد. یافته‌های مشابه در مطالعات وانگ و همکاران و کریمیان و همکاران نیز گزارش شده‌اند که بهبود مقاومت فشاری و برشی را به تشکیل شبکه‌های کلسیتی بین ذرات خاک نسبت داده‌اند(Wang et al., 2024)(Karimian & Hassanlourad, 2022). با این حال، در تحقیق حاضر دامنه بهبود به‌مراتب بیشتر بوده که می‌تواند ناشی از تراکم یکنواخت‌تر رسوبات $CaCO_3$ و تشکیل فازهای کلسیتی پایدارتر باشد. در نتیجه، فرایند MICP می‌تواند جایگزینی مؤثر برای بهسازی شیمیایی پرهزینه و آلاینده در خاک‌های کویری باشد.

نتایج آنالیز المان محدود

در اشکال ۶ و جدول ۴ نتایج آنالیز نشست و تنش مؤثر متوسط در خاک برای ۵ حالت مطابق جدول ۳ ارائه شده است.

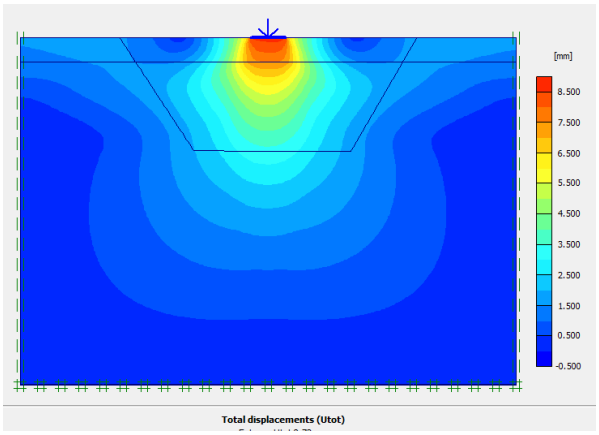


نشست 10.69 mm

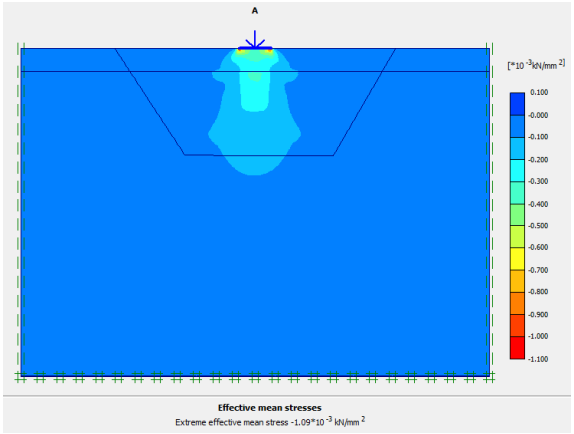


تنش متوسط مؤثر 599×10^{-6} KN/mm^2

شکل(٦): نشست کلی و تنش مؤثر متوسط در خاک بدون بهسازی.

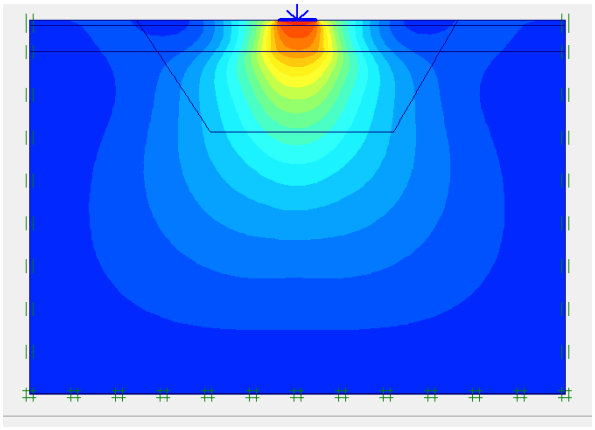


نشست 8.72 mm

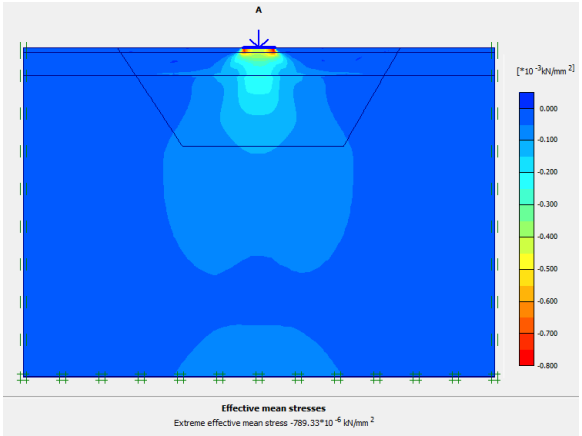


تنش متوسط مؤثر 1.09×10^{-3} KN/mm^2

شکل(۷): نشست کلی و تنش مؤثر متوسط خاک بهسازی شده در سطح با باکتری مگاتریوم.

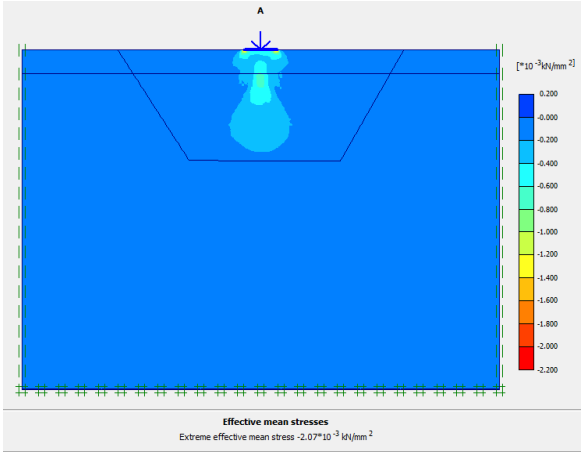


نشست 7.08 mm

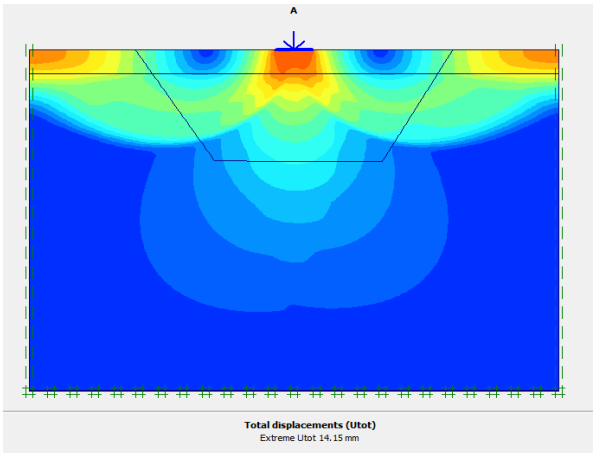


تنش متوسط مؤثر 789.33×10^{-6} KN/mm^2

شکل(۸): نشست کلی و تنش مؤثر متوسط خاک بهسازی شده در عمق D/2 با باکتری مگاتریوم.

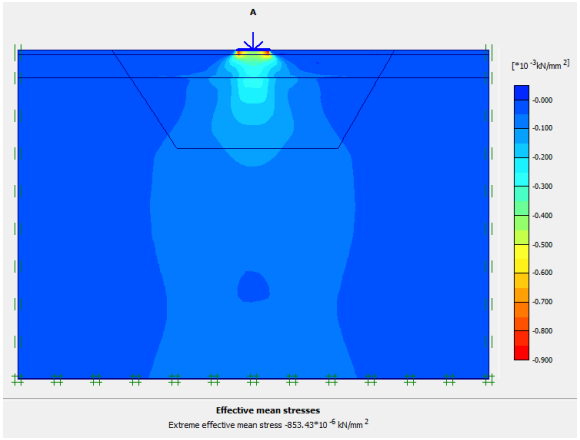


تنش متوسط مؤثر 2.07×10^{-3} KN/mm^2

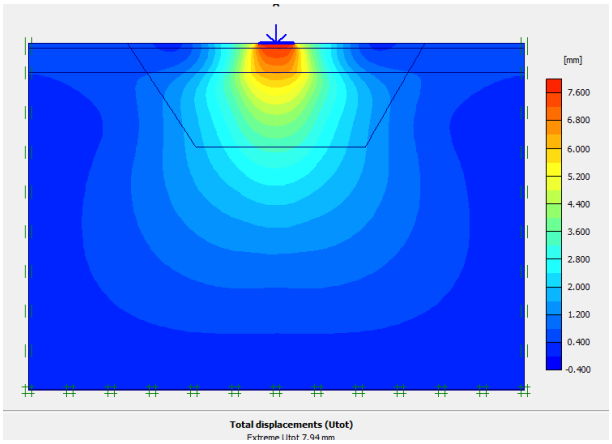


نشست 14.15 mm

شکل(۹): نشست کلی و تنش مؤثر متوسط خاک بهسازی شده در سطح با باکتری پاستوری.



تنش متوسط مؤثر 853.43×10^{-6} KN/mm^2



نشست 7.94 mm

شکل (۱۰): نتایج آنالیز اجزاء محدود نشست کلی و تنش مؤثر متوسط خاک.

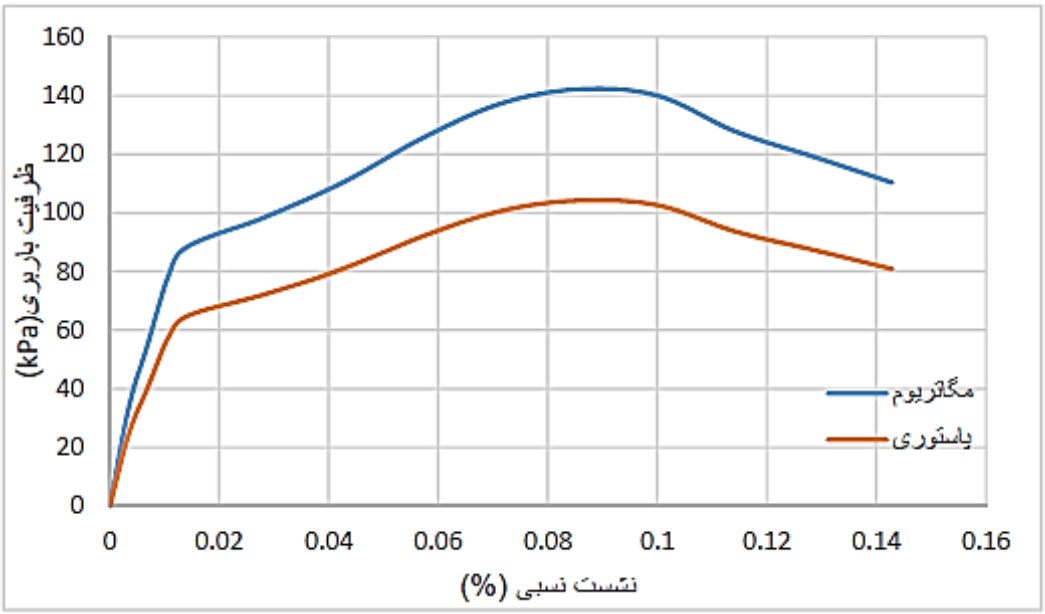
جدول (٤): نتایج آنالیز المان محدود برای ۵ حالت آزمایش.

شماره	مدل	نوع باکتری	عمق پی	توزیع کرنش (٪)	نشست پی (mm)	ظرفیت باربری (kP)
۱	ساده بدون بهسازی	–	–	۲۴.۱۱	۱۰.۶۹	۹۴
۲	بهسازی شده در سطح	مگاتریوم	۰	۳۵.۱۲	۸.۷۲	۱۸۹
۳	بهسازی شده در عمق D/2	مگاتریوم	D/2	۲۴.۷۵	۷.۰۸	۱۴۲
۴	بهسازی شده در سطح	پاستوری	۰	۳۹.۶۱	۱۴.۱۵	۱۲۳
۵	بهسازی شده در عمق D/2	پاستوری	D/2	۳۰.۵۳	۷.۹۴	۱۰۴

نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند هرچه عمق بهسازی پایین‌تر از تراز پی باشد میزان تأثیر لایه بهسازی شده کمتر می‌گردد؛ به‌طوری‌که اگر فاصله بالای لایه بهسازی شده از زیر پی مقدار 2D باشد، بهسازی تأثیری در افزایش ظرفیت باربری نخواهد

داشت. نمودار ظرفیت باربری ـ نشست نسبی پی نواری روی خاک بهسازی شده زیستی در عمق D/2 در شکل ۷ نشان داده شده است.

نتایج مدلسازی عددی و آزمایش‌های فیزیکی نشان دادند که اثر بهسازی با افزایش عمق لایه زیر پی کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که بیشترین تأثیر در سطح و کمترین در عمق D/2 مشاهده شد. این یافته‌ها با لای و همکاران و خسروی و همکاران همخوانی دارد که گزارش کردند موقعیت ناحیه بیوسمنتاسیون نسبت به پی، تعیین‌کننده انتقال تنش‌ها و گسیختگی موضعی خاک است(Lai et al., 2024). با کاهش فاصله از سطح پی، چگالی کلسیت افزایش یافته و ناحیه گسیختگی به لایه‌های عمیق‌تر منتقل می‌شود که منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش می‌گردد. بنابراین، در طراحی‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر MICP، تعیین عمق بهینه تزریق محلول سیمانی یکی از عوامل کلیدی در بهبود ظرفیت باربری است.



شکل (۱۱): نمودار ظرفیت – نشست نسبی پی نواری روی خاک بهسازی شده زیستی در عمق D/2.

مدلسازی عددی انجام‌شده در نرم‌افزار PLAXIS با مدل ساختاری کولمب–موهر، مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت و انحراف نتایج کمتر از ۱۰٪ بود. این همخوانی نشان‌دهنده‌ی صحت فرضیات تحلیلی و قابلیت اطمینان روش مدل‌سازی در پیش‌بینی رفتار خاک‌های تیمارشده زیستی است. پژوهش‌های حسن و همکاران و عباسی و همکاران نیز اعتبار روش FEM را در شبیه‌سازی بهسازی‌های زیستی تأیید کرده‌اند(Hasan et al., 2022)(Abbasi et al., 2025). مدل حاضر با استفاده از داده‌های واقعی آزمایشگاهی، امکان پیش‌بینی دقیق نشست و توزیع تنش مؤثر را فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار طراحی برای پروژه‌های آینده در مهندسی بیوژئوتکنیک به‌کار رود.

در مجموع، نتایج این تحقیق تأیید می‌کند که فناوری MICP با بهره‌گیری از باکتری‌های اورئولیتیک، رویکردی پایدار و مؤثر برای بهسازی و احیای خاک‌های کویری است. مقایسه با مطالعات گذشته نشان داد که عملکرد سویه *B. megaterium* در شرایط اقلیمی ایران بهینه‌تر از گونه‌های متداول است. این فناوری ضمن افزایش مقاومت خاک و ظرفیت باربری، اثرات منفی زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند و پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی، عمرانی و زیست‌محیطی دارد. با این وجود، توسعه کاربرد میدانی نیازمند تدوین استانداردهای طراحی، بهینه‌سازی تزریق و ارزیابی پایداری بلندمدت در شرایط واقعی محیطی است تا بتوان آن را به‌صورت گسترده در مدیریت پایدار سرزمین‌های خشک و نیمه‌خشک به کار گرفت.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فناوری MICP می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار، کم‌هزینه و زیست‌سازگار برای بهسازی خاک‌های کویری ایرانو کاربردهای گسترده‌تر در زیست‌پالایی، کنترل ریزگردها و مهندسی ژئوتکنیک به کار گرفته شود. ایجاد یک لایه نازک بیوسمنتاسیون‌شده توسط باکتری‌های اورئولیتیک به‌ویژه *B. megaterium* موجب افزایش چشمگیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و در نتیجه ظرفیت باربری خاک‌های شنی تا بیش از سه برابر گردید .مقایسه سویه‌های باکتریایی نشان داد که *B. megaterium* عملکرد مؤثرتری نسبت به *S. pasteurii* در افزایش مقاومت برشی و پایداری خاک دارد. نتایج مدلسازی عددی با نرم‌افزارPLAXIS نیز مطابقت بالایی با داده‌های آزمایشگاهی داشت که اعتبار روش را تأیید می‌کند. در مجموع، استفاده از فرآیند MICP نه‌تنها موجب بهبود خصوصیات مکانیکی خاک و کاهش فرسایش بادی می‌شود، بلکه به دلیل ماهیت زیستی خود می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های شیمیایی پرهزینه و آلاینده باشد. با این حال، برای توسعه کاربرد صنعتی و میدانی این فناوری، تدوین پروتکل‌های استاندارد تزریق، ارزیابی پایداری بلندمدت و مطالعه اثرات زیست‌محیطی در مقیاس واقعیضروری است. این تحقیق پایه‌ای علمی برای توسعه راهکارهای بیوانجینری در مدیریت پایدار خاک و کاهش بیابان‌زایی در مناطق خشک ایران فراهم می‌کند.

References

Motallebirad, T., Tashakor, A., Abniki, R., & Azadi, D. (2024). Fifteen years of phenotypic and genotypic surveillance and antibiotic susceptibility pattern of actinomycetes (Mycobacterium, *Nocardia*, *Rhodococcus*, etc.) in clinical and environmental samples of Iran. *Journal of Medical Microbiology and Infectious Diseases*, 108(1), 116080.

Spinoni, J., Barbosa, P., Cherlet, M., Forzieri, G., McCormick, N., Naumann, G., et al. (2021). How will the progressive global increase of arid areas affect population and land-use in the 21st century? *Global and Planetary Change*, 205, 103597.

Silander, J. A., Jr., Bond, W. J., & Ratsirarson, J. (2024). The grassy ecosystems of Madagascar in context: Ecology, evolution, and conservation. *People and Planet*, 6(1), 94–115.

Talaie, A., Kamyab, H., Chelliapan, S., & Khalili, E. (2024). Sources and impacts of dust pollution in Iran: A comprehensive overview. *Journal of Environmental Technology and Trends*, 12(2), 1–15.

Hosseini, S., Azadi, D., & Absalan, A. (2023). Screening and molecular identification of *Nocardia* with ability to biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and phenol from Iranian ecosystems. *Current Microbiology Research*, 36(2), 113–127.

Qattan, S. Y. (2025). Harnessing bacterial consortia for effective bioremediation: Targeted removal of heavy metals, hydrocarbons, and persistent pollutants. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 37(1), 85.

Fazelikia, S., Abtahi, S. A., Kargar, M., & Jafarinia, M. (2023). Microbial induced calcite precipitation (MICP) potential of ureolytic *Bacillus* sp. isolated from the soil of eroded ecosystems for stabilizing and improving the fertility of eroded soils. *Geotechnical and Geological Journal*, 40(6), 569–581.

Bibi, S., Oualha, M., Ashfaq, M. Y., Suleiman, M. T., & Zouari, N. (2018). Isolation, differentiation and biodiversity of ureolytic bacteria of Qatari soil and their potential in microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. *RSC Advances*, 8(11), 5854–5863.

Boruah, R. P., Mohanadhas, B., & K, J. (2025). Microbially induced calcite precipitation for soil stabilization: A state-of-the-art review. *Geotechnical Journal*, 1–16.

Kalkan, E. (2020). A review on the microbial induced carbonate precipitation (MICP) for soil stabilization. *International Journal of Engineering Sciences and Knowledge Applications*, 2(1), 38–47.

Aligholi, H. Z. (2018). Numerical modeling and parametric study of piled rafts foundations using finite element software PLAXIS 2D. *International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 8(1), 14–22.

Cappa, M., Perego, C., Terzis, D., & Principi, P. (2025). *Bacillus megaterium* favours CO_2 mineralization into $CaCO_3$ over the ureolytic pathway. *Scientific Reports*, 15(1), 21861.

Sun, X., & Miao, L. (2020). Application of bio-remediation with *Bacillus megaterium* for crack repair at low temperature. *Journal of Advanced Cement Technology*, 18(5), 307–319.

Wang, Y.-J., Chen, W.-B., Yin, J.-H., Han, X.-L., Zhang, Y., Du, Y.-J., et al. (2024). Role of biochar in drained shear strength enhancement and ammonium removal of biostimulated MICP-treated calcareous sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(2), 04023140.

Karimian, A., & Hassanlourad, M. (2022). Mechanical behaviour of MICP-treated silty sand. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(7), 285.

Lai, H., Ding, X., Cui, M., Zheng, J., Chu, J., & Chen, Z. (2024). Factors affecting the effectiveness of biocementation of soil. *Journal of Biogeotechnics*, 2(3), 100087.

Hasan, H. A., Lafta, S. H., Majeed, M. W., Khabba, H., & Aghayarzadeh, M. (2022). Numerical simulation of pervious concrete pile in loose and silty sand after treating with microbially induced calcite precipitation. *Geotechnical Journal*, 22(90), 32–39.

Abbasi, M., Hosseinpour, I., Barari, A., & Mirmoradi, S. H. (2025). Mechanical properties of silty sand treated with MICP technique subjected to freeze–thaw cycles. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(1), 34.