

EXTENDED ABSTRACT

The Effective Parameters on Deviator Stress and Stiffness of Treated Sands by Microbial Induced Calcite Precipitation

Seyed Abdollah Ekramirad ^{a,*}, Mohammad Azadi ^b, Naser Shamskia ^b, Bagher Heidarpour ^c

^a Department of Civil Engineering, Langarud Branch, Islamic Azad University, Langarud, Iran

^b Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

^c Department of Civil Engineering, Roudsar and Amlash Branch, Islamic Azad University, Roudsar, Iran

Received: 14 November 2024; **Revised:** 04 February 2025; **Accepted:** 12 March 2025

Keywords:

Biological improvement, Cementation solution molarity, Optical density, Curing time, Deviator stress, Stiffness.

1. Introduction

Given the population growth, one of the challenges facing engineers in the construction field is access to land with suitable bearing capacity. Therefore, the lack of access to quality land compels geotechnical engineers to enhance the mechanical parameters of soil using various improvement methods. To address these issues, research into new improvement methods such as microbial induced calcite precipitation (MICP) has expanded.

Research on the parameters influencing the efficiency of the method and the development of various biological improvement techniques has continued. For instance, Harkes et al. (2010) investigated two-phase injection to prevent the accumulation and deposition of precipitate at the injection point. Al Qabany et al. (2012) evaluated the effect of cementation solution concentration and retention time on the efficiency of biological improvement methods under constant optical density conditions. Additionally, DeJong and Montoya (2015) examined the effect of cementation degree on the stress-strain behavior of sand in CU triaxial tests.

In this study, the impact of the molarity of the cementation solution, bacterial optical density, and curing time on the stress-strain behavior and deformation parameters of sand improved through microbial induced calcite precipitation will be investigated. For each parameter influencing the improvement process, 17 samples were obtained based on experimental design using Design Expert ver. 11.0.3.0 software. After preparation, the samples were subjected to consolidated undrained (CU) triaxial compression tests. The results from the triaxial tests were then analyzed through stress-strain curves and stiffness.

2. Methodology

2.1. Sample preparation and testing

The soil used in this research was sourced from the Kouhin region in Qazvin province. According to particle size analysis, the soil is classified as poorly graded sand (SP). The molds were made from PVC pipes with diameters and heights of 7 cm and 14 cm, respectively, in accordance with the specifications of the triaxial testing apparatus. To prevent blockage at the injection point and ensure uniformity in the improvement process, a four-phase injection method was utilized.

Next, to improve the samples, a cementation solution was prepared based on the desired molarities (Fig. (1-a)). Then, considering the curing times examined in this study, the injected samples were kept in appropriate laboratory conditions at temperatures between 27 to 30 degrees Celsius to allow for biological deposition within the pores. Fig. (1-b) shows a cemented sample on the triaxial apparatus.

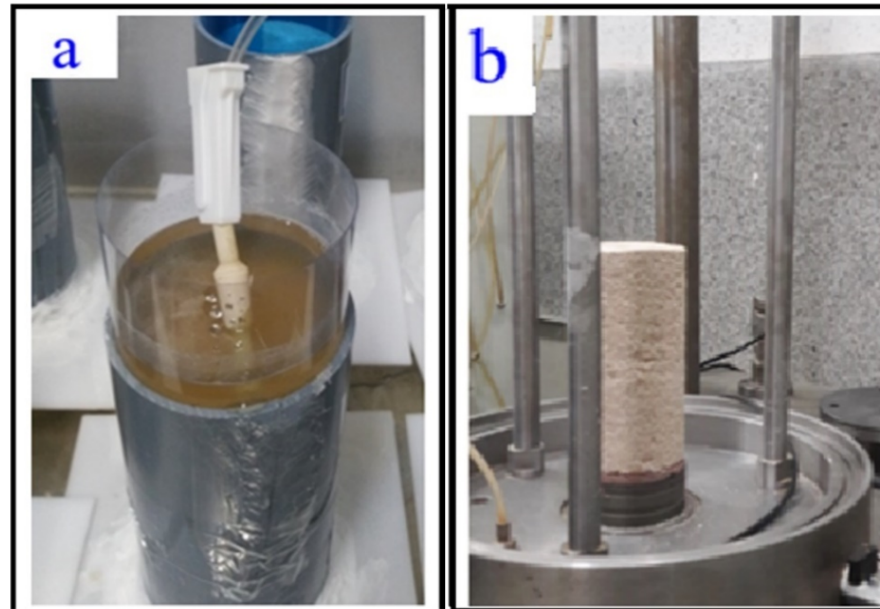


Fig. 1. a) Cementation solution injection, b) Treated sample in triaxial testing machine

To compare the stress-strain behavior and stiffness of samples before and after improvement, the samples were subjected to CU triaxial tests according to ASTM D4767-CU standards after being removed from the molds.

3. Discussion and Results

3.1. Comparison of stress-strain behavior

Based on the results from CU triaxial tests, the maximum deviatoric stress after biological improvement was found to be 957kPa. Additionally, the samples reached maximum deviatoric stress at axial strains of approximately 18 to 22 percent, after which they could not withstand additional loads with increasing strains. The results indicated that at lower molarity levels, the effect of molarity compared to pre-improvement conditions was not particularly significant. However, with increasing molarity and nutrient supply, better deposition occurred within the soil pores, leading to a faster increase in resistance and deviatoric stresses.

3.2. Comparison of sample stiffness

One of the key geotechnical parameters governing stress-strain behavior is soil modulus or stiffness. At the beginning of the CU triaxial test, samples exhibited strain-hardening behavior, and with increasing axial strain in small and elastic strain ranges, secondary modulus (E_{sec}) decreased rapidly. Subsequently, transitioning to a non-elastic region showed strain-softening behavior, where secondary stiffness (E_{sec}) gradually decreased until it approached a relatively stable value. Observations indicated that increasing the molarity of the cementation solution under similar optical density and curing time conditions resulted in an increase in secondary modulus (E_{sec}) of biologically improved samples.

The modulus (E_{50}) showed significant increases with higher molarity of the cementation solution, while after improvement through microbial induced calcite precipitation (MICP) at low molarity and optical density, stiffness did not increase significantly. The main factor contributing to the increase in secondary modulus (E_{sec}) and modulus (E_{50}) compared to pre-biological improvement conditions was raising the molarity of the cementation solution to 1.5 molar.

4. Conclusions

The molarity of the cementation solution has a significant impact on increasing the deviatoric stresses of sand improved via microbial induced calcite precipitation (MICP). Under conditions of equal optical density and curing time, an increase in the molarity of the cementation solution even resulted in an approximate 45% increase in the deviatoric stresses of the samples.

At the beginning of the CU triaxial test, the samples exhibited strain-hardening behavior, and with an increase in axial strain within the range of small and elastic strains, the secondary modulus (E_{sec}) decreased rapidly. Subsequently, transitioning to the non-elastic region showed strain-softening behavior, where the secondary stiffness (E_{sec}) decreased at a slower rate until it reached a relatively stable value. The increase in molarity, by creating more calcium carbonate precipitation between the soil pores, led to stronger contact bonds. Therefore, at lower strains, having higher strain-hardening resulted in an increase in secondary modulus (E_{sec}). A similar trend was observed concerning the equivalent stiffness at 50% of the maximum deviatoric stress (E_{50}).

پارامترهای مؤثر بر تنش انحرافی و سختی ماسه بهسازی شده تحت القاء رسوب کربنات کلسیم

سیدعبداله اکرامی راد^{1*}، محمد آزادی²، ناصر شمس کیا³، باقر حیدرپور⁴

¹ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد لنگرود، دانشگاه آزاد اسلامی، لنگرود

² دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین

³ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین

⁴ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودسر و املش، دانشگاه آزاد اسلامی، رودسر

دریافت: 1403/8/24، بازنگری: 1403/11/16، پذیرش: 1403/12/22، نشر آنلاین: 1403/12/22

چکیده

با افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی، یکی از چالش‌های مهندسان ژئوتکنیک دسترسی به زمین‌های با ظرفیت باربری مناسب می‌باشد. تاکنون تکنیک‌های مختلفی مثل تراکم، تزریق و غیره، جهت بهسازی خاک به کار گرفته شده است. اخیراً روش‌های نوآورانه و دوستدار محیط زیست مانند بهسازی تحت القای رسوب کربنات کلسیم، توسعه یافته است که تحقیق در خصوص عوامل مؤثر بر بهبود، افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های آن را ضروری می‌سازد. در این پژوهش، به بررسی تأثیر مولاریته محلول سیمانتاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل‌آوری نمونه بر رفتار تنش-کرنش و تغییرات سختی ماسه بهسازی شده بیولوژیکی، توسط آزمایش سه‌محوری فشاری تحکیم‌یافته زهکشی نشده پرداخته شد. خاک مورد استفاده از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده و از منطقه کوهین استان قزوین بوده که برای بهسازی آن از باکتری اسپروسارسینا (*Sporosarcina pasteurii*) پاستوری جهت تسریع واکنش و تولید رسوب، استفاده گردید. همچنین جهت جلوگیری از مسدودشدگی و کنترل توزیع یکنواخت رسوب، از روش تزریق چهارفازی استفاده شد. منحنی‌های تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری نشان داد که مولاریته محلول سیمانتاسیون (Cementation solution molarity) با افزایش 45 درصدی تنش انحرافی، بیشترین تأثیر را بر رفتار تنش-کرنش ماسه بهسازی شده داشته است و زمان عمل‌آوری نمونه و چگالی اپتیکی باکتری، دارای تأثیر کمتری در روند بهسازی بیولوژیکی بوده‌اند. از سوی دیگر، برای ماسه بهسازی شده با سطوح مولاریته و چگالی اپتیکی پایین، افزایش چندانی در تنش انحرافی نسبت به قبل از بهسازی حاصل نگردید. پس از بهسازی بیولوژیکی ماسه، سختی ثانویه (E_{sec}) و سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50})، در حدود $1/5$ تا 2 برابر افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: بهسازی بیولوژیکی، مولاریته محلول سیمانتاسیون، چگالی اپتیکی باکتری، زمان عمل‌آوری، تنش انحرافی، سختی.

1- مقدمه

پارامترهای مکانیکی خاک با استفاده از روش‌های مختلف بهسازی می‌نماید.

از دیرباز تکنیک‌های مختلفی همچون تراکم، تزریق و روش‌های مکانیکی جهت بهسازی خاک مورد استفاده قرار می‌گرفت که هرکدام مزایا و معایب خود را در پی داشت. از جمله این موارد می‌توان به استفاده از تزریق مواد شیمیایی مانند

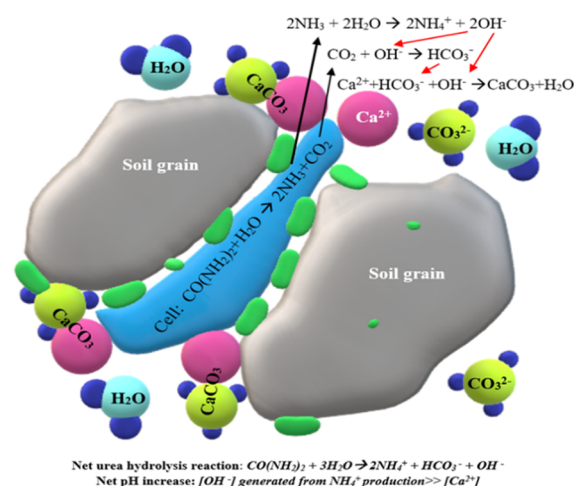
با توجه به رشد جمعیت، می‌توان گفت که یکی از چالش‌های پیش روی مهندسان در حوزه ساخت‌وساز، دسترسی به زمین‌های با ظرفیت باربری مناسب می‌باشد. لذا عدم دستیابی به زمین‌های با کیفیت مناسب، مهندسان ژئوتکنیک را مجاب به ارتقاء کیفی



کرد. تحقیقات در راستای پارامترهای تأثیرگذار بر کارایی روش و همچنین توسعه روش‌های مختلف بهسازی بیولوژیکی ادامه یافت، به‌طوری‌که Harkes و همکاران (2010)، به بررسی تزریق دو فازی جهت جلوگیری از تجمع و انباشته شدن رسوب در نقطه شروع تزریق پرداختند.

Al Qabany و همکاران (2012) اثر غلظت محلول سیمان‌تاسیون و زمان ماند را بر کارایی روش بهسازی بیولوژیکی در شرایط چگالی اپتیکی ثابت ارزیابی نمودند. همچنین اثر درجه سمنته شدن بر رفتار تنش- کرنش ماسه در آزمایش سه‌محوری CU بررسی گردید (DeJong و Montoya, 2015).

از دیگر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به بررسی اثر عوامل مختلف از جمله دما بر فعالیت اوره آزی و استراتژی‌های تزریق (Wang و همکاران، 2024)، ترمیم ترک بتن (Zhang و همکاران، 2024)، تأثیر مسیر تنش بر ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (Nafisi و همکاران، 2021)، کاهش شکنندگی ماسه ریز سمنته شده (Wang و همکاران، 2022)، بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌دانه‌های بازیافتی اصلاح شده (Tang و همکاران، 2023)، مقاومت در برابر فرسایش بادی ماسه بادی (Qu و همکاران، 2024) و اثرات بهسازی بیولوژیکی بر رفتار روانگرایی معادن باطله (Behzadipour و همکاران، 2024) اشاره نمود. شکل (1)، نحوه رسوب بیولوژیکی کلسیت به‌وسیله هیدرولیز اوره را نشان می‌دهد (Ekramirad و همکاران، 2023). بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی، بیشتر تحت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده انجام یافته و پارامترهای مرتبط با نشست خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است.



شکل 1- نحوه رسوب بیولوژیکی کلسیت به‌وسیله هیدرولیز اوره
 اوره (Ekramirad و همکاران، 2023)

فنوپلاست‌ها¹، پلی اورتان‌ها²، اکریل آمیدها³ و اپوکسی‌ها⁴ به درون خلل و فرج خاک در طول سال‌های گذشته اشاره کرد (Karol, 2003).

یکی از مشکلات اصلی در این زمینه، هزینه بالا و معضلات زیست‌محیطی آن‌ها می‌باشد. جهت مقابله با موارد ذکر شده، تحقیقات برای روش‌های جدید بهسازی مثل بهسازی به‌روش رسوب‌گذاری میکروبی کربنات کلسیم (MICP)⁵ گسترش یافت. یکی از زمینه‌های جدید بهسازی در حوزه ژئوتکنیک، استفاده از روش‌های زیستی در مسائل مهندسی بوده و جهت مقابله با فرسایش خاک، کنترل جریان آب در خاک و پایداری شیروانی‌ها از کاشت درختان و پوشش گیاهی استفاده می‌شد. با توجه به فعالیت میکروارگانیسم‌ها در خاک، از آن‌ها بیشتر در پاکسازی، انسداد زیستی و سمنته شدن خاک به‌کار گرفته شد (DeJong و همکاران، 2006).

با کنترل و مدیریت صحیح فرایند شیمیایی باکتری‌های موجود در عمق زمین، می‌توان با افزودن برخی مواد مثل تزریق آهک، پارامترهای مکانیکی خاک را نیز بهبود بخشید (DeJong و همکاران، 2010). بهره‌گیری از باکتری‌های موجود در خاک و ایجاد رسوب بین منافذ خاک در مهندسی ژئوتکنیک، به‌روش بهسازی بیولوژیکی معروف بوده، که ضمن سازگاری مناسب با محیط اطراف ما، با رسوخ بیشتر رسوب کربنات کلسیم در منافذ خاک برخی از معضلات ذکر شده در روش‌های تزریق شیمیایی را مرتفع می‌سازد.

نظارت حین بهسازی و بررسی پارامترهای مؤثر بر عمر مفید خاک بهسازی شده ضروری است. لذا جهت به حداقل رساندن محصولات جانبی حاصل متابولیسم میکروبی و ایجاد رسوب یکنواخت‌تر درون منافذ خاک باید سازگاری مناسبی بین اندازه میکروب و قطر منافذ خاک وجود داشته و ضمن جلوگیری از مسدودشدگی نقطه تزریق توسط تجمع میکروبی، مدت زمان بهسازی را مدیریت کرد. از آنجایی که اندازه میکروب نسبتاً کوچک و بین 0/5 تا 3 (μm) می‌باشد، محدودیت عمده انتقال میکروب بین منافذ خاک، قطر گلوگاه ارتباطی بین حفرات است (Madigan و همکاران، 2006).

در طول دو دهه گذشته تحقیقات زیادی در ارتباط با بهسازی بیولوژیکی صورت گرفته است که می‌توان به تقویت پارامترهای مکانیکی خاک (Whiffin, 2004)، افزایش مقاومت و سختی (Van Paassen, 2009; Rong, 2012)، تثبیت خاک (Prajapati و همکاران، 2023)، استفاده از روش غوطه‌وری (Wen و همکاران، 2019) و تولید آجر بیولوژیکی (Cheng و همکاران، 2020) اشاره

4. Epoxy

5. Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP)

1. Phenoplasts

2. Polyurethane

3. Acrylamide

جدول 1- مشخصات خاک

مشخصات	مقدار
طبقه بندی خاک	ماسه بد دانه بندی شده
ضریب یکنواختی	1/73
ضریب خمیدگی	1/026
چگالی دانه های جامد	2/63
چگالی خشک	1/59g/cm ³
تراکم نسبی	0/37

2-2- باکتری و محیط کشت

نقش باکتری در تسریع واکنش هیدرولیز اوره و کمک به رسوب زایی کربنات کلسیم می باشد. تاکنون باکتری های مختلفی از دسته هوازی و بی هوازی مورد مطالعه قرار گرفته است. باکتری اسپروسارسینا پاستوری⁷ مورد استفاده در این پژوهش، از خانواده باسیلاس با ساختار بیضوی شکل و دارای فعالیت اوره آزی مثبت بالایی می باشد. باکتری ها از مرکز تحقیقات علمی و صنعتی ایران به شماره PTCC 1645 (DSM33) به صورت لیوفلیزه⁸ تهیه گردید. هنگامی که باکتری ها در شرایط مناسب قرار می گیرند، قادر به رشد و تکثیر خواهند بود. شرایط مناسب یعنی محیط کشت مغذی، که حاوی کلیه احتیاجات میکروب اعم از مواد غذایی و آلی باشد. کشت باکتری می تواند در محیط کشت مایع (براث)⁹ یا محیط کشت جامد (آگار)¹⁰ صورت گیرد، که در این پژوهش از محیط کشت مایع (شکل (3)) جهت نگهداری کوتاه مدت و فعال سازی سویه لیوفلیزه و تهیه سوسپانسیون باکتری استفاده شده است. جهت تهیه آن، ابتدا به مقدار مورد نظر آب مقطر در داخل یک ارلن ریخته و مطابق دستورالعمل شرکت سازنده (مرک)¹¹ آلمان) معادل 8gr/lit از پودر براث به آن افزوده شده تا کاملاً همگن شود. نکته قابل توجه این است که حجم ظرف باید طوری تعیین گردد تا محلول داخل آن حداکثر 20% حجم ظرف را پر کند. این کار باعث می شود تا پس از کشت باکتری، اکسیژن کافی در اختیار آن قرار گیرد (Al Qabany و همکاران، 2012).

پس از حل شدن کامل براث، محلول داخل اتوکلاو در دمای 121 درجه سانتی گراد و به مدت 15 دقیقه قرار داده شد، تا استریل گردد. پس از استریل و خنک شدن محلول، اوره را به میزان دو درصد محیط کشت، وزن نموده و به کمک آب مقطر، محلول 20% آن تهیه گردید. در ادامه، محلول حاصل به کمک فیلتر 0/22 میکرون، در شرایط استریل به داخل محیط کشت اضافه شد.

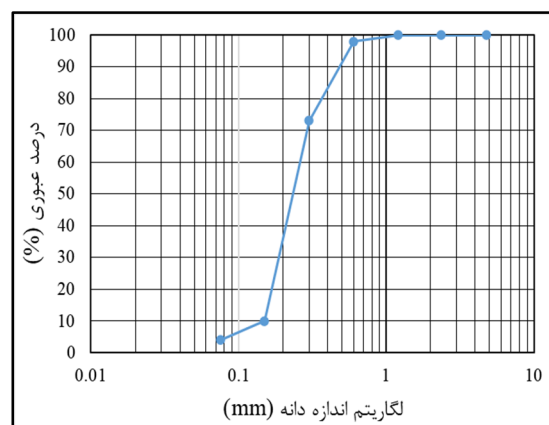
جهت ارزیابی فعالیت اوره آزی باکتری از روش پیشنهادی Whiffin (2004) بر اساس اندازه گیری تغییرات هدایت الکتریکی بهره گرفته شد. بدین صورت که هیدرولیز اوره منجر به تولید

از آنجایی که توجه به پارامترهای مقاومت و تغییر شکلی در سازه های ژئوتکنیکی ضرورت دارد، در این پژوهش به بررسی تأثیر هم زمان مولاریته محلول سیمان تاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل آوری نمونه بر رفتار تنش - کرنش و پارامترهای سختی ثانویه (E_{sec}) و سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) ماسه بهسازی شده توسط رسوب میکروبی کربنات کلسیم پرداخته خواهد شد. برای هر کدام از پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند بهسازی با سه سطح تغییرات، 17 نمونه بر اساس طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design Expert ver. 11.0.3.0 به دست آمد. پس از آماده سازی، نمونه ها تحت آزمایش سه محوری فشاری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU)⁶ قرار گرفته اند و در ادامه نتایج حاصل از آزمایشات سه محوری توسط منحنی تغییرات تنش - کرنش و سختی بررسی شده است.

2- مصالح مورد استفاده

2-1- مشخصات خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه کوهین واقع در استان قزوین بوده است. جهت تعیین مشخصات مکانیکی خاک از آزمایشات دانه بندی مطابق استاندارد ASTM 175 D422، چگالی دانه های جامد، جرم مخصوص خشک، تخلخل و تراکم نسبی استفاده شد. طبق آزمایش دانه بندی، خاک مورد نظر از نوع ماسه بد دانه بندی (SP) شده بوده (شکل (2)) و سایر مشخصات خاک در جدول (1) ارائه شده است.

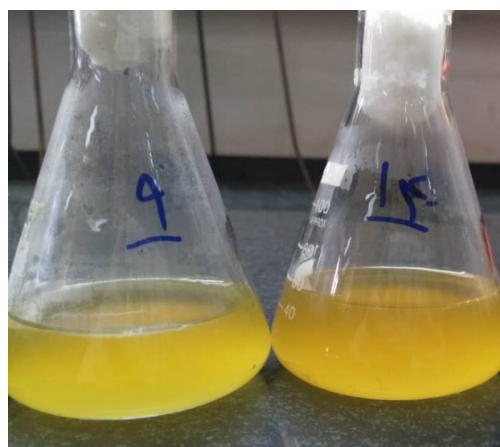


شکل 2- منحنی دانه بندی خاک

9. Nutrient broth
10. Nutrient agar
11. Merck

6. Consolidated Undrained Triaxial Compression Test
7. Sporosarcina pasteurii
8. Lyophilized

آمونیاک و دی اکسیدکربن شده و هدایت الکتریکی متعاقباً افزایش خواهد یافت.



شکل 3- الف) محیط کشت مایع (ناترینت برات و اوره) قبل،
ب) پس از کشت باکتری

3- روش کار

3-1- تهیه نمونه

برای ساخت نمونه از روش بارش خشک برای قرارگیری خاک در داخل قالب استفاده شد. قالب‌ها از جنس لوله PVC با قطر و ارتفاع به ترتیب 7 و 14 سانتی متر مطابق با شرایط دستگاه آزمایش سه محوری ساخته شد. از آنجایی که جهت جلوگیری از مسدودشدگی نقطه شروع تزریق و یکنواختی فرایند بهسازی از تزریق چهار فازی استفاده گردید، لذا نیاز به تعبیه دریچه خروجی در انتهای تحتانی قالب با امکان باز و بسته شدن می‌باشد. همچنین قبل از دریچه خروجی، فیلتر گذاشته شد تا در حین تخلیه محلول در انتهای هر فاز تزریق، خروج و حذف دانه‌های خاک اتفاق نیفتد. قبل از تزریق جهت بهسازی، برای تهیه محلول سیمنتاسیون، ابتدا باکتری کشت داده شده در محیط کشت مایع جداسازی می‌گردد، که بهترین زمان بین 24 تا 48 ساعت پس از کشت باکتری می‌باشد. به منظور جداسازی آن، ابتدا سوسپانسیون به دستگاه

سانتریفیوژ انتقال یافته تا با سرعت 400rpm در مدت زمان 20 دقیقه، رسوب باکتری تهیه گردد. چگالی اپتیکی باکتری نیز بر اساس طول موج 600nm توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری می‌شود.

در مرحله بعد جهت بهسازی نمونه، ابتدا محلول سیمنتاسیون را بر اساس مولاریته‌های مورد نظر مطابق جدول (2) و با توجه به حجم مولی اوره و کلرید کلسیم دو آبه به ترتیب برابر 60 و 147 (گرم بر مول) آماده می‌کنیم. جهت توزیع یکنواخت رسوب کربنات کلسیم، محلول سیمنتاسیون به روش ثقلی به داخل منافذ خاک تزریق می‌گردد. قبل از انجام تزریق، خاک در سه لایه در درون قالب PVC جای گرفته و توسط آب مقطر به طور کامل شستشو داده می‌شود (Lin و همکاران، 2016). گام بعد، مرحله تزریق سوسپانسیون باکتری‌های رقیق شده به انضمام محیط کشت و بافر بوده که با توجه به تحقیقات Han و همکاران (2010)، با حجم معادل 1/2 برابر حجم خلل فرج خاک انجام می‌گیرد (Al Han و همکاران، 2016).



(الف)



(ب)

شکل 4- الف) تزریق محلول سیمنتاسیون؛ ب) نمونه پس از بهسازی در دستگاه آزمایش سه محوری

بر اساس رسیدن به کارایی ماکزیمم و سرعت تزریق به دست آمده توسط Al Qabany و همکاران (2012) محاسبه گردید. سپس با توجه به زمان عمل‌آوری مورد بررسی در این پژوهش مطابق جدول (2)، نمونه‌های تزریق شده در آزمایشگاه در شرایط مناسب و دمای بین 27 تا 30 درجه نگهداری شده تا پروسه رسوب‌گذاری بیولوژیکی بین منافذ صورت گیرد. سپس نمونه بهسازی شده تحت آزمایش سه‌محوری فشاری تحکیم‌یافته زهکشی نشده قرار خواهد گرفت. شکل (4-ب)، نمونه سمنته‌شده بر روی دستگاه سه‌محوری را نشان می‌دهد. برنامه زمان‌بندی ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایشات در جدول (3) آمده است.

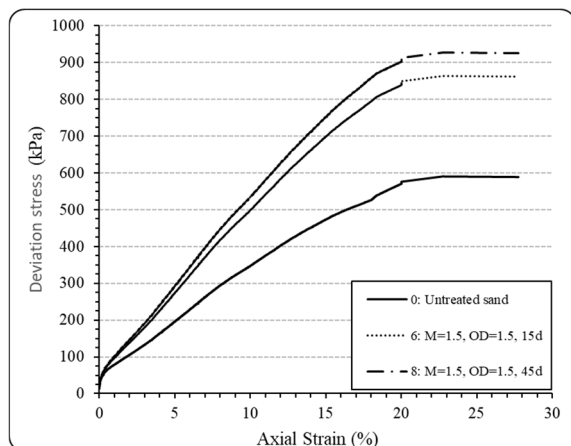
جهت جلوگیری از هدر رفتن و انجام واکنش باکتری‌ها، نیاز به تثبیت آن‌ها توسط محلول کلرید کلسیم در داخل حفرات خاک بوده، تا پس از افزودن محلول سیمان‌تاسیون رسوب‌گذاری شکل گیرد (Harkes و همکاران، 2010). در اینجا، از تزریق چهار فازی استفاده شد، که با فاصله زمانی 6 ساعته پس از تثبیت باکتری، تزریق محلول سیمان‌تاسیون آغاز گردید (شکل (4-الف)). با توجه به سطوح مختلف مولاریته محلول، زمان‌های انتظار متفاوتی بین فازهای تزریق وجود خواهد داشت. از سوی دیگر، بعد از تزریق فازهای اول و دوم جهت بهبود فرایند شکل‌گیری رسوب بین منافذ، تزریق مجدد باکتری به انضمام بافرها و سپس تثبیت آن‌ها صورت می‌گیرد. ضمناً مقدار زمان انتظار بین فازهای مختلف

جدول 2- سطوح تغییرات پارامترهای مؤثر بر بهسازی بیولوژیکی

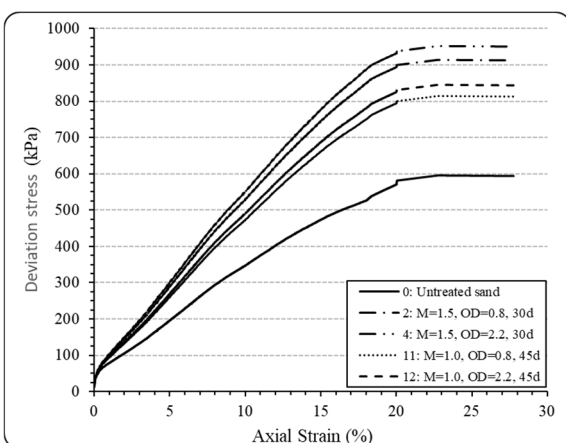
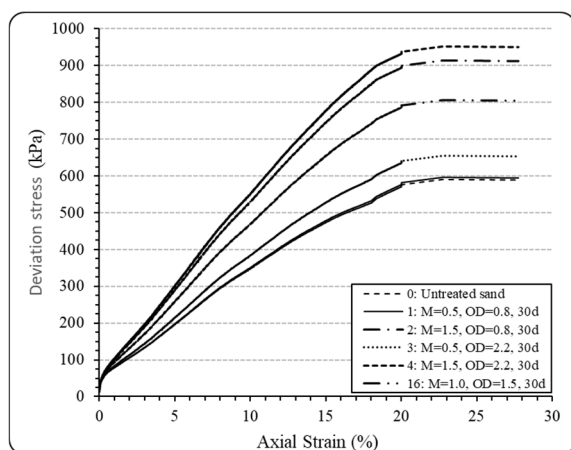
نمونه	متغیرهای مستقل	سطح تغییرات
A	مولاریته سیمان‌تاسیون (mol/L)	0/5 1/0 1/5
B	چگالی اپتیک باکتری (OD ₆₀₀)	0/8-1/2 1/5-2/0 2/0-4/0
C	زمان عمل‌آوری (روز)	15 30 45

جدول 3- برنامه زمان‌بندی ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایشات بر اساس طرح آزمایش به روش سطح پاسخ

شماره نمونه	مولاریته (mol/L)	چگالی اپتیک باکتری (OD ₆₀₀)	زمان آزمایش (روز)	زمان ساخت نمونه	مدت زمان بهسازی (روز)	زمان آزمایش
1	0/5	0/1-8/2	30	1400/06/27	2	1400/07/28
2	1/5	0/1-8/2	30	1400/08/15	6	1400/09/22
3	0/5	2/4-0/0	30	1400/06/27	2	1400/07/28
4	1/5	2/4-0/0	30	1400/08/15	6	1400/09/22
5	0/5	1/2-5/0	15	1400/08/19	2	1400/09/06
6	1/5	1/2-5/0	15	1400/08/15	6	1400/09/06
7	0/5	1/2-5/0	45	1400/08/19	2	1400/10/06
8	1/5	1/2-5/0	45	1400/08/15	6	1400/10/06
9	1	0/1-8/2	15	1400/08/08	4	1400/08/27
10	1	2/4-0/0	15	1400/08/08	4	1400/08/27
11	1	0/1-8/2	45	1400/08/08	4	1400/09/27
12	1	2/4-0/0	45	1400/08/08	4	1400/09/27
13	1	1/2-5/0	30	1400/07/20	4	1400/08/25
14	1	1/2-5/0	30	1400/07/20	4	1400/08/25
15	1	1/2-5/0	30	1400/08/03	4	1400/09/09
16	1	1/2-5/0	30	1400/08/03	4	1400/09/09
17	1	1/2-5/0	30	1400/06/21	4	1400/07/25



شکل 5- تأثیر مولاریته محلول سیمان تاسیون بر تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری



شکل 6- تأثیر چگالی اپتیک باکتری بر تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری

3-2- آزمایش سه محوری CU

جهت مقایسه رفتار تنش - کرنش و سختی نمونه‌ها در حالات قبل و بعد از بهسازی، نمونه‌ها پس از خروج از قالب تحت آزمایش سه محوری CU مطابق استاندارد ASTM D4767-CU قرار می‌گیرند. قبل از جای گذاری آزمونه، ابتدا غشاء لاستیکی از نظر سوراخ و نشت مورد بازبینی قرار می‌گیرد. نمونه را با غشای لاستیکی پوشانده و پس از قرارگیری بر روی دستگاه سه محوری، توسط حلقه‌های لاستیکی آب‌بند می‌گردد. هوای محبوس داخل منافذ خاک را توسط گاز CO_2 تخلیه کرده و نمونه با کنترل B اسکمتون¹² اشباع می‌شود. جهت تحکیم نمونه از فشار همه جانبه 100 کیلو پاسکال استفاده گردیده و پس از پایان تحکیم نمونه، با حصول اطمینان از بسته بودن شیرهای زهکشی، بارگذاری جهت اعمال تنش‌های انحرافی اعمال شده تا گسیختگی نمونه رخ دهد. بارگذاری بر اساس روش کنترل کرنش انجام گرفته و پس از اتمام آزمایش، با توجه به خروجی داده‌های دستگاه سه محوری رفتار تنش - کرنش و سختی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

4- بحث و نتایج

4-1- مقایسه رفتار تنش - کرنش

جهت بررسی تأثیر پارامترهای مولاریته محلول سیمان تاسیون، چگالی اپتیک و زمان عمل‌آوری نمونه، مجموعه‌ای از آزمایشات سه محوری CU مطابق با سطوح تغییرات جدول (2)، قبل و بعد از بهسازی نمونه انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش سه محوری CU حداکثر تنش انحرافی پس از بهسازی بیولوژیکی برابر 957 kPa به دست آمد که در مقایسه با حالت قبل از بهسازی تقریباً 62 درصد افزایش داشته است. جهت مقایسه نمونه‌ها قبل و بعد از بهسازی تحت آزمایش سه محوری CU، نمودارهای تنش انحرافی در برابر کرنش محوری ترسیم گردید. مطابق شکل‌های (5) تا (7) مشاهده گردید که شیب نمودار تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در کرنش‌های پایین، زیاد بوده و با افزایش کرنش محوری شیب ملایم‌تری را دنبال خواهد کرد. ضمناً نمونه‌ها تقریباً در کرنش‌های محوری حدود 18 تا 22 درصد، به حداکثر تنش انحرافی رسیده و پس از آن با افزایش کرنش‌ها، نمونه‌ها قادر به تحمل بار بیشتر نخواهند بود.

مولاریته محلول سیمان تاسیون یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار تنش - کرنش ماسه بهسازی شده بیولوژیکی می‌باشد. شکل (5) نشان می‌دهد که مولاریته محلول سیمان تاسیون می‌تواند تأثیر زیادی بر افزایش تنش‌های انحرافی ماسه پس از بهسازی توسط رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) داشته باشد.

خوبی را دنبال کرده، اما پس از آن رشد قابل ملاحظه‌ای نداشته است.

4-2- مقایسه سختی نمونه

یکی از پارامترهای مهم ژئوتکنیکی حاکم بر رفتار تنش- کرنش، مدول یا سختی خاک می‌باشد. در ادامه مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) مورد بررسی قرار گرفت. طبق آنچه در بخش‌های قبلی مشاهده شد (شکل‌های (5) تا (7))، شیب نمودارهای تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در کرنش‌های پایین (محدوده ارتجاعی) زیاد بوده و با انتقال به محدوده غیر ارتجاعی کاهش یافت. مطلب فوق بیانگر این نکته است که در ابتدای آزمایش سه‌محوری CU، نمونه‌ها رفتار سخت شونده کرنشی داشته و با افزایش کرنش محوری در محدوده کرنش‌های کوچک و ارتجاعی، مدول ثانویه (E_{sec}) با سرعت زیاد کاهش می‌یابد (مطابق شکل‌های (8) تا (10)). سپس با انتقال به ناحیه غیرارتجاعی رفتار نرم‌شوندگی کرنشی از خود نشان داده و سختی ثانویه (E_{sec}) با نرخ کاهشی ملایم‌تری، نهایتاً به مقدار تقریباً ثابتی میل می‌کند. باید توجه داشت که در کرنش‌های کوچک، تغییر شکل‌های به وجود آمده حاصل شکستن پیوند بین دانه‌ها و باندهای تماسی ناشی از سمت‌شدن بیولوژیکی و در محدوده رفتار ارتجاعی بوده، در حالی که تغییر شکل‌ها در کرنش‌های بزرگ، حاصل لغزش دانه‌ها بر روی هم با خاصیت غیر ارتجاعی همراه خواهد بود.

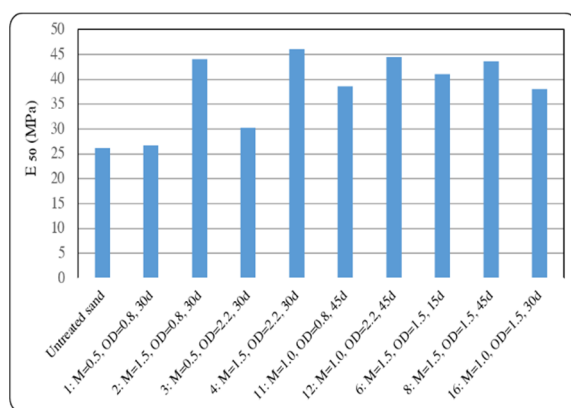
مشاهدات حاصل از شکل (8) نشان داد که افزایش مولاریته محلول سیمان‌تاسیون در شرایط چگالی ایتیکی و زمان عمل‌آوری مشابه، باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) نمونه‌های بهسازی شده بیولوژیکی می‌گردد (مقایسه نمونه‌های 1 و 2 و همچنین 3 و 4). در واقع افزایش مولاریته منجر به تشکیل رسوب کربنات کلسیم بیشتر بین منافذ خاک و ایجاد باندهای تماسی قوی‌تر گشته و در نتیجه در کرنش‌های پایین، کرنش سخت شونده بالاتری داشته و افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) را در پی خواهد داشت. از طرفی دیگر برای نمونه‌های با سطوح مولاریته محلول سیمان‌تاسیون و چگالی ایتیکی پایین، به دلیل عدم شکل‌گیری مناسب رسوب کربنات کلسیم بین منافذ خاک، افزایش قابل ملاحظه در سختی ثانویه (E_{sec}) نسبت به حالت قبل از بهسازی مشاهده نگردید. مطابق شکل (11)، روند مشابه مدول ثانویه (E_{sec}) در ارتباط با سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) مشاهده گردید. مجدداً مدول (E_{50})، با افزایش مولاریته محلول سیمان‌تاسیون افزایش زیادی داشته، در حالی که پس از بهسازی توسط رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) با مولاریته و چگالی ایتیکی پایین، سختی چندان افزایش پیدا نکرد (نمونه 1).

با توجه به شکل (5)، مقایسه نمونه‌های 3 و 4 در شرایط چگالی ایتیکی و زمان عمل‌آوری یکسان نشان داد که با افزایش مولاریته محلول سیمان‌تاسیون از 0/5 به 1/5 مولار بر لیتر، مقدار تنش انحرافی در نمونه‌ها از 655kPa به 952kPa تغییر یافته و با افزایش حدود 45 درصدی همراه بوده (روند مشابه برای نمونه‌های 1 و 2 نیز دیده شده است) که تطابق مناسب آن با کارهای Feng و همکاران (2016) دارد. از طرفی دیگر، نتایج نشان داده که در سطوح مولاریته پایین، تأثیر مولاریته نسبت به حالت قبل بهسازی چندان چشمگیر نیست و با افزایش مولاریته با تأمین مواد مغذی، رسوب گذاری بهتری در داخل منافذ خاک شکل گرفته و با ایجاد پیوندهای تماسی قوی‌تر بین دانه‌ها، روند افزایش مقاومت و تنش‌های انحرافی سریع‌تر دنبال می‌گردد. همچنین در شکل (5) نمونه با غلظت مولی 0/5، به دلیل پایین بودن زیاد مولاریته محلول سیمان‌تاسیون و چگالی ایتیکی باکتری، نسبت به حالت قبل از بهسازی بیولوژیکی، افزایش تنش انحرافی چندان حاصل نگردید.

پارامتر دیگری که در این پژوهش به آن پرداخته شد، چگالی ایتیکی باکتری بود. مطابق شکل (6)، مقایسه نمونه‌های 2 و 4 (و همچنین 11 و 12) نشان داد که چگالی ایتیکی باکتری نسبت به مولاریته محلول سیمان‌تاسیون تأثیر بسیار کمتری بر افزایش تنش‌های انحرافی داشته است. در شرایط یکسان مولاریته و زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های 2 و 4، با افزایش چگالی ایتیکی باکتری از 0/8 به 2/2، میزان تنش‌های انحرافی از 914kPa به 952kPa و تقریباً معادل 4 درصد افزایش داشته است، که در مقایسه با پارامتر قبلی چندان قابل ملاحظه نبود. از سوی دیگر، مقایسه شکل‌های (5) و (6) نشان داد که روند افزایش مقاومت با تغییرات چگالی ایتیکی باکتری، در سطوح مولاریته بالاتر به مراتب کمتر است، که خود گویای نقش بسزای مولاریته محلول سیمان‌تاسیون بر افزایش تنش انحرافی می‌باشد.

جهت بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر بهسازی بیولوژیکی ماسه (MICP)، بر اساس جدول (2)، نمونه‌ها در بازه زمانی 15، 30 و 45 روزه تحت آزمایش سه‌محوری CU قرار گرفتند. با توجه به شکل (7)، روند تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری نشان داد که در شرایط مولاریته محلول سیمان‌تاسیون و چگالی ایتیکی برابر، افزایش زمان عمل‌آوری باعث افزایش مقاومت نمونه‌های بهسازی شده می‌گردد. به طوری که برای نمونه‌های 6 و 8، افزایش زمان عمل‌آوری از 15 به 45 روز باعث افزایش حدود 7 درصدی تنش انحرافی گردید. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات سه‌محوری CU نشان داد که در سطوح مولاریته و چگالی ایتیکی پایین، زمان عمل‌آوری تأثیر چندان بر روند بهسازی ندارد (نمونه 1 در شکل (5)). تنش‌های انحرافی نمونه‌ها از شروع زمان عمل‌آوری تا محدوده زمانی بین 35 تا 39 روزه روند افزایشی بسیار

در ادامه بررسی شکل‌های (6) و (11) نشان داد که در صورت یکسان بودن مولاریته محلول سیمان‌تاسیون برای نمونه‌های 2 و 4، افزایش چگالی اپتیکی باکتری، باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) گردیده، اما افزایش مشاهده شده در مقایسه با تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون بسیار کمتر می‌باشد. همچنین افزایش زمان عمل‌آوری نیز، هر چند باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) می‌گردد، اما میزان تغییرات آن‌ها بسیار زیاد نیست (شکل‌های (10) و (11)). ضمن آن‌که عامل اصلی افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) نسبت به حالت قبل از بهسازی بیولوژیکی، افزایش مولاریته محلول سیمان‌تاسیون به $1/5$ مولار بوده است.

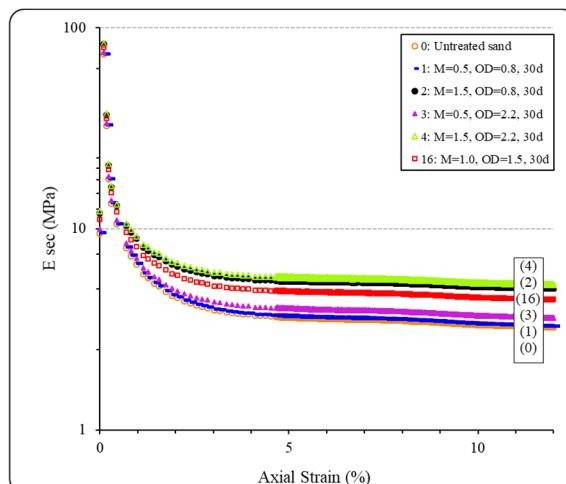


شکل 11- تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل‌آوری بر مدول (E_{50}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP)

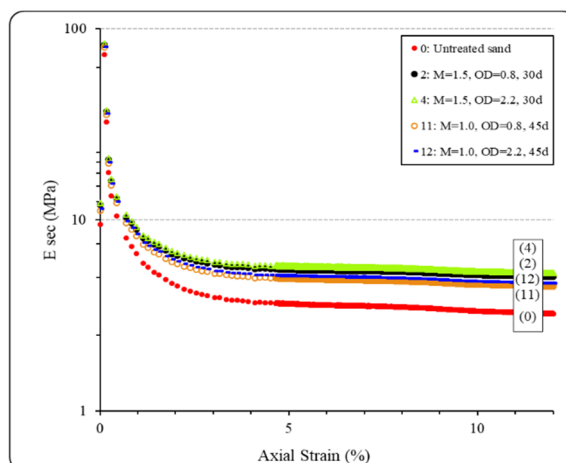
5- نتیجه‌گیری

از پارامترهای مهم ژئوتکنیکی حاکم بر رفتار تنش- کرنش خاک، بررسی تغییرات تنش انحرافی و سختی نسبت به کرنش محوری بوده که تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون، چگالی اپتیکی باکتری و زمان عمل‌آوری نمونه بر بهسازی توسط رسوب میکروبی کرنات کلسیم (MICP) تحت آزمایش سه‌محوری فشاری تحکیم یافته زهکشی نشده مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه آمده است:

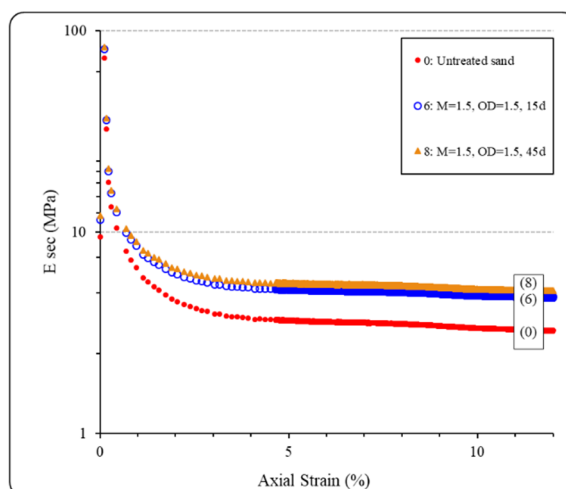
- حداکثر تنش انحرافی پس از بهسازی بیولوژیکی برابر 957 kPa به‌دست آمد، که نسبت به قبل از بهسازی تقریباً 62 درصد افزایش داشته است.
- شیب منحنی‌های تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در کرنش‌های پایین، زیاد بوده و با افزایش کرنش محوری شیب ملایم‌تری را دنبال کرد. همچنین نمونه‌ها تقریباً در کرنش‌های محوری حدود 18 تا 22 درصد، به حداکثر تنش انحرافی رسیدند.



شکل 8- تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون بر مدول ثانویه (E_{sec}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP)



شکل 9- تأثیر چگالی اپتیکی باکتری بر مدول ثانویه (E_{sec}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP)



شکل 10- تأثیر زمان عمل‌آوری نمونه بر مدول ثانویه (E_{sec}) ماسه بهسازی شده بیولوژیکی (MICP)

می‌تواند در مواجهه با نیروها و علی‌الخصوص نیروهای دینامیکی و عکس‌العمل خاک در برابر نشست تأثیرگذار باشد.

6- مراجع

- Al Qabany A, Soga K, Santamarina C, "Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138 (8), 992-1001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000666](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666)
- Behzadipour H, Sadrekarimi A, "Effects of microbially induced calcite precipitation on static liquefaction behavior of a gold tailings sand", *Biogeotechnics*, 2024, 100097. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100097>
- Cheng L, Kobayashi T, Shahin MA, "Microbially induced calcite precipitation for production of "bio-bricks" treated at partial saturation condition", *Construction and Building Materials*, 2020, 231, 117095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117095>
- 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\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1381))
- DeJong JT, Mortensen BM, Martinez BC, Nelson DC, "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, 2010, 36 (2), 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>
- Ekrmirad SA, Azadi M, Shamskia N, "The effective parameters on the behaviour of treated sands by microbial-induced calcite precipitation under undrained triaxial test", *Archives of Mining Sciences*, 2023, 55-69. <https://doi.org/10.24425/ams.2023.144317>
- 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), 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001379](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001379)
- Han Z, Cheng X, Ma Q, "An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 15 (4), 673-679. <https://doi.org/10.1007/s11803-016-0357-6>
- Harkes MP, Van Paassen LA, Booster JL, Whiffin VS, van Loosdrecht MCM, "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement", *Ecological Engineering*, 2010, 36 (2), 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.01.004>
- Karol RH, "Chemical Grouting and Soil Stabilization", Revised and Expanded, 2003, 12, Crc Press. <https://doi.org/10.1201/9780203911815>
- Lin H, Suleiman MT, Brown DG, Kavazanjian JrE, "Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*
- مولاریته محلول سیمان‌تاسیون تأثیر زیادی بر افزایش تنش‌های انحرافی ماسه بهسازی شده تحت القای رسوب کربنات کلسیم (MICP) داشته و در شرایط چگالی ایتیکی و زمان عمل‌آوری یکسان، افزایش مولاریته محلول سیمان‌تاسیون حتی منجر به افزایش تنش انحرافی نمونه‌ها در حدود 45 درصد گردید. از طرفی دیگر، در سطوح مولاریته پایین به دلیل عدم تامین مواد مغذی، تأثیر مولاریته (حتی با افزایش چگالی ایتیکی و زمان عمل‌آوری) نسبت به حالت قبل از بهسازی چندان چشم‌گیر نیست.
 - چگالی ایتیکی باکتری نسبت به مولاریته محلول سیمان‌تاسیون تأثیر بسیار کمتری بر افزایش تنش‌های انحرافی داشته و حداکثر تأثیرگذاری آن بر روند بهسازی تقریباً معادل 4 تا 6 درصد بوده است.
 - افزایش زمان عمل‌آوری از 15 به 45 روز باعث افزایش تنش انحرافی ماسه بهسازی شده گردید. همچنین تنش‌های انحرافی نمونه‌ها از شروع زمان عمل‌آوری تا محدوده زمانی بین 35 تا 39 روزه روند افزایشی بسیار خوبی را دنبال کرده، اما پس از آن رشد قابل ملاحظه‌ای نداشته است.
 - در ابتدای آزمایش سه‌محوری CU، نمونه‌ها رفتار سخت‌شونده کرنشی داشته و با افزایش کرنش محوری در محدوده کرنش‌های کوچک و ارتجاعی مدل ثانویه (E_{sec}) با سرعت زیادی کاهش یافت. سپس با انتقال به ناحیه غیرارتجاعی رفتار نرم‌شوندگی کرنشی را دنبال کرده و سختی ثانویه (E_{sec}) با نرخ کاهشی ملایم‌تری، نهایتاً به مقدار تقریباً ثابتی رسید.
 - افزایش مولاریته با ایجاد رسوب کربنات کلسیم بیشتر بین منافذ خاک باعث ایجاد باندهای تماسی قوی‌تر گشته، لذا در کرنش‌های پایین، با دارا بودن کرنش سخت‌شونده بالاتر منجر به افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) خواهد شد. روند مشابه مدول ثانویه (E_{sec}) در ارتباط با سختی معادل 50 درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) مشاهده گردید.
 - افزایش چگالی ایتیکی باکتری باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) گردید، اما افزایش مشاهده شده در مقایسه با تأثیر مولاریته محلول سیمان‌تاسیون بسیار کمتر بود.
 - همچنین افزایش زمان عمل‌آوری باعث افزایش مدول ثانویه (E_{sec}) و مدول (E_{50}) گردید، اما میزان تغییرات آن‌ها بسیار زیاد نیست.
 - با افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی، یکی از چالش‌های مهندسان ژئوتکنیک دسترسی به زمین‌های با ظرفیت باربری مناسب می‌باشد. لذا ضمن به‌کارگیری روش‌های مختلف بهسازی، از دیدگاه ژئوتکنیکی توجه به پارامترهای مقاومتی و تغییر شکلی خاک بسیار حائز اهمیت بوده و افزایش پارامترهای سختی خاک

concrete crack repair: A review", *Construction and Building Materials*, 2024, 411, 134313.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134313>

- Engineering, 2016, 142 (2), 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001383](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001383)
- Madigan MT, Brock TD, Martinko JM, Parker J, "Brock biology of microorganisms", Upper Saddle River (NJ): Prentice-Hall, 2003.
- Montoya BM, DeJong JT, "Stress-strain behavior of sands cemented by microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141 (6), 4015019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001302](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001302)
- Nafisi A, Liu Q, Montoya BM, "Effect of stress path on the shear response of bio-cemented sands", *Acta Geotechnica*, 2021, 16, 3239-3251.
<https://doi.org/10.1007/s11440-021-01286-7>
- Prajapati NK, Agnihotri AK, Basak N, "Microbial induced calcite precipitation (MICP) a sustainable technique for stabilization of soil: A review", *Materials Today: Proceedings*, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.303>
- Qu J, Li G, Ma B, Liu J, Zhang J, Liu X, Zhang Y, "Experimental study on the wind erosion resistance of aeolian sand solidified by microbially induced calcite precipitation (MICP)", *Materials*, 2024, 17 (6), 1270. <https://doi.org/10.3390/ma17061270>
- Rong H, Qian CX, Li L, "Study on microstructure and properties of sandstone cemented by microbe cement", *Construction and Building Materials*, 2012, 36, 687-694.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.063>
- Tang Q, Tian A, Ling C, Huang Y, Gu F, "Physical and mechanical properties of recycled aggregates modified by microbially induced calcium carbonate precipitation", *Journal of Cleaner Production*, 2023, 382, 135409.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135409>
- Van Paassen LA, "Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation", University of Delf, Dissertation, 2009.
- Wang X, Li C, Fan W, Li H, "Reduction of brittleness of fine sandy soil biocemented by microbial-induced calcite precipitation", *Geomicrobiology Journal*, 2022, 39 (2), 135-147.
<https://doi.org/10.1080/01490451.2021.2019858>
- Wang X, Bhukya PK, Arneppalli DN, Chen S, "Coupled multiphysical model for investigation of influence factors in the application of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16 (6), 2232-2249.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.03.007>
- Wen K, Li Y, Liu S, Bu C, Li L, "Development of an improved immersing method to enhance microbial induced calcite precipitation treated sandy soil through multiple treatments in low cementation media concentration", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37 (2), 1015-1027.
<https://doi.org/10.1007/s10706-018-0669-6>
- Whiffin VS, "Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement", Doctoral Dissertation, Murdoch University, 2004.
- Zhang YS, Liu Y, Sun XD, Zeng W, Xing HP, Lin JZ, Yu L, "Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique in