

Sandy Soils Stabilization Using Calcite Microbial Deposition

Anis Saffari¹ , Mohammad Sharifipour^{2✉} , Jahangir Khazaie³ , Mojtaba Taran⁴

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: anis.saffari1990@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: sharifipour@razi.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: j.khazaie@razi.ac.ir
4. Department of Biology, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: mtaran@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2025-01-02
Received in revised form
2025-04-19
Accepted
2025-06-13
Available online
2025-06-23

Keywords:
MICP,
Soil Improvement,
Shear Strength,
Bender Elements,
Shear Module

ABSTRACT

Today, the need to implement construction projects in the vicinity of rivers and sea coasts is inevitable. On the other hand, the soils of these areas generally have problems such as low bearing capacity or prone to liquefaction. The need to improve these soils in order to implement huge projects such as those on the southern shores of the Persian Gulf of the Oman Sea is a necessary and inevitable thing. Considering the extent of the beaches and the need for construction projects in these areas, inventing an optimal method to stabilize them can provide a solution for the optimal use of coastal lands adjacent to rivers and seas. Among soil stabilization methods, microbial calcite precipitation (MICP) method is a new and emerging method that uses microorganisms in soil and chemical processes and as a result of producing calcite sediment, it provides the possibility of increasing shear strength, shear modulus, and also reducing soil permeability. In this research, the effects of this method on Babolsar beach sand have been investigated. For this purpose, by conducting direct shear tests and measuring shear wave velocity in non-cemented and cemented samples, the process of improving shear strength and increasing shear modulus was investigated by measuring shear wave velocity in samples prepared from Babolsar sand. Evaluation the results shows that the microbial calcite precipitation (MICP) method is effective and has caused a relative increase of two to three times in the shear strength and four times in the shear modulus of Babolsar sand. In the following, there is a good comparison and agreement between the obtained results and the results of other researchers.

Cite this article: Saffari, Anis., Sharifipour, Mohammad., Khazaie, Jahangir., & Taran, Mojtaba. (2025). Sandy Soils Stabilization Using Calcite Microbial Deposition. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 66-80.

DOI: 10.22126/amcen.2025.11574.1036



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.11574.1036

Publisher: Razi University

Introduction

Current land improvement methods mainly include injecting chemicals into the soil, which has a negative effect on the environment [1]. In recent years, the use of microbial calcite precipitation (MICP) has been proposed to improve soils, which is a new and environmentally friendly method [2]. Based on this, MICP is a bio-geo-chemical process, in which biological activity is used to increase the pH of the environment and provide favorable conditions for the formation of calcite deposits [3]. The created sediment increases the contact surface of sand grains with each other, and as a result, it increases the strength and hardness of the soil [4]. Among the processes that can cause the formation of calcium carbonate deposits by increasing the pH of the environment is the hydrolysis of urea ([5] and [6]. Hydrolysis of urea is a chemical reaction in which urea reacts with water and produces an ionic product [7].

In this research, the potential of biological improvement (MICP method) in the improvement of fine-grained sand soil in Babolsar is evaluated. If this method is effective in the laboratory scale, by upgrading the scale of this method, it is possible to ensure the desired result in the field, and finally, by localizing this method, it will help the economic cycle of the country and also speed up the construction process in the coastal areas. This method has a high potential in improving erodible soils. In the past researches, during the improvement, the process of injecting nutrient solutions was accompanied by aeration. But since in the real world and in the lower layers of the soil (especially in areas where the underground water level is high), there is a lack of oxygen to some extent. The innovation of this research is that, in order to make the environmental conditions realistic, the injection process was carried out under a pressure of 200 kilopascals and without aeration.

Method

In order to localize the studies, MICP biological improvement method was implemented on Babolsar sandy soil. The bacteria used in this study was *Bacillus pastorii* (PTCC 1645). To keep the sand sample, suction method or creating a vacuum inside the sample was used. At first, the suction pressure equal to 30 kPa was applied. After establishing the triaxial cell and applying all-round pressure, the suction pressure decreased gradually, then the all-round stress was increased in steps of 50 kPa until it reached 200 kPa. In all stages of the test, including the injection of biological solutions and cementation, sending waves and recording information of shear waves, this comprehensive pressure was maintained on the samples. Direct shear tests were performed according to ASTM D 3080-98. In this study, in order to control the progress of cementation with the passage of time, the shear wave speed was measured with the help of the Bandar Element device installed in the three-axis device of Razi University (Figure 4). As shown in the figure. The two probes installed in the upper and lower caps of the three-axis device are used to send and receive shear waves

Results

By comparing the results, it can be said that the amount of adhesion between the treated grains is about double and the friction angle between the grains is also twice that of the non-treated

sample. Of course, the higher the number of injections, the more resistant samples can be obtained. This increase in adhesion and internal friction angle can be attributed to the formation of calcite deposits, cementation between particles, and creating friction between calcite crystals and sand particles. The effect of calcite microbial deposition on the shear wave velocity during a fifteen-step injection process shows that initially the shear wave velocity increase rate is very low, but with the passage of time, its value increases gradually. Since it reached its maximum value in the middle of the experiment, and finally its rate decreased and reached zero, and this means that at the end of the experiment, the operation was injected, so it is not possible to form more calcite.

Conclusions

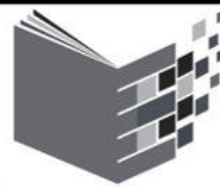
According to the obtained results, the biological remediation method increased the shear strength of coarse-grained sand in Babolsar. The results of the experiments conducted in this study show the high potential of the MICP method in the improvement of sandy soils and its great importance due to the occurrence of less adverse environmental effects of the materials used, in order to improve the soils at greater depths with less expenditure. The results show that remediation is possible deep below the ground water surface where the presence of oxygen is limited or absent at all, assuming sufficient injection of bacteria containing urease enzyme.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تثبیت خاک‌های ماسه‌ای به وسیله رسوب میکروبی کلسیت

انیس صفاری^۱، محمد شریفی‌پور^۲، جهانگیر خزایی^۳، مجتبی تاران^۴

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: anis.saffari1990@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

رایانامه: sharifipour@razi.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: j.khazaie@razi.ac.ir

۴. گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: mtaran@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	مدل امروزه نیاز به اجرای پروژه‌های عمرانی در مجاورت رودخانه‌ها و سواحل دریاها امری اجتناب ناپذیر است. از طرفی خاک‌های این مناطق، عموماً دارای مشکلاتی از قبیل پایین بودن ظرفیت باربری و یا مستعد روانگرایی هستند. نیاز به بهسازی این خاک‌ها به منظور اجرای پروژه‌های عظیم نظیر آنچه در سواحل جنوبی خلیج فارس دریای عمان وجود دارد، امری الزامی و اجتناب ناپذیر است. باتوجه به گستردگی سواحل و نیاز به پروژه‌های عمرانی در این مناطق، ابداع روشی بهینه برای تثبیت آن‌ها می‌تواند راهکاری برای استفاده‌ی بهینه از زمین‌های ساحلی مجاور رودخانه‌ها و دریاها را فراهم کند. از میان روش‌های تثبیت خاک، روش رسوب میکروبی کلسیت (MICP) روشی جدید و نوظهور است که با استفاده از میکروارگانیسم‌های موجود در خاک و فرآیندهای شیمیایی و در نتیجه تولید رسوب کلسیت، امکان افزایش مقاومت برشی، مدول برشی و همچنین زمینه کاهش نفوذپذیری خاک را فراهم می‌کند. در این پژوهش اثرات این روش بر روی ماسه‌ی ساحلی بابلر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و اندازه‌گیری سرعت موج برشی در نمونه‌های سیمانی نشده و سیمانی شده، روند ارتقاء مقاومت برشی و افزایش مدول برشی با اندازه‌گیری سرعت موج برشی در نمونه‌های تهیه شده از ماسه بابلر مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که روش رسوب میکروبی کلسیت (MICP) موثر بوده و سبب افزایش نسبی دو تا سه برابر در مقاومت برشی و چهار برابر در مدول برشی ماسه بابلر شده است. در ادامه، نتایج بدست آمده با نتایج سایر محققین مقایسه و مطابقت مناسبی وجود دارد.
تاریخ دریافت:	۱۴۰۳/۱۰/۱۳
تاریخ بازنگری:	۱۴۰۴/۰۱/۳۰
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۴/۰۳/۲۳
تاریخ انتشار:	۱۴۰۴/۰۴/۰۲
کلیدواژه‌ها:	روش رسوب میکروبی کلسیت، بهسازی خاک، مقاومت برشی، بندرالمنت، مدول برشی

استناد: صفاری، انیس؛ شریفی‌پور، محمد؛ خزایی، جهانگیر؛ تاران، مجتبی. (۱۴۰۴). تثبیت خاک‌های ماسه‌ای به وسیله رسوب میکروبی کلسیت. مجله

DOI: 110.22126/amcen.2025.11574.1036

مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۱)، ۶۶-۸۰.

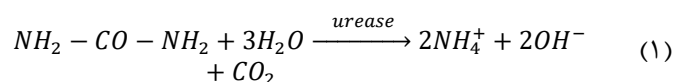


© نویسندگان.

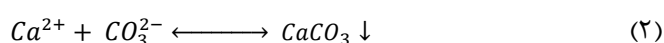
ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

روش‌های کنونی بهسازی زمین عمدتاً شامل تزریق مواد شیمیایی به داخل خاک هستند، که این امر روی محیط زیست اثر منفی دارد [۱]. در سال‌های اخیر استفاده از رسوب میکروبی کلسیت^۱ (MICP) به منظور بهسازی خاک‌ها مطرح شده است، که یک روش جدید و سازگار با محیط زیست است [۲]. بر این اساس MICP یک فرآیند بیو-ژئوشیمی^۲ است، که در آن از فعالیت بیولوژیکی برای افزایش pH محیط و فراهم نمودن شرایط مطلوب تشکیل رسوب کلسیت استفاده می‌شود [۳]. رسوب ایجاد شده سطح تماس دانه‌های ماسه به همدیگر را افزایش داده، و در نتیجه استحکام و سختی خاک را افزایش می‌دهد [۴]. از جمله فرآیندهای که می‌تواند با افزایش pH محیط سبب تشکیل رسوب کربنات کلسیم شود هیدرولیز اوره است [۵] و [۶]. هیدرولیز اوره یک واکنش شیمیایی است که در آن اوره با آب واکنش می‌دهد و محصول یونی تولید می‌کند [۷]. هنگامی که این واکنش در حضور یون کلسیم (Ca^{2+}) رخ می‌دهد، با افزایش pH رسوب کربنات کلسیم تشکیل می‌شود. هیدرولیز اوره (بدون حضور کاتالیزور) یک فرآیند آرام و طولانی است و در حضور آنزیم اوره‌آز^۳ (آنزیمی که برخی از میکروارگانیسم‌ها قادر به ترشح آن می‌باشند)، حدوداً 10^{14} بار سریعتر از فرآیند معمولی (بدون حضور کاتالیزور) است [۶]. میکروارگانیسم‌های هوازی که قادر به مصرف اوره به‌عنوان منبع انرژی اند، از بهترین کاندیدها هستند، زیرا این میکروارگانیسم‌ها دو منبع برای تولید CO_2 ایجاد می‌کنند: تنفس سلولی، تجزیه اوره باسیلوس‌ها که باکتری‌های قلیادوستی هستند و بطور طبیعی در خاک موجوداند و همچنین فعالیت اوره‌آز بالایی دارند، یکی از گزینه‌های مناسب برای فرآیند MICP می‌باشند [۸]. تجزیه‌ی اوره به وسیله‌ی آنزیم اوره‌آز مطابق رابطه (۱) رخ می‌دهد [۹]:



آنزیم اوره‌آز به باکتری اجازه می‌دهد که اوره را به‌عنوان منبع انرژی مصرف کرده و آمونیاک (NH_3) و کربن دی‌اکسید (CO_2) به‌عنوان محصولات واکنش تولید کند [۱۰]. هنگامی که این مولکول‌ها وارد مایع منفذی می‌شوند، در حضور آب دو واکنش خودبه‌خودی رخ می‌دهد، آمونیاک با آب واکنش داده و با جذب H^+ ، آمونیوم (NH_4^+) و هیدروکسید (OH^-) تولید می‌کند، درحالی‌که کربن دی‌اکسید به همراه اسید کربنیک، کربنات و یون‌های بی‌کربنات، مطابق رابطه (۲) در وضعیت تعادل pH قرار می‌گیرند [۱۱].



افزایش pH به دلیل حضور یون هیدروکسید ناشی از تولید آمونیوم است، که محیط قلیایی مورد نیاز برای تشکیل رسوب کلسیت را فراهم می‌کند. در یک محیط غنی در از کلسیم، رسوب کربنات کلسیم ($CaCO_3$) تشکیل می‌شود. تاکنون مطالعات بسیاری بر روی بهسازی بیولوژیکی خاک‌ها انجام شده است و پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از جمله، افزایش مقاومت برشی [۸]؛ [۶]؛ [۱۰] و [۱۲]، کاهش نفوذپذیری [۱۳] و [۱۴]، افزایش مقاومت روانگرایی [۱۵]؛ [۱۶] و [۱۷].

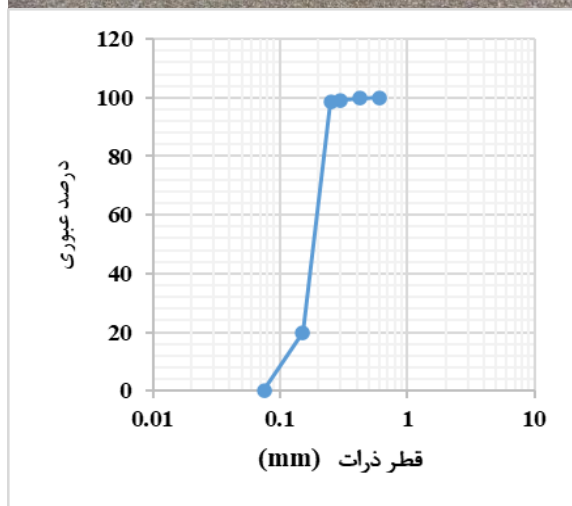
بهزادی پور و همکاران (۲۰۱۹)، بیان کردند که نانوذرات تشکیل شده پس از فرآیند MICP در خاک‌های دانه‌ای از لحاظ پارامترهای مقاومتی، شرایط بهتری نسبت به حالت اولیه دارند [۱۸]. آن‌ها نشان دادند که اگرچه روش MICP چسبندگی خاک را افزایش می‌دهد، اما نقش اساسی را در افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ایفا می‌کند. چوی^۴ و همکاران (۲۰۲۰)، نشان دادند که روش MICP باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک می‌شود [۱۹].

سیونگ-هان بک^۵ و همکاران (۲۰۲۴)، با تزریق دوغاب زیستی در خاک و اندازه‌گیری مقادیر نفوذپذیری در درصدهای متفاوت کلسیم کربنات دریافتند که مقدار کلسیم کربنات بیشتر از محدوده ۱۰ - ۱۵ درصد، این روش کارایی خود را حفظ خواهد کرد [۲۰]. نتایج مطالعات انجام شده توسط کریمیان و همکاران (۱۳۹۷)، بر روی خاک‌های

⁴ Choi⁵ Seung-Han Beak¹ Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP)² Bio-geo-chemistry³ Enzyme urease

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی بابلسر

$D_{50}(mm)$	C_u	C_c	G_s	e_{min}	e_{max}
0.177	1.865	1.260	2.749	0.511	0.814



شکل ۱. تصویر دانه‌ها و نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی بابلسر

۲-۲. میکروارگانیسم مورد استفاده

سویه‌ی مورد استفاده در این پژوهش باکتری باسیلوس پاستوری (1645PTCC^۶) بوده است، که از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های

ماسه‌ای سطحی، نشان می‌دهد افزایش مقاومت ناشی از بهسازی زیستی تنها به مقدار کلسیت تشکیل شده بستگی ندارد بلکه محل تشکیل رسوب و تعداد پیوندها اثر بیشتری دارند [۲۷]. ملک دوست و همکاران (۱۴۰۲)، با انجام آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده روی ماسه تثبیت شده به روش MICP، اثرات توأم فشار همه جانبه، تغییرات بازه دمایی، مدت زمان اعمال هر سیکل و تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد بر پارامترهای تغییر شکلی نظیر، سختی سکانت، سختی تانژانت، سختی معادل ۵۰ درصد مقاومت بیشینه و انرژی جذب شده را مورد ارزیابی قراردادند [۲۸]. آن‌ها دریافتند که اعمال سیکل‌های ذوب و انجماد موجب کاهش پارامترهای تغییر شکلی نمونه‌های تثبیت شده می‌شود. همچنین اثر مخرب سیکل‌های ذوب و انجماد بر سختی بیشتر از انرژی جذب شده می‌باشد. در این تحقیق پتانسیل بهسازی بیولوژیکی (روش MICP) در بهبود خاک ماسه بد دانه‌بندی شده بابلسر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورت موثر بودن این روش در مقیاس آزمایشگاهی، می‌توان با ارتقای مقیاس این روش، به‌صورت میدانی نیز از حصول نتیجه‌ی مورد نظر اطمینان حاصل کرد و در نهایت با بومی‌سازی این روش به چرخه‌ی اقتصاد مملکت کمک کرده و همچنین روند ساخت و ساز در مناطق ساحلی را تسریع بخشید. از طرفی این روش پتانسیل بالایی در بهبود خاک‌های فرسایش‌پذیر دارد. در تحقیقات گذشته در طول بهسازی، فرآیند تزریق محلول‌های مغذی همراه هواده‌ی بوده است. اما از آنجاییکه در عالم واقعیت و در لایه‌های زیرین خاک (به‌خصوص در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالا است)، تا حدی کمبود اکسیژن وجود دارد. نوآوری این تحقیق در آنست که به منظور واقعی‌سازی شرایط محیطی، فرآیند تزریق تحت فشار ۲۰۰ کیلو پاسکال و بدون هواده‌ی انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. خاک مورد استفاده

بمنظور بومی‌سازی مطالعات، روش بهسازی بیولوژیکی MICP بر روی خاک ماسه‌ی بابلسر اجرا شد. تصویر دانه‌های ماسه و نمودار دانه‌بندی و سایر مشخصات فیزیکی این خاک به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر e_{min} و e_{max} مطابق استاندارد ASTM D 4254 – 91 تعیین شدند.

⁶ Persian Type Culture Collection

صنعتی ایران^۷ به صورت لیوفیلیزه^۸ خریداری شده و بر اساس محیط پیشنهادی DSM 33 کشت داده شده است.

۲-۳. روش کشت نمونه‌ها

۲-۳-۱. تهیه محیط کشت آگار و کشت باکتری

مطابق محیط پیشنهادی DSM 33، پلیت‌های حاوی محیط کشت نوترینت آگار^۹ ۲٪ اوره تهیه شد. بعد از باز کردن آمپول لیوفیلیزه با رعایت نکات ایمنی، ۰.۳~۰.۴ میلی‌لیتر آب مقطر به ماده‌ی خشک درون آمپول اضافه و به‌دقت آن‌را مخلوط کرده تا به شکل سوسپانسیون یکنواختی درآید و سپس سوسپانسیون به پلیت حاوی محیط کشت آگار منتقل و به کمک یک لوپ استریل شده به صورت خطی کشت داده شد. به‌منظور کاهش خطر آلودگی محیط کشت و جلوگیری از رشد قارچ‌ها و کلنی‌های^{۱۰} غیر از کلنی‌های مورد نظر، تمامی مراحل فوق در زیر هود انجام شد. برای فراهم آوردن شرایط مطلوب رشد باکتری، پلیت فوق به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور^{۱۱} با دمای ۳۷°C در گرمخانه نگه داری شد [۲۱].

۲-۳-۲. آماده‌سازی محلول بیولوژیکی و سیمانناسیون

به‌منظور آماده‌سازی ۱۰۰ CC محیط کشت مایع برای تلقیح باکتری، ۰.۸g^{۱۲} نوترینت برات توسط آب مقطر به حجم ۹۰CC رسیده و بعد از اتوکلاو و خنک شدن، ۱۰CC اوره‌ی ۲٪ فیلترشده به آن اضافه شد. پس از آماده‌سازی محلول، در کنار شعله و با رعایت شرایط استریلیزاسیون^{۱۳}، به کمک یک لوپ استریل شده، یک تک کلونی از کلونی‌های رشدیافته در محیط کشت آگار برداشته و به محیط کشت مایع انتقال داده شد. سپس ارلن حاوی محیط کشت مایع و باکتری تلقیح شده به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور شیکردار با دمای ۳۰°C در گرمخانه نگه داری شد. پس از انکوباسیون^{۱۴}، به‌منظور جداسازی ذرات معلق و مواد نامحلول سوسپانسیون در 1000g به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شده و پس از سانتریفیوژ مایع رویی دور ریخته شد. سلول‌های ته‌نشین شده در محیط کشت مایع جدید کشت داده شدند و

برای دومین بار به‌منظور حذف مواد خارج سلولی سانتریفیوژ شده و مایع رویی حذف شده و سپس سلول‌ها به حجم نهایی ۴۰CC از محیط کشت اوره (جدول ۲) انتقال داده شدند. از طرفی برای تهیه‌ی ۱۰۰۰CC محلول بیولوژیکی، با استفاده از آب مقطر محلولی به حجم ۹۰۰CC بدون اوره، از مواد ذکر شده در جدول ۲ آماده گردید. مقدار pH محلول فوق با استفاده از هیدروکلریک اسید N ۵، روی ۶ تنظیم شد. پس از اتوکلاو و خنک شدن، با اضافه کردن ۱۰۰CC محلول اوره‌ی ۲٪ فیلتر شده، pH آن افزایش یافت. با هواده‌ی محلول فوق، pH آن افزایش یافته و از ۶/۵ به ۷/۷ رسید. سپس سوسپانسیون باکتری به ۱L محیط کشت اوره اضافه شده و برای اطمینان از توزیع یکنواخت سلول‌ها، محلول به آرامی هم‌زده شد. بدین ترتیب محلول بیولوژیکی برای تزریق به داخل نمونه آماده شد.

همچنین برای تهیه‌ی محلول سیمانناسیون^{۱۵}، مطابق روش شرح داده شده، ابتدا محیط کشت اوره آماده شد، به‌طور هم‌زمان ۱۴/۷ gr کلسیم کلرید در ۱۰۰CC آب مقطر حل شده و جداگانه اتوکلاو شد. سپس به محیط کشت اوره اضافه گردید، بدین ترتیب محلول سیمانناسیون آماده شد. غلظت محلول بیولوژیکی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر^{۱۶} اندازه‌گیری شده و به صورت عددی بدون بُعد که دانسیته‌ی نوری نامیده می‌شود، بیان شد. در این پژوهش OD^{۱۶} محلول برابر ۰/۸۰-۱/۲ بود.

۲-۴. آماده‌سازی نمونه‌ها و تزریق محلول‌ها

به‌منظور ایجاد تزریقی با جریان یکنواخت، در بالا و پایین نمونه‌ها، علاوه بر سنگ متخلخل از کاغذ صافی نیز استفاده گردید. برای نگهداشتن نمونه ماسه‌ای از روش مکش و یا ایجاد خلا داخل نمونه استفاده شد. در ابتدا فشار مکشی معادل ۳۰ kPa اعمال شد.

پس از استقرار سلول سه‌محوری و اعمال فشار همه‌جانبه، فشار مکش به تدریج کاهش یافت، سپس تنش همه‌جانبه در گام‌های ۵۰ kPa

¹³ Incubation

¹⁴ Cementation

¹⁵ Spectrophotometer

¹⁶ Optical Density (OD)

⁷ IROST

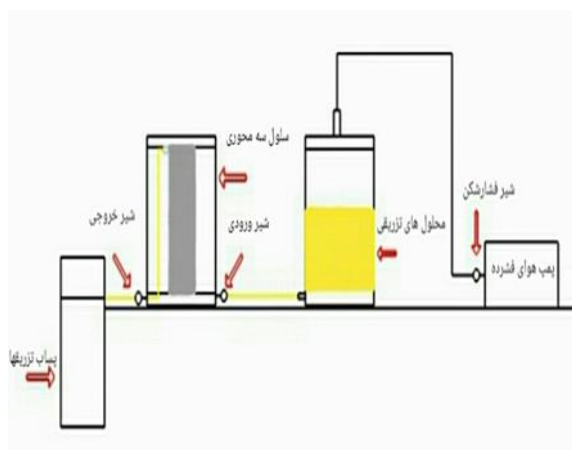
⁸ Lyophilize

⁹ Nutrient agar

¹⁰ Colony

¹¹ Incubator

¹² Sterilization



شکل ۲. شمای کلی سیستم تزریق

۵-۲. مراحل آماده سازی نمونه های آزمایش برش مستقیم

آزمایشات برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM D 3080 – 98 انجام شد. در این راستا، سه نمونه ی برش مستقیم مطابق آنچه که در بخش آماده سازی نمونه گفته شد، با تراکم نسبی ۳۰٪ آماده گردید (شکل ۳-الف). قالب های برش مستقیم دارای قطر ۷ و ضخامت ۲ سانتی متر است. به منظور جلوگیری از بهم خوردگی و شسته شدن ماسه، در بالا و پایین نمونه دو لایه کاغذ صافی قرار داده شد. محلول بیولوژیکی و محلول های سیمان تاسیون مطابق روش گفته شده به نمونه ها تزریق شدند. عملیات تزریق به مدت ۳ روز ادامه داشت (شکل ۳-ب). بعد از آخرین مرحله ی تزریق، نمونه ها به مدت ۷ روز در دمای 25°C نگهداری شده تا عمل سیمان تاسیون کامل گردد (شکل ۳-ج). برای ارزیابی پیشرفت آزمایش و تعیین مقاومت بهبود یافته، نمونه های سیمانی شده تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند و پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) محاسبه شدند.

افزایش یافته تا به 200 kPa رسید. در تمامی مراحل آزمایش، اعم از تزریق محلول های بیولوژیکی و سیمان تاسیون، ارسال امواج و ثبت اطلاعات امواج برشی، این فشار همه جانبه بر روی نمونه ها حفظ شد. پس از آماده سازی نمونه ها، در ابتدا محلول بیولوژیکی در یک نرخ 10 ml/min ، از پایین به بالا به داخل نمونه ها تزریق شد، در تزریق اولیه برای جلوگیری از تشکیل رسوب در طول لقاح باکتری، از کلسیم-کلرید استفاده نشد.

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی محلول های مورد استفاده

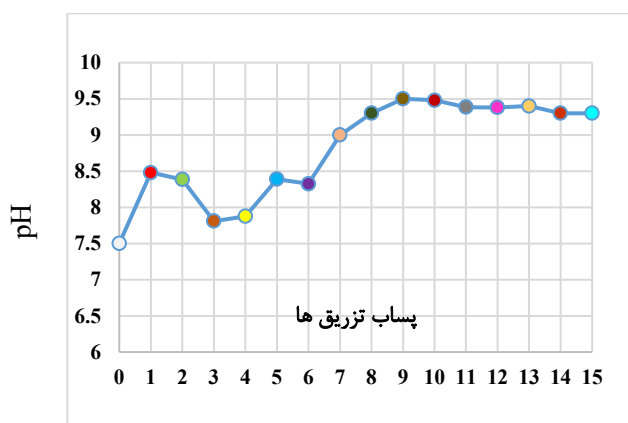
ترکیبات	محلول
نوترینت براث 3 gr/l	محیط کشت اوره (مورد استفاده در محلول های زیر)
آمونیم کلرید 10 gr/l	
سدیم بی کربنات 2.12 gr/l	
اوره 20 gr/l	
pH محلول قبل از اتوکلاو شدن با استفاده از هیدروکلریک اسید N ۵، روی ۶ تنظیم شد.	محلول بیولوژیکی
<i>Bacillus pasteurii</i> (OD: 0.8 -1,2)	
محیط کشت اوره 1L	محلول سیمان تاسیون
محیط کشت اوره 1L	
کلسیم کلرید 140 gr/l	

برای آن که باکتری ها به ذرات خاک بچسبند، محلول بیولوژیکی به مدت ۱۲ ساعت در داخل نمونه باقی ماند. بعد از گذشت ۱۲ ساعت، محلول سیمان تاسیون در یک نرخ 10 ml/min از پایین به بالا به داخل نمونه ها تزریق شد. تزریق محلول سیمان تاسیون هر ۴-۶ ساعت یکبار تکرار شد. شکل ۲ شمای کلی سیستم تزریق را نشان می دهد. سیستم تزریق شامل پمپ هوای فشرده، سلول شیشه ی استریل شده حاوی محلول های تزریقی، سلول سه محوری و در انتها ظرفی برای جمع آوری پساب بود. در هنگام تزریق فشار هوای پمپ روی 200 kPa تنظیم شد و با باز شدن شیر ورود هوا، محلول داخل سلول تحت فشار قرار گرفت. سپس شیر زهکشی سلول سه محوری باز شده و محلول تحت فشار به داخل نمونه تزریق شد. محلول جدید وارده نمونه شده، بدیهی است چون نمونه اشباع بود، محلول قدیمی از نمونه خارج شده و در ظرف جمع آوری گشت.

۳. اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر

۱-۳. اندازه‌گیری pH

یکی از پارامترهای بسیار مهم و تاثیرگذار در شروع سیمان‌تاسیون میکروبی، پتانسیل هیدروژن محیط pH است. طبق یافته‌های مارتنسن^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۱) نرخ رسوبگذاری به طور مستقیم به نرخ افزایش pH وابسته است [۴]. حتی به منظور اطمینان از تداوم فعالیت بیولوژیکی در داخل نمونه، pH بطور دائم بررسی می‌شود. بنابراین به به منظور حصول اطمینان از تداوم فعالیت بیولوژیکی و تشکیل رسوب کلسیت در داخل نمونه، پساب تزریق‌ها به طور دائم جمع‌آوری و pH آن‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ۴).



شکل ۴. تغییرات pH با گذشت زمان

۲-۳. اندازه‌گیری سرعت موج برشی

امواج برشی امواج الاستیکی هستند، که انتشار موج در محیط سبب ارتعاش ذرات بر راستای عمود بر مسیر انتشار می‌شود و این امواج جهت انتشار نیازمند محیطی هستند که سختی برشی کافی داشته باشد [۲۲]. یکی از فاکتور مهم تاثیرگذار روی سرعت انتشار موج برشی (V_s)، سطح تماس ذرات با یکدیگر است [۲۳]. از دیگر فاکتورهایی که این مقدار را تحت تاثیر قرار می‌دهند، می‌توان به استحکام ذرات، تراکم خاک و تنش همه جانبه اشاره کرد [۲۲]. از آنجایی که رسوب کلسیت به طور مستقیم سطح تماس ذرات با یکدیگر را تحت تاثیر قرار می‌دهد، می‌توان اذعان کرد که تغییر در



الف) نمونه‌ی آماده شده با تراکم نسبی ۳۰٪



ب) نمونه‌ی اشباع شده



ج) نمونه‌ها بعد از ۷ روز عمل آوری
شکل ۳. آماده سازی نمونه‌های آزمایش برش مستقیم



شکل ۶. نمونه آماده سازی شده برای آزمایش سه محوری

پس از استقرار نمونه‌ها در سلول سه محوری و پر نمودن سلول توسط آب، بصورت مرحله‌ای فشار همه جانبه با گام‌های افزایشی ۵۰ کیلو پاسکال بر نمونه اعمال شد. نهایتاً در فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال، پس از تزریق محلول مغذی بر اساس موارد پیش گفته، در هر ۴۵ دقیقه یک‌بار، امواج برشی با استفاده از یک موج سینوسی با فرکانس ۱۰ kHz ارسال شده و امواج دریافتی ثبت شدند (شکل ۷). سرعت موج بر اساس نسبت طول مسیر حرکت موج به زمان سفر موج (L/T) محاسبه می‌شود [۲۴، ۲۵]. طول سفر موج در المان خمشی را برابر فاصله نوک تیغه فرستنده موج تا نوک تیغه گیرنده موج در نظر می‌گیرند [۲۶].

شکل (۷) موج برشی ارسالی با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز، سیگنال‌های دریافتی و همچنین منحنی تابع همبستگی متقابل را برای یک نمونه ماسه، تحت فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. برای تعیین زمان سفر موج برشی نقاط خاصی روی سیگنال‌های فرستاده شده و دریافتی قرار گرفته است. از جمله نقطه S و P بر روی موج تارسال شده، فواصل TC_1 و TC_2 برای تابع همبستگی متقابل و نقاط S_1 ، S_2 ، S_3 و P_1 و P_2 روی موج دریافتی مشخص شده‌اند. بر این اساس علامتهای TSS_1 ، TSS_2 و TSS_3 جهت زمان شروع تا شروع

سختی برشی نمونه با تغییر در سرعت موج برشی منعکس می‌شود، همانگونه که در فیزیک کلاسیک رابطه‌ی مستقیم بین سرعت موج برشی و مدول برشی به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

لذا انتظار می‌رود، رسوب کلسیت سبب افزایش درگیری دانه‌ها و در نهایت سبب افزایش مدول برشی نمونه‌های تیمار شده گردد، بنابراین می‌توان از سرعت موج برشی به عنوان شاخص اثربخشی MICP استفاده نمود [۱۰]. در این مطالعه بمنظور کنترل روند پیشرفت سیمان‌تاسیون با گذشت زمان، سرعت موج برشی به کمک دستگاه بندر المنت^{۱۸} نصب شده در دستگاه سه محوری دانشگاه رازی اندازه‌گیری شد (شکل ۴). همانطور که در شکل مشخص است، از دوتیغه که در کپهای بالایی و پایینی دستگاه سه محوری نصب شده‌اند برای ارسال و دریافت موج برشی استفاده می‌شوند.



شکل ۵. دستگاه بندر المنت نصب شده در دستگاه سه محوری

شکل ۶ یکی از نمونه‌های آماده سازی شده از ماسه بابل‌سر برای انجام آزمایش سه محوری را نشان می‌دهد. برای ساخت نمونه‌ها از روش بارانی و با اعمال فشار مکشی ۳۰ کیلو پاسکال به کمک پمپ خلاء استفاده شده‌اند.

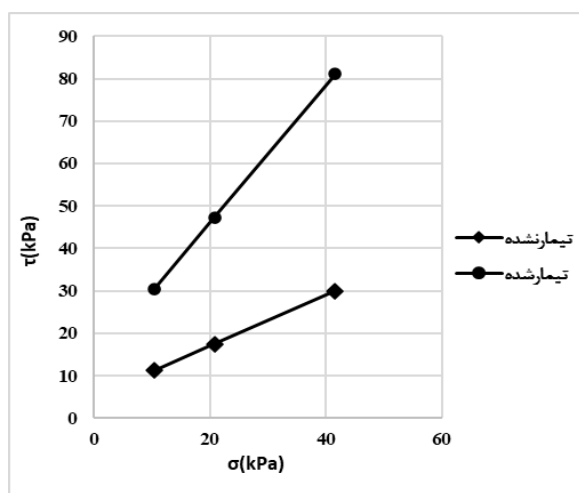
¹⁸ Bender Elements

با کاهش pH سرعت موج برشی در این بازه‌ی زمانی تغییر محسوسی نداشته و یا ثابت بماند. بعد از تزریق چهارم با شروع مجدد فعالیت میکروبی و هیدرولیز اوره‌ی موجود، pH شروع به افزایش کرده و در یک روند صعودی به میانگین ایده‌آل ۹ رسید و تا انتهای آزمایش در محدوده ایده‌آل باقی ماند.

۴-۲. تاثیر MICP روی مقاومت برشی

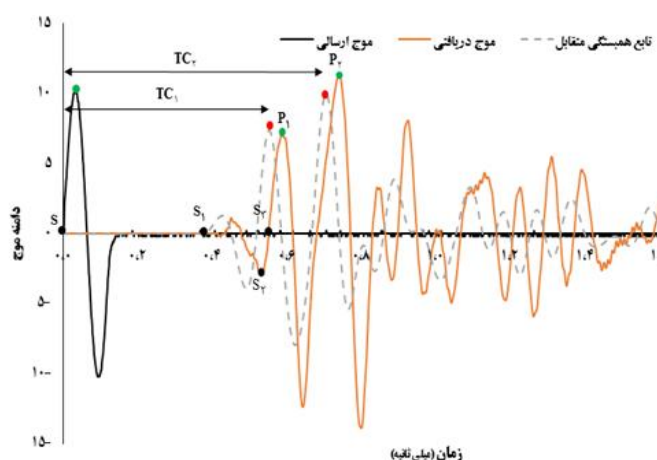
پس از ۷ روز نمونه‌ها از قالب خارج گردید و آزمایش برش مستقیم بر روی آن‌ها انجام شد. این آزمایش‌ها تحت تنش‌های نرمال (10,39، 20,78، 41,57) بر حسب کیلوپاسکال انجام شدند. شکل ۸ نمودار تنش برشی در مقابل تنش نرمال را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد سطح زیر منحنی تنش برشی نمونه بهسازی شده از نمونه‌ی بهسازی نشده بالاتر است.

با مقایسه‌ی بین نتایج بدست آمده، از شکل ۸، می‌توان گفت مقدار چسبندگی بین دانه‌های تیمار شده حدوداً دو برابر و زاویه اصطکاک بین دانه‌ها نیز به میزان دو برابر نمونه‌ی تیمار نشده است. البته هرچه تعداد تزریق‌ها بیشتر باشد می‌توان به نمونه‌هایی با مقاومت بالاتر دست یافت. می‌توان این افزایش در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را به تشکیل رسوب کلسیت، سیمانتاسیون بین ذرات و ایجاد اصطکاک بین کریستال‌های کلسیت و ذرات ماسه نسبت داد.



شکل ۴. نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب فشار سر بار در نمونه‌های ماسه تیمار شده و نشده

موج، TPP_1 و TPP_2 برای حالت حداکثر موج ارسالی تا حداکثر موج دریافتی و TC_1 و TC_2 برای زمان سفر معادل حالت حداکثر تابع همبستگی متقابل در نظر گرفته شده است. به عبارت دقیق‌تر تمامی نقاط مذکور می‌توانند یک مبنا برای محاسبه زمان سفر موج باشند. بنابراین، در ادامه با انجام محاسبات زمان سفر موج توسط هر کدام از روش‌های فوق، سعی بر آنست که دقیق‌ترین زمان سفر موج برشی را از میان آن‌ها استخراج نمود.



شکل ۷. امواج ارسالی، دریافتی و تابع همبستگی متقابل برای نمونه تحت فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال و فرکانس ۱۰ کیلوهرتز

۴. بررسی نتایج

۴-۱. تغییرات pH با گذشت زمان

تشکیل رسوب کلسیت به‌عنوان یکی از نتایج فعالیت متابولیسمی باکتری که سبب افزایش pH ابتدایی محیط شده، رخ می‌دهد. در واقع نقش اصلی باکتری‌ها در فرآیند رسوب دهی، ایجاد محیطی قلیایی (با افزایش pH) از طریق فعالیت‌های مختلف فیزیولوژی است. بر این اساس، pH پساب تزریق‌ها، در طول تیمار یک شاخص خوب برای تعیین زمان مورد نیاز بین تیمارها است [۱۰]. همانطور که نمودار تغییرات pH (شکل ۴) نشان می‌دهد، با شروع فعالیت بیولوژیکی و هیدرولیز اوره، فرآیند MICP شروع شده و pH محیط شروع به افزایش می‌کند، بعد از تزریق سوم اندکی pH کاهش یافته که احتمالاً به دلیل کاهش سطح فعالیت میکروبی است، انتظار می‌رود

۳-۴. تغییرات سرعت موج برشی با گذشت زمان

اثر رسوب میکروبی کلسیت روی سرعت موج برشی در شکل ۹ نشان داده شده است. در این نمودار تغییرات سرعت موج برشی بر حسب زمان از شروع تزریق و همچنین در طی یک فرآیند تزریق پانزده مرحله‌ای ارائه شده است. نمای کلی نمودار نشان می‌دهد که در ابتدا نرخ افزایش سرعت موج برشی بسیار پایین است، اما با گذشت زمان، به تدریج مقدار آن افزایش می‌یابد. بطوریکه در اواسط آزمایش به بیشترین مقدار خود رسیده، و در نهایت نرخ آن کاهش یافته و به صفر می‌رسد، و این بدان معنی است که در انتهای آزمایش، عملیات تزریق شده است، فلذا امکان تشکیل کلسیت بیشتری وجود ندارد. بمنظور بررسی دقیق روند افزایش سرعت موج برشی، که شامل مراحل شروع فعالیت میکروبی، تشکیل سیمان‌تاسیون و افزایش سرعت موج برشی می‌باشد، نمودار سرعت موج برشی - زمان به سه بخش تقسیم می‌شود که به تفصیل در مورد هر بخش توضیح داده می‌شود.

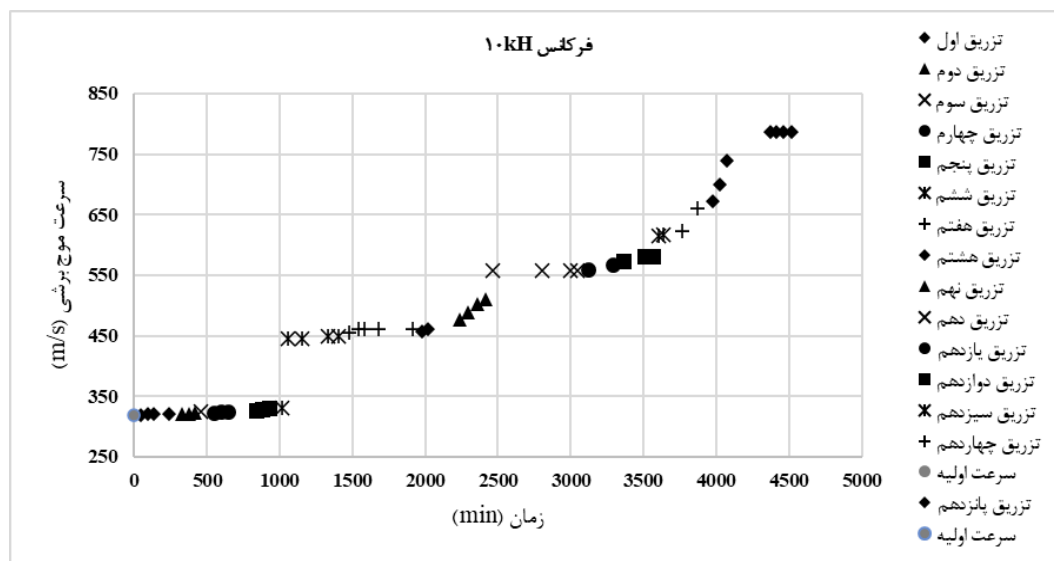
بخش اول: زمان شروع تشکیل رسوب کلسیت به عوامل متعددی از جمله فعالیت و غلظت میکروبی، سرعت واکنش و خصوصیات خاک بستگی دارد. در ابتدای آزمایش، با گذشت زمان و تزریق محلول سیمان‌تاسیون، روند افزایش سرعت موج برشی بسیار ناچیز است. که این امر ممکن است علاوه بر عوامل ذکر شده، به دلیل وارد شدن باکتری‌ها به یک محیط جدید و عدم سازگاری با این محیط باشد. از طرفی بهبود خواص خاک میسر نمی‌شود مگر اینکه فرآیندهای واکنش در قسمت‌های خاصی از ماتریس خاک تشکیل شوند، که روی رفتار خاک تاثیر بگذارند. در بحث MICP، رسوب‌های کلسیت که در محل تماس ذرات با هم تشکیل می‌شوند، نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند. رسوب‌های که در مایع منفذی تشکیل می‌شوند و یا روی سطح ذرات را پوشش نمی‌دهند، تاثیر بسزایی روی تغییر مقاومت، سختی، نفوذپذیری و همچنین سرعت موج برشی ندارند [۱۱]. این امر در اوایل آزمایش دیده شد، در واقع چون pH افزایش یافته بود، می‌توان نتیجه گرفت که اوره‌ی موجود در محلول

سیمانتاسیون توسط باکتری‌ها هیدرولیز شده و در نتیجه در حضور یون‌های کلسیم، کریستال‌های کربنات کلسیم تشکیل شده است، اما همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود سرعت موج برشی افزایش چندانی ندارد. بنابراین می‌توان گفت که در این مرحله کریستال‌های کلسیت چندانی در محل تماس ذرات تشکیل نشده‌اند.

بخش دوم: با گذشت زمان، باکتری‌ها به محیط جدید عادت کرده و شرایط برای افزایش فعالیت آن‌ها و تجزیه اوره مناسب می‌گردد. هر چه فعالیت اوره‌آز بیشتر باشد، مقدار مشخصی از اوره در زمان کمتری هیدرولیز می‌شود.

در حضور یون کلسیم (Ca^{2+}) رسوب کربنات کلسیم تشکیل می‌شود. با افزایش فعالیت جمعیت میکروبی، و افزایش هیدرولیز اوره، pH به مقدار آیدئال $8\frac{1}{3}$ - $9\frac{1}{5}$ رسید و شرایط برای تشکیل رسوب کلسیت به بهترین نحو ایجاد می‌شود. با گذشت زمان، رسوب کلسیم کربنات به پایدارترین شکل خود یعنی کلسیت تبدیل شد و همانگونه که در ادامه نمودار شکل ۹ دیده می‌شود، روند افزایش سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در انتهای این بخش، نرخ تزریق اندکی کاهش یافته بود، که این امر نشان‌دهنده‌ی کاهش نفوذپذیری است، اما در عین حال محلول‌های سیمان‌تاسیون قادر هستند به سهولت وارد و خارج گردند. در واقع رسوب میکروبی کلسیت بدون آنکه منجر به نفوذناپذیری خاک شود، سبب بهسازی خاک ماسه بابل‌ساز شده و این در مقایسه با سایر روش‌های بهسازی یک ویژگی منحصر به فرد است.

بخش سوم: انتظار می‌رود با گذشت زمان و تشکیل رسوب کلسیت، تخلخل و فضای خالی بین ذرات و در نتیجه نفوذپذیری نمونه کاهش یابد و محلول سیمان‌تاسیون در اواخر آزمایش بطور یکنواخت توزیع نشود، از طرفی باکتری‌ها در بین رسوب‌های تشکیل شده محصور شوند و نتوانند محیط لازم و مناسب برای هیدرولیز اوره را بوجود آورند، بنابراین روند افزایش سرعت موج برشی کاهش می‌یابد.



شکل ۹. نمودار تغییرات سرعت موج برشی با گذشت زمان در نمونه تحت فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال

به ذکر است، با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه آن با نتایج دی‌جانگ و همکاران (۲۰۰۶)، زمان مورد نیاز برای شروع رسوب-گذاری متفاوت است [۲]. با توجه به نمودار تغییرات pH (شکل ۴) و مقایسه‌ی آن با نمودار سرعت موج برشی- زمان (شکل ۹)، می‌توان نتیجه گرفت، در ابتدای آزمایش با شروع فعالیت میکروبی و هیدرولیز اوره، pH افزایش یافته و محیط مناسب برای تشکیل رسوب کلسیت فراهم می‌شود، و در نتیجه سرعت موج برشی افزایش می‌یابد، اما پس از تزریق سوم (شکل ۴)، pH کاهش یافته و در نتیجه در این مرحله، سرعت موج برشی تقریباً ثابت می‌ماند (شکل ۹). این امر نشان می‌دهد، تقریباً سطح فعالیت میکروبی در این مرحله ناچیز است. بعد از تزریق پنجم (شکل ۴)، میزان pH در یک روند صعودی شروع به افزایش می‌کند و فعالیت میکروبی از سر گرفته می‌شود. در واقع آنزیم‌های اوره‌آز اوره‌ی موجود در محلول را هیدرولیز کرده و سبب افزایش pH می‌شوند. بعد از رسیدن pH به میانگین ایده آل ۹ (از تزریق هفتم به بعد)، یک جهش بزرگ در روند افزایش سرعت موج برشی (شکل ۹) مشاهده می‌شود. در واقع می‌توان نتیجه گرفت

همانطور که انتظار می‌رفت، در اواخر آزمایش نرخ تزریق کاهش یافته است، اما نمونه نفوذناپذیر نشده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

طبق نتایج بدست آمده، روش بهسازی بیولوژیکی سبب افزایش مقاومت برشی ماسه بدانه بندی‌شده بابلر شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه، بیانگر پتانسیل بالای روش MICP در بهسازی خاک‌های ماسه‌ای و اهمیت بسیار بالای آن به دلیل وقوع اثرات نامطلوب زیست محیطی کمتر مورد استفاده، جهت بهسازی خاک‌ها در اعماق بیشتر با صرف هزینه‌ی کمتر است. نتایج نشان می‌دهند که بهسازی در اعماق زیر سطح آب زیرزمینی که حضور اکسیژن در آنجا محدود است یا اصلاً وجود ندارد، با فرض تزریق کافی از باکتری‌های حاوی آنزیم اوره‌آز امکان‌پذیر است. نمودار سرعت موج برشی-زمان روندی مشابه با نمودار بدست آمده توسط دی‌جانگ^{۱۹} و همکاران (۲۰۰۶) را نشان می‌دهد. در واقع عدم حضور اکسیژن مانع فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها نشده است. بنابراین می‌توان گفت که در عمق‌های پایین‌تر از سطح زمین که اکسیژن در دسترس نیست، نیز می‌توان برای بهسازی از روش MICP استفاده نمود. لازم

- [8] B.M. Mortensen, M.J. Haber, J.T. DeJong, L.F. Caslake, D.C. Nelson (2011). "Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation". *Journal of Applied Microbiology*, Volume 111, Issue 2, 1 August 2011, Pages 338–349.
- [9] Ramakrishnan, V., Ramesh, K. P., and Bang, S. S. (2001). "Bacterial concrete." *Proc. of SPIE-Int. Society of Optical Engineering*, 4234, 168–176.
- [10] Weil, M. H., DeJong, J. T., Martinez, B. C. & Mortensen, B. M. (2012). "Seismic and resistivity measurements for real-time monitoring of microbially induced calcite precipitation in sand". *ASTM Geotech. Test. J.* 35, No. 2, GTJ103365.
- [11] DeJong, J. T., Mortensen, M. B., Martinez, B. C. & Nelson, D. C. (2010). "Biomediated soil improvement". *Ecol. Engng* 36, No. 2, 197–210.
- [12] Al Qabany, A., Mortensen, B., Martinez, B., Soga, K. & DeJong, J. (2011). "Microbial carbonate precipitation: correlation of S-wave velocity with calcite precipitation". *Proc. Geofrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, TX, ASCE Geotechnical Special Publication 211, 3993–4001.
- [13] Whiffin, V. S., Van Paassen, L. A. & Harkes, M. P. (2007). "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique". *Geomicrobiol. J.* 24, No. 5, 417–423.
- [14] Al Qabany, A. & Soga, K. (2013). "Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils". *Geotechnique* 63, No. 4, 331–339.
- [15] Burbank, M., Weaver, T., Green, T., Williams, B. & Crawford, R. (2011). 135 "Precipitation of calcite by indigenous microorganisms to strengthen liquefiable soil". *Geomicrobiol. J.* 28, No. 4, 301–312.
- [16] He, J., Chu, J. & Ivanov, V. (2013). "Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas". *Geotechnique*, 63, No. 4, 267–275.
- [17] Montoya, B. M., DeJong, J. T. & Boulanger, R. W. (2013). "Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial induced calcite precipitation". *Geotechnique*, 63, No. 4, 302–312.
- [18] Behzadipour, H., M.S. Pakbaz, and G.R. Ghezelbash, Effects of biocementation on strength parameters of silty and clayey sands. *Bioinspired*, ۹/۸–۸/۳ pH محدوده بهینه مقدار ۹/۸–۸/۳ است، که این نتیجه با یافته‌های محققین پیشین مطابقت دارد. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، زمان مورد نیاز برای حصول سطح سیمان‌تاسیون مورد نظر، به عوامل مختلفی از جمله غلظت باکتری‌ها، سرعت واکنش، خصوصیات خاک، غلظت یون کلسیم و سایر مواد مورد استفاده در محلول‌های سیمان‌تاسیون بستگی دارد. بعنوان یک نتیجه می‌توان گفت که در بهسازی میدانی، زمان مورد نیاز برای دستیابی به سطح سیمان‌تاسیون مورد نظر متغیر خواهد بود و قبل از اجرای آن، باید یکسری آزمایش‌ها برای تقریب این زمان انجام شود.
۵. منابع
- [1] Karol, R. H. (2003). "Chemical grouting and soil stabilization". New York: Marcel Dekker.
- [2] DeJong, J. T., Fritzges, M. B. & Nu'sslein, K. (2006). "Microbial induced cementation to control sand response to undrained shear". *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Engng* 132, No. 11, 1381–1392.
- [3] DeJong, J. D., Soga, K. S., Kavazanjian, E. et al. (2013). "Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities, and challenges". *Geotechnique* 63, No. 4, 287–301.
- [4] Mortensen, B. M., Haber, M. J., DeJong, J. T., Caslake, L. F. & Nelson, D. C. (2011). "Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation". *J. Appl. Microbiol.* 111, No. 2, 338–349.
- [5] Benini, S., Rypniewski, W. R., Wilson, K. S., Miletti, S., Ciurli, S. & Mangani, S. (1999). "A new proposal for urease mechanism based on the crystal structures of the native and inhibited enzyme from *Bacillus pasteurii*: why urea hydrolysis costs two nickels". *Structure* 7, No. 2, 205–216.
- [6] Ciurli, S., Benini, S., Rypniewski, W. R., Wilson, K. S., Miletti, S. & Mangani, S. (1999). "Structural properties of the nickel ions in urease: novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms". *Coordination Chem. Rev.* 190–192, 331–355.
- [7] Kalantary, F., Kahani, M. (2015). "Evaluation of the Ability to Control Biological Precipitation to Improve Sandy Soils". *Procedia Earth and Planetary Science* 15 (2015) 278 – 284.

- Biomimetic and Nanobiomaterials, 2019. 9(1): p. 24-32.
- [19] Choi, S.-G., et al., Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers. Construction and Building Materials, 2020. 246: p. 118415.
- [20] Baek, S.-H., T.-H. Kwon, and J.T. DeJong, Reductions in Hydraulic Conductivity of Sands Caused by Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024. 150(2): p. 04023134.
- [21] دستورالعمل آماده سازی، تهیه و کنترل کیفی محیط‌های کشت، آزمایشگاه مرجع سلامت وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، تابستان ۱۳۹۶
- [22] Santamarina, J. C., Fam, M. A., and Klein, K. A. (2001). "Soils and Waves". Wiley, West Sussex.
- [23] Sharifipour, M., Dano, Ch. (2006). "Effect of grains roughness on waves velocities in granular packings". First Euro Mediterranean in Advances on Geomaterials and Structures – Hammamet 3-5 May Tunisia.
- [24] Dyvik, R. and Madshus, C. (1985) "Lab Measurements of Gmax Using Bender Elements". In: Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, ASCE, 186-196.
- [25] Viggiani, G., and Atkinson, J. (1995) "Interpretation of bender element tests". Geotechnique, 8(32), 373A.
- [26] Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T., and Shibuya, S. (2009) "Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements". Soils and Foundations, 49(4), 631-650.
- [27] اکرم کریمیان، محمود حسنلوراد، غلامرضا کریمی (۱۳۹۷)، "تثبیت زیستی ماسه به روش تزریق سطحی"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۴، صفحات ۷۳۵ تا ۷۴۶
- [28] مینا ملكدوست پیشکناری، محمد آزادی، مجید قیومی (۱۴۰۲)، "بررسی تأثیرات سیکل‌های ذوب و انجماد بر پارامترهای تغییر شکلی ماسه تثبیت‌شده به‌روش بیولوژیکی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۳۵، شماره ۴، صفحات ۱۳ تا ۲۳