

بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد بهسازی خاک به روش بیولوژیکی در خاک‌های ماسه‌ای با درصد ریزدانه متفاوت

داریوش شریفی اسدی^۱، علیرضا اردکانی^{۲*}، قاسمعلی گروسی^۳

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
۲- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
۳- دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

*a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶۰۶/۲۷]

تاریخ دریافت: [۹۶۰۲/۲۳]

چکیده

یکی از روش‌های متداول بهسازی خاک، استفاده از افزودنی‌ها به منظور بهبود ویژگی‌های مقاومتی و نفوذپذیری خاک است. اغلب از سیمان یا مواد شیمیایی به‌عنوان عامل چسبنده ذرات خاک استفاده می‌شود که باعث افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی آن می‌شود. در این پژوهش با استفاده از آخرین فناوری زیستی میکروبی، نوع جدیدی از مصالح ساختمانی، یعنی سیمان زیستی، به‌عنوان جایگزینی برای سیمان و یا مواد شیمیایی ایجاد شده است. سم‌تاسیون زیستی یا فرآیند رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP)، بهبود مقاومت و سختی خاک و سنگ با استفاده از فعالیت‌های میکروبی و فرآورده‌های آن‌هاست. در این پژوهش از خاک ماسه‌ای با درصد متفاوت سیلت ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ و در دو حالت سست ($D_r=40\%$) و متراکم ($D_r=100\%$) و از باکتری *Sporosarcina Pasteurii* به دلیل فعالیت اوره‌آزی بالا و غیر بیماری‌زا بودن در فرآیند MICP استفاده شد. به‌منظور در نظر گرفتن شرایط خاک بر عملکرد این نوع روش بهسازی، پارامترهای آزمایش تک‌محوری و میزان رسوب کربنات کلسیم بررسی شد. با توجه به نتایج، افزایش درصد ریزدانه از ۰ تا ۲۰ درصد منجر به کاهش ۴۰٪ و ۴۶٪ در میزان رسوب کربنات کلسیم، افزایش ۵۷٪ و ۴۱٪ در مقاومت تک‌محوری و افزایش ۷۹٪ و ۷۱٪ در مدول الاستیسیته نمونه‌ها به ترتیب در دو حالت سست و متراکم شد. بنظر می‌رسد این تغییرات ناشی از کم شدن فضای خالی و افزایش سطح تماس بین ذرات خاک بوده است.

واژگان کلیدی: بهسازی زیستی، رسوب میکروبی کربنات کلسیم، مقاومت تک‌محوری، خاک ماسه‌ای، سیلت غیرخمیری.

۱- مقدمه

زیستی^۱ می‌تواند به‌صورت جامد و مایع استفاده شود. در حالت مایع، دوغاب زیستی^۲ می‌تواند با ویسکوزیته بسیار کم مانند آب جریان یابد. بنابراین در مقایسه با سیمان و مواد شیمیایی راحت‌تر در داخل خاک انتقال می‌یابد [1]. از مزایای بهسازی به روش زیستی

کنترل منابع طبیعی تجدیدپذیر (میکروارگانیزم‌ها و فرآورده‌های آن) می‌تواند منجر به حل مشکلات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی و رسیدن به منافع اقتصادی عظیم در صنعت ساختمان شود. علاوه بر این، کاربرد زیست‌فناوری میکروبی در صنعت ساختمان برخی از روش‌های موجود ساخت‌وساز را ساده‌تر می‌کند. برای نمونه سیمان

1 Biocement
2 BiogROUT

ضروری‌اند. در حضور باکتری خارجی، بهبود قابل توجهی در مقاومت برشی خاک رسوبی ایجاد شده است که با افزایش تراکم، این میزان بهبود، افزایش یافته است. این تأثیر در مورد نفوذپذیری نمونه‌های بهسازی شده روند کاهشی داشته و با افزایش تراکم، میزان کاهش بیشتر شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از باکتری خارجی، تغییرات بیشتری در مقاومت برشی و نفوذپذیری خاک نسبت به حالتی که تنها از باکتری‌های بومی موجود در خاک استفاده شده، ایجاد کرده است [5].

شاهین^۵ و همکاران با استفاده از روش MICP، روی تغییر و بهبود خواص مکانیکی و ژئوتکنیکی ماسه سیلیکاته مطالعاتی انجام دادند. در این مطالعه، با استفاده از ستون‌های آزمایشگاهی اثر تعدادی از پارامترهای محیطی کلیدی در تشکیل رسوب ناشی از تجزیه اوره در میان خاک بررسی شدند. این پارامترها شامل اثر غلظت آنزیم اوره‌آز، دما، شستشو با آب باران، آلودگی نفتی و سیکل ذوب و یخ است. نتایج آزمایش نشان داد که الگوی بهینه رسوب کریستال می‌تواند با فعالیت کم آنزیم اوره‌آز و دمای محیط، مقاومت تک‌محوری خاک (UCS) را به مقدار زیادی بهبود ببخشد [6].

فرآیند MICP توسط پارک^۶ و همکاران روی خاک سیمانته شده ضعیف انجام شد. در این پژوهش محیط کشت حاوی باکتری در چند مرحله تزریق وارد خاک شد. مقاومت تک‌محوری نمونه‌های یک بار تزریق ۵٪ نسبت به نمونه‌های تزریق نشده افزایش یافت. در نمونه‌های با دویار تزریق و بیشتر مقاومت نمونه‌ها به تدریج تا ۵۰٪ نمونه‌های تزریق نشده کاهش یافت. به دلیل از بین رفتن پیوندهای موجود بین دانه‌های سیمانته شده خاک توسط رسوب میکروبی کلسیت و جایگزینی رسوب کلسیت با سیمان موجود در خاک، مقاومت نمونه‌ها، به‌خصوص در تعداد تزریق‌های بیشتر، کاهش یافت [7].

فنگ^۷ و همکاران مقاومت خاک سیمانته شده با MICP و سیمان پرتلند و خاک سیمانته شده طبیعی را با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مقاومت بیشینه سیمان MICP و پرتلند تقریباً با هم برابر بوده و سختی سیمان MICP به اندازه سختی سیمان طبیعی است [8]. روشن بخت و همکاران روی عوامل مؤثر بر فرآیند MICP در یک

می‌توان به اقتصادی بودن، عمق نفوذ بیشتر، سازگاری بیشتر با محیط‌زیست و کاربرد در محیط‌های اشباع و غیراشباع اشاره کرد. به همین دلیل مطالعه روی عواملی که بر عملکرد این روش مؤثرند، ضروری به نظر می‌رسد.

فرآیند تشکیل رسوب و یا سیمان زیستی در حضور میکروارگانیسم‌ها را فرآیند رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) می‌نامند. در نتیجه این فرآیند، مقاومت و سختی خاک افزایش یافته و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد [2].

مقاومت ماسه سیمانته شده در حالت باکتری با غلظت بالا بسیار بیشتر از حالت با غلظت پایین سلول‌های باکتری است [3]. همچنین سرعت پایین واکنش ممکن است در بعضی شرایط برای بازدهی بیشینه MICP نامطلوب باشد، چرا که هیدرولیز اوره به تدریج توسط کپسوله شدن سلول‌های باکتری با کلسیت، محدود می‌شود [4]. مشخصات سیمان تشکیل شده در خاک به درصد ریزدانه بستگی دارد و میزان رسوب کربنات کلسیم در ماسه دو برابر سیلت است [3].

اثر شرایط خاک بر فرآیند MICP توسط کیم^۳ و همکاران بررسی شد. آن‌ها پس از بررسی سه نوع خاک ماسه‌ای با دانسیته نسبی ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ و خاک سیلتی با تراکم نسبی ۶۰٪، ۷۵٪ و ۹۰٪ و نیز خاک هوازده خوب و بد دانه‌بندی شده به این نتیجه رسیدند که: میزان کربنات کلسیم تولیدشده در خاک ماسه‌ای دو برابر بیشتر از کربنات کلسیم رسوب کرده در خاک سیلتی است و میزان این رسوب در خاک هوازده بد دانه‌بندی شده، به دلیل وجود فضای خالی بیشتر و در خاک ماسه‌ای با دانسیته نسبی ۶۰٪ و خاک سیلتی با تراکم نسبی ۹۰٪ بیشترین میزان را خواهد داشت [3].

انجی^۴ و همکاران با مطالعه روی عوامل مؤثر بر فرآیند MICP در خاک، به بررسی مقاومت برشی و نفوذپذیری خاک رسوبی پرداختند. این عوامل شامل مواد غذایی، نوع باکتری (باکتری بومی یا خارجی)، سازگاری هندسی باکتری، غلظت سلول‌های باکتری، تثبیت و توزیع باکتری در خاک، دما، غلظت واکنش‌گر، pH، روش تزریق و تراکم خاک بودند که برای فرآیند بهسازی به روش MICP

1 Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation

2 Encapsulation

3 Kim

4 Ng

5 Shahin

6 Park

7 Feng

فرآیند MICP استفاده شده است [11].

۲- مواد و مصالح

۱-۲ خاک استفاده شده

در این پژوهش، از ماسه کارخانه‌ای و مخلوط ماسه-سیلت با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ استفاده شد. ماسه‌ی استفاده شده در این پژوهش، ماسه سیلیکا شکسته شماره ۱۶۱ بوده و سیلت استفاده شده نیز از نوع PG است. این خاک‌ها تولید شده در کارخانه تأمین ماسه ریخته‌گری واقع در فیروزکوه بوده و دارای دانه‌بندی یکنواختی هستند. آزمایش دانه‌بندی برای تعیین اندازه دانه‌های خاک و نوع دانه‌بندی، بر اساس استاندارد ASTM D422 انجام شده است. مشخصات ماسه ۱۶۱ و سیلت PG و نمودار دانه‌بندی آنها به ترتیب در جدول و شکل (۱) آمده است.

جدول ۱. مشخصات دانه‌بندی خاک ماسه ۱۶۱ و سیلت PG فیروزکوه

Soil type	Cu	Cc	Soil class.
Sand 161	1.86	0.99	SP
Silt PG	2.70	1.20	ML

Table 1. sand 161 and silt PG grading properties

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ و سیلت PG

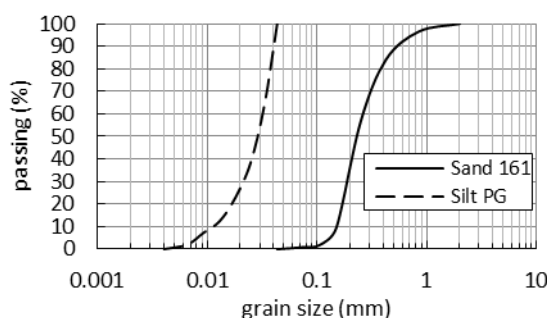


Fig. 1. Grading chart of sand 161 and silt PG

خلاصه نتایج آزمایش‌های مشخصات خاک‌های بررسی شده مطابق استانداردهای ASTM D4318 و ASTM D4254 و ASTM D854 در جدول (۲) آمده است.

نمونه ماسه بد دانه‌بندی شده، آزمایش‌هایی انجام دادند. آنها نشان دادند عواملی از قبیل ریزمغذی‌ها، نوع باکتری، هماهنگی هندسی باکتری، تراکم سلول باکتری، دما، غلظت واکنش دهنده‌ها، pH و روش تزریق بر روی پیشرفت موفقیت آمیز بهسازی مؤثرند. همچنین دریافتند که تزریق مرحله‌ای باکتری موجب گسترش سماتاسیون در طول نمونه شده و تمایل به رسوب در محل تماس ذرات با یکدیگر است [9].

همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد تراکم نسبی ماسه مقاومت تک‌محوری آن نیز افزایش می‌یابد و با کاهش حجم محلول سماتاسیون^۱ تزریق شده به نمونه‌ها به میزان یک سوم حجم حفرات، کاهش قابل توجهی در بهبود مقاومت خاک ایجاد نمی‌شود و می‌تواند به اقتصادی‌تر شدن طرح بهسازی به هنگام اجرای در محل کمک کند [10].

با هدف درک اثر شرایط خاک و استفاده از این نوع روش بهسازی در پروژه‌های عملی و کاربردی، آزمایش‌های آزمایشگاهی به منظور ارزیابی شرایط مختلف زمین، انجام شد. در این پژوهش سعی شده است به عنوان نوآوری با استفاده از خاک‌های استاندارد که تاکنون مورد آزمایش قرار نگرفته‌اند، خاک‌هایی با درصدهای زیردانه متفاوت ایجاد شوند، تا اثر توزیع اندازه ذرات و افزایش میزان ریزدانه غیرخمیری روی عملکرد این نوع روش بهسازی مورد بحث و بررسی قرار گیرند. همچنین بررسی اثر تراکم نسبی روی چنین خاک‌هایی با توزیع متفاوت اندازه ذرات، ضروری به نظر می‌رسید. به منظور بررسی این موضوعات بعد از بیان پیشینه پژوهش در بخش مقدمه، مطالب در ۳ بخش ارائه می‌شود. در بخش بعدی مصالح و مواد استفاده شده در این پژوهش بیان می‌شود سپس آزمایش‌های انجام شده و روش انجام آن، به منظور بررسی آثار مورد نظر، معرفی می‌شود. در پایان نتایج این آزمایش‌ها بیان شده و با ذکر کارهای مشابه در این زمینه تحلیلی روی نتایج بدست آمده ارائه می‌شود. شایان ذکر است که خاک مورد استفاده در این پژوهش، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و به همراه درصدهای متفاوت ریزدانه غیرخمیری از نوع سیلت PG بوده و از باکتری اسپروسارسینا پاستوری^۲ به دلیل فعالیت اوره‌آزی^۳ بالا و غیر بیماری‌زا بودن در

1 Cementation
2 Sporosarcina Pasteurii
3 Urease

Ca^{2+} ۰/۷۵ استفاده می‌شود. ویژگی آخر برای MICP اهمیت ویژه‌ای دارد [11].

در مواردی که به دلیل محدودیت‌های فنی و بیولوژیکی امکان استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای تولید آنزیم اوره‌آز میسر نباشد، می‌توان از آنزیم اوره‌آز استفاده نمود [13، 14]. این آنزیم را می‌توان از گیاهانی مانند باقلای هندی نیز استخراج کرد [7]. ژائو^۱ و همکاران درصد رسوب کربنات کلسیم و مقاومت تک‌محوری نمونه‌های بهسازی شده با UPB^۲ و آنزیم اوره‌آز را با یکدیگر مقایسه کردند و دریافتند که بهبود مقاومت تک‌محوری در حالت MICP بیشتر از نمونه‌های با آنزیم اوره‌آز است [15].

باکتری استفاده شده در این پژوهش از نوع میله‌ای^۳ و با نام *S. Pasteurii* است که از مرکز منطقه‌ای کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران (PTCC) به صورت آمپول لیوفیلیزه^۴ با کد PTCC 1645 تهیه شد.

۲-۳ محیط کشت مورد استفاده

در این پژوهش، از دو نوع محیط کشت M1 و M2 که به ترتیب توسط [16، 17] برای این نوع سویه پیشنهاد شده‌اند، استفاده شده است که جزییات آن‌ها در جداول (۳ و ۴) آمده است.

جدول ۳. محیط کشت M1 اختصاصی باکتری *Sporosarcina Pasteurii*

Composition	Content (g L ⁻¹)
Peptone Meat	5 gr
Meat-Extract	3 gr
Agar	15 gr

Table 3. M1 medium for *Sporosarcina Pasteurii*

جدول ۴. محیط کشت M2

Composition	Content (g L ⁻¹)
Tris Base	0.13 M (pH=9)
Yeast-Extract	20 gr
NH ₄ Cl	10 gr
Agar	15 gr

Table 4. M2 medium

5 0.75 mol/litr

6 Zhao

7 Urease Producing Bacteria

8 Bacillus

9 Freeze-dried

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های اولیه روی خاک

	S0%	S5%	S10%	S15%	S20%
G _s	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
e _{max}	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83
e _{min}	0.57	0.52	0.46	0.41	0.37
D ₅₀	0.25	0.24	0.22	0.21	0.20
C _u	1.86	1.96	5.68	6.67	7.67
C _c	0.99	0.98	2.63	2.96	3.26
Soil Class	SP	SP	SP-SM	SM	SM
PI	-	-	-	-	-

Table 2. Result of basic experiments of soil

۲-۲ میکروارگانیسم مورد استفاده

مناسب‌ترین باکتری برای انسداد زیستی^۱ و سم‌تاسیون زیستی استفاده از باکتری‌های گرم-مثبت^۲ است که به دلیل دیواره سلولی ضخیم مقاومت بیشتری در برابر تغییرات فشار اسمزی^۳ از خود نشان می‌دهند. این تغییرات فشار معمولاً به هنگام ساخت‌وساز و احیای اراضی در خاک ایجاد می‌شود. معروف‌ترین روش تولید سیمان زیستی، ترکیب میکروارگانیسم‌های تولیدکننده اوره‌آز و نمک‌های کلسیم محلول است. میکروارگانیسم‌ها فرآیند هیدورلیز اوره را تسریع می‌کنند و باعث افزایش pH در طول فرآیند تجزیه اوره به یون آمونیا و تشکیل کلسیم در خاک و سنگ می‌شوند [12]. گستره وسیعی از میکروارگانیسم‌ها، آنزیم اوره‌آز را تولید می‌کنند، زیرا اوره فرآورده نهایی متابولیسم نیتروژن در بدن انسان و حیوانات است و در طبیعت نقش منبع نیتروژن را برای بسیاری از میکروارگانیسم‌ها ایفا می‌کند. از دیگر آنزیم‌های مهم در MICP کربنیک‌ان‌هیدراز است که کاتالیزور فرآیند برگشت‌پذیر و جاذب آب CO₂ است [11].

در بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه سم‌تاسیون زیستی از باکتری *Sporosarcina pasteurii* (پیش‌تر با نام *Bacillus pasteurii*) به‌ویژه سویه^۴ *S. pasteurii* به دلیل فعالیت اوره‌آزی بالا، گرم مثبت بودن و توانایی رشد در pH بالای ۸/۵ و غلظت بالای کلسیم با کمینه M

1 Bioclogging

2 Gram-Positive

3 Osmotic Pressure

4 Strain

تزریق سوسپانسیون و محلول‌ها از بالا به پایین در قالب، به دلیل جریان ثقلی، توزیع تقریباً یکنواختی را از سلول‌های باکتری و محلول‌ها در طول قالب ایجاد می‌کند [11].

از روش‌های مختلفی برای تزریق سوسپانسیون و محلول سم‌تاسیون به داخل قالب برای ماسه ۱۶۱ استفاده شد تا روش مورد نظر برای کسب مقاومت مطلوب به منظور بررسی عملکرد MICP روی ماسه دارای ریزدانه به دست آید. در نهایت تزریق به صورت مرحله‌ای انجام شد که به صورت زیر است [2]:

۱. در روز اول، تزریق مرحله‌ای سوسپانسیون باکتری و محلول تثبیت‌کننده، به صورت BS+FS+BS+FS است که باعث نگهداشت بیشتر باکتری به سطح دانه‌های خاک می‌شود. حجم هر تزریق به اندازه یک چهارم حجم حفرات است تا در مجموع برابر حجم حفرات شود.

۲. در روزهای دوم تا پنجم، تزریق مرحله‌ای سوسپانسیون باکتری و محلول سم‌تاسیون، به صورت BS+CS+BS+CS است. حجم هر تزریق به اندازه یک چهارم حجم حفرات است تا در مجموع برابر حجم حفرات شود. حجم حفرات با توجه به نوع خاک و درصد تراکم نسبی به صورت جدول (۵) است.

جدول ۵: حجم حفرات خاک‌های مختلف (ml یا cm³)

	0%	5%	10%	15%	20%
	silt	silt	silt	silt	silt
Dr=40%	100.73	99.22	96.68	94.16	92.18
Dr=100%	85.06	81.01	74.24	68.51	63.51

Table 5. Pore volume for types of soil

۳- آزمایش‌ها

۳-۱ اندازه‌گیری غلظت سوسپانسیون باکتری

برای اندازه‌گیری غلظت باکتری‌ها از دستگاه اسپکتروفتومتر^۵ استفاده شد. به وسیله این دستگاه می‌توان مقدار چگالی نوری (OD)^۶ را برای محلول تعیین کرد. در این مرحله عددی که دستگاه نشان می‌دهد OD محلول است و بیان‌گر غلظت محلول حاوی باکتری در

عصاره مخمر و عصاره گوشت تأمین‌کننده مواد غذایی و ویتامین B برای تکثیر باکتری هستند. آمونیوم کلرید، نیتروژن مورد نیاز باکتری را تأمین می‌کند. Tris Buffer نیز می‌تواند pH محیط را ثابت نگه دارد [18].

۲-۴ آماده‌سازی نمونه‌ها

این آماده‌سازی شامل آماده کردن سوسپانسیون باکتری (BS)، محلول تثبیت‌کننده (FS) و محلول سم‌تاسیون (CS) است و با استفاده از پمپ پرستالتیک^۴ به داخل قالب تزریق شد.

۲-۴-۱ آماده‌سازی سوسپانسیون باکتری (BS)

بعد از توزین مواد، تهیه محیط کشت و استریل کردن آن در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه اتوکلاو، محیط کشت به زیر هود لامینار منتقل شده و بعد از خنک شدن محیط کشت، عملیات کشت انجام می‌گیرد.

عملیات کشت در مورد محیط کشت مایع با استفاده از سمپلر صورت گرفت که با استفاده از سرسمپلر استریل، مقدار یک میلی‌لیتر از باکتری کشت داده شده از آمپول لیوفیلیزه برداشته و به ارلن حاوی محیط کشت جدید منتقل شد. سپس ارلن درون دستگاه انکوباتور شیکر ۳۳ درجه سانتی‌گراد با دور ۱۷۰ rpm قرار داده شد [19]. محلول باکتری به مدت ۱۶ ساعت درون انکوباتور قرار گرفت و بلافاصله بعد از بیرون آوردن از انکوباتور، برای تزریق آماده شد.

۲-۴-۲ آماده‌سازی محلول تثبیت‌کننده (FS) و محلول سم‌تاسیون (CS)

استفاده از محلول تثبیت‌کننده، مقاومت یونی بین ذرات خاک و جذب باکتری به دانه‌های خاک را افزایش می‌دهد. بدین منظور بعد از تزریق سوسپانسیون باکتری محلول تثبیت‌کننده حاوی کربنات کلسیم با غلظت ۰/۰۵ M به نمونه‌ها تزریق شد. این کار با نرخ جریان بسیار کم انجام شد تا فرصت اختلاط و جای‌گیری ذرات باکتری در میان دانه‌های خاک فراهم شود [2].

۲-۵ چگونگی تزریق

- 1 Bacterial Suspension
- 2 Fixation Solution
- 3 Cementation Solution
- 4 Peristaltic Pump

5 Spectrophotometer
6 Optical Density

محدود نشده مطابق استاندارد ASTM-D2166 استفاده شد. در این آزمایش فشار محدودکننده صفر است و بار محوری تا ایجاد گسیختگی در نمونه با سرعت ثابت 1 mm/min اعمال می شود.

۳-۴ اندازه گیری درصد کربنات کلسیم

درصد کربنات کلسیمی که در بین دانه های خاک تشکیل می شود، رابطه مستقیمی با مقاومت تک محوری کسب شده توسط نمونه ها دارد، بنابراین محاسبه آن ضروری است که با توجه به امکانات آزمایشگاه به دو روش زیر اندازه گیری شد.

۳-۴-۱ روش اسید شویی^۳

در این روش، ابتدا نمونه ها درون آن خشک شده و وزن آن ها (m_1) یادداشت می شود. سپس نمونه ها چند بار با هیدروکلریک اسید^۴ شسته می شوند تا کربنات کلسیم موجود در نمونه ها از آن خارج شود. بار دیگر، نمونه های شسته شده با اسید، درون آن قرار می گیرند و وزن آن ها پس از خشک شدن (m_2) یادداشت می شود. در نهایت، درصد رسوب کربنات کلسیم ($\text{CaCO}_3\%$) با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\text{CaCO}_3\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3)$$

اگر نمونه های خاک حاوی مواد قابل حل در اسید از قبیل فرآورده های فرعی کلسیت باشد، ممکن است نتایج حاصل از این آزمایش به اندازه کافی دقیق نباشد. به علاوه، این روش نیازمند خشک کردن نمونه ها، قبل و بعد از اسید شویی است که زمان انجام آزمایش را افزایش می دهد [8]. از روش تیتراسیون^۵ نیز برای محاسبه درصد کربنات کلسیم استفاده شده است.

۳-۴-۲ روش تیتراسیون

در این روش روی 2 gr از خاک مورد آزمایش، مقدار 20 ml هیدروکلریک اسید دو نرمال ریخته و ظرف بر روی گرمکن قرار می گیرد تا به مدت 30 ثانیه جوشانده شود. در این حالت، بخشی از اسید با کربنات موجود در نمونه خنثی می شود. پس از گذراندن محلول باقی مانده از صافی، باقی مانده اسید با استفاده از سود 0/5

مقایسه با محیط کشت خالی است. تعداد باکتری با استفاده از معادله (1) قابل محاسبه است [15]:

$$Y = 8.59 \times 10^7 \times Z^{1.3627} \quad (1)$$

Y: تعداد باکتری ها در هر میلی لیتر

Z: OD محلول در طول موج 600 نانومتر

محیط کشت های M1 و M2 از نظر میزان رشد و غلظت محیط کشت، بررسی شدند و بهترین آن به عنوان محیط کشت باکتری برای تزریق انتخاب شد.

۳-۲ اندازه گیری فعالیت اوره آزی

با توجه به اهمیت ترشح و آنزیم اوره آز توسط باکتری، فعالیت آنزیم اوره آز اندازه گیری می شود. فعالیت این آنزیم با اندازه گیری میزان هیدرولیز اوره قابل اندازه گیری است.

زمانی که یک مولکول مانند کلسیم کلرید در آب به یون های سازنده اش تجزیه می شود، هدایت الکتریکی^۱ محلول به دست آمده با توجه به میزان یون موجود در محلول افزایش می یابد. هنگامی که یک مولکول اوره در آب هیدرولیز می شود، به یون های آمونیا و کربنات تبدیل می شود [20]. لذا با ترکیب محلول 1/1 مولار اوره و سوسپانسیون باکتری به ترتیب با نسبت حجمی 9 به 1، روند تغییرات هدایت الکتریکی در اوایل آزمایش با گام زمانی 30 ثانیه اندازه گیری می شود، سپس با داشتن رابطه ی بین تغییر هدایت الکتریکی و میزان مولکول اوره تجزیه شده، فعالیت آنزیم اوره آز بر حسب مول بر ثانیه با استفاده از معادله (2) به دست می آید [20]:

$$\text{هدایت الکتریکی (ms/min)} = \text{اوره هیدرولیز شده (mm/min)} \times 11 \quad (2)$$

برای اندازه گیری هدایت الکتریکی از دستگاه هدایت سنج با قابلیت اندازه گیری هدایت الکتریکی تا 20 ms، استفاده شد. واحد اندازه گیری هدایت الکتریکی، زیمنس^۲ (s) است که معکوس اهم واحد مقاومت الکتریکی است.

۳-۳ اندازه گیری مقاومت تک محوری (UCS)

برای اندازه گیری مقاومت تک محوری نمونه ها از آزمایش فشاری

3 Gravimetric acid washing

4 HCl

5 Titration

1 Electric Conductivity

2 Siemens

۲-۴ تأثیر تعداد کشت‌ها بر فعالیت اوره‌آزی

بررسی تأثیر تعداد کشت‌ها بر فعالیت اوره‌آزی با اندازه‌گیری مقدار سممتاسیون حاصل از ترکیب ۱۵ میلی‌لیتر سوسپانسیون باکتری و ۱۵ میلی‌لیتر محلول سممتاسیون صورت گرفت. با توجه به شکل (۳) هر چه تعداد کشت‌ها افزایش می‌یابد مقدار سممتاسیون تشکیل شده کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان در نتیجه کاهش فعالیت اوره‌آزی با افزایش تعداد کشت‌ها دانست.

شکل ۳. میزان رسوب در تعداد کشت‌های مختلف از محیط کشت M2

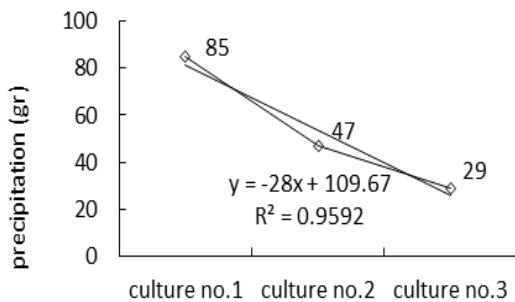


Fig. 3. The precipitation of different culture in M2 medium

بنابراین، برای تزریق از کشت دوم استفاده شد. با توجه به اینکه کشت اول برای احیای باکتری موجود در فریزر به کار می‌رود، مقدار کمی داشته (۲۰ میلی‌لیتر) و نمی‌توان از آن برای تزریق استفاده کرد. بنابراین، تمام سوسپانسیون‌های تهیه‌شده از کشت دوم است.

۳-۴ فعالیت اوره‌آزی باکتری S. Pasteurii

هدایت الکتریکی محلول اوره و باکتری به مدت ۵ دقیقه و با فاصله زمانی ۳۰ ثانیه (۰/۵ دقیقه) اندازه‌گیری شد که نتیجه آن در شکل (۴) آمده است.

با توجه به رابطه بین هدایت الکتریکی و مقدار اوره هیدرولیزشده فعالیت اوره‌آزی باکتری از معادله (۴) به دست می‌آید.

شکل ۴. تغییرات هدایت الکتریکی در برابر زمان

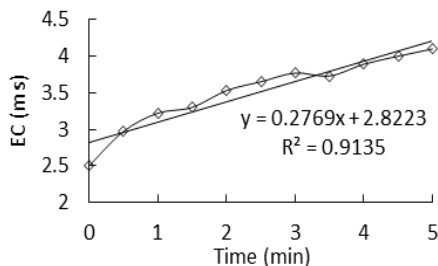


Fig. 4. Hydraulic conductivity vs time

نرمال تیترو می‌شود. سپس اسید مصرفی برای خشتی شدن کربنات محاسبه می‌شود. مقدار اسید مصرفی متناظر با کربنات کلسیم موجود در نمونه است.

۳-۵ آنالیز XRD

طیف‌سنجی پرتو ایکس (XRD) متداول‌ترین روش پراش پرتو ایکس در مشخصه‌یابی مواد است. با توجه به اینکه کریستال‌های کربنات کلسیم دارای سه نوع ساختار کلسیت، وتریت، و آراگونیت هستند، برای شناسایی این ساختارها از آنالیز XRD استفاده شد.

۳-۶ عکس‌برداری SEM

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ابزارهای مطالعه در نانو فناوری است که می‌تواند به شیوه بمباران الکترونی، تصاویری از اجسامی به کوچکی ۱۰ نانومتر تهیه کند. در این پژوهش برای نوع و چگونگی قرارگیری رسوب کربنات کلسیم در بین دانه‌های خاک، از SEM استفاده شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱ انتخاب محیط کشت

رشد باکتری با اندازه‌گیری OD محیط کشت‌های M1 و M2 با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر بررسی شد. با توجه به شکل (۲) رشد باکتری در محیط M2 بهتر بوده و در OD بیشتری به فاز مرگ می‌رسد و در نتیجه احتمال زنده‌بودن باکتری به هنگام تزریق، بیشتر خواهد بود. بنابراین در ادامه کار باکتری S. Pasteurii در محیط M2 کشت داده شد.

شکل ۲. میزان غلظت باکتری در محیط کشت‌های M1 و M2

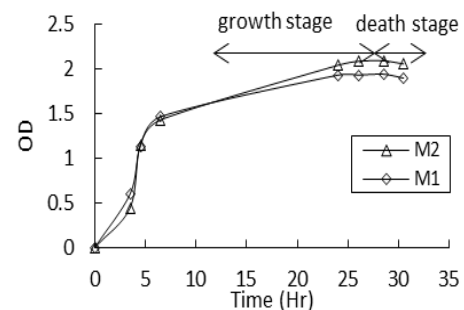


Fig. 2. Optical density of bacteria in M1 and M2 medium

1 X-ray Powder Diffraction

2 Scanning electron microscopy

۴-۵ عکس های SEM

برای بررسی چگونگی قرارگیری رسوب در بین دانه های خاک و شکل ظاهری آن ها از تصویربرداری SEM استفاده شد که عکس های آن برای دو نمونه خاک ماسه ای با ۲۰٪ سیلت قبل و بعد از عمل آوری در شکل های (۷ و ۸) آمده است. با توجه به شکل های فوق، چگونگی تشکیل رسوب در بین دانه های خاک کاملاً مشهود است. از طرف دیگر، با توجه به کروی بودن رسوب های تشکیل یافته، می توان گفت که رسوب ها از نوع وتریت است [11]. در واقع، این عکس ها علاوه بر نشان دادن چگونگی قرارگیری رسوب، مؤید نتایج مربوط به آزمایش XRD و طیف های مربوطه نیز هستند.

شکل ۷: خاک ماسه ای با ۲۰٪ سیلت قبل از عمل آوری

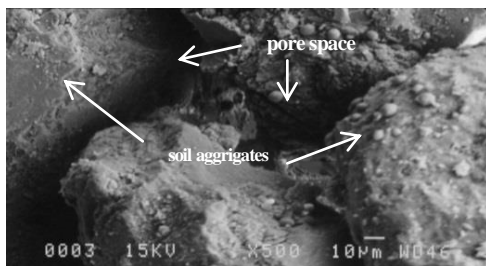


Fig. 7. SEM result for sand with silt 20% before treatment

شکل ۸: خاک ماسه ای با ۲۰٪ سیلت بعد از عمل آوری

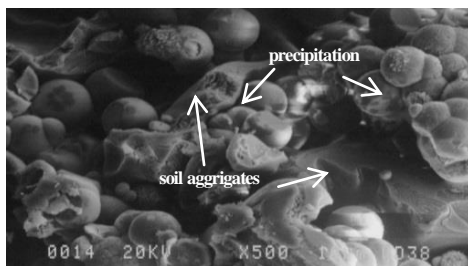


Fig. 8. SEM result for sand with silt 20% after treatment

۴-۶ مقاومت تک محوری

۲۴ ساعت پس از آخرین مرحله تزریق، نمونه ها از قالب خارج شده و به منظور طی دوره عمل آوری و کسب مقاومت به مدت ۱۴ روز در محیط آزمایشگاه و در دمای محوطه آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از عمل آوری مقاومت تک محوری نمونه ها اندازه گیری شد. نمودار تنش-کرنش به دست آمده برای دو حالت، سست و متراکم در شکل های (۹ و ۱۰) رسم شده اند.

$$Urease \ Activity = 11 \times \text{شیب نمودار هدایت الکتریکی نسبت به زمان} \quad (۴)$$

با توجه به این مقدار (۳/۰۴۵) می توان از تشکیل ۷۰٪ رسوب کربنات کلسیم اطمینان حاصل کرد [21].

۴-۴ آنالیز XRD

برای ایجاد سممتاسیون زیستی از نسبت ۱ M اوره و کلرید کلسیم برای محلول سممتاسیون استفاده شد. در این حالت رسوب کربنات کلسیم تشکیل شده تمام سطح دانه های خاک را در بر می گیرد. کیفیت رسوب در فرآیند MICP به منشاء معدنی آن بستگی دارد [11]. برای تعیین منشاء معدنی کربنات تشکیل شده از آنالیز XRD استفاده شد. این آنالیز برای دو نمونه خاک ماسه ای و ماسه با سیلت ۲۰ درصد انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش ها و مقایسه الگوی بدست آمده از نمونه خاک (طیف ردیف اول در شکل های ۵ و ۶) با بانک های اطلاعاتی این آزمایش نشان داد که منشاء معدنی غالب در رسوب تشکیل یافته از نوع وتریت است.

شکل ۵. نتیجه آزمایش XRD خاک ماسه ای

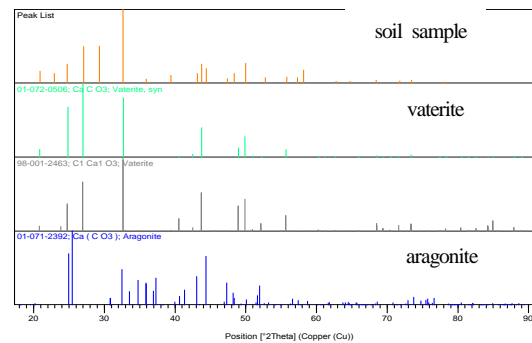


Fig. 5. XRD result for sand

شکل ۶. نتیجه آزمایش XRD خاک ماسه ای با سیلت ۲۰ درصد

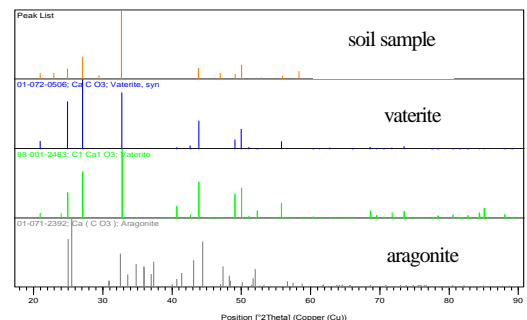


Fig. 6. XRD result for sand with silt 20%

افزایش درصد ریزدانه در خاک، نقاط تماس بین دانه‌ها افزایش یافته و در نتیجه تعداد نقاط اتصال کریستال‌های کربنات کلسیم به دانه‌های خاک افزایش یافته و منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری می‌شود. این نتیجه با نتایج بدست آمده در مراجع [۳] و [5] انطباق دارد.

شکل ۱۱: مقاومت تک‌محوری در برابر درصد سیلت مخلوط خاک

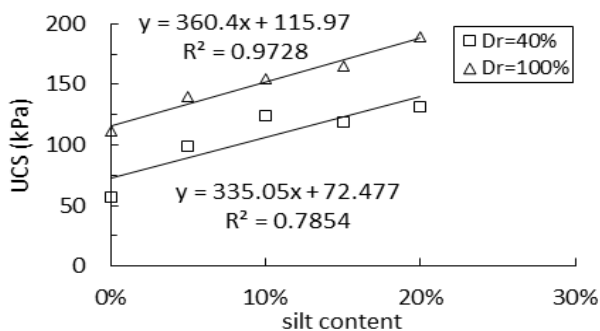


Fig. 11: q_u vs silt content

همچنین در حالت کلی با افزایش تراکم نسبی، میزان مقاومت تک‌محوری افزایش یافته است. این افزایش مقاومت به دلیل کم شدن فضای بین دانه‌ها و کوتاه شدن اتصال کریستال‌های کربنات کلسیم در بین دانه‌ها است. با کوتاه شدن اتصال، نیروی قابل تحمل توسط این اتصالات افزایش می‌یابد. در نتیجه مقاومت تک‌محوری با افزایش میزان تراکم نسبی افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج آزمایش‌های روشن‌بخت و همکاران در سال ۲۰۱۶ و مقایسه‌ای که آنها با کارهای توکاموتو و همکاران و چنگ و همکاران روی خاک‌های متفاوت از خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش انجام داده‌اند [10]، و همچنین نتایج بدست آمده از مراجع [3]، [5] هماهنگی دارد.

جدول ۷. مقادیر E_{50} برای خاک‌های مختلف در دو حالت سست و متراکم

Soil type	E_{50} (MPa)	
	Dr=40%	Dr=100%
S0%	6.33	13.96
S5%	15.02	25.02
S10%	25.90	28.53
S15%	23.71	29.41
S20%	29.77	47.37

Table 7. E_{50} for types of soil in loose and dense state

مقادیر E_{50} از نمودار تنش-کرنش استخراج شده و در جدول ۷ و

شکل ۹. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های سست ($Dr=40\%$) با درصد‌های متفاوت

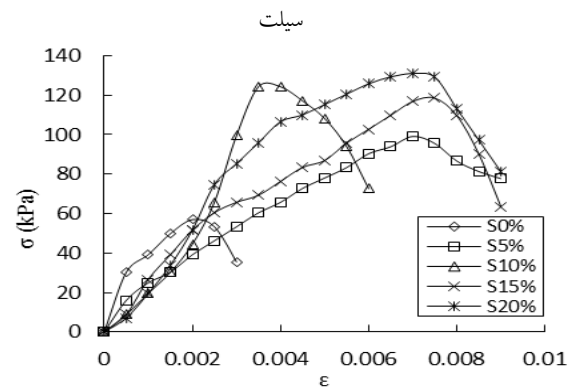


Fig. 9. Stress-strain diagram for types of soil in loose state ($Dr=40\%$)

شکل ۱۰: نمودار تنش-کرنش نمونه‌های متراکم ($Dr=100\%$) با درصد‌های متفاوت

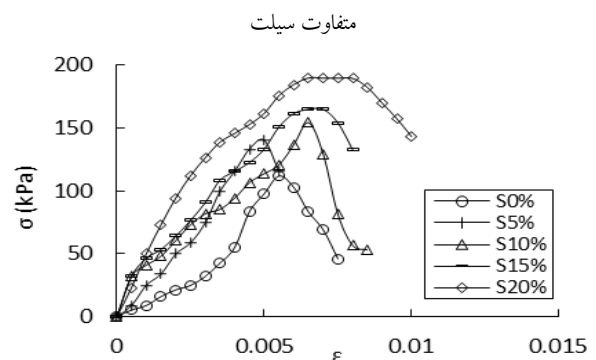


Fig. 10: stress-strain diagram for types of soil in dense state ($Dr=100\%$)

از نمودار تنش-کرنش، می‌توان پارامترهای q_u و E_{50} را استخراج کرد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. مقادیر مقاومت تک‌محوری در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: مقادیر q_u برای خاک‌های مختلف در دو حالت سست و متراکم

Soil type	q_u (kPa)	
	Dr=40%	Dr=100%
S0%	56.93	111.68
S5%	99.12	140.12
S10%	124.34	154.07
S15%	118.53	164.70
S20%	130.98	189.49

Table 6: q_u for types of soil in loose and dense state

همان‌طور که در نمودار شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها با افزایش درصد سیلت افزایش یافته است. با

حالت سست و متراکم در شکل های (۱۴ و ۱۵) آمده است. با توجه به نمودارها اگرچه میزان کرنبات رسوب یافته در نمونه ها کاهش یافته است، اما به دلیل کوتاه تر شدن اتصال دانه های خاک مقاومت بیشتری توسط آن ها تحمل می شود.

شکل ۱۴: میزان رسوب در برابر مقاومت تک محوری در حالت سست

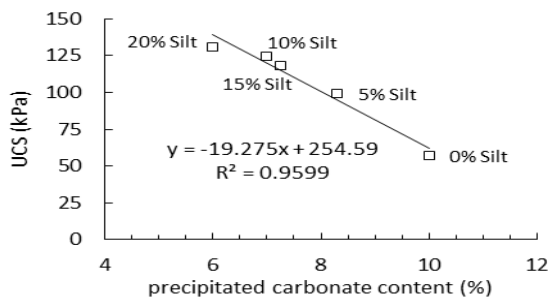


Fig. 14: precipitated carbonate content vs q_u in loose state

شکل ۱۵: میزان رسوب در برابر مقاومت تک محوری در حالت متراکم

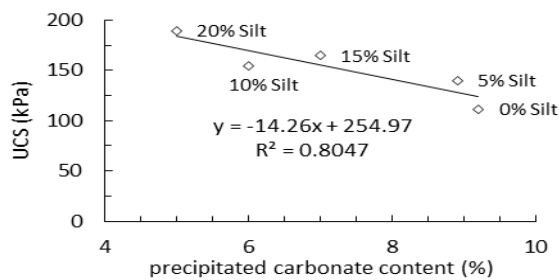


Fig. 15. precipitated carbonate content vs q_u in dense state

۵- نتیجه گیری

عوامل زیستی بسیاری روی محیط کشت باکتری و رشد آن، محلول سمستاسیون و ترکیب آن ها در خاک اثرگذارند. از جمله عواملی که در این پژوهش بررسی شدند، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تعداد کشت ها از یک محیط روی فعالیت اوره آزی باکتری ها مؤثر بوده و با افزایش تعداد کشت ها فعالیت اوره آزی کاهش می یابد.
- استفاده از محلول تثبیت کننده باعث افزایش نگهداشت باکتری، درون نمونه های خاک می شود. این اثر با بررسی محلول خروجی از نمونه ها و کشت دوباره باکتری از آن ها مشهود است.

بررسی شرایط خاک از جمله شرایطی است که به گذر از مرحله آزمایشگاهی و عملی شدن طرح کمک می کند. در این پژوهش دو عامل دانه بندی و تراکم نسبی برای مخلوط ماسه ۱۶۱ و سیلت PG

شکل (۱۲) آمده است. مانند مقاومت تک محوری مقادیر E_{50} با افزایش درصد ریزدانه و تراکم نسبی روند افزایشی دارد که ناشی از کم شدن فضای بین دانه ها، کاهش طول اتصالات و افزایش تعداد اتصالات کریستال های کرنبات کلسیم و در نتیجه افزایش سختی است.

شکل ۱۲: مقادیر مدول E_{50} در برابر درصد سیلت مخلوط خاک

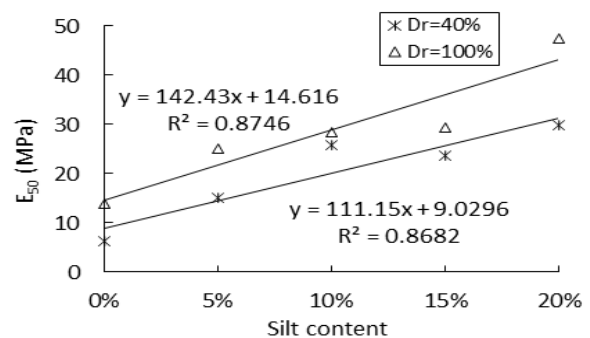


Fig. 12: E_{50} vs silt content

۴-۷ درصد کرنبات کلسیم

پس از آزمایش تک محوری، نمونه ها درون آون قرار گرفتند تا برای آزمایش آماده گردند. همان طور که در بخش ۳-۴ بیان شد، درصد وزنی کرنبات کلسیم تشکیل شده در نمونه ها به دو روش اندازه گیری شد. میانگین نتایج این آزمایش ها در شکل (۱۳) آمده است.

شکل ۱۳: میزان کرنبات کلسیم رسوب یافته در خاک های مختلف

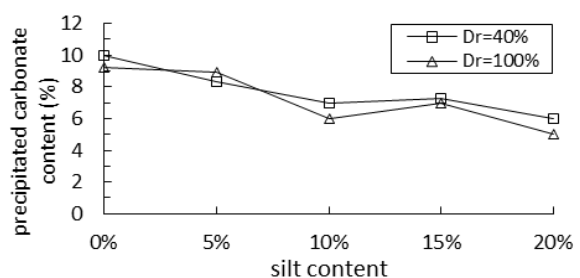


Fig. 13. Precipitated carbonate content in types of soil

با توجه به نمودار می توان مشاهده کرد که میزان رسوب با افزایش درصد سیلت و افزایش تراکم نسبی، به دلیل کاهش فضای خالی در میان دانه های خاک، روندی کاهشی دارد. میزان رسوب کرنبات کلسیم در برابر مقاومت تک محوری در دو

- induced calcite precipitation on the strength of sand. *J. Mater. Civ. Eng.* 26, 6014017 (2014).
8. Feng, K. & Montoya, B. M. Drained Shear Strength of MICP Sand at Varying Cementation Levels. *Ifcee* 2242–2251 (2015).
9. Rowshanbakht, K., Khomehchiyan, M., Sajedi, R. H. & Nikudel, M. R. Soil Improvement using calcium carbonate precipitation and the Effective Factors on it. *J. Iran. Assoc. Eng. Geol.* 8, 1–12 (in persian)
10. Rowshanbakht, K., Khomehchiyan, M., Sajedi, R. H. & Nikudel, M. R. Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment. *Ecol. Eng.* 89, 49–55 (2016).
11. Ivanov, V. & Stabnikov, V. in *Construction Biotechnology* 109–138 (Springer, 2017).
12. Ivanov, V. *Environmental microbiology for engineers*. (CRC Press, 2015).
13. Yasuhara, H., Hayashi, K. & Okamura, M. in *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* 3984–3992 (2011).
14. Carmona, J. P. S. F., Oliveira, P. J. V. & Lemos, L. J. L. Biostabilization of a Sandy Soil Using Enzymatic Calcium Carbonate Precipitation. *Procedia Eng.* 143, 1301–1308 (2016).
15. Zhao, Q. *et al.* Factors affecting improvement of engineering properties of micp-treated soil catalyzed by bacteria and urease. *J. Mater. Civ. Eng.* 26, 4014094 (2014).
16. PTCC. Persian Type Culture Collection. Available at: <http://ptcc.irost.org/DBank-details.asp?id=27&code=0>. (Accessed: 4th March 2017)
17. ATCC. *Sporosarcina pasteurii* (Miquel) Yoon et al. ATCC® 11859™. Available at: https://www.lgcstandards-atcc.org/products/all/11859.aspx?geo_country=de#culturemethod. (Accessed: 4th March 2017)
18. Li, S. A laboratory study of the effects of bio-stabilization on geomaterials. (2013).
19. Lin, H., Suleiman, M. T., Brown, D. G. & Kavazanjian, E. Mechanical Behavior of Sands Treated by Microbially Induced Carbonate Precipitation. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 142, 04015066 (2015).
20. Kalantary, F. & Kahani, M. Evaluation of the Ability to Control Biological Precipitation to Improve Sandy Soils. *Procedia Earth Planet. Sci.* 15, 278–284 (2015).
21. Ivanov, V. & Stabnikov, V. in *Construction Biotechnology* 1–22 (Springer, 2017).

مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش درصد ریزدانه نقاط تماس بین دانه‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه تعداد اتصال دانه‌ها به یکدیگر توسط کریستال‌های کربنات کلسیم افزایش یافته و مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها و مدول الاستیسیته E_{50} افزایش می‌یابد.
- با افزایش درصد تراکم نسبی، فضای خالی بین دانه‌ها خاک کاهش می‌یابد. بنابراین طول پیوندهای میان دانه‌ها کاهش یافته و می‌توانند نیروی بیشتری را تحمل کنند.
- با افزایش درصد ریزدانه و تراکم نسبی خاک، میزان کربنات کلسیم رسوب یافته به دلیل کاهش فضای بین دانه‌ها کاهش می‌یابد.
- بهسازی به روش MICP قابلیت استفاده در خاک‌های مختلف را دارد و امکان استفاده از این روش در پروژه‌های عملی وجود دارد.

References

۶- مراجع

1. Chu, J., Ivanov, V., He, J., Maeimi, M. & Wu, S. in *Ground Improvement Case Histories: Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering Methods* 571–589 (2015).
2. Cheng, L. & Cord-Ruwisch, R. In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation. *Ecol. Eng.* 42, 64–72 (2012).
3. Kim, D., Park, K. & Kim, D. Effects of ground conditions on microbial cementation in soils. *Materials (Basel)*. 7, 143–156 (2013).
4. Cuthbert, M. O. *et al.* Controls on the rate of ureolysis and the morphology of carbonate precipitated by *S. Pasteurii* biofilms and limits due to bacterial encapsulation. *Ecol. Eng.* 41, 32–40 (2012).
5. Ng, W., Lee, M. & Hii, S. An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement. *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 62, 723–729 (2012).
6. Shahin, M. A., Cheng, L. & Mujah, D. Influence of Key Environmental Conditions on Microbially Induced Cementation for Soil Stabilization. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 4016083 (2016).
7. Park, S.-S., Choi, S.-G. & Nam, I.-H. Effect of plant-

Investigating effective factors of biocementation soil improvement on sandy soil with different Fine-content

D. Sharifi Asadi¹, A. Ardakani^{2*}, G. Garoosi³

1- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University

2- Assistant Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University

3- Associate Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University

*a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

Abstract:

One of the most common methods of soil improvement is to use additives in order to improve strength properties and permeability of the soil. Cements or chemicals are usually used as binders for soil particles, which lead to increase the soil shear strength and reduce its hydraulic conductivity (i.e. permeability). Nevertheless, these materials are not suitable for soil improvement in the long term because they require significant natural resources. The use of cement and chemicals for soil improvement is expensive and time-consuming. Management of renewable natural resources (microorganisms and their products) could lead to solve geotechnical and environmental problems and achieve great economic benefits in the building industry. In addition, the application of microbial biotechnology in the building industry make easier some of the existing methods of construction. Using the latest microbial biotechnology, a new type of building materials, namely biocement, has been produced as an alternative to cement or chemicals. Biocementation is the improvement of strength and stiffness of rock and soil by using microbial activity and their products. The process of the formation of precipitates or biocement in the presence of microorganisms is called microbially induced calcium precipitation (MICP). Biocement can be used in solid and liquid states. In the liquid state, biogROUT can flow like water with very low viscosity. Therefore, compared to cement and chemicals, it will be transmitted into the soil, more easily. Naturally, biocement is formed in the presence of microorganisms in ambient temperature and thus, it requires less energy. Because of the abundance of microorganisms in the nature and easy to reproduce with low cost, this type of cement is sustainable. The Microorganisms that are suitable for the production of biocement are usually non-pathogenic and environment friendly. In addition, unlike cement, soil can be improved without disturbance of ground and the environment; since microorganisms can penetrate into the soil and grow in it. This dissertation aims to realize the effect of ground condition on the MICP process in non-cohesive soils. Since this method is still in the laboratory stage, for being used in practical projects, it is required to carry out laboratory experiments, including relative density and particle size distribution, to evaluate the performance of this method in different ground conditions. For this purpose, it was used from Sandy soil with different silt contents of 0%, 5%, 10%, 15% and 20% in two states of Loose ($D_r = 40\%$) and dense ($D_r = 100\%$) conditions in this research. The high urease activity and non-pathogenic bacteria *S. Pasteurii* was also used in the MICP process. In order to consider the soil conditions on the efficiency of this type of improvement method, uniaxial compressive test parameters and precipitated calcium carbonate content were investigated. According to the results, increasing of silt content from 0% to 20%, leads to reductions of 40% and 46% in precipitated calcium carbonate content, increases of 57% and 41% in the uniaxial strength and increases of 79% and 71% in the elasticity modulus of the samples in two loose and dense conditions, respectively. It seems that these changes were resulted from shrinking of the empty space and increasing of the contact area between the soil particles.

Keywords: Biological Improvement, Microbial Induced calcium carbonate Precipitation (MICP), Unconfined compressive strength, Sandy soil, Non-plastic Silt.