نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و هفتم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۲ / مقاله علمی- پژوهشی: صفحات ۲۴۱ تا ۲۵۳

ارزیابی عملکرد بهسازی پایدار خاک‌های متورم‌شونده با استفاده از روش MICP

علیرضا افتخاری[۱]، مسعود میرمحمدصادقی[۲*]، احمد جلالیان[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹)

چکیده

استفاده از روش های مبتنی بر زیست‌فناوری در قلمرو مهندسی ژئوتکنیک به تولد دانش نوین بیوژئوتکنولوژی انجامیده است و مطالعات متعددی نیز با استفاده از این دانش نو در مسائل مختلف ژئوتکنیکی از جمله کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت برشی به‌ویژه در خاک‌های ماسه‌ای انجام شده و نتایج مطلوبی حاصل شده است. با این وجود، در زمینه‌ی بهبود خواص مکانیکی خاک‌های رسی، به‌ویژه کاهش تورم خاک‌های متورم‌شونده که یکی از انواع خاک‌های مسئله دار محسوب می‌شود، با استفاده از بیوژئوتکنولوژی پژوهش‌های اندکی صورت پذیرفته است. علت عمده تورم خاک‌های متورم شونده وجود رس‌های مونت‌موریلونیتی در این نوع خاک‌ها است. استفاده از مواد افزودنی شیمیایی برای پایدارسازی خاک‌های متورم شونده نظیر آهک و سیمان، یک عمل متداول است. با این حال نگرانی‌های زیست‌محیطی مربوط به تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید مواد شیمیایی و نیز اثرات مخربی که این مواد بر روی محیط زیست و خاک‌ها دارد پژوهشگران را به استفاده از جایگزین‌های تثبیت کننده پایدار دیگری ترغیب کرده است. فرایند رسوب میکروبی کلسیت Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) روشی است که می‌تواند یک راه حل بالقوده برای حل این مشکل باشد. هدف از این پژوهش بررسی میزان اثرگذاری روش (MICP) بر روی تورم‌پذیری خاک‌های رسی متورم‌شونده و نیز تأثیر آن بر روی مقاومت مکانیکی این نوع از خاک‌ها بوده است. بدین‌منظور با استفاده از باکتری Sporosarcina pasteurii و کلسیم کلراید و اوره به‌عنوان مواد مغذی بر روی یک خاک رسی با حد روانی ۵۳، آزمایشات تورم یک بعدی، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش حدود اتربرگ انجام شد. به‌منظور طراحی آزمایش‌ها و نیز تحلیل آماری نتایج، روش تاگوچی مورد استفاده قرار گرفت. این روش آزمایش‌ها را به‌طریق فاکتوریل جزئی طراحی می‌کند و تعداد آنها را بدون اثر قابل توجه در نتایج کاهش می‌دهد. به این منظور چهار فاکتور غلظت باکتری، نسبت مولاریته مواد غذایی، مدت زمان تیمار کردن و رطوبت خاک با ۴ سطح تغییرات انتخاب شد. پس از انجام آزمایش‌ها و استخراج نتایج مشاهده شد که روش (MICP) در کاهش پتانسیل تورمی خاک‌های متورم‌شونده مؤثر واقع شده و نیز باعث افزایش قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری محدود نشده خاک و مقاومت برشی زهکشی نشده آن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهسازی زیستی خاک، خاک‌های متورم شونده، فرایند رسوب میکروبی کلسیت

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.
۲. پژوهشگاه نیرو، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی وزارت نیرو.
۳. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: MmSadeghi@nri.ac.ir

مقدمه

عدم توجه به وجود خاک‌های مسئله‌دار در ساختگاه ممکن است موجب به وجود آمدن خسارت‌های سنگین در پروژه‌های عمرانی شود. بنابراین، لازم است که این‌گونه خاک‌ها شناسایی و اصلاح شوند. از جمله این خاک‌ها، خاک‌های متورم‌شونده یا آماسی هستند که شدیداً تمایل به جذب آب و تورم دارند. علت عمده تورم خاک‌های متورم شونده وجود رس‌های مونتموریلونیتی در این نوع خاک‌ها است (۱۲). وجود یون سدیم در رس‌های مونتموریلونیتی، ظرفیت جذب آب را در آنها بالا برده است و بنابراین، باعث افزایش حجم در این‌گونه خاک‌ها می‌شود. از طرفی مشکل اساسی در مورد خاک‌های تورم‌پذیر این است که تغییر شکل آنها بسیار بزرگ‌تر از تغییر شکل‌های الاستیک است و بنابراین، نمی توان آن را به کمک فرضیه‌های معمول الاستیک و یا پلاستیک پیش‌بینی کرد. تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک‌های تورم‌پذیر اغلب غیریکنواخت و نامتعادل بوده و ممکن است موجب ایجاد خسارت‌های قابل توجه به سازه و رویه‌های مستقر بر روی آنها شود. مقدار خسارتی که این پدیده برای سازه ها، به‌ویژه پی‌ها و سازه‌های سبک به وجود می‌آورد، از همه حوادث طبیعی مثل زمین لرزه و سیل بیشتر است. در کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که اغلب سرمایه گذاری‌های سنگینی برای احداث سازه‌های هیدرولیکی شامل انواع کانال‌ها و لوله‌های انتقال و توزیع آب و فاضلاب صورت می‌گیرد، اغلب این پدیده خسارت‌های بسیار زیادی را نیز به این سازه‌ها به‌واسطه سبکی آنها وارد می‌سازد.

تثبیت شیمیایی خاک‌های تورم‌پذیر یکی از روش‌های از بین بردن تورم خاک‌های متورم‌شونده است ولی لزوم استفاده از روش‌های دوست‌دار طبیعت و جایگزینی آنها با روش‌های سنتی برای از بین بردن تورم خاک‌های متورم شونده از جمله اصلاح شیمیایی خاک‌های آماسی توسط سیمان و آهک، ضروری به‌نظر می‌رسد. هدف از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی به‌کارگیری تکنیک فرایند رسوب میکروبی کلسیت (MICP) برای بهسازی پایدار خاک‌های رسی متورم شونده و کنترل تورم در آنها است.

مبانی بیوژئوتکنولوژی

طرح روش‌های اصلاح شیمیایی خاک در واقع این ایده را تحقق می‌بخشد که ویژگی‌های مکانیکی توده خاک (بزرگ مقیاس) تابع خصوصیات ریزمقیاس خاک است. این جمله بدین معناست که ما می‌توانیم با تغییر ریزساختار خاک، خصوصیات مهندسی توده خاک را تغییر دهیم. یکی از روش‌های نوین تغییر ریزساختار خاک، استفاده از میکرو ارگانیسم‌ها و روش‌های بیوشیمیایی است (۱). هر موجود زنده‌ای که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده نباشد و تنها قادر باشیم زیر میکروسکوپ آن را ببینیم، میکروارگانیسم نامیده می‌شود. میکروارگانیسم‌ها شامل باکتری ها، آغازیان و بعضی از قارچ‌ها مانند مخمرها هستند.

در هر گرم خاک در عمق یک متر بیش از 10^9 سلول باکتری وجود دارد که با افزایش عمق شمار آنها کاهش می‌یابد، به‌طور متوسط در عمق ۳۰ متری که معمولا پایین‌ترین محدوده اکثر فعالیت‌های بهسازی مهندسی خاک به‌شمار می‌آید، شمار باکتری‌ها در حدود 10^6 سلول در هر گرم است که تعداد زیادی از آنها می‌توانند در بهسازی خاک شرکت کنندو برای تقویت پارامترهای مهندسی خاک کافی هستند. در همین راستا برای استفاده از این باکتری‌ها برای بهسازی دو روش وجود دارد (۴). روش اول که بر پایه تحریک بیولوژیکی باکتری‌ها (Bio-Stimulation) است که با اضافه‌کردن مواد مغذی مورد نیاز باعث فعال شدن باکتری‌های رسوب‌زا مورد نظرمی‌شود، در این روش کشت و رشد باکتری در داخل خاک صورت می‌گیرد. استفاده از این روش به‌دلیل مشکلات فراوان در تأمین محیط کشت مناسب بسیار دشوار بوده به همین دلیل از این روش بیشتر برای پاکسازی خاک‌های آلوده (Bio-remediation) استفاده می‌شود و در بهسازی ویژگی‌های مهندسی چندان کاربرد ندارد. روش دوم

افـزایش باکتری‌هـا (Bio-Augmentation) اسـت کـه در ایـن روش باکتری‌های رسوب‌زا مورد نظر به‌طور مستقیم به خـاک اضافه می‌شـوند. در ایـن روش کلیـه مراحـل کشـت و رشـد باکتری‌ها در آزمایشگاه و با استفاده از راکتورهـای مخصـوص صورت می‌گیرد. باکتری‌هایی که برای انجام تقویت و بهسازی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند بایـد خاصـیت رسـوب‌زایی داشته باشند.

تاریخچه مختصری از بیوژئوتکنولوژی

روش MICP برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط گلاپودی و همکاران (۶) برای بررسی کاهش درصد نفوذ پذیری ماسه بـا اسـتفاده از بـاکتری Bacillus pasteurii بـه‌کار گرفتـه شـد. استوکزفیشر و همکاران (۱۴) در سال ۱۹۹۹ میلادی مطالعـات بیشتری را در زمینه خصوصیات فیزیکـی و شـیمیایی رسـوب $CaCO_3$ بـا اسـتفاده از روش MICP و بـه‌کارگیری بـاکتری Bacillus pasteurii انجـام دادنـد. بررسـی کـاربرد MICP در بهبود مقاومت و سختی خاک، برای اولین بـار در سـال ۲۰۰۲ توسط اسماعیل و همکاران (۷) مـورد پـژوهش قـرار گرفـت. مقاومت برشی و سختی خاک تحت تیمار روش MICP توسط دی‌یونگ و همکاران (۴ و ۵) با استفاده از یکسری آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده، مـورد ارزیـابی قـرار گرفت. با وجود مطالعات بیشمار در مقیاس آزمایشگاهی و بـا توجه به اثربخشـی کلـی ایـن روش، ولـی عـدم اطمینـانی در کاربردی بودن این روش در مقیاس‌های بزرگ وجـود داشـت. ون‌پاسن و همکاران (۱۵ و ۱۶) در سال ۲۰۱۰ یـک آزمـایش در مقیاس بزرگ و با ۱۰۰ متر مکعب نمونه ماسه انجام دادند. نتـایج پـژوهش آنهـا نشـان داد کـه بـه‌کارگیری روش MICP به‌طور قابل ملاحظه‌ای سختی و مقاومت خاک‌های دانـه‌ای را در کاربردهایی با مقیاس بزرگ، بهبود می‌بخشد.

سدجادی و همکـاران (۱۳)، مکانیسـم‌های مـؤثر بـر بهبـود خاک‌های تورمی بـا اسـتفاده از زیسـت‌فناوری بـر روی خـاک متـورم‌شـونده‌ای کـه به‌صـورت مصـنوعی و از ترکیـب ماسـه سیلت‌دار بسیار ریز و بنتونیـت و کائولینیـت تهیـه شـده بـود را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج پـژوهش چیتـوری و همکـاران (۳) در این زمینه بیانگر افزایش مقاومت فشاری محدودنشـده و کاهش در رفتار تورمی خاک رسـی متورم‌شـونده تیمارشـده بـا روش MICP بود. همچنین، تأثیر به کارگیری روش MICP بـرای کاهش ترک‌های ناشی از خشکیدگی خـاک رسـی متورم‌شـونده در معرض تر و خشک شدن‌های متوالی توسط لیو و همکـاران (۹) مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

خصوصیات خاک مورد بررسی

خاکی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفـت، خـاک رسـی بـا حـداکثر وزن مخصـوص خشـک (Maximum Dry Unit Weight (MDUW، ۱/۷۱ gr/cm^3 و رطوبـت بهینـه (Optimum Moisture Content (OMC، ۲۰ درصد است که دارای حد خمیری (PL) ۳۱ و حد روانی (LL) ۵۳ بود. مطابق جدول ۱ که طبقه‌بندی پتانسیل تورمی بر حسـب حدود اتربرگ را نشـان می‌دهـد، ایـن خـاک در رده بـا مقـدار تورم‌پذیری زیاد قرار می‌گیرد.

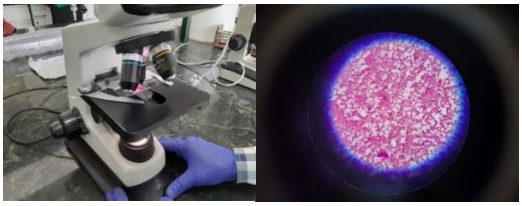
بین معیارهای ارائـه شـده بـرای ارزیـابی پتانسـیل یـا شـدت تورم‌زایی خاک‌ها کـه توسـط پژوهشـگران مختلـف ارائـه شـده، تفاوت هایی وجود دارد. علـت ایـن اخـتلاف را بایـد در کـاربرد معیارهای ارائه شده جستجو کرد که در این رابطه نـوع و بزرگـی سازه دارای نقش اصلی است. به همین علـت در ارزیـابی اثـرات تورم خاک بر سازه باید به نوع و بزرگی سازه و نیز مقاومت ذاتی آن در مقابل تغییر شکل‌های قابل انتظار توجه کافی مبذول شود.

میکروارگانیسم مورد استفاده

میکروارگانیسم مورد استفاده در این پژوهش، یـک بـاکتری بـا نام علمی *Sporosarcina pasteurii* است. سویه مورد استفاده این باکتری از مرکز کلکسـیون قارچ‌هـا وباکتری‌هـای صـنعتی ایران به شـماره PTCC 1645 (DSM33) و به‌صـورت کشـت زنـده تهیـه می‌شـود. بـاکتری *Sporosarcina pasteurii* از

جدول ۱. طبقه‌بندی پتانسیل تورمی بر حسب حدود اتربرگ

مقدار تورم‌پذیری	Chen (1983)	Seed et al. (1962)	USBR (1956)
خیلی زیاد	LL > 60	PI > 35	PI > 35
زیاد	40 < LL < 60	20 < PI < 35	25 < PI < 41
متوسط	30 < LL < 40	10 < PI < 20	15 < PI < 28
کم	LL < 30	PI <10	0 < PI <15



شکل ۱. باکتری *Sporosarcina pasteurii* پس از انجام آزمایش رنگ آمیزی گرم (رنگی در نسخه الکترونیکی)

خانواده باسیلاس و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دارای اسپور در غشای بدنه خود است و به‌طور طبیعی در خاک موجود است؛ همچنین این باکتری از نوع باکتری‌های اوره‌آز مثبت و با فعالیت اوره‌آزی بسیار بالا است. فعالیت متابولیک این باکتری که یک باکتری خاکزی قلیادوست نیز است، سبب مصرف اوره در درون سلول خود شده و پس از شکستن اوره، دو ترکیب آمونیاک (NH_3) و دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید می‌کند.

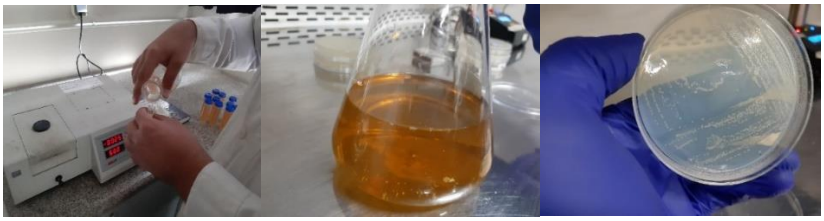
فرایند رسوب میکروبی کلسیت

در این پژوهش از ۲ محیط کشت جامد نوترینت آگار و محیط کشت مایع عصاره مخمر و کلرید آمونیوم، در طول آزمایش برای تهیه سوسپانسیون باکتری استفاده به‌عمل آمد. پس از آماده‌سازی محیط کشت جامد، باکتری‌ها به کمک لوپ در محیطی کاملاً استریل و زیر هود لامینار به‌صورت کشت خطی (Streaking) روی محیط کشت جامد مطابق شکل ۲، قرار می‌گیرند. بعد از آماده‌سازی محیط کشت مایع، باکتری‌های رشد پیدا کرده در محیط کشت جامد، به محیط کشت مایع منتقل شده و درنهایت برای فراهم کردن شرایط مناسب برای رشد میکروارگانیسم و نیز کنترل رطوبت، دما، میزان اکسیژن و دی اکسید کربن، ارلن محتوی باکتری واقع در محیط کشت مایع را درون دستگاه انکوباتور شیکردار قرار می‌دهیم. پس از ۴۸ ساعت با استفاده از دستگاه نورسنجی غلظت باکتری در طول موج ۶۰۰ نانومتر روی مقدار مشخصی که در طرح آزمایش ارائه شده بود تنظیم شد.

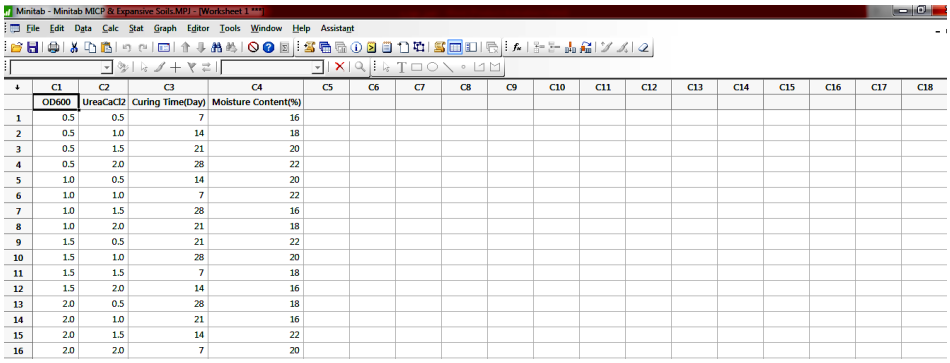
روش تحقیق

در این پژوهش آزمایش‌های تورم یک بعدی (1-D)، مقاومت فشاری محدود نشده یا تک‌محوری (UCS) و نیز آزمایش حدود اتربرگ برای بررسی اثربخشی روش MICP بر روی خاک رسی موردنظر با مقدار تورم‌پذیری زیاد مورد استفاده قرار گرفتند.

برای طراحی آزمایش تحکیم یک بعدی به‌منظور سنجش میزان تورم خاک، روش تاگوچی (۱۱) به‌همراه نرم‌افزار تخصصی Minitab مورد استفاده قرار گرفت. این روش توسط دکتر تاگوچی در اواسط جنگ جهانی دوم به‌منظور توسعه روش‌های جدید در بهینه سازی فرایندهای مهندسی در کشور ژاپن ابداع شد. روش تاگوچی آزمایش‌ها را با روش



شکل ۲. قرارگیری باکتری‌ها روی محیط کشت و تنظیم میزان غلظت باکتری (رنگی در نسخه الکترونیکی)



	C1	C2	C3	C4
	OD600	UreaCaCl2	Curing Time(Day)	Moisture Content(%)
1	0.5	0.5	7	16
2	0.5	1.0	14	18
3	0.5	1.5	21	20
4	0.5	2.0	28	22
5	1.0	0.5	14	20
6	1.0	1.0	7	22
7	1.0	1.5	28	16
8	1.0	2.0	21	18
9	1.5	0.5	21	22
10	1.5	1.0	28	20
11	1.5	1.5	7	18
12	1.5	2.0	14	16
13	2.0	0.5	28	18
14	2.0	1.0	21	16
15	2.0	1.5	14	22
16	2.0	2.0	7	20

شکل ۳. طراحی آزمایش به کمک روش تاگوچی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

فاکتوریل جزئی طراحی می‌نماید و تعداد آنها را بدون اثر قابل توجه در نتایج کاهش می‌دهد. به این منظور ۴ فاکتور برای بررسی مطابق شکل ۳ درنظر گرفته شد. این فاکتورها شامل غلظت باکتری (OD_{600})، نسبت مولاریته موادغذایی ($Urea\text{-}CaCl_2$)، مدت زمان تیمارکردن خاک (Curing Time) و میزان رطوبت خاک (Moisture Content) با ۴ سطح تغییرات بودند. با نگاه به جدول تاگوچی مشاهده می‌شود که ماتریس ارتوگونال مناسب بر اساس تعداد عوامل و سطوح موردنظر L_{16} است.

در روش تاگوچی، از متغیری به نام SN (Signal-to-noise ratio) برای مقایسه اثر یک فاکتور در سطوح مختلف استفاده میشود که به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود. در این رابطه n برابر تعداد تکرار و y برابر نتیجه حاصل از هر تکرار آزمایش است. SN پراکندگی حول یک نقطه معین را بیان می‌کند و هرچه این مقدار بیشتر باشد پراکندگی کمتر خواهد بود.

$$SN = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \qquad (۱)$$

آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D698 به‌صورت پروکتور استاندارد با هدف یافتن درصد رطوبت بهینهٔ خاک انجام شد. هدف از محاسبه درصد رطوبت بهینه، تعیین میزانی از ترکیب مواد غذایی و سوسپانسیون باکتری است که هنگام افزوده‌شدن به خاک، آن را با بیش‌ترین وزن مخصوص در قالب قرار دهد. بنابر نتایج این آزمایش، میزان رطوبت بهینه برابر ۲۰ درصد تعیین شد.

برای انجام آزمایش تورم یک بعدی (۲) و با توجه به طرح آزمایش روش تاگوچی، همزمان از ۴ دستگاه تحکیم کالیبره شده مطابق شکل ۴، استفاده می‌کنیم. قطر رینگ تحکیم ۶/۳۵ سانتی‌متر، ارتفاع آن ۲/۵۴ سانتی‌متر و حجم آن ۸۰/۴ سانتی‌متر مکعب بود. آزمایش مطابق با استاندارد ASTM-D4546 انجام گرفت و در طول آزمایش فقط درصد تورم اندازه گیری شد.

اگر مدت زمان تیمار خاک ۷ روز درنظر گرفته شود، مطابق با طرح آزمایش طراحی‌شده توسط روش تاگوچی مطابق جدول ۲، چهار نمونه از خاک رس مورد آزمایش را با غلظت باکتری، نسبت مولاریته مواد مغذی و نیز میزان رطوبت‌های متفاوت ترکیب کرده و در رینگ دستگاه تحکیم قرار داده می‌شود.

به همین ترتیب برای زمان‌های تیمار ۱۴ روز، ۲۱ روز و نیز

شکل ۴. استفاده از ۴ دستگاه تحکیم به‌صورت همزمان (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. طرح آزمایش ۷ روزه

شماره آزمایش طبق طرح تاگوچی	شماره دستگاه تحکیم	مدت زمان تیمار (روز)	غلظت باکتری OD_{600}	نسبت مولاریته مواد مغذی (Urea-$CaCl_2$)	میزان رطوبت خاک (٪)
T_1	۱	۷	۰/۵	۰/۵ – ۱	٪ ۱۶
T_6	۲	۷	۱	۱/۵ – ۱/۵	٪ ۲۲
T_{11}	۳	۷	۱/۵	۱/۵ – ۱	٪ ۱۸
T_{16}	۴	۷	۲	۳ – ۱/۵	٪ ۲۰

۲۸ روز با توجه به طرح آزمایش روش تاگوچی، نسبت به آماده‌سازی نمونه‌ها اقدام و سپس آنها در رینگ دستگاه تحکیم قرار داده شد. میزان غلظت باکتری مورد استفاده، نسبت مولاریته مواد مغذی و نیز میزان رطوبت‌های متغیر مورد استفاده در آماده‌سازی نمونه‌ها برای هر یک از زمان‌های تیمار در جدول‌های ۳ و ۴ و ۵ نشان داده شده است.

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده یا (UCS) یک حالت خاصی از آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) است که در آن فشار محدودکننده‌ای بر نمونه وارد نمی‌شود و تنش محوری بر نمونه به تدریج افزایش پیدا می‌کند، تا زمانی که نمونه گسیخته شود. فشار قائم محوری نهایی که با q_u نشان داده می‌شود در واقع مقاومت تک محوری خاک است که می‌توان آن را دو برابر مقاومت چسبندگی بدون زهکشی خاک درنظر گرفت.

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده یا تک محوری، مقداری حدود ۱۸۰ گرم از خاک رس را وزن کرده و با درنظرگرفتن میزان رطوبت بهینه ۲۰ درصد برای آن، آزمایش را با درنظر گرفتن غلظت باکتری (OD_{600}) برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲و با درنظر گرفتن نسبت مولاریته مواد مغذی (Urea-$CaCl_2$) برابر با ۱/۵–۱/۵، محلول محتوی باکتری و مواد مغذی را به خاک اضافه کرده و با حفظ رطوبت، ۲۴ ساعت بعد نمونه‌های خاک تیمار شده را درون محفظه دستگاه UCS قرار داده شد. سپس قرائت میزان نیروی وارد بر نمونه به‌صورت هر ۱۵ ثانیه یکبارمطابق شکل ۵، اقدام صورت گرفت.

نتایج

نتایج حاصل از روش MICP بر روی حدود اتربرگ

برای سنجش میزان تأثیر باکتری و نیز مواد مغذی آن بر روی حد روانی (LL) و شاخص خمیری خاک (PI)، آزمایش حد روانی و حد خمیری با درنظر گرفتن اینکه غلظت باکتری مورد استفاده (OD_{600}) دو مقدار ۱ و ۱/۵ داشته باشد و نیز مولاریته مواد مغذی (Urea/$CaCl_2$) را ۱/۵–۱/۵ و ۰/۷۵–۱/۵ درنظر بگیریم، بر روی نمونه خاک رسی و به روش چند نقطه‌ای و با درنظر گرفتن مدت زمان ۵ روز برای تیمار خاک، انجام گرفت. با مقایسه نتایج به‌دست آمده برای حد روانی قبل و پس از تیمار

جدول ۳. طرح آزمایش ۱۴ روزه

شماره آزمایش طبق طرح تاگوچی	شماره دستگاه تحکیم	مدت زمان تیمار (روز)	غلظت باکتری OD_{600}	نسبت مولاریته مواد مغذی (Urea-$CaCl_2$)	میزان رطوبت خاک (٪)
T_2	۱	۱۴	۰/۵	۱/۵ – ۱/۵	٪ ۱۸
T_5	۲	۱۴	۱	۰/۵ – ۱	٪ ۲۰
T_{12}	۳	۱۴	۱/۵	۳ – ۱/۵	٪ ۱۶
T_{15}	۴	۱۴	۲	۱/۵ – ۱	٪ ۲۲

جدول ۴. طرح آزمایش ۲۱ روزه

شماره آزمایش طبق طرح تاگوچی	شماره دستگاه تحکیم	مدت زمان تیمار (روز)	غلظت باکتری OD_{600}	نسبت مولاریته مواد مغذی (Urea-$CaCl_2$)	میزان رطوبت خاک (٪)
T_3	۱	۲۱	۰/۵	۱/۵ –۱	٪ ۲۰
T_8	۲	۲۱	۱	۳ –۱/۵	٪ ۱۸
T_9	۳	۲۱	۱/۵	۰/۵ –۱	٪ ۲۲
T_{14}	۴	۲۱	۲	۱/۵ –۱/۵	٪ ۱۶

جدول۵. طرح آزمایش ۲۸ روزه

شماره آزمایش طبق طرح تاگوچی	شماره دستگاه تحکیم	مدت زمان تیمار (روز)	غلظت باکتری OD_{600}	نسبت مولاریته مواد مغذی (Urea-$CaCl_2$)	میزان رطوبت خاک (٪)
T_4	۱	۲۸	۰/۵	۳ – ۱/۵	٪ ۲۲
T_7	۲	۲۸	۱	۱/۵ – ۱	٪ ۱۶
T_{10}	۳	۲۸	۱/۵	۱/۵ – ۱/۵	٪ ۲۰
T_{13}	۴	۲۸	۲	۰/۵ – ۱	٪ ۱۸

شکل ۵. انجام آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده بر روی نمونه خاک رس (رنگی در نسخه الکترونیکی)

خاک رسی، مشاهده شد که مقدار حد روانی درحالتی که غلظت باکتری (OD_{600}) را برابر با ۱/۵ و نسبت مولاریته مواد مغذی (Urea-$CaCl_2$) را ۱/۵–۱/۵ درنظر بگیریم، از میزان ۵۳ درصد اولیه به ۵۹ درصد و حد خمیری آن از میزان ۳۱ درصد اولیه به ۳۹ درصد افزایش و درحالتی که غلظت باکتری (OD_{600}) را برابر با ۱/۵ و نسبت مولاریته مواد مغذی (Urea-$CaCl_2$) ۱/۵–۰/۷۵ باشد، میزان حد روانی از ۵۳ درصد به ۵۷ درصد و نیز حد خمیری آن از ۳۱ درصد به ۳۶ درصد

افزایش داشته است.

با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته، می‌توان گفت که بیشترین مقدار افزایش در حد روانی و کاهش شاخص خمیری (PI)، درحالتی که باکتری غلظت بیشتری داشته، صورت گرفته است. همچنین نسبت برابر Urea و $CaCl_2$ نیز منجر به افزایش بیشتر حد روانی و کاهش بیشتر شاخص خمیری در خاک رسی شده است. این ویژگی موجب می‌شود تا کارایی خاک در عملیات خاکی بالا رود که این امر به‌ویژه در کارهای راهسازی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. افزایش مقادیر LL و PL با افزایش مقدار غلظت باکتری (OD_{600}) و نیز نسبت مولاریته مواد مغذی ($Urea\text{-}CaCl_2$)، بیانگر این مطلب است که رسوب کلسیت ناشی از روش MICP باعث می‌شود که بلورهای کلسیت تشکیل شده در فضای حفره‌ای همانند یک پل ارتباطی بین ذرات خاک، پیوندهایی ایجاد می‌کنند و بنابراین، بدینوسیله چسبندگی یا به‌عبارت دیگر سیمانتاسیون بین ذره‌ای را در خاک افزایش می‌دهند.

نتایج آزمایش تورم یک‌بعدی

برای اندازه‌گیری میزان اثربخشی استفاده از روش MICP بر کاهش تورم خاک رس، آزمایش تورم یک‌بعدی بر روی نمونه‌های تیمار شده با استفاده از طرح آزمایش روش تاگوچی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است.

با بررسی نمودار آماری نمودار پراکندگی نشان داده شده در شکل ۶ موارد زیر را می‌توان به‌دست آورد:

برای فاکتور میزان غلظت باکتری (OD_{600})، کمترین میزان از تورم‌های قائم در مقدار OD برابر با ۲ صورت گرفته است. در نتیجه می‌توان گفت که کاهش میزان تورم ارتباط مستقیمی با میزان غلظت باکتری دارد به‌نحوی که افزایش غلظت باکتری منجر به کاهش میزان تورم بر حسب درصد می‌شود. این نتیجه را می‌توان به این نحو تفسیر کرد که باکتری بیشتر در محیط، باعث افزایش تجزیه اوره در محیط خواهد شد و در نتیجه شرایط مناسب‌تری را برای تولید کربنات و درنهایت تشکیل کلسیت ایجاد خواهد کرد. همچنین، برای فاکتور نسبت مولاریته مواد مغذی ($Urea/CaCl_2$)، با توجه به نمودار داده شده در بالا، بیشترین اثرگذاری برای کاهش درصد تورم خاک رسی، در نسبت برابر یا ۱/۵-۱/۵ مولار از مقادیر اوره و کلسیم کلراید انجام می‌شود. این نتیجه را نیز این‌گونه می‌توان تفسیر کرد که عملکرد فرایند رسوب کلسیت، به مقدار اوره و غلظت کلسیم کلرید بستگی دارد به‌نحوی که غلظت بیشتر اوره و کلرید کلسیم می‌تواند کلسیت بیشتری تولید کند. از طرفی نمی‌توان مقدار این دو ماده را در محیط بیش از اندازه زیاد کرد چرا که شرایط رشد و فعالیت باکتری نیز در این زمینه حائز اهمیت است.

با بررسی نتایج نمودارهای نشان داده شده در مورد مدت زمان تیمار خاک توسط ترکیب محلول باکتری و مواد مغذی، این نتیجه حاصل می‌شود که با گذشت زمان میزان اثرگذاری روش MICP بر روی میزان تورم خاک متورم‌شونده افزایش یافته و بیشترین میزان کاهش تورم خاک رسی، ۲۱ روز پس از اضافه‌کردن محلول باکتری و مواد مغذی انجام گرفته است. به‌طوری که هر چهار مقدار تورم ایجاد شده در آزمایش انجام گرفته در این زمان، زیر خط برازش داده شده قرار دارند. این نتیجه را این‌گونه می‌توان تفسیر کرد که افزایش مدت زمان تیمار خاک به روش MICP، باعث توزیع یکنواخت کلسیت بیشتری در توده خاک می‌شود. از طرفی توزیع یکنواخت کلسیت هنگامی قابل دسترس است که سلول‌های باکتری زمان کافی برای انجام واکنش داشته باشند و در واقع، به‌دلیل دسترسی بیشتر میکروارگانیسم به مواد مغذی و انجام فعالیت متابولیک بیشتر، به‌تدریج و با افزایش مدت زمان تیمار خاک، از میزان تورم خاک کاسته شده و به پایین‌ترین حد خود در ۲۱ روز یعنی به مقدار ۰/۱۲ درصد می‌رسد. در ادامه و با گذشت بیشتر زمان، به‌تدریج دوباره بر میزان درصد تورم خاک افزوده می‌شود که می‌تواند ناشی از کاهش فعالیت باکتریایی بعد از زمان خاصی باشد. همچنین، نتایج حاصل از شکل ۷ بیانگر این مطلب هستند که کمترین مقدار تورم ایجاد شده در خاک پس از تیمار به روش MICP، در میزان رطوبت ۲۰ درصد تا ۲۲ درصد

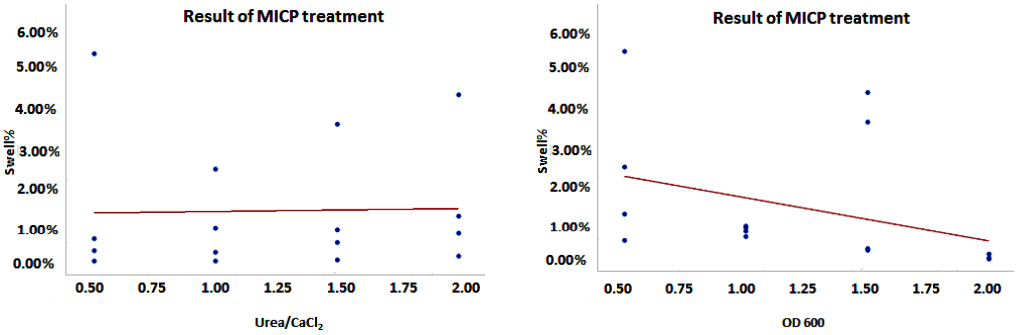
جدول ۶. نتایج آزمایش تورم یک بعدی

شماره آزمایش	میزان تورم قائم خاک ٪
T_1	٪ ۵/۳۹
T_6	٪ ۰/۹۶
T_{11}	٪ ۳/۶
T_{16}	٪ ۰/۲۵

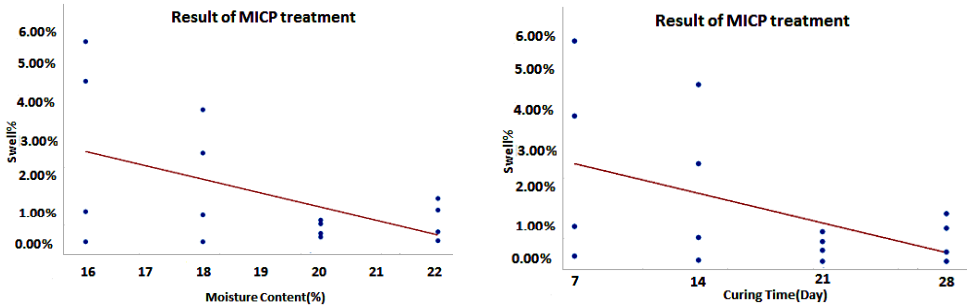
شماره آزمایش	میزان تورم قائم خاک ٪
T_2	٪ ۲/۴۶
T_5	٪ ۰/۷
T_{12}	٪ ۴/۳۵
T_{15}	٪ ۰/۱۵

شماره آزمایش	میزان تورم قائم خاک ٪
T_3	٪ ۰/۵۹
T_8	٪ ۰/۸۴
T_9	٪ ۰/۳۹
T_{14}	٪ ۰/۱۲

شماره آزمایش	میزان تورم قائم خاک ٪
T_4	٪ ۱/۲۶
T_7	٪ ۰/۹۲
T_{10}	٪ ۰/۳۴
T_{13}	٪ ۰/۱۳

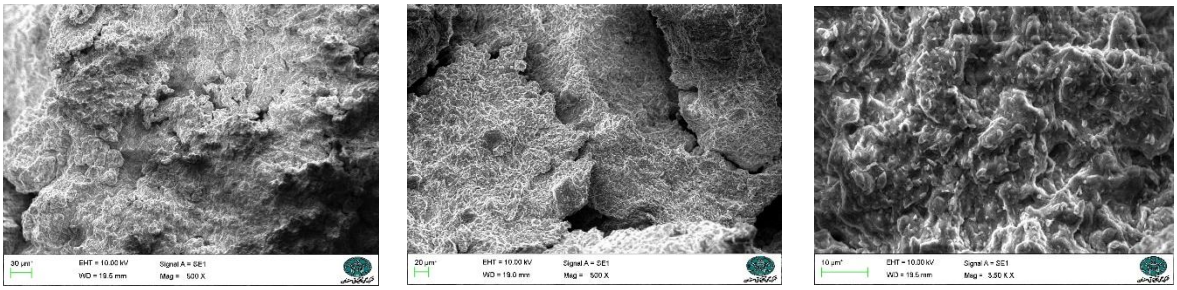


شکل ۶. میزان تأثیر مقدار غلظت باکتری (OD_{600})و نسبت مولاریته مواد مغذی ($Urea/CaCl_2$) به کمک روش MICP بر روی درصد تورم (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. میزان تأثیر مقدار مدت زمان تیمار خاک و میزان تأثیر مقدار رطوبت خاک به کمک روش MICP بر روی درصد تورم (رنگی در نسخه الکترونیکی)

انجام گرفته است. در میزان رطوبت ۲۰ درصد هر چهار مقدار به‌دست آمده برای درصد تورم خاک، زیر خط برازش داده شده قرار دارند. این میزان رطوبت بر اساس آزمایش تراکم اولیه صورت گرفته بر روی نمونه خاک رسی، در واقع همان میزان رطوبت بهینه یا (OMC) است. به‌صورت کلی رطوبت بیشتر خاک، محیط مناسب‌تری را برای رشد و فعالیت باکتری فراهم می‌کند.



شکل ۸. نتایج حاصل از تصویربرداری به کمک میکروسکوپ الکترونی

نتایج مقاومت برشی تک‌محوری

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش در حالت طبیعی، میزان مقاومت فشاری محدود نشده (q_u) نمونه خاک رس قبل از تیمار برابر با ۲/۴۷ کیلونیوتن بر مترمربع وحداکثر مقاومت برشی (τ_f) و همچنین مقاومت برشی زهکشی نشده (c_u) در این آزمایش برابر با ۱/۲۳۵ کیلونیوتن بر مترمربع است. برای بررسی تأثیر استفاده از روش MICP بر روی مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه رسی، باکتری با غلظت (OD_{600}) ۱/۵ را با مواد مغذی ($Urea/CaCl_2$) با مولاریته (۱/۵–۱/۵) و نسبت برابر در شرایط رطوبت بهینه، به نمونه خاک رسی افزوده و پس از ۷۲ ساعت (با حفظ رطوبت) نمونه را در غلاف استاندارد دستگاه قرار داده و مراحل آزمایش دوباره تکرار شد. پس از انجام آزمایش، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونهq_u برابر با ۵/۹۰ کیلونیوتن بر متر مربع و در نتیجه مقدار مقاومت برشی حداکثر (τ_f) و نیز مقاومت برشی زهکشی نشده (c_u) در این آزمایش برابر با ۲/۹۵ کیلونیوتن بر مترمربع حاصل شد.

برای بررسی تأثیر میزان افزایش غلظت باکتری روی مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک رسی، در آزمایش بعدی مقدارغلظت باکتری (OD_{600}) برابر با ۲ درنظر گرفته شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش، برای خاک رسی تیمار شده به کمک روش MICP و درحالتی که غلظت باکتری مورد استفاده برابر با ۲ و نسبت مولاریته مواد مغذی برابر باشد، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونه q_u برابر با ۷/۰۵ کیلونیوتن بر مترمربع حاصل می‌شود و در نتیجه مقدار مقاومت برشی حداکثر (τ_f) و نیز مقاومت برشی زهکشی نشده (c_u) در این آزمایش برابر با ۳/۵۳ کیلونیوتن بر مترمربع است. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت برشی تک‌محوری انجام گرفته بر روی نمونه خاک رسی قبل و بعد از تیمار آن با استفاده از روش MICP، مشاهده می‌شود مقدار مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت برشی حداکثر (τ_f) و نیز مقاومت برشی زهکشی نشده (c_u) پس از افزودن محلول باکتری به‌همراه مواد مغذی اوره و کلسیم کلرید به خاک رسی، افزایش قابل توجهی داشته است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده و افزایش مقدار مقاومت برشی و مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک رسی بعد از تیمار به کمک روش MICP، می‌توان گفت با توجه به اساس کار دستگاه مقاومت برشی تک محوری، درحالتی که هیچ‌گونه بار جانبی به خاک وارد نمی‌شود، چسبندگی به‌عنوان مقاومت برشی در خاک درنظر گرفته می‌شود. و با توجه به اینکه وجود باکتری و مواد مغذی اوره و کلرید کلسیم در خاک باعث افزایش میزان چسبندگی خاک می‌شود. بنابراین، مقدار مقاومت برشی نمونه خاک رسی بعد از تیمار به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. از طرفی در مقاومت برشی زهکشی نشده، بارگذاری به سرعت انجام شده و فرصتی برای فرار آب از داخل نمونه خاک وجود ندارد. بنابراین، فشار آب حفره ای، مقداری بیش از صفر است. بخشی از نیروی اعمال شده توسط آب و بخشی دیگر توسط اسکلت خاک تحمل می‌شود. باکتری *Sporosarcina pasteuri* از نوع باکتری‌های اوره‌آز مثبت و با فعالیت اوره‌آزی بسیار بالا است و به‌عنوان کاتالیزگر عمل میکند

و اوره موجود یا اضافه شده به محیط را تجزیه میکند و به آمونیوم، بی کربنات‌ها و یون‌های کربنات تبدیل می‌کند و به علت وجود یون‌های کلسیم در خاک، با یون‌های کربنات پیوند می‌خورند و باعث رسوب کربنات کلسیم می‌شوند که در بین دانه‌های خاک سمنتاسیون ایجاد می‌کند و همین فرایند باعث بالاتر رفتن مقاومت برشی و مقاومت فشاری محدود نشده نمونه می‌شود.

تصویربرداری به کمک میکروسکوپ الکترونی (SEM) Scanning Electron Microscopy

به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیرات ناشی از تیمار به کمک روشMICP بر روی خاک رسی متورم‌شونده مورد آزمایش، نمونه خاک قبل و بعد از تیمار با غلظت باکتری‌های (OD_{600}) ۱ و ۱/۵ و با نسبت مولاریته مواد مغذی ($Urea/CaCl_2$) برابر با ۱/۱-۵/۵، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی در شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان، تصویربرداری شد. همانطور که در شکل ۸ مشخص است، بلورهای کلسیت پس از تیمار به روش MICP بر روی دانه‌های خاک تشکیل شده و فضای حفره‌ای بین دانه‌ای را پر کرده است که این فرایند در ادامه باعث افزایش چسبندگی بین دانه‌های خاک شده و منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی توده خاک می‌شود.

نتیجه‌گیری

با جمع‌بندی کلیه نتایج به‌دست آمده از روند تحقیقاتی صورت گرفته بر روی میزان اثرگذاری روش MICP بر روی کاهش تورم خاک رسی متورم شونده می‌توان موارد زیر را به‌صورت کلی بیان کرد:

- بر اساس نتایج آزمایش تورم یک بعدی انجام گرفته بر روی خاک رسی متورم‌شونده قبل و بعد از تیمار به روش بیوزیستی و به بیان دیگر بیوسیمانتاسیون MICP، این روش راهکاری مؤثر برای کاهش میزان تورم خاک‌های رسی متورم شونده محسوب می‌شود به‌نحوی که، در صورت رسیدن رطوبت به خاک پس از تیمار با این روش، درصد تورم کمتری در خاک نسبت به حالت قبل از آن، قابل مشاهده است.
- مطابق با نتایج آزمایش حدود اتربرگ انجام گرفته بر روی نمونه خاک متورم شونده بهسازی شده به طریق MICP، به‌کارگیری این روش باعث افزایش حد خمیری و حد روانی و کاهش شاخص خمیری خاک می‌شود. این ویژگی موجب می‌شود تا کارایی خاک در عملیات خاکی بالا رود که این امر به‌ویژه در کارهای راهسازی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.
- به واسطه بلورهای کلسیت تشکیل شده در طول فرایند ناشی از آنزیم‌های اوره‌آز تولید شده توسط باکتری، همانند یک پل ارتباطی بین ذرات خاک، پیوندهایی ایجاد می‌کنند و بنابراین، بدینوسیله چسبندگی و به‌عبارت دیگر سیمانتاسیون بین ذره‌ای را در خاک رسی متورم شونده، افزایش می‌دهند.
- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت برشی تک محوری بر روی نمونه خاک تیمار شده به کمک روش MICP در این پژوهش مطابق با نتایج آزمایشات صورت گرفته توسط چیتوری و همکاران (۳) بیانگر این موضوع بود که استفاده از روش MICP بر روی خاک رسی، باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری محدود نشده خاک و نیز مقاومت برشی زهکشی نشده آن می‌شود.
- این روش می‌تواند با خنثی کردن بار الکتریکی منفی سطح ذرات رس که عامل اصلی جذب رطوبت و افزایش حجم خاک است و نیز کلسیم تولید شده طی فرایند تیمار، جایگزین کاتیون‌های تک ظرفیتی اطراف ذرات رس شده و پتانسیل تورمی آن را کاهش دهد.
- نتایج به‌دست آمده از این پژوهش همانند نتایج پژوهش‌های سدجادی و همکاران (۱۳) نشان داد که استفاده از باکتری با غلظت بیشتر، برابر بودن نسبت مولاریته مواد مغذی اوره و کلرید کلسیم، به‌کارگیری رطوبت بهینه برای خاک و نیز افزایش مدت زمان تیمار خاک به کمک روش MICP، بیشترین بازدهی را در جهت کاهش میزان تورم خاک به‌همراه خواهد داشت.

- نتایج حاصل از تصویربرداری به کمک میکروسکوپ الکترونی بیانگر این موضوع است که بلورهای کلسیت پس از تیمار به روش MICP بر روی دانه‌های خاک تشکیل شده و فضای حفره‌ای بین‌دانه‌ای را پر می‌کند.

با توجه به اینکه مواد به‌کار رفته برای تیمار خاک، اثرات مخرب زیست‌محیطی به‌همراه ندارند، بنابراین، استفاده از این روش برای بهسازی پایدار خاک‌های متورم‌شونده نسبت به سایر روش‌های بهسازی خاک با استفاده از مواد شیمیایی و یا پلیمری، توصیه می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Al Qabany, A., K. Soga and C. Santamarina. 2012. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138(8): 992-1001.
2. ASTM D 4546. 1996. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
3. Chittoori, B., T. Rahman, M. Burbank and A. A. B. Moghal. 2019. Evaluating shallow mixing protocols as application methods for microbial induced calcite precipitation targeting expansive soil treatment. *In:* Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
4. De Jong, J. T. 2010. Bio-mediate soil improvement. *Ecological Engineering* (36):197-210.
5. De Jong, J. T., B. C. Martinez, B. M. Mortensen and D. C. Nelson. 2009. Up scaling of bio-mediated soil improvement. *In:* 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. The International Award-Winning Bibliotheca Alexandrina in Alexandria, Egypt.
6. Gollapudi, U., C. Knutson, S. Bang and M. Islam. 1995. A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere* 30: 695-705.
7. Ismail, M., H. Joer, M. Randolph and A. Meritt. 2002. Cementation of porous materials using calcite. *Journal of Geotechnique* 52(5):313-324
8. Ivanov, V and J. Chu. 2008. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 7(2):139-153.
9. Liu, B., C. Zhu and C. S. Tang. 2020. Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP). *Journal of Engineering Geology* 264: 105389.
10. Martinez, B. C., T. H. Barkouki, J. T. DeJung and T. R. Ginn 2011. Upscaling of Microbial Induced Calcite Precipitation in 0.5m Columns: Experimental and Modeling Results. *In*: ASCE Geo-Institute Annual Conference: Geo-Frontiers, Dallas, Texas, USA.
11. Mirmohammad Sadeghi, M. 2016. Evaluation of factors affecting the shear strength of the biologically treated sandy soil using Taguchi method. *Modares Civil Engineering Journal* 16(3): 191-202.
12. Nelson, J. D. and D. J. Miller. 1992. Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. John Wiley and Sons, New York, USA.
13. Sadjadi, M., E. Nikooee and G. Habibagahi. 2014. Biological Treatment of Swelling Soils Using Microbial Calcite Precipitation. PP. 917-922. In: Khalili, N., A.R. Russell and A. Khoshghalb (Eds.), Unsaturated Soils: Research and Applications, CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
14. Stocks-Fischer. 1999. Microbiological precipitation of $CaCO_3$. *Soil Biology and Biochemistry* (31): 1563-1571.
15. Van Paassen, L. A., R. Ghose, T. J. M. Van der Linden, W. R. L. Van der Star and M. C. M. Van Loosdrecht. 2010. Quantifying bio-mediated ground improvement by ureolysis: a large scale biogrout experiment. *ASCE Journal for Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(12): 1721-1728.
16. Van Paassen, L. A. 2009. Ground improvement by microbial induced carbonate precipitation. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
17. Whiffin, V. S., L.A. Van Paassen, and M. P. Harkes. 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Journal of Geomicrobiology* 24(5): 417-423.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 27, No. 2, Summer 2023, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Performance Evaluation of MICP Method for Sustainable Improvement of Expansive Soils

A. R. Eftekhari[1], M. Mirmohammad Sadeghi[2*] and A. Jalalian[3]

(Received: May 8-2022 ; Accepted: February 8-2023)

Abstract

The use of biotechnology-based methods in the field of geotechnical engineering has led to the birth of new knowledge of biogeotechnology and several studies have been conducted using this new knowledge in various geotechnical issues including reducing permeability and increasing shear strength, especially in sandy soils and the desired results have been obtained. Nevertheless, little research has been done using biogeotechnology in the field of improving the mechanical properties of clay soils, especially in reducing the swelling of expansive soils, which is considered one of the types of problematic soils. The main cause of swelling of expansive soils is the presence of montmorillonite clays in these types of soils. Using chemical additives to stabilize expansive soils such as lime and cement is a common practice. However, environmental concerns related to greenhouse gas production caused by the production of chemical substances and the destructive effects of these substances on the environment and soils have encouraged researchers to use other sustainable stabilization alternatives. Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) is a technique that can be a promising solution to solve this problem. The objective of the present study was to investigate the effect of the MICP method on the swelling of expansive clay soils and its effect on the mechanical strength of this type of soil. One-dimensional swelling tests, uniaxial compressive strength tests, and Atterberg limits tests were performed on clay soil with a liquid limit of 53 using Sporosarcina pasteurii bacteria, calcium chloride, and urea as nutrients. Taguchi's method was used for the design of the experiments and the statistical analysis of the results. This method designs experiments through partial factorial and reduces their number without a significant effect on the results. Bacterial concentration, nutrient molarity ratio, treatment time, and soil moisture were selected as four factors with Four levels of variation. The results showed that the (MICP) method was effective in reducing the swelling potential of expansive soils and also caused a significant increase in the unconfined compressive strength of the soil and its undrained shear strength.

Keywords: Soil bioremediation, Expansive soils, Microbial induced carbonate precipitation

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2. Niro Research Institute (NRI), Higher Educational and Research Complex of the Ministry of Energy.
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
*: Corresponding author, Email: MmSadeghi@nri.ac.ir