

## کاربردهای میدانی رسوب میکروبی کربنات کلسیم در بهسازی خاک؛ چالش‌ها و فرصت‌ها

مهدی ملکی کاکلر\* و محسن یاوری<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۱۲)

## چکیده

در سال‌های اخیر، بهسازی زیستی خاک بر پایه رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) به‌عنوان یک شاخه جدید در مهندسی ژئوتکنیک مطرح شده و هدف آن نیز بهبود خواص مکانیکی خاک است. امکان استفاده از MICP در حل مسائل ژئوتکنیکی از قبیل روانگرایی و فرسایش باعث شده این روش سازگار با محیط زیست، کم‌هزینه و مناسب به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های متداول بهسازی خاک مطرح شود. با این حال، با وجود استفاده گسترده از این فناوری در مقیاس آزمایشگاهی، تعداد کمی از کاربردهای میدانی برای ارزیابی کارایی آن در مقیاس بزرگ اجرا شده است. از این رو، این مقاله بررسی جامعی در مورد این روش زیستی، نقش فرایندهای بیولوژیک در مهندسی ژئوتکنیک و عوامل تأثیرگذار فرایند به ویژه در کاربرد مقیاس بزرگ آن ارائه می‌کند. هدف اصلی این بررسی، ارزیابی پارامترهای اصلی محدود کننده اجرای روش در مقیاس میدانی است. در نهایت پیشرفت لازم برای استفاده صنعتی از این فناوری و چالش‌های اصلی پیش رو برای تحقیقات آینده قبل از کاربرد عملی آن به‌طور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: سیمان بیولوژیک، اوره‌آز، رسوب میکروبی کربنات، مقیاس میدانی

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان  
\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mmaleki@znu.ac.ir

## مقدمه

سیالیت ماسه‌های سست (روانگرایی) که با فرسایش خاک همراه است، می‌تواند باعث تشکیل پایبندگی (فرسایش داخلی رسوبات شن و ماسه توسط مجرای جریان آب زیرزمینی) شده و به سرعت به زیرسازه‌های مهندسی مانند سدهای خاکی منتقل شود. شکست ناگهانی و فاجعه‌آمیز اغلب منجر به از دست دادن زندگی و پیامدهای بزرگ مالی است. اصلاح و بهسازی خاک اغلب به منظور امن و پایدار کردن سازه‌ها انجام می‌پذیرد. در یک دهه گذشته با توجه به افزایش جمعیت در محیط‌های شهری و کاهش محیط‌های مناسب برای ساختمان‌سازی، نیاز به بهسازی افزایش یافته است (۳).

استراتژی‌های کاهش خطر شامل روش‌های مختلف بهسازی خاک از قبیل متراکم‌سازی و مخلوط کردن خاک است که به دلیل صرف هزینه و انرژی بسیار بالا اغلب برای حجم بزرگی از خاک مناسب نیست. در روش‌های دیگر بهسازی خاک به منظور کاهش پایبندگی و روانگرایی، مواد سیمانی کننده مانند سیمان بسیار ریز (Micro-fine cement)، اپوکسی (Epoxy) و پلی اورتان (Polyurethane) به درون حفرات خاک تزریق می‌شود (۱۳). با توجه به مشکلات زیست محیطی ایجاد شده و نیز مسئله انرژی مصرفی بالای این روش‌ها، لزوم ایجاد روش‌هایی جایگزین برای اصلاح خاک که مناسب‌تر و منطبق‌تر با محیط زیست باشد ضروری به نظر می‌رسد. یکی از نویدبخش‌ترین فرایندها، اصلاح زیستی خاک با استفاده از رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP: Microbial Induced Carbonate Precipitation)

است که در آن فرایند زمین - شیمیایی اصلاح خاک با فعالیت میکروب‌ها تسهیل می‌شود. این واکنش‌ها در حفرات موجود در ساختار خاک رخ می‌دهد و در نتیجه یک رسوب از مواد معدنی تشکیل خواهد شد که خواص فیزیکی شیمیایی خاک را تغییر می‌دهد (۱۲ و ۲۰). از سوی دیگر این روش اصلاح دارای مواد مصرفی ارزان و کم خطر است که آسیب کمتری به محیط زیست وارد می‌کند و از آن

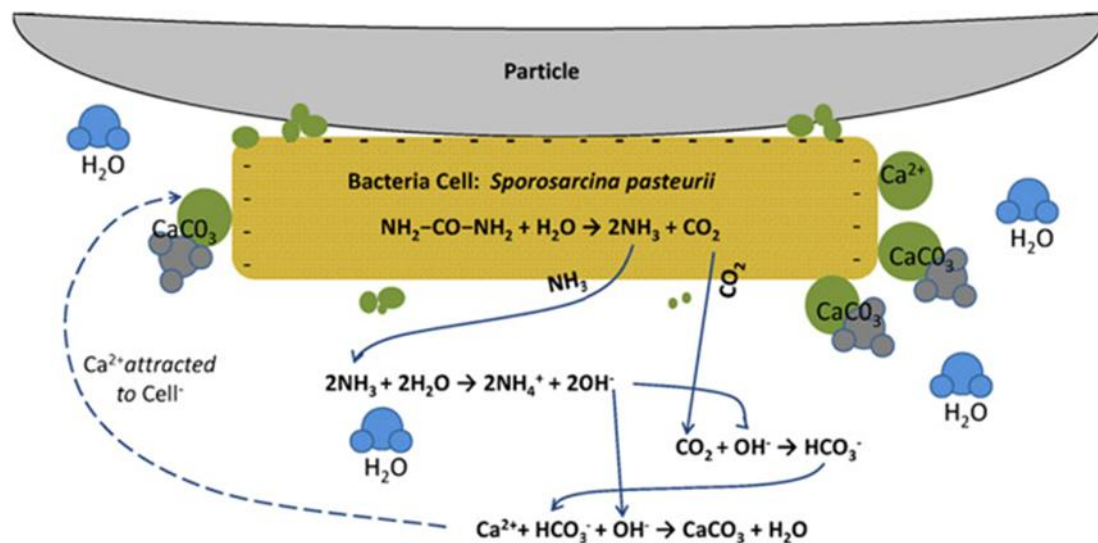
می‌توان علاوه بر تثبیت خاک‌های روان به منظور جلوگیری از انتشار گردوغبار، برای جلوگیری از روانگرایی خاک و عواقب غیرقابل اجتناب آن، ممانعت از ایجاد پایبندگی در سدها و خاکریزها و پایدارسازی خاک‌ها قبل از ساخت تونل بهره گرفت (۵ و ۱۴).

اولین بحث‌های جدی در زمینه واکنش‌های زیستی در مهندسی ژئوتکنیک را میچل و سانتاماریا در سال ۲۰۰۵ ارائه کردند و همزمان این موضوع به عنوان یک زمینه تحقیقاتی مهم توسط انجمن تحقیقات ملی آمریکا برای قرن بیست و یکم تعیین شد (۱۹). در سال ۲۰۰۸ با اجلاس زیست-زمین-عمران (Bio-geo-civil) و چندین نشست تخصصی در اجلاس‌های ملی و بین‌المللی، مقالاتی در مورد پتانسیل استفاده از این زمینه ارائه شد. تاکنون، پژوهشگران در زمینه ژئوتکنیک، برنامه‌های تحقیقاتی چندرشته‌ای (Multidisciplinary studies) را برای توسعه استراتژی‌ها و پیشبرد این زمینه در حال ظهور با هدف شناسایی چالش‌های اصلی و فرصت‌های پیش رو انجام داده‌اند (۷)

این تحقیق به نقش فناوری بهسازی زیستی خاک بر پایه رسوب میکروبی کربنات (MICP)، به منظور برنامه‌های مقاوم سازی خاک می‌پردازد. پارامترهای اصلی محدود کننده اجرای این روش به‌ویژه در مقیاس میدانی ارزیابی و همچنین پیشنهادهایی برای اجرای آن در مقیاس میدانی ارائه شده است.

## مکانیسم اثر رسوب میکروبی کربنات کلسیم

ساده‌ترین و معمول‌ترین مکانیسم برای تشکیل رسوب میکروبی کربنات استفاده از یک باکتری یورولیتیک (Ureolytic bacteria) (دارای فعالیت آنزیمی اوره‌آز) به عنوان کاتالیزور واکنش‌های بیوشیمیایی است که این باکتری در محیط آزمایشگاهی کشت شده و سپس به درون خاک تزریق می‌شود. این روش زیستی با استفاده از باکتری‌های یورولیتیک که در خاک و محیط زیست طبیعی به‌وفور یافت می‌شوند، می‌تواند باعث سیمانی



شکل ۱. نمادینی از رسوب بیولوژیک کلسیت درون ساختمان خاک (۵)

پوشانده می‌شوند. درنهایت با محدود شدن تدریجی انتقال مواد مغذی سلول باکتریایی احاطه شده در میان رسوبات از بین رفته و مواد زائد از سیستم خارج می‌شود (شکل ۲) (۷).

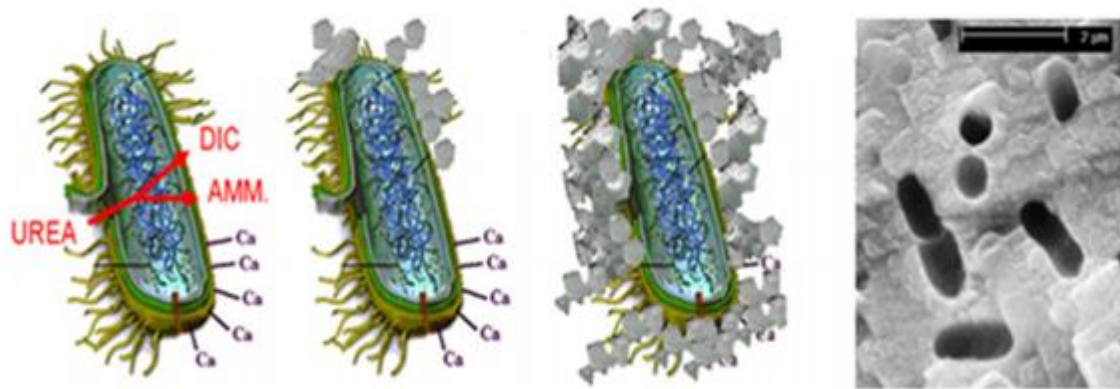
بیشترین مطالعات رسوب میکروبی کربنات از طریق هیدرولیز اوره با استفاده از باکتری *Bacillus pasteurii* (ATCC 6453) بوده که هم اکنون تحت عنوان *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859) طبقه‌بندی شده است. مواردی از قبیل حساسیت کم تحت شرایط غلظت بالای نمک، فعالیت آنزیمی بالا (۳۱) و عدم لخته شدن (۳) را می‌توان از جمله دلایل استفاده گسترده از این باکتری دانست.

#### عوامل مؤثر در کنترل کارایی MICP

کارایی فناوری زیستی MICP بستگی مستقیم با توزیع فضایی رسوب میکروبی و همچنین نوع کریستال تشکیل شده کربنات کلسیم دارد (۵). از این رو عوامل مؤثر بر این روش از قبیل فعالیت آنزیمی، دسترسی به محل‌های هسته‌زایی، pH، دما، درجه اشباع، غلظت محلول‌های واکنش دهنده، نرخ تزریق مواد مغذی، عمق نفوذ باکتری‌ها و منحنی دانه‌بندی خاک باید کنترل شود.

شدن قابل کنترل و در نرخ بسیار سریع (کمتر از ۲۴ ساعت) در مقایسه با سیمانی شدن شیمیایی شود (۵). مجموعه واکنش‌های بیوشیمیایی شامل هیدرولیز اوره توسط باکتری و تولید آمونیاک و دی‌اکسید کربن درنهایت منجر به رسوب زیستی رسوب کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) می‌شود. روند کلی واکنش‌های شیمیایی که درون توده خاک رخ می‌دهد به صورت نمادین در شکل ۱ نشان داده شده است (۵).

سلول‌های باکتری نیز به دلیل آنکه یون هیدروکسید بر دیواره آنها قرار گرفته است دارای بار الکتریکی منفی هستند و به سطح دانه‌های خاک که دارای غلظت به نسبت بالایی از مواد مغذی نسبت به محیط اطراف خود هستند، می‌چسبند (۳۱). از سوی دیگر یون کلسیم نمک کلسیم‌دار نیز بر اثر بار منفی موجود بر دیواره سلول باکتری جذب آن می‌شود. به محض اضافه شدن اوره به محیط، باکتری‌ها یون‌های کربنات معدنی و آمونیوم در محیط آزاد می‌کنند. در حضور یون کلسیم، این امر می‌تواند منجر به ایجاد محیط فوق اشباع موضعی شود که باعث ایجاد رسوب غیریکنواخت کربنات بر دیواره سلول شده که خواص مکانیکی خاک بهبود می‌یابد. در صورت وجود سوبسترا و فعالیت آنزیمی کافی همه سطح سلول‌ها توسط رسوبات

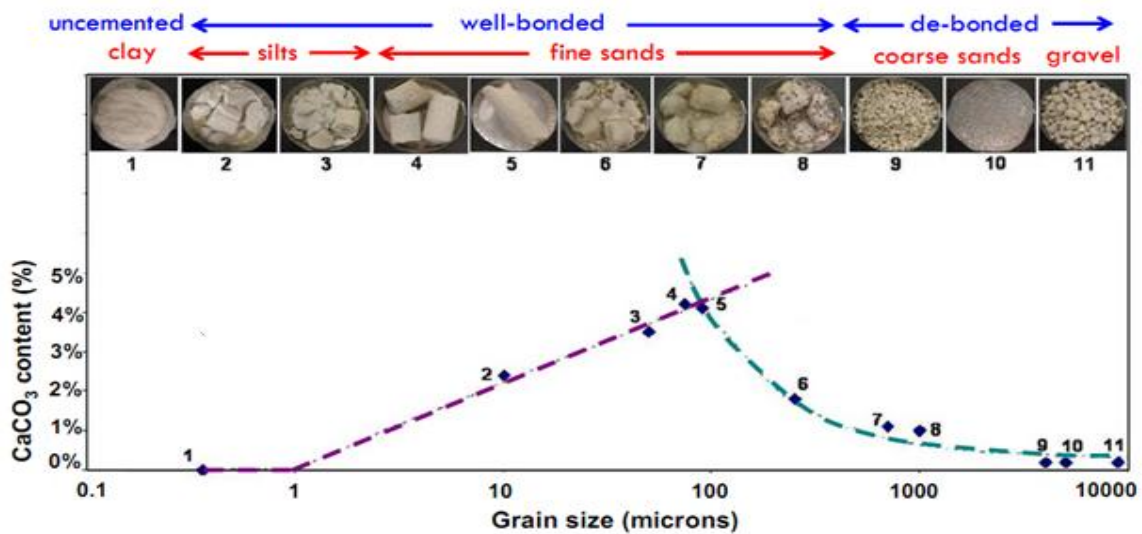


شکل ۲. شکل ساده‌ای از آنچه در حین رسوب کلسیم کربنات تحت اثر آنزیم اوره‌آز رخ می‌دهد (۷).

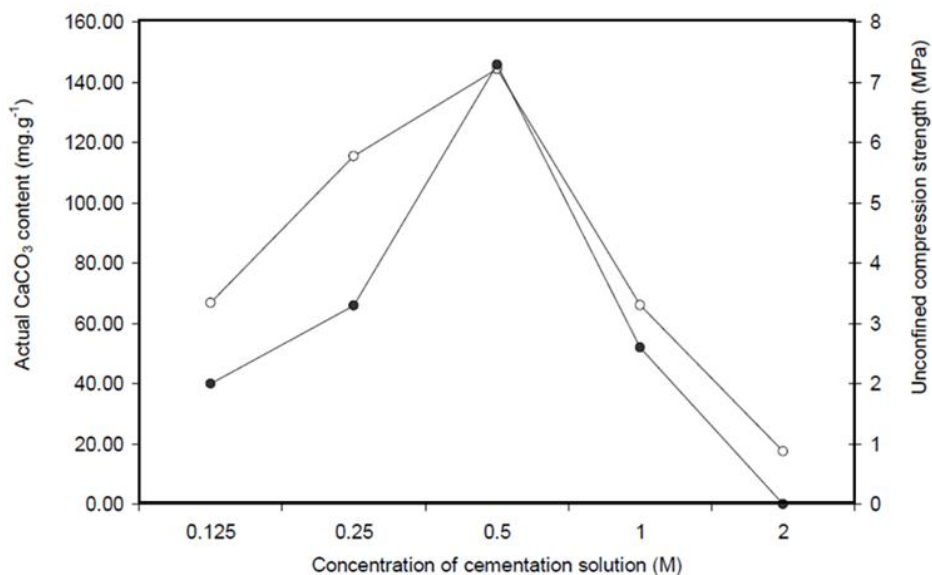
نسبت داد و همچنین رسوب نامناسب در خاک‌های درشت‌دانه را ناشی از ناکافی بودن رسوب ایجاد شده برای اتصال دانه‌های درشت خاک به یکدیگر و تعداد کم نقاط اتصال بین خاک‌های درشت‌دانه بیان کرد (۲۴).

از سوی دیگر تولید بیولوژیک پایدار و مداوم کریستال‌های کربنات کلسیم به‌طور مستقیم با رشد سلولی و فعالیت‌های آنزیمی اوره‌آزی مرتبط است (۶). استوکس فیشر و همکاران نشان دادند که فعالیت اوره‌آزی به‌سرعت از pH ۶ تا ۸ افزایش می‌یابد و به بالاترین مقدار خود در pH برابر ۸ می‌رسد و در pHهای بالاتر به‌تدریج کاهش می‌یابد، اما از آنجا که با افزایش pH میزان  $\text{CO}_3^{2-}$  تولیدی افزایش می‌یابد بنابراین میزان pH برابر با ۹ برای فعالیت بهینه اوره‌آز در رسوب کربنات کلسیم توصیه شده است (۱). در مورد اثر دما روی فعالیت آنزیمی، دمای بهینه برای فعالیت اوره‌آزی میکروب‌ها در حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. با این حال این دمای بهینه برای فعالیت اوره‌آزی (۶۰ درجه سلسیوس) چه در آزمایشگاه و چه در صحرا به‌منظور عمل‌آوری خاک غیر اجرایی است. با توجه به واکنش‌های هیدرولیز و رسوب فرایند زیستی، غلظت واکنش دهنده‌ها (مانند اوره و کلسیم کلرید) و درجه شوری آنها بر روند رسوب بیولوژیک کربنات کلسیم اثر می‌گذارد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است نرخ افزایش رسوب انجام شده و همچنین تولید مقاومت

جابه‌جایی باکتری‌ها و باقی‌ماندن آنها درون شبکه حفرات متصل به هم موجود در خاک بستگی به اندازه نسبی دانه‌ها (بزرگی ورودی حفرات نسبت به یک باکتری یا توده باکتری‌ها)، اندرکنش الکتریکی، زبری سطح و شکل سلول‌ها دارد (۲۴). اندازه آنها معمولاً در محدوده ۵/۰ تا ۳ میکرومتر است. میکروب‌های خاک از طریق حفرات بین ذرات خاک جابه‌جا می‌شوند. سازگاری ژئومتریک باکتری‌های تولیدکننده اوره‌آز به‌دلیل این که جابه‌جایی باکتری‌ها در خاک لازمه عمل‌آوری خاک است، اهمیت دارد (۲۲). حرکت باکتری‌ها در خاک بستگی به نسبت اندازه قطر حفرات به اندازه باکتری یا باکتری‌های به هم چسبیده، اندرکنش‌های الکتریکی، زبری سطح و شکل سلول‌ها دارد (۲۹). وجود مقادیر بالایی از سیلت و رس در خاک مانع از حرکت میکروب‌ها می‌شود که بر نحوه توزیع باکتری‌ها در خاک اثر می‌گذارد؛ بنابراین لازم است به نوع خاک، اندازه حفرات بین دانه‌های خاک و اندازه باکتری‌ها در هنگام انتخاب باکتری مناسب برای ایجاد رسوب کلسیت توجه شود (۲۲). ریباتا-لاندا با رسم تغییرات اندازه دانه‌ها در برابر میزان رسوب کربنات کلسیم (شکل ۳) دریافت که بیشترین میزان رسوب کربنات کلسیم در دانه‌هایی با اندازه حدوداً ۱/۰ میلی‌متر ایجاد می‌شود. او کاهش رسوب ایجاد شده در خاک‌های ریزدانه را به پایین آمدن نرخ فعالیت باکتری‌ها و عدم نفوذ مناسب مواد مغذی در خاک‌های با دانه‌بندی ریز



شکل ۳. تغییرات مقدار منحنی دانه‌بندی با تغییر اندازه دانه‌ها (۲۴)

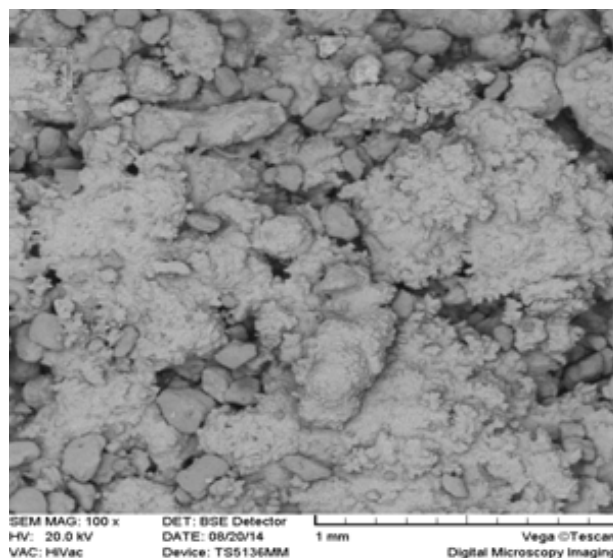


شکل ۴. تأثیر افزایش غلظت کلرید کلسیم در نرخ رسوب‌گذاری (○) و افزایش مقاومت (●) در ستون ماسه (۱)

مانند روش تزریق و غلظت واکنش‌دهنده‌های شیمیایی کنترل می‌شود (۱۷). از آنجایی که باکتری‌ها به‌عنوان بیوکاتالیست می‌توانند باعث تشکیل  $\text{CaCO}_3$  از محلول‌های سیمانی کننده شوند بنابراین تزریق و نگهداشت باکتری‌ها در داخل ماتریس خاک مهم است. باکتری‌های تولید کننده اوره‌آز باید در هنگام تزریق به‌صورت یکنواخت در خاک توزیع و تثبیت شوند. جذب باکتری‌ها به سطح دانه‌های خاک بستگی به رژیم

کاملاً بستگی به غلظت کلسیم دارد. البته روند افزایش رسوب با افزایش غلظت واکنش‌دهنده‌ها تنها برای غلظت‌های مشخصی حاکم است. درجه شوری بالا که بیشتر تحت تأثیر نمک کلسیم است می‌تواند فعالیت میکروبی را کاهش دهد و بدین شکل میزان تولید آنزیم اوره‌آز توسط میکروب‌ها را کاهش داده یا از بین ببرد.

علاوه بر این، میزان رسوب کلسیت با عوامل بیوشیمیایی



شکل ۵. ماسه عمل‌آوری شده تحت تزریق پیش مخلوط به همراه پاشش (۱۴)

مطالعات انجام شده توسط التاودی (Al-Thawadi) با اضافه کردن یون کلسیم به محلول باکتری‌ها میزان چسبیدن باکتری‌ها به خاک قبل از تزریق به میزان ۲ تا ۴ برابر افزایش می‌یابد (۱).

مطالعات وسیعی بر روش مناسب‌تر و مطلوب‌تر ایجاد رسوب بیولوژیک کلسیم کربنات انجام گرفته است. بیشتر تحقیقات انجام شده بر ایجاد رسوب بیولوژیک کلسیم کربنات با استفاده از روش تزریق بوده است که مشابه تزریق دوغاب مواد مصنوعی برای اصلاح خاک است. تاکنون سه روش اصلی تزریق در منابع مورد بررسی قرار گرفته است: (۱) تزریق محلول‌های واکنش دهنده (محلول سماتاسیون و باکتری) در خاک‌های اشباع شده (۱، ۱۱ و ۱۵). (۲) تزریق نفوذ سطحی (Surface percolation) در خاک‌های غیراشباع (۲۳ و ۳) روش پیش‌مخلوط به همراه پاششی (۱۴ و ۱۶). شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه‌ای از ماسه عمل‌آوری شده تحت تزریق پیش مخلوط به همراه پاشش را نشان می‌دهد (۱۴).

بررسی اثر غلظت محلول واکنش دهنده با تزریق غلظت‌های برابر محلول کلسیم کلرید و اوره نشان می‌دهد با تغییرات غلظت واکنش دهنده‌ها از ۰/۱۲۵ مولار تا ۲ مولار بیشترین میزان رسوب کربنات کلسیم در غلظت ۰/۵ مولار اوره و کلسیم

جریان، ویژگی‌های دیواره سلولی و بار الکتریکی سطح آنها، دانه‌بندی خاک، ساختار سطح و کانی‌شناسی خاک، شیمی محلول باکتری‌ها شامل pH، نوع و غلظت یون‌ها و کربن آلی حل شده دارد (۱۱). همچنین روش‌های نامناسب تزریق ممکن است منجر به قرار گرفتن باکتری‌ها تنها در چند نقطه یا خروج از خاک همراه با محلول تزریقی شوند. مطالعات چگونگی توزیع باکتری‌ها و پایدار کردن باکتری‌ها در یک نمونه ۱۸ سانتی‌متری از ماسه نشان می‌دهد اگر ابتدا به اندازه حجم حفرات (Pore volume) خاک، محلول تثبیت‌کننده نمکی (شامل محلول کلسیم کلرید ۵۰ میلی‌مولار) و سپس محلول رقیق نشده باکتری‌ها به درون خاک تزریق شود تقریباً تمامی باکتری‌ها درون نمونه خاک باقی می‌ماند. غلظت بالای محلول پایدارکننده (محلول بسیار رقیق نمکی که پس از تزریق باکتری‌ها، برای ثابت کردن باکتری‌ها در محلشان تزریق می‌شود) لخته شدن باکتری‌ها را افزایش می‌دهد و در نتیجه جذب باکتری‌ها و ثابت شدن آنها را در ستون ماسه افزایش می‌دهد (۱۱). برای جذب مناسب باکتری‌ها به سطح دانه‌های خاک لازم است که جریان محلول پایدارکننده سرعت پایینی داشته باشد تا فرصت کافی برای واکنش باکتری‌ها با محلول پایدارکننده وجود داشته باشد (۱۱). همچنین بر اساس

فرایند اصلاح و بهسازی زیستی خاک، مقاومت خاک‌های ماسه‌ای را در برابر روانگرایی بالا برده و همچنین باعث بهبود خواص دینامیکی در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری نشده می‌شود (۲۰). از دیدگاه هیدرولیکی، مقاومت خاک با استفاده از روش MICP افزایش یافته درحالی که کاهش شدید نفوذپذیری در ماسه‌های عمل‌آوری شده رخ نمی‌دهد. ویفین و همکاران (۳۲) نیز با عمل‌آوری یک ستون ماسه به ارتفاع ۵ متر دریافتند که میزان نفوذپذیری در همه ستون تا حدودی کاهش می‌یابد اما این مقدار کاهش ثابت نیست و به‌نظر نمی‌رسد که با مقدار رسوب کلسیت متناسب باشد (شکل ۶). آنها عدم وجود رابطه‌ای دقیق بین نفوذپذیری و میزان کاهش آن را به‌دلیل ناهمگنی تشکیل رسوب کربنات کلسیم در طول ستون خاک توجیه کرده‌اند. با توجه به یافته‌های آنها میزان مقاومت نمونه‌های اصلاح شده بیولوژیک به‌طور چشمگیری تحت تأثیر میانگین مقدار رسوب کربنات کلسیم ایجاد شده است درحالی که نفوذپذیری بیشتر تحت تأثیر ناهمگن بودن رسوب ایجاد شده است. به‌عبارت دیگر یک نقطه کوچک با نفوذپذیری کم به‌شدت بر میزان نفوذپذیری نمونه تأثیر می‌گذارد درحالی که مقاومت فشاری خیلی کمتر تحت تأثیر ایجاد رسوب تنها در یک محل کوچک است (۲۸) و (۳۲). همچنین هنگام ورود جریان آب در توده خاک، این روش مانع فروشویی ذرات ریزدانه شده که این امر مانع از فرسایش و رسوب داخلی خاک می‌شود.

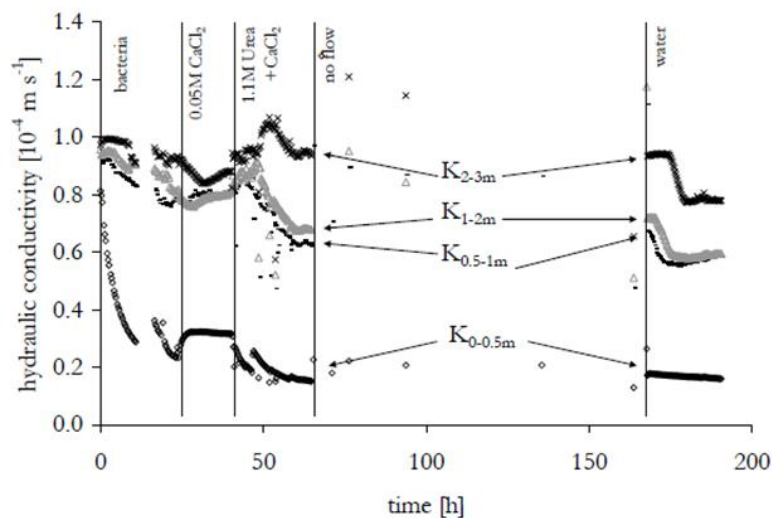
#### آزمایش‌های مقیاس بزرگ

چندین آزمایش میدانی و مقیاس بزرگ برای امکان‌سنجی و کارایی MICP در محل بهسازی خاک انجام شده است. اولین تلاش در مقیاس کامل برای بهسازی منطقه بندری روتردام در هلند در سال ۲۰۰۴ انجام شد. استفاده از MICP با موفقیت نفوذپذیری خاک ماسه‌ای را کاهش و همچنین عملکرد خوبی را در طولانی‌مدت نشان داد. در سال ۲۰۰۵ از روش بهسازی زیستی برای جلوگیری از نفوذ آب‌های شور زیرزمینی در کانال‌های آب هارلیمیرمیر (Haarlemmermeer) واقع در خطوط

کلرید حاصل می‌شود (۱). از سوی دیگر توزیع کریستال‌های کربنات کلسیم در فضاهای خالی در مقیاس ذرات (mm) اهمیت فراوان دارد. توزیع رسوب تشکیل شده با ضخامت کم در اطراف دانه‌های خاک به‌دلیل اتصال کم دانه‌ها تأثیر قابل ملاحظه در ویژگی‌های مکانیکی خاک نداشته، ولی توزیع مناسب رسوب در حالتی که رسوب تنها در نقاط تماس دانه‌های خاک با یکدیگر ایجاد می‌شود باعث بهبود ویژگی‌های خاک می‌شود. از سوی دیگر توزیع همگن کریستال‌ها در داخل ماتریس خاک ماسه‌ای در غلظت پایین محلول سماتاسیون رخ می‌دهد (۲۲). چنگ و همکاران (۲) نشان دادند که مقاومت بالای MICP ایجاد شده در حالت غیراشباع به‌دلیل تشکیل کریستال‌های کلسیت در مکان‌های مؤثر میان ذرات خاک است.

#### ویژگی‌های مهندسی بهبود یافته خاک

فرایند اصلاح زیستی خاک مبتنی بر ایجاد پیوند در تماس ذرات خاک با یکدیگر است. این مکانیسم تشکیل رسوب باعث بهبود مقاومت مکانیکی در عین حال کاهش نفوذپذیری و افزایش محتوای جامد می‌شود (۵). از ویژگی‌های مهندسی خاک که در روش اصلاح زیستی تحت تأثیر قرار می‌گیرند می‌توان به مقاومت، سختی، نفوذپذیری و پایداری در برابر روانگرایی و فرسایش بادی اشاره کرد (۱۰، ۱۴، ۲۸). کارایی روش زیستی به‌منظور بهبود مقاومت ماسه و همچنین ریزدانه در مقیاس آزمایشگاهی کاملاً اثبات شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مانند چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) تابعی از محتوای کریستال‌های کلسیت رسوب شده هستند (۲). بسیاری از پژوهشگران از مقاومت فشاری نامحدود (UCS) برای توصیف استحکام ماسه‌های عمل‌آوری شده زیستی استفاده کرده‌اند که نتایج حاصل حاکی از رابطه مستقیم مقاومت نمونه با مقدار رسوب کربنات کلسیم است (۲، ۱۵ و ۳۲). علاوه بر این، با استفاده از این روش سختی یا مدول الاستیسیته خاک (E) بهبود یافته (۲) و سختی برشی حداکثر (Small-strain shear stiffness) نیز با استفاده از این روش افزایش می‌یابد (۱۸).



شکل ۶. کاهش نفوذپذیری در طول ستون به دست آمده بعد از عمل آوری بیولوژیک (۲۸)

خشک متوسط  $1560 \text{ kg/m}^3$  عمل آوری کرد (شکل ۹) (۲۹). در این عمل آوری، محلول به صورت پیوسته از سه چاه تزریق شد و با طی فاصله‌ای به طول ۵ متر در جعبه به سمت چاه‌های خروجی حرکت کرده و نرخ جریان کلی تقریباً  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  و گرادیان هیدرولیکی  $0.3 \text{ m/m}$  بود. بعد از عمل آوری توده  $100 \text{ m}^3$  ماسه با آب شسته شد و توده ماسه سیمانی شده به حجم  $40$  مترمکعب که به خطوط جریان هیدرولیکی (Hydrological flow field) محدود شده بود به دست آمد. خطوط جریان به ویژه در نزدیکی چاه‌های خروجی به سهولت دیده می‌شود (شکل ۱۰-الف).

ون پس دریافت که سمناسیون در طول خط جریان همگن است در حالی که مقدار کلسیت رسوب کرده در جهت عمود بر جریان به شدت تغییر می‌کند. همچنین با ایجاد یک مقطع قائم در طول خط جریان (شکل ۱۰-ب) دیده شد که مقدار کریستال‌های کربنات کلسیم از  $0.8$  تا  $24$  درصد وزن خشک تغییر می‌کند. آزمایش‌های مقیاس بزرگ حاکی از مقاومت بالای ایجاد شده در اثر رسوب کربناتی بود، با این حال توزیع مقدار کلسیت رسوب شده در هر دو آزمایش ناهمگن بود. انتقال ناهمگن واکنشگرها و مسیرهای ترجیحی جریان که منجر به افزایش محتوای کلسیم کربنات در آن نقاط در مقایسه با سایر

راه آهن پرسرعت آمستردام-پاریس بهره گرفته شد (شکل ۷) (۲۶).

فشار بالای آب‌های شور زیرزمینی در ماسه پلیستسن (Pleistocene) باعث جریان آب‌های شور به سمت بالا می‌شد که با توجه به اکوسیستم پیچیده و حساس منطقه هارلیمیر میر استفاده از روش بهسازی و انسداد (Biosealing) زیستی به دلیل سازگاری با محیط زیست تنها راه حل ممکن بود. با استفاده از شرایط و روش‌های مشابه با عملیات مقیاس بزرگ، امکان‌پذیری فرایند بهسازی زیستی با رویکرد گام به گام از حجم  $1$  مترمکعب به  $100$  مترمکعب نمونه ماسه توسط ون پس دنبال شد (۲۹). ابتدا یک مخزن با ابعاد  $(9/10 \times 1/1 \times 1)$  متر) با ماسه پر شده به طوری که چاه تزریق در مرکز آن (برای شبیه‌سازی تزریق کروی از یک نقطه یکپارچه) و فیلترهای زهکشی در کناره‌های قرار داشت. سوسپانسیون باکتریایی و محلول‌های واکنش دهنده سیمان کننده (اوره / کلسیم کلرید  $0.5$  مولار) از مرکز مخزن با سرعت جریان ثابت تزریق شد. حجم کل تزریقی محلول سیمانی شدن،  $3500$  لیتر بود که به طور متوالی از طریق ۸ فرایند ناپیوسته (بیچ) و در طول  $50$  روز تزریق شد (شکل ۸).

با استفاده از تجربیات حاصل از این آزمایش، ون پس یک جعبه بتنی (به ابعاد  $2.5 \times 6 \times 8$  متر) را با ماسه مرطوب و تراکم





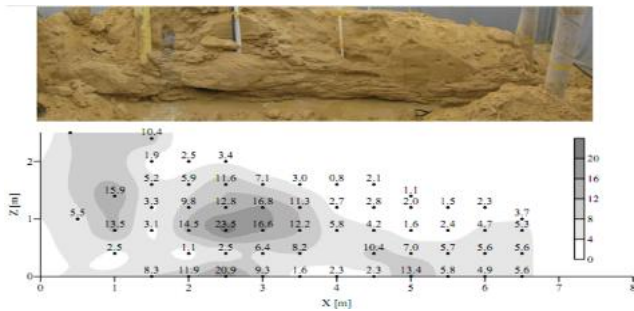
شکل ۷. استفاده از روش بهسازی و انسداد زیستی در کانال قطار سریع‌السیر در هارلم‌میر (۲۶)



شکل ۸. خاک عمل‌آوری شده به‌روش زیستی در آزمایش با حجم ۱ متر مکعب (۲۹)



شکل ۹. آزمایش بزرگ مقیاس (  $m^3 100$  ) شامل سه چاهک تزریق و سه چاهک تخلیه برای تزریق محلول به حجم خاک قبل و بعد از عمل‌آوری (۲۹)



ب) مقطع طولی عبوری از وسط چاهک‌های مرکزی که مقدار کرنبات کلسیم را نشان می‌دهد.



الف) الگوی سیمانی شدن توده سیمانی شده به حجم  $100 \text{ m}^3$

شکل ۱۰. الگوی سیمانی شدن و توزیع آن در آزمایش بزرگ مقیاس تزریق ( $100 \text{ m}^3$ ) (۲۹)

که در آن ۵ ناحیه (تزریق / استخراج) برای محدوده‌ای به اندازه  $3 \times 3 \times 150$  متر به کار رفته است. هر ناحیه دارای یک نقطه تزریق در هسته و یک نقطه استخراج در گوشه‌های منطقه هدف ( $5/5 \times 150 \times 0$ ) بود که در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. هدف از این آزمایش، عمل‌آوری ماسه اوتواوا با دانه‌بندی ( $50-70 \mu\text{m}$ ) بود که با تزریق محلول‌ها به ماسه اشباع شده انجام می‌شد.

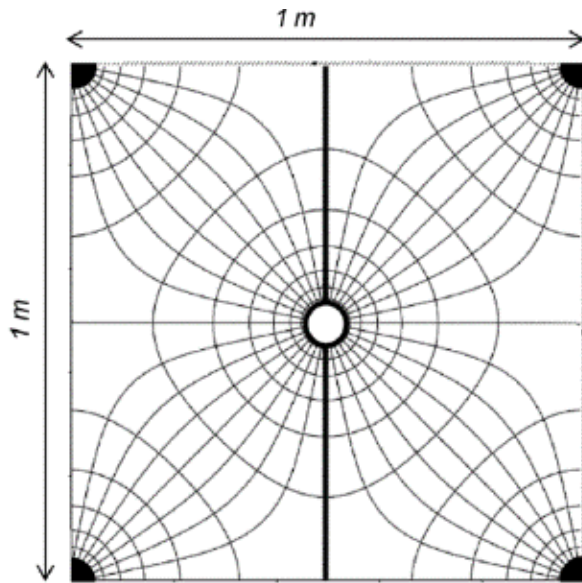
فرایند MICP در دو مرحله انجام شد. مرحله اول شامل جریان  $30$  لیتری سوسپانسیون باکتریایی در یک محلول غنی از اوره در طی  $50$  ساعت ناپیوسته بود (فرایند در طول شب متوقف می‌شد). فاز دوم در دو چرخه انجام گرفت که شامل تزریق محلول دارای یون کلسیم با سرعت جریان بالا در  $1$  ساعت و سپس دوره استراحت  $2$  ساعته بود. چرخه اول در جهت جریان تزریق باکتری، درحالی که چرخه دوم در جهت معکوس انجام می‌شد ( $18$ ). عمل‌آوری یکنواخت و همگن تحت شرایط میکروبی بسیار فعال انجام گرفت ولی به دلیل انسداد چاه تزریقی، امکان انجام فاز دوم تزریق میسر نشد.

گومز و همکاران (۹) یک مطالعه میدانی در استفاده از MICP برای جلوگیری از گردوغبار و فرسایش ماسه‌های سست در اطراف معدنی در استان ساسکاچوان کانادا انجام دادند. در عمق  $28$  سانتی‌متر خاک، بهسازی انجام شده و تشکیل پوسته سیمانی

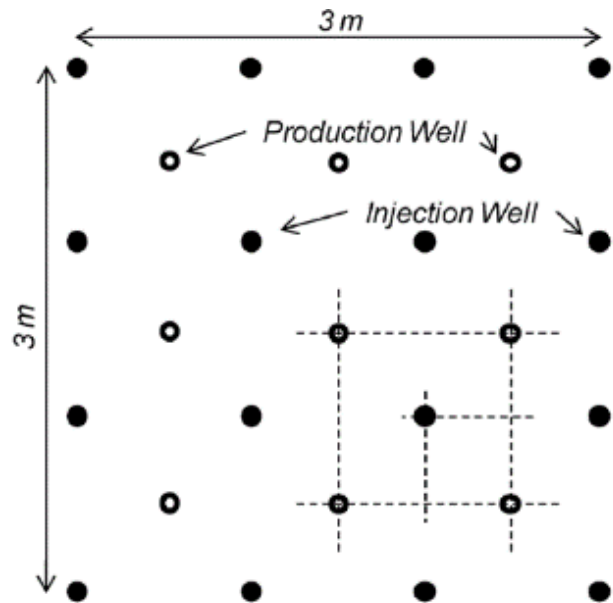
نقاط می‌شد از جمله دلایل ذکر شده برای توجیه این ناهمگنی در این آزمایش‌ها بود.

یکی دیگر از آزمایش‌های میدانی انجام شده توسط ون پسن (۲۹) برای پیدا کردن راه حلی برای تثبیت گمانه در بستر شنی بود. این آزمایش ابتدا در مقیاس آزمایشگاهی در یک مخزن  $3$  متر مکعبی پر شده با شن انجام گرفت. انجام حفاری در جهت افقی این طرف نشان‌دهنده انجام موفقیت‌آمیز روش بود که با توجه به آن آزمایش میدانی در مقیاس بالا صورت گرفت. حجم کل خاک  $1000$  مترمکعب در عمق بین  $3$  تا  $20$  متر پایین‌تر از سطح مورد عمل‌آوری بیولوژیک قرار گرفت که برای این منظور  $200 \text{ m}^3$  سوسپانسیون باکتری و  $300$  تا  $600 \text{ m}^3$  از محلول‌های سیمانی‌کننده حاوی اوره و کلسیم کلرید استفاده شد. به‌علت آزاد شدن یون‌های آمونیوم، آب‌های زیرزمینی آلوده شده با این آلاینده به‌منظور تصفیه آن استخراج شد. استخراج آب تا رسیدن غلظت آمونیوم در آن به مقدار قبل از انجام آزمایش عمل‌آوری انجام شد و در طی این مرحله آب به یک تصفیه‌خانه محلی منتقل شد. نتایج عمل‌آوری نشان داد که در طی عملیات حفاری پایداری لایه شنی حفظ شده و لوله‌گذاری خط‌گاز نیز بدون نشست و فروریختگی انجام شد.

دی جونگ و همکاران (۴) نیز یک روش عمل‌آوری سه بعدی برای پیاده سازی MICP در مقیاس میدانی را توسعه دادند. این روش براساس الگوی جریان نشان داده شده در شکل ۱۱-الف بود



ب) خطوط جریان و خطوط پتانسیل برای منطقه تحت عمل آوری زیستی در ابعاد (۵/۵×۰/۱۵×۰) متر



الف) طرح الگوی جریان شامل چاهک‌های تزریق و استخراج

شکل ۱۱. الگوی تکراری پنج نقطه‌ای طراحی شده توسط دی جونگ و همکاران (۴)

آزمیزی از بیوکلسیس برای عمل آوری و بهسازی خاک ماسه‌ای دارای ریزدانه سیلت در جنوب فرانسه استفاده کردند. در آن محل علائم خوردگی و شکست در دیوار نگهدارنده یک پل بزرگ پدیدار شده بود. به دلیل وجود یک تراموا در زیر آن و همچنین وجود ساختمان‌های شخصی در مجاورت آن، ازدحام جمعیت در محل مذکور زیاد و همچنین سطح دسترسی به آن بسیار کم بود. از سوی دیگر عمر دیوار ۷۰ سال و از سطوح فشرده تقویت شده با میله‌های کششی فولادی زیرافقی ساخته شده بود. سیستم از پانل‌های بتونی پیش‌ساخته مجهز به اتصالات جاسازی شده (برای ثابت نگهداشتن میله‌های تقویت کننده فولادی) ساخته شده بود. عملیات میدانی بدون وقفه در ترافیک بزرگراه و بدون متوقف کردن تراموا انجام شد. علاوه بر این، با توجه به اینکه محل در منطقه شهری بود امکان اجرای تکنیک‌های متداول وجود نداشت. همچنین به دلیل اینکه فضای موجود در جلوی دیوار برای قرار دادن دستگاه حفاری کافی نبود، میخ‌کوبی خاکی انجام نشد. از سوی دیگر، تزریق جت ملاط فشار

شده با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر مقاومت در برابر فرسایش را افزایش داد. یافته‌های تحقیق مذکور MICP می‌تواند یک روش امیدوار کننده برای جلوگیری از فرسایش در مقیاس بزرگ تر باشد. نتایج همچنین نشان داد که استفاده از محلول با غلظت کم در مقایسه با غلظت‌های متوسط و بالا باعث بیشترین افزایش مقاومت می‌شود که علت این موضوع می‌تواند با همگنی توزیع رسوب در کل نمونه مرتبط باشد (۹).

سولتانچ باچی (Soletanche-bachy) یک پیمانکار فرانسوی، روش خودش را برای اجرا در مقیاس صنعتی کانی‌سازی بیولوژیک توسعه داد و این روش را فرایند بیوکلسیس (Biocalcis) نامید. در سال ۲۰۰۹، کارایی این فرایند صنعتی در یک آزمایش پایلوت انجام شده در هلند که با مشارکت دو شرکت VSF و Deltares انجام شد، مورد تأیید قرار گرفت. این آزمایش پایلوت منجر به امکان‌سنجی روش و همچنین ارزیابی هزینه‌ها شد (۸). اشنالت فیلت و همکاران (۸) به‌طور موفقیت



شکل ۱۲. مقاوم سازی دیوار نگهدارنده خاک با استفاده از روش بیوکلسیس در مقیاس میدانی (۸)

می شود.

#### محدودیت ها و چالش های روبه رو در کاربرد میدانی روش

##### زیستی و پیشنهادها

تکنیک های مختلفی برای بهبود عملکرد این روش در مقیاس متر استفاده شده است. اگرچه پیشرفت هایی در این عرصه از طریق تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته با این حال برخی از مسائل مانع توسعه این راهکار زیستی در مقیاس میدانی شده است. از این آزمایش ها در مقیاس بزرگ، محدودیت های متعدد کاربرد MICP در مقیاس میدانی باید مورد توجه قرار گیرد:

**مواد سمی:** آمونیوم و نترات محصولات جانبی هیدرولیز اوره هستند. تولید غلظت های بالای این ترکیبات، اثرات سمی بر سلامت انسان و پوشش گیاهی، ایجاد کرده و علاوه بر آن اکوسیستم های زمینی را نیز در معرض آلودگی قرار می دهند. در نتیجه کنترل این مواد آلاینده طی عملیات زیستی به لحاظ رعایت استانداردهای قانونی زیست محیطی ضروری به نظر می رسد (۲۱). حجم قابل توجهی از واکنش های شیمیایی و محلول های میکروبی در طول فرایند MICP به خصوص در کاربرد میدانی آن تولید می شوند. البته بعضی از پژوهشگران استفاده مجدد پساب های غنی از آمونیاک را به عنوان کود برای گیاهان پیشنهاد می کنند (۵). البته در سال های اخیر یک

بالا با توجه به امکان ایجاد خطرات پایداری در سازه فراهم نبود. در نهایت اینکه بتن پرکننده از مواد فشرده با نفوذپذیری بسیار پایین تشکیل شده بود (نفوذپذیری کمتر از  $10^{-6}$  متر بر ثانیه). با توجه با این محدودیت ها، بیوکلسیس پیشنهاد شد. امکان سنجی روش با استفاده از خاک محل پس از تست آزمایشگاهی و پایلوت تأیید شد. این بهسازی توسط ۲۳ دیواره افقی با عرض ۵ متر در ۳ خط تزریق انجام شد که دارای زهکشی در پایه ناحیه تزریق بود (شکل ۱۲). حجم کل برابر با ۱۰۰ متر مکعب با بیش از ۳ متر ارتفاع و طول ۶ متر پرشیومتری (Coring and pressiometric tests) برآورد شد (۱۰).

این آزمایش ها قابلیت انجام روش مقاوم سازی دیوار را تأیید کرده و یک راه حل نهایی را ارائه می دهد که شامل یک بلوک زیستی می شود. این بلوک زیستی همانند یک سازه نگهدارنده عمل می کند که می تواند تکیه گاهی برای پایداری سازه اصلی و همچنین مهاری برای جلوگیری از ریزش خاک های اطراف باشد.

انجام این آزمایش ها از یک سو بر مزایای استفاده از فرایندهای بهسازی زیستی خاک تأکید داشته و از سوی دیگر چالش های مهم پیش رو در اجرای آن را در مقیاس میدانی برجسته می کنند که در ادامه به آنها اشاره

**امکان‌سنجی:** پارامترهایی مانند سرعت جریان تزریق، تعداد، حجم و غلظت تزریق، عوامل کلیدی تأثیرگذار در اجرای موفقیت آمیز MICP هستند. این پارامترها باید در آزمایشگاه مورد بررسی قرار بگیرند که این مسئله می‌تواند زمان‌بر و هزینه‌بر باشد. این در حالی است که در استفاده از تکنیک‌های متداول بهسازی خاک پارامترها کاملاً قابل کنترل بوده و کارایی آنها را در طول سال‌ها اثبات شده است. مزیت استفاده از فناوری‌های بهسازی زیستی خاک این است که استفاده از آن طبیعی بوده و در ساختارهای موجود اختلال و مزاحمتی ایجاد نمی‌کند (۸). با این‌حال، برخی از مراحل طراحی ممکن است برای افزایش آگاهی و آموزش در صنعت مورد نیاز باشد. از سوی دیگر مطالعات آماری شامل کنترل دقیق اطمینان / کیفیت، عملیات نظارت در حین انجام فرایند و حفظ استانداردها برای فرایندهای مجدد عمل‌آوری و بهسازی باید مورد توجه قرار گیرد.

**عملکرد:** مدل‌هایی برای بهینه‌سازی اثرات زمان و هزینه شده با هدف اجرای بهسازی زیستی در محل ارائه شده است (۹). با وجود پیشرفت‌های قابل توجه پژوهشگران در زمینه عمل‌آوری همگن در ماتریس خاک، این موضوع یکی از ضعف‌های اصلی در کاربرد روش‌های زیستی است. با وجود این، هنگامی که متغیرها از جمله تعداد تزریق، روش تزریق، غلظت واکنش دهنده‌ها و جریان تزریق، به‌طور کامل کنترل شوند، بهسازی یکنواختی می‌تواند ایجاد شود. تمام این پارامترها بسته به شرایط میدان، نقطه هدف‌گذاری شده و نتایج اولیه در مقیاس آزمایشگاهی تعیین می‌شوند.

**ماندگاری:** بهسازی زیستی برای یک کاربرد خاص نیازمند دوام و ماندگاری مطابق با الزامات آن کاربرد است. اگر شرایط قلیایی در محل عمل‌آوری رخ دهد انتظار می‌رود MICP برای بیش از ۵۰ سال ماندگاری داشته باشد و برای افزایش دوام آن نیز باید از عمل‌آوری گاه به گاه استفاده شود (۲۰). مطالعات طول عمر و ماندگاری در هنگام تماس با باران اسیدی نشان داد که

روش جدید برای رسوب بیولوژیک کربنات کلسیم با استفاده از پسماندها نیز پیشنهاد شده که از آن تحت عنوان روش نیترات‌زدایی (Denitrification) یاد می‌شود. در این روش همراه با روند کاهش نیترات به‌منظور تولید گاز نیتروژن، اسیدهای چرب به کربنات تبدیل می‌شوند. در روش نیترات-زدایی به‌دلیل آنکه هم اسید چرب و هم نیترات می‌توانند به‌صورت نمک کلسیم وارد سیستم شوند نیازی به اضافه کردن نمک کلسیم به خاک نیست. در ضمن در این روش می‌توان باکتری‌ها را به‌صورت درجا در خاک رشد داد. از روش نیترات‌زدایی برای تولید گاز در خاک برای کاهش خطر روانگرایی و استفاده از فاضلاب‌های غنی از مواد غذایی برای ایجاد رسوب استفاده شده است (۲۷ و ۳۰).

**هزینه:** هزینه کلسیم و اوره بالاتر از سیمان معمولی بوده که این عامل باعث بالا رفتن هزینه این فناوری می‌شود. با توجه به این موارد اجرای این فرایند نیاز به تحقیقات اولیه در مقیاس کوچک و آزمایشی قبل از ارتقا به مقیاس میدانی دارد (۲۸ و ۲۹). علاوه بر این، چاه‌های تزریق و استخراج می‌توانند بخش غیرقابل اغماض هزینه نهایی باشد. از نظر اقتصادی تهیه محیط کشت برای باکتری‌ها نیز می‌تواند به‌عنوان دیگر عامل محدود کننده در کاربرد فناوری MICP محسوب شود به‌طوری که استفاده از MICP در تثبیت شن‌های روان بر اساس روش ارائه شده در کار ملکی کاکلر و همکاران چیزی در حدود ۲۵۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال به ازای یک هکتار است. از این‌رو استفاده از محیط کشت‌های صنعتی ارزان‌قیمت مانند ملاس و یا عصاره خیسانه ذرت (Corn steep liquor) می‌تواند راهکاری برای کاهش هزینه‌های فرایندی تا ۳۰ درصد هزینه باشد (۱۶). هزینه کلی روش MICP (مواد، تجهیزات و نصب) در خاک‌های اشباع از ۲۵-۷۵ دلار آمریکا به ازای هر مترمکعب خاک متغیر بوده و بسته به مقدار رسوب کریستال‌های کربنات کلسیم تا حدود ۵۰۰ دلار آمریکا برای هر متر مکعب خاک می‌تواند هزینه داشته باشد (۵).

جدول ۱. خلاصه محدودیت‌ها و چالش‌های استفاده از روش زیستی و راهکار پیشنهادی برای غلبه بر آنها

محدودیت	توضیحات	راهکار پیشنهادی
مواد سمی	تولید آمونیوم و نیترات	استفاده از روش نیترات‌زدایی
هزینه	هزینه مربوط به کلسیم و اوره، هزینه حفر چاه‌های تزریق و استخراج و هزینه محیط کشت باکتری در مقایسه با روش‌های متداول	استفاده از محیط کشت‌های صنعتی ارزان‌قیمت مانند ملاس و یا عصاره خیسانده ذرت با کاهش حدود ۳۰ درصدی هزینه‌ها
امکان سنجی	زمان‌بر و هزینه‌بر بودن بررسی برخی پارامترهای عملیاتی در آزمایشگاه برای اجرای موفقیت‌آمیز MICP	افزایش آگاهی و آموزش در صنعت، عملیات نظارت در حین انجام فرایند و حفظ استانداردها برای فرایندهای مجدد عمل‌آوری
عملکرد	عدم عمل‌آوری همگن در ماتریس خاک	کنترل تعداد تزریق، روش تزریق، غلظت واکنش دهنده‌ها و جریان تزریق
ماندگاری	احتمال فرسایش در شرایط اسیدی	ارزیابی دقیق و مستمر تخریب درازمدت کریستال‌های رسوبی کربنات کلسیم

### نتیجه‌گیری

روش‌های اصلاح زیستی خاک در ۱۵ سال گذشته افزایش یافته و نتایج بیشماری از کاربرد این روش‌ها در مواجهه با مسائل ژئوتکنیک از قبیل بهینه‌سازی روش‌های زیستی، عوامل کلیدی تأثیرگذار بر فرایند و مدل‌سازی عددی در مراجع گزارش شده است. اکنون تحقیق باید روی تست و مدل‌سازی شرایط درجا و با توجه به نیازهای عملی در رابطه با پایداری، هزینه، عملکرد، امکان‌سنجی و ماندگاری متمرکز شود. فرصت‌ها و چالش‌ها برای برنامه‌های کاربردی ژئوتکنیک در این کار شناسایی شد تا مباحث را برای فرصت‌های آینده باز کنند.

فرسایش شدیدی رخ نمی‌دهد. تنها پس از جریان ۱۲ لیتر باران اسیدی متناظر با میزان بارش باران ۵ ساله (بارندگی ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال) روی دانه‌های ماسه عمل‌آوری شده فقط ۰/۷ گرم کاهش وزن مشاهده شد (۲). با وجود این، پیشنهاد می‌شود تخریب درازمدت کریستال‌های رسوبی کربنات کلسیم باید مورد ارزیابی دقیق واقع شود. همچنین کاربرد این فناوری ممکن است در مناطقی از جهان مانند بیابان‌ها انجام شود که در آن عواملی مانند دما، pH، آب‌وهوا برای اجرای آن مطلوب است. محدودیت‌ها و چالش‌های استفاده از روش زیستی و راهکار پیشنهادی برای غلبه بر آنها به‌طور خلاصه در جدول ۱ آمده است.

### منابع مورد استفاده

1. Al-Thawadi S. 2008. High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria. PhD Dissertation, Murdoch University.
2. Cheng, L., R. Cord-Ruwisch and M. A. Shahin. 2013. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal* 50: 81-90.
3. De Jong, J. T., B. M. Mortensen, B. C. Martinez and D. C. Nelson. 2010. Bio-mediated soil improvement.

- Ecological Engineering* 36: 197-210.
4. De Jong, J. T., M. B. Fritzges and K. Nüsslein. 2006. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132: 1381-1392.
  5. De Jong, J., B. Martinez, T. Ginn, C. Hunt, D. Major and B. Tanyu. 2014. Development of a scaled repeated five-spot treatment model for examining microbial induced calcite precipitation feasibility in field applications. *Geotechnical Testing Journal* 37: 424-435.
  6. De Muynck, W., K. Cox, N. De Belie and W. Verstraete. 2008. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials* 22: 875-885.
  7. De Muynck, W., K. Verbeke, N. De Belie and W. Verstraete. 2010. Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone. *Ecological Engineering* 36: 99-111.
  8. Filet, A. E., J. -P. Gadret, M. Loygue and S. Borel. 2012. Biocalcis and its applications for the consolidation of sands. *Grouting and Deep Mixing* 1767-1780.
  9. Gomez, M. G., B. C. Martinez, J. T. DeJong, C. E. Hunt, L. A. Delaming, D. W. Major and S. M. Deworatzek. 2015. Field-scale bio-cementation tests to improve sands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement* 168: 206-216.
  10. Haouzi, F. Z. and B. Courcelles. 2018. Major applications of MICP sand treatment at multi-scale levels: A review. *In: Conference Proceeding of GeoEdmonton, Edmonton, Canada.*
  11. Harkes, M. P., L. A. Van Paassen, J. L. Booster, V. S. Whiffin and M. Van Loosdrecht. 2010. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement. *Ecological Engineering* 36: 112-117.
  12. Jiang, N. -J., K. Soga and M. Kuo. 2016. Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 143: 04016100.
  13. Karol, R. H. 2003. Chemical Grouting and Soil Stabilization, Revised and Expanded. Crc Press, Boca Raton
  14. Maleki-Kakelar, M. and S. Ebrahimi. 2016. Up-scaling application of microbial carbonate precipitation: optimization of urease production using response surface methodology and injection modification. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13: 2619-2628.
  15. Maleki-Kakelar, M. M., S. Ebrahimi and M. Hosseini. 2016. Improvement in soil grouting by biocementation through injection method. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 11: 930-938.
  16. Maleki-Kakelar, M., S. Ebrahimi, F. Asadzadeh and M. E. Tabrizi. 2016. Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13: 937-944.
  17. Maleki-Kakelar, M., S. Ebrahimi, F. Asadzadeh. and M. E. Tarbizi. 2016. Evaluation of the Efficiency of Microbial Induced Carbonate Precipitation For Loose Sand Dunes Fixation. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 47: 407-415. (In Farsi)
  18. Martinez, B. 2012. Experimental and numerical upscaling of MICP for soil improvement. PhD Dissertation, University of California, Davis, CA, USA.
  19. Mitchell, J. K. and J. C. Santamarina. 2005. Biological considerations in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131: 1222-1233.
  20. Montoya, B. and J. Dejong. 2013. Healing of biologically induced cemented sands. *Geotechnique Letters* 3: 147-151.
  21. Mujah, D., M. A. Shahin and L. Cheng. 2017. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. *Geomicrobiology Journal* 34: 524-537.
  22. Ng, W. -S., M. -L. Lee, S. -L. Hii, W. -S. NG, M. -L. Lee and S. -L. Hii. 2012. An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 62: 723-729.
  23. Ozdogan, A. 2010. A study on the triaxial shear behavior and microstructure of biologically treated sand specimens. PhD Dissertation, University of Delaware, Newark, USA.
  24. Rebata-Landa, V. 2007. Microbial activity in sediments: effects on soil behavior. PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
  25. Stabnikov, V., M. Naeimi, V. Ivanov and J. Chu. 2011. Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement. *Cement and Concrete Research* 41: 1143-1149.
  26. Van Beek, V., J. Lambert, M. Blauw, P. De Louw and E. Faassen. 2008. Application of BioSealing for saltwater seepage reduction. *In: 10th International Conference on Soil-Water System, Milano, Italy.*
  27. Van Der Star, W. R., E. Taher, M. P. Harkes, M. Blauw, M. C. Van Loosdrecht and L. A. Van Paassen. 2009. Use of waste streams and microbes for in situ transformation of sand into sandstone. *In: Proceedings of International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories, Singapore, 9-11.*

28. Van Paassen, L. 2009. Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation. PhD Dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
29. Van Paassen, L. 2011. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications. *Geo-Frontiers 2011@ sAdvances in Geotechnical Engineering, ASCE* 4099-4108.
30. Van Paassen, L. A., C. M. Daza, M. Staal, D. Y. Sorokin, W. Vav der Zon and M. Van Loosdrecht. 2010. Potential soil reinforcement by biological denitrification. *Ecological Engineering* 36: 168-175.
31. Whiffin V. S. 2004. Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of biocement. PhD Dissertation, Murdoch University.
32. Whiffin, V. S., L. A. Van Paassen and M. P. Harkes. 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal* 24: 417-423.



## Field Scale Application of Microbial Induced Carbonate Precipitation in Soil Improvement: Challenges and Opportunities

M. Maleki-Kakelar\* and M. Yavari<sup>1</sup>

(Received: January 1-2019; Accepted: August 3-2019)

### Abstract

Biocementation through microbial induced carbonate precipitation (MICP) is a recently developed new branch in geotechnical engineering that improves the mechanical properties of bio-treated soils. The potential application of MICP to handle problems such as liquefaction and erosion has been established; this technique offers an environmentally friendly, cost-effective and convenient alternative to traditional soil improvement approaches. Nevertheless, in spite of the widespread demonstration of the process at laboratory scale, few field and practical applications have been implemented to assess the efficiency of the biochemical process. Therefore, this paper presents a review of the utilization of MICP for soil improvement and discusses the treatment process including the key constituents involved and the main affecting factors, especially in field scale applications. The major contribution of this research is to identify the main parameters restricting the application of this method on site. Finally, technical and commercial progress in the industrial adoption of the technology and the main challenges that are ahead for the future research prior to real practical application are briefly discussed.

**Keywords:** Biocement, Urease, Microbial Induced Carbonate Precipitation, Field scale

---

<sup>1</sup>- Department of Chemical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: mmaleki@znu.ac.ir