نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و چهارم / شماره اول / بهار ۱۳۹۹

مقاله مروری

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

مهدی ملکی کاکلر* و محسن یاوری[۱]

(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 این‌حال، 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 این‌رو، 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. درنهایت 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

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

سیالیت ماسه‌های سست (روانگرایی) که با فرسایش خاک همراه است، می‌تواند باعث تشکیل پایپینگ (فرسایش داخلی رسوبات شن و ماسه توسط مجرای جریان آب زیرزمینی) شده و به‌سرعت 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 به‌منظور 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 به‌دلیل صرف هزینه و انرژی بسیار بالا اغلب برای حجم بزرگی از خاک مناسب نیست. در روش‌های دیگر بهسازی خاک به‌منظور کاهش پایپینگ 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 زیست‌محیطی ایجاد شده و نیز مسئله انرژی مصرفی بالای این روش‌ها، لزوم ایجاد روش‌هایی جایگزین برای اصلاح خاک که مناسب‌تر و منطبق‌تر با محیط‌زیست باشد ضروری به‌نظر 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 درنتیجه 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 محیط‌زیست وارد می‌کند و از آن می‌توان علاوه بر تثبیت خاک‌های روان به‌منظور جلوگیری از انتشار گردوغبار، برای جلوگیری از روانگرایی خاک و عواقب غیرقابل اجتناب آن، ممانعت از ایجاد پایپینگ 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 به‌عنوان 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)

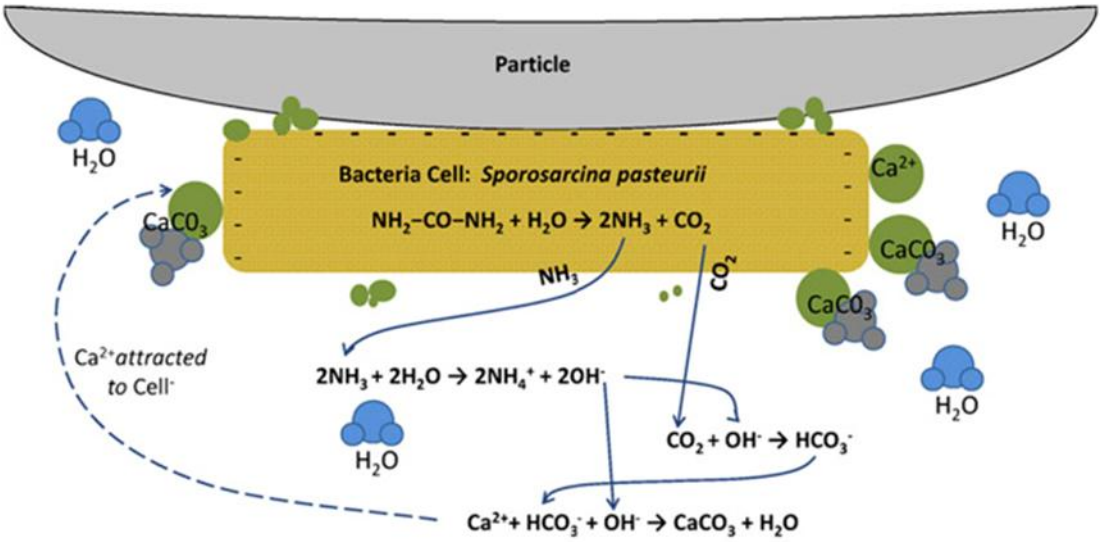
این تحقیق به نقش فناوری بهسازی زیستی خاک بر پایه رسوب میکروبی کربنات (MICP)، به‌منظور برنامه‌های مقاوم سازی خاک می‌پردازد. پارامترهای اصلی محدود کننده اجرای این روش به‌ویژه در مقیاس میدانی ارزیابی و همچنین پیشنهادهایی برای اجرای آن در مقیاس میدانی ارائه شده است.

مکانیسم اثر رسوب میکروبی کربنات کلسیم

ساده‌ترین و معمول‌ترین مکانیسم برای تشکیل رسوبی میکروبی کربنات استفاده از یک باکتری یورولیتیک (Ureolytic bacteria) (دارای فعالیت آنزیمی اوره‌آز) به‌عنوان 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 بافت می‌شوند، می‌تواند باعث سیمانی

www.SID.ir

Archive of SID



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

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 ($CaCO_3$) می‌شود. روند کلی واکنش‌های شیمیایی که درون توده خاک رخ می‌دهد به‌صورت نمادین در شکل ۱ نشان داده شده است (۵).

سلول‌های باکتری نیز به‌دلیل آنکه یون هیدروکسید بر دیواره آنها قرارگرفته است دارای بار الکتریکی منفی هستند و به سطح دانه‌های خاک که دارای غلظت به‌نسبت 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. درصورت وجود سوبسترا و فعالیت آنزیمی کافی همه سطح سلول‌ها توسط رسوبات 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).

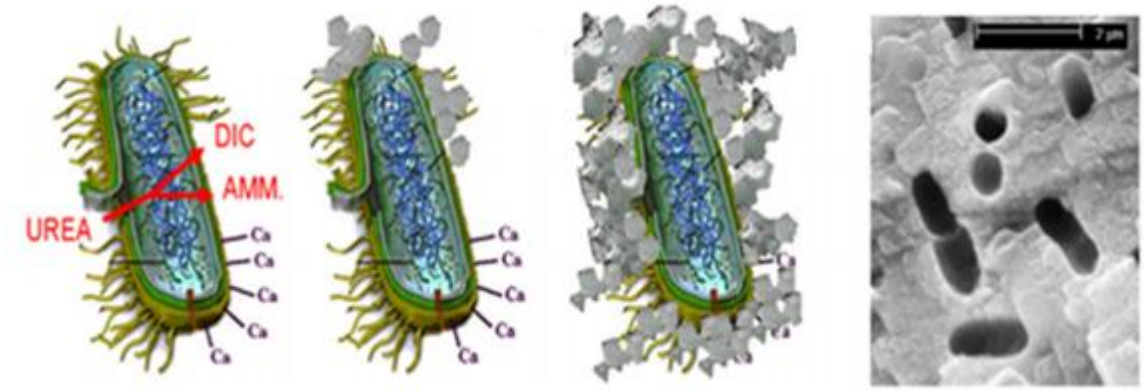
بیشترین مطالعات رسوب میکروبی کربنات از طریق هیدرولیز اوره با استفاده از باکتری *Bacillus pasteurii* (ATCC 6453) بوده که هم اکنون تحت عنوان *Sporsarcina pasteurii* (ATCC 11859) طبقه‌بندی شده است. مواردی از قبیل حساسیت کم تحت شرایط غلظت بالای نمک، فعالیت آنزیمی بالا (۳۱) و عدم لخته شدن (۳) را می‌توان از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

www.SID.ir

Archive of SID



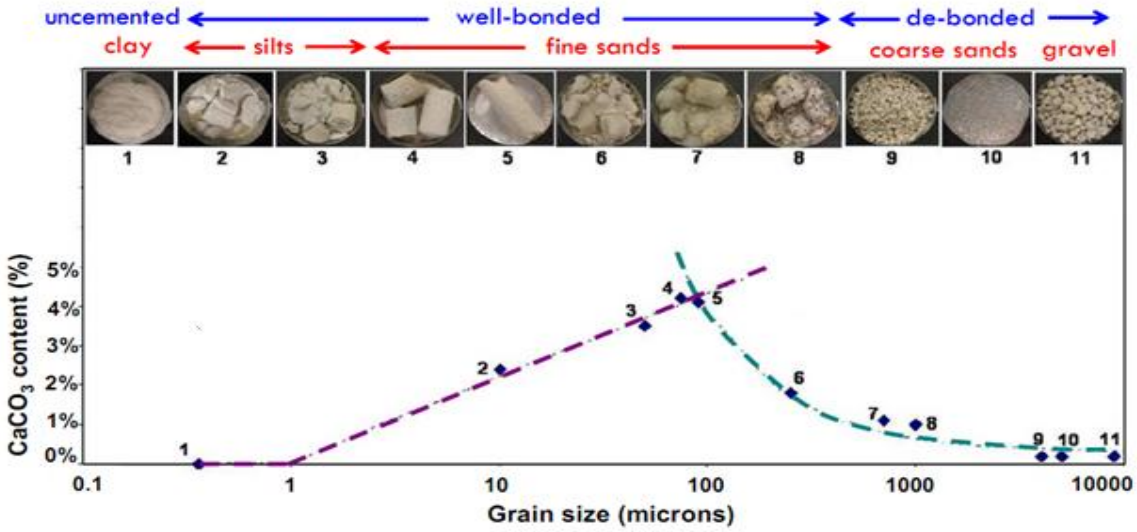
شکل ۲. شکل ساده‌ای از آنچه در حین رسوب کلسیم کربنات تحت اثر آنزیم اوره‌آز رخ می‌دهد (۷).

جابه‌جایی باکتری‌ها و باقی‌ماندن آنها درون شبکه حفرات متصل به‌هم 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 ۰/۵ تا ۳ میکرومتر است. میکروب‌های خاک از طریق حفرات بین ذرات خاک جابه‌جا می‌شوند. سازگاری ژئومتریک باکتری‌های تولید کننده 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 به‌هم 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 ۰/۱ 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 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).

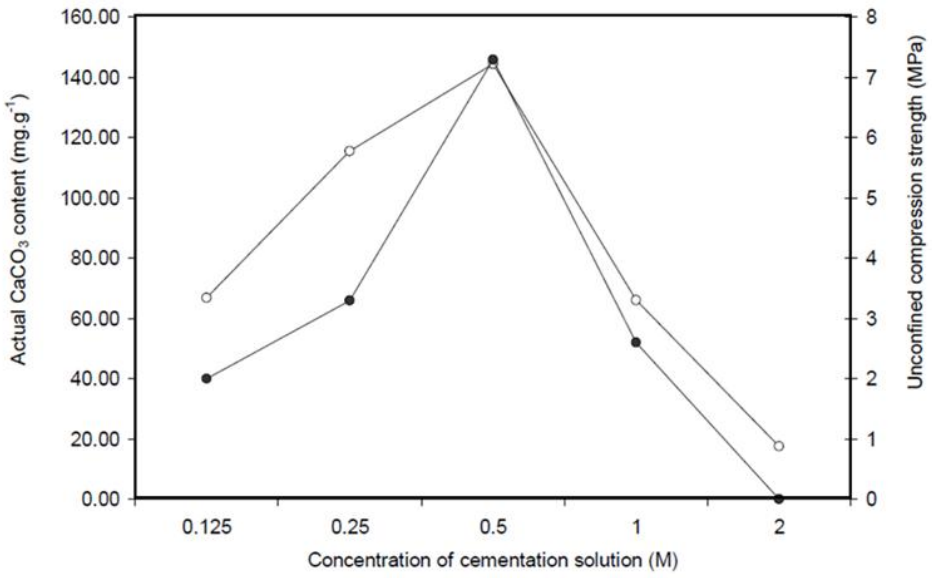
از سوی دیگر تولید بیولوژیک پایدار و مداوم کریستال‌های کربنات کلسیم به‌طور مستقیم با رشد سلولی و فعالیت‌های آنزیمی اوره‌آزی مرتبط است (۶). استوکس فیشر و همکاران نشان دادند که فعالیت اوره‌آزی به‌سرعت از pH، ۶ تا ۸ افزایش می‌یابد و به بالاترین مقدار خود در pH برابر ۸ می‌رسد و درpHهای بالاتر به‌تدریج کاهش می‌یابد، اما از آنجا که با افزایش pH میزان 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 این‌حال 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 می گذارد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است نرخ افزایش رسوب انجام شده و همچنین تولید مقاومت

www.SID.ir

Archive of SID



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



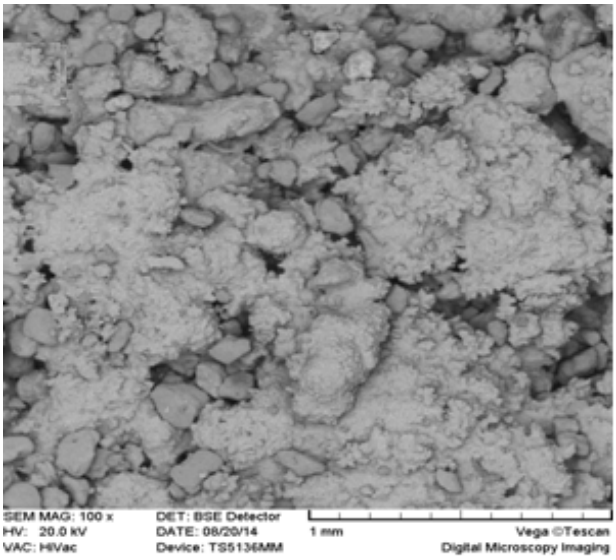
شکل ۴. تأثیر افزایش غلظت کلرید کلسیم در نرخ رسوب‌گذاری (○) و افزایش مقاومت (●) در ستون ماسه (۱)

کاملاً بستگی به غلظت کلسیم دارد. البته روند افزایش رسوب با افزایش غلظت واکنش دهنده‌ها 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 مانند روش تزریق و غلظت واکنش‌دهنده‌های شیمیایی کنترل می‌شود (۱۷). از آنجایی که باکتری‌ها به‌عنوان بیوکاتالیست می توانند باعث تشکیل $CaCO_3$ 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

www.SID.ir

Archive of SID



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

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 تثبیت کننده نمکی (شامل محلول کلسیم کلرید ۵۰ میلی مولار) و سپس محلول رقیق نشده باکتری‌ها به درون خاک تزریق شود تقریباً تمامی باکتری‌ها درون نمونه خاک باقی می‌ماند. غلظت بالای محلول پایدار کننده (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 پایدار کننده سرعت پایینی داشته باشد تا فرصت کافی برای واکنش باکتری‌ها با محلول پایدار کننده وجود داشته باشد (۱۱). همچنین بر اساس مطالعات انجام شده توسط التاودی (Al-Thawadi) با اضافه کردن یون کلسیم به محلول باکتری‌ها میزان چسبیدن باکتری‌ها به خاک قبل از تزریق به میزان۲ 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 سمانتاسیون و باکتری) در خاک‌های اشباع شده (۱، ۱۱ و ۱۵). ۲) تزریق نفوذ سطحی (Surface percolation) در خاک‌های غیراشباع (۲۳) و ۳) روش پیش‌مخلوط به‌همراه 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 غلظت های 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

www.SID.ir

Archive of SID

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 سمانتاسیون 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 و 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 (φ) 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 ازاین روش افزایش می‌یابد (۱۸).

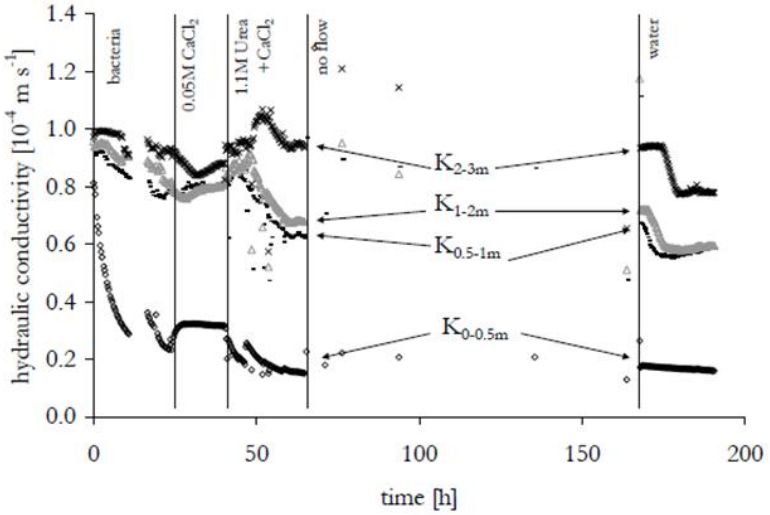
فرایند اصلاح و بهسازی زیستی خاک، مقاومت خاک‌های ماسه‌ای را در برابر روانگرایی بالا برده و همچنین باعث بهبود خواص دینامیکی در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری نشده می شود (۲۰). از دیدگاه هیدرولیکی، مقاومت خاک با استفاده از روش MICP افزایش یافته درحالی که کاهش شدید نفوذپذیری در ماسه‌های عمل‌آوری شده رخ نمی‌دهد. 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

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶ . کاهش نفوذپذیری در طول ستون به‌دست آمده بعد از عمل‌آوری بیولوژیک (۲۸)

راه‌آهن پرسرعت آمستردام –پاریس بهره گرفته شد (شکل ۷) (۲۶).

فشار بالای آب‌های شور زیرزمینی در ماسه پلیستسن (Pleistocene) باعث جریان آب‌های شور به‌سمت بالا می‌شد که با توجه به اکوسیستم پیچیده و حساس منطقه هارلیمیرمیر استفاده از روش بهسازی و انسداد (Biosealing) زیستی به‌دلیل 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 ۱ مترمکعب به ۱۰۰ مترمکعب نمونه ماسه توسط ون پسن دنبال شد (۲۹). ابتدا یک مخزن با ابعاد (۰/۹ × ۱/۱ × ۱ متر) با ماسه پر شده به‌طوری 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 ۰/۵ مولار) از مرکز مخزن با سرعت جریان ثابت تزریق شد. حجم کل تزریقی محلول سیمانی شدن،۳۵۰۰ لیتر بود که به‌طور متوالی از طریق ۸ فرایند ناپیوسته (بچ) و در طول ۵۰ روز تزریق شد (شکل ۸).

با استفاده از تجربیات حاصل از این آزمایش، ون پسن یک جعبه بتنی (به ابعاد ۸×۵/۶×۲/۵ متر) را با ماسه مرطوب و تراکم خشک متوسط ۱۵۶۰ kg/m^3 عمل‌آوری کرد (شکل ۹) (۲۹). در این عمل‌آوری، محلول به‌صورت پیوسته از سه چاه تزریق شد و با طی فاصله‌ای به طول ۵ متر در جعبه به‌سمت چاه‌های خروجی حرکت کرده و نرخ جریان کلی تقریباً ۱ m^3/h و گرادیان هیدرولیکی ۰/۳ m/m بود. بعد از عمل‌آوری توده ۱۰۰ m^3 ماسه با آب شسته شد و توده ماسه سیمانی شده به حجم ۴۰ مترمکعب که به خطوط جریان هیدرولیکی (Hydrological flow field) محدود شده بود به‌دست آمد. خطوط جریان به‌ویژه در نزدیکی چاه‌های خروجی به سهولت دیده می‌شود (شکل ۱۰– الف).

ون پسن دریافت که سمنتاسیون در طول خط جریان همگن است درحالی که مقدار کلسیت رسوب کرده در جهت عمود بر جریان به‌شدت تغییر می‌کند. همچنین با ایجاد یک مقطع قائم در طول خط جریان (شکل ۱۰– ب) دیده شد که مقدار کریستال‌های کربنات کلسیم از ۰/۸ تا ۲۴ درصد وزن خشک تغییر می‌کند. آزمایش‌های مقیاس بزرگ حاکی از مقاومت بالای ایجاد شده در اثر رسوب کربناتی بود، با این‌حال 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

www.SID.ir

Archive of SID

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

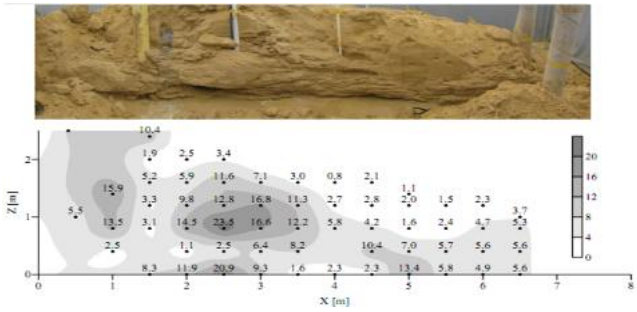
شکل ۸ خاک عمل‌آوری شده به‌روش زیستی در آزمایش با حجم ۱ متر مکعب (۲۹)

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)

www.SID.ir

Archive of SID

الف) الگوی سیمانی شدن توده سیمانی شده به حجم ۱۰۰ m^3



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

شکل ۱۰. الگوی سیمانی شدن و توزیع آن در آزمایش بزرگ‌مقیاس تزریق (۱۰۰m^3) (۲۹)

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 ۳ متر مکعبی پر شده با شن انجام گرفت. انجام حفاری در جهت افقی این ظرف نشان‌دهنده انجام موفقیت‌آمیز روش بود که با توجه به آن آزمایش میدانی در مقیاس بالا صورت گرفت. حجم کل خاک ۱۰۰۰ مترمکعب در عمق بین ۳ تا ۲۰ متر پایین‌تر از سطح مورد عمل‌آوری بیولوژیک قرار گرفت که برای این منظور ۲۰۰m^3 سوسپانسیون باکتری و ۳۰۰ تا ۶۰۰ m^3 از محلول‌های سیمانی کننده 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 تصفیه خانه محلی منتقل شد. نتایج عمل‌آوری نشان داد که در طی عملیات حفاری پایداری لایه شنی حفظ شده و لوله‌گذاری خط گاز نیز بدون نشست و فروریختگی انجام شد.

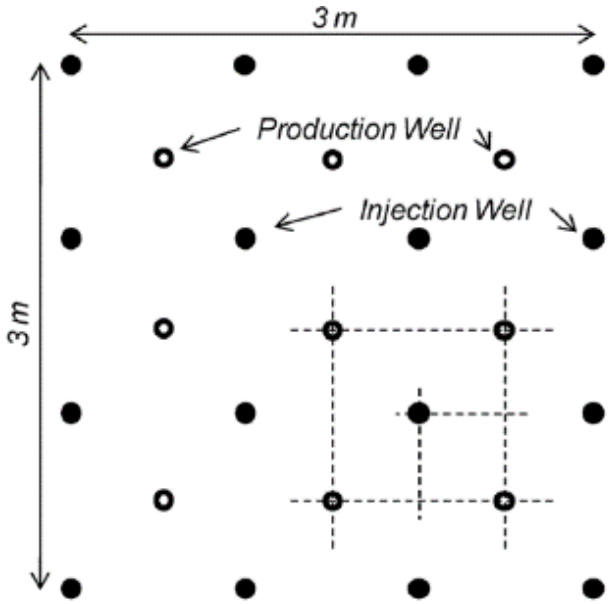
دی جونگ و همکاران (۴) نیز یک روش عمل‌آوری سه بعدی برای پیاده سازیMICP در مقیاس میدانی را توسعه دادند. این روش براساس الگوی جریان نشان داده شده در شکل ۱۱-الف بود که در آن ۵ ناحیه (تزریق / استخراج) برای محدوده‌ای به اندازه ۳×۳×۰/۱۵متر به‌کار رفته است. هر ناحیه دارای یک نقطه تزریق در هسته و یک نقطه استخراج در گوشه‌های منطقه هدف (۰/۵×۰/۵×۰/۱۵) بود که در شکل ۱۱- ب نشان داده شده است. هدف از این آزمایش، عمل‌آوری ماسه اوتاوا با دانه‌بندی (۷۰-۵۰μm) بود که با تزریق محلول‌ها به ماسه اشباع شده انجام می‌شد.

فرایند MICP در دو مرحله انجام شد. مرحله اول شامل جریان ۳۰ لیتری سوسپانسیون باکتریایی در یک محلول غنی از اوره در طی ۵۰ 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 ۱ ساعت و سپس دوره استراحت ۲ ساعته بود. چرخه اول در جهت جریان تزریق باکتری، درحالی که چرخه دوم در جهت معکوس انجام می‌شد (۱۸). عمل‌آوری یکنواخت و همگن تحت شرایط میکروبی بسیار فعال انجام گرفت ولی به‌دلیل انسداد چاه تزریقی، امکان انجام فاز دوم تزریق میسر نشد.

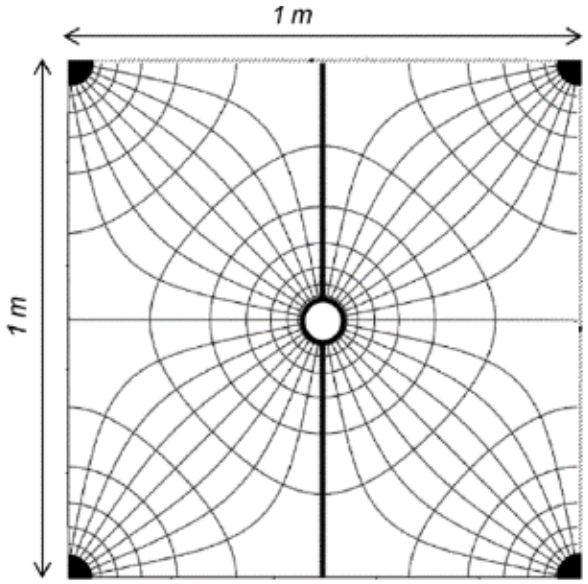
گومز و همکاران (۹) یک مطالعه میدانی در استفاده از MICP برای جلوگیری از گردوغبار و فرسایش ماسه‌های سست در اطراف معدنی در استان ساسکاچوان کانادا انجام دادند. در عمق ۲۸ سانتی‌متر خاک، بهسازی انجام شده و تشکیل پوسته سیمانی

www.SID.ir

Archive of SID



الف) طرح الگوی جریان شامل چاهک‌های تزریق و استخراج



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

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

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 بزرگ‌تر 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 آمیزی از بیوکلسیس برای عمل‌آوری 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. به‌دلیل 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 به‌دلیل اینکه فضای موجود در جلوی دیوار برای قرار دادن دستگاه حفاری کافی نبود، میخ‌کوبی خاکی انجام نشد. از سوی دیگر، تزریق جت ملاط فشار

www.SID.ir

Archive of SID

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

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 محدودیت‌ها، بیوکلسیس پیشنهاد شد. امکان‌سنجی 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 بود. نتایج نهایی توسط تست‌های هسته‌گیری در محل و پرشیومتری (Coring and pressiometric tests) برآورد شد (۱۰).

این آزمایش‌ها قابلیت انجام روش مقاوم‌سازی دیوار را تأیید کرده و یک راه حل نهایی را ارائه می‌دهد که شامل یک بلوک زیستی می‌شود. این بلوک زیستی همانند یک سازه نگهبان عمل می‌کند که می‌تواند تکیه‌گاهی برای پایداری سازه اصلی و همچنین مهاری برای جلوگیری از ریزش خاک‌های اطراف باشد.

انجام این آزمایش‌ها از یک‌سو بر مزایای استفاده از فرایندهای بهسازی زیستی خاک تأکید داشته و از سوی دیگر چالش‌های مهم پیش رو در اجرای آن را در مقیاس میدانی برجسته می‌کنند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

محدودیت‌ها و چالش‌های روبه‌رو در کاربرد میدانی روش زیستی و پیشنهادها

تکنیک‌های مختلفی برای بهبود عملکرد این روش در مقیاس متر استفاده شده است. اگرچه پیشرفت‌هایی در این عرصه از طریق تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته با این‌حال برخی از مسائل مانع توسعه این راهکار زیستی در مقیاس میدانی شده است. از این آزمایش‌ها در مقیاس بزرگ، محدودیت‌های متعدد کاربرد MICP در مقیاس میدانی باید مورد توجه قرار گیرد:

مواد سمی: آمونیوم و نیترات محصولات جانبی هیدرولیز اوره هستند. تولید غلظت‌های بالای این ترکیبات، اثرات سمی بر سلامت انسان و پوشش گیاهی، ایجاد کرده و علاوه بر آن اکوسیستم‌های زمینی را نیز در معرض آلودگی قرار می دهند. درنتیجه کنترل این مواد آلاینده طی عملیات زیستی به لحاظ رعایت استانداردهای قانونی زیست‌محیطی ضروری به نظر می‌رسد (۲۱). حجم قابل توجهی از واکنش‌های شیمیایی و محلول‌های میکروبی در طول فرایند MICP به‌خصوص در کاربرد میدانی آن تولید می‌شوند. البته بعضی از پژوهشگران استفاده مجدد پساب‌های غنی از آمونیاک را به‌عنوان کود برای گیاهان پیشنهاد می‌کنند (۵). البته در سال‌های اخیر یک

www.SID.ir

Archive of SID

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 می توانند 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 خیسانده ذرت (Corn steep liquor) می‌تواند راهکاری برای کاهش هزینه های فرایندی تا ۳۰ درصد هزینه باشد (۱۶). هزینه کلی روش MICP (مواد، تجهیزات و نصب) در خاک‌های اشباع از ۷۵-۲۵ 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).

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 هزینه بر 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

www.SID.ir

Archive of SID

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، هرینه 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 کریستال های رسوبی کربنات کلسیم

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.

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.

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.

www.SID.ir

Archive of SID

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. Verbeken, 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.

www.SID.ir

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 $CaCO_3$ 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.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil Science
Vol. 24, No. 1, Spring 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Review Article

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

M. Maleki-Kakelar* and M. Yavari[1]

(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

1- Department of Chemical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
*: Corresponding author, Email: mmaleki@znu.ac.ir

www.SID.ir