

بررسی رویکرد های مختلف و موفقیت القای میکروبی ترسیب آهک (MICP)

در مهار گرد و غبار

کامیار امیرحسینی

دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مدیریت حاصلخیزی و زیست فناوری خاک، گرایش بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده

مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران. پست الکترونیک (amirhosseini.k@ut.ac.ir)

چکیده

هدف از این مقاله بررسی کارایی روش های زیستی متکی بر فعالیت آنزیمی ریزجانداران خاکزی در متوقف سازی گرد و غبار و مقایسه آن با سایر روش های پیشنهاد شده است. مقایسه روش های مختلف مکانیکی، شیمیایی و زیستی موجود در مهار مشکلات ناشی از فرسایش بادی در انتخاب پایدار ترین رویکرد مبارزه با آن همزمان با اعمال کمترین فشار به محیط زیست، سیاست گذاران را در تصمیم گیری های مدیریتی در حوزه مهار گرد و غبار یاری خواهد کرد. در اصلی ترین روش مکانیکی کنترل فرسایش، با احداث موانع فیزیکی عمود بر جهت باد های غالب منطقه نسبت به کاهش تولید گرد و غبار اقدام می شود. روش های شیمیایی مبارزه با گرد و غبار نیز بر استفاده از انواع مهارکننده های شیمیایی متکی است. این روش ها معمولاً با هزینه های زیاد احداث موانع فیزیکی و مشکلات زیست محیطی همراه است. در یکی از اثر بخش ترین روش های زیستی، فعالیت آنزیم اوره آز تبدیل اوره به کربنات و در نهایت تولید رسوب آهک را در محیط خاک کنترل می کند. القای میکروبی ترسیب آهک (MICP) در محیط خاک به عنوان روشی کم هزینه، پایدار و دوست دار محیط زیست از پتانسیل بالایی در کاهش میزان گرد و غبار از طریق افزایش اتصال ذرات خاک و مقاومت آن در برابر عوامل فرساینده برخوردار است. این مقاله مروری-تحلیلی با تکیه بر روش تحقیق سندی خصوصیات اصلی، نقاط قوت و چالش های مربوط به روش های مرسوم متوقف سازی گرد و غبار را مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج نشان می دهد که فعالیت های آنزیمی ریزجانداران خاکزی قادر است تا به صورتی موفق در راستای اهداف حفاظت از منابع خاک، خصوصاً با توجه به شرایط موجود در خاک های کشور به کار گرفته شود.

واژه های کلیدی:

فرسایش بادی، کنترل گرد و غبار، روش های زیستی

مقدمه

فرسایش به عنوان یک فرایند طبیعی همواره در حال وقوع می باشد و تشکیل خاک های آبرفتی و بادرفتی در مواقعی نیز منجر به تولید خاک های حاصلخیز و قابل بهره برداری شده است. فرسایش تشدید ناشی از فعالیت های انسانی مانند کشاورزی موجب افزایش سرعت تخریب خاک در مقابل سرعت تشکیل آن شده و تمامی جوانب زندگی انسان اعم از تغذیه و سلامت او را به خطر می اندازد (رفاهی، ۱۳۹۳). طبق بررسی های صورت گرفته، در اشکال مختلف فرسایش سالانه شاهد جدا شدن حدود ۷۵ میلیارد تن خاک از سطح زمین هستیم (Pimental و همکاران، ۱۹۹۵). با توجه به آنکه حدود ۸۰ درصد از اراضی کشاورزی در جهان در معرض آسیب های ناشی از فرسایش تشدید قرار دارد، بررسی دقیق اثرات این فرایند و روش های پیشنهاد شده جهت مبارزه با آن به منظور پیاده سازی برنامه های حفاظتی از اهمیت بالایی برخوردار است (Santra و همکاران، ۲۰۱۷).

فرسایش که یک فرایند سه مرحله ای شامل جداسازی ذرات از توده خاک، انتقال توسط عوامل فرساینده مختلف و در نهایت رسوبگذاری آنها می باشد، برای وقوع نیازمند انرژی است. جریان های آب و باد را می توان به عنوان اصلی ترین منابع تامین انرژی

معرفی کرد. فرسایش بادی به ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک اثراتی چشمگیر را در فرسایش خاک بر جای می گذارد (Shao, ۲۰۰۸). انواع خاک ها تحت چنین شرایطی به علت کمبود رطوبت قابل استحصال، عمدتاً از پوشش گیاهی ضعیفی برخوردار هستند. کمبود ماده آلی همراه با تجمع نمک های مختلف همچون کلرید سدیم می تواند پراکندگی ذرات در این خاک ها افزایش و آنها را در معرض فرسایش بادی قرار دهد.

تولید گرد و غبار که به عنوان کلیدی ترین منبع ذرات معلق در هواکره شناخته می شود از جمله اثرات فرسایش بادی است (Saadoud و همکاران، ۲۰۱۸). گرد و غبار به ذرات جامد معلق در هوا اشاره دارد که به واسطه اندازه کوچک (قطر کمتر از ۱۰۰ میکرون) قادر به طی کردن مسافت های طولانی به همراه باد می باشد (سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ۱۳۹۵). تاثیر تولید گرد و غبار در محل اصلی وقوع و در نقاطی خارج از مکان اصلی بروز آن نیز قابل مشاهده است.

با توجه به آنکه فرایند فرسایش بادی به صورت انتخابی عمل می کند، جدا سازی ذرات با اندازه کوچک (رس و سیلت) و مواد سبک (کربن آلی خاک) از توده خاک به مرور موجب کاهش کیفیت و حاصلخیزی می شود (Lal, ۲۰۲۰). ورود ذرات ریز حامل مواد غذایی همچون فسفات ها به محیط های آبی باعث غنی سازی آنها و تشکیل نواحی مرده می شود (رفاهی، ۱۳۹۳). انتقال کربن توسط فرسایش بادی و باز توزیع آن در سطح زمین باعث تولید گاز های گلخانه ای مانند CO_2 ، CH_4 و N_2O از طریق فرایند های تجزیه و متان زایی است (Lal, ۲۰۲۰). این امر بر چالش های موجود در مبارزه با گرمایش جهانی می افزاید.

ذرات ریز خاک می تواند حامل آلودگر ها و ریزجاندانان خاکی نیز باشد (Stabnikov و همکاران، ۲۰۱۳). انتشار این ذرات در محیط زیست سلامت انسان را تهدید می کند. در بین ذرات با اندازه های مختلف، گرد و غبار با اندازه کم تر از ۱۰ میکرون به ویژه برای سلامت عمومی انسان مضر شناخته شده و بروز بیماری هایی همچون بیماری مزمن انسدادی ریه، بیماری های قلبی عروقی، بیماری عروق مغزی و عفونت های حاد تنفسی به غلظت آن در هوا ارتباط دارد (Li و همکاران، ۲۰۱۰). تغییر ترکیب شیمیایی هواکره، کاهش ظرفیت فتوسنتزی از طریق آسیب به بافت های گیاهی و برگ ها و ایجاد آسیب های فیزیکی در دام ها از جمله دیگر اثرات گرد و غبار در محیط زیست محسوب می شود (Song و همکاران، ۲۰۱۹).

روش های مکانیکی، شیمیایی و زیستی متعددی جهت مبارزه با فرسایش بادی و کنترل گرد و غبار پیشنهاد شده است. روش های فیزیکی و شیمیایی مبارزه با فرسایش معمولاً با هزینه های بالا همراه بوده و خود می تواند موجب بروز مشکلات زیست محیطی شود. استفاده از قدرت زیستی خاک ها، راه حل هایی اقتصادی و سازگار با محیط زیست را ارائه می دهد. هدف از این مقاله مقایسه ویژگی های اصلی کلیدی ترین روش های پیشنهاد شده در منابع و بررسی عملکرد رویکرد های زیستی جایگزین در مبارزه با مشکل گرد و غبار است. روش های مرسوم مبارزه با فرسایش بادی با اشاره به اساسی ترین خصوصیات آنها و محدودیت های احتمالی در به کارگیری هر روش مورد بحث قرار گرفته است. در آخر به جزئیات روش زیستی و دستاورد های آن در مهار گرد و غبار پرداخته شده است.

روش های مکانیکی

روش های مکانیکی به شکلی مستقیم با فرسایش بادی مبارزه می کند. در اصلی ترین رویکرد، با احداث موانعی فیزیکی (باد شکن ها) عمود بر جهت باد های بیش وز منطقه، سرعت باد در سطح زمین تا مسافتی پشت مانع کاهش می یابد (گرچی، ۱۳۹۸). احداث بادشکن ها زمانی در کاهش گرد و غبار موثر واقع می شود که طراحی آنها به شکلی صحیح صورت گرفته باشد و به نگهداری آنها در حالت بهینه توجه شود (الهائی زاده و فروزانی، ۱۳۹۸). لذا به کار گیری روش های مکانیکی نیازمند دانش و نیروی متخصص است. با توجه به مشکل بودن پیاده سازی عملیات حفاظت مکانیکی و هزینه معمولاً زیاد اینگونه پروژه ها، استفاده از این روش تنها زمانی پیشنهاد می شود که امکان به کارگیری روش های دیگر با توجه به شرایط منطقه وجود نداشته باشد، کاهش هزینه های مربوط به خسارت های ناشی از فرسایش در مقایسه با هزینه احداث پروژه قابل توجه باشد و نهایتاً، اجرای عملیات مکانیکی جهت جلوگیری از فرسودگی شدید زمین الزامی قلمداد شود (رفاهی، ۱۳۹۳).

احداث موانع فیزیکی با کاهش سرعت باد تا ۸۰ درصد در پشت باد شکن ها موجب کاهش خسارت ناشی از فرسایش و جلوگیری

از سایر اثرات مضر باد شده و با تغییر خرد اقلیم منطقه از طریق کاهش تبخیر، افزایش تولید محصولات زراعی را به همراه خواهد داشت. بادشکن های زیستی با ایجاد زیستگاه برای انواع گونه های جانوری بر غنی سازی زیست بوم کشاورزی نیز می افزاید. در مقابل، احداث موانع، قسمتی از سطح زمین را اشغال کرده و در استفاده از ماشین های کشاورزی محدودیت ایجاد می کند. سایه اندازی اینگونه موانع نیز می تواند موجب کاهش رشد گیاه در نزدیکی بادشکن شود. مصرف آب توسط بادشکن های زیستی و فراهم آوری زیستگاه برای جانوران موذی از جمله دیگر نقاط ضعف آنها محسوب می شود (گرچی، ۱۳۹۸).

روش های شیمیایی

پایه و اساس روش های شیمیایی استفاده از موادی است که موجب تثبیت ذرات خاک و متعاقبا کاهش تولید گرد و غبار می شود. تحقیق بر روی مواد شیمیایی با پتانسیل های مختلف در سرکوب گرد و غبار از بیش از نیم قرن پیش آغاز شده (Han و همکاران، ۲۰۰۷) و نتایج حاصل از مطالعات منجر به استفاده از انواع مختلفی از مواد آلی و غیر آلی مانند محلول های پلی آکریل آمید، لاتکس بوتادین استایرن، اوره فرمالدئید، امولسیون آسفالت، لیگنین، اتر نشاسته و غیره شده است (Stabnikov و همکاران ۲۰۱۳).

نحوه تاثیر و عملکرد مهارکننده های گرد و غبار با توجه به نوع ماده مورد بررسی می تواند متفاوت باشد. به طور کلی، با افشان شدن محلول بر سطح خاک، قطرات با قطر کمتر از ۸ میکرون به داخل خاک نفوذ کرده و باعث اتصال ذرات به یکدیگر می شود. قطرات با قطر بزرگتر در سطح خاک باقی مانده و یک لایه حفاظتی را بر سطح آن ایجاد می نمایند (Han و همکاران، ۲۰۰۷). در این خصوص باید گفت که خصوصیات فیزیکوشیمیایی ماده مهار کننده مانند نوع گروه های عاملی موجود، نیرو های بین مولکولی و ویژگی های الکتریکی ترکیب نیز در خواص چسبندگی آن موثر است (Cheng، ۱۹۹۱).

جهت عملی بودن روش های شیمیایی، مهارکننده های مورد استفاده باید غیر سمی و غیر آلودگر، کارا، سازگار با شرایط محیطی محل مصرف، با عمر طولانی و مقرون به صرفه باشد (Han و همکاران ۲۰۰۷). هزینه کاربرد روش های شیمیایی معمولا زیاد است (آگره و همکاران، ۲۰۱۹). این هزینه بالا می تواند به قیمت زیاد تولید ترکیبات مختلف و یا به هزینه عملیات اضافه کردن مهارکننده ها به خاک مربوط باشد.

به نظر می رسد نگرانی اصلی در رابطه با مصرف مهارکننده های گرد و غبار به رفتار آنها در محیط زیست باز می گردد. بسیاری از محلول های نمکی که به منظور افزایش جذب رطوبت، کاهش تبخیر و تثبیت ذرات ریز خاک مورد استفاده قرار می گیرد (Lohnes و Coree، ۲۰۰۲)، توسط گیاهان قابل جذب است (Goodrich و همکاران، ۲۰۰۹) و در غلظت های بالا موجب تخریب بافت ها و حتی مرگ گیاهان می شود (Goodrich و Jacobi، ۲۰۱۲). مالچ های نفتی نیز از طول عمر محدودی (حدود دو سال) برخوردار است و رنگ تیره آنها می تواند با کاهش ضریب سپیدایی خاک سطحی موجب بر هم خوردن توازن انرژی در محیط شود (الهائی زاده و فروزانی، ۱۳۹۸). از منظری دیگر، احتمال داده می شود که افزایش دمای خاک، پراکنش ریزجانداران میانه دوست بیماری زا که در دامنه دمایی ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی گراد دارای بیشترین فعالیت هستند را افزایش دهد. بروز سایر اشکال آلودگی مانند فلزات سنگین و غلظت های بالای گوگرد در مالچ های نفتی از جمله دیگر عوامل محدود کننده کاربری آنها در محیط زیست به شمار می رود (صادقی، ۱۳۹۳). از طرف دیگر، حلالیت عامل های مهارکننده در محلول خاک موجب انتقال آنها به لایه های پایین تر و ورود این ترکیبات به آب های زیر زمینی می شود (Rushing و همکاران، ۲۰۰۶؛ Stabnikov و همکاران، ۲۰۱۳؛ آگره و همکاران، ۲۰۱۹؛ Song و همکاران، ۲۰۱۹).

روشن است که استفاده از مواد شیمیایی مختلف در راستای تثبیت ذرات خاک در اراضی بدون پوشش، جاده های آسفالت نشده، مکان های ساخت و ساز، معادن و محل های دفن زباله با محدودیت هایی جانبی همراه است. بنابراین، استفاده از آنها باید با در نظر گرفتن تمامی جوانب سلامت انسان و محیط زیست صورت گیرد. تسعید و انتقال یافتن از طریق باد، روان آب های آلوده به مهارکننده ها، جذب توسط گیاهان و جانوران و ورود ترکیبات شیمیایی به زنجیره غذایی و تماس مسقیم در حین افزودن مواد به خاک از جمله راه هایی است که انسان را در معرض آلودگی های ناشی از مهارکننده های شیمیایی قرار می دهد (Michigan Department of

3- Microclimate

4- Albedo coefficient

5- Pathogenic and mesophilic microorganisms

Environmental Quality, ۲۰۱۴).

سایر روش های مرسوم در کاهش میزان گرد و غبار شامل آب پاشی سطح خاک (Meyer, ۲۰۱۱) و پوشاندن خاک با استفاده از پوشش گیاهی زنده یا بقایای گیاهی می باشد (Yang و Ci, ۲۰۱۰). استفاده از آب به علت مشکلات احتمالی مربوط به تشکیل گل و تولید روان آب به ویژه در نواحی که با بحران کمبود آن روبرو هستند، قابل توجیه نیست (Wu و همکاران، ۲۰۱۶). کاربرد مالچ های گیاهی نیز می تواند توسط عوامل زراعی محدود شود (Yang و Ci, ۲۰۱۰).

روش های زیستی

استفاده از ظرفیت زیستی خاک در مهار گرد و غبار، به عنوان اصلی ترین بخش این مقاله، در پنج قسمت مختلف مورد بحث قرار گرفته است. در قسمت های زیر به استعداد فعالیت های زیستی در به کارگیری آنها در برنامه های حفاظتی، راهبرد های اصلی در استفاده از آنها، مبانی نظری رسوب پیدا کردن آهک در خاک در اثر فعالیت های زیستی، نقاط قوت و چالش های موجود در پیاده سازی روش های زیستی پرداخته شده است.

پتانسیل بالقوه بیولوژی خاک

افزایش لحظه ای جمعیت و تقاضای روز افزون برای غذا و منابع طبیعی، سامانه های مدیریت اراضی و کشاورزی را به سمت روش های مکانیکی و شیمیایی با قابلیت تولید نتایج مطلوب در زمانی نسبتاً کوتاه سوق داده است. همان طور که پیشتر بحث شد، اگرچه استفاده از هر یک از این رویکردها در مقابله با انواع مشکلات زیست محیطی دارای نقاط قوت مربوط به خود است، پایداری روش های مورد استفاده و سازگاری آنها با جوانب گوناگون محیط زیست نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

آنچه عامل تمایز بین گرد و خاک مخل و خاک حاصلخیز با قابلیت تولید بالا می باشد، فعالیت زیستی و حیاتی است که در آن جریان دارد. منشأ طبیعی و تغییرات پویای خاک، تکیه یک جانبه بر روش های غیر زیستی در رویارویی با اکثر مشکلات زیست محیطی مربوطه را ناکافی جلوه می دهد (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳). فعالیت بسیاری از موجودات خاکزی در بهبود ویژگی های متعدد خاک به خوبی شناسایی شده است. به طور مثال، فعالیت مورچه ها با افزایش دانه بندی، بهبود تهویه و نفوذپذیری در خاک همراه است (Espinoza و Santamarina, ۲۰۱۰). اهمیت حضور و تاثیر زیاد کرم های خاکی بر انواع خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک موجب استفاده از آنها به عنوان شاخص های سلامت خاک شده است (اعتصامی، ۱۳۹۷).

خاک به عنوان یکی از متنوع ترین زیست بوم های شناخته شده بر روی کره زمین، زیستگاه بسیاری از موجودات میکروسکوپی است. تنها بخش کوچکی از ریزجانداران خاکزی (کمتر از ۱ درصد) در محیط آزمایشگاه قابل مطالعه می باشد. فراوانی چشمگیر ریزجانداران خاکزی و حضور بیش از 10^{12} ریزجاندار در هر کیلو گرم خاک سطحی (Mitchell و Santamarina, ۲۰۰۵)، بیانگر احتمال وجود فرایند های متعدد بیوژئوشیمیایی مطالعه نشده در آن و نوید بخش امکان بهره برداری از قدرت زیستی خاک جهت رفع مشکلات زیست محیطی است (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳).

پیش زمینه پژوهش در مورد القای میکروبی ترسیب آهک

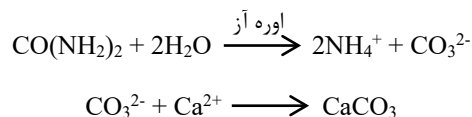
بخش قابل توجهی از مطالعات زیستی با در نظر گرفتن کاربرد نتایج در مسائل حفاظت خاک و زمین فناوری، بر القای میکروبی ترسیب آهک^۶ (MICP) تمرکز داشته است (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳؛ آگره و همکاران، ۲۰۱۹؛ Hodges و Lingwall, ۲۰۲۰a). در القای میکروبی ترسیب آهک، رسوب آهک در نتیجه فعالیت های میکروبی در خاک تشکیل می شود (Stocks-Fischer و همکاران، ۱۹۹۹). فعالیت های متعددی از جمله آبکافت^۷، دنیتریفیکاسیون، احیای سولفات و احیای آهن، موجب رسوب پیدا کردن آهک در خاک می شود (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال به نظر می رسد که تشکیل رسوب آهک از طریق آبکافت^۷ بهره با کارایی بالا تری نسبت به سایر فرایندها صورت می پذیرد (Dejong و همکاران، ۲۰۱۰).

واکنش های شیمیایی که موجب تولید رسوب آهک می شود بدون دخالت ریزجانداران نیز به شکلی طبیعی و با سرعتی پایین در

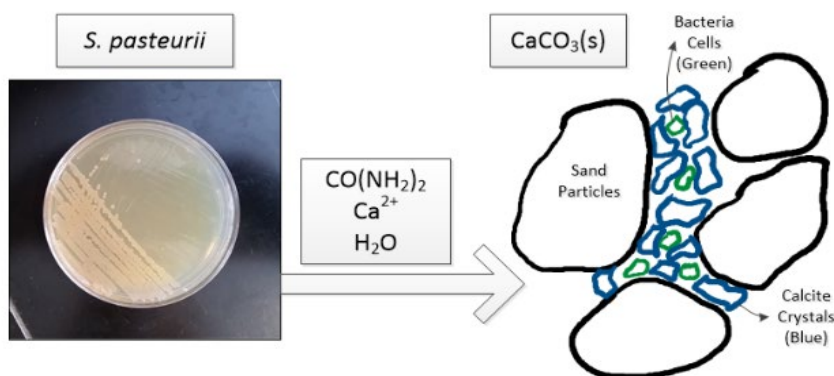
6- Microbial-induced calcite precipitation

7- Hydrolysis

خاک انجام می پذیرد. در این خصوص، دخالت اجزای زنده زیست بوم خاک موجب تسريع اين فرايند می شود (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳). آنزيم اوره آز را می توان به عنوان کلیدی ترین بخش MICP قلمداد کرد. اين آنزيم که در انواع مختلفی از ریزجانداران و گیاهان (Bachmeier و همکاران، ۲۰۰۲) از جمله باکتری *Sporosarcina pasteurii* (Ferris و همکاران، ۱۹۹۶) و لوبیا (Song و همکاران، ۲۰۱۹) موجود است، تبدیل اوره به آمونیوم و آزادسازی یون کربنات را کنترل می کند. کربنات آزاد شده در حضور کلسیم، طبق واکنش های زیر، به شکل آهک رسوب می یابد:



فرايند صورت گرفته نوعی معدنی سازی زیستی^۸ است. با قرار گرفتن در فضا های خالی موجود بين ذرات خاک، باکتری تولید کننده آنزيم به عنوان مرکز آهک سازی عمل کرده و امکان پر شدن فضا های خالی با آهک را فراهم می سازد (Lingwall و Hodges، ۲۰۲۰a). ایجاد اتصالات آهکی بين ذرات خاک موجب افزایش مقاومت آن در برابر فرسایش می شود (همان جا). مفهوم کلی MICP با استفاده از باکتری *S.pasteurii* در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است.



شکل شماره ۱- شمایی از مفهوم کلی القای ترسیب آهک توسط باکتری *S.pasteurii* (Lingwall و Hodges، ۲۰۲۰b)

راهکارها

دخالته انسان در فعاليت میکروبی عمدتاً به منظور تسريع یا تقويت یک فرايند متناسب با نیاز های مدیریتی صورت می پذیرد (Lingwall و Hodges، ۲۰۲۰a). دو راهکار اصلی که در به کارگیری ریزجانداران به منظور دستیابی به اهداف مدیریتی مورد استفاده قرار گرفته است، شامل راهکارهای Biostimulation و Bioaugmentation می شود. این راهکارها به عنوان روش های اصلی در زیست پالایی شناخته شده و تحقیقات بر روی آنها از بیش از سی سال پیش آغاز شده است (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳). در راهکار Biostimulation با بهینه نگه داشتن شرایط محیطی نسبت به تحریک رشد باکتری اقدام می شود. در راهکار دوم یا Bioaugmentation، افزودن گونه های شناسایی شده با قابلیت مطلوب به خاک، توان زیستی خاک را در جهت انجام فرایندهای مد نظر افزایش می دهد. به طور کلی، بهینه سازی شرایط به منظور تحریک رشد جوامع بومی خاک به رویکرد دیگر ترجیح داده می شود (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳). عدم قابلیت رقابت گونه های غیر بومی با جوامع بومی که به شرایط موجود در محل مورد نظر سازگاری یافته است را می توان به عنوان محدودیت اصلی Bioaugmentaion معرفی کرد. بهبود شرایط محیطی جهت تحریک رشد باکتری نیز با محدودیت هایی روبرو است. این محدودیت ها شامل عدم اطمینان از یکنواختی مکانی تیمارهای اضافه شده در محل مورد نظر و نیز، امکان وقوع تاخیر زمانی بین فراهم آوری عوامل محرک رشد تا مشاهده شدن فعالیت تقویت شده باکتری ها می باشد (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳). البته باید گفت که برقراری یک سازش نسبی بین این دو روش و تلاش جهت بهینه سازی شرایط رشد پس از افزوده شدن باکتری ها به خاک پیشنهاد شده است (Martinez، ۲۰۱۲).

دستورات لازم به منظور پیاده سازی موفق MICP در منابع متعدد مورد بحث قرار گرفته است (Stocks-Fisher و همکاران، ۱۹۹۹؛ Bachmeier و همکاران، ۲۰۰۲؛ Crawford و همکاران، ۲۰۱۰). به طور خلاصه، محلولی که در این روش به عنوان یک مهار کننده گرد و غبار زیستی به سطح خاک اضافه می شود شامل دو بخش اصلی و حاوی مواد مورد نیاز جهت رشد (مواد غذایی، اوره و باکتری های جداسازی شده) و محلول کاتیونی نمک کلرید کلسیم می باشد (Hodges و Lingwall، ۲۰۲۰a).

نقاط قوت

آهک تولید شده توسط فعالیت میکروبی به عنوان یک عامل سیمانی کننده طبیعی در خاک عمل کرده و موجب اتصال ذرات خاک به یکدیگر و افزایش خاکدائگی می شود. این امر مقاومت خاک در برابر عوامل فرساینده را افزایش می بخشد (Hodges و Lingwall، ۲۰۲۰b). با توجه به آنکه طول عمر آهک تولید شده با سایر اشکال آهک که تحت شرایط طبیعی در خاک شکل می گیرد مشابه است، در صورت استمرار شرایط قلیایی، خاک های تیمار شده با MICP می تواند تا پنجاه سال به شکلی پایدار باقی بماند (Dejong و همکاران، ۲۰۰۹). آهک در مقابل سایر عوامل سیمانی کننده زیستی (به طور مثال، پلی ساکارید های برون سلولی) که در معرض تجزیه قرار دارند، از پایداری بیشتری برخوردار است (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳). اساس طبیعی معدنی سازی زیستی آهک نیز به معنای حذف اثرات مضر زیست محیطی و همین طور کاهش مصرف انرژی و مشارکت کمتر در تولید گاز های گلخانه ای می باشد. فعالیت موثر باکتری های *S.pasteurii* در دما های بالا (۴۵ درجه سانتی گراد) و رطوبت نسبی پایین (۲۰ درصد) (Meyer و همکاران، ۲۰۱۱)، بیانگر امکان استفاده از آنها در اقلیم های خشک و نیمه خشک است. تمایل بیشتر آهک جهت تشکیل رسوب در شرایط قلیایی (Song و همکاران، ۲۰۱۹) احتمال موفقیت MICP در خاک های کشورمان را افزایش می دهد.

ایجاد خاکدانه های پایدار در MICP به شکلی موثر (تا ۹۹/۸ درصد) موجب کاهش انتقال ریزجاندانان خاکریز بیماری زا از طریق هوا می شود (Stabnikov و همکاران، ۲۰۱۳). تولید یون آمونیم در طی آبکافت اوره می تواند به عنوان منبع عنصر غذایی پر مصرف نیتروژن برای گیاهان محسوب شود. استفاده از MICP در کنار سایر روش های زیستی مبارزه با فرسایش موجب افزایش اثر بخشی آنها می شود. ایجاد یک لایه نازک سله مانند در سطح خاک، بذرها را در مراحل اولیه جوانه زنی در برابر عوامل فرساینده محافظت کرده و امکان استقرار بهتر گیاه را به وجود می آورد (Hodges و Lingwall، ۲۰۲۰a). این قابلیت می تواند در ایجاد پوشش گیاهی در مواقعی که شرایط محیطی برای استقرار گیاهان مناسب نیست (مانند خندق ها) مورد استفاده قرار گیرد.

دست کاری راحت سلول های باکتری امکان ایجاد گونه های مهندسی شده با قابلیت تولید مقادیر بالای آنزیم را ممکن می سازد (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳؛ پوربابایی، ۱۳۹۹). کشت باکتری ها به منظور پیاده سازی MICP می تواند زمان بر باشد (Hamdan و Kavazanjian، ۲۰۱۶) و در صورت روبرو بودن با محدودیت های زمانی در انجام چنین پروژه ای می توان ترسیب آهک را از طریق استفاده مسقیم آنزیم اوره آز القا کرد (Song و همکاران، ۲۰۱۹). قیمت محلول های مهار کننده زیستی گرد و غبار و مقداری از آنها که برای ایجاد تاثیرات مطلوب در سطح خاک مورد نیاز است در مقایسه با سایر مهار کننده ها کمتر می باشد (Stabnikov، ۲۰۱۳).

چالش ها

آگاهی از تمامی محدودیت های احتمالی و هر گونه خلاء پژوهشی در رابطه با روش MICP در متوقف سازی گرد و غبار، می تواند مسیر مطالعات آینده را روشن سازد و به اجرای صحیح برنامه های مدیریتی کمک کند. از این جهت، اجرای بررسی های آزمایشگاهی با مقیاس کوچک، پیش از به کارگیری در میدان پیشنهاد شده است (Hodges و Lingwall، ۲۰۲۰a). چالش های موجود در به کارگیری پتانسیل ریزجاندانان خاکریز در برنامه های حفاظتی را می توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد.

در دسته اول به نکاتی اشاره می شود که با توجه به آنها می توان در راستای تولید روش های تحقیق استاندارد و تکرار پذیر حرکت کرد و امکان مقایسه بین نتایج بدست آمده از تحقیقات مختلف را فراهم ساخت. با توجه به آنکه تاثیر MICP بر کاهش میزان گرد و غبار با استفاده از تونل های باد، سنجش می شود، خصوصیات باد های ایجاد شده باید مشخص و قابل کنترل باشد. استفاده از عوامل ضد استاتیک از چسبیدن ذرات ریز خاک به دیواره های تونل باد، جلوگیری کرده و باعث افزایش صحت داده های بدست آمده می

9- Enzyme-induced calcite precipitation (EICP)

10- Antistatic agents

شود. استفاده از فیلترها در مسیر جریان باد از بروز آلودگی های زمینه ای جلوگیری خواهد کرد. زمان انکوباسیون باکتری ها در نمونه های خاک بر میزان واکنش های انجام شده تاثیر گذار است. لذا می بایست زمان های مختلف انکوباسیون جهت شناسایی زمان بهینه برای بیشترین تاثیر باکتری ها بر کاهش فرسایش پذیری نمونه های خاک مورد بررسی قرار گیرد. درجه خلوص مواد استفاده شده نیز بر فعالیت باکتری ها موثر است. افزایش میزان مواد استفاده شده می تواند به منظور جبران درجه خلوص پایین مواد در نظر گرفته شود. در مطالعات صورت گرفته توسط Song و همکاران (۲۰۱۹) و Dejong و همکاران (۲۰۱۳) به نکات مذکور توجه شده است.

دسته دیگری از چالش ها، توجه محققین را به اثرات جانبی استفاده از MICP معطوف می سازد. آبکافت اوره در محیط خاک با افزایش موضعی pH همراه بوده و تغییرات بزرگ آن می تواند بر جوامع جانوری و گیاهی خاک تاثیر گذار باشد. شوری محلول های مهارکننده زیستی نیز احتمال محدود شدن کاربرد آنها در خاک های شور را افزایش می دهد. تشکیل لایه های آهکی سطحی با ضخامت بیش از حد، موجب تولید رواناب در سطح خاک شده و آن را در معرض فرسایش آبی قرار می دهد. جهت جلوگیری از آلودگی های زیست محیطی مصرف اوره می بایست با رعایت راهنما ها و غلظت مجاز صورت گیرد (EPA, ۲۰۰۲). نکات فوق در تحقیقات Hodges و Lingwall (۲۰۲۰a, ۲۰۲۰b) مورد بحث قرار گرفته است.

آخرین دسته از چالش ها به زمینه هایی اشاره دارد که نیازمند مطالعه بیشتر است. پیچیدگی محیط خاک، اطلاع داشتن از تغییرات مکانی ترکیبات و ریزجانداران را دشوار می سازد و ناهمگن بودن آن از میزان اطمینان افزوده شدن یکنواخت باکتری ها و سوبسترا ها می کاهد. تعیین نیاز تیمار ها به افزوده شدن مجدد مواد با به کار گرفتن برنامه های دقیق سنجش کیفیت امکان پذیر است. تحلیل های اقتصادی و تفسیر پایداری MICP نیز در تصمیم گیری های مدیریتی حایز اهمیت است. مطالعات Meyer و همکاران (۲۰۱۱) و Dejong و همکاران (۲۰۱۳) به جزئیات نکات ذکر شده پرداخته است.

نتیجه گیری

اهمیت بالای منابع خاک و رابطه ی تنگاتنگ آن با بقای تمدن ها، محققین را مجاب به ارایه انواع روش های فیزیکی، شیمیایی و زیستی جهت حفاظت از این منبع حیاتی کرده است. در اکثر مواقع رویکرد های فیزیکی و شیمیایی در مبارزه با فرسایش و مشکلات ناشی از آن به عنوان روشی پایدار شناخته نمی شود. چنین راهکار هایی معمولاً با هزینه های زیاد و مشکلات زیست محیطی همراه است. بهره برداری از قدرت زیستی بومی خاک ها روشی نوین را در رویارویی با مشکلات گرد و غبار ارایه می دهد (Dejong, ۲۰۱۳). تولید رسوب آهک در نتیجه فعالیت آنزیمی ریزجانداران خاکری، موجب افزایش خاکدانی و مقاومت خاک در برابر عوامل فرساینده می شود. با بهره گیری از فرایند طبیعی MICP مهار پایدار گرد و غبار از طریق روشی سازگار با محیط زیست ممکن است. مصرف کمتر انرژی در این روش، موجب کاهش هزینه ها و مشارکت کمتر در گرمایش جهانی می شود. تنوع زیستی زیاد، انعطاف پذیری بالا و سهولت دست کاری ریزجانداران خاکری استفاده از آنها را در دامنه گسترده ای از شرایط محیطی از جمله دمای بالا، رطوبت نسبی پایین و شرایط قلیایی امکان پذیر می سازد.

پتانسیل عظیم و بکر اجزای زنده زیست بوم خاک نیازمند تحقیق و مطالعه بیشتر به ویژه پیش از معرفی اشکال تقویت شده آن در میدان می باشد. تولید روش های تحقیق استاندارد به منظور افزایش تکرار پذیری و مقایسه نتایج مختلف، توجه به اثرات جانبی فرایند MICP بر سایر اجزای محیط خاک و درک بهتر از خصوصیات پویای خاک و فعالیت ریزجانداران در پیاده سازی موفق MICP در متوقف سازی گرد و غبار از اهمیتی کلیدی برخوردار است. با توجه به اقلیم حاکم و شرایط موجود در خاک های ایران، بهره برداری از فعالیت های آنزیمی ریزجانداران خاکری در راستای حفاظت از منابع خاک های کشور امکان پذیر است.

منابع

- اعتصامی، ح. ۱۳۹۷. تقریرات درس بیولوژی خاک. گروه علم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
- الهائی زاده، م. و م. فروزانی. ۱۳۹۸. راهکارهای عملی جهت کاهش گرد و غبار و پیامدهای ناشی از آنها. سومین کنفرانس ملی پژوهش های نوین در مهندسی کشاورزی، محیط زیست و منابع طبیعی، مشهد.



چهارمین کنفرانس ملی حفاظت خاک و آبخیزداری با محوریت گرد و غبار

تهران- پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

۲۸ بهمن ماه ۱۳۹۹



- پوربابایی، ا. ۱۳۹۹. تقریرات درس زیست پالایی خاک و آب. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران.
- رفاهی، ح. ۱۳۹۳. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۱۷، ۱۴۸ و ۳۸۳.
- سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. ۱۳۹۵. شناخت پدیده گرد و غبار و راه های کنترل آن. تالار ترویج دانش و فنون کشاورزی، تهران.
- صادقی، ز. ۱۳۹۳. نگاهی به اثرات مخرب زیست محیطی مالچ های نفتی به منظور مهار ریز گرد ها و معرفی فناوری های جایگزین آن. اولین همایش ملی بهداشت محیط، سلامت و محیط زیست پایدار، همدان.
- گرچی اناری، م. ۱۳۹۸. تقریرات درس فرسایش و حفاظت خاک. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران.
- Rajabi Agereh, S., Kiani, F., Khavazi, K., Rouhipour, H., & Khormali, F. 2019. An environmentally friendly soil improvement technology for sand and dust storms control. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 6(1), 63-71.
- Bachmeier, K. L., A. E. Williams, J. R. Warmington, and S. S. Bang. 2002. Urease Activity in Microbiologically-Induced Calcite Precipitation. *Journal of Biotechnology*, Vol. 93, pp. 171-181.
- Cheng, D.Y. 1991. Study of shifting sand stabilization with polymers. *Research of shifting sand control* (2), Ningxia People's Publishing House, Yingchuan, pp. 349-357.
- Ci, L., & Yang, X. 2010. Desertification and its control in China (p. 500). China: Springer/Higher Education Press.
- Crawford, R. L., M. B. Burbank, T. J. Weaver, and B. C. Williams. 2010. In situ Precipitation of Calcium Carbonate (Caco3) By Indigenous Microorganisms to Improve Mechanical Properties of a Geomaterial, US Patent# US 8420362 B2.
- DeJong, J. T., Martinez, B. C., Mortensen, B. M., Nelson, D. C., Waller, J. T., Weil, M. H., Ginn, T. R., Weathers, T., Barkouki, T., Fujita, Y., Redden, G., Hunt, C., Major, D. and Tanyu, B. 2009. Upscaling of bio-mediated soil improvement, *Proc. 17th Int. Conf, Soil Mech, Geotech, Engng, Alexandria*, 2300-2303.
- DeJong, J. T., Mortensen, M. B., Martinez, B. C. & Nelson, D. C. 2010. Biomediated soil improvement, *Ecol, Engng* 36, No. 2, 197-210.
- DeJong, J. T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., Van Paassen, L. A., Al Qabany, A., ... and Weaver, T. 2013. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. In *Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print 2013* (pp. 143-157), Ice Publishing.
- U.S. EPA. 2002. Urea tolerance reassessment eligibility decision (TRED). *Federal Register* 67 (72): 18197-18202.
- Espinoza, D. & Santamarina, J. C. 2010. Ant tunneling: a granular media perspective. *Granular Matter* 12, No. 6, 607-616.
- Ferris, F. G., Stehmeier, L. G., Kantzas, A. Mourits, F. M. 1996. Bacteriogenic mineral plugging. *J. Can. Petrol, Technol.* 35, No. 8, 56-61.
- Goodrich, B. A., Koski, R. D., and Jacobi, W. R. 2009. Condition of soils and vegetation along roads treated with magnesium chloride for dust suppression. *Water, Air, and Soil Pollution*, 195, 165-188.
- Goodrich BA, Jacobi WR. 2012. Foliar damage, ion content, and mortality rate of five common roadside tree species treated with soil applications of magnesium chloride. *Water Air Soil Pollut*; 223(2): 847-62.
- Hamdan, N., Kavazanjian, E. 2016. Enzyme-induced carbonate mineral precipitation for fugitive dust control. *Geotechnique* 66:546-555.
- Han, Z., Wang, T., Dong, Z., Hu, Y., and Yao, Z. 2007. Chemical stabilization of mobile dunefields along a highway in the Taklimakan Desert of China. *Journal of Arid Environments*, 68(2), 260-270.
- Hodges, T. M., and Lingwall, B. N. 2020a. Effects of Microbial Biomineralization Surface Erosion Control Treatments on Vegetation and Revegetation along Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119812093362.
- Hodges, T. M. and Lingwall, B. N. 2020b. Laboratory Study in the Treatment of Burned Soils with Microbial Augmentation for Erosion Control. In *Geo-Congress 2020: Biogeotechnics* (pp. 20-28), Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Lal, R. 2020. Soil erosion and gaseous emissions. *Applied Sciences*, 10(8), 2784.
- Li, X., Zhu, Y., and Zhang, Z. 2010. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*, 45(3), 766-775.
- Lohnes, R. E. and Coree, B. J. 2002. Determination and evaluation of alternate methods for managing and controlling highway-related dust. *Iowa Highway Research Board/Department of Transportation Report TR449*.



چهارمین کنفرانس ملی حفاظت خاک و آبخیزداری با محوریت گرد و غبار

تهران- پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

۲۸ بهمن ماه ۱۳۹۹



- Martinez, B. C. 2012. Experimental and numerical upscaling of MICP for soil improvement. Doctoral dissertation, University of California, Davis, CA, USA.
- Meyer, F. D., S. Bang, S. Min, L. D. Stetler, and S. S. Bang. 2011. Microbiologically-Induced Soil Stabilization: Application of *Sporosarcina Pasteurii* for Fugitive Dust Control. Geo-Frontiers 2011, Dallas, Tex.
- Michigan Department of Environmental Quality. 2014. Guidelines for Selecting Dust Suppressants to Control Dust and Prevent Soil Erosion. Office of Environmental Assistance.
- Mitchell, J. K. & Santamarina, J. C. 2005. Biological considerations in geotechnical engineering. ASCE J. Geotech. Geoenviron. Engng 131, No. 10, 1222–1233.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. and Blair, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science-AAAS-Weekly Paper Edition 267 (5201), 1117–1122.
- Rushing, J. F., Harrison, A., Tingle, J. S., Mason, Q. and McCaffrey, T. 2006. Evaluation of dust palliatives for unpaved roads in arid climates. J. Performance of Constructed Facilities 20: 281-286.
- Saadoud, D., Hassani, M., Peinado, F. J. M., and Guettouche, M. S. 2018. Application of fuzzy logic approach for wind erosion hazard mapping in Laghouat region (Algeria) using remote sensing and GIS. Aeolian research, 32, 24-34.
- Santra, P., Moharana, P. C., Kumar, M., Soni, M. L., Pandey, C. B., Chaudhari, S. K., and Sikka, A. K. 2017. Crop production and economic loss due to wind erosion in hot arid ecosystem of India. Aeolian Research, 28, 71-82.
- Shao, Y. 2008. Physics and Modelling of Wind Erosion. Springer.
- Stabnikov, V., Chu, J., Myo, A. N. and Ivanov, V. 2013. Immobilization of sand dust and associated pollutants using bioaggregation. Water, Air, & Soil Pollution, 224(9), 1-9.
- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K. and Bang, S. S. 1999. Microbiological precipitation of CaCO_3 : Soil Biol. Biochem, 31, No. 11, 1563–1571.
- Wu Z., Zhang X., Wu M. 2016. Mitigating construction dust pollution: state of the art and the way forward. J Clean Prod 112:1658–1666.