19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

کنترل زیستی فرسایش بادی: بررسی پتانسیل MICP به عنوان یک فناوری پایدار

بیژن خلیلی مقدم

عضو هیات علمی گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

(khalilimoghadam@asnrukh.ac.ir; bkhalilimoghadam@gmail.com)

چکیده

هدف از این پژوهش، تولید مالچ سازگار با محیط زیست با استفاده از روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) می باشد. بدین منظور از ماسه های روان بکر غرب رودخانه کرخه، از عمق سطحی و زیرسطحی نمونه برداری گردید و باکتری های تولیدکننده آنزیم اوره آز که قادر به رشد در دمای بین ۴۵-۵ درجه سانتیگراد و شوری ۲۰ دسی زیمنس بر متر بوده اند و همچنین توانایی ترسیب کربنات کلسیم را داشته اند، برای تولید مالچ انتخاب گردیده اند. نتایج این پژوهش نشان داده است که در شرایط صحرایی بر خلاف شرایط آزمایشگاهی، باکتری های بومی *Bacillus licheniformis 1D1* و *Bacillus mojavensis 2D2* توانایی بالاتری در تثبیت ماسه های‌روان نسبت به باکتری غیر بومی *Sporosarcina pasteurii* داشته اند. به دلیل ترسیب کربنات کلسیم(۵/۹۷ -۳/۹۴ درصد در شرایط آزمایشگاهی و ۴/۸۷-۳ درصد در شرایط صحرایی)، در بین ذرات شن طی فرآیند MICP، به شکل های واتریت، آرگونیت و کلسیت(بر اساس نتایج XRD و SEM) ، به طور معنی داری مقاومت خاک افزایش و فرسایش پذیری بادی کاهش یافت. مالچ پاشی زیستی، باعث افزایش مقاومت فروروی(۱۰-۸/۳۰ برابر در شرایط آزمایشگاهی و ۷/۵۷-۵/۲۴ برابر در شرایط صحرایی)، چسبندگی (۴۰/۳۰-۱۳/۷۹ برابر در شرایط آزمایشگاهی و ۱۵/۰۴-۹/۹۴ برابر در شرایط صحرایی) و سرعت حد آستانه فرسایش بادی(۲۰/۵۰-۳۶/۱۱ برابر در شرایط صحرایی)نسبت به ماسه روان بدون تیمار گردیده است که در نتیجه آن، در شرایط صحرایی، فرسایش پذیری بادی ماسه ها، ۹۱/۸۸-۸۴/۰۷ برابر نسبت به ماسه روان بدون تیمار کاهش یافت.

واژگان کلیدی: مالچ سازگار با محیط زیست، ویناس، باکتری های تولید کننده اوره آز، ماسه روان

مقدمه

فناوری بیولوژیکی سبز و سازگار با محیط زیست با نام رسوب میکروبی کربنات کلسیم به عنوان یک روش بهسازی خاک توسعه داده شده است. روش MICP برای اصلاح خواص مکانیکی خاک مانند مقاومت، سختی و نفوذپذیری به کار میرود. به دلیل سادگی و عدم تولید پروتون اضافی، در بسیاری از کاربردهای MICP تا به امروز از باکتریهای هیدرولیزکننده اوره استفاده میشود و از این رو این روش تحت عنوان رسوب میکروبی کربنات کلسیم شناخته میشود (ویفین و همکاران، ۲۰۰۷). برخی مطالعات انجام شده در زمینه MICP در جدول ۱ آمده است.

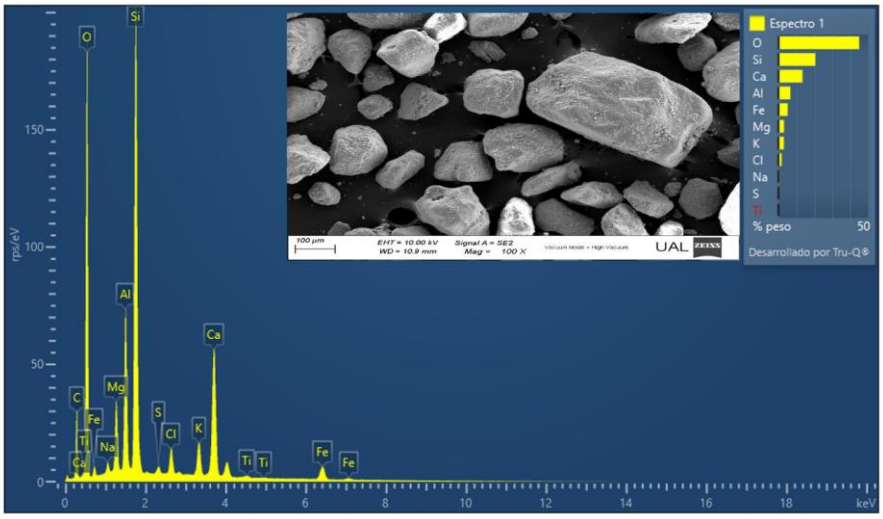
جدول ۱: برخی مطالعات انجام شده در زمینه MICP

تأثیرات مهم	بستر اعمال شده	میکروارگانیسم مورد استفاده	منابع
بهبود مقاومت فشاری کاهش هدررفت خاک تولید کریستال‌های واتریت	خاک شنی	*Sporosarcina pasteurii* (PTCC 1645)	ملکی و همکاران، ۲۰۱۶
کاهش ترک خوردگی	خاک رسی	*S. pasteurii* (ATCC 11859)	ویل و همکاران، ۲۰۲۰
تشکیل پلی‌مورف‌های کربنات کلسیم	بتن	*S. pasteurii* (DSM33)	زهنیر و همکاران، ۲۰۲۰
افزایش استحکام و ساختار فشرده‌تر	خاکستر بادی	*S. pasteurii* (BNCC136654)	تیان و همکاران، ۲۰۲۲
استحکام بالا و انعطاف‌پذیری خوب	شن	*Bacillus oceanicus* (22085)	وانگ و همکاران، ۲۰۲۲
بهبود تراکم‌پذیری و استحکام برشی	خاک آلی	*S. pasteurii* (NCIMB 8221)	کاناکسی و همکاران، ۲۰۱۵
سیمان‌سازی همگن و افزایش استحکام	ماسه سیلیس	*Bacillus sphaericus* (MCP-11)	چنگ و کوردرویش (۲۰۱۲)
حذف کادمیوم از طریق ترسیب	خاک آلوده به کادمیوم	*Pseudochrobactrum sp.*	شنگ و همکاران، ۲۰۲۲
تشکیل سله و افزایش مقاومت فشاری نامحدود	خاک آهکی	*S. pasteurii* (ATCC 1376)	لی و همکاران، ۲۰۲۳
کاهش انباشت محتوای نمک	خاک شور	*Bacillus oceanic* (XR1#)	وانگ و همکاران، ۲۰۲۴
افزایش مقاومت فروروی کاهش مقدار خاک فرسایش‌یافته	ماسه بادی	*S. pasteurii* (ATCC 1645)	دوزالی جوشین و همکاران، ۱۳۹۷
تولید کریستال‌های $CaCO_3$	ماسه روان	*Sporosarcina sp.* *Bacillus sp.*	کارگر و کارگر ، ۱۳۹۷
تحکیم و تثبیت ماسه بادی کاهش نفوذ	ماسه بادی	*S. pasteurii* (ATCC 1645)	باغبانان و همکاران، ۱۳۹۵
تشکیل کریستال‌های واتریت کاهش مقدار خاک فرسایش‌یافته افزایش مقاومت برشی	شن روان	*S. pasteurii* (ATCC 1645)	ملکی کاکلر و همکاران، ۱۳۹۵
کاهش تراوایی افزایش مقاومت برشی و فشاری	خاک‌های ماسه‌ای	*S. pasteurii* (ATCC 1645)	روشن‌بخت و همکاران، ۱۳۹۴
تشکیل سله در سطح کاهش هدررفت خاک	شن ریز و درشت	*S. pasteurii* (ATCC 11859)	بنگ و همکاران، ۲۰۱۱
افزایش مقاومت فشاری	خاک‌های سبک	*S. pasteurii* (MTCC 1771)	شارما و رام‌کریشنان، ۲۰۱۶
افزایش استحکام ترمیم شکاف سیمان	شن	*S. pasteurii* (NCIMB 8841)	ابو ال عنین و همکاران، ۲۰۱۲
افزایش مقاومت برشی	خاک شنی	*S. pasteurii* (ATCC 1645)	آزادی و همکاران، ۲۰۱۷
افزایش مقاومت فشاری	شن سیلیس	*S. pasteurii* (ATCC 11859)	ژائو و همکاران، ۲۰۱۴
افزایش ظرفیت نگهداشت خاک	شن	*S. pasteurii* (DSMZ 33)	وایفین و همکاران، ۲۰۰۷

تاکنون مطالعه جامعی در ارتباط با کاربرد MICP در کنترل تپه های ماسه ای به صورت صحرایی انجام نگردیده است، این پژوهش باهدف تولید مالچ های زیستی از ضایعات کشاورزی و باکتری های بومی منطقه برای کنترل ماسه های روان در شرایط جنوب‌غرب کشور انجام شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از ۸ منطقه عرصه ماسه های روان غرب روخانه کرخه(شکل ۱) که کمترین تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی مشاهده شده است، برای نمونه برداری انتخاب گردید. در هر منطقه از عمق ۳۰ - ۰ و ۶۰-۳۰سانتیمتر نمونه‌برداری صورت گرفت و نمونه‌ها جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی به آزمایشگاه منتقل گردید. از هر نقطه حدود ۳ کیلوگرم ماسه های روان برداشت شد و هر نمونه در کیسه‌های پلاستیکی مجزا ذخیره گردید. نمونه ها پس از انتقال به آزمایشگاه به دو بخش تقسیم شد: یک بخش جهت بررسی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی ماسه های روان و بخش دوم برای جداسازی باکتری های بومی استفاده گردید.



شکل ۱- میکروسکوپ الکترونی روبشی و تجزیه عنصری ماسه های روان

این پژوهش به صورت دو آزمایش جداگانه به صورت آزمایشگاهی و صحرایی انجام گردید: در شرایط آزمایشگاهی، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا شد. تیمارهای آزمایش عبارتند: نوع باکتری در پنج سطح شامل: سه نوع باکتری بومی *Bacillus licheniformis 1S5, Bacillus licheniformis 1D1, Bacillus mojavensis 2D2,* و باکتری غیربومی *Sporosarsina past*، شاهد(بدون باکتری)؛ نوع منبع کربن شامل ویناس الکل، ویناس خمیرمایه و ویناس غلیظ؛ پ-هاش محیط: خنثی شده و خنثی نشد ه؛ مواد افزودنی: افزودن اوره و کلرید کلسیم و بدون افزودنی، که در قالب ۱۸۰ واحد آزمایشی صورت گرفته است. در ابتدا ویناس های اسیدی و خنثی در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتیگراد برای ۱۵ دقیقه استریل شده و هر لیتر از ویناس اتوکلاو شده به ۴ ارلن با حجم ۵۰۰ میلی لیتر به میزان ۲۵۰ میلیلیتر افزوده شد. سپس به هرکدام از ارلن‌ها یک درصد از کشت شبانه باکتری افزوده و سپس به شیکر انکوباتور با دمای ۳۰ درجه انتیگراد برای مدت ۷۲ ساعت انتقال داده شدند. پس از دوره انکوباسیون، به ویناس‌هایی با تیمار مواد افزودنی، ۲ درصد اوره و ۲ درصد کلرید کلسیم صنعتی در شرایط استریل افزوده و به خوبی باهم مخلوط شدند. شن استریل به میزان ۱۲ کیلوگرم به سینی‌ها افزوده شده و با استفاده از پیستوله، هرکدام از تیمارهای ویناس به میزان یک لیتر در هر سینی شن پاشیده شد.

در شرایط صحرایی، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار بر روی ماسه‌های روان در شرایط طبیعی اجرا شد. تیمارهای آزمایش عبارتند: نوع باکتری در پنج سطح شامل: سه نوع باکتری بومی *Bacillus licheniformis 1S5,*

Bacillus licheniformis 1D1, Bacillus mojavensis 2D2, و باکتر ی غیربومی *Sporosarsina pasturii* ، شاهد(بدون باکتری)؛ نوع منبع کربن شامل ویناس الکل، ویناس خمیرمایه و ویناس رقیق؛ پ-هاش محیط: خنثی شده و خنثی نشده؛ مواد افزودنی: افزودن اوره و کلرید کلسیم و بدون افزودن، که در قالب ۱۸۰ واحد آزمایشی صورت گرفته است. به هر کدام از ویناس‌های اسیدی و خنثی به مقدار ۱۰ درصد حجمی باکتری کشت شده در محیط نوترینت براث افزوده گردید. سپس به وینا س‌هایی با تیمار مواد افزودنی، ۲ درصد اوره و ۲ درصد کلرید کلسیم صنعتی افزوده و به خوبی باهم مخلوط شدند. با استفاده از پیستوله، هرکدام از تیمارهای ویناس به میزان یک لیتر در هر واحد معادل سینی شن(۱۰۵ * ۳۵ * ۲) سانتیمتر پاشیده شد.

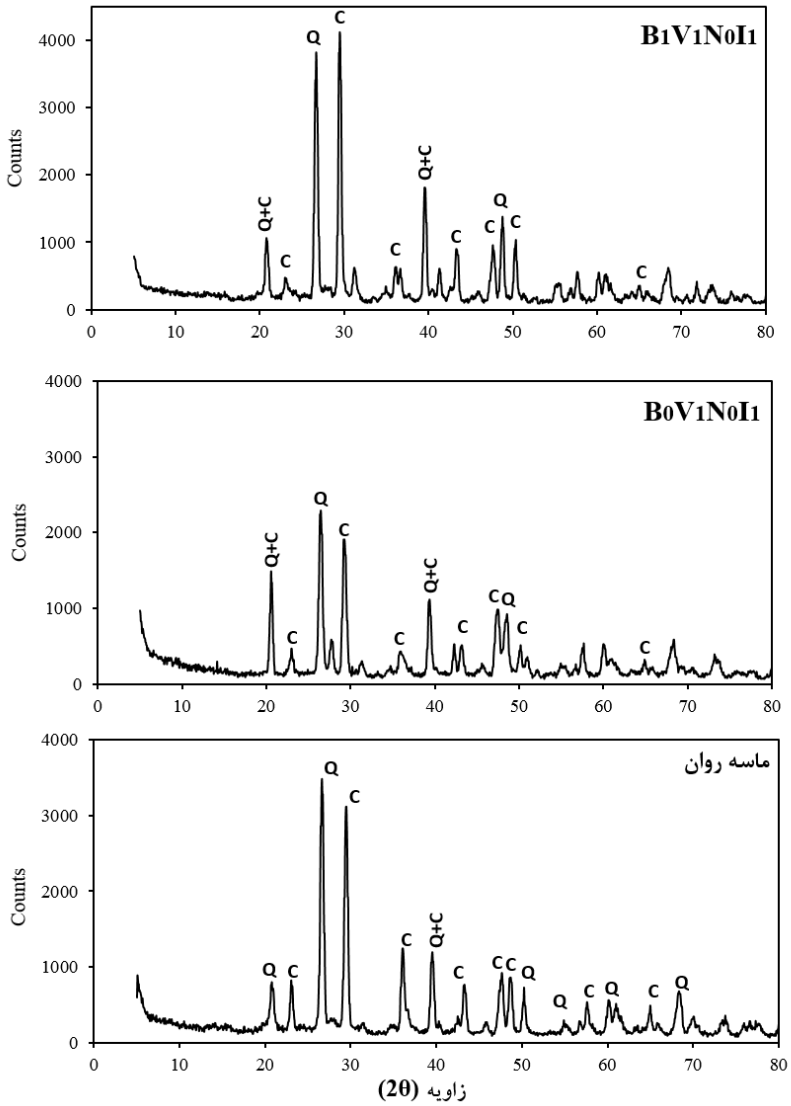
برای بررسی میزان فرسایش بادی از دستگاه سنجش فرسایش بادی یا تونل باد استفاده گردیده است. بدین منظور ابتدا سینی دستگاه سنجش فرسایش بادی تهیه و پس از پر نمودن آنها با ماسه بادی و پاشیدن مواد در غلظت و مقدار مشخص بر روی آن، یک ماه در فضای باز در معرض هوای آزاد قرار گرفته و سپس سرعت آستانه و میزان فرسایش بادی اندازه‌گیری خواهد شد. برای انجام آزمایش فرسایش بادی سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه و با تداوم ۱۵ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. سرعت آستانه فرسایش بادی و مقدار فرسایش پذیری بادی با استفاده از دستگاه تونل باد قابل حمل در صحرا مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. مالچ ها باید بتوانند میزان فرسایش بادی را بیشتر از ۹۰ درصد در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دهند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید. همچنین، از نرم افزار اکسل جهت رسم نمودارها استفاده شد.

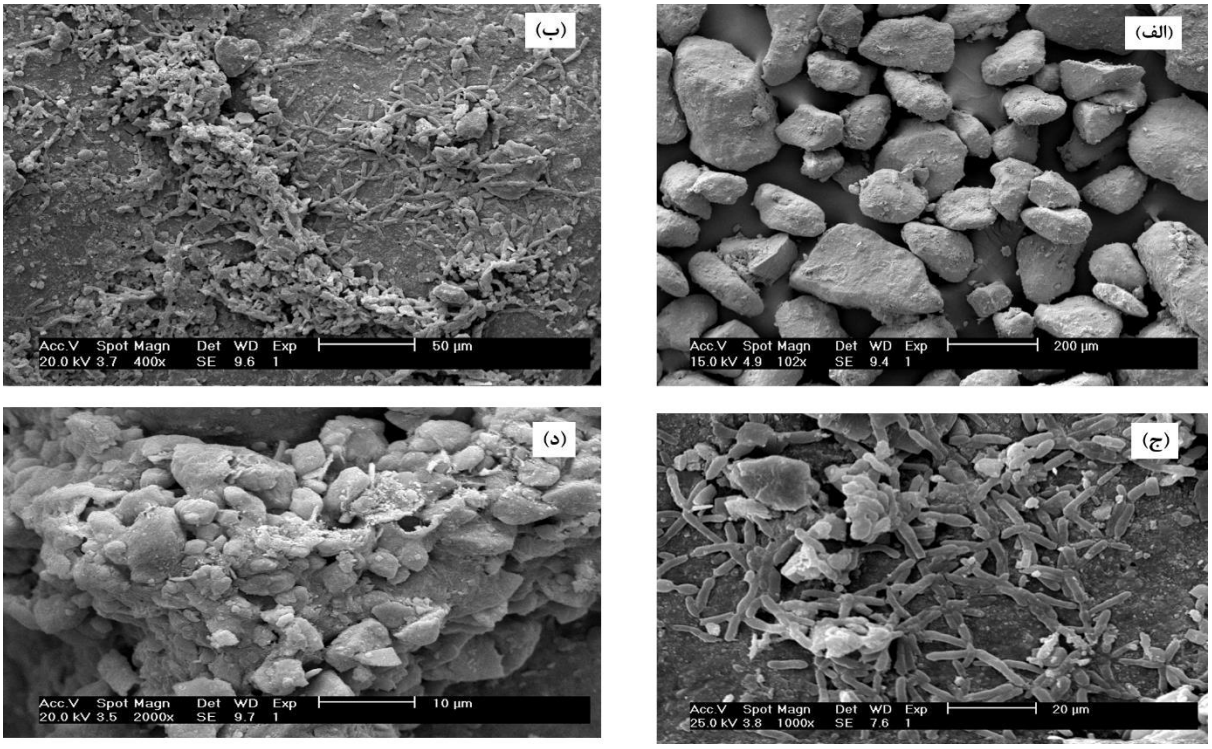
نتایج و بحث

همانطوری که در این شکل مشاهده می گردد، کانی غالب در نمونه ماسه روان، کوارتز و کلسیت می باشد. مقایسه تیمار شاهد $B_0V_1N_0I_1$با نمونه ماسه های روان نشان می دهد که افزودن ویناس کارخانه الکل به ماسه های روان باعث افزایش ترسیب کانی کلسیت در تیمار شاهد(پیک ۲۰/۷۸ درجه) و تیمارB1V1N0I1 (پیک ۲۹/۲۵ درجه) گردیده است. مقایسه تیمار حاوی باکتری *Bacillus licheniformis 1S5*با نمونه ماسه های روان بیان کننده این موضوع است که افزودن باکتری بومی *Bacillus licheniformis 1S5*به همراه ویناس کارخانه الکل به همراه ماده افزودنی و در پ-هاش خنثی موجب افزایش میزان کربنا ت کلسیم می گردد.

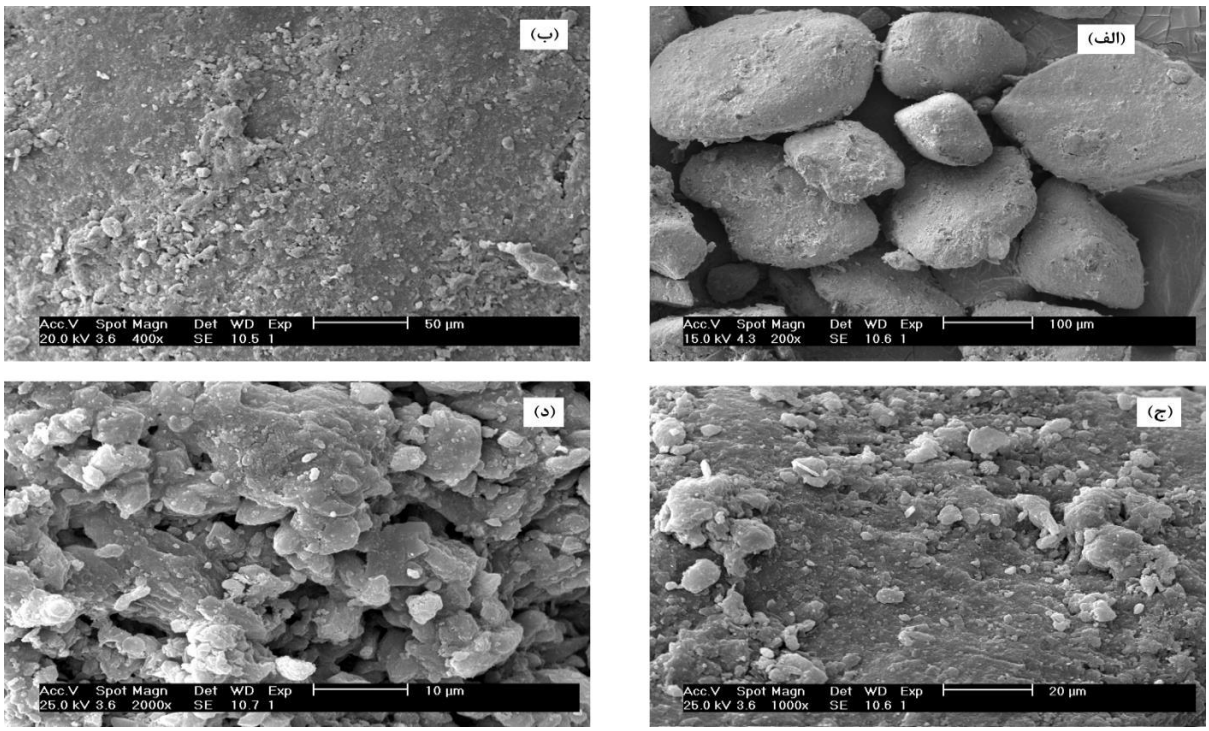
تصاویر ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ، تیمار شاهد، B0V1N0I1 و B1V1N0I1 می باشد. همانطوری که در این تصاویر مشاهده می گردد، میزان فراوانی بلورهای کربنات کلسیم B1V1N0I1 نسبت به شاهد بیشتر بوده است. که بیشتر از نوع کروی شکل(واتریت) می باشد. همانطوری که در تصویر ۱ مشخص است باکتری های بومی خاک، در حفرات بین ذرات شن، ویناس کارخانه الکل را تجزیه نموده و کربنات کلسیم تولید می نمایند. که در نتیجه آن ذرات خاک به هم متصل می گردد و مقاومت ذرات در برابر فرسایش بادی افزایش می یابد. وان پاسن و همکاران (۲۰۱۰) و آچال و پن(۲۰۱۱) اظهار داشتند که MICP از طریق هیدرولیز اوره قابل کنترل ترین مسیر ترسیب کربنات است، و طبق گفته های آچال و پان(۲۰۱۱)، در کمترین زمان به با بالاترین سطح ترسیب $CaCO_3$ می رسد.



شکل ۲- پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه ماسه روان، B0V1N0I1 بدون باکتری، ویناس کارخانه الکل و پ-هاش خنثی نشده و با ماده افزودنی)وB1V1N0I1 باکتریBacillus licheniformis 1S ، ویناس کارخانه الکل و پ-هاش خنثی نشده و با ماده افزودنی (Q: کانی کوارتز و C: کانی های کربناته(کلسیت، واتریت و آراگونیت)



شکل ۲- آنالیز SEM برای تیمار B0V1N0I1الف) بزرگنمایی 200X، ب) بزرگنمایی 400X، ج) بزرگنمایی 1000X، د)بزرگنمایی 2000 X



شکل ۳- آنالیز SEM برای تیمار B1V1N0I1الف) بزرگنمایی 200X، ب) بزرگنمایی 400X، ج) بزرگنمایی 1000X، د)بزرگنمایی 2000 X

نتیجه‌گیری

کاهش و کنترل فرسایش بادی مهمترین معیار مورد بررسی در ارزیابی کارایی مالچ ها می باشد، در واقع کنترل فرسایش بادی دلیل اصلی استفاده از مالچ های مختلف در عرصه های بیابانی می باشد(زارع و همکاران، ۱۳۹۷). مالچ های زیستی ترکیباتی هستند که در این پژوهش تولید و مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای تولید این مالچ ها، از تکنیک ترسیب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) و ویناس به عنوان منبع کربن ارزان استفاده شده است. بدین منظور جدایه های مناسب برای تکنیک MICPو سازگار با ماسه های روان جنوب غرب ایران غربالگری، شناسایی و ثبت ژن(۶موردجدایه) گردیده اند. همه جدایه های ثبت شده، در برابر شوری(بیش از ۲۰ دسی زیمنس) وگرما(بیش از ۴۵ درجه سانتیگراد) مقاوم بوده اند و توانایی رشد و تکثیر در هر چهار نوع ویناس کارخانه الکل، ویناس خمیرمایه، ویناس غلیظ و ویناس رقیق را داشته اند. اما این توانایی در مورد ویناس غلیظ کمتر بوده است. همچنین این جدایه ها، مولد آنزیم اوره آز و کربنیک آنهیداز بوده اند و توانایی ترسیب کربنات کلسیم به شکل واتریت(تشخیص بوسیله پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ نوری) و تا حدی کلسیت را داشته اند. بهترین منابع کلسیمی، برای این جدایه ها، کلرید کلسیم با غلظت ۲ درصد و همچنین بهترین منبع آمونیمی اوره با غلظت ۲ درصد بدست آمده است.

با توجه به قدرت تولید آنزیم اوره آز و توانایی ترسیب کربنات کلسیم، از بین این جدایه ها، سه جدایه بومی *Bacillus mojavensis 2D2* ، *Bacillus licheniformis 1D1* ، *Bacillus licheniformis 1S5*و جدایه غیربومی *Sporosarcina pasteurii* برای تهیه مالچ مورد استفاده قرار گرفتند. اوره و کلرید کلسیم را به عنوان پیش ماده برای ترسیب کربنات کلسیم در مالچ های زیستی در نظر گرفته شد. از آنجایی که، پ-هاش اسیدی ویناس(۵ –۴)، می تواند بر روی ویژگی های ماسه های روان و پایداری کانی های ترسیبی مانند کربنات کلسیم موثر باشد، بنابراین اثر خنثی سازی پ -هاش محیط کشت(ویناس) مالچ ها قبل از پاشش، بر ویژگی های ماسه های روان مورد توجه قرار گرفت.

این ترکیبات در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی بر روی ماسه های روان مالچ پاشی شدند و ویژگی های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی ماسه های روان مورد بررسی و ارزیابی واقع شدند. در شرایط آزمایشگاهی، ترکیبات مختلف مورد استفاده شامل انواع ویناس(کارخانه الکل، کارخانه خمیرمایه و غلیظ)، باکتری(*Sporosarcina pasteurii* ، *Bacillus mojavensis 2D2* ، *Bacillus licheniformis 1D1* ، *Bacillus licheniformis 1S5*و شاهد) و مواد افزودنی(کود اوره و کلرید کلسیم) می باشد که در دو حالت پ-هاش خنثی و پ-هاش اسیدی مورد ارزیابی قرار گرفتند. این مالچ ها به طور معنی داری باعث بهبود ویژگی های مکانیکی(مقاومت فروروی و چسبندگی)، فیزیکی(ضخامت سله و زبری سطح) و شیمیایی(کربنات کلسیم و مواد آلی)گردیده است.

همچنین افزودن مالچ ها باعث افزایش شوری و نسبت جذب سدیم ماسه های روان گردیده است. مالچ های با ماده زمینه ویناس خمیر مایه نسبت به ویناس کارخانه الکل کارایی بهتری در بهبود ویژگی های فیزیکی و مکانیکی و تثبیت ماسه های روان داشته اند. اما مالچ های با زمینه ویناس غلیظ کارایی قابل قبولی نداشته اند. مالچ های حاوی باکتری غیربومی *Sporosarcina pasteurii*از کارایی بالاتری در افزایش ترسیب کربنات کلسیم، ضخامت سله، زبری سطح و مقاومت ماسه های روان نسبت به مالچ های دارای باکتری های بومی(، Bacillus mojavensis 2D2 ، *Bacillus licheniformis 1D1* ، *Bacillus licheniformis 1S5*) در شرایط آزمایشگاهی برخوردار بوده است. اگرچه تفاوت معنی داری بین کارایی باکتری غیربومی *Sporosarcina pasteurii*و باکتری بومی *Bacillus mojavensis 2D2* وجود نداشته است. مقایسه باکتری های بومی با یکدیگر نشان می دهد که باکتری های *Bacillus mojavensis 2D2* و *Bacillus licheniformis 1D1* نسبت به باکتری *Bacillus licheniformis 1S5* از کارایی بهتری در بهبود ویژگی های مورد ارزیابی ماسه های روان دارا می باشند. اگرچه استفاده از کود اوره و کلرید کلسیم باعث افزایش ترسیب کربنات کلسیم و مقاومت ماسه های روان گردیده است، ولی بدون استفاده از این مواد نیز باکتری های بومی *Bacillus mojavensis 2D2*و *Bacillus licheniformis 1D1* توانایی افزایش ترسیب کربنات کلسیم، ضخامت سله، زبری سطح و مقاومت ماسه های روان را داشته اند. اما افزودن کود اوره و کلرید کلسیم به محیط باکتری غیربومی*Sporosarcina pasteurii* باعث افزایش معنی دار ترسیب کربنات کلسیم و افزایش زبری، مقاومت ماسه های روان می گردد. به دلیل خاصیت بافری ماسه های روان، بعد از مالچ پاشی، پ-هاش ماسه های روان به حدود ۷/۴۰ می رسد که تفاوت چندانی با حالت خنثی شده (۷/۴۴) ندارد. بنابراین بر اساس ارزیابی انجام شده، در شرایط آزمایشگاهی از بین ۶۰ ترکیب مالچی، سه مالچ به عنوان مالچ های برتر

برای تثبیت ماسه های روان شناخته شده است، ترکیب مالچ اول: باکتری *Sporosarcina pasteurii* ، با محیط کشت خمیرمایه و حاوی اوره) ۲ درصد(و کلرید کلسیم) ۲ درصد(و پ-هاش خنثی نشده، ترکیب مالچ دوم: باکتری *Bacillus mojavensis 2D2* ، با محیط کشت خمیرمایه و بدون مواد افزودنی و پ-هاش خنثی نشده و ترکیب مالچ سوم: باکتری *Bacillus licheniformis 1D1* ، با محیط کشت خمیرمایه و و بدون مواد افزودنی و پ- هاش خنثی نشده.

در شرایط صحرایی، ترکیبات مختلف مورد استفاده شامل ویناس(ویناس کارخانه الکل، ویناس خمیرمایه و ویناس رقیق)، باکتری(*Sporosarcina pasteurii* ، *Bacillus mojavensis 2D2*، *Bacillus licheniformis 1D1*، *Bacillus licheniformis 1S5* و شاهد) و مواد افزودنی(کود اوره و کلرید کلسیم) می‌باشد که در دو حالت پ-هاش خنثی و پ-هاش اسیدی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در شرایط صحرایی، این مالچ ها به طور معنی داری باعث بهبود ویژگی های مکانیکی(مقاومت فروروی و چسبندگی)، فیزیکی(فرسایش پذیری بادی، سرعت حد آستانه فرسایش بادی، ضخامت سله) و شیمیایی(کربنات کلسیم و مواد آلی) گردیده است. همچنین افزودن مالچ ها در شرایط صحرایی نیز، باعث افزایش شوری(۲۵ دسی زیمنس بر متر) و نسبت جذب سدیم(۴۵) ماسه های روان گردیده است. مالچ های با ماده زمینه ویناس رقیق که ترکیبی برابر از کارخانه الکل و خمیرمایه می باشد نسبت به ویناس کارخانه الکل خمیرمایه، کارایی بهتری در کاهش فرسایش پذیری بادی، افزایش سرعت حد آستانه فرسایش بادی، مقاومت خاک ضخامت سله و به طور کلی تثبیت ماسه های روان داشته اند. در شرایط صحرایی(برخلاف شرایط آزمایشگاهی)، مالچ های حاوی باکتری های بومی *Bacillus licheniformis 1D1* و *Bacillus mojavensis 2D2* از کارایی بالاتری در تثبیت ماسه های روان نسبت به مالچ های دارای باکتری غیر بومی *Sporosarcina pasteurii* برخوردار بوده است.

مقایسه باکتری های بومی با یکدیگر در شرایط صحرایی نیز نشان می دهد که باکتری های *Bacillus mojavensis 2D2*و *Bacillus licheniformis 1D1* نسبت به باکتری *Bacillus licheniformis 1S5* از کارایی بهتری در بهبود ویژگی های مورد ارزیابی ماسه های روان دارا می باشند. در شرایط صحرایی افزودن کود اوره و کلرید کلسیم به محیط کشت ویناس برای هر دو نوع باکتری های بومی و غیر بومی، در مقایسه با شرایط بدون مواد افزودنی، باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه های روان گردیده است. همچنین، در این شرایط، خنثی کردن پ -هاش ویناس در مقایسه با خنثی نشدن آن، بهبود خواص مکانیکی ماسه های روان را در پی داشته است. در شرایط صحرایی، از بین ۶۰ ترکیب مالچی، دو مالچ به عنوان مالچ های برتر برای تثبیت ماسه های روان شناخته شده است، ترکیب مالچ اول :باکتری *Bacillus licheniformis 1D1* ، با محیط کشت ویناس رقیق و حاوی اوره) ۲ درصد(و کلرید کلسیم) ۲ درصد)و پ-هاش خنثی نشده، ترکیب مالچ دوم: باکتری *Bacillus mojavensis* 2D2 ، با محیط کشت ویناس رقیق و حاوی اوره(درصد) و کلرید کلسیم(درصد) و پ -هاش خنثی شده.

به طور کلی مالچ های زیستی برتر باعث کاهش میزان فرسایش پذیری بادی، افزایش سرعت حد آستانه فرسایش بادی، مقاومت فروروی، چسبندگی، ضخامت سله، ترسیب کربنات کلسیم و مواد آلی در مقایسه با ماسه های روان بدون تیمار گردیده است. که بیان کننده این موضوع می باشد، که در شرایط حاکم بر بیابان ها مانند گرما و سرمای شدید، اختلاف درجه حرارت شب و روز تابش شدید آفتاب و اشعه ماوراء بنفش خورشید، بادهای غالب و فرساینده و بارش های شدید و سیل آسا به مرور زمان مقاومت و حدآستانه فرسایش پذیری مالچ، کاهش و فرسایش پذیری بادی افزایش می یابد. درز و ترک های مالچ های زیستی هم در شرایط آزمایشگاهی و هم صحرایی قابل توجه نبوده است. اما در شرایط صحرایی تردد انسان یا دام، در سطح این مالچ ها درز و ترک ایجاد نموده است. شدت ایجاد درز و ترک ها با توجه به خاصیت ارتجاعی مالچ ها، قابل تامل است. خاصیت ارتجاعی این نوع مالچ ها در شرایط صحرایی مساله ساز بوده است و همین درز و ترک ها ناشی از ورود دام یا انسان باعث افزایش فرسایش پذیری بادی گردیده است. که به نظر می رسد اضافه نمودن رس های ارتجاع پذیری مانند بنتونیت کلسیم دار، به این مالچ ها در کاهش فرسایش پذیری بادی کمک نماید.

از لحاظ زیست محیطی، بهتر است از باکتری های بومی همان منطقه استفاده شود و کاربرد باکتری غیربومی توصیه نمی گردد. با توجه به اینکه در شرایط آزمایشگاهی اختلاف معنی داری بین کارایی باکتری غیر بومی *Sporosarcina pasteurii* و باکتری بومی *Bacillus mojavensis 2D2* در تثبیت ماسه های روان وجود نداشته است.از طرفی، کارایی باکتری های بومی در شرایط صحرایی بهتر از باکتری های غیر بومی بوده است، کاربرد جدایه های بومی در اولویت قرار می گیرد. بنابراین مالچ با

ترکیب باکتری های *Bacillus mojavensis 2D2* و *Bacillus licheniformis 1D1* با محیط کشت ویناس رقیق و حاوی اوره(۲ درصد) و کلرید کلسیم(۲ درصد) و پ -هاش خنثی شده انتخاب می گردد.

فهرست منابع

Gat, D., Ronen, Z., Tsesarsky, M. 2016. Soil bacteria population dynamics following stimulation for ureolytic microbial-induced CaCO3 precipitation. Environmental Science and Technology. 50 (2): 616–624.

Hammes, F., Verstraete, W. 2002. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 1:3–7.

چکیده انگلیسی

Biological Control of Wind Erosion: Evaluation of the Potential of MICP as a Sustainable Technology

Bijan Khalili Moghadam
Department of Soil Science, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran(**Email:** khalilimoghadam@asnrukh.ac.ir)

Abstract :
The aim of this study was to produce an environmentally friendly mulch using the microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. For this purpose, samples of sand dunes were collected from surface and subsurface layers in the western region of the Karkheh River. Urease-producing bacteria capable of growing within a temperature range of 5–45 °C and salinity up to 20 dS m^{-1}, and with the ability to precipitate calcium carbonate, were selected for mulch production. The results indicated that, under field conditions, unlike laboratory conditions, the indigenous bacteria Bacillus licheniformis 1D1 and Bacillus mojavensis 2D2 exhibited higher efficiency in stabilizing sand compared to the non indigenous bacterium *Sporosarcina pasteurii*. Due to calcium carbonate precipitation (ranging from 94.3–97.5% under laboratory conditions and 83–87.4% under field conditions) between sand particles during the MICP process, vaterite, aragonite, and calcite phases were formed (confirmed by XRD and SEM analyses). This significantly enhanced soil strength and reduced wind erosion susceptibility. Bio-mulching increased penetration resistance by 10–30.8 times under laboratory conditions and 24.5–57.7 times under field conditions; cohesion by 13.79–40.30 times (laboratory) and 9.94–15.04 times (field); and the threshold wind erosion velocity by 36.11–50.20 times (field) compared to untreated sand. Consequently, under field conditions, the wind erosion susceptibility of treated sands decreased by 84.07–91.88 times compared to untreated sand.
Keywords: Environmentally friendly mulch, vinasse, urease-producing bacteria, sand dunes, Khuzestan