

## ارزیابی کارایی رسوب میکروبی کربنات برای تثبیت شن‌های روان

مهدی ملکی کاکلر<sup>۱</sup>، سیروس ابراهیمی<sup>۲\*</sup>، فرخ اسدزاده<sup>۳</sup>، مهرداد امامی تبریزی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲. دانشیار مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۴. استادیار مهندسی عمران، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

### چکیده

فرسایش بادی یکی از عوامل اصلی در تخریب خاک و محیط زیست و همچنین آلودگی هوا در مناطق خشک و نیمه خشک است. با توجه به هزینه‌های زیاد استفاده از مالچ‌های نفتی و همچنین اثرات مخرب محیط زیستی این نوع مالچ‌ها، در تحقیق حاضر، اثر فرآیند ترسیب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) به عنوان یک روش بیولوژیک سبز و سازگار با محیط زیست جهت کنترل فرسایش بادی و تثبیت شن‌های روان مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور با استفاده از یک دستگاه تونل باد، فرسایش نمونه‌های سیمانی شده بیولوژیکی در طیفی از سرعت‌های مختلف باد در دامنه‌ی ۱۰ تا ۵۵ کیلومتر بر ساعت در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از کف تونل شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که در تمامی سرعت‌های باد تیمار MICP در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش معنی‌داری در مقدار فرسایش خاک ایجاد کرده است. با این حال تأثیر MICP در سرعت‌های بالا بسیار چشمگیر بود به طوری که شار تلفات خاک در تیمار شاهد و تیمار MICP در سرعت ۵۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۲۴۰ در مقابل ۲/۱۳ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت بود. نتایج آزمایش مقاومت فروری نشان داد که کاربرد MICP تا حدود ۳ برابر سبب افزایش مقاومت فروری لایه‌ی سطحی نمونه‌ها شده است که نشان‌دهنده تشکیل لایه مقاوم سطحی بر روی نمونه‌های سیمانی شده است. بررسی رسوبات کربنات کلسیم با استفاده از آنالیز XRD و SEM نیز نشان داد رسوبات کربنات کلسیم بیشتر به شکل کریستال‌های واتریت می‌باشد که به صورت یک پل ارتباطی سبب اتصال ذرات سست ماسه به یکدیگر شده و مقاومت آن‌ها را در مقابل تنش برشی باد افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیمان بیولوژیکی، MICP، کنترل فرسایش بادی، مقاومت فروری

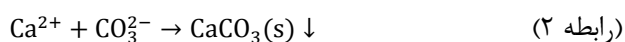
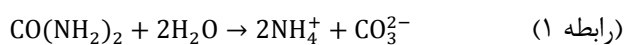
### مقدمه

می‌رود که این امر به نوبه‌ی خود سبب کاهش بهره‌وری کشاورزی می‌گردد. علاوه بر این آلودگی هوا و آب‌های سطحی و همچنین کاهش دید افقی ناشی از گرد و غبار از دیگر پیامدهای منفی فرسایش بادی است که می‌تواند اثرات سویی بر سلامت انسان داشته باشد (Van Pelt Diouf *et al.*, 1990; and Zobeck, 2004). فرسایش بادی حتی ممکن است در مناطق اقلیمی مرطوب نیز به صورت موضعی رخ دهد اما وقوع آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک شایع‌تر است (Fryrear and Skidmore, 1985). با توجه به اینکه کشور ما نیز از نظر اقلیمی در شرایط خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و با در نظر گرفتن ملاحظات محیط زیستی، کنترل فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت زیادی برخوردار است روش‌های مختلفی برای کنترل فرسایش بادی و در نتیجه کاهش گرد و غبار وجود دارد. این روش‌ها غالباً به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند (Goudie and Middleton, 2006)

فرسایش بادی یکی از عوامل اصلی در تخریب خاک و محیط زیست، آلودگی هوا، انتقال ذرات معلق و ترسیب آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی است (Movahedan *et al.*, 2012). حرکت و انتقال ذرات گرد و غبار خاک توسط نیروی باد به عنوان یکی از علل اصلی فرآیند بیابان‌زایی شناخته شده است که در نتیجه آن تبدیل مناطق کشاورزی به زمین‌های بایر و ایجاد پوشش شن و ماسه بر روی آن‌ها است. تپه‌های شنی، به علت رطوبت ناکافی و همچنین عدم پوشش مناسب گیاهی، دارای چسبندگی کمی بوده و مستعد فرسایش بادی می‌باشند. در طی فرآیند فرسایش بادی از سطح خاک‌ها و به تبع آن ایجاد طوفان‌های گرد و غبار، مواد مغذی و مواد آلی خاک از بین

\* نویسنده مسئول: sirous.ebrahimi@epfl.ch

واسطه زیستی<sup>۴</sup> نیز خوانده می‌شود، برای اصلاح خواص مکانیکی خاک مانند مقاومت، سختی و نفوذپذیری بکار می‌رود. در MICP با هیدرولیز اوره توسط سلول‌های باکتریایی و یا آنزیم اوره‌آز خالص به عنوان کاتالیزور، یون‌های کربنات و آمونیوم تولید می‌شوند (رابطه ۱) که در ادامه، یون‌های کربنات تولید شده به آسانی در حضور یک منبع کلسیم موجب تشکیل رسوب کربنات کلسیم می‌شوند (رابطه ۲). به دلیل سادگی و عدم تولید پروتون اضافی، در بسیاری از کاربردهای MICP تا به امروز، از باکتری‌های هیدرولیز کننده اوره استفاده می‌شود و از این رو این روش تحت عنوان رسوب میکروبی کربنات کلسیم شناخته می‌شود (Whiffin et al., 2007).



در سال‌های اخیر کاربردهای متعددی برای فناوری MICP گزارش شده است که این کاربردها در طیف وسیعی از حوزه‌ها نظیر حذف آلاینده‌ها (Hammes Fujita et al., 2010; et al., 2003; van Paassen et al., 2010)، بهسازی خاک (Whiffin et al., 2007; Wiktor and Jonkers, 2011) و حفاظت و مرمت آثار تاریخی (Tiano et al., 1999) جای می‌گیرند.

در کنار کاربردهای فوق‌الذکر MICP در زمینه‌های مختلف، اخیراً استفاده از MICP به عنوان یک عامل مهار کننده گرد و غبار<sup>۵</sup> در خاک‌های سیلنتی و رسی مورد بررسی قرار گرفته است (Bang et al., 2011; Meyer et al., 2011). این مطالعه در واقع به عنوان یک بسطی بر پژوهش‌های اخیر در زمینه ارزیابی پتانسیل فناوری MICP در کنترل فرآیند فرسایش بادی و جلوگیری از انتقال ماسه‌های سست تپه‌های شنی است. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی آزمایشگاهی استفاده از فناوری MICP با باکتری *Sporosarcina Pasteurii* در کاهش تلفات خاک ناشی از فرسایش بادی به کمک تونل باد بوده و طی آن اثر MICP در افزایش مقاومت فروری نمونه‌ی شن به عنوان یک شاخص ساده از مقاومت لایه سطحی خاک مورد آزمایش قرار گرفته است. در نهایت، مورفولوژی و ساختار کانی‌شناسی بلورهای رسوب کربنات کلسیم با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۶</sup> (SEM) و پراش پرتو اشعه ایکس<sup>۷</sup> (XRD) مورد بررسی قرار گرفته است.

(Movahedan et al., 2012): ۱. روش‌های زراعی که در آن‌ها از پوشش گیاهی یا باقی‌مانده محصولات برداشت شده به عنوان باد شکن و محافظ سطح خاک استفاده می‌شود، ۲. روش‌های مکانیکی که در آن‌ها با ایجاد موانع مکانیکی مانند فنس‌های فلزی در مقابل جریان باد سرعت باد را کاهش می‌دهند، ۳. ایجاد لایه مقاوم به فرسایش در سطح خاک با استفاده از تثبیت‌کننده‌های مختلف نظیر مالچ نفتی و مواد پلیمری.

روش زراعی اغلب بسیار دشوار است زیرا خاک ممکن است از نظر کشاورزی نامناسب باشد. علاوه بر این، باد می‌تواند باعث کندن ریشه گیاهان جوان شده و یا با بلند کردن ماسه‌ها به آن‌ها آسیب برساند. از سوی دیگر، این روش نیازمند دوره طولانی زمان رشد داشته و تأمین منابع آب کافی برای رشد گیاهان است که سبب دشواری اجرای آن در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌گردد (Diouf et al., 1990). استفاده از شبکه‌های فلزی نیز به علت تاب برداشتن و پیچش لبه‌ها ناکارآمد است. همچنین، ایجاد تلاطم در قسمت بادپناه<sup>۱</sup> خود می‌تواند حفاظت مؤثر را کاهش دهد (Goudie and Middleton, 2006). علاوه بر روش‌های فوق‌الذکر، ایجاد لایه‌ی سطحی مقاوم نیز به دلیل هزینه پایین و مدت زمان کم برای اجرا، در بسیاری از عملیات کنترل فرسایش بادی استفاده می‌گردد (He et al., 2008). در این روش از موادی نظیر آب، مواد پلیمری و مالچ‌های نفتی به عنوان مقاوم کننده‌ی لایه‌ی سطحی استفاده می‌شود (Armbrust and Lyles, 1975; Lyles et al., 1974). با این حال استفاده از این مواد مخصوصاً مالچ‌های نفتی می‌تواند پیامدهای منفی زیست محیطی به همراه داشته باشد (Armbrust and Dickerson, 1971).

افزایش مقاومت لایه سطحی خاک در مقابل تنش برشی جریان باد، عاملی کلیدی در کنترل فرسایش بادی است. از این رو، اساس بسیاری از روش‌های کنترل فرسایش خاک مورد استفاده در حال حاضر، مبتنی بر تثبیت و تقویت سطح خاک است. در این رابطه، شکل‌گیری پوسته فیزیکی به شدت می‌تواند خطر فرسایش باد را کاهش دهد. در سال‌های اخیر فناوری بیولوژیکی سبز و سازگار با محیط زیست با نام رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP<sup>۲</sup>) به عنوان یک روش بهسازی خاک توسعه داده شده است (DeJong et al., 2010). روش MICP که با نام‌های دیگری مانند سیمان‌تاسیون میکروبی<sup>۳</sup> و بهسازی

4 Bio-mediated soil improvement

5. Dust Suppressant

6. Scanning Electron Microscope (SEM)

7. X-ray Diffraction (XRD)

1. Lee

2 Microbial Induced Carbonate Precipitation

3 Microbially Induced Cementation

مخصوص با ابعاد  $15 \times 15 \times 5$  سانتی متر استقرار یافت و به مدت ۵ دقیقه در معرض جریان باد با سرعت‌های مختلف قرار داده شد. کاهش جرم نمونه‌ها پس از شبیه‌سازی جریان باد به عنوان مقدار خاک فرسایش یافته در نظر گرفته شد. ذکر این نکته لازم است که برای توزیع مناسب باکتری به عنوان بیوکاتالیست بر روی سطح، سطح نمونه‌ها باید رطوبت کافی را داشته باشد و بعد از آن محلول باکتریایی به همراه محلول سیمان کننده تزریق شود.

#### آماده‌سازی نمونه

ابتدا سینی‌های مخصوص دستگاه سنجش فرسایش بادی بر روی زمین چیده شد. پس از ریختن نمونه‌های خاک در سینی‌ها به چگالی تقریبی برابر با  $1.7 \text{ gem}^{-3}$  اندازه‌گیری و سپس سطح آن به طور کامل صاف و یکنواخت گردید. نسبت پوکی<sup>۳</sup> نمونه‌های درون سینی پس از آماده‌سازی در حدود  $0.51$  بود. حجم تیمار بیولوژیکی MICP شامل باکتری و محلول سیمان کننده اضافه شده به سینی‌های معادل با تخلخل یک سانتی متر از عمق نمونه‌های بود؛ به عبارت دیگر حجم محلول MICP به گونه‌ای انتخاب شد که بتواند یک سانتی متری سطح نمونه‌ها را به طور کامل اشباع کند. محلول MICP به صورت کاملاً یکنواخت و به کمک آبپاش به روی خاک داخل سینی پاشیده شد. به منظور خشک شدن کامل تیمارها، سینی‌های آماده شده به مدت چهار روز در هوای آزاد خشک شد. به منظور یکسان‌سازی شرایط بستر، بر روی تیمار شاهد نیز آب‌پاشی با همان حجم اما بدون محلول MICP صورت گرفت. شکل (۲) نمونه‌های شاهد و نمونه‌هایی که فرآیند MICP در آن‌ها صورت گرفته است را نشان می‌دهد. در جدول (۱) جزئیات مربوط به محلول MICP آماده شده ارائه شده است.

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی محیط کشت باکتری

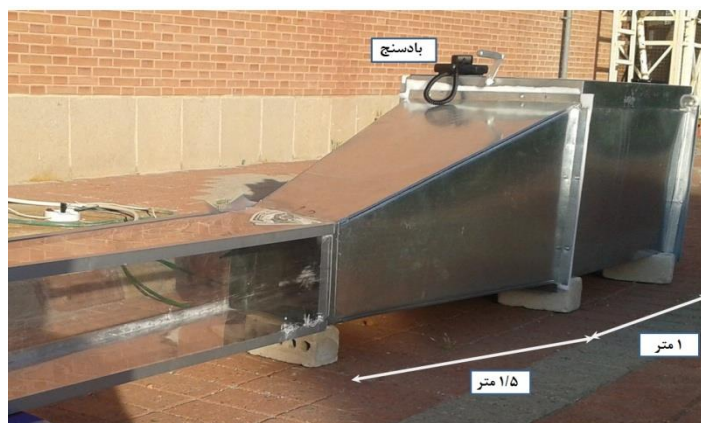
در فناوری MICP، از باکتری *Sporosarcina pasteurii* (PTCC<sup>۱</sup> 1645) به عنوان باکتری تولید کننده اوره‌آز استفاده شد. کشت میکروارگانیسم و فرآیند شبیه‌سازی فرسایش بادی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات بیوتکنولوژی دانشگاه صنعتی سهند انجام شد. کشت باکتری در یک محیط استاندارد با ترکیب ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر<sup>۲</sup>، ۱۰ گرم بر لیتر کلرید آمونیوم و  $0.24$  گرم بر لیتر کلرید نیکل در pH برابر ۹ انجام شد (Whiffin et al., 2007). باکتری *S. pasteurii* در یک شیکر انکوباتور (DR 3020، شرکت فن آوران سهند آذر ایران) با  $200$  دور در دقیقه تحت شرایط هوازای کشت داده شد. محلول سیمان کننده MICP نیز شامل کلرید کلسیم و اوره بود. همه آزمایش در دمای  $2 \pm 25$  درجه سانتی‌گراد انجام شد.

### تهیه‌ی نمونه و آزمایش فرسایش بادی

برای انجام این تحقیق یک نمونه خاک شنی با حدود ۹۵٪ شن و ۵٪ سیلت از عمق ۱۰-۰ cm سطح تپه‌های ماسه‌ای که دارای pH برابر با ۸٫۱ بود از استان یزد در مرکز ایران انتخاب شد. به منظور بررسی اثر فناوری MICP در کنترل فرسایش بادی از دستگاه تونل باد (شکل ۱) استفاده شد. این دستگاه قادر به تولید جریان باد با سرعتی در محدوده‌ی ۱۰ تا ۶۰ کیلومتر در ساعت در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از کف تونل است. تونل باد ساخته شده برای انجام فرآیند فرسایش بادی شامل فن، یکنواخت کننده توزیع هوا، مبدل و محفظه آزمایش بوده و محفظه آزمایش آن نیز دارای ابعاد  $150 \times 30 \times 30$  سانتی‌متر است. نمونه‌ی شاهد و همچنین نمونه‌ی MICP درون سینی‌های

1. Persian Type Culture Collection
2. Yeast Extract

### 3. Void ratio



شکل ۱. تونل باد مورد استفاده برای انجام فرآیند فرسایش بادی به ترتیب از راست به چپ: فن، یکنواخت کننده توزیع هوا، مبدل و محفظه آزمایش



شکل ۲. تصویری از سطح نمونه شاهد و نمونه سیمانی شده با فناوری MICP

جدول ۱. جزئیات مربوط به تهیهی محلول MICP

توضیحات	نرخ جریان	حجم تزریق	نوع محلول
	پاششی	۰/۵ برابر حجم فضای منفذی	باکتری
محلول ۱ مولار اوره و کلرید کلسیم	پاششی	برابر حجم فضای منفذی	محلول سیمان کننده

شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت باد مقدار تلفات خاک در نمونه‌ی شاهد به صورت نمایی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت از سرعت ۱۰ تا ۳۵ کیلومتر بر ساعت، میزان افزایش فرسایش بادی در نمونه‌ی شاهد ناچیز است اما با افزایش سرعت باد از ۳۵ به ۵۵ کیلومتر بر ساعت در نمونه شاهد، شار تلفات خاک به یک‌باره از ۵/۳۳ به حدود ۲۴۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت افزایش می‌یابد که نشان دهنده‌ی اهمیت سرعت‌های جریان بالا در تلفات خاک است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، روند افزایشی شار تلفات خاک از MICP بسیار کند بوده و در سرعت ۵۵ کیلومتر بر ساعت نهایتاً به مقداری در حدود ۲/۱۳ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت افزایش یافته است. علاوه بر این، تفاوت در مقدار فرسایش بین تیمارهای بیولوژیکی و شاهد ارتباط مستقیم با سرعت باد دارد. به طوری که در مقایسه بین نمونه‌ی شاهد و MICP ملاحظه می‌شود، در سرعت ۵۵ کیلومتر بر ساعت جرم خاک فرسایش یافته برای نمونه‌ی شاهد ۲۴۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت و برای نمونه‌ی MICP تنها در حدود ۲/۱۳ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت است که نشان دهنده‌ی اثر بسیار چشمگیر MICP در کنترل فرسایش بادی به ویژه در سرعت‌های بالای باد است.

#### اندازه‌گیری مقاومت فروروی<sup>۱</sup>

به منظور بررسی اثر MICP بر روی مقاومت به فروروی نمونه‌ها از دستگاه میکروپنترومتر استفاده شد. این دستگاه دارای یک میله کوچک با نوک مخروطی است که مقدار فشار لازم برای فرو رفتن میله مذکور در نمونه را ثبت می‌نماید. مقاومت فروروی نمونه‌ها در ۳ نقطه از سطح هر نمونه تعیین شده و به منظور مقایسه نتایج از آزمون t استفاده شد.

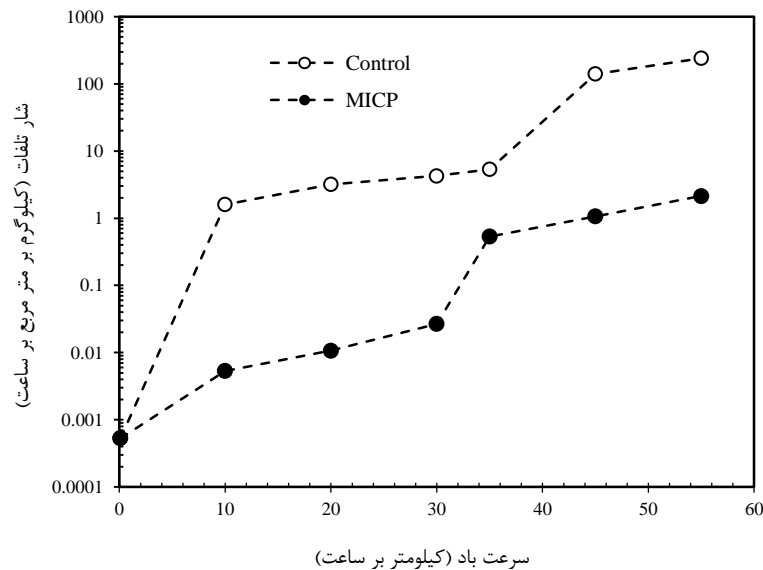
#### آنالیز SEM و XRD

برای بررسی توزیع رسوب کربنات کلسیم در نمونه‌ها و اطمینان از وجود آن در حفره‌های یک سانتی‌متری سطح خاک، عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از میکروسکوپ مدل CamScan MV2300, Canada مورد بررسی قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل نحوه توزیع رسوب کربنات کلسیم بر روی سطح خاک، برش نازک از نمونه شن دارای تیمار MICP تهیه و یا استفاده از دستگاه XRD مدل Bruker, D8ADVANCE, Germany مورد آنالیز قرار گرفت.

#### نتایج و بحث

نتایج مربوط به تغییرات مقدار خاک فرسایش یافته در دو تیمار شاهد و MICP در سرعت‌های مختلف باد در شکل (۳) ارائه

1. Penetration resistance



شکل ۳. شمار تلفات خاک در نمونه فرآوری شده با باکتری و نمونه شاهد در سرعت‌های مختلف تونل باد

آنها حاکی کارایی مطلوب مالچ رسی-آهکی با نسبت ۲۰۰ گرم رس و ۱۰ گرم آهک در سطح برابر با ۰/۳ مترمربع بود. این پژوهشگران دریافتند که با کاربرد نسبت مذکور مقدار فرسایش-پذیری بادی در حدود ۲/۷ برابر کاهش می‌یابد. نظر به اختلافات موجود از نظر دامنه سرعت‌های مورد استفاده و همچنین تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی خاک و نوع مالچ مورد استفاده، مقایسه جامع بین تیمارها از لحاظ فنی و اقتصادی به راحتی امکان‌پذیر نیست؛ با این وجود به نظر می‌رسد با توجه به مطالعات ذکر شده کاربرد تیمار بیولوژیکی MICP از دو جنبه دارای برتری نسبی است. از یک سو اثرات زیست محیطی آن به دلیل استفاده از باکتری‌های بومی موجود در خاک (*S. pasteurii*) نسبتاً کم است. از سوی دیگر به دلیل اینکه ترکیب مورد استفاده در MICP محلول آبی (باکتری و محلول سیمان کننده) بوده و ترسیب آن پس از تزریق در خاک اتفاق می‌افتد در نتیجه کاربرد عملی آن در شرایط صحرائی و مقیاس بزرگ آسان‌تر است. این در حالی است مخلوط کردن رس با خاک (Majdi *et al.*, 2006) و تزریق سوسپانسیون رس و آب (Hazirei and Zare Ernani, 2013) در مقیاس بزرگ نیاز به تجهیزات بسیار پیشرفته مهندسی داشته و تقریباً غیر عملی است.

#### مقاومت فروری

مقاومت فروری لایه سطحی به عنوان یک شاخص ساده از مقاومت در برابر فرسایش بادی با استفاده از فرسایش برای تیمارها در شرایط هوا خشک در ۱ سانتی‌متری لایه سطحی از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل (۴) ارائه شده

بررسی منابع نشان می‌دهد که برای کنترل فرسایش بادی، مالچ‌ها و موادی نظیر رس و آهک (Diouf *et al.*, 1990)، پلی‌وینیل استات (Movahedan *et al.*, 2012)، و موادی بر پایه لیگنین (Shulga and Betkers, 2011) مورد استفاده واقع شده‌اند. به عنوان مثال افزودن رس و کربنات کلسیم، می‌تواند فرآیند تشکیل پوسته در خاک شنی را بهبود بخشد. تشکیل پوسته سطحی، سرعت آستانه جدایش و در نتیجه مقدار تنش برشی مورد نیاز باد برای شروع فرسایش را افزایش می‌دهد (Gillette *et al.*, 1982; Gillette *et al.*, 1980).

(Majdi *et al.*, 2006) از مالچ رسی نیز به عنوان تیماری

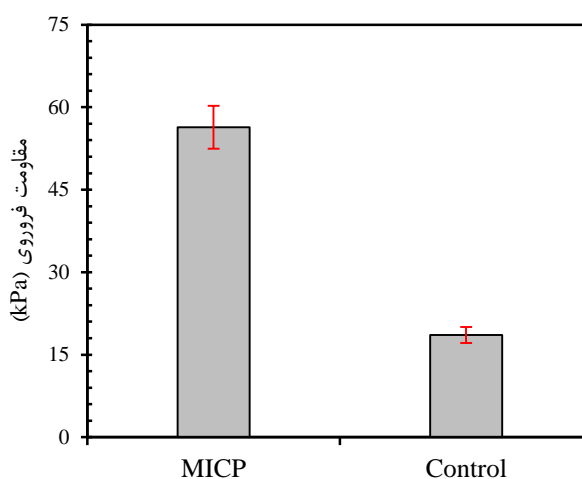
در جهت کاهش فرسایش بادی استفاده کرده‌اند. نتایج آنها بیانگر نقش مثبت مالچ رسی در کاهش فرسایش بادی است با این حال تیمارهای آنها شامل حجم زیادی از خاک رسی (نسبت خاک رس اضافه شده (مالچ) و نمونه خاک به صورت ۱:۱) بود. از این رو تأمین این مقدار مالچ و تزریق آن به خاک از لحاظ عملی و کاربردی به سختی امکان‌پذیر است. Movahedan *et al.*, (2012) نیز از پلیمر پلی وینیل استات به منظور کاهش فرسایش بادی استفاده نموده‌اند که نتایج آنها بیانگر کاهش ۹۰ درصدی مقدار فرسایش در خاک‌های با بافت متوسط تا سنگین در اثر کاربرد پلی‌وینیل استات است، با اینحال اثرات منفی محیط زیستی ترکیب مواد مورد استفاده و همچنین حجم بالای تزریق آن در درازمدت می‌تواند مشکلاتی را در محیط زیست ایجاد کند. (Hazirei and Zare Ernani, 2013) از مالچ رسی-آهکی به منظور تثبیت ماسه‌های روان استفاده نمودند. نتایج

2006) مقایسه شد. مقدار فراوانی نسبی کریستال‌های مختلف  $\text{CaCO}_3$  با مقایسه مساحت زیر نمودار پیک‌های مشخصه مهم با نسبت‌های اندازه‌گیری شده در یک نمونه از ترکیب معلوم انجام شد. با توجه به موارد مذکور غالب کریستال‌های تشکیل شده (۹۲٫۳٪) از نوع واتریت بوده و تنها درصد کمی از کریستال‌ها (۷٫۷٪) از نوع کریستال‌های کلسیت می‌باشند. مورفولوژی نمونه سیمانی شده بیولوژیکی MICP توسط SEM تعیین شد که در آن کریستال‌های  $\text{CaCO}_3$  در بین دانه‌های خاک تشکیل شده است (شکل ۶). به علت رسوب بالای کربنات کلسیم، یک پل ارتباطی بین دانه‌های ماسه تشکیل شده که در آن دانه‌های ماسه به راحتی از همدیگر قابل تمیز نیست (شکل ۶(A-B)). در شکل (۶(D-C)) کریستال‌هایی با شکل و اندازه‌های مختلف و حداکثر در اندازه ۱۰ میکرومتر مشاهده می‌شود. این کریستال‌ها بر اساس نتایج XRD بیشتر شامل کریستال‌های واتریت است هرچند در بعضی قسمت‌ها کریستال‌های کلسیت و رد پای میکروارگانسیم‌ها هم قابل مشاهده است.

در فرآیند ترسیب کریستال‌های کربنات کلسیم، هم تشکیل بیوفیلم و هم فوق اشباعیت محلی<sup>۱</sup> نقش کلیدی دارد. تشکیل بیوفیلم روی سطوح ذرات حاصل فعالیت آنزیمی باکتری‌ها در طی فرآیند بیولوژیک است. بیوفیلم تشکیل شده می‌تواند هسته اولیه برای تشکیل یون کربنات باشد. از یک سو باکتری‌ها به دلیل وجود بار منفی در دیواره سلولی خود، سایت هسته‌زایی برای تشکیل کریستال ایجاد می‌کنند ( Hammes and Verstraete, 2002). از سوی دیگر فعالیت آنزیمی باکتری‌ها منجر به فوق اشباعیت کربنات در فاز مایع می‌شود ( De Muynck et al., 2008). این فوق اشباعیت کربنات در حضور یون‌های کلسیم، نهایتاً باعث آغاز فرآیند ترسیب کریستال‌های کربنات کلسیم در داخل بیوفیلم می‌شود. تشکیل بیوفیلم با توجه به وجود مواد پلیمری خارج سلولی<sup>۲</sup>، محیط مناسبی را برای رسوب کریستال‌های واتریت فراهم می‌سازد. علاوه بر این، رسوب کریستال‌های کربنات کلسیم در منافذی که در آن بیوفیلم تشکیل نشده هم امکانپذیر است. در این حالت هم رسوب کریستال‌های کلسیت و هم واتریت محتمل است ( Lian et al., 2006). با توجه به مطالب مذکور، رسوب کریستال‌های کربنات کلسیم بصورت غیرهمگن در دو نوع واتریت و کلسیت در سطح خاک تشکیل می‌شود که البته نتایج مربوط به XRD و SEM نیز این مورد را تأیید می‌کند.

است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود استفاده از تیمار MICP توانسته است به طور معنی‌داری مقدار مقاومت فروروی نمونه‌ی شن را افزایش دهد به طوری که مقدار متوسط مقاومت فروروی در نمونه‌ی MICP برابر با ۵۶ کیلو پاسکال است در حالی که مقاومت فروروی نمونه‌ی شاهد تنها ۱۸ کیلو پاسکال است که این امر نشان‌دهنده‌ی افزایش تقریباً ۳ برابری مقاومت فروروی نمونه‌ی شن در اثر استفاده از MICP است. افزایش مقاومت فروروی در نمونه‌ی حاوی MICP می‌تواند به دلیل تشکیل رسوب کربنات کلسیم در بین حفرات خاک باشد که سبب ایجاد یک لایه سخت در یک سانتی‌متری سطح نمونه-ها شده است. با فرض اینکه رسوب کربنات کلسیم تنها در ۱ سانتی‌متر لایه بالای سطح رخ داده باشد (حجم خاک برابر با ۲۲۵ سانتی‌متر مکعب) مقدار کریستال به صورت تئوری و بر اساس روابط استوکیومتری معادلات ۱ و ۲ محاسبه شده و مقدار آن معادل با ۵ گرم کریستال در هر سانتی‌متر مکعب خاک بدست آمد. این مقدار کریستال رسوب شده در بین دانه-های خاک باعث افزایش حدود ۳ برابری مقاومت فروروی در مقایسه با نمونه شاهد شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که اعمال MICP در سطح خاک علاوه بر اینکه مقاومت آن را در برابر تنش برشی جریان باد افزایش می‌دهد، مقاومت خاک در مقابل نیروی فروروی را نیز افزایش می‌دهد.



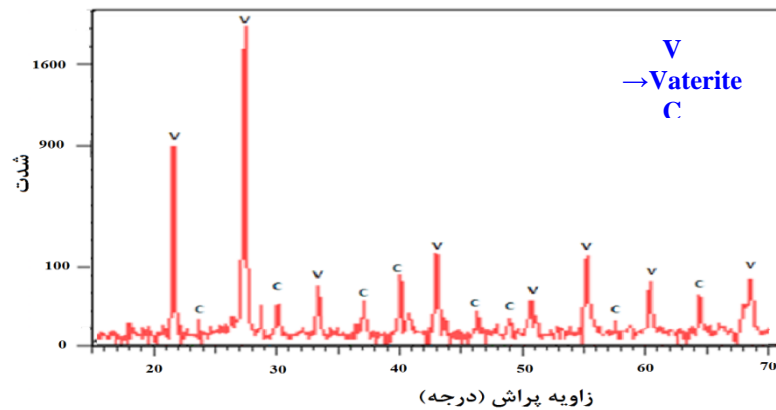
شکل ۴ - مقایسه‌ی مقاومت فروروی نمونه‌های شن شاهد و نمونه‌های با تیمار MICP

#### آنالیز SEM و XRD

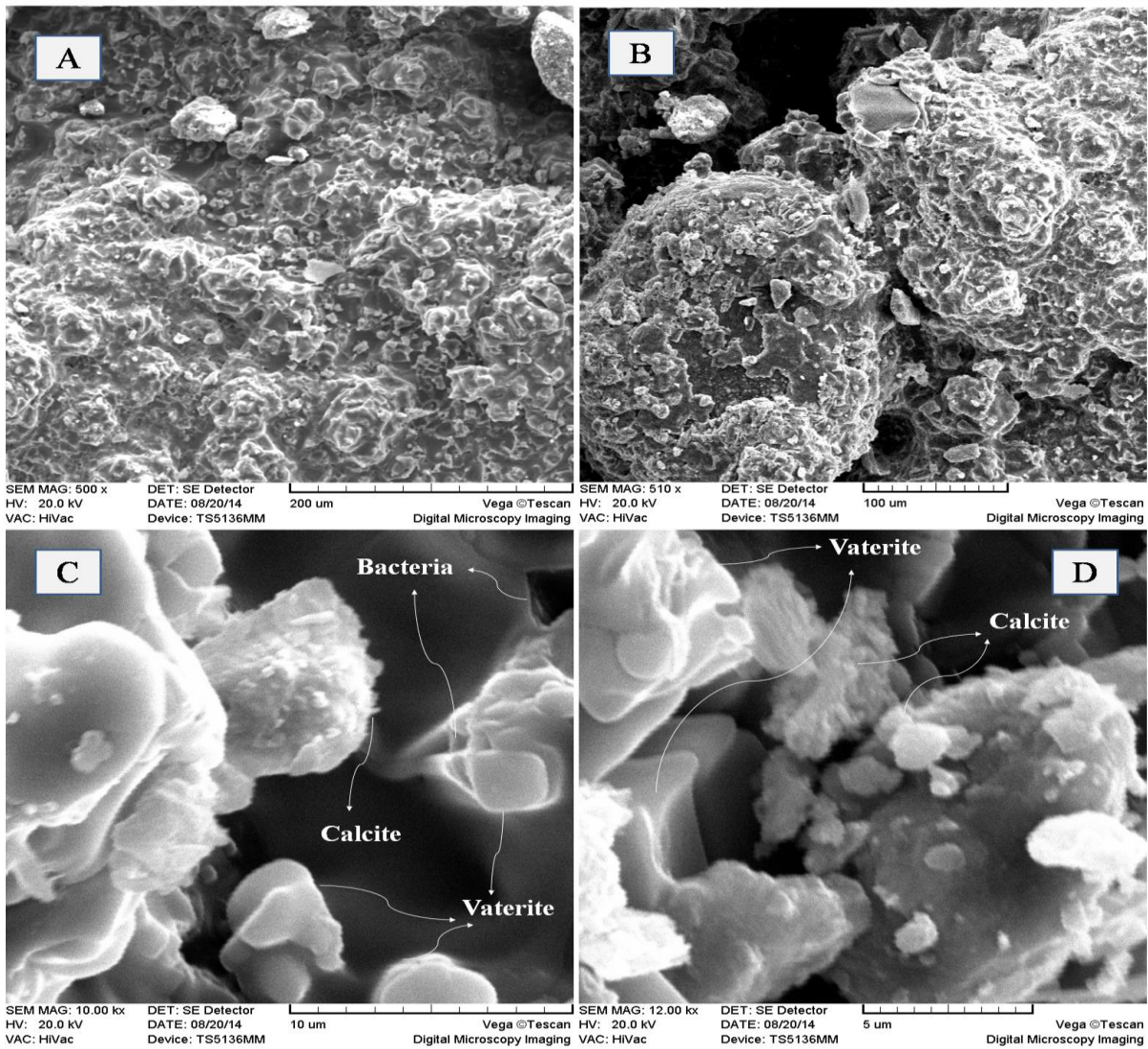
به منظور تشخیص کمی نوع رسوبات تشکیل شده در بین حفرات خاک، نتایج مربوط به آنالیز XRD نمونه‌ی MICP در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج XRD با طیف پراش معمول برای کلسیت و واتریت در پژوهش‌های قبلی ( Lian et al.,

1. Local Supersaturation  
2. Extracellular Polymeric Substances (EPS)





شکل ۵. آنالیز XRD برای نمونه دارای MICP



شکل ۶. آنالیز SEM برای ماسه بهسازی شده توسط فرآیند MICP: (A و B) به علت رسوب کربنات کلسیم یک پل ارتباطی بین دانه‌های ماسه تشکیل شده است و دانه‌های ماسه به راحتی از همدیگر قابل تمیز نیست (C و D) در بزرگنمایی بالاتر کریستال‌هایی با شکل و اندازه‌های مختلف حداکثر به اندازه ۱۰ میکرومتر تشکیل شده است که هم شامل کریستال‌های واتریت و هم کریستال‌های کلسیت می‌شود و در بعضی قسمت‌ها رد پای میکروارگانیسم‌ها نیز کاملاً مشهود است.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، کارایی فرآیند رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) به عنوان یک روش افزایش مقاومت خاک در مقابل تنش برشی جریان باد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از MICP در سطح خاک می‌تواند اثر بسیار قابل توجهی در کاهش تلفات خاک ناشی از فرسایش بادی به ویژه در سرعت‌های بالای جریان باد داشته باشد به طوری که استفاده از تیمار MICP، نسبت تلفات خاک را در مقایسه با نمونه شاهد در سرعت جریان برابر با ۵۵ کیلومتر بر ساعت، در حدود ۱۰۰ برابر کاهش می‌دهد. به نظر می‌رسد افزایش مقاومت لایه سطحی نمونه‌ها در اثر تولید سیمان بیولوژیک ناشی از فناوری MICP دلیل اصلی در کاهش تلفات خاک است. نتایج حاصل از مقایسه مقاومت فروروی نمونه شاهد و MICP بیانگر افزایش معنی‌دار و ۳ برابری مقاومت فروروی در تیمار نسبت به نمونه شاهد است. آنالیز SEM و XRD مؤید این واقعیت است که تشکیل رسوبات کربنات کلسیم که اغلب آنها از نوع واتریت می‌باشند دلیل اصلی افزایش مقاومت فروروی نمونه‌های MICP و در نتیجه مقاومت آنها در مقابل نیروی فرساینده باد است. با توجه به نتایج بدست آمده، تشکیل ساختار مقاوم در سطح خاک توسط فرآیند MICP می‌تواند باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای فرسایش خاک،

تثبیت تپه‌های ماسه‌ای برای کنترل گرد و غبار و ایجاد مجدد پوشش گیاهی شود. اگرچه تحقیقات در زمینه MICP بسیار جوان بوده و ابعاد مختلف آن مانند روش تزریق ناشناخته است اما با این حال روش MICP با توجه به تشکیل رسوب تقریباً نامحلول  $\text{CaCO}_3$  در آب و همچنین سازگاری با محیط زیست می‌تواند هم‌ردیف با سایر روش‌ها به عنوان یک روش جدید مطرح گردد. از نظر اقتصادی تهیه محیط کشت برای باکتری‌ها می‌تواند به عنوان عامل اصلی محدودکننده در کاربرد فناوری MICP محسوب گردد بطوریکه استفاده از MICP بر اساس روش ارائه شده در این پژوهش و بر مبنای قیمت‌های کنونی چیزی در حدود ۲۵۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال به ازای یک هکتار است. از این رو استفاده از محیط کشت‌های صنعتی ارزان‌قیمت مانند ملاس و یا عصاره خیس‌اندۀ ذرت<sup>۱</sup> به منظور کاهش هزینه‌های فرآیندی تا ۳۰ درصد هزینه کنونی می‌تواند از موضوعات تحقیقات آتی باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای بررسی کارایی این شیوه در شرایط طبیعی، پژوهش در سطح پایلوت در عرصه‌شن‌های روان اجرا شود.

1. Corn steep liquor

## REFERENCES

- Armbrust, D., and Dickerson, J. (1971). Temporary wind erosion control: cost and effectiveness of 34 commercial materials. *Journal of soil and water conservation* 26, 154-157.
- Armbrust, D., and Lyles, L. (1975) Soil stabilizers to control wind erosion. In W.R. Gardner and W.C. Moldenhauer (Eds.), *Soil Conditioners* (pp. 77-82). Soil Science Society of America Special Publication. No.7. Madison, WI.
- Bang, S. C., Min, S. H., Bang, S. S. (2011). KGS Awards Lectures: Application of Microbiologically Induced Soil Stabilization Technique for Dust Suppression. *International Journal of Geo-Engineering* 3, 27-37.
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., and Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and concrete Research* 38, 1005-1014.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., and Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering* 36, 197-210.
- Diouf, B., Skidmore, E., Layton, J., and Hagen, L. (1990). Stabilizing fine sand by adding clay: laboratory wind tunnel study. *Soil technology* 3, 21-31.
- Fryrear, D. W., and Skidmore, E. (1985). Methods for controlling wind erosion. In R. F. Follett and B. A. Stewart (Eds.) *Soil Erosion and Crop Productivity* (pp.443-57). Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Fujita, Y., Taylor, J. L., Wendt, L. M., Reed, D. W., and Smith, R. W. (2010). Evaluating the potential of native ureolytic microbes to remediate a 90Sr contaminated environment. *Environmental science & technology* 44, 7652-7658.
- Gillette, D. A., Adams, J., Endo, A., Smith, D., and Kihl, R. (1980). Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)* 85, 5621-5630.
- Gillette, D. A., Adams, J., Muhs, D., and Kihl, R. (1982). Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)* 87, 9003-9015.
- Goudie, A. S., and Middleton, N. J. (2006). Dust Storm Control. In A. Goudie and N. J. Middleton (Eds.), *Desert Dust in the Global System* (Chapter 8). (pp. 193-199). Springer Science & Business Media.
- Hammes, F., Seka, A., Van Hege, K., Van de Wiele, T., Vanderdeelen, J., Siciliano, S. D., and Verstraete, W. (2003). Calcium removal from industrial wastewater by bio-catalytic  $\text{CaCO}_3$



- precipitation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 78, 670-677.
- Hammes, F., and Verstraete, W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in environmental science and biotechnology* 1, 3-7.
- Hazirei, F., and Zare Ernani, M. (2013). Investigation of Effect of Clay-Lime Mulch for Sand Dunes Fixation. *Journal of Water and Soil* 27, 373-380.
- He J.-J., Cai, Q.-G., and Tang, Z.-J. (2008). Wind tunnel experimental study on the effect of PAM on soil wind erosion control. *Environmental monitoring and assessment* 145, 185-193.
- Lian, B., Hu, Q., Chen, J., Ji, J., and Teng, H. H. (2006). Carbonate biomineralization induced by soil bacterium *Bacillus megaterium*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 5522-5535.
- Lyles, L., Schrandt, R., and Schmeidler, N. (1974). Commercial soil stabilizers for temporary wind-erosion control. *Trans. ASAE* 17, 1015-1019.
- Majdi, H., Karimian-Eghbal, M., Karimzadeh, H., and Jalalian, A. (2006). Effect of Different Clay Mulches on the Amount of Wind Eroded Materials. *JWSS-Isfahan University of Technology* 10, 137-149.
- Meyer, F., Bang, S., Min, S., Stetler, L., and Bang, S. (2011). Microbiologically-Induced Soil Stabilization: Application of *Sporosarcina pasteurii* for Fugitive Dust Control. In proceedings of *Geo-Frontiers 2011@ sAdvances in Geotechnical Engineering*, pp. 4002-4011. ASCE.
- Movahedan, M., Abbasi, N., and Keramati, M. (2012). Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science* 1 (2) 81 –86.
- Shulga, G., and Betkers, T. (2011). Lignin-based dust suppressant and its effect on the properties of light soil. In "Proceedings of the 8th International Conference „Environmental Engineering", pp. 19-20.
- Tiano, P., Biagiotti, L., and Mastromei, G. (1999). Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *Journal of microbiological methods* 36, 139-145.
- van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J., van der Star, W. R., and van Loosdrecht, M. C. (2010). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136, 1721-1728.
- Van Pelt, R., and Zobeck, T. (2004). Effects of Polyacrylamide, Cover Crops, and Crop Residue Management on Wind Erosion. In proceedings of *13th International Soil Conservation Organisation Conference (ISCO)*, July 2004. Brisbane, Australia, pp. 1-4.
- Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., and Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal* 24, 417-423.
- Wiktor, V., and Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites* 33, 763-770.