نشریه علمی تحقیقات مرتع و بیابان ایران
جلد ۲۶ شماره ۴، صفحه ۸۳۷-۸۲۴، (۱۳۹۸)
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijrdr.2019.120677
شناسه دیجیتال (DOR): 98.1000/1735-0875.1398.4.824.77.26.1575.1603

ارزیابی کارایی بهسازهای زیستی در مهار فرسایش بادی خاک

ساره رجبی اگره[۱*]، فرشاد کیانی[۲]، کاظم خاوازی[۳]، حسن روحی‌پور[۴] و فرهاد خرمالی[۵]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران، پست الکترونیک: r.sareh@gmail.com

۲- دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۳- استاد، بخش تحقیقات بیولوژی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج، ایران

۴- دانشیار، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۵- استاد، گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۰۴

چکیده

پدیده مخرب بیابان‌زایی و فرسایش بادی امروزه از مهمترین بحران‌های زیست محیطی در جهان است که از چالش‌های جدی در برابر تولید پایدار و مدیریت اراضی کشاورزی محسوب می‌شود. در این پژوهش، اثر فرایند ترسیب میکروبی کربنات کلسیم به‌عنوان یک بهساز زیستی و سازگار با محیط‌زیست برای مهار فرسایش بادی و تثبیت خاک مطالعه شده است. بدین‌منظور با استفاده از شبیه‌سازی در تونل باد، میزان فرسایش نمونه‌های سیمانی شده از طریق زیستی در دامنه‌ای از سرعت‌های مختلف باد (صفر تا ۹۸ کیلومتر بر ساعت) در دو نوع خاک با بافت شنی و سیلتی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی در سه تکرار بررسی گردید. بررسی سرعت آستانه حرکت ذرات خاک نشان داد که در خاک هواخشک با بافت سیلتی ذرات خاک در سرعت ۸ کیلومتر بر ساعت و خاک شنی ذرات خاک در باد با سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت شروع به حرکت کردند. درصورتی‌که در تمامی نمونه‌های سیمانی شده با روش زیستی، ذرات در سرعت ۹۷ کیلومتر بر ساعت حرکت نکردند. همچنین نتایج نشان داد شار تلفات خاک در تمامی تیمارهای سیمانی شده با روش زیستی در سرعت‌های مختلف باد در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش معنی‌داری داشتند. تفاوت در مقدار تلفات خاک در بین نمونه‌های سیمانی شده با روش زیستی و تیمارهای شاهد در سرعت‌های بالای باد بسیار چشمگیر بود. به‌طوری‌که در سرعت‌های بیش از ۵۷ کیلومتر بر ساعت میزان تلفات خاک در تیمارهای شاهد به یکباره افزایش قابل‌ملاحظه‌ای نشان داد، درصورتی‌که در خاک‌های تیمار شده با باکتری میزان تلفات خاک بسیار ناچیز و در حدود ۲/۵ کیلوگرم در مترمربع در ساعت بود. همچنین نتایج نشان داد که مقدار کربنات کلسیم برابر و مقاومت فروروی سطح خاک در تیمارهای سیمانی شده با روش زیستی نسبت به تیمارهای شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داشت که این امر نشان‌دهنده تشکیل یک لایه مقاوم سطحی بر روی نمونه‌های سیمانی شده است. مقایسه بین باکتری‌های مورد استفاده در این پژوهش نیز نشان داد که *Bacillus infantis* و *Paenibacillus* sp. کارایی بالایی در مهار فرسایش بادی داشتند. بنابراین بنظر می‌رسد که سیمانی شدن به روش زیستی می‌تواند روشی مؤثر برای تثبیت ذرات سطح و مهار فرسایش بادی خاک باشد.

واژه‌های کلیدی: اوره‌آز، تثبیت خاک، سیمان زیستی، شار تلفات خاک.

مقدمه

یکی از مهمترین بحران‌های زیست محیطی پدیده مخرب بیابان‌زایی و فرسایش بادی است. فرسایش بادی که از عوامل محدودکننده حاصلخیزی خاک در بسیاری از نقاط جهان است با کاهش عمق خاک سطحی، چالشی جدی در برابر تولید پایدار و مدیریت اراضی کشاورزی می‌باشد (Santra *et al.*, 2017; Eftekhari *et al.*, 2013). بعلاوه در سال‌های اخیر پدیده ریزگرد و طوفان شن و ماسه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به پدیده‌ای زیست محیطی در حال رشد تبدیل شده است که اثرهای مخرب فراوانی را بدنبال داشته است (Saadoud *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018). فرسایش بادی یک فرایند بسیار پیچیده است، زیرا تحت تأثیر عوامل مختلف همانند شرایط آب‌وهوایی (بارندگی، باد و دما)، خواص خاک (بافت خاک، ترکیب و خاکدانه‌سازی)، ویژگی‌های سطح زمین (توپوگرافی، رطوبت، زبری آئرودینامیک سطح و پوشش گیاهی) و کاربری زمین (کشاورزی، معدن و چراگاه) قرار دارد (XueYong *et al.*, 2014).

از مؤثرترین اقدامات حفاظتی در مهار فرسایش بادی می‌توان به افزایش مقاومت لایه سطحی خاک در مقابل تنش برشی جریان باد اشاره کرد. ازاین‌رو، 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.

امروزه تثبیت ذرات خاک با استفاده از افزودنی‌ها، پایدارکننده‌ها و اصلاح‌کننده‌های مختلف انجام می‌شود (Prats *et al.*, 2014). استفاده از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی (Goodrich & Jacobi, 2012; Fattah *et al.*, 2016; Han *et al.*, 2007)، مکانیکی (Zhang *et al.*, 2005; Azimzadeh & Fotouhi, 2013) و زیستی (Tisdall *et al.*, 2012) در مطالعات مختلف گزارش شده است. با وجود استفاده گسترده از تثبیت‌کننده‌ها و افزودنی‌های حفاظتی در خاک، کاربرد آنها به دلیل عدم پایداری و اثبات اثرهای سوء محیط‌زیستی نتوانسته است کارایی لازم را به‌عنوان راه‌حل مناسب در مهار فرسایش و اصلاح خاک داشته باشند (Abu-Zreig *et al.*, 2007). اثرهای سوء محیط‌زیستی و انسانی مالچ‌های نفتی و پلیمرها و ناپایداری آنها در سطح خاک نیز به اثبات رسیده است (Stabnikov *et al.*, 2013; Epelde *et al.*, 2013; Rezaie, 2009).

اقدامات زراعی یک روش معمول برای کنترل فرسایش خاک است، اما این روش دارای محدودیت‌های بسیاری می‌باشد. خاک مناطق دارای فرسایش بادی از نظر کشاورزی نامناسب بوده و علاوه بر این، تأمین منابع آب کافی برای رشد گیاهان، سبب دشواری اجرای آن در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌گردد (Stabnikov *et al.*, 2013).

سطح خاک به ضخامت چند میلی‌متر تا چندین سانتی‌متر، محل تجمع ریزموجودات (Microorganism) خاکزی از قبیل باکتری‌ها، سیانوباکترها و قارچ‌هاست (Chamizo *et al.*, 2012). مطالعات نشان داده است که با فراهم نمودن شرایط مناسب برای رشد و توسعه فضای زیستی، این موجودات از طریق تغییر شرایط سطح خاک، تأثیر بسزایی در ایجاد پوسته فیزیکی در سطح خاک و پایداری خاک در برابر فرسایش خواهند داشت (Chen *et al.*, 2006). ریزموجودات در پوسته زیستی سطح خاک با سازوکارهای مختلفی همانند ترشح مواد چسبنده پلی‌ساکاریدی، رسوب کربنات کلسیم و تشکیل شبکه‌ای از هیف‌های قارچی باعث بهبود چسبندگی ذرات ریز خاک و افزایش پایداری آن می‌شوند. ریزموجودات خاک‌زی توانایی فعالیت در اسیدیته ۴ تا ۱۱ و دمای بین ۱۰ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد (Fallah *et al.*, 2009) و تحمل شرایط خشکی تا ۱۵ درصد رطوبت را دارند (Hui Xia *et al.*, 2007).

در سال‌های اخیر فنآوری زیستی سازگار با محیط زیست با نام رسوب میکروبی کربنات کلسیم (Microbial induced calcite precipitation) به عنوان یک روش بهسازی خاک توسعه یافته است. که با الهام گرفتن از طبیعت و با استفاده از فعالیت باکتری‌ها موجب تغییر ویژگی‌های

شیمیایی و فیزیکی سطح خاک می‌شود. در این پدیده، اوره توسط آنزیم اوره‌آز ترشح‌شده از باکتری‌ها و سایر ریزموجودات، هیدرولیز و کربنات کلسیم در حضور یون کلسیم تشکیل می‌شود. پس از ته‌نشینی رسوب تشکیل شده، پوشش و اتصال ایجاد شده بین ذرات خاک، باعث تثبیت ذرات در سطح خاک می‌شوند. ریزجاندارانی که توانایی ترشح آنزیم اوره‌آز را داشته باشند می‌توانند باعث رسوب کربنات کلسیم شوند. باکتری‌های متعلق به جنس *باسیلوس* اغلب این توانایی را دارند(Stabnikov *et al*., 2013). Schwantes-Cezari و همکاران (۲۰۱۷)، با بررسی رسوب میکروبی کربنات کلسیم گزارش کردند که باکتری *Bacillus subtilis* AP91 توانایی بالایی در رسوب کربنات کلسیم دارد. همچنین Wang (۲۰۱۵) با بررسی کاربرد رسوب میکروبی کربنات کلسیم در صنعت به نقش مهم این دسته از باکتری‌ها اشاره کرده است.

از آنجایی‌که سطح وسیعی از استان گلستان توسط نهشته‌ها بادرفتی مثل تلماسه، لس و مشتقات آن پوشانده شده است و بیابان‌زایی در منطقه نیمه‌خشک استان گلستان به‌دلیل شرایط اقلیمی، ادافیکی و ژئومورفولوژیکی خاص در شکل فعال خود به‌وقوع پیوسته است (Arami *et al*., 2014) و با توجه به سازگار بودن بهسازهای زیستی با محیط‌زیست و اقتصادی بودن استفاده از ریزموجودات خاک‌زی در بهبود ساختمان خاک و کاهش میزان بادرفت خاک‌ها، این تحقیق انجام شد.

مواد و روش‌ها

ریزجانداران مورد استفاده در این پژوهش، از خاک مناطق خشک و دارای فرسایش بادی استان گلستان جداسازی و بر روی آنها آزمون‌های غربال‌گری توانایی تولید آنزیم اوره‌آز (Chu *et al*., 2012)، بررسی مقاومت به خشکی (Michel & Kaufmann, 1973) و توانایی رسوب کربنات کلسیم (Stabnikov *et al*., 2013) انجام شد و درنهایت ۱۱ جدایه برای آزمایش نهایی انتخاب گردید (جدول ۱).

به‌منظور بررسی اثر بهسازهای زیستی بر مهار فرسایش و رسوبات بادی در خاک با آزمایش شبیه‌سازی در تونل باد، میزان فرسایش نمونه‌های سیمانی شده از طریق زیستی در دامنه‌ای از سرعت‌های مختلف باد (صفر تا ۹۸ کیلومتر بر ساعت) در دو نوع خاک با بافت شنی و سیلتی به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی در سه تکرار بررسی گردید.

جدول ۱- مشخصات باکتری‌های مورد استفاده در این پژوهش و مقادیر تولید آنزیم اوره آز ($mM/min\ NH_4^+$)

Molecular identification	Urease activity ($mM/min\ NH_4^+$)
Chryseobacterium gleum	۶/۸۲
Bacillus halotolerans	۱۴/۱۴
Pseudomonas paralactis	۱۴/۲۱
Bacillus paralicheniformis	۱۵/۶۸
Paenibacillus sp1	۱۰/۰۸
Paenibacillus sp2	۱۹/۲۹
Bacillus megaterium	۲۱/۹۷
Paenibacillus sp3	۳۶/۸۴
Bacillus pumilus	۷/۰۶
Bacillus infantis	۱۹/۷۴
Bacillus albus	۵/۶۳

برای انجام این تحقیق دو نوع خاک با بافت سیلتی و شنی از تپه‌های لسی استان گلستان با مشخصات جغرافیایی ۵۵ درجه و ۲۷ دقیقه و ۲۳ ثانیه طول جغرافیایی، ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۲۰ ثانیه عرض جغرافیایی و ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۴۹ دقیقه و ۴ ثانیه عرض جغرافیایی به‌منزله بستر آزمایش انتخاب شد.

در نمونه‌های خاک هواخشک، مقدار ماده آلی (Walkley & Black, 1934)، کربنات کلسیم برابر (CCE) (Pansu & Gautheyrou, 2006)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت عناصر غذایی فسفر، پتاسیم، کلسیم (Ehyaei and Behbahani Zadeh, 1993)، بافت خاک،توزیع اندازه ذرات خاک و پایداری خاکدانه (Kemper & Rosenau, 1986) اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ و منحنی دانه‌بندی خاک‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش

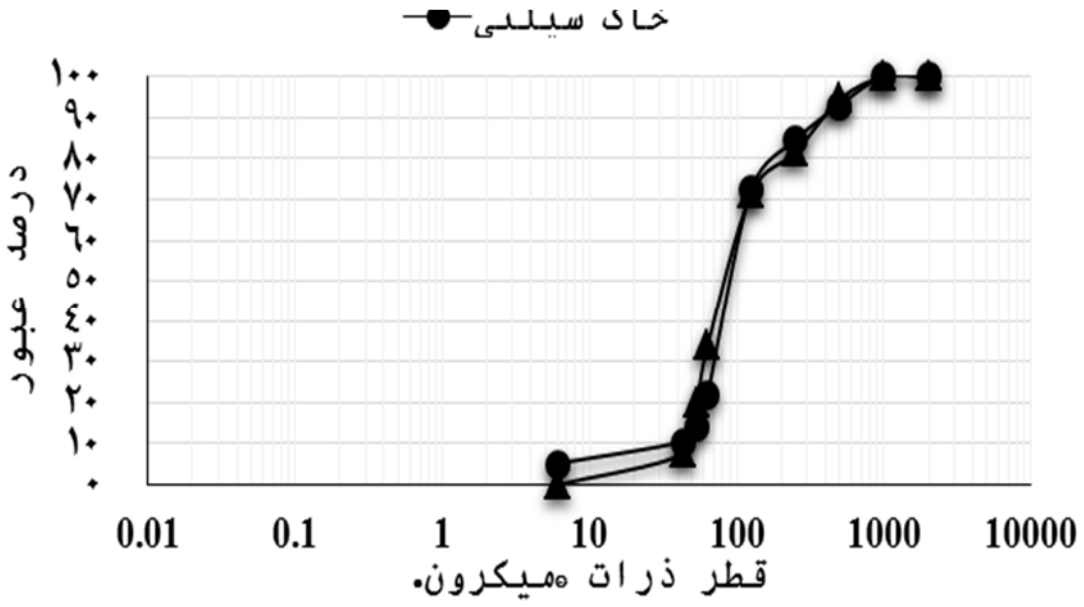
ویژگی	خاک ۱	خاک ۲
عمق (سانتی‌متر)	۰-۵	۰-۵
pH عصاره اشباع	۷/۶۱	۷/۱۲
شوری (دسی‌زیمنس بر متر)	۰/۷۸	۰/۹۶
کربنات کلسیم برابر (درصد)	۱۱/۵۳	۹/۳۲
ماده آلی (درصد)	۰/۰۸	۰/۰۷
نیتروژن (درصد)	۰/۰۱	۰/۰۱
فسفر (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۶/۲۸	۴/۲۰
پتاسیم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۱۷۰	۱۳۸/۲
وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۰۸	۰/۹۹
رس (درصد)	۱۰	۶
سیلت (درصد)	۷۶	۴۹
شن (درصد)	۱۴	۴۵
بافت خاک (درصد)	سیلت لوم	لومی - شنی
GMD dry (میلی‌متر)	۰/۳۸۸	۰/۳۷۸
MWD dry (میلی‌متر)	۰/۱۶۵	۰/۲۱۹
شاخص پایداری خاکدانه (WAS)	۰/۱۸۵	۰/۱۶۹

GMD: Geometric mean diameter
MWD: Mean weight diameter
WAS: Wet Aggregate stability

برای اندازه‌گیری شار تلفات خاک از سینی‌های فلزی مخصوص سنجش فرسایش بادی به ابعاد ۵×۳۰×۵۰ سانتیمتر استفاده شد. پس از ریختن نمونه‌های خاک در سینی، سطح آنها به‌طور کامل صاف و یکنواخت گردید. مقدار سوسپانسیون باکتری (با تراکم جمعیت $۱۰^{۸}\times ۱$ در هر میلی‌لیتر سوسپانسیون تهیه شده بر روی محیط کشت مایع

(Nutrient Broth)) و محلول سیمانی کننده (کلرید کلسیم + اوره) به‌گونه‌ای انتخاب شد که بتواند یک سانتی‌متر سطح نمونه‌ها را به‌طور کامل اشباع کند (جدول ۳).

ابتدا سوسپانسیون باکتری به‌وسیله آبپاش دستی به صورت یکنواخت بر سطح خاک پاشیده و به‌مدت ۲۴ ساعت به حال خود گذاشته شد. سپس محلول سیمانی کننده (کلرید کلسیم + اوره) با غلظت یک مولار اوره و ۱ مولار کلرید کلسیم (غلظت مناسب در آزمایش جداگانه‌ای در ستون خاک تعیین شد) به نمونه‌های خاک اضافه شد. همچنین دو تیمار بدون مالچ زیستی شامل تیمار نمونه خاک آبپاشی شده با آب‌مقطر و نمونه خاک آبپاشی شده با محلول سیمانی کننده به‌عنوان نمونه‌های شاهد در نظر گرفته شد. پس از ده روز، تیمارهای کاملاً خشک شده به تونل باد منتقل شد. برای تعیین آستانه فرسایش و مقاومت تیمارها در مقابل سرعت‌های مختلف باد از تونل باد مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور با سطح مقطع اتاق آزمون ۸۰×۸۰ سانتی‌متر با طول ۱۶ متر استفاده شد. بدین‌منظور نمونه‌های سیمانی شده از طریق زیستی و شاهد ابتدا توزین و به‌مدت ۵ دقیقه در معرض جریان باد با سرعت‌های مختلف (صفر تا ۹۸ کیلومتر بر ساعت) قرار داده شد. میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض باد به‌عنوان میزان تلفات خاک بر حسب کیلوگرم در مترمربع در ساعت محاسبه شد (Movahedan *et al*., 2013). همچنین مقاومت فروروی (Penetration resistance) با استفاده از دستگاه نفوذسنج (Ghaffari & zomorrodian, 2017) و کربنات کلسیم برابر (CCE) به روش تیتراسیون با اسید (Pansu & Gautheyrou, 2006) تعیین گردید. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، به‌وسیله نرم‌افزار SPSS تجزیه‌وتحلیل آماری و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد. درنهایت بهترین جدایه باکتری برای کاهش فرسایش‌پذیری بادی شناسایی گردید.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده در پژوهش

جدول ۳- خلاصه‌ای از محلول‌های استفاده شده در این پژوهش

جزئیات	حجم منفذی	محلول	تیمار
-	۰/۵	باکتری	MICP
یک مولار اوره	۰/۲۵	اوره	
یک مولار کلرور کلسیم	۰/۲۵	کلرور کلسیم	
-	۱	آب مقطر	شاهد ۱
یک مولار اوره	۰/۵	اوره	شاهد ۲
یک مولار کلرور کلسیم	۰/۵	کلرور کلسیم	

نتایج

باکتری مورد استفاده در پژوهش

همان‌طور که در جدول شماره ۱ ارائه‌شده است، بیشتر باکتری‌های استفاده شده در این پژوهش از جنس باسیلوس هستند. باکتری‌های جنس باسیلوس از مهمترین باکتری‌های تولیدکننده آنزیم اوره‌آز هستند که به‌دلیل پراکندگی در طبیعت و مقاومت نسبت به عوامل شیمیایی و فیزیکی، به شرایط محیطی سازگاری مناسبی دارند (Stabnikov *et al*., 2013).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

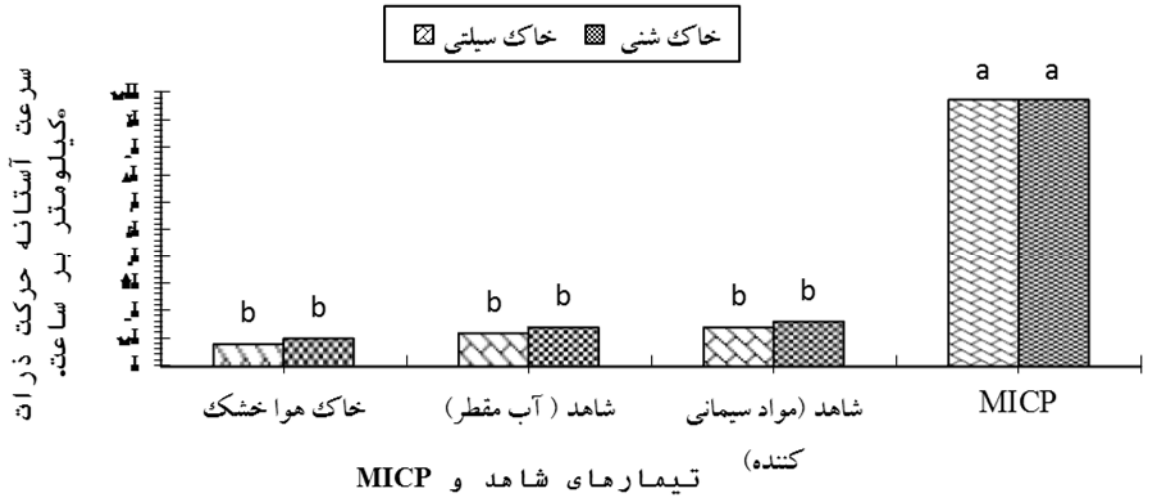
با بررسی نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش که در جدول ۲ ارائه شده است خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش دارای بافت‌های سیلتی و شنی بوده که از خاک‌های حساس به فرسایش می‌باشند. همچنین حدود ۷۰ درصد ذرات خاک قطر برابر ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرون دارند که از ذرات آسیب‌پذیر به فرسایش بادی هستند (شکل ۱)(Shao, 2008) .

شکل ۲- تونل باد مورد استفاده برای انجام فرایند فرسایش بادی به‌ترتیب از چپ به راست (فن، یکنواخت‌کننده توزیع هوا، مبدل و محفظه آزمایش)

سرعت آستانه حرکت ذرات

به‌منظور بررسی سرعت آستانه حرکت ذرات پس از قرارگیری نمونه‌ها در تونل باد، به‌دقت حرکت ذرات بررسی شد. نتایج نشان داد که در خاک هواخشک (Air dried) با بافت سیلتی سرعت آستانه حرکت ۸ کیلومتر بر ساعت بود، در حالی که در خاک هواخشک شنی ذرات خاک در باد با

سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت شروع به حرکت کردند. در خاک‌های آب‌پاشی شده با آب‌مقطر سرعت آستانه حرکت کمی افزایش داشت و به‌ترتیب به ۱۲ و ۱۴ کیلومتر بر ساعت رسید، در صورتی‌که در تمامی تیمارهای MICP ذرات در باد با سرعت ۹۷ کیلومتر بر ساعت نیز حرکت نکردند (شکل ۳).



*: در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه می‌باشند در آزمون LSD در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

شکل ۳- مقایسه سرعت آستانه حرکت ذرات خاک تحت تیمارهای شاهد و MICP

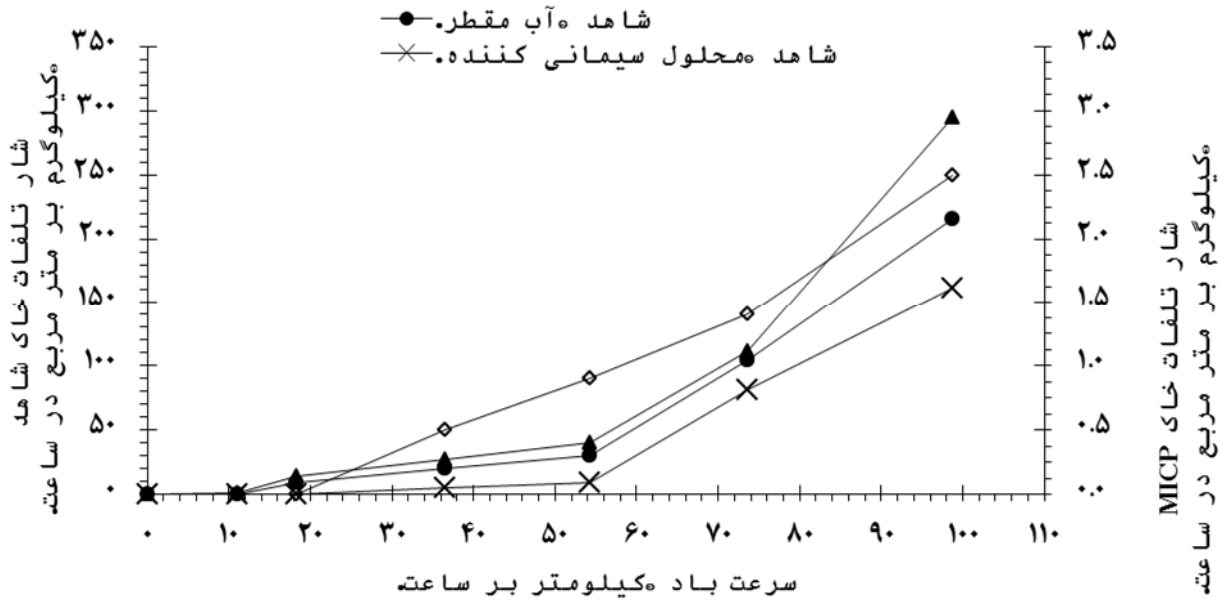
شار تلفات خاک

نتایج مربوط به تغییرات مقدار خاک فرسایش یافته در تیمارهای شاهد و MICP در سرعت‌های مختلف باد در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت باد مقدار تلفات خاک در نمونه‌های شاهد افزایش یافت. به‌طوری‌که با افزایش سرعت تا ۱۸ کیلومتر بر ساعت، میزان فرسایش بادی در نمونه‌های هواخشک هر دو نوع بافت خاک سیلتی و شنی ناچیز بود اما با افزایش سرعت باد از ۱۸ به ۳۷ کیلومتر بر ساعت در خاک سیلتی، شار تلفات خاک از ۱۵/۲ به حدود ۸۹/۲۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت افزایش یافت که این امر نشان‌دهنده پایین بودن سرعت آستانه حرکت ذرات در خاک‌های سیلتی نسبت به خاک‌های شنی می‌باشد.

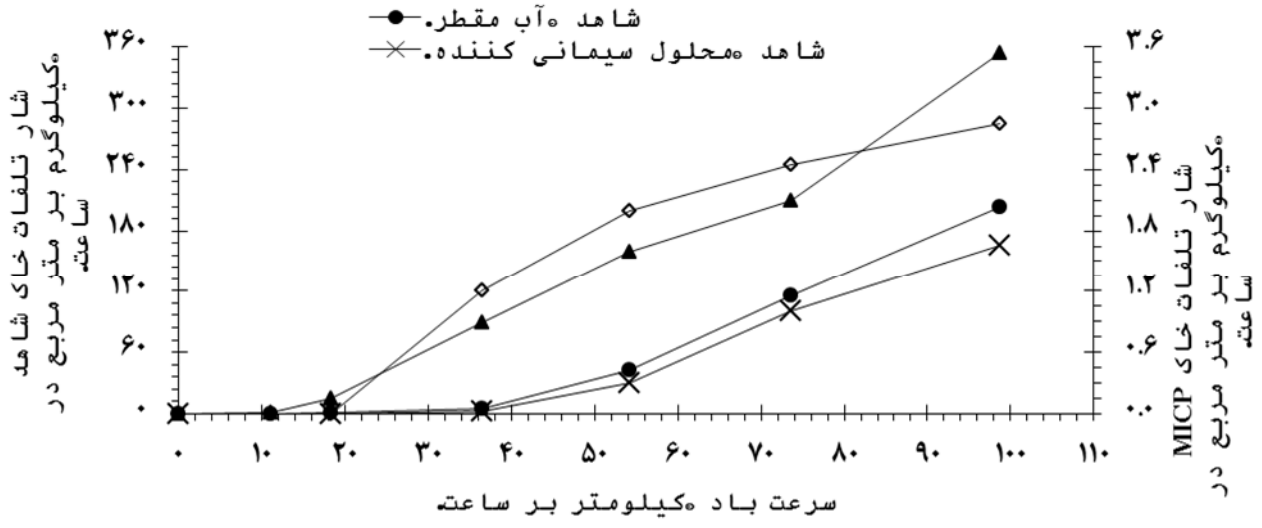
مقایسه نتایج نشان می‌دهد زمانی که بر سطح خاک آب یا مواد سیمانی کننده (اوره و کلرور کلسیم یک مولار) پاشیده شد در هر دو نوع بافت خاک، شار تلفات خاک تا سرعت ۳۷ کیلومتر بر ساعت ناچیز بود، اما در سرعت‌های بالاتر میزان تلفات افزایش یافت، ولی نسبت به خاک هواخشک کمتر بود.

در خاک شنی در بین تیمارهای دارای باکتری و شاهد شار تلفات خاک تا سرعت ۵۷ کیلومتر بر ساعت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. در سرعت بیشتر از ۵۷ کیلومتر در ساعت میزان تلفات خاک در خاک شاهد چشمگیر بود و به ۳۵۴ کیلوگرم در مترمربع در ساعت در سرعت ۹۸ کیلومتر در ساعت رسید. همچنین نتایج نشان داد تفاوت در مقدار تلفات خاک در بین تیمارهای باکتریایی و تیمارهای بدون باکتری (تیمارهای شاهد) در سرعت‌های بالای باد بسیار چشمگیر بود. به‌طوری‌که در سرعت‌های بیش از ۵۷ کیلومتر بر ساعت میزان تلفات خاک در تیمارهای شاهد افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشت، در صورتی

که در خاک‌های تیمار شده با نمونه‌های باکتریایی میزان تلفات خاک بسیار ناچیز و در حدود ۲/۵ کیلوگرم در مترمربع در ساعت بود که این موضوع نشان‌دهنده نقش باکتری‌ها در کنترل حرکت ذرات خاک و بالا بردن سرعت آستانه حرکت آنها می‌باشد.



شکل ۴- مقایسه شار تلفات خاک (کیلوگرم در مترمربع در ساعت) در تیمارهای شاهد و MICP در خاک شنی



شکل ۵- مقایسه شار تلفات خاک (کیلوگرم در مترمربع در ساعت) در تیمارهای شاهد و MICP در خاک سیلتی

مقاومت فروروی سطح خاک

مقاومت فروروی لایه سطحی به‌عنوان یک شاخص از مقاومت سطح خاک در برابر فرسایش بادی با استفاده از فروسنج در شرایط هواخشک در لایه سطحی نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۴ و شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۴- میانگین مربعات مقاومت فروروی و کربنات کلسیم خاک تحت تأثیر بهساز زیستی

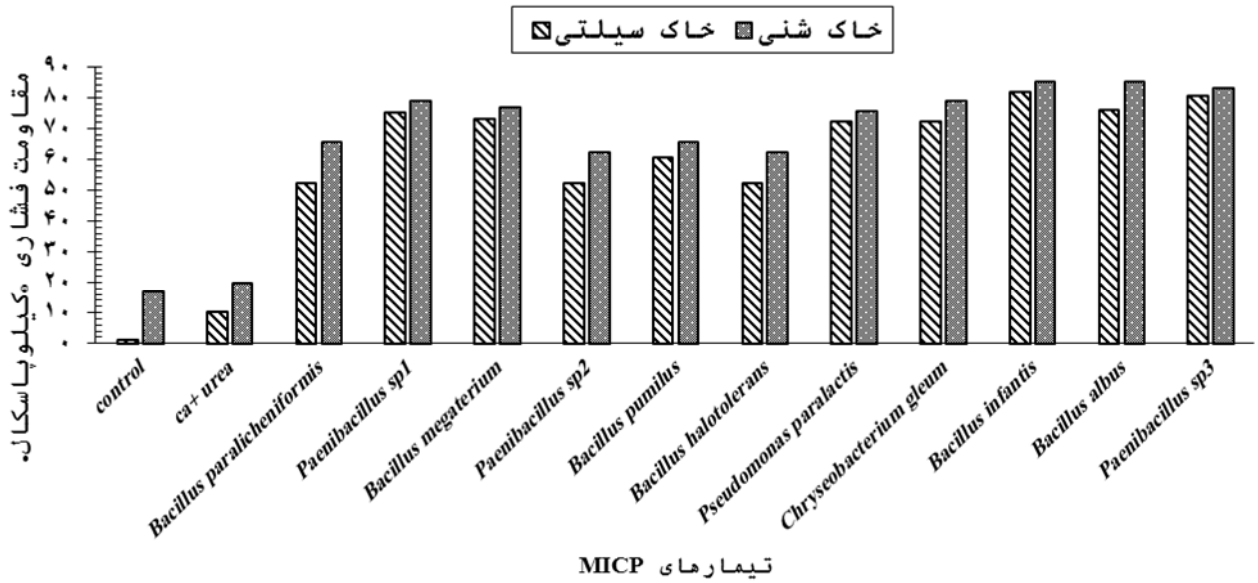
تیمار	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		کربنات کلسیم	مقاومت فروروی
بافت خاک	۱	۳۳۳/۰۶۴**	۸۷/۰۰۶ns
باکتری	۱۲	۶۵/۸۳۱**	۳۰۴۵/۰۷**
باکتری×بافت خاک	۱۲	۳/۲۰۴**	۱۹۳/۷۶۰**
خطا	۵۲	۰/۲۳۱	۲۹/۹۳۱
ضریب تغییرات (CV(٪	-	۲/۹۴	۸/۹۶۰

: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح یک درصد و پنج درصد و غیر معنی‌دار ns و*،**

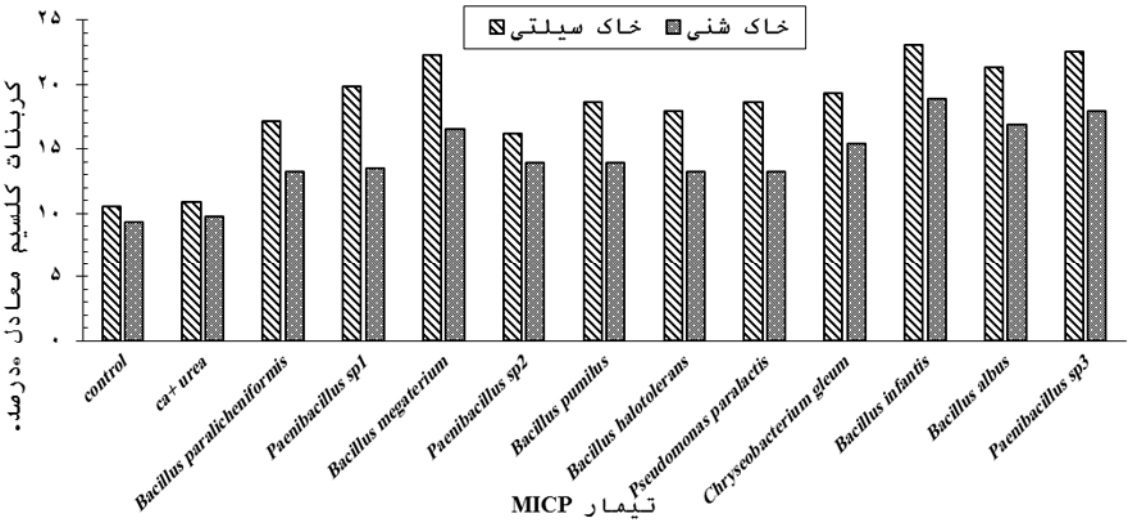
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که استفاده از مالچ زیستی تأثیر بسزایی در ایجاد لایه فیزیکی سطحی در هر دو خاک شنی و سیلتی داشته است. مقایسه میانگین نتایج نشان داد که استفاده از تیمار MICP به‌طور معنی‌داری مقدار مقاومت فروروی را در هر دو نوع بافت خاک افزایش داد، به‌طوری‌که بیشترین مقدار مقاومت فروروی در نمونه MICP با کاربرد باکتری‌های *Bacillus infantis* و *Paenibacillus sp3* و کمترین مقاومت در تیمار اسپری شده با آب‌مقطر بود. بررسی نتایج نشان داد که با استفاده از محلول سیمانی کننده میزان مقاومت سطح افزایش کمی دارد ولی با تلقیح خاک با باکتری افزایش قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده شد، به‌طوری‌که در بافت شنی و سیلتی به‌ترتیب ۵ و ۸ برابر افزایش داشت (شکل ۶).

کربنات کلسیم برابر

به‌منظور بررسی نقش باکتری‌ها در ترسیب کربنات کلسیم در خاک، مقدار کربنات کلسیم برابر در تیمارهای MICP اندازه‌گیری شد که نتایج در شکل ۷ ارائه‌شده است. بررسی نتایج نشان داد که با اعمال تیمارهای MICP در هر دو بافت خاک، مقدار کربنات کلسیم افزایش معنی‌داری داشت، به‌طوری‌که در تیمار *Bacillus infantis* بیشترین مقدار آن مشاهده شد که نسبت به شاهد بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یافت.



شکل ۶- مقایسه میانگین مقاومت فروروی (کیلوپاسکال) در تیمارهای شاهد و نمونه‌های MICP(مقایسه با آزمون LSD در سطح پنج درصد)



شکل ۷- مقایسه میانگین مقدارکربنات کلسیم برابر (درصد) در تیمارهای شاهد و نمونه‌های MICP (مقایسه با آزمون LSD در سطح پنج درصد)

بحث

در این تحقیق، کارایی بهسازهای زیستی با توانایی ترسیب کربنات کلسیم به‌عنوان روشی برای افزایش مقاومت خاک در مقابل تنش برشی جریان باد ارزیابی شد. نتایج نشان داد که کاربرد بهساز زیستی اثر قابل‌توجهی در کاهش تلفات ناشی از فرسایش بادی به‌ویژه در سرعت‌های بالا دارد. به‌طوری‌که میزان تلفات خاک تا سرعت ۹۸ کیلومتر در ساعت در حد ۲/۵ کیلوگرم در مترمربع در ساعت

اندازه‌گیری شد. بنابراین به نظر می‌رسد افزایش مقاومت سطحی در نمونه‌های تیمار شده با سیمان زیستی ناشی از فناوری MICP دلیل اصلی کاهش تلفات خاک است. با بررسی نتایج حاصل از این پژوهش مشاهده شد که میزان کربنات کلسیم در نمونه‌های تیمار شده با بهسازهای زیستی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. به‌طوری‌که با ترسیب کربنات کلسیم در بین ذرات خاک، کربنات کلسیم مانند سیمان باعث ایجاد پل ارتباطی بین ذرات شده، در نتیجه با افزایش قطر خاکدانه‌ها، مقاومت ذرات به حرکت در برابر جریان باد افزایش یافت. نتایج حاصل از مقایسه مقاومت فروروی نمونه‌های تیمار شده با باکتری و شاهد نیز بیانگر این مطلب است که تشکیل رسوب کربنات کلسیم در بین حفره‌های خاک باعث ایجاد یک لایه سخت در یک سانتیمتری سطح نمونه‌ها شده است که در نتیجه افزایش تعداد اتصال دانه‌ها به یکدیگر توسط کریستال‌های کربنات کلسیم می‌باشد. بررسی نتایج نشان داد که با استفاده از محلول سیمانی کننده میزان مقاومت سطح افزایش کمی دارد اما کاربرد محلول سیمانی کننده به همراه باکتری اوره‌آز مثبت افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت سطح نسبت به نمونه شاهد ایجاد نمود که این موضوع نشان‌دهنده نقش مهم باکتری‌ها در رسوب کربنات کلسیم و افزایش مقاومت سطح است. با بررسی تیمارهای باکتری استفاده شده در این پژوهش، بیشترین مقدار کربنات کلسیم برابر و بیشترین مقاومت فروروی سطح در خاک‌های تلقیح شده با *Bacillus infantis* و *Paenibacillus sp3* که توانایی بالایی در تولید آنزیم اوره‌آز داشتند مشاهده شد که این موضوع نیز بر ارتباط بین میزان تولید آنزیم اوره‌آز و ترسیب کربنات کلسیم و نقش باکتری در این فرایند و افزایش مقاومت سطح تأکید می‌کند. Douzali joushin و همکاران (۲۰۱۸) نیز با بررسی کاربرد مالچ زیستی به همراه باکتری *Bacillus Pasteurii* در مهار فرسایش بادی در منطقه جبل کندی نیز به نتایج مشابه این تحقیق دست یافتند.

Kucharski و همکاران (۲۰۰۵) نیز با مطالعه استفاده از ریزجانداران مولد اوره‌آز، اوره و نمک‌های محلول کلسیم، در فرایند سیمانی شدن زیستی در مواد نفوذپذیر، دریافتند که ریزجانداران با القاء رسوب‌گذاری کلسیت در خاک و سنگ موجب افزایش مقاومت فشاری به بیش از ۵ مگاپاسکال می‌شوند. همچنین Whiffin و همکاران (۲۰۰۷) نیز با بررسی اثر باکتری *Sporosarcina pasteurii* بر استحکام خاک نشان دادند که ستون‌های دارای کلسیت بیشتر، مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند.

منابع مورد استفاده

- Abu-Zreig, M., Al-Sharif, M. and Amayreh, J., 2007. Erosion control of arid land in Jordan with two anionic polyacrylamides. Journal of Arid land research management, 21: 315-328.
- Arami, A. H., Ownegh, M. and Sheikh, V. B., 2014. Assessment of desertification hazard by using the 9 criteria IMDPA model in Semi-arid Agh-Band region, Golestan Province. Journal of Water and Soil Conservation, 21 (2): 153-172.
- Azimzadeh, H. R. and Fotouhi, F., 2013. The study on the effects of desert pavement on wind erodibility (Case study: Yazd- Ardakan plain). Iranian journal of Range and Desert Reseach, 20(4): 695-705.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Miralles, I. and Domingo, F., 2012. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. Journal of Soil Biology and Biochemistry, 49: 96-105.
- Chen, L. Z., Xie, Z. M., Hu, C. X., Li, D. H., Wang, G. H. and Liu, Y. D., 2006. Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China. Journal of Arid Environments, 67: 521-527.
- Chu, J., Stabnikov, V. 1. and Ivanov, V., 2012. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil. Journal of Geomicrobiology, 29:544–549.
- Douzali joushin, F., Badv, K., Barin, M. and Sultani jige, H., 2018. Inhibition of wind erosion by SBR polymer and Bacillus pasteurii microorganism (Case study: Jabal Kandy region). Iranian Journal of Soil and Water Research, 49 (4): 795-806.
- Eftekhari, R., Moghaddamnia, A. R., Ekhtesasi, M. R., Basirani, N., Shahriari, A. R. and Khosravi, M., 2013. Evaluation of desertification intensity using ICD model in the southwest of Hirmand city, Iranian Journal of Range and Desert Reseach, 20(4): 669-678.
- Ehyaei, M. and Behbahani Zadeh, A. A., 1993.

Methods of soil chemical analysis. Tehran water and soil research institute, Technical Journal, No 983. 150p.
- Epelde, L., Burges, A., Mijangos, I. and Garbisu, C., 2013. Microbial properties and attributes of ecological relevance for soil quality monitoring during a chemical stabilization field study. Journal of Applied Soil Ecology, 75: 1-12.
- Fallah, A., Besharati, H., Khosravi, H., 2009. Soil Microbiology, Ajir Publishing, 192p.
- Fattah, M. Y., Joni, H. H. And Al-Dulaimy, A., 2016. Strength characteristics of dune sand stabilized with lime-silica fume mix. International Journal of Pavement Engineering, 19(10): 874-882.
- Ghaffari, H. and Zomorrodian, M., 2017. Evaluation of shear strength of soil stabilized by microbiology. Iranian Journal of Soil and Water Research, 48(4): 737-748.
- Goodrich, B. A. and Jacobi, W. R., 2012. Foliar damage, ion content, and mortality rate of five common roadside tree species treated with soil applications of magnesium chloride. Journal of Water Air Soil Pollutant, 223: 847–862.
- Han, Z., Wang, T., Dong, Y., Hu, Z. and Yao, Z., 2007. Chemical stabilization of mobile dune fields along a highway in the Taklimakan Desert of China. Journal of Arid Environments, 68: 260–270.
- Hui Xia, P., ZhengMing, C. H., XueMei, Z. H., ShuYong, M., XiaoLing, Q. and Fang, W., 2007. A Study on an Oligotrophic Bacteria and its ecological characteristics in an Arid Desert Area. Science in China Series D: Journal of Earth Sciences, 50: 128-134.
- Kemper, W. D. and Rosenau, R. C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. ASA and SSSA, Madison (WI), pp. 425–442.
- Kucharski, E. S., Winchester, W., Leeming, W. A., Cord-Ruwisch, R., Muir, C., Banjup, W. A., Whiffin, V. S., Al-Thawadi, S. W. and Mutlaq, J., 2005. Microbial biocementation, Patent Application. WO/2006/066326; International Application No.PCT/ AU2005/001927.
- Michel, B. and Kaufmann, M. R., 1973. The Osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Journal of Plant physiology, 51: 914-916.
- Movahedan, M., Abbasi, N. and Keramati Toroghi, M., 2013. Experimental investigation of Polyvinyl Acetat effect on wind erosion of different soils by impacting sand particles. Journal of Water and Soil Conservation, 20(1): 55-75.
- Pansu, M. and Gautheyrou, J., 2006. Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. Springer Science and Business Media, Germany.
- Prats, S. A., Martins, M. A. D. S., Malvar, M. C., Ben, M. and Keizer, J. J., 2014. Polyacrylamide application versus forest residue mulching for reducing post-fire runoff and soil erosion. Journal of Science of the total environment, 468-469(0): 464-474.
- Rezaie, S. A., 2009. Comparison between Polylatice polymer and petroleum mulch on seed germination and plant establishment in sand dune fixation. Iranian journal of Range and Desert Reseach, 16 (1): 124-136.
- Saadoud, D., Hassani, M., Martin Peinado, F. J. and Guettouche, M. S., 2018. Application of fuzzy logic approach for wind erosion hazard mapping in Laghouat region (Algeria) using remote sensing and GIS. journal of 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. Journal of Aeolian Research, 28: 71–82.
- Schwantes-Cezari, N., Medeiros, L., De Oliveira J. R. A., Kobayashi, R. and Toralles, B., 2017. Bio precipitation of calcium carbonate induced by Bacillus subtilis isolated in Brazil. International Journal of Bio deterioration and Biodegradation, 123: 200-205.
- Shao, Y., 2008. Physics and modelling of wind erosion. www.springer.com/series/5669, 575 p.
- Stabnikov, V., Chu, J., Naing Myo, A. and Ivanov, V., 2013. Immobilization of sand dust and associated pollutants using bio aggregation. Journal of Water Air Soil Pollutant, 224:1631-1639.
- Tisdall, J. M., Nelson, S. M., Wilkinson, K. G., Smith, S. E. and McKenzie, B. M., 2012. Stabilization of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi. Journal of Soil Biology & Biochemistry, 50:134-141.
- Walkley, A. and Black, I. A., 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. Journal of Soil Science, 37: 29–38.
- Whiffin, V. S., Van Passen, L. A. and Harkes, M. P., 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geo microbiology Journal, 24: 1-7.
- XueYong, Z., ChunLai, Z., Hong, C, LiQiang, K. and YongQiu, W., 2014. Cogitation on developing a dynamic model of soil wind erosion. journal of Science china Earth Sciences, 58:462–473

– Zhang, C., Wang, X., Zou, X., Tian, J., Liu, B., Li, J., Kang, L., Chen, H. and Wu, Y., 2018. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area. journal of Soil and Tillage Research, 178: 1–10.
– Zhang, Y. M., Wang, H. L., Wang, X. Q., Yang, W. K. and Zhang, D. Y., 2005. The microstructure of micro biotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China. journal of Geoderma, 132: 441–449.

Evaluation of the efficiency of biological reformer in controlling wind erosion

S. Rajabi Agereh[1*], F. Kiani[2], K. Khavazi[3], H. Rouhipour[4] and F. Khormali[5]

1*- Corresponding author, Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, E-mail: r.sareh@gmail.com
2- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3- Professor, Department of Biology, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran
4- Associate Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
5- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received:09/25/2018 Accepted:12/25/2018

Abstract

Nowadays, the destructive phenomenon of desertification and wind erosion is one of the most important environmental crises in the world, which are serious challenges to sustainable production and agricultural land management. In the present study, the effect of microbial precipitation of calcium carbonate has been studied as a biological reformer and compatible for controlling wind erosion and soil stabilization. For this purpose, erosion rate of bio-cemented samples was investigated through ….in a wind tunnel under the condition of wind velocity of (0 to 98 km hr^{-1}) in two soil types with sandy and silty texture in a completely randomized design in three replications. Investigation of the threshold velocity of soil particle movement revealed that air dried soil particles begin to move at the velocity of 8 and 10 km hr^{-1} in the silty and sandy soils respectively, however, in all biological samples (MICP) particles did not move at 97 $km.hr^{-1}$. The results also indicated that the weight loss of all MICP treatments at different wind velocities were significantly reduced as compare to the control. The amount of the soil loss among biological cemented samples and control treatments were dramatically different at higher velocities. So that, at velocities more than 57 km/h, soil losses indicated significantly enhancement in control, whereas in the soils which are treated by bacteria, soil losses were insignificant and approximately 2.5 $kg.m^{-2}.hr^{-1}$. The results also showed that the equal's amount of calcium carbonate and the penetration resistance of the soil surface increased significantly in MICP treatments as compare to control treatments, this event indicated the formation of a surface-resistant layer on bio-treated cement samples. In this study, the comparison of used bacteria also showed that *Bacillus infantis* and *Paenibacillus* sp_3 have high efficiency in controlling wind erosion. Therefore, it seems that cementation by biological methods could be an effective way to stabilize surface particles and control soil erosion.

Keywords: Urease, soil stabilization, bio cement, soil loss flux.