

مقایسه عملکرد دو روش، رسوب میکروبی کربنات کلسیم و پلیمر پلی‌ونیل استات در کاهش فرسایش بادی

داود نامدار خجسته^{۱*}، مسعود بازگیر^۲، سید عبدالله هاشمی باباحیدری^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲)

چکیده

یکی از مشکلات زیست‌محیطی کشور افزایش میزان فرسایش بادی و گرد و غبار به ویژه در استان‌های مرزی است که سالانه پیامدهای زیانبار زیادی در حوزه‌های اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و سلامت را در پی داشته است. مقابله با این پدیده‌ها نیازمند برنامه‌ریزی کوتاه مدت و دراز مدت است. روش‌های مختلفی برای کنترل این پدیده‌ها وجود دارد. در این پژوهش عملکرد دو روش زیستی (رسوب میکروبی کربنات کلسیم) و شیمیایی (کاربرد پلی‌ونیل استات) بررسی و با هم مقایسه شده است. نمونه‌برداری از یکی از مناطق مولد گرد و غبار در استان ایلام (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری) انجام شد. برای روش رسوب میکروبی، از باکتری *Bacillus sphaericus* در دو سطح (وجود یا عدم وجود باکتری)، مقدار ماده مغذی (با دو سطح صفر و ۰/۵ مولار) و حجم محلول (۱۲۳، ۲۶۴ و ۳۶۹ میلی‌لیتر) بصورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. برای روش شیمیایی از پنج سطح از پلیمر پلی‌ونیل استات شامل شاهد، ۱، ۱/۵، ۲، و ۲/۵ درصد استفاده گردید. بعد از ۲۸ روز ویژگی‌های هدر رفت خاک، مقاومت فشاری و پایداری خاکدانه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که برای روش رسوب میکروبی، تیمار دوبار مه پاشی باکتری با ۰/۵ مولار مواد مغذی و حجم محلول ۲۶۹ میلی‌لیتر (BS₂ C₁) و برای روش شیمیایی سطح ۲/۵ درصد به عنوان بهترین تیمار برای تثبیت سطح خاک انتخاب گردید. مقایسه این دو روش نشان داد که به طور میانگین، میزان افزایش مقاومت فشاری، پایداری خاکدانه و کاهش هدررفت خاک در روش شیمیایی بیشتر از روش زیستی بود. با این وجود برای انتخاب روش مناسب علاوه بر عملکرد فیزیکی مالچ باید مسایل زیست‌محیطی و اقتصادی را نیز در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: زیستی، پلی‌ونیل استات، رسوب میکروبی کربنات کلسیم، تثبیت خاک

نامدار خجسته د، بازگیر م، هاشمی باباحیدری ع. ۱۴۰۲. مقایسه عملکرد دو روش، رسوب میکروبی کربنات کلسیم و پلیمر پلی‌ونیل استات در کاهش فرسایش بادی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۱، شماره ۳. صفحه: ۱۱۰-۱۲۰.

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد (مکاتبه کننده)

۲- دانشیار گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۳- استادیار گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد

*پست الکترونیک: D.namdar@shahed.ac.ir

مقدمه

یکی از مشکلات زیست‌محیطی کشور، فرسایش بادی و گرد و غبار بوده که در سال‌های اخیر به دلیل توسعه ناپایدار، بروز جنگ‌های منطقه‌ای و مداخلات نادرست انسانی در اکوسیستم‌های منطقه زیاد شده است (Khaledi, 2013). در ایران حدود ۲۵ درصد از مساحت کشور بدلیل قرار گرفتن بر روی کمربند خشک و بیابانی جهان، متأثر از توفان‌های گرد و غباری بوده (Hamidi *et al.*, 2015; Kaskaoutis *et al.*, 2013). و در استان‌های مرزی کشور میزان گرد و غبار و فرسایش بادی بیشتر است. میزان گرد و غبار و فرسایش بادی هر ساله خسارات زیادی به کشاورزی، محیط زیست، راه آهن، سلامت انسان و غیره وارد کرده است (Namdar Khojasteh *et al.*, 2021). مقابله با پدیده گرد و غبار و فرسایش بادی نیازمند برنامه‌ریزی بصورت کوتاه مدت و دراز مدت می‌باشد (Hamidi *et al.*, 2013; Rashki *et al.*, 2021; Kaskaoutis *et al.*, 2016; Babaei Fini *et al.*, 2015). با توجه به وضعیت اقلیمی، جغرافیایی و محدودیت‌های زیست‌محیطی در کشور ایران، کنترل مدیریت فرسایش بادی و گرد و غبار در نواحی مستعد فرسایش بادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Kakler *et al.*, 2016).

روش‌های متنوعی جهت تثبیت خاک و کنترل فرسایش بادی از جمله روش‌های زیستی شامل افزایش پوشش گیاهی و ریزجانداران (Anderson *et al.*, 2014)، روش‌های مکانیکی و فیزیکی از قبیل استفاده از بادشکن (Namdar Khojasteh & Zareh, 2021)، شیمیایی و معدنی از جمله کاربرد پلیمرهای شیمیایی و محصولات نفتی (Namdar Khojasteh *et al.*, 2016, 2017; Bazgir & Namdar Khojasteh, 2019) و روش‌های نوین با استفاده از بادشکن مکانیزه (Namdar Khojasteh & Bonsu Asumadu, 2021) وجود دارد. مکانیسم اصلی این روش‌ها، کاهش سرعت باد، افزایش چسبندگی ذرات خاک و افزایش پایداری خاکدانه می‌باشد (Jafarishalkoohy *et al.*, 2016; Namdar Khojasteh *et al.*, 2015).

استفاده از پلیمرهای شیمیایی و معدنی از دیرباز مورد توجه کارشناسان حفاظت خاک در کشور بوده است. پژوهش‌های زیادی در رابطه با این خاک‌پوش‌ها در کشور انجام شده است. به عنوان مثال، بازگیر و نامدار خجسته (Bazgir & Namdar Khojasteh, 2019) با بررسی

پلیمرهای پلی ونیل الکل و پلی ونیل استات در استان ایلام گزارش کردند که ترکیب پلی ونیل استات با کربنات کلسیم و پلیمر زانتان می‌تواند باعث کاهش هدررفت خاک، افزایش مقاومت فشاری گردد، هرچند در مقایسه با پلیمر زیستی نظیر زانتان، تأثیر پلیمرهای شیمیایی بر افزایش مقاومت فشاری بیشتر بود. در پژوهش دیگر نامدار خجسته و همکاران (Namdar Khojasteh *et al.*, 2016) در استان سمنان نشان دادند که افزودن ماده پلیمری زیستی و شیمیایی به سطح خاک، به دلیل افزایش پیوند فیزیکی و شیمیایی بین ذرات خاک و پلیمر، باعث به هم پیوستن ذرات خاک و افزایش مقاومت سطحی خاک در برابر باد می‌شود.

در سال‌های اخیر، فناوری زیستی سبز و سازگار با محیط زیست، بنام MICP یا همان رسوب میکروبی کربنات کلسیم، به عنوان یک روش بهسازی خاک توسعه یافته است (Kakler *et al.*, 2016; Kargar & Kargar, 2018; Sohrabi & Khodaparast, 2018; Nikseresht *et al.*, 2019). ریزجانداران با سازوکارهای گوناگون از قبیل تولید مواد چسبناک (پلیمری)، کاهش pH و هیدرولیز سبب بهم پیوستگی و چسبندگی ذرات خاک و در نهایت تثبیت و کاهش انتشار ذرات گرد و غبار می‌شوند (Lababpour, 2016; Sohrabi & Khodaparast, 2018).

در میان ریزجانداران مختلف، باکتری‌ها به عنوان عمومی‌ترین و رایج‌ترین ریزجانداران قلیا دوست خاک، نقش بسزایی در فرآیند سیمانی شدن از طریق تولید آنزیم اوره‌آز ایفا می‌کنند (Sohrabi & Khodaparast, 2018). به طور کلی، با قرار گرفتن کربنات کلسیم تولید شده بصورت پوششی روی دانه‌های خاک، پیوند ذرات خاک بیشتر شده و استحکام خاکدانه‌ها و مقاومت آنها افزایش می‌یابد (Sohrabi & Khodaparast, 2018; Ooi *et al.*, 2008).

هدف از این پژوهش بررسی آزمایشگاهی استفاده از فناوری MICP با باکتری *Bacillus sphaericus* و پلیمر پلی ونیل استات در مقیاس نیمه آزمایشگاهی و مقایسه اثر آنها با یکدیگر در کاهش تلفات خاک ناشی از فرسایش بادی به کمک تونل باد و مقاومت فشاری و پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های با منشأ تولید گرد و غبار در منطقه مولد گرد و غبار در استان ایلام می‌باشد.

مواد و روش ها

نمونه برداری و آماده سازی خاک

نمونه برداری در این پژوهش در یکی از مناطق مولد گرد و غبار در نزدیکی شهرستان مهران (دشت محسن آباد) در استان ایلام انجام شد. این منطقه عاری از هرگونه فعالیت کشاورزی و بصورت بایر می باشد. این شهرستان دارای آب و هوای گرم و خشک با میانگین بارش سالیانه ۲۵۱ میلی متر می باشد. متوسط دمای سالیانه ۲۴/۲ درجه سانتی گراد و حداقل و حداکثر مطلق دما به ترتیب ۶/۲ و ۵۲ درجه سانتی گراد است.

بعد از نمونه برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی متری (در چهار نقطه متفاوت) از منطقه مورد نظر، آزمایش هایی از جمله درصد اجزاء رس، سیلت و شن به روش هیدرومتری (McLean, 1983)، ماده آلی به روش شیمیایی (Walkley & Black, 1934)، رطوبت اشباع به روش وزنی تعیین شد. جهت آزمایش های تونل باد میزان ۵۰۰ کیلوگرم خاک نیز از نقاط مختلف دشت به آزمایشگاه انتقال یافت. خاک بعد از عبور از الک ۲ میلی متری، با استفاده از اتوکلاو، در دمای ۱۲۱ درجه سیلسیوس و فشار ۱۵ PSI^۱ (پوند بر اینچ مربع) به مدت دو ساعت استریل و پس از سرد شدن، خاک توزین شده به میزان تقریبی ۳ کیلوگرم در سینی هایی به ابعاد ۳۵×۳۵×۳ سانتی متری ریخته شد.

تهیه سویه باکتری، کشت و آماده سازی آن و اعمال تیمارها

باکتری *Bacillus sphaericus* PTCC1 1487 (CIP S25) (001 مورد استفاده جهت انجام این پژوهش، از سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران (IROST) به صورت کشت خالص تهیه شد. سویه باکتری در پتری دیش های حاوی محیط نوترینت آگار سترون کشت داده شد. پتری دیش های کشت داده شده به مدت ۷-۵ روز در انکوباتور با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. پس از اطمینان از رشد مناسب و بدون آلودگی سویه باکتری، برای رسیدن به غلظت مورد نظر از باکتری به روش اسپکتروفوتومتری، ابتدا باکتری در محیط کشت مایع نوترینت برات (Merck®, Germany) سترون کشت داده شد و تا زمان رسیدن به انتهای فاز رشد تصاعدی (۷ روز) در انکوباتور شیکردار در دمای ۲۸/۵ درجه سانتی گراد و

۲۰۰ دور در دقیقه نگهداری شد. غلظت باکتری موجود در محیط کشت محلول مورد استفاده در آزمایش به روش اندازه گیری تراکم نوری^۲ با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۰۰ نانومتر تعیین شد (Moravej *et al.*, 2018) از محیط کشت نوترینت برات سترون به عنوان شاهد برای خواندن استفاده شد و هر نمونه سه بار خوانده شد. با توجه به اینکه گزارش شده است که جمعیت باکتری در تراکم نوری معادل ۱ (OD=1) برابر با ۱۰^۹ سلول در هر میلی لیتر است (Ooi *et al.*, 2008)، پس از چندین بار تکرار آزمایش، بیشترین میزان تراکم نوری، ۰/۵ به دست آمد.

تیمارهای شیمیایی و زیستی

در این پژوهش از پلیمر پلی ونیل استات با پنج سطح صفر (C₀)، ۱ (C₁)، ۱/۵ (C₂)، ۲ (C₃) و ۲/۵ (C₄)، درصد به عنوان خاک پوش شیمیایی و از باکتری *Bacillus sphaericus* بعنوان خاک پوش زیستی با سه فاکتور سویه باکتری (وجود یا عدم وجود باکتری)، مقدار ماده مغذی (با دو سطح صفر و ۰/۵ مولار) و حجم محلول (۱۲۳، ۲۶۴ و ۳۶۹ میلی لیتر) بصورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. برای تهیه ماده مغذی ۰/۵ مولار از نوترینت برات (۳ گرم در لیتر)، کلرید آمونیوم (۱۰ گرم در لیتر) و بی کربنات سدیم (۲/۱۲ گرم در لیتر) استفاده شد (Zomorodian *et al.*, 2019). تیمارهای خاک پوش شیمیایی به میزان دو لیتر بر متر مربع بر سطح خاک (سطح سینی) محلول پاشی شد (نامدار خجسته و همکاران، ۲۰۱۶). برای خاک پوش زیستی، تیمارهای آماده شده به صورت یکنواخت به سطح خاک محلول پاشی و سپس در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد در اتاقک کشت قرار داده شدند. سطح خاک برای مرطوب نگه داشتن، هر سه روز یکبار با ۵۰ تا ۱۰۰ میلی لیتر آب به صورت یکنواخت به مدت ۲۵ روز مه پاشی شد. سپس سینی ها به مدت ۳ روز در شرایط محیط باز قرار داده شدند تا سطح آن خشک شود، پس از آن، آزمون های تونل باد، مقاومت فشاری و پایداری خاکدانه در تمام تیمارها بعد از ۲۸ روز انجام گردید.

² Optical Density^۱ یک پی اس آی معادل ۶/۸۹ کیلو پاسکال

آزمون‌های انجام شده

آزمون تونل باد

در این مطالعه از دستگاه تونل باد از نوع مدار باز دمنده^۱ ساخت دانشگاه شاهد تهران استفاده شد. دستگاه تونل باد از دو قسمت مولد باد و آزمایش تشکیل شده است. قسمت مولد باد از یک جت فن با قدرت ۱۵ کیلو وات و ۲۸۰۰ دور در دقیقه تشکیل شده است. سرعت باد تولید شده در قسمت مولد بین ۰/۳ تا ۲۰ متر بر ثانیه در ارتفاع ۳۰ سانتی متری است. در این پژوهش از حداکثر سرعت باد برای آزمایش استفاده شد. قسمت آزمایش از ورقه آهن گالوانیزه به طول ۴ متر با ارتفاع ۳۵ و عرض ۳۵ سانتی متر تشکیل شده است. در قسمت بالای این بخش، حفره‌هایی به منظور اندازه‌گیری سرعت باد و میزان غبار تعبیه شده است. نمونه‌ها قبل از قرار گرفتن در قسمت آزمایش دستگاه ابتدا توزین شده و بعد از ۱۵ دقیقه آزمون، دوباره توزین شدند. کاهش وزن خاک در سینی‌ها نشان دهنده هدر رفت خاک می‌باشد.

اندازه‌گیری مقاومت فشاری

در این پژوهش برای بررسی مقاومت فشاری، از پنترومتر فشاری مدل H-4137 استفاده شد. بدین ترتیب پنترومتر با نوک ۱/۳ اینچی با انتهای مسطح به طور تدریجی در سطح خاک مالچ‌پاشی شده قرار گرفت. برای هر تیمار بیش از سه تکرار انجام و سپس میانگین سه تکرار محاسبه شد. اندازه‌گیری مقاومت فشاری برای نمونه‌های خاک بعد از ۲۸ روز از زمان شروع آزمایش انجام شد.

آزمون پایداری خاکدانه

برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه از دستگاه الک تر^۲ استفاده شد. این دستگاه از ۸ الک با قطر منافذ به اندازه ۱۰، ۱۸، ۳۵، ۶۰، ۱۲۰، ۲۳۰، ۲۷۰ و ۳۲۵ مش تشکیل شده است. در این روش ۵ گرم از نمونه خاک تیمار شده با پلیمر در دستگاه قرار گرفت و به مدت ۵ دقیقه الک شد. پس از به پایان رسیدن زمان مورد نظر، خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک، در آون با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و توزین شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل اطلاعات از نرم افزارهای (v.22) SPSS و (v4.2.2) R انجام گردید. تجزیه واریانس داده‌ها به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گردید. در نهایت مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده با روش دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک

بافت خاک منطقه مورد پژوهش لومی تا لوم رسی بوده و ماده آلی خاک‌ها با میانگین ۰/۸۲ درصد بسیار پایین بوده که بیانگر ضعیف بودن پوشش گیاهی به دلیل اقلیم خشک و بارندگی پایین منطقه می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد پژوهش

Table 1. Soil physico-chemical properties

Soil Properties	Minimum	Maximum	Average	Standard Error
Saturation Moisture Content	28.5	38.00	32.65	0.84
Clay (%)	3.40	36.40	25.75	2.49
Silt (%)	31.60	45.20	38.49	1.27
Sand (%)	28.40	40.00	34.24	0.87
Organic Matter (%)	0.17	1.56	0.82	0.15

میزان هدررفت خاک

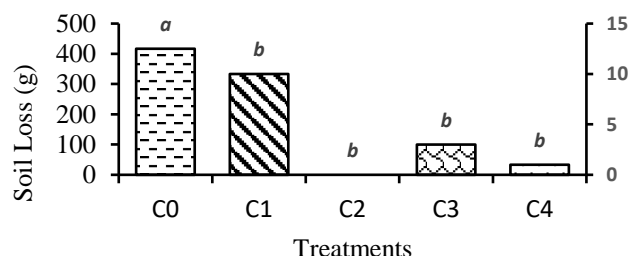
مقایسه با سایر تیمارها در سطوح مختلف در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. میزان هدررفت خاک در بین تیمارهای مختلف با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نشان نداد. نتایج آزمون هدر رفت خاک برای روش زیستی نشان داد حجم محلول نیز تاثیر معنی‌داری بر میزان هدر رفت خاک

شکل ۱ اثر تیمارهای مختلف پلیمر پلی ونیل استات در کنترل میزان فرسایش بادی (هدر روی خاک) به صورت آزمایشگاهی در تونل باد را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، تیمار شاهد (C₀) یا بدون خاک‌پوش در

^۲ Wet Sieving^۱ Open Circuit Wind Tunnel

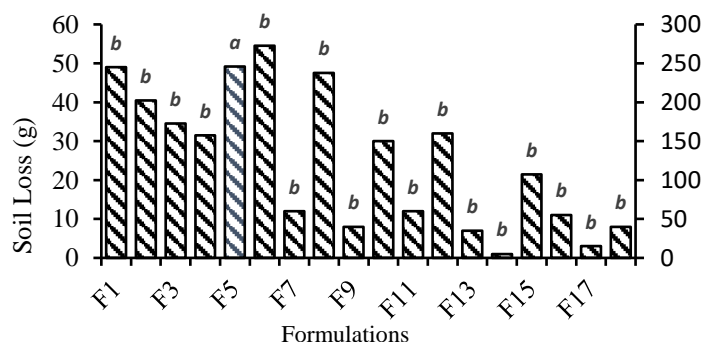
باکتری (BS₂ WC₂) می‌باشد و بیشترین هدررفت خاک ۵ درصد مشاهده نگردید. کمترین هدر رفت خاک در تیمار بار حجم محلول ۱۲۳ میلی‌لیتر به میزان ۲۳/۴۲ گرم به دست آمد. با افزایش غلظت باکتری میزان هدر رفت خاک به طور معنی‌داری در سطح ۵ درصد کاهش پیدا کرد. هدر رفت خاک در سطح با دوبار مه‌پاشی باکتری (۸/۵۸) گرم خاک در هر سینی) کمتر از یک بار مه‌پاشی (۲۳/۵۸) گرم خاک) و بدون باکتری (۷۶ گرم خاک) می‌باشد. نتایج اثر متقابل مواد مغذی و حجم محلول نشان داد که کمترین هدر رفت خاک (۲۱/۳۳) گرم خاک) در تیمار بدون مواد مغذی و حجم محلول ۲۴۶ میلی‌لیتر (C₀ WC₂) می‌باشد. بیشترین هدر رفت خاک (۸۷ گرم خاک) در تیمار با سطح مواد مغذی ۰/۵ مولار با حجم محلول ۳۶۹ میلی‌لیتر (C₁ WC₃) می‌باشد. در کل، اثر متقابل مواد مغذی و حجم محلول در هیچ کدام از تیمارها در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود. نتایج بررسی اثر متقابل غلظت باکتری و حجم محلول نشان داد که کمترین هدر رفت خاک (۲ گرم) در تیمار با حجم محلول ۲۶۴ میلی‌لیتر و با دوبار مه‌پاشی ۰/۵ مولار) می‌باشد (شکل ۲).

نداشته و بین سطوح مختلف اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده نگردید. کمترین هدر رفت خاک در تیمار بار حجم محلول ۱۲۳ میلی‌لیتر به میزان ۲۳/۴۲ گرم به دست آمد. با افزایش غلظت باکتری میزان هدر رفت خاک به طور معنی‌داری در سطح ۵ درصد کاهش پیدا کرد. هدر رفت خاک در سطح با دوبار مه‌پاشی باکتری (۸/۵۸) گرم خاک در هر سینی) کمتر از یک بار مه‌پاشی (۲۳/۵۸) گرم خاک) و بدون باکتری (۷۶ گرم خاک) می‌باشد. نتایج اثر متقابل مواد مغذی و حجم محلول نشان داد که کمترین هدر رفت خاک (۲۱/۳۳) گرم خاک) در تیمار بدون مواد مغذی و حجم محلول ۲۴۶ میلی‌لیتر (C₀ WC₂) می‌باشد. بیشترین هدر رفت خاک (۸۷ گرم خاک) در تیمار با سطح مواد مغذی ۰/۵ مولار با حجم محلول ۳۶۹ میلی‌لیتر (C₁ WC₃) می‌باشد. در کل، اثر متقابل مواد مغذی و حجم محلول در هیچ کدام از تیمارها در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود. نتایج بررسی اثر متقابل غلظت باکتری و حجم محلول نشان داد که کمترین هدر رفت خاک (۲ گرم) در تیمار با حجم محلول ۲۶۴ میلی‌لیتر و با دوبار مه‌پاشی



شکل ۱- میزان هدررفت خاک برای تیمارهای مختلف (خاک‌پوش پلیمری) (تیمار C₀ به دلیل مقادیر بیشتر در نمودار عمودی سمت چپ (۰-۵۰۰) و سایر تیمارها در نمودار عمودی سمت راست (۰-۱۲) نشان داده شده است)

Figure 1. The amount of soil loss for different treatments (polymer mulches) (C₀ treatment is shown in the left vertical axis (0-500 and other treatments in the vertical graph on the right (0-12) due to higher values)



شکل ۲- بررسی اثر متقابل سطوح غلظت باکتری، مواد مغذی و حجم محلول بر هدر رفت خاک (فرمولاسیون F₅ به دلیل مقادیر بیشتر در نمودار عمودی سمت راست (۰-۳۰۰) و سایر فرمولاسیون‌ها در نمودار عمودی سمت چپ (۰-۶۰) نشان داده شده است)

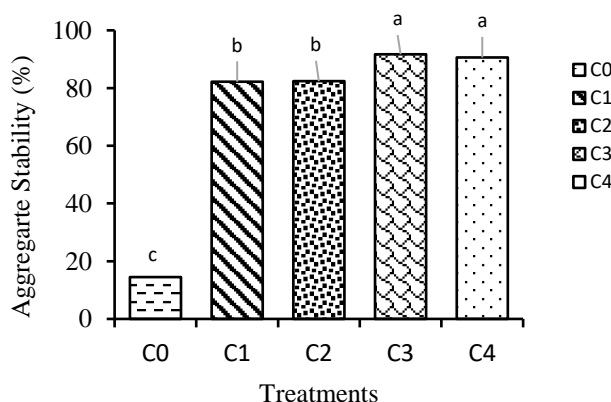
Figure 2. Assessment of the different effects of bacterial concentration levels, nutrients and solution volume on soil loss (formulation F₅ due to higher values is shown in the right vertical axis)

محلول نشان داد که در هیچکدام از تیمارها تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد وجود ندارد. بیشترین پایداری خاکدانه (۳۲/۹۸ درصد) در تیمار با غلظت ۰/۵ مولار و حجم محلول ۲۶۴ میلی لیتر (C_1 WC $_2$) و کمترین پایداری خاکدانه (۲۲/۷۹ درصد) در تیمار بدون مواد مغذی و حجم محلول ۱۲۳ میلی لیتر (C_0 WC $_1$) است. نتایج اثر متقابل غلظت باکتری و حجم محلول نشان داد که بین تیمارها تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد وجود ندارد. بیشترین پایداری خاکدانه با میزان ۳۷/۶۰ درصد در تیمار با دوبار مه پاشی باکتری و حجم محلول ۱۲۳ (BS_2 WC $_1$) و کمترین پایداری با میزان ۲۰/۵۹ درصد در تیمار بدون باکتری با ۱۲۳ میلی لیتر حجم محلول (WB WC $_1$) می باشد. نتایج اثر متقابل سطوح غلظت باکتری با مواد مغذی نشان داد که بین تیمارها در سطح ۵ درصد اختلاف معنی داری وجود دارد. بیشترین پایداری (۳۶/۹۰ درصد) در تیمار با دوبار مه پاشی باکتری و غلظت ۰/۵ مولار (BS_2 C $_1$) و کمترین پایداری (۲۱/۷۳ درصد) در تیمار بدون باکتری و بدون ماده مغذی (WB C $_0$) به دست آمد. نتایج کلی اثر متقابل سطوح غلظت باکتری، حجم محلول و مواد مغذی نشان داد که بین تیمارها اختلاف معنی داری وجود دارد به طوری که بیشترین (۴۲/۵۵ درصد) و کمترین (۱۸ درصد) پایداری خاکدانه در تیمارهای F_{16} (دوبار مه پاشی باکتری + ۰/۵ مولار مواد مغذی + ۱۲۳ میلی لیتر محلول) و F_7 (یک بار مه پاشی باکتری + بدون مواد مغذی + ۱۲۳ میلی لیتر محلول) می باشد (شکل ۴).

به طور کلی نتایج این آزمون نشان داد که با افزایش سطح غلظت باکتری، میزان هدر رفت خاک کاهش می یابد، به طوری که هدررفت خاک در تیمار با دوبار مه پاشی کمتر از یک بار مه پاشی و بدون باکتری است.

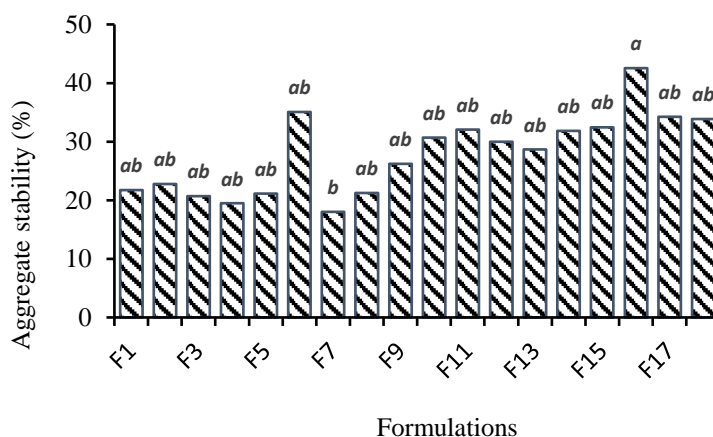
آزمون پایداری خاکدانه

بر اساس شکل ۳، بیشترین و کمترین پایداری خاکدانه به ترتیب مربوط به تیمار C_4 با ۸۵ درصد و شاهد (C_0) با ۱۸ درصد مشاهده گردید و اختلاف معنی داری را نشان دادند ($P < 0.05$). در بین تیمارهایی که از خاک پوش پلی ونیل استات استفاده گردید، تیمارهای C_3 و C_4 نسبت به تیمارهای C_1 و C_2 پایداری بیشتری از خود نشان دادند. نتایج روش زیستی نشان داد که اثر حجم محلول بر پایداری خاکدانه در سطح ۵ درصد معنی دار نیست. بیشترین و کمترین پایداری خاکدانه با میزانهای ۲۹/۷۲ و ۲۶/۸۵ درصد به ترتیب در سطوح محلول با ۳۶۹ (WC_{t3}) و ۲۶۴ (WC_{t2}) میلی لیتر می باشد. روند پایداری خاکدانه با افزایش حجم محلول به صورت نمایی افزایش یافته که نشان دهنده مؤثر بودن حجم محلول در پایداری است. تأثیر غلظت باکتری بر پایداری خاکدانه در سطح ۵ درصد معنی دار بوده به طوری که بیشترین پایداری با میزان ۳۳/۹۴ درصد در تیمار دو بار مه پاشی باکتری (BS_{2t}) و کمترین پایداری با میزان ۲۳/۴۸ درصد در تیمار بدون باکتری (WB_t) مشاهده شد. این نتایج نشان دهنده مؤثر بودن غلظت باکتری در افزایش پایداری خاکدانه می باشد. نتایج اثر متقابل سطوح مواد مغذی و حجم



شکل ۳- پایداری خاکدانه‌ها برای تیمارهای مختلف (خاک پوش پلیمری)

Figure 3. Aggregates stability for different treatments (mulches)



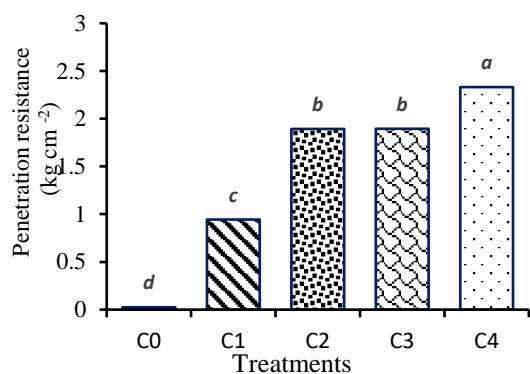
شکل ۴- بررسی اثر متقابل سطوح غلظت باکتری، مواد مغذی و حجم محلول بر پایداری خاکانه
Figure 4. Assessment of the effect of different concentration levels of bacteria, nutrients and solution volume on soil stabilization

آزمون مقاومت فشاری

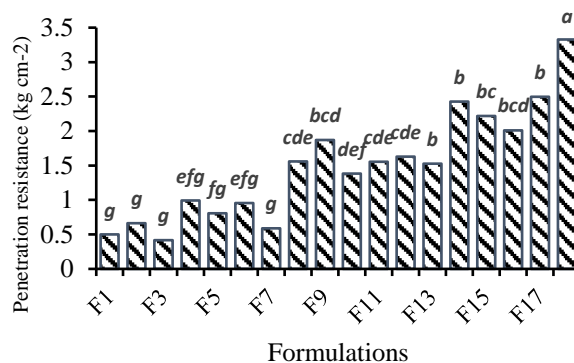
تیمار C₄ به میزان ۲/۴ کیلوگرم بر سانتی مترمربع به طور معنی داری در سطح ۵ درصد، بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به سایر تیمارها با غلظت‌های مختلف و تیمار شاهد، از خود نشان داد. همچنین این تغییرات به صورت نمایی از تیمار شاهد به سمت تیمار C₄ روند افزایشی داشتند (شکل ۵).

نتایج تیمار زیستی نشان داد که با وجود روند صعودی مقاومت فشاری با حجم محلول، تفاوت بین این سطوح در سطح ۵ درصد معنی دار نیستند. حجم محلول ۳۶۹ (WC₃) دارای بیشترین (۱/۷۳ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) و حجم ۱۲۳ (WC₁) داری کمترین (۱/۱۶ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) مقاومت فشاری هستند. تأثیر غلظت باکتری بر مقاومت فشاری در سطح ۵ درصد معنی دار بوده به طوری که با افزایش غلظت باکتری مقاومت فشاری به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقاومت فشاری (۲/۳۳ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) برای دوبار مه پاشی باکتری (BS₂t) و کمترین مقاومت فشاری (۰/۷۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) در سطح بدون باکتری (WBt) می‌باشد. نتایج بررسی اثر متقابل مواد مغذی و حجم محلول نشان داد که بین تیمارها تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد وجود دارد. بیشترین مقاومت فشاری (۱/۹۷ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) برای سطح مواد مغذی ۰/۵ مولار با حجم محلول ۲۶۴ میلی لیتر (C₁ WC₂) و کمترین مقاومت فشاری (۰/۸۷ کیلوگرم بر سانتی مترمربع)

برای تیمار بدون مواد مغذی و حجم ۱۲۳ میلی لیتر (C₀) می‌باشد. نتایج اثر متقابل غلظت باکتری و حجم محلول نشان داد که بین تیمارها اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد وجود دارد و با افزایش غلظت باکتری و حجم محلول میزان مقاومت فشاری به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقاومت فشاری (۲/۷۷ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) برای تیمار با دوبار مه پاشی باکتری و حجم محلول ۳۶۹ میلی لیتر (BS₂ WC₃) و کمترین مقاومت فشاری (۰/۶۸ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) برای تیمار بدون باکتری با حجم محلول ۳۶۹ میلی لیتر (WB WC₃) است. نتایج اثر متقابل غلظت باکتری و مواد مغذی نشان داد که با افزایش غلظت باکتری و مواد مغذی، مقاومت فشاری به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین (۲/۶۱ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) و کمترین (۰/۵۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) مقاومت فشاری برای تیمارهای با دو بار مه پاشی با غلظت ۰/۵ مولار (BS₂ C₁) و بدون باکتری بدون مواد مغذی (WB C₀) می‌باشد. نتایج اثر متقابل غلظت باکتری، مواد مغذی و حجم محلول نشان داد بین تیمارها اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد وجود دارد، به طوری که با افزایش غلظت باکتری و مواد مغذی، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت فشاری (۳/۳۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) برای تیمار F₁₈ و کمترین مقاومت فشاری (۰/۴۱ کیلوگرم بر سانتی مترمربع) برای تیمار F₃ می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۵- اثر تیمارهای مختلف (خاک پوش پلیمری) بر مقاومت فشاری خاک
Figure 5. Penetration resistance for different treatments (mulches)



شکل ۶- بررسی اثر متقابل سطوح غلظت باکتری، مواد مغذی و حجم محلول بر مقاومت فشاری
Figure 6. Assessment of different concentration levels of bacteria, nutrients and solution volume on penetration resistance

کاهش هدر رفت خاک، افزایش مقاومت فشاری و پایداری خاکدانه در روش شیمیایی با افزایش غلظت پلیمر بیشتر است، به طوریکه با افزایش غلظت پلیمر، میزان مقاومت فشاری در مقایسه با روش زیستی بیشتر افزایشی بود. علیرغم تأثیر مثبت روش زیستی بر شاخص‌های ذکر شده، سطوح مختلف مواد مغذی و حجم محلول بر هدر رفت خاک تأثیر معنی‌داری نداشت. با توجه به ویژگی‌های بهینه این زیست فناوری نوین، استفاده از خاک پوش زیستی در راستای تثبیت شن‌های روان و خاک می‌تواند، جایگزین مناسبی برای سایر روش‌های تثبیت گرد و غبارها از قبیل مالچ‌پاشی باشد.

پژوهندگان دیگر نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های نوین مبارزه با فرسایش بادی نظیر روش رسوب میکروبی می‌تواند کمک شایانی به تثبیت گرد و غبار در نواحی مستعد و کانون‌های این پدیده باشند (Devrani *et al.*, 2021; Meng *et al.*, 2021; Gebru *et al.*, 2021). نتایج این پژوهش با یافته‌های دیگر پژوهندگان مطابقت دارد. منگ و همکاران (Meng *et al.*, 2021) در پژوهشی، روش رسوب میکروبی با مقاومت فشاری ۴۶۰ کیلوپاسکال و هدر رفت خاک صفر بعد از ۳۰ روز را، یک تکنیک کارآمد و دوام برای کنترل فرسایش بادی عنوان کرد. دویی و همکاران (Dubey *et al.*, 2021) با بررسی سوسپانسیون‌های مختلف زیستی با مولاریته متفاوت، به این نتیجه رسیدند که سوسپانسیون با غلظت یک مولار، میزان مقاومت خاک به هدررفت خاک در سرعت ۵۵ کیلومتر بر ساعت بیشتر

نتایج و بحث

در این پژوهش دو خاک پوش زیستی و شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفتند. هر دو خاک پوش در آزمون هدر رفت خاک، مقاومت فشاری و پایداری خاکدانه با تیمارهای شاهد که بدون خاک پوش بودند اثرات متفاوتی نشان دادند. نتایج بدست آمده بیانگر اثر مثبت این خاک پوش‌ها بر کاهش هدررفت خاک، افزایش مقاومت فشاری و پایداری خاکدانه بودند. فرایند اصلی خاک پوش‌های زیستی، به هم چسبیدن ذرات خاک با عامل سیمانی ناشی از فعالیت آنزیم اوره‌آزی ریزجاندار یا پلیمر می‌باشد در خاک پوش زیستی، باکتری استفاده شده با تغییر pH و رسوب کربنات، پوشش و اتصالاتی بین ذرات خاک ایجاد کرده که این عامل باعث مقاومت فشاری، پایداری خاکدانه و افزایش استحکام و پایداری خاک می‌شود (Dubey *et al.*, 2021; Meng *et al.*, 2021). در خاک پوش شیمیایی، چسبیدن ذرات خاک با پلیمر انجام شده و افزایش غلظت پلیمر تا حد مشخصی باعث افزایش مقاومت فشاری، پایداری خاکدانه و کاهش هدر رفت خاک می‌گردد. با افزایش غلظت پلیمر (بالای ۲/۵ درصد)، به دلیل لزوجت بالای آن، میزان نفوذ سوسپانسیون در خاک کم شده و پلیمر روی سطح خاک باقی می‌ماند. بنابراین، در غلظت‌های بالای خاک پوش شیمیایی، علاوه بر مسایل اقتصادی، به دلیل عدم نفوذ پلیمر در خاک، کاهش هدررفت و افزایش مقاومت فشاری اتفاق نمی‌افتد (Dubey *et al.*, 2021; Meng *et al.*, 2021). مقایسه دو روش شیمیایی و زیستی نشان داد که

باکتری، پایداری خاکدانه به صورت خطی افزایش یافت. حجم محلول بر مقاومت فشاری اثر معنی‌دار نداشته اما مواد مغذی و غلظت باکتری تاثیر معنی‌داری بر مقاومت فشاری داشتند. نتایج کلی مقایسه تیمارهای مختلف در این طرح نشان داد که تیمار دو بار مه پاشی باکتری با ۰/۵ مولار مواد مغذی و حجم محلول ۲۶۹ میلی‌لیتر (BS₂ C₁) به عنوان بهترین تیمار برای تثبیت سطح خاک است. همچنین نتایج مربوط به مقایسه پلیمر پلی ونیل استات و خاک‌پوش باکتریایی نشان داد که میزان مقاومت فشاری و کاهش هدر رفت خاک در تیمار شیمیایی بیشتر از روش زیستی است، اما با توجه به سازگار بودن خاک‌پوش باکتریایی با محیط زیست نسبت به پلی ونیل استات، انجام پژوهش‌های بیشتر با روش زیستی در صحرا و در سطح وسیعتر در استان ایلام پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

این پژوهش با همکاری دانشگاه شاهد و دانشگاه ایلام و حمایت مالی و معنوی صندوق حمایت از پژوهشگران کشور به شماره طرح ۹۷۰۰۳۷۵۳ انجام گردید. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت مالی و معنوی دانشگاه شاهد، دانشگاه ایلام و صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (INSF) تشکر کنند.

References

- Anderson J., Bang S., Bang S., Lee S.J., Choi S.R., and Dho N.Y. 2014. Reduction of wind erosion potential using microbial calcite and soil fibers. *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, pp. 1664-1673.
- Babaei Fini O., Safarrad T., and Karimi, M. 2016. Analysis and Identification of Synoptic Patterns of Dust Storms in the West of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 5 (1): 105-120. (In Persian).
- Bazgir M., and Namdar Khojasteh D. 2019. Biological, chemical and mineral mulches effect on stabilization of dust storm sources, case study: Ilam Province. *Watershed Engineering and Management*, 10 (1): 701-713. (In Persian)
- Devrani R., Dubey A., Ravi K., and Sahoo L. 2021. Applications of bio-cementation and bio-polymerization for aeolian erosion control. *Journal of Arid Environments*, 187 (2): 104433.
- Dubey A., Devrani R., Ravi K., Dhami K., Mukherjee A., and Sahoo L. 2021. Experimental investigation to mitigate aeolian erosion via biocementation employed with a novel ureolytic soil isolate. *Aeolian Research*, 52 (2): 100-127.
- Gebri A., Kidanemariam G., and Gebretinsae, K. 2021. Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review. *Chemical Engineering Science*, 238 (2): 116-126.
- Hamidi M., Kavianpour R., and Shao Y. 2013. Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49 (2): 279-286.
- Hossner L. 1996. Dissolution for total elemental analysis. *Methods of soil analysis, Part 3*, pp. 49-64.
- Jafarishalkoohy A., Vafaeian M., Rowshanzamir M.A., and Mirmohammadsadeghi, M. 2015. Effective Factors in Fine-Grained Soil Stabilization to Prevent Dust Generation. *Journal of Water and Soil Science*, 19 (5): 273-286. (In Persian)

شده و این روش را مناسب برای افزایش مقاومت فرسایش‌پذیری خاک می‌دانند. کاهانی و همکاران (Kahani *et al.*, 2014) به این نتیجه رسیدند که حداقل ۲۸ روز برای رسیدن به مقاومت نهایی سطح خاک با استفاده از روش MICP لازم است و حداکثر مقاومت خاک با استفاده از باکتری بومی حدود ۶۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. بین فعالیت باکتری با قابلیت هیدرولیز آمونیم و میزان رسوب کلسیت یک وابستگی مثبت وجود دارد و بهره‌گیری از روش MICP در سطح خاک می‌تواند در فرسایش بادی در سرعت‌های بالاتر موثر باشد (Kakler *et al.*, 2016).

نتیجه‌گیری کلی

در روش شیمیایی، با افزایش غلظت پلیمر میزان مقاومت فشاری و پایداری خاکدانه افزایشی بوده و میزان هدر رفت خاک نسب به شاهد کاهش چشمگیری داشت. افزایش مواد مغذی و حجم محلول تاثیر معنی‌داری بر روی هدر رفت خاک نداشته اما با افزایش سطح غلظت باکتری، میزان هدر رفت خاک کاهش می‌یابد. همچنین افزایش مواد مغذی و حجم محلول تاثیر معنی‌داری بر پایداری خاکدانه نداشته اما روند پایداری خاکدانه با افزایش حجم محلول به صورت نمایی افزایش داشت. با افزایش میزان

- Kahani M., Kalantari F., Bazaz zadeh R., and Mirzaei B. 2014. Bio-deposition of calcium carbonate in sandy soils and its effect on increasing soil strength. *Journal of Environmental Science*, 52 (3): 1-11. (In Persian)
- Kakler M., Ebrahimi S., Farokh A., and Tabrizi E. 2016. Evaluation of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation efficiency for stabilization of sand. *Iranian Soil and Water Research*, 47 (3): 407-415. (In Persian)
- Kargar M. 2018. Monitoring of biocement- and biogrout- producing bacteria in desert habitats of Iran. *Journal of Microbial World*, 11(2): 51-60. (In Persian)
- Kaskaoutis D., Rashki A., Houssos E., Mofidi A., Goto D., Bartzokas A., Francois P., and Legrand, M. 2015. Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran. *Climate Dynamics*, 45 (6): 407-424. (In Persian)
- Khaledi K. 2013. Economic Loss of Dust Storms in Iran West Provinces Case Study of Ilam, Khuzestan and Kermanshah. *Quarterly Journal of Economic Modeling*, 7 (5): 105-125. (In Persian)
- Lababpour A. 2016. Accelerating the Soil Restoration Using Prokaryotic Soil Microalgae to Prevent from Dust Emissions. *Hakim Health System Research*, 19 (2): 111-117. (In Persian)
- McLean E. 1983. Soil pH and lime requirement. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties* 9, pp. 199-224.
- Meng H., Gao Y., He J., Qi Y., Hang L. 2021. Microbially induced carbonate precipitation for wind erosion control of desert soil: Field-scale tests. *Geoderma*, 383(1): 1-16.
- Moravej S., Habibagahi G., Nikooee E., and Niazi A. 2018. Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation. *Geoderma*, 315 (1):130-137.
- Namdar Khojasteh D., Bahrami H.A., Kianirad M., and Sprigg, W. 2017. Using Bio-mulch for Dust Stabilization (Case Study: Semnan Province, Iran). *Nature Environment & Pollution Technology*, 16 (2): 217-225.
- Namdar Khojasteh D., and Bonsu Asumadu-Sakyi, A. 2021. Design, manufacture, and testing of an innovative ridging device for controlling of wind erosion. *Arid Land Research and Management*, 2(1): 1-22.
- Namdar Khojasteh D., and Zareh, S. 2021. Evaluating the efficiency of bio-soil windbreaker device for wind erosion control: A Case Study of Chaharmahal and Bakhtiari Province, Junqan District. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 10 (2): 1-16. (In Persian)
- Namdar Khojasteh D., Bahrami H., and Kianirad M. 2016. Comparison of different polymer formulations on dust stabilization and aggregate stability. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)* 110 (1): 51-62. (In Persian)
- Namdar Khojasteh D., Goudarzi G., Taghizadeh-Mehrjardi R., Asumadu-Sakyi A.B., and Fehrest-Sani M. 2021. Long-term effects of outdoor air pollution on mortality and morbidity–prediction using nonlinear autoregressive and artificial neural networks models. *Atmospheric Pollution Research*, 12 (1): 46-56.
- Nikseresht F., Landi A., Sayyad G., Ghezlbash G., and Bahrami, H. 2019. Effect of *Sporosarcina pasteurii* and Culture Media on Microbial Carbonate Induced Precipitation and Wind Erosion Control in Sandy Soil of Khuzestan province, Iran. *Applied Soil Research*, 7(1): 1-13. (In Persian)
- Ooi T., Ariff A., Halimi M., and Shamsuddin Z. 2008. Growth kinetics of diazotrophic *Bacillus sphaericus* UPMB10 cultured using different types and concentrations of carbon and nitrogen sources. *Malaysian Journal of Microbiology*, 4(1): 15-25.
- Rashki A., Middleton J., and Goudie S. 2021. Dust storms in Iran–Distribution, causes, frequencies and impacts. *Aeolian Research*, 48(1): 100-110.
- Sohrabi N., and Khodaparast M. 2018. Investigation of the effect of fine particles on biological improvement of sandy soil. *Journal of Engineering Geology*, 12 (3): 687-706. (In Persian).
- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1): 29-38.
- Zomorodian A., Ghaffari H., and O'Kelly C. 2019. Stabilisation of crustal sand layer using biocementation technique for wind erosion control. *Aeolian Research*, 40(2): 34-41.

Evaluation and comparison of the performance of two methods, Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation and polyvinyl acetate in reducing wind erosion

Davood Namdar Khojasteh^{1*}, Masoud Bazgir², Seyed Abdollah Hashemi Babaheidari³

(Received: January 2023 Accepted: December 2021)

Abstract

Increased wind erosion and dust are the country's environmental issues, particularly in the border provinces. Every year, wind erosion and dust have several negative implications in the social, economic, cultural, and health. Dealing with these phenomena necessitates both short- and long-term planning. These phenomena can be controlled in a variety of ways. In this study, the performance of two biological (Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation) and chemical (polyvinyl acetate application) approaches was studied. Sampling was taken from one of the dust sources' areas in Ilam province (0-30 cm depth). In this study, polymer polyvinyl acetate with five levels of zero (C₀), 1 (C₁), 1.5 (C₂), 2 (C₃), and 2.5 (C₄), as chemical mulch and *Bacillus sphaericus* with three factors of bacterial strain (presence or absence of bacteria), nutrient content (with two levels of 0, 0.5 M) and volume of solution (123, 264 and 369 ml) as a factorial experiment in the form of the Completely Randomized Design with three repetitions have been used. The trays were placed in ambient conditions, and wind tunnel, penetration resistance, and aggregate stability tests were performed on all samples after 28 days. A double bacterial spray with 0.5 M of nutrients and a solution volume of 269 ml (BS2 C1 WC2) was shown the most efficient treatment for soil stabilization using the MICP approach. The best treatment for surface stabilization utilizing the chemical method was observed at 2.5 percent (C₄). A comparison of these two methods showed that the rate of increase in penetration force, aggregate stability, and decrease in soil loss in the chemical method was higher than in the biological method. In a nutshell, the MICP approach is advised to manage dust storms in Ilam province.

Keywords: Biological, Polyvinyl acetate, Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation, Soil stabilization

Namdar Khojasteh D., Bazgir M., and Hashemi Babaheidari A. 2023. Evaluation and comparison of performance of two methods, Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation and polyvinyl acetate in reducing wind erosion. *Applied Soil Research*, 11(3): 110-120.

1. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Water and Soil Engineering, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

3. Assistant Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran

* Corresponding Author Email: D.namdar@shahed.ac.ir