



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هفتم، شماره سوم، ۱۳۹۹

۱۸۰-۱۶۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2020.17693.3318

مقاله کامل علمی - پژوهشی

کاهش رواناب سطحی خاک‌های متأثر از چرخه انجماد - ذوب با استفاده از سیانوباکتری‌های خاک‌زی

سودابه قره‌محمودلی^۱، علی نجفی‌نژاد^{۱*}، سید حمیدرضا صادقی^۲، بهروز زارعی دارکی^۴،

علی محمدیان بهبهانی^۵ و حسین خیرفام^۶

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،
^۲ دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۳ استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی،
دانشگاه تربیت مدرس، ^۴ استادیار گروه زیست‌شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۵ استادیار گروه مدیریت مناطق
خشک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۶ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه
و استادیار گروه علوم محیط زیست، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

چکیده

سابقه و هدف: امروزه استفاده از ریزموجودات خاک‌زی به‌عنوان تلقیح‌کننده‌های خاک برای ترویج روش‌های زیست فن‌آوری بر حفظ محیط زیست مطرح می‌باشد. از طرفی شرایط خاک و اقلیم از جمله عوامل مؤثر بر کمیت و کیفیت فرسایش خاک می‌باشد. به‌نحوی که ویژگی‌های اقلیمی و پدیده‌های متأثر از آن مانند شرایط یخبندان و ذوب از وجوه تبیین‌کننده مفهوم پویایی فرسایش هستند. در این راستا، حفظ خاک در دامنه‌های حوزه‌های آبخیز و نقش قابل توجه چرخه انجماد-ذوب در تولید رواناب سطحی استفاده از ریزموجودات خاک‌زی از جمله سیانوباکتری‌ها به سبب ایجاد پایداری و شرایط مناسب توالی حضور پوشش گیاهی، چسبندگی و تثبیت خاک‌دانه‌ها برای احیاء و ارتقاء پایدار بوم‌سازگان ضروری به‌نظر می‌رسد و حال آن‌که اغلب شیوه‌های حفاظت خاک و آب در شبکه‌های زه‌کشی به‌صورت مهندسی و بدون توجه به توان‌مندی‌های روش‌های زیستی مهار هدررفت آب و خاک صورت می‌گیرد. از این‌رو، با هدف امکان‌سنجی تلقیح سیانوباکتری‌های خاک‌زی در مهار رواناب سطحی از خاک‌های تحت شرایط انجماد-ذوب در مقیاس کرت کوچک آزمایشی برنامه‌ریزی شد.

مواد و روش‌ها: برای این منظور، خاک مورد مطالعه از اراضی دیم رها شده و حساس به فرسایش منطقه بدرانلو در استان خراسان شمالی تهیه شد. سپس مناسب‌ترین سیانوباکتری‌های موجود در خاک مادری در حفاظت آب و خاک شناسایی، انتخاب، خالص‌سازی، تکثیر و در شش تکرار روی کرت‌ها تلقیح شدند. در این راستا مقایسه تیمارهای شاهد و تلقیح‌شده با سیانوباکتری و نیز تحت شرایط یک چرخه انجماد و ذوب به باران شبیه‌سازی‌شده با دوام ۳۰ دقیقه و شدت حدود ۷۰ میلی‌متر بر ساعت روی کرت‌های فرسایشی کوچک (۰/۵ در ۰/۵ متر) با شیب ۲۰ درصد مستقر در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشگاه تربیت مدرس صورت گرفت.

* مسئول مکاتبه: sadeghi@modares.ac.ir

یافته‌ها: یافته‌های پژوهش نشان داد که تیمار تلقیح‌شده با سیانوباکتری پس از طی یک چرخه انجماد-ذوب به‌صورت معنی‌دار ($P < 0/001$) نسبت به تیمار شاهد باعث بهبود مؤلفه‌های رواناب سطحی شد. در این راستا مقایسه آماری میانگین‌ها نیز نشان داد که تیمار تلقیح سیانوباکتری به‌صورت معنی‌دار ($P < 0/001$) باعث افزایش زمان شروع و زمان تا اوج رواناب، کاهش حجم، مقدار اوج و ضریب رواناب سطحی به‌ترتیب ۲۲۸، ۴۹ درصد و ۶۵، ۴۸ و ۶۵ درصد نسبت به تیمار شاهد شدند.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از پژوهش فعلی نشان داد که اثرگذاری مثبت تلقیح سیانوباکتری‌های خاک‌زی می‌تواند ابزاری کارآمد، اقتصادی و زیستی برای بهبود رفتار هیدرولوژیک خاک‌های مناطق تحت‌تأثیر انجماد-ذوب باشد. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش قابلیت استفاده در تبیین الگوهای مدیریتی حفاظت آب و خاک و قابل‌تعمیم به مناطق با شرایط مشابه را نیز خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاک، تثبیت‌کننده‌های خاک، خاک یخزده، شبیه‌ساز باران، مدیریت رواناب

مقدمه

فرسایش خاک و ایجاد سیل از پیامدهای مهم ناشی از تخریب اراضی^۱ بوده که کاهش بهره‌وری، افزایش بلاهای طبیعی، مشکلات اقتصادی، اجتماعی و سیاسی را در پی دارد (۹، ۲۷ و ۴۴). فرسایش خاک از مهم‌ترین عوامل تهدید کمیت و کیفیت خاک محسوب می‌شود که پیامدهای ناخواسته آن را می‌توان به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات امروزی بوم‌سازگان‌های مختلف تلقی نمود (۴۲). از طرفی میزان تخریب اراضی و فرسایش خاک و در نتیجه اثرات سوء ناشی از آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک با فصول سرد و یخبندان به سبب وقوع چرخه انجماد-ذوب خاک^۲ سطحی نمود بیش‌تری دارد (۷ و ۲۰). چرخه انجماد و ذوب آب موجود در خاک، نقش قابل‌توجهی در تولید رواناب سطحی دارد. فشار ناشی از تورم خاک به‌دلیل یخ‌زدگی باعث درهم‌ریختگی ساختمان خاک شده و از طرف دیگر ذوب یخ، افزایش محتوی رطوبتی خاک و کاهش چسبندگی و اصطکاک بین خاکدانه‌ها را در پی خواهد

داشت. هر چند امکان مدیریت این چرخه طبیعی امکان‌پذیر نیست (۲۸)، ولی می‌توان از طریق تغییر و بهبود ویژگی‌های خاک سطحی اثرات ناشی از چرخه انجماد-ذوب در میزان هدررفت خاک و آب را مدیریت کرد (۶ و ۷).

در حال حاضر روش‌های زیست‌فن‌آوری^۳ مبتنی بر استفاده از ریزموجودات به‌عنوان تلقیح‌کننده خاک، ابزاری بالقوه برای بهبود کیفیت خاک و مقابله با تخریب خاک در مناطق دیم رهاشده تلقی شود (۱۳، ۳۲، ۴۰ و ۴۳). در این بین، پوسته‌های زیستی خاک^۴ نقش مهمی در تنظیم فرآیندهای محیط‌زیستی خاک ایفا می‌کنند. که برای ارتقاء زیستگاه‌ها و احیاء پوشش گیاهی در مقیاس بزرگ قابل‌توجه است (۵۸). گل‌سنگ‌ها، خزها، قارچ، باکتری و سیانوباکتری‌ها و سایر پروکاریوت‌ها پوسته‌های زیستی خاک را به‌وجود می‌آورند که از نزدیک با سطح خاک معدنی در ارتباط هستند و یک لایه افقی نازک منسجم ایجاد می‌کنند (۸). سیانوباکتری‌ها به‌دلیل داشتن قابلیت تنظیمات اسمزی، یونی و وجود املاح پروتئینی و

3- Bio-technology

4- Soil Biocrust

1- Land Degradation

2- Freezing and Thawing Cycles Soil

سیانوباکتری‌ها در میکروسکوپ الکترونی استنباط کردند که با رشد بیش‌تر سیانوباکتری‌های رشته‌ای، پلی‌ساکاریدهای بیش‌تری را آزاد می‌کنند. پژوهش‌های ایشان نشان داد که ترشحات پلی‌ساکاریدی می‌تواند سیانوباکتری رشته‌ای را با ذرات خاک پیوند دهد و در نتیجه باعث افزایش ضخامت پوسته بیولوژیکی خاک شوند (۵۹). صادقی و همکاران (۲۰۱۷) اثر تلقیح باکتری و سیانوباکتری‌ها بر خاک حساس به فرسایش با فرض بهبود مؤلفه‌های رواناب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که ضریب و اوج رواناب در تیمار باکتری و سیانوباکتری و ترکیب باکتری و سیانوباکتری نسبت به کرت شاهد کاهش یافت. همچنین تأخیر در شروع رواناب نسبت به کرت شاهد با سطح معنی‌داری یک درصد، ۳۸ تا ۲۰۵ درصد، تأخیر در زمان رسیدن به حداکثر رواناب ۴۸ تا ۵۲ درصد و کاهش ضریب رواناب ۷۴ تا ۹۶ درصد و کاهش اوج رواناب ۴۸ تا ۸۶ درصد در تیمار باکتری، تیمار سیانوباکتری و تیمار ترکیبی باکتری و سیانوباکتری نسبت به کرت گزارش شد (۴۵). چمیزو و همکاران (۲۰۱۸) اثر تلقیح دو گونه سیانوباکتری *Phormidium ambiguum* و *Scytonema javanicum* بر خاک‌های مختلف به مدت سه ماه تحت شرایط آزمایشگاهی را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که گونه *S. javanicum* باعث افزایش کربن و نیتروژن خاک و گونه *P. ambiguum* باعث افزایش میزان پلی‌ساکارید خاک و افزایش آب‌گریزی^۵ خاک شد (۱۳). بر اساس نتایج پژوهش سپهر و همکاران (۲۰۱۹) نقش حفاظتی سیانوباکتری بر پایداری خاک در دو خاک اریدوسول در شمال‌شرق ایران تأیید شد. نتایج پژوهش نشان داد که سیانوباکتری‌ها قادر به افزایش نیتروژن و کربن خاک، تشکیل خاک‌دانه‌های بزرگ و افزایش پایداری خاک در شرایط خشکی و

سازگار و هم‌چنین وجود غلاف ژلاتینی در اغلب محیط‌های آبی و خاکی یافت می‌شوند (۱۷، ۱۹، ۲۹ و ۴۹). سیانوباکتری‌ها در برابر تنش‌های مختلف محیط زیستی از جمله درجه حرارت پایین، خشکی، اشعه ماورای بنفش، انجماد و تنش‌های دیگر مقاومت می‌کنند (۴۹ و ۵۲).

تلقیح سیانوباکتری‌ها امکان افزایش چسبندگی خاکدانه‌ها از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی^۱، آگزوپلی‌ساکارید^۲ و ایجاد شبکه‌های شبه‌تارنکبوتی مانند^۳ در سطح خاک (۱۱، ۳۶ و ۵۴)، توانایی تثبیت نیتروژن و کربن (۲۵ و ۳۳)، جذب و ذخیره آب (۱۵)، کاهش هدررفت آب و خاک (۱۳، ۲۶، ۲۷ و ۴۵)، بهبود حاصلخیزی و سلامت خاک (۱ و ۲۶) و در نتیجه پایداری خاک و مقاومت در برابر فرسایش (۱۱ و ۴۱) را فراهم کرده است. زنجیره‌های تشکیل‌شده و گسترش‌یافته نیز خاکدانه‌های اطراف خود را با خاصیت چسبندگی خود به هم متصل^۴ می‌کند که منجر به پایداری قابل توجه خاک‌دانه‌ها در مقابل برخورد قطرات باران یا تنش برشی رواناب سطحی خواهند شد (۲۶).

بر اساس نتایج حاصل از بررسی پیشینه‌های پژوهشی می‌توان بیان نمود که سیانوباکتری‌ها قادر به مدیریت منابع آب، خاک و حفظ عمل‌کرد بوم‌سازگان (۳۸) می‌باشند. در این راستا، ایسا و همکاران (۲۰۰۷)، تأثیر تلقیح سیانوباکتری خاک‌زی *Nostoc sp.* بر افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها را بیش از ۱۴ درصد برآورد کرد (۲۴). ساتو و همکاران (۲۰۰۲) و پائول و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که سیانوباکتری‌ها ۱۲ تا ۲۰ برابر وزن خشک خود توانایی جذب آب را دارند (۴۷ و ۳۷). وو و همکاران (۲۰۱۳) با مشاهده

- 1- Polysaccharide
- 2- Exopolysaccharide
- 3- Spider-like System
- 4- Binding and Bonding Effects

5- Soil Hydrophobicity

تنظیم جامعه زیستی خاک بوده‌اند (۵۰ و ۶۰). جمع‌بندی پیشینه‌های پژوهشی مرتبط نشان می‌دهد که استفاده از تثبیت‌کننده‌های خاک‌زی با هدف اصلی کاهش رواناب سطحی و فرسایش خاک تحت شرایط انجماد و ذوب مورد توجه قرار نگرفته است. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش سیانوباکتری‌ها بر مهار پیامدهای چرخه انجماد-ذوب با تأکید بر تولید رواناب در مقیاس کرت‌های آزمایشی و به‌واسطه تأثیر اثبات‌شده آن‌ها در خاصیت به‌هم‌چسبندگی و ارتباط پیوندی خاک و آب و طبعاً نقش قابل انتظار آن‌ها در تخفیف اثر انجماد و ذوب بر بهبود کیفیت خاک و افزایش نفوذ برنامه‌ریزی شد. در این راستا انتظار می‌رود که تلقیح سیانوباکتری‌ها به خاک یک منطقه تحت تأثیر فرآیندهای انجماد-ذوب بتوانند نقش معنی‌داری در بهبود مؤلفه‌های هدررفت آب بازی کنند.

مواد و روش‌ها

خاک مورد نیاز پژوهش از منطقه بدرانلو در ۱۰ کیلومتری غرب شهر بجنورد واقع در استان خراسان شمالی به‌دلیل تخریب‌های شدید انسانی و هم‌چنین رخداد چرخه انجماد-ذوب در انتهای فصل زمستان و قبل از بهار و در نتیجه فرسایش شدید خاک و وقوع سیل وجود پیشینه پژوهشی مناسب (۶ و ۷) و طبعاً اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی مناسب چرخه انجماد-ذوب و نیز امکان اجرای نتایج حاصل از پژوهش و هم‌چنین قابلیت دسترسی تهیه شد. ارتفاع محل نمونه‌برداری از کاربری دیم رها شده با ارتفاع ۱۰۲۰ متر و در مختصات طول جغرافیایی $11^{\circ} 15'$ و 57° شرقی و $10^{\circ} 32'$ عرض شمالی در جهت شمالی با شیب متوسط ۲۰ درصد و در ورقه بجنورد نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵,۰۰۰ و نهشته‌های لسی دوره کواترنر واقع شده است.

به‌سبب ضرورت بهره‌گیری از سیانوباکتری‌های بومی^۱ و سازگار با شرایط هر منطقه در راستای حفظ تعادل زیستی و افزایش امکان استقرار سیانوباکتری‌ها از نمونه‌های برداشت شده از منطقه مدنظر استخراج شدند. برای این منظور پس از انتخاب محل مناسب نمونه‌برداری و برداشت خاک، به‌منظور کشت، استخراج، شناسایی، خالص‌سازی و تکثیر سیانوباکتری‌ها با استفاده از استوانه پلی‌وینیل کلراید^۲ مدرج (۵) اقدام به نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی از عمق صفر تا پنج سانتی‌متری سطح خاک منطقه (۱۲) با ۱۳ نمونه خاک از مساحت یک هکتاری (۸ عدد روی اضلاع محیط و ۴ عدد روی منصف‌الاضلاع و یک عدد نمونه نیز از مرکز) تهیه شد و به آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس منتقل و تا قبل از انجام آزمایش‌ها در دمای چهار درجه سانتی‌گراد (۵) نگهداری شد و سپس در زیر هود کاملاً استریل، به ذرات با قطر کم‌تر از دو میلی‌متر تبدیل شدند. به‌منظور رشد، خالص‌سازی و شناسایی سیانوباکتری‌ها اقدام به استفاده از محیط کشت‌های عمومی (۱۸) و (۳۰) سیانوباکتری‌های خاک‌زی شد. پس از بررسی و ارزیابی تعداد گسترده‌ای از محیط کشت‌های عمومی سیانوباکتری‌های خاک‌زی، سه محیط کشت BBM^۳، Chu10 و BG11^۴ به‌دلیل عمل‌کرد و متداول بودن، میزان توانایی در رشد طیف گسترده‌ای از جنس‌های مختلف سیانوباکتری‌های خاک، اقتصادی بودن و هم‌چنین قابلیت دسترسی و تهیه آسان، انتخاب و بر اساس دستورکارهای استاندارد (۳ و ۵۱) استفاده شد. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های خاک برای کشت، نمونه‌های خاک را با هاون کوبیده و از الک با مش ۲۰۰۰ میکرون عبور داده و به‌میزان پنج گرم در درون

1- Endemic

2- Polyvinyl Chloride (PVC)

3- Bold's Basal Medium

4- Blue Green 11

به دلیل ضرورت قرار گرفتن تیمارهای برنامه ریزی شده در شرایط دمایی و رطوبتی قابل مدیریت، محدودیت‌های فنی موجود و هزینه بالای انتقال خاک از منطقه مورد مطالعه، از کرت‌های مکعبی به ابعاد سطحی ۰/۵ متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر و حجم کلی ۰/۰۷۵ مترمکعب به سبب امکان نفوذ عمقی سرما از سطح، استقرار در سامانه شبیه‌ساز انجماد-ذوب و نیز موجود در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. در این راستا تلاش شد تا حداکثر تشابه با حالت طبیعی برای دستیابی به نتایج با اطمینان بیشتر صورت پذیرد. به این منظور در ابتدا بقایای گیاهی، سنگ و سنگ‌ریزه از نمونه‌های خاک حذف شد تا شرایط برای همه کرت‌ها مشابه و از خطاهای غیرقابل پیش‌بینی جلوگیری شود. سپس خاک هوا خشک شده و عبور داده شده از الک‌های هشت و سه میلی‌متری برای پر کردن بخش بالایی کرت‌های آزمایشی تهیه شد. عمق ۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر کرت‌ها از پوکه معدنی پر و خاک به ضخامت حدود ۱۰ سانتی‌متر در بخش بالایی کرت‌ها قرار داده شد. به طوری که سطح نمونه خاک با سطح سرریز کرت‌ها یکسان باشد. سپس کوبیدگی لازم توسط غلطک تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری نمونه خاک دست‌نخورده منطقه مورد مطالعه (۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) انجام شد. تعداد کل تیمارهای آزمایشی در مجموع ۱۲ عدد (۲ تیمار در شش تکرار) بوده است. پس از این مرحله، به منظور تأمین شرایط رطوبت پیشین خاک و متناسب با شرایط طبیعی، حدود ۲۴ ساعت تحت شرایط اشباع قرار گرفته و سپس به مدت ۲۴ ساعت دیگر رها شده تا به حالت شرایط رطوبتی مزرعه (حدود ۳۰ درصد) برسد (۷، ۲۳، ۴۶). در نهایت پس از آماده‌سازی کرت‌ها، سیانوباکتری‌های تکثیر شده با حجم و تعداد حدود 10^9 تا 10^{12} عدد در ۰/۵ لیتر و هم‌چنین ۰/۵ لیتر آب نیز به‌ازای هر کرت تهیه (۵۵) و

پتری‌ها با سه تکرار به صورت جداگانه ریخته (۱۱۷) نمونه خاک پنج گرمی) و از سه محیط کشت به میزان پنج میلی‌لیتر به پتری‌ها اضافه شد و لامل‌ها به تعداد لازم درون آن‌ها قرار گرفت، سپس درون ژرمیناتور مدل Binder ساخت آلمان و با فراهم کردن شرایط بهینه برای رشد سیانوباکتری‌ها تحت دمای 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد و شدت نور ۲۴ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه در دوره‌های نوری ۱۴:۱۰ (مدت زمان ساعت روشنایی: تاریکی) تنظیم و استفاده شد. سپس سیانوباکتری‌های موجود در خاک با استفاده از لام نئوبار و میکروسکوپ با قدرت تفکیک بالا و بر اساس ویژگی‌های ریخت‌شناسی ذکر شده در راهنماهای باکتری‌شناسی برگگی^۱ شناسایی و شمارش شدند (۱۰ و ۲۲). طی این مرحله، ۸۱۹ نمونه با سه تکرار در طی بازه زمانی ۲۸ روزه و هر چهار روز یکبار شناسایی و شمارش شدند. از بین سیانوباکتری‌ها *Oscillatoria* sp. *Nostoc* sp. *Lyngbya* sp. و *Microcoleus* sp. به دلیل اثبات ترشح فراوان پلی‌ساکریدها، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها، تثبیت نیتروژن و ترسیب کربن، ظرفیت نگه‌داشت آب، توان زیست و افزایش در شرایط نامناسب محیطی (۱۱، ۱۳، ۱۶، ۳۳، ۳۴، ۳۹ و ۴۰) خالص‌سازی و استفاده شدند. در نهایت به منظور تلقیح سیانوباکتری‌های انتخاب شده در سطح کرت‌ها، اقدام به تکثیر سیانوباکتری‌ها در حجم و تعداد زیاد (۳۱ و ۵۳) شد. سیانوباکتری‌ها به‌وسیله لوپ‌های میکروبیولوژی به ترتیب سری به محیط‌های مایع ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌لیتری منتقل (۲ و ۲۱) و مرتباً تا رسیدن به تعداد مناسب 10^{12} سلول در لیتر (۵۶) و قابلیت انتقال به کرت‌ها شمارش شدند. بدین‌منظور محیط کشت اختصاصی برای تکثیر سیانوباکتری‌ها محیط غذایی BBM انتخاب و استفاده شد.

محیط نرم‌افزار Excel 2013 تشکیل شد. به منظور انجام مقایسه‌های آماری، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک^۱ بررسی شد. داده‌های غیرنرمال با استفاده از روش لگاریتم با پایه ۱۰ و یا روش‌های اصلاحی لگاریتمی به حالت نرمال تبدیل شدند. هم‌چنین آزمون همگنی واریانس‌ها^۲ نیز به‌عنوان یکی از ملزومات اولیه تجزیه و تحلیل داده‌ها بررسی شد. برای این منظور از آزمون لوون^۳ به‌سبب کم‌ترین میزان حساسیت به نرمال بودن داده‌ها و مناسب‌ترین آزمون برای داده‌های کم استفاده شد. پس از برقراری شرط‌های مطروحه، تجزیه و تحلیل و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون t جفتی (۶۱) انجام شد. کلیه آزمون‌های آماری فوق برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در محیط نرم‌افزار SPSS 21 انجام شد.

نتایج و بحث

پس از آماده‌سازی کرت‌های آزمایشی و استقرار آن‌ها در شیب موردنظر، شبیه‌سازی باران با خصوصیات برشمرده پیشین، انجام گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمونه‌برداری آزمایش‌ها، جدول ۱ مقادیر مشاهداتی زمان شروع رواناب و تحلیل‌های آماری در طول بارش در تیمارهای پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، تیمار سیانوباکتری زمان شروع رواناب را ۲۲۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از نمونه‌برداری حجم رواناب در گام‌های زمانی تعیین شده طی بارش حدود ۸/۷۵ لیتر باران شبیه‌سازی شده، جدول‌های ۲ تا ۴ مقادیر حجم کل رواناب، حجم رواناب پنج دقیقه پس از اتمام بارندگی و هم‌چنین تغییرات زمانی حجم رواناب با اختلاف معنی‌دار ($P < 0.006$) را نشان می‌دهد. حجم کل رواناب اندازه‌گیری شده پس از

روی سطح کرت‌های آماده‌سازی شده اسپری (۲۷، ۴۸ و ۵۷) و به‌مدت ۶۰ روز از زمان تلقیح (۲۷) در شرایط هوای آزاد و به‌دور از بارندگی نگه داشته شدند.

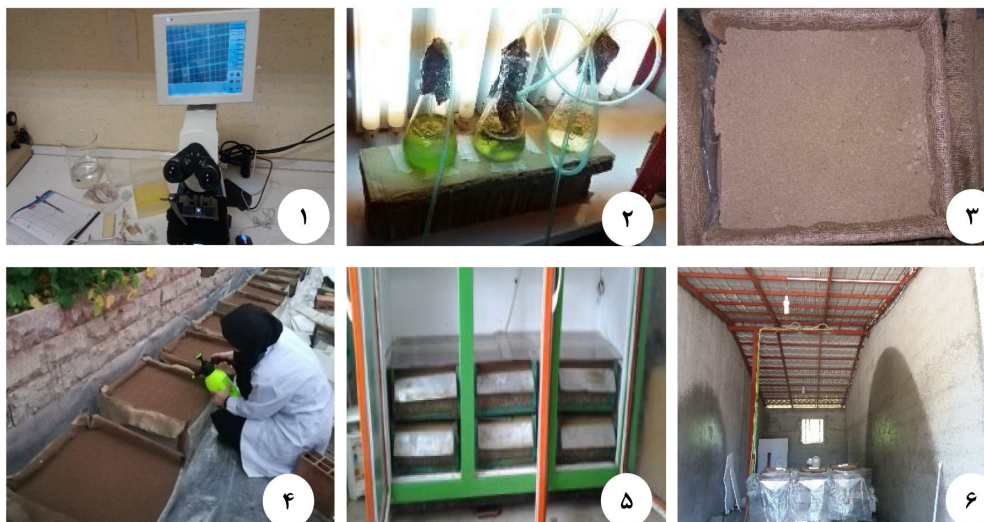
به‌منظور القاء شرایط یخبندان حاکم بر منطقه مادری خاک از سامانه یخبندان دانشگاه تربیت مدرس با ابعاد $2 \times 1/70$ متر و با قابلیت‌های تولید سرما تا 30^- درجه سانتی‌گراد با القای سرما از بالا (۷)، با قابلیت چرخش هوا، تنظیم دما به‌صورت دستی و دیجیتال و زمان‌سنج استفاده شد. برای این منظور چرخه انجماد-ذوب با در نظر گرفتن متغیرهای تداوم چرخه، عمق هدف، تعداد روزهای چرخه و دامنه تغییرات دمایی خاک منطقه مادری در قالب ایجاد شرایط یخبندان در دمای 20^- درجه سانتی‌گراد به‌مدت سه روز و سپس دو روز ذوب به تمام کرت‌های آزمایشی تلقیح‌شده و شاهد القا شد (۷).

کرت‌های آزمایشی مطابق با شیب ۲۰ درصد منطقه نمونه‌برداری روی چهار چوب‌های آهنی کافی مستقر شدند. سپس تحت شبیه‌سازی باران و با شدت حدود ۷۰ میلی‌متر بر ساعت و با تداوم ۳۰ دقیقه مبتنی بر نتایج حاصل از تحلیل منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی وقایع بارندگی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بجنورد (۶ و ۷) به‌عنوان معرف منطقه مادری خاک قرار گرفتند. حجم رواناب و مؤلفه‌های آن در سه گام زمانی دو دقیقه، سه گام زمانی سه دقیقه و تا پایان واقعه بارش با گام‌های زمانی پنج دقیقه و پنج دقیقه پس از پایان واقعه اندازه‌گیری و در بانک اطلاعات تیمارهای آزمایشی ثبت شدند (۷). نمایی از مراحل مختلف کار و نیز شرایط آزمایشگاهی ایجاد شده برای اجرای پژوهش حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. این پژوهش در قالب طرح بلوک تصادفی، با شش تکرار در هر تیمار انجام شد. بانک اطلاعاتی شامل تعداد تداوم بارندگی، زمان شروع رواناب، زمان تا اوج رواناب، میزان رواناب در بازه‌های زمانی مختلف و کل زمان تولید رواناب در

1- Shapiro-Wilk
2- Homogeneity of Variance
3- Levene

دقیقه پس از اتمام بارندگی نیز در تیمار سیانوباکتری ۹۵ درصد کم‌تر از تیمار شاهد بود.

اتمام باران شبیه‌سازی شده در کرت‌های شاهد و سیانوباکتری به ترتیب ۴۴۹۷/۸ و ۱۵۷۹/۲ میلی‌لیتر بود. به نحوی که مقادیر میانگین حجم رواناب در پنج



شکل ۱- نمایی از مراحل مختلف اجرایی و شرایط آزمایشگاهی ایجاد شده برای پژوهش شامل شناسایی و تکثیر سیانوباکتری‌ها (۱ و ۲)، آماده‌سازی کرت‌ها (۳)، تلقیح سیانوباکتری‌ها (۴)، چیدمان کرت‌ها در سامانه سرمایشی (۵) و شبیه‌سازی باران (۶).

Figure 1. Isolation and proliferation of cyanobacteria (1 and 2), preparation of plots (3), inoculation of cyanobacteria (4), inducing plots to freezing-thawing cycle in cooling system (5), and rainfall simulation on treated plots (6).

جدول ۱- زمان شروع رواناب (دقیقه) در کرت‌های شاهد و تیمار شده با سیانوباکتری.

Table 1. Times to runoff (min) in control and cyanobacteria treated plots.

ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation (mm)	میانگین Mean (mm)	تکرار Replication					تیمار Treatment	
			6	5	4	3	2		1
24.81	1.51	6.10 ^a	8.35	5.24	7.13	4.03	5.58	6.25	شاهد Control
20.19	4.05	20.06 ^b	27.28	16.50	17.18	21.57	17.50	20.30	سیانوباکتری Cyanobacteria

حروف a و b نشانگر اختلاف معنی‌دار بین مقادیر حاصل از کرت شاهد و تیمار شده در سطح اعتماد بیش از ۹۹ درصد می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر حجم کل رواناب (میلی‌لیتر) خروجی از کرت‌های شاهد و تیمار شده با سیانوباکتری.

Table 2. Total volume runoff (ml) output from control and cyanobacteria treated plots.

ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation (mm)	میانگین Mean (mm)	تکرار Replication					تیمار Treatment	
			6	5	4	3	2		1
14.6	656.4	4497.8 ^a	4110	4336	4591	4327	3878	5745	شاهد Control
52.2	824.0	1579.2 ^b	160	2160	1871	1712	2440	1132	سیانوباکتری Cyanobacteria

حروف a و b نشانگر اختلاف معنی‌دار بین مقادیر حاصل از کرت شاهد و تیمار شده در سطح اعتماد بیش از ۹۹ درصد می‌باشد.

جدول ۳- حجم رواناب (میلی‌لیتر)، پنج دقیقه پس از اتمام بارندگی در کرت‌های شاهد و تیمار شده با سیانوباکتری.

Table 3. Runoff volume (ml) five minutes after precipitation in cyanobacteria and control treated plots.

ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation (mm)	میانگین Mean (mm)	تکرار Replication						تیمار Treatment
			6	5	4	3	2	1	
151.0	245.0	162.2 ^a	42	60	32	35	150	654	شاهد Control
50.7	4.0	7.8 ^b	4	10	13	4	11	5	سیانوباکتری Cyanobacteria

حروف a و b نشانگر اختلاف معنی‌دار بین مقدارهای حاصل از کرت شاهد و تیمار شده در سطح اعتماد بیش از ۹۹ درصد می‌باشد.

نتایج زمان تا اوج و مقدار اوج رواناب پس از شروع بارش نیز در تیمارهای مطالعاتی در جدول ۵ آورده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که زمان تا اوج و مقدار اوج رواناب به ترتیب در تیمار شاهد ۳۳/۶۰ دقیقه، ۱۹۸/۵ میلی‌لیتر و سیانوباکتری ۵۰/۰۶ دقیقه و ۱۰۳/۵ میلی‌لیتر بود.

جدول ۴- تغییرات زمانی حجم رواناب (میلی‌لیتر) در بازه‌های زمانی دو، سه و پنج دقیقه در کرت‌ها.

Table 4. Time variations of runoff volume (ml) at two, three, and five minutes intervals in plots.

ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation (mm)	میانگین Mean (mm)	تکرار Replication						زمان Time (min)	تیمار Treatment
			6	5	4	3	2	1		
33.9	24.6	75.2	76	120	60	64	51	64	1	شاهد Control
21.3	28.6	134.0	150	166	156	102	98	132	2	
25.2	46.9	186.0	198	250	208	194	116	150	3	
28.0	99.1	353.3	308	460	422	315	195	420	1	
22.0	88.4	401.8	340	374	485	384	298	530	2	
20.8	100.3	482.8	402	482	520	405	424	664	3	
14.6	118.9	814.3	862	668	840	850	684	982	1	
9.4	84.6	903.3	836	854	900	916	850	1064	2	
8.1	79.6	987.5	896	902	968	1062	1012	1085	3	
0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	1	سیانوباکتری Cyanobacteria
0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	2	
244.9	2.4	1.0	0	6	0	0	0	0	3	
117.0	41.7	35.7	0	96	68	0	50	0	1	
89.3	94.0	105.3	0	155	168	81	228	0	2	
71.4	134.2	187.8	0	261	210	180	386	90	3	
58.6	174.4	297.5	14	412	360	312	502	185	1	
46.7	199.3	426.5	68	570	496	525	580	320	2	
43.4	224.4	517.5	74	650	556	610	683	532	3	

جدول ۵- زمان تا اوج (دقیقه) و حجم (میلی‌لیتر) رواناب از شروع بارندگی در کرت‌ها.

Table 5. Time to peak (min) and volume (ml) of runoff from rainfall start in plots.

ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation (mm)	میانگین Mean (mm)	تکرار Replication						تیمار Treatment									
			6	5	4	3	2	1										
مقدار	زمان	مقدار	زمان	مقدار	زمان	مقدار	زمان	مقدار	زمان	مقدار	زمان	متغیر						
8.58	18.56	16.98	6.23	198.50 ^a	33.60 ^b	179	38.35	180	35.24	194	37.13	212	34.3	202	35.58	221	21.25	شاهد
43.34	8.09	44.86	4.05	103.50 ^b	50.06 ^a	15	57.28	130	46.50	111	47.18	122	51.57	137	47.50	106	50.30	سیانوباکتری

حروف a و b نشانگر اختلاف معنی‌دار بین مقادیر حاصل از کرت شاهد و تیمار شده در سطح اعتماد بیش از ۹۹ درصد می‌باشد.

تغییرات زمانی ضریب رواناب و ضریب رواناب کل در تیمارهای پژوهش را نشان می‌دهد. ضریب رواناب کل با توجه به بارش کل ورودی در زمان آزمایش در تیمار شاهد ۵۱/۴۰ درصد و تیمار سیانوباکتری ۱۸/۰۵ درصد به‌دست آمد.

پس از نمونه‌برداری رواناب در گام‌های زمانی تعیین شده طی واقعه بارش، ضریب رواناب با توجه به بارش کل ورودی (حدود ۸/۷۵ لیتر) در زمان آزمایش و نیز مقادیرهای ۰/۵۸۳، ۰/۸۷۵ و ۱/۴۵۸ لیتر در پایه‌های زمانی دو، سه و پنج دقیقه در هر یک از تیمارها به‌دست آمد. جدول‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب

جدول ۶- تغییرات زمانی ضریب رواناب (درصد) در بازه‌های زمانی دو، سه و پنج دقیقه پس از شروع رواناب در کرت‌ها.

Table 6. Time changes of runoff coefficient (%) in two, three, and five minute intervals after runoff in plots.

ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation (mm)	میانگین Mean (mm)	تکرار Replication						زمان Time (min)	تیمار Treatment
			6	5	4	3	2	1		
33.96	4.22	12.44	13.04	20.58	10.29	10.98	8.75	10.98	1	شاهد Control
21.34	4.90	22.98	22.98	28.47	26.76	17.50	16.81	22.64	2	
25.20	8.04	31.90	31.90	42.88	35.68	33.28	19.90	25.73	3	
28.05	11.33	40.38	35.20	52.57	48.23	36.00	22.29	48.00	1	
21.99	10.10	45.92	38.86	42.74	55.43	43.89	34.06	60.57	2	
20.76	11.46	55.18	45.94	55.09	59.43	46.29	48.46	75.89	3	
14.60	8.16	55.85	59.12	45.82	57.61	58.30	46.91	67.35	1	
9.36	5.80	61.96	57.34	58.57	61.73	62.83	58.30	72.98	2	
8.07	5.46	67.73	61.45	61.87	66.39	72.84	69.41	74.42	3	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	سیانوباکتری Cyanobacteria
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2	
224.95	0.42	0.17	0.00	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00	3	
117.00	4.77	4.08	0.00	10.97	7.77	0.00	5.71	0.00	1	
89.28	10.75	12.04	0.00	17.71	19.20	9.26	26.06	0.00	2	
71.44	15.34	21.47	0.00	29.83	24.00	20.57	44.11	10.29	3	
58.62	11.96	20.40	0.96	28.26	24.69	21.40	34.43	12.69	1	
46.72	13.67	29.25	4.66	39.09	34.02	36.01	39.78	21.95	2	
43.37	15.39	35.49	5.08	44.58	38.13	41.84	46.84	36.49	3	

جدول ۷- مقادیر ضریب رواناب کل (درصد) خروجی از کرت‌های شاهد و تیمار شده با سیانوباکتری.

Table 7. Total Runoff Coefficient (%) Output from in control and cyanobacteria treated plots.

ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation (mm)	میانگین Mean (mm)	تکرار Replication					تیمار Treatment	
			6	5	4	3	2		1
			14.59	7.50	51.40 ^a	46.97	49.55		52.47
52.18	9.42	18.05 ^b	1.83	24.69	21.38	19.57	27.89	12.94	سیانوباکتری Cyanobacteria

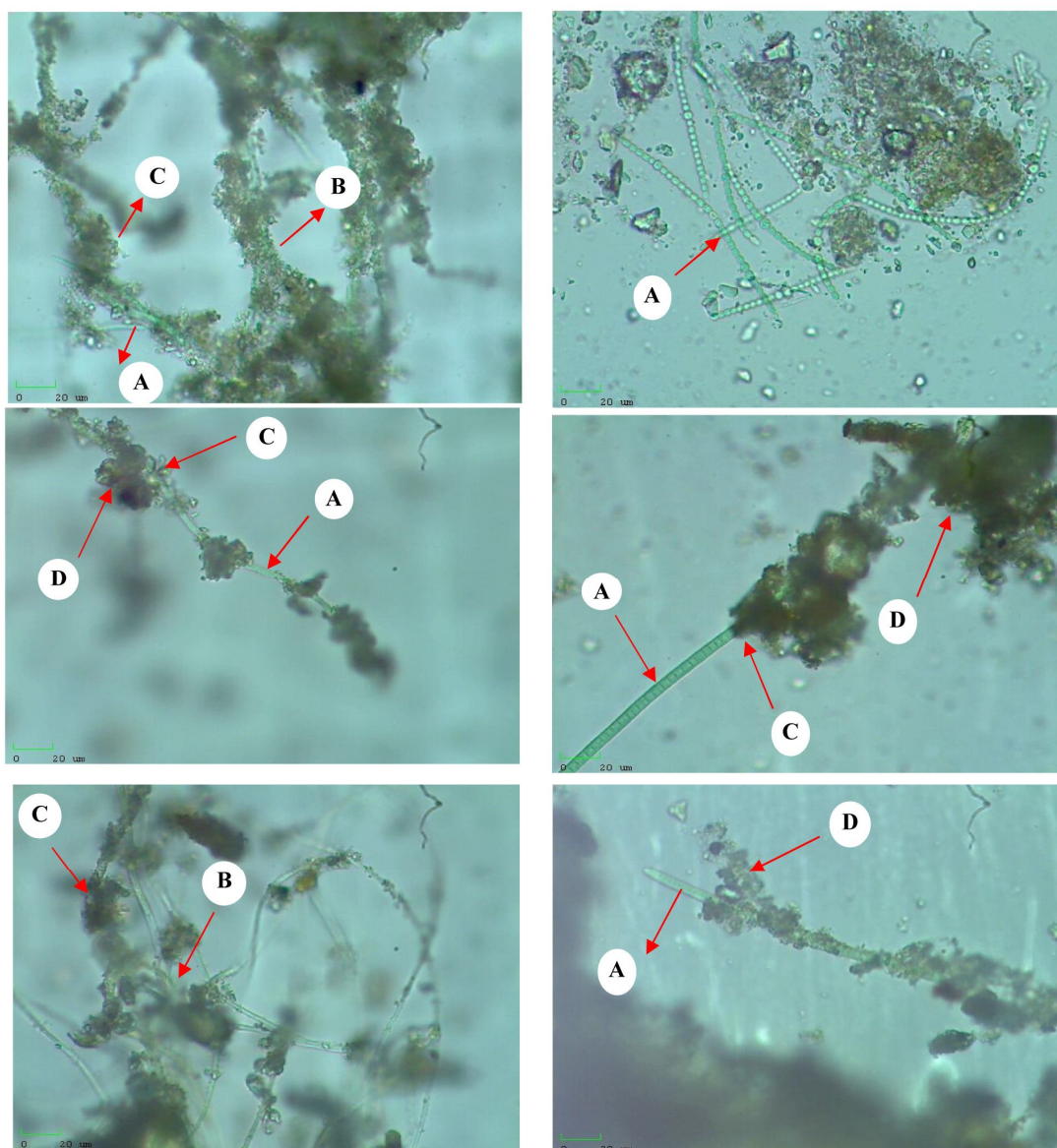
حروف a و b نشانگر اختلاف معنی‌دار بین مقادیر حاصل از کرت شاهد و تیمار شده در سطح اعتماد بیش از ۹۹ درصد می‌باشد.

همکاران (۲۰۱۷) کاهش ۹۶ درصدی ضریب رواناب، ۱۶۸ درصدی زمان شروع و کاهش ۸۳ و ۳۴ درصدی در مقدار اوج و زمان تا اوج رواناب را گزارش کرده‌اند. ایشان نشان دادند که تلقیح ریزموجودات بومی به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، می‌تواند به‌طور عملی برای بازگرداندن چرخه‌های هیدرولوژیکی محلی در خاک مورد استفاده قرار گیرند (۴۵). غلاف‌های ضخیم دیواره سلولی قابلیت محافظت در برابر شکل‌گیری کریستال یخ را دارند (۴۹). هم‌چنین دیواره‌های سلولی سیانوباکتری‌ها توانایی بالایی در جذب آب داشته و قابلیت ارتجاعی بودن دیواره سلولی آن‌ها امکان حفظ و ذخیره آب در سلول‌های سیانوباکتری‌ها را تا چندین برابر افزایش داده است (۳۹ و ۴۱). پیرل و پریسکو (۱۹۹۸) نیز نشان دادند که سیانوباکتری‌ها توانمندی فتوسنتز و تولید اکسیژن در مناطق با دمای کم‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد را نیز دارند (۳۵). فیدروفا و همکاران (۲۰۱۹) فعالیت اسمزی ترکیبیات فعال توسط ریزموجودات را در واکنش به انجماد تأیید کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش نشان می‌دهد که تیمار سیانوباکتری سبب تأخیر در ایجاد رواناب و قطع رواناب در نتیجه افزایش میزان جذب و نگهداری آب در خاک و کاهش رواناب طی فرآیند آزمایش شدند (۲۹). نتایج مذکور مطابق با گزارش (۱۱، ۱۵ و ۴۵) بود. تحلیل نتایج نشان داد که داشتن

پلی‌ساکارید و آگزوپلی‌ساکاریدهای تولید شده توسط سیانوباکتری‌ها ترکیبات مهمی برای توسعه بیوفیلم از طریق ارتباط جوامع میکروبی در زیستگاه‌های مختلف هستند (۵۴). ترشح پلی‌ساکارید در سیانوباکتری‌ها سابقاً توسط پژوهش‌گران به‌صورت موفقیت‌آمیز به اثبات رسیده است (۱۱، ۳۹، ۵۴ و ۵۹). تحلیل نتایج پژوهش حاضر و بررسی یافته‌های پژوهش‌های مرتبط پیشین نشان می‌دهد که سیانوباکتری‌های خاک‌زی تمایل زیادی به چسبیدن به اطراف خاک‌دانه‌ها از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی خود داشته و ضمن چسبیدن به اطراف ذرات ریز خاک، از طریق رشد شبکه‌ای، مجموعه‌ای از ذرات ریز خاک را به‌صورت زنجیره‌ای به هم متصل کرده و سطوح خاک‌دانه‌ها را می‌پوشانند (۱۱، ۲۶، ۲۷، ۴۱، ۴۵، ۵۴ و ۵۹). همان‌طور که در عکس‌های مندرج در شکل ۲ (تصاویر تهیه شده توسط نگارنده‌ها) به‌خوبی دیده می‌شود، با افزایش جمعیت سیانوباکتری‌ها قدرت زنجیره‌ها و چسبندگی بیشتر شده و خاک‌دانه‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. در این راستا، نتایج رودریگز-کابالرو و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که نقش سیانوباکتری‌ها به‌ویژه ترشحات پلی‌ساکاریدی در خاک‌های با بافت سنگین به سبب جذب آب و افزایش تخلخل باعث افزایش نفوذ و کاهش رواناب شدند (۳۸). هم‌چنین صادقی و

و یا فیلم‌های زیستی باعث اتصال ذرات خاک به یکدیگر و همچنین جذب آب شده بر کاهش حجم، زمان شروع، زمان تا اوج و همچنین مقدار اوج رواناب و ضریب رواناب تأثیر داشته است (شکل ۲).

ترکیبات فعال اسمزی، آنزیم‌ها و املاح سازگاری سیانوباکتری‌ها قابلیت محافظت در واکنش به انجماد را تسهیل کرده است. خاصیت چسبندگی و ژله‌ای سیانوباکتری‌ها و ایجاد لایه‌های محافظ پلی‌ساکاریدی



شکل ۲- نمای میکروسکوپی از سیانوباکتری‌ها (A) و گسترش شبکه‌ای (B)، نحوه اتصال ذرات خاک به دیواره‌های چسبنده سیانوباکتری‌ها (C) و اتصال ذرات خاک دانه‌ها به یکدیگر (D).

Figure 2. Microscopic view of cyanobacteria (A), their network expansion (B), soil particles binding to the adhesive walls of cyanobacteria (C) and bonding soil particles to each other (D).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی ارزیابی تلقیح سیانوباکتری‌های تثبیت‌کننده خاک با توان تکثیر و سازگاری با خاک حساس به فرسایش و تحت چرخه انجماد-ذوب اراضی دیم منطقه بدرانلو واقع در استان خراسان شمالی در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس در کرت‌های کوچک آزمایشی انجام شد. نتایج این پژوهش بیانگر تأثیر معنی‌دار تلقیح سیانوباکتری‌ها بر مهار زمان شروع رواناب، حجم رواناب، زمان تا اوج و مقدار اوج و همچنین حجم و ضریب رواناب بود. نتایج پژوهش نشان داد که سیانوباکتری‌ها از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی و آگزوپلی‌ساکارید امکان چسبندگی خاک‌دانه‌ها را افزایش داده و باعث پایداری بیش‌تر خاک‌دانه‌ها شدند. با این حال امکان‌سنجی کاربرد تلقیح ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکتری‌های تثبیت‌کننده خاک در شرایط محیطی مختلف از یک سو و فرسایش خاک در شرایط انجماد-ذوب از سویی دیگر ضرورت انجام پژوهش‌های تکمیلی در بهره‌گیری از قابلیت ریزموجودات خاک‌زی را ضروری می‌نماید.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر در قالب رساله دکتری خانم مهندس سودابه قره‌محمودلی و با حمایت صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران ریاست جمهوری (طرح شماره ۹۶۰۱۳۱۹۴) و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و همچنین دانشگاه تربیت مدرس در قالب فرصت مطالعاتی نامبرده انجام گرفته است. بخشی از حمایت‌های زمینه‌ای پروژه نیز توسط ستاد توسعه زیست فناوری معاونت علمی فناوری ریاست جمهوری برای نویسنده مسئول (طرح شماره ۹۷۱۲۰۱) تأمین شده است. همچنین نویسندگان از کمک‌های ارزشمند جناب آقای دکتر مرتضی بهزادفر، سرکار خانم دکتر زینب حزباوی، خانم مهندس عاطفه جعفرپور، خانم مهندس سمیه زارع، آقای مهندس مصطفی ذبیحی‌سیلابی و آقای مهندس سعید احمدی در بخش‌های مختلف اجرایی پژوهش در دانشگاه تربیت مدرس تقدیر می‌شود.

منابع

1. Abinandan, S., Subashchandrabose, S.R., Venkateswarlu, K., and Megharaj, M. 2019. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39: 8. 981-998.
2. Amutha, R., Karunakaran, S., Dhanasekaran, S., Hemalatha, K., Monika, R., Shanmugapriya, P., and Sornalatha, T. 2014. Isolation and mass production of biofertilizer (*Azotobacter* and *Phosphobacter*). *Inter. J. Latest Res. Sci. Technol.* 3: 1. 79-81.
3. Andersen, R.A. 2005. *Algal culturing techniques*. Elsevier Academic Press, London, 578p.
4. Bahig, A.E., Aly, E.A., Khaled, A.A., and Amel, K.A. 2008. Isolation, characterization, and application of bacterial population from agricultural soil at Sohag Province, Egypt. *Malaysi. J. Microbiol.* 4: 2. 42-50.
5. Barger, N.N., Castle, S.C., and Dean, G.N. 2013. Denitrification from nitrogen-fixing biologically crusted soils in a cool desert environment, southeast Utah, USA. *Ecological Processes*, 2: 1. 1-9.
6. Behzadfar, M., Sadeghi, S.H.R., Khanjani, M.J., and Hazbavi, Z. 2012. Effectability of runoff and sediment yield from soils induced by freezing and thawing cycle under simulated rainfall condition. *J. Soil Water Resour. Cons.* 2: 1. 13-25. (In Persian)

7. Behzadfar, M., Sadeghi, S.H.R., Khanjani, M.J., and Hazbavi, Z. 2017. Effects of rates and time of zeolite application on controlling runoff generation and soil loss from a soil subjected to a freeze-thaw cycle. *International Soil and Water Conservation Research*, 5: 2. 95-101.
8. Bowker, M.A. 2007. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity. *Restoration Ecology*, 15: 1. 13-23.
9. Bowker, M.A., Belnap, J., Chaudhary, V.B., and Johnson, N.C. 2008. Revisiting classic water erosion models in drylands: The strong impact of biological soil crusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 9. 2309-2316.
10. Buchanan, R.E., and Gibbons, N.E. 1974. *Bergey's manual of determinative bacteriology* (8th ed.). Williams and Wilkins, Baltimore, Maryland. 1246p.
11. Cania, B., Vestergaard, G., Kublik, S., Köhne, J.M., Fischer, T., Albert, A., Winkler, B., Schloter, M., and Schulz, S. 2019. Biological soil crusts from different soil substrates harbor distinct bacterial groups with the potential to produce exopolysaccharides and lipopolysaccharides. *Microbial Ecology*, Pp: 1-16.
12. Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., Solé-Benet, A., and Domingo, F. 2012a. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. *Ecosystems*, 15: 148-161.
13. Chamizo, S., Mugnai, G., Rossi, F.R., Certini, G., and De Philippis, R. 2018. Cyanobacteria Inoculation Improves Soil Stability and Fertility on Different Textured Soils: Gaining Insights for Applicability in Soil Restoration. *Frontiers in Environmental Science*, 6: 49.
14. Chamizo, S., Stevens, A., Cantón, Y., Miralles, I., Domingo, F., and van Wesemael, B. 2012b. Discriminating soil crust type, development stage, and degree of disturbance in semi-arid environments from their spectral characteristics. *Europ. J. Soil Sci.* 63: 42-53.
15. Deng, J., Orner, E.P., Chau, J.F., Anderson, E.M., Kadilak, A.L., Rubinstein, R.L., Bouchillon, G.M., Goodwin, R.A., Gage, D.J., and Shor, L.M. 2015. Synergistic effects of soil microstructure and bacterial EPS on drying rate in emulated soil micromodels. *Soil Biology and Biochemistry*, 83: 116-124.
16. Dong, C., Zhang, H., Yang, Y., He, X., Liu, L., Fu, J., Shi, J., and Wu, Z. 2019. Physiological and transcriptomic analyses to determine the responses to phosphorus utilization in *Nostoc* sp. *Harmful algae*, 84: 10-18.
17. Du, L., Wang, R., Gao, X., Hu, Y., and Guo, S. 2020. Divergent responses of soil bacterial communities in erosion-deposition plots on the Loess Plateau. *Geoderma*, 358, 113995.
18. Ehlers, K., Bunemann, E.K., Oberson, A., Frossard, E., Frostegard, A., Yuejian, M., and Bakken, L.R. 2008. Extraction of soil bacteria from a ferralsol. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 1940-1946.
19. Elster, J., and Benson, E.E. 2004. Life in the polar terrestrial environment with a focus on algae and cyanobacteria. In: Fuller, B.J., Lane, N., Benson, E.E. (Eds.), *Life in the Frozen State*. CRC Press, Boca Raton, FL, Pp: 111-150.
20. Entry, J.A., Sojka, R.E., and Hicks, B.J. 2008. Carbon and nitrogen stable isotope ratios can estimate anionic polyacrylamide degradation in soil. *Geoderma*, 145: 1. 8-16.
21. Garbeva, P., Tyc, O., Remus-Emsermann, M.N.P., van der Wal, A., Vos, M., Silby, M., and de Boer, W. 2011. No apparent costs for facultative antibiotic production by the soil bacterium *Pseudomonas fluorescens* Pf0-1. *PLoS One* 6: 11. e27266.
22. Garrity, G.M., Boone, D.R., and Castenholz, R.W. 2001. *Bergey's manual of systematic bacteriology*. (2nd ed.). New York, USA. 1: 173p.
23. Harvey, R.A. 2007. *Microbiology*. Lippincott Williams & Wilkins, 395p.

24. Hawke, R.M., Price, A.G., and Bryan, R.B. 2006. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: A laboratory investigation. *Catena*, 65: 237-246.
25. Issa, O.M., Défarge, C., Le Bissonnais, Y., Marin, B., Duval, O., Bruand, A., Luigi D'Acqui, P., Nordenberg, S., and Annerman, M. 2007. Effects of the inoculation of cyanobacteria on the microstructure and the structural stability of a tropical soil. *Plant and soil*, 290: 1-2. 209-219.
26. Kheirfam, H. 2020. Increasing soil potential for carbon sequestration using microbes from biological soil crusts. *J. Arid Environ.* 172: 104022. [Doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104022](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104022).
27. Kheirfam, H., Sadeghi, S.H.R., Homae, M., and Zarei Darki, B. 2017a. Quality Improvement of an Erosion-Prone Soil through Microbial Enrichment. *Soil and Tillage Research*, 165: 230-238.
28. Kheirfam, H., Sadeghi, S.H.R., Zarei Darki, B., and Homae, M. 2017b. Controlling Rainfall-Induced Soil Loss from Small Experimental Containers through Inoculation of Bacteria and Cyanobacteria. *Catena*, 152: 40-46.
29. Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., and Jentsch, A. 2010. Effects of soil freeze-thaw cycles differ between experimental plant communities. *Basic and Applied Ecology*, 11: 1. 65-75.
30. Kvidrová, J., Elster, J., and Komárek, J. 2019. Ecophysiology of cyanobacteria in the Polar Regions. In *Cyanobacteria*, pp. 277-302. Academic Press.
31. Lindahl, V., and Bakken, L.R. 1995. Evaluation of methods for extraction of bacteria from soil, *FEMS. Microbiology Ecology*, 16: 135-142.
32. Lutton, E., Schellevisa, R., and Shanmuganathan, A. 2013. Culture-dependent methods increase observed soil bacterial diversity from Marcellus shale temperate forest in Pennsylvania, *J. Stud. Res.* 2: 1. 9-16.
33. Maestre, F.T., Solé, R., and Singh, B.K. 2017. Microbial biotechnology as a tool to restore degraded drylands. *Microbial Biotechnology*, 10: 1250-1253.
34. Méjean, A., Mazmouz, R., Mann, S., Calteau, A., Médigue, C., and Ploux, O. 2010. The genome sequence of the cyanobacterium *Oscillatoria sp.* PCC 6506 reveals several gene clusters responsible for the biosynthesis of toxins and secondary metabolites. *J. Bacteriol.* 192: 19. 5264-5265.
35. Morsy, F.M., Elbadry, M., El-Sayed, W.S., and El-Hady, D.A. 2019. Dark and photofermentation H₂ production from hydrolyzed biomass of the potent extracellular polysaccharides producing cyanobacterium *Nostoc commune* and intracellular polysaccharide (glycogen) enriched *Anabaena variabilis* NIES-2095. *Inter. J. Hydr. Ener.* 44: 31. 16199-16211.
36. Paerl, H.W., and Priscu, J.C. 1998. Microbial phototrophic, heterotrophic and diazotrophic activities associated with aggregates in the permanent ice cover of Lake Bonney, Antarctica, *Microbial Ecology*, 36: 3-4. 221-230.
37. Parikh, A., and Madamwar, D. 2006. Partial characterization of extracellular polysaccharides from cyanobacteria, *Bioresource Technology*, 97: 1822-1827.
38. Powell, J.T., Chatziefthimiou, A.D., Banack, S.A., Cox, P.A., and Metcalf, J.S. 2015. Desert crust microorganisms, their environment, and human health. *J. Arid Environ.* 112: 127-133.
39. Rodriguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Lázaro, R., and Escudero, A. 2013. Soil loss and runoff in semiarid ecosystems: a complex interaction between biological soil crusts, microtopography, and hydrological drivers. *Ecosystems*, 16: 4. 529-546.
40. Rossi, F., and De Philippis, R. 2015. Role of Cyanobacterial Exopolysaccharides in Phototrophic Biofilms and in Complex Microbial Mats. *Life*, 5: 2. 1218-1238.
41. Rossi, F., Li, H., Liu, Y., and De Philippis, R. 2017. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. *Earth-Science Reviews*, 171: 28-43.

42. Rossi, F., Mugnai, G., and De Philippis, R. 2018. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant and Soil*, 429: 1-2. 19-34.
43. Sadeghi, S.H.R. 2010. Study and measurement of water erosion. Tarbiat Modares University Press. 200p. (In Persian)
44. Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., Gholami, L., and Khaledi Darvishan, A. 2017. Soil and water conservation using amendments, Tarbiat Modares University Press. 501p. (In Persian)
45. Sadeghi, S.H.R., and Kheirfam, H. 2015. Temporal variation of bed load to suspended load ratio in Kojour River, Iran. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 43: 10. 1366-1374.
46. Sadeghi, S.H.R., Kheirfam, H., Homaei, M., Zarei Darki, B., and Vafakhah, M. 2017. Improving runoff behavior resulting from Direct Inoculation of Soil Micro-Organisms. *Soil and Tillage Research*, 171: 35-41.
47. Sadeghi, S.H., Raeisi, M.B., and Hazbavi, Z. 2018. Influence of freeze-only and freezing-thawing cycles on splash erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 6: 275-279.
48. Satoh, K., Hirai, M., Nishio, J., Yamaji, T., Kashino, Y., and Koike, H. 2002. Recovery of photosynthetic systems during rewetting is quite rapid in a terrestrial cyanobacterium, *Nostoc commune*. *Plant and Cell Physiology*, 43: 2. 170-176.
49. Sears, J.T., and Prithiviraj, B. 2012. Seeding of large areas with biological soil crust starter culture formulations: using an aircraft disbursable granulate to increase stability, fertility and CO₂ sequestration on a landscape scale. In: *IEEE Green Technologies Conference*. Tulsa, OK, 19-20 April 2012. Pp: 1-3.
50. Seckbach, J. (Ed.). 2007. *Algae and cyanobacteria in extreme environments* (Vol. 11). Springer Science & Business Media. 812p.
51. Sepehr, A., Hassanzadeh, M., and Rodriguez-Caballero, E. 2019. The protective Role of Cyanobacteria on Soil Stability in Two Aridisols in Northeastern Iran. *Geoderma Regional*, 16: e00201.
52. Sharma, R., Singh, G., and Sharma, V. K. 2011. Comparison of different media formulation on growth, morphology and chlorophyll content of green alga, *Chlorella vulgaris*. *Inter. J. Pharma Biol. Sci.* 2: 2. 509-516.
53. Tashyreva, D., and Elster, J. 2015. Effect of nitrogen starvation on desiccation tolerance of Arctic *Microcoleus* strains (cyanobacteria). *Frontiers in Microbiology*, 6: 278p.
54. Tisdall, J.M., Nelson, S.E., Wilkinson, K.G., Smith, S.E., and McKenzie, B.M. 2012. Stabilisation of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, 50: 134-141.
55. Tiwari, O.N., Bhunia, B., Mondal, A., Gopikrishna, K., and Indrama, T. 2019. System metabolic engineering of exopolysaccharide-producing cyanobacteria in soil rehabilitation by inducing the formation of biological soil crusts: A review. *J. Clean. Prod.* 211: 70-82.
56. Valencia, Y., Camapum, J., and Torres, F.A. 2014. Influence of biomineralization on the physico-mechanical profile of a tropical soil affected by erosive processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 74: 98-99.
57. Vieira, F.C.S., and Nahas, E. 2005. Comparison of microbial numbers in soils by using various culture media and temperatures. *Microbiological Research*, 160: 197-202.
58. Wang, W.B., Liu, Y.D., Li, D.H., Hua, C.X., and Rao, B.Q. 2009. Feasibility of cyanobacterial inoculations for biological soil crusts formation in desert area. *Soil Biology and Biochemistry*, 41: 926-929.
59. Wei, H., Jiao, Y., and Liu, H. 2015. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical property of silty clay modified by fly ash and crumb rubber. *Cold Regions Science and Technology*, 116: 70-77.
60. Wu, Y., Rao, B., Wu, P., Liu, Y., Li, G., and Li, D. 2013. Development of artificially induced biological soil crusts in fields and their effects on top soil. *Plant and Soil*, 370: 1-2. 115-124.

61. Wubs, E.J., Van der Putten, W.H., Bosch, M., and Bezemer, T.M. 2016. Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. *Nature Plants*, 2: 8. 16107.
62. Zare Chahuki, M.A. 2014. Data analysis in natural resources research with SPSS software. First Edition, Jihad Tehran University Press, 310p. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 27(3), 2020
<http://jwsc.gau.ac.ir>
DOI: 10.22069/jwsc.2020.17693.3318

Research Full Paper

Reducing Surface Runoff from Soils Subjected to a Freezing-Thawing Cycle using Soil Cyanobacteria

S. Gharemahmudli¹, A. Najafinejad², *S.H.R. Sadeghi³, B. Zarei Darki⁴,
A. Mohammadian Behbahani⁵ and H. Kheirfam⁶

¹Ph.D. Student of Watershed Management Sciences and Engineering, Dept. of Watershed Management Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

²Associate Prof., Dept. of Watershed Management Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

³Professor, Dept. of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University,

⁴Assistant Prof., Dept. of Marine Biology, Faculty of Marine Science, Tarbiat Modares University,

⁵Assistant Prof., Dept. of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

⁶Assistant Prof., Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University and Assistant Prof., Dept. of Environmental Sciences, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 02.08.2020; Accepted: 08.22.2020

Abstract

Background and Objectives: Nowadays, the use of soil microorganisms as soil inoculators is being promoted to promote biotechnological methods to protect the environment. On the other hand, soil and climate conditions are among the important factors affecting the quantity and quality of soil erosion. So that, climatic agents such as freezing and thawing influence erosion dynamics. In this regards, soil conservation in watershed slopes and the significant role of freezing-thawing cycle in the production of surface runoff by the use of soil microorganisms such as cyanobacteria due to stability and proper sequence conditions of vegetation cover, adhesion and stabilization of soil for regeneration. Sustainable upgrading of ecosystems seems to be essential, while most soil and water conservation practices in the drainage network are engineered without considering the potential of biological methods for water and soil loss control. Therefore, the purpose of this study was to investigate the feasibility of inoculation of soil cyanobacteria in inhibition of surface runoff from soil under freezing-thaw conditions in a small plot.

Materials and Methods: For this purpose, the studied soil was taken from dryland and prone to erosion area of Badranloo in North Khorasan Province. Then, the most suitable native cyanobacteria in origin soil were identified, selected, purified and propagated, and ultimately inoculated on the plots in six replications for the capability assessment for soil and water conservation. Comparison of control and inoculated treatments with cyanobacteria under a freezing and thawing cycle was made under simulated rain conditions with intensity of about 72 mm.h⁻¹ lasting for 30 min and on small erosion plots (0.5 x 0.5 m) with slope of 20% in the Rain and Erosion Simulation Laboratory of Tarbiat Modares University, Iran.

Results: The results showed that inoculated cyanobacteria treatment after a freeze-thaw cycle significantly ($P < 0.001$) improved the surface runoff components compared to the control

* Corresponding Author; Email: sadeghi@modares.ac.ir

treatment. Statistical comparisons of the means also showed that cyanobacteria inoculation treatment significantly ($P < 0.001$) increased runoff commencement and time to peak at respective tune of 228 and 49%, and decreased runoff peak and volume at rates of 48 and 65% compared to those of the control treatment.

Conclusion: The results of the current study showed the positive effect of soil cyanobacteria inoculation for water conservation. It therefore could be supposed as an efficient, economic, and biological tool for improving the hydrological behavior of freezing-thawed soils. Hence, the results of this study could be used to designate the management patterns of water and soil conservation and extend to areas with similar conditions.

Keywords: Fandoghlu forests, Land use change, Principle component analysis (PCA), Soil quality