"مقاله پژوهشی"

ایجاد و احیای پوسته‌های زیستی در بوم‌سازگان‌های تخریب‌یافته با فن‌آوری تلقیح سیانوباکتریایی

حسین خیرفام[1] و فرخ اسدزاده[2]

۱- استادیار، دانشگاه ارومیه (نویسنده مسوول: h.kheirfam@urmia.ac.ir)
۲- دانشیار، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶
صفحه: ۱۳۲ تا ۱۳۸

چکیده

تخریب زمین ناشی از دخالت‌های انسانی منجر به توسعه بیابان و پیدایش بوم‌سازگان‌های ناپایدار از قبیل بسترهای خشک‌شده تالاب‌ها و دریاچه‌ها می‌شود. از این‌رو، تسریع در فرآیند خوداحیایی بوم‌سازگان‌های نوپدید ناپایدار شرایط دست‌یابی به اهداف توسعه پایدار را فراهم خواهد کرد. لذا پژوهش حاضر با هدف امکان‌سنجی ایجاد پوسته‌های زیستی در بوم‌سازگان نوپدید و حساس به فرسایش بادی بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه از طریق فن‌آوری زیستی تلقیح سیانوباکترها برنامه‌ریزی شد. برای انجام این پژوهش، نمونه‌های حجمی خاک ماسه‌ای از بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه برداشت شده و در داخل سینی‌های کوچک فرسایشی (با ابعاد طول، عرض و عمق ۵۰ در ۳۰ در ۱۰ سانتی‌متر) ریخته و آماده‌سازی شدند. سپس سیانوباکترهای بومی استخراج و تکثیرشده از منطقه با غلظت ۱/۵۲ گرم بر لیتر روی نمونه‌های آزمایش تلقیح شدند. پس از ۱۲۰ روز، به‌منظور ارزیابی میزان زیست‌پوسته‌سازی، اقدام به اندازه‌گیری شاخص‌های مهم توسعه پوسته‌های زیستی خاک شامل غلظت کلروفیل، ضخامت پوسته و میزان اتصال‌پذیری شد. تحلیل یافته‌ها نشان داد که تلقیح سیانوباکترها منجر به بهبود معنی‌دار (p<۰/۰۱) و به‌ترتیب ۶۰ و ۲/۸۹ برابری میزان غلظت کلروفیل و ضخامت پوسته نسبت به تیمار شاهد شد. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خاک نیز قابلیت سیانوباکترها در ایجاد اتصال قوی بین ذرات خاک را تأیید کرد. بر اساس نتایج پژوهش فعلی می‌توان فن‌آوری تلقیح سیانوباکترها را به‌عنوان راهکاری نوین و سریع و هم‌راستا با اهداف حفاظت از خاک و کنترل تخریب زمین در زیست‌پوسته‌سازی بوم‌سازگان‌های نوپدید و ناپایدار پیشنهاد نمود.

واژه‌های کلیدی: بیابان‌زدایی، پایداری خاک، پوسته زیستی خاک، تخریب زمین

مقدمه

سازمان ملل متحد به‌منظور رفع چالش‌های جهانی متعدد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی، اهداف هفده‌گانه برای دستیابی به توسعه پایدار را تا سال ۲۰۳۰ میلیادی برنامه‌ریزی کرده است (۹). از این‌رو، دستیابی به توسعه پایدار نیازمند توسعه و پایداری متوازن در سه مؤلفه مهم جهانی یادشده به‌ویژه محیط زیست می‌باشد (۲۶). در این راستا، خاک پویا و سالم به‌عنوان مهم‌ترین عامل در پایداری بوم‌سازگان‌ها بوده که منجر به تأمین امنیت غذایی می‌شود. با این حال، تخریب‌های زمین ناشی از فعالیّت‌ها و بهره‌برداری‌های غیراصولی انسانی به‌عنوان تهدید جدی برای عملکرد خاک و در نتیجه بوم‌سازگان‌ها بوده که در این بین بعضاً منجر به پیدایش بوم‌سازگان‌ها و زمین‌ریخت‌های نوپدید[1] و ناپایدار نیز می‌شود (۱۱). تخریب زمین با خسارت سالانه ۴۲۰ میلیارد دلاری به‌عنوان مهم‌ترین تهدید جهانی امنیت غذایی بوده (۲۵)؛ که اتخاذ سیاست‌های کوتاه، میان و بلندمدت مدیریت منابع آب و خاک از طریق احیاء و بهبود بوم‌سازگان‌های تخریب‌یافته و یا نوپدید ناپایدار را برای دستیابی به توسعه پایدار اجتناب‌ناپذیر کرده است (۹). خشکی تالاب‌ها و دریاچه‌های داخلی ناشی از بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب از مهم‌ترین نمایه‌های تخریب زمین و ایجاد بوم‌سازگان‌های خشک با بسترهای رسوبی ناپایدار بوده که بحران خشکی دریاچه ارومیه از مهم‌ترین نمودهای آن می‌باشد (۱۰). بخش قابل توجهی از حوزه آبخیز ۵۰ هزار کیلومترمربعی دریاچه ارومیه به‌سبب برخورداری از منابع آب و خاک مناسب و سهم بالای بخش کشاورزی در اقتصاد جوامع آبخیزنشینان آن تحت بهره‌برداری شدید کشاورزی می‌باشد (۸). از این‌رو، کاهش آب ورودی به دریاچه ارومیه (با مساحت بیش از پنج هزار کیلومترمربع) منجر به کاهش سطح، تراز و حجم آب آن شده است؛ به‌گونه‌ای که در ۲۰ سال گذشته (۱۳۷۸ تا ۱۳۹۸) بیش از ۷۰ درصد مساحت دریاچه ارومیه خشک شده است (۱۳). در کنار راه‌کارهای مرسوم از قبیل استقرار پوشش گیاهی، استفاده از خاک‌پوش‌های زیستی و غیرزیستی از قبیل از قبیل گچ و آهک، باقی‌مانده محصولات زراعی ، مالچ‌های نفتی و انواع پلیمرهای نفتی و زیست‌تخریب‌پذیر نیز برای احیاء و بهبود بوم‌سازگان‌های تخریب‌یافته و یا نوپدید ناپایدار استفاده می‌شود (۲۲). با این حال، علی‌رغم گزارش نتایج موفقیت‌آمیز از کاربرد افزودنی‌ها و اصلاح‌گرها در این راستا (۱۶)، امّا گزارش‌هایی از اثرگذاری ناپایدار و اثرات سوء محیط زیستی از آن‌ها تا حدودی کاربرد وسیع آن‌ها را با چالش مواجه کرده است (۱۲). در کنار رویکردهای متعدد احیای اراضی تخریب‌یافته یا بهبود پایداری بسترهای رسوبی بوم‌سازگان‌های نوپدید ناپایدار، اخیراً ایجاد پوسته‌های زیستی خاک مورد توجه قرار گرفته است (۱۱).

پوسته‌های زیستی خاک محل تجمع متراکم ریزموجودات خاک‌زی (باکتری‌ها، خزه‌ها، سیانوباکترها، جلبک‌ها، قارچ‌ها و

1- New-born ecosystems and landforms

[Downloaded from drnl.sanru.ac.ir on 2026-02-02]

[DOR: 20.1001.1.27174425.1399.1.1.12.1]

گل‌سنگ‌ها) در بوم‌سازگان‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده که منجر به بهبود مؤلفه‌های کیفی و کمّی خاک از قبیل افزایش محتوای مواد مغذی خاک و پایداری و اتصال‌پذیری بین ذرات ناپایدار خاک (خاک‌دانه‌سازی) می‌شوند (۱۳). از طرفی نتایج مطالعات پیشین حاکی از آن است که ریزموجودات موجود در پوسته‌های زیستی خاک به‌عنوان اولین حلقه از زنجیره زیست‌بوم خاک، امکان رشد و فعالیّت سایر موجودات وابسته به خاک را فراهم می‌آورند (۴). بدیهی است افزایش فعالیّت‌های میکروبی سطح خاک امکان بهبود ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک را فراهم ساخته (۱۲) و در نتیجه به افزایش پایداری خاک و طبعاً در احیای اراضی تخریب یافته یا بوم‌سازگان‌های نوپدید ناپایدار منجر خواهند شد (۲۳). بررسی‌ها نشان داده‌اند که ریزموجودات پوسته‌ی زیستی خاک از طریق ترشح مواد چسبنده پلی‌ساکاریدی و هم‌چنین اتصال سلولی زنجیره‌ای با یک‌دیگر در اطراف ذرات خاک، باعث چسبیدگی ذرات ریز خاک و تشکیل ریزساختار شده که با گسترش ابعادی زنجیره‌های سلولی تشکیل‌شده باعث ارتباط و پیوستگی ریزساختارها با یک‌دیگر شده و در نهایت ذرات خاک با ساختار بزرگ تشکیل می‌شود. تغییرات به‌وجود آمده در سطح خاک و تبدیل ذرات ریز خاک به ذرات با ساختار بزرگ‌تر باعث اصلاح مؤلفه‌های دخیل در احیای اراضی می‌شود (۱۳).

هرچند، تشکیل پوسته‌های زیستی خاک در بوم‌سازگان‌های نوپدید بسیار زمان‌بر (بعضاً تا ۵۰ سال) بوده (۳)؛ که نیازمند بهره‌گیری از راه‌کارهای نوین برای تسریع در چنین فرآیندی می‌باشد. در این راستا، اخیراً رویکرد ایجاد و یا توسعه کمّی و کیفی پوسته‌های زیستی خاک از طریق فن‌آوری تلقیح ریزموجودات خاک به‌ویژه سیانوباکترها (به‌عنوان مهندسان و اولین حلقه از توالی بوم‌سازگان‌ها) مورد توجه قرار گرفته است (۱۱). به‌گونه‌ای که، نتایج موفقیت‌آمیزی از رویکرد ایجاد و یا احیای پوسته‌های زیستی از طریق تلقیح سیانوباکتریایی در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای (۲۶،۱۰)، تعدیل رفتار هیدرولوژیکی آب (۲۱)، بهبود کیفیت خاک (۱۱)، احیای پوشش گیاهی (۱۸) و ترسیب کربن و تثبیت نیتروژن (۲۶) گزارش شده است.

جمع‌بندی پیشینه پژوهشی حاکی از قابلیت بالا و توجه ویژه پژوهشگران در استفاده از رویکرد تلقیح سیانوباکترها در راستای حفظ و احیای بوم‌سازگان‌ها می‌باشد. به‌گونه‌ای که پژوهش‌های اولیه صرفاً با هدف بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌ها در شرایط غنا و فقر پوسته‌های زیستی برنامه‌ریزی شده‌اند. پس از آگاهی و تأیید نقش مؤثر و اثرگذار سیانوباکترها در بهبود ویژگی‌های کیفی و کمّی خاک، روند پژوهش‌ها به‌سمت نحوه بهره‌مندی از قابلیت سیانوباکترها در بهبود پایداری بوم‌سازگان‌ها متمرکز شد. در این راستا، اغلب پژوهش‌ها بر بهبود ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از طریق افزایش فعالیّت سیانوباکترهای موجود در پوسته زیستی خاک انجام شد. با این حال، اخیراً استفاده از رویکرد تلقیح مستقیم و سطحی سیانوباکترها به خاک مطرح شد که بهبود ویژگی‌های کیفی خاک‌های فقیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک از مهم‌ترین اولویت‌های پژوهشی بود. در این بین، استفاده از قابلیت تلقیح سیانوباکترها در ایجاد پوسته زیستی و بهبود مؤلفه‌های فیزیکی و شیمیایی مناطق بیابانی به‌ویژه بوم‌سازگان‌های تخریب‌یافته و یا نوپدید ناپایدار نیز مورد توجه قرار گرفته است. در این بین، اندازه‌گیری میزان توسعه زیست‌پوسته‌های ایجاد و یا احیاشده به‌منظور مدیریت بهینه فرآیند و میزان تلقیح ضروری بوده که تا کنون کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف اندازه‌گیری شاخص‌های اصلی نشان‌دهنده میزان توسعه پوسته‌های زیستی ایجاد شده پس از فرآیند تلقیح سیانوباکتریایی در مقیاس آزمایشگاهی برنامه‌ریزی شد.

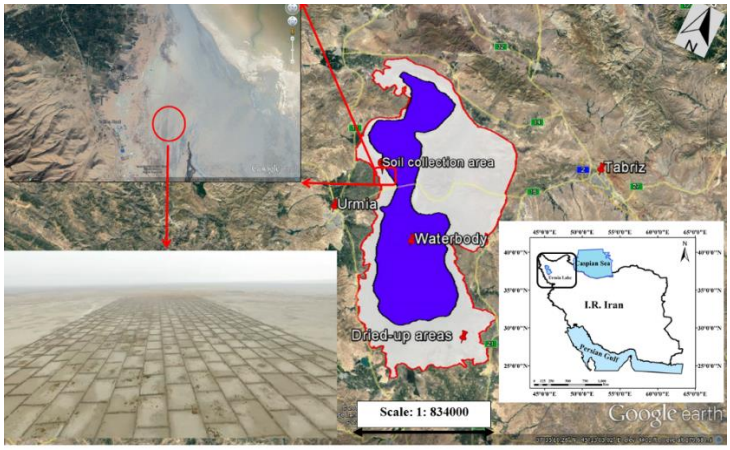
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای انجام پژوهش حاضر و امکان‌سنجی زیست‌پوسته‌سازی در بوم‌سازگان‌های نوپدید از طریق تلقیح سیانوباکترها، بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه به‌عنوان یک بوم‌سازگان نوپدید انتخاب شد. دریاچه ارومیه در محدوده جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه و ۳۸ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۵۰ دقیقه و ۴۶ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی در بین دو استان آذربایجان‌غربی و شرقی و در شمال‌غربی ایران واقع شده است. مساحت این دریاچه حدود ۵۰۰۰ کیلومترمربع بوده که که طبق آخرین آمار حدود ۳۵ درصد از مساحت اولیه دریاچه ارومیه از بوم‌سازگان آبی به بسترهای خشک‌شده تبدیل شده که حساسیت بالایی به فرسایش بادی دارند (۱۳). نمایی از موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و برداشت خاک در شکل ۱ ارائه شده است.

[Downloaded from drnl.sanru.ac.ir on 2026-02-02]

[DOR: 20.1001.1.27174425.1399.1.1.12.1]



شکل ۱- نمایی از موقعیت منطقه مورد مطالعه و برداشت خاک در بخش غربی دریاچه ارومیه، شمال غربی ایران
Figure 1. General view of the study area and soil collection location in the west of Lake Urmia, northwestern Iran

نمونه‌برداری و آماده‌سازی مایه تلقیح سیانوباکترها

به‌منظور کشت، استخراج، شناسایی، خالص‌سازی و تکثیر سیانوباکترها اقدام به نمونه‌برداری از سطح خاک (صفر تا دو سانتی‌متری) منطقه مورد مطالعه شد. پس از نمونه‌برداری از خاک سطحی، تمام نمونه‌ها در زیر هود کاملاً استریل، خرده شده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری با هم مخلوط شده و سپس به‌مقدار ۱۰۰ گرم برای کشت و استخراج سیانوباکترها برداشت شد (۱۵). نمونه نهایی برداشت‌شده به پتری‌های هشت سانتی‌متری منتقل (۱۰ گرم خاک به‌ازای هر پتری) شده و لامل‌های کوچک چهار سانتی‌مترمربعی در سطح خاک جانمایی شدند. سپس اقدام به کشت و جداسازی سیانوباکترهای خاک با استفاده از محیط‌کشت عمومی CHU10 شد (۲) شده و سیانوباکترهای جداسازی‌شده براساس ویژگی‌های ریخت‌شناسی ذکر شده در راهنمای باکتری‌شناسی Bergey شناسایی شدند (۷). در نهایت، از بین جمعیت سیانوباکترهای خاک منطقه، جنس‌های *Nostoc* sp. و *Oscillatoria* sp. انتخاب و برای تهیه مایه تلقیح در حجم زیاد (۱/۵۰ گرم بر لیتر) تکثیر شدند (۱۰).

اجرای آزمایش و اندازه‌گیری شاخص‌ها

برای اجرای آزمایش، نمونه‌های حجمی خاک برداشت شده از بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه به سینی‌های استاندارد اندازه‌گیری فرسایش بادی و مورد استفاده در تونل‌های مدار باز شبیه‌سازی باد، با ابعاد طول، عرض و عمق ۵۰ در ۳۰ در ۱۰ سانتی‌متر منتقل و مطابق با شرایط طبیعی لایه‌بندی و آماده شدند. از آن‌جایی که پژوهش حاضر هم‌زمان با یک طرح پژوهشی گسترده با هدف اندازه‌گیری فرسایش بادی در پوسته‌های زیستی انجام شد، لذا ابعاد سینی‌های فرسایشی مورد استفاده در این پژوهش متناسب با ابعاد محل قرارگیری سینی‌ها در تونل شبیه‌ساز باد مورد استفاده در طرح پژوهشی مذکور و مطابق با استاندارد بادساز مورد استفاده انتخاب شدند. سپس مایه تلقیح سیانوباکتریایی آماده شده به‌صورت محلول در آب و با وزن زیست‌توده تقریبی ۱/۵۰ گرم بر لیتر و به مقدار یک لیتر بر مترمربع روی سطح سینی‌ها با سه تکرار اسپری شده و ۱۲۰ روز نگه‌داری شد (۱۱). در انتهای آزمایش، نمونه‌هایی از سطح خاک برداشت شده و سپس مقادیر شاخص‌های مدنظر برای بررسی امکان‌پذیری تشکیل پوسته‌های زیستی اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری محتوای کلروفیل-آ نمونه‌ها اقدام به اضافه نمودن پنج میلی‌لیتر آب‌مقطر روی یک گرم خاک محتوای لوله‌های آزمایش ۱۰ میلی‌لیتر شده و پس از انجام فرآیند سانتریفیوژ (۸۰۰۰ دور در دقیقه) به مدت ۱۰ دقیقه، نمونه‌ها به‌مدت پنج دقیقه در محیط آون تحت دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار داده شده و پس از آن در دمای چهار درجه سانتی‌گراد محیط یخچال به‌مدت ۲۴ ساعت نگه‌داری شدند. سپس با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۶۶۵ نانومتر، میزان غلظت محلول سانتریفیوژ و جداسازی شده نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند (۵). در نهایت با استفاده از رابطه (۱) اقدام به تخمین محتوای کلروفیل-آ نمونه‌های آزمایش شد (۱۹). برای اندازه‌گیری ضخامت پوسته‌های ایجاد شده در تیمارهای مطالعاتی اقدام به برداشت نمونه‌های سطحی با استفاده از قاشقک نمونه‌برداری و سپس اندازه‌گیری ضخامت آن‌ها از طریق کولیس دیجیتالی با دقت بالا شد. برای ارزیابی اتصال ذرات خاک و ساختار پوسته زیستی تیمارهای مطالعاتی اقدام به تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌های خاک شد.

رابطه (۱)

$$\text{Chlorophyll} - a = (11.9035 \times A665_0 \times V) \times (g\, soil^{-1}) \times L$$

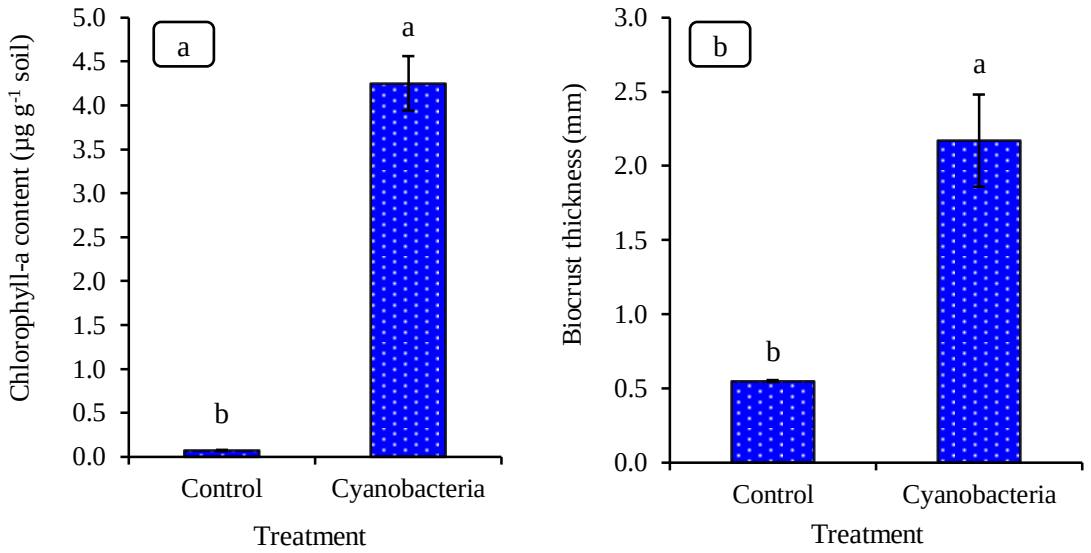
که در این رابطه V و L به‌ترتیب حجم حلال و طول لوله آزمایش می‌باشد. در نهایت پس از اندازه‌گیری‌ها، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی و مقایسه میانگین‌های مؤلفه‌های مورد بررسی بین تیمار شاهد و تلقیح مایه سیانوباکتریایی با استفاده از آزمون t انجام شد (۱۷).

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که میزان غلظت کلروفیل-آ در تیمار شاهد بسیار ناچیز و به مقدار ۰/۰۷۳ میکروگرم بر گرم بود؛ در

[Downloaded from drnl.sanru.ac.ir on 2026-02-02]
[DOR: 20.1001.1.27174425.1399.1.1.12.1]

حالی‌که تلقیح سیانوباکتریایی منجر به افزایش قابل توجه و معنی‌دار به‌میزان ۵۷ برابری غلظت کلروفیل-آ در نمونه‌ها شد که مقدار آن ۴/۲۵ میکروگرم بر گرم اندازه‌گیری شد (شکل ۲الف). از آنجایی که مقادیر کلروفیل-آ به‌طور مستقیم نشان‌دهنده میزان زی‌توده سیانوباکتریایی در پوسته‌های زیستی می‌باشد (۱۰)، بنابراین، یافته‌های پژوهش حاضر نشان‌داد که تلقیح مایه سیانوباکتریایی منجر به ایجاد سریع پوسته زیستی توسعه‌یافته شده است. سیانوباکترها در بلافاصله پس از تلقیح و استقرار در سطح خاک، به‌سرعت شروع به ترشح مقادیر زیادی از مواد پلی‌ساکاریدی برون‌سلولی تا ۶۰ درصد حجم زیست‌توده خود می‌کنند (۱). اندازه‌گیری محتوای کلروفیل-آ پوسته‌های زیستی یکی از راه‌کارهای مرسوم در برآورد میزان زیست‌توده و ترشحات برون‌سلولی سیانوباکترها در سطح خاک است (۱۰)؛ که در این پژوهش افزایش قابل توجهی از محتوای کلروفیل-آ مشاهده شد. ترشحات برون‌سلولی و حتی درون‌سلولی سیانوباکترها ترکیبی از پلی‌ساکاریدها، لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA می‌باشند (۲۰). ترشحات پلی‌ساکاریدی سیانوباکترها در محیط خاک آزاد شده و یا در اطراف سلول‌های سیانوباکتریایی تجمع کرده که میزان آن حدود ۵۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه اندازه‌گیری شده است (۱۴). ترشحات پلی‌ساکاریدی سیانوباکترها علاوه‌بر برخورداری از خاصیت چسبندگی، حاوی مقدار قابل توجهی از مواد آلی (۲۲ درصد وزنی ترشحات (۶)) بوده که نقش فزآینده‌ای در اتصال‌پذیری ذرات خاک، تأمین مواد مغذی برای سیار ریزموجودات خاک‌زی و افزایش محتوای رطوبتی خاکه داشته که منجر به افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (۱۳). پلی‌ساکاریدهای تجمع‌یافته در اطراف سلول‌های سیانوباکتریایی نیز شرایط اتصال سیانوباکترها به اطراف ذرات خاک و در نتیجه اتصال ذرات به‌یکدیگر را فراهم می‌کنند. از طرفی، ترشحات تجمع‌یافته روی سلول‌ها، منجر به محافظت سیانوباکترها در برابر تنش‌های محیطی از قبیل شوری، خشکی و تغییرات دمایی می‌شود (۲۴).



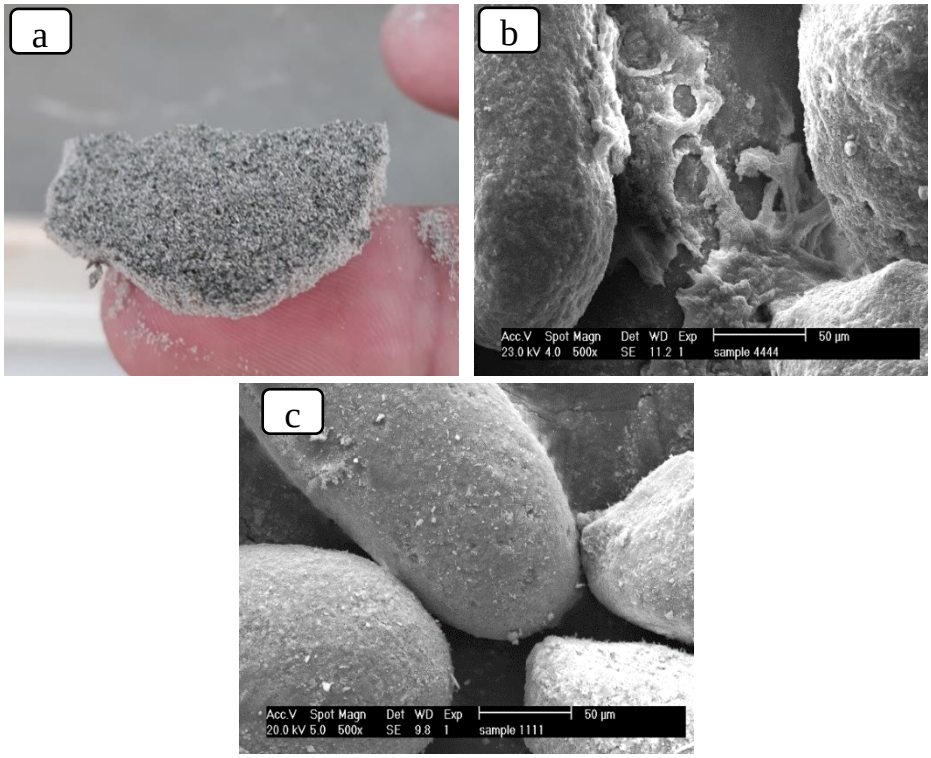
شکل ۲- تغییرات محتوای کلروفیل-آ (الف) و ضخامت پوسته زیستی (ب) در تیمارهای با و بدون تلقیح مایه سیانوباکتریایی
Figure 2. Variation of the chlorophyll-a content and biocrust thickness in the treatments with and without of cyanobacterial inoculation

از طرفی، اندازه‌گیری و مقایسه رفتار تیمارهای با و بدون تلقیح سیانوباکتریایی نشان داد که ضخامت پوسته (سطح) خاک (شکل ۲ ب) در شرایط بدون تلقیح ۰/۵۵ میلی‌متر (عدم ایجاد پوسته) بوده که با تلقیح سیانوباکترها پوسته‌هایی با ضخامت حدود ۲/۱۷ میلی‌متر در سطح خاک ایجاد شد (شکل ۳الف). بنابراین، تلقیح سیانوباکتریایی علاوه‌بر افزایش محتوای کلروفیل سطح خاک، منجر به افزایش ۲۸۹ درصدی ضخامت پوسته در خاک بوم‌سازگان‌های نوپدید ناپایدار شد. در کنار قابلیت‌های ذکرشده، بسیاری از سیانوباکترهای خاک، به ویژه جنس‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر (*Nostoc sp.* و *Oscillatoria sp.*)، دارای اندام‌های رشته‌ای بوده (۲۰) که بین فضای بین ذرات خاک توسعه پیدا کرده و یک شبکه منسجم از رشته‌ها و ذرات خاک را به‌هم پیوند می‌دهند (۲۷). رشته‌های سیانوباکتریایی علاوه‌بر پر کردن فضای متخلخل خاک، یک لایه نسبتاً ضخیم سیانباکتر-ذرات خاک با ضخامت یک تا سه میلی‌متر روی سطح خاک ایجاد می‌کنند که منجر به افزایش ضخامت پوسته زیستی خاک می‌شوند (۶،۱۳).

در کنار افزایش ضخامت پوسته‌زیستی خاک در شرایط تلقیح سیانوباکترها، تصایر میکروسکوپ الکترونی ایجاد اتصال‌های پیچیده و پایداری بین ذرات خاک را نشان داد (شکل ۳ ب) که از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی سلول‌ها (۱۱) و به‌ویژه رشته‌های شبکه‌ای تار عنکبوتی‌وار (۲۷) سیانوباکترهای تلقیح و توسعه یافته پوسته‌زیستی تشکیل شده

[Downloaded from drnl.sanru.ac.ir on 2026-02-02]
[DOR: 20.1001.1.27174425.1399.1.1.12.1]

بود. در حالی‌که، هیچ نوع اتصالی در بین ذرات خاک تیمارهای بدون تلقیح سیانوباکتر مشاهده نشد (شکل ۳ ج). رشته‌های سیانوباکترها از طریق توسعه در بین فضای بین ذرات خاک منجر به اتصال آن‌ها به‌یک‌دیگر شده و در نهایت شرایط برای تشکیل خاک‌دانه‌های بزرگ را ایجاد کرده (۱۱) و در نهایت لایه‌ای نسبتاً ضخیم و پایدار در سطح خاک را تشکیل می‌دهد (۶).



شکل ۳- زیست‌پوسته تشکیل شده با تلقیح مایه سیانوباکتریایی (الف)، اتصال ذرات خاک در شرایط تلقیح سیانوباکترها (ب) و عدم اتصال ذرات در شرایط بدون تلقیح (ج).

Figure 3. Biocrust formed by inoculation of cyanobacterial (a), binding of soil particles under inoculation of cyanobacteria (b) and un-bonded particles under non-inoculation (c).

یافته‌های پژوهش حاضر نشان‌داد که بوم‌سازگان‌های نوپدید به‌دلیل عدم برخورداری از پوسته‌های‌زیستی توسعه‌یافته، حساسیت و ناپایداری بالایی در برابر عوامل تخریب داشته که منجر به تهدید امنیت غذایی و بوم‌سازگان‌های مجاور خواهد شد. از طرفی رویکرد زیست‌پوسته‌سازی از طریق فن‌آوری تلقیح سیانوباکتریایی از طریق بهبود نمایه‌های مهم پویایی پوسته‌زیستی و هم‌چنین مؤثر در پایداری خاک از جمله محتوای کلروفیل-آ، ضخامت پوسته و اتصال بین‌ذره‌ای به‌صورت قابل توجهی کارایی تلقیح سیانوباکتریایی در زیست‌پوسته‌سازی در بوم‌سازگان‌های نوپدید را تأیید کرد. با این‌حال، انجام آزمایش‌های تکمیلی در مقیاس پایلوت‌های صحرایی با هدف ارزیابی راه‌کار یادشده در شرایط طبیعی در کنار اندازه‌گیری متغیرهای متعدد خاک ضروری است.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با کد ۹۸/م/۰۰۱ که با تصویب و حمایت مالی حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه در پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه اجرا شده است. لذا نهایت قدردانی از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه و هم‌چنین گروه علوم محیط زیست پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه را دارد. هم‌چنین از گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه ارومیه برای بهره‌مندی از آزمایشگاه اندازه‌گیری فرسایش بادی نهایت سپاسگزاری می‌شود.

[Downloaded from drnl.sanru.ac.ir on 2026-02-02]

[DOR: 20.1001.1.27174425.1399.1.1.12.1]

منابع

1. Adessi, A., R.C. de Carvalho, De R. Philippis, C. Branquinho and da J.M. Silva. 2018. Microbial extracellular polymeric substances improve water retention in dryland biological soil crusts. Soil Biology & Biochemistry, 116: 67-69.
2. Andersen, R.A. 2005. Algal culturing techniques, Elsevier Academic Press, London, 578 pp.
3. Belnap, J., B.J. Walker, S.M. Munson and R.A. Gill. 2014. Controls on sediment production in two US deserts. Aeolian Research, 14: 15-24.
4. Bowker, M.A., J. Belnap and M.E. Miller. 2006. Spatial modeling of biological soil crusts to support rangeland assessment and monitoring. Rangeland Ecology & Management, 59: 519-529.
5. Castle, S.C., C.D. Morrison and N.N. Barger. 2011. Extraction of chlorophyll a from biological soil crusts: a comparison of solvents for spectrophotometric determination. Soil Biology and Biochemistry. 43(4): 853-856.
6. Chamizo, S., G. Mugnai, F. Rossi, G. Certini and R. De Philippis. 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.
7. Garrity, G.M., D.R. Boone and RW. Castenholz. 2001. Bergey's manualof systematic bacteriology. (2nd ed.). New York, USA. 1: 173 pp.
8. Harvey, R. A. 2007. Microbiology. Lippincott Williams & Wilkins, 395 pp.
9. Hassanzadeh, E., M. Zarghami and Y. Hassanzadeh. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. Water Resources Management, 26(1): 129-145.
10. Keesstra, S., G. Mol, J. De Leeuw, J. Okx, M. De Cleen and S. Visser. 2018. Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. Land, 7(4): 133.
11. Kheirfam, H. and F. Asadzadeh. 2020. Stabilizing sand from dried-up lakebeds against wind erosion by accelerating biological soil crust development. European Journal of Soil Biology, 98: 103189.
12. Kheirfam, H., S.H.R. Sadeghi, and B. Zarei Darki. 2020. Soil conservation in an abandoned agricultural rain-fed land through inoculation of cyanobacteria. Catena, 187: 104341.
13. Kheirfam, H. S.H.R. Sadeghi, M. Homaee and B. Zarei Darki. 2017. Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment. Soil and Tillage Research, 165: 230-238.
14. Kheirfam, H. and M. Roohi. 2020. Accelerating the formation of biological soil crusts in the newly dried-up lakebeds using the inoculation-based technique. Scince of the Total Environment, 706: 136036.
15. Kumar, D., J. Kvíderová, P. Kaštánek and J. Lukavský. 2017. The green alga Dictyosphaerium chlorelloides biomass and polysaccharides production determined using cultivation in crossed gradients of temperature and light. Engineering in Life Sciences, 17(9): 1030-1038.
16. Lecomte, J., M. St-Arnaud and M. Hijri. 2011. Isolation and identification of soil bacteria growing at the expense of arbuscular mycorrhizal fungi. FEMS Microbiology Letters, 317: 43-51.
17. Liu, J., B. Shi, H. Jiang, H. Huang, G. Wang and T. Kamai. 2011. Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. Engineering Geology, 117: 114-120.
18. McDonald, J.H. 2015. Handbook of biological statistics, 3rd ed. Sparky House Publishing, Baltimore, Maryland, 305 pp.
19. Perera, I., S.R. Subashchandrabose, K. Venkateswarlu, R. Naidu and M. Megharaj. 2018. Consortia of cyanobacteria/microalgae and bacteria in desert soils: an underexplored microbiota. Applied Microbiology and Biotechnology, 102(17): 7351-7363.
20. Ritchie, R.J. 2006. Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents. Photosynthesis Research, 89(1): 27-41.
21. Rossi, F. and R. De Philippis. 2015. Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats. Life, 5: 1218-1238.
22. Sadeghi, S.H.R., H. Kheirfam, M. Homaee, B. Zarei Darki and M. Vafakhah. 2017. Improving runoff behavior resulting from direct inoculation of soil micro-organisms. Soil and Tillage Research, 171: 35-41.
23. Sadeghi, S.H.R., L. Gholami, E. Sharifi, A.V. Khaledi Darvishan and M. Homaee. 2015. Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions. Solid Earth, 6: 1-8.
24. Strauss, S.L., T.A. Day and F. Garcia-Pichel. 2012. Nitrogen cycling in desert biological soil crusts across biogeographic regions in the Southwestern United States. Biogeochemistry, 108: 171-182.
25. Verma, E., S. Chakraborty, B. Tiwari, S. Singh and A.K. Mishra. 2018. Alleviation of NaCl toxicity in the cyanobacterium Synechococcus sp. PCC 7942 by exogenous calcium supplementation. Journal of Applied Phycology, 30: 1465-1482.
26. Visser, S., S. Keesstra, G. Maas and M. De Cleen. 2019. Soil as a basis to create enabling conditions for transitions towards sustainable land management as a key to achieve the SDGs by 2030. Sustainability, 11(23): 6792.
27. Wang, W.B., Y.D. Liu, D.H. Li, C.X. Hua and B.Q. Rao. 2009. Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area. Soil Biology and Biochemistry, 41: 926-929.
28. Williams, A.J., M. Pagliai and G. Stoops. 2018. Physical and biological surface crusts and seals. In Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier, 539-574.

[Downloaded from drnl.sanru.ac.ir on 2026-02-02]

[DOR: 20.1001.1.27174425.1399.1.1.12.1]

Creation and Restoration of Biocrusts in the Degraded Ecosystems by Cyanobacterization Technology

Hossein Kheirfam[1] and Farrokh Asadzadeh[2]

1- Assistant Professor Urmia University (Corresponding author: h.kheirfam@urmia.ac.ir)
2- Associate Professor Urmia University
Received: December 3, 2020 Accepted: December 26, 2020

Abstract

Human-induced land degradation often lead to desertification and then emerging new-born unstable ecosystems, such as dried-up lake and, or wetland beds. Therefore, accelerating the self-restoring time of new-born unstable ecosystems will lead to the achievement of sustainable development goals. Accordingly, this study planned to evaluate the possibility of using cyanobacterial inoculation technology to create biocrusts in the Lake Urmia dried beds, as a new-born and wind erosion-prone ecosystem. To this end, the bulk samples were taken from the Lake Urmia dried beds, and the samples poured into the erosion small-scale trays (with 50, 30, and 10 cm length, width, height). The existing cyanobacteria were selected, purified and proliferated from the soil origin soil, and then they inoculated (1.52 g l^{-1}) on the trays. After 120 days, we measured the important indicators of the biocrust development including chlorophyll concentration, thickness and aggregate stability to assess the extent of biocrust creation. We found that the cyanobacteria inoculation improved the chlorophyll concentration and thickness of the soils by 57 -and 2.89-fold, respectively, as compared to the control. Assessing the scanning electron microscopy images from the soil surface also confirmed the ability of cyanobacteria in increasing the strong bindings between soil particles. By and large, in line with the objectives of soil conservation, our inoculation technique was an effective and rapid way to control land degradation and create biocrusts in the new-born unstable ecosystems.

Keywords: Biological soil crust, Combat desertification, Land degradation, Soil stability

[Downloaded from drnl.sanru.ac.ir on 2026-02-02]

[DOR: 20.1001.1.27174425.1399.1.1.12.1]