پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکتری بر محتوای ماده آلی و نیتروژن بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی

صائمه صادقی‌گجوتی[۱]، حسین خیرفام*[۲]، سعید نجفی[۳]

۱- دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

بوم‌سازگان‌های سالم برای توسعه پایدار بسیار مهم هستند و به‌عنوان پایه و اساس امنیت غذایی و تنوع زیستی بوده و منابع و خدمات ضروری برای بقاء و رفاه را فراهم می‌آورند. ضعف در اجرای طرح توسعه پایدار باعث افزایش بهره‌برداری از منابع و ناپایداری بوم‌سازگان‌ها، به‌ویژه در مدیریت آب و خاک می‌شود. افزون بر این، شیوه‌های ناپایدار منجر به شکل‌گیری مناظر جدید و شکننده شده است. خشکی دائمی یا دوره‌ای (فصلی) تالاب‌ها به‌دلیل مصرف ناپایدار آب، از جمله پیامدهای منفی بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب است که بستر آن‌ها را به منابع تولید گرد و غبار تبدیل می‌کند. به‌رغم تلاش‌های گسترده برای تثبیت و افزایش پایداری بسترها، ماندگاری و عملکرد راهکاری مرسوم برای مهار فرسایش بادی در این بسترها به‌دلیل آبگیری دوره‌ای تالاب‌ها، با چالش مواجه‌شده است. اخیراً، رویکرد تلقیح سیانوباکترها با هدف تثبیت بسترهای حساس به فرسایش مورد توجه قرار گرفته اما کارایی آن تحت شرایط خشکی-آبگیری تالاب‌ها بررسی‌نشده است. افزون‌براین، اندازه‌گیری مستقیم فرسایش بادی ناشی از اقدامات تثبیت بسترها، استفاده از شاخص‌های تعیین‌کننده حساسیت به فرسایش خاک از قبیل محتوای ماده آلی و نیتروژن کل از مؤلفه‌های غنای پوسته زیستی خاک نیز، مرسوم است. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکترهای بومی بر محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک تحت شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری اجرا شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*__مسئول مکاتبات:__ h.kheirfam@urmia.ac.ir

استناد: صادقی‌گجوتی، ص.، خیرفام، ح.، نجفی، س.، ۱۴۰۵. ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکتری بر محتوای ماده آلی و نیتروژن بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۴۴-۲۶.

شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370375.1629

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱، **تاریخ بازنگری**: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸، **تاریخ پذیرش**: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، **تاریخ انتشار**: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ۱، شمارهٔ پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۲۶ تا ۴۴.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان فارس

© نویسندگان

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، تالاب بین‌المللی قوبی باباعلی در استان آذربایجان‌غربی در شمال‌غرب ایران، انتخاب شد. این تالاب ۵۰۰ هکتاری که به کنوانسیون رامسر معروف است. تالاب نامبرده به‌دلیل کاهش بارندگی و استفاده ناپایدار از آب در بالادست، به‌طور فصلی تحت تناوب خشکی و آبگیری است. نمونه‌های حجمی از خاک بستر خشک‌شده تالاب تهیه شد و برای آماده‌سازی درون سینی‌های کوچک فرسایشی انتقال یافتند. هم‌زمان، سیانوباکترهای بومی و مؤثر در حفاظت خاک بستر خشک‌شده تالاب، استخراج، شناسایی، خالص‌سازی و ازدیاد شدند. از سیانوباکترهای به‌دست آمده (*Nostoc sp.* و *Oscillatoria sp.*) چهار غلظت صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تهیه شد. سپس، سیانوباکترهای تهیه‌شده بر اساس تیمارهای تعریف‌شده در چهار تکرار روی سینی‌های آماده‌شده آب-تلقیحی شدند. ژرفای نفوذ مایه تلقیح حداقل یک سانتی‌متر بود. سپس، سینی‌های تیمارشده در دو شرایط خشکی کامل (نشان‌دهنده تالاب خشک‌شده دائمی) به‌مدّت ۱۳۴ روز و خشکی-آبگیری (نشان‌دهنده تالاب فصلی با تجربه تناوب خشکی در فصول گرم سال و آبگیری در فصول بارشی سال) به‌طور ۶۰ روز خشکی، ۶۰ روز غرقابی و ۱۴ روز خشکی (مجموعاً ۱۳۴ روز) قرار گرفتند. در مجموع ۳۲ آزمایش (۱۶ آزمایش در شرایط خشکی کامل و ۱۶ آزمایش در شرایط خشکی-آبگیری) انجام شد. این پژوهش در قالب طرح آزمایشی کامل تصادفی و از تیر تا آبان ماه سال ۱۴۰۱ انجام شد. پس از پایان آزمایش، اندازه‌های ماده آلی و نیتروژن کل خاک به‌ترتیب با استفاده از روش‌های والکلی-بلک و کجلدال اندازه‌گیری شد. در پایان، تحلیل آماری نتایج با استفاده از تجزیه پراکنش یک و دوطرفه و آزمون تی مستقل انجام شد.

نتایج و بحث

یافته‌ها نشان داد که اثرات تیمارهای تلقیح سیانوباکترها (غلظت صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) روی محتوای نیتروژن در هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر، معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود. اثرات تیمارهای تلقیح روی محتوای نیتروژن تحت شرایط خشکی-آبگیری در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر نیز معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود. تأثیرپذیری محتوای ماده آلی خاک از تیمارهای تلقیح در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر و تحت هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) بود. محتوای نیتروژن با تلقیح غلظت‌های متوسط سیانوباکتر (۳ گرم بر مترمربع) و زیاد (۶ گرم بر مترمربع) تحت شرایط خشکی به‌ترتیب ۲۶ و ۳۹٪ و تحت شرایط خشکی-آبگیری به‌ترتیب ۲۸ و ۴۴٪ افزایش یافت. ماده آلی نیز با تلقیح ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تحت شرایط خشکی کامل به‌ترتیب ۶۵ و ۷۲٪ و با تلقیح ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تحت شرایط خشکی-آبگیری به‌ترتیب ۴۹، ۵۴ و ۶۳٪ افزایش یافت. اثرات متقابل شرایط رطوبتی (خشکی کامل و خشکی-آبگیری) و تلقیح سیانوباکترها بر محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک معنی‌دار نبود (در سطح احتمال پنج درصد). عملکرد تلقیح غلظت کم سیانوباکترها (۱/۵ گرم بر مترمربع) در بهبود مؤلفه‌های بررسی‌شده قابل قبول نبود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد اثرات آبگیری طبیعی سالانه تالاب بر بهبود محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک و به‌بیان دیگر بر گسترش پوسته زیستی خاک در بسترهای خشک، مثبت نبود. ازاین‌رو، اجرای اقدامات دیگری مانند تلقیح سیانوباکترها برای بهبود مواد آلی و نیتروژن به‌عنوان مؤلفه‌های پایداری خاک ضروری است. یافته‌ها نشان داد که هنگامی که سیانوباکتری‌ها در شرایط خشکی-آبگیری به خاک تلقیح شدند، هم زنده ماندند و هم رشد کردند و همانند شرایط خشکی کامل، اندازه‌های ماده آلی و نیتروژن را افزایش دادند. در حالی‌که، تلقیح سیانوباکترها برای بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک در برابر عامل‌های فرساینده اثرگذار است، نگرانی‌هایی هم برای اثرات منفی آنها بر تالاب‌ها به‌عنوان یک گونه مهاجم، به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ، وجود دارد که مستلزم بررسی بیشتر است. تلقیح سیانوباکتری‌ها، به‌ویژه با غلظت حداقل ۳ گرم بر مترمربع، روشی سریع و سازگار با محیط زیست برای تثبیت بستر

تالاب‌های خشک، به‌ویژه برای تالاب‌هایی با شرایط آبگیری و خشکی متناوب، است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های تکمیلی در مقیاس صحرایی با شرایط تناوب خشکی و خشکی-آبگیری طبیعی همراه با اندازه‌گیری میدانی فرسایش بادی انجام شود.

واژگان کلیدی

بوم‌سازگان‌های خشک و نیمه‌خشک، پایداری خاک، تلقیح خاک، مدیریت منابع آب و خاک، ویژگی‌های خاک

مقدمه

گسترش و پایداری متوازن مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی امکان دستیابی به توسعه پایدار در راستای اجرای برنامه‌های هفده‌گانه تعریف‌شده سازمان ملل در افق سال ۲۰۳۰ را فراهم می‌آورد (کیسترا و همکاران ۲۰۱۸، ویزر و همکاران ۲۰۱۹). در این راستا، دستیابی به پایداری متوازن در هر سه مؤلفه نامبرده وابسته به خاک پویا و سالم است که در نتیجه منجر به تأمین امنیت غذایی و زیستی در جوامع می‌شود (ویزر و همکاران ۲۰۱۹). به‌رغم برنامه‌ریزی‌ها در مقیاس جهانی برای دستیابی به توسعه پایدار، ضعف در اجرای برنامه‌های هفده‌گانه، منجر به افزایش و حتی تشدید فعالیّت‌ها و بهره‌برداری‌های غیراصولی انسانی به‌ویژه در منابع آب و خاک شده است که اخیراً منجر به پیدایش بوم‌سازگان‌ها و زمین‌ریخت‌های نوپدید و ناپایدار شده است (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). خشکی تالاب‌ها از جمله نمایه‌ها و اثرات بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب است که بسترهای رسوبی و خشک‌شده آن‌ها را به‌عنوان یک بستر فرسایش‌پذیر و منشأ تولید ریزگرد محلی تبدیل کرده است (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰). همگام با تغییرات اقلیمی، اتکای بیش از حد اقتصاد روستایی به بخش کشاورزی، برخوردار نبودن از برنامه راهبردی در مدیریت منابع آب و خاک، نبودن هماهنگی مؤثر در نهادهای تخصصی بهره‌بردار از منابع آب و خاک، تغییرات فزاینده کاربری زمین، گسترش کمّی زمین‌های کشاورزی، تغییر الگوی کشت و مدیریت ناسازگار و غیراصولی منجر به کاهش منابع آب در سطح آبخیزها شده است (حسن‌زاده و همکاران ۲۰۱۲). کاهش ورود آب به آبخیزها به‌دلیل تغییرات اقلیمی از یک سو و افزایش مصرف منابع آب در بالادست به‌ویژه برای اهداف کشاورزی ناسازگار از سوی دیگر، منجر به کاهش حقابه بوم‌شناختی رودها و به‌ویژه تالاب‌ها و دریاچه‌های داخلی در فصول گرم سال شده است که نهایتاً منجر به خشکی آن‌ها در طول یا بخش زیادی از سال می‌شود (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). ورود رسوبات ریزدانه مواد انحلالی ناشی از اقدامات کشاورزی به تالاب‌ها در طول سال‌های گذشته منجر به ایجاد پهنه گسترده‌ای از کفه‌های با دانه‌بندی بسیار ریز رسوبی پس از خشکی تالاب‌ها می‌شود (خیرفام ۲۰۲۲). لایه رسوبی ژرف که حاوی رسوبات ریزدانه و مواد انحلالی است به‌سبب ابعاد ریز و وزن کم، پایداری قابل توجهی ندارد و منجر به کاهش آستانه برداشت رسوبات سطحی به‌وسیلهٔ نیروی باد در فصول خشک سال می‌شود (دانگ و همکاران ۲۰۱۸). بسترهای خشک‌شده تالاب‌ها که بعضاً حاوی ترکیبات مختلفی از نمک‌ها و بقایای کودهای شیمیایی و سموم کشاورزی است، در فصول گرم سال به‌دلیل هم‌زمانی بادهای شدید و فرساینده شرایط برای تشکیل کانون‌های ریزگرد محلی را فراهم می‌آورند (احمدی بیرگانی و همکاران ۲۰۱۸). از سوی دیگر، همسایگی مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی و مرتعی با تالاب‌ها از یک سو و تشدید فرسایش بادی و برداشت و انتقال ریزگردهای خاک و عناصر سمّی از بسترهای خشک‌شده آن‌ها از سوی دیگر منجر به ایجاد تهدیدهای زیستی برای جوامع انسانی، زمین‌های کشاورزی و دیگر گونه‌های گیاهی و

جانوری مناطق پیرامون می‌شود (ایمانی‌فر و محبی ۲۰۰۷). در راستای مهار فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اقدامات پرشمار زیست‌مهندسی مانند نهال‌کاری، بوته‌کاری و ساخت بادشکن انجام‌شده است (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). با این حال، به‌سبب افزایش نزولات جوی و کاهش مصرف آب در فصول سرد سال، ورود جریانات آبی به بسترهای تالاب‌ها دوباره شروع می‌شد که این رخداد منجر به پوشش بسترها به‌وسیلهٔ آب می‌شود. ازاین‌رو، امکان انجام اقدامات زیست‌مهندسی در بسترهای تالاب‌ها به‌دلیل ویرانی آن‌ها وجود ندارد. با این حال، به‌سبب پهنهٔ گستردهٔ بسترهای خشک‌شده تالاب‌ها در فصول خشک سال و نزدیکی این مناطق به زمین‌های کشاورزی و مسکونی، اجرای اقدامات مدیریتی و فنی برای مهار فرسایش بادی و کاهش ریزگردها اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، اخیراً ایجاد پوسته‌های زیستی مقاوم و پویا در بسترهای کاملاً خشک‌شده دریاچه‌ها با رویکرد زیستی تلقیح ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکترها مطرح‌شده است (خیرفام و روحی ۲۰۲۰) که یافته‌ها نیز بیانگر موفقیت این رویکرد است (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰).

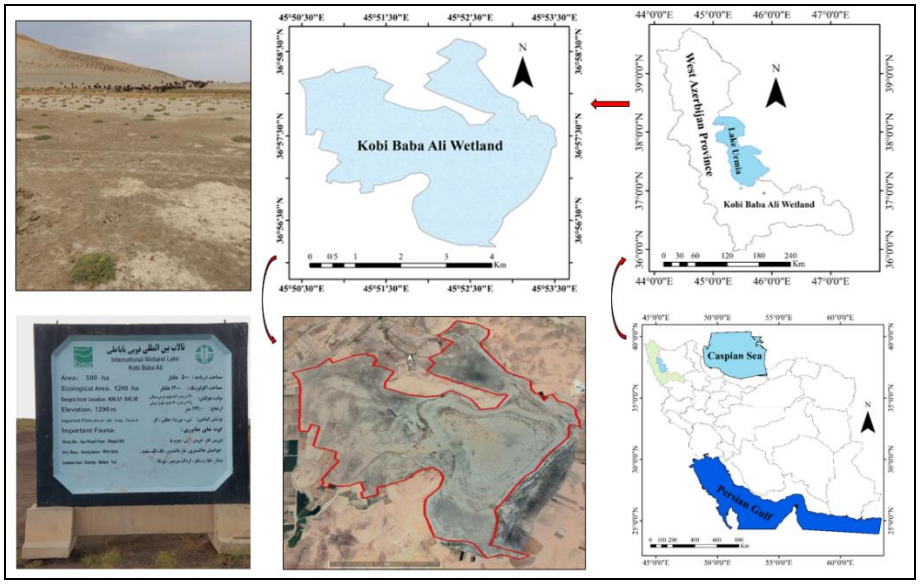
پوسته‌های زیستی خاک غالباً محل تجمع ریزموجودات خاک‌زی است که دامنه گسترش آن‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک گزارش‌شده است (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). ریزموجودات پوسته‌های زیستی غالباً از باکتری‌ها و سیانوباکترها تشکیل شده‌اند. این ریزموجودات با گسترش رشته‌ها و ترشحات پلی‌ساکاریدی خود هم محتوای عناصر غذایی خاک را بهبود می‌دهند و هم با اتصال ذرات خاک سبب افزایش پایداری خاک‌دانه‌های سطحی بسترها در برابر عامل‌های فرساینده به‌ویژه نیروی باد می‌شوند (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). با این حال، به‌دلیل سرعت زیاد نابودی از یک سو و سرعت کم ازیاد ریزموجودات خاک‌زی به‌دلیل شرایط نامساعد محیطی از سوی دیگر، گسترش پوسته‌های زیستی محدود و کند (تا ۵۰ سال) است که در نتیجه اثرگذاری این پوسته‌ها در بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک بسترها در برابر فرسایش، کاهش می‌یابد (بلنپ و همکاران ۲۰۱۴). در این راستا، محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک از مهم‌ترین مؤلفه‌های تعیین‌کننده سلامت و پایداری خاک در برابر عامل‌های نابودگر است (تیلور و همکاران ۲۰۱۰) که به‌عنوان شاخصی برای غنای پوسته زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز استفاده می‌شود (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). ازاین‌رو، تلقیح مستقیم ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکترها به خاک‌های در معرض نابودی یکی از راهکارهای سریع، زیستی و اثرگذار در احیاء و گسترش پوسته‌های زیستی است که کاربرد آن مورد توجه است (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰، خیرفام و روحی ۲۰۲۰، ۲۰۲۲). هرچند، موفقیت و قابلیت فرآیند تلقیح سیانوباکترها به‌عنوان ریزموجودات خودتغذیه و فتوسنتزکننده برای بهبود محتوای ماده آلی و نیتروژن به‌عنوان مؤلفه‌های پایداری خاک و غنای پوسته زیستی با هدف مهار فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأییدشده است؛ با این حال، اثربخشی آن‌ها در شرایط با تناوب خشکی (خشکی تالاب‌ها در فصول گرم) و آبگیری (آبگیری تالاب‌ها در فصول سرد) برای اهداف تلقیح، زیست‌پوسته‌سازی و بهبود مؤلفه‌های ماده آلی و نیتروژن خاک بررسی‌نشده است. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی تلقیح غلظت‌های مختلف زیست‌توده سیانوباکترها برای بهبود ماده آلی و نیتروژن خاک در راستای دستیابی به بسترهای مقاوم به فرسایش در بسترهای خشک‌شده تالاب‌ها با تناوب شرایط خشکی و آبگیری در مقیاس سینی‌های کوچک آزمایشگاهی و در شرایط محیطی مهارنشده، اجرا شد. در این راستا، ارزیابی رویکرد نوین تلقیح سیانوباکترها در بهبود مؤلفه‌های مهم پایداری خاک تالاب‌های خشک‌شده به‌ویژه با تناوب خشکی-آبگیری (به‌بیان دیگر یک بوم‌سازگان ترکیبی خشکی-آبی) تحت شرایط و ویژگی‌های دوگانه و پیچیده و هم‌چنین تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکترها با هدف دستیابی به یک سطح تلقیح بهینه، از جنبه‌های تمایز و نوآوری این پژوهش در

مقایسه با دیگر پژوهش‌ها بود که کم‌تر به آن توجه شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

برای انجام این پژوهش، خاک بسترهای خشک‌شده تالاب بین‌المللی قوبی باباعلی استان آذربایجان غربی در ۳۳ کیلومتری شهر مهاباد برای بررسی، انتخاب شد (شکل ۱). این تالاب با مساحت ۵۰۰ هکتاری در کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده است. در سال‌های گذشته به‌دلیل کاهش بارش‌ها و به‌ویژه بهره‌برداری‌های غیراصولی از منابع، آب ورودی آب آبخیز بالادست به‌شدت کاهش‌یافته است. این تالاب از اواخر خرداد ماه تا اواسط آبان خشک است. ازاین‌رو، بسترهای خشک‌شده آن به‌دلیل همزمانی با تشدید و تعدد بادهای فرساینده در بازه زمانی نامبرده در معرض فرسایش بادی بوده و منشاء برداشت ریزگرد می‌باشد. درصد سیلت، شن و رس خاک منطقهٔ‌مطالعه‌شده به‌ترتیب ۶۲، ۲۸ و ۱۰ ٪ بود که بر پایهٔ طبقه‌بندی USDA، بافت آن سیلتی-لومی بود. این نوع بافت در شرایط تردد و برهم‌خوردگی حساسیت زیادی به فرسایش بادی دارد. به‌دلیل تراکم زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی در پیرامون این تالاب و اثرات سوء ریزگردها در سال‌های گذشته، اجرای راهکارهای مهار و تثبیت بسترهای حساس به فرسایش ضروری است. هرچند در پیرامون بسترهای خشک‌شده تالاب به‌شکل بسیار محدود و پراکنده گونه‌های گیاهی با غالبیت نی (*Phragmites australis*)، علف بوریا (*Agrostis stolonifera*)، جگن (*Carex L.*) و گز (*Tamarix L.*) مشاهده شدند اما نقش به‌سزایی در تثبیت بسترهای خشک‌شده در برابر فرسایش بادی ندارند. ازاین‌رو، بسترهای خشک‌شده تالاب قوبی باباعلی به‌دلیل خشکی و آبگیری متناوب به‌عنوان منطقه پژوهشی انتخاب شد.



شکل ۱- موقعیت تالاب قوبی باباعلی در شمال‌غرب ایران.

Figure 1- Location of the Kobi Baba Ali wetland, northwest of Iran.

روش پژوهش

جداسازی و ازدیاد سیانوباکترها

در این پژوهش، از ژرفای صفر تا دو سانتی‌متری خاک بسترهای خشک‌شده منطقه مطالعه‌شده، با استفاده از لوله‌های پلی‌وینیل‌کلرید به قطر پنج سانتی‌متر برای کشت و استخراج سیانوباکترهای بومی، نمونه‌برداری شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). هم‌چنین، از ژرفای

صفر تا ۱۰ سانتی‌متری سطح خاک نمونه‌های حجمی برای تلقیح تیمارهای پژوهشی برداشت شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). نمونه‌های برداشت‌شده برای استفاده در فرآیند کشت و استخراج سیانوباکترها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی به آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه انتقال یافت و تا شروع آزمایش در دمای چهار درجه سانتیگراد نگهداری شد. سپس، هوا خشک شدند (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). برای جداسازی و شناسایی سیانوباکترها، یک گرم از نمونه خاک مخلوط‌شده از تمام نمونه‌های برداشته‌شده (۲۰ نمونه مرکب) از منطقه به ظرف‌های پتری با ۱۰ تکرار منتقل شد و لامل‌های ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر روی خاک‌ها نصب شد. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر محیط کشت سیانوباکتریایی CHU10 هر هفته یک بار به آن‌ها اضافه شد (خیرفام و همکاران ۲۰۲۰). پس از پایان زمان کشت، سیانوباکترهای رشدکرده روی لامل‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری با قدرت تفکیک زیاد و بر پایهٔ برخی ویژگی‌های مهم ریخت‌شناسی بیان‌شده در راهنمای باکتری‌شناسی Bergey شناسایی شدند (ووس و همکاران ۲۰۱۱). پس از شناسایی در حد جنس، سیانوباکترها بر اساس قابلیت زیاد ترشح پلی‌ساکارید، داشتن ساختار رشته‌ای و بیماری‌زا نبودن جداسازی شدند (ووس و همکاران ۲۰۱۱). پس از شناسایی جنس یا جنس‌های مناسب برای تلقیح (*Nostoc sp.* و *Oscillatoria sp.*)، خالص‌سازی انجام شد. سپس، با بهره‌گیری از محیط کشت مایع CHU10 سیانوباکترها ازدیاد شدند (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). پیوسته سیانوباکترها تا رسیدن به زیست‌توده‌های مد نظر در آزمایش، ازدیاد شدند. مایه تلقیح تا رسیدن به سطح زیست‌توده مطلوب رشد داده شد (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰). برای برآورد زیست‌توده سیانوباکتریها، یک نمونه ۲۰ میلی‌لیتری به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۸۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد تا سیانوباکترها از محیط کشت جدا شوند. سپس، سلول‌های سیانوباکترهای استخراج‌شده برای حذف رطوبت، در فریزدرایر خشک شدند و وزن خشک برای تعیین زیست‌توده اندازه‌گیری شد (انصاری و فاطما ۲۰۱۶). در این پژوهش، از چهار غلظت صفر (شاهد یا بدون تلقیح)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر لیتر (معادل گرم بر مترمربع به‌دلیل تلقیح یک لیتر در مترمربع) از زیست‌توده سیانوباکتریایی به‌عنوان تیمارهای تلقیح استفاده شد (اصغری و همکاران ۲۰۲۲). احتمال اثرات سوء محیط زیستی تلقیح سیانوباکترها از نگرانی‌های رویکرد تلقیح ریزموجودات خاک‌زی است که برخلاف سیانوباکترهای آبزی (جلبک‌های سبز-آبی)، تاکنون گزارشی از اثرات سوء محیط زیستی و بیماری‌زایی سیانوباکترهای خاک‌زی به‌ویژه جنس‌های بررسی‌شده در این پژوهش (*Nostoc sp.* و *Oscillatoria sp.*) مشاهده‌نشده است (صادقی و همکاران، ۲۰۲۰).

آماده‌سازی خاک و سینی‌های آزمایش

در این پژوهش از سینی‌های استاندارد آزمایشی با ابعاد طول، عرض و ژرفای ۵۰ در ۳۰ در ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد (سامر و همکاران ۲۰۱۸). همچنین، از چهار تیمار زیست‌توده با اندازه‌های صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از تلقیح سیانوباکترها و با چهار تکرار در دو گروه تیمارهای گروه خشک و تیمارهای گروه خشکی-آبگیری (مجموعاً ۳۲ آزمایش) استفاده شد. از آنجایی‌که، تلقیح ۱/۵ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در بسیاری از پژوهش‌های پیشین مشابه به‌عنوان کمترین غلظت برای دستیابی به بهبود مؤلفه‌های خاک استفاده‌شده است (صادقی و همکاران ۲۰۲۰)، در این پژوهش نیز کمترین سطح تلقیح، ۱/۵ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در نظر گرفته شد. از سوی دیگر، به‌دلیل اثرگذاری ناچیز حداقل غلظت تلقیح روی برخی مؤلفه‌های پایداری خاک در پژوهش‌های پیشین، در این پژوهش سعی شد تا غلظت‌های متوسط (۳ گرم بر مترمربع) و زیاد (۶ گرم بر مترمربع) از سیانوباکترها نیز با هدف اطمینان از اثرگذاری معنی‌دار و هم‌چنین دستیابی به سطح تلقیح بهینه از نظر اثربخشی و حتی هزینه‌کرد و امکان‌پذیری تولید، ارزیابی شود. در این راستا، در پژوهش‌های داکی (۲۰۱۶) و رونچرو-راموس و همکاران (۲۰۱۹) به‌ترتیب از ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها با هدف بهبود برخی مؤلفه‌های خاک استفاده‌شده است. به‌منظور انجام آزمایش و بر اساس

تیمارهای تعریف‌شده در مقیاس سینی‌های کوچک، ۲۰۰ کیلوگرم خاک از بستر تالاب قوبی باباعلی در حد امکان از نقاط مختلف منطقه و به‌شکل نمونه‌برداری مرکب جمع‌آوری، مخلوط و به آزمایشگاه منتقل شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). به این منظور، ابتدا نمونه‌های خاک هوا خشک شدند و برای حذف بقایای گیاهی و سنگ و سنگ‌ریزه از الک هشت میلی‌متری برای دستیابی به بیشترین تشابه با شرایط طبیعت عبور داده شدند. سپس، خاک آماده‌شده به‌شکل لایه‌ای درون سینی‌ها انتقال یافت. کوبیدگی لازم برای هر لایه به‌وسیلهٔ غلطک دستی انجام شد. در این پژوهش، کوبیدگی لایه‌ها و آماده‌سازی خاک سینی‌ها تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری نمونه خاک دست‌نخورده منطقه مطالعه‌شده انجام شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). زیست‌توده (فاز جامد) سیانوباکترهای ازدیادشده پس از انجام فرآیند سانتریفیوژ (۸۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۵ دقیقه) از فاز مایع (محیط کشت) جداسازی شد و برای فرآیند تلقیح به محیط آب استریل اضافه شد. سپس، مایه تلقیحی با وزن زیست‌توده‌های تعریف‌شده (صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر لیتر) تهیه شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۸). سپس، به اندازهٔ یک لیتر بر مترمربع (۱۵۰ میلی‌لیتر به‌ازای هر سینی) از مایه تلقیح سیانوباکتریایی روی هر یک از سینی‌ها با روش آب-تلقیحی اسپری شد (وانگ و همکاران ۲۰۰۹). از سوی دیگر، به‌منظور ایجاد شرایط یکسان در اجرای آزمایش، فرآیندهای فیزیکی آماده‌سازی سینی‌ها کاملاً مشابه بود و همگام با انتخاب تصادفی برای اعمال تیمارهای مختلف، شرایط محیطی (نور، دما و بلندی) یکسانی نیز برای تیمارهای پژوهشی اعمال شد. سینی‌های آماده‌شده به‌شکل طرح کامل تصادفی و در شرایط محیطی باز قرار گرفتند و صرفاً در شرایط بارش به فضای بسته منتقل شدند. با این حال، بر اساس الگوی زمانی بارشی منطقه و همچنین ایجاد شرایط با دریافت کمترین رطوبت به‌وسیلهٔ سیانوباکترهای تلقیحی، تا حدودی رطوبت‌دهی سطحی به‌شکل مه‌پاش و به اندازهٔ ۵۰ میلی‌لیتر به‌ازای هر سینی فرسایشی در هر بازه زمانی انجام شد (وانگ و همکاران ۲۰۰۹). طول دوره زمانی اجرای آزمایش حدوداً ۴/۵ ماه (۱۳۴ روز) بود. به‌منظور ایجاد شرایط خشکی و خشکی-آبگیری در تیمارهای بررسی‌شده، گروه تیمار خشکی کامل (۱۶ سینی) به‌مدت ۱۳۴ روز در شرایط محیطی باز قرار گرفتند و گروه تیمار خشکی-آبگیری (۱۶ سینی) به‌مدت ۶۰ روز در شرایط محیطی باز و شرایط خشکی قرار گرفتند، ۶۰ روز در شرایط آبگیری و داخل استخرهای آب و به‌شکل کامل غرقاب قرار گرفتند و در پایان ۱۴ روز در شرایط خشکی (به‌منظور بیشترین کاهش رطوبت سینی‌های تیمارهای گروه خشکی-آبگیری) نگهداری شدند. در پایان با اتمام دوره آزمایش، محتوای ماده آلی و نیتروژن به‌عنوان مؤلفه‌های غنای پوسته زیستی و پایداری خاک اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری ماده آلی و نیتروژن خاک

برآورد اندازه ماده آلی خاک تیمارها با اندازه‌گیری کربن آلی با روش والکلی-بلک و اعمال ضریب ون-بملن (۱/۷۲۲) انجام شد (والکلی و بلک ۱۹۳۴). ازاین‌رو، یک گرم از خاک نمونه‌های برداشت‌شده از غلظت‌های صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر هر یک از سینی‌های فرسایشی به ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری انتقال یافت. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر دی‌کرومات پتاسیم یک نرمال به آن افزوده شد و در پایان ۲۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به آن‌ها اضافه شد. این نمونه‌ها سرد شدند و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به‌همراه ۱۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک غلیظ همراه با ۲۰ الی ۳۰ قطره معرف دی‌فنل‌آمین اضافه شد. سپس، نمونه‌ها با فروآمونیوم سولفات ۰/۵ نرمال تا ظهور رنگ قرمز آجری تیتر شدند. هم‌زمان با نمونه‌های خاک، تمام مراحل فوق برای نمونه شاهد (بدون خاک) نیز انجام شد. در پایان بر اساس اندازهٔ مصرف فروآمونیوم سولفات ۰/۵ نرمال و با استفاده از رابطه ۱، محتوای درصد کربن آلی اندازه‌گیری شد. سپس، ماده آلی بر اساس درصد کربن آلی و با استفاده از ضریب ون-بملن برآورد شد.

رابطه (۱) $OC=[V\times(A-B)\times0.003\times100]\div[A\times M]$

OC: کربن آلی (درصد)، V: حجم دی‌کرومات (میلی‌لیتر)، A: حجم فروآمونیوم سولفات مصرفی برای

شاهد (میلی‌لیتر)، B: حجم فروآمونیوم سولفات مصرفی برای نمونه خاک (میلی‌لیتر)، M: وزن خاک خشک (گرم) است.

نیتروژن خاک تیمارهای بررسی‌شده با استفاده از روش کجلدال (کجدال ۱۸۸۳) اندازه‌گیری شد. در این پژوهش و بر اساس روش پیشنهادی، هضم خاک با افزودن دو میلی‌متر آب مقطر و سه میلی‌متر اسیدسولفوریک غلیظ و ۱/۱ گرم قرص کجلدال به لوله‌های آزمایشی انجام شد. سپس، به‌مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد و در دستگاه بلوک هضم به‌مدت یک ساعت در معرض دمای ۲۷۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۳۰ دقیقه نیز در دمای ۳۸۰ درجه سانتیگراد نگهداری شد تا عصاره آن شفاف شود. پس از سرد شدن نمونه‌ها، ۱۲ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد و عصاره‌های رقیق‌شده به بالن‌های تقطیر انتقال یافت. سپس، به نمونه‌ها ۲۰ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۱۰ نرمال اضافه شد. عصاره تولیدشده با ۲۵ میلی‌لیتر محلول اسید بوریک و دو قطره معرف برموکرزول مخلوط و وارد مرحل تقطیر شد. سپس، تمام گاز آمونیاک آن متصاعد و رنگ آن به سبز تغییر یافت. در پایان، مرحله تیتراسیون با افزودن تدریجی اسیدسولفوریک ۰/۱ نرمال تا مشاهده رنگ قرمز پررنگ ادامه یافت. پس از سنجش اندازهٔ اسیدسولفوریک ۰/۱ نرمال مصرف‌شده و با استفاده از رابطه ۲، درصد نیتروژن کل خاک محاسبه شد.

رابطه ۲ $$TN = (A-B)\times N\times(0.014)\times 100)/M_S$$

TN: نیتروژن آلی کل (درصد)، A: حجم اضافه‌شده اسیدسولفوریک به نمونه خاک (میلی‌لیتر)، B: حجم اضافه‌شده اسیدسولفوریک به نمونه شاهد بدون خاک (میلی‌لیتر)، N: نرمالیته اسیدسولفوریک، M_S: وزن خاک خشک (گرم) است.

تحلیل آماری

پس از اندازه‌گیری محتوای ماده آلی و نیتروژن کل در هر یک از تیمارهای پژوهشی، بانک اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار Excel 2016 به‌منظور تجزیه و تحلیل، تشکیل شد. پس از بررسی بهنجار و ناهنجار بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk، در شرایطی که لازم بود داده‌های ناهنجار به داده‌هایی با توزیع هنجار تبدیل شدند. سپس، همگن بودن پراکنش‌ها با استفاده از آزمون Levene انجام شد. پس از بررسی شرط‌های نامبرده، تحلیل اثرات چندجانبه اعمال شرایط خشکی و خشکی-آبگیری با استفاده از آزمون تجزیه پراکنش دو طرفه انجام شد. همچنین، تحلیل اثرات یک‌جانبه غلظت‌های مختلف از تلقیح زیست‌توده سیانوباکترها، با استفاده از آزمون پراکنش یک‌طرفه انجام شد. در پایان، مقایسه متغیرهای بررسی‌شده در هر یک از تیمارها و شرایط خشکی و آبگیری-خشکی با استفاده از آزمون t جفتی مستقل انجام شد. سپس، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی انجام شد. تمام آزمون‌های نامبرده در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 23 انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که اثر شرایط رطوبتی (اعمال شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری) فقط در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر روی محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) بود (جدول ۱). در حالی‌که، اثر تلقیح غلظت‌های مختلفی از سیانوباکترها (صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) اندازه‌های نیتروژن و ماده آلی خاک در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر منجر به تفاوت‌های معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) شد (جدول ۱). هرچند، اثرات متقابل شرایط رطوبتی (خشکی و خشکی-آبگیری) و تلقیح سیانوباکترها روی محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک غیرمعنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) بود (جدول ۱).

اثرات تیمارهای تلقیح (غلظت‌های صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها) روی محتوای نیتروژن در هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری (جدول ۲) در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود. هم‌چنین، تیمارهای تلقیح تحت شرایط خشکی-آبگیری در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر نیز اثرات معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) روی محتوای نیتروژن

داشتند. از طرفی، محتوای ماده آلی خاک در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر و تحت هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری تأثیرپذیری معنی‌داری (در سطح احتمال پنج درصد) از تیمارهای تلقیح (چهار غلظت صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها) داشت (جدول ۲). محتوای نیتروژن خاک تحت شرایط خشکی کامل در تیمارهای تلقیح غلظت صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر به‌ترتیب ۰/۰۰۸±۰/۱۱۱٪، ۰/۰۰۷±۰/۱۲۲٪، ۰/۰۱۰±۰/۱۴۰٪ و ۰/۰۰۵±۰/۱۵۵٪ و در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر به‌ترتیب ۰/۰۰۴±۰/۱۰۴٪، ۰/۰۲۶±۰/۱۱۰٪، ۰/۰۰۸±۰/۱۲۱٪ و ۰/۰۱۰±۰/۱۲۹٪ اندازه‌گیری شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که درصد نیتروژن خاک در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر و تحت شرایط خشکی کامل در تیمار تلقیح غلظت ۳ و ۶ گرم بر مترمربع به‌صورت معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) و به‌ترتیب ۲۶ و ۳۹ ٪ بیش‌تر از تیمار شاهد بوده و غلظت کم (۱/۵ گرم بر مترمربع) از تلقیح سیانوباکترها منجر به افزایش محتوای نیتروژن خاک نشد (شکل ۲). در حالی‌که، در شرایط خشکی کامل و در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر، تلقیح سیانوباکترها با هر سه غلظت ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تأثیر معنی‌داری (در سطح احتمال پنج درصد) بر اندازه‌های نیتروژن کل خاک نداشتند (شکل ۲).

جدول ۱- نتایج تجزیه پراکنش دو طرفه برای برآورد اثر شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری (شرایط رطوبتی) و تلقیح غلظت‌های مختلفی از سیانوباکترها بر محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک.

Table 1-Results of two-way ANOVA to determine the effects of complete dry and dry-dewatering conditions (moisture conditions) and cyanobacterial inoculation concentration levels on treatments soil nitrogen and organic matter.

Variable	Soil depht	Variation sources	df	Mean Square	F-value	Sig.
Total nitrogen (%)	0-1 cm	Moisture conditions	1	0.001	7.526*	0.014
		Inoculation	3	0.003	29.486**	0.0001
		Moisture conditions×inoculation	3	0.00002	0.196ns	0.898
	0-5 cm	Moisture conditions	1	0.001	4.186ns	0.058
		Inoculation	3	0.001	7.175**	0.003
		Moisture conditions×inoculation	3	0.00001	0.055ns	0.982
Organic matter (%)	0-1 cm	Moisture conditions	1	0.302	5.146*	0.037
		Inoculation	3	1.613	27.455**	0.0001
		Moisture conditions×inoculation	3	0.039	0.664ns	0.586
	0-5 cm	Moisture conditions	1	0.355	3.842ns	0.068
		Inoculation	3	1.964	11.562**	0.0001
		Moisture conditions×inoculation	3	0.004	0.450ns	0.987

ns= not significan
*= significantly at p<0.05
**= significantly at p<0.01

ns: بدون معنی داری
*= معنی دار در سطح ۵٪
**=معنی دار در سطح ۱٪

نتایج اندازه‌گیری محتوای نیتروژن خاک در شرایط خشکی-آبگیری نیز نشان داد که اندازه‌های این متغیر در ژرفای‌های صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر برای هر یک از تیمارهای تلقیح (غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) سیانوباکترها به‌ترتیب ۰/۰۱۱±۰/۱۱۷٪، ۰/۰۱۵±۰/۱۳۲٪، ۰/۰۰۷±۰/۱۵۱٪ و ۰/۰۰۵±۰/۱۶۹٪ و ۰/۰۰۵±۰/۱۱۱٪، ۰/۰۰۹±۰/۱۱۹٪، ۰/۰۰۱±۰/۱۳۰٪ و ۰/۰۰۴±۰/۱۴۲٪ بود (شکل ۲). افزون بر این، در شرایط خشکی-غرقابی، محتوای نیتروژن خاک در تیمارهای تلقیح با غلظت ۳ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر به‌ترتیب ۲۸ و ۴۴٪ و در تیمارهای با تلقیح ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر به‌ترتیب ۱۷ و ۲۸٪ (در سطح احتمال یک درصد) در

مقایسه با شاهد (تلقیح با غلظت صفر گرم بر مترمربع) افزایش یافت بود (شکل ۲). در این راستا، اثر غلظت کم تلقیح (۱/۵ بر مترمربع) از سیانوباکترها روی اندازه‌های نیتروژن خاک در هر دو ژرفا، معنی‌دار نبود (در سطح احتمال پنج درصد). اندازه‌های ماده آلی خاک تحت شرایط خشکی کامل در تیمارهای تلقیح با غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر به‌ترتیب ۰/۴۲±۱/۶۳٪، ۱۱/۲۴±۲/۰٪، ۰/۱۷±۲/۶۹٪ و ۰/۰۷±۲/۸۰٪ و ۰/۴۲±۱/۵۵٪، ۱۸۵/۰۷±۲/۰ ٪، ۱۵/۲۴±۲/۰ ٪ و ۰/۱۶±۲/۵۰٪ بود (شکل ۲). نتایج تحلیل نشان داد اثر دو غلظت ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر معنی‌دار بود (در سطح احتمال یک درصد). محتوای ماده آلی در تیمارهای تلقیح با غلظت ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر به‌ترتیب ۶۵ و ۷۲ ٪ در مقایسه با شاهد افزایش یافت (شکل ۲). هم‌چنین، در شرایط خشکی کامل، محتوای ماده آلی در هر سه تیمار تلقیح با غلظت ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر به‌ترتیب ۴۱، ۴۴ و ۶۱ ٪ در مقایسه با شاهد افزایش یافت که این افزایش ها از نظر آماری معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود (شکل ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه پراکنش یک طرفه برای برآورد اختلافات (در سطح احتمال پنج درصد) **اثرات تلقیح سیانوباکترها روی محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک تحت شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری.**

Table 2- Results of one-way ANOVA to determine differences (p<0.05) cyanobacterial inoculation effects on soil nitrogen and organic matter content under completely dry and dry-dewatering conditions.

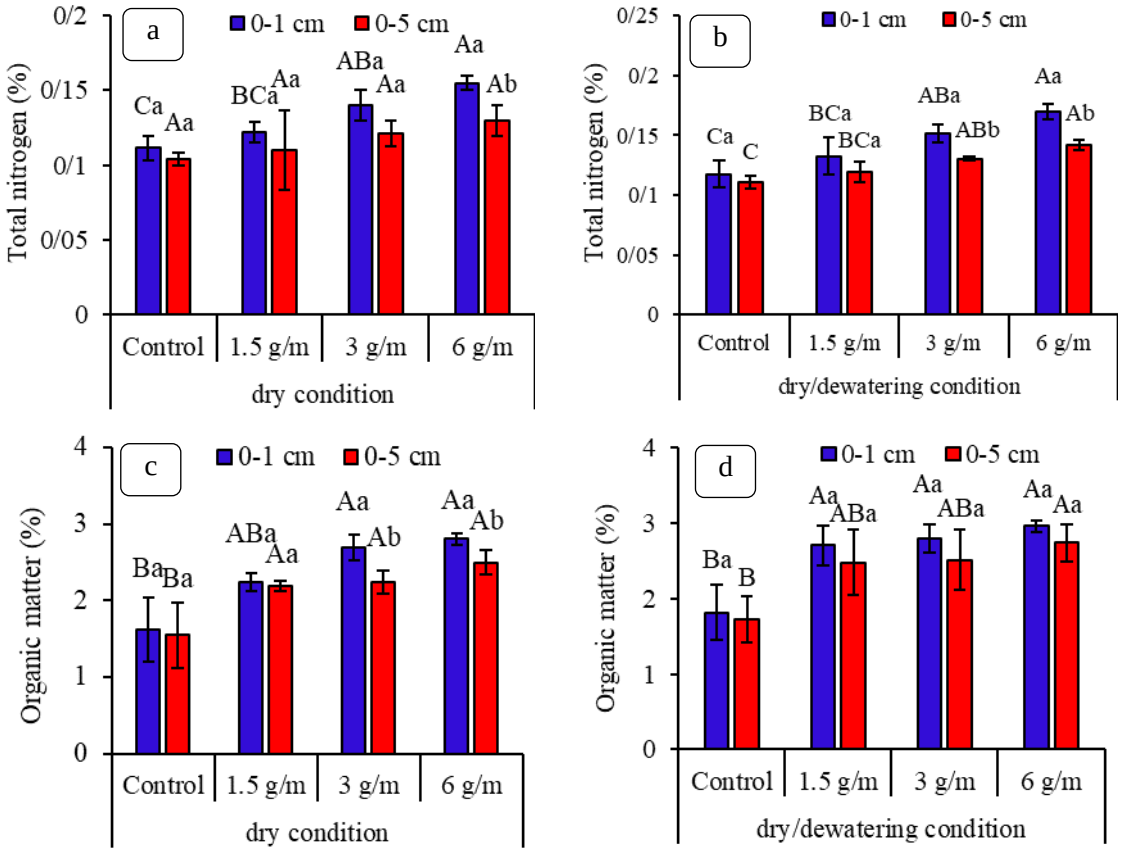
Treatments	Variable	Soil depht	Variation sources	df	Mean Square	F-value	Sig.
Completely dry	Total nitrogen (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.001	18.488**	0.001
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.0001	1.732ns	0.237
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
	Organic matter (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.860	15.34**	0.001
			Within groups	8	0.056		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.468	8.31**	0.008
			Within groups	8	0.059		
			Total	11			
Dry-dewatering	Total nitrogen (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.002	12.968**	0.002
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.001	16.646**	0.001
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
	Organic matter (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.793	12.891**	0.002
			Within groups	8	0.061		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.582	4.613*	0.037
			Within groups	8	0.126		
			Total	11			

ns= not significan
*= significantly at p<0.05
**= significantly at p<0.01

ns: بدون معنی داری
*= معنی دار در سطح ۵ ٪
**=معنی دار در سطح ۱ ٪

در شرایط خشکی-آبگیری، اندازه‌های ماده آلی خاک در تیمارهای تلقیح با غلظت صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر به‌ترتیب ۰/۳۶±۱/۸۱٪، ۰/۲۶±۲/۷۰٪،

۰/۱۸±۲/۸۰٪ و ۰/۰۸±۲/۹۵٪ و در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر به‌ترتیب ۰/۳۱±۱/۷۲٪، ۰/۴۳±۲/۴۸٪، ۰/۴۰±۲/۵۱٪ و ۰/۲۴±۲/۷۳٪ بود (شکل ۲). بررسی نتایج تجزیه پراکنش یک طرفه نشان داد محتوای ماده آلی در شرایط خشکی-آبگیری و در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متری خاک، در هر سه تیمار تلقیح با غلظت ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۴۹، ۵۴ و ۶۳٪ افزایش یافت که از نظر آماری این افزایش‌ها معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود (شکل ۲). از سوی دیگر، در همین شرایط رطوبتی ولی در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر از خاک، فقط غلظت ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها منجر به افزایش معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) محتوای ماده آلی (۵۸ ٪) در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲). نتایج مقایسه اثرات تیمارهای پژوهشی بر متغیرهای نیتروژن و ماده آلی خاک (ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر) در دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری نشان داد که اثرات این تیمارها معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) نبود. در شرایط رطوبتی نیز فقط اثر تیمار شش گرم بر متر مربع از سیانوباکترها بر مقدار نیتروژن خاک معنی‌دار بود (جدول ۳ و شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه میانگین محتوای نیتروژن (الف و ب) و مواد آلی (ج و د) در پاسخ به تیمارهای (صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) تلقیح سیانوباکترها تحت شرایط خشکی کامل (الف و ج) و خشکی-آبگیری (ب و د).

(حروف بزرگ مشابه نشان‌دهنده نبودن اختلاف معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) در میان تیمارهای تلقیح در هر ژرفا و حروف کوچک مشابه نشان‌دهنده نبودن اختلاف معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) میان ژرفا در هر غلظت از تلقیح است).

Figure 2- Comparison of the mean soil nitrogen (a and b) and organic matter (c and d) content in response to cyanobacteria inoculation treatments (0, 1.5, 3, and 6 g m^{-2}) under both completely dry (a and c) and dry-dewatering (b and d) conditions.

(Similar upercase letters indicate no significant difference (p>0.05) among inoculation treatments at each depth and similar lowercase letters indicate no significant difference (p>0.05) between depths at each inoculation level).

در این پژوهش تحلیل نتایج نشان داد که بافت خاک بسترهای خشک‌شده تالاب قوبی باباعلی (منطقه مطالعه‌شده) به‌دلیل سیلتی-لومی بودن (سیلت ۶۲ ٪، شن ۲۸ ٪ و رس ۱۰ ٪) با درصد رس کم و درصد سیلت زیاد، نسبت به فرسایش بادی بسیار حساس هستند. افزون بر این، از یک سو چسبندگی کم میان‌ذره‌ای و از سوی دیگر کم بودن جرم و اندازه ذرات شرایطی فراهم آورده است که این خاک‌ها به فرسایش بادی حساس باشند (نان و همکاران ۲۰۱۸، خیرفام و روحی ۲۰۲۰). در این راستا، آوسیلا و همکاران (۲۰۱۵) نیز حساسیت زیاد خاک‌های با محتوای کم رس در برابر نیروی باد را گزارش کرده‌اند. از یک سو اثرات مثبت محتوای رس (۱۰ تا ۴۰ ٪) سبب بهبود اتصال‌پذیری میان ذرات و پایدارسازی خاک‌دانه‌ها (شوایتزر و همکاران ۲۰۱۹) می‌شود و از سوی دیگر، محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک نیز منجر به افزایش اتصال‌پذیری ذرات خاک به‌یکدیگر، افزایش محتوای رطوبت خاک، تحریک فعالیت و جمعیت میکروبی و پوشش گیاهی و در نتیجه بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک می‌شوند (شوایتزر و همکاران ۲۰۱۹، اویشی و همکاران ۲۰۲۵). با این حال، تحلیل نتایج و اندازه‌های نیتروژن (۰/۱۱۱٪) و ماده آلی (۱/۶۳٪) خاک نشان‌دهنده فقر نسبی محتوای نیتروژن و ماده آلی بسترهای خشک‌شده تالاب مطالعه‌شده بود. در این راستا، خیرفام (۲۰۲۲) و ژائو و همکاران (۲۰۲۵) نیز اثرات منفی کمبود ماده آلی و نیتروژن خاک و افزایش فرسایش‌پذیری خاک در برابر نیروی باد را گزارش کرده‌اند.

جدول ۳- نتایج آزمون t مستقل برای برآورد اختلافات میانگین (در سطح احتمال پنج درصد) محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک در دو شرایط خشکی و خشکی-آبگیری در هر یک از تیمارهای تلقیح سیانوباکترها.

Table 3- Results of an independent samples t-test to determine the mean difference (p<0.05) between the two groups of completely dry and dry-dewatering conditions on soil nitrogen and organic matter content at each cyanobacteria inoculation level separately.

Variable	Inoculation concentration	Treatment		df	t-value	Sig.
		Completely dry	Dry-dewatering			
Total nitrogen (%)	0 (control)	0.111	0.117	4	-0.792^{ns}	0.472
	1.5 g m^{-2}	0.122	0.132	4	-1.036^{ns}	0.359
	3 g m^{-2}	0.140	0.151	4	-1.521^{ns}	0.203
	6 g m^{-2}	0.155	0.169	4	-3.096**	0.003
Organic matter (%)	0 (control)	1.63	1.81	4	-0.570^{ns}	0.599
	1.5 g m^{-2}	2.24	2.70	4	-2.751^{ns}	0.051
	3 g m^{-2}	2.69	3.80	4	-0.718^{ns}	0.512
	6 g m^{-2}	2.80	2.95	4	-2.370^{ns}	0.077

ns= not significan
**= significantly at p<0.01

ns: بدون معنی داری
**=معنی دار در سطح ۱ ٪

ماده آلی خاک به‌عنوان یک ماده چسبنده عمل می‌کند و ذرات خاک را به‌شکل خاکدانه در کنار هم نگه می‌دارد. این خاکدانه‌ها یک ساختار پایدار و متخلخل ایجاد می‌کنند که در برابر فرسایش بادی مقاوم است. ازاین‌رو، با کمبود ماده آلی، ساختار خاک ضعیف شده و آن را بیشتر مستعد به نابودی و فرسایش می‌کند (فن و همکاران ۲۰۲۵). از سوی دیگر، نیتروژن خاک نیز به‌عنوان یک ماده مغذی برای رشد گیاه عمل می‌کند و به‌طور غیرمستقیم سبب تسریع گسترش پوشش گیاهی و افزایش پایداری خاک در برابر عامل‌های فرساینده می‌شود در نتیجه حساسیت خاک به فرسایش کاهش می‌یابد (هان و همکاران ۲۰۲۳). یافته‌های این پژوهش نشان داد که اثر شرایط غرقابی (آبگیری تالاب) روی محتوای نیتروژن کل و ماده آلی معنی‌داری نبود. ازاین‌رو، استفاده از دیگر راهکارهای بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک در بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی ضروری است. در راستای بهبود مؤلفه‌های پایداری

خاک، تحت شرایط خشکی کامل، تلقیح سیانوباکترها با غلظت ۳ و ۶ گرم بر مترمربع به‌ترتیب سبب افزایش ۶۵ ٪ و ۷۲ ٪ ماده آلی و ۲۶ ٪ و ۳۹ ٪ نیتروژن کل خاک در مقایسه با شاهد شدند که نشان‌دهنده اثرگذاری قابل توجه این تیمارها بود.

سیانوباکترها با فرآیندهای پرشماری منجر به افزایش ماده آلی و نیتروژن خاک می‌شوند. از آنجایی که سیانوباکترها موجودات فتوسنتزکننده‌ای هستند تحت تأثیر نور خورشید دی‌اکسید کربن جو را به ترکیبات کربن آلی (مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها) تبدیل می‌کنند. کربن آلی جذب‌شده در فرآیند فتوسنتز به‌وسیلهٔ سیانوباکترهای خاک به ماده آلی در خاک تبدیل می‌شود. هم‌چنین کربن آلی ترسیب‌شده بخشی از زیست‌توده سلولی آن‌ها را تشکیل می‌دهد که پس از تجزیه سلول‌های مرده سیانوباکترها سبب افزایش محتوای ماده آلی خاک می‌شود. (نواز و همکاران ۲۰۲۴). از سوی دیگر، بسیاری از سیانوباکتری‌ها مواد چسبنده و ژلاتینی (مواد پلیمری) خارج سلولی ترشح می‌کنند که سرشار از پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و دیگر ترکیبات آلی است. این پلیمرها هم از سلول‌های سیانوباکترها در برابر عامل‌های محیطی نامساعد محافظت می‌کنند و هم ذرات خاک را به یکدیگر متصل کرده و خاکدانه‌های پایدار تشکیل می‌دهند که نقش به‌سزایی در افزایش محتوای ماده آلی خاک دارند (ماگر و توماس ۲۰۱۱). در این راستا، یافته‌های چامیزو و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که حدود ۲۲ ٪ از کل ترشحات برون‌سلولی سیانوباکترهای خاک‌زی از مواد آلی تشکیل شده است. خیرفام و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که این ترشحات سبب پیوند ذرات خاک به‌یکدیگر، افزایش خاصیت اسفنجی خاک برای جذب رطوبت می‌شود و منبع غذایی برای دیگر ریزموجودات خاک‌زی است. در نتیجه پایداری خاک بهبود می‌یابد. همچنین، سیانوباکترها عمدتاً با تثبیت زیستی (تبدیل نیتروژن جوی به شکل‌های قابل استفاده زیستی مانند آمونیاک یا آمونیوم) نیتروژن خاک را افزایش می‌دهند (نواز و همکاران ۲۰۲۴).

نتایج این پژوهش نشان داد که تلقیح سیانوباکترها با غلظت ۶ گرم بر مترمربع سیانوباکترها تحت شرایط خشکی-آبگیری (تجربه حداقل یک‌بار آبگیری تالاب در فصول بارشی سال)، سبب افزایش نیتروژن کل در مقایسه با تلقیح همان غلظت از سیانوباکترها در شرایط خشکی کامل شد. به‌بیان دیگر، آبگیری تالاب پس از یک دوره خشکی، نقش مؤثری در بهبود عملکرد سیانوباکترهای تلقیح شده در افزایش محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک نداشت. هرچند، فاصله زمانی کم (۱۴ روز) میان اتمام دوره آبگیری و انجام اندازه‌گیری‌ها، می‌تواند از دلایل اثرگذار نبودن آبگیری در عملکرد سیانوباکترها باشد. هم‌چنین اثرگذار نبودن تلقیح غلظت کم (۱/۵ گرم بر مترمربع) در افزایش محتوای ماده آلی و نیتروژن کل نیز ضرورت تلقیح حداقل ۳ گرم بر مترمربع از زیست‌توده سیانوباکترها با هدف بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک را تأیید کرد. از یک سو، توجه به اثرگذاری تلقیح سیانوباکترها بر افزایش مؤلفه‌های پایداری خاک و از سوی دیگر اطمینان از نبودن اثرات سوء و توجیه اقتصادی تلقیح سیانوباکترها نیز ضروری است. در این راستا یافته‌های صادقی و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که سیانوباکترهای تلقیح‌شده به خاک با هدف تعدیل رواناب سطحی ضمن موفقیت در دستیابی به اهداف، واحدهای سیانوباکتریایی در رواناب جمع‌آوری‌شده از سطح خاک تلقیح‌شده مشاهده نشدند. همچنین، صرفه اقتصادی تلقیح سیانوباکترها (۳۵۰ دلار در هر هکتار تلقیح) در مقایسه با برخی افزودنی‌های مرسوم خاک از قبیل زغال زیستی، پلی‌مرهای زیست‌تخریب‌پذیر، مالچ‌های گیاهی و کودهای حیوانی) را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

امروزه خشکی کامل یا دوره‌ای تالاب‌ها ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، ابعاد جدیدی از چالش‌های زیست‌محیطی را ایجاد کرده است که تثبیت بسترهای آن‌ها یکی از اولویت‌های مدیریتی است. در این پژوهش اثربخشی تلقیح زیست‌توده‌های مختلفی از سیانوباکترهای بومی روی بسترهای

خشک‌شده یک تالاب فصلی در شرایط خشکی کامل و تجربه حداقل یک دوره خشکی-آبگیری با هدف بهبود محتوای نیتروژن کل و ماده آلی خاک به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم پایداری خاک بررسی شد. یافته‌ها بیانگر محتوای کم نیتروژن و ماده آلی در بسترها بود. حتی یک‌بار آبگیری تالاب بعد از یک دوره خشکی نیز تأثیری در بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک نداشت. در حالی‌که، تلقیح سیانوباکترها، به‌ویژه با غلظت زیست‌توده متوسط (۳ گرم بر مترمربع) و زیاد (۶ گرم بر متر مربع)، بر افزایش محتوای نیتروژن کل و ماده آلی خاک به‌شکل قابل توجهی اثرگذار بود. قابلیت زنده‌مانی و استقرار مفید سیانوباکترهای تلقیح‌شده در بسترهای تالابی که برای دوره‌ای چندماهه غرقاب می‌شود، از ابهامات رویکرد تلقیح خاک با سیانوباکترها بود که نتایج این پژوهش تأییدکنندهٔ این قابلیت بود. از سوی دیگر، احتمال اثرات سوء بوم‌شناختی و زیست‌محیطی سیانوباکترهای خاک‌زی تلقیح‌شده با زیست‌توده زیاد بر محیط آبی تالاب در دوره‌های آبگیری از نگرانی‌های مطرح‌شده برای این رویکرد بود که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی بیشتر بررسی شوند. هرچند، تاکنون گزارشی از اثرات سوء بوم‌شناختی سیانوباکترهای خاک‌زی، به‌ویژه جنس‌های تلقیح‌شده در این پژوهش، گزارش‌نشده است. یکی دیگر از نگرانی‌ها احتمال تغییر در ترکیب جمعیت ریزموجودات خاک‌زی است که پیشنهاد می‌شود این موضوع در پژوهش‌های آتی برای یک یا چند جنس از سیانوباکترها بعد از تلقیح زیست‌توده بررسی شود.

سپاس‌گزاری

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد انجام شد. نویسندگان این مقاله از تمام حمایت‌های مالی و غیرمالی دانشگاه ارومیه تشکر و قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همهٔ اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: نمونه‌برداری، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ دوم: مفهوم‌سازی، راهنمایی، نمونه‌برداری، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج

نویسندهٔ سوم: راهنمایی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج

فهرست منابع

Avecilla F, Panebianco JE, Buschiazzo DE. 2015. Variable effects of saltation and soil properties on wind erosion of different textured soils. Aeolian Research. 18: 145-53. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.07.005.

Belnap J, Walker BJ, Munson SM, Gill RA. 2014. Controls on sediment production in two US deserts. Aeolian Research. 14: 15-24. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.03.007.

Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, Domingo F. 2012. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. Soil Biology and Biochemistry. 49: 96-105. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.017.

Ahmady-Birgani H, Agahi E, Ahmadi SJ, Erfanian M. 2018. Sediment source fingerprinting of the Lake Urmia sand dunes. Scientific Reports. 8(1): 206.

Ansari S, Fatma T. 2016. Cyanobacterial polyhydroxybutyrate (PHB): screening, optimization and characterization. PloS One, 11(6): e0158168. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158168.

Asghari S, Zeinalzadeh K, Kheirfam H, Azar BH. 2022. The impact of cyanobacteria inoculation on soil hydraulic properties at the lab-scale experiment. Agricultural Water Management. 272: 107865. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107865.

Chamizo S, Mugnai G, Rossi F, Certini G, 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. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00049.

D'Acqui LP. 2016. Use of indigenous cyanobacteria for sustainable improvement of biogeochemical and physical fertility of marginal soils in semiarid tropics. InBioformulations: For sustainable agriculture, New Delhi: Springer India. pp. 213-232. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2779-3_12.

Dang A, Bennett JM, Marchuk A, Biggs A, Raine SR. 2018. Quantifying the aggregation-dispersion boundary condition in terms of saturated hydraulic conductivity reduction and the threshold electrolyte concentration. Agricultural Water Management. 203: 172-178. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.005.

Eimanifar A, Mohebbi F. 2007. Urmia Lake (northwest Iran): A brief review. Saline Systems. 3(1): 5. https://doi.org/10.1186/1746-1448-3-5.

Fan J, Jiang X, He G. 2025. Soil Aggregates and Organic Carbon Transformation in Response to Microplastics Pollution. Water, Air and Soil Pollution. 236(8): 523. https://doi.org/10.1007/s11270-025-08202-9.

Han Y, Zhao W, Ding J, Ferreira CS. 2023. Soil erodibility for water and wind erosion and its relationship to vegetation and soil properties in China's drylands. Science of the Total Environment. 903: 166639. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166639.

Hassanzadeh E, Zarghami M, Hassanzadeh Y. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. Water Resources Management. 26(1): 129-145. https://doi.org/10.1007/s11269-011-9909-8.

Keesstra S, Mol G, De Leeuw J, Okx J, De Cleen M, Visser S. 2018. Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. Land. 7(4): 133. https://doi.org/10.3390/land7040133.

Kheirfam H. 2022. Spatial prioritization of wind-erosion-prone areas in the dried-up beds of Lake Urmia; using field sampling and in-vitro measurement. Catena. 217: 106507. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106507.

Kheirfam H, Asadzadeh F. 2020. Stabilizing sand from dried-up lakebeds against wind erosion by accelerating biological soil crust development. European Journal of Soil Biology. 98: 103189. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103189.

Kheirfam H, Roohi M. 2020. Accelerating the formation of biological soil crusts in the newly dried-up lakebeds using the inoculation-based technique. Science of the Total Environment. 706: 136036. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136036.

Kjeldahl C. 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. Zeitschrift für Analytische Chemie. 22: 366.

Mager DM, Thomas AD. 2011. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes. Journal of Arid Environments. 75(2): 91-97. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.001.

Nan L, Dong Z, Xiao W, Li C, Xiao N, Song S, Xiao F, Du L. 2018. A field investigation of wind erosion in the farming–pastoral ecotone of northern China using a portable wind tunnel: a case study in Yanchi County. Journal of Arid Land. 10(1): 27-38. https://doi.org/10.1007/s40333-017-0073-8.

Nawaz T, Fahad S, Gu L, Saud S, Zhou R. 2024. Cyanobacteria: Role in sustainable biomanufacturing and nitrogen fixation. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. (6): 2132-2155. https://doi.org/10.1002/bbb.2674.

Oishy MN, Shemonty NA, Fatema SI, Mahbub S, Mim EL, Raisa MB, Anik AH. 2025. Unravelling the effects of climate change on the soil-plant-atmosphere interactions: A critical review. Soil and Environmental Health. 13: 100130. https://doi.org/10.1016/j.seh.2025.100130.

Roncero-Ramos B, Román JR, Gómez-Serrano C, Cantón Y, Acién FG. 2019. Production of a biocrust-cyanobacteria strain (*Nostoc commune*) for large-scale restoration of dryland soils. Journal of Applied Phycology. 31(4): 2217-2230. https://doi.org/10.1007/s10811-019-1749-6.

Sadeghi SHR, Kheirfam H, Zarei Darki B. 2020. Controlling runoff generation and soil loss from field experimental plots through inoculating cyanobacteria. Journal of Hydrology. 585: 124814. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124814.

Schweizer SA, Bucka FB, Graf-Rosenfellner M, Kögel-Knabner I. 2019. Soil microaggregate size composition and organic matter distribution as affected by clay content. Geoderma. 355: 113901.https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019113901.

Sommer CG, Lehning M, Fierz C. 2018. Wind tunnel experiments: influence of erosion and deposition on wind-packing of new snow.

Frontiers in Earth Science. 6: 4. https://doi.org/10.3389/feart.2018.00004.

Taylor MD, Kim ND, Hill RB, Chapman R. 2010. A review of soil quality indicators and five key issues after 12 yr soil quality monitoring in the Waikato region. Soil Use and Management. 26(3): 212-224. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00276.x.

Visser S, Keesstra S, Maas G, De Cleen M, Molenaar C. 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. https://doi.org/10.3390/su11236792.

Vos P, Garrity G, Jones D, Krieg NR, Ludwig W, Rainey FA, Schleifer KH, Whitman WB, editors. 2011. Bergey's manual of systematic bacteriology: Volume 3: The Firmicutes. Springer Science and Business Media. 1450 p. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68489-5.

Walkley A, Black IA. 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.

Wang W, Liu Y, Li D, Hu C, Rao B. 2009. Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area. Soil Biology and Biochemistry. 41(5): 926-929. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.001.

Zhao F, Meng Z, Liu Y, Li P, Tang G. 2025. Soil carbon and nitrogen changes due to soil particles redistribution caused by photovoltaic array. Frontiers in Environmental Science. 13: 1552447.https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1552447.

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

Assessment of the Effects of Inoculating Different Concentrations of Cyanobacteria on Organic Matter and Nitrogen Content in the Dried Seasonal Wetlands Bedsof seasonal wetlands

Saemeh Sadeghi Gajouti[1], Hossein Kheirfam[2]*, Saeed Najafi[3]

1- M.Sc., Graduate, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Healthy ecosystems are vital for sustainable development, serving as the foundation for food security and biodiversity while providing essential resources and services for survival and well-being. Weaknesses in implementating sustainable development plans lead to increased exploitation of resources and instability of ecosystems, particularly in water and soil management. Furthermore, unsustainable practices have led to the formation of new and fragile landscapes. Permanent or seasonal dryness of wetlands, due to unsustainable water consumption, is one of the negative consequences of improper exploitation of water resources, turning their beds into sources of dust. Despite extensive efforts to stabilize and enhance the sustainability of beds, the durability and effectiveness of conventional solutions for controlling wind erosion in these beds have faced challenges due to the periodic flooding of wetlands. Recently, the approach of inoculating cyanobacteria aimed at stabilizing erosion-sensitive beds has gained attention; however, its effectiveness under dry-flooding conditions of wetlands has not been examined. Furthermore, direct measurement of wind erosion resulting from bed stabilization efforts, as well as the use of indicators determining soil erosion sensitivity, such as organic matter content and total nitrogen from the components of soil biological richness, is also common. Therefore, this study was conducted to evaluate the effects of inoculating different concentrations of native cyanobacteria on the organic matter content and nitrogen in the soil under conditions of complete dryness and dry-flooding.

Materials and Methods

For this research, the international Kobi Baba Ali Wetland, in West Azerbaijan Province in northwestern Iran was selected. This 500-hectare wetland is known as the Ramsar Convention.

Article Type: Research Article
***Corresponding Authors' E-mail:** h.kheirfam@urmia.ac.ir
Citation: Sadeghi Gajouti, S., Kheirfam, H., Najafi, S. 2026. Assessment of the Effects of Inoculating Different Concentrations of Cyanobacteria on Organic Matter and Nitrogen Content in the Dried Seasonal Wetlands Bedsof seasonal wetlands. Watershed Management Research. 39(1): 26-44.
DOI: 10.22092/wmrj.2025.370375.1629
Received: 12 August 2025, **Received in revised form:** 30 August 2025, **Accepted:** 22 September 2025
Published online: 21 March 2026
Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 26-44.
Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center
©Author(s)

The mentioned wetland is subject to seasonal cycles of dryness and flooding due to decreased rainfall and unsustainable water use upstream. Volume soil samples from the dried bed of the wetland were collected and transferred for preparation into small erosion trays. Simultaneously, native cyanobacteria for soil conservation of the dried-up wetland bed were extracted, identified, purified, and propagated.

From the obtained Cyanobacterial (*Nostoc sp.* and *Oscillatoria sp.*) four concentrations of 0, 1.5, 3, and 6 g m^{-2} were prepared. Then, the prepared cyanobacteria were water-inoculated on prepared trays based on the defined treatments in four replicates. The penetration depth of the inoculation solution was at least one cm. Then, the treated trays were placed under two conditions: completely dry (representing a permanently dried wetland) for 134 days, and dry-dewatering (representing a seasonal wetland experiencing cycles of dryness in the warm seasons and flooding during the rainy seasons) with a total of 60 days of dryness, 60 days of flooding, and 14 days of dryness (a total of 134 days). A total of 32 experiments were conducted (16 experiments under complete dryness conditions and 16 experiments under dry-flooding conditions). The study was conducted in the from of a completely randomized experimental design from July to November 2022. After the completion of the experiments, the measurements of organic matter and total nitrogen in the soil were determined using the Walkley-Black and Kjeldahl methods, respectively. Finally, statistical analysis of the results was conducted using one-way and two-way analysis of variance and independent t-tests.

Results and Discussion

The findings showed that the effects of cyanobacteria inoculation treatments (concentrations of 0, 1.5, 3, and 6 g m^{-2}) on nitrogen content at depths of 0 to 1 cm were significant (at the 1% probability level) under both complete dryness and dry-flooding conditions. The effects of the inoculation treatments on nitrogen content under dry-flooding conditions at depths of 0 to 5 cm were also significant (at the 1% probability level). The effect of inoculation treatments on soil organic matter content was significant (at the 5% probability level) at both depths of 0 to 1 and 0 to 5 cm and under both complete drought and drought-waterlogging conditions. Nitrogen content increased by 26% and 39% under complete dryness conditions with the inoculation of medium (3 g m^{-2}) and high (6 g m^{-2}) concentrations of cyanobacteria, and by 28% and 44% under dry-flooding conditions, respectively. Organic matter also increased by 65% and 72% under complete dryness conditions with the inoculation of 3 and 6 g m^{-2}, and by 49%, 54%, and 63% with the inoculation of 1.5, 3, and 6 g m^{-2} under dry-flooding conditions, respectively. The interaction effects of moisture conditions (dry vs. dry-dewatering) and cyanobacterial inoculation on soil nitrogen and organic matter content were not insignificant (at the 5% probability level). The performance of inoculating low concentrations of cyanobacteria (1.5 g m^{-2}) in improving the examined components was not acceptable.

Conclusion and Suggestions

The results of this study indicated that the effects of the annual natural flooding of the wetland on improving soil organic matter and nitrogen content, and in other words, on the expansion of the soil biological crust in dry beds, were not positive. Therefore, the implementation of other measures, such as the inoculation of cyanobacteria, is essential for improving organic matter and nitrogen as components of soil sustainability. The findings showed that when cyanobacteria were inoculated into the soil under dry-flooding conditions, they both survived and grew, similar to complete dryness conditions, increasing the measurements of organic matter and nitrogen. While the inoculation of cyanobacteria is effective in improving soil sustainability components against erosive factors, there are also concerns about their negative effects on wetlands as an invasive species, especially on a large scale, which requires further investigation. The inoculation of cyanobacterial, especially at a concentration of at least of 3 g m^{-2} is a rapid and environmentally friendly method for stabilizing the substrates of dried wetlands, particularly for wetlands with alternating flooding and dryness conditions. It is recommended that complementary studies be conducted on a desert scale with conditions of alternating dryness and natural dry-flooding, along with field measurements of wind erosion.

Keywords: Arid and semi-arid ecosystems, soil and water resource management, soil inoculation, soil properties, soil stability

Article Type: Research Article

Acknowledgement
This research was conducted as part of a master's thesis. The authors of this article would like to thank and express their gratitude for all the financial and non-financial support from Urmia University.

Conflicts of interest
The authors of this article declare that there are no conflicts of interest regarding the writing and publication of the content and results of this research.

Data Availability Statement
All information and results are presented in the text of the article.

Authors' Contribution
Author 1: Sampling, laboratory measurements, software/statistical analyses, writing - original draft of the article
Author 2: Conceptualization, supervising, sampling, laboratory measurements, software/statistical analyses, manuscript editing, and checking the results
Author 3: Supervising, software/statistical analyses, manuscript editing, and checking the results