

امکان‌سنجی تثبیت ماسه‌های روان حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه ارومیه با استفاده از تلقیح و تحریک سیانوباکترهای خاک‌زی بومی

حسین خیرفام^{۱*} و فرخ اسدزاده^{۲،۳}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۰)

چکیده

اخیراً ایجاد پوسته‌های زیستی خاک با تلقیح سطحی ریزموجودات برای تثبیت ماسه‌های روان، مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی تثبیت بسترهای ماسه‌های دریاچه‌های خشک‌شده با هدف تقلیل اثرات سوء محیط‌زیستی ضروری است. هدف از این پژوهش امکان‌سنجی تثبیت ماسه‌های روان بسترهای خشک‌شده دریاچه‌ی ارومیه از طریق تلقیح و تحریک سیانوباکترهای خاک‌زی در شرایط آزمایشگاهی بود. بدین منظور، نمونه‌های حجمی از بستر منطقه جبل‌کندی ارومیه به‌عنوان کانون ماسه‌های روان تهیه گردیدند و پس از انتقال به داخل سینی‌های فرسایش، آماده‌سازی شدند. سپس سیانوباکترهای مؤثر در تثبیت خاک، استخراج، شناسایی، خالص‌سازی و تکثیر شدند. هم‌چنین ماده محرک غذایی سیانوباکتریایی با نام تجاری CHU10 از طریق انحلال عناصر غذایی مختلف در آب استریل شده آماده شد. در نهایت با افزودن یک لیتر در مترمربع از محلول سیانوباکتریایی، CHU10 و آب استریل شده به ترتیب سه تیمار تلقیح سیانوباکترها، تحریک سیانوباکترها و شاهد با سه تکرار برنامه‌ریزی شد. پس از ۱۲۰ روز، اقدام به شبیه‌سازی باد با سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه روی سینی‌ها شد. شدت انتقال ماسه‌ها از روی سینی‌ها توسط باد در تیمارهای شاهد، تحریک سیانوباکترها و تلقیح سیانوباکترها به ترتیب ۱/۵۸، ۱/۳۵ و ۰/۰۵ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه بود. تحلیل یافته‌ها نشان داد که هر دو راه‌کار تحریک و تلقیح سیانوباکترها منجر به کاهش معنی‌دار ($p < 0/01$) و به ترتیب ۱۴ و ۹۶ درصدی انتقال ماسه‌ها نسبت به تیمار شاهد شدند. با این حال، اثرگذاری تلقیح سیانوباکترها نسبت به تیمار تحریک سیانوباکترها بسیار بیش‌تر بود. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خاک نیز قابلیت سیانوباکترها در ایجاد اتصال قوی بین ذرات خاک را تأیید کرد. علاوه بر این، تلقیح سیانوباکترها منجر به بهبود محتوای ماده آلی (۱۶۲ درصد) و پایداری خاک‌دانه‌ها (۱۰۶ درصد) به‌عنوان شاخص‌های مهم پایداری خاک شد. در نهایت به‌منظور دستیابی به راه‌کار مؤثر برای تثبیت بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه انجام پژوهش‌های تکمیلی در شرایط طبیعی ضروری است.

واژه‌های کلیدی: افزودنی‌های خاک، پوسته‌ی زیستی خاک، تثبیت خاک، تلقیح میکروبی، فرسایش بادی

خیرفام ح، اسدزاده ف. ۱۳۹۹. امکان‌سنجی تثبیت ماسه‌های روان حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه ارومیه با استفاده از تلقیح و تحریک سیانوباکترهای خاک‌زی بومی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۱. صفحه: ۳۱-۴۳.

- ۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران
- ۲- استادیار گروه علوم محیط زیست، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ایران
- ۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران
- ۴- دانشیار گروه فرآوری رسوبات، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ایران

* پست الکترونیک: h.kheirfam@urmia.ac.ir

مقدمه

و غبار از کانون‌های حساس به فرسایش حاشیه‌های دریاچه ارومیه و حفاظت از بوم‌سازگان‌های تحت تنش‌های ناشی از حرکت ماسه‌های روان ضروری می‌باشد. لذا در کنار اقدامات مرسوم از قبیل نهال کاری، بوته‌کاری و احداث بادشکن، ارائه و آزمون راه‌کارهای بوم‌سازگان محور، اقتصادی و پایدار اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. علاوه بر این، راه‌کارهای مرسوم دارای محدودیت‌هایی از قبیل صرف هزینه و زمان زیاد، درصد زنده‌مانی پایین در زمان‌های اولیه کاشت و ماندگاری پوشش گیاهی به سبب تنش‌های محیطی شدید، عدم پوشش تمام سطوح کانون‌های ماسه‌های روان نیز می‌باشند. تثبیت ماسه‌ها و خاک‌دانه‌های سطح از طریق کاربرد خاک‌پوش‌ها و افزودنی‌های زیستی و غیرزیستی از جمله اقدامات حفاظتی در دستیابی به افزایش آستانه‌ی برداشت خاک و ذرات نمک می‌باشد (Aller et al., 2017; Kheirfam et al., 2018; Sadeghi et al., 2017b). روند توجه پژوهش‌گران در استفاده از رویکردهای بوم‌سازگان-محور و زیستی در حفاظت از منابع خاک امروزه منجر به پیدایش رویکرد بهره‌گیری از قابلیت جامعه میکروبی خاک در حفظ و احیاء پایدار بوم‌سازگان‌ها شده است. به‌گونه‌ای که اخیراً امکان بهره‌گیری از قابلیت ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکترها به‌عنوان مهندسان بوم‌سازگان (Bowker et al., 2005) در حفاظت خاک و تثبیت ذرات ریز خاک به‌ویژه به‌صورت تلقیح گسترده سطحی مورد توجه قرار گرفته و نقش مثبت آن‌ها در این خصوص تأیید شده است (Kheirfam et al., 2017b). بر اساس یافته‌های پژوهش‌های مذکور، قابلیت سیانوباکترها و حتی سایر ریزموجودات موجود در پوسته‌های غنی زیستی خاک یا احیاء شده در اتصال و پیوستگی ذرات ریز خاک و تشکیل ریزساختار¹ و یا ریز-شبکه و در نهایت تشکیل بزرگ-ساختار² یا شبکه‌های-تار عنکبوتی از طریق ترشحات مواد چسبنده پلی‌ساکاریدی و تمایل به توسعه و رشد گسترده سطحی تأیید شده است. با این حال، جمعیت و در نتیجه اثرگذاری سیانوباکترها در مناطق تازه خشک‌شده دریاچه‌ها و هم‌چنین بسترهای ماسه‌ای بسیار پایین می‌باشد. اصولاً پوسته‌های زیستی خاک و محل تجمع متراکم ریزموجودات خاک‌زی در مناطق خشک و

تأمین نیازها و بهبود معیشت جوامع انسانی هم‌زمان با حفظ و تضمین سلامت پایدار بوم‌سازگان‌ها از چالش‌های جدی جهانی در راستای دستیابی به توسعه‌ی پایدار می‌باشد (Sadeghi et al., 2009). در این بین، افت کمی و کیفی منابع آب ناشی از بهره‌برداری غیراصولی از منابع طبیعی به تهدیدی اساسی برای امنیت محیط زیست و جوامع تبدیل شده است (Bowker et al., 2008). از مهم‌ترین نمایه‌های ناپایداری و تهدید سلامتی بوم‌سازگان‌ها در ایران، بحران خشک شدن دریاچه‌ی ارومیه می‌باشد. امروزه خشکی بیش از ۶۰ درصدی دریاچه‌ی ارومیه باعث بروز تبعات محیط‌زیستی و انسانی گسترده‌ای شده که بر اساس پیش‌بینی‌ها سایر اثرات سوء شدید آن نیز در طولانی‌مدت نمود بیش‌تری خواهد داشت (Hassanzadeh et al., 2012). از جمله پیامدهای خشکی دریاچه ارومیه نمایان شدن بسترهای حاشیه‌ای دریاچه ارومیه بوده است که متشکل از رسوبات ریز و ماسه‌ای ته‌نشین شده رودخانه‌ای و نمک‌های چسبیده به آن‌ها در طی قرن‌ها می‌باشد. در برخی از مناطق حاشیه‌های خشک شده دریاچه ارومیه پهنه‌هایی از ماسه‌های روان وجود دارد که در فصول خشک به‌دلیل کمبود رطوبت و پایداری بسیار ضعیف به‌عنوان مناطق با پتانسیل ماسه‌های روان شناخته می‌شوند (Asadzadeh et al., 2017).

در کنار حساسیت بالای بسترهای ماسه‌ای حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه ارومیه، فراوانی بادهای شدید و فرساینده شمال غرب کشور در فصول خشک شرایط برای جدایش، برداشت و انتقال ذرات ماسه و نمک‌ها متصل به آن‌ها به مناطق کشاورزی، مسکونی و صنعتی حاشیه دریاچه را تشدید کرده است (Ahmady-Birgani, 2018; Hamzhepour & Bogaert, 2019). پدیده فرسایش بادی و برداشت و انتقال ماسه‌های روان و حامل نمک بی‌شک تهدیدی جدی برای جوامع انسانی، بوم‌سازگان‌های کشاورزی، منابع طبیعی و گونه‌های گیاهی و جانوری مناطق پیرامونی است که پیش‌بینی می‌شود در آینده شدت بیش‌تری نیز بگیرد (Nikseresht et al., 2019). بر این اساس، مدیریت و مهار چالش انتقال ذرات نمک، گرد

2. Macro-structure

1. Micro-structure

هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی تثبیت‌پذیری ماسه‌های روان حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه‌ی ارومیه از طریق تلقیح سیانوباکترهای بومی و بردبار به سوری و تحریک آن‌ها با افزودن محرک غذایی سیانوباکترهای بانک خاک در مقیاس سینی‌های فرسایشی کوچک آزمایشگاهی و با شبیه‌سازی باد با تونل بادی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی سیانوباکترهای تلقیحی و محرک غذایی
برای انجام پژوهش حاضر محدوده‌ای ۱۰۰ هکتاری از بسترهای ماسه‌ای خشک‌شده منطقه جبل‌کندی ارومیه واقع در بخش غربی دریاچه ارومیه (۳۷ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی) و ۲۰ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه و ۱۶ ثانیه شرقی) به‌عنوان منطقه نمونه‌برداری و برداشت خاک مدنظر قرار گرفت (شکل ۱). نمونه‌برداری مطابق با روش پیشنهادی چامیزو و همکاران (Chamizo et al., 2012) به‌صورت تصادفی از خاک ماسه‌ای منطقه جبل‌کندی ارومیه واقع در بخش غربی دریاچه ارومیه از عمق صفر تا دو سانتی‌متری از سطح به‌منظور کشت، استخراج، شناسایی، خالص‌سازی و تکثیر سیانوباکترهای خاک انجام شد. نمونه‌های برداشت شده در کیسه‌های پلی‌اتیلن استریل گردید، به آزمایشگاه گروه علوم محیط زیست پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه منتقل شد و تا قبل از انجام آزمایش‌ها در دمای چهار درجه سلسیوس نگهداری شد. برخی ویژگی‌های خاک برداشت شده در جدول ۱ ارائه شده است. به‌منظور جداسازی و شناسایی سیانوباکترها، یک گرم از نمونه خاک مخلوط شده از تمام نمونه‌های برداشته شده از منطقه به ظرف‌های پتری با سه تکرار منتقل و محیط کشت Bold Basal و BG11 به‌میزان پنج میلی‌لیتر و هر سه روز یک بار به آن‌ها اضافه شد (Kheirfam et al., 2017a). هم‌چنین به‌منظور پایش و شناسایی سیانوباکترها، لامل‌های ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر نیز در داخل ظرف‌های پتری تعبیه گردید و در بازه زمانی ۳۰ روزه و به‌صورت روزانه با استفاده از میکروسکوپ‌های با قدرت تفکیک بالا و بر اساس ویژگی‌های ریخت‌شناسی ذکر شده در راهنماهای باکتری‌شناسی Bergey شناسایی شدند (Buchanan & Gibbons, 1974; Garrity et al., 2001). برای انتخاب سیانوباکترهای مناسب برای تثبیت ماسه‌های روان، ویژگی‌های مختلف از قبیل توان

نیمه‌خشک در طی سالیان بسیار طولانی و آن‌هم بعد از پایداری بوم‌سازگان‌ها ظاهر شده و اثرگذار خواهند شد. در حالی که، بسترهای تازه خشک‌شده دریاچه‌ها از قبیل دریاچه ارومیه به‌عنوان بوم‌سازگانی بسیار نوپا، حساس و ناپایدار شناخته می‌شوند (He et al., 2019). از طرفی، سیانوباکترها فتوسنتزکننده بوده و در طی فرآیند فتوسنتز، کربن را به خاک اضافه و یا از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی خود مواد مغذی محیط خاک را افزایش می‌دهند که در نهایت منجر به ایجاد منابع غذایی برای توسعه سایر ریزموجودات از قبیل باکتری‌ها می‌شوند (Kheirfam, 2020). از این‌رو، تا زمانی که جمعیت این ریزموجودات در خاک بسیار کم باشد، افزایش مواد غذایی در خاک معنی‌دار نبوده و اثرگذاری آن‌چنانی ندارند و یا نهایتاً چندین دهه و یا قرن طول خواهد کشید (Belnap et al., 2014). در این راستا، پژوهش‌های متعددی در مقیاس جهانی با هدف بهره‌مندی از فرآیند احیای پوسته‌های زیستی از طریق تلقیح ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکتر برای تثبیت تپه‌های ماسه‌ای (Wang et al., 2009)، تعدیل رفتار هیدرولوژیکی آب در بسترهای ماسه‌ای مناطق بیابانی (Colica et al., 2014)، بهبود کیفیت خاک و مقابله با بیابان‌زایی (Rossi et al., 2017)، احیای پوشش گیاهی در بیابان‌ها (Perera et al., 2018) و ترسیب کربن و تثبیت نیتروژن در مناطق بیابانی و خشک (Muñoz-Rojas et al., 2018; Kheirfam, 2020) شروع شده است. یافته‌های پژوهش‌های یاد شده امکان بهبود وضعیت اکولوژیکی و تثبیت‌پذیری بسترهای حساس به فرسایش بادی مناطق بیابانی و خشک را تأیید کرده‌اند.

به‌سبب اهمیت موضوع و ضرورت تثبیت و افزایش آستانه برداشت ماسه‌های روان حاشیه‌های دریاچه ارومیه توسط باد، افزایش مصنوعی و غنی‌سازی جمعیت میکروبی پوسته‌های زیستی حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه از طریق تلقیح مستقیم و یا تحریک سیانوباکترها به‌عنوان راه‌کاری نوین، زیستی، اجراپذیر، با صرفه‌ی اقتصادی و در عین حال اثربخشی زیاد در کوتاه‌مدت می‌تواند راه‌کاری مناسب در تثبیت ذرات نمک و گرد و غبار سطوح خشک‌شده دریاچه‌ی ارومیه باشد؛ راه‌کاری که قبل از اجرا در مقیاس کلان باید در مقیاس خرد و در شرایط آزمایشگاهی امکان‌سنجی و ارزیابی شود.

میلی‌لیتری از BG11 منتقل (Garbeva *et al.*, 2011) و مرتباً تا رسیدن به زی‌توده ۱/۵ گرم بر لیتر (Vieira & Nahas, 2005) و قابلیت انتقال به سینی‌ها اندازه‌گیری شدند. برای تخمین زی‌توده سیانوباکترها، نمونه ۵۰ میلی‌لیتری از محلول سیانوباکترها با استفاده از فرآیند سانتریفیوژ و ۸۰۰۰ دور به مدت ۱۵ دقیقه از فاز مایع جداسازی شده و پس از تخلیه رطوبت آن با استفاده از فریزدرایر اقدام به توزین آن‌ها شدند (Ansari & Fatma, 2016).

هم‌چنین به منظور تهیه ماده محرک غذایی سیانوباکتریای از محیط کشت CHU10 با ترکیب ۰/۲۳۲ گرم کلسیم نترات، تتراهیدرات، ۰/۰۱ گرم دی‌پتاسیم فسفات، ۰/۰۲۵ گرم منیزیم سولفات هپتاهیدرات، ۰/۰۲ گرم سدیم کربنات، ۰/۰۴۴ گرم سدیم متاسیلیکات پنتاهیدرات، ۰/۰۳۵ گرم سیترات آهن و ۰/۰۳۵ گرم اسید سیتریک در یک لیتر آب مقطر (Andersen, 2005) به دلیل قابلیت تولید در حجم زیاد با هزینه کم (۴۰ هزار ریال بر اساس آخرین قیمت استعلام شده برای خرید عناصر غذایی مورد استفاده در تولید یک لیتر از CHU10 در سال ۱۳۹۸) و هم‌چنین محرک سریع سیانوباکترها استفاده شد (Andersen, 2005).

زنده‌مانی، تکثیر و فعالیت در شرایط دمایی، pH، شوری، رطوبتی و خاکی مختلف، توان ترشح مواد چسبنده پلی‌ساکارییدی، رشد شبکه‌ای، تشکیل ساختارهای ریز و بزرگ، تبدیل مواد غذایی به حالت‌های قابل استفاده برای سایر ریزموجودات، رشد، فعالیت و تکثیر سریع، گستره حضور زیاد در مناطق مختلف، استخراج و تکثیر آسان در شرایط آزمایشگاهی و هم‌چنین عدم بیماری‌زا بودن برای انسان و سایر موجودات نیز برای تمام باکتری‌ها و سیانوباکترهای شناسایی شده مورد بررسی قرار گرفت (Kheirfam *et al.*, 2017a). هرچند به سبب فقر مواد غذایی در بسترهای ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه، صرفاً دو جنس سیانوباکتر (*Oscillatoria sp.* و *Nostoc sp.*) در منطقه شناسایی شدند. هر دو جنس سیانوباکتر استخراج و شناسایی شده به سبب هم‌خوانی با معیارهای ذکر شده، در طی چندین مرحله با استفاده از لامل‌های شیشه‌ای و سوزن‌های نوک باریک میکروبیولوژی به محیط کشت مایع BG11 منتقل و خالص‌سازی شدند (Kheirfam *et al.*, 2017a). در نهایت به منظور تلقیح سیانوباکترهای انتخاب شده در سطح سینی‌های فرسایشی، اقدام به تکثیر آن‌ها در حجم و تعداد زیاد شد. بدین منظور سیانوباکترها به وسیله لوپ‌های میکروبیولوژی به ترتیب سری به محیط‌های مایع ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Table 1. Description of the soil properties of the study region

Property	Description	Property	Description
Sand (%)	86	Organic N (g kg ⁻¹)	0.08
Silt (%)	7	Mean weight diameter (mm)	0.39
Clay (%)	7	Geometric mean diameter (mm)	0.067
Texture	Sandy	pH	8.5
Bulk density (g cm ⁻³)	1.67	EC (dS m ⁻¹)	1.45
Organic C (g kg ⁻¹)	0.075		

پژوهش حاضر نیز مطابق با استاندارد بادساز مورد استفاده انتخاب انتخاب شدند. به منظور انجام آزمایش بر اساس تیمارهای تعریف شده در مقیاس سینی‌های کوچک فرسایشی، به میزان ۳۰۰ کیلوگرم ماسه از تپه‌ها و بسترهای ماسه‌ای-نمکی منطقه جبل‌کندی در حد امکان از نقاط مختلف منطقه جمع‌آوری، مخلوط و به آزمایشگاه منتقل شد. به همین منظور، ابتدا نمونه‌های خاک هواخشک و برای حذف بقایای گیاهی و سنگ و سنگ‌ریزه از الک هشت میلی‌متری برای حداکثر تشابه با

آماده‌سازی سینی‌های آزمایش

در این پژوهش از سینی‌های استاندارد فرسایشی (با ابعاد طول، عرض و عمق ۵۰ در ۳۰ در ۱۰ سانتی‌متر) مستقر در آزمایشگاه گروه علوم محیط زیست پژوهش‌شده مطالعات دریاچه ارومیه با حداکثر تشابه با شرایط طبیعی و به تعداد نه عدد استفاده شد. ابعاد سینی‌های فرسایشی مورد استفاده در شبیه‌سازی فرآیند فرسایش بادی وابسته به ابعاد محل قرارگیری سینی‌ها در تونل شبیه‌ساز باد بوده و لذا ابعاد سینی‌های آزمایش در

در انتهای بازه زمانی چهارماهه می‌شود (Kheirfam *et al.*, 2019). بر همین اساس، بر اساس الگوی زمانی بارشی منطقه و همچنین ایجاد شرایط حداقلی دریافت رطوبت توسط سیانو باکترهای تلقیحی اقدام به رطوبت‌دهی سطحی و به‌صورت مه‌پاش (اسپری) و به‌مقدار ۳۰ میلی‌لیتر به‌ازای هر سینی فرسایشی شد. از طرفی، به‌منظور ایجاد شرایط کاملاً یکسان، همان مقدار رطوبت‌دهی نیز روی تیمارهای شاهد و محرک غذایی CHU10 نیز شد. همچنین به‌منظور فراهم‌سازی حداکثر اثرگذاری سیانوباکترهای تلقیح شده، بازه زمانی ۱۲۰ روزه بین زمان اعمال تیمارها تا اجرای آزمایش شبیه‌سازی باد مدنظر قرار گرفت.

شبیه‌سازی باد

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند فرسایش بادی و انتقال ذرات ماسه، از دستگاه شبیه‌ساز (تونل) باد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه استفاده شد. دستگاه مذکور از نوع تونل‌های باد با مدار باز است. در این تونل هوا از بیرون به داخل تونل جریان دارد. ابعاد (طول در عرض) محفظه آزمایش در این تونل برابر با ۴۰ در ۳۰ سانتی‌متر بوده و دارای مجرای مخروطی شکل به طول ۱۷۵ سانتی‌متر و قطر ورودی ۶۰ سانتی‌متر است. طول بخش پخش‌کننده در این تونل ۹۰ سانتی‌متر بوده و سطح مقطع آن در انتهای تونل ۱۰۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد. نیروی لازم برای ایجاد جریان باد در این تونل از یک موتور الکتریکی با قدرت سه کیلووات و متصل به پروانه‌ای با قطر ۵۵ سانتی‌متر، تأمین می‌شود. سرعت چرخش پروانه و در نتیجه سرعت باد با استفاده از یک دستگاه اینورتر متصل به دینام تغییر می‌کند و در نتیجه امکان ایجاد حداکثر سرعت باد ۲۲ متر بر ثانیه را فراهم می‌آورد. هرچند بر اساس آخرین تحلیل‌ها سرعت بادهای غالب در منطقه بین پنج تا ۲۸ کیلومتر بر ساعت (۱/۴ تا ۷/۸ متر بر ثانیه) است (Ahmady Birgani *et al.*, 2018). با این حال بادهای فرساینده در بازه سرعت ۵۰ تا ۷۵ کیلومتر بر ساعت (تقریباً ۱۴ تا ۲۱ متر بر ثانیه) قرار دارند (Douzali *et al.*, 2018). بنابراین، در پژوهش حاضر نیز اقدام به شبیه‌سازی باد با سرعت ۷۲ کیلومتر بر ساعت (۲۰ متر بر ثانیه) شد. در نهایت پس از اتمام زمان آزمایش در پژوهش حاضر، میزان هدررفت خاک از

حالت طبیعی عبور داده شد. سپس کوبیدگی لازم توسط غلطک تا رسیدن به جرم ویژه‌ی ظاهری نمونه خاک دست‌نخورده منطقه مورد مطالعه انجام گرفت (Kheirfam *et al.*, 2017a). از طرفی، به‌سبب عدم برخورداری خاک شنی مورد مطالعه از یک ساختمان مشخص، لایه‌بندی و دانه‌بندی خاک شنی در تمام پروفیل و لایه‌های بسترهای ماسه‌ای منطقه برداشت نمونه‌های حجمی مشابه بوده و از این‌رو، در سینی‌های فرسایشی نیز ضرورتی برای شبیه‌سازی لایه‌بندی خاک و همچنین اعمال رطوبت از کف در راستای ایجاد ساختمان مشابه با طبیعت وجود نداشت.

اعمال تیمارهای تعریف شده

سیانو باکترهای تکثیر شده پس از انجام فرآیند سانتریفیوژ (۸۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه) و جداسازی فاز سیانوباکترها از محیط کشت به محیط آب استریل اضافه گردید و مایه تلقیحی با وزن زیست‌توده تقریبی ۱/۵ گرم در لیتر تهیه شد. سپس به میزان یک لیتر بر مترمربع (۱۵۰ میلی‌لیتر به‌ازای هر سینی) از محلول سیانوباکتریایی تهیه شده روی هر یک از سینی‌ها به‌روش آب-تلقیحی اسپری شد (Wang *et al.*, 2009). از طرفی محرک غذایی CHU10 نیز به میزان ۱۵۰ میلی‌لیتری به‌ازای هر سینی فرسایشی روی نمونه‌های خاک شنی آماده‌سازی شده اسپری شد. در نهایت به‌منظور حذف اثر رطوبت اضافه شده به سینی‌های تیمارهای تلقیح سیانوباکترها و محرک غذایی CHU10، به‌همان میزان (۱۵۰ میلی‌لیتر) آب استریل شده نیز روی هر یک از سینی‌های آزمایشی تیمار شاهد نیز اضافه شد (Kheirfam *et al.*, 2017a). در پژوهش حاضر سه تکرار برای هر تیمار نیز مدنظر قرار گرفت. از طرفی، به‌منظور ایجاد شرایط یکسان در اجرای آزمایش، فرآیندهای فیزیکی آماده‌سازی سینی‌های مطالعه کاملاً مشابه بوده و ضمن انتخاب تصادفی برای اعمال تیمارهای مختلف، شرایط محیطی (نور، دما، ارتفاع) یکسانی نیز برای تیمارهای مطالعاتی اعمال گردید. یافته‌های پژوهش‌های پیشین در بخش جنوبی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه نشان داده است که تلقیح سیانوباکترها قبل از شروع ماه‌های مرطوب (اواخر پاییز تا اواسط بهار) امکان استقرار موفقیت‌آمیز سیانوباکترهای تلقیح شده را افزایش داده و منجر به حداکثر اثرگذاری

داده‌های غیرنرمال به حالتی با توزیع نرمال مدنظر قرار گرفت. همچنین آزمون همگنی واریانس‌ها نیز به‌عنوان یکی از ملزومات اولیه‌ی تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون Levene بررسی شد. پس از برقراری شرط‌های مطروحه، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون Tukey انجام شد. آزمون‌های آماری یادشده برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 23 انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه نشان‌دهنده وجود تفاوت‌های معنی‌دار ($p < 0/01$) در بین تیمارهای مطالعاتی در میزان انتقال (هدررفت) ماسه از روی سینی‌ها بود (جدول ۲). میزان انتقال ماسه‌ها از روی سینی‌های تیمار شاهد هفت کیلوگرم بود که نشان‌دهنده انتقال ماسه با شدت $1/58$ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه می‌باشد. شدت بالای انتقال ماسه از تیمار شاهد توسط نیروی باد شبیه‌سازی شده حاکی از پایداری ضعیف ماسه‌ها بود که محتوای کم رس (هفت در صد) و سیلت (هفت در صد) از دلایل آن می‌باشد (Nan et al., 2018).

میزان انتقال ماسه در تیمار تحریک رشد سیانوباکترهای خاک با استفاده از افزودن ماده محرک غذایی CHU10 و شدت انتقال آن‌ها به ترتیب $6/61$ کیلوگرم و $1/35$ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه اندازه‌گیری شد (شکل ۱). از این‌رو، تحریک سیانوباکترهای خاک از طریق محیط کشت CHU10 منجر به کاهش معنی‌دار ($p < 0/01$) و بیش از ۱۴ درصدی در انتقال ماسه‌ها توسط باد و در نتیجه بهبود تثبیت‌پذیری بستر ماسه‌ای بود. در حالی‌که تلقیح مستقیم سیانوباکترها به سطح سینی‌ها سبب کاهش چشم‌گیر انتقال ماسه‌های روان ($p < 0/01$) و به‌میزان ۹۶/۶ درصد شد. در نهایت مقدار هدررفت ماسه از روی سینی‌ها $0/24$ کیلوگرم و شدت انتقال آن نیز $0/05$ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

طریق نیروی باد از طریق اندازه‌گیری وزن سینی‌های فرسایش تیمارها قبل و بعد از اجرای آزمایش محاسبه شد.

اندازه‌گیری متغیرهای مهم خاک

به‌منظور تکمیل بانک اطلاعاتی و تحلیل بهتر نتایج به‌دست آمده، افزون بر اندازه‌گیری میزان ماسه‌های برداشت و منتقل شده از سطح سینی‌های فرسایش اقدام به اندازه‌گیری ماده آلی، اتصال‌پذیری بین‌ذره‌ای خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها به‌عنوان سه متغیر مهم مؤثر در تثبیت بسترهای ماسه‌ای در برابر نیروی باد شد. ماده آلی کل با استفاده از روش پیشنهادی والکلی-بلک (Walkley & Black, 1934) و همچنین ارتباط بین ذره‌ای از طریق تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) اندازه‌گیری شدند. پایداری خاک‌دانه‌ها نیز با استفاده از روش الک خشک با اندازه قطرهای منافذ $0/05$ ، $0/10$ ، $0/25$ ، $0/50$ ، 1 و 2 میلی‌متر تعیین شد. برای اندازه‌گیری پایداری خاک‌دانه‌ها از دو شاخص میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (رابطه ۱) و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها (رابطه ۲) استفاده شد (Xue et al., 2019).

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right] \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، MWD و GMD به ترتیب میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها (میلی‌متر)، \bar{X}_i میانگین حسابی قطر خاک‌دانه‌ها در هر کلاس اندازه منافذ الک‌ها، w_i نسبت وزن خاک‌دانه‌های خشک باقی‌مانده در هر الک به وزن کل خاک‌دانه‌ها و n نیز تعداد الک‌های مورد استفاده برای روش الک خشک می‌باشد.

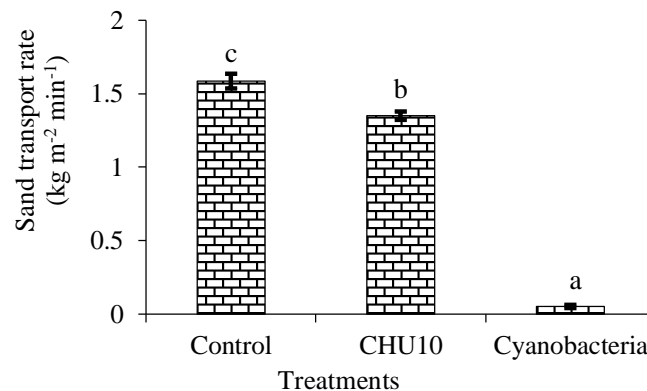
تحلیل‌های آماری

در نهایت پس از اجرای تمام آزمایش‌ها، بانک اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار Excel 2013 به‌منظور تجزیه و تحلیل تشکیل شد. به‌منظور انجام مقایسه‌های آماری مطابق با دستورالعمل پیشنهادی مک دونالد (McDonald, 2015)، ابتدا نرمال و یا عدم نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد. سپس در صورت نیاز، تبدیل

جدول ۲- نتایج تجزیه و تحلیل واریانس یک طرفه برای بررسی تغییرات انتقال ماسه توسط باد، محتوای ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌های سطح خاک تیمارهای مختلف مطالعاتی.

Table 2. Results of the one-way ANOVA comparing the variation of the wind-induced sand transport, organic matter content, mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) in the various treatments.

Variable		df	Mean square	F-value	p-value
Sand transport (kg)	Between Groups	3	2.047	1779	0.000
	Within Groups	8	0.001		
	Total	11			
Organic matter (g kg ⁻¹)	Between Groups	3	0.042	51.2	0.000
	Within Groups	8	0.001		
	Total	11			
MWD (mm)	Between Groups	3	0.170	387	0.000
	Within Groups	8	0.000		
	Total	11			
GMD (mm)	Between Groups	3	0.016	273	0.000
	Within Groups	8	0.000		
	Total	11			



شکل ۱- مقایسه میانگین هدررفت (انتقال) ماسه از سطح سینی‌های تیمارهای مطالعاتی توسط نیروی باد

Figure 1. The mean comparison of the wind-induced sand transport from the treatments

حروف غیرمشابه روی نمودارها نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد. خطوط خطای روی نمودارها نیز نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشد.

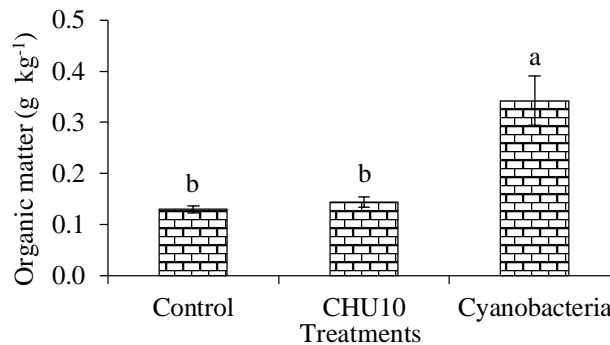
Bars with different letters show a significant difference (Tukey, $p < 0.05$). Error bars show the standard deviation.

هیدروژنی-اکسیژنی (Cx-Hy-Oz) صورت می‌گیرد (Rossi *et al.*, 2015). تحلیل مقادیر ماده آلی اندازه‌گیری شده از خاک سطحی (صفر تا یک سانتی‌متری) تیمارهای مطالعاتی نیز نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار ($p < 0.01$) و ۱۶۲ درصدی ماده آلی در تیمار تلقیح سیانوباکتر نسبت به تیمار شاهد بود (جدول ۱ و شکل ۲)، هرچند تحریک سیانوباکترها از طریق ماده محرک غذایی CHU10 تأثیر معنی‌داری نداشت. در این راستا، حتی افزایش ۲۳ برابری ترسیب کربن با تلقیح سیانوباکترها گزارش شده است (Kheirfam, 2020). به عبارتی ماده آلی خاک با ایجاد یک شار منفی قوی‌تر نسبت به سایر گروه‌های آلی کربوکسیلی

یافته‌ها نشان داده‌اند که در خاک‌های بدون پوشش گیاهی همانند بسترهای ماسه‌ای حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه ارومیه، ماده آلی خاک نقشی اساسی در هم‌آوری ذرات خاک و در نتیجه پایداری آن‌ها دارد (Zou *et al.*, 2018). از طرفی سیانوباکترهای خاک‌زی قابلیت بالایی در ترسیب کربن در سطح خاک (تشکیل‌دهنده ۵۸ درصد محتوای ماده آلی خاک) دارند (Kheirfam *et al.*, 2020). در این فرآیند، ذخیره کربن در خاک از طریق فرآیند فتوسنتز و جذب دی‌اکسید کربن از جو توسط سیانوباکترها و تبدیل آن با کمک انرژی نوری به اکسیژن و همچنین مواد آلی به شکل زنجیرهای کربنی-

کیلوگرم و ۱/۳۵ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه اندازه‌گیری شد (شکل ۱). از این‌رو، تحریک سیانوباکترهای خاک از طریق محیط کشت CHU10 منجر به کاهش معنی‌دار ($p < 0.01$) و بیش از ۱۴ درصدی در انتقال ماسه‌ها توسط باد و در نتیجه بهبود تثبیت‌پذیری بستر ماسه‌ای بود. در حالی که تلقیح مستقیم سیانوباکترها به سطح سینی‌ها سبب کاهش چشم‌گیر انتقال ماسه‌های روان ($p < 0.01$) و به‌میزان ۹۶/۶ درصد شد. در نهایت مقدار هدررفت ماسه از روی سینی‌ها ۰/۲۴ کیلوگرم و شدت انتقال آن نیز ۰/۰۵ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

و فنولی قابلیت بالایی در هم‌آوری کاتیون‌های خاک داشته که چنین فرآیندی منجر به افزایش و ایجاد اتصال‌های قوی بین ذرات خاک می‌شود. میزان انتقال ماسه‌ها از روی سینی‌های تیمار شاهد هفت کیلوگرم بود که نشان‌دهنده انتقال ماسه با شدت ۱/۵۸ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه می‌باشد. شدت بالای انتقال ماسه از تیمار شاهد توسط نیروی باد شبیه‌سازی شده حاکی از پایداری ضعیف ماسه‌ها بود که محتوای کم رس (هفت درصد) و سیلت (هفت درصد) از دلایل آن می‌باشد (Nan *et al.*, 2018). میزان انتقال ماسه در تیمار تحریک رشد سیانوباکترهای خاک با استفاده از افزودن ماده محرک غذایی CHU10 و شدت انتقال آن‌ها به‌ترتیب ۶/۶۱



شکل ۲- مقایسه میانگین محتوای ماده آلی در خاک سطحی تیمارهای مطالعاتی

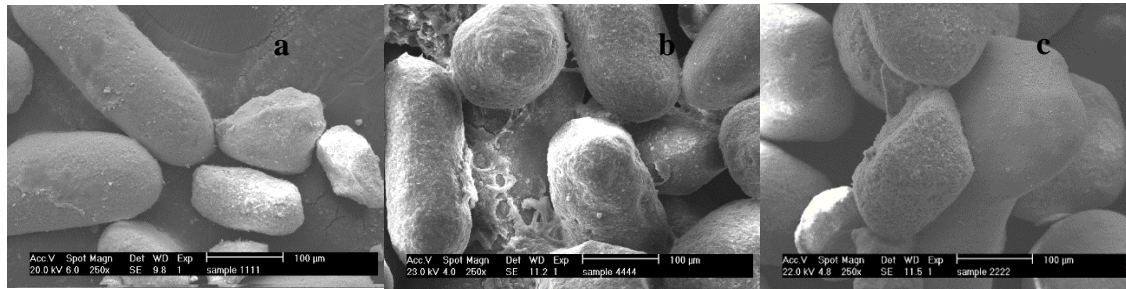
Figure 2. The mean comparison of the organic matter content in the treatments soils surface.

حروف غیرمشابه روی نمودارها نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد. خطوط خطای روی نمودارها نیز نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشد.

Bars with different letters show a significant difference (Tukey, $p < 0.05$). Error bars show the standard deviation.

باد با حداقل نیروی ممکن انجام شده و لذا بسیار حساس به فرسایش و برداشت توسط نیروی باد خواهند بود. از طرفی، سیانوباکترهای خاک‌زی بر خلاف جنس‌های آب‌زی آن‌ها، در فضای آزاد خاک حضور نداشته و تمایل زیادی به چسبیدن به اطراف خاک‌دانه‌ها از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی و هم‌چنین رشته‌های تارنکبوتی خود دارند (De Philippis & Rossi, 2015; Ranan *et al.*, 2015).

بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده در شکل ۳، توسعه سیانوباکترها در بین ذرات خاک به‌صورت پیچیده و در هم‌تنیده اتفاق افتاده (شکل ۳ ج) که یافته‌های حاصل از پژوهش‌های چامیزو و همکاران (Chamizo *et al.*, 2018) نیز چنین فرآیندی را تأیید کرده‌اند. در حالی که ارتباط و قرارگیری ذرات خاک (خاک شنی) در تیمار شاهد (شکل ۳ الف) نشان می‌دهد که ذرات خاک هیچ‌گونه ارتباط و پیوستگی با یک‌دیگر نداشته‌اند که در این صورت انتقال این ذرات توسط نیروی



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نحوه ارتباط بین ذره‌های خاک در تیمار شاهد (a)، تحریک سیانوباکتر با افزودن محرک غذایی CHU10 (b) و تلقیح سیانوباکترها (c)

Figure 3. The scanning electron microscopy images of the control (a), stimulation of cyanobacteria by the CHU10 stimulant (b), and inoculation of cyanobacteria (c) treatments

اساس میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌های با مقادیر کم‌تر از ۰/۴ بین ۰/۴۰ تا ۰/۸۰، ۰/۸۰ تا ۱/۳۰، ۱/۳۰ تا دو و بیش‌تر از دو میلی‌متر، میزان پایداری خاک‌دانه‌ها رابه ترتیب بسیار ناپایدار، ناپایدار، نسبتاً پایدار، پایدار و بسیار پایدار تقسیم‌بندی کرده که از این‌رو، خاک‌دانه‌های تیمارهای شاهد و تحریک سیانوباکترها با CHU10 در دسته‌ی ناپایدار و خاک‌دانه‌های تیمارهای تلقیح سیانوباکترها در دسته نسبتاً پایدار قرار گرفتند.

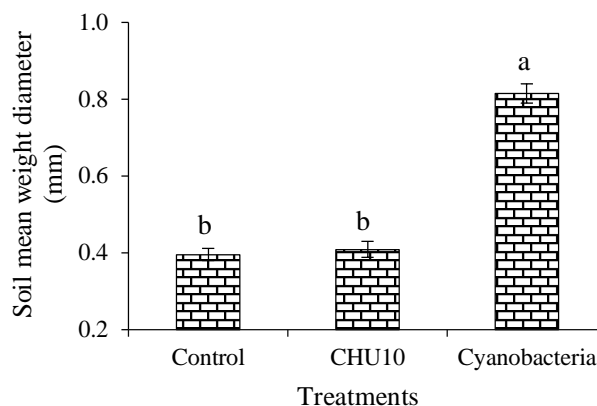
نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان تثبیت ماسه‌های روان بخشی از بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه از طریق تلقیح و تحریک سیانوباکترهای خاک‌زی در شرایط شبیه‌سازی آزمایشگاهی باد و در مقیاس سینی‌های فرسایشی انجام شد. نمونه‌های حجمی برداشت شده از بسترهای ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه حساسیت و ناپایداری بالایی در برابر نیروی باد داشت که در شرایط طبیعی منجر به حرکت و توسعه گسترده ماسه‌های روان به سمت اراضی کشاورزی و مسکونی می‌گردد. از طرفی رویکرد تحریک سیانوباکترها از طریق افزودن ماده محرک رشد هرچند منجر به کاهش نسبی شدت انتقال ماسه‌های روان شد، به‌نظر می‌رسد به‌دلیل عدم بهبود ویژگی‌های مؤثر خاک در تثبیت ماسه‌ها، در بلندمدت اثرگذار نخواهد بود. در حالی‌که، یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که تلقیح سیانوباکترها از طریق بهبود ویژگی‌های مهم شیمیایی و فیزیکی مؤثر خاک در پایداری بسترهای ماسه‌ای از جمله ماده آلی، اتصال بین‌ذره‌ای و توزیع اندازه ذرات ثانویه، به‌صورت قابل توجهی فرآیند انتقال

از این‌رو، سیانوباکترها بخشی از سطوح و اطراف خاک‌دانه‌ها را پوشانده و از طریق ترشحات پلی‌ساکاریدی چسبناک خود ضمن چسبیدن به اطراف ذرات ریز خاک، از طریق رشد شبکه‌ای مجموعه‌ای از ذرات ریز خاک را به‌صورت زنجیره‌ای بهم متصل می‌کنند (Issa *et al.*, 2007; Kheirfam *et al.*, 2017a,b). اتصال ریزذرات خاک توسط سیانوباکترها به‌یکدیگر و تشکیل بزرگ ذرات منجر به خاک‌دانه‌سازی شده که در این شرایط خاک‌دانه‌های بسیار بزرگ‌تر و ساختارهای خاک در مقیاس ماکرو و بسیار مقاوم در برابر نیروی باد ایجاد می‌شود (شکل ۳ج). تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تیمار تحریک سیانوباکترها با CHU10 (شکل ۳ب) ارتباط بین‌ذره‌ای محسوسی نشان نداد که دلیل آن می‌تواند عدم تأثیرپذیری جامعه سیانوباکترهای خاک از محرک غذایی باشد. تحلیل تغییرات مقادیر میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌های به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها حاکی از اختلاف‌های معنی‌دار ($p < 0.01$) بین تیمارهای مطالعاتی بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در تیمار شاهد به‌ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۶۶ میلی‌متر بود (شکل‌های ۴ و ۵). تحریک سیانوباکترها با CHU10 توانایی ایجاد تغییرات در مؤلفه‌های مورد بررسی را نداشت. با این حال، تلقیح سیانوباکترها میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌های خاک مورد مطالعه را به‌ترتیب ۱۰۶ و ۱۹ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داده که باعث شد تا مقادیر این دو مؤلفه به‌ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۷۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شود. در این راستا، لی بیسونایز (Le Bissonnais, 2016) بر

خاک ضروری است. در صورت موفقیت راه کار حاضر در مقیاس پایلوت و با توجه به هزینه‌های پایین اجرای آن (حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیون برای هر هکتار) و همچنین سهولت در تولید و تلقیح سطحی آن از یک سو و ضرورت تثبیت ماسه‌های روان و کانون‌های ریزگرد در حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه ارومیه و حتی مناطق بیابانی کشور، اجرای این راه کار اقتصادی و کارا خواهد بود.

ماسه‌های روان توسط باد را مهار می‌کند. بنابراین، تلقیح سیانوباکترها به‌عنوان راه‌کاری نوین و دوست‌دار محیط‌زیست در شرایط آزمایشگاهی منجر به تثبیت حداکثری بسترهای ماسه‌های حاشیه‌های خشک شده دریاچه ارومیه شد. از این‌رو، انجام آزمایش‌های تکمیلی در مقیاس پایلوت‌های صحرائی با هدف ارزیابی این راه کار در شرایط طبیعی در کنار اندازه‌گیری متغیرهای مؤثر

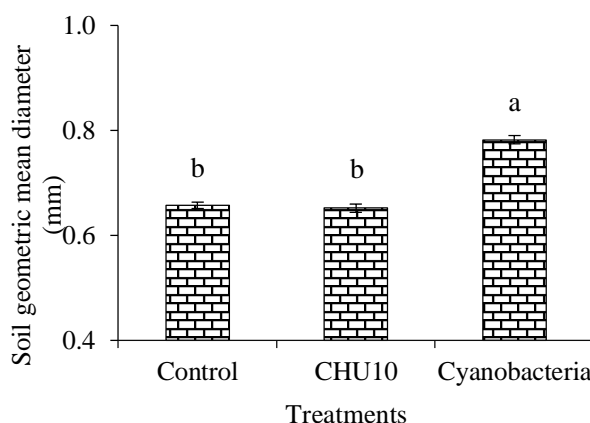


شکل ۴- مقایسه میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در خاک سطحی تیمارهای مطالعاتی

Figure 4. The mean comparison of the soil mean weight diameter (MWD) in the treatments soils surface

حروف غیرمشابه روی نمودارها نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد. خطوط خطای روی نمودارها نیز نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشد.

Bars with different letters show a significant difference (Tukey, $p < 0.05$). Error bars show the standard deviation



شکل ۵- مقایسه میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در خاک سطحی تیمارهای مطالعاتی

Figure 5. The mean comparison of the soil geometric mean diameter (GMD) in the treatments soils surface

حروف غیرمشابه روی نمودارها نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد. خطوط خطای روی نمودارها نیز نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشد.

Bars with different letters show a significant difference (Tukey, $p < 0.05$). Error bars show the standard deviation

شده است. لذا نهایت‌قدردانی از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه و همچنین پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه را دارد. همچنین از گروه مهندسی علوم خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه ارومیه برای بهره‌مندی از سامانه تونل باد نهایت سپاسگزاری می‌شود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با کد ۰۰۱/م/۹۸ که با تصویب و حمایت مالی حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه در پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه اجرا

References

- Ahmady-Birgani H., Agahi E., Ahmadi S.J., and Erfanian M. 2018. Sediment source fingerprinting of the Lake Urmia sand dunes. *Scientific Reports*, 8: 206.
- Aller D., Rathke S., Laird D., Cruse R., and Hatfield J. 2017. Impacts of fresh and aged biochars on plant available water and water use efficiency. *Geoderma*, 307: 114-121.
- Andersen R.A. 2005. Algal culturing techniques, *Elsevier Academic Press*, London, 578 p.
- Ansari S., and Fatma T., 2016. Cyanobacterial polyhydroxybutyrate (PHB): screening, optimization and characterization. *PLoS One* 11: e0158168.
- Asadzadeh F., Khodadadi M., and Ehsan Malahat E. 2017. Predicting wind erodibility of sand dunes by particle size distribution models in parts of western coast of Urmia Lake. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24: 126-141. (In Persian).
- Belnap J., Walker B.J., Munson S.M., and Gill R.A. 2014. Controls on sediment production in two US deserts. *Aeolian Research*, 14: 15-24.
- 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*, 65: 158-167.
- Bowker M.A., Belnap J., Davidson D.W. and Phillips S.L. 2005. Evidence for micronutrient limitation of biological soil crusts: importance to arid-lands restoration. *Ecological Applications*, 15: 1941-1951.
- Buchanan R.E., and Gibbons N.E. 1974. *Bergey's manual of determinative bacteriology* (8th Ed.). Williams and Wilkins, Baltimore, Maryland. 1246 p.
- 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.
- Chamizo S., Cantón Y., Miralles I., and Domingo F. 2012. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 49: 96-105.
- Colica G., Li H., Rossi F., Li D., Liu Y., and De Philippis R. 2014. Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 68: 62-70.
- De Philippis R., and Vincenzini M. 1998. Extracellular polysaccharides from cyanobacteria and their possible applications. *FEMS Microbiological Reviews*, 22: 151-175.
- Douzali Joushin F., Badv K., Barin M. and Sultani Jige H. 2018. Inhibition of wind erosion by SBR polymer and *Bacillus pasteurii* microorganism (Case study: Jabal Kandy region). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49: 795-806. (In Persian)
- Garbeva P., Tyc O., Remus-Emsermann M.N.P., van der Wal A., Vos M., Silby M., and Boer W. 2011. No apparent costs for facultative antibiotic production by the soil bacterium *Pseudomonas fluorescens* Pf0-1. *PLoS One* 6: e27266.
- Garrity G.M., Boone D.R., and Castenholz R.W. 2001. *Bergey's manual of systematic bacteriology*. (2nd Ed.). New York, USA. 1: 173 p. Harvey, R. A. 2007. *Microbiology*. Lippincott Williams & Wilkins, 395 p.
- Hamzhepour N., and Bogaert P. 2019. Spatio-temporal prediction of soil salinity using soft data and Bayesian maximum entropy method in western shores of Urmia Lake. *Applied Soil Research*, 6: 71-83.
- Hassanzadeh E., Zarghami M., and Hassanzadeh Y. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management*, 26: 129-145.
- He M., Hu R., and Jia R. 2019. Biological soil crusts enhance the recovery of nutrient levels of surface dune soil in arid desert regions. *Ecological Indicators*, 106: 105497.
- 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: 209-219.
- Kheirfam H. 2020. Increasing soil potential for carbon sequestration using microbes from biological soil crusts. *Journal of Arid Environments*, 172: 104022.

- 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.
- Kheirfam H., Sadeghi S.H.R., and Zarei Darki B. 2019. Soil conservation in an abandoned agricultural rain-fed land through inoculation of cyanobacteria. *Catena*, 104341. *Catena*, 152:156-163.
- 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.
- Le Bissonnais Y. 2016. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 67: 11-21.
- McDonald J.H. 2015. Handbook of biological statistics, (3rd Ed.). Sparky House Publishing, Baltimore, Maryland. 305 p.
- Muñoz-Rojas M., Román J.R., Roncero-Ramos B., Erickson T.E., Merritt D.J., Aguila-Carricondo P., and Cantón Y. 2018. Cyanobacteria inoculation enhances carbon sequestration in soil substrates used in dryland restoration. *Science of the Total Environment*, 636: 1149-1154.
- Nikseresht F., Landi A., Sayyad G., Ghezelbash G., and Bahrami H. 2019. Effect of *Sporosarcina pasteurii* and culture media on Microbial Carbonate Induced Precipitation and wind erosion control in sandy soil of Khuzestan. *Applied Soil Research*, 7(3):1-13. (In Persian)
- Nan L., Dong Z., Xiao W., Li C., Xiao N., Song S., Xiao F., and 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 Arid Land*, 10: 27-38.
- Perera I., Subashchandrabose S.R., Venkateswarlu K., Naidu R., and Megharaj M. 2018. Consortia of cyanobacteria/microalgae and bacteria in desert soils: an underexplored microbiota. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102: 7351-7363.
- Raanan H., Felde V.J., Peth S., Drahorad S., Ionescu D., Eshkol G., Treves H., Felix-Henningse P., Berkowicz S.M., Keren N., Horn R., Hagemann M., and Kaplan A. 2015. Three-dimensional structure and cyanobacterial activity within a desert biological soil crust. *Environmental Microbiology*, 18: 372-383.
- Rossi F., and De Philippis R. 2015. Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats. *Life*, 5(2): 1218-1238.
- 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.
- Sadeghi S.H.R., Ghavimi Panah M.H., Younesi H., and Kheirfam H. 2018. Ameliorating some quality properties of an erosion-prone soil using biochar produced from dairy wastewater sludge. *Catena*, 171: 193-198.
- Sadeghi S.H.R., Jalili, Kh., and Nikkami D. 2009. Land use optimization in watershed scale. *Land Use Policy*, 26: 186-193.
- 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.
- Xue S., Ye Y., Zhu F., Wang Q., Jiang J., and Hartley W. 2019. Changes in distribution and microstructure of bauxite residue aggregates following amendments addition. *Journal of Environmental Science*, 78: 276-286.
- Wang W.B., Liu Y.D., Li D.H., Hua C.X., and Rao B.Q. 2009. Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area. *Soil Biology and Biochemistry*, 41: 926-929.
- Zou X., Li J., Cheng H., Wang J., Zhang C., Kang L., Liu W., and Zhang F. 2018. Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of northern China. *Catena*, 167: 429-439.

Feasibility of Moving Sands Stabilization in the Dried-up Beds of Lake Urmia using Inoculation and Stimulation of Soil Native Cyanobacteria

Hossein Kheirfam^{1, 2*}, Farrokh Asadzadeh^{3, 4}

(Received: November 2019 Accepted: January 2020)

Abstract

The stabilization of the dried-up lakebeds is necessary. Recently, biocrust formation/restoration through the microbial inoculation has been considered to stabilize the moving sands. Accordingly, this study planned to evaluate the possibility of using cyanobacterial inoculation and stimulation in stabilization of the moving sands beds of Lake Urmia at the laboratory conditions. To this end, the bulk samples were taken from Jabal-Kandi region (from Urmia) as a hotspot region for the moving sands, and the samples poured into the erosion trays. The most suitable existing cyanobacteria for the soil stabilization were selected, purified and proliferated from the origin soil. The stimulant nutrient (CHU10) was also prepared by dissolving various nutrients in sterile water. Then, the three treatments of control, stimulation of cyanobacteria, and inoculation of cyanobacteria were prepared by adding 1 l m⁻² of sterile water, CHU10, and cyanobacterial solution at three replications. After 120 days, the wind (72 km h⁻¹ for 30 min) was simulated on the trays. The rate of the wind-induced sand transport from the control, stimulated, and inoculated treatments were 1.58, 1.35, and 0.05 kg m⁻² min⁻¹, respectively. We found that both stimulated and inoculated methods significantly reduced ($P < 0.01$) the wind-induced sand transport by 14 and 96%, respectively, as compared to control. However, the inoculation of cyanobacteria was more effective than the stimulation of cyanobacteria. Assessing the scanning electron microscopy images from the soil surface also confirmed the ability of cyanobacteria in increasing the strong bindings between soil particles. Furthermore, inoculation of cyanobacteria increased the soil organic matter content and aggregate stability of the study soil, as important indicators of soil stability, by 162 and 106%, respectively. However, the inoculation of cyanobacteria under natural conditions is necessary to achieve an effective way in stabilizing dried-up beds of Lake Urmia.

Keywords: Biological soil crust, Microbial inoculation, Soil amendments, Soil stabilization, Wind erosion

Kheirfam F., and Asadzadeh F. 2020. Soil feasibility of mowing sands stabilization in the dried-up beds of Lake Urmia using inoculation and stimulation of soil native cyanobacteria. *Applied Soil Research*, 8(1): 31-43.

1. Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Iran

2. Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Iran

3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran

4. Associate Professor, Department of Sediment Processing, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Iran

* Corresponding Author Email: h.kheirfam@urmia.ac.ir