Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

Changeability of saline soil surface due to soil cyanobacteria inoculation using image processing

Sudabeh Gharemahmudli[1], Seyed Hamidreza Sadeghi[*2], Vahideh Sadat Sadeghi[*3]

1. Postdoctoral Researcher, Dept. of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: gharemahmudlisudabe@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: sadeghi@modares.ac.ir
3. Corresponding Author, Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, 87717-67498, Iran. E-mail: vs.sadeghi@iut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 02.19.2024
Revised: 03.14.2024
Accepted: 04.08.2024

Keywords:
Soil biocrust,
Soil erosion,
Soil stability,
Soil surface roughness

ABSTRACT

Background and Objectives: Land degradation and soil erosion are critical global problems due to their adverse effects on agricultural productivity, the environment, and their impact on food security and quality of life. In recent years, the study of the effect of soil microorganisms on soil degradation in dry areas and saline soil on various components of soil stability and stabilization has attracted the attention of many researchers. In the present research, it has tried to present new biological solutions and methods in compliance with the standards for curbing land degradation based on surface inoculation of soil-borne cyanobacteria on the surface of saline and alkaline soil. This research was done based on the natural conditions of the soil in the field under study and the evaluation of the potential effect of the inoculation of local soil cyanobacteria on the stability and stabilization of the saline and sodium soil surface using image processing.

Materials and Methods: In this regard, the biologically studied soil was prepared from saline and erosion-sensitive lands from the Incheh Borun region in Golestan Province, Iran. Then, the most suitable cyanobacteria in the mother soil were identified, selected, purified, and propagated in two different soil salinities with two repetitions on prepared plots with dimensions of one in one in the study area. In order to maximize the effect of cyanobacteria in the soil environment, after 50 days of inoculation of cyanobacteria on the soil surface, in order to process the image with MATLAB software with different algorithms, the surface of the plots was photographed.

Results: The results obtained from visual observation showed that the morphometry of soil surface in soil with low and high salinity, the surface of the soil treated with cyanobacteria was less swollen, and soil particles were mixed than the surface of the control treatment. According to the results obtained from the software, the value of the standard deviation of the pixels and the entropy of the images obtained from the image processing showed in the treatments with a lower salinity level compared to the treatments with a higher salinity level. The mean value of the standard deviation of the pixels of the images in the treatment inoculated with cyanobacteria has decreased by 37.36% and 14.55%, respectively,

compared to the control treatment significantly (P<0.01). In addition, the mean entropy of the images in the treatment inoculated with cyanobacteria decreased by 9.18% and 3.04%, respectively, compared to the control treatment in a non-significant manner (P>0.01).

Conclusion: According to the results, it can be said that the inoculation of cyanobacteria on the surface of saline soil can be considered to increase stabilization and reduce the degradation of soil grains on the soil surface. The results of the present study can be therefore considered as a bioengineering approach for soil stabilization in saline watersheds, which ultimately provides the basis for water, food, and environmental security.

Cite this article: Gharemahmudli, Sudabeh, Sadeghi, Seyed Hamidreza, Sadeghi, Vahideh Sadat. 2024. Changeability of saline soil surface due to soil cyanobacteria inoculation using image processing. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (2), 119-137.



© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2024.22219.3715
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹۴

تغییرپذیری سطح خاک شور ناشی از تلقیح سیانوباکتری‌های خاک‌زی با استفاده از پردازش تصویر

سودابه قره‌محمودلی[۱]، سیدحمیدرضا صادقی[۲*]، وحیده‌السادات صادقی[۳*]

۱. پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.
رایانامه: gharemahmudlisudabe@modares.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.
رایانامه: sadeghi@modares.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران.
رایانامه: vs.sadeghi@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲/۱۱/۳۰
تاریخ ویرایش: ۰۲/۱۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۱/۲۰

واژه‌های کلیدی:
پایداری خاک،
پوسته‌زیستی خاک،
زبری سطحی خاک،
فرسایش خاک

چکیده

سابقه و هدف: تخریب سرزمین و فرسایش خاک به دلیل اثرات نامطلوب آن‌ها بر بهره‌وری کشاورزی، محیط‌زیست و تأثیر آن بر امنیت غذایی و کیفیت زندگی، یک مشکل مهم جهانی است. در سال‌های اخیر بررسی تأثیر ریزموجودات خاک‌زی بر تخریب خاک در مناطق خشک و خاک شور بر مؤلفه‌های مختلف پایداری و تثبیت خاک نظر بسیاری از پژوهش‌گران را جلب کرده است. در پژوهش حاضر سعی شده است راه‌کارها و روش‌های نوین و زیستی با رعایت استانداردها در مهار تخریب سرزمین بر مبنای تلقیح سطحی سیانوباکتری‌های خاک‌زی در سطح خاک شور و قلیایی ارائه شود. این پژوهش بر مبنای شرایط طبیعی خاک در عرصه میدانی موردمطالعه و ارزیابی پتانسیل اثر تلقیح سیانوباکتری‌های خاک‌زی بومی منطقه بر پایداری و تثبیت سطح خاک شور و سدیمی با استفاده از پردازش تصویر صورت گرفت.

مواد و روش‌ها: در همین راستا، خاک موردمطالعه زیستی از اراضی شور و حساس به فرسایش از منطقه اینچه‌برون در استان گلستان تهیه شد. سپس مناسب‌ترین سیانوباکتری‌های موجود در خاک مادری در حفاظت آب‌وخاک شناسایی، انتخاب، خالص‌سازی و تکثیر شدند و در دو شوری متفاوت خاک با دو تکرار روی کرت‌ها آماده‌شده با ابعاد یک در یک، در منطقه موردمطالعه تلقیح شدند. به‌منظور حداکثر اثرگذاری سیانوباکتری‌ها در محیط خاک پس از گذشت ۵۰ روز از تلقیح سیانوباکتری‌ها بر سطح خاک به‌منظور پردازش تصویر با نرم‌افزار MATLAB با الگوریتم‌های مختلف اقدام به عکس‌برداری از سطح کرت‌ها شد.

یافته‌ها: نتایج به‌دست‌آمده از مشاهده چشمی نشان داد ریخت‌سنجی سطح خاک در خاک با شوری کم و زیاد، سطح خاک تیمار تلقیح شده با سیانوباکتری نسبت به سطح تیمار شاهد حالت پف‌کرده و به‌هم‌ریختگی ذرات خاک کم‌تر بود. طبق نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار مقدار انحراف استاندارد پیکسل‌ها و آنتروپی تصاویر حاصل از پردازش تصویر در تیمارها با سطح شوری کم‌تر نسبت به تیمارها با سطح شوری بیش‌تر، میانگین مقدار انحراف استاندارد پیکسل‌های تصاویر در تیمار تلقیح شده با سیانوباکتری به ترتیب ۳۷/۳۶ و ۱۴/۵۵درصد نسبت به تیمار شاهد به‌صورت معنی‌دار (P<۰/۰۱) کاهش داشته است. هم‌چنین میانگین آنتروپی تصاویر نیز در تیمار تلقیح شده با سیانوباکتری به ترتیب ۹/۱۸ و ۳/۰۴ درصد نسبت به تیمار شاهد به‌صورت غیرمعنی‌دار (P>۰/۰۱) کاهشی به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان کرد، تلقیح سیانوباکتری‌ها بر سطح خاک شور برای افزایش تثبیت و کاهش تخریب خاکدانه‌های سطح خاک می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. ازاین‌رو نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به‌عنوان رویکردی زیستی مهندسی برای تثبیت خاک در حوزه‌های آبخیز شور تلقی شود که درنهایت امنیت آب، غذا و محیط‌زیست را زمینه‌سازی می‌کند.

استناد: قره‌محمودلی، سودابه، صادقی، سیدحمیدرضا، صادقی، وحیده‌السادات (۱۴۰۳). تغییرپذیری سطح خاک شور ناشی از تلقیح سیانوباکتری‌های خاک‌زی با استفاده از پردازش تصویر. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۱ (۲)، ۱۳۷-۱۱۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22219.3715

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

فرسایش خاک تهدیدی جدی برای منابع خاک و محیط‌زیست به‌شمار می‌آید که باعث کاهش حاصلخیزی، فرسایش خاک و تولید محصولات می‌شود (۱). فرسایش خاک، سیلاب‌ها و رسوبات به‌عنوان یک موضوع حیاتی محیط‌زیست جهانی، از پیامدهای مهم تخریب اراضی هستند که منجر به کاهش بهره‌وری و پایداری کشاورزی، افزایش بلایای طبیعی و مسائل اقتصادی، اجتماعی و سیاسی می‌شود (۲). برای دستیابی به توسعه پایدار، تلاش‌های کارآمد و همه‌جانبه ضروری است. این امر مستلزم استفاده از چندین فن برای حفظ منابع طبیعی و بوم‌سازگان است که درنتیجه حفاظت از خاک‌وآب و بهبود شرایط اقتصادی حاصل می‌شود (۳).

شوری خاک یکی از مشکلات و محدودیت‌های اصلی خاک کشاورزی و تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است (۴). شوری خاک ناشی از افزایش تبخیر و تجمع نمک به دلیل تخریب فیزیکی و شیمیایی خاک است که باعث کاهش پایداری خاک، نفوذ آب و فرسایش خاک می‌شود. انباشت نمک در خاک‌های مناطق خشک نه‌تنها بر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تأثیر می‌گذارد، بلکه باعث کاهش بهره‌وری خاک، پوشش‌گیاهی و بیابان‌زایی می‌شود (۵ و ۶). شوری و بیابان‌زایی با هم تعامل داشته و بر بوم‌سازگان و هم‌چنین فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی تأثیر منفی می‌گذارند. شوری و خشکی خاک باعث تورم و برهم‌ریختگی ساختمان خاک شده و از طرف دیگر افزایش تبخیر آب از لایه‌های سطحی خاک کاهش محتوی رطوبتی خاک، چسبندگی و اصطکاک بین خاکدانه‌ها را در پی خواهد داشت.

شوری خاک باعث تغییر یا حتی اختلال در ویژگی‌های طبیعی، زیست‌شیمیایی و فرسایشی می‌شود (۷). املاح بیش از حد مانع از جذب آب و جذب مواد مغذی شده و باعث ایجاد تنش در گیاه و کاهش تولید کلی می شود. بنابراین، افزایش سطح شوری منجر به از دست رفتن منابع خاک موجود می‌شود که بر توسعه کشاورزی و رفاه بوم‌شناختی تأثیر می‌گذارد (۸ و ۹). در صورت عدم حفاظت، این وضعیت می‌تواند در درازمدت به یک مشکل اجتماعی-اقتصادی و سلامت انسان تبدیل شود (۱۰). پایداری خاکدانه‌ها میزان توانایی و مقاومت ذرات خاک در برابر تنش‌های برشی نیروهای بیرونی مانند آب و باد بوده و عواملی مانند بافت خاک، تبادل کاتیونی، میزان مواد آلی و جمعیت، نوع و عملکرد ریزموجودات خاک‌زی بر مقادیر آن تأثیرگذار است (۱۱).

پوسته زیستی خاک[1]، سطح تحکیم‌یافته ناشی از تجمع ذرات خاک، سیانوباکتری‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها، گلسنگ‌ها و خزه‌ها بوده که به‌صورت گروهی یا انفرادی با ضخامت یک میلی‌متر تا چند سانتی‌متر در مناطق مختلف آب‌وهوایی قابل‌مشاهده است (۱۲). گروهی از ریزموجودات هستند که زیستگاه طبیعی آن‌ها محیط خاک بوده و به سبب فعالیت آن‌ها نقش مهمی در چرخه عناصر در طبیعت، تشکیل و حاصلخیزی خاک دارند. ریزموجودات خاک‌زی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم با هم در ارتباط بوده و علاوه بر تأمین مواد مغذی برای رشد و فعالیت همدیگر، شرایط زیستن برای سایر موجودات در سطح بالایی خاک را نیز فراهم می‌آورند (۱۳ و ۱۴). استفاده از پوسته‌های زیستی خاک به‌عنوان یکی از روش‌های زیستی برای بهبود رفتار هیدرولوژیکی، انسجام، تجمع و فرسایش‌پذیری خاک به‌گونه‌ای تلقی می‌شود که در برابر عوامل مخرب خاک و آب مقاومت می‌کند (۱۵).

1- Biological soil crusts

سیانوباکتری‌ها یکی از اجزای اصلی پوسته‌های زیستی خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که در لایه سطحی خاک رشد می‌کنند و با ترشح مواد پلی‌ساکاریدی در چرخه عناصر شرکت کرده و نقش مهمی در بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک دارند (۱۶). سیانوباکتری‌ها که به‌عنوان سیانوفیتا هم شناخته می‌شوند از فیلوم[1] باکتری‌ها بوده که انرژی خود را از طریق فتوسنتز به‌دست می‌آورند (۱۷). سیانوباکتری‌ها در طیف گسترده‌ای از محیط‌ها به‌ویژه خاک حضور داشته و در شرایط نامناسب محیطی توانایی زنده‌مانی، رشد و فعالیت را دارند (۱۸). برخی از جنس‌های خاک‌زی سیانوباکتری‌ها خاصیت جذب آب (۱۹)، توانایی تثبیت نیتروژن و کربن (۲۰)، غلاف چسبنده و قابلیت بالای ترشح پلی‌ساکاریدی و هم‌چنین سامانه رشد شبکه‌ای در بین ذرات خاک (۲۱) را دارند.

در سال‌های اخیر بررسی تأثیر ریزموجودات خاک‌زی بر تخریب خاک در مناطق خشک و خاک شور بر مؤلفه‌های مختلف پایداری و تثبیت خاک نظر بسیاری از پژوهش‌گران را جلب کرده است. رسی و همکاران (۲۰۱۷) در یک مطالعه مروری امکان تکثیر و تولید در مقیاس صنعتی سیانوباکتری‌ها در استخرهای بزرگ و تلقیح آن‌ها به سطح وسیعی از اراضی برای مقابله با بیابان‌زایی و بهبود ویژگی‌های خاک مناطق در حال تخریب و تخریب‌شده را تأیید کردند (۲۲). کاکه و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر پوسته‌های زیستی خاک بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های اراضی مرتعی شور در آلاگل، ترکمن‌صحرا، شمال شرق ایران را مورد بررسی قرار دادند. تحلیل نتایج نشان داد که خاک‌های دارای پوشش‌زیستی، سطوح کربن آلی، نیتروژن، فسفر، مس و آهن را افزایش داده و pH، کربنات کلسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم، نسبت جذب سدیم و درصد سدیم قابل تعویض را نسبت به خاک‌های بدون پوسته‌زیستی کاهش داده است. چگالی ظاهری در خاک‌ها با پوشش‌زیستی نسبت به خاک‌های غیرزیستی کاهش یافته است. به‌طورکلی، پوسته‌های زیستی تأثیر مثبتی بر بسیاری از ویژگی‌های خاک داشتند و درنتیجه کیفیت خاک را افزایش دادند (۲۳). سپهر و همکاران (۲۰۱۹) اثر نقش حفاظتی سیانوباکتری بر پایداری خاک در دو خاک اریدوسول[2] در شمال شرق ایران را موردبررسی قراردادند. نتایج پژوهش نشان داد که سیانوباکتری‌ها قادر به افزایش نیتروژن و کربن خاک، تشکیل خاکدانه‌های بزرگ، افزایش پایداری خاک و تنظیم جامعه زیستی در شرایط خشکی بوده‌اند (۲۴). قره‌محمودلی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر تلقیح سیانوباکتری‌های بومی از منطقه بدرانلو در خراسان شمالی، به‌منظور بهبود الگوی درز و شکاف خاک و مهار رواناب سطحی در شرایط انجماد-ذوب، تحت بارش شبیه‌سازی‌شده در شرایط آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترک‌های عمیق و بزرگ در تیمار شاهد به‌طور قابل‌توجهی به شکاف‌های کم‌عمق، کوچک با طول بیش‌تر و عرض کم‌تر در نمونه‌های تلقیح شده با سیانوباکتری‌ها، بهبود یافتند. هم‌چنین در تیمار سیانوباکتری با ترشح پلی‌ساکارید و ایجاد یک شبکه عنکبوت مانند در سطح خاک باعث اتصال خاکدانه‌ها و افزایش زمان شروع رواناب (۲۷۴ درصد؛ $P<۰/۰۱$) و کاهش حجم رواناب (۱۴۷- درصد؛ $P<۰/۰۰۱$) شده است (۲۵). صادقی و همکاران (۲۰۲۳ الف) به بررسی کارایی تلقیح سیانوباکتری و باکتری بر هدررفت خاک طی پنج بارندگی متوالی با استفاده از شبیه‌ساز باران در خاک‌های حساس به فرسایش مرزن‌آباد پرداختند. بیش‌ترین تلفات خاک به میزان حدود ۳۰ کیلوگرم در تیمار شاهد در اولین بارندگی رخ داد. در مقابل،

1- Phylum

2- Eridosol

تیمارهای تلقیح جداگانه و ترکیبی سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها با ترشح پلی‌ساکاریدها و درنتیجه پایداری خاکدانه‌ها به‌طور معنی‌داری ($P<0/01$) به ترتیب ۹۹/۶۵، ۹۹/۹۱ و ۱۰۰ درصد از هدررفت خاک در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دادند (۲۶). صادقی و همکاران (۲۰۲۳ ب) در یک مطالعه مروری به بررسی رابطه بین ریزموجودات خاک‌زی در هدررفت خاک و کنترل رواناب پرداختند. تحلیل بیش از ۷۷ مقاله بررسی‌شده نشان داد که استفاده از ریزموجودات خاک‌زی در کنترل رواناب و هدررفت خاک مؤثر بوده است. در ۸۲ درصد از پژوهش‌های منتشرشده بین‌المللی، استفاده از سیانوباکتری‌ها برای حفظ منابع آب‌وخاک ترجیح داده و یا توصیه‌شده است (۲۷).

پیشینه پژوهشی بیانگر آن است که نقش سازنده ریزموجودات خاک‌زی به‌عنوان یک رویکرد پایدار برای احیای خاک‌های تخریب‌شده با استفاده از سیانوباکتری‌ها در سال‌های اخیر در مباحث بوم‌شناختی بسیار موردتوجه قرارگرفته است. در پژوهش‌های صورت گرفته نقش ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌ها در پایداری خاکدانه‌ها، افزایش مقاومت کششی و برشی ذرات خاک و افزایش کیفیت خاک برای حضور و رشد سایر موجودات و پوشش‌گیاهی به اثبات رسیده است. بااین‌حال، رویکردهایی که از طریق آن‌ها تلقیح میکروبی برای احیای خاک‌های تخریب‌شده استفاده می‌شود، هنوز متنوع و یک موضوع چالش‌برانگیز است. علاوه‌بر این امروزه با پیشرفت فنّاوری، پژوهش‌گران سعی در ارائه روش‌های جدید و بسیار آسان‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف با پردازش تصویر دارند (۲۵) که دقیق، سریع و غیرمخرب است (۲۸). پردازش تصویر روشی ساده برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف قابل ارزیابی برای به حداقل رساندن خطاها است. ازاین‌رو استفاده از روش‌های جدید ازجمله پردازش تصویر در مطالعات پایداری و تثبیت خاکدانه‌ها و هم‌چنین رعایت استانداردها امری لازم در نیل به هدف‌های متصور و توجیه به‌کارگیری روش‌های تفکیک جدید است.

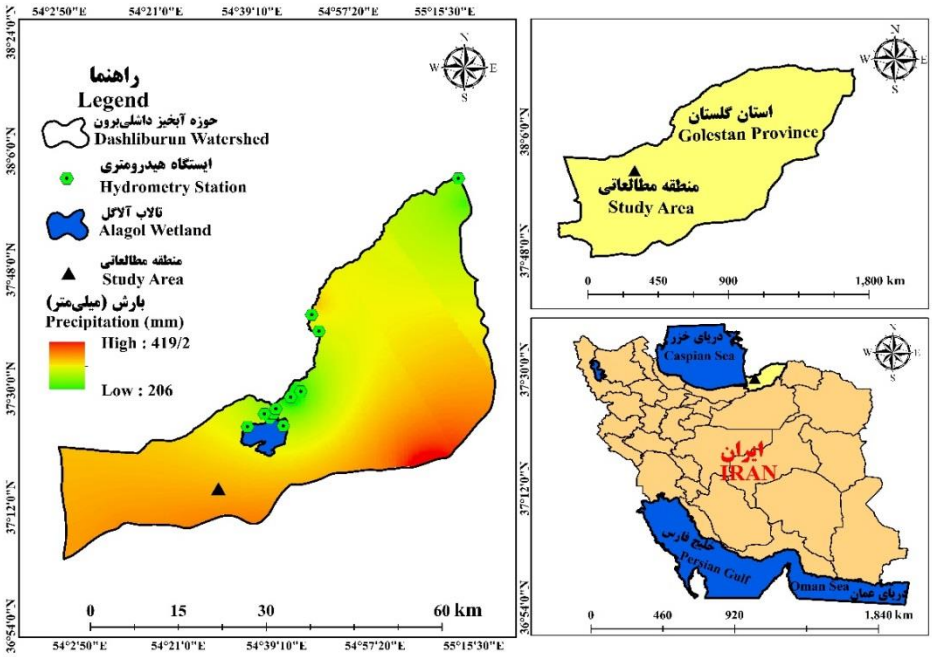
بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر امکان‌سنجی پایداری و تثبیت خاکدانه‌ها ناشی از تلقیح سیانوباکتری‌ها روی یک خاک شور و سدیمی با شوری متفاوت و با کمک پردازش تصویر است. ازاین‌رو پژوهش حاضر باهدف تحلیل پایداری خاک با استفاده از پردازش تصویر با الگوریتم‌های مختلف با کمک نرم‌افزار MATLAB 2017a پیش‌بینی شد. در این فرآیند مقایسه تیمارها با استفاده از تصاویر تهیه‌شده از روی کرت‌های آزمایشی به‌منظور تعیین و تحلیل پایداری خاکدانه‌ها تلقیح‌شده و نشده با سیانوباکتری‌های در خاک شور و سدیمی مدنظر قرار گرفت.

مواد وروش‌ها

به‌منظور اثرگذاری تلقیح سیانوباکتری بر پایداری خاکدانه‌ها و کاهش تخریب سطح خاک شور و قلیایی، نیاز به بهره‌گیری از سیانوباکتری‌های بومی و سازگار با شرایط منطقه در راستای حفظ تعادل زیستی و افزایش استقرار آن‌ها می‌باشد. بدین‌منظور سیانوباکتری‌ها از نمونه‌های خاک برداشت‌شده از سطح خاک منطقه مدنظر استخراج شدند. برای این منظور نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی از عمق صفر تا دو سانتی‌متری از منطقه اینچه‌برون به‌دلیل شور و قلیایی بودن خاک منطقه انجام شد.

منطقه نمونه‌برداری در اینچه‌برون با موقعیت ۵۴ درجه ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه ۷ دقیقه عرض شمالی و در ۴۰ کیلومتری شمال شهرستان گرگان و ۲۵ کیلومتری شمال آق‌قلا قرار گرفته است. این منطقه جزء مراتع قشلاقی استان گلستان بوده و

معرف مراتع شور این استان است. ارتفاع متوسط اراضی این منطقه از سطح دریای آزاد حدود ۱۰ متر است. آب‌وهوای ایستگاه هواشناسی اینچه‌برون، گرم و خشک بوده و دوره کم باران در این ناحیه عموماً از خرداد تا مهر بوده و بر اساس دیاگرام آمبروترمیک ایستگاه ذکرشده، دوره خشک سال در آن هشت تا نه ماه است. میانگین بارندگی سالیانه در ایستگاه اینچه‌برون ۲۹۱ میلی‌متر بوده و ریزش باران به‌طور عمده طی ماه‌های آبان تا اردیبهشت و حداکثر آن در بهمن و برابر با ۲۷/۵ میلی‌متر است. میانگین سالانه درجه حرارت روزانه در ایستگاه هواشناسی اینچه‌برون ۱۷/۰۶ درجه سانتی‌گراد، گزارش‌شده است. شکل ۱ نمایی از منطقه موردمطالعه در اینچه‌برون، استان گلستان را نشان می‌دهد.

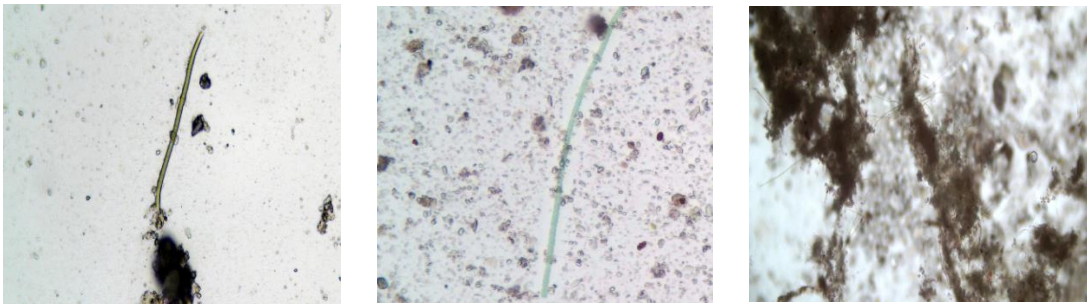


شکل ۱- نمایی از منطقه موردمطالعه و برداشت نمونه در اینچه‌برون استان گلستان.

Figure 1. A view of the study area and sample collection in Incheh Borun, Golestan Province, Iran.

پس از برداشت، نمونه‌های خاک منطقه موردمطالعه به آزمایشگاه منتقل و تا قبل از انجام آزمایش‌ها در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شدند. سپس نمونه‌های خاک در زیر هود کاملاً استریل، به ذرات با قطر کم‌تر از دو میلی‌متر تبدیل و برای کاهش انحراف و خطا در مراحل جداسازی و شناسایی سیانوباکتری‌ها، تمام نمونه‌های خاک به میزان ۱۰۰ گرم با هم مخلوط شدند (۲۶ و ۲۹). برای کشت و استخراج سیانوباکتری‌های نمونه‌ها از محیط کشت عمومی Bold Basal با بهترین کارایی و با کم‌ترین هزینه استفاده شد (۱۶). فرآیند کشت سیانوباکتری‌ها با اضافه کردن محیط کشت به ظروف پتری حاوی یک گرم از نمونه خاک و با استقرار لامل‌های ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر روی خاک انجام‌شده و پس از رشد و مشاهده سیانوباکتری‌ها روی لامل‌ها اقدام به شناسایی بر مبنای ریخت‌شناسی آن‌ها از طریق میکروسکوپ نوری و سپس انتقال جنس‌های انتخاب‌شده به محیط کشت‌های مایع شدند (۲۹، ۳۰ و ۳۱). انتخاب جنس‌های مفید سیانوباکتری‌ها بر مبنای توان زنده‌مانی، توان ترشح مواد چسبنده پلی‌ساکاریدی، رشد شبکه‌ای، تبدیل مواد غذایی به حالت‌های قابل‌استفاده برای سایر ریزموجودات،

گستره حضور زیاد در مناطق مختلف، تحمل شرایط سخت و هم‌چنین عدم بیماری‌زا بودن برای انسان و سایر موجودات است. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده، دو جنس سیانوباکتری *Nostoc* sp. و *Oscillatoria* sp. که بیش‌ترین غالبیت در بین گزینه‌های مهم و نهایی برای تلقیح را داشتند انتخاب شدند. به‌منظور تلقیح سیانوباکتری‌های انتخاب‌شده در سطح خاک، اقدام به تکثیر سیانوباکتری‌های شناسایی و انتخاب‌شده به تعداد 10^{10} تا 10^{12} سلول در لیتر شد (۲، ۱۵، ۲۶، ۲۹ و ۳۲). پس از انجام آزمایش EC و pH نمونه خاک منطقه مطالعاتی و مشخص کردن خاک با دو شوری متفاوت در منطقه، اقدام به جاگذاری کرت‌ها در منطقه مورد مطالعه شد. بدین‌منظور اقدام به ساخت و تهیه کرت‌هایی با ابعاد یک در یک شده و در منطقه مطالعاتی جاگذاری شدند. پس از آماده‌سازی کرت‌ها، سیانوباکتری‌های تکثیرشده با تعداد حدود 10^{10} تا 10^{12} سلول در لیتر به‌صورت تصادفی روی کرت‌ها پاشیده شدند. نمونه‌ای از تصاویر میکروسکوپی سیانوباکتری‌های تلقیح شده در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمونه‌ای از تصاویر میکروسکوپی سیانوباکتری تلقیح شده.

Figure 2. Example of the microscopic images of inoculated cyanobacteria.

برای پردازش تصویر با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و تعریف چند الگوریتم مختلف در پژوهش فعلی ابتدا مبادرت به تهیه تصویر با کیفیت بالا و در شرایط مناسب نوری مشابه در ساعت ۹ تا ۱۱ صبح به سبب وجود نور متعادل از فاصله معین و ثابت به‌طور کاملاً عمود از سطح خاک شد. پژوهش حاضر در شرایط صحرایی و میدانی و هر یک با سه تکرار و با اهداف اصلی مختلف و از جمله پایداری خاک‌دانه‌ها پیش‌بینی شده بود. بر همین اساس این روند با تکرار کافی و شرایط مطلوب مبتنی بر افزایش پایش و تکرار عکس‌برداری پیش‌بینی شده بود ولی متأسفانه امکان این موضوع به سبب بارش سیل‌آسا در منطقه و تخریب کامل کرت‌های آزمایشی و فوت ناگهانی نگهبان فراهم نشد. ولی با توجه به تعداد تصاویر تهیه شده که به خوبی نمایان‌گر اثر مثبت تلقیح سیانوباکتری‌ها بودند به همین دلیل از دو تکرار استفاده شد. به‌نحوی‌که ویژگی‌های طیفی سطحی خاک به‌خوبی نشان داده شود. در ادامه تصاویر تهیه‌شده به‌صورت مربع بدون وجود سایه و یا اشیای دیگر ویرایش و باقدرت تفکیک ۵۰۰ در ۵۰۰ پیکسل و بُعد تقریبی پنج سانتی‌متر باتوجه به ابعاد کرت‌ها و در گام اول ورود به نرم‌افزار، به مقیاس خاکستری (با سطح روشنایی صفر تا ۲۵۵) تبدیل شدند. در این پژوهش آنتروپی و انحراف معیار هر تصویر در مقیاس خاکستری محاسبه شد و نیز از الگوریتم‌های std filtering و Entropy filtering به‌منظور مقایسه بهتر تصاویر استفاده شد (۳۳، ۳۴). نمونه‌ای از تصاویر آماده‌شده از تیمارها برای ورود به نرم‌افزار در شکل ۳ ارائه شده است.



تیمار شاهد در خاک با شوری زیاد
Control treatment in soil with high salinity

تیمار سیانوباکتری در خاک با شوری زیاد
Cyanobacteria treatment in soil with high salinity

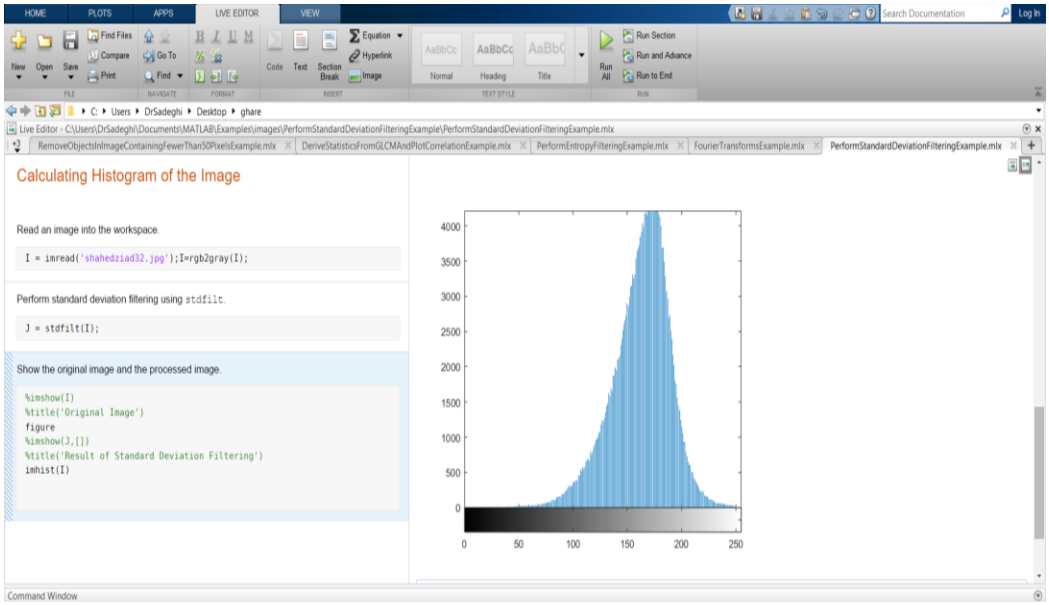
تیمار شاهد در خاک با شوری کم
Control treatment in soil with low salinity

تیمار سیانوباکتری در خاک با شوری کم
Cyanobacteria treatment in soil with low salinity

شکل ۳- نمونه تصاویر آماده‌شده از سطح خاک تلقیح شده با سیانوباکتری و شاهد در دو سطح شوری متفاوت.

Figure 3. Examples of prepared images of soil surface inoculated with cyanobacteria and control at two different salinity levels.

ابتدا تصاویر رنگی به تصاویر خاکستری با سطح‌بندی روشنایی از صفر تا ۲۵۵ که پیکسل‌های سفید با مقدار ۲۵۵ روشنایی کامل و پیکسل‌های تیره با مقدار صفر با تیرگی کامل تبدیل شدند و سپس هیستوگرام معادل شدت روشنایی تصاویر تهیه و ترسیم شد. به‌این‌ترتیب که در هیستوگرام‌ها محور افقی سطح روشنایی از صفر تا ۲۵۵ و محور عمودی تعداد پیکسل‌ها با هر سطح روشنایی را نشان می‌دهد. تصاویری از محیط کار نرم‌افزار در شکل ۴ ارائه‌شده است. سپس حداقل و حداکثر سطح روشنایی باقابلیت تفکیک متناسب با تعداد حداقل و حداکثر مساحت پیکسل‌های موجود در تصویر تعیین و نتایج مربوطه به‌صورت عدد، نمودار و شکل نمایش داده شدند.



شکل ۴- نتایج به‌دست‌آمده از پردازش تصویر در نرم‌افزار MATLAB.

Figure 4. Results obtained from image processing in MATLAB software.

تحلیل‌های آماری: به‌منظور انجام مقایسه‌های آماری، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد. داده‌های غیرنرمال با استفاده از روش لگاریتم با پایه ۱۰ و یا روش‌های اصلاحی لگاریتمی به حالت نرمال تبدیل شدند. هم‌چنین آزمون همگنی واریانس‌ها نیز به‌عنوان یکی از ملزومات اولیه تجزیه‌وتحلیل داده‌ها بررسی شد. برای این منظور از آزمون Levene به سبب کم‌ترین میزان حساسیت به نرمال بودن داده‌ها و مناسب‌ترین آزمون برای داده‌های کم استفاده شد. پس از برقراری شرط‌های طرح‌شده، تجزیه‌وتحلیل و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون t جفتی انجام شد. همه آزمون‌های آماری فوق برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در محیط نرم‌افزار SPSS 21 انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از روش پردازش تصویر با نرم‌افزار MATLAB با پنج الگوریتم متفاوت و متناسب برای مقایسه پایداری و تثبیت سطح خاک شور و قلیایی با دو تیمار تلقیح شده با سیانوباکتری و تیمار شاهد در دو سطح شوری خاک با دو تکرار در جدول ۱ ارائه شده است.

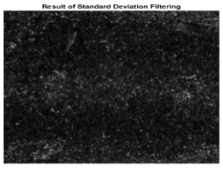
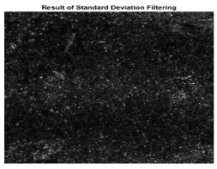
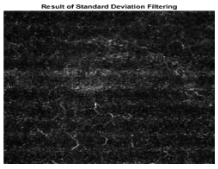
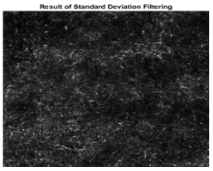
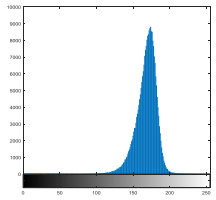
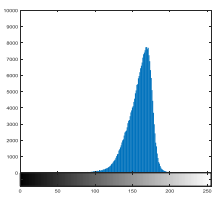
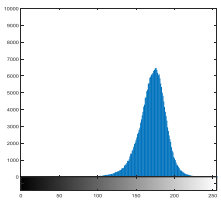
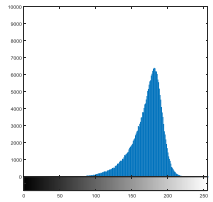
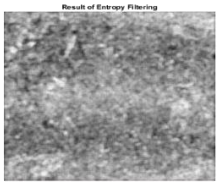
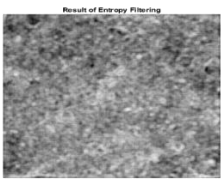
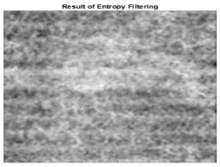
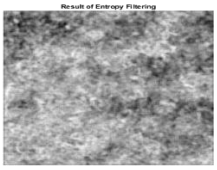
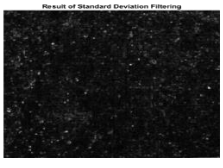
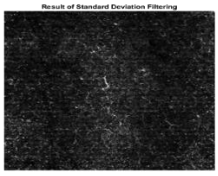
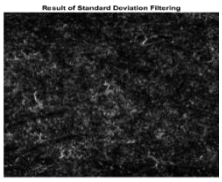
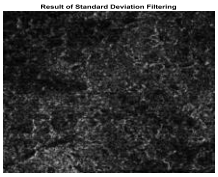
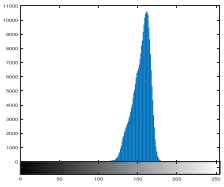
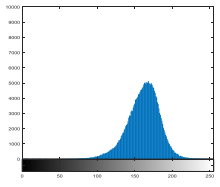
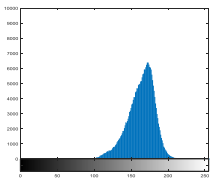
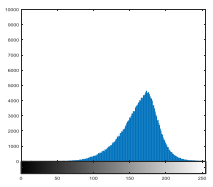
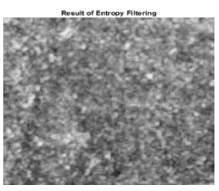
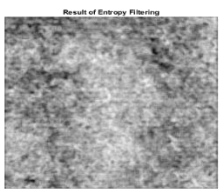
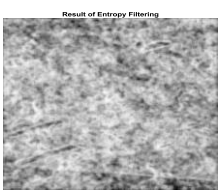
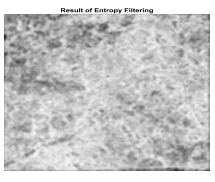
بنلپ و الدریج (۲۰۰۳) بیان کردند که پوسته‌های زیستی به اختلالات بسیار حساس هستند و زمان بازیابی آن‌ها در شرایط طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً بین دهه‌ها تا هزاره‌ها است (۳۵ و ۳۶). بااین‌حال، زمان بازیابی را می‌توان با تلقیح درجا خاک با گونه‌های پوسته زیستی، مانند سیانوباکتری‌ها، در بوم‌سازگان خشک و نیمه‌خشک تخریب‌شده افزایش داد (۳۷). هم‌چنین زمان توسعه پوسته‌های زیستی نقش مهمی در مزایای داده‌شده به آن‌ها در خاک دارد. حفاظت از فرسایش خاک توسط سیانوباکتری به‌طور مثبت با سن پوسته‌های زیستی مرتبط است. هنگامی‌که سیانوباکتری‌ها به مدت ۴۵ تا ۶۰ روز و بیش‌تر رشد می‌کنند، رواناب و هدررفت فرسایش خاک کاهش می‌یابد (۳۱، ۳۸، ۳۹ و ۴۰).

بر همین اساس، به‌منظور حداکثر اثرگذاری سیانوباکتری‌ها در محیط خاک (۲، ۳۸ و ۴۱) پس از گذشت ۵۰ روز از تلقیح سیانوباکتری‌ها بر سطح خاک نتایج به‌دست‌آمده از مشاهده چشمی ریخت‌سنجی سطح خاک تیمار تلقیح‌شده با سیانوباکتری و تیمار شاهد در شوری‌های متفاوت نشان داد که در خاک با شوری کم (۵/۶ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر) سطح تیمار شاهد نسبت به تیمار تلقیح شده با سیانوباکتری حالت پف‌کرده و به‌هم‌ریختگی ذرات خاک داشت (شکل ۳). هم‌چنین تیمارهایی که در خاک با شوری بیش‌تر (۱۵/۴ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر) قرار داشتند نسبت به دو تیمار که در شوری کم‌تر قرار داشتن حالت پف‌شدگی و ترک‌های ریز بیش‌تری داشتند. البته در تیمارهای شور تیمار تلقیح شده با سیانوباکتری مقدار به‌هم‌ریختگی و پف‌شدگی خاک نسبت به تیمار شاهد کم‌تر بود (شکل ۳).

در پژوهش حاضر، انحراف استاندارد پیکسل‌های تصویر یا انحراف معیار دوبُعدی، اندازه‌گیری پراکندگی شدت سطح خاکستری تصویر را ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان معیاری از سطح توان جزء سیگنال متناوب به‌دست‌آمده توسط دوربین لحاظ شود. آنتروپی یک تصویر نیز معیاری برای میزان تصادفی بودن تصویر است. بنابراین انتظار کلی این است که در صورت تثبیت خاکدانه‌ها، انحراف استاندارد پیکسل‌های تصویر و آنتروپی تصاویر، مقدار کم‌تری نسبت به وضعیت عدم تثبیت خاکدانه‌های سطح خاک داشته باشند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱، انحراف استاندارد پیکسل‌های تصویر و آنتروپی به‌دست‌آمده در تیمار تلقیح‌شده با سیانوباکتری نسبت به تیمار شاهد کم‌تر است که این اختلاف در خاک‌ها با شوری بیش‌تر مقدار آن کاهشی است.

جدول ۱- نتایج حاصل از نرم‌افزار MATLAB با الگوریتم‌های مختلف در تیمارهای تلقیح‌شده با سیانوباکتری و شاهد در دو سطح شوری متفاوت.

Table 1. The results of MATLAB software with different algorithms in treatments inoculated with cyanobacteria and control at two different salinity levels.

	تیمار سیانوباکتری در خاک با شوری کم Cyanobacteria treatment in soil with low salinity	تیمار شاهد در خاک با شوری کم Control treatment in soil with low salinity	تیمار سیانوباکتری در خاک با شوری زیاد Cyanobacteria treatment in soil with high salinity	تیمار شاهد در خاک با شوری زیاد Control treatment in soil with high salinity
انحراف استاندارد Standard deviation	14.3642	18.5823	18.1424	21.2403
آنتروپی تصویر Image entropy	6.0796	6.1932	6.1723	6.3170
انحراف استاندارد فیلترشده Std filtering				
هیستوگرام Histogram				
آنتروپی فیلترشده Entropy filtering				
انحراف استاندارد Standard deviation	11.0886	22.0518	22.7013	26.5718
آنتروپی تصویر Image entropy	5.4183	6.4673	6.4746	6.7267
انحراف استاندارد فیلترشده Std filtering				
هیستوگرام Histogram				
آنتروپی فیلترشده Entropy filtering				

جدول ۲- نتایج سطح معنی‌داری حاصل از آزمون t جفتی بر انحراف استاندارد و آنتروپی تصویر در کرت‌های تیمار شده با سیانوباکتری و شاهد.

Table 2. The results of the significance level of the paired T-test on the standard deviation and entropy of the image in the plots treated with cyanobacteria and control.

مؤلفه موردبررسی Checked variable	انحراف معیار Standard deviation	اشتباه معیار Criterion error	درجه آزادی Degree of freedom (df)	آماره t t-Value	سطح معنی‌داری Significance level
انحراف استاندارد Standard deviation	4.957	2.478	3	6.146	0.009
آنتروپی تصویر Image entropy	0.443	0.221	3	-1.758	1.177

بر اساس داده‌های جدول‌های ۱ و ۲ نتایج بیانگر این است که مقدار انحراف استاندارد پیکسل‌ها و آنتروپی تصاویر حاصل از پردازش تصویر در تیمارها با سطح شوری کم‌تر نسبت به تیمارها با سطح شوری بیش‌تر، میانگین مقدار انحراف استاندارد پیکسل‌های تصاویر در تیمار تلقیح‌شده با سیانوباکتری به ترتیب ۳۷/۳۶ و ۱۴/۵۵ درصد نسبت به تیمار شاهد به‌صورت معنی‌دار (P<۰/۰۱) کاهش داشته است. هم‌چنین میانگین آنتروپی تصاویر نیز در تیمار تلقیح‌شده با سیانوباکتری به ترتیب ۹/۱۸ و ۳/۰۴ درصد نسبت به تیمار شاهد به‌صورت غیرمعنی‌دار (P>۰/۰۱) کاهشی به دست آمد.

هم‌چنین در Std filtering پیکسل‌های روشن‌تر در تصویر فیلترشده با همسایگی‌های تصویر اصلی با انحرافات استاندارد بزرگ‌تر مطابقت دارد و در Entropy filtering، پیکسل‌های روشن‌تر در تصویر فیلترشده مربوط به همسایگی تصاویر اصلی با آنتروپی بالاتر است. بنابراین انتظار می‌رود در وضعیت تثبیت‌شده نسبت به وضعیت تثبیت نشده قسمت‌های روشن کم‌تری داشته باشند. یعنی در وضعیت تثبیت‌شده سطح خاک انحراف معیار دوبعدی و نیز آنتروپی تصویر کم‌تر است. با توجه به شکل‌های جدول ۱ استنباط می‌شود که پیکسل‌های تیره در تیمارهای تلقیح‌شده نسبت به تیمار شاهد بیش‌تر است. هم‌چنین در تیمارها با شوری بیش‌تر نسبت تیرگی پیکسل‌ها در تیمار تلقیح شده کم‌تر از تیمار با شوری کم‌تر است که می‌توان نتیجه گرفت در تیمارهای با شوری کم‌تر عملکرد تلقیح سیانوباکتری‌ها بهتر از تیمارهای با شوری بیش‌تر است و تثبیت خاکدانه‌ها بیش‌تر است. البته در تیمارهای با شوری بیش‌تر عملکرد تیمار تلقیح‌شده نسبت به تیمار شاهد بهتر بوده است. همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد در مشاهده چشمی نیز تفاوت‌های تثبیت خاک سطحی کاملاً مشهود است که پردازش تصویر نیز آن را تائید کرد. در این راستا، خیرفام و روحی (۲۰۲۰) نشان دادند *Oscillatoria* sp. و *Nostoc* sp. سیانوباکتری رشته‌ای و تولیدکننده پیشگام در خاک، با ترشح اگزوپلی‌ساکارید سبب اتصال ذرات خاک و افزایش پایداری خاک و بهبود ویژگی‌های سطحی خاک در مناطق خشک و تخریب‌شده می‌شوند (۴۲).

علاوه بر این هر هیستوگرام نیز بیانگر توزیع مقدار در مقیاس خاکستری است که فراوانی وقوع هر مقدار در سطح خاکستری را نشان می‌دهد. هم‌چنین در خصوص هیستوگرام، انتظار می‌رود نمودار دارای کشیدگی بیش‌تر (ماکزیمم بزرگ‌تر) در وضعیت تثبیت‌شده باشد و نیز با توجه به این‌که در خاکدانه‌های

تثبیت‌نشده، قسمت‌های تیره‌رنگ بیش‌تری در تصویر سطح خاکستری اولیه نسبت به وضعیت تثبیت‌شده وجود دارد انتظار می‌رود نمودار هیستوگرام بیش‌تر متمایل به قسمت‌های پایین‌تر سطح روشنایی باشد و علاوه بر آن از وضعیت نرمال دور و دارای چولگی به سمت چپ باشد. همان‌طور که در شکل‌های جدول ۱ مشاهده می‌شود نمودار هیستوگرام در تیمارهای تلقیح شده با سیانوباکتری توزیع نرمال و منحنی کشیده‌تر بوده و تیمارهای شاهد منحنی کشیدگی کم‌تر، چوله به چپ و منفی که نشانگر سطح روشن بوده است.

بررسی‌ها نشان داده‌اند که افزایش جمعیت سیانوباکتری‌ها با تلقیح در سطح خاک باعث افزایش ترشحات پلی‌ساکاریدی شده که باعث چسبیدگی خاکدانه‌ها و ساختارهای ریز خاک به یکدیگر و تشکیل ذرات و بزرگ ساختارهایی از خاک شده (۴۳) و افزایش پایداری خاکدانه‌ها و آستانه فرسایش‌پذیری خاک (۲، ۳۲، ۴۴، ۴۵، ۴۶ و ۴۷) می‌شود. هم‌چنین پلی‌ساکاریدهای ترشح‌شده باعث تأمین منابع غذایی برای سایر ریزموجودات خاک‌زی و افزایش فعالیت آن‌ها می‌شود (۴۸). از سویی دیگر سیانوباکتری‌های *Nostoc* sp. و *Oscillatoria* sp. که مؤثر در اتصال خاکدانه‌ها به یکدیگر هستند اغلب به‌صورت چسبیده در اطراف خاکدانه‌ها توانایی تکثیر و تشکیل کلونی را داشته و با گسترش ابعادی کلونی‌ها، زنجیره‌های به هم متصلی را ایجاد می‌کنند. زنجیره‌های تشکیل و گسترش‌یافته نیز خاکدانه‌های اطراف خود را با خاصیت چسبندگی خود به هم متصل کرده و خاکدانه‌ها قابلیت تثبیت و پایداری قابل‌توجهی خواهند داشت (۳۸ و ۴۹). از طرفی نتایج پژوهش‌های بنیادی و زیست‌شناسی نشان می‌دهد که سیانوباکتری‌ها قابلیت بالایی برای زیست در شرایط نامناسب و توانایی تحمل محیط‌های سخت را داشته و به‌دلیل عدم وابستگی غذایی به محیط قابلیت احیا پس از تحمل شرایط دشوار را دارند. به‌گونه‌ای که توانایی فعالیت در pH بین چهار تا ۱۱ و دمای ۸۰- تا ۵۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و مقاومت در برابر تنش‌های مختلف را دارند (۱۸، ۲۶، ۲۷، ۲۹، ۵۰، ۵۱ و ۵۲) سیانوباکتری‌ها رشته‌هایی برای حرکت و دست‌یابی به نور و زندگی و تکثیر در شرایط نامناسب محیطی دارند (۲۰، ۲۶، ۲۷، ۲۹ و ۵۳). آن‌ها با تحرک جانبی در سطح خاک (۵۴) و یا عمودی (۵۵) برای پراکندگی و محافظت در برابر تابش زیاد حرکت می‌کنند (۵۳). علاوه بر این، متابولیسم (سوخت‌وساز) سیانوباکتری‌ها با چرخه‌های هیدراتاسیون و خشک شدن معمولی در بیابان‌ها سازگار است (۵۶) و هنگامی‌که آب در دسترس است، مانند زمان وقوع شبنم، فعال می‌شوند (۵۷). سیانوباکتری‌ها قادر به تحمل دماهای بالا و اشعه ماورای بنفش با تولید رنگ‌دانه‌های غربالگر UV مانند سیتونمین هستند (۵۸). آن‌ها دارای سامانه خودتغذیه‌ای بوده که باعث تبدیل مواد معدنی به مواد آلی می‌شوند که می‌توانند مواد غذایی ریزموجودات خاک‌زی دگرتغذیه را تأمین کرده و بستر فعالیت و تکثیر بیش‌تر آن‌ها را فراهم نمایند. بنابراین این فرایند می‌تواند به ظهور و احیای بعدی موجودات زنده و گیاهان نیز کمک نماید.

بر همین اساس، در صورت وجود تعداد ریزموجودات در واحد سطح، ذرات خاک به هم دیگر متصل و باعث افزایش مقاومت برشی سطح خاک و پایداری خاکدانه‌ها (۲۳، ۵۹ و ۶۰) می‌شوند. هرچند سیانوباکتری‌ها در بانک ریزموجود خاک موردمطالعه وجود داشت، ولی به سبب جمعیت کم‌تر سیانوباکتری‌ها و تعداد کم در واحد سطح، میزان اثرگذاری آن‌ها در اتصال ذرات بسیار کم بود. بنابراین پس از تلقیح سیانوباکتری‌ها به تیمار مذکور به‌سرعت تکثیر کرده و با افزایش تعداد سیانوباکتری‌ها در واحد

سطح و با چسبیدن به اطراف ذرات ریز خاک و هم‌چنین ترشح پلی‌ساکارید باعث ایجاد اتصال قوی بین ذرات خاک و افزایش آستانه جدایش و حرکت ذرات خاک شده‌اند. مطالعات اخیر ازجمله چی و همکاران، (۲۰۲۰) و لان و همکاران، (۲۰۲۲) تأیید می‌کند که تلقیح سیانوباکتری‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری باعث توسعه پوسته‌های زیستی خاک در زمین‌های خشک تخریب‌شده شود (۶۱ و ۶۲). سیانوباکتری‌ها به‌دلیل داشتن قابلیت تنظیمات اسمزی، یونی و وجود املاح پروتئینی و سازگار و هم‌چنین وجود غلاف ژلاتینی در اغلب محیط‌های آبی و خاکی و حتی در قطب‌های شمال و جنوب نیز یافت می‌شوند (۶۳ و ۶۴). سیانوباکتری‌ها در برابر تنش‌های مختلف محیط‌زیستی ازجمله درجه حرارت پایین، خشکی، اشعه ماورای بنفش، انجماد و تنش‌های دیگر مقاومت می‌کنند (۲۹، ۵۰ و ۶۳).

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که یک اثر آستانه در پاسخ مربوط به اثر سیانوباکتری‌ها در خاک‌های شور و قلیایی وجود دارد. به‌طوری‌که تلقیح سیانوباکتری‌ها می‌تواند بر تثبیت و پایداری خاکدانه‌های سطح خاک با شوری کم (۵/۶ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر) اثر معنی‌دار و مثبتی داشته باشد. درحالی‌که در شوری بالا (۱۵/۴ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر) نسبت به شوری کم تأثیر کم‌تری داشته است. به‌نوعی می‌توان بیان کرد خاک‌های با شوری کم‌تر نسبت به تلقیح سیانوباکتری‌ها پاسخ متفاوت و بهتری نسبت به شوری بالا نشان دادند. ولی درهرصورت تلقیح سیانوباکتری‌ها در نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه‌های تیمارنشده با سیانوباکتری در هر دو حالت با شوری کم و با شوری زیاد اثر مثبت و معنی‌داری داشته است. سیانوباکتری‌ها به‌دلیل داشتن قابلیت تنظیمات اسمزی، یونی و وجود املاح پروتئینی و سازگار و هم‌چنین وجود غلاف ژلاتینی نسبت به تنش شوری مقاومت می‌کنند و اجازه می‌دهند آن‌ها در شرایط بسیار نامساعد محیطی از طریق واکنش‌های منحصر به‌خود تکثیر و ایجاد شوند. بنابراین این یافته‌ها بینش‌هایی را در مورد بهبود پایداری و تثبیت خاکدانه‌های سطح خاک شوری ارائه می‌دهد. بااین‌حال، چگونگی تأثیر ریزموجودات زنده به‌خصوص سیانوباکتری‌ها بر پایداری و تثبیت سطح خاک شور نیاز به مطالعه بیش‌تر برای پیش‌بینی تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش و گردوخاک در آینده دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور (INSF) برگرفته از طرح شماره "۴۰۱۵۰۰۷" و مساعدت‌های دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس برای انجام این پژوهش سپاسگزار هستند. هم‌چنین از داوران محترم این مقاله که با نظرات و پیشنهادهای خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند تشکر می‌نمایند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش مربوط به طرح پسادکتری نویسنده اول می‌باشد که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می باشند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:

نویسنده اول: روش‌شناسی و جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات، بازدیدهای میدانی، مشارکت در آنالیزها، نگارش مقاله.

نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در آنالیزها، نظارت تحقیق.

نویسنده سوم: روش‌شناسی اطلاعات، برنامه‌نویسی و استخراج داده‌های مرتبط با پردازش تصاویر و اصلاح مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فناوران کشور (INSF) برگرفته از طرح شماره "۴۰۱۵۰۰۷" صورت گرفته است.

منابع

1. Ashgevar Heydari, M., Sadeghi, S. H. R., & Jafarpoor, A. (2023). Hydrological properties of rill erosion on a soil from a drought-prone area during successive rainfalls as a result of microorganism inoculation. *Sustainability*, 15 (19), 14379.
2. Sadeghi, S. H. R., Kheirfam, H., & Zarei Darki, B. (2020a). Controlling runoff generation and soil loss from field experimental plots through inoculating cyanobacteria. *Journal of Hydrology*, 124814.
3. Gharemahmudli, S., Sadeghi, S. H. R., Najafinejad, A., Zarei Darki, B., Mohammadian Behbahani, A., & Kheirfam, H. (2024). Controlling enhanced surface runoff components as a result of a freezing-thawing cycle by inoculating soil bacteria and cyanobacteria. *Soil & Tillage Research*, 237, 105989.
4. Kundu, S., Perinjelil, S. J., & Thakur, N. (2022). Soil salinization and bioremediation using halophiles and halotolerant microorganisms. In Mitigation of Plant Abiotic Stress by Microorganisms (pp. 231-256). Academic Press.
5. Kakeh, J., Gorji, M., Sohrabi, M., Tavili, A., & Pourbabaee, A. A. (2018). Effects of biological soil crusts on some physicochemical characteristics of rangeland soils of Alagol, Turkmen Sahra, NE Iran. *Soil and Tillage Research*, 181, 152-159.
6. Wu, L., Farías, M. E., Torres, R. M., Xia, L., Song, S., Saber, A. A., & Lan, S. (2022). Salinity affects microbial composition and function in artificially induced biocrusts: Implications for cyanobacterial inoculation in saline soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, 108691.
7. Decock, C., Lee, J., Necpalova, M., Pereira, E. I. P., Tendall, D. M., & Six, J. (2015). Mitigating N_2O emissions from soil: from patching leaks to transformative action. *Soil*, 1, 687-694.
8. Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57, 1017-1023.
9. Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. International soil and water conservation Research, 3 (4), 316-323.
10. Brevik, E. C., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J. N., Six, J., & Van Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of SOIL. *Soil*, 1 (1), 117-129.
11. Pulido Moncada, M., Gabriels, D., Cornelis, W., & Lobo, D. (2015). Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators, *Land Degradation and Development*, 26 (8), 843-852.
12. Belnap, J., & Lange, O. L. (2013). Biological soil crusts: Structure, function, and management. Vol. 150, Springer Science and Business Media, 506 p.

13. Buscot, F., & Varma A. (2006). Microorganisms in soils: roles in genesis and functions. Vol. 3, Springer Science and Business Media, 422 p.
14. Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., Solé-Benet, A., & Domingo, F. (2012). Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. *Ecosystems*, 15, 148-161.
15. Sadeghi, S. H. R., Sadeghi Satri, M., Zarei Darki, B., & Kheirfam, H. (2020b). Runoff and soil loss from small plots of erosion-prone marl soil inoculated with bacteria and cyanobacteria under real conditions, *European Journal of Soil Biology*, 101, 103214.
16. Jafarpoor, A., Sadeghi, S. H. R., Homaee, M., & Zarei Darki, B. (2023). Effect of different culture media on the growth of soil cyanobacteria for soil and water conservation, *Applied Soil Research*. 11 (2), 71-81. [In Persian]
17. Oren, A. (2004). A proposal for further integration of the cyanobacteria under the Bacteriological Code. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54 (5), 1895-1902.
18. Moller, C. L., Vangsøe, M. T., & Sand-Jensen, K. (2014). Comparative growth and metabolism of gelatinous colonies of three cyanobacteria, Nostoc commune, Nostoc pruniforme, and Nostoc zetterstedtii, at different temperatures. *Freshwater Biology*, 59, 2183-2193.
19. Johnson, A. F., Baker, W. W., Anderson, L. C., Gholson, Jr. A. K. (2013). Flora of calcareous upland glades in Gadsden and Jackson counties, Florida. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 7, 475-494.
20. Méjean, A., Mann, S., Maldiney, T., Vassiliadis, G., Lequin, O., & Ploux, O. (2009). Evidence that biosynthesis of the neurotoxic alkaloids anatoxin-aand homoanatoxin-a in the cyanobacterium Oscillatoria PCC 6506 occurs on a modular polyketide synthase initiated by L-proline. *Journal of the American Chemical Society*, 131, 7512-7513.
21. Parikh, A., & Madamwar, D. (2006). Partial characterization of extracellular polysaccharides from cyanobacteria, Bioresource *Technology*, 97, 1822-1827.
22. Rossi, F., Li, H., Liu, Y., & 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.
23. Kakeh, J., Gorji, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Khormali, F., Sohrabi, M., & Cerdà, A. (2020). Biological soil crusts determine soil properties and salt dynamics under arid climatic condition in Qara Qir, Iran. *Science of the total environment*, 732, 139168.
24. Sepehr, A., Hassanzadeh, M., & Rodriguez-Caballero, E. (2019). The protective role of cyanobacteria on soil stability in two aridisols in northeastern Iran. *Geoderma Regional*, 16, 1-10.
25. Gharemahmudli, S., Sadeghi, S. H. R., Sadeghi, V. S., Najafinejad, A., & Jafarpoor, A. (2022). Morphometrical analysis of cracks and crevices on a cyanobacterized soil surface subjected to a freeze-thaw cycle using image processing. *Catena*, 213, 106150.
26. Sadeghi, S. H. R., Heydari, M. A., & Jafarpoor, A. (2023b). Inhibitability of soil loss and sediment concentration during consecutive rainfalls from experimental plots treated by endemic microorganisms. *International Journal of Sediment Research*. 38 (3), 446-454.
27. Sadeghi, S. H. R., Jafarpoor, A., Homaee, M., & Gharemahmudli, S. (2023a). Controllability of soil loss and runoff using soil microorganisms: A review. *Ecohydrology & Hydrobiology*.
28. Ren, J., Li, X., & Zhao, K. (2015). Quantitative analysis of relationships between crack characteristics and properties of soda-saline soils in Songnen Plain China. *Chinese Geographical Science*. 25 (5), 591-601.
29. Sadeghi, S. H., Jafarpoor, A., Homaee, M., & Gharemahmudli, S. (2023). Controllability of soil loss and runoff using soil microorganisms: A review. *Ecohydrology & Hydrobiology*.

30. Sadeghi, S. H. R., Kheirfam, H., Homaee, M., & Zarei Darki, B. (2017). Improvability of water infiltration in an erosion-prone soils under laboratorial conditions through artificial increasing of soil microorganisms population. *Journal of Water and Soil Researches* (*Agricultural Sciences*), 47 (4), 797-805. [In Persian]
31. Jafarpoor, A., Sadeghi, S. H. R., Zarei Darki, B., & Homaee, M. (2022). Changes in hydrologic components from a mid-sized plots induced by rill erosion due to cyanobacterization, *Soil and Water Conservation Research*, 10 (1), 143-148.
32. Gharemahmudli, S., Najafinejad, A., Sadeghi, S. H. R., Zarei Darki, B., Mohammadian Behbahani, A., & Kheirfam, H. (2020). Reducing surface runoff from soils subjected to a freezing-thawing cycle using soil cyanobacteria, *Journal of Water and Soil Conservation*, 27 (3), 163-180. [In Persian]
33. Gonzalez, R. C., & R. E. Woods, S. L. (2003). Eddins, digital image processing using MATLAB, new jersey, Prentice Hall, Chapter 11.
34. Solomon, C., & Breckon, T. (2011). Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in MATLAB. John Wiley & Sons.
35. Belnap, J., & Eldridge, D. J. (2003). Disturbance and recovery of biological soil crusts. In: Belnap, J., Lange, O.L. (Eds.), Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management. Springer, Berlin, pp. 363-383. **https://doi.org/ 10.1007/978-3-642-56475-8_27.**
36. Guida, G., Nicosia, A., Settanni, L., & Ferro, V. (2023). A review on effects of biological soil crusts on hydrological processes. Earth-Science Reviews, 104516.
37. Belnap, J. (1993). Recovery rates of cryptobiotic crusts: inoculant use and assessment methods. The Great Basin Naturalist, 53, 89-95.
38. Kheirfam, H., Sadeghi, S. H. R., Darki, B. Z., & Honaee, M. (2017). Controlling rainfall-induced soil loss from small experimental plots through inoculation of bacteria and cyanobacteria. *Catena*, 152, 40-46.
39. Bullard, J. E., Ockelford, A., Strong, C., & Aubault, H. (2018). Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123 (12), 3697-3712.
40. Gao, L., Bowker, M. A., Sun, H., Zhao, J., & Zhao, Y. (2020). Linkages between BSCs development and water erosion and implications for erosion model implementation. *Geoderma* 357, 113973.
41. Sadeghi, S. H. R., Kheirfam, H., Homaee, M., Zarei Darki, B., & Vafakhah, M. (2017). Improving runoff behavior resulting from direct inoculation of soil micro-organisms. *Soil and Tillage Research*, 171, 35-41.
42. 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.
43. DeJong, J. T., Fritzges, M. B., & Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132 (11), 1381-1392.
44. Strauss, S. L., Day, T. A., & Garcia-Pichel, F. (2012). Nitrogen cycling in desert biological soil crusts across biogeographic regions in the Southwestern United States. *Biogeochemistry*, 108, 171-182.
45. Chamizo, S., Mugnai, G., Rossi, F. R., 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.
46. Kuwabara, T., Iwamoto, K., Hara, H., Yamaguchi, T., Mohamad, S. E., Abdullah, N., Khudzari, J. Md., & Othman, F. S. (2021). Prevention of soil erosion using microalgae in Malaysia IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 1051, 012047.
47. Chheang, P., Min, F. T. Y., Khudzari, J. M., & Iwamoto, K. (2022). Isolation

and characterization of filamentous biological soil crust forming algae from Malaysia. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 1091, 012028.

48. Li, X., Hui, R., Tan, H., Zhao, Y., Liu, R., & Song, N. (2021). Biocrust research in China: recent progress and application in land degradation control. *Frontiers in Plant Science*, 12, 751521.
49. Maqubela, M. P., Mnkeni, P. N. S., Malam Issa, O., Fernández, P., Teresa, M., & D'Acqui, L. P. (2009). Nostoc cyanobacterial inoculation in South African agricultural soils enhances soil structure, fertility, and maize growth. *Plant and Soil*, 315, 79-92.
50. Tashyreva, D., & Elster, J. (2015). Effect of nitrogen starvation on desiccation tolerance of Arctic Microcoleus strains (cyanobacteria). *Frontiers in microbiology*, 6, 278.
51. Morsy, F. M., Elbadry, M., El-Sayed, W. S., & El-Hady, D. A. (2019). Dark and photofermentation H_2 production from hydrolyzed biomass of the potent extracellular polysaccharides producing cyanobacterium Nostoc commune and intracellular polysaccharide (glycogen) enriched Anabaena variabilis NIES-2095. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (31), 16199-16211.
52. Dong, C., Zhang, H., Yang, Y., He, X., Liu, L., Fu, J., Shi, J., & Wu, Z. (2019). Physiological and transcriptomic analyses to determine the responses to phosphorus utilization in Nostoc sp. *Harmful algae*, 84, 10-18.
53. Roncero-Ramos, B., Muñoz-Martín, M. Á., Chamizo, S., Fernández-Valbuena, L., Mendoza, D., Perona, E., ... & Mateo, P. (2019). Polyphasic evaluation of key cyanobacteria in biocrusts from the most arid region in Europe. *PeerJ*, 7, e6169.
54. Sorochkina, K., Velasco Ayuso, S., & Garcia-Pichel, F. (2018). Establishing rates of lateral expansion of cyanobacterial biological soil crusts for optimal restoration. *Plant and Soil*, 429 (1-2), 199-211.
55. Garcia-Pichel, F., & Pringault, O. 2001. Microbiology: cyanobacteria track water in desert soils. *Nature*. 413, 380-381.
56. Rajeev, L., Da Rocha, U. N., Klitgord, N., Luning, E. G., Fortney, J., Axen, S. D., Shih, P. M., Bouskill, N. J., Bowen, B. P., Kerfeld, C. A., Garcia-Pichel, F., Brodie, E. L., Northen, T. R., & Mukhopadhyay, A. (2013). Dynamic cyanobacterial response to hydration and dehydration in a desert biological soil crust. *ISME Journal* 7 (11), 2178-2191.
57. Büdel, B., Bendix, J., Bicker, F. R., & Allan Green, T. G. (2008). Dewfall as a water source frequently activates the endolithic cyanobacterial communities in the granites of Taylor Valley, Antarctica. *Journal of Phycology*. 44 (6), 1415_1424.
58. Potts, M. (1994). Desiccation tolerance of prokaryotes. *Microbiological Reviews*. 58, 755-805.
59. Carrasco, L., Caravaca, F., Azcón, R., & Roldán, A. (2009). Soil acidity determines the effectiveness of an organic amendment and a native bacterium for increasing soil stabilisation in semiarid mine tailings. *Chemosphere*, 74 (2), 239-244.
60. Kakeh, J., Sanaei, A., Sayer, E. J., Hazhir, S., Gorji, M., & Mohammadi, M. H. (2022). Biocrust diversity enhances dryland saline soil multifunctionality. *Land Degradation & Development*. 34 (2), 521-533.
61. Chi, Y., Li, Z., Zhang, G., Zhao, L., Gao, Y., Wang, D., Liu, L., Cai, D., & Wu, Z. (2020). Inhibiting desertification using aquatic cyanobacteria assisted by a nanocomposite. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8, 3477-3486.
62. Lan, S., Wu, L., Adessi, A., & Hu, C. (2022). Cyanobacterial persistence and influence on microbial community dynamics over 15 years in induced biocrusts. *Environmental Microbiology*, 24, 66-81.
63. Seckbach, J. (Ed.). (2007). Algae and cyanobacteria in extreme environments (Vol. 11). Springer Science & Business Media. 812 p.
64. Kvíderová, J., Elster, J., & Komárek, J. (2019). Ecophysiology of cyanobacteria in the polar regions. In Cyanobacteria, 277-302 p. Academic Press.