ارزیابی هم‌افزایی سیانوباکتر و رس بنتونیت بر تثبیت خاک سطحی حساس به فرسایش بادی و کاهش گرد و غبار

چکیده

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است و مهار آن بدون اتکا به مواد شیمیایی، به‌ویژه در زیست‌محیط‌های حساس، یک ضرورت مدیریتی به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، رویکردهای تثبیت خاک سازگار با محیط‌زیست و استفاده از مواد زیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند.. در این پژوهش، کارایی هم‌زمان سیانوباکترهای خاک‌زی و رس بنتونیت کلسیم‌دار به‌عنوان یک فناوری تثبیت زیست–معدنی ارزیابی شد تا امکان بهبود ویژگی‌های سطحی خاک و مقاومت آن در برابر فرسایش بادی بررسی شود. تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح بنتونیت (۲۵ و ۵۰ گرم بر مترمربع)، سه سویه سیانوباکتر و مخلوط این سه سویه و همچنین ترکیب سیانوباکتر–بنتونیت بود. پس از دوره رشد شش ماهه و استقرار پوسته زیستی تشکیل شده از سیانوباکتر، مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیکی شامل سرعت حد آستانه فرسایش بادی، میانگین وزنی قطر خاکدانه، مقاومت به فرورفتن، و نیز شاخص‌های زیستی شامل کلروفیل a، تنفس میکروبی، کربن زیست‌توده میکروبی، کربن آلی و نیتروژن کل اندازه‌گیری شد. یافته‌ها نشان داد که تلفیق سیانوباکتر و بنتونیت موجب افزایش ۶۱ درصدی میانگن قطر خاکدانه، بهبود انسجام سطحی خاک و افزایش ۱۰۰ درصد سرعت حد آستانه فرسایش بادی نسبت به شاهد و کاهش پراکندگی و انتقال ذرات ریز گردید. ماتریکس زیستی تولیدشده توسط سیانوباکترها در کنار نقش بنتونیت در افزایش چسبندگی و مقاومت خاک در برابر کنده شدن توسط باد، اثر هم‌افزایی بارزی ایجاد کرد. در مجموع، استفاده از این ترکیب زیستی–معدنی به‌عنوان رویکردی کم‌هزینه، پایدار و سازگار با محیط‌زیست می‌تواند گزینه‌ای کاربردی برای مدیریت فرسایش بادی و کنترل کانون‌های گردوغبار در نواحی خشک باشد.

واژگان کلیدی: *بنتونیت، سیانوباکتر، تثبیت زیستی–معدنی، فرسایش بادی، گرد وغبار*

Abstract

Wind erosion is one of the most critical environmental and economic challenges in arid and semi-arid regions, and its control—particularly without reliance on chemical stabilizers—is essential for protecting vulnerable ecosystems. In recent years, environmentally friendly and biologically based approaches have gained increasing attention. This study evaluated the combined effectiveness of soil-dwelling cyanobacteria and calcium-bentonite clay as a bio-mineral stabilization technology to enhance surface soil properties and resistance to wind erosion. The experimental treatments included two bentonite application rates (25 and 50 g m^{-2}), three cyanobacterial strains and their mixture, as well as a combined cyanobacteria–bentonite treatment. After a growth period sufficient for cyanobacterial development and extracellular polymeric substance formation, a set of physical indicators—including threshold friction velocity, mean weight diameter of aggregates, and penetration resistance—along with biological indices such as chlorophyll *a*, microbial respiration, microbial biomass carbon, soil organic carbon, and total nitrogen were measured. The results showed that the combined application of cyanobacteria and bentonite led to a 61percent increase in mean aggregate diameter, improved soil surface cohesion, and a 100 percent increase in the threshold wind erosion velocity compared to the control, while significantly reducing the dispersion and transport of fine particles.”. The EPS-based biological matrix produced by cyanobacteria, together with the adhesive and water-retentive effects of bentonite, generated a pronounced synergistic interaction. Overall, the application of this bio-mineral combination represents a low-cost, sustainable, and environmentally compatible strategy for mitigating wind erosion and controlling dust-emission hotspots in dryland environments.

Keywords: bentonite; bio-mineral stabilization; cyanobacteria; wind erosion; dust control

Extended Abstract

Introduction

Wind erosion is a major driver of land degradation in arid and semi-arid regions, where low rainfall, sparse vegetation, and fragile soil surfaces create conditions highly susceptible to particle detachment and transport.

ویرایش نشده

Conventional soil stabilizers—especially chemical mulches—have shown limited success due to their high cost, short longevity, and incompatibility with natural ecosystems. As a nature-based alternative, cyanobacteria-induced biostabilization has emerged as a promising approach; cyanobacteria enhance soil cohesion through the production of extracellular polysaccharides (EPS), nitrogen fixation, and formation of biological crusts. Meanwhile, bentonite clay, owing to its swelling capacity, high surface charge, and water retention, can improve physical soil cohesion and reduce detachability. Despite these advantages, interactions between biological (cyanobacteria) and mineral (bentonite) stabilizers remain poorly understood, and few studies have evaluated their combined effectiveness against wind erosion. This study aims to assess the synergistic potential of cyanobacteria–bentonite bio-mineral stabilization in enhancing soil structural stability and increasing threshold friction velocity under controlled wind tunnel conditions.

Methodology

Surface soil samples (0–5 cm) were collected from wind-erosion-prone lands of Aran-Bidgol (Kashan). After air-drying and sieving (<2 mm), initial physico-chemical properties including texture, pH, EC, organic carbon, and macronutrients were measured. Cyanobacterial strains (79et, 50et, 57et, and a mixed combination) were obtained from the National Biological Resource Center and cultured in BG-11 medium. Bentonite was prepared from a natural calcium-rich source. A factorial experiment was implemented in a randomized complete block design (RCBD) with four replicates and the following treatments:

(1) cyanobacteria strains, (2) bentonite at 25 and 50 g m^{-2}, (3) cyanobacteria + bentonite combinations, and (4) untreated control. Treatments were applied to 60 soil trays (100 × 30 × 3 cm) in six rounds at three-week intervals. Cyanobacteria suspension (0.5 g L^{-1}) and bentonite slurry were sprayed uniformly. Trays were maintained utdoors under controlled conditions for six months. Measured variables included:

- wind erosion threshold velocity, using a laboratory wind tunnel;
- mean weight diameter (MWD) of aggregates via dry sieving;
- penetration resistance using a micro-penetrometer;
- chlorophyll a, microbial respiration, microbial biomass carbon, organic C, and total N. Data were analyzed using ANOVA and Tukey's test at 5% significance level.

Results and Discussion

The soil was sandy loam with low organic carbon (0.17%) and moderate salinity (EC = 8.8 dS m^{-1}), typical of erosion-prone arid-region soils. ANOVA indicated that cyanobacteria and bentonite independently and significantly increased wind-erosion resistance, MWD, and penetration resistance ($p < 0.01$). Cyanobacteria significantly increased biological indicators (chlorophyll a, microbial biomass, respiration), whereas bentonite showed no significant effect on biochemical properties. Wind-tunnel tests revealed a substantial rise in threshold friction velocity in all cyanobacteria-treated soils due to EPS-induced aggregation and crust formation. Bentonite also increased threshold velocity by filling pore spaces and promoting cohesive bonding among particles. The highest erosion resistance occurred in the combined treatment of mixed cyanobacteria + bentonite (50 g m^{-2}), emonstrating a strong bio-mineral synergistic effect. Similarly, MWD increased markedly in both cyanobacteria and bentonite treatments, and reached its maximum under the combined application. These results indicate that physical bonding by bentonite creates a conducive matrix for microbial colonization and EPS network formation. Cyanobacteria significantly increased soil organic carbon, microbial biomass, and total nitrogen, confirming the biological enrichment of treated surfaces. Bentonite alone did not alter chemical properties but strengthened structural integrity. Overall, the integration of biological crust formation and mineral-based cohesion provided a robust framework for stabilizing sandy loam soils against wind detachment.

Conclusions

The combined application of cyanobacteria and bentonite significantly enhanced soil resistance to wind erosion through complementary biological and mineral processes. While cyanobacteria improved biochemical activity

and aggregate stability via EPS production and biomass accumulation, bentonite reinforced physical cohesion and reduced particle mobility. The bio-mineral stabilization strategy demonstrated superior performance compared with individual treatments, particularly in increasing wind-erosion threshold velocity and aggregate stability. These findings highlight the potential of low-cost, eco-friendly, and durable stabilizers for managing wind erosion in dryland environments. The approach offers a practical alternative to conventional chemical mulches and can contribute to sustainable land-degradation mitigation in arid landscapes.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, methodology, investigation, data curation, and writing of the original draft as well as review and editing of the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Data Availability

Statement Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the support from the University of Tehran, Iran for providing the financial support for this research project.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ویراستاری نشده

مقدمه

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است و نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش حاصل‌خیزی خاک، تخریب زیست‌بوم‌ها، تهدید زیرساخت‌های انسانی و افزایش انتشار گردوغبار دارد (fattahi et al, 2020). عواملی مانند بارندگی کم، پوشش گیاهی فقیر، نوسانات دمایی زیاد و فعالیت‌های انسانی باعث افزایش شکنندگی خاک در این مناطق می‌شود و سطحی سست و مستعد برای انتقال ذرات ایجاد می‌گردد (Ekhtesasi and Sepehr, 2009). در چنین شرایطی، مدیریت فرسایش بادی نه‌تنها یک ضرورت زیست‌محیطی، بلکه یک اولویت اقتصادی و اجتماعی برای جوامع محلی و سیاست‌گذاران محسوب می‌شود. تجربه نشان داده است که استفاده از روش‌های سنتی تثبیت خاک به‌ویژه مالچ‌های شیمیایی به دلیل هزینه زیاد، اثرگذاری کوتاه‌مدت، آلودگی‌های ثانویه و ناسازگاری با سامانه‌های بوم‌شناختی، نمی‌تواند پاسخ‌گوی نیاز مناطق خشک باشد (Toy et al., 2002). ازاین‌رو، پژوهشگران به‌دنبال یافتن راهکارهایی سازگار با طبیعت و کم‌هزینه هستند که ضمن تقویت پایداری سطح خاک، موجب کاهش وابستگی به مداخلات پرهزینه شوند.

یکی از رویکردهای نوین و امیدوارکننده، استفاده از تثبیت زیستی بر پایه فعالیت سیانوباکترهاست. سیانوباکترهای خاک‌زی با ایجاد ساختمان‌های پلی‌ساکاریدی خارج‌سلولی، تشکیل پوسته‌های زیستی، افزایش اتصال ذرات و فراهم‌سازی عناصر غذایی، نقش مهمی در افزایش انسجام سطحی خاک دارند (Yu et al, 2024; Belnp, 2006). از سوی دیگر، مواد معدنی رسی مانند بنتونیت به‌دلیل ظرفیت جذب زیاد، تورم‌پذیری و ایجاد چسبندگی میان ذرات، می‌توانند به افزایش پایداری ساختمان خاک کمک کنند (Abulimiti et al, 2023). بر این اساس، ترکیب هم‌زمان فرآیندهای زیستی مبتنی بر سیانوباکتر و ویژگی‌های فیزیکی–معدنی بنتونیت می‌تواند یک سازوکار هم‌افزا ایجاد کند که منجر به افزایش مقاومت مکانیکی سطح خاک در برابر نیروهای فرسایشی

شود. با وجود این ظرفیت‌ها، مطالعات اندکی به بررسی اثر هم‌زمان این دو عامل پرداخته‌اند و اغلب پژوهش‌ها به‌طور مجزا به تثبیت زیستی یا معدنی پرداخته‌اند.

ازاین‌رو، مسئله‌ی اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی اثربخشی ترکیب سیانوباکتر و بنتونیت کلسیم‌دار به‌عنوان یک راهکار تثبیت زیستی–معدنی برای کنترل فرسایش بادی است. این پژوهش با هدف بررسی اثرات فیزیکی و زیستی ناشی از این ترکیب طراحی شده است تا مشخص شود آیا چنین رویکردی می‌تواند پایداری سطح خاک و مقاومت مکانیکی آن در برابر پراکندگی ذرات را به‌طور معنی‌دار افزایش دهد یا خیر. فرضیه پژوهش این است که بنتونیت از طریق سازوکارهایی همچون افزایش چسبندگی ذرات خاک، حفظ رطوبت و کاهش پدیده پراکندگی ذرات، و سیانوباکتر با تولید مواد پلیمری خارج سلولی، ایجاد پوسته زیستی و افزایش ماده آلی خاک سبب کاهش فرسایش‌پذیری آن می‌شوند. همچنین، پیش‌بینی می‌شود ترکیب این دو عامل، اثر هم‌افزایی داشته و منجر به بهبود پایداری و مقاومت به فرسایش خاک گردد. ضرورت انجام این پژوهش از نیاز روزافزون به فناوری‌های کم‌هزینه، بادوام و سازگار با زیست‌محیط خشک ناشی می‌شود؛ فناوری‌هایی که بتوانند علاوه بر کاهش فرسایش، موجب ارتقای کیفیت زیستی خاک گردند.

پیشینه پژوهش

تثبیت خاک در برابر فرسایش بادی بر تعامل سه گروه عامل استوار است: ویژگی‌های فیزیکی خاک، فرآیندهای زیستی، و نقش مواد معدنی ریزدانه. از منظر فیزیکی، ساختمان خاک و پیوستگی میان ذرات مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده پایداری سطحی است، به‌گونه‌ای که هرچه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بزرگ‌تر و چسبندگی سطحی بیشتر باشد، مقاومت خاک در برابر پراکندگی ذرات نیز افزایش می‌یابد. حد آستانه فرسایش بادی نیز تابعی از نیروهای نگه‌دارنده میان ذرات خاک است (Ravi et al, 2011; Bagnold, 1941).

از دیدگاه زیستی، ریز جانداران به‌ویژه سیانوباکترها از طریق تولید پلی‌ساکارید، تثبیت نیتروژن، و ایجاد پوسته‌های زیستی، پایداری سطحی خاک را افزایش می‌دهند. پوسته‌های زیستی با ایجاد لایه نازک در سطح خاک علاوه بر افزایش نفوذپذیری آن، بازدارندگی قابل توجهی در برابر فرسایش بادی دارند (Karimi et al, 2024; Hu et al, 2020; Belnap, 2003). سیانوباکترها قادرند شبکه‌ای از رشته‌ها و پلیمرهای چسبنده ایجاد کنند که ذرات را در کنار یکدیگر تثبیت می‌کند (Noy et al, 2021). رس‌ها به‌ویژه بنتونیت، به دلیل تورم‌پذیری، بار سطحی منفی و قدرت جذب آب بالا، می‌توانند باعث افزایش انسجام ساختمان خاک شوند. بنتونیت به دلیل خاصیت تورمی، در میان رس‌ها جایگاه ویژه‌ای دارد و باعث پرشدن فضاهای خالی و افزایش نیروهای چسبندگی بین ذرات می‌شود (Qian et al, 2024; Gates et al, 2018). البته این ویژگی‌ها می‌توانند همزمان سبب کاهش نفوذپذیری خاک در حضور رس بنتونیت شوند و استفاده از تثبیت‌کننده‌های زیستی در کنار این عامل معدنی می‌تواند این مشکل را رفع نماید. بنابراین، ترکیب عوامل زیستی و معدنی در رویکرد نظری سبب تثبیت زیستی–معدنی ذرات خاک خواهد شد. به عبارت دیگر، تقویت هم‌زمان فرآیندهای زیستی و فیزیکی خاک سبب خواهد شد که خاک سطحی وضعیتی پایدار و مقاوم در برابر نیروهای فرسایشی پیدا کند.

مطالعات متعددی به نقش سیانوباکترها در تثبیت خاک پرداخته‌اند. برای نمونه، Chamizo et al, (2018) نشان دادند که حضور سیانوباکترهای رشته‌ای موجب افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها و کاهش پراکندگی ذرات در آزمایش‌های تونل باد می‌شود. همچنین Wang et al (۲۰۲۵) گزارش کردند که تشکیل پوسته‌های زیستی باعث افزایش سرعت حد آستانه فرسایش تا ۶۴/۷۳ درصد مقدار اولیه می‌شود. در مطالعه ای دیگر که توسط Wang et al (۲۰۲۵) به بررسی تأثیر تلقیح سیانوباکترها و افزودن بیوچار

ویرایش اولیه

بر کنترل فرسایش بادی خاک‌های بدون پوشش در مناطق خشک انجام شد، بیان کردند که سیانوباکترها با تشکیل بیوفیلم و تثبیت ذرات سطحی خاک و بیوچار با بهبود ساختمان خاک و افزایش چسبندگی ذرات، به‌طور قابل توجهی هدررفت خاک را کاهش می‌دهند.

در رابطه با نقش رس‌ها، مطالعاتی مانند Awad et al, (2019) به بررسی اثر بنتونیت بر بهبود پایداری خاک پرداختند و نشان دادند که افزودن مقادیر اندک رس بنتونیت می‌تواند مقاومت برشی و پایداری سطحی را افزایش دهد. بااین‌حال، بخش عمده‌ی این پژوهش‌ها تنها یک عامل تثبیت‌کننده را بررسی کرده‌اند.

مطالعات ترکیبی زیستی–معدنی محدودترند؛ برای مثال، Khojasteh et al, (2017) دریافتند که ترکیب یک پلیمر زیستی با رس کائولینیت باعث افزایش قابل توجه مقاومت خاک در برابر فرسایش آبی می‌شود. بااین‌حال، مطالعاتی که ترکیب سیانوباکتر و بنتونیت را در زمینه فرسایش بادی بررسی کرده باشند، بسیار نادرند و در این زمینه خلأ پژوهشی قابل توجهی وجود دارد. همچنین شناخت سازوکارهای هم‌افزایی میان فرآیندهای زیستی (مانند تولید پلی ساکاریدهای سلولی، افزایش مواد آلی) و فرآیندهای مکانیکی (چسبندگی و تورم رس) نیازمند پژوهش‌هایی دقیق و کنترل‌شده است. با توجه به اینکه بسیاری از خاک‌های مناطق خشک از نظر ترکیب معدنی فقیرند، ترکیب این دو عامل ممکن است تأثیری فراتر از ترکیب هر عامل دیگری باهم داشته باشد (Shi et al, 2025). بنابراین، فاصله میان دانسته‌های تجربی درباره‌ی تثبیت زیستی و تثبیت معدنی، نیازمند پژوهش‌هایی است که این دو مسیر را در چارچوبی یکپارچه بررسی کنند.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه و خاک مورد مطالعه

نمونه‌برداری خاک مورد مطالعه در این پژوهش از اراضی حساس به فرسایش بادی واقع در اقلیم خشک–نیمه‌خشک شهرستان آران و بیدگل استان اصفهان انجام شد. نمونه‌برداری از لایه سطحی خاک (۰ تا ۵ سانتی‌متر) انجام گرفت و پس از انتقال به آزمایشگاه، نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط هواخشک شدند. سپس خاک‌ها به‌آرامی خرد شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند تا اندازه‌گیری‌های اولیه انجام شوند. ویژگی‌های اولیه خاک مانند بافت (درصد شن، سیلت، و رس)، واکنش شیمیایی (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم اندازه‌گیری‌شدند.

مواد مورد استفاده

برای فراهم کردن جزء زیستی در این پژوهش، سویه‌های سیانوباکتر از مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران تهیه و در محیط غذایی BG-11 کشت داده شدند. کشت میکروبی پس از رسیدن به فاز رشد پایدار، برداشت و به‌صورت سوسپانسیون یکنواخت برای اعمال به خاک آماده گردید. جزء معدنی نیز از یک منبع طبیعی بنتونیت کلسیم‌دار طبیعی تهیه و پیش از مصرف خشک و یکنواخت شد.

طرح آزمایش و تیمارها

ویرایش نشده

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا گردید. هر بلوک شامل هشت سینی از ترکیب سیانوباکترها+بنتونیت، چهار سینی از سویه‌های مختلف سیانوباکتر، دو سینی شامل دو سطح بنتونیت و یک سینی شاهد بود (جدول۱).

جدول ۱. تیمارهای مورد مطالعه

تیمار	سویه/مقدار
سیانوباکتر	79 et
	50 et
	57 et
	تلفیق سویه‌ها (combination)
بنتونیت	بنتونیت کلسیم دار به میزان ۲۵ گرم در متر مربع (B25)
	بنتونیت کلسیم دار به میزان ۵۰ گرم در متر مربع (B50)
بنتونیت+سیانوباکتر	بنتونیت کلسیم دار به میزان ۲۵ گرم بر متر مربع + 79et
	بنتونیت کلسیم دار به میزان ۲۵ گرم بر متر مربع + 50et
	بنتونیت کلسیم دار به میزان ۲۵ گرم بر متر مربع + 57et
	بنتونیت کلسیم دار به میزان50 گرم بر متر مربع + 79et
	بنتونیت کلسیم دار به میزان50 گرم بر متر مربع + 50et
	بنتونیت کلسیم دار به میزان50 گرم بر متر مربع + 57et
	بنتونیت کلسیم دار به میزان ۲۵ گرم بر متر مربع + ترکیب سویه‌های سیانوباکتر
	بنتونیت کلسیم دار به میزان ۵۰ گرم بر متر مربع + ترکیب سویه‌های سیانوباکتر
شاهد	خاک بدون اعمال تیمار (Blank)

ویرایشی نشده

اعمال تیمارها

نمونه‌های خاک در ۶۰ سینی با ابعاد ۱۰۰×۳۰×۳ سانتی‌متر به عنوان بستر خاک مورد آزمایش تونل باد و ۶۰ نمونه ظرف زیرگلدانی به منظور آزمون‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آماده شدند. تیمارها در شش نوبت و با فاصله سه هفته اعمال شدند. محلول سیانوباکتر با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر و به میزان ۳۰۰ میلی‌لیتر در هر سینی در هر نوبت پاشیده شد و در مجموع ۵ گرم بر متر مربع سیانوباکتر به خاک اضافه گردید. تیمار بنتونیت نیز به صورت دوغاب به مقدار ۲۵ و ۵۰ گرم بر متر مربع به سینی‌ها اعمال شد. خاک تیمار شده در سینی‌های مخصوص تونل باد در فضای باز نگهداری شد و از اثر بارندگی یا باد شدید محافظت گردید، به طوری که در دوره ۶ ماهه نگهداشت تیمارها، نور طبیعی بدون اختلال در دسترس خاک بود. متغیرهای پاسخ مورد اندازه‌گیری در این پژوهش شامل شاخص‌های فیزیکی مانند میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، سرعت حد آستانه فرسایش بادی، مقاومت به فروروی و شاخص‌های زیستی و شیمیایی مانند کلروفیلa ، تنفس میکروبی، کربن زیست‌توده میکربی، کربن آلی و نیتروژن هستند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک

برای ارزیابی مقاومت سطح خاک در برابر باد، سرعت حد آستانه فرسایش بادی با استفاده از تونل باد آزمایشگاهی که سرعت باد تولیدی بین صفر تا ۱۳ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری و طول کانال چهار متری که دارای محفظه جم آوری ذرات انتقال شده می‌باشد، تعیین شد. در این روش، نمونه‌ها در تونل باد قرار داده شده و سرعت حد باد به‌صورت تدریجی افزایش داده شد تا

زمانی که نخستین نشانه‌های حرکت ذرات مشاهده گردد (Gillette, ۱۹۷۸). پایداری خاکدانه‌های تشکیل شده به‌روش الک خشک اندازه‌گیری شد. برای این منظور ابتدا نمونه‌های خاک از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شدند و سپس توسط دستگاه الک لرزان از سری الک‌هایی به قطر ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، و ۰/۰۶۲۵ میلی‌متری عبور داده شدند. مدت زمان لرزه مکانیکی الک‌ها برای هر نمونه خاک ۵ دقیقه با سرعت دورانی افقی ۵۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد. در نهایت پس از جداسازی ذرات شن، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به عنوان شاخص پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید (Kemper & Rosenau, 1986).

معادله (۱)
$$MWD = \sum_{i=1}^{n} w_i \bar{x}_i$$

که آن $\bar{x}$ میانگین قطر خاکدانه‌های باقی مانده روی الک و w_i نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل می‌باشند.

مقاومت به فروروی نمونه‌های خاک مورد مطالعه نیز با استفاده از دستگاه فروسنج جیبی[۱] اندازه‌گیری شد (Blake & Hartge, 1986). بافت خاک نیز به روش هیدرومتر تعیین شد (Gee & Bauder, 1986).

اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

کربن آلی خاک با روش‌های والکلی بلک (Walkley & Black, 1934)، نیتروژن کل خاک با استفاده از دستگاه کجلدال (Kirek, 1950)، Ec و pH خاک از طریق عصاره اشباع و به وسیله دستگاه Ec و pH سنج، فسفر به روش اولسن (Olsen, 1954)، پتاسیم به روش جایگزینی یون آمونیوم (Bower et al, 1952) و آهک به روش تیتراسیون (Rowell, 1994) تعیین شدند. به‌منظور ارزیابی فعالیت زیستی مرتبط با رشد سیانوباکترها، استخراج کلروفیل a از پوسته‌ها طبق پروتکل Castel et al (۲۰۱۱) انجام شد. برای سنجش فعالیت میکروبی خاک، تنفس میکروبی با روش انکوباسیون بسته ارزیابی شد (Isermeyer, 1952). در این روش میزان CO_2 تولیدشده در دوره انکوباسیون اندازه‌گیری گردید و به‌عنوان شاخصی از فعالیت زیستی خاک گزارش شد. کربن زیست‌توده میکروبی نیز بر اساس تدخین خاک با کلروفرم اندازه‌گیری شد (Jenkinson et al, 1976).

تحلیل آماری

پیش از انجام تحلیل‌ها، داده‌ها از نظر نرمال‌بودن توزیع و همگنی واریانس‌ها با آزمون Shapiro-Wilk و Levene بررسی شدند. سپس تحلیل واریانس برای طرح فاکتوریل انجام شد و در مواردی که اثرات عوامل یا برهم‌کنش آن‌ها معنی‌دار بود ، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی (Tukey) در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Excell، SPSS، و Minitab انجام شد.

یافته‌های پژوهش

خصوصیات اولیه خاک

[۱] Pocket penetrometer

ویراستاری نشده

خاک مورد مطالعه از نوع سبک‌بافت بود و در بافت لوم شنی قرار داشت. این نوع خاک‌ها فرسایش‌پذیری و قابلیت زیادی برای پراکندگی توسط باد دارند (Chipel, 1954; Fattahi et al, 2025). واکنش شیمیایی خاک در محدوده خنثی تا کمی قلیایی قرار داشت. این محدوده شرایط شیمیایی مناسبی برای فعالیت ریزجانداران فراهم می‌کند. مقدار کربن آلی اولیه خاک نسبتاً کم بود. این شرایط غالب خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است که مستعد تخریب سطحی و فرسایش بادی هستند. همچنین دیگر خصوصیات اندازه‌گیری شده در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۲. خصوصیات اولیه خاک مورد مطالعه

pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	درصد ذرات اولیه خاک			غلظت عناصر غذایی پر مصرف			درصد اجزای شیمیایی	
		شن	سیلت	رس	N (درصد)	P (ppm)	K (ppm)	کربن آلی	آهک
۷/۱۶	۸/۸	۷۸/۸	۱۸/۷	۱/۳	۰/۰۱۱	۴/۳۱	۹۱/۴	۰/۱۷	۲۱/۴

نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد که اثرات اصلی سیانوباکتر و بنتونیت، بر سرعت حد آستانه فرسایش بادی، میانگین وزنی قطر خاکدانه، مقاومت به فروروی معنی‌دار و افزایشی بود. همچنین، خصوصیاتی مثل کربن آلی، نیتروژن کل، کربن زیست‌توده میکروبی، و کلروفیل a در اثر تیمار با سیانوباکتر افزایش معنی‌داری داشتند ولی بنتونیت اثر معنی‌داری بر این خصوصیات نداشته است. همچنین اثر متقابل سیانوباکتر و بنتونیت بر سرعت حد آستانه فرسایش بادی، مقاومت به فروروی، تنفس میکروبی و کلروفیل a تفاوت معنی‌دار نشان داده‌اند.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

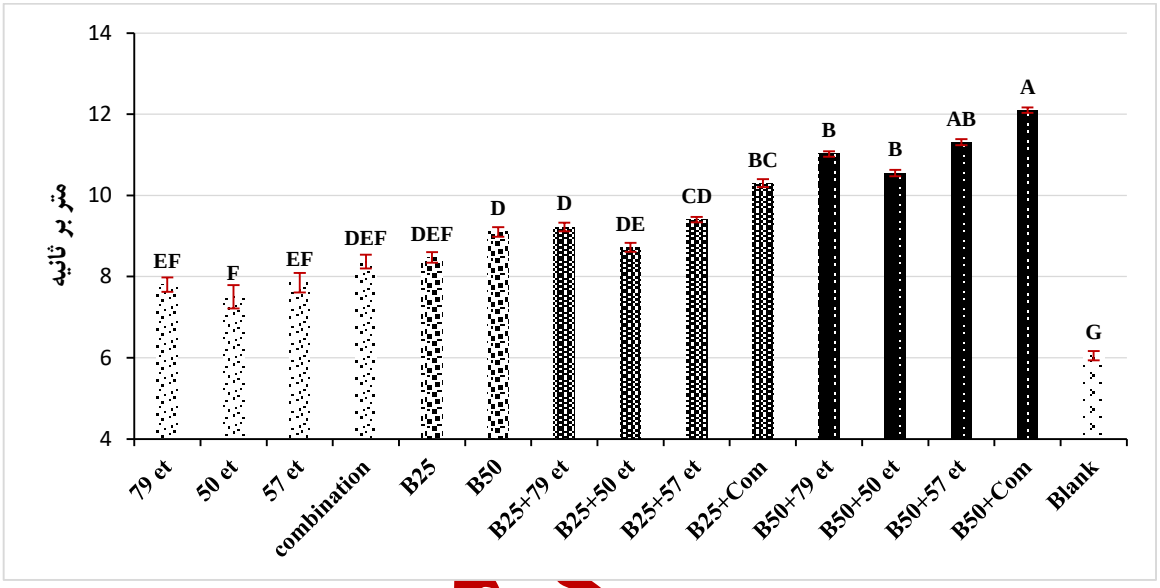
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		سرعت حد آستانه فرسایش بادی	MWD	مقاومت به فروروی	کربن آلی	نیتروژن کل	تنفس میکروبی	کربن زیست‌توده میکروبی	کلروفیل a
سیانوباکتر	۳	۳/۴۰۵۸ **	۰/۰۲۳۹ **	۱۰۸۶/۲ **	۰/۰۰۱۰۸ *	۱۰/۰۸ *	۰/۰۰۸۰ **	۲۰/۵۲۲ **	۰/۲۱۰۴ **
بنتونیت	۱	۲۶/۶۴۵۰ **	۰/۰۲۴۲ **	۴۰۵۴۱/۳ **	۰/۰۰۰۰۱ ns	۹/۰۰۲ ns	۰/۰۰۲۲ ns	۵/۶۹ ns	۰/۰۰۶۰ ns
سیانوباکتر × بنتونیت	۳	۰/۰۱۲۵ **	۰/۰۰۰۹ ns	۶۰۴/۷ **	۰/۰۰۰۰۴ ns	۹/۹۲ ns	۰/۰۰۳۴ *	۰/۱۲۱ ns	۰/۰۵۸۳ *
خطا	۲۱	۰/۰۲۵۸	۰/۰۰۱۱	۱۱۰/۱	۰/۰۰۰۲۸	۹/۳۵	۰/۰۰۰۸۹	۰/۱۰۶	۰/۰۱۴۰
ضریب تغییرات	–	۹/۸۴	۹/۳۱	۱۳/۴۱	۸/۸۱	۱۶/۵	۷/۳	۶/۳۵	۹/۴۴

** تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ns غیر معنی دار

اثر تیمار بر سرعت حد آستانه فرسایش بادی

نتایج مقایسه تیمارها نشان داد که کاربرد سیانوباکتر و بنتونیت در خاک به‌طور معنی‌داری سرعت حد آستانه فرسایش بادی را افزایش داد (شکل شماره ۱). بیشترین افزایش مربوط به تیمار ترکیبی سیانوباکتر و B50 بود که مقدار آن دو برابر تیمار شاهد است. این نتیجه می‌تواند به ایجاد شبکه‌های چسبنده ناشی از ترشح پلی ساکاریدهای سیانوباکتر در بین ذرات خاک سطحی نسبت داده شود. به نظر می‌رسد، این شبکه‌ها باعث افزایش مقاومت خاک در برابر جدا شدن و تاخیر در آغاز کنده شدن توسط باد شدند (Chamizo et al, 2018). در تیمارهای دارای بنتونیت نیز، B50 باعث افزایش ۵۰ درصدی سرعت حد آستانه فرسایش بادی نسبت

به تیمار شاهد شد. این اثر می‌تواند ناشی از پر کردن فضاهای خالی سطح خاک، افزایش انسجام سطحی و ایجاد پوشش سیمان رس‌ی باشد که ذرات خاک را به هم متصل می‌کند (Ekhtesasi & Ahmadi, 2022). روند صعودی سرعت حد آستانه فرسایش بادی در اثر حضور سیانوبکاتری و بنتونیت و همچنین اثر هم‌افزایی ترکیب این دو به طور واضح در شکل شماره ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



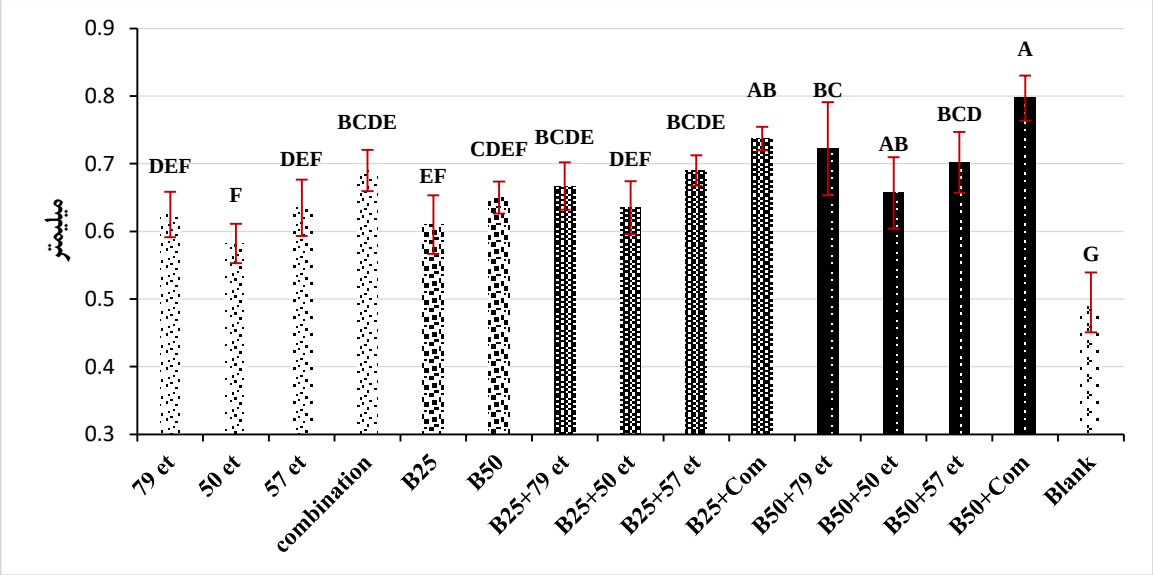
شکل ۱. نمودار تاثیر تیمارها بر سرعت حد آستانه فرسایش بادی

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

اثر تیمارها بر پایداری خاکدانه (MWD)

تغییرات میانگین وزنی قطر خاکدانه به‌عنوان شاخصی از پایداری ساختمانی در تیمارهای مورد مطالعه در شکل (۲) مشاهده می‌شود. در تیمارهای حاوی سیانوباکتر و بنتونیت، میانگین وزنی قطر خاکدانه افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشت به طوری که تیمار ترکیبی سیانوباکتر و B50 باعث افزایش ۶۱ درصدی میانگین وزنی قطر خاکدانه نسبت به شاهد شده است که نشان‌دهنده توانایی پلی‌ساکاریدهای ترشح شده در اتصال ذرات و ایجاد خاکدانه‌های درشت‌تر و پایدار است. همچنین، نتایج نشان داد که افزودن بنتونیت به‌صورت مستقل باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه به مقدار حداقل ۲۴ درصد نسبت به شاهد شد (شکل۲). تیمار ترکیبی سیانوبکتر–بنتونیت بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه را نشان داد که ثابت می‌کند تثبیت زیستی و معدنی اثر هم‌افزاینده نسبت به کاربرد تکی هر یک از تیمارها دارند.

نسخه ی نشانه

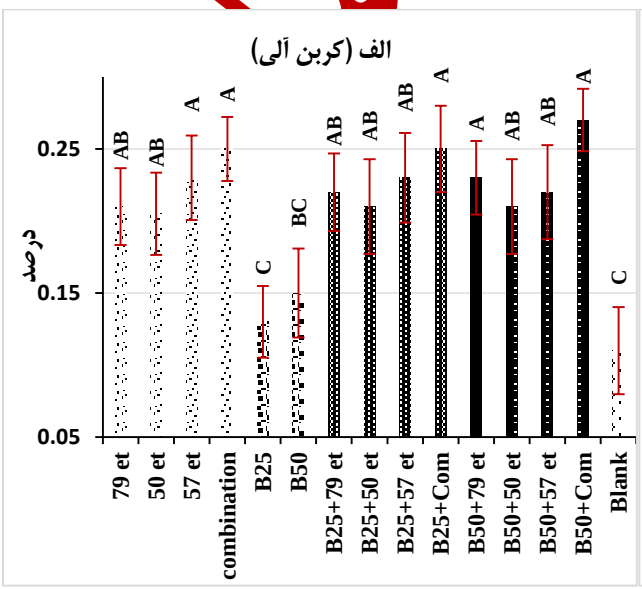


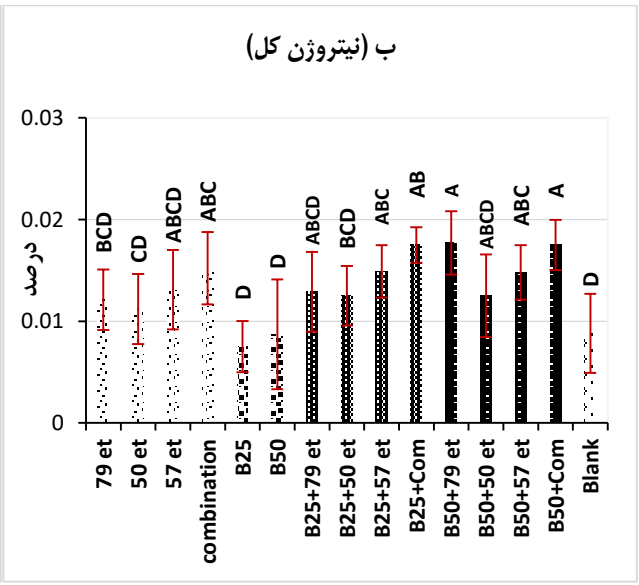
شکل ۲. نمودار تاثیر تیمارها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

اثر تیمارها بر کربن آلی و نیتروژن خاک

نتایج نشان داد که کربن آلی و نیتروژن خاک در حضور سیانوباکتر افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد داشت (شکل ۳). چنین افزایشی عمدتاً ناشی از تولید زیست‌توده میکروبی (شکل ۴ –ج) و پلی ساکاریدهای ترشح شده از سیانوباکترها و همچنین توان بالقوه برخی گونه‌های سیانوباکتر در تثبیت نیتروژن است (Bhardwaj et al, 2025). بنتونیت به‌صورت مستقل تغییرات محسوسی در کربن آلی و نیتروژن خاک ایجاد نکرد، اما در تیمارهای ترکیبی مقدار کربن آلی و نیتروژن خاک نسبت به شاهد زیادتر بود. این نتایج نشان می‌دهند که نقش اصلی در بهبود خصوصیات شیمیایی خاک متعلق به فعالیت زیستی سیانوباکتر است، در حالی که بنتونیت نقش مکمل دارد و بیشتر ساختمان و استحکام خاک را بهبود می‌بخشد.



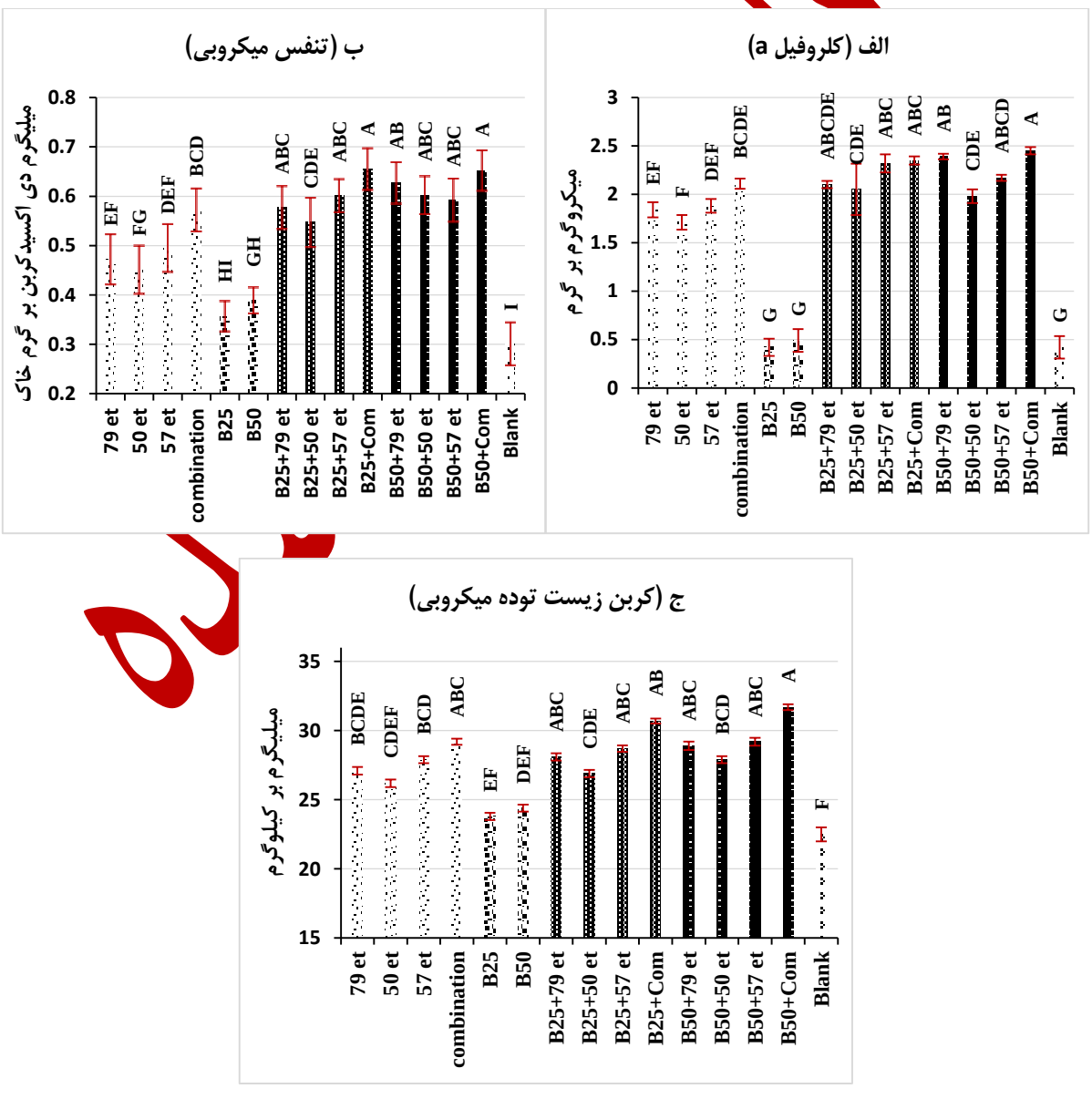


شکل۳. نمودار تاثیر تیمارها بر کربن آلی خاک (الف) و نیتروژن کل (ب)

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار باهم می‌باشد.

اثر تیمارها بر کلروفیل a ، تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی

کلروفیل a ، تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی شاخص‌هایی از میزان فعالیت زیستی در خاک هستند. در این مطالعه، کلروفیل aبه‌طور معنی‌داری در تیمارهای حاوی سیانوباکتر افزایش یافت (شکل ۴– الف) که بیانگر فعالیت فتوسنتزی موفق و رشد پایدار زیست‌توده میکروبی (شکل۴–ج) است. همچنین بر اساس شکل (۴–ب) تنفس میکروبی نیز در این تیمارها افزایش یافت که نشان‌دهنده ارتقای فعالیت میکروبی و دسترسی بهتر به ترکیبات کربنی محلول است. در تیمارهای B50 و B25، افزایش ملایمی در تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی مشاهده شد (شکل ۴–ب و ج) که احتمالاً ناشی از بهبود نگهداری رطوبت و تعدیل ریزاقلیم سطح خاک است.



شکل۴. نمودار تاثیر تیمارها بر کلروفیل a (الف)، تنفس میکروبی (ب) و کربن زیست‌توده میکروبی (ج)

بحث

سازوکارهای فیزیکی، زیستی و معدنی در تثبیت خاک

نتایج نشان داد که تثبیت خاک یک فرآیند چندبعدی است که تحت تأثیر سازوکارهای زیستی و معدنی قرار دارد. سیانوباکترها با سازوکارهایی همچون تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی و توسعه شبکه‌های چسبنده (Chamizo et al, 2012; Chen et al, 2007)، ذرات خاک را به یکدیگر متصل کرده و مقاومت برشی سطح خاک را افزایش می‌دهند، که با یافته‌های Chen et al, (2007)، Zhao et al, (2021) و خیرفام و اسدزاده، (۱۳۹۹) همخوانی دارد؛ آن‌ها گزارش کردند پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی تولیدشده توسط سیانوباکترها موجب افزایش انسجام ذرات و کاهش فرسایش بادی می‌شود (فرامرزی و همکاران، ۱۴۰۳). از سوی دیگر، بنتونیت به دلیل ساختار ورقه‌ای، ظرفیت تورم و توانایی پر کردن حفرات ریز، یک ماتریکس فیزیکی پایدار ایجاد کرده و به‌طور مستقل انسجام سطح خاک را بهبود می‌بخشد و در تثبیت ذرات سبک نقش مؤثری ایفا می‌کند (Javiz et al, 2023)، که مشابه نتایج Daud, (2018) است. علاوه بر این، حضور بنتونیت با افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت، شرایط مطلوبی برای رشد و فعالیت زیستی سیانوباکتر فراهم می‌کند (Lei et al, 2022) و موجب گسترش یکنواخت پوسته زیستی و افزایش طول عمر شبکه پلی-ساکاریدهای خارج سلولی می‌شود. هم‌افزایی این سازوکارهای زیستی و معدنی در تیمار ترکیبی بنتونیت و سیانوباکتر منجر به ایجاد ساختمان زیستی–معدنی پایدار شد که از نظر مکانیکی مقاوم‌تر از تیمارهای تک‌عاملی است و این یافته با نتایج Tang et al, (2019) مطابقت دارد، که نشان دادند ترکیب ریزجانداران با اصلاح‌کننده‌های معدنی مقاومت خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

اثرات تیمارها بر کربن آلی و نیتروژن خاک

افزایش کربن آلی خاک در اثر تیمارهای مورد استفاده می‌تواند به چند عامل اصلی نسبت داده شود. نخست، بهبود ساختمان خاک و تجمع ذرات؛ بنتونیت با جذب ذرات ریز و افزایش پایداری خاکدانه‌ها، شرایط مناسبی برای تجمع مواد آلی فراهم می‌کند (Javiz et al, 2023). علاوه بر این، افزایش رطوبت خاک و کاهش تجزیه مواد آلی نیز نقش مهمی دارد؛ بنتونیت با نگهداری رطوبت و محدود کردن تهویه‌ی بیش از حد، باعث کاهش تجزیه سریع کربن آلی می‌شود (Lei et al, 2022). همچنین، افزایش تولید زیست‌توده میکروبی توسط سیانوباکترها با تثبیت CO_2 و تولید ترکیبات آلی محلول، ورودی جدیدی از کربن را به خاک اضافه می‌کند (Mager & Thomas, 2011). حضور رس همچنین منجر به تثبیت کربن از طریق تشکیل ترکیبات پایدار آلی–معدنی می‌شود که مانع از اکسیداسیون سریع کربن آلی می‌گردد. این یافته‌ها با مطالعات Chen et al, (2025) همخوانی دارد که نشان دادند تثبیت کربن آلی به‌شدت به حضور ذرات رس و فعالیت میکروبی وابسته است و استفاده هم‌زمان از مواد زیستی و معدنی یکی از مؤثرترین راهکارها برای افزایش پایداری کربن آلی خاک به شمار می‌رود. نتایج این تحقیق همچنین با پژوهش‌های اخیر Wu et al, (2024)، Li et al, (2025) و Zhang et al, (2023) هم‌راستا است؛ آن‌ها گزارش کردند که استفاده از سیانوباکترها در خاک‌های خشک باعث بهبود محتوای کربن آلی از طریق افزایش تولید زیست‌توده، ترشح مواد آلی و تشکیل پوسته‌های زیستی شده و کاربرد رس‌های اسمکتایتی و مونتموریلونایتی نیز به دلیل افزایش پیوندهای فیزیکی بین ذرات خاک و مواد آلی، پایداری کربن آلی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

ویرایشی نشده

افزایش نیتروژن کل در تیمارهای سیانوباکتر را می‌توان ناشی از توان تثبیت زیستی نیتروژن توسط سیانوباکترها دانست. این ریزجانداران از طریق فعالیت آنزیم نیتروژناز قادر به تثبیت نیتروژن اتمسفری و تبدیل آن به شکل‌های معدنی قابل جذب هستند (Mugnai et al, 2024). افزون بر این، ترشح ترکیبات آلی از قبیل پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی، باعث تجمع ذرات خاک و بهبود رطوبت و محیط ریشه‌ای می‌شود که به پایداری بیشتر نیتروژن کمک می‌کند (Wu et al, 2024).

نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های Lie et al (2023) و Datta et al (2020) همسو است که گزارش کردند افزودن سیانوباکتر و بنتونیت موجب افزایش معنی‌دار نیتروژن کل خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود. همچنین Mazor et al (1996) گزارش کردند پوسته‌های زیستی تشکیل‌شده از سیانوباکترها نقش مهمی در بازچرخش نیتروژن دارند و در بلندمدت موجب بهبود حاصلخیزی خاک‌های شنی می‌گردند.

فعالیت زیستی خاک‌های تیمار شده

اثر هم‌افزایی بنتونیت و سیانوباکتر بر فعالیت‌های زیستی خاک را می‌توان ناشی از تعاملات مثبت میان بخش‌های فیزیکی (بنتونیت) و زیستی (سیانوباکتر) خاک دانست. بنتونیت با حفظ رطوبت و جلوگیری از نوسانات دمایی (Javiz et al, 2023)، شرایط پایدارتری برای رشد سیانوباکتر فراهم می‌کند، در حالی که سیانوباکترها با تولید پلی ساکاریدها و ترشحات آلی (Chamizo et al, 2012)، سبب تجمع و فعالیت بیشتر میکروبی می‌شوند. پژوهش‌های مشابه نیز نشان داده‌اند که تلقیح خاک‌های خشک با سیانوباکتر همراه با مواد رسی یا آلی می‌تواند به افزایش تنفس، زیست‌توده میکروبی و چرخه کربن منجر شود (Lie et al, 2021; Datta et al, 2020). همچنین سیانوباکترها با انجام فرایند فتوسنتز و تولید کلروفیل و ترشح ترکیبات کربن‌دار محلول، مواد آلی و نیتروژن معدنی، منابع غذایی مناسبی برای سایر ریزجانداران خاک فراهم کرده و موجب افزایش ذخایر کربن زیستی می‌شوند (Hu et al, 2020). علاوه بر این، تشکیل بیوفیلم‌ها و ساختارهای فیلامنتی حاصل از رشد سیانوباکترها، پایداری خاکدانه‌ها را افزایش داده و شرایط فیزیکی مطلوبی برای بهبود تنفس و تکثیر میکروب‌ها فراهم می‌کند که باعث افزایش کربن زیست‌توده میکروبی می‌شود (Belnap et al, 2013; Maestre et al, 2011؛ قره‌محمودلی و همکاران، ۱۴۰۳).

تعامل زیستی–معدنی: بنیان هم‌افزایی واقعی

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهند که بیشترین اثرگذاری زمانی رخ می‌دهد که سیانوباکتر و بنتونیت به‌صورت هم‌زمان اعمال شوند. این هم‌افزایی ناشی از ترکیب چند سازوکار مکمل است. بنتونیت با افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش تهویه بیش از حد، محیطی پایدار و مناسب برای فعالیت میکروبی فراهم کرده و باعث کاهش تجزیه سریع کربن آلی و افزایش پایداری مواد آلی در خاک می‌شود (Javiz et al, 2023). از سوی دیگر، پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی تولیدشده توسط سیانوباکترها ذرات خاک را به یکدیگر متصل کرده و ساختمان رسی–معدنی خاک را یکپارچه می‌کنند و موجب افزایش زیست‌توده میکروبی و ورودی کربن به خاک می‌شوند (Chamizo et al, 2012; Rossi & De philippis, 2015). علاوه بر این، پیوندهای فیزیکی بنتونیت با این پلیمرهای زیستی یک ماتریکس مرکب ایجاد کرده و در نتیجه، پوسته‌ای با مقاومت مکانیکی زیاد، انسجام ساختمانی بهتر و پایداری بیشتر در برابر تنش‌های خشک–مرطوب شکل می‌گیرد، که از اثرات تک‌عاملی هر یک از تیمارها فراتر است (Kidron et al, 2020; Lei et al, 2019).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ویراستاری نشده

نتایج این پژوهش نشان داد که تثبیت خاک در اراضی خشک و نیمه‌خشک فرآیندی چندبعدی است که به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر سازوکارهای زیستی و معدنی قرار دارد. بیشترین بهبود در تمام ویژگی‌های بررسی‌شده در تیمار ترکیبی سیانوباکتر و بنتونیت مشاهده شد، که اثر هم‌افزایی بین سازوکارهای زیستی و معدنی را تایید می‌کند. یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های اخیر درباره استفاده از پوسته‌های زیستی برای مهار فرسایش بادی سازگار است، اما یک نوآوری کلیدی دارد که عبارت از ترکیب هدفمند رس بنتونیت با عامل زیستی فعال یعنی سیانوباکتر می‌باشد.

در مجموع، تثبیت زیستی–معدنی یک سامانه چندعاملی است که در آن سیانوباکتر نقش عامل چسباننده زیستی و بنتونیت نقش عامل ساختمانی–فیزیکی را ایفا می‌کند. تعامل این دو عامل، سامانه‌ای ایجاد می‌کند که از نظر مقاومت سطحی، پایداری در برابر تنش‌های محیطی و انسجام ذرات، کارآمدتر از هر روش به تنهایی است. این یافته‌ها اثبات می‌کنند که توسعه راهکارهای تلفیقی در مدیریت فرسایش بادی، آینده‌دار، کم‌هزینه و قابل‌گسترش است.

به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده هم‌زمان از سیانوباکترها و بنتونیت یک راهکار پایدار و مؤثر برای کاهش فرسایش بادی، بهبود انسجام خاک و ارتقای کیفیت زیستی خاک‌های حساس به فرسایش است و می‌تواند پایه‌ای برای توسعه فناوری‌های تثبیت زیستی–معدنی در مقیاس عملیاتی باشد.

با توجه به نتایج، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تثبیت زیستی–معدنی در مقیاس میدانی و تحت شرایط اقلیمی واقعی ارزیابی کنند تا اثرات بلندمدت و عملیاتی آن روشن گردد. همچنین، بررسی گونه‌ها و ترکیب‌های متنوع میکروبی به‌منظور شناسایی بهترین شرایط هم‌افزایی با مواد معدنی و تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی این رویکرد می‌تواند امکان پیاده‌سازی پایدار آن را در اراضی خشک و نیمه‌خشک فراهم کند.

منابع

خیرفام، حسین، و اسدزاده، فرخ. (۱۳۹۹). امکان سنجی تثبیت ماسه های روان حاشیه های خشک شده دریاچه ارومیه با استفاده از تلقیح و تحریک سیانوباکترهای خاک زی بومی. تحقیقات کاربردی خاک، ۸(۱)، ۳۱-۴۳.

فرامرزی، هانیه؛ رسولی صدقیانی، میرحسن؛ خیرفام، حسین و برین، محسن. (۱۴۰۳). تلقیح سیانوباکتری‌ها به منظور بهبود زیست پوسته سازی و تثبیت پذیری بسترهای خشک شده دریاچه ارومیه. تحقیقات کاربردی خاک، ۱۲(۱), ۱۵-۲۵.

قره محمودلی، سودابه؛ صادقی، سیدحمیدرضا و صادقی، وحیده‌السادات . (۱۴۰۳). تغییرپذیری سطح خاک شور ناشی از تلقیح سیانوباکتری‌های خاک‌زی با استفاده از پردازش تصویر. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱(۲), ۱۱۹-۱۳۷.

Abulimiti, M., Wang, J., Li, C., Zhang, Y., & Li, S. (2023). Bentonite could be an eco-friendly windbreak and sand-fixing material. *Environmental Technology & Innovation*, *29*, 102981.

Awad, A. M., Shaikh, S. M., Jalab, R., Gulied, M. H., Nasser, M. S., Benamor, A., & Adham, S. (2019). Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: a comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, *228*, 115719.

Bagnold, R. A. (1941). The effect of sand movement on the surface wind. In *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* (pp. 57-76). Dordrecht: Springer Netherlands.

Belnap, J. (2003). The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *1*(4), 181-189.

ویرایش‌شده

Belnap, J., Phillips, S. L., & Troxler, T. (2006). Soil lichen and moss cover and species richness can be highly dynamic: the effects of invasion by the annual exotic grass Bromus tectorum, precipitation, and temperature on biological soil crusts in SE Utah. *Applied Soil Ecology*, *32*(1), 63-76.

Bhardwaj, A., Prasanna, R., Chakrabarti, B., Kannojiya, S., Kumar, M., Ansari, W. A., ... & Shivay, Y. S. (2025). Diazotrophic cyanobacteria alleviate the impact of elevated CO2 and beneficially influence the growth of rice. *Discover Plants*, 2(1), 121.

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 363-375.

Castle, S. C., Morrison, C. D., & Barger, N. N. (2011). Extraction of chlorophyll a from biological soil crusts: A comparison of solvents for spectrophotometric determination. *Soil Biology and Biochemistry*, *43*(4), 853-856.

Chamizo, S., Cantón, Y., Rodríguez-Caballero, E., Domingo, F., & Escudero, A. (2012). Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics. *Journal of Hydrology*, 452, 130-138.

Chamizo, S., Mugnai, G., Rossi, F., Certini, G., & De Philippis, R. (2018). Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: gaining insights for applicability in soil restoration. *Frontiers in Environmental Science*, *6*, 49.

Chen, X., Jia, S., Wang, Y., & Wang, N. (2011). Biological crust of Nostoc flagelliforme (cyanobacteria) on sand bed materials. *Journal of Applied Phycology*, *23*(1), 67-71.

Chen, Z., Chen, L., Lu, R., Lou, Z., Zhou, F., Jin, Y., ... & Chen, S. (2025). A national soil organic carbon density dataset (2010–2024) in China. *Scientific Data*, *12*(1), 1480.

Chepil, W. S. (1954). Seasonal fluctuations in soil structure and erodibility of soil by wind. *Soil Science Society of America Journal*, 18(1), 13-16.

Daud, K. A. (2018). Cohesionless soil properties improvement using bentonite. *ARPN Journal of Engineering and Applied sciences*, *13*(1).

Ekhtesasi, M. R., & Sepehr, A. (2009). Investigation of wind erosion process for estimation, prevention, and control of DSS in Yazd–Ardakan plain. *Environmental monitoring and assessment*, *159*(1), 267-280.

Fattahi, S. M., Soroush, A., & Huang, N. (2020). Wind erosion control using inoculation of aeolian sand with cyanobacteria. *Land Degradation & Development*, *31*(15), 2104-2116.

Fattahi, S. M., Soroush, A., Motameni, S., Khorand, M., & Eslami, A. (2025). Quantifying Soil Erodibility in Wind Erosion: Insights from a Wind Tunnel Database.

Gates, W. P., Gibbs, D., & Amstberg, M. (2018, October). Resilience of Australian polymer-modified powdered sodium bentonite geosynthetic clay liners to downslope bentonite erosion. In *The International Congress on Environmental Geotechnics* (pp. 633-640). Singapore: Springer Singapore.

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 383-411.

Gillette, D. G. (1978, January). TESTS OF A PORTABLE WIND TUNNEL FOR DETERMINING WIND EROSION THRESHOLD VELOCITIES. In Geology Field Conference on Aeolian Processes (Vol. 78, p. 18).

Hu, R., Wang, X. P., Xu, J. S., Zhang, Y. F., Pan, Y. X., & Su, X. (2020). The mechanism of soil nitrogen transformation under different biocrusts to warming and reduced precipitation: From microbial functional genes to enzyme activity. *Science of the Total Environment*, *722*, 137849.

Isermeyer, H. (1952). A simple method for the determination of soil-respiration and carbonates in soil.

Jenkinson, D. S., & Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass. *Soil biology and Biochemistry*, *8*(3), 209-213.

Karimi, A., Tahmourespour, A., & Hoodaji, M. (2024). Cyanobacterial biocrust alters soil physical properties reducing soil erosion and aerosol production. *Brazilian Journal of Microbiology*, *55*(3), 2453-2461.Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 425-442.

Khojasteh, D. N., Bahrami, H. A., Kianirad, M., & Sprigg, W. (2017). Using Bio-mulch for Dust Stabilization (Case Study: Semnan Province, Iran). *Nature Environment & Pollution Technology*, *16*(4).

Kidron, G. J., Wang, Y., & Herzberg, M. (2020). Exopolysaccharides may increase biocrust rigidity and induce runoff generation. *Journal of Hydrology*, 588, 125081.

Kirk, P. L. (1950). Kjeldahl method for total nitrogen. *Analytical chemistry*, *22*(2), 354-358.

Klute, A. (1965). Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, *9*, 210-221.

Lei, Z. H. O. U., MONREAL, C. M., & MCLAUGHLIN, N. B. (2022). Bentonite-humic acid improves soil organic carbon, microbial biomass, enzyme activities and grain quality in a sandy soil cropped to maize (Zea mays L.) in a semi-arid region. *Journal of Integrative Agriculture*, 21(1), 208-221.

Li, S., Huang, W., Peng, C., Jing, X., Ding, J., Chen, T., ... & Liang, Y. (2025). Enhancement of rice production and soil carbon sequestration utilizing nitrogen-fixing cyanobacteria. *Applied Soil Ecology*, *207*, 105940.

Maestre, F. T., Bowker, M. A., Cantón, Y., Castillo-Monroy, A. P., Cortina, J., Escolar, C., ... & Martínez, I. (2011). Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *Journal of arid environments*, 75(12), 1282-1291.

Mager, D. M., & Thomas, A. D. (2011). Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes. *Journal of Arid Environments*, 75(2), 91-97.

Mazor, G., Kidron, G. J., Vonshak, A., & Abeliovich, A. (1996). The role of cyanobacterial exopolysaccharides in structuring desert microbial crusts. *FEMS microbiology ecology*, *21*(2), 121-130.

Mugnai, G., Chamizo, S., Certini, G., Li, H., Rossi, F., & Adessi, A. (2024). The contribution of the phototrophic fraction in the fertility of different successional stages of induced biological soil crusts. *Biology and Fertility of Soils*, *60*(7), 911-926.

Noy, K., Ohana-Levi, N., Panov, N., Silver, M., & Karnieli, A. (2021). A long-term spatiotemporal analysis of biocrusts across a diverse arid environment: The case of the Israeli-Egyptian sandfield. *Science of the Total Environment*, *774*, 145154.

Qian, L., Wang, J., Xiao, J., Yang, L., Xia, L., Song, S., ... & Wu, L. (2024). Clay minerals accelerate the formation of indoor biocrusts: Effects and mechanism. *Soil and Tillage Research*, *244*, 106217.

Ravi, S., D'Odorico, P., Breshears, D. D., Field, J. P., Goudie, A. S., Huxman, T. E., ... & Zobeck, T. M. (2011). Aeolian processes and the biosphere. *Reviews of Geophysics*, *49*(3).

Rossi, F., & De Philippis, R. (2015). Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats. *Life*, 5(2), 1218-1238.

Rowell, D. L. (1994). Soil science: Methods & applications. Routledge.

Shi, P., Guan, X., Xiao, J., Li, Z., & Gómez, J. A. (2025). Mechanisms of Soil Inorganic Carbon Migration and CO2 Exchange in Arid and Semi-Arid Regions. *European Journal of Soil Science*, *76*(6), e70241.

Tang, S., Ma, Q., Marsden, K. A., Chadwick, D. R., Luo, Y., Kuzyakov, Y., ... & Jones, D. L. (2023). Microbial community succession in soil is mainly driven by carbon and nitrogen contents rather than phosphorus and sulphur contents. *Soil Biology and Biochemistry*, *180*, 109019.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, *37*(1), 29-38.

Wang, Z., Liu, X., Sun, F., Jiang, Q., Shang, H., & Zheng, C. (2025). Effect of biochar and cyanobacteria crust incorporation on soil wind erosion in arid mining area under freeze-thaw action. *Scientific Reports*, *15*(1), 16363.

Wang, Z., Sun, F., Yang, T., Liu, X., Jiang, Q., Shang, H., & Zheng, C. (2025). Wind erosion control of bare surface soil in arid mining area by cyanobacterial inoculation and Biochar amendment. *Catena*, *250*, 108765.

Wu, L., Dong, J., Song, J., Zhu, Y., Che, S., Qin, X., ... & Wu, Z. (2024). The Nitrogen Fixation Characteristics of Terrestrial Nitrogen-Fixing Cyanobacteria and Their Role in Promoting Rice Growth. *Agronomy*, *15*(1), 62.

Wu, Y., Lu, Y., Deng, M., Wu, J., Guo, G., Chen, D., ... & Li, X. (2025). Cyanobacterial colonization on epilithic mosses in degraded karst ecosystem: the role of moss traits and environmental factors. *Oikos*, e11578.

Yu, X., Xiao, B., Cao, Y., & Kidron, G. J. (2024). Microbial-induced extracellular polymers are fundamentally responsible for the mechanical stability of biocrusts in drylands. *Catena*, *245*, 108349.

Zhang, C., Chen, X., Zhou, K., Li, J., Meza, J. V. G., Song, S., ... & Xia, L. (2025). Synergistic effects of clays and cyanobacteria on the accumulation dynamics of soil organic carbon in artificial biocrusts. *Journal of Environmental Management*, *374*, 124110.

Zhao, T., Lozano, Y. M., & Rillig, M. C. (2021). Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a function of microplastic shape, polymer type, and exposure time. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, 675803.

Kheirfam, H., Asadzadeh, F. (2020). Feasibility of Mowing Sands Stabilization in the Dried-up Beds of Lake Urmia using Inoculation and Stimulation of Soil Native Cyanobacteria. *Journal of Applied Soil Research*, 8, 1, 2020, 31-43. (in Persian)

Gharemahmudli, S. , Sadeghi, S. H. and Sadeghi, V. S. (2024). Changeability of saline soil surface due to soil cyanobacteria inoculation using image processing. *Journal of Water and Soil Conservation*, *31*(2), 119-137. doi: 10.22069/jwsc.2024.22219.3715. (in Persian)

Faramarzi, H., Rasouli sedghiani, M. H., Kheirfam, H., Barin, M. (2024). Inoculation of Cyanobacteria in order to Improve Biocrustation and Stabilizing Dried-up Beds of Urmia Lake. *Journal of Applied Soil Research*, 12(1), 15-25. (in Persian)