



Publisher: Soil and Water Research Institute of Iran

Journal of Land Management

<https://lmj.areeo.ac.ir>

A comprehensive review of the effects of biological soil crusts on soil fertility, moisture conservation, erosion control, and ecosystem resilience

Mohammadi, R. and Hosseinalizadeh, M. * 

Ph.D. student of Desert Management and Control, Dept. of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. rashinmohammad@icloud.com
Associate Prof., Dept. of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Mhalizadeh@gau.ac.ir

Article Info

Article Type: Review Article

Received: May 13, 2025

Accepted: July 04, 2026

Keywords: Inoculation of biological soil crusts, Temporal succession, Soil resistance, Cyanobacteria, Biological soil crust Restoration

Corresponding author's email address:
Mhalizadeh@gau.ac.ir

Extended Abstract

Objectives

This article presents a comprehensive review of the roles played by biological soil crusts (BSCs) in improving soil fertility, regulating hydrological processes, and reducing soil erosion in arid and semi-arid ecosystems, with special attention paid to application of artificial inoculation approaches. The study addresses a critical environmental challenge in Iran, where arid and semi-arid areas account for approximately 75% of the ecosystems facing such dire consequences as desertification, sand and dust storms, as well as accelerated wind erosion. Due to the moisture deficiency along with other adverse climatic conditions, soils in these ecosystems are highly vulnerable to degradation as a result of their generally sparse vascular plant cover. However, many of these areas are home to intersperse spaces that are covered by communities of plants and microbial microorganisms known as BSCs. These crusts, formed through the interactions of mineral particles with cyanobacteria, algae, fungi, lichens, and bryophytes are recognized as common covers in arid and semi-arid regions. By significantly influencing early ecosystem processes, these crusts are appropriately described as "ecosystem engineers" in arid lands. Numerous field and farm studies have been recently conducted in Iran to investigate the roles of BSCs in improving soil physicochemical properties, regulating hydrological responses, and reducing erosion.

Methodology

A systematic review was conducted using study reports published between 1980 and 2025. The methodology included searching both international databases (using such relevant terms in English as cyanobacteria, algae, fungi, lichens, bryophytes, biological soil crust, soil erosion, runoff, and land restoration) and domestic databases (using equivalent Persian terms). Inclusion criteria involved studies addressing at least one of the following three main themes: 1) erosion and sedimentation, 2) hydrological processes, and 3) fertility and soil quality characteristics, with provision of quantitative or qualitative data. General reports and case studies that merely addressed taxonomic aspects without direct connection to ecosystem functions of crusts were excluded from the present review. Ultimately, approximately 160 sources forming the basis for the current analysis and synthesis were selected that included field and experimental studies, modeling studies, previous reviews, and domestic research.

Results

The comprehensive review of the 160 studies from 1980 to 2025 demonstrates that BSCs significantly reduce soil erosion depending on crust type, successional stage, coverage percentage, and spatial scale. Cyanobacterial crusts seem to have achieved reductions of approximately 77-99% in erosion as reported in many field and laboratory experiments while moss crusts with adequate coverage have reportedly resulted in nearly 100% reduction in surface erosion and, in some cases, dust emission. During early successional stages, cyanobacteria and bacteria are reported to have provided the initial core of surface restoration through extracellular polysaccharides (EPS)

generation, nitrogen fixation, soil aggregate formation, and increased structural cohesion. The experimental studies reviewed show that single-application artificial inoculation of these microorganisms in late autumn on loose, erosion-prone soils substantially reduces runoff and sedimentation while it also enables faster formation of stable crusts which reduces ecosystem recovery time from the natural multi-decadal periods to approximately 5-10 years. The implementation cost of this approach is reported to be typically around \$350 per hectare, making it a cost-effective strategy for large-scale soil restoration.

Upon achieving any coverage greater than 36%, mosses in advanced successional stages become the most effective factor involved in reducing erosion and improving surface stability. By altering the moisture and thermal regimes of the surface layer, they simultaneously affect evaporation, infiltration, and water redistribution on both patch and bulk scales. Lichens also play a role in long-term stabilization under specific conditions (such as rocky or sloped surfaces). These results indicate that the targeted use of artificial BSC inoculation, when combined with moss cover management, represents an efficient and accelerating approach to erosion control, enhanced fertility, and optimized soil hydrological behavior in land restoration programs. Given the moisture-thermal regimes of Iran, the inoculation of such native cyanobacteria as *Phormidium* spp. and *Scytonema* spp. at optimal concentrations of 100 million cells per liter (10^8 cells L⁻¹) during late autumn may be recommended as a practical operational strategy. This approach expectedly strikes a balance among cost, microbial survival, restoration efficiency in arid climates, and ecosystem equilibrium.

Conclusion

The present systematic review of 160 sources demonstrates that biological soil crusts are effective tools for sustainable soil management in arid and semi-arid ecosystems, with their efficacy significantly influenced by the type of constituent microorganisms, successional stage, and environmental conditions. Cyanobacteria, particularly the species *Phormidium ambiguum* and *Scytonema javanicum* (used at optimal concentrations of 100 million cells per liter in late autumn), are identified as the most suitable options in arid climates for initial artificial inoculation stages on erosion-prone soils on the grounds that they rapidly stabilize soil particles and enhance fertility through nitrogen fixation and EPS secretion to reduce ecosystem recovery time from several decades to 5-10 years. In contrast, mosses in advanced successional stages, especially with a coverage exceeding 36%, are most effective in reducing erosion (up to nearly 100%) and improving surface stability while they simultaneously moderate soil moisture and temperature regimes to affect runoff, infiltration, and evaporation. Lichens also play a role in long-term stabilization under specific conditions (such as rocky or sloped surfaces). BSCs possess significant operational and economic potentials as demonstrated by scientific evidence for large-scale soil management, particularly through the use of native cyanobacteria inoculation as a low-cost and effective method. The key challenge to be addressed in future is the upscaling of these laboratory findings to the watershed level in which case not only might they be integrated with operational guidelines but also help local communities participate in the continuous monitoring of these living soil health indicators and their adaptation to climate change. Smart integration of microbial inoculation using native plant species along with socio-economic evaluation of technology appraisal by local communities in land restoration programs may be recommended as future research to achieve enhanced ecosystem resilience.

Cite this Article: Mohammadi, R. and Hosseinalizadeh, M., 2026. A comprehensive review of the effects of biological soil crusts on soil fertility, moisture conservation, erosion control, and ecosystem resilience. *Journal of Land Management*, 14(1), PP. 113-146.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.368649.388>



ارزیابی جامع نقش پوسته‌های زیستی خاک در ارتقای حاصلخیزی، حفظ رطوبت، کاهش فرسایش و تاب‌آوری بوم‌سازگان

راشین محمدی و محسن حسینعلی‌زاده* 

دانشجوی دکتری مدیریت مناطق بیابانی، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

rashinmohammadi@yahoo.com

دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

mhalizadeh@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مروری	این مقاله مروری با تحلیل پژوهش‌های طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵، نقش پوسته‌های زیستی خاک (BSCs) را در بهبود حاصلخیزی، تنظیم فرآیندهای هیدرولوژیکی و کاهش فرسایش خاک در بوم‌سازگان‌های خشک و نیمه‌خشک، با تأکید ویژه بر کارایی رویکردهای تلقیح مصنوعی، بررسی می‌کند. شواهد کمی نشان می‌دهد که BSCs بسته به نوع، مرحله توالی، درصد پوشش و مقیاس مکانی، فرسایش را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که پوسته‌های سیانوباکتریایی در بسیاری از آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، کاهش حدود ۷۷ تا ۹۹ درصدی و پوسته‌های خزهای در پوشش‌های کافی، کاهش نزدیک به ۱۰۰ درصدی در فرسایش سطحی و گاه انتشار غبار را رقم زده‌اند. در مقیاس‌های مختلف، این کارکرد به ریزعارضه‌نگاری، ناهمگنی درون‌جامعه‌ای و الگوی استقرار آن‌ها در مراحل اولیه توالی، سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها از طریق تولید پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی، تثبیت نیتروژن، تشکیل خاکدانه و افزایش انسجام ساختاری خاک، هسته آغازین فرآیند احیای سطح را فراهم می‌کنند. مرور گسترده‌ای از مطالعات تجربی نشان می‌دهد که تلقیح مصنوعی یک‌باره در اواخر پاییز این ریزموجودات بر روی خاک‌های سست و مستعد فرسایش، ضمن کاهش محسوس رواناب و رسوب، تشکیل سریع‌تر پوسته‌های پایدار را ممکن ساخته و زمان بازیابی را از بازه‌های طبیعی چندده‌ساله به حدود ۵ تا ۱۰ سال کاهش می‌دهد؛ این در حالی است که هزینه اجرای این رویکرد معمولاً در حدود ۳۵۰ دلار در هکتار گزارش شده است. در مراحل پیشرفته‌تر توالی، خزها با دستیابی به پوشش بالاتر از حدود ۳۶ درصد، به مؤثرترین عامل کاهش فرسایش و بهبود پایداری سطحی تبدیل می‌شوند و در عین حال، با تغییر رژیم رطوبتی و دمایی لایه سطحی، بر تخییر، نفوذپذیری و توزیع مجدد آب در مقیاس لکه‌ای و توده‌ای اثر می‌گذارند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از تلقیح مصنوعی BSCs، در ترکیب با مدیریت پوشش خزهای رویکردی کارآمد و تسریع‌کننده برای کنترل فرسایش، افزایش حاصلخیزی و بهینه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی خاک در برنامه‌های احیای سرزمین محسوب می‌شود. با عنایت به رژیم‌های رطوبتی-حرارتی ایران، تلقیح یک‌باره سیانوباکتری‌های بومی نظیر <i>Phormidium spp.</i> و <i>Scytonema spp.</i> با غلظت بهینه ۱۰۰ میلیون سلول در لیتر در اواخر پاییز، به‌عنوان راهکار عملیاتی پیشنهاد می‌گردد. این رویکرد، تعادل مناسبی میان هزینه، بقای میکروبی و کارایی احیا در اقلیم‌های خشک و تعادل بوم‌سازگان را برقرار می‌سازد.
واژه‌های کلیدی: تلقیح مصنوعی پوسته‌های زیستی خاک، توالی زمانی، مقاومت خاک، سیانوباکتری، احیای پوسته‌های زیستی	
آدرس ایمیل نویسنده مسئول: mhalizadeh@gau.ac.ir	

استناد: محمدی، راشین و حسینعلی‌زاده، محسن، ۱۴۰۵. ارزیابی جامع نقش پوسته‌های زیستی خاک در ارتقای حاصلخیزی، حفظ رطوبت، کاهش

فرسایش و تاب‌آوری بوم‌سازگان. نشریه مدیریت اراضی، ۱۴ (۱)، صص. ۱۱۳-۱۴۶.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.368649.388>

مقدمه

رشد بیابان در ایران یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی کشور است؛ به‌طوری‌که بخش وسیعی از اراضی، به‌ویژه حدود ۷۵ درصد از بوم‌سازگان^۱ خشک و نیمه‌خشک، با پیامدهای بیابانی شدن از جمله خشک‌شدن دریاچه‌های داخلی، طوفان‌های ماسه، گردوغبار و تشدید فرسایش بادی مواجه‌اند. در این بوم‌سازگان‌ها به دلیل کمبود رطوبت و سایر شرایط نامساعد اقلیمی، پوشش گیاهی آوندی عموماً پراکنده است و در نتیجه خاک‌ها در معرض تخریب شدید قرار دارند. با این حال، در بسیاری از این مناطق، فواصل بین گیاهان توسط جوامع ریزموجودات گیاهی و میکروبی پوشانده شده است که به‌عنوان «پوسته‌های زیستی خاک» شناخته می‌شوند. پوسته‌های زیستی خاک، حاصل مشارکت ذرات معدنی با سیانوباکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها، گل‌سنگ‌ها و بروفیت‌ها هستند و پوشش رایج فضاهای باز اطراف گیاهان آوندی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آیند. این پوسته‌ها با تأثیرگذاری قابل توجه بر فرایندهای بوم‌سازگان‌های اولیه، به‌درستی به‌عنوان «مهندسان زیست‌بوم» در اراضی خشک توصیف شده‌اند (Weber et al., 2016; Kidron et al., 2021).

در سال‌های اخیر، در ایران نیز مطالعات میدانی و مزرعه‌ای متعددی به بررسی نقش پوسته‌های زیستی در بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک، تنظیم پاسخ‌های هیدرولوژیکی و کاهش فرسایش پرداخته‌اند (Jafari et al., 2004; Kaslakheh et al., 2012; Kakeh et al., 2013, 2016, 2020a, 2020b; Gholamhosseini et al., 2020, 2021; Sepehr et al., 2019). پژوهش‌ها در مناطقی مانند آلاگل و تپه‌های گسی گلستان، مراتع قره‌قیر، دشت‌سره‌های شمال‌شرق ایران و حاشیه پلایاها نشان داده است که حضور و توسعه پوسته‌های سیانوباکتریایی، گل‌سنگی و خزهای، ضمن کاهش چشمگیر رواناب و رسوب، با افزایش ماده آلی، نیتروژن و پایداری خاک‌دانه‌ها، به‌طور معنی‌داری کیفیت و تاب‌آوری خاک را

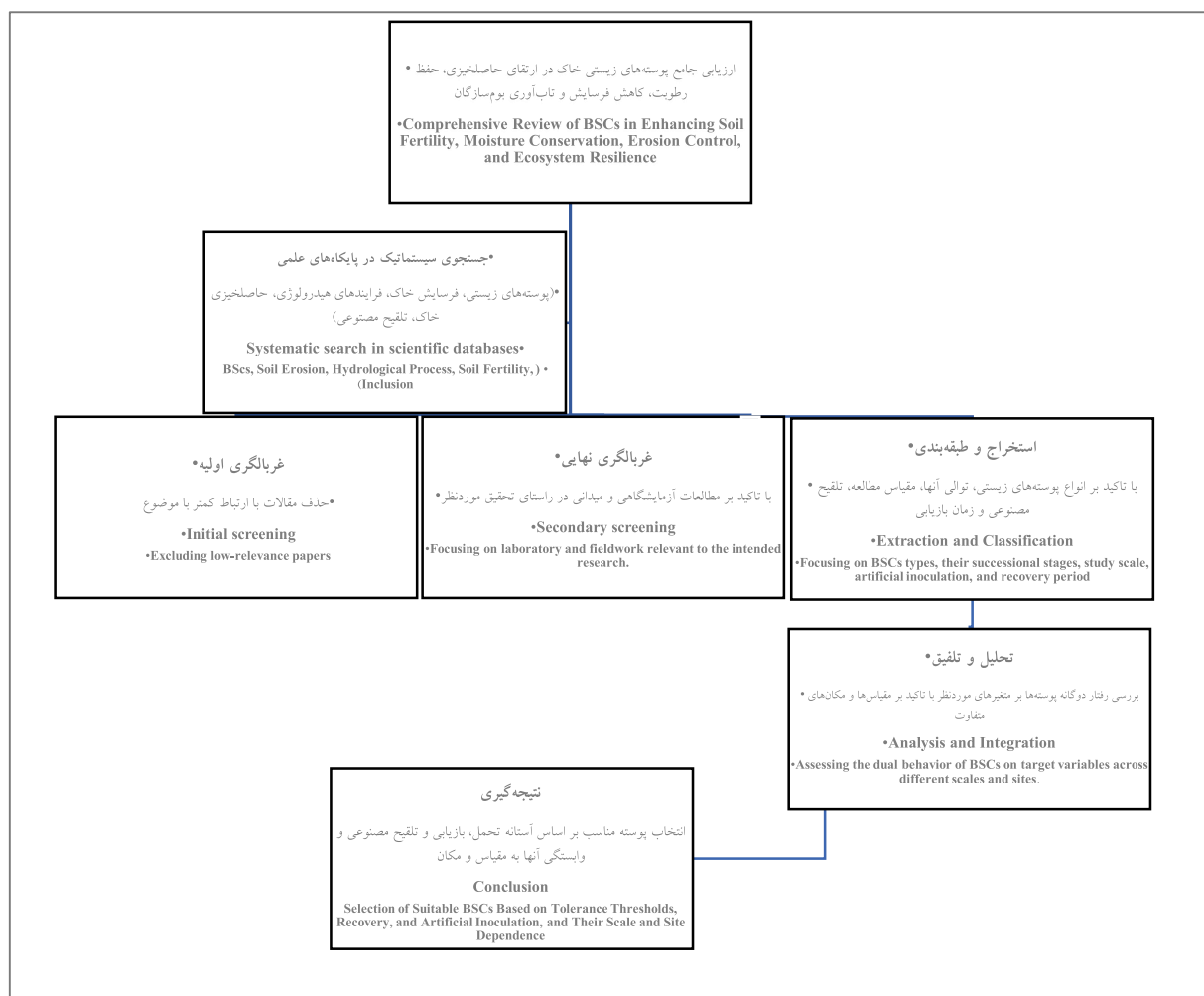
در برابر فرسایش و تغییر اقلیم ارتقا می‌دهد (Jafari et al., 2004; Gheytasi et al., 2022; Hemati Daiv et al., 2022; Matboo et al., 2024). خاک‌های لسی شمال گلستان، پوسته‌های گل‌سنگی با افزایش کربن آلی و بخش‌های مختلف کربن، سطح کیفیت و پایداری خاک‌های حساس را بهبود داده‌اند (Soleimanzadeh et al., 2019) و در مراتع قره‌قیر، حضور کریپتوگام‌ها به افزایش معنی‌دار کربن آلی، نیتروژن و فسفر قابل‌جذب منجر شده است (Tavili et al., 2010).

در کنار توالی طبیعی، رویکرد «تلقیح مصنوعی» ریزموجودات سازنده پوسته‌ها، به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، در سال‌های اخیر به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تسریع تشکیل BSCs و کنترل فرسایش در ایران مطرح شده است (Kheirfam et al., 2017a, 2017b; Sadeghi et al., 2017, 2020a, 2020b; Jafarpour et al., 2022; Mumzaei et al., 2022). می‌دهد که تلقیح مستقیم سیانوباکتری‌های بومی در خاک‌های فرسایش‌پذیر، می‌تواند ضمن کاهش محسوس رواناب و رسوب و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک، زمان تشکیل پوسته‌های پایدار را از بازه‌های طبیعی چنددهه‌ساله به حدود چند سال تا یک دهه کاهش دهد. به‌طور مشخص، در مرتع گل‌گنگ واقع در حوزه آبخیز حبله‌رود، اعمال سه غلظت مختلف سیانوباکتری (10^8 ، 10^{10} و 10^{12} سلول در لیتر) نشان داده است که تلقیح در غلظت بهینه، در یک دوره کمتر از یک سال، نیتروژن کل را حدود ۲۱ درصد و پتاسیم و کربن آلی را بیش از ۵۰ درصد افزایش داده و در عین حال، pH خاک را حدود ۰/۴ واحد کاهش می‌دهد (Mirzahosseini et al., 2023). این نتایج، همراه با شواهد به‌دست‌آمده از مکان‌های دیگر، جایگاه تلقیح سیانوباکتری‌های بومی را به‌عنوان راهبردی کم‌هزینه و اثربخش برای بهبود حاصلخیزی و پایداری خاک در مراتع تخریب‌یافته ایران تقویت می‌کند. با این وجود، تعیین «مناسب‌ترین نوع ریزموجودات» (سیانوباکتری‌ها، خزها، گل‌سنگ‌ها یا ترکیب آن‌ها) و نیز

انجام شده در پایگاه‌های داخلی لحاظ شد. معیارهای ورود مطالعات شامل تمرکز بر نقش پوسته‌های زیستی در یکی از سه محور اصلی این پژوهش (فرسایش و رسوب، فرایندهای هیدرولوژیکی و ویژگی‌های حاصلخیزی و کیفیت خاک) و ارائه داده‌ها یا تحلیل‌های کمی یا کیفی قابل استناد بود. در مقابل، گزارش‌های کلی و مواردی که صرفاً به جنبه‌های طبقه‌بندی بدون ارتباط مستقیم با عملکرد بوم‌سازگانی پوسته‌ها می‌پرداختند، از مرور حاضر کنار گذاشته شدند. در نهایت، حدود ۱۶۰ منبع منتخب، شامل ترکیبی از مقالات تجربی میدانی و آزمایشگاهی، مطالعات مدل‌سازی، مرورهای پیشین و پژوهش‌های داخلی، مبنای تحلیل‌ها و جمع‌بندی‌های این نوشتار قرار گرفت. نمودار جریان‌ی ساختار پژوهش در هفت مرحله و مطابق شکل ۱ ارائه شده است.

«غلظت و دوز بهینه تلقیح» در هر منطقه، با توجه به هدف مدیریتی (کاهش فرسایش، افزایش حاصلخیزی، تنظیم رواناب و تبخیر) و شرایط اقلیمی و خاکی محلی، همچنان یک چالش علمی و اجرایی است. بر این اساس، نوشتار حاضر با مرور نظام‌مند مطالعات جهانی و داخلی، به بررسی نقش پوسته‌های زیستی خاک در فرسایش، فرایندهای هیدرولوژیکی و حاصلخیزی و همچنین تبیین معیارهای انتخاب مناسب‌ترین ریزموجودات و راهبردهای تلقیح مصنوعی در بوم‌سازگان‌های خشک و نیمه‌خشک، با تأکید ویژه بر شواهد تجربی ایران می‌پردازد.

در مورد ایران، علاوه بر معادل‌های انگلیسی، واژه‌های فارسی متناظر مانند «پوسته زیستی خاک»، «سیانوباکتری»، «خزه»، «گل‌سنگ»، «فرسایش»، «رواناب»، «نفوذپذیری» و «احیای اراضی» نیز در جستجوهای



شکل ۱- نمودار جریان‌ی تحقیق
Figure 1- Flowchart of study

می‌کنند که منجر به کاهش تجمع ذرات خاک می‌شود (Chamizo et al., 2020b). این پوسته‌های زیستی با تولید ترک‌های سطحی در خاک‌های سنگین‌بافت، نفوذپذیری را افزایش می‌دهند. خشک‌شدن متناوب لایه‌های این پوسته‌ها به تشکیل برجستگی‌های موجی شکل منجر می‌شود که سرعت رواناب و فرسایش را کاهش می‌دهد (Danin et al., 1998; Kidron et al., 1999).

قارچ‌ها را می‌توان به صورت موجودات زنده آزاد، تجزیه‌کننده مواد و یا هم‌زیست با ریشه گیاهان در نظر گرفت. هیف‌های آن‌ها با اتصال ذرات خاک به یکدیگر، تخلخل خاک را بهبود بخشیده و ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهند (Rodríguez-Caballero, 2019). گل‌سنگ‌ها به‌عنوان یکی دیگر از ریزموجودات زیستی، نتیجه ارتباط هم‌زیستی بین یک قارچ رشته‌ای و یک ریزموجود فتوسنتزکننده هستند که می‌تواند یک جلبک یا سیانوباکتری باشد (Ladron' de Guevara et al., 2015). خزها نیز به شاخه‌ی بروفیت‌ها یا گیاهان غیرآوندی تعلق دارند و از طریق کپسول‌های اسپور تکثیر می‌شوند. بعد از بلوغ کپسول اسپور، بافت آن خشک شده و کپسول باز می‌شود. اسپورها به‌وسیله عوامل طبیعی پخش شده و به مکان‌های جدید منتقل می‌شوند. وقتی به یک محیط مناسب (معمولاً یک سطح مرطوب و سایه‌دار) برسند، شروع به جوانه‌زنی می‌کنند. این پوسته‌ها در محیط‌های خشک می‌توانند بدون ساختارهای تولیدمثلی، تنها با تکه‌تکه شدن ساده و به صورت غیرجنسی تولیدمثل کنند (Slate et al., 2020; García et al., 2020). بنابراین، پوسته‌های زیستی با ترشح متابولیت‌های ثانویه، بر ریخت‌شناسی سلولی، ریخت‌شناسی پوسته و نفوذپذیری خاک تأثیرگذارند (Canton' et al., 2020; Chamizo et al., 2018). ویژگی‌های ریخت‌شناختی اختصاصی پوسته‌ها، به‌ویژه سطح ویژه بالای گل‌سنگ‌ها و خزها، ظرفیت جذب آب بالایی ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که ترشحات خارج سلولی آن‌ها قادرند بیش از

سیانوباکتری‌ها، باکتری‌های رشته‌ای هستند که نیتروژن اتمسفر را تحت شرایط بی‌هوازی، فتوسنتز و تثبیت می‌کنند. برخی از گونه‌های این باکتری‌ها به دلیل مقاومت به حرارت محیطی، حتی در مناطق تخریب‌شده با دماهای بالا نیز می‌توانند زنده بمانند (Roncero-Ramos et al., 2019). تخمین‌های جهانی حاکی از آن است که پوسته‌های زیستی خاک در مقیاس جهانی سالانه حدود ۰/۱ پتاگرم کربن در هکتار تثبیت می‌کنند (Garcia-Pichel et al., 2003)؛ در مقیاس محلی، نرخ تثبیت کربن توسط پوسته‌های سیانوباکتریایی بین ۱۰ تا ۴۰ گرم بر مترمربع در سال (معادل ۰/۱ تا ۰/۴ تن در هکتار) گزارش شده است. سیانوباکتری‌ها به متمرکز شدن پوسته‌ها در بوم‌سازگان تحت تنش منجر شده و به‌عنوان هسته‌های اصلی پوسته‌های زیستی محسوب می‌شوند (Zhang et al., 2015). علاوه بر این، در مقایسه با خزها و گل‌سنگ‌ها، در تشکیل و توالی گونه‌ها نقش کلیدی دارند (Eldridge & Greene, 1994). شگفت‌آور است که این پوسته‌های زیستی حتی در شرایط فراخشک نیز تثبیت نیتروژن را به‌صورت کارآمد ادامه می‌دهند و فعالیت آن‌ها با بلوغ پوسته همبستگی مثبت دارد (Su et al., 2011). غلاف‌های سیانوباکتریایی و مواد پلی‌ساکاریدی خارج سلولی^۲ این پوسته‌ها می‌توانند آب را تا هشت برابر وزن خشک خود جذب کرده و تا ۷۰ برابر حجم خود منبسط شوند و در نتیجه منافذ سطحی خاک را مسدود نمایند (Colica et al., 2014). در واقع، مقدار بالایی از پلی‌ساکارید خارج سلولی ترشح شده توسط پوسته‌های زیستی سیانوباکتری، سبب مسدود شدن منافذ شده و رواناب را افزایش می‌دهد. سیانوباکتری‌های مختلف مانند *Phormidium ambiguum* و *Scytonema javanicum* پلی‌ساکاریدهای بیشتری ترشح می‌کنند که ظرفیت اتصال زیادی دارند و به تشکیل پایدارتر ذرات خاک کمک می‌کنند. علاوه بر این، در شرایط محیطی محدود، پوسته‌های زیستی ترکیبات آلی کمتری تولید

خاک بوده و شبکه‌ای را تشکیل می‌دهند که ذرات خاک را به هم نزدیک می‌کند (Bowker et al., 2008). ایسا و همکاران (Issa et al., 2001) در تحقیقی اشاره کرده‌اند که مساحت منافذ پوسته‌ها از حدود ۳/۵ درصد در ابتدای توالی تا حدود ۱۱/۶ تا ۲۳/۷ درصد در انتهای توالی تغییر می‌کنند.

همچنین رطوبت خاک، اثرات مختلف پوسته‌های زیستی بر رواناب و پالایش^۳ را تعیین می‌کند. هنگامی که خاک خشک است، پوسته‌های زیستی با دارا بودن ترک‌هایی در سطح خود سبب افزایش نفوذپذیری می‌شوند اما زمانی که خاک مرطوب است، این ترک‌ها ناپدید شده و باعث افزایش رواناب می‌شوند (Rodríguez-Caballero et al., 2012). گل‌سنگ‌ها بیش از سیانوباکتری‌ها باعث ایجاد منافذ ریز در سطوح خاک می‌شوند (Canton' et al., 2020) که کاهش شدت رواناب را به دنبال دارد (Rodríguez Caballero et al., 2012).

توسعه توالی پوسته‌ها به صورت پیشرونده تحت تاثیر اثرات ترکیبی عوامل زیستی و غیرزیستی بوده و نه تنها به تعاملات بین آنزیم‌های خاک و میکروب‌ها، بلکه با پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی ترشح شده توسط سیانوباکتری‌ها نیز ارتباط تنگاتنگی دارد (Mazor et al., 2004; Chen et al., 2014; Wu et al., 1996). در شرایط تنش‌های غیرزیستی شدید، توالی بوم‌سازگان به عنوان یک مکانیسم توسعه‌ای مرکزی در پویایی آن‌ها نقش داشته و با خدمات بوم‌سازگان، اهمیت آن‌ها افزایش یافته است. توالی پوسته‌ها یک فرایند پیوسته و ممتد است که با جایگزینی تدریجی گونه‌ها در مراحل مختلف و مشترک مشخص می‌شود (Bowker, 2007). این پیشرفت توالی تحت تأثیر عوامل غیرزیستی مانند آب و هوا، ویژگی‌های خاک، ریزعارضه‌نگاری^۴، آتش‌سوزی و اختلالات و همچنین عوامل زیستی مانند پوشش گیاهان آوندی است. بر اساس جایگزینی غالب نهان‌زادگان، توالی پوسته‌ها را می‌توان به سه مرحله اصلی تقسیم کرد: مرحله پیشگام که

۷۰ برابر وزن خشک خود، رطوبت را نگه دارند (Chamizo et al., 2012a). با این حال، این پوسته‌ها در شرایط بارش‌های شدید به صورت دوگانه، آب‌گریزی لایه سطحی خاک را افزایش داده، جریان ترجیحی را تقویت کرده و رواناب سطحی را ۱۵ تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهند (Fischer et al., 2010). گل‌سنگ و خزه با ریخت‌شناسی سه‌بعدی خشن‌تر، زبری سطح خاک را افزایش داده و سرعت رواناب را کاهش (Kidron, 2015) همچنین، خزه‌ها قادر به جذب مستقیم آب و مدیریت آن در ساختارهای برگری خود هستند (Catcheside, 1980). این جوامع زیستی، با افزایش محتوای ماده آلی خاک، به دام‌اندازی ذرات خاک را تشدید کرده (Gao et al., 2017)، با ترشح پلی‌ساکارید خارج سلولی سبب تغییر خصوصیات شیمیایی خاک می‌شوند (Kidron et al., 2020b, 2022b).

پوسته‌های زیستی در مراحل اولیه توالی ممکن است نفوذپذیری را کاهش دهند، اما در مراحل پیشرفته‌تر، با افزایش ضخامت و زبری سطح، نفوذپذیری افزایش می‌یابد (Belnap et al., 2013). در واقع علاوه بر کربن و نیتروژن، بسیاری از ویژگی‌های پوسته‌های زیستی، مانند زی‌توده، ضخامت، زبری سطح و تولید مواد آلی، با مراحل تکامل توالی مختلف پوسته‌های زیستی افزایش می‌یابد که بر پاسخ هیدرولوژیکی خاک نیز تأثیر می‌گذارد (Bowker et al., 2018; Canton' et al., 2020; Eldridge et al., 2020).

با افزایش پوشش پوسته‌ها در ابتدای توالی، زمان شروع رواناب کوتاه‌تر می‌شود، در حالی که با افزایش پوشش آن‌ها در انتهای توالی، رواناب با تأخیر ایجاد می‌شود. در مقابل، پوسته‌های مراحل انتهایی توالی (مانند گل‌سنگ‌ها و خزه‌ها) تمایل دارند آب را جذب کرده و متورم شوند؛ این امر زبری سطح را افزایش داده و سرعت رواناب را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، ساختارهای گل‌سنگ و خزه (هیفاها) نیز مسئول پیوند فیزیکی ذرات

در آن سیانوباکتری‌ها غالب هستند؛ مرحله میانی که با مقاومت بیشتر در برابر اختلالات و حضور غالب جلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌ها مشخص می‌شود؛ و مرحله پایانی یا پایدار که در آن گل‌سنگ‌ها غالب هستند. در مناطقی با بارش بالاتر یا رطوبت محلی، ممکن است خزّه تشکیل شوند. با این حال، فشارهای خارجی مانند فعالیت‌های انسانی (مثلاً تردد وسایل نقلیه و چرای بیش از حد) ممکن است باعث تشدید توالی معکوس پوسته‌ها شوند. به نقل از فیلیپس و همکاران (Phillips et al., 2022) تغییر اقلیم به توالی معکوس توالی پوسته‌های زیستی منجر می‌شود. نتایج پژوهشی نشان داد ((Hassanzadeh et al., 2015)) توالی پوسته‌های زیستی از تغییرات ژئومورفولوژی نیز تبعیت می‌کند که این تغییرات نیز به نوبه خود بر تغییرات خصوصیات خاک تأثیرگذار هستند. آنها با تغییرات پروفیل طولی مخروطه‌افکنه‌ای در خراسان رضوی، از بالادست به پایین‌دست بر تکامل توالی پوسته‌های زیستی صحه گذاشتند.

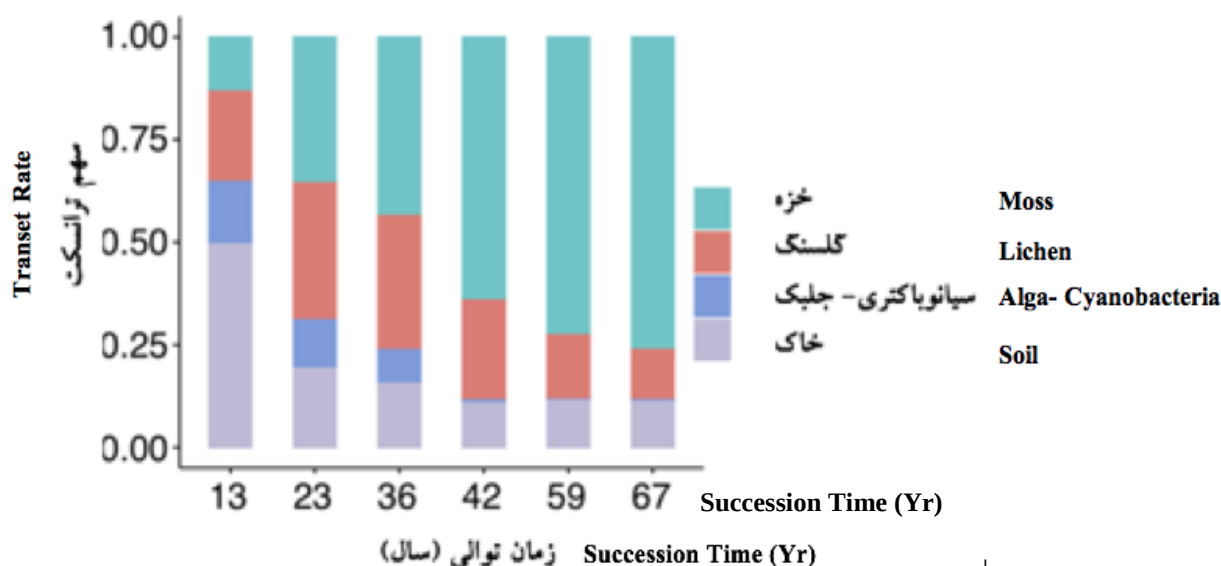
از طرف دیگر فعالیت تثبیت نیتروژن به صورت یکنواخت در طول توالی پوسته‌ها افزایش نمی‌یابد. به عنوان مثال، پوسته‌های خزّه‌ای برای تأمین نیتروژن خود به سیانوباکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن موجود در اطرافشان وابسته هستند (Zhang et al., 2022). ژائو و همکاران (Zhao et al., 2010a) در فلات لسی چین مشاهده کردند که نرخ سالانه تثبیت نیتروژن برای پوسته‌های جلبکی و خزّه‌ای به ترتیب ۱۳ و ۳ کیلوگرم در هکتار است که با افزایش سهم خزّه‌ها در ترکیب پوسته‌ها، میزان تثبیت نیتروژن کاهش می‌یابد (Zhao et al., 2010a). در تحقیقی دیگر در فلات لسی چین، نشان داده شده است که چگالی ظاهری خاک در ابتدا در طول مراحل اولیه توالی پوسته‌های سیانوباکتریایی افزایش می‌یابد، اما در پوسته‌های بالغ و غالب خزّه‌ای، نسبت به خاک‌های غالب سیانوباکتریایی، حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد (Zhao et al., 2010b).

پوسته‌های خزّه‌ای (در مراحل پایانی توالی) در مقایسه با پوسته‌های سیانوباکتریایی (در مراحل اولیه توالی)، از خاک در برابر فرسایش محافظت بهتری ارائه می‌دهند. ناپن و همکاران (Knapen et al., 2007) کاهش ۳۷ درصدی و ۷۹ درصدی نرخ جدایش خاک را به ترتیب برای پوسته‌های سیانوباکتریایی و پوسته‌های خزّه‌ای گزارش کردند. بل‌نپ و همکاران (Belnap et al., 2013) میزان تلفات رسوب را تحت پوسته‌های سیانوباکتریایی و خزّه‌ای به ترتیب ۴۰۰ گرم در مترمربع و صفر گرم در مترمربع ثبت کردند؛ در حالی که چامیزو و همکاران (Chamizo et al., 2017) کاهش فرسایش را از میزان پایه خاک لخت (314 ± 465 گرم در مترمربع) به 46 ± 75 گرم در مترمربع برای پوسته‌های سیانوباکتریایی و 14 ± 24 گرم در مترمربع برای پوسته‌های خزّه‌ای گزارش نمودند.

ظرفیت پوسته‌های زیستی برای بازگشت به شرایط قبل از تخریب، به عنوان "زمان بازیابی" تعریف شده است. مطالعات نشان داده‌اند که زمان بازیابی پوسته‌های زیستی از دهه‌ها تا قرن‌ها متغیر است و به ترکیب پوسته‌ها و ماهیت اختلالات وارد شده بستگی دارد. لیو و همکاران (Liu et al., 2017) دریافتند که زمان بازیابی برای باکتری‌ها بیش از ۱۵ سال است، در حالی که این زمان برای قارچ‌ها از دهه‌ها تا قرن‌ها متغیر است. علاوه بر این، کیدرون و همکاران (Kidron et al., 2020a) بیان کردند که زمان‌های بازیابی اشاره شده در مقالات، ممکن است منجر به تفسیر نادرست از زمان بازیابی شود و گزارش کردند که این زمان برای سیانوباکتری‌ها از ۵ الی ۱۰ سال در تغییر است، در حالی که گل‌سنگ‌ها و خزّه‌ها به ۲۰-۱۰ سال زمان برای بازیابی، نیاز دارند. مطالعات نشان می‌دهند که برای بازگشت پوسته‌های زیستی خزّه پس از حذف آنها، ۱۷ تا ۲۲ سال، زمان لازم است. با این حال، در شرایط مناسب اقلیمی و رطوبتی، پوسته‌های سیانوباکتریایی می‌توانند در عرض یک سال تشکیل شوند و تنها در ۸ تا ۱۰ سال از طریق توالی بوم‌سازگان به مرحله پایدار توالی

تلقیح در شرایط آزمایشگاه (کمتر از یک سال) با شرایط عرصه (۵ تا ۱۰ سال برای سیانوباکتری‌ها و ۱۰ تا ۲۰ سال برای گل‌سنگ و خز) متفاوت است؛ بنابراین، جوامع زیستی قابلیت بازسازی پیوسته و مستمر خود را دارا هستند. حتی در صورت آسیب دیدن، به مرور زمان بهبود می‌یابند (Kidron et al., 2020) که در بلندمدت در پایداری خاک ایفای نقش می‌کنند. به نقل از سون و همکاران (Sun et al., 2025)، تغییرات پوشش پوسته‌های زیستی در یک دوره زمانی تقریبی ۷۰ ساله در شکل شماره (۲) آورده شده است. همانطور که پیداست با گذر زمان، از حدود ۴۰ سال به بعد، پوسته‌های سیانوباکتری و جلبک توسط خز و گل‌سنگ جایگزین شده و به مرور زمان نیز از وسعت گل‌سنگ کاسته و به وسعت خز افزوده می‌شود.

یعنی پوسته‌های زیستی خز پیش روند (Kidron et al., 2008; Zhang & Wang, 2010). بلنپ و الدریج (Belnap & Eldridge, 2003) اشاره کردند که پوسته‌های زیستی به تنش وارده بسیار حساس بوده و زمان بازیابی آن‌ها در شرایط طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً بین ده‌ها تا هزاران سال متغیر است. با این حال، زمان بازیابی را می‌توان با تلقیح خاک با اجزای مختلف پوسته‌های زیستی، مانند سیانوباکتری‌ها، در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک تخریب شده، کاهش داد (Belnap, 1993) که این مهم در تسریع عملکردهای مفید بوم‌سازگان در شرایط تخریب شدید اثبات شده است (Chiquoine et al., 2016). از طرفی به نقل از گافوان (Gufwan et al., 2025)، زمان بازیابی کامل ناشی از



شکل ۲- تغییرات زمانی درصد پوشش پوسته‌های زیستی (Sun et al., 2025)

Figure 2- Temporal variability of BSCs coverage (Sun et al., 2025)

و همکاران (Fox et al., 2004)، پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی مانند ذره رس عمل می‌کند. به نحویکه آب را در چند دقیقه جذب کرده و درز و ترک‌های موجود را مسدود می‌کند. عبارتی سایر محققین مانند (Chenu, 1993; Or et al., 2007) اشاره کرده‌اند که ظرفیت بالای ذخیره آب، تورم بالای خاک و مسدود شدن خلل و فرج و کاهش نفوذپذیری را به دنبال دارد. به‌عنوان مثال به نقل از چنو (Chenu, 1993)، اضافه شدن پلی‌ساکاریدهای خارج

تأثیر پوسته‌های زیستی بر ویژگی‌های خاک و ویژگی‌های فیزیکی خاک

پوسته‌های زیستی نقش مهمی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک ایفا می‌کنند. این جوامع زیستی با ترشح پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی، به‌عنوان یک ترکیب اصلی از پوسته‌ها که ویژگی‌های عمده آن‌ها به نوع پوسته و غالبیت آن بستگی دارد (Wang et al., 2023a)، خصوصیات فیزیکی خاک را تغییر می‌دهد. به نقل از فاکس

ریخت‌شناسی و گونه غالب جمعیت میکروبی، زبری سطح خاک را تغییر می‌دهند و از سطوح صاف تا سطوح رگوز متغیر هستند. افزایش زبری سطح خاک نیز سرعت رواناب را کاهش داده و زمان نگه‌داشت آب در خاک را افزایش دهد. (Rodríguez-Caballero et al., 2012)

چرخه کربن و نیتروژن

پوسته‌های زیستی نقش مهمی در چرخه کربن و نیتروژن خاک ایفا می‌کنند. این پوسته‌ها، کربن را در طیف وسیعی از ترکیبات آلی تثبیت می‌کنند و از مواد آلی خاک برای تکمیل فرآیندهای متابولیکی خود استفاده می‌کنند (Ladron' de Guevara et al., 2014). همچنین، سیانوباکتری‌ها قادر به تثبیت نیتروژن اتمسفر به صورت نیترات و آمونیاک هستند که به حاصلخیزی خاک کمک می‌کند. (Billings et al., 2003; Elbert et al., 2012)

حاصلخیزی خاک

پوسته‌های زیستی با تسریع هوازدهی مواد معدنی و تولید آنزیم‌های معدنی‌کننده مواد مغذی (مانند دامینازها، فسفاتازها و سولفاتازها) به حل‌شدن مواد معدنی کمک می‌کنند (Zhang et al., 2018a). همچنین، ترشحات مختلف پوسته‌های زیستی می‌تواند در پاسخ به تر و خشک شدن آن‌ها تغییر کند که منجر به هوازدهی فیزیکی می‌شود (Garcia-Pichel, et al., 2016). این فرآیندها باعث افزایش تجمع عناصر غذایی ماکرو (کربن، نیتروژن و فسفر) و میکروهای ضروری (کلسیم، منگنز و روی) در خاک می‌شوند (Bullard et al., 2018). از طرف دیگر این جوامع زیستی نیز شرایط جوانه‌زنی بذور را در شرایط سخت محیطی نسبت به خاک‌های بدون پوسته زیستی فراهم می‌کنند (Nawaz, 2024). به نقل از Belnap, J., and Büdel, B. (2016)، این جوامع زیستی به اصل سازماندهی مشهور بوده که به تشکیل جزایر حاصلخیز منجر شده و در نهایت توسط رواناب به گیاهان آوندی سود می‌رسانند.

سلولی به کانی‌های رسی کائولونیت و مونت‌موریلونیت در پتانسیل بالای آب، قطر خلل و فرج را از ۰/۵ تا ۴ میکرومتر به حدود ۰/۲ میکرومتر کاهش می‌دهد. این پلی‌ساکاریدها از طریق افزایش ترک‌های سطحی خاک‌های با بافت سنگین، هدایت هیدرولیکی خاک و نفوذپذیری را افزایش می‌دهد (Belnap, 2006). این ترکیبات در پوسته‌های زیستی سیانوباکتری‌ها تا ۷۵ درصد مواد تشکیل‌دهنده را به خود اختصاص می‌دهند (Mager, 2010). به نقل از لیچنر و همکاران (Lichner et al., 2013)، پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی از طریق تولید لایه‌های خاک آبگریز منجر به کاهش هدایت هیدرولیکی شده و در هنگام جذب رطوبت، بویژه در پوسته‌های تکامل یافته در خاک‌های ماسه‌ای، مسدود شدن خلل و فرج خاک را به دنبال دارند (Colica et al., 2014; Fischer et al., 2010, 2013, Lichner et al., 2013). بافت خاک نیز متأثر از پوسته‌های زیستی بوده که فرآیندهای هیدرولوژیکی را تعدیل می‌کند (Canton' et al., 2020). در خاک‌های ریز بافت، پوسته‌های زیستی رواناب را کاهش داده و نفوذ را افزایش می‌دهند (Eldridge et al., 2020). برعکس، این پوسته‌ها باعث کاهش نفوذ و افزایش رواناب در خاک‌های درشت بافت می‌شوند و این امر به دلیل کاهش تخلخل خاک و قطع هدایت هیدرولیکی است (Eldridge et al., 2020).

تخلخل و زبری سطح خاک

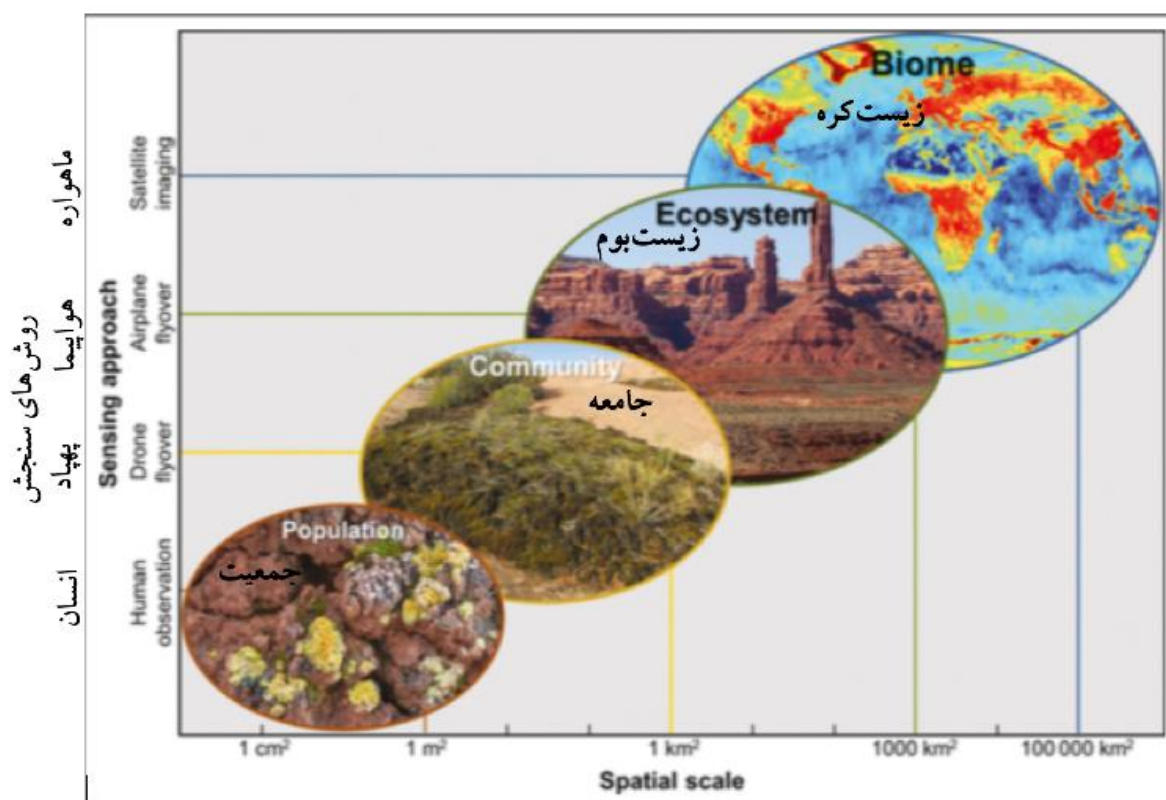
پوسته‌های زیستی تأثیر مستقیمی بر تخلخل خاک دارند. ساختارهای رشته‌ای موجود در این پوسته‌ها می‌توانند به تشکیل حفراتی در خاک منجر شوند که تخلخل را افزایش می‌دهند. با این حال، پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی ترشح شده می‌توانند منافذ خاک را به صورت جزئی مسدود کرده، مسیر آب را مختل کرده و نفوذ را کاهش و تبخیر را افزایش دهد (Kidron et al., 2020b, 2022a). همچنین، پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی با تغییر آرایش ذرات در ساختمان خاک، منافذ ناپیوسته‌ای در خاک تولید می‌کنند که نفوذپذیری را کاهش می‌دهد (Canton' et al., 2020; Xiao et al., 2019). پوسته‌های زیستی، بر اساس

جوامع زیستی با بهبود ساختمان خاک، پایداری خاکدانه‌ها را افزایش داده و فرسایش‌پذیری خاک را کاهش می‌دهد (Felde et al., 2014). این بهبود به دلیل افزایش تخلخل خاک، تشکیل خلل و فرج درشت و افزایش هدایت هیدرولیکی است (Rossi et al., 2012).

مقیاس‌ها و روش‌های متعدد سنجش جوامع زیستی در دو حالت کلی (شکل شماره ۳) و منطقه‌ای (شمال استان گلستان به عنوان محدوده‌ای با پتانسیل بالای پوسته‌های زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک) در شکل شماره ۴ آورده شده است.

در شکل شماره ۴، تنوع بالای پوسته‌ها و نقش چشمگیر آن‌ها در حفاظت آب و خاک به همراه تنوع عناصر موجود در پوسته‌ها در مقیاس‌های مختلف بررسی به وضوح نشان داده شده است.

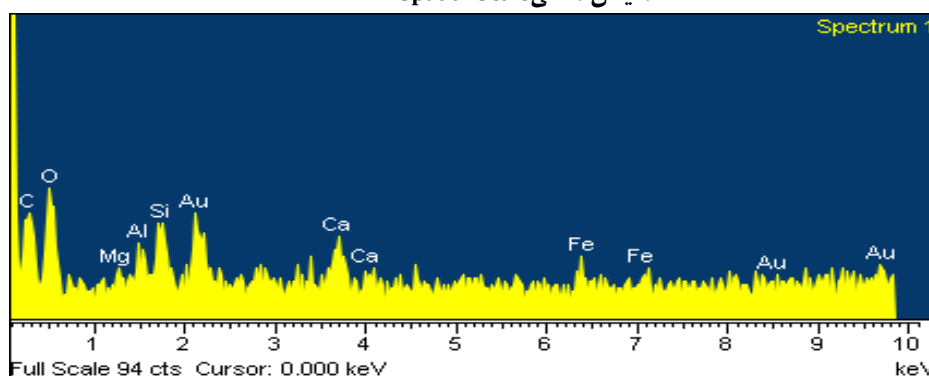
پوشش زیستی کمتر از ۶۰ درصد و یا بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نسبت به خاک بدون پوشش زیستی، منجر به کاهش تبخیر می‌شود (Berdugo et al., 2014). با این حال، پوشش زیستی بیشتر از ۷۵ درصد به دلیل افزایش درجه حرارت خاک و افزایش درصد پوشش پوسته زیستی، می‌تواند تبخیر را افزایش دهد (Kidron & Tal, 2012). پوسته‌های سیانوباکتری با تولید رنگدانه‌های جذب‌کننده UV، سطح آلودگی خاک را کاهش داده و دمای خاک را افزایش می‌دهند که این موضوع بر متابولیسم میکروبی تأثیر می‌گذارد (Ferrenberg et al., 2015; Rutherford et al., 2017).



شکل ۳- مقیاس‌ها و روش‌های مختلف تصویربرداری
Figure 3- Different scales and imaging methods



مقیاس مکانی Spatial Scale



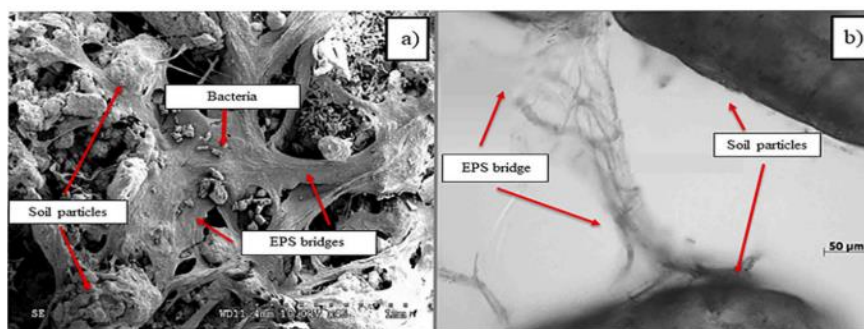
Edax

شکل ۴- تنوع پوسته‌های زیستی و فرایندهای رفتاری آن‌ها در مقیاس‌ها و چشم‌اندازهای متفاوت

Figure 4- Diversity of BSCs and their behavioral processes across various scales and perspectives

مولکولی بالا هستند. هر دو گونه، پلی‌ساکارید بیشتر و پایدارتری نسبت به آنچه که توسط *Nostoc Commune* ایجاد شده است، تشکیل می‌دهند. این نویسندگان (Chamizo et al., 2022a) رشد میکروبی بهتر پوسته‌های زیستی را در خاک ماسه‌ای با ترشح بیشترین میزان پلی‌ساکارید خارج سلولی را مشاهده کردند. علاوه بر این، زمانی که شرایط محیطی و غذایی محدود می‌شود، پوسته‌های زیستی ترکیبات آلی کمتر و ساده‌تری تولید می‌کنند که سبب تجمع کمتر ذرات خاک می‌شود (Chamizo et al., 2020b) (شکل شماره ۵).

چامیزو و همکاران (Chamizo et al., 2020b) پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی تولید شده توسط سه سیانوباکتری مختلف (*Scytonema Nostoc commune* و *Phormidium ambiguum javanicum*) را از نظر حجم ترشح شده و ترکیب شیمیایی مقایسه کردند. گونه *Phormidium ambiguum* میزان پلی‌ساکارید خارج سلولی بیشتر با ظرفیت اتصال بیشتری نسبت به دو سیانوباکتری دیگر را نشان داد. پلی‌ساکارید خارج سلولی تولید شده توسط *Phormidium ambiguum* و *Scytonema javanicum* دارای پلیمرهایی با وزن



شکل ۵- (الف) ذرات خاک، باکتری‌ها و پلی‌ساکارید خارج سلولی تولید شده توسط ریزموجودات مختلف *Nostoc commune* و *Schizothrix cf. Delicatissima* (در ب) زیر میکروسکوپ SEM مشاهده شد (Guida et al., 2023)

Figure 5- (a) Soil particles, bacteria, and extracellular polysaccharides produced by different microorganisms, including *Nostoc commune* and *Schizothrix cf. delicatissima*; (b) observed under SEM (Guida et al., 2023)

همکاران (Faist et al., 2017) نتایج متفاوتی گزارش کرده‌اند و نشان داده‌اند که پوسته‌های زیستی می‌توانند در برخی شرایط، نفوذپذیری را کاهش دهند. این امر به دلیل ترشح مواد آبریز و مسدود شدن خلل و فرج خاک توسط پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی است (Colica et al., 2014; Tighe et al., 2012). میزان تولید این مواد آبریز به ویژه در پوسته‌های زیستی گل‌سنگ و به دنبال آن پوسته‌های زیستی خزه بیشتر است، در حالی که در پوسته‌های زیستی سیانوباکتری وجود ندارد. هیدرولوژی خاک تحت تأثیر عوامل متعددی از پوسته‌های زیستی قرار می‌گیرد که از جمله مهمترین عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

درجه پوشش و زبری سطح: افزایش درصد پوشش پوسته‌های زیستی معمولاً به کاهش رواناب و افزایش نفوذ منجر می‌شود (Roman et al., 2021). فلد و همکاران (Felde et al., 2015) گزارش کردند که پوسته‌های ضخیم‌تر در مقایسه با پوسته‌های نازک‌تر می‌توانند مقادیر بیشتری آب را در طول رویدادهای بارندگی جذب کنند. به نقل از هارپر و ماربل (Harper & Marble, 1988)، هنگامی که درصد پوشش گل‌سنگ و خزه کمتر از ۶۱ درصد باشد، اختلافی بین خاک‌های دارای پوسته و بدون پوسته موجود نیست. هرچند خاک‌های دارای بیش از ۸۵ درصد پوشش گل‌سنگ و خزه نسبت به خاک‌های بدون پوسته، سریعتر خشک می‌شوند. پوسته‌ها با افزایش زبری سطح، سرعت رواناب را کاهش داده و

تأثیر پوسته‌های زیستی بر هیدرولوژی خاک

پوسته‌های زیستی، به عنوان یکی از اجزای اساسی بوم‌سازگان‌های طبیعی، نقش حیاتی در تنظیم فرآیندهای هیدرولوژیکی خاک ایفا می‌کنند. با توجه به تغییرات اقلیمی دهه‌های اخیر، درک تأثیرات این پوسته‌ها بر هیدرولوژی خاک به یکی از موضوعات مهم در مجامع علمی تبدیل شده است. مطالعات متعددی در سراسر جهان به بررسی نقش پوسته‌های زیستی در این زمینه تخصصی پرداخته‌اند، اما نتایج آن‌ها در برخی موارد متناقض به نظر می‌رسد (Belnap et al., 2003). به نقل از الدریج و همکاران (Eldridge et al., 2020)، سازوکار تأثیر جوامع زیستی بر هیدرولوژی بصورت پیچیده و به پوشش و ترکیب گونه‌های موجود در جوامع زیستی و همچنین شرایط محل تشکیل وابسته است.

تأثیر پوسته‌های زیستی بر نفوذپذیری و رواناب

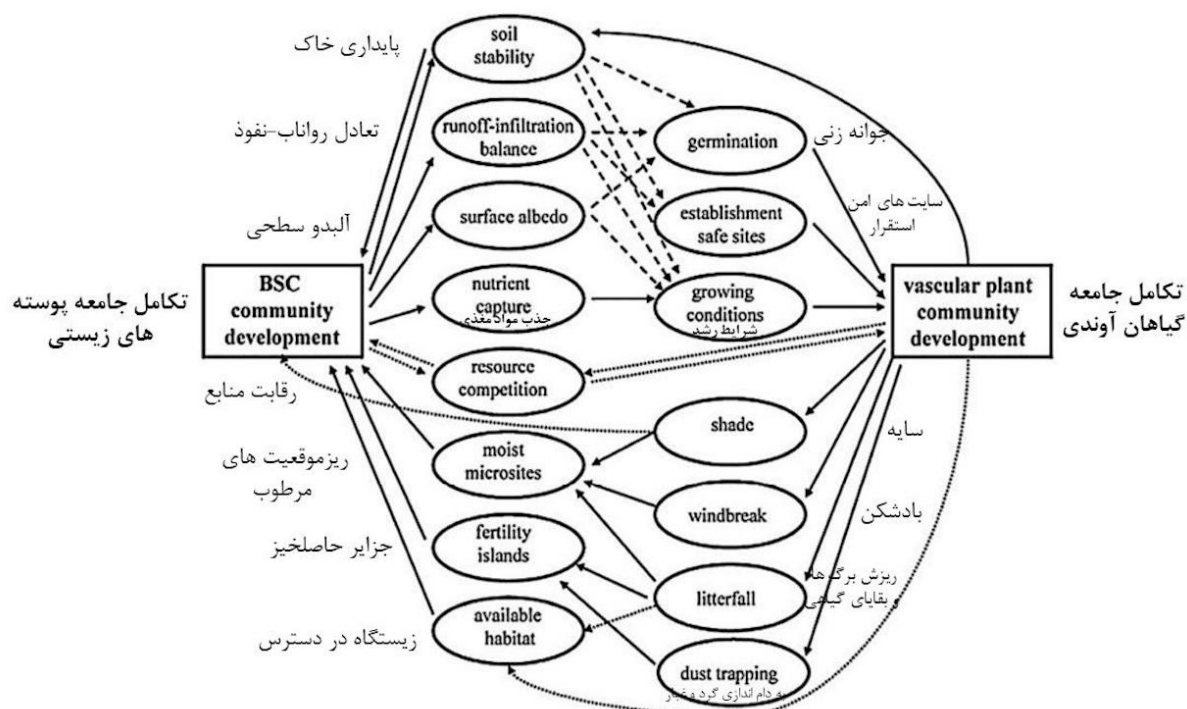
برخی از مطالعات حاکی از افزایش نفوذپذیری خاک با حضور پوسته‌های زیستی هستند (Gao et al., 2017; Xiao et al., 2011; Wei et al., 2015). این افزایش نفوذپذیری به دلیل تولید مواد آلی، پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی و افزایش زبری سطح خاک است که به کاهش سرعت رواناب و افزایش زمان نگه‌داشت آب منجر می‌شود (Rodríguez-Caballero et al., 2012). با این حال، محققانی مانند الدریج و همکاران (Eldridge et al., 2020) و فایست و

(2012)، آماس‌پذیری آن‌ها به محض مرطوب شدن و تولید ریزعارضه‌نگاری جدید و افزایش ضریب زبری (Rodríguez-Caballero et al., 2015)، افزایش خاکدانه‌سازی، تشکیل خلل و فرج درشت و بهبود نفوذپذیری (Felde et al. 2014) اشاره کرد. به نقل از وارن (Warren, 2003a)، بافت خاک نیز بر روی هیدرولوژی پوسته‌ها نیز تاثیرگذار است. به‌نحویکه پوسته‌های با خاک‌های ماسه‌ای در مقایسه با پوسته‌های با خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های بدون پوسته، نفوذپذیری را کاهش می‌دهند. تمامی انواع پوسته‌های زیستی قابلیت جذب آب را دارند. به‌عنوان مثال: سیانوباکتری‌ها تا ۱۰ برابر آب موجود در خود و ۸ تا ۱۲ برابر وزن خشک خود قابلیت جذب آب دارند (Verrecchia et al., 1995). به‌نحویکه جذب آب در گل‌سنگ‌ها و خزها نیز به نوع گونه آن‌ها بستگی دارد. موارد استثنایی توسط رودریگوز-کابالرو (Rodríguez-Caballero et al., 2013) برای آبگریزی گل‌سنگ‌ها اشاره شده است. به‌عبارتی خزها می‌توانند آب را بطور مستقیم جذب کرده، آن را در ساختارهای برگ خود مدیریت کنند (Catcheside, 1980). از طرف دیگر این جوامع زیستی به روش‌های مختلف اعم از به دام‌اندازی رسوبات و مسدود شدن خلل و فرج خاک (Verrecchia et al., 1995)، تورم و مسدود شدن خلل و فرج خاک از طریق تولید پلی‌ساکاریدهای بیرونی و جذب آب (Colica et al., 2014) و آب‌گریزی برخی از پوسته‌های زیستی (Tighe et al., 2012) منجر به کاهش نفوذپذیری می‌شوند. مدل مفهومی اندرکنش بین پوسته‌های زیستی و گیاهان به نقل از بوکر (Bowker, 2007) در شکل شماره ۶ آورده شده است.

زمان نگه‌داشت آب را افزایش می‌دهند (Rodríguez-Caballero et al., 2012).
مواد آلی و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی: پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی تولید شده توسط پوسته‌های زیستی، به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، ظرفیت بالایی برای جذب آب دارند و فرآیندهای هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Chenu, 1993; Or et al., 2007) یکی از دلایل آبدوستی پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی در این نوع پوسته، وجود اسیدهای Ureidosuccinic است که پایداری آن‌ها در محیط‌های خیلی شور و قلیایی و همچنین شرایط خشک و خیلی گرم را افزایش داده (Sepehr et al., 2019) و آبگیری آن‌ها بلافاصله بعد از خشکی، فتوسنتز را فعال می‌کند (Sand-Jensen & Jespersen, 2012). به‌عنوان مثال این مواد، تبخیر را متوقف کرده و به افزایش کارایی درازمدت سلول‌ها (افزایش مدت زمان فتوسنتز بویژه در فصول سرد سال) منجر می‌شوند (Lange et al., 1998).

تنوع پاسخ‌های هیدرولوژیکی در انواع پوسته‌ها

پوسته‌های زیستی، ویژگی‌های متعددی از جامعه گیاهی نظیر ترکیب گونه‌ای، تراکم گیاه، اندازه گیاه و ساختار جامعه گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در عوض، گیاهان بر دریافت باران، کاهش رواناب و افزایش نفوذپذیری خاک تاثیرگذارند (Loik et al., 2004; Ludwig et al., 2005). بنابراین، پوسته‌های زیستی بطور مستقیم از طریق درصد و ترکیب پوشش پوسته و بطور غیرمستقیم از طریق تاثیر بر ویژگی‌های خاک بر نفوذپذیری خاک تاثیرگذارند. از این میان می‌توان به افزایش ضریب زبری سطح زمین (افزایش زمان نگه‌داشت آب و کاهش سرعت رواناب) (Rodríguez-Caballero et al. 2012)، تولید پلی‌ساکاریدهای بیرونی در جذب آب (Chamizo et al., 2012a)، افزایش هدایت هیدرولیکی (Rossi et al.,



شکل ۶- اندرکنش^۵ پیچیده بین پوسته‌های زیستی و جوامع گیاهی (فلش‌های توپر: عمدتاً اثرات مثبت، فلش‌های نقطه‌چین: عمدتاً اثرات منفی و فلش‌های خط‌چین: اثرات متفاوت را نشان می‌دهند). (اقتباس از Bowker (2007))

Figure 6- The complex interactions between biocrusts and plant communities. Solid arrows indicate mainly positive effects, dotted arrows indicate mainly negative effects, and dashed arrows represent variable effects. (Adapted from Bowker (2007))

سطح خاک می‌شوند و خزه بیشترین تجمع شبنم را نسبت به سایر پوسته‌ها از خود نشان داده است (Li et al., 2020, 2022).

برای لحاظ کردن اثر فرآیندهای^۶ مختلف، رفتار متنوع پوسته‌های زیستی در مقیاس‌های متعدد توسط مدل‌های مفهومی بررسی شده است. به عنوان مثال، مدل مفهومی EcoHyD توسط بالدواف و همکاران (Baldauf et al., 2023) برای لحاظ کردن سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در بلندمدت بر رفتار هیدرولوژی پوسته‌های زیستی در مقیاس چشم‌انداز در مناطق خشک اسپانیا مورد استفاده قرار گرفته است. به نقل از بل‌ناپ (Belnap, 2006) مدل مفهومی تاثیرات احتمالی انواع مختلف پوسته‌های زیستی بر ویژگی‌های خاک تاثیرگذار بر چرخه هیدرولوژی در اقلیم‌های مختلف در شکل شماره ۷ آورده شده است.

تأثیر پوسته‌های زیستی بر فرآیندهای تبخیر و رطوبت خاک

پوسته‌های زیستی با تغییر ساختمان خاک، تعادل آبی را تنظیم کرده و درجه حرارت و رطوبت خاک را کنترل می‌کنند (Chamizo et al., 2016). به عنوان مثال، مواد پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی تولید شده توسط پوسته‌ها می‌توانند تبخیر را متوقف کرده و به افزایش کارایی فتوسنتز در فصول سرد سال کمک کنند (Lange et al., 1998). همچنین، این مواد به جذب بخار آب موجود در جو و تشکیل شبنم کمک می‌کنند (Colica et al., 2014; Fischer et al., 2012). به نقل از چنگ و همکاران، جی و همکاران، لی و همکاران و لیو و همکاران (Cheng et al., 2022; Ji et al., 2013; Li et al., 2020; Liu et al., 2006) پوسته‌های زیستی منجر به افزایش تجمع شبنم بر روی

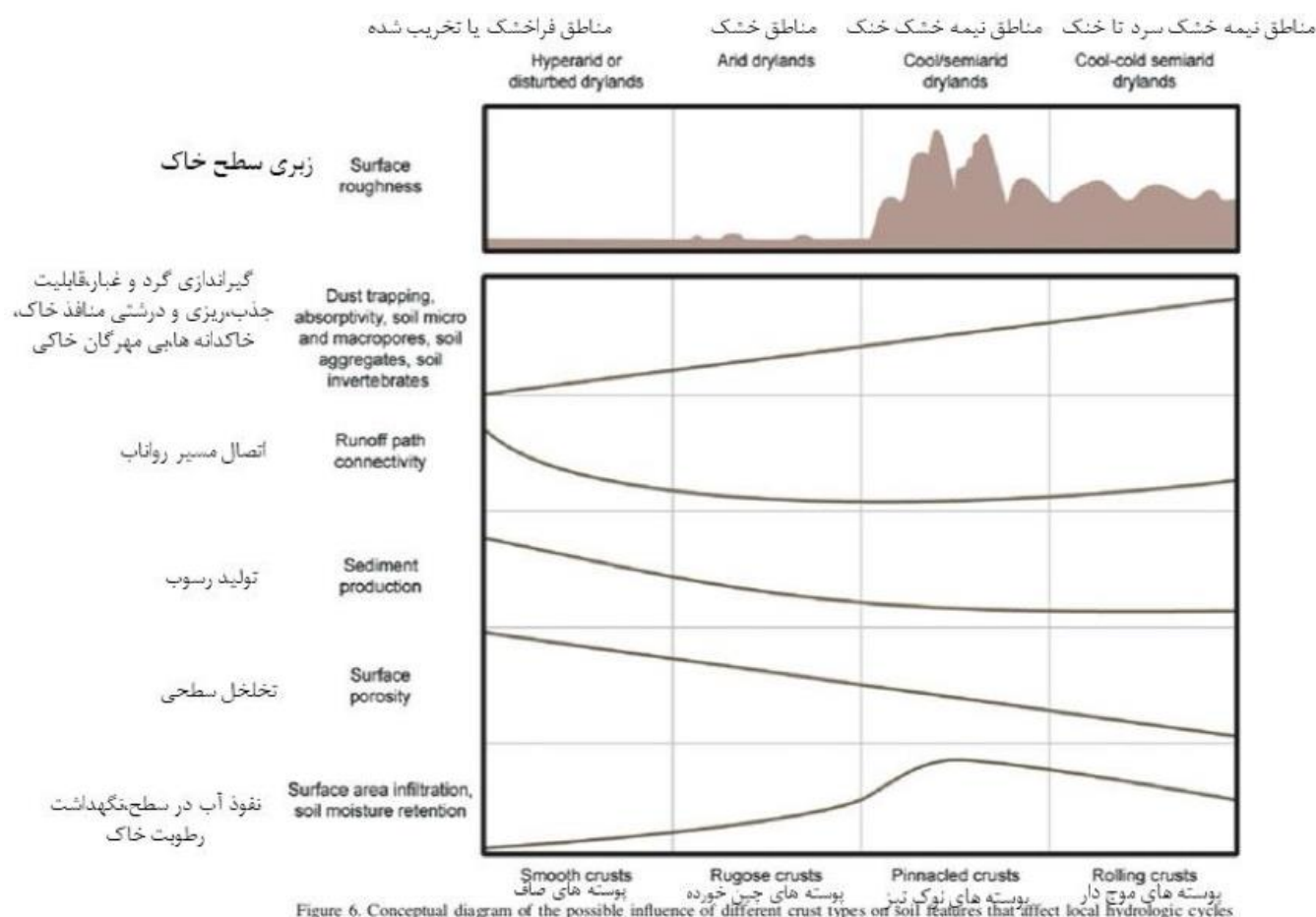


Figure 6. Conceptual diagram of the possible influence of different crust types on soil features that affect local hydrologic cycles

شکل ۷- مدل مفهومی تاثیرات احتمالی پوسته‌های زیستی بر ویژگی‌های خاک موثر بر چرخه هیدرولوژی در اقلیم‌های مختلف (اقتباس از Belnap, 2006)

Figure 7- Conceptual model of the potential impacts of biocrusts on soil properties affecting the hydrological cycle in different climates (Adapted from Belnap, 2006)

به نقل از (Miralles- Mellado et al., 2011)، از این طریق بیابان‌زایی را کاهش می‌دهد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پوسته‌های زیستی به محافظت از خاک در برابر فرسایش کمک می‌کنند، به ویژه زمانی که پوشش گیاهی تنک و اندک است (Gao et al., 2017). مطالعات متعددی در سرتاسر جهان بر حفاظت پوسته‌های زیستی در برابر فرسایش آبی تأکید دارند (Belnap & Lange, 2003; Bowker et al., 2008; Chamizo et al., 2017)؛ و ادعان داشته‌اند که فرسایش خاک تحت تأثیر توالی و درصد پوشش پوسته‌های زیستی قرار می‌گیرد (Gao et al., 2020a, 2020b; Zhao et al., 2014).

پوسته‌های زیستی و فرآیندهای فرسایش خاک پوسته‌های زیستی از طریق پایداری ذاتی که در بالا تشریح شد، تعادل خرد زیتگاه‌ها را فراهم کرده که این مهم به کاهش فرسایش منجر شده (Belnap & Lange, 2003; Belnap et al., 2013) و از این طریق تثبیت کربن و نیتروژن (Barger et al., 2016; Duran et al., 2021) و چرخه مواد را به دنبال دارد (Young et al., 2022). این جوامع از طریق ذخیره آب، خدمات بوم‌سازگان را بهبود بخشیده، در محیط‌های خشک، ذرات سیلت را به دام انداخته (Chamizo et al., 2012) و فرسایش را کاهش می‌دهد که (Williams et al., 2012).

مزایای ارائه شده توسط مراحل مختلف متوالی پوسته‌های زیستی در واقع نتایج تجمعی تغییرات متعدد در خواص خاک، زبری سطح و هیدرولوژی خاک است. پوسته‌ها، پایداری خاکدانه و مقاومت خاک در برابر فرسایش آبی را با مکانیسم‌های مختلف بهبود می‌بخشند. تأثیرات پوسته‌های زیستی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد: (الف) رهگیری قطرات باران، کاهش انرژی جنبشی و افزایش مقاومت خاک در برابر تأثیر بارندگی. (ب) کاهش حجم و سرعت رواناب با افزایش زبری سطح و تخلخل خاک (ج) و تثبیت خاکدانه. پوسته‌های زیستی به‌عنوان یک مانع فیزیکی در برابر برخورد قطرات باران با سطح خاک عمل کرده و انرژی جنبشی قطرات باران را کاهش می‌دهد (Sadeghi et al., 2020b). ضخامت پوسته، مقاومت پوسته‌های زیستی خاک را در برابر ضربه قطرات باران را نشان می‌دهد. پوسته‌های زیستی در برخی موارد رواناب سطحی را کاهش می‌دهند و حجم رواناب سطحی و فرسایش و تلفات خاک ناشی از آن را محدود می‌کنند. حتی با رواناب زیاد، پوسته‌های زیستی، زبری سطح را در مقایسه با خاک لخت، افزایش داده و سرعت رواناب سطحی و تنش برشی آن را کاهش می‌دهند (Rodríguez-Caballero et al., 2012, 2013). به دلیل افزایش زبری، ظرفیت انتقال جریان کاهش یافته و پوسته‌های زیستی می‌توانند ذرات خاک را که توسط رواناب سطحی منتقل می‌شوند، حفظ کنند. در واقع، برخی از مطالعات (Xiao et al., 2019) به تفاوت‌های بین پوسته‌های زیستی و خاک‌های بایر در مورد توزیع اندازه ذرات خاک اشاره کرده‌اند. افزایش ذرات ریز مانند سیلت و رس در خاک‌های پوشیده از پوسته‌های زیستی به دلیل به دام افتادن توسط پوسته‌های زیستی باعث افزایش زبری سطح خاک می‌شود. با این حال، رودریگز-کابالرو و همکاران (Rodríguez-Caballero et al., 2013) اثرات زبری سطح خاک به مقاومت در برابر فرسایش حاصل از بارندگی را گزارش کردند. به این نحو که افزایش زبری سطح بر زاویه برخورد قطره باران و نیروی اعمال شده

خیرفام و همکاران (Kheirfam et al., 2017c) در بررسی اثر تلقیح باکتری با خاک‌های حساس به فرسایش (جاده چالوس-مازندران) در کرت‌های کوچک به اثر باکتری‌ها در افزایش تثبیت نیتروژن تاکید داشته و این روش را به‌عنوان روشی زیستی و مقرون به صرفه در اصلاح خاک پیشنهاد دادند.

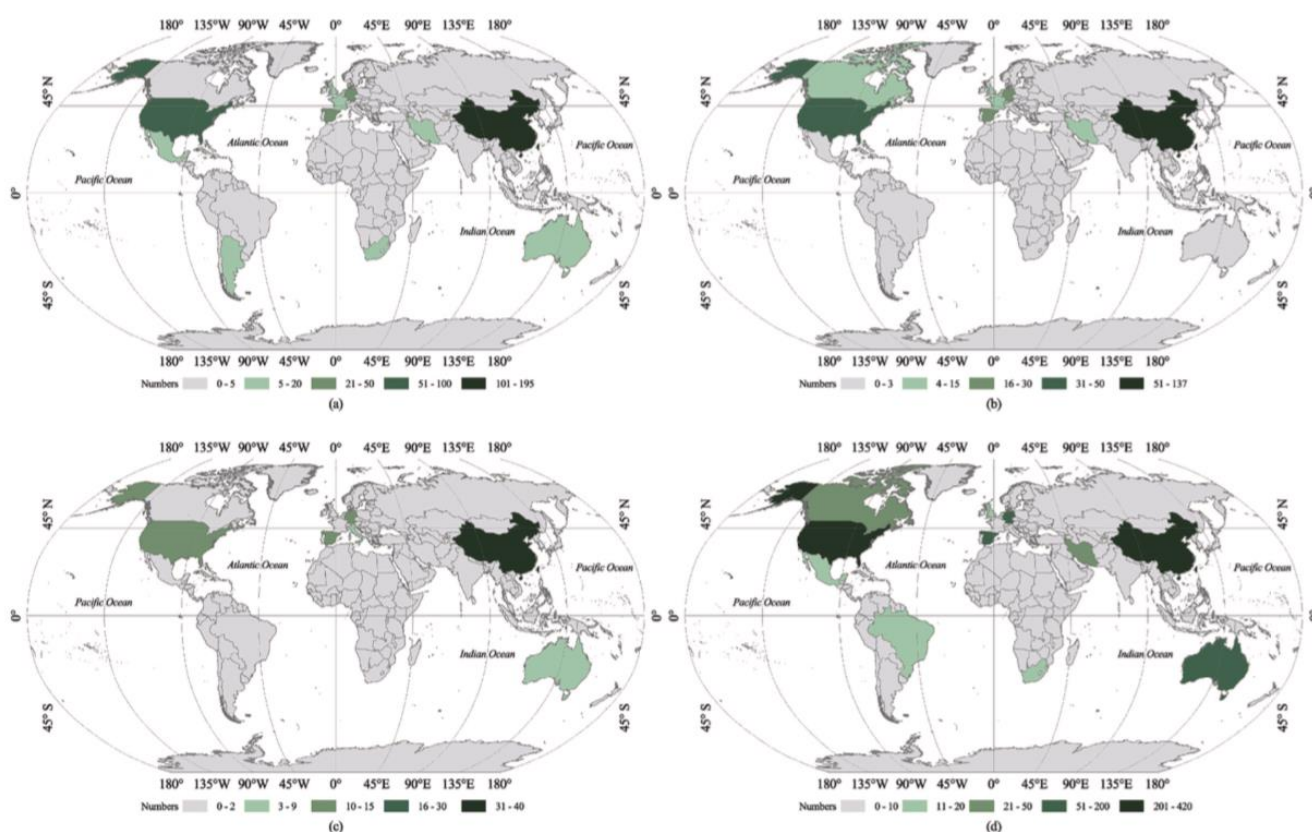
خیرفام و اسدزاده (Kheirfam & Asadzade, 2020) در پژوهشی تحت عنوان امکان‌سنجی تثبیت ماسه‌های روان بستر خشک شده دریاچه ارومیه از طریق تلقیح و تحریک سیانوباکترهای خاکزی در شرایط آزمایشگاهی با شبیه‌سازی باد فرساینده با سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت به این مهم رسیدند که هر دو تیمار تلقیح و تحریک به کاهش ۹۶ و ۱۴ درصد کاهش فرسایش نسبت به تیمار شاهد منجر شدند. علاوه بر این، تلقیح سیانوباکتری افزایش مواد آلی حدود ۱۶۰ درصدی و پایداری خاکدانه ۱۰۵ درصدی را به دنبال داشت.

گائو و همکاران (Gao et al., 2020a) بین پوسته‌های زیستی سیانوباکتری و غلظت رسوب و همچنین بین ویژگی‌های پوسته‌های زیستی خزه (پوشش و زیست توده) با غلظت رسوب، همبستگی منفی پیدا کردند. حفاظت از فرسایش خاک توسط پوسته‌های زیستی سیانوباکتری به طور مثبت با سن آن‌ها مرتبط است. هنگامی که پوسته‌های زیستی سیانوباکتری به مدت حداقل ۶۰ روز رشد کنند، فرسایش خاک ۹۹ درصد نسبت به خاک لخت، کاهش می‌یابد (Kheirfam et al., 2017a, 2017b) و غلظت رسوب نیز کاهش می‌یابد. به نقل از والتین (Valentin, 2002) مقدار فرسایش توسط پوسته‌های زیستی در مقابل خاک بدون پوسته تا ۹۰ درصد قابل کاهش است. میزان رواناب برای خاک‌های فاقد پوسته، ۸۷ درصد ثبت شده است (Gao et al., 2020a). در منطقه نیمه‌خشک، رسوب سالانه در خاک‌های لخت معادل ۴۶۵ گرم بر مترمربع در سال در مقایسه با خاک‌های پوشیده شده با سیانوباکتری (۷۵ گرم بر مترمربع) و گلسنگ (۲۴ گرم بر مترمربع) گزارش شده است (Chamizo et al., 2017).

و تکامل پوسته‌ها را علاوه بر عوامل محیطی در مطالعات متعدد بر رفتار هیدرولوژی و فرسایش پوسته‌های زیستی مهم دانستند.

برخی از مطالعات کلیدی که در آن‌ها به تاثیر پوسته‌های زیستی بر رفتار هیدرولوژی و فرسایش خاک اشاره شده است در جدول‌های شماره ۱ و ۲ آورده شده است.

توسط قطره هنگام رسیدن به سطح خاک تاثیر می‌گذارد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2025) در مقاله‌ای مروری (بالغ بر ۲۰۰۰ مقاله) فرایندهای هیدرولوژی و دینامیک فرسایش خاک تحت تاثیر پوسته‌های زیستی را مورد بررسی قرار دادند (شکل ۸). آن‌ها بر نقش دوگانه پوسته‌ها بر فرایندهای هیدرولوژی و دینامیک فرسایش تاکید داشته و ناهمگنی مکانی، مقیاس مطالعه، نوع پوسته، مراحل توالی



شکل ۸- پراکنش مکانی (الف). نفوذپذیری، (ب). تبخیر، (ج). نقطه شبنم و (د). فرسایش پوسته‌های زیستی

(اقتباس از Yang و همکاران؛ ۲۰۲۵)

Figure 8- Spatial distribution of (a) infiltration, (b) evaporation, (c) dew point, and (d) erosion of biocrusts (Adapted from Yang et al., 2025)

جدول ۱- تاثیر پوسته‌های زیستی بر نفوذپذیری و تبخیر

Table 1- Effects of Biocrusts on infiltration and evaporation

منابع Resources	توضیحات تکمیلی In-depth Consideration	جهت/مقدار تغییر Difference Value	مقیاس مطالعه Study Scale	شرایط محیطی / نوع خاک Environmental Conditions/ Soil Type	روش ارزیابی Evaluation Method	متغیر مورد بررسی Intrested Variables	نوع پوسته Biological Soil Crust Type
Belnap et al. (2013); Baldauf et al. (2023); Rodriguez- Caballero et al. (2012)	این اثرات در مراحل پیشرفته توالی پوسته‌ها (به ویژه با افزایش ضخامت و زبری سطح) مشاهده می‌شود. افزایش نفوذپذیری ناشی از تشکیل شبکه‌های رشته‌ای توسط هیف‌های قارچی و افزایش تخلخل خاک است که به کاهش سرعت رواناب و افزایش زمان نگهداشت آب منجر می‌شود. این امر به دلیل افزایش تخلخل و تشکیل منافذ درشت‌تر در خاک توسط ساختارهای فیزیکی پوسته‌ها است. These effects are observed in the advanced stages of biocrust succession (especially with increasing thickness and surface roughness). The increased infiltration results from the formation of filamentous networks by fungal hyphae and from increased soil porosity, which in turn reduces runoff velocity and increases water retention time. This is due to the enhancement of porosity and the development of coarser pores in the soil created by the physical structures of the crusts	افزایش (در مراحل پیشرفته توالی) Increase (in advanced stages (of succession	کلی General	خشک و نیمه‌خشک Arid and semi-arid	اندازه‌گیری آزمایشگاهی / میدانی Laboratory/field measurement	نفوذپذیری Infiltration	سیانوباکتری، گل‌سنگ، خزه Cyanobacteria, Lichen, Moss
Li et al. (2008, 2010a); Colica et al. (2014); Issa et al. (2001)	این رفتار دوگانه ناشی از ترشح EPS است که در شرایط مرطوب، منافذ خاک را مسدود می‌کند. این مواد، به دلیل ظرفیت بالای جذب آب، در حالت مرطوب منبسط شده و باعث می‌شوند که آب به جای نفوذ، به رواناب تبدیل شود. این اثر به ویژه در پوسته‌های سیانوباکتریایی با ترشحات غنی از EPS مشاهده می‌شود. This dual behavior is attributed to the secretion of EPS, which under wet conditions clogs the soil pores. Owing to their high water-absorption capacity, these substances swell in the wet state, causing water to be converted into runoff rather than infiltrating. This effect is observed particularly in cyanobacterial crusts with EPS-rich secretions.	کاهش (در شرایط مرطوب و مراحل اولیه توالی) Reduction (under moist conditions and early successional (stages	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک ماسه‌ای، شرایط مرطوب Sandy soil, moist conditions	شبیه‌ساز باران Rainfall Simulator	نفوذپذیری Infiltration	سیانوباکتری، گل‌سنگ، خزه Cyanobacteria, Lichen, Moss
Shi et al. (2023); Fischer et al. (2010); Tighe et al. (2012)	این اثرات بیشتر در پوسته‌های گل‌سنگی مشاهده می‌شود که با ایجاد لایه‌های آب‌گریز، نفوذ را محدود می‌کنند. این آب‌گریزی ناشی از ترکیبات شیمیایی موجود در ساختار گل‌سنگ است که باعث می‌شود آب به جای نفوذ، به رواناب تبدیل شود. این امر در مناطق خشک با بارش‌های شدید، می‌تواند منجر به افزایش رواناب و کاهش نفوذپذیری شود. These effects are predominantly observed in lichen crusts, which restrict infiltration by forming hydrophobic layers. This hydrophobicity stems from chemical compounds within the lichen structure, causing water to be converted into runoff rather than infiltrating. In arid regions subjected to intense rainfall, this phenomenon can lead to increased runoff and reduced infiltration.	کاهش Decrease	کرت (میدانی) Field plot	خاک ماسه‌ای، صحرای تنگر چین Sandy soil, China's Tengger Desert	شبیه‌ساز باران Rainfall Simulator	نفوذپذیری Infiltration	جلبک، گل‌سنگ، مخلوط خزه- گل‌سنگ Alga, Lichen, Moss-lichen mixture
Wei et al. (2015); Gao et al. (2017); Rossi et al. (2012)	این اثرات ناشی از افزایش تخلخل و تشکیل منافذ درشت‌تر در خاک توسط ساختارهای فیزیکی پوسته‌ها (هیف‌های قارچی) است. این ساختارها، شبکه‌ای ایجاد می‌کنند که ذرات خاک را به هم متصل کرده و پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهند که باعث می‌شود آب به راحتی در خاک نفوذ کرده و زمان نگهداشت آب افزایش یابد. These effects are attributed to the increase in porosity and the formation of coarser pores in the soil by the physical structures of the crusts (fungal hyphae). These structures create a network that binds soil particles together and enhances soil aggregate stability, allowing water to infiltrate the soil more easily and increasing water retention time	افزایش Increase	کرت (میدانی) Field plot	خاک لسی، چین Loess soil, China	شبیه‌ساز باران Rainfall Simulator	نفوذپذیری Infiltration	گل‌سنگ، خزه Lichen, Moss

ادامه جدول ۱

Gao et al. (2017); Felde et al. (2014); DeJong et al. (2006)	این اثرات در مراحل پیشرفته توالی پوسته‌ها (با افزایش تولید مواد آلی و پلی‌ساکاریدی) مشاهده می‌شود. این مواد آلی باعث اتصال ذرات خاک به یکدیگر شده و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشند که باعث افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش نفوذپذیری می‌شود. These effects are observed in the advanced stages of crust succession (with increased production of organic matter and polysaccharides). These organic substances bind soil particles together and improve soil structure, which increases porosity and, consequently, enhances infiltration.	افزایش Increase	کرت (میدانی) Field plot	خاک لسی، چین Loess soil, China	شبیه‌ساز باران Rainfall Simulator	نفوذپذیری Infiltration	سیانوباکتری، خزه Cyanobacteria, Moss
Li et al. (2022); Xiao et al. (2019); Chen et al. (2024)	این رفتار در شرایط خشک عمدتاً توسط سیانوباکتری‌ها مشاهده می‌شود که با ترشح پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی (EPS) منافذ خاک را مسدود می‌کنند. اگرچه خزه‌ها نیز می‌توانند منافذ را مسدود کنند، اما سیانوباکتری‌ها نسبت به خزه‌ها مقاومت بالاتری به خشکی داشته و در مراحل اولیه توالی مناطق خشک، نقش اصلی را در کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب ایفا می‌کنند. This behavior under dry conditions is predominantly observed in cyanobacteria, which clog soil pores through the secretion of extracellular polysaccharides (EPS). Although mosses can also clog pores, cyanobacteria exhibit greater drought resistance than mosses and play the primary role in reducing infiltration and increasing runoff during the early stages of succession in arid regions.	کاهش (در شرایط خشک و با لایه‌های متراکم) Reduction (in arid conditions and with compacted layers)	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	شبیه‌ساز باران Rainfall Simulator	نفوذپذیری Infiltration	خزه Moss
Kakeh et al (2013) Hemati Daiv et al. (2022) Matboo et al. (2024)	موثر بودن پوسته‌ها بر هدایت الکتریکی و اسیدیته و رواناب و کاهش شوری Effects of crusts on electrical conductivity, acidity, runoff, and salinity reduction	افزایش دو برابری Two-fold increase	میدانی و کرت Field and plot	خاک لومی، خشک، لس‌های شمال و شرق گلستان Loamy soil, dry conditions, loess deposits of northern and eastern Golestan	میدانی و شبیه‌ساز باران Field and Rainfall Simulator	نفوذپذیری Infiltration	متنوع Various
Chamizo et al. (2016); Belnap et al. (2013); Eldridge et al. (2020)	این افزایش نفوذپذیری ناشی از افزایش زبری سطح و کاهش سرعت جریان آب است. این اثرات در مقیاس‌های مختلف (از نقطه‌ای تا منطقه‌ای) مشاهده می‌شوند و نشان می‌دهند که با افزایش وسعت پوشش پوسته‌ها، کاهش رواناب نیز افزایش می‌یابد. این امر به دلیل ایجاد موانع فیزیکی توسط پوسته‌ها برای حرکت آب است. This increase in infiltration is attributed to the increased surface roughness and reduced water flow velocity. These effects are observed at various scales (from point to regional) and indicate that as crust cover expands, runoff reduction also increases. This is due to the formation of physical barriers by the crusts against water movement.	کاهش (۶۲٪) سیانوباکتری، ۵۸٪ گلستگ، ۵۳٪ خزه در رواناب Reduction in runoff: 62% by cyanobacteria, 58% by lichens, and 53% by mosses	نقطه‌ای، کوچکتر از ۲ مترمربع، بزرگتر از ۲ مترمربع Point, <2 m ² , >2 m ²	خاک ماسه‌ای، نیمه خشک Sandy soil, Semi-arid	شبیه‌ساز باران Rainfall Simulator	نفوذپذیری Infiltration	سیانوباکتری، گلستگ، خزه Cyanobacteria, Lichen, Moss
Kakeh et al. (2020a)	تا ۷۷ روز اول، پوسته‌های زیستی موجب کاهش تبخیراز سطح خاک شدند. از روز ۷۷ تا ۱۴۲، تأثیر پوسته‌ها بر تبخیر معنی‌دار نیست. During the first 77 days, biological crusts reduced evaporation from the soil surface. From day 77 to day 142, the effect of the crusts on evaporation is not significant.	کاهش Decrease	میدانی Field	خاک لومی و لسی، خشک Loamy and Loess soil, Dry	شبیه‌سازی آزمایشگاهی Laboratory Simulator	تبخیر Evaporation	متنوع Various

ادامه جدول - ۱

Xiao et al. (2009); Lange et al. (1998); Zhang et al. (2018a)	این اثر در مراحل اولیه خشک شدن خزهای متراکم مشاهده می‌شود که با ایجاد لایه‌ای محافظ، باعث نگهداشت آب در سطح خاک شده و تبخیر را کاهش می‌دهد. This effect is observed in the early drying stages of dense mosses, which, by forming a protective layer, retain water at the soil surface and reduce evaporation.	کاهش (در ابتدا) Decrease (initially)	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	اندازه‌گیری تبخیر مستقیم Direct evaporation measurement	تبخیر Evaporation	خزه Moss
Li et al. (2020); Kidron & Tal (2012); Sun et al. (2024)	این اثر در مراحل بعدی خشک شدن خزهای متراکم مشاهده می‌شود که با افزایش دمای سطح خاک، تبخیر را افزایش می‌دهد. خزها در این مراحل، با ایجاد لایه‌های متراکم، دمای سطح خاک را افزایش داده و باعث می‌شوند که آب به سرعت تبخیر شود. This effect is observed in the later drying stages of dense mosses, which enhance evaporation by increasing the soil surface temperature. During these stages, mosses form dense layers that raise the soil surface temperature, causing water to evaporate rapidly.	افزایش Increase	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	اندازه‌گیری تبخیر مستقیم Direct evaporation measurement	تبخیر Evaporation	خزه Moss
Li et al. (2022); Wang & Zhang (2024); Zhou et al. (2024)	این اثر ناشی از افزایش دمای سطح خاک و کاهش رطوبت خاک در حضور خزه است. خزها در این مراحل، با ایجاد لایه‌های متراکم، دمای سطح خاک را افزایش داده و باعث تشدید به ویژه در شرایط خشک می‌شود. This effect results from the increase in soil surface temperature and the decrease in soil moisture in the presence of moss. During these stages, mosses form dense layers that raise the soil surface temperature, thereby intensifying evaporation, particularly under dry conditions.	افزایش Increase	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	اندازه‌گیری تبخیر مستقیم Direct evaporation measurement	تبخیر Evaporation	خزه Moss
Chamizo et al. (2011); Berdugo et al. (2014); Elbert et al. (2012)	این اثرات ناشی از تعادل بین افزایش دمای سطح خاک و کاهش رطوبت خاک در حضور گلسنگ و سیانوباکتری است. در این شرایط، اثرات مثبت و منفی بر تبخیر با هم تعادل می‌یابند و باعث می‌شوند که تغییرات تبخیر قابل چشم‌پوشی باشد. These effects result from the balance between increased soil surface temperature and decreased soil moisture in the presence of lichens and cyanobacteria. Under these conditions, the positive and negative effects on evaporation counterbalance each other, resulting in negligible changes in evaporation	تغییر اندک و قابل چشم‌پوشی Slight and negligible change	کرت (میدانی) Field plot	خاک ماسه‌ای، نیمه خشک Sandy soil, Semi-arid	اندازه‌گیری تبخیر مستقیم Direct evaporation measurement	تبخیر Evaporation	گلسنگ، سیانوباکتری Lichen, Cyanobacteria
Berdugo et al. (2014); Kidron & Tal (2012); Zhao et al. (2025)	این رفتار دوگانه ناشی از تعادل بین افزایش دمای سطح خاک و کاهش رطوبت خاک در حضور گلسنگ و خزه است. در پوشش‌های کمتر و بیشتر از ۷۵٪، به ترتیب اثرات مثبت و منفی بر کاهش تبخیر غالب است. این امر به دلیل افزایش دمای سطح خاک در پوشش‌های بالا است. This dual behavior arises from the balance between the increase in soil surface temperature and the decrease in soil moisture in the presence of lichen and moss. At cover levels below and above 75%, positive and negative effects on evaporation reduction, respectively, predominate. This is due to the increase in soil surface temperature at high cover levels	کاهش برای پوشش ۲۵-۷۵٪؛ افزایش برای پوشش >۷۵٪ Decrease for 25-75% cover; increase for >75% cover	کرت (میدانی) Field plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	اندازه‌گیری تبخیر مستقیم Direct evaporation measurement	تبخیر Evaporation	گلسنگ، خزه Lichen, Moss
Kidron & Tal (2012); Rutherford et al. (2017); Billings et al. (2003) Sun et al. (2024); Ferrenberg et al. (2015); Rutherford et al. (2017)	این اثر ناشی از افزایش دمای سطح خاک و کاهش رطوبت خاک در حضور سیانوباکتری و خزه است. سیانوباکتری‌ها با تولید رنگدانه‌های جذب‌کننده UV، سطح آلبیدوی خاک را کاهش داده و دمای خاک را افزایش می‌دهند که آب به سرعت تبخیر می‌شود. This effect results from the increased soil surface temperature and decreased soil moisture in the presence of cyanobacteria and moss. By producing UV-absorbing pigments, cyanobacteria reduce soil albedo and increase soil temperature, causing water to evaporate rapidly	افزایش Increase	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	اندازه‌گیری تبخیر مستقیم، شبیه‌سازی تبخیر و آنالیز ایزوتوپ Direct evaporation measurement, Simulation, Isotope analysis	تبخیر Evaporation	سیانوباکتری، خزه، مخلوط خزه و سیانوباکتری Cyanobacteria, Mosses, and mixed Moss-Cyanobacteria

جدول ۲- تاثیر پوسته‌های زیستی بر فرسایش خاک و برخی از خصوصیات خاک

Table 2- Effects of Biocrusts on Soil erosion and some studied soil properties

منابع Resources	توضیحات تکمیلی In-depth Consideration	جهت/مقدار تغییر Difference Value	مقیاس مطالعه Study Scale	شرایط محیطی / نوع خاک Environmental Conditions/ Soil Type	روش ارزیابی Evaluation Method	متغیر مورد بررسی Intrested Variables
Zhao et al. (2025); Guo et al. (2023)	این کاهش نمایی ناشی از افزایش زبری سطح و کاهش سرعت جریان آب است. خزها با ایجاد لایه‌های متراکم، سطح خاک را پوشانده و باعث جذب آب در سطح خاک شده و در نتیجه فرسایش کاهش می‌یابد. This exponential decrease is attributed to the increased surface roughness and reduced water flow velocity. By forming dense layers, mosses cover the soil surface and promote water absorption at the soil surface, thereby reducing erosion.	کرت (میدانی) Field plot	خاک قرمز، مناطق کوهستانی Red soil, mountainous regions	کاهش نمایی با پوشش پوسته Exponential reduction with biocrust cover	فرسایش خاک Soil Erosion	خزه Moss
Liu et al. (2017); Kheirfam et al. (2017a, b); Sadeghi et al. (2020a)	برداشت پوسته‌های زیستی از سطح خاک، اثرات حفاظتی آن‌ها را از بین می‌برد و در نتیجه فرسایش را افزایش می‌دهد. پوسته‌ها نیز در خاک‌های مستعد فرسایش، خصوصیات کیفی خاک را بهبود می‌بخشند. The removal of biological crusts from the soil surface eliminates their protective effects and consequently increases erosion. Furthermore, in erosion-prone soils, these crusts also improve soil quality properties	کرت (آزمایشگاهی و میدانی) Laboratory and field plot	خاک رسی، خشک Clayey soil, dry conditions	کاهش با پوشش پوسته و تیمارهای برداشت Reduction with biocrust cover and harvest treatments	فرسایش خاک Soil Erosion	سیانوباکتری، خزه
Zhang et al. (2020); Gao et al. (2020a); Zhao et al. (2010b)	خزه‌ها با ایجاد پوشش متراکم، سطح خاک را محافظت کرده و فرسایش را از طریق افزایش زبری سطح و کاهش سرعت جریان آب، کاهش می‌دهند. همچنین مانع نفوذ آب به خاک شده و حفظ سطحی آب را به دنبال دارند. By forming a dense cover, mosses protect the soil surface and reduce erosion through increased surface roughness and reduced water flow velocity. They also impede water infiltration into the soil, resulting in surface water retention.	کرت (میدانی) Field plot	خاک رسی، منطقه سد سه‌گانه چین Clay soil, Three Gorges Dam region, China	کاهش Decrease	فرسایش خاک Soil Erosion	خزه Moss
Zhang et al. (2021); Zhao et al. (2010a, b);	حذف خزه اثرات حفاظتی را از بین می‌برد و باعث افزایش فرسایش می‌شود. The removal of moss eliminates the protective effects and leads to increased erosion.	کرت (میدانی) Field plot	خاک رسی، منطقه سد سه‌گانه چین Clay soil, Three Gorges Dam region, China	برداشت پوسته خزه به کاهش فرسایش منجر می‌شود. The removal of moss-dominated biocrusts results in decreased erosion	فرسایش خاک Soil Erosion	خزه Moss
Zhao et al. (2010a, b, 2025);	پوسته‌های زیستی تحت تأثیر شرایط محیطی هستند و شرایط خشکی تابستانی، فرسایش را افزایش می‌دهد. Biological crusts are influenced by environmental conditions, and summer drought conditions increase erosion	کرت (میدانی) Field plot	خاک رسی، منطقه سه‌گانه چین Clay soil, Three Gorges Dam region, China	خشکی تابستانه بر ظرفیت برداشت تابستانه اثر دارد. Summer drought affects summer harvest capacity	فرسایش خاک Soil Erosion	خزه Moss
Jafarpoor et al. (2022); Sadeghi et al. (2020a); Kheirfam et al. (2017a,c)	تلقیح سیانوباکتری، فرسایش را به حداقل می‌رساند و باعث افزایش پایداری خاکدانه می‌شود. این اثرات ناشی از افزایش تخلخل و تشکیل منافذ درشت‌تر در خاک توسط ساختارهای فیزیکی پوسته‌ها است. تلفات خاک و رسوب به ترتیب: ۸۲٪ و ۶۲٪. کاهش معنی‌دار مولفه‌های هیدرولوژی و هیدرولیکی (نهشته‌های مارنی) و کاهش رواناب و رسوب در کرت‌های بزرگ در اراضی تخریب شده، به ترتیب ۶۰٪ و ۱۳۵٪. کاهش فرسایش در کرت‌های کوچک تا ۹۹٪. Cyanobacterial inoculation minimizes erosion and enhances soil aggregate stability. These effects result from the increased porosity and the formation of coarser pores in the soil by the physical structures of the crusts. Soil loss and sediment: 82% and 62%, respectively. Significant reductions in hydrological and hydraulic components (marl deposits), and reductions in runoff and sediment in large plots in degraded lands: 60% and 135%, respectively. Erosion reduction in small plots of up to 99%.	کرت (میدانی و آزمایشگاهی) Laboratory and field plot	مارن، خاک رسی، منطقه خراسان شمالی Marl, clay soil, North Khorasan region	کاهش Decrease	فرسایش خاک (شیاری) Rill erosion	سیانوباکتری و باکتری Cyanobacteria, Bacteria

ادامه جدول ۲-

Guo et al. (2020a, 2023);	پوشش متراکم خزه از طریق افزایش زبری سطح و کاهش سرعت جریان آب، کاهش چشمگیر فرسایش و افزایش پایداری خاکدانه را به دنبال دارد. خزه‌ها با ایجاد لایه‌های متراکم، سطح خاک را پوشانده و باعث می‌شوند که آب به جای نفوذ، در سطح خاک جمع شود. Dense moss cover leads to a significant reduction in erosion and increased soil aggregate stability through enhanced surface roughness and reduced water flow velocity. By forming dense layers, mosses cover the soil surface, causing water to accumulate on the surface rather than infiltrate".	کرت (میدانی) Field plot	خاک رسی، منطقه سه‌گانه چین Clay soil, Three Gorges Dam region, China	کاهش چشمگیر بویژه برای پوشش خزه بیش از ۷۰٪ Significant reduction, especially for moss cover >70%	فرسایش خاک Soil Erosion	خزه Moss
Gheytasi et al. (2022) Matboo et al. (2024)	شاخص فرسایش‌پذیری بین پوسته‌های فیزیکی و گلسنگ تفاوت معنی‌داری نداشتند، اما این شاخص بین پوسته‌های فیزیکی-خزه و خزه-گلسنگ اختلاف معنی‌دار داشتند. کاهش رسوب اثر پوسته‌های مختلف نسبت به خاک بدون پوسته به ترتیب ۵ تا ۱۰ برابر در پلات‌های تقریبی ۲ مترمربعی با شدت بارش ۸۲ میلی‌متر بر ساعت There was no significant difference in the erodibility index between physical crusts and lichen crusts, whereas this index differed significantly between physical-moss crusts and moss-lichen crusts. Sediment reduction resulting from the different crusts relative to uncrusted soil was 5 to 10 times greater, respectively, in plots of approximately 2 m ² under a rainfall intensity of 82 mm/hour.	میدانی و کرت Field and Field plot	خاک لومی- شمال استان گلستان Loamy soil, Northern Golestan Province	متغیر و معنی‌دار Variable and significant	فرسایش‌پذیری خاک و فرسایش خاک Soil erodibility, Soil erosion	فیزیکی، خزه و گلسنگ Physical, Moss, and Lichen
Shafiee et al. (2023)	تاثیر پوسته زیستی حدود ۹۵ درصد افزایش مقاومت سطحی و ۹۰ درصد کاهش فرسایش بادی را به‌دنبال دارد. The effect of biological crusts results in approximately a 95% increase in surface resistance and a 90% reduction in wind erosion.	تونل باد Wind tunnel	خاک سیلتی. کویر میقان Silty soil, Meighan Desert	کاهش فرسایش Erosion Control	فرسایش بادی Wind Erosion	متنوع Various
Belnap et al. (2013); Chamizo et al. (2017); Bowker et al. (2008)	خزه کاملاً فرسایش را متوقف می‌کند و باعث افزایش پایداری خاکدانه می‌شود. این اثرات ناشی از افزایش زبری سطح و کاهش سرعت جریان آب است. Moss completely halts erosion and enhances soil aggregate stability. These effects are attributed to increased surface roughness and reduced water flow velocity	کرت (میدانی) Field plot	خاک شنی، خشک Sandy soil, Dry	کاهش Decrease	فرسایش خاک Soil Erosion	سیانوباکتری، خزه Cyanobacteria, Moss
Felde et al. (2014); Rossi et al. (2012); DeJong et al. (2006)	افزایش پایداری خاکدانه‌ها ناشی از افزایش تخلخل و تشکیل منافذ درشت‌تر در خاک توسط ساختارهای فیزیکی پوسته‌ها است که باعث می‌شود ذرات خاک به هم متصل شده و پایداری خاکدانه‌ها افزایش یابد. The increase in soil aggregate stability results from the increased porosity and the formation of coarser pores in the soil by the physical structures of the crusts, which causes soil particles to bind together and further enhances aggregate stability.	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک لومی، خشک Loamy soil, dry	افزایش Increase	پایداری خاکدانه‌ها Soil Aggregate Stability	سیانوباکتری، خزه Cyanobacteria, Moss
Kaslakheh et al. (2012)	علاوه بر افزایش پایداری به افزایش مواد آلی و بهبود ساختمان خاک در خاک‌های دارای پوسته اشاره شده است. In addition to increased stability, higher organic matter content and improved soil structure have been reported in crusted soils	میدانی Field	خاک لومی، خشک Loamy soil, dry	افزایش ۳ برابری Three-fold increase	پایداری خاکدانه Soil Aggregate Stability	گلسنگ Lichen
Billings et al. (2003); Elbert et al. (2012); Su et al. (2011)	سیانوباکتری‌ها به دلیل توانایی در فتوسنتز و تثبیت نیتروژن در شرایط خشک، قادر به تثبیت نیتروژن اتمسفر به صورت نیترات و آمونیاک هستند که به حاصلخیزی خاک کمک می‌کند. Due to their ability to photosynthesize and fix nitrogen under dry conditions, cyanobacteria are capable of fixing atmospheric nitrogen in the form of nitrate and ammonia, which contributes to soil fertility.	کرت (میدانی) Field plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	افزایش (تثبیت نیتروژن)	حاصلخیزی خاک Soil Fertility	سیانوباکتری Cyanobacteria
Zhang et al. (2018a); Gao et al. (2017); Zhao et al. (2010a)	خزه‌ها با تولید مواد آلی و ترشح آنزیم‌های معدنی‌کننده مواد مغذی، به حل شدن مواد معدنی کمک می‌کنند. این فرآیندها باعث افزایش تجمع عناصر غذایی ماکرو (کربن، نیتروژن و فسفر) و میکرو (کلسیم، کرم، منگنز، روی و آرسنیک) در خاک می‌شوند. Mosses facilitate the dissolution of minerals through the production of organic matter and the secretion of nutrient-mineralizing enzymes. These processes lead to the increased accumulation of macronutrients (carbon, nitrogen, and phosphorus) and micronutrients (calcium, chromium, manganese, zinc, and arsenic) in the soil.	کرت (میدانی) Field plot	خاک رسی، خشک Clay soil, dry	افزایش (تجمع مواد آلی) Increase (soil organic matter accumulation)	حاصلخیزی خاک Soil Fertility	خزه Moss

ادامه جدول ۲-

DeJong et al. (2006); Felde et al. (2014); Mager (2010); Rossi et al. (2012)	تلقیح سیانوباکتری‌ها باعث افزایش تخلخل خاک و تشکیل منافذ درشت‌تر می‌شود. این امر به دلیل تشکیل شبکه‌های فیزیکی توسط هیف‌های قارچی و ترشح مواد آلی است که به افزایش نفوذپذیری و کاهش فرسایش منجر می‌شود. Cyanobacterial inoculation increases soil porosity and promotes the formation of coarser pores. This is attributed to the formation of physical networks by fungal hyphae and the secretion of organic matter, which in turn leads to increased permeability and reduced erosion.	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک لومی، خشک Loamy soil, dry	افزایش Increase	تخلخل خاک Soil Pore	سیانوباکتری Cyanobacteria
Rodriguez-Caballero et al. (2012); Kidron (2015); Zhang et al. (2020)	افزایش زبری سطح خاک، ناشی از ریخت‌شناسی سه‌بعدی و خشن‌تر خزه‌ها است. این زبری سطح باعث کاهش سرعت رواناب و افزایش زمان نگهداشت آب در خاک می‌شود. این اثر به ویژه در مراحل پیشرفته توالی پوسته‌ها مشاهده می‌شود. The increase in soil surface roughness results from the three-dimensional and rougher morphology of mosses. This surface roughness reduces runoff velocity and increases water retention time in the soil. This effect is observed particularly in the advanced stages of crust succession.	کرت (میدانی) Field plot	خاک لسی، چین Loess soil, China	افزایش Increase	زبری سطح خاک Soil Surface Roughness	خزه Moss
Issa et al. (2001); Mager (2010); Chenu (1993)	ترشح EPS به دلیل تشکیل شبکه‌های فیزیکی و اتصال ذرات خاک به یکدیگر توسط سیانوباکتری‌ها، باعث کاهش وزن مخصوص خاک و افزایش تخلخل می‌شود. EPS secretion, through the formation of physical networks and the binding of soil particles to one another by cyanobacteria, leads to a decrease in soil bulk density and an increase in porosity.	کرت (آزمایشگاهی) Laboratory plot	خاک ماسه‌ای، خشک Sandy soil, Dry	کاهش Decrease	وزن مخصوص خاک Soil Bulk Density	سیانوباکتری Cyanobacteria
Mirzahassemi et al. (2023)	از منظر حاصلخیزی در کارایی تلقیح مستقیم سیانوباکتری‌های بومی در سه غلظت مختلف، علاوه بر کاهش pH: حدود ۰/۴ From a fertility perspective, regarding the efficacy of direct inoculation of native cyanobacteria at three different concentrations, in addition to a pH reduction of about 0.4:	کرت (میدانی) Field plot	حبله‌رود Hableh Rud	افزایش Increase	نیترژن (۲۱٪) پتاسیم (۵۱٪) کربن (۵۱٪) N (21%) P (51%) C (51%)	سیانوباکتری Cyanobacteria
Alavizadeh et al., 2012	بررسی تاثیر خزه با ۴ تراکم متفاوت در دو شدت مختلف رواناب. با کاهش تراکم خزه، تولید رسوب و فرسایش ویژه افزایش یافت. وجود و عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین تولید رسوب و فرسایش ویژه و نفوذپذیری برای تیمارهای مختلف درصد خزه Investigation of the effect of moss at four different densities under two different runoff intensities. With decreasing moss density, sediment production and specific erosion increased. Presence and absence of significant differences in sediment production, specific erosion, and infiltration among the different moss-percentage treatments.	کرت (میدانی) Field plot	سد طرق - مشهد Torogh dam, Mashhad	افزایش Increase	تولید رسوب و فرسایش ویژه Specific erosion and sedimentation	خزه Moss
Ahmadian et al. (2019)	در تیمار خزه و سیانوباکتری نیز بین چهار بازه زمانی (فصول) اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در فصل تابستان میزان حفظ رطوبت پوسته‌های خزه و سیانوباکتری بیشتر از بوته درمنه می‌باشد. توانایی حفظ رطوبت سیانوباکتری بیشتر از دو تیمار خزه و بوته درمنه بود. There is also a significant difference among the four-time intervals (seasons) in the moss and cyanobacteria treatments. During the summer, the moisture retention of moss and cyanobacteria crusts is greater than that of Artemisia shrubs. The moisture retention capacity of cyanobacteria was higher than that of the other two treatments, moss and Artemisia shrub.	میدانی Field	خاک لومی - ماسه‌ای (پارک ملی گلستان) Loamy/Sandy soil, National Golestan Park	افزایش Increase	رطوبت زیر پوسته Moisture under crust	سیانوباکتری و خزه Cyanobacteria, Moss

تلقیح میکروبی برای تشکیل پوسته‌های زیستی

استفاده از تلقیح میکروبی برای تشکیل پوسته‌های زیستی خاک، ابزاری قدرتمند و اقتصادی برای محافظت خاک در برابر فرسایش آبی و فرآیندهای بیابان‌زایی به‌شمار می‌آید (Sepehr et al., 2019; Gholamhosseinian et al., 2020, 2021; Sadeghi et al., 2017, 2020a). مطالعات مختلف، از تلقیح سیانوباکتری‌ها (مانند *Nostoc* spp., *Oscillatoria* spp., *Lyngbya* spp.) باکتری‌ها (مانند سویه *Bacillus subtilis* و *Azotobacter* spp.) و نیز ترکیب این دو گروه برای تسریع تشکیل پوسته‌های زیستی و بهبود پاسخ هیدرولوژیکی و حاصلخیزی خاک استفاده شده است.

صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2016) نشان دادند که تلقیح سیانوباکتری‌ها در مقیاس کرت‌های آزمایشی می‌تواند زمان شروع رواناب را حدود ۳۸-۲۰ درصد و زمان رسیدن به اوج رواناب را حدود ۵۲-۴۸ درصد در مقایسه با خاک‌های بدون پوشش، کاهش دهد. در این آزمایش‌ها، تیمارهای تلقیحی معمولاً با محلول‌های حاوی زی‌توده سیانوباکتری (در غلظت‌های چند گرم وزن خشک بر مترمربع) و حجم‌های مشخص مایع تلقیح (در حدود چند لیتر بر مترمربع، متناسب با ابعاد کرت‌ها) بر سطح خاک اعمال شده‌اند و نتایج نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار ضریب رواناب و بار رسوب بوده است. به نقل از صادقی و همکاران در مطالعه‌ای دیگر در مقیاس کرت برای تلقیح باکتری و سیانوباکتری در حفاظت خاک، کاهش ۷۷-۲۹ درصدی حجم و ضریب رواناب و همچنین کاهش ۸۹-۷۷ درصدی هدررفت خاک گزارش شده است (Sadeghi et al., 2020). در شرایط آزمایشگاهی و میکروکرت‌ها نیز تلقیح کنترل‌شده ریزموجودات، امکان ارزیابی دقیق‌تر نقش غلظت مایع تلقیح، نوع بستر و رژیم رطوبتی را در رشد و کارکرد پوسته‌ها فراهم کرده است (Chamizo et al., 2018).

در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر، Chamizo et al. (2020b) با تلقیح گونه‌های *Microcoleus vaginatus* و *Stylidium javanicum* بر روی

ستون‌های ماسه‌ای نشان دادند که افزایش تدریجی غلظت تلقیح (از مقادیر پایین تا غلیظ‌تر) و تکرار تیمار در چند نوبت آبیاری می‌تواند پایداری خاک‌دانه‌ها و سرعت توالی جوامع زیستی را به‌طور محسوسی افزایش دهد. نتایج پژوهش Gharemahmudli et al. (2020) نیز در اراضی دیم فرسایش‌پذیر منطقه بدرانلو در استان خراسان شمالی نشان داد که بر اثر تلقیح تیمارهای سیانوباکتری (به‌صورت محلول‌پاشی با حجم مشخص مایع تلقیح بر روی کرت‌های مزرعه‌ای)، در مقایسه با تیمار شاهد، زمان شروع رواناب و زمان تا اوج به‌ترتیب حدود ۲۲۸ و ۴۹ درصد افزایش و حجم رواناب، اوج رواناب و ضریب رواناب به‌ترتیب حدود ۶۵، ۴۸ و ۶۵ درصد کاهش یافته است.

تشکیل پوسته‌های زیستی از طریق تلقیح سیانوباکتری‌ها و باکتری‌ها می‌تواند پایداری خاک‌دانه‌ها را در محیط‌های تخریب‌شده بهبود بخشد (DeJong et al., 2006). به‌عنوان مثال، تلقیح سیانوباکتری‌های مختلف مانند *Phormidium* و *Scytonema javanicum* *ambiguum* در خاک‌های لوم و لوم شنی، باعث کاهش آلودگی خاک و افزایش تجمع ذرات خاک شده است (Chamizo et al., 2017, 2019). علیرغم مدت کوتاه مطالعات آزمایشگاهی (۴۵ روز)، تلقیح سیانوباکتری باعث کاهش آلودگی خاک و افزایش تجمع ذرات خاک در هر دو خاک بسیار تخریب‌شده، شد. به‌طور کلی، افزودن باسیلوس به خاک، تجمع ذرات خاک را بهبود بخشیده و به مستحکم شدن ذرات ماسه به دلیل وجود کربنات کلسیم و رسوب گچ ناشی از فعالیت میکروبی کمک می‌کند (DeJong et al., 2006).

از منظر حاصلخیزی نیز مطالعات میدانی در ایران کارایی تلقیح سیانوباکتری را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، Mirzahosseini et al. (2023) در مرتع نیمه‌استپی گلگنگ (حوزه آبخیز حبله‌رود) نشان دادند که تلقیح مستقیم سیانوباکتری‌های بومی در سه غلظت مختلف

(۱۰^۸، ۱۰^{۱۰} و ۱۰^{۱۲} سلول در لیتر سوسپانسیون^۶ (BBM) می‌تواند در یک دوره کمتر از یک سال، در مقایسه با تیمار شاهد، نیتروژن کل خاک را حدود ۲۱ درصد و پتاسیم و کربن آلی را حدود ۵۱ درصد افزایش داده و در عین حال، pH را حدود ۰/۴ واحد کاهش دهد؛ به‌طوری‌که غلظت ۱۰^۸ سلول در لیتر به‌عنوان غلظت بهینه برای بهبود حاصلخیزی و کارایی اقتصادی معرفی شد. ضمناً کارایی محیط کشت BBM برای رشد سیانوباکتری‌ها توسط Jafarpoor et al. (2023) در آزمایشگاه به‌منظور تلقیح مصنوعی تایید شده است.

انتخاب ریزموجودات تنها یکی از چندین متغیر تأثیرگذار بر موفقیت فرآیند تلقیح است. شرایط زمانی و اقلیمی اعمال تلقیح (فصل، الگوی بارش و دسترسی به آب) می‌تواند به‌طور مستقیم در موفقیت یا شکست این فناوری نقش داشته باشد. معمولاً اواخر پاییز و اوایل زمستان، به‌دلیل هم‌زمانی با آغاز دوره بارش و پرهیز از تنش دمایی شدید، به‌عنوان مناسب‌ترین زمان‌ها برای اعمال تلقیح گزارش شده‌اند؛ در حالی‌که بخش عمده فصل زمستان به‌علت رخداد یخ‌زدگی و فصل تابستان به‌دلیل کمبود رطوبت و شدت بالای دما و تابش، برای استقرار اولیه پوسته‌های تلقیح‌شده مناسب نیستند (Young et al., 2019; Pen-Mouratov et al., 2011). الگوی بارش و در دسترس بودن آب، به‌ویژه در مناطق کم‌بارش و نیمه‌خشک، رشد میکروبی و سرعت توسعه پوسته‌های زیستی را پس از تلقیح محدود می‌کند (Zhou et al., 2020b).

از دیدگاه اقتصادی، تلقیح میکروبی یک گزینه مقرون‌به‌صرفه برای تثبیت خاک محسوب می‌شود. هزینه کاربرد تلقیح سیانوباکتری معمولاً در حدود ۳۵۰ دلار در هکتار گزارش شده است، در حالی‌که هزینه به‌کارگیری بیوپلازما حدود ۸۰۰۰ دلار در هکتار، خاک‌پوش کاه حدود ۷۵۰ دلار در هکتار و پلی‌اکریل‌آمید حدود ۱۰۰۰ دلار در هکتار است (Sadeghi et al., 2020a). همچنین هزینه تثبیت ماسه‌های روان با روش‌های متداول در ایران در

حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیون تومان در هکتار برآورد شده است. در مقابل، پوسته‌های زیستی تشکیل‌شده از طریق تلقیح، در صورت مدیریت مناسب، می‌توانند حداقل به‌مدت ۱۸ ماه در مزارع و کرت‌های آزمایشی دوام آورده و هم‌زمان با بهبود پایداری سطحی، فرسایش، رواناب و حاصلخیزی خاک را تعدیل کنند (Bowker et al., 2020; Mirzahosseini et al., 2023).

نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه بر اساس مرور نظام‌مند ۱۶۰ منبع، نشان می‌دهد که پوسته‌های زیستی خاک (BSCs) ابزارهای مؤثری در مدیریت پایدار خاک در بوم‌سازگان خشک و نیمه‌خشک هستند و کارایی آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر نوع ریزموجودات سازنده، مرحله توالی و شرایط محیطی قرار دارد. در این راستا، سیانوباکتری‌ها، به‌ویژه گونه‌هایی مانند *Phormidium ambiguum* و *Scytonema javanicum* (با غلظت بهینه ۱۰۰ میلیون سلول در لیتر در اواخر پاییز در اقلیم‌های خشک) به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای مراحل آغازین تلقیح مصنوعی در خاک‌های فرسایش‌پذیر شناخته می‌شوند، چرا که ضمن تثبیت سریع ذرات خاک و افزایش حاصلخیزی از طریق تثبیت نیتروژن و ترشح پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی، زمان بازیابی بوم‌سازگان را از چندین دهه به ۱۰-۵ سال کاهش می‌دهند. در مقابل، خزده‌ها در مراحل پیشرفته توالی، به‌ویژه با پوشش بالاتر از ۳۶ درصد، مؤثرترین عامل در کاهش فرسایش (تا نزدیک به ۱۰۰ درصد) و بهبود پایداری سطحی هستند و هم‌زمان با تعدیل رژیم رطوبتی و حرارتی خاک، بر رواناب، نفوذ و تبخیر تأثیر می‌گذارند. گل‌سنگ‌ها نیز در شرایط خاص (مانند سطوح سنگی یا شیب‌دار) نقش پایدارسازی بلندمدت را ایفا می‌کنند. پوسته‌های زیستی نه‌تنها ظرفیت علمی، بلکه پتانسیل عملیاتی و اقتصادی قابل‌توجهی برای مدیریت پایدار خاک دارند، به‌ویژه با استفاده از تلقیح سیانوباکتری‌های بومی به‌عنوان روش

هوشمند تلقیح میکروبی با گونه‌های گیاهی بومی و ارزیابی اقتصادی-اجتماعی پذیرش این فناوری توسط جوامع محلی در برنامه‌های احیای اراضی در پژوهش‌های آتی برای افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان توصیه می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

کم‌هزینه و مؤثر در مقیاس وسیع. چالش کلیدی آینده، انتقال این دانش از محیط آزمایشگاهی به مقیاس حوضه‌ای و تلفیق آن با راهنمایی‌های عملیاتی و مشارکت جوامع محلی برای پایش مستمر این «شاخص‌های زنده سلامت خاک» و سازگاری با تغییرات اقلیمی است؛ بنابراین، انتخاب هوشمندانه ریزموجودات بر اساس هدف مدیریتی کنترل فرسایش، افزایش حاصلخیزی یا تنظیم رفتار هیدرولوژیکی) و شرایط محلی، کلید موفقیت راهبردهای تلقیح مصنوعی در برنامه‌های احیای اراضی است. تلفیق

Reference

- Ahmadian, N., Abedi, M. & Sohrabi, M., 2019. Comparison of the role of moss, cyanobacteria and Artemisia shrub in soil moisture conservation and soil temperature modifications. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(2), pp.474–486. (In Persian). <https://sid.ir/paper/359726/en>
- Alavizadeh, F., Naseri, K., Golkarian, A. & Tavili, A., 2014. The study of biological soil crust (mosses) roles in protection of surface soil in front of water erosion (Case study: rangelands around Torogh Dam in Khorasan Razavi Province). *Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources)*, 67(1), pp.83–92. (In Persian) <https://sid.ir/paper/162355/en>.
- Baldauf, S., Cantón, Y. & Tietjen, B., 2023. Biocrusts intensify water redistribution and improve water availability to dryland vegetation: insights from a spatially-explicit ecohydrological model. *Frontiers in Microbiology*, 14, p.1179291. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1179291>
- Barger, N.N., Weber, B., Garcia-Pichel, F., Zaady, E. & Belnap, J., 2016. Patterns and controls on nitrogen cycling of biological soil crusts. In: B. Weber, B. Büdel & J. Belnap, eds. *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*. Cham: Springer International Publishing, pp.257–285.
- Belnap, J., 1993. Recovery rates of cryptobiotic crusts: inoculant use and assessment methods. *The Great Basin Naturalist*, 53(1), pp.89–95.
- Belnap, J., 2006. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 20(15), pp.3159–3178. <https://doi.org/10.1002/hyp.6325>
- Belnap, J. & Büdel, B., 2016. Biological soil crusts as soil stabilizers. In: B. Weber, B. Büdel & J. Belnap, eds. *Biological soil crusts: an organizing principle in Drylands*. Ecological Studies. Cham: Springer International Publishing, pp.305–320.
- Belnap, J. & Eldridge, D.J., 2003. Disturbance and recovery of biological soil crusts. In: J. Belnap & O.L. Lange, eds. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Berlin: Springer, pp.363–383. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_27
- Belnap, J. & Lange, O.L. eds., 2003. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8>
- Belnap, J., Prasse, R. & Harper, K.T., 2003. Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants. In: J. Belnap & O.L. Lange, eds. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Berlin: Springer-Verlag, pp.281–300. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_17
- Belnap, J., Wilcox, B., Van Scoyoc, M.W. & Phillips, S.L., 2013. Successional stage of biological soil crusts: an accurate indicator of ecohydrological conditions. *Ecohydrology*, 6(3), pp.474–482. <https://doi.org/10.1002/eco.1281>

12. Berdugo, M., Soliveres, S. & Maestre, F.T., 2014. Vascular plants and biocrusts modulate how abiotic factors affect wetting and drying events in drylands. *Ecosystems*, 17(7), pp.1242–1256. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9789-0>
13. Billings, S.A., Schaeffer, S.M. & Evans, R.D., 2003. Nitrogen fixation by biological soil crusts and heterotrophic bacteria in an intact Mojave Desert ecosystem with elevated CO₂ and added soil carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(5), pp.643–649. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00011-7)
14. Bowker, M.A., 2007. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity. *Restoration Ecology*, 15(1), pp.13–23. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00185.x>
15. Bowker, M.A., Antoninka, A.J. & Chuckran, P.F., 2020. Improving field success of biocrust rehabilitation materials: hardening the organisms or softening the environment? *Restoration Ecology*, 28(S1), pp.S177–S186. <https://doi.org/10.1111/rec.12965>
16. Bowker, M.A., Belnap, J., Chaudhary, V.B. & Johnson, N.C., 2008. Revisiting classic water erosion models in drylands: the strong impact of biological soil crusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), pp.2309–2316. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.008>
17. Bu, C., Wu, S., Han, F., Yang, Y. & Meng, J., 2015. The combined effect of moss-dominated BSCs and vegetation on erosion and soil moisture and implications for disturbance on the Loess Plateau, China. *PLoS ONE*, 10(5), p.e0127394. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127394>
18. 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), pp.3697–3712. <https://doi.org/10.1029/2018JG004726>
19. Cantón, Y., Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Lázaro, R., Roncero-Ramos, B., Román, J.R. & Solé-Benet, A., 2020. Water regulation in cyanobacterial BSCs from drylands: negative impacts of anthropogenic disturbance. *Water*, 12(3), p.720. <https://doi.org/10.3390/w12030720>
20. Catcheside, D.G., 1980. *Mosses of South Australia*. Adelaide: D.J. Woolman, Government Printer.
21. Chamizo, S., Adessi, A., Certini, G. & De Philippis, R., 2020a. Cyanobacteria inoculation as a potential tool for stabilization of burned soils. *Restoration Ecology*, 28(S1), pp.S106–S114. <https://doi.org/10.1111/rec.13092>
22. Chamizo, S., Adessi, A., Mugnai, G., Simiani, A. & De Philippis, R., 2019. Soil type and cyanobacteria species influence the macromolecular and chemical characteristics of the polysaccharidic matrix in induced BSCs. *Microbial Ecology*, 78(2), pp.482–493. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1305-y>
23. Chamizo, S., Adessi, A., Torzillo, G. & De Philippis, R., 2020b. Exopolysaccharide features influence growth success in BSCs-forming cyanobacteria, moving from liquid culture to sand microcosms. *Frontiers in Microbiology*, 11, p.568224. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.568224>
24. Chamizo, S., Cantón, Y., Domingo, F. & Belnap, J., 2011. Evaporative losses from soils covered by physical and different types of biological soil crusts. *Hydrological Processes*, 27(3), pp.324–332. <https://doi.org/10.1002/hyp.9235>
25. Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., Solé-Benet, A. & Domingo, F., 2012b. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. *Ecosystems*, 15(1), pp.148–161. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9499-6>
26. Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R. & Domingo, F., 2013. The role of biological soil crusts in soil moisture dynamics in two semiarid ecosystems with contrasting soil textures. *Journal of Hydrology*, 489, pp.74–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.051>
27. Chamizo, S., Cantón, Y., Miralles, I. & Domingo, F., 2012a. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semi-arid ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 49, pp.96–105. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.12.014>
28. 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, p.49.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00049>
29. Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Román, J.R. & Cantón, Y., 2017. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. *Catena*, 148, pp.117–125.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.014>
30. Chen, L., Rossi, F., Deng, S., Liu, Y., Wang, G., Adessi, A. & De Philippis, R., 2014. Macromolecular and chemical features of the excreted extracellular polysaccharides in induced biological soil crusts of different ages. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, pp.1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.011>
31. Chiquoine, L., Abella, S. & Bowker, M., 2016. Rapidly restoring biological soil crusts and ecosystem functions in a severely disturbed desert ecosystem. *Ecological Applications*, 26(4), pp.1260–1268. **<https://doi.org/10.1890/15-0973.1>**
32. Colica, G., Li, H., Rossi, F., Li, D., Liu, Y. & De Philippis, R., 2014. Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, pp.62–70.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.025>
33. Danin, A., Dor, I., Sandler, A. & Amit, R., 1998. Desert crust morphology and its relations to microbiotic succession at Mt. Sedom, Israel. *Journal of Arid Environments*, 38(2), pp.161–174. **<https://doi.org/10.1006/jare.1997.0328>**
34. 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), pp.1381–1392.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:11\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1381))
35. Deng, S., Zhang, D., Wang, G., Zhou, X., Ye, C., Fu, T., Ke, T., Zhang, Y., Liu, Y., Chen, L. et al., 2020. Biological soil crust succession in deserts through a 59-year-long case study in China: how induced biological soil crust strategy accelerates desertification reversal from decades to years. *Soil Biology and Biochemistry*, 141, p.107665.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107665>
36. Duran, P., Mora, M.L., Francisco, M., Barra, P.J., Jofré, I., Kuzyakov, Y. & Merino, C., 2021. Biological crusts to increase soil carbon sequestration: new challenges in a new environment. *Biology*, 10(11), p.1190. **<https://doi.org/10.3390/biology10111190>**
37. Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., Steinkamp, J., Büdel, B., Andreae, M.O. & Pöschl, U., 2012. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*, 5(7), pp.459–462. **<https://doi.org/10.1038/ngeo1486>**
38. Eldridge, D.J. & Greene, R.S.B., 1994. Microbiotic crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 32(3), pp.389–415. **<https://doi.org/10.1071/SR9940389>**
39. Eldridge, D.J. & Greening, R.S.B., 2003. The role of biological soil crusts in soil stabilization and erosion control. *Soil Research*, 41(6), pp.925–934.
<https://doi.org/10.1071/SR03030>
40. Eldridge, D.J., Reed, S., Travers, S.K., Bowker, M.A., Maestre, F.T., Ding, J., Havrilla, C., Rodríguez-Caballero, E., Barger, N., Weber, B. et al., 2020. The pervasive and multifaceted influence of biocrusts on water in the world's drylands. *Global Change Biology*, 26(10), pp.6003–6014. **<https://doi.org/10.1111/gcb.15232>**
41. Faist, A.M., Herrick, J.E., Belnap, J., Van Zee, J.W. & Barger, N.N., 2017. Biological soil crusts and disturbance controls on surface hydrology in a semi-arid ecosystem. *Ecosphere*, 8(1), p.e01691. **<https://doi.org/10.1002/ecs2.1691>**
42. Felde, V.J., Peth, S., Uteau-Puschmann, D., Drahorad, S. & Felix-Henningsen, P., 2014. Soil microstructure as an under-explored feature of biological soil crust hydrological properties: case study from NW Negev Desert. *Biodiversity and Conservation*, 23(7), pp.1687–1708. **<https://doi.org/10.1007/s10531-014-0693-7>**
43. Ferrenberg, S., Reed, S.C. & Belnap, J., 2015. Climate change and physical disturbance cause similar community shifts in biological soil crusts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(39), pp.12116–12121.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1509150112>

44. Fischer, T. & Veste, M., 2015. The impact of biological soil crusts on the hydrological properties of sandy soils. *Geoderma*, 257–258, pp.1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.005>
45. Fischer, T., Veste, M., Wiehe, W. & Lange, P., 2010. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany. *Catena*, 80(1), pp.47–52. **<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.09.006>**
46. Fischer, T., Yair, A., Veste, M. & Geppert, H., 2013. Hydraulic properties of biological soil crusts on sand dunes studied by ¹³C-CP/MAS-NMR: a comparison between an arid and a temperate site. *Catena*, 110, pp.155–160.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.005>
47. Galun, M., Bubrick, P. & Garty, J., 1982. Structural and metabolic diversity of two desert-lichen populations. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 53, pp.321–324.
48. Gao, L., Bowker, M.A., Sun, H., Zhao, J. & Zhao, Y., 2020a. Linkages between biocrusts development and water erosion and implications for erosion model implementation. *Geoderma*, 357, p.113973. **<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113973>**
49. Gao, L., Bowker, M.A., Xu, M., Sun, H., Tuo, D. & Zhao, Y., 2017. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 105, pp.49–58. **<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.009>**
50. Gao, L., Sun, H., Xu, M. & Zhao, Y., 2020b. Biocrusts resist runoff erosion through direct physical protection and direct modification of soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, 20(1), pp.133–142. **<https://doi.org/10.1007/s11368-019-02372-w>**
51. García-Carmona, M., Arcenegui, V., García-Orenes, F. & Mataix-Solera, J., 2020. The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management. *Journal of Environmental Management*, 262, p.110287.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110287>
52. Garcia-Pichel, F., Felde, V.J.M.N.L., Drahorad, S.L. & Weber, B., 2016. Microstructure and weathering processes within biological soil crusts. In: B. Weber, B. Büdel & J. Belnap, eds. *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*. Cham: Springer, pp.237–255. **https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_13**
53. Garcia-Pichel, F., Johnson, S.L., Youngkin, D. & Belnap, J., 2003. Small-scale vertical distribution of bacterial band diversity in biological soil crusts from arid lands in the Colorado Plateau. *Microbial Ecology*, 46(3), pp.312–321.
<https://doi.org/10.1007/s00248-003-3003-6>
54. 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. *Water and Soil Conservation*, 27(3), pp.163–180. (In Persian)
55. Gheytsi, F., Mohammadian Behbahani, A., Hosseinalizadeh, M. & Asgari, H.R., 2022. Comparative analysis of soil physico-chemical properties in erodibility of various desert crusts (Case study: hills around Aji-Gol lake, Golestan province, Iran). *Desert Ecosystem Engineering*, 7(21), pp.33–44. (In Persian). **<https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.21.25>**
56. Gholamhosseinian, A., Sepehr, A. & Emadodin, I., 2020. The effects of biocrusts on soil parameters in a semi-arid pediment at north-eastern Iran. *Revista de Geomorfologie*, 22(1), pp.5–19.
57. Gholamhosseinian, A., Sepehr, A., Sohrabi, M. & Emadodin, I., 2021. Assessing the role of lichens in the prevention of dust emission in dryland: Case study at north-eastern Iran. *Aeolian Research*, 50, p.100697. **<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100697>**
58. Guida, G., Nicosia, A., Settanni, L. & Ferro, V., 2023. A review on effects of biological soil crusts on hydrological processes. *Earth-Science Reviews*, 245, p.104516.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104516>
59. Guo, Q., Wang, Z. & Shen, N., 2023. Plot-based study to evaluate raindrop detachment capacity on moss-dominated biocrusted slope under simulated rainfall with different intensities. *Catena*, 226, p.107084. **<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107084>**

60. Gufwan, L.A., Peng, L., Gufwan, N.M., Lan, S. & Wu, L., 2025. Enhancing soil health through biocrusts: A microbial ecosystem approach for degradation control and restoration. *Microbial Ecology*, 88(1), pp.1–26.
61. Harper, K.T. & Marble, J.R., 1988. A role for nonvascular plants in management of arid and semiarid rangelands. In: P.T. Tueller, ed. *Vegetational science applications for rangeland analysis and management*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, pp.135–169.
62. Hassanzadeh Bashtian, M., Sepehr, A., Farzam, M. & Bahreini, M., 2017. Distribution of biological soil crusts along surface evolution of a semiarid alluvial fan. *Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources)*, 70(2), pp.401–414. (In Persian) <https://sid.ir/paper/207388/en>
- Hemati Daiv, A., Zare Garizi, A., Sheikh, V., Mohammadian Behbahani, A., 2022. Effects of biological soil crusts on surface runoff quality. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(4), pp.93–106. (In Persian) <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11617.115>
63. Issa, O.M., Le Bissonnais, Y., Défarge, C. & Trichet, J., 2001. Role of a cyanobacterial cover on structural stability of sandy soils in the Sahelian part of western Niger. *Geoderma*, 101(3–4), pp.15–30. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00010-3)
64. Jafarpoor, A., Sadeghi, S. H., Darki, B. Z., & Homae, M. (2022). Changes in morphologic, hydraulic, and hydrodynamic properties of rill erosion due to surface inoculation of endemic soil cyanobacteria. *Catena*, 208, 105782.
65. Jafarpoor, A., Sadeghi, S.H., Homae, 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), pp.71–81. Available at: <https://sid.ir/paper/1165765/en>
66. Jafari, M., Tavili, A., Zargham, N., Heshmati, G.A., Chahouki, M.Z., Shirzadian, S., Azarnuvand, H., Zehtabian, Gh.R. & Sohrabi, M., 2004. Comparing some properties of crusted and uncrusted soils in Alagol Region of Iran. *Pakistan Journal of Nutrition*, 3(5), pp.273–277. (In Persian) <https://doi.org/10.3923/pjn.2004.273.277>
67. Kakeh, J., Gorji, M., Mohammadi, M.H., Asadi, H., Khormali, F., Sohrabi, M. & Cerdà, A., 2020b. Biological soil crusts determine soil properties and salt dynamics under arid climatic condition in Qara Qir, Iran. *Science of the Total Environment*, 732, p.139168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139168>
68. Kakeh, J., Gorji, M., Pourbabaei, A.A., Tavili, A. & Sohrabi, M., 2016. Investigating the effect of biological crusts on some biological properties of soil (Case Study: Qare Qir Rangelands of Golestan Province). *Water and Soil*, 29(6), pp.1533–1541. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.31143>
69. Kakeh, J., Gorji, M., Tavili, A., Sohrabi, M. & Pourbabaei, A.A., 2013. The effects of biological soil crusts on soil hydrologic properties in range land of Qare Qir, Golestan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(4), pp.397–403. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2013.50412>
70. Kakeh, J., Gorji, M., Mohammadi, M.H., Asadi, H., Khormali, F. & Sohrabi, M., 2020a. Studying the effects of biocrusts on soil water dynamic and evaporation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(5), pp.1255–1264. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.292760.668400>
71. Kaslakheh, S., Khormali, F. & Barani Motlagh, M., 2012. Physicochemical and micromorphological properties of biological crusts (lichen) in the Alagol loess hills – Golestan province. *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 19(1), pp.1–12. (In Persian)
72. Kheirfam, H., Sadeghi, S.H.R., Darki, B.Z. & Homae, M., 2017a. Controlling rainfall induced soil loss from small experimental plots through inoculation of bacteria and cyanobacteria. *Catena*, 152, pp.40–46. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.006>
73. Kheirfam, H., Sadeghi, S.H.R., Homae, M. & Zarei-Darki, B., 2017b. Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment. *Soil and Tillage Research*, 165, pp.230–238. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.021>
74. Kheirfam, H., Homae, M., Sadeghi, S.H.R. & Zarei Darki, B., 2017c. The role of enriching soil biological crusts through inoculation and stimulation of bacteria in

- increasing nitrogen in erosion-susceptible soil. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 31(2), pp.545–556. (In Persian)
75. Kheirfam, H. & Asadzade, F., 2020. Feasibility study of stabilizing quicksand on the dried margins of Lake Urmia using inoculation and stimulation of native soil cyanobacteria. *Applied Soil Research*, 8(1), pp.1–10. (In Persian)
76. Kidron, G.J., 2014. The negative effect of biocrusts upon annual-plant growth on sand dunes during extreme droughts. *Journal of Hydrology*, 508, pp.128–136.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.043>
77. Kidron, G.J., 2015. The role of crust thickness in runoff generation from microbiotic crusts. *Hydrological Processes*, 29(8), pp.1783–1792. **<https://doi.org/10.1002/hyp.10243>**
78. Kidron, G.J., Fischer, T. & Xiao, B., 2022a. The ambivalent effect of biocrusts on evaporation: Can the contradictory conclusions be explained? A review. *Geoderma*, 416, p.115805. **<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115805>**
79. Kidron, G.J., Lichner, L., Fischer, T., Starinsky, A. & Or, D., 2022b. Mechanisms for biocrust modulated runoff generation – a review. *Earth-Science Reviews*, 231, p.104100.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104100>
80. Kidron, G.J., Tal, S.Y., 2012. The effect of biocrusts on evaporation from sand dunes in the Negev Desert. *Geoderma*, 179–180, pp.104–112.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.013>
81. Kidron, G.J., Vonshak, A. & Abeliovich, A., 2008. Recovery rates of microbiotic crusts within a dune ecosystem in the Negev Desert. *Geomorphology*, 100(3–4), pp.444–452.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.013>
82. Kidron, G.J., Xiao, B. & Benenson, I., 2020. Data variability or paradigm shift? Slow versus fast recovery of biological soil crusts – a review. *Science of the Total Environment*, 721, p.137683. **<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137683>**
83. Kidron, G.J., Yaalon, D.H. & Vonshak, A., 1999. Two causes for runoff initiation on microbiotic crusts: hydrophobicity and pore clogging. *Soil Science*, 164(1), pp.18–27.
<https://doi.org/10.1097/00010694-199901000-00003>
84. Knapen, A., Poesen, J., Galindo-Morales, P., Baets, S.D. & Pals, A., 2007. Effects of microbiotic crusts under cropland in temperate environments on soil erodibility during concentrated flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(12), pp.1884–1901.
<https://doi.org/10.1002/esp.1504>
85. Ladrón de Guevara, M., Lázaro, R., Quero, J.L., Ochoa, V., Gozalo, B., Berdugo, M., Lluís, O., Escolar, C. & Maestre, F.T., 2014. Simulated climate change reduced the capacity of lichen dominated biocrusts to act as carbon sinks in two semi-arid Mediterranean ecosystems. *Biodiversity and Conservation*, 23(7), pp.1787–1807.
<https://doi.org/10.1007/s10531-014-0681-y>
86. Li, S., Bowker, M.A. & Xiao, B., 2022. Impacts of moss-dominated biocrusts on rainwater infiltration, vertical water flow, and surface soil evaporation in drylands. *Journal of Hydrology*, 612, p.128176. **<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128176>**
87. Li, X., He, M., Zerbe, S., Li, X. & Liu, L., 2010. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(8), pp.932–940. **<https://doi.org/10.1002/esp.1974>**
88. 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, p.751521. **<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.751521>**
89. Lichner, L., Hallett, P.D., Drongová, Z., Czachor, H., Kováčik, L., Mataix-Solera, J. & Homolák, M., 2013. Algae influence the hydrophysical parameters of a sandy soil. *Catena*, 108, pp.58–68. **<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.012>**
90. Liu, F., Zhang, G., Sun, F., Wang, H. & Sun, L., 2017. Quantifying the surface covering, binding and bonding effects of biological soil crusts on soil detachment by overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(15), pp.2640–2648.
<https://doi.org/10.1002/esp.4205>

91. Liu, L., Liu, Y., Hui, R. & Xie, M., 2017. Recovery of microbial community structure of biological soil crusts in successional stages of Shapotou desert revegetation, Northwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 107, pp.125–128.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.030>
92. Loik, M.E., Breshears, D.D., Lauenroth, W.K. & Belnap, J., 2004. Climatology and ecohydrology of precipitation pulses in arid and semiarid ecosystems of the western USA. *Oecologia*, 141(2), pp.269–281. **<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1634-y>**
93. Ludwig, J.A., Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Tongway, D.J. & Imeson, A.C., 2005. Vegetation patches and runoff–erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology*, 86(2), pp.288–297. **<https://doi.org/10.1890/04-0549>**
94. Maestre, F.T. & Cortina, J., 2004. Ecological restoration of degraded drylands: a review of the effectiveness of biological soil crusts. *Restoration Ecology*, 12(3), pp.277–287.
<https://doi.org/10.1111/j.1061-2971.2004.00378.x>
95. Maestre, F.T., Martín, N., Díez, B., Lopez-Poma, R., Santos, F., Luque, I. & Cortina, J., 2006. Watering, fertilization, and slurry inoculation promote recovery of biological crust function in degraded soils. *Microbial Ecology*, 52(3), pp.365–377.
<https://doi.org/10.1007/s00248-006-9017-0>
96. Mager, D.M., 2010. Carbohydrates in cyanobacterial soil crusts as a source of carbon in the southwest Kalahari, Botswana. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(2), pp.313–318.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.003>
97. Matboo, A., Sheikh, V., Mohammadian Behbahani, A. & Zare Garizi, A., 2024. Effects of biocrusts on the hydrological components and sediment production at experimental plot scale in arid environments. *Watershed Engineering and Management*, 16(1), pp.117–134. (In Persian) **<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.361926.2015>**
98. 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), pp.121–130. **<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1996.tb00304.x>**
99. Mi, G., Ping, Y., Zhao, Y., Liu, F. & Guo, Z., 2024. Seasonal variation of soil detachment capacity induced by moss crusts in red soil hilly area. *Acta Ecologica Sinica*, 44(22), pp.10391–10400. **<https://doi.org/10.5846/stxb202303200663>**
100. Mirzahosseini, M., Jafari, M., Azarnivand, H., Tavili, A., Zarei Darki, B. & Canton Castilla, Y., 2023. Determination of the best concentration of cyanobacteria to improve soil fertility in rangeland (Case study: Jamabroud catchment). *ECOPERSIA*, 11(2), pp.113–124. Available at: **<https://sid.ir/paper/1147768/en>**
101. Mumzaei, A., Sadeghi, S.H.R., Zarei Darki, B. & Homaei, M., 2022. Reviewing the performance of soil microorganisms on soil and water loss components. *Extension and Development of Watershed Management*, 9(35), pp.61–70.
102. Nawaz, T., Saud, S., Gu, L., Khan, I., Fahad, S. & Zhou, R., 2024. Cyanobacteria: harnessing the power of microorganisms for plant growth promotion, stress alleviation, and phytoremediation in the era of sustainable agriculture. *Plant Stress*, 11, p.100399.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100399>
103. Pen-Mouratov, S., Hu, C., Hindin, E. & Steinberger, Y., 2011. Soil microbial activity and free-living nematode community in the playa and in the sandy biological crust of the Negev Desert. *Biology and Fertility of Soils*, 47(4), pp.363–375. **<https://doi.org/10.1007/s00374-011-0540-x>**
104. Phillips, M.L., McNellis, B.E., Howell, A., Lauria, C.M., Belnap, J. & Reed, S.C., 2022. Biocrusts mediate a new mechanism for land degradation under a changing climate. *Nature Climate Change*, 12, pp.71–76. **<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01249-6>**
105. Pluis, J.L.A., 1994. Algal crust formation in the inland dune area, Laarder Wasmeer, the Netherlands. *Vegetatio*, 113(1), pp.41–51. **<https://doi.org/10.1007/BF00045194>**
106. Pluis, J.L.A. & de Winder, B., 1990. Natural stabilization. *Catena Supplement*, 18, pp.195–208.
107. Reed, S.C., Delgado-Baquerizo, M. & Ferrenberg, S., 2019. Biocrusts science, and global change. *New Phytologist*, 223(3), pp.1047–1051. **<https://doi.org/10.1111/nph.15992>**

108. Rodríguez-Caballero, E., Aguilar, M.A., Cantón, Y., Chamizo, S. & Aguilar, F.J., 2015. Swelling of biocrusts upon wetting induces changes in surface micro-topography. *Soil Biology and Biochemistry*, 82, pp.1–5. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.12.013>
109. Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Afana, A. & Solé-Benet, A., 2012. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion. *Geomorphology*, 145–146, pp.81–89. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.042>
110. Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Lázaro, R. & Escudero, A., 2013. Soil loss and runoff in semiarid ecosystems: a complex interaction between biological soil crusts, micro-topography, and hydrological drivers. *Ecosystems*, 16, pp.529–546. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9626-z>
111. Rodríguez-Caballero, E., Román, J.R., Chamizo, S., Roncero Ramos, B. & Cantón, Y., 2019. Biocrusts landscape-scale spatial distribution is strongly controlled by terrain attributes: topographic thresholds for colonization in a semiarid badland system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(13), pp.2771–2779. <https://doi.org/10.1002/esp.4706>
112. Román, J.R., Roncero-Ramos, B., Rodríguez-Caballero, E., Chamizo, S. & Cantón, Y., 2021. Effect of water availability on induced cyanobacterial biocrusts development. *Catena*, 197, p.104988. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104988>
113. Roncero-Ramos, B., Muñoz-Martín, M.Á., Chamizo, S., Fernández-Valbuena, L., Mendoza, D.A., Perona, E., Cantón, Y. & Mateo, P., 2019. Polyphasic evaluation of key cyanobacteria in biocrusts from the most arid region in Europe. *PeerJ*, 7, p.e6169. <https://doi.org/10.7717/peerj.6169>
114. Rossi, F., Potrafka, R.M., Garcia-Pichel, F. & De Philippis, R., 2012. The role of the exopolysaccharides in enhancing hydraulic conductivity of biological soil crusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, pp.33–40. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.011>
115. Rutherford, W.A., Painter, T.H., Ferrenberg, S., Belnap, J., Okin, G.S., Flagg, C. & Reed, S.C., 2017. Albedo feedbacks to future climate via climate change impacts on drylands biocrusts. *Scientific Reports*, 7(1), p.44188. <https://doi.org/10.1038/srep44188>
116. 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, pp.35–41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.04.007>
117. 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*, 585, p.124814. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124814>
118. Sadeghi, S.H.R., Sadeghi-Satri, M., Kheirfam, H. & Darki, B.Z., 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, p.103214. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103214>
119. Sand-Jensen, K. & Jespersen, T.S., 2012. Tolerance of the widespread cyanobacterium *Nostoc commune* to extreme temperature variations (–269 to 105 °C), pH and salt stress. *Oecologia*, 169(2), pp.331–339. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2226-5>
120. 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, p.e00201. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00201>
121. Shafiee, H., Ghareh, S., Lajevardi, S.H., Zeighami, E. & Poor Kalhor, M., 2023. Investigation of the effect of biological modification on increasing the resistance of alkaline silty soils in arid and semi-arid regions against water and wind erosion (Case study: Miqan desert). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 53(111), pp.119–135. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/jcee.2022.48805.2090>
122. Shi, W., Pan, Y., Zhang, Y., Hu, R. & Wang, X., 2023. The effect of different biocrusts on soil hydraulic properties in the Tengger Desert, China. *Geoderma*, 430, p.116304. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116304>
123. Soleimanzadeh, M., Khormali, F., Sohrabi, M., Ghorbani Nasrabadi, R. & Kehl, M., 2019. Evaluating biological attributes of soil quality in loessial soils under lichen biological soil

- crusts in northern Golestan province. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 42(3), pp.1–17. (In Persian) <https://sid.ir/paper/233685/en>
124. Su, Y., Zhao, X., Li, A., Li, X. & Huang, G., 2011. Nitrogen fixation in biological soil crusts from the Tengger desert, Northern China. *European Journal of Soil Biology*, 47(3), pp.182–187. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.02.003>
125. Sun, F., Xiao, B. & Ghanbarian, B., 2024. Increasing effect of biocrusts on evaporation is evidenced by simulating evaporation and diffusion experiments and water stable isotope analysis. *Journal of Hydrology*, 637, p.131427. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131427>
126. Sun, F. & Xiao, B., 2021. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem. *Journal of Hydrology*, 568, pp.792–802. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.051>
127. Sun, J., Yu, K., Rietkerk, M., Chen, N., Zhang, H., Song, G. & Li, X., 2025. Spatial and temporal scale-dependent feedbacks govern dynamics of biocrusts in drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(30), e2424836122.
128. Tavili, A. & Jafari, M., 2007. Effects of cryptogams on soil chemical properties. *Rangeland*, 1(2), pp.199–209. (In Persian) <https://sid.ir/paper/136184/en>.
129. Tighe, M., Haling, R.E., Flavel, R.J. & Young, I.M., 2012. Ecological succession, hydrology and carbon acquisition of biological soil crusts measured at the micro-scale. *PLoS ONE*, 7(10), p.e48565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048565>
130. Valentin, C., 2002. Biological soil crusts: structure, function and management. *Geoderma*, 107, pp.299–301. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00085-X)
131. Verrecchia, E., Yair, A., Kidron, G.J. & Verrecchia, K., 1995. Physical properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, north-western Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 29(4), pp.427–437. <https://doi.org/10.1006/jare.1995.1032>
132. Warren, S.D., 2003a. Synopsis: influence of biological soil crusts on arid land hydrology and soil stability. In: J. Belnap & O.L. Lange, eds. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp.349–360.
133. Warren, S.D., 2003b. Biological soil crusts and hydrology cycles in North American deserts. In: J. Belnap & O.L. Lange, eds. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Berlin: Springer-Verlag, pp.327–337. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_20
134. Weber, B., Belnap, J., Büdel, B., Antoninka, A.J., Barger, N.N., Chaudhary, V.B., Darrouzet-Nardi, A., Eldridge, D.J., Faist, A.M., Ferrenberg, S. & Bowker, M.A., 2022. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community. *Biological Reviews*, 97(5), pp.1768–1785. <https://doi.org/10.1111/brv.12862>
135. Weber, B. & Büdel, B., 2008. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8>
136. Weber, B., Büdel, B. & Belnap, J. eds., 2016. *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*. Cham: Springer International Publishing Switzerland.
137. Wei, W., Yu, Y. & Chen, L., 2015. Response of surface soil hydrology to the micro-pattern of bio-crust in a dry-land loess environment, China. *PLoS ONE*, 10(7), p.e0133565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133565>
138. Wu, N., Pan, B. & Zhang, Y., 2004. Effects and ecological significance of soil-inhabiting microorganisms in the formation of biological soil crusts. *Arid Zone Research*, 21(4), pp.444–450.
139. Xiao, B., Bowker, M.A., Zhao, Y., Chamizo, S. & Issa, O.M., 2022. Biocrusts: engineers and architects of surface soil properties, functions, and processes in dryland ecosystems. *Geoderma*, 424, p.116015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116015>
140. Xiao, B., Hu, K.L., Ren, T.S. & Li, B.G., 2016. Moss-dominated biological soil crusts significantly influence soil moisture and temperature regimes in semiarid ecosystems. *Geoderma*, 263, pp.35–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.012>

141. Xiao, B., Sun, F., Hu, K. & Kidron, G.J., 2019. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem. *Journal of Hydrology*, 568, pp.792–802.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.051>
142. Xiao, B., Wang, Q., Zhao, Y. & Shao, M., 2011. Artificial culture of biological soil crusts and its effects on overland flow and infiltration under simulated rainfall. *Applied Soil Ecology*, 48(1), pp.11–17. **<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.02.006>**
143. Xiao, B., Zhao, Y. & Shao, M., 2009. Characteristics and numeric simulation of soil evaporation in biological soil crusts. *Journal of Arid Environments*, 74(1), pp.121–130. **<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.07.010>**
144. Yang, Y., Deng, Y., Cai, C., Wang, F., Fang, Y. & Duan, X., 2025. Biocrusts' impact on hydrological processes and erosion dynamics: A review. *Geoderma*, 459, p.117383. **<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117383>**
145. Young, K.E., Bowker, M.A., Reed, S.C., Duniway, M.C. & Belnap, J., 2019. Temporal and abiotic fluctuations may be preventing successful rehabilitation of soil-stabilizing biocrusts communities. *Ecological Applications*, 29(5), p.e01908. **<https://doi.org/10.1002/eap.1908>**
146. Zhang, B., Zhang, Y., Li, X. & Zhang, Y., 2018. Successional changes of fungal communities along the biocrust development stages. *Biology and Fertility of Soils*, 54(3), pp.285–294. **<https://doi.org/10.1007/s00374-017-1259-0>**
147. Zhang, B., Zhou, X. & Zhang, Y., 2015. Responses of microbial activities and soil physical-chemical properties to the successional process of biological soil crusts in the Gurbantunggut desert, Xinjiang. *Journal of Arid Land*, 7(1), pp.101–109. **<https://doi.org/10.1007/s40333-014-0063-8>**
148. Zhang, G., Ding, W., Pu, J., Li, J., Qian, F. & Sun, B., 2020. Effects of moss-dominated biocrusts on soil detachment by overland flow in the Three Gorges Reservoir Area of China. *Journal of Mountain Science*, 17(10), pp.2418–2431. **<https://doi.org/10.1007/s11629-020-6135-0>**
149. Zhang, G., Yi, L., Ding, W., Lei, X., Wang, Y., Sun, B. & Li, J., 2021. Apportioning above- and below-ground effects of moss biocrusts on soil detachment by overland flow in a subtropical climate. *Journal of Mountain Science*, 18(10), pp.2646–2655. **<https://doi.org/10.1007/s11629-021-6807-0>**
150. Zhang, Y., Gao, M., Yu, C., Zhang, H., Yan, N., Wu, Q., Song, Y. & Li, X., 2022. Soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities differ among biocrust types and soil layers in a degraded karst ecosystem. *Catena*, 212, p.106057. **<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106057>**
151. Zhang, Y. & Wang, X., 2010. Summary on formation and developmental characteristics of biological soil crusts in desert areas. *Acta Ecologica Sinica*, 30(16), pp.4484–4492.
152. Zhao, H., Guo, Y., Zhou, R. & Drake, S., 2010. Biological soil crust and surface soil properties in different vegetation types of Horqin Sand Land, China. *Catena*, 82(2), pp.70–76. **<https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.05.002>**
153. Zhao, Y., Ping, Y., Mi, G., Xiao, Z., Liu, F., Cai, C. & Guo, Z., 2025. Extreme summer drought increased soil detachment capacity of biocrusts in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 247, p.106372. **<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106372>**
154. Zhao, Y., Qin, N., Weber, B. & Xu, M., 2014. Response of biological soil crusts to raindrop erosivity and underlying influences in the hilly Loess Plateau region, China. *Biodiversity and Conservation*, 23(7), pp.1669–1686. **<https://doi.org/10.1007/s10531-014-0680-z>**
155. Zhao, Y., Xu, M. & Belnap, J., 2010. Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 74(10), pp.1186–1191. **<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.008>**