

The effect of wind erosion on soil physicochemical properties and microbial activity response in the sustainability of the Sistan Plain ecosystem

Morteza Saberi^{1*} , Rasool Khatibi² , Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno¹ 

¹ Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

² Assistant Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Extended Abstract

Introduction

Soil degradation is closely related to increased wind erosion. Wind erosion has multifaceted and widespread effects on arid and semi-arid ecosystems. This phenomenon weakens soil structure and fertility by decreasing the soil's physicochemical quality, reducing organic matter and nutrients, and causing significant biological changes, thereby limiting the ecosystem's capacity. In the Sistan Plain, the occurrence of long and strong winds, known as the 120-day winds, is a prominent example of this erosion that has numerous consequences for the environment and human societies. These winds, by moving soil particles and reducing microbial activity, not only disrupt ecosystem performance but also threaten people's physical health through the spread of polluted dust, leading to increased respiratory problems, allergies, and chronic diseases. Moreover, continuous exposure to these conditions can create psychological and social stress, reduce agricultural productivity and quality of life, and result in economic and migration consequences. These conditions highlight the importance of carefully examining the impacts of wind erosion on the physicochemical properties and microbial activities of the soil, as well as its broader implications for ecosystem sustainability and regional challenges.

Materials and Methods

In the present study, the region was categorized into four levels of soil erosion intensity as the main treatment: no erosion, low, moderate, and severe erosion. To investigate the effects of these treatments on changes in soil properties, sampling was conducted based on a completely randomized design in the fall of 2023. At each erosion level, five homogeneous areas with similar physiographic conditions were selected, and five soil samples were collected from each area at a depth of 0 to 30 cm. The soil samples were combined using a composite sampling method. Some samples were immediately transported to the laboratory in sealed containers and stored in a refrigerator after collection to measure microbial characteristics while maintaining initial humidity. The remaining samples were air-dried and passed through a 2 mm sieve to determine physical and chemical properties. Physical characteristics assessed included soil texture, bulk density, and porosity; chemical characteristics included organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and potassium, acidity, electrical conductivity, calcium carbonate, and sodium absorption ratio. Microbial characteristics were catalase enzyme activity, basal and stimulated microbial respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, and microbial contribution. Data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) in SPSS software version 26, and means were compared using Duncan's test at a 95% confidence level. Additionally, correlations among the studied characteristics were examined using R software.

Results and Discussion

The results of this study demonstrated that the intensity of wind erosion had significant and widespread effects on the physicochemical and microbial properties of the Sistan Plain soil. As erosion intensity increased, the levels of organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and potassium, as well as soil porosity, decreased significantly. Conversely, bulk density, electrical conductivity, calcium carbonate, and sodium absorption ratio showed a significant increase. This pattern indicated the removal of fine particles rich in organic matter and nutrients from the soil surface, while coarser particles, richer in calcium carbonate and salts, remained as a result of wind erosion. Changes in surface soil pH were not significant. Additionally, the results indicated a significant decline in microbial activity and soil biological indicators. Catalase enzyme activity, basal and stimulated microbial respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, and microbial population all decreased progressively with increasing erosion intensity. The highest values were observed in non-eroded soils, while the lowest values occurred in soils subjected to severe erosion. The ratio of microbial biomass carbon to nitrogen exhibited significant changes but

no clear trend. The relative contribution of microbial carbon to total organic carbon increased at high erosion intensities, likely due to a sharp decline in total organic carbon. Correlations between erosion intensity and microbial indices were strongly negative (-0.94 to -0.99), whereas the microbial C/N ratio showed a moderate positive correlation, and the soil microbial contribution exhibited a weak negative correlation. These findings highlight that wind erosion directly limits microbial activity, organic matter decomposition, and soil nutrient cycling, posing a severe threat to the sustainability of soil fertility and ecosystem function in the Sistan Plain. Implementing appropriate soil management practices is essential to reduce erosion, preserve soil microbiota, and ensure ecosystem stability.

Conclusion

The present study indicates that wind erosion not only alters the physical and chemical properties of the soil but also significantly impacts the activity and dynamics of the microbial community. The reduction of organic matter, changes in bulk density, porosity, nutrient loss, and decreased microbial activity suggest that wind erosion limits the ecosystem's capacity to maintain biological function and sustainability. These findings underscore the importance of soil resource management and the development of conservation strategies in arid regions. They can also inform the design of sustainable agricultural programs aimed at mitigating the adverse effects of wind erosion. Future research should explore the interactions between soil physicochemical and microbial changes over extended time scales, as well as the combined effects of climate change and wind erosion, to develop more effective strategies for protecting dryland ecosystems.

Keywords: Wind erosion, Physical and chemical properties, Bulk density, Microbial diversity, Microbial biomass carbon and nitrogen

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support of the University of Zabol (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) for conducting this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Morteza Saberi: Writing - original draft preparation; **Rasool Khatibi:** Resources, Software, Manuscript editing; **Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno:** Formal analysis and investigation

*Corresponding Author, E-mail: Morteza Saberi, Mortezasaberi@uoz.ac.ir

Citation: Saberi, M., Khatibi, R., & Dahmardeh, M.R. (2026). The effect of wind erosion on soil physicochemical properties and microbial activity response in the sustainability of the Sistan Plain ecosystem. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(1), 149 -163.

doi: 10.22098/mmws.2025.18242.1664

Received: 02 September 2025, Received in revised form: 16 September 2025, Accepted: 16 September 2025,
Published online: 21 March 2026

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 149- 163.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تأثیر فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و پاسخ فعالیت میکروبی در پایداری اکوسیستم دشت سیستان

مرتضی صابری^{۱*}، رسول خطیبی^۲، محمدرضا دهمرده قلعه نو^۱

^۱ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
^۲ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

فرسایش بادی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب خاک، تأثیر قابل‌توجهی بر فعالیت میکروبی خاک در دشت سیستان دارد. مطالعه حاضر در پاییز ۱۴۰۲ با هدف بررسی اثر شدت فرسایش خاک بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک انجام شد. شدت فرسایش در چهار سطح بدون فرسایش، کم، متوسط و شدید دسته‌بندی شد و نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک در چهار منطقه همگن با شرایط فیزیوگرافی مشابه انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت فرسایش، کربن آلی از ۰/۵۳ به ۰/۱۴ درصد، نیتروژن کل از ۰/۰۶۱ به ۰/۰۱۲ درصد، پتاسیم قابل جذب از ۱۵۲/۶ به ۶۳/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و فسفر قابل جذب از ۶/۹ به ۱/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت. تخلخل خاک نیز از ۵۵/۳ به ۳۳ درصد افت کرد، در حالی که وزن مخصوص ظاهری از ۱/۱۲ به ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، هدایت الکتریکی از ۲/۰۴ به ۸/۶ دسی‌زیمنس بر متر، کربنات کلسیم از ۹ به ۱۹/۳ درصد و شاخص جذب سدیم از ۳/۹ به ۸/۵ افزایش یافتند. تغییر pH خاک معنادار نبود و خاک‌ها ماهیت نسبتاً خنثی خود را حفظ کردند. شاخص‌های میکروبی شامل فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس پایه و برانگیخته، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها با شدت فرسایش کاهش قابل‌توجه داشتند. به‌طوری که کربن زیست‌توده میکروبی ۱۷۹ به ۳۹/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و نیتروژن زیست‌توده از ۱۸/۶ به ۳/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت. نسبت C/N زیست‌توده میکروبی تغییر معنادار داشت اما روند مشخصی نشان نداد و سهم نسبی میکروبی خاک در شدت‌های بالا افزایش یافت. همبستگی بین فرسایش و شاخص‌های میکروبی منفی و بسیار قوی بود. یافته‌ها نشان می‌دهند که فرسایش بادی توان اکوسیستم را در حفظ عملکرد و پایداری زیستی محدود می‌کند و مدیریت مناسب خاک برای کاهش فرسایش و حفظ میکروبیوتای خاک ضروری است. این مطالعه می‌تواند راهنمای طراحی برنامه‌های پایدار کشاورزی و حفاظت از اکوسیستم‌های خشک باشد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش بادی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، وزن مخصوص ظاهری، تنوع میکروبی، کربن و نیتروژن زیست توده میکروبی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: مرتضی صابری، Mortezasaberi@uoz.ac.ir

استناد: صابری، مرتضی، خطیبی، رسول، و دهمرده قلعه نو، محمدرضا (۱۴۰۵). تأثیر فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و پاسخ فعالیت میکروبی در پایداری اکوسیستم دشت سیستان. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۱)، ۱۴۹-۱۶۳.

doi: 10.22098/mmws.2025.18242.1664

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۱۴۹ تا ۱۶۳

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

حفظ منابع طبیعی و بهره‌برداری پایدار از آن‌ها یکی از چالش‌های اساسی محیط‌زیستی در دنیای امروز است. خاک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای اکوسیستم‌های زمینی، نقش حیاتی در تأمین پایداری زیست‌کره، تولید مواد غذایی، تنظیم چرخه‌های مواد مغذی و نگهداری تنوع زیستی دارد (Fathizad et al., 2020). با این حال، فرسایش خاک که اغلب ناشی از تغییرات کاربری اراضی و مداخلات انسانی است، باعث تخریب ساختار خاک، کاهش میزان مادهٔ آلی، از دست رفتن عناصر غذایی، کاهش عمق خاک و کاهش تنوع میکروبی آن می‌شود (Mandal et al., 2021). کاهش خاک سطحی به‌دلیل مدیریت ناصحیح اراضی، تهدیدی جدی برای کیفیت و عملکرد اکوسیستم‌های خاکی ایجاد می‌کند و نیازمند پایش مستمر و ارزیابی دقیق واکنش خاک نسبت به فرسایش برای تدوین برنامه‌های مدیریتی و حفظ پایداری اکولوژیکی است (Qiu et al., 2021). فرسایش بادی خاک یک مسئلهٔ جهانی مهم است که سالانه حدود ۳/۵۸ میلیارد تن خاک از مزارع سراسر جهان جابه‌جا می‌کند (Yang et al., 2024). فرآیندی تدریجی که طی آن ذرات خاک از سطح زمین جدا شده و توسط باد یا جریان‌های آب منتقل می‌شوند (Dehghanpour et al., 2025) و در طول زمان منجر به کاهش کیفیت خاک (Zainuddin et al., 2024)، افت حاصلخیزی و کاهش توان اکوسیستم می‌شود (Tanner et al., 2023). اثرات فرسایش شامل فشردگی خاک، تخریب ساختار، کاهش ذخایر مواد مغذی و افزایش شوری است که چالش‌های ژئوآکولوژیکی و محیط‌زیستی گسترده‌ای ایجاد می‌کند (Zolfaghari et al., 2024). مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل ساختار پراکنده و ناپایدار خاک، پوشش گیاهی کم و محتوای پایین مادهٔ آلی، نسبت به فرسایش بادی حساس هستند (Kheirabadi et al., 2018). بادهای ۱۲۰ روزهٔ دشت سیستان نمونه‌ای بارز از فرسایش بادی شدید هستند که موجب جابه‌جایی ذرات ریز خاک، کاهش ظرفیت نگهداری عناصر غذایی و اختلال در شبکه‌های غذایی میکروبی می‌شوند. انتشار گرد و غبار حامل آلاینده‌ها، میکروب‌های بیماری‌زا و ذرات گرده، تهدید جدی برای سلامت انسان ایجاد کرده و حساسیت‌های تنفسی و بیماری‌های مزمن ریوی را افزایش می‌دهد (Miao et al., 2020). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فرسایش بادی می‌تواند ترکیب و تنوع جامعه میکروبی خاک را تغییر داده، فعالیت‌های زیستی و چرخهٔ مواد مغذی را کاهش دهد (Diallo et al., 2023) و ذخایر کربن و نیتروژن خاک را تحت تأثیر قرار دهد (Iturri and Boshyazo., 2023). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که شدت فرسایش بادی با کاهش پیچیدگی شبکه‌های میکروبی، افت تنوع تاکسونومی و کاهش مادهٔ آلی خاک همراه است و این امر در نهایت موجب تضعیف ساختار

خاک و کاهش حاصلخیزی آن می‌شود (Qiu et al., 2021). افزون بر این، فرسایش بادی و رسوب گرد و غبار می‌توانند ساختار و عملکرد شبکه‌های غذایی میکروبی خاک را مختل کرده و توان اکوسیستم را در بازسازی طبیعی محدود نمایند (Zhao et al., 2025). نقش میکروارگانیسم‌های منتقل‌شده توسط باد در چرخهٔ بیوژئوشیمیایی عناصر مغذی، ذخیره کربن و تثبیت خاک نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Acosta-Martinez et al., 2015). در همین راستا، بررسی تعامل میان کربن آلی خاک و فرسایش بادی نشان داد که این فرآیند با کاهش ذخایر کربن همراه است و میزان کربن آلی می‌تواند حساسیت خاک به فرسایش را تحت تأثیر قرار دهد، زیرا نقش کلیدی در پایداری و تشکیل خاک‌دانه‌ها دارد. همچنین تجمع کربن در رسوبات جابه‌جا شده توسط باد، چه در حرکت جهشی و چه در معلق‌سازی ذرات، به‌عنوان مسیری مهم در چرخهٔ کربن شناسایی شده است (Iturri and Buschiazzo, 2023). شواهد دیگر حاکی از آن است که کاهش مادهٔ آلی تنها به شستشوی سطحی محدود نمی‌شود، بلکه برداشت لایهٔ سطحی خاک و نمایان شدن افق‌های زیرین با محتوای کم‌تر مواد آلی نیز نقش مؤثری در این روند دارد (Moradi et al., 2024). به‌طور خاص، Sánchez-Moreno and Yuste, (2022) گزارش کردند که فرسایش بادی با کاهش منابع غذایی و عناصر مغذی، موجب افت فعالیت زیستی و تغییر چرخهٔ مواد مغذی می‌شود و علاوه بر کاهش تنوع و فراوانی میکروارگانیسم‌ها، ساختار جوامع میکروبی را نیز دگرگون می‌سازد. نتایج پژوهش‌های اخیر نیز نشان می‌دهد که افزایش شدت فرسایش و کاهش پوشش گیاهی، نه‌تنها ساختار جامعهٔ میکروبی را تغییر می‌دهد، بلکه کارکردهای کلیدی مانند تنفس میکروبی، چرخهٔ نیتروژن و فعالیت‌های آنزیمی را نیز به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد (Mai et al., 2024). مطالعه‌ای در حوضهٔ آبخیز دهبکری استان کرمان (Saberi et al., 2025)، نشان داد که افزایش شدت فرسایش باعث کاهش محتویات رطوبت، نیتروژن کل، کربن آلی، فسفر کل، پتاسیم قابل‌دسترس و فعالیت زیستی خاک می‌شود. این تغییرات مهم در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، تأثیر مستقیمی بر تنوع و عملکرد میکروبیوتای خاک دارند و منجر به کاهش عملکرد چندگانه خاک می‌شوند. همچنین Saberi et al., (2025) با بررسی حوزهٔ آبخیز منزلاب، شهرستان زاهدان دریافتند که شدت فرسایش موجب کاهش معنادار کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم، فسفر و تخلخل خاک شده و در مقابل پارامترهایی مانند اسیدیته، هدایت الکتریکی، آهک و وزن مخصوص ظاهری خاک افزایش می‌یابد. این تغییرات فیزیکی و شیمیایی به کاهش شاخص‌های زیستی خاک و افت کیفیت زیستی و فعالیت میکروبی خاک منجر شده است.

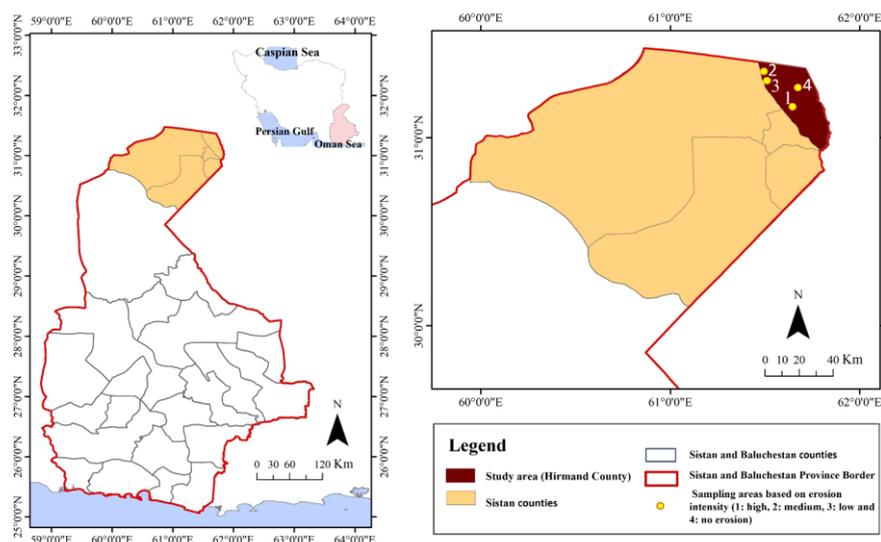
و ۵۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۴ دقیقه عرض شمالی و بین ۶۱ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. ارتفاع متوسط منطقه حدود ۴۸۰ متر از سطح دریا بوده و از نظر توپوگرافی به‌طور عمده هموار است (شکل ۱). منابع آبی منطقه به‌شدت وابسته به رودخانه هیرمند و تالاب بین‌المللی هامون هستند که در دهه‌های اخیر تحت تأثیر خشکسالی‌های متوالی و کاهش آورد رودخانه، به‌طور گسترده خشکیده‌اند (Etā'at and Varzesh, 2012). میانگین بارندگی سالانه حدود ۵۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۲۲ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. بیشینه دمای تابستان‌ها گاه به بالای ۴۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و کمینه زمستانی تا نزدیک صفر کاهش می‌یابد (ایستگاه سینوپتیک زابل، دوره آماری ۳۰ ساله). بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه و نقشه بیوکلیماتیک ایران، اقلیم منطقه بیابانی گرم و خشک شدید است و تعداد روزهای خشک سالانه بیش از ۳۳۰ روز گزارش شده است. داده‌های ایستگاه سینوپتیک زابل نشان می‌دهد که بادهای غالب منطقه موسوم به بادهای ۱۲۰ روزه از اوایل خرداد تا پایان شهریور از سمت شمال و شمال‌غرب به جنوب و جنوب‌شرق می‌وزند. میانگین سرعت این بادهای در طول دوره فعالیت حدود ۸ تا ۱۰ متر بر ثانیه بوده و در برخی روزها سرعت‌های بیش از ۲۰ متر بر ثانیه نیز ثبت شده است. استمرار و شدت این بادهای عامل اصلی فرسایش بادی در سیستان محسوب می‌شود و سبب خیزش گرد و غبار، طوفان‌های ماسه‌ای و جابه‌جایی شدید رسوبات سطحی می‌شود.

در دشت سیستان، وقوع بادهای طولانی و شدید یکی از مهم‌ترین عوامل فرسایش بادی و تخریب خاک است که با جابه‌جایی ذرات ریز و از دست رفتن مواد آلی، موجب تغییر در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و افت فعالیت‌های میکروبی می‌شود. این تغییرات نه تنها حاصلخیزی و پایداری اکوسیستم‌های خاکی را تهدید می‌کنند، بلکه از طریق افزایش گرد و غبار و شوری خاک، پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی قابل‌توجهی مانند مشکلات تنفسی، کاهش کیفیت زندگی و مهاجرت‌های اجباری به همراه دارند. در این شرایط، بررسی اثر شدت فرسایش بادی بر خصوصیات خاک از جنبه‌های مختلف (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) ضروری است، زیرا می‌تواند تصویر دقیقی از فرآیندهای تخریب و محدودیت‌های زیستی منطقه ارائه دهد. نوآوری مطالعه حاضر در آن است که برای نخستین بار در دشت سیستان، اثر سطوح مختلف شدت فرسایش بادی به‌طور هم‌زمان بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های میکروبی خاک ارزیابی شده و نتایج آن می‌تواند مبنایی علمی برای مدیریت پایدار منابع خاک و کاهش تهدیدهای اکولوژیکی و اجتماعی ناشی از فرسایش باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از دشت سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان است که در محدوده جغرافیایی بین ۳۰ درجه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و محدوده مورد مطالعه در منطقه سیستان، استان سیستان و بلوچستان، ایران
Figure 1. Geographical location and study area in the Sistan region, Sistan and Baluchestan Province, Iran

شد و نمونه‌برداری در پاییز ۱۴۰۲ انجام گرفت. برای هر سطح فرسایش، پنج منطقه همگن از نظر توپوگرافی، بافت خاک، پوشش گیاهی و عدم مداخلات انسانی انتخاب شد تا اثرات

۲-۲- نمونه‌برداری خاک

در این مطالعه، شدت فرسایش خاک به‌عنوان عامل اصلی در چهار سطح شامل بدون فرسایش، فرسایش کم، متوسط و شدید تعیین

میلی‌لیتری اصلاح شدند. پس از ۲۰ دقیقه انکوباسیون در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، یک میلی‌لیتر محلول آلوم پتاسیم اشباع شده به بالن اضافه و سپس فیلتر شد. محلول رویی به وسیله اسپکتروفوتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر تجزیه و تحلیل شد و فعالیت آن به صورت میلی‌مول KMnO₄ گرم بر لیتر خاک خشک بیان شد. در این آزمایش ۲ میلی‌لیتر از بافر حاوی هیدروژن پراکسید فاقد عصاره آنزیمی به عنوان نمونه شاهد به منظور صفر کردن دستگاه اسپکتروفوتومتر استفاده شد. میزان فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی ۳۹/۴ میلی‌مولار بر سانتی‌متر بر اساس سرعت مصرف هیدروژن پراکسید در دقیقه محاسبه شد (فعالیت آنزیم کاتالاز برابر است با اختلاف جذب تقسیم بر ۳۹/۵ ضرب در عدد ۱۰۰).

کربن زیتوده میکروبی (MBC) به روش گازدهی با کلروفرم استخراج اندازه‌گیری شد (Brookes et al., 1985). نمونه‌های خاک مرطوب (۱۰ گرم خاک خشک در آن) به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط تاریکی با کلروفرم بدون اتانول تدخین شدند و نمونه‌های کنترل با وزن برابر تدخین نشدند. هر دو نمونه تدخین شده و تدخین نشده با ۴۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۵ مولار K₂SO₄ (نسبت خاک به محلول ۱:۴) استخراج و به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه تکان داده شدند. عصاره از طریق غشای ۰/۴۵ میلی‌متر فیلتر شد و سپس در آنالایزر کربن آلی کل اندازه‌گیری شد. برای محاسبه این خصوصیت زیستی از رابطه ۱ استفاده شد (Qu et al., 2020):

$$MBC = Ec / K_{Ec} \quad (1)$$

در این فرمول Ec از تفاوت کربن آلی تدخین شده به کربن آلی نمونه‌های تدخین نشده محاسبه می‌شود. K_{Ec} ضریب تبدیل Ec به MBC است که ۰/۴۵ در نظر گرفته شد (Qu et al., 2020). این فرمول برای محاسبه نیتروژن زیتوده میکروبی نیز صادق است با این تفاوت که نیتروژن آلی تدخین شده و نیتروژن آلی نمونه‌های تدخین نشده در این فرمول مدنظر بود و ضریب تبدیل ۰/۵۴ است (Qu et al., 2020). برای اندازه‌گیری نیتروژن زیتوده میکروبی خاک به روش تدخین-استخراج، نمونه‌های خاک پس از تدخین با کلروفرم، با محلول K₂SO₄ عصاره‌گیری و عصاره‌ها تا موقع اندازه‌گیری در دمای تقریباً ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در نهایت مقدار نیتروژن زیتوده میکروبی به روش ایندوفنل بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

جمعیت میکروارگانیسم‌ها با روش بیش‌ترین تعداد احتمالی^۲ (MPN) محاسبه شد. برای شمارش باکتری‌ها با استفاده از روش بیشینه تعداد احتمالی (MPN)، سوسپانسیون خاک با سری رقت

فرسایش مستقل از تفاوت‌های محیطی بررسی شود. در هر منطقه، پنج زیرنمونه خاک برداشت شد؛ یک نمونه در مرکز منطقه و چهار نمونه دیگر در اطراف آن در چهار جهت اصلی (شمال، جنوب، شرق و غرب) و با فاصله تقریبی ۱۵-۱۰ متر از مرکز قرار گرفتند. زیرنمونه‌های هر منطقه با هم ترکیب و یک نمونه مرکب تهیه شد. بنابراین، برای هر تیمار پنج نمونه مرکب و مجموعاً ۲۰ نمونه مرکب مورد تحلیل قرار گرفت. بخشی از نمونه‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبی بدون الک و با حفظ رطوبت اولیه، در ظروف دربسته و در دمای ۴-۵ درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل منتقل و نگهداری شد تا فعالیت میکروبی حفظ شود. بخش دیگر نمونه‌ها برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک ۲ میلی‌متری آماده شد. این طراحی نمونه‌برداری با انتخاب مناطق همگن، فاصله مناسب بین نقاط و استفاده از نمونه مرکب، نماینده واقعی هر سطح فرسایش بوده و امکان تحلیل آماری دقیق اثرات فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی خاک را فراهم می‌کند (Bastani et al., 2023).

۳-۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

در این مطالعه، برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی، بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین شد (Schuman et al., 2002). وزن مخصوص ظاهری خاک به روش کلوخه‌ای، تخلخل از طریق محاسبه بر اساس چگالی حجمی اندازه‌گیری شد (Chen et al., 2022). برای اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی، کربن آلی با روش والکی و بلاک و نیتروژن کل با استفاده از روش کج‌لدال تعیین شد. فسفر قابل دسترس خاک با روش اولسن و پتاسیم قابل دسترس با استفاده از استات آمونیوم خنثی استخراج و توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. مقدار pH و هدایت الکتریکی با روش پتانسیومتری، میزان آهک خاک به روش تیتراسیون و نسبت جذب سدیم با استفاده از عصاره اشباع خاک تعیین شد (Bastani et al., 2023; Kamali et al., 2022).

۴-۲- ویژگی‌های میکروبی خاک

برای ارزیابی ویژگی‌های میکروبی خاک، از روش‌های استاندارد و مرجع استفاده شد. به منظور مطالعه تأثیر فرسایش خاک بر فعالیت‌های آنزیمی خاک، آنزیم کاتالاز خاک با نمونه‌های ۲ گرمی خاک با اضافه کردن ۵ میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید ۰/۳ درصد و ۴۰ میلی‌لیتر آب فوق خالص در یک بالن مخروطی ۱۰۰

² Most Probable Number

¹ Microbial Biomass Carbon

پایه انجام شد (Schinner et al., 2012). برای محاسبه سهم میکروبی، نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل مورد استفاده قرار گرفت (Chen et al., 2022).

۲-۵- تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های حاصل از خصوصیات خاک با استفاده از طرح آزمایشی کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. هر تیمار فرسایش شامل ۵ تکرار بود. داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس یکطرفه (ANOVA) در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ تحلیل شدند. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن (در سطح احتمال ۹۵ درصد) استفاده شد. در نهایت همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مطالعه شده در محیط نرم‌افزار R بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکی و

شیمیایی

براساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، شدت فرسایش بادی تأثیر معناداری بر اغلب ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک دشت سیستان داشته است. با افزایش شدت فرسایش، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب و همچنین تخلخل خاک کاهش یافتند، در حالی که وزن مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم و شاخص جذب سدیم به‌طور معناداری افزایش نشان دادند. این الگو نشان می‌دهد که فرسایش بادی با جابه‌جایی ذرات ریز و کاهش مواد آلی و عناصر غذایی، سطح خاک را فقیر کرده و هم‌زمان به دلیل باقی‌ماندن ذرات درشت‌تر و نمک‌های محلول، شوری و سطح سدیم خاک افزایش می‌یابد. تغییر pH در سطح معنادار نبود که می‌تواند ناشی از ظرفیت بافری خاک‌های آهکی و شور منطقه باشد. به‌طور کلی، افزایش شدت فرسایش با کاهش خصوصیات کیفی و حاصلخیزی و ایجاد تغییرات نامطلوب در وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک، پایداری اکوسیستم دشت سیستان را تهدید می‌کند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که فرسایش بادی با حذف ذرات ریز و افزایش ذرات درشت، باعث سبک‌تر شدن خاک و کاهش پایداری ساختاری آن می‌شود. این تغییرات کاهش ظرفیت نگهداری آب و تخلخل خاک را به همراه دارد، که منجر به محدود شدن رشد ریشه و فعالیت میکروبی می‌شود (Zhao et al., 2025). افزایش وزن مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل مشاهده شده، بیانگر فشردگی خاک و کاهش تهویه است که شرایط نامساعدی برای نفوذ آب و اکسیژن فراهم می‌کند (Wang et al., 2021). این تغییرات هم‌چنین می‌تواند منجر به

۱۰ دهمی با آب تهیه شد و مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از آن را به پتری دیش‌های حاوی نوترینت آگار و نیستاتین اضافه شد و درون انکوباتور در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از ۲۴ ساعت تعداد کلنی‌های باکتری‌ها شمرده شدند. برای شمارش جمعیت قارچ‌ها ۱۰۰ میکرولیتر از رقت‌های تهیه شده را به پتری-های حاوی مقادیر مشخصی از پپتون، دکستروز، رزبنگال، استرپتومایسین و آگار اضافه شد. نمونه‌ها در انکوباتور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت پنج روز نگهداری شدند و روش شمارش مستقیم شمرده شدند. کشت میکروبی به دو شیوه کشت سطحی در پتری دیش برای شمارش میکروارگانیسم‌های هوازی و کشت زیرسطحی که در آن محلول خاک زیر محیط کشت قرار داده می‌شود، برای شمارش میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی اجباری و اختیاری انجام شد (Ali-Asghar Zad, 2006). نتایج مربوط به نوع میکروارگانیسم‌ها در این مقاله آورده نشده است.

تنفس پایه میکروبی با روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد. بدین منظور ۱۰ گرم خاک مرطوب درون ظرف شیشه‌ای تیره اضافه شد. ۱۰ میلی‌لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۵/۰ نرمال در بالن ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس درون ظرف شیشه‌ای قرار داده شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. پس از اتمام انکوباسیون بالن برداشته و محلول هیدروکسید سدیم درون ارلن مایر ریخته شد و محتویات بالن دو مرتبه با آب مقطر شستشو داده شد و سپس به ارلن اضافه شد. در ادامه ۲ میلی‌لیتر محلول کلرید باریم ۰/۵ مولار اضافه شد. ۴ قطره شناساگر فنل فتالین به محلول اضافه و با اسید کلریدریک ۰/۵ نرمال تیتراژ شد. برای تهیه شاهد، این روش بدون خاک انجام شد. مقدار تنفس پایه $(\text{mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ از رابطه ۲ محاسبه شد (Anderson, 1982).

$$(2) \quad \text{تنفس میکروبی} = \frac{(B-S) \times N \times 22 \times 100}{(SW \times \%dm)}$$

در این فرمول، S بیانگر حجم اسید کلریدریک مصرف شده در خاک بر حسب میلی‌لیتر است، B نشان‌دهنده حجم اسید کلریدریک مصرف شده در نمونه شاهد (میلی‌لیتر) است، SW وزن اولیه نمونه خاک بر حسب گرم را نشان می‌دهد، Dm به‌عنوان فاکتور تبدیل خاک خشک در نظر گرفته می‌شود، N نرمالیت اسید است و عدد ۲۲ نیز وزن اکی‌والان دی‌اکسید کربن بر حسب میلی‌گرم را نشان می‌دهد.

تنفس ناشی از بستر خاک‌ها SIR (تنفس برانگیخته) با توجه به میزان حداکثر تنفس اولیه ریزجانداران پس از غنی‌سازی خاک با منبع اضافی کربن و انرژی (گلوکز) با روش افزودن گلوکز و تیتراسیون ارزیابی شد. ۱۰ گرم خاک مرطوب با ۴۰ میلی‌گرم گلوکز (۰/۴ درصد) مخلوط شد و سپس بقیه مراحل همانند تنفس

فرسایش یافته نه تنها پایداری خاکدانه‌ها را کاهش می‌دهد بلکه افزایش هدایت حرارتی و نوسانات دمایی خاک را نیز به دنبال دارد، که می‌تواند عملکرد جوامع میکروبی حساس به دما را تحت تأثیر قرار دهد (Guo et al., 2018).

تشدید شکنندگی خاک و کاهش مقاومت آن در برابر تنش‌های محیطی شود (Gan et al., 2024). یافته‌های پیشین نیز نقش کلیدی ماده آلی در تثبیت خاکدانه‌ها و پایداری ساختاری خاک را تأیید کرده‌اند (Liang et al., 2018). کاهش ماده آلی در مناطق

جدول ۱- تجزیه واریانس شدت فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک
Table 1. Analysis of variance of erosion intensity on soil physicochemical properties

Soil Properties	Source of Variation	df	Mean Squares	F
Organic Carbon (%)	Between Groups	3	0.08	136.80**
	Within Groups	16	0.00	
Total Nitrogen (%)	Between Groups	3	0.00	68.50**
	Within Groups	16	0.00	
Available Potassium (mg kg ⁻¹)	Between Groups	3	5211.40	101.20**
	Within Groups	16	51.20	
Available Phosphorus (mg kg ⁻¹)	Between Groups	3	18.80	144.50**
	Within Groups	16	0.13	
pH	Between Groups	3	0.03	3.70 ^{ns}
	Within Groups	16	0.00	
EC (dSm ⁻¹)	Between Groups	3	24.40	98.90**
	Within Groups	16	0.24	
CaCO ₃	Between Groups	3	58.30	43.70**
	Within Groups	16	1.30	
Sodium Adsorption Ratio	Between Groups	3	11.30	54.05**
	Within Groups	16	0.20	
Bulk Density (gcm ⁻³)	Between Groups	3	0.09	235.40**
	Within Groups	16	0.00	
Porosity (%)	Between Groups	3	183.50	84.70**
	Within Groups	16	2.10	

** and ^{ns} indicate significance at the 1% probability levels, and non-significance, respectively.

بیانگر کاهش منابع غذایی میکروارگانیسم‌ها و محدود شدن ظرفیت خاک برای حفظ مواد مغذی است (Pimentel and Burgess, 2013). این کاهش مواد مغذی موجب کاهش فعالیت متابولیسمی میکروارگانیسم‌ها (Mendel et al., 2023)، کاهش تثبیت نیتروژن و کاهش تجزیه مواد آلی می‌شود (Mendel et al., 2021). علاوه بر این، انتقال ذرات غنی از مواد مغذی توسط باد، دسترسی گیاهان به عناصر ضروری را محدود می‌کند و بنابراین توان اکوسیستم در بازسازی پوشش گیاهی و مقابله با فرسایش را کاهش می‌دهد (Qiu et al., 2021; Diallo et al., 2023). تغییرات اسیدیته و افزایش هدایت الکتریکی خاک نیز پیامدهای زیان‌باری برای فعالیت میکروبی دارند و می‌توانند دسترسی گیاهان به مواد مغذی را محدود کنند (Sun et al., 2021)، به‌ویژه در مناطق خشک مانند دشت سیستان (Tanner et al., 2023; Zolfaghari et al., 2024). علاوه بر این، افزایش کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم باعث پراکندگی خاکدانه‌ها و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود که فعالیت میکروبی و رشد گیاه را محدود می‌کند (Zainuddin et al., 2024).

نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲) نشان داد که شدت فرسایش بادی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک دارد. با افزایش شدت فرسایش، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس و همچنین تخلخل خاک کاهش یافتند، در حالی که وزن مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم افزایش یافتند. کاهش تخلخل ناشی از خروج ذرات ریز، به‌ویژه رس و سیلت، و از بین رفتن خاکدانه‌ها است؛ این ذرات کوچک و سبک با جریان باد به راحتی جابه‌جا می‌شوند و نقش کلیدی در حفظ ساختار خاک و ظرفیت نگهداری آب دارند. ذرات درشت‌تر باقی می‌مانند اما توان پشتیبانی ساختار خاک و نگهداری رطوبت را ندارند، بنابراین کاهش تخلخل و کیفیت خاک رخ می‌دهد. تغییر pH معنادار نبود و خاک‌ها ماهیت آهکی و نسبتاً خنثی خود را حفظ کردند. تغییر بافت از لومی‌رسی به شنی، همراه با کاهش تجمع خاکدانه‌ها، نشان‌دهنده تخریب ساختار خاک و کاهش عملکرد اکوسیستم است. در مجموع، فرسایش بادی با تخریب هم‌زمان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، کیفیت و پایداری اکوسیستم‌های منطقه را به شدت تهدید می‌کند.

فرسایش بادی تغییرات قابل توجهی در ترکیب شیمیایی خاک ایجاد می‌کند. کاهش کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم،

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2. Comparison of mean effects of erosion on soil physical and chemical properties

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Organic Carbon (%)	0.59 ^a	0.47 ^b	0.30 ^c	0.16 ^d
Total Nitrogen (%)	0.063 ^a	0.048 ^b	0.023 ^c	0.016 ^c
Available Potassium (mg kg ⁻¹)	161.3 ^a	148.6 ^b	96.5 ^c	79.0 ^d
Available Phosphorus (mg kg ⁻¹)	8.32 ^a	7.78 ^b	4.55 ^c	3.45 ^d
pH	7.68 ^a	7.63 ^a	7.69 ^a	7.61 ^a
EC (dSm ⁻¹)	0.54 ^c	0.60 ^{bc}	0.70 ^b	0.93 ^a
CaCO ₃	9 ^d	12 ^c	15 ^b	19.3 ^a
Sodium Adsorption Ratio	3.9 ^d	5.6 ^c	6.9 ^b	8.5 ^a
Bulk Density (gcm ⁻³)	1.36 ^c	1.41 ^c	1.49 ^b	1.58 ^a
Porosity (%)	46.6 ^a	42.5 ^b	35.9 ^c	33.2 ^c
Soil texture	Loamy clay	Loamy clay	Loamy sand	Sandy

Different letters in each row indicate a significant difference ($p < 0.05$).

کربنات کلسیم، نسبت جذب سدیم و وزن مخصوص ظاهری همبستگی مثبت بالایی با فرسایش دارند، که نشان‌دهنده تجمع یون‌ها و مواد معدنی به صورت نسبی در خاک‌های تحت فرسایش و فشردگی بیش‌تر آن‌ها است. این الگوی همبستگی نشان می‌دهد که فرسایش باعث کاهش باروری و مواد آلی خاک می‌شود، در حالی که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مرتبط با تراکم و نمک‌زدگی افزایش می‌یابند، و بر پایداری محیطی و ظرفیت تولیدی خاک تأثیر منفی قابل توجهی دارد (شکل ۲).

نتایج جدول ۳ نشان‌دهنده همبستگی قابل توجه بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک تحت تأثیر فرسایش است. فرسایش با اکثر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مانند کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر همبستگی منفی بسیار قوی دارد، که بیانگر کاهش این مواد مغذی در اثر افزایش فرسایش است. به طور مشابه، تخلخل خاک با فرسایش نیز همبستگی منفی نشان می‌دهد، که کاهش ظرفیت نگهداری آب و تهویه خاک را منعکس می‌کند. در مقابل، ویژگی‌هایی مانند اسیدیته، هدایت الکتریکی،

جدول ۳- نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 3. Results of Pearson correlation coefficients between soil physical and chemical properties

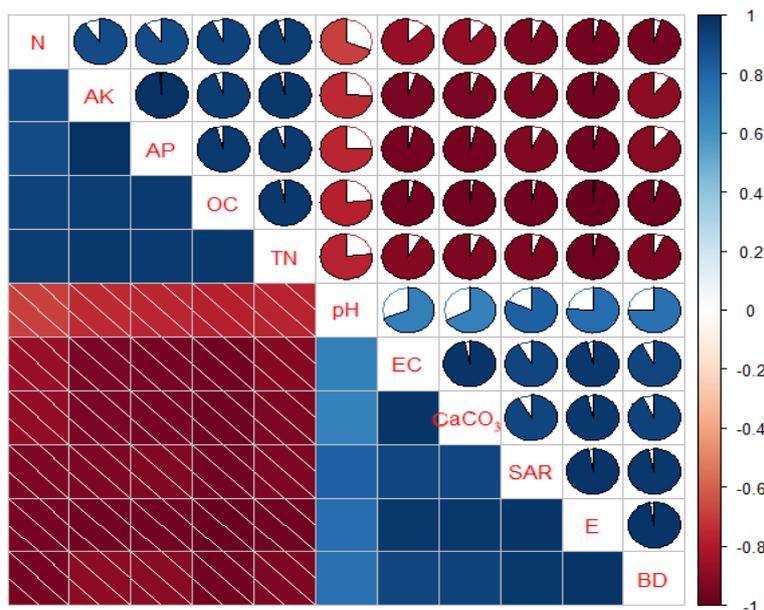
	E	OC	TN	AK	AP	PH	EC	CaCO ₃	SAR	BD	N
E	1										
OC	-0.99	1.00									
TN	-0.97**	0.97	1								
AK	-0.97	0.95	0.97	1							
AP	-0.97	0.96	0.95	0.99	1						
PH	0.76	-0.77	-0.77	-0.75	-0.75	1					
EC	0.97	-0.96	-0.91	-0.95	-0.96	0.69	1				
CaCO ₃	0.97	-0.98	-0.93	-0.94	-0.96	0.68	0.97	1			
SAR	0.98	-0.96	-0.94	-0.93	-0.93	0.81	0.91	0.91	1		
BD	0.98	-0.97	-0.93	-0.90	-0.90	0.75	0.92	0.93	0.97	1.00	
N	-0.95	0.93	0.95	0.90	0.89	-0.68	-0.87	-0.89	-0.93	-0.96	1

Erosion (E), Organic Carbon (OC), Total Nitrogen (TN), Available Potassium (AK), Available Phosphorus (AP), Soil Acidity (pH), Electrical Conductivity (EC), Calcium Carbonate (CaCO₃), Sodium Adsorption Ratio (SAR), Bulk Density (BD), Porosity (N)

به طور محسوسی افت کردند. در مقابل، نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده تفاوت معناداری نداشت و بیانگر پایداری نسبی تعادل C/N میان سطوح مختلف فرسایش است، هر چند مقادیر مطلق هر دو عنصر کاهش یافت. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که فرسایش بادی با تخریب بستر زیستی، توان اکولوژیکی خاک و ظرفیت آن در چرخه عناصر غذایی را به طور جدی محدود می‌کند.

۳-۲- اثر فرسایش بادی بر ویژگی‌های میکروبی

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که شدت فرسایش بادی در سطح احتمال یک درصد اثر معناداری بر بیش‌تر شاخص‌های زیستی خاک دارد. با افزایش شدت فرسایش، فعالیت آنزیمی و متابولیک کاهش یافته و ذخایر کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی در اثر از دست رفتن مواد آلی و ریزدانه‌های حاصلخیز



شکل ۲. ماتریس همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک
Figure 2. Pearson correlation matrix for soil physicochemical properties

جدول ۴- تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات میکروبی خاک

Table 4. Analysis of variance of wind erosion intensity on soil microbial properties

Soil Properties	Source of Variation	df	Mean Squares	F
Catalase Enzyme ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	Between Groups	3	212.5	87.9 **
	Within Groups	16	2.41	
Basal Microbial Respiration ($\text{mgCO}_2^{-1} \text{ gsoil.day}$)	Between Groups	3	0.016	244.7 **
	Within Groups	16	0	
Basal respiration ($\text{mgCO}_2^{-1} \text{ gsoil.day}$)	Between Groups	3	0.069	163.1 **
	Within Groups	16	0	
Microbial Biomass Carbon (mg kg^{-1})	Between Groups	3	11518.8	250.4 **
	Within Groups	16	46	
Microbial Biomass Nitrogen (mg kg^{-1})	Between Groups	3	138.9	231.3 **
	Within Groups	16	0.6	
MBC/ MBN (mg kg^{-1})	Between Groups	3	13.1	2.6 ^{ns}
	Within Groups	16	4.8	
Microorganism Population ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	Between Groups	3	2.1	88.1 **
	Within Groups	16	0.02	
Microbial Quotient ($\text{mgCmicg}^{-1} \text{ Corg}$)	Between Groups	3	69.4	6.5*
	Within Groups	16	10.6	

***, *, and^{ns} indicate significance at the 1% and 5% probability levels, and non-significance, respectively.

افزایش نشان داد که احتمالاً به دلیل کاهش شدید کربن آلی کل و بالا رفتن سهم نسبی کربن میکروبی است. به طور کلی، فرسایش بادی با تخریب بستر زیستی خاک، فعالیت میکروبی و کارکردهای اکولوژیکی آن را محدود ساخته و پایداری حاصلخیزی و چرخه عناصر غذایی در اکوسیستم‌های سیستم را تهدید می‌کند. شواهد هم‌چنین نشان می‌دهد که این پدیده توانایی میکروارگانیسم‌ها در مشارکت در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و مقابله با تنش‌های محیطی را تضعیف می‌کند (Williams et al., 2025; Kong et al., 2025; Dou et al., 2022). افت فعالیت آنزیم کاتالاز و تنفس پایه، کاهش قدرت جامعه میکروبی در مدیریت تنش‌های اکسیداتیو و حفظ عملکرد زیستی را نشان می‌دهد (Zhao et al., 2025). محدودیت منابع

نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵) نشان داد که شدت فرسایش بادی اثر کاهنده و معناداری بر اغلب ویژگی‌های میکروبی خاک دارد. با افزایش شدت فرسایش، فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس میکروبی (پایه و برانگیخته)، کربن و نیتروژن زیست‌توده و جمعیت میکروارگانیسم‌ها به طور پیوسته کاهش یافت؛ به طوری که خاک‌های بدون فرسایش بالاترین مقادیر و خاک‌های با فرسایش شدید کم‌ترین مقادیر را داشتند. این روند بیانگر افت زیستی خاک در اثر از دست رفتن مواد آلی و ریزدانه‌های حاصلخیز است. نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده در سطوح مختلف فرسایش تغییرات معناداری داشت، اما الگوی مشخصی مشاهده نشد که می‌تواند ناشی از حساسیت بیش‌تر نیتروژن نسبت به کربن باشد. هم‌چنین، سهم میکروبی خاک در شدت‌های بالای فرسایش نسبی

و مواد مغذی از دلایل اصلی اثرات منفی فرسایش بادی بر ویژگی‌های میکروبی است، عاملی که با محدودیت دسترسی به منابع غذایی، کاهش فعالیت متابولیکی و تغییر ترکیب جمعیت باکتریایی، عملکرد میکروارگانیسم‌های خاک را مختل می‌سازد (Chen et al., 2020).

غذایی و رطوبت نیز انعطاف‌پذیری عملکردی میکروارگانیسم‌ها را کاهش می‌دهد (Luo et al., 2025). به‌رغم کاهش تراکم و تنوع میکروبی، سهم آن‌ها در چرخه کربن تغییر چندانی نداشت که بیانگر حفظ نسبی کارکردهای زیستی در شرایط فرسایش است (Miao et al., 2020; Taner et al., 2023). در مجموع، کاهش ماده آلی

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های میکروبی خاک

Table 5. Mean comparison of erosion effects on soil microbial properties

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Catalase Enzyme ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	26.6 ^a	21 ^a	13 ^b	7.6 ^c
Basal Microbial Respiration ($\text{mgCO}_2^{-1} \text{gsoil.day}$)	0.22 ^a	0.17 ^b	0.11 ^c	0.05 ^d
Basal respiration ($\text{mgCO}_2^{-1} \text{gsoil.day}$)	0.46 ^a	0.37 ^b	0.24 ^c	0.11 ^d
Microbial Biomass Carbon (mg kg^{-1})	179 ^a	156.6 ^b	106.3 ^c	39.3 ^d
Microbial Biomass Nitrogen (mg kg^{-1})	18.6 ^a	13.7 ^b	7.3 ^c	3.2 ^d
MBC/MBN (mg kg^{-1})	9.6 ^{ab}	11.4 ^{ab}	14.5 ^{ab}	13 ^{ab}
Microorganism Population ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	2.9 ^a	2.3 ^b	1.5 ^c	1.08 ^d
Microbial Quotient ($\text{mgCmicg}^{-1}\text{Corg}$)	33.4 ^{bc}	33.09 ^c	37.1 ^a	39.1 ^a

Different letters in each row indicate a significant difference ($p < 0.05$).

تغییرات فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک تحت تأثیر فرسایش بادی، پیامدهای گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های خشک دارند. کاهش حاصلخیزی خاک، محدودیت رشد پوشش گیاهی، افت فعالیت‌های میکروبی و کاهش پایداری خاک باعث افزایش شکنندگی اکوسیستم و کاهش توان آن در مقابله با تنش‌های محیطی می‌شود (Řezáčová et al., 2021). این تغییرات هم‌چنین بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و بازده اکوسیستم تأثیر منفی دارند و می‌توانند منجر به فرسایش ثانویه و کاهش کیفیت خاک شوند. در نتیجه، مدیریت فرسایش بادی و حفاظت از خاک در مناطق خشک اهمیت حیاتی دارد. استفاده از پوشش گیاهی مقاوم، تثبیت خاکدانه‌ها و افزایش ماده آلی خاک می‌تواند به کاهش اثرات فرسایش و ارتقای عملکرد میکروبی کمک کند (Liang et al., 2018).

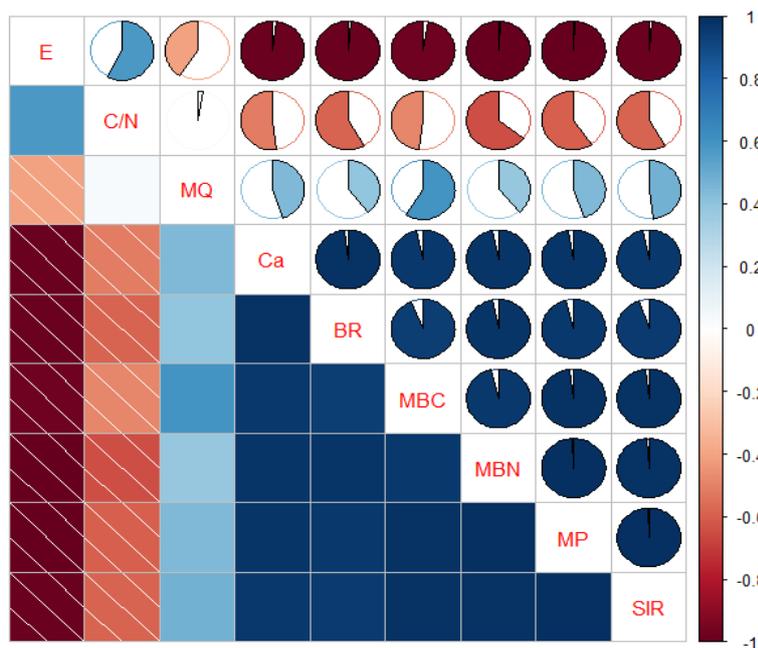
نتایج جدول ۶ نشان‌دهنده روابط قوی بین فرسایش و ویژگی‌های میکروبی خاک است. فرسایش با اغلب شاخص‌های میکروبی مانند آنزیم کاتالاز، تنفس میکروبی پایه، تنفس برانگیخته، کربن میکروبی، نیتروژن میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها همبستگی منفی بسیار قوی (-0.94 تا -0.99) نشان داد. این الگو بیانگر آن است که افزایش فرسایش منجر به کاهش فعالیت میکروبی، ظرفیت تجزیه مواد آلی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها در خاک می‌شود. نسبت کربن به نیتروژن میکروبی (C/N) با فرسایش همبستگی مثبت متوسط (0.58) دارد، که می‌تواند ناشی از کاهش بیش‌تر نیتروژن زیست‌توده نسبت به کربن زیست‌توده در اثر فرسایش باشد. سهم میکروبی خاک با فرسایش همبستگی ضعیف و منفی (-0.41) دارد که بیانگر کاهش نسبی فعالیت میکروبی در مقایسه با کل فرایندهای خاک است (شکل ۳).

جدول ۶- نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های میکروبی خاک

Table 6. Results of Pearson correlation coefficient analysis for soil microbial properties

	E	Ca	MP	SIR	BR	MBC	MBN	C/N	MQ
E	1								
Ca	-0.98	1							
MP	-0.99	0.97	1						
SIR	-0.99	0.97	0.99	1					
BR	-0.98	0.98	0.96	0.95	1				
MBC	-0.97	0.96	0.98	0.98	0.94	1			
MBN	-0.99	0.97	0.99	0.99	0.97	0.96	1		
C/N	0.58	-0.52	-0.59	-0.59	-0.59	-0.48	-0.65	1	
MQ	-0.41	0.45	0.44	0.48	0.39	0.59	0.39	0.03	1

Erosion (E), Catalase enzyme (Ca), Basal microbial respiration (MP), Induced Respiration (SIR), Microorganism population (BR), Microbial Biomass Carbon (MBC), Microbial Biomass Nitrogen (MBN), Microbial Biomass C/N Ratio (C/N), Microbial Quotient (MQ)



شکل ۳. ماتریس همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های میکروبی خاک
Figure 3. Pearson correlation matrix for soil microbial properties

حفاظتی در مناطق خشک را برجسته می‌کند و می‌تواند به طراحی برنامه‌های پایدار کشاورزی و کاهش اثرات منفی فرسایش بادی کمک نماید. پژوهش‌های آینده باید به بررسی تعاملات بین تغییرات فیزیوشیمیایی و میکروبی خاک در مقیاس‌های زمانی طولانی و اثرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و فرسایش بادی بپردازند تا راهبردهای مؤثرتری برای حفاظت از اکوسیستم‌های خشک ارائه شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه زابل (IR-UOZ-) Grant code: GR-8721) برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مرتضی صابری: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ رسول خطیبی:

۴- نتیجه‌گیری

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی جهانی است که تأثیرات عمیقی بر کیفیت خاک، کارکرد اکوسیستم و پایداری محیط‌زیست دارد. این پدیده با حذف لایه‌های سطحی خاک، تغییر بافت، کاهش ماده آلی و انتقال عناصر غذایی، حاصلخیزی خاک را کاهش داده و توان اکوسیستم‌های خشک را در بازسازی و مقابله با تنش‌های محیطی محدود می‌کند (Zhang et al., 2023; Li et al., 2018). یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که شدت فرسایش بادی در دشت سیستان باعث تغییرات چشمگیر در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک شده است. کاهش ماده آلی، تغییر در وزن مخصوص و تخلخل و افت منابع غذایی قابل دسترس، نشان‌دهنده تضعیف ساختار خاک و کاهش پویایی جامعه میکروبی می‌باشند. این نتایج با یافته‌های Zhao et al. (2021)، Qiu et al. (2021)، al. (2025)، Moradi et al. (2024)، Mai et al. (2024)، Sánchez-Moreno et al. (2022) و Sirjani et al. (2024) هم‌خوانی دارد.

مطالعه حاضر نشان داد که فرسایش بادی نه تنها خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر می‌دهد، بلکه فعالیت و پویایی جامعه میکروبی را نیز به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش ماده آلی، تغییر وزن مخصوص و تخلخل، افت عناصر غذایی و کاهش فعالیت میکروبی نشان می‌دهد که فرسایش بادی توان اکوسیستم را در حفظ عملکرد و پایداری زیستی محدود می‌کند. این یافته‌ها اهمیت مدیریت منابع خاک و توسعه راهبردهای

صابری، مرتضی؛ نوری، مصطفی؛ ابراهیمی، مهدیه. (۱۴۰۴). واکنش تنوع میکروبی به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ناشی از فرسایش آبی در حوضه دهکری، استان کرمان. *مخاطرات طبیعی محیطی*. انتشار آنلاین پیش از چاپ، doi: 10.22111/jneh.2025.51723.2110

صابری، مرتضی؛ دهمرده قلعه نو، محمدرضا؛ خطیبی، رسول؛ کریمیان، وحید. (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات فرسایش آبی بر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک در حوضه منزلاب، شهرستان زاهدان. *تحقیقات آب و خاک ایران*. انتشار آنلاین پیش از چاپ doi: 10.22059/ijswr.2025.395713.669946

علی‌اصغرزاده، ناصر (۱۳۹۰). روش‌های آزمایشگاهی در بیولوژی خاک. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تبریز، ۵۴۶ صفحه.

راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ محمدرضا دهمرده قلعه نو: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله

منابع

- اطاعت، جواد، و ورزش، اسماعیل (۱۳۹۰). هیدروپولیتیک هیرمند: دلایل، آثار و پیامدها. *پژوهش‌های جغرافیایی انسانی*، ۸۰(۲)، ۱۹۳-۲۱۲.
- دهقان پور، عنایتی ضمیر، نعیمه، لندی، غفاری، حیدر. (۱۴۰۴). بهبود مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی با تلقیح باکتری و افزودن برخی اصلاح‌کننده‌ها. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، doi: 10.22098/mmws.2025.16806.1561.۳۲۲-۳۰۹،(۲)۵
- Amendments. *Soil and Water Modeling and Management*.5(2), 309-322. doi: ۱۰,۲۲۰۹۸MMWS.2025.16806.1561 [In Persian]
- Diallo, I. D., Tilioua, A., Darraz, C., Alali, A., & Sidibe, D. (2023). Study and analysis of seasonal soil degradation in Lower Guinea and Forest Guinea. *Results in Engineering*, 19, 101381. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101381
- Dou, X., Ma, X., Zhao, C., Li, J., Yan, Y., & Zhu, J. (2022). Risk assessment of soil erosion in Central Asia under global warming. *Catena*, 212, 106056. doi: 10.1016/j.catena.2022.106056
- Etā'at, J., & Varzesh, E. (2011). The Helmand Hydropolitics: Causes, Effects, and Consequences. *Human Geography Research*, 80(2), 193-212. [In Persian]
- Fathizad, H., Ardakani, M.A.H., Heung, B., Sodaiezadeh, H., Rahmani, A., Fathabadi, A., Scholten, T., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2020). Spatio-temporal dynamic of soil quality in the central Iranian desert modeled with machine learning and digital soil assessment techniques. *Ecological Indicators*, 118, 106736. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106736
- Gan, F., Shi, H., Gou, J., Zhang, L., Dai, Q., & Yan, Y. (2024). Responses of soil aggregate stability and soil erosion resistance to different bedrock strata dip and land use types in the karst trough valley of Southwest China. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(3), 684-696. doi: 10.1016/j.iswcr.2023.09.002
- Guo, X., Feng, J., Shi, Z., Zhou, X., Yuan, M., Tao, X., Hale, L., Yuan, T., Wang, J., Qin, Y., & Zhou, J. (2018). Climate warming leads to divergent succession of grassland microbial communities. *Nature Climate Change*, 8(9), 813-818. doi: 10.1038/s41558-018-0254-2
- Iturri, L. A., & Buschiazzo, D. E. (2023). Interactions between wind erosion and soil organic carbon. In *Agricultural Soil Sustainability and Carbon Management* (pp.
- References**
- Acosta-Martinez, V., Van Pelt, S., Moore-Kucera, J., Baddock, M. C., & Zobeck, T. M. (2015). Microbiology of wind-eroded sediments: Current knowledge and future research directions. *Aeolian Research*, 18, 99-113. doi: 10.1016/j.aeolia.2015.06.001
- Ali-Asghar Zad, N. 2006. Laboratory Methods in Soil Biology (Translation). University of Tabriz Publication, Tabriz. [In Persian]
- Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9: 831-871. doi: 10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41
- Bastani, M., Sadeghipour, A., Kamali, N., Zarafshar, M., & Bazoot, S. (2023). How does livestock graze management affect woodland soil health? *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1-8. doi: 10.3389/ffgc.2023.1028149
- Brookes, P.C., A. Landman, G. Pruden and D.S. Jenkinson. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6): 837-842. doi: 10.1016/0038-0717(85)90144-0
- Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Ecological Indicators*, 34, 1-12. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108470
- Chen, Q., Dong, J., Zhu, D., Hu, H., Delgado-Baquerizo, M., Ma, Y., He, J.-Z., & Zhu, Y.-G. (2020). Rare microbial taxa as the major drivers of ecosystem multifunctionality in long-term fertilized soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 141, 107686. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107686
- Dehghanpour, Enayati Zameer, Naeimeh, Lendi, Ghafari, Heydar. (2025). Improving Soil Resistance against Wind Erosion by Bacterial Inoculation and Addition of Some

- 163–179). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-323-95911-7.00005-0
- Kamali, N., Sadeghipour, A., Souri, M., & Mastinu, M. (2022). Variations in soil biological and biochemical indicators under different grazing intensities and seasonal changes. *Land, 11*, 1537. doi: 10.3390/land11091537
- Kheirabadi, H., Mahmoodabadi, M., Jalali, V., & Naghavi, H. (2018). Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. *Geoderma, 323*, 22–30. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.02.042
- Kong, T., Liu, T., Gan, Z., Jin, X., & Xiao, L. (2025). Diversity and Functional Differences in Soil Bacterial Communities in Wind–Water Erosion Crisscross Region Driven by Microbial Agents. *Agronomy, 15*(7), 1734. doi: 10.3390/agronomy15071734
- Li, P., Liu, L., Wang, J., Wang, Z., Wang, X., Bai, Y., & Chen, S. (2018). Wind erosion enhanced by land use changes significantly reduces ecosystem carbon storage and carbon sequestration potentials in semiarid grasslands. *Land Degradation & Development, 29*(11), 3469–3478. doi: 10.1002/ldr.3118
- Liang, Y., Lal, R., Guo, S., Liu, R., & Hu, Y. (2018). Impacts of simulated erosion and soil amendments on greenhouse gas fluxes and maize yield in Miamian soil of central Ohio. *Scientific Reports, 8*(1), 520. doi: 10.1038/s41598-017-18922-6
- Luo, S., Yuan, J., Song, Y., Ren, J., Qi, J., Zhu, M., Feng, Y., Li, M., Wang, B., Li, X., & Song, C. (2025). Elevated salinity decreases microbial communities complexity and carbon, nitrogen and phosphorus metabolism in the Songnen Plain wetlands of China. *Water Research, 276*, 123285. doi: 10.1016/j.watres.2025.123285
- Mai, Z., Chen, Q., Wang, L., Zhang, J., Cheng, H., Su, H., Zhang, S., & Li, J. (2024). Bacterial carbonic anhydrase-induced carbonates mitigate soil erosion in biological soil crusts. *Journal of Environmental Management, 352*, 120085. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120085
- Mandal, D., & Giri, N. (2021). Soil erosion and policy initiatives in India. *Current Science, 120*(6), 1007–1012.
- Mendel, N., Sîretanu, D., Sîretanu, I., Brilman, D. W., & Mugele, F. (2021). Interlayer cation-controlled adsorption of carbon dioxide in anhydrous montmorillonite clay. *The Journal of Physical Chemistry C, 125*(49), 27159–27169. doi: 10.1021/acs.jpcc.1c06746
- Mendel, N., Sîretanu, I., Mugele, F., & Brilman, D. W. W. (2023). Biogas upgrading using cation-exchanged bentonite clay. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 62*(43), 17883–17892. doi: 10.1021/acs.iecr.3c01635
- Miao, L., Wu, L., Sun, X., Li, X., Zhang, J. (2020). Method for solidifying desert sands with enzyme-catalysed mineralization. *Land Degrad. Dev. 31* (11), 1317e1324. doi: 10.1002/ldr.3499
- Moradi HR, Rezaei V, Erfanian M. (2024). Investigation of physicochemical characteristics of soil in badland areas formation. *Researches in Earth Sciences. 15*(3):91–105. doi: 10.48308/esrj.2021.101282.
- Pimentel, D., & Burgess, M. 2013. Soil erosion threatens food production. *Agriculture, 3*, 443–463. doi: 10.3390/agriculture3030443
- Qiu L, Zhang Q, Zhu H, Reich PB, Banerjee S, van der Heijden MG, Wei X. (2021). Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality. *The ISME Journal. 15*(8):2474–2489. doi: 10.1038/s41396-021-00946-4
- Qu, Y., J. Tang, Z. Li, Z. Zhou, J. Wang, S. Wang and Y. Cao. (2020). Soil enzyme activity and microbial metabolic function diversity in soda saline-alkali rice paddy fields of northeast China. *Sustainability, 12*(23): 10095. doi: 10.3390/su122310095
- Řezáčová, V., Czako, A., Stehlík, M., Mayerová, M., Šimon, T., Smatanová, M., & Madaras, M. (2021). Organic fertilization improves soil aggregation through increases in abundance of eubacteria and products of arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientific Reports, 11*(1), 12548. doi: 10.1038/s41598-021-91653-x
- Saberi M, Dahmardeh Ghaleno MR, Khatibi R, Karimian V. (2025). Assessment of the effects of water erosion on changes in soil physical, chemical, and biological properties in the Monzelab watershed, Zahedan County. *Iranian Journal of Soil and Water Research. Advance online publication.* doi: 10.22059/ijswr.2025.395713.669946. [In Persian]
- Saberi M, Nori M, Ebrahimi M. (2025). Microbial diversity response to changes in physical and chemical properties of soil caused by water erosion in the Dehbakari watershed, Kerman province. *Journal of Natural Environmental Hazards. Advance online publication:1–1.* doi: 10.22111/jneh.2025.51723.2110. [In Persian]
- Sánchez-Moreno S, Yuste JC (2022) Forest dieback switches the relationships between microfaunal bacterivore guilds and soil nutrients. *Soil Biol Biochem 172*:108763. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108763
- Schinner F, Öhlinger R, Kandeler E and Margesin R, 2012. *Methods in Soil Biology. Springer Science & Business Media. https://books.google.com/books*
- Schuman GE, Janzen HH, Herrick JE. (2002). Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental*

- Pollution*. 116:391–396. doi: 10.1016/S0269-7491(01)00215-9
- Sirjani, E., Sameni, A., Mahmoodabadi, M., Moosavi, A. A., & Laurent, B. (2024). In-situ wind tunnel experiments to investigate soil erodibility, soil fractionation and wind-blown sediment of semi-arid and arid calcareous soils. *Catena*, 241, 108011. doi: 10.1016/j.catena.2024.108011
- Sun J, Fu B, Zhao W, Liu S, Liu G, Zhou H, et al. (2021). Optimizing grazing exclusion practices to achieve Goal 15 of the sustainable development goals in the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*. 66:1493–1496. doi: 10.1016/j.scib.2021.03.014
- Tanner, S., Ben-Hur, M., Argaman, E., & Katra, I. (2023). The effects of soil properties and aggregation on sensitivity to erosion by water and wind in two Mediterranean soils. *Catena*, 221, 106787. doi: 10.1016/j.catena.2022.106787
- Wang, B. R., An, S. S., Liang, C., Liu, Y., & Kuzyakov, Y. (2021). Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 162, 108422. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108422
- Williams, G., Miller, R., & Deng, S. (2025). Dynamic relationships between microbial community, enzyme activity, and soil properties across global ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 206, 105843. doi: 10.1016/j.apsoil.2024.105843
- Yang, C., Nan, Z., Huo, Y., Gan, N., Xu, L., Zhao, S., & Huang, H. (2024). Research on the mechanical performance of windshield glass for rail vehicles under gravel impact loadings. *Results in Engineering*, 23, 102587. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102587
- Zainuddin, S. N. H., Ariffin, E. H., Taslin, P. N. A., Dong, W. S., Ramli, M. Z., Abdul Maulud, K. N., Awang, N. A., Nadzri, M. I., Ibrahim, M. S. I., & Ratnayake, A. S. (2024). Sand dune restoration as sustainable natural architectural design for coastal protection along seasonal storm-prone beach. *Results in Engineering*, 22, 102149. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102149
- Zhang, X., Pei, G., & Zhang, T. (2023). Erosion effects on soil microbial carbon use efficiency in the Mollisol cropland in northeast China. *Soil Ecology Letters*, 5(4). doi: 10.1007/s42832-023-0176-4
- Zhao, C., Li, Y., Zhou, Z., Wu, R., Su, M., & Song, H. (2025). Simulated wind erosion and local dust deposition affect soil micro-food web by changing resource availability. *Ecological Processes*, 14(1), 7. doi: 10.1186/s13717-024-00574-w
- Zolfaghari, F., Shojaei, S., Khosravi, H., & Bandak, I. (2024). Evaluation of the effect of the mixture of soil textural compounds on the strength of the soil crust: coding and optimization. *Results in Engineering*, 22, 101988. doi: 10.1016/j.rineng.2024.101988.