



Response of Soil Microbial Diversity to Physical and Chemical Changes Caused by Water Erosion: A Case Study of Cheheltan Forest Site, Bam County

Morteza Saberi¹ | Mostafa Nori²

1. Corresponding Author, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: Mortezasaberi@uoz.ac.ir

2. Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: Mostafanori1362@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 7, 2025

Revised: Oct. 21, 2025

Accepted: Nov. 10, 2025

Published online: Jan. 2026

Keywords:

Soil biological properties,

Soil texture,

Organic carbon,

Catalase enzyme,

Soil microbial changes

ABSTRACT

Water erosion is a major factor in decreasing soil quality and fertility in arid and semi-arid ecosystems. This study examined how different levels of water erosion affect the physical, chemical, and microbial properties of soil at Cheheltan Forest Site, Bam County. Soil samples were collected at four erosion levels: no erosion, low, moderate, and severe erosion. Measurements included soil texture, bulk density, moisture, pH, organic and inorganic carbon and nitrogen, organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and potassium, ammonium, and nitrate. Biological indicators such as catalase enzyme activity, microbial carbon and nitrogen stocks, basal microbial respiration, microbial populations, and overall soil microbial contribution were also evaluated. Results showed that as erosion severity increased, organic carbon decreased from 6.6 to 4 g kg⁻¹, total nitrogen from 0.6 to 0.3 g kg⁻¹, and available potassium from 156.3 to 83.28 mg kg⁻¹. Enzyme activity, microbial stocks, respiration, and microbial populations also declined significantly, with soil microbial contribution reaching 0.65 in severely eroded plots. Correlation analysis revealed that biological indices had positive and significant relationships with organic matter, total nitrogen, available phosphorus and potassium, and soil moisture. Conversely, sand percentage was negatively related, while clay and silt percentages showed positive relationships with microbial activity. These findings highlight that water erosion severely compromises the biological stability and function of soil ecosystems by reducing organic matter and nutrients and altering soil texture. Sustainable soil management is crucial to preserve soil fertility and ecological functions in these regions.

Cite this article: Saberi, M., Nori, M. (2025). Response of Soil Microbial Diversity to Physical and Chemical Changes Caused by Water Erosion: A Case Study of Cheheltan Forest Site, Bam County., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (11), 3027-3046. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403696.670019>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403696.670019>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water erosion is particularly severe in arid and semi-arid regions, such as the Chehelton area in Bam city, due to irregular rainfall, steep slopes, and limited vegetation cover. This process significantly alters the physical and chemical properties of the soil by reducing soil depth, decreasing fertility, and transporting nutrients downstream. These changes include a reduction in organic matter, an increase in bulk density, and diminished nutrient availability. Given the high susceptibility of the Chehelton region to water erosion and the scarcity of studies on its natural soils, it is essential to investigate the effects of varying erosion intensities on the soil's physical, chemical, and biological properties. This study aims to analyze changes in soil aggregate stability, organic matter content, nutrient levels, and microbial communities resulting from erosion, in order to elucidate the relationships between soil properties and microbial responses. The findings will provide a scientific foundation for sustainable soil management and the enhancement of ecosystem function in arid and semi-arid areas. The primary hypothesis is that increasing erosion intensity will lead to reduced soil stability, loss of organic carbon, and decreased microbial diversity and activity.

Method

The study was conducted in the Dehbakari watershed, southeast of Bam city, with a semi-arid climate and an altitude of 1951 to 3168 m. The Chehelton forest site was selected as the focus of water erosion, and two working units with similar vegetation cover and a northern slope were identified using digital elevation model and GIS. Random sampling was carried out in two 100-m transects and four erosion intensities (no erosion, low, medium, severe) were investigated in each transect, so that a total of 24 plots and three soil samples were collected from a depth of 0 to 30 cm. The samples were stored for microbial analysis while maintaining the initial moisture content and were prepared for the evaluation of physical and chemical properties after drying. Physicochemical properties included texture, bulk density, moisture, pH, total and inorganic carbon and nitrogen, available phosphorus and potassium, ammonium and nitrate. Microbial indices included catalase enzyme activity, microbial biomass carbon and nitrogen, basal respiration, microbial population and soil microbial fraction were measured. Data were analyzed by one-way analysis of variance and Duncan test at 95% confidence level to investigate the effect of water erosion intensity on soil physical, chemical and microbial properties.

Results

Data analysis showed that water erosion intensity has a significant effect on soil physical, chemical and microbial properties. With increasing erosion intensity, the percentage of sand increased and the amounts of silt and clay decreased, indicating a decrease in soil cohesion and an increase in its sensitivity to movement and erosion. The results showed that with increasing erosion intensity, organic carbon decreased from 6.6 to 4 g kg⁻¹, total nitrogen from 0.6 to 0.3 g kg⁻¹, and available potassium from 156.3 to 28.83 mg kg⁻¹. Enzyme activity, microbial stocks, respiration, and microbial population also decreased significantly, and the soil microbial contribution in severe erosion plots reached 0.65. This indicates a decrease in nutrients and soil capacity to support biological activity. Correlation and PCA analysis showed that organic matter, nutrients, and soil texture are the main factors of biological stability, and the first two components explained more than 98% of the changes caused by erosion. These findings emphasize that water erosion significantly reduces soil biological capacity and fertility by destroying structure, reducing nutrients, and changing environmental conditions.

Conclusions

The present study demonstrates that soil erosion has extensive and multidimensional effects on the physical, chemical, and microbial properties of soil. Increasing erosion intensity alters soil texture by increasing the sand fraction while decreasing silt and clay content, reducing moisture levels, and increasing bulk density, all of which severely degrade the soil's physical quality. Concurrently, the selective removal of topsoil—rich in organic matter and nutrients—leads to declines in organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and potassium, thereby diminishing the soil's capacity to support biological activity and nutrient cycling. Soil biological indicators, including enzyme activity, microbial biomass, basal microbial respiration, and microbial population, are significantly impacted by erosion. The reduction of food resources and organic matter decreases microbial diversity and functionality, limiting the soil's ability to sequester carbon and sustain ecosystem functions. These findings suggest that soil erosion is a multifaceted, cyclical process that simultaneously disrupts the physical, chemical, and biological properties of the soil, ultimately reducing the performance of ecosystems. Therefore, implementing conservation and management strategies, identifying

high-risk areas, and restoring degraded soils are essential to maintaining long-term soil quality and ecosystem performance. Future research should focus on the role of microbial species in response to erosion and their contributions to carbon and nutrient sequestration to inform optimal, science-based conservation strategies.

Author Contributions

Conceptualization, Morteza Saberi; methodology, Morteza Saberi and Mostafa Nori; Software and validation, Morteza Saberi; Investigation and resources, Mostafa Nori; data curation, Morteza Saberi; writing-original draft preparation, Morteza Saberi and Mostafa Nori; writing-review and editing, Morteza Saberi; visualization Mostafa Nori; supervision, project administration and funding acquisition, Morteza Saberi. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct. The study involved only soil sampling and laboratory analysis, without any interaction with humans or animals; hence, ethical approval was not applicable

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

پاسخ تنوع میکروبی خاک به تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از فرسایش آبی: مطالعه موردی سایت جنگلی چهل تن، شهرستان بم

مرتضی صابری^۱ | مصطفی نوری^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mortezasaberi@uoz.ac.ir

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: Mostafanori1362@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرسایش آبی یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت و حاصلخیزی خاک در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک است. در این مطالعه، تأثیر شدت‌های مختلف فرسایش آبی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در سایت جنگلی چهل تن شهرستان بم بررسی شد. نمونه‌برداری خاک در چهار درجه فرسایش شامل بدون فرسایش، فرسایش کم، متوسط و شدید انجام گرفت و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی شامل بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، رطوبت، اسیدیته، کربن و نیتروژن آلی معدنی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، آمونیوم و نیترات اندازه‌گیری شدند. شاخص‌های زیستی شامل آنزیم کاتالاز، ذخایر کربن و نیتروژن میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و سهم میکروبی خاک ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت فرسایش، مقادیر کربن آلی از ۶/۶ به ۱۴ kg ⁻¹ ، نیتروژن کل از ۰/۶ به ۰/۳ kg ⁻¹ و پتاسیم قابل دسترس از ۱۵۶/۳ به ۸۳/۲۸ mg kg ⁻¹ کاهش یافت. فعالیت آنزیمی، ذخایر میکروبی، تنفس و جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز به طور معنی‌داری کاهش یافتند و سهم میکروبی خاک در پلات‌های فرسایش شدید به ۰/۶۵ رسید. تحلیل همبستگی نشان داد که شاخص‌های زیستی رابطه مثبت و معنی‌داری با ماده آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس و رطوبت خاک دارند، در حالی که درصد شن رابطه منفی و درصد رس و سیلت رابطه مثبت با فعالیت میکروبی نشان داد. این یافته‌ها تأکید می‌کند که فرسایش آبی از طریق کاهش مواد آلی، عناصر غذایی و تغییر بافت خاک، پایداری زیستی و عملکرد اکوسیستم خاک را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و مدیریت پایدار خاک برای حفظ حاصلخیزی و کارکردهای اکولوژیکی در این مناطق ضروری است.
واژه‌های کلیدی: خصوصیات بیولوژیکی خاک، بافت خاک، کربن آلی، آنزیم کاتالاز، تغییرات میکروبی خاک.	

استناد: استاد: صابری، مرتضی؛ نوری، مصطفی. (۱۴۰۴). پاسخ تنوع میکروبی خاک به تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از فرسایش آبی: مطالعه موردی سایت جنگلی چهل تن، شهرستان بم، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۱)، ۳۰۴۶-۳۰۲۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403696.670019>



© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403696.670019>

مقدمه

خاک به عنوان یکی از اجزای بنیادی اکوسیستم‌های زمینی، نقشی کلیدی در تولید غذا، حفظ تنوع زیستی، ذخیره‌سازی کربن، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و پایداری اکوسیستم دارد (Mandal et al., 2021). با این حال، فرسایش خاک، به ویژه فرسایش آبی، به عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب تخریب لایه‌های حاصلخیز سطحی خاک و کاهش کیفیت و عملکرد آن می‌شود (Wu et al., 2020; Molla et al., 2022). فرسایش آبی عمدتاً ناشی از برخورد قطرات باران و جریان رواناب سطحی است و ذرات سطحی خاک، که اغلب غنی از کربن آلی، نیتروژن و سایر مواد مغذی هستند، را از محل خود جابه‌جا می‌کند (Plotnikova et al., 2024). این فرآیند نه تنها موجب کاهش عمق خاک و از بین رفتن لایه حاصلخیز می‌شود، بلکه ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک را نیز دگرگون می‌کند و نفوذپذیری، تخلخل و ظرفیت نگهداری آب خاک را کاهش می‌دهد (Yang et al., 2024).

از دست رفتن لایه‌های سطحی خاک اثرات عمیقی بر جامعه میکروبی خاک دارد. میکروارگانیسم‌های خاک، از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و دیگر موجودات ریز، نقش اساسی در تجزیه مواد آلی، تثبیت نیتروژن و بازیافت عناصر مغذی ایفا می‌کنند و فعالیت آن‌ها شاخصی مهم برای پایش کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم است (Qiu et al., 2021). کاهش منابع غذایی و تخریب ساختار خاک ناشی از فرسایش آبی باعث کاهش تنوع و فعالیت این جوامع میکروبی می‌شود و در نتیجه، فعالیت‌های آنزیمی و تنفس میکروبی خاک کاهش یافته و عملکرد چندانگانه خاک، شامل نگهداری آب، تثبیت کربن و بازیافت عناصر غذایی، دچار اختلال می‌گردد (Saleem & Jousset, 2019; Zhang et al., 2023). مطالعات میدانی نشان داده‌اند که در مناطق رسوبی تجمع نسبی مواد مغذی، فعالیت میکروبی و تنوع زیستی نسبت به مناطق فرسایش یافته افزایش می‌یابد، در حالی که مناطق فرسایش یافته با کاهش قابل توجه کربن آلی خاک، نیتروژن کل و فعالیت آنزیمی مواجه هستند (Zhang et al., 2023).

تأثیر فرسایش آبی بر جوامع میکروبی خاک، یکی از مهم‌ترین پیامدهای اکولوژیکی این فرآیند است. کاهش منابع غذایی و تخریب ساختار خاک، فشار شدیدی بر تنوع و فعالیت میکروبی وارد می‌کند و باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند دفسفاتاز، اوره‌آز و کاتالاز می‌شود که نقش مهمی در چرخه‌های کربن، نیتروژن و فسفر دارند (Qiu et al., 2021; Zhang et al., 2023). کاهش فعالیت میکروبی و تغییر ترکیب جامعه میکروبی می‌تواند به طور مستقیم بر عملکرد اکوسیستم تأثیر بگذارد و ظرفیت خاک برای مقابله با تنش‌های محیطی و بازسازی منابع خود را کاهش دهد (Li et al., 2025).

تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیب، تنوع و فراوانی جوامع میکروبی خاک، به شدت وابسته به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است (Sadegi et al., 2023). عواملی مانند اسیدیته، ماده آلی، میزان رطوبت و مواد مغذی از جمله عوامل تأثیرگذار بر ساختار این جوامع می‌باشند. علاوه بر این، گروه‌های میکروبی مختلف مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها و جلبک‌ها، بعنوان شاخص‌های قابل اعتماد برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک شناخته می‌شوند (Qu et al., 2019). این جوامع در تنظیم چرخه مواد مغذی (Gayan et al., 2023)، عملکردهای اکوسیستم (Li et al., 2025) و تجمع کربن آلی (Xu et al., 2023) نقش بسزایی دارند. مطالعه‌ی یانگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که فرسایش خاک تأثیرات منفی چندانگانه‌ای بر ویژگی‌های خاک دارد؛ به طوری که پایداری خاکدانه‌ها کاهش یافته، فعالیت آنزیمی محدود می‌شود و تنوع میکروبی خاک دچار افت می‌گردد. این تغییرات موجب کاهش عملکرد چندانگانه خاک و تضعیف توان اکولوژیکی آن می‌شوند، که اهمیت مدیریت و پایش فرسایش در حفاظت از کارکردهای اکوسیستم را برجسته می‌کند (Yang et al., 2024). در همین راستا، کیو و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی اثر فرسایش آبی بر تنوع میکروبی خاک در استان هیلونگجیانگ چین گزارش کردند که پلات‌های تحت فرسایش دارای شبکه‌های میکروبی کمتر پیچیده، تعداد گونه‌های کمتر و کاهش همبستگی بین گونه‌ها نسبت به پلات‌های بدون فرسایش هستند. همچنین، فرسایش خاک ترکیب جامعه میکروبی را تغییر داده و فراوانی نسبی گروه‌های غالب میکروبی مانند Proteobacteria، Bacteroidetes و Gemmatimonadetes را کاهش می‌دهد (Qiu et al., 2021). مطالعات صابری و همکاران (۲۰۲۵) در آبخیز منزلاب، شهرستان زاهدان، نشان داد که افزایش شدت فرسایش آبی منجر به کاهش قابل توجه کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم، فسفر و تخلخل خاک می‌شود، در حالی که برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند اسیدیته، هدایت الکتریکی، میزان آهک و چگالی ظاهری خاک افزایش می‌یابند. این تغییرات در خواص خاک اثرات مستقیم بر شاخص‌های زیستی آن داشته و موجب کاهش فعالیت میکروبی و افت کیفیت زیستی خاک می‌گردند (Sabeti et al., 2025). تغییرات فیزیکوشیمیایی خاک همچنین با کاهش تنوع عملکردی و فعالیت‌های زیستی میکروبی همراه است و ظرفیت خاک برای استفاده از منابع کربنی و عملکرد اکوسیستم را محدود می‌کند (Yang et al., 2024).



به‌طور مشابه، فعالیت زیستی و ذخایر کربن میکروبی در لایه‌های سطحی و عمقی خاک به شدت تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته و کاهش این منابع نشان‌دهنده محدود شدن توان بازیابی و نگهداری کربن در خاک است (Zhang et al., 2023).

مطالعات محدودی به بررسی اثر فرسایش آبی بر ویژگی‌های خاک و جوامع میکروبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران پرداخته‌اند. از جمله می‌توان به تحقیق صابری و همکاران (۲۰۲۵) در آبخیز منزلاب، شهرستان زاهدان، دهمرده قلعه نو و صابری (۲۰۲۵) در حوزه آبخیز سرباز اشاره کرد که تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. سایر مطالعات مرتبط عمدتاً در خارج از ایران و در اکوسیستم‌های خشک یا نیمه‌خشک دیگر انجام شده است، مانند مطالعه کیو و همکاران (۲۰۲۱) در استان هیلونگجیانگ چین و تحقیقات یانگ و همکاران (۲۰۲۴) در مناطق خشک، که بیشتر بر فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک متمرکز بوده‌اند. با این حال، مطالعات جامع و تلفیقی در اکوسیستم طبیعی خشک ایران، به ویژه منطقه چهل تن بم، که هم‌زمان تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و پاسخ‌های میکروبی را بررسی کنند، تاکنون انجام نشده است.

فرسایش آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند منطقه چهل تن در شهرستان بم، به دلیل بارش‌های نامنظم، شیب‌های تند و پوشش گیاهی پراکنده، بسیار شدید است و موجب کاهش عمق خاک، افت حاصلخیزی و انتقال مواد مغذی به پایین‌دست می‌شود. این فرآیند تغییرات قابل‌توجهی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ایجاد کرده و از جمله باعث کاهش مواد آلی، افزایش چگالی ظاهری و محدود شدن دسترسی به عناصر غذایی می‌شود. با توجه به حساسیت بالای منطقه چهل تن به فرسایش آبی و خلأ مطالعات جامع در خاک‌های طبیعی این ناحیه، بررسی اثر شدت‌های مختلف فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ضروری به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش تحلیل هم‌زمان تغییرات پایداری خاکدانه‌ها، مواد آلی، عناصر مغذی و شاخص‌های زیستی و میکروبی خاک در شدت‌های مختلف فرسایش آبی است تا روابط میان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و پاسخ‌های میکروبی خاک آشکار شود. فرضیه اصلی مطالعه آن است که با افزایش شدت فرسایش، پایداری خاک کاهش یافته، میزان کربن آلی و عناصر مغذی کاهش می‌یابد و در نتیجه تنوع و فعالیت میکروبی خاک افت می‌کند. نوآوری این تحقیق در رویکرد تلفیقی آن نهفته است؛ به گونه‌ای که برای نخستین بار در یک اکوسیستم طبیعی خشک ایران، تغییرات هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در شدت‌های مختلف فرسایش آبی بررسی می‌شود. علاوه بر این، استفاده از شاخص‌های زیستی و میکروبی، رویکردی نو برای ارزیابی اثر فرسایش بر عملکرد و کیفیت خاک ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنای علمی برای مدیریت پایدار خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد.

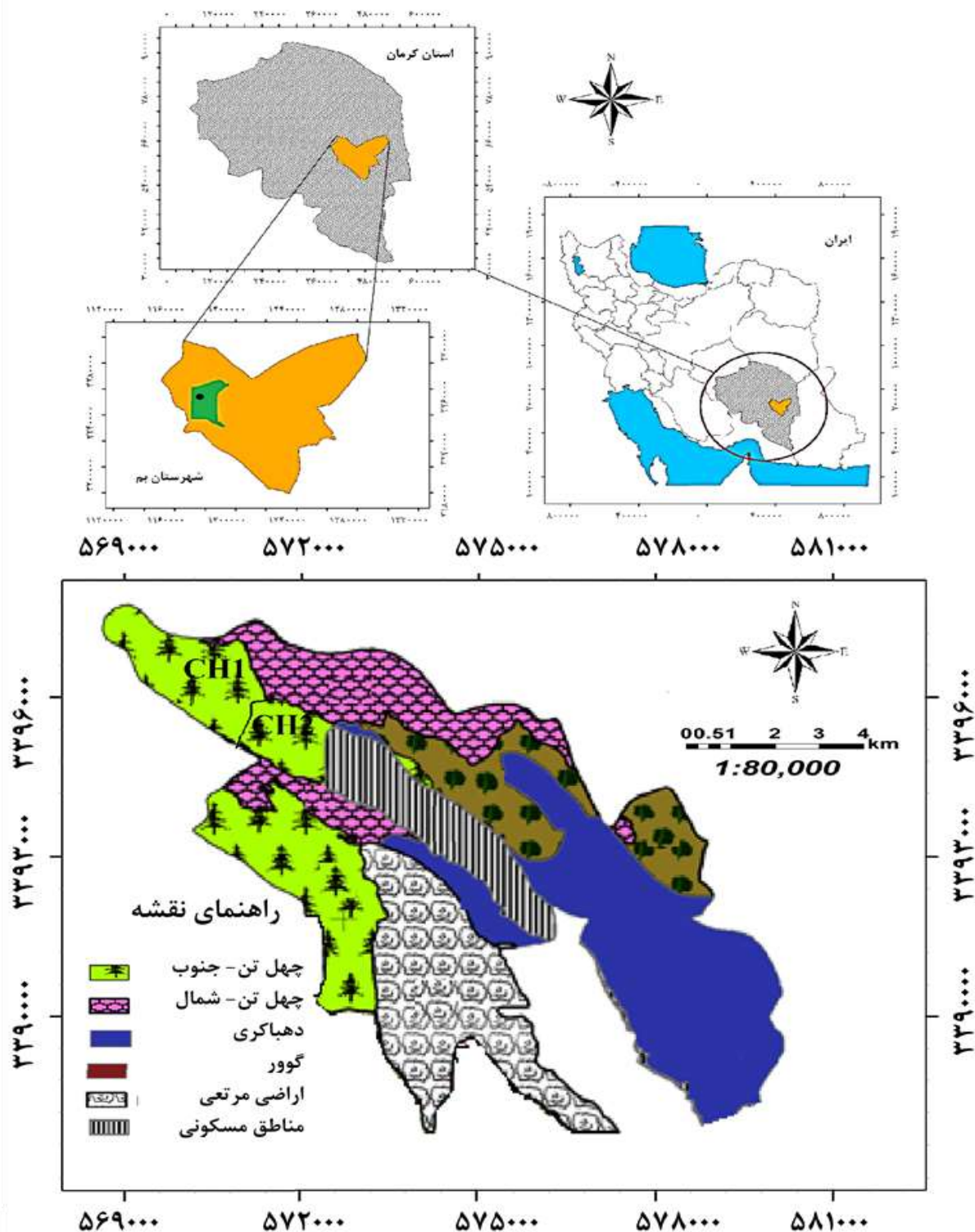
روش‌شناسی پژوه

محدوده مطالعاتی در حوزه آبخیز ده‌بکری (۵۷ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی) در جنوب‌شرقی استان کرمان و بین شهرهای بم و جیرفت واقع شده است. مساحت این حوزه حدود ۸۲/۰۲ کیلومترمربع است و ارتفاع آن از ۱۹۵۱ تا ۳۱۶۸ متر از سطح دریا متغیر است. اقلیم منطقه نیمه‌خشک و بر اساس شاخص دوارتن طبقه‌بندی شده و میانگین بارندگی سالانه آن ۲۲۰ میلی‌متر است. شرایط کوهستانی باعث شده آب و هوای تابستان معتدل و زمستان سرد باشد، رطوبت نسبی بین ۴۵ درصد (مرداد) تا ۹۳ درصد (بهمن) و متوسط دمای ماهانه بین ۵- تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد متغیر باشد.

برای بررسی پاسخ تنوع میکروبی خاک به تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از فرسایش آبی، سایت جنگلی چهل تن به عنوان یکی از کانون‌های اصلی فرسایش خاک در این حوزه انتخاب شد (Pakzad et al., 2021). منطقه جنگلی چهل تن در بخش غربی آبخیز ده‌بکری قرار دارد که از پوشش گیاهی متنوعی شامل گونه‌های سوزنی برگ و پهن برگ مانند سرو کوهی (*Juniperus excelsa*)، ارس (*Juniperus polycarpus*)، بنه (*Pistacia atlantica*)، داغداغان (*Celtis australis*)، کیکم (*Acer monspessulanum*) برخوردار است. به منظور تحلیل دقیق اثر فرسایش بر خاک و ویژگی‌های میکروبی آن، ابتدا نقشه واحدهای کاری تهیه شد (شکل ۱). این نقشه با تلفیق داده‌های ارتفاع، شیب و جهت مستخرج از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری SRTM در محیط ArcGIS 10 تولید شد و پهنه‌های نسبتاً همگن را مشخص کرد (جدول ۱). بر اساس این نقشه، دو واحد کاری در بخش جنوبی جنگل چهل تن (CH_1 و CH_2) انتخاب شدند که به دلیل همجواری مکانی، پوشش گیاهی غالب یکسان و جهت شیب مشابه (شمالی)، امکان نمونه‌برداری دقیق و مقایسه پاسخ‌های میکروبی خاک تحت شدت‌های مختلف فرسایش فراهم شد. این طراحی مطالعه پایه‌ای مناسب برای بررسی روابط میان تغییرات فیزیکوشیمیایی خاک و تنوع میکروبی در اکوسیستم‌های جنگلی تحت فرسایش آبی فراهم می‌کند.

جدول ۱. مشخصات کلی واحدهای کاری مورد مطالعه

واحدکاری	طبقه شیب	جهت	طبقه ارتفاع	مساحت (هکتار)	درصد مساحت	سایت
CH1	۰-۲۵٪	North	۱۵۰۰-۲۱۰۰	۱۹۶/۷	۲/۵	چهل تن
CH2	۲۵-۶۵٪	North	۲۱۰۰-۲۵۰۰	۱۲۲/۲۳۶	۱/۶	



شکل ۱- موقعیت حوزه مورد مطالعه در استان و کشور



نمونه‌برداری خاک

این مطالعه بر اساس طرح کاملاً تصادفی انجام شد. برای نمونه‌برداری، در هر واحد کاری یک ترانسکت به صورت تصادفی در امتداد شیب نواحی کوهستانی انتخاب شد و در مجموع دو ترانسکت مورد بررسی قرار گرفتند. طول هر ترانسکت با توجه به شیب‌های مورد مطالعه ۱۰۰ متر تعیین شد. بر اساس مشاهدات میدانی، فرسایش آبی غالب در این منطقه عمدتاً به اشکال سطحی و شیاری مشاهده شد. با توجه به اینکه شدت فرسایش معمولاً با درجه شیب و فاصله از رأس شیب افزایش می‌یابد، چهار درجه فرسایش شامل بدون فرسایش، فرسایش کم، فرسایش متوسط و فرسایش شدید در هر ترانسکت انتخاب شد که بر اساس نقشه‌های فرسایش و رسوب منطقه تعیین گردید. فرض شد که شرایط اولیه خاک در تمام پلات‌ها مشابه بوده و تغییرات مشاهده‌شده در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک ناشی از اثر فرسایش است. نمونه‌برداری در پلات‌های ۱×۱ متر مربع انجام شد، به گونه‌ای که برای هر درجه فرسایش سه پلات در طول هر ترانسکت در نظر گرفته شد و فاصله تقریبی بین پلات‌ها ۱۰-۱۵ متر بود. در مجموع ۲۴ پلات نمونه‌برداری گردید (۲ ترانسکت × ۴ درجه فرسایش × ۳ پلات). از هر پلات، سه نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد تا امکان ارزیابی جامع خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک فراهم شود. بلافاصله پس از برداشت، نمونه‌ها به دو بخش تقسیم شدند: بخشی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبی، بدون الک کردن و با حفظ رطوبت اولیه در ظروف دربسته و در مجاورت یخ خشک به آزمایشگاه منتقل شد و تا زمان آزمایش در یخچال نگهداری شد؛ بخش دیگر برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک دو میلی‌متری مورد استفاده قرار گرفت (Bastani et al., 2023; Kamali et al., 2022).

خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

در این مطالعه، ۱۲ پارامتر به‌عنوان خصوصیات چند عملکردی خاک مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات خاک شامل بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، محتوی رطوبت، اسیدیته، کربن آلی، نیتروژن کل، آمونیوم (NH_4^+)، نیترات (NO_3)، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، کربن آلی معدنی و نیتروژن آلی معدنی بودند. تمامی این متغیرها اطلاعاتی در مورد طیف وسیعی از فرآیندهای خاک از جمله در دسترس بودن مواد مغذی، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و بهره‌وری میکروبی ارائه می‌دهند.

بافت خاک (درصد ذرات شن، سیلت، رس) به روش آنالیز پراش لیزر (Wang et al., 2022) تعیین شد. وزن مخصوص ظاهری خاک به‌عنوان پارامتر موثر در توزیع محتوای کربن با استفاده از مغزه‌های خاک دست نخورده با به کارگیری سیلندرهایی با قطر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (Barnard et al., 2025). رطوبت خاک به‌عنوان مقدار آب موجود در خاک در زمان نمونه‌برداری تعریف شد و یکی از شاخص‌های کلیدی فیزیکی برای ارزیابی ظرفیت نگهداری آب و نفوذپذیری خاک محسوب می‌شود. محتوی رطوبت با روش وزنی تعیین شد: نمونه‌های خاک تازه وزن‌کشی شده و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا وزن ثابت خشک شدند. اختلاف وزن نمونه‌ها قبل و بعد از خشک شدن، به‌عنوان درصد وزن خشک خاک گزارش شد (Qu et al., 2020). اسیدیته خاک در عصاره خاک: آب (۱:۵) با pH متر اندازه‌گیری شد. کربن آلی (SOC) و نیتروژن کل (TN) به‌ترتیب با روش اکسیداسیون دی کرومات والکی و بلاک (Walkley & Black, 1934) و روش کج‌دال (Kjeldahl, 1883) تعیین شدند. آمونیوم (NH_4^+) و نیترات (NO_3^-)، با استفاده از یک آنالیز جریان پیوسته با دستگاه AutoAnalyzer پس از استخراج با ۲ مول بر لیتر KCL اندازه‌گیری شد (Qu et al., 2020). فسفر قابل دسترس (AP) خاک با روش اولسن تعیین شد. پتاسیم قابل دسترس با استات آمونیوم خنثی استخراج شد و توسط طیف‌سنجی جذب اتمی^۳ اندازه‌گیری شد (Kaur et al., 2024). برای تعیین کربن آلی معدنی، نمونه‌های خاک مرطوب (معادل ۱۵ گرم خاک خشک شده در آون) با ۶۰ میلی‌لیتر K_2SO_4 نیم مولار (نسبت خاک به محلول ۱:۴) به مدت یک ساعت عصاره‌گیری شد. پس از سانتریفیوژ کردن در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۵ دقیقه، مایع رویی از طریق یک فیلتر غشایی ۰/۴۵ میلی‌متری فیلتر شد و در دستگاه آنالیزر، مقدار کربن آلی کل اندازه‌گیری شد (Tian et al., 2015).

خصوصیات زیستی خاک

خصوصیات زیستی مورد مطالعه در این تحقیق شامل فعالیت آنزیمی خاک (آنزیم کاتالاز)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده

1 Mineralized organic carbon

2 Mineralized organic nitrogen

3 Atomic Absorption Spectrometry

4 Microbial biomass carbon

میکروبی^۱ (MBN)، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه بودند. به منظور مطالعه تاثیر فرسایش خاک بر فعالیت‌های آنزیمی خاک، آنزیم کاتالاز خاک با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به وسیله اسپکتروفوتومتر UV با طول موج تقریباً ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. کربن زیتوده میکروبی به روش گازدهی با کلروفرم^۲ استخراج اندازه‌گیری شد (Brookes et al., 1985). برای محاسبه این خصوصیت زیستی از رابطه یک استفاده گردید (Qu et al., 2020):

$$MBC = \frac{Ec}{K_{Ec}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

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). جمعیت میکروارگانیسم‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی^۳ (MPN) محاسبه شد. تنفس میکروبی از جمع‌آوری دی اکسیدکربن رها شده در هیدروکسید سدیم و انجام تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Anderson, 1982). همچنین با تقسیم کربن آلی زیتوده میکروبی به کربن آلی خاک سهم میکروبی خاک تعیین شد (Martens, 1995).

آنالیز داده‌ها

داده‌های مربوط به خصوصیات خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ تحت تجزیه واریانس یک‌طرفه (ANOVA) قرار گرفتند. جهت مقایسه میانگین‌ها، آزمون دانکن با سطح اطمینان ۹۵ درصد به کار گرفته شد.

یافته‌های پژوهش

تاثیر فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۲) که شدت فرسایش خاک به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک قرار گرفته است. درصد شن، رس، سیلت، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت خاک همگی در بین تیمارها تفاوت معنی‌دار داشتند که نشان‌دهنده حساسیت بالای این ویژگی‌ها نسبت به تغییر شرایط فرسایشی است. افزایش درصد شن با کاهش انسجام و پیوستگی ذرات همراه بوده و خاک را مستعد جابجایی و فرسایش می‌کند. همچنین، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت خاک نقش مهمی در نگهداری آب و تراکم خاک دارند و به‌طور مستقیم شدت فرسایش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین، تغییرات بافت و ویژگی‌های فیزیکی خاک از عوامل کلیدی در شدت فرسایش به شمار می‌روند و مدیریت مؤثر این ویژگی‌ها می‌تواند راهکاری کارآمد برای کاهش خسارت‌های ناشی از فرسایش باشد.

جدول ۲. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

خصوصیات خاک	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
رس (%)	بین گروه‌ها	۸۸/۳	۹۷/۰۳**
	درون گروه‌ها	۰/۹۱	
شن (%)	بین گروه‌ها	۲۰۵/۰۶	۲۲۸/۴**
	درون گروه‌ها	۰/۹	
سیلت (%)	بین گروه‌ها	۸۹/۰۱	۹۴/۶۹**
	درون گروه‌ها	۰/۹۴	
وزن مخصوص ظاهری (gcm-3)	بین گروه‌ها	۰/۲۲	۲۲/۰**
	درون گروه‌ها	۰/۰۱	
رطوبت (%)	بین گروه‌ها	۴/۹۹	۰/۴۸**
	درون گروه‌ها	۱۰/۳۶	

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که تغییر درجه فرسایش خاک با تغییر محسوسی در خصوصیات فیزیکی آن همراه است. در شرایط بدون فرسایش، خاک دارای درصد بالاتر رس (۴۰٪) و رطوبت بیشتر (۳۰/۱۲٪) بوده و بافت آن از نوع رسی است که معمولاً

1 Microbial biomass nitrogen

2 Chloroform fumigation

3 Most Probable Number



موجب افزایش انسجام ذرات و مقاومت در برابر جداشدگی می‌شود. با افزایش شدت فرسایش، درصد رس و رطوبت کاهش یافته و در مقابل درصد شن افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در خاک‌های با فرسایش متوسط بیشترین مقدار شن (۵۱٪) ثبت شده است. همچنین، درصد سیلت در شرایط کم‌فرسایش بالاترین مقدار (۳۳٪) را نشان می‌دهد، اما در فرسایش متوسط به حداقل (۱۹٪) می‌رسد که بیانگر حساسیت بالای این جزء در فرایندهای فرسایشی است. از نظر وزن مخصوص ظاهری نیز با افزایش شدت فرسایش، مقادیر بالاتری مشاهده شده که نشان‌دهنده تراکم بیشتر و کاهش نفوذپذیری است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که فرسایش باعث تغییر محسوس در بافت خاک از رسی به لوم رسی و لوم رسی شنی شده و کاهش مواد ریزدانه و رطوبت، زمینه را برای ناپایداری بیشتر و شدت بالاتر فرسایش فراهم می‌سازد (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

خصوصیات خاک	درجه فرسایش			
	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
درصد رس	۴۰±۰/۰۳ ^a	۳۰±۰/۰۲ ^b	۳۰±۰/۰۲ ^b	۲۸±۰/۰۳ ^c
درصد شن	۳۲±۰/۰۳ ^d	۳۸±۰/۰۲ ^c	۵۱±۰/۰۲ ^a	۴۵±۰/۰۲ ^b
درصد سیلت	۲۸±۰/۰۳ ^b	۳۲±۰/۰۲ ^a	۱۹±۰/۰۲ ^d	۲۷±۰/۰۳ ^c
وزن مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)	۱/۳±۰/۰۱ ^a	۱/۸±۰/۰۱ ^b	۱/۸±۰/۰۱ ^b	۱/۹۰±۰/۰۳ ^b
درصد رطوبت	۱۲/۳۰±۰/۰۳ ^a	۹/۱۶±۰/۰۲ ^b	۸/۲۵±۰/۰۳ ^c	۶/۲۱±۰/۰۳ ^d
بافت خاک	رسی لومی	رسی لومی	شنی رسی لومی	شنی رسی لومی

حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در هر سایت می‌باشد (p<0.05). داده‌ها ± اشتباه از معیار

تاثیر فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که شدت فرسایش تأثیر متفاوتی بر خصوصیات شیمیایی خاک دارد. تغییرات اسیدیته و کربن آلی معدنی در بین تیمارهای مختلف معنی‌دار نبود و بیانگر پایداری نسبی این شاخص‌ها در برابر فرسایش است. در مقابل، نیتروژن آلی معدنی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس در سطح احتمال یک درصد به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر شدت فرسایش قرار گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد که فرسایش با انتقال و حذف مواد آلی و عناصر غذایی، منجر به افت شدید حاصلخیزی خاک می‌شود. همچنین، غلظت یون‌های معدنی آمونیوم و نترات نیز در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار داشتند که می‌تواند ناشی از ناپایداری چرخه نیتروژن و کاهش فعالیت میکروبی در خاک‌های فرسایش‌یافته باشد. به‌طور کلی، یافته‌ها تأیید می‌کنند که افزایش شدت فرسایش با کاهش منابع کربن و نیتروژن و افت دسترسی به عناصر غذایی همراه بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در تضعیف کیفیت و پایداری شیمیایی خاک ایفا می‌کند.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که شدت فرسایش اثر معنی‌داری بر اغلب خصوصیات شیمیایی خاک در سایت جنگلی چهل تن دارد. اسیدیته و کربن آلی معدنی در بین سطوح مختلف فرسایش تفاوت قابل توجهی نشان ندادند و نسبتاً پایدار باقی ماندند. در مقابل، نیتروژن آلی معدنی در سطوح کم، متوسط و شدید نسبت به خاک بدون فرسایش کاهش معنی‌داری داشت. همچنین، کربن آلی و نیتروژن کل روند کاهشی مشخصی را با افزایش شدت فرسایش نشان دادند به‌طوری‌که در خاک‌های با فرسایش شدید به کمترین مقدار رسیدند. فسفر و پتاسیم قابل دسترس نیز به شدت تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته و در تیمار فرسایش شدید افت چشمگیری نسبت به خاک دست‌نخورده داشتند. نتایج نشان داد که با افزایش شدت فرسایش، مقدار آمونیوم (NH₄⁺) کاهش یافت، زیرا این یون به لایه‌های سطحی خاک جذب شده و همراه با ذرات خاک فرسایش یافته از محل خارج می‌شود. در مقابل، نترات (NO₃⁻) به دلیل عدم جذب قوی توسط خاک، قابلیت حرکت و شست‌وشو دارد و در سطوح فرسایش متوسط و شدید افزایش نسبی مشاهده شد، که ممکن است ناشی از تجزیه سریع‌تر مواد آلی و آزاد شدن نیتروژن معدنی باشد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر فرسایش آبی بر چرخه نیتروژن و حاصلخیزی خاک‌های جنگلی منطقه چهل تن است.

تاثیر فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

نتایج جدول ۶ نشان داد که شدت فرسایش اثر بسیار معنی‌داری بر تمامی خصوصیات میکروبی خاک دارد. فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط

فرسایش کاهش یافت که بیانگر تضعیف توانایی خاک در خنثی سازی ترکیبات اکسیدکننده و کاهش قدرت دفاعی میکروبی است. همچنین کربن و نیتروژن زی توده میکروبی در خاک های دچار فرسایش به طور چشمگیری کاهش پیدا کردند که نشان دهنده افت ذخایر غذایی و محدود شدن فعالیت میکروارگانیسم ها می باشد. کاهش تنفس میکروبی پایه و جمعیت میکروارگانیسم ها نیز نشان می دهد که فرسایش، کمیت و پویایی جامعه میکروبی را تحت تأثیر منفی قرار داده است. علاوه بر این، سهم میکروبی خاک نیز در سطوح بالاتر فرسایش کمتر شد که حاکی از کاهش کارایی میکروارگانیسم ها در استفاده از کربن آلی است. در مجموع، این نتایج بیانگر آن است که شدت فرسایش با تغییر در شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، محیط زیست میکروارگانیسم ها را نامساعد ساخته و توان زیستی و چرخه های حیاتی خاک را به طور جدی تضعیف می کند.

جدول ۴. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

خصوصیات خاک	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
اسیدیته	بین گروه ها	۰/۲۶	۱۰۳/۸ ^{ns}
	درون گروه ها	۰/۰۰۳	
کربن آلی معدنی (mg kg ⁻¹)	بین گروه ها	۰/۰۵	۱۹/۷۶ ^{ns}
	درون گروه ها	۰/۰۰۳	
نیتروژن آلی معدنی (mg kg ⁻¹)	بین گروه ها	۰/۱۸	۷۳/۲۴*
	درون گروه ها	۰/۰۰۲	
کربن آلی (g kg ⁻¹)	بین گروه ها	۴/۶۹	۴۶۹۶/۱**
	درون گروه ها	۰/۰۰۱	
نیتروژن کل (g kg ⁻¹)	بین گروه ها	۰/۰۹	۹۲۲/۷**
	درون گروه ها	۰/۰۰	
فسفر قابل دسترس (g kg ⁻¹)	بین گروه ها	۰/۰۱	۱۰۲/۸**
	درون گروه ها	۰/۰۰	
پتاسیم قابل دسترس (g kg ⁻¹)	بین گروه ها	۳۵۳۹/۰۴	۱۳۷۴۳۸۴/۹**
	درون گروه ها	۰/۰۰	
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	بین گروه ها	۰/۶۴	۶۴۵۴/۰*
	درون گروه ها	۰/۰۰	
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	بین گروه ها	۰/۱۵	۱۵۸۴/۷*
	درون گروه ها	۰/۰۰	

** و * به ترتیب معنی داری در سطح احتمال یک، پنج درصد و ns عدم معنی داری

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

خصوصیات خاک	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
اسیدیته	۶/۸۰±۰/۰۳ ^a	۶/۱۶±۰/۰۳ ^a	۶/۲۳±۰/۰۲ ^a	۶/۲۳±۰/۰۳ ^a
کربن آلی معدنی (mg kg ⁻¹)	۲/۳۰±۰/۰۱ ^a	۲/۱۱±۰/۰۱ ^a	۲/۰۴±۰/۰۱ ^a	۲/۰۱±۰/۰۳ ^a
نیتروژن آلی معدنی (mg kg ⁻¹)	۲/۷۰±۰/۰۱ ^a	۲/۱۵±۰/۰۲ ^b	۲/۲۶±۰/۰۲ ^b	۲/۲۱±۰/۰۳ ^b
کربن آلی (g kg ⁻¹)	۶/۶۰±۰/۰۳ ^a	۴/۱۶±۰/۰۳ ^b	۴/۱۱±۰/۰۳ ^b	۴/۰۰±۰/۰۳ ^c
نیتروژن کل (g kg ⁻¹)	۰/۶۰±۰/۰۱ ^a	۰/۵۶±۰/۰۱ ^b	۰/۴۴±۰/۰۱ ^c	۰/۳۱±۰/۰۱ ^d
فسفر قابل دسترس (g kg ⁻¹)	۰/۳۰±۰/۰۲ ^a	۰/۲۶±۰/۰۲ ^b	۰/۲۰±۰/۰۱ ^c	۰/۱۷±۰/۰۱ ^d
پتاسیم قابل دسترس (g kg ⁻¹)	۱۵۶/۳۰±۸/۷۱ ^a	۱۳۰/۱۳±۸/۱۲ ^b	۹۰/۵۴±۶/۳۳ ^c	۸۳/۲۸±۶/۴۵ ^d
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	۴/۳۲±۰/۰۲ ^b	۴/۰۸±۰/۰۲ ^b	۵/۱۱±۰/۰۲ ^a	۴/۲۱±۰/۰۲ ^b
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	۱/۶۴±۰/۰۳ ^a	۱/۶۷±۰/۰۳ ^a	۱/۳۴±۰/۰۲ ^b	۱/۲۰±۰/۰۳ ^b

حروف متفاوت در هر ردیف نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر سایت می باشد (p<0.05). داده ها ± اشتباه از معیار



جدول ۶. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

خصوصیات خاک	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
آنزیم کاتالاز ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	بین گروه‌ها ۳	۲۵۸/۷	۳۸۶/۷**
	درون گروه‌ها ۲۰	۰/۶۶	
کربن زیتوده میکروبی (mg/kg)	بین گروه‌ها ۳	۸۲۱۳/۴	۸۲۹۶/۳**
	درون گروه‌ها ۲۰	۰/۹۹	
نیتروژن زیتوده میکروبی (mg/kg)	بین گروه‌ها ۳	۳/۲۵	۳۵/۱۳**
	درون گروه‌ها ۲۰	۰/۰۹۲	
تنفس میکروبی پایه ($\text{mgCO}_2/\text{gsoil.day}$)	بین گروه‌ها ۳	۰/۰۲۲	۳۳۲/۸**
	درون گروه‌ها ۲۰	۰/۰۰۰	
جمعیت میکروارگانیسم‌ها ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	بین گروه‌ها ۳	۴/۲۸	۴۲۸۷۵/۰**
	درون گروه‌ها ۲۰	۰/۰۰۰	
سهم میکروبی خاک ($\text{mgCmicg}^{-1}\text{Corg}$)	بین گروه‌ها ۳	۲/۵۹	۶۴/۷**
	درون گروه‌ها ۲۰	۰/۰۴	

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که افزایش شدت فرسایش به‌طور معنی‌داری موجب کاهش تمامی شاخص‌های زیستی خاک شده است. در شرایط بدون فرسایش، بالاترین فعالیت آنزیم کاتالاز ($36/3$)، کربن ($78/1$) و نیتروژن زی‌توده میکروبی ($5/3$)، تنفس میکروبی پایه ($0/37$)، جمعیت میکروارگانیسم‌ها ($2/8$) و سهم میکروبی خاک ($2/82$) مشاهده شد که بیانگر پویایی و سلامت بالای سیستم زیستی خاک در این شرایط است. با افزایش شدت فرسایش، این مقادیر به‌طور پیوسته کاهش یافتند، به‌طوری‌که در خاک‌های با فرسایش شدید، فعالیت آنزیمی، ذخایر کربن و نیتروژن میکروبی، نرخ تنفس و تراکم میکروارگانیسم‌ها به کمترین مقدار رسید. کاهش سهم میکروبی خاک در فرسایش شدید ($0/65$) نیز نشان‌دهنده افت کارایی میکروارگانیسم‌ها در بهره‌برداری از کربن آلی می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شدت فرسایش با تغییر شرایط زیست‌محیطی خاک (مانند کاهش مواد آلی و رطوبت)، زیست‌توده و فعالیت میکروبی را به‌شدت تضعیف کرده و نقش اساسی در کاهش کیفیت و حاصلخیزی زیستی خاک ایفا می‌کند (جدول ۷).

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

خصوصیات خاک	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
آنزیم کاتالاز ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	$36/3 \pm 0/5^a$	$35/0 \pm 1/0^a$	$26/0 \pm 1/0^b$	$16/3 \pm 0/5^c$
کربن زیتوده میکروبی (mg/kg)	$78/1 \pm 0/1^a$	$50/9 \pm 0/1^b$	$30/7 \pm 0/1^c$	$19/2 \pm 0/1^d$
نیتروژن زیتوده میکروبی (mg/kg)	$5/3 \pm 0/5^a$	$3/4 \pm 0/1^b$	$3/3 \pm 0/1^b$	$3/0 \pm 0/05^b$
تنفس میکروبی پایه ($\text{mgCO}_2/\text{gsoil.day}$)	$0/37 \pm 0/1^a$	$0/33 \pm 0/05^b$	$0/30 \pm 0/1^c$	$0/17 \pm 0/05^d$
جمعیت میکروارگانیسم‌ها ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	$2/8 \pm 0/1^a$	$1/5 \pm 0/1^b$	$0/4 \pm 0/1^c$	$0/2 \pm 0/1^d$
سهم میکروبی خاک ($\text{mgCmicg}^{-1}\text{Corg}$)	$2/82 \pm 0/1^a$	$1/83 \pm 0/03^b$	$1/19 \pm 0/1^c$	$0/65 \pm 0/1^d$

حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در هر سایت می‌باشد ($p < 0.05$). داده‌ها $\pm$ اشتباه از معیار

همبستگی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک

نتایج ماتریس همبستگی نشان می‌دهد که شاخص‌های میکروبی خاک در سایت جنگلی چهل تن ارتباط نزدیکی با خصوصیات فیزیکوشیمیایی دارند. در این میان، فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس میکروبی و سهم میکروبی، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با ماده کربن آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب و رطوبت خاک نشان دادند. به‌طوری‌که این ویژگی‌ها مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده پایداری زیستی خاک هستند. در مقابل، درصد شن با تمامی شاخص‌های زیستی رابطه منفی معنی‌دار داشت، در حالی که درصد رس و سیلت همبستگی مثبت و قوی نشان دادند که بیانگر نقش بافت خاک در پایداری زیست‌توده و فعالیت میکروبی است. وزن مخصوص ظاهری نیز همبستگی مثبت معنی‌داری با شاخص‌های زیستی داشت که نشان‌دهنده اثر غیرمستقیم تراکم بر پویایی میکروبی است. از سوی دیگر، نترات (NO_3^-) همبستگی مثبت و معنی‌داری با شاخص‌های زیستی داشت، در حالی که آمونیوم

(NH₄⁺) غالباً فاقد ارتباط معنی‌دار یا دارای همبستگی منفی بود، که نشان‌دهنده تفاوت نقش گونه‌های معدنی نیتروژن در فعالیت میکروبی می‌باشد. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که کیفیت زیستی خاک بیش از هر چیز تحت تأثیر ماده آلی، عناصر غذایی و بافت خاک قرار دارد و فرسایش از طریق تغییر این عوامل می‌تواند فعالیت زیستی و حاصلخیزی خاک را به شدت دگرگون سازد (جدول ۸).

جدول ۸. ماتریس همبستگی شاخص‌های میکروبی با خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در سایت جنگلی چهل تن

	pH	Mosture	Cm	Nm	OC	TN	AP	AK	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Clay	Sand	Silt	BD
Catalase	۰/۴۸*	۰/۸۹**	۰/۷۸**	۰/۴۹*	۰/۶۰**	۱**	۰/۹۳**	۰/۸۷**	n.s. ۰/۱۱	۰/۹۴**	۰/۶۸**	-۰/۶۴**	n.s. ۰/۲۹	۰/۷۲**
MBC	۰/۸۰**	۰/۹۸**	۰/۹۷**	۰/۷۸**	۰/۸۸**	۰/۸۸**	۰/۹۸**	۰/۹۸**	-۰/۳۴*	۰/۸۷**	۰/۹۱**	-۰/۸۷**	n.s. ۰/۴۱	۰/۹۲**
MBN	۰/۶۰**	۰/۹۱**	۰/۸۸**	۰/۵۷**	۰/۷۳**	۰/۹۲**	۰/۹۹**	۰/۹۸**	-۰/۴۴*	۰/۹۷**	۰/۷۶**	-۰/۸۷**	۰/۵۶**	۰/۷۸**
MP	۰/۵۵**	۰/۹۲**	۰/۸۲**	۰/۵۶**	۰/۶۶**	۰/۹۹**	۰/۹۴**	۰/۹۰**	n.s. ۰/۱۲	۰/۹۴**	۰/۷۴**	-۰/۶۷**	n.s. ۰/۲۸	۰/۷۷**
BR	۰/۸۳**	۰/۹۶**	۰/۹۸**	۰/۷۹**	۰/۸۹**	۰/۸۲**	۰/۹۷**	۰/۹۹**	-۰/۴۴*	۰/۸۵**	۰/۹۱**	-۰/۹۲**	* ۰/۴۸	۰/۹۲**
MQ	۰/۸۷**	۰/۹۸**	۰/۹۶**	۰/۷۶**	۰/۸۶**	۰/۹۰**	۰/۹۹**	۰/۹۸**	n.s. ۰/۳۲	۰/۸۹**	۰/۹۰**	-۰/۸۵**	* ۰/۴۰	۰/۹۱**

آنزیم کاتالاز (Catalase)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBC)، جمعیت میکروبی (MP)، تنفس میکروبی پایه (MR)، سهم میکروبی (MQ)، (** معنی‌دار در سطح یک درصد، * معنی‌دار در سطح پنج درصد، n.s. غیرمعنی‌دار)

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در جدول ۹ نشان می‌دهد که دو مؤلفه نخست بیشترین نقش را در تبیین تغییرات ناشی از فرسایش در سایت جنگلی چهل تن داشته‌اند. مؤلفه اول با مقدار ویژه ۶۰۱۶/۳۳ حدود ۹۶/۴۶ درصد از واریانس کل را توضیح داد که بیانگر اهمیت بسیار بالای این محور در تبیین تغییرات خصوصیات خاک است. مؤلفه دوم نیز با مقدار ویژه ۱۵۰/۷۵ حدود ۲/۴۱ درصد از واریانس را پوشش داد و همراه با مؤلفه اول توانست نزدیک به ۹۹ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توضیح دهد. مؤلفه سوم سهم بسیار اندکی (۱/۱۲۳ درصد) در واریانس داشت و سایر مؤلفه‌ها عملاً نقشی در تبیین تغییرات نشان ندادند. این نتایج نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از تغییرات مربوط به عوامل مؤثر در فرسایش خاک تنها با دو مؤلفه اصلی قابل توجیه است و این دو محور می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های کلیدی در شناسایی و تفسیر فرآیندهای فرسایشی و عوامل مؤثر بر پایداری خاک در این سایت به کار گرفته شوند.

جدول ۹. عوامل مؤثر در فرسایش در سایت جنگلی چهل تن-آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

مؤلفه	مقدار ویژه	واریانس (درصد)	واریانس تجمعی (درصد)	Broken-stick Eigenvalue
۱	۶۰۱۶/۳۳	۹۶/۴۶	۹۶/۴۶	۱۰۸۲/۶۹
۲	۱۵۰/۷۵	۲/۴۱	۹۸/۸۷۷	۷۸۵/۶۸
۳	۷۰/۰۱۹	۱/۱۲۳	۱۰۰	۶۳۷/۱۸۲
۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۵۳۸/۱۸۱
۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۴۶۳/۹۲۹
۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۴۰۴/۵۲۸
۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۳۵۵/۰۲۸
۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۳۱۲/۵۹۸
۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۲۷۵/۴۷۳
۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۲۴۲/۴۷۲

بر اساس نتایج جدول ۱۰، مؤلفه‌های اصلی استخراج‌شده از آنالیز PCA نشان می‌دهند که مهم‌ترین متغیرهای محیطی مرتبط با فرسایش در سایت جنگلی چهل تن به‌طور متفاوتی در هر محور تبیین می‌شوند. در محور اول، بیشترین همبستگی منفی با پتاسیم قابل جذب، کربن زی‌توده میکروبی، فعالیت آنزیم کاتالاز و درصد رس مشاهده شد که بیانگر تأثیر شدید این ویژگی‌ها بر شکل‌گیری تغییرات اصلی در خاک است. در محور دوم، بیشترین همبستگی مثبت با درصد شن و رطوبت خاک دیده می‌شود، در حالی که سیلت همبستگی منفی قوی با این مؤلفه دارد. بنابراین این محور بیشتر نمایانگر نقش بافت خاک در کنترل فرآیند فرسایش است. محور سوم سهم کمتری در تبیین تغییرات دارد اما نشان می‌دهد که برخی خصوصیات شیمیایی از جمله کربن آلی خاک و نیتروژن کل ارتباط بیشتری با آن دارند. به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که ترکیب ویژگی‌های زیستی (مانند فعالیت میکروبی و آنزیمی) همراه با عوامل شیمیایی و فیزیکی



(به‌ویژه بافت و عناصر غذایی) ساختار اصلی تغییرات ناشی از فرسایش را تشکیل می‌دهند و دو محور اول می‌توانند به عنوان شاخص‌های کلیدی برای تبیین پویایی خاک و اثر فرسایش مورد استفاده قرار گیرند.

جدول ۱۰. همبستگی متغیرهای محیطی در سایت جنگلی چهل تن با مؤلفه‌های اصلی در آنالیز PCA

متغیر	مؤلفه (محور)		
	اول	دوم	سوم
pH	-۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۸۳	۰/۰۳۸۸
Moisture	-۰/۰۵۴۲	۰/۰۹۸۵	۰/۰۴۴۳
Cm	-۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۷۱
Nm	-۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۰۲	۰/۰۳۳۳
OC	-۰/۰۲۳۷	۰/۰۲۹۶	۰/۱۳۲۱
TN	-۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۶۸	-۰/۰۱۵۳
TP	-۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۷۰	۰/۰۱۳۲
AP	-۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۱۲
AK	-۰/۷۶۵۸	-۰/۲۴۶۱	-۰/۱۳۶۳
NH ₄ ⁺	۰/۰۰۴۶	۰/۰۶۰۱	-۰/۰۰۵۷
NO ₃ ⁻	-۰/۰۰۴۷	-۰/۰۰۱۴	-۰/۰۱۹۵
Clay	-۰/۱۰۵۸	۰/۱۸۹۱	۰/۴۶۷۲
Sand	۰/۱۶۶۸۰	۰/۴۵۳۲	-۰/۲۴۳۹
Silt	-۰/۰۶۲۲	-۰/۶۴۲۳	-۰/۲۳۳۲
BD	-۰/۰۱۶۶۶	۰/۰۳۲۵	۰/۰۶۴۹
Catalase	-۰/۱۸۷۷	۰/۳۶۹۰	-۰/۷۳۲۶
MBC	-۰/۵۷۲۴	۰/۳۶۵۵	۰/۲۸۴۳
MBN	-۰/۰۴۹۸	-۰/۰۱۰۱	-۰/۰۹۴۸
MP	-۰/۰۲۴۷	-۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۷۶
BR	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۰	-۰/۰۰۴۶
MQ	-۰/۰۲۰۲	۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۳۲

بحث

در پژوهش حاضر، برای نخستین بار در منطقه جنگلی چهل تن، اثر شدت‌های مختلف فرسایش آبی بر سه بعد اصلی کیفیت خاک شامل: ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی، به صورت یکپارچه بررسی شد. برخلاف اغلب مطالعات پیشین که تنها به یک یا دو جنبه از تغییرات خاک پرداخته‌اند، نتایج این تحقیق نشان داد که فرسایش آبی فرآیندی زنجیره‌ای است که از طریق تغییر هم‌زمان در ساختار فیزیکی و ترکیب شیمیایی، سبب تضعیف فعالیت‌های زیستی و میکروبی می‌شود. که با یافته‌های مطالعات پیشین همسو است (Sensoy, 2024; Yang et al., 2024; Kanianska et al., 2024). با این وجود، اثرات فرسایش خاک بر جوامع میکروبی و فعالیت‌های زیستی خاک تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Qu et al., 2020).

اثر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

پژوهش حاضر نشان داد که فرسایش آبی تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. با افزایش شدت فرسایش، درصد شن افزایش و مقادیر سیلت و رس کاهش یافت، که نشان‌دهنده جدایش انتخابی ذرات ریز و سبک‌تر توسط فرسایش است، در حالی که ذرات درشت‌تر مانند شن به دلیل جرم بیشتر در سطح خاک باقی می‌مانند (Li et al., 2015). کاهش ذرات ریز و رس که نقش پیونددهنده و تثبیت‌کننده خاکدانه‌ها را دارند، موجب تضعیف ساختار خاک، کاهش تخلخل و ظرفیت نگهداری آب، افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش نفوذپذیری می‌شود (Plotnikova et al., 2024). این تغییرات فیزیکی مستقیماً بر تهویه خاک، رشد ریشه گیاهان و فعالیت میکروارگانیسم‌ها تأثیرگذار است (Asghari & Arkhazloo, 2020). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که خاک به‌طور طبیعی شکننده و تخلخل آن پایین است، اثرات فرسایش شدیدتر بوده و حذف ذرات ریز و ماده آلی موجب افزایش شکنندگی خاک و حساسیت آن به

فرسایش بیشتر می‌شود (Mandal & Giri, 2021). از منظر اکولوژیکی، این تغییرات فیزیکی می‌توانند زنجیره‌ای از اختلالات شیمیایی و زیستی را ایجاد کرده و ظرفیت خاک در حفظ عملکردهای اکوسیستم را کاهش دهند. تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک نه تنها ساختار و عملکرد آن را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه پیامدهای غیرمستقیمی نیز بر فرآیندهای زیستی برجای می‌گذارد (Iqbal et al., 2025). شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که در شرایط فرسایش شدید، تنوع و فعالیت میکروبی خاک به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد، موضوعی که بیانگر افت توان زیستی و اختلال در چرخه مواد آلی و عناصر غذایی است (Qiu et al., 2021). بنابراین، تغییر در بافت، سازمان خاکدانه‌ها و میزان تخلخل می‌تواند زنجیره‌ای از ناپایداری‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی ایجاد کند که در نهایت، پایداری و کارکرد اکوسیستم خاک را به‌طور جدی تهدید می‌سازد (Dong et al., 2024).

اثر فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که فرسایش خاک به‌طور چشمگیری بر افت کیفیت شیمیایی آن اثرگذار است. در شرایط شدت بالای فرسایش، مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل، نیتروژن آلی معدنی و نیز فسفر و پتاسیم قابل دسترس به‌طور معناداری کاهش یافتند. این روند بیانگر آن است که تشدید فرسایش نه تنها سبب افت مواد آلی و عناصر غذایی کلیدی می‌شود، بلکه ظرفیت حاصلخیزی و پایداری خاک در اکوسیستم مطالعه‌شده را نیز تضعیف می‌کند. این نتایج با تحقیقات پیشین همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که فرسایش آبی اغلب منجر به جابجایی و از بین رفتن لایه سطحی خاک می‌شود، لایه‌ای که بیشترین غلظت مواد آلی و عناصر غذایی ضروری را در خود جای داده است (Wang et al., 2021; Mandal et al., 2023).

این کاهش عمدتاً ناشی از حذف انتخابی خاک سطحی غنی از مواد آلی و عناصر غذایی و رسوب آن در نواحی پایین‌دست است (Moradi et al., 2024). افت ماده آلی نه تنها ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی را کاهش می‌دهد (Sun et al., 2021)، بلکه چرخه‌های تغذیه‌ای و فعالیت میکروبی خاک را نیز مختل می‌سازد (Banerjee et al., 2020). کاهش نیتروژن به‌عنوان عنصر اساسی چرخه‌های زیستی خاک و رشد گیاه، بهره‌وری اکوسیستم و پایداری خاک را به‌شدت تضعیف می‌کند، زیرا دسترسی به عناصر غذایی حیاتی مستقیماً بر رشد گیاه و عملکرد اکولوژیک اثرگذار است (Nabiollahi et al., 2018). کاهش فسفر و پتاسیم قابل دسترس نیز از دیگر پیامدهای فرسایش است. این عناصر مهم از طریق شستشو و حذف خاک سطحی کاهش یافته و ظرفیت خاک برای تأمین نیازهای غذایی گیاهان را کاهش می‌دهند (Mandal et al., 2021). ماده آلی نقش مهمی در تثبیت و حفظ این عناصر غذایی در خاک دارد و کاهش آن با تخریب ساختار خاک، عملکرد این عناصر را محدود می‌سازد (Moradi et al., 2024).

ثبات نسبی اسیدیته خاک تحت سطوح مختلف فرسایش احتمالاً ناشی از ویژگی‌های ذاتی خاک و شرایط محیطی منطقه است. هرچند فرسایش در برخی مطالعات موجب کاهش pH شده است، اثر آن بسته به بافت خاک، محتوای کلسیم، پوشش گیاهی و میزان بارش ممکن است محدود یا غیرمشهود باقی بماند (Lal & Bruce, 1999). این یافته نشان می‌دهد که تعامل پیچیده عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک می‌تواند تغییرات اسیدیته را تحت تأثیر فرسایش مهار کند (Kaihura et al., 1999). بر اساس نتایج پژوهش حاضر، شدت فرسایش خاک تأثیر قابل توجهی بر چرخه نیتروژن دارد. در خاک‌های با فرسایش متوسط و شدید، میزان نترات (NO_3^-) افزایش و آمونیوم (NH_4^+) کاهش یافته است. این تغییرات نشان‌دهنده آزادسازی سریع نیتروژن از ماده آلی، فعالیت بالاتر نیتریفیکاسیون و کاهش جذب گیاهی است که تعادل بین معدنی‌سازی، نیتریفیکاسیون و شستشوی نیتروژن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Schoof et al., 2025). حفظ لایه سطحی خاک برای پایداری چرخه نیتروژن و جلوگیری از خروج نترات از اکوسیستم ضروری است (Yao et al., 2025). در کل، فرسایش خاک نه تنها ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی را تغییر می‌دهد، بلکه فرآیندهای زیستی نیتروژن را مختل کرده و تعادل چرخه آن را برهم می‌زند. بنابراین، مدیریت موثر خاک برای حفظ پایداری اکوسیستم ضروری است.

اثر فرسایش بر ویژگی‌های میکروبی خاک

براساس نتایج پژوهش حاضر، شدت فرسایش تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های میکروبی خاک دارد. تمام شاخص‌های زیستی شامل فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس پایه میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و سهم میکروبی خاک، به‌طور معناداری تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده حساسیت بالای جوامع میکروبی نسبت به تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از فرسایش است. با افزایش شدت فرسایش، تأثیر این پارامترها به‌طور تدریجی تشدید شد، که این الگو با نتایج گزارش‌شده توسط سایر محققان همخوانی دارد (Seitz et al., 2022; Zhang et al., 2024; Zhao et al., 2023; Soltani Toularoud & Asghari, 2021). کاهش

ویژگی‌های زیستی خاک عمدتاً ناشی از افت ماده آلی و عناصر مغذی است، که موجب کاهش تنوع و کارایی جوامع باکتریایی می‌شود. محدود شدن دسترسی به منابع غذایی و تغییرات متابولیسی در ترکیب جمعیت باکتری‌ها، عملکرد میکروارگانیسم‌ها را کاهش داده و نقش آن‌ها در حفظ سلامت و پایداری خاک را تضعیف می‌کند (Banerjee et al., 2020).

فعالیت آنزیم کاتالاز، به‌عنوان شاخصی از ظرفیت اکسیداتیو و عملکرد میکروبی خاک، در خاک‌های بدون فرسایش و با فرسایش اندک بالاترین مقادیر را نشان داد و با افزایش شدت فرسایش به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت، که بیانگر کاهش کارکردهای دفاعی و تنفسی میکروارگانیسم‌ها در خاک‌های فرسایش‌یافته است (Kirkels et al., 2014; Feng et al., 2019). این روند نشان می‌دهد که ماده آلی و عناصر غذایی خاک نقش کلیدی در تحریک فعالیت آنزیم کاتالاز و تسهیل فرآیند معدنی‌سازی مواد آلی ایفا می‌کنند (De Nijs & Cammeraat, 2020). نتایج نشان داد که فرسایش منجر به کاهش قابل‌توجه کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی و کاهش جمعیت میکروارگانیسم‌ها می‌شود. این تغییرات به کاهش منابع غذایی، تخلخل و رطوبت خاک منجر شده و ظرفیت ذخیره و بازیافت نیتروژن توسط میکروارگانیسم‌ها را کاهش می‌دهد. در نتیجه، توان زیستی خاک افت کرده و شرایط زیستی آن تخریب می‌شود. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان‌دهنده تأثیرات منفی فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک هستند (Qiu et al., 2021; Bruni et al., 2025; Tang et al., 2023). سهم میکروبی که نسبت کربن میکروبی به کربن کل خاک را نشان می‌دهد، کاهش قابل ملاحظه‌ای در شدت فرسایش بالا دارد که بیانگر کاهش نقش میکروارگانیسم‌ها در تثبیت کربن و چرخه کربن خاک است (Zhang et al., 2023). در مقابل، مناطق رسوبی حاصل از فرسایش آبی، نسبت به سایر نواحی فرسایش‌یافته، فعالیت زیستی و آنزیمی بالاتری از خود نشان می‌دهند. این امر ناشی از انتقال ذرات ریز رس و مواد آلی توسط جریان‌های فرسایشی است که موجب تجمع خاک با بافت ریزدانه و محتوای آلی بالاتر در این مناطق می‌شود. چنین شرایطی نه‌تنها فعالیت آنزیم‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه به پایداری کربن و تقویت فرآیندهای اکوسیستمی خاک کمک می‌کند، که اهمیت ویژه‌ای در حفظ عملکرد و سلامت اکوسیستم‌های خاکی مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (Zhang et al., 2024). از سوی دیگر، وزن مخصوص کمتر خاک و بهبود تهویه خاک در سایت‌های بدون فرسایش شرایط مناسبی برای فعالیت، رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌های هوازی فراهم می‌کند (Asghari & Arkhazloo, 2020). در مقابل، افزایش وزن مخصوص ظاهری و کاهش ماده آلی در خاک‌های فرسایش‌یافته باعث افزایش هدایت حرارتی و کاهش ظرفیت گرمایی خاک می‌شود، که به نوسانات دمایی روزانه و فصلی شدیدتر منجر می‌گردد (Qiu et al., 2021). این تغییرات حرارتی، به‌طور غیرمستقیم موجب کاهش تنوع و کارایی میکروبی خاک می‌شوند، زیرا بسیاری از میکروب‌های خاک به تغییرات دمایی موضعی حساس هستند (Guo et al., 2022). در نهایت، کاهش کیفیت خاک ناشی از فرسایش در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که به‌طور طبیعی مستعد فرسایش و تخریب هستند، شدت بیشتری دارد؛ این موضوع نیز توسط مطالعات پیشین مورد تأیید قرار گرفته است (Mandal & Giri, 2021).

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که مهم‌ترین متغیرهای مرتبط با شدت فرسایش در سایت جنگلی چهل‌تن شامل پتاسیم قابل جذب، کربن زی‌توده میکروبی، فعالیت آنزیم کاتالاز و درصد رس بودند که همگی با محور اول همبستگی منفی داشتند. این الگو بیانگر آن است که افزایش شدت فرسایش موجب کاهش عناصر غذایی، افت فعالیت‌های زیستی و تخریب ساختار خاک‌های ریزبافت می‌شود. کاهش پتاسیم و شاخص‌های زیستی نظیر کربن زی‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم کاتالاز نشان‌دهنده کاهش حاصلخیزی و ظرفیت میکروبی خاک در اثر از بین رفتن لایه سطحی غنی از ماده آلی است. محور دوم با همبستگی مثبت نسبت به درصد شن و رطوبت و همبستگی منفی با سیلت، نقش تعیین‌کننده بافت خاک را در کنترل فرسایش نشان می‌دهد. افزایش ذرات درشت‌دانه و کاهش سیلت در خاک‌های فرسایش‌یافته باعث افت پایداری خاکدانه‌ها، کاهش نگهداشت رطوبت و تضعیف فعالیت میکروبی می‌شود. محور سوم نیز ارتباط بیشتری با کربن آلی و نیتروژن کل دارد که اهمیت ویژگی‌های شیمیایی را در حفظ پایداری و چرخه مواد مغذی خاک نشان می‌دهد.

به‌طور کلی، نتایج PCA بیانگر آن است که ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به‌صورت هم‌زمان و در تعامل با یکدیگر نسبت به فرسایش واکنش نشان می‌دهند و دو محور نخست می‌توانند شاخص مناسبی برای تبیین پویایی و شدت فرسایش باشند. از سوی دیگر، فعالیت آنزیمی خاک رابطه نزدیکی با ذرات ریز رس و ماده آلی دارد، زیرا این اجزا بستر مناسبی برای تثبیت و پایداری آنزیم‌ها فراهم می‌کنند (Daunorras et al., 2024). در نتیجه، در خاک‌های بدون فرسایش که دارای مقدار بیشتری ماده آلی و رس هستند، فعالیت آنزیمی و میکروبی بالاتر بوده و فرآیندهای معدنی‌سازی و تثبیت کربن به‌طور موثرتری انجام می‌شود؛ در حالی که در خاک‌های فرسایش‌یافته این کارکردها تضعیف می‌گردد (Shi et al., 2011).

نتیجه گیری کلی

پژوهش حاضر با هدف بررسی همزمان اثر شدت‌های مختلف فرسایش آبی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در اکوسیستم طبیعی خشک منطقه چهل تن انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش شدت فرسایش موجب تغییر آشکار در بافت خاک، افزایش درصد شن، کاهش رس و سیلت، و افزایش جرم مخصوص ظاهری شد که بیانگر کاهش پایداری و کیفیت فیزیکی خاک است. این تغییرات فیزیکی، به‌ویژه حذف انتخابی لایه‌های سطحی غنی از مواد آلی، منجر به افت قابل توجه کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس گردید و چرخه عناصر غذایی را مختل کرد. در راستای فرضیه پژوهش، شاخص‌های زیستی و میکروبی خاک نیز کاهش معنی‌داری نشان دادند؛ به‌گونه‌ای که کاهش منابع آلی و مواد مغذی سبب افت زی‌توده میکروبی، تنفس پایه و فعالیت آنزیمی شد و در نهایت، تنوع و پویایی جوامع میکروبی محدود گردید. این یافته‌ها فرضیه اصلی مطالعه را تأیید می‌کنند که افزایش شدت فرسایش باعث تضعیف ساختار فیزیکی خاک، کاهش حاصلخیزی و افت تنوع میکروبی می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که فرسایش آبی فرآیندی چندبعدی است که از طریق برهم‌زدن تعامل میان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی، پایداری اکوسیستم را تهدید می‌کند. بر این اساس، اجرای اقدامات مدیریتی برای کنترل فرسایش، بازسازی خاک‌های تخریب‌شده و تقویت ماده آلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است. مطالعات آینده باید بر شناسایی سازوکارهای میکروبی در تثبیت عناصر غذایی و ترمیم خاک متمرکز شوند تا راهکارهای حفاظتی مؤثرتر توسعه یابد.

REFERENCES

- Anderson, J. P. E. (1982). Soil respiration. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (pp. 831–871). ASA and SSSA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>
- Asghari, S. H., & Arkhazloo, H. S. (2020). Effects of land use and slope on soil physical, mechanical and hydraulic quality in Heyran neck, Ardabil Province. *Journal of Environmental Erosion Research*, 37, 79–91. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1399.10.1.6.7>
- Banerjee, S., Misra, A., Sar, A., Pal, S., Chaudhury, S., & Dam, B. (2020). Poor nutrient availability in opencast coalmine influences microbial community composition and diversity in exposed and underground soil profiles. *Applied Soil Ecology*, 152, 103544. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103544>
- Barnard, J. H., Edeh, J. A., van Rensburg, L. D., & du Preez, C. C. (2025). Calibration of an apparent electrical conductivity sensor using capacitance probes for determining soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 89(1), e20799. <https://doi.org/10.1002/saj2.20799>
- 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, Article 1188971. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1028149>
- Brookes, P. C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D. S. (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. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
- Bruni, E., Yuste, J. C., Menichetti, L., Flores, O., Guasconi, D., Guenet, B., ... & Manzoni, S. (2025). Microbial biomass—not diversity—drives soil carbon and nitrogen mineralization in Spanish holm oak ecosystems. *Geoderma*, 460, 117408. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117408>
- Dahmardeh ghaleno, M. R. and Saberi, M. (2025). Assessment of the Role of Water Erosion Intensity in Soil Property Alterations within the Framework of Sustainable Land Management in Arid Regions (Case Study: Sarbaz Watershed, Southeastern Iran). (e728859). *Desert Management*, In press. doi: [10.22034/jdmal.2025.2067347.1509](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2067347.1509)
- Daunoras, J., Kačergius, A., & Gudiukaitė, R. (2024). Role of soil microbiota enzymes in soil health and activity changes depending on climate change and the type of soil ecosystem. *Biology*, 13(2), 85. <https://doi.org/10.3390/biology13020085>
- De Nijs, E. A., & Cammeraat, E. L. (2020). The stability and fate of Soil Organic Carbon during the transport phase of soil erosion. *Earth-Science Reviews*, 201, 103067. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103067>
- Dong, L., Yao, X., Zhang, H., Deng, Y., Hu, T., Baquerizo, M. D., & Wang, W. (2024). Microbial diversity is especially important for supporting soil function in low nitrogen ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 194, 109442. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109442>
- Feng, C., Ma, Y., Jin, X., Wang, Z., Ma, Y., Fu, S., & Chen, H. Y. (2019). Soil enzyme activities increase following restoration of degraded subtropical forests. *Geoderma*, 351, 180–187.



<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.006>

- Gayán, A., Borah, P., Nath, D., & Kataki, R. (2023). Soil microbial diversity, soil health and agricultural sustainability. In *Sustainable Agriculture and the Environment* (pp. 107–126). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00006-3>
- Guo, Y., Wu, J., & Yu, Y. (2022). Differential response of soil microbial community structure in coal mining areas during different ecological restoration processes. *Processes*, 10(10), 2013. <https://doi.org/10.3390/pr10102013>
- Iqbal, S., Begum, F., Nguchu, B. A., Claver, U. P., & Shaw, P. (2025). The invisible architects: microbial communities and their transformative role in soil health and global climate changes. *Environmental Microbiome*, 20(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00694-6>
- Kaihura, F. B. S., Kullaya, I. K., Kilasara, M., Aune, J. B., Singh, B. R., & Lal, R. (1999). Soil quality effects of accelerated erosion and management systems in three eco-regions of Tanzania. *Soil and Tillage Research*, 53(1), 59-70. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00077-X)
- 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. <https://doi.org/10.3390/land11091537>
- Kanianska, R., Kizeková, M., Jančová, L., Čunderlík, J., & Dugátová, Z. (2024). Effect of soil erosion on soil and plant properties with a consequence on related ecosystem services. *Sustainability*, 16(16), 7037. <https://doi.org/10.3390/su16167037>
- Kaur, S., Chandel, S., Singh, K., Singh, D., & Singh, V. K. (2024). Comparative Assessment of Extractants for Available Potassium in Calcareous Soil of Punjab. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(13), 2009-2027. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2336577>
- Kirkels, F. M. S. A., Cammeraat, L. H. N., & Kuhn, J. (2014). The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes: A review of different concepts. *Geomorphology*, 226, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.023>
- Kjeldahl, J. 1883. Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körpern. *Zeitschrift Für Analytische Chemie*, 22(1): 366–382. <https://doi.org/10.1007/BF01338151>
- Lal, R., & Bruce, J. P. (1999). The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science & Policy*, 2(2), 177-185. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(99\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(99)00012-X)
- Li, S., Shi, Z., Liu, W. H., Li, W., Liang, G., & Liu, K. (2025). Long-term Kentucky bluegrass cultivation enhances soil quality and microbial communities on the Qinghai-Tibet Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1510676. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1510676>
- Li, Z., Xiao, H., Tang, Z., Huang, J., Nie, X., Huang, B., Ma, W., Lu, Y., & Zeng, G. (2015). Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of southern China. *European Journal of Soil Biology*, 71, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.003>
- Mandal, D., & Giri, N. (2021). Soil erosion and policy initiatives in India. *Current Science*, 120(6), 1007–1012. <https://www.jstor.org/stable/27310319>
- Mandal, D., Chandrakala, M., Alam, N. M., & Mandal, U. (2021). Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India. *CATENA*, 204, 105440. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105440>
- Mandal, D., Patra, S., Sharma, N. K., Alam, N. M., Jana, C., & Lal, R. (2023). Impacts of soil erosion on soil quality and agricultural sustainability in the north western Himalayan region of India. *Sustainability*, 15, 5430. <https://doi.org/10.3390/su15065430>
- Martens, R. (1995). Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations. *Biology and Fertility of Soils*, 19, 87–99. <https://doi.org/10.1007/BF00336142>
- Molla, A., Skoufogianni, E., Lolas, A., & Skordas, K. (2022). The impact of different cultivation practices on surface runoff, soil and nutrient losses in a rotational system of legume–cereal and sunflower. *Plants*, 11(23), 3513. <https://doi.org/10.3390/plants11233513>
- Moradi, H. R., Rezaei, V., & Erfanian, M. (2024). Investigation of physicochemical characteristics of soil in badland areas formation. *Researches in Earth Sciences*, 15(3), 91–105. <https://doi.org/10.48308/esrj.2021.101282>
- Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Davari, M. (2018). Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024>
- Pakzad, M., T. Rostami Shahraji and R. Ebrahimi Atani. 2021. Determination of Spatial Pattern of Woody

- Species using Point Pattern Analysis (Case Study: Chehel-tan Dehbakri Forest, Kerman Province). *Ecology of Iranian Forest*, 9(17): 152–162. [10.52547/ifej.9.17.152](https://doi.org/10.52547/ifej.9.17.152)
- Plotnikova, O. O., Demidov, V. V., Farkhodov, Y. R., Tsymbarovich, P. R., & Semenov, I. N. (2024). Influence of water erosion on soil aggregates and organic matter in arable Chernozems: Case study. *Agronomy*, 14(8), 1607. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081607>
- Qiu, L., Zhang, Q., Zhu, H., Reich, P. B., Banerjee, S., van der Heijden, M. G., ... & Wei, X. (2021). Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality. *The ISME journal*, 15(8), 2474–2489. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00913-1>
- Qu, K., Guo, F., Liu, X., Lin, Y., & Zou, Q. (2019). Application of machine learning in microbiology. *Frontiers in Microbiology*, 10, 827. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00827>
- Qu, Y., Tang, J., Li, Z., Zhou, Z., Wang, J., Wang, S., & Cao, Y. (2020). Soil enzyme activity and microbial metabolic function diversity in soda saline-alkali rice paddy fields of northeast China. *Sustainability*, 12(23), 10095. <https://doi.org/10.3390/su122310095>
- Saberi, M., Dahmardeh Ghaleno, M. R., & Khatibi, R., Karimian, V. (2025). Assessment of the Effects of Water Erosion on Changes in Soil Physical, Chemical, and Biological Properties in the Manzelab Watershed, Zahedan County., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (7), <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.395713.669946>
- Sadeghi, S., Petermann, B. J., Steffan, J., Brevik, E., & Gedeon, G. (2023). Predicting microbial responses to changes in soil physical and chemical properties under different land management. *Applied Soil Ecology*, 188, 104878. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104878>
- Saleem, M., J. Hu and A. Jousset. 2019. More than the sum of its parts: microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50(1): 145–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062605>
- Schoof, J., Holz, M., Rütting, T., Well, R., & Buchen-Tschiskale, C. (2025). Impact of different soil erosion levels on gross N transformation processes and gaseous N losses: An incubation study. *Soil Biology and Biochemistry*, 109905. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109905>
- Seitz, T. J., Schütte, U. M., & Drown, D. M. (2022). Unearthing shifts in microbial communities across a soil disturbance gradient. *Frontiers in microbiology*, 13, 781051. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.781051>
- Sensoy, H. 2024. Impact of deforestation and erosion on some soil physicochemical properties and microbial activity on steep slopes. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 45(2): 305–318. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2311>
- Shi, W. (2011). Agricultural and ecological significance of soil enzymes: Soil carbon sequestration and nutrient cycling. In G. Shukla & A. Varma (Eds.), *Soil Enzymology* (pp. 43–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_3
- Soltani Toularoud, A., & Asghari, S. (2021). Assessment the effect of slope aspect and position on some soil microbial indices in rangeland and forest. *Environmental Erosion Research Journal*, 11(1), 58–74. [10.52547/jeer.11.1.58](https://doi.org/10.52547/jeer.11.1.58)
- Sun, S., Zhang, G., He, T., Song, S., & Chu, X. (2021). Effects of landscape positions and landscape types on soil properties and chlorophyll content of citrus in a sloping orchard in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Sustainability*, 13(8), 4288. <https://doi.org/10.3390/su13084288>
- Tang, S., Ma, Q., Marsden, K. A., Chadwick, D. R., Luo, Y., Kuzyakov, Y., ... & Jones, D. L. (2023). Microbial community succession in soil is mainly driven by carbon and nitrogen contents rather than phosphorus and sulphur contents. *Soil Biology and Biochemistry*, 180, 109019. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109019>
- Tian, J., L. McCormack, J. Wang, D. Guo, Q. Wang, X. Zhang, G. Yu, E. Blagodatskaya and Y. Kuzyakov. 2015. Linkages between the soil organic matter fractions and the microbial metabolic functional diversity within a broad-leaved Korean pine forest. *European Journal of Soil Biology*, 66: 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2014.12.001>
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29–38.
- Wang, 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. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>
- Wang, Y., Lv, W., Xue, K., Wang, S., Zhang, L., Hu, R., et al. (2022). Grassland changes and adaptive management on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 668–683. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00330-8>



- Wu, X. L., Wei, Y. J., Cai, C. F., Yuan, Z. J., Liao, Y. S., & Li, D. Q. (2020). Effects of erosion-induced land degradation on effective sediment size characteristics in sheet erosion. *Catena*, 195, 104843. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104843>
- Xu, Y., Ge, X., Gao, G., Yang, Y., Hu, Y., Li, Z., & Zhou, B. (2023). Microbial pathways driving stable soil organic carbon change in abandoned Moso bamboo forests in southeast China. *Journal of Environmental Management*, 345, 118890. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118890>
- Yang, Q., Peng, J., Ni, S., Zhang, C., Wang, J., & Cai, C. (2024). Soil erosion-induced decline in aggregate stability and soil organic carbon reduces aggregate-associated microbial diversity and multifunctionality of agricultural slope in the mollisol region. *Land Degradation & Development*, 35(11), 3714-3726. <https://doi.org/10.1002/ldr.5163>
- Yao, S., Gao, X., Wei, B., Niu, Y., Zhou, H., Lu, G., ... & Peng, Y. (2025). Context-dependent effects of grassland degradation on soil nitrogen cycling processes. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02187-3>
- Zhang, H., Jiang, N., Zhang, S., Zhu, X., Wang, H., Xiu, W., ... & Yang, D. (2024). Soil bacterial community composition is altered more by soil nutrient availability than pH following long-term nutrient addition in a temperate steppe. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1455891. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1455891>
- 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). <https://doi.org/10.1007/s42832-023-0176-4>
- Zhang, Y., Liu, X., Li, P., & Xiao, L. (2024). Response of carbon acquisition enzyme activity and organic carbon mineralization to soil erosion and deposition. *Soil and Tillage Research*, 243, 106169. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106169>
- Zhao, L., He, Y., Zheng, Y., Xu, Y., Shi, S., Fan, M., ... & Nian, F. (2023). Differences in soil physicochemical properties and rhizosphere microbial communities of flue-cured tobacco at different transplantation stages and locations. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1141720. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1141720>