

## بررسی تأثیر فرسایش آبی بر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در حوضه آبخیز منزلاب، شهرستان زاهدان

### چکیده

در این پژوهش، تأثیر فرسایش آبی بر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در حوضه آبخیز منزلاب، به‌عنوان واحد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌برداری خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) در چهار وضعیت شامل بدون فرسایش، فرسایش کم، فرسایش متوسط و شدید در پلات‌های با ابعاد مشخص انجام شد. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، تخلخل، محتوی رطوبت خاک، اسیدیته، هدایت الکتریکی، آهک، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس برای ارزیابی عملکرد کلی خاک اندازه‌گیری شد. شاخص‌های زیستی خاک شامل فعالیت آنزیمی خاک، کربن و نیتروژن زیتوده میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه اندازه‌گیری گردید. آنالیز داده‌ها تحت تجزیه واریانس یکطرفه با سه تکرار با نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. یافته‌های حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که شدت فرسایش تأثیر معنی‌داری بر تمامی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و زیستی خاک دارد. با افزایش شدت فرسایش کربن آلی، نیتروژن کل، مقدار پتاسیم، فسفر و تخلخل خاک کاهش یافت. برخلاف عناصر غذایی، اسیدیته، هدایت الکتریکی و آهک و وزن مخصوص ظاهری خاک با افزایش شدت فرسایش به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. نتایج نشان داد که شدت فرسایش تأثیر قابل توجهی بر کلیه شاخص‌های زیستی دارد. شدت فرسایش، روند کاهش سیلیسی‌داری بر تمامی پارامترهای زیستی داشت که نشان‌دهنده افت کیفیت زیستی و اختلال در فعالیت میکروبی خاک است. به‌طور کلی تغییرات در ویژگی‌های میکروبیوتای خاک به شدت با تغییرات ناشی از فرسایش در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مرتبط است. بنابراین، انجام اقدامات حفاظتی و مدیریتی موثر قبل از تخریب بیشتر در مناطق فرسایشی توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تنوع میکروبی خاک، حاصلخیزی خاک، سنگ فرسایش، کیفیت زیستی

## Assessment of the Effects of Water Erosion on Changes in Soil Physical, Chemical, and Biological Properties in the Monzelab Watershed, Zahedan County

### ABSTRACT

The present study investigated the effect of water erosion on changes in the soil's physical, chemical, and biological properties in the Manzlab watershed as a study unit. We conducted soil sampling (0-30 cm depth) in four conditions: no erosion, low erosion, moderate erosion, and severe erosion in plots with specific dimensions. The physical and chemical characteristics of the soil were measured, including soil texture, bulk density, porosity, soil moisture content, acidity, electrical conductivity, lime, organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and potassium to evaluate the overall soil performance. Soil biological indicators were measured, including soil enzymatic activity, microbial biomass carbon and nitrogen, microorganism population, soil microbial contribution, and basal microbial respiration. Data analysis was done using a one-way analysis of variance with three replications using SPSS software. The findings from the variance analysis showed that erosion intensity affects all physical, chemical, and biological properties of the soil significantly. With increasing erosion intensity, total carbon, nitrogen, potassium, phosphorus, and soil porosity decreased. Unlike nutrients, acidity, electrical conductivity, and lime and soil bulk density increased significantly with increasing erosion intensity. The results showed that erosion intensity affects all biological indicators significantly. Erosion intensity had a significant decreasing trend on all biological parameters, which indicates a decrease in biological quality and disruption in soil microbial activity. Generally, changes in soil microbiota characteristics are strongly related to erosion-induced changes in soil physicochemical properties. Therefore, the utility of effective conservation and management measures is advocated to prevent further degradation in erosion-affected areas.

**Keywords:** Soil microbial diversity, Soil fertility, *Erosion intensity*, *Biological quality*

### Introduction

Despite the known effects of water erosion, integrated assessments of its impact on multiple soil properties are limited, particularly in vulnerable regions like the Manzlab watershed.

The present study investigated the effect of water erosion on changes in the soil's physical, chemical, and biological properties in the Manzlab watershed as a study unit.

## Method

To assess the impact of water erosion on various soil properties, a systematic sampling and analysis procedure was conducted across different erosion intensities in the study area

### *Study Design and Sampling Procedures*

We conducted soil sampling (0-30 cm depth) in four conditions: no erosion, low erosion, moderate erosion, and severe erosion in plots with specific dimensions.

### *Physical and Chemical Soil Analyses*

The physical and chemical characteristics of the soil were measured, including:

- Soil texture
- Bulk density
- Porosity
- Soil moisture content
- pH (acidity)
- Electrical conductivity (EC)
- Lime content
- Organic carbon
- Total nitrogen
- Available phosphorus
- Available potassium

These parameters were analyzed to evaluate overall soil quality and performance under different erosion levels.

### *Biological Indicators Assessment*

Soil biological indicators were also measured, including:

- Soil enzymatic activity
- Microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN)
- Microorganism population
- Soil microbial contribution
- Basal microbial respiration

These indicators provided insight into the biological health and microbial functionality of the soil.

### *Data Analysis*

Data were statistically analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) with three replications. All analyses were performed using SPSS software.

## Results

The findings from the variance analysis showed that erosion intensity affects all physical, chemical, and biological properties of the soil significantly. With increasing erosion intensity, total carbon, nitrogen, potassium, phosphorus, and soil porosity decreased. Unlike nutrients, acidity, electrical conductivity, and lime and soil bulk density increased significantly with increasing erosion intensity. The results showed that erosion intensity affects all biological indicators significantly. Erosion intensity had a significant decreasing

trend on all biological parameters, which indicates a decrease in biological quality and disruption in soil microbial activity.

### **Conclusions**

Generally, changes in soil microbiota characteristics are strongly related to erosion-induced changes in soil physicochemical properties. Therefore, the utility of effective conservation and management measures is advocated to prevent further degradation in erosion-affected areas.

### **Author Contributions**

Conceptualization, Morteza Saberi; methodology, Morteza Saberi and Vahid Karimian; Software and validation, Morteza Saberi and Rasol Khatibi; Investigation and resources, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno; data curation, Rasol Khatibi; writing original draft preparation, Morteza Saberi; writing-review and editing, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno, Vahid Karimian and Rasol Khatibi; visualization, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno; 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.



## مقدمه

فرسایش خاک یک مشکل زیست‌محیطی گسترده است و می‌تواند منجر به تخریب قابل توجه خاک در اکوسیستم‌های طبیعی شود (Molla et al., 2022). فرسایش بادی و آبی دو نوع اصلی فرسایش محسوب می‌شوند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌طور قابل توجهی با یکدیگر تعامل دارند (Wu et al., 2020). مقدار خاک از دست رفته از طریق فرسایش ترکیبی بادی و آبی بیشتر از میزان از دست رفتن خاک در اثر هر یک از فرسایش‌ها به‌تنهایی است (Lie et al., 2021). فرسایش شامل فرآیندهای پویای جدا شدن و انتقال ذرات ریز خاک است که همراه با آن‌ها، عناصر غذایی پسمانده به این ذرات نیز از دست می‌روند و منجر به کاهش حاصلخیزی، تخریب ساختار فیزیکی و بیولوژیکی خاک و در نهایت زوال بهره‌وری اکوسیستم می‌گردد (Owens., 2020).

فرسایش آبی یکی از اساسی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در اکوسیستم‌های طبیعی محسوب می‌شود که عمدتاً تحت تأثیر عواملی نظیر بارندگی، رواناب سطحی، شیب زمین و عدم پوشش گیاهی مناسب رخ می‌دهد و منجر به جابجایی و حذف ذرات سطحی خاک می‌گردد. این فرآیند نه تنها موجب از بین رفتن لایه حاصل‌خیز سطحی، کاهش ماده آلی و عناصر غذایی و تخریب ساختار فیزیکی خاک می‌شود، بلکه به‌طور مستقیم عملکرد بیولوژیکی و اکولوژیکی خاک را نیز مختل می‌سازد بطوریکه شدت آن در اراضی شیب‌دار و مناطقی خشک و نیمه‌خشک بارز بوده و تغییرات قابل‌توجهی را در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به دنبال دارد (Tuo et al., 2023). از جمله پیامدهای فرسایش آبی، اثرات آن بر جوامع میکروبی خاک است. میکروارگانیسم‌های خاک از اجزای کلیدی شبکه‌های بیوشیمیایی محسوب می‌شوند که در تجزیه مواد آلی، تثبیت نیتروژن و پایداری زیستی خاک نقش بسزایی دارند (Fierer., 2017). مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب، تنوع و فراوانی جوامع میکروبی خاک به شدت تحت تأثیر تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قرار می‌گیرد (Sadeghi et al., 2023). از جمله عوامل مؤثر بر ساختار این جوامع می‌توان به pH، ماده آلی، میزان رطوبت و مواد مغذی اشاره کرد (Dasgupta & Brahmprakash, 2021). علاوه بر آن، میکروارگانیسم‌های خاک نظیر قارچ‌ها، باکتری‌ها و جلبک‌ها، شاخص‌های معتبری برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک محسوب می‌شوند (Qu et al., 2019). این جوامع نه تنها در تنظیم چرخه مواد مغذی (Gayan et al., 2023)، بلکه می‌توانند بر عملکردهای اکوسیستم (Li et al., 2025) و تجمع کربن آلی خاک تأثیر بگذارند (Xu et al., 2023). میکروارگانیسم‌های خاک تأثیر قابل توجهی بر رشد، تولید و کیفیت محصول دارند. آنها همچنین به حفظ بهره‌وری خاک، مقاومت در برابر تنش‌های غیرزیستی و احیای عملکردهای حیاتی خاک کمک می‌کنند (Das et al., 2022). تغییر در ترکیب جوامع میکروبی خاک می‌تواند به عنوان یک شاخص قابل اعتماد برای ارزیابی کیفیت خاک حاصل از فعالیت‌های مختلف باشد (Guo et al., 2022). در مقایسه با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، هم میکروارگانیسم‌ها و هم آنزیم‌های خاک نسبت به تغییرات و اختلالات محیطی حساس‌تر هستند و می‌توانند شرایط محیطی فعلی خاک را بهتر نشان دهند (Hou et al., 2014). فراوانی و زیست‌توده میکروارگانیسم‌های خاک می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی (مانند تغییرات آب و هوایی، توپوگرافی، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و شیوه‌های مدیریت خاک) قرار گیرد (Andrade-Linares et al., 2021). فرسایش خاک می‌تواند باعث توزیع مجدد مواد مغذی و منابع خاک در امتداد چشم‌انداز شود این تغییرات می‌تواند بر فعالیت میکروبی خاک و متابولیسم جامعه میکروبی تأثیر بیشتری بگذارد (Kong et al., 2022).

در مجموع، مطالعات مختلف نشان می‌دهند که فرسایش آبی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تأثیرات منفی قابل توجهی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد که می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر تجزیه مواد آلی، تثبیت عناصر غذایی، حفظ حاصلخیزی، تنوع و عملکرد جوامع میکروبی خاک اثر بگذارد. از این رو، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تأثیر تغییرات ایجادشده در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ناشی از فرسایش آبی در حوضه آبخیز مازلا، شهرستان زاهدان انجام شد تا با شناخت بهتر پیامدهای فرسایش، زمینه ارائه راهکارهای مؤثر برای حفظ سلامت خاک و پایداری اکوسیستم فراهم گردد.

## پیشینه پژوهش

Formatted: Justify Low

Formatted: Highlight

تمامی ابعاد مطالعه تحقیق بررسی نشده است. نوآوری مشخص تحقیق چیست؟  
مطالعات گذشته بیشتر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تمرکز داشتند ولی مطالعه حاضر بطور همزمان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک بررسی شد

سعی گردد بر ضرورت و تفاوت این تحقیق با  
تحقیق‌های دیگر در داخل و خارج از کشور به‌طور مفصل اشاره شود.

هدف انجام این تحقیق به‌طور کامل اشاره شود.

Formatted: Justify Low, Indent: First line: 0.2"

به‌صورت مجزا ارائه نشود در داخل مقدمه گنجانده شود.  
انجام شد

رفرنس‌ها از قدیم به‌جدید ارائه شود.  
انجام شد

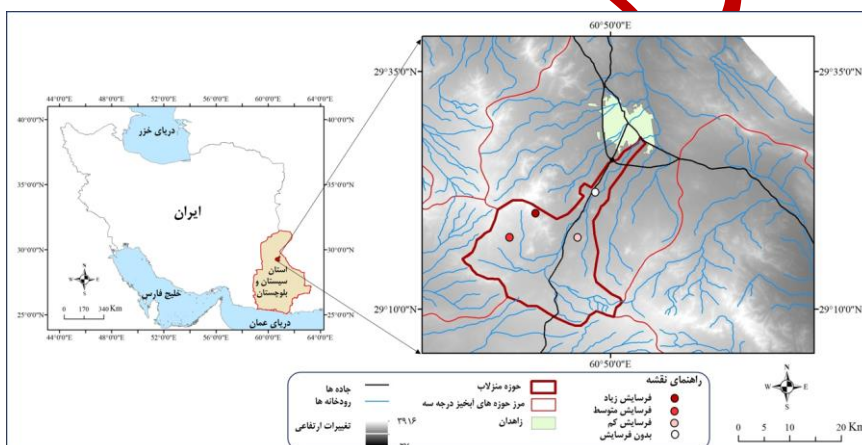
مطالعه محسنی (۲۰۱۹) پیرامون تأثیر فرسایش آبی بر تنوع زیستی خاک در اکوسیستم‌های خشک نشان داد که مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در مناطق رسوب‌گذاری به‌طور معنی‌داری کمتر از نواحی فرسایشی بود. با این حال، بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در بخش‌های رسوبی مشاهده شد، که می‌تواند ناشی از شرایط ریزمحیطی مساعدتر و تجمع نسبی مواد آلی در این مناطق باشد. Sui و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که ساختار و تنوع میکروارگانیسم‌های خاک می‌تواند تحت تأثیر کربن آلی خاک، pH خاک و فسفر در خاک‌های جنگلی قرار گیرد. میکروارگانیسم‌های موجود در خاک نقش اساسی در فرایندهای بیوشیمیایی مانند تجزیه مواد آلی و معدنی شدن مواد غذایی در خاک دارند بنابراین، در میزان دی‌اکسیدکربن ورودی و خروجی و پایداری اکوسیستم تأثیرگذار هستند. Qiu و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند، تغییرات در ویژگی‌های میکروبی به‌طور قابل توجهی با تغییرات ناشی از فرسایش در عملکرد چندگانه خاک مرتبط می‌باشد. مطالعه‌ی Sadeghi و همکاران (۲۰۲۳) در زمینه پیش‌بینی پاسخ‌های میکروبی به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحت مدیریت‌های مختلف کاربری زمین نشان داد که بین مجموع اسیدهای چرب فسفولیپیدی و ساختار جوامع میکروبی خاک ارتباط قوی‌ای وجود دارد. بر اساس نتایج این تحقیق، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک به‌عنوان شاخص‌های مؤثر و قابل اعتماد در پیش‌بینی ترکیب و تنوع جوامع میکروبی قابل استفاده هستند. میکروارگانیسم‌های موجود در خاک آنزیم‌های زیادی آزاد می‌کنند که در مقایسه با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به تغییرات محیطی بسیار حساس می‌باشند و شاخص مناسبی برای مطالعه پایداری اکوسیستم‌ها در برابر تغییرات و آشوب‌های محیطی می‌باشند (Li et al., 2020 و Zhang, Qiu et al., 2021). همکاران (۲۰۲۳) با بررسی اثرات فرسایش بر کارایی استفاده از کربن میکروبی خاک در زمین‌های زراعی بیان کردند که کربن میکروبی با افزایش نرخ فرسایش خاک در عمق ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه‌ی Yang و همکاران (۲۰۲۴) در منطقه مالپسول شمال چین نشان داد که فرسایش خاک تأثیر چشمگیری بر پایداری خاک‌دانه‌ها و محتوای کربن آلی دارد. یافته‌ها حاکی از آن است که فرسایش منجر به کاهش ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، تنوع میکروبی و فعالیت آنزیمی در محل برداشت خاک شده و در مقابل، موجب تجمع نسبی مواد مغذی، افزایش تنوع میکروبی و بهبود فعالیت‌های آنزیمی در نواحی رسوب‌گذاری می‌گردد. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که فرسایش با برهم زدن ساختار خاک‌دانه‌ها، کارایی استفاده از منابع و عملکردهای زیستی، به کاهش عملکرد چندگانه‌ی خاک منجر می‌شود و در نهایت توان اکولوژیکی خاک را در اکوسیستم‌های تحت تأثیر فرسایش تضعیف می‌کند. در زمینه تأثیر فرسایش آبی بر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، مطالعه‌ای توسط Plotnikova و همکاران (2024) انجام شد. این تحقیق به بررسی تأثیر فرسایش آبی بر ساختار خاک‌دانه‌ها و ماده آلی خاک در خاک‌های چمن‌زار پرورده است. نتایج نشان داد که فرسایش آبی موجب کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها و کاهش محتوای کربن آلی خاک گردید، که این امر به تضعیف ساختار خاک و کاهش حاصلخیزی آن منجر می‌گردد. به‌طور کلی محققین بیان کردند، درک اثرات فرسایش آبی بر ویژگی‌های خاک برای شناخت فرآیند تخریب خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، حیاتی و ضروری است (Jolivet et al., 2021).

در مجموع، مطالعات مختلف نشان می‌دهد که فرسایش آبی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تأثیرات منفی قابل توجهی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد که می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر تجزیه مواد آلی، تثبیت عناصر غذایی، حفظ حاصلخیزی، تنوع و عملکرد جوامع میکروبی خاک اثر بگذارد. بررور منابع انجام شده در زمینه تحقیق حاضر، مطالعه‌ای که اثر همزمان شدت‌های مختلف فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک را نشان دهد مشاهده نگردید. از این رو، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تأثیر شدت‌های مختلف فرسایش آبی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در حوضه آبخیز منزلاب، شهرستان زاهدان انجام شد تا با شناخت بهتر پیامدهای فرسایش، زمینه ارائه راهکارهای مؤثر برای حفظ سلامت خاک و پایداری اکوسیستم فراهم گردد.

## روش‌شناسی پژوهش

حوضه آبخیز منزلاب، به مساحت ۴۹۳۳۸/۱ هکتار و موقعیت جغرافیایی، ۶۰ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۴۶ دقیقه طول شرقی

و ۲۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی شهرستان زاهدان است. محیط این حوضه برابر با ۱۴۳ کیلومتر بوده و ارتفاع آن از ۱۳۸۳ متر در پایین‌ترین نقطه تا ۲۵۶۴ متر در بلندترین نقطه متغیر است. از نظر تقسیمات سیاسی، حوضه منزلاب در استان سیستان و بلوچستان، شهرستان زاهدان، بخش مرکزی و دهستان چشمه‌زیارت قرار دارد. درون این حوضه، سکونت‌گاه‌های متعددی وجود دارند که عمدتاً شامل روستاهایی با جمعیت کم هستند. همچنین، شهر زاهدان در نزدیکی خروجی این حوضه واقع شده است. از نظر آب و هوایی این منطقه جزء ناحیه ایران-تورانی و دارای اقلیم سرد خشک می‌باشد. به علت وجود سرما در طول پاییز و تا اواسط اسفند تقریباً همه گیاهان منطقه به صورت خشک بوده و از اواسط اسفند و اوایل فروردین رویش گیاهی شروع می‌شود. بارندگی متوسط سالانه ۱۰۱ میلی‌متر می‌باشد که دی ماه با ۱۸/۳۹ میلی‌متر بیشترین و شهریور ماه با ۰/۱۲ میلی‌متر کمترین میزان بارش را دارا است. همچنین بیشترین درصد بارش فصلی در فصل زمستان با ۵۹/۷۳ درصد و کمترین آن در فصل تابستان با ۲/۶۳ درصد می‌باشد. حداقل و حداکثر میانگین درجه حرارت سالانه به ترتیب ۱۰/۵۸ و ۲۵/۰۵ درجه سانتیگراد است (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، ۱۳۹۰).



### نمونه‌برداری خاک

نمونه‌برداری خاک در این تحقیق به صورت طرح کاملاً تصادفی انجام شد. با توجه به آنکه فرسایش معمولاً در شیب‌ها رخ می‌دهد و شدت آن معمولاً با درجه شیب و فاصله از بالای شیب افزایش میابد (Qu et al., 2020)، ابتدا از نقشه‌های فرسایش و رسوب موجود در منطقه برای طبقه‌بندی شدت‌های فرسایش خاک که عبارت بودند از: بدون فرسایش، فرسایش کم، فرسایش متوسط و فرسایش شدید، استفاده گردید. سپس در هر سایت فرسایشی، چهار منطقه همگن با شرایط فیزیوگرافی تقریباً مشابه انتخاب شد و در هر کدام از آنها پنج نمونه از خاک (یک نمونه در مرکز و چهار نمونه بصورت معالوه در اطراف آن) برداشت شد. نمونه‌برداری خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری صورت گرفت. نمونه‌های خاک مناطق همگن هر سایت فرسایشی با هم ترکیب شده تا یک نمونه مرکب به دست آمد. بعد از برداشت خاک‌ها با الکی ۲ میلی‌متر الک شده و نمونه‌ها به دو بخش تقسیم شدند، بخشی برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در هوای آزاد خشک شدند و قسمتی جهت انجام آزمایشات زیستی خاک، در یخچال حاوی یخ خشک حمل و نگهداری شده و آزمایشات میکروبی خاک بر روی آنها صورت گرفت (Bastani et al., 2023; Kamali).

(et al., 2022).

### خصوصیات فیزیگوشیمیایی خاک

در این مطالعه، جهت بررسی خصوصیات فیزیکی بافت خاک به روش هیدرومتری، درصد شن، رس و سیلت، با استفاده از مثلث بافت خاک (Schuman et al., 2002)، وزن مخصوص ظاهری با استفاده از روش کلوخه، تخلخل با استفاده از چگالی حجمی اندازه گیری شدند (Chen et al., 2022). برای اندازه گیری فاکتورهای شیمیایی، کربن آلی (SOC) و نیتروژن کل (TN) به ترتیب با روش اکسیداسیون دی کرومات والکی و بلاک و روش کج‌دلال، فسفر قابل دسترس (AP) خاک با روش اولسن، پتاسیم قابل دسترس (AK) با استات آمونیوم خنثی استخراج شد و توسط طیف‌سنجی جذب اتمی، اسیدیت و هدایت الکتریکی با استفاده از روش پتاسیومتری، رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی و آهک خاک به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Bastani et al., 2023; Kamali et al., 2022; Qu et al., 2020).

### خصوصیات زیستی خاک

خصوصیات زیستی مورد مطالعه در این تحقیق شامل فعالیت آنزیمی خاک (آنزیم کاتالاز)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBN)، جمعیت میکروارگانیس‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه بودند. به منظور مطالعه تأثیر 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<sup>۳</sup> استخراج اندازه‌گیری شد (Brookes et al., 1985). برای محاسبه این خصوصیات زیستی از فرمول زیر استفاده گردید (Qu et al., 2020):

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

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. 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 میکروارگانیس‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی<sup>۴</sup> (MPN) محاسبه شد. تنفس میکروبی از جمع‌آوری دی اکسید کربن رها شده در هیدروکسید سدیم و انجام تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Anderso., 1982). همچنین با تقسیم کربن آلی زیتوده میکروبی به کربن آلی خاک سهم میکروبی خاک تعیین شد (Martens., 1995).

### آنالیز داده‌ها

داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک، مورد تجزیه واریانس یکطرفه (ANOVA) با سه تکرار توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ قرار گرفتند. میانگین‌ها با کمک آزمون دانکن در سطح احتمال ۹۵ درصد مقایسه شد همبستگی پارامترهای مطالعه شده با آزمون ضریب همبستگی پیرسون در محیط نرم افزار R انجام گردید.

### یافته‌های پژوهش

#### تأثیر فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

یافته‌های حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که شدت فرسایش تأثیر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. اگرچه درصد رس در بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری نشان نداد، اما در بازه‌ای نسبتاً محدود (۹/۶ تا ۱۰/۶ درصد) تغییر کرد (جدول ۱).

جدول ۱. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

| منبع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | F |
|--------------|------------|----------------|---|
|--------------|------------|----------------|---|

<sup>۱</sup>. Microbial biomass carbon

<sup>۲</sup>. Microbial biomass nitrogen

<sup>۳</sup>. Chloroform fumigation

<sup>۴</sup>. Most Probable Number



|                         |              |   |       |          |
|-------------------------|--------------|---|-------|----------|
| رس (%)                  | بین گروه‌ها  | ۳ | ۰/۵۵  | ۱/۱۱ ns  |
|                         | درون گروه‌ها | ۸ | ۰/۵۰  |          |
| شن (%)                  | بین گروه‌ها  | ۳ | ۴۴/۳  | ۳۷/۹ **  |
|                         | درون گروه‌ها | ۸ | ۱/۱۶  |          |
| سیلت (%)                | بین گروه‌ها  | ۳ | ۴۴/۷  | ۴۱/۳ **  |
|                         | درون گروه‌ها | ۸ | ۱/۰۸  |          |
| وزن مخصوص ظاهری (gcm-3) | بین گروه‌ها  | ۳ | ۰/۰۹  | ۱۰/۳۸ ** |
|                         | درون گروه‌ها | ۸ | ۰/۰۰۹ |          |
| تخلخل (%)               | بین گروه‌ها  | ۳ | ۱۳۵/۵ | ۱۳۵/۵ ** |
|                         | درون گروه‌ها | ۸ | ۱/۰۰  |          |

\*\*وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪، ns: عدم تفاوت معنی‌دار

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، با افزایش شدت فرسایش، درصد شن به‌طور معنی‌داری افزایش یافته و در مقابل، درصد سیلت و میزان تخلخل به‌صورت معکوس کاهش یافتند. به‌طور خاص، درصد شن از ۶۹ درصد در خاک فاقد فرسایش به ۷۸ درصد در شرایط فرسایش شدید رسید، در حالی که درصد سیلت از ۲۰/۶ به ۱۱/۶ کاهش یافت. تخلخل خاک نیز از ۴۵ درصد به ۳۹/۶ درصد کاهش یافت، که نشان‌دهنده افزایش تراکم و فشردگی خاک‌های تحت تأثیر فرسایش است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که وزن مخصوص ظاهری در خاک‌های با فرسایش کم و متوسط نسبت به سایر تیمارها بیشتر است (به‌ترتیب ۱/۵۷ و ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، در حالی که در خاک‌های فاقد فرسایش مقدار کمتری ثبت شد (به‌ترتیب ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) (جدول ۲).

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

| فاکتور                  | شدت فرسایش | کم    | متوسط | شدید  |
|-------------------------|------------|-------|-------|-------|
| رس (%)                  | a۱۰/۶      | a۱۰/۰ | a۹/۶  | a۱۰/۳ |
| شن (%)                  | d۶۹/۰      | c۷۱/۶ | b۷۴/۳ | a۷۸/۰ |
| سیلت (%)                | a۲۰/۶      | b۱۷/۳ | c۱۵/۶ | d۱۱/۶ |
| وزن مخصوص ظاهری (gcm-3) | c۱/۳۵      | b۱/۵۷ | b۱/۵۵ | a۱/۳۹ |
| تخلخل (%)               | a۴۵/۰      | b۲۲/۲ | c۳۷/۶ | d۲۹/۶ |

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد (p<0.01).

#### تأثیر فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که شدت فرسایش تأثیر معنی‌داری بر کلیه خصوصیات شیمیایی خاک از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل دسترس، اسیدیته، هدایت الکتریکی، رطوبت وزنی و درصد آهک خاک دارد (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

| منبع تغییرات      | درجه آزادی | میانگین مربعات | F         |
|-------------------|------------|----------------|-----------|
| کربن آلی          | ۳          | ۱۳/۸           | ۲۸۱/۸ **  |
|                   | ۸          | ۰/۰۴           |           |
| نیتروژن کل        | ۳          | ۰/۲۲           | ۳۷۸/۹ **  |
|                   | ۸          | ۰/۰۰۱          |           |
| پتاسیم قابل دسترس | ۳          | ۱۶۱۸۷/۶        | ۴۶۲۵/۰ ** |
|                   | ۸          | ۳/۵۰           |           |
| فسفر قابل دسترس   | ۳          | ۴۳/۴           | ۱۵۶۵/۲ ** |
|                   | ۸          | ۰/۰۲           |           |
| PH                | ۳          | ۰/۵۶           | ۱۵/۴ *    |

|       |              |   |      |          |
|-------|--------------|---|------|----------|
| Ec    | درون گروه‌ها | ۸ | ۰/۰۳ |          |
|       | بین گروه‌ها  | ۳ | ۶/۳۹ | ** ۵۲۴/۲ |
| رطوبت | درون گروه‌ها | ۸ | ۰/۰۱ |          |
|       | بین گروه‌ها  | ۳ | ۸/۰۲ | ** ۱۶۸/۸ |
| آهک   | درون گروه‌ها | ۸ | ۰/۰۴ |          |
|       | بین گروه‌ها  | ۳ | ۳۸/۳ | ** ۷۶/۶  |
|       | درون گروه‌ها | ۸ | ۰/۵  |          |

\*\* و \* به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد

کربن آلی در خاک‌های بدون فرسایش با ۶/۵۸ گرم در کیلوگرم بیشترین مقدار را داشت و با افزایش شدت فرسایش، این مقدار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و در خاک‌های با فرسایش شدید به ۱/۴۴ رسید. الگوی مشابهی برای نیتروژن کل مشاهده شد که از ۰/۸۲ گرم در کیلوگرم در خاک بدون فرسایش به ۰/۲۲ گرم در کیلوگرم در خاک‌های فرسایش یافته شدید کاهش یافت. مقدار پتاسیم و فسفر قابل دسترس نیز روندی نزولی را با افزایش شدت فرسایش نشان دادند. به‌طور مشخص، پتاسیم از ۲۸۱ به ۱۱۱/۳ و فسفر از ۱۲/۵ به ۲/۶ میلی گرم در کیلوگرم کاهش یافت. برخلاف عناصر غذایی، اسیدیته خاک با افزایش شدت فرسایش افزایش یافت، به‌طوری‌که در خاک‌های بدون فرسایش مقدار آن از ۷/۸ به ۸/۲ در خاک‌های با فرسایش شدید رسید. همچنین هدایت الکتریکی از ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر در خاک‌های بدون فرسایش به ۳/۹ دسی‌زیمنس بر متر در خاک‌های فرسایش یافته شدید افزایش یافت، که نشان‌دهنده افزایش شوری در نتیجه از دست رفتن مواد آلی و تجمع نمک‌ها می‌باشد. رطوبت خاک نیز کاهش معنی‌داری با افزایش شدت فرسایش داشت و از ۱۲/۳ درصد در وضعیت بدون فرسایش به ۸/۴ درصد در وضعیت فرسایش شدید رسید. در مقابل، مقدار آهک در خاک با افزایش شدت فرسایش افزایش یافت و از ۸/۳ درصد به ۱۲/۳ درصد رسید (جدول ۴).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

| فاکتور            | شدت فرسایش | کم     | متوسط  | شدید   |
|-------------------|------------|--------|--------|--------|
| کربن آلی          | a۶/۵۸      | b۴/۵۱  | c۳/۳۷  | d۱/۴۴  |
| نیتروژن کل        | ۰/۸۷a      | b۰/۶۵  | c۰/۴۶  | d۰/۲۲  |
| پتاسیم قابل دسترس | a۲۸۱/۰     | b۲۳۱/۶ | c۱۷۲/۳ | d۱۱۱/۳ |
| فسفر قابل دسترس   | a۱۲/۵      | b۹/۷۱  | c۶/۸۵  | d۳/۶۳  |
| PH                | b۷/۸       | a۸/۱   | a۸/۱   | a۸/۲   |
| Ec                | c۱/۵       | b۲/۵   | a۳/۵   | a۳/۹   |
| رطوبت             | a۱۲/۳      | b۱۰/۴  | c۹/۴   | d۸/۴   |
| آهک               | c۸/۳       | b۹/۳   | a۱۲/۰  | a۱۲/۳  |

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد ( $p < 0.01$ ).

#### تأثیر فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

نتایج تحلیل واریانس حاکی از این است که شدت فرسایش تأثیر معنی‌داری ( $p < 0.01$ ) بر کلیه خصوصیات زیستی اندازه‌گیری شده در خاک دارد. این ویژگی‌ها شامل فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و سهم میکروبی خاک از کربن آلی بودند. مقدار آماره F در تمامی صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گزارش شد (جدول ۵).

جدول ۵. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

| منبع تغییرات                                                             | درجه آزادی                  | میانگین مربعات | F                |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------|
| آنزیم کاتالاز ( $\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$ ) | بین گروه‌ها<br>درون گروه‌ها | ۳<br>۸         | ۸۰/۷۷ **<br>۰/۱۰ |

|           |        |   |              |                                                      |
|-----------|--------|---|--------------|------------------------------------------------------|
| ۸۶۰۰/۳ ** | ۹۳۱۹/۴ | ۳ | بین گروه‌ها  | کربن زیتوده میکروبی (mg/kg)                          |
|           | ۱/۰۷   | ۸ | درون گروه‌ها |                                                      |
| ۱۳۷۶/۵ ** | ۶۰/۰۴  | ۳ | بین گروه‌ها  | نیتروژن زیتوده میکروبی (mg/kg)                       |
|           | ۰/۰۴   | ۸ | درون گروه‌ها |                                                      |
| ۳۰۸/۸ **  | ۰/۰۴۲  | ۳ | بین گروه‌ها  | تنفس میکروبی پایه (mgCo2/gsoil.day)                  |
|           | ۰/۰۰   | ۸ | درون گروه‌ها |                                                      |
| ۴۶۹/۵ **  | ۱۲/۹   | ۳ | بین گروه‌ها  | جمعیت میکروارگانیسم‌ها (تعداد در ۱۰۷ در گرم خاک خشک) |
|           | ۰/۰۲   | ۸ | درون گروه‌ها |                                                      |
| ۳۳۷/۰۲ ** | ۳/۸۶   | ۳ | بین گروه‌ها  | سهم میکروبی خاک (mgCmicg-1Corg)                      |
|           | ۰/۰۱   | ۸ | درون گروه‌ها |                                                      |

\*\*وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪

مقایسه میکبین‌ها نشان داد که شدت فرسایش تأثیر قابل توجهی بر تمامی شاخص‌های زیستی اندازه‌گیری شده در خاک دارد. با افزایش شدت فرسایش، روند کاهش معنی‌داری در اغلب پارامترهای زیستی مشاهده شد. فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معنی‌داری از ۴۴/۶ در خاک بدون فرسایش به  $24/5 \mu\text{mol KMnO}_4 \text{g}^{-1}$  در خاک‌های با فرسایش شدید کاهش یافت. میزان کربن زی‌توده میکروبی نیز به‌شدت تحت تأثیر فرسایش قرار گرفت، به‌طوری‌که در خاک بدون فرسایش ۱۵۵/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شد، حال آنکه در شرایط فرسایش شدید این مقدار به ۳۰/۶ کاهش یافت. نیتروژن زی‌توده میکروبی نیز روندی مشابه داشت و از ۱۴/۳۶ در خاک بدون فرسایش به ۴/۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار با فرسایش شدید کاهش یافت. تنفس میکروبی پایه، به‌عنوان شاخصی از فعالیت متابولیکی موجودات ریزحاک، کاهش معنی‌داری را با افزایش شدت فرسایش نشان داد. جمعیت میکروبی نیز کاهش قابل توجهی را نشان داد، به‌طوری‌که از ۴۶۹/۵ در تیمار بدون فرسایش به ۰/۲۹ تعداد در گرم خاک خشک در شرایط فرسایش شدید رسید. در نهایت، سهم میکروبی خاک نیز کاهش یافت، به‌طوری‌که از ۳۳۷/۰۲ در تیمار شاهد به ۰/۲۵ میلی‌گرم کربن میکروبی بر گرم کربن آلی کل در شرایط فرسایش شدید رسید (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسه میکبین اثر فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

| فاکتور                                                                 | بدون فرسایش | کم      | متوسط  | شدید   |
|------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|--------|--------|
| آنزیم کاتالاز ( $\mu\text{mol KMnO}_4 \text{g}^{-1} \text{dry soil}$ ) | a۶/۴۴       | b۵/۵۱   | c۴/۴۰  | d۲/۵۴  |
| کربن زیتوده میکروبی (mg/kg)                                            | ۱۵۵/۸a      | b۱۲۰/۰۶ | c۶۷/۶۵ | d۳۰/۵۸ |
| نیتروژن زیتوده میکروبی (mg/kg)                                         | a۱۴/۳۶      | b۱۱/۳۳  | c۶/۷۴  | d۴/۴۲  |
| تنفس میکروبی پایه (mgCo2/gsoil.day)                                    | a۰/۵۸       | b۰/۵۱   | c۰/۴۲  | d۰/۳۰  |
| جمعیت میکروارگانیسم‌ها (تعداد در ۱۰۷ در گرم خاک خشک)                   | a۴/۵۳       | b۳/۶۸   | c۰/۸۷  | d۰/۲۹  |
| سهم میکروبی خاک (mgCmicg-1Corg)                                        | a۲/۶۷       | b۱/۶۹   | c۰/۴۴  | d۰/۲۵  |

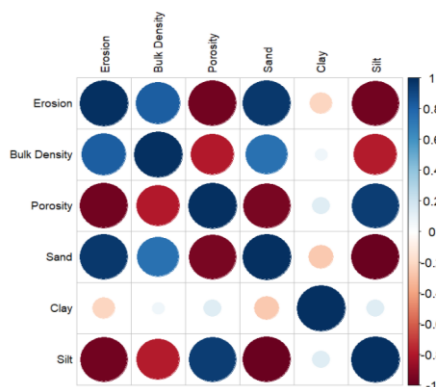
حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد ( $p < 0.01$ ).

#### همبستگی خصوصیات فیزیوشیمیایی و زیستی خاک

نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که فرسایش آبی با وزن مخصوص ظاهری خاک رابطه مثبت و قوی (۰/۸۳) دارد، به‌طوری‌که با افزایش فرسایش، وزن مخصوص ظاهری خاک افزایش یافته است. افزایش شدت فرسایش به‌طور معنی‌داری با کاهش تخلخل خاک و درصد سیلت همبستگی منفی قوی (۰/۹۶-) نشان داد، که بیانگر کاهش فضاهای خالی خاک و ذرات ریز در اثر فرسایش است. درصد شن نیز همبستگی مثبت بالایی (۰/۹۶) با فرسایش داشت، که نشان‌دهنده افزایش ذرات درشت‌تر خاک در مناطق فرسایش یافته می‌باشد. ارتباط فرسایش با درصد رس ضعیف و منفی (۰/۲۲-) بود، که بیانگر تأثیر کمتر فرسایش بر ذرات ریز رس است. بطور کلی نتایج حاکی از این است که فرسایش آبی منجر به تغییرات قابل توجه در خصوصیات فیزیکی خاک شده و می‌تواند بر ساختار و کیفیت خاک تأثیر منفی بگذارد (جدول ۷ و شکل ۲).

جدول ۷. نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای فیزیکی خاک

|              | erosion | Bulk density | Porosity | Sand  | Clay | Silt |
|--------------|---------|--------------|----------|-------|------|------|
| erosion      | ۱       |              |          |       |      |      |
| Bulk Density | ۰/۸۳    | ۱            |          |       |      |      |
| Porosity     | -۰/۹۶   | -۰/۸۰        | ۱        |       |      |      |
| Sand         | ۰/۹۶    | ۰/۷۴         | -۰/۹۴    | ۱     |      |      |
| Clay         | -۰/۲۲   | ۰/۰۷         | ۰/۱۴     | -۰/۲۶ | ۱    |      |
| Silt         | -۰/۹۶   | -۰/۷۹        | ۰/۹۵     | -۰/۹۹ | ۰/۱۳ | ۱    |



شکل ۲. همبستگی پیرسون بین متغیرهای فیزیکی خاک

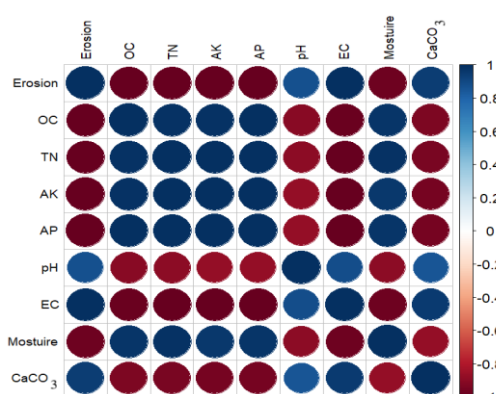
تحلیل همبستگی بین فرسایش و خصوصیات شیمیایی خاک نشان داد که فرسایش با تمامی متغیرها به جز اسیدیته (pH) رابطه منفی و معنی دار دارد. فرسایش با کربن آلی (OC)، نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP) و رطوبت خاک (Moisture) همبستگی منفی بسیار قوی (۰/۹۹ تا -۱) دارد که نشان دهنده کاهش شدید این عناصر و ویژگی ها در اثر فرسایش است. همچنین، هدایت الکتریکی (EC) و کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) نیز در نواحی فرسایش یافته افزایش یافته اند و با فرسایش همبستگی مثبت بالا نشان دادند. در مقابل، اسیدیته خاک با فرسایش همبستگی مثبت نسبتاً قوی (۰/۸۸) داشت. نتایج حاکی از آن است که فرسایش آبی منجر به کاهش قابل توجه عناصر غذایی و رطوبت در خاک شده و شرایط شیمیایی خاک از جمله شوری و قلیائیت را تحت تأثیر قرار داده است که در نهایت می تواند عملکرد زیستی خاک را تضعیف کند (جدول ۸ و شکل ۳).

جدول ۸. نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای شیمیایی خاک

|          | Erosion | OC   | TN   | AK   | AP   | pH    | EC   | Moisture | CaCO3 |
|----------|---------|------|------|------|------|-------|------|----------|-------|
| Erosion  | ۱       |      |      |      |      |       |      |          |       |
| OC       | -۰/۹۹   | ۱    |      |      |      |       |      |          |       |
| TN       | -۰/۹۹   | ۰/۹۸ | ۱    |      |      |       |      |          |       |
| AK       | -۱/۰۰   | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۱    |      |       |      |          |       |
| AP       | -۱/۰۰   | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۱/۰۰ | ۱    |       |      |          |       |
|          | ۰/۸۸    | ۰/۹۱ | ۰/۹۰ | ۰/۸۷ | ۰/۸۷ | ۱     |      |          |       |
| pH       |         | -    | -    | -    | -    | -     |      |          |       |
|          | ۰/۹۹    | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۱/۰۰ | -۰/۸۹ | ۱    |          |       |
| EC       |         | -    | -    | -    | -    | -     | -    |          |       |
| Moisture | -۰/۹۸   | ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ۰/۹۷ | ۰/۹۷ | -۰/۸۹ | ۰/۹۷ | ۱        |       |

CaCO<sub>3</sub>

کربن آلی (OC)، نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، رطوبت (Mostuire)، آهک (CaCO<sub>3</sub>)



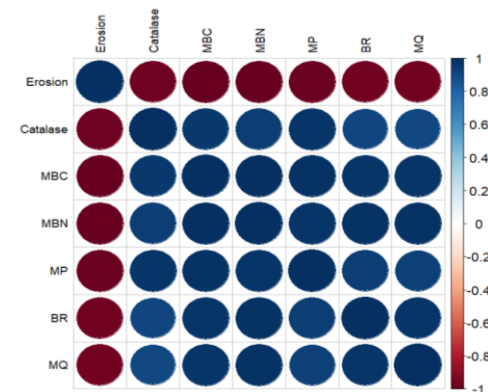
شکل ۳. همبستگی پیرسون بین متغیرهای شیمیایی خاک

نتایج حاصل از تحلیل ضرایب همبستگی پیرسون نشان داد که فرسایش آبی تأثیر منفی و معناداری بر ویژگی‌های زیستی خاک دارد. به طوری که بین میزان فرسایش و شاخص‌های زیستی از جمله آنزیم کاتالاز (-۰/۹۷)، کربن زیتوده میکروبی (-۱/۰۰)، نیتروژن زیتوده میکروبی (-۰/۹۹)، جمعیت میکروبی (-۰/۹۹)، تنفس میکروبی پایه (-۰/۹۶) و سهم میکروبی (-۰/۹۶) همبستگی منفی و در سطح احتمال بالا مشاهده گردید. این نتایج نشان می‌دهد که فرسایش آبی به طور قابل توجهی موجب کاهش فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی در خاک می‌شود که در نهایت به تضعیف عملکردهای زیستی و کاهش توان اکوسیستمی خاک در فرایندهای کلیدی مانند چرخه مواد مغذی و پایداری زیستی منجر می‌گردد (جدول ۹ و شکل ۴).

جدول ۹. نتایج تجزیه ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرهای زیستی خاک

|          | Erosion | Catalase | MBC  | MBN  | MP   | MR   | MQ |
|----------|---------|----------|------|------|------|------|----|
| Erosion  | ۱       |          |      |      |      |      |    |
| Catalase | -۰/۹۷   | ۱        |      |      |      |      |    |
| MBC      | -۱/۰۰   | ۰/۹۶     | ۱    |      |      |      |    |
| MBN      | -۰/۹۹   | ۰/۹۴     | ۱/۰۰ | ۱    |      |      |    |
| MP       | -۰/۹۹   | ۰/۹۸     | ۰/۹۹ | ۰/۹۷ | ۱    |      |    |
| MR       | -۰/۹۶   | ۰/۹۲     | ۰/۹۸ | ۰/۹۹ | ۰/۹۵ | ۱    |    |
| MQ       | -۰/۹۶   | ۰/۹۰     | ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ۰/۹۳ | ۰/۹۷ | ۱  |

آنزیم کاتالاز (Catalase)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBC)، جمعیت میکروبی (MP)، تنفس میکروبی پایه (MR)، سهم میکروبی (MQ)



شکل ۴. همبستگی پیرسون بین متغیرهای زیستی خاک

## بحث

نظر به اینکه فرسایش آبی از مهمترین عوامل تخریب در حوزه‌های آبخیز مناطق مختلف کشور می‌باشد لذا در پژوهش حاضر تاثیر شدت‌های مختلف این فرسایش بر خصوصیات خاک حوضه آبخیز منزلا ب بررسی شد.

نتایج این پژوهش نشان داد فرسایش، تاثیر قابل توجهی بر اکثر ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. بر اساس نتایج جدول ۲ در بین ویژگی‌های مطالعه شده، میزان رس به عنوان یک ویژگی بافتی، کمترین تغییر را نشان داده که حاکی از پایداری نسبی آن در برابر اثرات تخریبی فرسایش بود. تحقیقات انجام شده توسط Řezáčová و همکاران (۲۰۲۱) بر نقش مثبت مواد آلی در فرآیند تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها تاکید دارد. یافته‌های آنان نشان می‌دهد که افزایش مواد آلی، موجب افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌گردد. در همین راستا، ترنان و همکاران (۱۹۹۶) رس را به عنوان نوعی ملات بین ذرات خاک توصیف نموده و بیان داشته‌اند که افزایش مقدار رس، منجر به افزایش پایداری ساختمان خاک می‌گردد. پژوهش‌های رازیا و کی (۱۹۹۴) نیز بر این نکته صحنه گذاشته و گزارش داده‌اند که افزایش میزان رس در خاک، با افزایش پایداری خاکدانه‌ها همراه است. در مطالعه حاضر شدت فرسایش باعث افزایش شن و کاهش سیلت و میزان تخلخل شد. افزایش بخش درشت خاک در اثر فرسایش توسط محققان نیز گزارش شده است (Mandal and Dadhwal., 2012). این تغییر در بافت خاک می‌تواند ناشی از حذف انتخابی ذرات توسط عامل فرساینده (آب) باشد. در این فرآیند، ذرات درشت‌تر شن به دلیل وزن بیشتر، مقاومت بالاتری از خود نشان داده و در سطح خاک باقی می‌مانند. این تغییر در بافت خاک به طور مستقیم بر تخلخل آن نیز تاثیرگذار است. از سوی دیگر وزن مخصوص ظاهری در خاک‌های با فرسایش کم و متوسط بیشتر از خاک‌های فاقد فرسایش و فرسایش شدید شد. این تفاوت می‌تواند به اثرات متقابل ساختار خاک، میزان مواد آلی و فرآیندهای فشردگی ناشی از فرسایش مرتبط باشد.

در بررسی تاثیر فرسایش آبی بر خصوصیات شیمیایی خاک یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که فرسایش آبی تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات شیمیایی خاک در منطقه مورد بررسی داشته است. Lal و همکاران (۲۰۰۵)، در بررسی خود نشان داد که کمبود پتاسیم، فسفر، نیتروژن و پایین بودن ظرفیت تبادل کاتیونی در کنار محتویات مواد آلی از مهمترین عوامل شیمیایی در شدت بخشیدن به فرآیند فرسایش هستند. با افزایش شدت فرسایش، کاهش معنی‌داری در سطوح کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر خاک رخ داده است که با نتایج محققین (Mandal et al., 2023. Mandal et al., 2021) همخوانی دارد. این امر احتمالاً ناشی از شستشوی مواد مغذی و اختلال در چرخه جذب و رهاسازی این عناصر توسط ماده آلی است. Pimentel و Burgess (۲۰۱۳) بیان کردند، فرسایش غلظت و ذخیره کربن آلی خاک و وضعیت مواد مغذی را کاهش می‌دهد. این امر به شدت بر بافت و ساختار خاک، ظرفیت نگهداری آب موجود و ویژگی‌های حفظ و انتقال آب تاثیر می‌گذارد (Pimentel and Burgess, 2013). کاهش کربن

آلی در مراحل شدید فرسایش نشان می‌دهد که فرآیند فرسایش عامل اصلی تعیین کننده تغییرات در خواص خاک سطحی در مناظر مستعد فرسایش است و بر عملکردهای خاک که از رشد گیاه، حفظ آب و در دسترس بودن آن پشتیبانی می‌کنند، تأثیر می‌گذارد (Wauriu and Lal., 2003). در مطالعه حاضر pH خاک روند صعودی داشته‌اند. Mandal و همکاران (۲۰۲۳) با مطالعه تأثیرات فرسایش خاک بر خاک در منطقه شمال غربی هیمالیا به این نتیجه رسیدند که فرسایش خاک تأثیرات قابل توجهی بر کیفیت خاک دارند. در این زمینه تشدید شدت فرسایش منجر به افزایش pH خاک شده است. نتایج همچنین نشان از تأثیرگذاری شدت فرسایش بر رطوبت خاک دارد، که منجر به کاهش آن شده است که با نتایج Sun و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. می‌توان بیان کرد، کاهش کربن آلی خاک از دلایل مرتبط باشد. این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهند که فرآیند فرسایش، با تخلیه مواد آلی و عناصر غذایی، نه تنها ساختار شیمیایی خاک را به طور مستقیم تغییر می‌دهد، بلکه به طور غیرمستقیم نیز کیفیت کلی خاک را کاهش می‌دهد. این مساله اهمیت اقدامات حفاظتی خاک را در جلوگیری از فرسایش و حفظ کیفیت آن آشکار می‌سازد. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نیز حاکی از کاهش معنی‌دار کربن، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس در محدوده فرسایش دارد. از عوامل تأثیرگذار بر کاهش کربن آلی و پارامترهای مرتبط می‌توان بیان کرد، در اراضی فرسایش یافته خاک سطحی با گذشت زمان حذف می‌شود و خاک زیرسطحی در معرض سطح قرار خواهد گرفت که میزان ماده آلی در این سطح کمتر می‌باشد. ماده آلی دارای نقش حیاتی بر خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک دارد، تغییر در میزان ماده آلی به دلیل اثرگذاری بر فعالیت‌های بیولوژیک، تبادل کاتیونی، اسیدیته و میزان عناصر غذایی یکی از مهمترین شاخصه‌های کیفیت شیمیایی و بیولوژیک است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ماده آلی نقش مهمی در تشکیل خاکدانه‌ها داشته و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشد (Moradi et al., 2024).

در این بررسی تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک نیز بررسی شد. نتایج جدول ۶ حاکی از آن است که تمام ویژگی‌های زیستی مورد بررسی تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته است. میزان نایب‌پذیری ویژگی‌های مذکور با افزایش شدت فرسایش بیشتر شده است که با مطالعات Qu و همکاران (۲۰۲۱) و Asghari و Soltani (۲۰۲۱) همخوانی دارد. این نتایج نشان‌دهنده حساسیت بالای پارامترهای زیستی خاک نسبت به شدت فرسایش می‌باشد. بنظر می‌رسد از دلایل مهم اثر منفی شدت فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک، کاهش ماده آلی و مواد مغذی باشد که باعث از بین رفتن تنوع و عملکرد باکتری‌های خاک باشد که در ادامه، کاهش دسترسی به منابع غذایی، متابولیسم و ترکیب باکتری‌ها را متأثر ساخته که این موارد کارکرد میکروارگانیسم‌های خاک و نقش آنها در عملکرد خاک را مختل خواهد کرد (Banerjee et al., 2020; Chen et al., 2020). بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز که شاخصی از پتانسیل اکسیداتیو میکروبی خاک محسوب می‌شود در خاک بدون فرسایش به دست آمد این فعالیت در خاک‌های با فرسایش شدید به کمترین میزان کاهش یافت. این کاهش بیانگر افت کارکردهای دفاعی و تنفس میکروبی در شرایط تخریب ساختار خاک است. محققین بیان می‌کنند که، وجود مواد آلی و عناصر غذایی در مناطق بدون فرسایش و یا با فرسایش کمتر باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز می‌شود که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد (Makoi and Ndakidemi., 2008). میزان کربن زی‌توده میکروبی، نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و سهم میکروبی خاک در پژوهش حاضر به شدت تحت تأثیر فرسایش قرار گرفت، به‌طوری‌که در خاک بدون فرسایش بیشترین مقدار و در خاک با فرسایش شدید به کمترین میزان رسیده‌اند. از دلایل این روند کاهشی می‌توان به مواردی همچون؛ کاهش منابع آلی، تخریب رطوبت خاک در اثر فرسایش، کاهش ظرفیت ذخیره و بازچرخ نیتروژن توسط جامعه میکروبی در خاک‌های تخریب‌یافته، افت توان زیستی و کاهش دسترسی به کربن قابل مصرف برای میکروارگانیسم‌ها است. در نتیجه روند کاهشی پارامترهای مذکور، کاهش کیفیت اکولوژیکی، تخریب شرایط زیستی خاک و همچنین افت نسبی سهم موجودات زنده در چرخه کربن و ظرفیت ذخیره‌سازی کربن در خاک‌های با شدت بالای فرسایش اتفاق می‌افتد. Li و همکاران (۲۰۱۵)، در بررسی پاسخ میکروبی خاک به تغییرات ناشی از فرسایش آبی در جنوب چین گزارش نمودند که محل رسوب‌گذاری دارای فعالیت زی‌توده میکروبی و آنزیمی بیشتری نسبت به سایر مکان‌های فرسایشی است. خصوصیت انتخابی فرسایش آبی باعث انتقال ذرات ریزدانه رس و همچنین مواد آلی می‌شود. بنابراین محدوده بدون فرسایش در مقایسه با نقاط فرسایش یافته دارای خاک‌های با بافت ریزدانه و مواد آلی هستند. آنزیم‌ها همبستگی قوی با ذرات معدنی رس و مواد آلی دارند بنابراین، وجود رس و ماده آلی بیشتر در مکان‌های بدون فرسایش نقش اساسی در تشکیل مواد آلی

آنزیمی دارند. متعاقبا، وجود مواد آلی در محدوده بدون فرسایش با افزایش آنزیمها از طریق فعالیت میکروارگانیسمها، باعث ایجاد شرایط لازم به منظور معدنی شدن و تثبیت کربن خواهد شد (Shi, 2011). محققین (Mandal and Giri, 2021) بر این باورند که کاهش کیفیت خاک در اثر فرسایش برای خاک‌های مناطق گرمسیری که بسیار مستعد فرسایش و سایر فرآیندهای تخریب هستند، شدیدتر است که موید نتایج تحقیق حاضر است.

### نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی یافته‌های پژوهش حاضر به وضوح نشان داد که فرسایش آبی، پیامدهای گسترده و قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد. شدت فزاینده‌ی فرسایش، با تغییرات مخربی نظیر دگرگونی بافت خاک، کاهش تخلخل، افزایش وزن مخصوص، ظاهری و تقلیل رطوبت خاک، منجر به تنزل کیفیت فیزیکی آن می‌گردد. علاوه بر این، فرسایش موجب کاهش چشمگیر در مواد مغذی ضروری خاک، از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم شده و بدین ترتیب، شاخص‌های شیمیایی حیاتی خاک را تضعیف می‌نماید. از سوی دیگر، پارامترهای زیستی، مانند فعالیت آنزیمها، زی توده میکروبی و تنفس پایه نیز تحت تأثیر فرسایش، کاهش قابل توجه را تجربه می‌کنند که نشانگر آسیب‌پذیری شدید فرایندهای بیولوژیکی خاک در مواجهه با این پدیده است. فرسایش آبی، نه تنها با تخریب ساختار سطحی خاک، موجبات کاهش حاصلخیزی و فعالیت زیستی آن را فراهم می‌آورد، بلکه در بلندمدت، عملکرد اکوسیستمی و ظرفیت ذخیره‌سازی کربن در خاک را نیز تضعیف می‌کند. بر این اساس، اتخاذ رویکردهای مدیریتی و حفاظتی کارآمد به منظور کاهش شدت فرسایش و حفظ کیفیت پایدار خاک در مناطق مستعد، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌رود. در این مطالعه، نخست شناسایی گونه‌های میکروبی وجود نداشت تا ارتباط گونه میکروبی با تغییرات خاک ناشی از فرسایش مشخص شود. پیشنهاد می‌شود ضمن مطالعه جوامع میکروبی خاک ارتباط گونه‌های میکروبی خاک با تغییرات خصوصیات خاک ناشی از فرسایش و همچنین منای ریسوب در شدت‌های مختلف فرسایش بررسی شود.

### تقدیر و تشکر

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

### منابع

سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری، ۱۳۹۰. مطالعات تفصیلی \_ اجرایی آبخیزداری حوضه منازله شهرستان زاهدان. اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان سیستان و بلوچستان.

### References

- Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9: 831–871.
- Andrade-Linares, D. R., Zistl-Schlingmann, M., Foesel, B., Dannenmann, M., Schulz, S., & Schlöter, M. (2021). Short term effects of climate change and intensification of management on the abundance of microbes driving nitrogen turnover in montane grassland soils. *Science of the Total Environment*, 780, 146672.
- Banerjee, S., Misra, A., Sar, A., Pal, S., Chaudhury, S. and 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: doi 10.1016/j.apsoil.2020.103544



Bastani, M., A. Sadeghipour, N. Kamali, M. Zarafshar & S. Bazoot, 2023. How does livestock graze management affect woodland soil health? *Frontiers in Forests and Global Change*, 6: 1-8.

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.

Chai, C., Han, L., Xiong, C., Ge, A., Yue, X., Li, Y., ... & Song, J. (2024). Soil microbial diversity and network complexity drive the ecosystem multifunctionality of temperate grasslands under changing precipitation. *Science of The Total Environment*, 906, 167217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167217>

Chen, L., T. Baoyin, & F. Xia, 2022. Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Journal of Ecological Indicator*, 34: 1-12.

Das, P. P., Singh, K. R. B., Nagpure, G., Mansoori, A., Singh, R. P., Ghazi, I. A., ... & Singh, J. (2022). Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*, 214, 113821. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113821>

Dasgupta, D., & Brahmaprakash, G. (2021). Soil microbes are shaped by soil physico-chemical properties: A brief review of existing literature. *International Journal of Plant & Soil Science*, 33, 59–71.

Dungait, J. A., Ghee, C., Rowan, J. S., McKenzie, B. M., Hawes, C., Dixon, E. R., ... & Hopkins, D. W. (2013). Microbial responses to the erosional redistribution of soil organic carbon in arable fields. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.003>

Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>

Gayan, A., Borah, P., Nath, D., & Katak, 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>

Hou, S., Xin, M., Wang, L., Jiang, H., Li, N., & Wang, Z. (2014). The effects of erosion on the microbial populations and enzyme activity in black soil of northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 295–301.

Jolivet, M.; Braucher, R.; Dovchintseren, D.; Hocquet, S.; Schmitt, J.M.; Team, A. Erosion around a large-scale topographic high in a semi-arid sedimentary basin: Interactions between fluvial erosion, aeolian erosion and aeolian transport. *Gemorphology* 2021, 386, 107747.

Kamali, N., A. Sadeghipour, M. Souri & M. Mastinu, 2022. Variations in Soil Biological and Biochemical Indicators under Different Grazing Intensities and Seasonal Changes. *Land*, 11: 1537.

Kennedy, A. C., & Stubbs, T. L. (2006). Soil microbial communities as indicators of soil health. *Annals of Arid Zone*, 45, 287–308.

Kong, W., Su, F., Zhang, Q., Ishii, S., Sadowsky, M. J., Banerjee, S., ... & Wei, X. (2022). Erosion and deposition divergently affect the structure of soil bacterial communities and functionality. *Catena*, 209, 105805.

Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>

- Lal, T.N., Hinterberger, T., Widman, G., Schröder, M., Hill, N.J., Rosenstiel, W., Elger, C.E., Scholkopf, B. and Birbaumer, N., 2005. Methods towards invasive human brain computer interfaces. In L. K. Saul, Y. Weiss, and L. Bottou, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 17*. MIT Press, Cambridge.
- Li, C., Cano, A., Acosta-Martinez, V., Veum, K. S., & Moore-Kucera, J. (2020). A comparison between fatty acid methyl ester profiling methods (PLFA and EL-FAME) as soil health indicators. *Soil Science Society of America Journal*, 84, 1153–1169.
- Li, H.Q.; Zhu, H.S.; Wei, X.R.; Liu, B.Y.; Shao, M.A. (2021). Soil erosion leads to degradation of hydraulic properties in the agricultural region of Northeast China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 314, 107388.
- 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.
- Li, Z., Xiao, H., Tang, Z., Huang, J., Nie, X., Huang, B., Ma, W., Lu, Y. and 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.
- Makoi, J.H. and Ndakidemi, P.A. 2008. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem: *African Journal of Biotechnology*. 7: 181-191.
- Mandal, D.; Chandrakala, M.; Alam, N.M.; Roy, T.; Mandal, U. 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* 2021, 204, 105440.
- Mandal, D.; Dadhwal, K.S. *Land Evaluation and Soil Assessment for Conservation Planning and Enhanced Productivity*; Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute: Dehradun, India, 2012; p. 90.
- Mandal, D.; Patra, S.; Sharma, N.K.; Alam, N.M.; Jana, C.; Lal, R. Impacts of Soil Erosion on Soil Quality and Agricultural Sustainability in the North Western Himalayan Region of India. *Sustainability* 2023, 15, 5430. 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.
- Mohseni, N. (2019). Impact of water erosion on soil biological diversity in arid ecosystems. *Researches in Earth Sciences*, 10(2), 21–33. <https://doi.org/10.52547/esrj.10.2.21>
- Molla, A.; Skoufogianni, E.; Lolas, A.; Skordas, K. The impact of different cultivation practices on surface runoff, soil and nutrient losses in a rotational system of legume–cereal and sunflower. *Plants* 2022, 11, 3513.
- Moradi, H. R. , Rezaei, V. and 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
- Moreno-de las Heras, M. (2009). Development of soil physical structure and biological functionality in mining spoils affected by soil erosion in a Mediterranean-continental environment. *Geoderma*, 149, 249–256.
- Owens, P. N. (2020). Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 4115–4143.
- Park, J.-H., Meusburger, K., Jang, I., Kang, H., & Alewell, C. (2014). Erosion-induced changes in soil biogeochemical and microbiological properties in Swiss Alpine grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 69, 382–392.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., ... & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>

Pimentel, D.; Burgess, M. Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture* 2013, 3, 443–463.

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.

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.

Qu, K., Guo, F., Liu, X., Lin, Y., & Zou, Q. (2019). Application of machine learning in microbiology. *Frontiers in Microbiology*, 10, 827.

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.

Rasiah, V., and Kay, B.D. 1994. Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 935–942.

Řezáčová, V., Czako, A., Stehlík, M., Mayerová, M., Šimon, T., Smatanová, M., & Madaras, M. (2021). Organic fertilization improves soil aggregation through increase in abundance of eubacteria and products of arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientific Reports*, 11(1), 12548.

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>

Schuman, G. E., H. H. Janzen & J. E. Herrick, 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 116: 391–396.

Shi, W. 2011. Agricultural and ecological significance of soil enzymes: soil carbon sequestration and nutrient cycling. *Soil Enzymology*, 43–60.

Soltani Toularoud, A and S, Asghari. 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.

Sui, X., Zhang, R., Frey, B., Yang, L., Liu, Y., Ni, H., & Li, M. H. (2021). Soil physicochemical properties drive the variation in soil microbial communities along a forest successional series in a degraded wetland in northeastern China. *Ecology and Evolution*, 11, 2194–2208.

Sun, S.; Zhang, G.; He, T.; Song, S.; Chu, X. 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* 2021, 13, 4288.

Ternan, J.L., Williams, A.G., Elmes, A., and Hartley, R. 1996. Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management. *Earth Surface Processes and Landforms*. 21: 181–193.

Tuo D, Lu Q, Wu B, Li Q, Yao B, Cheng L, Zhu J. Effects of Wind-Water Erosion and Topographic Factor on Soil Properties in the Loess Hilly Region of China. *Plants (Basel)*. 2023 Jul 6;12(13):2568. doi: 10.3390/plants12132568. PMID: 37447129; PMCID: PMC10347127.

Veum, K. S., Lorenz, T., & Kremer, R. J. (2019). Phospholipid fatty acid profiles of soils under variable handling and storage conditions. *Agronomy Journal*, 111, 1090–1096.

Wauriu, M.; Lal, R. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara. Solomon Islands. *Soil Tillage Res.* 2003, 70, 19–27.

Wu, X.L.; Wei, Y.J.; Cai, C.F.; Yuan, Z.J.; Liao, Y.S.; Li, D.Q. Effects of erosion-induced land degradation on effective sediment size characteristics in sheet erosion. *Catena* 2020, 195, 104843.

Xiao, H., Li, Z., Chang, X., Huang, J., Nie, X., Liu, C., ... & Jiang, J. (2017). Soil erosion-related dynamics of soil bacterial communities and microbial respiration. *Applied Soil Ecology*, 119, 205–213.

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>

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>

فید استادی نشانه