

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)

Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno^{1*}, Morteza Saberi¹

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

*Corresponding author: mr.dahmardeh@uoz.ac.ir

Received date: 29/07/2025

Accepted date: 03/09/2025



[10.22034/jdmal.2025.2067347.1509](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2067347.1509)

Abstract

The Sarbaz watershed—characterized by steep terrain, episodic intense rainfall, and sparse vegetation—exhibits a high susceptibility to severe water erosion. This research investigated how varying water- erosion intensities affect the physical, chemical, and biological attributes of soils within the Sarbaz watershed. Soil sampling was conducted across four erosion- intensity classes (none, low, moderate, severe) at a depth of 0–30 cm using a completely randomized design. Composite samples were analyzed via one- way ANOVA in SPSS, and inter-parameter correlations were examined in R to identify significant statistical relationships. Increasing erosion intensity reduced clay content (26.4 → 18.1 %), increased bulk density (1.33 → 1.64 g cm⁻³), and lowered both porosity and gravimetric moisture (14.4 → 6.7 %). Chemically, substantial declines occurred in soil nutrients: SOC (11.87 → 2.03 g kg⁻¹), TN (0.93 → 0.17 g kg⁻¹), AP (18.5 → 4.2 mg kg⁻¹), and AK (279 → 102 mg kg⁻¹). Biological indices, including catalase activity, microbial biomass, and basal respiration—also decreased markedly under higher erosion intensities. The decline in microbial carbon relative to total carbon indicated reduced microbial participation in carbon stabilization and biogeochemical cycling. Overall, water erosion substantially degraded soil structure and functionality, with the most pronounced impacts on organic matter and microbial biomass—two critical determinants of biological sustainability and fertility. Therefore, scientifically grounded management and conservation strategies are indispensable for preserving and restoring the physical, chemical, and biological integrity of soils across the Sarbaz watershed, constituting a foundational step toward sustainable land management in this arid environment.

Keywords: Soil stability, arid and semi-arid soils, biogeochemical cycle, microbial activity, catalase enzyme.

How to cite this article

Dahmardeh Ghaleno, MR and Saberim, 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). *Desert Management*, 13(3), 37-58. DOI: [10.22034/jdmal.2025.2067347.1509](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2067347.1509)



Extended Abstract

Introduction

Soil erosion is one of the most widespread environmental problems and leads to considerable degradation of soil quality in natural ecosystems (23). Wind and water erosion are recognized as the two major types of erosion, which often occur together and interact strongly in arid and semi- arid regions (42). The total amount of soil lost through their combined effects is generally higher than that caused by each type of erosion separately (15).

Among these, water erosion is regarded as one of the most serious threats to soil quality, especially under arid and semi- arid climate conditions. It reduces soil organic matter, disturbs the nutrient balance, and weakens microbial activity, thereby affecting the soil's overall ecological functioning. The Sarbaz watershed, located in southeastern Iran, is characterized by steep slopes, sparse vegetation cover, and limited but intense summer rainfall. These factors create favorable conditions for surface runoff, flash floods, and severe water erosion.

The impacts of erosion in this region extend beyond the direct degradation of soil. They also contribute to downstream sediment accumulation, damage to agricultural lands, and a higher risk of flooding. Although the Sarbaz watershed is ecologically important and highly sensitive to erosion processes, comprehensive research on how different levels of water- erosion intensity influence its soil properties has been limited. Therefore, this study aims to examine the effects of varying intensities of water erosion on the physical, chemical, and biological characteristics of soil in the Sarbaz watershed, and to provide scientific insights for effective conservation planning and sustainable soil- resource management.

Materials and Methods

Soil sampling in this study was carried out using a completely randomized design. Initially, erosion and sedimentation maps available for the region were used to classify the intensity of soil erosion (Fig. 1), including four categories: no erosion, low erosion, moderate erosion, and severe erosion (Table 1). In each erosion category, four homogeneous areas with similar physiographic conditions were selected. Within each area, five soil samples were taken — one from the center and four arranged in a plus-shaped pattern around it. Sampling was performed from a depth of 0–30 cm. For each erosion category, samples collected from homogeneous areas were mixed to form a composite sample. Immediately after collection, the samples were divided into two parts. The portion intended for analyses of biological properties was transferred to the laboratory in sealed containers to maintain the original moisture condition and was kept near dry ice during transport. These samples were not sieved and were stored in a refrigerator until biological measurements were conducted. The remaining portion was used for determining physical and chemical properties. These samples were air-dried and passed through a 2 mm sieve (12). Statistical analyses were performed using one-way analysis of variance (ANOVA) in SPSS software. Duncan's multiple range test at a 95 % confidence level was employed to compare mean values. Correlations among the studied soil parameters were also evaluated using R software.

Results and Discussion

The results of this study revealed that various intensities of water erosion significantly affected the physical, chemical, and biological properties of soils in the Sarbaz watershed. From a physical standpoint, increasing erosion intensity was associated with a reduction in clay content, an increase in bulk density, and a decrease in soil porosity. A marked decline in gravimetric moisture—from 14.4 % in non- eroded soils to 6.7 % in severely eroded soils—along with an increase in bulk density from 1.33 to 1.64 g cm⁻³, indicated a reduction in the soil's water- retention capacity and greater compaction (Tables 2–4). Chemical analyses showed that higher erosion intensity caused a clear depletion of essential soil nutrients. The contents of organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and potassium declined significantly with increasing erosion severity. For example, organic carbon decreased from 11.87 g kg⁻¹ in non- eroded soils to 2.03 g kg⁻¹ in severely eroded soils, and similar trends were observed for other nutrients (Tables 5–7). This overall reduction indicates a decrease in soil fertility and a disruption of biogeochemical cycles. Regarding biological properties, catalase enzyme activity, microbial basal respiration, and microbial biomass were all considerably lower under eroded conditions (Tables 8–10). Likewise, the ratio of microbial carbon to total carbon—which represents the contribution of microorganisms to soil organic carbon stabilization—declined significantly with increasing erosion intensity. This decrease reflects a deterioration in soil biological quality and a reduced role of microbial communities in carbon fixation. These changes are mainly attributed to

erosion- induced loss of organic matter, deterioration of soil structure, reduction in moisture, and decreasing habitat suitability for microorganisms. Overall, an increase in erosion intensity led to a simultaneous decline in the physical, chemical, and biological indicators of soil quality. This joint degradation has a substantial adverse impact on the ecological functioning of soils and threatens the environmental sustainability of the Sarbaz watershed.

Conclusion

In arid and semi- arid areas, water erosion severely reduces soil ecosystem efficiency by causing extensive changes in soil structure and composition. From a physical perspective, the decline in clay percentage and the breakdown of soil aggregates result in higher bulk density and lower porosity, which in turn restrict water- retention capacity and soil aeration. Because clay plays a key role in aggregate stability as well as in water and nutrient retention, its reduction has a clear negative effect on overall soil quality (30). From a chemical standpoint, the decrease in essential nutrients such as organic carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium reflects a decline in the soil's nutritional capacity and fertility potential. These findings agree with previous reports indicating that water erosion removes the nutrient- rich surface layers of soil (20). Reduction in soil organic carbon is among the most pronounced consequences of erosion, as fine, carbon- rich particles are selectively displaced and later deposited in sedimentary zones (23). On the biological side, reduced enzyme activities such as catalase, along with declines in microbial biomass and respiration, demonstrate weakened biological functioning and reduced microorganism populations (18). These components are crucial for processes such as carbon stabilization and nutrient cycling (45). The combined physical, chemical, and biological degradations triggered by erosion threaten the environmental sustainability of the region and further intensify the erosion cycle. Therefore, maintaining soil texture and organic matter, particularly in non- eroded areas, is essential for controlling and mitigating the adverse effects of water erosion. Developing management strategies based on ecological principles and applying effective conservation practices represent key steps toward restoring soil properties and strengthening the resilience of natural resources in the Sarbaz watershed.

Keywords: Soil stability, Arid and semi-arid soils, Biogeochemical cycle, Microbial activity, Catalase enzyme.

Table 1. General characteristics of the study working units

Working Unit	Dominant Land Use	Elevation Class (m)	Aspect	Slope Range (%)
No erosion	Poor range	790-900	North & South	2-14
Low erosion	Poor range	900-950	North & South	2-16
Moderate erosion	Poor range	950-1300	East & West	12-25
severe erosion	Poor range	1300-1650	East & West	25-45

Table 2. Analysis of variance for the effects of erosion intensity on soil physical properties

Soil parameters		df	Mean Squares	F	sig
Sand (%)	Between Groups	3	245.6	226.7	zero**
	Within Groups	16	1.08		
Silt (%)	Between Groups	3	129.2	229.7	zero**
	Within Groups	16	0.56		
Clay (%)	Between Groups	3	17.7	13.5	0.002**
	Within Groups	16	1.3		
Moisture (%)	Between Groups	3	33.3	65.9	zero**
	Within Groups	16	0.5		
Bulk Density (g/cm ³)	Between Groups	3	0.58	71.5	zero**
	Within Groups	16	0.001		
Porosity (%)	Between Groups	3	100.0	120.1	zero**
	Within Groups	16	0.83		

** Indicate significance at the 1% probability levels.

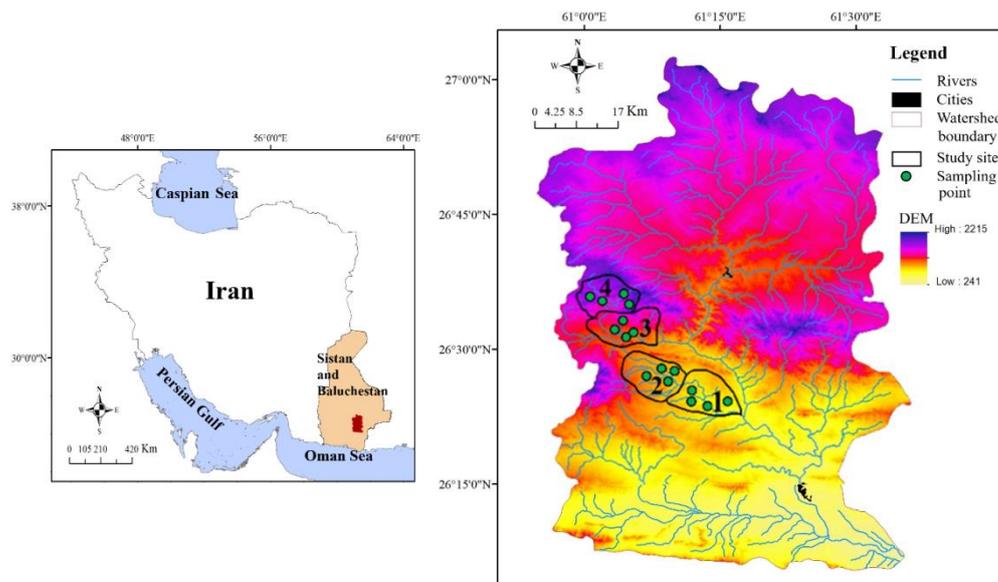


Figure 1. Location of the Sarbaz watershed within the province and the country (1 = no erosion, 2 = low, 3 = moderate, 4 = severe erosion)

Table 3. Mean comparison for the effects of erosion intensity on soil physical properties

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Sand (%)	d 50.3 ± 0.6	c 57.0 ± 0.5	b 65.0 ± 0.5	a 71.0 ± 0.5
Silt (%)	a 27.6 ± 0.3	b 22.6 ± 0.3	c 17.3 ± 0.6	d 12.5 ± 0.2
Clay (%)	a 21.7 ± 1.02	a 20.2 ± 0.6	b 17.6 ± 0.3	b 16.4 ± 0.4
Moisture (%)	a 14.4 ± 0.3	b 12.1 ± 0.5	c 9.5 ± 0.4	d 6.7 ± 1.0
Bulk Density (g/cm ³)	d 1.33 ± 0.005	c 1.42 ± 0.008	b 1.56 ± 0.01	a 1.64 ± 0.02
Porosity (%)	a 48.0 ± 0.5	b 46.0 ± 0.5	c 41.3 ± 0.3	d 35.0 ± 0.5

Different letters within each Row indicate a significant difference ($p < 0.05$)

Table 4. Results of correlation coefficient analysis among soil physical properties

	Erosion	Sand	Silt	Clay	Moisture	BD	N
Erosion	1						
Sand	0.99	1					
Silt	-0.99	-0.99	1				
Clay	-0.90	-0.93	0.88	1			
Moisture	-0.97	-0.98	0.97	0.91	1		
BD	0.97	0.97	-0.96	-0.91	-0.94	1	
N	-0.96	-0.95	0.96	0.84	0.95	-0.91	1

Table 5. Analysis of variance for the effects of erosion intensity on soil chemical properties

Soil parameters		df	Mean Squares	F	sig
Organic Carbon (%)	Between Groups	3	57.2	982.1	zero**
	Within Groups	16	0.05		
Total Nitrogen (%)	Between Groups	3	0.26	113.9	zero**
	Within Groups	16	0.02		
Available Potassium (mg/kg)	Between Groups	3	11699.8	626.7	zero**
	Within Groups	16	18.6		
Available Phosphorus (mg/kg)	Between Groups	3	25.4	356.7	zero**
	Within Groups	16	0.71		
pH	Between Groups	3	0.01	1.68	0.24 ^{ns}
	Within Groups	16	0.01		
EC (dS/m)	Between Groups	3	3.18	4609.9	zero**
	Within Groups	16	0.01		

** and * indicate significance at the 1% and 5% probability levels, respectively.

Table 6. Mean comparison for the effects of erosion intensity on soil chemical properties

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Organic Carbon (%)	a 11.8 ± 1.0	b 9.2 ± 1.0	c 5.01 ± 1.0	d 2.03 ± 0.04
Total Nitrogen (%)	a 1.0 ± 0.04	b 0.83 ± 0.02	c 0.62 ± 0.01	d 0.33 ± 0.01
Available Potassium (mg/kg)	a 224.6 ± 3.2	b 193.3 ± 2.3	c 142.08 ± 2.0	d 82.0 ± 0.2
Available Phosphorus (mg/kg)	a 12.1 ± 1.0	b 9.7 ± 0.03	c 7.2 ± 1.0	d 5.5 ± 1.0
pH	a 7.97 ± 0.07	a 8.06 ± 0.06	a 8.0 ± 0.04	a 7.89 ± 0.02
EC (dS/m)	d 0.8 ± 0.01	c 1.1 ± 0.07	b 1.7 ± 0.06	a 3.1 ± 1.0

indicate a significant difference (p<0.05) Different letters within each Row

Table 7. Results of correlation coefficient analysis of soil chemical Properties

	Erosion	OC	TN	AK	AP	pH	EC
Erosion	1						
OC	-0.99	1					
TN	-0.98	0.97	1				
AK	-0.98	0.98	0.98	1			
AP	-0.99	0.99	0.96	0.97	1		
pH	-0.34	0.33	0.38	0.40	0.28	1	
EC	0.93	-0.93	-0.95	-0.96	-0.91	-0.49	1

Table 8. Analysis of variance for the effects of erosion intensity on soil biological properties

Soil parameters	df	Mean Squares	F	sig
Catalase Enzyme ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1}$ dry soil)	Between Groups	3	3.41	433.1 zero**
	Within Groups	16	0.00	
Microbial Biomass Carbon (mg/kg)	Between Groups	3	58958.4	1938.3 zero**
	Within Groups	16	30.4	
Microbial Biomass Nitrogen (mg/kg)	Between Groups	3	633.5	1243.0 zero**
	Within Groups	16	0.5	
Basal Microbial Respiration (mg CO_2 /g soil-day)	Between Groups	3	0.23	206.3 zero**
	Within Groups	16	0.00	
Microorganism Population ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1}$ dry soil)	Between Groups	3	4.96	841.3 zero**
	Within Groups	16	0.00	
Microbial Quotient (mg Cmic / g Corg)	Between Groups	3	3.17	365.4 zero**
	Within Groups	16	0.00	

**Significant difference between treatments at the 1% level

Table 9. Mean comparison of erosion effects on soil biological properties

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Catalase Enzyme ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1}$ dry soil)	a 3.05 ± 0.05	b 2.07 ± 0.05	c 1.06 ± 0.03	^d 0.68 ± 0.05
Microbial Biomass Carbon (mg/kg)	a 370.0 ± 4.5	b 273.3 ± 2.3	c 143.0 ± 2.5	^d 52.3 ± 1.7
Microbial Biomass Nitrogen (mg/kg)	a 39.6 ± 0.5	b 30.1 ± 0.4	c 17.7 ± 0.3	^d 6.3 ± 0.2
Basal Microbial Respiration (mg CO_2 /g soil-day)	a 0.85 ± 0.03	b 0.54 ± 0.01	c 0.38 ± 0.01	d 0.19 ± 0.008
Microorganism Population ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1}$ dry soil)	a 3.07 ± 0.06	b 2.09 ± 0.05	c 0.84 ± 0.02	d 0.18 ± 0.01
Microbial Quotient (mg Cmic / g Corg)	a 3.5 ± 0.07	b 2.8 ± 0.06	c 2.1 ± 0.008	d 1.1 ± 0.03

Different letters within each Row indicate a significant difference (p<0.05)

Table 10. Results of correlation coefficient analysis among soil biological properties

	Erosion	Catalase	MBC	MBN	MP	MR	MQ
Erosion	1						
Catalase	-0.98	1					
MBC	-0.99	0.98	1				
MBN	-0.99	0.97	0.99	1			
MP	-0.98	0.98	0.97	0.97	1		
MR	-0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	1	
MQ	-0.99	0.95	0.98	0.99	0.97	0.97	1



بررسی نقش شدت فرسایش آبی بر تغییر ویژگی‌های خاک در چارچوب مدیریت پایدار اراضی بیابانی (بررسی موردی: حوزه آبخیز سرباز)

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

۱. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

* نویسنده مسئول: mr.dahmardeh@uoz.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷



[10.22034/jdmal.2025.2067347.1509](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2067347.1509)

چکیده

حوزه آبخیز سرباز با شیب‌های تند، بارش‌های رگباری و پوشش گیاهی محدود، مستعد فرسایش شدید خاک است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر شدت‌های مختلف فرسایش آبی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در حوزه آبخیز سرباز انجام شد. نمونه برداری خاک در چهار طبقه شدت فرسایش: بدون فرسایش، کم، متوسط و شدید و از عمق صفر تا ۳۰m با روش کاملاً تصادفی و به طور ترکیبی انجام شد و داده‌های حاصل با آزمون ANOVA تحلیل شد. همچنین، همبستگی بین متغیرها بررسی شد تا ارتباطات آماری میان آنها مشخص شود. نتایج نشان داد که افزایش شدت فرسایش، موجب کاهش درصد رس از ۲۶/۴ به ۱۸/۱، افزایش جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳۳ به ۱/۶۴g/cm³، کاهش رطوبت وزنی خاک از ۱۴/۴ به ۶/۷ و کاهش تخلخل می‌شود. از نظر شیمیایی، کاهش معنی‌داری در عناصر تغذیه‌ای خاک مشاهده شد، به طوری که SOC از ۱۱/۸۷ به ۲/۰۳g/kg، TN از ۰/۹۳ به ۰/۱۷g/kg، AP از ۱۸/۵ به ۴/۲mg/kg و AK از ۲۷۹ به ۱۰۲mg/kg کاهش یافت. شاخص‌های زیستی فعالیت آنزیم کاتالاز، زیست‌توده میکروبی و تنفس پایه، در شدت‌های زیاد فرسایش کاهش معناداری نشان دادند. نسبت کربن میکروبی به کربن کل نیز کاهش یافت که بیانگر تضعیف نقش میکروارگانیسم‌ها در تثبیت کربن و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که فرسایش آبی ساختار و عملکرد خاک را تضعیف می‌کند. به طور کلی، بیشترین تأثیر فرسایش بر مواد آلی و زیست‌توده میکروبی خاک مشاهده شد، که نقش کلیدی در کاهش پایداری زیستی و حاصلخیزی خاک دارند. بنابراین، طراحی و اجرای راهکارهای مدیریتی و حفاظتی مبتنی بر اصول علمی برای حفظ و احیای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در حوزه آبخیز سرباز، برای مدیریت پایدار اراضی بیابانی این منطقه مهم است.

واژگان کلیدی: پایداری خاک، خاک‌های خشک و نیمه‌خشک، چرخه بیوژئوشیمیایی، فعالیت میکروبی، آنزیم کاتالاز.

استناد به این مقاله

دهمرده قلعه نو، محمدرضا و صابری، مرتضی. (۱۴۰۴). بررسی نقش شدت فرسایش آبی بر تغییر ویژگی‌های خاک در چارچوب مدیریت پایدار اراضی بیابانی (بررسی موردی: حوزه آبخیز سرباز). مدیریت بیابان، ۱۳(۳)، ۳۷-۵۸. DOI: [10.22034/jdmal.2025.2067347.1509](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2067347.1509)

■ مقدمه

فرسایش خاک مشکل محیط‌زیستی فراگیری است که موجب تخریب قابل توجه خاک در بوم‌سازگان‌های طبیعی شود (۲۲) و در قالب فرایندهای بادی و آبی نقش مهمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارند (۴۱). مقدار خاک از دست رفته در اثر فرسایش ترکیبی، بیش از میزان خاک از دست رفته ناشی از هر یک از انواع فرسایش به‌صورت مجزا است (۱۴).

فرسایش آبی، علاوه بر تخریب خاک، تهدیدی جدی برای پایداری محیط‌زیست و بهره‌وری بوم‌سازگان‌های طبیعی است. این پدیده بیشتر ناشی از انرژی برخورد قطرات باران و جریان رواناب سطحی است و موجب جدا شدن و انتقال ذرات سطحی خاک می‌شود که معمولاً غنی از مواد آلی و عناصر غذایی هستند (۴۲). از آنجا که فرسایش ساختار فیزیکی خاک را تغییر می‌دهد، نفوذپذیری کاهش یافته و پایداری خاک‌دانه‌ها تضعیف می‌شود؛ در نتیجه، جامعه میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی خاک نیز زیر تأثیر قرار می‌گیرد و مقدار SO_4^1 کاهش می‌یابد، که در پایان ظرفیت بوم‌سازگاری و حاصلخیزی خاک را کاهش می‌دهد (۲۵).

پژوهش‌های انجام شده در شمال چین نشان داد که فرسایش آبی تأثیر قابل توجهی بر کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها و میزان SOC دارد. همچنین، این فرایند موجب کاهش تنوع میکروبی و فعالیت آنزیمی در مناطق فرسایش یافته و در مقابل، در مناطق رسوب‌گذاری افزایش نسبی مواد مغذی، تنوع میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی مشاهده شده است. این نتایج بیانگر آن است که فرسایش موجب تخریب ساختار خاک‌دانه‌ها و کاهش بهره‌وری منابع خاک شده و به تبع آن، عملکرد بوم‌سازگان‌های آسیب‌دیده را کاهش می‌دهد (۴۲).

از آنجا که میکروارگانیسم‌های خاک نقش اساسی در چرخه مواد مغذی و حفظ پایداری خاک دارند، کاهش تنوع و فعالیت این جوامع زیستی به شدت پایداری زیستی و حاصلخیزی خاک را مختل می‌کند (۸). ترکیب، تنوع و فراوانی جوامع میکروبی خاک به شدت وابسته به تغییرات

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است (۳۲). عواملی مانند pH، OM^2 ، میزان رطوبت و مواد مغذی بر ساختار این جوامع تأثیرگذار هستند (۷). علاوه بر این، گروه‌های میکروبی مختلف مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها و جلبک‌ها به‌عنوان شاخص‌های قابل اعتماد برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک شناخته می‌شوند (۲۸). بنابراین، می‌توان گفت تغییرات ناشی از فرسایش در ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک مستقیماً بر جوامع میکروبی اثرگذار است (۱۵).

بررسی‌های گوناگون نشان داده‌اند که افزایش شدت فرسایش موجب کاهش محتویات رطوبت، TN^3 ، SOC ، AP^4 ، AK^5 و فعالیت زیستی خاک می‌شود، که این تغییرات اثر مستقیمی بر تنوع و عملکرد میکروبیوتای خاک دارند و کاهش عملکرد چندگانه خاک را به دنبال دارند (۳۱). شدت فرسایش آبی موجب کاهش مواد مغذی (۹) و افزایش برخی عوامل مخرب مانند اسیدیته و چگالی ظاهری می‌شود که نهایتاً منجر به افت شاخص‌های زیستی و کاهش فعالیت میکروبی خاک می‌شود (۳۰).

در بررسی انجام‌شده بر روی خاک‌های زراعی چرنوزم، مشخص شد که فرسایش آبی موجب کاهش معنی‌دار در پایداری خاک‌دانه‌ها و محتوای SOC می‌شود، که این امر به تضعیف ساختار فیزیکی و افت توان حاصلخیزی خاک منجر می‌شود (۲۶). همچنین، رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و پاسخ‌های میکروبی در کاربری‌های مختلف زمین مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که ساختار جوامع میکروبی خاک با میزان اسیدهای چرب فسفولیپیدی ارتباط معنی‌دار دارد؛ بنابراین می‌توان از این اسیدها به‌عنوان شاخصی معتبر برای پیش‌بینی ترکیب و تنوع میکروبی استفاده کرد (۳۲). افزون بر این، تغییرات در ویژگی‌های میکروبی خاک با تغییرات ناشی از فرسایش در عملکرد چندگانه خاک مرتبط است (۲۷). همچنین مشخص شده که تنوع و ساختار جمعیت میکروبی در خاک‌های جنگلی تحت تأثیر عواملی نظیر pH، SOC و P خاک قرار دارد (۴۰). میکروارگانیسم‌های خاک به‌عنوان

² Organic Matter³ Total Nitrogen⁴ Available Phosphorus⁵ Available Potassium¹ Soil Organic Carbon

مشاهده شده است. با این حال، اغلب این مطالعات بر مناطق زراعی متمرکز بوده و کمتر به بوم‌سازگان‌های طبیعی خشک پرداخته‌اند. این خلأ پژوهشی، ضرورت مطالعه حاضر را در حوزه آبخیز سرپاز آشکار می‌سازد. با وجود اهمیت این حوزه و حساسیت زیاد آن نسبت به فرسایش، تاکنون هیچ مطالعه‌ای اثر همزمان سطوح مختلف شدت فرسایش آبی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در حوزه آبخیز سرپاز را بررسی نکرده‌است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف تحلیل اثرات شدت‌های متفاوت فرسایش آبی بر ویژگی‌های مختلف خاک در این منطقه انجام شده است. فرضیه اصلی مطالعه آن است که افزایش شدت فرسایش منجر به کاهش پایداری ساختار خاک، میزان مواد آلی و تنوع میکروبی می‌شود.

■ مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه

حوزه آبخیز سرپاز، واقع در استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران، با مساحتی حدود 1350 km^2 ، یکی از مناطق حساس و آسیب‌پذیر در زمینه فرسایش آبی است. بر اساس بازدید و مشاهده‌های میدانی و داده‌های اداره کل منابع طبیعی استان سیستان و بلوچستان، فرسایش آبی در این منطقه به اشکال سطحی، شیاری، آبراه‌ای و کناری مشاهده شده‌است. به منظور بررسی تأثیر فرسایش بر خاک، چهار طبقه شدت فرسایش شامل بدون فرسایش، فرسایش کم، فرسایش متوسط و فرسایش شدید تعریف شد. مناطقی با پوشش گیاهی مناسب و حداقل نشانه‌های فرسایش به‌عنوان طبقه بدون فرسایش انتخاب شدند (جدول ۱). این دسته‌بندی چهارگانه، زمینه لازم برای مطالعه تأثیرات فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک فراهم می‌کند و امکان مقایسه تغییرات شاخص‌های کلیدی خاک در سطوح مختلف شدت فرسایش را ایجاد می‌نماید.

حوضه آبخیز در عرض‌های جغرافیایی $25^{\circ}55'$ تا $27^{\circ}10'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $60^{\circ}55'$ تا $61^{\circ}40'$ شرقی قرار گرفته است (شکل ۱) و از نظر پستی‌بلندی شامل زمین‌های کوهستانی و تپه‌ماهور با شیب‌های تند و متوسط می‌باشد، به‌گونه‌ای که شیب عمومی منطقه در

عناصر کلیدی در فرآیندهای زیست‌ژئوشیمیایی نقش مهمی در تجزیه ترکیبات آلی و آزادسازی عناصر غذایی ایفا می‌کند و از این طریق بر جریان CO_2 در خاک و پایداری عملکرد بوم‌سازگان اثرگذارند (۴۰). افزایش شدت فرسایش در اراضی کشاورزی موجب کاهش چشمگیر ذخایر کربن میکروبی در لایه‌های ۵ تا 20 cm خاک گردید، که بیانگر محدود شدن منابع کربنی در لایه‌های سطحی خاک و کاهش بهره‌وری میکروبی در استفاده از کربن است (۴۳). آنزیم‌های آزاد شده توسط میکروارگانیسم‌های خاک نسبت به تغییرات محیطی بسیار حساس‌اند و بنابراین می‌توانند شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی پایداری بوم‌سازگان‌ها در برابر تغییرات محیطی و آشوب‌های طبیعی باماسهد (۲۷).

فرسایش آبی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از تهدیدات مهم محیط‌زیست به شمار می‌رود که موجب افت کیفیت خاک، کاهش مواد آلی، اختلال در توازن عناصر غذایی و تضعیف جامعه میکروبی خاک می‌شود (۳۸). حوزه آبخیز سرپاز با شرایط اقلیمی خاص، از جمله بارش‌های رگباری شدید و پوشش گیاهی محدود، به شدت در معرض فرسایش و پیامدهای ناشی از آن قرار دارد. اثرات فرسایش در این منطقه تنها به تخریب خاک محدود نمی‌شود، بلکه پیامدهای ثانویه‌ای مانند رسوب‌گذاری در مناطق پایین‌دست، تخریب اراضی کشاورزی و افزایش سیل‌خیزی را نیز به همراه دارد.

با توجه به اینکه فرسایش آبی موجب کاهش OM، تغییر pH، افزایش چگالی ظاهری و کاهش رطوبت خاک می‌شود، انتظار می‌رود این تغییرات به‌طور مستقیم بر زیستگاه میکروارگانیسم‌ها تأثیر گذارد و ترکیب، تنوع و عملکرد آنها را دچار اختلال کند. به بیان دیگر، تخریب ساختار فیزیکی و کاهش منابع کربنی و غذایی خاک، شرایط را برای بقای جامعه میکروبی محدود می‌کند و در نتیجه، فعالیت‌های زیستی و آنزیمی خاک نیز افت پیدا می‌کند. یافته‌های برخی پژوهش‌ها در شمال چین (۴۱)، خاک‌های چرنوزم اروپا (۲۶)، حوزه آبخیز دهبکردی کرمان (۳۱) و حوزه آبخیز منزلاب زاهدان (۳۰) نیز نشان داده‌اند که شدت فرسایش با کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها، SOC و تنوع میکروبی همراه است، در حالی که در مناطق رسوب‌گذاری افزایش نسبی مواد مغذی و فعالیت زیستی

اندازه‌گیری درصد ماسه، رس و سیلت با استفاده از روش هیدرومتری تعیین و نتایج به کمک مثلث بافت خاک (۳۳) طبقه‌بندی شد. جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از روش کلوخه و تخلخل آن از طریق محاسبه چگالی حجمی برآورد شد (۶). متغیرهای شیمیایی خاک شامل SOC و TN و به ترتیب از طریق روش اکسیداسیون دی کرومات^۱ (DO) والکی و روش کجلدال اندازه‌گیری شدند. AP با روش اولسن و AK با استخراج استات آمونیوم^۲ (EAA) خنثی تعیین و سپس توسط طیف‌سنجی جذب اتمی تحلیل شدند. علاوه بر این، pH خاک با استفاده از پتاسیومتر و EC نیز با روش استاندارد اندازه‌گیری و رطوبت خاک به صورت وزنی تعیین شد (۴).

ویژگی‌های زیستی خاک

ویژگی‌های زیستی مورد مطالعه در پژوهش حاضر شامل آنزیم کاتالاز، کربن زیتوده میکروبی^۳ (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی^۴ (MBN)، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه بودند. به منظور بررسی تأثیر فرسایش خاک بر فعالیت‌های آنزیمی خاک، آنزیم کاتالاز خاک با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به وسیله اسپکتروفوتومتر UV با طول موج تقریباً ۲۴۰nm اندازه‌گیری شد. کربن زیتوده میکروبی به روش گازدهی با کلروفرم^۵ -استخراج اندازه‌گیری شد (۵). برای محاسبه این ویژگی زیستی از رابطه (۱) استفاده شد (۲۹):

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

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 (۲۹).

بسیاری از نواحی بیش از ۳۰٪ است. ارتفاع از سطح دریا در این منطقه از حدود ۲۴۱m در نواحی پایین دست جنوب تا بیش از ۲۲۱۵m در بخش‌های مرتفع شمالی متغیر است. اقلیم حوضه گرم و خشک با بارش سالانه کم و پراکنده، بیشتر در قالب بارش‌های رگباری و شدید تابستانی، با میانگین بارندگی ۱۰۰ تا ۲۵۰mm، و دمای متوسط سالانه بین ۲۲ تا ۲۸°C است که در ماه‌های گرم به بیش از ۴۵°C می‌رسد. پوشش گیاهی محدود، خاک‌های حساس و بارش‌های پر شدت، این حوضه را در معرض فرسایش شدید آبی و پیامدهای مخرب آن، از جمله کاهش حاصلخیزی خاک و تخریب بوم‌سازگان، قرار داده است.

داده‌برداری خاک

نمونه‌برداری خاک در پژوهش حاضر به صورت طرح کاملاً تصادفی انجام شد. در آغاز بر اساس بازدیدهای میدانی، نقشه شدت فرسایش در منطقه با طبقه‌بندی بدون فرسایش، فرسایش کم، فرسایش متوسط و فرسایش شدید، تهیه شد. سپس در هر منطقه فرسایشی، چهار منطقه همگن با شرایط فیزیوگرافی تقریباً مشابه انتخاب شد و در هر کدام از آنها، پنج نمونه خاک، یک نمونه در مرکز و چهار نمونه به صورت علامت بعلاوه در اطراف آن برداشت شد. نمونه‌برداری از خاک از عمق صفر تا ۳۰cm انجام شد. برای هر مکان فرسایشی، نمونه‌های برداشت شده از مناطق همگن با هم ترکیب شده و یک نمونه مرکب تهیه شد. بلافاصله پس از برداشت، نمونه‌های خاک به دو بخش تقسیم شدند. بخشی از نمونه‌ها که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی در نظر گرفته شده بود، بدون الک کردن و با حفظ شرایط رطوبتی اولیه، در ظروف دربسته و در مجاورت یخ خشک به آزمایشگاه منتقل و تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال نگهداری شد. بخش دیگر نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری نمونه‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک ۲mm، مورد استفاده قرار گرفت (۱۲).

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

در پژوهش حاضر، ویژگی‌های فیزیکی بافت خاک شامل

¹ Dichromate Oxidation

² Extraction of Ammonium Acetate

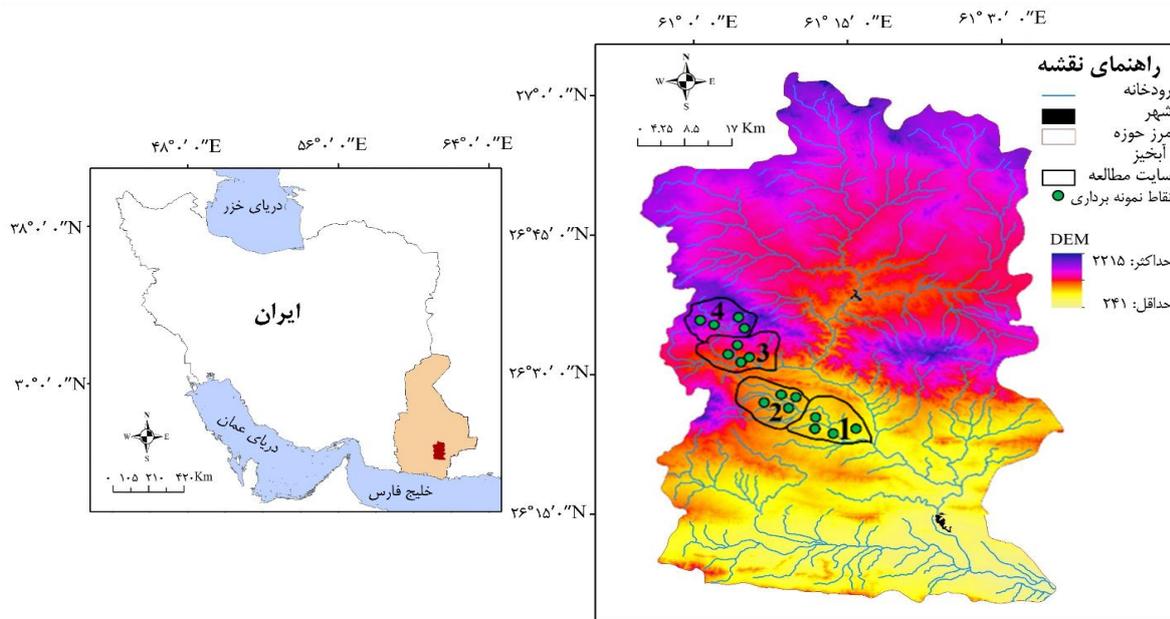
³ Microbial biomass carbon

⁴ Microbial biomass nitrogen

⁵ Chloroform fumigation

جدول ۱. مشخصات کلی واحدهای کاری مطالعاتی

واحد کاری	کاربری/پوشش غالب	طبقه ارتفاعی	جهت	دامنه شیب
بدون فرسایش	مرتع فقیر	۹۰۰-۷۹۰	شمالی و جنوبی	۲-۱۴٪
فرسایش کم	مرتع فقیر	۹۵۰-۹۰۰	شمالی و جنوبی	۲-۱۶٪
فرسایش متوسط	مرتع فقیر	۱۳۰۰-۹۵۰	شرقی و غربی	۱۲-۲۵٪
فرسایش شدید	مرتع فقیر	۱۶۵۰-۱۳۰۰	شرقی و غربی	۲۵-۴۵٪



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز سرباز در استان و کشور

(۱: بدون فرسایش، ۲: فرسایش کم، ۳: فرسایش متوسط، ۴: فرسایش شدید)

گرفته شد. همچنین، تحلیل همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه در محیط نرم افزار R انجام شد.

نتایج

تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که شدت فرسایش تأثیر بسیار معنی‌داری بر درصد ماسه، سیلت، رس، رطوبت، وزن مخصوص ظاهری و تخلخل خاک دارد، به طوری که میانگین مربعات بین گروه‌ها به‌طور قابل توجهی بالاتر از درون گروه‌ها است. این نتایج بیانگر تفاوت آماری قوی بین سطوح مختلف فرسایش در خصوص تغییرات فیزیکی خاک بوده و نشان می‌دهد که فرسایش به‌طور موثر ترکیب بافتی، ظرفیت نگهداری آب و ساختار خاک را تغییر می‌دهد (جدول ۲).

با افزایش شدت فرسایش، تغییرات معنی‌داری در ویژگی‌های فیزیکی خاک مشاهده شد که نشان‌دهنده

جمعیت میکروارگانیسم‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی^۱ (MPN) محاسبه شد. تنفس میکروبی از جمع‌آوری CO₂ رها شده در NaOH و انجام تیتراسیون اندازه‌گیری شد (۱) همچنین با تقسیم کربن آلی زیتوده میکروبی به کربن آلی خاک سهم میکروبی خاک تعیین شد (۲۲).

تحلیل داده‌ها

پس از انجام اندازه‌گیری آزمایشگاهی، نرمال بودن داده‌ها با آزمون Kolmogrove- Smirnov و همگنی واریانس‌ها با آزمون Levene ارزیابی شد. داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) شد. برای مقایسه میانگین‌ها، آزمون دانکن با سطح اطمینان ۰.۹۵ به کار

¹ Most Probable Number

همبستگی ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج همبستگی نشان داد که شدت فرسایش با بافت خاک، رطوبت، وزن مخصوص ظاهری و تخلخل روابط معنی‌دار و قوی دارد. بین فرسایش و درصد ماسه همبستگی مثبت بسیار زیاد و در مقابل با سیلت و رس همبستگی منفی مشاهده شد، که نشان می‌دهد با افزایش فرسایش، بخش‌های ریزدانه‌تر خاک از بین می‌رود و خاک ماسه‌ای‌تر می‌شود. فرسایش همچنین موجب کاهش قابل توجه رطوبت خاک و تخلخل می‌شود و در مقابل وزن مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد، که این امر بیانگر کاهش تخلخل، فشردگی بیشتر خاک و افت کیفیت فیزیکی آن است. این روابط نشان می‌دهد که فرسایش تخریب ساختار فیزیکی خاک را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (جدول ۴).

تخریب ساختاری خاک است. درصد ماسه به‌طور پیوسته از ۵۰/۱ به ۷۱٪ افزایش یافت، در حالی که مقادیر سیلت و رس کاهش یافتند، که بیانگر حذف ذرات ریزتر و باقی ماندن ذرات درشت‌تر در نتیجه فرآیند فرسایش است. کاهش قابل توجه رطوبت خاک از ۱۴/۴ به ۶/۷٪ در خاک‌های فرسایش‌یافته، به همراه افزایش وزن مخصوص ظاهری از ۱/۳۳ به ۱/۶۴ gcm^{-3} نشان‌دهنده کاهش ظرفیت نگهداری آب و افزایش فشردگی خاک است. همچنین، درصد تخلخل از ۴۸٪ در خاک‌های بدون فرسایش به ۳۵٪ در خاک‌های با فرسایش شدید رسید که این افت، حاکی از بسته شدن فضای خالی بین ذرات و کاهش نفوذپذیری است. این نتایج گویای آن است که فرسایش نه تنها بافت خاک را دگرگون می‌کند، بلکه با تأثیر بر رطوبت، چگالی و تخلخل، توان زیستی و تولیدی خاک را نیز به شدت کم می‌کند (جدول ۳).

جدول ۲. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

متغیرهای خاک	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	معنی‌داری
درصد ماسه	بین گروه‌ها	۲۴۵/۶	226.7**	3
	درون گروه‌ها	۱/۰۸		۱۶
درصد سیلت	بین گروه‌ها	۱۲۹/۲	229.7**	3
	درون گروه‌ها	۰/۵۶		۱۶
درصد رس	بین گروه‌ها	۱۷/۷	13.5**	3
	درون گروه‌ها	۱/۳		۱۶
درصد رطوبت	بین گروه‌ها	۳۳/۳	65.9**	3
	درون گروه‌ها	۰/۵		۱۶
وزن مخصوص ظاهری	بین گروه‌ها	۰/۵۸	71.5**	3
	درون گروه‌ها	۰/۰۰۱		۱۶
درصد تخلخل	بین گروه‌ها	۱۰۰	120.1**	3
	درون گروه‌ها	۰/۸۳		۱۶

** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۳. مقایسه میانگین تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

متغیرهای خاک	شدت فرسایش			
	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
ماسه (%)	۵۰/۳±۰/۶ ^d	۵۷/۰±۰/۵ ^c	۶۵/۰±۰/۵ ^b	۷۱/۰±۰/۵ ^a
سیلت (%)	۲۷/۶±۰/۳ ^a	۲۲/۶±۰/۳ ^b	۱۷/۳±۰/۶ ^c	۱۲/۵±۰/۳ ^d
رس (%)	۲۱/۷±۱/۰۲ ^a	۲۰/۲±۰/۶ ^a	۱۷/۶±۰/۳ ^b	۱۶/۴±۰/۳ ^b
رطوبت (%)	۱۴/۴±۰/۳ ^a	۱۲/۱±۰/۵ ^b	۹/۵±۰/۴ ^c	۶/۷±۰/۱ ^d
وزن مخصوص ظاهری (gcm^{-3})	۱/۳۳±۰/۰۰۵ ^d	۱/۴۲±۰/۰۰۸ ^c	۱/۵۶±۰/۰۱ ^b	۱/۶۴±۰/۰۰۳ ^a
تخلخل (%)	۴۸/۰±۰/۵ ^a	۴۶/۰±۰/۵ ^b	۴۱/۳±۰/۳ ^c	۳۵/۰±۰/۵ ^d

حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد (p<0.05).

تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که اثر شدت فرسایش بر SOC، TN، AP و AK و همچنین EC خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما تغییرات آن بر pH خاک معنی‌دار نبود. این نتایج بیانگر آن است که فرسایش تأثیر قابل توجهی بر افت مواد آلی و عناصر غذایی خاک دارد و

همچنین موجب افزایش شوری می‌شود، در حالی که pH خاک نسبتاً پایدار باقی مانده است. تفاوت زیاد میانگین مربعات بین و درون گروه‌ها برای بیشتر ویژگی‌ها تأکید می‌کند که شدت فرسایش عامل تعیین‌کننده‌ای در تغییر کیفیت شیمیایی خاک است (جدول ۵).

جدول ۴. نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی خاک

فرسایش	ماسه	سیلت	رس	رطوبت	وزن مخصوص ظاهری	تخلخل
۱	۰/۹۹					
ماسه		۱				
سیلت	-۰/۹۹		۱			
رس	-۰/۹۰	-۰/۹۳	۰/۸۸	۱		
رطوبت	-۰/۹۷	-۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۱	۱	
وزن مخصوص ظاهری	-۰/۹۷	۰/۹۷	-۰/۹۶	-۰/۹۱	-۰/۹۴	۱
تخلخل	-۰/۹۶	-۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۹۵	-۰/۹۱

جدول ۵. تحلیل واریانس شدت فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

متغیرهای خاک	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	معنی‌داری
کربن آلی	بین گروه‌ها	۵۷/۲	۹۸۲/۱	صفر**
	درون گروه‌ها	۰/۰۵		
نیتروژن کل	بین گروه‌ها	۰/۲۶	۱۱۳/۹	صفر**
	درون گروه‌ها	۰/۰۲		
پتاسیم در دسترس	بین گروه‌ها	۱۱۶۹۹/۸	۶۲۶/۷	صفر**
	درون گروه‌ها	۱۸/۶		
فسفر در دسترس	بین گروه‌ها	۲۵/۴	۳۵۶/۷	صفر**
	درون گروه‌ها	۰/۷۱		
pH	بین گروه‌ها	۰/۰۱	۱/۶۸	ns/۰/۲۴
	درون گروه‌ها	۰/۰۱		
هدایت الکتریکی	بین گروه‌ها	۳/۱۸	۴۶۰۹/۹	صفر**
	درون گروه‌ها	۰/۰۱		

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

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

متغیرهای خاک	شدت فرسایش			
	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
کربن آلی (g/kg)	۱۱/۸±۰/۱ ^a	۹/۲±۰/۱ ^b	۵/۰۱±۰/۱ ^c	۲/۰۳±۰/۰۴ ^d
نیتروژن کل (g/kg)	۱/۰±۰/۰۴ ^a	۰/۸۳±۰/۰۲ ^b	۰/۶۲±۰/۰۱ ^c	۰/۳۳±۰/۰۱ ^d
پتاسیم قابل دسترس (mg/kg)	۲۲۴/۶±۳/۳ ^a	۱۹۳/۳±۲/۳ ^b	۱۴۲±۲/۰۸ ^c	۸۲±۲/۰ ^d
فسفر قابل دسترس (mg/kg)	۱۲/۱±۰/۱ ^a	۹/۷±۰/۰۳ ^b	۷/۲±۰/۱ ^c	۵/۵±۰/۱ ^d
pH	۷/۹۷±۰/۰۷ ^a	۸/۰۶±۰/۰۶ ^a	۸/۰±۰/۰۴ ^a	۷/۸۹±۰/۰۲ ^a
هدایت الکتریکی (dsm ⁻¹)	۰/۸±۰/۰۱ ^d	۱/۱±۰/۰۷ ^c	۱/۷±۰/۰۶ ^b	۳/۱±۰/۱ ^a

حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد (p<0.05).

جدول ۷. نتایج تجزیه ضرایب همبستگی ویژگی‌های شیمیایی خاک

فرسایش	کربن آلی	نیتروژن کل	پتاسیم	فسفر	pH	هدایت الکتریکی
فرسایش	۱					
کربن آلی	-۰/۹۹	۱				
نیتروژن کل	-۰/۹۸	۰/۹۷	۱			
پتاسیم	-۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۱		
فسفر	-۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۷	۱	
pH	-۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۲۸	۱
هدایت الکتریکی	۰/۹۳	-۰/۹۳	-۰/۹۵	-۰/۹۶	-۰/۹۱	-۰/۴۹

ناشی از فرسایش دارد. این الگوها گویای تأثیر منفی فرسایش بر کیفیت شیمیایی خاک و کاهش ظرفیت تولیدی آن است (جدول ۷).

تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر شدت فرسایش بر تمامی شاخص‌های زیستی خاک از جمله آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیزم‌ها و سهم میکروبی در سطح یک درصد آماری معنی‌دار بود. مقدار زیاد میانگین مربعات بین‌گروه‌ها در مقایسه با درون گروه‌ها نشان‌دهنده تفاوت آماری قابل توجه بین سطوح مختلف فرسایش و تأثیر بارز آن بر عملکرد زیستی خاک است (جدول ۸).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش شدت فرسایش، تمامی شاخص‌های زیستی خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. فعالیت آنزیم کاتالاز در خاک‌های بدون فرسایش بیشتر بود و در شرایط فرسایش شدید به‌میزان چشمگیری کاهش یافت، که نشان‌دهنده افت شدید فعالیت آنزیمی و اختلال در عملکرد زیستی خاک است. به‌طور مشابه، میزان کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی در خاک‌های بدون فرسایش بیشتر بود و در خاک‌های تحت فرسایش شدید کاهش محسوسی را نشان داد. همچنین نرخ تنفس میکروبی و جمعیت میکروارگانیزم‌ها کاهش قابل توجهی داشتند که مؤید افت فعالیت میکروبی و پویایی زیستی خاک است. نسبت سهم میکروبی نیز با افزایش شدت فرسایش کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که فرسایش به‌طور مستقیم بر سلامت زیستی خاک تأثیر منفی گذاشته و موجب تضعیف عملکرد اکولوژیکی آن می‌شود (جدول ۹).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش شدت فرسایش، مقدار SOC، TN، AP و AK در خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، به‌طوری‌که SOC از $11/87 \text{ g kg}^{-1}$ در خاک‌های بدون فرسایش به $2/03 \text{ g kg}^{-1}$ در خاک‌های با فرسایش شدید رسید و روندی مشابه برای دیگر عناصر غذایی مشاهده شد. این کاهش چشمگیر نشان‌دهنده تخریب ساختار خاک، از دست رفتن مواد آلی و کاهش ظرفیت تغذیه‌ای آن در اثر فرسایش است. در مقابل، EC با افزایش فرسایش از $0/85$ به $3/15 \text{ dS m}^{-1}$ افزایش یافت که احتمالاً ناشی از تمرکز نمک‌ها به دلیل کاهش مواد آلی و شست‌وشوی سطحی عناصر مفید است. در حالی که pH خاک در همه تیمارها تغییر معنی‌داری نداشت، ثبات نسبی آن نشان می‌دهد که واکنش خاک تحت تأثیر فرسایش کمتر دگرگون شده است. این نتایج حاکی از آن است که فرسایش نه‌تنها موجب افت مواد آلی و عناصر غذایی خاک می‌شود، بلکه می‌تواند با افزایش شوری، کیفیت شیمیایی خاک را نیز به خطر اندازد (جدول ۶).

همبستگی ویژگی‌های شیمیایی

نتایج همبستگی نشان داد که شدت فرسایش با بیشتر ویژگی‌های شیمیایی خاک دارای همبستگی منفی قوی و معنی‌دار است. به‌طوری‌که با افزایش فرسایش، میزان SOC، TN، AP و AK به‌شدت کاهش می‌یابد. این روند بیانگر افت حاصلخیزی و تخلیه عناصر غذایی مهم در اثر فرسایش است. در مقابل، EC همبستگی مثبت قوی با فرسایش داشت، که احتمالاً ناشی از تجمع نمک‌ها در لایه‌های سطحی خاک بر اثر کاهش پوشش گیاهی و آبخوبی مواد آلی است. رابطه ضعیف‌تر بین فرسایش و pH نشان می‌دهد که pH خاک نسبت به سایر ویژگی‌ها حساسیت کمتری به تغییرات

همبستگی ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج حاصل از ماتریس همبستگی نشان داد که فرسایش خاک با شاخص‌های زیستی شامل فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن زی توده میکروبی، نیتروژن زی توده میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، تنفس میکروبی پایه و سهم میکروبی دارای همبستگی منفی و بسیار معنی‌دار می‌باشد. این همبستگی‌های منفی قوی بیانگر آن است که با افزایش شدت فرسایش، فعالیت زیستی و پایداری میکروبی

خاک به شدت کاهش می‌یابد. همچنین، همبستگی مثبت بین شاخص‌های زیستی نشان داد که این متغیرها به صورت هم‌راستا تحت تأثیر شرایط محیطی و کیفیت خاک قرار می‌گیرند. کاهش هماهنگ این شاخص‌ها در خاک‌های فرسایش‌یافته بیانگر تخریب شدید زیست‌سازگان خاک و تضعیف چرخه‌های زیستی و متابولیکی است که می‌تواند عملکرد بوم‌سازگان خاک را به‌طور چشمگیری مختل کند (جدول ۱۰).

جدول ۸. تجزیه واریانس شدت فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک

متغیرهای خاک	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	معنی‌داری
آنزیم کاتالاز	بین گروه‌ها	۳/۴۱	۴۳۱/۱	صفر**
	درون گروه‌ها	صفر		
کربن زی توده میکروبی	بین گروه‌ها	۵۸۹۵۸/۴	۱۹۳۸/۳	صفر**
	درون گروه‌ها	۳۰/۴		
نیتروژن زی توده میکروبی	بین گروه‌ها	۶۳۳/۵	۱۲۴۳	صفر**
	درون گروه‌ها	۰/۵		
تنفس میکروبی پایه	بین گروه‌ها	۰/۲۳	۲۰۶/۳	صفر**
	درون گروه‌ها	صفر		
جمعیت میکروارگانیسم‌ها	بین گروه‌ها	۴/۹۶	۸۴۱/۳	صفر**
	درون گروه‌ها	صفر		
سهم میکروبی	بین گروه‌ها	۳/۱۷	۳۶۵/۴	صفر**
	درون گروه‌ها	صفر		

** وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک

متغیرهای خاک	شدت فرسایش		
	بدون فرسایش	کم	متوسط
آنزیم کاتالاز ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	۳/۰۵±۰/۰۵ ^a	۲/۰۷±۰/۰۵ ^b	۱/۰۶±۰/۰۳ ^c
کربن به نیتروژن زی توده میکروبی (mg/kg)	۳۷۰/۰±۴/۵ ^a	۲۷۳/۳±۳/۲ ^b	۱۴۳/۰±۲/۵ ^c
نیتروژن زی توده میکروبی (mg/kg)	۳۹/۶±۰/۵ ^a	۳۰/۱±۰/۴ ^b	۱۷/۷±۰/۳ ^c
تنفس میکروبی پایه (mgCo2/gsoil.day)	۰/۸۵±۰/۰۳ ^a	۰/۵۴±۰/۰۱ ^b	۰/۳۸±۰/۰۱ ^c
جمعیت میکروارگانیسم‌ها ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	۳/۰۷±۰/۰۶ ^a	۲/۰۹±۰/۰۵ ^b	۰/۸۴±۰/۰۲ ^c
سهم میکروبی خاک (mgCmicg-1Corg)	۳/۵±۰/۰۷ ^a	۲/۸±۰/۰۶ ^b	۲/۱±۰/۰۰۸ ^c

حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد (p<0.05).

جدول ۱۰. نتایج تجزیه ضرایب همبستگی ویژگی‌های زیستی خاک

فرسایش	آنزیم کاتالاز	کربن زی توده میکروبی	نیتروژن زی توده میکروبی	تنفس میکروبی پایه	جمعیت میکروارگانیسم‌ها	سهم میکروبی
فرسایش	۱					
آنزیم کاتالاز	-۰/۹۸	۱				
کربن زی توده میکروبی	-۰/۹۹	۰/۹۸	۱			
نیتروژن زی توده میکروبی	-۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۹	۱		
تنفس میکروبی پایه	-۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۱	
جمعیت میکروارگانیسم‌ها	-۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۷	۱
سهم میکروبی	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۷	۱

■ بحث و نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که فرسایش آبی تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. با افزایش شدت فرسایش، درصد ماسه در خاک افزایش و مقادیر سیلت و رس کاهش یافت. این روند نشان‌دهنده جدایش انتخابی ذرات ریزتر خاک توسط عامل فرساینده آب است. به طوری که ذرات سبک‌تر نظیر رس و سیلت به راحتی از سطح خاک جدا شده و از بین می‌روند، در حالی که ذرات درشت‌تر نظیر ماسه مقاومت بیشتری داشته و در سطح باقی می‌ماند (۱۷). در نتیجه، بافت خاک در اثر فرسایش درشت‌تر و ساختار فیزیکی آن تضعیف می‌شود. نتایج تأیید می‌کند، کاهش چشمگیر رس نشان‌دهنده برداشت انتخابی ذرات ریز و سبک در طول فرسایش است. از آنجا که رس نقش مهمی در پایداری خاکدانه‌ها، ظرفیت نگهداشت آب و مواد مغذی دارد، کاهش آن اثر منفی بر کیفیت خاک دارد (۳۰). رس به عنوان عامل پیونددهنده بین ذرات، نقش مهمی در تشکیل خاکدانه‌ها ایفا می‌کند و کاهش آن می‌تواند منجر به ناپایداری ساختار خاک شود (۳۷). این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون سرباز، که ساختار خاک به طور طبیعی شکننده‌تر است، اهمیت مضاعف دارد. از سوی دیگر، فرسایش موجب افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک و کاهش معنی‌دار تخلخل و رطوبت وزنی خاک گردید. این تغییرات ناشی از تخریب ساختار خاکدانه‌ای، کاهش مواد آلی و کاهش ظرفیت خاک در حفظ فضاهای خالی است (۲۶). در نتیجه، با افزایش فشردگی خاک، نفوذپذیری آب و هوادهی کاهش یافته و رشد ریشه گیاهان و فعالیت‌های میکروبی با محدودیت مواجه می‌شود (۲).

تغییرات مذکور در ویژگی‌های فیزیکی خاک نه تنها تأثیر مستقیم بر ساختار و عملکرد خاک در حوزه‌آبخیز دارد، بلکه به طور غیرمستقیم بر متغیرهای زیستی خاک نیز اثر می‌گذارد. در همین راستا، کاهش تنوع میکروبی و عملکردهای میکروبی در خاک‌های تحت فرسایش شدید گزارش شده است که نشان‌دهنده کاهش فعالیت زیستی و چرخه مواد آلی و مغذی می‌باشد (۲۷). بنابراین، تغییر در بافت، ساختار و تخلخل خاک، می‌تواند زنجیره‌ای از اختلالات فیزیکی، شیمیایی و زیستی را در پی داشته‌باشد

که در پایان عملکرد بوم‌سازگان خاک را زیر تأثیر قرار می‌دهد (۳۱).

نتایج نشان داد که شدت فرسایش، تأثیر عمیقی بر کاهش شاخص‌های شیمیایی خاک در حوزه‌آبخیز سرباز دارد. به ویژه مقادیر SOC، TN، AP و AK به طور معنی‌داری با افزایش شدت فرسایش کاهش یافته‌اند. این یافته‌ها با مطالعات متعدد پیشین همسو است که فرسایش آبی موجب حذف خاک سطحی غنی از مواد آلی و عناصر غذایی می‌شود (۲۰). کاهش SOC از پیامدهای بارز فرسایش است، چرا که ذرات ریز و غنی از SOC به طور انتخابی توسط فرسایش جابجا و در مناطق رسوبی ته‌نشین می‌شوند (۲۳). حذف خاک سطحی غنی موجب می‌شود خاک زیرین که SOC کمتری دارد، در سطح باقی بماند که به کاهش ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی منجر می‌شود (۳۶). کاهش OM خاک همچنین فعالیت میکروبی و چرخه‌های تغذیه‌ای خاک را مختل می‌کند که پیامد آن افت حاصلخیزی خاک است (۳). با افزایش شدت فرسایش TN کاهش معنی‌دار پیدا کرد که این موضوع از کاهش OM خاک و از دست رفتن خاک سطحی ناشی می‌شود (۱۶). N به عنوان عنصر حیاتی برای فرآیندهای زیستی خاک و رشد گیاهان، کاهش آن می‌تواند تأثیرات منفی در بهره‌وری بوم‌سازگان و پایداری خاک داشته باشد (۲۴). فرسایش انتخابی ذرات ریز موجب انتقال ذرات حاوی N و SOC به مناطق پایین‌دست می‌شود (۱۱). کاهش AP و AK نیز از دیگر پیامدهای فرسایش است. این عناصر مهم از طریق شستشو و حذف خاک سطحی کاهش و ظرفیت خاک برای تأمین نیازهای غذایی گیاهان را کاهش می‌دهند (۱۹ و ۳۹). 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 می‌کند (۲۳). از نظر pH خاک، نسبت به سایر ویژگی‌ها حساسیت کمتری به تغییرات ناشی از فرسایش نشان داد. همچنین افزایش EC به همراه افزایش شدت فرسایش ممکن است نشانگر تجمع نمک‌ها و تغییرات یونی خاک باشد که بر فعالیت زیستی و کارایی خاک اثرگذار است (۳۶). در پایان، کاهش معنی‌دار SOC، TN، AP و AK ناشی از فرسایش شدید نه تنها کیفیت شیمیایی خاک را

سهم میکروبی که نسبت کربن میکروبی به کربن کل خاک را نشان می‌دهد، کاهش قابل ملاحظه‌ای در شدت فرسایش زیاد دارد که بیانگر کاهش نقش میکروارگانیسم‌ها در تثبیت کربن و چرخه کربن خاک است (۴۳). همچنین، محققان بیان کردند که مکان‌های رسوبی فرسایش آبی فعالیت زیستی و آنزیمی بیشتری نسبت به دیگر مناطق فرسایش یافته دارند؛ زیرا فرسایش آبی ذرات ریز رس و مواد آلی را منتقل می‌کند و خاک مناطق بدون فرسایش را با بافت ریزدانه و محتوای آلی بیشتری حفظ می‌کند (۱۷). این امر موجب افزایش فعالیت آنزیم‌ها و پایداری کربن می‌شود (۳۴). از سوی دیگر، جرم مخصوص کمتر خاک و بهبود تهویه خاک در مکان‌های بدون فرسایش شرایط مناسبی برای فعالیت، رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌های هوازی فراهم می‌کند (۲). افزایش وزن مخصوص ظاهری و کاهش OM در خاک‌های فرسایش‌یافته موجب افزایش هدایت حرارتی و کاهش ظرفیت گرمایی خاک می‌شود که موجب نوسان دمایی روزانه و فصلی شدیدتر می‌شود (۲۷). تغییرات حرارتی خاک‌های فرسایش یافته، به‌طور غیرمستقیم به کاهش تنوع و عملکرد میکروبی مرتبط است زیرا اکثر میکروب‌های خاک حساس به تغییرات دمایی موضعی هستند (۱۰). در پایان، کاهش کیفیت خاک ناشی از فرسایش در مناطق خشک و نیمه‌خشک که مستعد فرسایش و تخریب هستند، شدت بیشتری دارد که با دیگر بررسی‌ها نیز همخوانی دارد (۱۹).

نتایج ماتریس همبستگی نشان داد که همه شاخص‌های زیستی خاک با شدت فرسایش رابطه منفی و بسیار معنی‌داری دارند؛ به‌طوری‌که افزایش فرسایش موجب کاهش فعالیت زیستی و پایداری میکروبی خاک می‌شود. همچنین همبستگی مثبت بین شاخص‌های زیستی بیانگر آن است که این متغیرها به‌طور هماهنگ تحت تأثیر شرایط محیطی و کیفیت خاک قرار می‌گیرند. این الگوهای همبستگی را می‌توان بر اساس مکانیسم‌های محیط‌زیست ناشی از فرسایش تفسیر کرد. فرسایش خاک با جدا کردن و جابجایی ذرات سطحی غنی از مواد آلی و عناصر غذایی، مهم‌ترین بستر رشد و منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌ها را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، افت MBC و MBN در خاک‌های فرسایش‌یافته تا حد

کاهش می‌دهد بلکه بر توان بوم‌شناختی خاک در حفظ پایداری عملکرد زیستی نیز تأثیرگذار است. این نتایج اهمیت توجه به مدیریت جامع حفاظت خاک، جلوگیری از فرسایش و اجرای اقدامات احیایی را در حفظ سلامت و بهره‌وری بلندمدت حوزه‌آبخیز سرباز تأکید می‌کند.

در بررسی حاضر، تأثیر شدت فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک به وضوح نشان داده شده است (جدول ۶). تمام متغیرهای زیستی شامل آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و سهم میکروبی خاک به طور معنی‌دار تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته‌اند. شدت اثرگذاری این متغیرها با افزایش شدت فرسایش به طور پیوسته بیشتر شده است، که با یافته‌های سایر محققان همسو می‌باشد (۲ و ۳۵). این کاهش در ویژگی‌های زیستی عمدتاً ناشی از افت OM و کاهش مواد مغذی خاک است که منجر به نابودی تنوع و عملکرد جامعه باکتریایی خاک می‌شود. کاهش دسترسی به منابع غذایی، متابولیسم و تغییر ترکیب باکتری‌ها در نهایت موجب کاهش عملکرد میکروارگانیسم‌های خاک و تضعیف نقش آن‌ها در حفظ سلامت و پایداری خاک می‌گردد (۳). فعالیت آنزیم کاتالاز، که شاخصی از پتانسیل اکسیداتیو و فعالیت بیوشیمیایی میکروبی خاک است، بیشترین مقدار را در خاک‌های بدون فرسایش و کم‌فرسایش نشان داده و با افزایش شدت فرسایش به طور چشمگیری کاهش یافته است. این روند نشان‌دهنده کاهش کارکردهای دفاعی و تنفسی میکروارگانیسم‌ها در خاک‌های فرسایش‌یافته است، که با دیگر بررسی‌ها همخوانی دارد (۱۸). وجود مواد آلی و عناصر غذایی در خاک‌های بدون فرسایش موجب تحریک فعالیت آنزیمی کاتالاز می‌شود و این آنزیم نقش مهمی در فرآیند معدنی شدن مواد آلی از طریق هیدرولیز دارد (۱۳). کاهش قابل توجه کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی و کاهش جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز از دیگر آثار منفی فرسایش است که کاهش منابع غذایی، تخلخل، و رطوبت خاک را در پی دارد (۳۰). کاهش ظرفیت ذخیره و بازیافت نیتروژن توسط میکروارگانیسم‌ها، افت توان زیستی و دسترسی محدود به کربن قابل استفاده، موجب افت کیفیت اکولوژیکی و تخریب شرایط زیستی خاک می‌شود (۳۴).

کاهش فعالیت آنزیم‌ها، زیست‌توده میکروبی و تنفس پایه میکروبی، نشان‌دهنده تضعیف عملکرد بوم‌شناختی و کاهش پایداری زیستی خاک است. بر اساس شدت فرسایش و شاخص‌های کلیدی خاک، مدیریت پایدار اراضی بیابانی می‌تواند به صورت هدفمند طراحی شود: در خاک‌های بدون فرسایش یا فرسایش کم، حفظ پوشش گیاهی، در خاک‌های با فرسایش متوسط، استفاده از گیاهان حفاظتی و مدیریت رواناب؛ و در خاک‌های با فرسایش شدید، ایجاد بسترهای حفاظتی و اجرای خاک‌ورزی حفاظتی توصیه می‌شود. این چارچوب مدیریت پایدار، با توجه به شدت فرسایش و ویژگی‌های هر طبقه خاک، امکان حفظ کارایی و پایداری خاک و بهره‌برداری بهینه از منابع اراضی بیابانی را فراهم می‌سازد. به طور کلی، بیشترین تأثیر فرسایش بر مواد آلی و زیست‌توده میکروبی خاک مشاهده شد، که نقش کلیدی در کاهش پایداری زیستی و حاصلخیزی خاک دارند. این کاهش‌ها، همراه با افت تنوع و جمعیت میکروبی، ظرفیت تثبیت کربن و پایداری بوم‌سازگان خاک را به شدت محدود می‌کنند. بنابراین، طراحی و اجرای راهکارهای مدیریتی و حفاظتی مبتنی بر اصول علمی برای حفظ و احیای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در حوزه آبخیز سرباز، گامی اساسی برای پایداری منابع طبیعی و ارتقای تاب‌آوری محیط‌زیست این منطقه است.

■ سپاسگزاری

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

زیادی ناشی از کاهش مواد آلی قابل دسترس است. همچنین تخریب ساختار خاک‌دانه‌ها و کاهش پایداری آن‌ها منجر به افت تخلخل، کاهش نفوذپذیری و تهویه خاک شده و شرایط زیستی نامساعدی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌سازد (۳۴). پیامد این تغییرات، کاهش همزمان فعالیت آنزیم‌ها، تنفس میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌هاست که در پایان چرخه‌های زیستی و متابولیسی خاک را تضعیف می‌کند. یافته‌های این بررسی همسو با نتایج گزارش شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک (۳۰ و ۳۱) است که نشان داده‌اند شدت فرسایش با کاهش تنوع و فعالیت میکروبی ارتباط مستقیم دارد. بنابراین، روابط همبستگی منفی به دست آمده در این تحقیق صرفاً بازتاب یک رابطه آماری نیست، بلکه بیانگر مکانیسم‌های اکولوژیکی است که پایداری زیستی خاک و عملکرد بوم‌سازگان‌های وابسته را به شدت کاهش می‌دهد. فرسایش آبی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از عوامل اصلی کاهش کیفیت و کارایی خاک است که با برهم زدن چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد زیستی و حاصلخیزی خاک دارد. نتایج این مطالعه در حوزه آبخیز سرباز نشان داد که افزایش شدت فرسایش بیشترین تأثیر را بر کاهش مواد آلی و فعالیت زیستی میکروارگانیسم‌ها دارد. از منظر فیزیکی، فرسایش موجب کاهش درصد رس، کاهش پایداری ذرات، تخریب ساختار خاک، کاهش تخلخل و افزایش جرم مخصوص ظاهری می‌شود، که به نوبه خود ظرفیت نگهداری آب، تهویه و شرایط مناسب برای توسعه ریشه گیاهان و میکروارگانیسم‌ها را محدود می‌کند. از دیدگاه شیمیایی، افت قابل توجه SOC، TN، AP و AK و از نظر زیستی،

■ 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. 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. [dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1399.10.1.6.7](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1399.10.1.6.7) [In Persian]
- 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. doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103544

4. 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. doi.org/10.3389/ffgc.2023.1028149
5. 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. [doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
6. Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Ecological Indicators*, 34, Article 108002. doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108470
7. Dasgupta, D., & Brahma Prakash, 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. doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i130409
8. Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590. doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87
9. Gayan, 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). doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00006-3
10. 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. doi.org/10.3390/pr10102013
11. Huang, J., Li, Z., Zeng, G., Zhang, J., Li, J., Nie, X., Ma, W., & Zhang, X. (2013). Microbial responses to simulated water erosion in relation to organic carbon dynamics on a hilly cropland in subtropical China. *Ecological Engineering*, 60, 67–75. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.040
12. Kamali, N., Sadeghipour, A., Souiri, M., & Mastinu, M. (2022). Variations in soil biological and biochemical indicators under different grazing intensities and seasonal changes. *Land*, 11, 1537. doi.org/10.3390/land11091537
13. 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. doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.023
14. 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107388. doi.org/10.1016/j.agee.2021.107388
15. 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. doi.org/10.3389/fpls.2025.1510676
16. Liu, W., Chen, Z., Rong, L., Duan, X., Qin, Y., Chun, Z., ... & Liu, T. (2024). Soil Erosion Thickness and Seasonal Variations Together Drive Soil Nitrogen Dynamics at the Early Stage of Vegetation Restoration in the Dry-Hot Valley. *Microorganisms*, 12(8), 1546. doi.org/10.3390/microorganisms12081546
17. 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. doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.003
18. Makoi, J. H., & Ndakidemi, P. A. (2008). Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. *African Journal of Biotechnology*, 7, 181–191. doi.org/10.4314/ajb.v7i3.58355
19. Mandal, D., & Giri, N. (2021). Soil erosion and policy initiatives in India. *Current Science*, 120(6), 1007–1012. www.jstor.org/stable/27310319
20. 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. doi.org/10.3390/su15065430
21. Martens, R. (1995). Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations. *Biology and Fertility of Soils*, 19, 87–99. doi.org/10.1007/BF00336142
22. 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. doi.org/10.3390/plants11233513
23. 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. doi.org/10.48308/esrj.2021.101282
24. 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. doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024
25. 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. doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9
26. Plotnikova, O. O., Demidov, V. V., Farkhodov, Y. R., Tsymbarovich, P. R., & Semenkov, I. N. (2024). Influence of water erosion on soil aggregates and organic matter in arable Chernozems: Case study. *Agronomy*, 14(8), 1607. doi.org/10.3390/agronomy14081607
27. 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. doi.org/10.1038/s41396-021-00958-2
28. Qu, K., Guo, F., Liu, X., Lin, Y., & Zou, Q. (2019). Application of machine learning in microbiology. *Frontiers in Microbiology*, 10, 827. doi.org/10.3389/fmicb.2019.00827
29. 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. doi.org/10.3390/su122310095
30. 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 Monzelab watershed, Zahedan County. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, In press. doi.org/10.22059/ijswr.2025.395713.669946 [In Persian]
31. Saberi, M., Nori, M., & Ebrahimi, M. (2025). Microbial diversity response to changes in physical and chemical properties of soil caused by water erosion in the Dehbakari watershed, Kerman province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, In press. doi.org/10.22111/jneh.2025.51723.2110 [In Persian]
32. 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. doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104878
33. Schuman, G. E., Janzen, H. H., & Herrick, J. E. (2002). Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 116, 391–396. [doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00215-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00215-9)
34. 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. doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_3
35. 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. dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1400.11.1.7.5
36. 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. doi.org/10.3390/su13084288

37. Ternan, J. L., Williams, A. G., Elmes, A., & Hartley, R. (1996). Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(2), 181–193. [doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837)
38. Tuo, D., Lu, Q., Wu, B., Li, Q., Yao, B., Cheng, L., & Zhu, J. (2023). Effects of wind–water erosion and topographic factor on soil properties in the Loess Hilly Region of China. *Plants*, 12(13), 2568. doi.org/10.3390/plants12132568
39. Wang, B. R., An, S. S., Liang, C., Liu, Y., & Kuzyakov, Y. (2021). Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 162, 108422. doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422
40. Wang, K., Zhang, Y., Tang, Z., Shangguan, Z., Chang, F., Jia, F. A., Chen, Y., He, X., Shi, W., & Deng, L. (2019). Effects of grassland afforestation on structure and function of soil bacterial and fungal communities. *Science of the Total Environment*, 676, 396-406. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.259
41. Wu, X., Wei, Y., Cai, C., Yuan, Z., Liao, Y., & Li, D. (2020). Effects of erosion-induced land degradation on effective sediment size characteristics in sheet erosion. *CATENA*, 195, 104843. doi.org/10.1016/j.catena.2020.104843
42. 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. doi.org/10.1002/ldr.5163
43. Zhang, X., Pei, G., & Zhang, T. (2023). Erosion effects on soil microbial carbon use efficiency in the Mollisol cropland in northeast China. *Soil Ecology Letters*, 5(4). doi.org/10.1007/s42832-023-0176-4

