Assessment of the Impact of Combined Wind and Water Erosion on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties in Bampur Region, Sistan and Baluchestan Province

Morteza Saberi [a,*], Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno [a], Rasool Khatibi [b], Alireza Shahriari [c], Mehdi Sarparast [d]

[a] *Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran*
[b] *Assistant Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol. Zabol.*
[c] *Associate Professor, Department of Green Space, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchistan. Zahedan.*
[d] *Ph.D. in Natural Resources, Combating Desertification, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources Gorgan , Natural Resources and Watershed Management Organization, Iran.*

Research Full Paper

Article History (Received: 2025/05/31 Accepted: 2025/07/29)

Extended abstract

1- Introduction

In recent years, soil erosion, especially in arid and semi-arid areas, has been considered one of the most critical environmental threats, which reduces the productive capacity of ecosystems and disrupts their natural balance by causing extensive changes in the physical, chemical, and biological properties of soil systems. Soil erosion can lead to significant soil degradation in natural ecosystems. Wind and water erosion are the two main types of erosion that interact significantly with each other in arid and semi-arid areas. The amount of soil lost through combined wind and water erosion is greater than the amount lost due to each of the erosions alone. This study aimed to assess the impacts of combined wind and water erosion on the physical, chemical, and biological properties of soils in the Bampour region of Sistan and Baluchestan Province, southeastern Iran.

2- Methodology

Soil sampling in this study was done in a completely randomized design. First, erosion and sedimentation maps available in the region were used to classify soil erosion intensities, including: no erosion, low erosion, moderate erosion, and severe erosion. Then, in each erosion region, four homogeneous areas with common physiographic conditions were selected. In each of them, five soil samples (one sample in the center and four samples in the form of a plus sign around it) were collected. Soil sampling was carried out from a depth of 0 to 30 cm. For each erosion site, samples collected from homogeneous areas were mixed to prepare a composite sample. Immediately after collection, the soil samples were divided into two parts. Part of the samples intended for measuring biological properties were transported to the laboratory in sealed containers to maintain the initial humidity conditions and in the vicinity of dry ice. These samples were not sieved and were stored in the refrigerator until the experiments were performed. The other part of the samples was used to measure physical and chemical properties after drying in the open air and passing through a 2 mm sieve. The data were subjected to one-way analysis of variance (ANOVA) using SPSS software. Duncan's test with a 95% confidence level was used to compare the means. Also, the correlation between the studied parameters was analyzed in the R software environment.

3- Results

The results indicated that erosion intensity significantly influences all physical, chemical, and biological soil properties. The most pronounced changes in physical properties were observed in bulk density and porosity,

[*] **Corresponding Author: Mortezasaberi@uoz.ac.ir**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

highlighting their high sensitivity to erosion processes. Analysis of variance confirmed that erosion intensity has a significant impact on key chemical parameters, including organic carbon, total nitrogen, available potassium and phosphorus, soil pH, electrical conductivity, and moisture content. Organic carbon concentration was highest in non-eroded soils (55.5 g/kg) and decreased significantly as erosion severity increased. Similarly, soil moisture content declined sharply from 19.9% in non-eroded soils to 7.3% under severe erosion conditions. Strong negative correlations were found between erosion intensity and organic carbon, total nitrogen, available potassium, electrical conductivity, and moisture, indicating that reductions in these soil fertility indicators are associated with increased erosion severity. Moreover, microbial biomass and enzymatic activities declined significantly with increasing erosion, reflecting the degradation of soil biological health. High F-values across biological parameters underscore the sensitivity of soil microbial communities to erosional disturbances and the consequent decline in soil quality. Correlation analyses revealed extremely strong negative relationships (ranging from -0.97 to -0.99) between erosion intensity and all measured biological indices, suggesting that robust microbial activity and biomass contribute critically to soil stability and erosion resistance.

4- Discussion & Conclusions

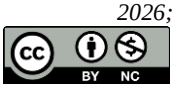
Combined water and wind erosion exerts profound and widespread impacts on the physical, chemical, and biological properties of soils. Increased erosion intensity induces destructive alterations such as modifications in soil texture, reduced porosity, elevated bulk density, and decreased moisture content—ultimately leading to a significant decline in soil physical quality. Erosion also causes a marked depletion of essential soil nutrients, including organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and potassium, thereby impairing key soil chemical indicators and soil fertility levels .Biological attributes—such as enzymatic activities, microbial biomass carbon and nitrogen, and basal microbial respiration—also decline under increasing erosion pressure, underscoring the high sensitivity of soil biological functioning to erosional processes. This degradation not only compromises surface soil structure and fertility but also disrupts vital ecosystem services such as nutrient cycling, microbial activity, and long-term carbon sequestration .Moreover, a decline in microbial populations impairs soil biological processes, weakening nutrient dynamics and limiting soil regeneration capacity. These cascading effects ultimately diminish soil productivity and ecosystem resilience. Therefore, identifying erosion-prone areas and implementing targeted soil conservation and restoration strategies is critical for mitigating erosion impacts and preserving soil quality and ecosystem sustainability.

Key Words: Combined wind–water erosion, Soil physicochemical properties, Soil microbial activity, Bampur region**.**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

Cite this article: Saberi, M., Dahmardeh Ghaleno, M.R., Khatibi, R., Shahriari, A.R., & Sarparast, M. (2026). Assessment of the Impact of Combined Wind and Water Erosion on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties in Bampur Region, Sistan and Baluchestan Province. *Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 15 (4) :104-123*. http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.104



© The Author(s).

DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.104 Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

بررسی تأثیر فرسایش ترکیبی بادی و آبی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در منطقه بمپور، استان سیستان و بلوچستان

مرتضی صابری*: *دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل.*

محمدرضا دهمرده قلعه نو: *دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل.*

رسول خطیبی: *استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل. زابل.*

علیرضا شهریاری: *دانشیار گروه فضای سبز، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان. زاهدان.*

مهدی سرپرست: *دکتری بیابان‌زدائی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری.*

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷)

DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.104

چکیده

در سال‌های اخیر، فرسایش خاک به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی مطرح بوده است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر فرسایش ترکیبی بادی و آبی بر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در منطقه بمپور، واقع در استان سیستان و بلوچستان انجام شد. نمونه‌برداری خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در چهار کلاس شدت فرسایش شامل بدون فرسایش، فرسایش کم، متوسط و شدید انجام گرفت. به‌منظور ارزیابی پاسخ خاک به این فرایندها، پارامترهای فیزیکی (بافت، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل)، شیمیایی (اسیدیته، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، رطوبت) و زیستی (فعالیت آنزیمی، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و سهم میکروبی خاک) مورد سنجش قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از آزمون واریانس یک‌طرفه و نرم‌افزار SPSS انجام شد. نتایج نشان داد که شدت فرسایش ترکیبی بادی و آبی تأثیر معنی‌داری بر کلیه ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد. بیشترین میزان تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی مربوط به جرم مخصوص ظاهری و تخلخل بود که نشان می‌دهد این دو ویژگی به شدت تحت تأثیر فرسایش قرار می‌گیرند. کربن آلی در خاک‌های بدون فرسایش با ۵/۵۵ گرم بر کیلوگرم، بیشترین مقدار را داشت و با افزایش شدت فرسایش، این مقدار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین افزایش شدت فرسایش منجر به کاهش معنی‌دار شاخص‌های میکروبی خاک شده است. تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۱ درصد در تمامی متغیرها بیانگر حساسیت بالای ویژگی‌های زیستی خاک به فرسایش و کاهش چشمگیر کیفیت زیستی خاک در شرایط فرسایش‌یافته است. به‌طور کلی، فرسایش نه‌تنها حاصلخیزی و فعالیت میکروبی خاک را کاهش می‌دهد، بلکه عملکرد اکوسیستمی و ظرفیت ذخیره‌سازی کربن را نیز مختل می‌کند. بنابراین، اجرای اقدامات حفاظتی برای کنترل فرسایش و حفظ کیفیت پایدار خاک ضروری است.

واژگان کلیدی: فرسایش ترکیبی بادی و آبی، خصوصیات خاک، فعالیت زیستی میکروبی خاک، منطقه بمپور.

* نویسندهٔ مسئول: Mortezasaberi@uoz.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

۱ـ مقدمه

استفاده‌ی پایدار از منابع زیست‌محیطی و حفاظت از آن‌ها از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که توجه جهانی را به خود جلب کرده‌است. خاک به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین اجزای اکوسیستم‌های زمینی، نقشی کلیدی در پایداری زیست‌کره، تولید غذا، تنظیم چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کند. با این حال، فرسایش خاک که عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات کاربری اراضی رخ می‌دهد، موجب تخریب ساختار خاک، کاهش ماده آلی، از دست رفتن عناصر غذایی، کاهش عمق خاک و افت تنوع زیستی و میکروبی آن می‌شود (Fathizad *et al*, 2020). از دست رفتن خاک سطحی به‌دلیل مدیریت نادرست اراضی، تهدیدی جدی برای کیفیت و کارایی عملکردهای زیستی خاک به‌شمار می‌رود (Mandal *et al*, 2021). ازاین‌رو، پایش دقیق کیفیت خاک و واکنش آن نسبت به فرسایش، برای برنامه‌ریزی مدیریتی و پایداری اکولوژیکی ضروری است (Qiu *et al*, 2021).

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 (Li *et al*, 2021).

فرسایش بادی علاوه بر تأثیرات گسترده‌ای که بر اقلیم، کیفیت هوا و سلامت انسان در مقیاس جهانی دارد (Creamean *et al*, 2013)، قادر است ذرات ریز آلی موجود در سطح خاک را جابجا کرده و از بین ببرد، این فرایند موجب کاهش قابل‌توجه ذخایر مواد مغذی، کاهش حاصلخیزی و تخریب ساختار فیزیکی و بیولوژیکی خاک می‌شود، رشد گیاهان را محدود می‌کند و در نهایت منجر به افت چشمگیر بهره‌وری خاک می‌شود (Li *et al*, 2018; Owens, 2020). با افزایش شدت فرسایش بادی و کاهش پوشش گیاهی، نه‌تنها ساختار جامعه میکروبی دگرگون می‌شود، بلکه کارکردهای کلیدی مانند تنفس میکروبی، چرخه نیتروژن و فعالیت‌های آنزیمی نیز دچار افت می‌شوند (Long *et al*., 2018). مطالعات انجام‌شده در نواحی خشک و نیمه‌خشک نشان می‌دهد که فرسایش بادی شبیه‌سازی‌شده و رسوب‌گذاری گرد و غبار می‌توانند اثرات قابل‌توجهی بر ساختار و عملکرد شبکه‌های غذایی میکروبی خاک برجای گذارند. این فرآیندها از طریق جابجایی ذرات سطحی خاک و تغییر در دسترسی به منابع آلی، به‌طور مستقیم بر ترکیب جامعه میکروبی تأثیر می‌گذارند و با کاهش تنوع عملکردی میکروارگانیسم‌ها، موجب تضعیف پایداری عملکردهای زیستی خاک می‌شوند. این تغییرات به‌ویژه بر تعاملات تغذیه‌ای بین گروه‌های میکروبی حساس اثر گذاشته، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی خاک را مختل می‌سازند و توان اکوسیستم خاک را برای مقابله با تنش‌های محیطی کاهش می‌دهند. به‌طور کلی، فرسایش بادی علاوه بر پیامدهای فیزیکی و شیمیایی، موجب اختلال در فرآیندهای زیستی خاک شده و عملکرد پایدار اکوسیستم‌های خاکی را تهدید می‌کند (Zhao *et al*, 2025). پژوهشگران در یک مطالعه به بررسی تعامل بین فرسایش بادی و کربن آلی خاک پرداخته و نشان دادند که فرسایش بادی می‌تواند به کاهش ذخایر کربن خاک منجر شود و SOC می‌تواند بر حساسیت خاک به فرسایش بادی تأثیر بگذارد، زیرا بر تجمع خاک تأثیر می‌گذارد. آن‌ها همچنین به بررسی تجمع کربن در رسوبات منتقل‌شده توسط باد از طریق دو فرآیند حرکت جهشی و

* نویسندهٔ مسئول: Mortezasaberi@uoz.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

معلق‌سازی ذرات پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که فرسایش بادی نه تنها خاک را جابجا می‌کند، بلکه کربن آلی خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد، که این امر می‌تواند بر کیفیت خاک و چرخه کربن در محیط زیست تأثیر بگذارد (Iturri & Buschiazzo, 2023).

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 می‌شود. 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 مناطق 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 چرخه‌های بیوژئوشیمیایی محسوب می‌شوند که در تجزیه مواد آلی، تثبیت نیتروژن و پایداری زیستی خاک نقش بسزایی دارند (Fierer, 2017). نتایج مطالعه‌ی در منطقه مالیسول 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 می‌شود. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که فرسایش با بر هم 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 (Yang *et al*, 2024). اثرات فرسایش بر کارایی استفاده از کربن میکروبی خاک در زمین‌های زراعی بررسی شد، نتایج نشان داد که کربن میکروبی با افزایش نرخ فرسایش خاک در عمق ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Zhang *et al*, 2023). به‌منظور بررسی اثرات فرسایش آبی بر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، مطالعه‌ای انجام گرفت. این پژوهش به‌طور مشخص بر تأثیر فرسایش آبی بر پایداری خاکدانه‌ها و محتوای ماده آلی خاک متمرکز بود. نتایج حاصل نشان داد که فرسایش آبی موجب کاهش معنی‌دار در پایداری خاکدانه‌ها و کاهش غلظت کربن آلی خاک می‌گردد؛ که این امر با تضعیف ساختار خاک و کاهش حاصلخیزی آن همراه است (Plotnikova *et al*, 2024).

در منطقه بمپور (استان سیستان و بلوچستان) به‌دلیل وجود شرایط خاص اقلیمی از جمله بارش‌های موسمی، سیلاب‌های ناگهانی، بادهای شدید و پوشش گیاهی محدود، پدیده‌ی فرسایش ترکیبی بادی و آبی غالب است. این نوع فرسایش تأثیرات قابل‌توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک دارد که می‌تواند عملکردهای کلیدی خاک مانند تثبیت عناصر، تجزیه مواد آلی، پایداری ساختار خاک و فعالیت‌های زیستی را تحت تأثیر قرار دهد. با وجود مطالعات پراکنده، هنوز درک کاملی از اثرات هم‌زمان فرسایش بادی و آبی بر ویژگی‌های میکروبیولوژیکی خاک در این منطقه وجود ندارد. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف پایش تغییرات ویژگی‌های خاک در پاسخ به

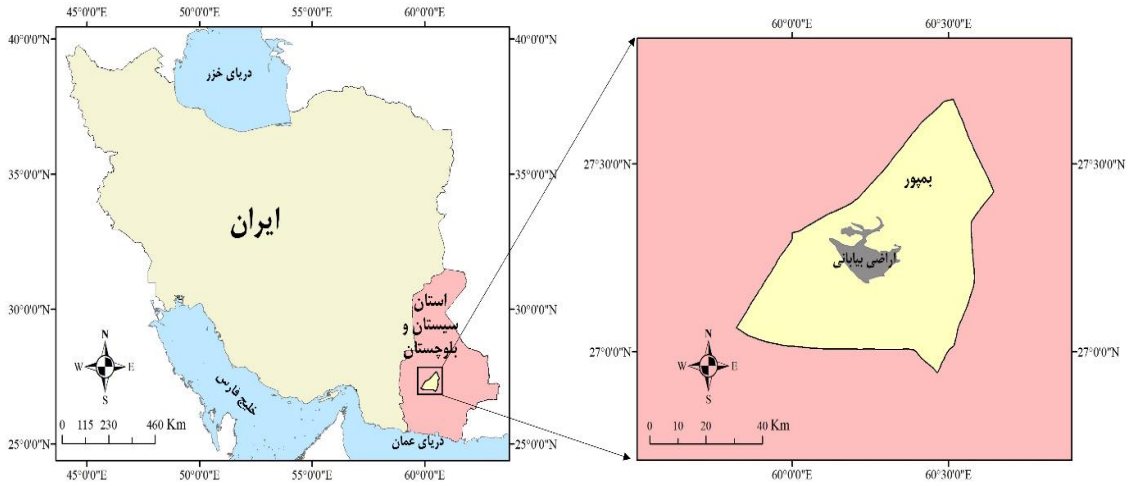
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

فرسایش در منطقه‌ی بمپور انجام شده‌است تا با شناسایی بهتر پیامدهای فرسایش، امکان ارائه‌ی راهکارهای مؤثر برای حفظ سلامت خاک و پایداری اکوسیستم‌های محلی فراهم شود.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه (شکل ۱) اراضی بیابانی منطقه بمپور واقع در شهرستان ایرانشهر در استان سیستان و بلوچستان است. این منطقه بین عرض‌های °۲۷ ′۰۰ تا °۲۷ ′۳۰ شمالی و طول‌های °۶۰ ′۰۰ تا °۶۰ ′۳۰ شرقی واقع شده‌است. از نظر اقلیمی، بمپور دارای اقلیم گرم و خشک با متوسط بارش سالانه حدود ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. بخش عمده بارندگی در ماه‌های دی، بهمن و اسفند به صورت رگبارهای شدید و کوتاه‌مدت رخ می‌دهد که فرصت نفوذ آب به خاک را کاهش داده و عمدتاً به شکل روان‌آب (سیلاب) از منطقه خارج می‌شود. متوسط دمای سالانه منطقه حدود ۲۸ درجه سانتی‌گراد است؛ حداقل دما به ۶- درجه سانتی‌گراد در دی‌ماه و حداکثر دما تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد در مردادماه می‌رسد. در تابستان، دما در اغلب روزها از ۵۰ درجه سانتی‌گراد فراتر رفته و موجب توقف فعالیت‌های زیستی گیاهان برای مدت طولانی می‌شود. علاوه بر کمبود بارندگی، دمای بسیار بالا و وزش طوفان‌های شدید از عوامل محدودکننده رشد پوشش گیاهی در این منطقه به شمار می‌روند.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

۳ـ مواد و روش

۳ـ۱ـ نمونه‌برداری خاک

نمونه‌برداری خاک در این تحقیق به‌صورت طرح کاملاً تصادفی انجام شد. ابتدا از نقشه‌های فرسایش و رسوب موجود در منطقه برای طبقه‌بندی شدت‌های فرسایش خاک شامل: بدون فرسایش، فرسایش کم، فرسایش متوسط و فرسایش شدید، استفاده شد. سپس در هر منطقهٔ 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 ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. برای هر سایت فرسایشی، نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق همگن با هم ترکیب شده و یک نمونه مرکب تهیه گردید. 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

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

یخچال نگهداری شد. بخش دیگر نمونه‌ها، جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک ۲ میلی‌متری، مورد استفاده قرار گرفت (Bastani *et al*, 2023 & Kamali *et al*, 2022).

۳ـ2ـ آنالیز آزمایشگاهی- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

در این مطالعه، جهت بررسی ویژگی‌های فیزیکی، درصد شن، رس و سیلت به روش هیدرومتری و بافت خاک، با استفاده از مثلث بافت خاک تعیین شد (Schuman et al., 2002)، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از روش کلوخه، تخلخل با استفاده از چگالی حجمی اندازه‌گیری شدند (Chen *et al.*, 2022). برای اندازه‌گیری شاخص‌های شیمیایی، کربن آلی (OC) و نیتروژن کل (TN) به‌ترتیب با روش اکسیداسیون دی‌کرومات (والکی و بلاک) و روش کجلدال، فسفر قابل دسترس (AP) خاک با روش اولسن، پتاسیم قابل دسترس (AK) با استات آمونیوم خنثی استخراج شد و توسط طیف‌سنجی جذب اتمی، اسیدیته و هدایت الکتریکی با استفاده از روش پتاسیومتری و رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی اندازه‌گیری شد (Bastani *et al*, 2023 & Kamali *et al*, 2022).

۳ـ3ـ آنالیز آزمایشگاهی- ویژگی‌های زیستی خاک

ویژگی‌های زیستی مورد مطالعه در این تحقیق شامل فعالیت آنزیمی خاک (آنزیم کاتالاز)، کربن زی‌توده میکروبی[1] (MBC)، نیتروژن زی‌توده میکروبی[2] (MBN)، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه بودند. به منظور مطالعهٔ تاثیر فرسایش خاک بر فعالیت‌های آنزیمی خاک، آنزیم کاتالاز خاک با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به وسیله اسپکتروفوتومتر UV با طول موج تقریبا ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. کربن زی‌توده میکروبی به روش گازدهی با کلروفرم[3] - استخراج و اندازه‌گیری شد (Brookes *et al.*, 1985). برای محاسبه این ویژگی زیستی از رابطه یک استفاده گردید (Qu *et al*, 2020):

$$MBC = \frac{Ec}{K_{Ec}} \qquad (۱)$$

در این فرمول Ec از تفاوت کربن آلی تدخین شده به کربن آلی نمونه‌های تدخین نشده محاسبه می‌شود. K_{Ec} ضریب تبدیل Ec به MBC است که ۰/۴۵ درنظر 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 میکروارگانیسم‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی[4] (MPN) محاسبه شد. تنفس میکروبی از جمع‌آوری دی اکسیدکربن رها شده در هیدروکسید سدیم و انجام تیتراسیون اندازه گیری شد (Anderso, 1982). همچنین با تقسیم کربن آلی زیتوده میکروبی به کربن آلی خاک سهم میکروبی خاک تعیین شد (Martens, 1995).

۳ـ4ـ آنالیز آماری

داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک، مورد تجزیه واریانس یکطرفه (ANOVA) توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ قرار گرفتند. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن (در سطح احتمال ۹۵ درصد) استفاده شد. همچنین همبستگی پارامترهای مطالعه شده در محیط نرم افزار R انجام گرفت.

[1] Microbial biomass carbon
[2] Microbial biomass nitrogen
[3] Chloroform fumigation
[4] Most Probable Number

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

۴-یافته‌ها

۴-۱- تاثیر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

تجزیه واریانس داده‌ها نشـــان داد که شـــدت فرســـایش تأثیر معنی‌داری بر تمامی ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد (جدول ۱). به‌طور مشـخص، درصـد شن، سیلت، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل بین تیمارهای مختلف تفاوت آماری معنی‌داری در سطح ۱ درصد نشان دادند. بیشترین تفاوت مربوط به جرم مخصوص ظاهری و تخلخل بود که نشان می‌دهد این دو ویژگی به شـدت تحت تأثیر فرسـایش قرار می‌گیرند. به‌طور کلی، این نتایج نشـان می‌دهد که افزایش شـدت فرسایش می‌تواند به تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های فیزیکی خاک منجر شود.

جدول ۱- تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

فاکتور		درجه آزادی	میانگین مربعات	F
شن(٪)	بین گروه‌ها	۳	۱۶۲/۳	۲۷۸/۲ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۵۸	
رس(٪)	بین گروه‌ها	۳	۴۹/۸	۷۴/۸ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۶۶	
سیلت(٪)	بین گروه‌ها	۳	۳۶/۷	۱۱۰/۲ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۳۳	
جرم مخصوص ظاهری(gcm^{-3})	بین گروه‌ها	۳	۰/۳۸	۹۰/۹ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰۴	
تخلخل (٪)	بین گروه‌ها	۳	۷۴/۰۵	۱۹۰/۶ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۳۸	

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱ درصد

نتایج مقایســه میانگین‌ها (جدول ۲) نشـان می‌دهد که شـدت فرسایش تأثیر معناداری بر کلیه ویژگی‌های فیزیکی خاک داشته است.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات فیزیکی خاک

فاکتور	شدت فرسایش			
	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
شن(٪)	^{d}۶۰/۶	^{c}۶۷/۶	^{b}۷۳/۳	^{a}۷۷/۶
رس(٪)	^{a}۱۸/۰	^{b}۱۳/۰	^{c}۱۰/۳	^{d}۸/۶
سیلت(٪)	^{a}۲۱/۳	^{b}۱۹/۳	^{c}۱۶/۳	^{d}۱۳/۳
جرم مخصوص ظاهری(gcm^{-3})	^{c}۱/۵۹	^{b}۲/۰۲	^{b}۲/۰۵	^{a}۲/۴۷
تخلخل (٪)	^{a}۴۸/۲	^{b}۴۴/۹	^{c}۴۰/۳	^{d}۳۶/۹

حروف متفاوت در هر ردیف نشاندهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

با افزایش شدت فرسایش، درصد شن به‌طور پیوسته افزایش یافته و از ۶۰/۶ درصد در شرایط بدون فرسایش به ۷۷/۶ در شرایط فرسایش شدید رسیده است. در مقابل، درصد رس و سیلت کاهش معنی‌داری را نشان می‌دهند. بطوریکه مقدار رس و سیلت به ترتیب از ۱۸ و ۲۱/۳ درصد در اراضی بدون فرسایش به ۸/۶ و ۱۳/۳درصد در اراضی با فرسایش شدید کاهش یافته اســت. نتایج تأیید می‌کند که فرسایش، ذرات ریز و سبک را ترجیحاً حمل می‌کند. کاهش چشمگیر رس

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

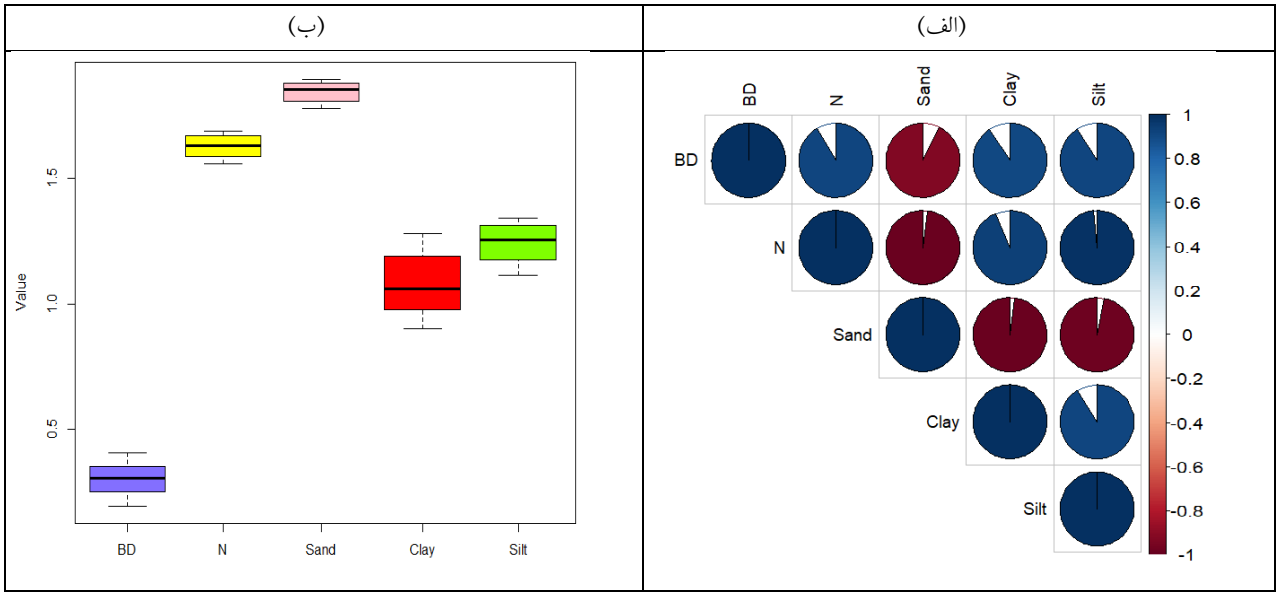
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

نشان‌دهنده‌ی 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. همچنین، جرم مخصوص ظاهری خاک در اثر فرسایش افزایش یافته و از ۱/۵۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در شرایط بدون فرسایش به ۲/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار با فرسایش شدید رسیده است. به دنبال این افزایش، میزان تخلخل نیز به‌طور معنی‌داری کاهش یافته و از ۴۸/۲ به ۳۶/۹ درصد رسیده است. این تغییرات نشان‌دهندهٔ آن است که فرسایش، با جدا کردن ذرات ریز و مواد آلی، ساختار فیزیکی خاک را به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتایج همبستگی نشان‌دهنده روابط قوی و معنادار بین ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و اجزای بافتی (شن، رس، سیلت) بود. همبستگی منفی بین شن و جرم مخصوص ظاهری و تخلخل وجود دارد (جدول ۳ و شکل ۲ ب). نمودار باکس‌پلات ویژگی‌های فیزیکی خاک نشان داد که درصد ماسه دارای بیشترین میانگین و جرم مخصوص ظاهری کمترین مقدار را در بین متغیرهای بررسی‌شده دارد. تخلخل و جرم مخصوص ظاهری با پراکندگی کم، از یکنواختی بالاتری برخوردار بودند، در حالی که درصد رس بیشترین دامنه تغییرات را نشان داد (شکل ۲ ب).

جدول ۳- نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین خصوصیات فیزیکی خاک

	Bulk density	Porosity	Sand	Clay	Silt
Bulk Density	۱				
Porosity	۰/۹۱	۱			
Sand	-۰/۹۲	-۰/۹۸	۱		
Clay	۰/۹۰	۰/۹۳	-۰/۹۸	۱	
Silt	۰/۹۱	۰/۹۸	-۰/۹۷	۰/۹۱	۱



شکل ۲: (الف) ماتریس همبستگی (ب) plot box بین ویژگی‌های فیزیکی خاک

۱-۴-تاثیر فرسایش بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که شدت فرسایش تأثیر معنی‌داری بر کلیه ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل دسترس، اسیدیته، هدایت الکتریکی خاک دارد (جدول ۴).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

جدول ۴- تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

فاکتور		درجه آزادی	میانگین مربعات	F
کربن آلی	بین گروه‌ها	۳	۸/۴۰	۲۶۴۰/۷ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰۳	
نیتروژن کل	بین گروه‌ها	۳	۰/۲۰	۱۵۰۹/۵ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰	
پتاسیم قابل دسترس	بین گروه‌ها	۳	۸۴۹۹/۴	۶۳۷۴/۵ **
	درون گروه‌ها	۸	۱/۳۳	
فسفر قابل دسترس	بین گروه‌ها	۳	۳۱/۰۹	۴۴۳/۱ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۷	
PH	بین گروه‌ها	۳	۰/۰۳۶	۱۳/۶۲ *
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰۳	
EC	بین گروه‌ها	۳	۴/۰۳	۴۶۰۹/۹ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰۱	

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

مقدار کربن آلی در خاک‌های بدون فرسایش با ۵/۵۵ گرم در کیلوگرم در بالاترین سطح قرار داشت. با افزایش شدت فرسایش، این میزان به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و در خاک‌های تحت فرسایش شدید به ۱/۸۷ گرم در کیلوگرم رسید (جدول ۵). همچنین نیتروژن کل از ۰/۷۷ گرم در کیلوگرم در خاک بدون فرسایش به ۰/۱۸ گرم در کیلوگرم در خاک‌های تحت فرسایش شدید کاهش یافت. مقادیر پتاسیم و فسفر قابل دسترس نیز با افزایش شدت فرسایش روندی کاهشی نشان دادند، بطوری که غلظت پتاسیم از ۱۸۷ به ۷۸ و فسفر از ۱۱/۶ به ۴/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت. برخلاف عناصر غذایی، مقدار pH خاک با افزایش شدت فرسایش روند افزایشی اندکی نشان داد. به گونه‌ای که از ۷/۹ در خاک‌های بدون فرسایش به ۸/۱۴ در خاک‌های با فرسایش شدید رسید. همچنین هدایت الکتریکی (EC) از ۱/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر در خاک‌های بدون فرسایش به ۳/۹۲ دسی‌زیمنس بر متر در خاک‌های تحت فرسایش شدید افزایش پیدا کرد، که امر نشان‌دهندهٔ افزایش شوری خاک در اثر کاهش ماده آلی و تجمع نمک‌ها در سطح خاک است (جدول ۵).

جدول ۵ : مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات شیمیایی خاک

فاکتور	شدت فرسایش			
	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
کربن آلی	^{a}۵/۵۵	^{b}۴/۹۰	^{c}۳/۱۵	^{d}۱/۸۷
نیتروژن کل	۰/^{a}۷۷	^{b}۰/۵۹	^{c}۰/۳۶	^{d}۰/۱۸
پتاسیم قابل دسترس	^{a}۱۸۷	^{b}۱۶۴/۳	^{c}۹۳	^{d}۷۸
فسفر قابل دسترس	^{a}۱۱/۶	^{b}۹/۷	^{c}۶/۳	^{d}۴/۵
PH	^{c}۷/۹۰	^{c}۷/۹۳	^{b}۸/۰۳	^{a}۸/۱۴
Ec	^{d}۱/۳۶	^{c}۱/۷۷	^{b}۲/۹۱	^{a}۳/۹۲

حروف متفاوت در هر ردیف نشاندهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

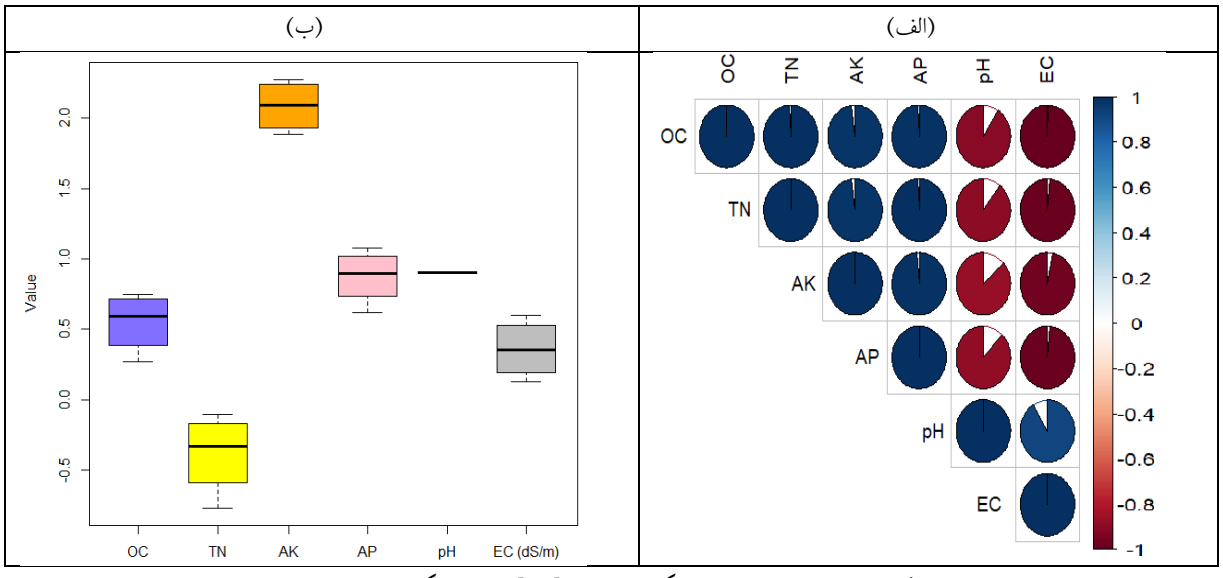
همبستگی ویژگی‌های شیمیایی

ماتریس همبستگی نشان‌دهنده روابط آماری قوی بین ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب، فسفر قابل جذب، اسیدیته و هدایت الکتریکی خاک است (جدول ۶). همبستگی بسیار بالا بین کربن آلی و نیتروژن کل (۰/۹۹) و همچنین بین کربن آلی با فسفر قابل جذب (۰/۹۸) بیانگر نقش مؤثر ماده آلی در پایداری حاصل‌خیزی خاک است. همبستگی منفی قوی بین هدایت الکتریکی با کربن آلی (۰/۹۹-) و نیتروژن کل (۰/۹۸-) نشان می‌دهد که با کاهش مواد آلی شوری خاک افزایش می‌یابد. همچنین، اسیدیته نیز با اغلب ویژگی‌ها همبستگی منفی دارد، که بیانگر تأثیر کاهش ماده آلی در افزایش قلیائیت خاک است. به‌طور کلی، این نتایج بیانگر تعامل تنگاتنگ بین ماده آلی، عناصر غذایی، رطوبت، شوری و اسیدیته در تعیین وضعیت شیمیایی خاک بوده و بر اهمیت حفظ ماده آلی برای بهبود کیفیت شیمیایی خاک تأکید دارند (شکل ۳ الف). نتایج حاصل از نمودار باکس‌پلات نشان داد که در بین ویژگی‌های شیمیایی خاک، پتاسیم و فسفر قابل جذب دارای بالاترین مقادیر استاندارد شده بودند که بیانگر فراوانی نسبی آن‌ها در نمونه‌های خاک است. در مقابل، مقدار نیتروژن کل کمترین را نشان داد، که ممکن است حاکی از فقر نیتروژن در خاک باشد. کربن آلی در سطح متوسط قرار داشت و از توزیع نسبتاً یکنواختی برخوردار بود. مقدار pH خاک تقریباً ثابت بود و هدایت الکتریکی در سطح پایین‌تری نسبت به سایر متغیرها قرارداشت(شکل ۳ ب).

جدول ۶- نتایج تجزیه ضرایب همبستگی خصوصیات شیمیایی خاک

	OC	TN	AK	AP	pH	EC
OC	۱					
TN	۰/۹۹	۱				
AK	۰/۹۷	۰/۹۷	۱			
AP	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۸	۱		
pH	-۰/۹۰	-۰/۸۹	-۰/۸۶	-۰/۸۸	۱	
EC	-۰/۹۹	-۰/۹۸	-۰/۹۶	-۰/۹۸	۰/۹۱	۱

کربن آلی (OC)، نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC).



شکل ۳: (الف) ماتریس همبستگی (ب) plot box بین ویژگی‌های شیمیایی خاک

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

۳-۴- تاثیر فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج جدول ۷ نشـان داد که شـدت فرسـایش تأثیر معنی‌داری در سـطح ۱ درصـد آماری ($P<0.01$) بر تمامی شـاخص‌های زیسـتی خاک دارد. افزایش شدت فرسایش منجر به کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز، میزان کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسـم‌ها و سـهم میکروبی در خاک گردید. مقادیر بالای آماره F در تمامی متغیرها بیانگر حساسیت بالای ویژگی‌های زیستی خاک به فرسایش و کاهش چشمگیر کیفیت زیستی خاک در شرایط فرسایش‌یافته است.

جدول ۷- تجزیه واریانس شدت فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

فاکتور		درجه آزادی	میانگین مربعات	F
آنزیم کاتالاز (µmol $KMnO_4$ g^{-1}dry soil)	بین گروه‌ها	۳	۵۳۲/۲	۳۵۴/۸ **
	درون گروه‌ها	۸	۱/۵	
کربن زیتوده میکروبی(mg /kg)	بین گروه‌ها	۳	۸۷۵۲/۸	۷۵۰۲/۴ **
	درون گروه‌ها	۸	۱/۱۶	
نیتروژن زیتوده میکروبی(mg /kg)	بین گروه‌ها	۳	۳۷/۴	۱۰۲۹/۵ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۳	
تنفس میکروبی پایه($mgCo_2$/gsoil.day)	بین گروه‌ها	۳	۰/۰۸	۲۱۹/۵ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰	
جمعیت میکروارگانیسم‌ها (CFU $\times 10^7$ g^{-1} dry soil)	بین گروه‌ها	۳	۳/۷۵	۲۹۴۵/۴ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰۱	
سهم میکروبی خاک($mgCmicg^{-1}Corg$)	بین گروه‌ها	۳	۲/۵۳	۴۰۵۸/۵ **
	درون گروه‌ها	۸	۰/۰۰۱	

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱ درصد

بر اسـاس نتایج جدول ۸، افزایش شـدت فرسـایش باعث کاهش معنی‌دار در تمامی ویژگی‌های زیستی خاک شده است. فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسم‌ها و سهم میکروبی خاک همگی در شـرایط فرسـایش شـدید نسبت به خاک‌های بدون فرسایش کاهش چشم‌گیری نشان دادند. بیشـترین میزان کاهش مربوط به جمعیت میکروارگانیسـم‌ها و سـهم میکروبی خاک بود که در شرایط فرسایش شدید مشـاهده شـد. این نتایج نشـان می‌دهد که فرسایش خاک، از طریق کاهش مواد آلی و تخریب زیست‌محیط میکروبی، به‌طور مستقیم منجر به تضعیف ظرفیت زیستی خاک را می‌شود.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر خصوصیات زیستی خاک

فاکتور	شدت فرسایش			
	بدون فرسایش	کم	متوسط	شدید
آنزیم کاتالاز (µmol $KMnO_4$ g^{-1}dry soil)	^{a}۴۲/۳	^{b}۳۶/۶	^{c}۲۲/۵	^{d}۱۳/۰
کربن زیتوده میکروبی (mg /kg)	۱۳۶/^{a}۰	^{b}۱۱۴/۰	^{c}۴۹/۳	^{d}۲۰/۵
نیتروژن زیتوده میکروبی (mg /kg)	^{a}۱۰/۳	^{b}۸/۷	^{c}۵/۰	^{d}۲/۵
تنفس میکروبی پایه (mgCo2/gsoil.day)	^{a}۰/۶۴	^{b}۰/۵۲	^{c}۰/۳۷	^{d}۰/۲۵
جمعیت میکروارگانیسم‌ها (CFU $\times 10^7$ g^{-1} dry soil)	^{a}۲/۷	^{b}۱/۸	^{c}۰/۷۳	^{d}۰/۲۲

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

سهم میکروبی خاک (mgCmicg-1Corg)	^{a}۲/۱	^{b}۱/۷	^{c}۰/۵۶	^{c}۰/۱۹

حروف متفاوت در هر ردیف نشاندهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

همبستگی ویژگی‌های زیستی خاک

ماتریس همبستگی، روابط بسیار قوی و مثبت (با ضریب همبستگی بین ۰/۹۸ تا ۰/۹۹) را میان تمامی شاخص‌های زیستی اندازه‌گیری‌شده در خاک، از جمله فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی، جمعیت میکروبی، تنفس میکروبی و سهم میکروبی خاک نشان داد. این همبستگی‌های بالا بیانگر وابستگی شدید این شاخص‌ها به یکدیگر است، به‌طوری که تغییر در یکی از آن‌ها معمولاً با تغییر هم‌زمان در سایر شاخص‌ها همراه است. همبستگی بسیار بالای بین MBC و MBN (۰/۹۹) نشان‌دهنده پیوستگی شدید چرخه‌های کربن و نیتروژن میکروبی در خاک است. همچنین، همبستگی بالای فعالیت آنزیم کاتالاز با زیست‌توده و تنفس میکروبی بیانگر آن است که این آنزیم می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب برای ارزیابی عملکرد کلی میکروبی خاک استفاده شود. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های زیستی خاک واکنش هماهنگی به شرایط محیطی دارند و می‌توانند به‌صورت تلفیقی، ابزار حساسی برای ارزیابی سلامت زیستی خاک به‌ویژه در شرایط تنش ناشی از فرسایش باشند (جدول ۹ شکل ۴ الف). نمودار باکس‌پلات نشان داد بین ویژگی‌های زیستی خاک ، آنزیم کاتالاز، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی دارای بالاترین مقادیر استاندارد شده بودند، که بیانگر فراوانی نسبی آن‌ها در نمونه‌های خاک است (شکل ۴ ب).

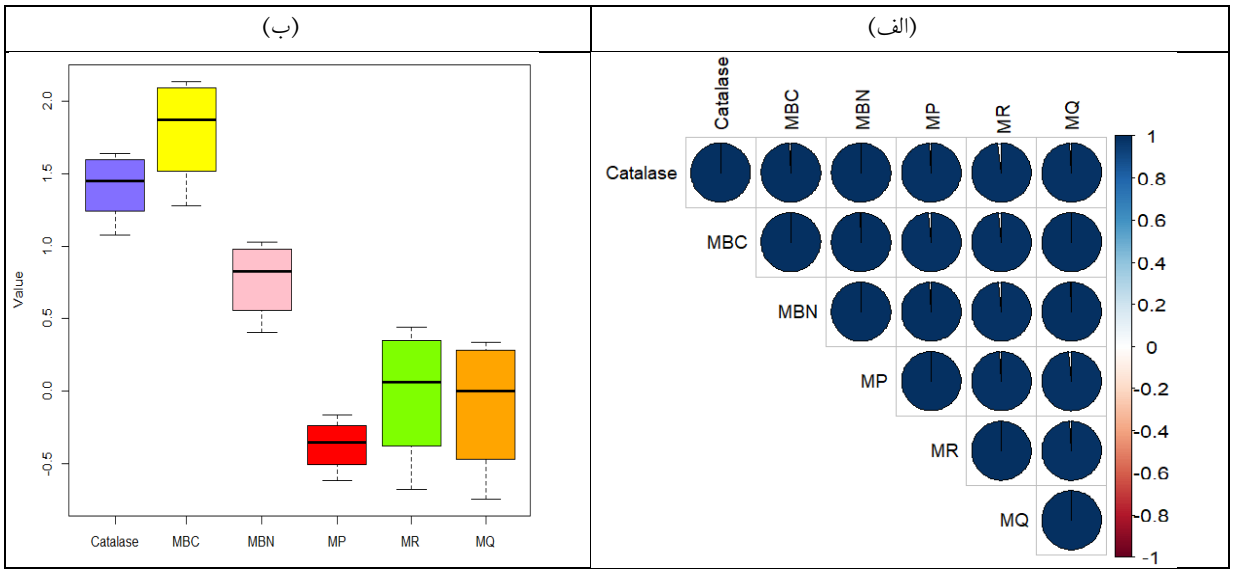
جدول ۹- نتایج تجزیه ضرایب همبستگی خصوصیات زیستی خاک

	Catalase	MBC	MBN	MP	MR	MQ
Catalase	۱					
MBC	۰/۹۹	۱				
MBN	۰/۹۹	۰/۹۹	۱			
MP	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۱		
MR	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۱	
MQ	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۱

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

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]



شکل ۴- (الف) ماتریس همبستگی (ب) **plot box** بین ویژگی‌های زیستی خاک

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه فرسایش آبی و بادی از مهم‌ترین عوامل تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شوند، این پژوهش با هدف بررسی اثر شدت‌های مختلف این دو نوع فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در اراضی بیابانی بمپور انجام شده است.

در مطالعه حاضر، فرسایش منجر به افزایش درصد شن در خاک شد. این پدیده عمدتاً به دلیل برداشت انتخابی ذرات ریزتر نظیر رس و سیلت توسط فرایند فرسایش و خروج آن‌ها از سطح خاک رخ می‌دهد. در حالی که ذرات درشت‌تر (شن) تمایل بیشتری به باقی‌ماندن دارند. بنابراین، درصد شن در خاک‌های فرسایش‌یافته افزایش می‌یابد (Li *et al*, 2015). ذرات رس و سیلت به دلیل اندازه کوچک و وزن کمتر، در مقابل فرسایش آبی یا بادی مقاومت کمتری دارند و بیشتر از سطح خاک جدا می‌شوند. این فرایند نه‌تنها منجر به کاهش مواد مغذی و آلی خاک می‌شود بلکه ساختار خاک را نیز مختل می‌کند (Mandal & Dadhwal, 2012). بر اساس گزارش‌های پیشین، کاهش ذرات سیلت و رس با افزایش شدت فرسایش همبستگی مستقیم نشان می‌دهد، که این امر مؤید برداشت انتخابی ذرات ریزتر در فرآیند فرسایش است (Hladký *et al*, 2016). با افزایش شدت فرسایش جرم مخصوص ظاهری افزایش یافت. با از بین رفتن مواد آلی، رس و ساختار دانه‌ای خاک، خاک‌ها به شکل متراکم‌تری در می‌آیند. در خاک‌های تحت تأثیر فرسایش، معمولاً ساختار خاکدانه‌ها تخریب شده و خاک به حالت پودری و سبک‌تری باقی می‌ماند. این وضعیت همراه با کاهش نفوذپذیری و افزایش شکنندگی خاک است، که می‌تواند منجر به تغییر در جرم مخصوص ظاهری شود (Abu-Hamdeh & Reeder, 2000). کاهش جرم مخصوص ظاهری و در نتیجه افزایش تخلخل،منجر به بهبود شرایط تهویه و تسهیل تبادل گازها به‌ویژه اکسیژن، در خاک می‌شود. تهویه مطلوب خاک، شرایط مناسب تری را برای فعالیت، رشد و تکثیر جمعیت میکروارگانیسم‌های هوازی فراهم می‌سازد (Asghari & Arkhazloo, 2020). فرسایش با از بین بردن خاک‌دانه‌ها و مواد آلی، موجب از دست رفتن پایداری ساختارخاک می‌شود. کاهش ماده آلی و ذرات رس، توانایی خاک در حفظ فضاهای خالی (تخلخل) را کاهش داده و در نتیجه، منجر به افزایش تراکم، کاهش نفوذپذیری و افت تخلخل خاک می‌گردد (Plotnikova *et al*, 2024). یافته‌های پژوهش‌های پیشین بر نقش مثبت

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

ماده آلی در فرآیند تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها تأکید دارند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش محتوای ماده آلی، پایداری خاکدانه‌ها را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Řezáčová *et al.*, 2021).

بررسی نتایج این مطالعه حاکی از آن است که فرسایش ترکیبی بادی و آبی به‌طور معنی‌داری بر تغییرات ویژگی‌های شیمیایی خاک، از جمله کاهش غلظت عناصر غذایی و کربن آلی، در منطقه مورد بررسی تأثیرگذار بوده است. فرسایش بادی و آبی، از عوامل اصلی تخریب خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. این نوع فرسایش با حذف انتخابی ذرات ریز و غنی از مواد آلی و عناصر غذایی، تغییرات شدیدی در کیفیت شیمیایی خاک ایجاد می‌کند (Huang *et al*, 2013). ذرات غنی از کربن و نیتروژن آلی که از طریق رواناب سطحی منتقل می‌شوند، در پایین‌دست رسوب کرده و موجب تهی شدن نواحی مبدأ از منابع غذایی می‌شوند. این پدیده در مناطقی که فرسایش بادی نیز فعال است، تشدید می‌شود، چراکه باد نیز همانند آب ذرات مغذی را جابه‌جا می‌کند (Lal, 2001).

یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که فرسایش شدید (اعم از بادی و آبی) منجر به کاهش معنی‌دار در مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل، و عناصر غذایی قابل‌دسترس از جمله پتاسیم و فسفر شده است. این نتایج با مطالعات بسیاری از محققین هم راستا است (Lal *et al*, 2005 & Mandal *et al*, 2021; 2023 & Pimentel and Burgess, 2013). آنها گزارش کرده‌اند که با افزایش شدت فرسایش، کاهش در ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC) ، عناصر غذایی و ماده آلی رخ می‌دهد که موجب تضعیف ساختار خاک و کاهش حاصل‌خیزی آن می‌شود. کاهش ماده آلی خاک نه تنها به دلیل شستشوی سطحی، بلکه به‌دلیل حذف خاک سطحی و در معرض قرار گرفتن افق‌های زیرین خاک است که از نظر مواد آلی فقیرتر هستند (Moradi *et al*, 2024). کاهش ماده آلی منجر به اختلال در فعالیت‌های زیستی خاک، کاهش ظرفیت نگهداری آب، افت پایداری خاکدانه‌ها، و تغییر در pH خاک و چرخه جذب و آزادسازی عناصر غذایی می‌گردد (Sun et al, 2021). فرسایش موجب تخریب خاکدانه‌های پایدار و از بین رفتن ساختار مطلوب خاک می‌شود، که این امر کاهش نفوذپذیری، تخلخل و ظرفیت نگهداری آب را در پی دارد (Li *et al*, 2022). فرسایش خاک سطحی را حذف می‌کند که معمولاً دارای بیشترین ظرفیت جذب و نگهداری آب است. با از بین رفتن این لایه، رطوبت کلی خاک کاهش می‌یابد .(Amooh & Bonsu, 2015) ذرات ریز مانند رس و ماده آلی که در نگهداری آب مؤثرند در اثر فرسایش کاهش می‌یابند و ظرفیت جذب آب کاهش می‌یابد این عوامل موجب می‌شوند خاک در مناطق فرسایش‌یافته رطوبت کمتری داشته باشد و شرایط نامساعدتری برای رشد گیاه و فعالیت میکروبی فراهم گردد (Lal, 2001). محققان تأیید می‌کند که تغییر کاربری اراضی و فرسایش، به‌ویژه در مناطق شیب‌دار، موجب افت کیفیت شیمیایی خاک می‌شود. در چنین شرایطی، کاهش عناصر غذایی و حذف خاک سطحی، با تضعیف ساختار خاکدانه‌ها و ظرفیت نگهداری آب در خاک همراه است (Wang et al, 2021 & Nabieehi et al, 2018).

نتایج حاصل از این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که شدت فرسایش تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های زیستی خاک دارد، به‌گونه‌ای که کلیه شاخص‌های زیستی مورد بررسی تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته‌اند. میزان تاثیرپذیری پارامترهای مورد بررسی با افزایش شدت فرسایش بیشتر شده است که با دستاوردهای محققان همخوانی دارد (Qiu *et al*, 2021 & Soltani and Asghari, 2021). به‌نظر می‌رسد یکی از دلایل اصلی تأثیر منفی شدت فرسایش بر ویژگی‌های زیستی خاک، کاهش ماده آلی و مواد مغذی باشد که منجر به کاهش تنوع و عملکرد جمعیت باکتری‌های

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

خاک می‌شود. این کاهش باعث محدودیت دسترسی به منابع غذایی، کاهش فعالیت متابولیکی و تغییر ترکیب جمعیت باکتری‌ها شـده و در نهایت، کارکرد میکروارگانیسم‌های خاک و نقش آن‌ها در حفظ عملکرد خاک را مختل می‌سازد (Banerjee *et al*, 2020 & Chen *et al*, 2020).

کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز و تنفس پایه میکروبی، که نشـانگر فعالیت متابولیکی میکروارگانیسـم‌ها است، بیانگر تضعیف فرآیندهای زیستی حیاتی در خاک‌های فرسایش‌یافته می‌باشد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در پلات‌های فاقد فرسـایش و با فرسـایش کم مشـاهده شد. لازم به ذکر است که آنزیم‌ها نقش بسیار مهمی در عملکرد بیوشیمیایی خاک ایفا می‌کنند (Li *et al*, 2015). وجود مواد آلی و عناصـر غذایی درمناطق بدون فرسایش و یا با فرسایش کمتر باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز می‌شـود (Makoi & Ndakidemi, 2008). برای آن که مواد آلی خاک توسط میکروارگانیسم‌های خاک معدنی شوند، باید توسط آنزیم‌هایی مانند کاتالاز هیدرولیز شوند (Caldwell, 2005). به‌همین دلیل مناطق بدون فرسـایش و مناطق رسوبی نقش مهمی در پروسه معدنی شدن کربن آلی دارند (Kirkels *et al*, 2014).

همچنین کـاهش قـابل توجه کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی و جمعیت میکروارگانیسـم‌ها نشـان می‌دهد که فرسـایش با کاهش منابع غذایی و زیسـتگاه میکروبی، تنوع و تراکم جمعیت میکروارگانیسم‌ها را کاهش می‌دهد. سهم میکروبی خاک نیز که معیاری از نسـبت کربن میکروبی به کربن کل خاک است، کاهش قابل توجهی را در فرسایش شـدید نشان می‌دهد که بیانگر افت کیفیت زیستی خاک و کاهش نقش میکروارگانیسم‌ها در تثبیت کربن خاک است از دلایل این روند کاهشـی می‌توان به مواردی همچون؛ کاهش منابع آلی، تخلخل و رطوبت خاک در اثر فرسـایش، کاهش ظرفیت ذخیره و بازچرخ نیتروژن توسط جامعه میکروبی در خاک‌های تخریب‌یافته، افت توان زیستی و کاهش دسـترسی به کربن قابل‌مصرف برای میکروارگانیسم‌ها نام برد (Shi, 2011). مطالعه اثر فرسایش بر کارایی استفاده از کربن میکروبی خاک نشـان داد که کربن میکروبی با افزایش نرخ فرسایش خاک در عمق ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Zhang *et al*, 2023). محققان در بررسـی پاسـخ میکروبی خاک به تغییرات ناشـی از فرسـایش آبی در جنوب چین گزارش نمودند که محل رسوب‌گذاری دارای فعالیت زیتوده میکروبی و آنزیمی بیشتری نسـبت به سایر مکان‌های فرسایشی است. ویژگی انتخابی فرسایش آبی باعث انتقال ذرات ریزدانه رس و همچنین مواد آلی می‌شود. بنابراین محدوده بدون فرسـایش در مقایسه با نقاط فرسایش یافته دارای خاک‌های با بافت ریزدانه و مواد آلی هسـتند (Li *et al*, 2015). کاهش کیفیت خاک در اثر فرسایش برای خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک که بسیار مستعد فرسایش و سایر فرآیندهای تخریب هستند، شدیدتر است (Mandal & Giri, 2021). که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد.

فرسـایش ترکیبی آبی و بادی پیامدهای گسـترده و مهمی بر ویژگی‌های فیزیکی، شـیمیایی و زیستی خاک دارد. افزایش شدت فرسایش باعث تغییرات مخرب مانند تغییر بافت خاک، کاهش تخلخل، افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش رطوبت شـده و در نتیجه کیفیت فیزیکی خاک به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین فرسـایش منجر به کاهش چشمگیر مواد مغذی حیاتی خاک از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم شده و شاخص‌های شیمیایی خاک را تضـعیف می‌کند. از سـوی دیگر، پارامترهای زیسـتی نظیر فعالیت آنزیمی، کربن و نیتروژن زیسـت‌توده

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

میکروبی و تنفس میکروبی پایه نیز کاهش یافته‌اند که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری فرآیندهای بیولوژیکی خاک در مواجهه با این نوع فرسایش است. این فرسایش نه تنها ساختار سطحی خاک را تخریب می‌کند و حاصلخیزی و فعالیت زیستی را کاهش می‌دهد، بلکه در بلندمدت عملکرد اکوسیستم و ظرفیت ذخیره‌سازی کربن در خاک را نیز به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، کاهش جمعیت میکروارگانیسم‌ها فرآیندهای چرخه مواد مغذی و تولید خاک را مختل کرده و باعث کاهش عملکرد اکوسیستم می‌شود. بنابراین، شناسایی مناطق پرخطر و اجرای برنامه‌های بازسازی و مدیریت حفاظتی خاک برای کاهش شدت فرسایش و حفظ پایداری کیفیت خاک در نواحی آسیب‌دیده، بسیار ضروری است.

منابع

1. Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal, 64*(4), 1285–1290. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x
2. Amooh, M. K., & Bonsu, M. E. N. S. A. H. (2015). Effects of soil texture and organic matter on evaporative loss of soil moisture. *Journal of Global Agriculture and Ecology, 3*, 152–161.
3. 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.
4. 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. (in persian)
5. 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.
6. Bastani, M., Sadeghipour, A., Kamali, N., Zarafshar, M., & Bazoot, S. (2023). How does livestock graze management affect woodland soil health. *Frontiers in Forests and Global Change, 6*, 1–8.
7. 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.
8. Caldwell, B. A. (2005). Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia, 49*, 637–644.
9. Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Ecological Indicators, 34*, 1–12.
10. Chen, Q., Dong, J., Zhu, D., Hu, H., Delgado-Baquerizo, M., Ma, Y., He, J.-Z., & Zhu, Y.-G. (2020). Rare microbial taxa as the major drivers of ecosystem multifunctionality in long-term fertilized soils. *Soil Biology and Biochemistry, 141*, 107686. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107686
11. Creamean, J. M., Suski, K. J., Rosenfeld, D., Cazorla, A., DeMott, P. J., Sullivan, R. C., White, A. B., Ralph, F. M., Minnis, P., Comstock, J. M., Tomlinson, J. M., & Prather, K. A. (2013). Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western U.S. *Science, 339*(6127), 1572–1578.
12. Fathizad, H., et al. (2020). Spatio-temporal dynamic of soil quality in the central Iranian desert modeled with machine learning and digital soil assessment techniques. *Ecological Indicators, 118*, 106736. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106736

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

13. 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
14. Hladký, J., Novotná, J., Elbl, J., Kynický, J., Juřička, D., Novotná, J., & Brtnický, M. (2016). Impacts of water erosion on soil physical properties. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 64*, 1523–1527.
15. 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.
16. Iturri, L. A., & Buschiazzo, D. E. (2023). Interactions between wind erosion and soil organic carbon. In *Agricultural Soil Sustainability and Carbon Management* (pp. 163–179). Academic Press.
17. Kamali, N., Sadeghipour, A., Souri, M., & Mastinu, M. (2022). Variations in soil biological and biochemical indicators under different grazing intensities and seasonal changes. *Land, 11*, 1537.
18. 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.
19. Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development, 12*(6), 519–539. https://doi.org/10.1002/ldr.472
20. Lal, T. N., Hinterberger, T., Widman, G., Schröder, M., Hill, N. J., Rosenstiel, W., Elger, C. E., Schölkopf, B., & Birbaumer, N. (2005). Methods towards invasive human brain computer interfaces. In L. K. Saul, Y. Weiss, & L. Bottou (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 17, pp. 737–744). MIT Press.
21. Li, P., Liu, L., Wang, J., Wang, Z., Wang, X., Bai, Y., & Chen, S. (2018). Wind erosion enhanced by land use changes significantly reduces ecosystem carbon storage and carbon sequestration potentials in semiarid grasslands. *Land Degradation & Development, 29*(11), 3469–3478.
22. 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.
23. Li, Z., Liu, X., Zhang, M., & Xing, F. (2022). Plant diversity and fungal richness regulate the changes in soil multifunctionality in a semi-arid grassland. *Biology, 11*(6), 870.
24. 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.
25. Long, X. E., Yao, H., Huang, Y., Wei, W., & Zhu, Y. G. (2018). Phosphate levels influence the utilisation of rice rhizodeposition carbon and the phosphate-solubilising microbial community in a paddy soil. *Soil Biology and Biochemistry, 118*, 103–114.
26. 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.
27. Mandal, D., & Giri, N. (2021). Soil erosion and policy initiatives in India. *Current Science, 120*(6), 1007–1012.
28. Mandal, D., Chandrakala, M., Alam, N. M., & Mandal, U. (2021). Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India. *CATENA, 204*, 105440. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105440

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

29. Mandal, D., & Dadhwal, K. S. (2012). *Land evaluation and soil assessment for conservation planning and enhanced productivity* (p. 90). Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute.
30. 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*(6), 5430. https://doi.org/10.3390/su15065430
31. Martens, R. (1995). Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations. *Biology and Fertility of Soils*, *19*, 87–99.
32. 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.
33. Moradi, H. R., Rezaei, V., & Erfanian, M. (2024). Investigation of physicochemical characteristics of soil in badland areas formation. *Researches in Earth Sciences*, *15*(3), 91–105. https://doi.org/10.48308/esrj.2021.101282
34. 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.
35. 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.
36. Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, *3*, 443–463.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Řezáčová, V., Czakó, A., Stehlík, M., Mayerová, M., Šimon, T., Smatanová, M., & Madaras, M. (2021). Organic fertilization improves soil aggregation through increases in abundance of eubacteria and products of arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientific Reports*, *11*(1), 12548.
41. Schuman, G. E., Janzen, H. H., & Herrick, J. E. (2002). Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, *116*, 391–396.
42. 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.
43. 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.
44. 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.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]

45. 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 (Basel), 12*(13), 2568. https://doi.org/10.3390/plants12132568
46. 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.
47. Wu, X. L., Wei, Y. J., Cai, C. F., Yuan, Z. J., Liao, Y. S., & Li, D. Q. (2020). Effects of erosion-induced land degradation on effective sediment size characteristics in sheet erosion. *Catena, 195*, 104843.
48. 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
49. 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
50. Zhao, C., Li, Y., Zhou, Z., Wu, R., Su, M., & Song, H. (2025). Simulated wind erosion and local dust deposition affect soil micro-food web by changing resource availability. *Ecological Processes, 14*(1), 7.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.104]